

# Twin-PBL 接合および高力ボルト継手を有する波形鋼板ウェブ橋の 実橋載荷実験 ―ペンケオタソイ川橋―

|        |            |      |
|--------|------------|------|
| 海外事業部  | 工務部        | 森下健二 |
| 技術本部   | 土木技術第一部    | 中井聖棋 |
| 札幌支店   | 土木工事部      | 清水俊一 |
| 東京土木支店 | 土木工事統括部技術部 | 熊谷善明 |

**概要:**近年、PC 橋の軽量化、施工の合理化をおよびコスト縮減を図るため、波形鋼板ウェブ橋の実績が増加している。ペンケオタソイ川橋は、上床版コンクリートと波形鋼板との接合に2列の孔あき鋼板ジベル(以降、Twin-PBL)を採用し、架設外ケーブルの定着突起を設ける必要性から、上床版の一部を打ち下ろすコンクリートエッジ方式とした。また、波形鋼板同士の接合に高力ボルトによる一面摩擦接合を採用している。これらの採用に関しては、模型実験や FEM 解析を行って設計に反映したが、実橋におけるデータがほとんどないのが現状であった。ここでは、実橋載荷試験を行った結果について報告する。

**Key Words:** 実橋載荷試験, Twin-PBL, 高力ボルト, 疲労

## 1. はじめに

ペンケオタソイ川橋(発注名: 広内第二橋)は、北海道上川郡新得町に位置し、砂防指定地にあるペンケオタソイ川を跨いで A1 側は日高山脈の裾野、A2 側は十勝平野の広大な牧草地となる北海道横断自動車道に架設された5 間連続波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋である(図-1)。

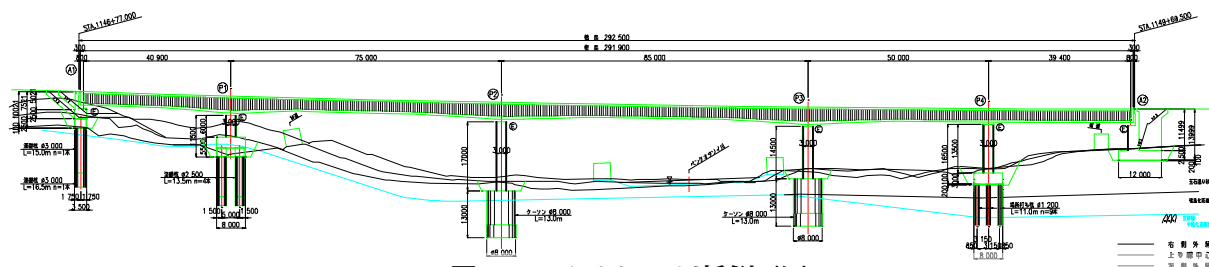


図-1 ペンケオタソイ川橋側面図

本橋では、床版コンクリートと波形鋼板ウェブとの接合に図-2 に示すような Twin-PBL を採用している。また、架設外ケーブルの定着突起配置の必要性より、図-3 に示すような上床版の一部が打ち下ろされるコンクリートエッジ方式としている。これら2つの方式を併用するのは本橋が初めてであり、コンクリートと孔あき鋼板ジベル(以降 PBL)の縁短距離が小さくなることから、耐力の低下が懸念された。これに対しては、模型実験や FEM 解析によって安全性を確認し、設計式を提案している<sup>1),2)</sup>。

一方、さらなるコスト縮減を図るため、波形鋼板同士の接合には高力ボルト

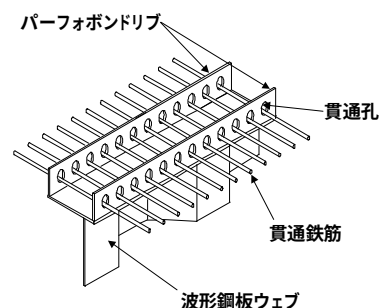


図-2 Twin-PBL 接合



森下健二



中井聖棋



清水俊一



熊谷善明

による一面摩擦接合を採用した。この場合、接合部では図-4 に示すように波形鋼板同士の軸線にずれが生じるとから、高力ボルトに活荷重による変動応力が生じ、疲労破壊の原因となることが懸念された。そこで、FEM解析によって高力ボルトの変動応力を

予測した結果、非常に小さな値であることを確認した。

しかし、これらの結果は部分的な模型実験やFEM解析結果であり、実際の橋梁における挙動のデータはほとんどないのが現状である。そこで、実橋におけるTwin-PBLおよび高力ボルト応力の挙動をトラックを载荷することによって計測し、妥当性を検証するものとした。ここでは、その結果について述べる。

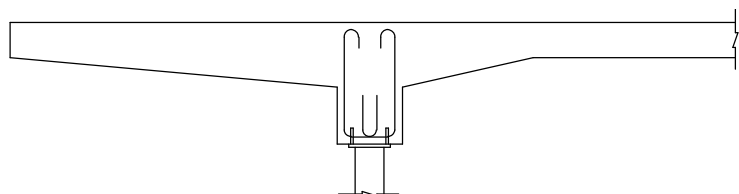


図-3 コンクリートエッジ方式

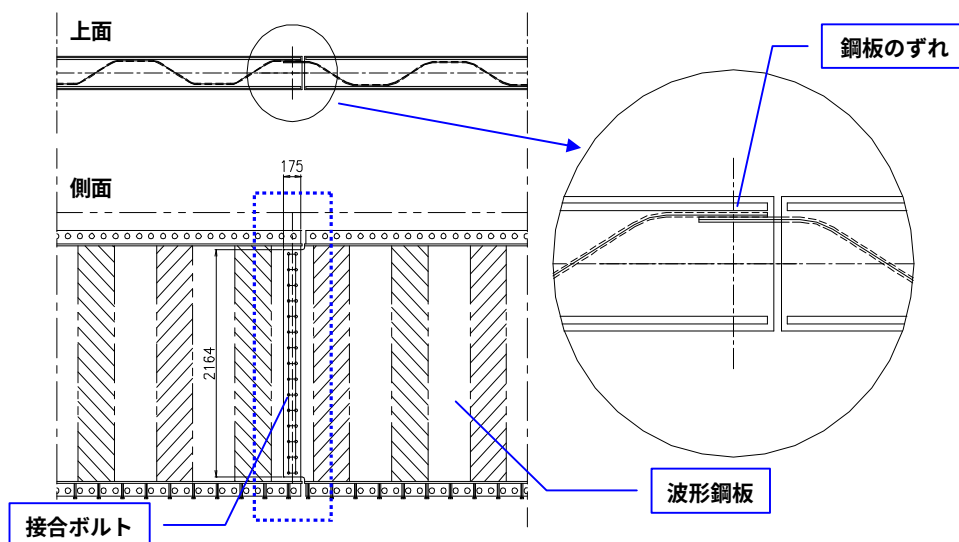


図-4 一面摩擦接合による鋼板軸線のずれ

## 2. 実験概要

### (1) Twin-PBL の計測

#### 1) 荷重载荷

本橋の施工は、P1～P3を移動作業車による片持ち架設により行い、P4近傍～A2は固定支保工によって施工した。これより、計測位置は、架設ケーブルの定着突起や上床版の偏向部の影響が少ないP4～A2間とした。計測位置を図-5に示す。

荷重の载荷方法は、トラック(20tf/台)を最大6台配置した。着目した荷重の载荷は、横方向曲げモーメントに着目した場合を3ケース、主方向水平せん断力に着目した場合を4ケースの合計7ケースとした。表-1に载荷ケース、図-6に载荷位置と载荷状況をそれぞれ示す。

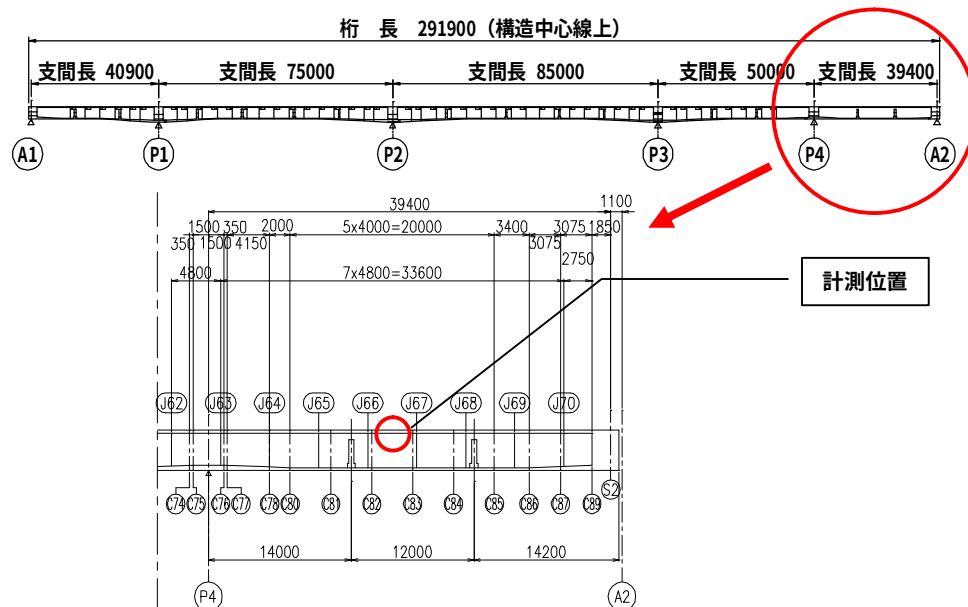


図-5 Twin-PBL 計測位置

表-1 载荷ケース一覧

| 試験項目           | 载荷ケース             | 载荷台数 | 備考   |
|----------------|-------------------|------|------|
| 横方向<br>曲げモーメント | 1 中間床版部並列载荷       | 2    | 当日追加 |
|                | 2 中間床版部縦列载荷       | 2    |      |
|                | 3 片持床版部载荷         | 2    |      |
| 主方向<br>水平せん断力  | 4 水平せん断力最大時(4台载荷) | 4    |      |
|                | 5 水平せん断力最大時(6台载荷) | 6    |      |
|                | 6 水平せん断力最小時(4台载荷) | 4    |      |
|                | 7 水平せん断力最小時(6台载荷) | 6    |      |

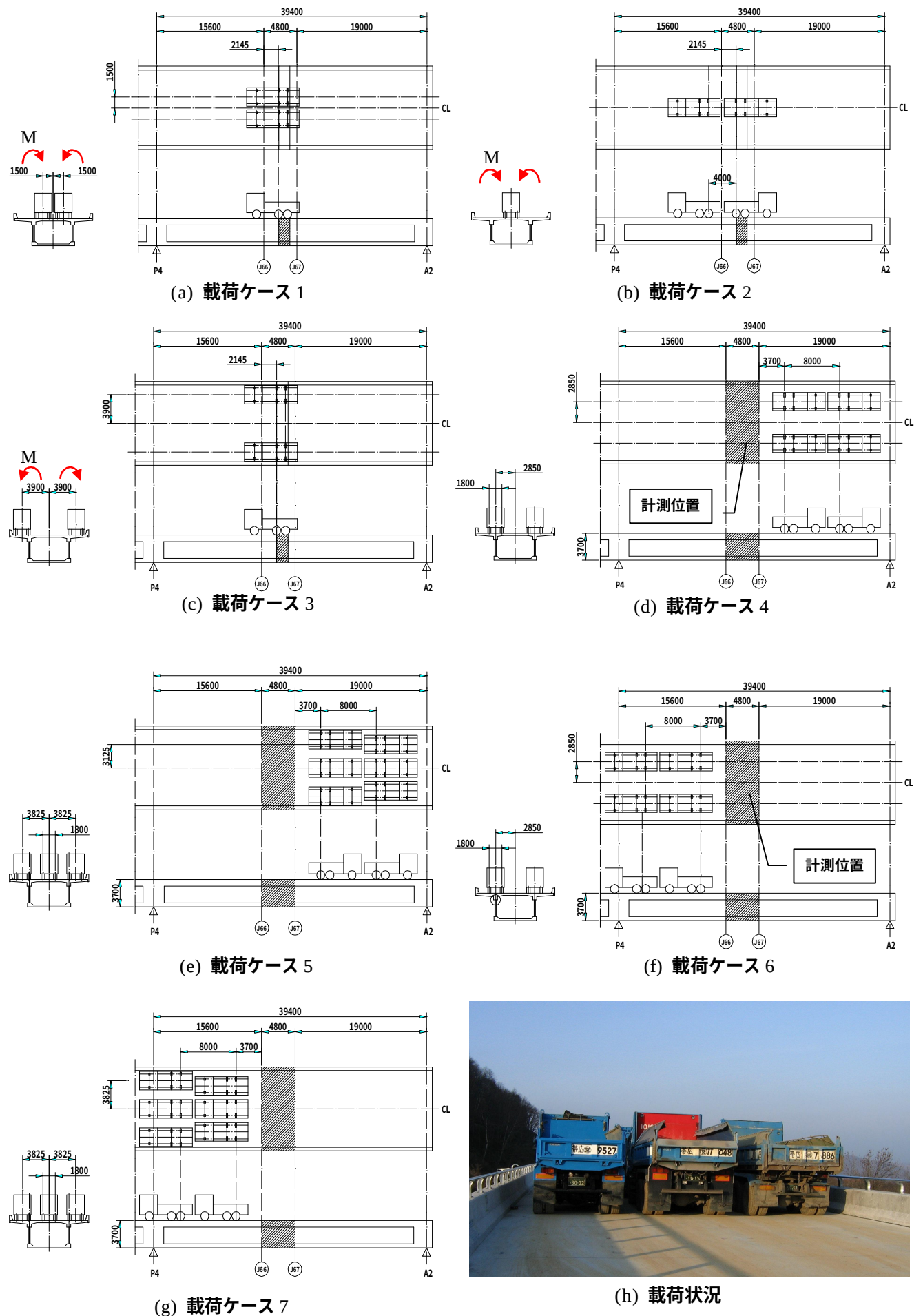


図-6 各ケースの荷重載荷位置および載荷状況

## 2) 解析および計測機器の配置

解析は、図-7 に示すように、計測位置が含まれる部分については、3次元モデル、隣接する径間については梁要素としたFEMモデルに輪荷重を载荷させることにより行った。3次元モデルは、コンクリートをソリッド要素、鋼板をシェル要素とし、PBLとコンクリートの付着を考慮した場合と無視した場合の2タイプとした。図-8 に3次元モデルとPBLの付着モデルを示す。なお、PBLのモデル化は、着目範囲のみであり、その他の部分はコンクリートと上フランジは剛結としてモデル化している。

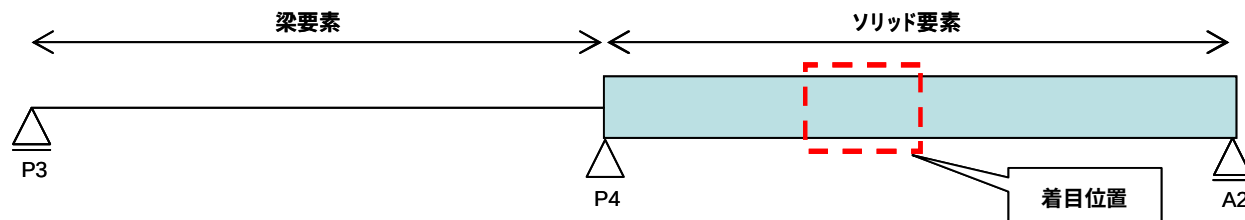
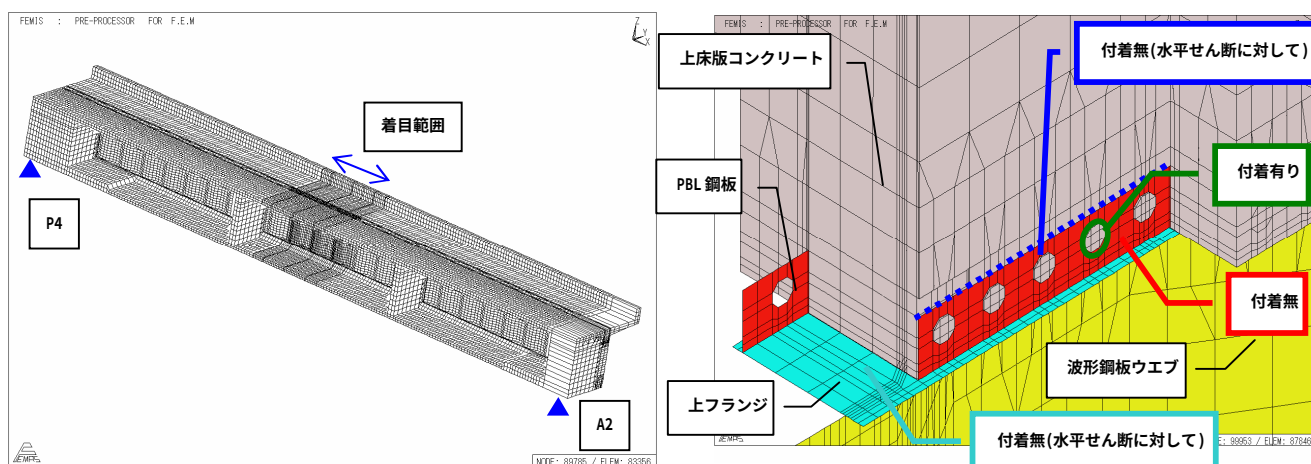


図-7 解析モデル全体



(a) 3次元モデル

(b) 付着無しモデル

図-8 3次元FEMモデルとPBLの付着

計測は図-9 に示すように、PBL および上フランジについては3軸ひずみゲージを貼付し、上フランジと上床版コンクリートの相対変位を計測するために高性能変位計を設置した。高性能変位計の設置状況を写真-1 に示す。高性能変位計は、横方向曲げモーメントを対象とした鉛直変位と、主方向せん断力を対象とした水平変位を計測できるように2方向に設置した。ひずみゲージの設置位置は、あらかじめ行ったFEM解析において、応力が大きくなる位置とし、PBLの孔と孔の間(以降PBL中段)、PBLと上フランジ溶接部近傍(以降PBL下段)に貼付した。また、変位計は輪荷重载荷位置の近傍を選定した。

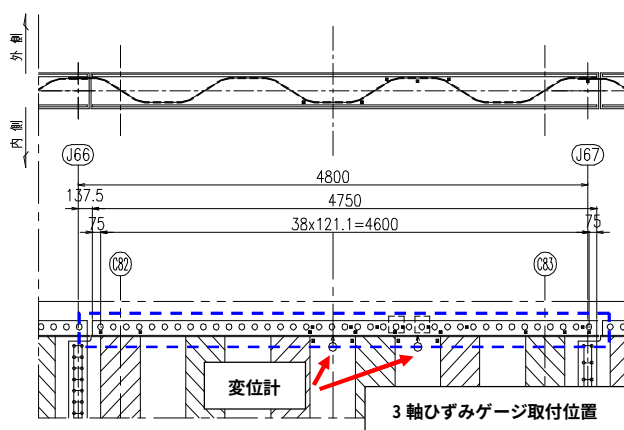


図-9 計測機器設置位置

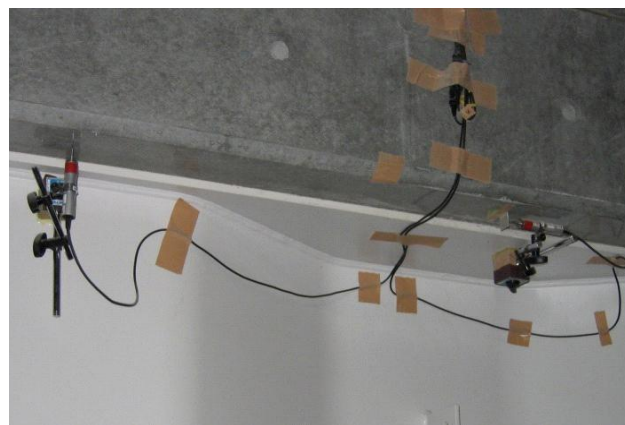


写真-1 高性能変位計設置状況



## (2) 高力ボルトの変動応力計測

### 1) 荷重載荷および計測

事前のFEM解析結果より、本橋の場合はねじりモーメントが最大または最小となる荷重状態において、高力ボルトの変動応力が最も大きくなることおよび高力ボルトの上下段の変動応力が大きくなることが確認された。これより、計測位置は、図-10に示すように支間が最も長いP2～P3径間のP2柱頭部と1ブロックの接合部とし、ボルトは上下段と中央を計測することとした。また、ボルトの計測は、あらかじめひずみを埋め込み加工したボルトを設置し、計測終了後に交換した。

荷重は、図-11に示すようにトラック(20tf/台)を8台載荷し、格子解析による設計荷重時の約90%のねじりモーメントを再現した。表-2に格子解析による断面力の比較を示す。

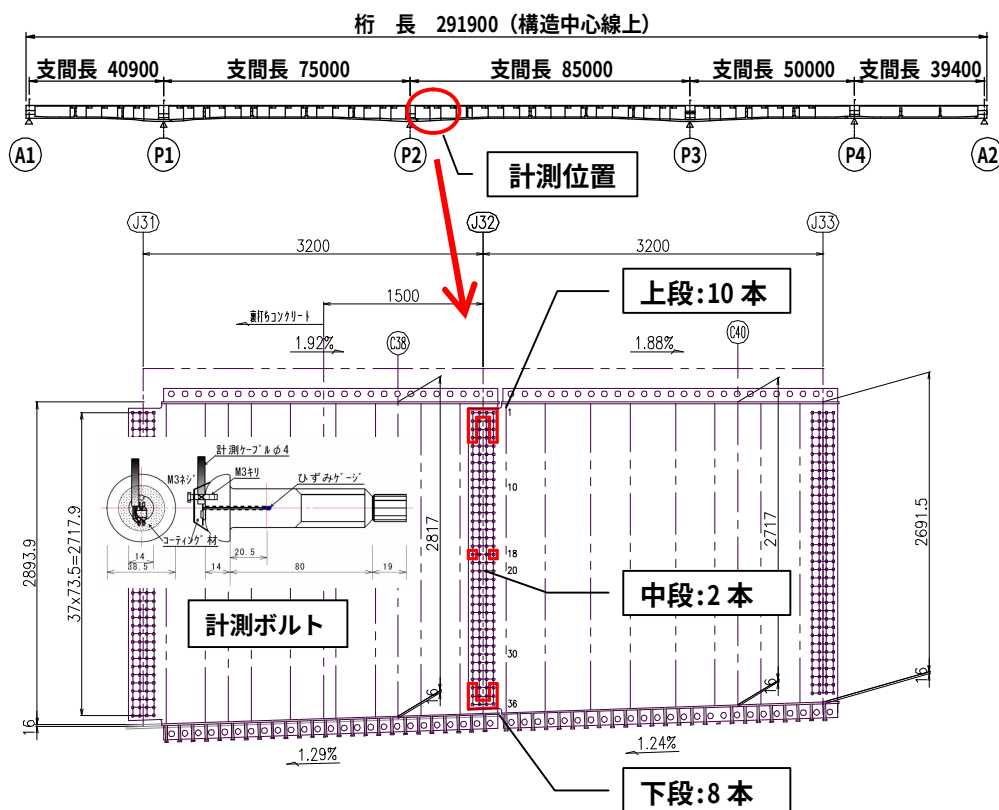


図-10 高力ボルト変動応力の計測位置

表-2 設計荷重と載荷荷重による断面力の比較

| 荷重状態        |       | 曲げモーメント<br>M(kN・m) | せん断力<br>S(kN) | ねじりモーメント<br>T(kN・m) |
|-------------|-------|--------------------|---------------|---------------------|
| ねじりモーメント最大時 | 設計荷重時 | -12,417.16         | 1,364.80      | 3,446.14            |
|             | 載荷試験時 | -3,429.20          | 1,114.14      | 3,037.91            |
|             | 比率    | 0.276              | 0.816         | 0.882               |
| ねじりモーメント最小時 | 設計荷重時 | -13,025.12         | 1,467.71      | -3,527.46           |
|             | 載荷試験時 | -3,427.63          | 1,114.22      | -3,090.69           |
|             | 比率    | 0.263              | 0.759         | 0.876               |

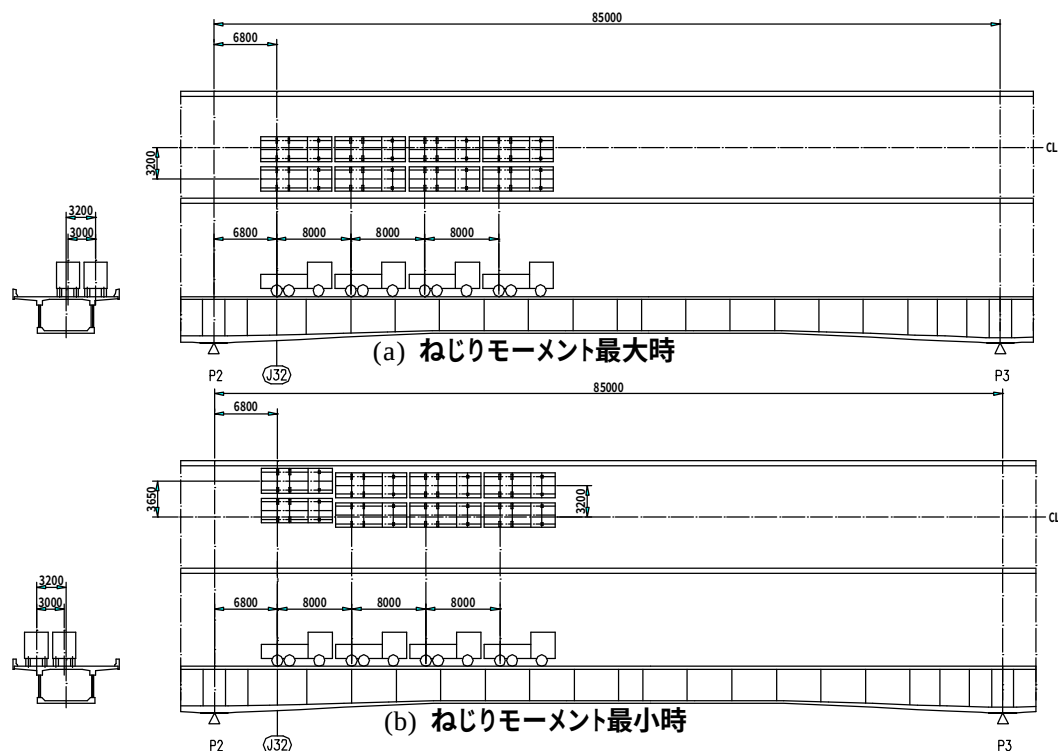


図-11 載荷位置

## 2) 解析方法

解析は、P1～P3についてモデル化し、図-12に示すように着目位置を含むP2～P3径間のP2から支間中央までを3次元モデルとし、その他の部分を梁要素とした。3次元モデルは、図-13に示すようにコンクリート部分をソリッド要素、鋼板をシェル要素とした。

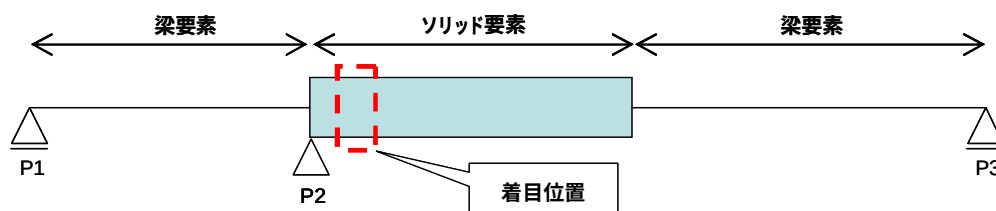


図-12 解析モデル全体

また、高力ボルトの剛性については、鋼板がボルトによって圧着されていることを考慮して、ボルト1本当当たりの鋼板面積および接合されている鋼板厚を用いてバネ定数を算出し、バネ要素としてモデル化した。バネ定数は、式(1)で算出し、 $2.405 \times 10^{10} \text{ N/m}$ とした。

$$k = E_s \times A / t \cdots \text{式(1)}$$

ここに、

$E_s$ : 鋼材のヤング係数

$A$ : ボルト1本当当たりが分担する波形鋼板の断面積

$t$ : 接合する波形鋼板厚さの合計

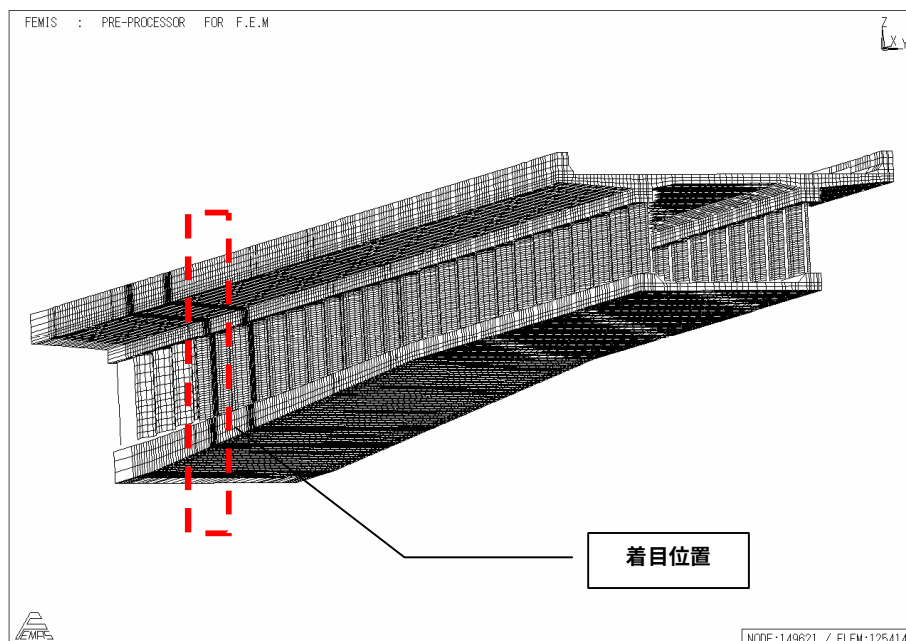


図-13 3次元 FEM モデル

## 3. 実験結果と考察

### (1) Twin-PBL の計測

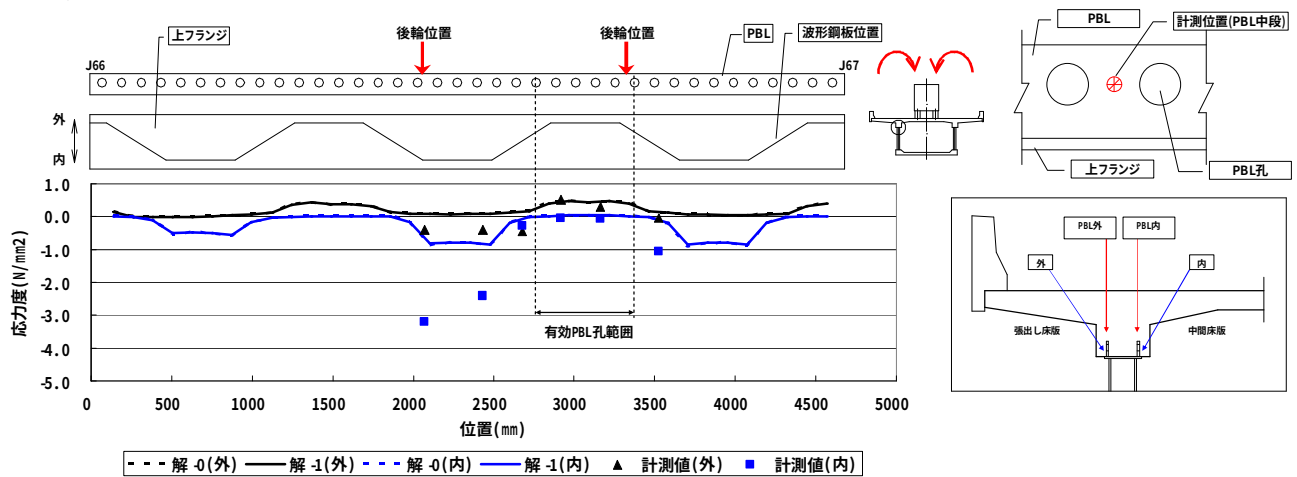
#### 1) 横方向曲げモーメント

横方向曲げモーメントに着目した载荷ケース2(中間床版部縦列载荷)におけるPBLの鉛直方向応力度の橋軸方向分布を図-14に示す。応力は、引張が正、圧縮を負とし、解-0はコンクリートと鋼の付着を有りとした場合、解-1は付着を無しとした場合の解析結果を示す。

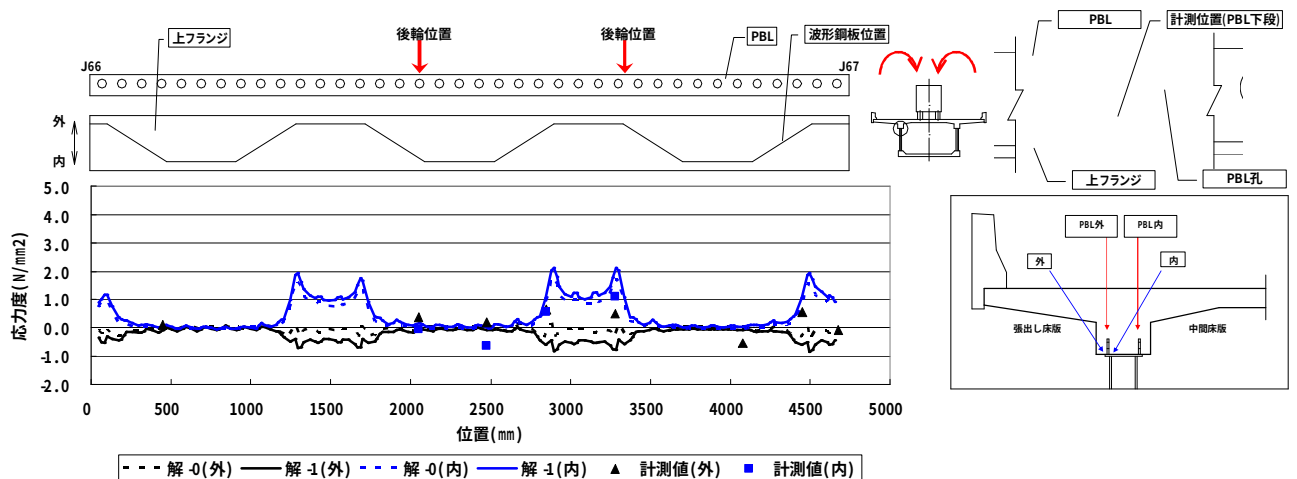
解析結果より、波形鋼板ウェブの位置によってPBLの応力に差が生じていることが理解できる。PBLの孔と孔の間(以降PBL中段)では、中間床版側の波形鋼板ウェブ直上付近で圧縮応力が大きくなり、片持床版側の波形鋼板ウェブ直上で引張応力が大きくなっている。これは、载荷位置に近い方の波形鋼板直上のPBLが圧縮力を分担し、载荷位置に遠い方の波形鋼板直上のPBLが引張力を分担しているためと考えられ、波形鋼板位置の違いによってPBLの荷重分担が異なるものと考えられる。また、コンクリートと鋼の付着の影響は小さく、PBL中段においてはほとんど影響されていない。PBLと上フランジの溶接部近傍(以降PBL下段)においてもPBL中段と同様の傾向であるが、波形鋼板の折り曲げ部の応力が大きくなる傾向があるのに加え、コンクリートと鋼の付着の影響がPBL中段に比較して大きくなっている。

一方、実測結果は、PBL中段の圧縮側において解析値より大きな値を示している箇所が認められるが、全体的には付着を考慮した解析値に近い応力となっている。また、本橋の設計では、横方向曲げモーメントに対して有効に働

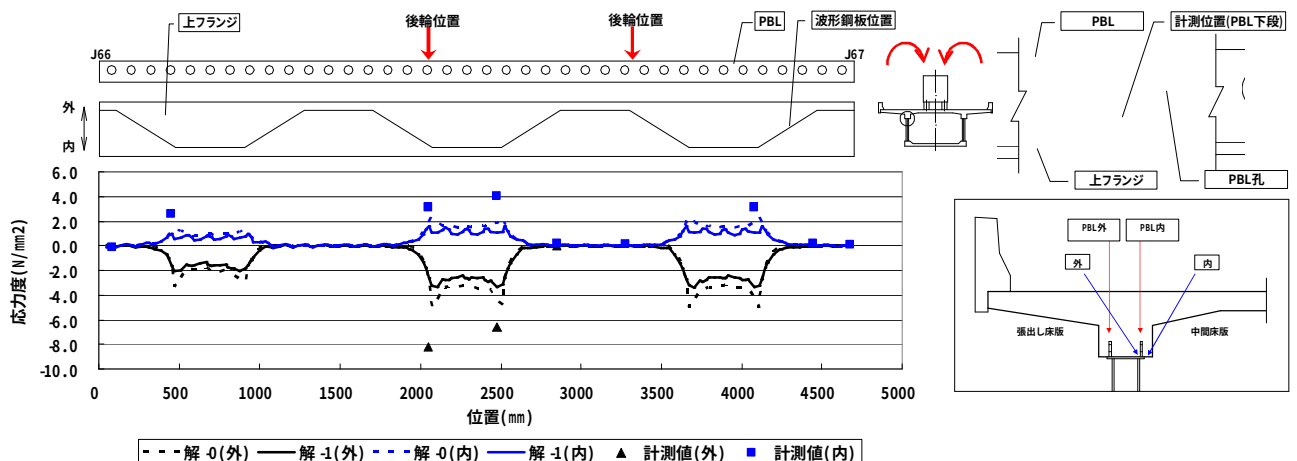
く PBL 孔の数を波形鋼板の配置位置によって分担が異なることから 1 波長当たり 5 個としているが, PBL の実測結果から, その妥当性が確認された。



(a)PBL 中段



(b)片持床版側 PBL 下段

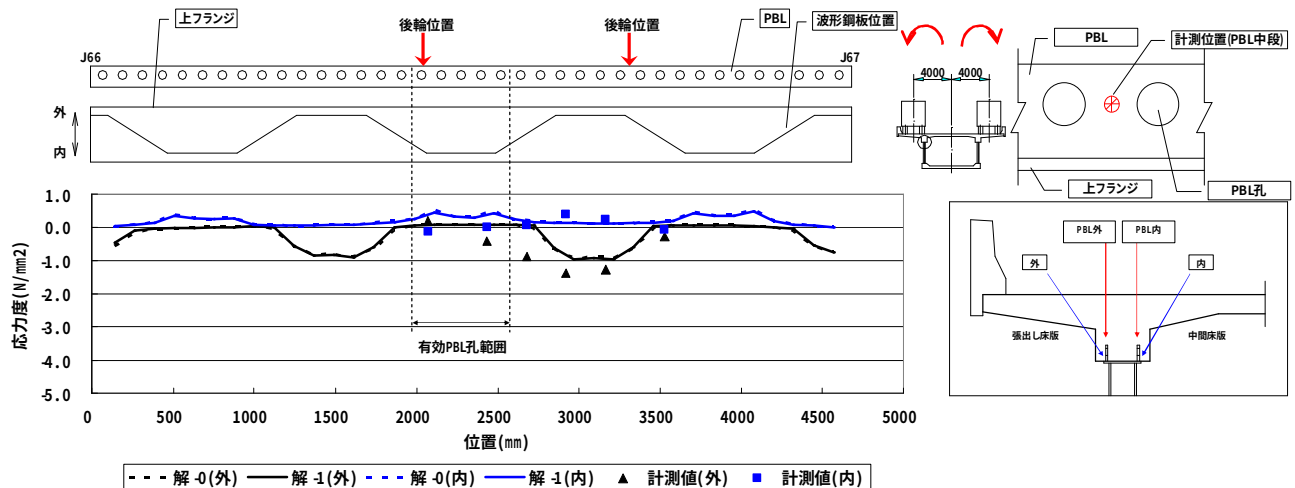


(c)中間床版側 PBL 下段

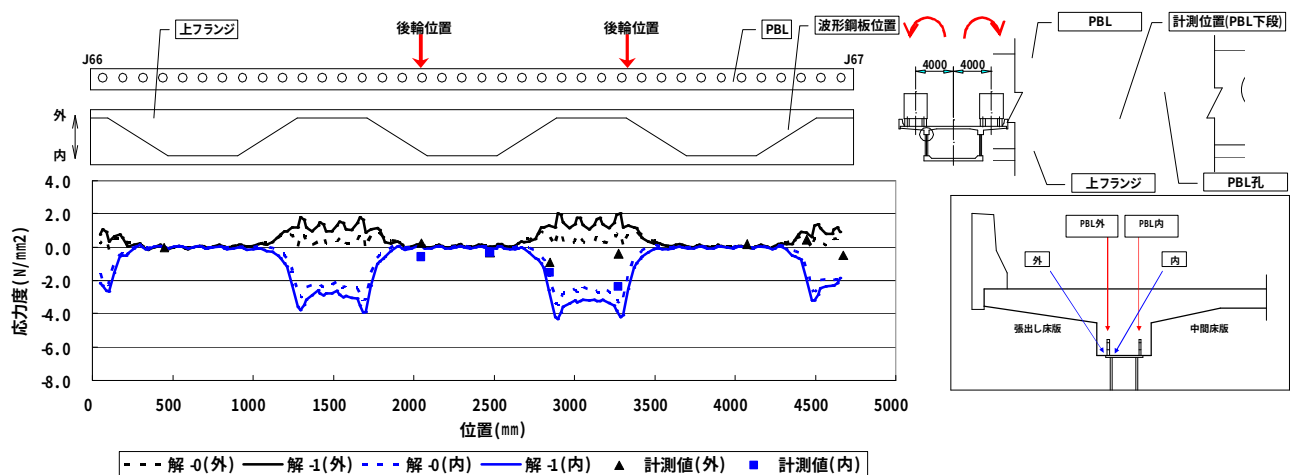
図-14 載荷ケース 2 による PBL の鉛直方向応力度

載荷ケース 3 (片持床版部載荷) における PBL の鉛直方向応力度の橋軸方向分布を図-15 に示す。付着の有無を考慮した解析結果は、載荷ケース 2 (中間床版縦列載荷) と同様の傾向を示した。また、実測結果は、PBL 中段および片持床版側の PBL 下段においては、付着有りに近い計測結果が得られているが、中間床版側 PBL 下段の応力分布は、解析値との傾向が一致せず、圧縮応力と引張応力が逆転している箇所がある。これは、断面の構成上、載荷ケース 3 の輪荷重載荷位置が片側の PBL の直上となっていることが一因と考えられる。これにより、輪荷重載荷位

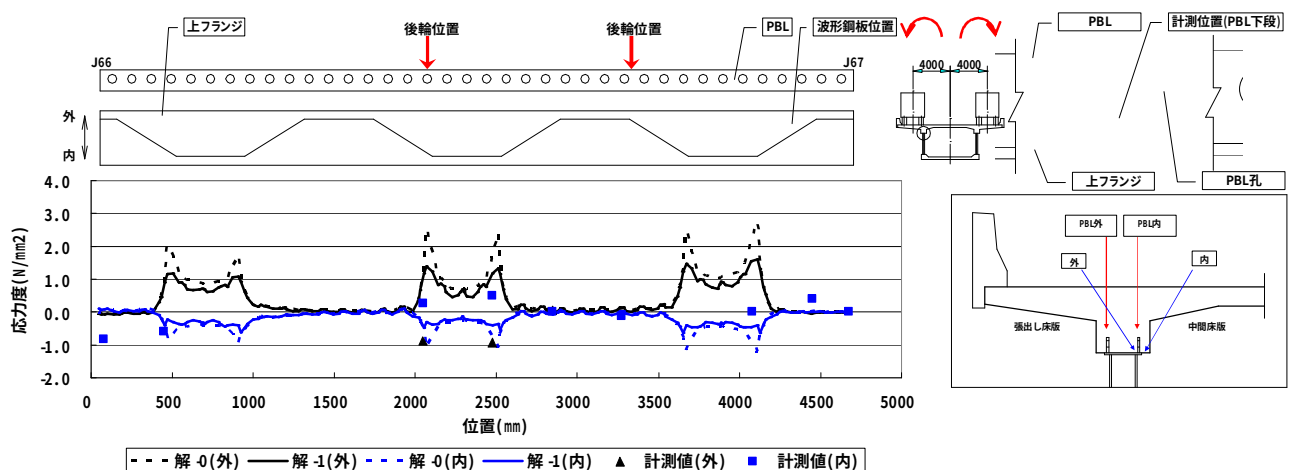
置の多少のずれが PBL 応力に及ぼす影響が大きくなり、解析値の傾向と異なった実測結果が得られたものと推察される。



(a)PBL 中段



(b)片持床版側 PBL 下段



(c)中間床版側 PBL 下段

図-15 載荷ケース3によるPBLの鉛直方向応力度

## 2) 水平せん断力

水平せん断力に着目した載荷ケース5によるPBLのせん断応力度を図-16に示す。FEM解析結果より、横方向曲げモーメント同様に、波形鋼板ウェブの位置によってPBLに生じる応力度が影響されており、主に波形鋼板ウェブ直



上のPBL応力度が大きい。したがって、橋軸方向の水平せん断力の大部分は、波形鋼板ウェブ直上のPBLで伝達されていると推察される。また、コンクリートとPBLの付着の有無が発生するせん断応力度に与える影響は大きいことが確認された。

実測値は、付着有りの解析値に近いものが多いが、部分的に付着有りと無しの中間の値となっているものや、付着無しに近いものがある。特に、中間床版側のPBLはその傾向が大きい。ただし、PBL下側は応力集中している箇所であり、ゲージ貼付位置のずれによって計測される応力度も変動が大きいものと予想される。

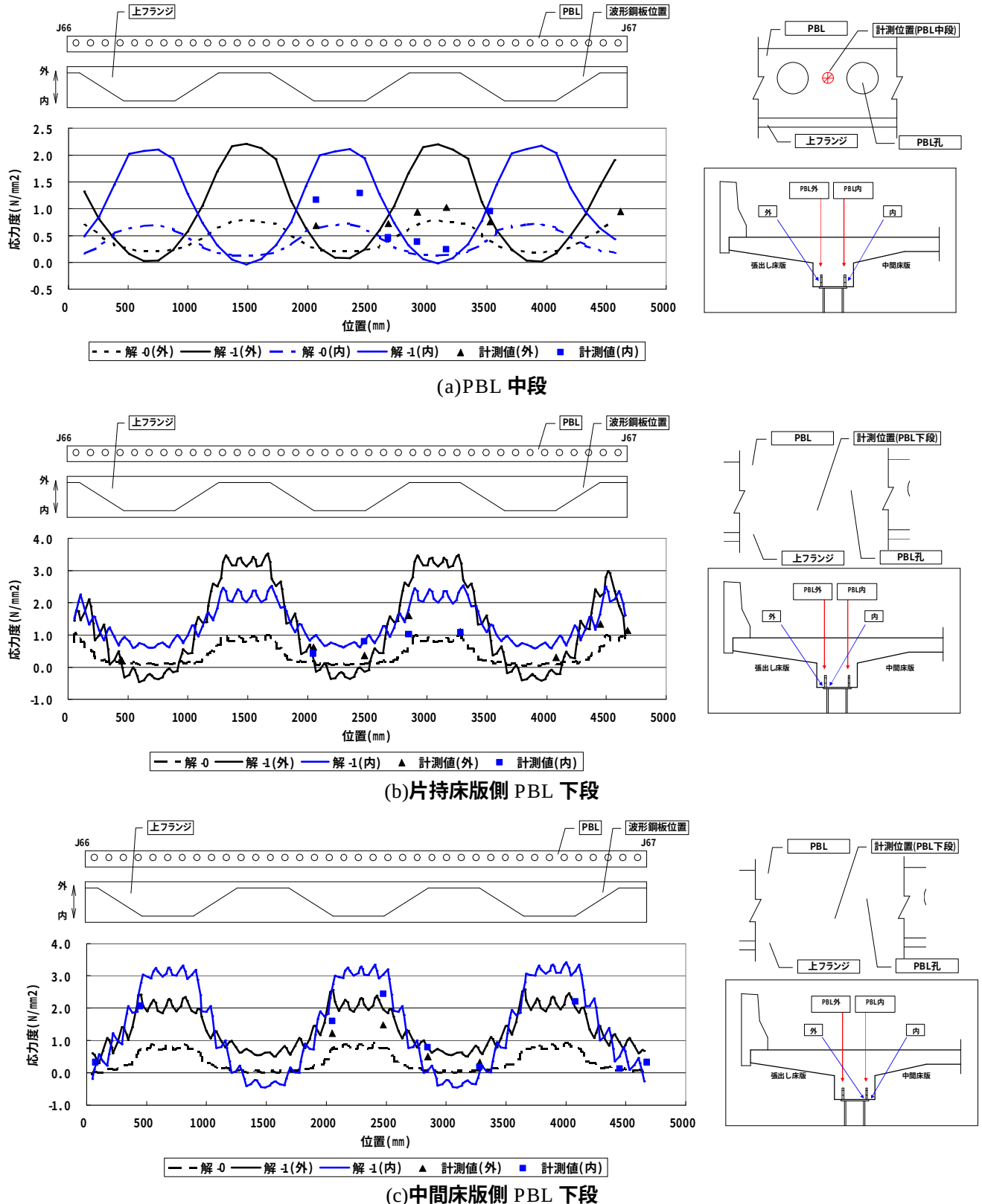


図-16 載荷ケース 5 による PBL のせん断応力度

### 3) 変位計計測結果

変位計の計測結果を表-3に示す。計測結果より、顕著な値は計測されなかった。これより、変位計の計測範囲では上床版コンクリートと上フランジの一体性が確認された。

表-3 変位計の計測結果

| 試験項目           | 荷重ケース             | 単位:(mm) |      |       |       |
|----------------|-------------------|---------|------|-------|-------|
|                |                   | 橋軸方向    |      | 上下方向  |       |
|                |                   | 右ウエブ    | 左ウエブ | 右ウエブ  | 左ウエブ  |
| 横方向<br>曲げモーメント | 1 中間床版部並列載荷       | 0.00    | 0.00 | 0.01  | 0.01  |
|                | 2 中間床版部縦列載荷       | 0.00    | 0.00 | 0.01  | 0.01  |
|                | 3 片持床版部載荷         | 0.00    | 0.00 | -0.01 | -0.01 |
| 主方向<br>水平せん断力  | 4 水平せん断力最大時(4台載荷) | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00  |
|                | 5 水平せん断力最大時(6台載荷) | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00  |
|                | 6 水平せん断力最小時(4台載荷) | 0.00    | 0.00 | 0.00  | 0.00  |
|                | 7 水平せん断力最小時(6台載荷) | -0.01   | 0.00 | 0.00  | 0.00  |

### (2) 高力ボルトの計測

図-17に、ねじりモーメント最大時と最小時の荷重ケースによる解析値と計測結果を示す。ボルトの変動応力は、引張が正であり、計測値は温度補正を行ったあとの値である。

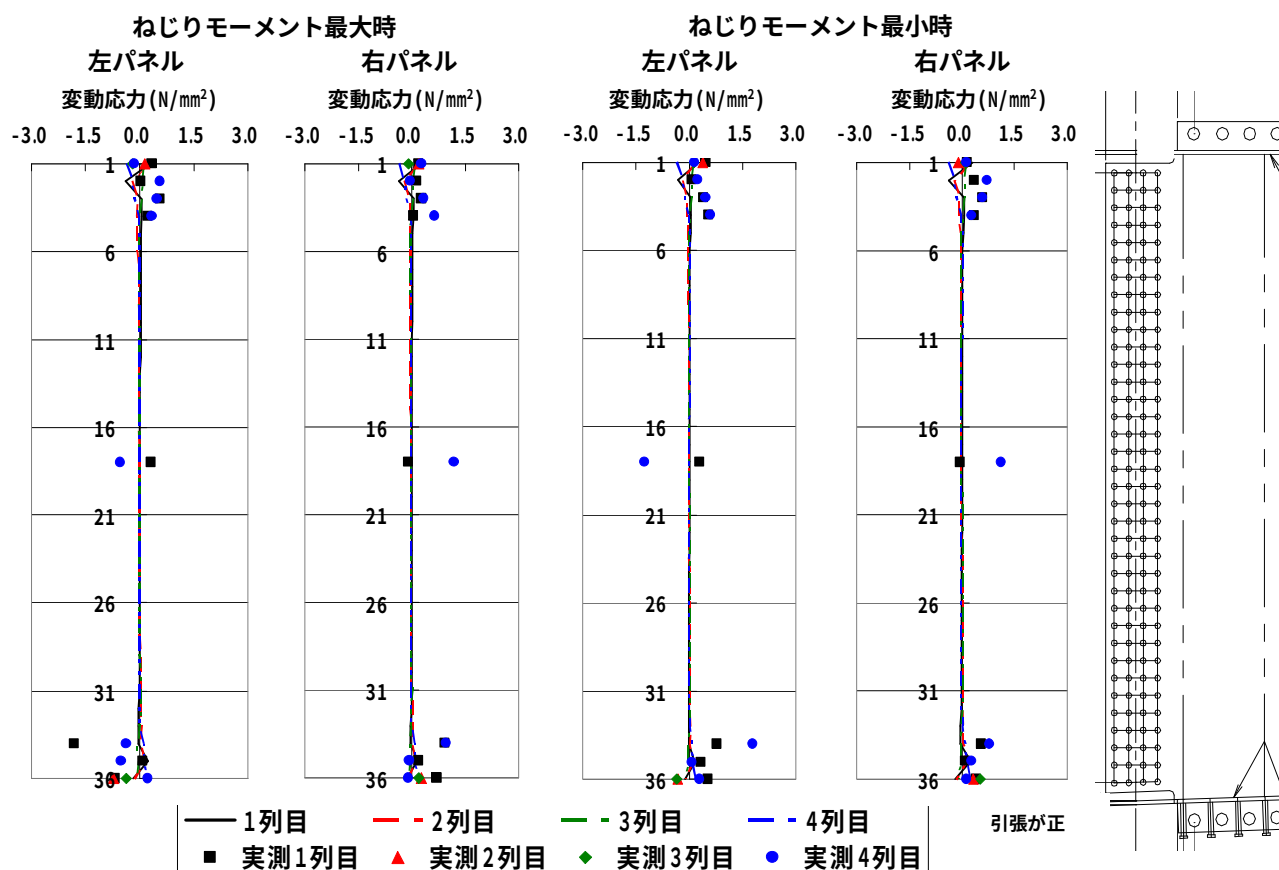


図-17 高力ボルト変動応力(N/mm²)計測結果

解析値と実測値には、応力の発生傾向に若干の差が認められる。これは、実際のボルトには軸力が導入され、鋼板同士の摩擦によって接合されているのに対し、FEM解析モデルでは高力ボルトをバネ評価しており、高力ボルトの軸力および鋼板同士の摩擦は考慮されていないことが一因と考えられる。これらの影響を考慮するため、高力ボルトの軸力および鋼板同士の摩擦を考慮した非線形 FEM 解析を行う方法も考えられるが、解析の煩雑さや変動応力が小さいこと、計測時のノイズの影響等を考慮すると、今回用いた解析方法で変動応力を予測しても十分評価できるものと判断した。

高力ボルトの疲労設計における打切り限界値は  $21\text{N/mm}^2$  であるのに対し、実橋載荷試験によって得られた変動応力の最大値は  $1.8\text{N/mm}^2$  程度であり、十分小さな値であった。作用しているねじりモーメントが設計で想定しているねじりモーメントの約 90%であることを考慮すると、活荷重によって変動する高力ボルトの応力は非常に小さな値であると考えられる。そのため、波形鋼板ウェブ橋の波形鋼板相互の接合に高力ボルトによる一面摩擦接合を採用しても、活荷重によるボルト疲労の問題はほとんど生じないものと考えられる。

#### 4. まとめ

上床版コンクリートと波形鋼板ウェブの接合に Twin-PBL を採用し、波形鋼板同士の接合を高力ボルトによる一面摩擦接合で設計・施工したペンケオタソイ川橋の実橋載荷試験結果より、以下の知見が得られた。

- (1)横方向曲げモーメントに対する計測結果から、設計時に設定した横方向曲げモーメントに対して有効に抵抗する PBL 孔の範囲の妥当性が確認された。
- (2)横方向曲げモーメントおよび水平せん断力に対しては、波形鋼板ウェブ直上の PBL 応力度が大きくなる。
- (3)水平せん断力による PBL の発生せん断応力度は、解析において鋼部材とコンクリート部材の付着を考慮した場合と付着を無視した場合の中間にある。
- (4)上床版コンクリートと波形鋼板上フランジとの相対変位は非常に小さい。
- (5)高力ボルトによる一面摩擦接合では、活荷重による高力ボルトの変動応力は非常に小さい。
- (6)高力ボルトによる一面摩擦接合を採用しても、活荷重によるボルトの疲労の問題が生じる危険性は小さいと考えられる。

#### 謝辞

本橋の設計・施工および実験を行うに当たり、設計手法の確立、施工方法、実験計画や実験結果評価方法等に対して多大なご助言を頂いた、日本道路公団 北海道支社 構造技術課の東田課長をはじめとする構造技術課の皆様、帯広工事事務所 新得工事区の皆様に、この場を借りて感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 竈本, 東田, 桜田, 清水: ツインパーフォボンドリブ接合部の押し抜きせん断実験による検討, 土木学会第 59 回 年次学術講演会, pp.1347-1348, 2004.9
- 2) 東田, 竈本, 桜田, 清水: ツインパーフォボンドリブ接合の押し抜きせん断実験, 第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.297-302, 2001.10