

高性能軽量コンクリートを用いた PRC はり部材の正負交番荷重下の曲げ・せん断耐荷特性

旭コンクリート工業株式会社 正会員 ○木村 慎
 大阪工業大学工学部 正会員 井上 晋
 大阪工業大学工学部 正会員 小林和夫

1. はじめに

コンクリート構造物の高性能化が積極的に行われている現在、軽量コンクリートは自重の大幅軽減、耐震性などの面から注目されている材料である。近年、新しい原料と製造技術によって高品質の軽量骨材が開発され、高強度で耐久性に富む軽量コンクリートの製造が可能になった。しかし、一般に軽量コンクリートを用いた部材のせん断耐力は、同じ圧縮強度を有する普通コンクリートを用いた場合よりも低下するとされている。現行の土木学会「コンクリート標準示方書（構造性能照査編）²⁾」（以下、標準示方書と称す）では、せん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力式を軽量コンクリートを用いた部材に適用する場合には、一律 70% に低減することが記述されている。この規定は、新しく開発された高性能軽量コンクリートの構造物への適用を阻害する要因ともなり、今後さらに不明な点を明らかにする必要がある。そこで本研究では、高性能軽量骨材を用いた PRC はり部材を対象として、正負交番繰返し荷重下のせん断耐荷特性に及ぼす各種要因の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリートの配合

使用した材料の物理特性とコンクリートの示方配合をそれぞれ表-1および表-2に示す。今回の実験で用いた軽量骨材は、真珠岩を原料とした造粒タイプの人工軽量骨材である。骨材内部に微細な独立気孔が均質に分散しているため、従来の軽量骨材に比べて吸水特性および強度特性が著しく改善されている。なお、軽量骨材は絶乾状態で使用した。

表-1 使用材料の物理特性

使用材料	記号	種類	主な物性
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度：3.12 g/cm ³
細骨材	S1	低吸水性高性能軽量骨材	絶乾密度：1.22 g/cm ³ 、24時間吸水率 8.0%
	S2	淀川産川砂	表乾密度：2.60 g/cm ³ 、吸水率 1.4%、F.M.=2.60
粗骨材	G1	低吸水性高性能軽量骨材	絶乾密度：1.17 g/cm ³ 、最大骨材寸法 15mm 24時間吸水率 2.7%
	G2	高槻産碎石	表乾密度：2.67 g/cm ³ 、最大骨材寸法 20mm 吸水率 0.99%、F.M.=7.16
混和剤	減水剤	減水剤	ポリオール複合体
	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの示方配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						減水剤 (C×%)	SP (C×%)
				W	C	S1	S2	G1	G2		
普通	68.0	49.0	2.0	170	250	—	939	—	994	0.25	—
軽量1種	38.0	45.0	3.0	177	447	—	769	423	—	—	1.0
軽量2種	40.0	45.0	3.0	191	388	352	—	433	—	—	1.0

2.2 供試体の概要

実験要因と供試体の概要をそれぞれ表-3および図-1に示す。本研究では、断面形状として図-1に示すような、幅×高さ=100×200mm、全長1800mmのPRCはり部材を対象とした。なお、いずれの供試体もコンクリートの設計基準強度 $f_{ck}=35\text{N/mm}^2$ 、せん断スパン比 $a/d=3.41$ とした。主鉄筋には2-D16 ($f_{sy}=338\text{N/mm}^2$)、スターラップにはD6 ($f_{sy}=350\text{N/mm}^2$)を、またPC鋼材には $\phi 13\text{mm}$ ボンドタイプ ($f_{py}=1243\text{N/mm}^2$)を用いた。実験要因は、断面内のプレストレス導入応力として、コンクリートの上下縁にそれぞれ、 1.0N/mm^2 、 3.0N/mm^2 、 5.0N/mm^2 の3種類、せん断補強筋配置間隔として、80mm ($p_w=0.79\%$)、120mm ($p_w=0.53\%$)の2種類、コンクリートの種類として、普通コンクリート、軽量1種コンクリート(粗骨材：軽量骨材、細骨材：川砂)、軽量2種コンクリート(粗骨材、細骨材ともに軽量骨材)の3種類とし、荷重は降伏変位の整数倍で各1回の正負交番繰返しとした。これらの要因の組合せにより合計13体のはりを作製した。

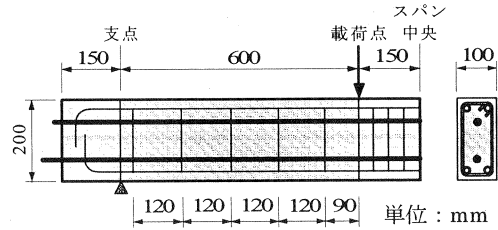


図-1 供試体の概要図(s=120mmの供試体)

表-3 実験要因

供試体	プレストレス量 (上下縁の応力) (N/mm^2)	せん断補強筋配置間隔 (mm)	コンクリートの種類	荷重方法
N-1-08	1.0	80	普通	正負交番 1回
N-3-08	3.0			
N-5-08	5.0			
N-1-12	1.0	120		
N-3-12	3.0			
N-5-12	5.0			
L1-1-08	1.0	80	軽量1種	
L1-3-08	3.0			
L1-5-08	5.0			
L1-1-12	1.0	120		
L1-3-12	3.0			
L1-5-12	5.0			
L2-3-12	3.0		軽量2種	

2.3 荷重試験方法

荷重試験方法は、供試体の全長1800mmに対して曲げスパン300mm、せん断スパン600mmとした($a/d=3.41$)対称2点集中荷重方式とし、基本降伏変位(別途に作製したPC鋼材を非緊張状態で配置したはりにおける主鉄筋の降伏時の変位から $\delta_y=5\text{mm}$ とした)の整数倍とした各変位レベルにおいて、各1回の単調漸増正負交番繰返し荷重を実施した。以下、本研究においては、各供試体の断面諸元を同一にし、耐力や変形性能に及ぼすプレストレスの効果を検討するために、基本降伏変位 $\delta_y=5\text{mm}$ を用いて考察を行った。

2.4 曲げ解析方法

曲げ破壊荷重の計算値は断面分割法による曲げ解析から算出した。応力ひずみモデルとして、コンクリートには土木学会コンクリート標準示方書モデル、鉄筋にはバイリニアモデル、PC鋼材にはBlakeley³⁾モデルを採用した。

2.5 せん断耐力の検討

せん断耐力算定式として、標準示方書の式を用い実験値との比較を行った。その際、軽量コンクリートを用いた供試体のコンクリートが負担するせん断耐力は、普通コンクリートを用いた供試体の70%とした。

表-4 コンクリートの強度試験結果

供試体	圧縮強度 f_c (N/mm^2)	引張強度 f_t (N/mm^2)	曲げ強度 f_b (N/mm^2)	弾性係数 E_c ($\times 10^4$) (N/mm^2)	単位体積 質量 (kg/m^3)
N-1-08	33.5	2.09	5.22	3.02	2280
N-3-08	34.3	2.62	5.11	3.06	2280
N-5-08	34.3	2.62	5.11	3.06	2280
N-1-12	35.8	3.49	5.72	3.01	2360
N-3-12	35.8	3.49	5.72	3.01	2360
N-5-12	35.8	3.49	5.72	3.01	2360
L1(軽量1種)	37.5	2.67	4.43	2.34	1830
L2(軽量2種)	33.1	2.20	2.72	1.37	1320

3. 実験結果および考察

コンクリートの強度試験結果を表-4に、せん断ひび割れ発生荷重、最大荷重、破壊形式等の実験結果を表-5に示す。

3.1 せん断ひび割れ発生荷重

L1-3-08、L1-5-12のせん断ひび割れ発生荷重の実測値は、同一条件の普通コンクリートを用いた供試体と同じ値になった。これは、プレストレスが軽量コンクリートの引張強度が小さいという欠点を補い、ひび割れの開口を抑制したためと考えられる。実測値と計算値を比較した場合、軽量1種コンクリートを用いたプレストレス量が比較的多い供試体は、せん断ひび割れ発生荷重の実測値が計算値を20~40%上回った。このことから、

軽量1種コンクリートにプレストレスを導入すると、標準示方書における軽量コンクリート部材のせん断耐力に対する低減係数は、過小評価になる場合があると考えられる。しかし、軽量2種コンクリートを用いた供試体は、プレストレス導入量が3.0N/mm²であったにもかかわらず、実材料計算値と実測値に差がなく、軽量2種コンクリートに関しては標準示方書の低減係数が適切であるといえる。

3.2 破壊形式

L1-5-12は、計算上せん断破壊先行型であったが曲げ破壊をした。また、耐力低下を生じる変位が普通コンクリートを用いた供試体と同じ値になった。これは、プレストレスの効果により斜めひび割れの進展やひび割れの開口が抑制されたため、コンクリートのせん断抵抗が向上したものと考えられる。一方、軽量2種コンクリートを用いた供試体L2-3-12は、耐力低下を生じる変位が普通コンクリートを用いた供試体に比べ3δ_y小さくなり、最終的に曲げ降伏後のせん断付着破壊をした。これは、発生した斜めひび割れが主鉄筋に沿って進展し、かぶりコンクリートの剥落と同時に耐力が低下する脆的な破壊であった。

3.3 荷重-変位関係

図-2に荷重-変位包絡線の一例を示す。プレストレス量について比較すると、せん断補強筋配置間隔120mmの供試体(せん断破壊先行型)は、コンクリートの種類に関わらず、プレストレス量

表-5 実験結果

供試体	せん断ひび割れ発生荷重		曲げ破壊荷重(計算値) P _{ub.cal} *2 (kN)	せん断破壊荷重(計算値) P _{us.cal} *3 (kN)	最大荷重(実測値) P _{u.exp} (kN)	*4 耐力低下が生じた変位	*5 破壊形式
	計算値 P _{cr.cal} *1 (kN)	実測値 P _{cr.exp} (kN)					
N-1-08	51.2	45	120.8	149.0	124.5	-9 δ _y	FS
N-3-08	55.3	45	123.0	155.8	132.1	+11 δ _y	M
N-5-08	59.0	75	123.4	159.5	133.4	+9 δ _y	FS
N-1-12	52.2	50	120.4	109.0	116.6	-8 δ _y	FS
N-3-12	56.1	57	121.3	112.9	120.8	-8 δ _y	FS
N-5-12	60.0	55	121.3	116.8	120.0	+9 δ _y	FS
L1-1-08	37.1	40	121.8	122.3	123.2	+10 δ _y	M
L1-3-08	39.8	45	122.4	125.0	122.7	+9 δ _y	M
L1-5-08	42.6	60	121.5	127.8	122.2	-8 δ _y	M
L1-1-12	37.1	35	121.9	93.9	113.0	+7 δ _y	FS
L1-3-12	39.8	50	122.4	96.6	121.9	+8 δ _y	FS
L1-5-12	42.7	55	121.5	99.4	125.9	+9 δ _y	M
L2-3-12	38.3	40	118.9	95.1	105.6	-5 δ _y	FSB

*1: P_{cr.cal}=2V_{cd} (V_{cd}は土木学会コンクリート標準示方書による)

*2: 断面分割法による曲げ解析を用いた。

*3: P_{us.cal}=2(V_{cd}+V_{sd}) (V_{cd},V_{sd}は土木学会コンクリート標準示方書による)

*4: 基本降伏変位: δ_y=5mm

*5: Mは曲げ破壊、FSは曲げ降伏後のせん断破壊

FSBは曲げ降伏後のせん断付着破壊

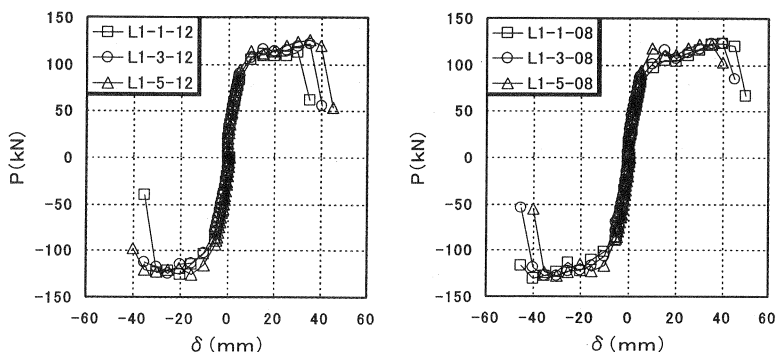


図-2 荷重-変位関係

が多い供試体ほど耐力低下を生じる変位が大きくなり、プレストレスの導入が終局変位の増加に効果的であることが確認できた。しかし、軽量1種コンクリートを用いたせん断補強筋配置間隔 80mm の供試体(曲げ破壊先行型)はプレストレス量が増加するにつれて、耐力低下を生じる変位が減少した。これらのことから、軽量コンクリートを用いる場合は、せん断補強筋量が多く計算上曲げ破壊を呈する部材に過大なプレストレスを与えると、軽量骨材の強度が弱いため、曲げスパン部のコンクリートの早期圧壊を招き、結果として変形性能が低下する可能性があるといえる。

3.4 コンクリート負担せん断力-変位関係

図-3にコンクリート負担せん断力-変位関係の一例を示す。全体的な傾向として、プレストレス量やせん断補強筋量が多い供試体は、ひび割れ発生以後のコンクリート負担せん断力の低下が緩やかになる傾向を示した。このことから正負交番荷重下においても、プレストレスやせん断補強筋はせん断ひび

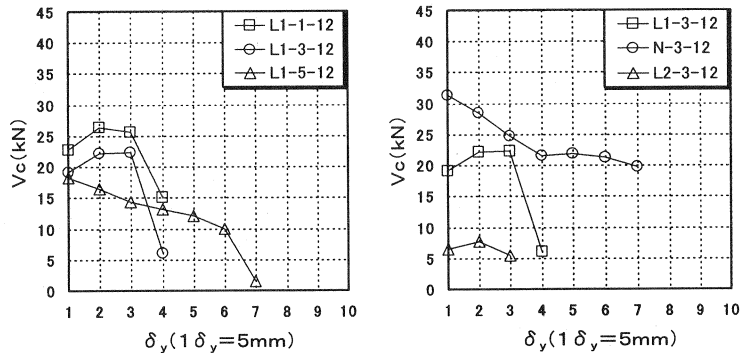


図-3 コンクリート負担せん断力-変位関係

割れの進展を抑制し、急激な耐力低下を防ぐ効果があるといえる。コンクリートの種類について比較すると、軽量コンクリートを用いた供試体は普通コンクリートを用いた供試体に比べ、同一変位におけるコンクリート負担せん断力が小さくなる傾向を示した。また、軽量コンクリートを用いた供試体は、ひび割れ発生以後にコンクリート負担せん断力が急激に低下した。これは、軽量コンクリートのせん断ひび割れ面が平滑であるため、骨材のかみ合わせ作用が小さいことが原因と考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) プレストレスやせん断補強筋は、軽量コンクリートを用いた部材においても正負交番繰返し荷重下におけるせん断ひび割れの進展を抑制し、急激な耐力低下を防ぐとともに、終局変位の増加に対して効果的であることが確認された。
- (2) 軽量コンクリートを用いた部材の繰返し載荷によるコンクリート負担せん断力の低下は、普通コンクリートを用いた部材に比べ顕著となる。しかし、プレストレスを導入することで急激に低下する変位は大幅に増加する。
- (3) 軽量コンクリートを用いた部材においても、プレストレス量とせん断補強筋量の適当な組合せによって、普通コンクリートを用いた部材と同等の変形性能を得ることができる。

【参考文献】

- 1) 例えば、岡本享久、石川雄康、榎木 隆、笹嶋昌男：高性能軽量コンクリート、コンクリート工学、Vol 37, No.4 ,pp12~18,1999
- 2) 土木学会コンクリート標準示方書【構造性能照査編】(2002年制定)
- 3) Blakeley,R.W.G : PC Sections with Cyclic Flexure,Proc.of ASCE,Vol08,No.ST-8,pp1717~1742,1973