早期劣化が発生した
PC橋梁のモニタリング

金沢大学　理工研究域　環境デザイン学系
深田宰史

戦略的イノベーション創造プログラム
(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)

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

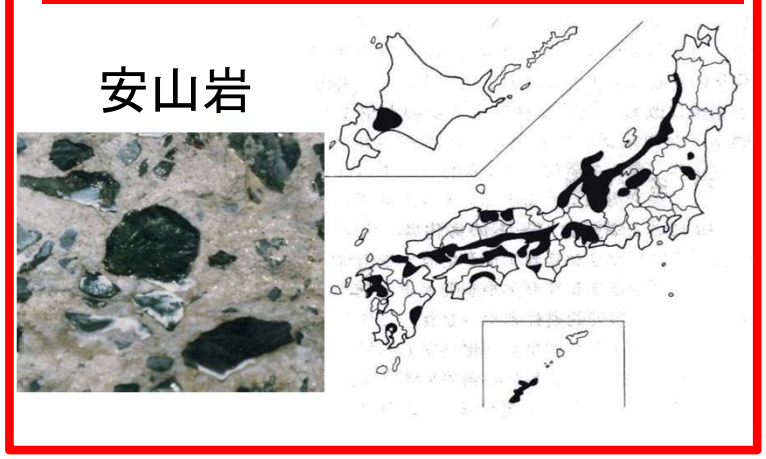
研究開発責任者：鳥居和之（金沢大学　理工研究域）
研究開発グループ　　：金沢大学
共同研究グループ（1）：金沢工業大学
共同研究グループ（2）：石川工業高等専門学校
共同研究グループ（3）：長岡技術科学大学
共同研究グループ（4）：福井大学

北陸地方の劣化状況

凍結防止剤散布の散布状況

季節風による塩分の飛来

コンクリート中の安山岩砕石



凍結防止剤散布による塩害劣化

飛来塩分による塩害劣化

アルカリ骨材反応（ASR）による劣化

経年劣化とは異なった早期劣化

研究開発の目的

地方道路橋の抱える課題

- 橋種・構造形式が多種多様
- 地域特性が複雑
- 人手，財源，技術力　すべてが不足

特に北陸地方では，
塩害やASRによる早期劣化橋梁に対しては，
緊急性と重要度の観点から，
これまでの画一的な
マネジメントシステムの適用が困難

産学官民の研究体制のもと，
早期劣化が生じた北陸地方のコンクリート橋を対象とした
トータルマネジメントシステムを確立

地方道路橋のモデルケース

◆ WG 1～WG 7 による研究開発の実施体制

WG 1　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
WG 2　ASRによる劣化機構の解明と構造部材の材料・構造性能評価
WG 3　橋梁の材料・構造性能評価とモニタリング技術の開発
WG 4　上部構造の健全度評価と材料・構造性能評価に基づく補修・補強技術の開発
WG 5　補修・補強材料の性能評価と簡易かつ経済的な新技術の開発
WG 6　メンテナンスマネジメントシステムの確立
WG 7　全体統括

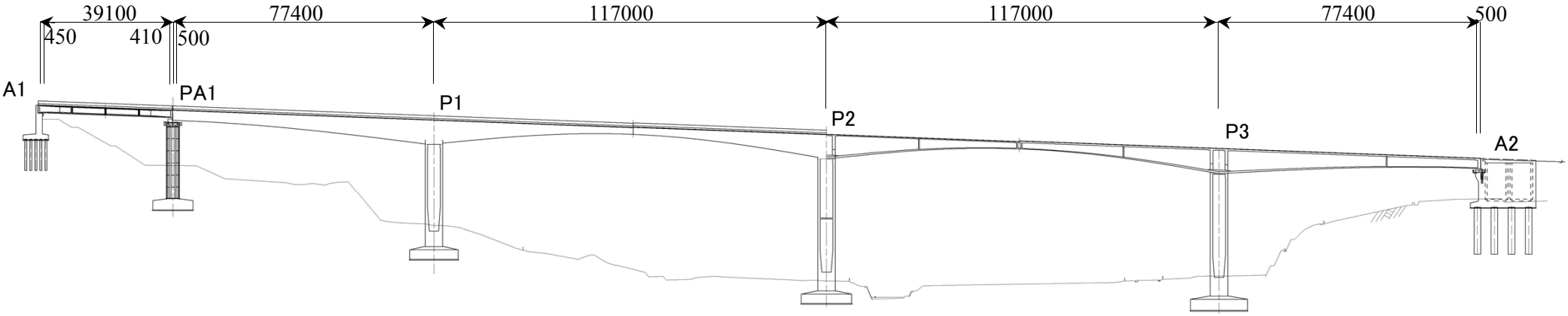
WG 3　橋梁の材料・構造性能評価とモニタリング技術の開発

◆ 劣化橋梁における静的および動的載荷試験による現況調査
◆ 劣化橋梁の変状を把握できるモニタリングシステムの開発
◆ モニタリングの結果に基づいた橋梁の劣化原因及び使用性・耐荷性の推定
◆ 早期劣化した実橋梁を対象とした長期モニタリング

塩害劣化したPCラーメン橋（ゲルバー橋）

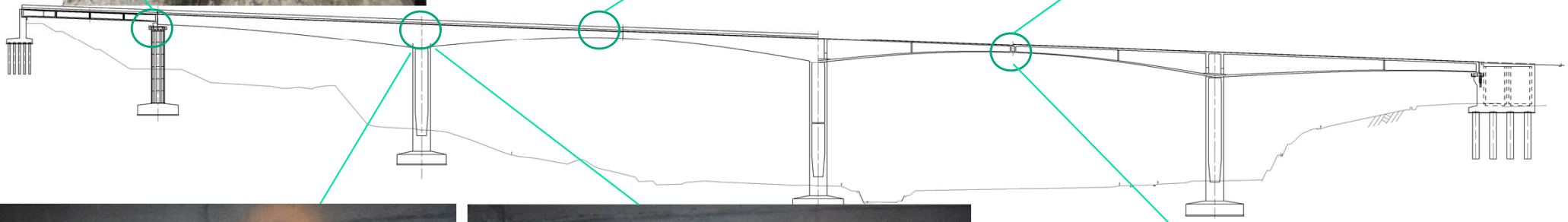
ASR劣化したPCラーメン橋（ゲルバー橋）

対象橋梁
竣工:1978(S53)年6月



ASRにより劣化したPC橋での長期モニタリング

4径間連続有ヒンジPCラーメン箱桁橋
（77.4m+117m+117m+77.4m）
竣工：1978(S53)年6月



P1柱頭部
左ウェブ

ASR劣化橋梁に対する
モニタリングの必要性

ASRによるひび割れ（亀裂変位）が進展中であるのか？

⇩ 目視点検だけではわからない

活荷重載荷による影響は？

温度変化による影響は？

長期モニタリング

何をモニタリングするべきか？

ASR劣化した橋梁の特徴

弾性係数の低下
（曲げ剛性の低下）

→ たわみ量の変化

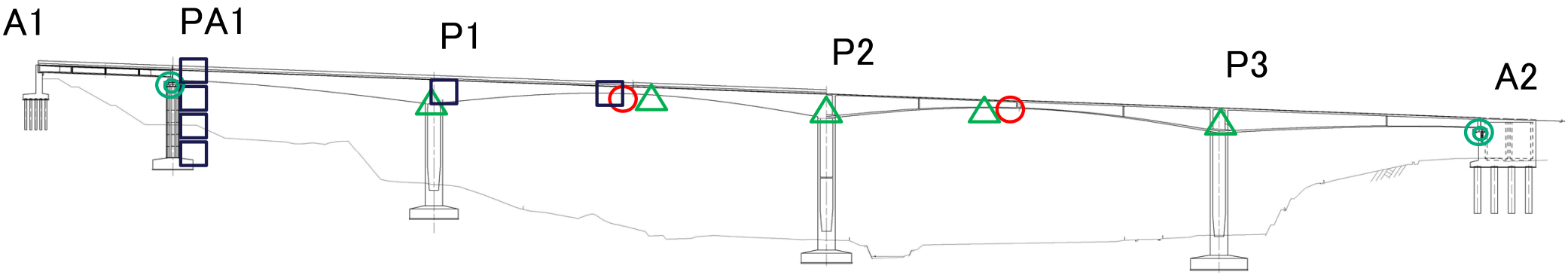
⇩

精度よく長期にモニタリングできる技術が必要！

代替手段として

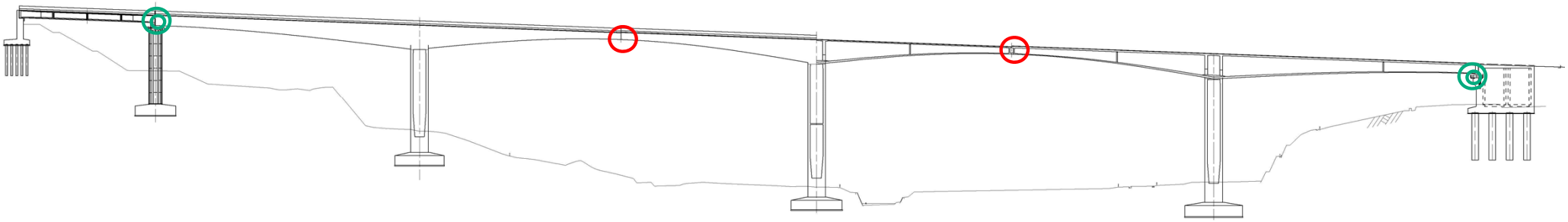
- ◆ **振動数，振動モードを使用した評価**
  高次振動モードを精度よく評価すべき
- ◆ **点評価の計測値を補間できる数値解析**

長期モニタリングにおける測定項目



○ ジョイント部の変位（3軸）
◎ 弾性支承部の変位（2軸）
△ 傾斜計（2軸）
□ 亀裂変位計

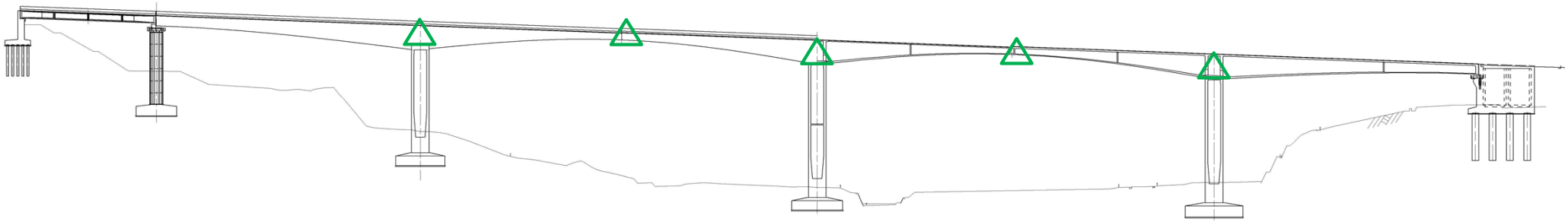
支承部の変位



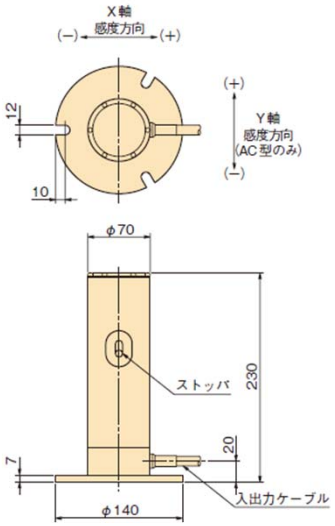
○ ジョイント部の変位

◎ 橋台支点部の変位

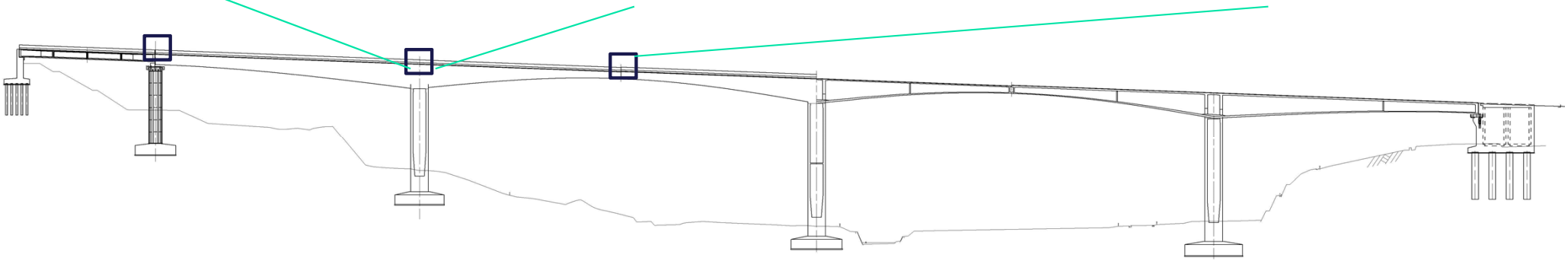
傾斜角



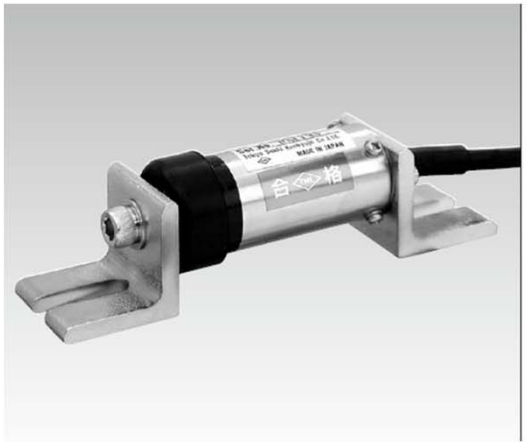
△ 傾斜計

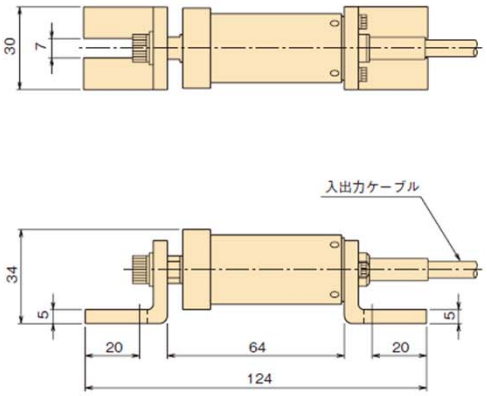


型 名	KB-5AB	KB-1AC
測定軸数		
容量	±5°	±1°
定格出力	約1mV/V（2000×10⁻⁶ひずみ）	
非直線性	0.5%RO	
相互干渉		
許容温度範囲	−20～+60℃	
入出力抵抗	350Ω	
推奨印加電圧	2V以下	
許容印加電圧	5V	



亀裂変位 □ 亀裂変位計と熱電対

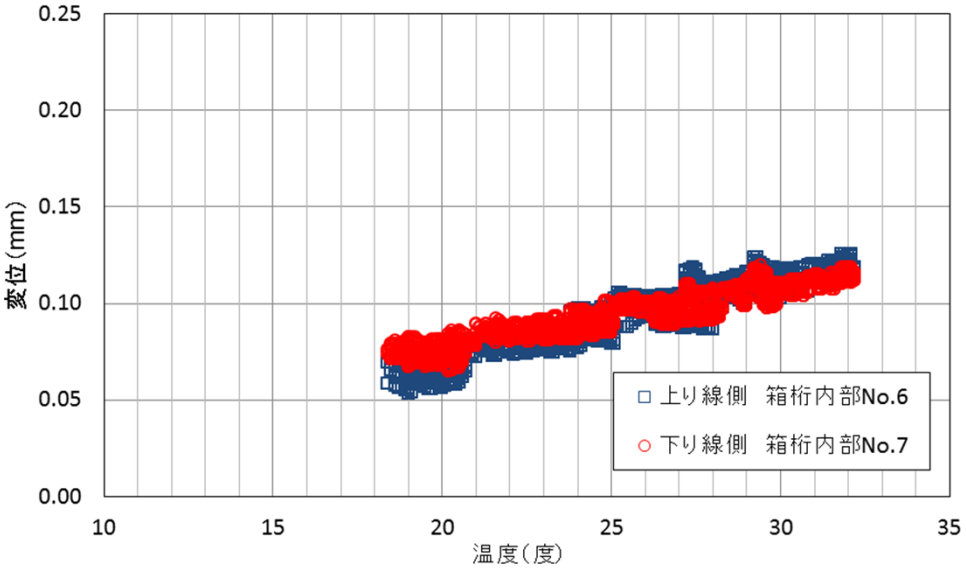


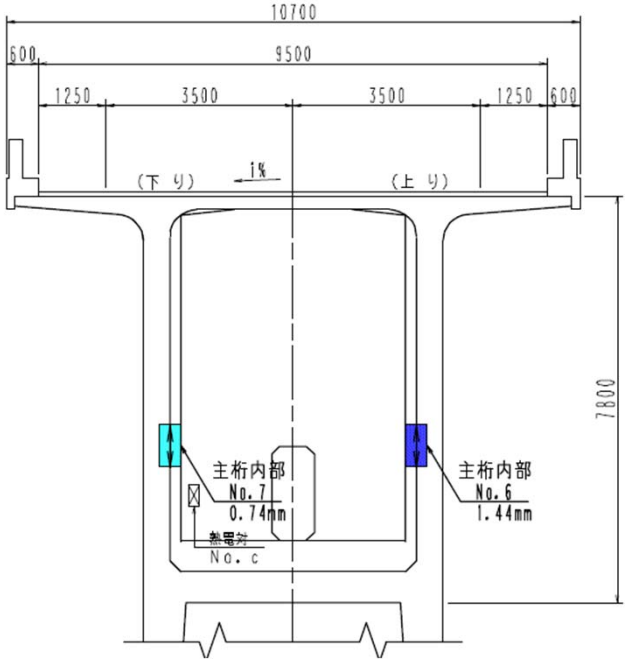


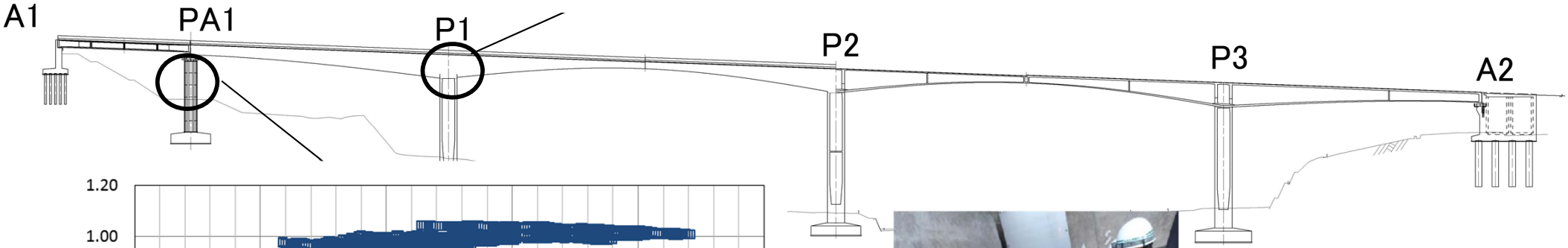
■仕様

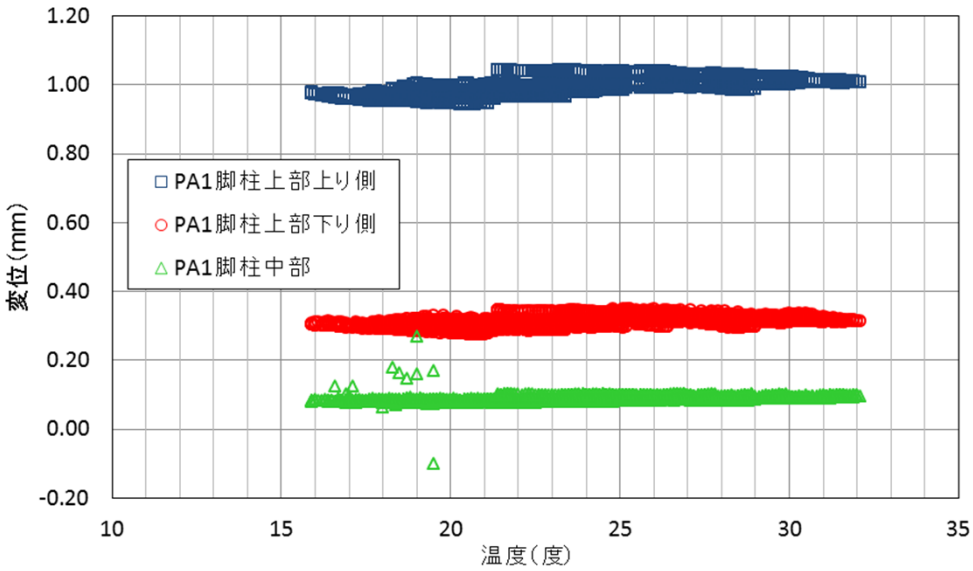
型 名	KG-2A	KG-5A
容量 (mm)	±2	±5
定格出力	約1.5mV/V (3000×10⁻⁶ひずみ)	約2mV/V (4000×10⁻⁶ひずみ)
感度 (×10⁻⁶ひずみ/mm)	約1500	約800
非直線性	0.5%RO	1%RO
測定力	15N (1.5kgf)	
許容温度範囲	−20～+60℃	
入出力抵抗	350Ω	
推奨印加電圧	2V以下	
許容印加電圧	5V	

モニタリング結果(亀裂変位)

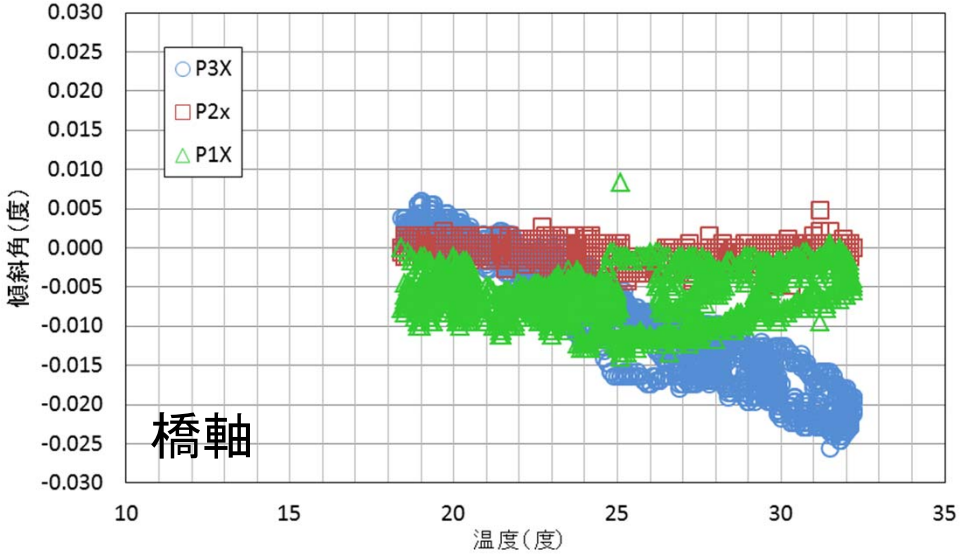


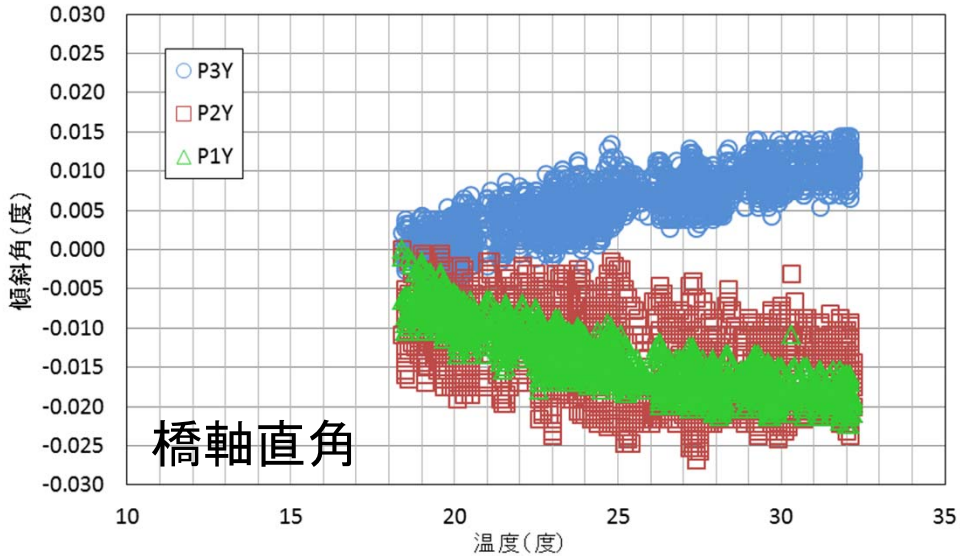


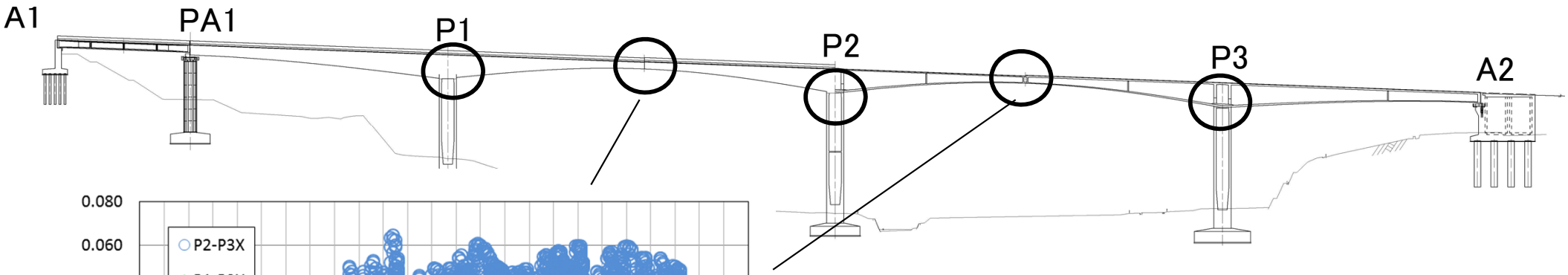


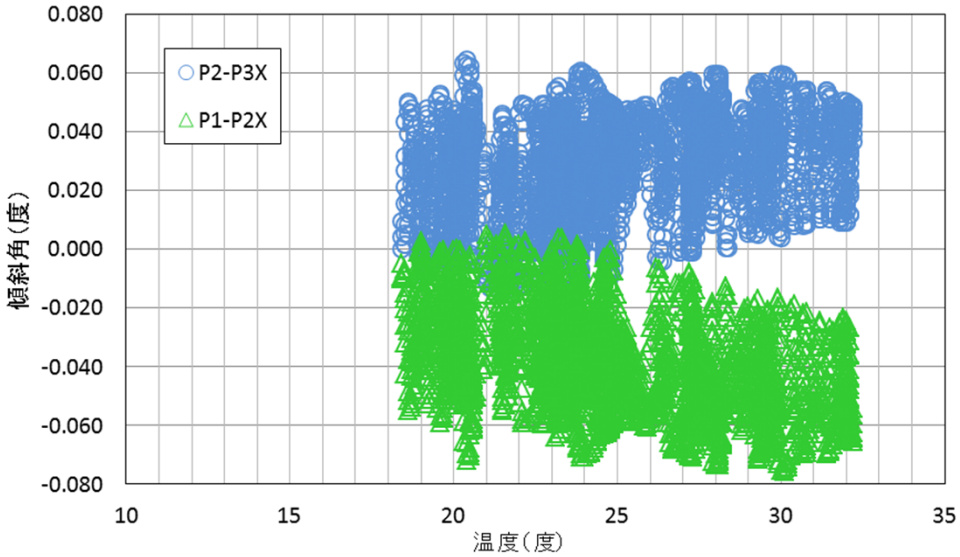


モニタリング結果（傾斜角）

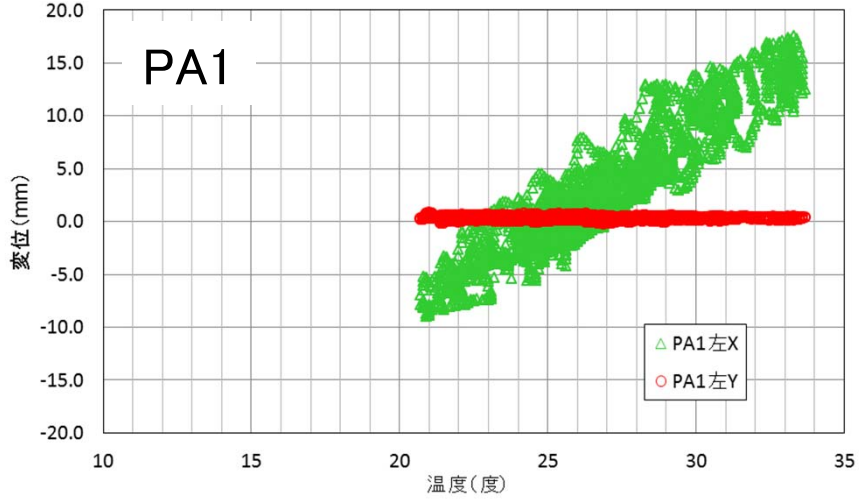


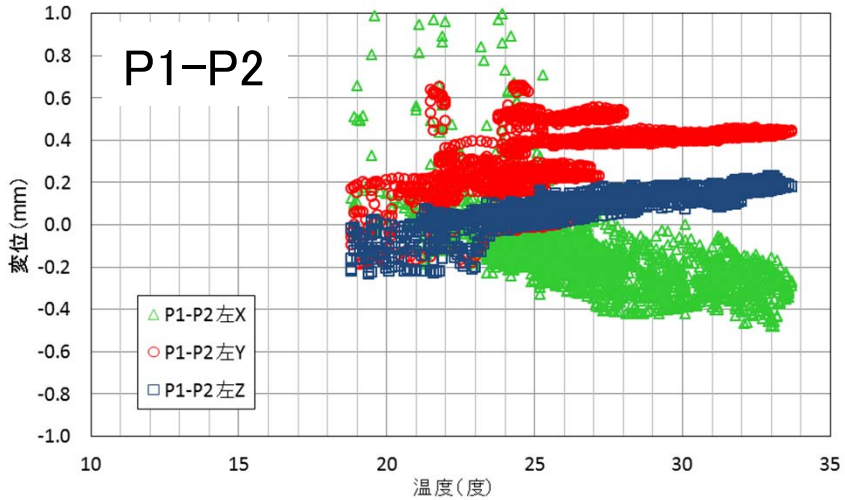


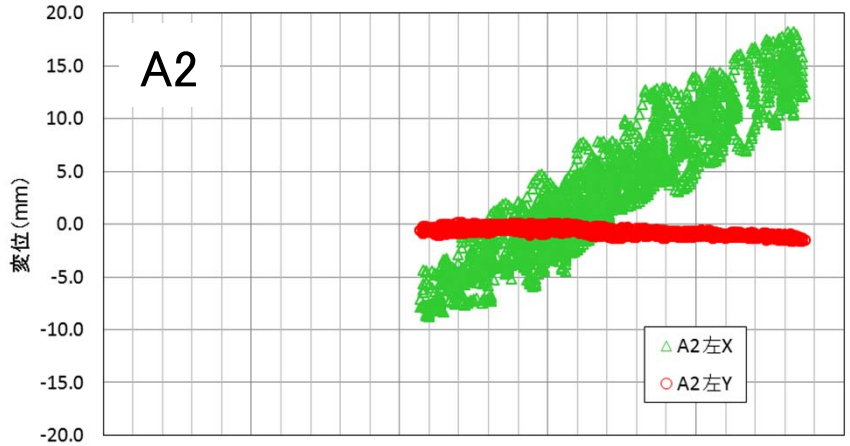


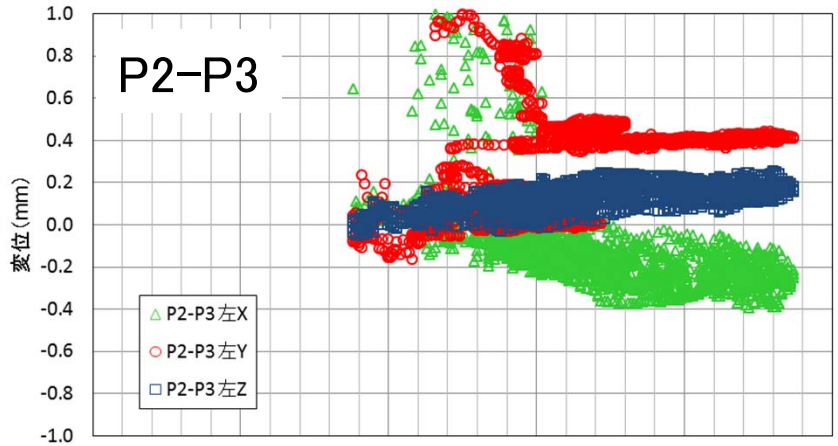


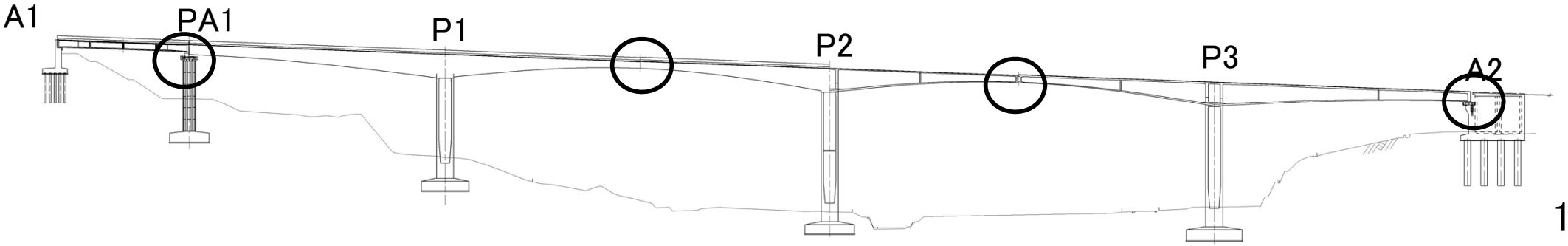
モニタリング結果（支点変位）











車両を用いた各種載荷試験の目的

- ひび割れへの影響はどの程度か？
- ゲルバーヒンジ部での変位はどの程度か？
- 橋梁全体の変位挙動（ヒンジ部の変位挙動も含む）はどの程度か？
- 走行試験および衝撃加振試験により橋梁全体の固有振動特性（固有振動数，振動モード，モード減衰定数）はどのようなものか？（今後の地震応答解析に活用）

試験項目

- 大型車両を2台用いた静的載荷試験
- 大型車両1台による走行試験
- 大型車両1台による衝撃加振試験

たわみによる性能評価

$$\delta \propto \frac{PL^3}{EI}$$

$$\delta \propto \frac{QL^4}{EI}$$

δ：たわみ

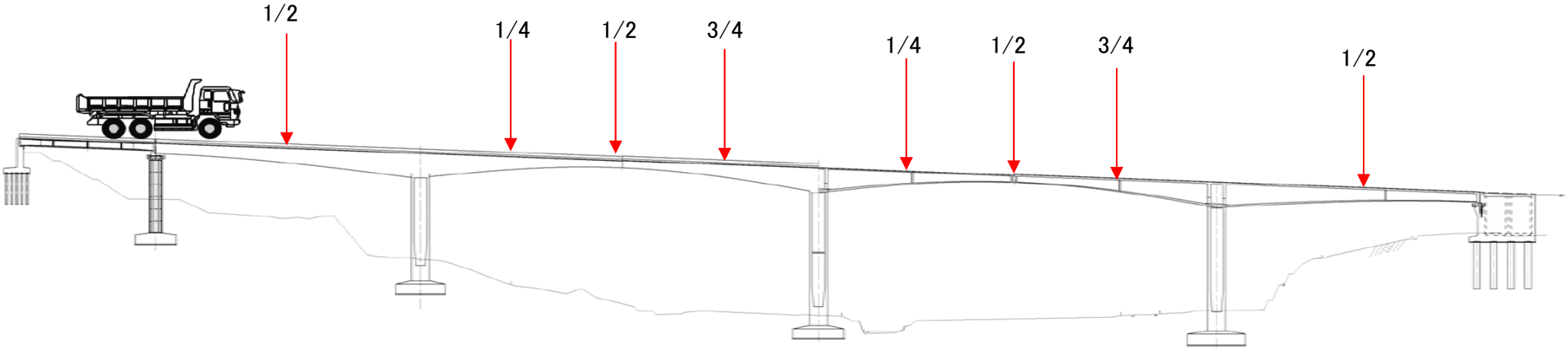
P：集中荷重

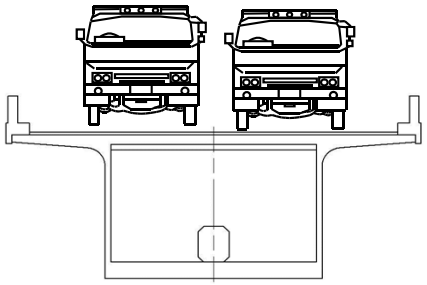
Q：等分布荷重

L：支間長

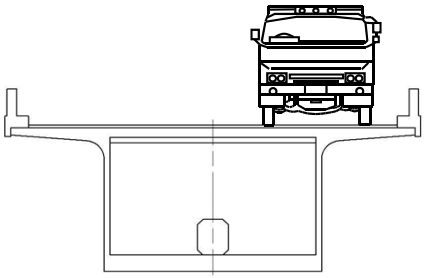
＜出典＞Jiri Strasky: Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges, Thomas Telford

静的載荷試験





並列載荷

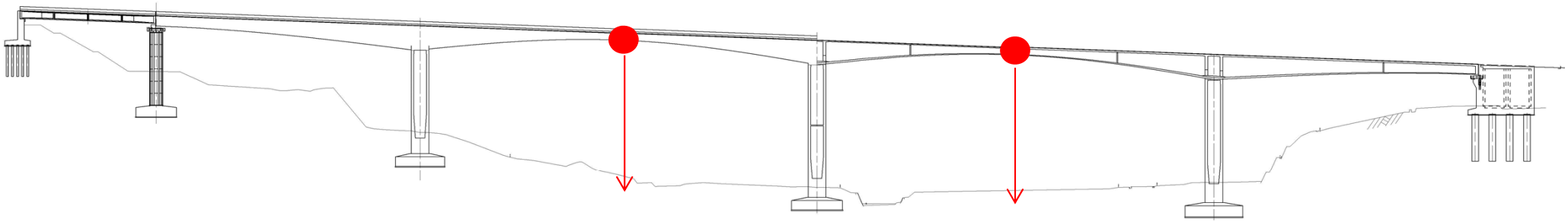


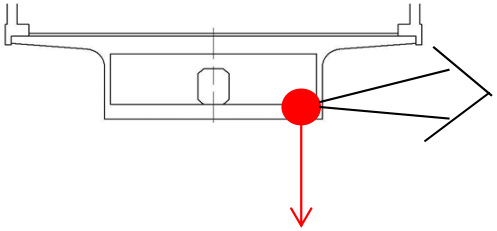
縦列載荷

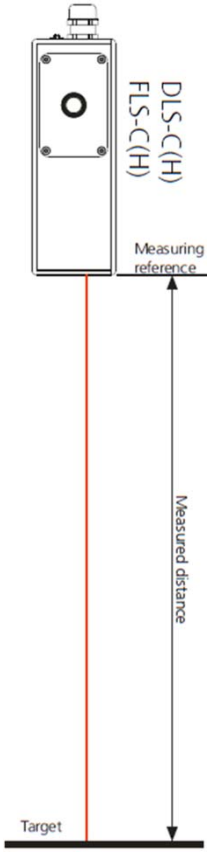
並列載荷

縦列載荷

レーザー変位計によるたわみ計測



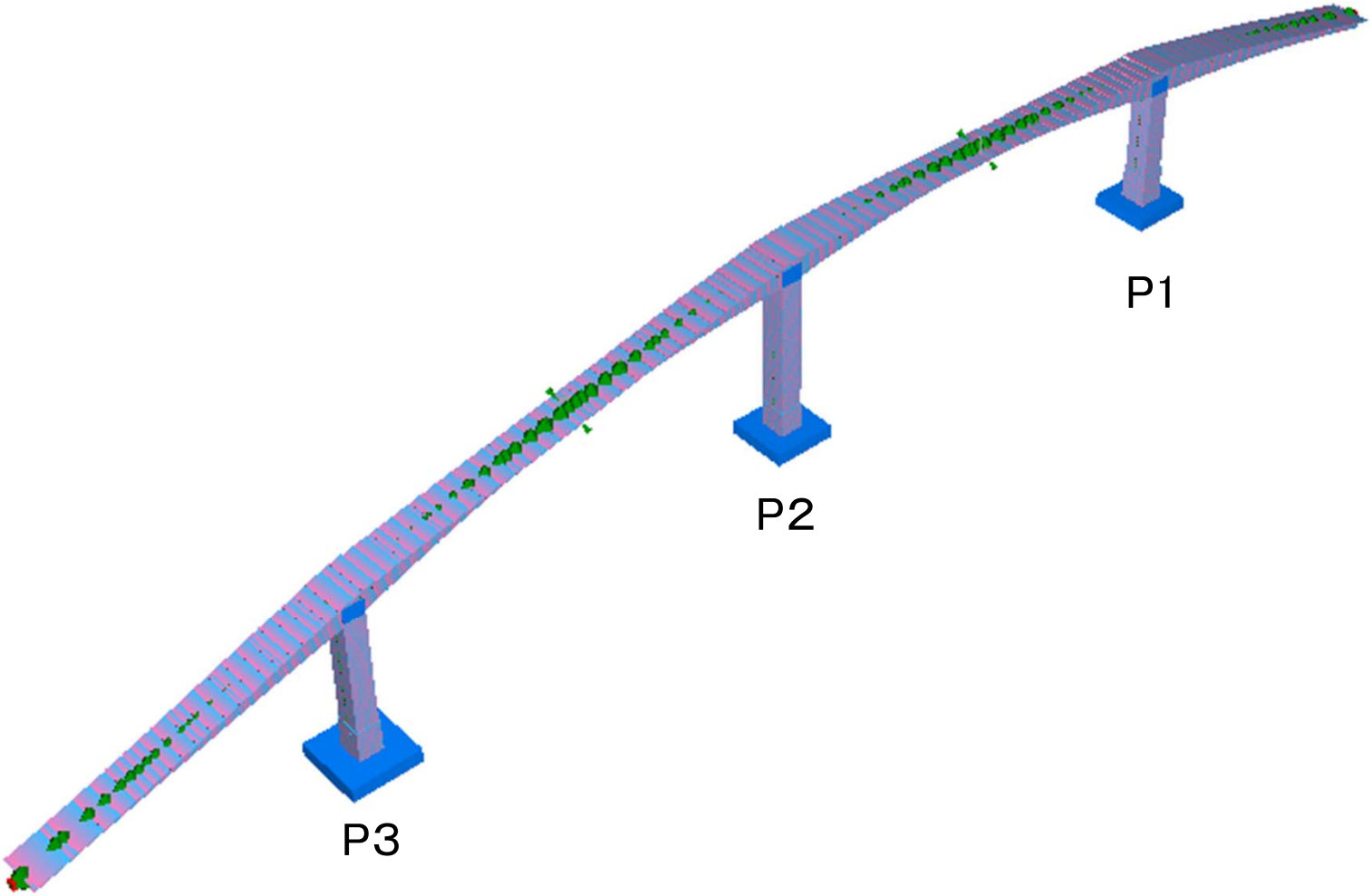




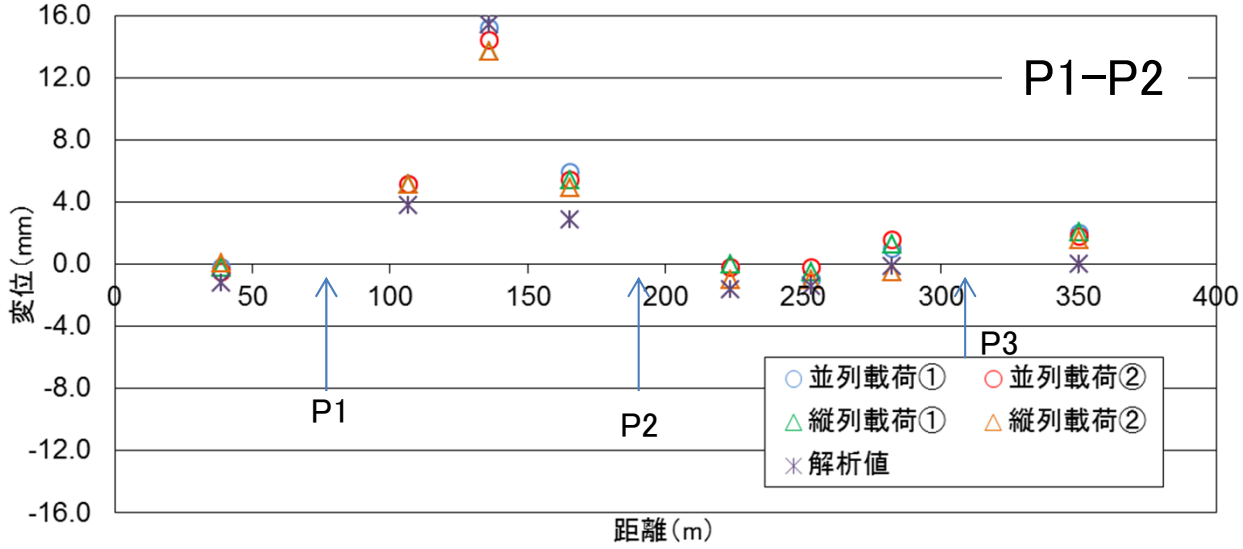
- ジョイント部の変位（レーザー変位）

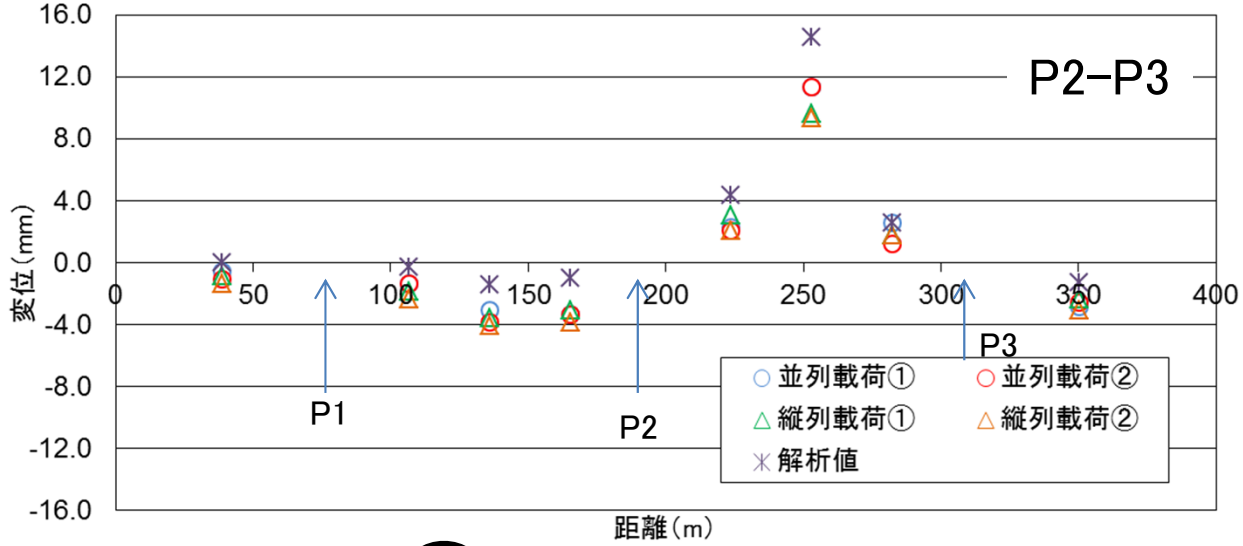
DLS-C15 (DIMETIX)
測定範囲　1m=0～5V
0.05～500mまで測定可能
6Hz or 20Hzまで追従可能

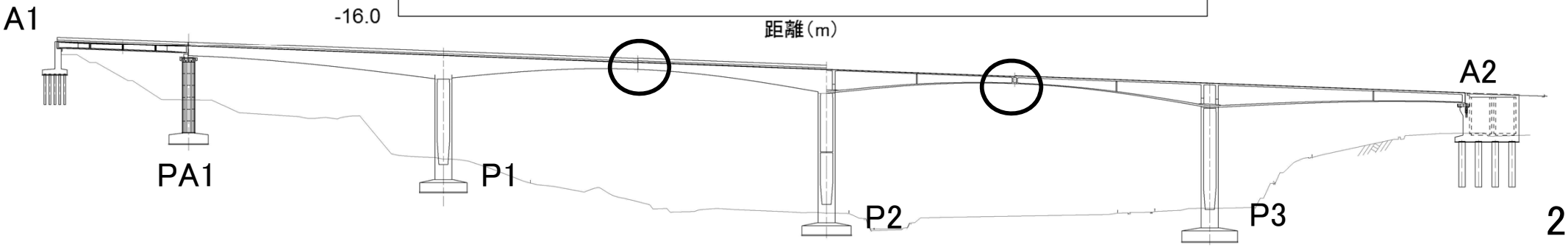
解析モデル



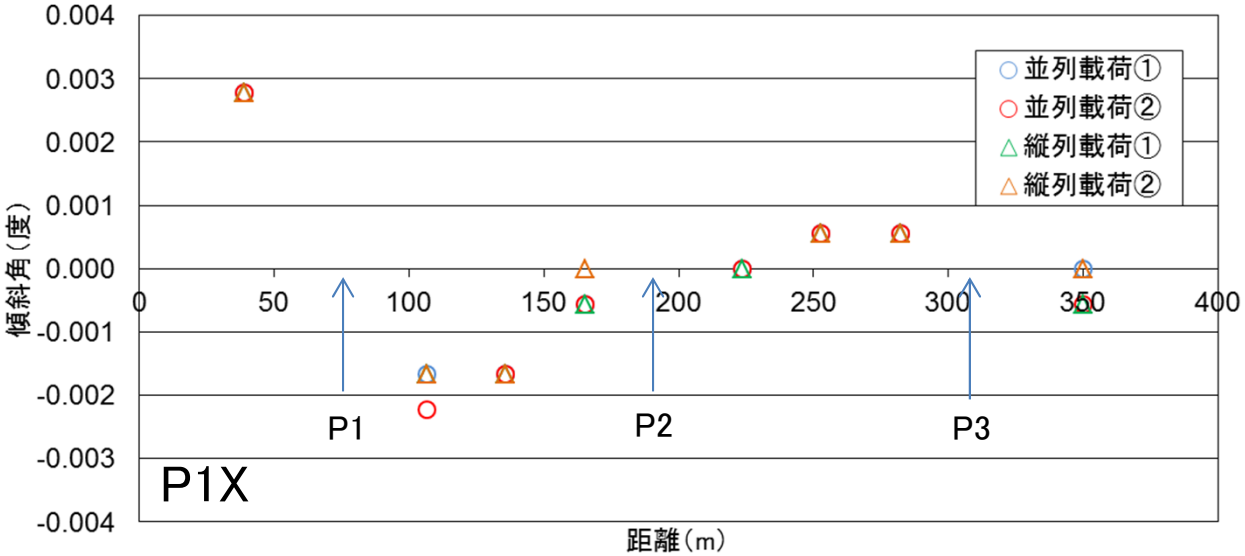
載荷試験結果（ヒンジ部の鉛直変位）

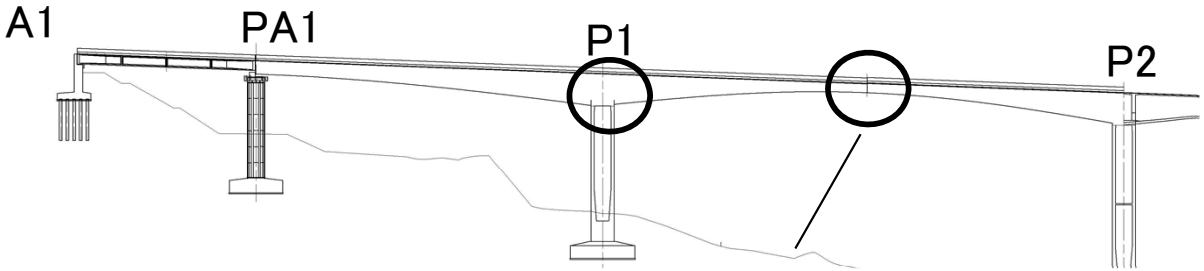


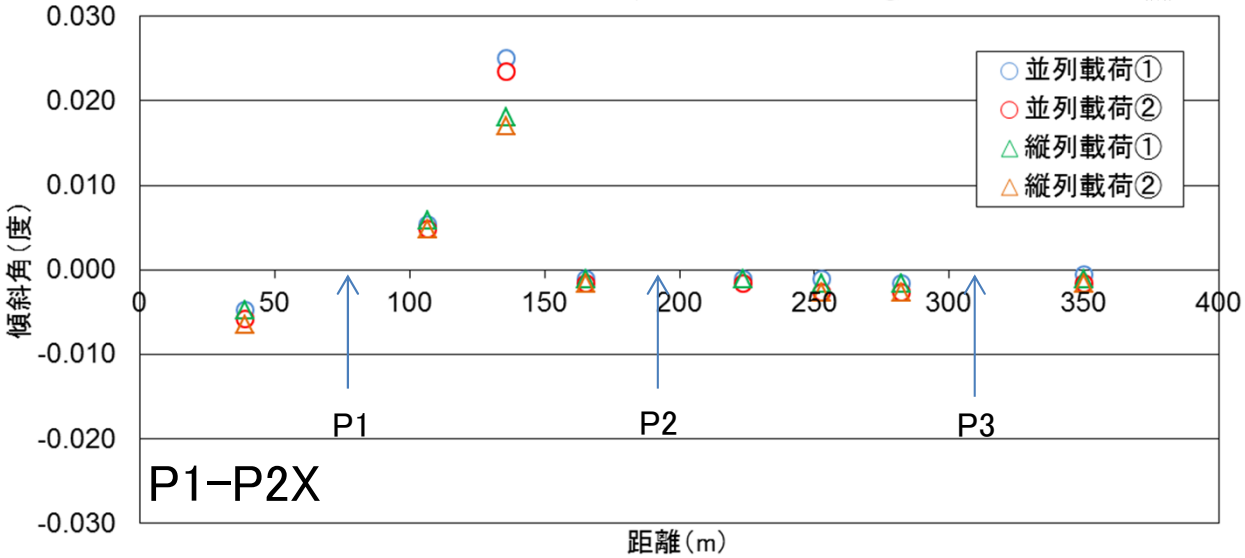




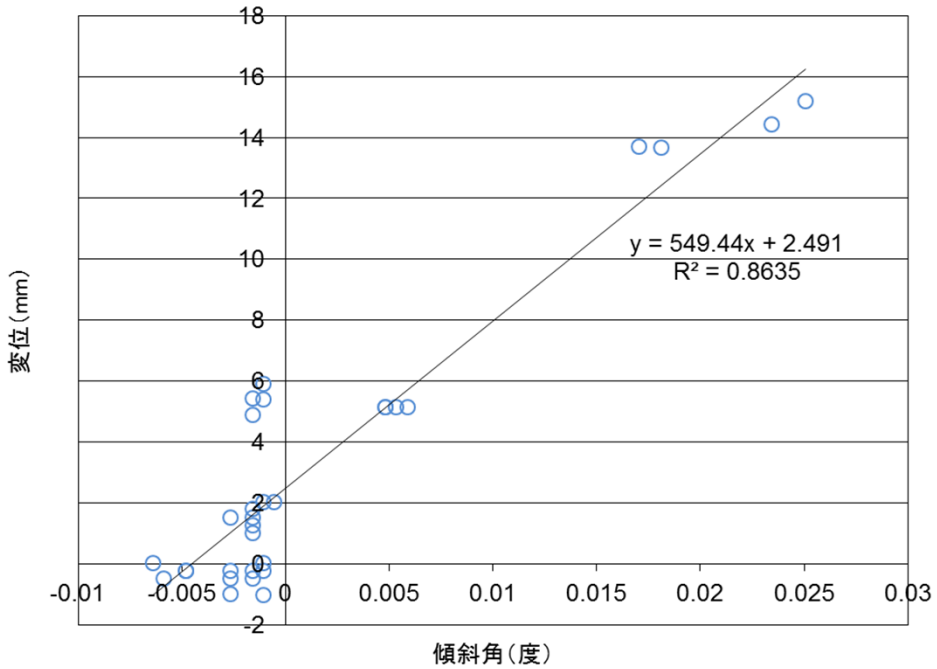
載荷試験結果（傾斜角）



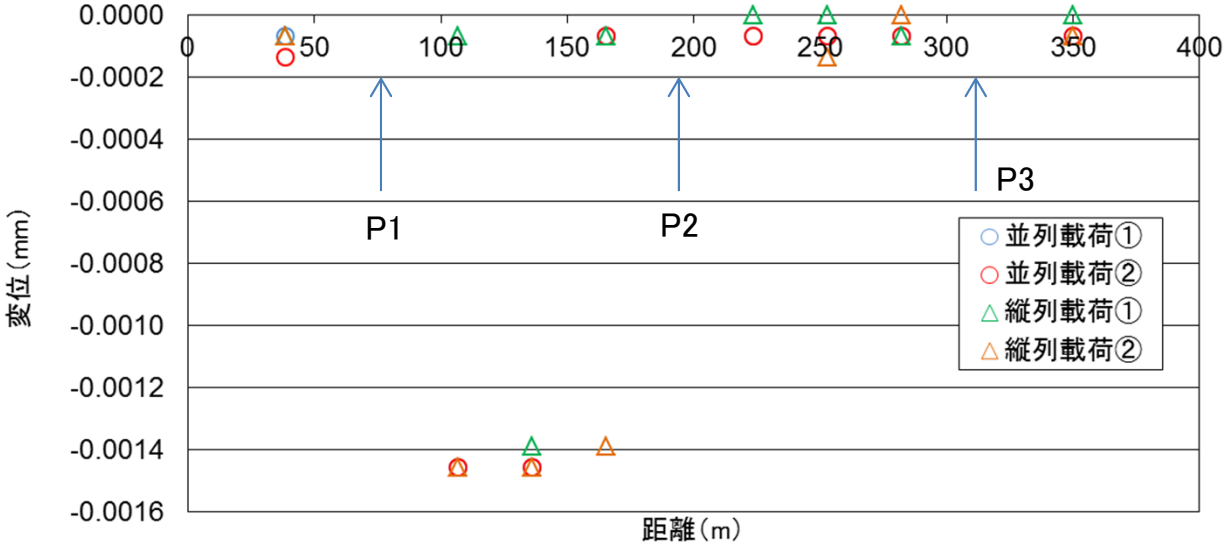


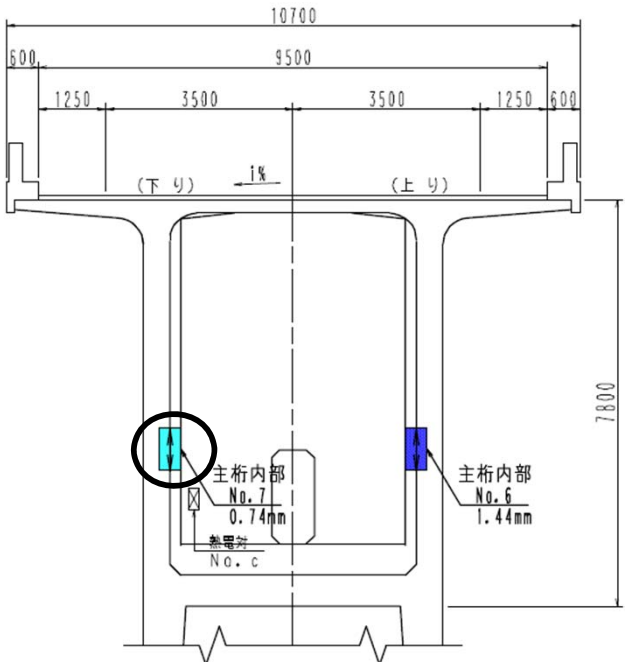


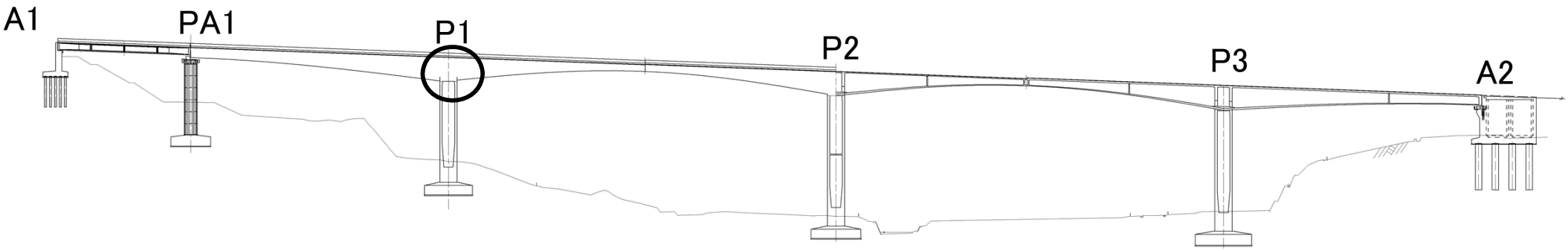
P1−P2Xの傾斜角と鉛直変位の関係



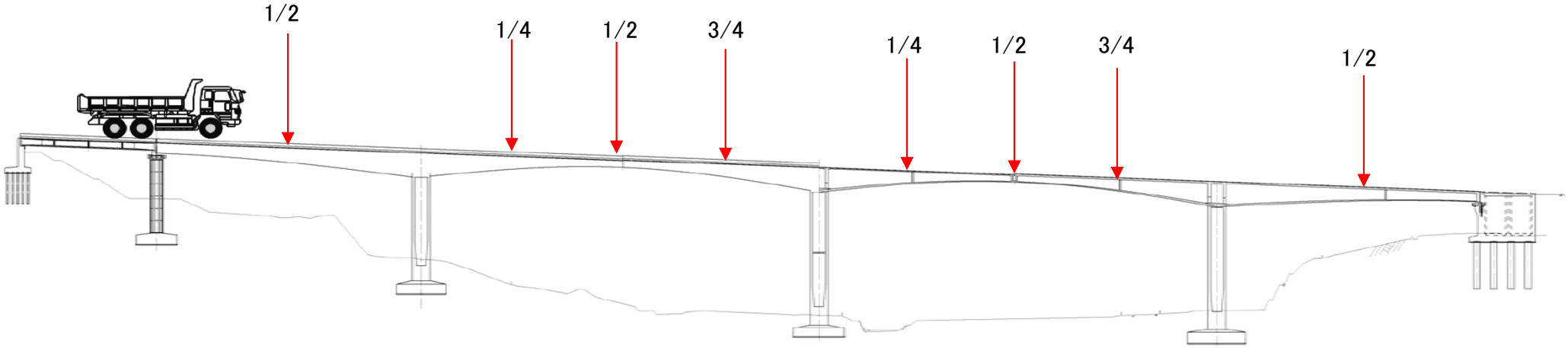
載荷試験結果(亀裂変位)

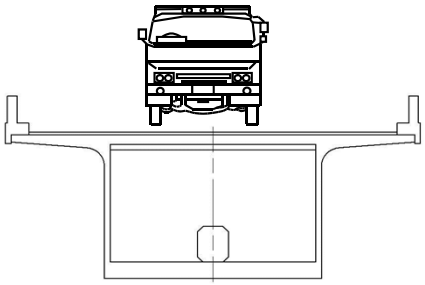

0.0000
-0.0002
-0.0004
-0.0006
-0.0008
-0.0010
-0.0012
-0.0014
-0.0016
0
50
100
150
200
250
300
350
400
変位(mm)
距離(m)
P1
P2
P3
並列載荷①
並列載荷②
縦列載荷①
縦列載荷②


10700
600
9500
1250
3500
3500
1250
600
(下り)
i%
(上り)
7800
主桁内部
No.7
0.74mm
主桁内部
No.6
1.44mm
熱電対
No.c

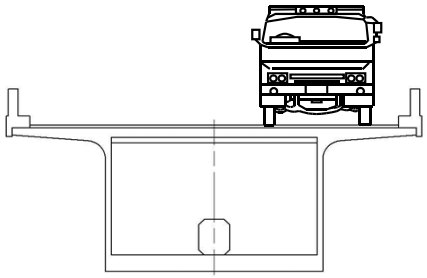

A1
PA1
P1
P2
P3
A2

衝撃加振試験



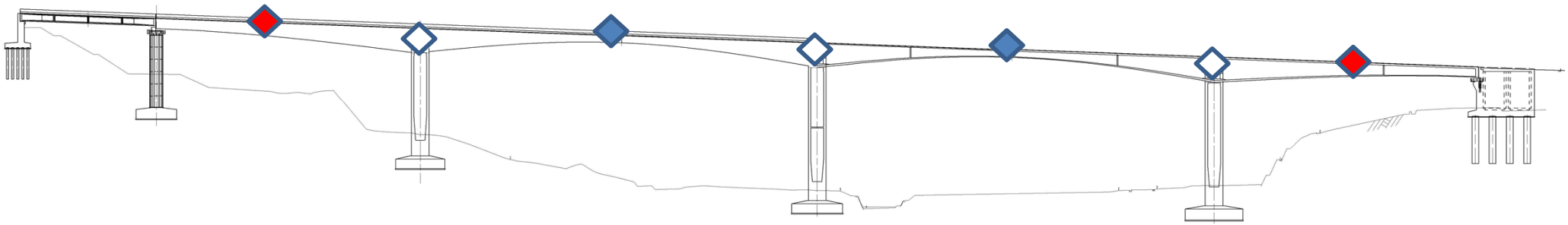


中央加振

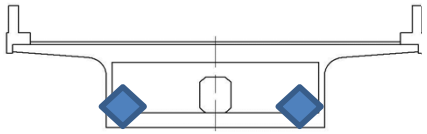


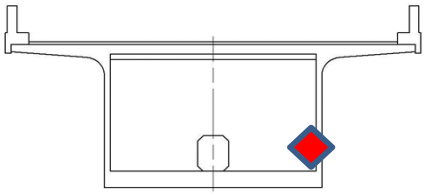
偏心加振

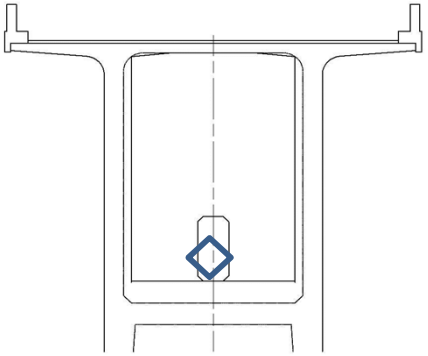
速度計による振動応答の計測



- ◆ 速度計（断面　2か所　鉛直z方向）
- ◆ 速度計（断面　1か所　鉛直z方向）
- ◇ 速度計（断面　1か所　水平2方向（橋軸x方向，橋軸直角y方向））

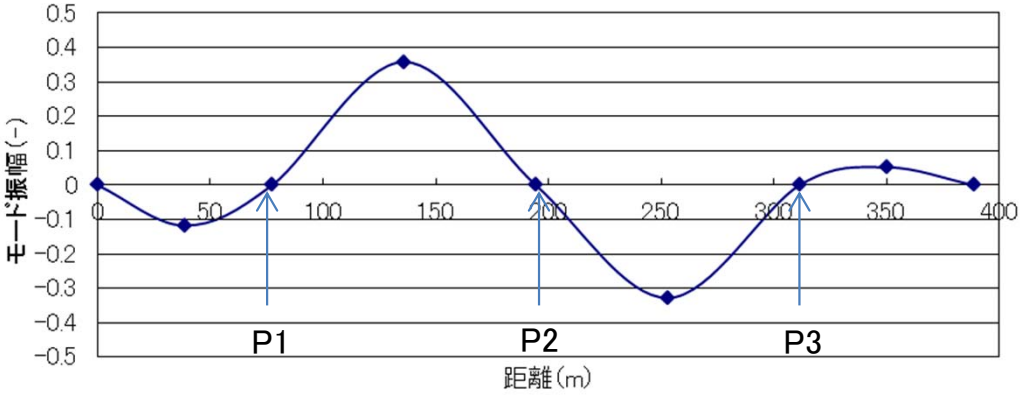




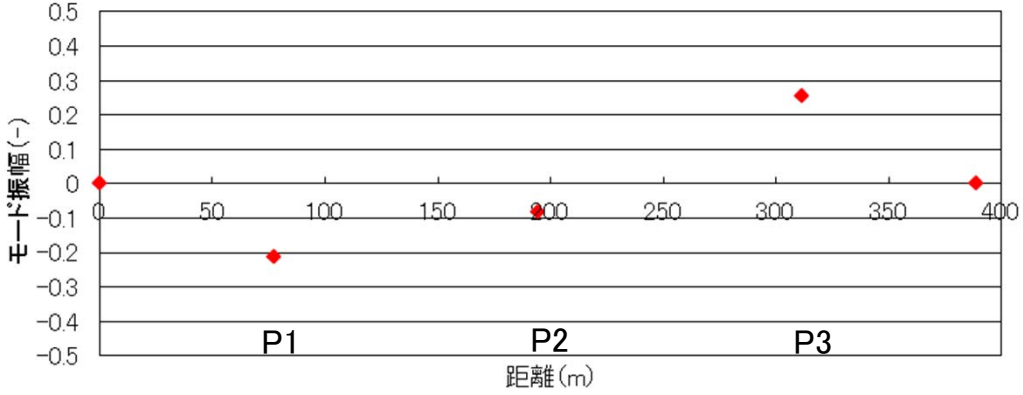


振動特性

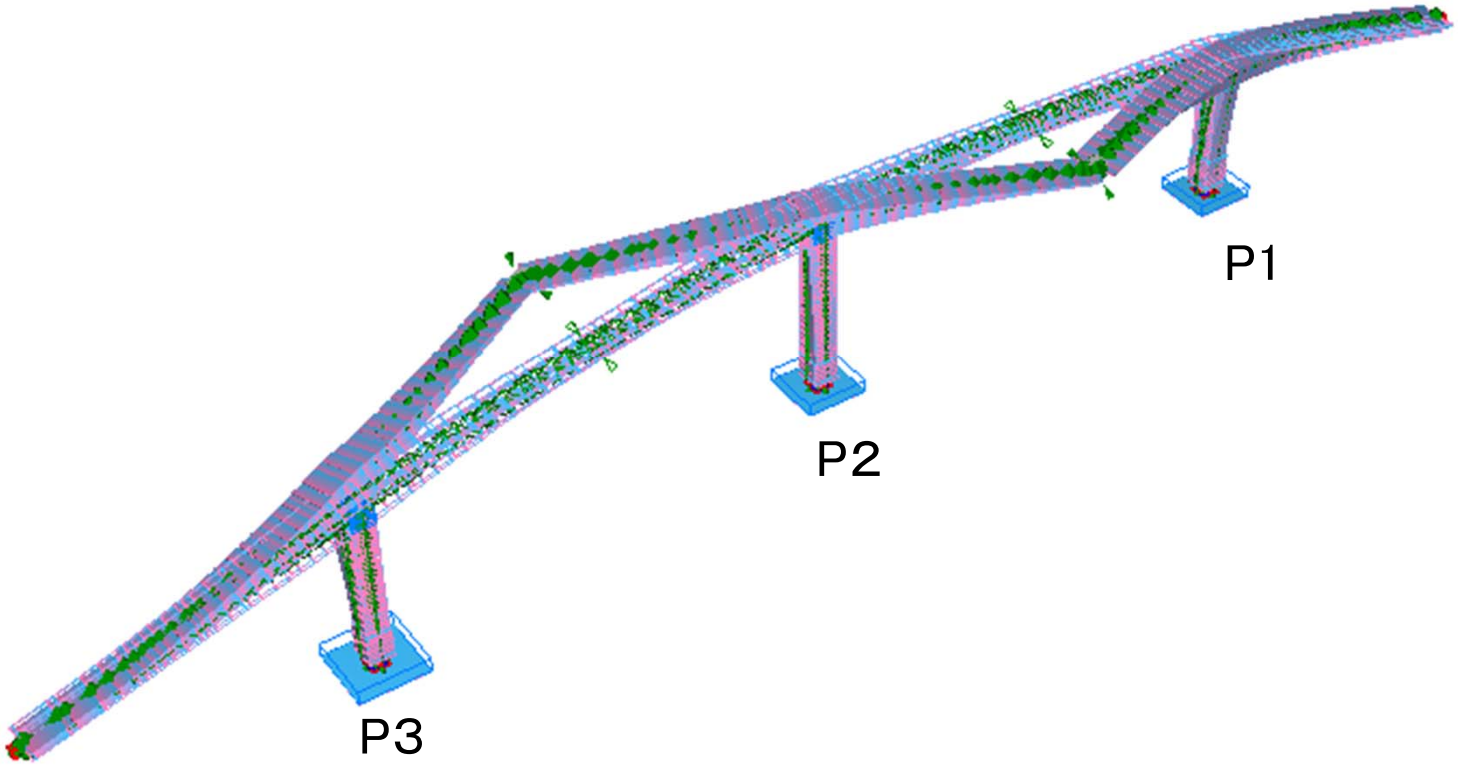
f=0.77Hz　h=0.019



鉛直方向

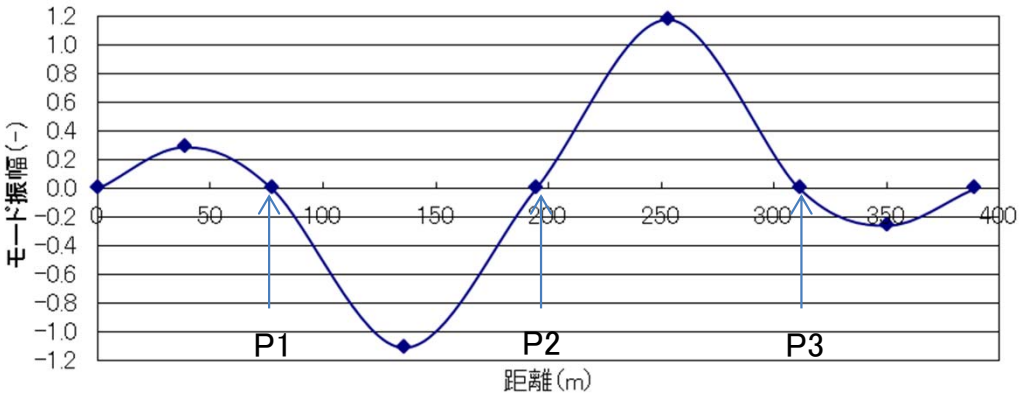


橋軸直角方向

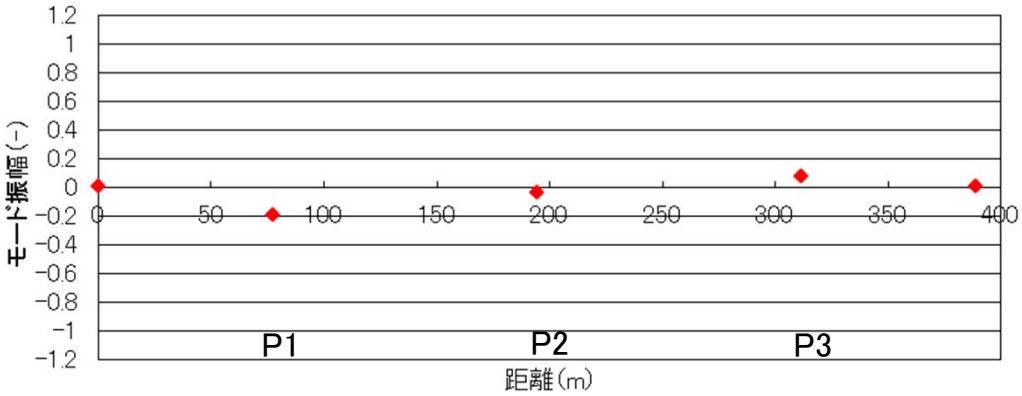


振動特性

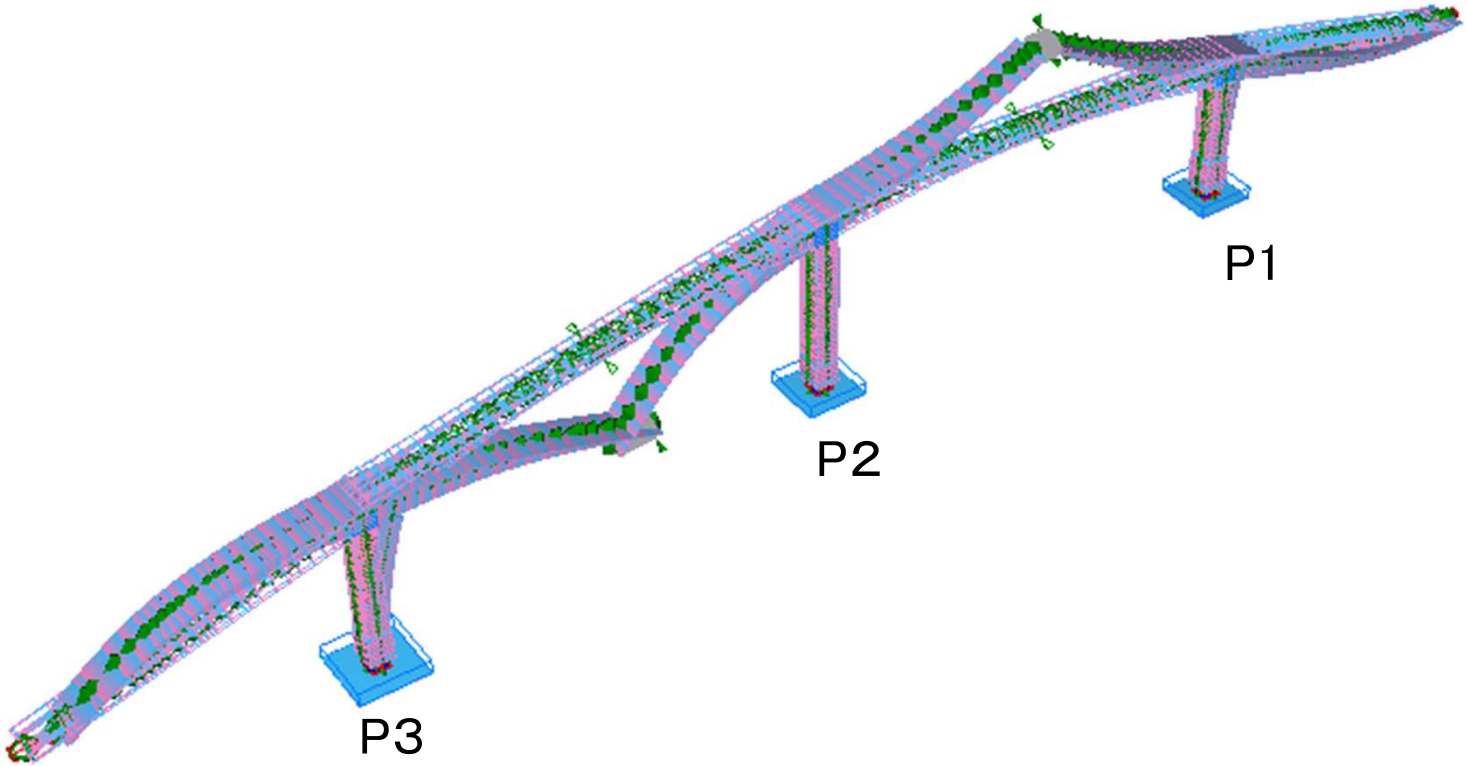
f=1.13Hz　h=0.009



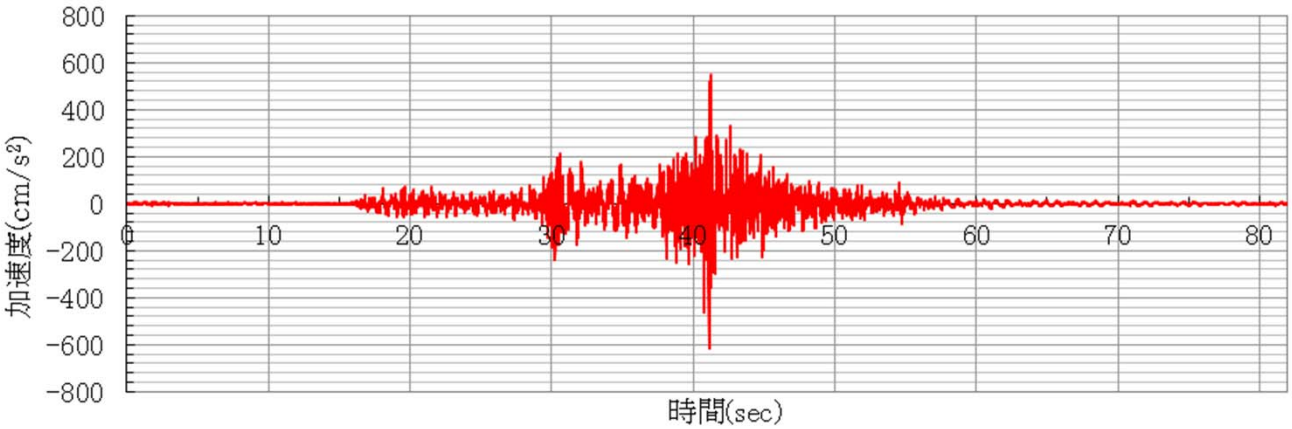
鉛直方向

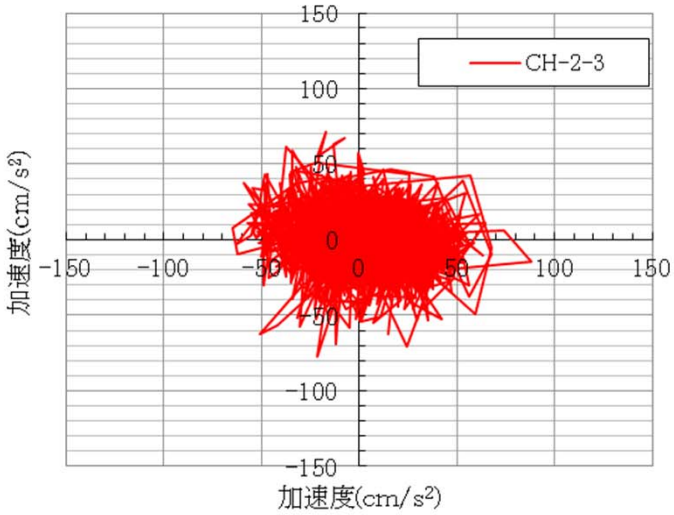


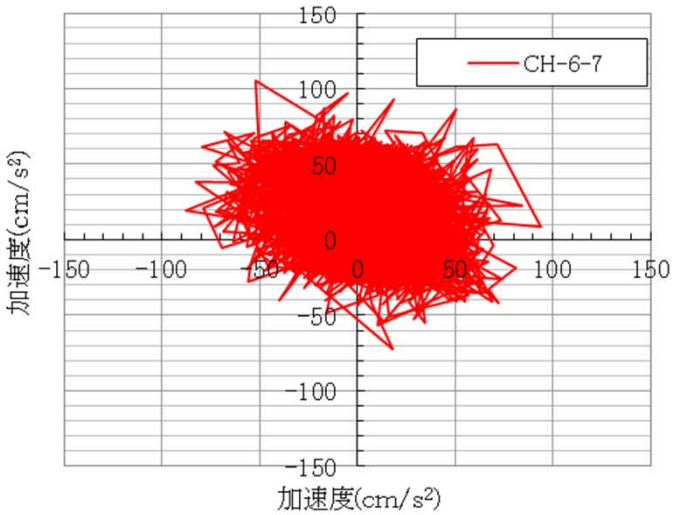
橋軸直角方向

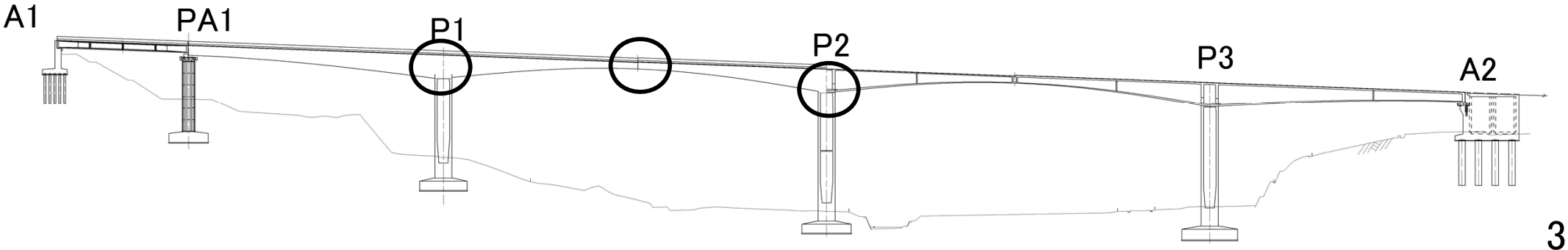


車両走行時の応答


800
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
加速度(cm/s²)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
時間(sec)


CH-2-3
150
100
50
0
-50
-100
-150
加速度(cm/s²)
-150
-100
-50
0
50
100
150
加速度(cm/s²)


CH-6-7
150
100
50
0
-50
-100
-150
加速度(cm/s²)
-150
-100
-50
0
50
100
150
加速度(cm/s²)

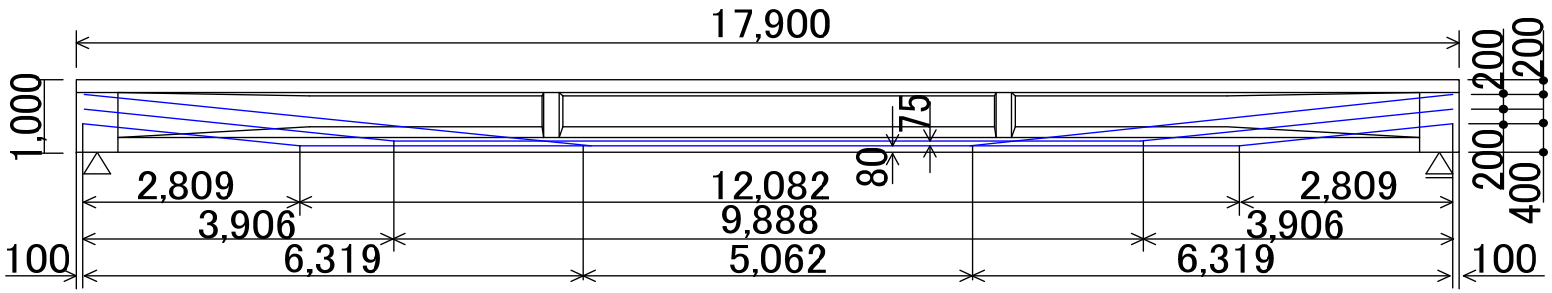

A1
PA1
P1
P2
P3
A2

塩害により撤去されたPC桁の材料・構造性能評価

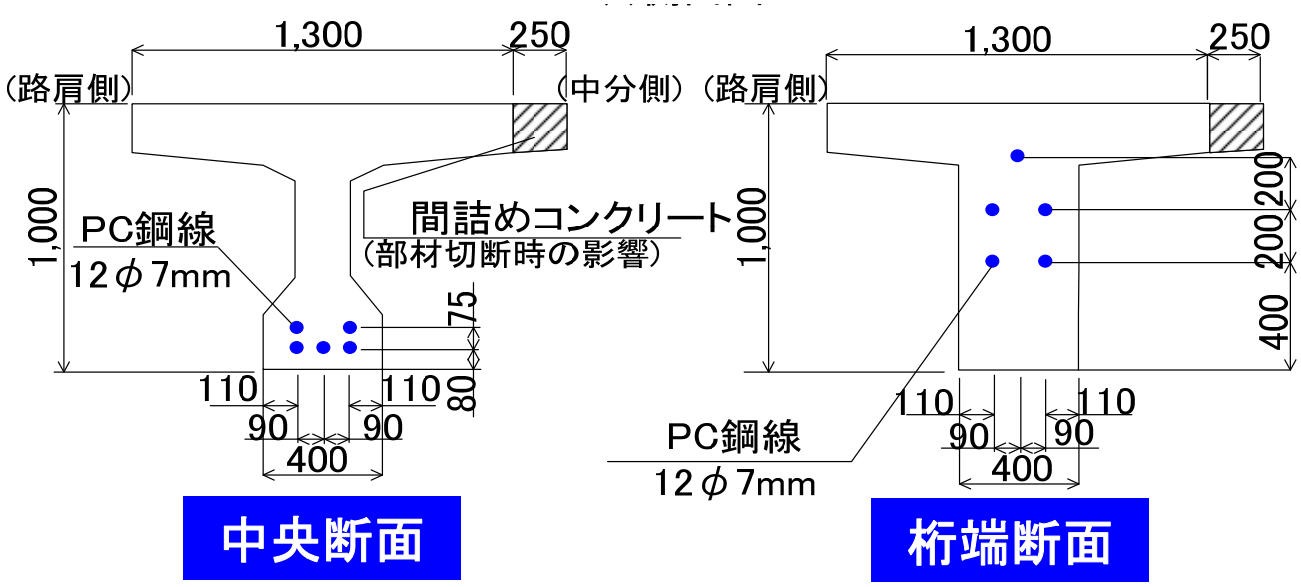
破壊に至る直前までの兆候を日頃の点検により検知・評価できる指標はないのか？

有馬直秀，深田宰史，玉田和也，森山守：塩害により撤去したPCT 桁の載荷試験と維持管理手法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1369-1374，2015.7.

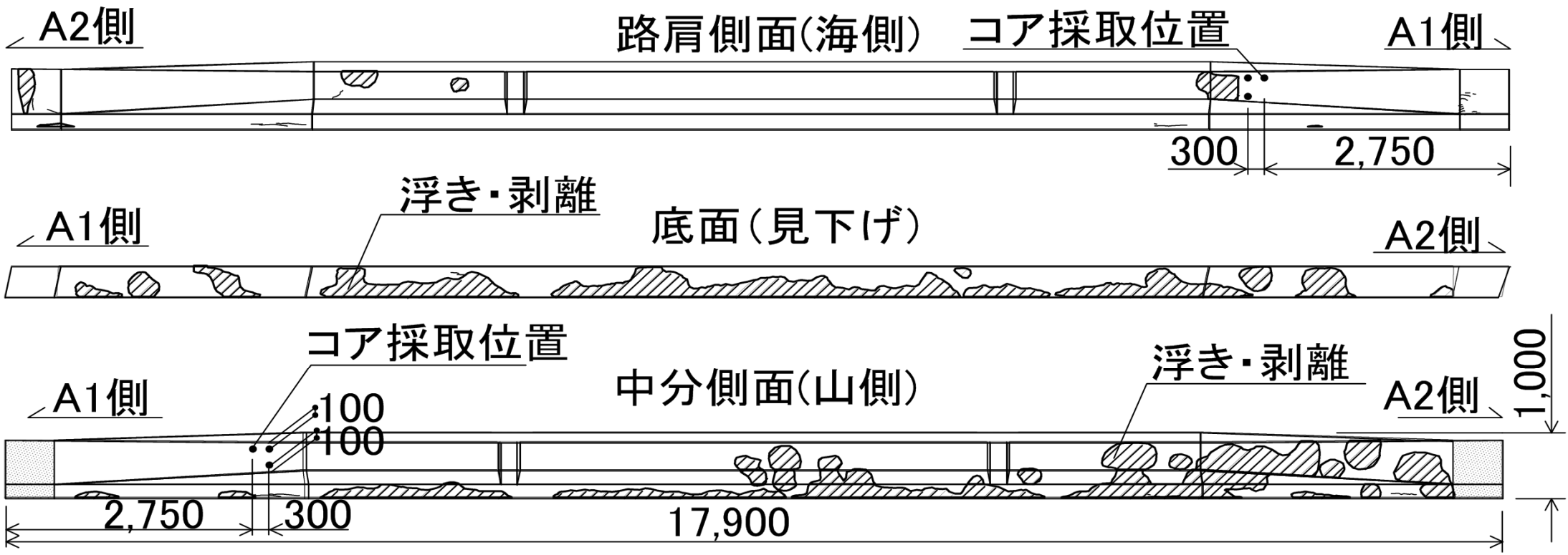
撤去桁　一般図

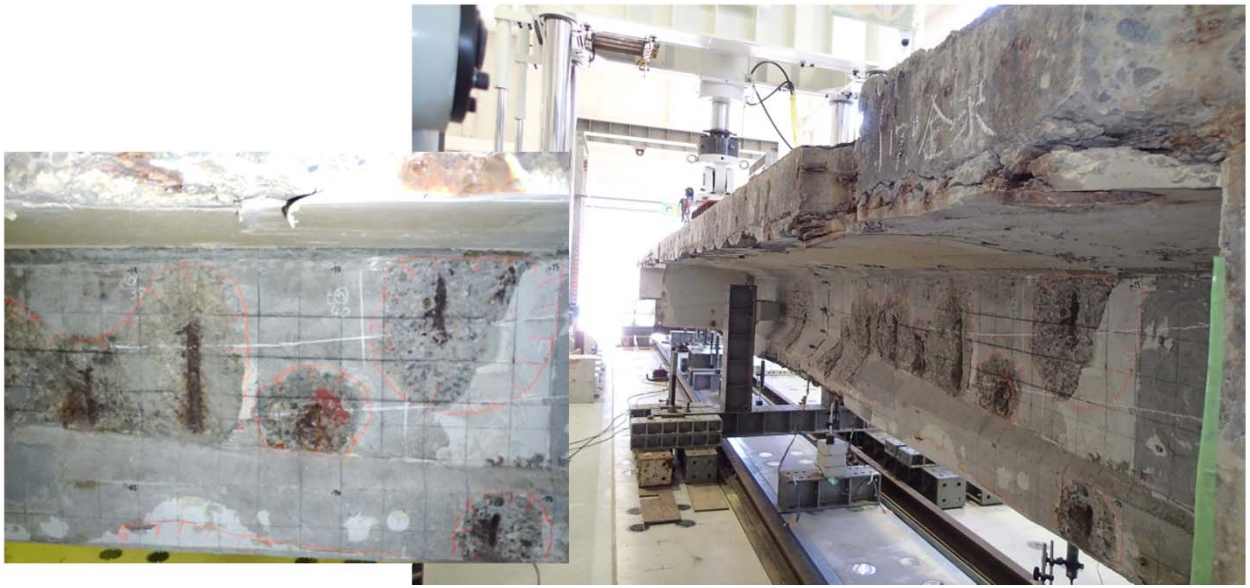


供用場所	北陸自動車道
桁　長	17.9 m（支間長17.2m）
竣工／撤去	1972年／1997年（供用期間25年）
構造形式	ポストテンション単純T桁橋
適用示方書	道示　昭和43年
定着工法	フレシネー工法
使用材料	σ_{ck}:400kg/cm^2　PC鋼材：12φ7mm×5本 鉄筋：SD30(D13)
主な補修履歴（上部工）	1）1982年 断面修復工，防水ライニング工， 2）1987年 断面修復工，防水ライニング工 3）1992年 防錆剤注入工，4）1997年架替え
その他	撤去後～2014年10月の期間：屋外曝露 載荷試験，各種調査：2014年10月に実施



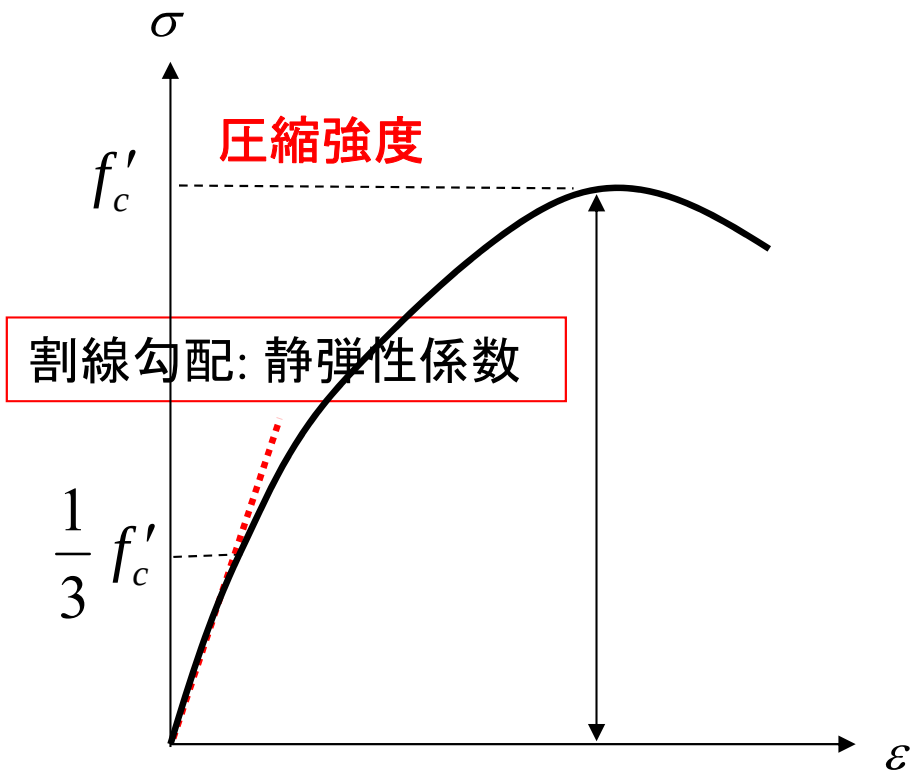
外観調査


A2側
路肩側面(海側)
コア採取位置
A1側
300
2,750
浮き・剥離
A1側
底面(見下げ)
A2側
コア採取位置
浮き・剥離
A1側
中分側面(山側)
A2側
100
100
1,000
2,750
300
17,900



圧縮・静弾性係数

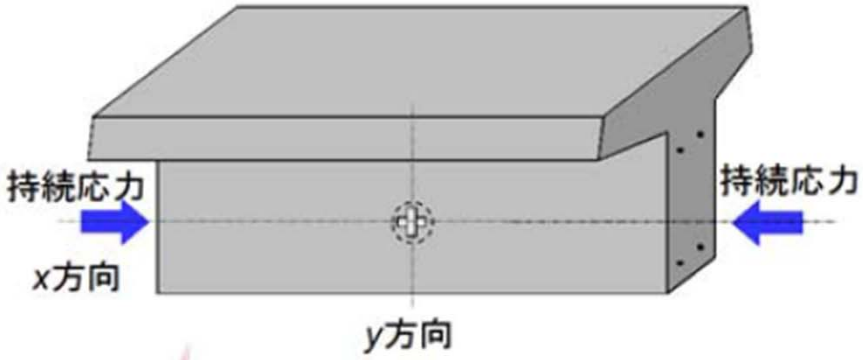
No	圧縮強度σ (N/mm²)	静弾性係数E (kN/mm²)
No.1	59.7	31.9
No.2	57.0	31.0
No.3	56.2	32.5
平均	57.6	31.8

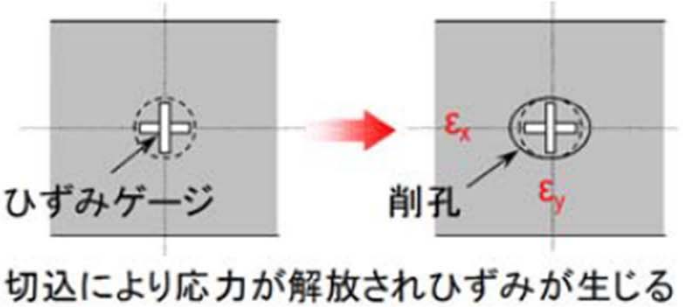


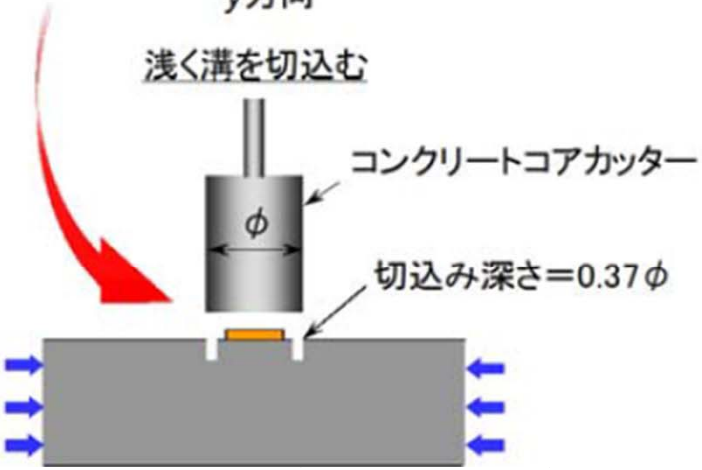
圧縮強度：設計基準強度40N/mm²をすべて満足
静弾性係数：設計値31kN/mm²を概ね満足

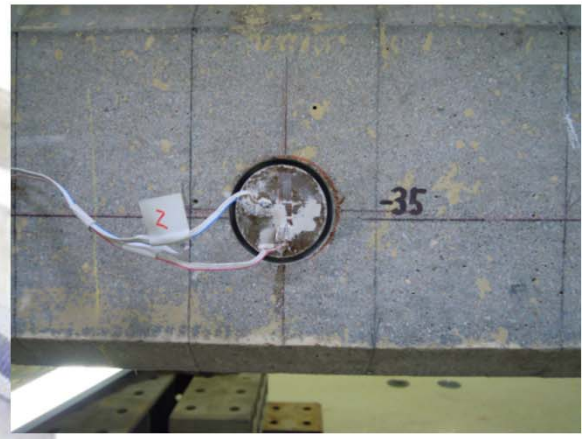
残存プレストレスの推定

（特許（第5095258号）取得，オリエンタル白石（株））





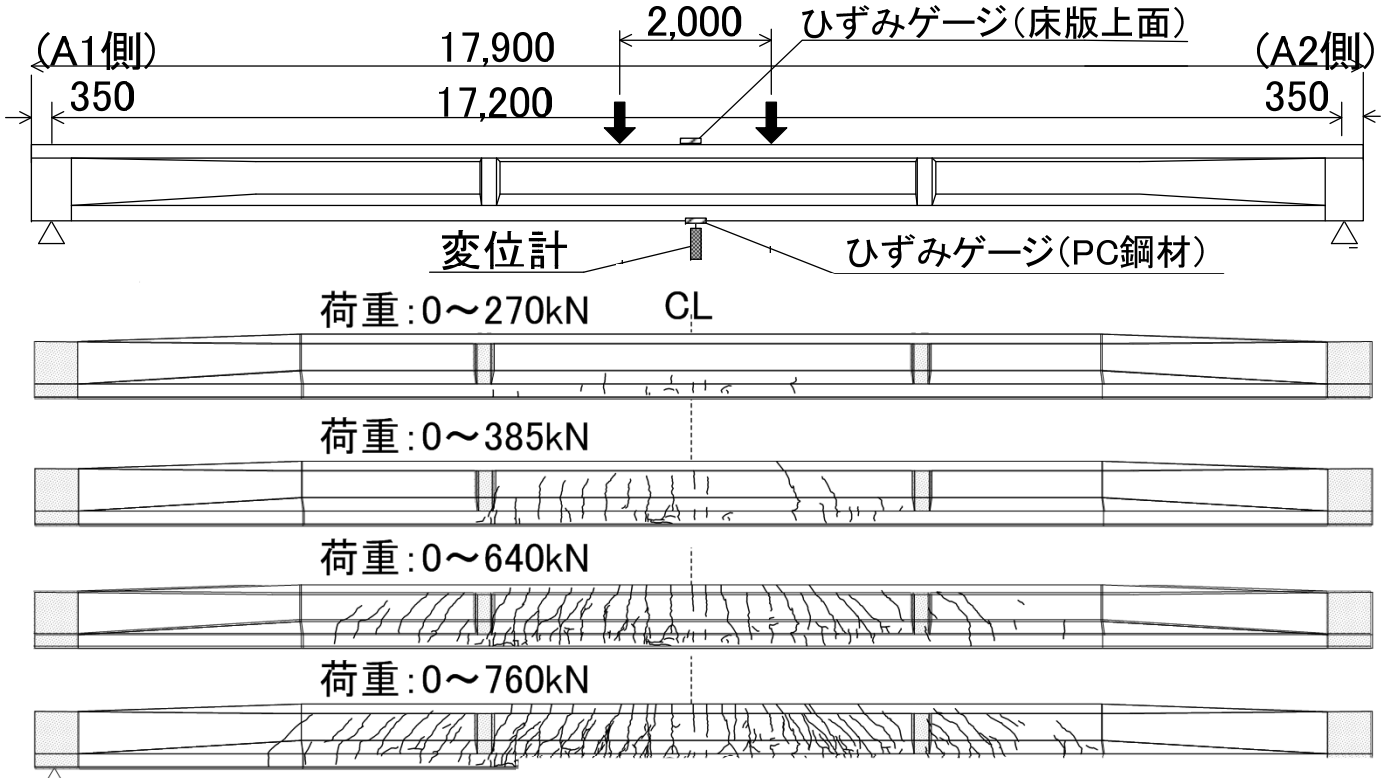


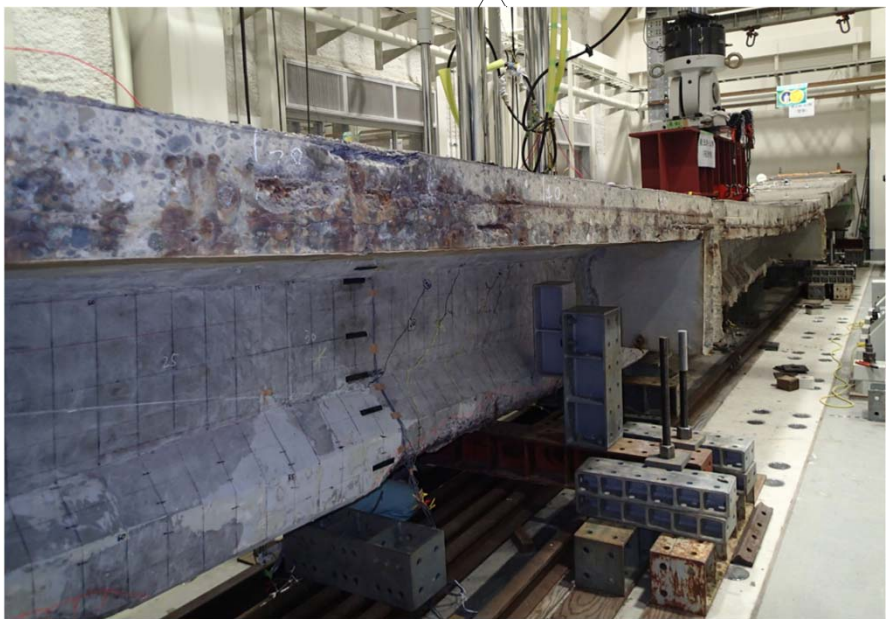


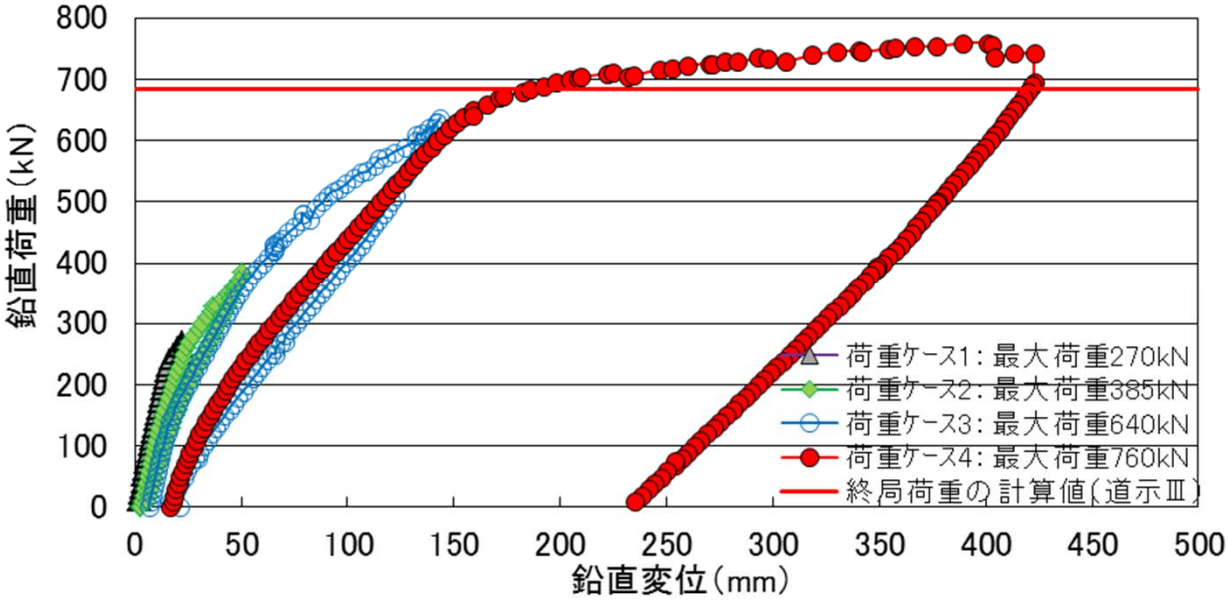
No	応力度N/mm^2		
	推定プレストレス	設計プレストレス	差
No.1	13.5	15.5	-2
No.2	14.7	13.6	1.1
No.3	6.1	6.3	-0.2
No.4	14.9	15.5	-0.6
No.5	11	13.6	-2.6
No.6	4.2	6.3	-2

＜文献＞二井谷教治，渡瀬博，阪田憲次，綾野克紀：コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究，コンクリート工学論文集，第20巻，第2号，pp.27-37，2009.5.

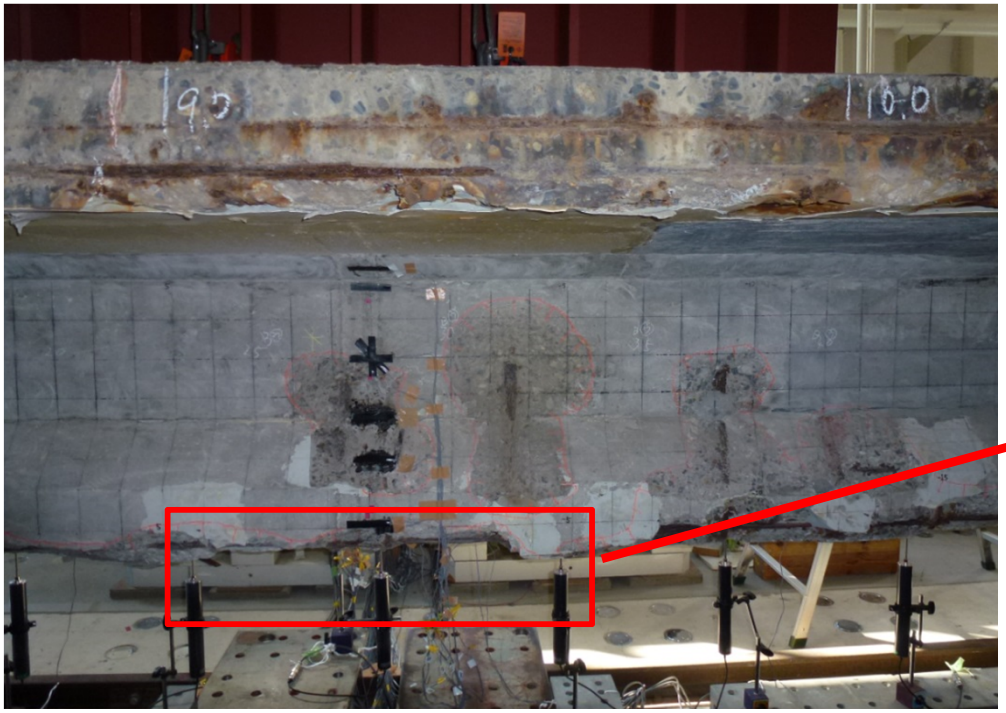
荷重－変位関係

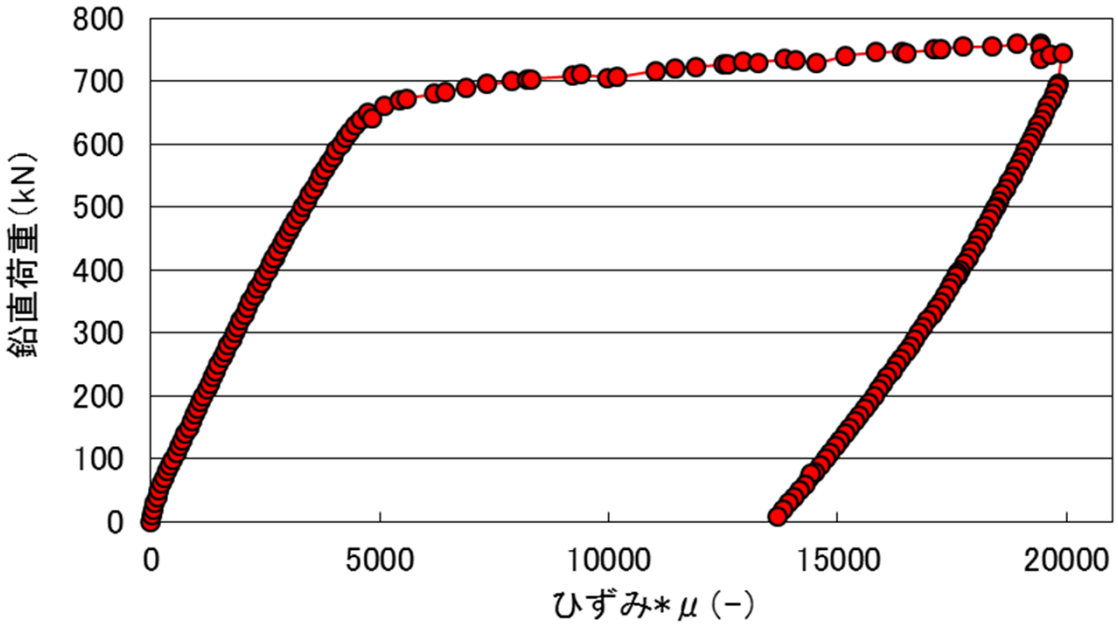

(A1側)
350
17,900
17,200
2,000
ひずみゲージ(床版上面)
(A2側)
350
変位計
ひずみゲージ(PC鋼材)
荷重:0～270kN
CL
荷重:0～385kN
荷重:0～640kN
荷重:0～760kN



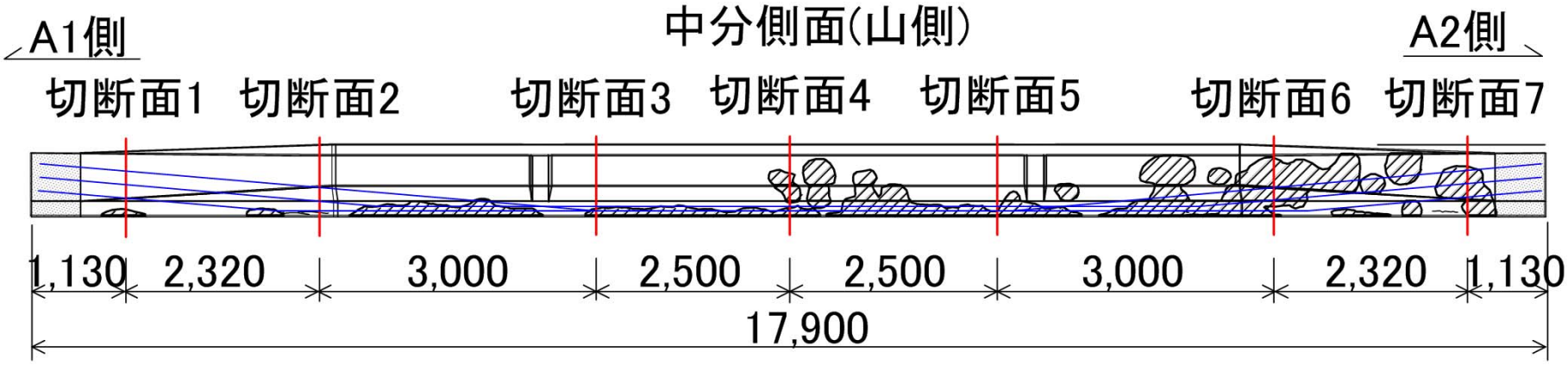

鉛直荷重(kN)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
鉛直変位(mm)
荷重ケース1: 最大荷重270kN
荷重ケース2: 最大荷重385kN
荷重ケース3: 最大荷重640kN
荷重ケース4: 最大荷重760kN
終局荷重の計算値(道示Ⅲ)

荷重－PC鋼材のひずみ関係

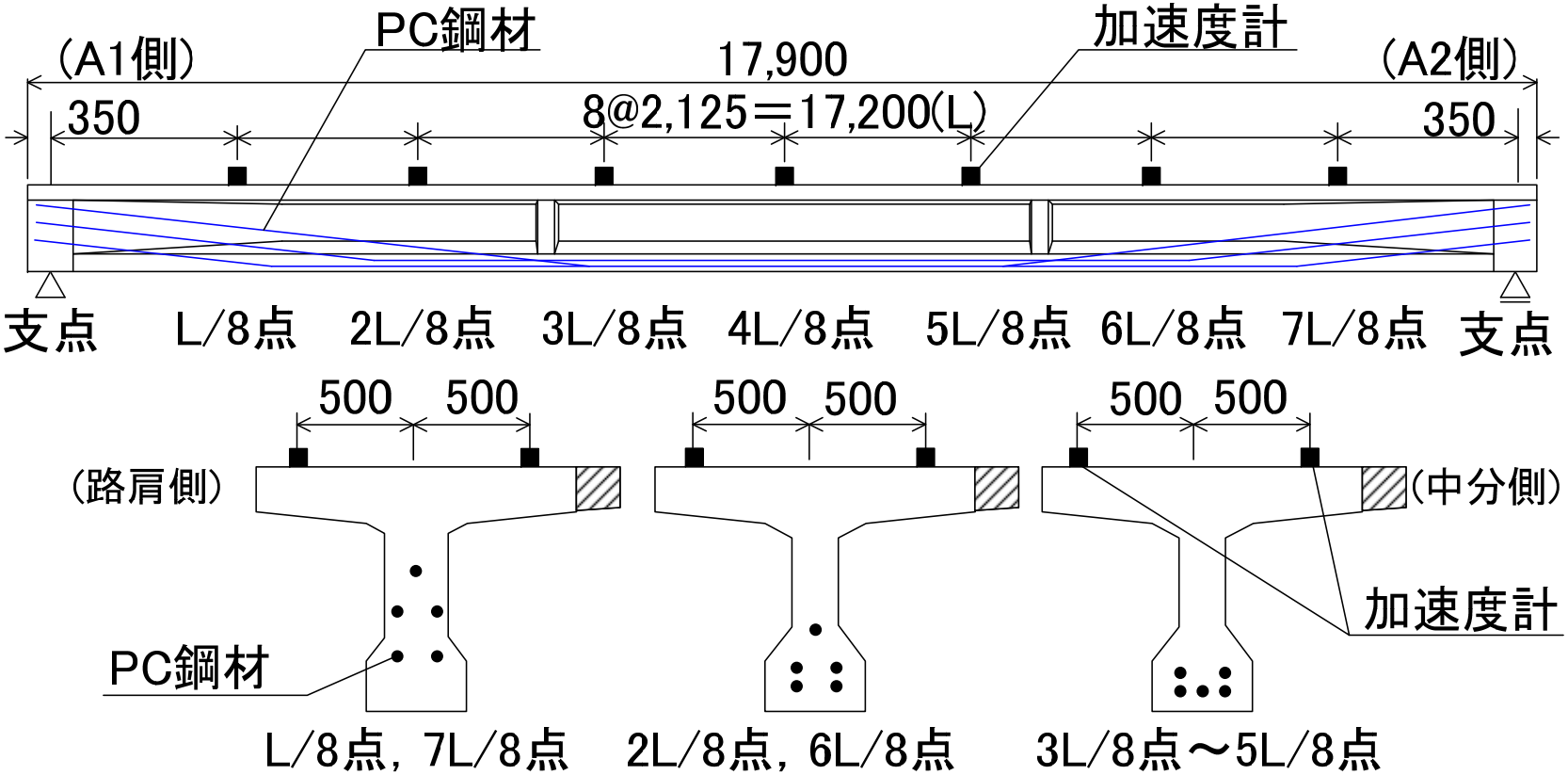




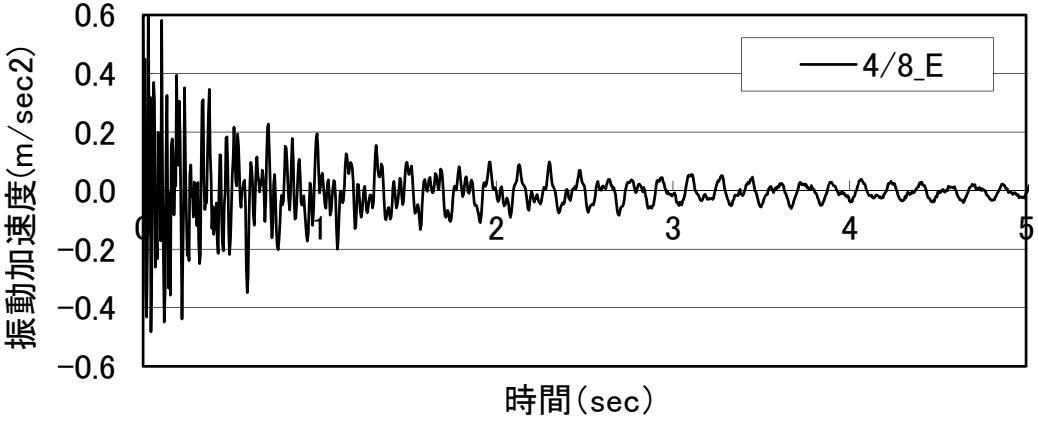
グラウト充填状況


A1側
中分側面(山側)
A2側
切断面1
切断面2
切断面3
切断面4
切断面5
切断面6
切断面7
1,130
2,320
3,000
2,500
2,500
3,000
2,320
1,130
17,900

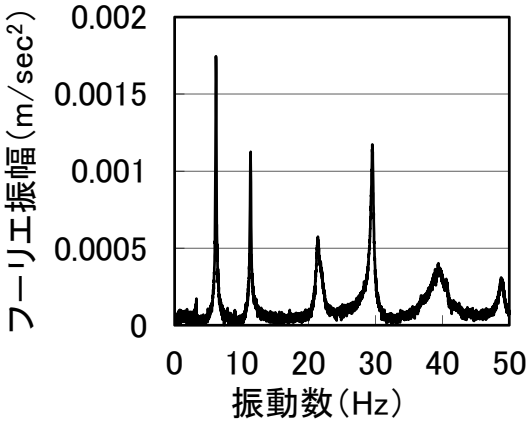
衝撃加振試験

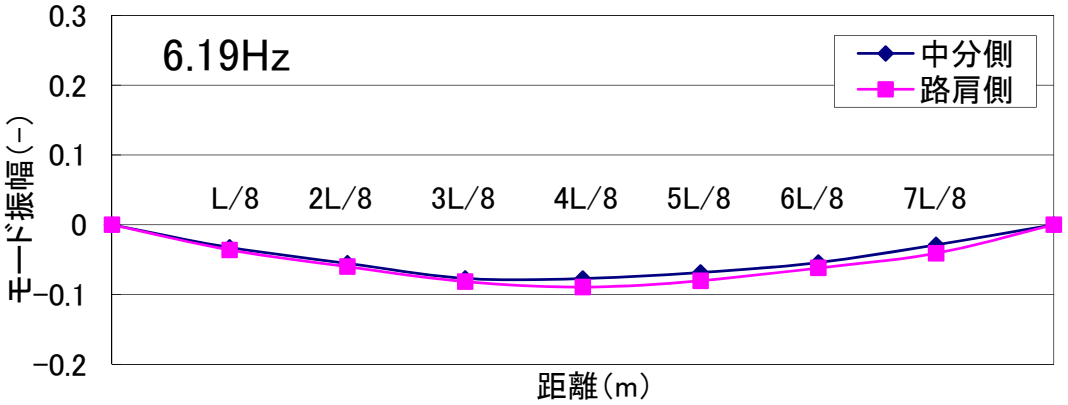


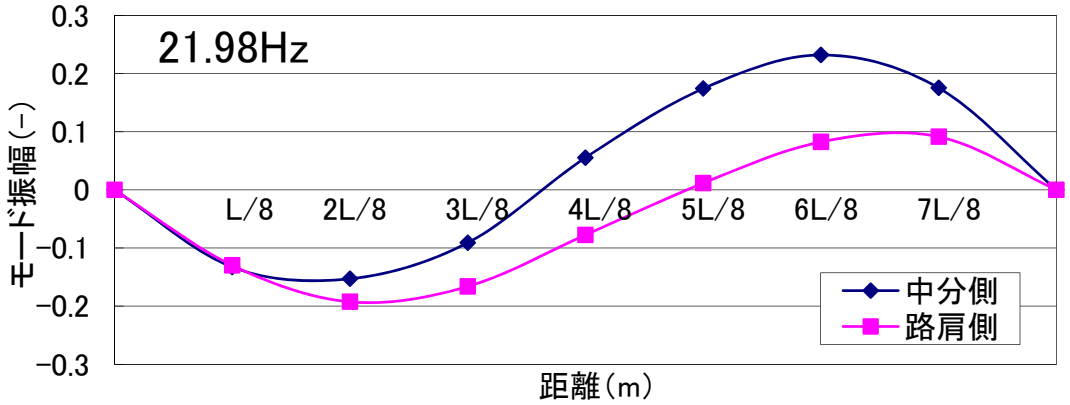
加振点：L/4，L/2，3L/4，幅員中央，偏心

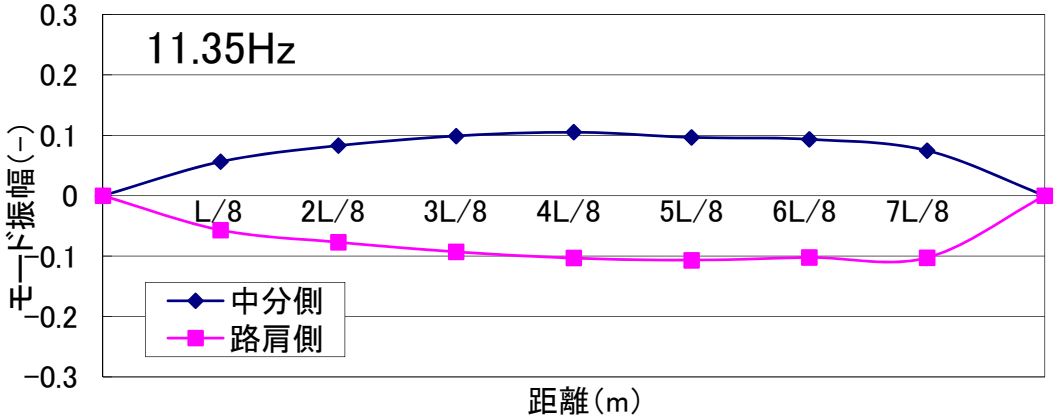


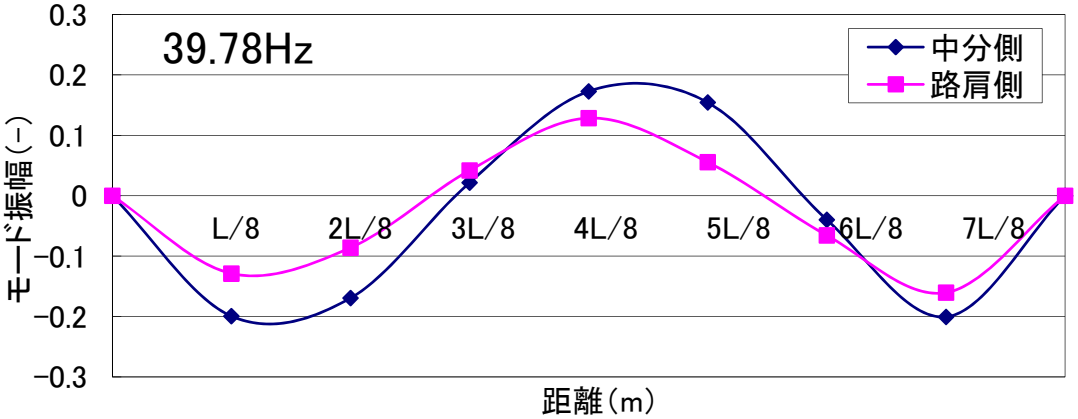
衝撃加振試験によるモード図





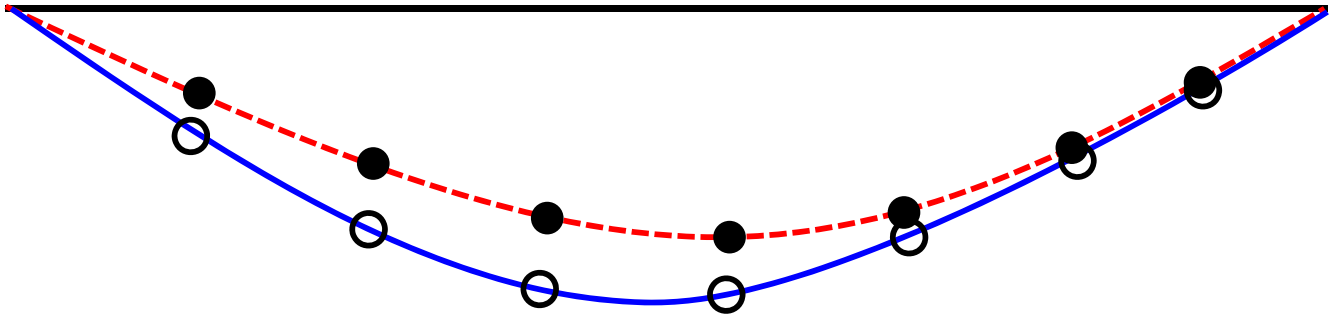




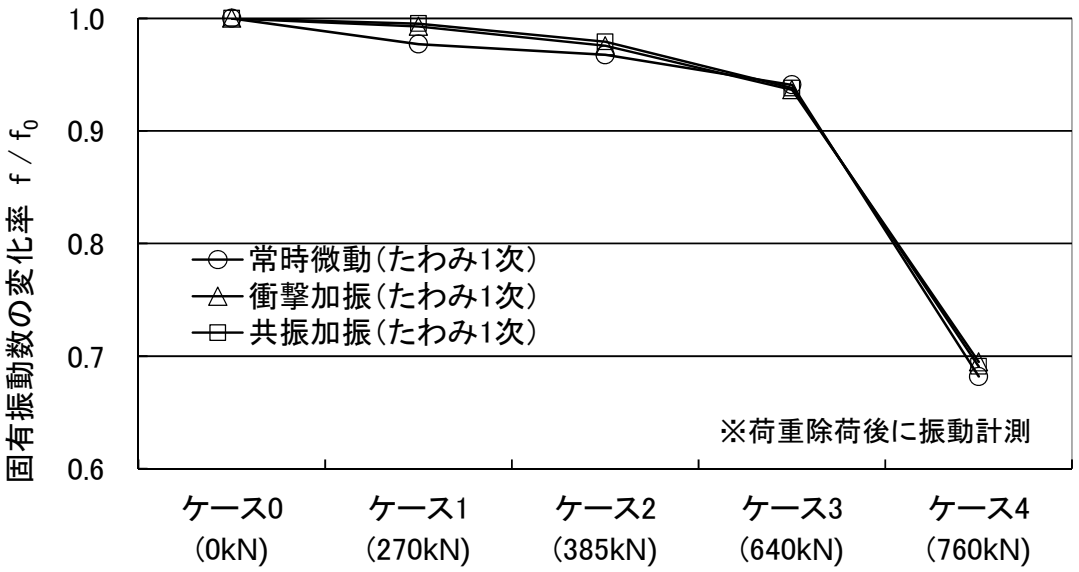
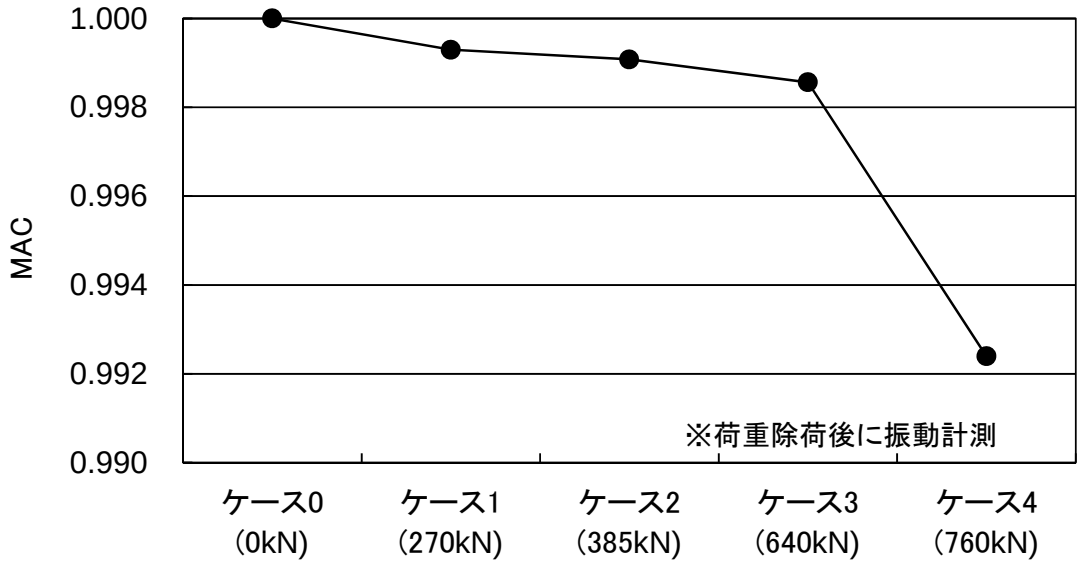
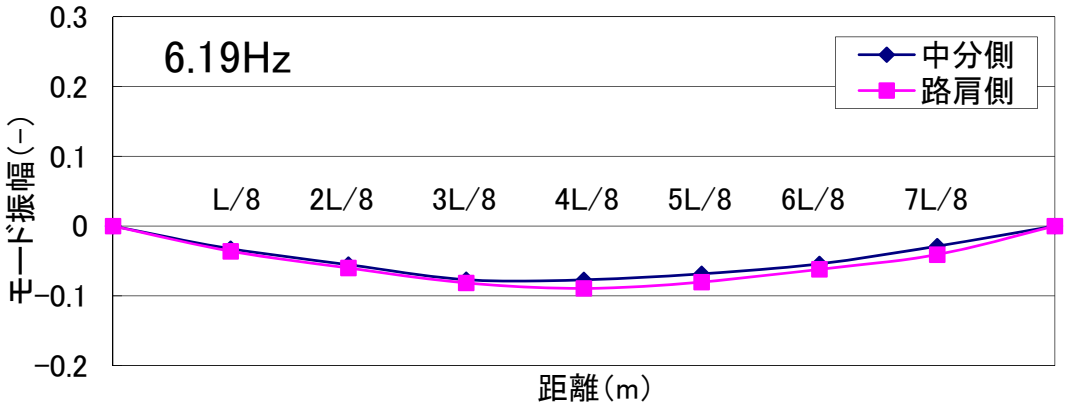


＜文献＞ Juang, J.N. and Pappa, R.S.: An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction, Journal of Guidance, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.

モード性信頼性評価基準
MAC（Modal Assurance Criterion）



$$MAC = \frac{\left(\sum_{j=1}^{n} \phi_{Tj}\phi_{Ej}\right)^2}{\sum_{j=1}^{n} \phi_{Tj}{}^2 \sum_{j=1}^{n} \phi_{Ej}{}^2}$$

ϕ_T：理論値または計測した初期値としての振動モード
ϕ_E：計測値または経過後の振動モード
n　：振動モードの観測点の数

載荷荷重ケースと振動数，MACの関係