

高性能軽量コンクリートを用いたPC連続はり部材の基本的耐荷特性

(株) ピーエス三菱 正会員 工修 ○和地 高弘
 大阪工業大学工学部 正会員 工博 小林 和夫
 大阪工業大学工学部 正会員 工博 井上 晋

1. はじめに

最近開発されている高性能人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートは、従来の軽量コンクリートに比べて軽量で、高性能 AE 減水剤の併用により優れた強度、耐久性や施工性を有するため、PC橋への活用が期待されている。そのため、実橋に多いPC連続桁の耐荷特性を明確にすることは重要な課題の一つである。

そこで、PC連続はりの基礎的資料を得るため、最も基本的な2スパン連続はりを対象とし、軽量および普通コンクリートはり供試体の載荷試験を行い、両者の曲げ耐荷特性を比較し、定量化について検討した。

2. 載荷試験

供試体は、図-1に示す幅×高さ×全長=100×160×3300mmの2スパン(2×1450mm)連続はりとし、圧縮強度 f'_c の目標強度が 60N/mm^2 の軽量および普通コンクリート部材を作成した。軽量、普通コンクリートには細骨材としてともに川砂、粗骨材として前者では軽量骨材(真珠岩系:最大寸法15mm、絶乾比重 1.2 ± 0.1 、24時間吸水率3%以下)、後者では普通砕石(最大寸法20mm)を用い、両者とも高性能AE減水剤を用いた。

PC鋼材には $\phi 9.2$ 、 $\phi 13$ 鋼棒を用い、同一径または異なる径のものを1本ずつ断面上下の対称位置に配置してプレストレスを導入した後、メタル製シース内にセメントペースト(W/C=45%、高性能注入用混和剤使用)でグラウト注入を行った。PC鋼棒の緊張応力は $0.7f_{py}$ (f_{py} :鋼棒の実降伏強度)とした。

載荷は左右スパンに対し各1点の対称集中荷重とし、端支点～載荷点の距離を950mm(タイプA)、725mm(タイプB)の2種類(線形弾性解析による中間支点と載荷点モーメントの比は各々1.81、1.20)とした。

供試体はすべて、極限解析法による曲げ破壊荷重作用時のせん断力に対し土木学会コンクリート標準示方書の設計せん断耐力式によりD6スターラップでせん断補強した。

表-1に示す12体の供試体の載荷試験を行い、ロードセルで3支点の反力、スパン中央のたわみ、中間支点と載荷点断面のPC鋼棒ひずみとコンクリートのひずみ(上下縁から15mm位置)を測定した。

軽量コンクリートはりの圧縮強度は目標値 60N/mm^2 にはほぼ等しかったが、普通コンクリートはりのCPC-2、4、6、8では 10N/mm^2 程度上回ったので、CPC-10、12では目標値になるよう配合修正した。軽量コンクリートの引張強度、ヤング係数(f'_c の1/3応力の割線係数)は普通コンクリートの大略60%、65%であった。

3. 解析方法

3.1 構成材料の応力-ひずみ関係

曲げ挙動の非線形解析では、PC鋼材はBlakeleyモデル¹⁾、鉄筋(組立筋)はバイリニアモデルとした。コンクリートは、最大応力 f'_c (圧縮強度)に到達後はParkモデル²⁾に従う場合(Model-1)、およびSheikh³⁾による断面内のひずみ勾配の影響を考慮して f'_c に到達後の $\Delta \epsilon_0$ 区間(ここでは、 1000μ を設定)は f'_c 値を保持し、その後はModel-1と同様としたもの(Model-2)の2種類とした。

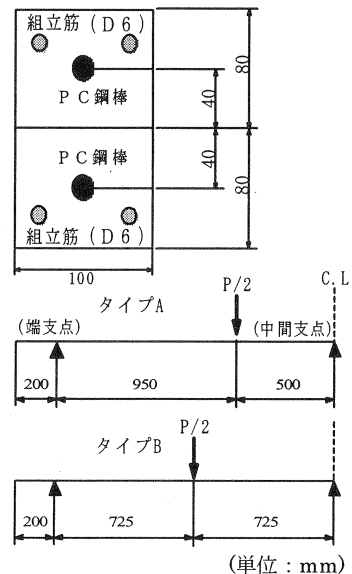


図-1 供試体の寸法と載荷タイプ

最大応力 f'_c までの応力-ひずみ曲線 ($\sigma - \epsilon_c$) 関係には、軽量コンクリートも含めた以下の式⁴⁾を用いた。

$$\eta = A\xi + B\xi^2 + C\xi^3 \quad (1)$$

ここに、 $\eta = \sigma / f'_c$ 、 $\xi = \epsilon_c / \epsilon_{c0}$ 、 A, B, C : 実験定数、 $\epsilon_{c0} : f'_c$ (kgf/cm²) 時のひずみ

A, B, C は、 $A+B+C=1$ 、 $A+2B+3C=0$ 、 $A\xi_0 + B\xi_0^2 + C\xi_0^3 = 1/3$ の3条件を満足するように定める。ただし、 ξ_0 は $\eta = 1/3$ での ξ 値で、次式により与えられる。

$$\xi_0 = \epsilon_{1/3 f'_c} / \epsilon_{c0} = (f'_c / 3 / E_{1/3 f'_c}) / \epsilon_{c0} \quad (2)$$

式(2)において、 $E_{1/3 f'_c} = 4500 \cdot k \cdot \rho^{1.5} \cdot f'_c^{0.5}$ 、 $\epsilon_{c0} = (34.3 - 6.67\rho) \times 10^{-4}$ である。

ここに、 $E_{1/3 f'_c} : 1/3 f'_c$ の割線ヤング係数(kgf/cm²)、 ρ : コンクリートの比重 (本実測値 : 軽量 : 1.82~1.87、普通 : 2.33~2.41)、 k : 骨材形状係数=1.0(非造粒型)~1.15(造粒型) (本解析値 : $k=1.15$)

3.2 PC連続はりの曲げ破壊荷重の算定と非線形解析法

破壊荷重 P'_u は、中間支点(A)と載荷点(B)に塑性ヒンジを仮定し、極限解析法の次式から算定した。

$$P'_u = 2 \times [M_{uA}(1/b) + M_{uB}(1/a+1/b)] \quad (3)$$

ここに、 M_{uA} 、 M_{uB} : A、B断面の最大抵抗曲げモーメント、 a 、 b : 載荷点~端支点、中間支点の距離
 非線形解析では、まず断面解析で曲げモーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係を求めた。次に、連続はりの中間支点部を切断した単純はりを静定基本系に選び、作用荷重に対して仮定した中間支点モーメント (M_A) から定まるスパンの曲げモーメント分布 (M_x) に対応する曲率分布 (ϕ_x) を $M-\phi$ 関係から求め、弾性荷重法で中間支点位置のたわみ角を算定した。実解析では、中間支点位置で左右スパンのたわみ角 (θ_L 、 θ_R) の連続条件 (本供試体 : 左右スパン対称で $\theta_L = \theta_R = 0$) を満足する M_A 値を繰返し計算で求めた。なお、中間支点または載荷点モーメントが M_{uA} 、 M_{uB} に到達後、式(3)の破壊荷重まで M_{uA} 、 M_{uB} 値を保持するとした。
 各荷重階の曲げモーメント分布が求まると、先の断面解析結果から荷重と諸量との関係が算出できる。

4. 結果と考察

4.1 曲げひび割れ発生荷重と破壊状況

曲げひび割れ発生荷重の実験値と計算値を表-1に示す。実験値は目視に基づくもので、計算値は中間支点と載荷点モーメントの線形弾性解析値が各々の曲げひび割れ抵抗モーメントに等しくなった時の荷重である。実験値と計算値との比の平均値は中間支点上で1.19、載荷点下で1.20であり、実験値と計算値は比較的良好に一致している。

表-1 供試体の種類および曲げひび割れ発生荷重と終局最大荷重

供試体	コンクリート	PC鋼棒		載荷タイプ	曲げひび割れ発生荷重						終局最大荷重				
		断面 上側	断面 下側		載荷点下			中間支点上			実験値 P_u (kN)	計算値 (Model-1)		計算値 (Model-2)	
					実験値	計算値	$\frac{P_{cr1}}{P'_{cr1}}$	実験値	計算値	$\frac{P_{cr2}}{P'_{cr2}}$		P'_{u1}	$\frac{P_u}{P'_{u1}}$	P'_{u2}	$\frac{P_u}{P'_{u2}}$
					(kN)	(kN)		(kN)	(kN)			(kN)		(kN)	
CPC-1	軽量	φ92	φ92	A	93.85	67.54	1.39	34.81	37.24	0.93	167.50	135.42	1.24	137.90	1.21
CPC-2	普通				88.26	82.01	1.08	46.58	45.21	1.03	170.73	141.42	1.21	144.80	1.18
CPC-3	軽量	φ13	φ13		100.03	109.65	0.91	86.20	60.59	1.42	205.25	185.77	1.10	198.86	1.03
CPC-4	普通				144.65	122.24	1.18	91.69	67.62	1.36	234.77	201.69	1.16	211.29	1.11
CPC-5	軽量	φ92	φ92	B	48.44	44.43	1.09	40.89	37.07	1.10	124.35	110.68	1.12	112.92	1.10
CPC-6	普通				68.65	54.05	1.27	60.11	45.40	1.32	132.68	115.83	1.15	118.60	1.12
CPC-7	軽量	φ13	φ13		91.69	72.54	1.26	82.38	60.42	1.36	167.40	152.14	1.10	162.86	1.03
CPC-8	普通				96.60	81.30	1.19	87.28	67.52	1.29	179.95	165.17	1.09	173.04	1.04
CPC-9	軽量	φ13	φ92	A	67.86	59.21	1.15	72.08	65.37	1.10	167.20	158.44	1.06	165.49	1.01
CPC-10	普通				82.38	74.07	1.11	79.43	73.18	1.09	180.64	159.22	1.13	165.80	1.09
CPC-11	軽量	φ13	φ92	B	56.39	38.91	1.56	75.51	65.29	1.16	134.84	126.89	1.06	132.53	1.02
CPC-12	普通				61.29	49.05	1.25	77.47	72.93	1.06	134.35	127.54	1.05	132.77	1.01

軽量コンクリートは、普通コンクリートと同様に、土木学会コンクリート標準示方書によりせん断補強を行い、いずれも最終的に中間支点部と載荷点部でコンクリートが圧壊し曲げ破壊した。

4.2 荷重-スパン中央たわみ関係

図-2のように、初期状態から終局最大荷重まで、軽量コンクリートはりのたわみは普通コンクリートはりより大きい。しかし、PC鋼材比が少なくなると、曲げひび割れ発生以降は両者の差が小さくなった。

図-3の計算値と実験値を比較すると、軽量、普通コンクリートはりともに終局最大荷重の近傍まで両者は大略一致している。ここでは、コンクリートの応力-ひずみ関係として Model-1、Model-2 の2種類について解析したが、終局最大荷重近傍を除いて両モデル間でほとんど差はみられなかった。本解析では終局最大荷重までの領域を対象としたが、さらにそれ以降のフォーリングブランチ域の解析の検討が必要である。

4.3 荷重-コンクリート圧縮ひずみ、PC鋼材応力関係

図-4から、軽量コンクリートはりは普通コンクリートはりに比べて同一荷重下のコンクリート圧縮ひずみ(中間支点で例示)が大きく、荷重-たわみ関係と同様なことが認められる。また、図-5より、終局最大荷重近傍を除いて Model-1、Model-2 の計算結果に差はみられず、両者とも実験値と大略一致している。

図示はしていないが、PC鋼材応力へのコンクリート種類の影響や計算値と実験値の関係についても、コンクリートひずみの場合と同様なことが認められた。

4.4 荷重-曲げモーメント関係

図-6より、荷重の増大に伴う曲げモーメントの増加挙動は軽量、普通コンクリートはりより明確な差はみられない。図示のように、曲げひび割れ発生後、荷重-曲げモーメント関係の実験値は線形弾性解析から次第に乖離し、曲げモーメントの再分配が生じている。この再分配の大小は、線形弾性解析による中間支点と

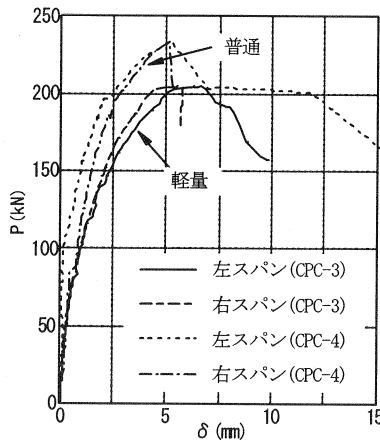


図-2 荷重-スパン中央たわみ関係

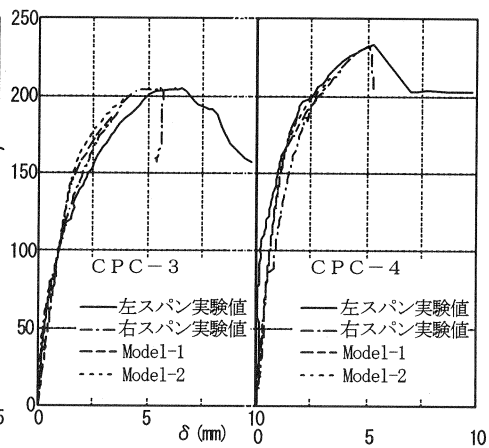


図-3 荷重-スパン中央たわみ関係

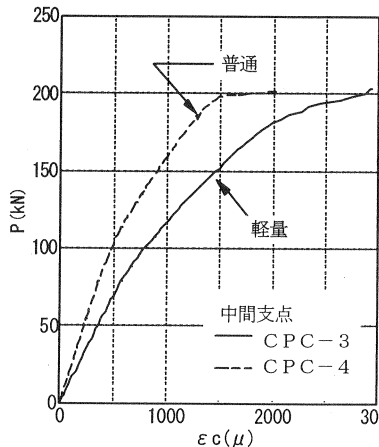


図-4 荷重-コンクリート圧縮ひずみ関係

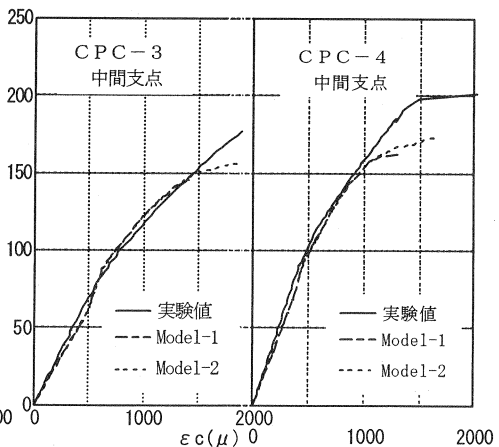


図-5 荷重-コンクリート圧縮ひずみ関係

載荷点モーメントの比と両断面の終局最大抵抗モーメントの比との相違の程度に左右されることが認められた。

図-7から、本非線形解析法によって軽量、普通の両コンクリートはりの荷重-曲げモーメント関係をよく推定できる。

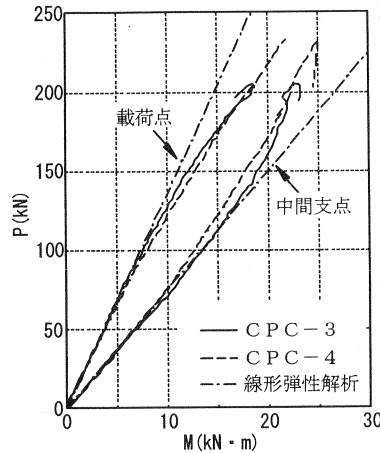


図-6 荷重-曲モーメント関係

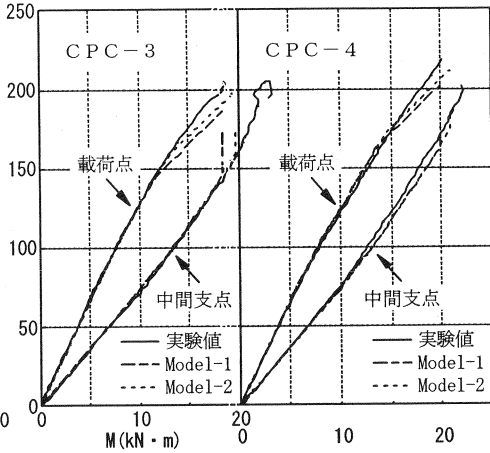


図-7 荷重-曲げモーメント関係

4.5 最大荷重

表-1より、軽量コンクリートはりの最大荷重は普通コンクリートはりより0~13% (平均6%) 小さい。これは、CPC-1~8では軽量コンクリートの圧縮強度は目標値 60N/mm^2 にほぼ等しかったが、普通コンクリートはそれより 10N/mm^2 程度大きかったためと考えられる。そこで、CPC-9~12では圧縮強度が同等となるよう普通コンクリートの配合を修正したが、この場合は普通コンクリートに対する軽量コンクリートはりの最大荷重の減少率は約3%(2ケースの平均)で、比較供試体数は少ないが両者の最大荷重はほぼ等しいと考えられる。

コンクリートの応力-ひずみ関係として Model-2 を用いた方が最大荷重の推定精度がより向上するが、Model-1、Model-2のいずれを適用しても、普通コンクリートはりと同様に、軽量コンクリートはりの終局最大曲げ耐力は極限解析法によって実用上十分な精度で算定できる。

5. まとめ

本研究から得られた主な結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 軽量コンクリートはりとはり普通コンクリートはりとはり比べて同一荷重時のたわみは大きくなるが、曲げひび割れ発生以降の荷重域における両者の差はPC鋼材量が少なくなると小さくなることが認められた。コンクリートの圧縮ひずみやPC鋼材応力に関しても同様である。
- (2) 荷重の増大に伴う中間支点、載荷点モーメントの増加挙動、すなわち曲げひび割れ発生後から始まる曲げモーメントの再分配挙動については、軽量、普通コンクリートはり間で明確な差はみられない。
- (3) コンクリートの圧縮強度が同等の場合、軽量コンクリートはりとはり普通コンクリートはりとはりほぼ同等の最大曲げ耐力を有し、両者ともその耐力の算定には塑性ヒンジ生成を仮定した極限解析法を適用できる。
- (4) 前述の非線形解析法により軽量コンクリートPC連続はりとはり曲げ耐力挙動を比較的よく算定できる。

参考文献

- 1) R.W.G.Blakeley : PC Sections with Cyclic Flexure, Proc. of ASCE, Vol. 108, No.ST-8, pp.1717-1742, 1973
- 2) R.Park & T.Paulay : Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Inter.Pub., pp.26-29, 1975
- 3) S.A.Sheikh : Confined Concrete Subjected to Axial and Bending Loads, Proc. of 8th WCEE, pp869-876, 1984
- 4) 小阪 義夫, 谷川 恭雄, 太田 福男 : 各種の骨材を用いたコンクリートの力学的性質の統一表示に関する研究、セメント技術年報、21巻、pp.311-315、1967