

連続合成鋼 2 主桁橋 PC 床版の載荷実験

Loading Tests for A Continuous Composite Two Main Girders Bridge

松野 進*, 数藤久幸**, 岩田節雄***, 塩見 健****, 安田和宏*, 松井繁之*****

Susumu MATSUNO, Hisayuki SUDO, Setsuo IWATA, Takeshi SHIOMI, Kazuhiro YASUDA and Shigeyuki MATSUI

*工修 日立造船(株) 技術研究所 鉄構・建機技術研究センター (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

**工修 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 橋梁設計部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89)

***工博 日立造船(株) 技術研究所 鉄構・建機技術研究センター (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

****工修 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 技術部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89)

*****工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Recently, rational composite bridges consisting of two main girders are apt to be adapted for the highway bridges in order to reduce construction costs. To develop continuous rational composite girder bridges with a few main girders, durable decks are required by giving prestress to the slab on intermediate supports. Two types prestressing methods of “Tendon system” and “Jack up down system” can be considered. But, there is no design data for the stress distributions in the prestressed deck slab, and for the bending moment under T loading conditions.

In this paper, the authors carried out half sized model tests and FEM analysis to investigate the stress distributions of a cast-in-place type prestressed concrete slab. It was clarified that the cross beams at intermediate support exerted decisive influence upon the stress distributions of PC slab under the transverse tendon and the design bending moments under T loading were discussed.

Key words: T loading test, composite two main girder, prestressed concrete slab, FEM analysis

1. まえがき

最近、合理化によるコスト削減の観点から現場打ち PC 床版を有する連続合成鋼 2 主桁橋が計画されるようになってきた。これらの橋梁では、床版支間が 6m と長支間になること及び中間支点上の負曲げモーメントを考慮して、橋軸直角方向に PC 鋼線によるプレストレス導入、橋軸方向にはジャッキアップダウンによるプレストレス導入が行われるのが一般的である。しかし、PC 鋼線によるプレストレス導入時及び T 荷重が作用した場合の床版や鋼桁の応力状態についてはこれまでのところ明らかにされたデータが少なく、設計手法の確立のために実機計測あるいは模型実験などによるデータの整備が望まれている。

本研究では、床版支間 6m の現場打ち PC 床版を用いた連続合成鋼 2 主桁橋の中間支点部に着目し、実橋と同じ施工方法で 1/2 縮尺模型を製作し、プレストレス導入時及び T 荷重載荷による床版や鋼桁の応力を FEM 解析と照合しながら調査した。

2. 床版へのプレストレス導入

2.1 試験体

試験体は、図-1 に示すように連続合成鋼 2 主桁橋の中間支点部を中心にして負曲げモーメントが生じる区間を対象にしたもので、主桁間隔 6m の合理化橋の 1/2 縮尺模型とした。

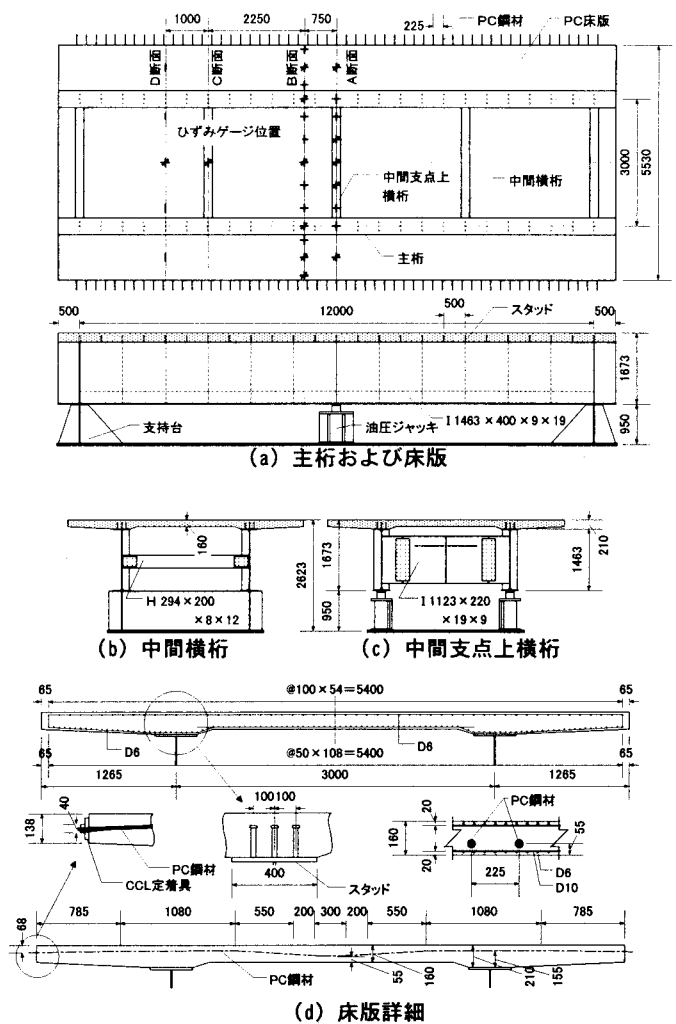
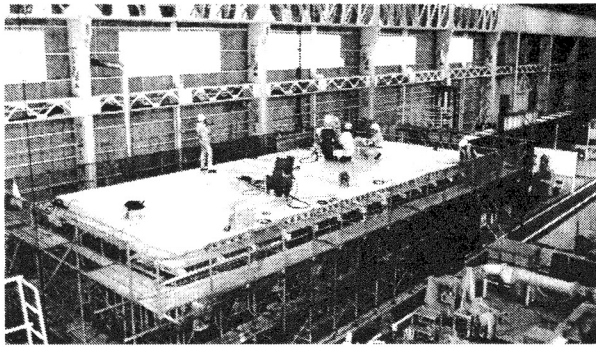


図-1 試験体



図一 2 試験体全景

床版及び鋼桁のA,B,C及びD断面にはひずみゲージ及び変位計を取り付けて計測を行った。なお、床版中央橋軸方向断面をE断面とした。図一2に示すように実験は雨風の天候に左右されないように屋内で行った。表一1に設計諸元および材料特性を示す。

表一 1 設計諸元及び材料特性

要素	部材及び材料名	諸元	
鋼桁	主桁	I	1464×400×19×9
	中間横桁	I	1123×220×19×9
	横桁	H	294×200×8×12
床版	コンクリート	設計基準強度 (N/mm ²)	40
		圧縮強度(6日) (N/mm ²)	55.8
		ヤング係数 (kN/mm ²)	30
		ポアソン比	0.2
		スランプ(流動化剤) (cm)	12
		セメント(早強) (kg/m ³)	464
		水 (kg/m ³)	178
		細骨材・粗骨材 (kg/m ³)	1588
	PC鋼材	材質・径 (mm)	SWPR7B-12.7
		工法 (アフターボンド)	CCL
鉄筋	材質・径 (mm)	D6, D10	
ずれ止	スタッド	長さ・径 (mm)	150×22φ

2.2 橋軸直角方向プレストレスの導入と床版の応力

橋軸直角方向へのプレストレス導入は CCL 工法により行った。また、12.7mm 径の PC 鋼線を 225mm ピッチに配置した。プレストレス導入時の材令は、6日である。初期プレストレス σ_p は、(1)式によって算定すると 1440N/mm² となるが¹⁾、安全余裕度を考慮して 1350N/mm² とした。また、PC 鋼材の 1 本当たりの緊張力は、132kN である。

$$\sigma_p = M_{in} (0.8\sigma_{py}, \sigma_{pu}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ_{py} 、 σ_{pu} : PC 鋼材の降伏点、引張り強さ
 一般にプレストレス導入中の引張り力は、摩擦力な

どにより減少するが、PC 鋼線の両端にロードセルを配置して引張り力を計測した結果、緊張端での導入量は 127kN であった。

緊張端ではくさび固定時に引き込み量(セット量)によって緊張量の損失が生じる。今回の実験では、セット量の計測値は 4mm であるため緊張力のロードセル計測値は 112kN となり、約 12%の減少となった。なお、固定端の緊張力は、117kN であった。

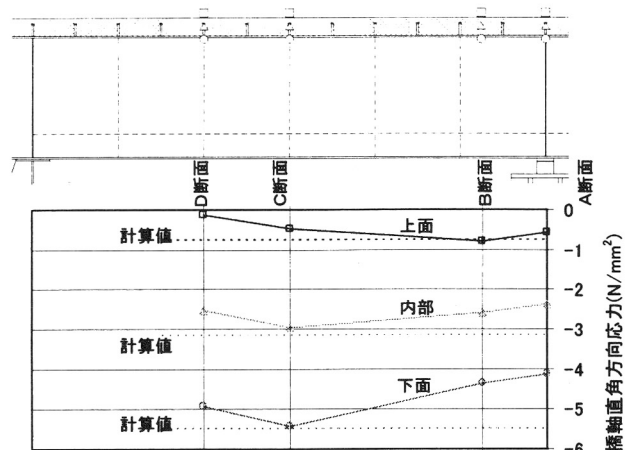
図一3(a)に橋軸直角方向プレストレス導入時のE断面における橋軸直角方向応力の分布を示す。床版の応力状態は厳密には板理論を用いて表すべきであるが、ここでは近似的に梁理論による応力を(2)式によって求めて破線で示した²⁾。その結果、中間支点A断面近傍では床版下面及び内部の計測応力値は梁理論による応力よりも 24~30%小さい結果となった。

$$\sigma = \frac{P_t}{A_e} \pm \frac{P_t \cdot e}{Z_e} \dots \dots \dots (2)$$

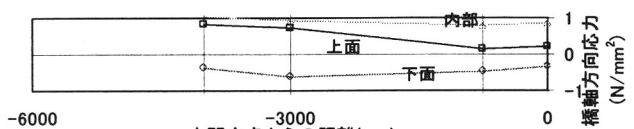
ここで、 A_e 、 Z_e : 鉄筋を考慮した床版 1m 幅の断面積及び断面係数、 e : 図心からの PC 鋼材の偏心量

一方、中間支点上横桁のひずみ計による軸力計測値は 52kN と大きく、プレストレス導入力が中間支点横桁にも流れたことがわかる。なお、中間横桁の軸力計測値は 17kN で、橋軸直角方向プレストレスに対する影響は小さい。

図一3(b)にプレストレスのポアソン効果によって生じる橋軸方向応力を示すが、床版内部及び上面において引張り応力が生じている。この引張り応力は、コンクリートの引張り許容応力の 20%程度であるのでクラックは発生しないが、負曲げモーメントによる引張り応力と加算されるので注意が必要である。また、床版下面には圧縮応力が生じている。



(a) 橋軸直角方向応力分布



(b) 橋軸方向応力分布

図一 3 プレストレス導入時の応力

図-4にA,B,D断面におけるプレストレス導入による橋軸直角方向の計測応力と梁理論値を比較したが、A断面では横桁の影響によって床版下面ではプレストレスが十分に導入されない結果が現れている。

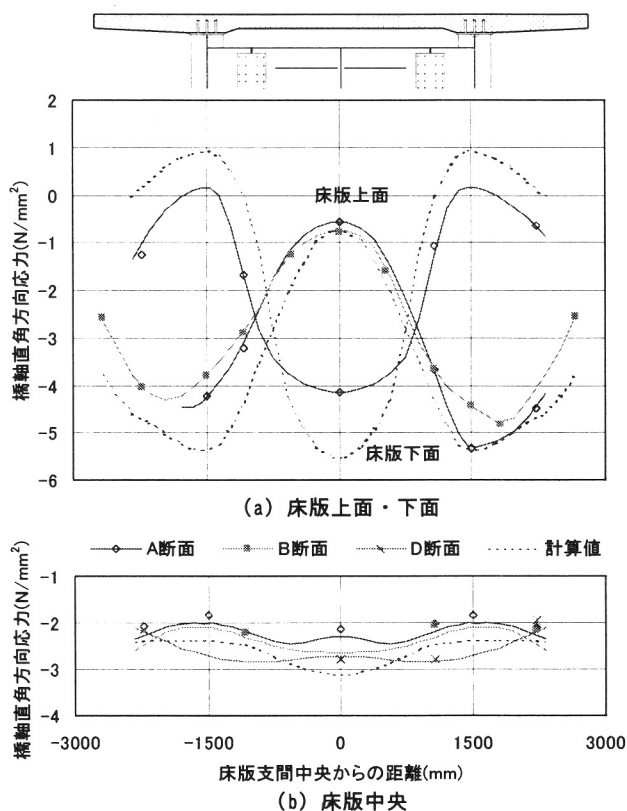


図-4 プレストレス導入時の床版応力(A, B, D断面)

2.3 橋軸方向プレストレス導入と床版の応力

活荷重作用時に負曲げによるクラックが入らないように、中間支点部をジャッキアップダウンして橋軸方向にプレストレスを導入した。導入圧縮応力は、コンクリートの乾燥収縮及びクリープによる減少を考慮して 3.5N/mm^2 とした。ジャッキアップは、あらかじめ鋼桁の中間支点部を 5.5mm 持ち上げ、コンクリートの硬化後にジャッキダウンを行った。

図-5に自重のみによるジャッキダウン後の中間支点部床版のひずみ分布を示すが、せん断遅れによる影響で主桁位置の橋軸方向応力が大きく、主桁支間内では小さくなっている。なお、床版上面でのプレストレス導入量は、試験体が部分モデルで軽量であるために自重のみでは 4.2mm しか沈下せず所定の圧縮応力 3.5N/mm^2 の 76% しか導入されなかったため、中間支点を強制的に変位させて所定の圧縮応力を導入した。

2.4 床版プレストレス導入時のFEM解析

図-6にFEM解析モデルを示す。解析では、床版をソリッド要素で板厚方向に4分割し、張出部の傾斜及びハンチなども忠実にモデル化した。鋼桁をシェル要素及びスタッドをバー要素で分割し、バー要素を床版

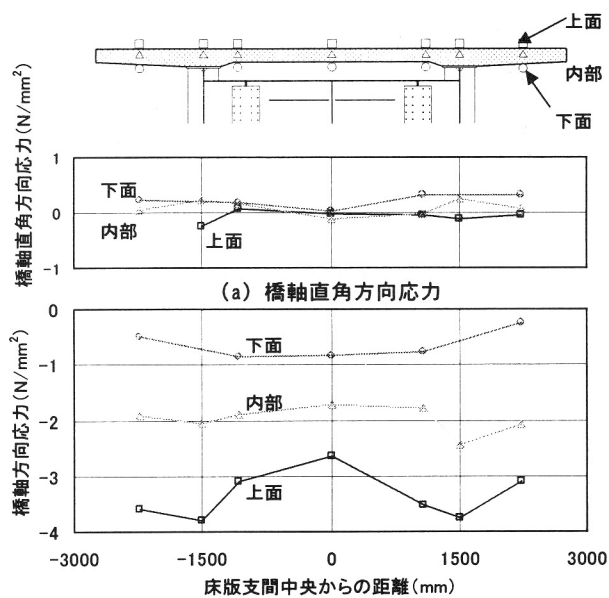


図-5 ジャッキダウン後の支間中央床版の応力

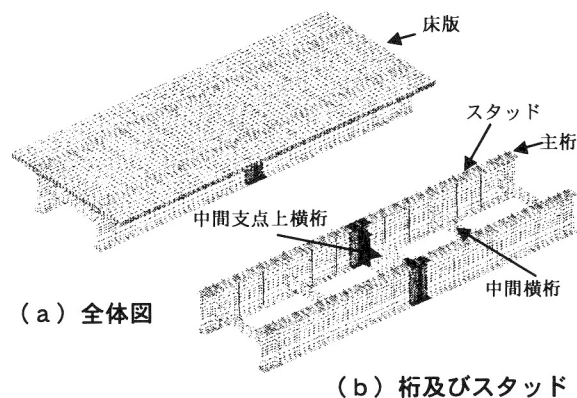


図-6 FEM解析モデル

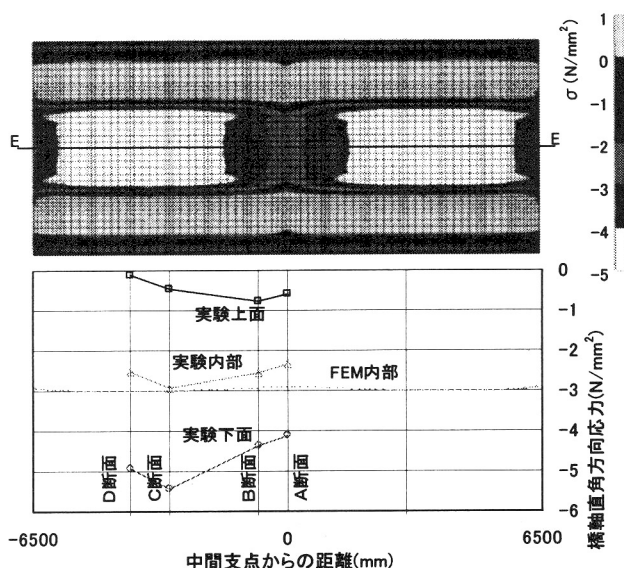


図-7 プレストレス導入時の床版応力(FEM解析)

内部のソリッド要素の節点に結合することによって合成構造のモデル化を行った。また、コンクリートとフランジ面は接触境界条件を用い、引張力が作用する場合には荷重を伝達させないものとした。

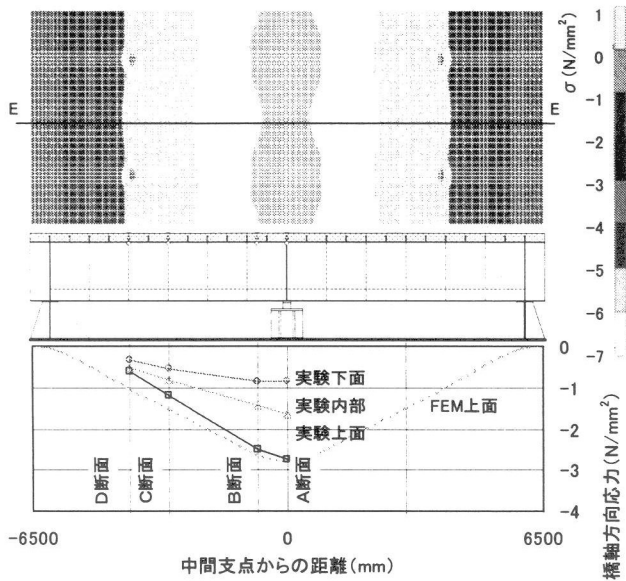


図-8 ジャッキダウン時の床版応力 (FEM 解析)

図-7に橋軸直角方向にプレストレスを導入した場合の床版の応力分布を示したが、床版内部の応力は、計測値とほぼ合っている。また、中間支点上横桁の位置では応力が低下し、プレストレスの導入されにくい状態が、実験値と良くあっている。

図-8にジャッキダウン時、床版上面の橋軸方向応力分布を示すが、応力は中間支点上の最大値を示したが、計測値とほぼ一致している。

3. T荷重載荷試験

試験は、道路橋示方書(I.2.1.3)で示されるT荷重を1/2縮尺にした1台及び2台を、図-9に示す位置に載荷して行った。試験荷重は2.5tfとし、各試験ケー

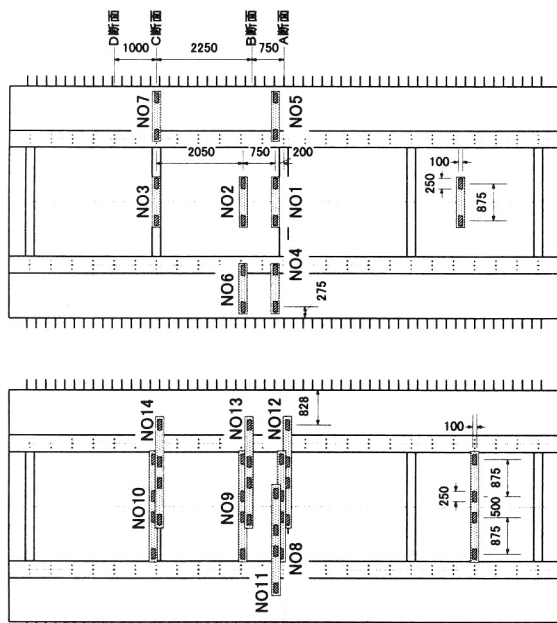


図-9 T荷重載荷位置

ス (NO1~NO14 とする) での床版に発生するひずみ及び変形量を計測した。

図-10は、床版中央1台載荷したNO1の場合のFEM解析による床版上面の応力分布を示すが、コンクリート圧縮応力が0.9~1.1N/mm²の範囲は1x1m程度と影響範囲が小さいことがわかる。

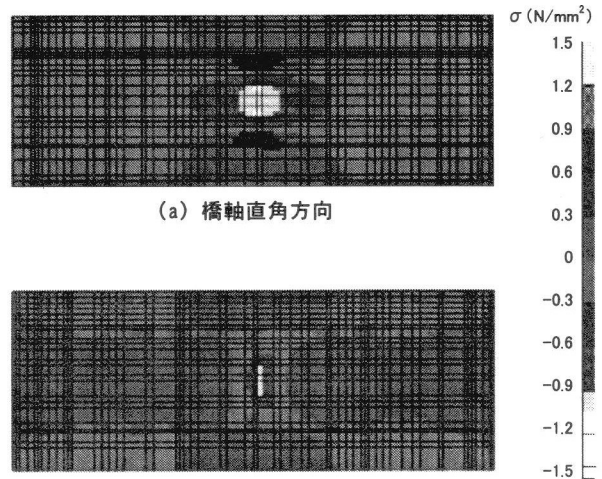


図-10 T荷重載荷時の床版上面の応力分布 (NO1)

図-11に試験ケースNO1,NO5,NO8の中央面鉛直変位分布の計測値とFEM解析値を示したが、両者はほぼ一致している。

図-12及び図-13にNO1の床版上面橋直方向及び橋軸方向のA,B,D断面応力分布を示す。図中にFEM解析値を示すが、両者はほぼ一致している。

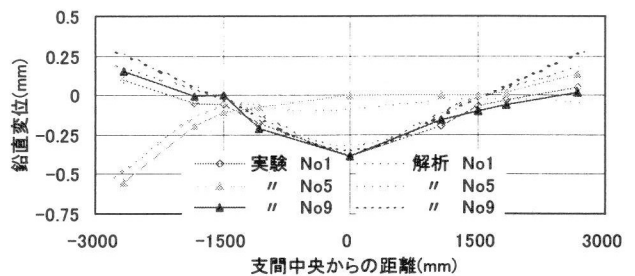


図-11 中央断面の鉛直変位分布

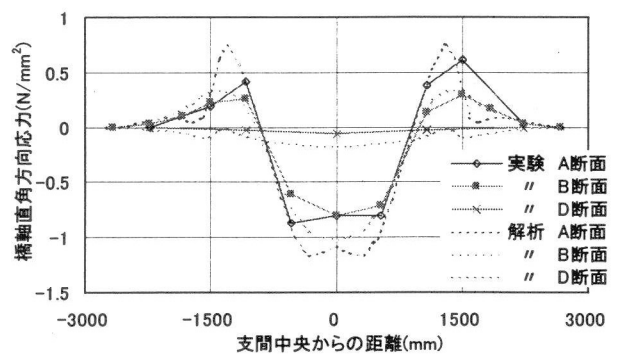


図-12 床版上面の橋軸直角方向応力分布 (NO1)

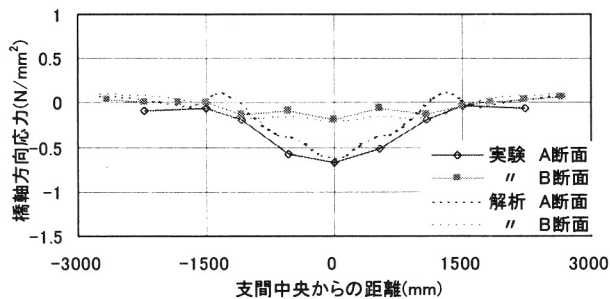


図-13 床版上面の橋軸方向応力分布 (N01)

図-14 に中間支点上横桁と主桁フランジとを連結するウェブギャップ板(WG板とする)のNO1での応力分布を示している。一般にWG板の端部には応力集中が生じ疲労強度が問題となる。事実FEM解析では応力集中が見られるが、計測値では、ほとんど見られなかった。そのため床版と主桁フランジ間を調査した結果、約0.2mm程度の隙間が生じていることがわかった。これは橋直方向プレストレス導入及びPC鋼材の曲線配置による影響と考えられ、床版のクリープ変形に伴って隙間の範囲は時間とともに拡大している。

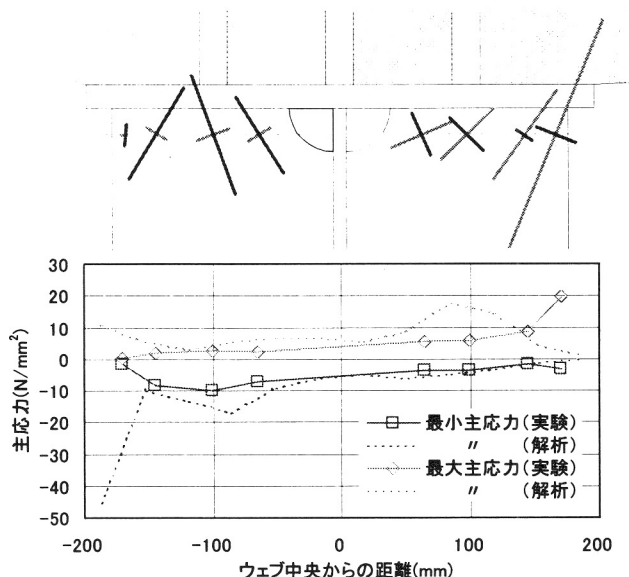


図-14 ウェブギャップ板の局部応力

図-15、図-16 にNO5における計測及びFEM解析による応力分布の比較を示すが、両者は良く一致している。主桁上の引張応力実測値は、 0.94N/mm^2 であるためクラック発生応力に比べて小さい。また、応力の範囲 ($0.5\sim 1.0\text{N/mm}^2$) は橋軸方向に1.4mである。

図-17、図-18 に示す主桁支間内に2台乗荷したNO9の発生応力はNO1に比べて1.6倍である。表-2に道路橋示方書(Ⅱ. 6.1.4)に従って求めた設計曲げモーメント及び実験から算定される曲げモーメントを示した。これによると道路橋示方書の設計曲げモーメントは、実験値の1.5~2倍大きいことが分か

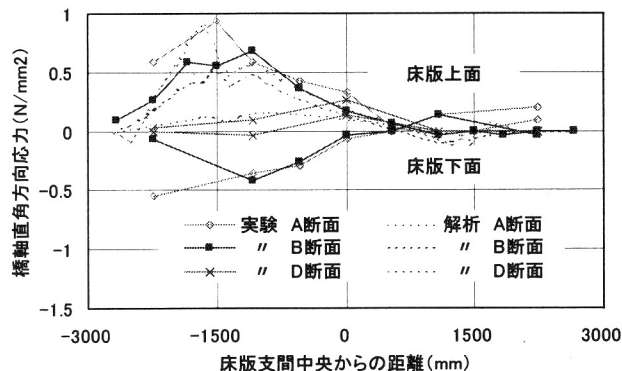


図-15 A, B, C断面の橋軸直角方向応力分布 (N05)



図-16 床版上面の軸直角方向応力分布 (N05)

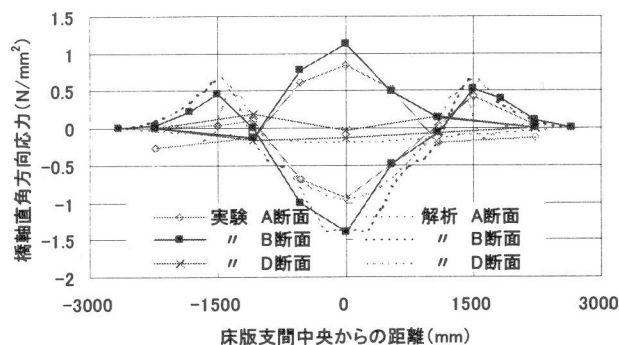


図-17 A, B, C断面の橋軸直角方向応力分布 (N09)

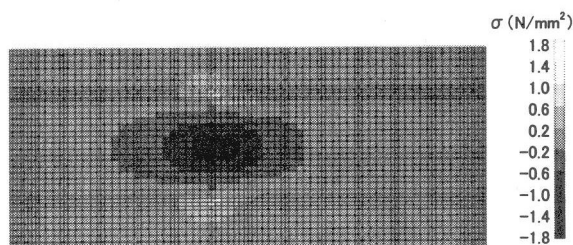


図-18 床版上面の橋軸直角方向応力分布 (N09)

り、床版の設計に対しては安全側の評価をしていることが分かった。これは、道路橋示方書の設計曲げモーメントは床版の橋軸直角方向に対して与えられていること、また、主桁位置では負曲げが発生し、単純支持条件ではないことが差異の原因と考えられるが、さらに衝撃や疲労及び過積載などの安全率が考慮されているものと考えられる。しかし、これからの性能設計規

定など使用限界状態を考慮した正確な設計をしていくためにはFEM解析をツールとする設計が今後必要になってくるものと考えられる。

表-2 T荷重による橋軸直角方向応力

試験番号	道示設計 曲げモーメント M_D (kN·m)	実測 最大応力 σ_E (N/mm ²)	実測最大 曲げモーメント M_E (kN·m)	比 M_E/M_D
NO 1	10.96	0.87	3.80	0.35
NO 2		0.91	3.94	0.36
NO 3		0.68	2.96	0.27
NO 4	15.16	0.74	5.65	0.37
NO 5		0.94	7.13	0.47
NO 6		0.74	5.65	0.37
NO 8	10.96	1.68	7.32	0.67
NO 9		1.39	6.06	0.55
NO 11	10.96	1.20	5.21	0.48
NO 12		1.16	5.07	0.46
NO 13		0.97	4.22	0.39

表-3 異方性を考慮した曲げモーメント比較

NO	位置	実測値		FEM		比 M2/M1	比 M3/M1	比 M2/M3
		M1 (kN·m)	M2 (kN·m)	等方性 M2	異方性 M3			
NO1	A	3.80	4.70	4.49		1.24	1.18	1.05
	B	4.67	5.61	3.70		1.20	0.79	1.52
NO5	A	2.96	1.52	2.25		0.51	0.76	0.68
	B	7.13	6.76	6.22		0.95	0.87	1.09
NO9	A	6.06	5.88	6.53		0.97	1.07	0.90
	B	3.93	5.01	4.17		1.27	1.06	1.20

これまでは床版を等方性として考えてきたが、現実には橋軸方向(配力鉄筋)と橋軸直角方向(主鉄筋+PC鋼材)とを比較すると橋軸方向鉄筋の方が、橋軸直角方向のそれよりも17%多く、床版を直交異方性版として解析する必要があると考えられる。そこで床版を異方性版として解析を行った。解析結果を図-19及び表-3に示すが、床版支間中央では異方性による差異は5~10%である。しかし、主桁上では解析ケースNO1で50%の差が見られ、異方性として解析した方が、局部応力が小さくなり実験値と良く合っている。なお、主桁上での局部応力は、ウェブギャップ板によるものであるが、配力鉄筋が多いために床版の配力鉄筋方向の変形が抑制されるものと考えられる。また、支間中央の局部応力は載荷点によるものである。

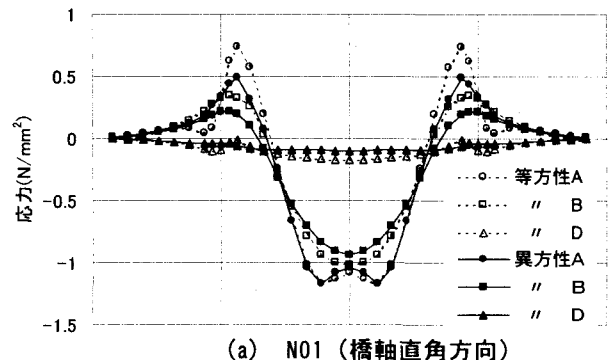
4. まとめ

本研究では、連続合成鋼2主桁橋の中間支点部に2

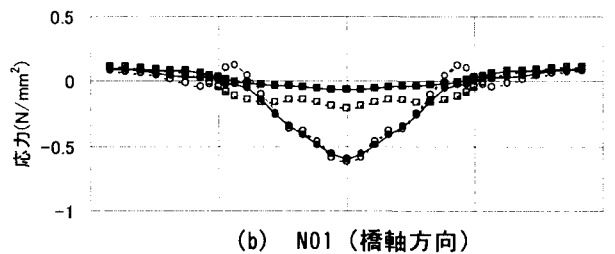
方向プレストレスを導入する現場打ちPC床版について1/2縮尺試験体によるPS導入試験及びT荷重載荷試験を行い床版内の応力分布について調査した結果、次の知見が得られた。

(1)橋軸直角方向プレストレスでは、中間支点上横桁の拘束効果によって床版下面及び内部の応力は、24~30%減少する。

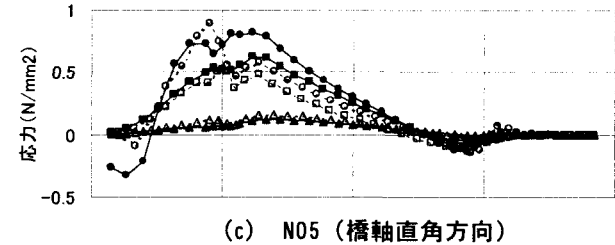
(2)T荷重載荷試験から道路橋示方書の設計曲げモーメントは実測応力から求められるそれよりも1.5~2倍であり、安全側となっている。



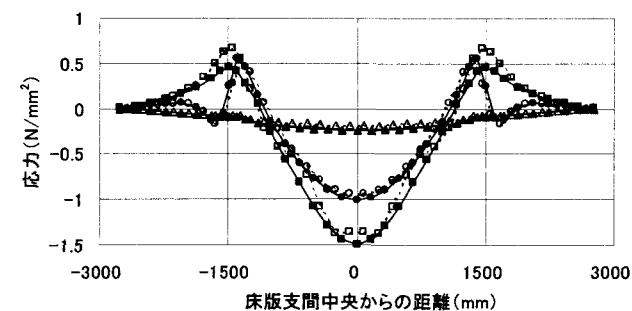
(a) NO1 (橋軸直角方向)



(b) NO1 (橋軸方向)



(c) NO5 (橋軸直角方向)



(d) NO9 (橋軸直角方向)

図-19 異方性を考慮した床版の応力分布

参考文献

- 1) (株)シー・シー・エル・ジャパン：CCL シングルストランド工法・設計施工規準(1996)
- 2) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説，共通編，鋼橋編，平成8年