

外ケーブルを用いた合成桁橋の床版打ち替え における構造検討

Study on Structural Behaviour of Composite Girder Bridge under Deck
Replacing Work using Tensioning Bars for Reducing Stresses of Steel
Girders against Lateral Buckling

伊藤 洋* 高田 道也** 神田 昌幸*** 西川 和廣**** 藤原 稔*****

ITO Yo, TAKATA Michiya, KANDA Masayuki, NISHIKAWA Kazuhiro and FUJIWARA Minoru

* 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-77 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

** ショーボンド建設株式会社 (〒101 東京都千代田区神田錦町3丁目18番地)

*** 建設省土木研究所橋梁研究室 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

**** 建設省土木研究所橋梁研究室 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

***** 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻教授 (〒980-77 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

Structural behaviour of a composite girder bridge under deck slab replacing work was studied. Since one lane was needed to be kept open to the traffic during the work, each girder was temporarily stressed by giving the tension of 50tf to the steel bars placed under each girder in order to avoid the lateral buckling due to the total effect of deck slab weight, machinery load and traffic load. Stress assessment for each girder during the work was carried out by measured data at the site and by numerical analysis, and showed that the stresses of each girder under the maximum loading condition stayed within the range of allowable stress. Influence of rigidity of cross beam and main girders on the effect of steel bar tensioning, and the change in tensile force of steel bars during the work were also studied and discussed.

Key Words : composite girder bridge, deck replacement, out cable tensioning

1 はじめに

既設の道路橋の中には鉄筋コンクリート床版に損傷を受けた状態で供用されているものも少なくない。このため、これらの床版の効率的な補修補強工法あるいは打ち替え工法の開発が急がれている。これらの工法には、その効果が確実に期待できるものであることに加えて、施工中もできるだけ交通の支障にならずかつ構造の安全が確保されるものであることが要求される。

合成桁橋の鉄筋コンクリート床版を打ち替える場合には、床版を撤去することによって鋼桁が床版との合成作用が失われた状態になる。この状態の鋼桁に施工用の資機材や交通荷重が作用すると、鋼桁の応力が超過し、横倒れ座屈を起こすことも考えられる。

外ケーブル工法は、これを避けるために図-1のように鋼桁の下面に沿ってケーブルを設置し、これを緊張することによって、鋼桁に負の曲げモーメントを与えて施工用の資機材や交通荷重による正の曲げモーメントを軽減する工法である。この工法はこれまで交通を全面的に止めて行われた例が一例あるのみで[1]、交通を確保しながら行われた例はこれまでになかった。

今回、交通を通しながら工事を行う場合でも外ケーブル工法が有効であることを確認するために、実際の合成桁橋において2車線のうちの片側の車線の交通を確保しながら、同工法を用いて鉄筋コンクリート床版を打ち替える試験施工が行われた[2]。本稿では施工中の構造の挙動に関して行った検討結果を報告する。検討項目は次の通りである。

1. 施工中の鋼桁の応力状態の推移
2. 外ケーブルによる鋼桁の応力緩和の効果
3. 施工中の外ケーブルの張力の変動

検討は現地測定の結果の分析と数値解析によって行った。

2 外ケーブル工法の概要

合成桁の床版の打ち替えにおいて、図-2のように片側の車線に交通を通しながら反対側の車線の床版の工事を行う場合、床版を打ち替える部分の鋼桁は床版との合成作用がなくなる。そのため新しい床版や施工資機材の重量、あるいは交通を通して隣の車線から横桁を介して鋼桁に伝達される交通荷重の影響などにより、鋼桁の

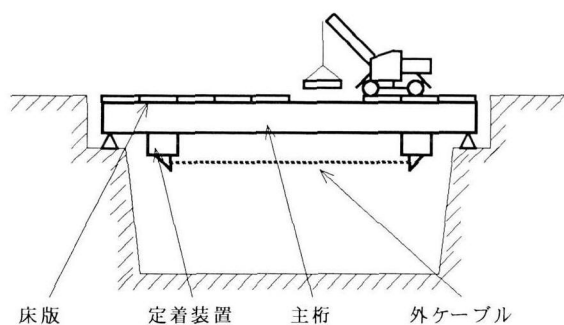


図-1: 外ケーブル工法における外ケーブルの配置

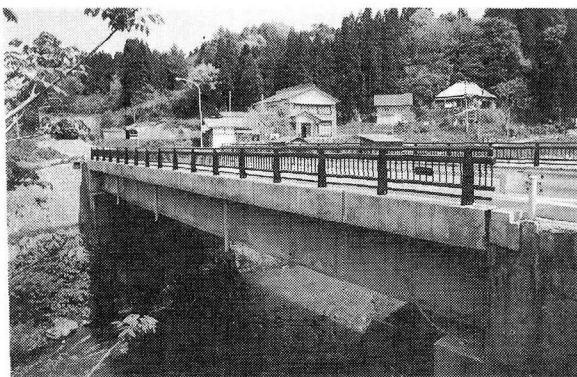


図-3: 施工の対象となった桜川橋の外観

応力が超過し、横倒れ座屈を起こすことも考えられる。

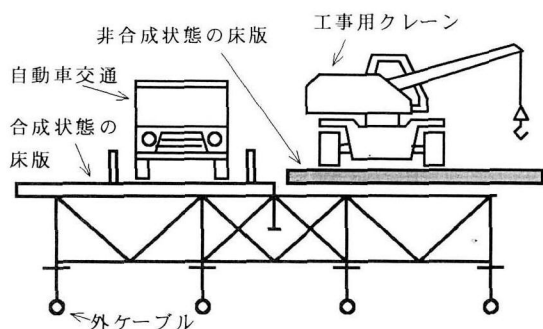


図-2: 床版の打ち替え中の構造系および荷重

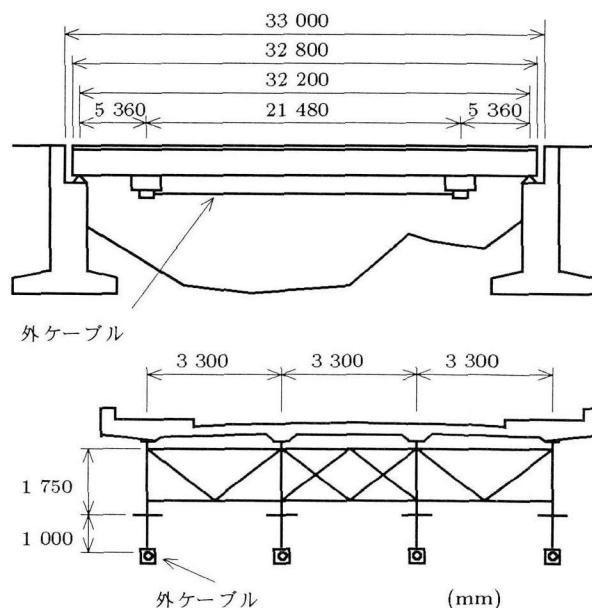


図-4: 施工の対象となった桜川橋の諸元および外ケーブルの配置

外ケーブル工法は、床版の打ち替えの施工中に床版との合作用のない鋼桁が床版や施工資機材の重量、あるいは交通荷重によって応力超過を起こすのを防止するために、鋼桁の下面に沿ってケーブルを設置してこれを緊張することによって、鋼桁に作用する応力度、とくに上フランジの圧縮応力度を軽減させた状態で床版の打ち替え工事を行う工法である。

3 試験施工の概要

3.1 試験施工の対象となった橋梁の概要

試験施工の対象となった橋梁は山形県小国町の国道113号線上の桜川橋である。この橋は支間長32.2m、幅員11.8mの4主桁単純活荷重合成桁橋で昭和49年に完成した。設計基準は昭和47年の道路橋示方書が用いられている。桜川橋の外観を図-3に、諸元を図-4に示す。

この路線は山形県と新潟県を結んでおり、平成7年現在の日交通量は6000台、大型車両混入率は20%である。床版（厚さ:21cm）は損傷が進行しており、平成6年3月には床版が部分的に陥没して覆工板による応急処置が施されたことがある。このため今回外ケーブル工法を用いて平成7年9月から12月にわたり床版の打ち替えが行われた。

3.2 外ケーブルの導入張力の決定

この工事では、施工中も施工用の資機材とともに交通荷重が橋上に載るため、橋の構造はこれらに対して安全であることが必要である。

最初に、図-2に示す施工中の最も厳しい構造条件および荷重条件に対して、外ケーブルを用いない場合の鋼桁の応力度の照査を行った。

この場合の交通荷重としては道路橋示方書のB活荷重を用いた。工事用クレーンの重量は、運搬する床版パネルの重量を含め31.5tfである。また、許容応力度は25%の施工時割り増しを考慮した。この計算には桁橋の設計に通常用いられる平面格子桁モデルを用いた。なおこの照査では、既設の床版のクリープや乾燥収縮による鋼桁の残留応力は、床版の損傷が進行していたことから、消滅しているものと考えた。

計算の結果、外ケーブルを用いない場合には鋼桁の上

フランジの圧縮応力度が許容応力度を最大18% 超過することがわかった（表-1）。

次に、鋼桁の上フランジの圧縮応力度を許容応力度以下とするために必要な外ケーブルの張力を求めた。上の計算に用いた平面格子桁モデルでは外ケーブルの構造を考慮できないため、この計算は、各外ケーブルに同量の張力を導入する場合は、それに伴う横桁や対傾構による主桁間の力の分配がなく、各主桁が独立して同じように挙動するものと考えて行った。

その結果、鋼桁の上フランジの圧縮応力度を許容応力度以下とするためには、各主桁の外ケーブルにそれぞれ50tfの張力の導入が必要であることが分かった（表-1）。

実際の施工では、この結果にもとづいて各主桁の下面に設置された外ケーブルにそれぞれ50tfの張力を導入して工事が行われた。

表-1: 施工中の鋼桁上フランジの圧縮応力度の最大値と許容応力度との比較（平面格子桁モデルによる）

	G1	G2	G3	G4
照査断面	SEC.4	SEC.2	SEC.2	SEC.4
許容応力度	2079	1974	1974	2079
外ケーブル不使用	2372	2329	2331	2370
	114%	118%	118%	114%
外ケーブル使用	2006	1863	1864	2003
	97%	94%	94%	96%

応力度の単位: kgf/cm²

注: 図中の % の値は許容応力度との対比

注: SEC.4は支間中央、SEC.2は支間の約1/4の位置

3.3 外ケーブル定着部の設計

外ケーブルを鋼桁に定着する構造を図-5に示す。実際には外ケーブルとしてPC鋼棒（φ32、B種2号）を用い、緊張はセンターホールジャッキで行った。外ケーブルと鋼桁との間には、鋼桁への応力集中を緩和し、また鋼桁に負の曲げモーメントを効率的に与えるために、枕梁と呼ばれる鋼製の梁部材を挿入した。枕梁の鋼桁への取り付けは、主桁に傷を付けないように高張力万力を用いて摩擦接合によって行った。枕梁を定着した部分の鋼桁のウェブは垂直補剛材を高力ボルトで取り付け補強した。

PC鋼棒、枕梁、および高張力万力による摩擦接合などの定着部の設計は、導入張力50tfに図-2に示す荷重によって生ずる張力増分を加えた値に対して行った。

この張力増分を求めるために、まず1本の主桁が単独で外ケーブルにより50tfの張力を導入されている状態を考えて、その主桁のたわみとそれに伴う外ケーブル張力増分の関係を求めた。次に図-2に示す荷重による主桁のたわみの最大値を平面格子桁モデルにより求め、先に求めた主桁のたわみとそれに伴う外ケーブルの張力増分の関係から、図-2に示す荷重による張力増分の値を求

めた。

その結果、最大13tfの張力の増加の見込まれた。したがって外ケーブルおよび定着部の設計は、初期導入張力の50tfが15tf増加しても耐えられるように65tfに対して行った。

さらに、外ケーブルを主桁に定着した部分の原寸大の供試体を作成して、ケーブルを緊張することによって定着部の鋼桁、枕梁などの耐荷力を確認した。実験は建設省土木研究所において行われた。

その結果、外ケーブルを設計張力の65tfで緊張した状態においても鋼桁や枕梁に塑性変形や座屈などの異常は見られず、供試体に取り付けたひずみゲージによる応力度も鋼材の降伏応力に対して小さい値であった。

また、この供試体に関して実験と同じ載荷条件に対して行ったFEMによる応力解析および座屈解析でも、鋼材の降伏や座屈は生じないことが分かり、今回用いた構造は外ケーブルの設計張力65tfに対して強度的に安全であることが確認された[3]。

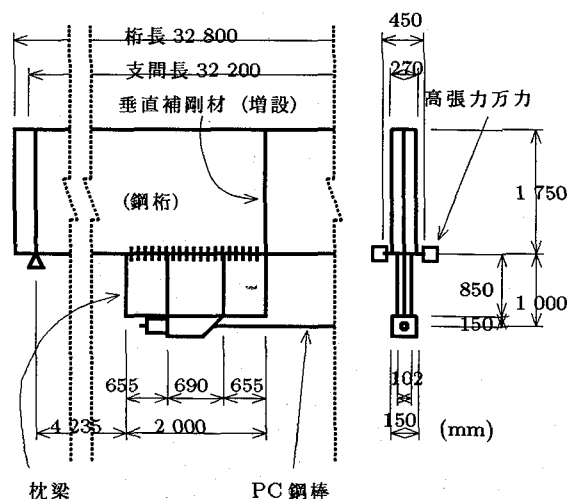


図-5: 外ケーブルの鋼桁への定着方法

3.4 施工の手順

この工事では迂回路がなかったため、常に1車線を確保する必要があり、床版の打ち替え作業は片側車線ずつ二段階に分けて行われた。施工の手順を図-6に示す。

まず、施工を始めるにあたって、桁の下面に吊り足場を設置し、G2桁とG3桁の間に新たに床版を支持するための縦桁を増設した。ついで舗装を全面にわたって撤去し、各主桁下面に沿って外ケーブルを設置した（B）。次に各主桁の外ケーブルをセンターホールジャッキにより緊張してそれぞれ50tfの張力を与えた（C）。

外ケーブルの緊張が終わった時点で一次施工に入った。まず一次施工側（G3、G4）の車線の交通を止め、床版を橋の端部から順にコンクリートカッターでブロック状に切

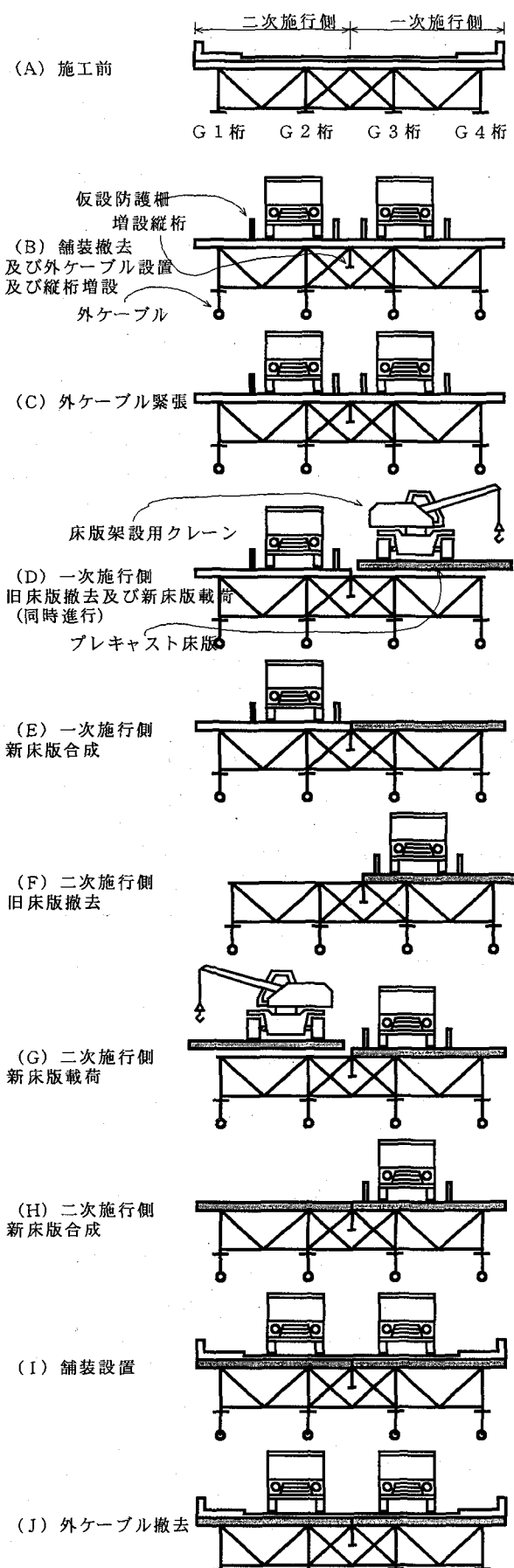


図-6: 床版打ち替えの施工手順および施工中の荷重

断・撤去し、プレキャストプレストレストコンクリート床版パネル（2m×6m、厚さ18cm、6.5tf/枚）を一枚ずつ架設した。床版パネルの架設はラフタークレーン（25tf）を用いて橋上を吊り走行しながら行った（D）。架設した床版パネルは橋軸方向にPCケーブルにより緊張・一体化した後に、箱抜き部分から鋼桁上フランジの上面にスタットジベルを溶植し、超速硬コンクリートを打設して鋼桁と床版を合成した（E）。

一次施工側の床版と鋼桁の合成が完了した段階で交通を一次施工側の車線に切り換え、二次施工側の車線を交通止めし、二次施工に移った。二次施工ははじめに全ての床版を撤去した後に（F）、床版パネルの架設を行い（G）、鋼桁と合成した（H）。これは施工性の違いを一次施工側と比較するためである。

その後舗装を施工し（I）、外ケーブルと吊り足場を撤去して全工事を完了した（J）。なお増設した縦桁はそのまま残した。

4 施工中の鋼桁の応力状態の推移

床版との合成作用がない状態の鋼桁が、新しい床版やクレーンなどの施工用資機材あるいは横桁を介して鋼桁に作用する交通荷重の影響により横倒れ座屈を生じないことを確認するために、各施工段階における鋼桁の応力度を実測あるいは数値計算により推定した。

なお、実測では基本的に橋上に交通荷重が載っていない状態で記録をとっていたので、各施工段階の構造に対する死荷重による応力度のみが測定された。このため、交通荷重や施工用資機材の影響は、それぞれ道路橋示方書に規定するB活荷重および工事用のクレーンの荷重に対して立体骨組みモデルによる数値計算から推定した。

また、施工中の各段階において20tfトラック二台を用いて載荷試験を行い、この載荷状態に対する鋼桁の応力度を確認した。

以下に、施工前の鋼桁上フランジの応力状態の推定、施工中の構造変化に伴う鋼桁上フランジの死荷重応力の変化、車両載荷試験による鋼桁の応力、および交通荷重（B活荷重）と施工資機材による鋼桁上フランジの応力度について、それぞれ行った検討の結果を述べる。

4.1 施工前の鋼桁上フランジの応力状態の推定

施工中の鋼桁の応力度の推移を推定するためには、施工前の鋼桁の応力状態を知る必要がある。そのためには既設の床版のクリープや乾燥収縮によって鋼桁に導入されている応力度を推定することが必要であるが、3.2に述べた外ケーブルの導入張力の計算では、床版の損傷が進行していたことからこの応力度は消滅したものと考えた。

ここでは二次施工において既設の床版を撤去した前後（図-6（F））の鋼桁応力度の実測値の変化を求め、これと立体骨組みモデルによる計算結果との比較を行い、床

版のクリープや乾燥収縮により鋼桁上フランジに残留した応力の推定を行った。なお立体骨組みモデルは図-7に示すように各部材を骨組み要素で立体的にモデル化したものである。

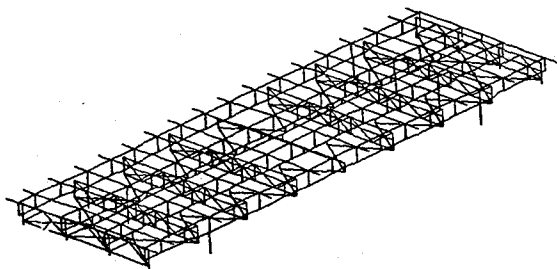


図-7: 立体骨組みモデル

二次施工側の既設床版の撤去にともなうG1桁の上フランジの圧縮応力度の減少は、実測値では 974kgf/cm^2 であった。これに対し、立体骨組みモデルによる計算値は、既存の床版のクリープや乾燥収縮により鋼桁に導入されている応力度が、建設時の予測どおりに生じていると仮定した場合の値は 1271kgf/cm^2 、生じていないと仮定した場合の値は 1001kgf/cm^2 であり、生じていないと仮定した場合の値の方が実測値に近かった。

この結果のみでは、既存の床版のクリープや乾燥収縮によって鋼桁に残留した応力度が施工前にはどの程度であったかについて確定的なことは言えないので、便宜上、以後の各検討においては、既設の床版のクリープや乾燥収縮の影響による鋼桁の上フランジへの応力は生じていないと仮定した。

4.2 施工中の構造変化に伴う死荷重による鋼桁上フランジの応力の変化

施工中に橋の構造状態が変化した際の、鋼桁上フランジの死荷重による応力度の変動を、実測値と計算値によって検討した。検討の対象とした工程は、一次施工側の旧床版撤去および新床版架設(C→D)、二次施工側の旧床版撤去(E→F)および二次施工側の新床版架設(F→G)である。

なお、一次施工と二次施工は床版の撤去および架設の方法が異なり、一次施工では床版の撤去と架設を床版パネル1枚毎に交互に行い(C→D)、二次施工では先に床版を全て撤去してから(E→F)、架設を行った(F→G)。

結果を表-2に示す。一次施工側の旧床版撤去および新床版架設(C→D)で、床版打ち替え側の桁(G3、G4)の実測による圧縮応力度の減少量は、G3で 139kgf/cm^2 、G4で 337kgf/cm^2 であった。これに対し、反対側の合成状態の桁(G1、G2)の応力にはあまり変化はみられなかった。

一次施工での床版の撤去および架設において、打ち替え側(G3、G4)の鋼桁上フランジの圧縮応力度が減少する

表-2: 橋の構造変化に伴う鋼桁上フランジの死荷重応力度の変化の実測値および計算値

(1) 一次施工側旧床版撤去及び新床版架設 (C→D)

	G1	G2	G3	G4
照査断面	SEC.4	SEC.4	SEC.4	SEC.4
実測値	-10	-15	-139	-337
計算値	-5	-49	-212	-342
主桁の状態	合成		非合成	

(2) 二次施工側旧床版撤去 (E→F)

	G1	G2	G3	G4
照査断面	SEC.4	SEC.4	SEC.4	SEC.4
実測値	-974	-296	7	8
計算値	-1001	-579	-158	-17
主桁の状態	非合成		合成	

(3) 二次施工側新床版架設 (F→G)

	G1	G2	G3	G4
照査断面	SEC.4	SEC.4	SEC.4	SEC.4
実測値	454	232	-18	-9
計算値	665	355	85	14
主桁の状態	非合成		合成	

注: 応力度は圧縮の増加を正、減少を負とした

注: 応力度の単位は kgf/cm^2

注: 計算値は立体骨組みモデルによる

注: SEC.4は支間中央

要因としては、床版厚の減少(旧21cm→新18cm)による死荷重の減少、合成作用が失われることによる桁の曲げ剛性の低下、および合成作用が失われることによる鋼桁断面の応力分布の変化が考えられる。

二次施工側の床版の撤去(E→F)と架設(F→G)でも、打ち替え側の桁(G1、G2)の変化が大きく、反対側の桁(G3、G4)は合成状態であるため変化が小さかった。

とくに床版の撤去(E→F)ではG1の鋼桁上フランジの圧縮応力度の減少が実測値で 974kgf/cm^2 とかなり大きくなった。この理由は、床版を一度に全て撤去したことで、一次施工側のように床版厚の変化による死荷重の変化とは違って、床版そのものによる大きな死荷重の減少が生じているためである。

床版の架設(F→G)においても、架設する床版そのものによる大きな死荷重の増加が生じるために打ち替え側の桁の変化が大きく、G1桁の上フランジの圧縮応力度の増加が 454kgf/cm^2 と大きくなった。

また、二次施工側の床版の撤去および架設(E→F→G)によって、G1では圧縮応力度の減少が 520kgf/cm^2 ($=974 - 454\text{kgf/cm}^2$)となり、一次施工側の同じ工程(C→D)によるG4の 337kgf/cm^2 に比べて大きめとなっている。

以上の工程に共通する傾向として、内桁(G2、G3)より外桁(G1、G4)の方が応力変化が大きい。例えば二次施工での新床版の架設時(F→G)のG1の上フランジの圧縮応力度の増加が実測値で 454kgf/cm^2 であるのに対し、G2は 232kgf/cm^2 と半分程度である。これは主とし

て、支間中央に設けられた横桁の荷重分配効果によるものと考えられる。

なお、計算値は実測値よりも変化がやや大きめになる傾向があるものの、おおよその傾向を把握できることが分かった。

4.3 車両載荷試験による鋼桁の応力

現場における車両載荷試験は20tfトラック2台の荷重車に対する各施工段階における構造の挙動を確認するために、図-6のB、C、D、E、G、H、IおよびJの各工程において行われた。荷重車の配置を図-8に示す。

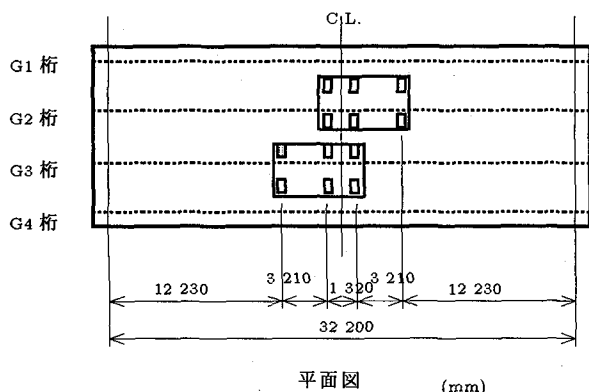


図-8: 荷重車の配置

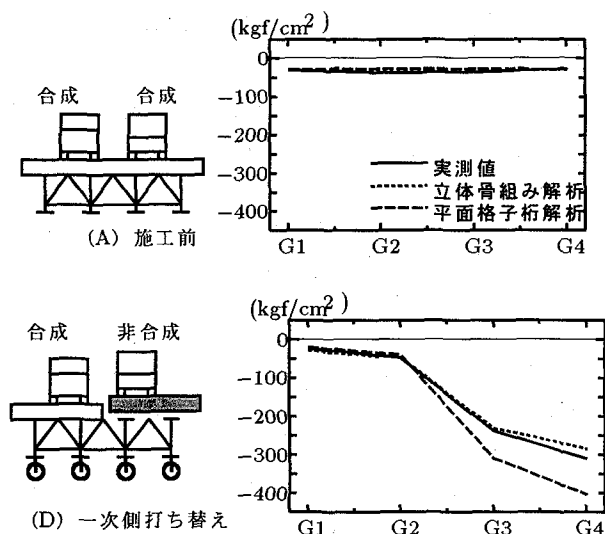
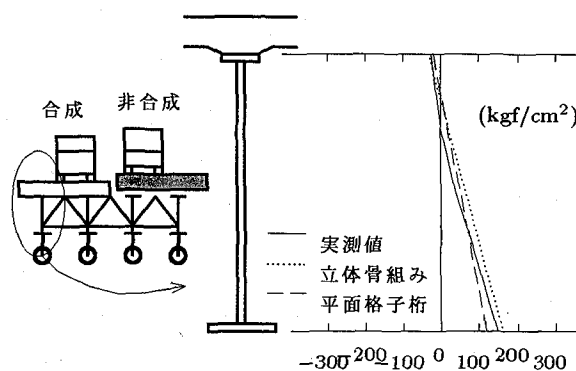


図-9: 載荷試験による支間中央の主桁上フランジの応力値の実測値と解析値 (図中の応力値は圧縮を負)

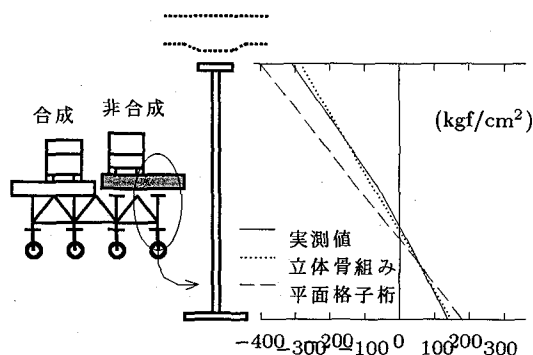
ここでは、各施工段階における車両載荷試験結果のうち、代表的な構造状態を示す施工前 (A) および一次側床版打ち替え中 (D) の二つの状態における結果に対して実測値と計算値を比較した。

まず支間中央の鋼桁の上フランジの応力度についての結果を図-9に示す。施工前 (A) は各鋼桁の上フランジの応力度は数十 kgf/cm^2 程度と小さく、各鋼桁ともほぼ均等であった。これに対して一次側床版打ち替え中 (D) は合成側と非合成側で上フランジの応力度が大きく異なり、非合成側の桁の上フランジには約 300kgf/cm^2 の圧縮応力が生じた。

次に一次施工中の鋼桁断面内の応力分布を図-10に示す。合成状態の鋼桁では中立軸が上フランジ付近にあるのに対し、非合成状態の鋼桁ではウェブのかなり下の方に下がっており、上フランジに大きな圧縮力がかかり易い状態であることが分かる。これに対し下フランジの応力度はいずれの場合もあまり差がないが、これは鋼桁の曲げ剛性の低下と中立軸の移動の影響が相殺しているためと考えられる。



合成状態の鋼桁の断面の応力度の分布



非合成状態の鋼桁の断面の応力度の分布

図-10: 載荷試験による支間中央の主桁断面の応力度分布 (一次施工時、図中の応力値は圧縮を負)

車両載荷試験の実測値と計算値を比較すると、立体骨組みモデルによる計算の結果は実測値と良く一致し、橋の挙動を精度良く解析できることが分かった。これに対し平面格子桁モデルによる値は床版打ち替え時 (D) の鋼桁が非合成になった状態において実測値よりも大きくなった。

さらに、車両載荷試験と同じ荷重車が片側の床版が非合成の状態 (D、G) に載荷された場合に鋼桁に生ずる応

表-3: 載荷試験による鋼桁上フランジの圧縮応力度の立体骨組みモデルによる計算結果

		G1	G2	G3	G4
	構造状態	二次施工中 (G)		一次施工中 (D)	
	照査断面	SEC.4	SEC.4	SEC.4	SEC.4
	許容応力度	2079	2175	2175	2079
1	死荷重分	1372	1457	1493	1357
		66%	67%	69%	65%
2	載荷試験の荷重車	292	241	233	286
		14%	11%	11%	14%
3	外ケーブルによる緩和効果	-233	-194	-169	-224
		-11%	-10%	-8%	-11%
	1+2	1664	1698	1726	1643
		80%	78%	79%	79%
	1+2+3	1431	1504	1557	1419
		69%	69%	72%	68%

応力度の単位: kgf/cm²

注: 図中の%の値は許容応力度との対比

注: SEC.4は支間中央

力の合計、すなわち、死荷重による応力と荷重車による応力の合計を計算により推定した。

これは、交通荷重に対する測定を行っていないため、それを補完する目安として、実際の交通状態と施工状態に近いと考えられる車両載荷試験の状態について、鋼桁の応力度の推定を行ったものである。

その結果を表-3に示す。このように、車両載荷試験に用いた程度の荷重に対しては、外ケーブルを用いた場合の鋼桁の上フランジの圧縮応力度は1400~1600kgf/cm²となり、25%の施工時割増しを考慮した許容応力度の68~72%であった。

4.4 交通荷重 (B 活荷重) と施工資機材による鋼桁上フランジの応力度

3.2に述べた、外ケーブルの導入張力を決めるために行ったB活荷重およびクレーン荷重に対する照査には平面格子桁モデルによる計算を用いたが、今回はこのような荷重状態に対する測定は行われていないので、ここでは改めて立体骨組みモデルを用いてこの荷重状態に対して計算を行った。

その結果を表-4に示す。これによると鋼桁上フランジの圧縮応力度は死荷重によるものが1300~1500kgf/cm²、B活荷重と工事用クレーンによるものが400~600kgf/cm²、外ケーブルによる緩和効果が100~300kgf/cm²、合計1600~1800kgf/cm²であった。これは25%の施工時割増しを考慮した許容応力度の80%~82%の値である。

また、外ケーブルを用いない場合の合計応力度は同じく施工時割増しを考慮した許容応力度の89~92%の値であった。これは、工事前に行われた施工中の構造の安全性の検討に用いられた平面格子桁モデルよりも立体骨組みモデルの方が各部材の剛性を実際の構造により近い形で考慮しているためである。

なお、工事前の施工中の構造の安全性の検討では25%

表-4: B活荷重とクレーン荷重による鋼桁上フランジの圧縮応力度の立体骨組みモデルによる計算結果

		G1	G2	G3	G4
	構造状態	二次施工中 (G)		一次施工中 (D)	
	照査断面	SEC.4	SEC.4	SEC.4	SEC.4
	許容応力度	2079	2175	2175	2079
1	死荷重分	1372	1457	1493	1357
		66%	67%	69%	65%
2	B活荷重と工事用クレーン	545	469	454	533
		26%	22%	21%	26%
3	外ケーブルによる緩和効果	-233	-194	-169	-223
		-11%	-10%	-8%	-11%
	1+2	1917	1926	1947	1889
		92%	89%	90%	91%
	1+2+3	1684	1732	1778	1666
		81%	80%	82%	80%

応力度の単位: kgf/cm²

注: 図中の%の値は許容応力度との対比

注: SEC.4は支間中央

の施工時割増しを考慮した許容応力度を用いているが、交通を通しながら施工する場合にもこの割増しを考慮するかどうかは考慮する荷重や用いる計算法も含めて今後の課題である。いまこの割増しを考慮しないとした場合には、外ケーブルを用いない場合の合計応力度は許容応力度の111~115%であるのに対して、外ケーブルを用いた場合の合計応力度は許容応力度の100~102%となる。

4.5 まとめ

施工中の構造変化に伴う、死荷重による鋼桁上フランジの圧縮応力度は、床版との合成作用が失われたときに減少した。とくに二次施工では既設床版の撤去による死荷重の減少の影響が大きく、非合成の状態の外桁の圧縮応力度に実測値で974kgf/cm²の減少が見られた。また横桁の荷重分配効果により一般に内桁より外桁の方が応力変化が大きい。

各施工段階において、20tfトラック2台の荷重に対する鋼桁の応力度を確認するために行った載荷試験では、非合成状態の鋼桁の上フランジの荷重車による圧縮応力度は実測値で300kgf/cm²程度であった。

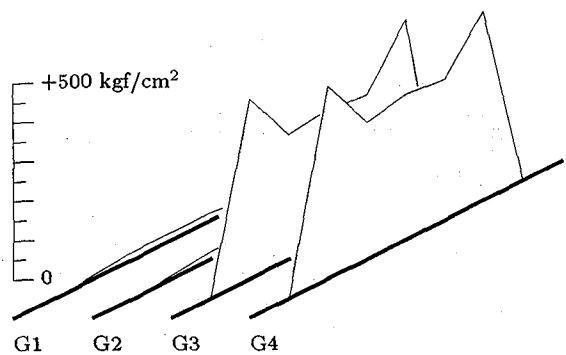
また、実際の交通状態と施工状態に近いと考えられるこの載荷試験の状態に対して立体骨組みモデルによって求めた鋼桁上フランジの圧縮応力度は1400~1600kgf/cm²となり、25%の施工時割増しを考慮した許容応力度の最大7割強であった。

床版打ち替え中にB活荷重とクレーンが載った状態に対して立体骨組みモデルによって求めた鋼桁上フランジの応力度は1600~1800kgf/cm²となり、25%の施工時割増しを考慮した許容応力度の最大8割強であった。なお、外ケーブルを用いない場合には同じく割増しを考慮した許容応力度の最大9割強であった。

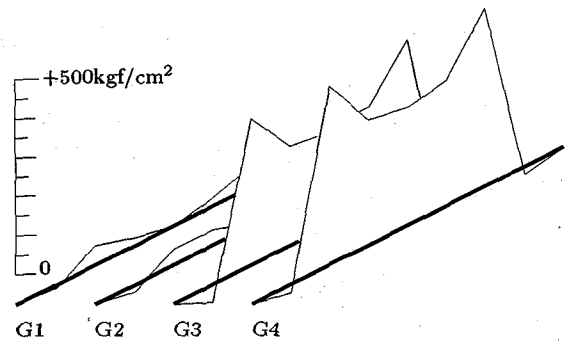
なお、交通を通しながら施工する場合にも許容応力度に対して25%の施工時割増しを考慮するかどうかは、考

慮すべき荷重や用いる計算法とともに今後の課題である。

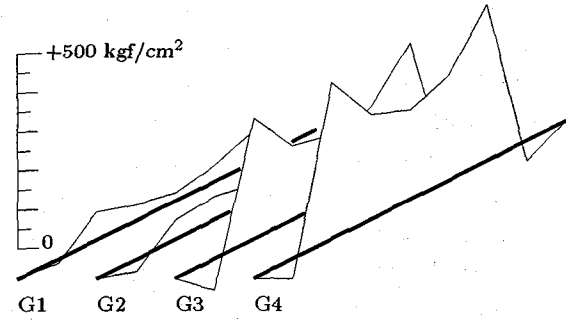
5 外ケーブルにより鋼桁上フランジに導入される応力の推定



(a) 横桁の影響を無視した設計時の計算結果



(b) 平面格子桁モデルによる計算結果



(c) 立体骨組みモデルによる計算結果

図-11: 外ケーブルを50tfで緊張した際に鋼桁上フランジに導入される応力度の比較（一次施工でG3、G4が非合成の状態の場合）

3.2で述べた外ケーブルの導入張力の検討では、各主桁の外ケーブルに同量の張力を導入する場合には、横桁や対傾構による各主桁間の力の分配は無く、各主桁がそれぞれ単独で挙動するものと考えた。

しかし実際には、各主桁の剛性の変化に伴って相対変位が生じ、これを横桁が拘束するために、導入張力により緩和される鋼桁上フランジの圧縮応力度が3.2で推定した値とは異なることが考えられる。

そこで、横桁の影響を考慮した場合の鋼桁上フランジの圧縮応力度の緩和効果を立体骨組みモデルを用いて計算し、これと3.2の計算結果および平面格子桁モデルによる計算結果と比較した。

図-11に一次施工中のG3、G4が非合成の場合の、外ケーブルを張力50tfで緊張した際の鋼桁上フランジの圧縮応力度の緩和効果の計算結果を示す。

表-5: 外ケーブルを張力50tfで緊張した時の、主桁上フランジの圧縮応力度の緩和効果の計算結果

	G1	G2	G3	G4
照査断面	SEC.4	SEC.4	SEC.4	SEC.4
横桁を無視した計算	11	8	332	367
平面格子桁モデル	-1	25	241	303
立体骨組みモデル	10	29	169	223

注：SEC.4は支間中央

単位:kgf/cm²

各主桁が独立して挙動すると仮定して横桁を無視して計算した場合が全体的に最も大きく、立体骨組みモデルによる計算結果が最も小さくなった。平面格子桁モデルによる計算結果はその中間である。支間中央断面の値で比べると表-5に示すように、とくに非合成側の内桁（G3）における差が著しく、横桁の影響を考えない場合の332kgf/cm²に対して立体骨組みモデルによる値は半分程度の169kgf/cm²となった。

今回のように床版を片側ずつ打ち替える場合は、合成側の主桁の曲げ剛性と、主桁、床版および横構が形成する準閉断面構造によるねじり剛性が、横桁を介して非合成状態の鋼桁の変位を拘束するため、外ケーブルの非合成側の鋼桁の上フランジの圧縮応力度を緩和する効果が減少することが分かった。

6 施工中の外ケーブルの張力変動

今回の施工では、構造変化や荷重変化に伴って外ケーブルの張力が初期導入張力の50tfに対して変動した場合に、外ケーブルの張力による鋼桁の応力度の緩和効果が減少することのないように、施工中に外ケーブルの張力が50tf以下になった場合にはセンターホールジャッキによって張力を50tfに補正した。

張力の補正をしない場合には作業効率の向上が期待できる。ここでは、張力の補正をしなかった場合の外ケーブルの張力の施工中の変動を推定した。

まず、車両載荷試験の結果を用いて外ケーブルの張力の変動量の実測値と立体骨組みモデルによる計算値の比較を行った。次に施工中の外ケーブルの張力の変動の実測値と計算値の比較を行い、さらに施工中に張力の補正を行わなかった場合の外ケーブルの張力の変動を計算で求め、張力の補正を行った場合と比較した。

6.1 車両載荷試験での外ケーブル張力の変化の実測値と計算値の比較

車両載荷試験による外ケーブル張力の変化の実測値と計算値を図-12に示す。20tfトラック二台の載荷による張

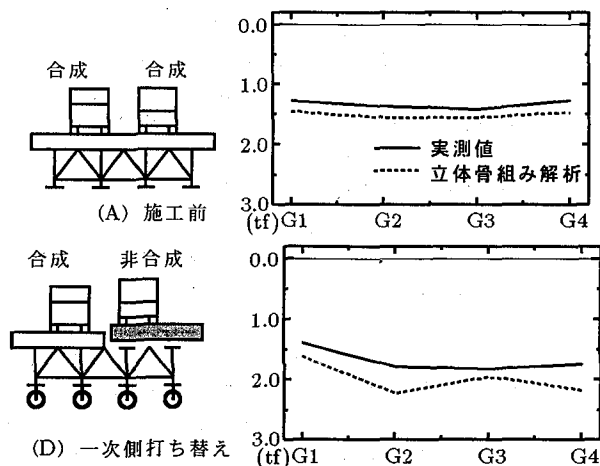


図-12: 車両載荷試験による外ケーブル張力の変化

力増加は最大2tf程度で、50tfの導入張力に対して4%程度の変化である。実測値より計算値がやや大きめとなった。

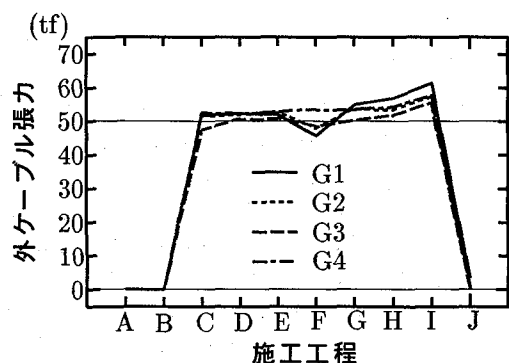


図-13: 外ケーブル張力の施工中の推移 (実測値)

6.2 施工中の外ケーブルの張力の変動

施工中の外ケーブル張力のひずみゲージによる実測値を図-13に示す。なお、この値は施工中の構造変化と死荷重によるものであり、交通荷重などの影響は含まれていない。

二次施工で床版を撤去した際 (F) に、死荷重の減少によって床版が撤去された側の外桁の外ケーブルの張力が6t減少した。これに対し、合成側の外桁の外ケーブルの張力はほとんど変化しなかった。なお、この直後には張力は50tfに補正されている。

また、その次に床版パネルを架設した際 (G) には、床版を架設した側の外桁の外ケーブルの張力が死荷重の増加によって5tf増加した。ただしこの場合は張力の補正は行っていない。外ケーブルの張力は、床版打ち替え終了後に舗装を設置した際 (I) に最も大きくなり、61tfであった。

次に、施工中に外ケーブルの張力が50tf以下になった時に張力を50tfに補正した場合としない場合での施工中の外ケーブルの張力の推移の計算結果を図-14および図-15に示す。

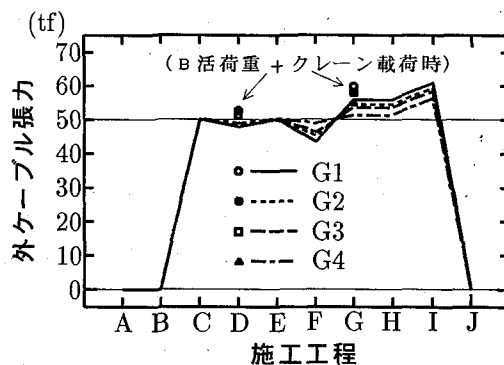


図-14: 外ケーブル張力の施工中の推移 (立体骨組みモデルによる計算値、張力の補正あり)

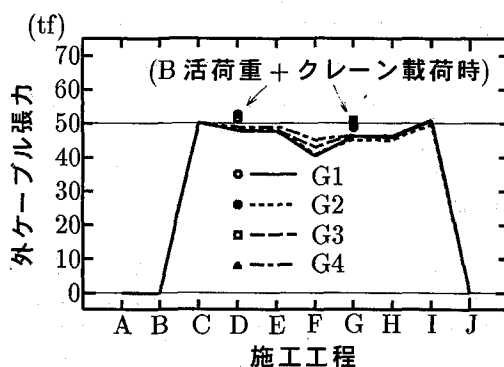


図-15: 外ケーブル張力の施工中の推移 (立体骨組みモデルによる計算値、張力の補正なし)

張力補正を行った場合の計算値 (図-14) は実測値 (図-13) と同様の傾向を示している。これに対して張力補正をしなかった場合の計算値 (図-15) は全般に低めに推移している。

表-6: 外ケーブルの張力の実測値と計算値の最大値と最小値

			G1	G2	G3	G4
実測値	張力調節有り	最小値	46	48	47	52
		最大値	61	57	55	58
計算値	張力調節有り	最小値	43	45	46	49
		最大値	61	59	58	56
	張力調節無し	最小値	40	41	43	45
		最大値	50	53	51	53

単位:tf

外ケーブルの張力の実測値および計算値の最大値と最小値を表-6に示す。施工中の外ケーブルの張力の変動に関して注意すべき点は、張力が最も増加した時でも外ケーブルそのものと定着部が強度的に安全であること (設計強度は65tf)、および床版打ち替え中に車両やクレーンが載った時に外ケーブルの張力が設定通り (50tf) に確保されていることの2点である。

施工中に張力補正を行った場合は、実測値も計算値も張力の最大値は61tfで、設計強度の65tf以下であった。また

最小値は実測値が46tf、計算値が43tfであるが、今回の工事では床版打ち替え中は50tfの張力が確保されるように補正された。

これに対して、張力補正を行わなかった場合は、張力の最大値は53tfと低めになり、設計強度に対して十分余裕がある。また張力の推移が全体的に低めになって最小値が40tfとなるものの、床版打ち替え中にB活荷重とクレーンが載った状態においては、外ケーブルの張力は設定値の50tfが確保されることが分かった。

6.3 まとめ

今回の施工では、施工中の外ケーブルの張力の変動は最大が61tf、最小が46tfであった。しかし床版打ち替え中は張力調整によって設定値の50tfが確保されていた。

これに対し、張力の調整を行わなかった場合の施工中の張力の変動を計算により推定した結果、張力は全体的に低めに推移し、最大値は53tf、最小値は40tfとなるが、最も厳しい構造状態および荷重状態に対しては設定値の50tfが確保されることが分かった。

7 結論

外ケーブル工法が交通を通しながら合成桁橋の床版打ち替えを行う場合でも有効であることを確認するために行われた今回の試験施工において、各施工段階における構造特性について現地測定の結果の分析と立体骨組みモデルによる数値解析によって検討を行った。主な結果のまとめを示す。

1. 今回の床版の打ち替え工事は、施工中に床版を撤去された鋼桁が床版やクレーン等の施工用資機材の重量あるいは交通荷重の影響により、鋼桁上フランジの応力が超過するのを防ぐために、各主桁の外ケーブルにそれぞれ50tfの張力を導入して行われた。

施工中の各段階の鋼桁の応力状態を確認するために行われた20tfトラック2台による載荷試験の結果、片側の幅員の床版が非合成状態となった場合の荷重車による鋼桁の上フランジの圧縮応力度の増加は300kgf/cm²程度であった。

今回は一般車両や工事用クレーンが載荷した状態での測定は行われなかったため、実際の交通や施工の状態に近いと考えられる、上で述べた載荷試験と同じ荷重と構造状態に対して、死荷重応力および荷重車による応力の合計を計算により推定した。その結果、これらの合計の圧縮応力度は外ケーブルを使用して施工した場合はおよそ1400~1600kgf/cm²となり、最大で許容応力度の約7割強であった。

また、上で述べた車両載荷試験と同じ構造状態に対して、B活荷重と工事用クレーンを載荷した場合の、死荷重の影響も考慮した鋼桁上フランジの応力度の合計を計算で推定した結果、外ケーブルを使用して施工した場合はおよそ1600~1800kgf/cm²となり、許容応力度の8割強であった。

2. 外ケーブルへの張力導入による鋼桁の上フランジの圧縮応力の緩和効果を数値計算により検討した。

その結果、今回のように床版を片側ずつ打ち替える場合は、合成側の主桁の曲げ剛性と、鋼桁、床版および横桁が形成する準閉断面構造のねじれ剛性が、横桁を介して非合成側の桁の変位を拘束するため、外ケーブルの導入張力による鋼桁上フランジの圧縮応力の緩和効果が減少することがわかった。

3. 外ケーブル張力の施工中の変動について検討した。検討は施工中の実測値と数値計算によって行った。

今回の施工では施工中の外ケーブルの張力の実測値は最大61tfであり、定着部の設計強度(65tf)以下であった。また最小値は46tfであり、床版打ち替え中は50tfを確保するための張力の補正が行われた。

これに対し、張力の補正を行わなかった場合の外ケーブルの張力の変動を計算により求めると、施工中の張力は全体的に低めに推移し、最大値は53tf、最小値は40tfとなった。しかし、最も厳しい構造状態および荷重状態においては初期導入張力の50tfが確保されていることが分かった。

8 おわりに

今回の検討によって、外ケーブル工法を用いて合成桁の床版を打ち替える場合の施工中の鋼桁の応力状態の推移、外ケーブルによる鋼桁の応力緩和の効果、施工中の外ケーブルの張力の変動など、施工中の構造の挙動をおおよそ把握することができた。今後の参考になれば幸いである。ただし、今回の検討は一施工例に対してのみ行ったものであり、さらに検討が進むことが期待される。

なお、今回の試験施工では許容応力度に対して25%の施工時割増しを考慮しているが、交通を通しながら施工する場合にもこの割増しを考慮するかどうかは、考慮すべき荷重や用いる計算法とともに今後の課題である。

最後に、この検討に際してお世話になった建設省山形工事事務所および(株)長大の皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 中村、丸山、高田、原田：外ケーブルによる鋼・コンクリート合成桁の補強効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1 (1994)
- [2] 西川、神田、上阪、高田、藤原：外ケーブルを用いた合成げた床版の打換え工法、第5回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集 (1996.6)
- [3] 宮崎、神田、藤原「外ケーブルを用いた合成げた床版の打ち替え工法」の定着部に関する研究、土木学会51回年次学術講演会、第1部 (1996.9)

(1996年9月6日受付)