

鋼横梁を有する連続ラーメン PC 床版 2 主桁橋の設計検討 Study on Design of In Place PC slab of continuous rigid frame 2-girder bridge

安松敏雄*, 田中伊純*, 志村泰広**, 中原智法***, 利根川太郎****

Toshio YASUMATSU, Izumi TANAKA, Yasuhiro SHIMURA, Tomonori NAKAHARA, Taro TONEGAWA

*日本道路公団 東京建設局 (〒105-0014 東京都港区芝 3-39-9)

**日本道路公団 東京建設局 さいたま工事事務所 (〒330-0038 さいたま市宮原町 1-10-1)

***日本橋梁株式会社 (〒675-0164 兵庫県加古郡播磨町東新島 3 番地))

****住友金属工業株式会社 (〒541-0041 大阪市中央区北浜 4-5-33))

In recent years, cast in place pre-stressed slab is mainly adopted to the twin girders' bridge because of rationality and labor-saving. In Tokyo Gaikan Expressway, a rigid-frame bridge with twin girders superstructure and T-shape pier, of which cross beam is steel member, is planned. The slab become PC slab pre-stressed in lateral direction.. But it is afraid of the introduction of the pre-stress to be not enough due to constrain by the steel cross beam.

Several attempt have been implemented to design the slab over the intermediate support part. With 2/3 scale model test and analytical approach, efficiency of pre-stressing to the PC slab over the part was made clear. The paper describes the outline of the design method for the slab of twin-girders' rigid-frame bridge based on the experiment and three dimensional finite element analysis.

Key words : cast in place PC slab, steel rigid frame bridge, efficiency of pre-stressing

1. はじめに

東京外環自動車道の三郷 JCT～三郷南 IC は、一般国道 298 号と併設した連続高架橋区間であり、鋼製横梁を介して上下部一体構造とした複合ラーメン形式を採用している。標準的な上部構造は、現場打ち PC 床版を有する主桁間隔 6 m の鋼連続 2 主桁であり、上下線の主桁を支点部において鋼製横梁により 1 本のコンクリート橋脚で支持する構造である。標準構造部の上部工断面を図-1 に示す。一般に、中間支点付近の場所打ち PC 床版には、剛性の高い横梁の拘束を受けることから、プレストレス導入量の低下等の問題があり、また鋼部材の拘束によりコンクリートのクリープ・乾燥収縮といった経時変化挙動に留意する必要がある。

従来、鋼桁の拘束によるプレストレス低下が懸念される箇所として、鋼 2 主桁橋の支点上横桁近辺や、閉断面箱桁上のダイヤフラム近辺などであるが、それらにおいては、何らかの検討を行った上で、プレストレス導入効率を算定している¹⁾が、本橋梁では、鋼桁の拘束が剛な横梁であることから、上記の部位以上に、プレストレスの導入効率が低下することが懸念された。

実橋を対象とした FEM 解析を行った結果、クリープ・乾燥収縮を考慮した場合、一般的な PC 構造物の「直後プレストレス」と「有効プレストレス」の関係以上にプレストレスが低下することが判明した。

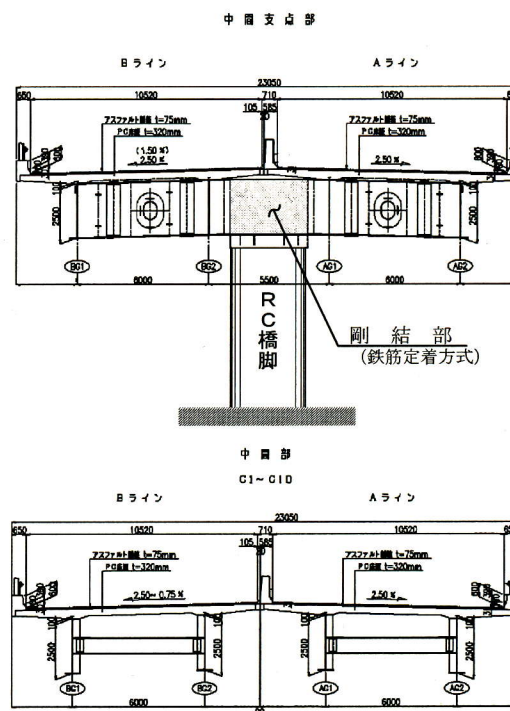


図-1 標準断面図

しかしながら、FEM 解析ではプレストレス導入低下の一因であるクリープ・乾燥収縮を厳密に検討することが困難であること、さらに本橋が鋼横梁を介した上下線一体の連続ラーメン橋という特殊な構造を採用

していることなどから、2/3 縮尺モデルにて、PC 床版プレストレス導入実験を行い、FEM 解析結果を検証することとした。

本報告では、2/3 縮尺モデルでの PC 床版プレストレス導入試験によるプレストレス導入効率の算定（橋軸直角方向に対する検討）ならびに実橋床版のひび割れ対策、並びにそれらを踏まえた実橋 PC 床版の主として橋軸直角方向の設計概要について述べる。

2 プレストレス導入実験 I

2.1 実験の目的

この実験の目的は、中間支点上横梁部をモデル化した供試体で、場所打ち PC 床版のプレストレス導入を行い、鋼横梁の拘束によるプレストレスの損失を確認することである。さらに実験結果と実験供試体をモデル化した FEM 解析と比較を行い、FEM 解析の妥当性も検討する。

2.2 実験の概要

実橋想定断面に対して、FEM 解析にて、鋼横梁の拘束がない範囲までが主桁間隔の 1 倍程度（横梁ウェブから約 6m 程度）であることが確認されていたため、橋軸方向に対しては、主桁間隔の 1.5 倍まで、橋軸直角方向に対しては、上下線で床版が分離されていることから、複合剛結部を含まない 2 主桁とし、主桁間の鋼横梁のみモデル化することとした。図-2 に実験供試体のモデル対象を、表-1 にコンクリートの配合を示す。PC 鋼材は、プレグラウト PC 鋼材 1s17.8 を 500mm ピッチ配置とし、鉄筋は実橋と鉄筋比が同じとなるように径と間隔を決定した。

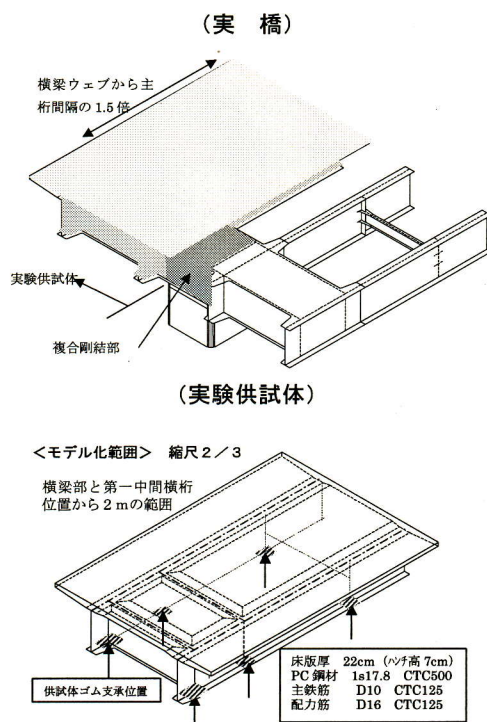


図-2 実験供試体のモデル化範囲

表-1 実験供試体コンクリート配合（種別 40-8-20）

W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kgf/m ³)			
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 砕石 G
44.0	42.8	165	375	747	1034

実験における主たる着目断面は、横梁の影響がないと想定される断面と、中間横桁位置、横梁ウェブ位置であり、これらの床版ひずみ分布によりプレストレスの損失を把握することとし、着目断面では、床版上下面ならびに主鉄筋のひずみを計測した。

実験供試体の FEM 解析は、床版を solid 要素、鋼桁を shell 要素とし、PC 鋼材を cable 要素とし、緊張力に相当する等価な温度荷重を作用させて、プレストレスを作用させた。なお、スタッドジベルはモデル化せずに鋼桁と床版とは節点共有で処理した。また、クリープ・乾燥収縮挙動に対しては、道路橋示方書・鋼橋編により等価なヤング係数を用いてコンクリートのヤング係数を設定し、乾燥収縮量は、200 μ とした。

2.3 実験結果と FEM 解析結果の比較

緊張直後プレストレス量に対しては、横梁の拘束（プレストレスが横梁に流れる）により、軸力換算で一般部の約 7 割程度のプレストレスが導入される計測結果となり、FEM 解析の結果と良好な一致を示した。図-3 に床版支間中央の床版コンクリートのひずみ分布を示す。鋼桁の拘束により、床版上下面のひずみの平均値は小さく、PC 鋼材は偏心配置をしているにも関わらず、床版上下面のひずみの差は小さくなっている。これは、鋼横梁の影響により、プレストレス導入対象断面積および断面定数の増加によるものと考えられる。

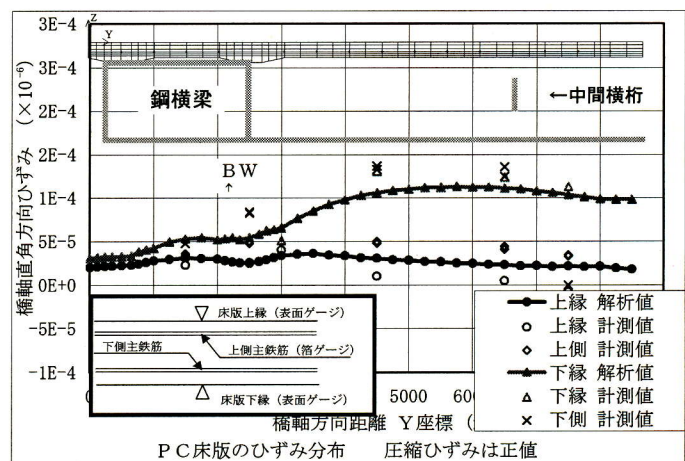


図-3 緊張直後プレストレスについて

2.4 クラック発生について

PC 緊張後約 2 ヶ月（8 月中旬）で、橋軸方向クラック（ひび割れ幅最大 0.16mm）の発生（図-4）ならびに、無数の橋軸直角方向の乾燥収縮クラック（ひび割れ幅 0.02~0.16mm 程度）が確認された。

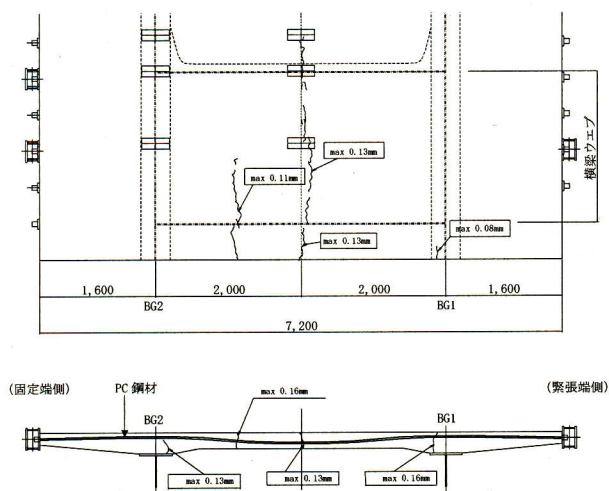


図-4 床版クラックマップ

2.5 クラックに対する考察

一般に、夜間において床版上面の温度が床版下面よりも低くなると推定される。ひび割れが発生した横梁位置は梁内に熱がこもりやすく、さらに床版下面には、ハンチ形成のための発泡スチロールが埋め込まれ断熱されている。したがって、日中暖められた床版が夜間にかけて冷える時、横梁直上の床版下面よりも、床版上面の方が冷えた外気の影響を受けて冷えやすいと考えられる。図-5の24時間変化を見ると、外気が冷える時間帯においてコンクリート上面温度が下面温度よりも低くなっている。この時、床版中央変位は日中時に対して0.6mm程度、下に凸になる変形挙動を示し、上記の推定を裏付ける傾向である。

この床版上下面の温度差はPC緊張後約2週間後の6月時点のものであり、日中気温の上がる真夏にはさらに大きな温度差があったものと予想される。

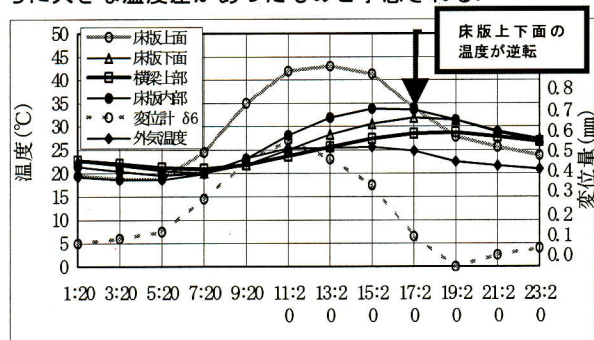


図-5 床版上下面の温度分布 (H12年6月)

以上のことから、

- ① 真夏の夜間時において、横梁位置の床版には上下面温度差の影響で相当量、下に凸になる挙動が生じていた。
- ② 床版が下に凸になろうとする時、床版につながる主桁の回転を横梁が拘束すると、床版の幅員中央の上面には引張ひずみが発生する。この時、当該部にはPC鋼材の偏心配置により、ほとんどプレストレスが導入

されていないので、ひび割れが生じやすい。

これらを検証する意味で、ここではクリープ・乾燥収縮の影響が比較的少ないと考えられる初期の段階で温度変化によるひずみの変化の傾向をとらえることを目的に、温度上昇時（主として午前中の挙動）、温度下降時（主として外気温の下がる夕方）の2ケースを想定して、6月の温度差荷重を与えたFEM解析を行い、実測値との比較を行った。

温度上昇時は、横梁の拘束により床版コンクリートに概ね圧縮応力が作用するため、引張りを助長する方向にははたらかないが、温度下降時の解析結果によると、横梁上の上側の鉄筋位置で、80 μ 程度の引張りひずみが生じたため、概ね計測値と一致する傾向を示した。また、横梁から離れたラインほど（Yの値が大）、温度変化による発生ひずみは小さくなっており、自由な収縮・膨張を示しており、横梁の影響が少なくなる傾向を、解析値および計測値ともに示している。

以上より、温度下降時に横梁の拘束により下に凸になろうとする変形を抑えるため、横梁上の床版上面には、引張りが生じ、かつPC鋼材の偏心配置によりそれが助長され、曲げ剛性の低下→引張応力度の増加となる繰り返しを日変動で行うことで、結果としてひび割れの発生の主要因であると考えられる。図-6に概念図を示す。

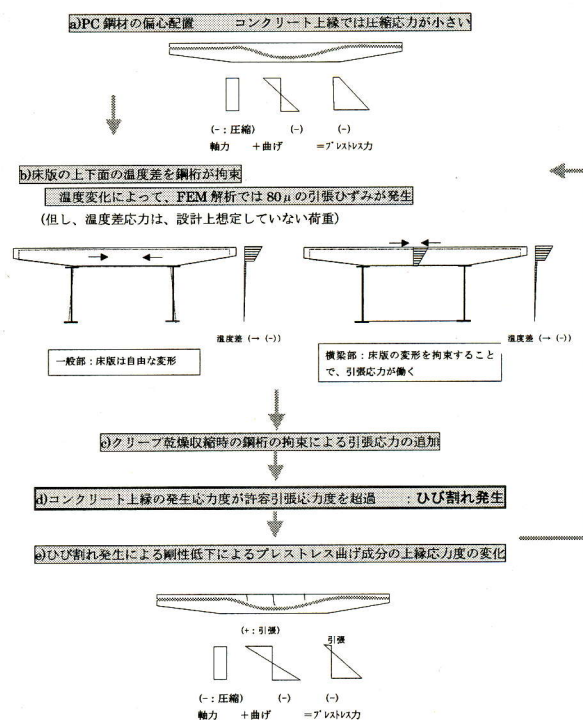


図-6 ひび割れ発生のフロー

2.6 実験結果を踏まえた床版の断面検討

2.5で示したPC鋼材の偏心配置による曲げクリープ変形によるひび割れ発生を防止するため横梁付近の

PC 鋼材配置を軸力配置にした場合、横梁上は床版を打下ろすことで解決されるが、横梁を離れた横梁付近の床版（以下、横梁近傍部の床版）では、活荷重時に床版下面で床版コンクリートの許容引張応力度を大きく超過するため設計が成り立たない。一方、活荷重応力の低減のために床版厚の増加（打ち下ろし）で対応した場合、死荷重応力の増加、床版断面積の増加に伴う平均プレストレス導入力の低下、ならびに乾燥収縮によるプレストレス低下が予想される。したがって、横梁近傍部での活荷重時の応力度を下げるためには、PC 鋼材の適度な偏心配置と床版断面の検討が必要となった。下記にその検討案、ならびに実験供試体モデルを用いた FEM 解析を行い、応力度の重ね合わせにより、床版断面の選定を行った。表－2 に検討結果を示す。表中の死荷重応力は、実験供試体が発生する実験供試体の FEM 解析により算出されるクリープ・乾燥収縮度の応力度であり、活荷重応力は、横梁の影響を考慮しない通常の設計曲げモーメントより算出される発生応力度を示す。これより、横梁近傍部の床版支間部の設計荷重時応力がもっとも改善できる改善案 2（横梁上ならびに横梁近傍部を打ち下ろした案）を選定することとした。

表－2 床版断面の検討（実験供試体相当）

特 徴		現状案 実験供試体 (打ち下ろしなし)	改善案 1 横梁上打ち下ろし (+膨張材)	改善案 2 横梁上・横梁近傍部打ち下ろし (+膨張材)
PC 鋼材 ピッチ (1S21.8)		500mm ピッチ	横梁上、横梁近傍部 375mm ピッチ 一般部 500mm ピッチ	同左
支間中央 床版下縁 応力度 (N/mm ²)	死荷重時	0.5 > 0	1.0 > 0	1.1 > 0
	活荷重時	-5.3	-5.3	-3.1
	計	-4.8 < -2.155 OUT	-4.2 < -2.155 OUT	-2.1 < -2.155 OK

注 1：死荷重応力は、クリープ・乾燥後の応力を示す。
ただし、後死荷重を含まない値である。

2.7 主鉄筋径の検討

実験においては、T 型の橋脚形状であることから、横梁直上の床版に主構作用と断面力が床版に作用することになり、床版支間方向（プレストレス導入方向）に引張りが生じる荷重ケースが考えられる。また、上述のとおり、床版上下面の温度差による床版のそり変形を横梁が拘束することによって、引張応力が発生する。以上のことから、床版上下面の温度差応力と横梁主構作用応力に対しては、同時性は無視した上で、それぞれの荷重に対して、発生引張力を床版主鉄筋にて抵抗することとし、横梁部の必要主鉄筋量の算出を行った。その結果、通常の 2 倍程度の鉄筋量が必要とな

り、D19 の主鉄筋を 125mm ピッチにて配置することとした。

以上のことから、表－3 にプレストレス導入実験 I でのプレストレス導入量およびクラック発生の結果を踏まえた構造細目を示す。

表－3 実験結果を踏まえた床版構造改善策

問題点	原因の特定	対策
橋軸方向	横梁上 PC 鋼材の偏心配置に起因する曲げクリープ変形の進展 日照による床版上下面の温度差に起因する床版そり変形の鋼横梁による拘束	横梁上の PC 鋼材偏心配置を見直し、偏心をなくした軸力配置とする。 そり変形の拘束による床版上下縁の鉄筋量増加によるひび割れ抵抗性向上を図る。 (主鉄筋径 D13→D19)
橋軸直角方向	乾燥収縮の低減	収縮補償として用いられる膨張材の添加。
全体構造の改善	上記要因ならびに設計荷重に対する抵抗性向上	床版構造の改善 (横梁上ならびに横梁近傍部の打ち下ろし)

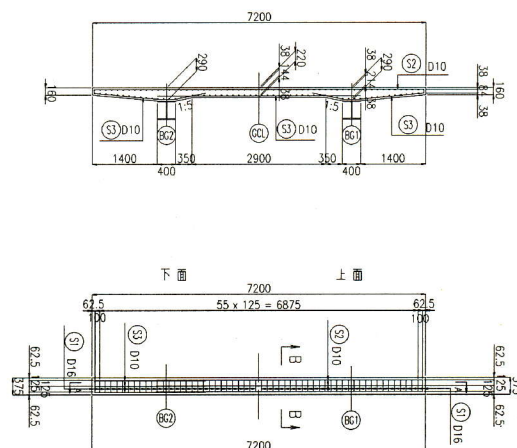
3 プレストレス導入実験 II

3.1 実験の概要

上述の検討結果の妥当性を検証するため、改善案 2 の 2/3 縮尺モデルを用いて、プレストレス導入確認実験 II を行った。また、膨張材添加の有無、鉄筋比の影響、鋼桁の拘束の影響度合いを確認するため、2/3 モデルと同厚・同幅員で橋軸方向長さが 375mm の材料比較モデルを表－4、図－7 の通り別途作成し、長期の収縮特性を比較することとした。

表－4 材料比較モデルのモデル概要

モデル	内部鉄筋量 (鉄筋比 ρ)	床版厚	膨張材	備考 (対象部位)
A-1	D10 CTC125 ($\rho=0.9\%$)	22cm	なし	2/3 モデル一般部
A-2	D10 CTC125 ($\rho=0.9\%$)	22cm	あり	"
B-1	D16 CTC125 ($\rho=1.5\%$)	29cm	なし	2/3 モデル横梁近傍部
B-2	D16 CTC125 ($\rho=1.5\%$)	29cm	あり	"



図－7 材料比較モデル（A－1，A－2タイプ）

3.2 実験結果について

緊張時において、横梁上および横梁近傍部のプレストレス導入量は、一般部に対してほぼ3割増のPC鋼材を配置することで、同程度のプレストレスが導入可能となる結果となった。また、PC鋼材の軸力配置により、床版上下面にほぼ均等にプレストレスが導入される結果となり、前回実験のクラックに起因する横梁上床版の曲げクリープ変形は発生せず、図-8に示すように計測値とFEM解析値との良好な一致が見られた。更にPC緊張後、8ヶ月の長期計測期間中では、プレストレス導入方向に対するクラックは皆無であった。しかしながら、3.3に示す問題点が生じたため、対策および設計への反映を行った。

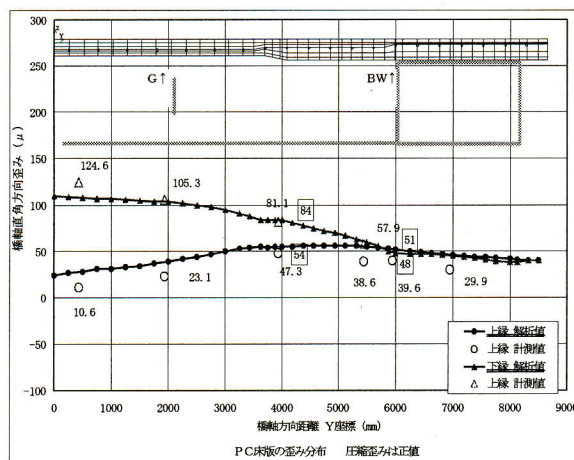


図-8 緊張直後プレストレスについて

3.3 問題点および対策

1) 問題点について

コンクリート打設後約70日程度で橋軸直角方向に進展する乾燥収縮クラックが発生した。(写真-1)クラック発生時の下側配力鉄筋の引張ひずみが約100 μ 、床版図心で約50 μ 発生した。この計測値から「所要鉄筋比の確保」ならびに「コンクリート配合面での収縮低減」を図ることとした。なお、上記発生クラックの進展状況を約3ヶ月計測したが、最大0.1mm程度で大きな進展は見られなかった。

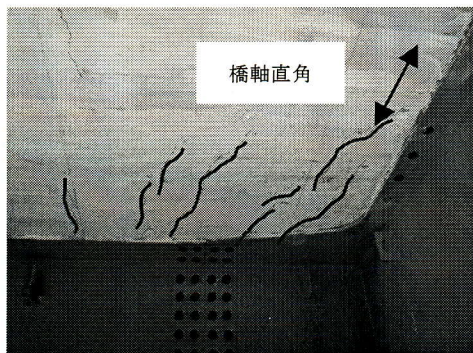


写真-1 横梁近傍部の乾燥収縮クラック

図-9に橋軸方向に配置された下側配力鉄筋のひずみ値を、図-10に膨張材の有無と鉄筋比をパラメータとした乾燥収縮の長期挙動結果を示す。

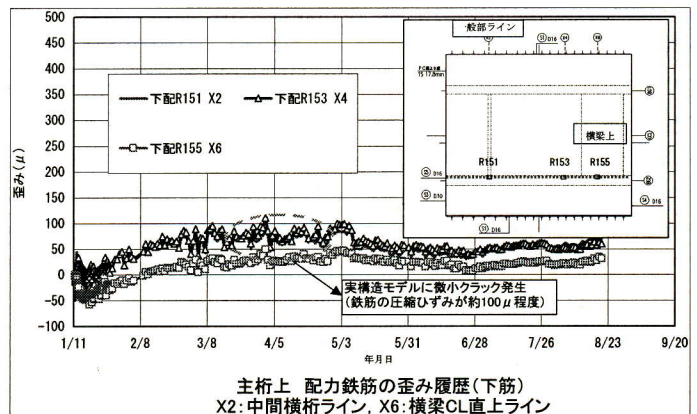


図-9 主桁上 配力鉄筋(下筋)のひずみ履歴

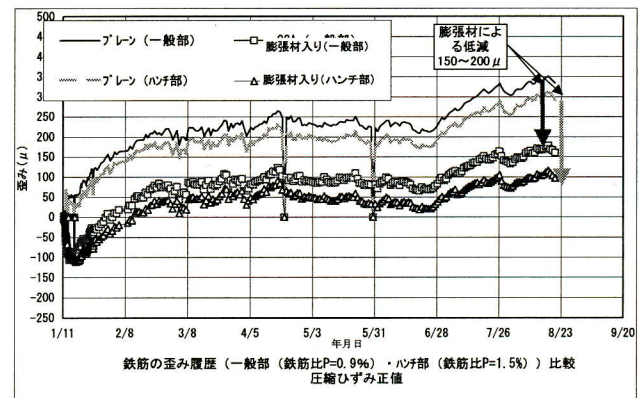


図-10 鉄筋比、膨張材の有無による収縮量の変化(材料比較モデル)

図-9のクラック発生段階では、床版の乾燥収縮量として配力鉄筋の収縮ひずみ値によると100 μ 程度生じていることがわかる。床版の乾燥収縮量は、コンクリート打設時から徐々に大きくなり、図では、2月中旬以降に約100 μ 程度に到達している。ここで、鉄筋比に着目し、鉄筋比が0.9%のAモデルに対して、鉄筋比が1.5%のBモデルの方が、6ヶ月段階での収縮量が50 μ 程度改善される結果となった。しかしながら、鋼桁に拘束された場合、一般にその効果は小さくなることから、任意の鉄筋比におけるコンクリートの乾燥収縮量の予測式²⁾をもとに上記鉄筋比の増加による収縮改善量を約20 μ 程度と想定した。

2) 対策について

実橋においては、連続合成桁的作用も考慮して、既往の研究成果³⁾を考慮して、所要の鉄筋比(配力鉄筋の鉄筋比1.4%程度)を確保することとした。しかしながら、一般に同種のコンクリートの最終収縮量は約290 μ 程度(鉄筋比1%程度)であることから、膨張材による収縮低減(設計上150 μ の改善)ならびに補強

鉄筋（所要の鉄筋比確保により 20μ 改善）での収縮低減策では、上記ひび割れ発生時の収縮ひずみ値を超えるため、あわせて床版コンクリート配合改善を行うこととした。検討の結果、セメント量及び水量を抑えた貧配合コンクリートとし、施工性確保の観点から高性能 AE 減水剤を使用することとした。表-5 に実橋の床版コンクリートの配合を、図-11 に構造概要図を示す。

表-5 実橋コンクリート配合（種別 40-15-20）

W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kgf/m ³)				
		水 W	セメン ト C	膨張材	細骨材 S	粗骨材 砕石 G
44.9	47.0	152	309	30	844	1001

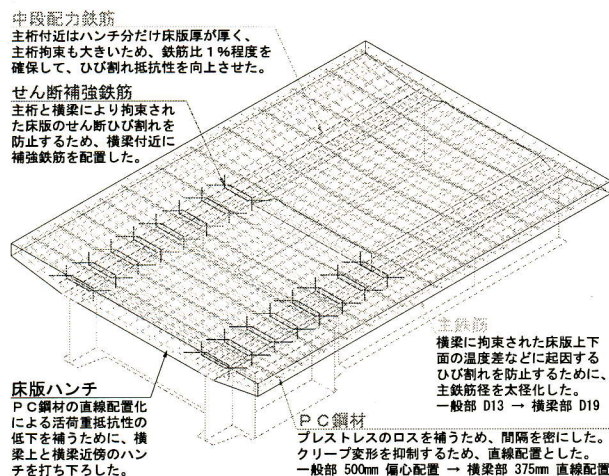


図-11 構造概要図

4 設計方針の適用性検討について

FEM 解析結果によれば、鋼横梁の剛性が大きくなるに従い、導入プレストレスは小さくなり、その影響は、PC 緊張直後より、クリープ乾燥収縮後の方が大きくなることがわかった。あわせて、鋼桁と床版の断面剛性の比（以下、断面構成比⁴⁾ α ）をパラメータとして、本基本方針の適用範囲について整理を行った。図-12、図-13に α を変化させた場合のクリープ・乾燥収縮後の橋軸直角方向の PC 緊張による応力度の比較を示す。図-13では、横梁上の一部に死荷重時にわずかな引張領域が現れているのに比して、剛性の大きい図-12の断面ではその領域が拡大しているため、プレストレス導入量決定に当たっては注意が必要である。

5. おわりに

中間支点上の剛な鋼横梁近傍部の PC 床版の設計について、プレストレス導入実験を踏まえて、主として橋軸直角方向についての検討結果を報告した。また、設計の妥当性確認を行うための実橋の計測や温度応力解析、床版コンクリートの配合検討、ならびに連続ラ

ーメン橋という特殊性を考慮した橋軸方向の補強鉄筋の一般化についても別途検討を行っている。これらについては、また別の機会に報告したいと考えている。

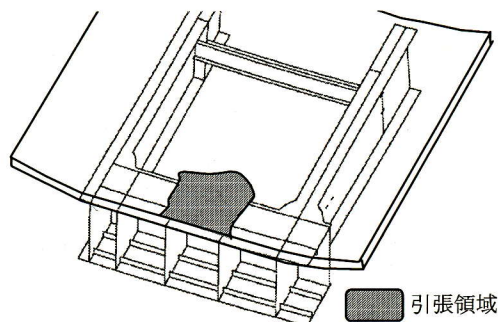


図-12 床版上面橋直方向応力度

($\alpha=0.5$: 同形状の横梁で上下フランジ厚が 75mm 厚)

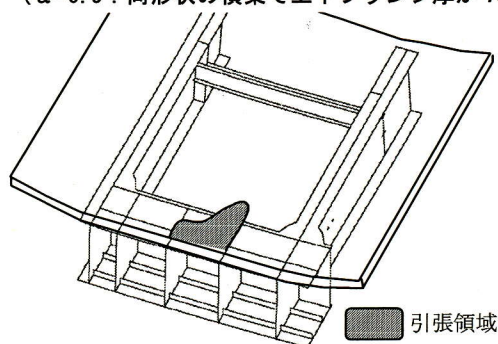


図-13 床版上面橋直方向応力度 ($\alpha=0.4$: 実橋)

【参考文献】

- 1) 本間敦史, 長谷俊彦, 黒岩 正, 亀川博文, 春日井俊博, 北村明彦: 鋼箱桁橋における場所打ち P.C. 床版の応力性状に関する研究, 構造工学論文集 Vol.49A, 2003.3.
- 2) 土木学会: 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 1989.3.
- 3) 緒方紀夫, 木曾 茂, 岩立次郎: 鋼連続合成桁の中間支点部床版に生じるひび割れに関する実験, 第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 25~29, 1995.
- 4) 大山, 栗田, 渡辺: 鋼・コンクリート二重合成連続箱桁橋の経時挙動に及ぼす断面構成比の影響, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム, 1999.11.