

高強度プレストレストコンクリート梁の長期曲げ性状に関する実験的研究

(株)ピーエス三菱 正会員 ○大塚 夕
 (株)ピーエス三菱 正会員 博士(工学) 福井 剛
 愛知淑徳大学 正会員 博士(工学) 岡本 晴彦

Abstract : An experiment of prestressed concrete beam subjected long term load with high strength concrete was conducted. The deflection progressed till about ten months, but the cracking width and length hardly changed. The progress of the deflection depended on creep of the compression concrete. The evaluation of the safe side of the maximum cracking width of the PC beam with high-strength concrete showed that it was possible with PRC guideline.

Key words : High strength concrete , Long-term loading , Cracking width , Deflection

1. はじめに

筆者らは 2010 年度に、高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート(以下 PC と略称)梁の曲げひび割れ性状に関する実験結果に対し、日本建築学会の PRC 指針¹⁾に記載されている曲げひび割れ幅評価式の適用性について報告²⁾した。限られた実験範囲ではあるが、高強度 PC 梁においても PRC 指針式を用いてひび割れ幅を安全側に評価することが可能であった。しかし、梁せいの影響や長期的な挙動に関しては未解明である。本研究は梁せいを变化させた試験体を対象に長期載荷実験を行い、ひび割れおよびたわみ挙動の経時変化を把握することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および載荷方法

試験体 LH-150 は 2010 年度に報告した試験体 SH-150 とプレストレスレベル $r\sigma_g$ 、梁幅、引張鉄筋量を同一とし、梁せいのみ 150mm 大きくして 500mm とした。PC 鋼材の径や本数などの配置による影響を排除し、主筋によるひび割れ幅制御のみを観察するために、PC 鋼材はアンボンド処理とした。なお、プレストレスの導入は材令 55 日、短期載荷実験は材令 229 日で行った。また、載荷直前まで試験体中央部を湿布封かん養生し、乾燥収縮の影響を小さくした。

表-1 に試験体概要、表-2 に材料試験結果、図-1 に試験体配筋図および載荷装置をそれぞれ示す。有効プレストレス P_e は PC 鋼棒定着部に設置したロードセルにより、短期載荷試験直前に計測した値である。

載荷は図-1 に示すように PC 鋼棒 4-17φ に張力を与えることによる単調載荷とし、後述するパイ型変位計による最大ひび割れ幅が 0.2mm に達した時点で終了した。この時点の荷重合計は 440kN であった。その後、荷重をホールドして長期載荷を行った。載荷用 PC 鋼棒は定期的に再緊張を行い、試験体のクリープ変形などによる載荷荷重の低下を補正した。なお、長期載荷実験は屋内で行った。

表-1 試験体概要

試験体名称	b×D (mm)	F_c (N/mm ²)	$r\sigma_g$	PC鋼棒	P_e (kN)	σ_g (N/mm ²)
LH-150	300×500	80	0.150	2-40φ	1837	12.2

引張鉄筋 4-D22 ($p_t=1.80\%$)
 $r\sigma_g=P_e/(b\cdot D\cdot F_c)$, $\sigma_g=P_e/(b\cdot D)$

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート

F_c	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)
80	105.00	45.60

(b) 鉄筋

径	仕様	A_s (mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s (kN/mm ²)
D22	SD345	387	379.3	570.5	197.2
D13	SD295A	127	353.4	482.6	182.4

(c) PC鋼棒

径	仕様	A_p (mm ²)	$\sigma_y^{*})$ (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_p (kN/mm ²)
40φ	SBPR1080/1230	1239	1176	1300	201

*) σ_y は 0.2% オフセットによる

2.2 計測項目

計測項目は、荷重-変形関係、ひび割れ幅、試験体 PC 鋼棒の張力、および曲率とした。ひび割れ幅は引張鉄筋高さに設置したパイ型変位計により、PC 鋼棒の張力はロードセルにより計測した。曲率は図-1 のパイ型変位計の裏側に設置した図-2 に示すパイ型変位計により計測した。

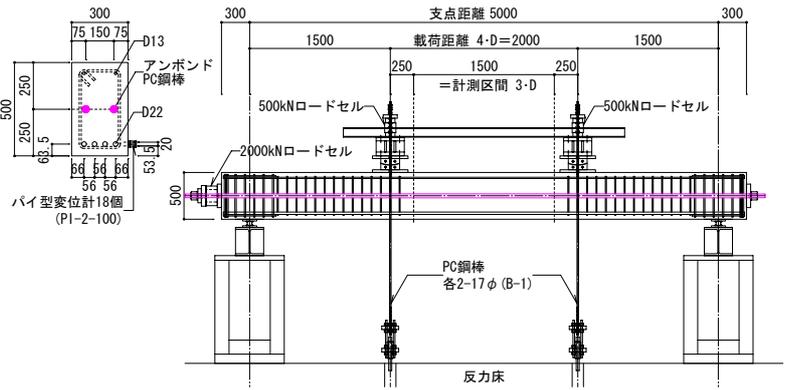


図-1 試験体配筋図および荷重装置

3. 実験結果

3.1 短期荷重実験結果

図-3 にひび割れ状況を示す。実線が短期荷重終了時、点線が長期荷重によるひび割れの進展をそれぞれ表している。これより長期的なひび割れの進展は小さいことがわかる。各ひび割れ位置の数字は短期荷重終了時から 11 ヶ月後までのひび割れ幅の推移を示す。平均ひび割れ間隔実験値 $e_{\delta_{av}}$ の算定にあたっては、ひび割れが引張鉄筋高さまで進展していない微細なひび割れは無視した。PRC 指針式による平均ひび割れ間隔計算値 $e_{\delta_{av}}$ は 169mm だが、実験結果は短期荷重終了時で 145mm(計算値の 0.86 倍)、11 ヶ月後で 130mm(同 0.77 倍)となった。平均ひび割れ間隔は PRC 指針式による計算値よりも小さく、2010 年度に報告した梁せいが小さい試験体と同じ傾向であった。

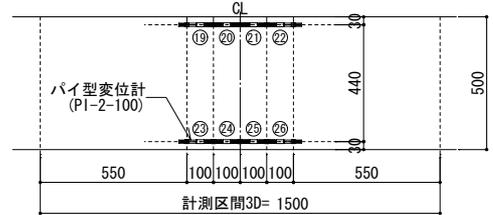


図-2 曲率測定用パイ型変位計

図-4 にモーメントと中央たわみの関係を示す。図中の記号は各実験値 ($e_{M_{cr}}$: 曲げひび割れ発生, $e_{M_{01}} \cdot e_{M_{02}}$: 最大ひび割れ幅 0.1mm・0.2mm) を示す。 $e_{M_{cr}}$ は曲げひび割れ耐力計算値で(1)式により算定した。図-5 は最初に幅が 0.2mm に達したひび割れの、モーメントとひび割れ幅の関係を表したものである。図中の計算値 1 は弾性材料を仮定した断面における釣合いより精算した鉄筋応力 σ_t を、計算値 2 は(2)式の略算で算出した鉄筋応力 σ_t をそれぞれ用いて、PRC 指針式に材料試験結果を代入することにより算出している。なお、PC 鋼棒張力の変動は実験においてほとんどみられなかったため荷重開始時の張力で一定とした。

$$e_{M_{cr}} = (0.56 \cdot \sqrt{\sigma_B + \sigma_g}) \cdot Z \quad \dots \quad (1)$$

$$\sigma_t = (M - \sigma_g \cdot Z) / \left(a_t \cdot \frac{7}{8} \cdot d_r \right) \quad \dots \quad (2)$$

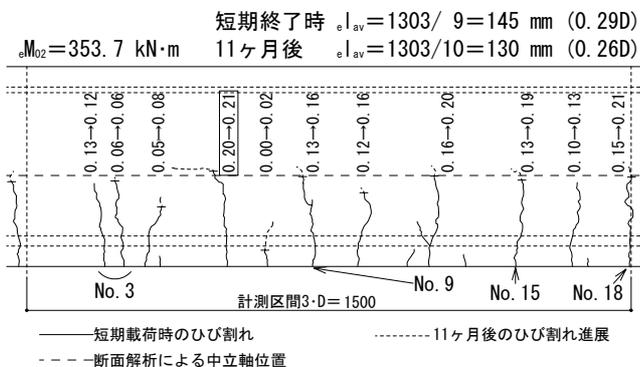


図-3 ひび割れ状況

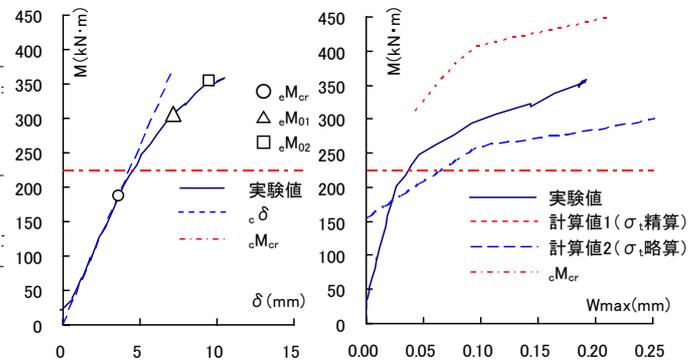


図-4 M-δ 関係

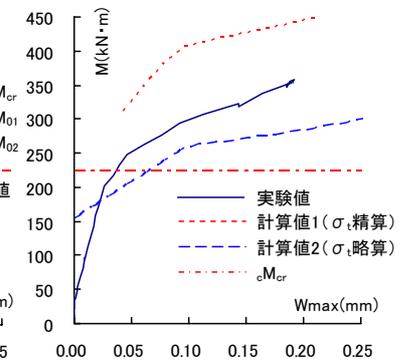


図-5 M-W_{max} 関係

3.2 長期荷重実験結果

図-6 はひび割れ幅実験値の推移を表したもので、 $e_{W_{max}}$ は最大ひび割れ幅、 $e_{W_{av}}$ は平均ひび割れ幅を示す。 $e_{W_{max}}$ 、 $e_{W_{av}}$ とも長期荷重開始から 6 ヶ月までは若干大きくなっているものの、その後はほぼ一定

値に収束しており、結果として長期荷重開始時の 1.2 倍程度となった。図には示していないが、ひび割れ幅合計値 $\Sigma_e W$ は、長期荷重開始時には 1.2mm で、その後は 1.4~1.6mm の間で推移している。ひび割れ幅は 10 ヶ月後にはほぼ一定値に収束していると言える。

図-7 は曲率と中央たわみの推移を表している。長期荷重開始時と比較すると曲率は 1.6 倍に、中央たわみは 1.7 倍に増加している。しかし 10 ヶ月を経過したあたりから増加量は少なくなり、一定値に収束していると言える。

図-8 は図-7 に示した曲率の算出に用いた、中央 400mm 区間のコンクリート平均ひずみを表している。ひずみ測定区間にはひび割れが 2 本発生しており、図-8 の下縁引張ひずみはこのひび割れも含めた平均値である。引張ひずみが長期荷重開始時と比較して 1.1 倍の増加にとどまっているのに対して、圧縮ひずみは 2.2 倍に増加している。この結果より、本試験体における曲率と中央たわみの増加については、圧縮側コンクリートのクリープ変形の影響が大きいことがわかる。

なお、1 月上旬から 4 月末にかけて計測できない期間があったため、当該期間は図-6~8 においてグラフが直線状になっている。

4. 考察

4.1 最大ひび割れ幅の検証

今回の実験結果に 2010 年度に報告した実験のデータ²⁾を加え、最大ひび割れ幅実験値 $e W_{max}$ と計算値 $c W_{max}$ との比較を行った結果を図-9 に示す。PC 試験体においては、略算による σ_t を用いた場合、全ての試験体で実験値が計算値を下回る結果となった。一方、精算による σ_t を用いた場合、高強度でプレストレスレベルが高い SH-150 および LH-150 において、実験値が計算値を上回る傾向が見られた。特に梁せいが大きい LH-150 においてその傾向が顕著である。RC 試験体 SH-000 においては計算方法の違いによる鉄筋応力 σ_t に大差はなく、実験値が計算値を若干上回っている。

4.2 中央たわみの検証

図-10 は最大ひび割れ幅実験値 $e W_{max}$ が 0.2mm に達した時点のひずみ分布と曲率を表している。図中の記号は ϵ_p は初期プレストレスによるコンクリートの圧縮ひずみ、 $\epsilon_c \cdot \epsilon_t$ はパイ型変位計で計測したコンクリートのひずみ、 $\epsilon_c \cdot \epsilon_t$ は線形補間した圧縮縁・引張縁コンクリートのひずみ、 x_n は中立軸位置、 ϕ は曲率、 δ は中央たわみを示す。なお、添え字は c が計算値、es が短期荷重実験値を表している。計算値のひずみと中立軸位置は、弾性材料を仮定した断面における釣合いより精算した。計算値の中央たわみ δ は曲率 ϕ を用いて、等曲げ区間は曲率が一定、荷重点から支点までは曲率が直線

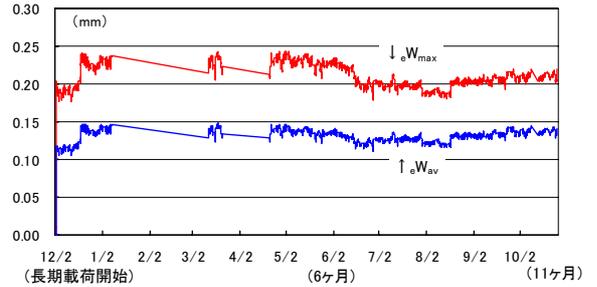


図-6 ひび割れ幅の推移

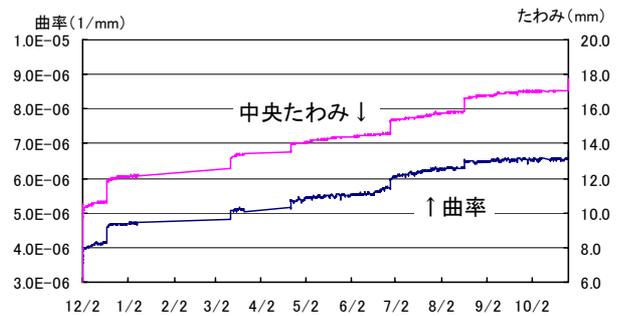


図-7 曲率と中央たわみの推移

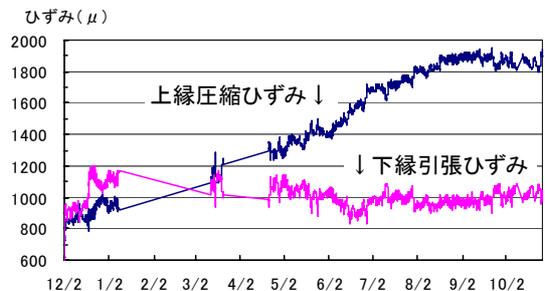


図-8 コンクリートひずみの推移

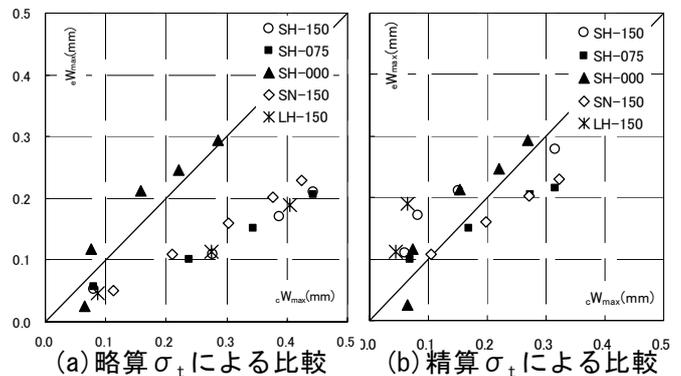


図-9 最大ひび割れ幅 W_{max} の実験値と計算値の比較

的に減少すると仮定して(3)式により算出した。ここで a は荷重点から支点までの距離を示す。

$$\delta = (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \times_c \phi / 24 \quad \dots (3)$$

曲率およびたわみの実験値は計算値より若干小さいが、計算値は実験結果を比較的よく推測できた。この結果を踏まえ、2010年度に報告した²⁾試験体についても同様に中央たわみの計算を行った結果を表-3に示す。最大ひび割れ幅実験値 ${}_e W_{max}$ = 0.2mm 時では約 20%の誤差でたわみを評価できているが、0.1mm 時では誤差が大きい結果となった。特に SH-075 および SH-000 においてその傾向が顕著である。これは 0.1mm 時は曲げひび割れ耐力時に近いため 0.1mm 時以降にも新規ひび割れが発生しており、ひび割れ本数が定常状態に至っていないことが原因であると考えられる。

5. ひび割れ幅計測方法の比較

計測方法の違いによるひび割れ幅の測定差を把握する目的で、画像処理によりひび割れ幅を計測する精度 0.01mm のマイクロSCOPEを用いて、本実験で採用しているパイ型変位計によるひび割れ幅の測定値との比較を行った。測定したひび割れは、図-3に示した No. 3, 9, 15, 18 の4箇所である。比較結果を表-4に示す。なお、No. 3 はひとつのパイ型変位計に対して2本のひび割れが発生しているため、マイクロSCOPEでは2本の合計値を採用した。No. 9 は画像処理を行った部位のひび割れ幅に欠けがあったため測定差が大きい、その他のひび割れは10%以内の誤差となっている。この結果より、両計測方法は同程度の精度でひび割れ幅を計測できることがわかった。

6. まとめ

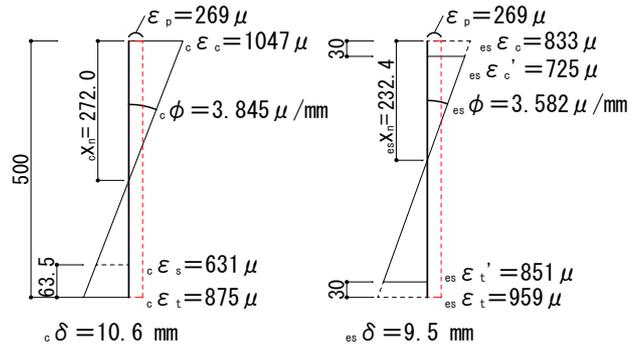
高強度コンクリートを用いた PC 梁の静的荷重実験の結果を報告し、2010年度の実験とあわせて最大ひび割れ幅の検証を行った。本報告および2010年度の実験範囲内において、高強度 PC 梁の最大ひび割れ幅は、引張鉄筋応力 σ_t に略算値を用いた PRC 指針式で安全側に評価できることを示した。しかし、精算による σ_t を用いると、プレストレスレベルが高い試験体においては実験値が計算値を上回る傾向があることを示した。

短期荷重実験のひずみ分布に対して計算値との比較を行った結果、曲率および中央たわみは10%程度の精度で評価できた。2010年度の実験に対して同様の検討を行ったところ、ひび割れ本数が定常化する ${}_e W_{max}$ = 0.2mm では比較的精度良く評価できたが、 ${}_e W_{max}$ = 0.1mm では計算値が実験値を過大評価する傾向があった。

長期荷重実験では、たわみの増大は約10ヶ月で収束する傾向がみられた。曲率の増大は、コンクリートのひずみ分布の推移から、圧縮側コンクリートのクリープ変形が主要因であることがわかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説, 2003. 2
- 2) 大塚夕, 福井剛, 岡本晴彦：純曲げを受ける高強度プレストレストコンクリート梁のひび割れ性状に関する実験的研究, 第19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論文集, pp. 389-392, 2010. 10



(a) 計算値 (b) 短期荷重実験時
図-10 ひずみ分布と曲率

表-3 中央たわみの実験値と計算値の比較

試験体名	${}_e W_{max} = 0.1mm$ 時				${}_e W_{max} = 0.2mm$ 時			
	計算値		実験値		計算値		実験値	
	${}_c \phi_{01}$ (μ/mm)	${}_c \delta_{01}$ (mm)	${}_e \delta_{01}$ (mm)	$\frac{{}_e \delta_{01}}{{}_c \delta_{01}}$	${}_c \phi_{02}$ (μ/mm)	${}_c \delta_{02}$ (mm)	${}_e \delta_{02}$ (mm)	$\frac{{}_e \delta_{02}}{{}_c \delta_{02}}$
LH-150	3.089	8.49	7.14	0.84	3.845	10.57	9.50	0.90
SH-150	6.418	13.12	10.54	0.80	8.773	17.94	16.06	0.90
SH-075	5.543	11.34	7.43	0.66	9.107	18.62	14.45	0.78
SH-000	3.781	7.73	4.96	0.64	5.135	10.50	9.04	0.86
SN-150	5.280	10.80	9.11	0.84	8.621	17.63	18.39	1.04

表-4 計測方法の違いによるひび割れ幅の差

計測方法	No. 3	No. 9	No. 15	No. 18
パイ型変位計 W_P (mm)	0.208	0.156	0.209	0.232
マイクロSCOPE W_M (mm)	0.206	0.197	0.226	0.236
W_M/W_P	0.990	1.263	1.081	1.017