

## 鋼道路橋のケーブル構造補強の提案

Proposal of a Retrofitting Method for Steel Road Bridges by Introduction of Cable Structures

皆藤悠太\*・佐々木栄一\*\*・山田均\*\*\*・勝地弘\*\*\*\*

Yuta KAITO, Eiichi SASAKI, Hitoshi YAMADA and Hiroshi KATUCHI

\*正会員 修(工) 横浜国立大学大学院(現オリエンタルコンサルタンツ) (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

\*\*正会員 博(工) 横浜国立大学准教授 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

\*\*\*フェロー 工博 横浜国立大学教授 大学院環境情報研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7)

\*\*\*\*正会員 博(工) 横浜国立大学教授 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

In this paper, we propose a retrofitting method by introduction of cable structure that setting up a tower on a pier of existing bridges and lifting up girders by cables. The purpose of this paper is to improve in loading-resistance and durability of existing bridges by the method. For the purpose of this paper, the properties of stress were compared before retrofitting and after using finite element method analysis. As a result, stress of live-load is decreased on the average 23% at girders of the whole span, it is possible to improve in loading-resistance and durability. Moreover, the size and pretension of cable-structures was adjusted and found to be possible to improve in saving and working.

**Key Words:** a retrofitting method, cable-structure, finite element method analysis

### 1. はじめに

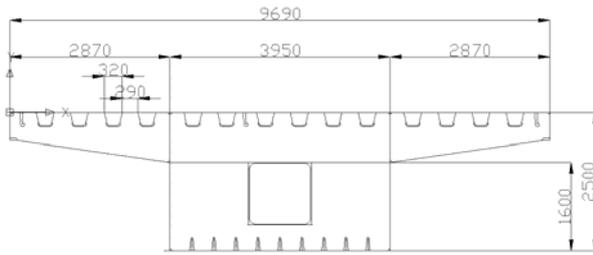
我が国では、橋梁ストックの高齢化の急増や道路構造令の設計自動車荷重の改正による車両大型化、交通量の増大により、現在の鋼道路橋が抱える問題として、耐荷力不足と耐久性低下が挙げられる。この問題の一般的な解決策として、既設橋の架け替えや補修・補強が考えられるが、経済的・社会的に既設橋の架け替えは困難な場合が多い。そこで、ライフサイクルコストの低減等を目的とした構造物の長寿命化に資する適切な予防保全対策が必要である。

このような問題を抱える既設橋梁の補強対策として、さまざまな工法<sup>1)</sup>がとられている。鋼板補強は、施工実績が多く、既設部材に補強部材を添接し、剛性を向上させる工法である。しかし、補強部材を溶接で取付けるのが簡単ではあるが、溶接によるコストアップ、疲労強度低下という不利が生じる。また、溶接を避け、高力ボルトを用いる添接板高力ボルト締め工法もあるが、補強部材を取付ける際、既設部材に多くの孔明けが必要となり、一時的に耐荷力の低下が生じる<sup>2)</sup>。さらには、鋼板補強工法の適用範囲は橋梁全体から見れば極めて局所的である。特に鋼床版構造を有する橋梁の場合は、1パネル・1径間毎に構造的に類似した部材配置となっているため、耐荷力・耐久性低下によって発生した疲労損傷は1箇所

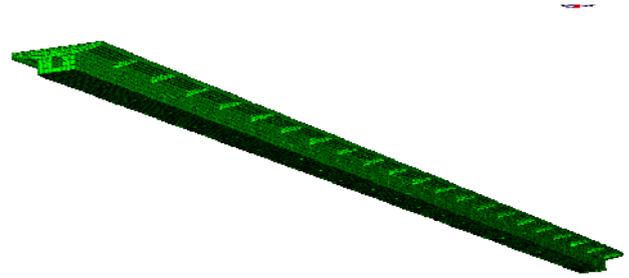
だけでなく、橋梁全体で発生している可能性が高い<sup>3)</sup>。ゆえに、橋梁全体の耐荷力・耐久性を向上させる補強工法が必要である。

外ケーブル工法は、最近注目されている<sup>4)</sup>主桁の性能向上工法<sup>5)</sup>であり、定着金具や偏向金具を既設部材の一部に取り付け、ケーブルを設置しプレストレスを導入して、死荷重や活荷重によって曲げモーメントを打ち消す方向に曲げモーメントを発生させる工法である<sup>6)</sup>。しかし、八塚ら<sup>8)</sup>によると、外ケーブル工法は応力域が改善されるのみで、走行車両による応力範囲が変化しないことを指摘しており、疲労から決まる耐久性については補強効果がないと考えられる。また、原田ら<sup>9)</sup>は外ケーブルプレストレス工法によって補強される既設橋梁を対象に、実験的、解析的に、耐荷性と耐久性の面での補強効果を確認しているが、死荷重状態での応力度が低減されるのみで、活荷重による応力範囲の減少は期待できないとしている。

ケーブルトラス橋<sup>9)</sup>は鋼桁とケーブルでトラス構造を形成した複合橋梁形式であり、国内道路橋でもほとんど例の見ない構造形式である。ケーブルトラス橋の力学的な特徴は、支間中央付近に配置した支柱によって鋼桁を弾性支持することにより、鋼桁に作用する面内曲げモーメントを低減させることである。しかし、望月らによるとこの形式はケーブルが桁端部に定着される自定式のため、主桁に橋軸方向圧縮力が作用し、安定性に十



図—1 対象橋梁断面図



図—2 対象橋梁のFEMモデル

分配慮する必要があるとしている。

外ケーブル構造<sup>10)</sup>は、プレストレストコンクリート連続下路桁橋の中間橋脚に一致する位置に支点タワーを、中間及び桁端橋脚の径間のほぼ中央位置に中間ブラケットを、桁端橋脚位置に定着ブラケットを設け、桁ウェブの外側面で桁長手方向に沿って所定の配線レイアウトで張設されたPCケーブル構造体である。外ケーブル構造への導入張力によって桁に生じる抵抗モーメントは、径間中央の中間ブラケット位置で桁を上側に押し上げるような上向きのモーメントとなる特徴を持つ構造である。外ケーブル構造によって導入される緊張力の水平成分は、桁断面の引張応力を所定値以下に抑えるものとして作用させているが、主部材に鋼材を有する鋼道路橋の場合、全体座屈照査や局部座屈照査の考慮が必要となる。

このように、既設鋼道路橋の架け替えに近い補強効果を持つ、橋梁全体の活荷重応力低減が可能な補強工法は現在確立されていない。そこで本研究では、既設鋼道路橋の耐荷力・耐久性向上のために3径間連続鋼床版箱桁橋を対象として、橋脚に塔を立て、ケーブルで桁を吊り上げるケーブル構造を付加する補強工法（以下、ケーブル構造補強とする）を提案し、三次元FEM解析を用いて応力性状に注目して補強効果を検討する。また、既設橋を対象としているため、ケーブル構造付加によって主桁部に発生する橋軸方向圧縮力を作用させないケーブル端部の処理も提案する。さらには、ケーブル構造補強を力学的な視点から検討するだけでなく、経済性や施工性を考慮したケーブル構造補強の検討も行う。

## 2. 対象橋梁

本研究では、実際の全長約180mの3径間連続鋼床版箱桁橋を対象として、ケーブル構造による補強を試設計し、その効果を解析的に検討することにした。3径間連続鋼床版箱桁橋の断面図を図—1（単位：mm）に示す。また、この鋼床版箱桁橋は1径間で7パネルを有している。図—2に、解析対象とする3径間連続鋼床版箱桁橋のFEM解析モデルを示す。本研究に用いた解析コードは、汎用有限要素プログラムABAQUS6.7-1を用いた。

3径間連続鋼床版箱桁橋の解析モデルの節点数は約32400、要素数は約38200であり、使用要素は3節点あるいは4節点のシェル要素を用いて、メッシュサイズは500mm×500mmを基本としてモデル化した。ただし、アスファルト、スカーラップ、箱桁部下フランジの縦リブおよび箱桁部下フランジの板厚変化は、解析モデル作成の複雑化を防ぎ、さらには解析時間の短縮を図るために省略した。使用鋼材はSM400を用い、弾性係数は200GPa、金属塑性は降伏応力350N/mm<sup>2</sup>で塑性ひずみ0、降伏応力400N/mm<sup>2</sup>で塑性ひずみ0.2、単位重量は77.0kN/m<sup>3</sup>とした。境界条件は、各径間の桁端部に杓を想定した500mm（橋軸方向）×1000mm（橋軸直角方向）の範囲の節点を鉛直方向のみ拘束とし、3径間全体の桁端部の一方のみを完全固定とした。載荷荷重は、対象橋梁が道路規格第1種3級、設計荷重がB活荷重で設計されていたため、B活荷重のL荷重<sup>11)</sup>を載荷し、死荷重も考慮するためにモデル全体に重力を与えた。

## 3. ケーブル構造の提案

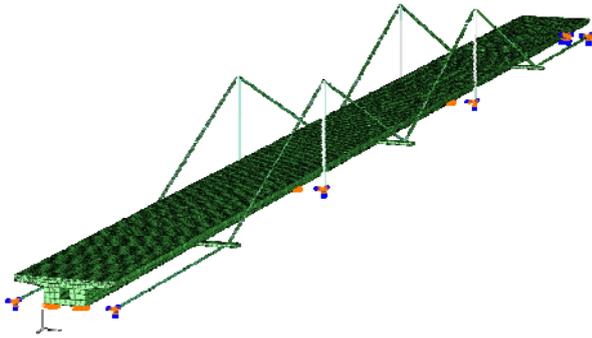
本研究で提案するケーブル構造による補強法のコンセプトを以下に示す。

- ・桁全体を補強すること
- ・ケーブル構造の力学的な役割として、死荷重を桁、活荷重をケーブルで分担すること
- ・ケーブル構造のケーブル端部を桁の外へ処理することにより、桁に軸力を発生させないこと。

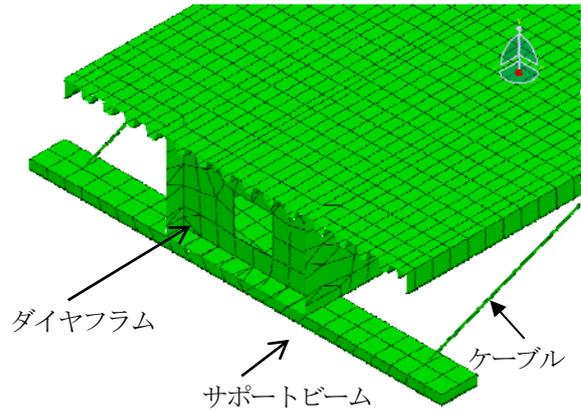
また、ケーブル構造補強後に期待する補強効果は、既設鋼道路橋の桁全体の死荷重応力低減だけでなく、従来の補強工法では実現できなかった活荷重応力低減を可能にし、耐荷力・耐久性の向上を図ることである。

### 3.1 ケーブル構造のFEMモデル化

3章で述べたケーブル構造補強のコンセプトをふまえ、対象橋梁である3径間連続鋼床版箱桁橋（図—2）の橋脚に塔を立て、ケーブルで桁を吊り上げるケーブル構造を付加したFEM全橋モデルを図—3に示す。ケーブル



図—3 ケーブル構造補強後のFEM全橋モデル



図—4 サポートビーム直上近傍のFEMモデル

構造を構成する塔、ケーブル、サポートビームやダイヤフラムの FEM モデル化について、また、ケーブル構造付加によって発生する軸力を打ち消すためのケーブル端部の処理方法を示す。

### (1) 塔

ケーブル構造に用いる塔の FEM 上の使用要素は、ビーム要素を用いてモデル化した。使用材料は、使用鋼材は SM400 を用い、弾性係数は 200GPa、金属塑性は降伏応力 350N/mm<sup>2</sup> で塑性ひずみ 0、降伏応力 400 N/mm<sup>2</sup> で塑性ひずみ 0.2、単位重量は 77.0kN/m<sup>3</sup> とした。塔の境界条件は、塔端部の橋脚側を変位・回転ともに固定、ケーブル側を自由とした。塔の高さは、ケーブル構造が斜張橋に近い力学的特性を持つように、L/5 (L：支間長) とした<sup>12)</sup>。また、塔の断面の形状は、弱軸・強軸が生じない正方形断面とした。断面寸法は活荷重をケーブルが全て負荷すると仮定し、各ケーブルにかかる活荷重分を座屈荷重と置き換えて算出した。以下に、断面寸法決定までの算出過程を示す。

対象橋梁全体の活荷重:  $P_L=5600\text{kN}$  に安全率 1.3 を考慮すると、安全率を考慮した活荷重:  $P_L'$  は

$$P_L' = 5600 \times 1.3 = 7280 \text{ kN} \quad (1)$$

ケーブル構造の塔の本数は橋梁全体で 4 本なので、塔 1 本あたりが負担する活荷重、つまり座屈荷重:  $P_{\alpha}$  は

$$P_{\alpha} = 7280 / 4 = 1820 \text{ kN} \quad (2)$$

ここで、オイラーの座屈荷重は

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(Kl)^2} \quad (3)$$

E: 弾性係数 (=  $2 \times 10^5$ )、I: 断面 2 次モーメント (mm<sup>4</sup>)

K: 有効長さ係数 (= 2)、l: 塔の高さ (= 11900mm)

であるから、式(1)~(3)より断面 2 次モーメント: I は

$$I = \frac{P_{cr} \cdot (Kl)^2}{\pi^2 E} = 5.22 \times 10^8 \text{ mm}^4 \quad (4)$$

また、正方形断面の一辺の長さ: X とすると、断面 2 次モーメント: I は

$$I = \frac{X^4}{12} \quad (5)$$

よって、式(4)、(5)より、正方形断面の一辺の長さ: X は

$$X = 281 \text{ mm} \quad (6)$$

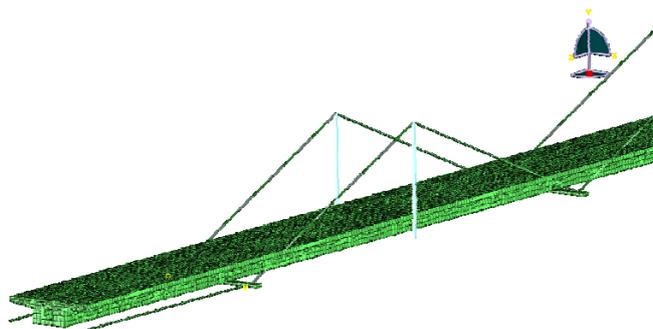
### (2) ケーブル

ケーブル構造に用いるケーブルの FEM 上の使用要素は、トラス要素を用いて、ケーブル 1 本を 1 要素としてモデル化した。使用材料は、呼び名: PC 鋼より線 15.2 mm、記号: SWPR19N を用いて、ヤング係数は  $1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、より線 1 本あたりの質量は 1.101Kg/m/本とし、ケーブルの断面積は 5000 mm<sup>2</sup> とした。ケーブルの境界条件は、ケーブル端部の塔側では塔の頂点の節点を共有し、サポートビーム側 (ケーブル構造のうち、ケーブルで桁を吊り上げるために用いる部材をサポートビームと本研究では呼ぶ) ではサポートビーム端部から橋軸直角方向に約 980mm、橋軸方向はサポートビーム橋軸方向長さの中間位置の節点と共有することとした。また、活荷重の約 25% をケーブルで分担することを目標とし、そのため 1 本あたりのケーブルに初期張力 500kN を導入した。

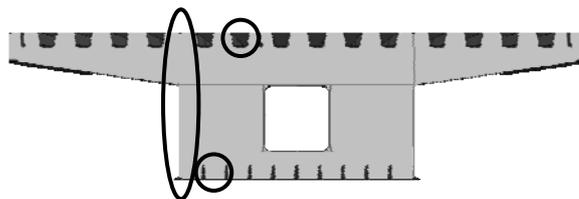
### (3) サポートビーム

本研究で用いるサポートビームは、ケーブルで桁を吊り上げるために下フランジに添接したはりのことで、設置位置は桁全体に補強効果が及ぶよう各径間の中央に設定した。サポートモデルの FEM 解析モデルの節点数は約 150、要素数は約 150 であり、使用要素は 3 節点あるいは 4 節点のシェル要素を用いて、メッシュサイズは 500mm×500mm を基本としてモデル化した。サポートビームの寸法は、橋軸直角方向 11690mm、橋軸方向 1000mm、鉛直方向 250mm、板厚 12mm とし、サポートビームと対象橋梁の箱桁部下フランジをリンクさせる添接板の寸法は橋軸方向 1000mm、鉛直方向 250mm、板厚 22mm とした。ここで、図—4 にサポートビーム直上近傍の FEM モデルを示す。

使用材料は、対象橋梁やケーブル構造の塔と同様の鋼



図—5 ケーブル端部の処理方法



図—6 FEM モデル応力評価位置

材を使用し、弾性係数、金属塑性、単位重量も対象橋梁と同様の条件である。サポートビームの設置位置は径間の中央部設置し、スパン全体を吊り上げることでスパン全体に補強効果をあたえるようにした。また、境界条件はサポートビームの添接板の全ての節点をリンクする対象橋梁の箱桁部ウェブと共有した。また、サポートビーム上面と対象橋梁箱桁部下フランジ下面の接触面では、接触方向挙動を剛接触とした。

#### (4) ダイヤフラム

本研究で提案するケーブル構造補強を付加することにより箱桁部全体が持ち上げられ、特にケーブル構造のサポートビーム直上の箱桁部ウェブには圧縮力が生じる。そこで、サポートビーム直上の箱桁部にダイヤフラムを挿入することで箱桁部の変形を抑え、圧縮力を低減した。サポートモデルの FEM 解析モデルの節点数は約 80、要素数は約 50 であり、使用要素は 3 節点あるいは 4 節点のシェル要素を用いて、メッシュサイズは 500mm×500mm を基本としてモデル化した。ダイヤフラムの形式は充腹板方式ダイヤフラム<sup>7)</sup>とし、ダイヤフラムの寸法は、橋軸直角方向 3950mm、鉛直方向 2500mm、板厚 11mm、マンホール（開口部）面積は 1100mm×1100mm とした。使用材料は、対象橋梁やケーブル構造の塔と同様の鋼材を使用し、弾性係数、金属塑性、単位重量も対象橋梁と同様の条件である。

#### (5) ケーブル端部の処理方法

図—5 に FEM モデル内でのケーブル端部の処理の様子を示す。ケーブル構造のサポートビーム側のケーブル端部をサポートビーム上に処理した場合、ケーブル張力の鉛直成分は桁を持ち上げる役割があるが、一方でケーブル張力の橋軸方向成分は、対象橋梁の桁に軸力として生じる。そこで本研究では、サポートビーム側のケーブル端部をサポートビーム上に処理するのではなく、サポートビーム上からさらに桁端部まで延長し、下部構造に固定する処理方法を取り、初期張力を延長したケーブルに導入することでケーブル張力の橋軸方向成分を打ち消した。

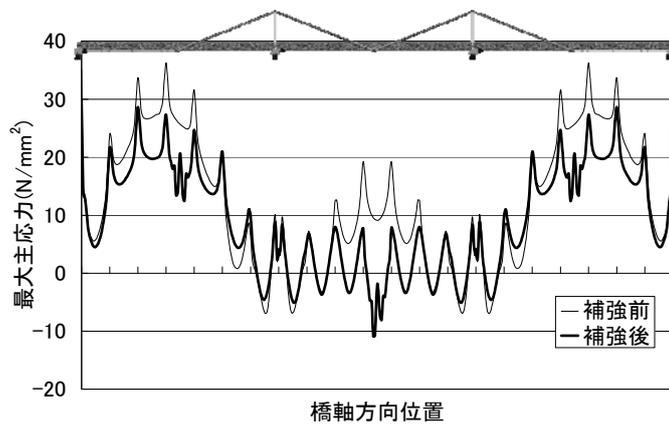
## 4. ケーブル構造補強の補強効果

本研究では、ケーブル構造補強の補強効果を確認するために、図—6 に示すように、一次部材である箱桁部下フランジとウェブ、二次部材からは鋼床版トラフリブについての補強前後の応力性状の変化を示す。下フランジは部材の端部の要素を避けるため、端部から 1 要素分橋軸直角方向にずらして選定した。また、メッシュサイズは下フランジで約 400×500mm、ウェブで約 500×500mm、トラフリブで約 320×500mm である。また、箱桁部下フランジの橋軸方向は全径間、箱桁部ウェブの鉛直方向は上下フランジ間、鋼床版トラフリブの橋軸方向は中央径間の応力性状に注目して最大主応力を用いて評価した。さらに、汎用有限要素法プログラム ABAQUS のプログラム制限上、死荷重応力はケーブル初期張力が作用した応力として算出した。

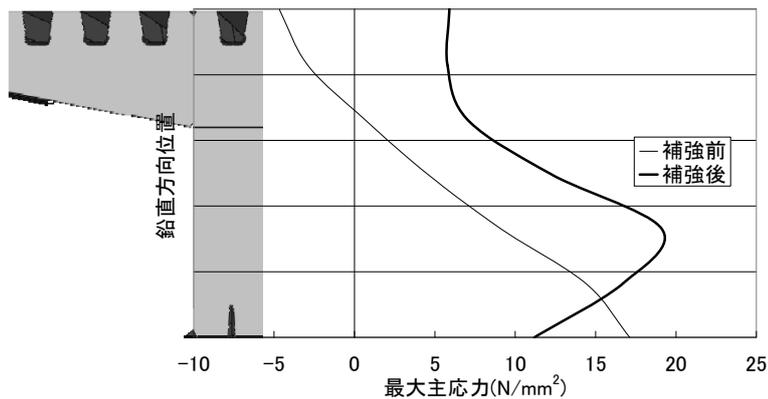
### 4.1 補強前後の死荷重応力の比較

図—7 に、対象橋梁にケーブル構造を補強する前と補強した後の橋梁全体の箱桁部下フランジの死荷重応力と橋軸方向位置の関係を示す。グラフの横軸は橋軸方向位置、縦軸は最大主応力を示しており、橋軸方向位置のイメージが掴めるよう、グラフ上方には FEM モデルの側面図を表示した。橋梁全体の応力性状の傾向に大きな変化はなく、サポートビーム直上近傍のみ応力が特に低減している。橋梁全体の応力低減率は平均 22%低減しており、中央径間・側径間ともに応力低減効果が見られた。ゆえに、ケーブル構造補強によって桁全体の耐荷力向上を図れたといえる。しかし、各径間の桁端部近傍で応力が補強前よりも高く出ている範囲がある。また、応力性状の 10N/mm<sup>2</sup> 程度の立ち上がりは、各パネル間にある横リブにより下フランジの変形が拘束されているために生じた応力である。

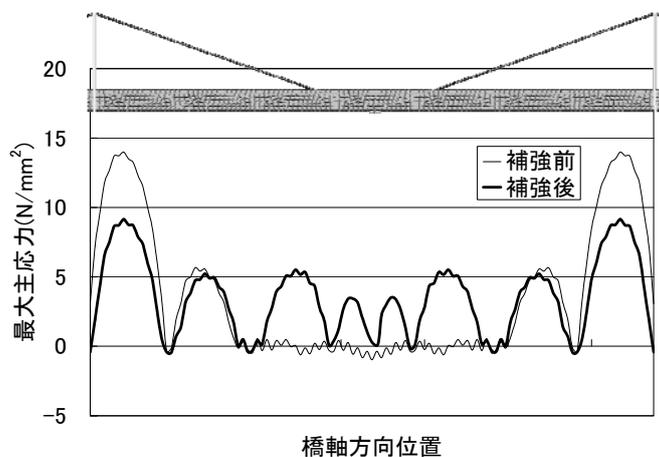
図—8 に、ケーブル構造補強前後の中央径間中央部の



図—7 補強前後の箱桁部下フランジの死荷重応力性状



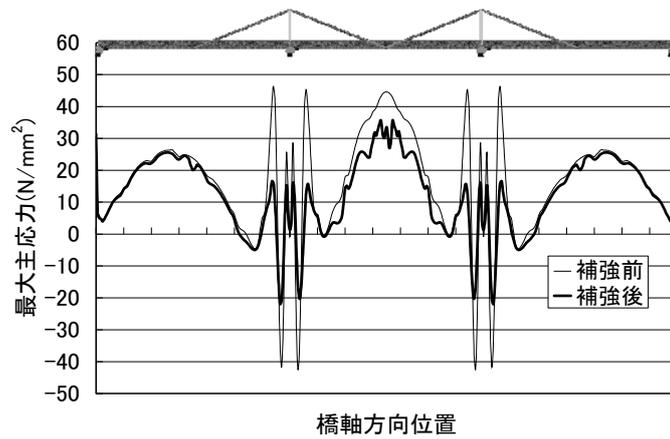
図—8 補強前後の箱桁部ウェブの死荷重応力性状



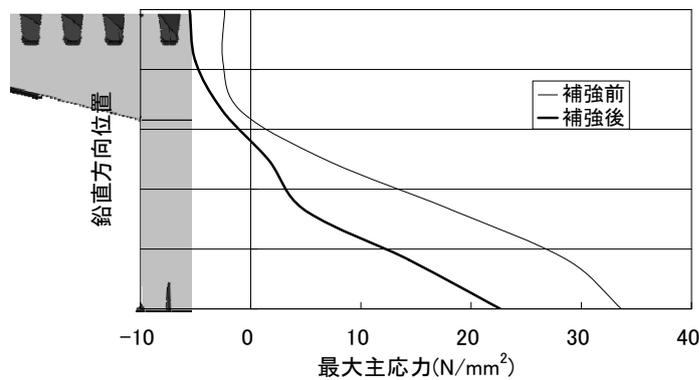
図—9 補強前後の鋼床版トラフリブの死荷重応力性状

箱桁部ウェブの死荷重応力と鉛直方向位置の関係を示す。グラフの横軸は最大主応力、縦軸は鉛直方向位置を示しており、グラフ左方には FEM モデルの断面図を表示した。死荷重には初期張力も解析プログラム制限上含まれているために、サポートビーム直上である中央径間中央部では、重力加速度以外にも初期張力の影響を大きく受けることになるため、初期張力の桁の吊り上げ作用が生じる。そのため補強後は、下フランジの引張応力は低減するが下フランジから上フランジに向かって約 800mm 近傍では、他の位置に比べ高い

応力度を示し、上フランジでは圧縮応力から引張応力に転じている結果となった。図—9 に、ケーブル構造補強前後の中央径間の鋼床版トラフリブの死荷重応力と橋軸方向位置の関係を示す。グラフの横軸は橋軸方向位置、縦軸は最大主応力を示しており、グラフ上方には FEM モデルの側面図を表示した。中央部近傍の 3 パネルの範囲では、補強前より補強後の方が応力が高いが、これは初期張力による桁の吊り上げ作用によるものである。



図—10 補強前後の箱桁部下フランジの活荷重応力性状



図—11 補強前後の箱桁部ウェブの活荷重応力性状

#### 4.2 補強前後の活荷重応力の比較

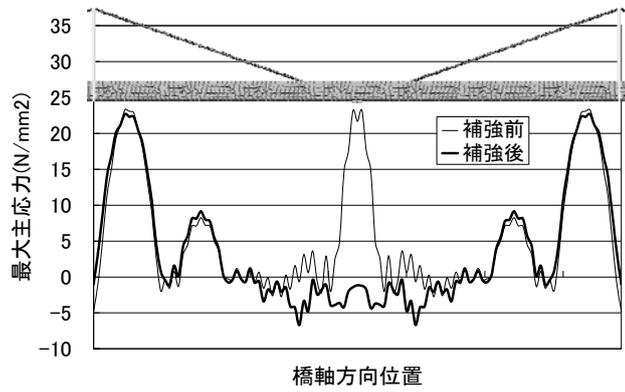
図—10 に、ケーブル構造補強前後の橋梁全体の箱桁部下フランジの活荷重応力と橋軸方向位置の関係を示す。グラフの横軸は橋軸方向位置、縦軸は最大主応力を示しており、グラフ上方には FEM モデルの側面図を表示した。橋梁全体の応力性状の傾向は補強前と大きく変わらず、補強前よりも応力度が大きくなる点はない。橋軸方向範囲別に補強前後の応力低減率を見ると、橋梁全体では平均 23%、中央径間のみだと 34%、側径間は 13%、桁端部では 71%活荷重応力が低減された。また、橋梁全体の中で他の位置に比べ補強前に高い応力度を示している中央径間中央部と、中央径間と側径間の桁端部近傍の 2 点は、補強後にそれぞれ 30%、65%応力度が低減しており、桁端部に関しては、補強後には橋軸方向の他の位置に比べ高い応力ではなくなった。よって、従来の補強工法では効果がなかったが、ケーブル構造補強では桁全体の活荷重応力の低減を可能とした。

図—11 に、ケーブル構造補強前後の中央径間中央部の箱桁部ウェブの活荷重応力と鉛直方向位置の関係を示す。グラフの横軸は最大主応力、縦軸は鉛直方向

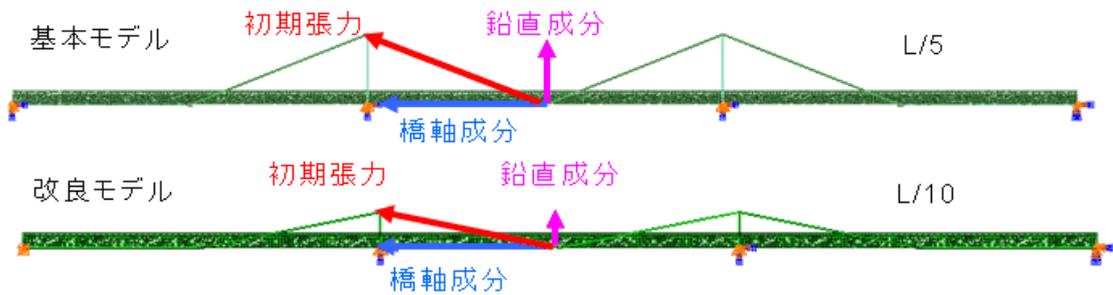
位置を示しており、グラフ左方には FEM モデルの断面図を表示した。補強前に比べ、補強後は初期張力による桁の吊り上げ作用により、ウェブ全体の応力が平均で 39%低減している。しかし、上フランジ近傍では、逆に圧縮応力が多少増加している。図—12 に、ケーブル構造補強前後の中央径間の鋼床版トラフリブの活荷重応力と橋軸方向位置の関係を示す。グラフの横軸は橋軸方向位置、縦軸は最大主応力を示しており、グラフ上方には FEM モデルの側面図を表示した。補強前後の応力低減率は、中央径間では 6%となった。また、中央径間中央部では補強前の発生応力が約 25N/mm<sup>2</sup>であったが、補強後は約 2 N/mm<sup>2</sup>と大きく応力が低減した。ケーブル構造補強は一次応力だけでなく、設計では考慮できない二次応力が発生しているトラフリブの活荷重応力低減を可能とした。

#### 5. ケーブル構造補強の経済性・施行性

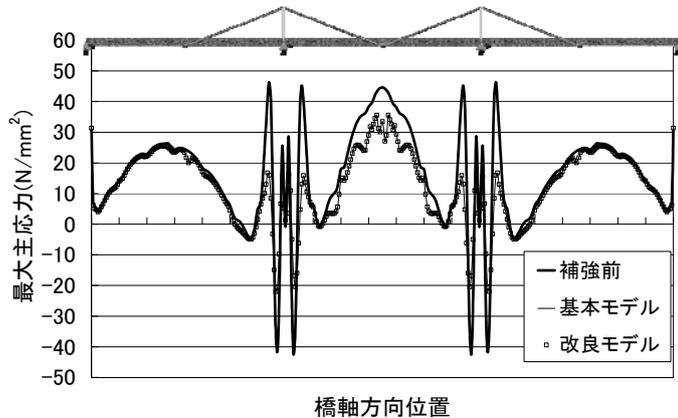
4 章において、ケーブル構造補強は既設鋼道路橋の桁全体の応力を抜本的に低減し、従来の補強工法にはない橋梁全体に補強効果があること。また、死荷重応



図—12 補強前後の鋼床版トラフリブの活荷重応力性状



図—13 基本モデルと改良モデルのケーブル張力成分



図—14 モデル別補強前後の箱桁部下フランジの活荷重応力性状

力低減だけでなく、従来の補強工法では実現できなかった活荷重応力低減を可能にし、既設鋼道路橋の耐荷力・耐久性の向上を図ることを可能とした補強法であることを示した。しかし、4章では力学的な視点からのみでケーブル構造補強を評価していたため、本章では工学的な視点からケーブル構造補強を評価するために、ケーブル構造補強の経済性・施工性を検討する。そこで本研究では、ケーブル構造の使用鋼材量を減らすことで経済性を向上、ケーブル構造の形状を縮小することで施工性を向上できることとした。

図—13 に 4 章で作成したケーブル構造のモデル

(以下、基本モデルとする) と、基本モデルに比べ塔高を 1/2 ( $L/10$ ) にしたモデル (以下、改良モデルとする) の初期張力の各方向成分を示す。改良モデルは基本モデルに比べて塔高が 1/2 のために、初期張力鉛直成分も約 1/2 となる。ケーブル構造補強は、桁の応力低減につながる大きな要因の 1 つが初期張力の鉛直成分といえる。ゆえに、基本モデルと同等の初期張力の鉛直成分を得るために、改良モデルの初期張力を約 2 倍にし、FEM 解析を行った。

図—14 にケーブル構造 (基本モデルと改良モデル) 補強前後の橋梁全体の箱桁部下フランジの活荷重

応力と橋軸方向位置の関係を示す。基本モデルと改良モデルの発生応力に差は見られず、改良モデルは経済性・施工性を考慮しながらも、基本モデルと同等の補強効果を得ることができた。

## 6. 結論

本研究では、鋼道路橋、特に、鋼床版桁形式の橋梁を対象として、既設構造であることを踏まえ、軸圧縮力を付与しないケーブル端部処理を取り込んだケーブル構造補強手法を提案し、3次元 FEM 解析を用いて、ケーブル補強効果を検討した。その結果、得られた結論を以下に示す。

1. ケーブル構造補強により死荷重応力は橋梁全体で平均 22% 低減し、桁全体の耐荷力向上を図ることが可能である。
2. ケーブル構造補強により活荷重応力は橋梁全体で平均 23% 低減しており、補強前よりも応力度が大きくなる点はない。よって、従来の補強工法では活荷重応力低減効果がなかったが、ケーブル構造補強では桁全体の活荷重応力の低減、耐久性向上を可能とした。
3. ケーブル構造のサポートビーム直上近傍では、鋼床版トラフリブの活荷重応力を低減でき、ケーブル構造補強は一次応力だけでなく、二次応力の低減にも効果があることを確認した。
4. ケーブル構造の塔高やケーブル初期張力を調整することで、経済性・施工性を考慮したケーブル構造補強を行えることを確認した。

## 謝辞

本研究は、基盤研究 (S) 「重度の疲労損傷を受けた鋼橋の機能回復・機能向上を目的とする橋梁再生工学の確立」 (研究代表者：東京工業大学三木千壽教授) の研究の一環として検討したものです。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐藤栄作：鋼道路橋の補修・補強の概要、橋梁と基礎、Vol.28, No.8, pp11-16, 1994.
- 2) 原田政彦, 梶川康男, 深田幸史：耐久性に着目した既設鋼橋の補強効果に関する考察, 土木学会論文集, No.710/ I -60, pp.129-139, 2002.
- 3) 三木千壽, 菅沼久忠, 富澤雅幸, 町田文孝：鋼床版桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.57-69, 2005.
- 4) 宮本文穂, 平田勝己, 柳下文夫, 森拓也：プレストレス合成桁の弾塑性挙動解析と橋梁補強工法への適用, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1101-1114, 1994.
- 5) 日本橋梁建設協会：鋼橋の Q&A 保全編, 2006.
- 6) 原田政彦, 上腰正人, 梶川康男：外ケーブルプレストレス工法で補強された既設鋼桁橋の構造特性, 土木学会論文集, No.675/ I -55, pp.331-341, 2001.
- 7) 松井繁之：外ケーブルによる鋼橋の補強 - 設計と施工の手引き -, 森北出版, 2005.
- 8) 八塚博, 柏木亮二, 山田金喜, 名取暢, 渡辺泰行：既設鋼桁橋のプレストレス導入による補強, 橋梁と基礎, vol.30, No.3, pp.15-24, 1996.
- 9) 望月秀次, 湯川保之, 花田克彦, 中川知和, 安田克典, 塙洋二：ケーブルトラス橋の構造特性と設計, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1181-1190, 1998.
- 10) 畑山義人, 大野浩, 高島英一, 高島垣明：プレストレストコンクリート連続下路桁橋, 公開特許公報, 特開 2001-64912, 2001.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書 ( I 共通編・II 鋼橋編) ・同解説, 2002.
- 12) 長大橋技術研究会：メタルデザインデータ, pp.306-315, 1986.

(2009年4月9日受付)