**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システムの開発**

「塩害による劣化機構の解明と構造部材の材料･構造性能評価(WG1)」
活動実績報告会　プログラム

10:00～10:20　開会の挨拶

北陸地域の道路橋の塩害に対する維持管理　　［金沢工業大学　宮里心一］

10:20～10:35　各種コンクリートへのフライアッシュの適用について

［富山県立大学　伊藤始］

10:35～10:50　伸縮装置からの効率的な塩分供給遮断対策（RC 連結工法）

［中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)　石川裕一］

10:50～11:05　乾湿繰返しにより析出した塩分によるコンクリートの物質移動への影響

［東京大学生産技術研究所　酒井雄也］

休憩

11:20～11:35　打音法による道路橋コンクリート床版の劣化損傷検知に関する検討について

［佐藤工業(株)　北川真也］

11:35～11:50　リモートセンシングによる橋梁モニタリングの実証実験

［金沢工業大学　徳永光晴］

11:50～12:05　防錆剤と亜鉛を併用した塩害事後保全対策（複合防食工法）

［中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)　青山實伸］

12:05～12:20　塩害劣化した鉄筋コンクリートの力学性能と対策時期の違いによる補修効果

［金沢工業大学　花岡大伸］

12:20～12:30　閉会の挨拶　　［金沢大学　鳥居和之（SIP 研究代表者）］

開会挨拶

金沢工業大学　**宮里心一**

（SIP北陸-WG1　主査）

そもそもSIPとは？

SIP 戦略的イノベーション創造プログラム
インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

総合科学技術・イノベーション会議が自らの司令塔機能を発揮して、府省の枠や旧来の分野の枠を超えたマネジメントに主導的な役割を果たすことを通じて、科学技術イノベーションを実現するために新たに創設するプログラム

期間： 平成26年度～

母体組織： 内閣府 Cabinet Office, Government of Japan

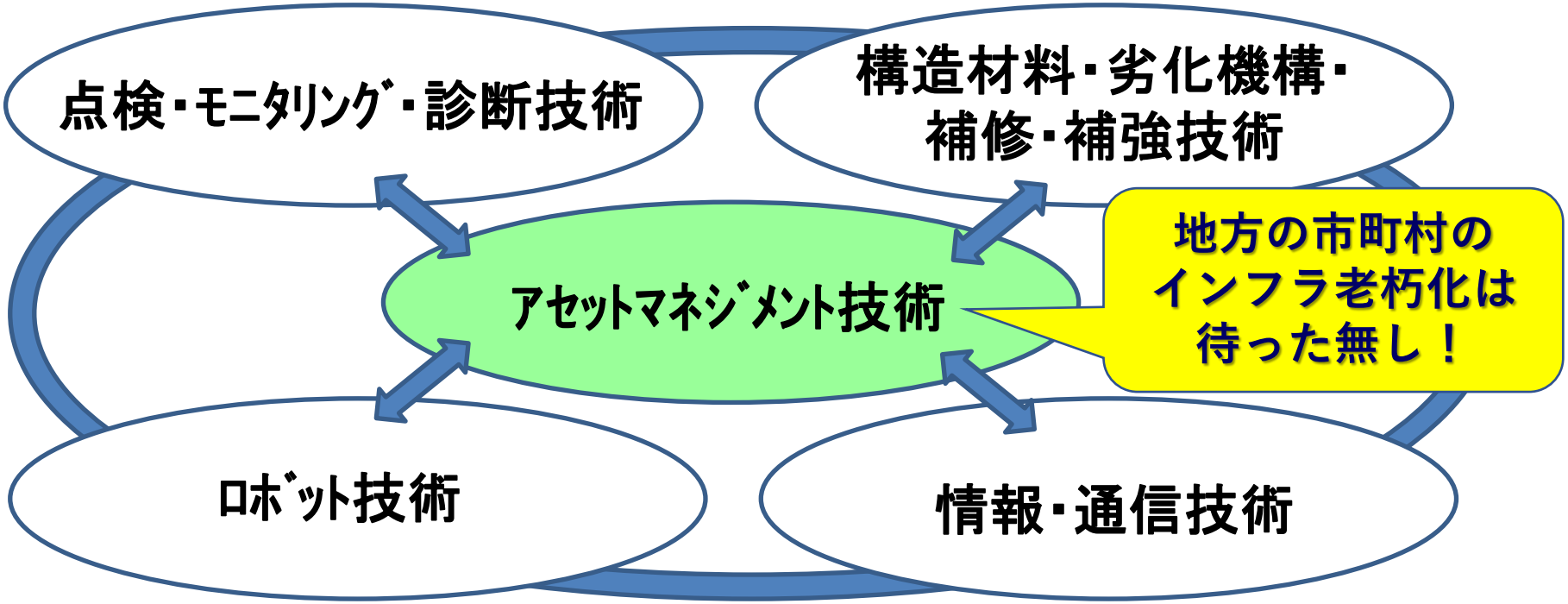
設定課題

課題	PD (ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄﾃﾞｨﾚｸﾀｰ)	管理法人
革新的燃焼技術	杉山雅則 (トヨタ自動車)	JST
次世代ﾊﾟﾜｰｴﾚｸﾄﾛﾆｸｽ	大森達夫(三菱電機)	NEDO
革新的構造材料	岸輝雄(東大 名誉教授)	JST
エネルギーキャリア	村木茂(東京ガス)	JST
次世代海洋資源調査技術	浦辺徹郎(東大 名誉教授)	JAMSTEC
自動走行システム	葛巻清吾(トヨタ自動車)	内閣府、警察庁、総務省、経産省、国交省
インフラ維持管理・更新・マネジメント技術	藤野陽三(横浜国立大学)	JST,NEDO
ﾚｼﾞﾘｴﾝﾄな防災・減災機能の強化	中島正愛(京大)	JST
次世代農林水産業創造技術	西尾健(法政大学)	農研機構
革新的設計生産技術	佐々木直哉(日立製作所)	NEDO
重要インフラ等におけるサイバーセキュリティの確保	後藤厚宏(情報ｾｷｭﾘﾃｨ大学院大学)	NEDO

インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

社会的目標

将来における維持管理更新の支出を現状より **20％低減**する。また、定量化された**インフラの性能指標や情報をできる限り「国民」と共有化**することにより、市民参加型の社会システムを構築する。



道路橋の老朽化対策に対する提言の変遷

年月	内容
15年4月	道路構造物の今後の管理･更新等のあり方
20年5月	道路橋の予防保全に向けた提言
25年2月	PC橋の長期保証に関する検討
25年6月	道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて
26年1月	高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する提言
26年4月	道路の老朽化対策の本格実施に関する提言
26年10月	SIP研究開始

SIP北陸

総合テーマ

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システムの開発

代表：鳥居和之（金沢大学）

情報発信 http://sip-hokuriku.com/

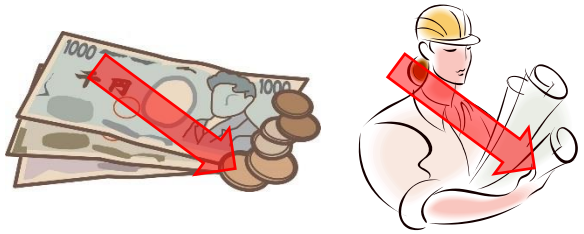
北陸地方

塩害，ASR，およびそれらの複合劣化が最も厳しく，メンテナンスに関する課題が濃縮された地域

財源，技術者，経験が不足

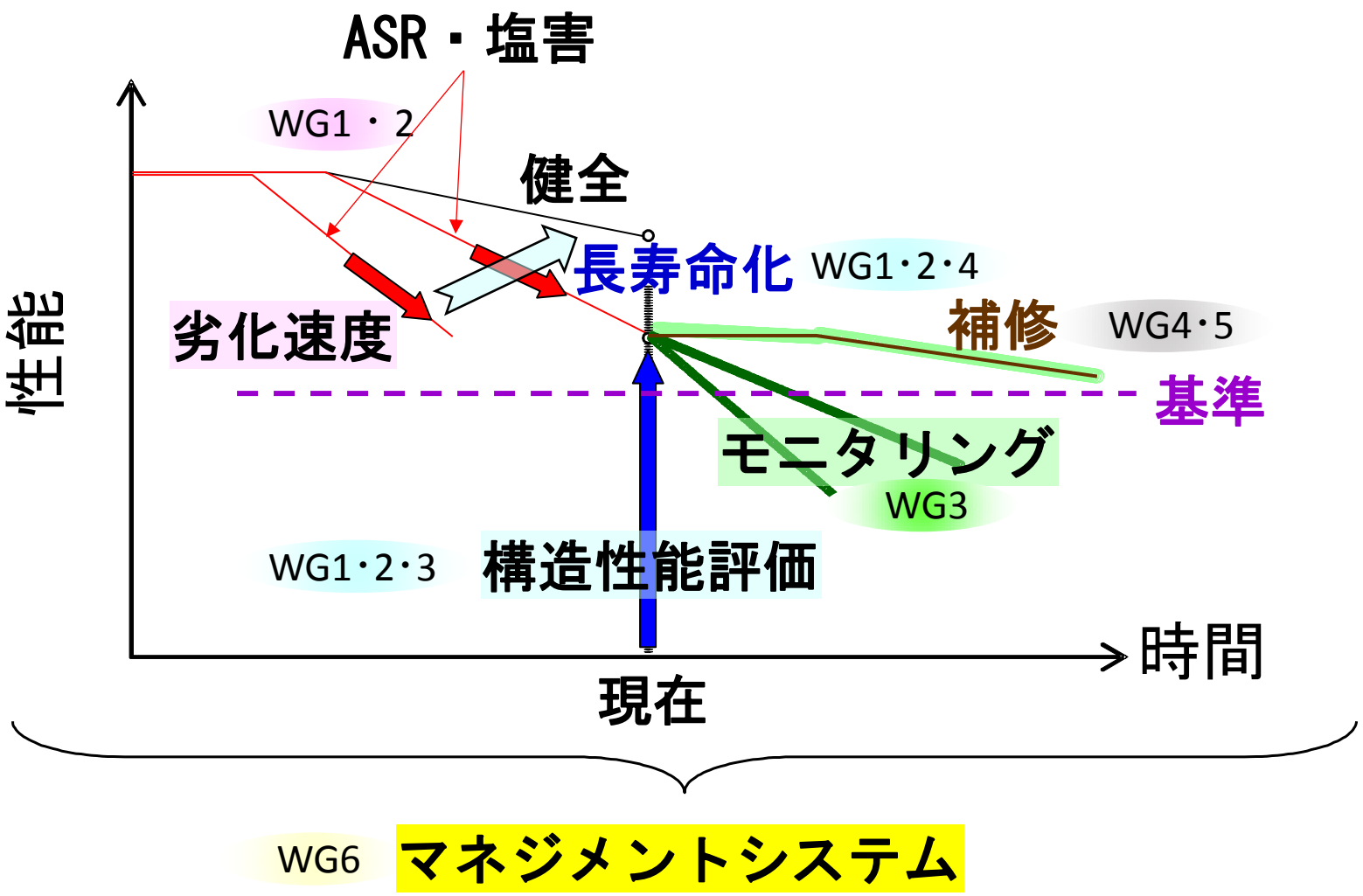
凍結防止剤散布による塩害劣化

ASRによる劣化



人員不足・財源不足・技術不足により、コンクリート橋のサービス水準・安全性の低下が特に懸念される地方公共団体に適用可能なアセットマネジメント技術を、経営マネジメントの視点を取り入れて開発し、地域展開する。

WGの関連（来年度から改組織）



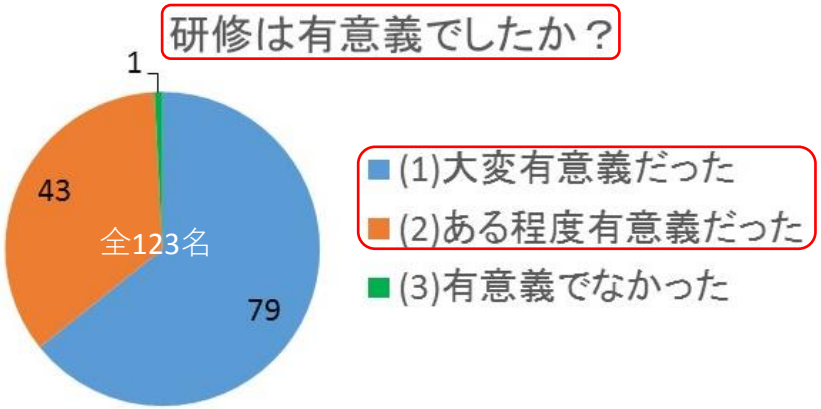
WG1：塩害による劣化機構の解明と構造部材の材料・構造性能評価

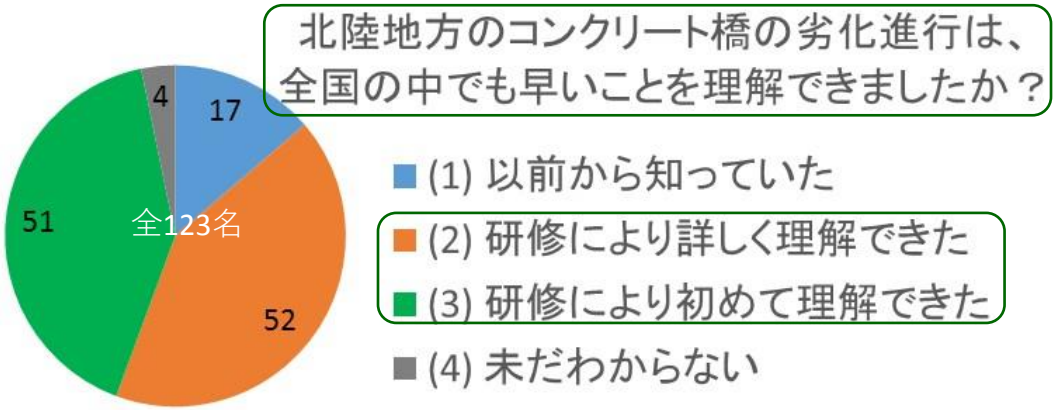
WG1の参画メンバー

主査	宮里 心一	金沢工業大学
	青山 敏幸	ピーエス三菱
	青山 實伸	中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋
	石川 裕一	中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋
	伊藤 始	富山県立大学
	北川 真也	佐藤工業
	木村 定雄	金沢工業大学
	小林 和弘	ピーエス三菱
	酒井 雄也	東京大学生産技術研究所
	武市 祥司	金沢工業大学
	徳永 光晴	金沢工業大学
	畑中 達郎	金沢工業大学
	花岡 大伸	金沢工業大学
	羽渕 貴士	東亜建設工業

自治体職員を対象にした出前講義やデモ

県	月日	参加者
富山	15/8/28	40人
	15/11/12	21人
石川	15/10/1	50人
福井	15/9/1	38人
	17/3/24	募集中





SIP終了後に地方自治体の職員も主体的に参加できるように講習会や広報活動を実施

報告会の流れ

	報告者	題目	ｶﾃｺﾞﾘｰ
1	宮里 心一	北陸地域の道路橋の塩害に対する維持管理	ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ
2	伊藤 始	各種コンクリートへのフライアッシュの適用について	長寿命化
3	石川 裕一	伸縮装置からの効率的な塩分供給遮断対策（RC連結工法）	
4	酒井 雄也	乾湿繰返しにより析出した塩分によるコンクリートの物質移動への影響	塩分浸透
5	北川 真也（木村定雄）	打音法による道路橋コンクリート床版の劣化損傷検知に関する検討について	点検
6	徳永 光晴	リモートセンシングによる橋梁モニタリングの実証実験	
7	青山 實伸	防錆剤と亜鉛を併用した塩害事後保全対策（複合防食工法）	補修
8	花岡 大伸	塩害劣化した鉄筋コンクリートの力学性能と対策時期の違いによる補修効果	補修設計

北陸地域の道路橋の塩害に対する維持管理

金沢工業大学　**宮里心一**

橋梁調査

富山県内の調査

2015/6/12～6/14
2015/9/12～9/14

石川県内の調査

2015/9/4～9/6

福井県内の調査

2015/5/29～5/31
2015/7/10～7/12

調査内容

	調査項目		
立地条件	汀線からの距離、橋梁名、架橋年月、道路管理者		
損傷の有無	ひび割れ	かぶりｺﾝｸﾘｰﾄの浮き	かぶりｺﾝｸﾘｰﾄの剥落
補修履歴	補修の有無（有る場合には種類）		

695橋の有効な調査データを集計

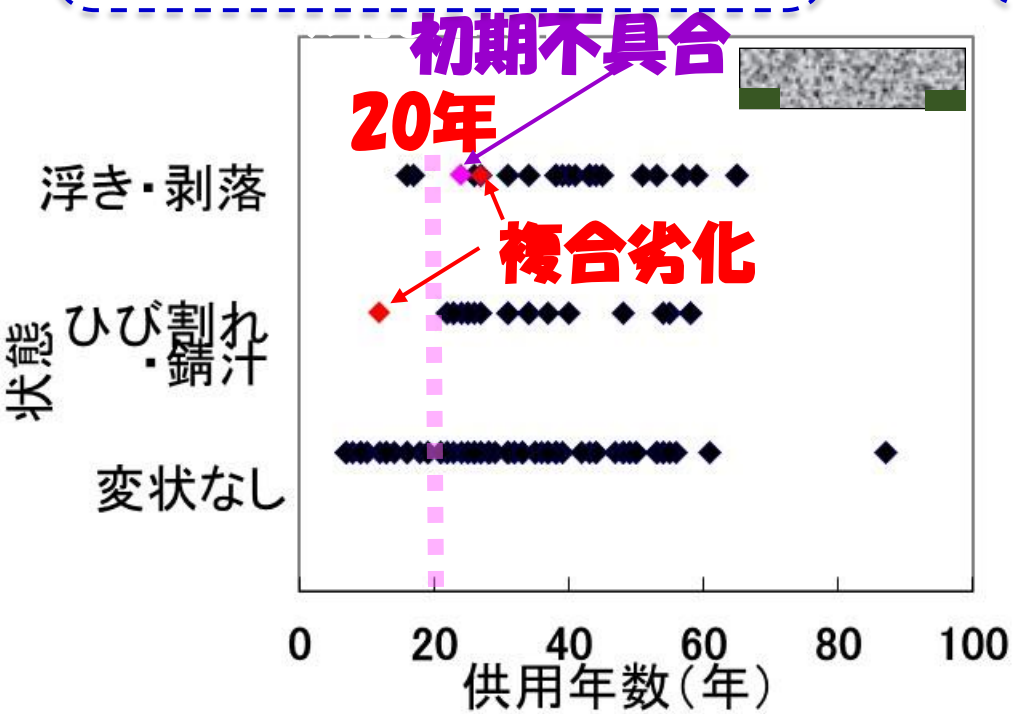
調査結果

凍結防止剤による塩害
33年

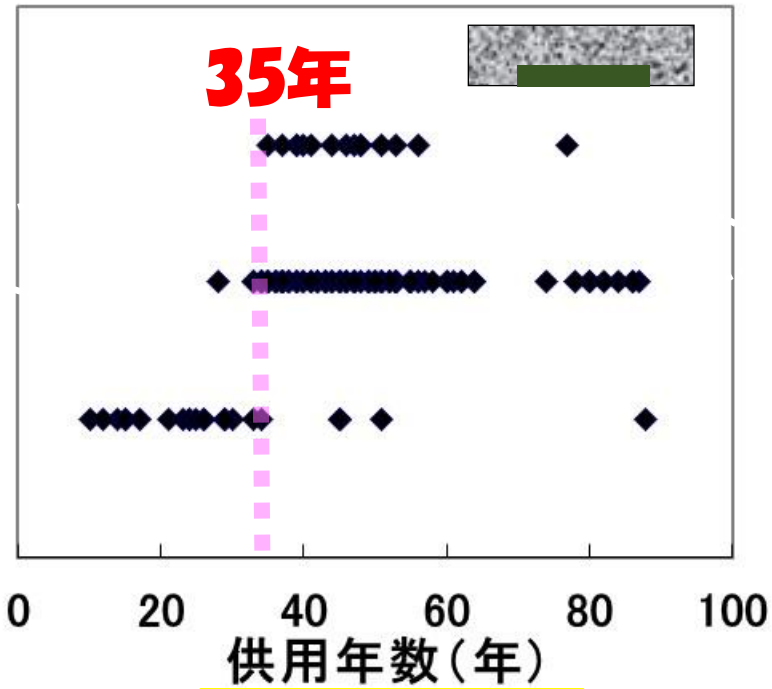
複合劣化

凍結防止剤の塩分で
ASRが加速

ASRのひび割れで
塩害劣化が加速



凍結防止剤

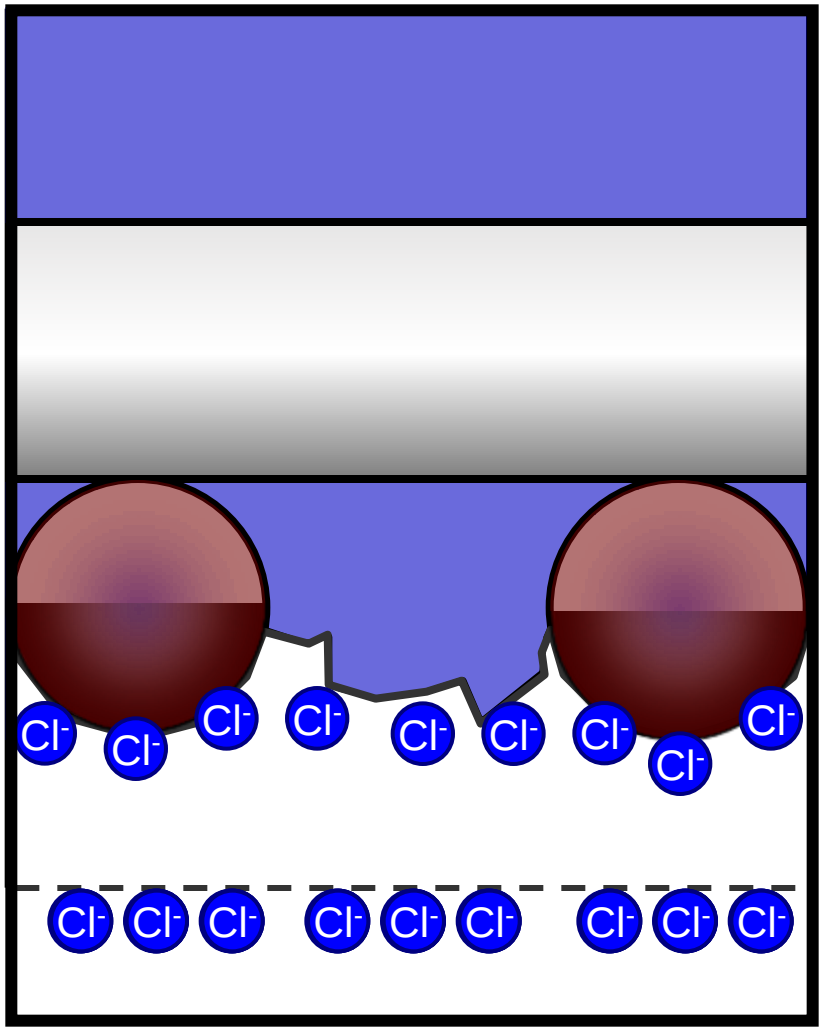


飛来塩分

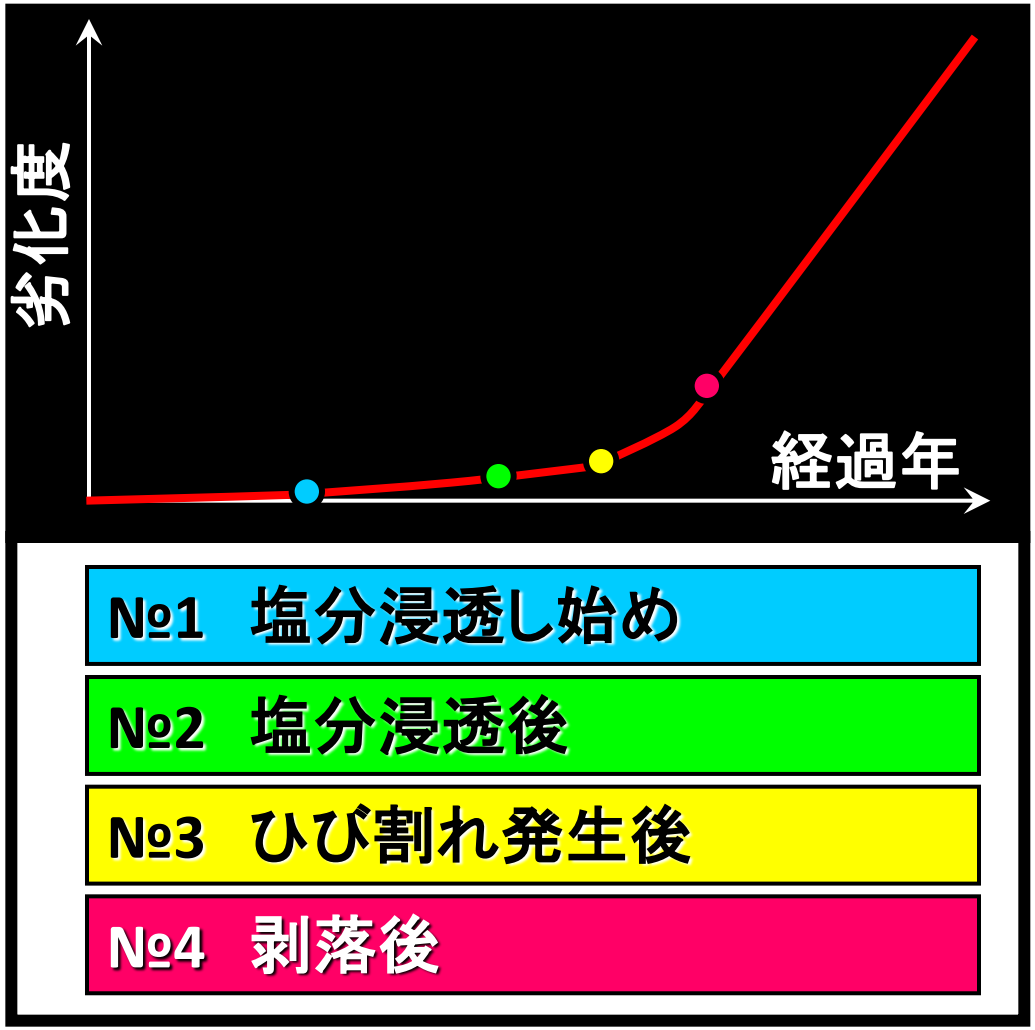
腐食進行メカニズムの解明・評価

実験概要

（山本恵理子、修論、2006）
（平野誠志、土木学会論文集、2015）



桁端部腐食進行過程（仮説）

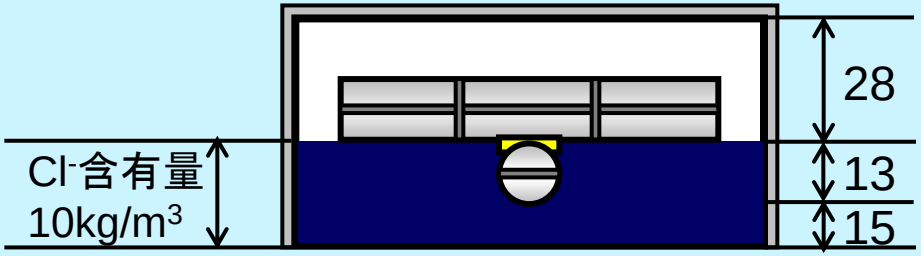


実験ケース

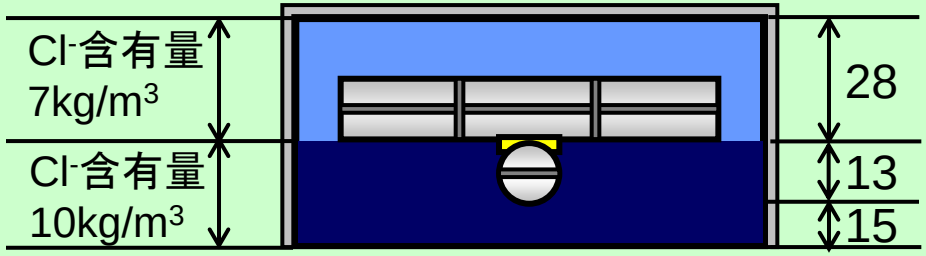
供試体概要

単位[mm]

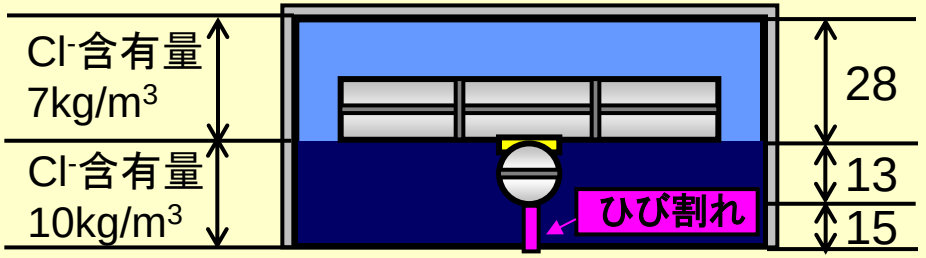
№1　塩分浸透し始め



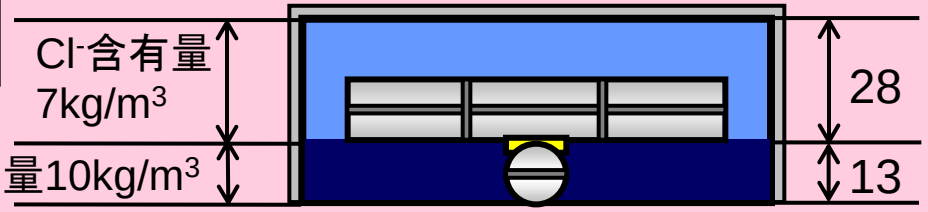
№2　塩分浸透後



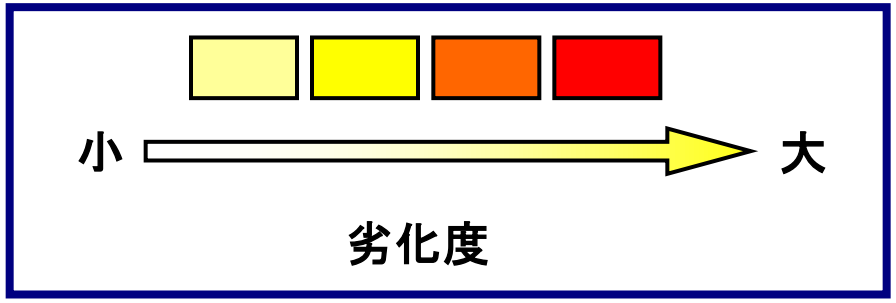
№3　ひび割れ発生後

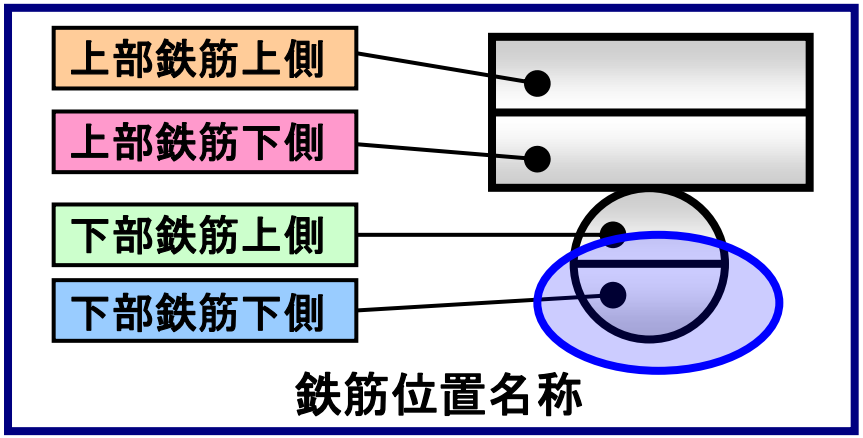


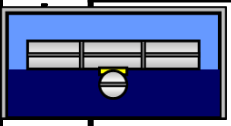
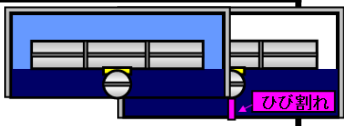
№4　剥落後



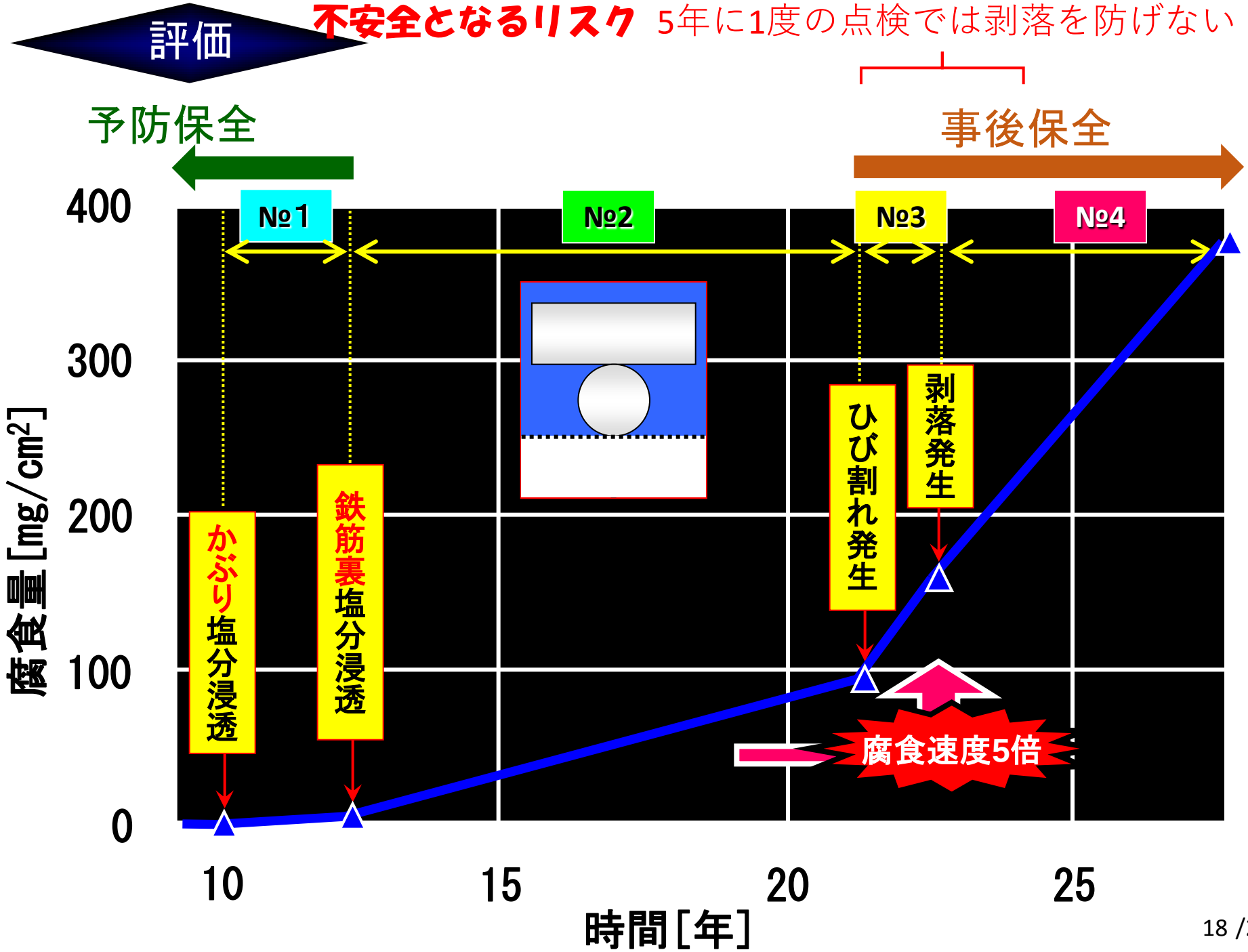
実験結果





実験ケース	№1 塩分浸透し始め	№2 塩分浸透後	№3 ひび割れ発生後	№4 剥落後
				
腐食速度	1 0 0 6	1 12 1 16	2 20 42 51	0 12 17 69

［mg/cm²/年］


評価
不安全となるリスク
5年に1度の点検では剥落を防げない
予防保全
事後保全
№1
№2
№3
№4
かぶり塩分浸透
鉄筋裏塩分浸透
ひび割れ発生
剥落発生
腐食速度5倍
腐食量[mg/cm2]
400
300
200
100
0
10
15
20
25
時間[年]

北陸地方の塩害道路橋に対する維持管理モデルの作成に向けた流れ

点検方法の合理化・高度化を提案

評価方法の合理化・体系化を提案

補修方法の安価化・体系化を提案

維持管理モデルの作成

劣化橋梁群のメンテナンスマネジメントシステムの実装

「管理者≠使用者」を参照
例）海洋環境，ｽﾀｼﾞｱﾑ等

北陸地方の早期劣化を鑑みたシナリオ策定

安全性・使用性を踏まえて管理限界を設定

2段階を設定
（事後・予防）

劣化進行モデルの作成

6市町で仮実装を試す

経営マネジメントの視点を取り入れる

シナリオ(案)

重要

維持管理は、
作業の目的を理解して
点検することが重要

部分的な**表面保護**・**防食工法**の適用で
トータルコストを低減

表面付着Cl⁻

直ぐに対策(**連結工法**)

路面からの流水有無

補修
(断面修復等)

補修方法
を選定

Cl⁻量

補修範囲
を特定

自然電位

近接目視 ←--→ **叩き**

補修効果の非破壊モニタリング

補強

更新

FA混和
耐食鉄筋
(桁端)
防水層

高 **低** **無**
残存性能の評価

構造解析

時間

変状なし

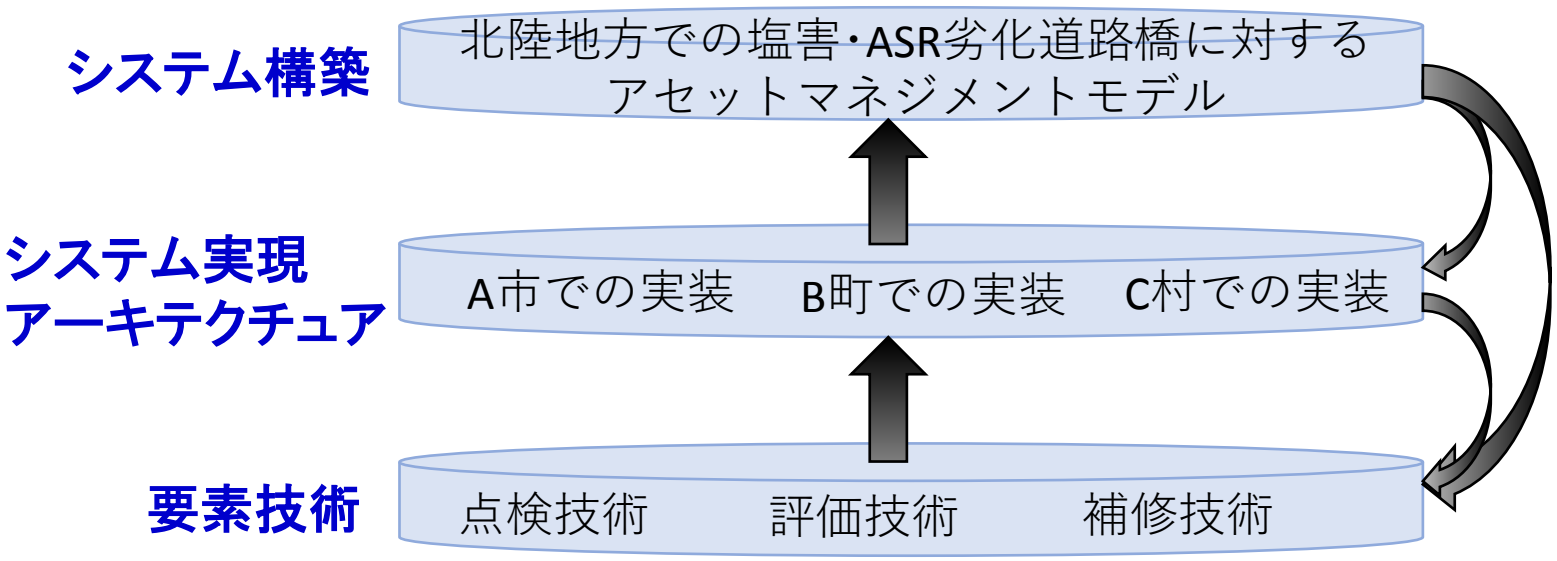
変状あり

耐荷性低下の疑念

コンカレントモデルにより展開

チーム間での情報共有や共同作業を積極的に導入し、複数の開発研究を同時に進める開発方法。これにより、無駄な研究を省け、完成時期は早まり、費用も削減できる。

ERCの3層研究戦略マップにより展開



エレベーターピッチ

塩害により通行止めの道路橋in沖縄

Need（ユーザーにとっての必要性）

- 北陸は新幹線開通で活性化している。
- 世界遺産や農業遺産、白山や立山などのユニークなスポットが多数ある。

  ⇒地域の持続的発展が望まれる。

- 古くから道路ネットワークが構築されている。
- 塩害とASRによる早期劣化は他に類を見ない。

  ⇒道路橋の延命化・長寿命化が望まれる。

・地震や大雨などの自然災害が起きる。

  ⇒部材の残存耐力の維持が望まれる。

Approach(解決策)

- 北陸地方の若手教員による市町村の維持管理の支援

  who 宮里・花岡(金沢工大)、深田・久保(金大)
  伊藤(富山県立大)、宮下(長岡技大)、鈴木(福大)

  what 自治体に応じた点検・評価・補修・補強・更新技術の提案

  when 平成29年度～30年度(必要に応じて継続)

  where 地方自治体の庁舎や現場

  how 関連する産(コンサルタント企業)や民(診断士)と連携

- 現場実証試験により各種技術の最適化・実用化

- [維持管理業務の契約] 単年度から多年度へ

- [技術職員の採用] 高得点に加えてやる気も考慮

Benefit/Cost（費用対効果）

	Tangible（有形）	Intangible（無形）
Benefit（長所）	• 自治体の支出の低減 • 道路利用者の渋滞による経済損出低減	• 市民の安全向上 • 管理者のリスク低減 • 他のSIPグループの開発技術の利活用 • 地元のメンテ関連企業の活性化 • 診断士の地位向上
Cost（短所）	• 自治体職員の勉強時間の増加	• 自治体職員のﾓﾁﾍﾞｰｼｮﾝの多様化 • 多企業の参画

Competition（競合他者）

- 市民の無関心
- 自治体職員の意識の低さ
- 技術力向上や誠意に欠けたコンサルタント

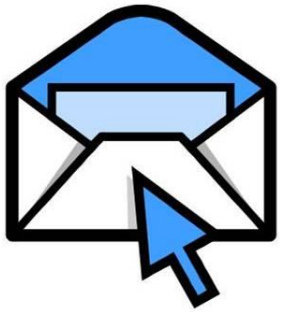
北陸SIPの地域実装プロジェクトと連携することで
ネットワークも活用しながら改善される。

Close（今後の提案）

自分達の自治体だけが出来ていないのでは無く、
日本全国でも成功事例はありません。

宮里宛に連絡を頂ければ、取組みについて
詳しく説明させて頂きます。

また、宮里から連絡しますので、是非とも前向きに
対応ください。



miyazato@neptune.kanazawa-it.ac.jp

〒924-0838　石川県白山市八束穂3-1　金沢工業大学

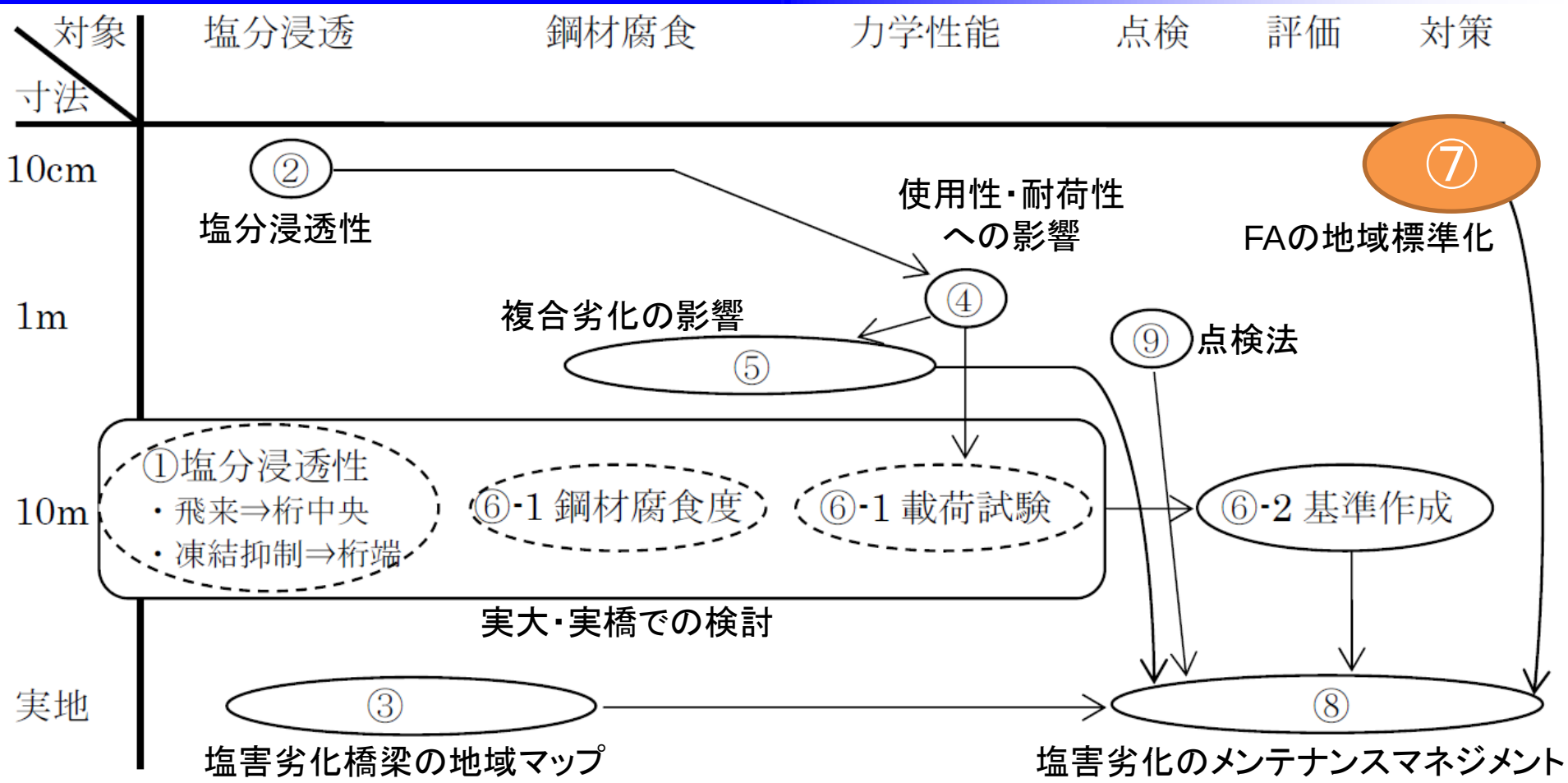
持続可能な
社会を目指して

各種コンクリートへの
フライアッシュの適用について

2017年 3月 14日
富山県立大学　環境工学科
伊藤　始

（2017年4月～　環境･社会基盤工学科）

SIP WG1 における位置づけ



⑦フライアッシュコンクリートの地域的標準化による塩害抑制対策

背景

石炭灰(フライアッシュ)

北陸で
年90万t

分級によりJIS Ⅱ 種相当

埋立て処分量を減らす

環境負荷の低減
産業副産物の利用

富山・石川・福井で、コンクリート用
混和材として実構造物に使用
（15%内割置換）

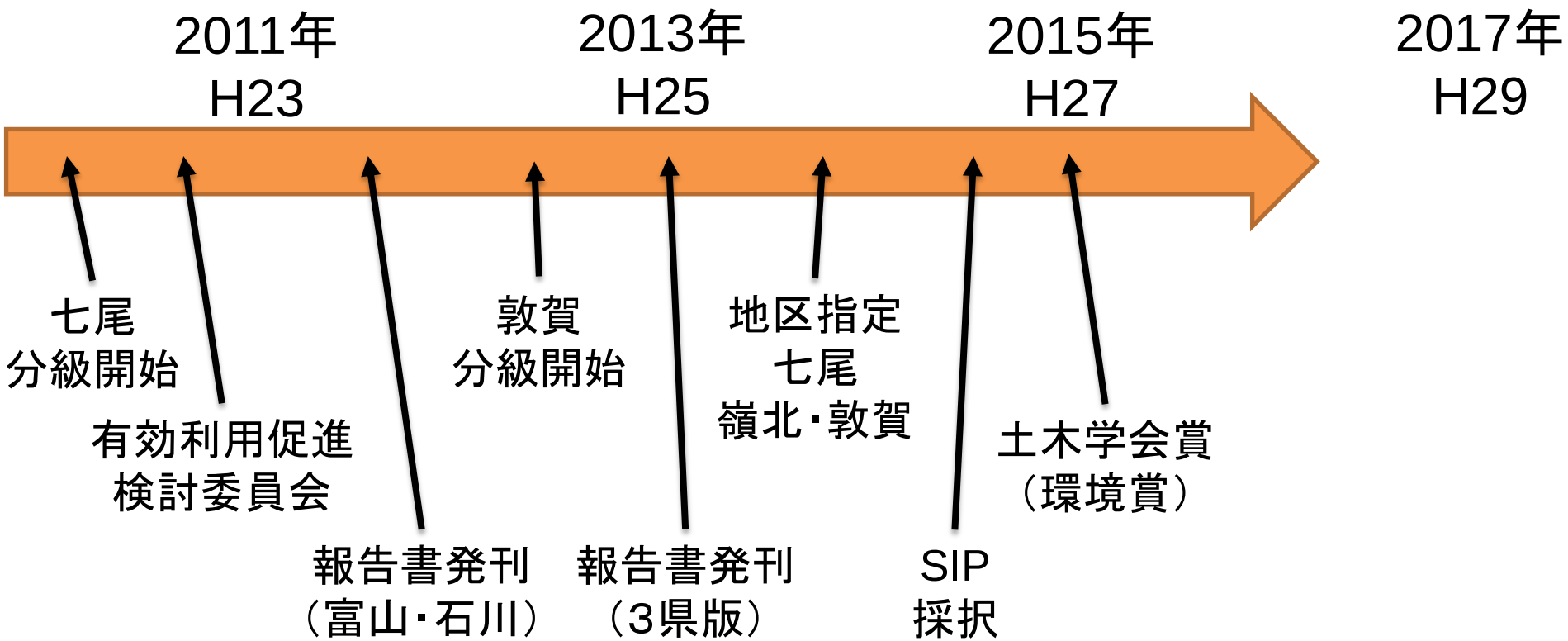
水和熱の抑制

ち密化：長期強度、耐久性

施工性能の改善

アルカリ骨材反応の抑制

北陸地方でのFA適用の流れ



重力式擁壁

逆T型擁壁

護岸ブロック

砂防えん堤

ﾎﾞｯｸｽｶﾙﾊﾞｰﾄ

橋台・橋脚

LNG関連工事

金大・ポステン梁

プレテン桁

取替用PCa-PC床版

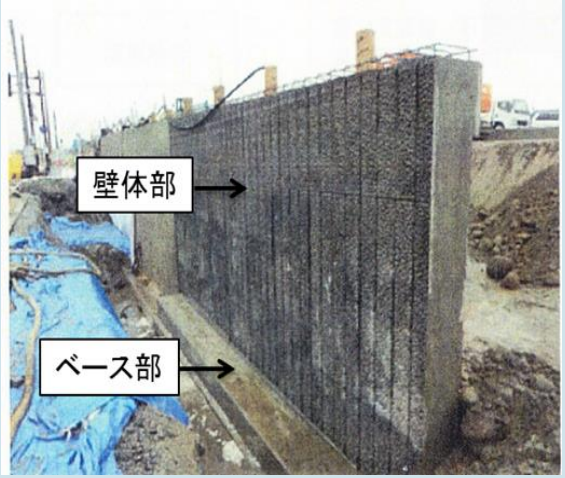
プレビーム桁

舗装コンクリート

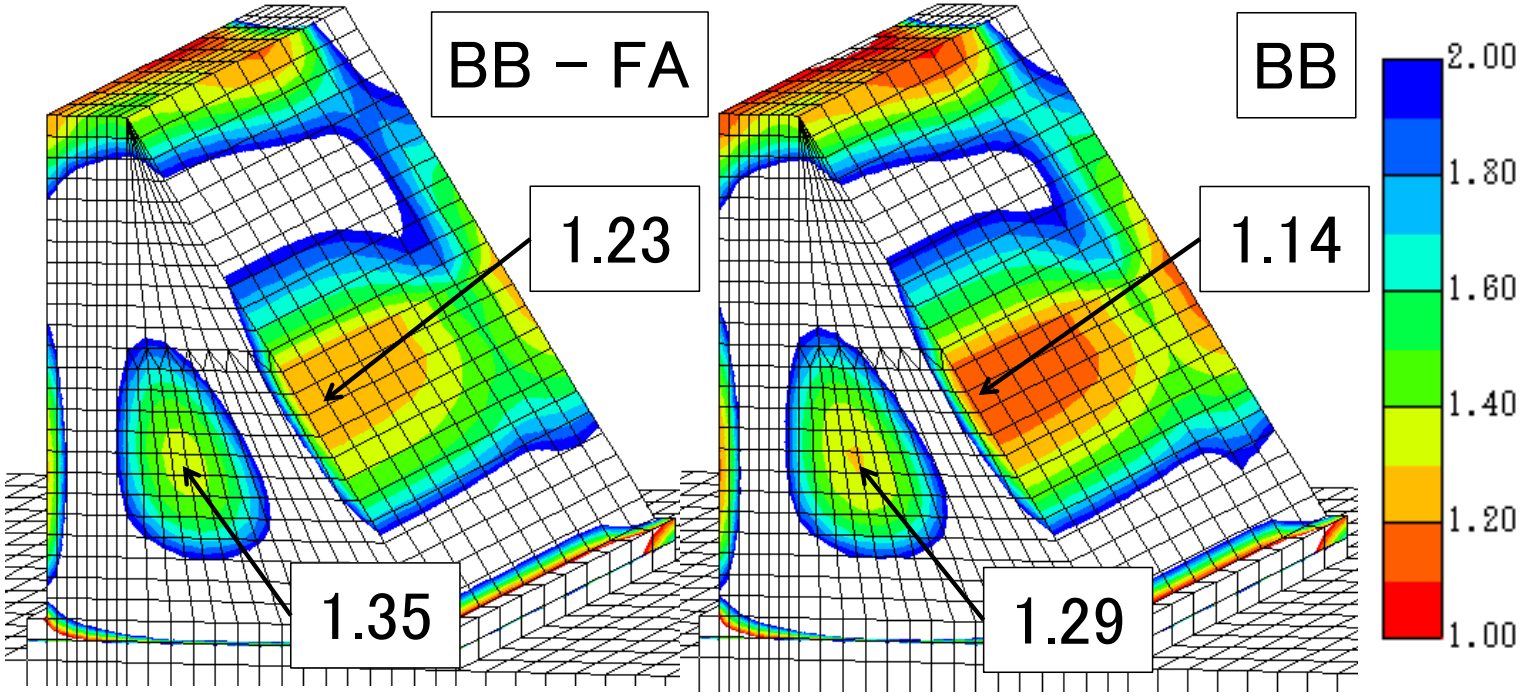
1．温度ひび割れ抑制

目的

2011年～2014年に検討：
温度ひび割れ抑制効果を、実構造物での計測と解析を基に明らかにする。

重力式擁壁 （石川県）	逆T型擁壁 （富山県）	六脚ブロック （国交省・富山）
		

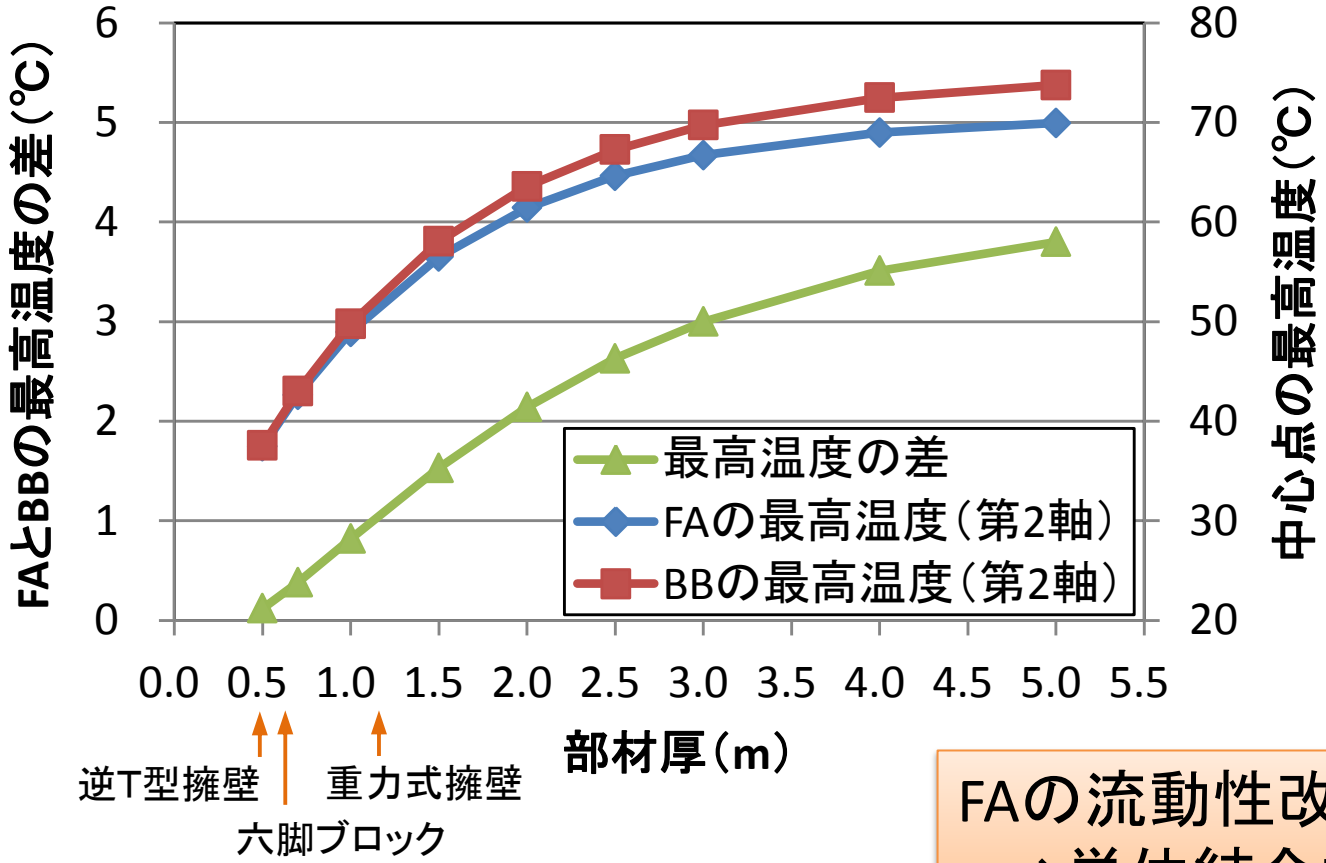
ひび割れ指数分布
重力式擁壁



期間内の最小値

〇FAの初期強度が大きいことで、ひび割れ指数が大きくなった。
〇部材厚さが大きいときに、FAによる温度ひび割れ抑制効果が大きくなった

効果が得られる構造物条件



断熱温度上昇特性の条件

		FA	BB
K	℃	46.5	50.9
α	―	0.783	0.688

FAの流動性改善
⇒単位結合材量の減少

↓

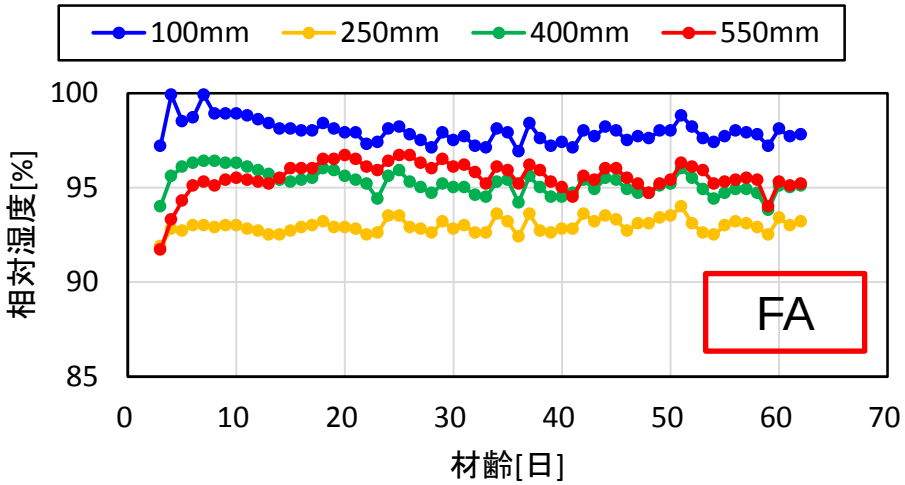
Kとαをさらに小さくできる

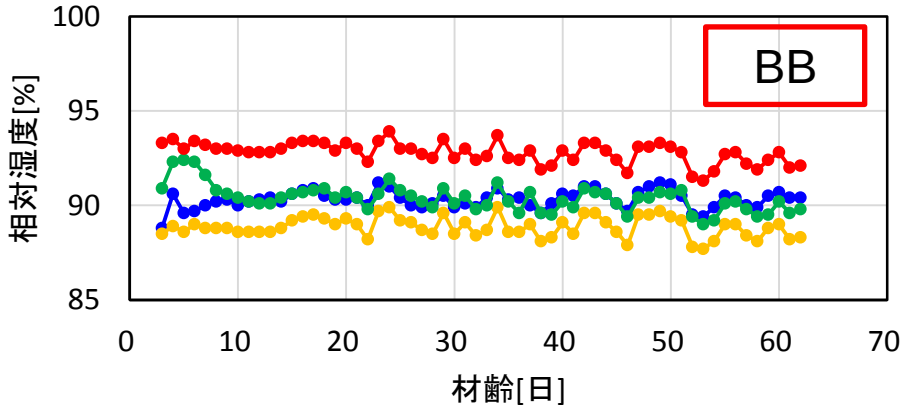
２．水分移動と収縮ひずみに関する検討

B4 二永勇也

連携・協力
- 北陸電力
- 国土交通省
- 婦中興業
- 立山生コンクリート

現場計測　湿気移動実験





相対湿度の低下傾向が見られず、
差異が明確とならなかった。

角柱供試体を用いた試験

①乾燥収縮試験

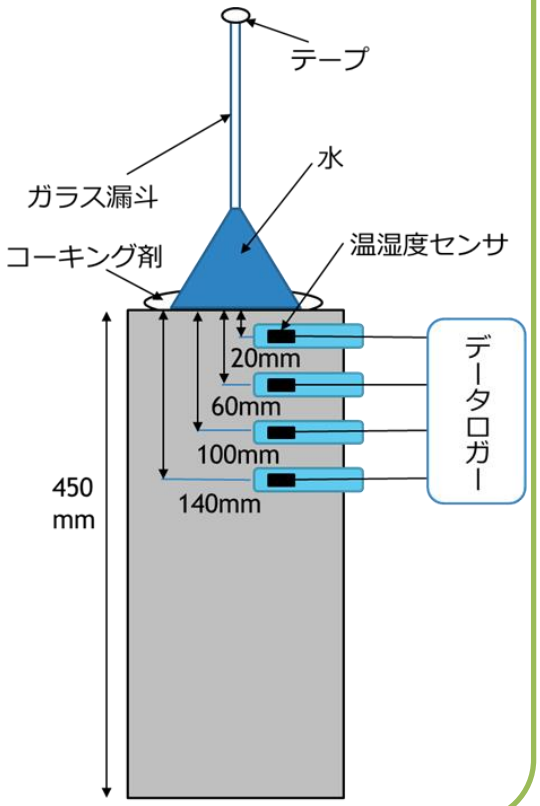
18ヶ月

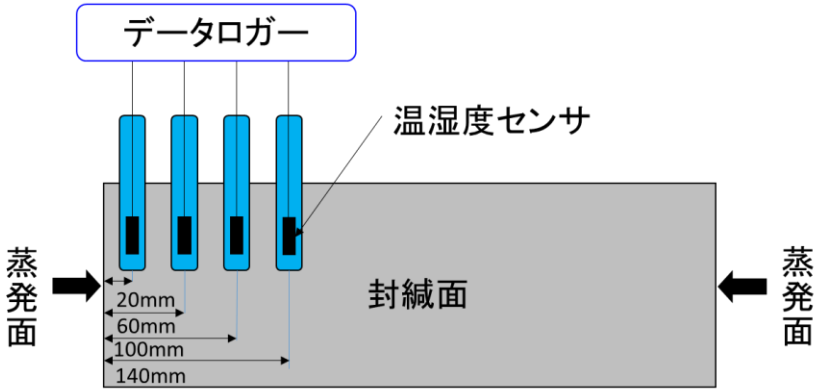
2ヶ月

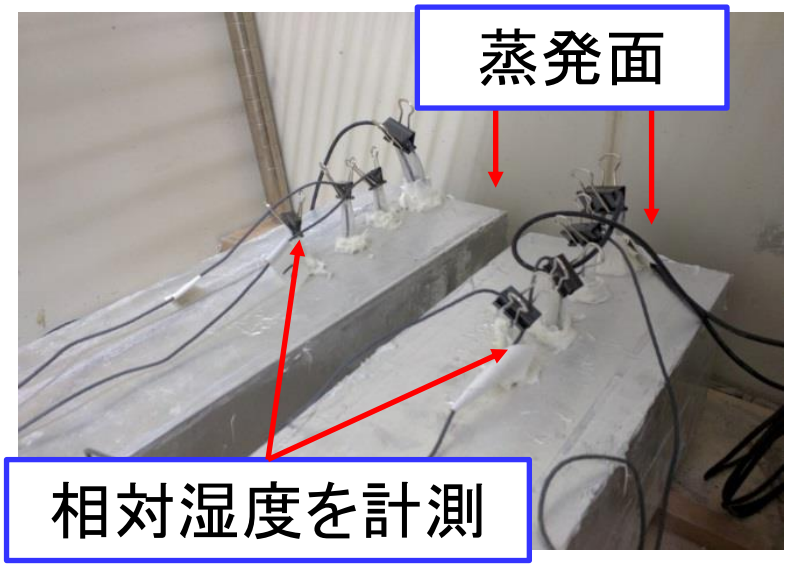
②透水試験

③湿気移動試験

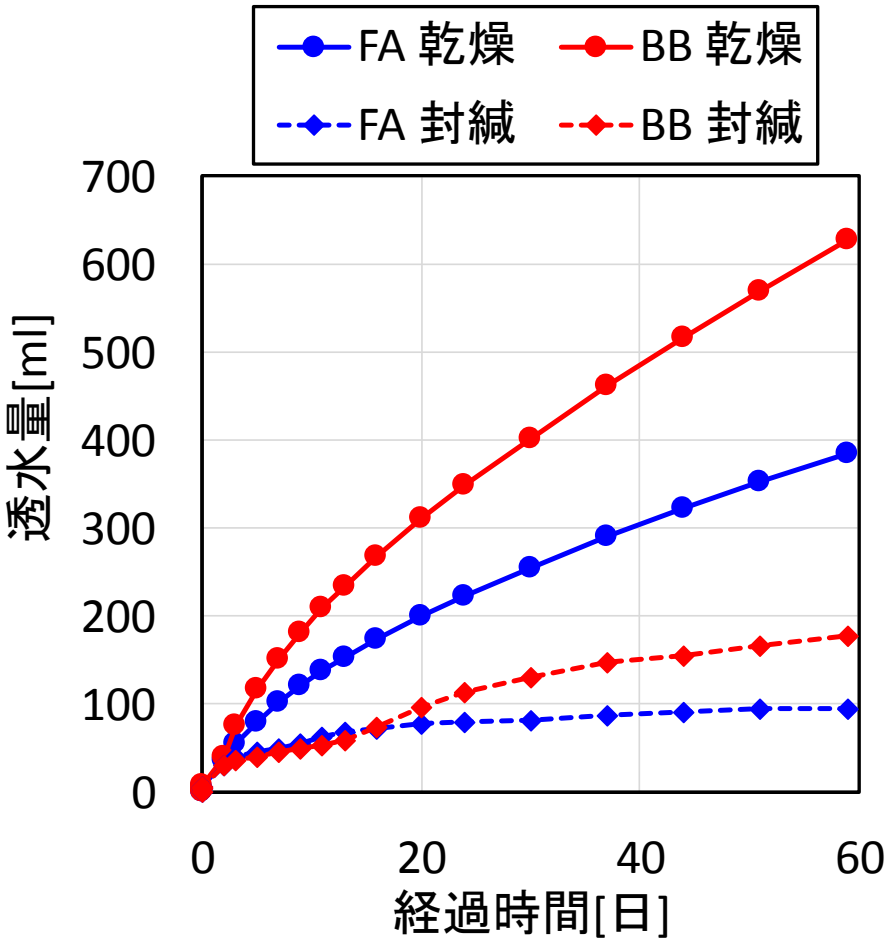
5ヶ月

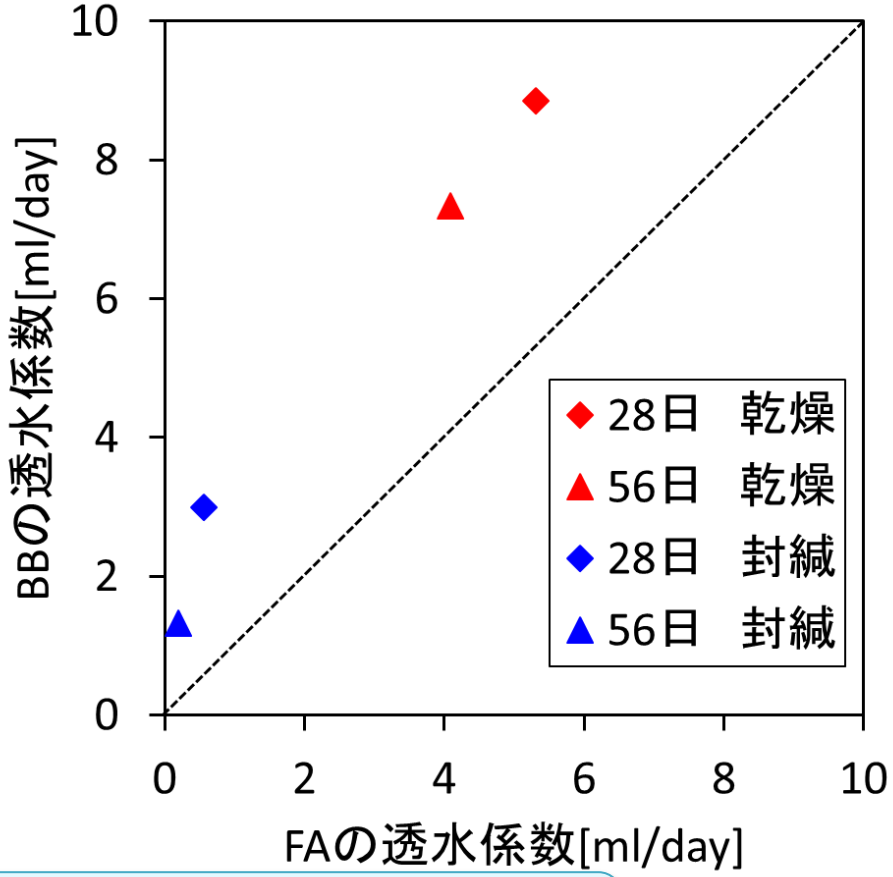






透水試験の結果

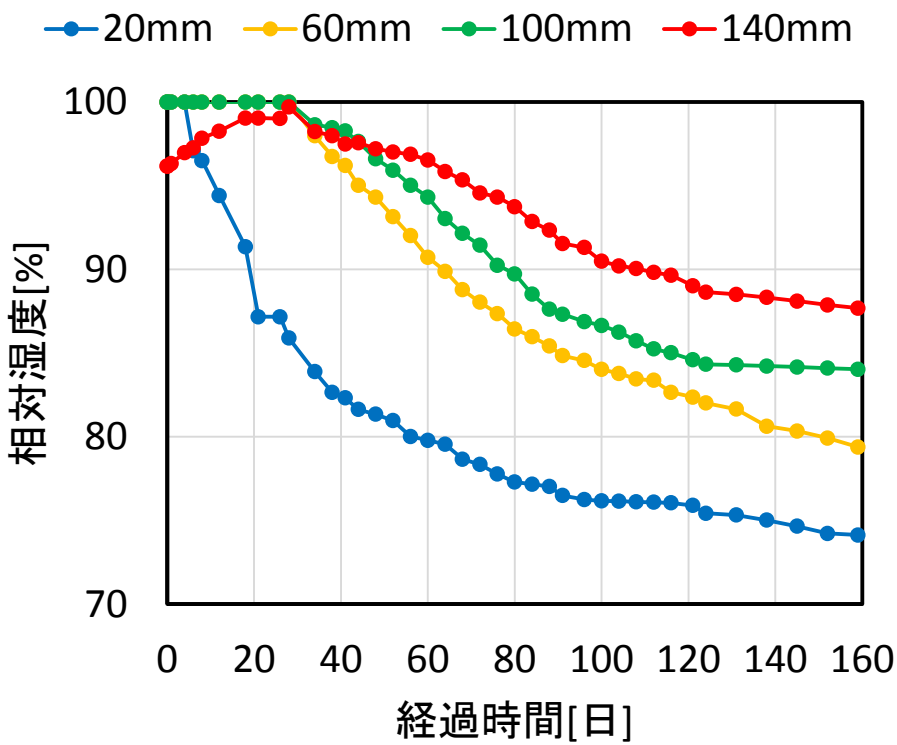




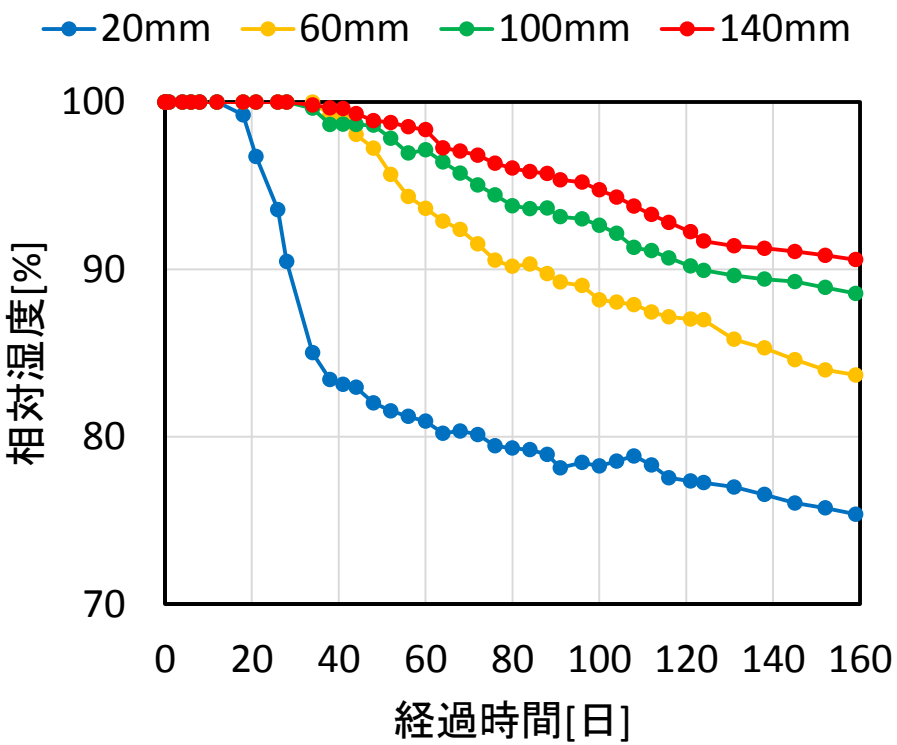
FAの透水係数は、BBの値よりも小さかった。

湿気移動解析

FA 乾燥

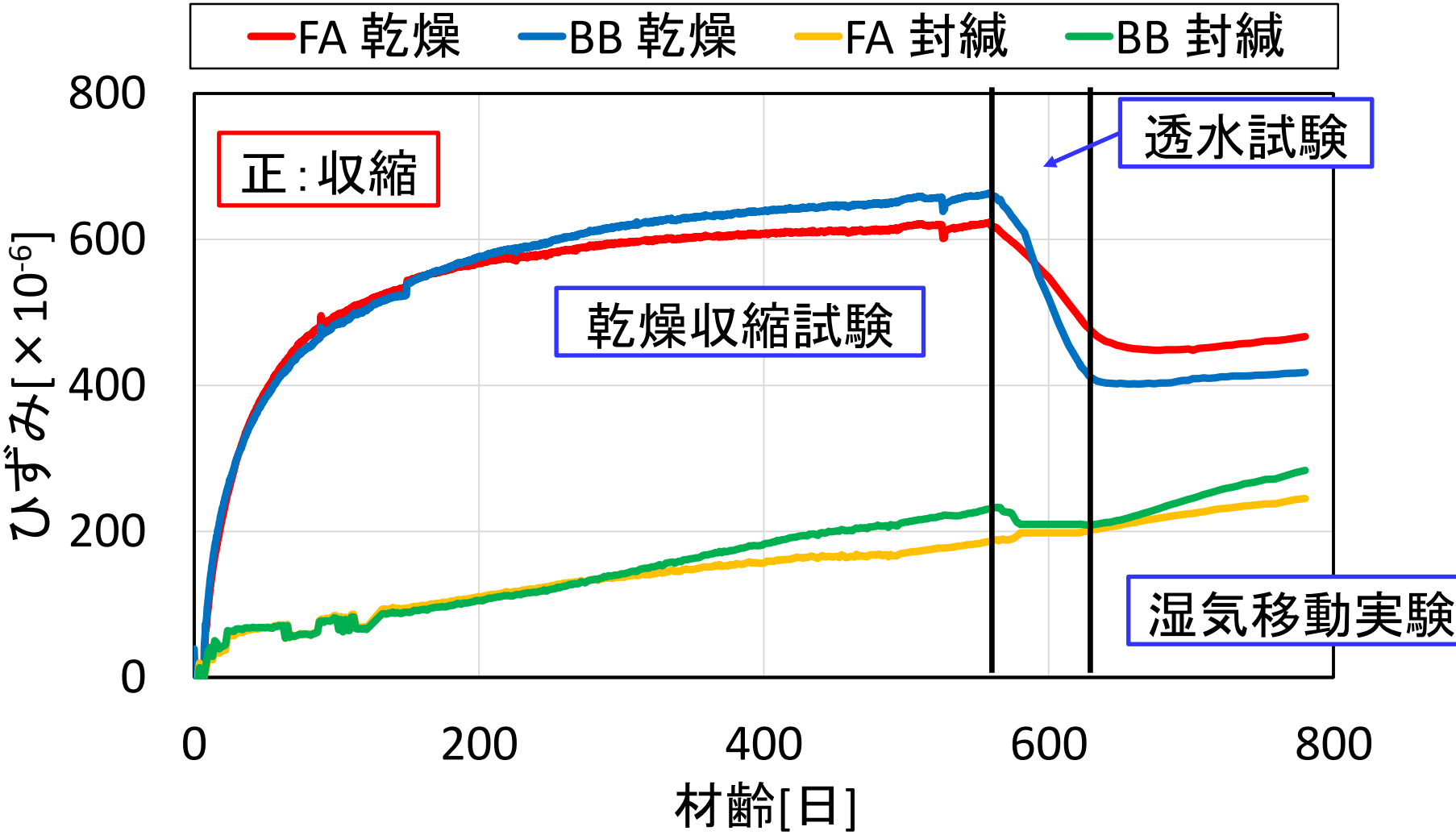


BB 乾燥



FAの相対湿度の低下が、若干早い傾向が見られた。

ひずみ履歴



3種類の試験ともに、FAのひずみの変化が小さかった。

3. 道路舗装用の速硬コンクリート 1Day Pave への適用

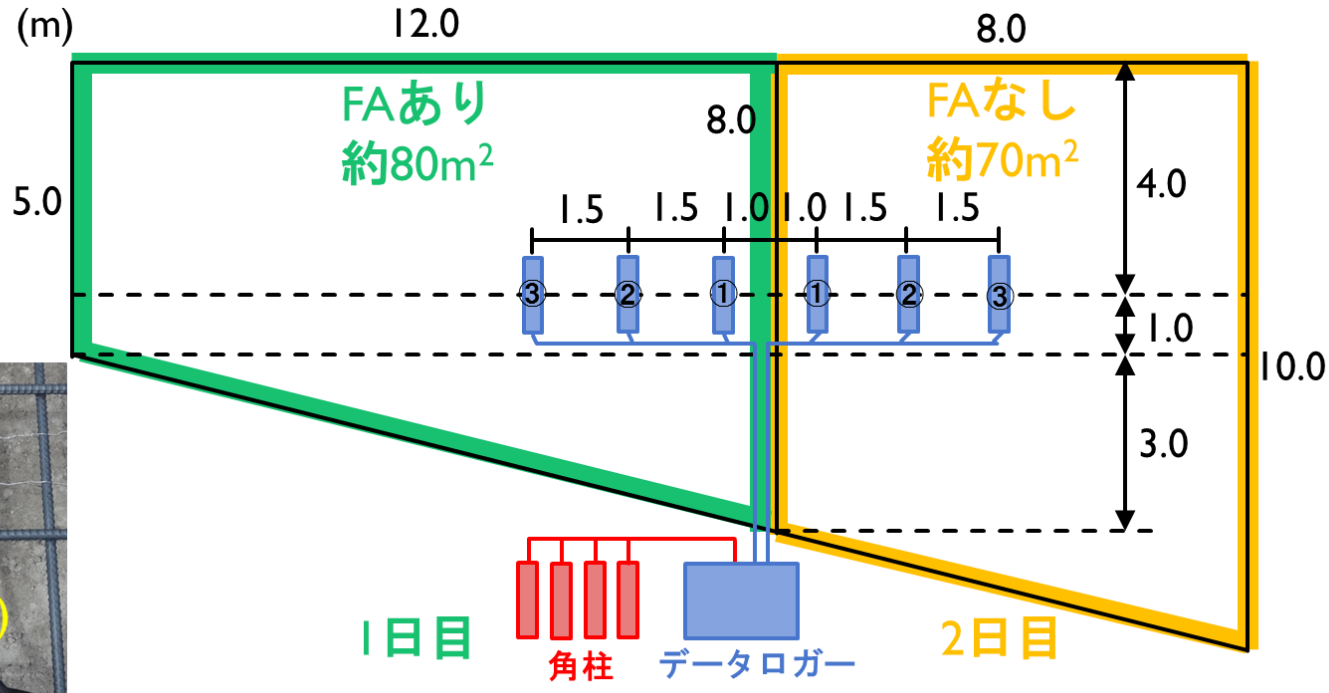
B4　毛利悠一郎

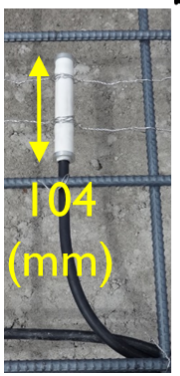
連携・協力
・黒部生コンクリート
・デンカセメント

実験の概要

ケース名	FAの有無	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				
			C	W	S	G	FA
FA	あり	35.0	458	160	591	1067	69
N	なし				718	1015	–

強度発現を優先し、砂置換



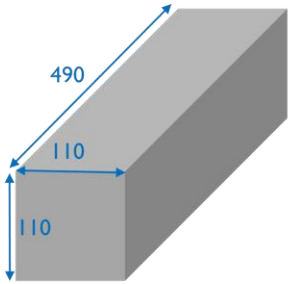


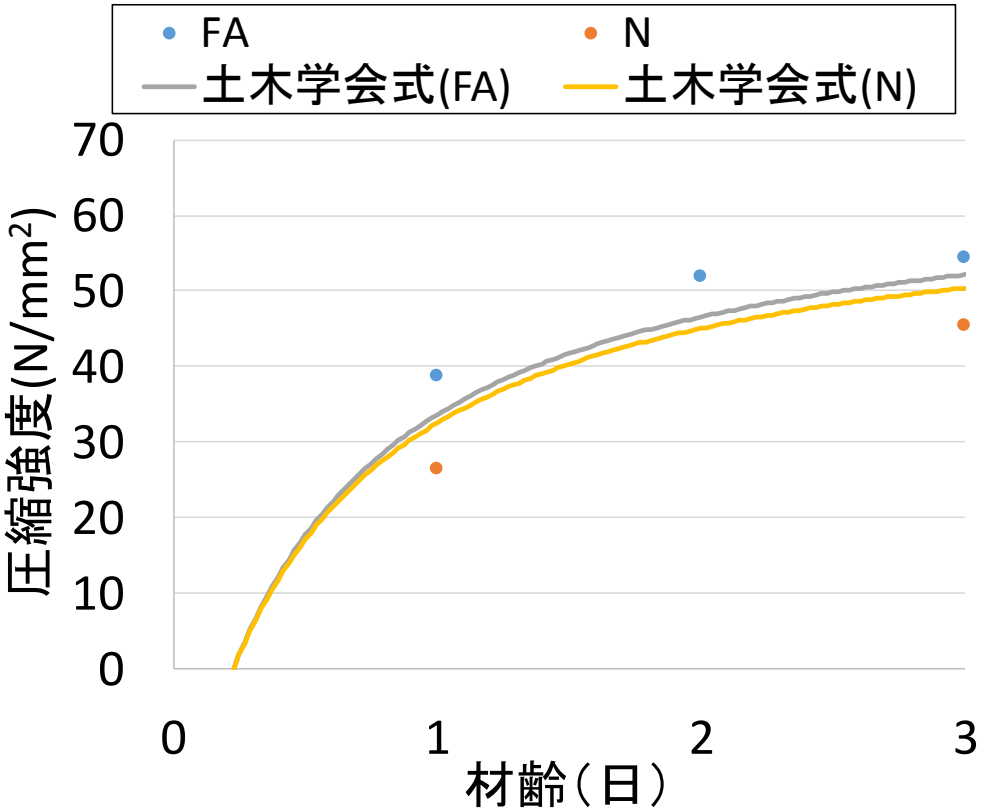
計測項目
ひずみ、温度
計測期間
2016/6/8～7/12

実験の状況

発泡スチロールあり

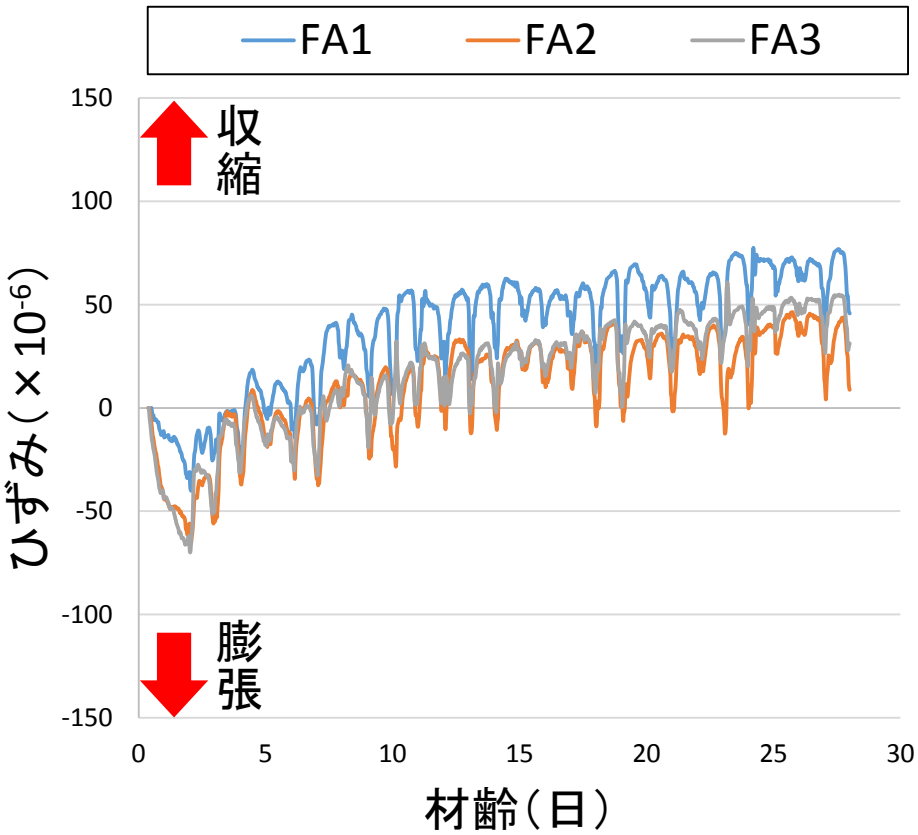
発泡スチロールなし
（コンクリート供試体実寸法）

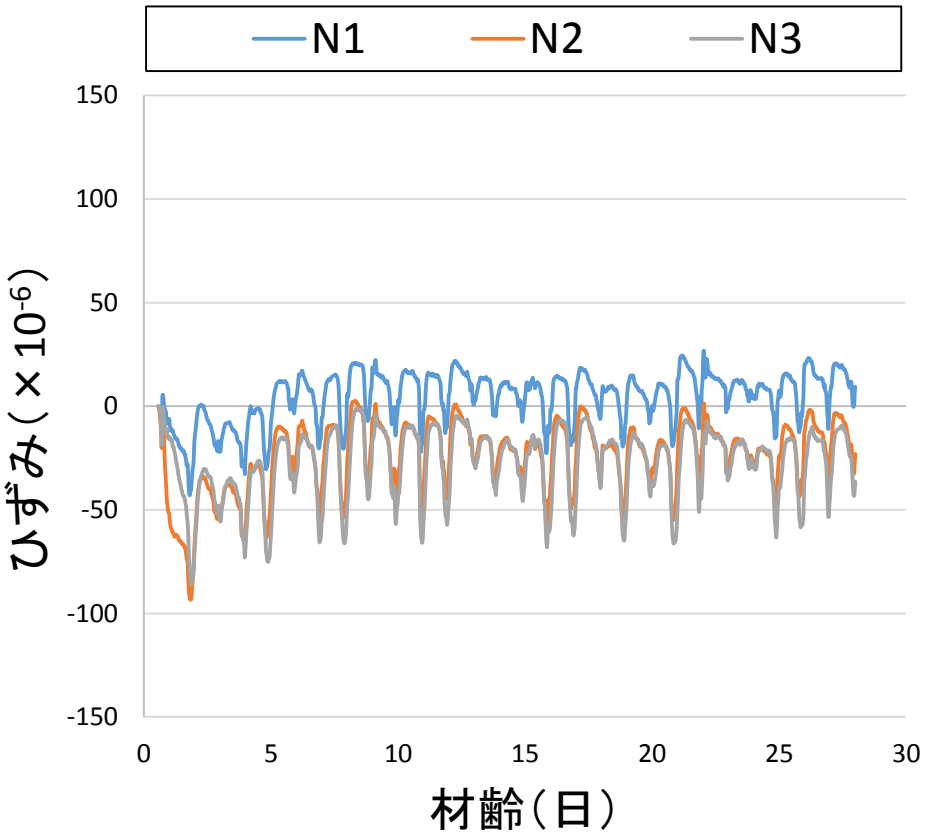




圧縮強度発現

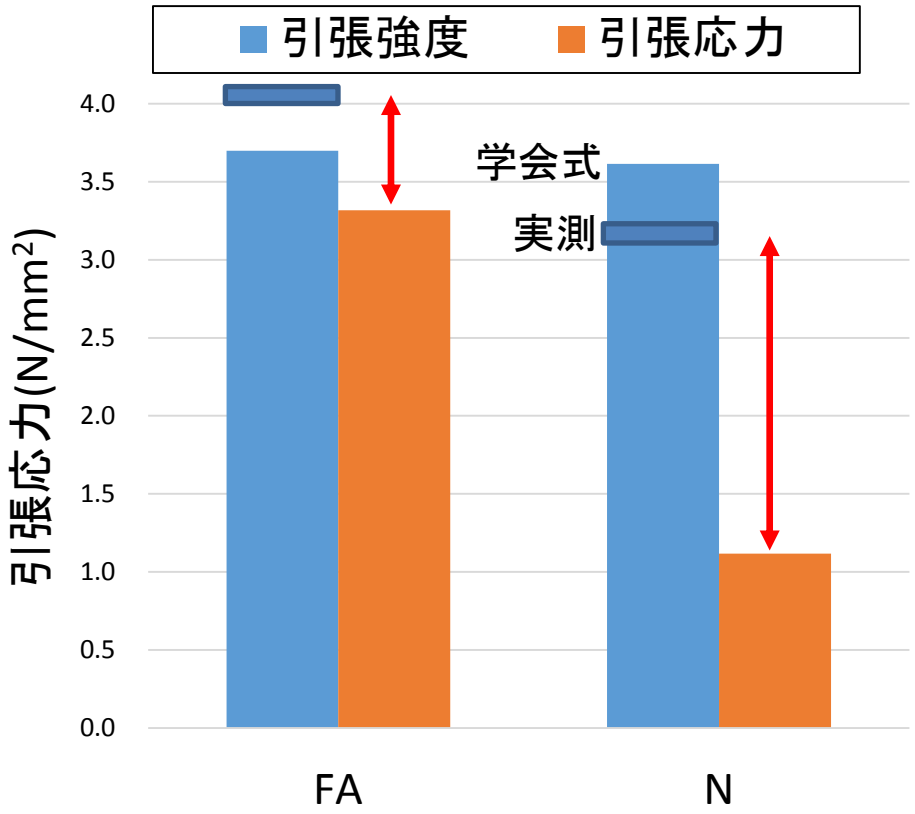
拘束ひずみの履歴

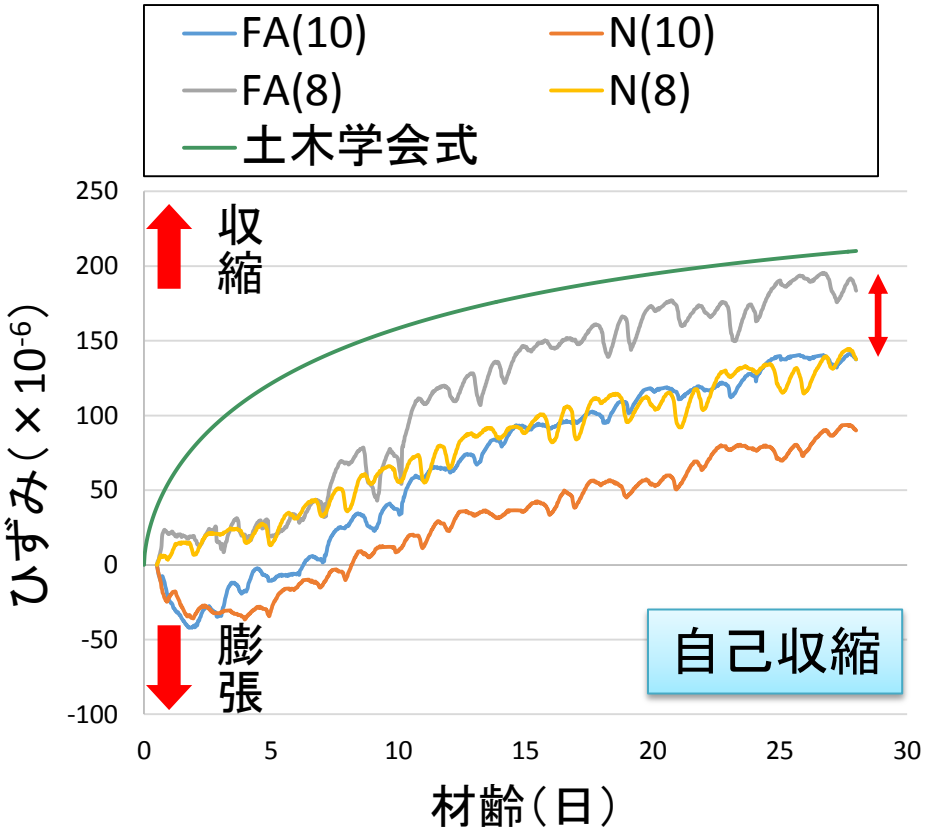




拘束ひずみ：計測値から温度成分を引いた値
⇒体積変化したときの地盤等からの拘束度合いで変化

結果の分析





今回の実験(砂置換)では
乾燥収縮　N＝FA
自己収縮　N＜FA

FAのひび割れ発生への余裕度が小さくなった。

4. プレビームへの適用
（高強度FAのデータ蓄積）

B4　川崎友莉

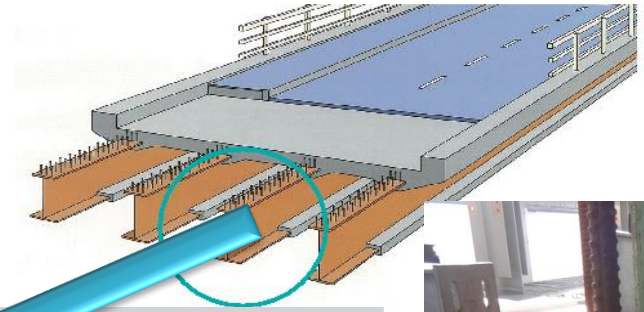
連携・協力
・川田工業
・となみ協立生コン

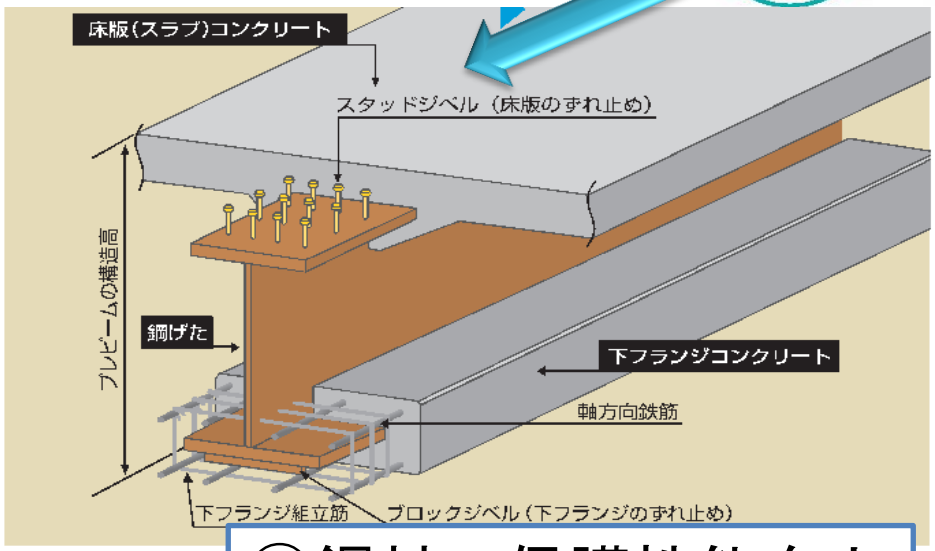
背景(プレビーム)

PC鋼材の代わりに，鋼桁の曲げ剛性を利用して下フランジコンクリートにプレストレスを導入する構造形式.

●部材の構成

床版(スラブ)コンクリート
＋
鋼げた
＋
下フランジコンクリート

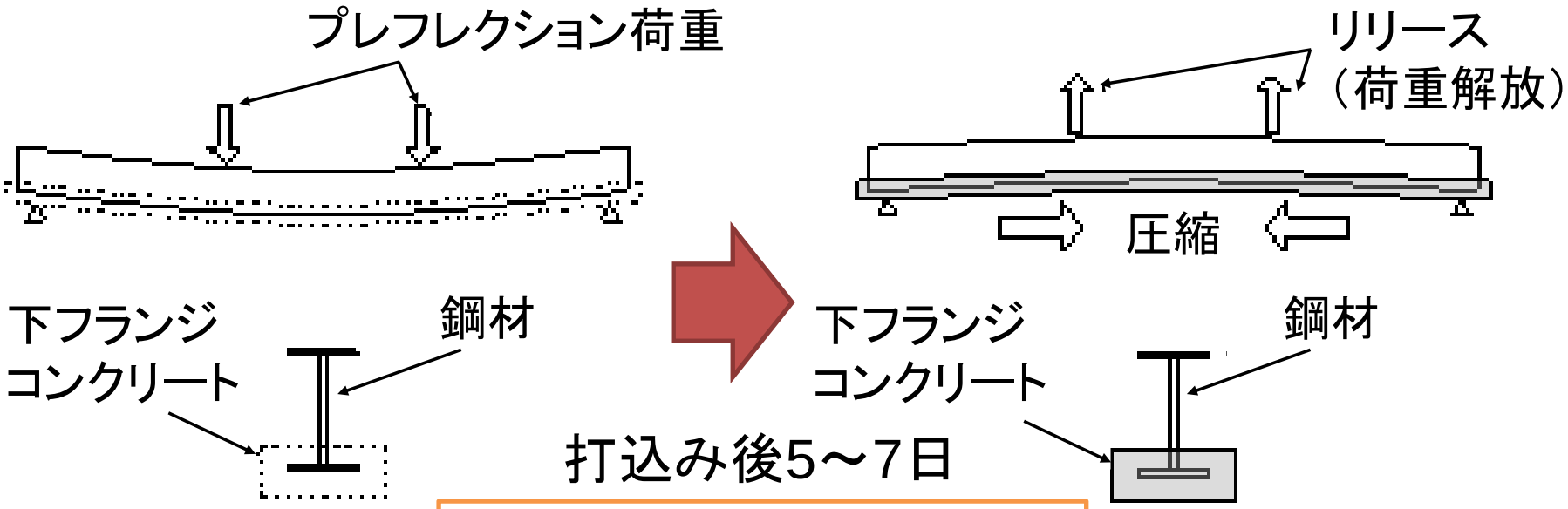




①鋼材の保護性能向上

②狭隘な打込み箇所

背景(プレビーム)



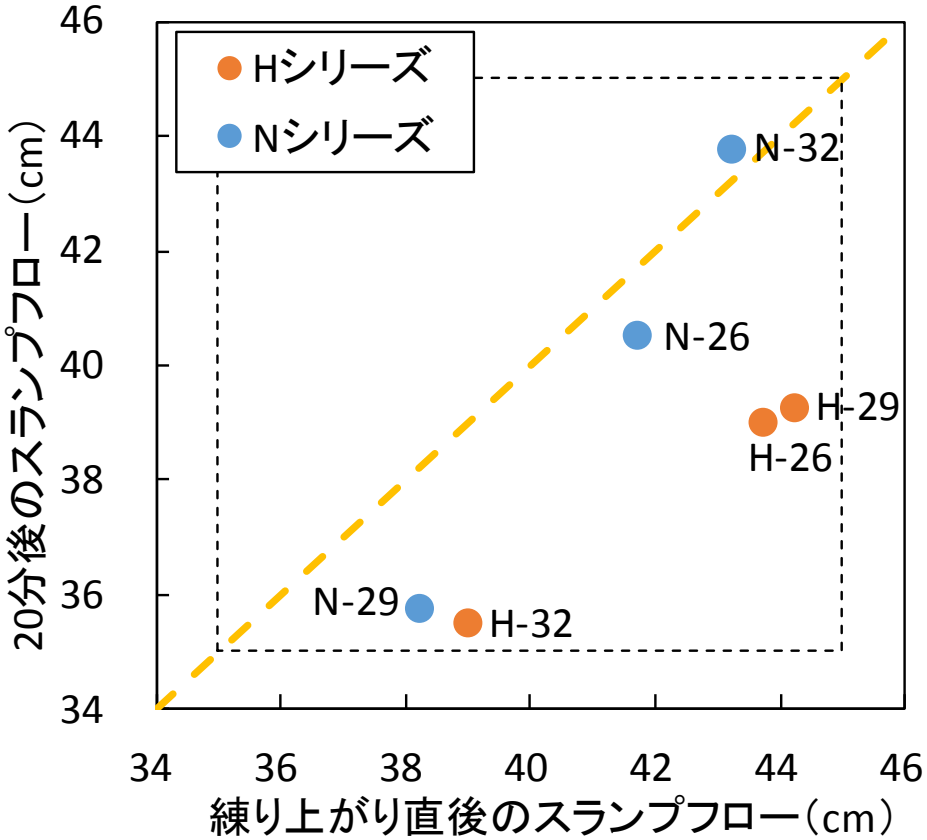
打込み後5～7日

③早期に高い強度の発現

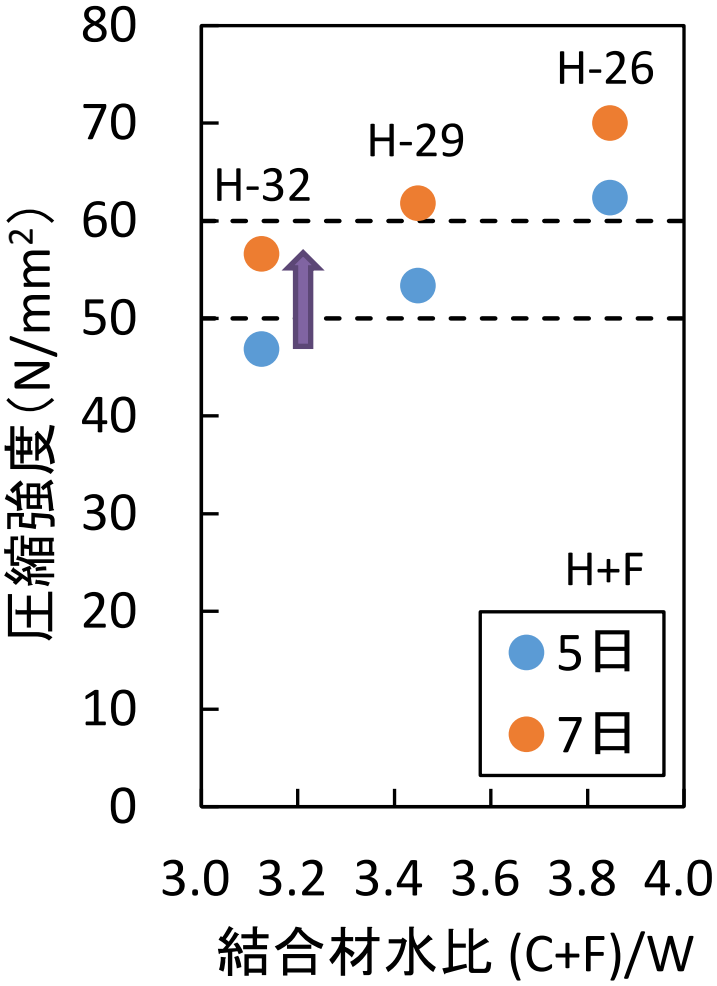
コンクリートに求められる性能
①鋼桁周囲の補強鉄筋を含む鋼材の保護性能
②高い流動性(フレッシュ性状の保持)
③早期の強度発現

フレッシュ、強度発現（2015年実施）

スランプフロー



圧縮強度・早強



塩分浸透試験の概要

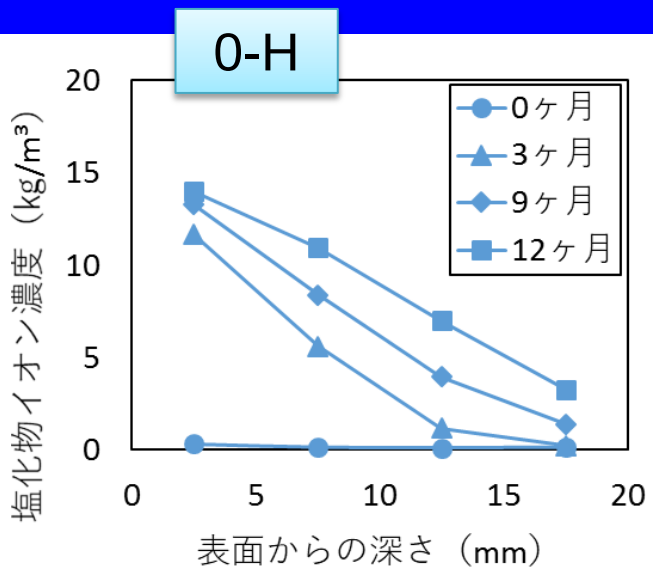
FA添加による塩分浸透抵抗性を確認

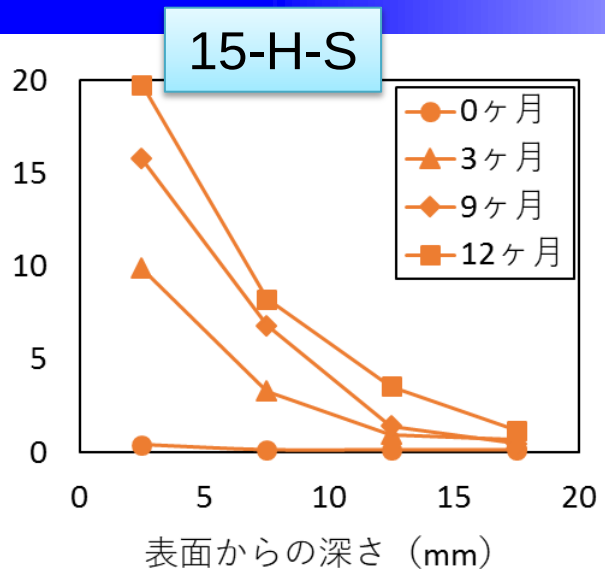
3ヶ月，9ヶ月，12ヶ月間の塩分浸漬試験を行った塩水（濃度10%）

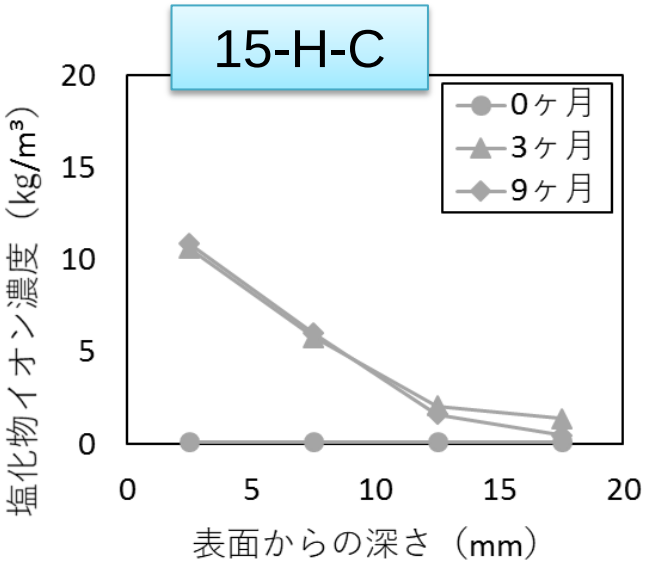
試験ケース

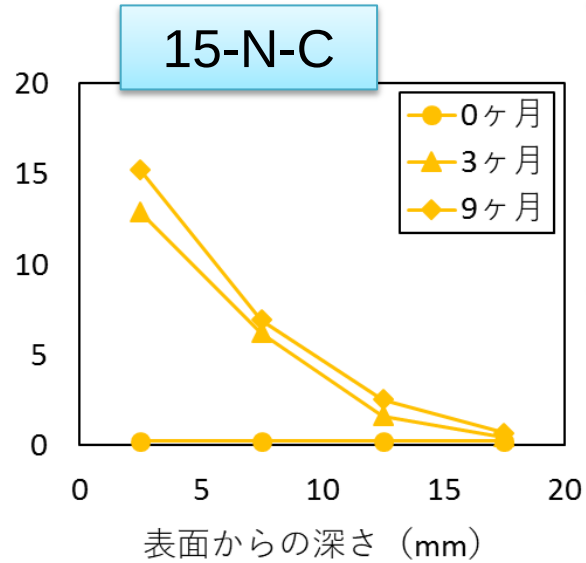
	セメント	FAの有無	W/C (%)	s/a (%)
0-H	早強	なし	31.2	42
15-H-S		15% 砂置換	31.2	40
15-H-C		15% セメント置換	29.0	39
15-N-C	普通	15% セメント置換	29.0	39

濃度分布







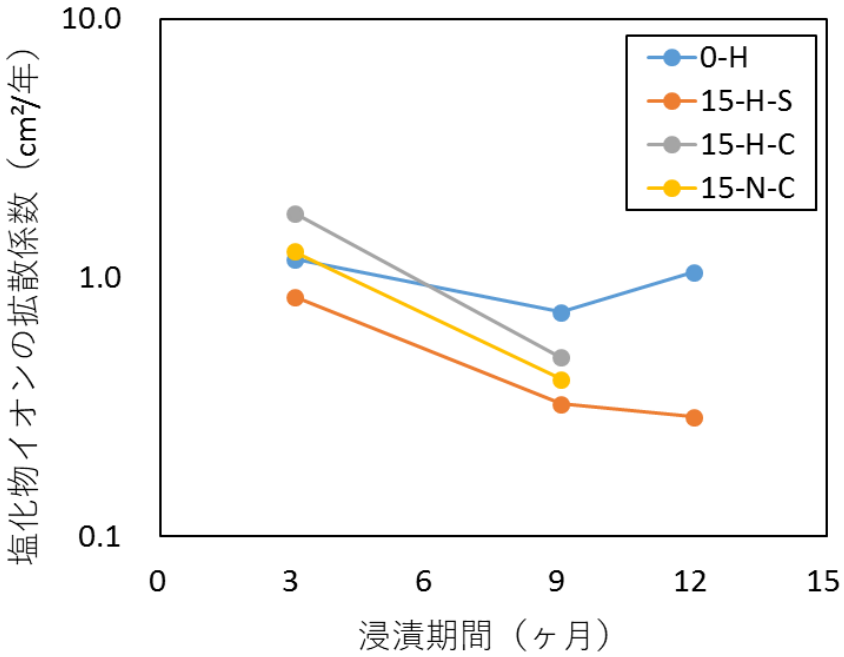


FAケースの
15～20 mm地点の
濃度が0 kg/m³に近い

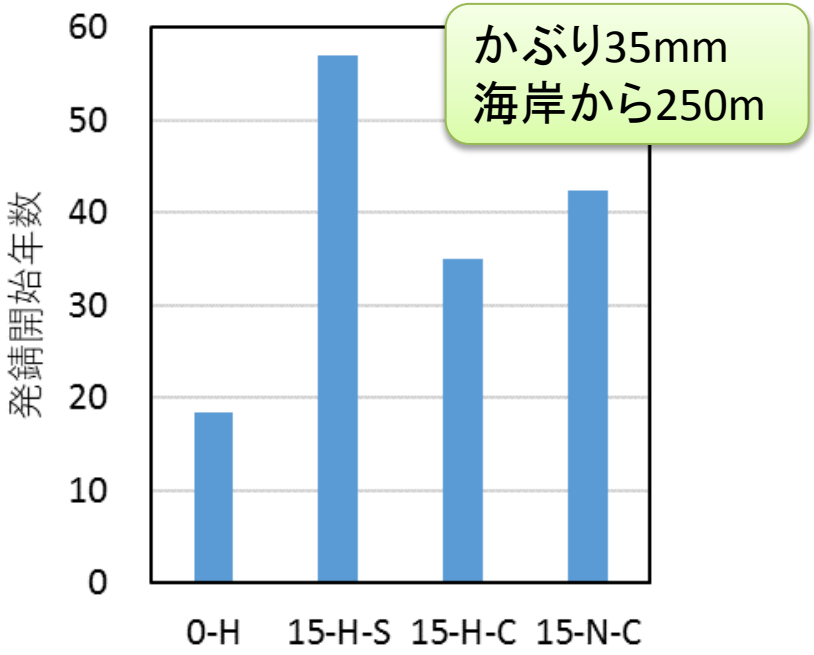
FAの3ヶ月から9ヶ月
の濃度変化が小さい

発錆開始年数の比較

拡散係数と浸漬期間の関係



発錆開始年数の計算



0-Hは、時間に依存していない
FA添加では、拡散係数が低下

FA・セメント置換の発錆は、
0-Hより15年以上遅れる

・FA添加は、塩害抑制に有効であった。
・FAケースでは、時間とともに抵抗性が向上した。

地域的標準化に向けて

北陸地方は、コンクリートの劣化が進行しやすい地域である。

↓

SIPでは、塩害抑制対策、ASR抑制対策を主目的に、フライアッシュコンクリートの地域的標準化を目指している。

↓

FAの技術的なメリットとデメリットは、おおむね整理されたが、コストの課題は残る。

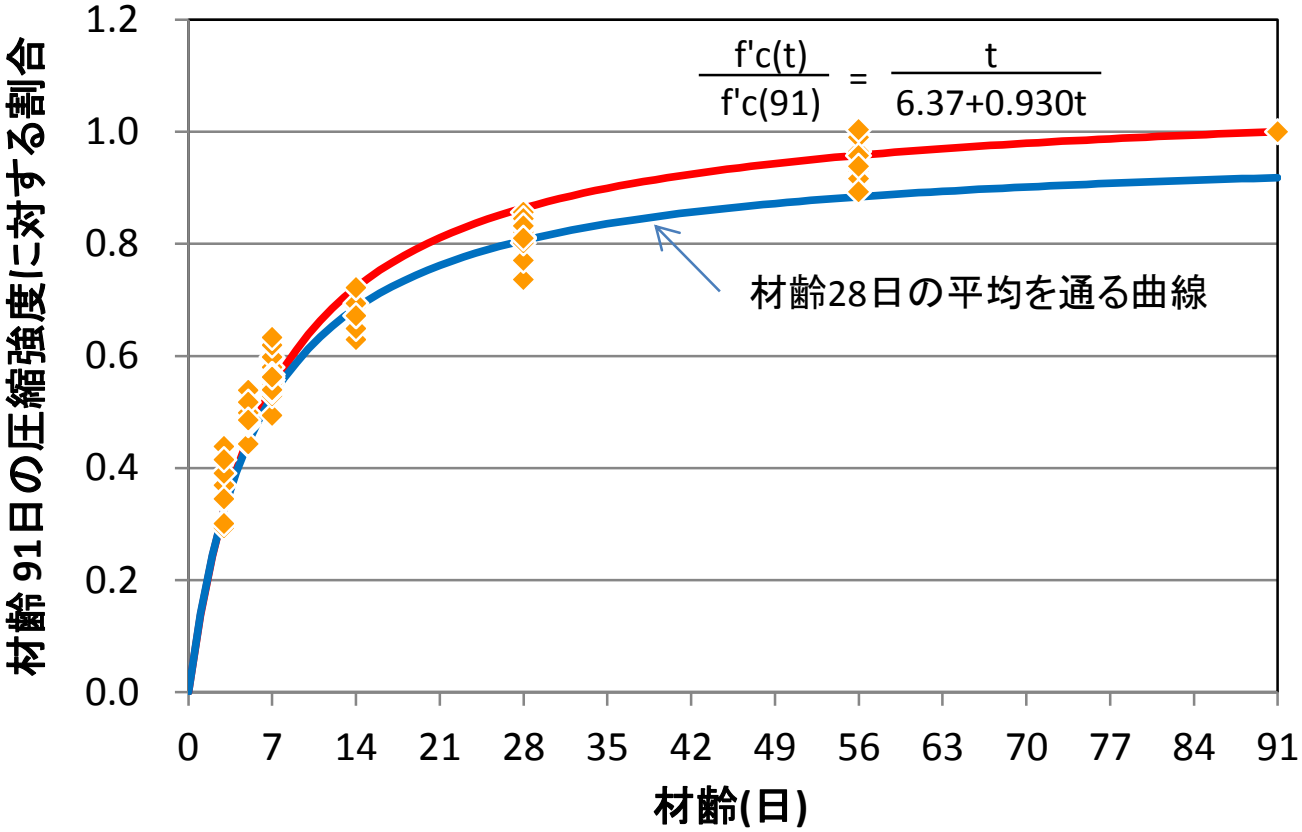
↓

ライフサイクルコスト（LCC）の考えを適用して、耐久性向上によるLCC低減効果が大きい構造物に適用していきたい。

ご清聴ありがとうございました

圧縮強度発現式の検討

・円柱供試体、標準養生
・試験グループ4、骨材産地5、材齢7　⇒　87データ



材齢91日に対する圧縮強度の割合

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システムの開発
「塩害による劣化機構の解明と構造部材の材料･構造性能評価(WG1)」

伸縮装置からの効率的な“塩分供給遮断対策(RC連結工法)

中日本ﾊｲｳｪｲ･ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ 名古屋(株)
金沢支店 石川　裕一

ご説明の適用範囲（塩害の発生要因）

この説明の適用範囲は，

“道路橋”における凍結防止剤による塩害の劣化機構の解明と，
“構造部材の材料・構造性能評価”

となります。

鉄筋コンクリートの塩害の発生要因

内在塩分		海砂の使用
外部からの塩分浸透		
海岸部	——	飛来塩分
内陸部	——	適用範囲 凍結防止剤

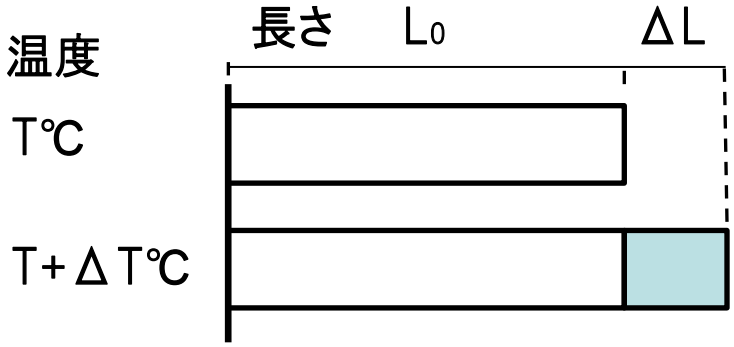
背景（凍結防止剤による道路橋の劣化機構の解明）

温度の変化により建設材料は“伸び・縮み”する性質を持っています。建設材料（鉄筋コンクリート）は，$\alpha=10\mu$ /℃で長さ率が変化します。道路橋では建設材料の“伸び・縮み”の影響を吸収するため，ある一定間隔に「伸縮装置」と呼ぶ橋けたの「継ぎ目」を設けています。なお，温度変化による橋けたの“伸び・縮み”の計算例を下記します。

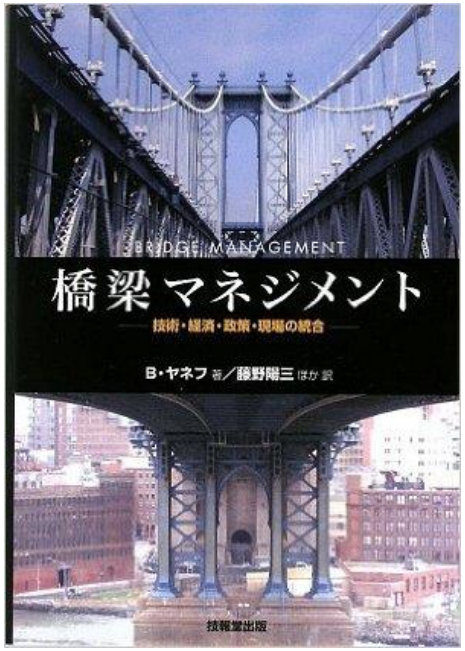
橋けたの「継ぎ目」は，路面からの雨水等が流れ落ちやすい傾向にあります。橋梁マネジメント（B・ヤネフ著／藤野陽三訳）によると，橋けたの「継ぎ目」からの漏水が橋梁の維持管理における大きな問題として紹介されています。

【計算の例】 橋けたの長さが50mで，
気温20℃を中心に±20℃で変化する場合

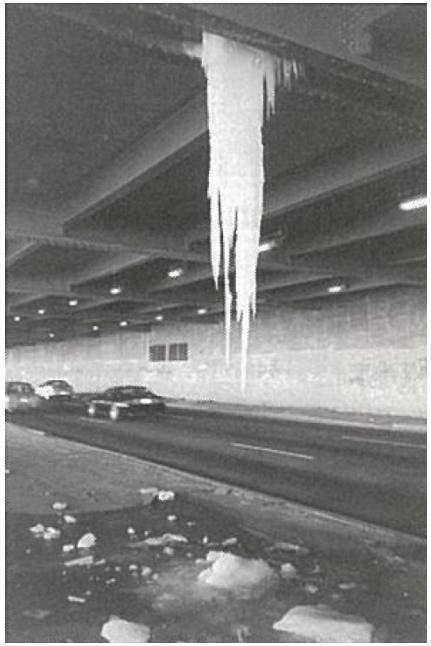
$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T℃$$
$$= 10\mu \times 50m \times 20℃ = 10mm$$



温度変化による長さ変化率（ μ : 10^{-6} ）



橋梁マネジメント，ヤネフ著
[ISBN 978-4765517577]【pp.165】



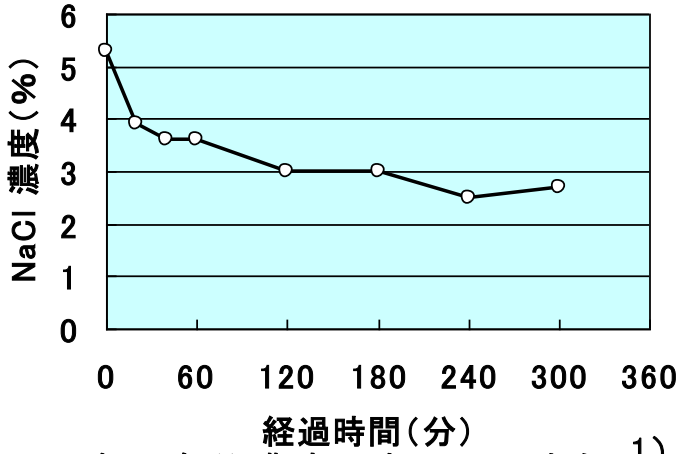
伸縮装置からの漏水

背景（凍結防止剤による道路橋の劣化機構の解明）

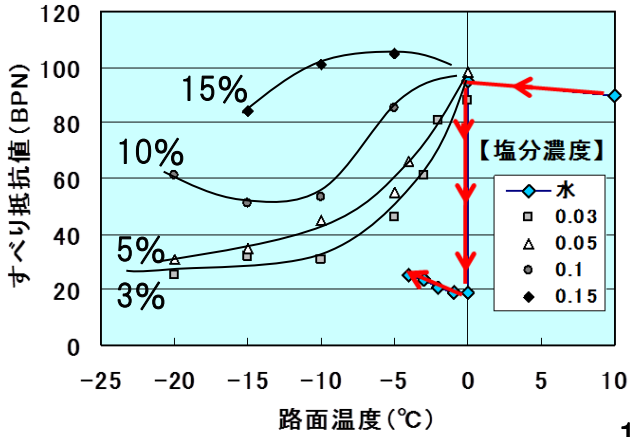
道路の管理業務では冬期間に路面が「凍らない」ように“塩（NaCl）”を散布しています。凍結防止剤の散布は20～30g/m^2/回（大さじ2杯分）で，路面水の塩分濃度は5～6%となります。なお塩分濃度は味噌汁が1%，海水が3%，イカの塩辛が6%と言われます。

路面水の塩分濃度は，時間の経過で低下します。路面水の塩分濃度が3%未満（海水の塩分濃度）になるとすべり抵抗値（BPN値）が低下するため，凍結防止剤を散布する目安としています。高速道路の管理においては，冬期において計画的に「塩をまく」ことで，路面水が急激に凍結することを解消し，スリップ事故を予防しています。

安全，安心な道路環境を提供できる



路面塩分濃度と時間の測定例 1）



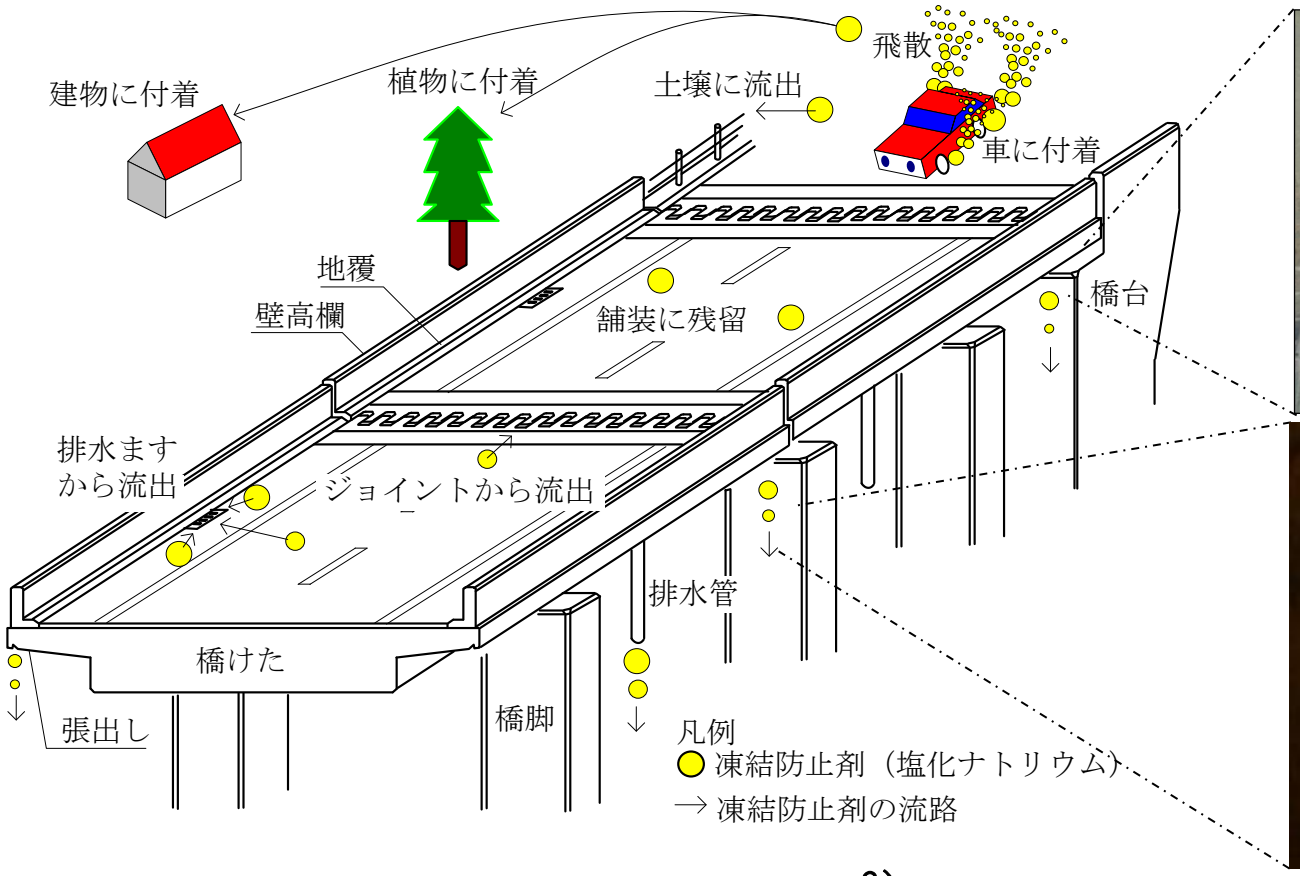
路面温度とすべり抵抗値の測定例 1）

30g/m^2/回

塩分6%以上

背景（凍結防止剤による道路橋の劣化機構の解明）

凍結防止剤の使用は，冬期における人流・物流の移動障害が発生するリスクを最小にしています。相反して，海水よりも高い塩分を人為的に路面へ供給するため，構造物には早期に塩害劣化が進行する傾向にあります。換言すれば，凍結防止剤の使用は構造物の健全性に影響を与えるリスクを高めています。冬期における凍結防止剤の使用は，「人流・物流の確保」と「道路橋の塩害」の相反問題（トレードオフ問題）をもたらします。

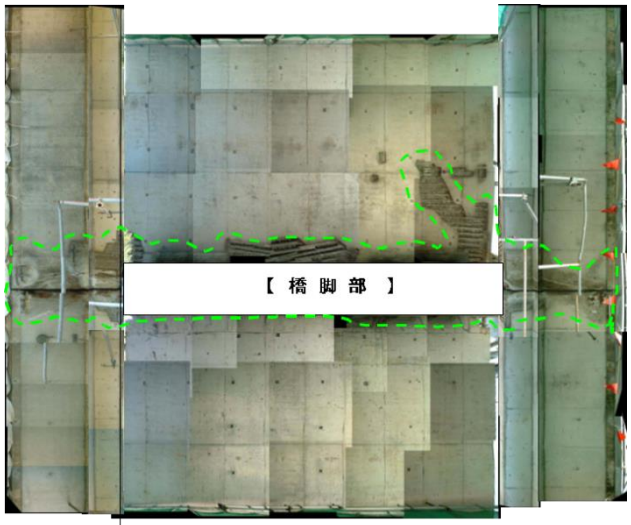


伸縮装置と凍結防止剤の流路 [2)]

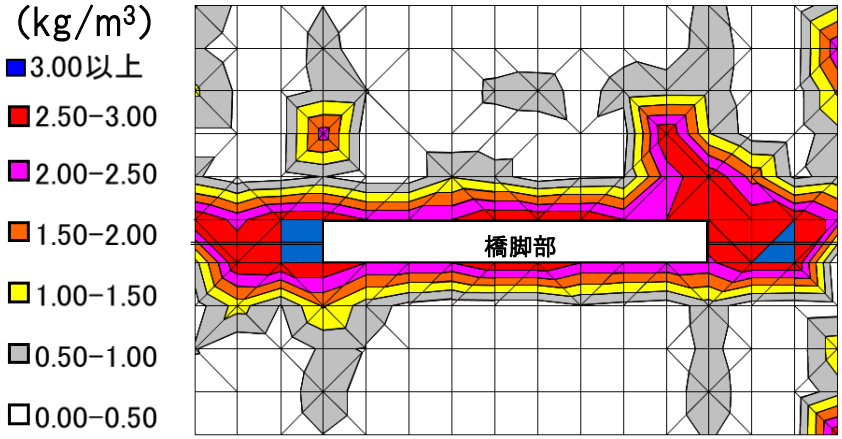
背景（凍結防止剤による道路橋の劣化機構の解明）

海水よりも高い塩分濃度の路面水が，橋けたの「継ぎ目」から流れ落ちた場合，鉄筋コンクリートは路面水が影響する範囲で変状（鉄筋露出・コンクリートの浮き）が一際，目立つようになります。

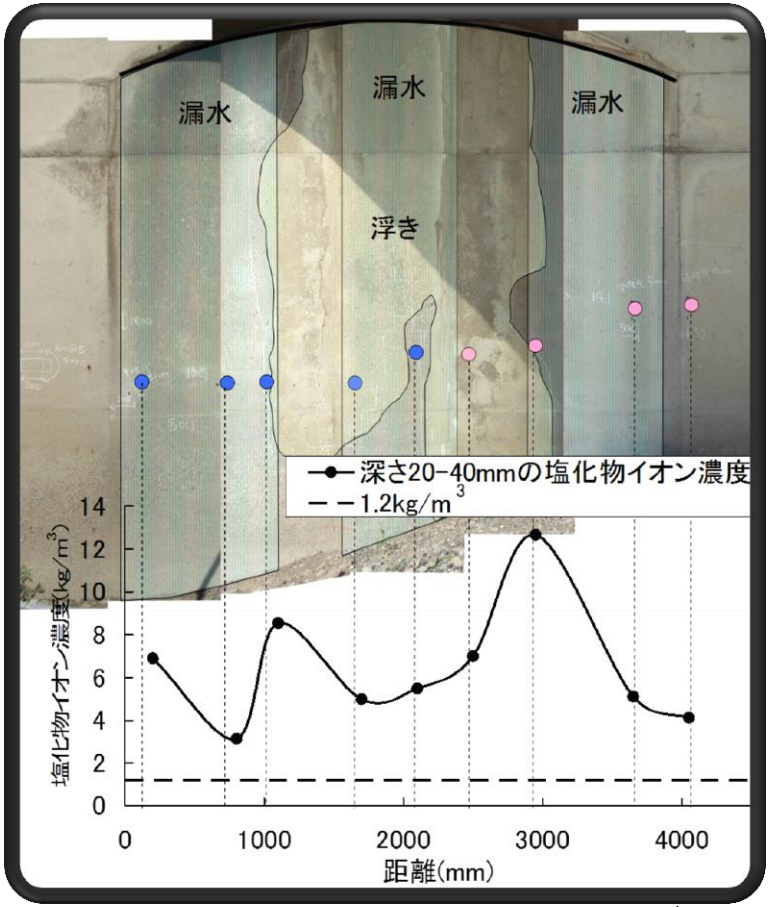
下図は凍結防止剤の影響を受けた既設道路橋の橋けた端部と橋脚を対象に，外観変状と塩分濃度の分布を調べた例を示しています。変状位置と，塩分が高い位置は相関しています。



橋けたの端部の外観（見上げ）



橋けたの端部の塩分濃度の面分布 3）



橋脚の塩分濃度分布 4）

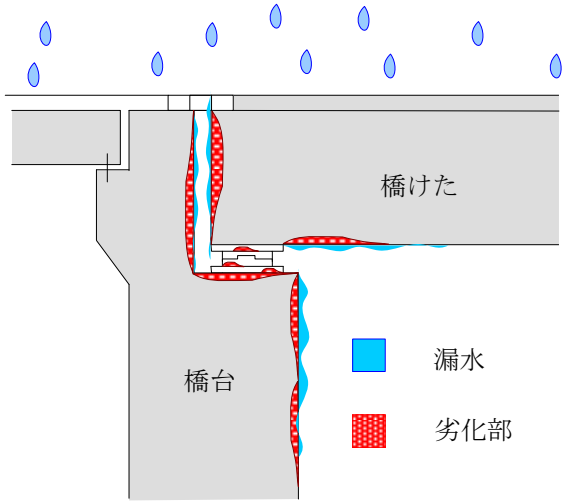
背景（凍結防止剤による道路橋の劣化機構の解明）

【劣化機構の解明】 まとめ

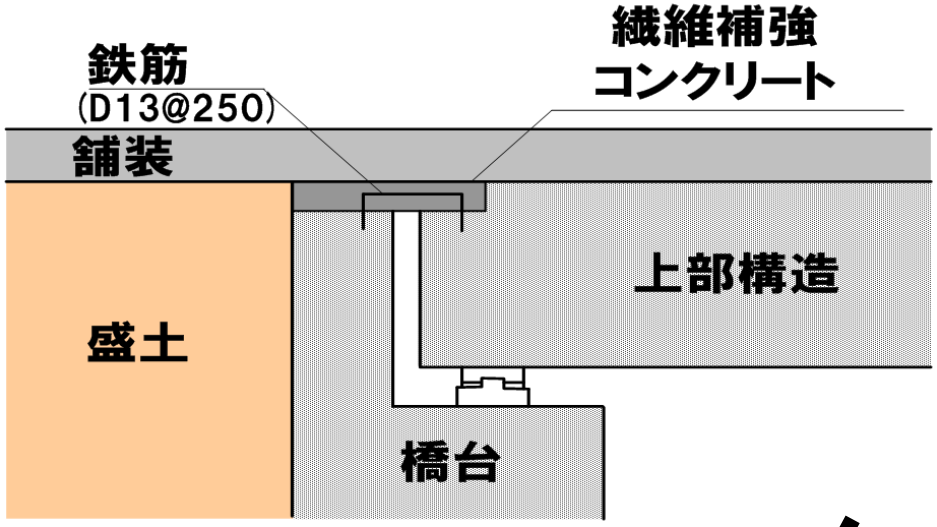
●凍結防止剤による既設道路橋の塩害は，橋けたの「端」で生じやすい。これは，橋けたの「継ぎ目」から路面水が流下することが原因となります。

●橋けたの「継ぎ目」は，排水しない構造（非排水構造）を採用してます。しかしながら，橋けたの「継ぎ目」は経年劣化に伴い，路面水を適切に排水できない状況となる場合があります。これが『凍結防止剤による道路橋の塩害劣化の原因』となります。

●凍結防止剤による塩害劣化の発生を予防するためには，橋けたの「継ぎ目」を無くことが有効な手段の1つとなります。橋けたの「継ぎ目」からの塩分供給を完全に遮断することにより，鉄筋コンクリート構造物の本体が長期間に補修費を最小限にして使える，すなわち構造物の長寿命化が図れるようになります。上記の考え方を北陸地域のぎじゅつ者の方々に共有できることは，SIPでの大きな成果といえます。



橋台とけた端部の漏水と劣化の範囲

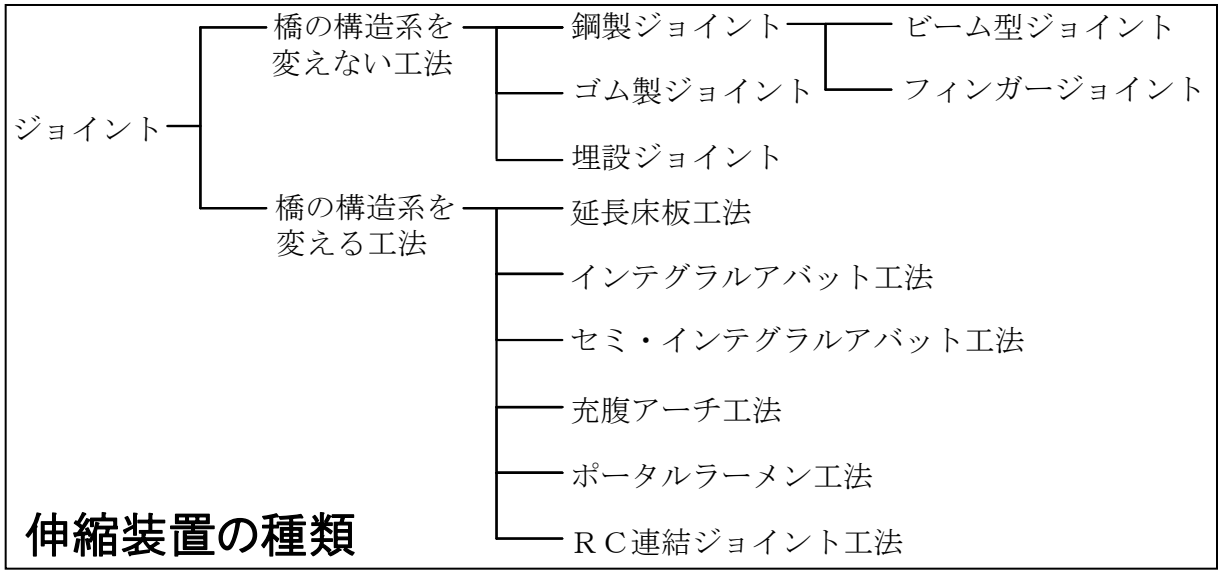


橋けたの「継ぎ目」を無くす工法の例

橋けたの「継ぎ目」を無くす工法の種類[2)]

橋けたの「継ぎ目」を無くす工法の種類は下図で整理できます。これらの種類の中で，中小規模の既設コンクリート橋において橋けたの「継ぎ目」を無くす工法として，RC連結ジョイントが最も有効な工法の1つとなります。

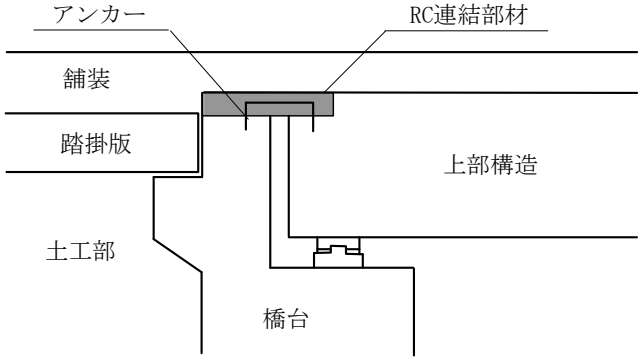
RC連結ジョイントは，北陸地域の高速道路を中心に交通規制などの制約を受ける環境下でも橋けたの「継ぎ目」を無くす施工が可能な技術として開発されたものです。



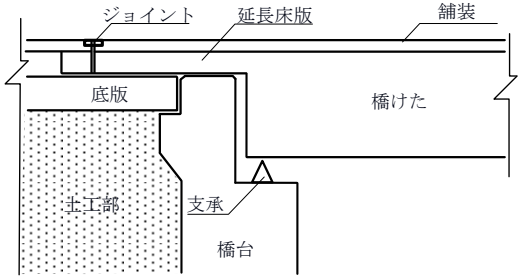
伸縮装置の種類

RC連結ジョイント工法

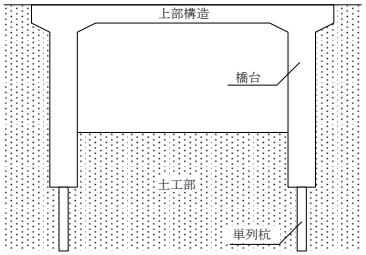
NETIS登録：HR-140022



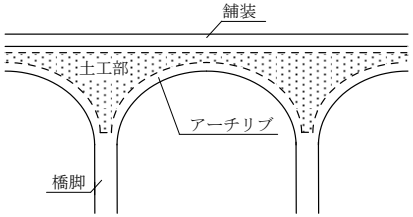
延長床版工法



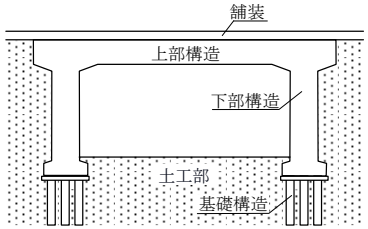
インテグラルアバット工法



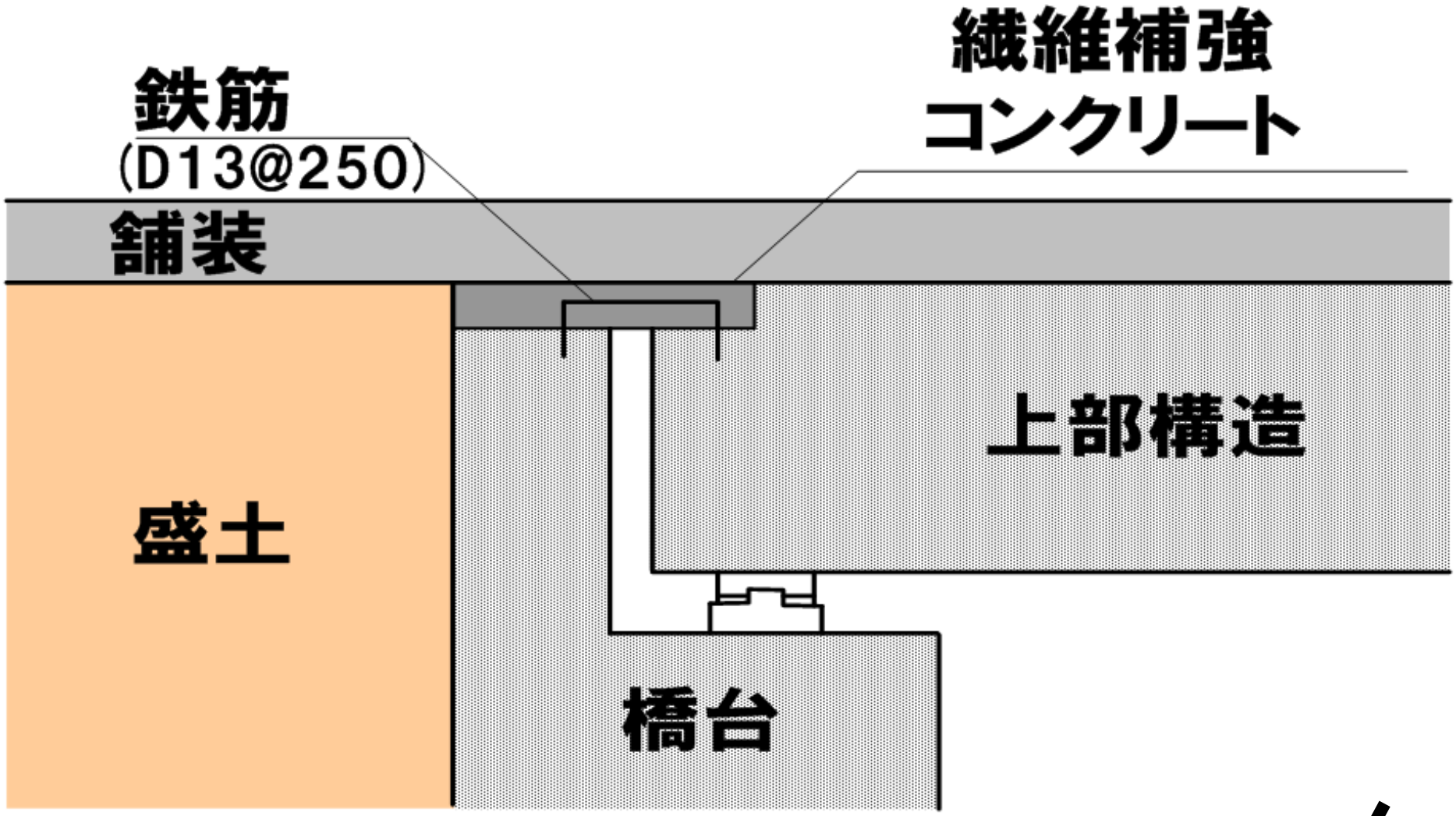
充腹アーチ工法



ポータルラーメン工法

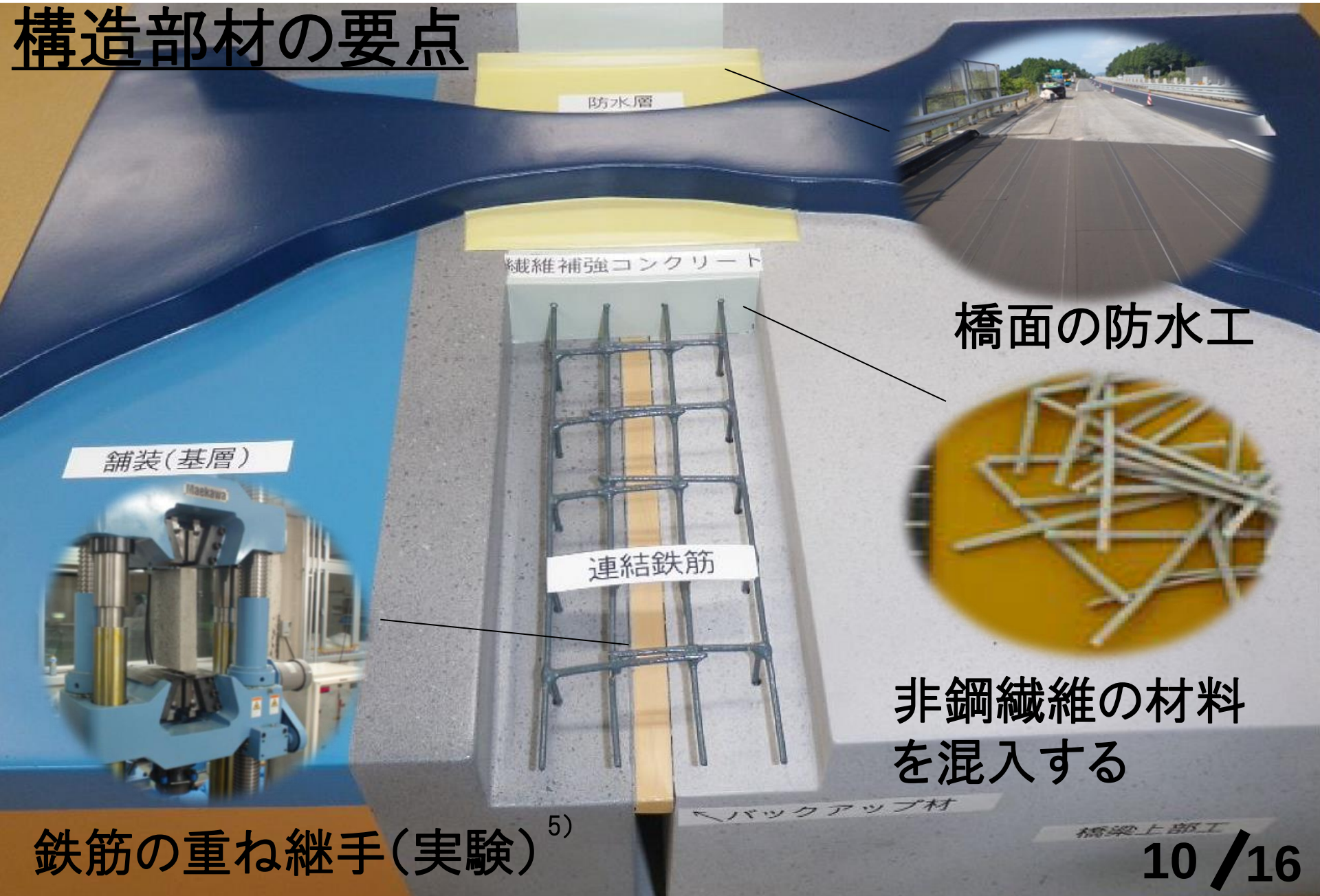


橋けたの継ぎ目を無くす対策（RC連結ジョイント）
構造部材の材料構成



橋けたの継ぎ目を無くす対策（RC連結ジョイント）

構造部材の要点



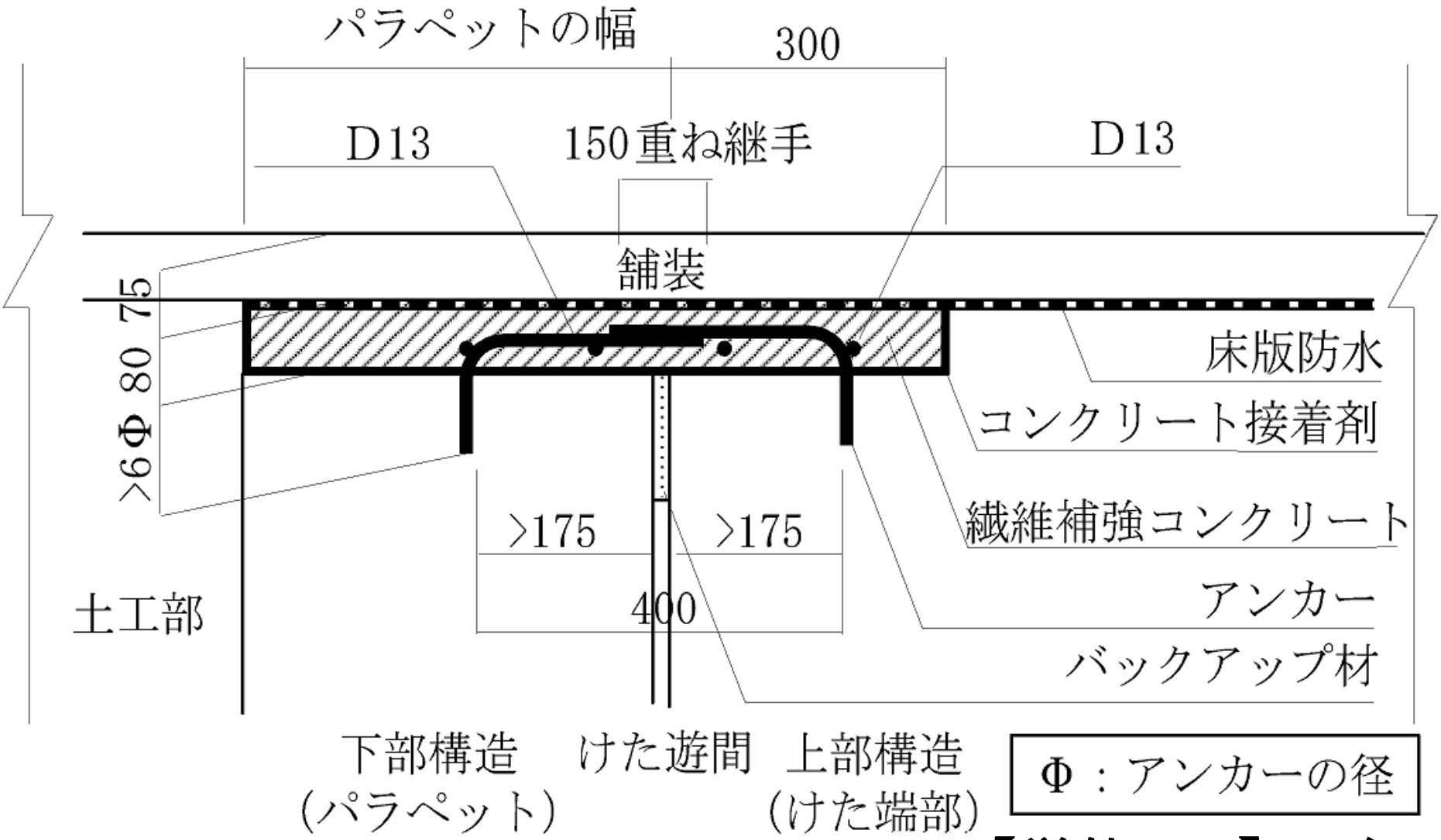
橋面の防水工

非鋼繊維の材料を混入する

鉄筋の重ね継手（実験）[5)]

橋けたの継ぎ目を無くす対策（RC連結ジョイント）

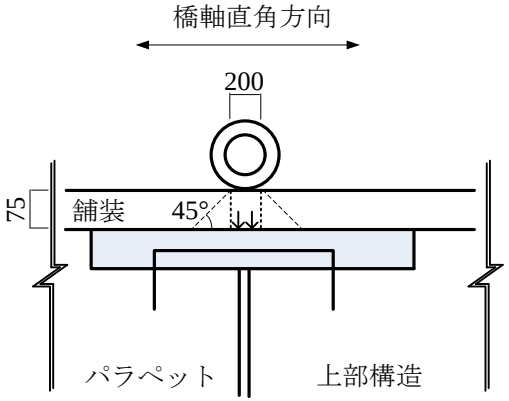
構造部材の細目



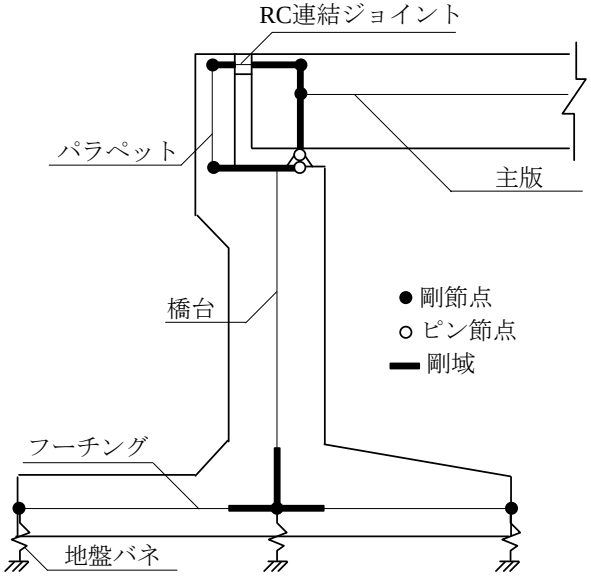
【単位mm】

橋けたの継ぎ目を無くす対策（RC連結ジョイント）
構造性能の評価（1）

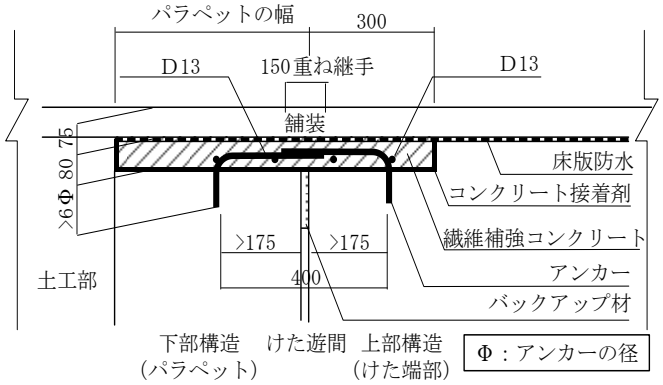
Q1：温度の変化により建設材料は“伸び・縮み”する性質を持っています。また交通車両が繰り返しジョイントの上を通過しますが，橋けたと橋台を鉄筋コンクリートで連結して大丈夫でしょうか？
A1：RC連結ジョイントの構造性能は，下記の概要で示すように評価しています。
　活荷重に対してB活荷重（衝撃係数0.4）を想定し，RC連結ジョイントの部材厚さ（8cm）を設定しています。けた遊間量が10cmまでであれば，B活荷重の合成応力の照査を満足します。
　温度変化に対して，骨組み解析を用いて許容応力度の照査を行っています。地盤条件（地盤の硬さ：N値）や橋台高さにも影響されますが，鉄筋量（D13@250mm）の場合は40m程度までは適用可能であると試設計されています。（N値=50，橋台高さ6.0mの場合）



活荷重の許容応力度照査



温度変化の許容応力度照査



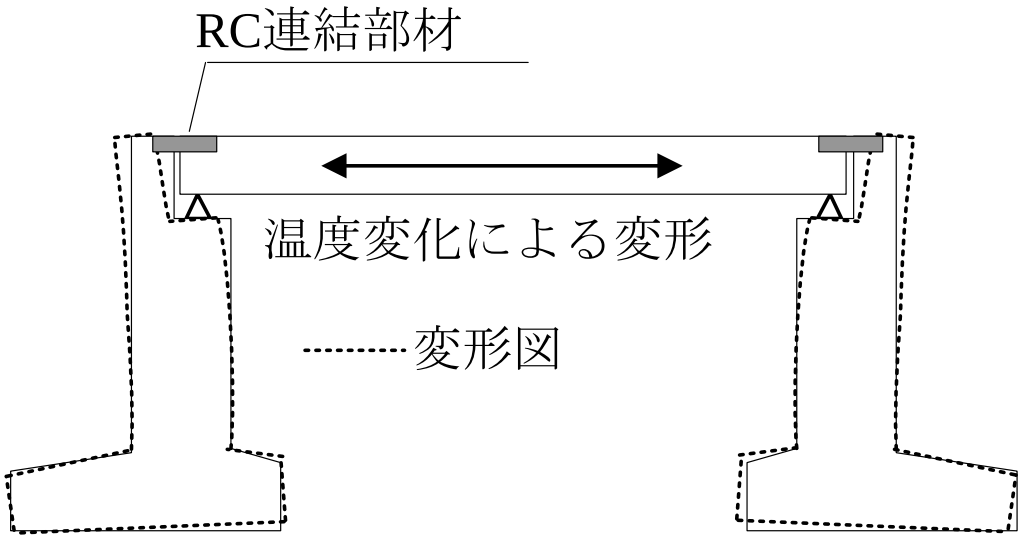
RC連結ジョイントの断面図

橋けたの継ぎ目を無くす対策（RC連結ジョイント）構造性能の評価（2）

Q2：連結部材の鉄筋量をD13@250mmとしているのには理由がありますか？

A2：RC連結ジョイントは，橋台の変形を考慮した解析により連結鉄筋の量を設定しています。鉄筋量を増やせば，比較的に長い橋までRC連結ジョイントは適用できます。しかしながら，その場合，橋台のパラペット基部がRC連結ジョイントよりも先に降伏してしまう危険性があります。このため，標準設計ではパラペット基部が降伏しないような鉄筋量を設定しています。また施工においても，鉄筋量が多いと既設配筋と干渉する弊害などが生じます。「設計」+「施工」の観点から，連結部材の鉄筋量はD13@250mmを標準値として設定しています。

RC連結ジョイントが降伏する力　＜　既設橋梁が降伏する力

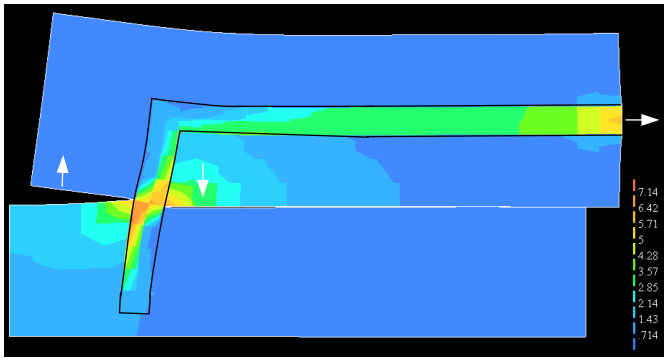


RC連結ジョイントの温度変化による挙動

RC連結ジョイントの施工

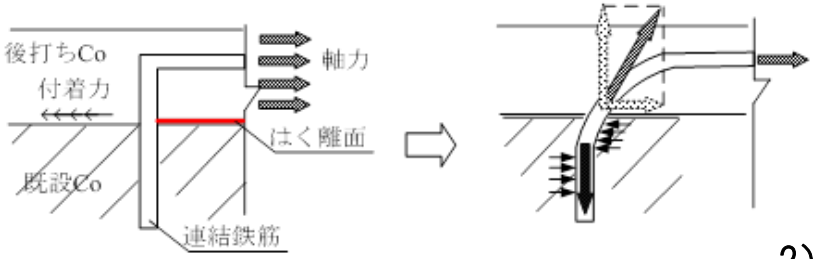
橋けたの継ぎ目を無くす対策（RC連結ジョイント）構造性能の評価（3）

Q3：大規模な地震などが生じた際，RC連結ジョイントはどのようになりますか？
A3：大規模な地震により，大きな水平力がRC連結ジョイントに作用した場合を想定して構造部材の安全性を評価しています。構造部材の安全性の評価は，FE解析や実験により確認しています。RC連結ジョイントに大きな水平力が作用すると，連結鉄筋が引抜かれる挙動となります。この終局挙動により大規模地震時が生じた場合でも，橋梁の本体を傷めること無くRC連結ジョイントが破損することを確認しています。またRC連結ジョイントの破損形態は，緊急車両などの通行障害となるものではなく，路面の平坦性を保った状態となります。



RC連結ジョイントの終局状態（FE解析）[2)]

RC連結ジョイントの終局状態（実験）[2)]



RC連結ジョイントの終局挙動の概要図[2)]

構造性能評価のまとめ

(1)既設コンクリート橋

理由：クリープ・乾燥収縮が収束したもの

(2)鋼製支承

理由：活荷重によるゴム沓の鉛直変位を懸念

(3)岩着基礎でないこと

理由：下部構造の剛体微動や変形を考慮する

上記の適用条件を満たした

可動支承側 と **固定支承側**

（設計伸縮量20mm以下）

塩分供給の遮断効果

【本工法の詳細情報】 RC連結ジョイント：NETIS HR-140022
特開2012-41708 ， 特開2013-060710

【参考論文】

1）青山：北陸地方のコンクリート構造物の塩害に関する耐久性確保に関する研究，金沢大学博士論文，2004.7
2）石川：凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究，長岡技術科学大学博士論文，2013.9
3）熊谷，高橋，青山：北陸地方の橋梁けた端部のコンクリート部材の損傷特性と劣化推移，土木学会論文集，2005.9
4）渡辺，小保田，河野：凍結防止剤による下部工の塩化物イオンの浸透性に関する考察，コンクリート工学論文集，2008.7
5）石川，渡辺，青山，宮下：両引き試験による異形鉄筋の重ね継手に関する基礎的研究，コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム，2011.9

「塩害による劣化機構の解明と構造部材の材料・構造性能評価(WG1)」
活動実績報告会

2017年3月14日

乾湿繰返しにより析出した塩分による コンクリート中の物質移動への影響

東京大学　生産技術研究所
酒井 雄也

塩害によるコンクリート構造物の劣化

塩害によりコンクリート構造物に深刻な劣化が生じ得る

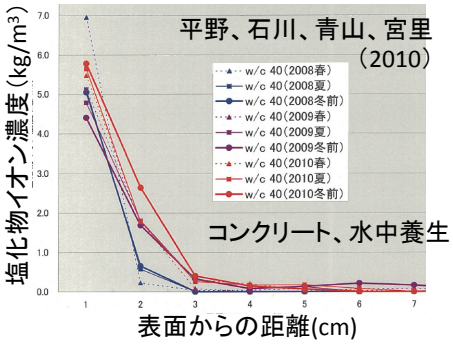
塩害を受けるコンクリート構造物の多くは乾湿環境下にある

乾湿繰り返し環境下での塩分侵入挙動は非常に複雑

背景:コンクリート中の複雑な塩分侵入挙動

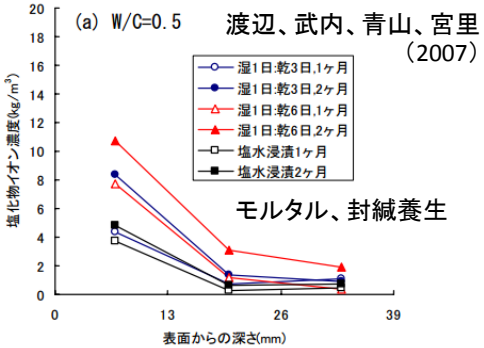
乾湿繰り返しによる塩分侵入の挙動は複雑

事例①:表面塩分量Coの変化



春:塩水噴霧後、他:屋外暴露後
↳表面塩分量の変化が徐々に小さくなる

事例②:乾湿インターバルの影響



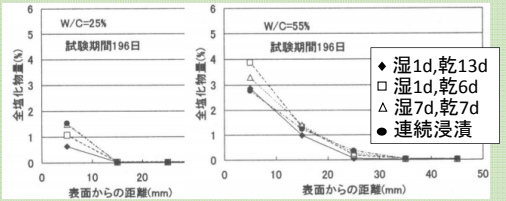
乾燥期間の異なる乾湿繰り返し
↳乾燥長い方が多くの塩分侵入

乾湿による塩分移動に関する他の報告

水セメント比(W/C)の影響

NaCl 3%溶液　　来海、岩淵(2001)

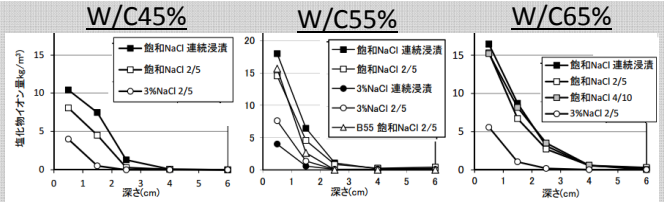
中～高W/C:乾湿の方が侵入
低W/C:連続浸漬の方が侵入



塩分濃度の影響

佐川、畠山、濱田、今村(2001)

飽和塩水(26%)では
W/Cが増加しても
連続浸漬の方が侵入



3ヶ月経過時点

いずれも乾燥による毛管現象のみでは説明できない現象で メカニズムは明らかになっていない

目的

検討目的：乾湿繰り返し環境下での塩分侵入機構の理解

乾湿繰り返しでの複雑な塩分侵入には何が支配的で
何を測れば高精度な予測ができるのかを把握

より正確な塩分侵入予測と的確な維持管理を可能にする

乾湿繰り返し環境下で起こる現象

①2年目以降は表面塩分量の変化が小さくなる

②中～高水セメント比では乾湿の方が侵入する
低水セメント比では連続浸漬の方が侵入する

③飽和塩水の場合は水セメント比が増加しても
連続浸漬の方が侵入

上記機構を説明できれば塩分侵入の理解が前進するのでは

研究のアプローチ

乾湿繰り返しで生じる複雑な現象を想像するには限界がある

マイクロ流路を用いた検討

市販のスライドガラスを2枚使用

（一方のガラスに流路を切削
もう一方に出入口の穴を削孔）

流路の幅：0.5mm、深さ：0.2mm

作製手順　**空隙の模擬流路を作製→乾湿繰り返し下で何が起きるのか**

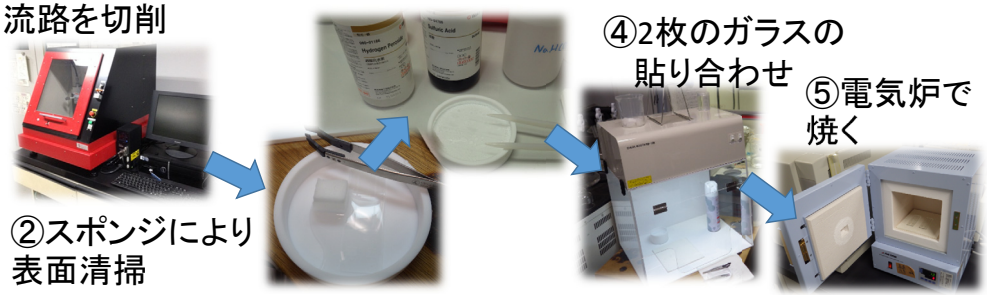
①微細加工機により流路を切削

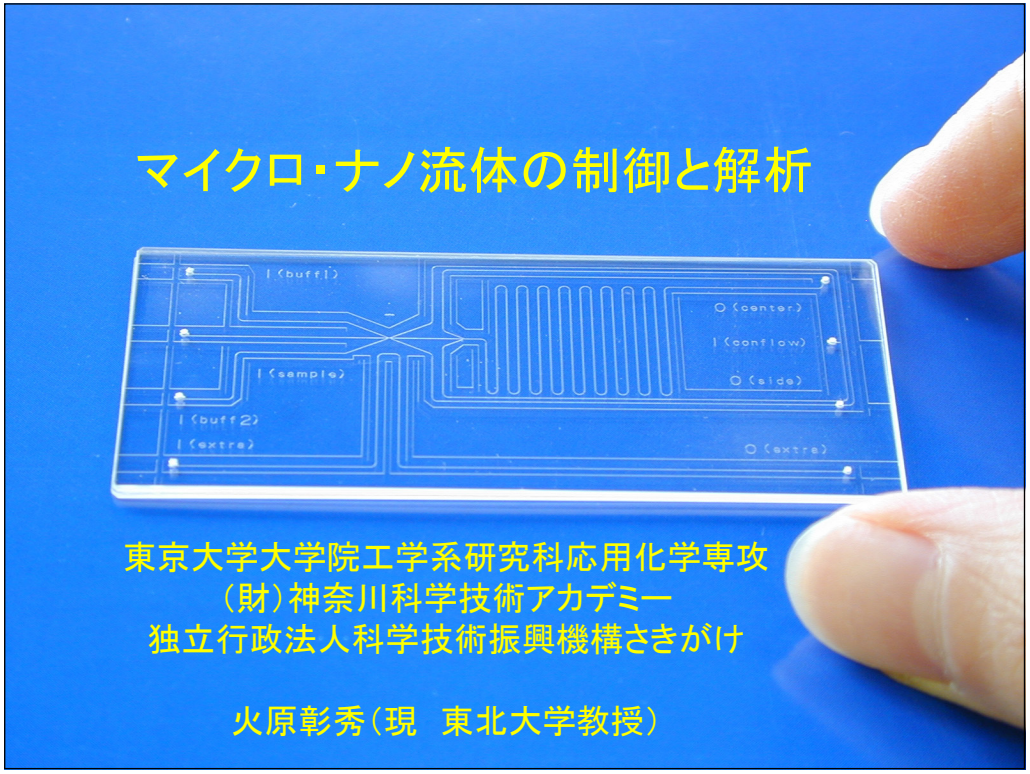
②スポンジにより表面清掃

③酸により表面処理

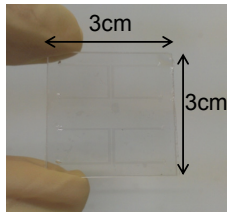
④2枚のガラスの貼り合わせ

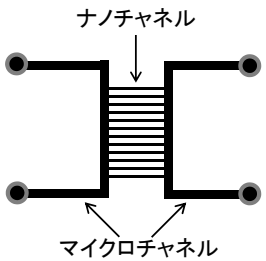
⑤電気炉で焼く





過去の検討の例：ナノチャネル

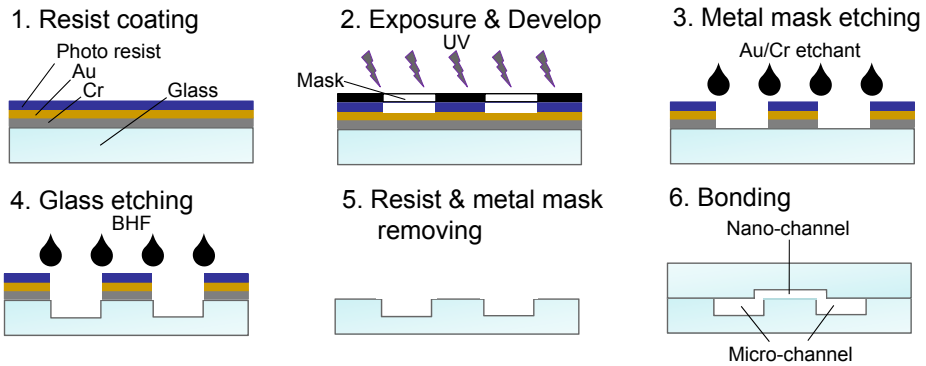




マイクロチャネル
幅: 500μm
深さ: 30μm

ナノチャネル
流路数: 32 本
長さ: 500μm
幅: 5μm
深さ: 95, 28, 16nm
(DEKTAKとAFMにより測定)

作製プロセス (photo lithography & wet etching)



研究のアプローチ

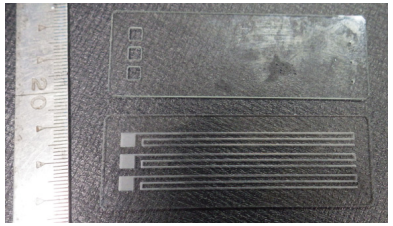
乾湿繰り返しで生じる複雑な現象を想像するには限界がある

マイクロ流路を用いた検討

市販のスライドガラスを2枚使用

（一方のガラスに流路を切削
もう一方に出入口の穴を削孔）

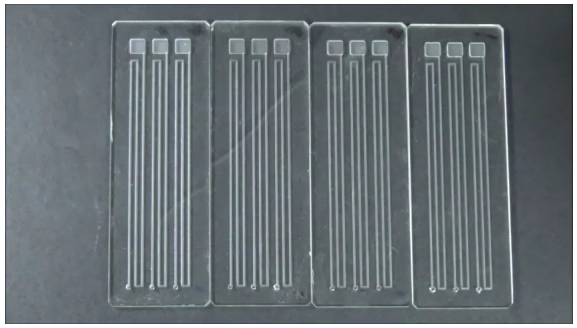
流路の幅：0.5mm、深さ：0.2mm



空隙の模擬流路を作製→乾湿繰り返し下の塩分移動を検討

純水導入の様子

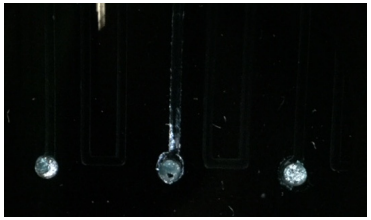
マイクロピペットにより
30μℓずつ導入



これまでの検討（塩水）

塩水を導入して乾燥した場合

濃度5%の塩水（塩化ナトリウム）を使用



析出した結晶により出入り口が閉塞し、流路からの水分逸散が抑制
（水では1時間以内に乾燥しきるが、閉塞すると1週間経過後も残存）

軽石を用いた析出塩分による詰まりの検討

実験手順

①軽石を40度で24時間乾燥（初期質量測定）

②濃度の異なる塩水に1時間浸漬

0, 3, 10, 12, 14, 16, 18, 20%

③塩水から取り出して湿潤質量測定

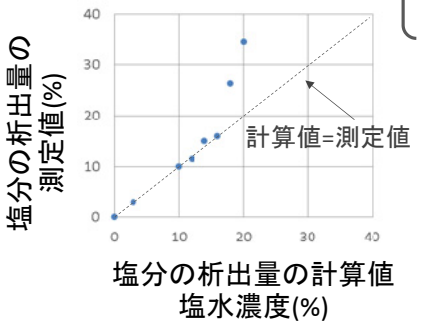
④40度で24時間乾燥（乾燥質量測定）

$$\text{塩分の析出による質量増加(\%)} = \frac{\text{乾燥質量} - \text{初期質量}}{\text{湿潤質量} - \text{初期質量}}$$

$$= \frac{\text{浸漬→乾燥後の質量増加}}{\text{浸潤した溶液の質量}}$$

軽石を用いた析出塩分による詰まりの検討

測定結果



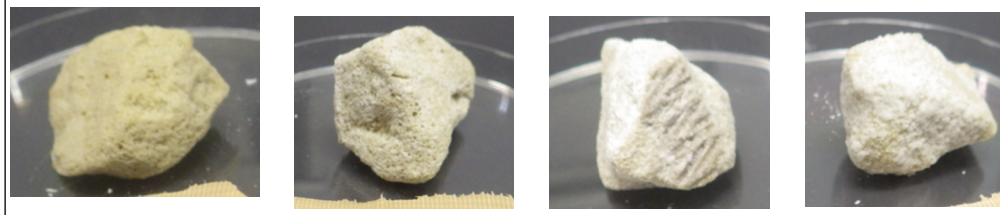
$$\text{塩分の析出量(\%)} = \frac{\text{乾燥質量} - \text{初期質量}}{\text{湿潤質量} - \text{初期質量}}$$

- 乾燥後の重量増加は塩水濃度10%までは溶解塩分量と同程度
- 塩分濃度20%では乾燥後の重量増加が計算値の1.7倍

塩分濃度18%以上では詰まりが生じ乾ききらなかったと考えられる

浸漬・乾燥後の軽石

写真下の数字は塩水濃度



0%　3%　10%　20%

セメントペーストを用いた析出塩分による詰まりの検討 13

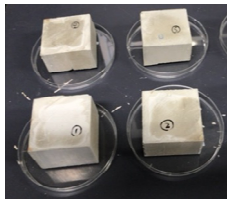
実験手順　　材齢4年、W/C40%、28日水中養生→気乾養生

①セメントペーストを40度で24時間乾燥（初期質量測定）

②濃度の異なる塩水に3日間浸漬　0, 5, 10, 20%

③塩水から取り出して湿潤質量測定

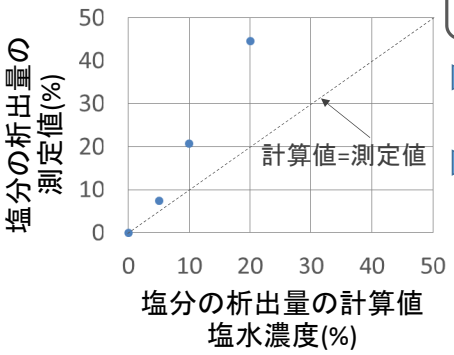
④40度で2週間乾燥（乾燥質量測定）



$$\text{塩分の析出による質量増加(\%)} = \frac{\text{乾燥質量} - \text{初期質量}}{\text{湿潤質量} - \text{初期質量}} = \frac{\text{浸漬→乾燥後の質量増加}}{\text{浸潤した溶液の質量}}$$

セメントペーストを用いた析出塩分による詰まりの検討 14

測定結果



$$\text{塩分の析出量(\%)} = \frac{\text{乾燥質量} - \text{初期質量}}{\text{湿潤質量} - \text{初期質量}}$$

▶ 低い塩分濃度から計測値と実験値が乖離

▶ 塩分濃度20%では乾燥後の重量増加が計算値の2.2倍

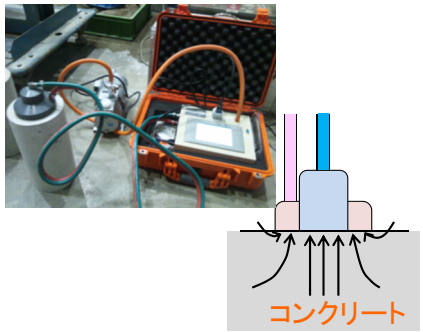
塩分濃度が増加するほど詰まりによって水分逸散が抑制されている可能性がある

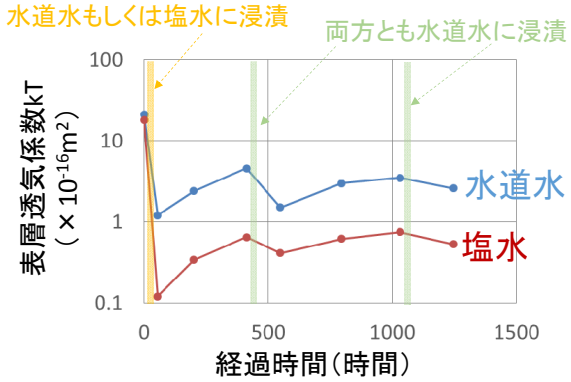
セメントに固定される塩分はセメント量の0.4%程度
→ セメントのすべてに固定されたとしても上のグラフでは3%程度の影響にとどまる

軽石より低濃度から乖離←緻密な空隙構造の方が詰まりやすい？

塩水に漬けたコンクリートの物質移動抵抗性 15

W/C40%のコンクリートを水道水もしくは塩水（20%）に24時間浸漬
その後、20℃湿度60%で乾燥させ、適宜表層透気試験を実施した

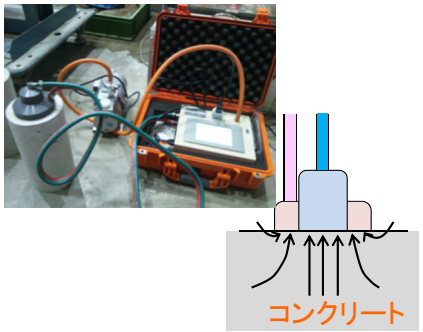


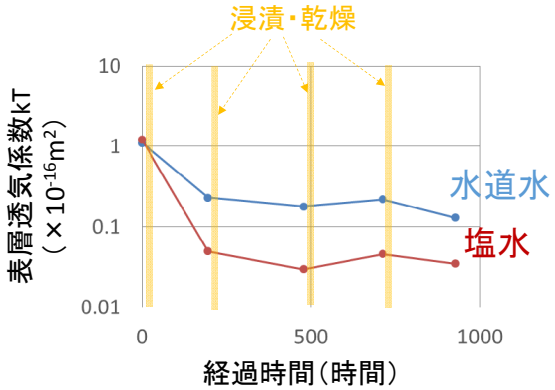


水道水に浸漬した供試体と比較して、塩水に浸漬した供試体は表層透気係数が1/10に減少した。水道水に浸漬後も差は残った

塩水に漬けたコンクリートの物質移動抵抗性 16

W/C55%のコンクリートを水道水もしくは塩水（5%）に24時間浸漬し、
20℃湿度60%での乾燥を繰り返し与えた。適宜表層透気試験を実施した





塩水濃度が5%でも、水道水に浸漬した供試体と比較して塩水に浸漬した供試体の表層透気係数は1/4に減少した

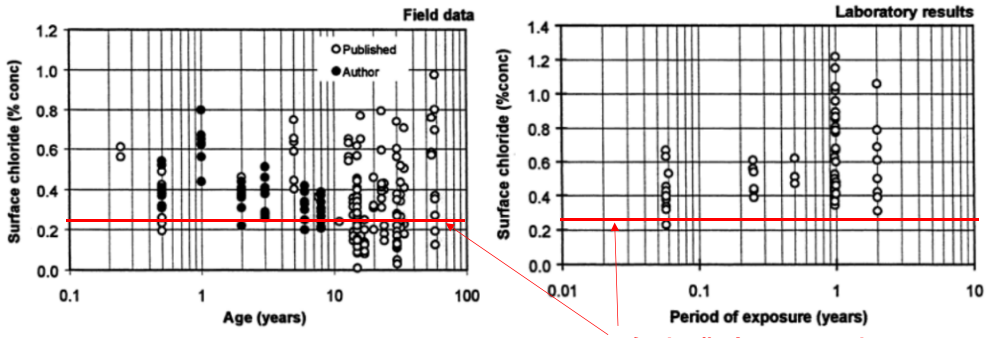
析出した塩分が物質移動抵抗に無視できない影響を与えうる
（塩水等の水溶液の意図的な散布により物質移動抵抗性を改善可能？）

コンクリート中での塩分濃縮

17

乾湿を受けるコンクリートの塩分濃度

Bamforth et al. 1997



These results are presented in Figure 2.3, together with other published results for Portland cement (PC) concretes (Marusin, 1986, Gjorv, 1979, Taylor Woodrow Research Laboratories, 1986, Thomas et al, 1990, Pollock, 1985, Uji, 1990, Taylor Woodrow Research Laboratories, 1980, Liam et al 1992, Funahashi, 1990, Thomas, 1990, Fukudome et al, 1993, Gourley et al, 1983, Sorensen et al, 1982, Cook et al, 1989, Sand, 1993, Bamforth and Chapman Andrews, 1994, Peterson, 1993, Matthews, 1994, Bamforth, 1993). Over 200 data points are included from 20 separate sources.

塩水濃度 10%に相当

（ペースト体積比が0.2、ペースト空隙率が0.3、コンクリート密度が 2.3 g/m³と仮定して計算）

乾湿によりコンクリート中の塩分濃度は大きく増加しうる

実構造物においても析出塩分による影響は生じ得ると考えられる

乾湿繰り返しによる塩分の濃縮はNagatani et al. (1990)や丸屋ら（1992）によって指摘されている

乾湿繰り返し環境下で起こる現象の説明

18

検討目的：乾湿繰り返し環境下での塩分侵入機構の理解

乾湿繰り返し環境下で起こる現象

①2年目以降は表面塩分量の変化が小さくなる

1年目に散布した塩分が析出して目詰まりするため？

②中～高水セメント比では乾湿の方が侵入する
低水セメント比では連続浸漬の方が侵入する

（軽石よりセメントペーストの方が低濃度の塩水で詰まり）

低水セメント比では乾湿で詰まりやすいことに起因？

③飽和塩水の場合は水セメント比によらず連続浸漬の方が侵入

濃度が高いため乾湿で詰まりやすい？

析出による詰まりを仮定すると”一応”説明可能

乾湿を受ける実構造物の耐久性評価には詰まりの考慮が必要か

戦略的イノベーション創造プログラムインフラ維持管理・更新・マネジメント技術

「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・システムの開発」

「塩害による劣化機構の解明と構造部材の材料・構造性能評価（WG1）」

打音法による道路橋コンクリート床版の劣化損傷検知に関する検討について

●金沢工業大学　　木村定雄

●佐藤工業株式会社　北川真也

報告内容

１．はじめに
２．打音法について
３．実験概要
４．実験結果と考察
５．まとめ
６．検討中の課題について

1．はじめに

寒冷地や沿岸部における道路橋の劣化損傷の原因

一般環境下における道路橋
→車両通行による繰返し荷重による疲労

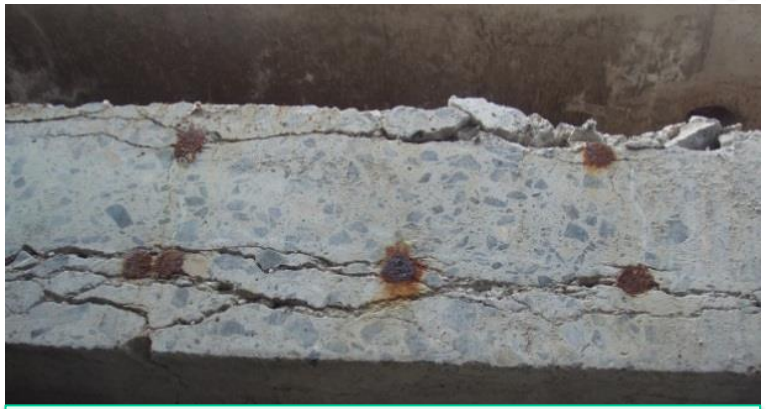
寒冷地や沿岸部における道路橋
→融雪剤・凍結防止剤の散布・飛来塩分

塩化物イオンが舗装下へ浸透、コンクリート床版上側に塩害を伴った劣化損傷が確認されている

写真：国土交通省ＨＰ
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_mn_000008.html

1．はじめに

コンクリート床版上側における劣化損傷例



コンクリート床版鉄筋位置ひび割れ

アスファルト舗装面のひび割れ・陥没

コンクリート床版の脆弱化

床版上側付近に生じた劣化損傷を床版下面から発見することは困難

写真提供：中日本高速道路株式会社金沢支社殿

1．はじめに

アスファルト舗装面および床版上面からの点検

アスファルト舗装面からの点検

アスファルト舗装撤去後における点検

補修計画において補修材料の種類やその数量を確定するために必要な点検

点検者の技量に依存している・面方向と深さ方向の定量的な状態を把握することは難しい・労力多大などの課題あり

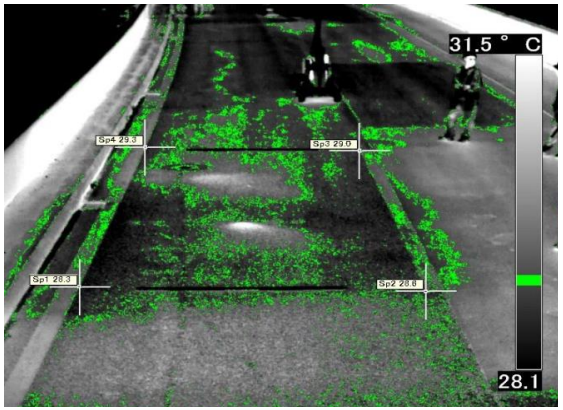
写真提供：中日本高速道路株式会社金沢支社殿

1．はじめに

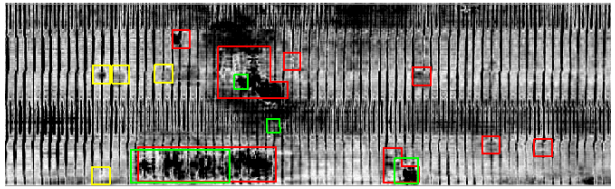
非破壊試験によるアスファルト舗装面からの調査

非破壊試験を用いた検討

電磁波法を用いた検討
（レーダー法、赤外線法）



赤外線法



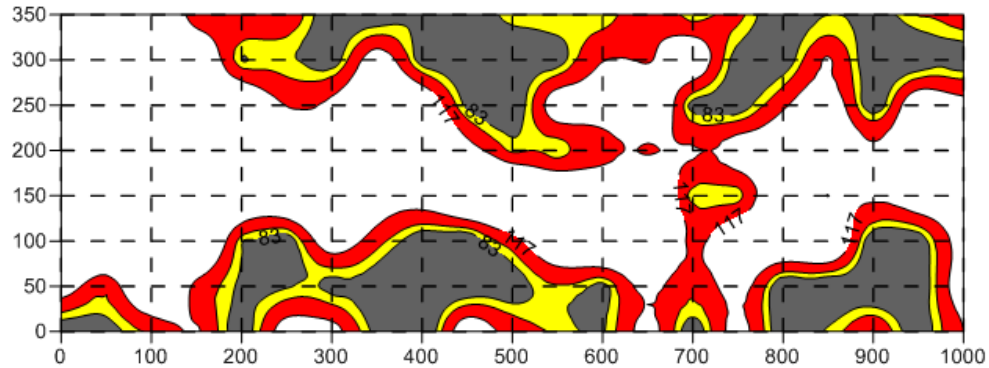
レーダー法

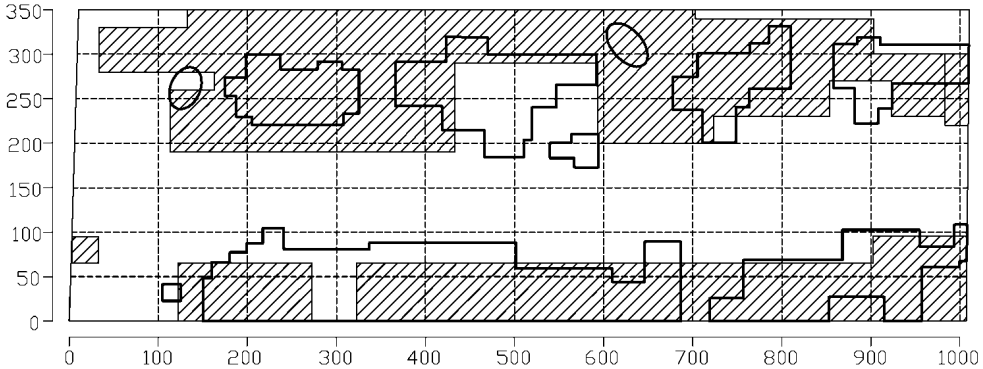
新たな試みとして打音法による検討

写真提供：中日本高速道路株式会社金沢支社殿

1．はじめに

アスファルト舗装面からの測定結果例 −実橋−（打音法−振幅を用いた評価結果）





アスファルト面からの叩き点検結果

コンクリート床版面からの叩き点検結果

	無	健全
	83mm以下	アスファルト混合物はく離
	84mm～93mm	かぶりコンクリート脆弱化
	94mm116mm	鉄筋位置水平ひび割れ

北川ら：打音法を用いた道路橋コンクリート床版調査，第５回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム，（社）日本非破壊検査協会，2015.8

1．はじめに

非破壊試験によるアスファルト舗装面からの調査

【実橋での実験結果より】

- 経験豊富な点検員でなくても測定可能である
- アスファルト舗装面から劣化損傷の範囲を特定できる

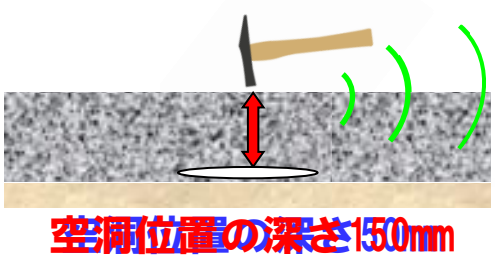
【劣化損傷状態を詳細に把握するため】

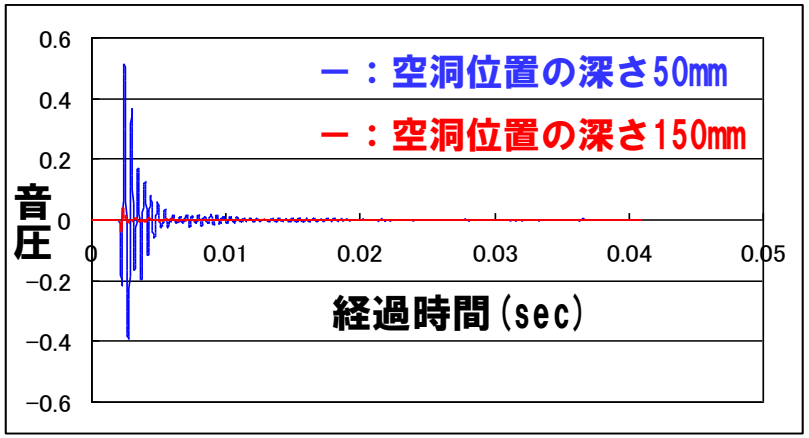
- 劣化損傷状態を判別するための評価指標として振動の大きさを示す振幅と周波数の基本特性を明らかにすること

2．打音法について

打音法の概要

「打音法」は弾性波法の一つであり、打撃対象物をハンマで叩いた際に発生する音で表層部の欠陥の有無を判断する「叩き点検」を改良した技術である．





デジタル値による評価で明確化

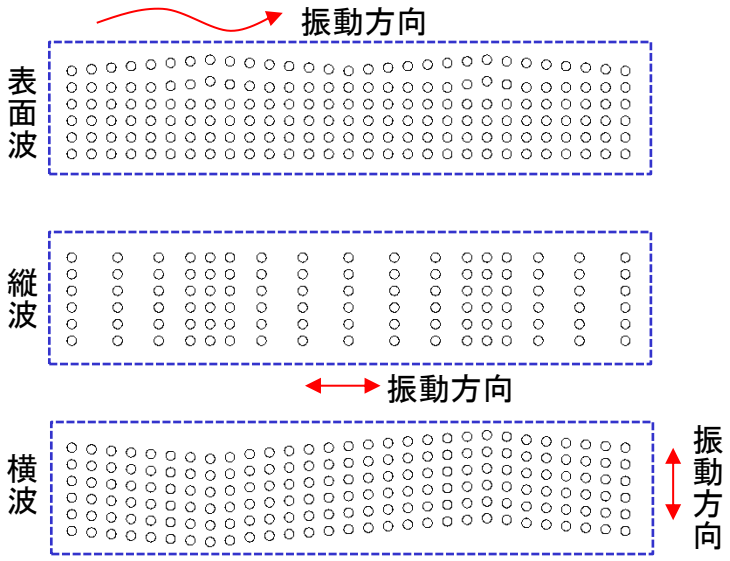
◆ 叩き点検⇒点検者の技量に依存．主観的な評価．
◆ 打音法　⇒デジタル値による評価．客観的・定量的な評価が可能．

2．打音法について

打音法の概要

打撃によって生じる波

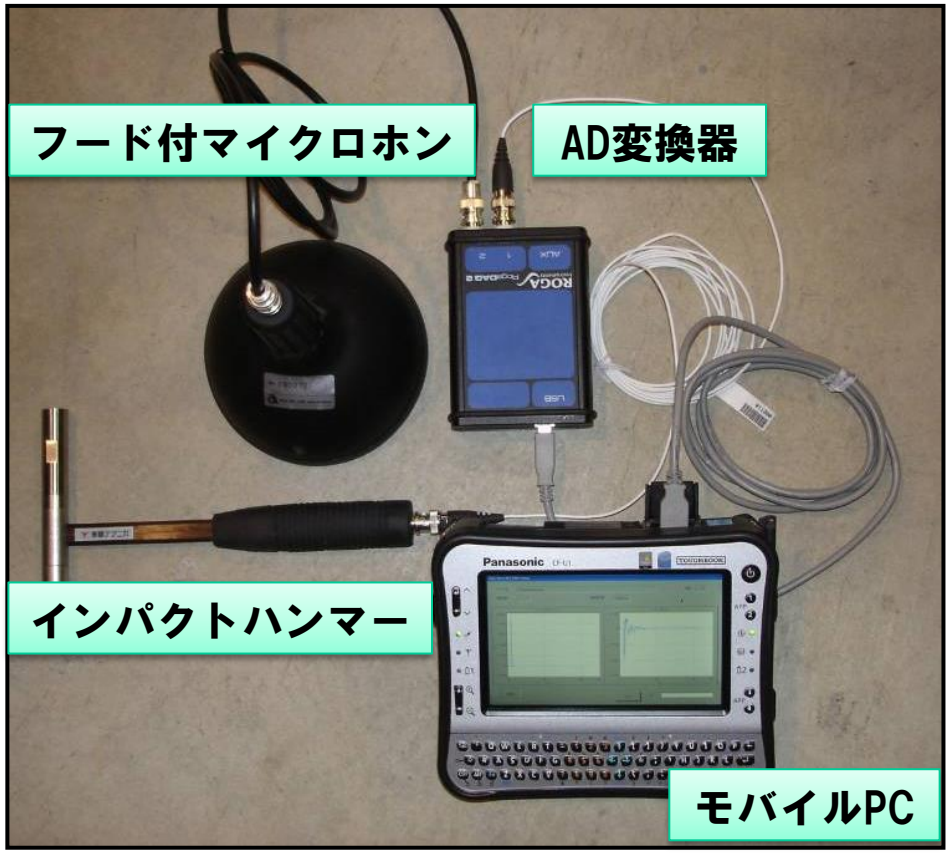
- ◆表面波
- ◆縦波
- ◆横波
- ◆曲げ波など



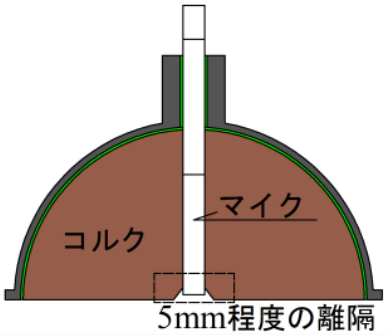
「打音法」は曲げ波によって生じる曲げ振動（たわみ振動）の波形情報を分析し評価する

2．打音法について

打音法の測定機器



測定機器



マイクロホンの構造

	特性	
インパクトハンマー	周波数	8 (kHz) まで
	感度	1.25 (mV/N)
フード付マイクロホン	周波数	20 (Hz) ～ 20 (kHz)
	感度	26 (mV/Pa)
AD変換器	サンプリング周波数	48 (kHz)

３．実験概要

検討項目について

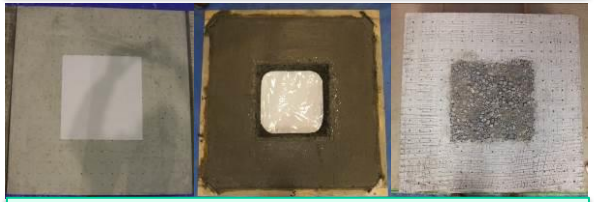
劣化損傷状態を判別するため以下の３項目について検討を行う．

① 劣化損傷状態ごとの**振幅**の特性
② 劣化損傷状態ごとの**振幅値比**の特性
③ 劣化損傷状態ごとの**周波数**の特性

3．実験概要

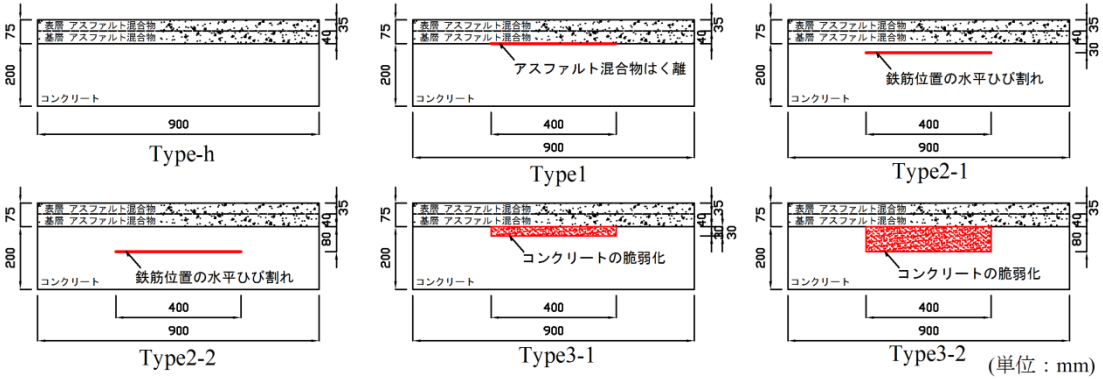
試験体の概要　－実橋模擬試験体－

アスファルト混合物舗設状況



模擬劣化損傷設置状況

アスファルト舗設試験体



ケース	劣化損傷の種別	劣化損傷までの深さ Dep. (mm)
Type-h	健全（一体化）	275
Type1	アスファルト混合物のはく離	75
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	105
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	155
Type3-1	コンクリートの脆弱化	75～105
Type3-2	コンクリートの脆弱化	75～155

3．実験概要

試験体の物性一覧

コンクリートの仕様

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)					
		W	C	S1	S2	G	Ad
54.5	43.9	157	288	558	239	1032	2.88

コンクリートの強度試験結果

圧縮強度 (N/mm²)	静弾性係数 (kN/mm²)	密度 (kg/m³)
37.2	27.0	2293

アスファルト混合物の仕様

6号砕石 (%)	7号砕石 (%)	荒砂 (%)	細砂 (%)	中目砂 (%)	石粉 (%)
36.0	22.0	16.0	11.0	9.0	6.0

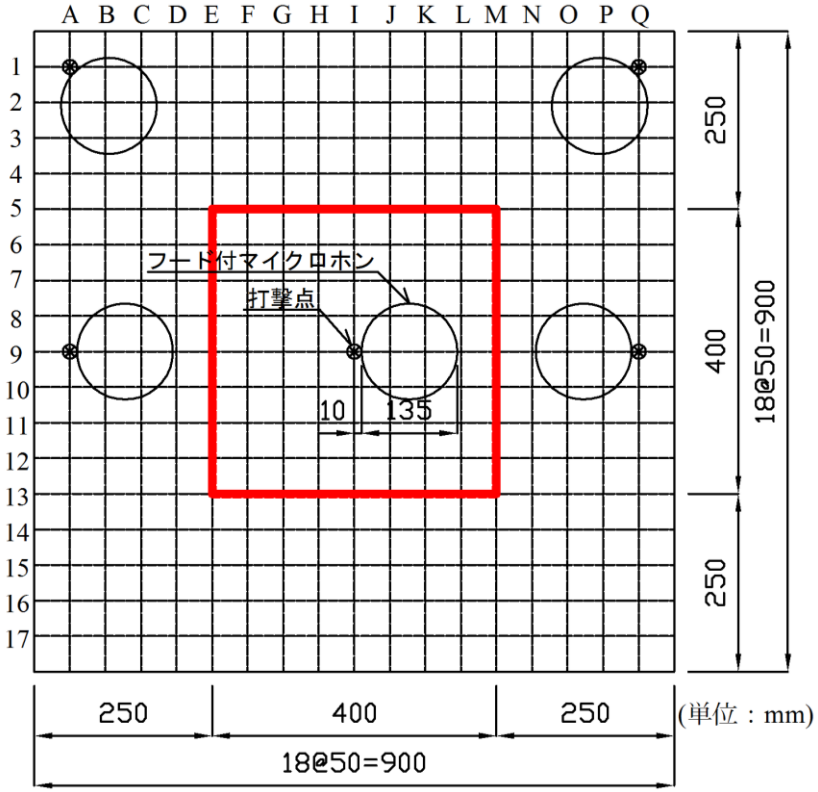
ストレートアスファルト60-80
密粒度アスファルト混合物（１３）

マーシャル試験結果

項目	測定値	規格値
最適アスファルト量 (%)	5.8	－
基準密度 (g/cm³)	2.322	－
理論密度 (g/cm³)	2.434	－
空隙率 (%)	4.6	3～5
飽和度 (%)	74.0	70～85
骨材間隙率 (%)	17.7	－
安定度 (kN)	12.20	6.00以上
フロー値 (1/100cm)	30	20～40
スティフネス (kN/m)	4067	－

3．実験概要

測定方法



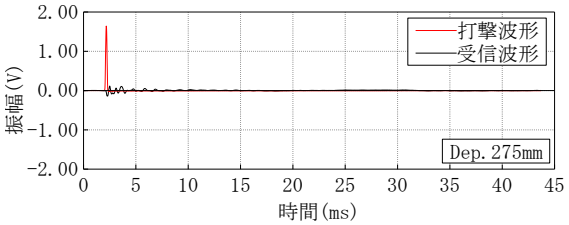
□は劣化損傷範囲

打撃点およびマイクロホン設置位置

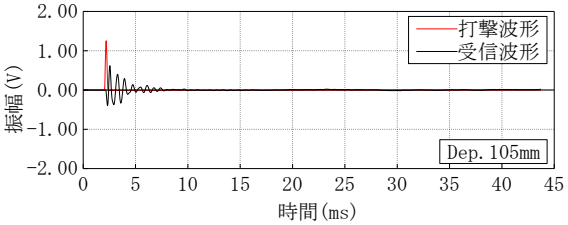
- ◆図中格子点→打撃点
- ◆点A-1から点Q-17の合計289点を各々10回ずつ測定
- ◆マイクロホンフード→打撃点から右側に離隔10mmの位置に設置
- ◆点A-1隅角部や点Q-9の辺部はフードが試験体の内側になるよう設置
- ◆アスファルト混合物温度が20℃となる一定環境下で測定

4．実験結果と考察

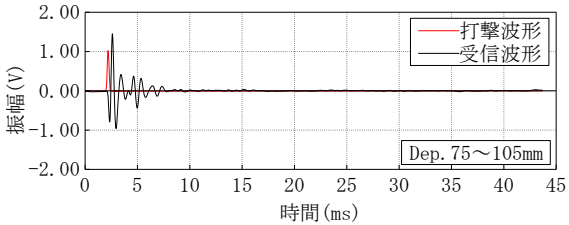
劣化損傷状態ごとの振幅の特性
ー中心位置における受信波形の振幅ー



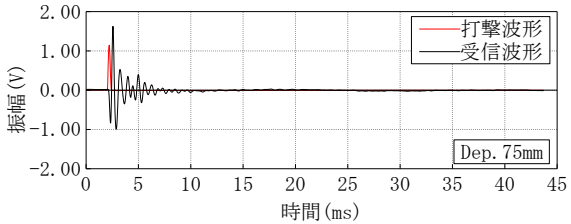
Type-h



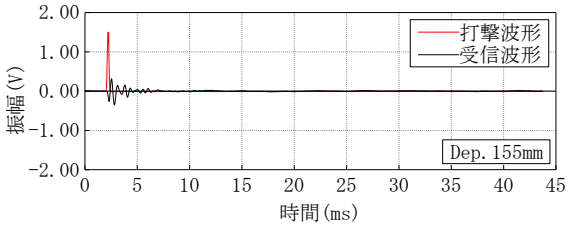
Type2-1



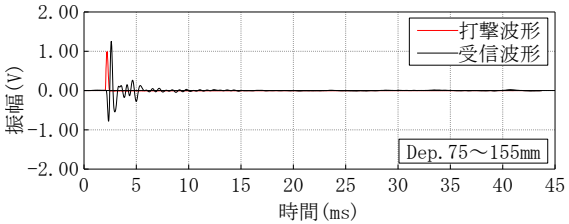
Type3-1



Type1



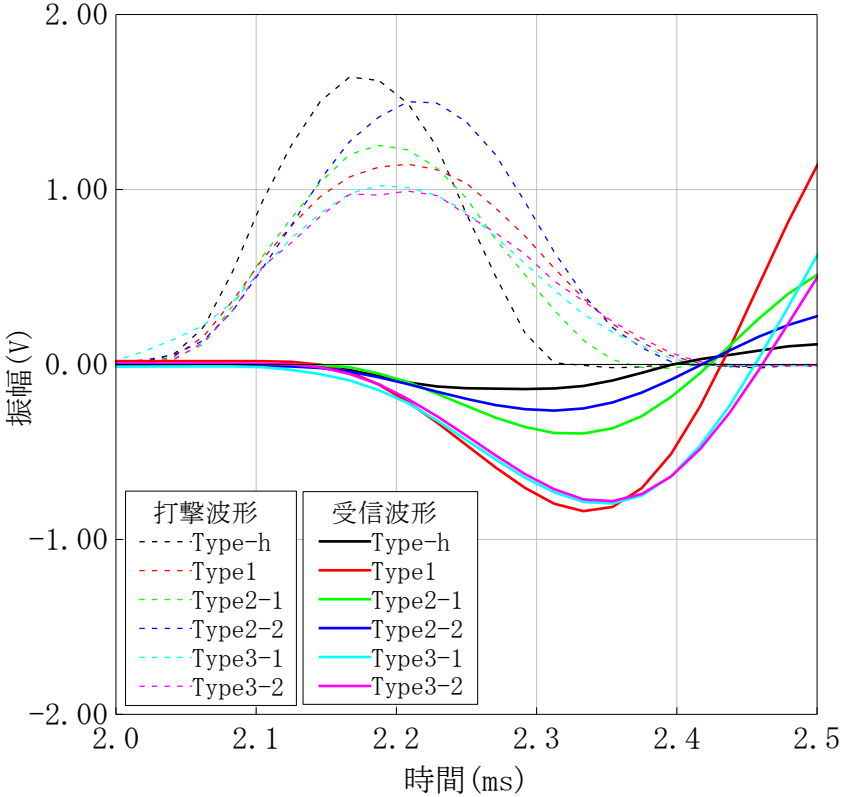
Type2-2



Type3-2

4．実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの振幅の特性
ー中心位置における受信波形の振幅ー



ケース	劣化損傷の種別	受信振幅の大小
Type-h	健全（一体化）	小
Type1	アスファルト混合物のはく離	大
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	Type-hより大
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	Type-hより大
Type3-1	コンクリートの脆弱化	大
Type3-2	コンクリートの脆弱化	大

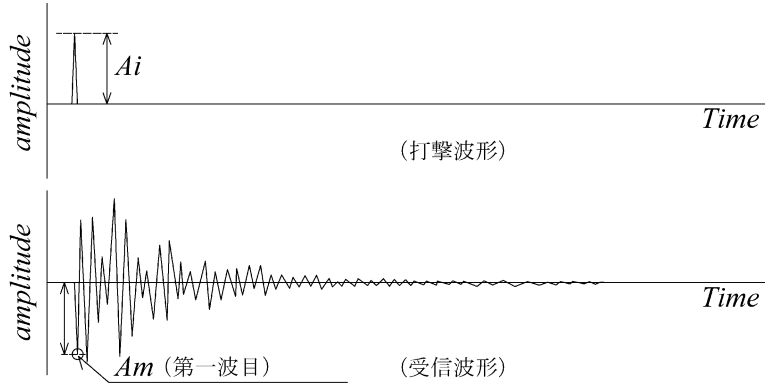
- 劣化損傷の有無によって得られる受信波形の振幅値は異なる特性を有している．
- 振幅値のみでは劣化損傷の状態を判別するまでの特性は有していない．

4．実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの振幅値比の特性

◆打撃波形→叩き方・対象物表面の凹凸状態に応じ変化
◆受信波形→打撃や劣化損傷の状況に応じた影響

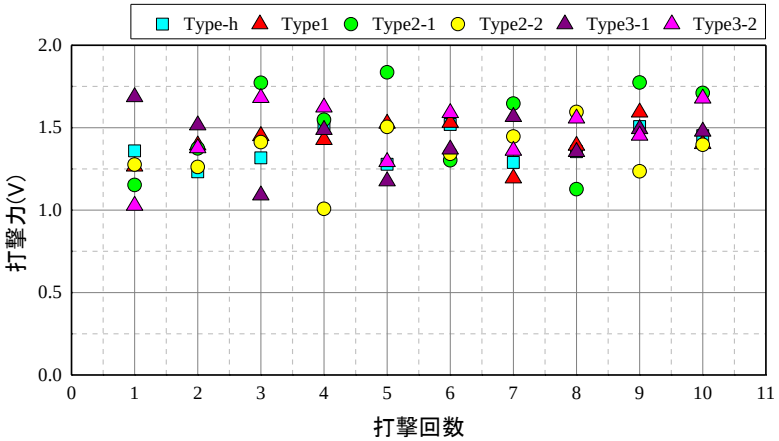
◆音圧振幅A_m（負の第一波目）と打撃力A_iの比を取り振幅値比Aとして評価する.
◆打撃力が1～2Vと安定する打撃を10回ずつ行い個々に算定される振幅値比を平均し平均振幅値比として取り扱う.

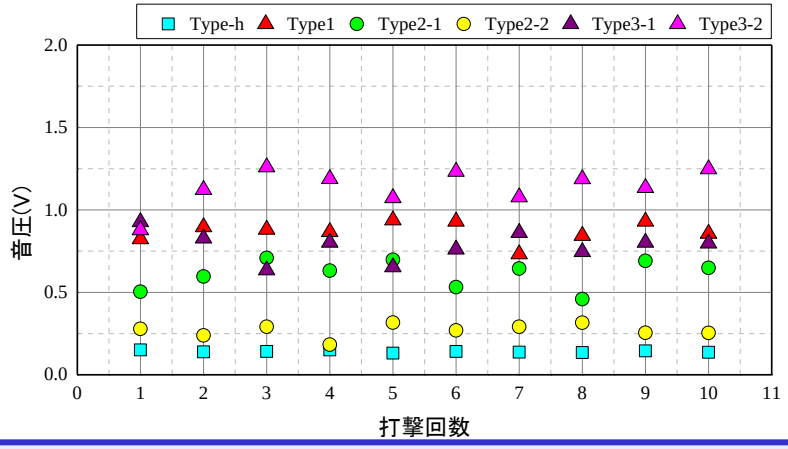


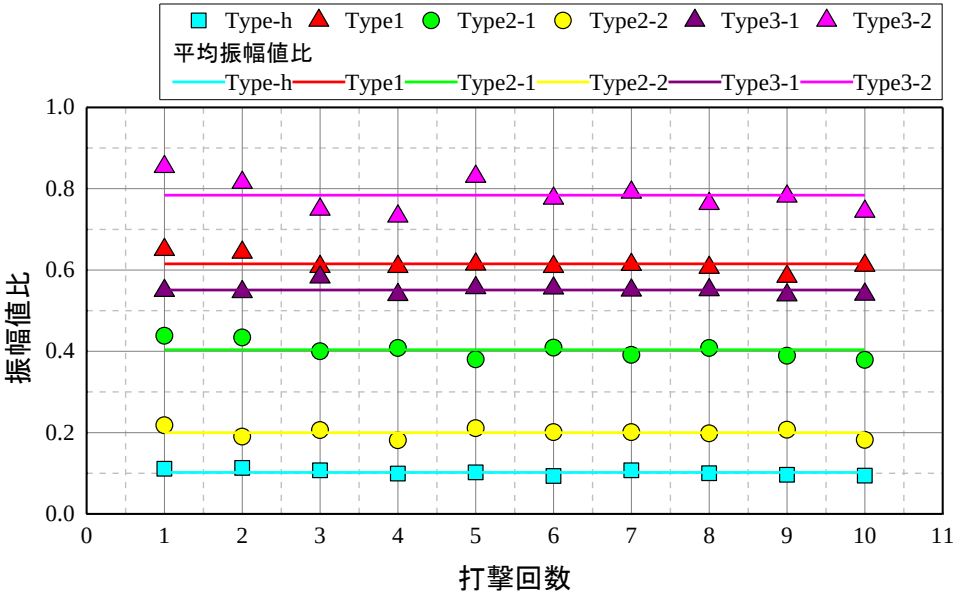
振幅値比 $A = Am / Ai$

4．実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの振幅値比の特性
ー試験体中心位置における振幅値比のばらつきー







振幅値比にすることで打撃等に応じた影響を除去することが可能

4．実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの振幅値比の特性
ー試験体中心位置における平均振幅値比ー

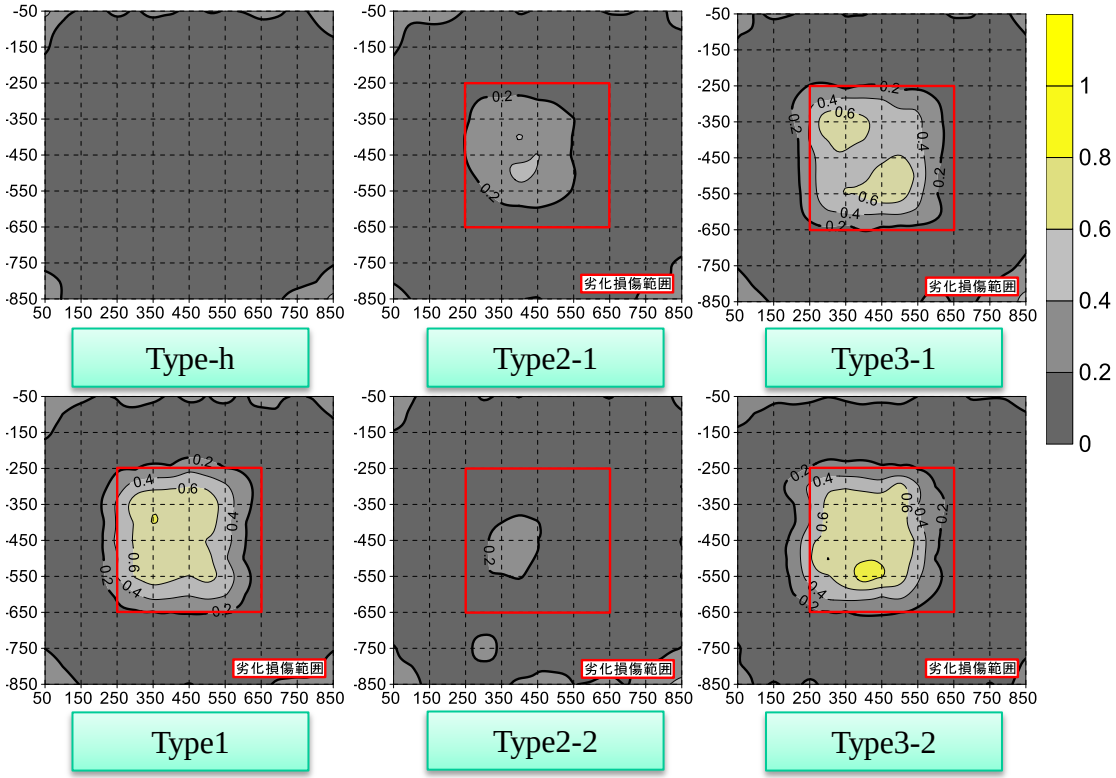
ケース	劣化損傷の種別	平均振幅値比A
Type-h	健全（一体化）	0.102
Type1	アスファルト混合物のはく離	0.615
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.404
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.200
Type3-1	コンクリートの脆弱化	0.551
Type3-2	コンクリートの脆弱化	0.784

- ◆ 劣化損傷の状態に関わらず劣化損傷が存在することによって振幅値比は大きくなる．
- ◆ Type2-1が0.404、Type2-2が0.200とType-hの0.102より大きいがType1より小さい．
- ◆ コンクリートが脆弱化した場合には平均振幅値比がばらつく傾向がある．

- ➢ 振動の大きさが曲げ振動を生じる部材厚さに関係する．
- ➢ はく離や損傷の存在により見掛けの部材厚が小さいと曲げ振動が大きく、見掛けの部材厚が大きいと曲げ振動が小さくなる特性を有している．

4. 実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの振幅値比の特性
ー平均振幅値比の分布ー



□は劣化損傷範囲

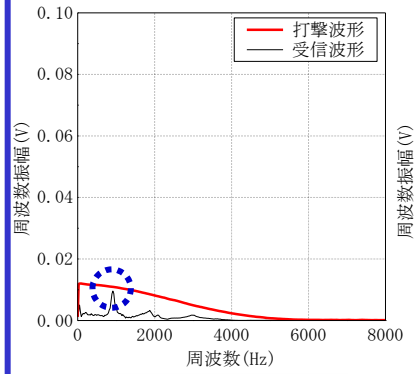
（単位：mm）

- ◆ 健全部の平均振幅値比を0.2と仮定することで劣化損傷範囲の検知が可能.
- ◆ Type1・Type3-1・3-2の平均振幅値比はほぼ同じ．アスファルト混合物とコンクリートのはく離現象とかぶりコンクリートの脆弱化現象は同等の曲げ振動.
- ◆ Type2-1は105mm位置に存在するひび割れ面を検知.
- ◆ Type2-2はひび割れ面の深さが155mmと深く検知精度が劣る.

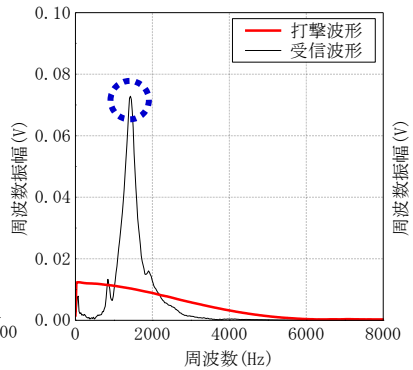
4．実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの周波数特性

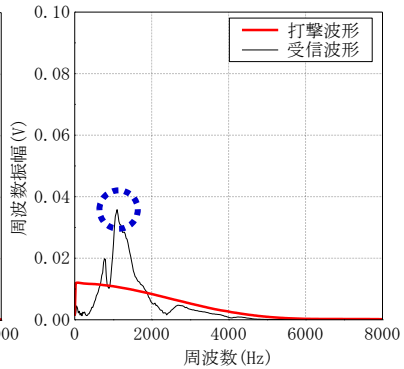
ー試験体中心位置における平均ピーク周波数と周波数振幅ー



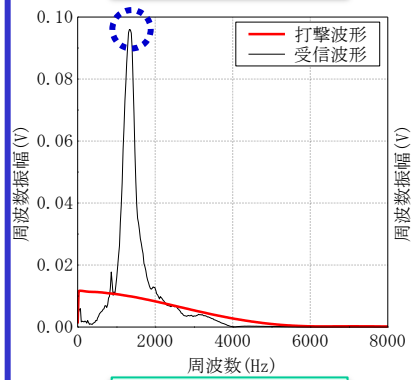
Type-h



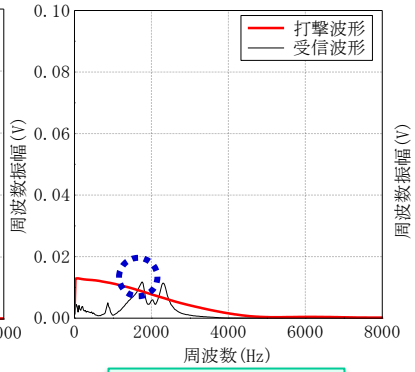
Type2-1



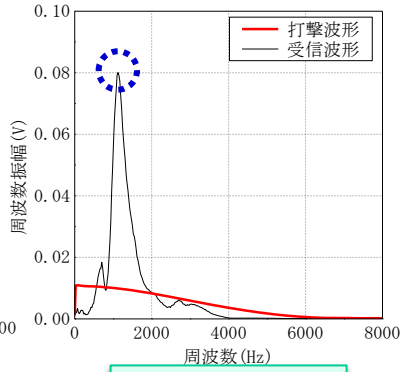
Type3-1



Type1



Type2-2

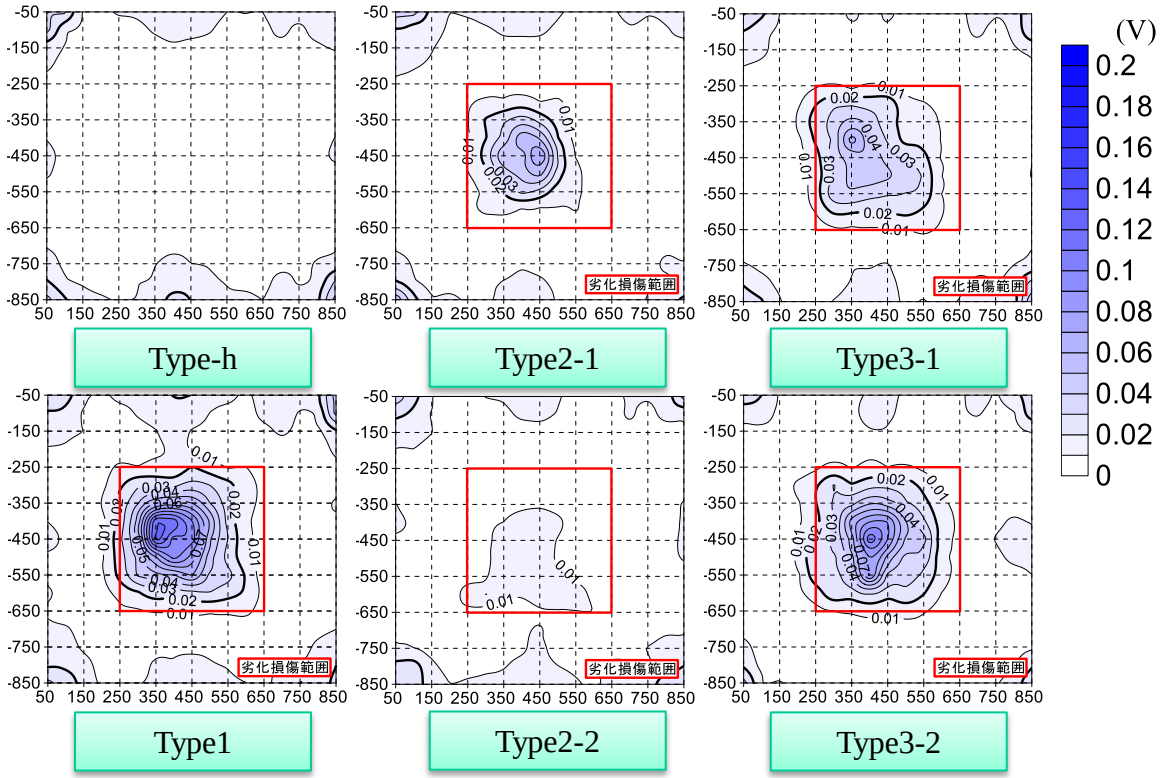


Type3-2

ケース	平均ピーク周波数 (Hz)	平均ピーク周波数振幅 (V)
Type-h	914	0.0096
Type1	1336	0.0960
Type2-1	1430	0.0711
Type2-2	1758	0.0118
Type3-1	1102	0.0373
Type3-2	1125	0.0796

4. 実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの周波数特性
ー平均ピーク周波数振幅の分布ー



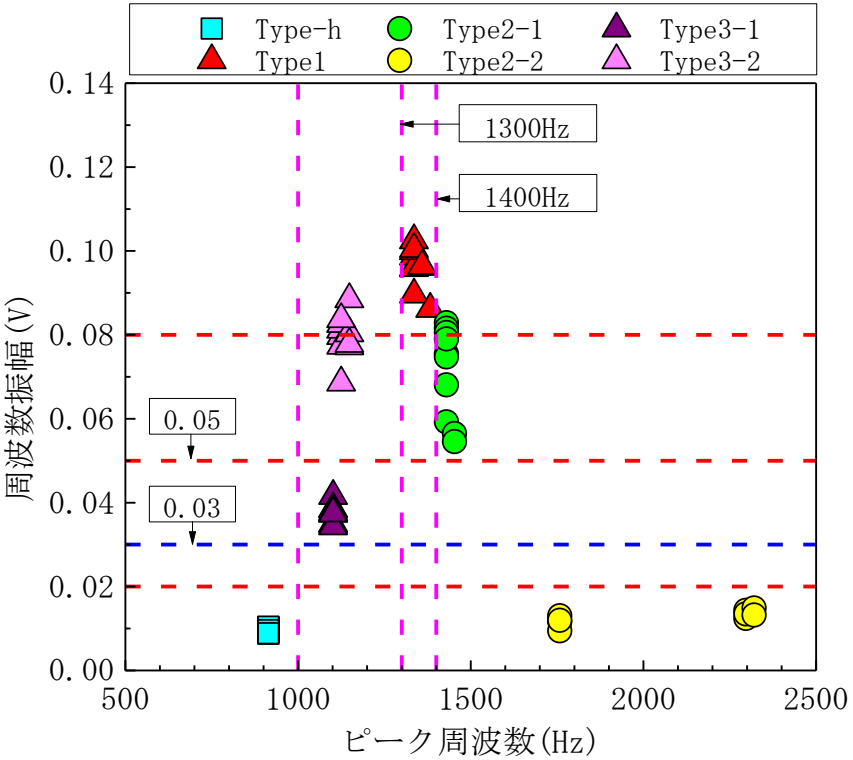
□は劣化損傷範囲

（単位：mm）

- ◆劣化損傷範囲を明確に示すことができている.
- ◆Type2-2については平均振幅値比の指標としたものに比べて劣化損傷部を表現している.

4．実験結果と考察

劣化損傷状態ごとの周波数特性
ー中心位置におけるピーク周波数と周波数振幅の関係ー



ケース	劣化損傷の種別	ピーク周波数	ピーク周波数振幅
Type-h	健全（一体化）	1000Hz未満	0.02V未満
Type1	アスファルト混合物のはく離	1300～1400Hz	0.08V以上
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	1400Hz以上	0.05V以上
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ		0.02V未満
Type3-1	コンクリートの脆弱化	1000～1300Hz	0.03V以上
Type3-2	コンクリートの脆弱化		

5．まとめ

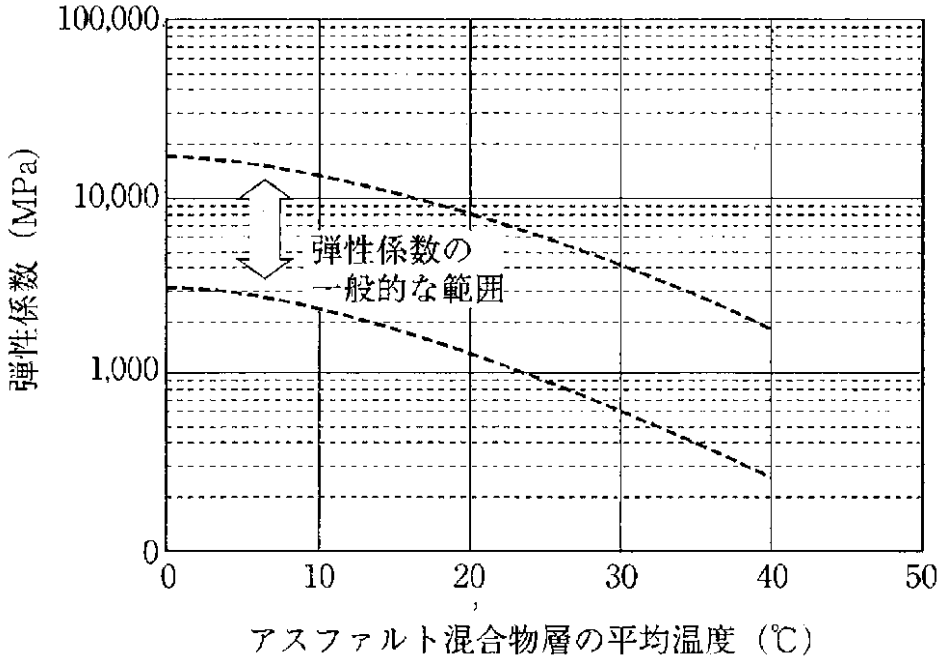
劣化損傷状態の推定

ケース	劣化損傷の種別	振幅値比	周波数	
			ピーク周波数	ピーク周波数振幅
Type-h	健全（一体化）	0.200未満	1000Hz未満	0.02V未満
Type1	アスファルト混合物のはく離	0.400以上	1300～1400Hz	0.08V以上
Type2-1	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.300～0.400	1400Hz以上	0.05V以上
Type2-2	鉄筋位置の水平ひび割れ	0.200～0.300		0.02V未満
Type3-1	コンクリートの脆弱化	0.400以上	1000～1300Hz	0.03V以上
Type3-2	コンクリートの脆弱化			

- 共　通　：劣化損傷状態により異なる特性を有している
- 振幅値比：劣化損傷の有無およびその範囲を判別できる
- 周 波 数　：劣化損傷の状態を判別できる可能性がある

6．検討中の課題について

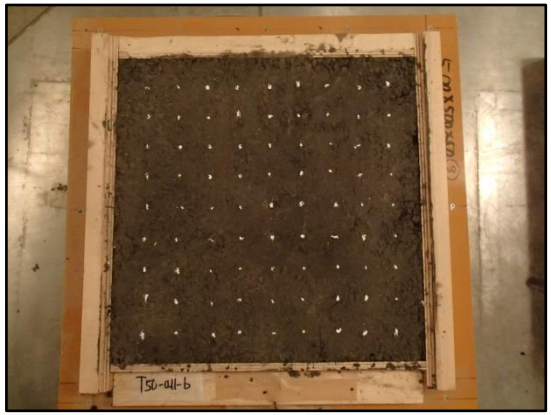
◆ アスファルト混合物はその温度によって弾性係数が変化
→アスファルト混合物の温度依存性を考慮した劣化損傷の推定法



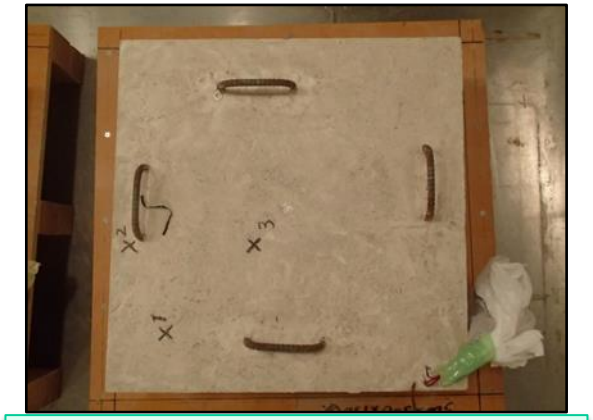
出典：日本道路協会、舗装設計便覧

６．検討中の課題について

試験体の概要　－単体試験体－



アスファルト混合物試験体



コンクリート試験体

試験体		幅×奥行き×厚さ(mm)
アスファルト混合物	T50	500×500× 50
	T75	500×500× 75
	T100	500×500×100
コンクリート	T100-con	500×500×100
	T150-con	500×500×150

６．検討中の課題について

実験の概要

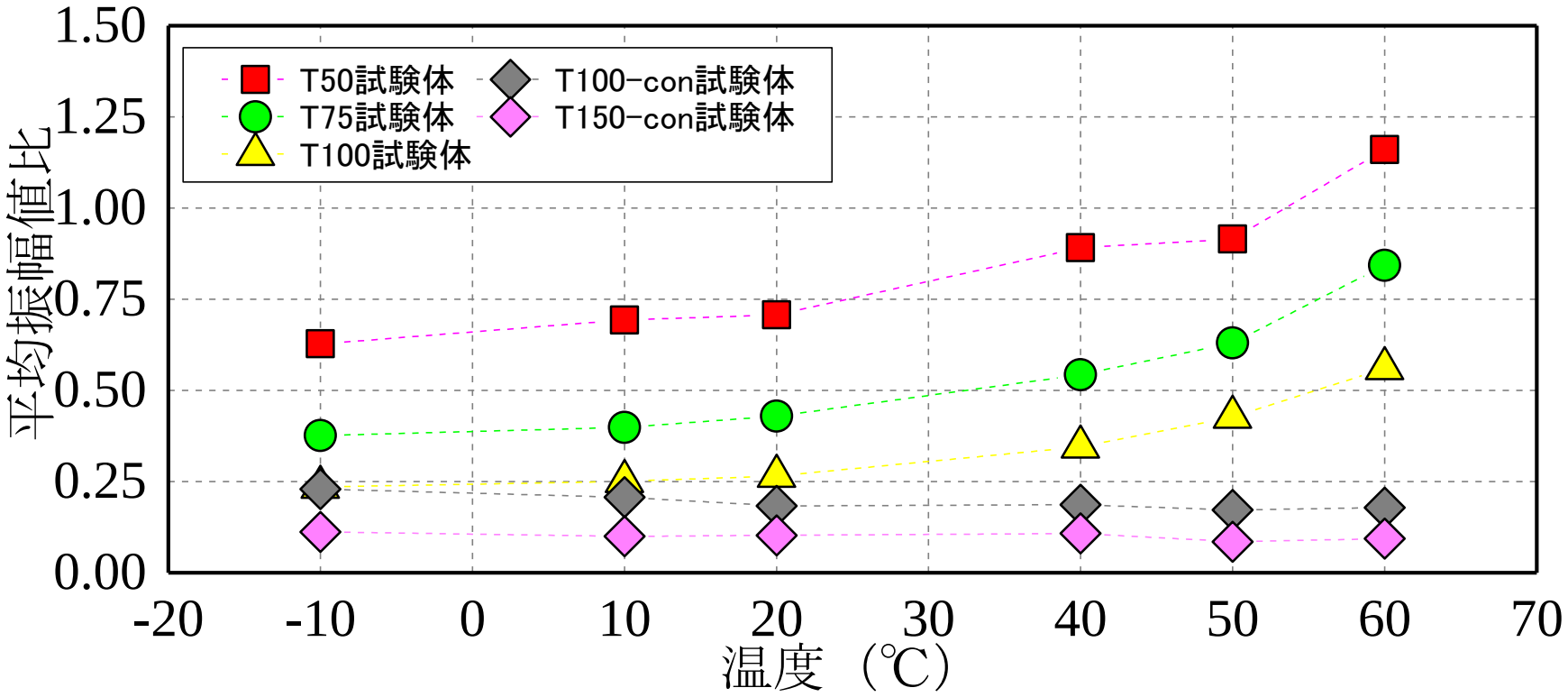
- ◆ 実構造物が暴露される気温を考慮
- ◆ 恒温恒湿室にてアスファルト混合物温度を管理

No.	設定雰囲気温度(℃)
1	-10
2	10
3	20
4	40
5	50
6	60

試験体設置状況（恒温恒湿室）

6．検討中の課題について

実験結果　ー温度と平均振幅値比の関係ー



徳永ら：舗装用アスファルト混合物の温度が打音特性に与える影響，土木学会第71回年次学術講演会，平成28年9月

以上となります.
ご清聴ありがとうございました.

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)
「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」
「(5)-(A)インフラマネジメント技術の国内外への展開を目指した統括的研究」
「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システムの開発」
WG1　塩害による劣化機構の解明と構造部材の材料・構造性能評価
③　塩害劣化橋梁のモニタリングと地域マップ作成

WG1 活動実績報告会

リモートセンシングによる橋梁モニタリングの実証実験

平成29年3月14日

徳永光晴、教授、博士(工学)
金沢工業大学
環境・建築学部　環境土木工学科
mtoku@neptune.kanazawa-it.ac.jp

日経新聞　平成29年3月9日、3月13日

【第三種郵便物認可】

インフラ検査にAI・ドローン

政府、新たな指針案

道路や橋など、コスト削減

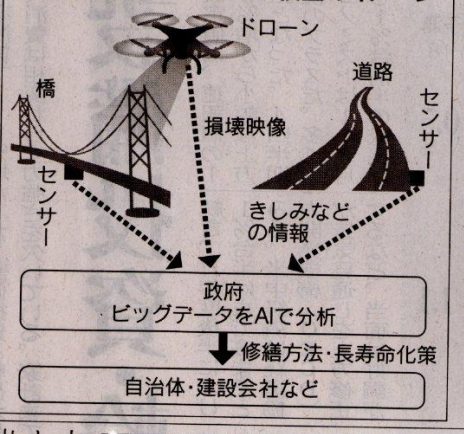
政府は8日、国や自治体のインフラ整備に関する新たな指針案をまとめた。人工知能（AI）やドローン（小型無人機）で道路や橋の傷み具合を定期検査するのが柱だ。人手不足や建設会社の減少が進む中、老朽化する公共インフラを低コストで点検して長寿命化を図る。2020年の東京五輪・パラリンピックに向けた建設需要の拡大や防災ニーズに対応する。

総合科学技術・イノベーション会議が今春にまとめる「科学技術イノベーション総合戦略2017」に盛り込む。同戦略は18年度予算案で科学技術分野の概算要求の指針となる。

政府系研究機関や国立大学、建設会社の合同チームに重点的に補助金を出すなどして、官民一体の研究開発を促す。インフラを検査するためのドローンの定期飛行を認める規制緩和も検討する。

政府はまず全国各地のインフラの管理状況や更新履歴を集めたビッグデータを整備する。その上でAIを活用し、インフラに取り付けたセンサーが感知したきしみなどの情報やドローンの撮影映像を分析。最も効率的な修繕方法や長寿命化策を見いだすことで、コスト削減につなげる。ビッグデータは条件付きで民間

政府が想定するインフラ検査のイメージ



高速道劣化AIで察知

3D画像解析、破損見逃さず

補修の緊急度を判断

老朽化が進む高速道路の管理にドローンや人工知能（AI）を導入する試みが始まった。日本の交通インフラの多くは1960年代の高度成長期に整備され、補修に緊急を要する場所が少なくない。先端技術の活用が限られた財源で交通網の安全を守るカギになる。

ひときわ人目を引く黄色い車が2月上旬の首都高速を巡回した。屋根に搭載した大きなアンテナのような装置がこの車の特徴だ。装置からレーザーを照射して橋脚や道路、周辺の地形を精密に読み取って3次元データに変換していく。照射回数は毎秒100万回以上。関係者は「高速道路スキャナー」と呼ぶ。

立体画像からAIが道路の変形や破損を読み取り、交通量や過去の定期点検記録と照合、補修の優先順位を決めていくという。2017年度にも本格的な運用を始める。

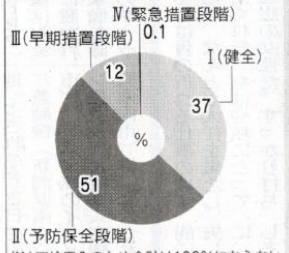
目視点検に限界

首都高は3割の路線が建設から40年以上が経過しているうえ、より精密な管理を求められる「道路橋」が全路線の8割を占める。目視やハンマーを使った打音検査だけでは時間がかかりすぎるうえ、通行規制も必要になる。情報収集車両は1台約1億5千万円と高額だが、首都高速の点検推進課は「効率化のために必要な

センサーeyes

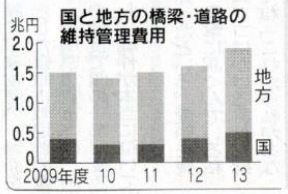
最新技術で道路の管理を効率化

全国の橋梁のうち約12%で緊急もしくは早期の修繕が必要

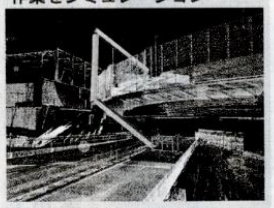


(注)四捨五入のため合計は100%にならない

国と地方の橋梁・道路の維持管理費用



高速道路を3Dデータ化し、作業をシミュレーション



ドローンを使った点検も

リモートセンシング活用への道が開けるか

現在、国交省は、ドローンなどを活用したモニタリングは、目視点検・検査とはならず保守点検の一部としても活用できないとの立場をとっている。

平成29年3月8日「総合科学技術・イノベーション会議」は「科学技術イノベーション総合戦略2017」に、インフラ整備に関する新たな指針案をまとめた。

AIやドローンを道路・橋梁の定期点検に利用するのか柱となっている。重点的に補助金を出すなど研究開発を促す。

インフラを点検するためにドローンの飛行・点検を認める規制緩和を検討する。
インフラの管理状況などビックデータを整備する。

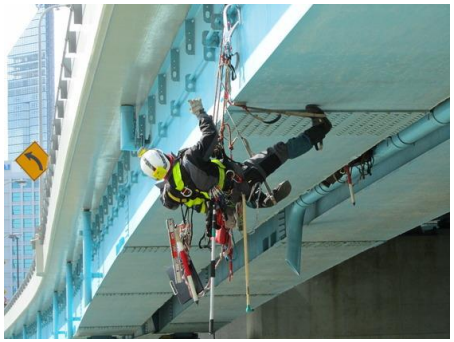
課題

リモートセンシングによるモニタリングで、いったい何がわかるのか?
何ができて、何ができないのかを明確にする必要がある。

橋梁のすべての場所を視認することは難しい、また視認できたとしても、たたき点検の代わりができるわけではない。
目的と役割(**簡易検査?)**を明確にすれば、活用が可能であると思われる。

期待する利用シーン

- スクリーニング
  目視点検する場所、時間スケールを削減
- 経年変化の確認
  亀裂・うき・ばがれ・さび・色彩などの変化抽出
- 目視点検の補助
  費用削減。ハイピアなど足場を必要とする所
  ロープアクセスを必要とするところ
- 問題があるかないか、AIによる画像診断



橋梁点検におけるリモートセンシングの活用方法

◆無人飛行機(ドローン)、ラジコンボートによる事前調査より得られた情報から，各橋梁の評価および点検すべき優先度を定める

道路橋定期点検要領

平成２６年６月
国土交通省　道路局

コンクリート部材の損傷　④ひびわれ　3／4

判定区分 Ⅲ　構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。（緊急措置段階）

例　主桁の支点部近傍に顕著なひびわれが生じており、支承部としての機能も著しく低下している場合

例　主部材に多数のひびわれが生じており、各所で内部鋼材の破断が生じていると考えられる場合

例　主部材の受梁など、その破壊が落橋に直接つながる部位で、顕著なひびわれが生じている場合

例　下部工の梁や柱に顕著なひびわれが生じており、進展すると落橋する可能性も疑われる場合

備考　■ひびわれの原因や部材への影響が容易に判断できない場合には、詳細調査を行う必要がある。

橋梁	判定	優先度	評価
Ⅰ橋	A	3	健全なため，点検対象から除外
Ⅱ橋	C1	1	C1判定から点検対象として5年後から本年度に変更
Ⅲ橋	B	2	B判定より，定期点検前に再度調査

橋梁点検におけるリモートセンシングの活用方法・続

◆定期点検を5年に1度実施する
→5年目にⅠ橋，Ⅱ橋，Ⅲ橋が点検対象と仮定

0　5　10　15　20（年）

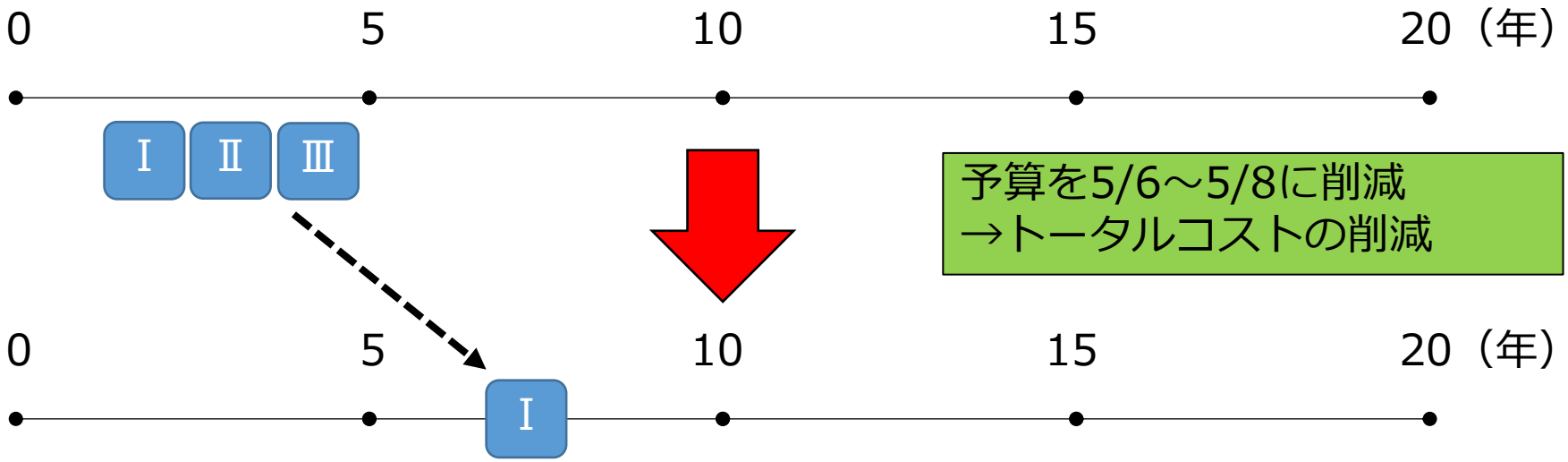
◆定期点検前（0～4年目）に無人飛行機によりⅠ橋，Ⅱ橋，Ⅲ橋を事前に調査(簡易検査)
→劣化具合を把握

ドローン

ラジコンボート

橋梁点検における無人飛行機の活用方法

◆調査結果から，各橋梁への対処を定める
例）健全な橋梁に対しては，5年目→6～8年目に変更



法改正の口火

定期点検前の一次スクリーニング技術

実験項目

UAV(ドローン)による点検

鋼部材

◆鋼部材に生じる腐食のモニタリング

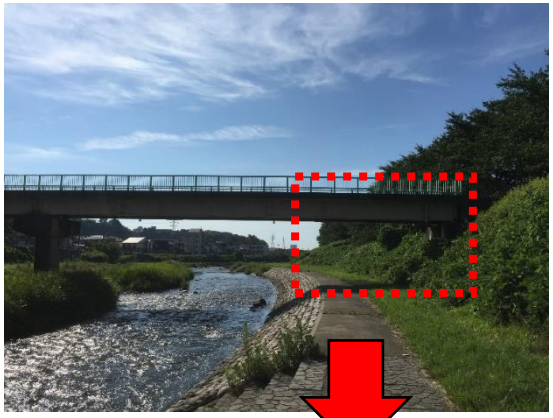
コンクリート部材

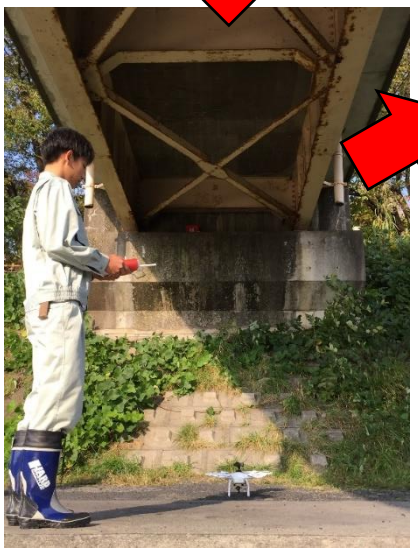
◆コンクリート部材に生じる劣化損傷のモニタリング

ラジコンボートによる点検

◆広角カメラ、全周囲カメラ、一眼レフカメラ、赤外カメラ、近赤外カメラ
◆ 3Dモデル

モニタリング方法

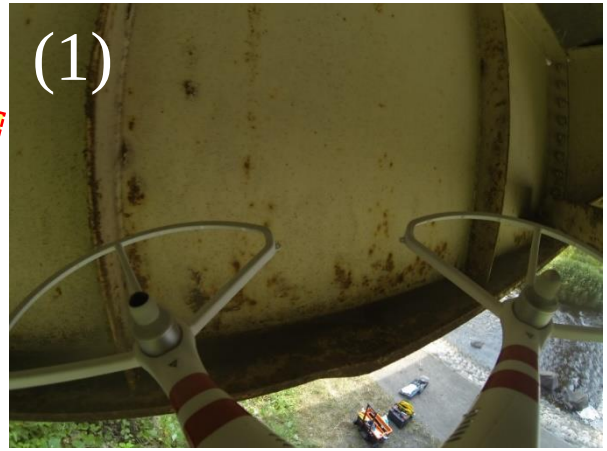


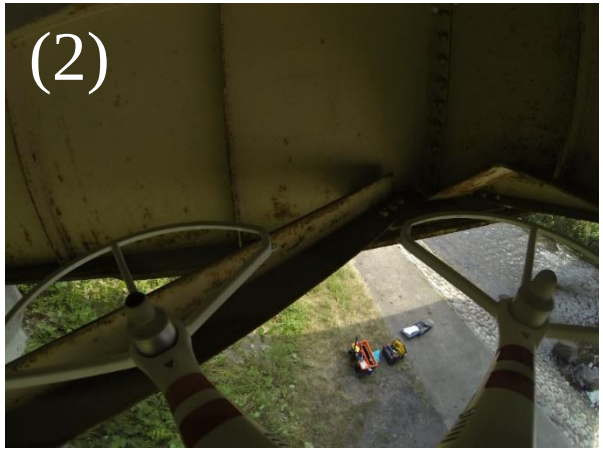


15～20度

・機体を固い地盤の上から飛行させ，モニタリングを実施した.
・部材に対して斜め上から空撮を実施しなければならないため，機体上部にカメラを15～20度傾けた上で設置した.

実験結果





(1)主桁下フランジ内側
(2)下横構
(3)支承部

（1） 主桁下フランジ内側

鮮明度 0%　明るさ 0%　コントラスト 0%

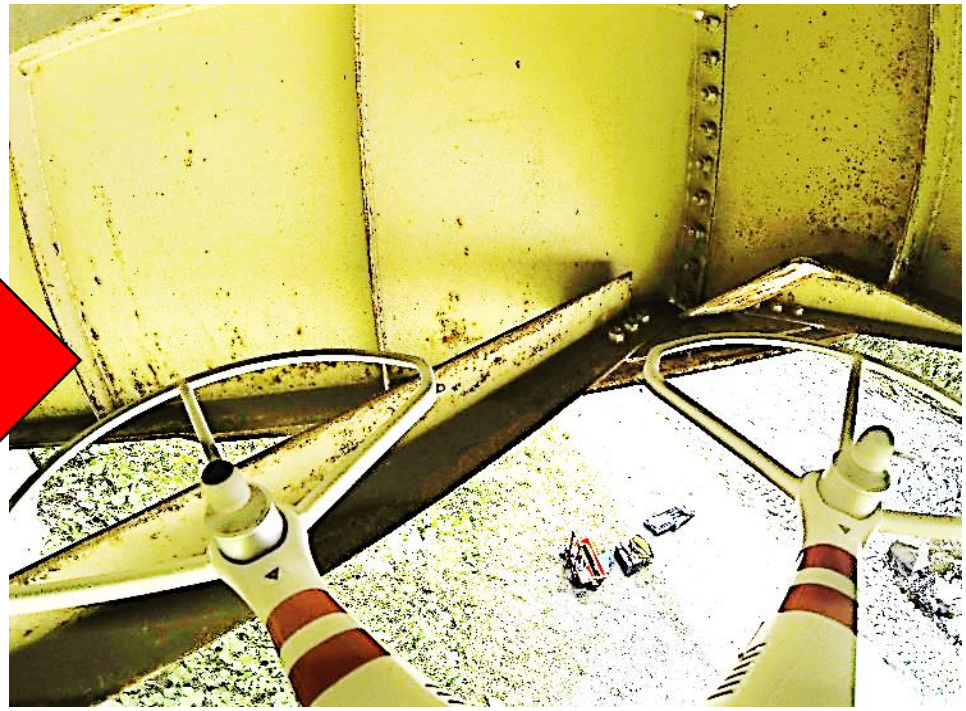
鮮明度 50%　明るさ +40%　コントラスト +40%

◆簡易的な画像処理を実施することでより鮮明に腐食のモニタリングが可能
◆機体下部にテザーを取り付ける等の安全対策が必要

（2） 下横構

鮮明度 0%　明るさ 0%　コントラスト 0%

鮮明度 77%　明るさ +69%　コントラスト +40%



◆（1）と同様に簡易的な画像処理をすることでより鮮明に腐食のモニタリングが可能
◆複雑な構造のため，習熟した操作技術が必要

（3）支承部

鮮明度 0%　明るさ 0%　コントラスト 0%

鮮明度 25%　明るさ +40%　コントラスト +15%

◆簡易的な画像処理を実施することで支承部周辺に発生した腐食のモニタリング可能
◆橋脚の存在から，ボルト等細部の部材はモニタリング出来ない

実験結果

床板ひび割れ

遊離石灰

錆汁

- 空撮後，連続的に得られた画像から抽出することで各劣化損傷の確認が出来た
- RCT桁は，逆U字形をしているため，2度に分けて左右から空撮する必要がある
- 機体自身に照明を取り付ける必要がある
  - ・日の当たらない：より鮮明な画像を得られる
  - ・日の当たる：画像の明るさを統一出来る

床版と水面が近い①

桟橋

※りんかい日産建設より

ダイバーによる目視点検

※株式会社国際海洋開発より

※国土交通省・国有港湾施設の集中点検結果より

床版と水面が近い②

船を用いた橋梁点検

※七尾市建設部土木課より

長い棒にカメラを取り付けての点検

※国土交通省・国有港湾施設の集中点検結果より

国土交通省・国有港湾施設の集中点検結果(http://www.mlit.go.jp/common/001023006.p

ラジコンボートによる実験

橋梁下はGPSの受信を行えないので，橋全体を感覚で撮影する他，川の流れによって不安定な走行状態となる

全周囲カメラ　撮影画像

全周囲カメラ 撮影画像

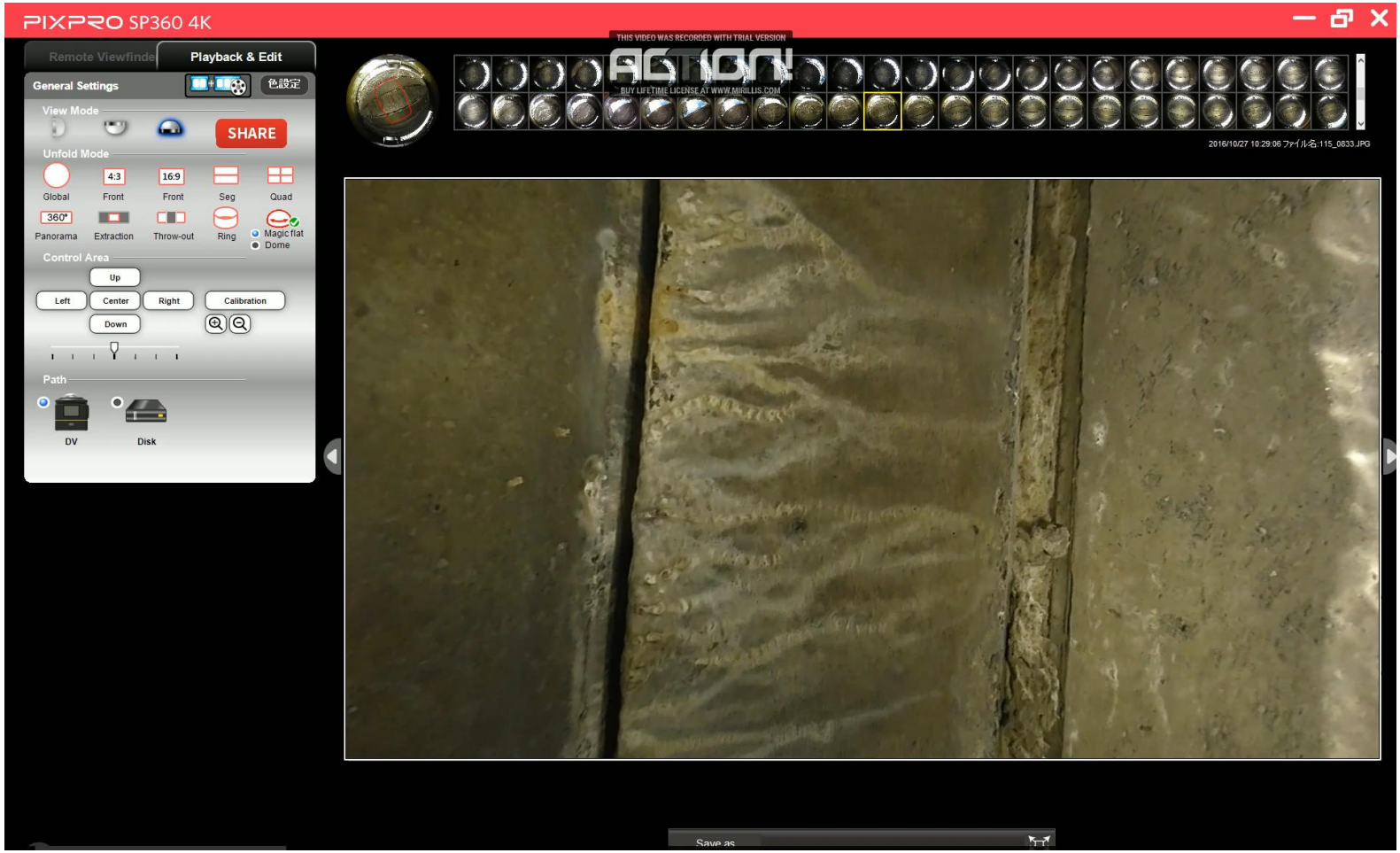
1375枚

錆汁

石灰,つらら,亀裂

コマ撮りで得られた画像から抽出することで各劣化損傷の確認が出来た

全周囲カメラの利点


PIXPRO SP360 4K
Remote Viewfinder
Playback & Edit
General Settings
色設定
View Mode
SHARE
Unfold Mode
Global
4:3
Front
16:9
Front
Seg
Quad
360°
Panorama
Extraction
Throw-out
Ring
Magic flat
Dome
Control Area
Up
Left
Center
Right
Calibration
Down
Path
DV
Disk
THIS VIDEO WAS RECORDED WITH TRIAL VERSION
BUY LIFETIME LICENSE AT WWW.MIRILLIS.COM
2016/10/27 10:29:06 ファイル名:115_0833.JPG
Save as

広角カメラ撮影画像

GoPro HERO3 撮影画像 **3075枚**

橋台の亀裂

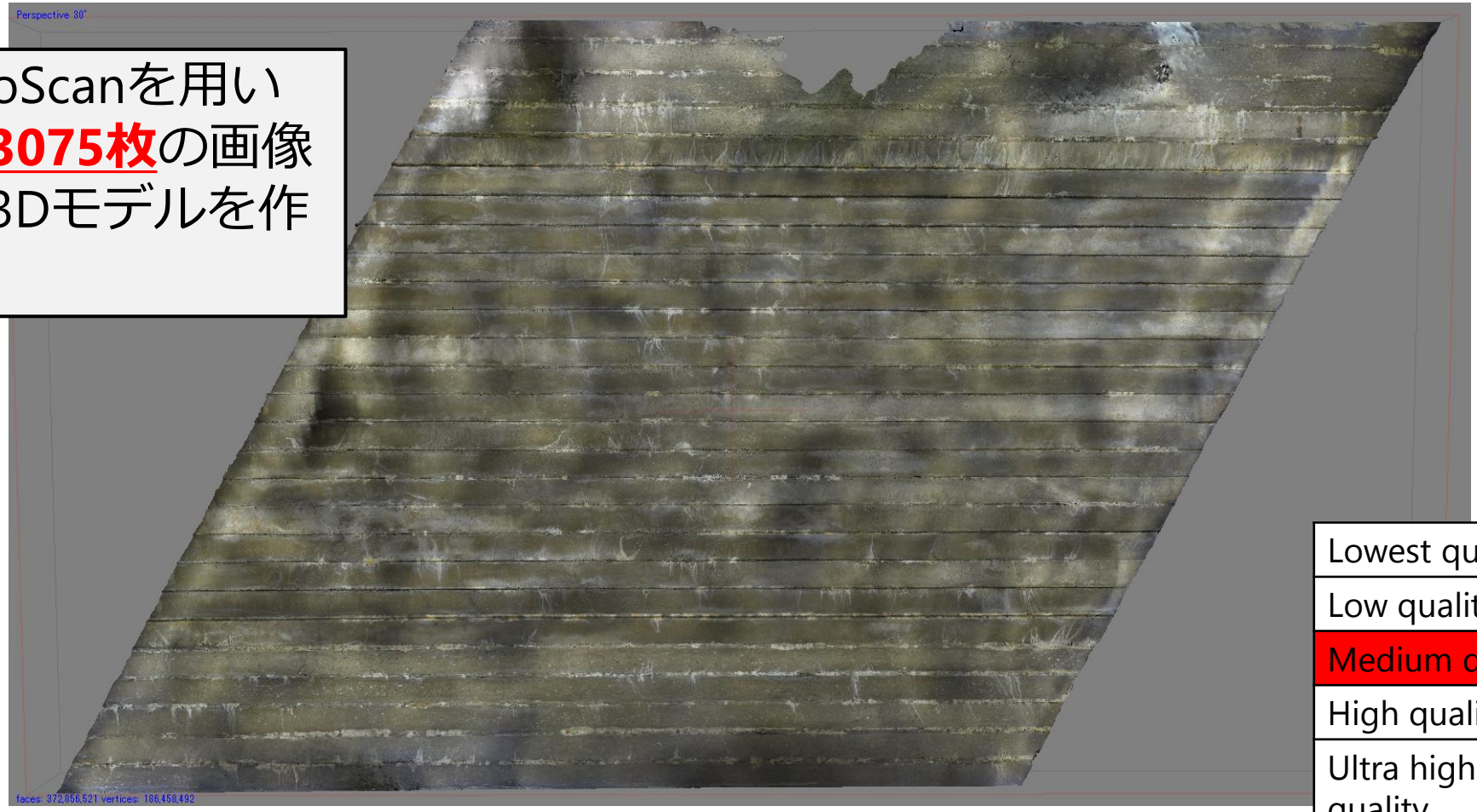
下面部の錆汁,石灰

石灰によるつらら

コマ撮りで得られた画像から抽出することで各劣化損傷の確認が出来た

3Dモデル（床板下面部）

PhotoScanを用いて、**3075枚**の画像から3Dモデルを作成



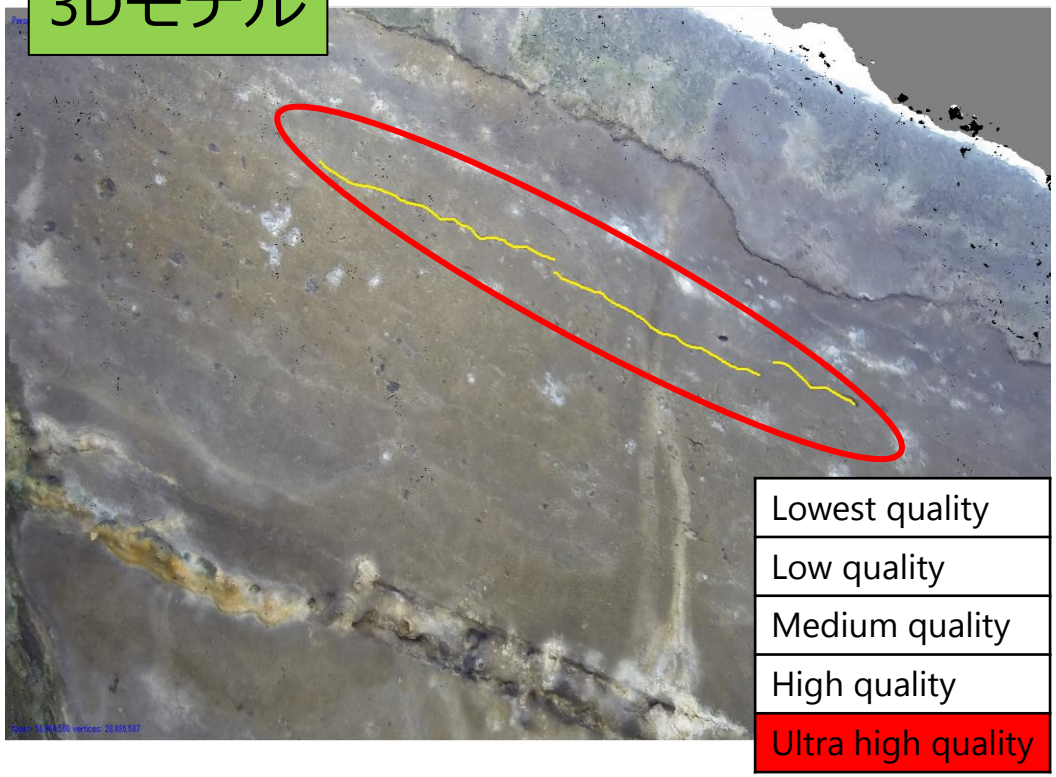
Lowest quality
Low quality
Medium quality
High quality
Ultra high quality

細部ひび割れ3Dモデル

撮影画像

下面部細部のひび割れ

3Dモデル



- Ultra high qualityにすることで、細かいひび割れを確認が出来た
- しかし、ひび割れ幅の算出は出来なかった

石灰によるつらら3Dモデル

Ultra high qualityにすることで、石灰のつららの確認が出来た

つららの3Dモデル比較

GoPro HERO3 BL

PENTAX K-S2

高画質機能を用いることで、石灰によるつららが鮮明になった

圃場の3Dモデル

カメラ	経度	緯度	高度 (m)	精度 (m)	誤差(m)
DJI_0099.JPG	136.811931	37.056473	-3.452000	10.000000	0.165274
DJI_0100.JPG	136.811932	37.056473	-3.452000	10.000000	0.135330
DJI_0101.JPG	136.811931	37.056474	-3.452000	10.000000	0.129100
DJI_0102.JPG	136.811932	37.056474	-3.452000	10.000000	0.136021
DJI_0103.JPG	136.811933	37.056474	-3.452000	10.000000	0.173707
DJI_0104.JPG	136.811933	37.056473	-3.452000	10.000000	0.154988
DJI_0105.JPG	136.811932	37.056473	-3.452000	10.000000	0.181448
DJI_0106.JPG	136.811931	37.056474	-3.352000	10.000000	0.062674
DJI_0112.JPG	136.811966	37.056475	-2.952000	10.000000	0.121117
DJI_0113.JPG	136.811965	37.056476	-2.952000	10.000000	0.222696
DJI_0114.JPG	136.811964	37.056475	-2.952000	10.000000	0.301024
DJI_0115.JPG	136.811962	37.056476	-3.052000	10.000000	0.189521
DJI_0116.JPG	136.811963	37.056475	-2.952000	10.000000	0.280760
DJI_0117.JPG	136.811962	37.056475	-3.052000	10.000000	0.172980
DJI_0118.JPG	136.811962	37.056475	-3.052000	10.000000	0.193039
DJI_0119.JPG	136.811963	37.056476	-3.052000	10.000000	0.172905
DJI_0120.JPG	136.811964	37.056476	-3.052000	10.000000	0.239708
DJI_0121.JPG	136.811964	37.056476	-3.052000	10.000000	0.286357
DJI_0122.JPG	136.811943	37.056479	-3.352000	10.000000	0.199217
DJI_0123.JPG	136.811943	37.056479	-3.452000	10.000000	0.059986
DJI_0124.JPG	136.811943	37.056480	-3.452000	10.000000	0.163028
DJI_0125.JPG	136.811943	37.056479	-3.352000	10.000000	0.213334
DJI_0126.JPG	136.811943	37.056479	-3.352000	10.000000	0.307568
DJI_0127.JPG	136.811943	37.056480	-3.252000	10.000000	0.210084
DJI_0128.JPG	136.811943	37.056480	-3.152000	10.000000	0.075991
DJI_0129.JPG	136.811944	37.056479	-3.252000	10.000000	0.188178
DJI_0130.JPG	136.811944	37.056479	-3.252000	10.000000	0.193878
DJI_0131.JPG	136.811945	37.056480	-3.252000	10.000000	0.221821
DJI_0132.JPG	136.811946	37.056480	-3.152000	10.000000	0.131914
DJI_0133.JPG	136.811945	37.056480	-3.152000	10.000000	0.162198
DJI_0134.JPG	136.811992	37.056479	-3.352000	10.000000	0.166986
DJI_0135.JPG	136.811992	37.056479	-3.352000	10.000000	0.090998
DJI_0136.JPG	136.811994	37.056479	-3.252000	10.000000	0.172935
DJI_0137.JPG	136.811994	37.056479	-3.252000	10.000000	0.304510
DJI_0138.JPG	136.811993	37.056479	-3.352000	10.000000	0.247433
DJI_0139.JPG	136.811993	37.056480	-3.252000	10.000000	0.414621
DJI_0140.JPG	136.811993	37.056480	-3.352000	10.000000	0.361254
DJI_0141.JPG	136.811992	37.056479	-3.452000	10.000000	0.174880
DJI_0142.JPG	136.811991	37.056479	-3.452000	10.000000	0.077463
DJI_0143.JPG	136.811991	37.056480	-3.252000	10.000000	0.119257
DJI_0144.JPG	136.811992	37.056480	-3.252000	10.000000	0.138814

経度	緯度	高度(m)	精度(m)	誤差(m)
136.811931	37.056473	−3.452000	10.000000	0.165274

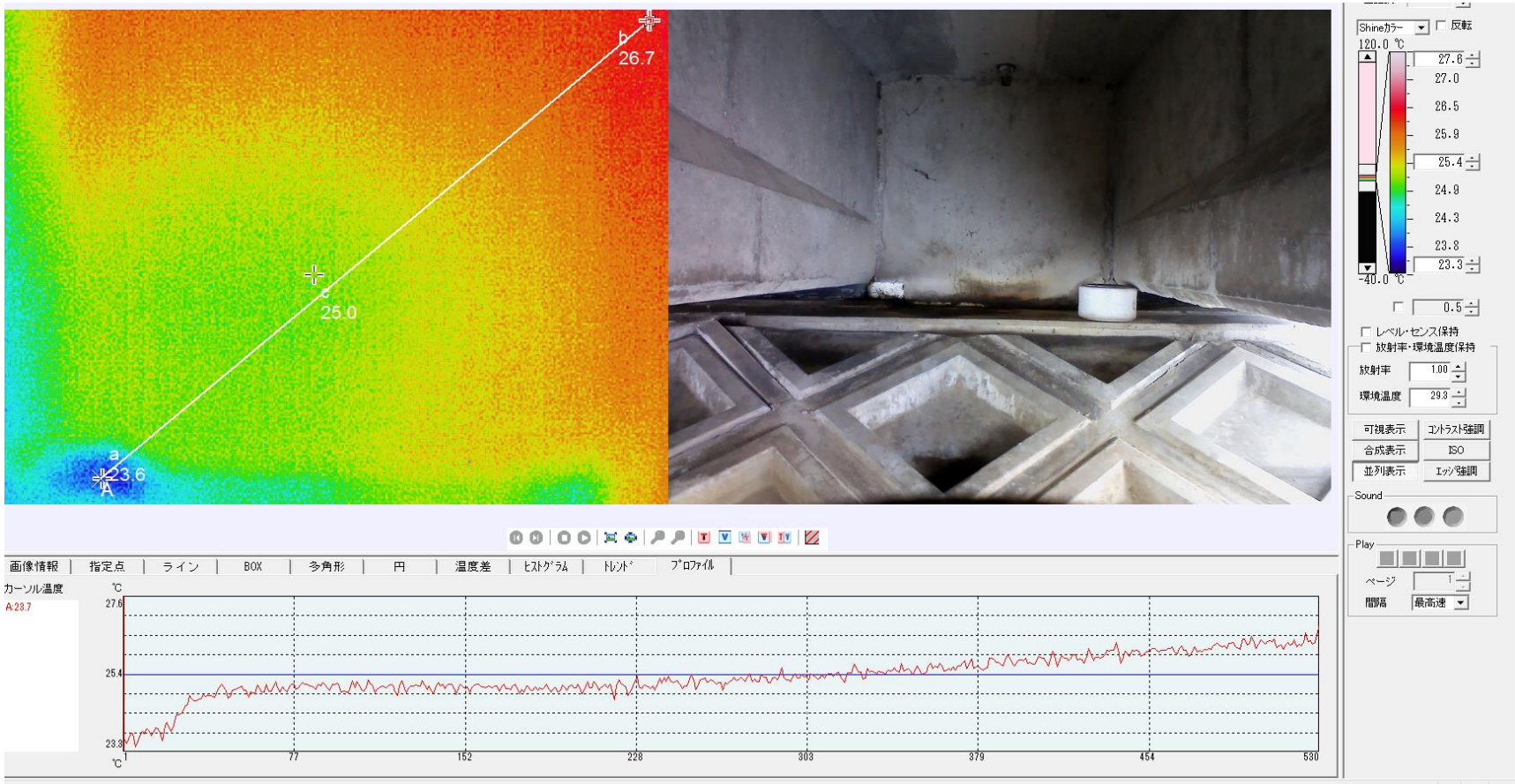
項目.3. カメラ位置と誤差の推定値.
Ｚエラーは楕円の色、ＸＹエラーは楕円の形状によって表現されます.
カメラの推定位置は黒いドットでマークされます.

X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	Z 誤差 (cm)	XY 誤差 (cm)	合計誤差 (cm)
7.391	6.84937	14.9056	10.0767	17.9921

テーブル 2. 平均カメラ位置エラー.

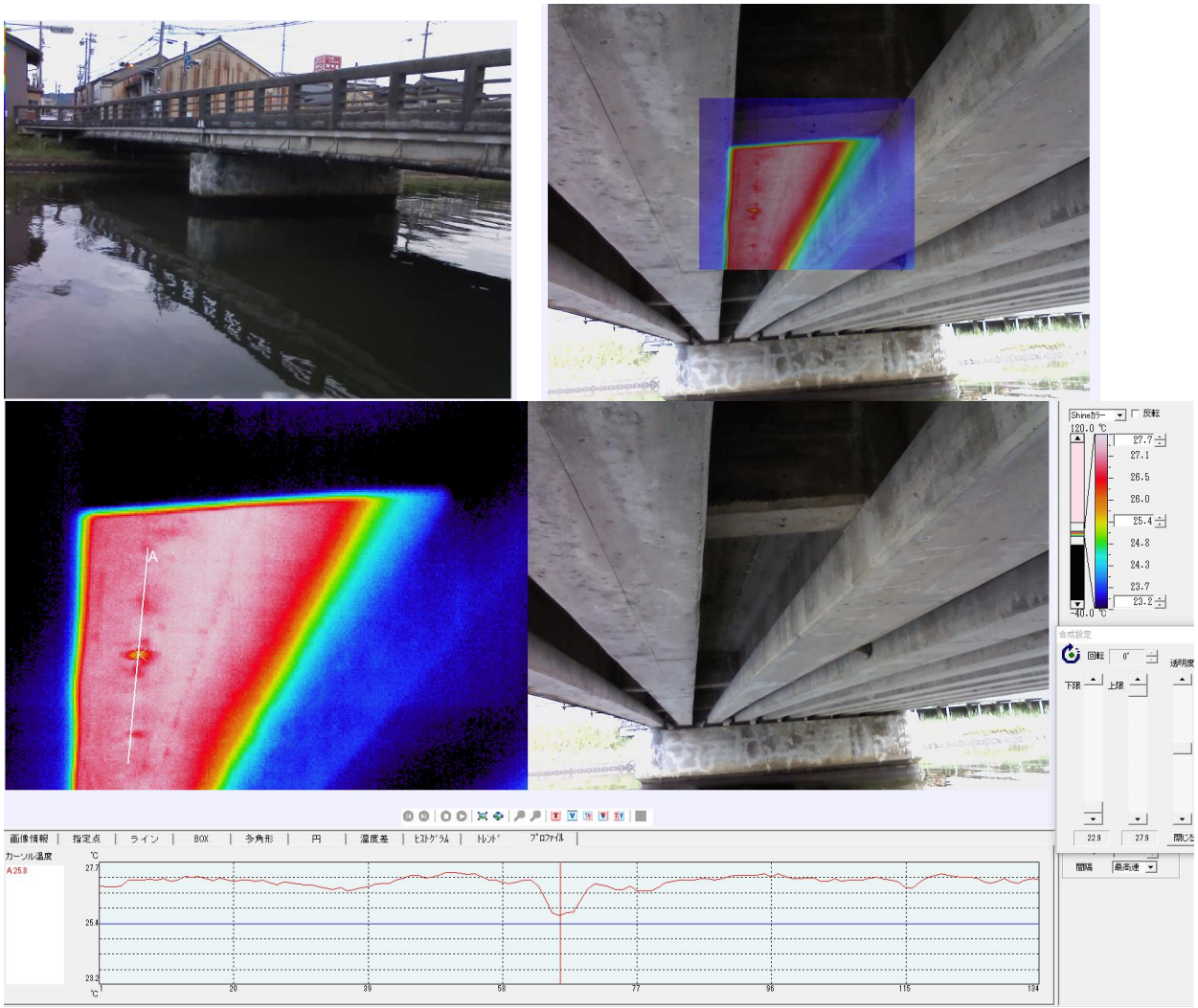
Thermo image

Spalling of concrete



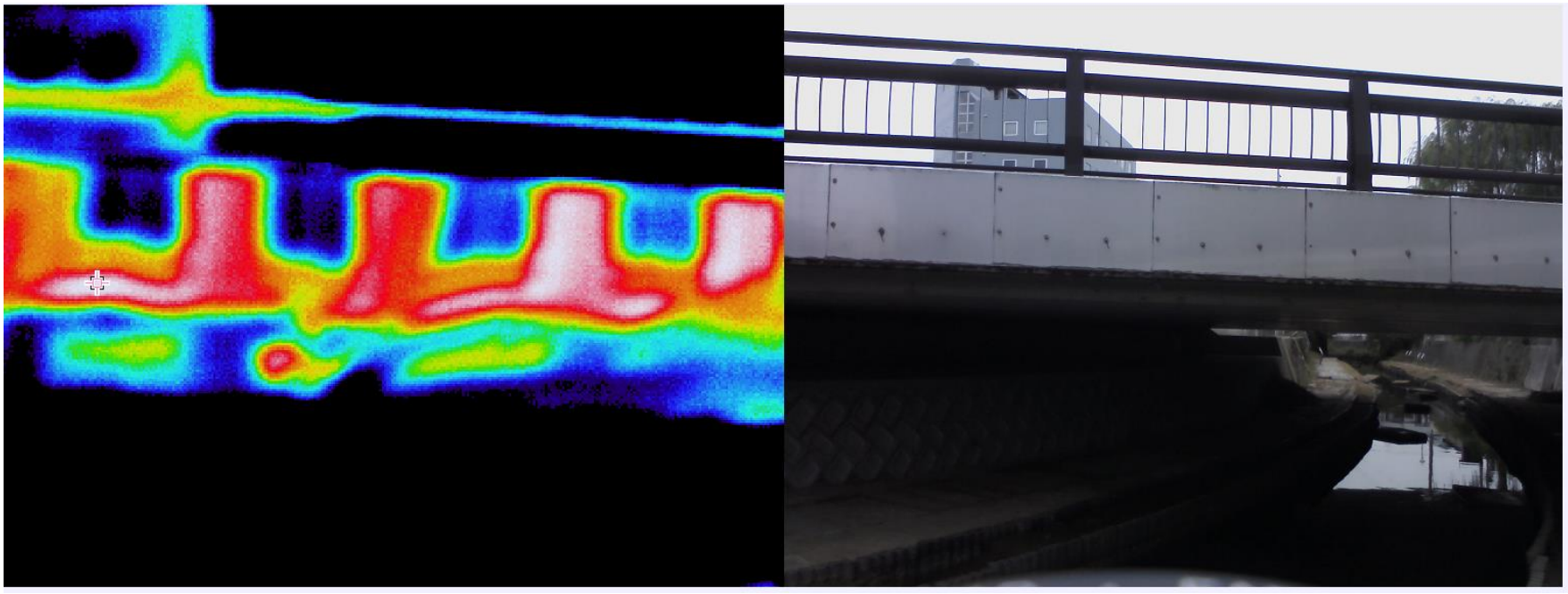
Thermo image

Damage to the concrete

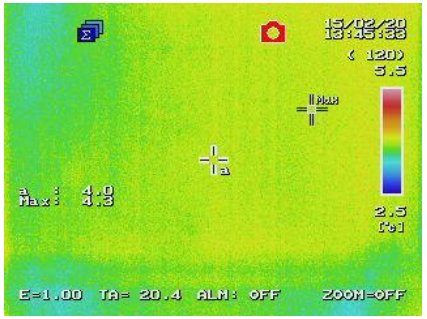


Thermo image

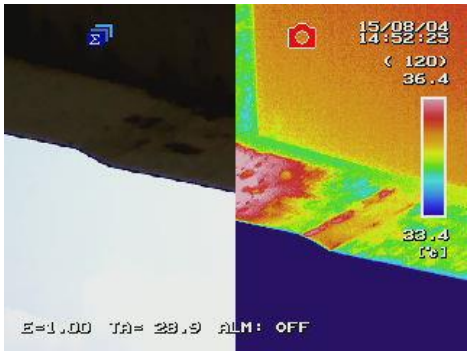
Inner gap



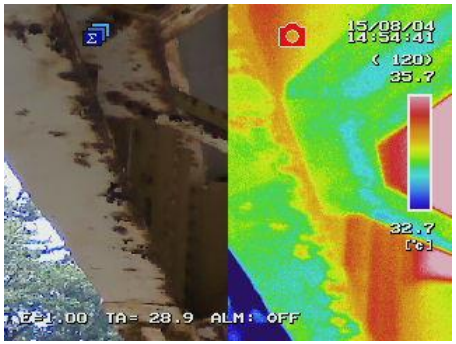
使用した熱赤外カメラ
剥離などの抽出を検討
InfReC R300SR-S (日本アビオニクス)
分解能　0.025℃

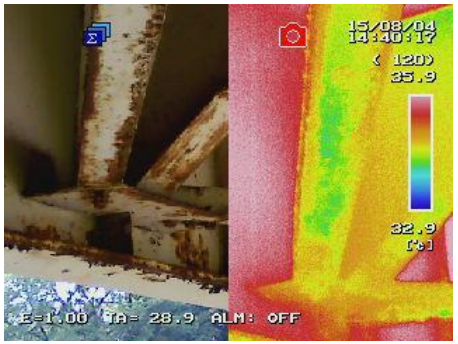


ひび割れ部と健全部の温度の差を
確認できないケースがあった。



鋼材では、目視による確認が
むずかして場所でも温度差を
確認できるところがある。





鋼材では、さび部と健全部の温度
差を確認できるところがある。

ドローンによる視認

◆無人飛行機を用いた空撮より，鋼部材に生じた腐食の画像が得られた
→健全度評価が可能だが，安全を考慮した対策が必要
◆コンクリート部材において，外観レベルでは確認出来た
◆模擬実験より得られた位置情報から距離を算出した結果，橋梁台帳に示されている値とほぼ相違のない値を得られた
→上空が開けている橋梁では，最低3点得ることで，「橋長」「幅員」「橋梁面積部」の算出が可能

無人飛行機を用いたモニタリングに一定の効果が認められた

ラジコンボートによる視認

- 全周囲カメラは専用アプリを用いることで橋全体を視認出来る
- 3Dモデルを実施し、3Dモデルから劣化損傷の確認は出来た
- 3Dモデルから、正確な損傷箇所が確認出来た
- コンクリート部材において、外観レベルのモニタリング可能

↓

ラジコンボートを用いて、水面と床板が狭い橋梁のモニタリングが可能

経済産業省　地方版IoT推進ラボ

白山市IoT推進ラボが認定。本学白山キャンパス(建設中)を中心としてIoTの壮大な実験場を整備する予定。
さまざまなセンサーネットワークを構築し、インフラ点検への活用を実証したい。

平成29年3月13日

防錆剤と亜鉛を併用した塩害事後保全対策工法
（複合防食工法）

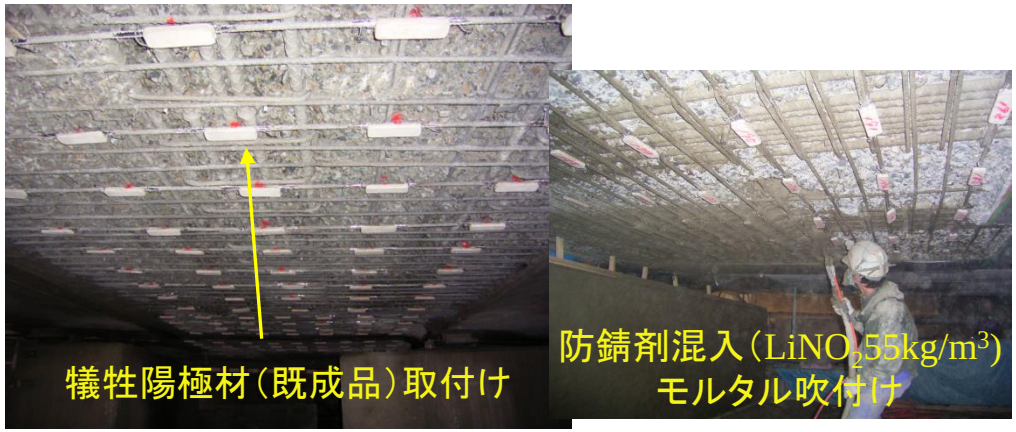
平成29年3月14日

中日本ﾊｲｳｴｲ･ｴﾝｼﾞﾆｱﾘﾝｸﾞ名古屋（株）金沢支店

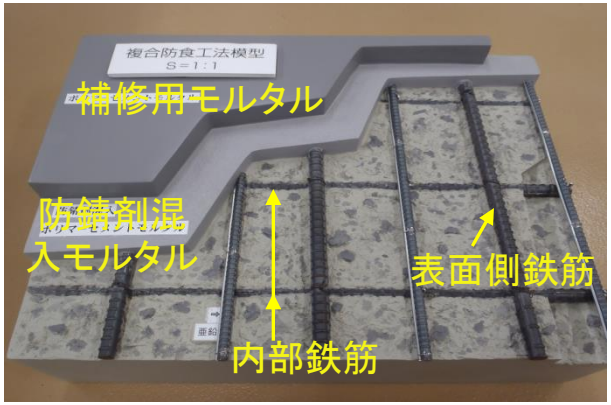
青山　實伸

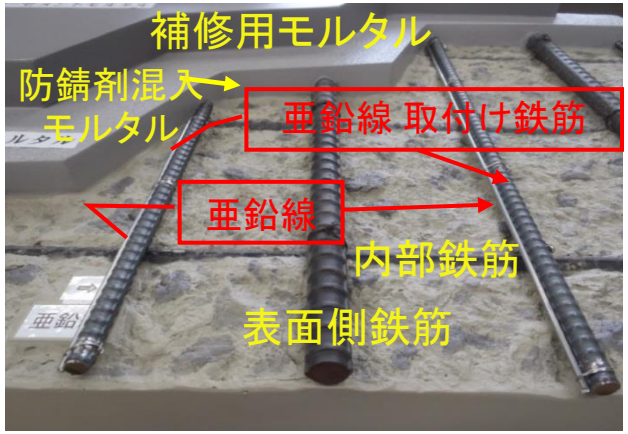
複合防食工法の概要

【既製品を用いた工法】

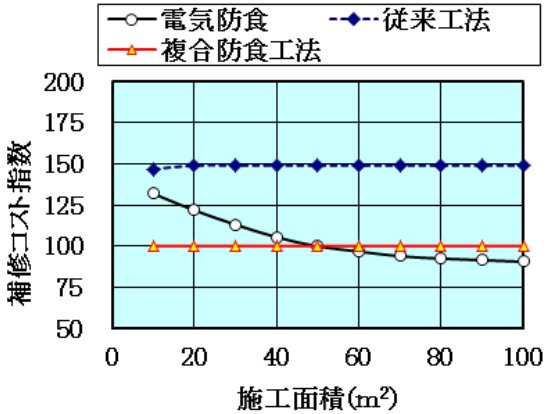


【亜鉛線を用いた工法】





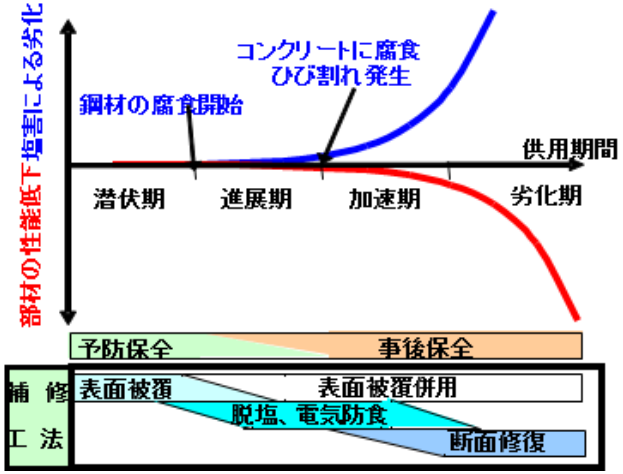
【コスト比較】

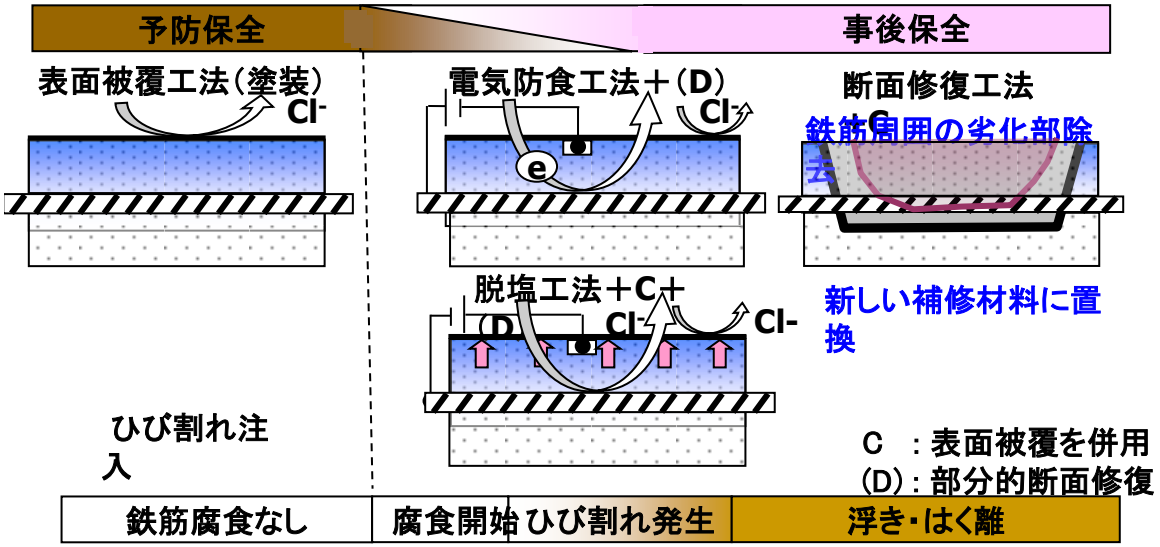


【断面修復厚】 表面側鉄筋背面までのハツリとし，断面修復厚を小さくする

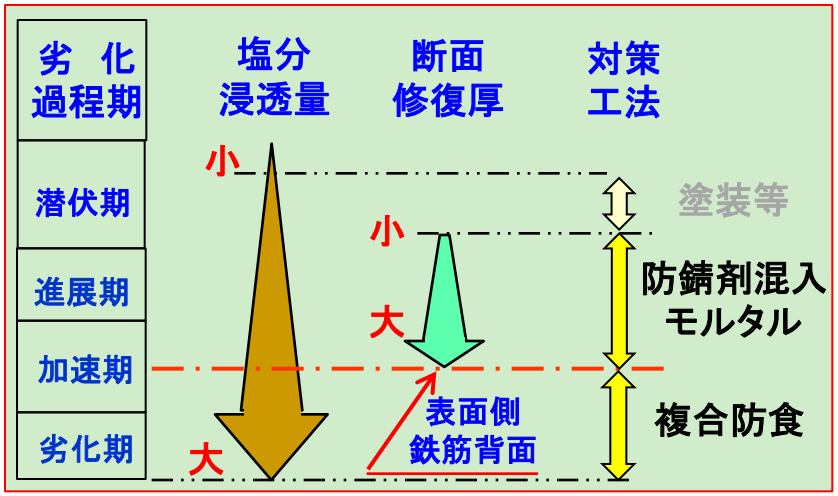
【内部鉄筋の防食】
【補修直後～】 犠牲陽極材で防食する
【長期的】 犠牲陽極材消失後は，防錆剤混入モルタルから浸透した防錆剤で防食する

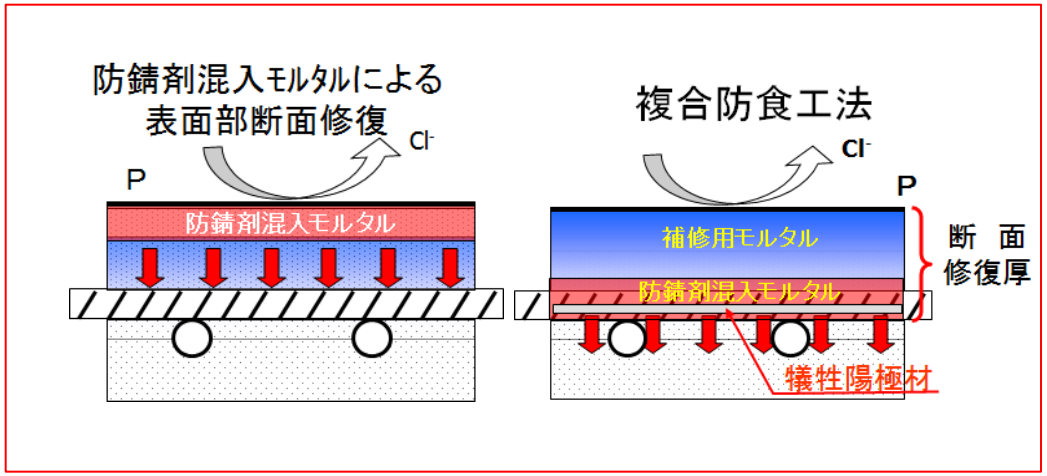
劣化過程期と塩害対策工法





【高濃度の防錆剤混入モルタルを活用した塩害対策工法】

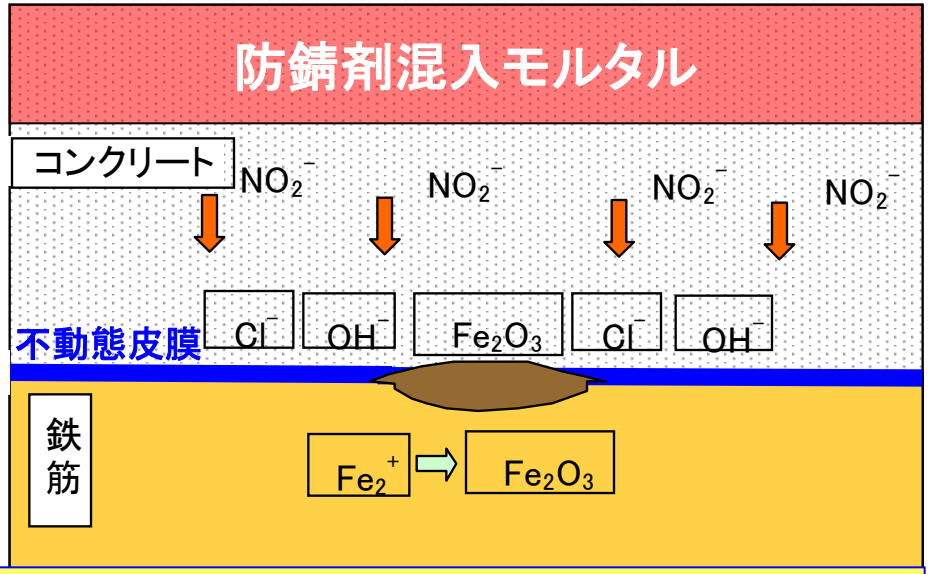




防錆剤による鉄筋防食

鉄筋防錆剤

【防錆成分】亜硝酸イオン(NO_2^-)



【不動態皮膜の修復】

亜硝酸イオンは鉄イオンと反応して不動態皮膜を修復する

【防錆効果の発現】

鉄筋位置の塩化物イオン(Cl^-)濃度と同程度の防錆成分(NO_2^-)濃度が浸透すると防錆効果が発現【モル比(NO_2^-/Cl^-) 0.8程度】する

【防錆剤】:補修用モルタルへの混入性や施工性より　亜硝酸リチウム($LiNO_2$)を用いる

【適用範囲】 内部鉄筋の防錆効果の発現が3年未満の場合

塩分浸透量が多く、防錆効果発現に3年以上⇒複合防食工法を適用

複合防食工法（防錆剤と犠牲陽極材の組合せ）

高濃度の防錆剤（$LiNO_2$）を混した入モルタル

防錆剤混入モルタル

犠牲陽極材（亜鉛）

犠牲陽極材の事例

NO_2^-による不動態皮膜の安定化

⇩ モル比（NO_2^-/Cl^-）＞0.8

浸透するのに時間を要する

⇩

長期的に有効

亜鉛と鉄筋の電位差

⇩

亜鉛が全て腐食すれば、効果なし（10年程度）

⇩

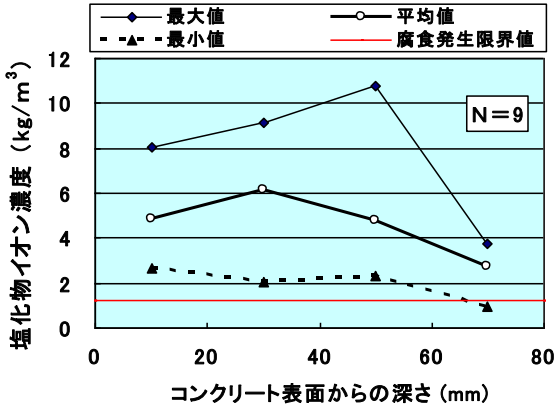
短期間に有効

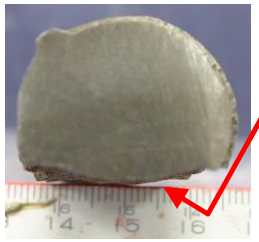
複合防食工法

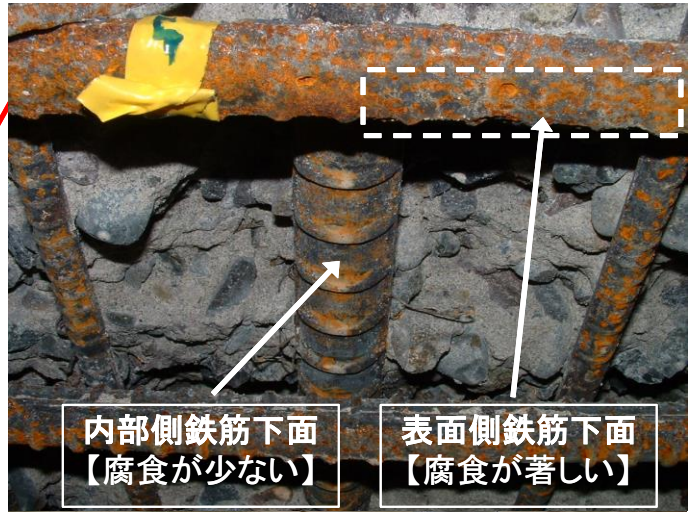
長期にわたり鉄筋防食を維持して補修のLCCを最小にする

複合防食工法の基礎実験結果

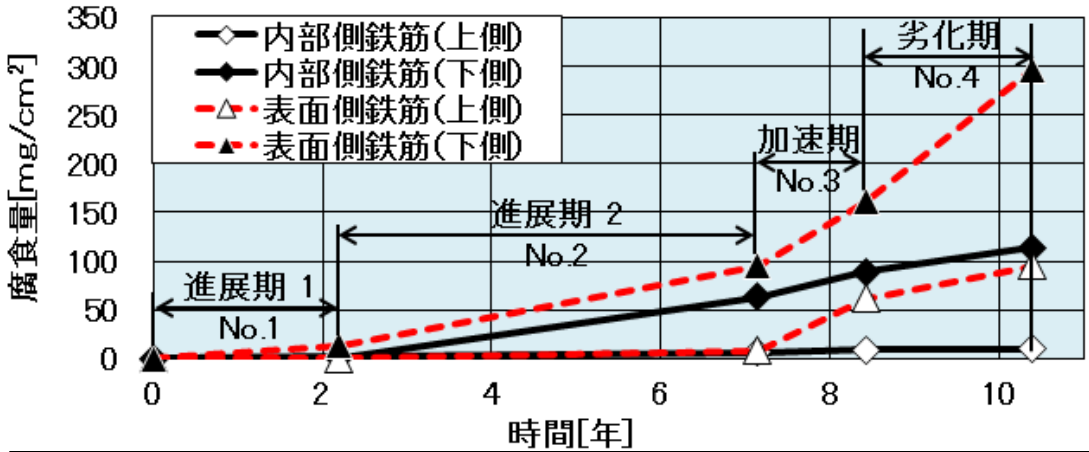
【鉄筋腐食の進行過程】







劣化部は、内部側鉄筋以深に多くの塩分浸透



【実験結果】

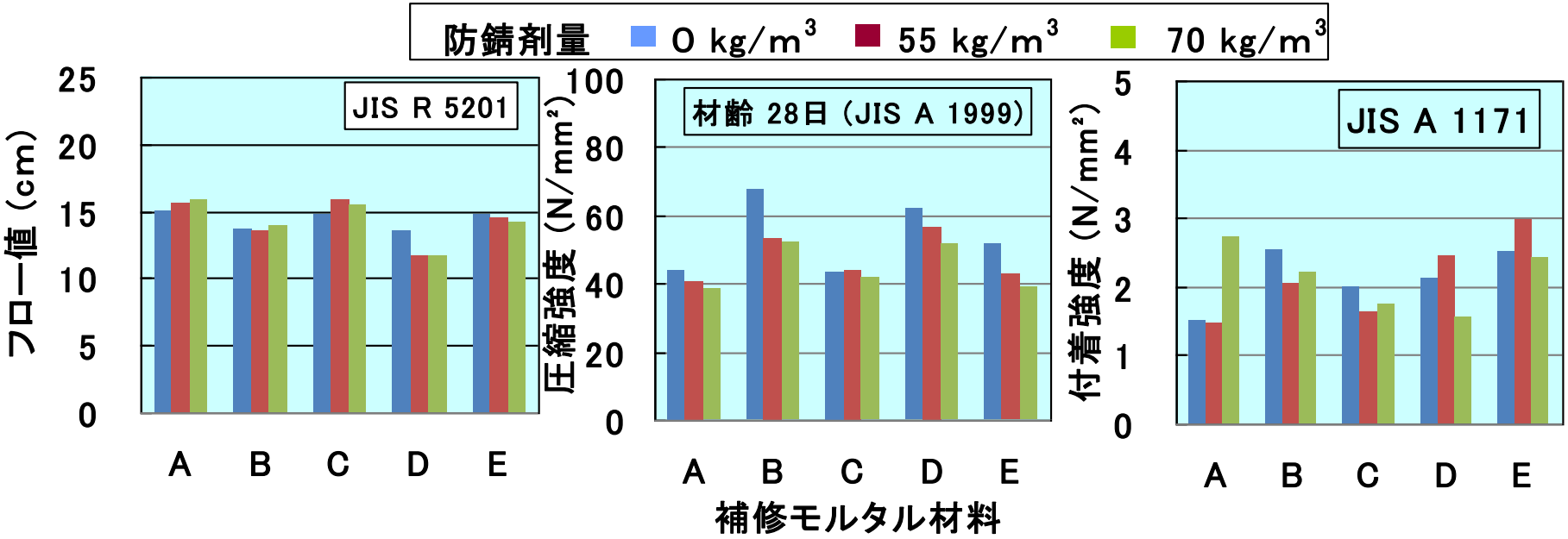
加速期以降は表面側鉄筋下面の腐食進行が激しい（鉄筋下面がアノード，他の鉄筋がカソードになる大きな腐食回路が形成されることが要因）

鉄筋腐食は表面側鉄筋下面が著しく、残りの鉄筋の腐食小

劣化（ひび割れ・浮き）は表面側鉄筋付近に発生している

防錆剤混入モルタルの特徴

【市販の補修用モルタルへの亜硝酸リチウム（$LiNO_2$）55kg/m^{3}および70kg/m^{3}混入した場合のコンシステンシーと強度に及ぼす影響　】

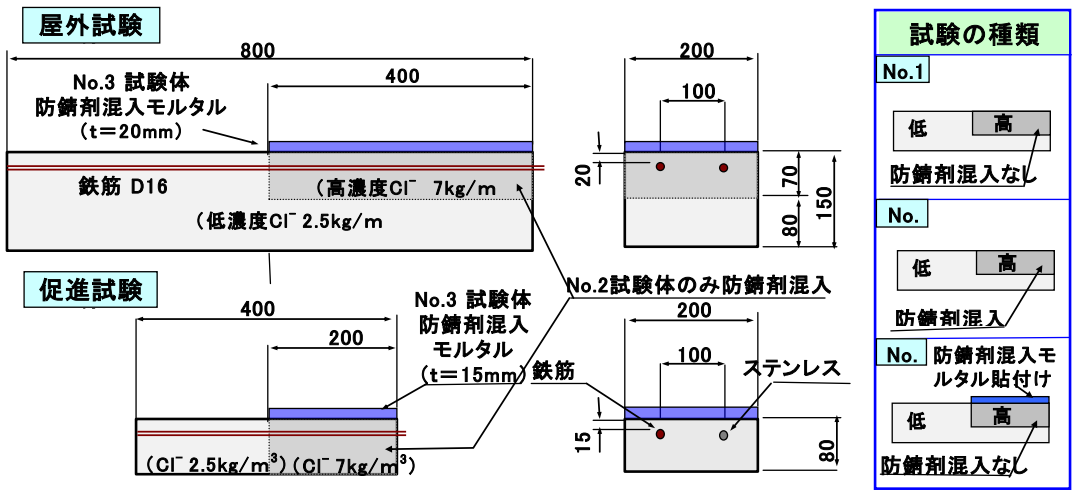


亜硝酸リチウム（$LiNO_2$）は70kg/m^{3}程度まで問題なく混入できる

施工性や圧縮強度，付着強度に及ぼす影響は小さい

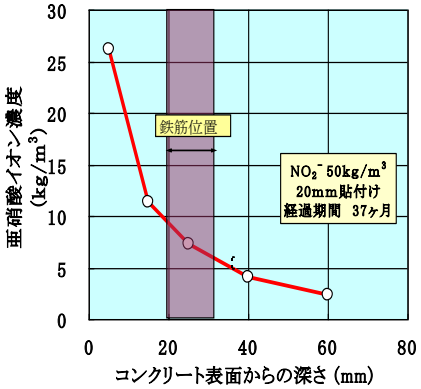
防錆剤混入モルタルの防食効果

【試験体の概要】

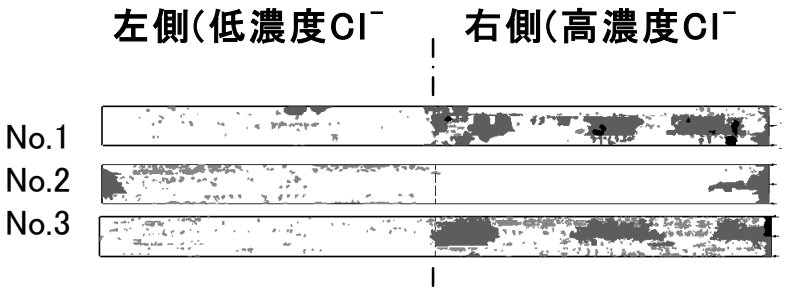


促進曝露条件：乾湿・繰り返し
（40℃4日間乾燥－3日間湿潤）

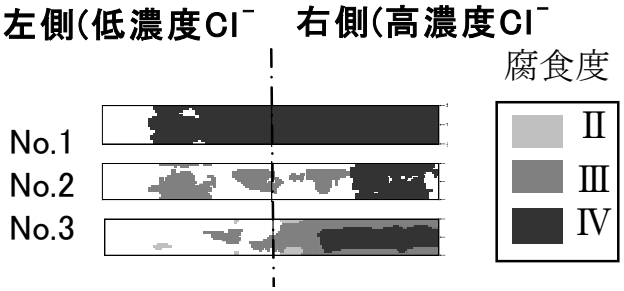
【No.3 試験体の防錆成分の浸透状況】



【試験後に解体した鉄筋の腐食状況】

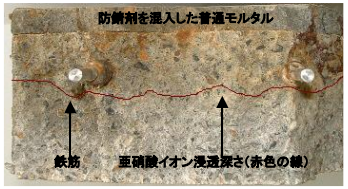


【屋外曝露37ヶ月後】



【促進試験 10ヶ月後】

【屋外曝露後】



【促進試験 後】

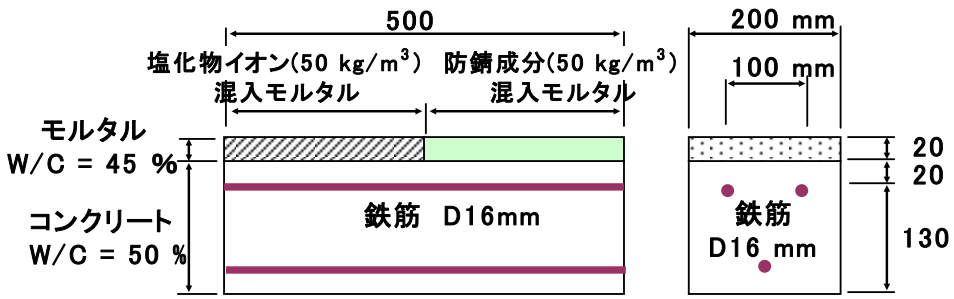
No1 試験体（無混入）：腐食が激しい

No.2 試験体（0.8モル相当の防錆剤混入）：防食効果が発現

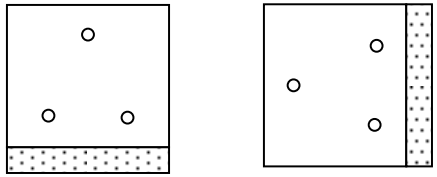
No.3 試験体（防錆成分の浸透）：防食効果の発現が始っている

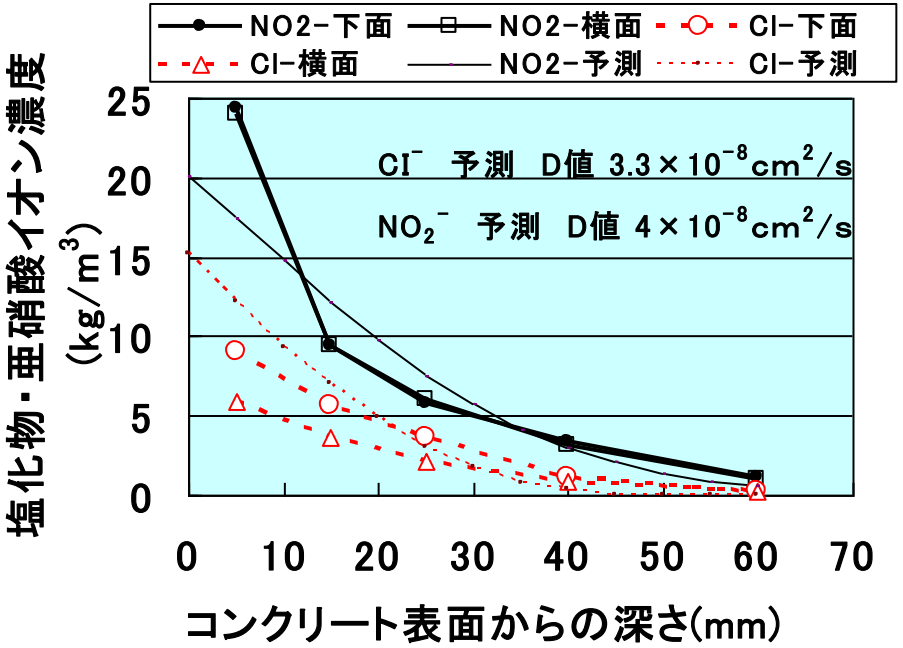
防錆成分の浸透性の定量的評価

【モルタル中の塩化物＆防錆成分の浸透性比較(37ヶ月後)】



貼付面：下面と側面に配置





防錆成分は，塩化物イオンと同様に濃度差によって浸透

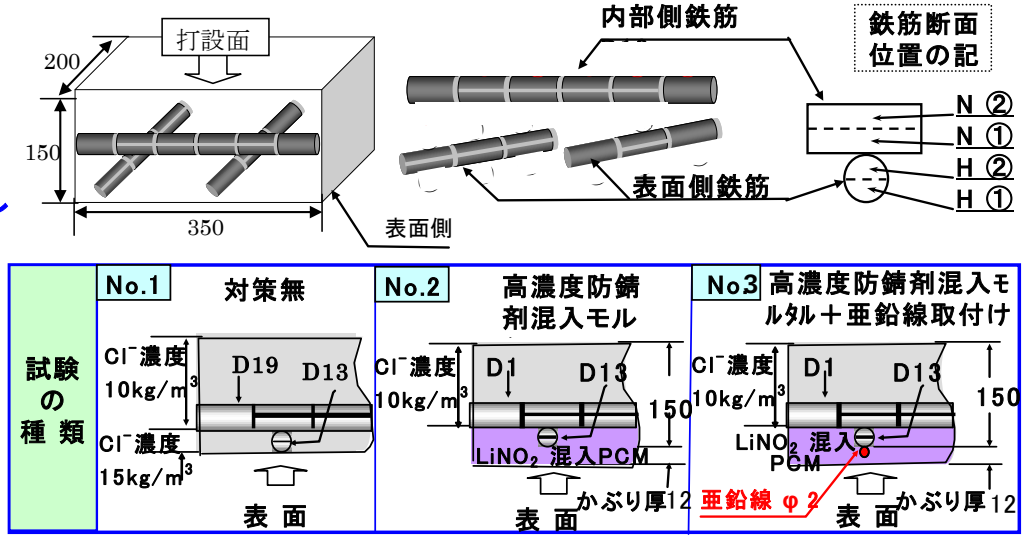
貼付面の方向による差はない

防錆成分は塩化物イオンより早く浸透する(D値が大)

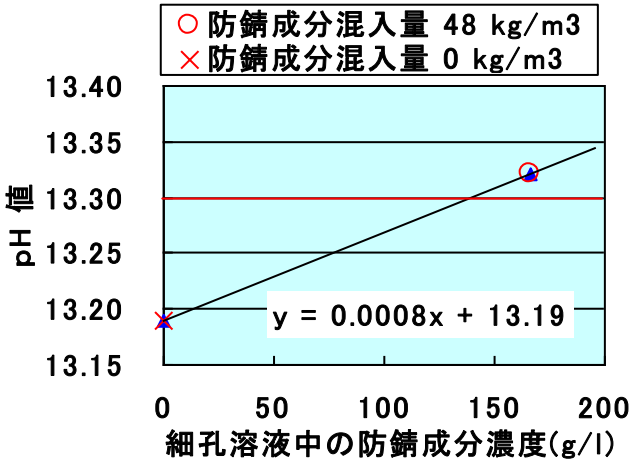
亜鉛線の犠牲陽極材としての防食効果

【試験体】

乾湿・繰返し試験



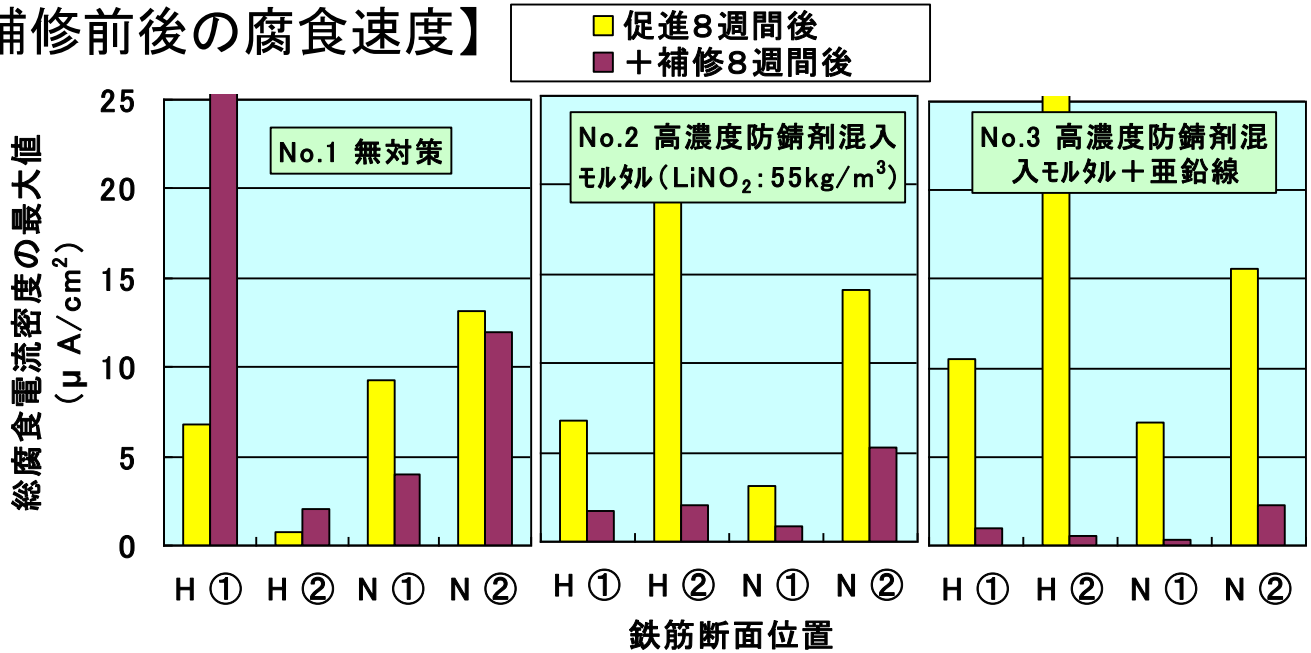
防錆剤混入モルタル中のpH



>PH13.3

>防錆剤混入量40kg/m³

【補修前後の腐食速度】

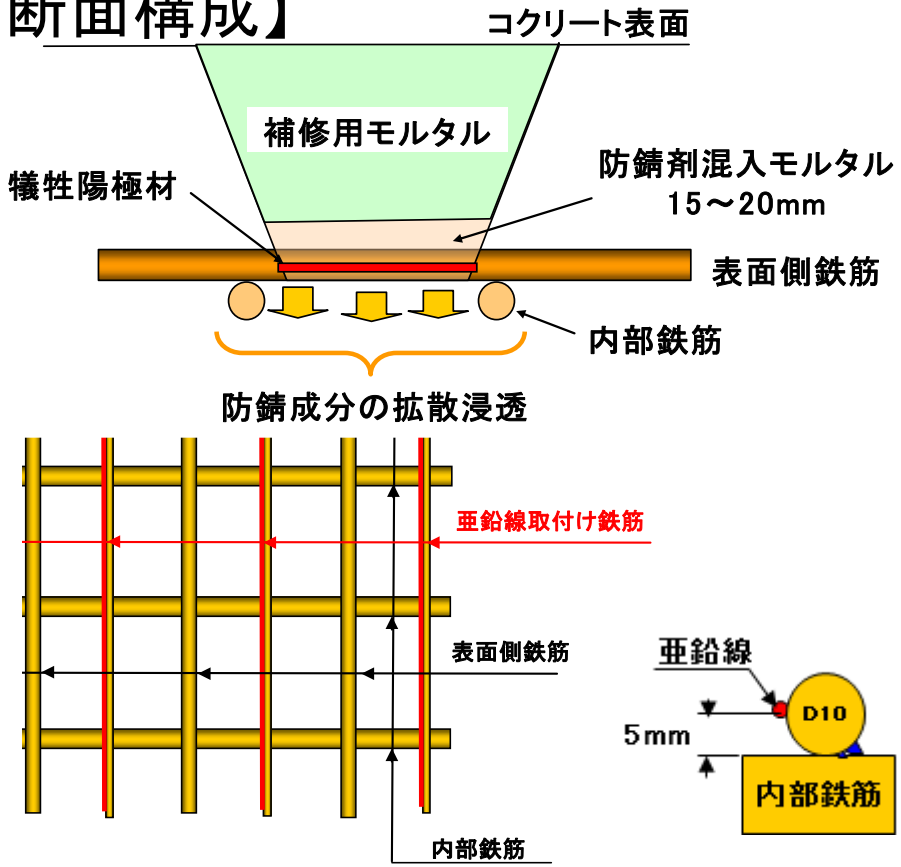


亜鉛線が犠牲陽極として機能する

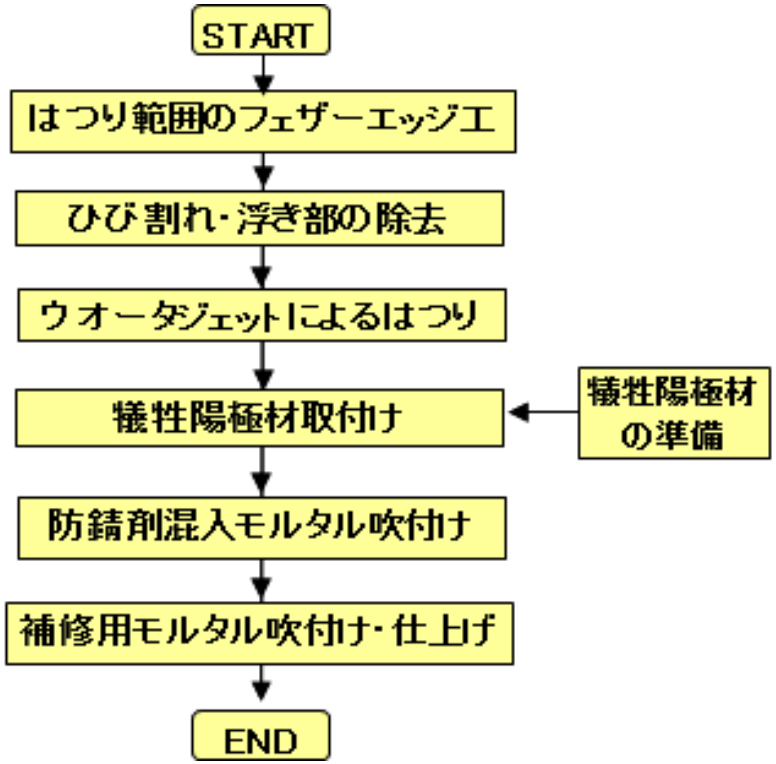
複合防食工法の設計・施工

【亜鉛線を用いた工法】

【断面構成】



【施工の流れ】



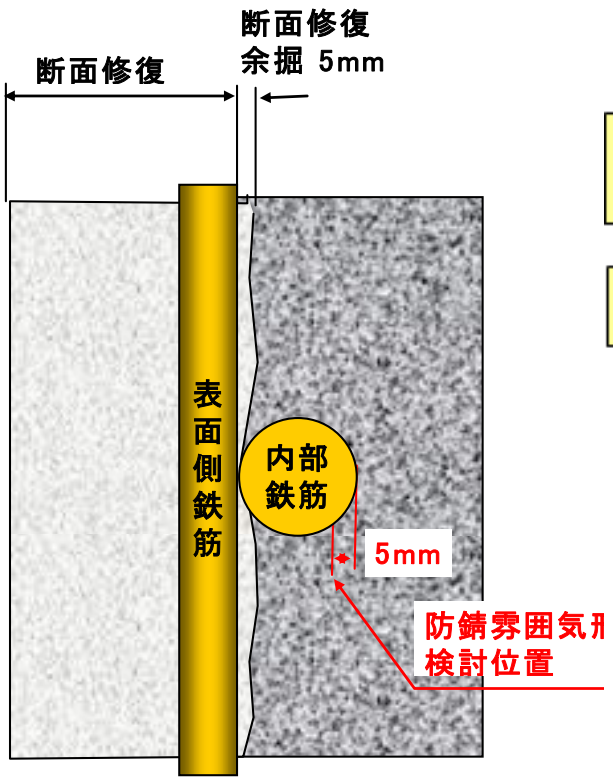
【断面修復深さ】:表面側鉄筋背面まで

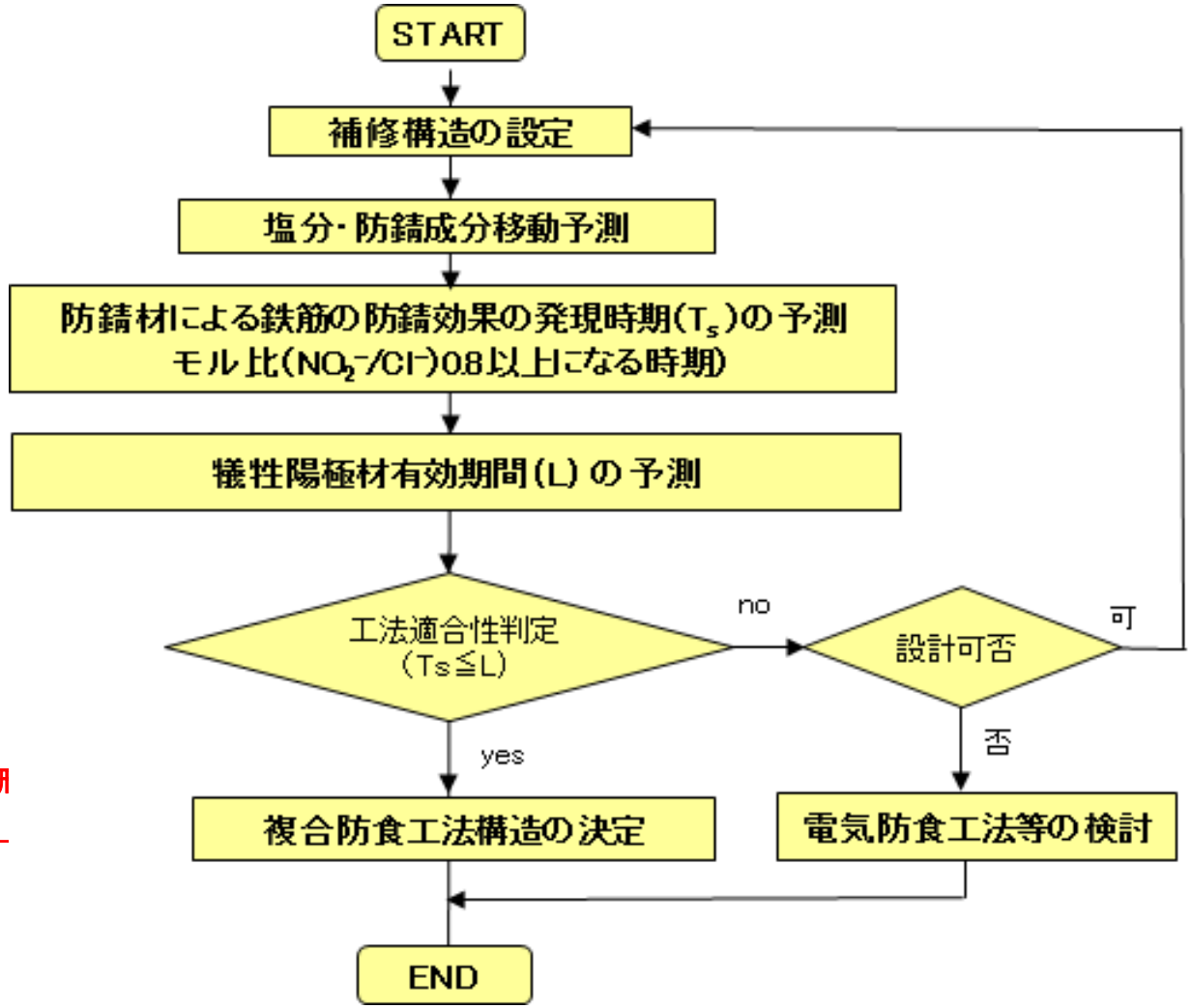
【断面修復構造】:防錆剤混入モルタル（15～20mm）＆補修用モルタル

【亜鉛線取付け】:鉄筋を表面鉄筋間に配置し，内部鉄筋とスポット溶接で接合

設計の流れ

【検討位置】

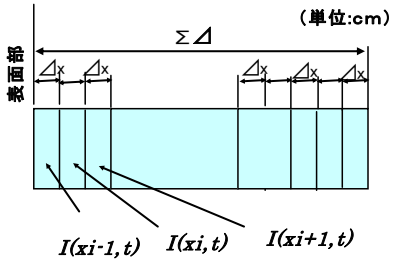




【設計】 犠牲陽極材の有効期間内に，防錆剤のよる鉄筋の防錆効果が発現する構造とする

設計の要点

【塩分・防錆成分移動予測】フイックの拡散方程式（差分法）を用いる



$$I(xi,t+\Delta t) = D \times \frac{A}{(\Delta x)^2} \times \Delta t + I(xi,t)$$

ここに，$A = \{I(xi-1,t) - 2 \times I(xi,t) + I(xi+1,t)\}$

ただし　I　：各種イオン濃度(kg/m^3)

D　見かけの拡散係数（cm^2/s）

【見掛けの拡散係数】
塩分≒防錆成分と考える（安全側）

【防錆効果発現時期】
モル比（NO_2^-/Cl^-）0.8となる時期（Ts）

【犠牲陽極材の有効期間】条件1と条件2から決定

【条件1】

亜鉛の腐食減量から推定される有効期間

有効期間（L）=亜鉛の質量/（2×防食対象鉄筋の表面積×ΔW/2）

補修直後の亜鉛の年間腐食減量（ΔW）
＝（腐食電流密度×腐食時間×亜鉛の分子量）/（2×ファラデー定数）

補修直後の腐食電流密度　0.3μA/cm^2

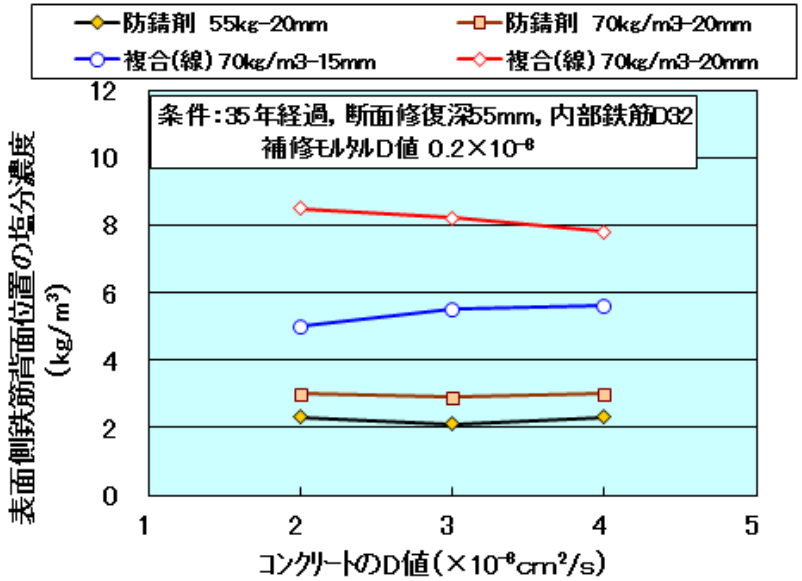
【条件2】

亜鉛の腐食環境の継続期間

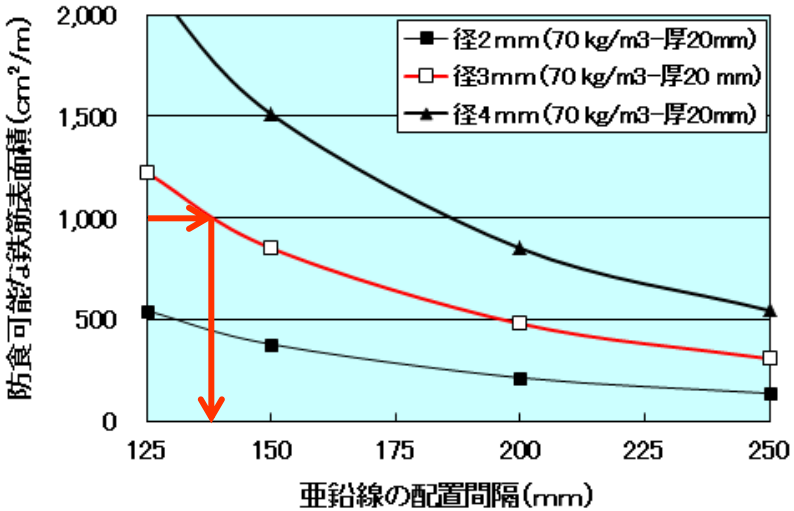
防錆成分濃度　＜40 Kg/m^3　（pH＜13.3）　になる期間

亜鉛線による複合防食工法の適用性

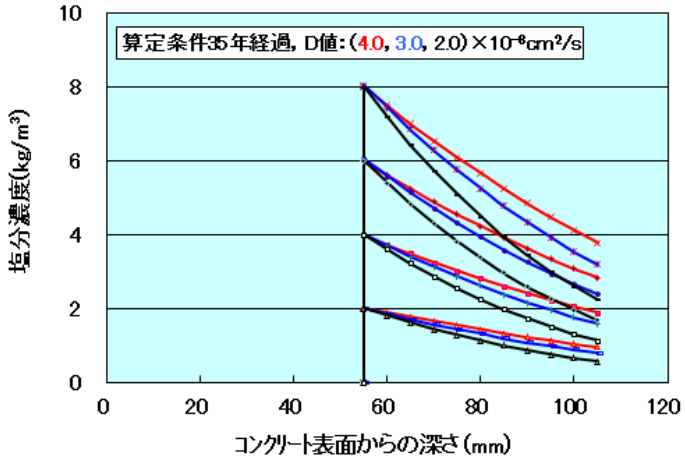
【防食適用可能な浸透塩分量
（内部鉄筋D32mmの例）】



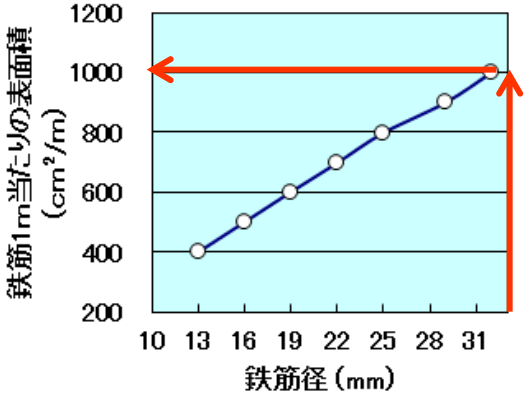
【亜鉛線の防食可能鉄筋表面積】
（表面側鉄筋背面Cl^-濃度8kg/m^3）



【参考】鉄筋背面の塩分濃度分布



【参考】鉄筋の表面積(1m当たり)



施　工

終わり

- ご静聴ありがとうございました

【関連発表論文】
1）青山 實伸，鳥居 和之：防錆混入ポリマーセメントモルタルによる塩害劣化コンクリート中の鉄筋防食効果，材料，Vol.52，No.9, pp.1075-1081, 2003.
2) 青山 實伸，平野 誠志，宮里 心一：塩害損傷を受けたコンクリート構造物の効率的補修法の考案，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, pp.1179-1184, 2008.
3) 平野 誠志,石川 貴之,宮里 心一,青山 實伸：凍結防止剤による塩害進展機構の解明とその現象に適した効果的補修工法の提案，土木学会論文集E2，Vol.71,No.3,pp.220-234,2015.

2017.3.14

塩害劣化した鉄筋コンクリートの力学性能と対策時期の違いによる補修効果

金沢工業大学　花岡　大伸

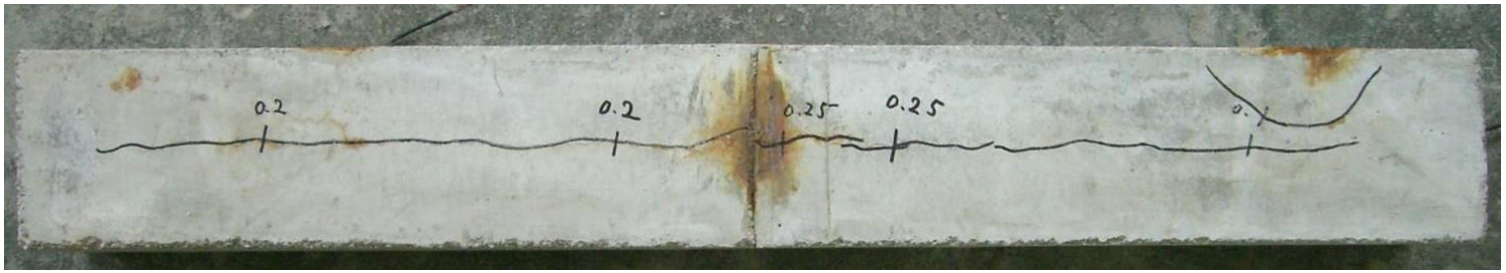
塩害劣化した鉄筋コンクリート部材

維持管理（対策方針の選択・意思決定）

⇒・部材の劣化状態（耐久性，力学性能など）

塩害劣化した鉄筋コンクリート部材

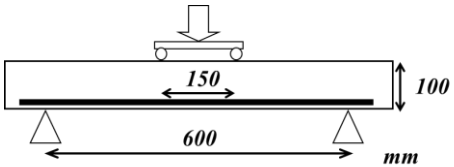
局部腐食

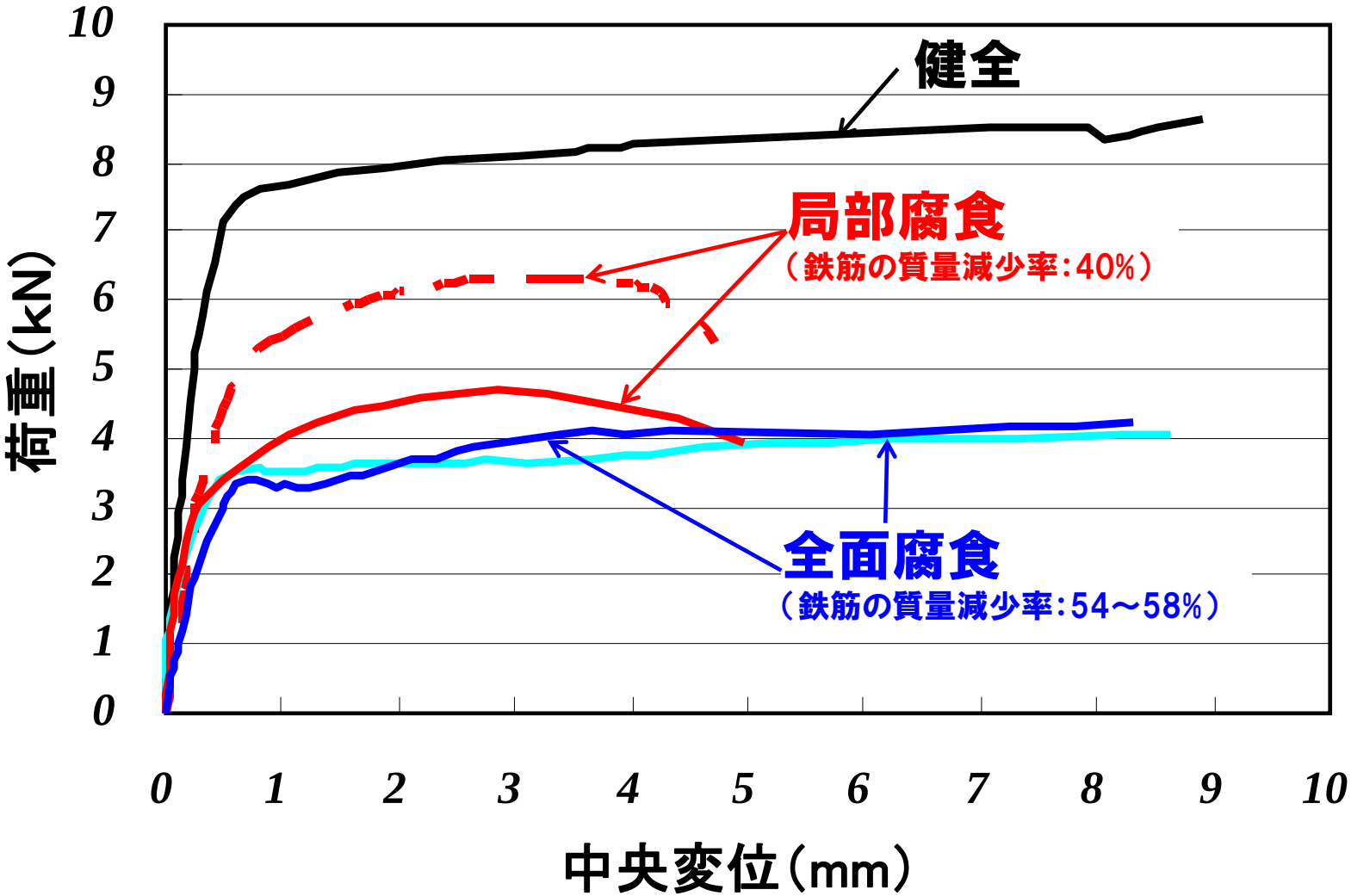


全面腐食

鉄筋の腐食形態がはりの曲げ性状に及ぼす影響

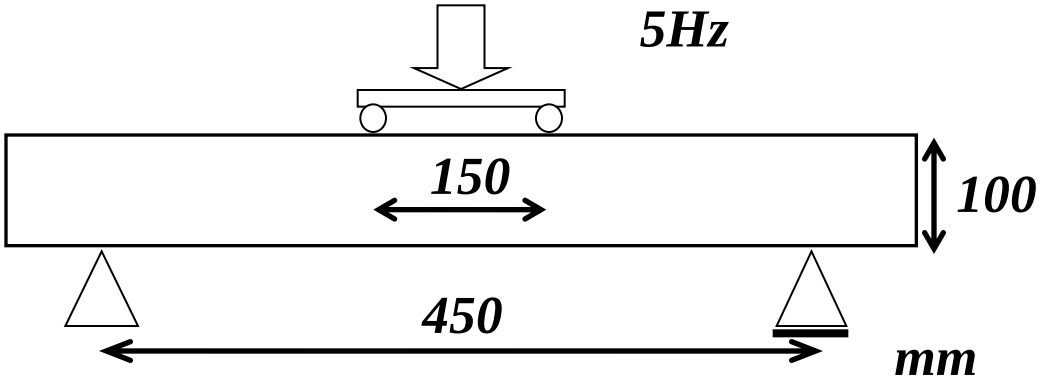
はりの曲げ試験の結果（例）

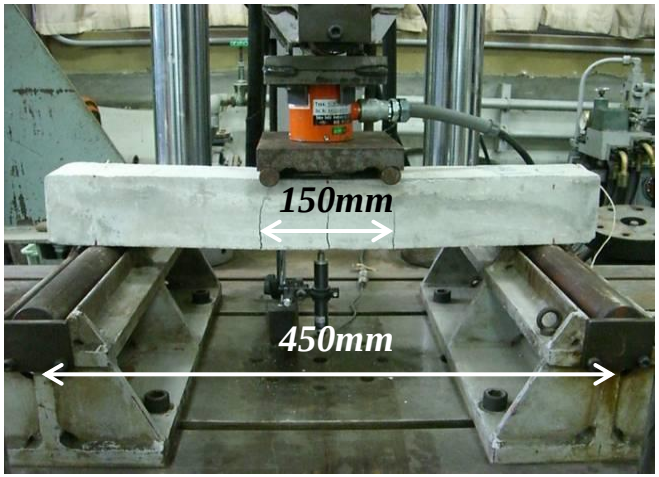


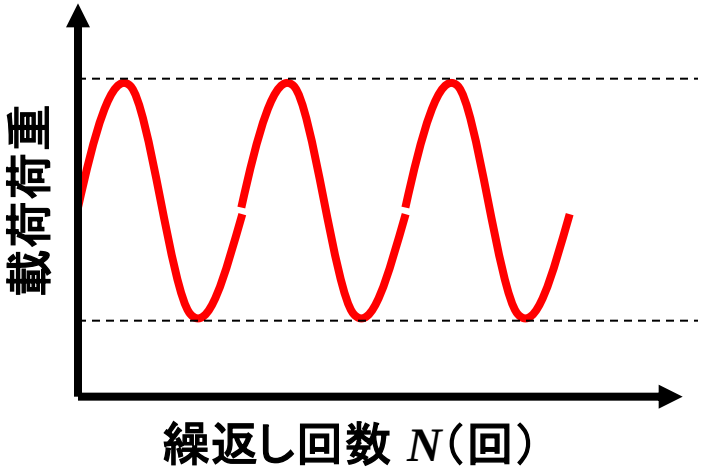


はりの疲労試験

載荷方法　　繰返し荷重 5Hz







降伏荷重の約0.5~0.75倍（$0.5\sim0.75P_y$）

降伏荷重の約0.1倍（$0.1P_y$）　一定

鉄筋の作用応力 σ_{min}= 49N/mm^2

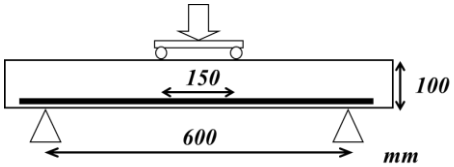
鉄筋の腐食減量率（質量減少率）を0%~24%.

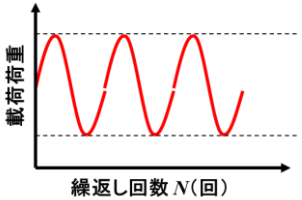
局部腐食12体+全面腐食12体　合計24体実施

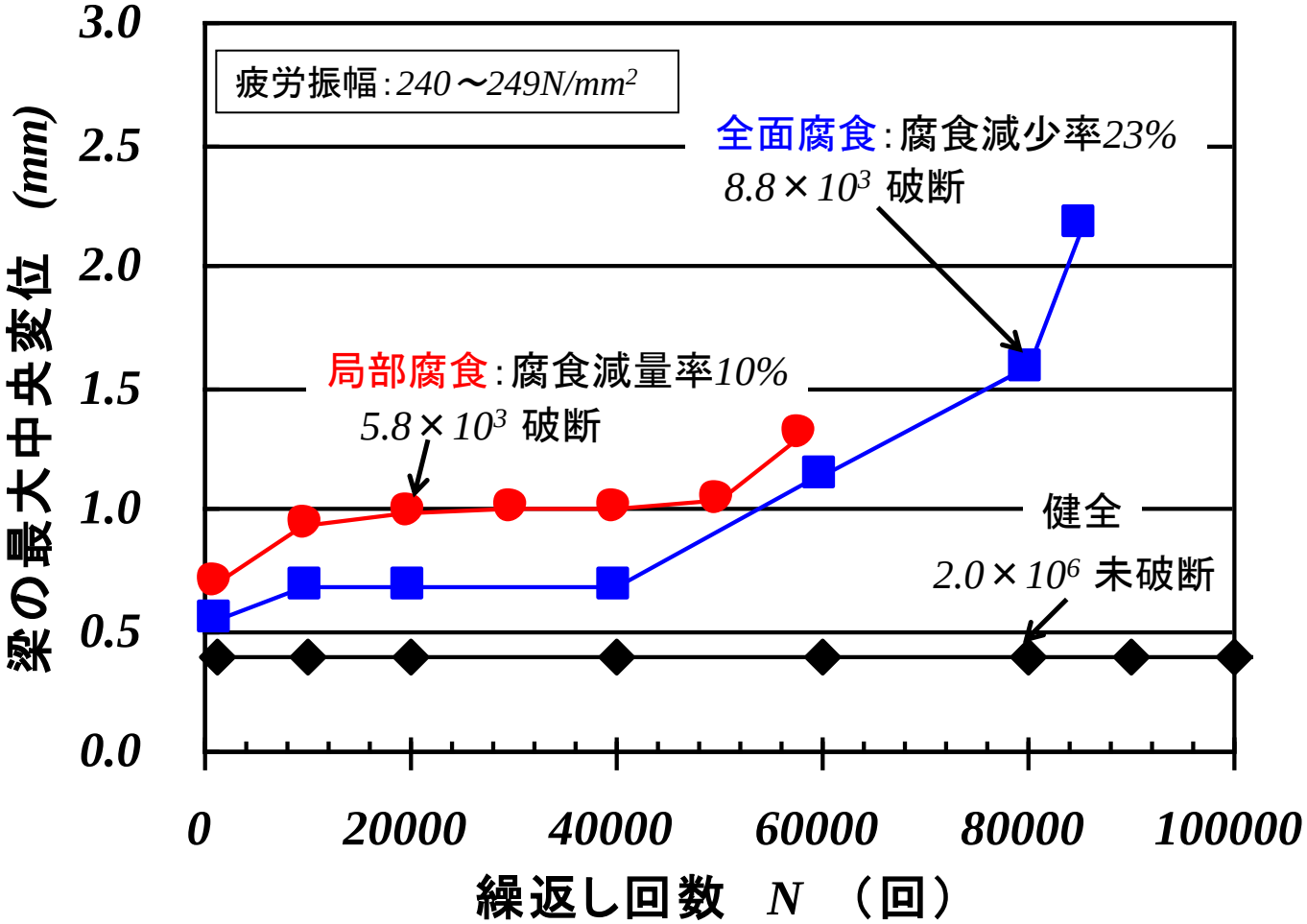
鉄筋の降伏点 f_y : 330N/mm^2

鉄筋腐食の形態がはりの疲労性状に及ぼす影響

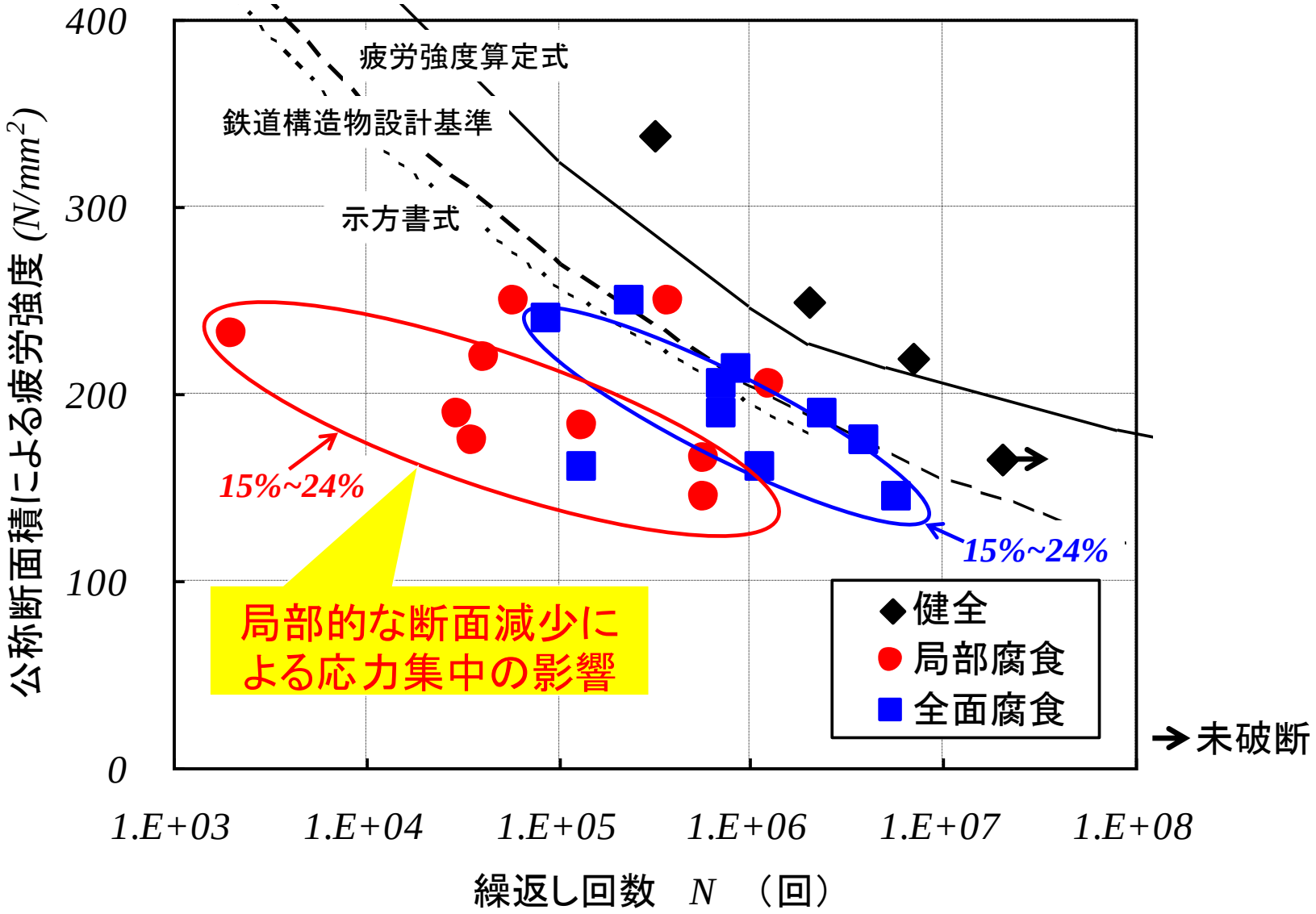
はりの疲労試験の結果（例）





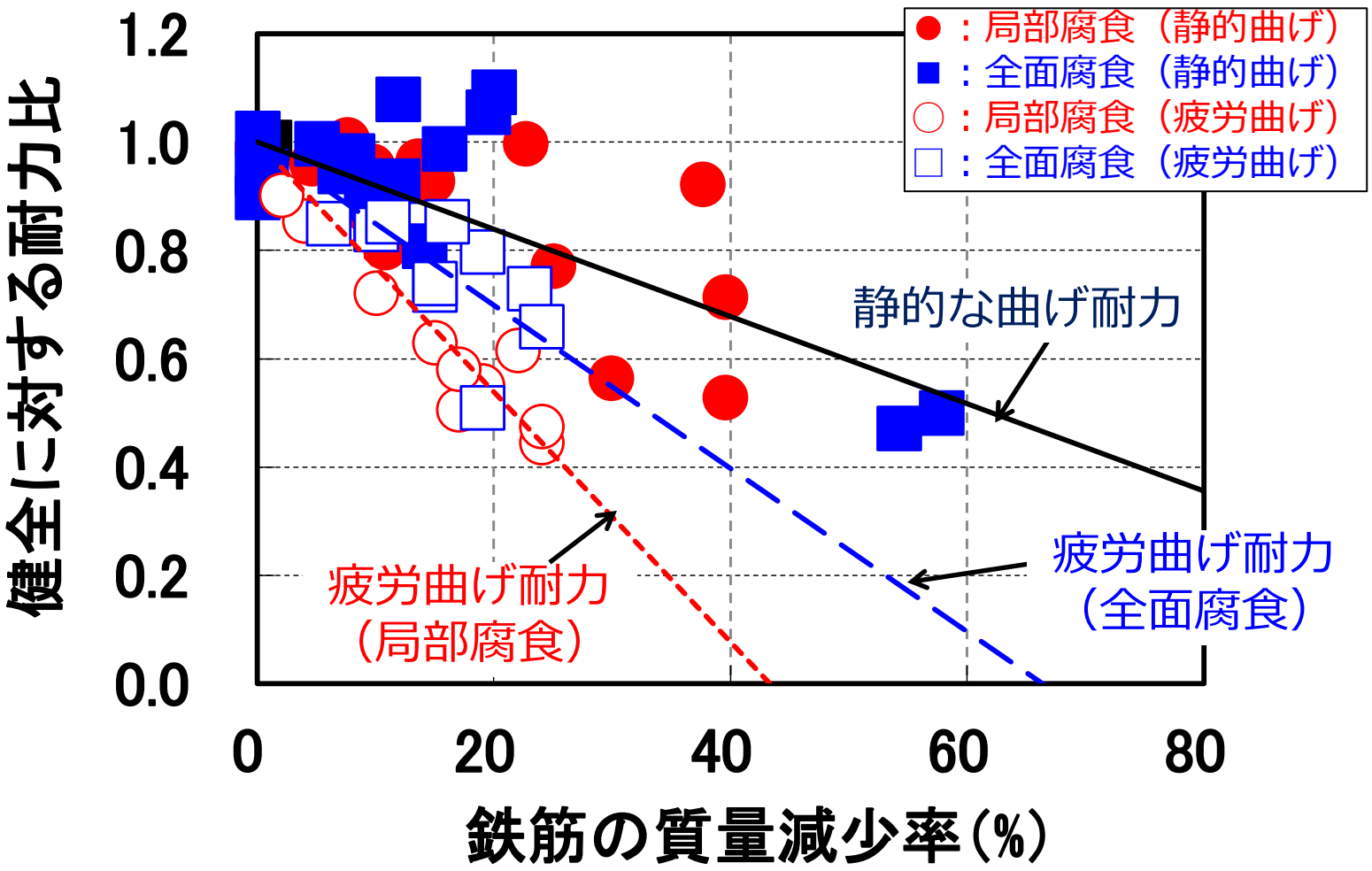


鉄筋の疲労強度（S-N関係）



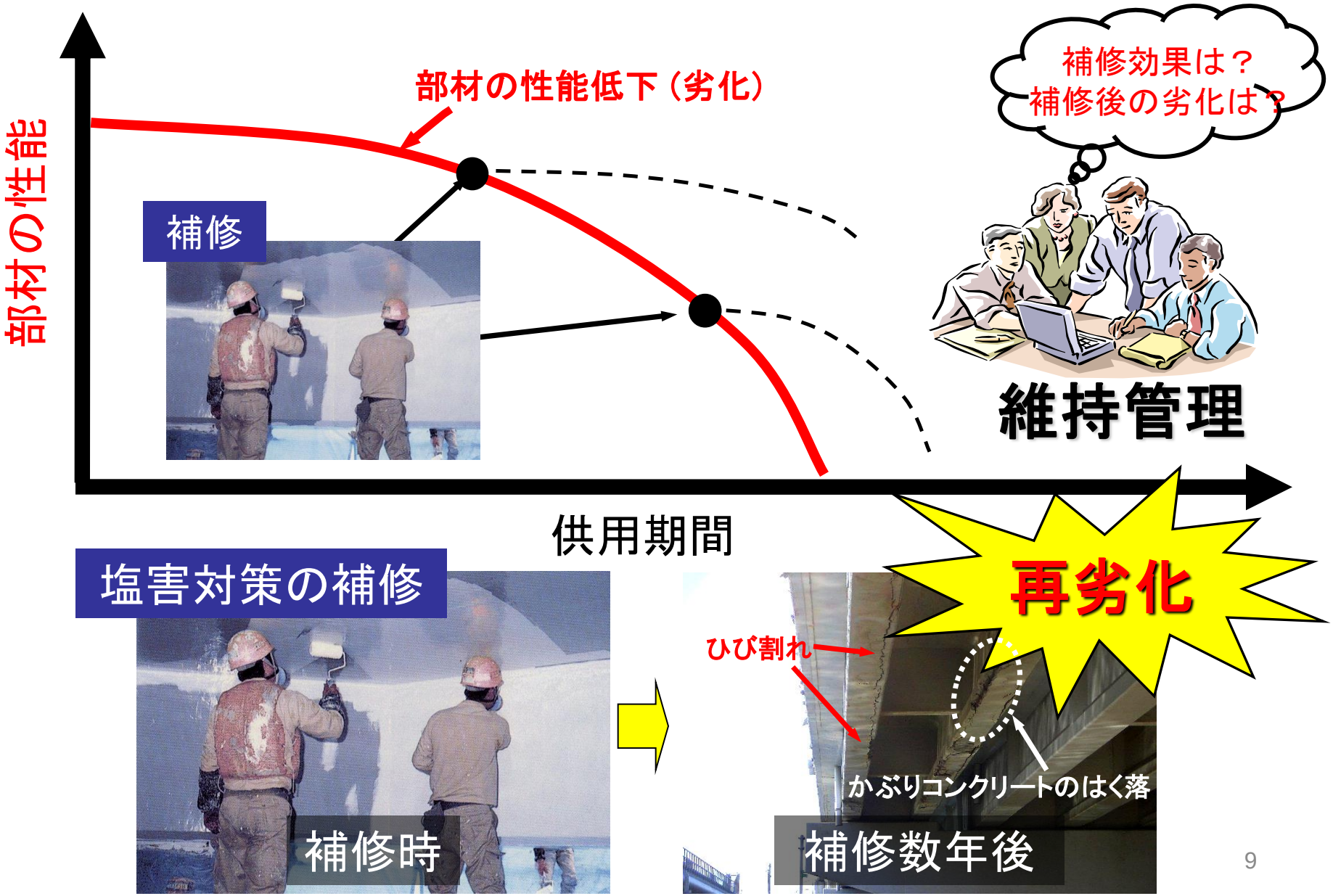
疲労強度=（上限応力−下限応力（$49N/mm^2$））

鉄筋の質量減少率と耐力比の関係



静的曲げ耐力に比べて，疲労曲げ耐力は耐力の低下率が大きい

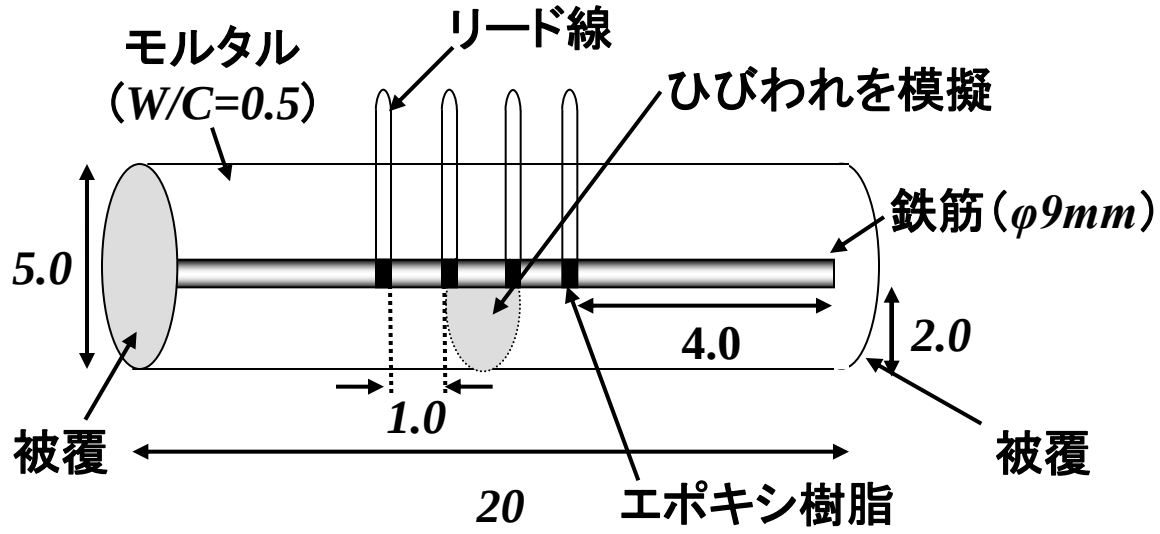
構造物の維持管理（補修効果）



補修効果の比較（供試験体）

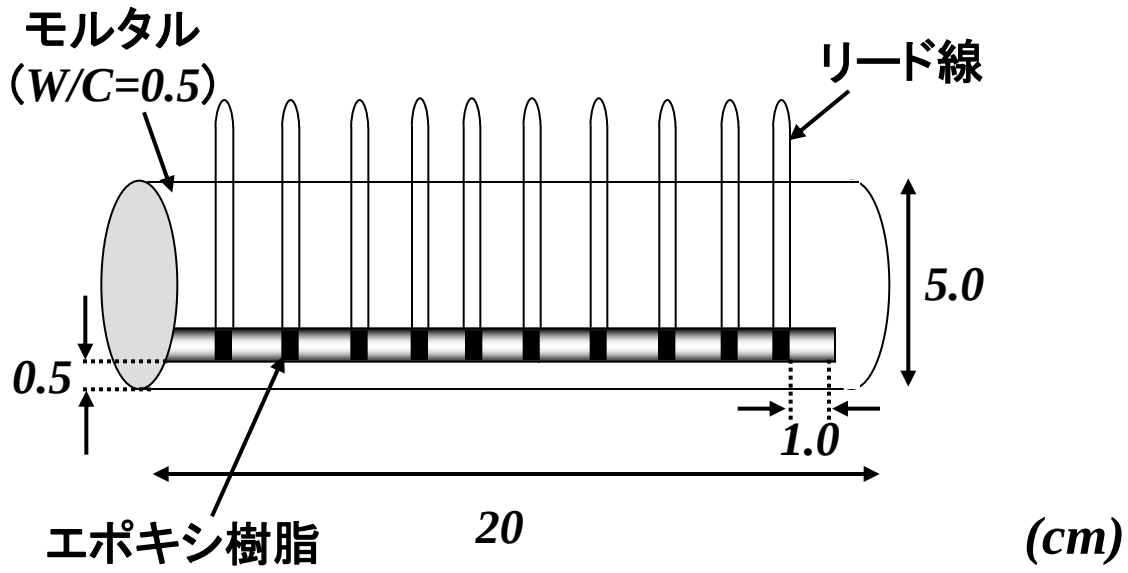
【ひび割れ供試体】

局部腐食

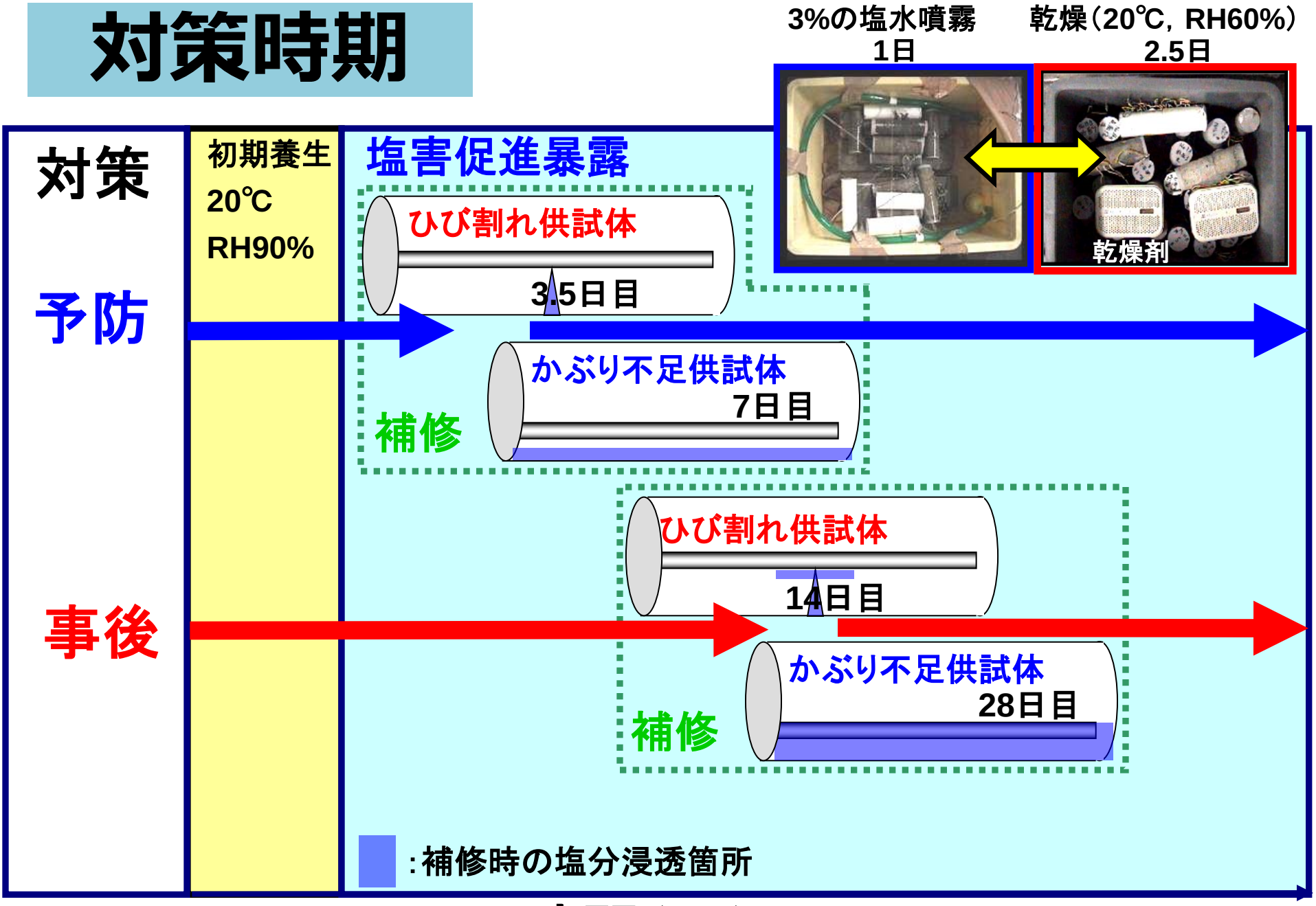


【かぶり不足試体】

全面腐食

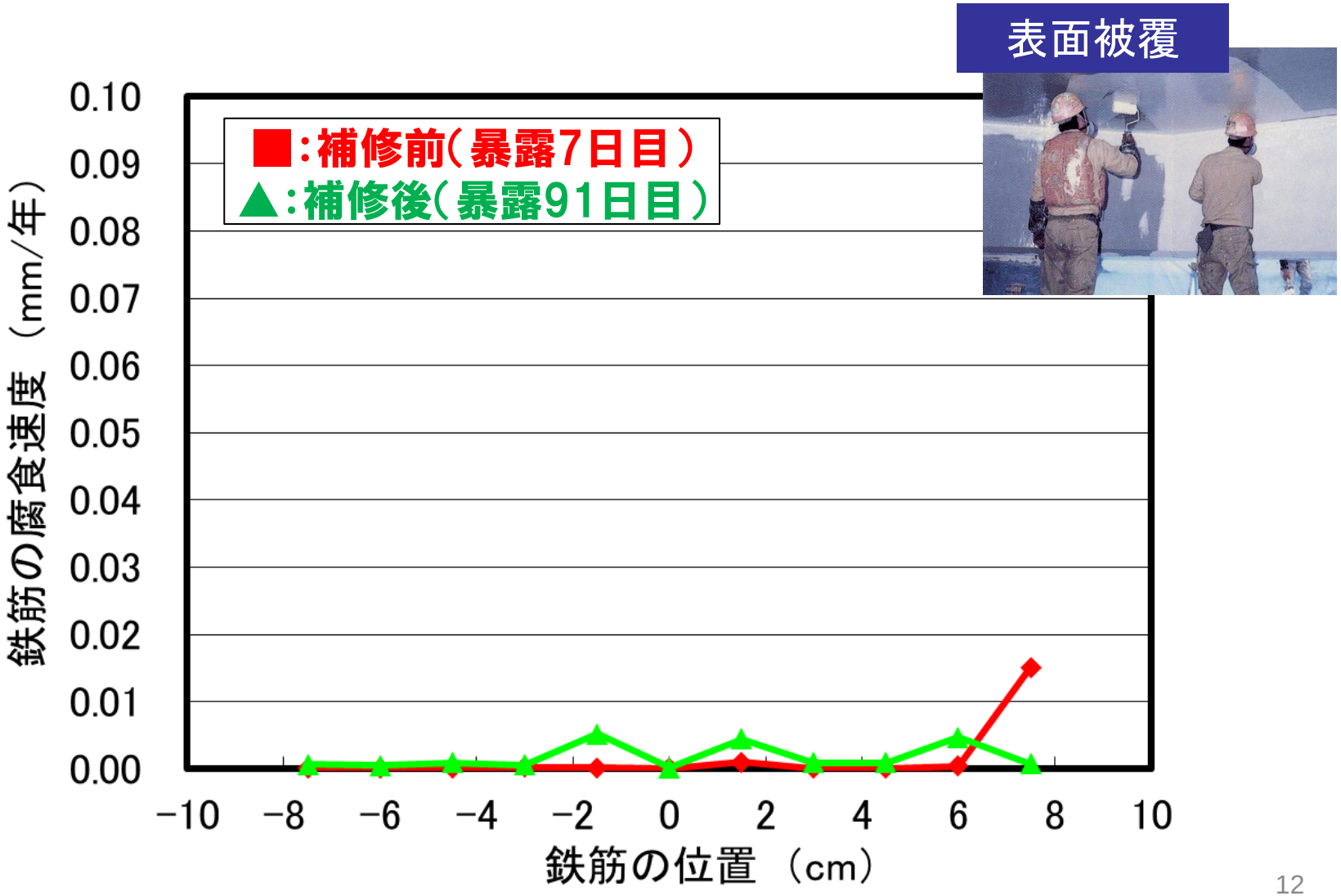


対策時期


3%の塩水噴霧
1日
乾燥（20℃，RH60%）
2.5日
乾燥剤
対策
初期養生
20℃
RH90%
塩害促進暴露
予防
ひび割れ供試体
3.5日目
かぶり不足供試体
7日目
補修
事後
ひび割れ供試体
14日目
かぶり不足供試体
28日目
補修
:補修時の塩分浸透箇所
0
28
時間（日）

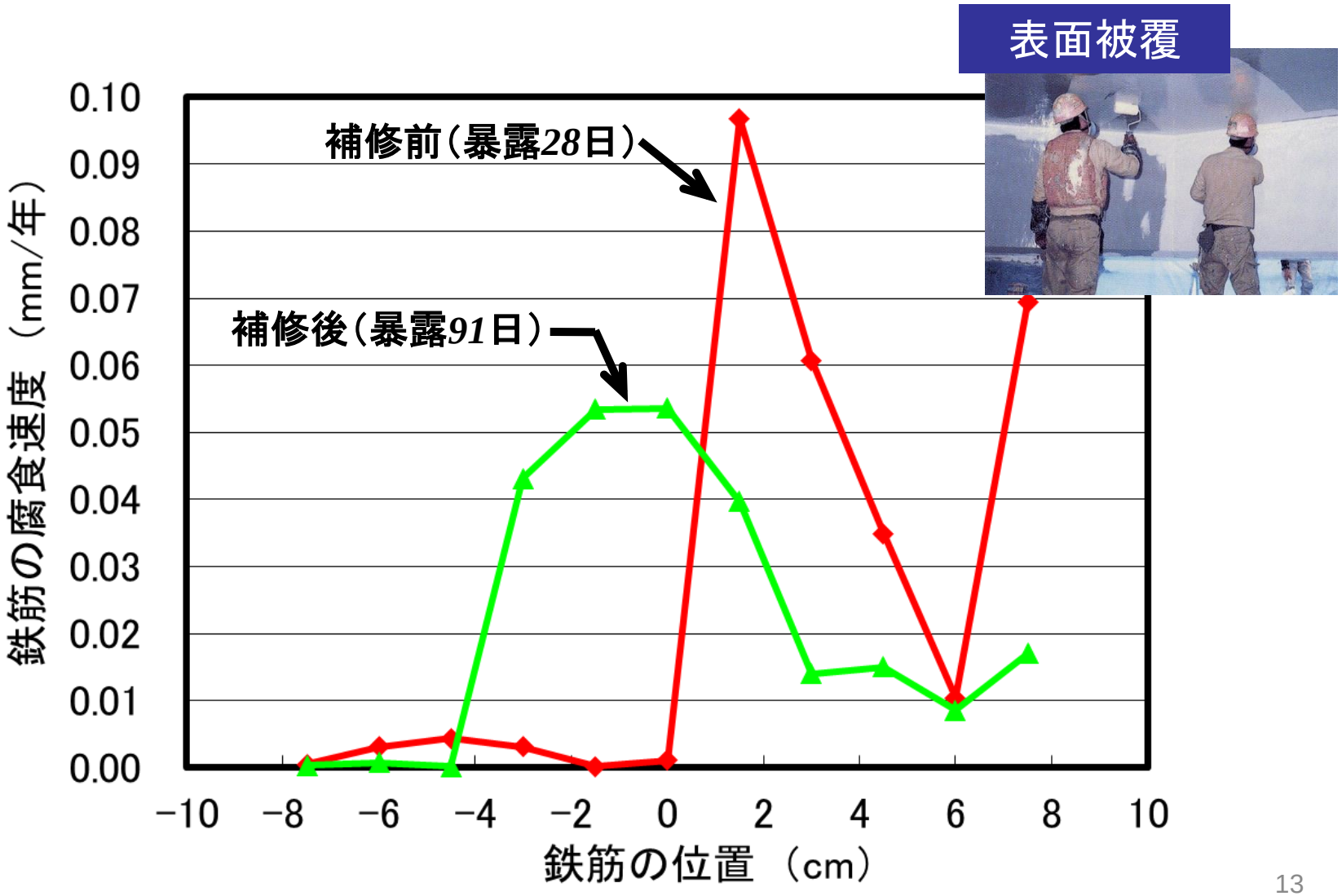
予防保全による補修効果の例

かぶり不足：予防保全として表面被覆を適用



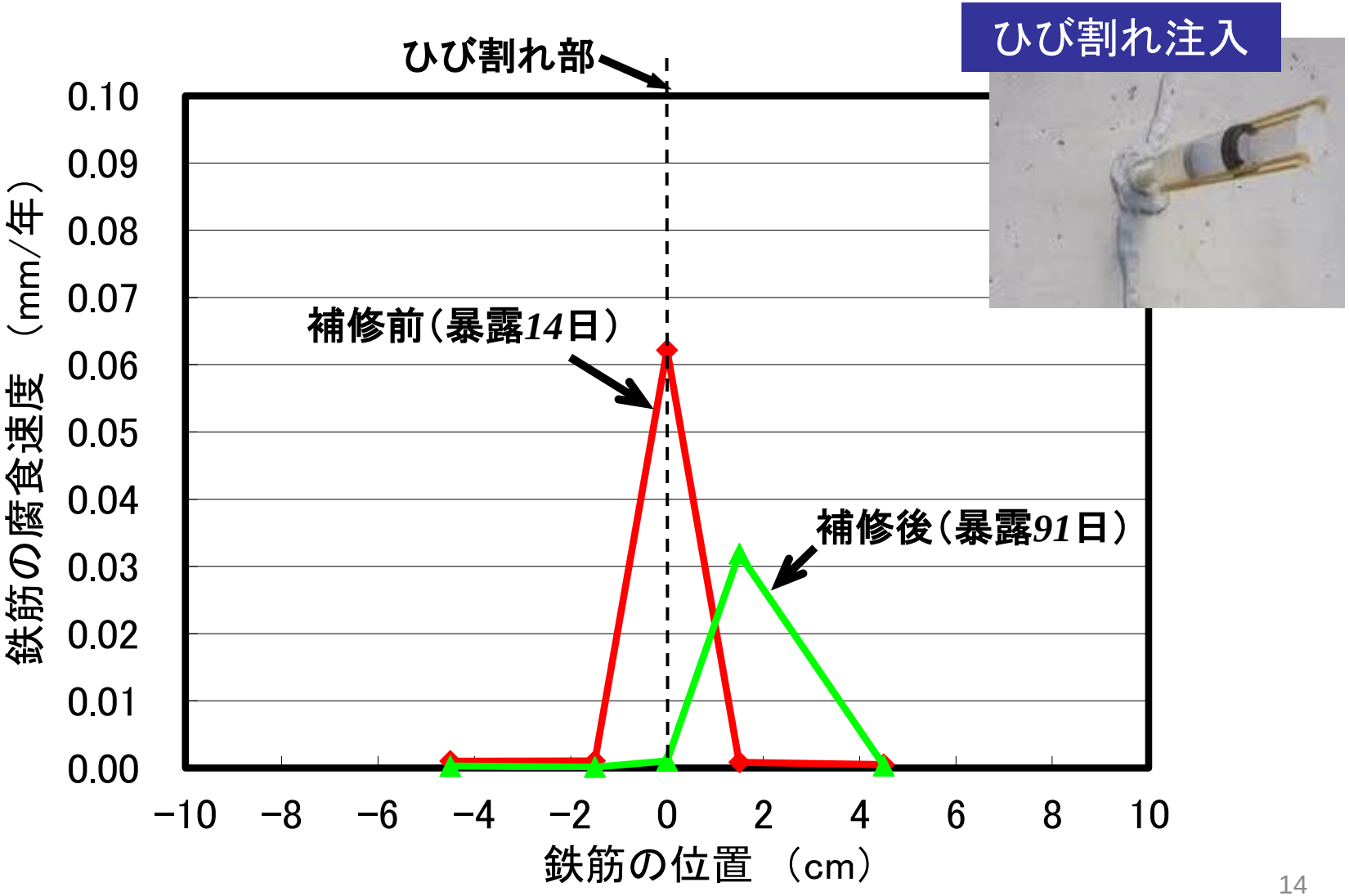
事後保全による補修効果の例

かぶり不足：事後保全として表面被覆を適用



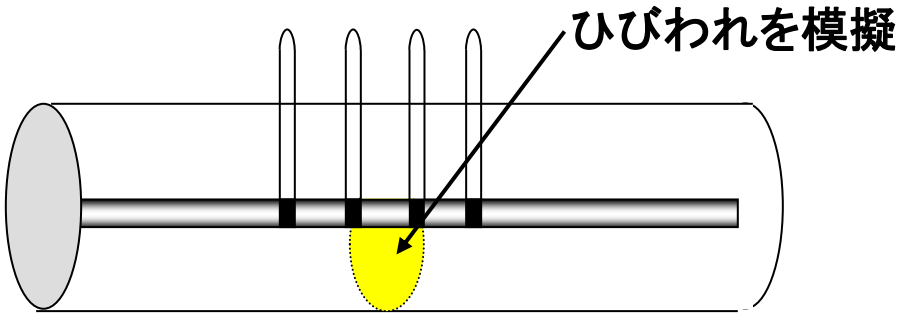
事後保全による補修効果の例

ひび割れ部：事後保全としてひび割れ注入を適用

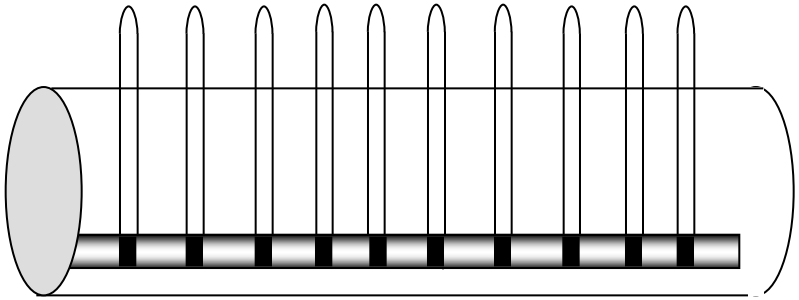


今後の取り組み
塩害に対する補修法の適正試験（案）

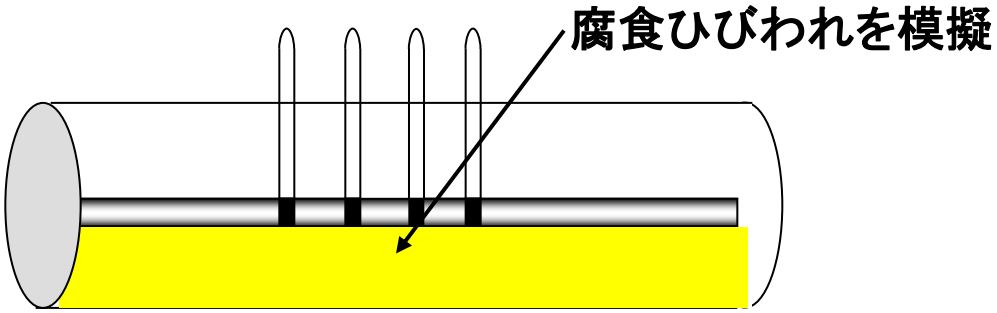
【ひび割れ供試体】



【かぶり不足試体】



【腐食ひび割れ供試体】



今後の取り組み
塩害に対する補修法の適正試験（案）

対策時期＼補修工法		ひび割れ注入	表面含浸材	表面被覆	断面修復	電気防食
予防保全	ひび割れ	○	?	○	○	?
	かぶり不足	-	?	○	○	?
事後保全	ひび割れ	×	?	△	○	?
	かぶり不足	-	?	×	○	?
	腐食ひび割れ	?	?	?	?	?

ご清聴有難うございました.