

(42) 第二東名高速道路天竜川橋の実物大模型試験結果報告 その1

日本道路公団 静岡建設局 浜松工事事務所 正会員 渡辺 将之
 日本道路公団 静岡建設局 構造技術課 正会員 福永 靖雄
 住友建設・極東工業・コーアツ工業JV 正会員 加藤 大典
 住友建設株式会社 PC設計部 正会員○小田切 隆幸

1. はじめに

第二東名高速道路天竜川橋は、張出し架設工法における架設鋼材を外ケーブルとした全外ケーブル橋である。全外ケーブル橋は、これまでに固定式支保工で施工された例が多いが、近年PC橋の代表的な施工方法である張出し架設工法への適用が注目されており、現在では数橋の橋梁が施工中である。張出架設の全外ケーブル橋では、大容量外ケーブルを桁内に設けた定着突起により緊張することから、定着突起は橋梁構造的に能上最も重要な部位の一つとなる。しかしながら、このような定着突起の施工例は少なく、また、設計に関する基準も明確でない。従って、本橋では部材厚の薄い最も危険な断面においてFEM解析を行い、定着突起の形状や補強筋量を決定している。本論は、外ケーブルを緊張した場合の主桁への影響を把握すること、検討した定着突起の形状および補強筋の妥当性を確認することを目的として行った実物大模型試験の結果報告である。

2. 試験概要

2.1 試験目的

張出し架設工法において、外ケーブルの定着突起は緊張力を主桁に伝達させる重要な部材の一つである。また、大容量の定着システム(19S15.2)を必要とし、工程上若材齢(3日)で緊張を行うことになる。そのためFEM解析により緊張力が主桁に及ぼす影響およびその補強方法の検討を行った。その結果、主桁および定着突起には局部的に大きな引張力が発生していた。従って、実物大の供試体を製作して、主桁および定着突起の安全性を検証する試験を行うこととした。

確認項目は以下の2ステップでの安全性能の検証である。若材齢時の目標強度は、定着工法により規定されている最低のコンクリート強度とし、終局時の目標コンクリート強度は設計基準強度以上とした。

① 0.70Pu 緊張試験

- ・若材齢でのプレストレス導入時の検証
- ・目標コンクリート強度: 31N/mm²
- ・緊張荷重: 1本あたり 3500kN (=0.70Pu)

② 0.86Pu 緊張試験

- ・終局時での検証
- ・目標コンクリート強度: 40N/mm²
- ・緊張荷重: 1本あたり 4300kN (=0.86Pu)

2.2 試験供試体

図-1 に供試体概要図を示す。供試体は試験結果を正確に実施工に反映させるため実物大断面で行う。対象断面の寸法は、床版幅17140mm、桁高2400mm、ウェブ厚450mmであり、桁高が最小で部材厚が最も薄い断面である。これは、事前に行ったFEM解析結果より、最も応力的に厳しい断面であることから決定した。ま

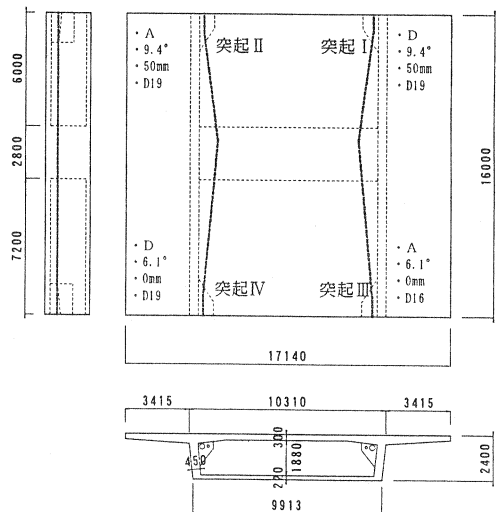


図-1 供試体概要図

た、橋軸方向の長さは、外ケーブルの角度変化やFEM解析の結果より16000mmとした。支持条件は、桁下に製作した反力台と幅2800mmの横桁部をゲビンデ鋼棒で剛結しており、試験は横桁部を中心に左右に張出した状態で行った。

表-1 に試験パラメーター一覧を示す。試験パラメーターは定着工法の相違、水平方向の角度変化、定着面の小口からの距離および補強筋の径であり、それぞれを組み合わせて4個の定着突起を製作した。定着工法は実施工で使用するディビダーク工法とアンダーソン工法の2種類である。水平方向の角度変化は、実構造における最大偏向角度と最小偏向角度をほぼ満足する角度として9.4°と6.1°とした。定着突起の主桁小口面からの距離は、打ち継ぎ目の処理方法や施工性およびFEM解析の結果から0mmと50mmの2種類とした。補強筋の径は、FEM解析より算出した補強筋径であるD16と安全側の配筋としたD19である。なお、4つの定着突起の内、突起Iを基本モデルとした。また、本橋では定着突起内に次ブロックで定着する外ケーブルが直線的に通過するため、供試体においても通過管を設置した。主桁の配筋や床版横締め等の構造細目は実構造物と同様とした。写真-1 に供試体状況を示す。

表-1 試験パラメーター一覧

	定着方法	水平方向角度変化	小口からの距離 (mm)	補強筋の径
突起I	ディビダーク	9.4°	50	D19
突起II	アンダーソン	9.4°	50	D19
突起III	アンダーソン	6.1°	0	D16
突起IV	ディビダーク	6.1°	0	D19

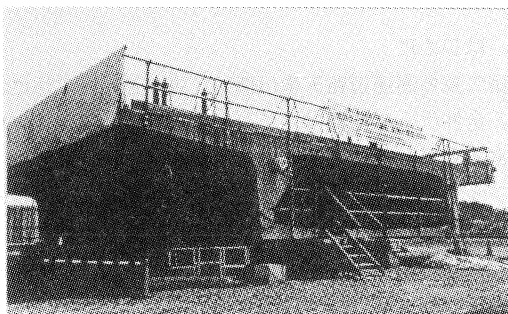


写真-1 供試体状況

2. 3 定着突起形状の決定

定着突起の設計手順を図-2 に示す。まず、各定着工法に規定されている縁端距離やジャッキの大きさ等から断面形状を決定し、外ケーブルの最小曲げ半径から橋軸方向の長さを決定する。次に、せん断力の照査を行って概略の補強筋量を算出し、定着突起内に補強筋が配置可能か確認する。次に、実際のケーブル配置から定着突起と外ケーブルとの取り合いを検討する。最後に、FEM解析により着目点の引張応力度を検証し、補強筋量および鉄筋配置を決定する。なお、着目点に関しては2.4 に述べる。補強筋量を決定する際には、図-3 に示した各界面に生じる引張力とせん断力に対して検討した。すなわち、FEM解析によって得られた各界面の応力に面積を乗じて引張力とせん断力を算出し、引張力は鉄筋のみにより負担させ、せん断力は偏向力を考慮したせん断伝達耐力により照査し決定した。なお、補強筋はSD345とし、鉄筋の引張応力度の制限値は、引張力照査時に120N/mm²、せん断照査時は350N/mm²とした。図-4 に定着突起の形状と鉄筋配置を示す。

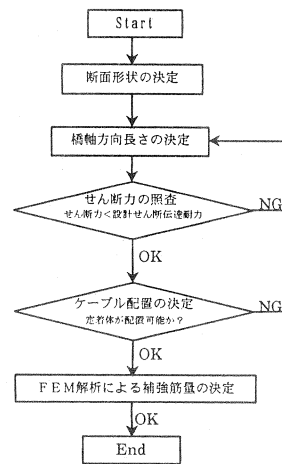


図-2 定着突起の設計手順

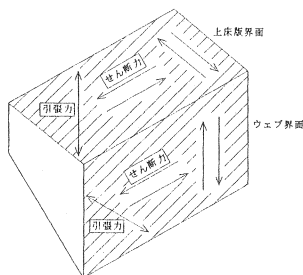


図-3 各界面に働く力

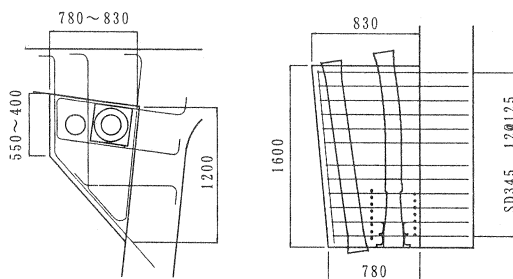


図-4 定着突起の寸法および配筋状況

2. 4 着目点の選定

定着突起の設計を行った際の線形FEM結果を図-5に示す。解析の結果、図中に示す①～③の位置、①定着突起下方のウェブ内側、②定着突起側面および③定着体近傍の3点においてコンクリートの設計引張強度程度の引張主応力が生じていた。こ

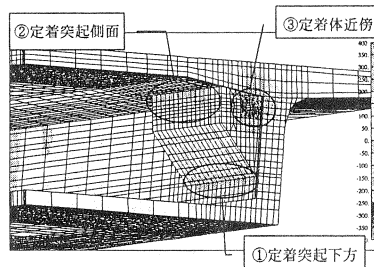


図-5 引張主応力分布

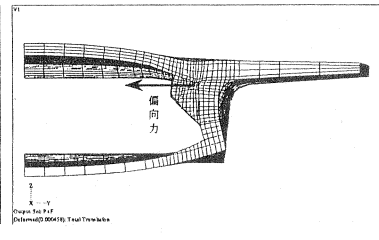


図-6 変形概要図

これは、定着突起内に働く外ケーブルの偏向力により、図-6の変形概要図に示すような変形（ウェブが内側に反る）が生じるためである。従って、本試験においても、上記の3点に着目して試験を行った。

3. 0.70Pu 緊張試験結果

3. 1 損傷状況

0.70Pu 緊張試験時のコンクリート強度は $\sigma_c=31.6\text{N/mm}^2$ 、弾性係数は $2.43\times 10^4\text{N/mm}^2$ であった。試験の結果、各突起で着目していた①定着突起下方および②定着突起側面には、0.70Puまで載荷してもひび割れの発生は観察されなかった。また、試験終了時に定着体（ディビダーク工法：リブキャストアンカー、アンダーソン工法：アンカープレート）近傍を観察したところ、突起小口面において定着体とコンクリートと縁切りが確認された。しかしながら、縁切りに起因するひび割れの発生は認められず、定着体近傍は健全であった。

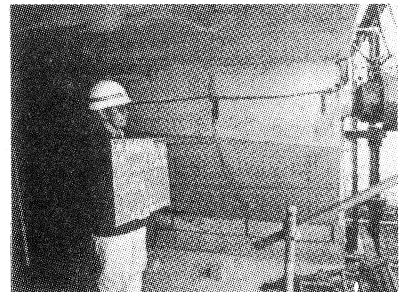


写真-2 0.70Pu 緊張試験状況

また、本供試体は全長16000mm程度の外ケーブルを両引きで緊張するため、定着を行う場合はセットロスの影響が大きいと考えられる。定着後の緊張力の減少量を算出すると約10%程度であった。従って、本試験では危険側の検証を行うために、セットロス調整および緊張力解放用の治具を製作し、これを用いて0.70Pu 緊張試験終了後にセットロスを解消した。

この時点で、外ケーブルの定着位置には0.70Pu (3500kN)の緊張力が作用していることになる。その状態で0.86Pu 緊張試験可能なコンクリート強度の発現まで約7日間放置した。持続載荷期間中、定期的に着目点の損傷状況を観察したが、ひび割れの発生は認められなかった。

3. 2 着目点のコンクリートひずみ性状

図-7～8に着目点のひずみ計測位置とコンクリートひずみ履歴を示す。なお、図中のひずみは正值が引張ひずみ、負値が圧縮ひずみを示す。各定着突起の試験結果は、パラメータによる差がほとんどなかった。①～③の着目点のひずみはほぼ線形に増加しており、引張ひずみは最大で100 μ 、応力に換算すると 2.4N/mm^2 程度であった。また、定着体近傍に貼り付けたゲージのひずみ履歴 (CTM2, CTM4) は、載荷荷重2000kN程度において勾配が変化していた。

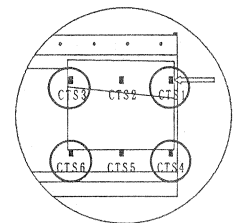
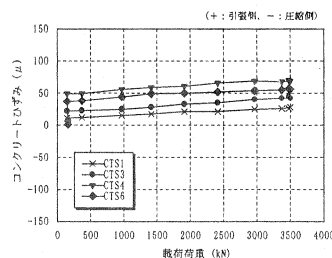


図-7 着目点①および②のコンクリートひずみ履歴

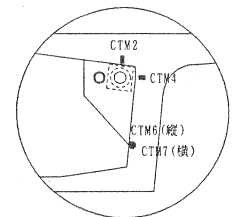
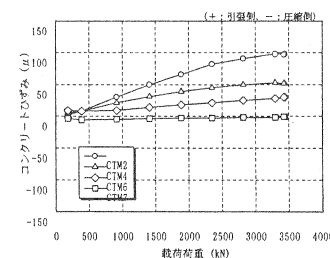


図-8 着目点③のコンクリートひずみ履歴

従って、この時点で定着体とコンクリートの縁切りが生じたものと考えられる。以上から、定着体近傍の主桁および定着突起には有害なひび割れは発生していないと考えられる。

3. 3 着目点の鉄筋ひずみ性状

図-9 にコンクリートひずみの着目点に対応する位置の鉄筋ひずみ履歴を示す。着目点①および②の鉄筋ひずみは、コンクリートと同様にほぼ線形に増加しており、引張ひずみの最大値は 50μ 程度、応力に換算して $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であった。また、着目点③に関しては、全て圧縮側に推移していた。以上から、 $0.70P_u$ 緊張試験の範囲内では、鉄筋ひずみの履歴からもひび割れ等の損傷がないことが確認できた。

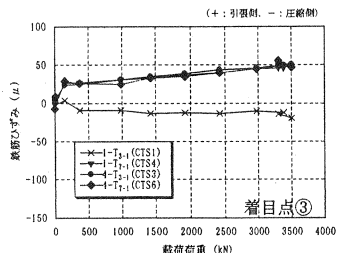
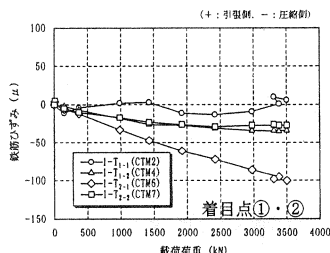


図-9 コンクリートひずみに対応する鉄筋ひずみ履歴

着目点①および②の鉄筋ひずみは、コンクリートと同様にほぼ線形に増加しており、引張ひずみの最大値は 50μ 程度、応力に換算して $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であった。また、着目点③に関しては、全て圧縮側に推移していた。以上から、 $0.70P_u$ 緊張試験の範囲内では、鉄筋ひずみの履歴からもひび割れ等の損傷がないことが確認できた。

3. 4 着目点における実験値と解析値の比較

図-10~11 に着目点のコンクリート応力と FEM 解析結果の比較を示す。図中の応力は、試験で得られたひずみ値に弾性係数を乗じて算出した。各突起の着目点①および②では、全ての定着突起において実験値が解析値よりも小さく、数値的な開きはあるものの応力履歴の傾向は類似していた。従って、本試験の範囲内において着目点の FEM 解析結果は、実験結果を概ね再現できるものと考えられる。

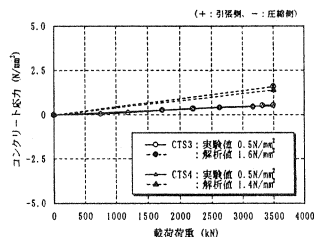
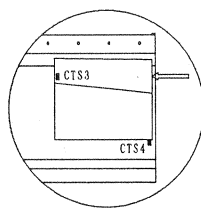


図-10 着目点①および②の比較

着目点③においては、実験値が解析値より小さくなる傾向にあり、最大で $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の差が生じていた。この要因としては、前述した定着体の縁切れが考えられる。すなわち、右図の応力履歴において 1500kN 前後で勾配が変化していることから、定着体とコンクリートの間で付着が切れ、その結果、緊張力は小口面ではなく定着体 (リブキャストアンカーまたはアンカープレート) の裏側から伝達され、小口面には応力が伝達しなかったものと考えられる。FEM 解析において、定着体は鋼製材料として取り扱っているが、コンクリートと定着体の界面における付着等の挙動は考慮していない。以上の要因から、実験値と解析値の差異が生じたものと推測される。

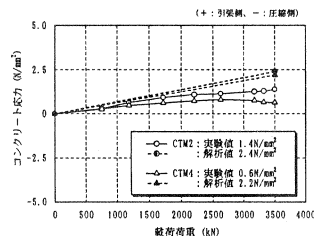
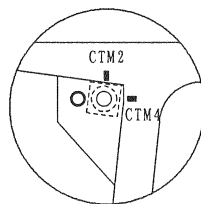


図-11 着目点③の比較

3. 4 小口断面の変形

図-12 に突起 I 断面における変形図を示す。小口断面の変形量は最大でも 1mm 以下と微小であり、また、突起 I ~ 突起 IV の変形状態は類似していた。実験値と FEM 解析値は、張出し床版先端部において若干の数値的な差があるものの、ウェブや下床版等の変形はほぼ一致しており概ね同様の結果であると評価できる。また、実験からも前述したウェブの変形、すなわち外ケーブルの偏向力 (突起内腹圧力) によりウェブが内側に反る変形を確認することができた。以上から、FEM 解析は試験供試体の変形状態を再現しているものと考えられる。

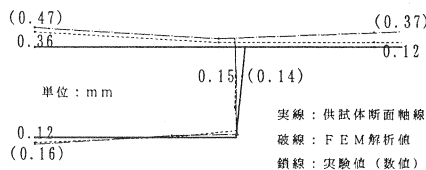


図-12 小口面の変形状態

3. 5 上床版応力度分布

図-13 に上床版橋軸方向応力度分布の解析結果を、図-14 にひずみ計測位置を示す。また、図-15~17 に各測点の応力度履歴とその解析結果を示す。なお、図中の数値は、正值が引張応力、負値が圧縮応力である。析の結果、張出し床版先端部の小口から 3500mm 程度までは、橋軸方向に引張応力 (図中○部分) が生じており、張出し床版先端には圧縮応力が伝達しにくいことが確認できた。また、試験結果を比較すると、小口から 1200mm の①断面では張出し床版先端の CH1-1 および床版支間中央の CH1-5 にはほとんど応力が伝達

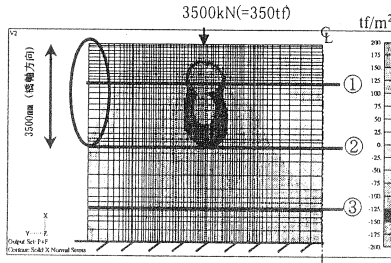


図-13 上床版橋軸方向応力度分布

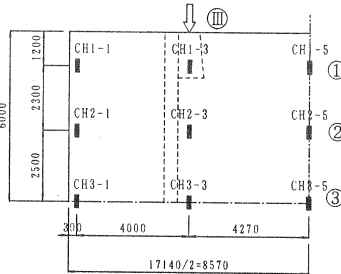


図-14 ひずみ計測位置

されず、定着突起真上の CH1-3 のみ緊張力が伝達していた。図中に示す棒解析値 (設計圧縮応力度 0.8N/mm^2) と比較しても張出し床版先端と床版支間中央では設計圧縮応力度に達していないことが確認できる。なお、棒解析値は緊張力の影響のみを考慮したものである。また、FEM解析結果と比較すると、3500kN 程度で若干の差異があるものの、解析値は実験値を精度良く評価していた。小口から 3500mm (1ブロック長程度) の位置の②断面では、張出し床版先端部 CH2-1 に依然として緊張力が伝わっていないことが確認できたが、張出し床版先端以外では設計圧縮応力度を超えていた。小口から 6000mm の位置の③断面においては、張出し床版先端の CH3-1 にも緊張力が伝達しており、ウェブ真上および床版支間中央の圧縮応力レベルはほぼ同等であった。また、CH-3 の実験値は、若干棒解析値に達していないものの、FEM解析値とほぼ類似した応力履歴を示していた。以上から、本試験の範囲内で、張出し床版先端に設計圧縮応力度が伝達するのは小口より 6000mm 以上の断面であることが明確となった。また、事前に行った FEM解析結果と実験結果は、ゲージの位置と解析における要素位置の違いにより多少の数値的な開きは見受けられるが、応力履歴の傾向はほぼ一致しており、概ね同様の結果であると評価できる。従って、FEM解析は試験供試体の応力分布性状をほぼ再現していると考えられる。

4. 0.86Pu 緊張試験結果

4. 1 損傷状況

0.86Pu 緊張試験は、持続荷重である 0.70Pu の緊張力を一旦除荷し、0kN から試験を行った。試験の結果、載荷荷重 2500kN~3000kN において、前述した着目点①および②に微細なひび割れが発生した。その後 0.86Pu (4300kN) まで緊張したところ、初期に発生したひび割れの幅および長さが進展するよりも、本数が増加していた。また、補強筋径が D16 である突起Ⅲにおいてひび割れ本数が若干多かったものの、各突起のひび割れ性状は類似しており、これらのひび割れ幅は最大で 0.04mm 程度と微小であった。図-16 にひび割れ性状を示す。

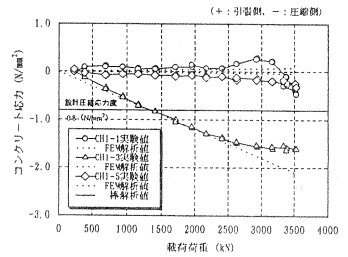


図-15 ①断面計測点応力度

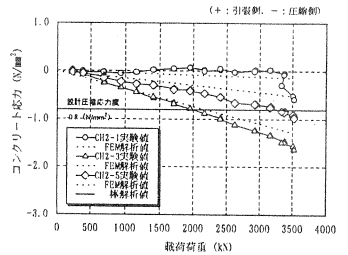


図-16 ②断面計測点応力度

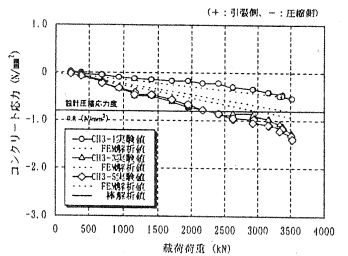


図-17 ③断面計測点応力度

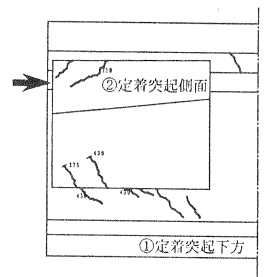


図-16 ひび割れ性状

4. 2 着目点におけるコンクリートおよび鉄筋のひずみ性状

図-17~19 に着目点①および②近傍における、コンクリートひずみ性状と鉄筋ひずみ性状を示す。両ひずみは荷重の増加に伴ってほぼ線形的に増加しており、応力履歴および数値的にひび割れの発生は確認できない。しかしながら、試験においてはひび割れが発生していることから、続荷重載荷中の応力変動に起因する目視できない微細なひび割れの発生やコンクリートの乾燥収縮が要因であると推測される。

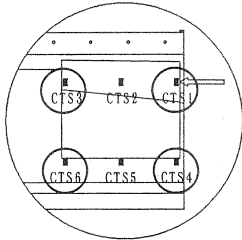


図-17 ひずみ計測位置

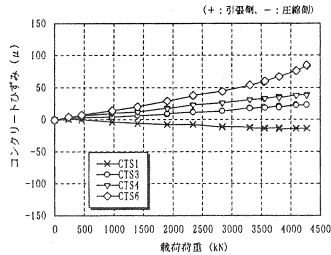


図-18 コンクリートひずみ性状

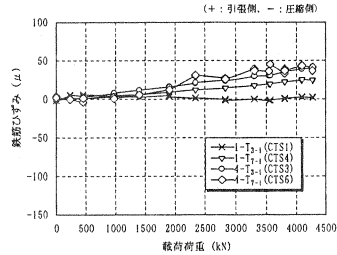


図-19 鉄筋ひずみ性状

5. まとめ

全外ケーブル橋における定着突起およびその近傍の主桁の耐荷性能を検証した実物大模型試験により、以下の知見が明らかとなった。

0.70Pu 緊張試験時

1. 対象とした外ケーブルの 0.7Pu (3500kN) 緊張時には、全ての定着突起において、その表面および定着突起下側の主桁 (ウェブ内側) にひび割れは発生しなかった。また、本橋の範囲内において検討した定着突起形状およびその補強方法の安全性が確認できた。
2. 外ケーブル定着面と主桁小口面との距離に関わらず、定着体近傍には有害なひび割れは発生しなかった。
3. 各定着体 (リブキャストアンカーおよびアンカープレート) の定着面では、緊張荷重時において定着体とコンクリートの縁切りが生じた。しかしながら、縁切りに起因するひび割れは発生せず、定着体近傍は健全であることが確認できた。
4. 定着突起表面および定着突起下方のウェブ内側の応力性状は、安全側ではあるが FEM 解析において概ね再現できることが確認された。また、定着面近傍に関しては定着体とコンクリートの縁切りの影響により、解析値と実験値に若干の差異が生じた。
5. 張出し床版先端部には設計圧縮応力度が伝達しにくいことが明らかとなった。また、解析値と実験値の応力履歴の傾向が類似していることから、FEM 解析により断面上縁の応力分布性状を概ね把握できるものと考えられる。

0.86Pu 緊張試験時

6. 持続荷重を一旦解放し、0kN から 4300kN (=0.86Pu) まで緊張をしたところ 3500kN (=0.70Pu) 以前において、各突起の定着突起下方ウェブ内側と定着突起側面に微細なひび割れが発生した。また、ひび割れは個々が進展するよりも本数が増加する傾向にあり、4300kN (=0.86Pu) 時のひび割れ幅は最大で 0.04mm 程度と微小であった。これらのひび割れは、持続載荷中に生じたと推測される微細なひび割れや乾燥収縮の影響により発生したと考えられるが、有害なひび割れではなく、主桁および定着突起の構造性能上問題ないと思われる。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、平成 8 年 12 月
- 2) (社) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工基準 (案)、平成 8 年 3 月