

ハイラーキ要素によるPC床版の曲げ解析

Bending analysis of prestressed concrete slabs by hierarchical elements

函館工業高等専門学校
函館工業高等専門学校
長岡技術科学大学名誉教授

正 員 渡辺 力 (Chikara WATANABE)
○学生会員 奥山雄介 (Yuusuke OKUYAMA)
正 員 林 正 (Masa HAYASHI)

1. まえがき

コンクリート床版を有する鋼・コンクリート複合橋梁構造物の全体解析において、鉄筋の等価剛性を正確に評価することを目的にハイラーキ RC 要素を検討し¹⁾、この要素をプレストレストコンクリート構造(PC構造)に拡張するためにハイラーキ RC・PC 要素の開発を進めている²⁾。この要素では、ソリッド要素内にケーブル要素を埋め込むことによって、要素を分割することなく任意の位置に多数の鉄筋や PC 鋼材を配置できるので、コンクリート床版の鉄筋と PC 鋼材の影響を考慮した効率的な全体解析が可能となる。

本報告では、ハイラーキ RC・PC 要素を PC 床版の曲げ解析に用いて、アンカープレートなどのモデル化の影響、PC 鋼材のモデル化の影響、直線、曲線、折曲げ形状など PC 鋼材の配置形状による影響について検証した結果を報告する。

2. ハイラーキ RC・PC 要素

ハイラーキ RC・PC 要素は図-1(b)のようにソリッド要素内に鉄筋や PC 鋼材などのケーブル要素を埋め込んだ要素である。すなわち、定式化においてケーブル要素の変位関数をソリッド要素の変位関数で表しており、コンクリートと鋼材の付着に関しては、変位関数にすべり係数を与えることで制御できる。また、コンクリートを線形弾性体と仮定し、クリープなどの影響は無視している。

鉄筋や PC 鋼材などのケーブル要素は、ハイラーキ写像の手法を用いることにより曲線形状にも配置できる。また、PC 鋼材におけるプレストレスは初期応力として定式化しており、プレストレス力 P_S は両端

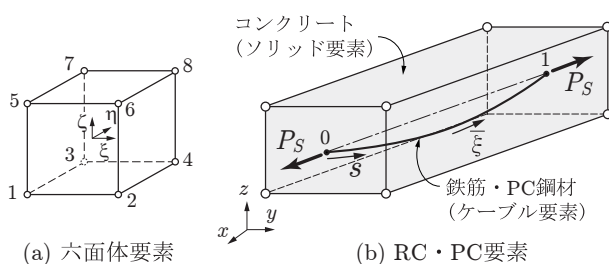
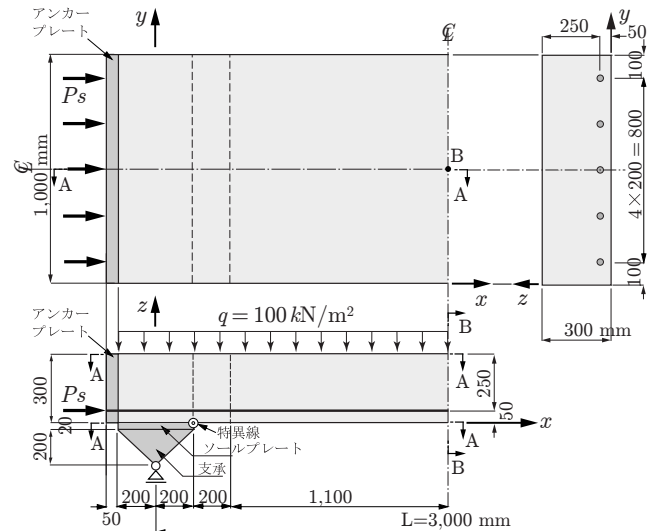
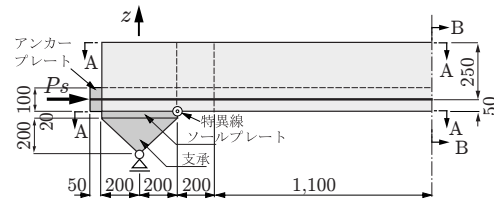


図-1 ハイラーキ RC・PC 要素



(a) Model-A



(b) Model-B

図-2 PC スラブ

0,1 を結ぶ弦方向に作用する自己平衡力となる²⁾。

3. 計算モデルの検討

(1) 計算モデル

計算モデルは、図-2 に示す支間 3m、幅 1m、厚さ 0.3m の単純支持された PC スラブである。荷重はスラブ上面に $q=100\text{kN/m}^2$ の等分布荷重を満載する。直径 20mm の PC 鋼材を有効高さ 250mm として 200mm 間隔に直線配置し、1 本あたり 150 kN のプレストレス力を与える。また、コンクリートのヤング係数 E_C 、ポアソン比 ν_C および鋼材の E_S 、 ν_S には次の値を用いる。

$$E_C = 3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2, \quad \nu_C = 0.167$$

$$E_S = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2, \quad \nu_S = 0.30$$

計算では、構造の対称性を考慮してスラブの 1/2 領域を計算する。支点付近の応力集中を緩和するためにソールプレートとローラー支承をモデル化し、境界条

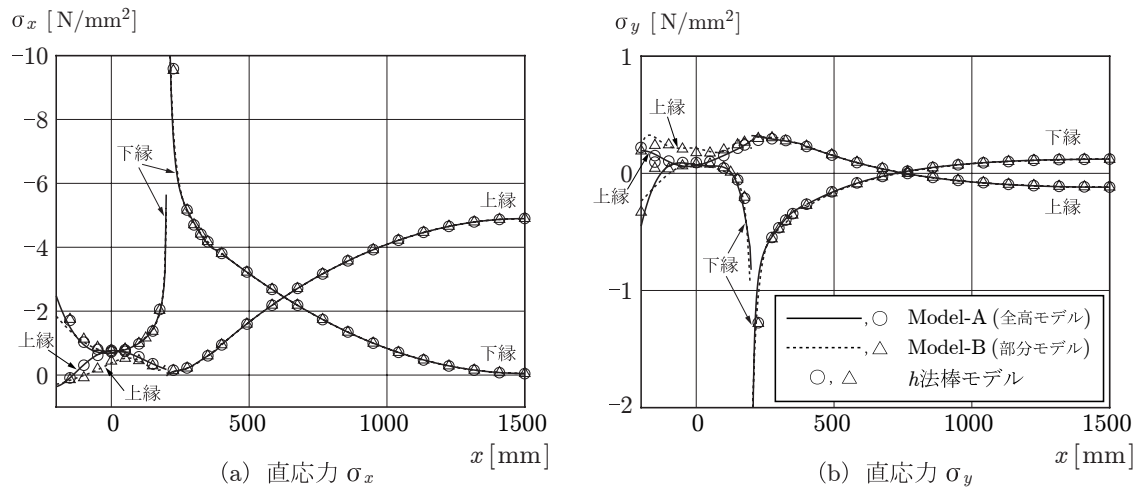


図-3 アンカープレートの影響

件は支承下端の鉛直変位を線支持としている．また，プレストレスの影響により，ソールプレートとスラブの結合部に大きな応力集中が発生するために，ソールプレート端部に特異線³⁾を配置する．

(2) アンカープレートのモデル化の影響

プレストレスを与えると端部に応力集中が発生する．これらがスラブに与える影響を緩和するために幅方向 (y 軸方向) に一様な厚さ 50mm のアンカープレートを設置するが，図-2(a) のように桁高全体に設けた場合 (Model-A) と，図-2(b) のように高さ 100mm として部分的に設けた場合 (Model-B) を検討する．

図-3 は，Model-A と Model-B の応力分布を比較したもので，A-A 線上 ($y=500\text{mm}$) におけるスラブの上・下縁の直応力 σ_x と σ_y を示したものである．比較のために，汎用構造解析システム ADINA⁴⁾を用いて 20 節点ソリッド要素により $51 \times 40 \times 12$ (x, y, z 軸方向) に細分割し，節点間にトラス要素を配置した h 法による解 (棒モデル) を $\circ$ ， $\triangle$ で示している．

支点付近において上縁でわずかにモデル化の影響はあるものの，Model-A と Model-B の応力は全体的に良く一致している．他の応力成分でもアンカープレートのモデル化の影響は少ないことから，以後の計算ではアンカープレートを桁高全体に設けた Model-A を用いる．

4. PC 鋼材のモデル化の影響

図-2(a) に示す計算モデルにおいて，RC・PC 要素モデルでは幅方向 (y 軸方向) と厚さ方向 (z 軸方向) に分割せずに，長手方向 (x 軸方向) には図の破線位置で分割して，スラブを 3 要素 (内，2 要素は特異要素) でモデル化する．また，各要素における変位関数の次数には， x 軸方向 (M) に 6 次式， y 軸方向 (N) と z 軸方

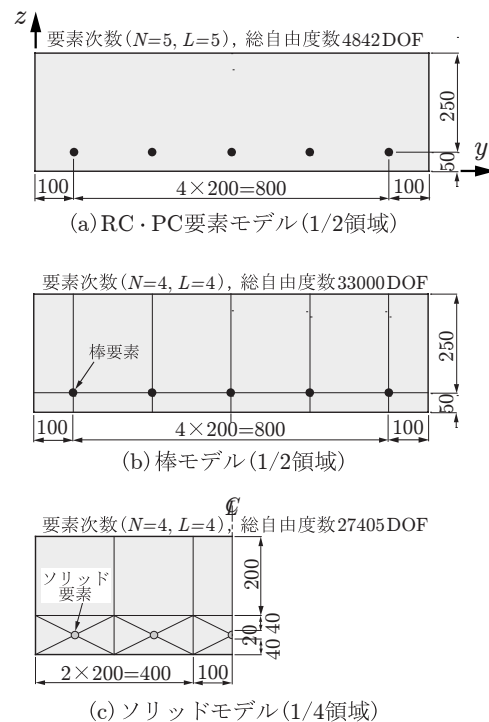


図-4 PC 鋼材のモデル化

向 (L) には 5 次式を用いる (図-4(a) 参照)．なお，ソールプレートとアンカープレートは 6 面体ソリッド要素で，支承は 5 面体ソリッド要素によりモデル化し，これより総自由度数は 4842DOF となる．

PC 鋼材をソリッド要素内に埋め込んだ RC・PC 要素モデルの精度を検証するために，比較解として図-4(b) に示すように PC 鋼材配置位置で分割して棒 (トラス) 要素を配置した棒モデル，図-4(c) に示すように PC 鋼材をソリッド要素でモデル化したソリッドモデルも計算する．さらに，棒モデル，ソリッドモデルの検証のために汎用構造解析システム ADINA⁴⁾を用いて 20 節点ソリッド要素により細分割した h 法による解も計算している．なお，RC・PC 要素モデルと棒モデルでは，ソリッドモデルと伸び剛性を一致させるために，PC 鋼

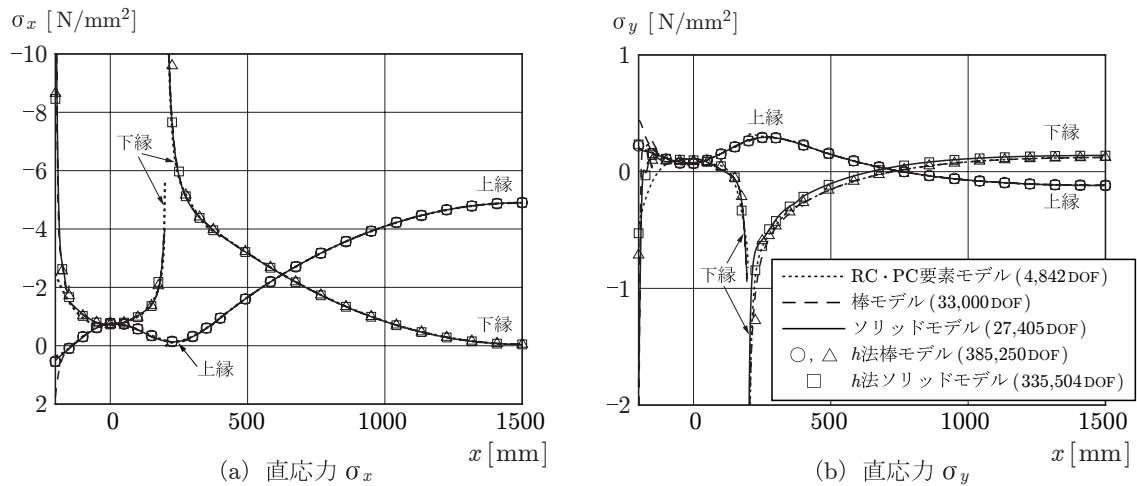


図-5 A-A 線上の応力

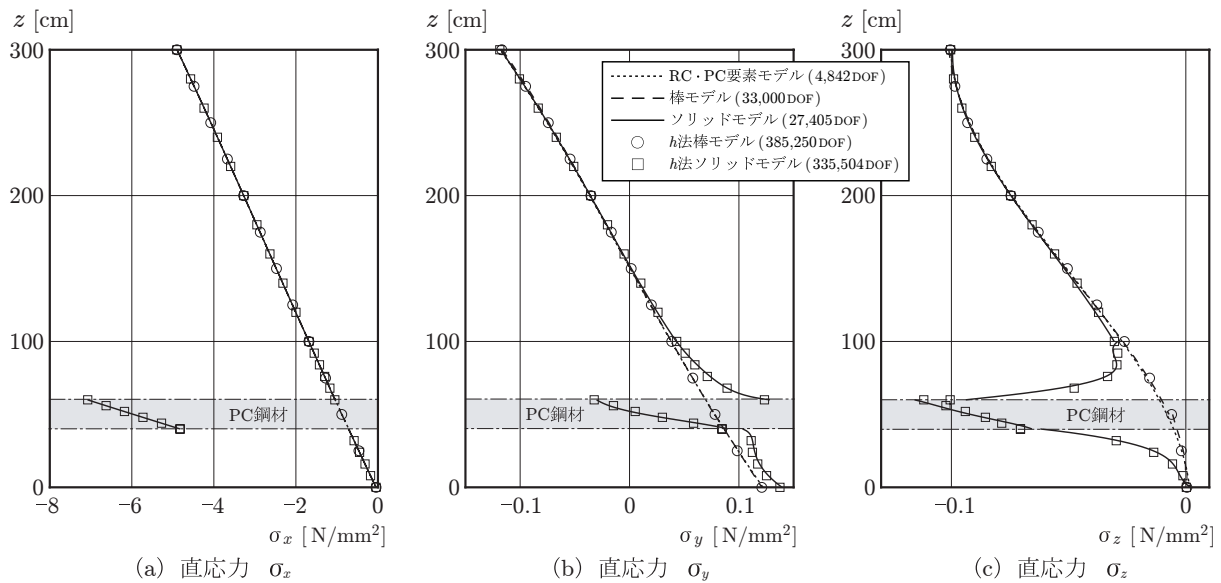


図-6 B-B 線上の応力

材には換算ヤング係数を用いている。

図-5 は、A-A 線上 ($y=500\text{mm}$) におけるスラブの上・下縁の直応力 σ_x と σ_y を示したものである。RC・PC 要素モデルによる計算値は、要素分割を行って節点間に棒要素を配置した棒モデルや PC 鋼材をソリッド要素でモデル化したソリッドモデルの計算値と良く一致しており、ソリッド要素内にケーブル要素を埋め込んだ RC・PC 要素モデルでも十分な解析精度が得られている。

図-6 は、支間中央 B-B 線上 ($x=1500, y=500\text{mm}$) における直応力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の厚さ方向 (z 軸方向) の分布を示したものである。図より、 σ_x ではどのモデルも良く一致した値が得られているが、ソリッドモデルの σ_y と σ_z では異種材料の結合による特異性から PC 鋼材の周辺で応力集中を起こしていることが分かる。PC 鋼材をトラス・ケーブル要素でモデル化した RC・PC 要素モデルや棒モデルではこの応力は計算できないが、

RC・PC 要素モデルの自由度数は棒モデルに対して約 $1/6.8$ となっており、効率良く PC 鋼材とプレストレス力の影響を考慮した全体解析が可能となる。

5. PC 鋼材の配置形状の影響

次に、PC 鋼材の配置形状の影響を調べる。図-4(a) の RC・PC 要素モデルにおいて、PC 鋼材を図-7 に示す直線配置、曲線配置、折曲配置の 3 ケースに配置する。なお、図-7(b) の曲線配置では、支点上 ($x=0$) で有効高さ 150mm 、支間中央で有効高さが 250mm となるように 2 次曲線で配置している。いずれの配置ケースにおいても、スラブを 3 要素でモデル化し、直径 20mm の PC 鋼材 5 本を支間中央で有効高さが 250mm となるように配置して、1 本あたり 150kN のプレストレス力を与えている。比較解には、汎用構造解析システム ADINA⁴⁾ を用いて 20 節点ソリッド要素により $51 \times 40 \times 12$ (x, y, z 軸方向) に細分割し、節点間にトラス要素を配置した h

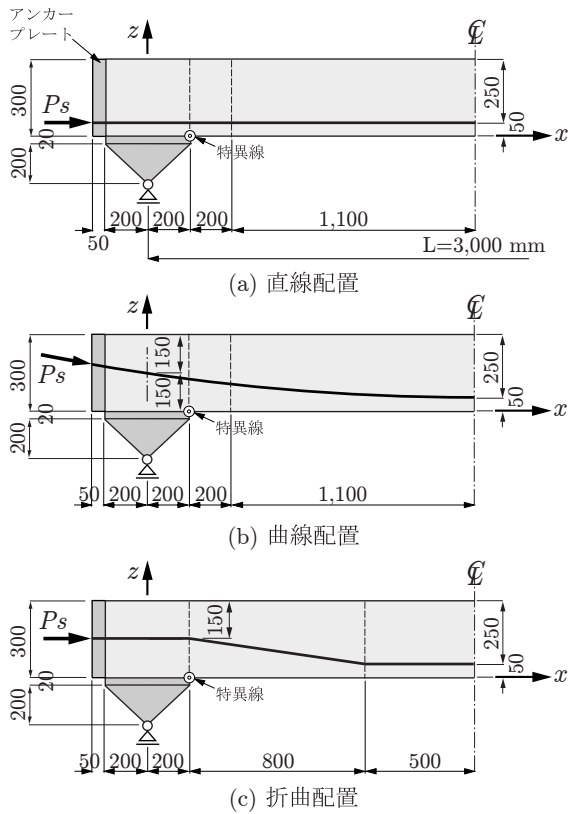


図-7 PC 鋼材の配置形状

法による解(棒モデル)を用いる。

図-8 は、A-A 線上 ($y=500\text{mm}$) におけるスラブ下縁のたわみ w 、スラブ上縁と下縁の直応力 σ_x を示したものである。比較のため、PC 鋼材とプレストレス力を省略した無補剛要素の値(実線、●印)も示してある。どの配置形状においてもハイラーキ RC・PC 要素モデルの計算値は、細分割した h 法棒モデルの計算値と良く一致している。

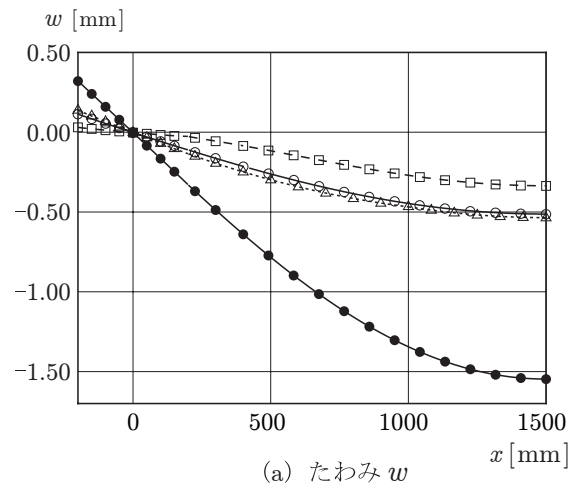
本計算例では、支間中央において分布荷重 q による引張応力を打ち消すようにプレストレス力を与えているが、下縁の直応力 σ_x は支間中央においてどの配置形状でもほぼゼロになっている(図-8(c))。

6. まとめ

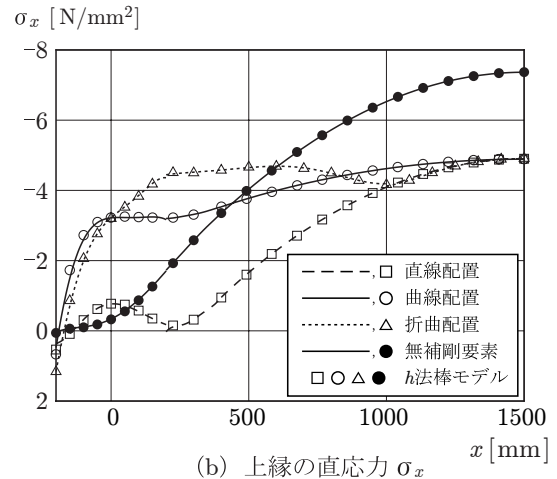
ハイラーキ RC・PC 要素を PC 床版の曲げ解析に用いた数値計算結果から以下のようなことが言える。

- 1) ハイラーキ RC・PC 要素により、PC 床版の等価剛性を十分に評価できる。
- 2) PC 鋼材が曲線形状や折曲形状に配置された場合でも要素を細分割することなく、十分な解析精度が得られる。

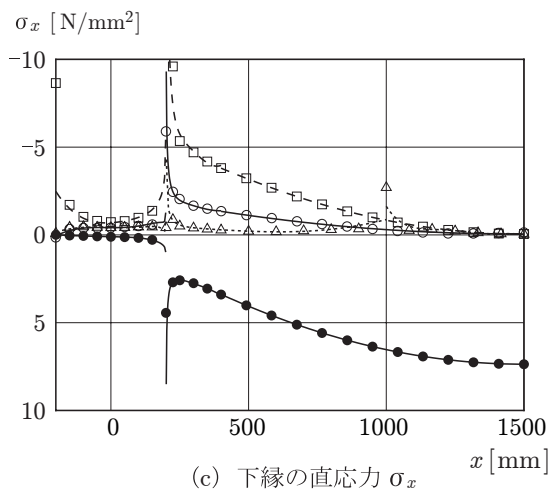
以上の検討から、ハイラーキ RC・PC 要素では PC 床版の等価剛性を十分に評価できることが分かった。今後、2 主桁橋など鋼・コンクリート複合橋梁構造物の PC 床版のモデル化に用いて、本要素の効率性



(a) たわみ w



(b) 上縁の直応力 σ_x



(c) 下縁の直応力 σ_x

図-8 A-A 線上の変位と応力

と実用性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 東 崇広, 渡辺 力, 林 正: 鉄筋コンクリート構造のハイラーキ RC 要素モデル, 土木学会北海道支部論文報告集 (CD-ROM), 第 61 号, I-41, 2005.
- 2) 渡辺 力, 林 正, 斎藤道生: PC 構造へのハイラーキ RC 要素の適用に関する基礎的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), pp.825-826, 2006.
- 3) 林 正, 渡辺 力, 斎藤道生: 応力集中問題に対する特異写像関数, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.113-123, 2003.
- 4) ADINA Theory and Modeling Guide: ADINA R & D Inc., 2003.