

長期荷重を受けるPC梁の復元力特性に関する実験的研究

日本大学 理工学部 正会員 工学博士 ○浜原 正行
 (株)ピーエス三菱 PC 建築部 同 博士(工学) 福井 剛
 松井建設(株) 技術部 同 博士(工学) 内田龍一郎

1 はじめに

地震時における部材の力学的挙動を検討しようとした実験では、長期荷重を考慮した荷重法を採用した例が少ない。プレストレストコンクリート(以下PCと略称)は、大スパン骨組の梁部材に多用されるため、長期鉛直荷重の影響が極めて大きい。本報告は、長期荷重の大きさを要因とした3体のPC梁試験体に対して、正負繰り返し載荷実験を行い、PC梁の復元力特性に及ぼす長期荷重の影響を実験的に検討しようとするものである。

2 実験概要

試験体概要 試験体は同一諸元を有する3体のPC梁であり、実験要因は表1に示すように錘重量の大きさ(曲げ危険断面の位置)である。図1に試験体配筋詳細を示す。

載荷方法 図2に加力装置を示す。長期荷重時の応力は南北スラブの先端部に設置した200kN串型ジャッキによる下向き鉛直力とスパン内の2箇所に対称に設置した錘の重量、および試験体自重によって再現した。南北ジャッキの荷重は材端フェイスメントと梁スパン中央の曲げモーメントが等しくなるように設定した。錘はNo2試験体では $Q_u > Q_L$ 、No3試験体では $Q_u < Q_L$ を満たす重量とした。すなわち、正曲げを受ける側の曲げ危険断面がNo2試験体では端部、No2試験体では載荷点となるように計画した。ここに、 Q_L は長期荷重時の材端せん断力、 Q_u は地震荷重時において材端が終局モーメント $=M_u$ に達したときのせん断力であり、次式によった。

$$Q_u = 2 \cdot M_u / L_o$$

$$M_u = T_{ry} \cdot j_r + T_{py} \left[D - 2T_{py} / (b \cdot \sigma_B) \right] = 60.3 \text{ kNm}$$

ここに、 L_o =内法スパン(5200mm)、 T_{ry} =主筋降伏荷重(28.5kN/本)、 T_{py} =PC鋼材降伏荷重(243kN/本)、 j_r =上端筋一下端筋間の距離(240mm)、 b =梁幅(150mm)、 D =梁せい(300mm)、 σ_B =設計時のコンクリート強度(30N/mm²)

地震時の載荷は上述のジャッキを用い、梁の南北フェイス位置での回転角(以後、回転角と略称)が等しくなるように制御した。なお、地震時の回転角と荷重は長期鉛直荷重からの増分値とした。

材料試験結果 表2にコンクリートの調査表を、表3.4にコンクリートと鋼材の材料試験結果一覧表を示す。

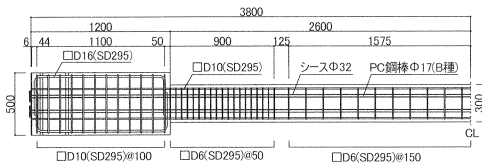


図1 配筋詳細

表2 コンクリートの調査表

空気量 %	W/C %	単位重量 (kg/m ³)				AE剤
		W	C	S	G	
4.5	50.0	185	370	797	909	5.15

表4 鋼材の材料試験結果

名称 (材種)	使用 部位	σ_y N/mm ²	σ_{max} N/mm ²	E kN/mm ²
D10(SD295)	梁主筋	338	469	171
Φ17(B種)	PC鋼棒	1066	1145	201

σ_y :降伏強度, σ_{max} :引張強度, E:ヤング係数

表1 試験体概要

試験体	錘重量/箇所 (曲げ危険断面)	共通因子 (単位: mm)
No1	ゼロ(端部)	$b=150, D=300, d_f=270, d_p=210, L_o=5200$
No2	12kN(端部)	主筋2-D10, PC鋼材1-Φ17(断面上下に 対称配置), スターツップ: D4 @50
No3	24kN(スパン内)	有効緊張力 $P_e=270\text{kN}$

[記号] b =梁幅, D =梁せい, d_f =普通鉄筋に関する有効せい
 d_p =PC鋼材に関する有効せい, L_o =内法スパン

表3 コンクリートの材料試験結果

試験体名	コンクリート (N/mm ²)			グランド σ_B N/mm ²
	σ_B	σ_T	E ×10 ⁴	
No1	35.54	3.31	2.70	60.40
No2	37.43	3.30	2.43	
No3	36.93	3.26	2.50	

σ_B :圧縮強度, σ_T :割裂強度, E:ヤング係数

3 実験結果

3.1 最終破壊状況

図3に各試験体の最終破壊状況を示す。No1 試験体は梁の上端と下端のひび割れ発生状況に違いが見られない。これに対して、No2, No3 試験体は、梁上端のひび割れは端部に集中し、下端のひび割れは中央部に向けての広い範囲に生じている。この傾向は鉛直荷重の大きいNo3 試験体のほうが顕著である。

3.2 せん断力-回転角 関係

図4に各試験体の地震時の梁せん断力と回転角の関係を示す。なお、2節でも示したように地震時の荷重と回転角は長期鉛直荷重からの増分値とし、せん断力は両端曲げモーメントを内法 π ンで除した値とした。いずれの試験体も比較的エネルギー吸収能力に富んだ履歴ループを描いており、回転角 4%に達しても顕著な耐力低下は見られない。最大せん断力時の回転角は、長期鉛直荷重を負荷しないNo1 試験体が最も小さく、No2 試験体がこれに次ぎ、長期鉛直荷重の大きいNo3 試験体が最も大きい値を示している。

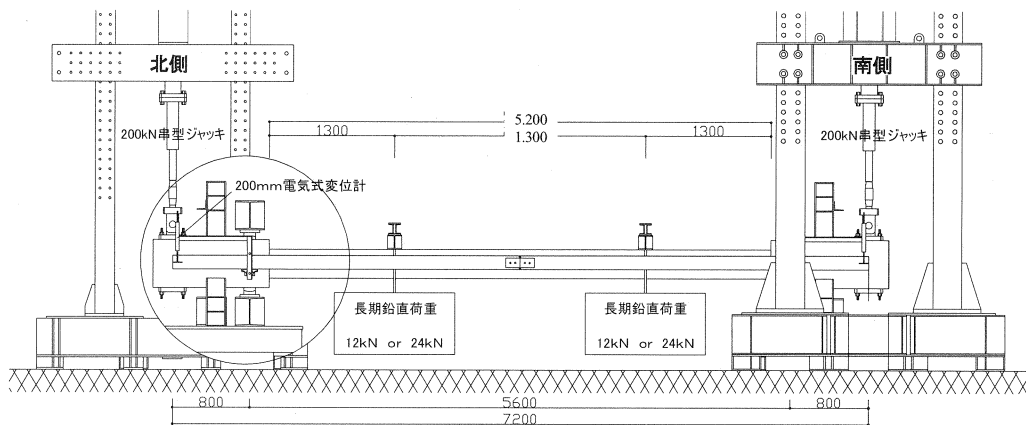


図2 加力装置

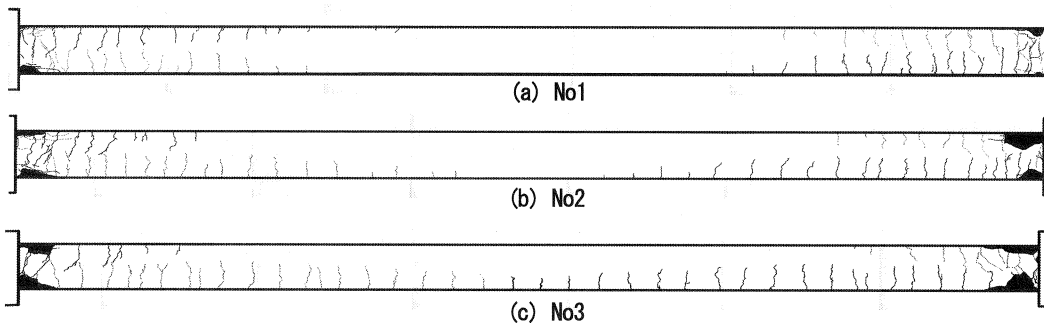


図3 最終破壊状況

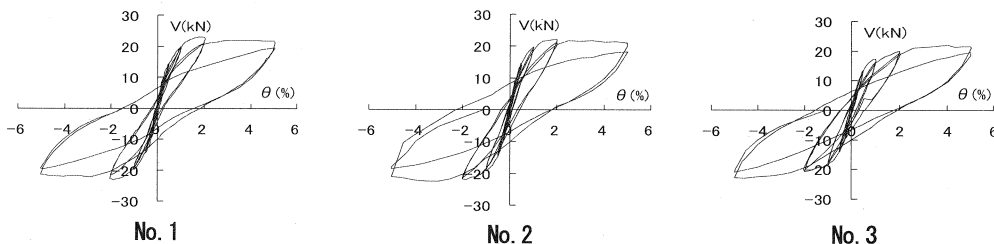


図4 梁のせん断力と回転角の関係

3.3 諸限界値

計算に用いた諸元 諸限界値の計算値に際しては、表1に記載した試験体諸元と表3、表4に記載したコンクリートと鋼材の材料試験結果を用いた。

曲げひび割れモーメント、最大せん断力 表5は曲げひび割れモーメント、最大せん断力、および最大せん断力時の回転角の実験値、計算値、および実験値/計算値の一覧を示したものである。

表5より以下のことが指摘できる。

(1) 曲げひび割れモーメントの実験値/計算値は 0.85~1.3 の範囲に収まっているが、垂重量が大きい試験体ほど実験値/計算値が大きい。

(2) 最大せん断力の実験値/計算値は 0.97~1.04 の範囲で収まっており、(4)式、(5)式による計算精度は比較的良好であることが分かる。また、最大せん断力時の回転角は長期鉛直荷重が大きい試験体ほど大きくなっている。

表5 諸限界値の実験値と計算値の一覧

試験体名	曲げひび割れモーメント (kNm)					最大せん断力 (kN)					最大せん断力時の回転角の実験値 θ_{max} (%)		
	実験値 cM_{cr}			計算値 cM_{cr}	実験値 / 計算値	実験値 cV_u			計算値 cV_u	実験値 / 計算値	正	負	平均
	正	負	平均			正	負	平均					
No1	20.35	18.63	19.49	22.83	0.85	23.05	23.14	23.10	22.23	1.04	1.73	1.84	1.80
No2	21.20	25.12	23.16	23.33	0.99	22.16	21.67	21.92	22.62	0.97	2.00	2.00	2.00
No3	21.40	38.82	30.11	23.19	1.30	21.97	23.05	22.51	22.52	1.00	4.03	4.60	4.32
計算式	$cM_{cr} = M_{Ecr} + M_L$ -----(1)					$cV_u = 2M_u / L_o$ -----(4)							
	$cM_{cr} = b \cdot D^2 (\sigma_g + \sigma_{tb}) / 6$ -----(2)					$M_u = T_{ry} \cdot j_r + T_{py} \cdot [D - \{2T_{py} / (b \cdot \sigma_B)\}]$ -----(5)							
	$\sigma_{tb} = (5/3) \times 0.07 \sigma_B$ -----(3) ¹⁾												

[記号] b =梁幅, D =梁せい, σ_g =平均ブリストル, σ_B =コンクリート圧縮強度, M_L =長期荷重時フェイスモーメント
 M_{Ecr} =梁上端曲げひび割れ発生時における地震時水平荷重時フェイスモーメント
 L_o =内法スパン, T_{ry} =主筋降伏荷重, T_{py} =PC 鋼材降伏荷重 j_r =上端筋から下端筋までの距離

降伏回転角 表6は各試験体の降伏回転角の実験値と計算値、および実験値/計算値を比較した一覧を示したものである。なお、降伏回転角の実験値 θ_y はスルトカーブ上で最大荷重の90%に達した点、またはスルトカーブ上の勾配が初期剛性の5%以下に低下したときの値のいずれか小さいほうの値を採用した²⁾。

降伏回転角の計算値 θ_y は(6)式を用いて算定した。(6)式中、 cV_u は(4)式、(5)式によった。初期剛性 K_e は(7)式、降伏剛性低下率 α_y は(8)式によって算定した。表6より以下のことが指摘できる。

実験値/計算値は 1.00~1.21 に収まっており、長期鉛直荷重を受ける試験体の降伏回転角も(6)~(8)式により、比較的精度良く推定できることが分かる。

表6 降伏回転角一覧表

試験体	θ_y (%)			$c\theta_y$ (%)	実験値 / 計算値	$c\theta_y = 0.9 \cdot cV_u / (\alpha_y \cdot K_e)$ -----(6)
	正	負	平均			
No1	1.06	1.16	1.11*	0.92	1.21	$\alpha_y = \left[0.043 \left(1 + \frac{a}{D} \right) + 1.64 \cdot \left(n_r \cdot P_t + n_p \cdot P_g \left(\frac{\sigma_{py}}{\sigma_{ry}} \right) \cdot \left(\frac{d_g}{D} \right) \right) \right] \cdot \left(\frac{d_r}{D} \right)^2$ -----(8) ³⁾
No2	0.98	1.16	1.07*	1.01	1.06	
No3	1.00	1.00	1.00**	1.00	1.00	

[註] * : 最大荷重の90% ** : 初期剛性の5%

[記号] E =コンクリートのヤング係数, I =断面二次モーメント, n_r, n_p =普通鉄筋とPC鋼棒のヤング係数比,
 P_t =引張鉄筋比=引張鉄筋断面積/(bD), P_g =PC鋼材断面積/(bD), σ_{py}, σ_{ry} : PC鋼棒と普通鉄筋の降伏応力,
 d_g =圧縮縁からPC鋼材重心までの距離, d_r =圧縮縁から引張鉄筋までの距離, a/D =せん断スパン比= $L_o/(2D)=8.67$

3.4 モーメントと回転角の関係

図5はフェイスモーメントと回転角の関係を示したものである。図5より、以下のことが指摘できる。

- (1) 長期荷重ゼロのNo1試験体は正側と負側で違いはなく、比較的小さな回転角で最大モーメントに達している。
- (2) 長期鉛直荷重を荷重したNo2, No3試験体は、上端が引張となる側ではNo1同様、比較的小さな回転角で最大モーメントに達したが、下端が引張となる側では、回転角が4%に達しても曲げモーメントが増加している。この傾向は長期鉛直荷重が大きいNo3試験体の方が顕著である。
- (3) No2, No3試験体の梁下端には広い範囲にわたってひび割れが発生した。下端の鋼材の伸びはこの広い領域でのひずみの累積値と与えられ、回転角はこの伸びによって生じる。したがって、同一の回転角条件下では、ひび割れ領域が狭い梁上端より下端のほうが鋼材引張ひずみ(すなわち、応力)が小さく、結果的に曲げモーメントが減少する。これが(2)で述べた現象の原因であると考えられる。

3.5 残留変形時の曲げモーメント分布

図6に残留変形時曲げモーメントを示す。端部の曲げモーメントはせん断力ゼロ時における南北ジャッキの荷重から求めた。回転角1/50に達すると端部曲げモーメントはほぼゼロとなっている。

4 まとめ

- 1) 曲げひび割れ荷重, 最大せん断力, 降伏回転角は既存の式で比較的精度よく推定できた。
- 2) 履歴ループ形状に及ぼす長期鉛直荷重の影響は見られなかったが, 最大荷重時の回転角は長期鉛直荷重の大きい試験体ほど大きかった。
- 3) 残留変形時の端部の曲げモーメントは, 回転角1/50に達するとほとんどゼロになった。

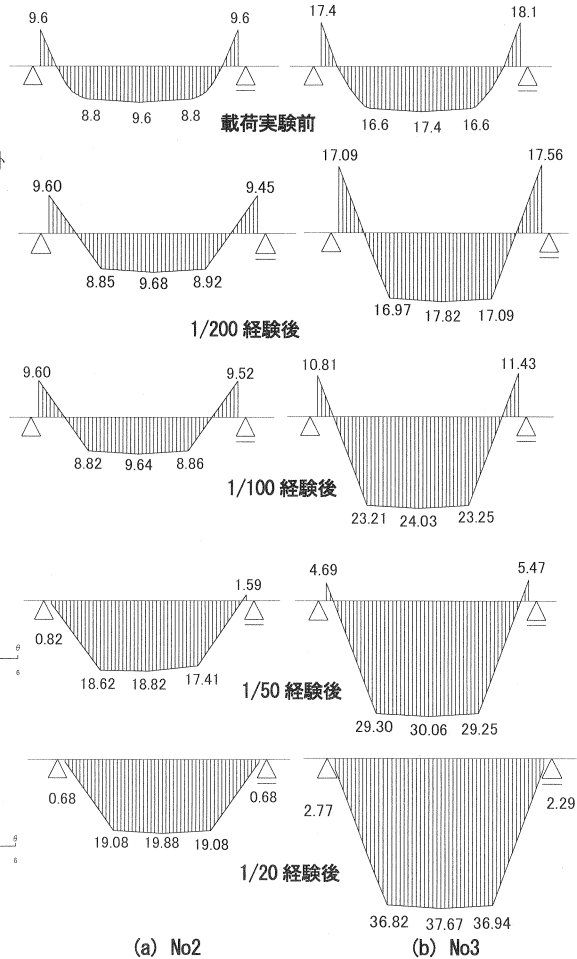


図6 残留変形時モーメント分布(単位: kNm)

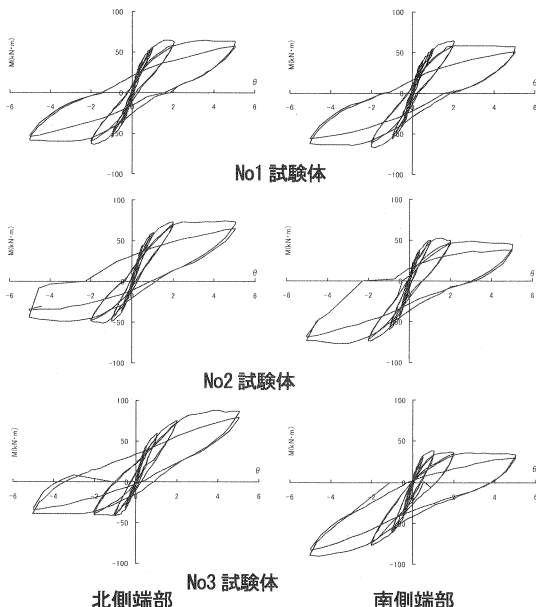


図5 端部曲げモーメント-回転角 関係

[参考文献] 1) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998, 1998年11月, p201, 2) 浜原正行ほか: プレストレストコンクリート曲げ部材の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.410, 1990年4月 pp.63-69, 3) 内田龍一郎ほか: 接合部の影響を考慮したPC梁の復元力特性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.575, 2004年1月