

## プレテンション部材のプレストレス損失の2次元FEM解析

横浜国立大学大学院 正会員 修士(工学) ○ 林 和彦  
 横浜国立大学大学院 正会員 Ph.D 樫 龍哉

### 1. はじめに

近年、プレテンション方式により鉛直プレストレスを導入したプレキャストウェブを用いる、プレテンションウェブを有するPC桁が提案されている。プレテンション部材では、部材端部に十分なプレストレスが導入されない範囲(伝達長)が存在するため、その伝達長の範囲を明らかにしておくことが必要である。

そこで本研究では、実物大のプレキャストウェブを模擬した供試体を作製し、鋼材の形状の違いとプレストレス量をパラメーターとした伝達長測定実験を行った結果<sup>1)</sup>を基に、2次元FEM解析を行い、鋼材とコンクリートとの付着特性の経時変化を含めた簡易な解析モデルを提案した。

### 2. 実験概要

鋼材の種類およびコンクリートへ導入されるプレストレス量をパラメーターとした伝達長測定実験<sup>1)</sup>の概要を示す。実物大のプレキャストウェブを想定して、供試体の寸法は外形が2000×800×300mmとし、図-1のように断面の中心に緊張材を配置している。緊張材として使用した鋼材は、コンクリートとの付着を期待した高強度の異形鉄筋(SD785相当)、ねじ節異形PC鋼棒およびPC鋼より線の3種類であり、表面の形状を写真-1に示す。プレストレス量は、5.0MPa、2.5MPa、1.25MPa、0MPaの4種類とし、表-1に示す合計7体の供試体を用いている。各供試体において、中心付近の2本の緊張材に端部から200mm間隔で1ヶ所2枚のひずみゲージ(ゲージ長2mm)を貼り付けている。

異形鉄筋は端部にねじを切り、ねじ節異形PC鋼棒はそのままの状態、ナットにて鋼材を緊張フレームに定着し、またPC鋼より線はくさび式定着具を用いて、プレテンション方式でプレストレスを導入した。鋼材ひずみの計測時期はプレステ

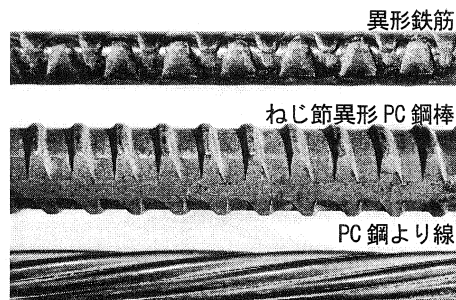


写真-1 鋼材の表面形状

表-1 実験供試体

供試体名	緊張材の種類	緊張材本数 [本]	有効プレストレス [MPa]	鋼材1本の緊張力*1 [kN]	$\sigma_p / \sigma_y$ *2	圧縮強度(プレストレス導入時) [MPa]	圧縮強度(28日) [MPa]
H-0	異形鉄筋(SD785相当) D16	8	0	0	0	60.4	73.2
H-1.25		4	1.25	75	0.48	58.4	75.4
H-2.5		8	2.5	75	0.48	57.6	74.4
G-2.5	ねじ節異形PC鋼棒 φ23	3	2.5	200	0.52	59.4	78.6
G-5.0		6	5.0	200	0.52	57.1	74.3
S-2.5	PC鋼より線 φ15.2	4	2.5	150	0.68	60.1	77.2
S-5.0		8	5.0	150	0.68	61.4	77.3

\*1 有効プレストレスに対応する値

\*2  $\sigma_p$ :有効プレストレスに対応する鋼材応力,  $\sigma_y$ :規格降伏強度

ス導入の直前直後, 1時間, 1日, 7日, 1ヶ月, 3ヶ月, 6ヶ月, 9ヶ月, 15ヶ月後である。供試体は全面で乾燥する状態で室内に置いた。表-2に鋼材の力学的特性, 表-3にコンクリートの配合を示す。

実験より得られた有効プレストレスの分布の経時変化を図-2に示す。一般に, PC鋼より線の伝達長は $65\phi$  ( $\phi$  15.2では988mm)とされているが<sup>2)</sup>, 異

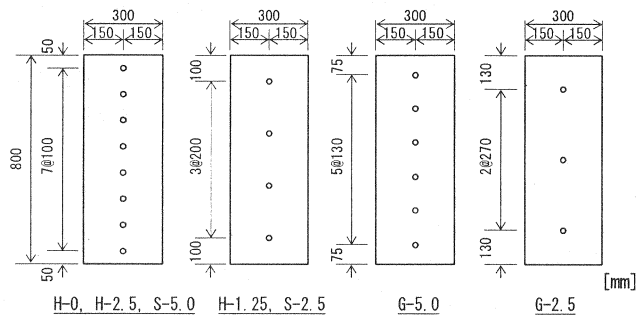


図-1 供試体断面図

表-2 鋼材の力学的特性

種類	呼び名	公称断面積 [mm <sup>2</sup> ]	降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
異形鉄筋 (SD785 相当)	D16	198.6	934	1069	191
ねじ節異形PC鋼棒 (SBPD930/1080)	$\phi$ 23	415.5	1083	1165	204
PC鋼より線 (SWPR7BN)	$\phi$ 15.2	138.7	1818	1912	199

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 [mm]	スランプ [cm]	水セメント比 [%]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]				
					水	早強セメント	細骨材	粗骨材	
20	8.0	35.9	2.0	42.8	154	429	764	1108	高性能減水剤 C×0.60%

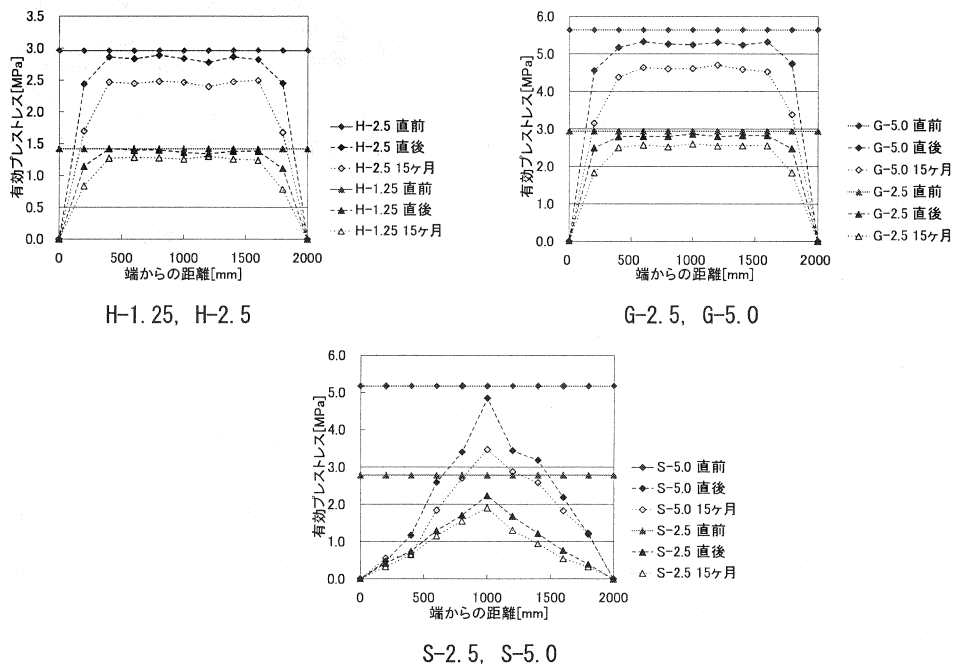


図-2 コンクリートの有効プレストレスの経時変化

形の鋼材を使用することにより伝達長を小さくすることが可能であることが示された。

また、クリープや乾燥収縮などの経時変化によるプレストレスの減少の度合いは、異形鉄筋とねじ節異形PC鋼棒では端部に近づくほどやや大きくなる傾向が見られる。

### 3. モデル化とFEM解析

#### 3. 1 解析概要

鋼材の応力伝達およびひずみの経時変化のモデル化を行うために、FEMにより解析を行った。使用したFEMプログラムは、2次元の4節点四角形要素を用いた弾塑性解析プログラムである<sup>3)</sup>。

図-3に示すように鋼材とコンクリートとの付着を表現するために、コンクリートと鋼材の間に、鋼材表面の凹凸の影響を含んだ領域を表す界面領域を仮定した。界面領域はコンクリートおよび鋼材と節点を共有させている。鋼材およびコンクリートは弾性として扱い、界面領域は材料非線形としている。

プレストレスは鋼材要素の初期ひずみ、乾燥収縮はコンクリート要素の初期ひずみとして入力し、クリープの解析には有効弾性係数法(割線係数法)を用いた。対称性から供試体の1/4を解析領域とした。

表-4にモデル化に関する数値を示す。要素の寸法として、軸方向には40分割(1要素1000/40=25mm)し、界面領域の幅は軸方向長さの5/1000(5mm)とした。要素のアスペクト比は、鋼材は2.5、界面は5、コンクリートは約2としている。コンクリート要素と界面要素の厚さは単位厚さ(1mm)とし、鋼材比から鋼材要素の厚さを定めた。要素分割の一例を図-3に示す。コンクリートの弾性係数は35GPaとし、鋼材の弾性係数は表-2の実測値を用いた。またポアソン比は0.3(鋼材)、0.2(界面)、0.2(コンクリート)とした。

#### 3. 2 乾燥収縮量とクリープ係数の推定

プレストレスを導入していない供試体H-0において、乾燥収縮量を一定としてコンクリート要素に初期ひずみとして与えて解析を行った結果、15ヶ月後の乾燥収縮によるひずみは190 $\mu$ となった。供試体端部から200mmの計測位置において鋼材ひずみの実測値が多少小さくなったが、そこでは供試体端部からの乾燥の

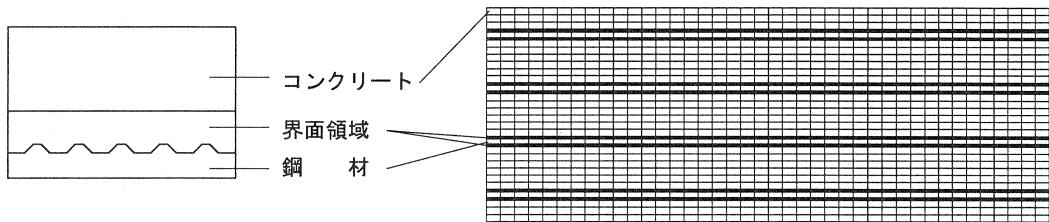


図-3 モデル化および要素分割図 (H-0, H-2.5)

表-4 モデル化に関する数値

供試体	節点数	要素数	コンクリート要素の幅[mm]	界面要素の幅[mm]	鋼材要素の幅[mm]
H-0, H-2.5	1517	1440	13.33	5	10
H-1.25	1435	1360	12.86		
G-2.5	1394	1320	13.16		
G-5.0	1435	1360	13.75		
S-2.5	1435	1360	12.86		
S-5.0	1517	1440	13.33		

影響も受けているためと考えられる。

また、供試体H, Gのひずみ一定区間のひずみの値をもとにして逆解析を行った結果、15ヶ月後のクリープ係数は1.5となり、全供試体にその値を用いた。

### 3. 3 界面領域のモデル化

界面領域は、せん断ひずみの増加により剛性が低下すると考え、異形鉄筋を用いた供試体Hとねじ節異形PC鋼棒を用いた供試体Gについては、界面特性を次のように1次関数として表現した。このとき、伝達応力-せん断ひずみ関係は2次関数で徐々に剛性が低下していくことを表す。すなわち、本モデルは簡単のため、弾性域およびひずみ軟化は無視している。

$$E = a(l + b\varepsilon) \quad (\text{ただし } E \geq 0) \quad (1)$$

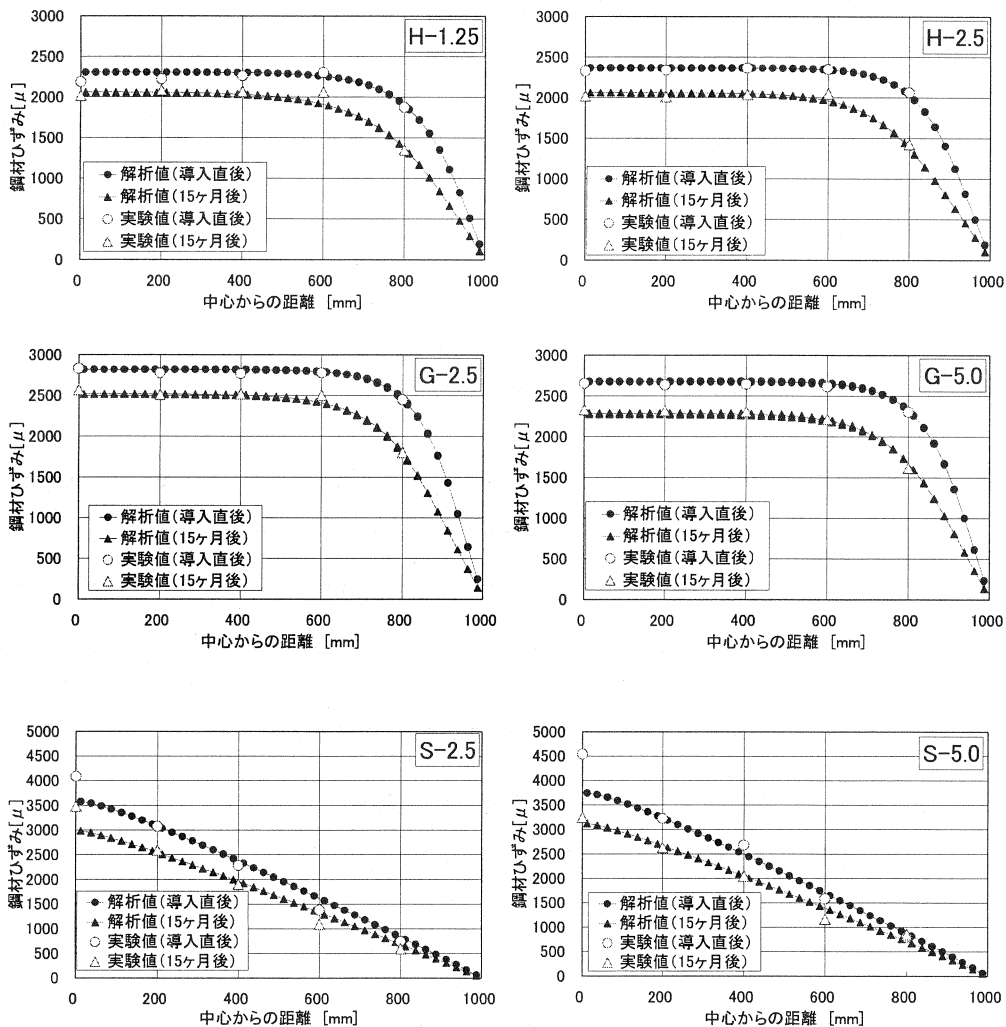


図-4 鋼材のひずみ分布の実験値と解析値の比較

PC 鋼より線については、付着力が期待できず、せん断ひずみの増加に応じて急激に剛性が低下すると考えられるために、異形鉄筋とねじ節異形PC 鋼棒と同様に、簡単のため弾性域とひずみ軟化を無視し、供試体Sの界面特性を次のようにべき関数とした。

$$E = ae^b \quad (\text{ただし } E \geq 0) \quad (2)$$

ここに、式(1)、(2)において、 $E$ : 弾性係数[MPa]、 $\epsilon$ : せん断ひずみ、 $a$ : 時間に依存した係数[MPa]、 $b$ : 定数である。係数 $a$ は、クリープや乾燥収縮の影響により剛性が変化することを表現している。

プレストレス導入直後と15ヶ月後において、供試体ごとに係数 $b$ を一定とし、 $a$ を変化させて解析を行い、これらの値を同定した。

### 3. 4 解析結果

プレストレス導入直後および15ヶ月後の鋼材のひずみ分布の実験値と解析値との比較を図-4に示す。実験値は、供試体中心から同一距離のひずみゲージの値の平均値である。図より、本モデルによって、実験値をよく表せることが確認できる。

界面領域の弾性係数-せん断ひずみの関係を図-5に示す。界面特性に関する係数の一覧をまとめたものが表-5である。界面領域の弾性係数-せん断ひずみ関係は、ひずみの増加に応じて剛性が低下するように表され、供試体H、Gではせん断ひずみが0.03~0.04で剛性が0に達している。PC 鋼より線を用いた供試体Sでは、供試体H、Gに比べて得られた弾性係数の値が小さく、付着力が小さいことを表している。

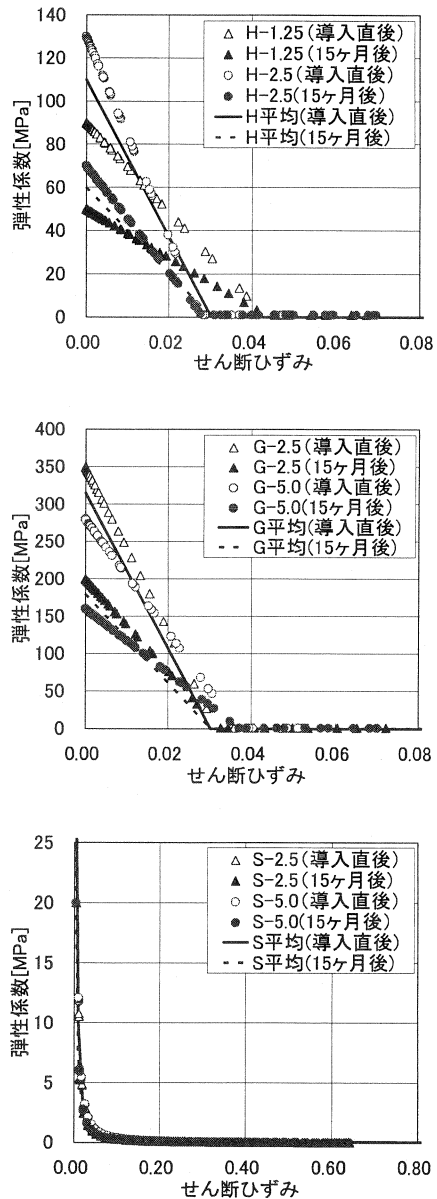


図-5 界面領域の弾性係数-せん断ひずみ関係

表-5 界面特性に関する係数の値

適用式	式(1)						式(2)			
	供試体	H-1.25	H-2.5	H 平均	G-2.5	G-5.0	G 平均	S-2.5	S-5.0	S 平均
$a$ (導入直後) [MPa]		90	130	110	350	280	315	0.01	0.01	0.01
$b$		-25	-40	-33	-35	-30	-33	-1.5	-1.5	-1.5
$a$ (15ヶ月後) [MPa]		50	70	60	200	160	180	0.007	0.007	0.007
$a$ (15ヶ月後)/ $a$ (導入直後)		0.56	0.54	0.55	0.57	0.57	0.57	0.70	0.70	0.70

経時変化による鋼材ひずみの減少は、界面領域の剛性を係数をかけて低下させることによって表すことができ、表-5より、その低下度合いは鋼材の種類ではほぼ同じであり、全体でも0.5~0.7程度のほぼ一定の値をとることがわかる。

表-5に鋼材種別ごとの界面の付着特性を表す係数の値を、各々の鋼材の平均値とし

て示した。これらの値は、代表的なプレテンション方式のプレキャストウェブに用いられる本研究で示した材料特性、有効プレストレス、鋼材1本当りの緊張力、および計測期間の範囲内で適用可能である。

供試体の変形の一例を図-6に示す。付着の劣化により界面の剛性が低下した端部において鋼材が引き込まれる様子が示されている。

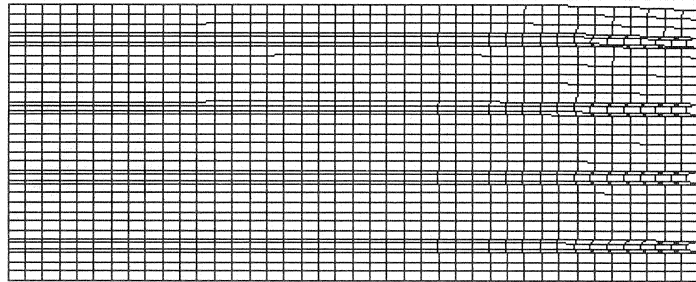


図-6 供試体の変形 (H-2.5の15ヶ月経過時)

#### 4. 結論

プレテンション方式により鉛直プレストレスを導入したプレキャストウェブを対象にし、そこで用いられる3種類の緊張材、すなわち異形鉄筋、ねじ節異形PC鋼棒およびPC鋼より線の付着特性を2次元FEM解析により求めた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- 1) プレテンション部材の付着特性を、界面領域の簡易的なモデルを用いて精度良く表すことが可能である。
- 2) クリープおよび乾燥収縮などの経時変化によって、鋼材とコンクリートの界面領域の剛性が低減し、低減した剛性は15ヶ月経過時においてプレストレス導入直後の値の0.5~0.7倍である。

#### 謝辞

本研究において横浜国立大学 学部4年生 稲葉 亘氏 (現、静岡ガス(株)) に協力をいただいた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三宅淳一郎, 林和彦, 池田尚治: プレテンションウェブを有するPC桁のせん断耐荷性能に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol. 45, No. 2, 2003. 3, pp. 126-133
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I共通編 IIIコンクリート橋編, 2002. 3, p. 200
- 3) Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L.: The Finite Element Method, Fourth Ed., Vol. 1, 2, McGraw-Hill, 1991