

# R7年度 橋梁技術講演会(中部地区)

## 鋼橋に関する先進的研究の紹介

－ 橋梁モニタリング, FRP補修/補強, 限界状態設計法 －

名古屋工業大学

社会工学類

特任教授 宮下 剛

# 本日の内容

## 橋梁モニタリング, FRP補修/補強, そして限界状態設計法へ

高齢化が急速に進行する橋梁の維持管理では、状況や状態を適切に評価し、効率的かつ効果的に補修/補強を行うことが求められる。前者については橋梁モニタリングが、後者についてはFRPによる補修/補強が、有望な方法として考えられ、それぞれについて研究事例を紹介する。また、平成29年の道路橋示方書の改定により、道路橋の設計体系が、従来の許容応力度設計法から、限界状態設計法をベースとする部分係数設計法へと移行した。ここでは、新設橋のみならず、既設橋に対する部分係数設計法が提案され始めている。この動向について、最新の研究とともに紹介を行う。

- 橋梁モニタリング
- 鋼構造物のFRP補修/補強
- 限界状態設計法

# 研究概要

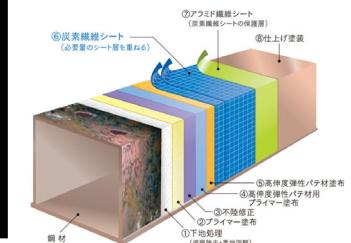
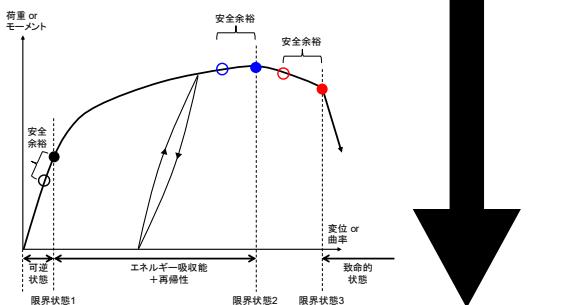
高齢化が急速に進行する橋梁<sup>1)</sup>の維持管理では、状況や状態を適切に評価し、効率的かつ効果的な補修/補強が必要となる。また、南海トラフ巨大地震の発生<sup>2)</sup>が懸念される中、地方自治体と協働し、防災・減災に向けた耐震対策が重要である。

1) わが国にある約73万橋のうち2032年度に建設後50年を経過する割合は約59%

2) 30年以内に発生する確率は70~80%（気象庁）

## 橋梁モニタリング

現況の把握、損傷検出、耐震診断



## 限界状態設計法

限界状態、部分係数、道示改定

## FRP補修/補強

腐食損傷の補修、耐震補強

最新の橋梁設計法を検討しつつ、橋梁モニタリングから現況を評価し、効率的かつ効果的な手法で補修・補強を行う。

# 橋梁モニタリング

# 調査橋梁一覧

## ■ 計測 or モニタリング関係(2005年～)

- (1a) 東海道新幹線・鋼箱桁橋←学位論文
- (1b) 東海道新幹線・RC高架橋
- (2a) 多々羅大橋
- (2b) 大芝大橋(広島県, 農道)
- (2c) 舞鶴クレインブリッジ(市道)
- (2d) 幸魂大橋(東京外環&R298)
- (2e) 新湊大橋(富山県)
- (2f) 間人漁港大橋(京都府)
- (3a) 本郷橋(岐阜県)
- (3b) 御殿場高架橋(新東名)
- (3c) 中ノ川橋梁(道央自動車道)
- (4a) 長生橋(長岡市, R351)
- (4b) 与板橋(長岡市, R403)
- (4c) 小坂橋(長岡市, R404)
- (4d) 鶴ノ島橋(長岡市, R404)
- (4e) 昭和橋(長岡市, R291)
- (5a) 檜木沢橋(田野畠村, R45)
- (5b) 大橋JCT(首都高)
- (6a) 大宮橋側道橋(舞鶴市, 鋼钣桁)
- (6b) 木津川御幸橋(八幡市, 鋼G桁)
- (6c) 豊橋(新潟市福島潟, 鋼钣桁)
- (6d) 大橋(南丹市, RC単純T桁)
- (6e) 物部大橋(綾部市)
- (6f) 金谷橋
- (7a) 妙高大橋(妙高市, R18)←SIP
- (8a) 旧大河津可動堰上部構(燕市)
- (9a) 長生橋(長岡市, R351)
- (10a) 子飼橋(熊本市)
- (10b) 北陸自動車道の橋梁
- (11) 錦帯橋(岩国市, 早大のサポート)
- (12) 常呂川橋(北見市, E61)

# 橋梁モニタリング

## 老朽化する橋梁の先進的な維持管理技術

# 鐵道橋

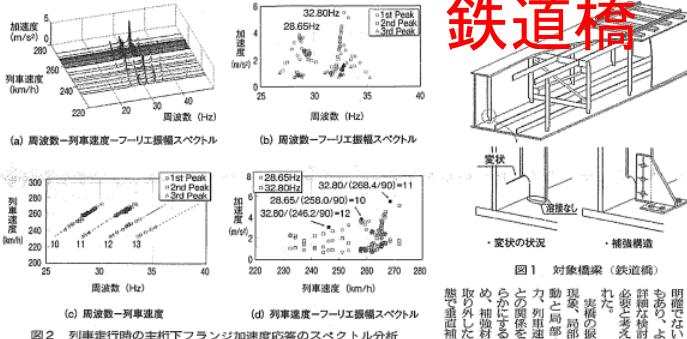


図2 列車走行時の主桁下フランジ加速度応答のスペクトル分析

## 社会インフラの一つである 橋梁の維持管理に向けて

ある（曾川大）、「ヨコハマ」が、明治開港場設立の年である（1859年）に、日本最初の郵便局として開設された。山梨県の郵便局は、明治10年（1877年）に開設されたのが最初のもので、その後、各市町村に開設が進んでいった。社会文化の発展とともに、郵便局は、その前に開設された「手紙便」とは、全く別個のものになってしまった。郵便局は、時代とともに、その役割を拡張していった。高齢化や少子化が進む中で、利用客が減少の一途を辿る中で、郵便局は、どうやって生き残らなければならないのか、いよいよ難題となってきた。

宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹:  
レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により  
発生する局部振動の把握と列車速度の影響, 土木  
学会論文集A, Vol.63, No.2, pp.277-296, 2007.4.  
**【2009年土木学会田中賞(論文部門)】**

## 【2009年土木学会田中賞(論文部門)】

これは共振曲線となる。

宮下剛, 岩崎英治, 長井正嗣, Tran Duy Khanh:  
供用から76年が経過した鋼ゲルバートラス橋の現地載荷試験と短期間モニタリング,  
構造工学論文集A, Vol.61, pp.439-450, 2015.3.  
**【2015年第61回構造工学シンポジウム論文賞】**

## 【2015年第61回構造工学シンポジウム論文賞】

## 老朽化する橋梁の 先進的な維持管理技術

# 道路橋

**JIRC**  
PROFESSIONAL  
ORIGINAL & TOOL

建設產業

おわりに

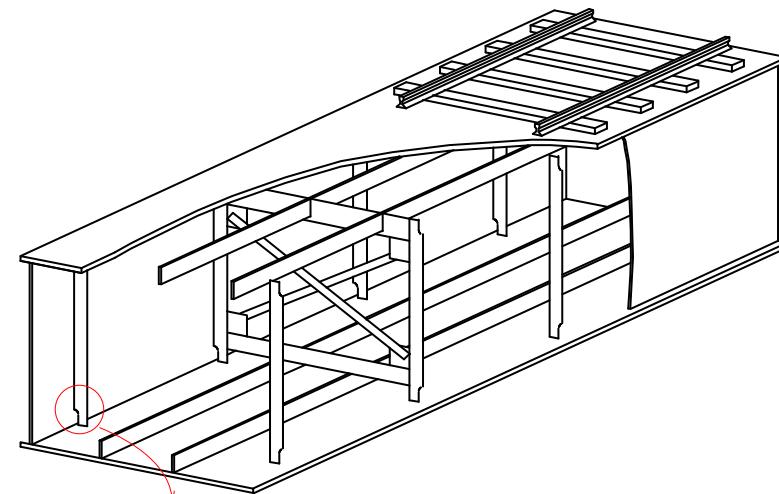


レーザー計測を用いた鋼鉄道橋の高速走行により発生する局部振動の把握と列車速度の影響

# 新幹線鋼箱桁橋 背景

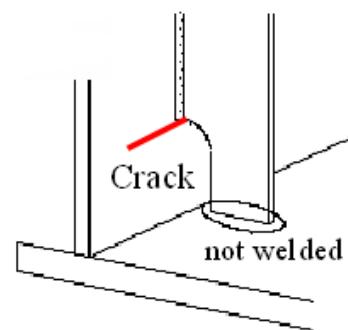
## ■ 変状の概要

垂直補剛材下端部の主桁ウェブ溶接部においてき裂が発生



## ■ 変状の対策

補強材を高力ボルトで取付ける  
同一の構造を有する部位全て



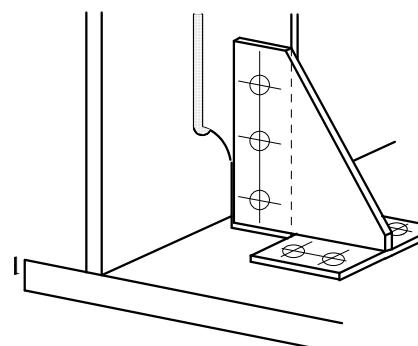
## ■ 対策の効果

不具合の報告なし

## ■ 変状の原因

杉本 (1997)

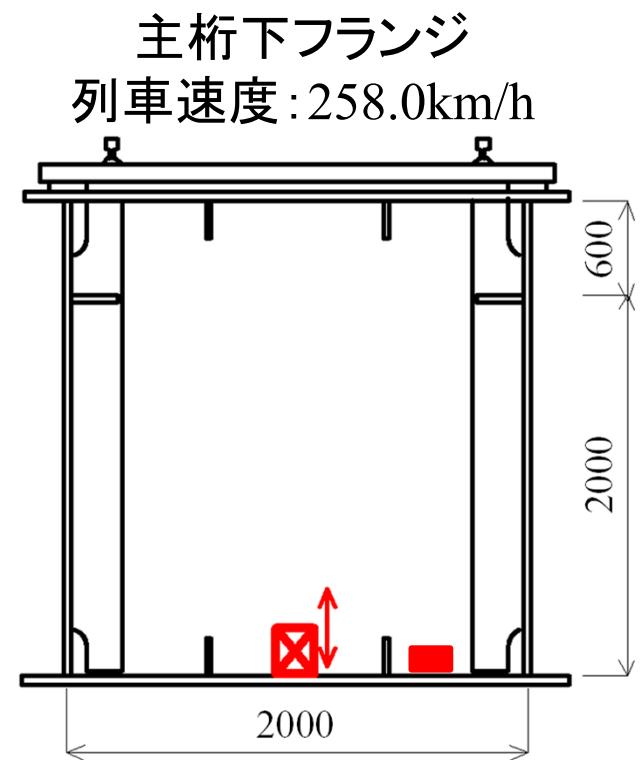
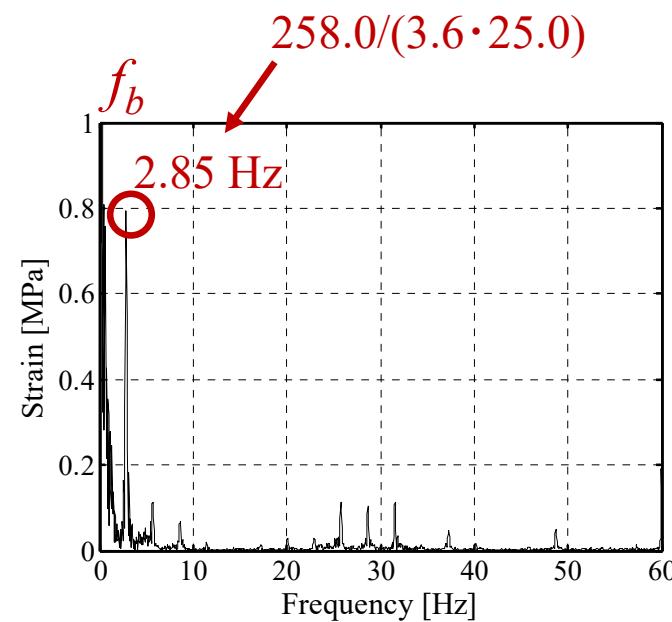
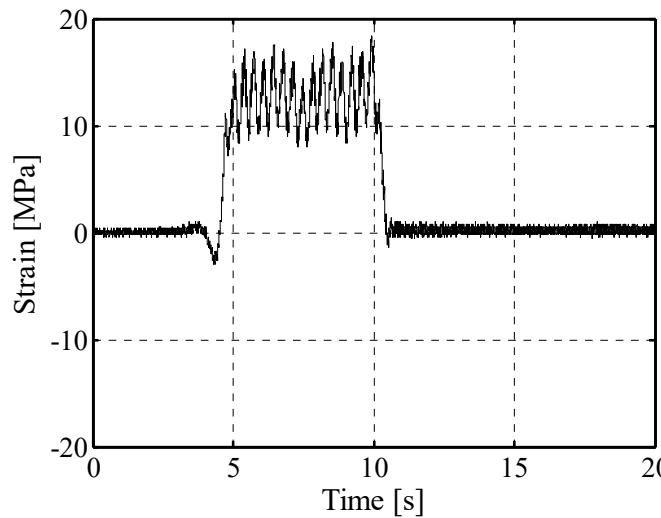
列車走行に伴う高次の局部振動  
発生メカニズムは明らかではない



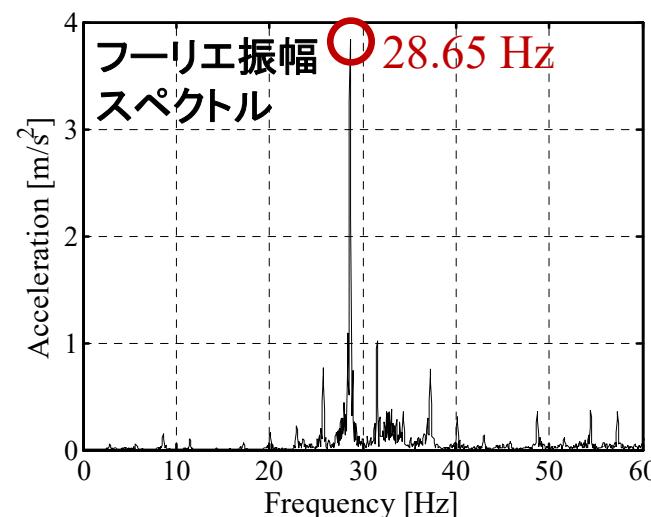
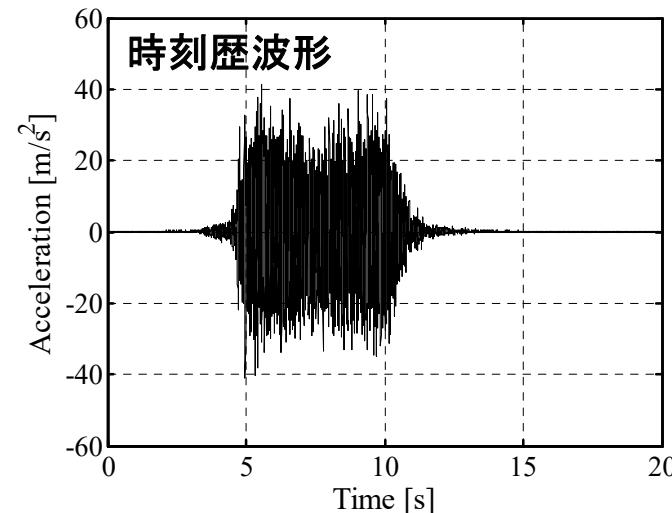
補強

# 新幹線鋼箱桁橋 計測結果

## ■ ひずみ

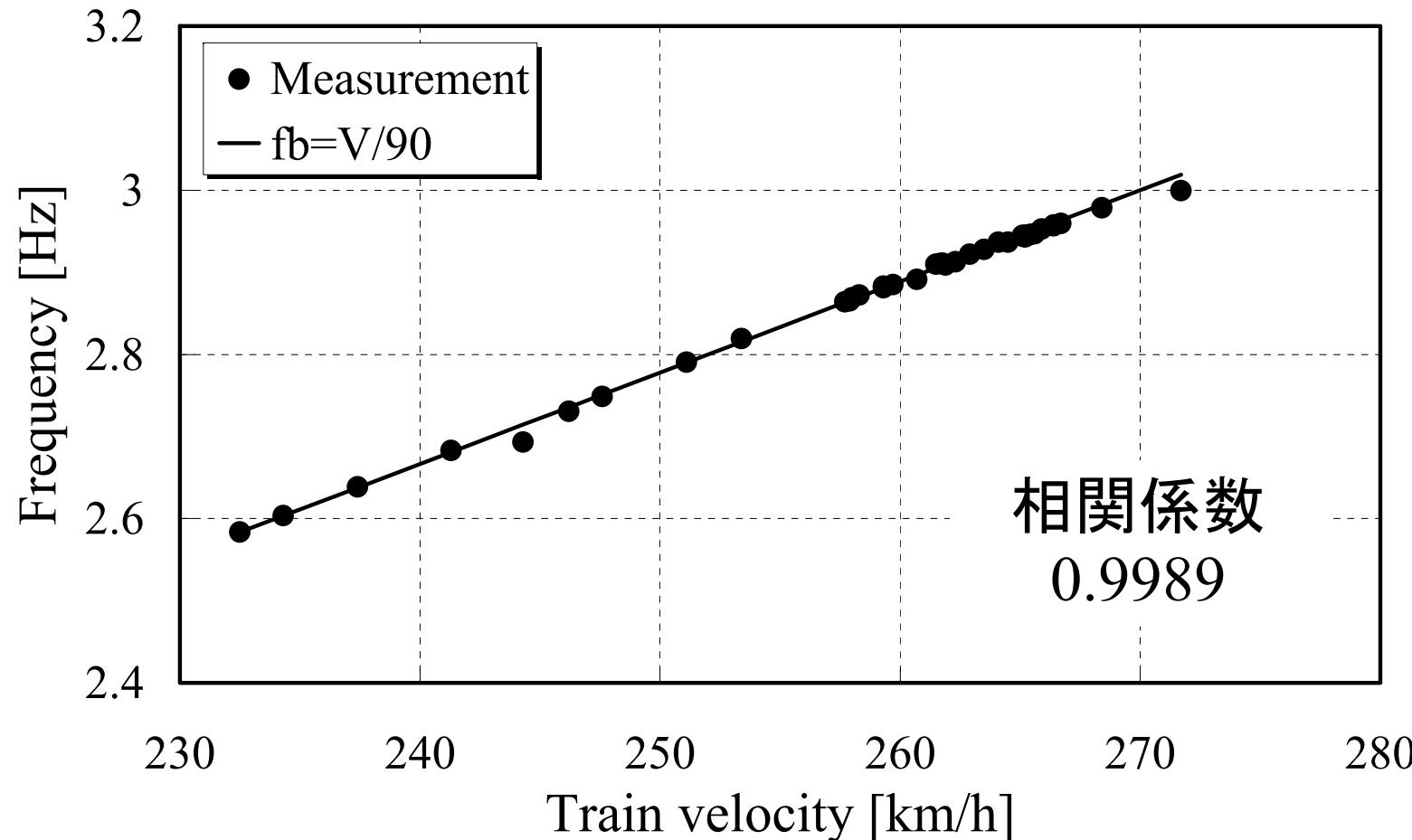


## ■ 加速度



## ■ 列車速度と $f_b$ の関係

全39列車について、フーリエ振幅スペクトルの2.0~3.0Hzにおけるピークを抽出

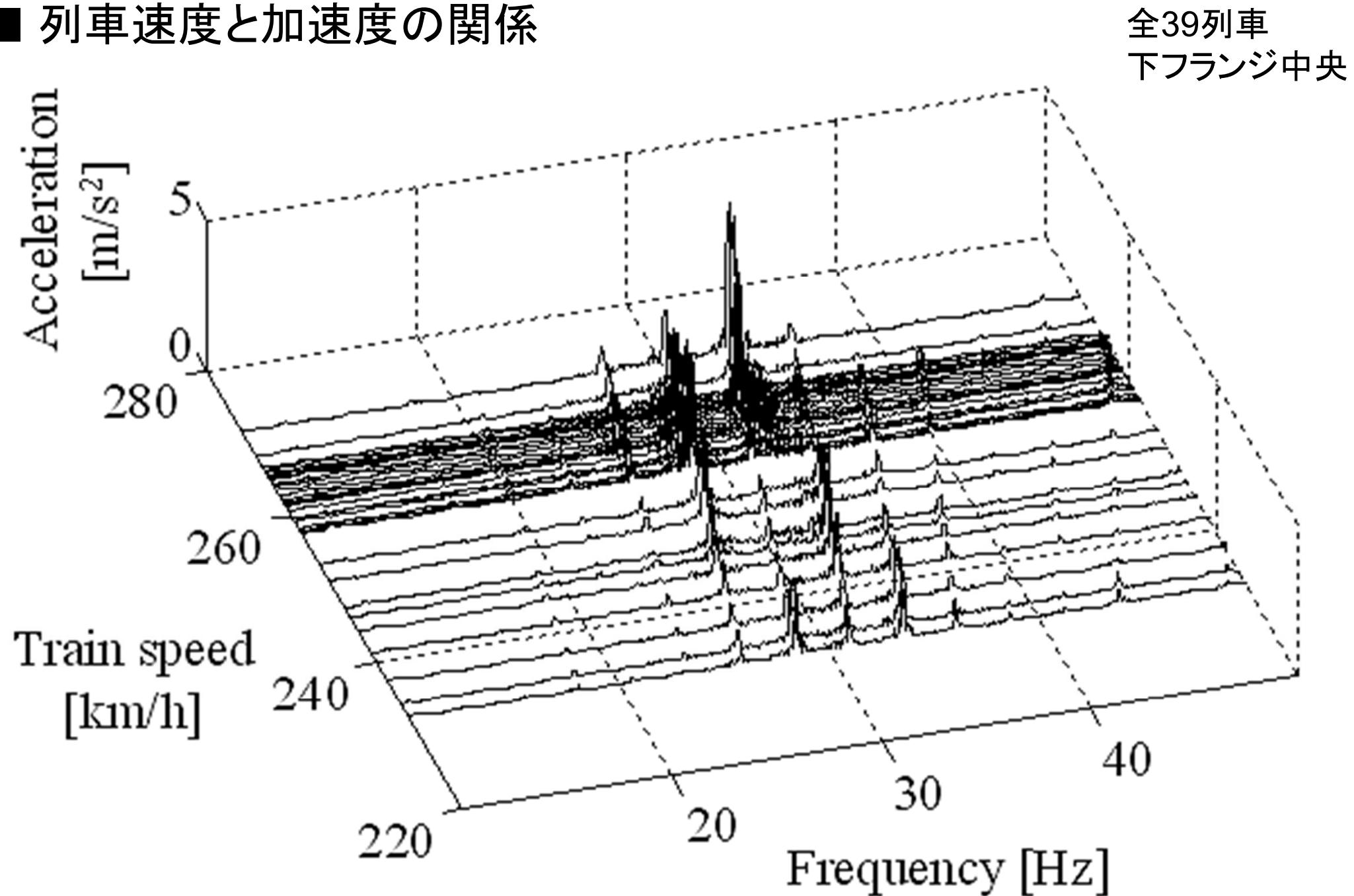


$$f_b = V/3.6A$$

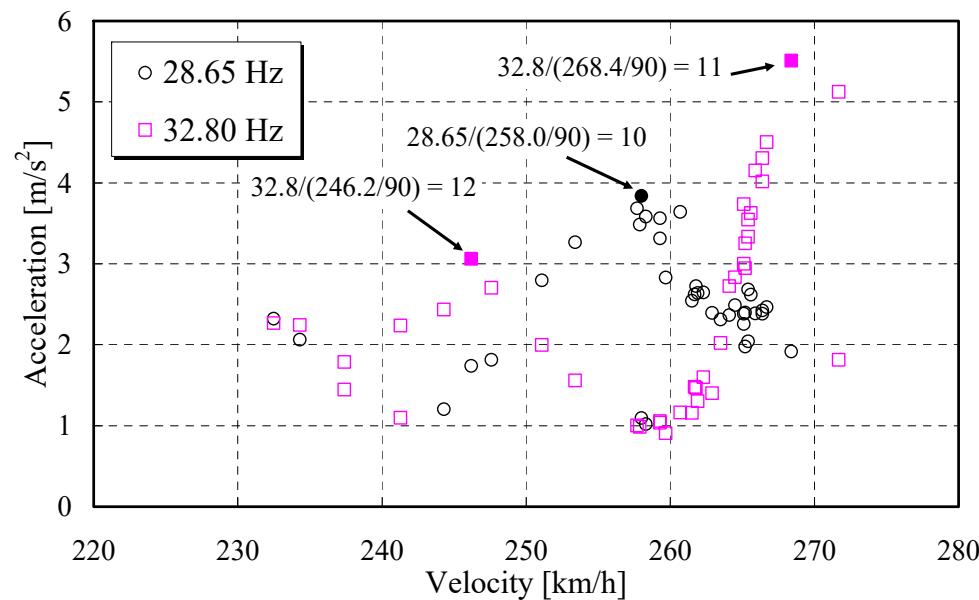
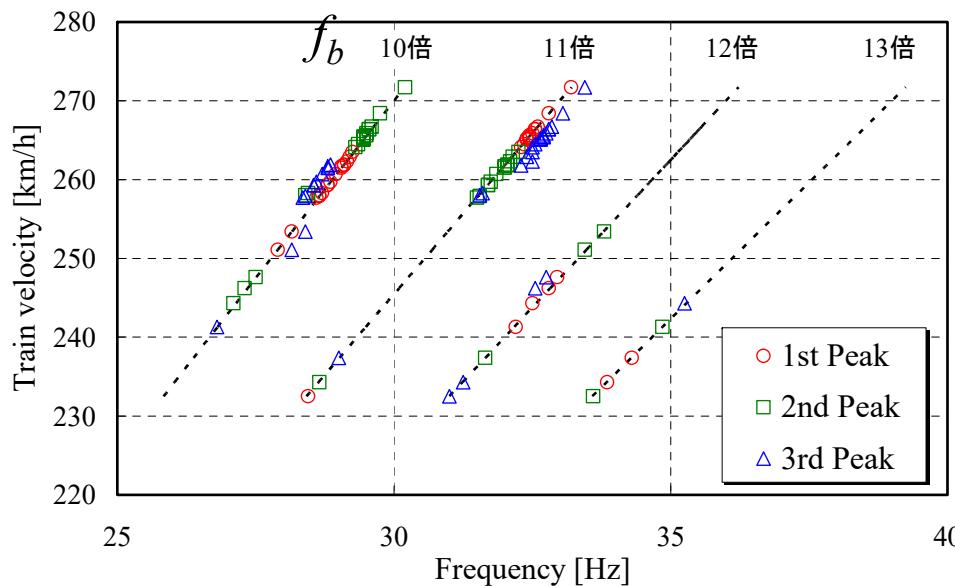
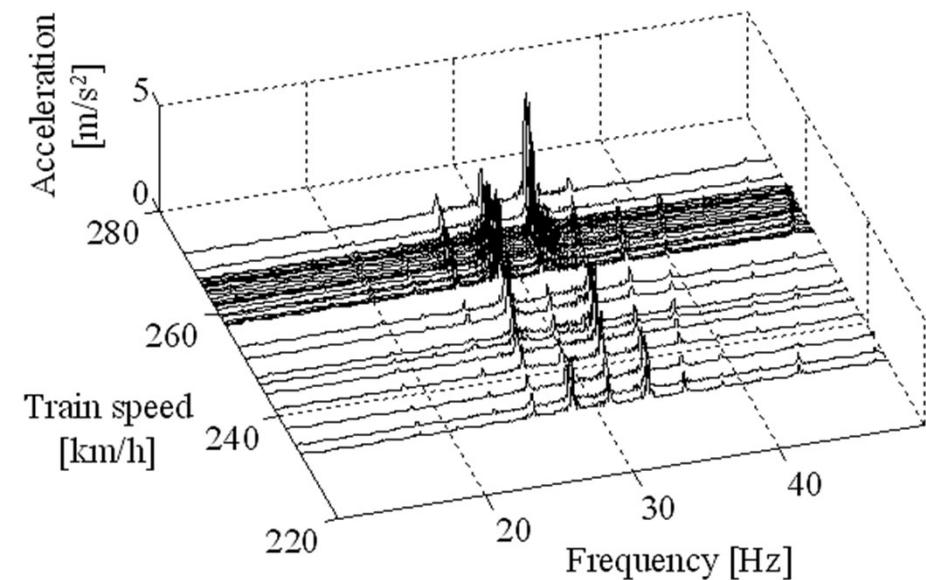
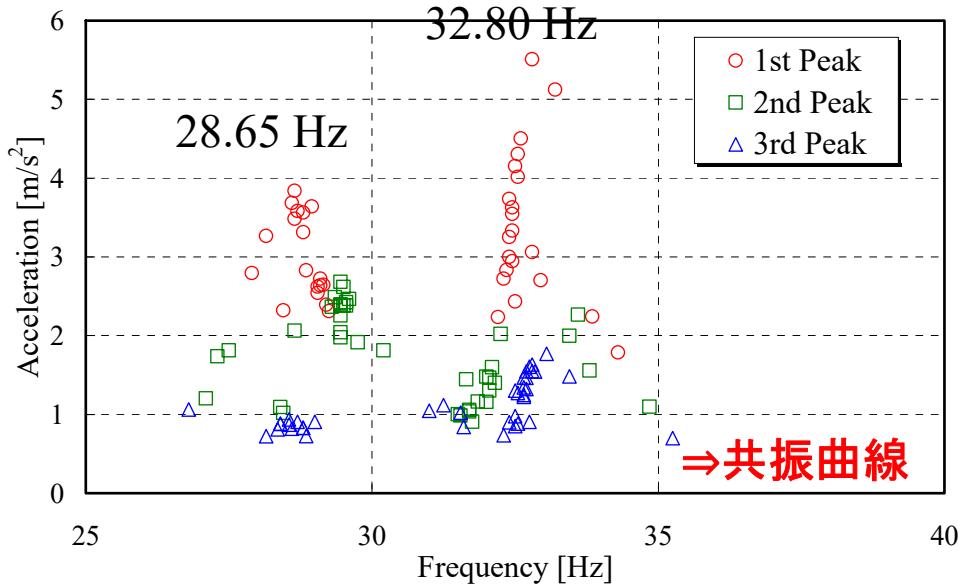
$V$  列車速度 [km/h]

$A$  列車長さ (=25.0m)

## ■ 列車速度と加速度の関係

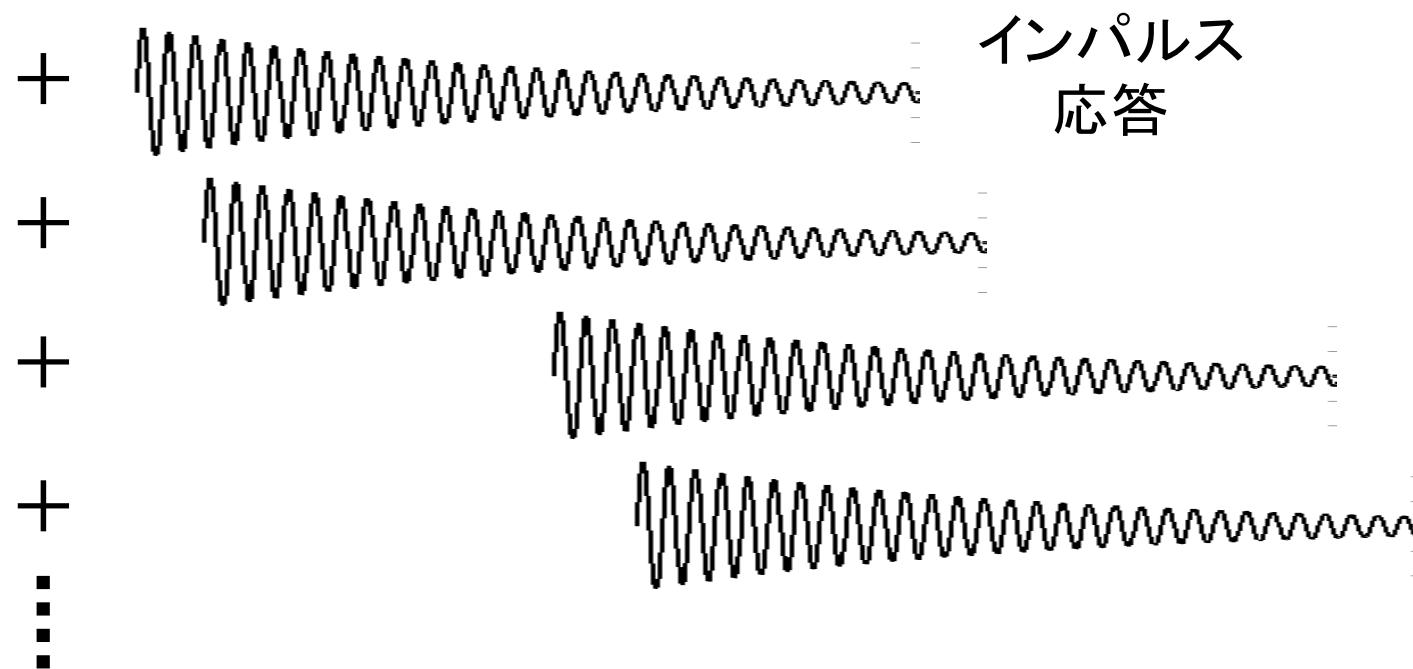
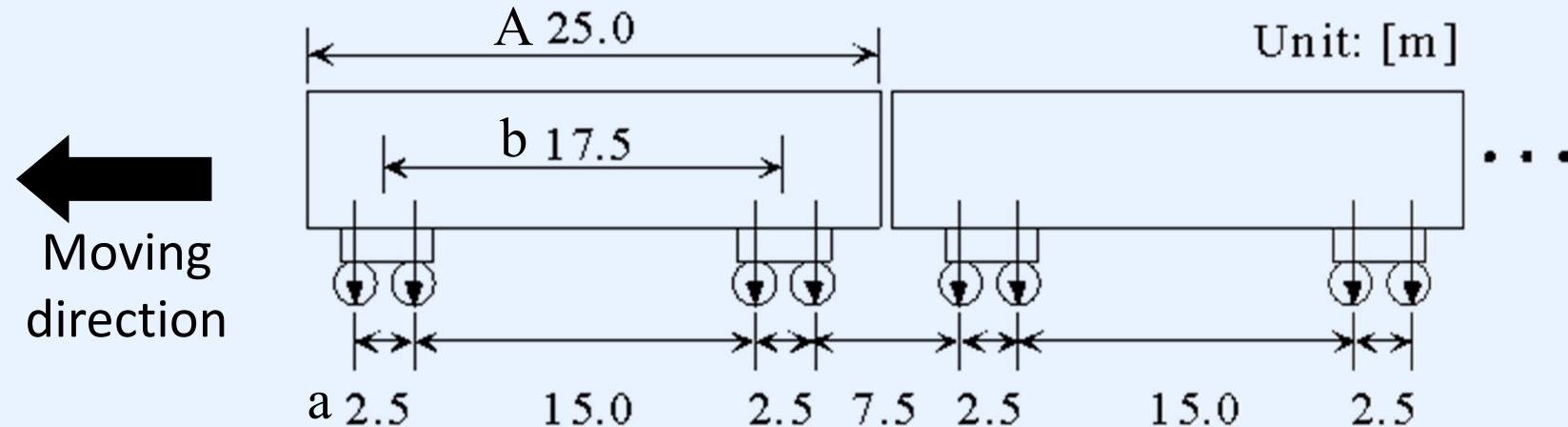


## ■ 列車速度と加速度の関係



# 新幹線鋼箱桁橋 解析モデル

車軸列による局部振動モードのインパルス応答の重ね合わせ



# 新幹線鋼箱桁橋 解析モデル

## インパルス応答の重ね合わせ

$$g(t) = \sum_{l=1}^M \frac{1}{m_l b_l} \sum_{k=1}^N \left[ e^{-a_l(t-\tau_{k1})} \sin \{b_l(t-\tau_{k1})\} + e^{-a_l(t-\tau_{k2})} \sin \{b_l(t-\tau_{k2})\} + e^{-a_l(t-\tau_{k3})} \sin \{b_l(t-\tau_{k3})\} + e^{-a_l(t-\tau_{k4})} \sin \{b_l(t-\tau_{k4})\} \right]$$

$$a_l = \xi_l \omega_{0l} \quad (l = 1, 2, \dots, M)$$

$$b_l = \omega_{0l} \sqrt{1 - \xi_l^2} \quad (l = 1, 2, \dots, M)$$

$$\tau_{k1} = 3.6 \cdot \{a + A(k-1)\} / V + c$$

$$\tau_{k2} = 3.6 \cdot \{2a + A(k-1)\} / V + c$$

$$\tau_{k3} = 3.6 \cdot \{a + b + A(k-1)\} / V + c$$

$$\tau_{k4} = 3.6 \cdot \{2a + b + A(k-1)\} / V + c$$

$$(k = 1, 2, \dots, N)$$

$M$  固有振動数の個数

$N$  車両数 (=16)

$\omega_{0l}$  固有角振動数 [radian]

$\xi_l$  減衰定数

$m_l$  モード外力の効果を含む質量

$V$  列車速度 [km/h]

$c$  外力が加わるまでの時間ラグ [s] (=5.0)

$a$  車軸間隔 [m] (=2.5)

$b$  台車間隔 [m] (=17.5)

$A$  車両長さ [m] (=25.0)

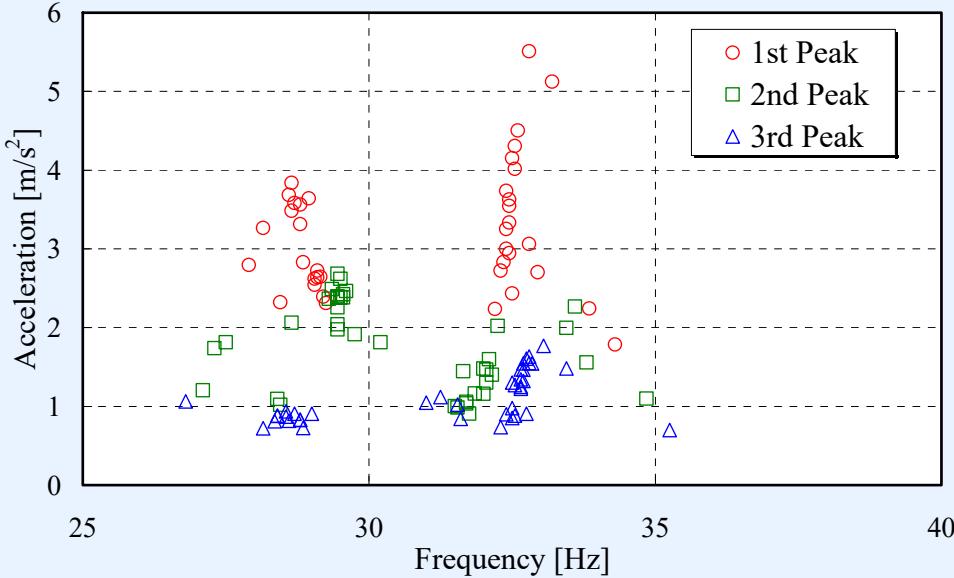
$t$  時間 [s]

モデルに含まれるパラメータは計測結果から同定される

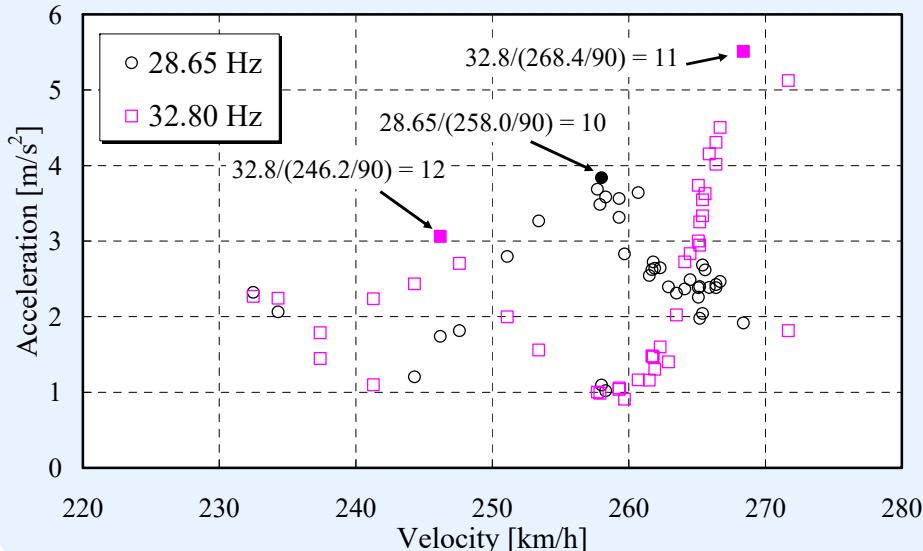
# 新幹線鋼箱桁橋 結果の比較

## 計測結果

### ・共振曲線

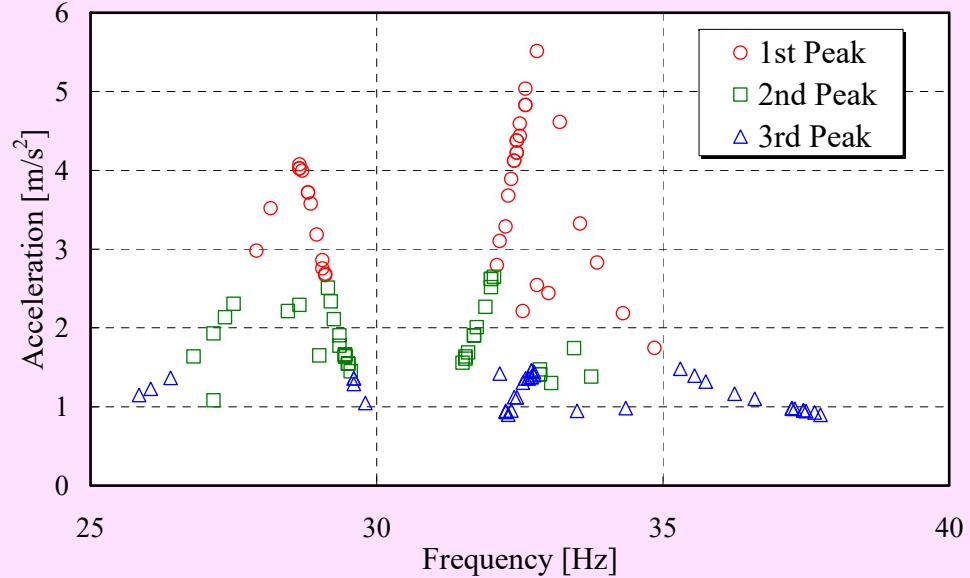


### ・列車速度－加速度

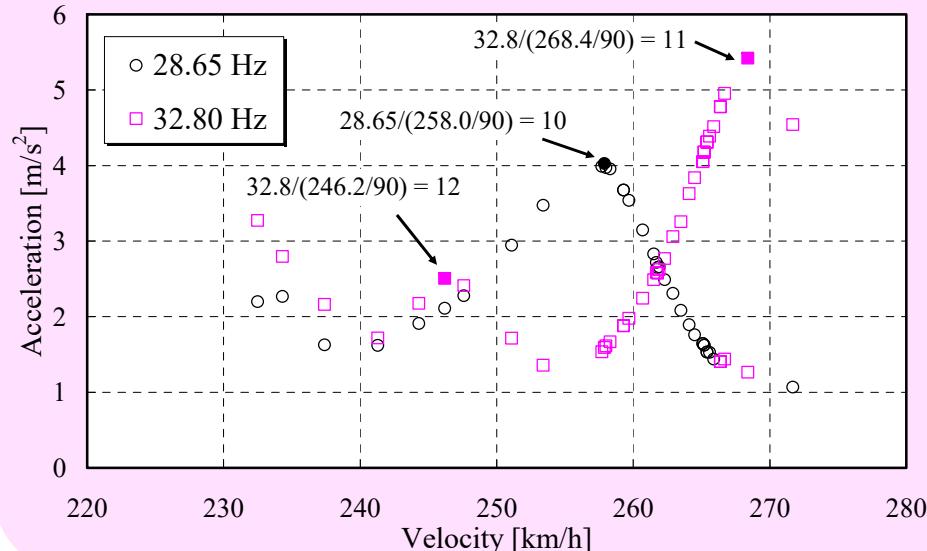


## 解析結果

### ・共振曲線

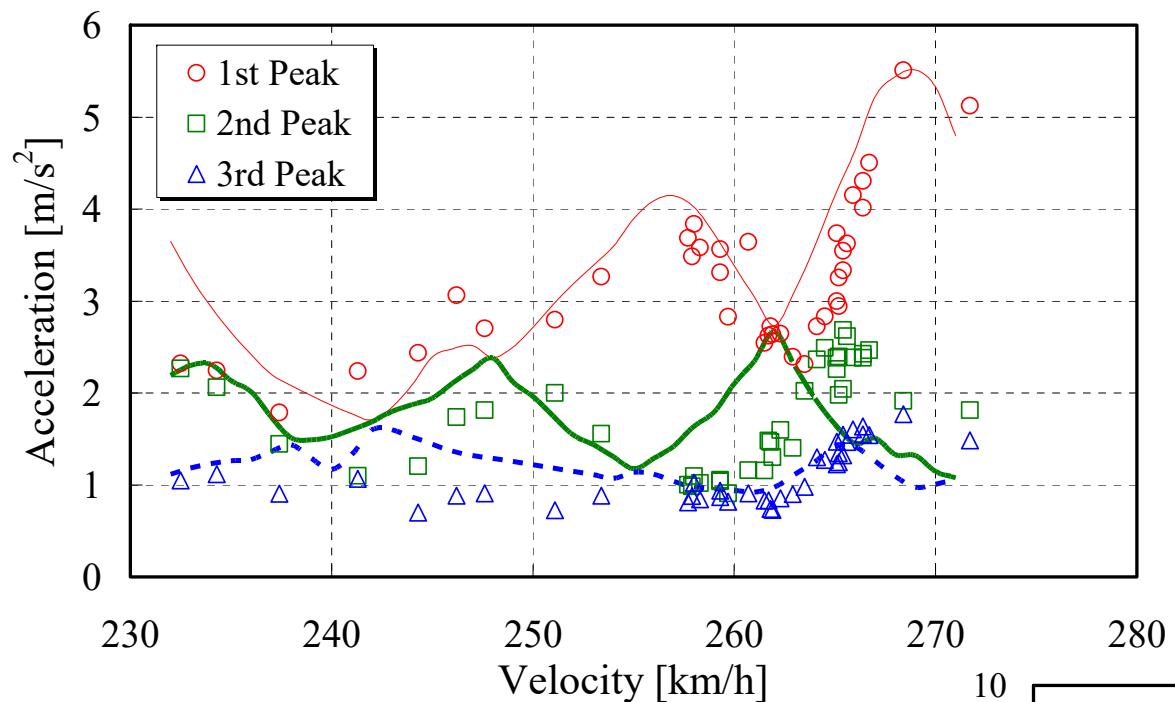


### ・列車速度－加速度

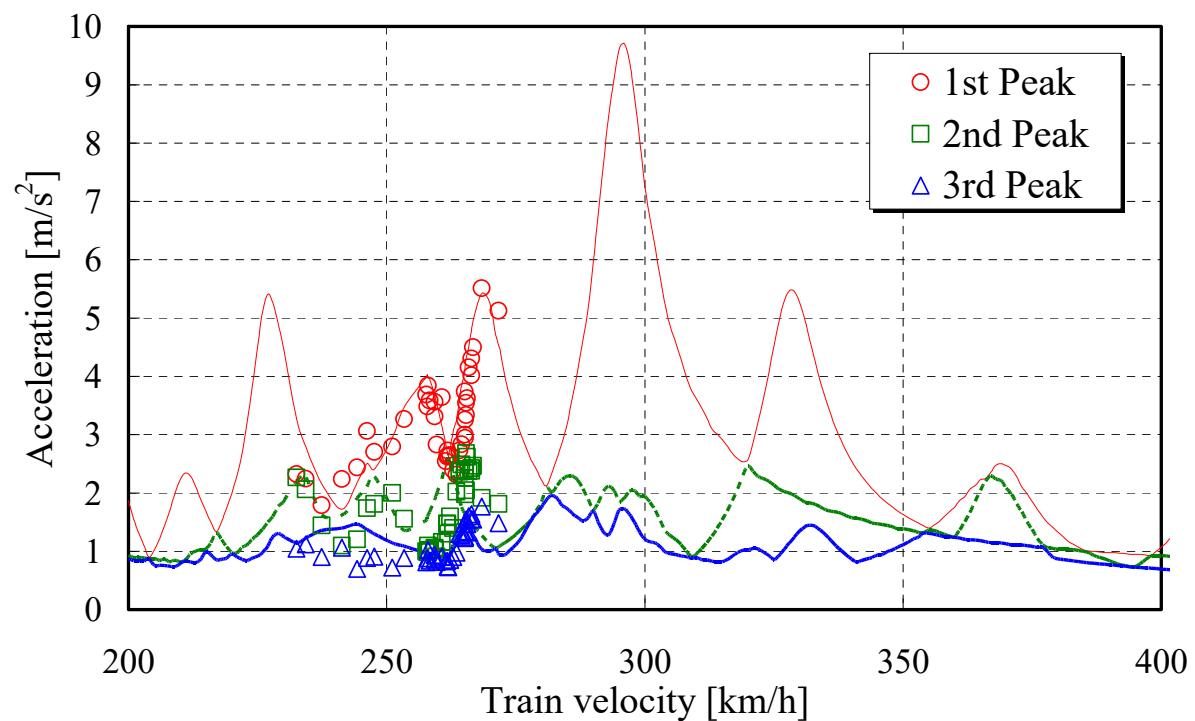


# 新幹線鋼箱桁橋 列車速度と加速度応答

19



Lines: 解析結果  
Dots: 計測結果



# 供用から76年が経過した 鋼ゲルバートラス橋の 現地載荷試験と短期間モニタリング



# 長生橋



側道橋

供用開始年	1937年(昭和12年)
路線名	一般国道351号
橋長	850.8m
支間長	67.50+11@65.00+67.50m
有効幅員	7.00m
斜角	90°

上部工形式	下路式鋼ゲルバートラス
下部工形式	門型ラーメン橋脚 (ケーソン基礎)
建設時設計 活荷重	12t自動車荷重 (大正15年内務省細則)
現状の供用 荷重	20t(TL-20)

※側道橋: 1972年に下部工張り出しで建設  
上路式鋼単純鉄桁, 橋長: 851.0m, 幅員: 2.50m

# 信濃川橋梁群 長岡市



蔵王橋(1994年~)

長岡大橋(1970年~, 1989年~)

大手大橋(1985年~, 2010年~)

長生橋(1937年~)

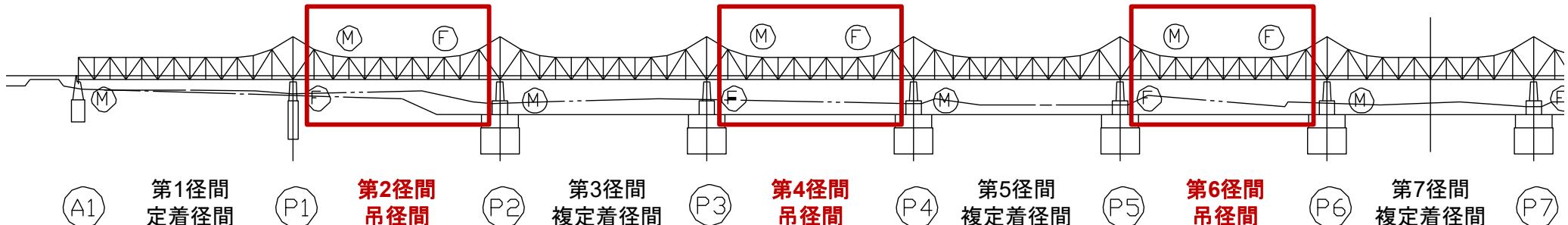
フェニックス大橋(2013年~)

越路橋(1998年~)

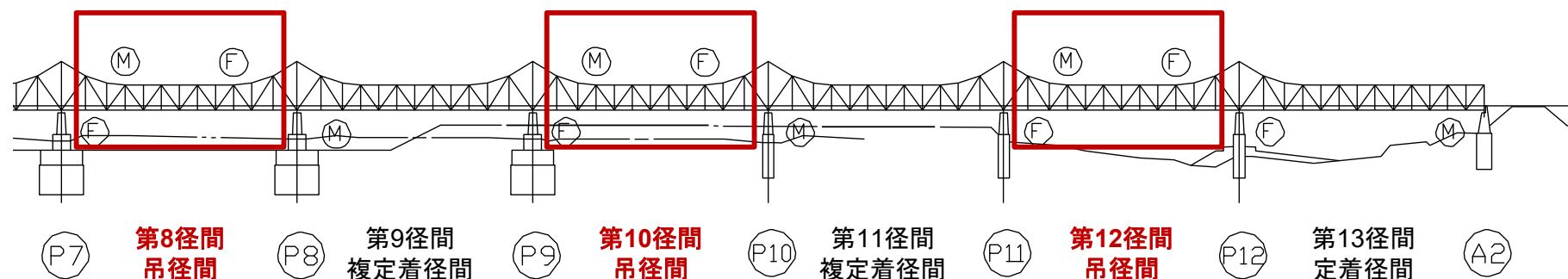


# 長生橋 構造的特徴

至 喜多町



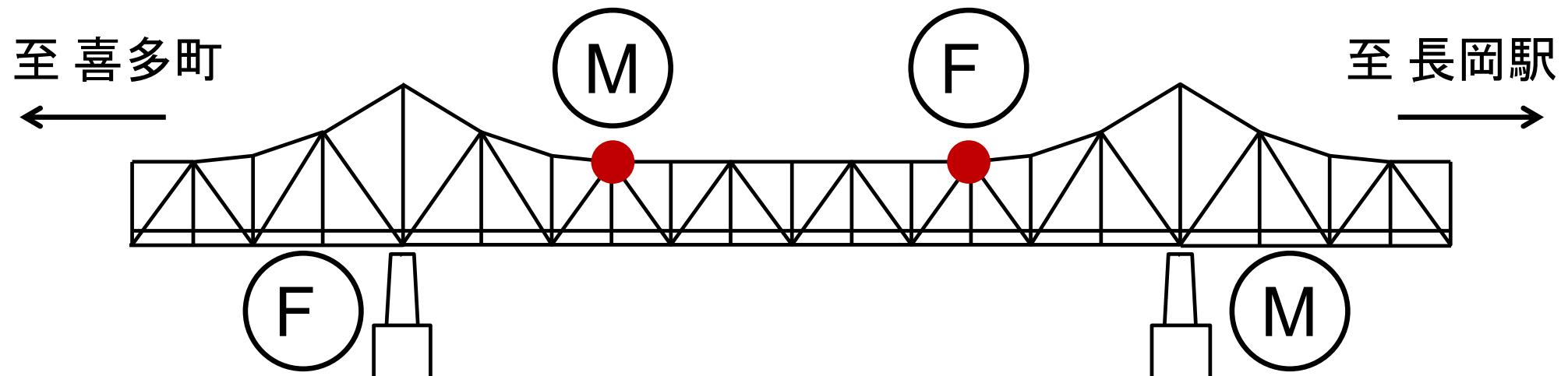
至 長岡駅



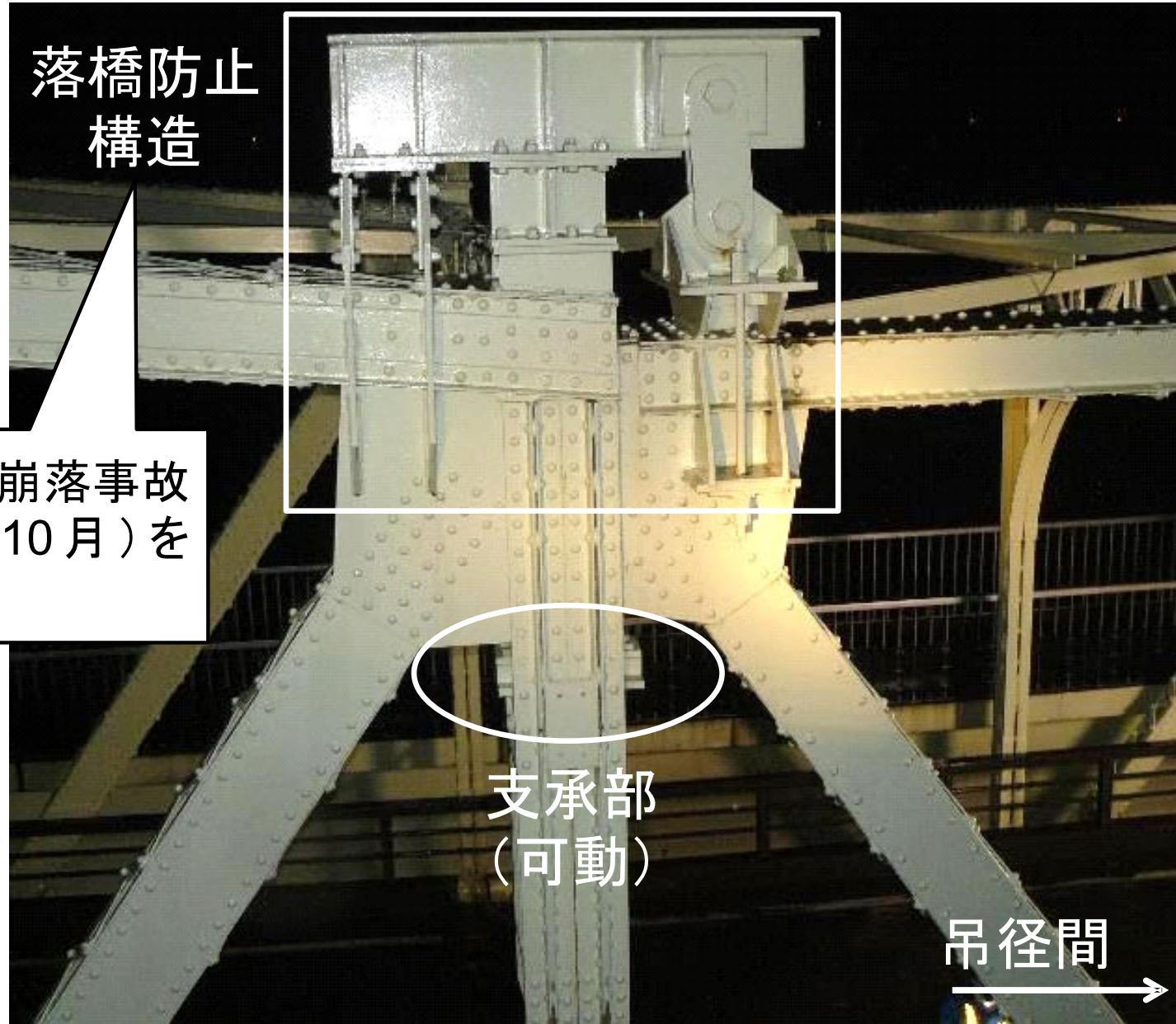
- ・設計当初の設計図面、設計計算書などはほとんど戦火で失われた。  
⇒1974年度の調査をもとに復元図面を作成

- ・偶数径間が吊径間  
⇒ゲルバーヒンジあり

# 長生橋 構造的特徴



# 長生橋 ゲルバーハンジ



# 長生橋 補修・補強の経緯

## ■ 2006年度：塗装塗替工事

- 主構下弦材の腐食が著しく、欠損面の補強が必要であることが判明
- 腐食状況調査とそれをふまえた補修設計



## ■ 2007年度～2011年度：下弦材の補修

- 鋼板の当て板、部材取替など

※2013年に土木学会の選奨土木遺産として選出



補修後に載荷試験などは実施されていない  
⇒応力性状などの現況性能把握が必要

# 載荷試験 & モニタリング 試験ケース

## ■ 静的載荷:合計4ケース

名称	実施日時	車両台数	載荷方向
静的載荷下り 1回目	2013/06/03 23:31:28	2	A1から A2
静的載荷下り 2回目	2013/06/04 23:52:48		
静的載荷上り 1回目	2013/06/04 00:46:21	2	A2から A1
静的載荷上り 2回目	2013/06/05 00:52:09		



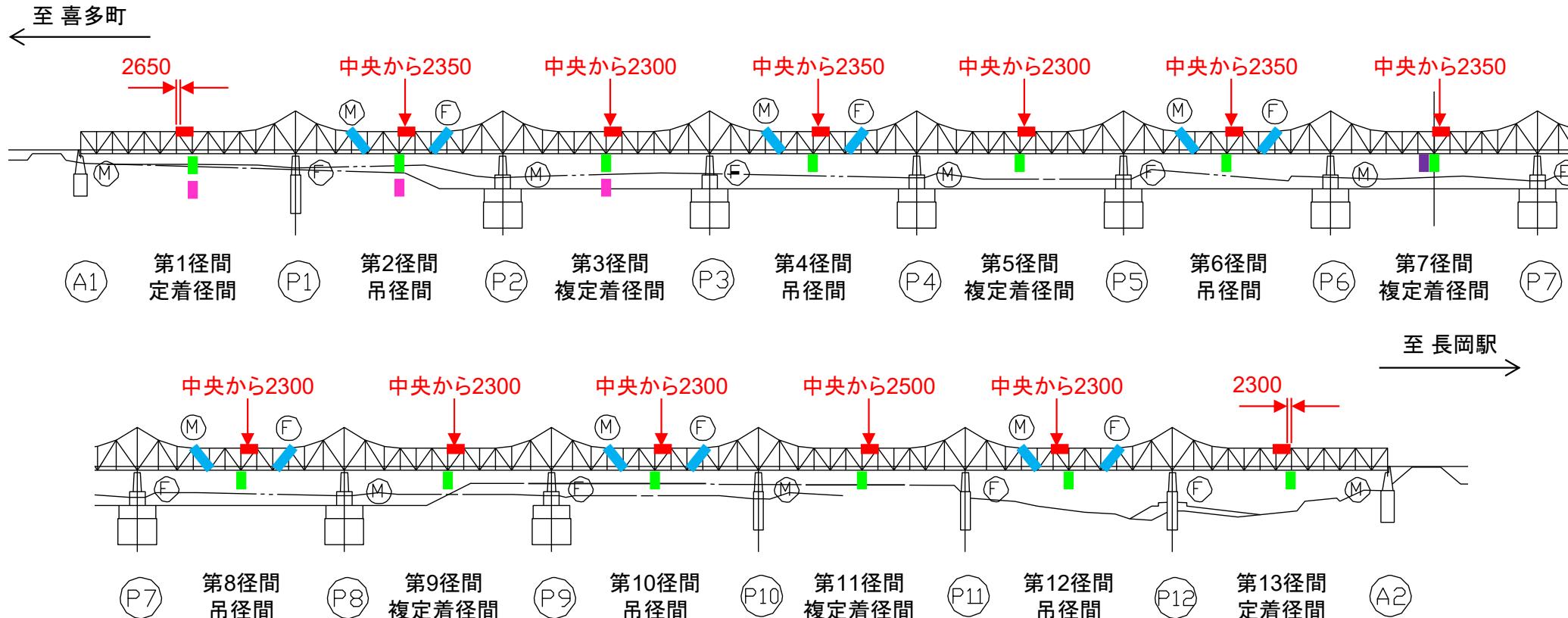
## ■ 動的載荷(30km/h):合計6ケース

名称	実施日時	車両台数	走行方向	走行車線
動的下り車線走行1回目	2013/06/05 23:40:46	1	A1から A2	下り
動的下り車線走行2回目	2013/06/05 23:58:58			
動的下り車線走行3回目	2013/06/06 00:13:12			
動的中央走行1回目	2013/06/05 22:49:42	1	A1から A2	中央
動的中央走行2回目	2013/06/05 23:10:16			
動的中央走行3回目	2013/06/05 23:29:23			

## ■ モニタリング:合計2ケース

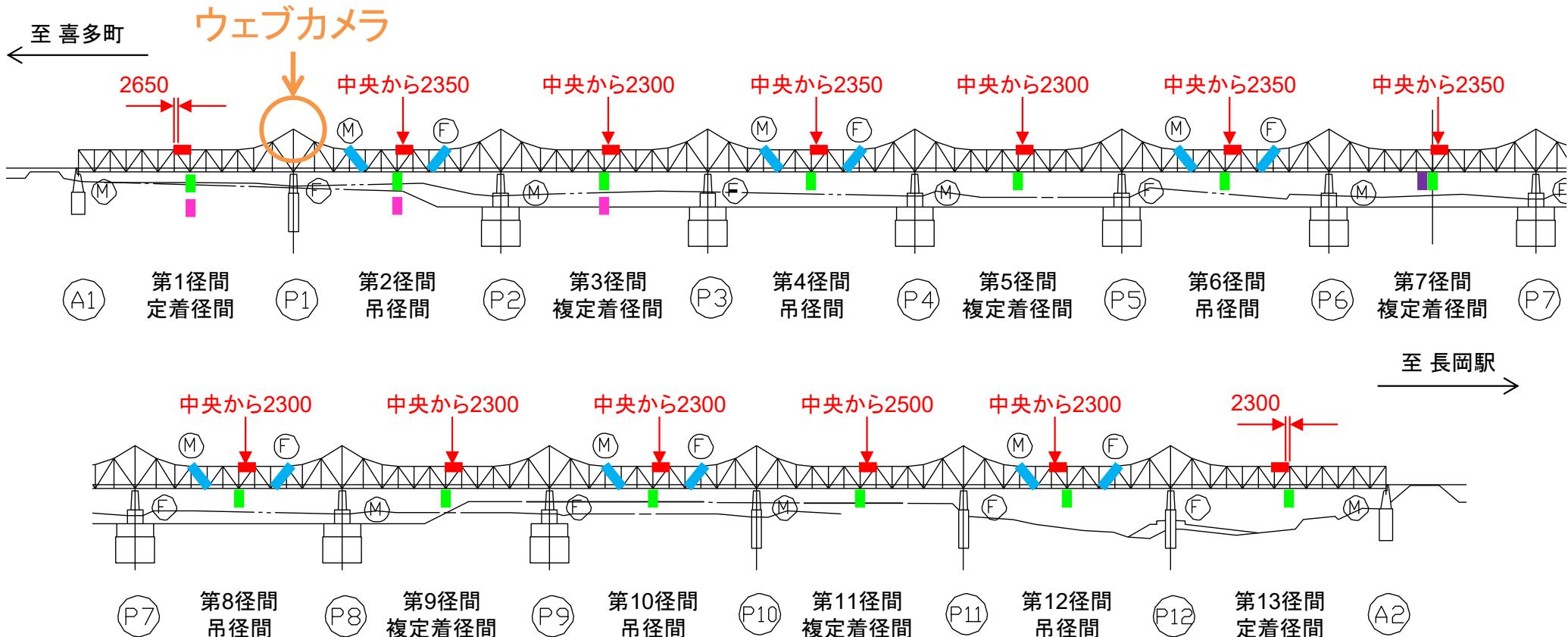
名称	開始日時	終了日時	計測時間(s)
モニタリング 1回目	2013/06/06 11:00	2013/06/09 10:00	259,200s (72h)
モニタリング 2回目	2013/06/13 02:00	2013/06/17 14:00	388,800s (108h)

# 計測システム



上弦材のひずみ:	4点/断面 × 1点/径間 × 13径間
斜材のひずみ:	4点/断面 × 2点/径間 × 6径間
径間中央のたわみ, 加速度(車道):	1点/径間 × 13径間
加速度(歩道):	1点/径間 × 3径間
温度:	1点
	合計130点

# 計測システム



- サンプリング周波数: 200Hz

- データ容量(モニタリング)

6月6日から3日間 : 14.8GB

6月13日から4.5日間 : 18.8GB

- ウェブカメラ

2013年6月6日～6月18日

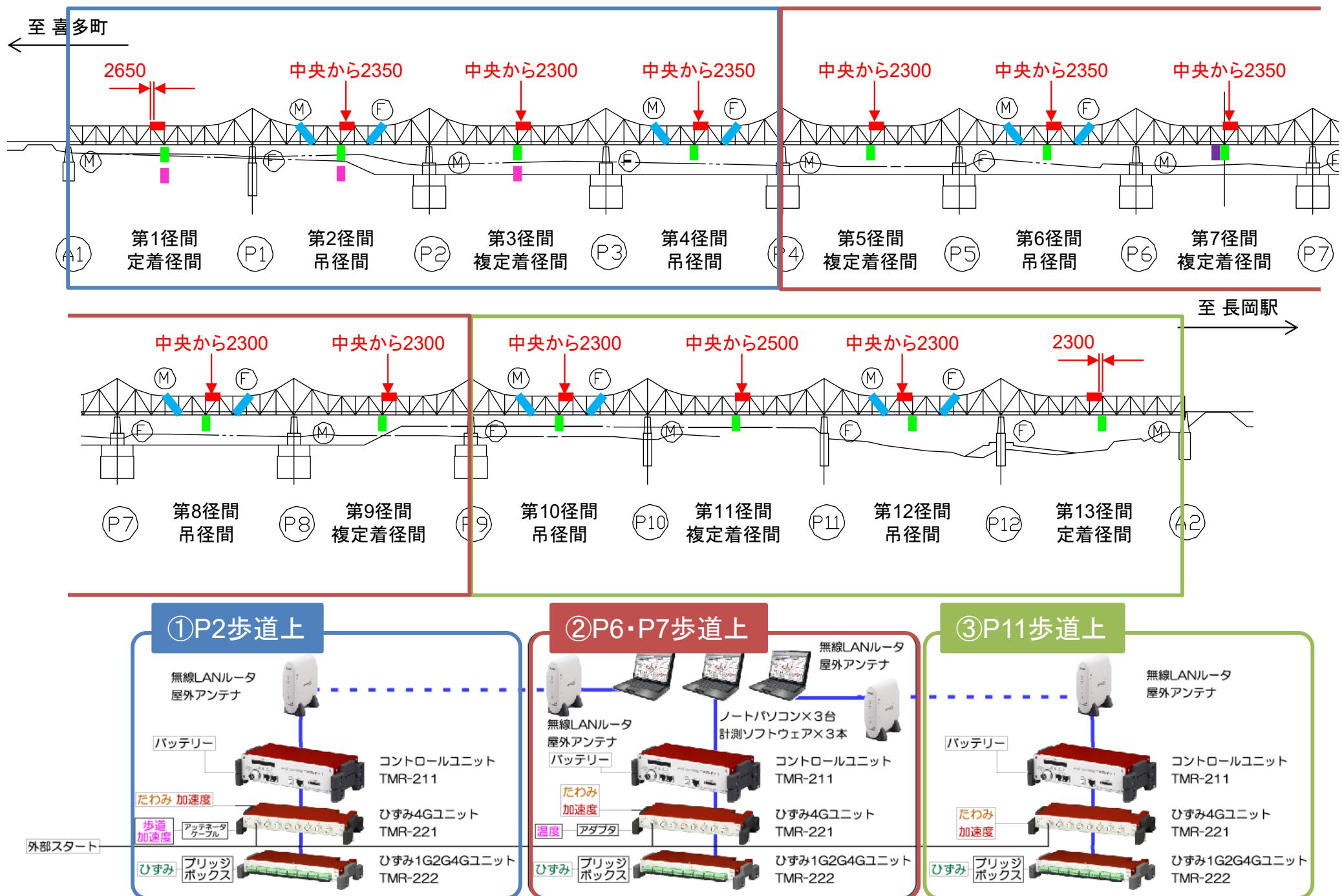
サンプリング時間: 1s

ファイル形式: mov

データ容量: 約0.8GB/時間, 約14GB/日



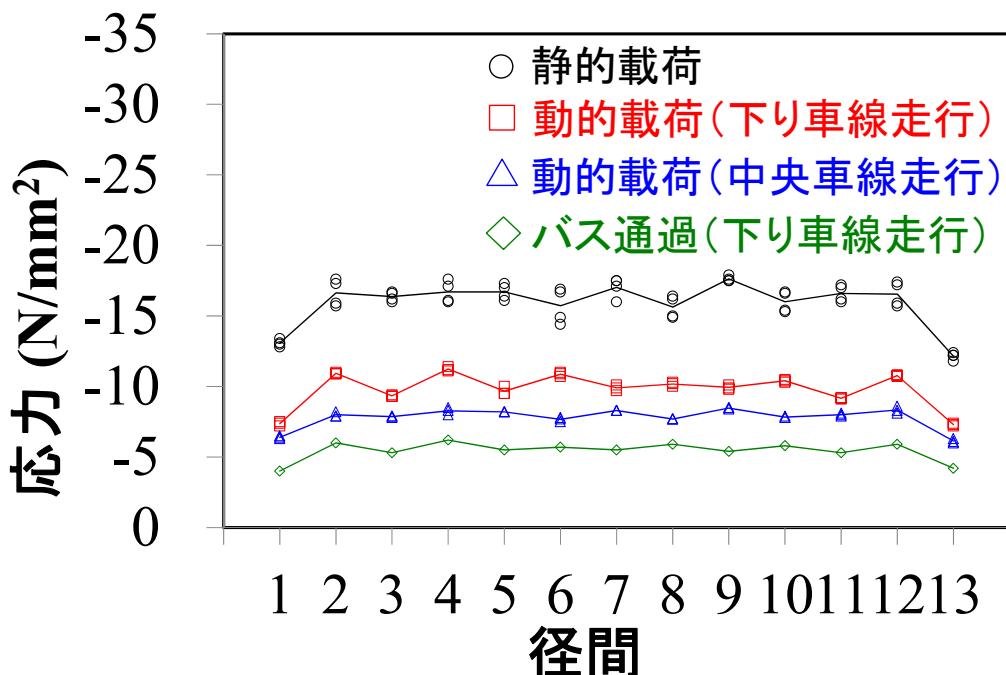
# 計測システム



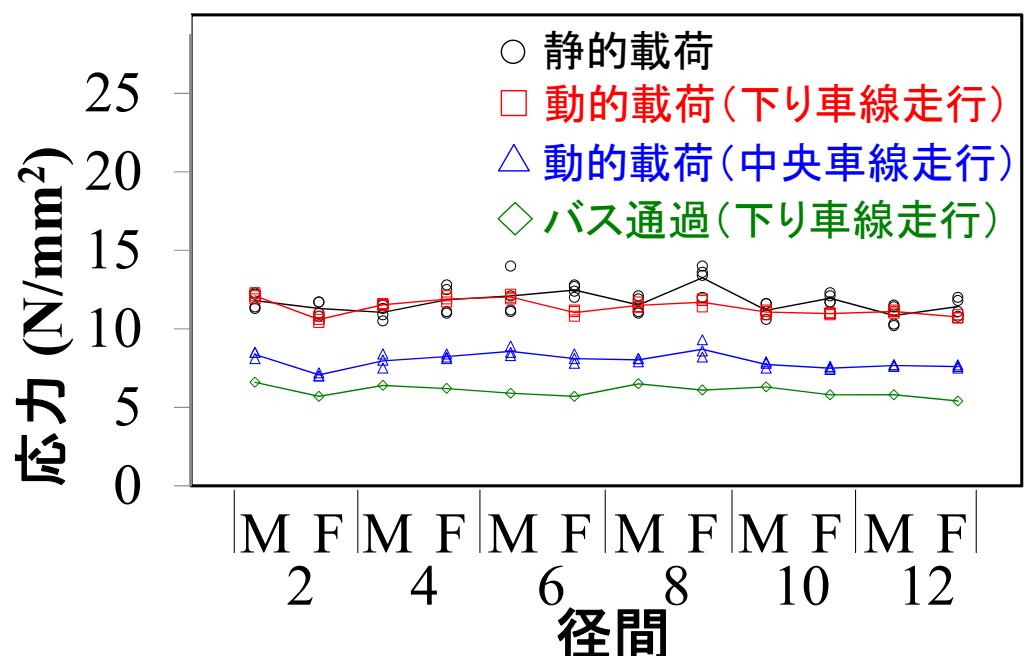
# 計測結果 靜的載荷試験

## ■ 軸方向応力度

### ・上弦材



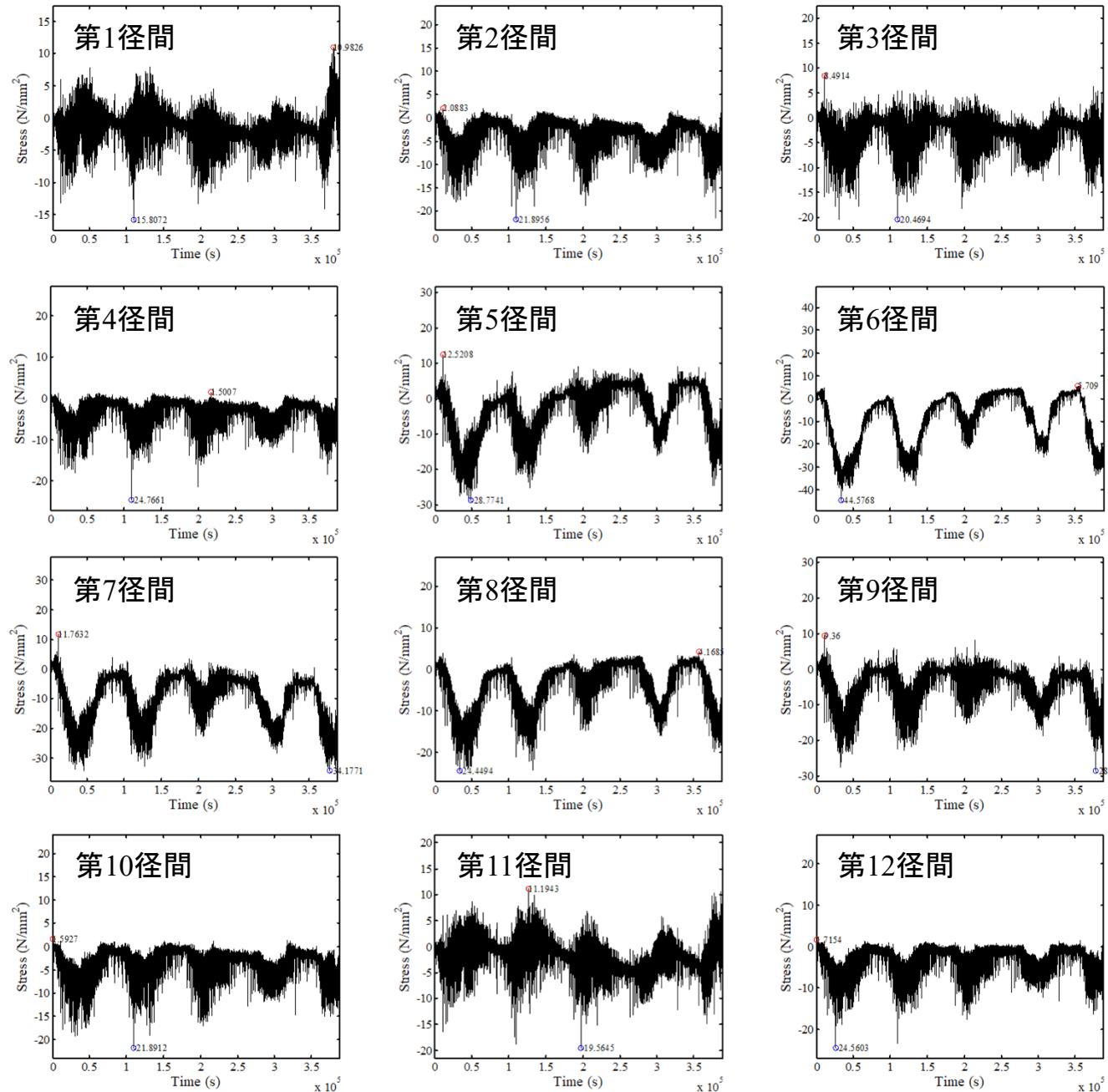
### ・斜材



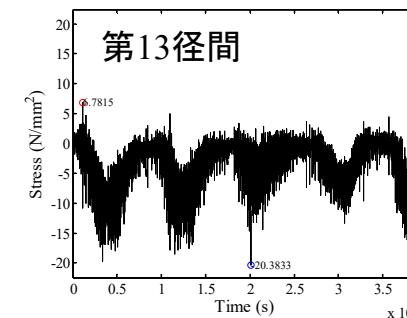
実線: 平均値  
M: 可動支承  
F: 固定支承

# モニタリング結果

## ■ 軸方向応力度(上弦材)



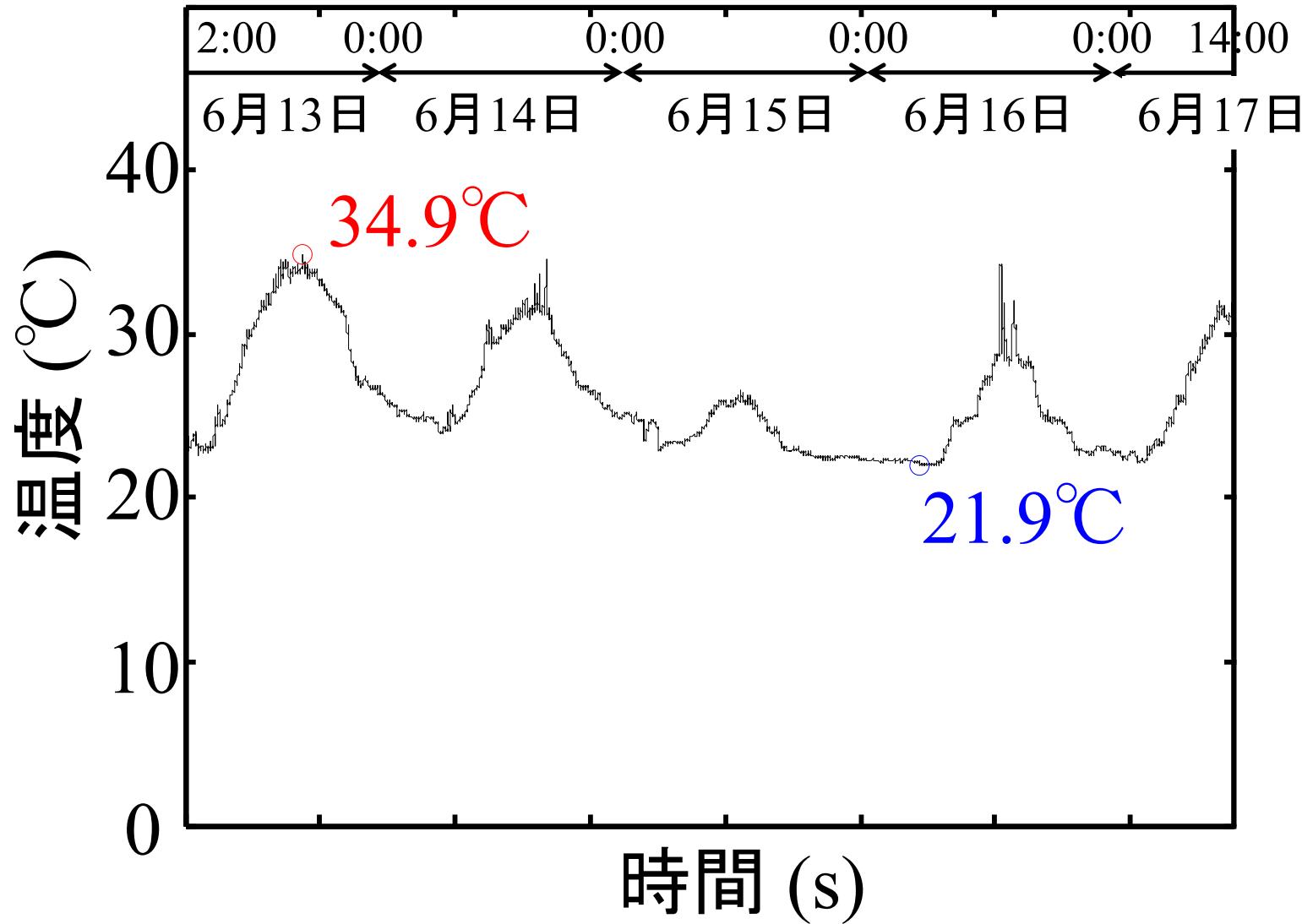
径間	最小応力 (MPa)	最大応力 (MPa)
1	-15.8	11.0
2	-21.9	2.1
3	-20.5	8.5
4	-24.8	1.5
5	-28.8	12.5
6	<b>-44.6</b>	5.7
7	-34.1	11.8
8	-24.4	4.2
9	-28.5	9.4
10	-21.9	1.6
11	-19.6	11.2
12	-24.6	1.7
13	-20.4	6.8



# 計測結果 温度変化

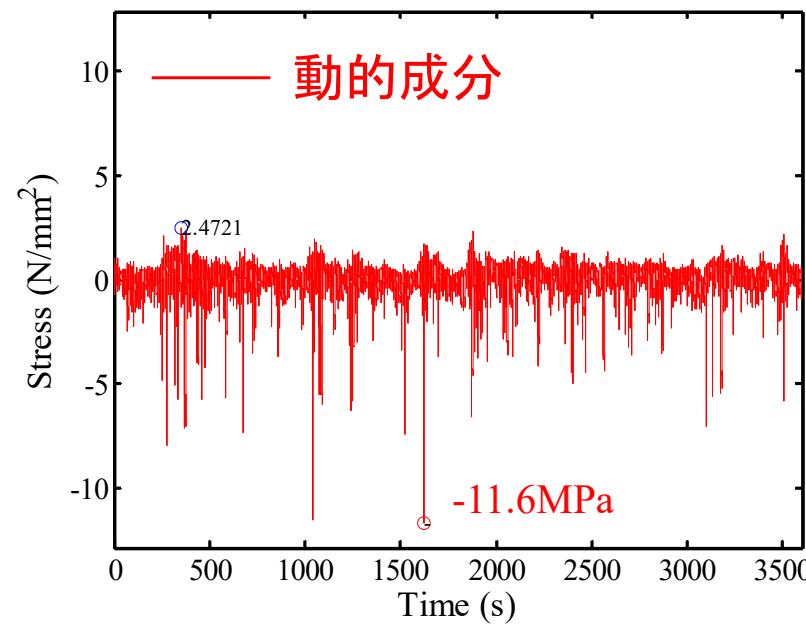
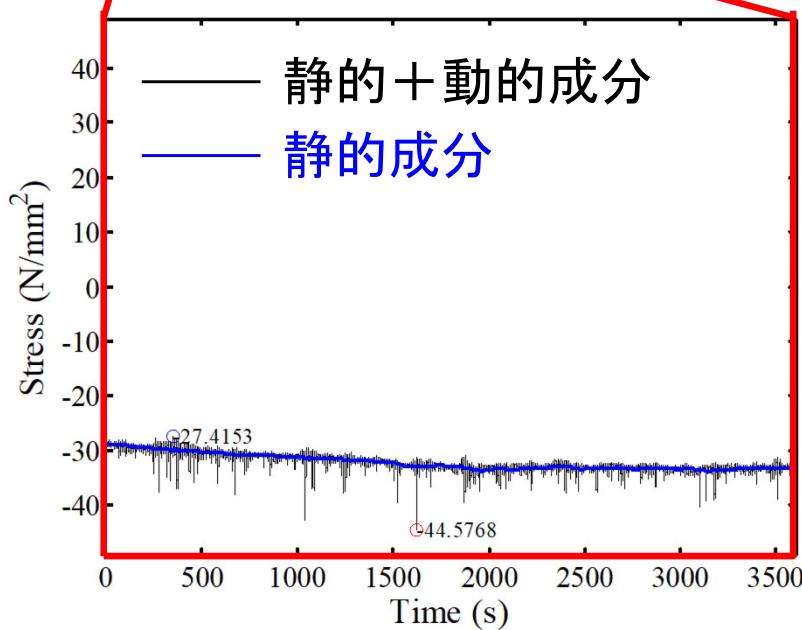
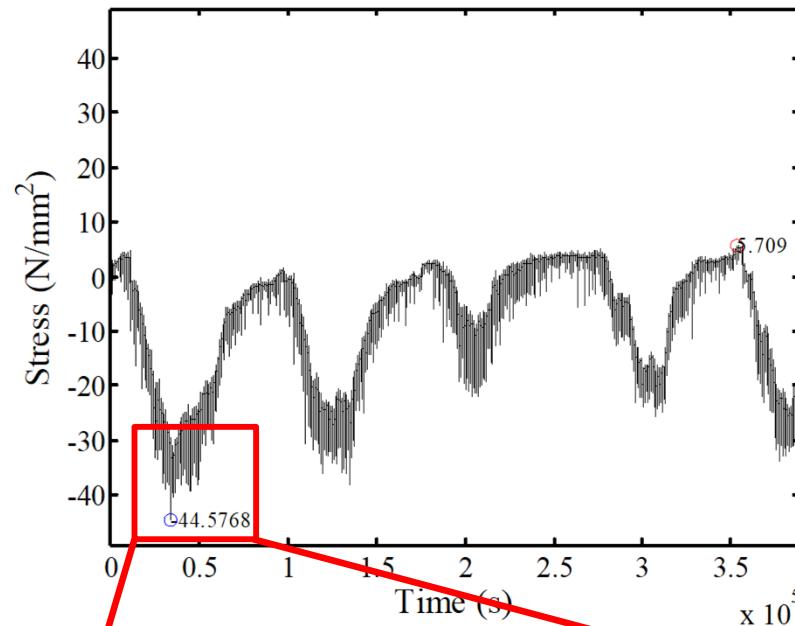
33

2013年6月13日2時～17日14時



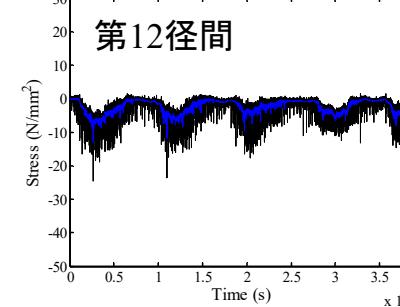
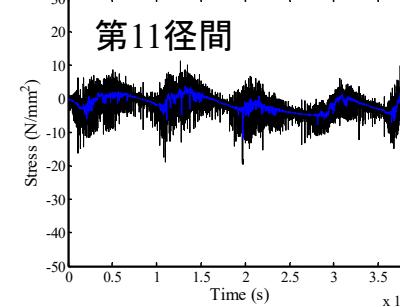
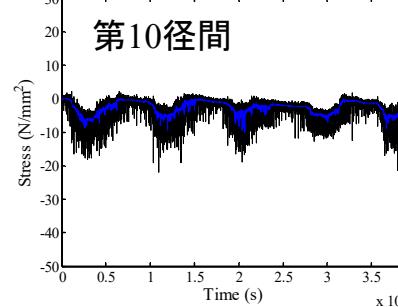
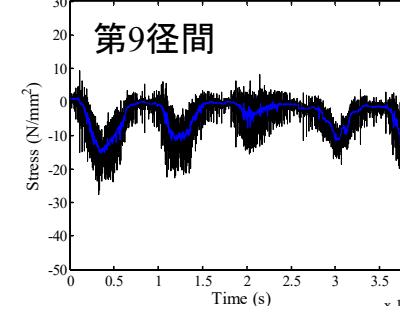
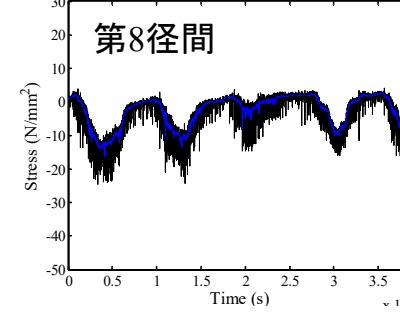
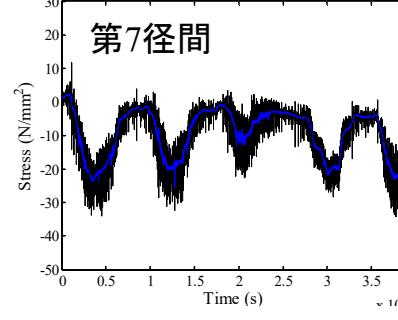
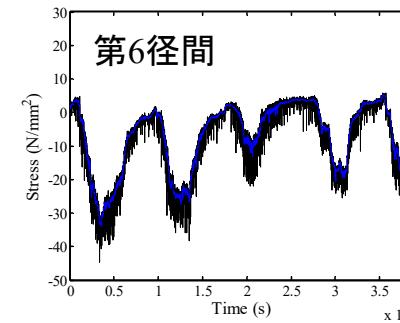
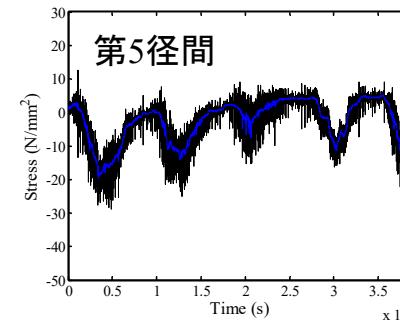
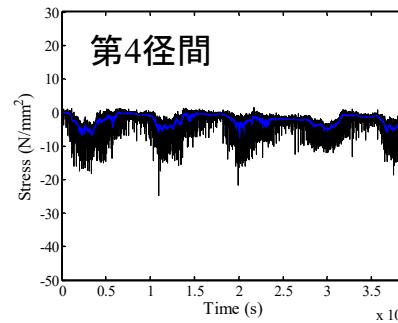
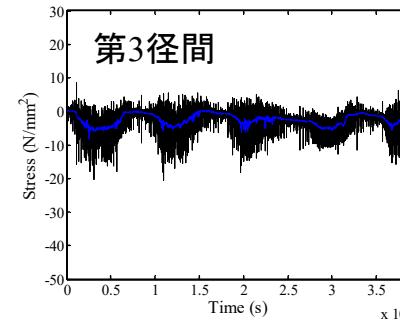
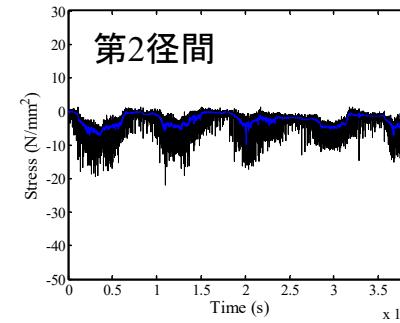
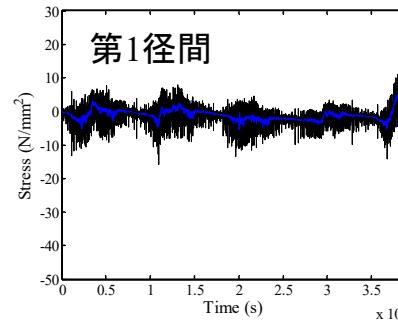
# モニタリング結果

## ■ 軸方向応力度(上弦材, 第6径間)

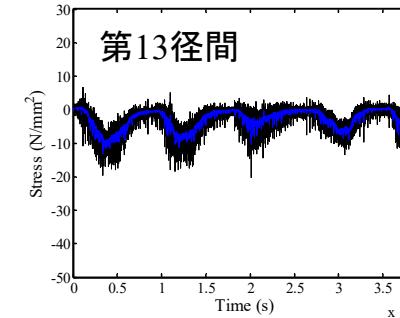


# モニタリング結果

## ■ 軸方向応力度(上弦材) — 静的+動的成分 — 静的成分

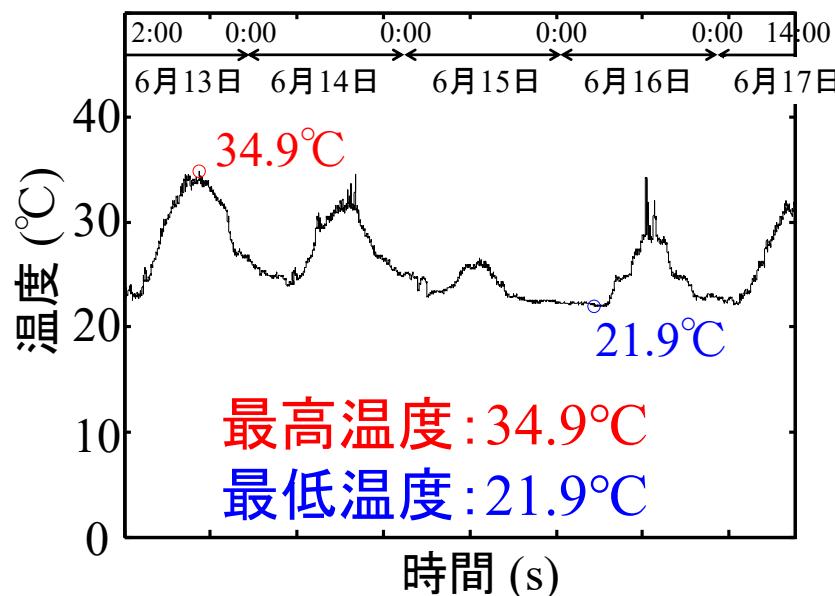


径間	最小応力 (MPa)	最大応力 (MPa)
1	-5.4	5.4
2	-9.8	0.1
3	-8.2	0.3
4	-7.4	0.1
5	-19.5	5.2
6	<b>-33.7</b>	5.3
7	-25.5	2.3
8	-16.3	2.6
9	-15.4	1.2
10	-10.1	0.0
11	-11.8	3.6
12	-13.0	0.0
13	-13.2	0.7



# モニタリング結果

## ■ 温度



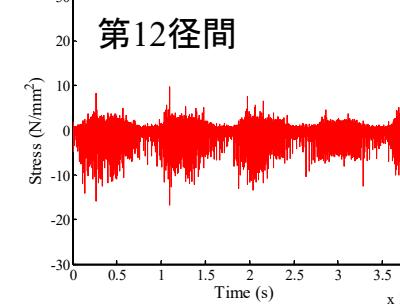
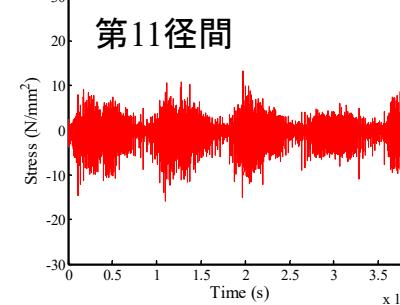
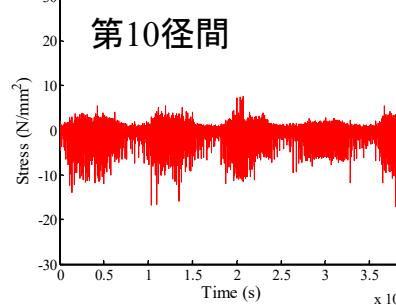
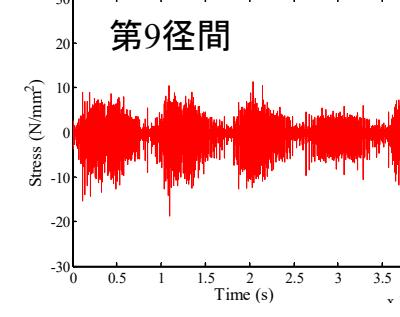
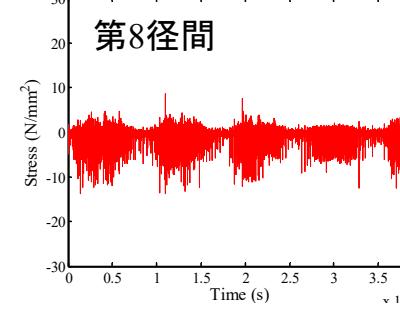
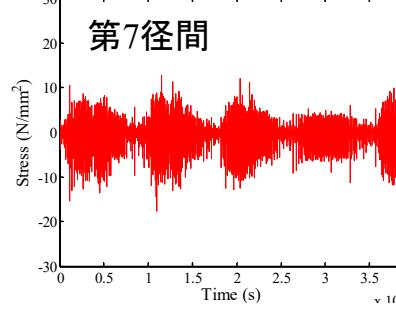
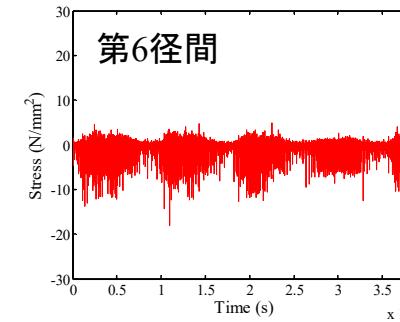
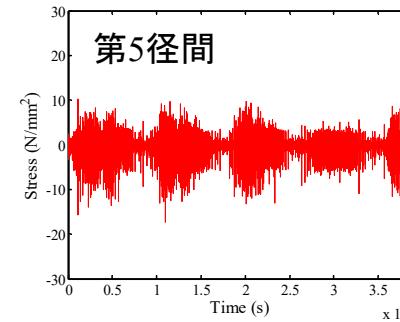
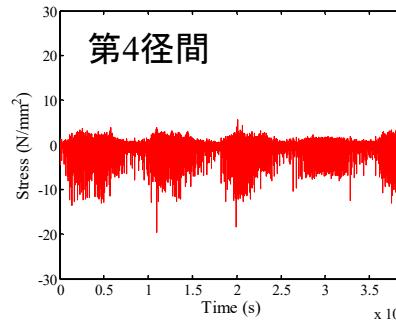
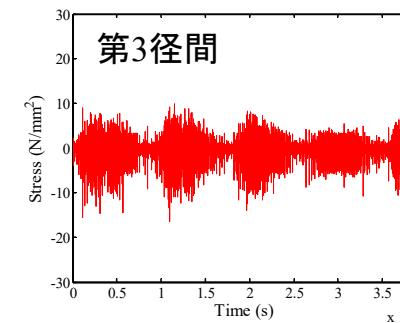
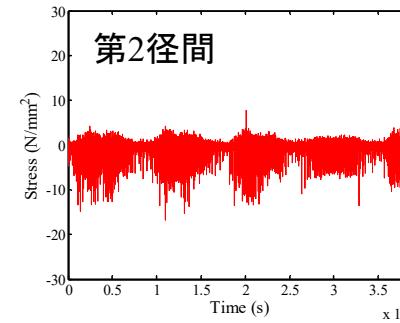
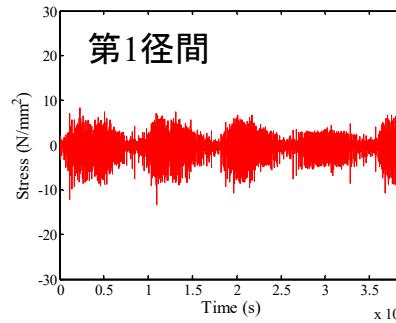
## ■ 温度応力のチェック

$$\begin{aligned}
 \sigma &= -E\alpha\Delta T \\
 &= -2 \times 10^5 \text{ (MPa)} \times 12 \times 10^{-6} \text{ ( /°C)} \times 13 \text{ (°C)} \\
 &= -31.2 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

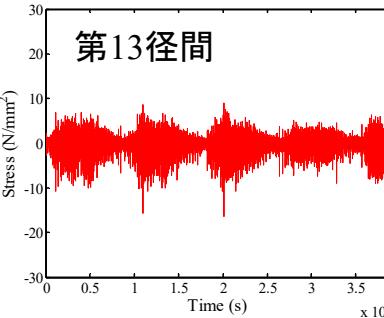
径間	最小応力 (MPa)	最大応力 (MPa)
1	-5.4	5.4
2	-9.8	0.1
3	-8.2	0.3
4	-7.4	0.1
5	-19.5	5.2
6	-33.7	5.3
7	-25.5	2.3
8	-16.3	2.6
9	-15.4	1.2
10	-10.1	0.0
11	-11.8	3.6
12	-13.0	0.0
13	-13.2	0.7

# モニタリング結果

## ■ 軸方向応力度(上弦材) —— 動的成分

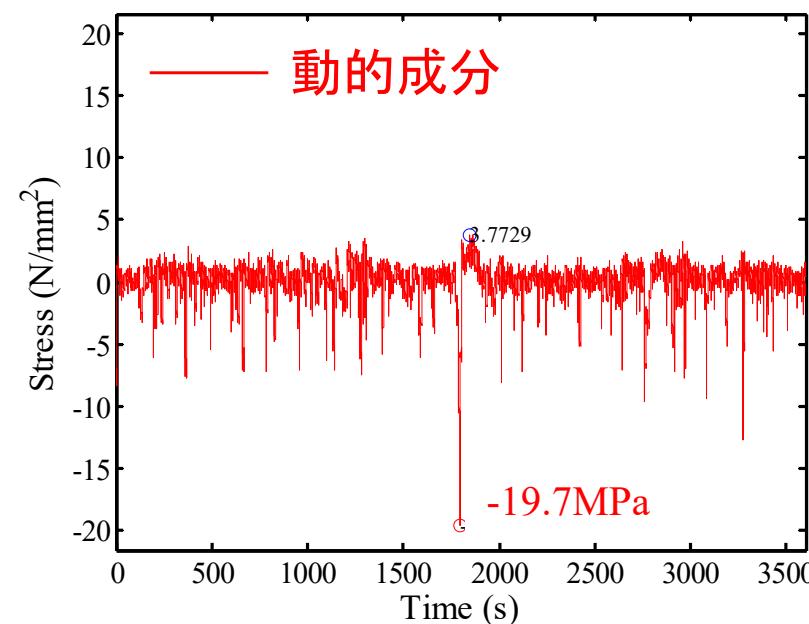
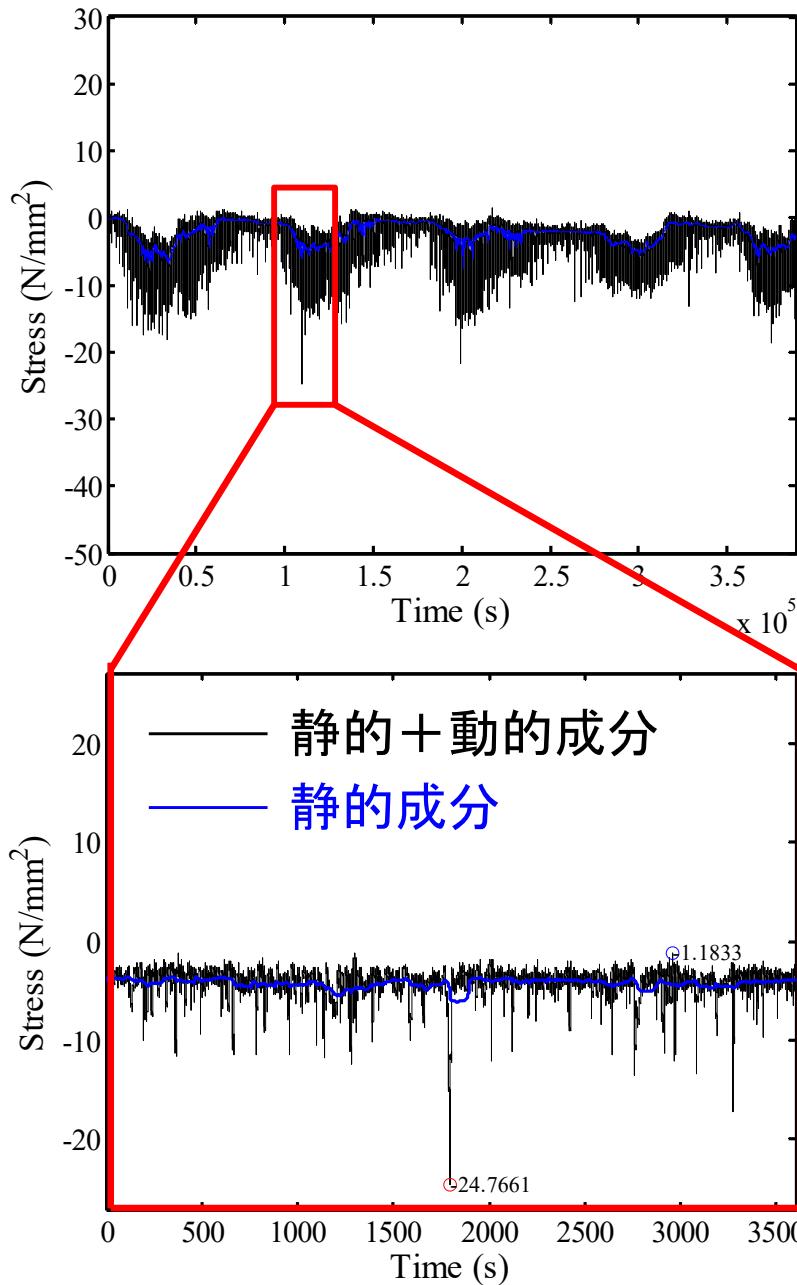


径間	最小応力 (MPa)	最大応力 (MPa)
1	-13.3	8.3
2	-16.9	7.8
3	-16.5	9.9
4	-19.7	5.5
5	-17.3	10.1
6	-18.0	4.8
7	-17.7	12.7
8	-13.8	8.7
9	-18.8	11.3
10	-17.1	7.5
11	-16.0	13.2
12	-16.7	9.8
13	-16.3	8.9



# モニタリング結果

## ■ 軸方向応力度(上弦材, 第4径間)



# ひずみ計測

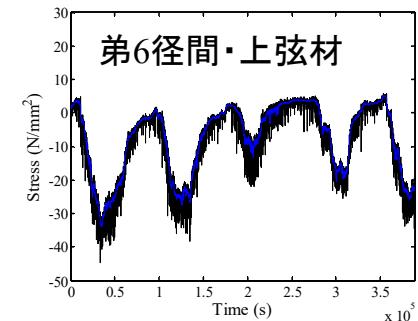
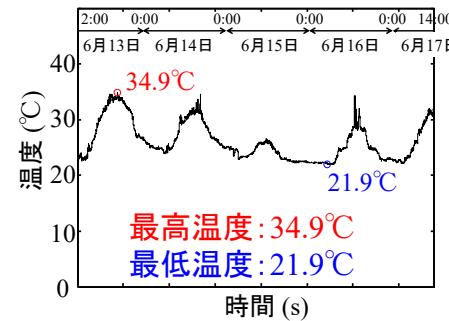
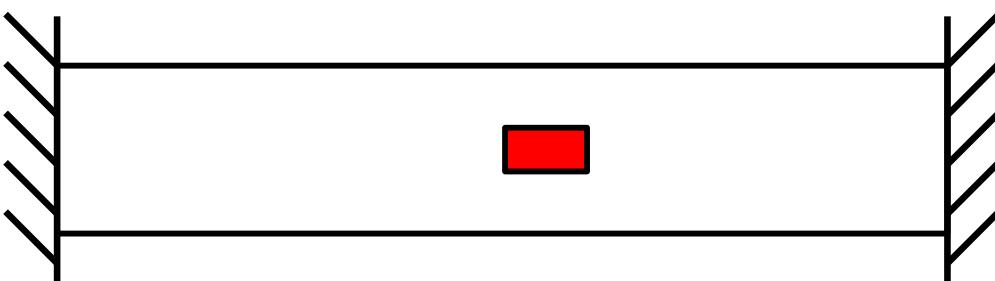
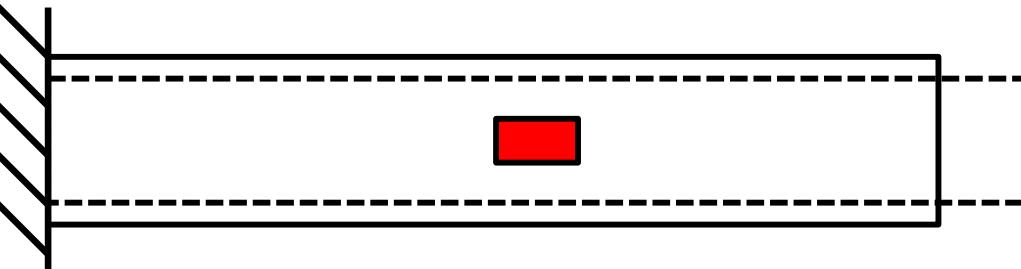
## ■ 温度補償型ひずみゲージの計測値

$$\varepsilon - \alpha \Delta T$$

$\varepsilon$  部材の伸縮によるひずみ

$\alpha$  線膨張係数

$\Delta T$  温度変化



ひずみ

$$\varepsilon - \alpha \Delta T = 0$$

→ 温度補償型ひずみゲージ

応力

$$\times E \rightarrow \sigma = 0$$

ひずみ

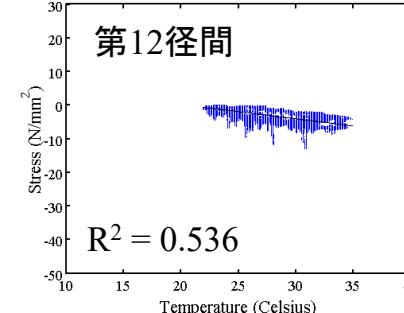
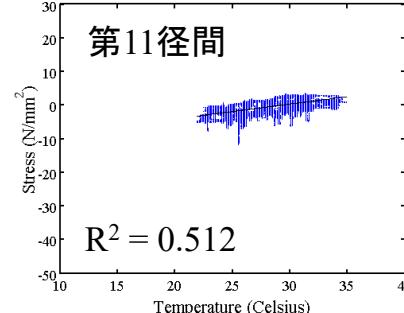
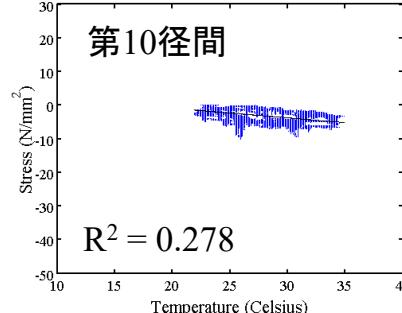
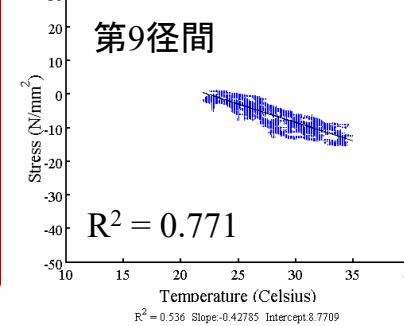
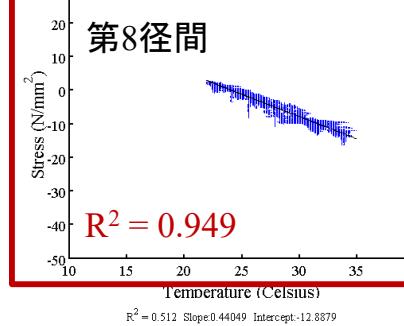
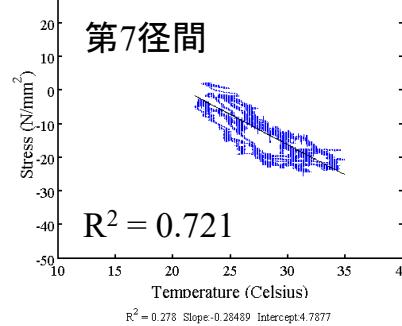
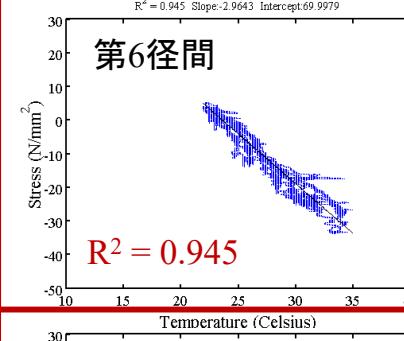
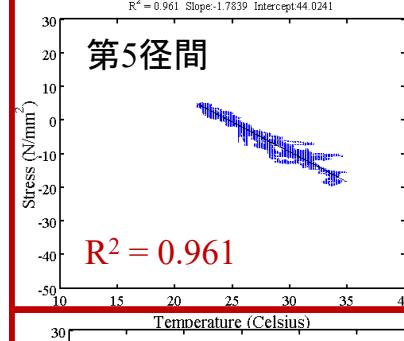
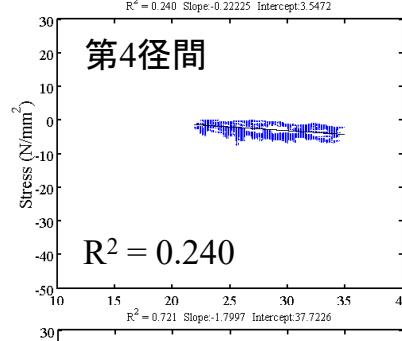
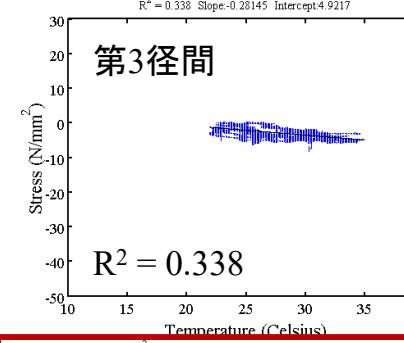
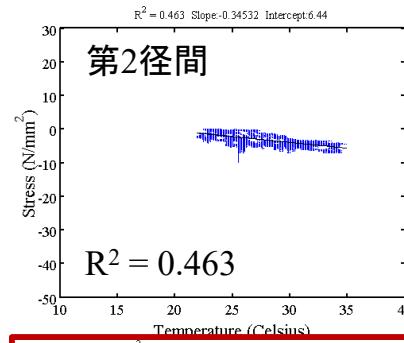
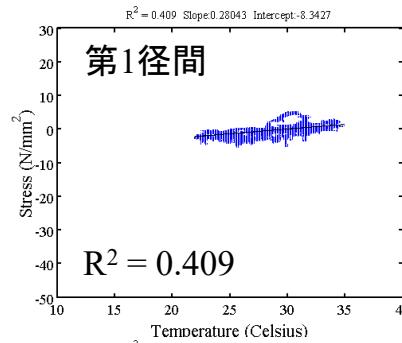
$$\varepsilon - \alpha \Delta T = -\alpha \Delta T \quad \times E \rightarrow \sigma = -E \alpha \Delta T$$

( $\varepsilon = 0$ )

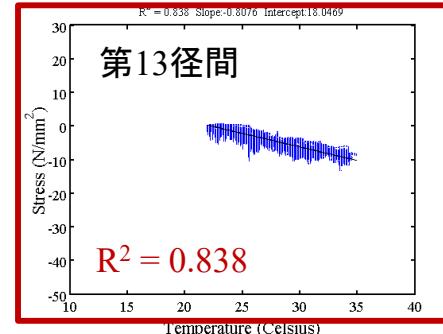
応力

# モニタリング結果

## ■ 温度一軸方向応力度(静的成分, 上弦材)



補修の優先順位付け



# 参考

新潟日報

2015年7月24日

新潟日報（2015年7月24日16面）

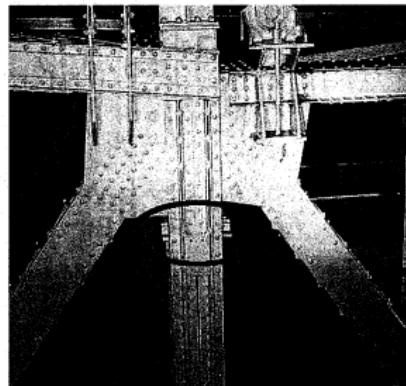
第3種郵便物認可

（日刊）

新潟



長岡支社 〒940-0082 長岡市千歳1-3-43  
代表 0258(34)9600  
報道部 (34)9633 FAX (34)9660



## 長生橋「ヒンジ機構」技科大調査

長岡市の長生橋が老朽化などのため、気温変化に伴う部材の収縮などで生まれる力を逃がす「ヒンジ機構」の一部が動いていない可能性があることが、長岡技術科学大の宮下剛准教授らの研究チームのモニタリング調査で分かった。宮下准教授は「設計上の安全余裕度があり、直ちに橋の損傷などにはつながらない」とした上で、ヒンジ機構は「補修の優先度が高い部分といえる」と話している。

## 「直ちに損傷にはつながらず」

長生橋のトラス構造の一部。丸囲み部分にヒンジ機構が組み込まれている

「直ちに損傷にはつながらず」

その結果、8カ所あるヒンジ機構のうち3カ所について、通行車両の荷重や温度変化で生じる力を逃がせない可能性が高いことが分かった。要因について宮下准教授は「老朽化により、ヒンジの可動部が固着しているとみられる」と分析する。宮下准教授らは調査結果を論文にまとめ、ことし4

長生橋は1937年に開通した。当時の部材を補修しながら使い続けており、今後の維持管理が課題となっている。

モニタリングは2013年6月13日～17日に実施。県の依頼による載荷試験の一環として行われた。橋の130地点にセンサーを取り付け、橋の状態を調べた。

月の構造工学シンポジウムで論文賞を受けた。地方自治体が管理する橋を対象とした大がかりなモニタリングは、全国的にも珍しいケースという。県道路管理課によると、長生橋では本年度に定期点検を行う予定。同課は「科技大学の調査結果を踏まえて点検し、必要があれば補修を考えたい」と話した。

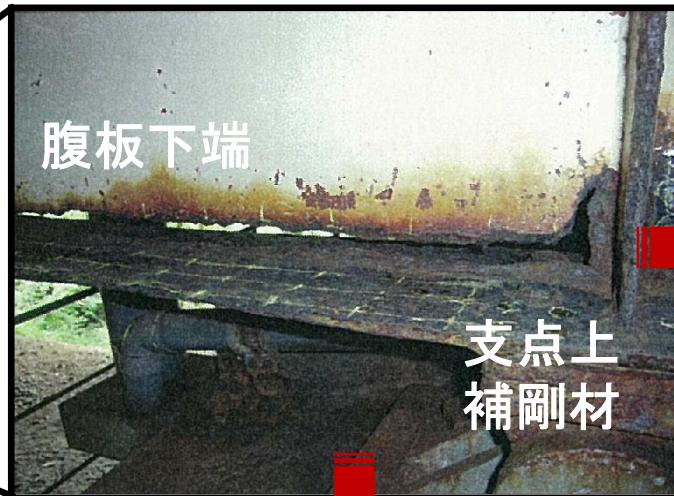
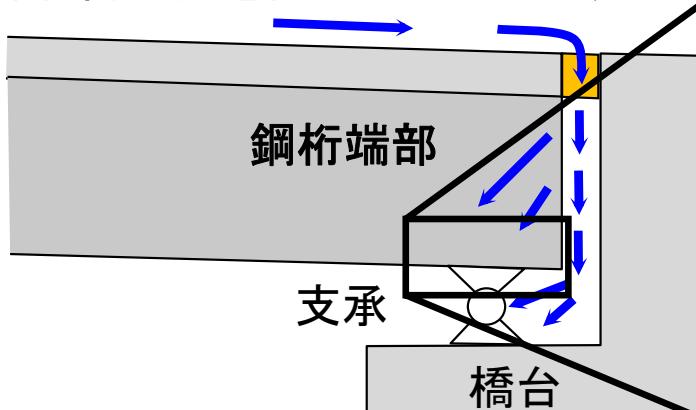
## 一部作動しない恐れ 老朽化優先補修を提言

# 鋼構造物の FRP補修/補強

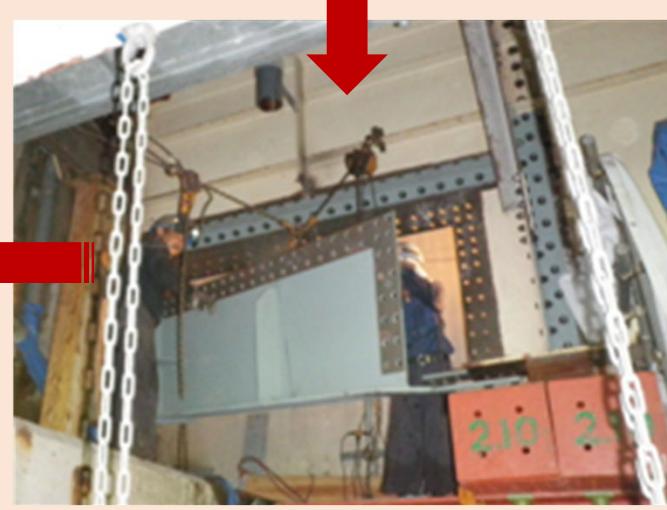
# 研究開発の背景

## ■ 鋼橋の最も多い腐食形態

凍結防止剤を含む漏水 伸縮装置



桁端部  
部材取替え



鋼部材による補修

施工性が悪い

なかなか補修が進まない

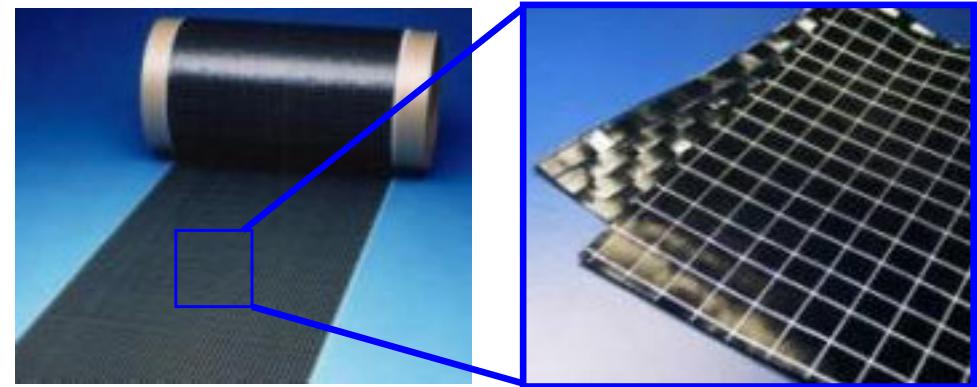
腐食が進行

CFRPによる簡易な補修法を検討

# シート種類と実橋への適用

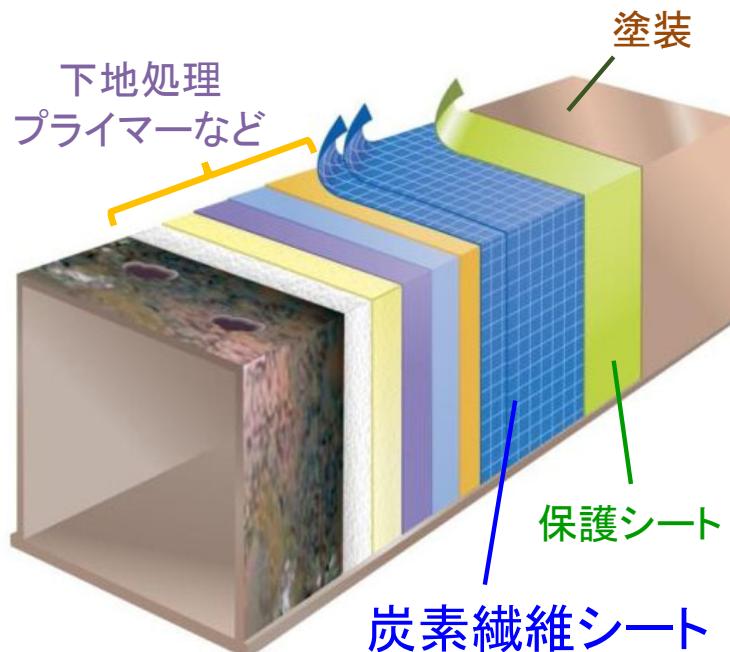
## ■ 炭素繊維(CFRP)シート

	弾性係数 GPa	引張強度 MPa
高強度型	245	3400
高弾性型	540 – 640	1900
鋼	200	400 - 570



※一般に、鉄と比較して  
比重:1/4倍, 比強度:10倍, 比弾性率:7倍

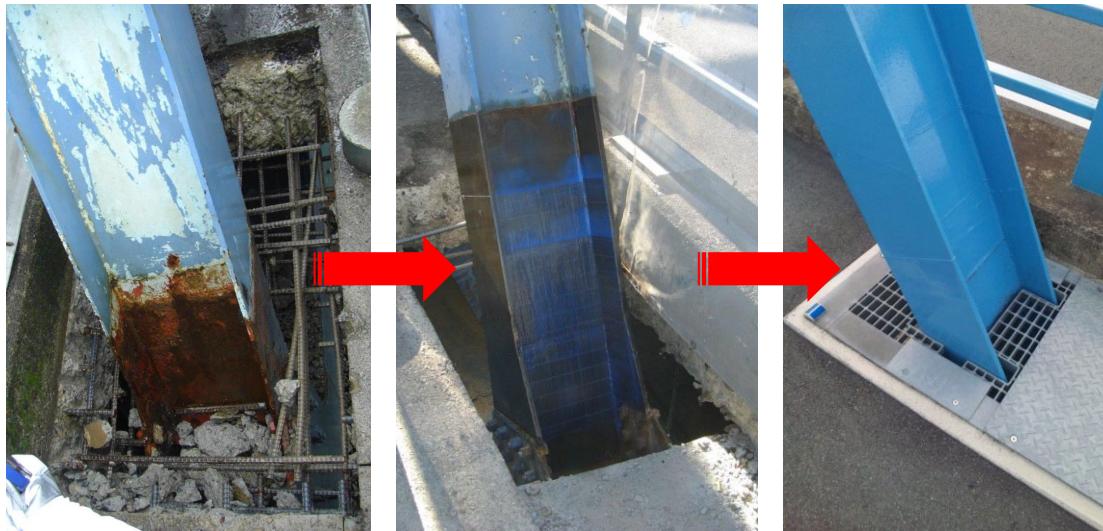
## ■ CFRP接着工法(軸力部材への適用)



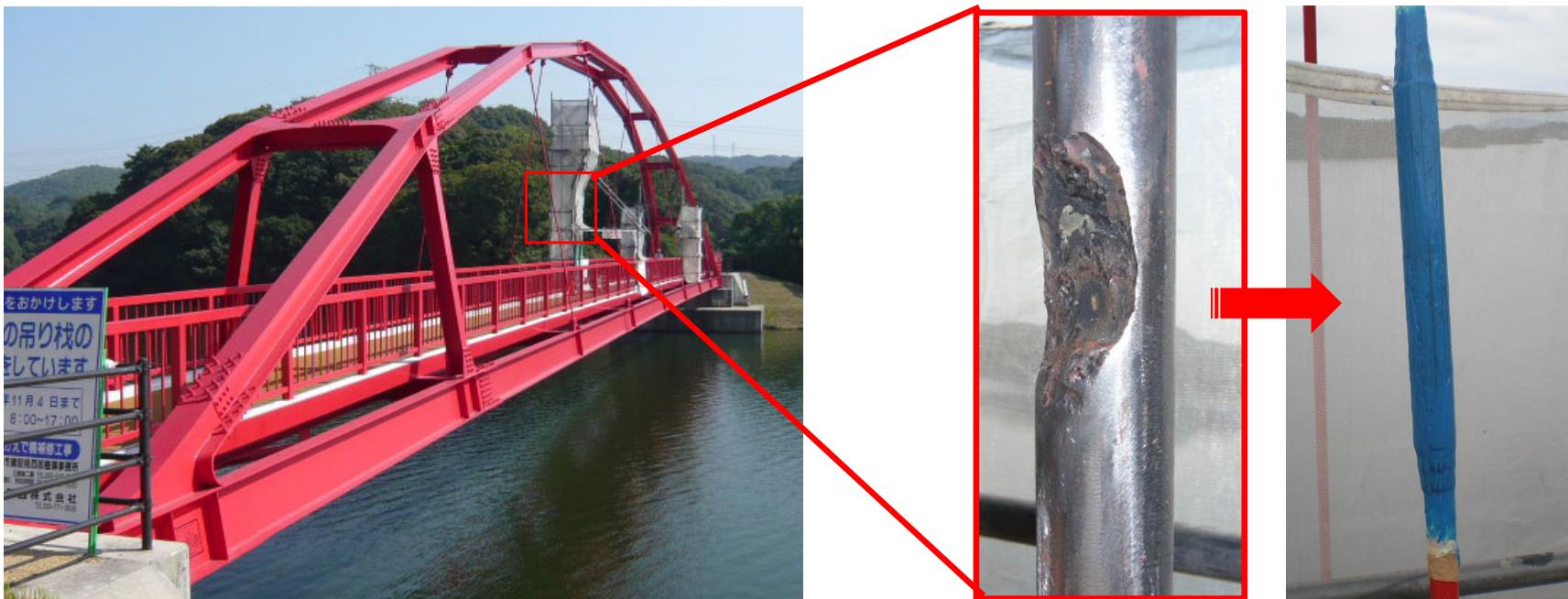
- ・ 対象橋梁: 浅利橋(中央自動車道, 1973年供用)
- ・ 2007年に補修工事を実施
- ・ 実橋計測により、補修効果を確認
- ・ これまでの経過観察では、はく離などの変状は見られない

# 軸力部材への適用

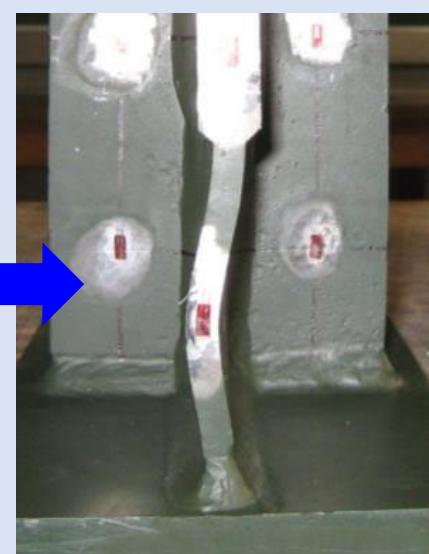
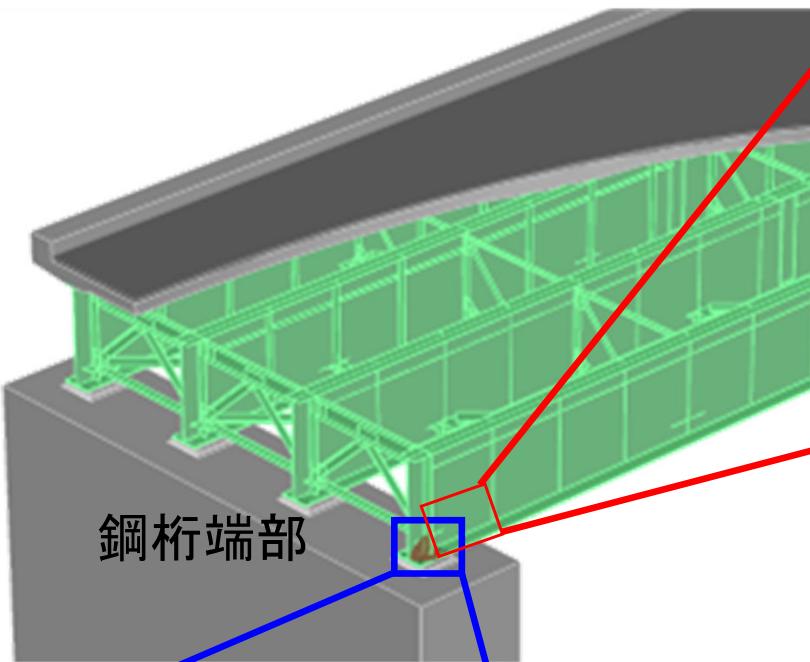
## ■ CFRP接着工法(軸力部材への適用)



## ■ CFRP接着工法(ケーブル部材への適用)

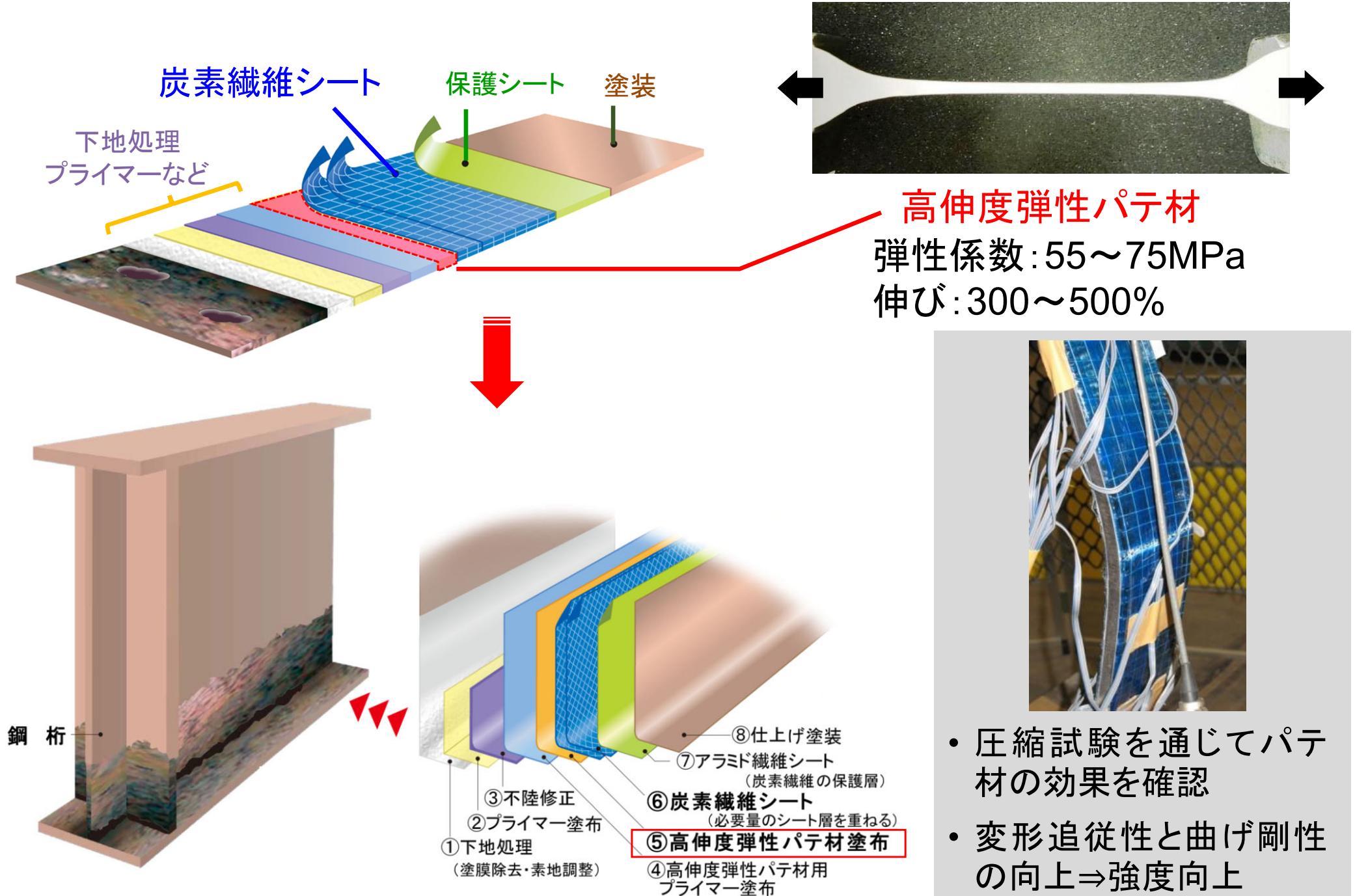


# 鋼橋桁端部での課題



- ・従来のCFRP接着工法では、座屈変形に追従できずにはく離。その結果、耐荷力が向上せず。
- ・2009年より、長岡技術科学大学、NEXCO総研、民間企業3社と共同研究を開始
- ・目的：座屈変形に追従して終局強度を向上させることが可能なCFRP接着工法の開発

# CFRPシートのはく離防止対策

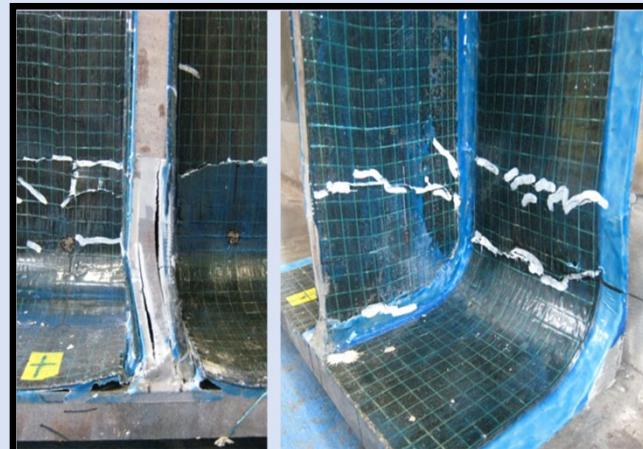


# 補修工法の検証実験

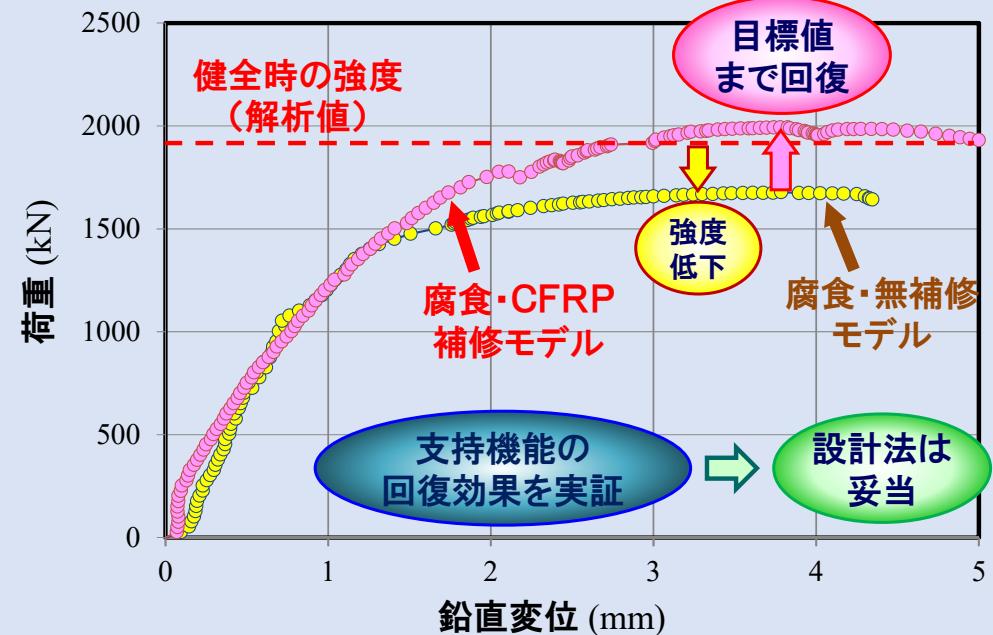
## ■ 圧縮試験：支点上補剛材



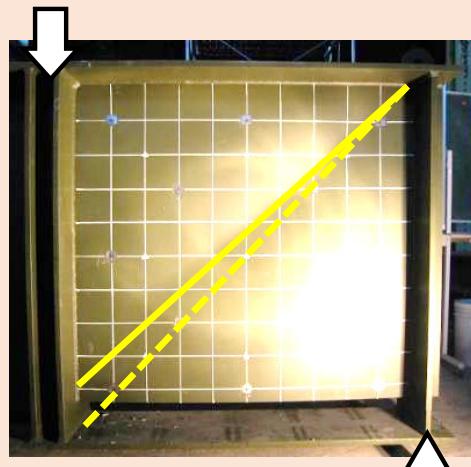
無補修



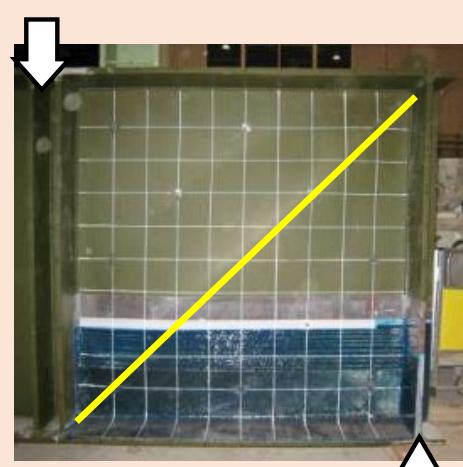
CFRP補修



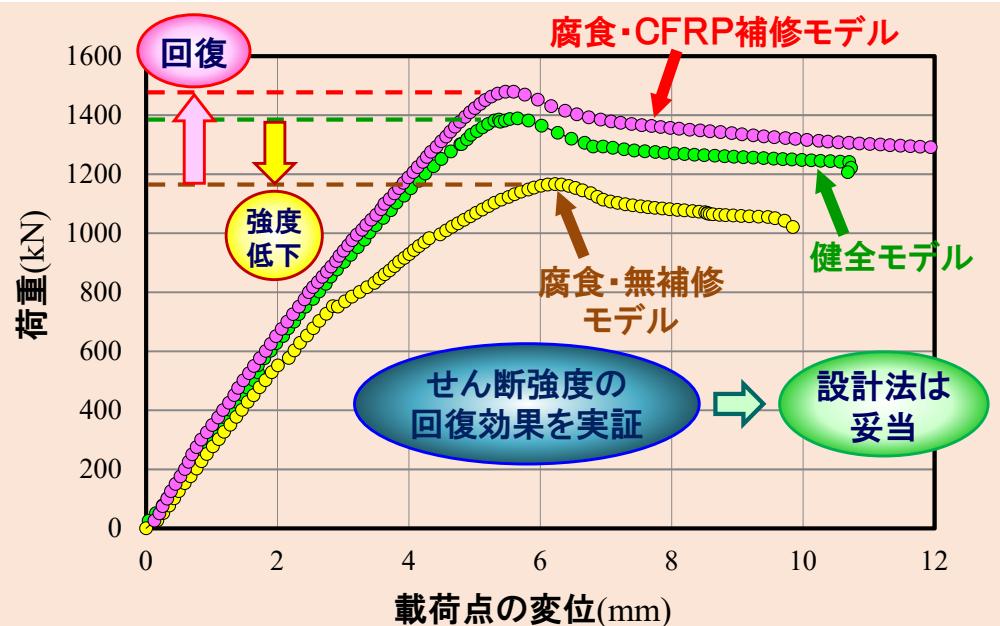
## ■ せん断試験：桁端腹板



無補修



CFRP補修



革新的な技術の開発！

# 成果の取りまとめ

## ■ 要領への反映、マニュアル化

- 2013年7月  
「NEXCO東・中・西日本、設計要領第二集(橋梁保全編)」  
「NEXCO東・中・西日本、構造物施工管理要領」
- 2013年10月  
「炭素繊維シートを用いた鋼構造物の補修・補強工法設計施工マニュアル」(NEXCO総研) → **設計要領・第二集・橋梁保全編へ**



## ■ 関連特許

- 特許第6327634号: 鋼構造物の補修補強方法(2013年出願、2018年登録)
- 特許第6436428号: 鋼橋の補修補強方法及び補強構造体(2013年出願、2018年登録)
- 特許第5688525号: 鋼板の繊維強化樹脂補修補強構造および補修補強方法(2010年出願、2015年登録)

## ■ 実施工



# CFRP接着工法 施工手順



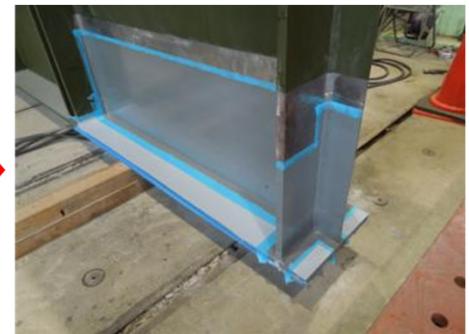
下地処理



プライマー塗布



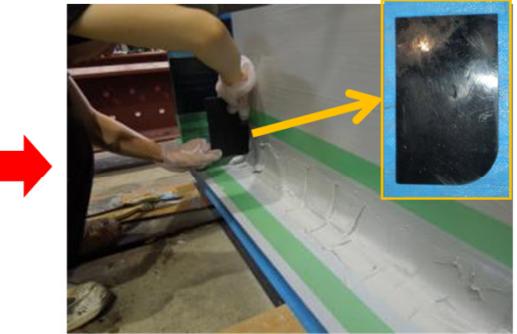
不陸修正



高伸度弹性パテ材用  
プライマー塗布



高伸度弹性パテ材塗布



R形状に成形



炭素繊維シートを  
所定の形状に切断



炭素繊維シートの  
貼付け

宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弹性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.71, No.5, pp.II\_23-II\_38, 2015.5.

若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弹性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集F4(建設マネジメント), Vol.71, No.1, pp.44-63, 2015.4.

# CFRP接着工法 補修設計法

## ■ 設計式

$$A_{sl} \leq c_n \times B_{cf} \times \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times n$$

断面欠損範囲  
(不陸修正) \*

$A_{sl}$  : 鋼部材の補修・補強必要断面積

$c_n$  : 応力低減係数

積層数 $n$	$c_n$
1	0.93
2	0.86
3	0.82
4	0.79
5	0.77
6~20	0.74

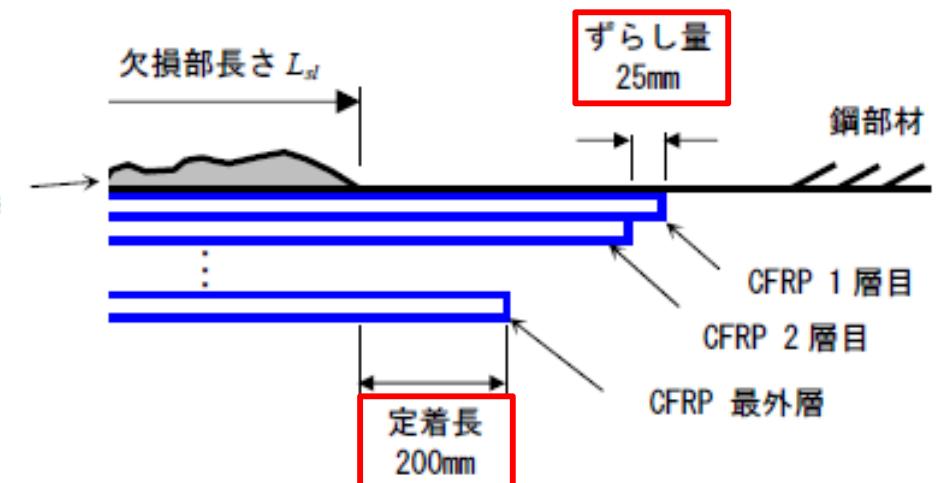
$B_{cf}$  : 炭素繊維シートの幅

$E_s$  : 鋼材の弾性係数

$E_{cf}$  : 炭素繊維シートの弾性係数

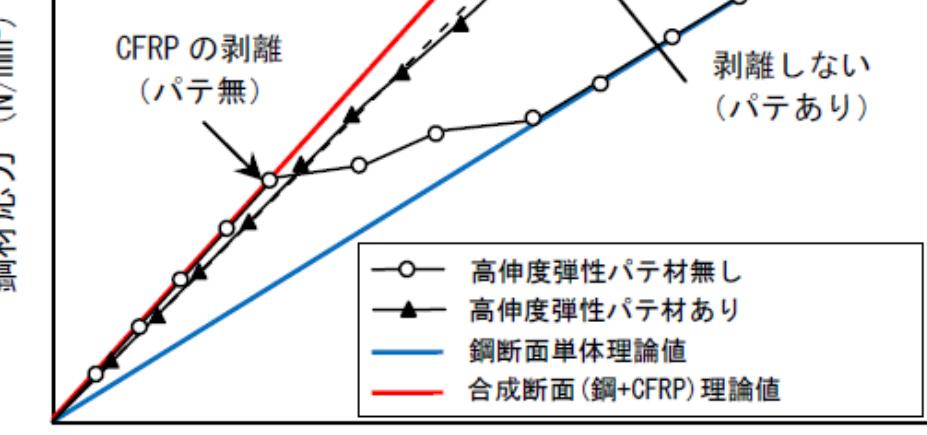
$t_{cf}$  : 炭素繊維シートの1枚あたりの厚さ

$n$  : 炭素繊維シートの積層数



高伸度弾性パテ材による伝達効率の低下

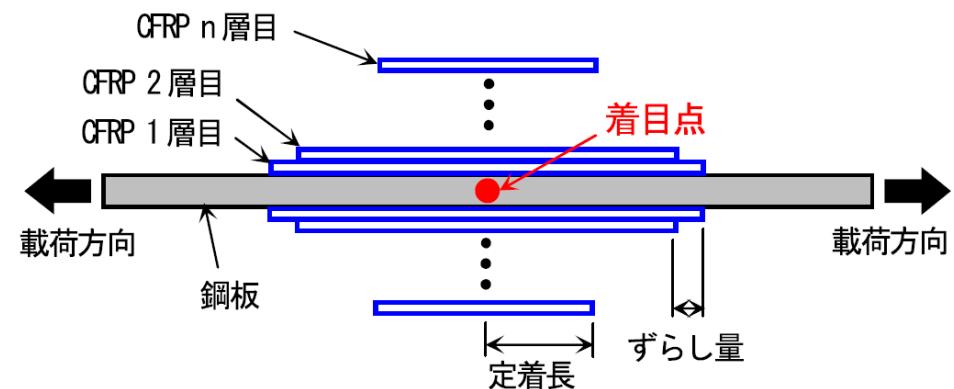
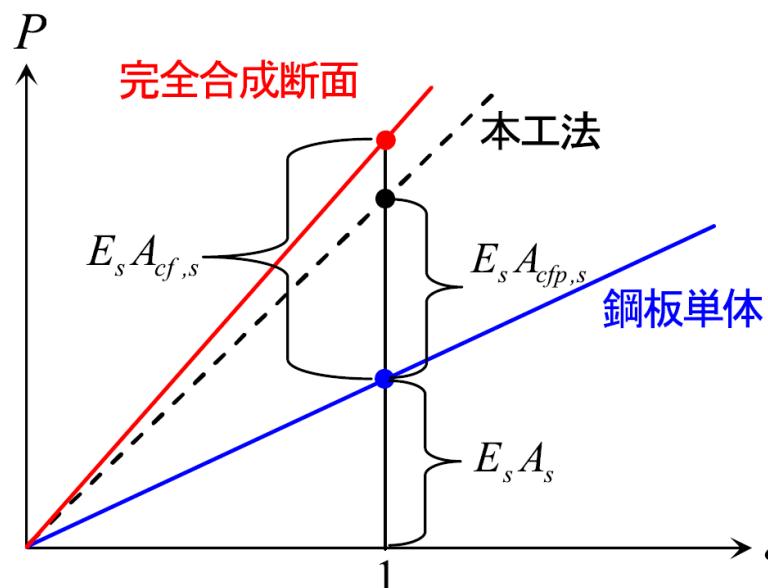
応力改善効果(理論値)



CFRP接着鋼板の応力－ひずみ関係

# CFRP接着工法 応力低減係数

52



## 応力低減係数

$$c_n \equiv \frac{E_s A_{cf,s}}{E_s A_{cfp,s}} \Leftrightarrow A_{cfp,s} = c_n A_{cf,s}$$

鋼換算

## フックの法則

$$P = E_s \times (A_s + A_{cfp,s}) \times \varepsilon$$

$$\Rightarrow c_n = \frac{P/\varepsilon - E_s A_s}{E_s A_{cf,s}}$$

P-εの傾き  
(実験より)

## 応力比

$$\xi \equiv \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{sn}}$$

着目点の応力  
外力による応力

$$\frac{E_s A_s}{E_s (A_s + A_{cf,s})} = \xi_0$$

完全合成断面の剛性比

## 応力低減係数

$$c_n = \frac{1/\xi - 1}{1/\xi_0 - 1}$$

数値解析から

# CFRPが接着された鋼板の応力解析

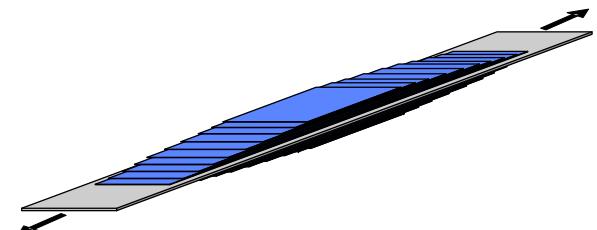
53

## ■ 課題

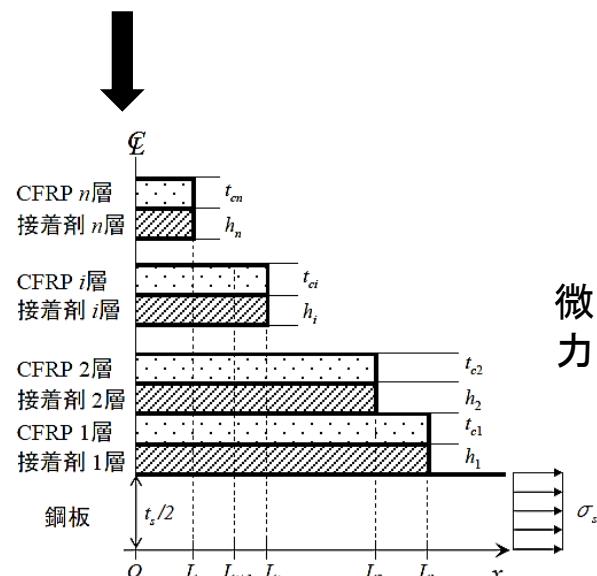
- 接着層が非常に薄いためFEAに多大な労力
- 理論解析によるアプローチ: 両面に2層のCFRPが接着された平鋼のみ  
※CFRPの積層数増加にともない、微分方程式が高階となる

## ■ 解決方法

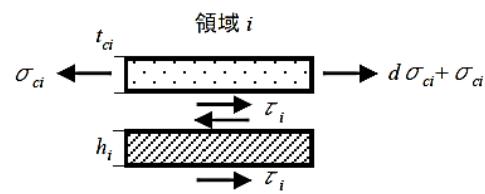
状態方程式を再帰的に作成し、固有値解析を数値解析的に実施する。



一軸引張を受けるCFRP接着鋼板



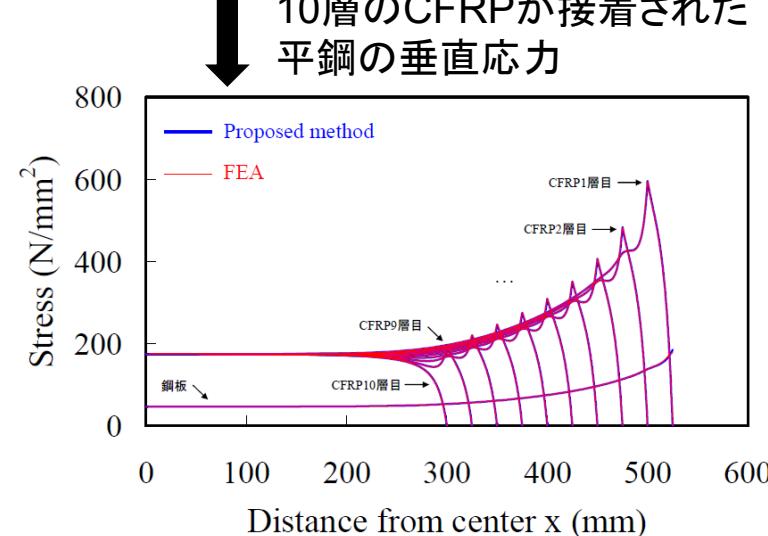
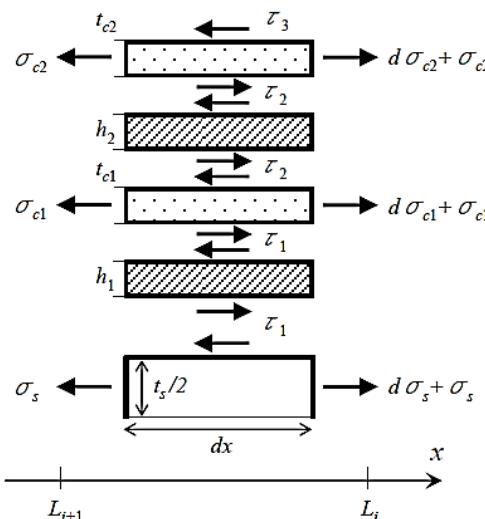
微小区間の  
力の釣合い



ひずみの  
関係式

$$\frac{d}{dx} \varepsilon_i = A_i \varepsilon_i$$

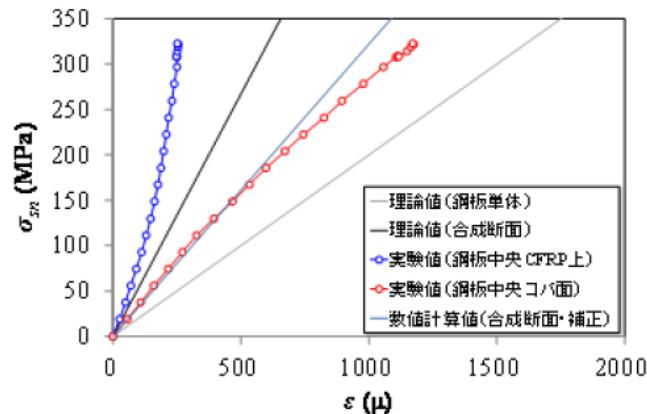
連立同次1次微分方程式



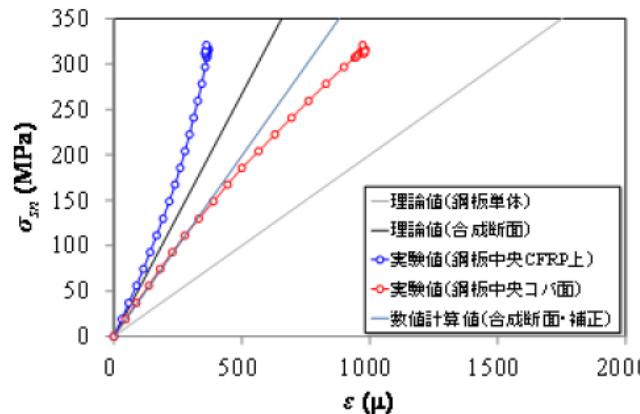
提案手法はFEAと同等の解析精度

# 検証&応力低減係数の決定

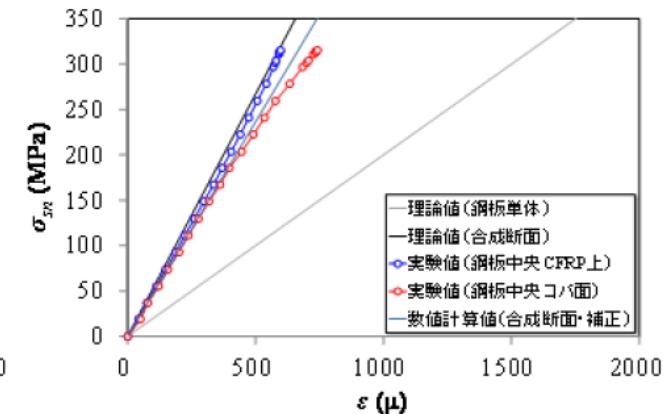
## ■ CFRP接着鋼板の応力ーひずみ関係(CFRP積層数:15層)



a) 定着長 100mm・ずらし量 10mm

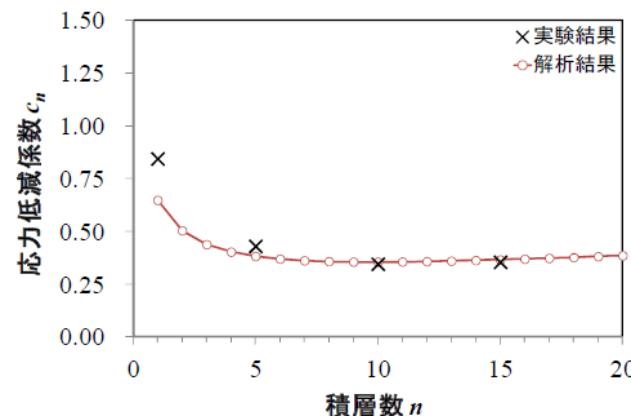


b) 定着長 200mm・ずらし量 10mm

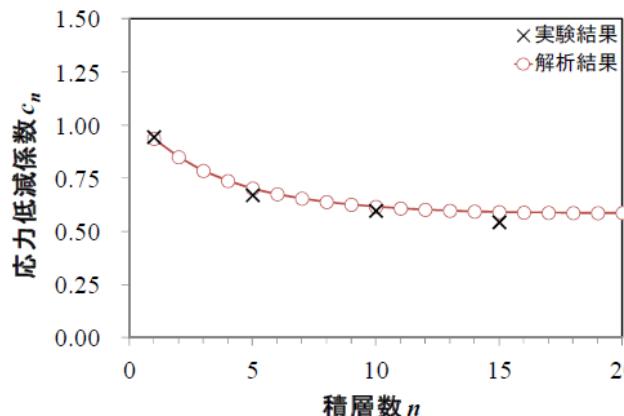


c) 定着長 200mm・ずらし量 25mm

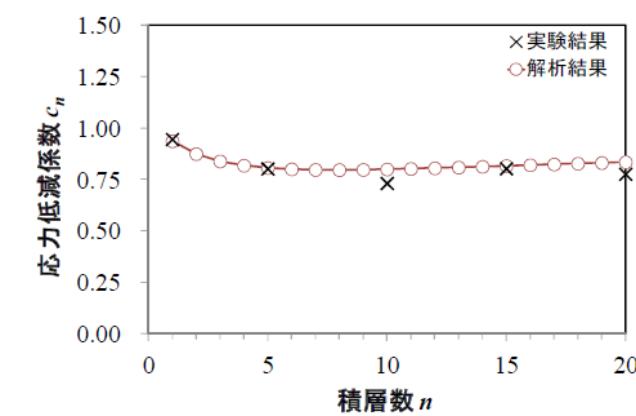
## ■ 応力低減係数 $c_n$ とCFRP積層数 $n$ の関係



a) 定着長 100mm・ずらし量 10mm



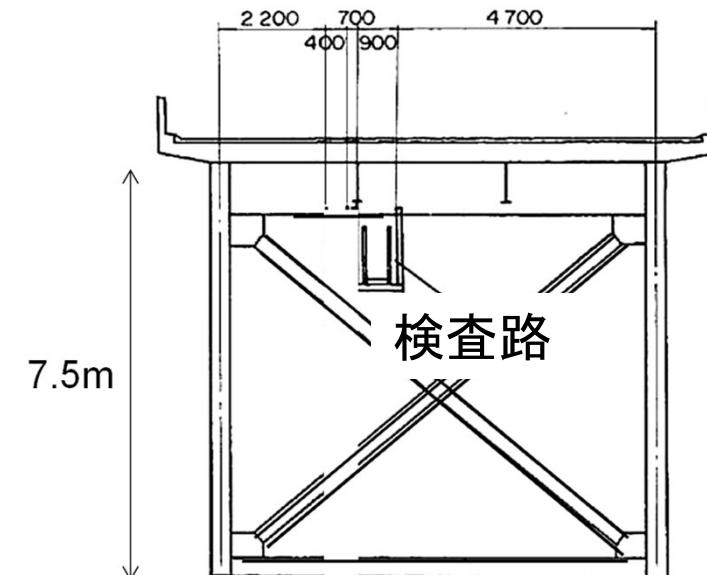
b) 定着長 200mm・ずらし量 10mm



c) 定着長 200mm・ずらし量 25mm

※ 実験結果は鋼材応力  $150\text{N/mm}^2$  付近

# 鋼トラス橋の腐食損傷



供用開始: 1974年10月

Vinh Ngoc PHAM, Takeshi MIYASHITA, Kazuo OHGAKI, Yusuke OKUYAMA, Yuya HIDEKUMA and Takuya HARADA: Load-Carrying Capacity of Corroded Gusset Plate Connection and its Repair Using CFRP Sheets, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 147, Issue 6, 2021.3.

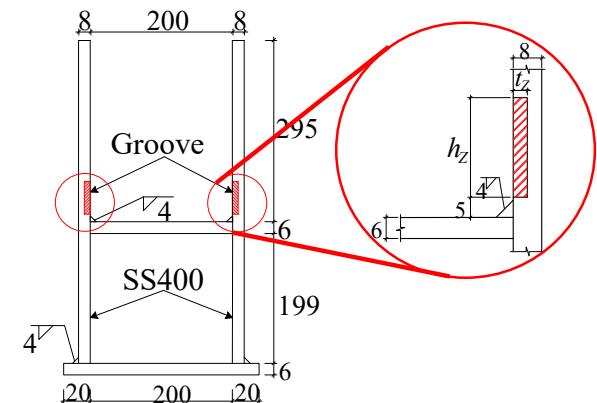
Vinh Ngoc PHAM, Takeshi MIYASHITA, Kazuo OHGAKI, Yuya HIDEKUMA and Takuya HARADA: Repair Method and Finite Element Analysis for Corroded Gusset Plate Connections Bonded to CFRP Sheets, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 147, Issue 1, 2020.10.

ロープアクセスによる点検

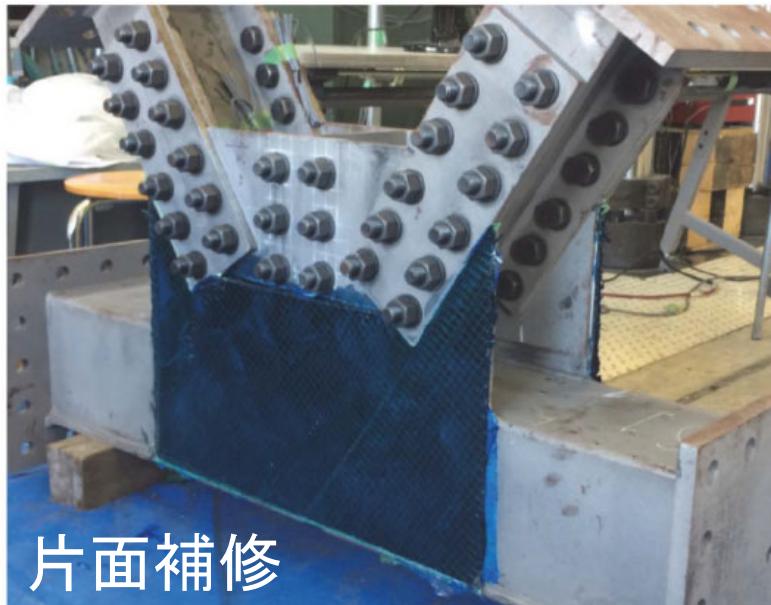
# 実験ケース

No.	試験体	腐食損傷	損傷量		CFRP補修		
			$h_z$ (mm)	$t_z$ (mm)	補修面	積層数	繊維方向
1	N	小 欠損量 50%	25	4	—	—	—
2	S				—	—	—
3	S1_45				片面	9外	$\pm 45^\circ$
4	S2_45				両面	4内+5外	$\pm 45^\circ$
5	S1_56				片面	9外	$\pm 56^\circ$
6	S2_56				両面	4内+5外	$\pm 56^\circ$
7	S2_90				両面	4内+5外	$90^\circ + 0^\circ$

CFRPシートの繊維  
方向もパラメータ

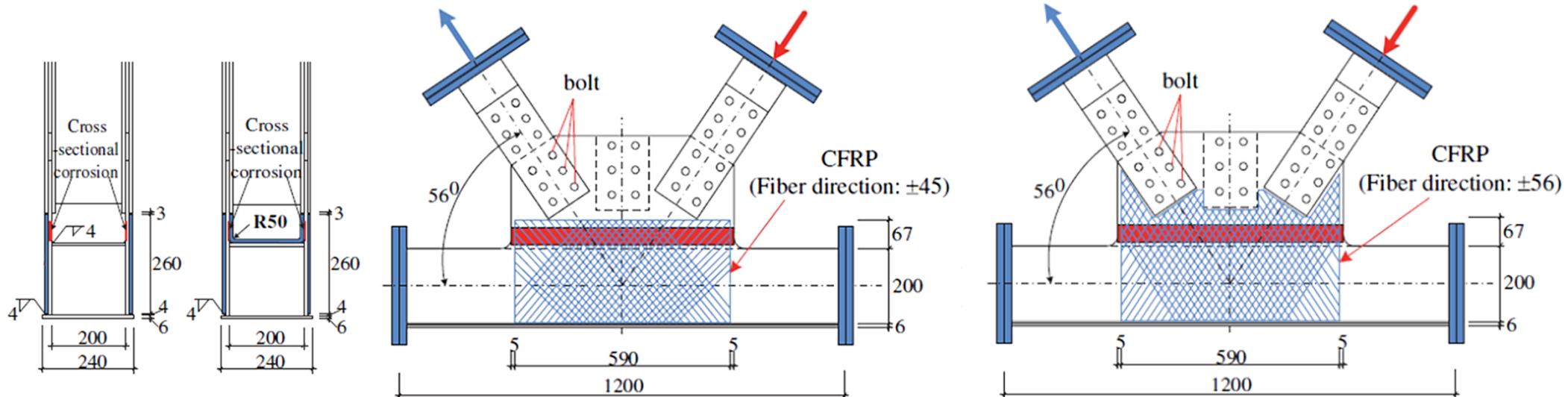


※ $\pm 56^\circ$  : 斜材の取付け方向,  $90^\circ + 0^\circ$  :せん断応力の低減 & 施工性向上



# 実験ケース(CFRPの貼付状況)

58



S1  
片面

S2  
両面

SO\_45

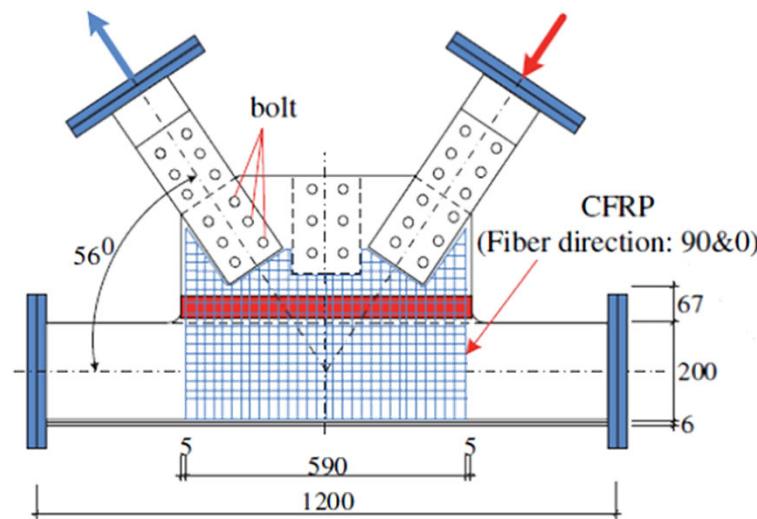
CFRP 繊維方向 :  $\pm 45^\circ$

SO\_56

CFRP 繊維方向 :  $\pm 56^\circ$

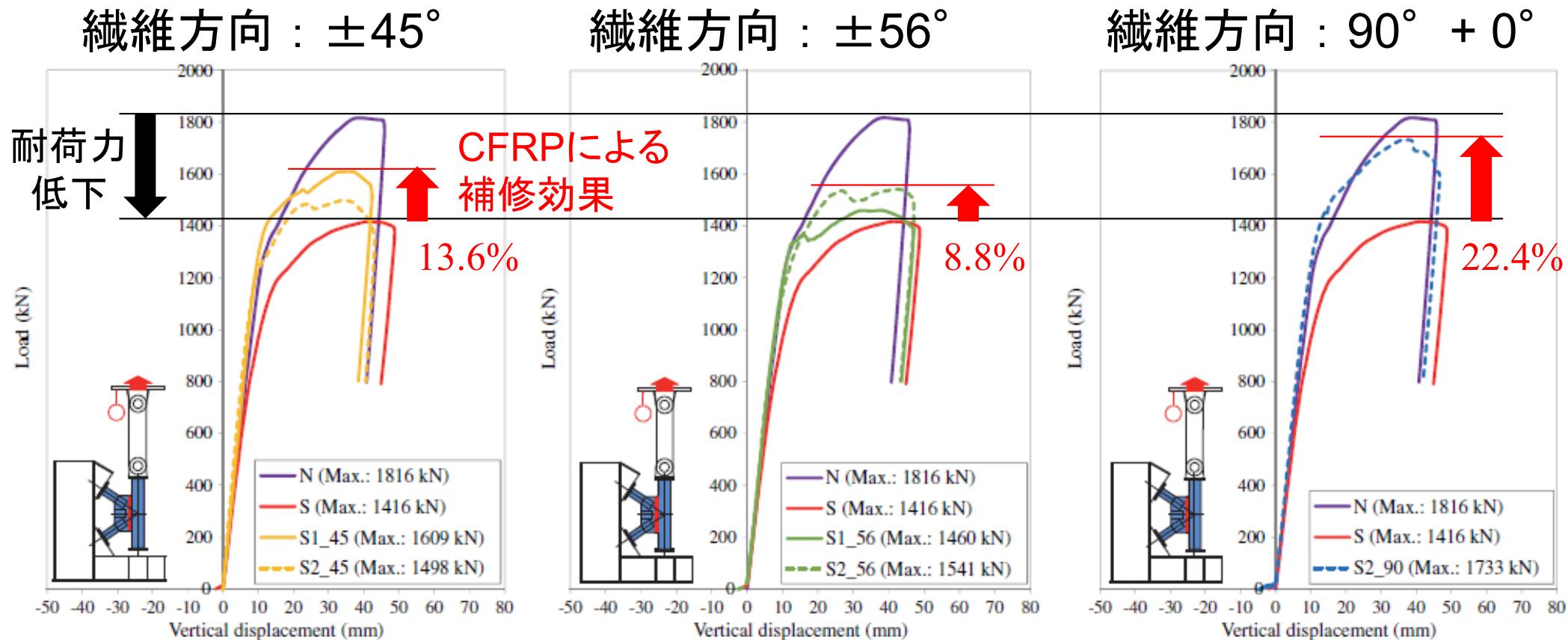
- CFRP種類：高弾性型
  - 引張弾性率：640GPa
  - 引張強度：2430MPa
  - 設計厚：0.143mm

※鋼材とCFRPシートの間には、はく離防止のため、高伸度弾性パテ材を塗布

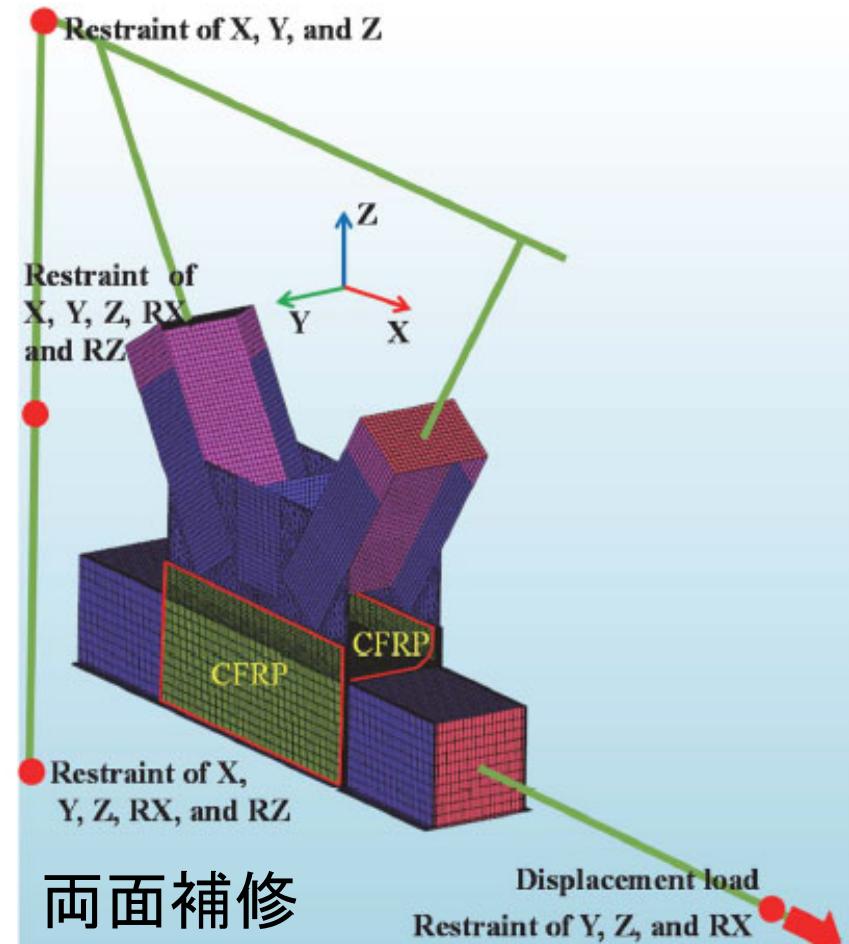
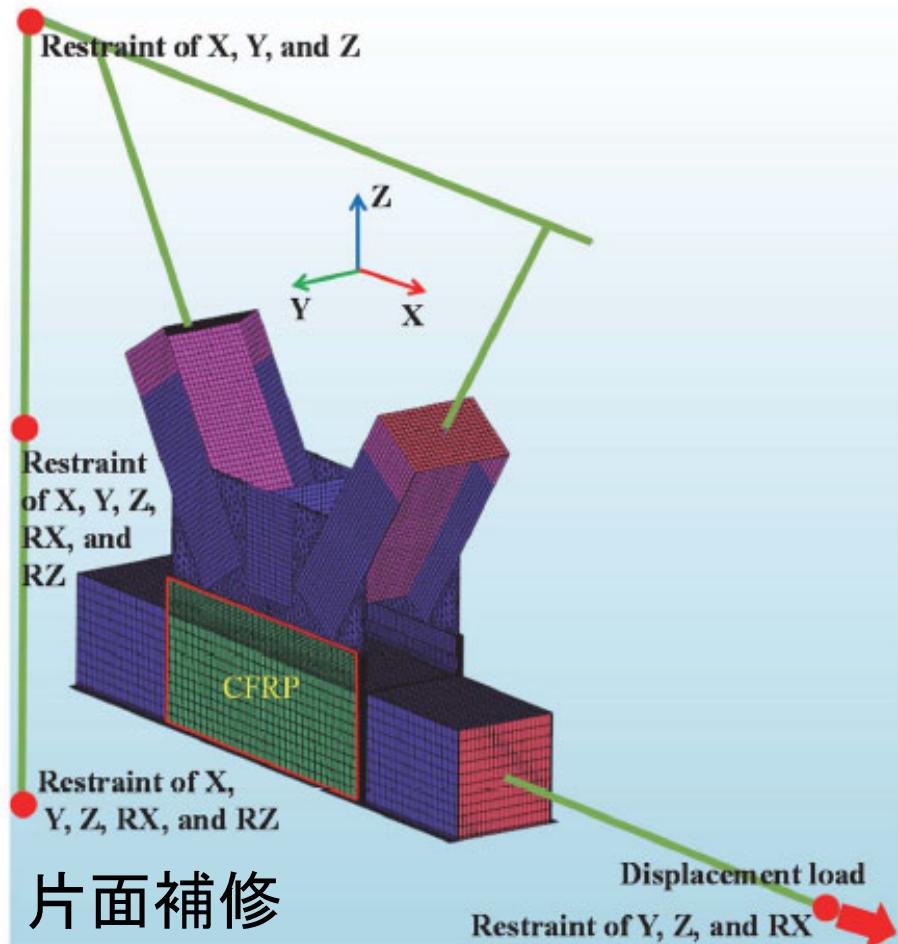


S2\_90

# 荷重一鉛直変位関係

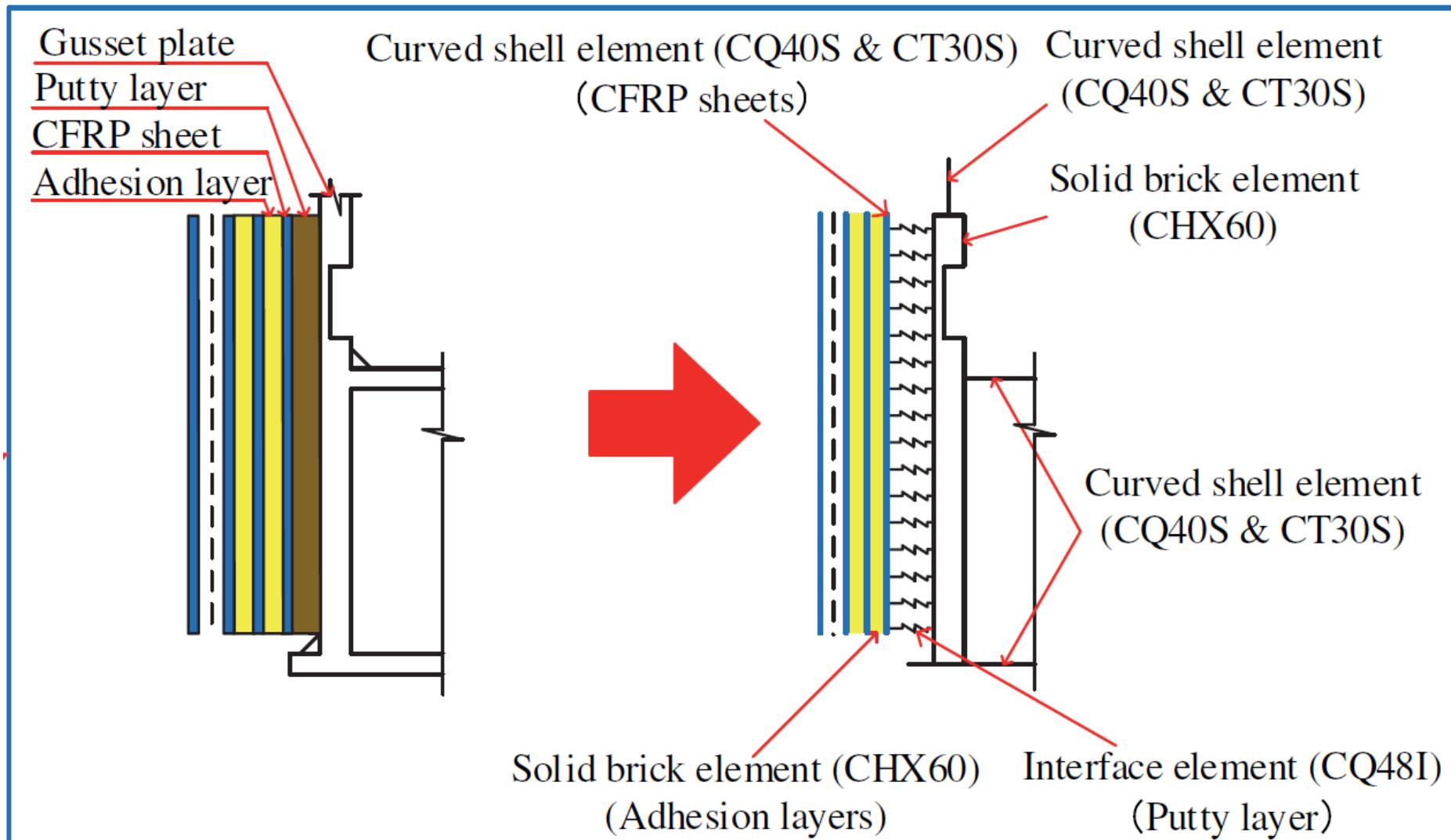


- CFRP 繊維方向が  $\pm 45^\circ$  と  $\pm 56^\circ$  では、両者の補修効果の差は小さい。
- CFRP 繊維方向が  $90^\circ + 0^\circ$  で、最大荷重が最大となる。  
← 損傷部のせん断応力を低減する効果が大きいため。
- CFRP 施工面による差は、バラツキが見られる。



- 考慮した非線形性
    - 鋼材の応力－ひずみ関係
    - 鋼材とCFRP間にあるパテ材の材料非線形性
- ※各CFRPの材料異方性は考慮するものの、材料非線形性は考慮せず
- ※各接着層の材料非線形性は考慮せず

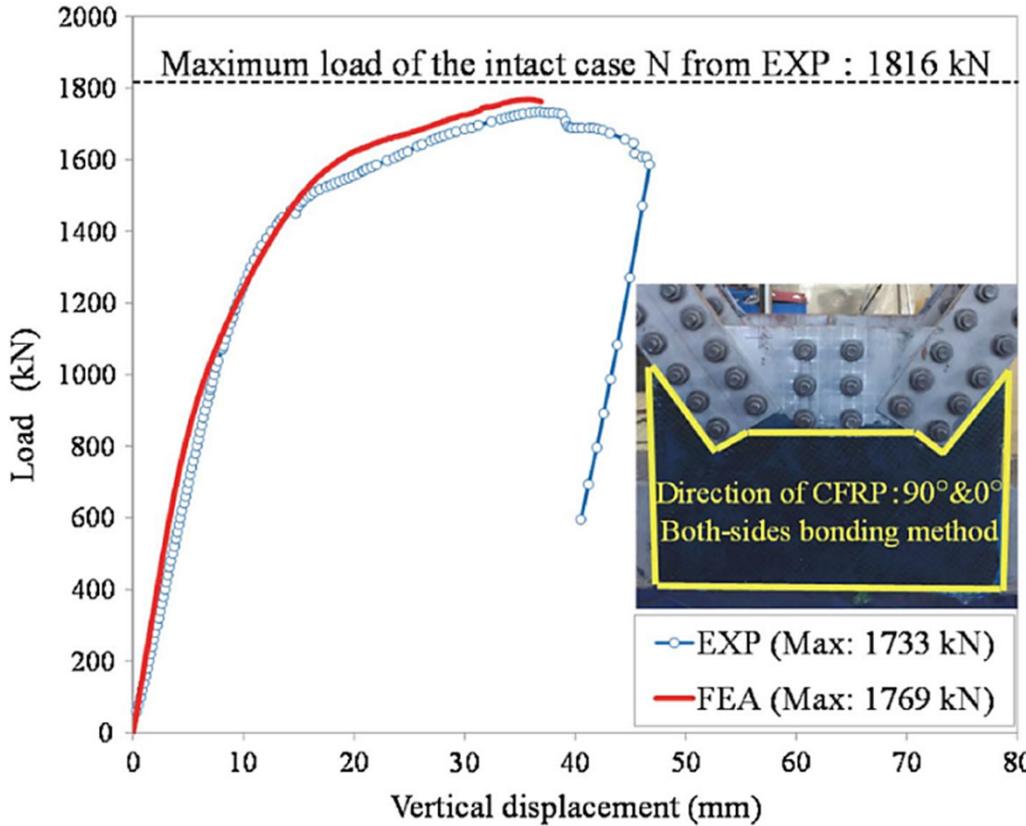
# パテ材のモデル化



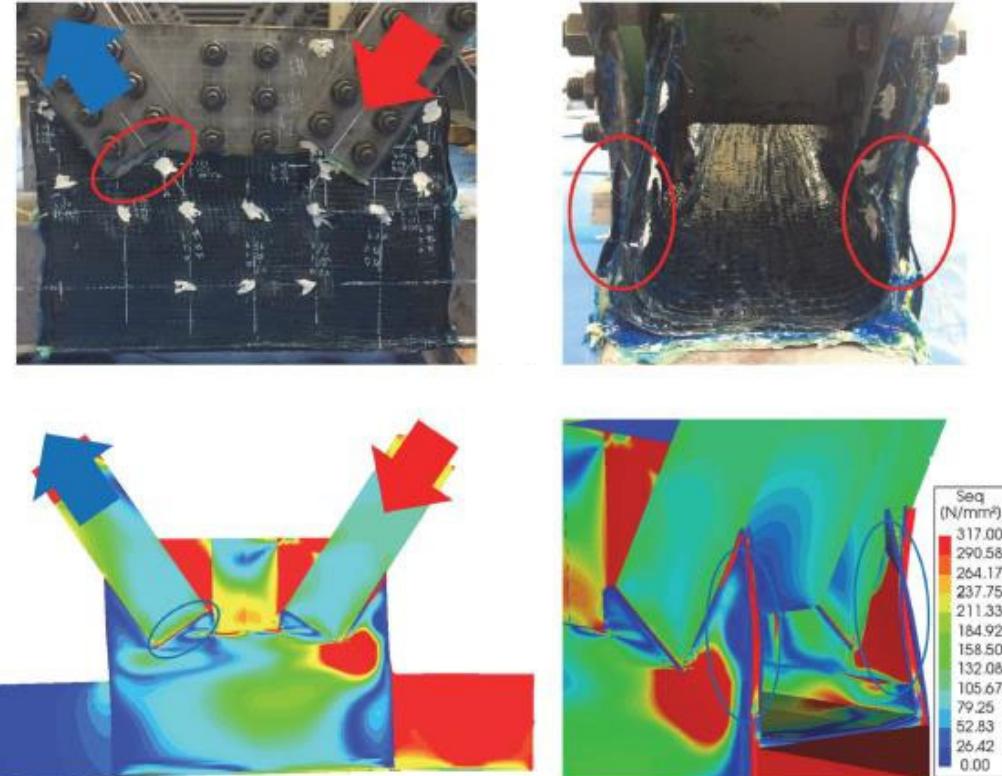
- ・ パテ材をインターフェース要素でモデル化(法線＆せん断方向)
- ・ CFRPはシェル要素でモデル化
- ・ 接着層はソリッド要素でモデル化

# 解析結果(S2\_90)

## 荷重-鉛直変位関係



## 破壊状況



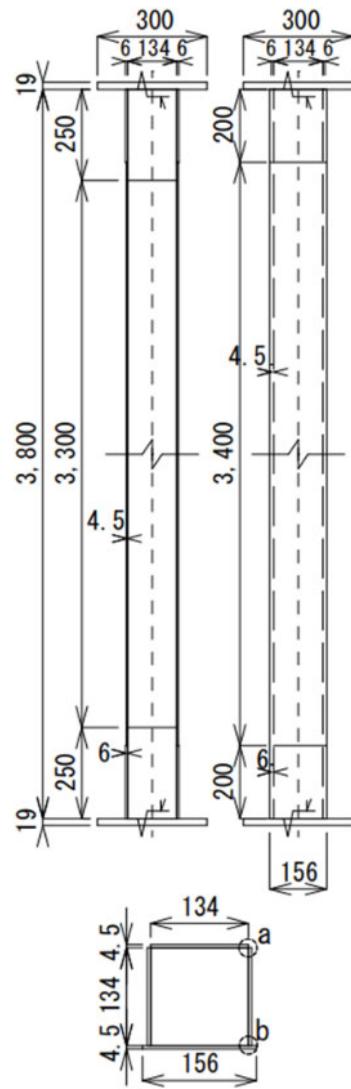
- FEAでも部材の座屈、CFRPのはく離を再現
- 最大荷重：1733kN（実験）, 1769kN（FEA） $\Rightarrow 1769/1733=1.02$

FEAは実験結果を概ね再現

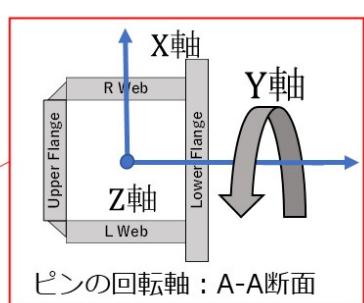
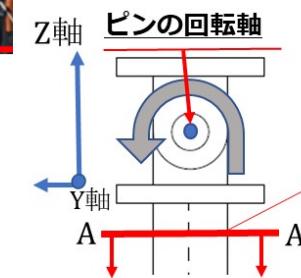
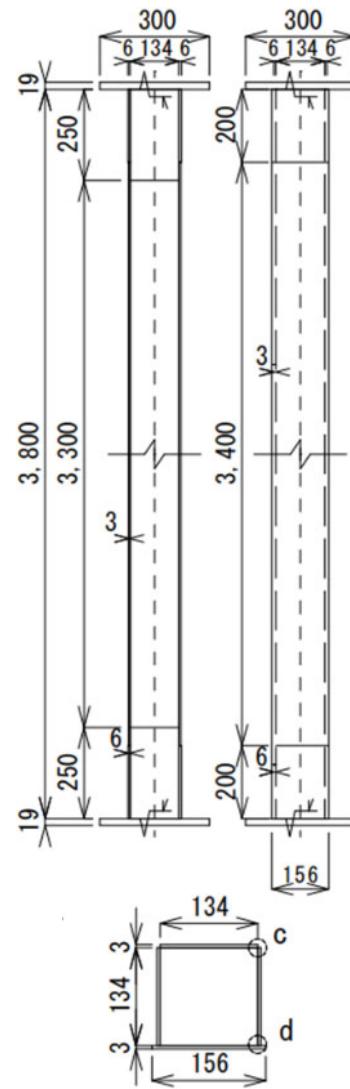
# 鋼部材 CFRP補強(耐震)

65

NC01



AC11&AC21

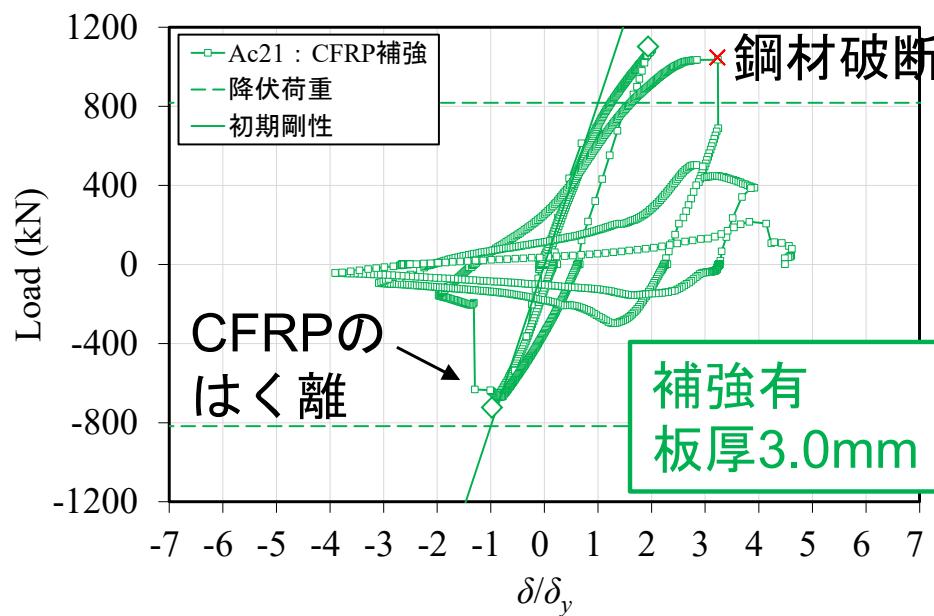
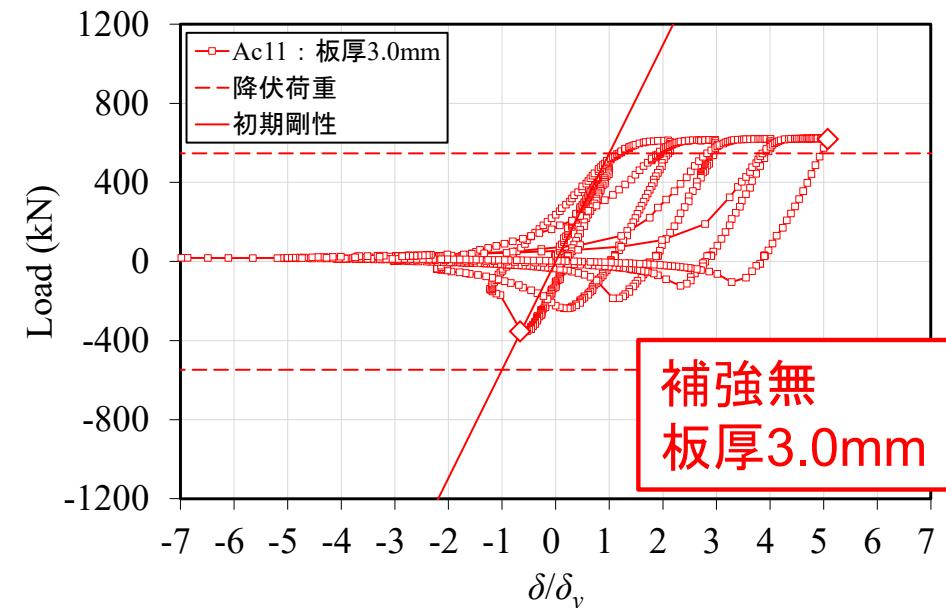
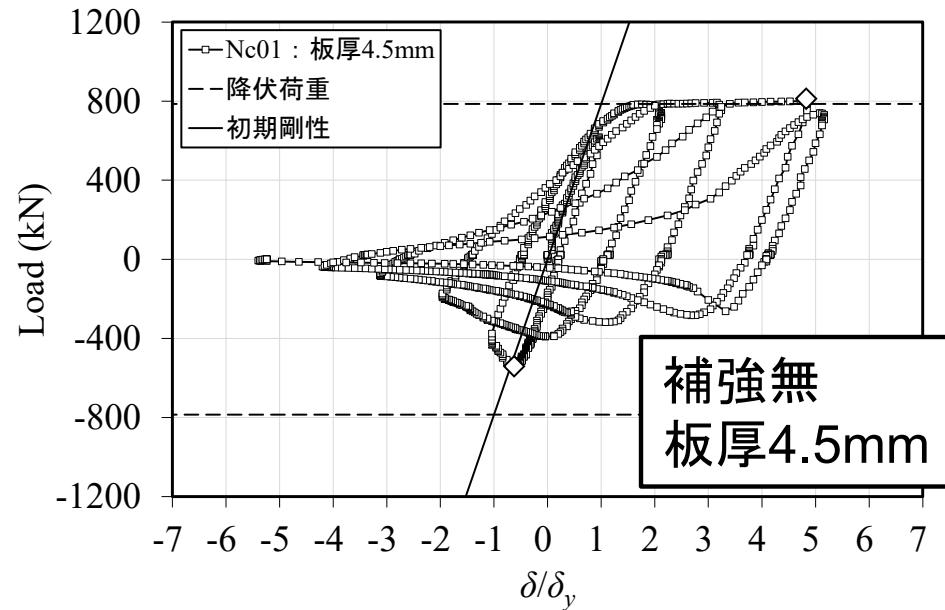


池田一喜, 宮下剛, 大垣賀津雄, 服部雅史, 後藤源太, 秀熊佑哉, 櫻井俊太,  
SYLL AMADOU SAKHIR : CFRPシート補強した鋼箱形断面長柱の単調載荷なら  
びに交番載荷実験, 土木学会論文集, Vol.81, No.14, 24-14008, 2025.6.

# 鋼部材 CFRP補強(耐震)

66

## 交番載荷実験

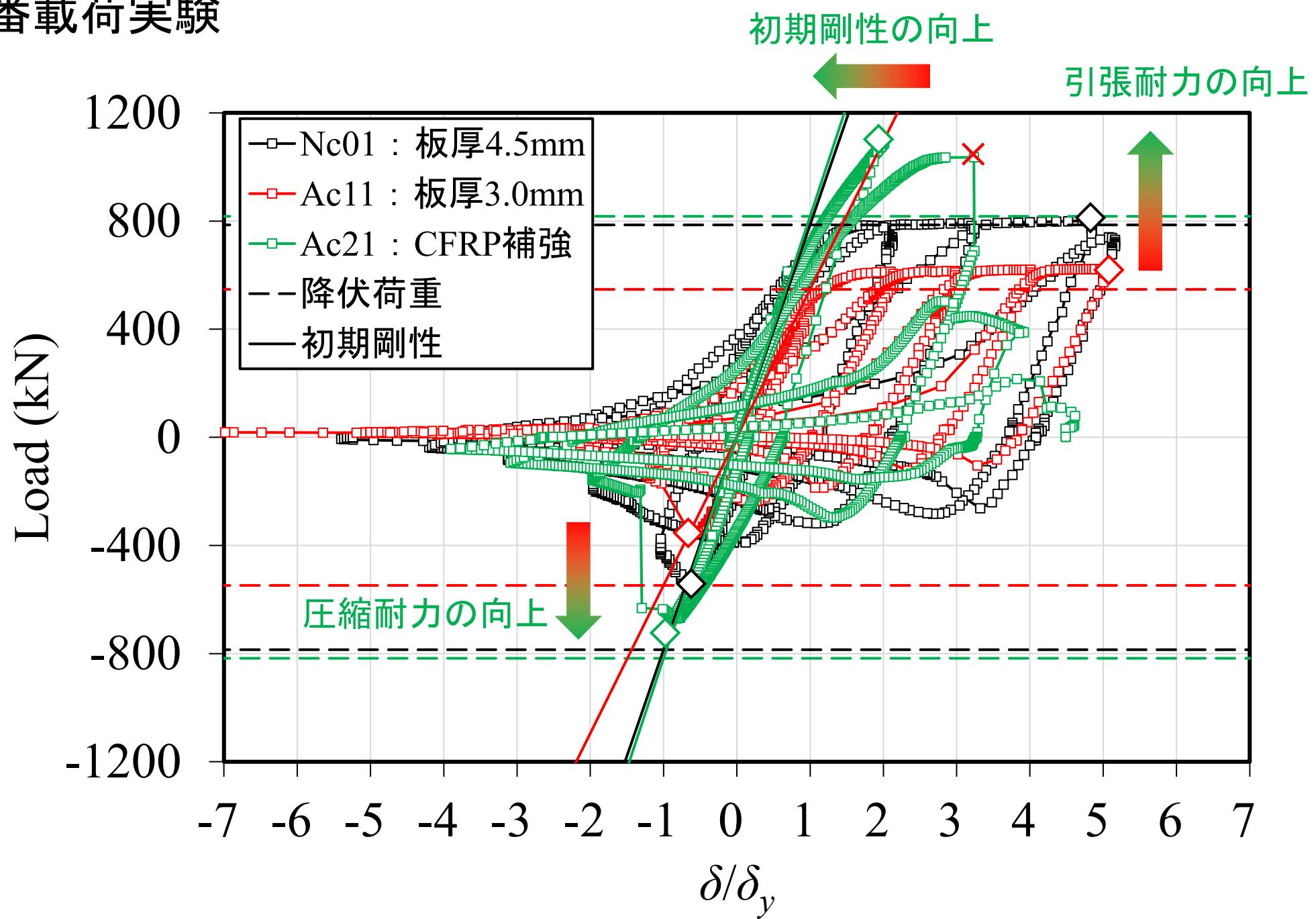


鋼材破断の発生状況

# 鋼部材 CFRP補強(耐震)

67

# 交番載荷実験

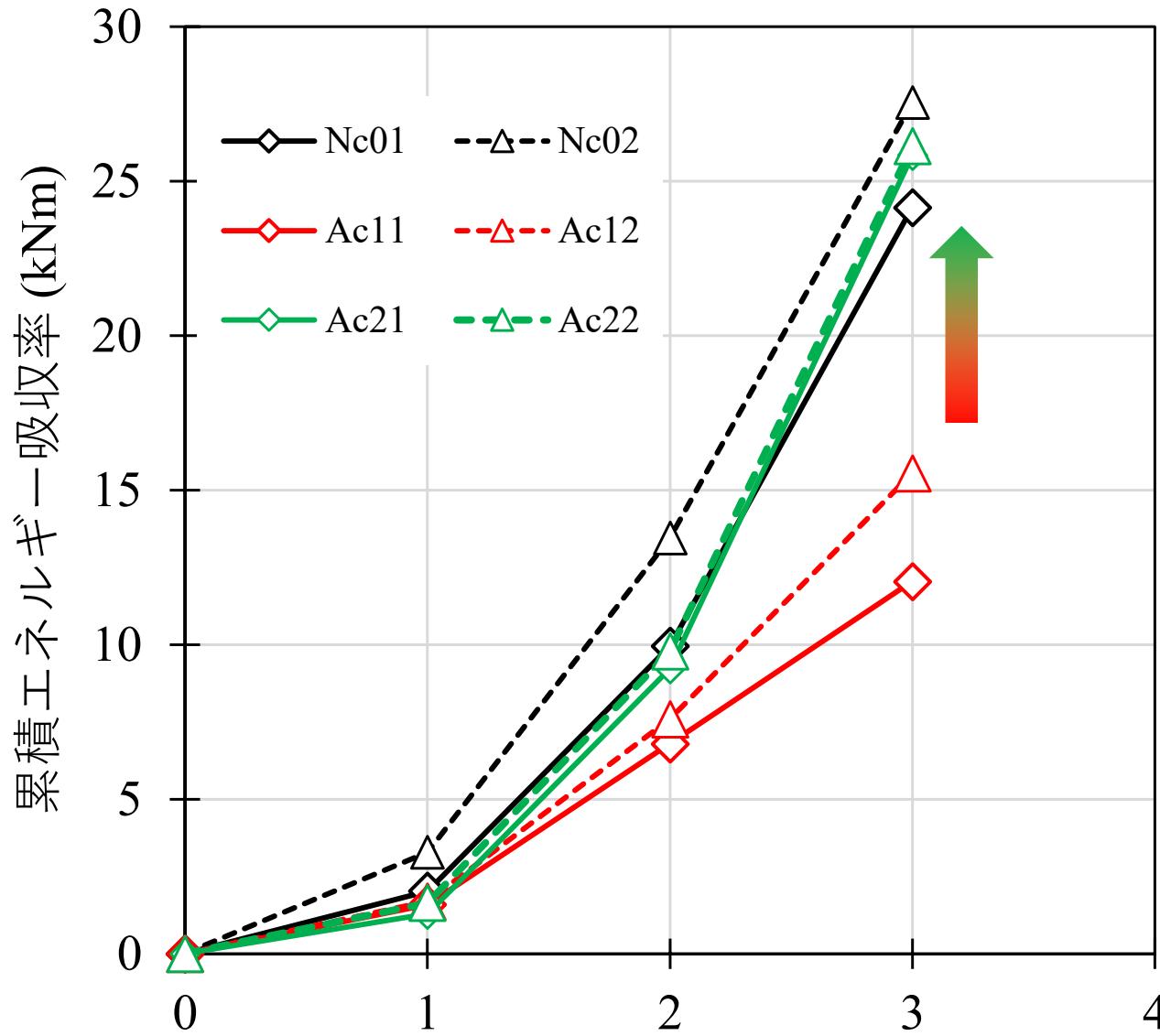


# 鋼部材 CFRP補強(耐震)

## 破壊状況

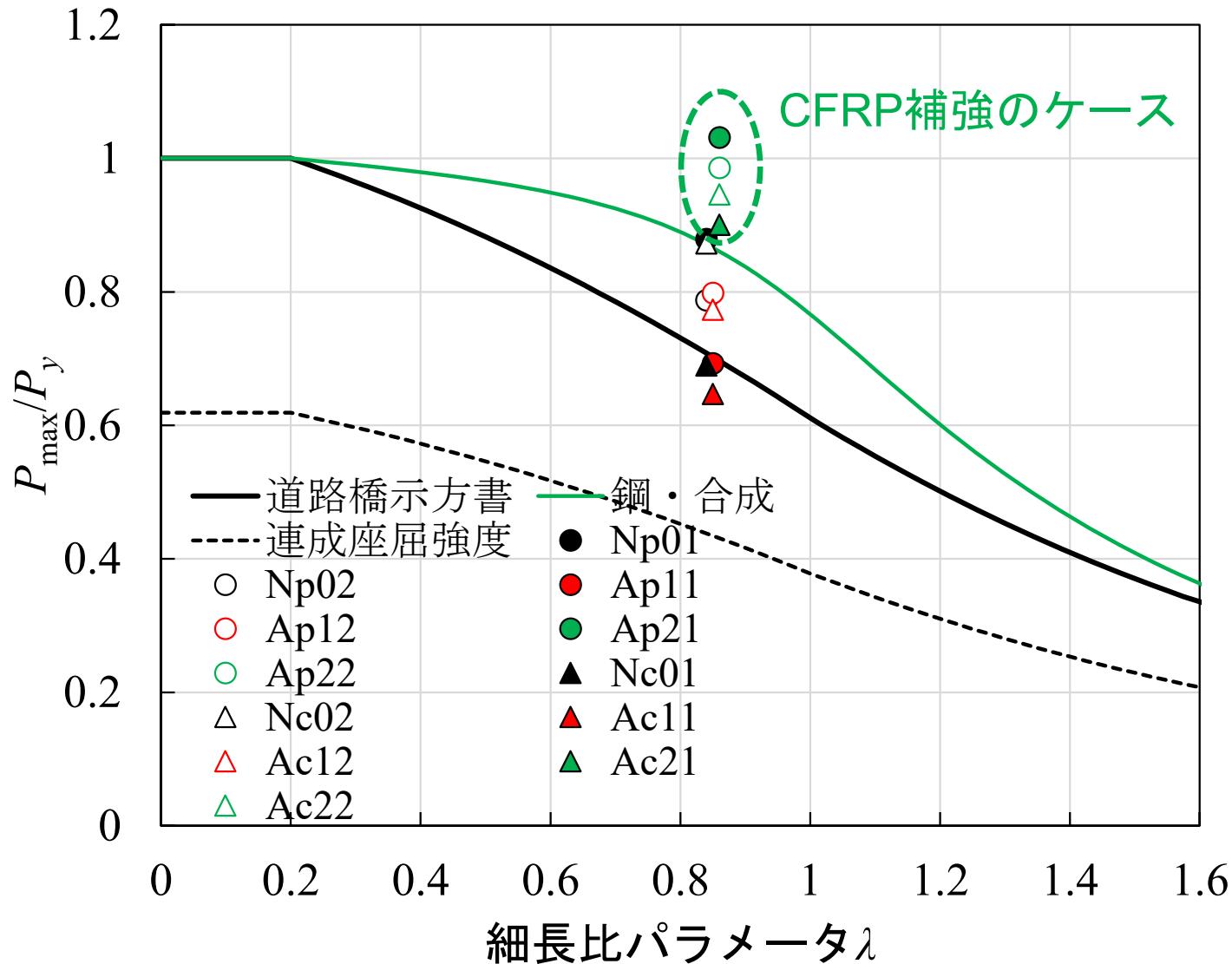


## 累積エネルギー吸収量



CFRP補強のケースでエネルギー吸収性能がアップ

## 耐荷力曲線

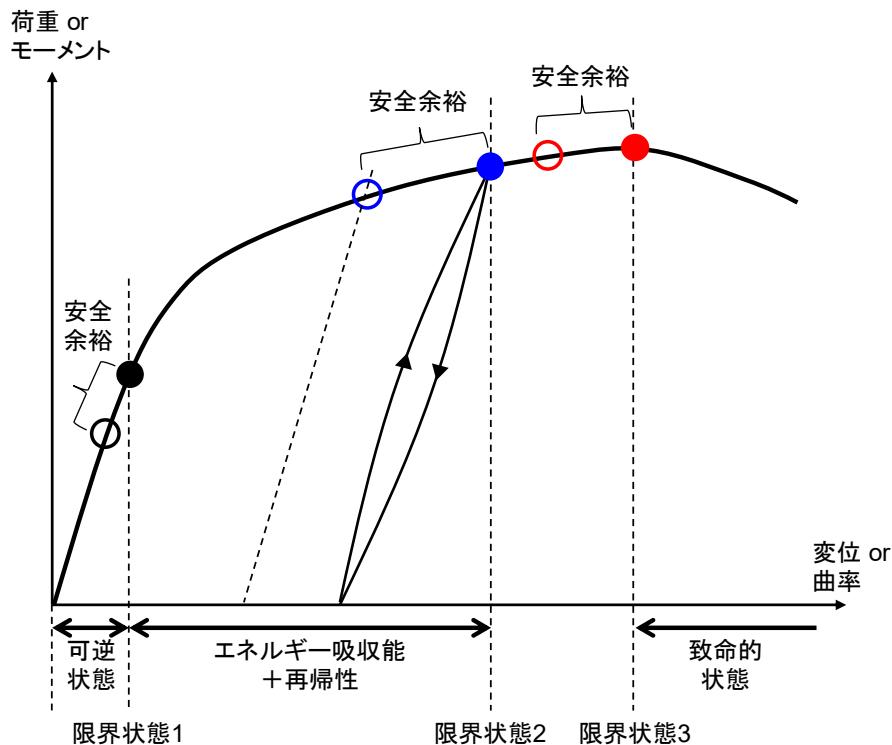


CFRP補強のケースは既往の耐荷力曲線を上回る

# 限界狀態設計法

# H29道示

許容応力度設計法  
→限界状態設計法



H29道示・共通編（表-解4.3.1）

	限界状態1	限界状態2	限界状態3
定義	部材等としての荷重を支 持する能力が確保されて いる限界の状態	部材等としての荷重を支 持する能力は低下してい るものあらかじめ想定 する能力の範囲にある限 界の状態	これを超えると部材等と しての荷重を支持する能 力が完全に失われる限界 の状態

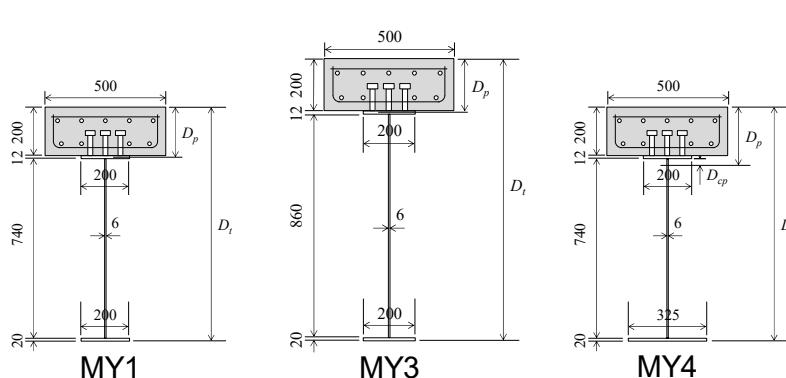
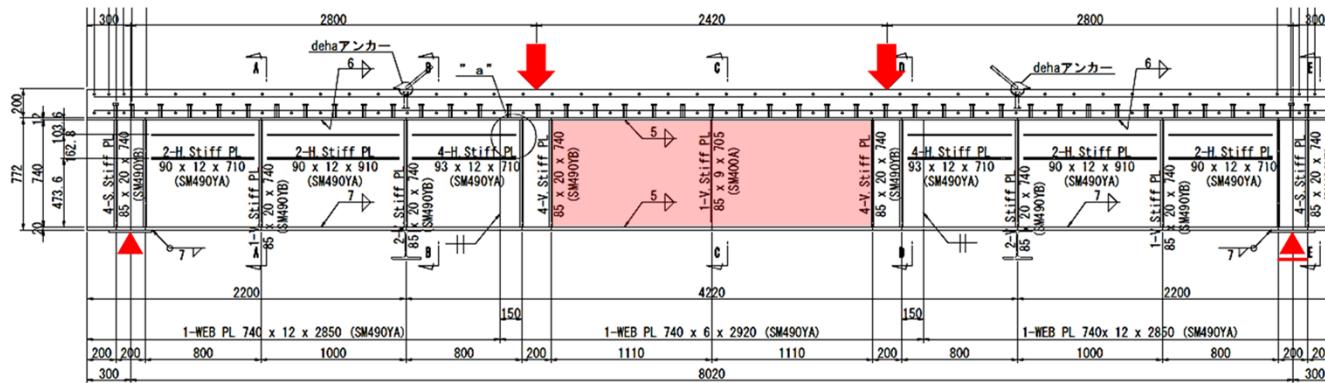
部材の限界状態や限界値の具体が不明確

# H29道示

	限界状態1	限界状態2	限界状態3
定義	部材等としての荷重を支持する能力が確保されている限界の状態  弹性限界	部材等としての荷重を支持する能力は低下しているもののあらかじめ想定する能力の範囲にある限界の状態  ？？？	これを超えると部材等としての荷重を支持する能力が完全に失われる限界の状態  終局限界
力学的解釈	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材等の挙動が可逆性を有する限界の状態</li> <li>部材等の能力を低下させる変位及び振動に部材等が至らない限界の状態</li> <li>部材等の設計で前提とする耐荷機構が成立する限界の状態</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材等の挙動が可逆性を失うものの、作用の繰返しに対して耐荷力を安定して発揮できる限界の状態、かつ</li> <li>部材等としての最大強度点を超えず、部材等の能力を低下させる残留変位の急変や剛性の急変に部材等が至らない限界の状態</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材等の挙動が可逆性を失うものの、耐荷力を完全には失わない限界の状態</li> </ul>

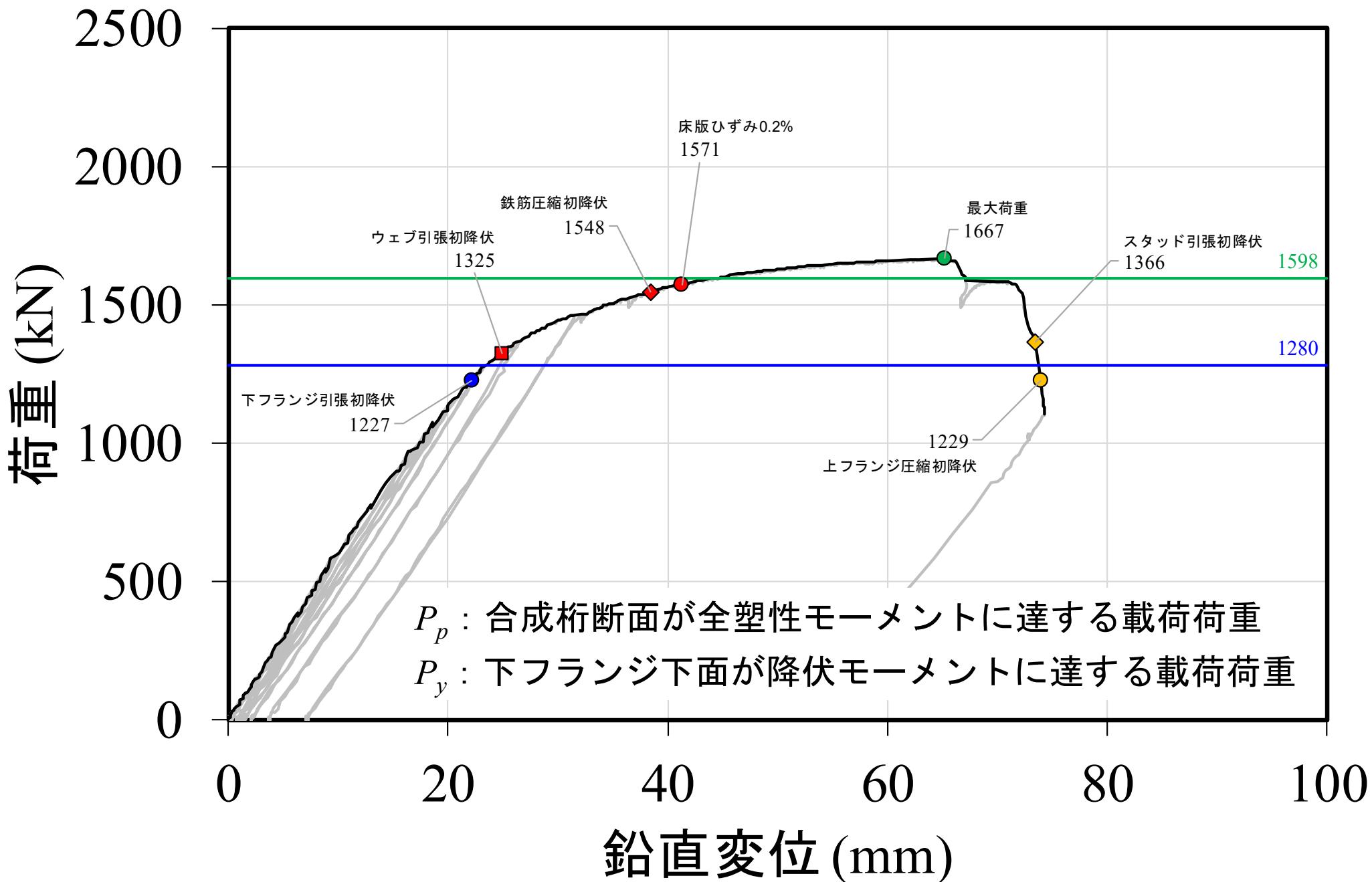
# 載荷試驗(H29~R1)

- ・合成桁の等曲げ載荷試験（4体）  
塑性中立軸位置の影響，ウェブ幅厚比の緩和，床版ディテール
  - ・合成桁の曲げせん断載荷試験（4体）  
ウェブ幅厚比の緩和，曲げとせん断の相関関係
  - ・合成2主桁の曲げせん断載荷試験（2体）  
疲労損傷した床版が耐荷力に与える影響，構造システム

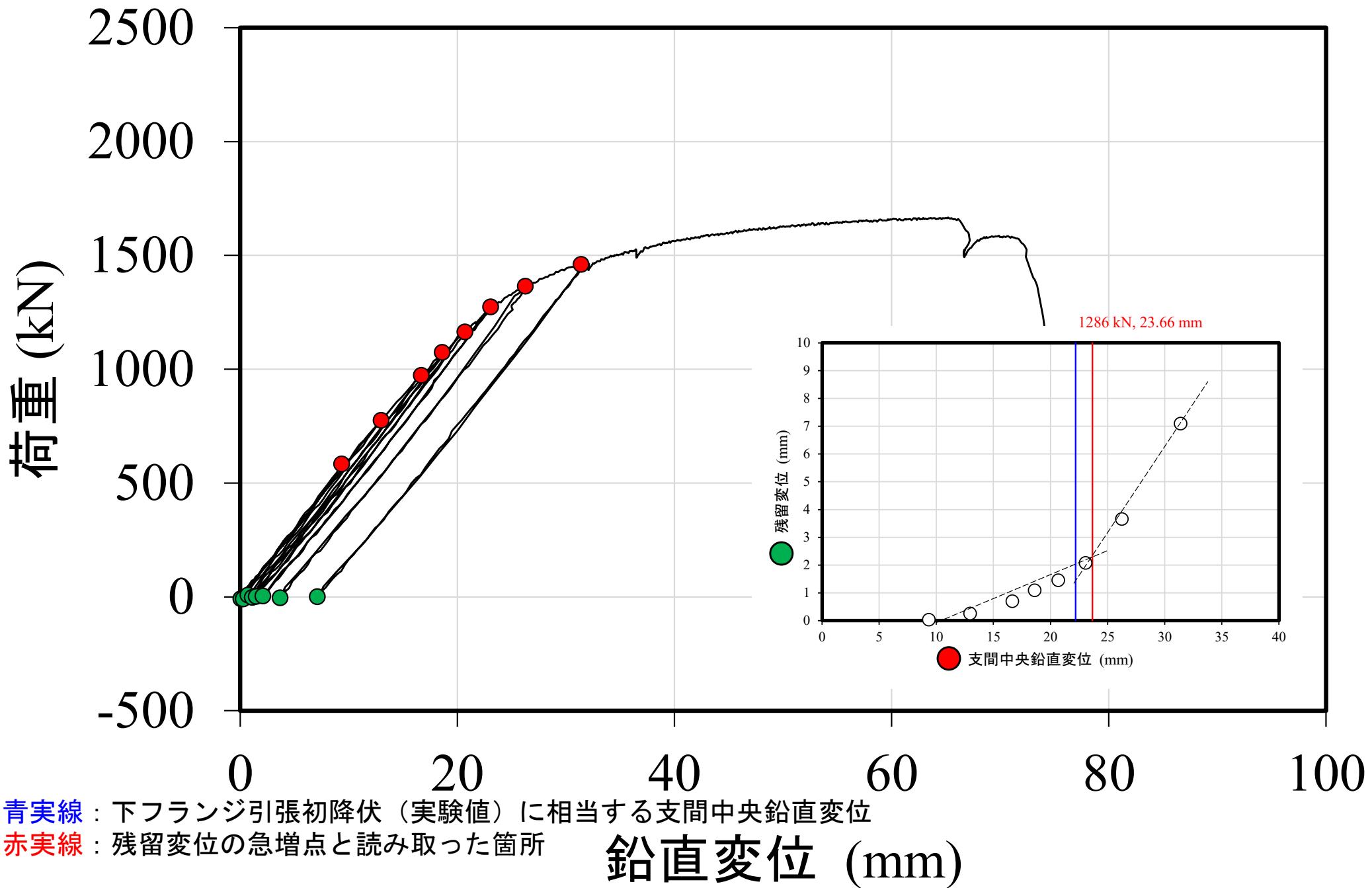


# 国土交通省道路局 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(宮下剛, 小野潔, 野阪克義, 北根安雄, 林偉偉)

# 荷重－変位関係(供試体MY1)

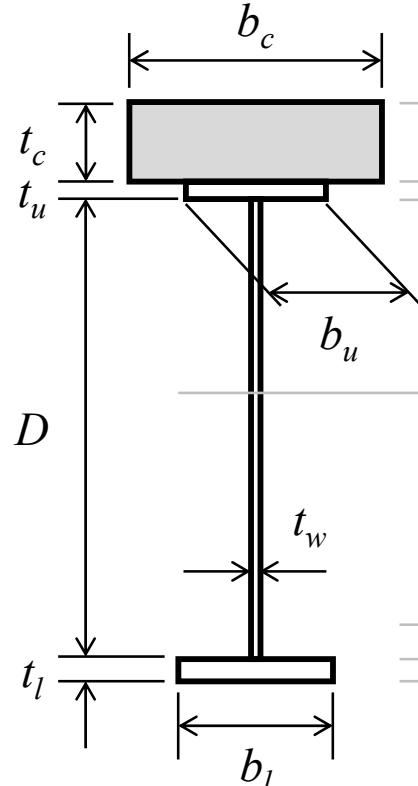


# 残留変形(支間中央変位, 供試体MY1)



# 限界状態2の候補

下フランジが降伏した後、  
ウェブ引張域の降伏が進行し、  
コンクリート床版上縁のひずみが2000 $\mu$ に達する状態



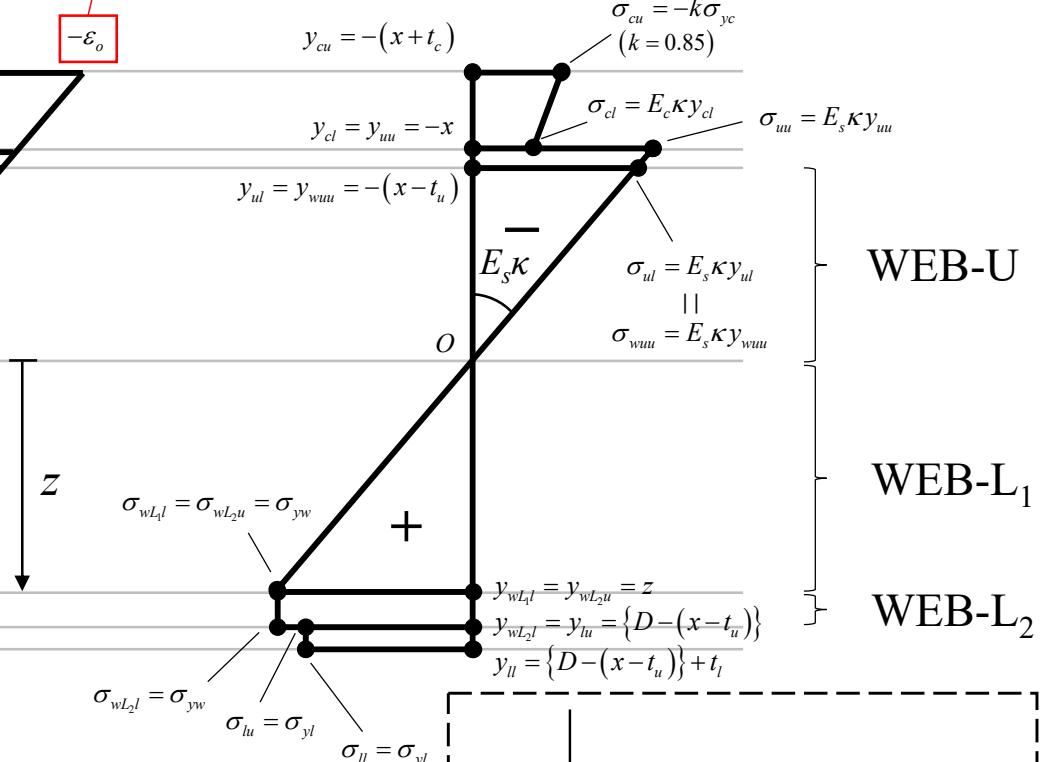
※ $x < 0$  も許す

$$\text{ひずみ} \quad \varepsilon = \kappa y$$

SLAB上面が2000 $\mu$  (= 0.002) ひずみに到達

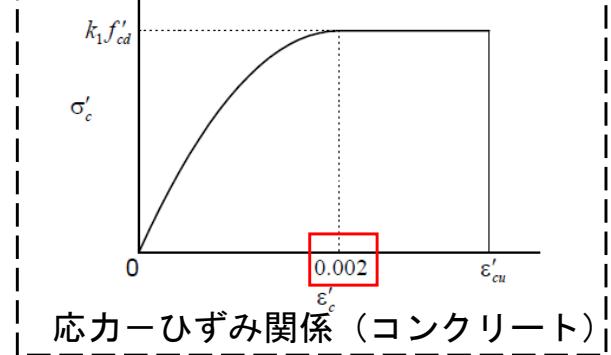
応力

$$\sigma = F(\varepsilon)$$

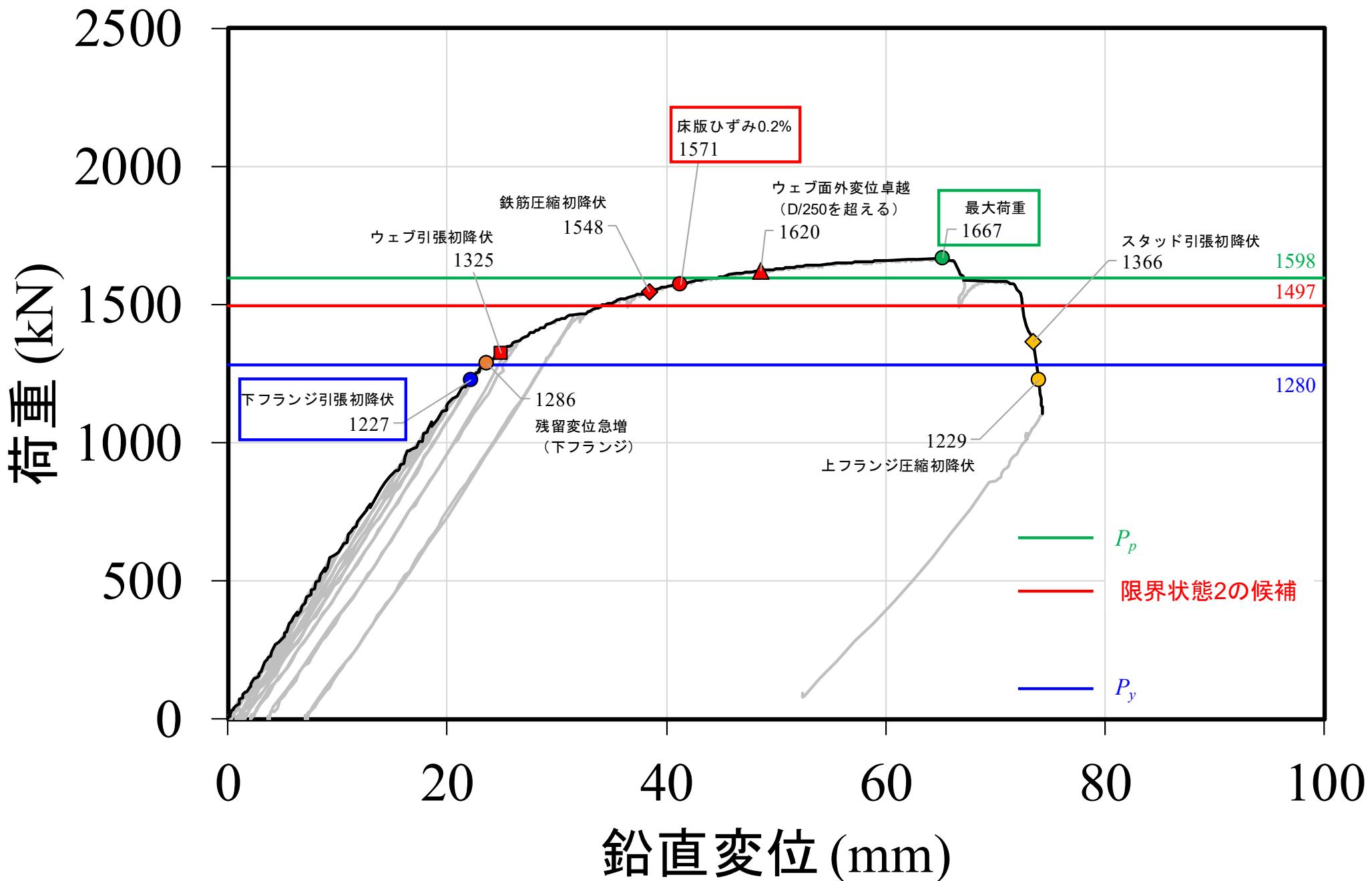


$$\text{曲率} : \kappa = \frac{-\varepsilon_o}{y_{cu}} \quad (\varepsilon_o = 0.002)$$

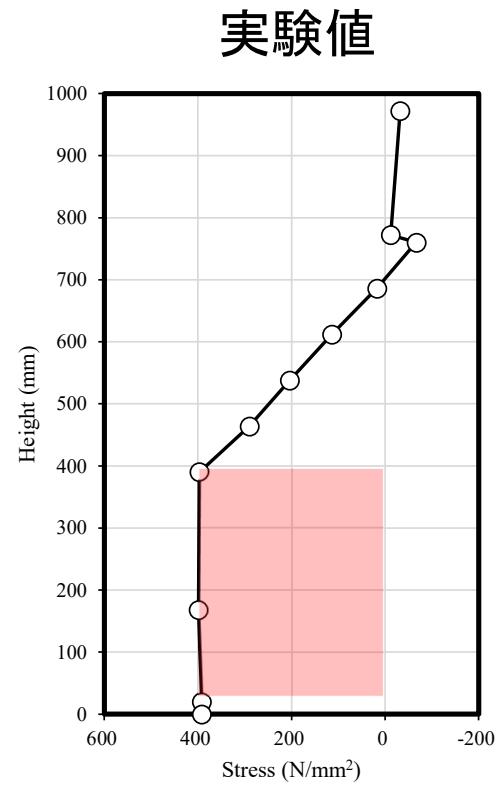
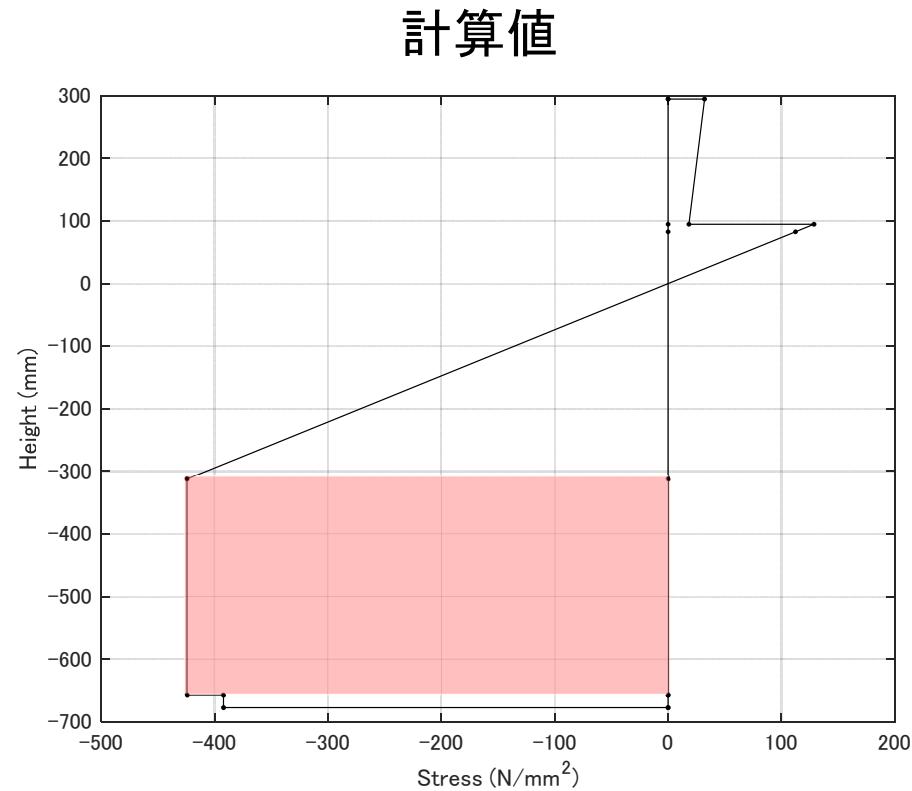
$$\text{中立軸からWEB塑性域までの距離} : z = \frac{\varepsilon_{yw}}{\kappa} = \frac{\sigma_{yw}/E_s}{\kappa}$$



# 荷重－変位関係(供試体MY1)



# 限界状態2の候補(ウェブの塑性化範囲)

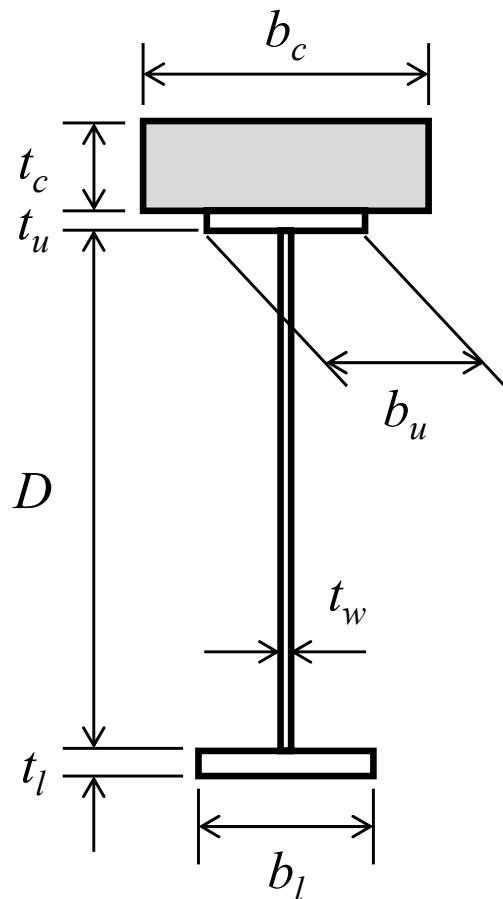


ウェブ高さに対するウェブが塑性化した高さの割合 (%)

46.6 %

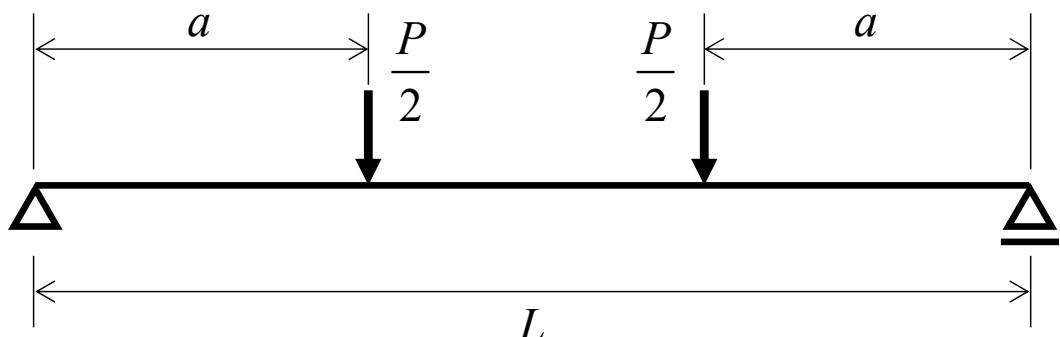
50 %

# 供試体(等曲げ)

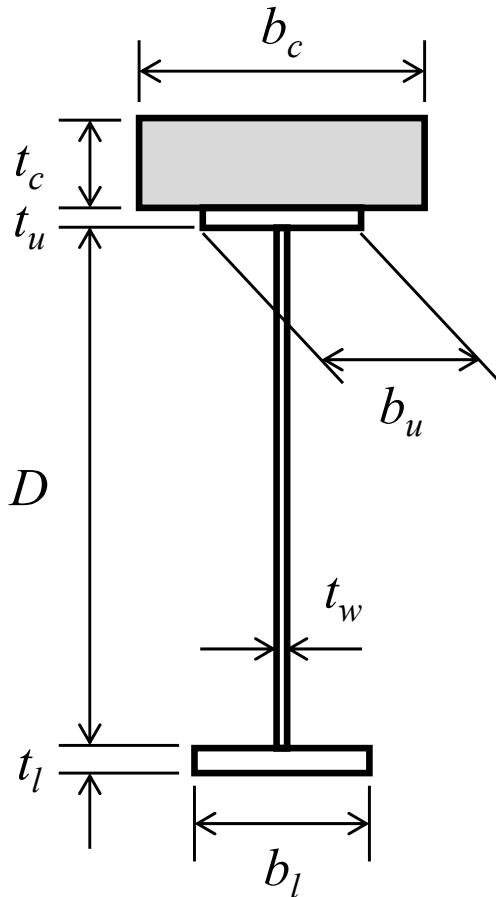


項目	記号	単位	MY1	MY3	MY4	E	MB1
SLAB	幅	bc	mm	500	500	500	500
	高さ	tc	mm	200	200	200	200
UFLG	幅	bu	mm	200	200	200	200
	厚さ	tu	mm	12	12	12	12
WEB	高さ	D	mm	740	860	740	720
	厚さ	tw	mm	6	6	6	6
LFLG	幅	bl	mm	200	200	325	200
	厚さ	tl	mm	20	20	20	20
SLAB	圧縮強度	fyc	N/mm <sup>2</sup>	37.8	39.6	39.0	38.0
UFLG	降伏点	fyu	N/mm <sup>2</sup>	405	405	405	415
WEB	降伏点	fyw	N/mm <sup>2</sup>	424	424	424	531
LFLG	降伏点	fyl	N/mm <sup>2</sup>	392	392	392	515
鋼種	—	—	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SBHS500
支点から載荷点までの距離	a	mm	2800	2800	2800	2800	2800
支点間距離	L	mm	8020	8380	8020	8020	7960
実験の実施年度	—	—	2017 (H29)	2017 (H29)	2017 (H29)	2018 (H30)	2018 (H30)

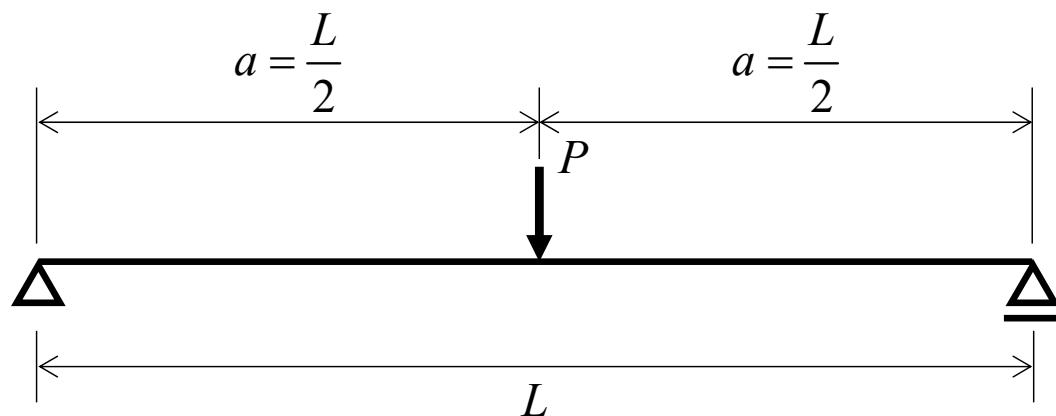
※EはMY1と同様で床版に鉄筋格子を配置



# 供試体(曲げせん断)



項目		記号	単位	A	B	C	D	2019C
SLAB	幅	bc	mm	500	500	500	500	500
	高さ	tc	mm	200	200	200	200	200
UFLG	幅	bu	mm	200	200	200	200	200
	厚さ	tu	mm	12	12	12	12	12
WEB	高さ	D	mm	740	860	860	860	720
	厚さ	tw	mm	6	6	6	6	6
LFLG	幅	bl	mm	200	200	200	200	200
	厚さ	tl	mm	20	20	20	20	22
SLAB	圧縮強度	fyc	N/mm <sup>2</sup>	36.3	38.3	38.4	36.9	47.1
UFLG	降伏点	fyu	N/mm <sup>2</sup>	433	433	433	433	570
WEB	降伏点	fyw	N/mm <sup>2</sup>	426	426	426	426	493
LFLG	降伏点	fyl	N/mm <sup>2</sup>	401	401	401	401	512
鋼種		—	—	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SM490Y	SBHS500
支点から載荷点までの距離		a	mm	3550	3975	5200	3975	2980
支点間距離		L	mm	7100	7950	10400	7950	5960
実験の実施年度		—	—	2018 (H30)	2018 (H30)	2018 (H30)	2018 (H30)	2019 (R1)

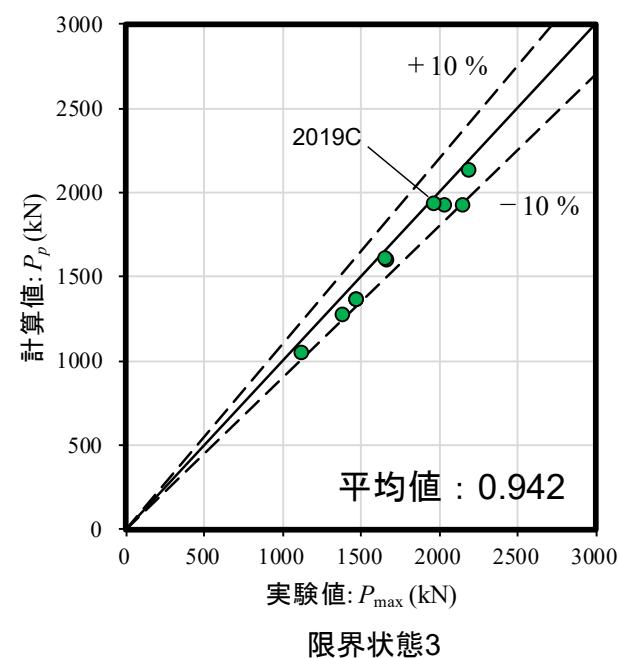
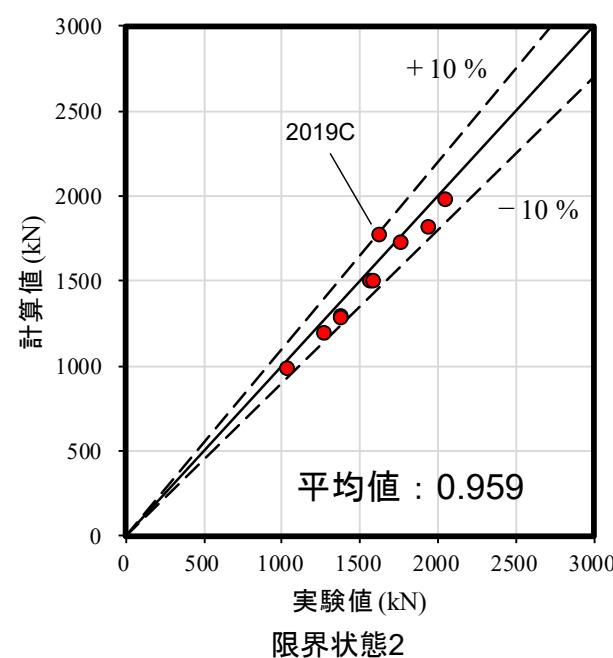
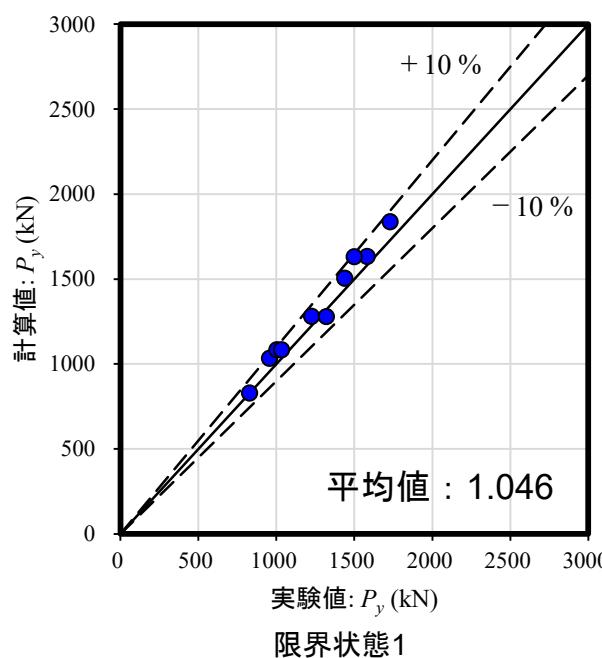


# 限界状態(案)の試算

		限界状態1			限界状態2			限界状態3		
		計算値	実験値	計算値/ 実験値	計算値	実験値	計算値/ 実験値	計算値	実験値	計算値/ 実験値
		Py	Py					Pp	Pmax	
等曲げ 試験体	MY1	1,280	1,227	1.043	1,497	1,571	0.953	1,598	1,667	0.959
	MY3	1,505	1,438	1.047	1,807	1,937	0.933	1,919	2,028	0.946
	MY4	1,838	1,729	1.063	1,977	2,046	0.966	2,131	2,185	0.975
	E	1,280	1,319	0.970	1,498	1,590	0.943	1,599	1,656	0.965
	MB1	1,633	1,581	1.033	1,723	1,765	0.976	1,918	2,147	0.893
曲げ せん断 試験体	A	1,033	957	1.079	1,190	1,277	0.932	1,270	1,383	0.918
	B	1,085	1,003	1.082	1,283	1,380	0.930	1,364	1,468	0.929
	C	829	829	1.001	981	1,034	0.949	1,043	1,118	0.933
	D	1,085	1,033	1.050	1,277	1,380	0.925	1,357	1,466	0.926
	2019C	1,631	1,499	1.088	1,765	1,628	1.084	1,925	1,967	0.978

SBHS500

SBHS500



終わりに

# 今後の研究

- CFRP補修・補強
  - 鋼桁の横倒れ座屈補強
  - 鋼製橋脚補強
  - 耐震補強（纖維方向に応じた役割の解明）
- 限界状態設計法
  - 鋼桁・合成桁の限界状態設計法の適用拡大
  - 鋼トラス橋格点部の限界状態設計法
  - 維持管理に向けた限界状態設計法
- モニタリング
  - 限界状態を意識したモニタリング



ご清聴ありがとうございました  
[miyashita.takeshi@nitech.ac.jp](mailto:miyashita.takeshi@nitech.ac.jp)

