

# 高強度材料を用いたプレストレストコンクリート部材の曲げ載荷挙動に関する基礎的研究

白濱昭二<sup>1</sup>・服部篤史<sup>2</sup>・宮川豊章<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 神鋼鋼線工業株式会社 鋼線事業部PC加工技術部 (〒660-0091 尼崎市中浜町10-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

現在、プレストレストコンクリート部材に用いるコンクリートあるいは鉄筋に関して、高強度を有するものが実用化されている。しかし、PC鋼材については高強度のものが開発されているものの、今だ一般化されるには至っておらず、従来強度のものが使用されているのが現状である。本研究では、高強度PC鋼材と、100MPa級の高強度コンクリートを含めた強度の異なるコンクリートを組み合わせたプレストレストコンクリート部材の曲げ載荷試験を行い、その実用化について検討を行った。さらに、ファイバーモデル法による試算を行い、高強度コンクリートを使用した場合の導入プレストレスに関する検討を行った。

*Key Words* : prestressed concrete, prestressing steel, high strength, duplex stainless steel

## 1. 序 論

現在、施工の省力化や省資源化、あるいは耐久性の向上などを目的として、コンクリート構造物に対してさまざまな新材料が登場している。それらは、従来の材料にはなかった新たな機能を備えた高機能性材料である。プレストレストコンクリートの分野においても、高強度、高耐久性などの性能を備えた緊張材が登場している<sup>1)</sup>。さらにコンクリートに関しては、高強度コンクリートあるいは自己充てんコンクリートなどがすでに実用化されている<sup>2)</sup>。

コンクリート構造物は、通常終局時に曲げ引張破壊をするように設計される場合が多く、その場合圧縮側のコンクリートと力学的に釣り合うのは、鉄筋コンクリートでは主筋であり、プレストレストコンクリートでは主筋およびPC鋼材である。したがって、高強度コンクリートを用いて終局曲げ強度を増加させるためには、配置する鉄筋あるいはPC鋼材等の引張側鋼材量も合わせて増加させる必要がある<sup>3)</sup>。しかし、実際には、かぶりやあきの制限のために、鋼材量を増やす事のみによって高強度コンクリートに対応させる事は容易でなく、鋼材の強度を増加させる事による対応も併用する必要がある。

鉄筋コンクリートの分野では、高強度コンクリ

ートと高強度鉄筋を用いた研究が進められており、実際の構造物にも適用されている<sup>4)</sup>。しかし、プレストレストコンクリートの分野においては、高強度PC鋼材の登場がごく最近であったため、高強度PC鋼材を用いたプレストレストコンクリート部材に関する研究はほとんどなされていないのが現状である。

本研究では、高強度PC鋼材および高強度コンクリートを使用したプレストレストコンクリート部材の曲げ挙動について載荷実験を行い、プレストレストコンクリート部材としての基礎的な性能を把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### (1) 緊張材

実験に使用した緊張材の一覧を表-1に、また、各緊張材の応力-ひずみ関係の概要を図-1に示すと共に、それらの特徴を以下に述べる。

#### a) PC鋼より線

通常用いられている緊張材であり、JIS記号はSWPR7BL(JIS G3536)である。

#### b) 高強度PC鋼より線

材料の化学成分のうち、CとSiを通常材より高め

表- 1 緊張材一覧

記号	種類	公称径	公称断面積	規格降伏強度	規格引張強度	リラクセーション値*	ヤング係数
		mm	mm <sup>2</sup>	MPa	MPa	10時間 %	GPa
HT	高強度PC鋼より線12.7mm	12.7	98.71	1 950 (2 359)	2 300 (2 405)	(0.30)	(191)
NT	PC鋼より線12.7mm	12.7	98.71	1 570 (1 819)	1 860 (1 931)	(0.57)	(191)
DP	2相ステンレスPC鋼より線12.7mm	12.7	98.71	1 430 (1 529)	1 550 (1 636)	(0.39)	(190)

( ) : 実測値

\* : 初期荷重はHTの場合で0.7×実引張荷重, その他は0.7×規格引張荷重

表- 2 コンクリートの配合

記号	粗骨材の最大寸法 mm	スランブ(フロー)の範囲 cm	空気量の範囲 %	水セメント比 W/(C+SF) %	細骨材率 s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>						
						水	セメント	シリカフューム	細骨材	粗骨材	混和剤	消泡剤
						W	C	SF	S	G	g/m <sup>3</sup>	g/m <sup>3</sup>
fc30	20	8±2.5	4.5±1.5	55	44.9	165	300	—	241	1 003	797	—
fc65	20	(55±5.0)	2.5±0.5	38	45.1	175	461	—	760	948	5 071	—
fc100	20	(55±5.0)	2.5±0.5	21	35.7	175	750	83	484	890	19 159	4 165

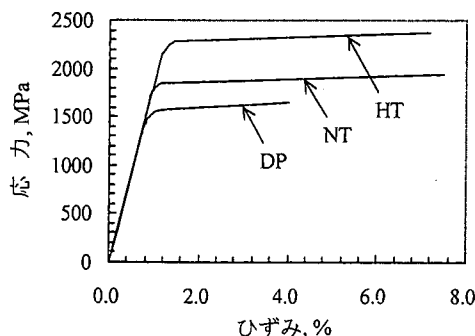


図- 1 緊張材の応力-ひずみ関係

る事によって高強度化を図ったものである。通常材に比べて、降伏強度、引張強度共に、2割以上の高強度化を実現している。

### c) 2相ステンレスPC鋼材

フェライト系のピアノ線、硬鋼線は結晶構造が体心立方格子であり(α相)、オーステナイト系のステンレス鋼線は面心立方格子(γ相)となっている。2相ステンレスPC鋼材は、これらの両相を混合したαとγの2相組織を有している。そのため、耐食性、特に耐塩化物腐食性に優れ、リラクセーション値が小さく優れた疲労特性を持つ。しかし、通常のPC鋼材に比べて降伏強度、引張強度共にやや低く、伸びも小さい。また、降伏比(降伏強度/引張強度)はやや高い。このPC鋼材は、引張強度が低い場合の比較用の緊張材として使用した。

### (2) コンクリート

実験に使用したコンクリートの配合を表- 2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤は、fc30シリーズには標準型のAE減水剤を、fc65およびfc100シリーズには標準型の高性能AE減水剤を使用した。fc100シリーズに使用したシリカフュームは比重2.2、比表面積17.1m<sup>2</sup>/g(BET法)である。また、fc100シリーズの場合、コンクリート量が大きく粘性が高いため、連行した空気が抜けにくいので、消泡剤(空気量調整剤)を使用して空気量を調整した。

グラウトは普通セメントを使用し、W/Cは45%で全供試体で共通とした。また、混和剤にはノンブリージング型で非膨張タイプのものを使用した。

### (3) 試験体

試験体は全長1 700mmで150mm×240mmの矩形断面とした。また、荷重はせん断スパン、曲げスパン共に500mmの3等分2点荷重とした。試験体寸法を図- 2に示す。軸方向筋については、緊張材の特性をそのまま曲げ挙動に反映させるために、組立て筋としてφ6の丸鋼を配筋するのみに止めた。

試験体は、コンクリート打設後、緊張まで脱型せずに湿布養生を行った。特に、混和材としてシリカフュームを用いたfc65シリーズおよびfc100シリーズの試験体は、初期養生が重要なため<sup>5)</sup>、コンクリー

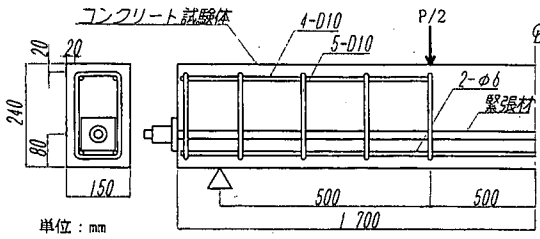


図-2 試験体寸法

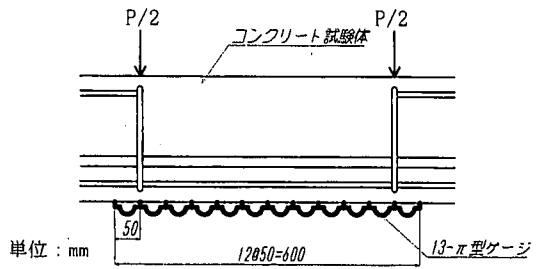


図-3 π型ゲージ貼付け位置

表-3 試験体一覧

試験体	記号		試験体数
	緊張材	コンクリート	
NT30	NT		2
HT30	HT	fc30	
DP30	DP		
NT65	NT		2
HT65	HT	fc65	
DP65	DP		
NT100	NT		2
HT100	HT	fc100	
DP100	DP		

ト打設後約1週間程度、20℃の恒温室で養生を行った。緊張は、コンクリートが所定の強度に達した時点で行い、緊張後直ちにグラウトを行った。導入プレストレス力は、0.7×規格引張荷重または0.85×規格降伏荷重のうち、小さい方の値とした。

実験は、3種類の緊張材と3種類のコンクリート全ての組み合わせについて行い、試験体数は、各シリーズにおいて2体とした。試験体一覧を表-3に示す。

#### (4) 実験方法

測定項目は、試験体中央部、載荷点および支点の変位、試験体中央部の上縁と下縁のコンクリートひずみ、緊張材および主筋中央部のひずみ、およびコンクリートのひび割れ状況とした。なお、各ひずみについてはプレストレス導入の過程においても測定を行った。

ひび割れ幅については、図-3に示すように試験体下面に連続して取り付け、ゲージ長50mmのπ型ゲージを用いて測定した。π型ゲージは、fc30シリーズのコンクリートを用いた試験体では等モーメント区間に10個を連続して取り付け、また、最

初に行ったfc30シリーズの試験体を用いた実験で、載荷点直下付近の、等モーメント区間からわずかに外れた位置にひび割れが発生したため、fc65およびfc100シリーズでは、等モーメント区間の10個に加えて、その外側に各1個ずつの、合計12個を連続して取り付けた。なお、測定は載荷荷重2.5kN毎に行い、ひび割れパターンを観察は10kN毎に行った。

載荷は、最初に部材が降伏するまで行い、その後2.5kNまで除荷した。除荷後、試験体の終局の手前まで載荷を行い、2.5kNまで除荷した。これは、試験体の終局に伴って、π型ゲージが破壊するのを防ぐためである。除荷を始める時点の判断は、コンクリート上縁ひずみが、fc30およびfc65シリーズの試験体は約0.003、fc100シリーズの試験体は約0.002に達した時点とした。これは、土木学会で定められたコンクリートのモデル化された応力-ひずみ曲線<sup>6)</sup>において、コンクリートの終局時の圧縮ひずみは、式(1a)および式(1b)に示されていることによった。

$$f'_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \quad \epsilon'_{cu} = 0.0035 \quad (1a)$$

$$f'_{ck} \geq 60 \text{ N/mm}^2 \quad \epsilon'_{cu} = 0.0025 \quad (1b)$$

ここに、

$f'_{ck}$  : コンクリート圧縮強度の特性値

$\epsilon'_{cu}$  : コンクリートの終局ひずみ

ただし、fc65シリーズを用いた試験体については、その圧縮強度が終局ひずみを判定する基準値付近であり、基準値自体が安全側の数値であることと、できるだけ多くのひび割れ幅の測定値を得るために、除荷を始める時点の判断をfc35シリーズと同じ0.003とした。2.5kNまで除荷後、π型ゲージを取り外し、試験体が破壊するまで載荷を続けた。

表- 4 試験結果一覧

記号	試験時コンクリート			$M_{cr}$		$M_u$			破壊モード		
	$f'_c$ MPa	$E_c$ GPa	$\eta$	$\sigma_{ce}$ MPa	Exp. kN·m	Calc. kN·m	Exp. kN·m	Calc. kN·m		Exp. Calc.	
HT30-1	27.1	25.0	0.91	8.17	16.0	17.2	0.93	37.2	32.9	1.13	上部圧壊
HT30-2			0.91	8.10	14.9	17.1	0.87	37.4	32.9	1.14	上部圧壊
NT30-1	27.1	25.0	0.90	6.41	13.6	14.7	0.93	32.5	29.1	1.12	上部圧壊
NT30-2			0.90	6.25	11.7	14.5	0.81	28.7	29.1	0.99	上部圧壊
DP30-1	27.1	25.0	0.89	5.40	12.3	13.2	0.93	29.4	26.8	1.10	上部圧壊
DP30-2			0.86	3.44	12.5	10.4	1.20	30.5	26.4	1.16	上部圧壊
HT65-1	66.5	44.0	0.92	8.79	20.9	22.6	0.93	47.5	38.7	1.23	上部圧壊
HT65-2			0.92	8.58	19.7	22.3	0.88	46.5	38.7	1.20	上部圧壊
NT65-1	66.5	44.0	0.92	7.66	18.4	21.0	0.88	40.6	32.3	1.26	上部圧壊
NT65-2			0.91	6.50	18.5	19.3	0.96	39.8	32.4	1.23	上部圧壊
DP65-1	66.5	44.0	0.90	5.46	14.7	17.8	0.83	34.7	29.6	1.17	緊張材破断
DP65-2			0.90	5.87	15.4	18.4	0.84	34.5	29.6	1.17	緊張材破断
HT100-1	109.1	44.2	0.92	8.50	23.4	26.1	0.90	49.4	39.6	1.25	上部圧壊
HT100-2			0.92	8.80	24.0	26.5	0.91	50.8	39.6	1.28	上部圧壊
NT100-1	109.1	44.2	0.91	6.81	20.9	23.6	0.88	41.3	32.9	1.26	上部圧壊
NT100-2			0.91	6.76	21.5	23.5	0.91	40.6	32.9	1.23	上部圧壊
DP100-1	109.1	44.2	0.90	5.45	17.2	21.7	0.79	36.9	30.1	1.23	緊張材破断
DP100-2			0.90	5.79	19.0	22.2	0.86	35.3	30.1	1.17	緊張材破断

$f'_c$ : コンクリート圧縮強度  $E_c$ : コンクリートヤング係数  $\eta$ : プレストレス有効係数

$\sigma_{ce}$ : 有効プレストレス力によるコンクリート下縁応力  $M_{cr}$ : ひび割れ発生モーメント  $M_u$ : 終局モーメント

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 実験結果一覧

実験結果一覧を表- 4に示す。ひび割れ発生モーメントの計算に用いたコンクリートの曲げ強度は、式(2)による計算値とした<sup>6)</sup>。なお、fc65シリーズおよびfc100シリーズの場合は混和材としてシリカフュームを使用しているが、この場合も、式(2)を適用することが可能である事が認められている<sup>7)</sup>。

$$f_b = 0.42 f'_c{}^{2/3} \quad (2)$$

ここに、

$f_b$ : 曲げ強度, MPa

$f'_c$ : 圧縮強度, MPa

圧縮強度は、載荷試験時に行った、試験体と同時に製作したテストピースの圧縮試験による試験結果の平均値を使用した。また、 $\sigma_{ce}$ は、式(3)および式(4)<sup>6)</sup>によって算定したPC鋼材の引張応力度の減少量を考慮して求めた。

$$\Delta\sigma_{pcv} = \frac{n_p \cdot \varphi (\sigma'_{cpl} + \sigma'_{cdp}) + E_p \cdot \varepsilon'_{cs}}{1 + n_p \cdot \frac{\sigma'_{cpl}}{\sigma_{pl}} \cdot \left(1 + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{pr} = \gamma \sigma_{pl} \quad (4)$$

ここに、

$\Delta\sigma_{pcv}$ : コンクリートのクリープおよび収縮によるPC鋼材の引張応力度の減少量

$\varphi$ : コンクリートのクリープ係数

$\varepsilon'_{cs}$ : コンクリートの収縮ひずみ

$n_p$ : PC鋼材のコンクリートに対するヤング係数比

$\sigma_{pl}$ : 緊張作業直後のPC鋼材の引張応力度

$\sigma'_{cpl}$ : 緊張作業直後のプレストレス力によるPC鋼材位置のコンクリートの圧縮応力

$\sigma'_{cdp}$ : 永久荷重によるPC鋼材位置のコンクリートの圧縮応力

$\Delta\sigma_{pr}$ : PC鋼材のリラクゼーションによる緊張材引張応力度の減少量

$\gamma$ : PC鋼材の見かけのリラクゼーション率

計算に用いたPCコンクリートのクリープ係数は1.5、コンクリートの収縮ひずみは $380 \times 10^{-6}$ とした<sup>6)</sup>。実際には試験体に用いたコンクリートの初期養生、配合および強度等が異なるため、これらも異なる値を用いるべきであるが、今回は計算を容易にするために、プレストレスを与えたときまたは載荷すると

きのコンクリートの材齢が28日であるときの値を、すべての試験体で用いた。試験体に用いた各緊張材のリラクゼーション値は表-1に示したようにそれぞれ異なるが、これらのデータは10時間リラクゼーション値であり、1000時間リラクゼーション値の実測値が得られていないことから、PC鋼材の見かけのリラクゼーション率はすべての緊張材で、低リラクゼーションPC鋼材の見かけのリラクゼーション率の設計値である1.5%とした<sup>9)</sup>。また、永久荷重によるPC鋼材位置のコンクリートの圧縮応力度は、試験体の自重を無視して0とした。得られたPC鋼材の引張応力度の減少量から求めたプレストレスの有効係数 $\eta$ は、0.85~0.92の範囲内であった。

ひび割れ発生モーメントおよび終局モーメントを計算するにあたり、以下の仮定を用いた。

- 平面保持が成立する。
- PC鋼材のひずみは、その位置でのコンクリートのひずみと同じとする。
- ひび割れ発生モーメントの検討ではコンクリートの全断面を有効とする。
- 終局モーメントの検討では中立軸以下の部分のコンクリートの引張り抵抗は無視する。

ひび割れ発生モーメントの試験値は、ひび割れ幅測定用の $\pi$ 型ゲージの値が急激に増加した時点とした。計算値は、引張側の縁応力がコンクリートの曲げ強度に達する時点として算出した。終局モーメントの測定値は最大モーメントとし、計算値は、圧縮側のコンクリート縁ひずみが終局ひずみとして、fc30シリーズのコンクリートを使用した試験体では3500 $\mu$ 、fc65およびfc100シリーズのコンクリートを使用した試験体では2500 $\mu$ に達した時点とした。また、断面圧縮域コンクリートの応力分布は、コンクリートの圧縮強度試験より得られた応力-ひずみ関係の実測値を用いて定めた。PC鋼材および主筋の応力-ひずみ関係についても、引張試験結果より求めた実測値を使用した。上記の応力-ひずみ関係をもとに、各材料のひずみに対応する応力を逐次参照しながら、コンクリートの終局ひずみの圧縮合力が、PC鋼材および主筋の引張力と等しくなる中立軸位置（コンクリート上縁から中立軸までの距離）をトリアル計算する事によって求め、終局モーメントを算出した。また、破壊モードにおける緊張材破断は、終局時に緊張材が破断したと思われる衝撃音があり、かつ試験体上縁の圧壊が認められず、終局後に除荷

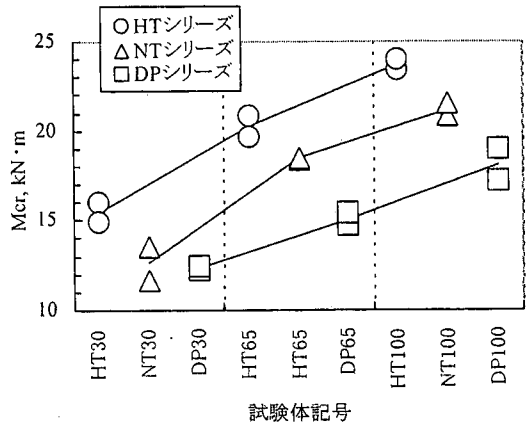


図-4 ひび割れ発生モーメント

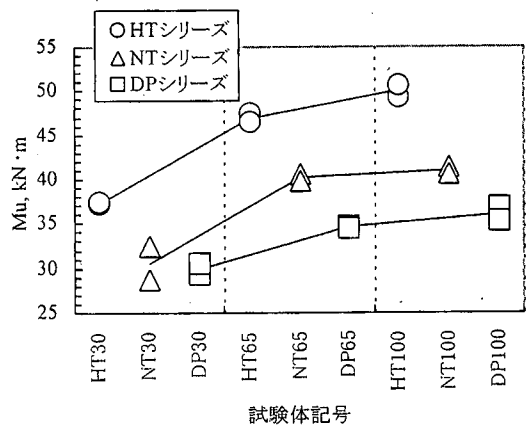


図-5 終局モーメント

した後も、緊張材が破断したと思われる近傍のひび割れが大きく開いたままである事によって判断した。

## (2) ひび割れ発生モーメント

ひび割れ発生モーメントを図-4に示す。

概ね緊張材の種類の違いによる導入プレストレス、あるいはコンクリート強度に応じた結果となった。すなわち、同一コンクリート強度の試験体で比較した場合、HTシリーズが最も大きなひび割れ発生モーメントを示し、DPシリーズが最も小さい値を示した。また、同一種類の緊張材を使用した試験体で比較した場合、コンクリート強度が増加するに従い、ひび割れ発生モーメントの増加が見られた。

実験値と計算値との比率（表-4参照）は、NTシリーズとHTシリーズがほぼ同程度の値となり、高強度PC鋼材を用いた場合でも通常と同じひび割れ発生モーメントの評価式を使用できることが確認でき

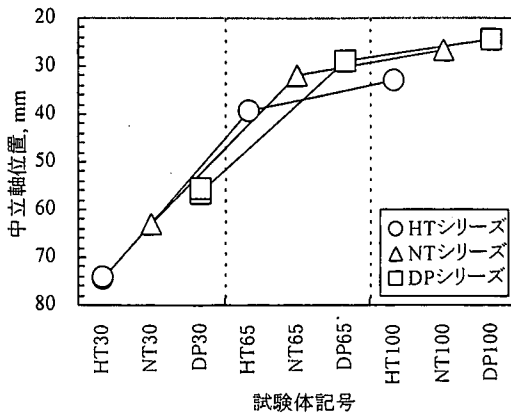


図-6 中立軸位置の計算値

た。DPシリーズでは、fc65およびfc100シリーズの場合でNTおよびHTシリーズよりも比率が小さくなる傾向が見られた。これは、ステンレス系鋼材の特徴として弾性範囲が短いため、ひび割れ発生時にはすでに鋼材の応力-ひずみ曲線が、弾性域を外れていたためであると考えられる。

### (3) 終局モーメント

終局モーメントを図-5に示す。

同一種類の緊張材を使用した試験体で比較した場合、コンクリート強度が増加するに従い、終局モーメントは増加している。しかし、増加の割合はコンクリート強度の増加に比べて緩やかになっており、fc100シリーズのコンクリートを使用した試験体ではほぼ頭打ちになっている。これは、曲げ耐力理論からも明らかのように、コンクリート強度が増加しても、終局時に引張側鋼材が降伏する破壊形式の場合、鋼材の降伏強度がそれに伴って増加しなければ、終局モーメントの増加を多くは望めないことを示している。すなわち、鋼材が降伏していれば、コンクリート強度が大きくなっても終局時の引張力は変化しないため、それに釣り合うコンクリートの圧縮合力の大きさにも変化は無い。したがって、コンクリート強度が大きくなれば、終局時のコンクリート上縁の応力は大きくなり、その分中立軸の位置は上に上がるものの、その量は終局モーメントを形成する鋼材の引張力の作用位置とコンクリートの圧縮合力の作用位置との距離に大きな影響を与えるほどの量ではないからである。以上は、高強度コンクリートの特性を終局モーメントに活用するためには、それに適した強度の鋼材を使用するか、あるいは鋼材量を増やす必要があることを示している。これは、

図-5において、fc30を用いた試験体として最も強度の小さいDPシリーズ、fc65を用いた試験体としてNTシリーズ、fc100を用いた試験体として最も強度の高いHTシリーズの各終局モーメント比較した場合、ほぼコンクリート強度に比例した分布になっていることからわかる。

一方、同一強度のコンクリートを使用した試験体で比較した場合、全てのコンクリート強度において、概ね緊張材の強度に応じた終局モーメントが得られた。これは、鋼材と違い、コンクリートでは中立軸の位置によって圧縮合力を変えられるからであると考えられる。つまり、コンクリート強度が同じで、終局時の鋼材が完全に降伏しているとすれば、鋼材強度が高くなるほどコンクリートは中立軸の位置を下げることによって、終局時の圧縮合力を大きく取ることができるからである。また、図-5において、最も強度の高いNTシリーズと最も強度の低いDPシリーズの終局モーメントの差が、コンクリート強度が低くなるにつれて縮まっているが、これは、中立軸による調整にも限度があり、鋼材の強度に比べてコンクリートの強度が小さ過ぎる場合には、鋼材が完全に降伏する前にコンクリートが圧壊してしまい、鋼材の強度を十分活用できないことが原因だと思われる。

参考値として図-6に各供試体の中立軸位置の計算値を示す。

有効プレストレスが明らかに異なるDPシリーズを除いて、中立軸の計算値は同一種類の試験体でほぼ同じ値となった。またコンクリート強度が高くなるにつれて中立軸位置が上がっている様子が見られる。同一コンクリートの場合で比較した場合でも、PC鋼材の引張強度の低いDPシリーズの中立軸位置は、引張強度の高いHTシリーズよりも上にある。

### (4) モーメント-たわみ関係

図-7に、各シリーズにおける代表的な試験体の曲げモーメント-たわみ曲線の包絡線を示す。

それぞれのコンクリート強度において、ひび割れが発生するまでは、各試験体は同様な曲げ剛性を示した。これは、本試験で使用した緊張材は、引張強度は異なるものの、ヤング係数は全てほぼ等しいことによる。ひび割れ発生後は、各緊張材の強度およびそれに伴う導入プレストレス量の違いがモーメントとたわみに反映されるとい、概ね妥当な結果となった。

終局時のたわみは、全体的にfc30シリーズのコンクリートを使用した試験体が最も小さくなった。これは、コンクリート強度が低いために終局時の中立

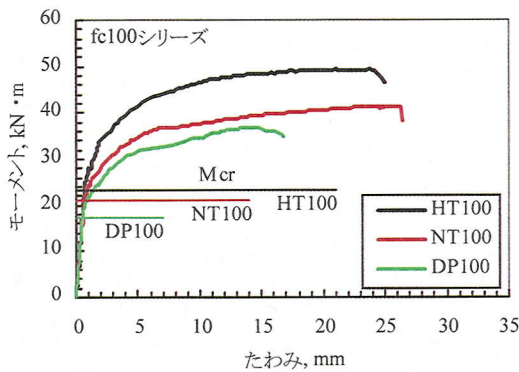
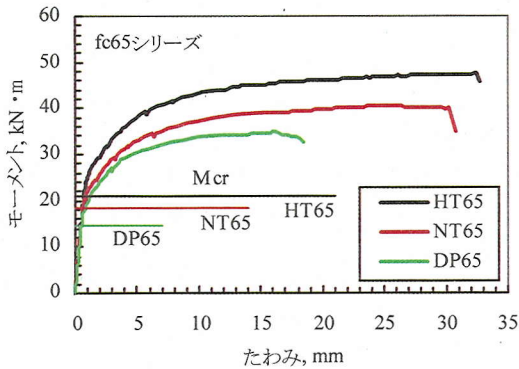
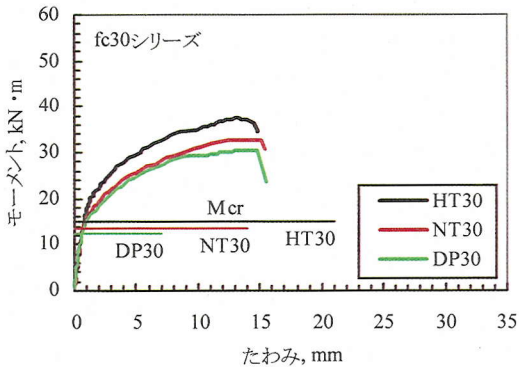


図-7 モーメント-たわみ曲線

軸位置を下げる必要があり、その結果、終局時の曲率が小さくなるためである。次いでfc100, fc65シリーズの順となった。fc100シリーズの方がfc65シリーズよりもコンクリート強度が高いにもかかわらず、終局時の変形が小さくなったのは、fc100シリーズのコンクリートの方が終局時のひずみが小さいためであると考えられる。また、DPシリーズでは、終局モードが緊張材破断型であったことも一因であると思われる。さらに、DPシリーズでは、fc65

シリーズのコンクリートを用いた試験体においても緊張材破断型であった。通常は、緊張材が破断することは無いと思われるが、DPシリーズに用いた緊張材である2相ステンレスPC鋼材の破断時の伸びが他の緊張材に比べて小さい(4%)ことや、等モーメント区間であっても終局時付近での曲率は一樣にはならず、局部的に曲率の増大が集中したと思われること等が、緊張材が破断した原因であると考えられる。

図-8に、緊張材の種類別にまとめた各載荷モーメントレベルにおけるたわみを示す。同一のモーメントレベルで試験体のたわみを比較した場合、コンクリート強度が大きくなるにしたがってたわみは小さくなっているが、fc30シリーズからfc65シリーズに増加した場合に比べて、fc65シリーズからfc100シリーズに増加した場合は、たわみの減少の割合は小さい。これは、部材の断面剛性に関わるコンクリートのヤング係数の大きさに関係していると考えられる。本試験では、表-4に示すように、fc30シリーズに用いたコンクリートのヤング係数は28.3GPaであり、fc65およびfc100シリーズのヤング係数はそれよりも大きく、それぞれ44.4, 47.6GPaと、ほぼ同じ値となっているからである。

以上は、同一の断面形状で異なる種類の緊張材を用いた結果を示した。言い換えれば、導入プレストレスの異なる試験体の曲げ挙動に関して検証した。しかし、実際の設計では最初に必要なプレストレスが算出され、それに見合うPC鋼材のサイズや構成、あるいは配置間隔が決まる。したがって、ここでは、同一の断面形状を用いて、コンクリート強度に応じたプレストレスを導入した場合のシミュレーション計算を行った。計算手法としては、PCモデルに所定の曲率増分を与え、発生する曲げモーメントと中立軸深さを収束計算し、その曲率増分を載荷前の曲率に加えて曲率を求め、その操作をコンクリートの上縁あるいは緊張材が終局ひずみに達するまで順次繰り返す、いわゆるファイバーモデル法を用いた。また、緊張力による軸力および曲げモーメントが釣り合う要素上縁のひずみ増分と中立軸深さを収束計算し、これらの値により、緊張材の緊張力による各要素、鉄筋、緊張材のひずみ増分を求めることにより、外力である緊張材の緊張力を内力、すなわち各要素のひずみに変換した。そして、この状態を載荷前のひずみとし、さらに曲率を求めた。要素の分割は、モデルの高さ方向に27分割とし、さらに、荷重-たわみ関係を求めるために、長さ方法に200分割した。計算に用いたPC梁の寸法、鋼材の配置構成およびコンクリート強度は、本実験で用いたものと同じものとした。導入プレストレスの上限値はコンクリー

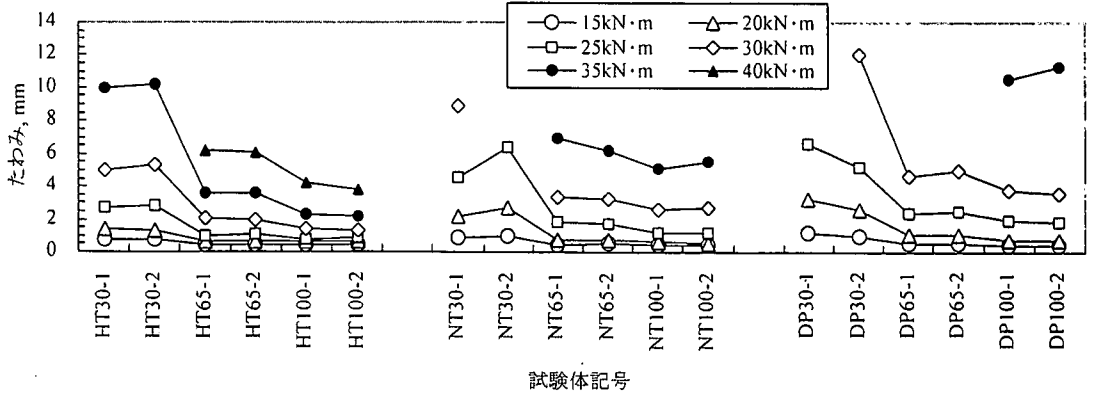


図-8 コンクリート強度の違いによるモーメントレベル別のたわみの比較

トの曲げ圧縮応力度および圧縮強度の1/1.7倍および1/2倍とした。さらに、PC鋼材指数 $q$ が0.3を上回らないように設定し、緊張直後の緊張材の引張応力度は、引張強度の0.7倍または降伏強度の0.85倍のうちの小さい方とした。PC鋼材指数は、ACI基準<sup>7)</sup>で定められている指数で、式(5)によって定義されており、破壊形式を分類する際の実用的な $q$ の限界値を大略0.3とみなし、 $q < 0.3$ の場合には鉄筋コンクリートの引張破壊、すなわち引張鉄筋降伏後に圧縮縁のコンクリートが圧縮破壊するじん性に富む破壊性状を示し、 $q > 0.3$ の場合には、圧縮破壊、すなわち鉄筋が降伏点に到達すると同時にコンクリートが圧縮破壊する非常に突発的な破壊性状を示すと考える<sup>8)</sup>。

$$q = p_p \frac{f_p}{f_{ck}} \quad (5)$$

ここに、

$p_p$  : PC鋼材比で  $p_p = A_p / (bd_p)$ 、ただし、  
 $A_p$  : PC鋼材の断面積、 $b$  : 断面の幅、  
 $d_p$  : PC鋼材に対する断面の有効高さ

$f_{ck}$  : コンクリートの設計基準強度 (今回の試算ではテストピースによる圧縮強度を用いた)

$f_p$  : 曲げ破壊時のPC鋼材引張応力で、PC鋼材とコンクリートとの間に付着が与えられている場合には、PC鋼材の引張強度  $f_{pu}$  を用いて、次式で求めた値とする

$$f_p = f_{pu} \left( 1 - 0.5 p_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} \right)$$

$\sigma_{cd}$  は、プレストレスの有効係数を一律に0.9として計算し、各緊張材の断面積は、上記の条件を満足す

ような3パターンを逆算して求めた。すなわち、同一のコンクリート断面、PC鋼材指数およびコンクリート強度が同じケースでは、使用するPC鋼材の断面積が、その引張強度に反比例するために、引張強度の低いPC鋼材を用いたケースではPC鋼材の断面積が大きくなり、引張強度の高いPC鋼材を用いた場合にはその逆となるため、結果的に有効プレストレス力が同じでPC鋼材の断面積が異なるということになる。また、コンクリートおよび緊張材の応力-ひずみ関係は、本実験で用いた材料の測定値を用いた。ひび割れ発生モーメントの判定は、コンクリートの引張縁ひずみが、式(2)およびコンクリートのヤング係数より逆算したコンクリートの引張ひずみに達した時点とし、終局モーメントはコンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみとして、fc30シリーズのコンクリートを使用した試験体では0.0035、fc65およびfc100シリーズのコンクリートを使用した試験体では0.0025に達するか、あるいは緊張材のひずみがHPおよびNTの場合は0.06、DPの場合は0.04に達した時点とした。試算条件および試算結果を表-5に示す。また、試算によって得られたモーメント-たわみ関係を図-9に示す。なお、表-5に示した記号は、実際に载荷試験を行った試験体の試験体記号(表-3参照)に準じ、末尾のL, M, Hは、それぞれPC鋼材指数 $q$ が0.19, 0.23, 0.29であることを示す。

以下に、シミュレーション計算の結果概要を示す。

同一のPC鋼材指数で比較した場合、コンクリート強度が同じケースで比較した場合でも、鋼材断面積の違いによって部材剛性が異なるものの、ひび割れ発生モーメントおよび終局モーメントに有意な差は見られない。なお、終局モードは、全てコンクリートの上部圧壊であった。これは、 $q$ の値が小さくなるにつれて緊張材破断モードに近づいていくと思わ



表- 5 試算条件および試算結果一覧

試算条件				試算結果			
記号	$A_p$ mm <sup>2</sup>	$\frac{f'_c}{\sigma_{ce}}$ $q$		$M_{cr}$ MPa	$M_u$ MPa	$\delta_{max}$ mm	$\varepsilon_{pu}$ %
HT30L	60.6			13.48	23.06	13.16	1.69
NT30L	74.9	5.5		12.82	22.75	13.05	1.53
DP30L	89.9			13.25	23.64	10.64	1.38
HT65L	148.7			28.83	50.68	8.79	1.35
NT65L	183.9	5.5	0.19	28.73	50.22	8.74	1.19
DP65L	220.6			29.59	51.96	8.53	1.05
HT100L	244.0			47.28	75.72	7.04	1.19
NT100L	301.7	5.6		46.53	75.45	7.02	1.03
DP100L	362.0			48.25	77.70	6.63	0.88
HT30M	75.7			15.05	27.02	11.00	1.47
NT30M	93.7	4.4		15.28	26.68	11.06	1.33
DP30M	112.4			15.73	27.67	10.77	1.18
HT65M	185.9			34.23	59.17	7.37	1.22
NT65M	229.8	4.4	0.23	33.54	58.96	7.51	1.07
DP65M	275.8			35.03	60.70	7.12	0.93
HT100M	304.9			55.50	86.71	6.00	1.11
NT100M	377.1	4.5		53.94	86.28	5.83	0.94
DP100M	452.5			56.51	89.52	5.65	0.80
HT30H	101.0			18.73	32.49	8.82	1.26
NT30H	124.9	3.3		18.36	32.28	8.78	1.10
DP30H	149.9			18.84	33.11	8.55	0.97
HT65H	247.8			43.21	70.44	5.98	1.11
NT65H	306.5	3.3	0.29	42.52	70.77	6.01	0.95
DP65H	367.7			44.11	73.12	5.81	0.92
HT100H	406.6			68.51	101.99	4.89	1.03
NT100H	502.8	3.3		67.87	101.96	4.76	0.86
DP100H	603.3			70.49	103.86	4.52	0.73

$\sigma_{ce}$ : 有効プレストレス力によるコンクリート下縁応力  
 $M_{cr}$ : ひび割れ発生モーメント  $M_u$ : 終局モーメント  
 $d_{max}$ : 終局時の試験体中央部の変位  
 $\varepsilon_{pu}$ : 終局時の緊張材ひずみ

れるが、今回の試算に用いた条件 ( $q$  の範囲内) では、計算上、破断までには至らないことを示している。また、コンクリート強度が異なる場合、あるいはコンクリート強度が同じでPC鋼材指数が異なる場合には、ひび割れ発生モーメントおよび終局モーメントに明確に差が現れる。これは、PC鋼材量が異なることによるプレストレス量の相違による結果である。

変形性状に関しては、全体的に、fc30シリーズの場合はコンクリートのヤング係数が小さいため、ひび割れ発生までの剛性が他のシリーズに比べて小さい。各コンクリートのシリーズにおいて、PC鋼材の断面積の違いが変形性状に現れることが予想されたが、最も断面積の大きなDPシリーズでひび割れ発生後の変形量が多少小さくなったものの、NTおよびHTシリーズではほとんど同じ挙動を示した。ま

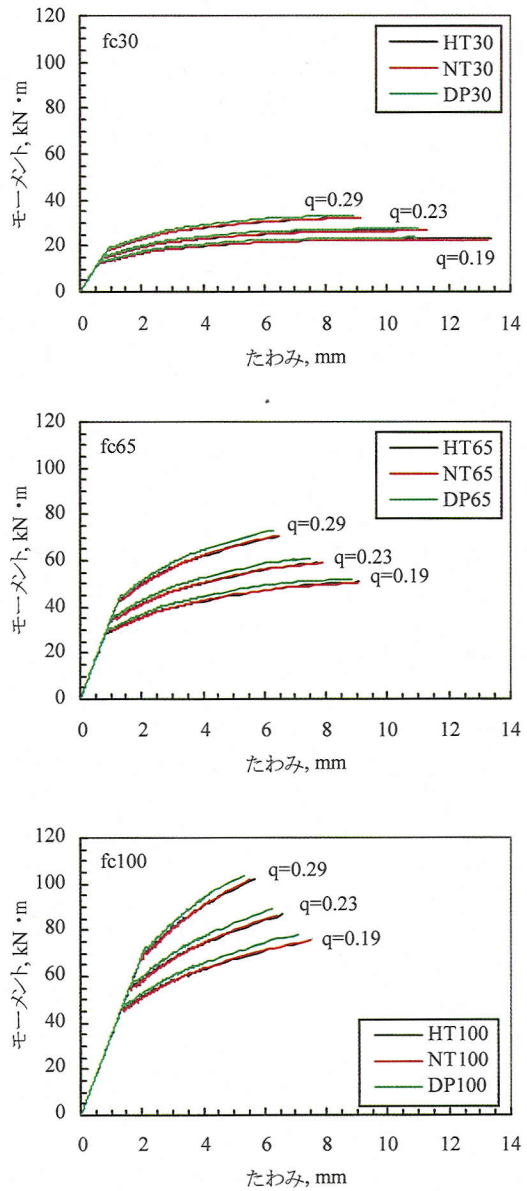


図- 9 試算結果

た、ひび割れ発生前では、全ての緊張材で変形性状に違いは見られない。このことから、今回行った試算の条件範囲内では、同一プレストレスを導入する場合で高強度PC鋼材を使用しても、PC鋼材の断面積が小さくなることによる部材剛性の低下に伴う変形性状の違いは、計算上、考慮する必要が無いことが認められた。

fc30の場合、 $q$  の値を増やしても、終局荷重はそれほどは増えず、逆に終局時のたわみが小さくなる

ため、コンクリート強度が小さい場合に大きなプレストレスを導入するのは得策ではないと思われる。また、モーメント-たわみ関係を見る限り、 $q$ が0.3近くになってもそれほど突発的な破壊性状ではないようである。fc65の場合、 $q=0.19$ および0.23では、終局時にすでにモーメント-たわみ曲線がほぼ水平になっているが、 $q=0.29$ では、終局時でもまだ荷重の増加傾向が見られる。fc100の場合では、全ての $q$ において終局時にもさらに荷重の増加傾向が見られ、特に $q=0.29$ ではその傾向が大きい。したがって、fc100クラスの高強度コンクリートの場合、コンファインドコンクリートやファイバーコンクリートにするなどの、じん性を改善させるための措置を施すことにより、変形能力が改善されると共に、終局荷重の増加が期待できると考えられる。以上より、コンクリート強度が65MPaの場合には引張破壊と圧縮破壊の境界値は、基準通り $q=0.3$ が概ね妥当であると考えられるが、30MPaの場合には、試算は行ってはいないものの、 $q=0.3$ をある程度超えても、引張破壊となることが予想される。また、逆に100MPaの場合には $q=0.3$ をかなり下回り、 $q=0.19$ の場合でも圧縮破壊するような様子は見られない。これは、この $q=0.3$ という指標は実用的な値であり、現時点ではPCにおいてコンクリート強度が30MPaおよび100MPaというのは実用的ではないといっても過言ではなく、 $q$ の算出式にコンクリート強度は考慮されてはいるものの、コンクリート強度の範囲毎に $q=0.3$ という指標を設定する必要があることを示している。

### (5) ひび割れ性状

各試験体の、 $\pi$ 型ゲージで測定したひび割れ幅の測定値の最大値を図-10に示す。なお、 $\pi$ 型ゲージの記号は、図-3に示した $\pi$ 型ゲージの取り付け図において、左側から順にPI0~PI11とした。この図から判断して、測定範囲内で最大ひび割れ幅が1mmを超えたものを、本試験における有効なひび割れと判断した。

図-11に、平均ひび割れ間隔を示す。ひび割れ間隔は、 $\pi$ 型ゲージを取り付けた区間長を(有効なひび割れ本数+1)で除することによって算出した。

図-11に示すように、平均ひび割れ間隔についてはPC鋼材の種類およびコンクリート強度の種類の違いによる有意な相違は認められなかった。これは、既往の研究では、ひび割れ間隔に影響する第1の因子はかぶりであると考えられており<sup>9)</sup>、本研究に用いた試験体の場合、PC鋼材のかぶりが約75mmと大きいため、緊張材の種類や、コンクリート強度が変

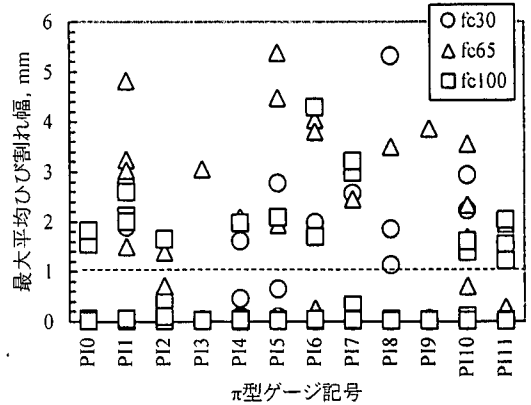


図-10 最大測定ひび割れ幅

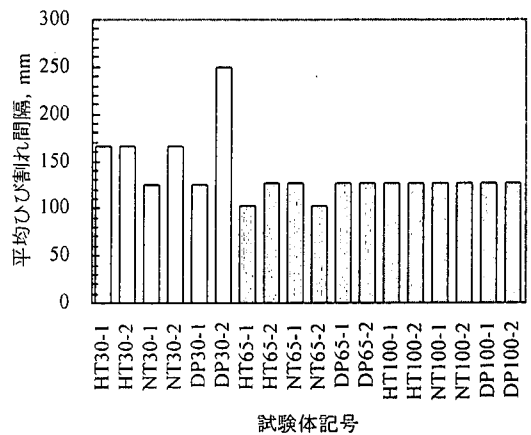


図-11 平均ひび割れ間隔

化してもひび割れ間隔に大きな影響を与えないためであると考えられる。なお、fc30シリーズのコンクリートを用いた各試験体で、平均ひび割れ間隔にばらつきが見られ、概ね他のシリーズに比べて大きな値を示しているのは、fc30シリーズの試験体では両載荷点直下の外側の $\pi$ ゲージ(PI0およびPI11)が取り付けおらず、その位置に発生したひび割れを平均ひび割れ間隔の算出に用いなかったためであると考えられる。

図-12に、コンクリート強度別にまとめた各曲げモーメントレベルにおける平均ひび割れ幅を示す。これは、有効なひび割れが発生した個所に取り付けてあった $\pi$ 型ゲージの、最大4個の測定値を平均した値である。

当然のことながら、全体的に見て引張強度が高く、すなわちプレストレスが最も大きいHTシリーズのひび割れ幅が最も小さく、引張強度の小さいDPシリーズのひび割れ幅が最も大きい結果となった。

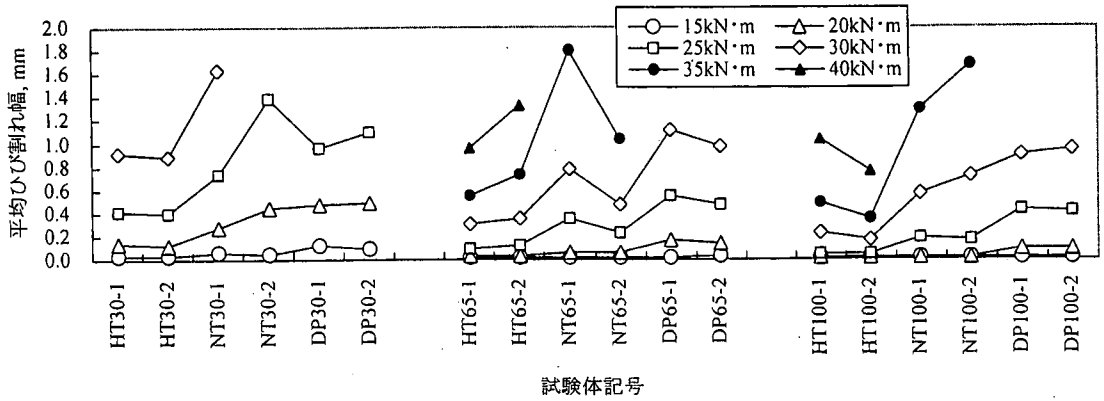


図- 12 緊張材種類の違いによる曲げモーメント別の平均ひび割れ幅の比較

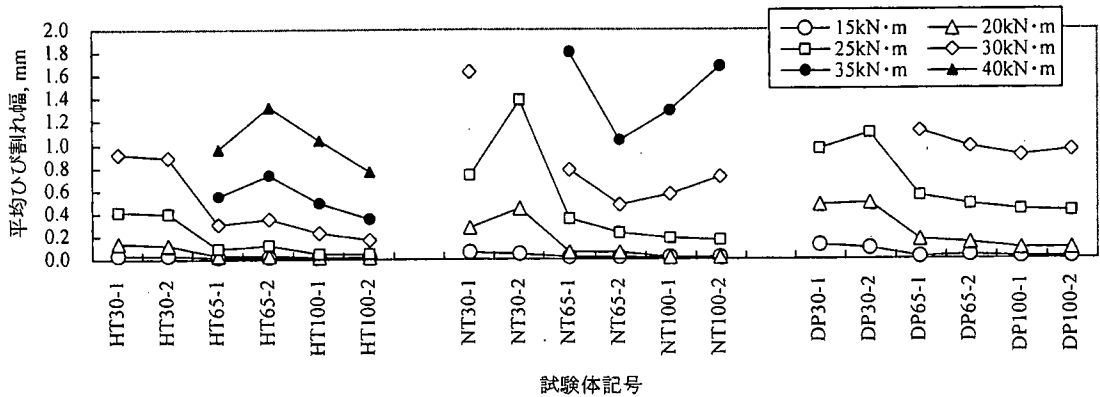


図- 13 コンクリート強度の違いによる曲げモーメント別の平均ひび割れ幅の比較

図- 13は、図- 12のグラフの横軸を、緊張材種類別に並べ替えたものである。コンクリート強度が、fc30シリーズからfc65シリーズに増加すると、各曲げモーメントレベルにおいてひび割れ幅が減少する傾向が見られたが、fc65シリーズからfc100に増加した場合には、両者のひび割れ幅にはほとんど差が見られなかった。これは、以下のように考えられる。

一般に、ひび割れ幅はひび割れ間隔に相当する項と、ひずみに関する項との積の形で表すことができる。ひび割れ幅に関しては、前述したように、各試験体でほぼ同じである。一方、ひずみに関する項は、試験体の変形性状に大きく依存する。すなわち、変形が大きくなるほどひずみは増大するため、ひび割れ幅も大きくなる。本実験の場合、同一のモーメントレベルで試験体のたわみを比較した場合、図- 13に示すように、コンクリート強度が大きくなるにしたがってたわみも大きくなっているが、fc30シリーズからfc65シリーズに増加した場合に比べて、fc65シリーズからfc100に増加した場合には、両者のた

わみにはほとんど差が見られなかった。この傾向は、ひび割れ幅の状況と一致する。すなわち、コンクリート強度が変化しても、ひび割れ間隔がほぼ等しい場合、ひび割れ幅は試験体のたわみに依存するひずみに支配されると思われるからである。以上を検証するために、各試験体のたわみ量と平均ひび割れ幅の関係について検討した。

図- 14は、各試験体の平均ひび割れ幅を、試験体中央部のたわみ量別にまとめたものである。

図- 14によれば、全体的にたわみ量が大きくなるほど平均ひび割れ幅のばらつきが大きくなる傾向が見られた。同一のPC鋼材を使用した試験体で平均ひび割れ幅を比較した場合、コンクリート強度が大きくなるにつれて、多少ではあるが同一たわみ量でのひび割れ幅が大きくなる傾向が見られるが、概ね、コンクリート強度に多くは依存していないことが認められた。また、PC鋼材の種類別、すなわちプレストレス量の異なる試験体別で比較した場合でも、同一たわみ量レベルでの平均ひび割れ幅にはそれほど

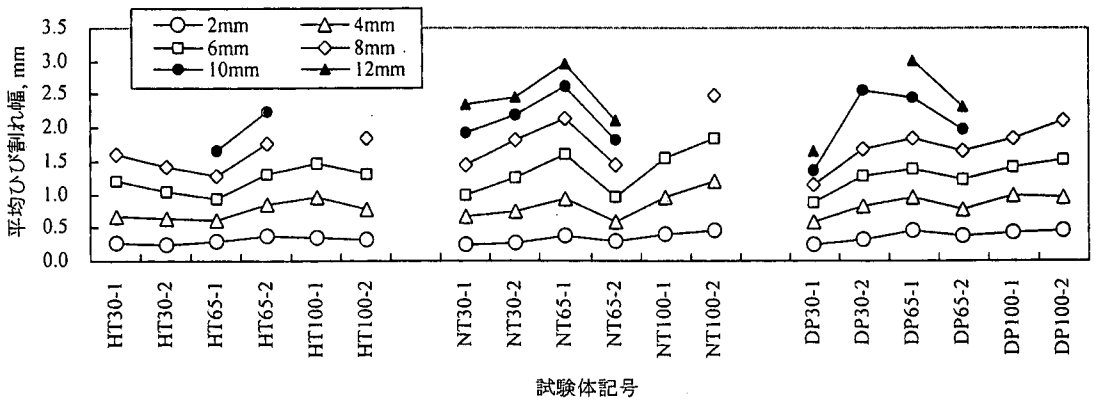


図-14 たわみ量による平均ひび割れ幅の比較

大きな差は認められなかった。

以上より、ひび割れ間隔がほぼ等しい場合のひび割れ幅は、試験体のたわみに依存することが確認できた。

#### 4. 結論

本研究では、高強度PC鋼より線、通常用いられる高炭素鋼PC鋼より線および2相ステンレスPC鋼よりの、3種類の特性の異なる緊張材を用いて、30MPa、65MPaおよび100MPa級の3種類のコンクリート強度を持つPC梁試験体を製作し、曲げ載荷試験を行った。さらに、ファイバーモデル法による試算を行い、高強度コンクリートを用いた場合の導入プレストレスに関する検討を行った。本研究で行った試験より、以下の結論を確認できた。

- (1) コンクリート強度の増加に応じて強度の高いPC鋼材を使用することで、終局モーメントも高くなり、高強度コンクリートの特性を活用できることが確認できた。
- (2) 導入プレストレスが大きいほど、同じ載荷モーメントレベルでのひび割れ幅は小さい。また、プレストレスが同等の場合、コンクリート強度が高いほどひび割れ幅は小さくなる傾向が見られたが、その割合はコンクリート強度が30MPaから65MPaに変わった時に大きく、65MPaから100MPaに変わった時では、それほど顕著な差は見られなかった。これは、コンクリート強度が30MPaと65MPaでは、コンクリートのヤング係数が大きく増加したのに対し、65MPaと100MPaでは、ヤング係数の差はほとんど増加しないことに起因する、試験体の変形性状に関係しているものと考えられる。

- (3) PC鋼材の種類が異なることによるコンクリートとの付着強度や導入プレストレス、あるいはコンクリート強度が異なっても、平均ひび割れ間隔にはそれほど影響しない。
- (4) 同様に、PC鋼材の種類やコンクリート強度が異なっても平均ひび割れ間隔が同等の場合、同一の試験体中央部のたわみ量で比較した場合の平均ひび割れ幅には大きな影響を与えない。

また、ファイバーモデル法による解析の結果より、以下の傾向を確認できた。

- (5) 同一のPC鋼材指数 $q$ で比較した場合、コンクリート強度が同じであれば、鋼材断面積の違いによって部材剛性が異なるものの、ひび割れ発生モーメントおよび終局モーメントに優位な差は見られない。したがって、コンクリート断面の減少や緊張作業量の低減という意味では、高強度PC鋼材を用いて鋼材の本数を減らした方が有利である。ただし、終局モーメントのみに注目し、経済性を重視した場合には、高強度PC鋼材を使用する代わりに鉄筋量を増やし、ひび割れを許容したPRC構造にした方が有利になる可能性もある。
- (6) PC鋼材指数は、コンクリート強度が小さくなるほどじん性に富む破壊性状と脆的な破壊性状の区切りとなる数値が大きくなる傾向が見られた。すなわち、 $q$ の値が0.3を多少超えてもコンクリート強度が30MPa程度であればそれほど脆的な破壊性状を示さないことが予想され、逆に、コンクリート強度が100MPa程度の場合には、 $q=0.23$ であっても脆的な破壊性状を示した。
- (7) コンクリート強度が高く、PC鋼材指数が0.3に近づく程脆的な破壊性状になる傾向が見られた。しかし、終局時にもまだ荷重の増加傾向

が見られるため、コンファインドコンクリートやファイバーコンクリートにするなどの、じん性を改善させるための措置を施すことにより、変形能力が改善されると共に、終局荷重の増加が期待できると考える。

設計手法が仕様規定から性能規定へと移行しつつある現在、コンクリート構造物にも、景観・美観などの性能が要求されるようになってきている。高強度コンクリートを使用することによって、コンクリート構造物の断面を縮小することが可能になり、従来に比べてよりスレンダーで美観に優れたデザインの構築が可能になる。また、材料も少なくすることができるため、資源の有効利用にも役立つ。さらに、シリカフェームを使用することによって、より緻密なコンクリートとなり、透水性や透気性等の面で有効に作用し<sup>9)</sup>、元々耐久的といわれているプレストレストコンクリートがより耐久性に優れたものとなる。ただし、水結合材比、単位セメント量および置換率などを適切に選定しなければ、逆に耐凍害性や中性化などの面でマイナスに作用するという報告<sup>9)</sup>もあり注意する必要がある。

本研究では、プレストレストコンクリートに100MPa級高強度コンクリートを使用した場合、その強度特性を活用するためには、緊張材も高強度PC鋼材を使用すると有効であるということが明らかになった。ただし、設計の面で言えば、高強度コンクリートの終局ひずみが通常のコンクリートに比べて小さいため、脆性的な破壊を防ぎ、必要なじん性を得るための措置、例えばコンファインドコンクリートや繊維補強コンクリートなどにすることが必要であると考えられる。施工面では、シリカフェームコンクリートは通常のコンクリートに比べてブリーディングが少なく、粘性が高いため、仕上げおよび初期養生方法が普通セメントコンクリートと異

なり、打設直後から急激な乾燥を防止するために、湿潤養生や、初期養生温度に対する十分な措置が必要である<sup>9)</sup>。

#### 参考文献

- 1) 例えば、児玉 勝，材奇 勉，山岡幸男，茨木信彦：2300MPa級高強度PC鋼より線の開発，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論文集，Vol.5，pp.561-564，1995.
- 2) 例えば、西崎文能，奥立 稔，近松竜一，川島宏幸：高強度・自己充てんコンクリートによるPCLNG貯槽の建設，コンクリート工学，Vol.37，No.10，pp.40-44，1999.10.
- 3) 田中政章，河野広隆，渡辺博志：高強度コンクリートを用いたPCはりの変形性能について，土木学会第50回年次学術講演会概要集，第5部，pp.922-923，1995.
- 4) 並木 哲，沢井布兆，黒羽健嗣，原 孝文：Fc1000kgf/cm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いた超高層建築物の施工，コンクリート工学，Vol.37，No.3，pp.35-38，1999.3.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリ80，シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針（案），1995.10.
- 6) 土木学会：平成8年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，1996.
- 7) ACI：Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89)，1989.
- 8) 小林和夫：コンクリート構造学，1995.3.
- 9) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，No.384/V-7，pp.21-32，1987.8.

(1999. 12. 28受付)

## BASIC PROPERTIES OF FLEXURAL BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH HIGH STRENGTH MATERIALS

Shoji SHIRAHAMA, Atsushi HATTORI and Toyoaki MIYAGAWA

High strength concrete and high strength reinforcing steel have been put into practical of prestressed concrete use at present. However high strength prestressing steel has been developed, but the prestressing steel has not been still in use. This paper presents the results of flexural test of the prestressed concrete beams using high strength prestressing steel and concrete with several strength includes 100MPa grade high strength concrete. Furthermore a trial calculation using fiber model method was made and the prestress strength applied high strength concrete beams with high strength prestressing steel was considered.