

小さい曲率半径を有する波形鋼板ウェブPC橋の実橋計測

オリエンタル建設(株) 正会員 ○ 渡辺 綾子
 国土交通省 東北地方整備局 長井ダム工事事務所 佐藤 徳男
 (独) 土木研究所 構造物研究グループ 橋梁構造チーム 麓 興一郎
 オリエンタル建設(株) 正会員 神山 正成

1. はじめに

長井ダム11号橋は、A1橋台からP1-P2径間中央付近までの曲率半径が $R=140\text{m}$ であり、これまで施工された波形鋼板ウェブPC橋の中で最も小さい。そのため、本橋では、平面骨組解析および立体骨組解析により、曲線の影響を評価した設計を実施した。しかし、平面線形の影響によって発生する付加的な応力を評価するためには、上床版、下床版、波形鋼板ウェブの形状および材料特性をより忠実にモデル化できる3次元FEM解析(以下、FEM解析)が有効だと考えられる。そこで、波形鋼板ウェブを有する曲線橋における特有の発生応力等を把握するため、FEM解析を行ったところ、最大張出し時において、柱頭部付近の下床版の一部に、平面および立体骨組解析では評価できない局部圧縮応力が発生する解析結果を得た。

以上のことから、本橋梁の張出し施工期間中、経時的に床版応力度の実橋計測を実施し、各施工段階における応力度の変動量を把握することによって、施工時の安全性を確認することとした。さらに、FEM解析および骨組解析における各施工段階の解析値を抽出し、本実橋計測において計測された実測値との比較を行うことによって、それぞれの解析手法の妥当性を照査した。以下にこれらの概要を示す。

2. 計測概要

2.1 計測実施橋梁

計測を実施した長井ダム11号橋の橋梁概要を以下に示す。また、本橋の完成時の全景を写真-1に示す。

橋梁形式：3径間連続ラーメン波形鋼板ウェブPC箱桁橋
 工期：平成14年3月23日～平成16年11月30日
 橋長：165.200m
 支間割：45.900m+72.000m+45.900m
 有効幅員：5.000m
 活荷重：A活荷重

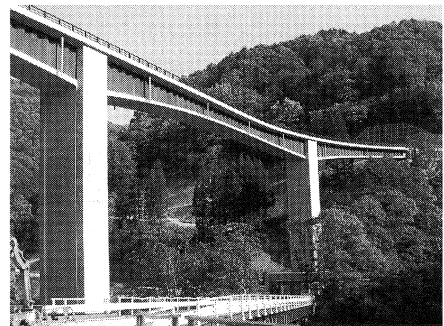


写真-1 長井ダム11号橋全景

2.2 計測項目

本計測は、張出し施工時の主桁自重やワーゲン荷重により柱頭部付近の下床版に集中すると考えられる圧縮応力に着目し、これらを分析するために必要となる床版コンクリートのひずみ計測を基本に実施することとした。また、計測は長期におよぶため、コンクリートの経時変化の影響(クリープ、乾燥収縮等)により、計測値と解析値の比較が困難となることが考えられたため、これらを把握するための計測も実施した。本計測に使用した測定機器の一覧を表-1に示す。

表-1 計測項目

計測項目	使用センサー
コンクリートのひずみ	埋込型ひずみ計
	鉄筋計
コンクリートの有効応力	有効応力計
コンクリートの乾燥収縮ひずみ	無応力計
コンクリート温度、外気温	熱電対

2. 3 計測位置

図-1に計測位置付近の側面図を、図-2に同じく平面図を示す。計測はA断面、B断面およびC断面の3断面で行った。A断面は、FEM解析において下床版に局部的な圧縮応力度が確認された部位付近の断面である。C断面は、P1橋脚に対してA断面と対称となる位置である。また、B断面は標準的な応力状態にある断面として選定した。

次に、各断面での計測機器設置位置を図-3に示す。計測機器は、基本的に断面中心位置の計測を目的として配置することとし、上下床版内に埋込型ひずみ計および鉄筋計を設置した。また、下床版については、無応力計、有効応力計および熱電対も同様に設置し、これらの計測値から経時的なひずみの変動等を把握することとした。また、上下床版のウェブ付根位置付近に、鉄筋計を左右対称に設置し、平面曲線の内側と外側のひずみ差を把握することによって、曲線橋特有の発生応力度について検証した。

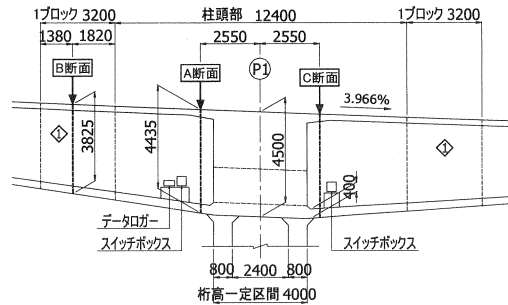


図-1 計測位置側面図

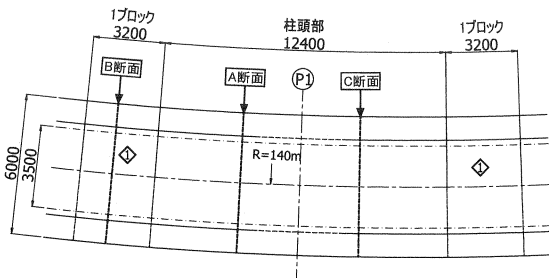


図-2 計測位置平面図

2. 4 計測方法

各断面のコンクリート打設前に、埋込型ひずみ計、鉄筋計、有効応力計および無応力計を上下床版の所定の位置にセットした。上下床版の計測機器設置状況を写真-2に示す。打設時には、センサー等に損傷を与えないよう留意しながら締め固めを行った。このとき同時に、コンクリート圧縮強度および弾性係数の経時変化測定用に円柱供試体φ100×200mmを12本(材齢3日, 7日, 28日, 91日, 各3本)採取し、所定の材齢まで養生を行った。

埋込型ひずみ計および鉄筋計により、各施工段階でのコンクリートのひずみを測定し、応力度を推定する。計測したひずみからコンクリートの応力度を推定するには、弾性係数が必要であるため、前述のコンクリート打設時に採取した円柱供試体により、所定の材齢においてコンクリートの弾性係数測定を行った。張出し施工時における計測ステップの基本は、1 ブロック施工あたり、1)コンクリート打設後、2)PC 鋼材緊張後、3)ワーゲン設置後とした。なお、上記3回の計測間は3時間ごとのインターバル計測とした。

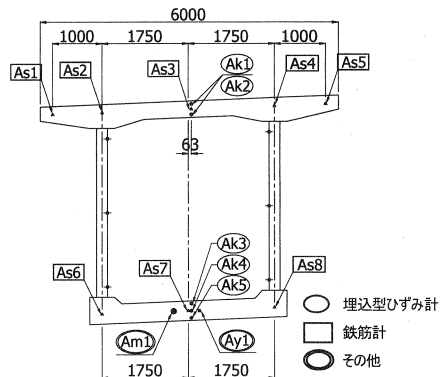


図-3 計測機器配置図 (A断面)

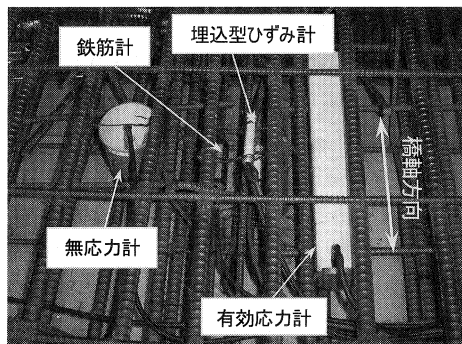


写真-2 下床版計測機器設置状況

3. 計測結果

3. 1 計測値と解析値の比較方法

埋込型ひずみ計および鉄筋計はコンクリートに生じる全

ひずみを計測する。計測された全ひずみには、一定応力下でも経時的に増加するひずみ（クリープひずみ、乾燥収縮ひずみ）が含まれている。一方解析値は、張出し施工中においては、応力の変化をとまなう弾性ひずみのみを評価した応力度を算出している。よって、解析値と実測値を同等な条件で比較するために、埋込型ひずみ計および鉄筋計の計測ひずみから、応力の変化をとまなわないクリープひずみおよび乾燥収縮ひずみを差し引いたものを計測値として評価することとした。乾燥収縮ひずみは、体積表面積比 (V/S) や相対湿度等の環境条件に大きく左右されるため¹⁾、実橋に設置した無応力計の計測値を乾燥収縮ひずみとして適用した。一方、クリープひずみは、埋設した計測器から直接その値を計測することができないため、式(1)²⁾により算出し適用することとした。なお、 σ_c および ϕ は設計値を使用した。

$$\epsilon_{cc} = \sigma_c / E_c \times \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

- σ_c : 作用する圧縮応力度
- E_c : 載荷時材齢のヤング係数
- ϕ : クリープ係数 (道路橋示方書の予測式²⁾を採用)

3. 2 断面中心位置での床版応力度の検計

各断面の応力度履歴の結果から、図-4にA断面上床版、図-5にA断面下床版を例として示す。計測値および解析値は1ブロックコンクリート打設前をゼロとしたものである。表示した埋込型ひずみ計および鉄筋計の値 (●, △) は、断面中心位置に配置した各計測器の検出値から経時変化分を差し引いた値 (以下、計測値) である。図中の実線はFEM解析値を示し、点線は平面骨組解析値を示している。

図-4によれば、上床版コンクリート応力度について、FEM解析値と平面骨組解析値にほとんど差異はない。また、埋込型ひずみ計の計測値 (●) は両解析値と概ね一致し、増減傾向もほぼ等しい。また、鉄筋計の計測値 (△) は埋込型ひずみ計の値よりも若干小さい値を示す傾向にあったが、変化量はほぼ同様の傾向を示していることから、鉄筋計と埋込型ひずみ計の計測値は同等だと評価できる。

図-5より、下床版コンクリート応力度のFEM解析値と平面骨組解析値を比較する。冬期休止前までの比較的発生応力度が小さい期間ではほとんど差異は見られない。しかし、冬期休止明けから最大張出し時にかけて、FEM解析値が平面骨組解析値よりも小さい値を示している。これは、解析手法の違いにより施工時の応力度算出方法が若干異なることに起因すると考えられる。発生応力度が大きくなるにつれ、この違いが解析値に与える影響も大きくなると考えられ、このことにより比較的発生応力度の増加傾向が大きくなる冬期休止明けからの施工段階において、それぞれの解析手法によって算出された解析値に差異が生じたものと推察される。また、計測値に関して、最大張出し時付近における埋込型ひずみ計の計測値 (●) は、解析値と比べて若干大きな値を示し、有効応力計の計測値 (□) は解析値よりも小さい値を示した。しかし、いずれの計測値についても、各施工段階における応力度の変化量の傾向は両解析値と概ね同等であり、平面

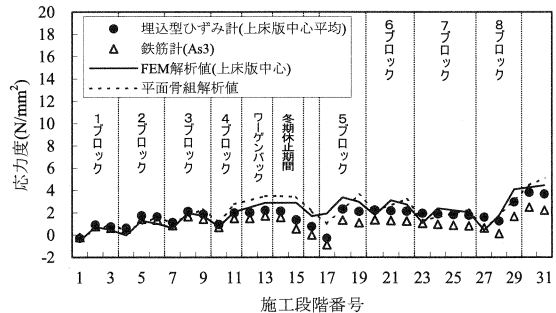


図-4 上床版応力度の推移 (A断面断面中心位置)

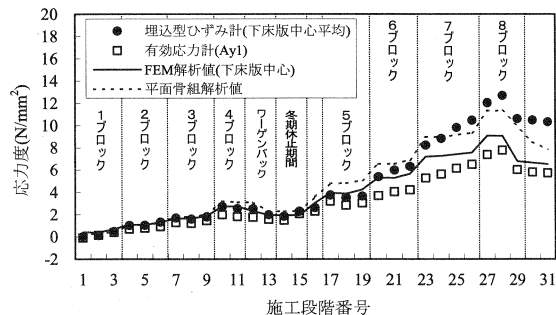


図-5 下床版応力度の推移 (A断面断面中心位置)

骨組解析およびFEM解析ともに解析手法の妥当性が確認できたと判断できる。

3. 3 最大圧縮応力度および平面線形の影響に関する検討

図-6より、FEM解析によって局部圧縮応力が確認された箇所に関して検討する。鉄筋計As8は、最大張出し時のFEM解析で、最大圧縮応力度が確認された位置を想定した測点であるが、配筋や施工上の制約から、その位置が解析値抽出位置と若干ずれている。そこで、太実線で示した最大圧縮応力度発生位置におけるFEM解析値と、細実線で示した鉄筋計As8設置位置のFEM解析値を比較したところ、制限値(20N/mm²)は下回るもの大きく異なる値を示し、最大張出し時においては約1.4倍の値となった。また、鉄筋計As8の計測値

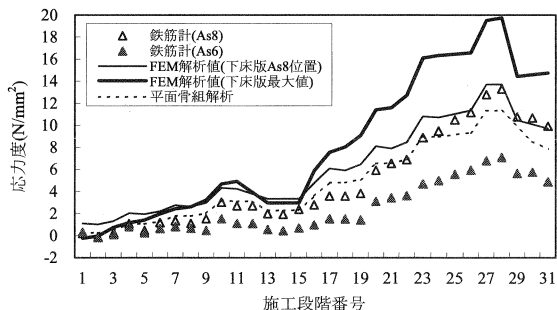


図-6 最大圧縮応力度発生位置の応力度推移

(△)と、As8設置位置のFEM解析値を比較すると、ほぼ同等の値を示している。以上より、計測値と同位置のFEM解析値がよい整合性を示していることから、最大圧縮応力度発生位置のFEM解析値も妥当な値だと考えられる。よって、当初懸念された局部圧縮応力に対して、施工時の安全性は確認できたと判断した。

ここで、図-6において点線で示した平面骨組解析値は、最大圧縮応力度発生位置のFEM解析値と比較すると、冬期休止前の張出し施工時においては概ね等しい値を示している。しかし、張出し長が長くなるにつれ差異が大きくなる傾向が見られ、最大張出し時における平面骨組解析値は、FEM解析値の60%程度となった。この相違について、以下のように考える。本橋のように曲率半径の小さい平面線形を有する波型鋼板ウェブ橋では、主桁の自重やワーゲン等の架設荷重による変形が主桁の軸線に対して偏心していることにより、大きなねじりモーメントが作用し、そり変形やねじり変形が生じることが予想される。これらの変形によって、床版に付加的な軸方向応力度が発生し、断面内で応力差が生じることが考えられるが、平面骨組解析では主桁断面を梁としてモデル化するため、そり応力を正確に評価できない。図-6によれば、下床版の左右ウェブ付根位置に設置した鉄筋計の計測値について、曲率半径の大きいRの外側(△)のほうが曲率半径の小さいRの内側(▲)の応力度より大きい傾向が見られる。この結果からも、実際に断面内で応力差が発生していることは明らかであり、FEM解析値はこれを評価していると考えられる。

4. まとめ

本実橋計測で得られた結果を以下に列挙する。

- 1) 張出し施工期間中、計測値の変動量を逐次解析値と比較することにより、施工の安全性を確認しながら作業を進めることができた。
- 2) 断面中心位置の床版応力度について、FEM解析値、平面骨組解析値および計測値は概ね一致していることから、両解析ともに妥当な設計手法だと判断できる。
- 3) 最大圧縮応力度発生位置付近に設置した鉄筋計の計測値は、同位置のFEM解析値とよい整合を示していることから、本橋梁におけるFEM解析は妥当であり、曲線橋特有のねじりモーメントによる付加応力度を精度よく評価していると考えられる。

参考文献

- 1) [2002年制定] コンクリート標準示方書・構造性能照査編, 土木学会, pp. 30-34
- 2) 道路橋示方書・同解説 I 共通編, pp30-38, 2001