

論文 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

大塚 夕*1・福井 剛*2・岡本 晴彦*3

要旨: コンクリート強度, プレストレスレベル, 梁せいをパラメーターとす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載荷実験を行った。その結果, 高強度コンクリートを用いた PC 梁に対しても, PRC 指針式のひび割れ幅算定式によりひび割れ幅を安全側に評価できるが, プレストレスが大きくなると同式はひび割れ間隔を過大評価する傾向があることを示した。また, 平均ひび割れ幅に対する最大ひび割れ幅の比率は PRC 指針と同様 1.5 倍が妥当であることを示した。長期載荷実験の結果から, 経時的なひび割れ幅の進展は少ないが, 圧縮側コンクリートのクリープ変形により曲率とたわみが増大することを確認した。

キーワード: プレストレストコンクリート梁, 高強度コンクリート, ひび割れ幅, ひび割れ間隔, 長期載荷

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下 PC と略称) 梁は従来から比較的高強度のコンクリートが用いられてきたが, 基規準の適用範囲の関係で Fc63 以下が多用されている。PC 梁はクリープや収縮が少ない高強度コンクリートとの相性は良く, 小さい断面で耐荷重性能に優れた梁を作ることが可能である。しかし, Fc63 を超える部材に関する基規準の整備は十分ではなく, 今後の技術的知見の蓄積が望まれている。

日本建築学会の PRC 指針¹⁾には, ひび割れ幅制御を目的とした設計式が掲載されており, その有用性も認識されている。しかし, これに関連する研究^{2),3)}では, Fc60 を超える高強度コンクリートは対象とされていない。近年, 高強度コンクリートを用いた RC 梁のひび割れ性状については研究成果^{4),5)}が蓄積されつつあるが, 高強度コンクリートを用いた PC 梁についてはいまだ検証が十分ではない。

本研究は, Fc80 の高強度コンクリートを用いて, 比較

的大きなプレストレスを与えた PC 梁のひび割れ性状を実験的に明らかにしようとするものである。そのうち 1 体の試験体に対しては, 長期的な載荷を行い, 高強度 PC 梁のひび割れおよびたわみ性状の経時変化を把握することも目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

実験要因は, コンクリート強度 (Fc80, Fc30), 式(1)に示すプレストレスレベル ($r\sigma_g$: 0, 0.075, 0.15) および梁せい (D: 350, 500) とし試験体数は 5 体とした。梁幅および主筋量は共通である。梁せい 500mm の試験体 LH-150 は長期的なひび割れおよび変形状を把握するため, 短期載荷試験後に長期載荷を行っている。なお $r\sigma_g=0$ は RC 試験体であり PC 鋼棒は配置していない。

$$r\sigma_g = P_e / (b \cdot D \cdot F_c) \quad (1)$$

図-1 に試験体形状および配筋, 表-1 に試験体一覧

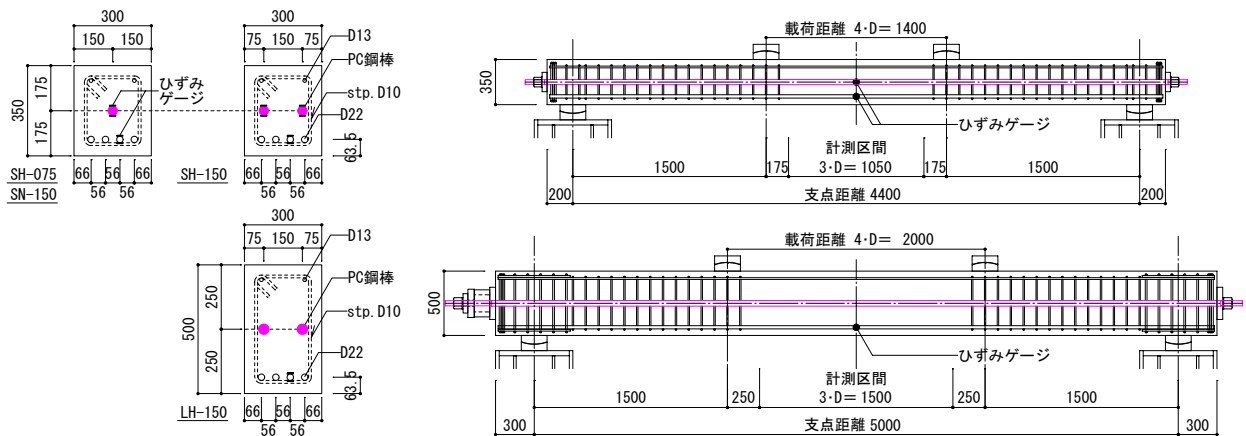


図-1 試験体形状および配筋 (単位 mm)

*1 (株) ピーエス三菱 建築本部設計部 (正会員)

*2 (株) ピーエス三菱 建築本部設計部 博士 (工学) (正会員)

*3 愛知淑徳大学 メディアプロデュース学部教授 博士 (工学) (正会員)

をそれぞれ示す。主筋によるひび割れ制御を観察するために、PC鋼材はアンボンドとした。なお、有効プレストレス力 P_e は、SH・SNタイプでは荷重時のPC鋼棒ひずみより、LH-150ではPC鋼棒定着部に設置したロードセルより算出した。プレストレス導入時のコンクリート材令はSHシリーズは40日、LHシリーズは55日であった。荷重はそれぞれ導入の5~12日後および半年後とした。また、各試験体は荷重直前まで湿布封かん養生し、乾燥収縮の影響を小さくした。

表-1 試験体一覧

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
SH-150	300×350	80	0.150	2-36φ	1416	13.5
SH-075			0.075	1-36φ	716	6.8
SH-000			0	—	0	0.0
SN-150			0.150	1-32φ	524	5.0

共通要因: 引張鉄筋 4-D22
 $\sigma_g = P_e / b \cdot D$

2.2 材料試験結果

表-2(a)~(c)に材料試験結果を示す。鉄筋の断面積は公称断面積, PC鋼棒の断面積はミルシートの値を示している。SHとLHのコンクリートは同じ調合だが、荷重時の材令が異なるため材料試験結果はそれぞれ記載している。

表-2 材料試験結果

(a) コンクリート

区分	F_c	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)
LH	80	105.00	—	45.60
SH	80	87.53	4.40	40.68
SN	30	37.56	2.93	29.35

(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
36φ	SBPR1080/1230	1002	1162	1285	200
32φ	SBPR1080/1230	777	1176	1286	201

*) σ_y は0.2%オフセットによる

2.3 荷重方法及び計測項目

SH・SNタイプの荷重は500kNジャッキを用いた単純

支持2点荷重による単調荷重としたが、後述する式(7)により算定した引張鉄筋の応力 σ_t が、長期許容応力度と等しい215N/mm²となる荷重で一度除荷した。LH-150は長期間の持続荷重を行うため、図-2に示すように縦締めPC鋼棒4-17φを用いて荷重を行っている。

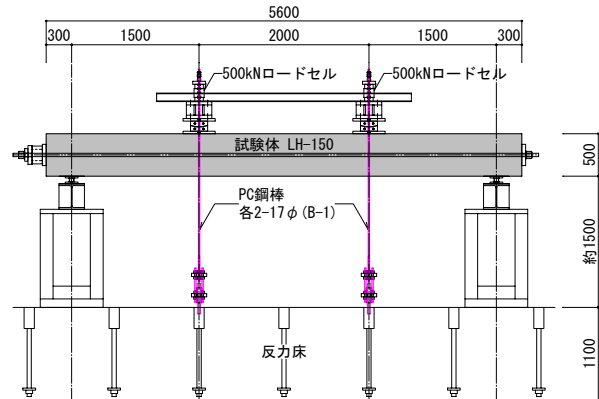


図-2 LH-150 荷重方法

短期荷重実験の計測項目は、荷重-変形関係とひび割れ幅、PC鋼棒および引張鉄筋のひずみとした。PC鋼棒および引張鉄筋のひずみは、図-1に示す位置で鋼材に貼り付けたひずみゲージにより計測した。LH-150のPC鋼棒張力の計測はロードセルで行っている。

ひび割れ幅は計測区間の引張鉄筋高さに設置したパイ型変位計により、変形は梁中央部に設置した変位計により計測した。図-3にひび割れ幅測定用パイ型変位計の配置を示す。

LH-150の長期荷重実験では前述の計測項目に加えて、曲率の経時変化を計測している。曲率は試験体中央400mmの範囲に図-4に示す位置でパイ型変位計を配置し、圧縮ひずみと引張ひずみを計測して算出している。

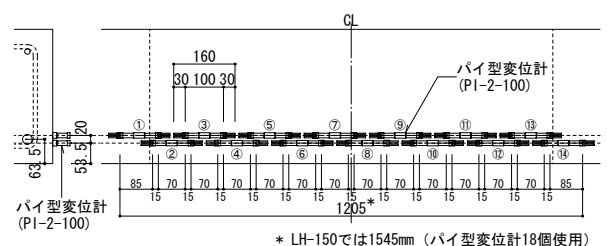


図-3 ひび割れ幅測定用パイ型変位計配置

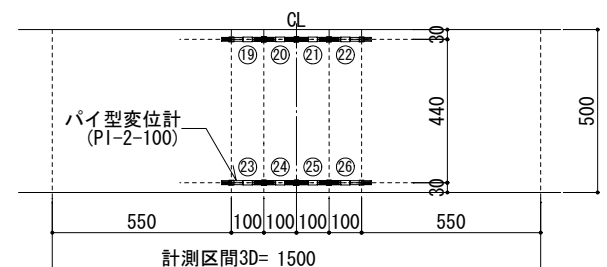


図-4 LH-150 曲率測定用パイ型変位計配置

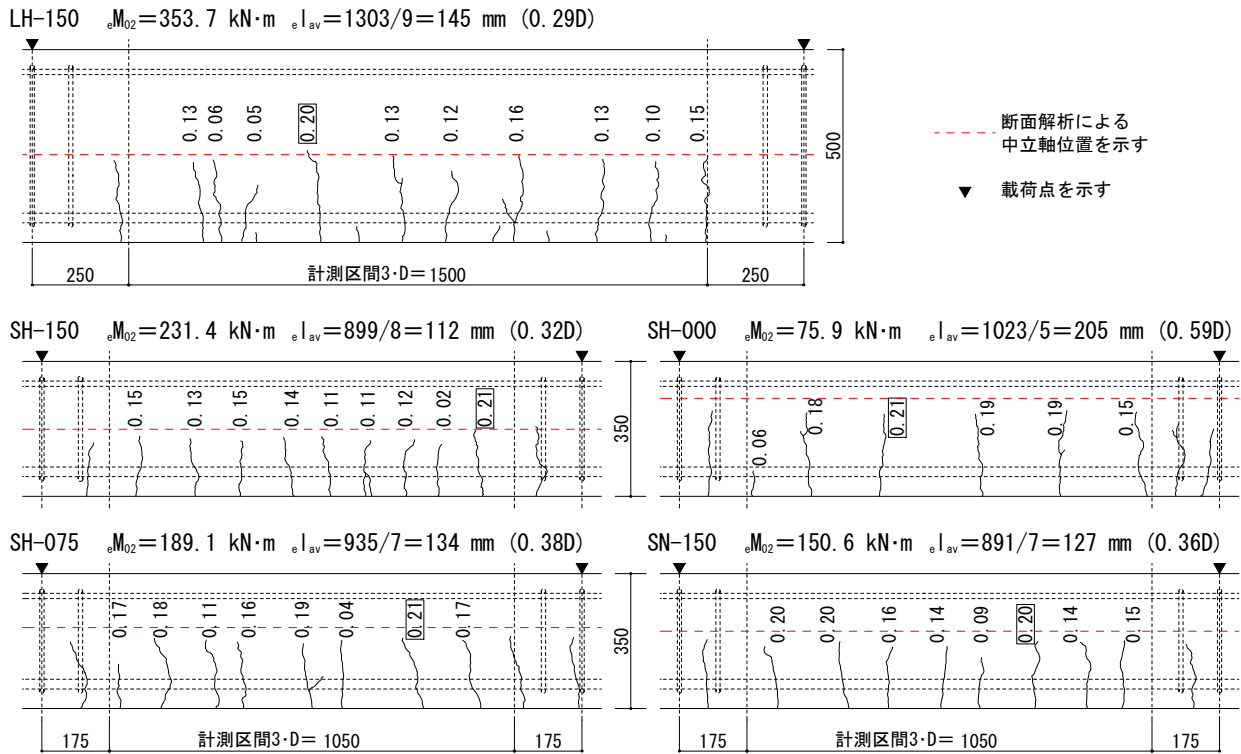


図-5 ひび割れ状況 ($eW_{max}=0.2\text{mm}$ 時)

3. 短期載荷実験結果

3.1 ひび割れ状況と平均ひび割れ間隔

図-5 はパイ型変位計の読み値による最大ひび割れ幅 eW_{max} が 0.2mm に達した時点のひび割れ状況である。図中の eM_{02} およびひび割れ先端の数値は、この時のモーメントとひび割れ幅を表している。また、図中の破線は材料試験結果を用いた断面解析による中立軸位置を表しており、ひび割れが概ね中立軸まで進展していることが分かる。

平均ひび割れ間隔実験値 eI_{av} は、中央 $3 \cdot D$ の範囲とした計測区間内の最も外側に発生したひび割れ間の距離をその間のひび割れ本数+1 で除した値とした。プレストレスが大きい試験体ほど平均ひび割れ間隔 eI_{av} が小さ

くなる傾向が見られた。プレストレスが大きい試験体はひび割れ発生時期の歪み勾配が大きいためにひび割れの長さが急激に進展しにくい。その結果、初期のひび割れに変形が集中せず他のひび割れが発生しやすいことが原因であると考えられる。

LH-150 ではひび割れの長さが短い副次的なひび割れが複数発生した。これらはいずれも幅が 0.05mm 未満の微細なひび割れであり、引張鉄筋高さまで進展していないことから、 eI_{av} の算定においては無視した。LH-150 と SH-150 を比較すると eI_{av} の絶対値は異なるが、梁せい D に対する eI_{av} の比率はほぼ同じ ($0.29D$, $0.32D$) であり、平均ひび割れ間隔は梁せいに依存する傾向がみられた。

PC 試験体(LH-150,SH-150,SH-075,SN-150)においては図-5 に示す $eW_{max}=0.2\text{mm}$ 以降に新たなひび割れは発

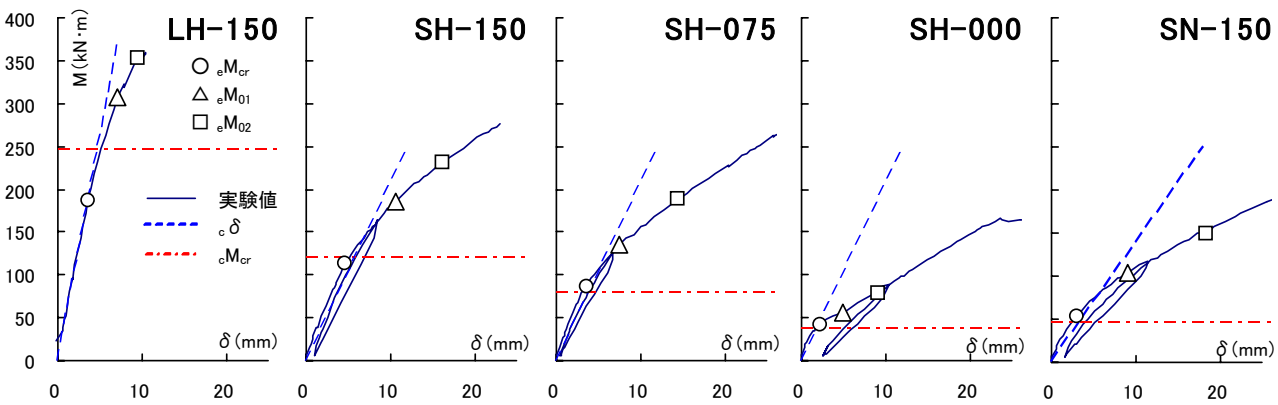


図-6 モーメントーたわみ関係

生しなかったが、RC試験体(SH-000)では ${}_eW_{max}$ が0.25mmを超えた時点で2本の追加ひび割れが発生したため、最終の ${}_e l_{av}$ は146mmであった。

なお、後述の式(5)に示すPRC指針式による平均ひび割れ間隔の計算値 ${}_e l_{av}$ は、引張鉄筋の配置と梁幅が同一であるために全ての試験体で169mmとなる。本実験の範囲では平均ひび割れ間隔はPRC指針式よりも小さくなっている。

3.2 モーメントーたわみ関係

図-6は各試験体のモーメントと中央部のたわみの関係を表したものである。図中の記号は各実験値のモーメント(${}_eM_{cr}$: 曲げひび割れ発生時、 ${}_eM_{01}$ ・ ${}_eM_{02}$: 最大ひび割れ幅0.1mm・0.2mm時)を示す。 ${}_e\delta$ は材料試験結果を用いた弾性変形量計算値、 ${}_eM_{cr}$ は材料試験結果を用いた曲げひび割れ耐力計算値で式(2)による。ここで、コンクリートの曲げ引張強度は $0.07\sigma_B$ とした。

$${}_eM_{cr} = (0.07 \cdot \sigma_B + \sigma_g) \cdot b \cdot D^2 / 6 \quad (2)$$

3.3 モーメントー最大ひび割れ幅関係

図-7は各試験体のモーメントと最大ひび割れ幅の関係を表したものである。ここで示したものは各試験体で最初に幅が0.2mmに達したひび割れの幅の推移である。図中の破線は式(3)~(6d)に示すPRC指針式による計算値を表しており、各式に材料試験結果を代入することによ

り算出している。

引張鉄筋応力 σ_t には、弾性材料を仮定した断面における釣合いより精算した値と、式(7)の略算で算出した値とを用いて、PRC指針式の適合性を検討した。なお、PC鋼棒は実験においても張力の変動はほとんど見られなかったため載荷開始時の張力で一定とした。

最大ひび割れ幅

$$W_{max} = 1.5 \cdot W_{av} \quad (3)$$

平均ひび割れ幅

$$W_{av} = l_{av} \cdot \varepsilon_{t-av} \quad (4)$$

平均ひび割れ間隔

$$l_{av} = 2 \cdot (c + s / 10) + 0.1 \cdot \phi / p_e \quad (5)$$

平均鉄筋ひずみ

$$\varepsilon_{t-av} = \frac{A + \sqrt{A^2 - 8 \times 10^3 \cdot E_s \cdot (F_t / p_e - 0.8 \cdot \sigma_t)}}{4 \times 10^3 \cdot E_s} \quad (6a)$$

$$A = 2 \times 10^3 \cdot \sigma_t - 0.8 \cdot E_s \quad (6b)$$

$$\text{ただし、} \varepsilon_{t-av} \geq 0.4 \cdot \sigma_t / E_s \quad (6c)$$

$$\text{かつ} \quad \varepsilon_{t-av} \geq (\sigma_t - 105) / E_s \quad (6d)$$

鉄筋応力(略算)

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

高強度コンクリートでプレストレスが大きい試験体(LH-150,SH-150)では、引張鉄筋応力 σ_t に精算値を用いるとひび割れ幅の実験値が計算値を大きく上回る結果となった。最大ひび割れ幅実験値 ${}_eW_{max}$ がおよそ0.2mmとなるモーメントにおける最大ひび割れ幅の計算値(図

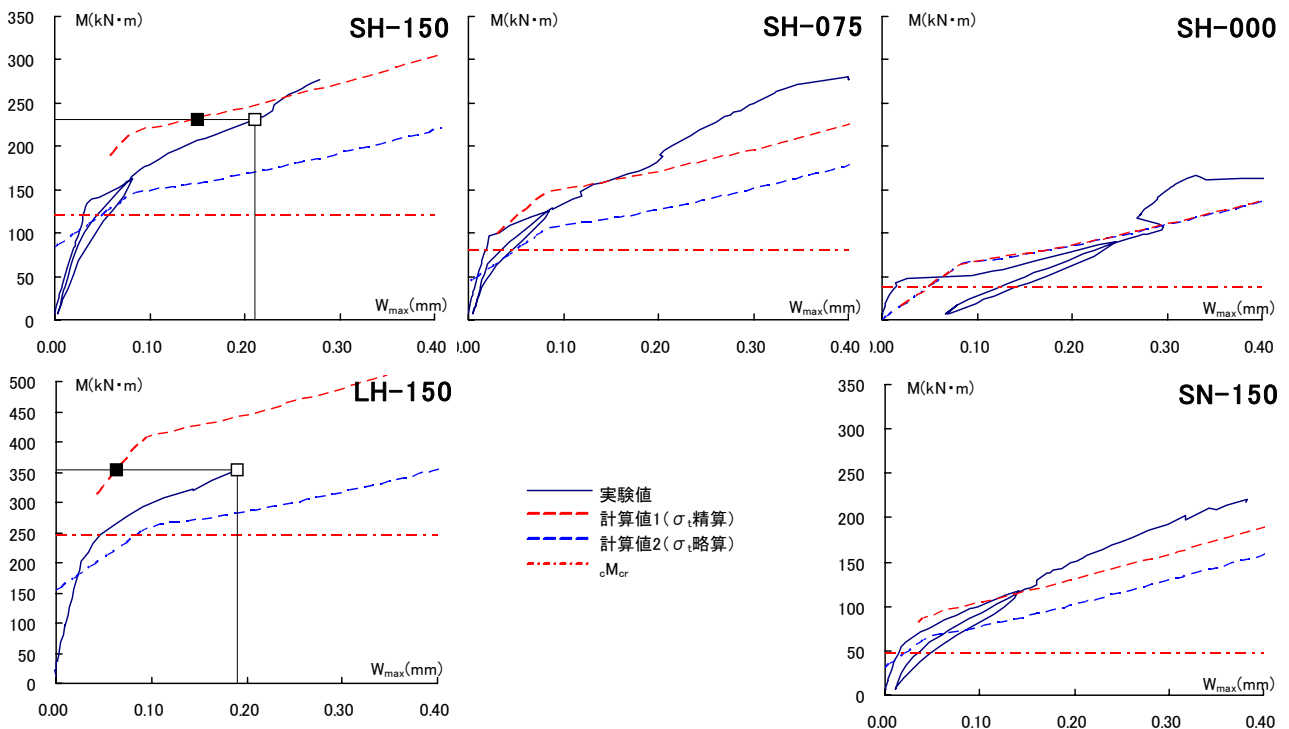


図-7 モーメントー最大ひび割れ幅関係

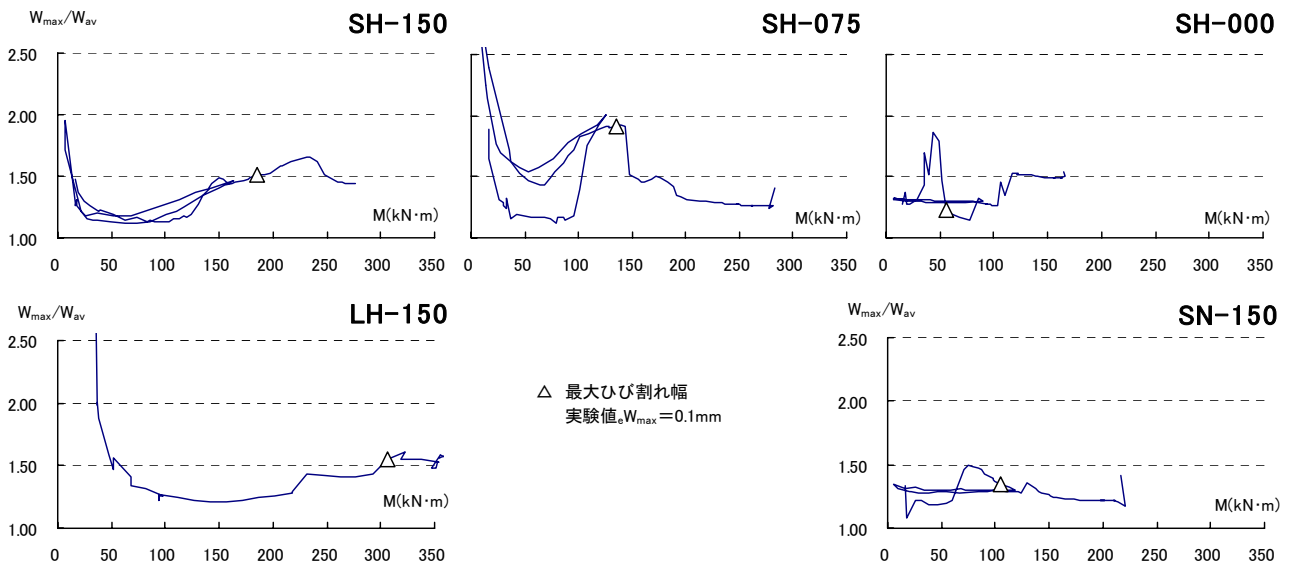


図-8 最大ひび割れ幅／平均ひび割れ幅－モーメント関係

の■)に対する実験値(図の□)の比率は、SH-150で1.41、LH-150で2.97となっていることから、梁せいが大きいひび割れ幅を過小評価する傾向があると言える。

一方で σ_t に略算値を用いた場合には、PC試験体(LH-150,SH-150,SH-075,SN-150)ではひび割れ幅の実験値が計算値を下回っていることが図-7から分かる。この傾向はモーメントが大きくなるほど顕著である。RC試験体(SH-000)は実験値と計算値が比較的近い値となっている。これは前述したようにプレストレスが大きいものほどひび割れ間隔が小さくなったことが原因の一つであると考えられる。

本実験の範囲では、引張鉄筋応力 σ_t に略算値を用いた場合には、高強度PC梁のひび割れ幅はPRC指針式で安全側に評価できていると言える。

3.4 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の関係

図-8は各試験体の平均ひび割れ幅に対する最大ひび割れ幅の比率とモーメントの関係を表したものである。

ひび割れ幅が小さい初期の段階ではばらつきが大きいですが、最大ひび割れ幅が0.1mm(図の△)を超えた辺りからはほぼ1.0~1.5に収まっており、PRC指針式の平均ひび割れ幅に対する最大ひび割れ幅の比率1.5に近い値となっている。

4. 長期載荷実験経過

LH-150は2009年12月2日に短期載荷実験を行い、その後は長期載荷実験を継続している。2010年10月末までの11ヶ月間における実験の経過を図-9~12に示す。

なお、載荷には図-2に示すようにPC鋼棒を用いており、試験体のクリープ変形などにより緊張力が低下するため定期的に張力調整を行っている。

図-9はひび割れ幅の推移を表したもので、 $\Sigma_e W$ はひび割れ幅合計、 ${}_e W_{max}$ は最大ひび割れ幅、 ${}_e W_{av}$ は平均ひび割れ幅を示す。ひび割れ幅合計は1.2mmから1.6mmの間で推移しておりほぼ一定値に収束していると言える。

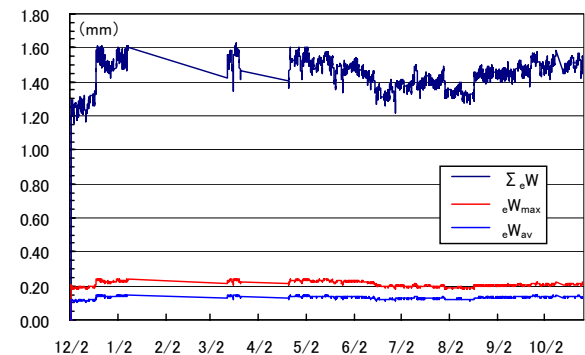


図-9 ひび割れ幅の推移

図-10はひび割れ状況の推移を表したもので、ひび割れの長さは若干進展しているものの大きな変化は無いことが分かる。ただし、引張鉄筋高さに達するひび割れが1本増え、平均ひび割れ間隔 ${}_e l_{av}$ が小さくなっている。

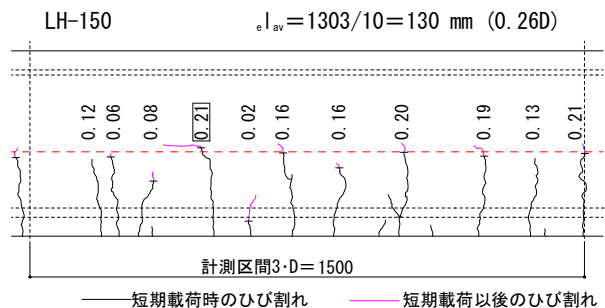


図-10 ひび割れ状況の推移

図-11 は曲率と中央たわみの推移、図-12 は曲率の算出に用いた中央 400mm 区間のコンクリートひずみをそれぞれ表している。なお中央 400mm 区間にはひび割れが 2 本発生しており、図-12 の下縁引張りひずみはこのひび割れも含めた平均値である。

前述したようにひび割れ幅合計値は増加していないが、曲率と中央たわみは増加傾向にあり変形は進行していることが分かる。載荷直後と比較すると、曲率は 1.65 倍 (4.0×10^{-6} から 6.6×10^{-6}) に、中央たわみは 1.7 倍 (10mm から 17mm) になっている。図-12 から明らかなように、下縁引張りひずみはほぼ一定値で推移しているのに対して、上縁圧縮ひずみは増加しており、曲率と中央たわみの増加は圧縮側コンクリートのクリープ変形によるものであると考えられる。

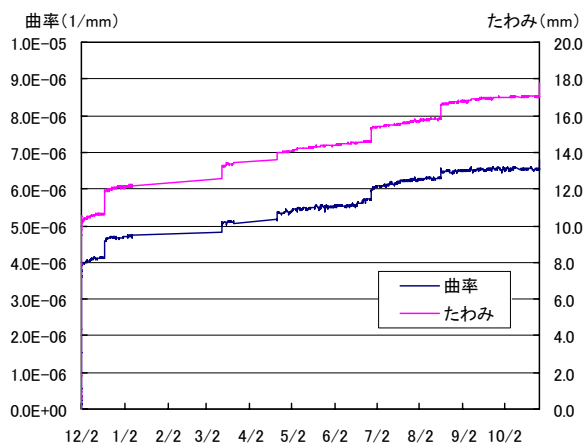


図-11 曲率と中央たわみの推移

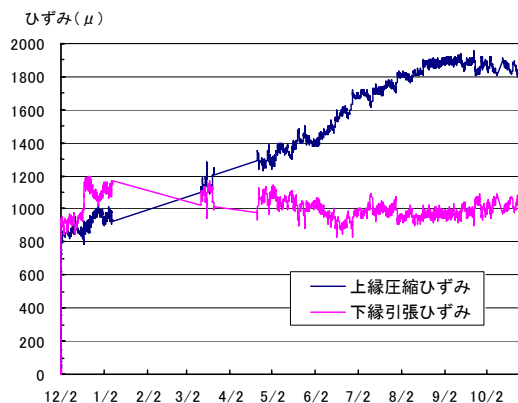


図-12 コンクリートひずみの推移

圧縮ひずみは長期載荷開始時の 800μ から 1900μ に増加しており、クリープ係数にすると 1.38 となる。長期載荷開始時の圧縮縁ひずみは応力に換算すると 36.5N/mm^2 であり、コンクリート圧縮強度 σ_B の 1/3 程度という比較

的大きな圧縮縁応力となっている。なお、日本建築学会の PC 規準⁶⁾ではクリープ係数の最終値として 2.0 という値が示されており、実験で得られたクリープ係数 1.38 は、設計上使用する範囲内に収まっている。

5. まとめ

純曲げを受ける高強度 PC 梁のひび割れ性状に関する静的載荷実験を行なった結果、プレストレスが大きい試験体ほど平均ひび割れ間隔が小さくなる傾向が見られた。また、平均ひび割れ間隔は梁せいの影響を受けることが確認できた。

本実験の範囲内において、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、平均ひび割れ間隔は実験値との整合性が低かった。また、平均ひび割れ幅に対する最大ひび割れ幅の比率として 1.5 倍を用いることの妥当性が確認できた。

高強度 PC 梁の長期載荷実験では、ひび割れ幅は合計値・最大値とも増加していないが、曲率と中央たわみは増加しており、その原因は圧縮側コンクリートのクリープ変形にあることが分かった。なお現在も長期載荷実験を継続中である。

謝辞：(株) ネットレンには PC 鋼棒を御提供頂きました。御厚意に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレ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) 鈴木計夫, 大野義照：プレレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅に関する研究—その 1 初期ひび割れについて—, 日本建築学会論文報告集, 第 303 号, 1981.5
- 3) 李振宝, 大野義照, 馬華：鉄筋コンクリート部材の長期曲げひび割れ幅算定法, 日本建築学会構造系論文集, 第 565 号, pp.103-110, 2003.3
- 4) 西拓馬, 大野義照, 中川隆夫, グエン テクオン：高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol29, No.3, 2007
- 5) 岡本晴彦：純引張下における高強度コンクリートと細径鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅳ, pp.861-862, 2010
- 6) 日本建築学会：プレレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998.11