

論文 人工軽量骨材を用いた PC はりの曲げせん断挙動

伊藤忠彦*¹・鈴木宣政*²・山口隆裕*³・池田尚治*⁴

要旨：本研究は人工軽量骨材を用いたプレストレストコンクリート(PC)はりのせん断特性を明らかにするために、せん断補強鉄筋の無い長方形断面はりを用いて実験的検討を行ったものである。実験因子としては、導入プレストレスの大きさを変化させることで、はりのせん断特性に与える影響を考察した。実験の結果、プレストレスを与えないはりでは、人工軽量骨材を用いるとせん断耐力は低下するが、PCはりでは普通骨材を用いたはりと同様に評価できることがわかった。

キーワード：人工軽量骨材、プレストレストコンクリート、はり、せん断、曲げ

1. はじめに

近年、建設工事における施工合理化や熟練労働者不足の対策のひとつとして、プレキャストセグメント工法による橋梁建設が注目されている[1]。プレキャストセグメントの重量軽減は、セグメントの運搬・架設に極めて効果的であるばかりでなく、構造物を軽量化することで地震力の低減にも有効である。構造物の軽量化は、外ケーブルの適用[2]や高強度コンクリートを用いて断面を薄くすることでも可能であり、近年これらの研究開発は著しいものがある。しかし一方では、我が国の人工軽量骨材の使用実績は予期した程多くなく、現在その生産量は年間100万m³以下である[3]。また、人工軽量骨材を土木構造物に使用した例は極めて少なく、部材としての力学的特性を正確に評価することが必要と思われる。本研究は、人工軽量骨材をプレストレストコンクリートはりに適用した場合の力学的特性のうち、せん断耐力に着目した実験を行い、現行の設計規準式[4]の適合性を考察するものである。

2. 実験概要

2.1 人工軽量骨材

本研究に使用した人工軽量骨材(以下ALA)は、膨張頁岩を原料とした非造粒型の一般市販品である。ALAの品質はJIS A 5002を満足するもので、区分はMA-417である。現在、一般に市販されているALAは施工時のポンプ圧送性を確保するため、工場出荷時に十分なプレウェッチングが施されている。そのため、本研究で使用したAL

表-1 人工軽量骨材の試験結果

試験状態*	粗骨材			細骨材		
	①	②	③	①	②	③
絶乾比重	1.26	1.26	1.27	1.68	1.62	1.59
表乾比重	1.41	1.66	1.67	1.86	1.88	1.87
含水率(%)	11.4	31.4	31.0	10.7	15.7	17.0
粗粒率	6.55			2.81		

*: ①絶乾状態から24時間吸水した状態
 ②入荷時の状態
 ③入荷時の状態から24時間吸水した状態

*1 横浜国立大学大学院 計画建設学専攻(西松建設(株)技術研究所在籍)、正会員

*2 横浜国立大学大学院 計画建設学専攻

*3 横浜国立大学助手 工学部建設学科、正会員

*4 横浜国立大学教授 工学部建設学科、正会員

Aの入荷時含水率は比較的高い値となっていた。表-1にALAの材料試験結果を示す。ALAの入荷時含水率は、絶乾状態からの24時間吸水率と比較すると、粗骨材で約3倍、細骨材で約1.5倍であった。

2.2 実験供試体

本研究で製作した供試体の一覧を表-2に示す。記号NCは普通骨材を用いた供試体であり、記号LCは細骨材・粗骨材ともにALAを用いた供試体である。供試体は図-1に示すように幅15cm高さ30cmの長方形断面はりとした。緊張材はφ17mmのPC鋼棒(C種1号)を使用し、軸方向鉄筋はD10(SD295)を4本配置した。また、スターラップ等のせん断補強鉄筋は配置しなかった。供試体の種類は、導入プレストレスが断面下縁で50 kgf/cm²(NC-50, LC-50)、および100 kgf/cm²(NC-100, LC-100)となるように緊張力を与えたPCはり、緊張力を与えないはり(以下NPCはり)の6種類となっている。緊張力は鋼棒に貼付したひずみゲージの値によって管理した。プレストレス導入はコンクリート打込み後、約4週間後に行い、緊張後は直ちにグラウト注入を行った。なお、緊張力を与えないNPCはりにもグラウト注入を行った。PCグラウトの水セメント比は45%とし、グラウト用混和剤(PZ-GF1720)はセメント量の1%を添加した。載荷方法は、スパン170cm、純曲げ区間40cmの1方向繰返し2点載荷とした。繰返し載荷の除荷点は、①鉄筋応力度1800 kgf/cm²時の荷重、②鉄筋降伏時の荷重の2点とした。表-3にコンクリートの配合を示す。配合Aが普通骨材コンクリート、配合BがALAコンクリートである。ALAコンクリートの配合設計は、表-1で求めた入荷時の

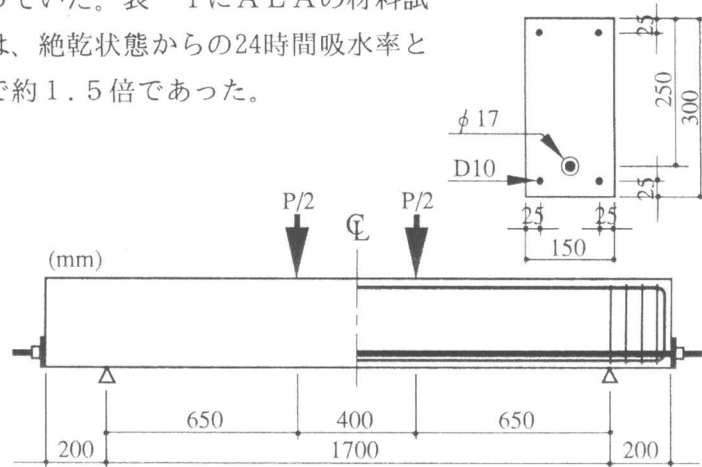


図-1 供試体寸法

表-2 実験供試体一覧 (kgf/cm²)

配合	種類	記号	コンクリート強度	導入応力度		緊張力 (tf)
				上縁	下縁	
A	NPC	NC-0	500	0	0	0
	PC	NC-50		-15	50	8.0
		NC-100		-30	100	16.0
B	NPC	LC-0	400	0	0	0
	PC	LC-50		-15	50	8.5
		LC-100		-30	100	17.0

表-3 コンクリート配合

配合	骨材	Gmax (mm)	粒径* (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
							W	C	s'	G*	AE減水剤
A	普通骨材	15	8	4.0	48	44	174	363	737	995	C*0.25%
B	ALA	15	8	4.0	43	40	174	405	498	652	C*0.25%

*: ALAの表乾比重は表-1-②を使用

表-4 コンクリートの材料試験結果 (kgf/cm²)

配合		コンクリート強度			弾性係数 (×10 ⁵)	グラウト強度
		緊張時	載荷時	標準養生		
A(普)	圧縮	508	569	504	2.50 (46)	515 (23)
	引張	38.3	37.0	-		
B(軽)	圧縮	403	411	421	1.45 (49)	
	引張	27.2	19.8	-		

註: () 内は試験材令を示す

表乾比重を用いて計算した。ただし、ALAは乾燥防止のため、入荷時からコンクリート打込みまで密封して実験室内に貯蔵した。また、普通骨材の粗骨材最大寸法はALAに合わせて15mmに調整して用いた。配合Aのコンクリート打込み時のスランプおよび空気量は、それぞれ8.5cmと3.1%、配合Bは14.5cmと4.0%であった。

3. 実験結果と考察

3.1 材料試験結果

表-4にコンクリートの材料試験結果を示す。強度試験用の円柱供試体(φ10cm×20cm)は、はり供試体と同様に実験室内で気中養生したものであるが、ALAコンクリートの引張強度は、既往の研究[5]にも示されているように、乾燥によって著しい強度低下を起こした。本実験では、緊張時から載荷時までの約3週間の室内乾燥で、引張強度は73%に低下したのである。実際、ALAを用いたNPCはり供試体(LC-0)では、乾燥収縮に伴って発生したと思われる微細なひびわれが、はり表面部に多数観察されたのである。普通骨材を用いたNPCはり供試体(NC-0)では、このようなひびわれは観察されなかったため、この点がALAコンクリートの問題点の一つと思われる。一方、PCはり供試体では緊張力によって、はり上縁に引張応力が発生しているため、普通骨材はり・ALAはり両供試体ともに、載荷時には上縁に微細なひびわれが観察された。ただし、ALAはりのひびわれ本数は普通骨材はりの約2倍であった。表-5に本実験に用いた鋼材の材料試験結果を示す。

3.2 曲げせん断試験結果

はりの載荷試験結果を表-6に示す。今回の実験では、すべての供試体で引張鉄筋降伏前に明確な斜めひびわれの発生が観察された。しかし、供試体はその後もある程度の荷重増加に耐えて、

表-5 鋼材の材料試験結果 (kgf/cm²)

種類	規格	降伏	引張	弾性係数	伸び
鉄筋(D10)	SD295	3,650	4,880	1.90*10 ⁶	28.4%
PC鋼棒(φ17)	C種1号	12,200	13,300	1.97*10 ⁶	10.4%

表-6 はりの載荷試験結果 (tf)

供試体	曲げひびわれ発生荷重	斜めひびわれ発生荷重	鉄筋降伏荷重	破壊荷重	破壊形態
NC-0	2.01	7.99	10.0	22.0	せん断
NC-50	6.00	13.5	14.0	23.9	せん断
NC-100	9.97	18.5	19.0	24.2	せん断+曲げ
LC-0	1.50	5.50	7.98	14.9	せん断
LC-50	6.02	13.0	14.0	20.7	せん断
LC-100	10.0	16.5	20.0	22.6	せん断

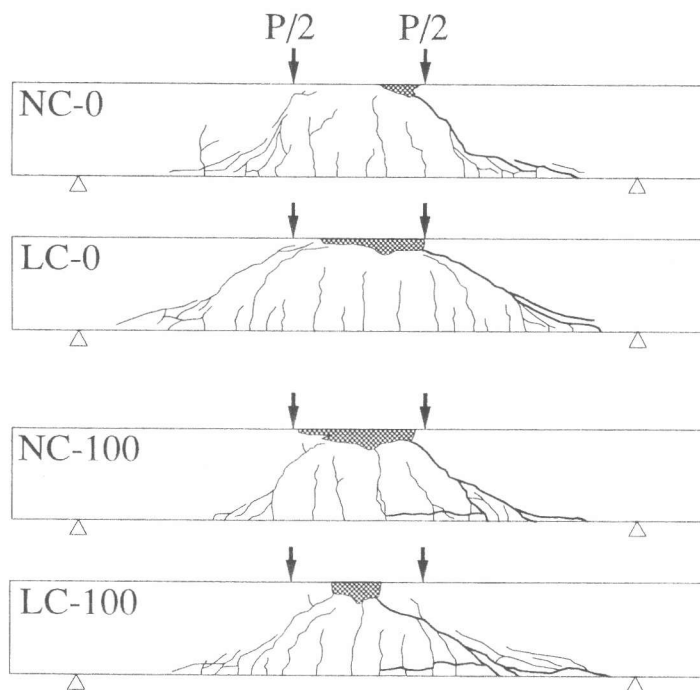


図-2 ひびわれ図

最終的には斜めひび割れ上部のコンクリートが圧縮破壊した。ただし、NC-100はコンクリートの圧縮破壊前にPC鋼棒が降伏した。図-2に、NPCはり(NC-0, LC-0)およびPCはり(NC-100, LC-100)のひびわれ図を示す。

図-3はALAはりの曲げひびわれ発生荷重から破壊荷重に至るまでの各状態における耐力比を普通骨材はりと単純に比較したものである。ALAはりの各状態における耐力は、NPCはりのLC-0ではNC-0の70%~80%程度に低下したのであるが、PCはり(LC-50, 100)では90%~100%程度であった。ここで、LC-0の鉄筋降伏荷重が低下しているのは、斜めひびわれ位置の鉄筋がスパン中央部より早期に降伏したためである。載荷時のALAはりとは普通骨材はりのコンクリート引張強度比(表-4)は約54%であったが、上述の耐力比はコンクリートの材料強度比ほどの違いは認められなかった。特に、PCはりではコンクリートの引張強度に影響されるとされる曲げひびわれおよび斜めひびわれの発生が、プレストレスを与えることで大幅に改善されたのである。したがって、ALAコンクリートの引張強度が普通骨材コンクリートよりも低い弱点は、PCはりでは無視できる程度の影響であることがわかった。なお、図-3でALAはりの最大耐力が低下しているのは、最終破壊形態がコンクリートの圧縮で支配されているため、コンクリート圧縮強度の差が現れたものと思われる。

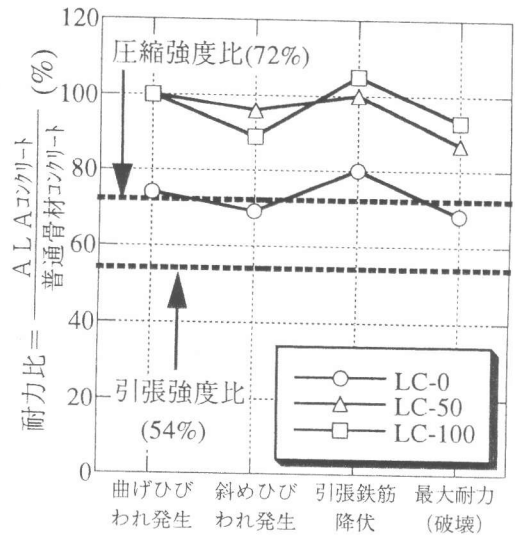


図-3 ALAはりの耐力比

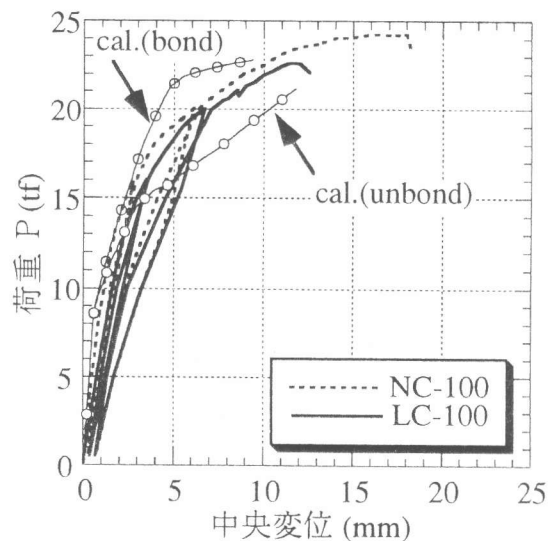
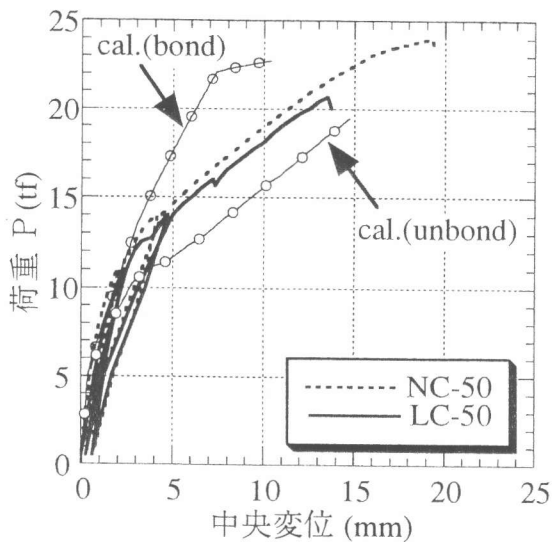
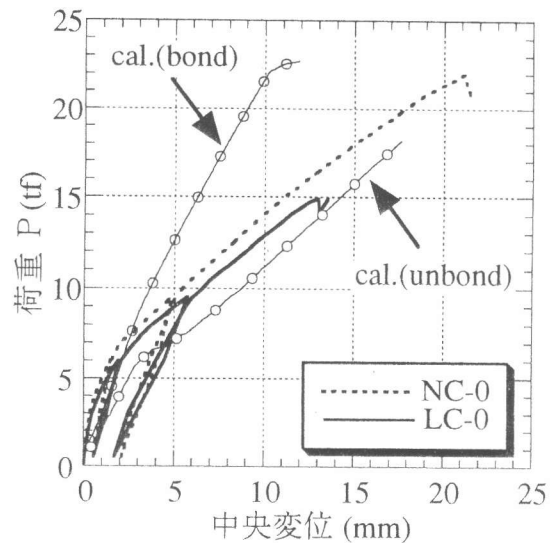


図-4 荷重-中央変位関係

各供試体の荷重-変位関係を図-4に示す。図-4には断面をファイバー状にモデル化した計算手法（以下ファイバーモデル）によるALAはりの計算結果も示してある。ただし、ファイバーモデルによる計算値は、PC鋼棒とコンクリートが完全付着と仮定した結果(bond)と、PC鋼棒とコンクリートの付着が全く無いと仮定した結果(unbond)の2種類の計算結果を示した。また、計算値はコンクリートの圧縮縁ひずみが 3500×10^{-6} に到達した点で破壊と定義した。図-4を通覧すると、実験値は初めボンド計算値と等しいが、鉄筋降伏荷重付近からボンド計算値と乖離し、その後はアンボンド計算値に漸近するのである。これは、実験に用いたPC鋼材が丸鋼であるため、付着強度が弱いことによる影響と思われる。また、NPCはり(LC-0)の終局荷重および変位の実験値は、ファイバーモデルによる計算値より相当低いが、これは実験が過早なせん断圧縮破壊となっているためである。同様に、PCはり(LC-50, LC-100)の終局荷重および変位の実験値は、ボンド計算値とアンボンド計算値の中間に位置しており、計算値はPCはりの曲げ変形挙動範囲を妥当に示していると思われる。

4. せん断耐力の検討

せん断耐力の計算結果を表-7に示す。計算値は式(1)に示す土木学会コンクリート標準示方書[4]で規定されている算定式で計算したものである。ただし、材料強度およびデコンプレッションモーメント M_0 は実験値を使用し、有効高さ d はコンクリートの圧縮縁から緊張材と引張鉄筋の重心位置までの距離とした。また、材料係数や部材係数等の安全係数は1.0として計算した。斜めひびわれ発生時の実験値(せん断力)と計算値を比較すると、計算値はALAコンクリートを用いたNPCはり(LC-0)を除き安全側の評価を与えた。ただし、示方書ではALAコンクリートはりのせん断耐力は、式(1)の70%とすることが規定されており、NPCはりでは現行の設計規準による評価が妥当であることが確認された。しかし、PCはりでは式(1)でせん断耐力を評価しても、ALAコンクリートは普通コンクリートと同等であったのである。したがって、本実験の範囲内では、ALAコンクリートをPCはりに使用した場合のせん断耐力は、式(1)の70%まで低減する必要は無いと思われる。

$$V_{c1} = 0.9 \beta_d \beta_p \beta_n (f'_c)^{1/3} \cdot b d \quad (1)$$

ここに、 f'_c : コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)、 b : はり断面幅(cm)、 d : 有効高(cm)

$$\beta_d = (100/d)^{1/4}, \quad \beta_p = \{100(A_s + A_p)/b d\}^{1/3}, \quad \beta_n = 1 + 2 M_0/M_u$$

表-7 斜めひびわれ発生せん断力の比較 (tf)

供 試 体	実 験 値	計 算 値			
	Vc.exp	Vc1.cal	exp/cal	Vc2.cal	exp/cal
NC-0	4.00	3.99	1.00	—	—
NC-50	6.75	5.43	1.24	5.94	1.14
NC-100	9.25	6.87	1.35	7.23	1.28
LC-0	2.75	3.58	0.77	—	—
LC-50	6.50	5.12	1.27	5.54	1.17
LC-100	8.25	6.37	1.30	6.84	1.21

また、既往の研究〔1〕を参考に、PCはりのコンクリートが分担するせん断耐力を式(2)で計算した結果も表-7に示した。 V_{c2} は式(1)で $\beta_n=1$ として計算した結果に、 M_c/a を直接加算したものである。ここに、 M_c/a は、PCはりの純曲げ区間が荷重ゼロから曲げひびわれが発生するまでの増加せん断力を意味している。本実験では、式(2)でPCはりのせん断耐力を評価しても安全側であった。

$$V_{c2} = V_{c1} + M_c/a \quad (2)$$

ここに、 M_c ：ひびわれ発生モーメント(kgf·cm)、 a ：せん断スパン長(cm)、 $\beta_n=1$

5. まとめ

以下に本実験で得られた結果をまとめる。

- ①人工軽量骨材コンクリートの引張強度は乾燥により著しく低下するため、一般の普通骨材コンクリートよりも相当に低い。しかし、この乾燥による引張強度の低下が部材の力学的特性に与える影響は、プレストレスを導入していないはりでは若干認められたものの、PCはりでは殆ど認められなかった。
- ②現行の土木学会コンクリート標準示方書による設計規準は、人工軽量骨材を用いたRCはりのせん断耐力を妥当に評価するが、人工軽量骨材を用いたPCはりのせん断耐力を過小評価する傾向が認められた。
- ③PCはりの変形挙動の実験値は、PC鋼棒とコンクリートが完全付着と仮定したボンド計算値と、PC鋼棒とコンクリートとの付着が全く無いと仮定したアンボンド計算値の中間的な結果を示した。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、横浜国立大学技官の森下豊氏、大学院生の飯島基裕君、4年生の兼丸隆裕君の多大な協力を頂いた。また、人工軽量骨材の使用に際しては日本セメント(株)の高羽登氏に御指導を賜った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: プレキャストセグメントPCはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, VOL.16-2, PP.967-972, 1994
- [2] 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: 外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, VOL.17-2, PP.773-778, 1995
- [3] Ikeda, S.: Development of Lightweight Aggregate Concrete in Japan, Proc. International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, PP.42-51, 1995, NORWAY
- [4] 土木学会コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編, 1991
- [5] 国分正胤, 小林正凡, 岡村甫, 山本泰彦: 軽量骨材コンクリートにおける問題点について, コンクリートライブラリー, 第24号, PP.1-13, 1969
- [6] 松貝 勇: 軽量鉄筋コンクリート桁のせん断強度について, コンクリートライブラリー, 第24号, PP.97-101, 1969