博　士　論　文

北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの電力関連施設への利活用促進に関する研究

A Study on the Promotion of Effective Utilization of Fly Ash Concretes in Electric Power Related Facilities in Hokuriku District

金沢大学大学院自然科学研究科
環境デザイン学専攻

学　籍　番　号　1624052010

氏　　名　久 保　哲司

主任指導教員名　鳥居　和之

提　出　年　月　2018 年 3 月

北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの電力関連施設への利活用促進に関する研究

ー目　　次ー

第１章　序　論

1.1 研究の背景 ……1

1.1.1 北陸地方が抱える深刻な ASR 問題 ……1

1.1.2 北陸地方の再生資源としてのフライアッシュ ……3

1.1.3 産学官連携による標準化の取組み ……5

1.1.4 フライアッシュコンクリートの用途拡大実績 ……6

1.1.5 電力関連施設等での ASR の実態 ……9

1.1.6 電力関連施設におけるアルカリシリカ反応抑制対策の現状 ……14

1.2 研究の位置付け ……16

1.3 研究の目的 ……17

1.3.1 アルカリシリカ反応により変形した電力関連施設の維持管理方策 ……17

1.3.2 新設する電力関連施設へのフライアッシュコンクリートの実装 ……17

1.4 本論文の構成 ……18

【参考文献】 ……19

第２章　既設電力関連施設のアルカリシリカ反応の状況と調査診断概要

2.1 概　説 ……21

2.2 導水路のアルカリシリカ反応に関する調査 ……21

2.2.1 調査概要 ……21

2.2.2 試験方法 ……22

2.2.3 試験結果および考察 ……25

2.3 取水塔のコンクリート調査 ……34

2.3.1 調査概要 ……34

2.3.2 試験結果 ……36

2.4 取水塔の耐荷性能 ……43

2.5 まとめ ……44

【参考文献】 ……45

第３章　アルカリシリカ反応により変形した取水塔の補強対策とモニタリングによる補強効果の確認

3.1 概　説 ……47

3.2 取水塔の ASR による変状の概要 ……47

3.3 取水塔変形のメカニズム ……52

3.3.1 モデルによる変形形状解析 ……53

3.4 構造物の健全性評価 ……55

3.4.1 安全性評価 ……55
3.4.2 使用性評価 ……56
3.5 補強対策 ……56
3.5.1 対策の基本的な考え方 ……56
3.5.2 対策方法の選定 ……56
3.5.3 対策の実施 ……57
3.6 モニタリングによる対策効果の確認 ……60
3.6.1 モニタリングの実施項目 ……60
3.6.2 定点測量によるモニタリングの結果 ……61
3.6.3 内面壁離隔測定結果 ……62
3.6.4 PC アンカー導入力の経時変化 ……63
3.6.5 計測孔内のひずみ計測（自動計測）結果 ……64
3.7 まとめ ……65
【参考文献】 ……66

第４章　北陸地方産フライアッシュの分級効果とフライアッシュコンクリートの品質
4.1 概　説 ……67
4.2 北陸地方産フライアッシュの品質保証 ……69
4.3 フライアッシュコンクリートの各種試験結果 ……73
4.4 まとめ ……85
【参考文献】 ……86

第５章　火力発電所建設工事におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策
5.1 概　説 ……88
5.1.1 富山新港火力発電所 LNG1 号機建設工事の概要 ……88
5.1.2 アルカリシリカ反応抑制対策 ……90
5.2 当該地方の砂の岩種判定 ……91
5.2.1 使用する砂 ……91
5.2.2 試験方法 ……92
5.2.3 試験結果および考察 ……92
5.3 アルカリシリカ反応性の確認 ……94
5.3.1 試験方法 ……94
5.3.2 試験結果および考察 ……94
5.4 ASR ゲル生成状況の観察 ……96
5.4.1 試験方法 ……96
5.4.2 試験結果および考察 ……96
5.5 ひび割れ発生状況の観察 ……97
5.5.1 試験方法 ……97

5.5.2 試験結果および考察 ……97
5.6 砂のアルカリシリカ反応性の評価 ……98
5.7 建設工事における ASR 抑制対策の適用 ……99
5.8 塩害対策を目的にしたプレキャスト PC 床版の LNG 船接岸桟橋への適用 ……99
5.8.1 研究の背景 ……99
5.8.2 試験方法 ……100
5.8.3 試験結果および考察 ……102
5.9 まとめ ……106
【参考文献】 ……107

第６章　プレキャスト PC 電柱におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策

6.1 概　説 ……110
6.2 PC 電柱の縦ひび割れ発生原因の調査 ……110
6.2.1 PC 電柱の配合と製造方法 ……110
6.2.2 調査方法 ……111
6.2.3 調査結果および考察 ……111
6.3 フライアッシュコンクリートによる ASR 抑制効果の検証 ……115
6.3.1 試験内容 ……115
6.3.2 試験結果および考察 ……115
6.4 フライアッシュコンクリートの遠心成形製品への適用性 ……116
6.4.1 遠心成形製品の製造工程 ……116
6.4.2 試験内容 ……116
6.4.3 試験結果および考察 ……118
6.5 まとめ ……121
【参考文献】 ……122

第７章　港湾構造物におけるフライアッシュ高含有コンクリートの適用性

7.1 概　説 ……123
7.2 浚渫砂とフライアッシュを用いたコンクリートの研究開発 ……123
7.2.1 使用材料 ……123
7.2.2 試験方法 ……126
7.2.3 試験結果および考察 ……127
7.3 消波ブロックの設計と試験施工 ……129
7.3.1 消波ブロックの設計 ……129
7.3.2 消波ブロックの試験施工 ……131
7.4 暴露試験による耐久性の確認 ……134
7.5 藻場造成材としての評価および藻場造成技術の開発 ……136
7.5.1 藻場造成技術の開発経緯 ……136
7.5.2 室内試験内容 ……136

7.5.3 室内試験結果および考察 …… 137
7.5.4 フィールド試験概要 …… 137
7.5.5 フィールド試験結果および考察 …… 138
7.5.6 今後の展開 …… 140
7.6 まとめ …… 141
【参考文献】 …… 142

第８章　結　論

8.1 本研究のまとめ …… 143
8.2 今後の課題と展望 …… 145
8.2.1 今後の課題 …… 145
8.2.2 今後の展望 …… 147

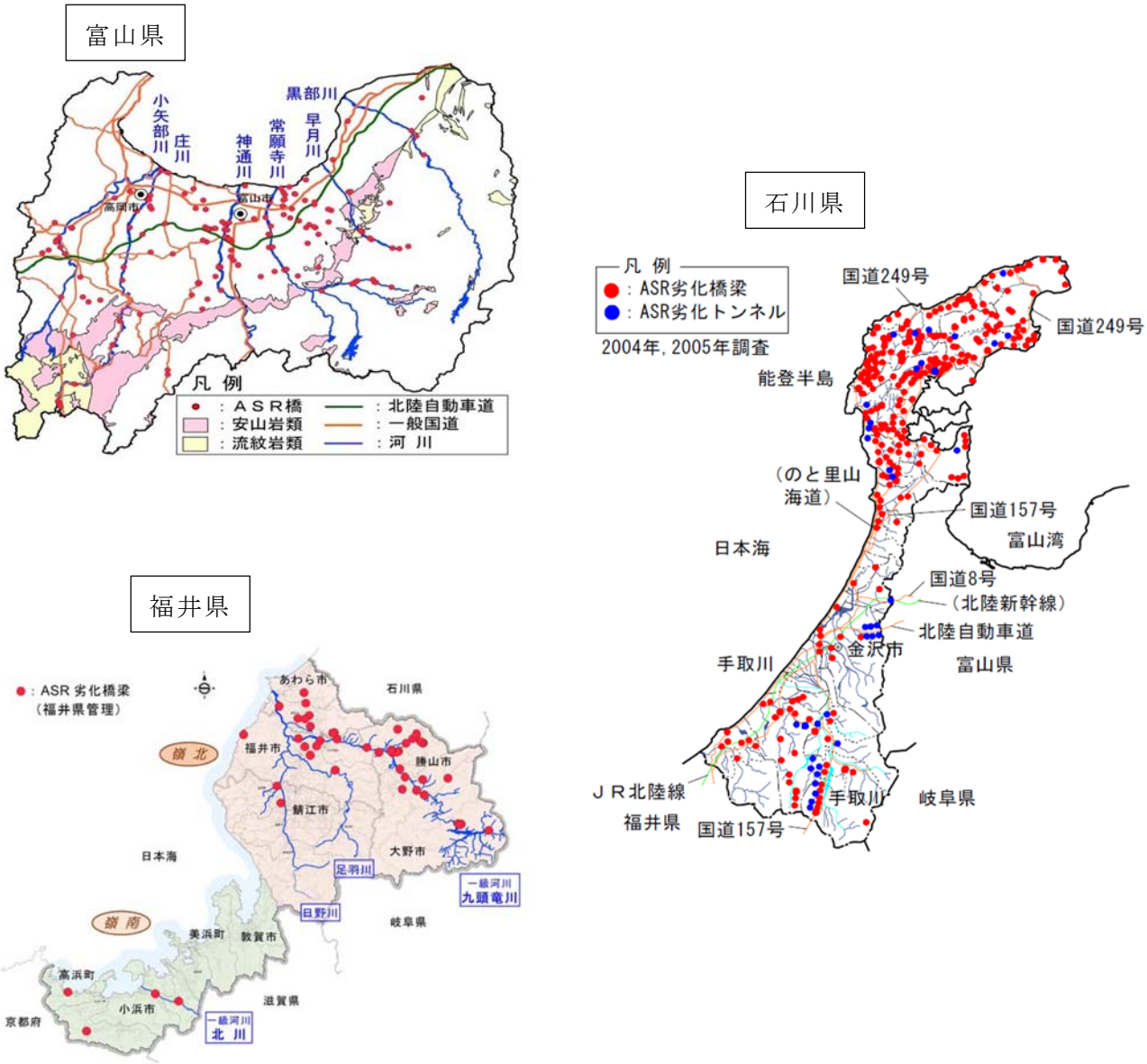
謝　辞 …… 148

第１章　序　論

1.1 研究の背景

1.1.1 北陸地方が抱える深刻な ASR 問題

北陸地方（富山県，石川県，福井県）では，火山岩起源（安山岩，流紋岩）や堆積岩起源（凝灰岩，チャート）の骨材を含む河川産骨材がコンクリート用骨材として長年にわたり使用されており，アルカリシリカ反応（ASR：Alkali Silica Reaction，以下，ASR）により劣化したコンクリート構造物が多数報告されている[1)]。金沢大学で調査した北陸 3 県における ASR 劣化橋梁の分布図を**図－1.1**[2)]に示す。また、一部の構造物では鉄筋破断やコンクリートの脆弱化などの深刻な ASR による劣化が報告されている[3)]。



図－1.1 北陸 3 県における ASR 劣化橋梁の分布状況
（金沢大学 SIP-WG2 ASR 部会 研究成果報告書－北陸地方における ASR 問題の解決を目指して－より引用）

北陸電力㈱の発電所においても ASR の発生が確認されている設備は多く，これまで劣化状況に応じて対応してきた。**表－1.1**に北陸電力㈱の発電所におけるASR発生数を示す。北陸電力㈱では，独自に「ASR劣化診断マニュアル」を作成し，構造物の診断を実施しており，表中の ASR 発生数は，発電所のいずれかの設備において，1 個所でも ASR が確認された場合の発電所数である。**表－1.1** より，富山県内の発電所で ASR の発生割合が 51%と高いが，これは富山県内では，上流に高い反応性を示す鉱物を含む岩体がある河川の川砂，川砂利を使用してきたことが関係している。特に常願寺川水系の川砂，川砂利には，安山岩や流紋岩などにクリストバライトやトリディマイトなどの高い反応性を示す鉱物が含まれていることが確認されており，発生割合も高い。近年，富山県内の他の河川産骨材を使用した場合でも，コンクリートの配合条件や環境条件によっては ASR が発生する可能性があり，注意が必要であることが指摘されている。また，石川県では手取川産の骨材，福井県では九頭竜川産の骨材が使用されることが多く，富山県内の河川産骨材と同様，ASR が発生する可能性があり，注意が必要である。

表－1.1 北陸電力㈱の発電所における ASR 発生数

	富山県	石川県	福井県	計
発電所数	82	24	24	130
ASR 発生数	42	5	2	49
発生割合（%）	51	21	8	38

一方，国内における新設構造物への ASR 抑制対策として，JIS A5308「レディーミクストコンクリート」付属書 B（規定）には，以下の 3 区分が示されている。

a. コンクリート中のアルカリ総量を規制する抑制対策

b. 安全と認められる骨材を使用する抑制対策

c. ASR 抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策

ここで，a.「アルカリ総量規制」では，コンクリート中のアルカリ総量 3kg/m^3 以下とすることが規定されているが，アルカリ総量 3kg/m^3 以下では，十分でないことが近年，指摘されている[4)]。実際，a.「アルカリ総量規制」を適用したにも拘らず，ASR が発生した事例も報告されている[5)]。なお，海外では，構造物の重要度に応じて，アルカリ総量を変える規定が運用されている事例もあり，**表－1.2** にカナダにおける規定の例を示す[6)]。

また、b.「安全と認められる骨材の使用」に関しては，JIS A1145「骨材のアルカリシリカ反応試験法（化学法）」で「無害」と判定された場合であっても ASR が発生する場合があることが指摘されており，JR 東日本では，その対応として独自の基準を設定している。

c.「混合セメントなどの使用」に関しては，「混合セメントを使用」する場合と「高炉スラグ微粉末又はフライアッシュを混和材として使用」する場合があり，「混合セメントの使

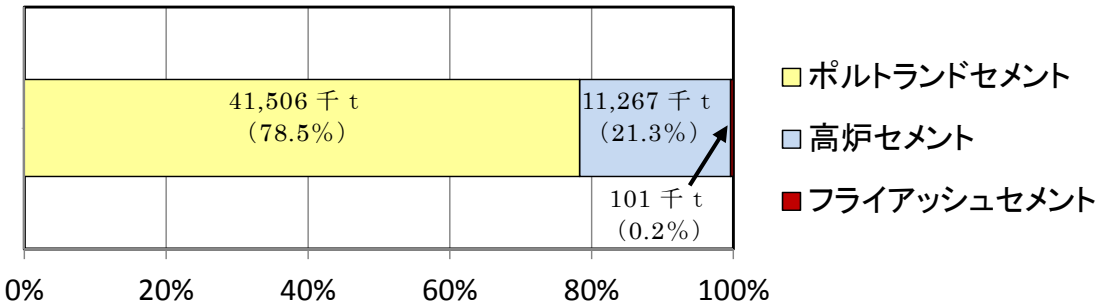
表－1.2 カナダにおける ASR 抑制対策の規定の例

対策方法	予防レベル				
	低い	中程度	高い	非常に高い	特別
ｱﾙｶﾘ総量（kg/m³）	3.0	2.4	1.8	1.2	ｱﾙｶﾘ総量 1.2 kg/m³ 以下，かつﾌﾗｲｱｯｼｭ置換率 35%以上
ﾌﾗｲｱｼｭ置換率（%）	15	20	25	35	

用」の場合には，セメントの質量分率が高炉セメントでは 40%以上，フライアッシュセメントでは 15%以上が規定されている。また，「高炉スラグ微粉末又はフライアッシュを混和材として使用」する場合には，「アルカリシリカ反応抑制効果があると確認された単位量で用いる」とされている。ここで，フライアッシュセメントは，国内では，大口の注文がないと製造されないため，ほとんど流通しておらず，大規模工事など以外は，混和材としての利用になるため，「ASR 抑制効果の確認」が必要になってくる。しかしながら，JIS の規定には，誰が，どのような方法で確認するのか明記されておらず，生コンクリート工場では，フライアッシュを ASR 抑制対策として利用しにくいという課題がある。

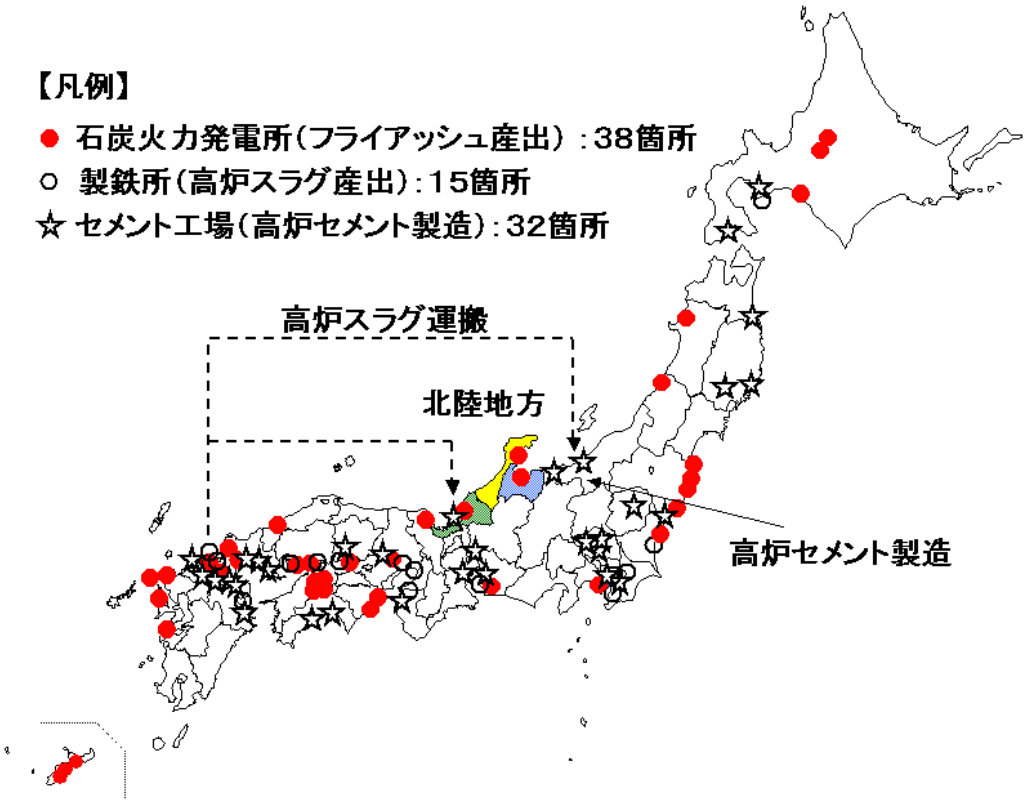
1.1.2 北陸地方の再生資源としてのフライアッシュ

石炭火力発電所から副産物として産出されるフライアッシュは，コンクリートに混和することにより，コンクリートの施工性や耐久性などが向上することが古くから知られている[7),8)]。フライアッシュの実際の構造物への適用に関しては，2001 年に環境省のグリーン購入法が施行され，高炉セメントは一般構造への使用を推進されたのに対し，フライアッシュセメントは温度ひび割れ低減の観点から主にダム等への使用を推進された。しかしながら，近年，ダムの新規開発可能地点がなくなってきたことや河川環境保全の観点から新規地点の採択が困難になってきたことにより，ダムの建設が少なくなり，フライアッシュがコンクリートに適用されることが少なくなってきた。フライアッシュがダム工事に適用される場合には，通常，ダムサイトにコンクリートバッチャープラントが設置され，フライアッシュセメントがセメント会社から供給される。また，セメント会社は，ダム等の大規模な需要がある場合にのみ，フライアッシュセメントを製造してきた。ここで，近年の課題のひとつは，ダム等の建設が少なくなるとともに，セメント会社ではフライアッシュセメントが製造されなくなってきたため，一般工事で使用したくても手に入りにくくなってしまったことがある。さらに，フライアッシュコンクリートは，元々，生コンクリート工場で製造される機会が少なかったことから，一般工事でフライアッシュコンクリートを出荷できる工場がほとんどなく，フライアッシュセメントが供給されない状況下では，さらに，フライアッシュコンクリートの製造が難しく，このため発注者がフライアッシュコンクリートを注文したくても，注文できない悪循環に陥っているのが実情である。**図－1.2** に平成 27 年度の全国種類別セメント生産量を示す。図の通り，高炉セメントが全体の約 21%を占めているのに対し，フライアッシュセメントは全体の約 0.2%に過ぎない。



図－1.2 平成 27 年度の全国種類別セメント生産量

一方で，前述した通り，公共工事の一般構造物においては，高炉セメントを用いたコンクリートが全国的に圧倒的なシェアを占めるに至っている。このことは，高炉セメントの原材料である高炉スラグ微粉末を産出する製鉄所がない北陸地方においても,同様であり，北陸地方においては，高炉スラグ微粉末は主に九州地方から北陸地方のセメント工場に運搬され高炉セメントが製造されている。**図－1.3** に全国の石炭火力発電所，製鉄所，セメント工場の位置図を示す [9)]。**図－1.3** に示す通り，北陸地方においては，フライアッシュを産出する石炭火力発電所が稼働しており，材料運搬にかかる環境負荷低減や地産地消の観点から,フライアッシュを用いたコンクリートを選択するのが妥当であると考えている。

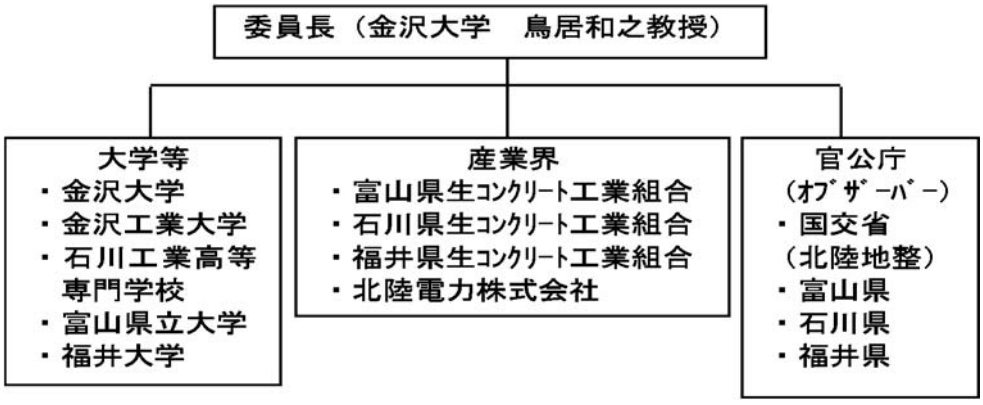


図－1.3 全国の石炭火力発電所、製鉄所およびセメント工場の位置図
（社団法人日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書，PP9-10，2010．より引用）

1.1.3 産学官連携による標準化の取組み

電力の安定供給に大きな役割を果たしている石炭火力発電所では，石炭燃焼に伴う副産物として大量のフライアッシュが産出される。このフライアッシュは循環型社会を推進するための有効な資源として注目されている。特に，北陸地方に製鉄所はなく，石炭火力発電所のみが存在する。そのため，コンクリート用混和材として，高炉スラグ微粉末よりフライアッシュの積極的な有効活用が望まれている。この様な社会的背景の下，石川県と富山県の境に立地する七尾大田火力発電所では平成 21 年 8 月に，福井県内に立地する敦賀火力発電所では平成 24 年 8 月に，それぞれ分級装置が稼働した。その結果，北陸地方においても，安定した品質のフライアッシュが，コンクリート用混和材として供給できるようになった。

昨今の我が国では，地産地消に着目した，地域の副産物を有効利用する取組みが各地で展開されており，平成 23 年 1 月に「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会（委員長：金沢大学 鳥居教授）」（以下，フライアッシュ委員会）が設立された[10)]。フライアッシュ委員会は，産学官が連携することによる技術的な信頼と社会的信用を確保しながら，コンクリートの耐久性向上によるコンクリート構造物の長寿命化と建設資材の地域的な活用（地産地消）による環境負荷低減を目指し，コンクリートへのフライアッシュの有効利用を促進することを目的としている。フライアッシュ委員会の構成を**図－1.4** に示す。フライアッシュ委員会は，大学等からのコンクリート工学の専門家が，産業界からは各県のコンクリート工業組合が，官公庁からはオブザーバーとして国土交通省北陸地方整備局企画部技術管理課長および各県土木部次長，または技幹が参画している。北陸電力㈱は，フライアッシュ産出事業者であり，委員として参画する一方，事務局として委員会を運営している。



図－1.4 フライアッシュ委員会の構成

フライアッシュ委員会では，北陸地方でフライアッシュコンクリートを標準化し，コンクリートの耐久性向上による「コンクリート構造物の長寿命化」と建設資材の地域的な活用による「環境負荷低減」を図ること，すなわち「北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの社会実装」を目指した研究を進めてきた。なお，耐久性向上を掲げている趣旨については，北陸地方は全国的に見ても ASR の発生例が多く，反応性鉱物を含む可能性のある骨材資源の有効活用や ASR 発生リスクの低減の観点から，より確実な ASR 抑制対

策としてのフライアッシュの活用が望まれることが背景にある[11)]。

フライアッシュ委員会での主な検討項目は以下の3点である。

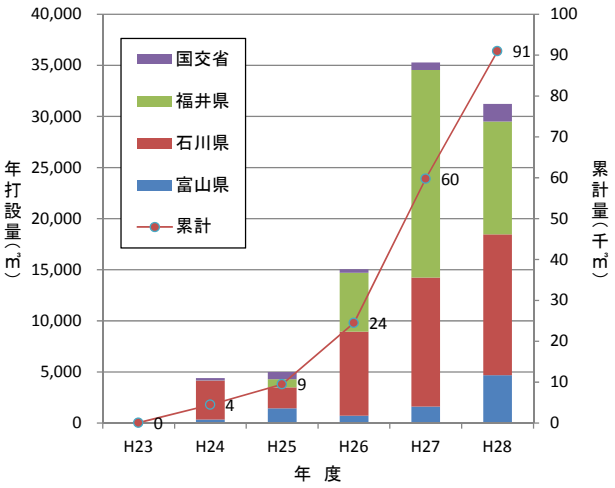
a. フライアッシュの品質保証とフライアッシュコンクリートの工学的性質の確認

b. 北陸地方産のフライアッシュを用いたコンクリートの実用化のための各種試験の実施と基本データの提供

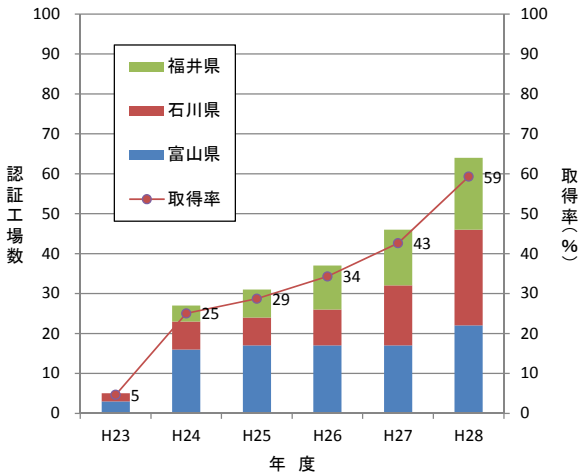
c. 北陸地方産のフライアッシュを用いたコンクリートの利用方策の検討

第1回委員会（平成23年1月24日）開催から，これまで第9回委員会（平成29年2月8日）まで開催し，審議を重ねてきた。

フライアッシュコンクリートの普及に際しては，「フライアッシュ産出事業者である電力会社のフライアッシュ供給体制と品質確保」，「コンクリートを製造するコンクリート工場のサイロ，計量設備等の増設や整備およびフライアッシュコンクリートの配合設計の確立」，「発注者が設計に積極的にフライアッシュの使用を取り入れていく姿勢と仕様書の整備」を関係者間で連携して行う必要があり，フライアッシュコンクリートの標準化が最も経済的かつ合理的な方策であると考えている。施策的には，平成26年度からは，石川県七尾地区が「モデル地区」に指定されたり，福井県嶺北地区および敦賀市が「推進地区」に指定されたりと，まだ地域が限定されているが，**図－1.5** に示すように，公共工事での標準化が着実に進行している。**図－1.5** は，公共工事において試験施工やモデル工事として，フライアッシュコンクリートが適用された実績を集計したものであり，橋脚，橋台，砂防堰堤，消波ブロック等々，各種構造物で使用されている。また，**図－1.6** に示すように，公共工事での使用に伴い，フライアッシュコンクリートのJIS認証を取得する生コンクリート工場も増えてきている。



図－1.5 公共工事におけるフライアッシュコンクリートの使用実績の推移



図－1.6 生コンクリート工場のJIS認証取得の推移

1.1.4 フライアッシュコンクリートの用途拡大実績

高度経済成長期に建設された多くのコンクリート構造物が供用50年を迎えており，老朽化した構造物の撤去，架替えなど，社会インフラの維持管理・更新が近年注目されてい

る。財政の逼迫や少子高齢化が進行するなか，今後，新設・更新される PC 構造物においても耐久性の向上による長寿命化などが求められている。そこでフライアッシュコンクリートを PC 構造物へ適用する取組み[12]も進んでいる。**写真－1.1** は，石川県に設置されたフライアッシュコンクリートを用いたわが国で最初のプレテンション方式 PC 橋[13]であり，**写真－1.2** は，福井県に設置されたプレテンション方式 PC 橋である。

写真－1.1 プレテンション方式 PC 橋（宮坂橋）

写真－1.2 プレテンション方式 PC 橋（大月橋）

また，道路橋の床版取替え工事において，塩害対策として，フライアッシュコンクリートを用いたプレキャスト PC 床版が採用されている。**写真－1.3** は，福井県内の高速道路に設置されたプレキャスト PC 床版であり，**写真－1.4** は，富山新港火力発電所の桟橋に設置されたプレキャスト PC 床版である。

写真－1.3 プレキャスト PC 床版（日野川橋）

写真－1.4 プレキャスト PC 床版（火力発電所桟橋）

フライアッシュコンクリートの北陸新幹線敦賀延伸工事への適用の取組みも進んでいる。鉄道・運輸機構にもフライアッシュ委員会の取組みが理解され，フライアッシュコンクリートが工事仕様書へ取込まれ，高架橋等の明かり構造物に採用されている。**写真－1.5** は，石川県内の橋脚の写真である。施工に問題なく，ブリーディングが少なく，仕上り面も良好である。

写真－1.5 北陸新幹線工事の橋脚（能美市西任田）

北陸新幹線敦賀延伸工事のトンネル工事においても，フライアッシュコンクリートが採用されている。吹付けコンクリートでは，フライアッシュの粘性によるリバウンド抑制も期待され，全施工区間でフライアッシュコンクリートが用いられている。**表－1.3** に配合の一例，**写真－1.6** に施工状況を示す。

表－1.3 吹付けコンクリートの配合例

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					化学混和剤 (C×%)
		W	C	FA	S	G	Ad*
53	56	191	360	87	911	784	1.3

Ad*：高性能減水剤

鉄道・運輸機構では，覆工コンクリートの施工性と品質の向上を目的として，最大骨材寸法を 40mm とし，かつ，コンクリートの流動化に伴うセントルの補強が不要となる，経済性に優れた高充填コンクリートの開発を行っている[14)]。そのひとつが粉末系高充填コンクリートで，セメントの一部をフライアッシュに置き換えることで，水密性の向上，長期強度増進，ASR の抑制，また，産業副産物の再利用による環境負荷低減への貢献など，数々の利点が生じる。北陸新幹線敦賀延伸工事のトンネル工事の一部で施工され，施工中のコンクリート圧力測定結果や仕上がり状況から，良好な結果が得られている。**表－1.4** に配合の一例，**写真－1.7** に施工状況を示す。

表－1.4 覆工コンクリートの配合例

W/C (%)	W/(C＋FA) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					化学混和剤((C＋FA)×%)
			W	C	FA	S	G	Ad*
63.5	51.6	51.0	165	260	60	890	883	1.2

Ad*：高性能減水剤

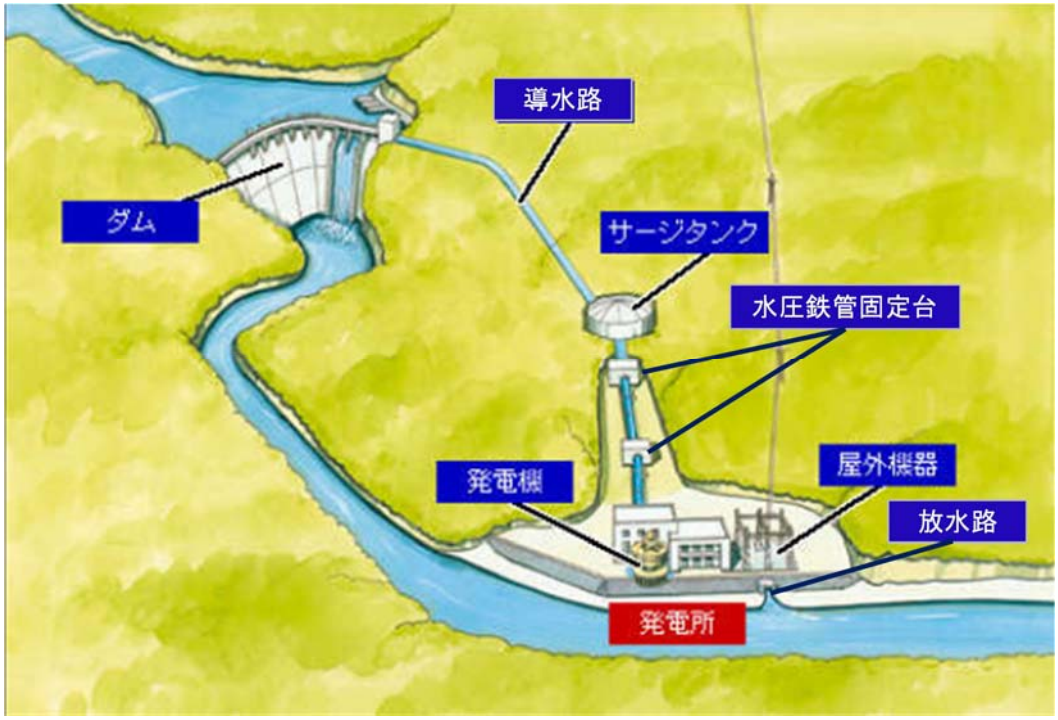
写真－1.6 吹付けコンクリートの施工状況（新北陸トンネル葉原工区）

写真－1.7 覆工コンクリートの施工状況（新北陸トンネル葉原工区）

なお，鉄道・運輸機構は，平成 29 年 3 月に北陸新幹線（金沢・敦賀間）の ASR 抑制対策を JR 東日本に準じて行うこととし,「北陸地方は良質なフライアッシュが入手できることから，混合セメントとしてフライアッシュセメント，もしくは混和材としてフライアッシュを混入した結合材を適用するのが望ましい。」と提言している。更に平成 29 年 9 月には,「普通セメントコンクリートとフライアッシュコンクリートまたは高炉セメントコンクリートの生コンクリートの単価が同等である場合, ASR 対策が不要と判定された場合でもフライアッシュコンクリートを優先的に選定するものとする。」としている。

1.1.5 電力関連施設等での ASR の実態

水力発電設備としてコンクリート構造物には，**図－1.7** に示すように，上流から取水ダム（取水口等付帯構造物を含む)，導水路，サージタンク，水圧鉄管固定台，発電所（水車・発電機基礎等)，放水路（放水口含む）がある。各コンクリート構造物は，目的や設置位置により，断面寸法，コンクリートの配合，鉄筋等金物による拘束力，作用荷重，水の供給環境，外気温等が異なり，ASR の発生する可能性が高い骨材を使用した場合の ASR 膨張量や膨脹に伴う変形量も異なってくる。以下に各コンクリート構造物の ASR の発生状況を示す。



図－1.7 水力発電設備（ダム水路式）のイメージ図
（島根県ＨＰ島根県企業局の水力発電より引用）

(1) 取水ダム（取水口等付帯構造物を含む）

取水ダムは標高の高い地点に位置することが多く，ASR によりひび割れが発生した場合，凍害との複合劣化が懸念される。実際には，ダム本体のコンクリートには高い強度が求められないことから，配合上，単位セメント量が少なくアルカリ総量が小さくなっており，ASR により劣化しているものは確認されていない。しかしながら，ダム洪水吐ゲートの門柱（**写真－1.8**，**写真－1.9** 参照）や取水塔（**写真－1.10** 参照）等の付帯構造物は，構造上高強度が求められ，単位セメント量が多いことから，ASR による劣化が確認されている。

写真－1.8 ダム付帯設備の劣化状況
（手取川水系）

写真－1.9 ダム付帯設備の劣化状況
（神通川水系）

写真－1.10 ダム付帯設備の劣化状況（常願寺川水系）

(2) 導水路

導水路は,ダムに貯めた水を十分に高低差が確保できる発電所地点まで導く水路であり,トンネル形式のものが多い。トンネル内は，数年に１度の抜水点検時以外は水に満たされており，また，地中にあることから，温度変化も小さい。それゆえ，トンネル形式の導水路には，ASR によるひび割れは，あまり見られない。

(3) サージタンク

サージタンクは,発電所停止時に施設を保護するため圧力を一旦抜くための水槽であり,発電所運転中は,サージタンク水位は低く,発電所停止時に一時的に水位が上がる。また,多くのサージタンクは，気中に露出しており，降雨により水が供給される環境にあることから，**写真－1.11** に示すように，ASR による劣化が確認されている。なお，写真のサージタンクは,劣化初期にケイ酸ナトリウム系の塗装を施しているが,劣化が進行している。

写真－1.11 常願寺川水系サージタンクの劣化状況（常願寺川水系）

(4) 水圧鉄管固定台

水圧鉄管には，静水圧，水撃圧及びサージングによる上昇水圧による大きな水圧が作用する。固定台は，それらの水圧と他の外力を支えており，曲り部では，更に不平均力や遠

心力を受けることとなる。固定台は，気中に露出しており，降雨により水が供給される環境にあることから，**写真－1.12** に示すように，ASR による劣化が確認されている。劣化が進行し，ブロックとしての一体化が損なわれた場合，構造上の問題となることが懸念される。

写真－1.12 水圧鉄管固定台の劣化状況（常願寺川水系）

(5) 発電所（水車・発電機基礎等）

発電所は，山間部に設けられることが多く，地勢上，半地下式となる場合が多い。その場合，地下水が供給される環境にあることから，**写真－1.13** に示すように，ASR による劣化が確認されている。劣化が進行し，水車基礎等に僅かな傾斜が生じた場合等，運転への支障が懸念される。

写真－1.13 発電所基礎の劣化状況（常願寺川水系）

写真－1.14 放水路の劣化状況（常願寺川水系）

(6) 放水路（放水口含む）

放水路は，発電に使用された水を河川に導くための水路であり，自由水面を持つ開水路形式のものが多い。発電所使用水量や河川水位により，放水路水位は変動する。また，降雨により水が供給される環境にあることから，**写真－1.14** に示すように，ASR による劣化が確認されている。

(7) 電力関連施設以外での ASR の発生状況

JR 東日本では，無害とされる骨材を使用したが，ASR によるひび割れが発生した事例（**写真－1.15** 参照）があり，独自の厳しい判定基準を設定し，対策を強化している。

また，一般的に耐久性の高い構造物であるプレストレストコンクリート（PC）構造物においても，ASR による劣化が確認されている。**写真－1.16** のプレテンション式 PC 橋梁（ホロー桁）では，下フランジの側面および下面に橋軸方向のひび割れが発生している。また，**写真－1.17** の PC 橋梁では，PC 鋼材定着部の局部的破壊により，桁の垂れ下がりが生じている。更に，**写真－1.18** の PC 水槽では，側壁と頂版に ASR による亀甲状のひび割れが発生している。

写真－1.15 上越新幹線高架梁に発生したASR ひび割れ

写真－1.16 PC 橋梁に発生したASR ひび割れ

写真－1.17 PC 橋梁に発生したASR ひび割れ

写真－1.18 PC 水槽に発生したASR ひび割れ

1.1.6 電力関連施設におけるアルカリシリカ反応抑制対策の現状

北陸電力㈱では，水力発電設備の劣化実態を明らかにし，劣化機構毎に管内設備全体を俯瞰的に捉えることで，コンクリート構造物の維持管理の効率化，高度化を図ることを目的とした取組みを進めてきた[15)]。コンクリート診断士による水力発電所の実態調査（主として，コンクリート劣化診断カルテの作成）は平成 18，19 年度に富山県内，平成 20 年度に石川・福井県内の水力発電所を対象に実施し，平成 21 年度にこれまで各事業所（電力部）で実施してきた点検との整合性を図った。コンクリート劣化診断カルテは，外部点検時に本体設備の明かりコンクリート部を対象に，初期診断結果を基に診断し，作成している。本体設備とは，本川ダム（本体，エプロン，排砂路，排砂ゲート，門柱等），ヘッドタンク，サージタンク，固定台，小支台，発電所基礎である。コンクリート劣化診断カルテには下記 a.～c.の項目を記載し，固定台など，構造物の個数が多いものは，代表的な構造物の写真を選定・添付している。

a. 構造物概要：構造物概要，診断月日，診断者，点検者

b. 構造物の状況：写真（全景，近景），記載事項（状況）

c. 診断結果：劣化原因，外観グレード，劣化度，進行度，維持管理方針，対策案

劣化原因については，「コンクリート診断技術」（㈳日本コンクリート工学協会編）[16)]に記載されている劣化機構が明らかなもの（凍害，ASR，中性化，摩耗・洗掘等）とそれ以外（初期欠陥，構造，外力によるもの）で分類している（**表－1.5**）。

表－1.5 劣化原因の選択項目

劣化機構が明らかなもの	その他
・凍害 ・ASR ・中性化 ・塩害 ・摩耗，洗掘 ・疲労 ・化学的浸食 ・火害	・初期欠陥 ・構造，外力によるもの （荷重，構造検討，支持条件，人為的行為）

外観グレードについては，「コンクリート診断技術」（㈳日本コンクリート工学協会編）[16)]に記載されている変状の原因毎の外観グレードに基づき，Ⅰ（潜伏期）～Ⅳ（劣化期）までの４段階に区分している（**表－1.6**）。

表－1.6 外観グレード（ASR の例）

外観グレード	症状
Ⅰ（潜伏期）	変状なし
Ⅱ（進展期）	反応生成物の膨張によるひび割れ発生
Ⅲ（加速期）	反応生成物の膨張によるひび割れが加速
Ⅳ（劣化期）	構造物の段差やコンクリートのはく離・はく落が発生

劣化度については，構造物の外観グレードと構造物の要求性能に基づいて，劣化度 a（軽微），劣化度 b （要観察），劣化度 c （要措置）を判定している（**表－1.7**）。ここで，構造物の要求性能[17]とは，安全性能，使用性能，周辺環境への影響性能を考慮している。

表－1.7 劣化度の判定区分

劣化度	内容
a （軽微）	要求性能に影響を及ぼす段階でない。
b （要観察）	要求性能に影響を及ぼす恐れがあり，補修の要否に関する検討が必要である。
c （要措置）	要求性能に影響を及ぼしており，補修を検討する必要がある。

進行度については，前年診断したコンクリート劣化診断カルテと対比して進行の有無を判定している（**表－1.8**）。

表－1.8 進行度の判定区分

進行度	区分の内容
有	今後，進行する可能性がある。
無	これまでのところ変状がないことから進行度は無し。 これまでのところ進行度がないことから進行度は無し。
不明	過去のデータがないことから進行度は不明。不明確。

維持管理方針については，劣化度と進行度を考慮して，経過観察，詳細調査，修繕工事を判断している（**表－1.9**）。

表－1.9 維持管理方針区分

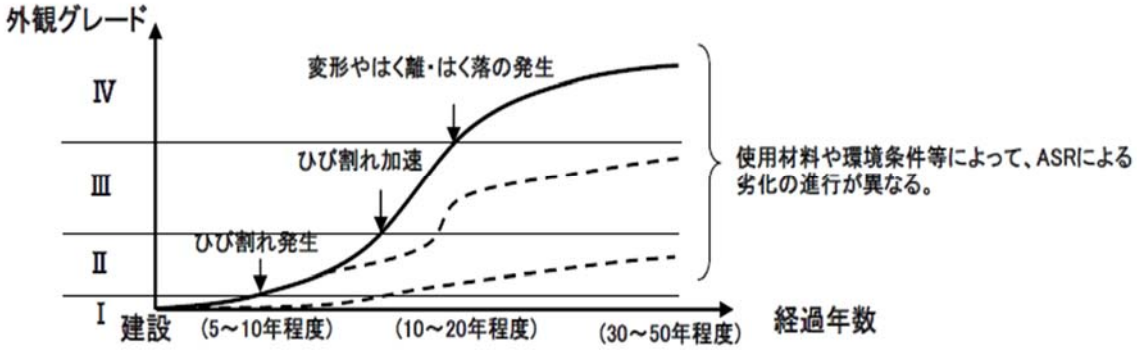
維持管理方針	区分の内容
経過観察	次回点検時に，進行度を調査する。 次回点検時に，変状の有無を調査する。
詳細調査	詳細調査の上，必要であれば予算計上する。
修繕工事	予算化を検討する。

対策案については，「コンクリート診断技術」（㈳日本コンクリート工学協会編）[16]に記載されている劣化機構別の補強・補修工法の選定に基づき，劣化原因と劣化度に対応した対策案を選定することとしている。

コンクリート劣化診断カルテにおいて，ASR による劣化が確認された設備は，74 設備あり，外観グレードⅡが 62 設備，外観グレードⅢが 11 設備，外観グレードⅣが 1 設備と

なっている。外観グレードⅣの１設備は構造物の要求性能から劣化度ｃ（要措置）と判定されており，補修を検討する必要がある。

補修は，**図－1.8** に示す ASR による劣化進行の概念を踏まえ，所定の効果が得られるように ASR による性能低下やライフサイクルコストを考慮して，**表－1.10** に示す工法から選択することとしている。



図－1.8 ASR による劣化進行の概念

表－1.10 ASR に対する補修，補強対策の一般的工法

目的	工法例
ASR 反応抑制	・水分遮断のための表面への塗料塗布
ASR 変形拘束	・PC（ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ）鋼線による変形拘束 ・外面のﾌﾟﾚｷｬｽﾄ板，鋼板等巻立てによる変形拘束
劣化部除去	断面修復（部分的改築）

1.2 研究の位置付け

北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの利活用拡大については，産学官が連携する委員会の取組みにより，公共工事での使用量が増加するとともに，約 6 割の生コンクリート工場が JIS 認証を取得している。しかしながら，至近年は以下の理由から取組みがあまり進展せず，足踏み状態となっている。

a. 生コンクリート組合毎に設定するフライアッシュコンクリートの価格が依然割高

b. 国および各県の仕様書改定（標準使用）に向けた具体的な検討が未進展

そこで，本研究では，電力関連施設でのフライアッシュコンクリートの需要を増やすとともに，北陸新幹線工事，高速道路工事での需要も掘り起こし，需要創出・拡大により，フライアッシュコンクリートの価格を低減するために，公共工事に用いる一般コンクリート以外の特殊コンクリートへの適用性と ASR 抑制効果を検証することとした。また，国および各県が ASR による性能低下やライフサイクルコストを考慮し，仕様書改定の必要性を認識するように，フライアッシュコンクリートの未使用リスクを示すとともに，ASR により劣化した電力関連施設の維持管理方策を確立し，仕様書改定に向けた具体的な検討の一助とすることとした。

1.3 研究の目的

1.3.1 アルカリシリカ反応により変形した電力関連施設の維持管理方策

水力発電所は，北陸電力㈱における貴重なピーク対応電源に位置づけられるとともに，地球環境問題・エネルギーセキュリティ上も二酸化炭素を排出しない純国産エネルギー源であることから，重要な設備である。したがって，長期間発電所を停止することは望ましくない。特に貯水量が多い貯水池内で運用上から年間のほとんどの期間水没した状況にある施設の再構築は難しい。したがって，ASR 劣化により変形した電力関連施設の維持管理においては，機能が確保されることを基本に，適切な補修・補強により長期間にわたって使用が可能とすることを目指している。

前述の通り，北陸電力㈱の水力発電設備には，ASR による劣化が確認された設備は，74 設備あり，外観グレードⅡが 62 設備，外観グレードⅢが 11 設備，外観グレードⅣが 1 設備となっている。外観グレードⅣの 1 設備は貯水池内の取水塔であり，再構築が非常に困難な設備である。したがって，この設備の維持管理においては，変形の経年変化およびコンクリート性状を十分調査し，構造物の健全性（安全性・使用性）を評価するとともに，ASR による変形のメカニズムを解明し，効果的な補修・補強を実施し，長期間にわたりモニタリングしていく必要がある。

この維持管理方策は，他の ASR による劣化が確認された設備が外観グレードⅣに進展した場合のモデルケースになるとともに，新設する電力関連施設へのフライアッシュコンクリートの採用を検討する際の維持管理費を含めたライフサイクルコストの指標のひとつになると考えている。

1.3.2 新設する電力関連施設へのフライアッシュコンクリートの実装

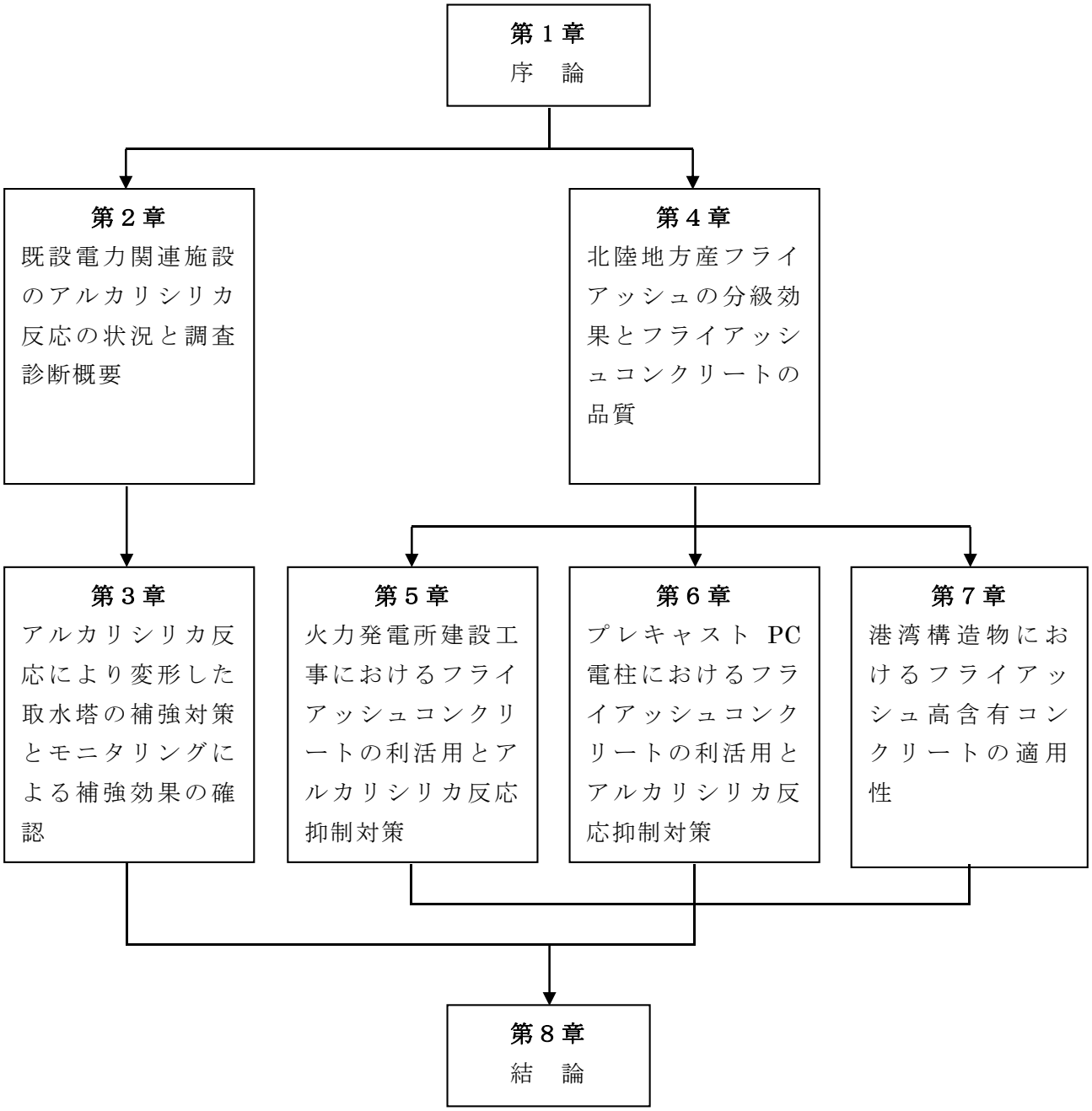
前述の通り，フライアッシュ委員会では，北陸地方でフライアッシュコンクリートを標準化し，コンクリートの耐久性向上による「コンクリート構造物の長寿命化」と建設資材の地域的な活用による「環境負荷低減」を図ること，すなわち「北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの社会実装」を目指した研究を進めてきた。その結果，北陸地方の多くの生コンクリート工場が JIS 適合品としてフライアッシュコンクリートを出荷できるようになり，新設する電力関連施設へのフライアッシュコンクリートの実装も可能となった。しかしながら，出荷可能なフライアッシュコンクリートは，普通ポルトランドセメントの 15～20%をフライアッシュに置換したものに限られ，呼び強度も 36 程度以下までであり，他のセメントや特殊な混和材を用いた場合もフライアッシュコンクリートは採用されていない。

一方，電力関連施設の高耐久化に向けて，温度ひび割れ抑制のため，低熱セメントや膨脹材の利用が進んでいる。また，北陸地方の電柱（PC 柱）の一部には，ASR が原因と考えられるひび割れが確認されている。

これらの構造物に ASR 等の抑制を目的としてフライアッシュを活用するためには，当該地方の骨材のアルカリシリカ反応性を評価し，フライアッシュの抑制効果を確認したうえで，試験練りを行い，生コンクリートのフレッシュ性状等の施工性を確認する必要があるが，実績を積み重ねることにより，将来的には，あらゆる電力関連コンクリート構造物へのフライアッシュコンクリートの実装が可能であると考えている。

1.4 本論文の構成

本論文の題目は,「北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの電力関連施設への利活用促進に関する研究」である。本論文の構成を**図－1.9** に示す。論文は，第１章から第８章までの８章で構成されており，第１章序論では，背景とフライアッシュコンクリートの利活用状況，第２章と第３章では，フライアッシュの未使用リスクとして ASR の状況と ASR が生じた構造物の調査・対策事例を示した。第４章では，一般コンクリートへのフライアッシュの利活用効果，第５～７章では特殊コンクリートへのフライアッシュの利用効果として，火力発電所建設工事，プレキャスト PC 電柱，港湾構造物でのフライアッ



図－1.9 本論文の構成図

シュの利活用効果と実績を示した。第８章結論では，フライアッシュの未使用リスクと利活用効果を踏まえ，経済性の観点を加えて，利活用促進への課題と展望を論じた。各章の概要は以下のとおりである。

「第１章 序論」では，北陸地方が抱える深刻な ASR 問題を提起し，北陸の地域特性を反映した「地産地消」,「エネルギーセキュリティ」,「コンクリート構造物の長寿命化」の3つの観点から,「フライアッシュコンクリートの利活用促進」の取組みの進展について述べるとともに「電力関連施設におけるアルカリシリカ反応抑制対策」の現状について述べた。また，本研究の位置付けと目的および本論文の構成を示した。

「第２章 既設電力関連施設のアルカリシリカ反応の状況と調査診断概要」では，再構築が非常に困難な導水路および取水塔の維持管理において，常に水の供給を受ける導水路トンネルと水の供給環境が変わる取水塔の ASR による劣化の程度や進行を調査したうえで，構造物の健全性（安全性・使用性）を評価した。

「第３章 アルカリシリカ反応により変形した取水塔の補強対策とモニタリングによる補強効果の確認」では，取水塔の ASR による変形のメカニズムを解明し，効果的な補修・補強を実施し，長期間にわたりモニタリングし，補強効果について検証した。

「第４章 北陸地方産フライアッシュの分級効果とフライアッシュコンクリートの品質」では，北陸産分級フライアッシュの製造技術を紹介し，分級効果確認試験の結果により，北陸産分級フライアッシュの品質および北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性について検証した。

「第５章 火力発電所建設工事におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策」では，火力発電所建設工事において，低熱セメントを用いた高強度コンクリート構造物および早強セメントと膨張材を採用する高強度コンクリート構造物への ASR の抑制を目的としたフライアッシュコンクリートの適用性を検証した。

「第６章　プレキャスト PC 電柱におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策」では，高強度でかつ遠心成型製品であるプレキャスト PC 電柱への ASR の抑制を目的としたフライアッシュコンクリートの適用性を検証した。

「第７章　港湾構造物におけるフライアッシュ高含有コンクリートの適用性」では，港湾構造物における浚渫砂とフライアッシュを多量に用いた消波ブロックの設計・施工方法を確立し，耐久性を確認するとともに，フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの藻場造成材への適用性を検証した。

「第８章　結論」では，本研究で得られた結論を総括するとともに，今後の課題と展望について述べた。

【参考文献】

1）鳥居和之：コンクリートの長寿命化への提言，橋梁と基礎，Vol.42，No.8，pp.82-84，2008.

2）金沢大学 SIP-WG2（ASR 部会）：研究成果報告書－北陸地方における ASR 問題の解決を目指して－，pp.19-43，2016.9.

3）鳥居和之，宮村雅之，湊俊彦，西川元気：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とそ

の対策，コンクリート工学，Vol.46，No.4，pp.27-33，2008.
4）独立行政法人 土木研究所：骨材のアルカリシリカ反応性に関する長期屋外暴露試験結果，土木研究所資料 第 4281 号，2014.3.
5）鳥居和之，橋本徹：今，何故，北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか，セメント・コンクリート，No.808，pp.18-23，2014.
6）Thomas, M; Fournier, B. AAR in North America: Recommended practices for testing aggregates and selecting preventive measures, Concrete in Australia, Vol.41,　No.2, pp.59-64,2015.
7）鳥居和之，川村満紀，枷場重正，谷口公一：石炭灰のコンクリート用混和材としての適用性，コンクリート工学年次講演論文集，Vol.7, pp.193-196，1985.
8）社団法人土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999.
9）社団法人日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書，pp.9-10，2010.
10）「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」報告書（富山・石川・福井版），2013.
11）鳥居和之，参納千夏男：骨材資源の活用を目指したアルカリシリカ反応抑制対策の提案，コンクリート工学，Vol.48，No.1，pp.578-581，2010.
12）俵道和，呉承寧，石川嘉崇，滝上邦彦：プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.197-202，2011.
13）桜田道博，山村智，鳥居和之，山中章平：フライアッシュを用いたプレテンション PTC 桁橋（宮坂橋歩道橋）の施工，プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集，pp.315-318，2015.10
14）若林功起，荻原秀樹，三浦貴幸，小山武志：フライアッシュを用いた高充填コンクリートで覆工の品質向上を目指す，トンネルと地下第 48 巻 1 号，pp45-53，2017.1
15）参納千夏男，橋本徹，長山明：コンクリート劣化診断カルテを利用した水力発電設備の維持管理，電力土木，No.350，pp.77-81，2010.
16）社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術’03～’08［基礎編］［応用編］，　2003～2008.
17）社団法人土木学会：コンクリート標準示方書［維持管理編］，2007.

第２章　既設電力関連施設のアルカリシリカ反応の状況と調査診断概要

2.1 概　説

水力発電所は，北陸電力㈱における貴重なピーク対応電源に位置づけられるとともに，地球環境問題・エネルギーセキュリティの観点からも二酸化炭素を排出しない純国産エネルギー源であることから，重要な設備である。したがって，長期間発電所を停止することは望ましくない。特に貯水量が多い貯水池内で，運用上年間のほとんどの期間水没した状況にある施設の再構築は難しい。したがって，ASR 劣化により変形した電力関連施設の維持管理においては，機能が確保されることを基本に，適切な補修・補強により長期間にわたって使用を可能とすることを目指している。

前述の通り，北陸電力㈱の水力発電設備において，ASR による劣化が確認された設備は，74 設備あり，外観グレードⅡが 62 設備，外観グレードⅢが 11 設備，外観グレードⅣが 1 設備となっている。外観グレードⅣの 1 設備は貯水池内の取水塔であり，再構築が非常に困難な設備である。したがって，この設備の維持管理においては，コンクリート性状を十分調査し，構造物の健全性（安全性・使用性）を評価する必要がある。

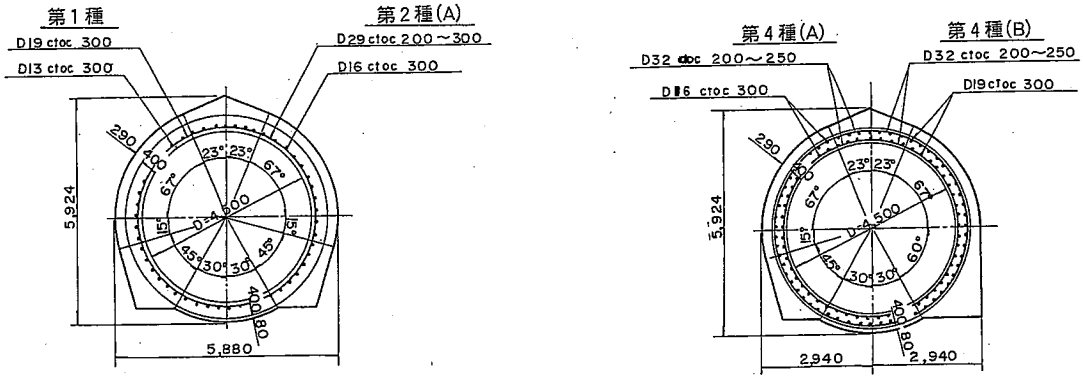
そこで本章では，まず，常に水の供給を受ける環境にある導水路トンネルの覆工コンクリートを対象とした詳細調査を実施し，水中部のコンクリート部材における ASR の特徴を把握した。次に，貯水池水位の変動に伴い水の供給環境が変わる取水塔の詳細調査を実施し，ASR の特徴を把握するとともに取水塔コンクリートの耐荷性能を評価した[1),2),3)]。

2.2 導水路のアルカリシリカ反応に関する調査

2.2.1 調査概要

水利構造物は水の供給を受ける環境にあるため ASR による劣化が生じた場合，劣化の程度や進行が他の構造物に比べ特徴的になると考えられる。そこで，水利構造物のうち，導水路トンネルの覆工コンクリートを対象とした詳細調査を実施し，水中部のコンクリート部材における ASR の特徴を把握することを目的とした。

詳細調査を実施した導水路トンネルは 1980 年に建設され，調査時点（2014 年）で 34 年が経過していた。覆工コンクリートの構造形式は，**図－2.1** に示す通り，鉄筋コンクリート構造で内径 4500mm の円形，壁厚 400mm であった。



(a) TD4850m 第１種　　(b) TD4920m 第４種(A)

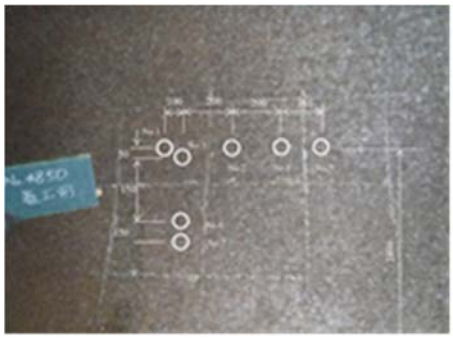
図－2.1 導水路トンネル断面

使用骨材は，富山県の常願寺川水系の川砂利・川砂であり，安山岩など火山岩類の反応性骨材が混入していた。導水路トンネルの内部点検では，TD4870m～TD4990m において覆工コンクリートにひび割れおよびひび割れからの析出物が確認された以外には，覆工コンクリート表面に ASR による劣化は認められなかった。詳細調査は，**表－2.1** に示す種別で，**写真－2.1** に示す 3 地点でφ55mm のコアを採取し，各種試験を実施した。

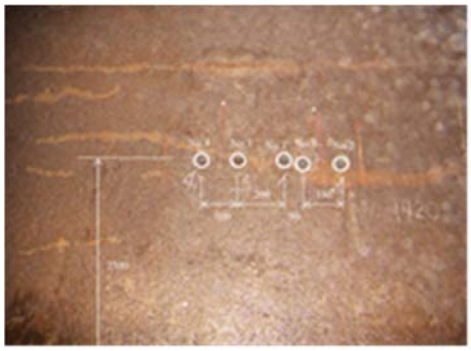
表－2.1 コア採取箇所の種別

コア採取箇所		コンクリート表面の状態	摘　要
横坑	坑門	乾湿繰り返し部	坑外のひび割れ部
導水路	TD 4850	湿潤部	
	TD 4920	湿潤部	ひび割れ区間

(a) 横坑坑門



(b) 導水路 TD4850m



(c) 導水路 TD4920m

写真－2.1 コア採取箇所

2.2.2 試験方法

試験内容は，コア側面における直径 5mm 以上の骨材（粗骨材）の岩種判定による岩種構成率の算出，総プロ法による水溶性アルカリの分析，JIS A 1108 による圧縮強度試験および JIS A 1149 による静弾性係数試験，NaOH 溶液浸漬法による促進養生試験，さらに偏光顕微鏡による薄片観察を実施した。

(1) 粗骨材の岩種面積率の算出

粗骨材の岩種面積率の算出は，コア側面にて展開写真を撮影し，直径 5mm 以上の骨材（粗骨材）を対象に岩種判定を行う。その後，展開写真上にて岩種ごとの面積を集計し，個々の岩石の面積率（%）を算出する。

(2) アルカリ分析

採取したコアの一部（表面部および深部，厚さ 3cm 程度）にてコンクリート中のアルカリ量の分析を行う。アルカリ量分析は「建設省総合開発プロジェクト　コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）平成元年 5 月　コンクリート中の水溶性アルカリ金属の分析方法（案）」に準拠して実施する。

(3) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度および静弾性係数試験は，コアを切取り整形し，コアの圧縮強度および静弾性係数を測定する。本試験は，採取したコアを試験用に切取り整形するため，湿式カッター（水使用）を用い，所定の長さに切り揃え，整形する。試験は，整形後のコアを用いて，JIS A 1107：2012「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法および圧縮強度試験方法」，JIS A 1108：2006「コンクリートの圧縮試験方法」および JIS A 1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従う。圧縮試験機は，前川試験機製作（最大秤量 2000 ｋN）を使用する。静弾性係数試験におけるひずみ測定は，ひずみゲージを用いる。

(4) 促進養生試験

促進養生試験は，カナダおよび米国の促進モルタルバー法に準拠したコアの促進養生試験カナダ法を実施する。カナダ法は温度 80℃，1 規定の NaOH 溶液にコアを浸漬し，膨張量の経時変化を測定するものである。

(5) 蛍光樹脂含侵によるひび割れ観察

蛍光樹脂含浸によるひび割れ観察は，採取したコアに蛍光塗料含有エポキシ樹脂を含浸させ，紫外線を照射することでひび割れの発生状況等を確認する[4)]。採取したコアは汚れ等を除去し，コアの状態のままで蛍光塗料含有エポキシ樹脂を含浸させる。これは，コアに発生したひび割れの状態を保護し，コアの切断で生じるひび割れや骨材のずれ等を最小限に保つためである。使用するエポキシ樹脂は，丸本ストルアス社製のスペシフィックス冷間埋込樹脂(主剤)，スペシフィックス-20（硬化剤）およびナフテン酸系の蛍光塗料を調合したものである。また，流動性を増すために少量のエタノールを加えている。脱泡には低真空状態の環境を保つため到達圧力 7×10^{-2}Pa の仕様の真空ポンプを使用する。コアの切断ではダイヤモンドブレードをゆっくり動かして，厚さ 10 ㎜程度のスラブ試料を作製し，観察面に再度，蛍光塗料含有エポキシ樹脂を含浸させる。研磨は，蛍光樹脂をはぎ取るため，＃80 の耐水研磨紙でコンクリート面を露出させ，＃120→＃1500 の耐水研磨紙で研磨，メノウ研磨板の上でアランダム＃3000 による研磨，乾式ダイヤモンド粒度 1μm による琢磨（ここでは絹性のシート上にダイヤモンド粒子を少量付着させ，コンクリートを研磨する手法）にて鏡面研磨を完了する。仕上がった試料は，紫外線の蛍光装置下で目視

によるマクロ的な観察，蛍光顕微鏡ではメゾレベル的な観察（倍率は 10 倍）を実施する。

(6) 薄片観察

薄片観察は,前項の蛍光樹脂を含浸させたコアの一部よりコンクリート片(縦 35×横 25×厚 10mm 程度）を切り出して，厚さ 20μm 程度の薄片試料を作製し，偏光顕微鏡にてメゾレベルおよびマクロレベルでのアルカリシリカ反応の状況等を確認する。

一般的にアルカリシリカ反応は以下の順序で進行するとされている[5), 6)]。

ⅰ）骨材の反応リムの形成
↓
ⅱ）骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き
↓
ⅲ）骨材内のひび割れ形成・ゲル充填
↓
ⅳ）骨材を取り巻くセメントペースト内のひび割れ形成・ゲル充填
↓
ⅴ）骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの沈殿

この進行段階の分類に基づき，劣化度を 3 段階（軽微・中程度・顕著）で評価する（**表－2.2** 参照)。骨材に初期の反応（反応リム・ゲルの取り巻き）のみが主に認められる場合には，軽微（潜伏期）と判定する。ひび割れが多数の骨材内に生じたものや，骨材からセメントペーストに向かって進展し，コンクリートに劣化を生じたことを意味する場合（進展期・加速期）は，中程度とみなす。さらに反応が進行し，ひび割れに沿った気泡内へのゲルの沈殿が頻繁に見られる場合は，顕著（加速期・劣化期）と考える。この方法は，一般に採用されている外観目視による構造物の劣化進行度の評価とは異なり，構造物表面に劣化（ひび割れ）が現れる前の段階でも反応の状態を評価できる。

表－2.2 アルカリシリカ反応の判定区分

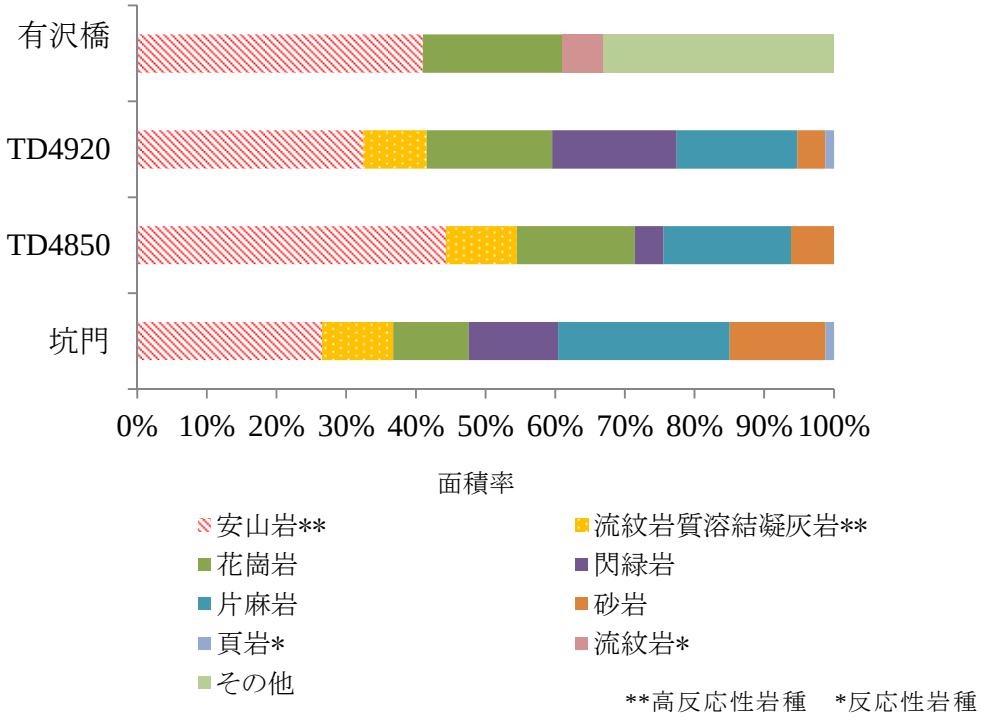
反応の程度→			
潜在的	軽微	中程度	顕著
反応ﾘﾑ ｹﾞﾙ/ｿﾞﾙ滲出	骨材粒子内のｹﾞﾙに充填されたひび割れ形成	ｾﾒﾝﾄﾍﾟｰｽﾄへのｹﾞﾙに充填されたひび割れ進展	ｹﾞﾙのｾﾒﾝﾄﾍﾟｰｽﾄ中の気泡充填

また，偏光顕微鏡観察ではアルカリシリカゲルの形態についても述べることとする。ゲルは，セメントペーストに向かうに従い，干せた水田のような形状を有するゲル，非晶質なゲルへと変わる。これは，ゲルが，セメント中の Ca（カルシウム）を取り込み，アルカリと置換するためとされている[7)]。

2.2.3 試験結果および考察

(1) 粗骨材の岩種面積率の算出

圧縮強度・静弾性係数試験に使用したコア（L=100mm 程度，各 3 本）の側面にて直径 5mm 以上の骨材を対象に岩種判定を行い，その面積率（面積は画像処理により算出）をもって岩種面積率を算出した。算出結果を**図－2.2** に示す。



図－2.2 粗骨材の岩種面積率の算出結果

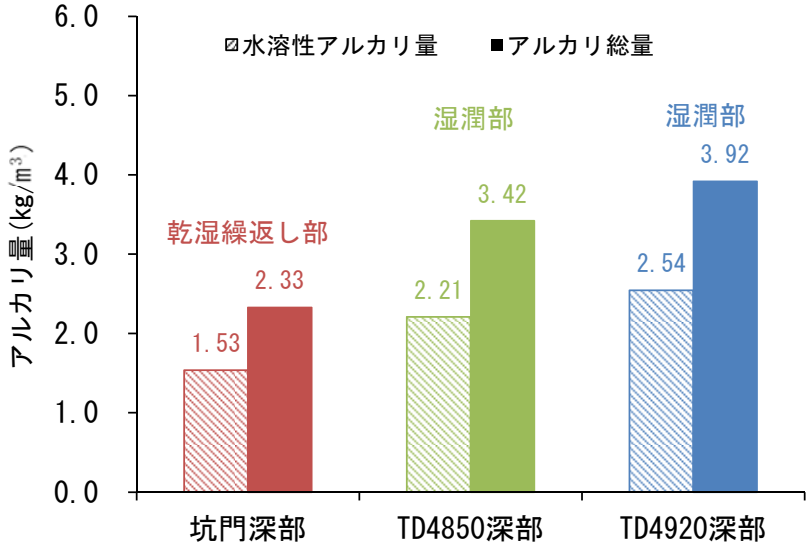
北陸地方における道路構造物の調査結果では，安山岩の面積率が約 4%で構造物の隅角部等にわずかなアルカリシリカ反応性のひび割れが発生し，その面積率が高くなるに従い，ひび割れが広範囲にわたる傾向があった [8)]。また，富山県でアルカリシリカ反応による鉄筋破断が確認された有沢橋では，安山岩の面積率が 40%であった [9)]。これらの事例と比較すると安山岩の面積率は全般的に高く，特に導水路内の TD4850 での安山岩の面積率は 40%を超えており，鉄筋破断が生じた有沢橋と同等の安山岩を含有していた。

(2) アルカリ分析

コアの深部（表面からの深さ 15～30cm 程度）から分析用のスライスカット試料（厚さ 3cm 程度）を切取り，試料調整した後，総プロ法（温度 40℃の蒸留水による温水抽出法）にてコンクリート中の等価アルカリ量（水溶性アルカリ量）を算出した。試験結果を**図－2.3** に示す。アルカリ量はコンクリートの単位容積重量を 2,300 kg/m³ と仮定している。また，アルカリ総量とは，温度 40℃の蒸留水での Na の回収率を 60%，K の回収率を 80%と仮定して算出したものである [10)]。

導水路内の TD4850 および TD4920 のアルカリ量は，坑門より高かった。これは坑門の設計基準強度は 18N/mm²,導水路の設計基準強度は 24N/mm² と単位セメント量の違いに

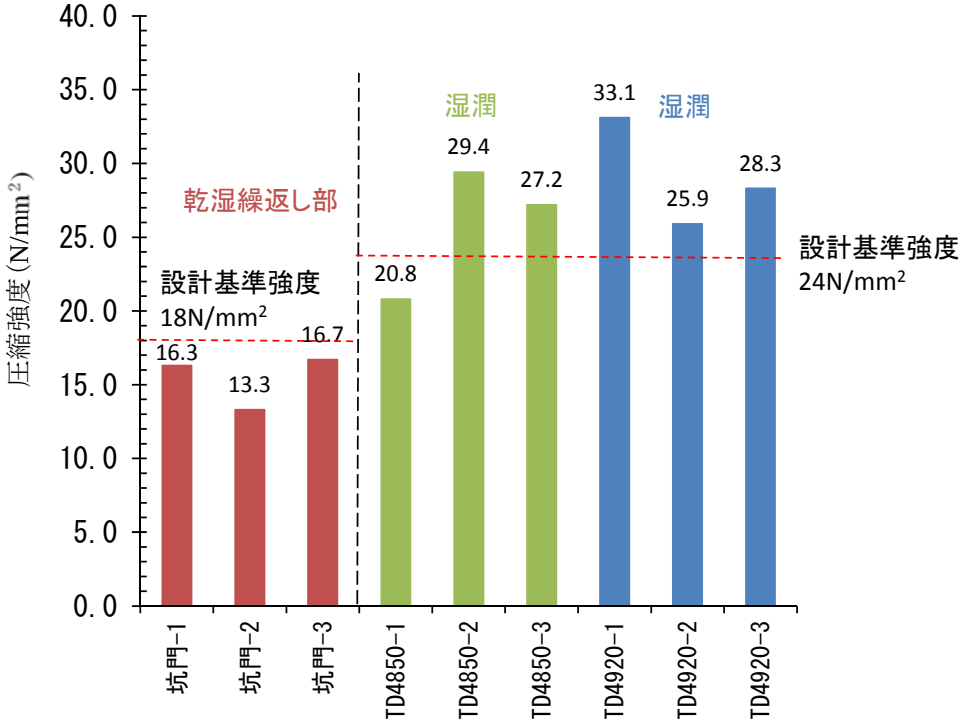
よるものと考えられた。アルカリ量は，骨材のアルカリ量を含むことから，アルカリ総量規制 3kg/m³(セメント＋混和材料由来のアルカリ)と直接比較できないが，導水路(TD4850 および TD4920）では比較的高濃度のアルカリ量を有するセメントが使用された可能性が高いと考えられた。



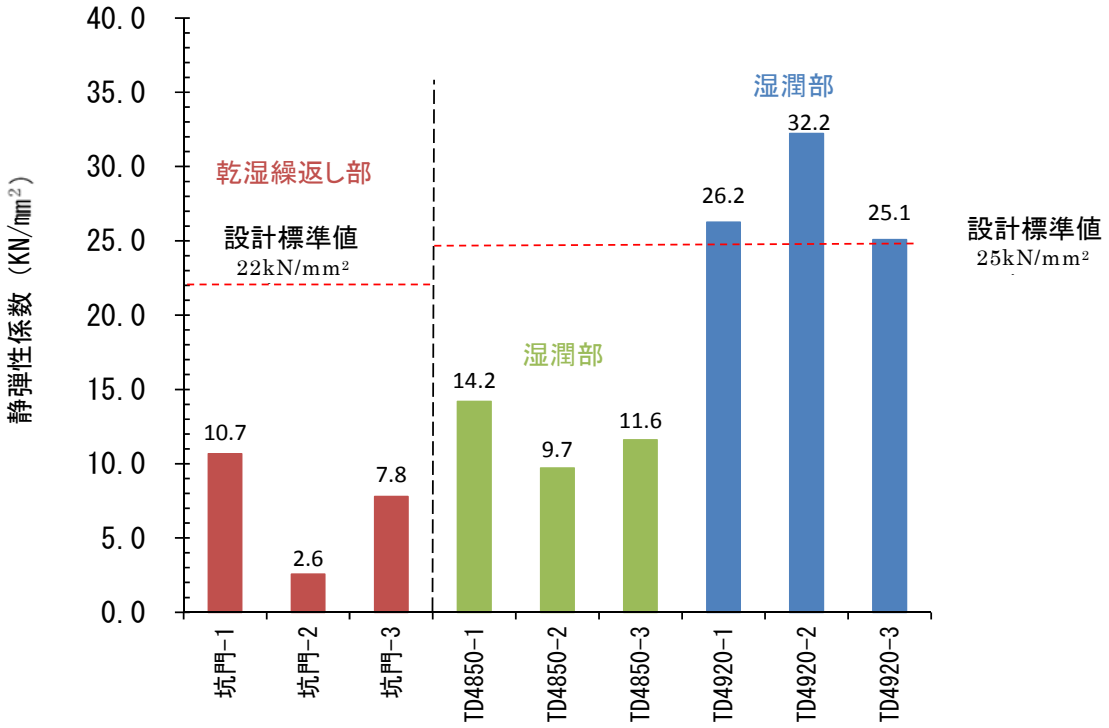
図－2.3 コア深部におけるアルカリ量の比較

(3) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を**図－2.4** および**図－2.5** に示す。



図－2.4 圧縮強度の試験結果

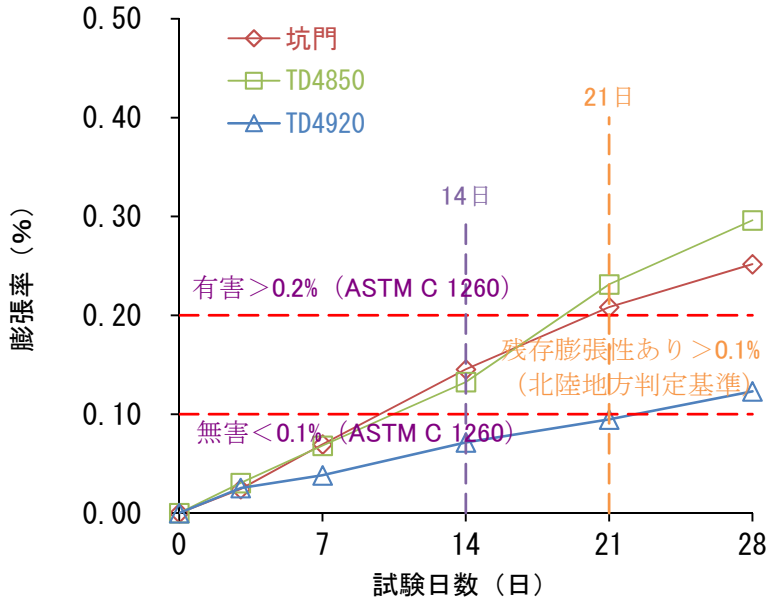


図－2.5 静弾性係数の試験結果

坑門で採取したコアの圧縮強度は，設計基準強度 18N/mm² を満足できていなかった。導水路から採取したコアの圧縮強度は，設計基準強度 24N/mm² をほぼ満足していた。

静弾性係数は，TD4920 を除き設計標準値を下回りアルカリシリカ反応が進行している可能性が考えられた。

(4) 促進養生試験



図－2.6 促進養生試験（カナダ法）の試験結果

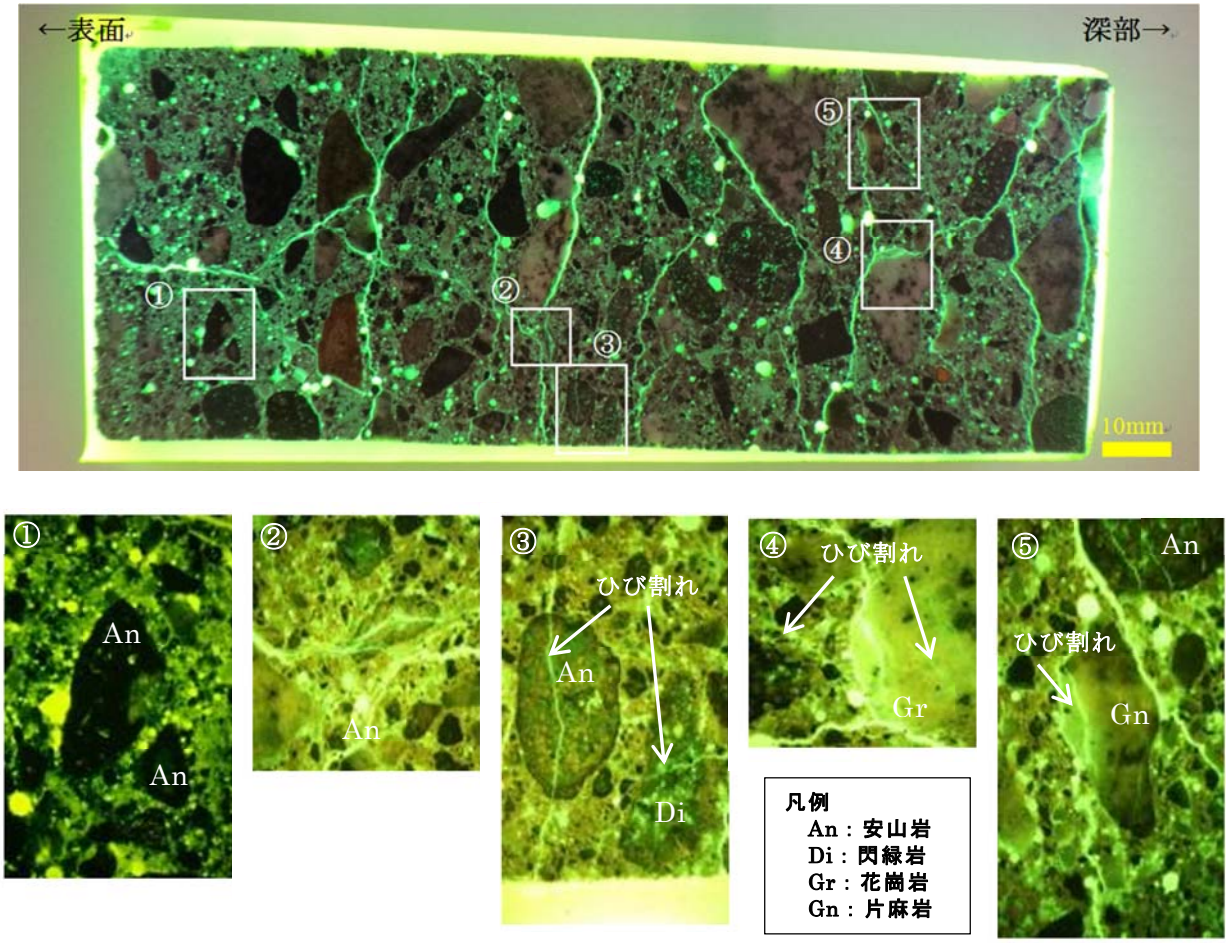
促進養生試験は，カナダおよび米国の促進モルタルバー法に準拠したコアによるカナダ法を実施した。本試験は，コアに外部よりアルカリを供給することで，アルカリシリカ反応性の火山系岩石や遅延膨張型の岩石に対して反応を誘発させ，今後の残存膨張性を知るうえで有効なデータを得ることができる。試験結果を**図－2.6** に示す。

坑門および TD4850 は ASTM の基準では「無害と有害の両者が存在する」，北陸地方の判定基準では「残存膨張性あり」，TD4920 は，ASTM の基準では「無害」，北陸地方の判定基準では「残存膨張性なし」と判定された。

(5) 蛍光樹脂含浸によるひび割れ観察

コアに蛍光樹脂を含浸させ，観察用のスラブ試料を作製した。本手法は，蛍光樹脂を含浸させ，紫外線を照射することでコンクリートの空隙やひび割れ内に浸透した蛍光樹脂の部分を励起させるものである。各試料の観察結果を以下に示す。

坑門の観察面では，ひび割れのほとんどが粗骨材（砂利）の周囲に発生しており鉛直方向のものが多い。これらのひび割れはコンクリート打設時のブリージングの影響で発生した可能性が高いものと推察された。コア表面付近のひび割れは水平方向のものであるが，アルカリシリカ反応による膨張がブリージングの影響を受けたひび割れとつながり，構造物表面に達したものと推察された（**写真－2.2** 参照）。

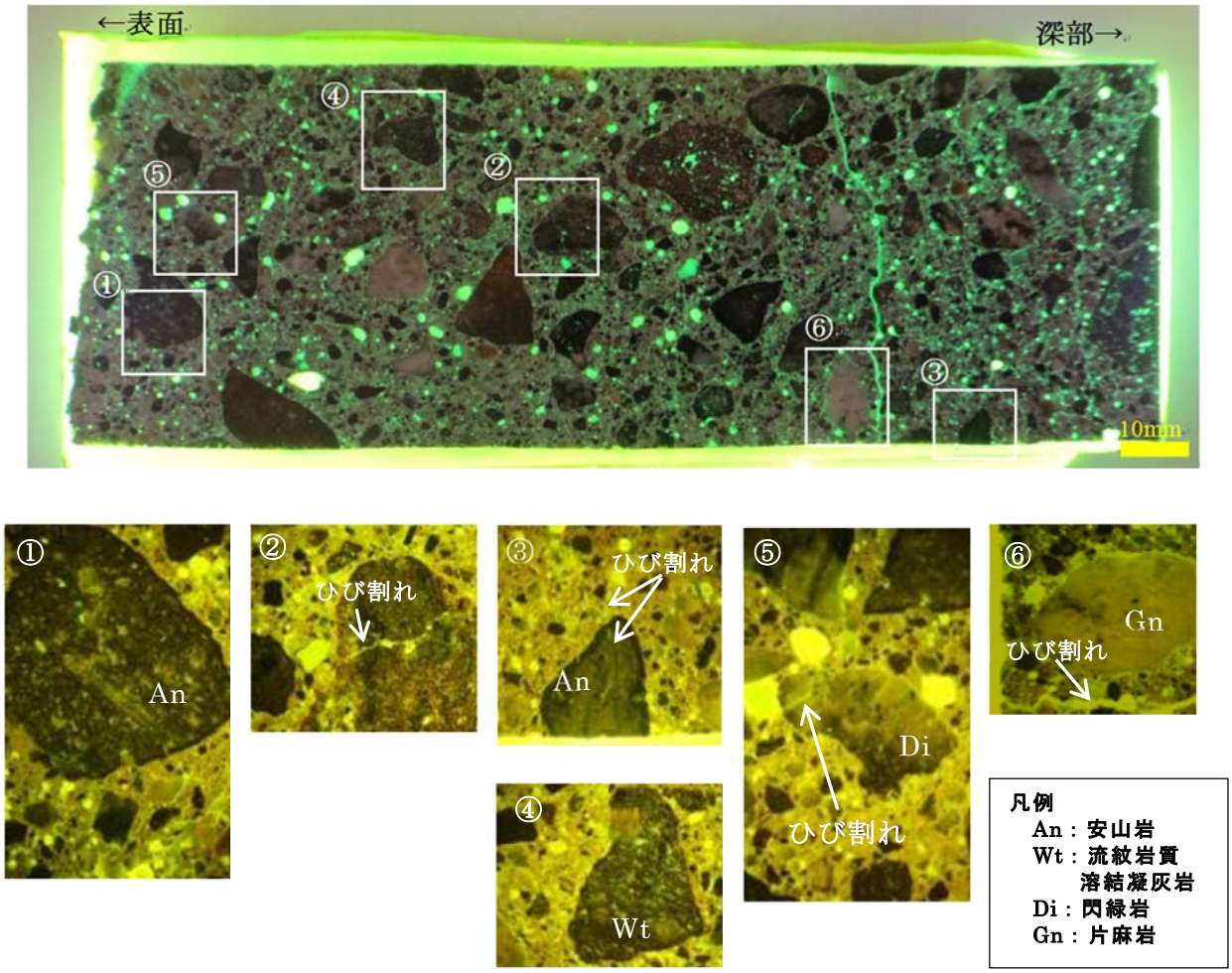


写真－2.2 蛍光顕微鏡による観察結果（坑門）

北陸地方で特に反応性の高い安山岩にアルカリシリカ反応性のひび割れが発生しているものもあれば発生していないものもあった。ひび割れの発生した安山岩は，安山岩中の約６割を占めた。また，一般的にアルカリシリカ反応性を示さない花崗岩，閃緑岩および片麻岩にアルカリシリカ反応性のひび割れが発生していた。ひび割れは骨材内部に留まるものやセメントペーストに進展するものもあった。

TD4850 の観察面では，マクロなひび割れはほとんど発生していない。深さ 11～12cm でブリージングの影響で発生した鉛直方向のひび割れが１本ある程度であった(**写真－2.3** 参照)。

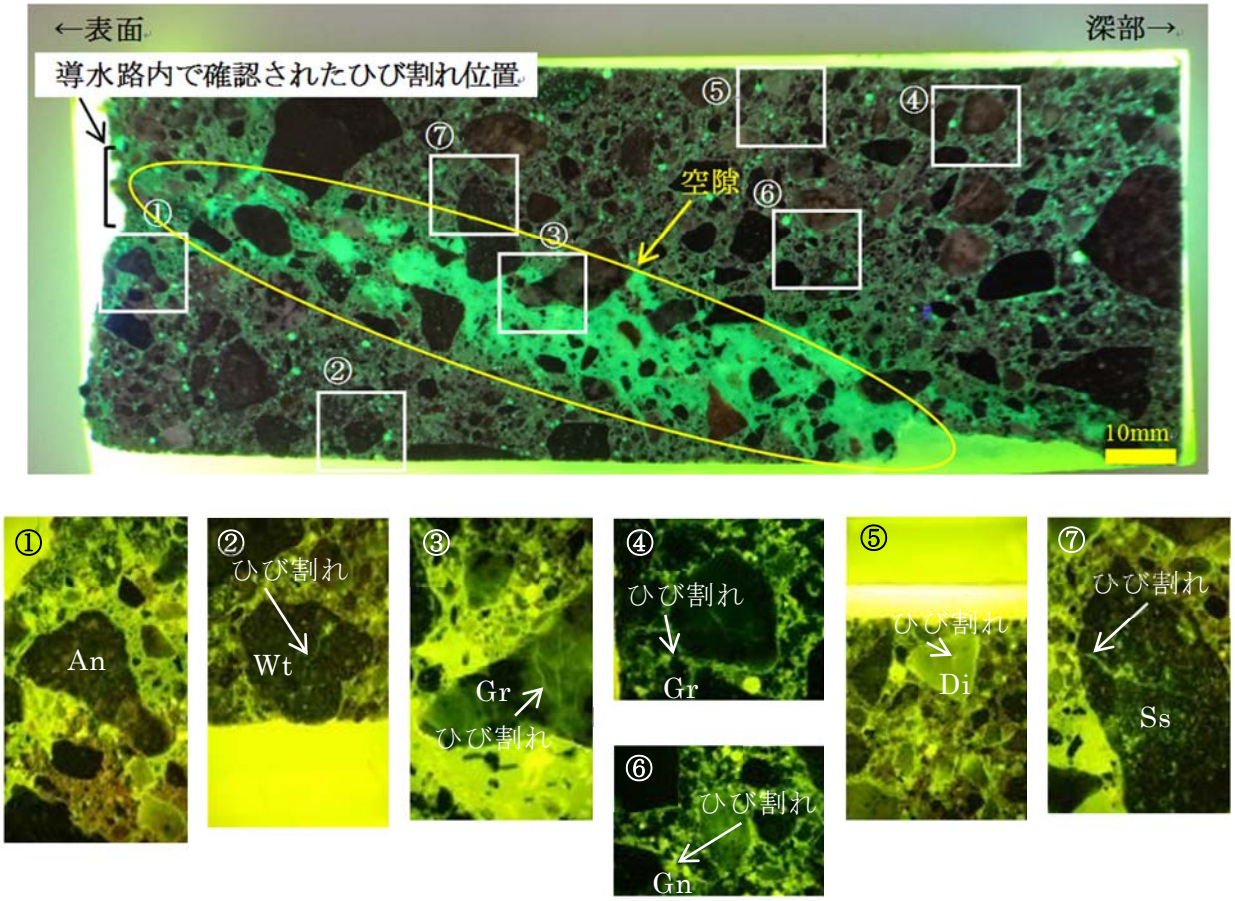
ひび割れの発生した安山岩は，安山岩中の約６割を占めたが，その多くはひび割れが骨材内に留まっており，セメントペーストに進展するものはわずかであった。また，花崗岩，閃緑岩および片麻岩にもアルカリシリカ反応性のひび割れが発生していたが，ひび割れは骨材内部に留まるものであった。なお，北陸地方で反応性の高い流紋岩質溶結凝灰岩ではひび割れの発生は認められなかった。



写真－2.3 蛍光顕微鏡による観察結果（TD4850）

TD4920 の観察面では，導水路内で確認されたひび割れ位置から，ほぼ直線的に空隙が発生し，かつ深部に向かうに従い，広がりを見せていた。空隙内ではセメントペーストが流出し，わずかに骨材が残っている状態であった。これはスラブ試料の作製過程で分離した骨材が流出した可能性もある。導水路内で発生しているひび割れはコンクリート打設中に発生した漏水が水みちを形成し，そのままコンクリートが硬化した可能性が高いと考えられた（**写真－2.4** 参照）。

安山岩および流紋岩質溶結凝灰岩にアルカリシリカ反応性のひび割れが発生しているものもあれば発生していないもあった。ひび割れの発生は，約 6～7 割を占めたが，ひび割れが骨材内に留まっており，セメントペーストに進展するものはなかった。また，花崗岩，閃緑岩および片麻岩にひび割れが発生していたが，ひび割れは骨材内部に留まるものであった。なお，堆積岩系の頁岩にひび割れは認められなかったが，砂岩には一部，骨材内にひび割れが発生しているものがあった。



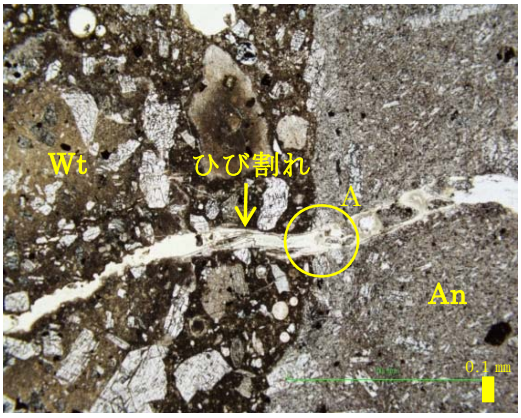
凡例　An：安山岩，　Wt：流紋岩質溶結凝灰岩，　Gr：花崗岩，　Di：閃緑岩，　Gn：片麻岩，　Ss：砂岩

写真－2.4 蛍光顕微鏡による観察結果（TD4920）

(6) 薄片観察

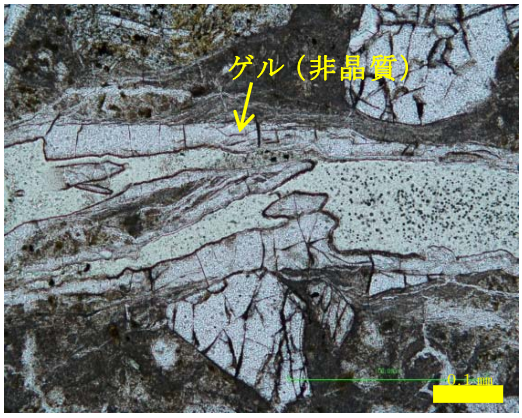
蛍光樹脂含浸によるひび割れ観察に使用したコアから，コンクリート片を切出し，蛍光樹脂を含浸させ，偏光顕微鏡の観察用の薄片を作製した。本手法は，蛍光樹脂を含浸していることから，蛍光顕微鏡での観察も可能としている。各試料の観察結果を以下に示す。

坑門のコアから作製した薄片の観察結果（**写真－2.5** 参照）では，ごく一部の安山岩および流紋岩質溶結凝灰岩の砂利で激しくアルカリシリカ反応を生じているものがあった。安山岩からのゲルがセメントペーストに進展し，気泡内にゲルが堆積していた。安山岩に発生したゲルは，骨材内部でも非晶質化していた。一方で流紋岩質溶結凝灰岩に発生したゲルは，骨材内部のごく一部で結晶化しており，まだ，アルカリシリカ反応が進行段階にあると推察された。

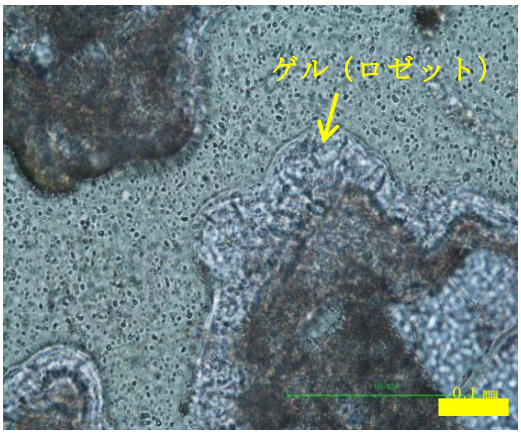


凡例　　An：安山岩，　Wt：流紋岩質溶結凝灰岩

(a) 砂利を貫通するひび割れ



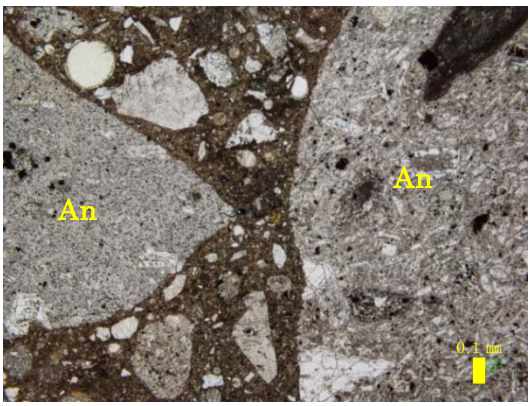
(b) Ａ部拡大



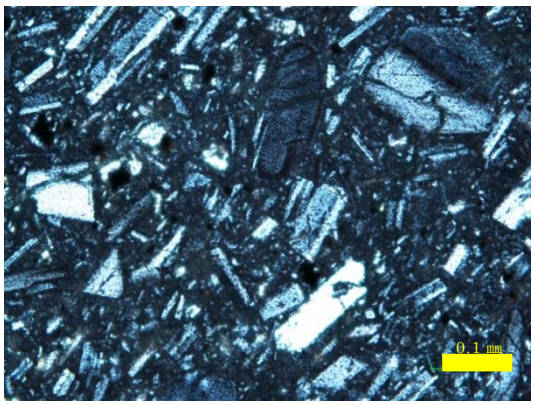
(c) 流紋岩質溶結凝灰岩のひび割れ部

写真－2.5 薄片の観察結果（坑門）

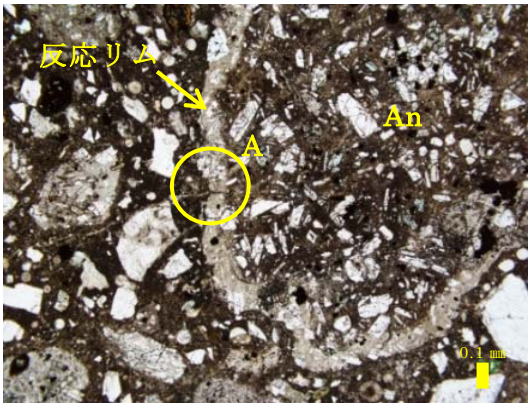
TD4850 のコアから作製した薄片の観察結果（**写真－2.6** 参照）では，アルカリシリカ反応性の高い安山岩の砂利に反応が認められるものもあれば反応が生じていないものもあった。反応していない安山岩でも反応性鉱物として火山ガラスやクリストバライトが確認された。反応リムを有する安山岩の砂利でセメントペーストへ小さなひび割れが進展しているものであった。なお，ひび割れ内にアルカリシリカゲルは確認できなかった。



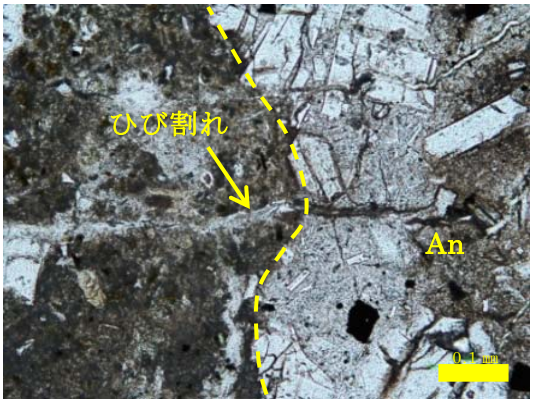
(a) 未反応の安山岩の砂利



(b) 火山ガラスおよびクリストバライト



(c) 反応した安山岩の砂利

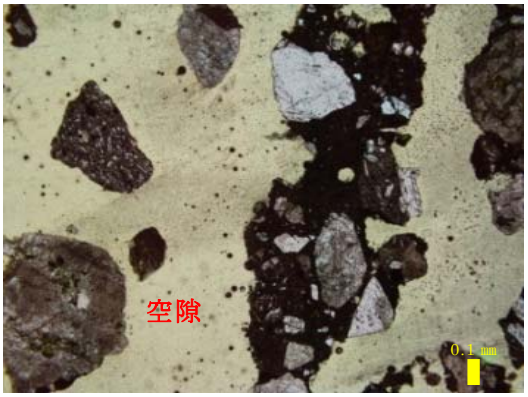


(d) Ａ部拡大

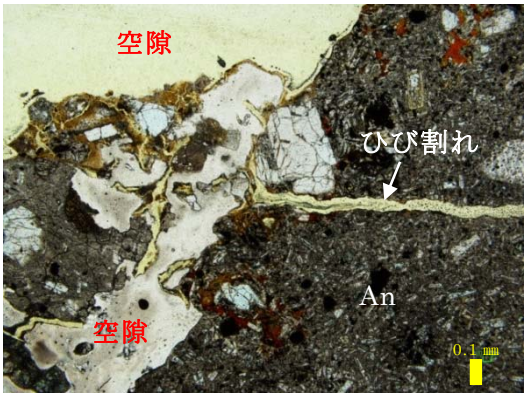
凡例　　An：安山岩

写真－2.6 薄片の観察結果（TD4850）

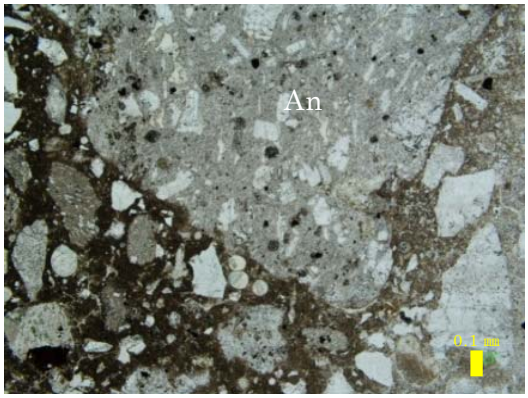
TD4920 のコアから作製した薄片の観察結果（**写真－2.7** 参照）では，空隙部分では，セメントペーストが流出し，骨材だけが残されているものがあった。なお，アルカリシリカ反応性の高い安山岩の砂利にはひび割れが発生し，ひび割れがセメントペーストに達するものもあった。また，全般的にアルカリシリカ反応が生じていないものが多く，反応性の高い安山岩（砂利）および流紋岩質溶結凝灰岩では反応リムやひび割れが発生していなかった。



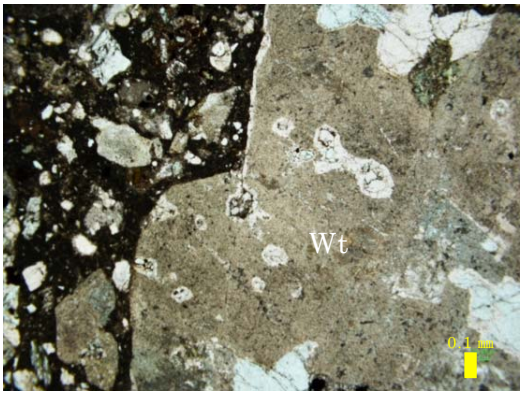
(a) 空隙部の状況



(b) 空隙部付近のひび割れ



(c) 未反応の安山岩の砂利



(d) 未反応の流紋岩質溶結凝灰岩の砂利

凡例　An：安山岩，　Wt：流紋岩質溶結凝灰岩

写真－2.7 薄片の観察結果（TD4920）

(7) 考察

坑門では**写真－2.8** に示すように 2 方向に発達したひび割れが発生し，アルカリシリカ反応性の高い安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩が，粗骨材の面積率の 36%を占めた。偏光顕微鏡観察の結果からもこれらの岩種の顕著な反応も確認されている。しかし，アルカリ量が 1.5kg/m^3（水溶性アルカリ）と低かったことから，一旦生じたアルカリシリカ反応が維持できない可能性が高いものと考えられ，今後の残存膨張性は低いものと判断された。促進養生試験カナダ法の結果では，試験日数 21 日での膨張率が 0.2%を超え，「残存膨張性あり」との判定を行った。しかし，本試験は外部からアルカリを供給し，かつ温度によりアルカリシリカ反応を誘発させる特徴があり，このようなアルカリ量の低いコンクリートで反応性岩種を含有するコンクリートでは膨張率が高くなる。促進試験の値だけで，残存膨張性を判断するのは非常に危険である事例でもあった。なお，AE 気泡が十分に機能しておらず，耐凍害性が期待できない可能性を指摘した。当該構造物の凍害危険度は低いが，特に南面のコンクリートでは今後，凍結融解作用によるコンクリートの劣化に注意が必要であると考えられた。

(a) 坑門正面

(b) 横坑側面

写真－2.8 横坑坑門のひび割れ

導水路のコンクリートは，坑門より多くの反応性の高い安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩を含有し，アルカリ量も多かった。しかし，顕微鏡下では骨材にひび割れが認められるもののアルカリシリカゲルの存在は確認できなかった。これは導水路内が，非常に水分の多い環境であり，アルカリシリカ反応により生成された物質はアルカリシリカゲルではなく，アルカリシリカゾルであったと考えられる。さらに発生したゾルはコンクリート中を移動する可能性があり，ゾルのままでは膨張力を発揮しないことが指摘されている[11)]。**写真－2.9** は，TD4920 No.1 コアを少し乾燥させたものである。コアには当初白色の生成物は発生していなかったが，時間の経過とともにゾルが空気に接触してゲルに変化した状況を示したものである。したがって，導水路のコンクリートは，反応性骨材およびアルカリ量ともに多いことから，アルカリシリカ反応のポテンシャル（潜在能力）は非常に高いが，常に湿潤状態が継続していることから，アルカリシリカ反応による異常膨張は発生しないと判断される。

写真－2.9 アルカリシリカゾルが空気に接触し，ゲル化したもの（TD4920 No.1）

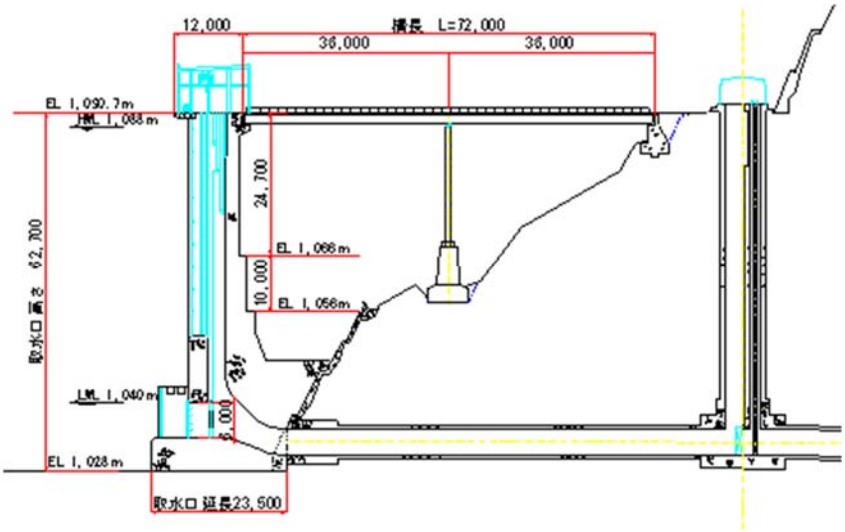
2.3 取水塔のコンクリート調査

2.3.1 調査概要

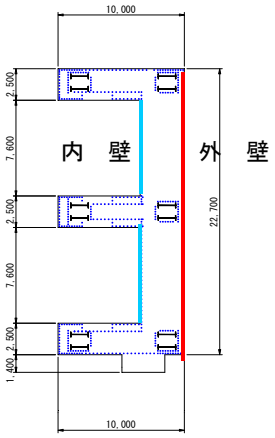
貯水池内に構築される取水塔は，貯水池水位の変動に伴い水の供給環境が変わることから，ASR による劣化が生じた場合，劣化の程度や進行が他の構造物に比べ特徴的になると考えられる。そこで，取水塔の躯体コンクリートを対象とした詳細調査を実施し，水中と気中を繰り返すコンクリート部材における ASR の特徴を把握することを目的とした。

詳細調査を実施した取水塔は 1977 年から 1979 年にかけて建設され，調査時点（表面部 2009 年，中心部 2011 年）で 30 年余りが経過していた。鉄骨鉄筋コンクリート造り（幅 22.7m，高さ 62.7m，延長 23.5m，呑口幅 7.6m×2 径間）の塔状の構造物（**図－2.7** 参照）である。

写真－2.10 に取水塔壁面の状況を示す。外壁面,内壁面ともに,広い範囲において亀甲状のひび割れが観察されたが，ひび割れは，ひび割れ幅 0.2 ㎜程（20～30cm 間隔）の軽微なひび割れであり，鉄筋が破断している可能性があるとされる 2mm 以上の連続したひび割れは観察されなかった[12),13)]。



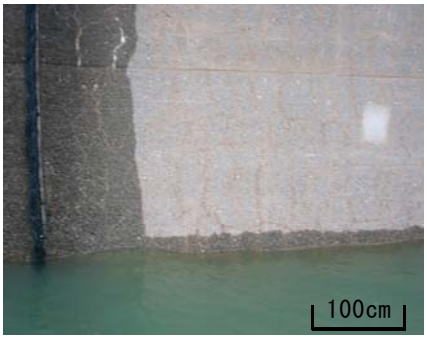
(a) 縦断面図



(b) 横断面図

図－2.7 取水塔断面図

(a) 外壁面の状況

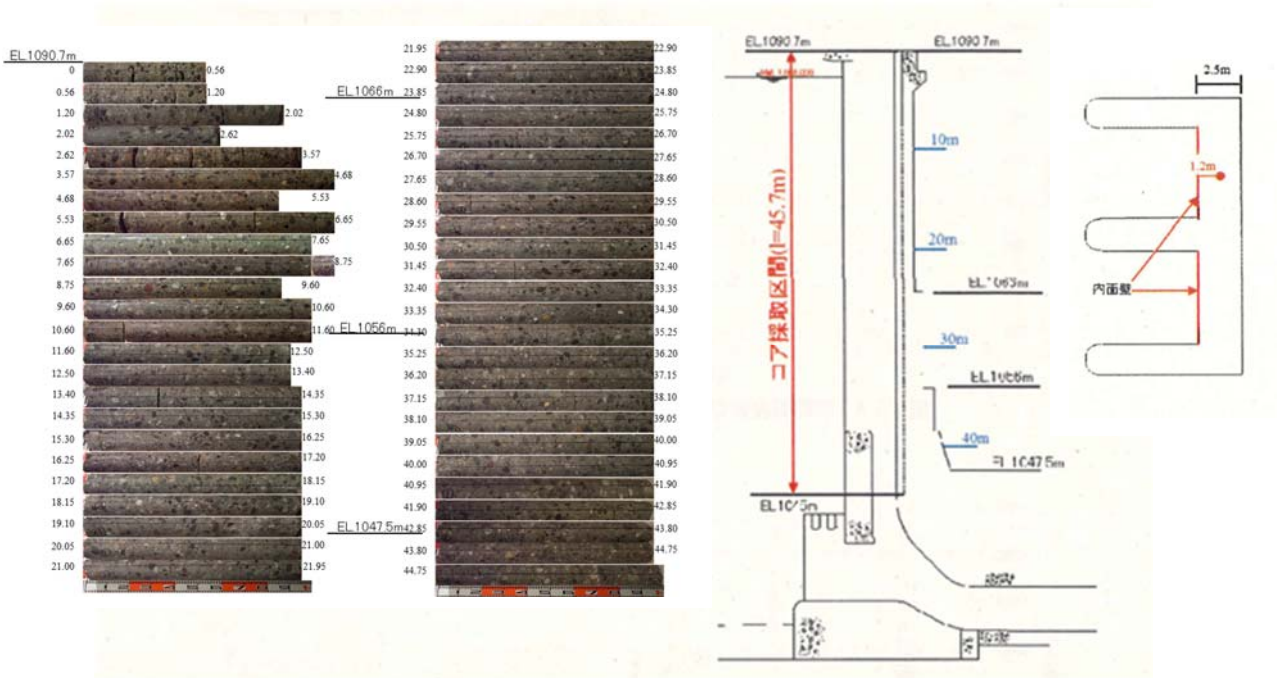


(b) 近景（□の箇所）

(c) 内壁面の状況

写真－2.10 壁面状況

詳細調査は，表面部（表面から50cm程度）および中心部（天端から45.7m）からコアを採取し，(1)圧縮試験および静弾性係数試験，(2)アルカリ分析，(3)残存膨張量試験（JCI-DD2法による），(4)走査型電子顕微鏡（SEM）観察，(5)中性化深さ試験を実施するとともに，表面部のコンクリートを取り除き，(6)鉄筋調査を実施した。なお，コア観察の結果，取水塔中心部のコンクリートには全体的にアルカリシリカ反応の兆候が確認され，断面変化部などでは，部分的に軽微なひび割れのみられた区間が存在したが，コアを連続的に採取したところ，外観上健全性を保持できていることが確認できた（**写真－2.11**参照）。

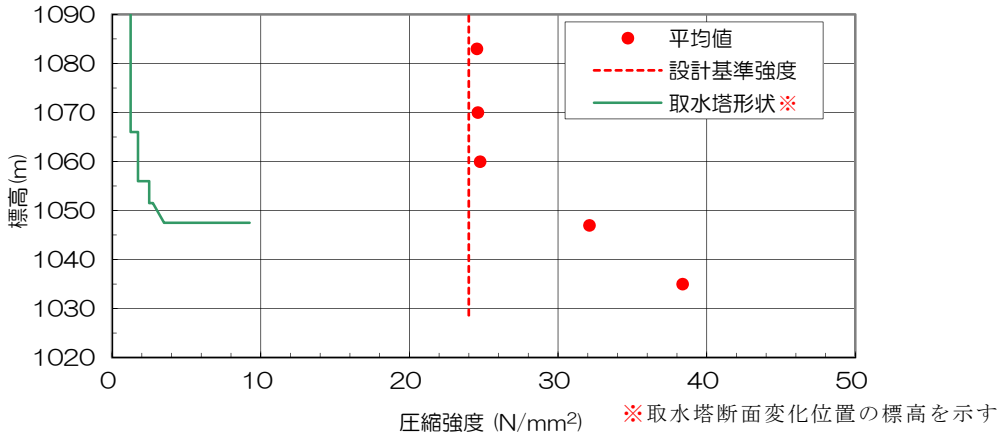


写真－2.11 コア写真

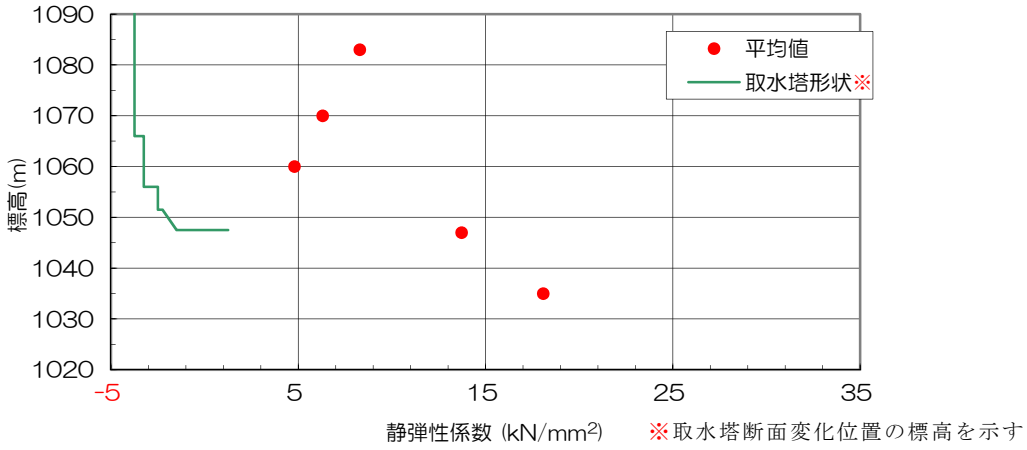
2.3.2 試験結果

(1) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

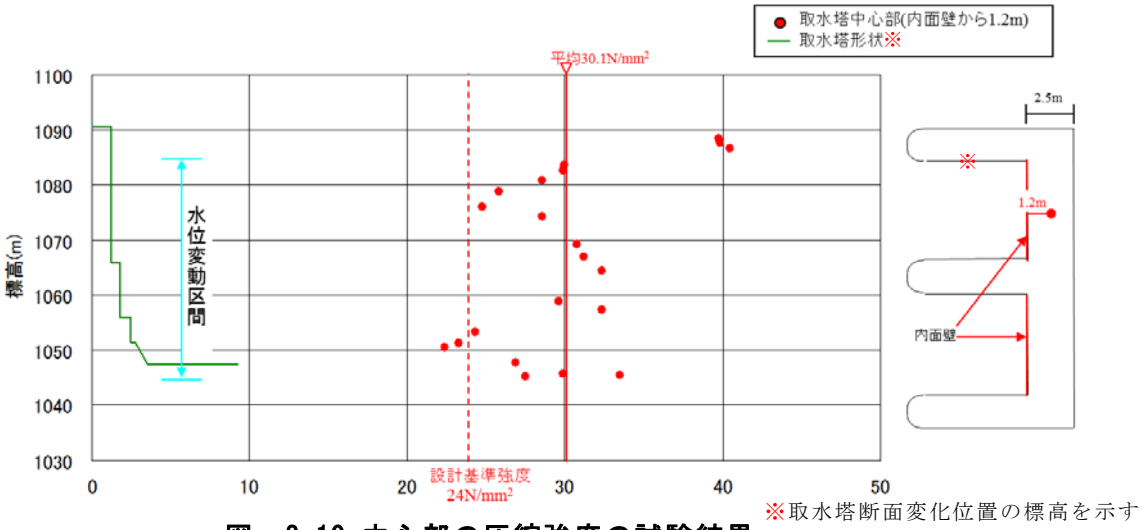
図－2.8，**図－2.9**に取水塔表面部の圧縮強度，静弾性係数の試験値を示す。圧縮強度は，平均的には設計基準強度（σ_{28}：24N/mm²）以上であり，圧縮強度，静弾性係数ともに，EL1050m付近以下において高い値を示している。また，**図－2.10**，**図－2.11**に，取水塔中心部のコアより採取した供試体の圧縮強度，静弾性係数の試験値を示す。圧縮強度は平均的には設計基準強度（σ_{28}：24N/mm²）以上であり，圧縮強度・静弾性係数共に，取水塔中心部のコアは表層部のコアと比べて相対的に高い値を示している。この原因としては、取水塔中心部は表層部に比べ鋼材等の拘束力が強いことが考えられる。



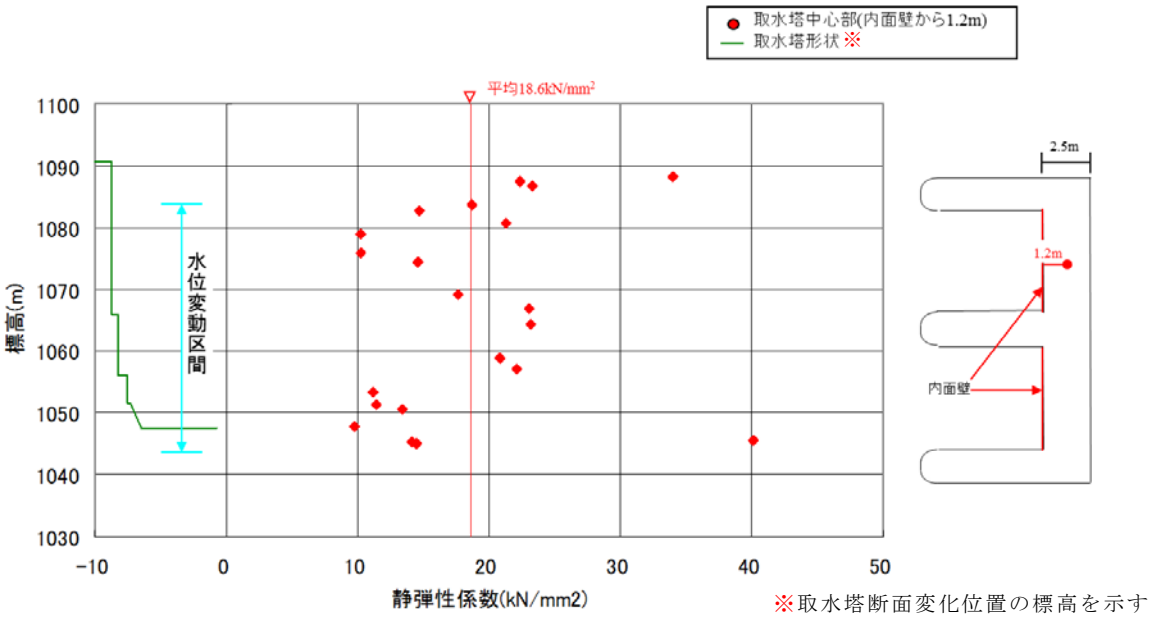
図－2.8 表面部の圧縮強度の試験結果（試料採取位置毎）



図－2.9 表面部の静弾性係数の試験結果（試料採取位置毎）



図－2.10 中心部の圧縮強度の試験結果

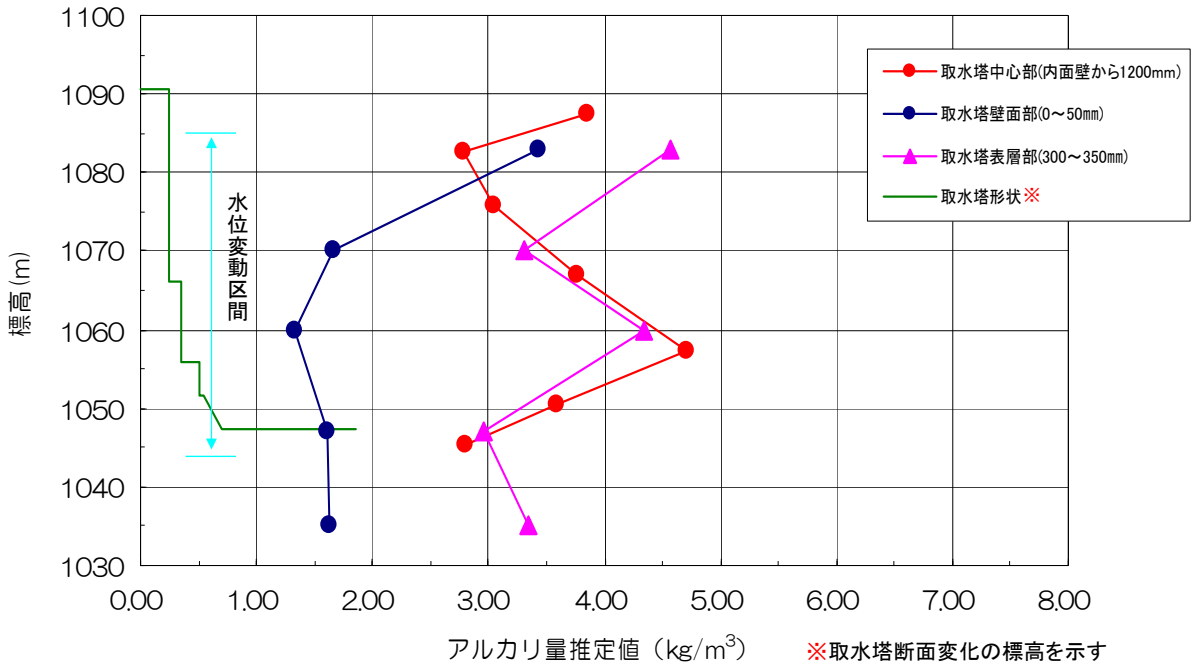


図－2.11 中心部の静弾性係数の試験結果

(2) アルカリ分析

図－2.12 に試料採取箇所のアルカリ量の測定結果を示す。アルカリ量の測定は，建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」[10]に従い，水溶性アルカリ量の測定結果よりコンクリート中のアルカリ量(骨材に含まれるアルカリ量を含む)を推定した。図より，コンクリート表面部のアルカリ量は，内部のアルカリ量より全体的に少なく，アルカリ分が水中に溶出したことが考えられる。

またコンクリート内部のアルカリ量の推定値は，3～4kg/m³であり，JIS A5308(レディミクストコンクリート付属書に規定されたコンクリート中のアルカリ総量規定値 3kg/m³を上回っており，今後も一定の期間は ASR が進行する可能性が考えられる。



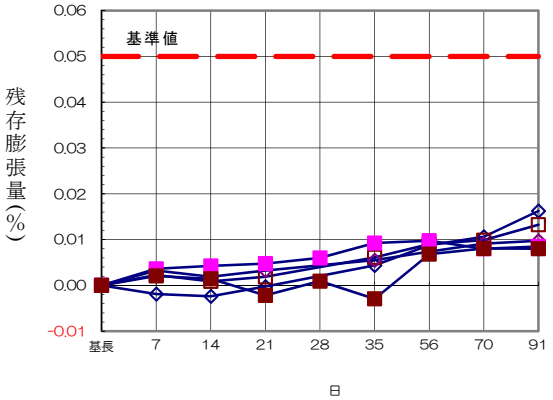
図－2.12 アルカリ含有量試験結果

(3) 残存膨張量試験

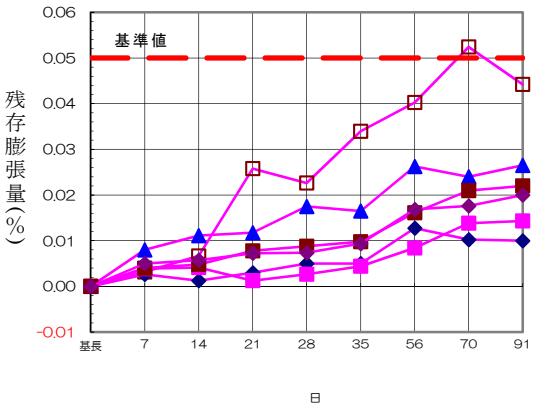
図－2.13 に JCI-DD2 法による取水塔表層部の残存膨張量試験結果を示す。なお，判定基準は建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」[10]での値 0.05%を採用した。**図－2.13** より，「残存膨張性あり」の判定となったのは，試料採取箇所 EL1070m と EL1060m における 2 試料であった。また，EL1070m，EL1060m における試料では全体的に膨張傾向がみられた。

表層部で膨張傾向のあった標高で，取水塔中心部の供試体(EL.1050m，EL.1060m，EL.1070mにおいて各2本)を用いて表層部と同様の残存膨張量試験(JCI DD2 法)を行った。**図－2.14**に，取水塔中心部の試験結果を取水塔表層部のコアの試験結果と併せて示す。取水塔中心部のコンクリートにはいずれも残存膨張性は認められず，取水塔全体としても全体的に建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」での基準値0.05%以下であり，取水塔全体として今後のアルカリシリカ反応の進行は

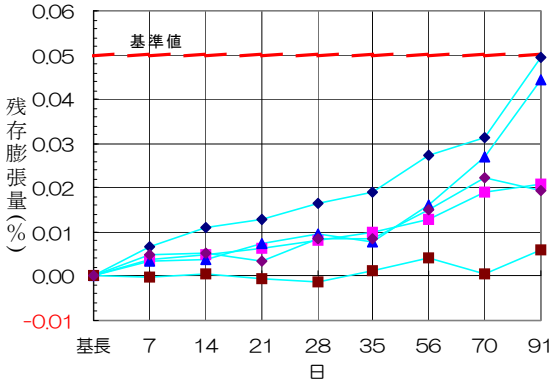
少ないと考えられる。



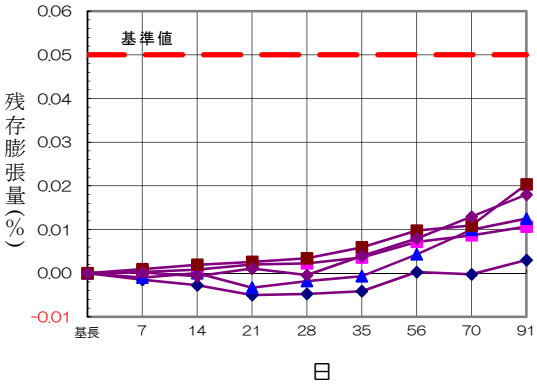
(a) 試料採取標高 EL1,087m（4 試料）



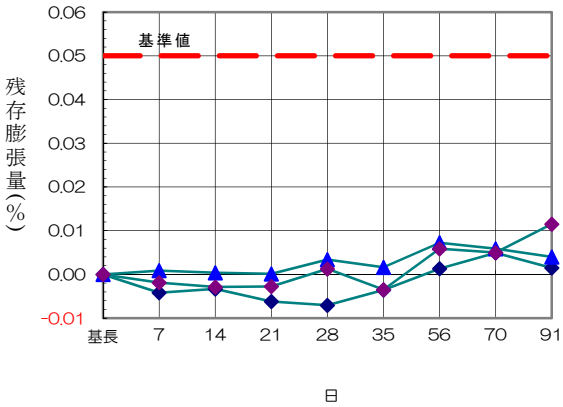
(b) 試料採取標高 EL1,070m（6 試料）



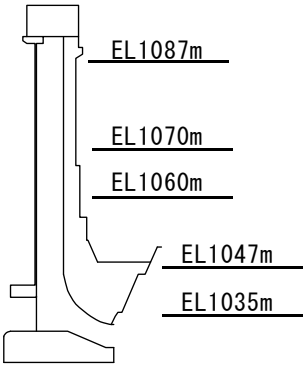
(c) 試料採取標高 EL1,060m（5 試料）



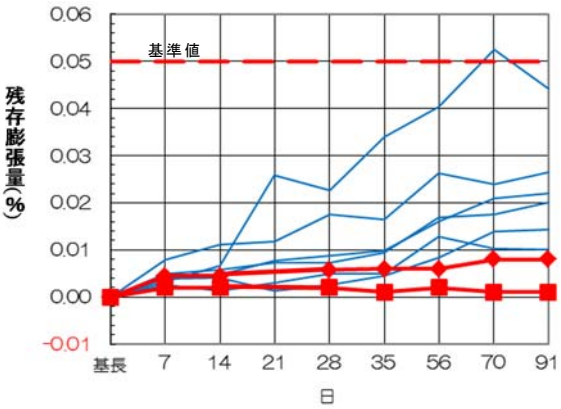
(d) 試料採取標高 EL1,047m（5 試料）



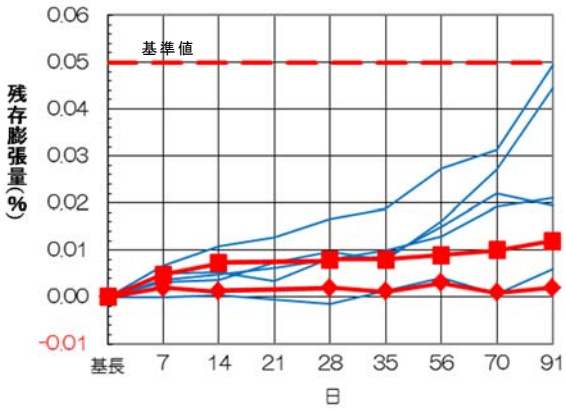
(e) 試料採取標高 EL1,035m（3 試料）



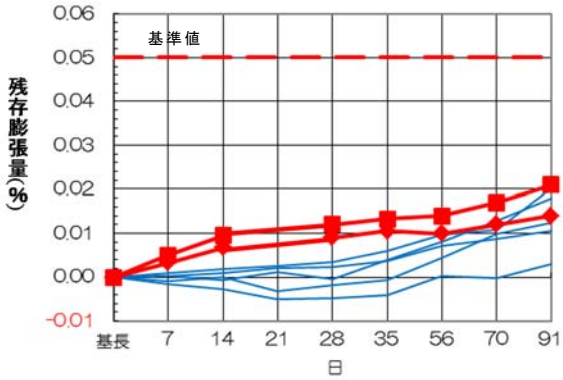
図－2.13 表層部の残存膨張量試験結果



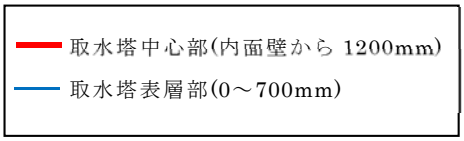
(a) 試料採取標高 EL1,070m 付近



(b) 試料採取標高 EL1,060m 付近



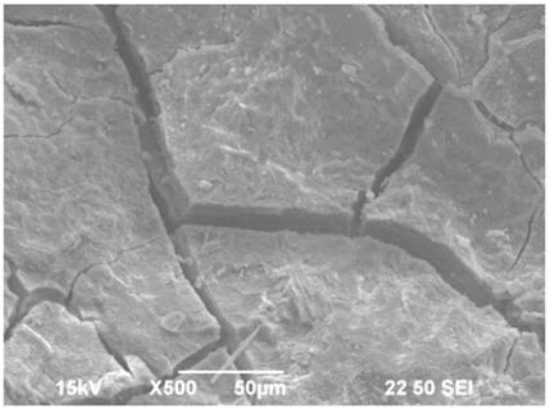
(c) 試料採取標高 EL1,050m 付近



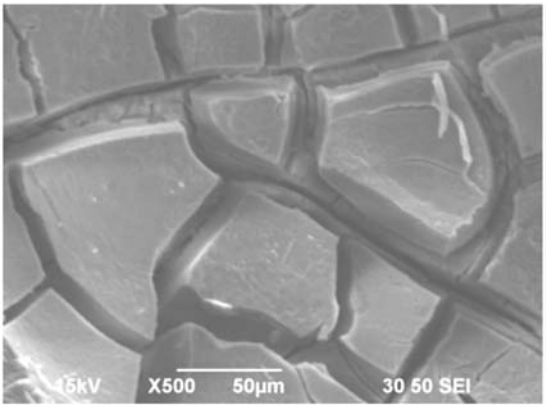
図－2.14 中心部の残存膨張量試験結果

(4) 走査型電子顕微鏡（SEM: Scanning Electron Microscope）観察

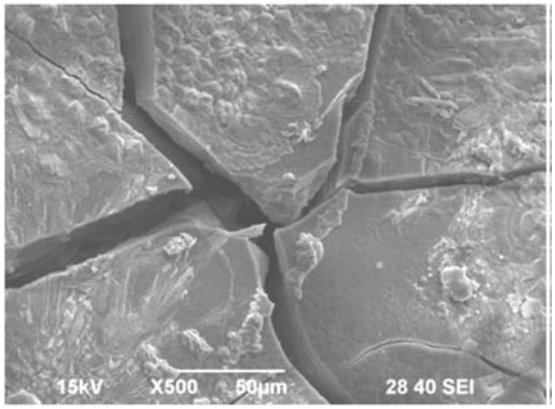
取水塔表面部で採取した試料の骨材表面（コンクリート中の骨材表面部分）の SEM 観察を行ったところ，全ての試料採取箇所において，アルカリ－シリカ型のゲルが確認された。**写真－2.12** に SEM 観察結果を示す。なお，EL.1035m 地点は 1 年中水面下にあり，ゾルであったと考えられるが，コアを採取し，空気に接触したことでゲル化したものと考えられる。



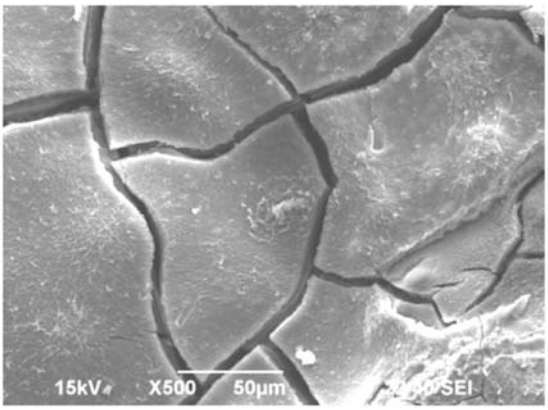
(a) ｱﾙｶﾘｰｼﾘｶ型のゲル（EL1,087m）



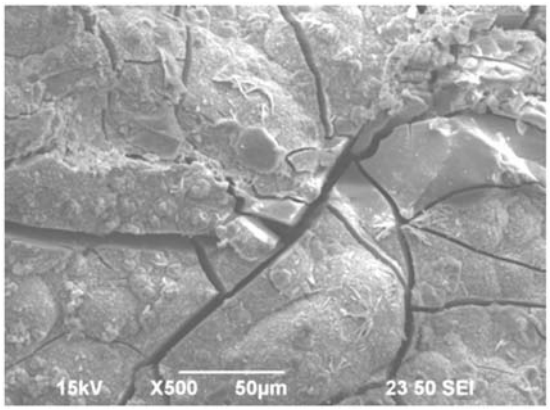
(b) ｱﾙｶﾘｰｼﾘｶ型のゲル（EL1,070m）



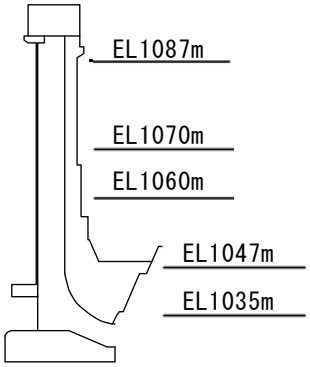
(c) ｱﾙｶﾘｰｼﾘｶ型のゲル（EL1,060m）



(d) ｱﾙｶﾘｰｼﾘｶ型のゲル（EL1,047m）



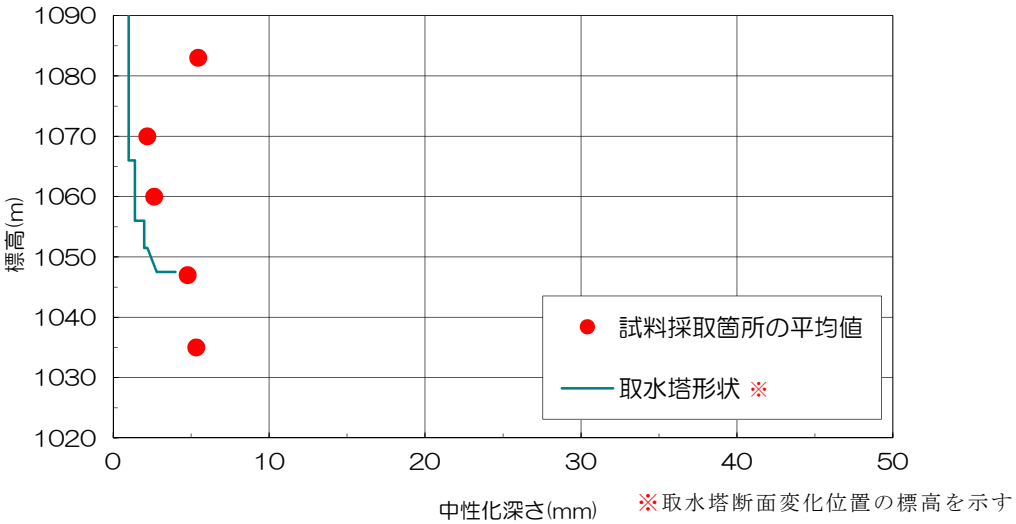
(e) ｱﾙｶﾘｰｼﾘｶ型のゲル（EL1,035m）



写真－2.12 ＳＥＭ観察結果

(5) 中性化深さ試験

図－2.15 に試料採取箇所毎の中性化深さ試験結果を示す。図より，中性化深さの平均値は 10 ㎜以下であり，鉄筋のかぶり 100 ㎜に対し十分小さい値であった。

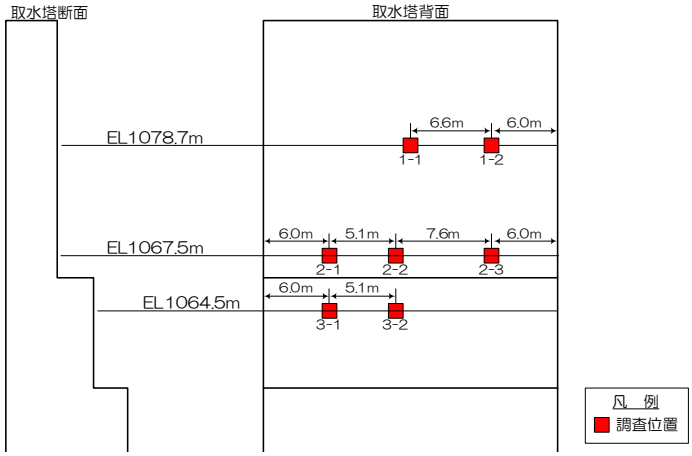


図－2.15 中性化深さ試験結果

(6) 鉄筋調査

図－2.16 に鉄筋調査位置図を、**写真－2.13** に鉄筋の状況写真を示す。

外壁面の 3 深度にわたり，ひび割れ幅が 0.2mm 程度の箇所のコンクリートを部分的にはつり，鉄筋の状況を調査した結果，いずれの箇所も鉄筋には破断や錆などの変状は見られず，コンクリートとの付着も確保されていた。



図－2.16 鉄筋調査位置図

(a) 縦方向鉄筋(EL1078.7m)

(b) 横方向鉄筋(EL1078.7m)

(c) 縦方向鉄筋(EL1067.5m)

(d) 横方向鉄筋(EL1067.5m)

(e) 縦方向鉄筋(EL1064.5m)

(f) 横方向鉄筋(EL1064.5m)

写真－2.13 鉄筋状況写真

2.4 取水塔の耐荷性能

外観調査の結果では，取水塔表面の広い範囲で亀甲状のひび割れが発生していることが確認され，躯体コンクリート骨材表面の SEM 観察では，全ての試料採取箇所でアルカリーシリカ型の ASR ゲルが確認されたことから，取水塔のコンクリートには，全体的にアルカリシリカ反応（ASR）が進行していると考えられる。

アルカリシリカ反応により劣化を受けた構造物の維持管理に関する知見[10),12),13)]のうち「アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案）」[14)]には，ASR による変状が構造物の耐荷性能に及ぼす影響に関して以下のように記載されている。

> 4.2 ASR による変状が構造物の耐荷性能に及ぼす影響の評価（抜粋）
>
> 次のいずれかに該当する場合には，ASR による変状により耐荷機構が変化し，耐荷性能に影響を及ぼしているおそれがあるものと評価する。
>
> (1) 構造物中の鉄筋が破断している場合，または破断しているおそれがある場合
> (2) コンクリートと鉄筋の付着や定着が損なわれているおそれがある場合
> (3) ＰＣ鋼材定着部の陥没および鋼材の突出等の変状が認められる場合
> (4) 上記以外に耐荷性能に影響を及ぼすと考えられる変状が認められる場合

以下に取水塔の耐荷性能に及ぼす影響を評価する。

(1) 構造物中の鉄筋破断について

内部の鉄筋が破断しているおそれがあるのは，「ひび割れ幅 2 ㎜以上の連続したひび割れがある」場合[14)]とされているが，取水塔のひび割れは，0.2 ㎜程度であり，破断していないと考えられる。また，はつり調査においても，破断のないことを確認している。

(2) コンクリートと鉄筋の付着や定着について

コンクリートと鉄筋の付着や定着については，①，②の方法により調査及び評価を行うとされている。

① 主鉄筋に沿ったひび割れがあり，そのひび割れ性状から主鉄筋を拘束する鉄筋に破断が生じていることが疑われる場合には，拘束鉄筋を調査する。その結果，拘束鉄筋に破断が生じている箇所では，主鉄筋とコンクリートの付着が喪失しているものと評価する。それ以外の場合には，主鉄筋とコンクリートの付着は健全であると評価する。

② 構造物の最外縁に位置する鉄筋については，当該鉄筋に沿ったひび割れや浮きの有無，及びその範囲について適切な方法で調査する。その結果，ひび割れや浮きが鉄筋位置まで到達している箇所では，当該鉄筋とコンクリートの付着が喪失しているおそれもあると評価する。

上記に関しては，取水塔には，破断のおそれのある 2 ㎜以上の主鉄筋に沿ったひび割れは，観察されなかったこと，ひび割れは，0.2 ㎜程度の亀甲状であり，最外縁に位置する

鉄筋に沿ったひび割れや浮きはほとんど観察されなかったことから，鉄筋とコンクリートの付着は喪失していないと考えられる。

(3) ＰＣ鋼材定着部の陥没および鋼材の突出等の変状について

取水塔には，ＰＣ鋼材は使用されていないことから，該当しない。

(4) その他耐荷性能に影響を及ぼすと考えられる変状について

その他耐荷性能に影響を及ぼすと考えられる変状としては，次の①～③が挙げられている。

① 腐食による鉄筋の断面欠損が疑われるような変状

② 圧縮力を受ける部分に生じているコンクリートのうき，剥離又は幅の大きなひび割れ

③ 荷重条件から曲げモーメントの大きい位置に生じている曲げひび割れ，又せん断力の大きい位置に生じているせん断ひび割れ

上記について，①に関しては，はつり調査において、鉄筋に腐食は確認されなかったことから問題ないと考えられる。

②に関しては，外観観察からコンクリートのうき，剥離又は幅の大きなひび割れは観察されなかったことから問題ないと考えられる。

③に関しては，取水塔は，軸力の卓越した塔状のＳＲＣ構造であり，外観観察から曲げひび割れ，せん断ひび割れは確認されなかったことから問題ないと考えられる。

以上より、その他耐荷性能に影響を及ぼすと考えられる変状は生じていないと考えられる。

(5) 耐荷性能評価

以上のことから，ガイドライン（案）の(1)～(4)には該当せず，取水塔は，鉄筋は健全で，鉄筋とコンクリートが荷重に対し，一体として抵抗する機構が保たれており，耐荷性能はASR による劣化がない場合に比べ大きく低下していることはないものと評価する。

2.5 まとめ

本章では，まず，常に水の供給を受ける環境にある導水路トンネルの覆工コンクリートを対象とした詳細調査を実施した。その結果，水中部のコンクリート部材は，反応性骨材を含有しアルカリ量が多く潜在的に膨張性が高い場合であっても，常に湿潤状態が継続している限り，ASR による膨張は発生しにくいことが判明した。

次に，貯水池水位の変動に伴い水の供給環境が変わる取水塔の詳細調査を実施した。その結果，取水塔のコンクリートには，全体的に ASR が進行しているが，耐荷性能は ASR による劣化がない場合に比べ大きく低下していることはないものと評価できた。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 水中部のコンクリート部材は，反応性骨材を含有しアルカリ量が多く潜在的に膨張性が高い場合であっても，常に湿潤状態が継続している限り，ASR による膨張は発

生しにくいことが判明した。

(2) 外観調査の結果では，取水塔表面の広い範囲で亀甲状のひび割れが発生していることが確認され，躯体コンクリート骨材表面の SEM 観察では，全ての試料採取箇所でアルカリーシリカ型の ASR ゲルが確認されたことから，取水塔のコンクリートには，全体的に ASR が進行していると考えられる。

(3) 取水塔には，破断のおそれのある 2mm 以上の主鉄筋に沿ったひび割れは観察されなかったこと，鉄筋は健全で，鉄筋とコンクリートの付着は喪失していないことから，鉄筋とコンクリートが荷重に対し，一体として抵抗する機能が保たれており，耐荷性能は ASR による劣化がない場合に比べ大きく低下していることはないものと評価できた。

(4) 取水塔中心部のコンクリートにはいずれも残存膨張性は認められず、取水塔全体としても全体的に建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」での基準値 0.05%以下であり、取水塔全体として今後のアルカリシリカ反応の進行は少ないと考えられる。

【参考文献】

1）久保哲司，参納千夏男，滝本弘 ：PC 工法による取水塔の ASR 補強対策及びモニタリング，電力土木, No.392, pp.78-82, 2017.

2）T.Kubo, T.Shibata, C.Sannoh, K.Torii : The Reinforcement of an ASR Affected Intake Tower Using Post-Tensioned Tendons, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Sao Paulo, CD-ROM 10 pages, 2016.

3）K.Torii, T.Kubo, C.Sannoh, M.Kanitani : The Alkali-Silica Reactivity of Andesitic River Aggregate and ASR Mitigation Effect by Using Fine Fly Ashes, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Sao Paulo, CD-ROM 9 pages, 2016.

4）五十嵐心一，川村満紀：蛍光顕微鏡によるセメント計複合材料の微視的破壊の観察，セメント・コンクリート，No.589，pp.30-39，1996.

5）Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S. & Hira, H. : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan. Materials Characterization, Vol.53, nos.2-4, pp.105-122, 2004.

6）Katayama T., Oshiro T., Sarai Y., Zaha K., and Yamato T. : Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873. 2008.

7）Katayama, T.: Petrographic diagnosis of Alkali-aggregate Reaction in Concrete based on Quantitative EPMA analysis, Proceedings of the 4th CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent Advance in Concrete Technology: pp.539-560, 1998.

8）野村昌弘，青山實伸，平　俊勝，鳥居和之:北陸地方における道路構造物の ASR によ

る損傷事例とその評価手法, コンクリート工学論文集, Vo.13, No.3, pp.105-114, 2002.
9）Daidai, T., Andrade, O., Torii, K. : THE MAINTENANCE AND REHABILITATION TECHNIQUES FOR ASRAFFECTED BRIDGE PIERS WITH FRACTURE OF STEEL BARS, Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Austin, Texas, USA, CD-R.
10）土木研究センター；建設省総合技術開発プロジェクト・コンクリートの耐久性向上技術の開発, 1989.
11）Tetsuya Katayama : ASR Gels and Their Crystalline Phases in concrete - Universal Products in Alkali -silica and Alkali-carbonate Reactions, Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Austin, Texas, USA, CD-R.
12）国土交通省：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）2003.3.
13）土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書―鉄筋破断と新たなる対応―，コンクリートライブラリー，2005.8
14）ASR に関する対策検討委員会：アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案），2008.3.

第３章　アルカリシリカ反応により変形した取水塔の補強対策とモニタリングによる補強効果の確認

3.1 概　説

これまで国内においては，水利構造物における ASR の発生事例報告や補修，補強事例報告は少ない。これは，水利構造物においては，効果的な対策が困難であり，対策が実施された場合においても,効果の検証までされることが少ないことが一因であると思われる。一般的に ASR を抑制する対策としては，コンクリート表面に塗料を塗布し，反応に必要な水分を遮断する方法があるが [1)]，水利構造物は，水分と接しており，水分を遮断することが困難であるため適用できない場合が多い。また，橋脚等において，耐震補強の観点も含めてプレキャスト板や鋼板により巻き立てされる事例があるが [2)]，ダムでは全体を巻き立てによって拘束することは不可能であり，ゲート門柱では，ゲートが干渉するため巻き立てすることはできない。このようなことから，水利構造物の ASR に対する補修，補強方法は確立されていないのが現状である。

本章では，第 2 章での詳細調査により全体的に ASR が進行していることが確認された取水塔の変形が進んでいることから，取水塔の ASR による変形のメカニズムを解明し，そのメカニズムを踏まえ，変形を抑制することを目的とした PC 工法による補強対策を実施することで，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事の回避が可能であることを検証した [3)，4)，5)]。

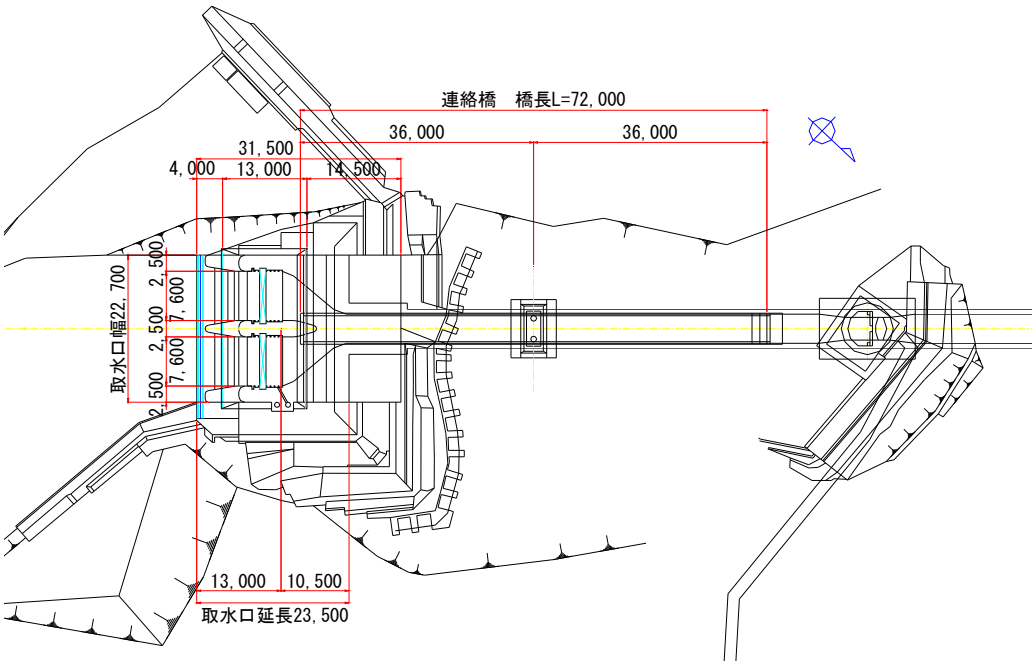
なお，PC 工法による水利構造物の ASR 補強対策事例としては，海外のアーチダムの事例があるが [6)]，これは，安定性の確保を主目的としたものであり，ASR による変形を抑制することを目的としたものではない。また，取水塔の ASR による変状事例は，海外の取水塔の報告はあるが，調査と将来の膨張予測までで，補強対策は実施されていない [7)]。このように今回の補強対策は,前例がなく,国内外において初めての試みであったことから，補強方法の検討に際しては，最新の知見を取り入れていく必要があった。そこで，当取水塔の補強方法検討においては，国内の有識者による委員会（「取水塔の補修検討委員会」：委員長 金沢大学 鳥居和之教授）を立ち上げ（2009 年 3 月），2013 年までに全 6 回の委員会において，調査結果の評価から効果の確認まで審議された。

また，本章では ASR により変形した既設電力関連施設を補強により維持管理しているが，その調査，対策の検討，対策の実施およびモニタリングには大きな労力・費用・時間を要している。劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事が必要となった場合には，工事中の発電ロスを含め更に莫大な費用を要する。今後，新設する電力関連施設においては，フライアッシュコンクリートの利活用等により，ASR のリスクを最小限に抑える努力が必要である。

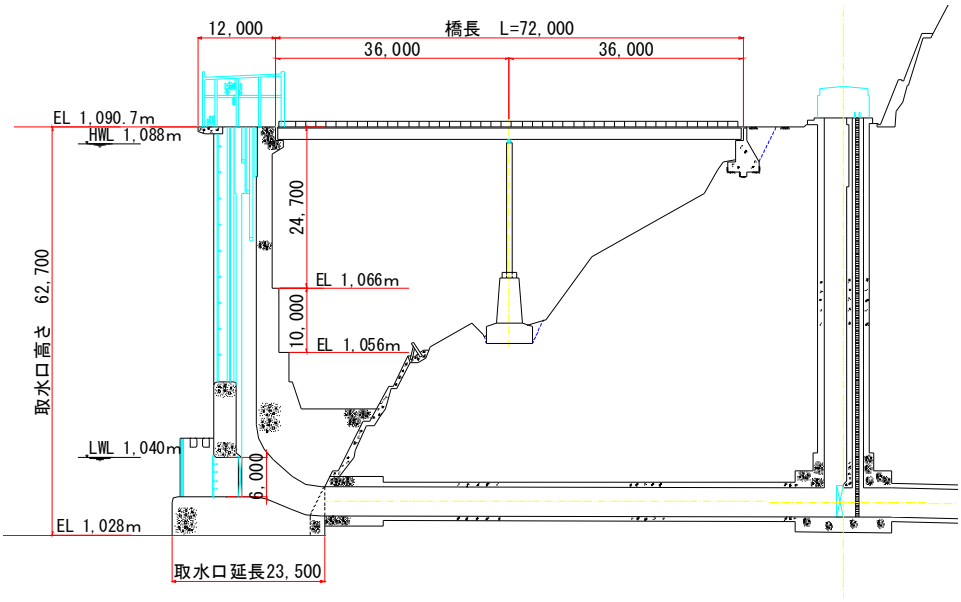
3.2 取水塔の ASR による変状の概要

取水塔は，先に建設されていたダム(1960年完成)湖中に再開発としてダムとは独立して建設（1977年度及び1978年度の冬期間に建設）されたものであり，鉄骨鉄筋コンクリート造り(幅22.7m，高さ62.7m，延長23.5m，呑口幅7.6m×2径間)の塔状の構造物（**図－3.1～3.3**参照）である。**写真－3.1**に取水塔の外観を示す。取水塔では，最大74m^3/s

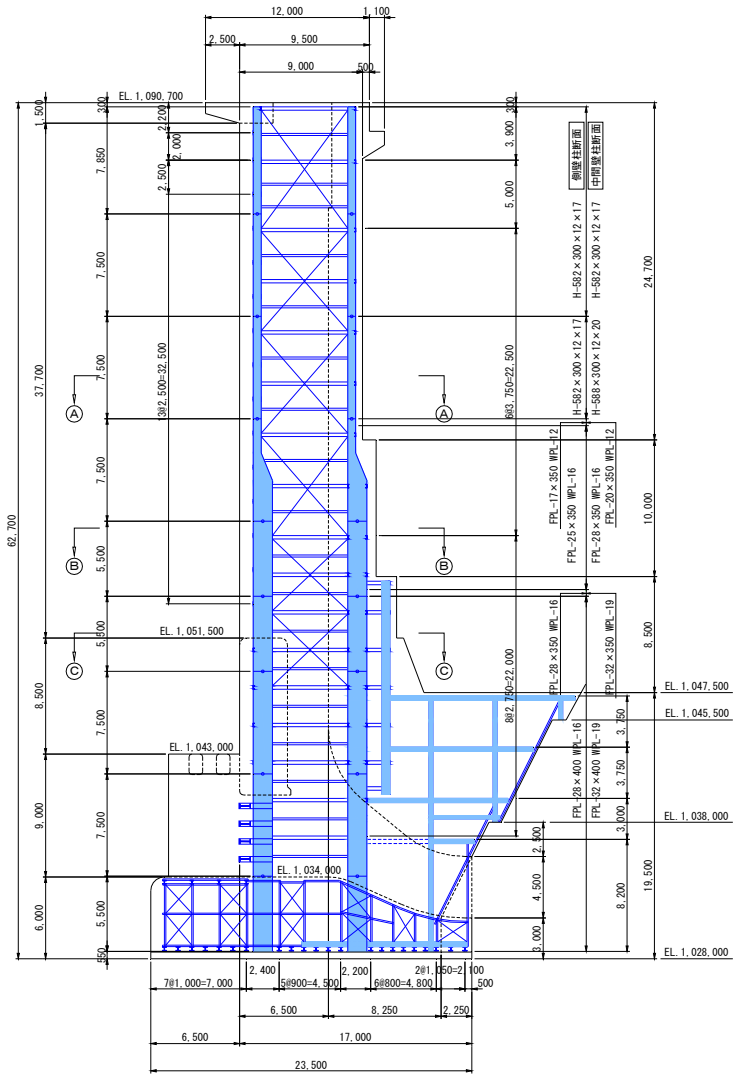
を取水し，3発電所で合計40万kWの発電が可能であり，取水塔は，北陸電力㈱の重要設備の位置付けにある。なお，取水された水は，農業用水としても利用されるため，前面（湖側）で取水する高さを角落としにより調整し，表層取水している。



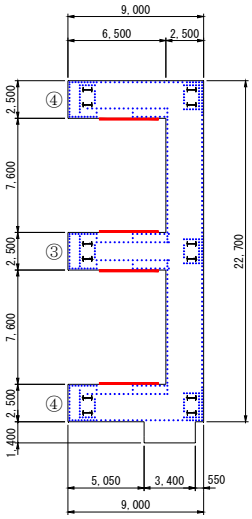
図－3.1 取水塔平面図



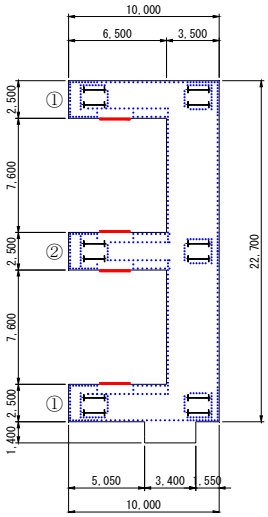
図－3.2 取水塔縦断面図



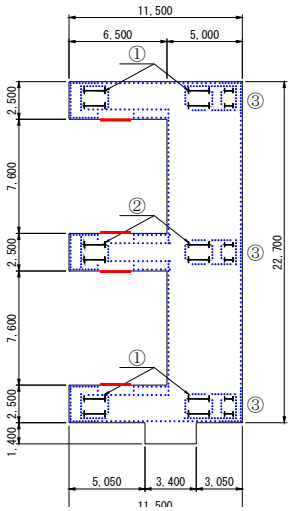
(a) 縦断面図



(b) A-A 断面図



(c) B-B 断面図

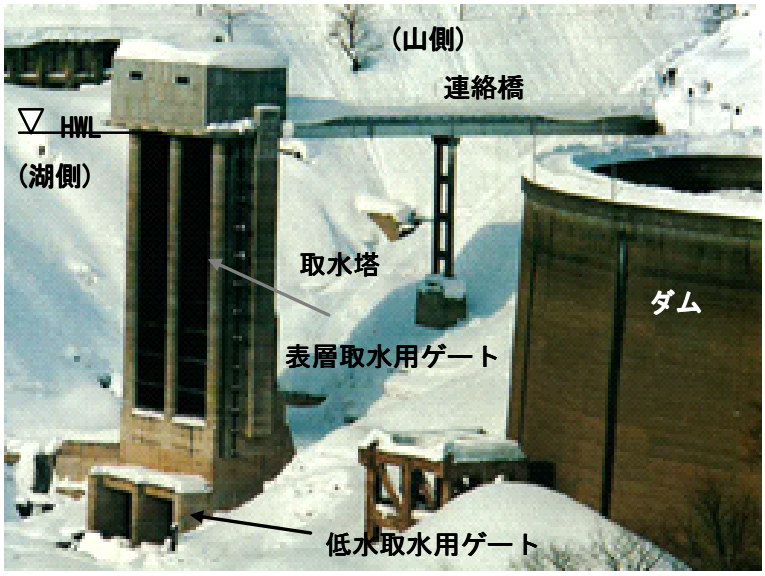


(d) C-C 断面図

Ｈ鋼 ①：BH-1400×400×16×28　③：H-588×300×12×20
②：BH-1400×400×19×32　④：H-582×300×12×17

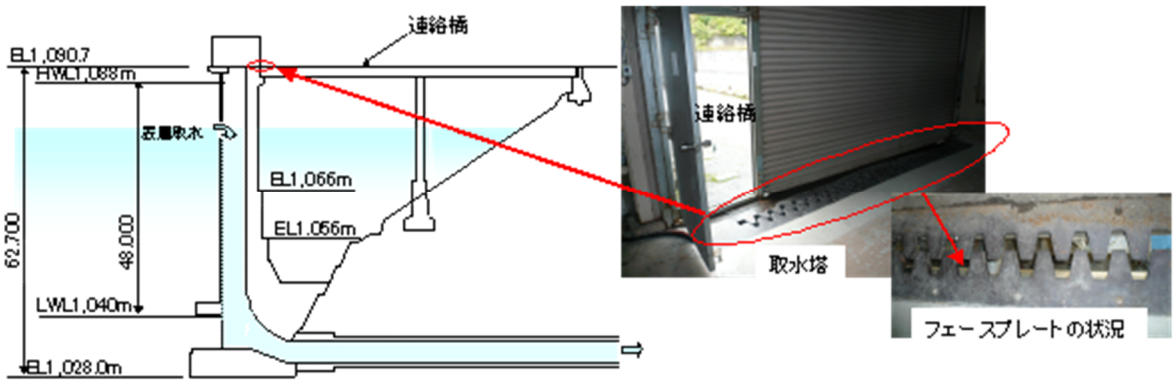
ゲート金物：[-200×90×2～8, PL-9.0mm
● 鉄筋(D16～D29)

図－3.3 取水塔構造図



写真－3.1 取水塔の外観（冬期の建設時）

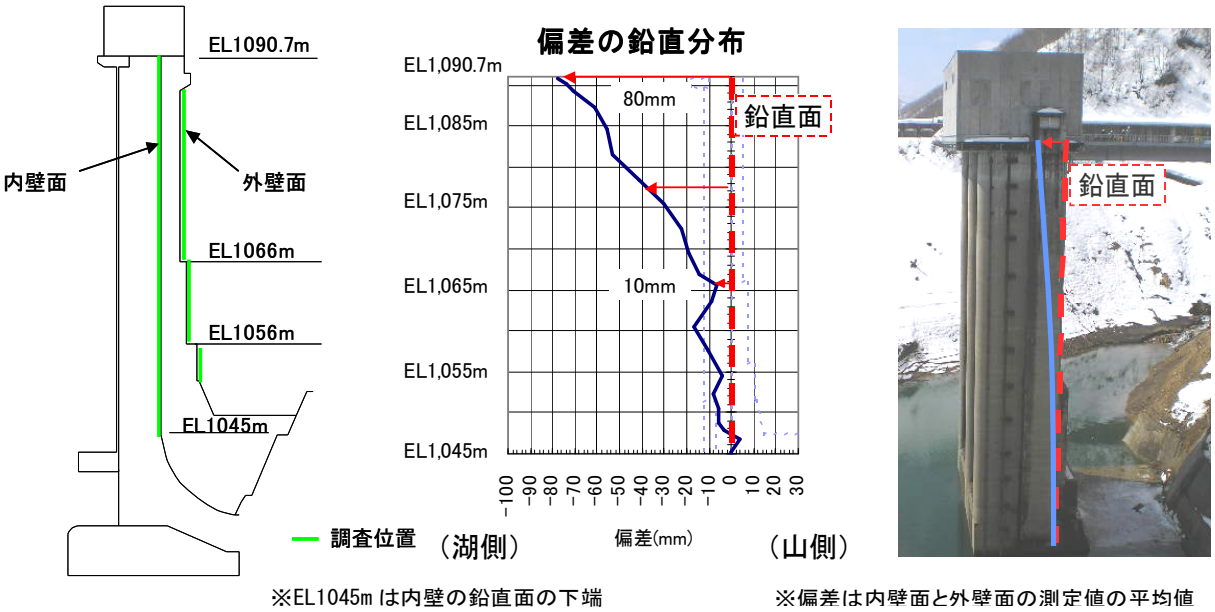
図－3.4に示すとおり，取水塔の完成から約20年後(1999年8月)に，取水塔と連絡橋との間にあるフェースプレートに約40mmの開きが確認されたことから，取水塔が傾斜している恐れがあり，詳細調査（変形形状及び躯体コンクリートの調査）が実施されるとともに定点測量によるモニタリングが開始された。



図－3.4 取水塔と連絡橋との隙間

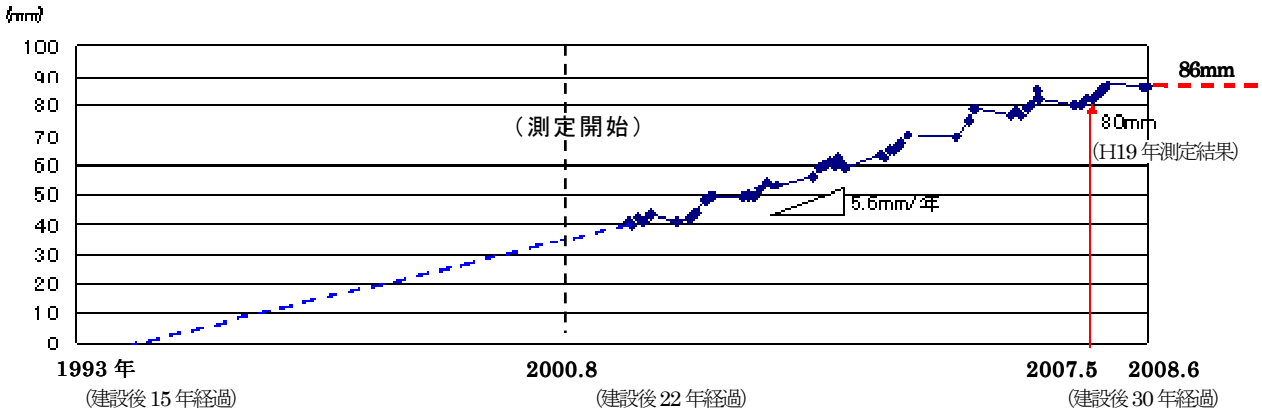
取水塔の内面壁と外面壁について形状を調査した結果を**図－3.5** に示す。この縦断面形状は，底部(EL1,045m)を基準とした形状を示している。調査は，内面壁については，底部から鉛直向きの赤外線レーザーを照射し，壁面との離れを仮設のゴンドラ上から，各標高において実測することにより形状を得た。また，外面壁については，対岸から超音波を照射し，外壁面で反射した超音波の位相差から形状を得た。内面壁と外面壁とでは，傾向が一致しており，**図－3.5** は，内面壁と外面壁の形状データの平均データを図化したものである。**図－3.5** より，壁面は，EL1,065m 付近から顕著に湖側に傾斜しており，塔頂部の EL1,090.7m では底部を基準とした鉛直線より 80mm の開きがあることがわかる。この調査結果より，建設当時の初期値は不明であるが，傾斜が底部から一様にないことから，底部の基礎や地盤の変状などによって傾斜しているのではなく，取水塔の躯体自体が変形し

ていることが明らかとなった。

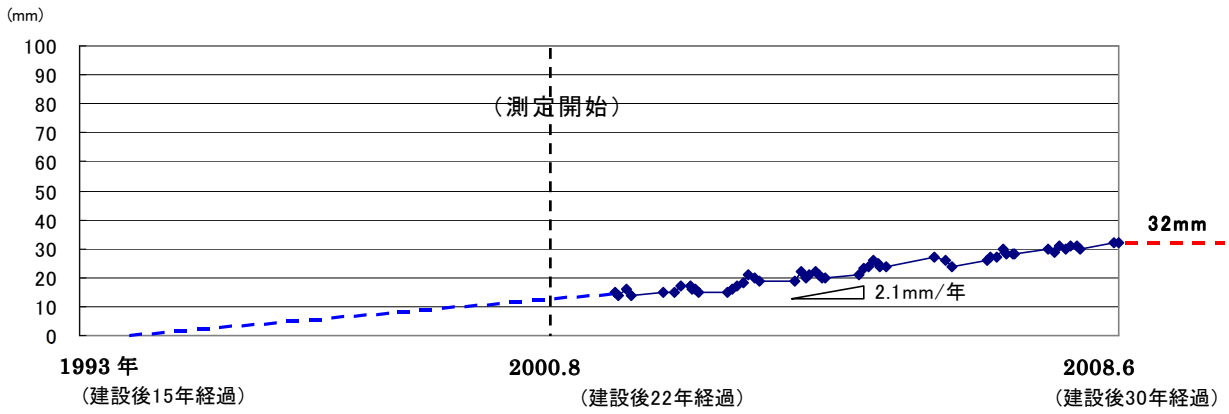


図－3.5 偏差の鉛直分布図

図－3.6 に取水塔頂部の定点の湖側への水平変位の経時変化を，**図－3.7** に取水塔頂部の定点の鉛直変位の経時変化を示す。これは，フェースプレートに開きが確認された 1 年後（2000 年 8 月）から測定されたものであり，本地点は，冬期間は積雪により交通が遮断されて近づけないため，測定は積雪の無い 5 月から 11 月に実施している。水平変位も鉛直変位も階段状に増加し，2008 年度を境に鈍化しているようにも見える。2000 年 8 月から 2008 年度までの水平変位量は，年間 5.6mm であり，2007 年 5 月の水平変位量を変形形状の調査で得られた塔頂部の開き 80mm とし，変形開始から同様の速さで変形していたと仮定すると，変形が開始したのは，1993 年頃（建設から 15 年経過）となる。また，2000 年 8 月から 2008 年度までの鉛直変位量は，年間 2.1mm であり，変形が開始したのを，水平変位と同様の 1993 年頃と仮定すると，2008 年 6 月の鉛直変位量は，32mm となった。



図－3.6 水平変位の経時変化

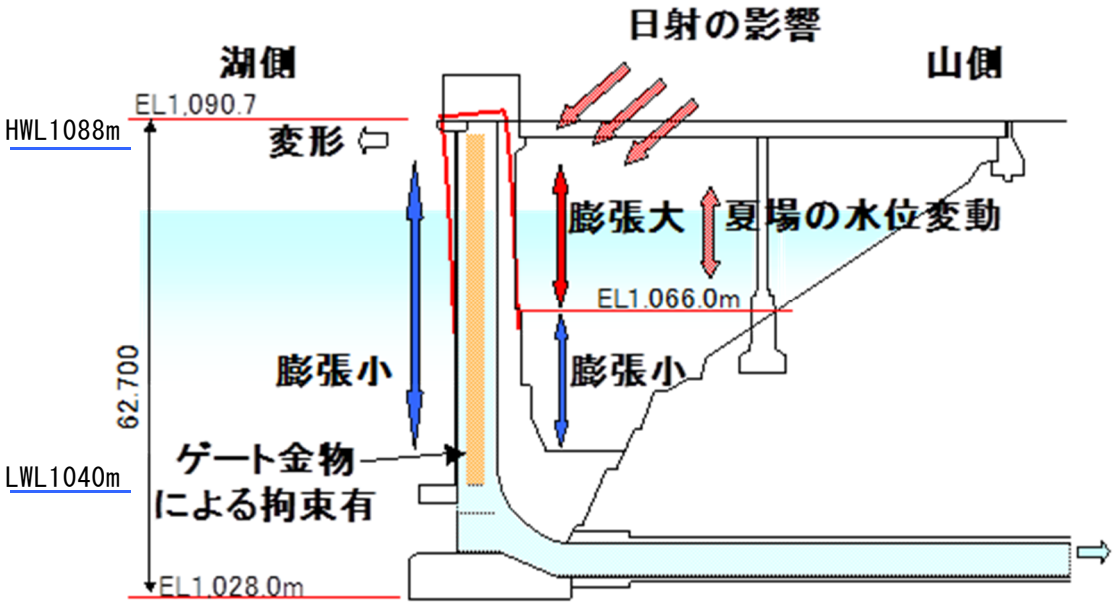


図－3.7 鉛直変位の経時変化

3.3 取水塔変形のメカニズム

躯体コンクリート調査の結果では，躯体全体に ASR が確認されたことから，躯体全体のコンクリートが ASR に伴い膨張していると考えられる。一方，取水塔は EL1,065m 付近から上部が湖側に傾斜している。

取水塔の形状は，高さが約 63m で，水平断面形状は水位に応じて選択取水が可能となるように取水口が EL1,089.2～1,051.5m の 38m 区間において，湖側に開いた櫛形をしており，ゲート関連の金物が前面に設置されている。（**図－3.3** 参照）この形状により，取水塔の山側の壁体は湖側と比べてコンクリートが露出しており，日射の影響を受けやすく，コンクリート温度が高くなることから ASR が進行し易く，また，鉛直方向の拘束条件が少ないことから，ASR に伴う膨張量も大きくなることが予想される。



図－3.8 取水塔変形要因の概略図

ダム水位は，4 月頃に最低水位（EL1,050m 程度）となり，日射の強い 5～8 月頃に EL1,060m～EL1,085m 程度に貯水した後，1 月頃から水位を下げるという年間運用がされている。躯体の変形が見られた取水塔上部は，このように夏季に水位が変動する部分に対応しており，ASR による反応生成物が形成されるとともに，水分の供給によって反応生成物が吸水膨張しやすい環境にあると推定される。さらには，EL1,066m より山側の上部のコンクリートは，鉄骨量が少ないため，ASR による変形を受けやすいことが考えられる。

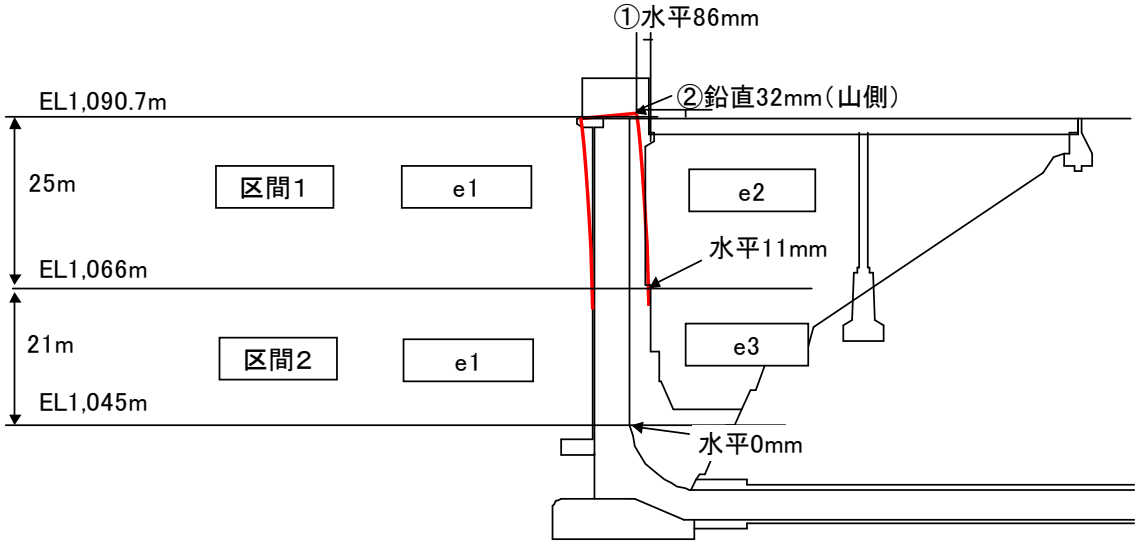
以上のことから，取水塔コンクリートに生じた ASR には，湖側壁体と山側壁体の環境条件と構造的な条件の違いにより，部位により膨張量に差が生じ，それが躯体の変形の原因となったと結論付けた。**図－3.8** に変形要因の概略を示す。

3.3.1 モデルによる変形形状解析

膨張率の差によって，現在の変状が起こりうることを確認することを目的とし，現在の変形形状をモデルにより模擬することを試みた。

(1) モデルの設定条件

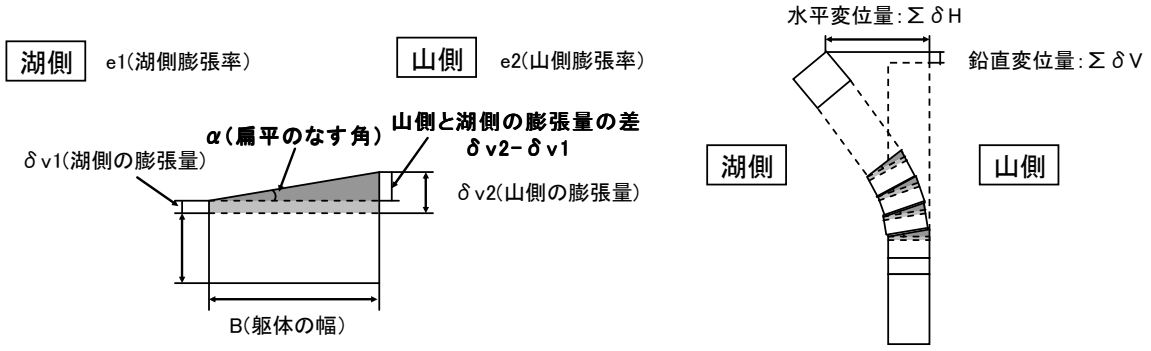
躯体の変形原因は，躯体の山側と湖側の膨張率に差があるためと考えられることから，以下のモデルによって幾何学的に躯体の変形を再現した。モデルの設定にあたっては，これまでの調査結果をもとに，EL1,066m を境に 2 区間に分割し，湖側躯体の膨張率 e1 は，同一と仮定した。モデルの設定条件を**図－3.9** に示す。



図－3.9 モデルの設定条件

(2) 変位の算出方法

基本的な考え方は，**図－3.10** に示すように湖側の膨張量（δv1）より山側の膨張量（δv2）が大きいと想定した。その膨張量の差により扁平になり，水平変位（ΣδH）と変直変位（ΣδV）が発生するので，湖側の膨張率（e1）および山側の膨張率（e2）とし，その膨張率を算出した。



図－3.10 簡易モデル

A. 水平変位（**図－3.11**）

水平変位の総和（ΣδH）は以下の式で算定される。

$$\Sigma\delta H$$
$$=(L+\delta v1)\sin\alpha+(\delta v2-\delta v1)\sin\alpha+(L+\delta v1)\sin2\alpha+(\delta v2-\delta v1)\sin2\alpha+\cdots\cdots+(L+\delta v1)\sin(n\alpha)+(\delta v2-\delta v1)\sin(n\alpha)$$
$$=(L+\delta v2)\sin\alpha+(L+\delta v2)\sin2\alpha+\cdots\cdots+(L+\delta v2)\sin(n\alpha)$$
$$=\sum_{i=1\sim n}L\times\sin i\alpha+\sum_{i=1\sim n}\delta v2\times\sin i\alpha$$
$$\fallingdotseq\sum_{i=1\sim n}L\times\sin i\alpha$$

ここで，$\sum_{i=1\sim n}\delta v2\times\sin i\alpha$ は十分小さいため無視する。

B. 鉛直変位（**図－3.12**）

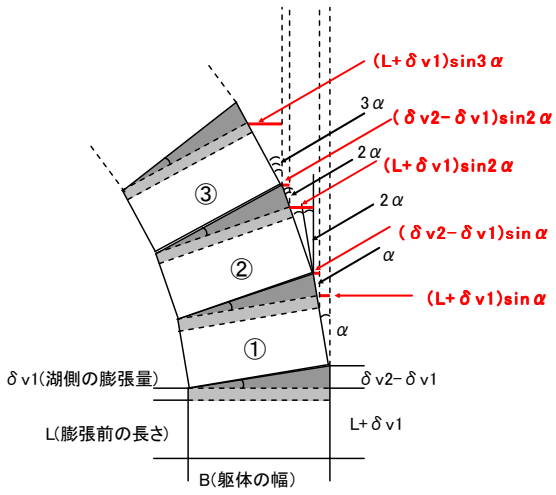
変形後の長さは，次式で表せる。

$$n\times L\times(e2+1)$$

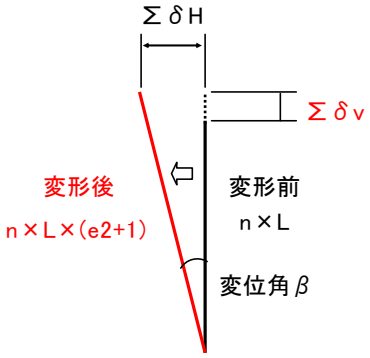
ここで，$\sin\beta=\Sigma\delta H/(nL(e2+1))$ より，$\beta=\sin^{-1}[(\Sigma\delta H/(nL(e2+1))]$ となる。変形後の鉛直長さは，$nL(e2+1)\cos\beta$ であるので，鉛直変位の総和（ΣδV）は次式で表せる。

$$\Sigma\delta v=nL(e2+1)\cos\beta-nL$$

以下の手順で膨張率を変化させ，現在の変状を生じさせる膨張率を試算した。



図－3.11 水平変位図



図－3.12 鉛直変位図

C. 水平変位量による膨張率の差の算出

膨張率の差(e2-e1)および(e3-e1)の違いから，水平変位量を算出し，EL1,066m での水平変位 11mm，取水塔頂部(EL1,090.7m)での水平変位 86mm（11mm+75mm）となる各区間の膨張率の差(e3-e1)および（e2-e1）をそれぞれ求めた。

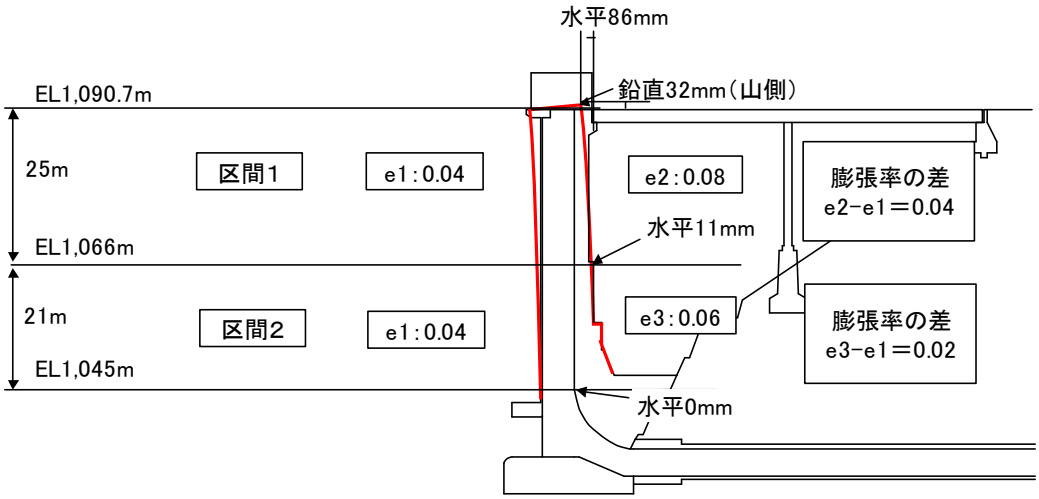
その結果，区間２では e3-e1＝0.021%となり，区間１では e2-e1＝0.042%となった。

D. 鉛直変位量による膨張率の算出

山側の鉛直変位量が高さ 32mm となるような膨張率 e1 を前述の鉛直変位算出式から求め，e2=e1+0.042%，e3=e1+0.021%の関係から，e2，e3 を求めた。

その結果，湖側の膨張率（e1）は，e1=0.0364%=364μ，山側の区間２の膨張率（e3）は，e3=0.0210%+0.0364%=0.0574%=574μ，山側の区間１の膨張率 e2 は，e2=0.0420%+0.0364%=0.0784%=784μ，となった。

図－3.13 に膨張率の推定結果を示す。以上により,膨張率の差によって,現在の変状が起こりうることが示された。



図－3.13 膨張率の推定結果図

3.4 構造物の健全性評価

当該構造物の健全性評価の指標としては，(1)安全性および(2)使用性があり，それぞれについて整理した。なお，第三者への影響や美観景観については，湖中に孤立した構造物であり今回の検討の対象としていない。

3.4.1 安全性評価

(1) 取水塔の安定性

取水塔の転倒および滑動の安定性については，常時および地震時において，**表－3.1** に示すように設計当初の基準を満足している。

表－3.1 取水塔の安定性

ケース		基準	現状	判定
常時	転倒	偏芯距離4.9m以内	1.41m(1.38m)	OK
	滑動	安全率1.5以上	53.8(53.8)	OK
地震時	転倒	偏芯距離7.1m以内	6.68m(6.63m)	OK
	滑動	安全率1.2以上	1.4(1.4)	OK

※：(　)は建設時の値

(2) 取水塔の耐荷性

構造物中の鉄筋が健全で，鉄筋とコンクリートが荷重に対し一体として抵抗する機構が保たれており，耐荷性能の低下はほとんどないと評価する。

3.4.2 使用性評価

(1) ゲート類の操作性

躯体の傾きは0.2度で許容値3.5度以内であるので要求性能を満足している。

(2) 通水性

導水路内部点検（平成19年3月）においてコンクリートのはく落等の異常はなく，要求性能を満足している。

3.5 補強対策

3.5.1 対策の基本的な考え方

取水塔では，最大74m^3/sを取水し，3発電所で合計40万kWの発電が可能であり，北陸電力㈱における貴重なピーク対応電源設備に位置づけられるとともに，地球環境問題・エネルギーセキュリティ上も二酸化炭素を排出しない純国産エネルギー源であることから，重要な設備である。したがって，長期間これらの発電所を停止することは望ましくない。また，本取水塔は貯水池の運用上から年間のほとんどの期間は水没した状況にあるため，再構築は難しい。

また，建設後30年が経過した取水塔の今後のASRの進展については，現状以上の速さで進展することはなく，収束状態に移行する可能性も考えられた。しかしながら，取水塔の変形は継続しており，コンクリートとゲート金物の固定に支障が生じる等の局部的な影響によって，ゲート類の操作性に支障を及ぼす恐れもあることから，ASRによる膨張や変形に対し少しでも抑制する予防的な対策が必要であった。

したがって，本設備の経年劣化に対する維持管理においては，「取水機能が確保されることを基本に，適切な補修・補強により長期間にわたって使用を可能とする」ことを基本方針とした。

3.5.2 対策方法の選定

アルカリシリカ反応に対する一般的な補修・補強対策[1)]と本取水塔への適用の対応を**表**

－3.2に示す。

一般的にアルカリシリカ反応を抑制する対策としては，反応に必要な水分の供給を遮断する方法がある。しかし，本取水塔は湖底から立ち上がった湖内に孤立した取水設備であり，取水塔内部は常時水浸状態であることから水分が浸透する環境にある。そのため，完全な対策の実施には取水塔内面および外面全域の対応が必要であり，限られた期間での確実な対策工事の実施は現実的ではなく，水分の遮断は困難である。

本構造物の場合，アルカリシリカ反応は建設後15年程度の経過後から顕在化し，その後30年近くまで緩やかに進行している。今後も急激な反応促進は考えがたく，収束することも考えられる。したがって，アルカリシリカ反応による膨張や変形に対し少しでも抑制する対応を検討することが妥当であると考えられる。

一般に考えられる変形拘束対策としては，PC鋼線による拘束や外面のプレキャスト版や鋼板等の巻き立てによる変形拘束が考えられる。しかし，本構造物は湖内に孤立して水没する高さの高い柱状構造物であり，湖側にゲートがある櫛形の複雑な断面形状である。したがって，水平方向での拘束には施工上問題が多く，限られた期間での確実な対策工事の実施は現実的ではない。また，変形が生じている原因は，湖側と山側の上方向の膨張量の違いによるものであることから，鉛直方向に拘束することが有効であると考えたため，取水塔頂部からの鉛直方向でのPC鋼線により拘束するPC工法を選定した。

なお，最も確実な対策としては再構築があるが，本構造物の維持管理の基本的な考え方により採用しない。

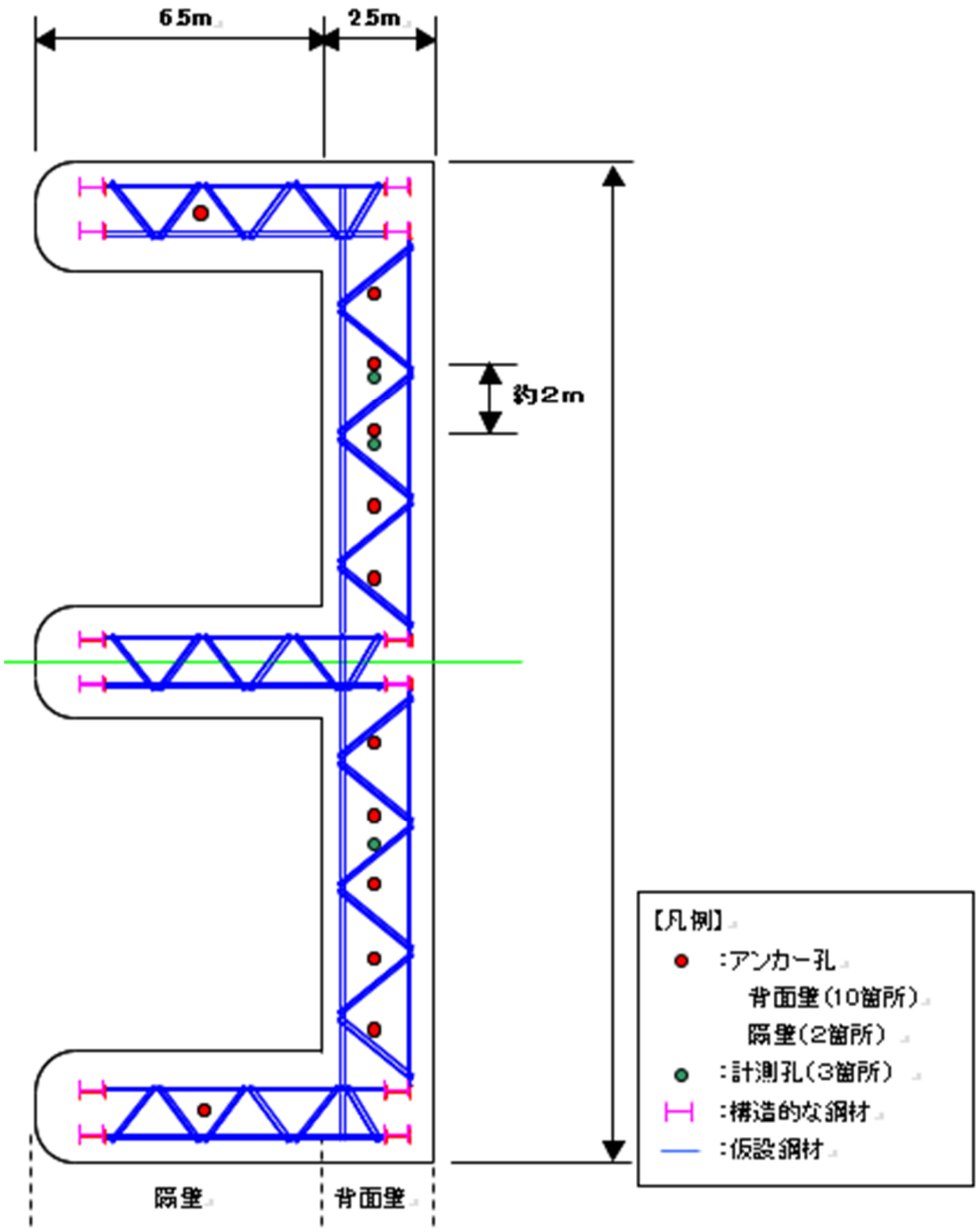
表－3.2 補修・補強対策の一般的工法と適用性

目的	工法例	今回の適用性
ASR 反応抑制	水分遮断のための表面への塗料塗布	×（取水塔下部は水に浸かっておりコンクリート内部への水分遮断は困難。）、
ASR 変形拘束	ＰＣ（プレストレスコンクリート）鋼線による変形拘束	○
	外面のプレキャスト板・鋼板等巻き立てによる変改拘束	△（形状が複雑であり、変改の拘束が困難。）
劣化部除去	断面修復（部分的改築）	×（大規模な修繕工事となる。）

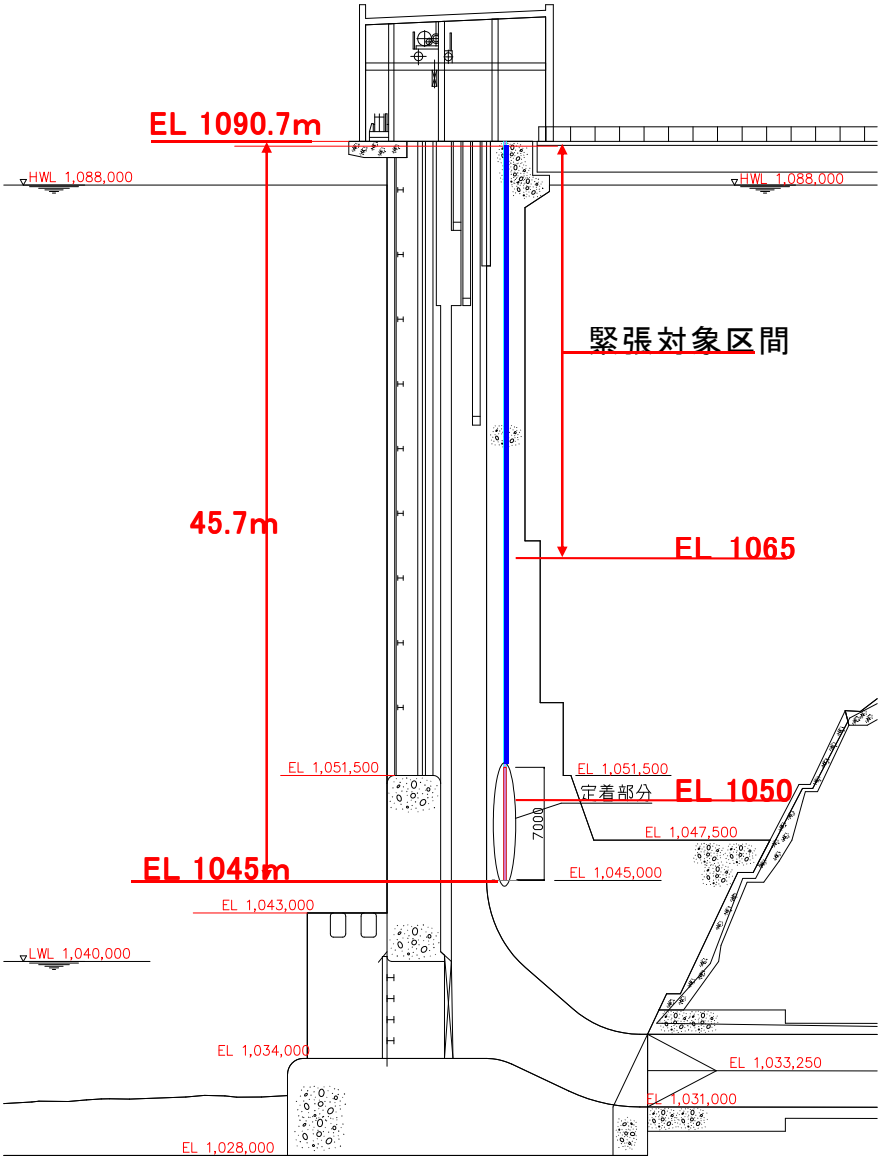
3.5.3 対策の実施

PC工法に使用するPCアンカーは，将来的なASR膨張に対応すること，地震が発生した場合に仕様に余力をもたすことを考慮し，導入緊張力を調整できる国内最大級のアンカーとして，SEEEタイブルアンカーA型(360TA)を使用することとした。**図－3.14**にアンカーの平面的な配置図を，**図－3.15**に縦断的なアンカーの配置図を示す。また，**表－3.3**に対策工の工程を，**表－3.4**にアンカーの仕様を示す。アンカーの施工は，事前調査として，内部コンクリートの状態とアンカーの施工性を把握することを目的として，2009年に１本だけ先行して行った。その後， 2011年に残りの11本を施工した。**写真－3.2**にアンカー挿入作業状況を示す。毎日の作業の終了時に孔の鉛直性を下げ振りにより確認し，ボーリングマシンの傾きを微調整することにより，全てのアンカー孔において，目標と

していた施工精度（±0.5°以内）を確保して，施工することができた。アンカーの緊張作業は，2012年の春に行った。ASRによる内部の膨張圧には，諸説有るものの[8]，膨張を抑制するのに必要な導入力に関しては，検証事例がほとんどなく，試験体や橋脚において周方向に0.2～0.3N/mm²程度の小さな拘束力を導入することにより，膨張量やひび割れの進展が低減された報告があること[2), 9), 10)]，本取水塔から採取したコアのクリープ試験の結果，0.5N/mm²程度の荷重で圧縮ひずみが確認されたことから[11)]，初期導入力は，一本当たり1,500kN（アンカー降伏荷重の50%，0.26N/mm²に相当）と設定し，効果を確認しながら調整することとした。



図－3.14 アンカーの配置図（平面図）



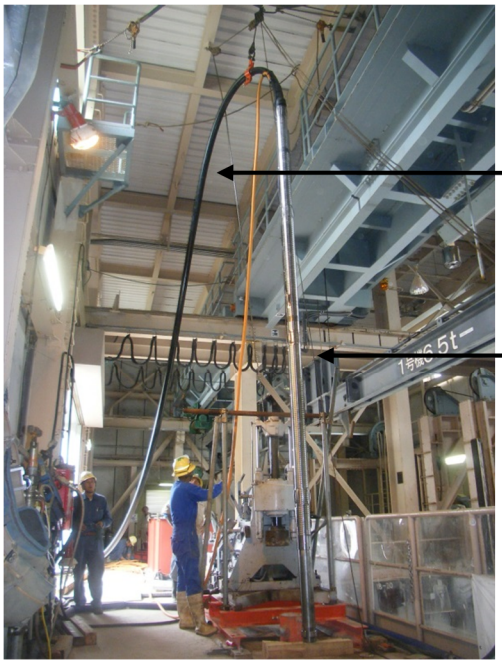
図－3.15 アンカーの配置図（縦断面図）

表－3.3 対策工の工程

年度	2009	2010	2011	2012	2013	2014以降
事前調査	事前調査の実施	モニタリング				
対策工事			対策工事の実施	対策（緊張）開始	モニタリング	

表－3.4 アンカーの仕様

項目		仕様
ｹｰﾌﾞﾙ諸元	ｹｰﾌﾞﾙ構成	19本×径12.7mm
	公称径	63.5mm
	断面積	1875.5mm^2
	PC鋼より線の単位質量	15.7kg/m
定着体諸元		径120mm,長さ4.7m
引張荷重		3,477kN
降伏点荷重		2,964kN



写真－3.2 アンカーの挿入作業状況

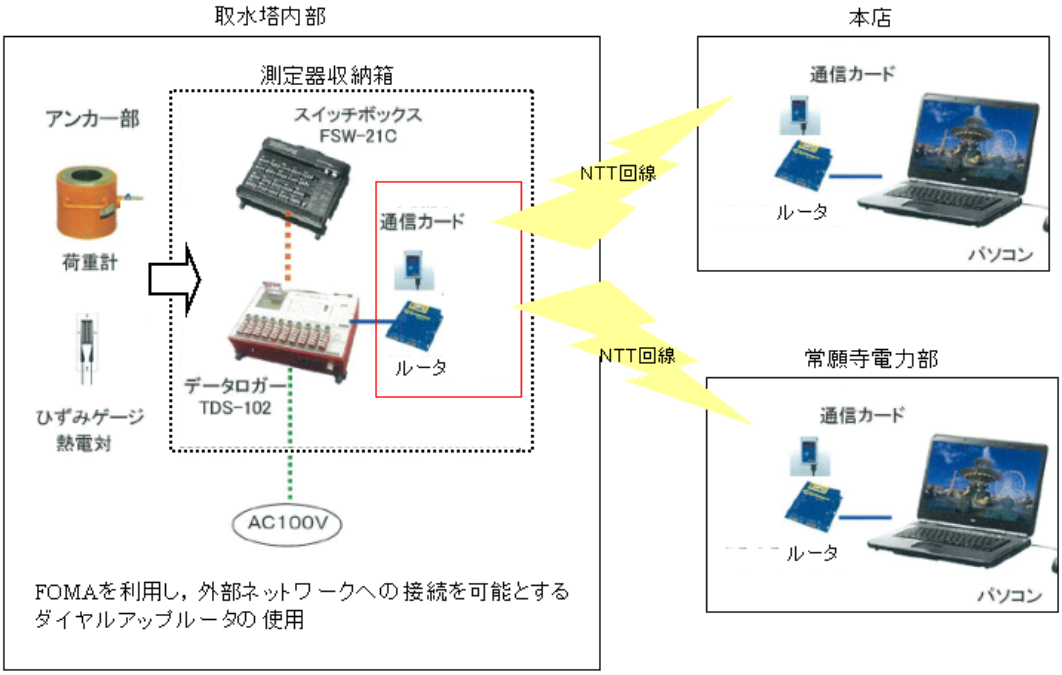
3.6 モニタリングによる対策効果の確認

3.6.1 モニタリングの実施項目

本施工後，計測管理システムにより，自動計測した荷重データと計測孔のひずみ値を事務所まで伝送し，モニタリングすることとした。また，毎月測量によって取水塔の頂部変位（水平変位と鉛直変位）を確認することとした。**表－3.5**に監視項目一覧を示す。また、**図－3.16**に計測管理システムの概要図を示す。

表－3.5 監視項目一覧表

		計測項目	計測点	計測頻度	監視項目	備考
定期監視項目	①取水塔頂部の水平変位・鉛直変位測量	取水塔の鉛直・水平挙動を測量にて計測	－	1回/月（12月～5月は欠測，ただし内壁面観察時には測量実施）	対策効果の確認	－
	②内面壁の定点観察・離隔測定	内壁面にゴンドラを下ろし，内壁面の定点写真観察及び離隔の計測を行う。	－	1回/年（3月～4月で水面が低下している状態）	異常事態に抽出	－
日常監視項目	③ロードセル（荷重計）自動計測	取水塔頂部のロードセルを用いて緊張力を計測	12点	1回/時 自動計測	異常事態に抽出	耐用年数 約10年
	④計測孔内のひずみ計測	計測孔内に各2～4mで設置してあるひずみ計で計測を行う。	3点	1回/時 自動計測	異常事態に抽出 対策効果の確認	耐用年数 約3～5年

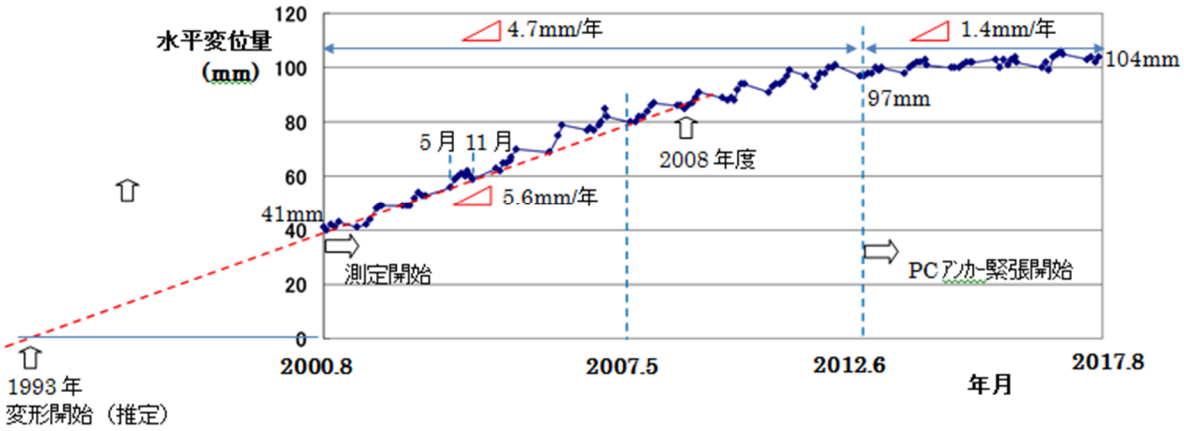


図－3.16 計測管理システムの概要図

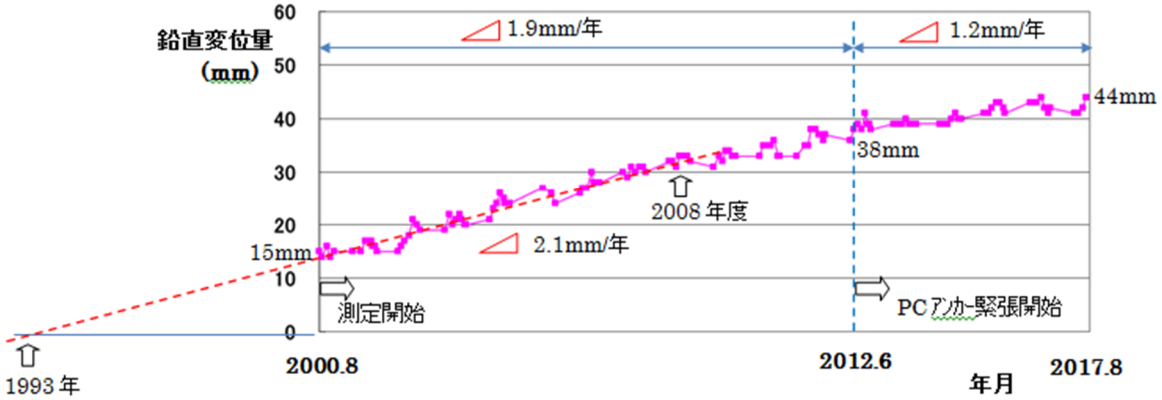
3.6.2 定点測量によるモニタリングの結果

図－3.17に取水塔頂部の定点の湖側への水平変位の経時変化を，**図－3.18**に取水塔頂部の定点の鉛直変位の経時変化を示す。**図－3.17**より，仮に水平変位が補強対策（緊張開始）以前と同じ割合（4.7mm/年）で進行した場合，2012年6月～2017年8月までに24mm進展することになるが，実際は，約1/3の割合（1.4mm/年）に低減され，7mmしか進展しなか

った。一方，鉛直変位においては，**図－3.18**より，仮に水平変位が補強対策（緊張開始）以前と同じ割合（1.9mm/年）で進行した場合，2012年6月～2017年8月までに10mm進展することになるが，実際は，約2/3の割合（1.2mm/年）に低減され，6mmしか進展しなかった。以上より，PC工法により，取水塔の変形は効果的に低減されていると判断できる。



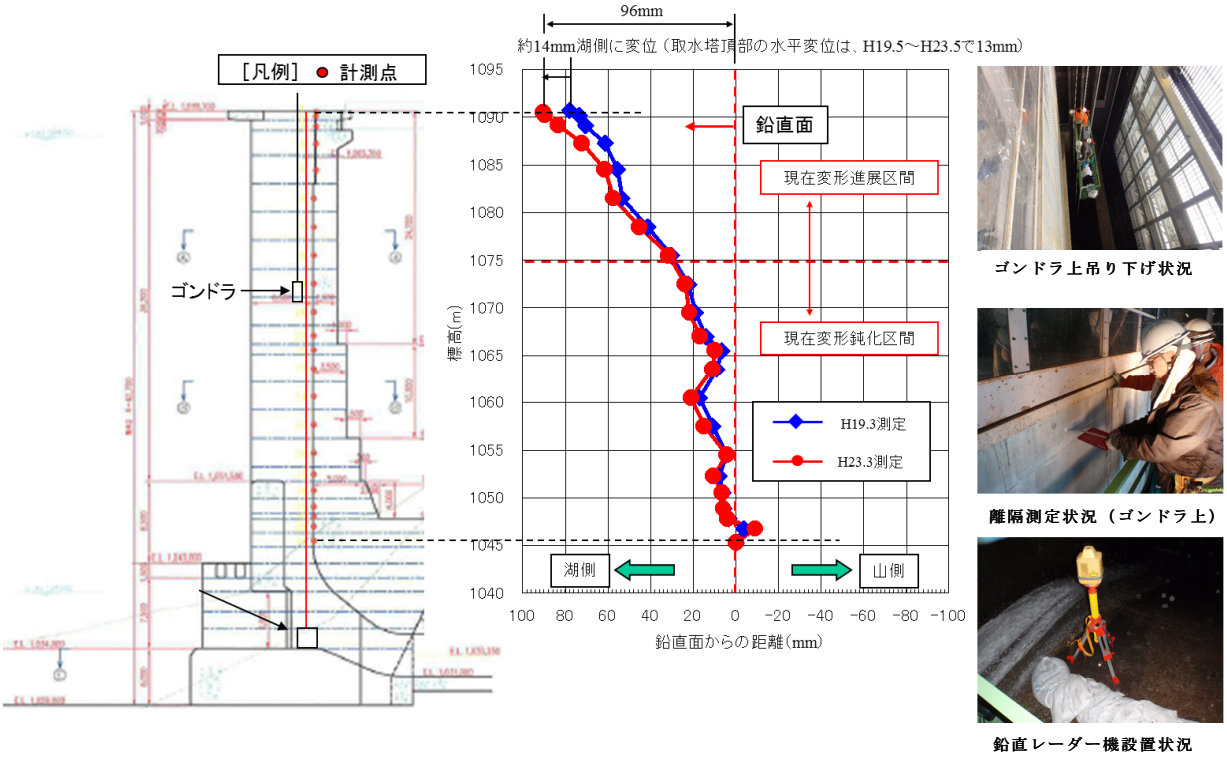
図－3.17 取水塔頂部の水平変位の経時変化



図－3.18 取水塔頂部の鉛直変位の経時変化

3.6.3 内面壁離隔測定結果

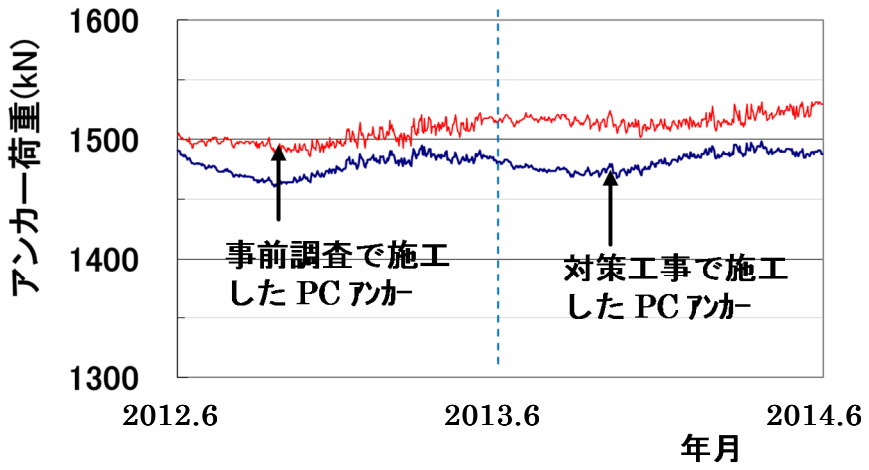
図－3.19に平成23年5月に測定した内面壁離隔測定結果を平成19年5月の結果と併せて示す。**図－3.19**より，取水塔の変形はEL1075mより上部において変位が進行していることが確認された。これは，平成24年6月の緊張開始以前での変位であるため，今後，定期点検の抜水時に対策後の変位の進行を確認する。



図－3.19 内面壁離隔測定結果（H19.5～H23.5）

3.6.4　PC アンカー導入力の経時変化

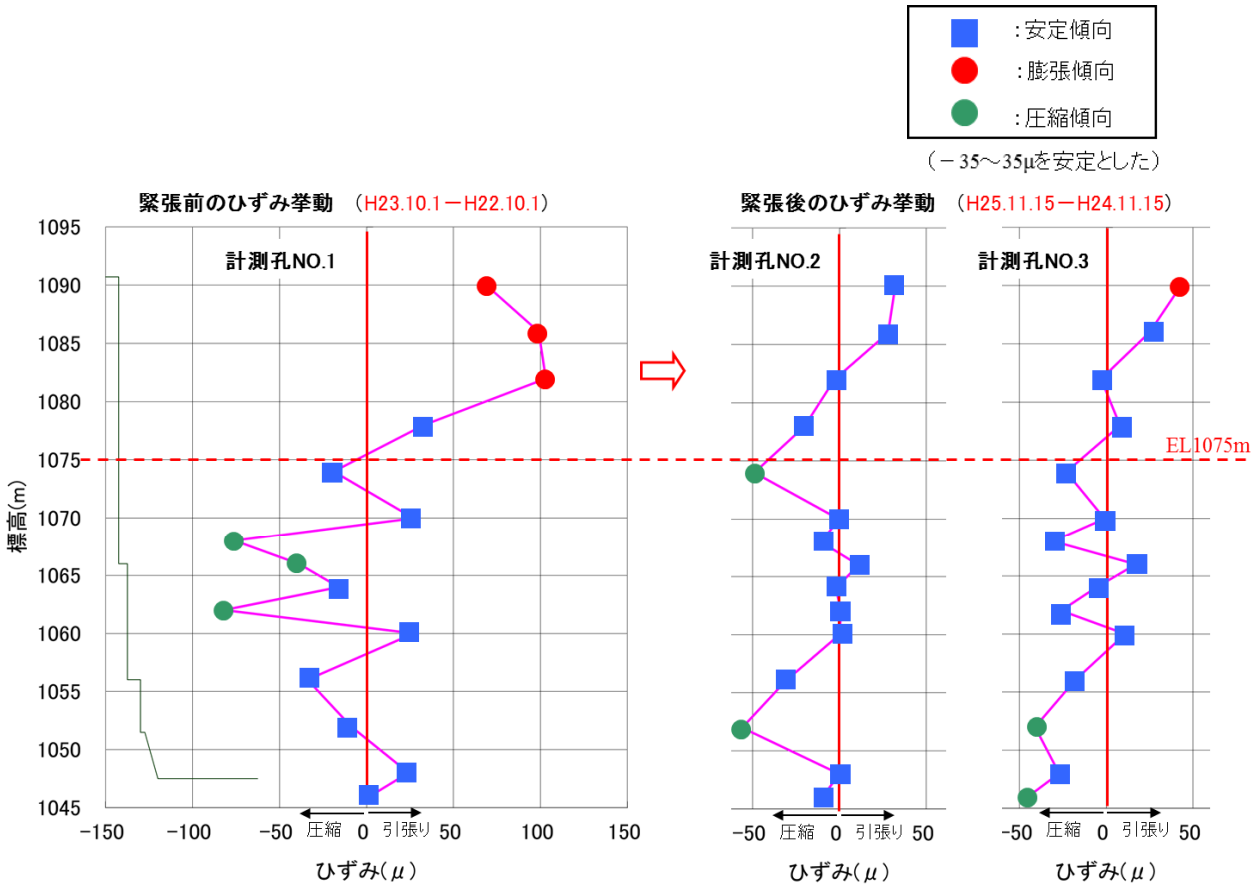
図－3.20にPCアンカー導入力の経時変化（緊張開始～2年間）を示す。導入力は，各PCアンカーの頭部に荷重計を設置し，自動計測している。対策工事（2011年）で施工した9本のPCアンカーについては，2012年6月に緊張荷重1,500kN導入後，季節的な変動を繰り返しながら現在（2017年）まで初期導入荷重を維持している。**図－3.20**には，代表する1本を示す。また，事前調査時に施工したPCアンカーについては，他の荷重計とは違った挙動を示し，少し高めで推移している。このアンカーは，グラウトを1回で施工したため，高いグラウト液圧がかかった状態でグラウトが硬化した結果，可動部であるテンドン（PC鋼材）とそれを保護する管（シース）との間に摩擦が残り，導入力が下部まで伝達しにくい状態になっている。この摩擦を解消することは，大きな課題であったが，対策工事では，摩擦低減策として，グラウトを3回に分けて施工したことにより，摩擦解消に成功している。PC工法を今回のように大深度で鉛直に適用することは，通常では行わないため，今回明らかとなった事象であるが，今後の本工法の適用に際しては，重要な情報であり，また，事前調査としての施工を本施工で反映できた事例として，ここに特記する。なお，ASR膨張による変形が抑制されているにもかかわらず，アンカー荷重が上昇していかない理由としては，ASRゲルが，コンクリート内部のASRによって発生した微細なひび割れ中に徐々に押し出され，応力が緩和されているためであると考えている[11)]。実構造物において，このような挙動が確認されたことは，大変貴重なことであり，また，ASRに対する本工法の効果を今後も検証していく上で重要な点であると捉えている。



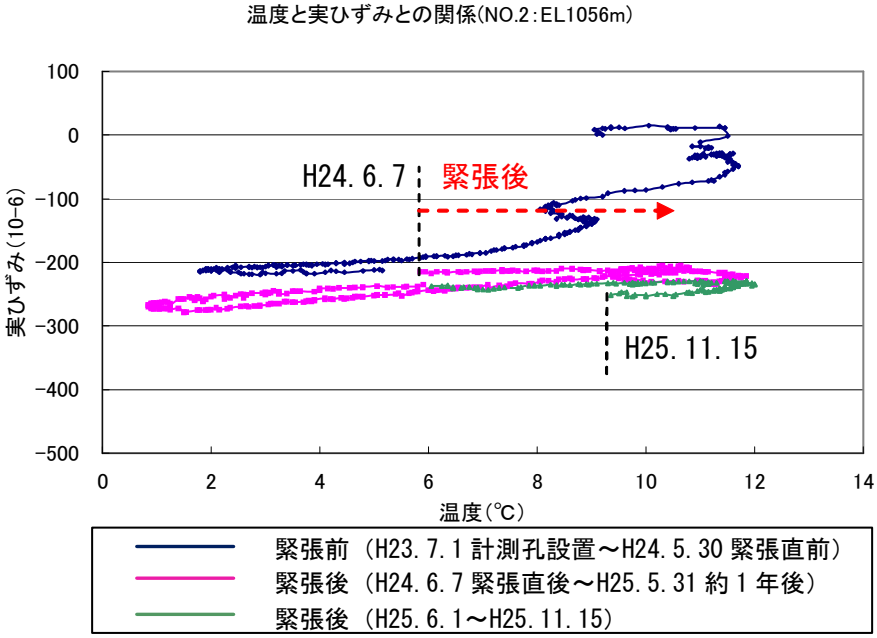
図－3.20 アンカー導入力の経時変化

3.6.5　計測孔内のひずみ計測（自動計測）結果

図－3.21にコンクリートのひずみ挙動を示す。**図－3.21**は，各標高のコンクリートのひずみを年間の差分で示したものである。**図－3.21**より，緊張前の年間のひずみ挙動に比較して，緊張後の年間のひずみ挙動は変動が少なく安定傾向にある。参考として実ひずみの例を**図－3.22**に示す。



図－3.21 コンクリートのひずみ挙動



図－3.22 実ひずみの例

3.7 まとめ

取水塔の ASR 対策では，貯水池水位の変動に伴い水の供給環境が変わる取水塔は，躯体の山側と湖側の ASR による膨張差（日射の影響と金物の拘束力の違いによる）によって，水平方向にも変形していることを確認した。そして，変形の主原因が ASR による鉛直方向の膨張であることから，PC 鋼線により頂部と定着部の間に鉛直方向の緊張力を与えることで膨張や変形を抑制し，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事の回避が可能であることを検証した。

なお，本章では，ASR により変形した既設電力関連施設を補強により維持管理しているが，その調査，対策の検討，対策の実施およびモニタリングには，既に 16 年の月日と数億円の費用を要している。取水塔のコンクリート量が約 1.5 万m^3であることから，1m^3当たり約 3 万円の費用を要していることとなる。また，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事が必要となった場合には，工事中の発電ロスを含め更に莫大な費用を要する。このことからも，今後，新設する電力関連施設においては，多少コンクリートの材料代が増加しても，フライアッシュコンクリートの利活用等により，ASR のリスクを最小限に抑える努力が必要である。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 取水塔は，上部の区間で，鉛直面に対してわずかに湖側に傾斜する形状に変形している。一方，取水塔のコンクリートには ASR の顕在化が確認され，取水塔の湖側壁体と山側壁体の環境（日射の影響）および構造上の条件（金物による拘束力）の違いにより ASR に伴うコンクリート膨張に差異が生じている。これらのことを総合的に考えると，取水塔は ASR により変形していると推定できる。

(2) PC アンカーにより 0.2～0.3N/mm^2の圧縮応力を与えることで，ASR による膨張を

抑制し，効果的に水平変位の増加を止めることができ，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事の回避が可能であることを検証した。

(3) ASR 膨張による変形が抑制されているにもかかわらず，アンカー荷重が上昇していかない理由としては，ASR ゲルが，コンクリート内部の ASR によって発生した微細なひび割れ中に徐々に押し出され，応力が緩和されているためであると考えられる。

【参考文献】

1）社団法人土木学会コンクリート委員会，コンクリート標準示方書 ［維持管理編］，2013.

2）石井浩司，奥田由法，和佐田慎吾，鳥居和之：ASR により劣化したコンクリート橋脚の対策事例，コンクリート工学, Vol.46，No.1, pp.55-60, 2008.

3）久保哲司，参納千夏男，滝本弘：PC 工法による取水塔の ASR 補強対策及びモニタリング，電力土木, No.392, pp.78-82, 2017.

4）T.Kubo, T.Shibata, C.Sannoh, K.Torii : The Reinforcement of an ASR Affected Intake Tower Using Post-Tensioned Tendons, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Sao Paulo, CD-ROM 10 pages, 2016.

5）K.Torii, T.Kubo, C.Sannoh, M.Kanitani : The Alkali-Silica Reactivity of Andesitic River Aggregate and ASR Mitigation Effect by Using Fine Fly Ashes, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Sao Paulo, CD-ROM 9 pages, 2016.

6）Bianchi, R. H. ; Bruce, D. . The use of post-tensioned tendons on Stewart Mountain dam, Arizona; A case study involving precision drilling，Second Interagency Symposium on Stabilization of Soils and Other Materials, 15pages, 1992.

7）Blaikie, N. K.; Bowling, A. J. . The assessment and management of alkali-silica reaction in the Gordon river power development intake tower. 10th International Conference on Alkali Aggregate Reaction, pp.500-507, 1996.

8）川村満紀，岩堀和馬：拘束下のモルタルにおいて発生するアルカリシリカ反応による膨張圧，コンクリート工学論文集，第 14 号第 3 巻, pp.1-9, 2003.

9）石井浩司，奥田由法，谷川伸，鳥居和之：ASR により劣化したコンクリート橋脚の補修・補強工法による抑制効果，コンクリート工学, Vol.43, No.7, pp.42-50, 2005.

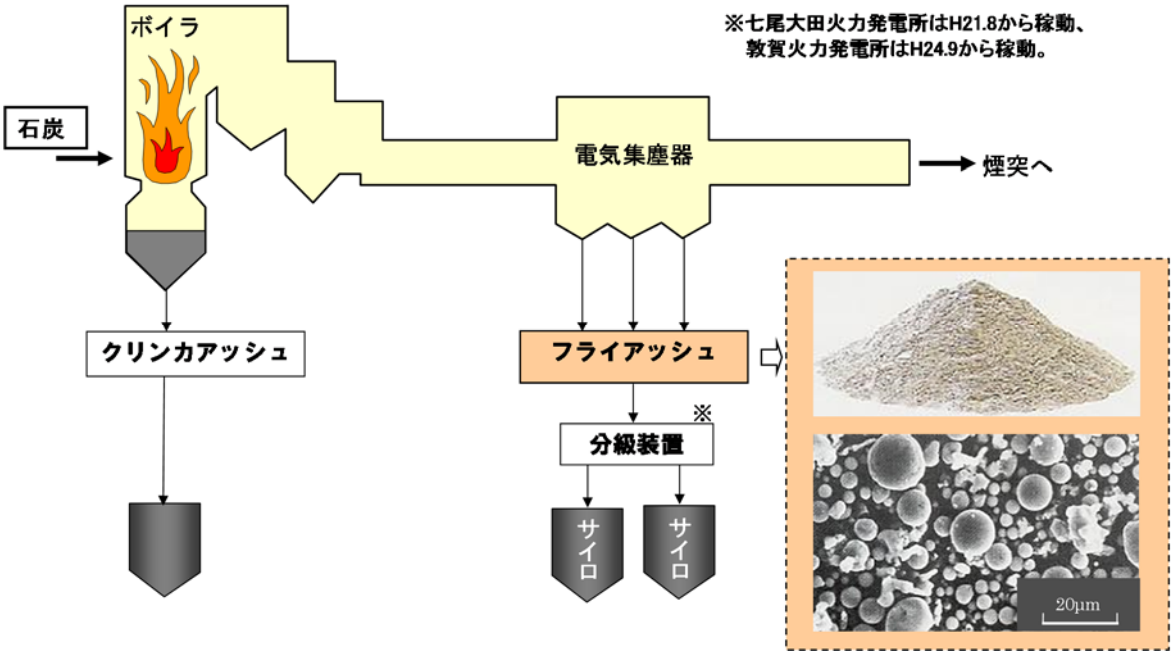
10）奥山和俊，石井浩司，奥田由法，鳥居和之：ASR が発生したフーチングの補修・補強とモニタリング，コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1263-1268, 2007.

11）鳥居和之，稲垣崇秀，脇田康介，参納千夏男：湿潤環境下における ASR 劣化コンクリートのクリープ挙動，コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.971-976, 2010.

第４章　北陸地方産フライアッシュの分級効果と フライアッシュコンクリートの品質

4.1 概　説

北陸地方には，３箇所に石炭火力発電所があり，年間約 65 万 t のフライアッシュが産出されている。富山新港火力発電所（1 号機：25 万 kW，2 号機：25 万 kW）は，発電所の年式が古く，過去に石油から石炭に燃料転換した経緯があり，高品質なフライアッシュの製造が望めないことから，七尾大田火力発電所（1 号機：50 万 kW，2 号機：70 万 kW）と敦賀火力発電所（1 号機：50 万 kW，2 号機：70 万 kW）のフライアッシュを対象とし，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」という 2 つの対策により，従来よりも高品質な北陸地方産分級フライアッシュを製造している。**図－4.1** にフライアッシュの生成概念図を示す。

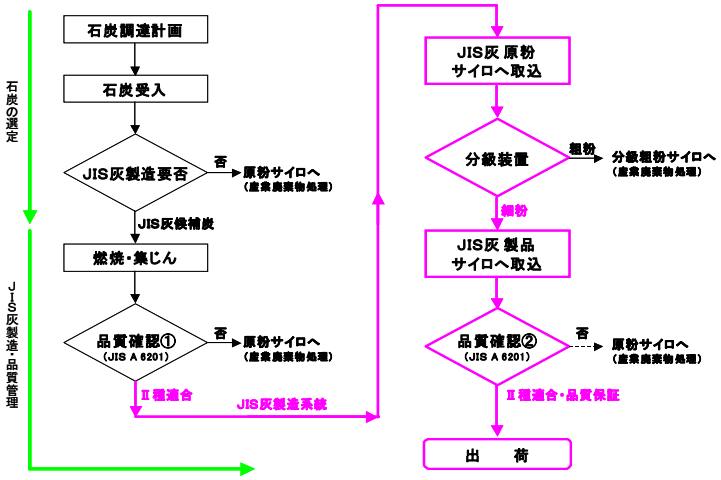


図－4.1 フライアッシュの生成概念図

「品質管理体制の強化」について，JIS 灰製造・品質管理フローを**図－4.2** に示す。これまでの各炭種の品質管理データに基づき，JIS 灰の生産が可能な石炭を選定し，2 度の品質確認で全品質管理項目が基準を満足することを確認した後，北陸地方産分級フライアッシュとして出荷している。

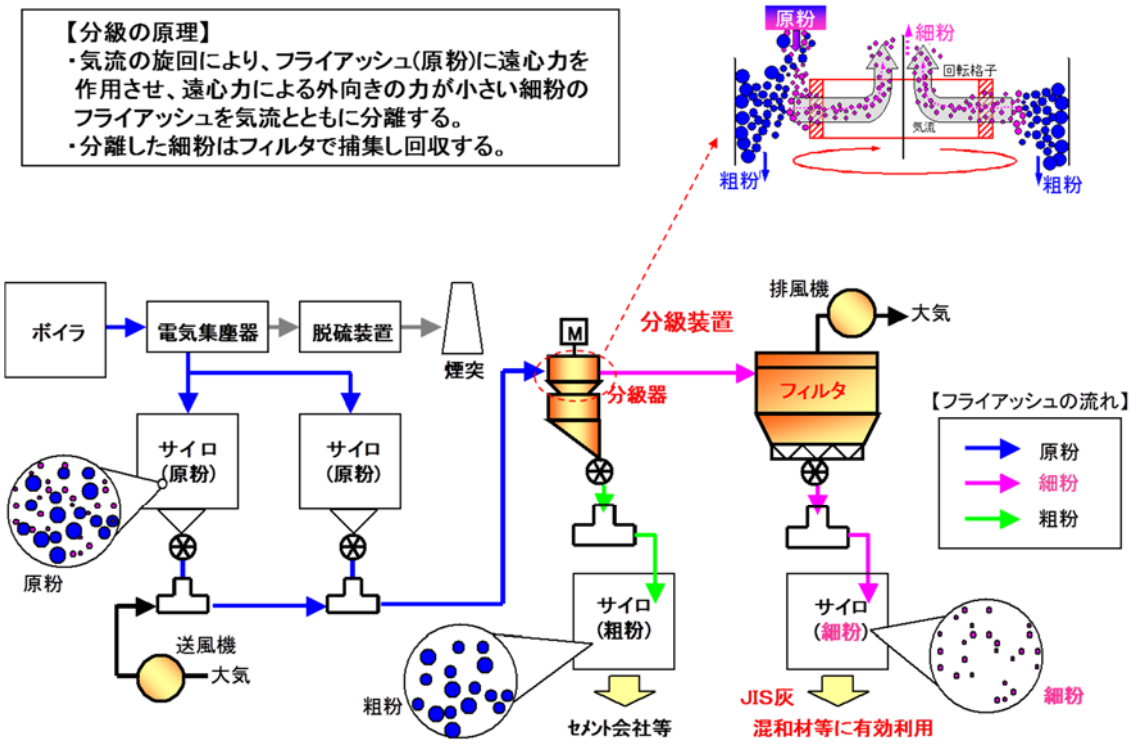
「分級装置の導入」について，分級装置の原理を**図－4.3** に示す。分級装置の内部に旋回流を発生させることにより，投入されたフライアッシュ原粉に遠心力を作用させ，遠心力による外向きの力が大きい粗粉は外側に，遠心力による外向きの力が小さい細粉が内側に分けられる。そして，内側に残った細粉は気流とともに分離され，フィルターで捕集し回収される仕組みである。分級装置の運用は，ブレーン比表面積を指標とし，フライアッ

シュ分級品のブレーン比表面積がフライアッシュ原粉の値より 1,000cm²/g 程度高くなるように調整している。



			品質確認 ①	品質確認 ②
採取箇所			電気集じん器出口	JIS灰製品サイロ出口
頻　度			JIS灰製造時、炭種切替毎	1回/月
確認項目（JIS A 6201）	二酸化けい素		○	○
	湿分		○	○
	強熱減量		○	○
	密度		○	○
	粉末度	45μふるい残分	○	○
		比表面積	○	○
	フロー値比		－	○
	活性度指数	材齢28日	－	○
		材齢91日	－	○
メチレンブルー吸着量			○	○
サンプル保管			－	○

図－4.2 JIS 灰製造・品質管理フロー



図－4.3 強制渦遠心分級の原理

北陸地方産分級フライアッシュの品質向上に伴い，北陸地方産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性が一層向上することが期待されることから，北陸地方において，幅広くフライアッシュコンクリートの利活用を推進するためには，汎用コンクリート

（普通セメントまたは高炉セメントを使用したコンクリート）に対し同等以上の耐久性を検証していく必要がある。

そこで本章では，まず，コンクリート用フライアッシュの JIS 規格項目（JIS A6201）について,七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所の品質管理データの分析を行うとともに，炭種や燃焼条件が同じになるように，同一サンプルを用いた分級効果確認試験を実施し，これらの結果を総合的に評価することにより，北陸地方産フライアッシュの品質を検証する。次に汎用コンクリートとの各種比較試験（室内試験）を実施し，北陸地方産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性について検証する[1)～6)]。

4.2 北陸地方産フライアッシュの品質保証

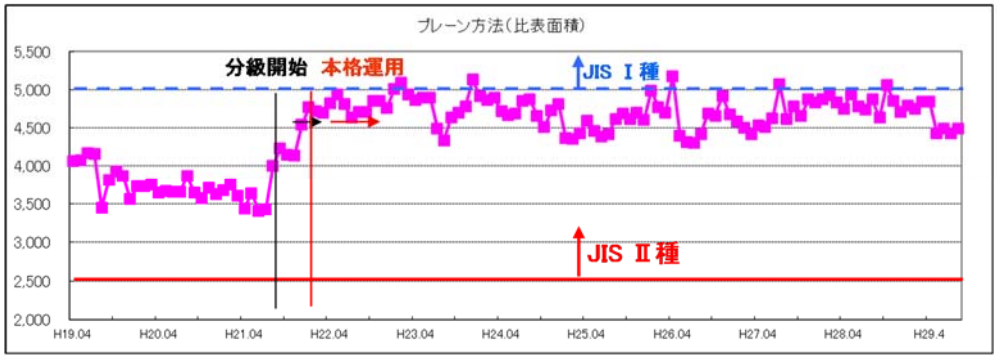
七尾大田火力発電所産分級フライアッシュおよび敦賀火力発電所産分級フライアッシュの分級後のフライアッシュの品質データを**表－4.1** に示す。両発電所で年間 3 万トンの分級フライアッシュを供給できる体制が整備されており，七尾大田火力発電所からは，石川県および富山県に，敦賀火力発電所からは，福井県に出荷されている。

表－4.1 分級後のフライアッシュの品質データ

JIS 項目		七尾大田火力発電所(平成 22 年 1 月～平成 29 年 8 月)		敦賀火力発電所(平成 24 年 12 月～平成 29 年 8 月)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
二酸化けい素含有量(%)		57.3	4.1	63.6	1.7
湿分(%)		< 0.1	－	< 0.1	－
強熱減量(%)		2.0	0.35	3.5	0.25
密度(g/cm³)		2.40	0.05	2.29	0.01
粉末度	網ふるい方法(45μm ふるい残分) (%)	0.5	0.5	1.3	0.3
	ブレーン方法(比表面積) (cm²/g)	4,710	198	4,660	122
フロー値比(%)		107	2	102	2
活性度指数(%)	材齢 28 日	97	7	94	7
	材齢 91 日	109	6	107	6

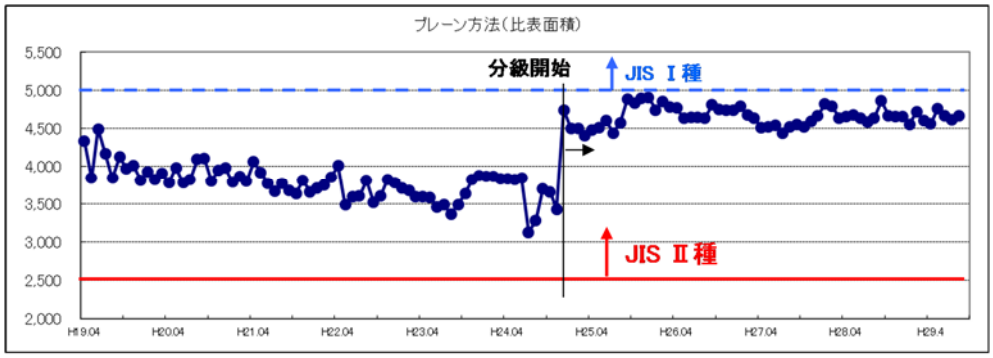
また，**図－4.4** に七尾大田火力発電所産フライアッシュのブレーン比表面積の推移を，**図－4.5** に敦賀火力発電所産フライアッシュのブレーン比表面積の推移を示す。七尾大田火力発電所においては，平成 21 年 8 月に分級が開始され，試運用を経て，平成 22 年 1 月から分級フライアッシュが供給されている。また，敦賀火力発電所においては，平成 24 年 12 月から分級フライアッシュが供給されている。いずれの発電所においても，分級前（原粉）の比表面積は，平均で 3700～3800 cm²/g であり，JIS Ⅱ種の規定の最低値 2500cm²/g よりも，かなり高い粉末度であった。これは，発電所では，石炭をボイラーで

燃焼した場合に採取されるフライアッシュの品質をある程度把握しており，比表面積の高いフライアッシュが採取されることが既知である石炭を燃焼したときに限って，フライアッシュをサイロに取り込んで出荷していたためである。近年，それに加えて，更なる品質の向上，安定化を図ることを目的とし，分級装置が稼働されたものである。特に，活性度指数に関して，材齢 28 日および材齢 91 日において，出荷後に JIS 規定値を割ってしまうリスク低減を図ることが背景にあった。分級装置は，原粉＋1000 cm²/g を目標として運用されたため，分級品の比表面積は，JIS Ⅰ種の最低値 5000 cm²/g と同等の高品質となっている。



	七尾	
	分級前 (～H21.7)	分級後 (H22.1～)
max	4,170	5,180
min	3,410	4,300
ave	3,730	4,710
標準偏差	*204*	*198*
JIS Ⅱ種	2,500以上	

図－4.4 七尾大田火力発電所産のフライアッシュのブレーン比表面積の推移（単位 cm²/g）

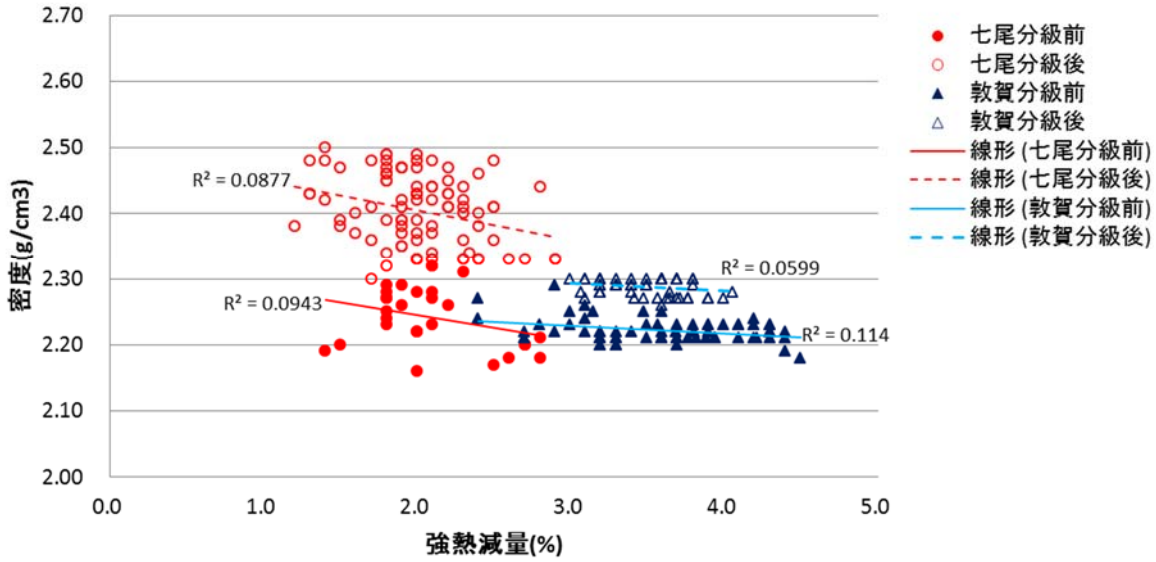


	敦賀	
	分級前 (～H24.11)	分級後 (H24.12～)
max	4,490	4,910
min	3,130	4,410
ave	3,780	4,660
標準偏差	*225*	*122*
JIS Ⅱ種	2,500以上	

図－4.5 敦賀火力発電所産のフライアッシュのブレーン比表面積の推移（単位 cm²/g）

参考として，**図－4.6** に，七尾大田火力発電所産分級フライアッシュおよび敦賀火力発電所産分級フライアッシュの強熱減量と密度の関係を示す。分級後の敦賀火力発電所産分級フライアッシュは，分級後の七尾大田火力発電所産分級フライアッシュと比べて，強熱減量の値が大きくバラツキが小さく，密度の値が小さくバラツキが小さくなっている。

フライアッシュの分級化による効果として，蛍光Ｘ線法による化学組成分析結果を**表－4.2** に，粉末Ｘ線回折／リートベルト解析による鉱物組成分析結果を**表－4.3** に[7]，レーザー回折法による粒度分布測定結果を**図－4.7** に，分級前後のフライアッシュの走査型電子顕微鏡による反射電子像を**写真－4.1** に，分級前後の活性度指数を**表－4.4** に示す。



図－4.6 強熱減量と密度の関係図

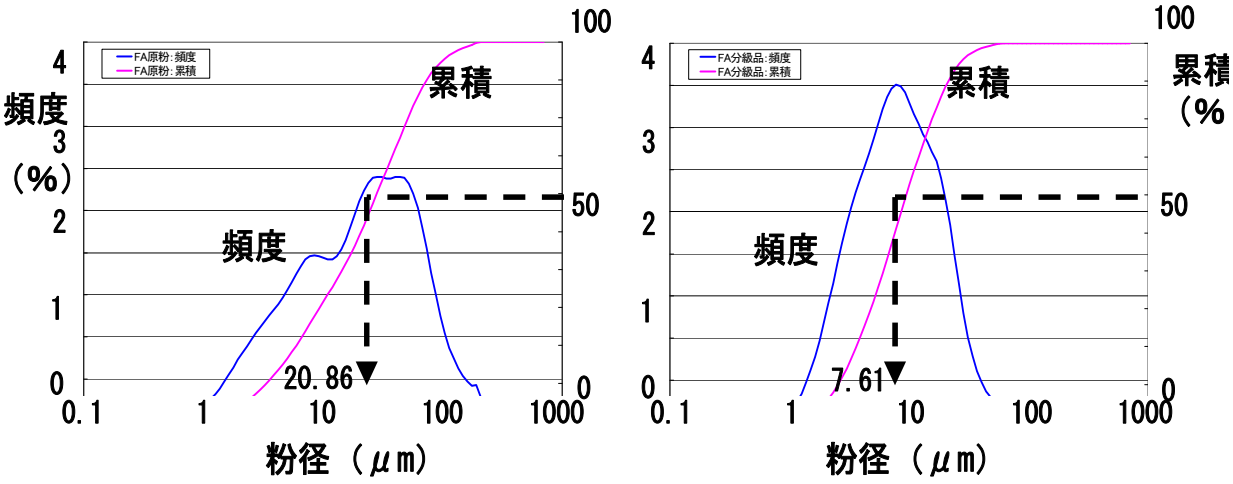
フライアッシュコンクリートの耐久性が向上するのは，フライアッシュには，ポゾラン活性があり，コンクリートに混和した場合にポゾラン反応を起こすためである。ポゾラン反応のメカニズムに関しては，諸説あるが[8), 9)]，いずれにしてもポゾラン反応にはフライアッシュ中の SiO_2，Al_2O_3 が関係している。**表－4.2** および**表－4.3** により，フライアッシュ分級品の方がフライアッシュ原粉よりも SiO_2 量の割合およびガラス質成分の割合が高くなっている。化学組成では SiO_2 量の多い方が，鉱物組成ではガラス質成分の多い方が一般的にポゾラン反応性が高いと言われていることから[10)]，この結果は，分級によってフライアッシュのポゾラン反応性が高くなっていることを実証している。**図－4.7** より，累積 50%の粒径はフライアッシュ原粉で 20.86μm，フライアッシュ分級品で 7.61μm とフライアッシュ分級品の粒径はフライアッシュ原粉の粒径の約 1/3 となっている。また，反射電子像では，分級により粒子の大きなものがなくなるとともに，角張った粒子，中空の粒子が少なくなり，細かく均等な球形の粒子が多くなっている。このことは，分級によってコンクリートのポゾラン反応性とともに流動性をも改善されていることを示唆している。以上のことから，**表－4.4** に示す分級後の活性度指数が高くなっている要因は，分級化による物理化学的な相乗効果によるものと推察される。

表－4.2 蛍光Ｘ線法による化学組成分析結果

試料名	化学組成分析(%)				
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	その他
原粉	50.93	29.53	8.01	4.36	7.17
分級品	53.60	28.93	6.74	3.20	7.53

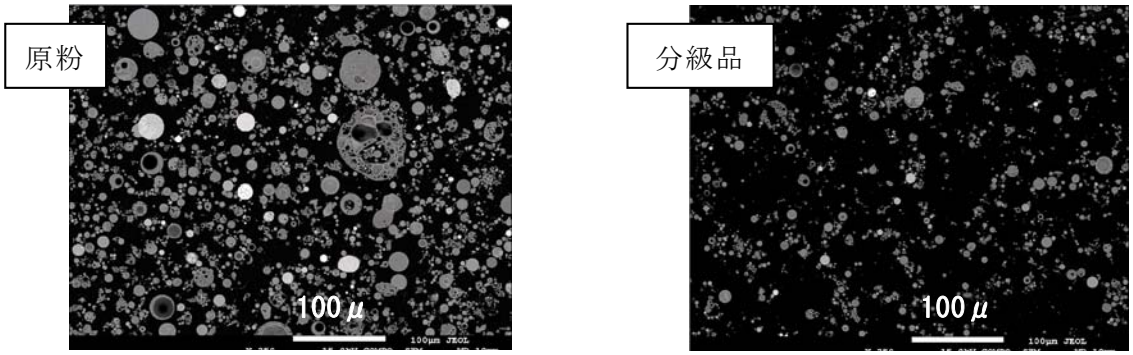
表－4.3 粉末Ｘ線回折／リートベルト解析による鉱物組成分析結果

試料名	結晶質成分(%)			ガラス質成分(%)
	石英	ムライト	その他	
原粉	5.4	26.7	2.8	65.1
分級品	5.0	20.6	1.2	73.2



(a) フライアッシュ原粉　　(b) フライアッシュ分級品

図－4.7 レーザー回折法による粒度分布測定結果



写真－4.1 走査型電子顕微鏡による反射電子像

表－4.4 分級前後の活性度指数

	材齢 28 日 (%)	材齢 91 日 (%)
原粉	83	95
分級品	91	104

4.3 フライアッシュコンクリートの各種試験結果

北陸地方の代表的な骨材を用いた試験を実際の生コンクリート工場で実施し，普通ポルトランドセメントにフライアッシュを 15%置換したコンクリート（以下，N+F）の配合を決定した。さらに，N+F の比較として，実際に出荷されている高炉セメント B 種を使用したコンクリート（以下，BB）と普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（以下，N）の配合を試験室にて製造し，各種比較試験を実施した。また，BB と同じセメント量で，普通ポルトランドセメントに高炉スラグを 42%置換したコンクリートを N+B とした。品質比較試験に使用した各骨材の配合，フライアッシュの品質，高炉スラグの品質を**表－4.5**，**表－4.6**，**表－4.7** に示す。

表－4.5 試験に使用した配合

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメント B 種，N＋B：高炉スラグ微粉末 42%置換，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

早月川産（27-8-25）

	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	高炉スラグ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	54.5	44.8	292	－	－	159	831	1044	2.92
BB	54.0	44.4	293	－	－	158	821	1050	2.93
N+B	54.0	44.4	169	－	123	159	831	1044	2.93
N+F	54.5	44.8	245	43	－	157	828	1044	2.88

庄川産（27-8-25）

	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	高炉スラグ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	54.0	44.2	286	－	－	154	814	1034	2.86
BB	51.5	42.8	297	－	－	153	782	1052	2.97
N+B	51.5	42.8	153	－	125	153	782	1052	2.97
N+F	50.0	43.5	255	45	－	150	795	1038	3.00

手取川産（27-8-25）

	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	セメント C (kg/m³)	フライアッシュ FA (kg/m³)	高炉スラグ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	54.7	44.0	285	－	－	156	802	1036	2.85
BB	53.7	43.4	287	－	－	154	789	1044	2.87
N+B	53.7	43.4	166	－	121	154	789	1044	2.87
N+F	53.3	45.8	230	40	－	144	851	1021	2.43

能登産(27-8-25)

	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	52.3	42.7	331	―	―	173	732	1024	3.31
BB	51.5	41.5	326	―	―	168	714	1051	3.59
N+B	51.5	41.5	189	―	137	168	714	1051	3.59
N+F	51.2	70.8	284	50	―	171	725	1024	3.34

九頭竜川産(24-8-25)

	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	53.9	44.2	297	―	―	160	810	1023	3.18
BB	51.0	42.5	308	―	―	157	774	1049	3.30
N+B	53.9	44.2	172	―	125	160	810	1023	3.18
N+F	51.0	43.5	253	45	―	152	799	1039	2.98

滋賀県今津産(24-8-20)

	水結合材比 W/(C+FA,B) (%)	細骨材率 s/a (%)	ｾﾒﾝﾄ C (kg/m³)	ﾌﾗｲｱｯｼｭ FA (kg/m³)	高炉ｽﾗｸﾞ B (kg/m³)	水 W (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	混和剤 ad (kg/m³)
N	53.9	43.6	304	―	―	164	822	1065	3.83
BB	51.9	42.3	310	―	―	161	796	1085	3.91
N+B	53.9	43.6	176	―	128	164	822	1065	3.83
N+F	51.9	42.6	270	48	―	165	791	1068	3.82

表－4.6 フライアッシュの品質

	JIS A6201 項目									アルカリ量(%)		
	二酸化けい素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm³)	粉末度		フロー値比(%)	活性度指数(%)		Na_2O	K_2O	R_2O (Na_2O当量)
					45μm ふるい残分 (%)	比表面積 (cm²/g)		材齢 28 日	材齢 91 日			
七尾産	53.35	0.10	2.0	2.44	0.8	4,870	106	91	99	0.32	1.24	1.14
敦賀産	67.23	<0.10	3.3	2.26	1.7	4,740	100	84	99	0.44	1.46	1.40

表－4.7 高炉スラグの品質

骨材	JIS A6206 項目										アルカリ量(%)		
	密度 (g/cm³)	比表面積 (cm²/g)	活性度指数(%)			フロー値比 (%)	酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	塩化物イオン (%)	Na_2O	K_2O	R_2O (Na_2O 当量)
			材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日								
①	2.90	4,120	73	103	108	101	5.29	1.97	0.97	0.007	0.25	0.28	0.43
②	2.90	3,940	68	98	114	102	5.26	1.99	1.04	0.006	0.22	0.23	0.37

①：富山・石川県の骨材を用いた試験に使用

②：福井県の骨材を用いた試験に使用

試験の結果，N+F の品質は BB，N+B と比べて全ての比較項目において同等もしくは効果大，N に比べて初期強度発現以外の全ての比較項目において同等もしくは効果大であることを確認した。特に，BB，N+B に対しては発熱量抑制，中性化抑止性の比較項目において，N に対しては ASR 抑制，塩化物イオン浸透抑止性の比較項目において，効果の差が顕著であった。品質比較試験結果の一覧表を**表－4.8** に示す。なお，ASR に関する試験においては，モルタルを使用している。

表－4.8 品質比較試験結果の一覧表（N+F の効果）

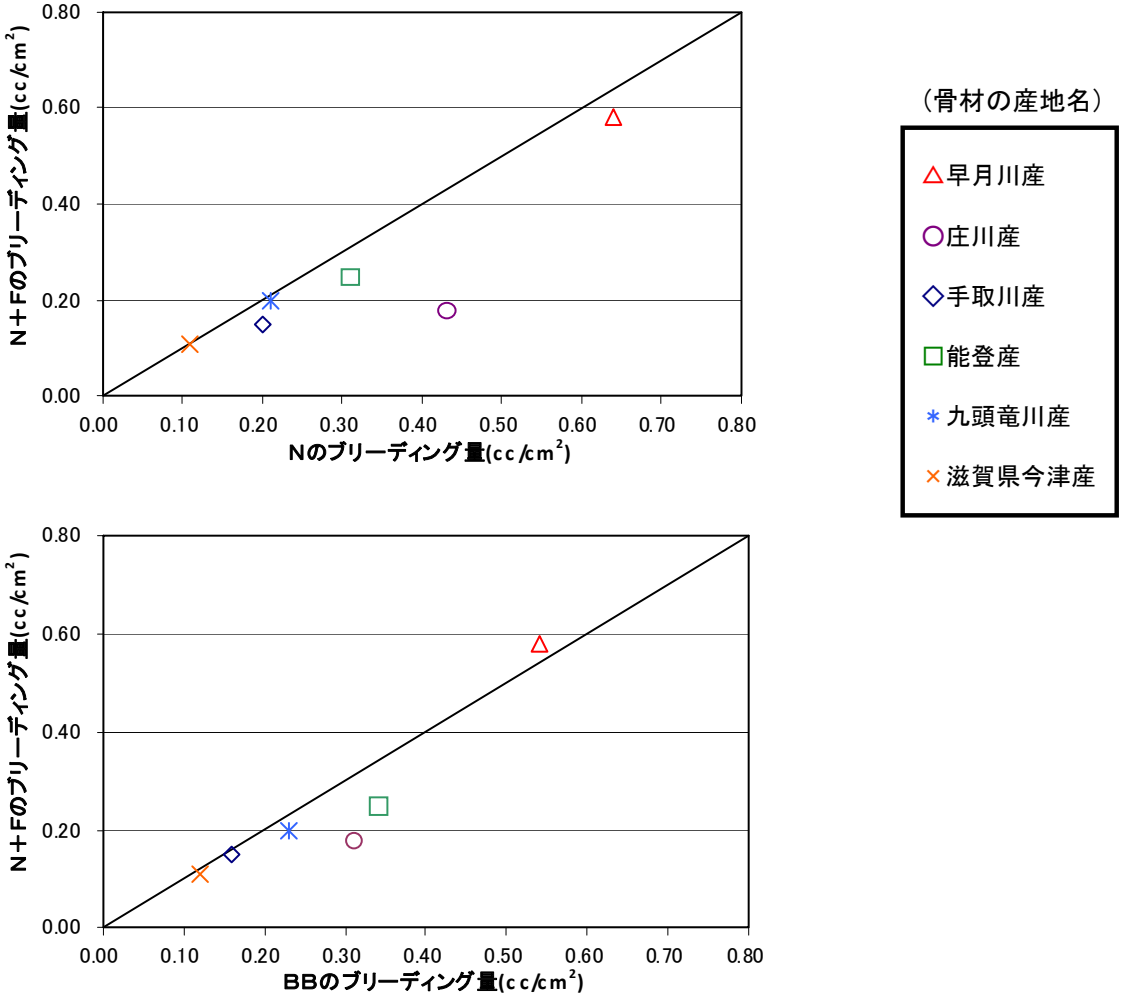
比較項目		比較対象 BB N+B	比較対象 N	主な測定項目
(1) 施工性向上		◎	◎	ブリーディング
(2)	初期強度発現	◎	△	圧縮強度
	長期強度増進	○	◎	
(3) 発熱量抑制		☆	◎	完全断熱温度上昇量
(4) 乾燥収縮抑制		◎	◎	乾燥収縮
(5) ＡＳＲ抑制		◎	☆	モルタルバー法
(6) 耐久性向上	A.透水抑性	○	○	透水量
	B.塩化物イオン浸透抑性	○	☆	塩化物イオン浸透深さ
	C.鉄筋腐食抑性	○	○	鉄筋の腐食状況
	D.凍害抵抗性	○	○	相対動弾性係数
	E.中性化抑性	☆	○	中性化深さ
	F.細孔率	○	○	細孔率

☆：効果大　◎：同等もしくは効果大　○：同等　△：効果小

(1) 施工性向上

ブリーディング試験結果を**図－4.8** に示す。図より，普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したコンクリート（N+F）のブリーディングは，普通ポルトランドセメ

ントを使用したコンクリート（N），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（BB）に比べ，同等もしくは少ない。なお，試験は，JIS A1123 に準拠し，コンクリート上面に浸み出した水をスポイトで吸い取り，水量を計測した。

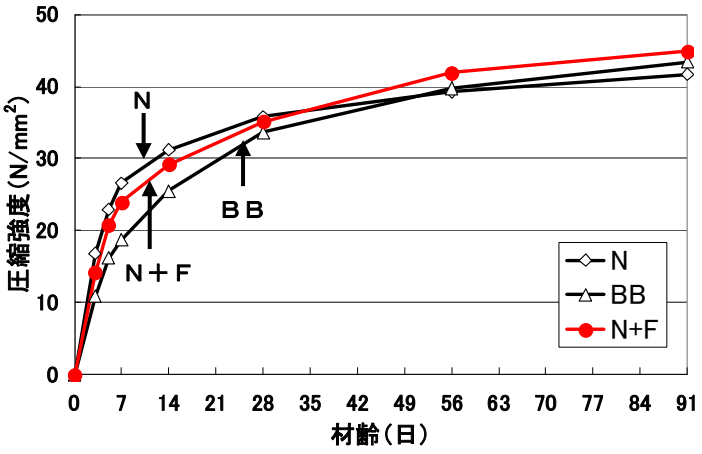


図－4.8 ブリーディング試験結果

（N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り)）

(2) 初期強度発現・長期強度増進

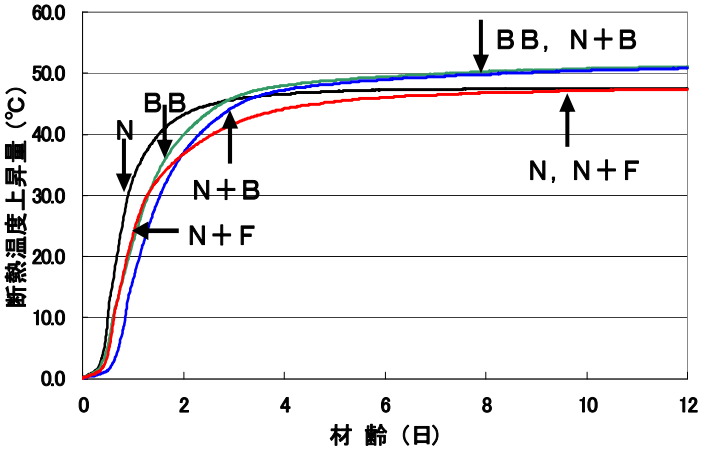
圧縮強度試験結果(各骨材の平均)を**図－4.9** に示す。図より，N+F の初期の強度発現（材齢 3 日，5 日強度）は，N より小さく，BB より大きい。また，N+F の長期強度は，材齢 56 日強度では N，BB より大きく，材齢 91 日強度ではNより大きく，BB と同等である。なお，試験は，JIS A1108 に準拠し，圧縮試験機により供試体の圧縮強度を測定した。



図－4.9 圧縮強度試験結果

(3) 発熱量抑制

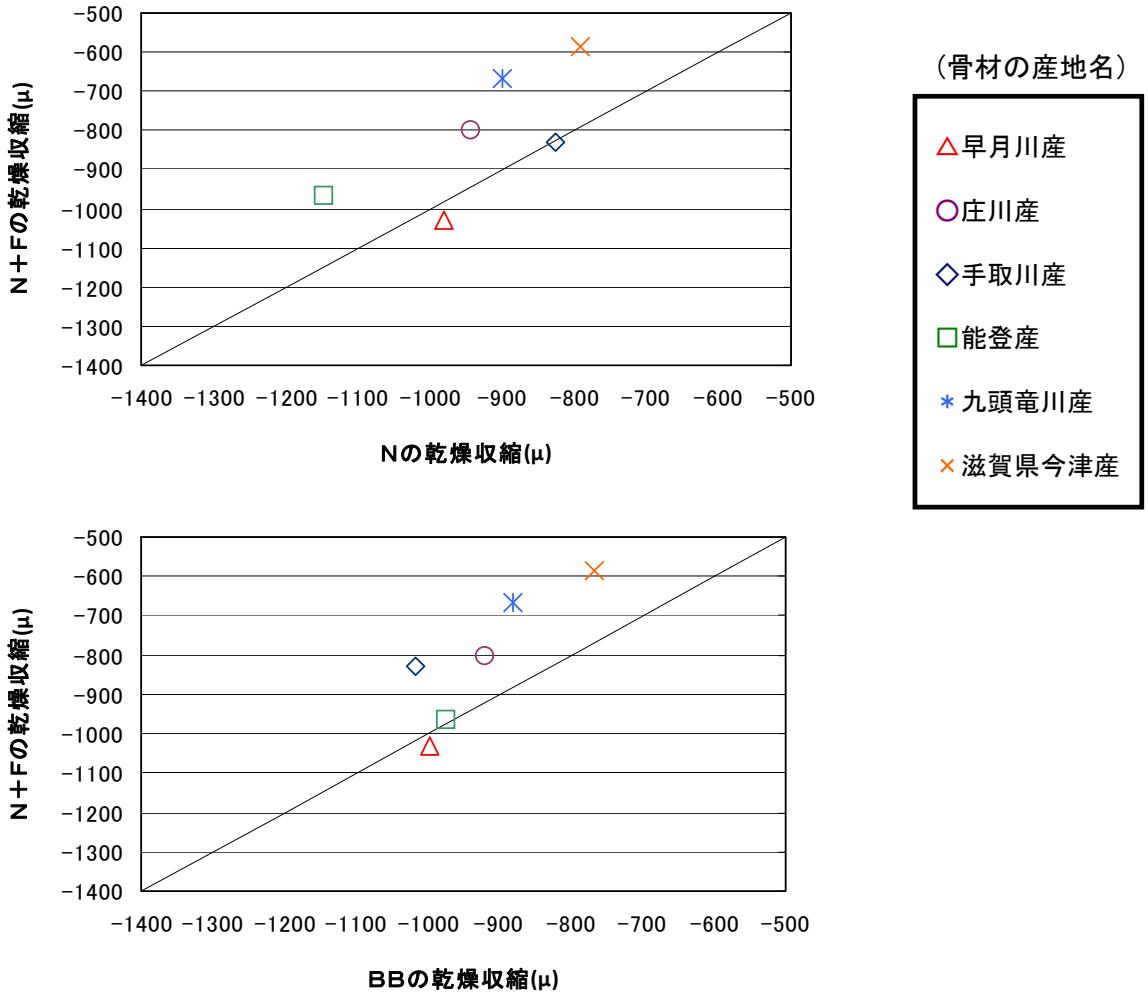
完全断熱温度上昇試験結果を**図－4.10** に示す。図より，N+F の温度上昇量（材齢 2 日以降）は，BB，N+B に比べ小さく，N+F は温度ひび割れ抑制に有効であることが示された。なお，この傾向は，簡易断熱試験や試験施工での現場計測でも同様であった。



図－4.10 完全断熱温度上昇試験結果

(4) 乾燥収縮抑制

乾燥収縮試験の結果を**図－4.11** に示す。図より，普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したコンクリート（N+F）の乾燥収縮は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（BB）に比べ，同等もしくは小さい。なお，試験は，JIS A1129-2 に準拠し，材齢 91 日までの供試体の側面の長さをコンタクトストレインゲージを用いて測定することにより，乾燥収縮ひずみを算出した。



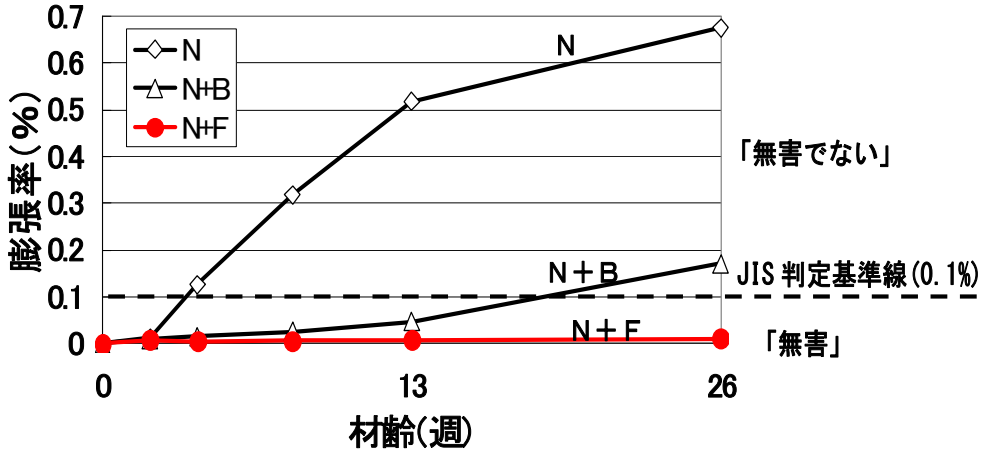
図－4.11 乾燥収縮試験結果

(N:普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントB種，N＋F:フライアッシュ 15%置換(内割り))

(5) ASR 抑制

モルタルバー法の測定結果を**図－4.12** に示す。試験は，JIS A1146（モルタルバー法）に準拠した。骨材は，北陸地方の中で最も反応性が高い常願寺川産の骨材を選定し，フライアッシュは七尾大田火力発電所産 15%を，高炉スラグは 42%をそれぞれ置換したモルタルバーを作製した。なお，JIS A1146 においては，セメントの全アルカリ量が Na_2Oeq で 1.2%となるように NaOH 水溶液を添加することとなっており，今回の試験では，混和材に含まれるアルカリ量を考慮して，アルカリ量を調整した。図より，普通ポルトランドセメントを使用したモルタル（N)，普通ポルトランドセメントに高炉スラグを置換したモルタル（N+B）では「無害でない」，普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したモルタル（N+F）では「無害」であった。従って，N+F は，北陸地方の中でも最も反応性が高い常願寺川産の骨材に対しても膨張が完全に抑制され，ＡＳＲ抑制効果が顕著であ

ることが確認された。



図－4.12 モルタルバー法の測定結果

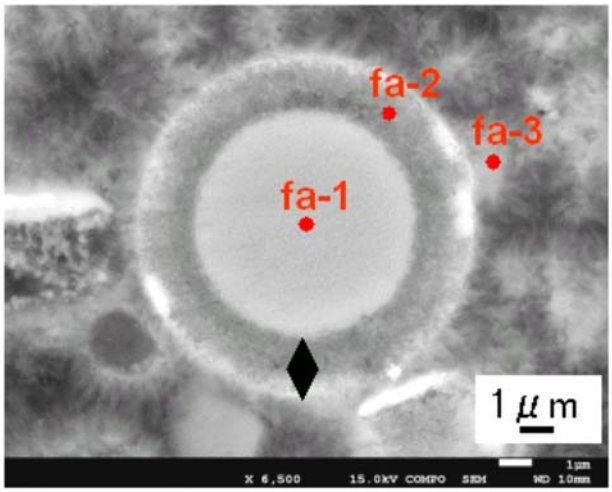
フライアッシュの混和により ASR が抑制される理由としては，従来，以下のように言われてきた。

A. セメントとの置換により，コンクリート中のアルカリ総量が減る効果

B. フライアッシュのポゾラン反応により，コンクリートが密実になる効果

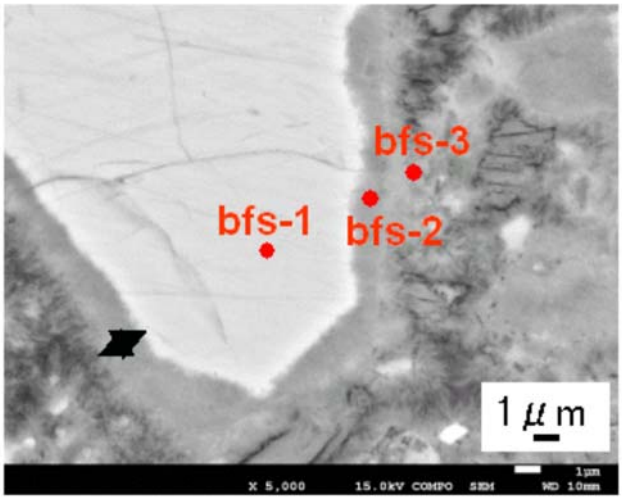
C. フライアッシュのポゾラン反応の際に,細孔溶液中のアルカリがポゾラン反応層に吸着される効果

上記のいずれが卓越するかは，不明確であるが，近年，C.に関して検証されている。**図－4.13** にフライアッシュ粒子の反応層の観察および分析結果(走査型電子顕微鏡による反射電子像およびエネルギー分散型Ｘ線分光法による分析結果)を，**図－4.14** に高炉スラグ



	fa-1	fa-2	fa-3
Ca/Si	0.05	0.88	1.64

図－4.13 フライアッシュ粒子の反応層の観察および分析結果



	bfs-1	bfs-2	bfs-3
Ca/Si	1.39	1.47	1.58

図－4.14 高炉スラグ微粉末の反応層の観察および分析結果

微粉末の反応層の観察および分析結果(走査型電子顕微鏡による反射電子像およびエネルギー分散型Ｘ線分光法による分析結果)を示す[11]。Ca/Si 比が小さいものほど，細孔溶液中のアルカリが吸着されやすいことが言われている。

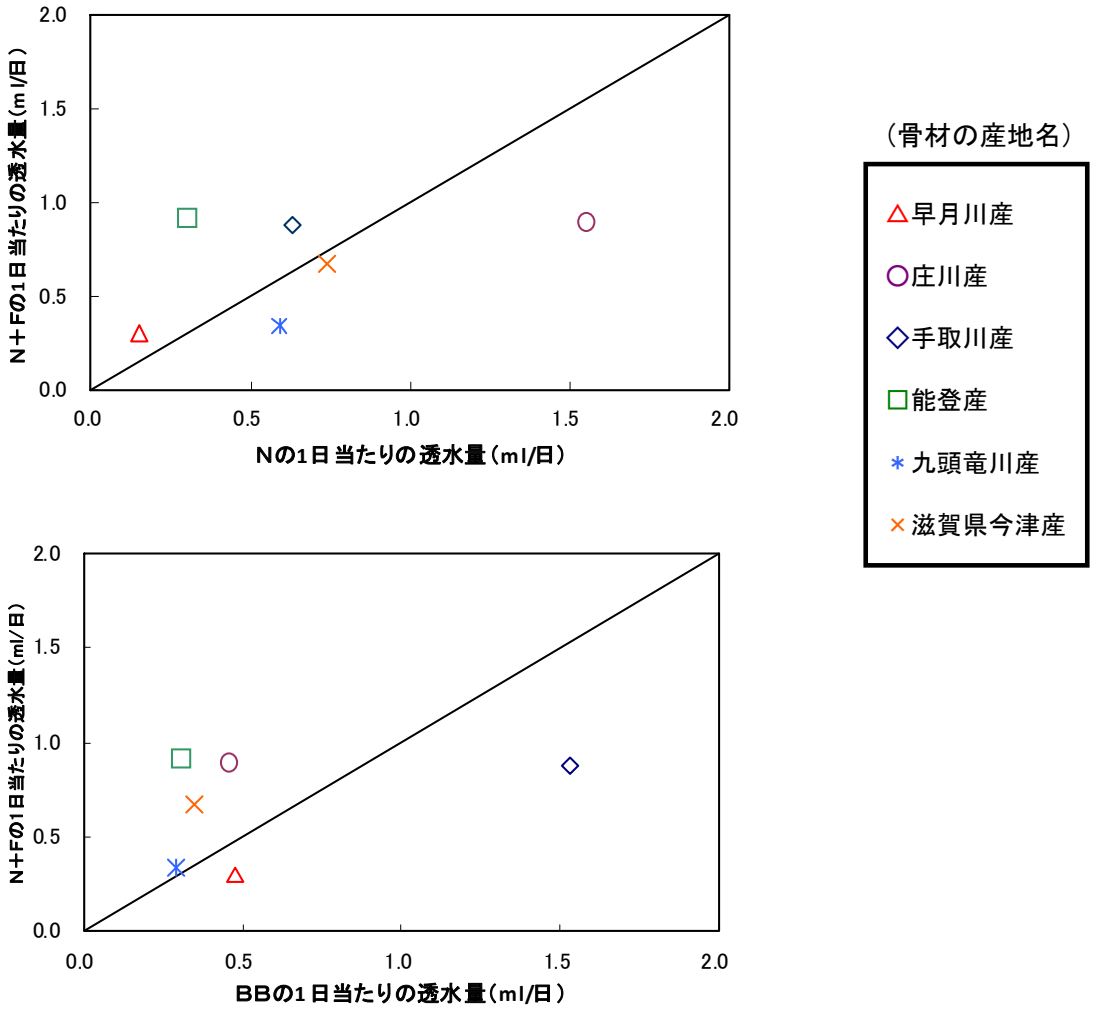
図－4.13 および**図－4.14** に示した通り，フライアッシュの反応層の Ca/Si 比は 0.88 であり，高炉スラグ微粉末の反応層の Ca/Si 比 1.47 に比べて小さく，細孔溶液中のアルカリを吸着し，OH-濃度を下げる効果が高いことが推察される。すなわち，フライアッシュの方が高炉スラグ微粉末よりも ASR 膨張を抑制している理由は，このためであると考えられる。

また，比表面積が大きいフライアッシュは，ASR 抑制効果が高いことは，多くの既往の研究でも示されており[12),13)]，さらに近年では，4μm 以下の微細な粒子の反応性が高いことが示されている[14)]。北陸地方産の分級フライアッシュの平均粒径は，7μm 程度であり，ASR 抑制効果が高いことが裏付けされていると言える。従って，七尾大田火力発電所産および敦賀火力発電所産のフライアッシュ分級品を使用する場合には，フライアッシュの置換率の標準値を 15%と決定した。

(6) 耐久性向上

A. 透水抑制

透水量の測定結果を**図－4.15** に示す。図より，普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したコンクリート（N+F）の透水抑止性は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（BB）と比べ同等である。なお，試験は，上面および底面以外をエポキシ樹脂にて被覆した材齢 91 日以降の角柱供試体(100mm×100mm×100mm)の上面に漏斗を載せて水を満たし，透水量を測定した。

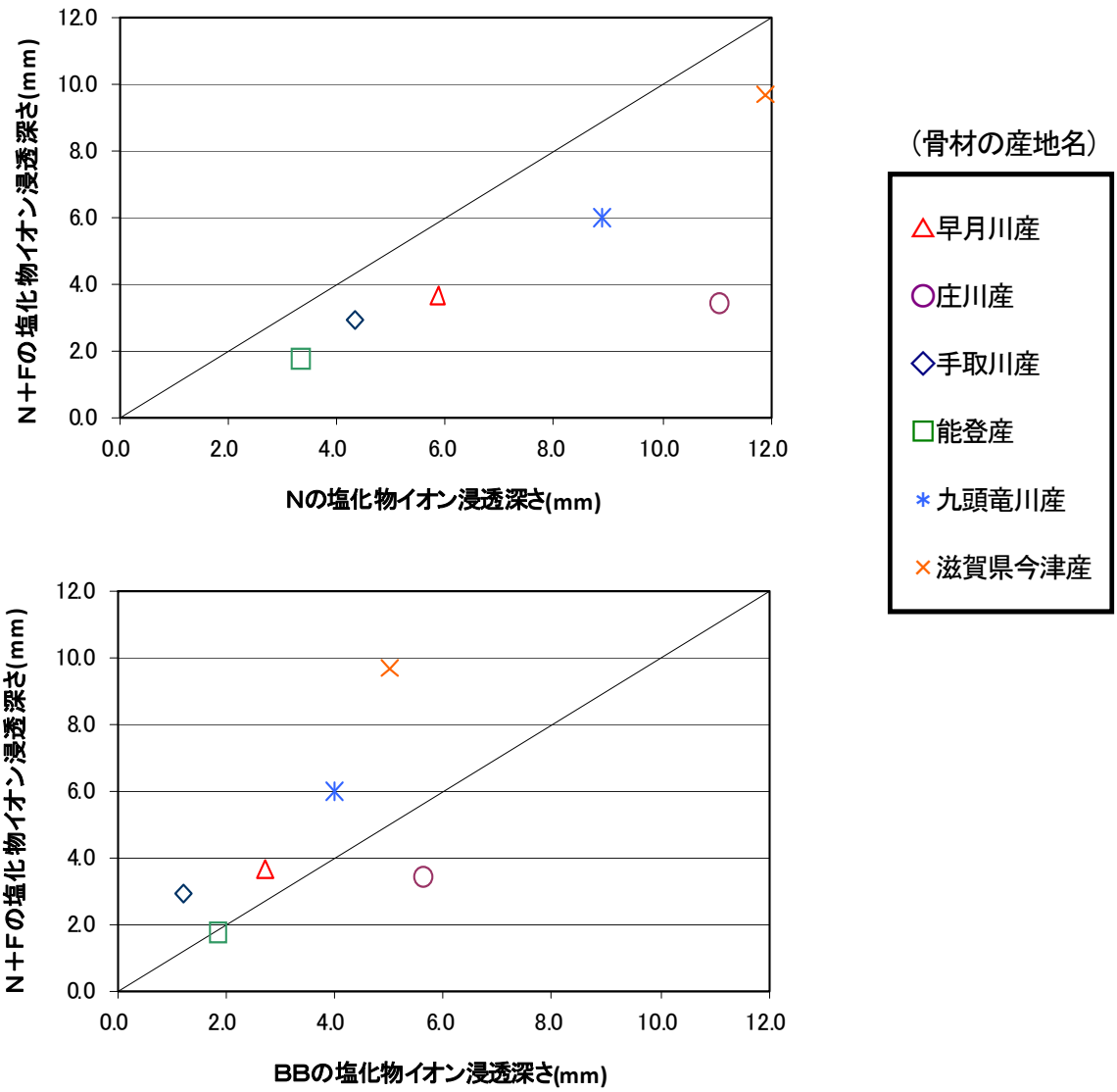


図－4.15 透水量の測定結果

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換）

B. 塩化物イオン浸透抑制

塩化物イオン浸透深さの測定結果を**図－4.16** に示す。図より、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したコンクリート（N+F）の塩化物イオン浸透深さは，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N）よりも小さく，高炉セメントＢ種を使用したコンクリート（BB）と同等である。なお，試験は，塩水に浸漬した供試体の Cl-浸透深さを測定した。供試体は材齢 91 日以降の供試体を使用し，暴露面以外はエポキシ樹脂にて被覆し，3%NaCl 溶液に 91 日間浸漬し，暴露後，エポキシ樹脂をはがし，断面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧し，発色法により塩化物イオンの浸透深さを測定した。

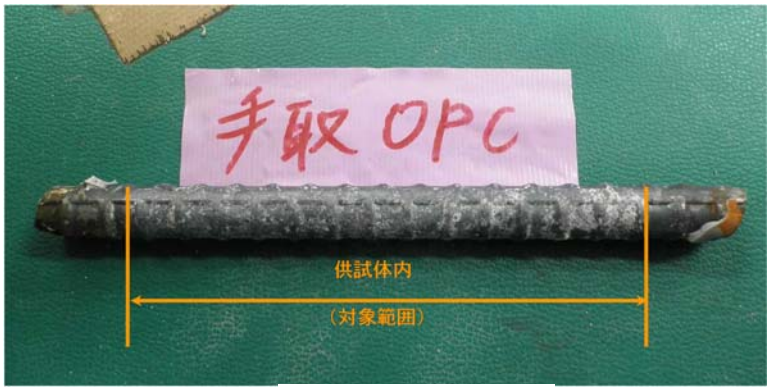


図－4.16 塩化物イオン浸透深さの測定結果

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｆ:フライアッシュ 15%置換）

C. 鉄筋腐食抑制

鉄筋の腐食状況（暴露 91 日経過）の一例を**写真－4.2** に示す。写真より，いずれも 91 日経過時点では腐食に至っていないことが確認できる（写真の端部の腐食は対象範囲外）。なお，供試体は材齢 91 日以降の供試体を使用し，温度 40℃、3%NaCl 水溶液に 12 時間浸漬、温度 40℃、RH60%以下で 72 時間乾燥を繰り返し，その後，供試体を割裂し，鉄筋の腐食状況を観察した。



(a)　N

(b)　N＋F

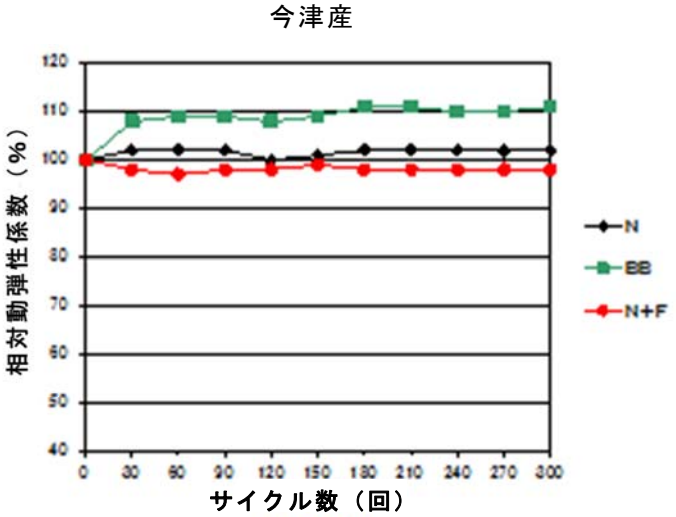
(c)　ＢＢ

写真－4.2 鉄筋の腐食状況（手取川産）

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

D. 凍害抵抗性

相対動弾性係数の測定結果の一例を**図－4.17** に示す。図より，凍害抵抗性に対する限界値である相対動弾性係数 60%を満足している。なお，試験は，JIS A1148（B 法）に準拠し，凍結と融解を 300 サイクルに亘り行った供試体（100mm×100mm×400mm）の相対動弾性係数を測定し，凍害抵抗性を評価した。

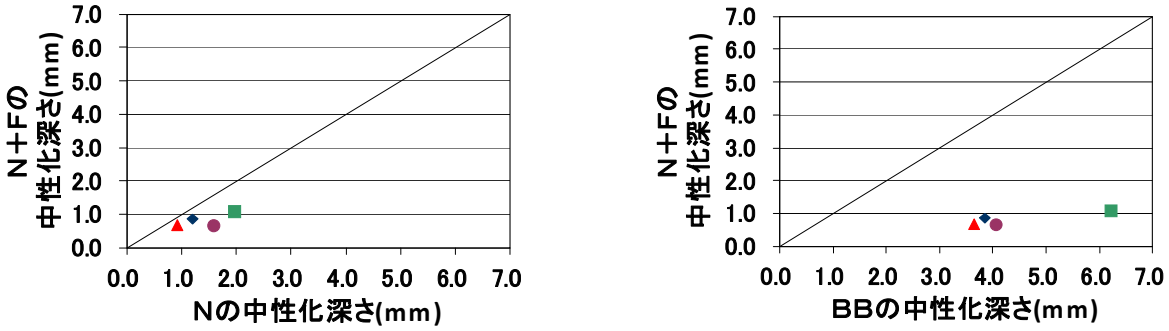


図－4.17 相対動弾性係数の測定結果（今津産）

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメントＢ種，Ｎ＋Ｆ：フライアッシュ 15%置換）

E. 中性化抑止性

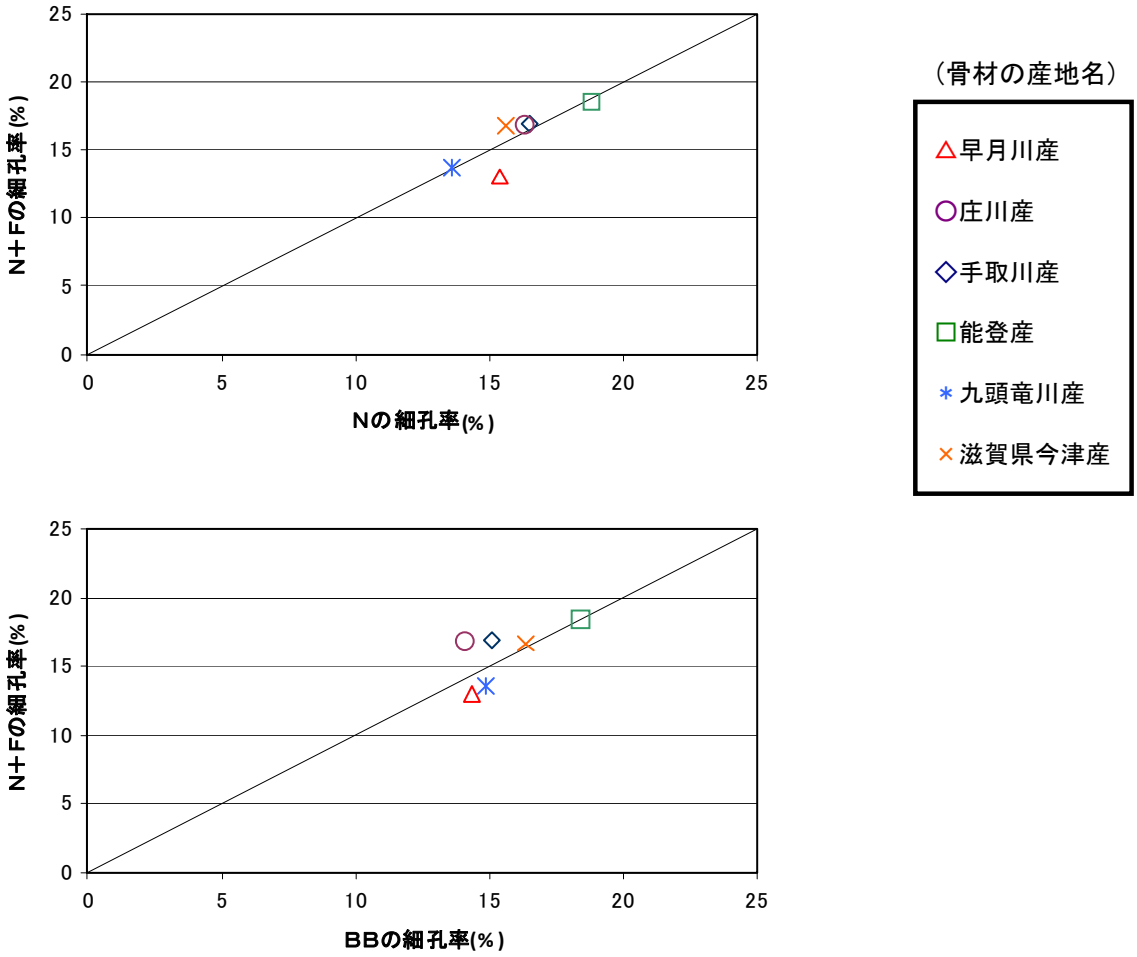
４種類の骨材を使用した中性化深さの測定結果を**図－4.18** に示す。試験には材齢 91 日以降の供試体を使用し，暴露面以外はエポキシ樹脂にて被覆後，JIS A1153 に準拠し，温度 20℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5%の条件下に 91 日間静置した。図より，N+F の中性化深さは，N，BB よりも小さいことが示された。従来，フライアッシュを置換したコンクリートは中性化速度が大きいと報告されることがあるが [9]，それは材齢 28 日から促進試験を開始したために，フライアッシュのポゾラン反応が十分に進んでいない段階で中性化試験を実施したことが理由として考えられる。今回の試験では，実際に中性化が進む段階では，ある程度の年数が必要なことを考慮し，水中養生 91 日後に促進を開始したことにより，フライアッシュのポゾラン反応が十分に進み，組織が緻密化されたことが N+F の中性化深さが小さかった理由と考えられた。



図－4.18 中性化深さ測定結果

F. 細孔率

細孔率を**図－4.19** に示す。普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したコンクリート（N+F）の細孔率は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート（N），高炉セメント B 種を使用したコンクリート（BB）と同等である。なお，試験は，水銀圧入式ポロシメータにより，材齢 91 日のコンクリート供試体の空隙分布を測定した。



図－4.19 細孔率

（N：普通ポルトランドセメント，BB:高炉セメント B 種，N＋F：フライアッシュ 15%置換）

4.4 まとめ

本章では，コンクリート用フライアッシュの JIS 規格項目（JIS A6201）について，七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所の品質管理データの分析を行うとともに，炭種や燃焼条件が同じになるように，同一サンプルを用いた分級効果確認試験を実施し，これらの結果を総合的に評価することにより，北陸地方産フライアッシュの品質を検証した。その結果，北陸地方産分級フライアッシュの品質は，硬化コンクリートの耐久性に関わる粉末度，活性度指数の 2 項目において，明確な品質の向上が認められるとともに，フラッシュコンクリートの流動性に関わる密度，フロー値比のバラツキが小さく品質の安定が認められ，

従来よりも高品質なフライアッシュになっていることを検証できた。

また，汎用コンクリートとの各種比較試験（室内試験）を実施し，北陸地方産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性について検証した。その結果，北陸地方産分級フライアッシュを使用したコンクリートの品質は高炉セメントを使用したコンクリートと比べて全ての比較項目において同等もしくは効果大，普通セメントを使用したコンクリートに比べて初期強度発現以外の全ての比較項目において同等もしくは効果大であることを確認した。特に，高炉セメントを使用したコンクリートに対しては発熱量抑制，中性化抑止性の比較項目において，普通セメントを使用したコンクリートに対しては ASR 抑制，塩化物イオン浸透抑止性の比較項目において，効果が顕著であった。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 分級装置を原粉＋1000 cm^2/g を目標として運用することで，北陸地方産フライアッシュの比表面積は，JIS Ⅰ種の最低値 5000 cm^2/g と同等の高品質となっている。

(2) フライアッシュ分級品の方がフライアッシュ原粉よりも SiO_2 量の割合およびガラス質成分の割合が高くなっていることから，分級によってフライアッシュのポゾラン反応性が高くなっていることを実証している。

(3) フライアッシュ原粉の比表面積を 1000 cm^2/g 程度高くすることにより，フライアッシュ分級品の粒径はフライアッシュ原粉の粒径の約 1/3 になることが確認できた。

(4) 分級により粒子の大きなものがなくなるとともに，角張った粒子，中空の粒子が少なくなり，細かく均等な球形の粒子が多くなっていることから，フレッシュコンクリートの流動性をも改善されていることを示唆している。

(5) フライアッシュの反応層の Ca/Si 比は 0.88 であり，高炉スラグ微粉末の反応層の Ca/Si 比 1.47 に比べて小さく，細孔溶液中のアルカリを吸着し，OH^-濃度を下げる効果が高いことが推察される。すなわち，フライアッシュの方が高炉スラグ微粉末よりも ASR 膨張を抑制している理由は，このためであると考えられる。

(6) 北陸地方産の分級フライアッシュの平均粒径は，7μm 程度と小さく，ASR 抑制効果が高いことから，七尾大田火力発電所産および敦賀火力発電所産のフライアッシュ分級品を使用する場合には，フライアッシュの置換率は，15%で十分であることが確認できた。

【参考文献】

1）久保哲司，参納千夏男，蟹谷真生，鳥居和之 ：フライアッシュコンクリートの社会実装を目的とした技術開発―北陸地方での経緯と実績―，コンクリート工学，Vol.53, No.9, pp.914-919, 2016.

2）K.Torii, T.Kubo, C.Sannoh, M.Kanitani : The Alkali-Silica Reactivity of Andesitic River Aggregate and ASR Mitigation Effect by Using Fine Fly Ashes, Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Sao Paulo, CD-ROM 9 pages, 2016.

3）K.Torii, T.Hashimoto, T.Kubo, C.Sannoh : The Alkali-Silica Reactivity of Volcanic Aggregate

and its Preventive Measure Using Fine Fly Ash, Proceedings of the 14th International Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-14), Ho Chi Minh, pp.310-318, 2016.

4）久保哲司，参納千夏男，蟹谷真生：北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの標準化に向けた取組みー「ASR 解決」の視点からー，電力土木, No.380, pp.115-119, 2015.

5）伊藤始，大橋真輝，蟹谷真生，久保哲司：フライアッシュを添加したコンクリートの物質透過性の検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.147-152, 2016.

6）田端辰伍，宮里心一，橋本徹，久保哲司，参納千夏男：北陸産分級フライアッシュを用いたコンクリートの実用化研究，材料, Vol.63, pp.702-709, 2014.

7）星野清一，平尾宙，山田一夫：非晶質混和材を含むセメントの鉱物の定量におけるX線回折／リートベルト法の適用，セメント･コンクリート論文集, No.59, pp.14-21, 2005.

8）山本武志，金津努：フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度メカニズムの実験的考察，土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.52-65, 2007.

9）社団法人日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007.

10）内川浩，宇智田俊一郎，羽原俊祐：セメント用混合材（スラグ，フライアッシュ，シリカフューム，もみ殻灰）中の非晶質相の構造とその水和反応性，セメント技術年報, No.39, pp.36-40, 1985.

11）広野真一，鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構，セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.499-506, 2012.

12）山本武志，金津努：API 法によるフライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果の評価，土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.657-671, 2006.

13）川端雄一郎，松下博通：アルカリシリカ反応抑制の観点からのフライアッシュの品質評価に関する研究，土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.379-395, 2007.

14）岸森智佳，扇嘉史，細川佳史，平尾宙：粒子解析によるフライアッシュの反応性評価，セメント・コンクリート論文集, No.68, pp.61-67, 2014.

第５章　火力発電所建設工事におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策

5.1 概　説

5.1.1 富山新港火力発電所 LNG1 号機建設工事の概要

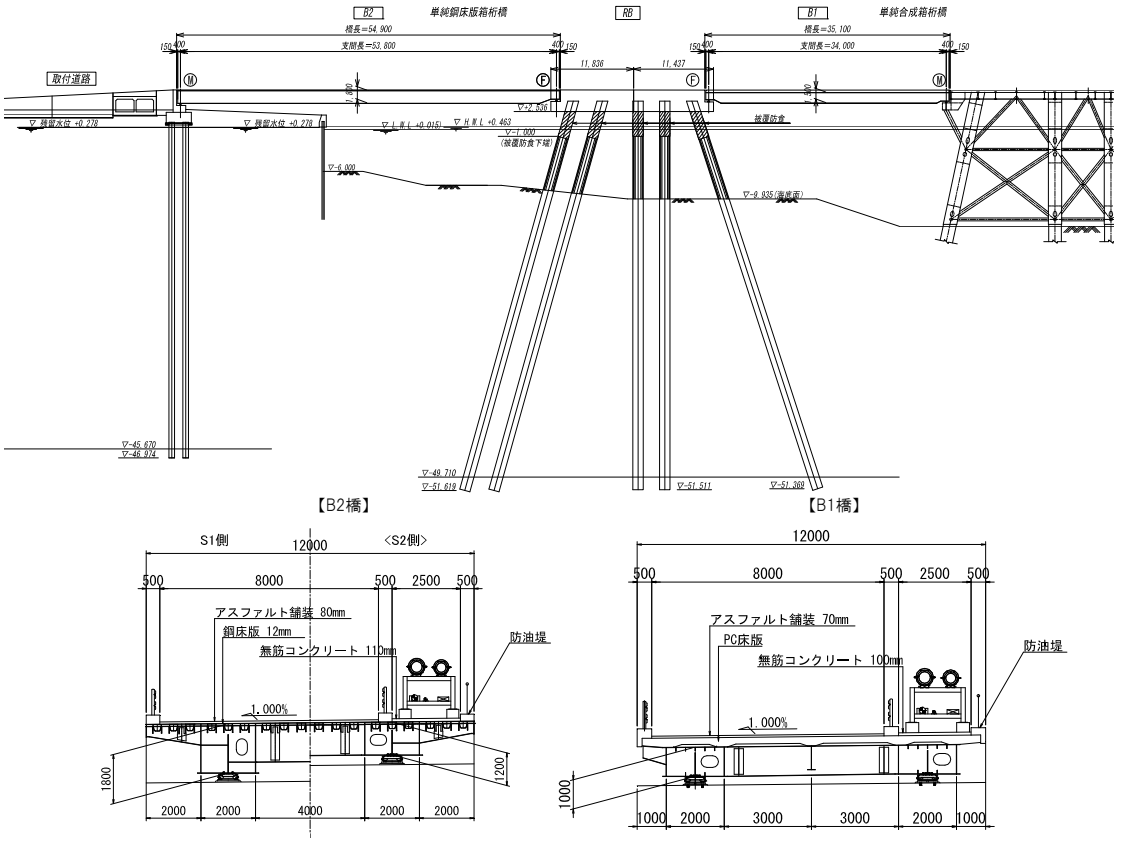
北陸電力㈱は，一層のエネルギーの多様化と低炭素社会の実現に向けて，火力発電設備の高効率化や再生可能エネルギーの導入拡大に取組んでいる。その一環として，昭和 46 年の運転開始以来，約 40 年が経過しており，新鋭石炭火力に比べ熱効率が劣り，運用性が悪い，富山新港火力発電所石炭 1 号機を廃止し，LNG を燃料としたコンバインドサイクル発電設備からなる,富山新港火力発電所 LNG1 号機へ,リプレースする計画である [1)]。

主要な土木工事は，(1)LNG バース工事，(2)LNG タンク工事，(3)復水器冷却水設備工事である。

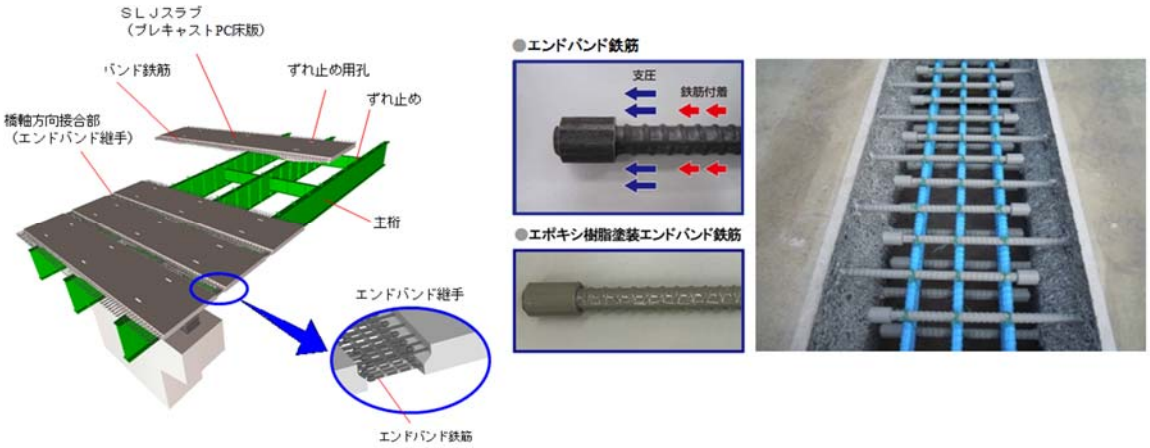
(1) LNG バース工事

LNG バースは,15 万 m³級 LNG 船に加え既設発電所燃料用の油タンカーを対象として，複合桟橋（全長 450m）とし，下部工には，ジャケット式と組杭式を採用している。

LNG バースと岸壁は,維持管理橋で接続して,冬季の厳しい海象条件に左右されずに機器類をメンテナンスできる設備配置とした。維持管理橋は，下部工を単純鋼桁橋とし，上部工には，耐久性に優れるプレキャスト PC 床版を採用している。**図－5.1** に維持管理橋断面図，**図－5.2** にプレキャスト PC 床版概要図を示す。



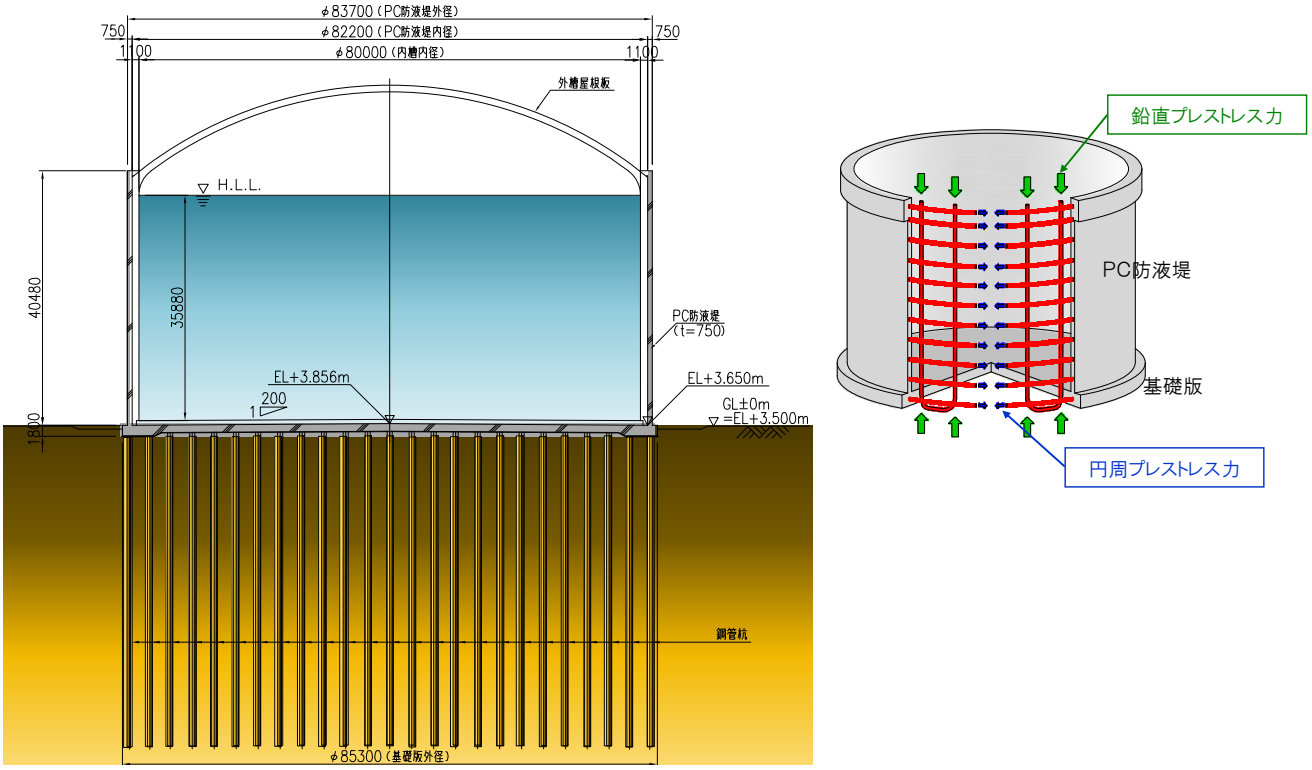
図－5.1 維持管理橋断面図



図－5.2 プレキャスト PC 床版概要図

(2) LNG タンク工事

LNG タンクの一般構造図を**図－5.3** に示す。PC 地上式を採用し，内径 80.0m，高さ 54.129m で，低温鋼材を用いた内槽鋼板と外槽鋼板との間にグラスウールと粒状パーライトを主体とした保冷材を充填した金属二重殻とし，さらに，万一の漏液時にも外部へ影響を及ぼさないように外槽鋼板の廻りをプレストレスコンクリートの防油堤で囲む構造となっている。基礎版および防油提の規模，形状からコンクリートの温度ひび割れが懸念され，所定のひび割れ指数（1.85）を満足するために，低熱ポルトランドセメントを採用する計画である。また，基礎版のコンクリート打設には，昼夜連続打設を計画し，防油提は，高さ約 40m を 13 リフトに分割しクライミング型枠工法による構築を計画している。



図－5.3 LNG タンクの一般構造図

(3) 復水器冷却水設備工事

復水器冷却水設備は，鉄筋コンクリート造の取水口，取水路，取水庭，放水槽，放水路，放水口と溶接鋼管造の循環水管からなる。冷却水取水量は，既設発電所の 8.50m^3/s から 9.06m^3/s に増量となるが，取水口，取水路の約 9 割，放水口については，水路の通水能力に問題なく,健全性についても確認できたことから,既設設備を流用することとしている。

5.1.2 アルカリシリカ反応抑制対策

北陸地方においては，これまで ASR に関して反応性骨材の特徴や反応性などが詳細に調査され，ASR の発生実態がかなり把握されてきている [2),3)]。また，ASR 抑制対策として JIS A5308「レディーミクストコンクリート」に推奨されているアルカリ総量(3kg/m^3 以下)を順守した場合でも，反応性が高い骨材を使用した場合や外部環境から供給されるアルカリの影響がある場合には，ASR が発生する恐れがあることから，北陸地方ではフライアッシュの使用が提案されている [4)]。一方，国内では JR 東日本は，既に独自に，化学法とモルタルバー法の基準を設定し,「準有害」と判定された場合には,「アルカリ総量を 2.2kg/m^3 に規制する対策もしくは混合セメント等による対策」を適用している [5)]。さらに，海外では，構造物の重要度と使用・環境条件に応じて，アルカリ総量を規制した上でさらに，フライアッシュ等を混和する規定が運用されている事例もある [6)]。これらの状況を鑑みれば，ASR が発生する恐れがある場合には,JIS による基準を満足させるだけでは不十分であり，使用材料や環境条件を考慮した個別の対応がさらに必要であると言える。今回，富山県の火力発電所の建設工事で使用される生コンクリートプラントの砂が，化学法(JIS A1145)では「無害」と判定されているが，同地方の砂は骨材からのアルカリが溶出する影響が指摘されていたこと [7)]，建設計画には高強度の配合の構造物があること，使用・環境条件が沿岸部で飛来塩分の影響があること等から，砂の反応性を詳細に調査し対策を検討する必要があると考えられた。そこで本章では，これらの砂の岩石学的調査および化学法と促進モルタルバー法(ASTM C1260)による反応性の評価を行った。反応性の評価に際しては，促進モルタルバー法による促進養生後の試料を用いて ASR ゲル生成状況とひび割れ発生状況の観察を行い，砂が起因する ASR に関していくつかの考察を加えた。さらに，評価結果を踏まえたより厳しい ASR 抑制対策の考え方を本建設工事において適用した [8)]。

また，北陸地方では，ASR や塩害による早期劣化に対するフライアッシュコンクリートの有効性が実証され，プレキャスト PC 桁や PC 床版の実橋への適用が進んでいる [9)]。本建設工事においても LNG 船着岸桟橋工事でプレキャスト PC 床版を適用した。一方，プレキャスト PC 床版を接合する間詰め部や端部の場所打ちコンクリートは，海水や凍結防止剤の侵入路になる接合面の隙間やひび割れの発生を防止する目的で，膨張材を用いた収縮補償コンクリートを使用することが規定されている。わが国の膨張材には，石灰系とカルシウムサルファアルミネート系の 2 種類があるが，更新事業では石灰系のものが多く使用されている。石灰系の膨張材は，膨張材の初期水和反応により $Ca(OH)_2$ を生成し，それらがコンクリート中に残存するが，$Ca(OH)_2$ が ASR 膨張に及ぼす影響に関しては様々な見解がある [10)]。そこで本章では，富山県常願寺川産の川砂および川砂利を使用した収縮補償コンクリートの ASR による膨張挙動を調べるとともに，フライアッシュの混和による ASR 抑制効果とそのメカニズムについて実験的に検討した [11)]。

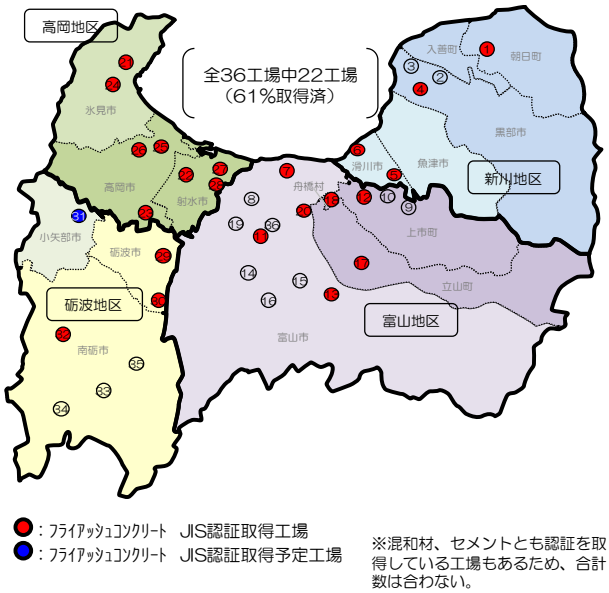
5.2 当該地方の砂の岩種判定

5.2.1 使用する砂

富山県では河川産骨材がコンクリート用骨材として長年にわたり使用されており，一部の構造物では鉄筋破断やコンクリートの脆弱化などの深刻な ASR による劣化が報告されている [12]。金沢大学で調査した富山県における ASR 劣化橋梁と安山岩・流紋岩の分布図を**図－5.4**[13]に示す。各河川の中上流域に安山岩類が分布し，庄川と小矢部川の上流域に流紋岩類が分布している。また，常願寺川や神通川，庄川の流域エリアで ASR 発生が多くみられる傾向がある。建設地点は富山県の射水市にあり，神通川と庄川の間の富山湾に面している。

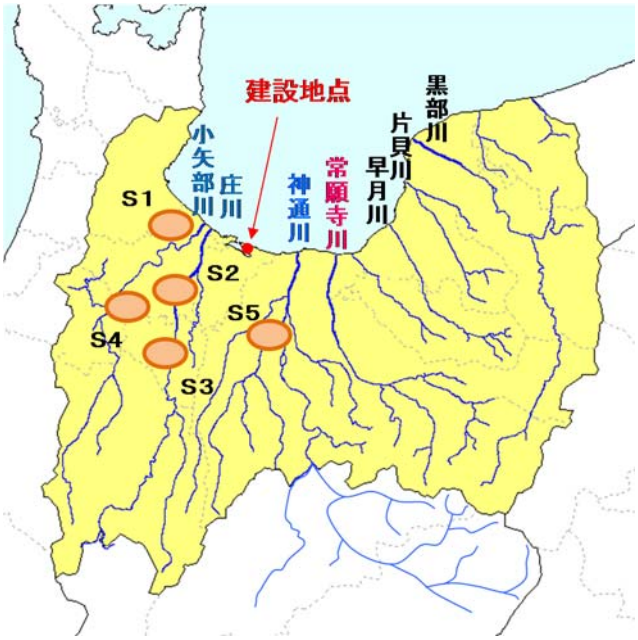
図－5.4 富山県における ASR 劣化橋梁と安山岩・流紋岩の分布図

富山県では,「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会（委員長：金沢大学鳥居教授）」の取組み [14]により，多くの生コンクリート工場でフライアッシュコンクリートのＪＩＳ認証取得が進んでおり，建設工事に生コンクリートを供給する高岡地区の８プラントも全てＪＩＳ認証を取得している（**図－5.5** 参照）。



図－5.5 ﾌﾗｲｱｯｼｭｺﾝｸﾘｰﾄの JIS 認証取得状況図

高岡地区８プラントは，**図－5.6** に示す５地点から砂を採取している。小矢部川産・庄川産・神通川産の骨材は，化学法で「無害」の判定であり，ASR 抑制対策としては，「無害」骨材の使用を適用すれば十分と考えられていた。



図－5.6 砂の採取地点図

5.2.2 試験方法

生コンクリートプラントで使用されている砂５種類(S1～S5 と呼ぶ)をそれぞれエポキシ樹脂で固めた後，20mm×20mm 程度のチップを切り出し，薄片試料（厚さ：20μm）を作製し，偏光顕微鏡により，砂を構成する岩石や鉱物を確認した。この際，特に ASR を生じる可能性のある岩石（安山岩，流紋岩質溶結凝灰岩，チャートなど）に着目した。岩石や鉱物の構成割合は，間隔 0.5mm，測定点数 300 点のポイントカウンティングにより求めた。

5.2.3 試験結果および考察

砂の岩種判定の結果を**表－5.1** に，偏光顕微鏡による薄片観察の一部(S4 および S5)を**写真－5.1** に示す。

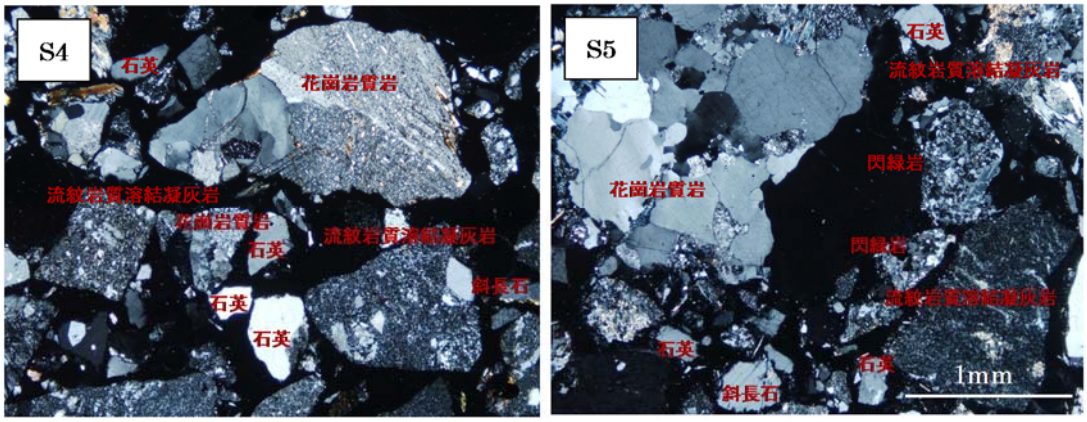
S1 の主岩種は ASR 反応性を示さない花崗岩質岩を起源とする岩片と結晶破片ならびに貝殻片であった。海に近い場所で採取された陸砂であるため，貝殻片が多く含まれていたものと推測される。ASR 反応性を示す流紋岩質溶結凝灰岩，安山岩，チャートなどの岩片の量比は少量であり，その影響は限定的なものと考えられた。S2 には，高い ASR 反応性を示す安山岩などの粒子は少なかったが，遅延膨張性の流紋岩質溶結凝灰岩と隠微晶質石英を含むチャート，珪長岩などの岩片が比較的多く含まれていた。また，S2 が採取される水系の流紋岩質溶結凝灰岩はコンクリート中でアルカリを溶出する可能性が指摘されており [7]，ASR 対策の要否と内容について再検討すべきであると考えられた。S3 は，S2 と同

じ水系の下流で採取されている川砂であり，その岩種構成は S2 と類似していた。S4 は，S2 および S3 と水系は異なるが，水源が近いためその岩種構成は S2 および S3 と類似していた。S5 には，高い ASR 反応性を示す安山岩などの粒子は少なかったが，流紋岩質溶結凝灰岩，チャート，黒雲母ホルンフェルス，頁岩，雲母片岩などの岩片が比較的多く含まれていた。S2,S3,S4,S5 は，安山岩と流紋岩質溶結凝灰岩を合わせた含有率がペシマム条件に相当している恐れがあり，促進モルタルバー法により ASR 反応性を確認して使用するなどの注意が必要であると考えられた[15)]。

表－5.1 砂の岩種類判定の結果

砂の記号	種別	岩石又は鉱物	量比(Vol.%)	主要な構成鉱物（概ね構成量比の多いものから順に記載）
S1（陸砂）	岩片	花崗岩質	24	石英，斜長石，カリ長石，黒雲母，白雲母
		流紋岩質溶結凝灰岩	6	隠微晶質石英*，石英，斜長石，カリ長石，緑泥石，絹雲母
		安山岩	2	斜長石，クリストバライト*，トリディマイト*，ガラス*，輝石，不透明鉱物
		砂岩	2	石英，斜長石，イライト，緑泥石
		頁岩	1	石英，斜長石，白雲母，イライト，緑泥石，隠微晶質石英*
		チャート	3	隠微晶質石英*，石英
	結晶片		41	石英，斜長石，カリ長石ほか
	貝殻片		21	方解石，アラゴナイト
S2（庄川上流産）	岩片	花崗岩質	13	石英，斜長石，カリ長石，黒雲母
		閃緑岩	9	斜長石，角閃石，黒雲母
		珪長岩	3	石英，隠微晶質石英*，カリ長石，斜長石
		流紋岩質溶結凝灰岩	35	隠微晶質石英*，石英，斜長石，カリ長石，緑泥石，絹雲母
		安山岩	2	斜長石，ガラス*，輝石，クリストバライト*，トリディマイト*，不透明鉱物
		砂岩	5	石英，斜長石，カリ長石，イライト，緑泥石
		頁岩	2	イライト，緑泥石，石英，隠微晶質石英*，斜長石
		チャート	2	隠微晶質石英*，石英，イライト，緑泥石
		黒雲母岩ホルンフェルス	1	石英，斜長石，隠微晶質石英*，黒雲母，白雲母
	結晶片		28	石英，斜長石，カリ長石ほか
S3（庄川下流産）	岩片	花崗岩質	22	石英，斜長石，カリ長石，黒雲母，緑泥石，白雲母
		閃緑岩	9	斜長石，角閃石，緑泥石，緑れん石
		珪長岩	2	石英，隠微晶質石英*，カリ長石，斜長石
		流紋岩質溶結凝灰岩	41	隠微晶質石英*，石英，斜長石，カリ長石，緑泥石，絹雲母
		安山岩	3	斜長石，ガラス*，輝石，クリストバライト*，トリディマイト*，不透明鉱物
		砂岩	3	石英，斜長石，イライト，緑泥石
		チャート	2	隠微晶質石英*，石英
	結晶片		18	石英，斜長石，カリ長石ほか
S4（小矢部川産）	岩片	花崗岩質	19	石英，斜長石，カリ長石，緑泥石，黒雲母
		閃緑岩	10	斜長石，角閃石，黒雲母，不透明鉱物
		珪長岩	4	石英，隠微晶質石英*，カリ長石，斜長石
		流紋岩質溶結凝灰岩	32	隠微晶質石英*，石英，斜長石，カリ長石，緑泥石，絹雲母
		安山岩	4	斜長石，輝石，ガラス*，クリストバライト*，トリディマイト*，不透明鉱物
		頁岩	3	石英，斜長石，白雲母，イライト，緑泥石，隠微晶質石英*
		チャート	4	隠微晶質石英*，石英
	結晶片		24	石英，斜長石，カリ長石ほか
S5（神通川産）	岩片	花崗岩質	26	石英，斜長石，カリ長石，黒雲母，緑泥石
		閃緑岩	9	斜長石，角閃石，輝石，黒雲母，石英，不透明鉱物
		流紋岩質溶結凝灰岩	19	隠微晶質石英*，石英，斜長石，カリ長石，緑泥石，絹雲母
		安山岩	2	斜長石，ガラス*，クリストバライト*，トリディマイト*，輝石，不透明鉱物
		砂岩	1	石英，斜長石，白雲母，イライト，緑泥石，隠微晶質石英*
		頁岩	3	石英，斜長石，白雲母，隠微晶質石英*，緑泥石，イライト
		チャート	2	隠微晶質石英*，石英，緑泥石
		黒雲母岩ホルンフェルス	3	石英，斜長石，黒雲母，隠微晶質石英*，白雲母，角閃石
		雲母片岩	3	石英，斜長石，白雲母，緑泥石，緑れん石
		緑色片岩	2	緑れん石，角閃石，輝石，斜長石
	結晶片		30	石英，斜長石，カリ長石ほか

＊：アルカリシリカ反応性を示す鉱物



写真－5.1 代表的な砂(S4, S5)の薄片観察結果

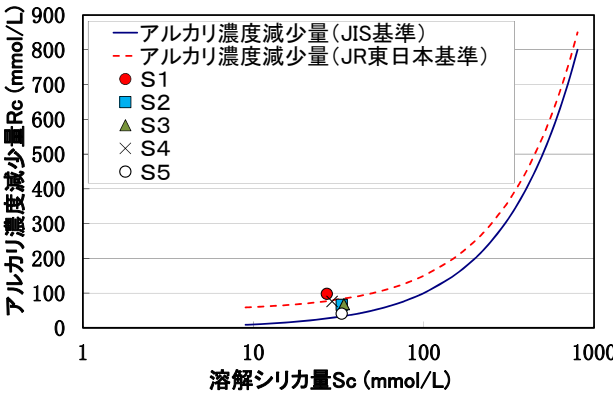
5.3 アルカリシリカ反応性の確認

5.3.1 試験方法

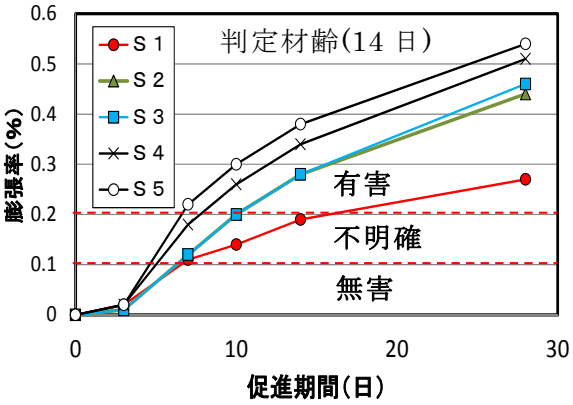
岩種判定した砂 5 種類(S1～S5)に関して，化学法(JIS A1145)と促進モルタルバー法(ASTM C1260)を適用した。促進養生期間中の長さ測定は，浸漬開始後 3,7,10,14 および 28 日に行い，判定は 14 日の測定結果により行った。

5.3.2 試験結果および考察

化学法(JIS A1145)の結果を**図－5.7** に，促進モルタルバー法(ASTM C1260)の結果を**図－5.8** にそれぞれ示す。**図－5.7** には，JIS の判定基準線に加えて JR 東日本の判定線を示す[5)]。図に示す通り，JIS の判定基準では，いずれの砂も「無害」の判定であったが，JR 東日本の判定基準では，S2～S5 が「準有害」の判定（JIS 基準と JR 東日本基準の判定線の間の領域）であった。また，促進モルタルバー法では，反応性鉱物として流紋岩質溶結凝灰岩とクリストバライト，トリディマイトを含む安山岩の含有率が 20～50%の S2～S5 は「有害」，それらの含有率が 8%と低い S1 は「無害」の判定であった。S5 の膨張率が最も高かったが，その他の反応性鉱物を含む岩種も含めると 29%であり，ペシマム混合率に近いことが影響していると推察される[15)]。この結果より，S2～S5 は JIS 法（化学法）で



図－5.7 化学法の結果



図－5.8 促進モルタルバー法の結果

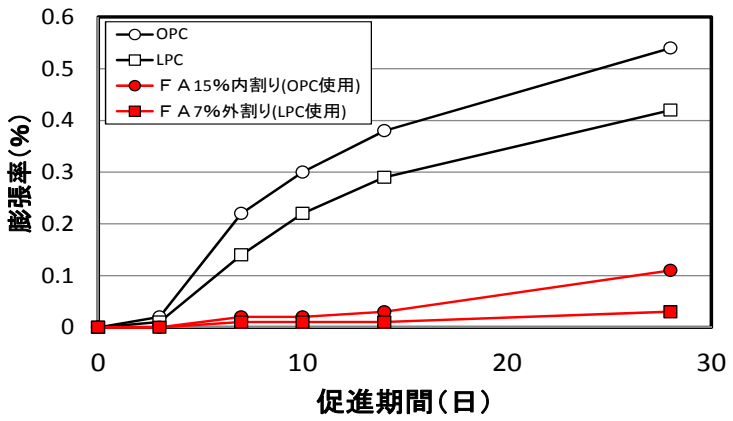
は「無害」であるが，JR 東日本のより厳しい判定条件と ASTM C1260 のより厳しい試験条件の下では，ASR が発生する可能性が一致して示されたことから，ASR 抑制対策を検討する必要性があると考えられた。

前述したように，今回調査対象とした砂は，火力発電所の建設工事で使用される生コンクリートプラントで実際に使用されている砂であり，アルカリシリカ反応性が確認されたことより，ASR 抑制対策を再検討することとした。抑制対策としては，北陸地方において ASR 抑制効果が確認されており，建設地点で入手可能な石川県七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュの使用を検討することとした [12]。火力発電所では，重要構造物としてタンクの建設（設計強度 60N/mm^2）が計画されており，発熱量抑制の観点から低熱ポルトランドセメント（LPC）の使用を前提とした配合が既に決まっていた。そこで，フライアッシュは，砂の容積置換（外割り置換）とし，配合修正に与える影響を最小限にすることとした。置換率は，試験練りにて良好なフレッシュ性状が確認された外割り 7%（セメント内割り置換で 13%相当）とした。さらに，その他の普通ポルトランドセメント（OPC）を使用する一般構造物においてもフライアッシュの適用を検討し，その際の置換率はセメント内割り 15%と設定した [4), 14)]。これらの配合に関して，フライアッシュによる ASR 抑制効果を確認することを目的として，促進モルタルバー試験において最も高い膨張率を示した S5 を用いて試験を行った。試験では，石川県七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュ（密度 2.49g/cm^3，比表面積 4,870cm^2/g）を用いた。**表－5.2** に試験で使用した配合を**図－5.9** に促進モルタルバー法(ASTM C1260)の結果をそれぞれ示す。

表－5.2 配合

ｹｰｽ(ｾﾒﾝﾄ種類)	配合（g／バッチ）				
	W	C	FA	S	ｱﾙｶﾘ量*
OPC	207	440	-	990	2.3
LPC	207	440	-	990	1.5
FA15%内割り(OPC)	207	374	66	990	1.9
FA7%外割り(LPC)	207	440	67	921	1.5

＊：アルカリ量(g/バッチ)はセメント分のみを示す。



図－5.9 促進モルタルバー法の結果

フライアッシュを混和しない場合には，OPC を使用した場合も LPC を使用した場合も，14 日材齢において 0.2%以上の膨張率を示し，ASTM C1260 の判定基準では，「有害」判定であった。なお，OPC は**図－5.8** のデータを再掲した。しかしながら各々の膨張率には違いがあり，普通ポルトランドセメント（OPC：アルカリ量 0.52%）を使用した方が，低熱ポルトランドセメント（LPC：アルカリ量 0.35%）を使用した場合よりも大きな膨張率であった。これは各々のセメントによるアルカリ量の違いが影響していると考えられる。一方，フライアッシュを混和した場合には，OPC を使用しフライアッシュを 15%内割り置換した場合も，LPC を使用しフライアッシュを 7%外割り置換した場合も膨張率は小さくなり，14 日材齢において 0.1%未満の膨張率を示し，ASTM C1260 の判定基準では，「無害」の判定であった。また，膨張率は，OPC を使用した場合の方が大きく，フライアッシュを混和しない場合と同じ傾向を示した。OPC を使用した場合には，セメントを 15%減じた分のアルカリ量が低減されているが，**表－5.2** に示すように LPC よりもアルカリ量が高いことが膨張率の違いに影響していると推察される。これは，セメントのアルカリ量が ASR の進展に及ぼす影響が大きいことを示しており，フライアッシュ等による ASR 抑制対策を適用した場合であってもセメントに含まれるアルカリ量も留意する必要があることを示唆している。

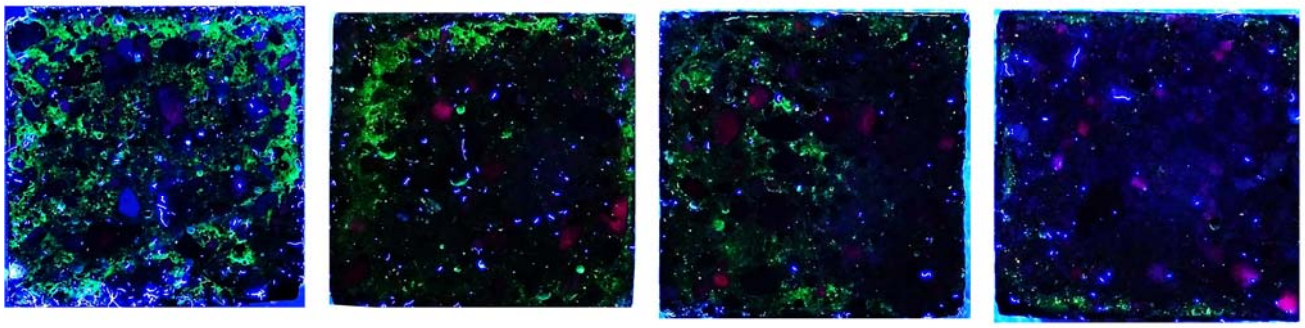
5.4 ASR ゲル生成状況の観察

5.4.1 試験方法

促進モルタルバー法による促進養生後(28 日後)の試料を切断し，切断面(25mm×25mm)にゲルフルオレッセンス法を適用した[16]。ゲルフルオレッセンス法は，希釈酢酸ウラニル溶液を切断面に塗布し，暗室状態で紫外線を照射し，ASR ゲルが発光することにより，ASR ゲルの生成状況を確認する手法であり，発光面積とコンクリートプリズムとの相関性があることが示されている[17]。なお，試料表面から 5 mm 以内の深さの範囲を外部，5 mm 以上の深さの範囲を内部とし，観察した。

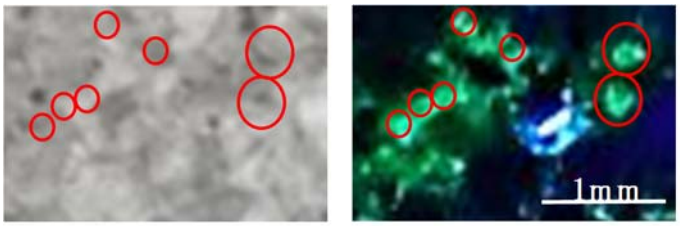
5.4.2 試験結果および考察

図－5.9 で示した促進モルタルバー法(ASTM C1260)による促進養生後(28 日後)の試料を用い，切断面(25mm×25mm)にゲルフルオレッセンス法を適用した結果を**写真－5.2** に示す。OPC 使用の場合には，断面全体に強い発光が確認された。一方，LPC の場合には，OPC と比較して発光は弱く，表面から 1/3(7mm)程度の範囲は発光していたが，内部の発光は限定的であった。外部の発光は，NaOH の浸透により ASR が促進されたものと考えられる。内部の ASR ゲルの生成状況の違いは，セメントのアルカリ量の違いが影響しており，これが促進モルタルバーの膨張量の違いにも表れていると考えられる。それに対して，フライアッシュを混和した場合には，OPC を使用した場合も LPC を使用した場合も，それぞれ OPC と比べて発光が弱くなっており，ASR ゲルの生成が効果的に抑制されていた。また，**写真－5.3** の OPC における拡大写真に示す通り，直径 0.1mm 以下程度の微小粒子の周囲で特に強く発光するとともに，周囲のセメントペースト部を埋めるように発光が広がっている状況が確認された。これは，微小粒子の反応で生成された ASR ゲルが周囲のセメントペースト部を充填していることを示している。



OPC　　LPC　　FA15%内割り(OPC 使用)　　FA7%外割り(LPC 使用)

写真－5.2 ゲルフルオレッセンス法による発光状況（全体）



白色灯下　　紫外線照射下

写真－5.3 ASR ゲル観察状況（OPC）

5.5 ひび割れ発生状況の観察

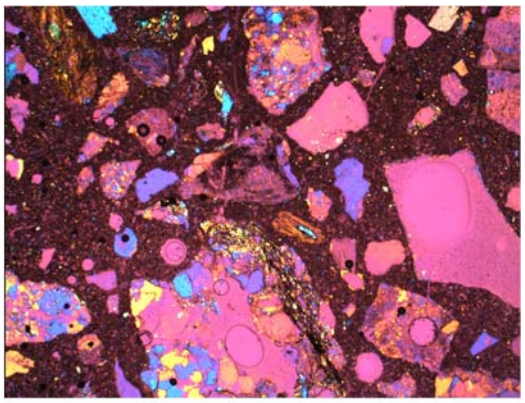
5.5.1 試験方法

促進モルタルバー法による促進養生後(28 日後)の試料から薄片試料（厚さ：20μm）を作製し，偏光顕微鏡により骨材の ASR 発生と膨張ひび割れの進展状況を観察した。

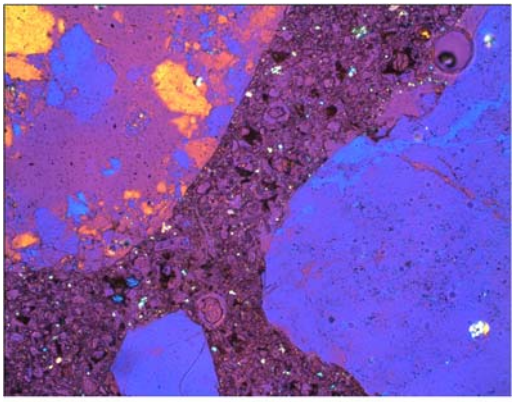
5.5.2 試験結果および考察

写真－5.4 にモルタル薄片の偏光顕微鏡による観察結果の一部を例として示す。OPC(**写真－5.4(a)**参照)では，外部において，流紋岩質溶結凝灰岩や安山岩粒子に割れを伴いセメントペーストまで伸びている微細なひび割れが 6 本確認されたが，内部において，ひび割れは少なかった。LPC(**写真－5.4(c)**参照)では，同様に，ひび割れは外部に 8 本確認されたが，内部においてはほとんど確認されなかった。それに対して，フライアッシュを混和した場合には，OPC 使用(**写真－5.4(d)**参照)では，外部にひび割れが 8 本確認されたが，内部にひび割れは無く，また LOC 使用では全体的にひび割れはほとんど無く，外部に 1 本確認されただけであった。

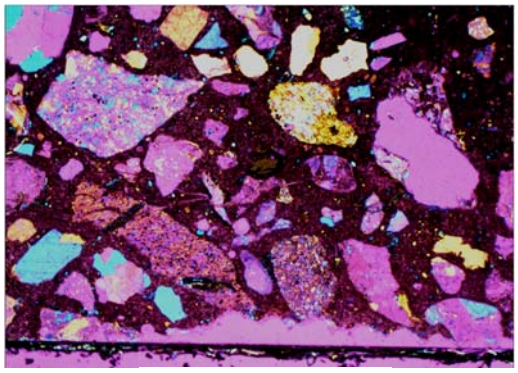
以上のように，ひび割れの発生は部分的なものであったが，**写真－5.4(b)**に示すようなクリストバライトを含む 0.1mm 以下の微小粒子の周囲がゲル状物質で取り囲まれている状況が前述の ASR ゲル生成範囲(**写真－5.2**)において確認された。このような状況は，OPC において特に多く見られたが，FA7%外割り(LPC 使用)では，ほとんど見られなかった。



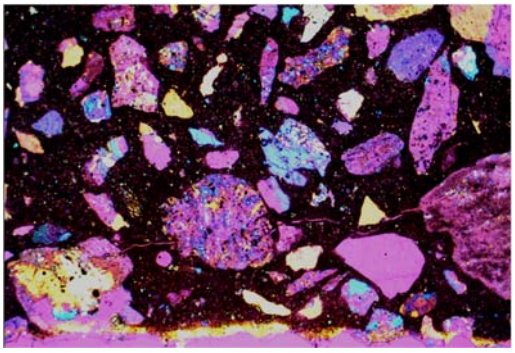
(a) OPC(外部)



(b) OPC(内部,拡大)



(c) LPC(外部)



(d) FA15%内割り(OPC 使用,外部)

写真－5.4 偏光顕微鏡によるモルタルバーの観察結果（直交ニコル下，石こう検板使用）

5.6 砂のアルカリシリカ反応性の評価

表－5.3 に促進モルタルバー試験結果，ASR ゲル生成状況および薄片観察結果のそれぞれの概略を合わせて示す。促進モルタルバーの膨張率と ASR ゲルの生成状況とはよく対応しており，ASR ゲルの生成量が多い方が膨張率は高い傾向であった。また，薄片観察の結果，ひび割れの本数に着目した場合，OPC，LPC および FA15%内割り(OPC 使用)に違いは見られなかったが，促進モルタルバーの膨張率は異なる結果であった。OPC では，内部に ASR ゲルの生成が確認されたが，ひび割れはほとんど確認されなかった。その一方で，FA15%内割り(OPC 使用)では，ひび割れの発生状況は，OPC と類似していたが，膨張率は大きく抑制されていた。この両者の違いは，ASR ゲルの生成量の違いにあると考えられる。ASR の膨張圧発現機構には諸説あり，ASR 膨張には骨材の割れに伴い発生する内部膨張力が大きく関与しているとの報告があるが [18]，前述の ASR ゲルの観察結果(**写真－5.3** および**写真－5.4(b)**)も合わせて考えると，反応性物質で構成される微小粒子が反応することによって生成された ASR ゲルがセメントペースト部を充填し，膨張に寄与していることが示唆された。

表－5.3 試験結果のまとめ

	膨張率	ASR ゲル生成状況		ひび割れ発生状況＊2	
	(14 日材齢)	外部＊1	内部＊1	外部＊1	内部＊1
OPC	大きい(0.38%)	多い	多い	多い(6 本)	少ない(1 本)
LPC	大きい(0.29%)	多い	少ない	多い(8 本)	無い(0 本)
FA15%内割り(OPC 使用)	小さい(0.03%)	少ない	少ない	多い(8 本)	無い(0 本)
FA7%外割り(LPC 使用)	小さい(0.01%)	少ない	ほとんど無い	少ない(1 本)	無い(0 本)

5.7 建設工事における ASR 抑制対策の適用

今回の評価結果を踏まえ，火力発電所建設工事において JIS で規定される以上のより厳しい ASR 抑制対策を適用することとした。すなわち，LNG タンクは，アルカリ量の少ない低熱ポルトランドセメントを使用するが，呼び強度が 60 と高く，既往の調査データより，砂からのアルカリ溶出量を 0.4mg/g 考慮した場合 [7]，アルカリ総量が 2.2kg/m^3 以上となるため，フライアッシュを砂の 7%容積置換（外割り）で使用することとした [6]。さらに，その他の普通ポルトランドセメントを使用する一般構造物において，アルカリ総量は 3kg/m^3 以下であるが，フライアッシュをセメントの 15%重量置換（内割り）で使用することとした。**表－5.4** にフライアッシュコンクリートの適用実績 [19]を示す。

表－5.4 フライアッシュコンクリートの適用実績

適用構造物	フライアッシュの使用方法	コンクリート数量
桟橋上部工等海洋構造物	セメントの 15%重量置換	約 2,900 m^3
LNG タンク※	砂の 7%容積置換	約 2,000 m^3
復水器冷却水設備等陸域構造物	セメントの 15%重量置換	約 23,700 m^3

※呼び強度が 40 以下の部位は，アルカリ総量が 2.2kg/m^3 未満であり，フライアッシュを使用していない

5.8 塩害対策を目的にしたプレキャスト PC 床版の LNG 船接岸桟橋への適用

5.8.1 研究の背景

北陸地方では，フライアッシュコンクリートを使用したプレキャスト PC 床版（設計基準強度：50N/mm^2）の地域実装を全国に先駆けて実施している。最初に，**写真－5.5** に示すように，平成 28 年 6 月に北陸電力・富山新港火力発電所の LNG 船着岸桟橋の新設工事にて，ASR および塩害（海水）対策として適用された。次いで，**写真－5.6** に示すように，平成 28 年 11 月に北陸自動車道日野川橋梁の RC 床版の更新工事にて，ASR および塩害（凍結防止剤）対策として適用された。これらのプレキャスト PC 床版は PC 専業社の敦賀工場にて製造されており，敦賀石炭火力発電所から産出したフライアッシュを用いている。フライアッシュは早強ポルトランドセメントの 15%を置換して使用した。また，プレキャスト PC 床版の間詰め部や端部に使用するフライアッシュ混入高強度収縮補償コンクリート（設計基準強度：50N/mm^2）の現地生コンでの製造と現場打設がすでに完了している [20]。本コンクリートの現場打設では，コンクリートの運搬時のスランプロスと少量打設での施

工法改善などが課題となった。

写真－5.5 火力発電所の LNG 船着岸桟橋工事

写真－5.6 日野川橋梁の床版更新工事

5.8.2 試験方法

収縮補償コンクリートには，PC 床版と同程度以上の強度と耐久性が要求される。そのため，早強セメント（T 社，密度：3.14 g/cm^3，ブレーン値：4410 cm^2/g，略号 HC）を使用して，コンクリートの設計基準強度を 50 N/mm^2（28 日材齢）および拘束膨張量を（200±50）×10^{-6}とした。膨張材（石灰系）は低添加型汎用品（T 社，密度：3.16 g/cm^3，ブレーン値：3400 cm^2/g，略号 Ex）を使用した。また，フライアッシュは七尾大田火力発電所産の分級品（密度：2.39 g/cm^3，ブレーン値：4650 cm^2/g，Ig. Loss：2.0%，平均粒径：7 μm，略号 FA）を使用した。常願寺川産の川砂（密度：2.62 g/cm^3，吸水率：1.85%）および川砂利（密度：2.60 g/cm^3，吸水率：1.45%，Gmax：25 mm）は，安山岩が 35 %含まれており，安山岩の反応性鉱物はオパールとクリストバライトである。さらに，常願寺川産の川砂および川砂利の岩石構成率（安山岩）はほぼ同じであり，いずれも顕著なアルカリシリカ反応性を示すことが知られている [21]。常願寺川産川砂利の化学法(JIS A1145)，モルタルバー法(JIS A1146)および促進モルタルバー法(ASTM C1260)によるアルカリシリカ反応性の判定結果を**表－5.5** に示す。この骨材は化学法およびモルタルバー法で「無害でない」，促進モルタルバー法で「有害」と判定された。

コンクリートの配(調)合を**表－5.6** に示す。早強セメント，フライアッシュおよび膨張材をコンクリートの圧縮強度発現に寄与する結合材とした。配(調)合は HC（早強セメント単味），収縮補償とした(HC＋Ex)（早強セメントと膨張材の組み合わせ），(HC＋FA＋Ex)（早強セメントとフライアッシュ，膨張材の組み合わせ）の 3 種類である。以降では，コンクリートの配(調)合を略号で示す。フライアッシュと膨張材を混和した配(調)合では，フライアッシュは結合材から単位膨張材量を差引いた量の 15%を置換した。単位膨張材量は 22kg/m^{3}とした。コンクリート試験体は 75 mm×75 mm×400 mm の直方体であり，脱枠後 2 週間の標準養生を行い，その後，2 週間の封緘養生を行った後に，飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 膨張試験に供した。なお，測定結果は試験体 2 体の平均である。

表－5.5 常願寺川産川砂利のアルカリシリカ反応性

化学法 (JIS A 1145)				モルタルバー法 (JIS A 1146)		促進モルタルバー法 (ASTM C 1260)	
Sc	Rc	Sc/Rc	判定	膨張率	判定	膨張率	判定
242	72	3.36	無害でない	0.68	無害でない	0.72	有害

表－5.6 コンクリートの配(調)合

配合名	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)						化学混和剤 ((HC+FA+Ex)×%)	
				W	HC	Ex	FA	S	G	SP*	DF**
HC	4.5	35	45	165	471	－	－	755	915	0.5	0.1
HC+Ex					449	22	－	755	915		
HC+FA+Ex					382	22	67	747	915		

SP*：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤，　DF**：消泡剤

(1) 飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 膨張試験

温度 50℃の飽和 NaCl 溶液にコンクリート試験体（セメント以外からのアルカリ添加無し）を完全に浸漬し，浸漬材齢にともなう長さと動弾性係数の変化を測定した。なお，本試験法は凍結防止剤の浸透にともなう ASR 膨張の発生を模擬している。

(2) 示差走査熱量分析による水和生成物およびポゾラン反応生成物の同定

浸漬期間 6 ヶ月および 12 ヶ月にて，コンクリート断片の粉末試料（温度 20℃での真空乾燥）を使用して，示差走査熱量分析（DSC）によりフライアッシュのポゾラン反応の進行状況と水酸化カルシウム，フリーデル氏塩の生成状況を検討した。

(3) 薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察

凍結防止剤（NaCl）が散布される環境条件では，NaCl のコンクリートへの浸透過程でフリーデル氏塩（$C_3ACaCl_2 \cdot 10H_2O$）が生成し，その際に解離した Na^+イオンと水酸化カルシウム（CH）との反応により OH^-イオンが生成する[10]。これが ASR を促進する要因の１つと考えられ，CH は OH^-イオンの供給源となる。このメカニズムを検証するために，コンクリートの薄片研磨試料（厚さ：20μm）を偏光顕微鏡にて観察し，膨張材起源の CH クラスターの残存形態を浸漬試験開始時に観察した。また，浸漬期間 12 ヶ月にて，硝酸銀溶液噴霧法(0.1 N の硝酸銀溶液噴霧による白色域)を用いて塩分浸透深さを計測するとともに，同断面にてゲルフルオレッセンス法[22]より ASR ゲルの生成状況（UV 灯下での黄緑色域）を比較した。

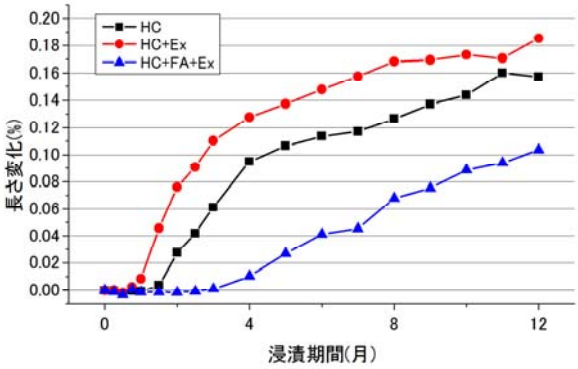
5.8.3 試験結果および考察

(1) 飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 膨張試験

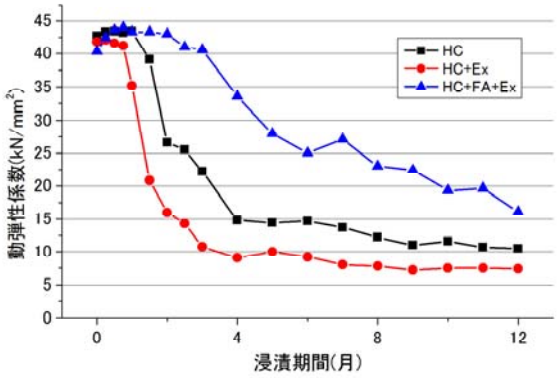
コンクリートの長さ変化を**図－5.10** に示す。飽和 NaCl 溶液浸漬法では，塩水が試験体に浸透した段階で，表面部の砂粒子から ASR の反応が順次始まると予測される。このため，浸漬期間 1 ヶ月後に，まず(HC＋Ex)，次いで HC の順番で膨張が発生することが認められた。また，コンクリートの膨張（表面ひび割れが目視で観察された段階（膨張率：0.04%～0.05%））が一旦始まると，表面ひび割れから NaCl 溶液が内部に浸透するので，それ以後は膨張が急速に加速している。一方，(HC＋FA＋Ex)は，両試験体と比較して，初期浸漬材齢での膨張が効果的に抑制されている。浸漬期間 12 ヶ月でのコンクリート試験体の最終膨張率は，(HC＋FA＋Ex)，HC，(HC＋Ex)の順番で増加している。以上の測定結果より，膨張材混入による初期浸漬期間での膨張促進影響とフライアッシュ 15%置換による初期･長期浸漬材齢での膨張抑制効果が確認できた。

コンクリートの動弾性係数の変化を**図－5.11** に示す。いずれのコンクリート試験体も膨張率の増大にともない動弾性係数が大きく低下していた。

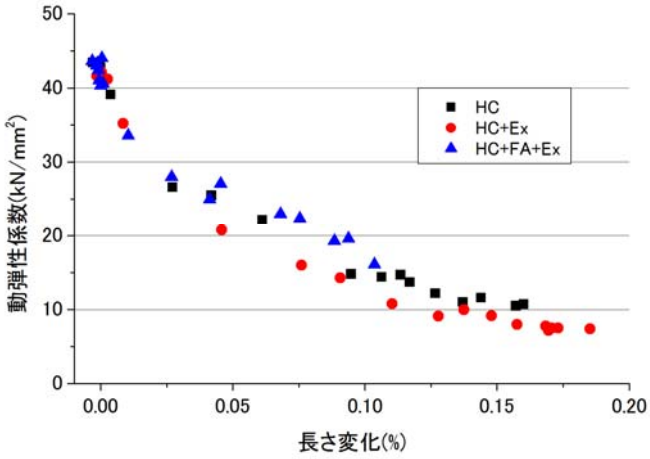
コンクリートの動弾性係数と長さ変化の関係を**図－5.12** に示す。3 種類のコンクリート試験体での両者の関係はコンクリートの種類に関係なく同一の線上にあることが明らかになった。この結果は高強度コンクリート（PC 桁など）での非破壊検査などに活用できる可能性がある。



図－5.10 コンクリートの長さ変化

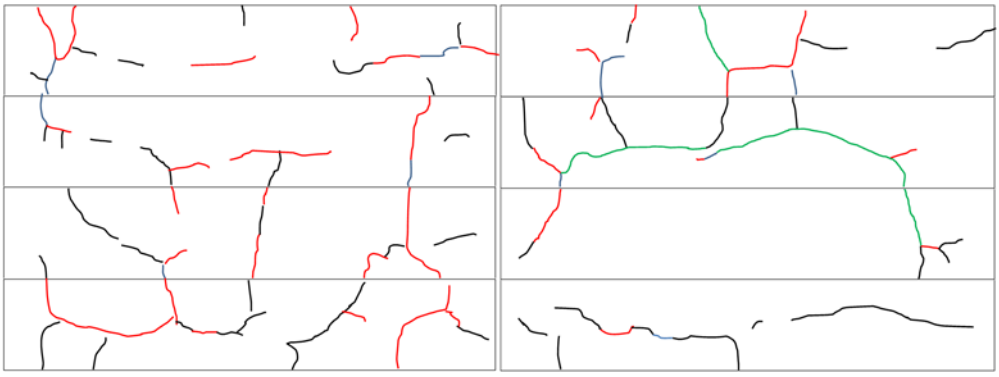


図－5.11 コンクリートの動弾性係数の変化



図－5.12 コンクリートの動弾性係数と長さ変化の関係

コンクリート（HC および(HC+Ex)）のひび割れ発生状況（浸漬期間 1 年）を**図－5.13** に示す。なお，ひび割れ幅の計測に関して，0.3mm～0.5mm を黒，0.5mm～0.7mm を赤，0.7mm～1.0mm を青，1.0mm 以上を緑で示している。なお，0.3mm 以下は記入していない。コンクリート試験体のひび割れは 3 種類のコンクリート試験体で大きく相違した。すなわち，(HC＋FA＋Ex)は表面に 0.3mm 以下の微細なひび割れが多数発生していたが，それ以上の大きなひび割れは観察されなかった。それに対して，HC 試験体および(HC+Ex)は，0.3mm 以上のひび割れが発生しており，とくに (HC+Ex)の長さ方向には 1.0mm 以上の大きなひび割れが発生していた。このようなコンクリートのひび割れ状況の相違には，ASR の発生部位（表面と内部）と ASR が発生した骨材の粒径（砂と砂利）とが密接に関係しているものと推測された。



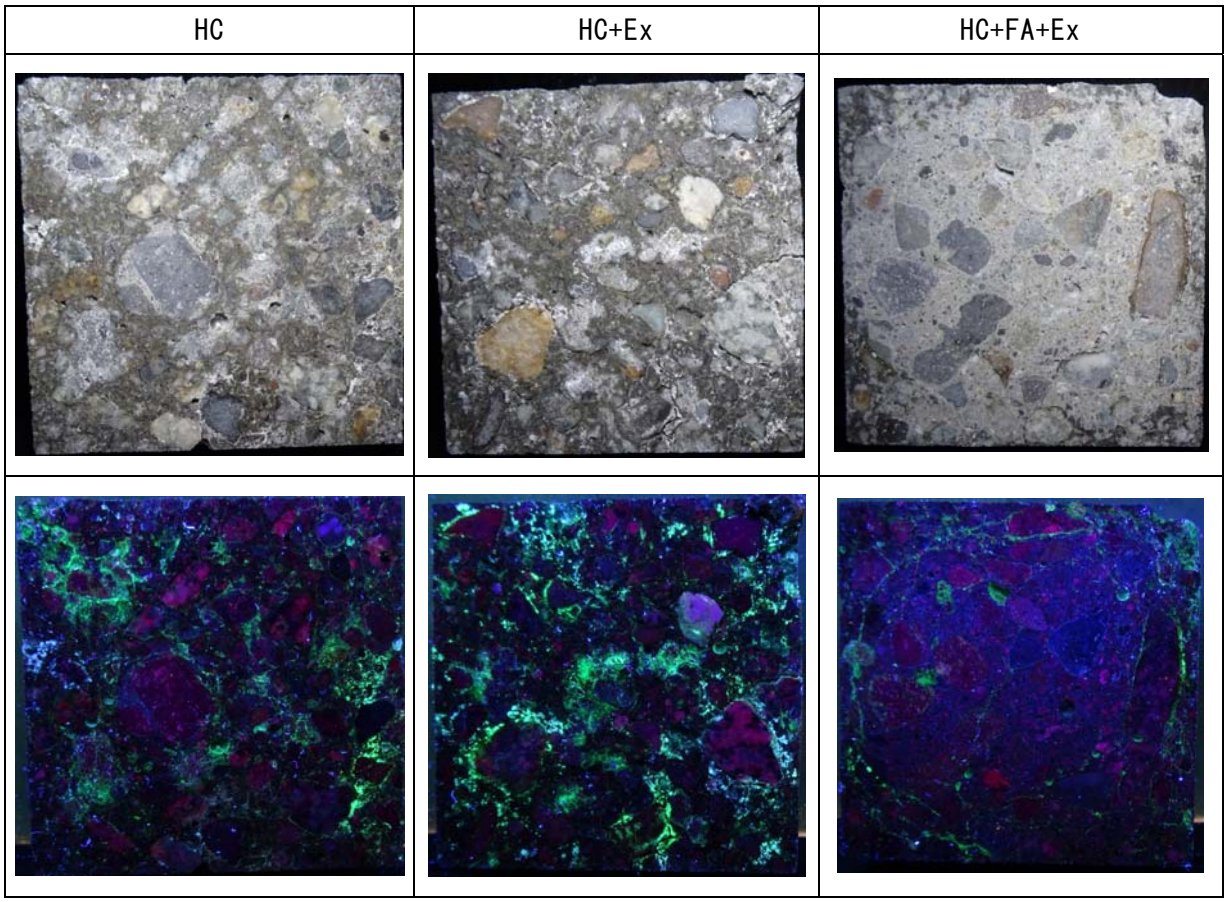
(a) HC　　(b) HC+Ex

図－5.13 コンクリートのひび割れ発生状況（浸漬期間 1 年）

コンクリート（浸漬期間 1 年）の塩分浸透深さの測定より，HC および(HC+Ex)は試験体全面に塩分が浸透していたのに対して，(HC＋FA＋Ex)は表面部（20mm 程度）のみに塩分浸透が限定されていた。

コンクリート（切断面）のゲルフルオレッセンス法による ASR ゲルの生成状況の観察結果（浸漬期間 1 年）を**写真－5.7** に示す。HC は，表面および内部ともに ASR ゲルが生成しており，細骨材および粗骨材ともに良く反応している状況が観察された。この際に，反応している粒子は火山岩（安山岩（灰白色）と流紋岩（茶色））のみであり，深成岩（花崗岩と閃緑岩）には反応の痕跡がまったく観察されなかった。また，(HC+Ex)は，HC と同様に内部でも ASR ゲルの生成が観察されたが，HC と比較して，断面全体での ASR ゲルの呈色反応がより鮮明であった。さらに，より大きな径の安山岩粒子の周囲にも ASR ゲルが生成していたのが特徴であった。これにはひび割れが内部まで貫通したことにより，内部でのアルカリ雰囲気がより増大したことが寄与していた。その一方で，(HC＋FA＋Ex)は，塩分が浸透した表面から 20mm の領域で，とくに細かい安山岩粒子の周囲に ASR ゲルの生成が観察された。このことが，(HC＋FA＋Ex)の表面部に微細なひび割れが多く発生した原因であると考えられた。以上より，フライアッシュの混和により ASR が抑制されたのは，コンクリートの緻密化による塩分浸透の抑制と，フライアッシュの周囲に生成

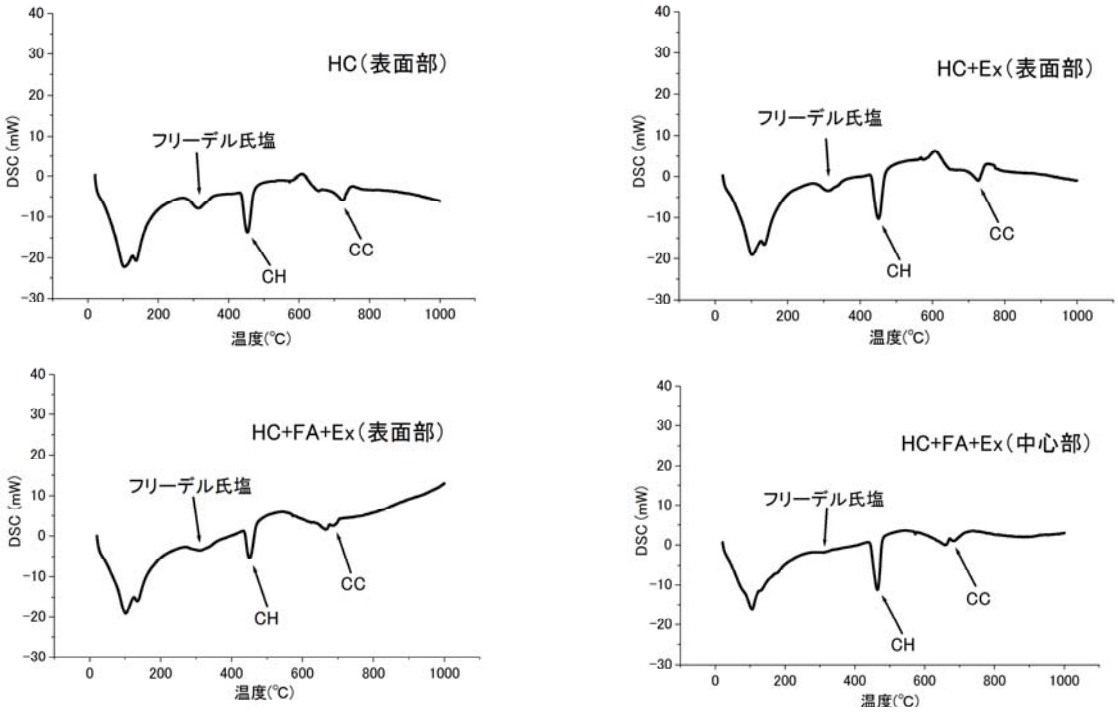
した低 Ca/Si 比の CSH によるアルカリ吸着との相乗作用によるものであると考えられた[23)]。



写真－5.7 コンクリート（切断面）の ASR ゲルの生成状況の観察結果（浸漬期間１年）

(2) 示差走査熱量分析による水和生成物およびポゾラン反応生成物の同定

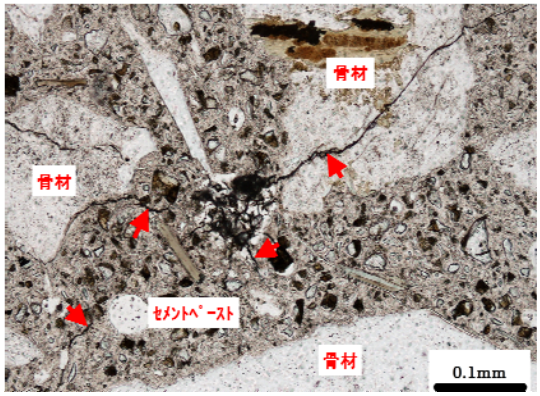
コンクリートの DSC 曲線（浸漬期間 6 ヶ月）を**図－5.14** に示す。コンクリートの水酸化カルシウム(CH)の残存量は，セメントの水和反応とフライアッシュのポゾラン反応の両者の進行度により増減する。いずれのコンクリート試験体でも，表面部（深さ 0mm～15mm）は浸漬期間 6 ヶ月において CH の吸熱ピーク(460℃)が大きく減少し，それにともないフリーデル氏塩のブロードな吸熱ピーク（350℃）が増大していた。それに対して，(HC＋FA＋Ex)の中心部（深さ 25mm～35mm）ではフリーデル氏塩のピークはまったく認められなかった。以上の分析結果は，NaCl の浸透による ASR 発生の主たる要因がフリーデル氏塩の生成によるアルカリ雰囲気の増大によるものであることを示唆している。



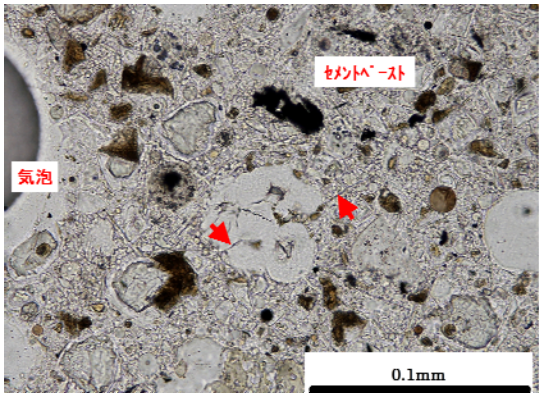
図－5.14 コンクリートの DSC 曲線（浸漬期間 6 ヶ月）

(3) 薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察

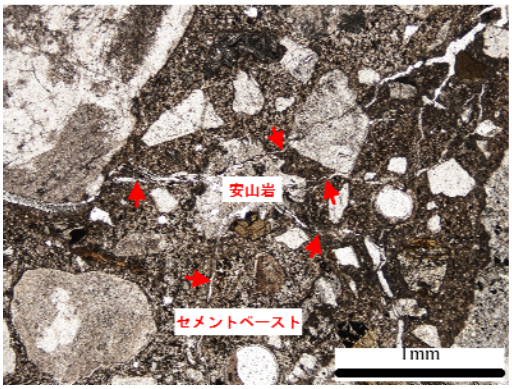
収縮補償コンクリート（表面部（深さ 0mm～15mm））の偏光顕微鏡観察結果（浸漬試験開始時および浸漬期間 6 ヶ月）を**写真－5.8** に示す。浸漬試験開始時においては，コンクリート試験体には，石灰系膨張材に由来する CH クラスター（最大径 0.1mm）がセメント硬化体に分散しており，その周囲には $Ca(OH)_2$ を生成する際に発生した放射状の膨張性ひび割れが観察された。同時に，細骨材の一部にひび割れの発生が認められた。このひび割れの発生頻度と規模（進展長さ）は，(HC＋Ex)と比較して(HC＋FA＋Ex)が効果的に低減されていた。残存 CH クラスターとひび割れの影響により，(HC＋Ex)の ASR による初期膨張が加速されたものと推測する。浸漬期間 6 ヶ月においては，(HC＋Ex)では，川砂および川砂利中の安山岩粒子がともに良く反応しており，安山岩粒子から進展した膨張ひび割れが多数観察された。また，安山岩粒子の界面に ASR ゲルが滲出するとともに，ひび割れの内部が ASR ゲルで充填されている様子も観察された。これらは HC においても同様の結果が観察された。それに対して，(HC＋FA＋Ex)では，表面部の川砂中の安山岩粒子は良く反応していたが，中心部は ASR が完全に抑制されていた。これらの観察結果は，ゲルフルオレッセンス法による観察結果とも一致していた。



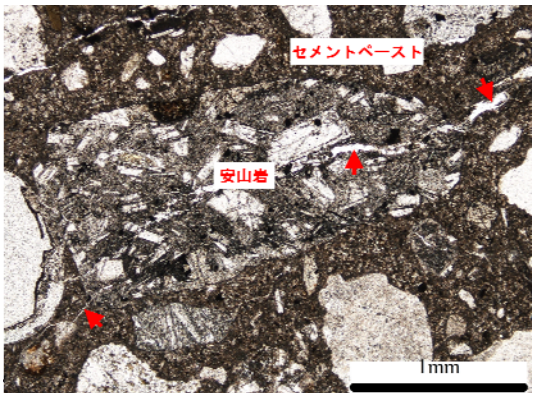
(a) HC+Ex 試験体（浸漬試験開始時）



(b) HC+FA+Ex 試験体（浸漬試験開始時）



(c) HC+Ex 試験体（浸漬期間 6 ヶ月）



(d) HC+FA+Ex 試験体（浸漬期間 6 ヶ月）

写真－5.8 収縮補償コンクリートの偏光顕微鏡観察結果（浸漬試験開始時）

5.9 まとめ

本章では，建設工事で使用される生コンクリートプラントの砂の岩石学的調査および化学法と促進モルタルバー法(ASTM C1260)による反応性の評価を行い，安山岩と流紋岩質溶結凝灰岩を合わせた含有率がペシマム条件に相当している恐れがある砂が含まれている場合，ASR が発生する可能性が示された。このことから，ASR 抑制対策を検討する必要があると考えられ，抑制対策として，フライアッシュを内割り 15%置換（セメント置換）または外割り 7%置換（砂置換）することによって， ASR 膨張を効果的に抑制することが促進モルタルバー法(ASTM C1260)により，確認できた。合わせて実施した砂のアルカリシリカ反応性の評価については，促進モルタルバー法による促進養生後の試料を用いて ASR ゲル生成状況とひび割れ発生状況の観察を行い，砂が起因する ASR に関して，内部に骨材の割れを伴うようなひび割れがほとんどない場合であっても，微小な骨材粒子が反応することによって生成した ASR ゲルが膨張に寄与していることが示唆された。さらに，評価結果を踏まえて，本建設工事において，JIS で規定される以上のより厳しい ASR 抑制対策の考え方を適用し，フライアッシュコンクリートの利活用促進につなげた。

また，本章では，富山県常願寺川産の川砂および川砂利を使用した収縮補償コンクリー

トの ASR による膨張挙動を調べるとともに，フライアッシュの混和による ASR 抑制効果とそのメカニズムについて実験的に検討した結果，プレキャスト PC 床版の収縮補償コンクリートにおいても，フライアッシュコンクリートの利活用により，ASR 膨張を効果的に抑制できることを確認した。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 化学法(JIS A1145)で「無害」判定の骨材を使用し，促進モルタルバー試験(ASTM C1260)を実施したところ「有害」判定結果となったが，使用セメントの種類の違いによって膨張率や ASR ゲルの生成状況が異なり，セメント由来のアルカリ量の違いが影響していると推察された。

(2) 建設工事で実際に使用される川砂に関して，フライアッシュを内割り 15%置換（セメント置換）または外割り 7%置換（砂置換）することによって， ASR 膨張を効果的に抑制することが可能であった。

(3) 川砂を使用した場合に，促進モルタルバーの膨張率，ASR ゲルの生成状況および薄片のひび割れ発生状況との比較から,内部に骨材の割れを伴うようなひび割れがほとんどない場合であっても，微小な骨材粒子が反応することによって生成した ASR ゲルが膨張に寄与していることが示唆された。

(4) 凍結防止剤（NaCl）の浸透を模擬した飽和 NaCl 溶液浸漬法において，コンクリートの ASR 膨張に及ぼす NaCl の促進作用は，フリーデル氏塩の生成過程でもたらされるアルカリ雰囲気の増大が主要因であった。

(5) 収縮補償コンクリートでは，石灰系膨張材に由来する CH 増加とひび割れ発生の影響により，コンクリートの初期および長期浸漬材齢での ASR 膨張が膨張材無混和のものよりも促進された。

(6)フライアッシュを混和することにより，収縮補償コンクリートでの ASR 発生が表面部分に限定され，ASR 膨張を効果的に抑制できた。これは，フライアッシュのポゾラン反応で生成した CSH のアルカリ吸着，外部からの塩分浸透の抑制，さらに膨張材由来の CH クラスターの減少の相乗作用によるものであると考えられた。

【参考文献】

1）西田勝行，藤木豊，北川朝恵：富山新港火力発電所 LNG1 号機建設工事の概要，電力土木, No.376, pp.53-59, 2015.

2）金沢大学 SIP－WG2(ASR 部会)，コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントの開発 研究成果報告書－陸地方における ASR 問題の解決を目指して－, 2016.

3）大代武志，野村昌弘，参納千夏男，鳥居和之：富山県における ASR 劣化橋梁の実態調査とその地域特性，コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1059-1064, 2016.

4）鳥居和之，参納千夏男：骨材資源の活用を目指したアルカリシリカ反応抑制対策の提案，コンクリート工学, Vol.48, No.1, pp.44-47, 2010.

5）松田芳範：JR 東日本における混和材使用の現状と課題，コンクリート工学, Vol.52,

No.5, pp.459-463, 2014.
6）Thomas,M.，Fournier,B. ：AAR in North America，Recommended practices for testing aggregates and selecting preventive measures，Concrete in Australia, Vol.41, No.2, pp.59-64, 2015.
7）鳥居和之，野村昌弘，南善導：北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状，セメントコンクリート論文集, No.60, pp.390-395, 2006.
8）久保哲司，佐野朝恵，参納千夏男，鳥居和之：砂のアルカリシリカ反応性評価と建設工事における ASR 抑制対策，コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.901-906, 2017.
9）山村智，桜田道博，小林和弘，鳥居和之：フライアッシュコンクリートの PC 橋梁への適用に関する実用化研究，プレストレストコンクリート, Vol.57, No.5, pp.46-53, 2015.
10）日本コンクリート工学会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, pp.8-9, 2008.
11）菊池弘紀，久保哲司，鈴木雅博，鳥居和之：収縮補償コンクリートのアルカリシリカ反応とフライアッシュによる抑制効果，コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.865-870, 2017.
12）鳥居和之：コンクリートの長寿命化への提言，橋梁と基礎, Vol.42, No.8, pp.82-84, 2008.
13）金沢大学 SIP-WG2（ASR 部会）：研究成果報告書－北陸地方における ASR 問題の解決を目指して－, pp.19-43, 2016.9.
14）北陸地方におけるフライアッシュのコンクリートへの有効利用促進検討委員会報告書（富山・石川・福井県版）, 2013.
15）菊地弘紀，山戸博晃，広野真一，鳥居和之：細・粗骨材の組み合わせのペシマム現象による ASR 劣化事例の検証，コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1041-1046, 2016.
16）参納千夏男，丸山達也，山戸博晃，鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発，コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013.
17）Igarashi,G.,Yamada,K.,Xu,Y.,Wong,H.,Hirono,S., Ogawa,S.：Image Analysis of Alkali-Aggregate Gel in Concrete Prism Test with Alkali-Wrapping，Proc. of 15th Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, 10pages, 2016.
18）川端雄一郎，広野真一，岩波光保，加藤絵万：岩石学的観察に基づく ASR による各種反応性骨材の損傷形態と損傷過程の評価，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1031-1036, 2011.
19）藤木豊，幸正昴大，宮本慎也：富山新港火力発電所 LNG1 号機建設工事における石炭灰の有効利用など環境保全への取り組み，電力土木, No.392, pp.44-48, 2017.
20）鈴木雅弘，杉山彰徳，松村達也，鳥居和之：分級フライアッシュを用いた収縮補償コンクリートの材料特性に関する検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.38，No.1, pp.135-140, 2016.
21）広野真一，鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフ

ライアッシュによる抑制機構，セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.499-506, 2013.
22）参納千夏男，丸山達也，山戸博晃，鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発，コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013.
23）広野真一，安藤陽子，大代武志，鳥居和之：フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較，セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.441-447, 2013.

第６章　プレキャストPC電柱におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策

6.1 概　説

重要な社会インフラの一つである電柱は，遠心成形により製造された中空円筒状のプレキャスト製品である。北陸地方においては，1973年以降，鉄筋コンクリート製のRC電柱から高耐久で水密性に優れたプレストレストコンクリート製のPC電柱に切り替わり今日に至っている。近年，このPC電柱のなかでも高強度を必要とする耐張型のPC電柱において，施設後10年程度の早期に特徴的な縦ひび割れが確認された。縦ひび割れの特徴としては，最大ひび割れ幅は0.2mm～数mm程度で，いずれも電柱の地際付近から上方向にひび割れが進行し，円周上の対角線方向に対となって縦ひび割れが発生している場合が多いことである。**写真－6.1**および**写真－6.2**に耐張型のPC電柱に発生した縦ひび割れの例を示す。

写真－6.1 PC電柱の全景

写真－6.2 PC電柱の縦ひび割れの例

本章では，この縦ひび割れの発生原因の特定調査を行い，ASRの発生を確認したことから，主要な発生原因がASRであると判断し，その対策としてフライアッシュを混和することが有効であったこと，また，フライアッシュの遠心成形製品への適用が可能であったことを検証した[1),2),3)]。

6.2 PC電柱の縦ひび割れ発生原因の調査

6.2.1 PC電柱の配合と製造方法

表－6.1に縦ひび割れが確認された耐張型のPC電柱の現在のコンクリートの配合の一例を示す。使用材料として，セメントはT社製の普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3，比表面積：3,350cm^2/g），粗骨材は富山県黒部川産の河川砂利（最大骨材寸法：

20mm，密度：2.70g/cm³，吸水率：1.21%，化学法(JIS A 1145)の判定：「無害」，Sc:23 mmol/ℓ，Rc:26mmol/ℓ），細骨材は富山県神通川産の陸砂（密度：2.60g/cm³，吸水率：1.87%，化学法(JIS A 1145)の判定：「無害」，Sc:29mmol/ℓ，Rc:51mmol/ℓ），混和材はTM社製の高強度混和材（密度：2.95g/cm³，比表面積：5,440cm²/g，主要成分：CaO 40～55%，SO_3 30～40%），化学混和剤はK社製の高性能減水剤を使用している。また，PC電柱は富山県内のプレキャスト製品工場で製造されており，その製造方法は遠心成形用の鋼製型枠にコンクリートを投入し，遠心力成形機により所定の条件で遠心力を加える。その後，常圧蒸気養生（前養生を2～4時間後，昇温速度20℃/時間で70℃まで温度を上昇させ，最高温度70℃を4時間保持）を実施し，管理材齢まで屋外で自然養生している。

表－6.1 PC電柱のｺﾝｸﾘｰﾄ配合（呼び強度 80ｸﾗｽ）

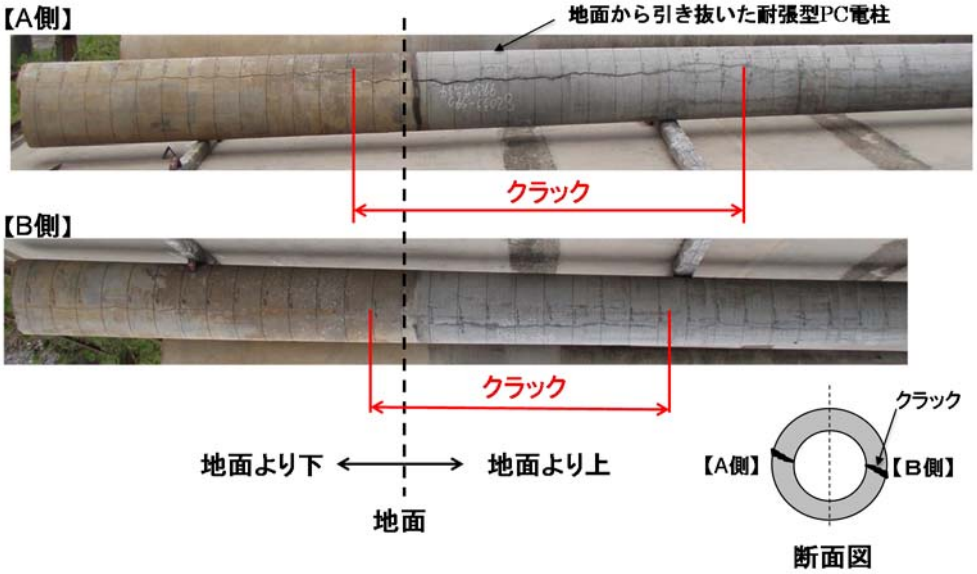
W/C	s/a	単位量(kg/m³)					高性能減水剤
		水(W)	結合材(P)		細骨材(S)	粗骨材(G)	
			ｾﾒﾝﾄ(C)	高強度混和材			
(%)	(%)						(P×%)
30.5	41	160	525	25	705	1011	1.1

6.2.2 調査方法

PC電柱に発生した縦ひび割れの発生原因調査は，(1)外観調査，(2)使用骨材とコンクリートの配合の追跡調査，(3)発生原因の特定調査により行った。(3)発生原因の特定調査では，A.ASRゲル簡易判定試験（ゲルフルオレッセンス法）[4]，B.偏光顕微鏡によるコンクリート薄片観察，C.フェノールフタレイン溶液の塗布による中性化深さ測定，D.塩化物イオン濃度測定を実施した。

6.2.3 調査結果及び考察

(1) 外観調査



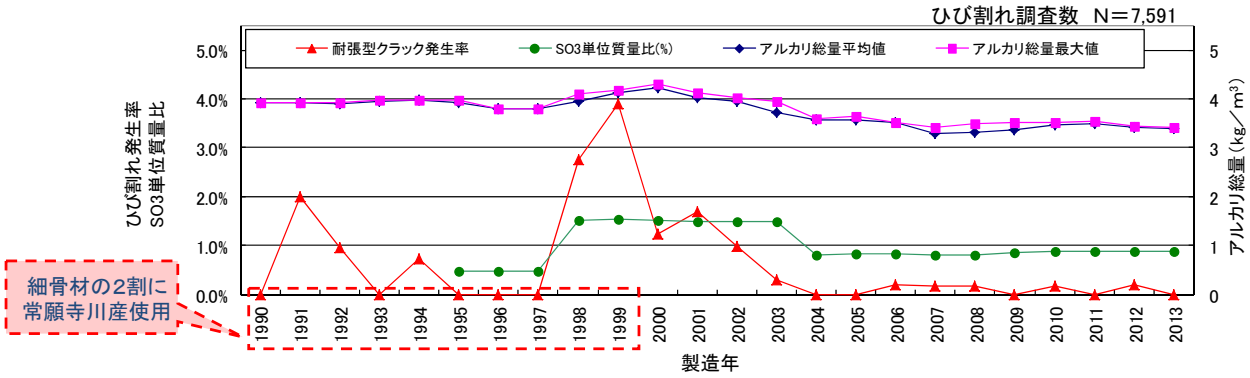
図－6.1 耐張型PC電柱のひび割れ発生状況

縦ひび割れが多く確認されている耐張型の PC 電柱は，土地利用の制限などから地支線を取り付けられない場合に用いる電柱で，北陸電力管内では 1990 年より導入され，管内全電柱の 1.2%がこの耐張型である。縦ひび割れの特徴としては，最大ひび割れ幅は 0.2mm～数 mm 程度で，いずれも電柱の地際付近から上方向にひび割れが進行し，円周上の対角線方向に対となって縦ひび割れが発生している場合が多く観察された。**図－6.1** に外観調査結果の一例を示す。

(2) 使用骨材とコンクリートの配合の追跡調査

耐張型 PC 電柱が導入された 1990 年以降を対象に巡視点検データから，製造年毎の縦ひび割れ発生率とアルカリ総量などの使用材料の変化を調査した結果を**図－6.2** に示す。細骨材には，主に神通川産骨材を使用しており，一部（細目）に常願寺川産骨材や黒部川産の骨材を使用していた時期もあった。

図－6.2 より，縦ひび割れ発生率は，細骨材のうち粗目に神通川産骨材，細目に常願寺川産骨材を使用していた 1990 年から 1999 年の製造時期，アルカリ総量が 4 kg/m^3 程度と多い 1990 年から 2003 年の製造時期及び SO_3 単位質量比が多い 1998 年から 2003 年の製造時期に高い発生率を示している。これらのことから，耐張型 PC 電柱に発生したひび割れの原因は，セメント由来のアルカリ総量が通常のコンクリートよりかなり高いこと，ASR の反応性の高い常願寺川産の細骨材を使用していたことが関係していると推察された。



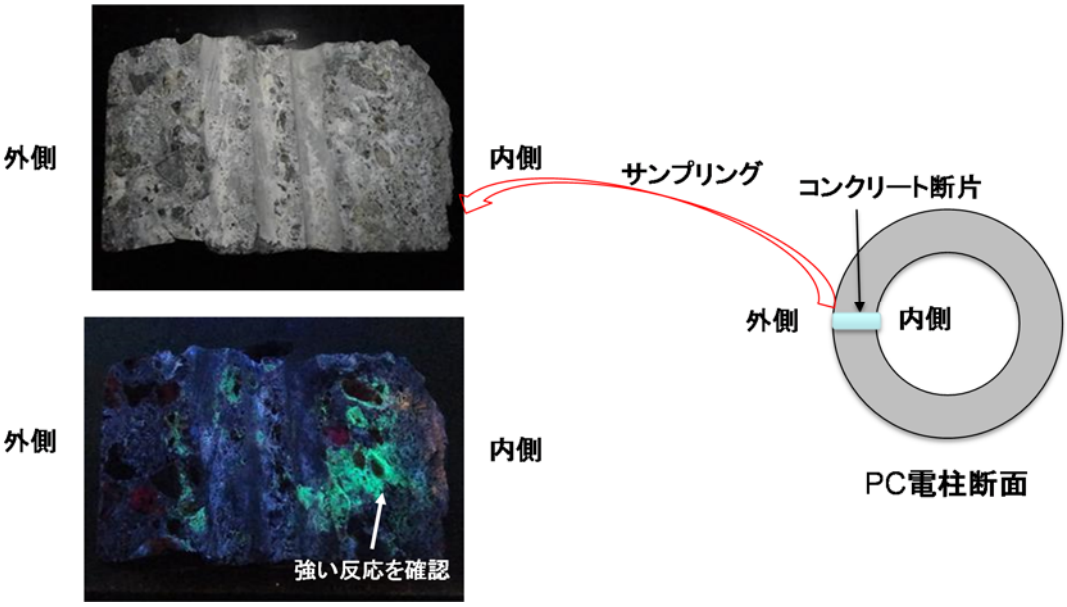
図－6.2 耐張型 PC 電柱のひび割れ発生率，ｾﾒﾝﾄのｱﾙｶﾘ総量および SO3 単位質量比の関係

(3) 発生原因の特定調査

A. ASR ゲル簡易判定試験（ゲルフルオレッセンス法）

縦ひび割れが発生した PC 電柱から採取（**写真－6.3** 参照）したコンクリート断片を用いて，ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易判定試験を実施した判定結果を**図－6.3** に示す。写真より，PC 電柱断面の内側（中空断面）において，一部の岩種の細骨材が激しく ASR を発生していることが判明した。

写真－6.3 コンクリート断片の採取状況



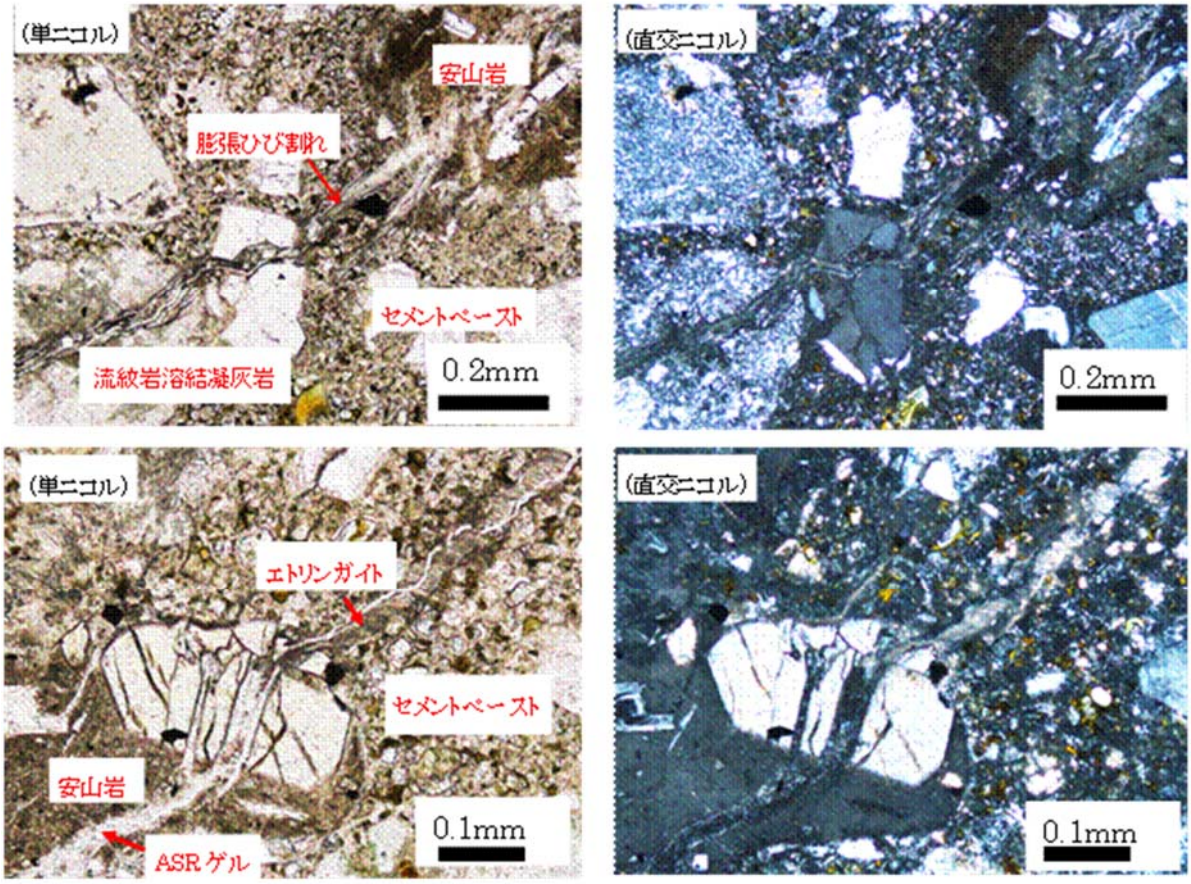
図－6.3 ゲルフルオレッセンス法の結果

B. 偏光顕微鏡によるコンクリート薄片観察

PC 電柱の製造過程において高温の蒸気養生を実施することや，配合において高強度混和材由来の SO_3 単位質量比が高いことから，エトリンガイトの遅延生成（DEF）による劣化も排除できないと考えられたため，コンクリート薄片を用いた岩石学的アプローチによる劣化原因調査[5)]を実施した。具体的には，縦ひび割れ発生率の高い 1999 年製造の劣化した耐張型の PC 電柱より採取したコンクリート片からコンクリート薄片（厚さ：20μm, 25×25mm）を多数作製し，偏光顕微鏡による詳細な観察により劣化メカニズムの解明を試みた。**写真－6.4** に偏光顕微鏡による観察結果を示す。粗骨材は閃緑岩，花崗岩，斑れい岩，片麻岩，流紋岩質溶結凝灰岩，緑色岩などからなり，流紋岩質溶結凝灰岩や一

部の花崗岩のみに ASR ゲルに充填された膨張ひび割れの発生が確認された。また，細骨材は流紋岩質溶結凝灰岩，花崗岩質岩，安山岩，砂岩，頁岩，チャートなどからなり，細骨材に含まれる安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩が顕著に ASR を発生しており，細骨材から進展した膨張ひび割れが多数観察された。これに対し，DEF の可能性を示唆するようなセメントペースト部でエトリンガイトが充填しているひび割れは確認されなかった。ただし，下段の写真に示すように，細骨材に含まれる安山岩から生じた膨張ひび割れ内部の ASR ゲルが，エトリンガイトの針状結晶に置き換わっている箇所も観察された。これは，Shayan et al[6),7)]の研究によれば，まず ASR による膨張ひび割れが一次的に発生し，その後 ASR ゲルの移動や水による溶出(溶解)によりできた空間に，二次的にエトリンガイトが生成したものであると考えられた。このような生成過程によるエトリンガイトは非膨張性と判断される。

これらのことから，PC 電柱に発生した縦ひび割れの主原因は ASR によるもので，エトリンガイトの遅延生成（DEF）による劣化の可能性は小さいと考えられた。



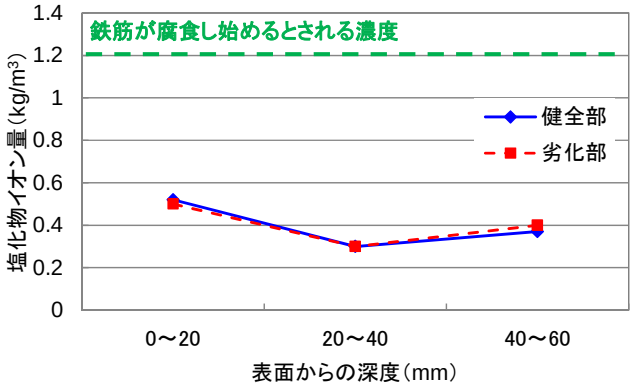
写真－6.4 コンクリート薄片の観察結果（ASR ゲルが観察された細骨材周辺の観察）

C. フェノールフタレイン溶液の塗布による中性化深さ測定

PC 電柱の頂部付近，地際付近，地中部の各断面で中性化深さを測定した。いずれの断面においても中性化深さは 1mm 程度で，中性化による鋼材腐食が縦ひび割れの主要な発生原因ではないと考えられた。

D. 塩化物イオン濃度測定

海岸より 1.2 ㎞地点に設置された一部劣化している PC 電柱を用い，表面からの深度，0～20mm，20～40mm，40～60mm において塩化物イオン濃度測定（JIS A 1154 を準拠）を実施した。結果を**図－6.4** に示す。図より，PC 電柱の塩化物イオン量は，劣化部，健全部ともに最大で 0.5kg/m³ 程度であり，鋼材が腐食を開始するとされている塩化物イオン量の 1.2kg/m³ を大きく下回っており，塩害による鋼材腐食が縦ひび割れの主要な発生原因ではないと考えられた。



図－6.4 塩化物イオン濃度測定結果

以上の調査から，縦ひび割れの主要な発生原因は，アルカリ総量が 4.0kg/m³ 近くあり，常願寺川産の骨材が使用されていたこと，ゲルフルオレッセンス法と偏光顕微鏡による薄片観察で ASR の発生が確認されたことより，ASR であると判断した。

6.3 フライアッシュコンクリートによる ASR 抑制効果の検証

6.3.1 試験内容

PC 電柱の縦ひび割れの主原因が ASR であると特定されたことから，その抑制対策として北陸地方で推進している高品質な分級フライアッシュの有効活用を検討した。まず，PC 電柱に実際使用している神通川産（2 種類）の骨材と黒部川産の骨材を用いて，分級フライアッシュ 15%（ブレーン比表面積約 4,700g/cm²）を混和したものとしないものの計 6 ケースの促進モルタルバー試験（ASTM C1260 に準拠）を実施し，骨材の ASR 膨張性とフライアッシュの ASR 抑制効果を確認した。さらに，現在の耐張型 PC 電柱の配合に分級フライアッシュ 15%を内割した配合により，ASR 反応性が高かった神通川産の骨材を用いて，促進コンクリートプリズム試験（CPT）[8),9)]を実施し，その効果を確認した。

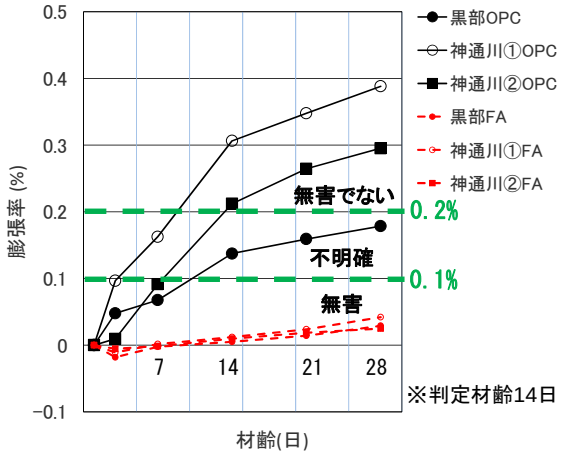
6.3.2 試験結果及び考察

促進モルタルバー試験結果を**図－6.5** に示す。図より，分級フライアッシュを混和しないケースでは神通川産の骨材がいずれも「無害でない」，黒部川産の骨材が「不明確」の判定であったが，分級フライアッシュを 15%混和することにより，いずれの骨材においても「無害」の判定となり十分な ASR 抑制効果が確認された。

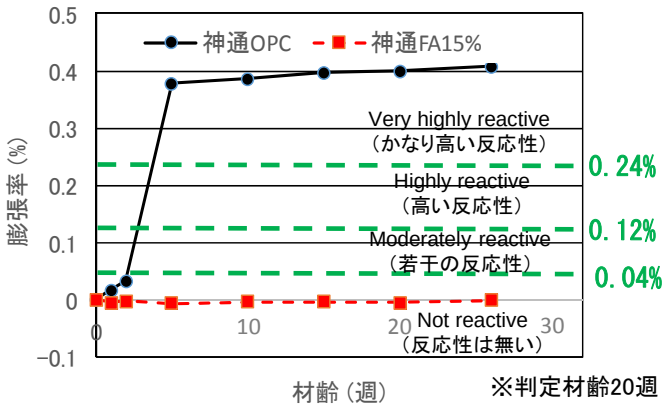
実配合による促進コンクリートプリズム試験結果を**図－6.6** に示す。図より，耐張型 PC

電柱の分級フライアッシュを活用した実配合においても，分級フライアッシュを 15%混和することにより，十分な ASR 抑制効果があることが確認された。

従って，今後，更新していく PC 電柱に，分級フライアッシュを ASR 抑制対策として活用することは，PC 電柱自体の耐久性向上に有効であることが確認された。



図－6.5 促進モルタルバー試験結果



図－6.6 促進コンクリートプリズム試験結果

6.4 フライアッシュコンクリートの遠心成形製品への適用性

6.4.1 遠心成形製品の製造工程

遠心成形製品の製造方法は，遠心成形用の鋼製型枠にコンクリートを投入し，遠心力成形機により所定の条件で遠心力を加える。その後，常圧蒸気養生（前養生を 2～4 時間後，昇温速度 20℃／時間で 70℃まで温度を上昇させ，最高温度 70℃を 4 時間保持）を実施し，所定の管理材齢まで屋外で自然養生している。

遠心成形の場合，成形時に余剰水を搾り出す際に微粒分であるセメントが一緒に流出することが報告されており [10]，セメントよりも比重の小さいフライアッシュを混和した場合，フライアッシュが余剰水とともに流出し，ASR 抑制対策としてのフライアッシュの十分な効果が期待できないことが懸念された。そこで，フライアッシュの添加率を変えた配合試験においてフレッシュ及び硬化コンクリートの特性を把握するとともに，遠心成形時に発生するスラリー成分の定量化と SEM 観察によりフライアッシュのポゾラン反応性を確認した。

6.4.2 試験内容

(1) 配合試験

配合試験は，プレキャスト製品工場の現状の製品配合を基準配合とし，北陸産分級フライアッシュの置換方法の違いにより，以下の 2 つのシリーズで実施した。

シリーズⅠ：セメント代替（内割り）によるフレッシュ性状および圧縮強度の把握

シリーズⅡ：セメント代替（内割り）と細骨材代替（外割り）の組合せによるフレッシュ性状および圧縮強度の把握と遠心成形供試体の SEM による微細組織の観察

シリーズⅠでは，分級フライアッシュが従来よりも高品質（ブレーン比表面積約4,700g/cm²，フライアッシュ平均粒径約8μm）[11),12)]となったことにより，内割比率を変化させ，主に強度発現状況を確認した。シリーズⅡでは，シリーズⅠの結果を踏まえ，所定の管理材齢において十分な強度発現が期待できる内割比率を決定した後に，外割比率を変化させ，主にコンクリートのフレッシュ性状の施工品質や内面仕上り状況などの製品品質が十分かどうかを確認した。これらの各配合試験においては，遠心成形時に発生するスラリー成分の各成分量を把握した。また，シリーズⅡの遠心成形供試体中の SEM 観察により，分級フライアッシュのポゾラン反応性を確認した。

シリーズⅠおよびシリーズⅡで用いた使用材料は，プレキャスト製品工場で実際に使用しているセメント，骨材，高強度混和材および化学混和剤である。使用材料の産地と基本物性を**表－6.2**に示す。遠心成形供試体（外径 200mm，厚さ 40mm，高さ 300mm の中空円筒供試体）の作製は，JIS A 1136「遠心力締固めコンクリートの圧縮試験方法」に準拠した。手順は，実際の遠心成形製品と同様，遠心成形用の鋼製型枠に所定量のコンクリートを投入し，遠心力成形機により 2G2 分，11G2 分，24G3 分，34G5 分の条件で遠心力を加えた。その後，型枠を傾けてスラリーを排出し，常圧蒸気養生（前置きを 2 時間とった後，昇温速度 20℃/時間で 70℃まで温度を上昇させ，最高温度 70℃を 4 時間保持し，その後徐冷）を実施し，所定材齢まで 20℃の恒温室で気中養生した。

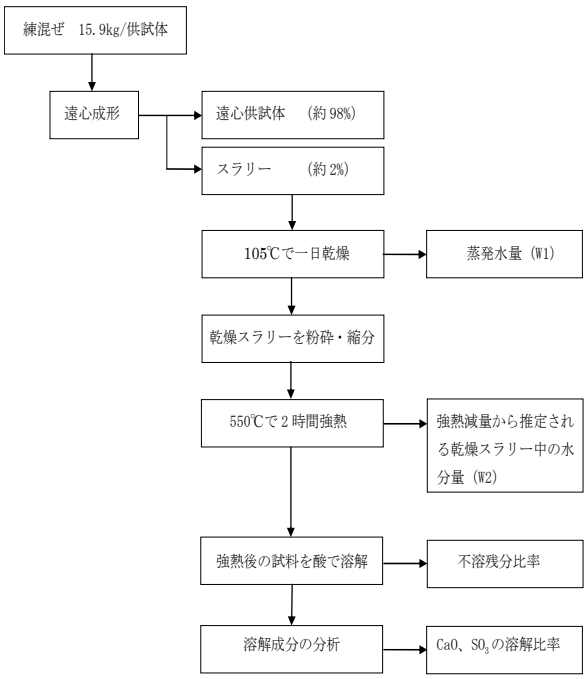
表－6.2 使用材料

使用材料		記号	産地･基本物性
セメント		C	T社製普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm^3, 比表面積: 3,350cm^2/g
混和材	高強度混和材	SM	TM社製, セメント重量の10%を添加, 密度:2.95g/cm^3, 比表面積:5,440cm^2/g
混和材	フライアッシュ	FA	北陸電力七尾大田火力発電所産, JISⅡ種, 密度:2.34g/cm^3, 比表面積:4,610cm^2/g
細骨材		S	富山県神通川産の陸砂, F.M. : 2.70, 密度 : 2.60g/cm^3, 吸水率 : 1.87%
粗骨材		G	富山県黒部川産の河川砂利, 最大骨材寸法:20mm, F.M.:6.60, 密度:2.70g/cm^3, 吸水率:1.21%
混和剤		MT	K社製高性能減水剤Ⅰ種

(2) スラリー成分の分析試験

スラリー成分の各分量の把握は，スラリーに含まれる水分量，骨材量，フライアッシュ量，セメント量及び高強度混和材量をそれぞれ算出した。スラリー成分の分析は**図－6.7**に示す分析フローにより実施した。まず，水分量は，105℃で 1 日乾燥させた乾燥スラリーの蒸発水量（W1）と乾燥スラリーを粉砕・縮分した調整試料を 550℃で 2 時間強熱した強熱減量から推定した乾燥スラリーに含まれる水分量（W2）の和とした。不溶残分として

骨材，フライアッシュがあるため,骨材量はフライアッシュを含まない基準配合の不溶残分比率から推定した。フライアッシュ量は，フライアッシュを含む配合ケースの不溶残分比率から前述で算出した骨材の不溶残分比率を差し引いた比率により推定した。溶解残分となるセメント量及び高強度混和材量は，カルシウム分（CaO）とイオウ分（SO_3）の溶解比率から推定した。溶解成分の分析は，CaO については（社）セメント協会の配合推定試験方法に準拠した EDTA 滴定法により，SO_3 については JIS R 5202 三酸化硫黄の定量方法に準拠した硫酸バリウム重量法により得た。



図－6.7 スラリー成分の分析フロー

(3) SEM 観察

遠心成形供試体（内割 10%，外割 11%，材齢 1 日，7 日，14 日，28 日）を用いて，遠心成形製品断面の内面部，中央部，外面部における分級フライアッシュのポゾラン反応性及びその試験体内での分布状況を二次電子像により観察した。

6.4.3 試験結果及び考察

(1) 配合試験

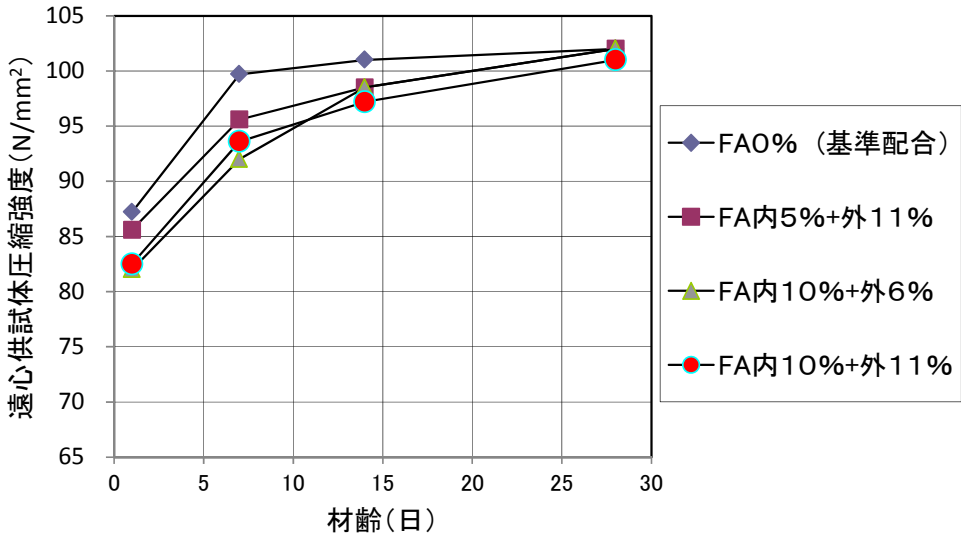
ここでは，シリーズⅡの試験結果について述べる。シリーズⅡで実施したコンクリートの配合を**表－6.3** に，圧縮試験結果を**図－6.8** に示す。なお，最も粉体量が多くなる FA 内 5%+外 16%のケースでは所定のフレッシュ性状（スランプ 18±3cm，空気量 2±1%）を確保することができなかったため試験結果から除外した。

図－6.8 より，材齢 14 日まではシリーズⅠと同等の強度発現が確認され，材齢 14 日から 28 日の材齢期間では，3 ケースともシリーズⅠ以上の強度発現となり，材齢 28 日での圧縮強度は基準配合と同等となることが確認された。これは，外割で添加した分級フライ

アッシュの良好なポゾラン反応と，フライアッシュの微粉末効果[13]による未水和セメントの水和反応の促進とによる効果が寄与していると推察された。従って，本製品ではフライアッシュのポゾラン反応の進行により供用中での強度増加が期待できるため，コンクリートのフレッシュ性状や製品の内面仕上り状況が満足する範囲内で，分級フライアッシュを内割・外割で適切に混和することは，良好なポゾラン反応による強度発現や ASR 抑制効果など，PC ポール・PC パイル製品自体の製品品質や耐久性を高める効果があると考えられた。なお，遠心供試体の仕上り状況は，目視および触診観察では粘性の増加がみられたが，製品製造において問題になるものではなかった。

表－6.3 シリーズⅡの配合

配合ケース	水紛体比 (W/P)	フライアッシュ比率 (FA/P)	単位量(kg/m^3)						高性能減水剤添加量
			水 (W)	紛体量(P)			細骨材 (S)	粗骨材 (G)	
				セメント (C)	高強度混和材 (SM)	フライアッシュ (FA)			
	(%)	(%)							(P×%)
FA0%（基準配合）	28.2	0.0	155	500	50.0	0.0	642	1088	0.95
FA内5%+外11%	24.9	16.1	155	475	47.5	100.0	552	1088	0.97
FA内10%+外6%	26.3	16.1	155	450	45.0	95.0	581	1088	0.96
FA内10%+外11%	24.7	21.1	155	450	45.0	132.0	539	1088	1.02
FA内5%＋外16%	24.7	21.0	155	475	47.5	139.0	508	1088	1.1～1.6

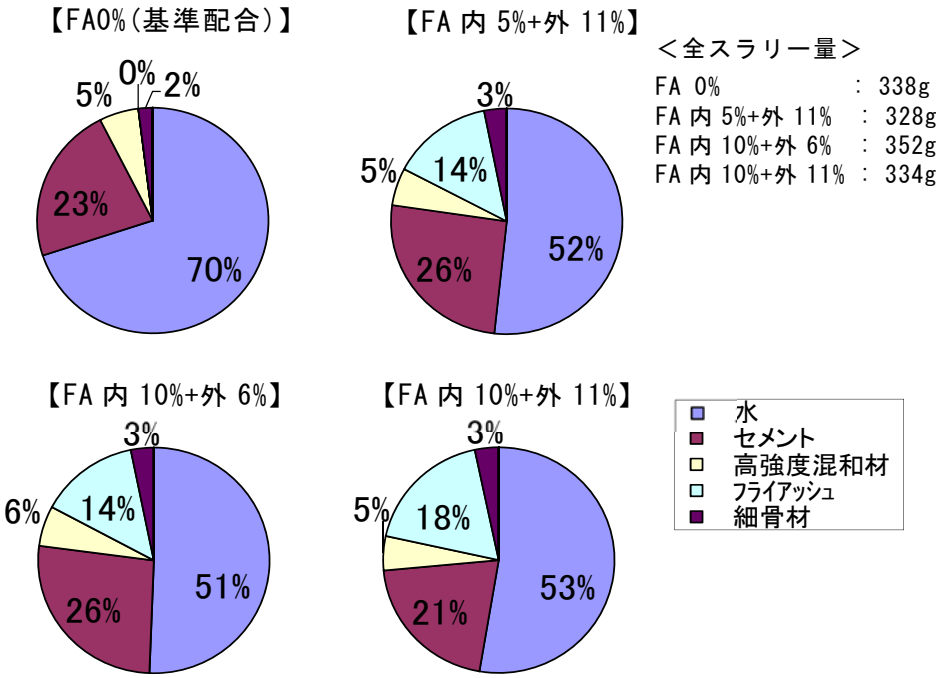


図－6.8 圧縮試験結果と材齢の関係（シリーズⅡ）

(2) スラリー成分の分析試験

図－6.9 に各配合における材料毎のスラリー成分比率を示す。スラリー溶出量はコンクリート投入量の約 2%と僅かであった。また，製品に残留するフライアッシュ量は，FA 内 5%+外 11%のケースが 15.5%に，FA 内 10%+外 6%が 15.5%に，FA 内 10%+外 11%が

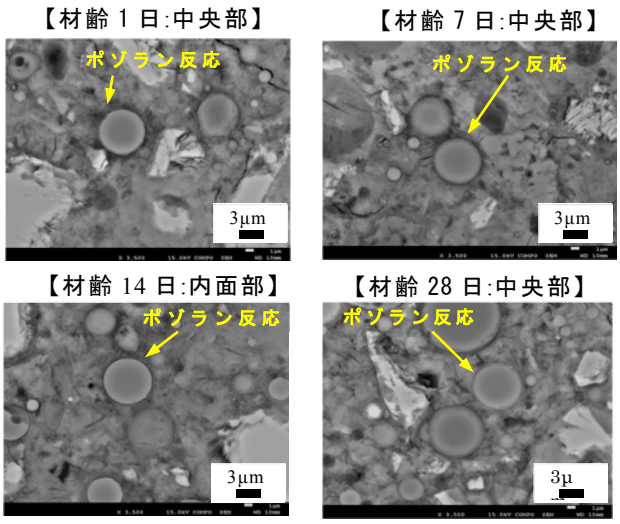
20.3%になり，いずれの配合においてもスラリー成分として溶出する量は投入量に対し1%以下とごく僅かであった。



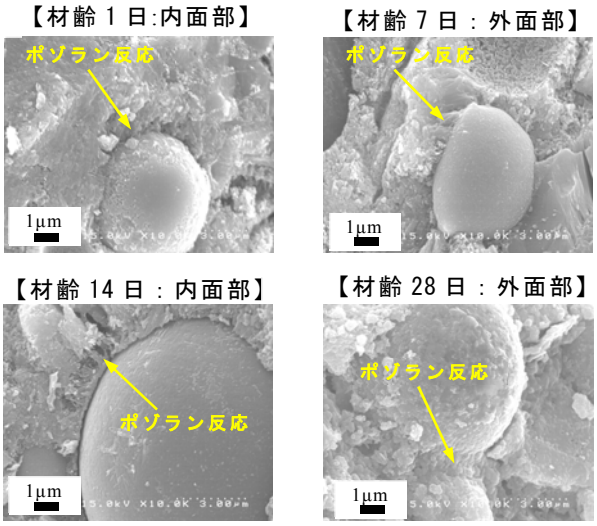
図－6.9 スラリー成分比率（シリーズⅡ）

(3) SEM 観察

遠心成形供試体（FA 内 10%+外 11%）の各材齢における反射電子像を**写真－6.5** に，二次電子像を**写真－6.6** に示す。なお，SEM 観察においては，製品断面の内面部，中央部，外面部に分けて観察を実施している。



写真－6.5 各材齢における反射電子像



写真－6.6 各材齢における二次電子像

写真－6.6 より，材齢 1 日では，内面部のごく一部のフライアッシュ粒子の周囲に，ポゾラン反応相がすでに認められた。また，外面部でもフライアッシュ粒子全体が反応しているものも認められたが，顕著に反応を示している粒子はごく僅かであった。材齢 14 日及び材齢 28 日では，内面部及び外面部のいずれにおいても，多くのフライアッシュ粒子の周囲にポゾラン反応相が明確に認められた。これらのことは，分級フライアッシュのポゾラン反応が，材齢 1 日の早期から始まり，材齢 14 日までにはかなり反応が進んでいることを意味している。

6.5 まとめ

本章では，PC 電柱における縦ひび割れの発生原因の特定調査を行った。各種試験結果などから，ASR により PC 電柱の断面方向の膨張が促進され，外縁部のコンクリートにほぼ均等に引張力が生じたため，円周上の対角線方向に対となる縦ひび割れが発生したものと推察した。そのことから，ASR 抑制対策として分級フライアッシュを 15%以上混和することが有効であること，また，遠心成形時に発生するスラリー成分の定量化実験とその試験体の SEM 観察を実施し，分級フライアッシュの遠心成形製品への適用が可能であることを検証した。

この結果を受けて，北陸電力㈱管内に PC 電柱を供給している日本海コンクリート工業㈱では，平成 28 年 4 月から生産する全ての PC 電柱に分級フライアッシュを混和している。このように ASR を抑制する目的で PC 電柱へフライアッシュを利用する取組みは全国的にも初めてである。

北陸電力㈱は，新設及び建替を迎える年間約 7～8 千本の PC 電柱全てに分級フライアッシュ適用製品を使用していく計画であり，また，電柱と同じ遠心成形で製造される PHC 杭にも分級フライアッシュを適用することが可能であることから，今後，更なるフライアッシュコンクリートの利活用促進が期待される。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) PC 電柱に発生した特徴的な縦ひび割れの発生原因は，各種試験結果などから，ASR により PC 電柱の断面方向の膨張が促進され，外縁部のコンクリートにほぼ均等に引張力が生じたため，円周上の対角線方向に対となる縦ひび割れが発生したものと推察された。

(2) PC電柱の製造過程から，エトリンガイトの遅延生成（DEF）による劣化も排除できないと考えられたため，コンクリート薄片を用いた岩石学的アプローチによる調査を実施したところ，DEFの可能性を示唆するひび割れ（セメントペースト部においてエトリンガイトで充填されているひび割れ）は確認されなかった。従って，PC電柱に発生した縦ひび割れの主原因はASRによるもので，エトリンガイトの遅延生成（DEF）による劣化の可能性は小さいと考えられた。

(3) 実際のプレキャスト製品工場でのフライアッシュコンクリートの適用にあたり，当該工場の使用材料，製造配合による ASR 抑制効果の確認を実施した。その結果，促進モルタルバー試験及びコンクリートプリズム試験のいずれの試験においても十分な ASR 抑制効果があることが確認された。従って，PC 電柱の ASR 抑制対策として，

分級フライアッシュを 15%以上混和することが有効であると考えられた。

(4) 分級フライアッシュを PC 電柱へ活用するにあたり，遠心成形時の余剰水の搾出の際にセメントよりも比重の小さいフライアッシュの流出が懸念されたことから, 遠心成形時に発生するスラリー成分の定量化実験とその試験体の SEM 観察を実施した。その結果, 分級フライアッシュがスラリー成分として溶出する量は投入量に対し 1%以下とごく僅かであり，遠心成形製品への適用には問題ないことが確認された。

【参考文献】

1）T.Kubo, C.Sannoh, T.Hashimoto, K.Torii : The ASR Cracking In Electrical Concrete Poles and its Mitigating Effects by Fine Fly Ash, Proceedings of the 10th ACI/RILEM International Conference on Cementitious Materials and Alternative Binders for Sustainable Concrete, Montreal, CD-ROM 14 pages, 2017.

2）橋本徹，古田勝，金井滋，鳥居和之：PC 電柱の縦ひび割れの発生原因の調査とその ASR 抑制対策，プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集, pp.251-256, 2015.

3）橋本徹，金井滋，林安成，鳥居和之：北陸産分級フライアッシュの遠心成形製品への適用性，コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.181-186, 2015.

4）参納千夏男，丸山達也，山戸博晃，鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発，コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.133-138, 2013.

5）広野真一：わが国の反応性骨材の地質学的な分布と岩石学的試験による骨材のアルカリシリカ反応性の判定に関する基礎的研究，金沢大学学位論文, 2015.

6）A. Shayan and G.W. Quick: Relative importance of deleterious reactions in concrete formation of AAR products and ettringite, Adv. In Cement Research, Vol.4, No.16, pp.149-157, 1992.

7）A. Shayan and I. Ivanusec: An experimental verification of the association of alkali-aggregate reaction and delayed ettringite formation, Cement and Concrete Coomposites, Vol.18, pp.161-170, 1996.

8）川端雄一郎，山田一夫，小川彰一，佐川康貴：加速コンクリートプリズム試験を用いた ASR 膨張の簡易予測，セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.449-455, 2013.

9）ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学会, pp.70-78, 2014.

10）増田靖彦，名越聖治：セメント二次製品の遠心締め固め成形方法，特許公報，第 2639411 号, 1997.

11）橋本徹，参納千夏男，久保哲司，鳥居和之：北陸産分級フライアッシュを用いたコンクリートの配合と強度，コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.133-138, 2013.

12）橋本徹，白根勇二，高橋晴香，鳥居和之：分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度改善メカニズムに関する一考察，材料, Vol.63, No.10, pp.694-701, 2014.

13）山崎寛司：鉱物質微粒末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究，土木学会論文集，第 85 号, pp.15-46, 1962.

第７章　港湾構造物におけるフライアッシュ高含有コンクリートの適用性

7.1 概　説

福井県の港湾で浚渫砂の処分が恒常的な課題となっている。一方，港湾では浚渫と合わせて消波ブロックを製造し，離岸堤を設置する必要がある。消波ブロックの製造には，既に確立されているフライアッシュを高含有したコンクリート（ハイボリュームフライアッシュコンクリート：HVFC）を製造する技術を利用する方法が考えられるが実際の適用例は少ない[1), 2)]。そこでHVFCに浚渫砂を混合し所要の品質を満たすことができれば，HVFCによる消波ブロックの適用が容易となり，浚渫砂処分の課題が解決されると共に，フライアッシュの有効活用が促進されることとなる。また，石川県の輪島地区では，藻場が減少（磯焼け）し，アワビやサザエなどの漁獲量の減少が問題となってきている。コンクリートブロックなどを用いて藻場を再生する場合，生物の生息を阻害するような成分が溶出しないことが必要あり，フライアッシュの有効利用が期待できる。

本章では，浚渫砂およびフライアッシュ原粉の品質を十分把握し，浚渫砂を混合した場合のコンクリートの配合，硬化メカニズムなどを検討することで，浚渫砂を混合したHVFCの製造技術を確立するとともに，消波ブロックを試作し，暴露試験により長期の耐久性を確認することで，将来の実用化に繋げている[3), 4)]。また，フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの室内試験とフィールド試験を行い，藻場造成材としての評価を進めている。

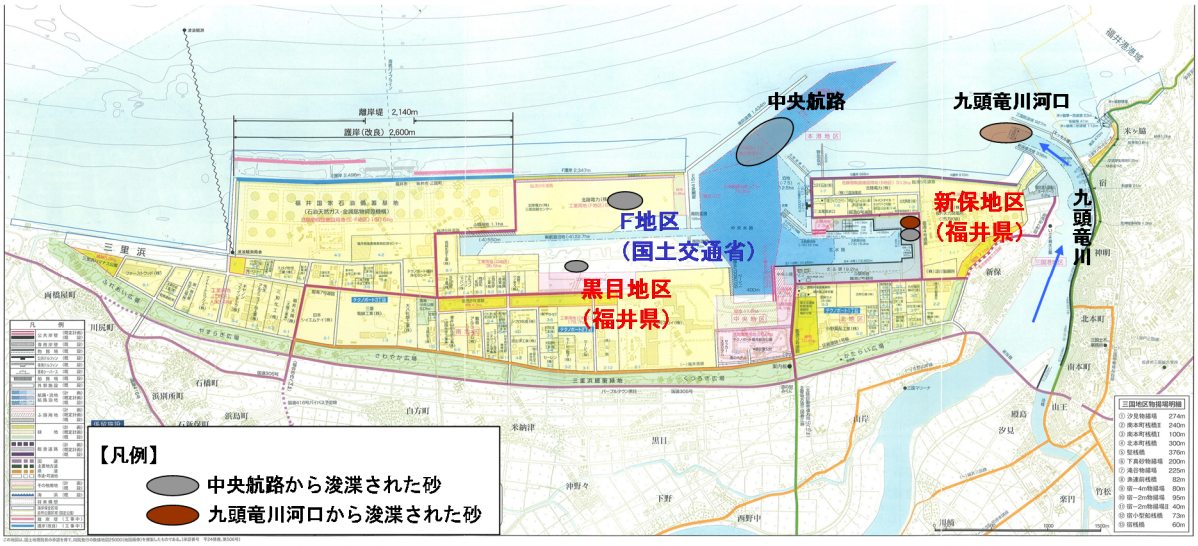
7.2 浚渫砂とフライアッシュを用いたコンクリートの研究開発

7.2.1 使用材料

(1) 浚渫砂

A. 採取位置

国交省がF地区に仮置きしている浚渫砂（H7～11年の中央航路の浚渫砂），福井県が福井港ふ頭用地（新保地区・黒目地区）に仮置きしている浚渫砂（H12年以降の浚渫砂）及び福井県が毎年浚渫する砂を対象とした。採取位置を**図－7.1**に示す。



図－7.1 浚渫砂の採取位置図

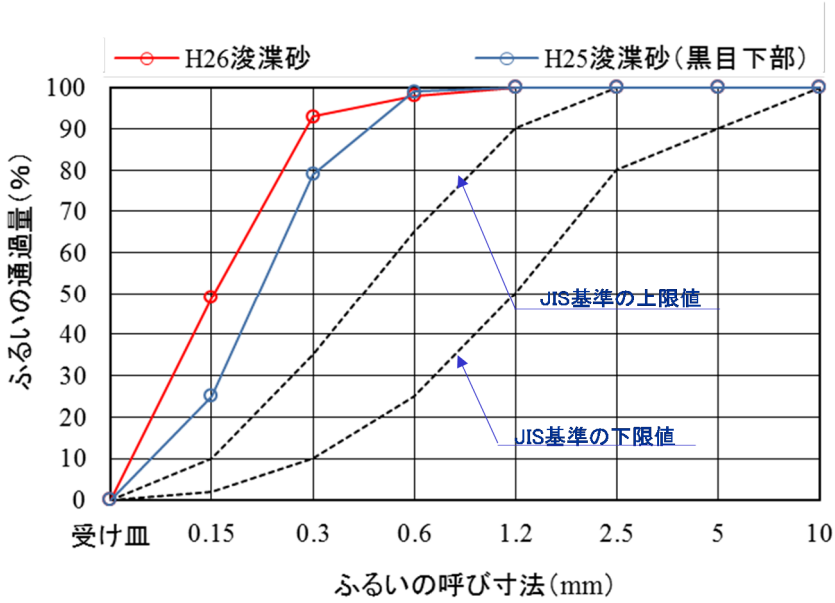
B. 試験結果

浚渫砂の試験結果を**表－7.1** に，粒度分布を**図－7.2** に示す。絶乾密度，吸水率，微粒分量，石炭･亜炭等で密度 1.95 に浮くものは，JIS の規格を満足していない。また，粒度については，JIS 基準の上限値を超えて細粒分が多くなっていることから，コンクリートの耐摩耗性への影響が考えられる。

表－7.1 浚渫砂の試験結果

試験項目		H26採取(中央航路砂)	H25採取(中央航路砂)		JIS A 5308（付属書 A）
		新保地区(1ケ月仮置) H26使用	黒目地区(1年仮置) H25使用	F地区(14～18年仮置)	
密　度 (g/cm³)	表乾	2.45	2.53	2.45	
	絶乾	2.29	2.43	2.34	2. 5以上
吸水率(%)		6.90	4.07	5.09	3. 5以下
塩分含有量(%)		0.014	0.061	0.004	0. 04以下
有機不純物(%)		標準色より淡い	標準色より淡い	標準色より淡い	標準色液の色と同じ又は淡い
粘土塊量(%)		ー※	ー※	ー※	1. 0以下
最大寸法(mm)		0.3	0.6	0.6	
粗粒率		0.60	0.97	0.88	
微粒分量(%)		15.90	8.84	2.18	3. 0以下
安定性(%)		0.7	4.1	0.6	10以下
石炭、亜炭等で密度1.95に浮くもの(%)		2.4	6.3	10.6	0. 5以下

※1. 2mm ふるいに留まる量が 5%未満となる試料については、試験を省略(JIS A1137)

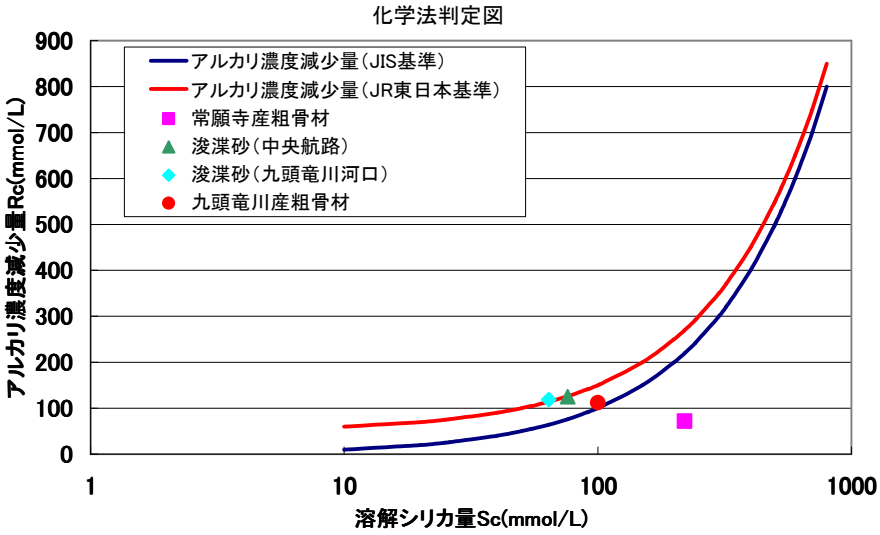


図－7.2 浚渫砂の粒度分布

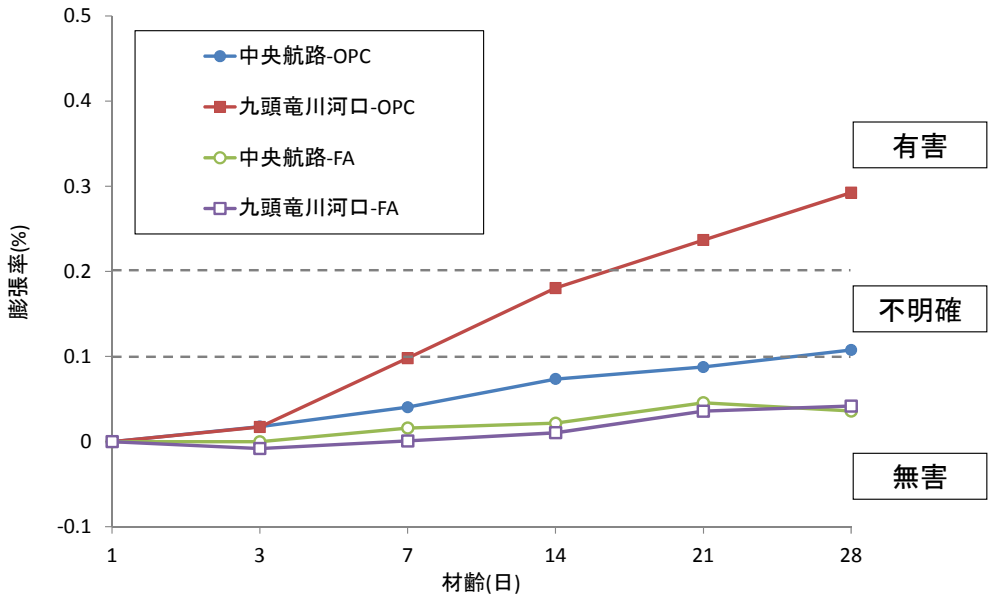
C. アルカリシリカ反応性

化学法(JIS A1145)の結果を**図－7.3** に，促進モルタルバー法(ASTM C1260)の結果を**図－7.4** にそれぞれ示す。**図－7.3** には，JIS の判定基準線に加えて JR 東日本の判定線を示

す[5]。図に示す通り，JIS の判定基準では，いずれの砂も「無害」の判定であったが，JR 東日本の判定基準では,「準有害」の判定（JIS 基準と JR 東日本基準の判定線の間の領域）であった。また，促進モルタルバー法では，中央航路の浚渫砂が「不明確」，九頭竜川河口の浚渫砂が「有害」であったが，いずれの浚渫砂もフライアッシュ（原紛 15%置換）を混和することで「無害」となった。



図－7.3 化学法の結果



図－7.4 促進モルタルバー法の結果

(2) フライアッシュ原粉

発生量が多く安価な敦賀火力産の原粉（分級前）を使用することとした。**表－7.2** に材料試験結果を示す。今回使用したフライアッシュ原粉（分級前）は、表のとおり，二酸化けい素，湿分，強熱減量，　密度，粉末度が JIS Ⅱ種の規格に適合している。

表－7.2 フライアッシュの材料試験結果

項　　目		今回使用品原粉(分級前) H26.6.19採取	H25年使用品原粉(分級前) H25.11.26採取	JIS品(分級後) (H25.12～H26.12)		JIS A6201 フライアッシュ規格値	
				平均	標準偏差	Ⅱ種	Ⅳ種
二酸化けい素		58.9	61.0	643	1.3	45.0以上	45.0以上
湿分		0.1	＜0.1	＜0.1	－	1.0以下	1.0以下
強熱減量		3.8	2.3	3.4	0.3	5.0以下	5.0以下
密度		2.19	2.17	2.30	0.00	1.95以上	1.95以上
粉末度	45μmふるい残分（%）	21	21	1.2	0.2	40以下	70以下
	比表面積(cm²/g)	3,680	3,570	4,744	81	2,500以上	1,500以上

(3) スラグ骨材

スラグ骨材は，コンクリートの比重 2.3 以上を満足させるために用いることから，品質（膨張等）に問題なく，比重調整効果の高いものを選定し，㈱星野産商の電気炉酸化スラグ「エコスター」を使用することとした。**表－7.3** に材料試験結果を示す。表のとおり，全ての項目が JIS 規格を満足している。

表－7.3 電気炉酸化スラグの材料試験結果

H26使用

項目		試験結果	JIS A 5011-4 (電気炉酸化スラグ骨材)
密　度 (g/cm³)	表乾	3. 63	－
	絶乾	3. 60	3. 0以上 4. 0未満
吸水率(%)		0. 71	2. 0以下
単位体積		2. 02	1. 6以上
粗粒率		6.48	協議値±0.30
微粒分量(%)		1. 0	協議値±1.0%
安定性(%)		0. 3	12以下
アルカリシリカ反応性		無害	(化学法)

H25使用

項目		試験結果	JIS A 5011-4 (電気炉酸化スラグ骨材)
密　度 (g/cm³)	表乾	3. 73	－
	絶乾	3. 70	3. 0以上 4. 0未満
吸水率(%)		0. 69	2. 0以下
単位体積		2. 11	1. 6以上
粗粒率		6.53	協議値±0.30
微粒分量(%)		0. 7	協議値±1.0%
安定性(%)		1. 6	12以下
アルカリシリカ反応性		無害	(化学法)

7.2.2 試験方法

フライアッシュと浚渫砂を同量できるだけ多く使用し，所定のフレッシュ性状（スランプ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%）を満足する配合を検討し，試験練りした。練り混ぜ水は，水道水と塩水（海水と同程度の濃度：3.3%）の２通りとした。海水をコンクリートに使用した場合，早期強度が増進することが知られており，水道水を使用する場合よりもコストが低減できるメリットがある[6), 7)]。また，コンクリートの目標比重を 2.3 以上とするために，スラグ骨材を混和する場合と混和しない場合を設定した。

試験練りしたコンクリートは，それぞれ圧縮強度試験に供した。また，スラグ骨材を混和した場合に材料分離していないことを確認するために,塩ビ管にコンクリートを投入し，硬化した後，切り出して断面を観察した。**表－7.4** に今回作成した配合表を示す。

表－7.4 配合表

		28日圧縮強度 (N/mm²)	比重	水結合材比 (%)	水セメント比 (%)	配合(kg/m³)					
						水	セメント	フライアッシュ	浚渫砂	スラグ	混和剤
スラグ有	NaCl有	23.4	2.38	40	125	257	205	437	437	956	3.1
	NaCl無	19.1	2.37								
スラグ無	NaCl有	24.3	1.87	38	127	341	269	617	617	-	4.0
	NaCl無	18.7	1.87								

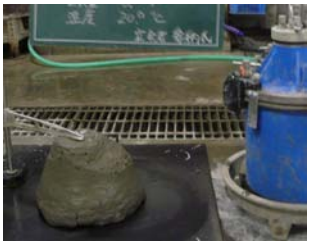
7.2.3 試験結果および考察

スランプ，空気量の試験結果を**表－7.5** に，試験状況の写真を**写真－7.1** に示す。表に示す通り，いずれのケースにおいても，所定のスランプ，空気量を満足することができた。

表－7.5 フレッシュ性状試験結果

		スランプ(cm)	空気量(%)
スラグ有	NaCl有	14.5	3.7
	NaCl無	14.0	3.5
スラグ無	NaCl有	11.5	4.0
	NaCl無	12.0	3.9

(a) スラグ有、NaCl 有



(b) スラグ有、NaCl 無

(c) スラグ無、NaCl 有

(d) スラグ無、NaCl 無

写真－7.1 フレッシュ性状試験状況

圧縮強度の試験結果を**表－7.6** に示す。表には，硬化体としての比重も合わせて示す。圧縮強度は，いずれのケースにおいても 28 日材齢で 20N/mm² 前後であったが，NaCl を添加した場合の方が，20%程度強度が大きい結果となった。また，比重は，スラグ骨材を混和した場合に，目標とした 2.3 以上を満足することができた。

表－7.6 圧縮強度試験結果

		圧縮強度(N/mm²)			比重
		3 日	7 日	28 日	
ｽﾗｸﾞ有	NaCl有	7.5	11.6	23.4	2.37
	NaCl 無	6.9	10.4	19.1	2.37
ｽﾗｸﾞ無	NaCl有	7.2	11.4	24.3	1.87
	NaCl 無	6.6	10.5	18.7	1.87

材料分離状況の確認試験結果を**写真－7.2** に示す。切断面の状況から，骨材の分離は確認されなかった。また，上下による比重の違いもほとんどなかったことから，材料分離はないことが確認された。

(a) 試験状況

(b) 切断面の状況

写真－7.2 材料分離状況の確認試験結果

今回の試験結果から以下の考察を得ることができた。

① 福井港浚渫砂および敦賀火力石炭灰（原粉）を主材とした硬化体の製造が可能。

② スラグ骨材を混ぜることによりフレッシュ性状を確保しつつ，密度の調整が可能（2.3t/m³ 以上）。

③ 強度の増進に，NaCl は有効（2～3 割以上の強度増）。

④ 粘性が高く，1m程度の打込みでも，上下間の顕著な分離は認められない。

⑤ 粘性が高く分離抵抗性も高いため，施工性を向上するには，大き目のスランプ設定が望ましい。

7.3 消波ブロックの設計と試験施工

7.3.1 消波ブロックの設計

配合設計は，アッシュクリートの配合設計技術をベースとし，単位容積質量が2,300kg/m³となるように，スラグ粗骨材（エコスター）の単位量を設定した。また、NaClの添加は有りのみの配合とし，フライアッシュと浚渫砂は同量とすることを条件とした。ここで，アッシュクリートは骨材等を混合することが可能な硬化体であるが，混合により圧縮強度が低下する傾向がある。H25 年度では，設計強度 21N/mm²，目標 27.9N/mm² に対し，実績 23.4 N/mm² となった。この結果を元に，H26 年度は設計強度 21，24，27 N/mm² の 3 水準で試験練りを行い，強度試験および溶出試験結果を確認することとした。実機による消波ブロックの製造は，事前試験練り時の結果を踏まえて配合を決定することとした。フレッシュ性状の目標値はランプ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%である。**表－7.7** にフレッシュ性状，**表－7.8** に配合表を示す。

表－7.7 フレッシュ性状

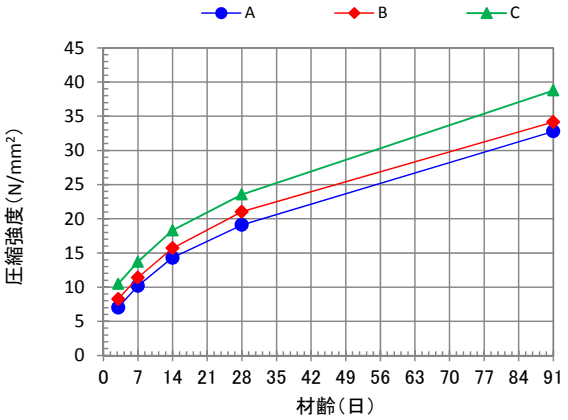
配合	試験結果			
	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	単位容積質量 (kg/m3)
A	14.0	4.2(5.0)	21.0	2358
	15 分後 12.5	4.0(4.8)	20.5	2374
B	16.0	5.7(6.5)	21.0	2338
	15 分後 14.5	5.1(5.9)	20.5	2362
C	15.5	4.7(5.5)	20.5	2378
	15 分後 14.0	4.1(4.9)	20.5	2383

表－7.8 配合表

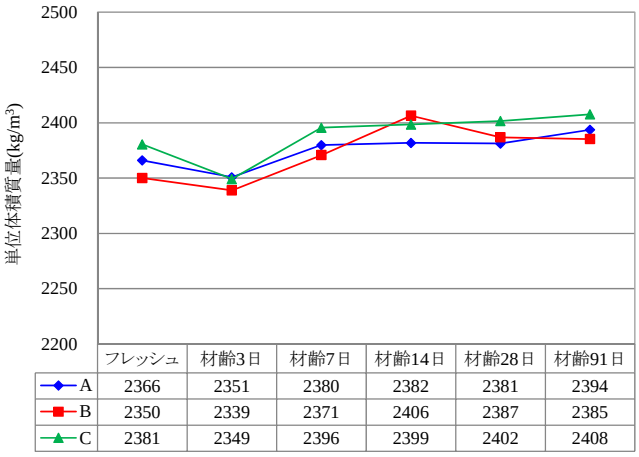
	W/C+F (%)	単位量 (kg／m³)							
		水	ｾﾒﾝﾄ	ﾌﾗｲｱｯｼｭ	浚渫砂	ｴｺｽﾀｰ	NaCl	SP8SV	AE 剤
A 21N	43.5	260	212	386	386	1068	8.58	1.0%	80A
B 24N	43.5	265	240	370	370	1065	8.76	1.0%	80A
C 27N	42.7	268	268	360	360	1055	8.65	0.8%	70A

図－7.5 に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度の結果を見てみると，これまでのアッシュクリートの強度推定式による予測値より低くなっており，これは前年度と同様，浚渫砂およびスラグ骨材を混合したことが強度低下の要因となっていると考えられる。また，昨年度の強度試験結果と比較して，7 日以降の圧縮強度伸び率が小さい傾向にあるが，昨年度と異なる浚渫砂を使用していることから定量的に評価することはできず，使用する浚渫砂の違いによって強度発現に及ぼす影響が異なると推察される。

図－7.6 に、単位体積質量を示す。フレッシュ時，硬化後，いずれも目標となる 2,300kg/m3 を満たしていた。



図－7.5 圧縮強度試験結果



	フレッシュ	材齢3日	材齢7日	材齢14日	材齢28日	材齢91日
A	2366	2351	2380	2382	2381	2394
B	2350	2339	2371	2406	2387	2385
C	2381	2349	2396	2399	2402	2408

図－7.6 単位体積質量測定結果

アッシュクリートの配合強度は、下記の（式１）で構成される。

（配合強度）

＝A×（C+kF）/ W+B　　・・・・（式１）

ここに、

A，B　　：回帰式の係数

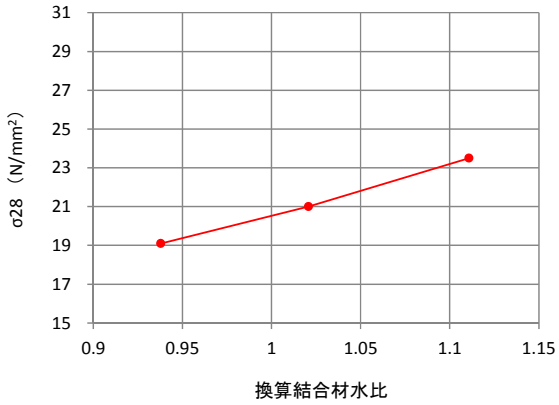
C，F，W　：それぞれセメント，フライアッシュ，水の単位量（kg/m³）

k　　：フライアッシュの強度寄与率をセメント量に換算する係数

（C＋kF）/ W：換算結合材水比

そこで、今回の 28 日強度試験結果（**図－7.5**）をもとに，浚渫砂混合 FA コンクリートに適合するように修正した係数 A，B を回帰式により算出し，配合強度予測式を求めた。A＝25.8，B＝-5.18 となり，**図－7.7** の通りとなった。

ここで，今回のような浚渫砂およびスラグ骨材を混合したことによる強度低下要因はこの係数の変化で包括的に吸収していることになる。また、石炭灰そのものの強度寄与率は基本的に変化しないと判断するのが妥当と思われるため，従来と同じ値（k＝0.0825）を使用することとした。



図－7.7 配合強度予測式

図－7.7 の配合強度予測式を使用して，実記試験配合を選定する。

ここで，試験練りを含め，呼び強度に対して配合強度を求めるための割増係数は，土木学会の算定式を使用するが，この算定に必要な変動係数は 15%と設定した。この値は，これまでのアッシュクリート技術の事業展開において使用していたものと同じ値である。通常の生コンであれば変動係数は 10%以下であるが，今回は石炭灰の単位量は少ないものの，これまで経験のない浚渫砂との混合であり，従来と同じ変動係数として算出したところ，配合強度は 27.9N/mm² となった。

以上の条件で配合修正すると，**表－7.9** の①の配合となる。

表－7.9 配合

配合	単位量（kg／m³）							
	水	ｾﾒﾝﾄ	ﾌﾗｲｱｯｼｭ	浚渫砂	ｴｺｽﾀｰ	NaCl	SP8SV	AE 剤
①	280	333	324	324	1050	9.26	0.8%	70A
②	274	323	340	340	1034	9.04	0.8%	70A

7.3.2 消波ブロックの試験施工

消波ブロックの作製は、㈱ホクコンのご協力を得て同社富山工場(**写真－7.3**)で実施した。

練混ぜは以下の手順で実施した。

① 浚渫砂+エコスター投入
② フライアッシュ投入
③ セメント投入
④ 空練り 10 秒
⑤ 水投入
⑥ 練混ぜ 120 秒

写真－7.3 ㈱ホクコン富山工場

当日に砂の表面水率を測定し，単位水量および単位細骨材量の修正を行っている。

表－7.10 に品質管理試験結果一覧を示す。配合選定により決定した①の配合においては，空気量は管理値（4.5±1.5％）内に収まっていたものの，スランプが練り上がり直後で 22.0cm，30 分後で 19.5cm といずれも管理値（12.0±2.5cm）を超えていた。

したがって，単位水量を下げた②の配合に修正し，再度練混ぜを行った。その結果，30 分後のスランプが 13.0cm，空気量は 4.2%といずれも管理値内に収まったことから，消波ブロックの作製を行った。

また，この時単位容積質量は 2,348kg/m³ と目標値を満足していた。

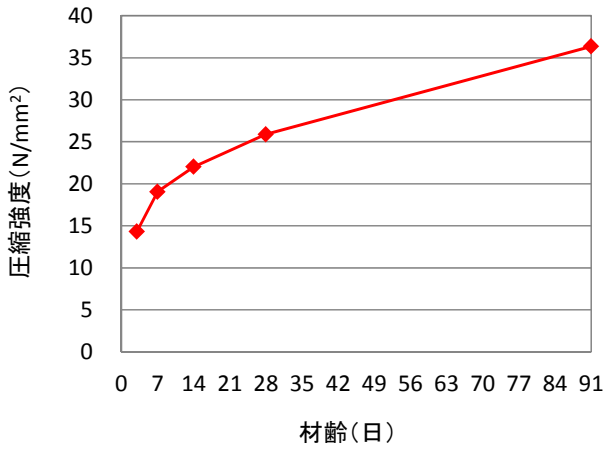
ブロック作製時，試験体を採取し，圧縮強度試験，硬化体の重金属溶出試験等各種試験に供した。

表－7.10 品質管理試験結果一覧

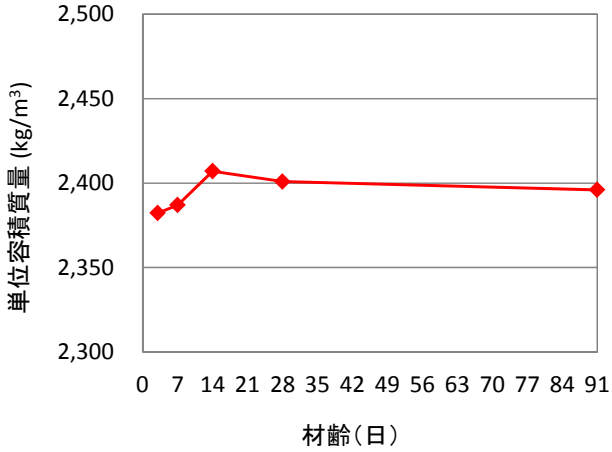
配合	品質管理試験				
	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(℃)	外気温 (℃)	単位容積質量 (kg/m³)
①	22.0	4.2(5.0)	28.0	32.0	－
	30 分後 19.5	3.7(4.5)	29.0	32.0	
②	16.0	4.2(5.0)	28.0	32.0	2348
	30 分後 13.0	4.2(5.0)	28.0	32.0	

図－7.8 にブロック作製時に採取した試験体の圧縮強度試験結果を示す。結果より，特に材齢 7 日までの初期強度の伸び率が大きく，材齢 14 日において目標強度の 21N/mm² に達していた。これは，供試体作製時の外気温が室内試験時よりも高く，水和反応が促進されたことが一因であったと考えられる。

図－7.9 に単位体積質量の測定結果を示す。単位体積質量はいずれの測定時においても目標の 2,300kg/m³ を満たしていた。また，材齢経過に伴う単位体積質量の増加傾向も，事前練り試験と同様，1～2%程度の増加が見られた。



図－7.8 圧縮強度試験結果



図－7.9 単位体積質量測定結果

表－7.11 に硬化体の溶出試験結果を示す。

硬化体は，実機試験時に作製した試験体であり，材齢 28 日において試験を実施している。結果より，重金属溶出試験結果は，基準値以下となった。

表－7.11 硬化体の溶出試験結果

	基準値 (mg／L)	硬化体 (材齢 28 日)
カドミウム	0.01	ND
鉛	0.01	0.003
六価クロム	0.05	ND
砒素	0.01	ND
総水銀	0.0005	ND
セレン	0.01	0.001
フッ素	0.8	0.10
ホウ素	1	ND

ブロックの打込み状況を**写真－7.4**，**写真－7.5** に示す。型枠の上部に今回の試験用に製作した受けホッパを設置したホイルローダより直接型枠内に打込み，バイブレータで締固めた。スランプを 12.0±2.5cm と設定したこともあり，打込みおよび締固めはスムーズに実施できた。

一方，ブリーディングは多く，天端部の沈下が続いた。夏期の施工を考慮して遅延型の高性能 AE 減水剤を使用したこと，フライアッシュを多量に用いたこと等が影響していると考えられる。施工状況を鑑みると，スランプを小さく設定しても施工は可能であると考えられる。スランプ設定を小さくし，単位水量を低減させることもブリーディング量の低減対策として考えられる。

上記のように，施工性に関しては，問題なくブロックを製作できることが確認できた。

写真－7.4 ブロックの打込み状況

写真－7.5 ブロックの打込み状況

脱型後のブロックの外観を**写真－7.6** に示す。本試験により製造したブロックは，脱型時に鋼製型枠の錆びが付着している状況が確認できた。また、フライアッシュを多量に使用している影響で，普通セメントを使用したブロックと比較して若干灰色が濃い色目となった。コンクリート表面に気泡も見られたが，実際に福井県の工事を担当している高野組の職員からは，工事で実際に使用している消波ブロックよりも出来型が良いとの評価をいただいた。

写真－7.6 ブロックの外観写真

7.4 暴露試験による耐久性の確認

平成 26 年 10 月 25 日にブロックの運搬および設置を行った。ブロックは、識別できるように茶色のマーキングを施し、陸上部と飛沫帯に各一体ずつ設置した。**写真－7.7**，**写真－7.8** にブロックの設置作業，**写真－7.9**，**写真－7.10** にブロックの設置状況を示す。

平成 26 年度に作製した消波ブロックの目視観察を平成 28 年 9 月と平成 29 年 3 月に実施した。平成 29 年 3 月の状況を**写真－7.11** に示す。目視観察においては，飛沫帯，陸上部とも大きな変状はなく，設置後約 2 年半時点での耐久性に問題がないことを確認した。また，平成 28 年 9 月に約 2 年材齢の圧縮強度試験を実施した。試験結果を**図－7.10** に示す。約 2 年が経過しても強度が増進しており，フライアッシュのポゾラン反応が継続していることが推察された。

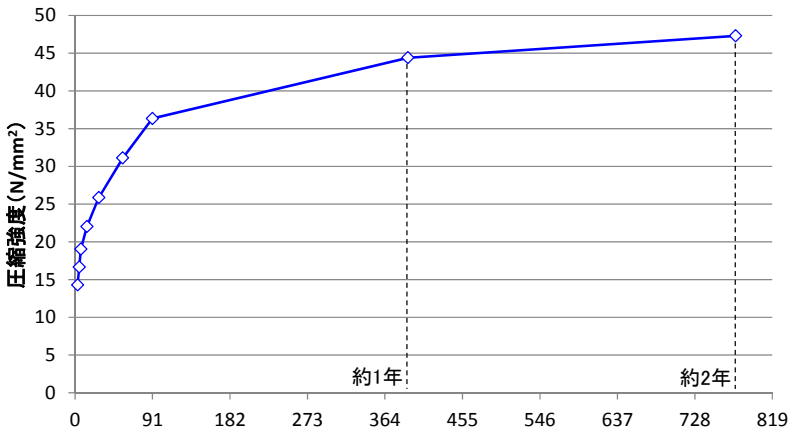
写真－7.7 ブロックの設置作業

写真－7.8 ブロックの設置作業

写真－7.9 ブロックの設置状況（飛沫帯）

写真－7.10 ブロックの設置状況（陸上部）

写真－7.11 ブロックの観察状況（設置後約 29 ヵ月）



図－7.10 圧縮強度試験結果

7.5 藻場造成材としての評価および藻場造成技術の開発

7.5.1 藻場造成技術の開発経緯

近年，全国的に藻場が減少（磯焼け）し，アワビやサザエなどの漁獲量の減少が問題となってきている。この要因としては，海流の変化，水温や栄養塩の変化，魚貝類やウニ類など食害生物の生息域や摂餌量の変化などが挙げられているが，まだ不明確な点が多い。北陸地方においても磯焼けが問題となっており，輪島地区では，アワビの漁獲量が 30 年前は年間約 30 トンだったが，近年は 3 トン前後に落ち込んでいる。そのため，輪島地区では，平成 24 年 2 月に石川県と漁協関係者らにより，藻場再生を目指した「輪島市藻場保全対策地域協議会」が設立され，海女によるシラヒゲウニやヒトデなどの食害生物の駆除,地元漁業者による藻場の成長を阻害する漂着ごみの除去などの活動が実施されている。

藻場を再生する方法のひとつとして,コンクリートブロックなどを沈める方法がある[8)]。その際，藻場を再生する基盤としては，藻が着床しやすく，また，生物が棲息できる空隙構造が求められる。また，生物の棲息を阻害するような成分が溶出しないことが必要である。今回，新たな試みとして，フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートに着目した。ポーラスコンクリートは空隙があり，藻場を再生する基盤としては適しており，適用事例も報告されている。しかしながら，コンクリートは，生物の棲息を阻害する恐れのある水酸化カルシウムが溶出することが懸念されている。そこで，フライアッシュにはコンクリート中の水酸化カルシウムを低減する効果があることに着目し，フライアッシュを高含有したポーラスコンクリートの実用化に向けた研究を実施することとした[9)]。なお，この研究は，一般財団法人北陸産業活性化センターのＲ＆Ｄ推進・研究助成制度に採択されて実施している。

7.5.2 室内試験内容

(1) 試験ケース及び配合

小型（10cm×20cm×3cm）のフライアッシュ高含有ポーラスコンクリート試験体を作製し，屋内水槽で藻の培養試験（ホンダワラ科ヤツマタモクから卵を採取し表面に植え付けし，経過観察）を実施した。試験ケースを**表－7.12** に示す。安山岩骨材は，石川県輪島市産の安山岩砕石を，電気炉酸化スラグは，富山県富山市太平洋製鋼社産を，低炭素フェロクロームスラグは，富山県射水市 JFE マテリアル産を，フライアッシュは，石川県七尾市北陸電力七尾大田火力発電所産を使用した。また，普通コンクリートの配合を**表－7.13** に，ポーラスコンクリートの配合を**表－7.14** に示す。配合は既往の研究成果を参考に，目標圧縮強度を 10N/mm^2 以上，目標空隙率を 25%，フライアッシュ置換率を 40%とした。

表－7.12 試験ケース

	ｺﾝｸﾘｰﾄの種類	粗骨材	ﾌﾗｲｱｯｼｭの混入
①	普通ｺﾝｸﾘｰﾄ	安山岩骨材	無
②	ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄ	安山岩骨材	有（ｾﾒﾝﾄの 40%）
③		電気炉酸化ｽﾗｸﾞ	
④		低炭素ﾌｪﾛｸﾛｰﾑｽﾗｸﾞ	

表－7.13 コンクリートの配合（1m³ 当たり）

Sl (cm)	Gmax (mm)	W/C (%)	C (kg)	W (kg)	s (kg)	G (kg)
8	25	63.1	244	154	837	1069

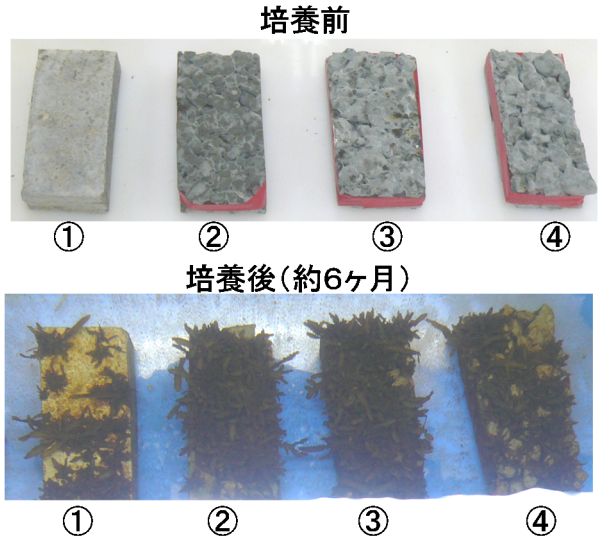
表－7.14 ポーラスコンクリートの配合（1m³ 当たり）

空隙率 (%)	Gmax (mm)	W/B (%)	C (kg)	W (kg)	FA (kg)	G (kg)
約 25	20	20.0	129	43	86	1548

7.5.3 室内試験結果および考察

(1) 藻の生育状況

写真－7.12 に培養前と培養後（約 6 ヶ月後）の状況写真を示す。**写真－7.12** に示す通り，培養後約 6 ヶ月後には，ポーラスコンクリート（②，③，④）の方がコンクリートよりも藻の生育状況が良好であることが明確となった。また，**写真－7.13** の試験体の断面に示す通り，付着器がポーラスコンクリートの表面の凹凸部分にしっかりと着床していることが確認された。なお，ヤツマタモクの付着器には地上の植物とは異なり養分を吸収する機能はないが，着床する初期に表面から溶け出す水酸化カルシウムがフライアッシュを混和したことにより少なかったことがコンクリートよりも着床が良好であった一因であると推察される。



写真－7.12 培養前と培養後（約６ヶ月後）の状況

写真－7.13 試験体(2013.1)の断面の状況

7.5.4 フィールド試験概要

(1) 試験体及び配合

フィールド試験におけるコンクリートパネルの配合を**表－7.15** に示す。粗骨材は，石川県輪島市産の安山岩砕石を，フライアッシュは，石川県七尾市北陸電力七尾大田火力発電

所産を使用した。試験体は，３種類のポーラスコンクリート製のパネル（50cm×50cm×10cm）をそれぞれ６枚ずつ製作し，コンクリートブロック（1m×1m×1m）２体の上面と両側面に１枚ずつアンカーで固定したものである。比較として６枚のコンクリート製パネル（21-15-20N）も製作し，同様に固定した。パネルには，それぞれ藻の母藻を結え付けた。これは母藻から胞子が散布され，パネル表面に着床することを期待したものである。

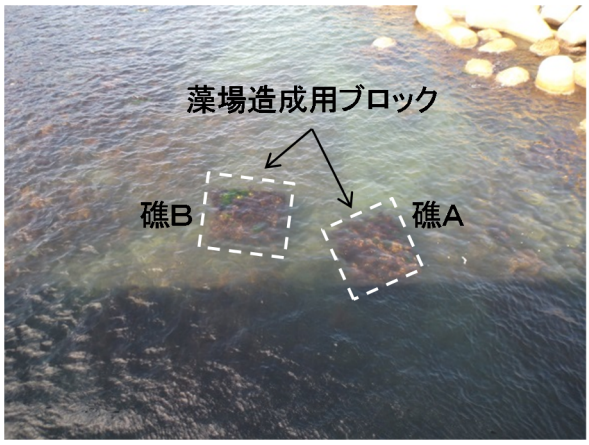
対象とする藻は地元の要望によりカジメ属とした。カジメ属は，輪島地方で食用として珍重されるばかりでなく，あわびの餌となるため，繁殖が望まれている[10)]。ブロックの外観を**写真－7.14** に示す。ブロックは平成 25 年 11 月に石川県輪島市名舟港の海中に設置した。設置状況を**写真－7.15** に示す。

表－7.15 フィールド試験のコンクリートパネルの配合

パネルの種類	設計基準強度 (N/mm²)	水結合材比 (%)	FA置換率 (%)	単位量(kg/m³)						圧縮強度*5 (N/mm²)
				水	セメント*1	フライアッシュ*2	細骨材*3	粗骨材*3	混和剤*4	
普通コンクリート	21	(W/C) 61.0	0	168	276	0	904	981	2.76	29.8
普通ポーラスコンクリート	10	18.0	0	48	298	0	0	1556	4.86	12.5
FA20%置換 ポーラスコンクリート	10	18.0	20	49	217	55	0	1556	4.43	15.3
FA40%置換 ポーラスコンクリート	10	17.9	40	47	157	105	0	1556	4.27	13.1

*1 セメント：普通ポルトランドセメント
*2 フライアッシュ：七尾大田火力発電所産（JISⅡ種）
*3 細骨材、粗骨材：輪島産安山岩砕石（細骨材の一部は福井県南条産硅石）
*4 減水剤：ナフタレンスルホン酸系高性能減水剤
*5 標準養生、材齢 28 日

写真－7.14 藻場造成用ブロックの外観



写真－7.15 藻場造成用ブロック設置状況（輪島市名舟港）

7.5.5 フィールド試験結果および考察

(1) 藻の生育状況

平成 25 年 11 月に試験体を設置してからこれまで調査を 5 回実施した。調査の結果を**図－7.11**，**図－7.12** に示す。設置から約 1 年後（平成 26 年 10 月）に 7 体，約 2 年後（平成 27 年 11 月）に 17 体，約 3 年後（平成 28 年 10 月）に 17 体のカジメ属の着床を確認することができた。第 1 回調査から第 2 回調査において，カジメ属の着床数が 2 倍となっ

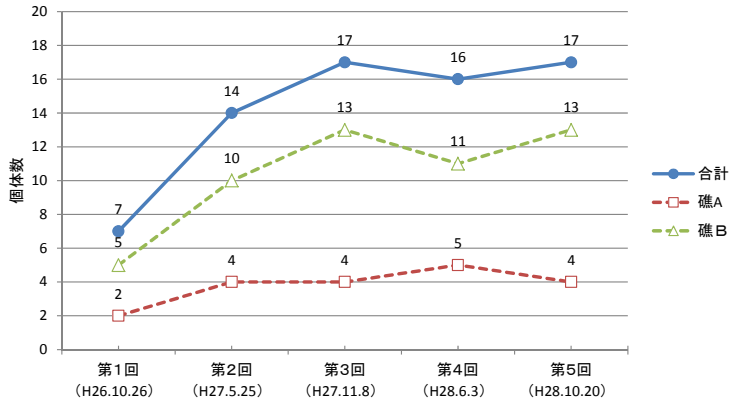
ているが，これは，着床数を増やすことを目的として，平成 26 年 11 月末にスポアバック方式（**図－7.13** 参照）により，追加で母藻をブロック周辺に設置した効果であると考えられる。

第 2 回の調査で確認されたカジメ属は，全て第 1 回調査と同じパネルに出現しており，葉長がより大きく，また突き出し（夏に先枯れした部分を突き出す様に伸長すること）が見られたことから，第 1 回に着生していた個体が生長したものと考えられる。

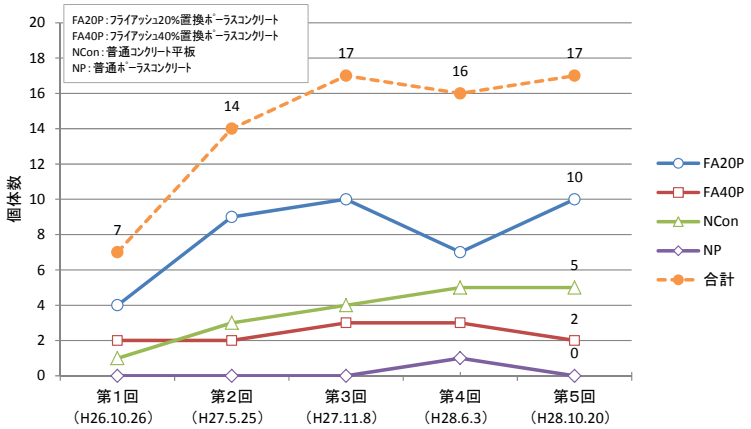
第 3 回調査から第 5 回調査までは，消失する個体もあったが，ほとんどの個体が残存しており，個体数に大きな変化はなく横ばいであった。葉長推移の一例を**写真－7.16** に示す。葉長については，平均葉長が夏の高温期の末枯れにより小さくなっていたが，30cm～50cm の 3 年目個体が大半を占めており，成長点からの突出しが見られたこと，また，一部の個体に子嚢斑が確認できたことから，順調に生長し生活環が回っていることが確認できた。

礁ごとにみると，礁 A では 4 体，礁 B では 13 体であり，礁 B に多く着生していた。カジメ属に限らず藻の生育は，水深，水温，潮流，光量，波浪などの環境条件により大きく左右される。本試験では，ほぼ同一箇所に礁を設置しているが，着床数に差があるため，波浪等によるわずかな環境条件の違いがあったと考えられる。

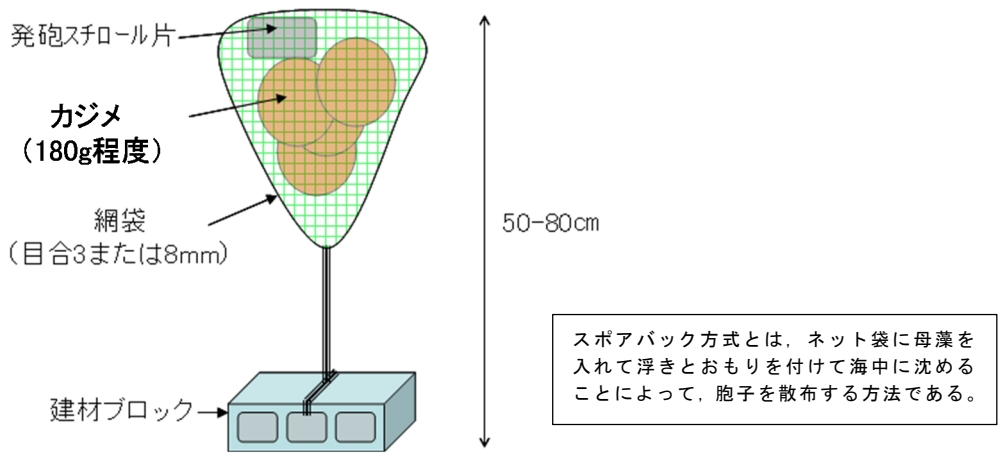
パネルごとの着床数を見ると，第 5 回調査では，フライアッシュ 20%置換したパネルに 10 体，フライアッシュ 40%置換したパネルに 2 体，普通コンクリートパネルに 5 体，普通ポーラスコンクリートに 0 体であった。フライアッシュを混和したパネルにカジメ属の着床数が多い傾向にあった。



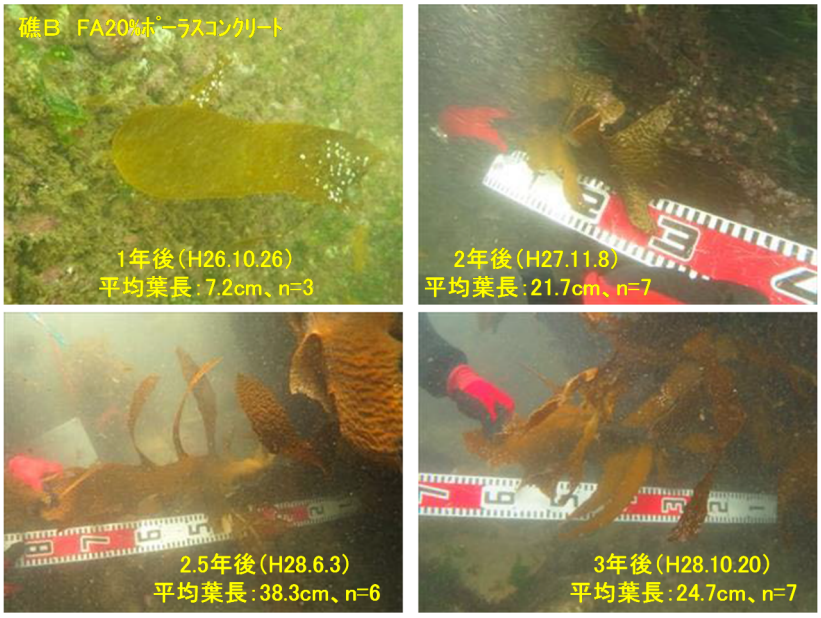
図－7.11 ブロック毎の着床数



図－7.12 パネル毎の着床数



図－7.13 スポアバックの模式図



写真－7.16 葉長の推移（礁 B/FA20%ﾎﾟｰﾗｽｺﾝｸﾘｰﾄﾊﾟﾈﾙ）

(2) 試験体の状況

2 試験体とも洗掘，埋没，転倒は見られなかったが，礁 B は設置時より天端が約 10°傾斜し，干潮時には一部海面上に露出する箇所があった。試験体の底質は，岩盤に玉石や小礫が乗っている状態で不安定な基質あったため，波により玉石等が洗われ，試験体が傾斜したものと考えられる。パネルについては，いずれも亀裂や脱落などの破損は見られず，約 3 年間の海中暴露における耐久性を確認した。

7.5.6 今後の展開

これまでの 5 回の調査では，7 体（H26 年 10 月）→14 体（H27 年 5 月）→17 体（H27 年 11 月）→16 体（H28 年 6 月）→17 体（H28 年 10 月）と，季節消長を繰り返しつつ，

増加傾向にある。葉長はやや小さくなったものの生長点の突出しが見られたことから順調に生長していると考えられる。

また，　周囲の天然石のカジメ属の被度（海藻が 50cm×50cm 枠に占める面積の割合）が 5%未満で推移している一方で，礁上ではカジメ属が個体数，被度ともに増加傾向にあり，礁 B の側面のフライアッシュ 20%のパネルでは被度が 40%を超えた。海藻全体の被度が 100%に近いパネルも多いことから，今後カジメ属の個体数が急激に増えることはないと考えられるが，今後，礁上で成熟したカジメ属から再生産を確認するとともに，周囲の景観被度より明らかに増えてくれば，藻礁の設置及びスポアバックの効果が明らかに確認できるものと思われる。特に直近の調査では子嚢斑の形成を視認できたことから，今後はさらに礁の着床母藻からの幼体加入による個体数の増加が期待されるため，引き続きフィールド調査を実施していく。H29 年度には試験体を陸上に引き揚げ着床している藻の含有成分の確認など詳細調査を実施する予定である。また合わせて，フライアッシュに含まれる成分が藻の成長に及ぼす影響を室内試験により調べる予定である。さらに，現在の輪島市名舟港でのフィールド試験結果を踏まえ，H29 年 10 月より輪島市舳倉島北東沖で石川県が実施している藻場造成エリアにおいて，規模を大きくしたフィールド試験（ブロック 10 体を設置）を実施する予定である。

7.6 まとめ

本章では，浚渫砂およびフライアッシュ原粉の品質試験を行い，浚渫砂の密度，吸水率，粒度分布およびフライアッシュ原粉の密度，粉末度等を把握した。試験練りにおいては，浚渫砂とフライアッシュ原粉の品質のバラツキや NaCl の影響を考慮し，適切な配合設計により所要品質のコンクリートの製造が可能であることを確認した。また，消波ブロックを試作し，暴露試験により 29 ヶ月後の設置状況を観察し，現時点で耐久性に問題ないことを確認していることから，浚渫砂を混合した HVFC の製造技術をほぼ確立できたと考える。今後は，引き続き試作した消波ブロックの耐久性等をモニタリングしていくとともに，消波ブロックに限らず他の 2 次製品への適用も検討していく。

また，フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの室内試験とフィールド試験を行い，カジメ属等の海藻が順調に生育していることが確認できた。今後は，規模を大きくしたフィールド試験により，藻場造成材として評価し，港湾構造物へのフライアッシュコンクリートの有効利用拡大につなげていきたい。

本章で得られた知見をまとめると，以下のとおりである。

(1) 九頭竜川河口の浚渫砂は，化学法(JIS A1145)で「無害」判定であるが，促進モルタルバー試験(ASTM C1260)を実施したところ「有害」判定結果となったが，フライアッシュを混和することで ASR 膨張を抑制できることを確認した。

(2) 中央航路の浚渫砂は，絶乾密度，吸水率，微粒分量等で JIS の規格を満足していないが，浚渫砂，フライアッシュ原粉（JISⅡ種の規格に適合）を主材とした硬化体の製造が可能であることを確認した。

(3) スラグ骨材を混ぜることにより，フレッシュ性状を確保しつつ，密度の調整（2.3t/m^3 以上）が可能であり，フレッシュコンクリートの粘性が高く分離抵抗性も高いため，

上下間の材料分離が生じないことを確認した。

(4) 硬化体の強度増進に NaCl は有効（2～3 割以上の強度増）であるが，浚渫砂の品質のバラツキにより，材齢 7 日以降の強度の伸び率が変動することから，配合設計では，変動係数を 15%と大きく設定する必要があった。

(5) フレッシュコンクリートの施工性に問題なく，消波ブロックを試験施工できた。設置後約 2 年半時点での目視観察結果から，耐久性に問題がないことを確認した。また，約 2 年材齢の圧縮強度試験を実施した結果，強度が増進しており，フライアッシュのポゾラン反応が継続していることが推察された。

(6) フィールド試験において，普通コンクリートパネルに比べて，フライアッシュを混和したパネルにカジメ属の着床数が多い傾向にあった。

(7) フィールド試験において，パネルについては，いずれも亀裂や脱落などの破損は見られず，約 3 年間の海中暴露における耐久性を確認した。

【参考文献】

1）佐藤幸惠：混和材を大量使用したコンクリートの海外における研究の動向，コンクリート工学, Vol.48, No.12, pp.45-51, 2010.

2）V.M.Malhotra, P.K.Mehta：High-Performance High Volume Fly Ash Concrete：Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice and Case Histories, Second Edition, 2005.

3）C.Sannoh, T.Kubo, K.Fukudome, K.Torii : Attempts to Implement the Use of Concrete Produced from Dredged Seabed Sand and Fly Ash Blended with Seawater in the Hokuriku District, Proceedings of the 40th International Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, pp.275-284, 2015.

4）久保哲司，参納千夏男，蟹谷真生：北陸地方における地域貢献を目的としたフライアッシュの有効利用促進，電力土木, No.376, pp.67-87, 2015.

5）松田芳範：JR 東日本における混和材使用の現状と課題，コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.459-463, 2014.

6）竹田好宣典，大即信明：海水・海砂を使用したコンクリートの開発－地球環境保全と品質向上を目指して，セメント・コンクリート, No.784, pp.24-30, 2012.

7）福留和人，石川嘉崇，大即信明，西田孝弘：フライアッシュを高置換したコンクリートの強度発現に及ぼす NaCl の効果，コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.187-192, 2013.

8）能登谷正浩：藻場の海藻と造成技術，（株）成山堂書店, pp171-179, 2003.

9）田中義人，澤崎晴彦，山戸博晃，鳥居和之：オートクレーブ処理したフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの強度と水和反応性状，セメントコンクリート論文集, No.55, pp366-371, 2001.

10）能登谷正浩：カジメ属の生態学と藻場造成，恒星社厚生閣, 2009.

第８章　結　論

8.1 本研究のまとめ

本研究では，北陸の地域特性を反映した「地産地消」,「エネルギーセキュリティ」,「コンクリート構造物の長寿命化」の 3 つの観点から,「フライアッシュコンクリートの利活用促進」の取り組みが進展している昨今，ASR 劣化により変形した電力関連施設の維持管理において，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事の回避が可能であることを検証できても，調査，対策の検討，対策の実施およびモニタリングには多くの費用を要する。そのため，今後，新設する電力関連施設においては，多少コンクリートの材料代が増加しても，フライアッシュコンクリートの利活用等により，ASR のリスクを最小限に抑える努力が必要であることを提言している。

新設する電力関連施設に用いるコンクリートについて，フライアッシュ委員会の活動により，汎用コンクリートとしてのフライアッシュコンクリートは，その施工性，強度発現性および耐久性の観点から，実構造物への適用に問題がないことを検証されている。しかし，特殊なコンクリートでは，フライアッシュコンクリートの適用性を検証しながら，使用していく必要がある。本研究では，低熱セメントを用いた高強度コンクリート，早強セメントを用いた収縮補償コンクリートおよび高強度コンクリート遠心成形製品へのフライアッシュコンクリートの適用性を検証し,実構造物に適用しており,これらの検証手法は,他の特殊コンクリートの適用性の検証に利用できると考えている。また，消波ブロック等の港湾構造物への適用が可能な浚渫砂を混合した HVFC の製造技術をほぼ確立するとともに，フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートを藻場造成材とした藻場造成技術の開発も進んでおり，港湾構造物においても，フライアッシュコンクリートの利活用が期待できる。

以上の検証結果を踏まえ，本研究では,「今後，新設する電力関連施設に用いる全てのコンクリートにフライアッシュコンクリートを活用すべきである」との結論を得た。

以下に，各章の内容および得られた結果を総括する。

「第１章 序論」では，北陸地方が抱える深刻な ASR 問題を提起し，北陸の地域特性を反映した「地産地消」,「エネルギーセキュリティ」,「コンクリート構造物の長寿命化」の 3 つの観点から,「フライアッシュコンクリートの利活用促進」の取り組みの進展について述べるとともに「電力関連施設におけるアルカリシリカ反応抑制対策」の現状について述べた。また，本研究の目的は，アルカリシリカ反応により変形した電力関連施設の維持管理方策と新設する電力関連施設へのフライアッシュコンクリートの実装であることを述べた。

「第２章 既設電力関連施設のアルカリシリカ反応の状況と調査診断概要」では，再構築が非常に困難な導水路および取水塔の維持管理において，水中コンクリート部材の ASR による劣化の程度や進行の調査を実施し，常に湿潤状態が継続している限り，ASR による膨張は発生しにくいことを確認した。また，取水塔のコンクリートには，全体的に ASR が進行しているが，耐荷性能は ASR による劣化がない場合に比べ大きく低下していない

ことを確認した。

「第３章 アルカリシリカ反応により変形した取水塔の補強対策とモニタリングによる補強効果の確認」では，取水塔の ASR による変形のメカニズムを解明し，変形の主原因が ASR による鉛直方向の膨張であることから，PC 鋼線により頂部と定着部の間に鉛直方向の緊張力を与えることで膨張や変形を抑制し，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事の回避が可能であることを検証した。

なお，ASR により変形した既設電力関連施設を補強により維持管理した場合でも，その調査，対策の検討，対策の実施およびモニタリングには多くの費用を要することから，今後，新設する電力関連施設においては，多少コンクリートの材料代が増加しても，フライアッシュコンクリートの利活用等により，ASR のリスクを最小限に抑える努力が必要であることを提言している。

「第４章 北陸地方産フライアッシュの分級効果とフライアッシュコンクリートの品質」では，北陸産分級フライアッシュの製造技術を紹介し，分級効果確認試験の結果により，従来よりも高品質なフライアッシュになっていることを検証した。また，北陸産分級フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性については，汎用コンクリートに比べて初期強度発現以外の全ての比較項目において同等もしくは効果大であることを確認した。

「第５章 火力発電所建設工事におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策」では，火力発電所建設工事で使用される砂の岩石学的調査および化学法と促進モルタルバー法(ASTM C1260)による反応性の評価を行い，安山岩と流紋岩質溶結凝灰岩を合わせた含有率がペシマム条件に相当している恐れがある砂が含まれている場合，ASR が発生する可能性が示されたこと。このことから，ASR 抑制対策を検討する必要性があると考えられ，抑制対策として，フライアッシュを内割り 15%置換（セメント置換）または外割り 7%置換（砂置換）することによって， ASR 膨張を効果的に抑制することが確認できた。また，低熱セメントを用いたコンクリートおよび早強セメントと膨張材を採用する構造物について，フライアッシュの抑制効果を確認したうえで，試験練りを行い，生コンクリートのフレッシュ性状等の施工性を確認することで，ASR の抑制を目的としたフライアッシュコンクリートの適用性を検証した。

「第６章　プレキャスト PC 電柱におけるフライアッシュコンクリートの利活用とアルカリシリカ反応抑制対策」では，PC 電柱における縦ひび割れの発生原因の特定調査を行った。各種試験結果などから，ASR により PC 電柱の断面方向の膨張が促進され，外縁部のコンクリートにほぼ均等に引張力が生じたため，円周上の対角線方向に対となる縦ひび割れが発生したものと推察した。そのことから，ASR 抑制対策として分級フライアッシュを 15%以上混和することが有効であること，また，遠心成形時に発生するスラリー成分の定量化実験とその試験体の SEM 観察を実施し，分級フライアッシュの遠心成形製品への適用が可能であることを検証した。

「第７章　港湾構造物におけるフライアッシュ高含有コンクリートの適用性」では，浚渫砂およびフライアッシュ原粉の品質試験を行い，浚渫砂の密度，吸水率，粒度分布およびフライアッシュ原粉の密度，粉末度等を把握した。試験練りにおいては，浚渫砂とフライアッシュ原粉の品質のバラツキや NaCl の影響を考慮し，適切な配合設計により所要品質のコンクリートの製造が可能であることを確認した。また，消波ブロックを試作し，暴露試験により 29 ヶ月後の設置状況を観察し，現時点で耐久性に問題ないことを確認していることから，浚渫砂を混合した HVFC の製造技術をほぼ確立できたと考える。

また，フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの室内試験とフィールド試験を行い，カジメ属等の海藻が順調に生育していることが確認できた。今後は，規模を大きくしたフィールド試験により，藻場造成材としての評価を高めていくことで，港湾構造物へのフライアッシュコンクリートの利活用が期待できる。

8.2 今後の課題と展望

本研究では，「今後，新設する電力関連施設に用いる全てのコンクリートにフライアッシュコンクリートを活用すべきである」との結論を得た。以下，この結論を補足するための今後の課題と今後の展望について述べる。

8.2.1 今後の課題

(1) 北陸産分級フライアッシュの品質の継続的改善

北陸産分級フライアッシュの品質は，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」の 2 つの対策により，従来よりも高品質なフライアッシュとなっている。現状の品質が維持できれば，十分フライアッシュコンクリートの利活用が拡大すると考えるが，いくら高品質であっても，供給量が確保できなかったり，品質のばらつきが大きくなることがあると，コンクリート製造業者にとっては，扱いにくい原材料となってしまい，一気に利活用が萎む恐れがある。従って，フライアッシュの生産者が，北陸産分級フライアッシュの品質変動を小さくするため，フライアッシュ品質の継続的改善を行うことが必要である。七尾大田発電所と敦賀火力発電所には，膨大な品質管理データがあり，炭種や燃焼条件などの相違による品質分析や分級品の取り出し方法などには，さらに改善の余地があると思われる。このような改善の積み重ねが，コンクリート製造業者の負担の軽減につながり，さらに，北陸産フライアッシュのブランド化につながっていくものと考える。

なお，敦賀火力発電所のフライアッシュの強熱減量が七尾大田火力発電所のフライアッシュに比べて多い点については，あまりバラツキが大きくないことから，最適な AE 減水剤と AE 剤の組み合わせを選定することで対応可能であると考えている。ボイラーを改造し燃焼効率を改善することや新たな設備で再燃焼することで強熱減量を少なくすることは可能であるが，フライアッシュの生産コストが高くなり，フライアッシュコンクリートの価格の問題につながることから，得策ではないと考えている。

(2) フライアッシュコンクリートの価格の問題

フライアッシュコンクリートは，生コンクリートプラントにおいてフライアッシュを混和材として使用する場合とフライアッシュセメントとして使用する場合の 2 通りの方法が

ある。

後者の場合は，セメント工場においてフライアッシュセメントを製造する必要があるが，セメント工場では，大規模なキルンを運用する関係上，相当量のフライアッシュセメントの需要が約束されない限り，本格的な製造には踏み切れない。このため，当面のフライアッシュコンクリートの製造は，前者のフライアッシュを混和材として使用する方法が主体となる。この場合，安価な北陸地方産分級フライアシュがセメントに置き換わることで材料費は減少するが，フライアッシュを貯蔵するためのサイロやフライアッシュを計量するための計量装置などの固定費が必要となってくる。

フライアッシュコンクリートの価格は，生コンクリート製造者が決定するが，フライアッシュがセメントよりも安価であるにもかかわらず，割高（地域によって同等～千円/m^3程度）となっている。実際には，フライアッシュ委員会の取組みが理解され，北陸地方の６割を超える生コンクリートプラントが設備を増強し，フライアッシュコンクリートを出荷しており，今後，公共工事，北陸新幹線工事，高速道路工事，電力関連工事等での需要創出により，徐々に価格差は小さくなると期待している。

将来的には，北陸地方の公共工事において，高炉セメントを用いたコンクリートに代わり，フライアッシュコンクリートが標準化されることで，大規模なキルンの運用に相当するフライアッシュセメントの需要が約束され，セメント工場において，フライアッシュセメントが製造されると考えている。そうなれば，価格の問題は解決し，現状の汎用コンクリートよりも安価でのフライアッシュコンクリートの製造が可能となる。

(3) コンクリートの製造品質の改善

当初，北陸地方産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，汎用コンクリートに比べ，経過１時間以降，スランプロスや空気量ロスが大きい傾向が見られた。また，冬期等にエアーが入り難く，多量の AE 剤を使用するケースが見られた。現在では，高機能 AE 減水剤やフライアッシュ用 AE 剤も含め，各生コンクリートプラントにおいて，最適な AE 減水剤と AE 剤の組み合わせを検討し，運搬に１時間を超える施工場所においても使用できるようになってきている。

北陸地方で公共工事に用いる汎用コンクリートの空気量は 4.5±2.5%であるが，北陸新幹線工事の明かり構造物の使用では空気量が 5.5±2.5%である。また，北陸地方の標高の高い地点では，凍害対策として更に多い空気量が求められることも考えられる。各生コンクリートプラントにおいては，更に最適な AE 減水剤と AE 剤の組み合わせを選定し，しっかり空気量を管理していく必要があると思われる。

また，フライアッシュコンクリートの出荷実績の少ない生コンクリート工場や技術力の乏しい生コンクリート工場では，未だにスランプや空気量の調整に苦労し，特殊なフライアッシュコンクリートの製造に消極的なことから，フライアッシュ委員会等の技術支援も必要だと思われる。更に，少量の特殊なフライアッシュコンクリートの出荷が必要な場合には，移動式小型プラントの開発も有効だと考えている。

(4) コンクリートの早期強度発現の増進

北陸地方産分級フライアッシュは，「品質管理体制の強化」と「分級装置の導入」によ

り，粉末度が上がり，活性度指数も改善しているが，北陸地方産分級フライアッシュを使用したコンクリートは，普通セメントを用いたコンクリートに比べ，材齢 3～14 日で数%強度発現が低下している。そのため，PC 構造物では PC 力の導入時期，建築構造物では型枠の撤去時期が遅れるために，フライアッシュコンクリートの利活用促進が難しくなっている。

本研究において，早強セメントを用いたコンクリートおよび高強度混和材を用いたコンクリートへの北陸地方産分級フライアッシュを混和したコンクリートの ASR 抑制効果を確認したことから，今後，早強セメントや高強度混和材により，早期強度を増進させたフライアッシュコンクリートの適用性を検証し，PC 構造物や建築構造物での利活用促進につなげる必要がある。

8.2.2 今後の展望

本研究の第 5 章，第 6 章，第 7 章で述べた通り，現状で電力関連施設での使用が見込まれる特殊なコンクリートへのフライアッシュコンクリートの適用性を検証した。今後，新工法や新材料の採用により，新たな特殊コンクリートを使用する場合でも，これらの検証手法を用いることで，フライアッシュコンクリートの適用性を検証できると考える。このことから，今後，新設する電力関連施設に用いる全てのコンクリートにフライアッシュコンクリートを適用できることとなる。

一方，フライアッシュ委員会の活動により，公共工事，発電所建設工事，北陸新幹線建設工事，高速道路建設工事等でのフライアッシュコンクリートの需要が増え，フライアッシュを貯蔵するためのサイロやフライアッシュを計量するための計量装置を設置した生コンクリートプラントが急増している。今後は，これらの固定費の償却が進み，フライアッシュコンクリートの価格が下がることが見込まれる。他の汎用コンクリートと同程度の価格まで下がれば，新設する電力関連施設に用いる全てのコンクリートにフライアッシュコンクリートを利活用できることとなる。

なお，本研究の第 3 章で述べた取水塔の ASR 対策は，世界的にも初めてと思われる取組みである。ASR 膨張や変形を効果的に抑制し，劣化部除去による断面修復等の大規模な修繕工事を回避していることから，今後，他の電力関連施設で ASR 膨張により変形が生じた場合に適用できると考える。

最後に，冒頭に挙げた「今後，新設する電力関連施設に用いる全てのコンクリートにフライアッシュコンクリートを活用すべきである」との理念の実現は，道半ばであるが，フライアッシュ委員会での活動とともに，着実に前進している。本研究の成果がこの理念の推進の一助となれば幸いである。

謝　辞

本論文は，2011 年（平成 23 年）1 月に設立された，産学官連携の「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」(委員長 : 金沢大学　鳥居教授）で蓄積された膨大なデータなどによる多面的な検証と委員会の取組みおよび北陸電力株式会社の水利構造物維持管理とフライアッシュ利活用の取組みにより構成されています。ここに，関係者各位に深く感謝いたします。

金沢大学理工研究域環境学系　鳥居和之教授には，本論文をとりとめる機会を与えていただくとともに，要所を押さえた温かいご指導とご教示を賜り，1 年 6 ヶ月間での博士論文の提出にお導きいただきました。ここに，深甚なる感謝の意を表します。また，本論文のとりまとめに際しては,金沢大学理工研究域環境学系　桝谷浩教授,同　深田宰史教授，同　石井浩司客員教授，金沢工業大学環境・建築学部環境系　宮里心一教授にご指導とご助言を賜りました。こころより感謝とお礼を申し上げます。さらに，石川工業高等専門学校　福留和人教授，北電技術コンサルタント株式会社　橋本徹氏，株式会社ピーエス三菱鈴木雅博氏には，参考論文の共著者として，貴重なご助言とご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。

本論文は，著者が北陸電力株式会社に在職しながらとりまとめたものです。志賀原子力発電所シーム問題や電力システム改革などによる経営環境の厳しいなか，金沢大学大学院博士後期課程への入学の許可を与えていただいた北陸電力株式会社　金井豊代表取締役社長，同　園博昭代表取締役副社長，同　柴田俊治顧問，同　前川功執行役員，同　古谷俊直執行役員に，こころより感謝とお礼を申しあげます。また，本論文の基礎データに関するご助言とご協力をいただいた，北陸電力株式会社土木部　小笠原功部長，同　渡邉茂統括課長，同　参納千夏男課長代理，同　蟹谷真生氏，同　佐野朝恵氏，北陸電力株式会社富山支店常願寺電力部　滝本弘課長,北陸電力株式会社石川支店手取電力部　菊池弘紀氏，さらに,海外発表の事務手続きなどのサポートをいただいた,北陸電力株式会社土木部　藤田久之副部長に，深く感謝の意を表します。

このように本論文は，数多くの方々からのご指導やご協力をいただくことにより，まとめることができたものです。ここに,すべての方々のお名前をあげることはできませんが，こころより感謝申しあげます。ありがとうございました。著者としては，本論文は研究名にもあるように利活用促進に関する研究であり，真の完成は「北陸地方の電力関連施設の全てのコンクリートにフライアッシュコンクリートの活用が標準化」されたときと考えております。従って，今後も関係者各位のご協力を得ながら，今後も真の完成を目指し努力していく所存です。関係者の皆様には，今後とも変わらぬご指導やご協力をお願い致します。

最後に，日常の健康管理やこころの支えとなってくれた，最愛の妻　立子，長男　卓也に，こころより感謝します。

2018 年 3 月

久 保　哲 司