

PC 連続合成桁橋における床版応力調査

大 山 進 司*
 長 江 進**
 川 上 洵***

1. はじめに

今日、道路橋の構造形式で、連続桁構造による伸縮装置が減少していることは、運転者の快適な走行性確保や維持管理費の低減につながることなどの利点が多く、道路橋として望まれる形式といえる。

連続桁構造の一形式である PC 連続合成桁橋は、架設地点近くのヤードで製作された PC 単純桁を架設し、中間支点上で隣接する径間の主桁を連続ケーブルで連結し連続桁に変換した後、床版施工を行って合成桁橋とする橋梁形式である。床版は、支点上の版の中に PC 鋼材を配置し、さらに非常に多くの鉄筋で補強した後、富配合のコンクリートを打設するといった設計・施工上複雑な一次床版と、RC 構造となる二次床版とで構成されている。このため、PC 連続合成桁橋における床版内に発生する応力は、一次床版では主としてコンクリート打設後、連続構造とするため導入するプレストレスおよびそれに伴うクリープ・乾燥収縮応力などの 2 次応力がみられる。また、二次床版には二次床版コンクリート打設後に乾燥収縮応力が、二次床版の中心に向かって発生することとなり、相反する応力が集中する一次床版と二次床版との施工打継目部は、構造上の欠陥部分となりかねない。

このため、PC 連続合成桁橋の床版に作用する内部応力低減を目的として、二次床版コンクリートを膨張材添

加コンクリート使用に変更し、コンクリート打設後の作用応力の低減状況把握や、設計・施工上特に複雑な構造となっている一次床版内の作用応力の発生形態の把握の調査を、東北自動車道八戸線「吉田橋」において実施したものである。

2. 調査概要

2.1 橋梁概要

本調査を実施した吉田橋の概要は、下記のとおりである。

工 事 名：東北自動車道吉田橋（PC 上部工）工事

路 線 名：東北縦貫自動車道 八戸線

工事箇所：岩手県二戸郡浄法寺町大字御山

橋梁形式：PC 4 径間連続 + 3 径間連続合成桁橋

橋長および幅員：橋長 239.370 m 幅員 8.500 m ~ 9.000 m

径 間 長：4 径間連続合成桁 36.310 m + 2@37.210 m + 36.310 m

3 径間連続合成桁 29.400 m + 30.300 m + 29.400 m

主桁間隔：下り線 3@2.450 m = 7.350 m

上り線 3@2.300 m = 6.900 m

2.2 PC 連続合成桁橋施工順序

PC 連続合成桁橋における基本的な施工順序は、図 2 に示す施工手順にて実施されている。

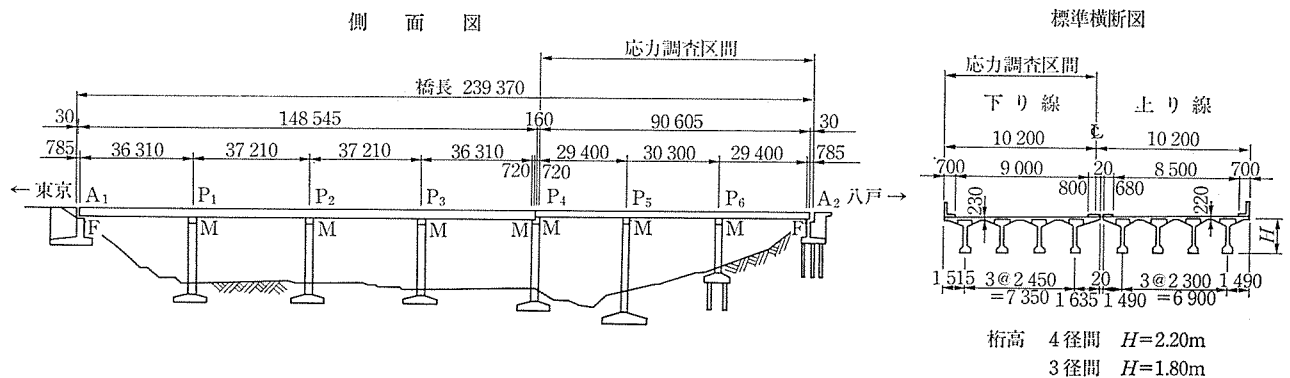


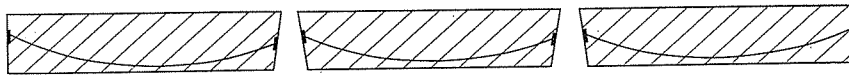
図-1 吉田橋概要図

* Shinji ŌYAMA：日本道路公団仙台建設局構造技術課長

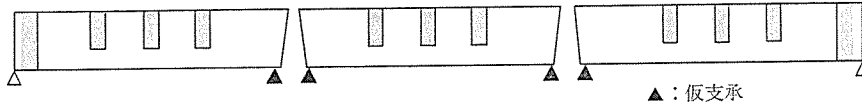
** Susumu NAGAE：日本道路公団仙台建設局構造技術課

*** Makoto KAWAKAMI：秋田大学鉱山学部土木工学科助教授

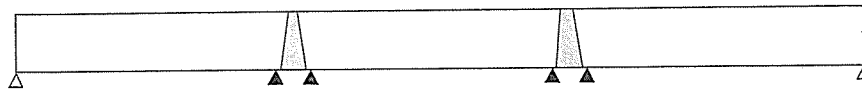
1) 主桁コンクリートの打設・緊張



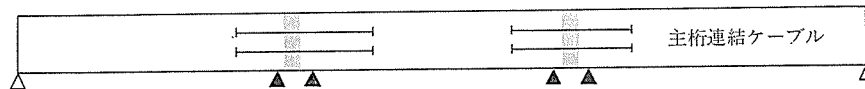
2) 仮支承上への主桁架設と中間横桁コンクリートの打設



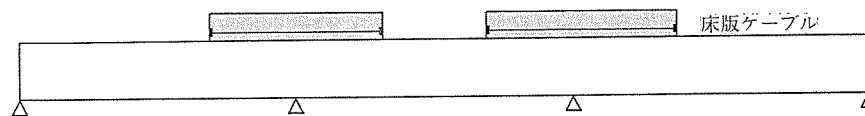
3) 中間支点横桁のコンクリート打設



4) 横桁横締めと主桁連結ケーブルの緊張



5) 本支承への移行と一次床版コンクリート打設・緊張



6) 二次床版コンクリート打設および橋面工

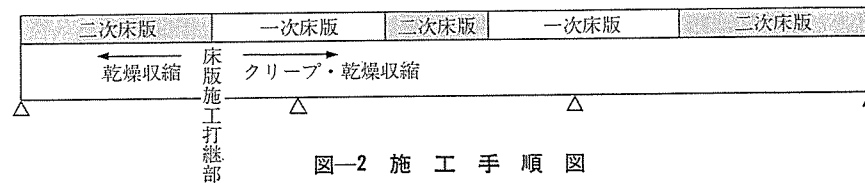


図-2 施工手順図

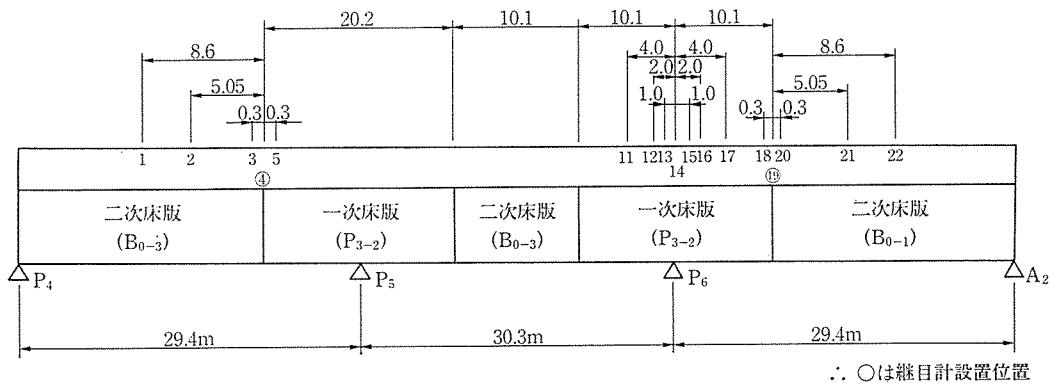


図-3 床版コンクリート種別および測定計器設置位置図

この施工順序において床版の構造モデルにおける死荷重状態を考慮してみると、前記のとおり一次床版コンクリートと二次床版コンクリートとの施工打継目部には、相反する応力が集中する構造上の欠陥部分となることが予想される。

2.3 床版応力調査項目

PC 連続合成桁橋の床版施工における、床版施工打継目部に作用する応力低減を考慮し、上り線 3 径間連続部を図-3 に示すように二次床版コンクリートに乾燥収縮応力に対する収縮補償を目的とした、膨張コンクリート

を使用した。さらに、連続桁の対称部の二次床版は普通コンクリートで施工し、下記調査項目について床版応力調査を実施した。

① 一次床版と二次床版との打継部における経時変化の調査

膨張コンクリート使用における作用応力低減効果の確認として、膨張材使用の有無による応力変化、差異の経時変化を調査する。

② 中間支点上周辺の床版応力調査

一次床版コンクリート内へのプレストレス導入応

表—1 床版コンクリート示方配合表

種 別	設計基準強度 (kgf/cm ²)	スラブ (cm)	空気量 %	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 %	細骨材比 %	単 位 量 (kg/m ³)					
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	膨張材 CSA #20
(P ₃₋₂) 早強セメント	350	7±1.5	4±1.0	25	43.4	41.5	165	380	734	1064	950	—
(B ₀₋₁) 普通セメント	240	8±2.5	4±1.0	25	54.0	45.0	162	300	828	1045	750	—
(B ₀₋₃) 普通セメント	240	8±2.5	4±1.0	25	54.0	45.0	162	270	828	1045	750	30

表—2 床版コンクリート材料試験結果

試験項目	コンクリート種別	養生	σ_1	σ_3	σ_7	σ_{28}	σ_{180}
圧縮強度 (kgf/cm ²)	P ₃₋₂	現場	225	321	396	462	505
		標準	—	319	376	475	539
	B ₀₋₁	現場	59	122	228	317	406
		標準	—	111	228	343	473
	B ₀₋₃	現場	82	135	200	285	401
		標準	—	124	184	300	429
引張強度 (kgf/cm ²)	P ₃₋₂	現場	22.5	29.9	33.4	36.9	—
		標準	—	31.2	32.5	35.2	—
	B ₀₋₁	現場	5.8	13.5	20.5	25.3	—
		標準	—	13.3	22.0	29.7	—
	B ₀₋₃	現場	9.2	13.4	16.4	25.0	—
		標準	—	13.6	16.9	25.6	—
静弾性係数 (kgf/cm ²)	P ₃₋₂	現場	2.36×10 ⁻⁵	2.63×10 ⁻⁵	2.82×10 ⁻⁵	3.01×10 ⁻⁵	3.33×10 ⁻⁵
		標準	—	2.80×10 ⁻⁵	2.78×10 ⁻⁵	3.08×10 ⁻⁵	3.28×10 ⁻⁵
	B ₀₋₁	現場	1.11×10 ⁻⁵	1.86×10 ⁻⁵	2.24×10 ⁻⁵	2.52×10 ⁻⁵	2.77×10 ⁻⁵
		標準	—	1.96×10 ⁻⁵	2.27×10 ⁻⁵	2.62×10 ⁻⁵	3.06×10 ⁻⁵
	B ₀₋₃	現場	1.33×10 ⁻⁵	1.72×10 ⁻⁵	2.14×10 ⁻⁵	2.35×10 ⁻⁵	2.93×10 ⁻⁵
		標準	—	1.73×10 ⁻⁵	2.17×10 ⁻⁵	2.58×10 ⁻⁵	3.30×10 ⁻⁵

力量、クリープ・乾燥収縮の影響による応力変化を構造系の変化に伴って調査する。

③ 実載荷重試験による応力調査

中間支点上に生ずる活荷重による断面力およびその分布状態等を把握するため、実車（総重量 30 t ダンプトラック）による載荷試験を実施した。

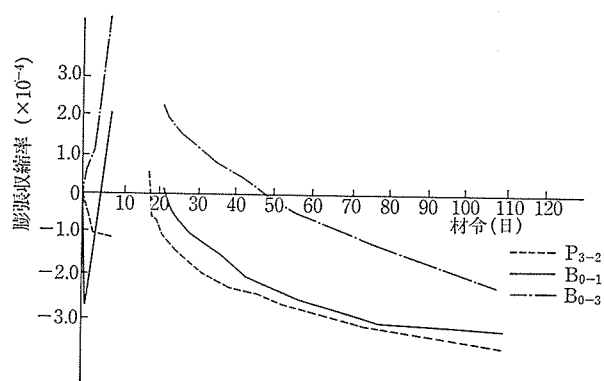
2.4 測定方法

床版内応力の測定として、図—3 の各位置に鉄筋計・コンクリートひずみ計・継目計・温度計等の測定計器を設置した。

各測定計器の測定値については、観測室に設置したパソコン (PC-9801) により自動測定を行いデータを蓄積し、一次床版コンクリート打設から9か月間の長期観測を実施したものである。

2.5 使用したコンクリート

調査区間で用いた床版コンクリートの示方配合表を表—1 に示す。また、コンクリート材料試験結果および



図—4 膨張収縮測定試験結果 (JIS A 6202 B法)

膨張収縮測定試験結果は、表—2 および 図—4 に示すとおりである。

図—4 の膨張収縮測定試験結果において、一部測定結果が空白となっているのは、生コン工場より膨張材製造メーカーへ搬送し水中養生を7日間実施後、20°C 60% 気乾養生としてから測定を実施したため、測定不可能な

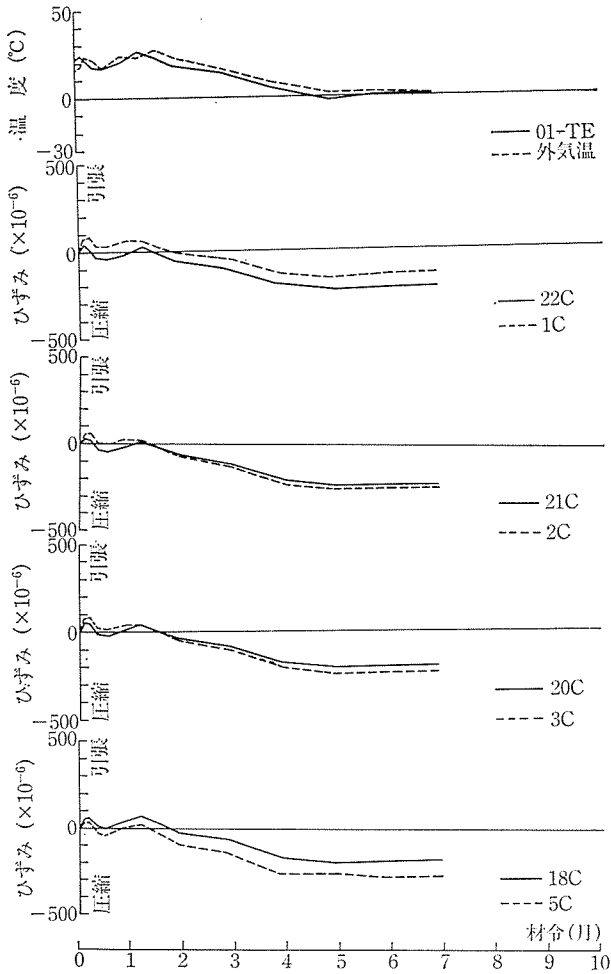


図-5 コンクリートひずみ図

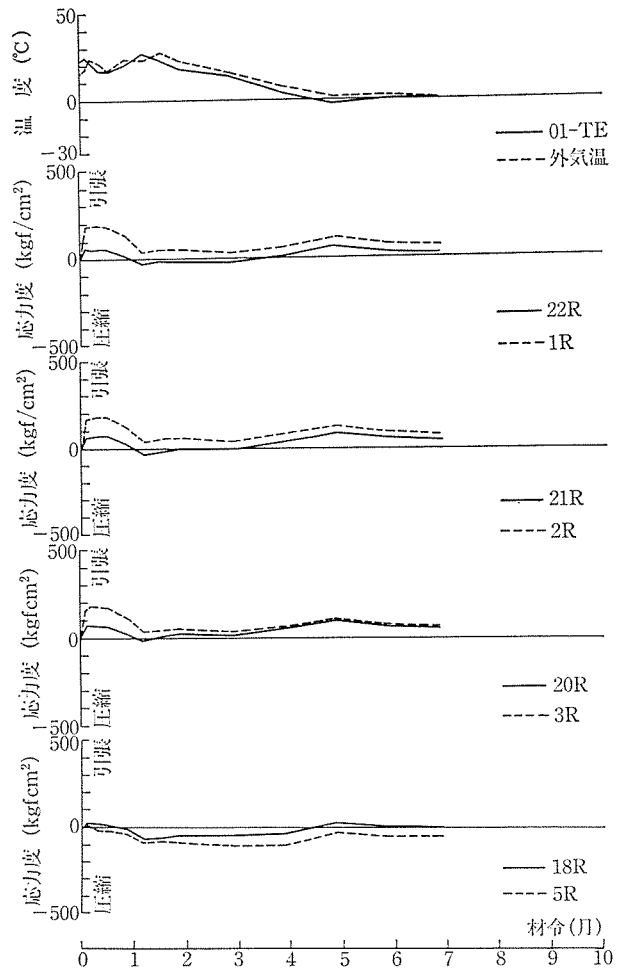


図-6 鉄筋計応力図

ためである。

3. 床版応力測定結果および考察

3.1 一次床版と二次床版との打継部における経時変化測定結果

一次床版と二次床版コンクリート打継目部に作用するひずみおよび応力測定の結果は、図-5 および 図-6 に示すとおりであった。図-5 および 図-6 は長期測定結果として、コンクリート打設後一週間までは一日置き、一か月目までは一週間ごと、以後一か月ごとに、早朝6時における応力状態を膨張コンクリート部と普通コンクリート部とを、対称断面ごとに示したものである。

図-5 および 図-6 から明らかなように、膨張コンクリートを使用した床版部 No. 1~No. 3 (破線) と、普通コンクリートを使用した床版部 No. 20~No. 22 (実線) の各断面におけるコンクリートひずみおよび鉄筋応力の差異は、膨張コンクリート使用による効果であり、膨張材によるケミカルプレストレスの影響によるものと考えられる。

これらの応力を、測定値が安定する材令2か月目で比

較してみると、床版打継目部より 8.6 m に設置した No. 1 および No. 22 断面では、コンクリートひずみで 52.4×10^{-6} 、鉄筋応力で 72.4 kgf/cm^2 ほど膨張コンクリート使用部が引張側に卓越している。また、5.05 m の No. 2 および No. 21 断面位置では、コンクリートひずみで 10.7×10^{-6} 圧縮側に卓越し鉄筋応力で 60.8 kgf/cm^2 引張側に卓越している。同じく 0.3 m 位置の No. 3 および No. 20 断面ではコンクリートひずみが 12.3×10^{-6} 圧縮側に、鉄筋応力で 28.4 kgf/cm^2 引張側に卓越した状態となっている。打継目部から 0.3 m 位置の一次床版内に設置した No. 5 および No. 18 断面では、コンクリートひずみ 64.7×10^{-6} 、鉄筋応力で 39.2 kgf/cm^2 と、共に圧縮側に卓越した床版応力状態を示している。

この応力状態を橋軸方向に図示すると図-7 のとおりであり、膨張コンクリート使用によるケミカルプレストレス効果は顕著である。

膨張コンクリート使用部の二次床版では、膨張効果により床版の中央では大きな引張傾向となるが、一次床版に近づくにつれ、すでに施工された一次床版の拘束によ

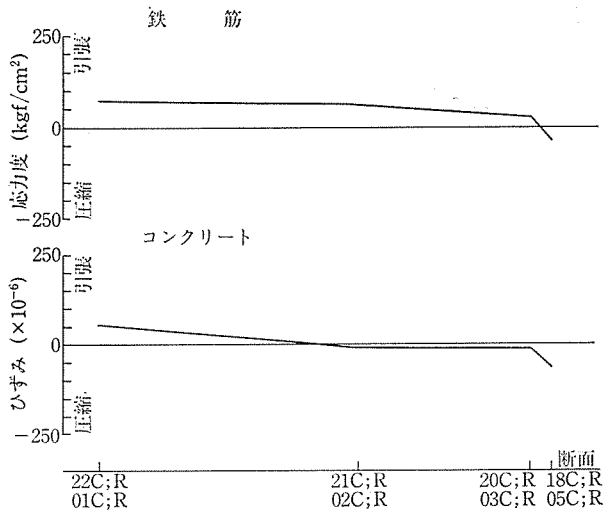


図-7 橋軸方向ひずみ応力差変化図

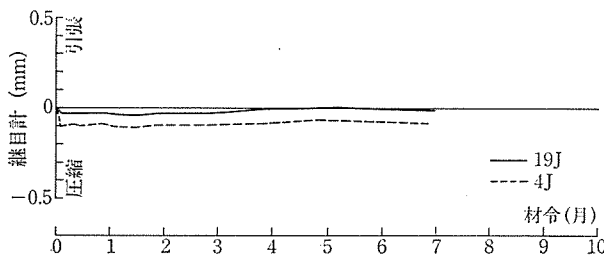


図-8 打継目計測定図

り圧縮傾向に作用している。打継目部を越えた一次床版では、二次床版の膨張作用により圧縮され大きな圧縮傾向となる。このことは、一次床版と二次床版との打継目部に設置した No. 4 および No. 19 断面位置の継目計からもうかがえる(図-8 参照)。

施工後、一次床版と二次床版との打継目部調査を実施した結果においては、普通コンクリート使用箇所も膨張コンクリート使用箇所でも、打継目部への有害クラック発生は確認されなかった。しかし、今回の床版応力調査の結果を見るかぎり、膨張材使用による効果は顕著であり、構造上欠陥部分となりやすい打継目部に有効に作用しているものと思われる。

3.2 中間支点上周辺の床版応力測定結果

中間支点上にあたる一次床版部においては、連続桁構造とするためにプレストレス導入を行っており、施工上構造系が変化していくため、床版に作用する応力は複雑に作用しているものと思われる。このため、構造変化に伴う設計理論値と測定値との比較を一次床版プレストレス導入時について行ったものを 図-9 に示す。

ここで、実測値との比較に用いる理論値は、施工工程の材令に適合したクリープ係数・乾燥収縮度について、道路橋示方書(2)の算出手法に基づいて計算された数値により、日本電算(株)所有の自動設計システム(PST/

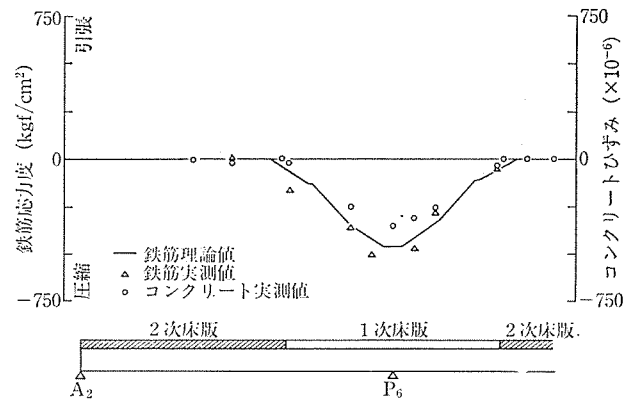


図-9 一次床版プレストレス導入時応力測定図

COMPUS) により設計計算し求めた数値である。

図-9 からもわかるように、理論値と実測値とは比較的よく一致しており、設計計算どおりの応力分布を示している。これは、実測用の測定ゲージに直接コンクリートを打設するというようなものでなく、測定ゲージを囲むすでに十分硬化したコンクリートに荷重として作用するという力学的な作用のみなので、温度などによる影響が少ないため理論値と実測値が一致しているものと考えられる。

3.3 実載荷荷重試験による応力調査結果

PC 連続合成桁は、その構造特性上中間支点付近(一次床版)における鋼材(PC 鋼材・鉄筋)の配置は非常に密なものとなっている。特に連結後に作用する荷重に対しては PC 構造としており、プレストレスのレベルを決定する大きな要因として活荷重によるものが挙げられる。このため、実車による載荷試験を行い、主として中間支点付近の断面力の発生分布を理論値と実測値とで比較したものである。

実荷重の載荷としてトラック 1 台当り総重量 30 t にて、対称荷重(CASE 1)と非対称荷重(CASE 2)について比較を行った。理論値の算出に当たっては載荷位置と載荷荷重に基づいて、格子計算を有限要素法による構造解析プログラムで算出した断面力を理論値としている。ここでは、格子計算に用いた断面諸量は詳細設計計算書と同一とし、コンクリートの弾性係数を $E_c = 350\,000 \text{ kgf/cm}^2$ としている。

格子理論解析より得られた理論値と、載荷試験により得られた G_0 桁床版上縁のひずみ測定値とを比較したものを 図-10 に、横分配によるひずみと変位を比較したものを 図-11 に示す。また、床版上縁のひずみを、理論値で得られた断面力からひずみに換算したものと、測定値を同時におくことにより P_0 支点上のひずみ分布の相違を比較したものが 図-12 に示したものである。

この結果、理論値と測定値とを比べると、各測定値と

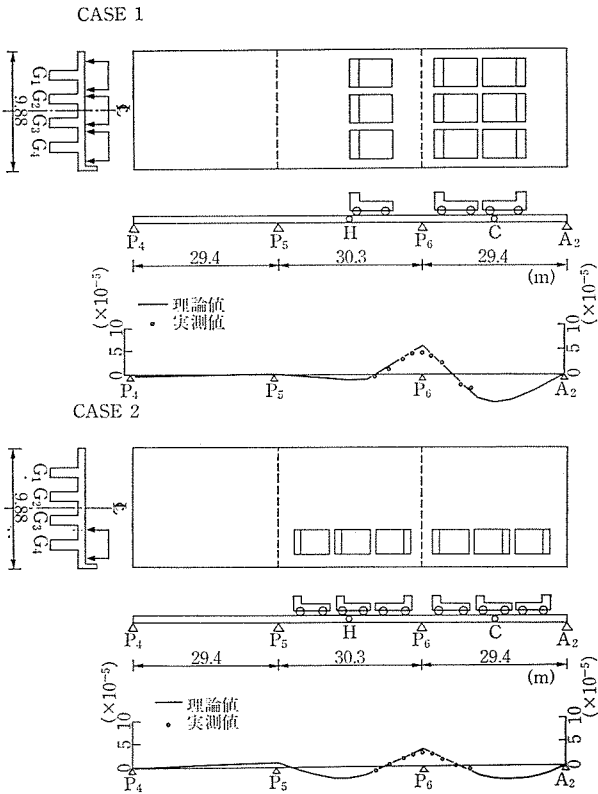


図-10 G₃ 桁床版上縁ひずみ測定図

も全般的によく一致しており、ほぼ設計計算どおりの挙動を示している。

しかし、図-12 に示すように P₆ 支点上において、測定値は理論値より 20% 前後小さい値を示している。

これは、理論値の算出は反力を点で支持するのに対し測定値は反力を支承を介して、ある分布幅をもって支持することによる差と考えられる。このため、詳細設計による断面力に対し 10~20% の余裕を持っており、安全側の設計となっていることや、道路橋示方書では支承部から 45° の応力分布となっているが、もう少し大きな角度で応力が桁高中心まで分布しているものと考えられる。

また、図-11 に示す横分配によるひずみ分布をみると、対称荷重・非対称荷重載荷時とも理論値と測定値が非常によく一致している。このことは、理論値の解析理論である格子構造理論の妥当性をよく示しているものと思われる。しかし、変位について測定値は理論値より小さい値となっているが、これは実測値である変位計の応答が若干鈍感であったようにも思われる。

4. むすび

今回の PC 連続合成桁橋における床版応力調査では、

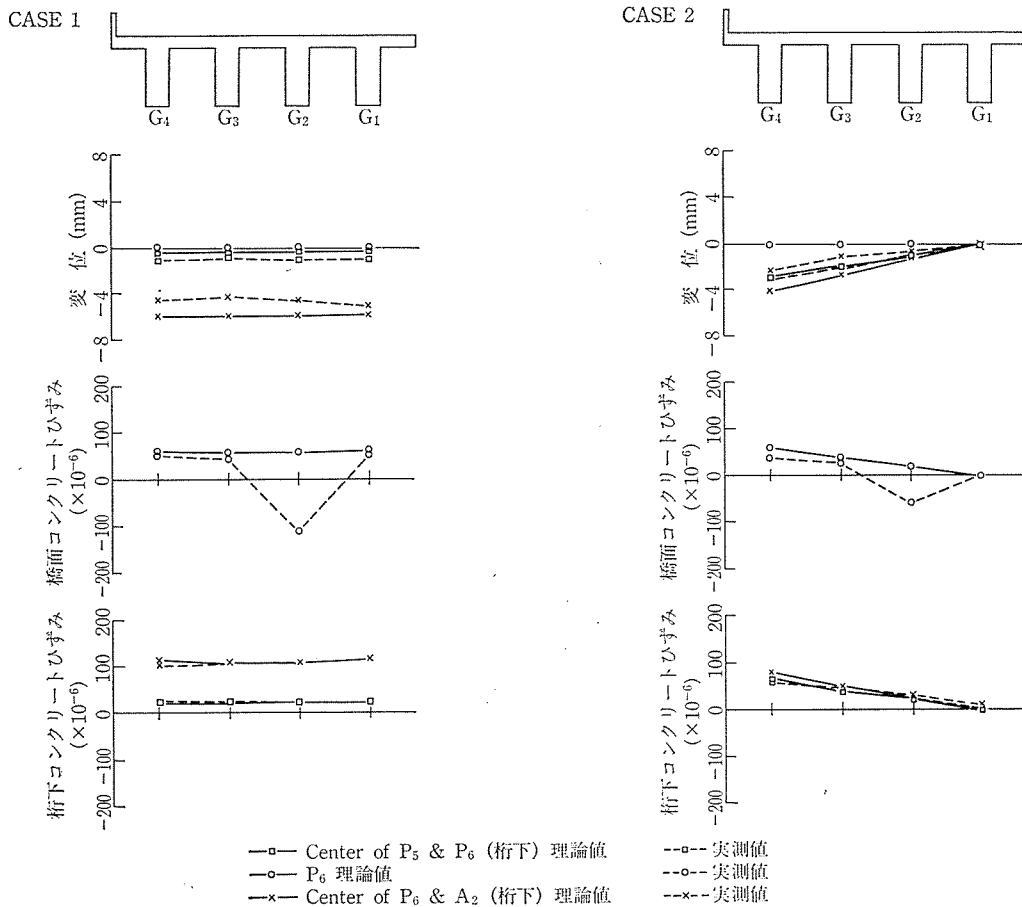


図-11 横分配方向ひずみおよび変位測定図

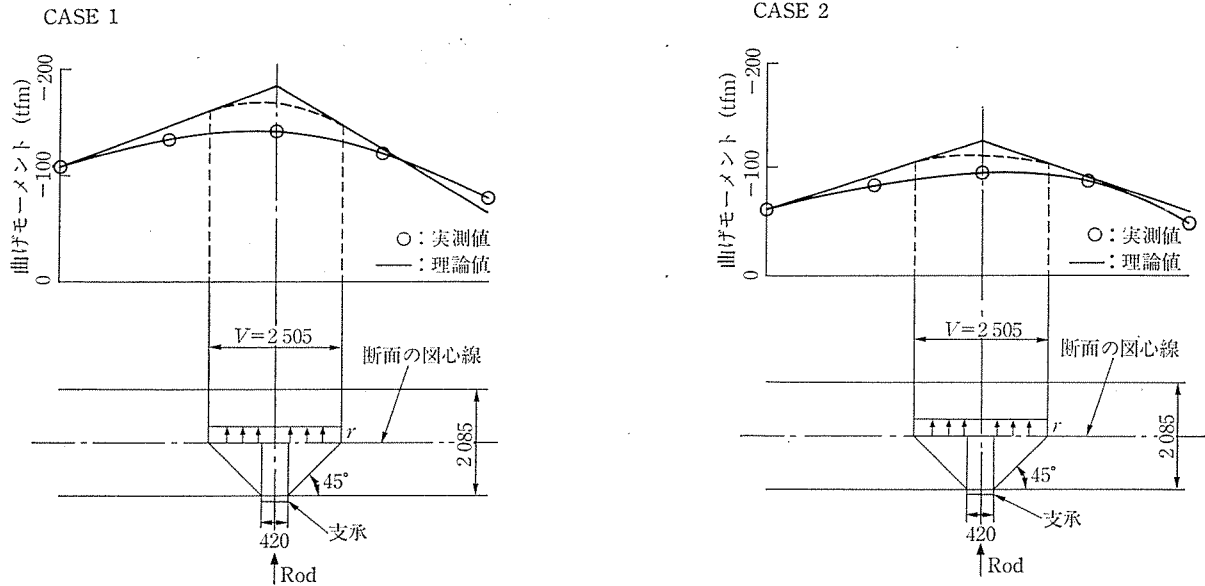


図-12 P₀ 支点上曲げモーメント図

PC 構造としての一次床版と RC 構造の二次床版という構造の相違する床版形式において、その構造上の接続点の品質低下が懸念されての応力調査であったが、二次床版に対し普通セメント使用部も、膨張コンクリート使用部においても、床版打継目部では構造上有害となるクラックの発生は確認されず、入念な施工さえ実施されれば特に問題はないものと判断される。しかし、床版応力調査の結果からも判断されるように、膨張材コンクリート使用によるケミカルプレストレス作用は、一次床版と二次床版打継目部に対して有効に作用しており、品質向上に大きく役立っているものと思われ、床版クラック調査においても二次床版全体に対して、乾燥収縮クラック発生防止に大きく作用している。このため、コンクリート単価としては1割程度のコストアップとなるが、より水密性の高いコンクリート品質確保のためにも、採用をはかっていくべきと考えている。

また、温度の影響による応力やクリープ・乾燥収縮による影響を定量的に求めることは困難と思われるが、今回のコンクリート温度測定は、測定断面に1箇所程度しか設置しなかったため、温度による床版内の上下方向の応力分布について確認することができず、測定データの

解析においても温度応力による影響が大きいため、適数の設置が必要であったと反省している。

一方、载荷試験による応力調査からは、詳細設計に用いている格子理論値に対し、各個の測定値は極めてよく一致しており詳細設計における解析理論の妥当性は十分確認された。特に、P₀ 上の中間支点上における断面力は設計断面力に対し 10%~20% 前後の余裕をもっていることが確認されたことは、設計計算上の許容値に対して多少の自由度をもって PC 鋼材の配置ができるものと思われる。中間支点上の一次床版は、PC 構造ということもあって断面厚の薄い床版内に複雑な PC 鋼材・鉄筋配置となっており、施工上の問題点として取り上げられており、設計計算上の余裕が確認されたことで、今後施工性を考慮した設計上の改善も進めていきたいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 吉田橋床版応力調査報告書, 日本道路公団仙台建設局, 平成元年3月
- 2) 道路橋示方書・同解説, (社)日本道路協会, 昭和53年1月

【1990年1月5日受付】