

論文 少数主桁合成桁の PC 床版に関するクリープ・乾燥収縮の影響評価について

上平 謙二*1・中井 俊雄*2・上野 修*3・富田 耕司*4

要旨: 少数主桁合成桁のプレキャスト PC 床版の設置順序に基づく場所打ち床版部のクリープ・乾燥収縮による床版への引張挙動に着目して、3次元 FEM 解析モデルを用いたクリープ・乾燥収縮による非線形解析を実施し、場所打ち床版部のひび割れ発生にも影響を及ぼす過度な引張応力度を発生させない有効な打設方法や境界条件の設定を検討した。検討結果、場所打ち床版には膨張材を混入するとともに、橋軸直角方向のプレストレス導入後、鋼主桁との一体化に対する遅延を図ればよいことが解った。

キーワード: 少数主桁合成桁、プレキャスト PC 床版、クリープ・乾燥収縮、膨張材

1. はじめに

近年、道路橋において、施工の省力化や経済性を考慮した合理化構造の一つとして、少数主桁の合成桁橋の建設が進んでいる。この場合の床版には、床版の支間長が長くなることから、橋軸直角方向にプレストレスされた PC 床版が採用される。また、この PC 床版の種類としても、プレキャスト PC 床版が採用される場合と、場所打ち PC 床版が採用される場合とに分類できる。

特に、プレキャスト PC 床版の割り付けによって生じる後打ち床版部においては、場所打ち床版部と隣接するプレキャスト床版との境界条件やプレストレスの導入手法によっては、場所打ち床版のプレストレスによるクリープの影響やプレキャスト PC 床版との乾燥収縮差によって床版に引張応力度が卓越する可能性もある。

本研究は、プレキャスト PC 床版と後打ち床版の材令差、後打ち床版近傍の拘束条件、ポストテンション方式による後打ち床版部へのプレストレスの導入効率を含めたクリープ・乾燥収縮によるコンクリート床版の引張応力度の影響評価を目的として、3次元 FEM 解析モデルを

用いたクリープ・乾燥収縮による非線形解析を実施し、ひび割れ発生に影響を及ぼす過度な引張応力度を発生させないための有効な場所打ち床版の打設方法や境界条件の設定を行なうものである。

2. 対象構造

本解析にあたっては、鋼主桁間隔が 5.5m 一定で、拡幅のない標準的な構造として飛島高架橋を対象構造とした。本橋では、プレキャスト PC 床版間の場所打ち床版部が図-1 に示すように、中間支点近傍に設けられているため、この部位に着目して解析を行なうこととした。

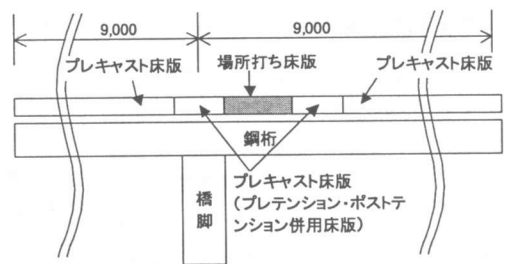


図-1 場所打ち床版位置

*1 ドーピー建設工業(株) 本社技術センター センター長 工博(正会員)

*2 日本道路公団 中部支社 名古屋工事事務所 豊明工事長

*3 ドーピー建設工業(株) 名古屋支店 工事部 主任

*4 日本構研情報(株) 技術計算部 課長

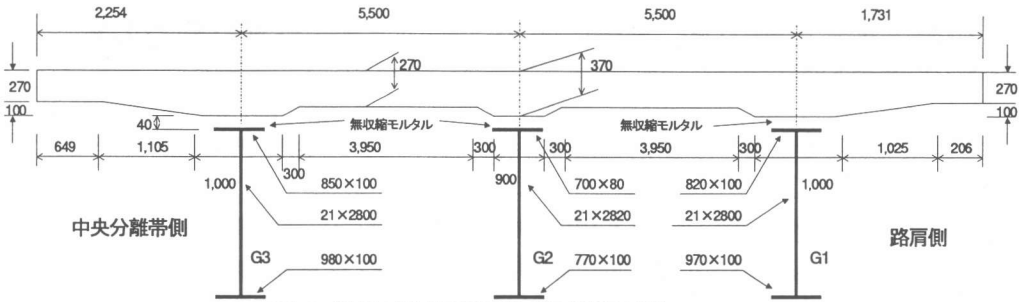


図-2 解析対象断面形状(支点部付近)

3. 解析条件

3.1 断面形状

断面形状は、図-2 に示すように3主桁を有する合成形で、プレキャスト PC 床版の幅員が14.985m、床版支間部の床版厚が27cm、鋼主桁間隔は5.5mである。また、鋼主桁上縁のフランジとプレキャスト PC 床版間には両者を一体化するために無収縮モルタルが注入される。

3.2 PC 鋼材および鉄筋配置

場所打ち床版部には、ポストテンション方式によって橋軸直角方向に1S21.8のPC鋼材でプレストレスが導入される。また、この場合のPC鋼材配置は、床版の橋軸直角方向の曲げモーメントに合理的な配置となるよう曲げ上げ、曲げ下げ配置を行なっている。

また、FEMによる非線形解析において、コンクリート中の鋼材の拘束効果の影響を考慮するため、鉄筋量の多い橋軸方向の鉄筋配置のみを考慮することとした。

3.3 材料の物性

本解析に用いた材料の物性は、表-1の通りである。なお、場所打ち床版とプレキャスト PC 床版のコンクリートの物性は同一である。

表-1 材料の物性

材料	項目	物性
コンクリート	ヤング係数	$E_{c28} = 33000 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 0.2$
鋼材	ヤング係数	$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 0.3$
PC鋼材	ヤング係数	$E_p = 200000 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 0.3$
無収縮モルタル	ヤング係数	$E_c = 21000 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	$\nu = 0.2$

3.4 経時変化によるコンクリートのヤング係数

本解析では、若材令コンクリートを取り扱うが、若材令でのコンクリートのヤング係数は、CEB-FIP (MC90) より、(1)式で求めることとした。これは、場所打ちコンクリート部のクリープ・乾燥収縮における影響度合いを調べることが主目的であるため、水セメント比等の物性を用いない簡略的な方法としたためである。

$$E_c(t) = \beta_E(t) \cdot E_{c28} \quad (1)$$

ここで、 $E_c(t)$ は、時刻 t でのコンクリートのヤング係数、 E_{c28} は、基準ヤング係数(材令28日に対する値)である。

また、(1)式の $\beta_E(t)$ は、(2)式で計算できる。

$$\beta_E(t) = \left(\exp\left(S \cdot \left(1 - 5.3/t^{0.5} \right) \right) \right)^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 S は、セメントの種類に関する定数であり、 $S=0.2$ は早強セメント、 $S=0.25$ は普通セメントである。

3.5 コンクリートの環境条件

本解析に用いるコンクリートの環境条件を表-2のように設定した。

表-2 コンクリートの環境条件

コンクリートの種類	早強セメント
平均温度	20°C
平均湿度	60%
有効厚(A/U)	15cm

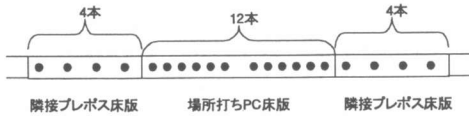
ここに、A:部材(コンクリート)断面積(cm^2)

U:外気に接する部材の周長(cm)

3.6 荷重

本解析で用いた荷重は、プレストレス力と自重である。

プレストレスについては、場所打ち床版に与えるポストテンションによるプレストレス力と隣接プレキャスト床版（プレテン床版に後からポストテンション方式によってプレストレスを導入する床版をいう）に与えるプレストレス力である。プレストレス力については、図-3 に示すように配置緊張している。



PC ケーブル 1 本の断面 $A_p(1S21.8)=312.9\text{mm}^2$

場所打ち PC 床版	隣接プレキャスト床版
$P_e=358800\text{ N/本}$	$P_e=337600\text{ N/本}$

図-3 PC 鋼材の配置と本数

3.7 施工ステージとクリープ及び乾燥収縮量

本解析に用いる施工ステージとクリープ・乾燥収縮量を表-3 に示す。ここで、解析日数を 120 日と設定したのは、橋面工施工までの影響を評価するためである。

表-3 施工ステージとクリープ・乾燥収縮量

施工ステージ	床版	材令 (日)	クリープ増分 $\Delta\phi$	乾燥収縮量増分 $\Delta\varepsilon_{sh}$
場所打ち PC 床版と隣接プレキャスト床版の緊張・グラウト	①	3	-	-
	②	368	-	-
	③	368	-	-
10日後				
隣接プレキャスト床版の間詰め・ジベル孔コンクリート打設	①	13	0.777	26.3
	②	378	0.196	1.5
	③	378	0.196	1.5
14日後				
場所打ち PC 床版ジベル孔モルタル打設	①	27	0.557	22.2
	②	392	0.216	2.1
	③	392	0.216	2.1
120日後				
着目時点 (応力照査着目時点)	①	147	1.246	73.8
	②	512	0.441	15.5
	③	512	0.441	15.1

ここで、クリープ係数と乾燥収縮は、各施工ステージ間で発生した増分量を示す。また、床版の記号は、①：場所打ち PC 床版、②：隣接プレキャスト床版、③：プレキャスト床版である。

また、場所打ち床版部に膨張コンクリートを使用した場合についてもその効果を検討するため、一例として図-4 に示すように 30kgf/m^3 の膨張材を用いた場合の膨張コンクリートの膨張ひずみを用いて解析した。

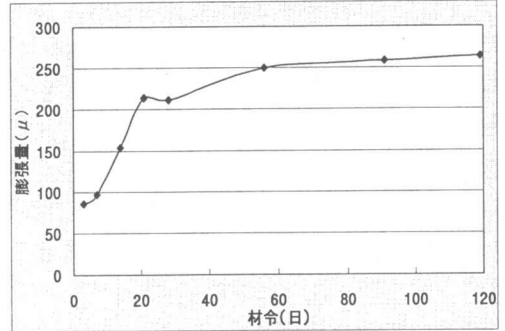


図-4 膨張コンクリートの膨張ひずみ

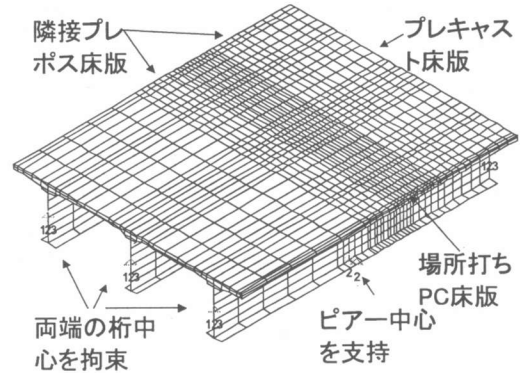


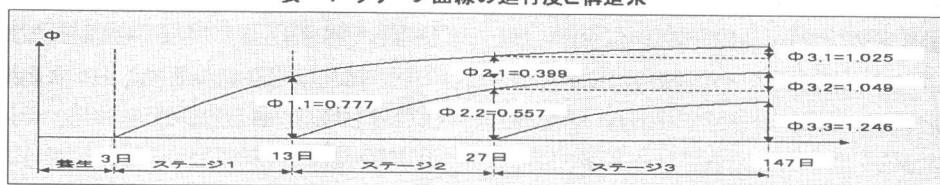
図-5 FEM 解析モデル

4. 解析モデル

本解析では、プレキャスト PC 床版間の調整目地への場所打ちコンクリートの打設、プレストレスの導入時期、スタッドジベル箱抜き部間詰めコンクリートの打設時期等の施工段階を考慮した構造系別に解析を行なっている。

本解析に用いた解析モデルを図-5 に示す。コンクリート床版については、ソリッド要素によって構築し、鋼主桁については薄肉構造であるため、シェル要素で構築した。コンクリート床版と鋼主桁の接合条件については、無収縮モルタルを打設するかしないかで、剛結か隙間を設けるかの境界条件を考慮した。また、解析範囲

表-4 クリープ曲線の進行度と構造系



	ステージ1	ステージ2	ステージ3
飛島高架橋施工法	構造系1 場所打ちコンクリートと隣接プレキャスト床版にプレストレス導入	構造系2 場所打ちコンクリート 上フランジ 橋桁 フランジ	構造系3 場所打ちコンクリート 上フランジ 橋桁 フランジ
第二東名 A 施工法	構造系1 場所打ちコンクリートにプレストレス導入	構造系3 場所打ちコンクリート 上フランジ 橋桁 フランジ	構造系3 場所打ちコンクリート 上フランジ 橋桁 フランジ
第二東名 B 施工法	構造系1 場所打ちコンクリートにプレストレス導入	構造系1 場所打ちコンクリート 2週間そのまま放置	構造系3 場所打ちコンクリート 上フランジ 橋桁 フランジ
乾燥収縮増分	$\epsilon_{sh,1} = 26.29 \mu$	$\epsilon_{sh,2} = 22.18 \mu$	$\epsilon_{sh,3} = 73.81 \mu$
弾性係数	$E_{c,1} = 26856 \text{ N/mm}^2$	$E_{c,2} = 31485 \text{ N/mm}^2$	$E_{c,3} = 32934 \text{ N/mm}^2$
影響コンクリートを使用した場合の影響率(増分)	67 μ	59 μ	52 μ

については、図-1に示すように中間支点からそれぞれ橋軸方向に9mの範囲とし、支点上の横桁や中間横桁もその形状や接合条件について忠実にモデル化した。本解析に用いたプログラムは、汎用プログラム(NASTRAN)である。

5. クリープ進行曲線と構造系変化

本解析に用いたクリープ曲線の進行度と構造系の変化の関係を表-4に示す。ここで、場所打ち床版打設時の境界条件とそれ以後の境界条件の相違を3施工方法で検討し、その境界条件の相違が場所打ち床版に与える影響について検討を行なった。

飛島高架橋施工方法では、まず、ステージ1において隣接するプレキャスト床版と一体となるように場所打ち床版を打設し、場所打ち床版部と隣接プレキャスト床版部にプレストレスを導入する。この時点では、隣接プレキャスト床版とその他のプレキャスト床版は分離された状態であり、更に鋼フランジと床版の間にはモルタルが注入されていない。ステージ2では、隣接プレキャスト床版とその他のプレキャスト床版の間詰め部に

コンクリートが打設され、さらに鋼フランジと床版の間にはモルタルが注入されて一体化される。しかし、場所打ち床版と鋼フランジの間にはモルタルが注入されていない。そしてステージ3で、鋼フランジと床版の間にもモルタルが注入されて一体化された状態となる。

第二東名 A 施工方法では、まず、ステージ1において場所打ち床版部だけにプレストレスを導入する。この時点では、場所打ち床版と隣接するプレキャスト床版は一体化されていないが、その他のプレキャスト床版は結合されている状態である。この場合、鋼フランジと床版の間にはモルタルが注入されていない。ステージ2では、場所打ち床版と隣接のプレキャスト床版が結合され、さらに鋼フランジと床版の間にはモルタルが注入されて一体化される。そしてステージ3は、ステージ2と同じ状態とする。

第二東名 B 施工方法では、第二東名 A 施工方法と同様、まず、ステージ1において場所打ちコンクリート床版部だけにプレストレスを導入する。この時点では、場所打ち床版と隣接するプレキャスト床版は一体化されていないが、そ

他のプレキャスト床版は結合されている状態である。この場合、鋼フランジと床版の間にはモルタルが注入されていない。ステージ2では、ステージ1の状態を2週間放置する。ステージ3では、場所打ち床版と隣接のプレキャスト床版が結合され、さらに鋼フランジと床版の間にはモルタルが注入されて一体化される。

6. クリープ・乾燥収縮の解析方法

基本的な考え方は、道路橋示方書に示されているクリープ・乾燥収縮に伴うコンクリート床版と鋼桁のひずみ差によって生じる断面力解析手法をFEM解析に応用したものである。

具体的には、図-6に示す3つの解析ステップを行なうことによりクリープ・乾燥収縮の時刻経FEM解析を行なうものである。

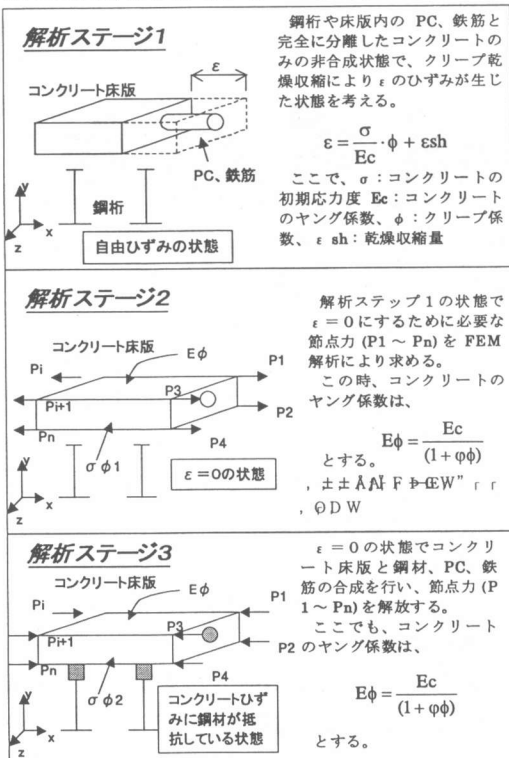


図-6 解析ステップ

上記の3つのFEM解析を行なった後、コンクリートのクリープ・乾燥収縮による変化応力度は、(3)式で求める。

$$\Delta \sigma_{\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{\phi 1}$ は、解析ステップ2でのFEM解析結果で、 $\sigma_{\phi 2}$ は、解析ステップ3でのFEM解析結果である。

7. 解析結果及び考察

場所打ち床版に着目したクリープ・乾燥収縮のFEM解析結果の応力発生状況をグラフ化すると表-5の通りとなる。これらの解析結果から、クリープ・乾燥収縮によって、場所打ち床版に引張応力の影響を最も受け難いのが、第二東名B施工法であり、次に第二東名A施工法で、最も影響を受けやすいのが飛島高架橋であることが解る。これは、場所打ち床版と隣接するプレキャスト床版との境界条件の差および放置期間を設けたための影響であることが容易に推測できる。また、発生応力度を見ると、飛島高架橋では、橋軸方向上縁応力度で床版支間中央付近に 1.4 N/mm^2 程度の引張応力度が発生しており、下縁応力度では、外側鋼フランジ近傍のハンチ付近で 2.0 N/mm^2 程度の引張応力度が発生している。特に、鋼フランジ近傍のハンチ付近で大きな引張応力度が観察されるのは、コンクリート床版が鋼桁上のフランジと剛結され、橋軸方向に拘束されるため橋軸方向に引張応力が大きく発生するものと考えられる。ここで、ひび割れが発生するとすれば、床版支間中央部の上縁側と下縁側の鋼フランジ近傍のハンチ部付近と考えられる。

また、本解析では、飛島高架橋施工法と第二東名A施工法において膨張材を使用した場合について解析を行なったが、表-6より理解できるように、膨張材の効果は、第二東名A施工法より飛島高架橋施工法に高い効果が見られた。また、この膨張材の効果のみ評価すれば、橋軸直角方向の長手方向に顕著に現れている。

応力度的には、飛島高架橋施工法において、橋軸直角方向で平均 1.6 N/mm^2 、橋軸方向で平均 0.9 N/mm^2 の圧縮効果が見られ、第二東名A施工法では、橋軸直角方向で平均 1.2 N/mm^2 、

表-5 クリープ・乾燥収縮のFEM解析結果

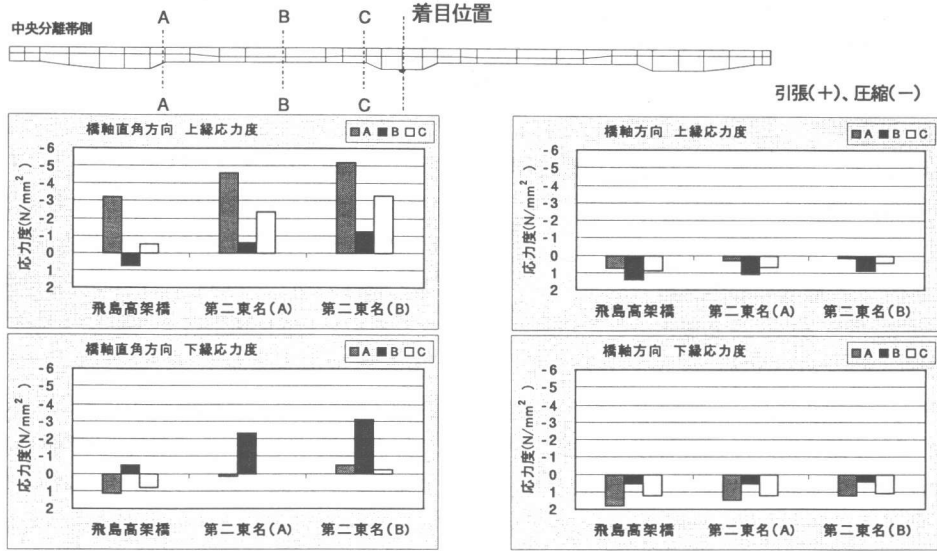
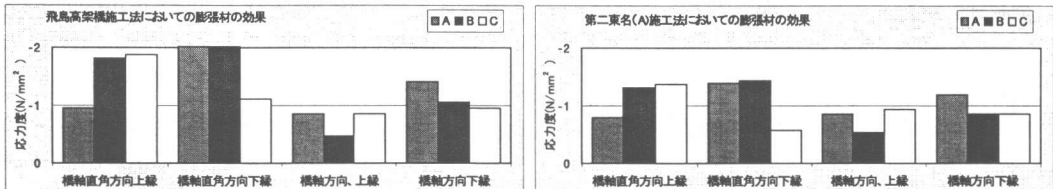


表-6 膨張材の効果



橋軸方向で平均 $0.9 N/mm^2$ の圧縮効果が見られた。

橋軸方向の引張作用に伴うひび割れ対策については、解析結果から、主たる原因が乾燥収縮と考えられるため、施工法よりも膨張材の使用が効果的であると考えられる。また、橋軸直角方向の引張作用については、主たる原因がプレストレスによるクリープの影響であると考えられるため、鋼主桁フランジとの一体化を遅らせるのが効果的であると考えられる。

8. まとめ

プレキャストPC床版間の後打ち床版の物性、打設方法及び鋼フランジとの拘束等によって、場所打ちコンクリート床版への引張応力度の発生要因について、種々な境界条件を設定してコンクリートのクリープ・乾燥収縮による3次元FEM解析を実施したが、本解析以上に更なる時間の経過によって、場合によってはひび

割れ発生を許容することも考えられるため、後打ちコンクリートの施工にあたっては、以下の方法が有効であると考えられる。

- ① 場所打ちコンクリートには、膨張性能を有効に発揮し得る膨張材を混入するのが望ましい。
- ② 場所打ちコンクリートにプレストレスを導入した後、鋼主桁フランジとの一体化を極力遅らせるのが望ましい。
- ③ 場所打ちコンクリート打設時には、プレキャストPC床版と縁を切っておくのが望ましい。

参考文献

- 1)宮下,立神,斉藤,木次:実橋を用いたプレキャストPC床版における静的載荷試験,第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム,pp.321~326,2000年10月