

(103) 軽量骨材コンクリートを用いた PC はりのせん断性状

日本大学大学院理工学研究科交通土木工学専攻 ○荒井 康治
 日本大学理工学部交通土木工学科 正会員 柳沼 善明

1. はじめに

従来の人工軽量骨材は普通骨材に比べて吸水率が高いために、軽量骨材コンクリートの施工性や耐久性が普通コンクリートに比較して劣る。このため軽量骨材コンクリートは、実構造物への利用範囲が制限されてきた。しかし近年、高性能化・高強度化のコンクリートが求められているなか、高性能な軽量骨材コンクリートが開発された¹⁾。高性能な軽量骨材コンクリートを実構造物へ適用するにあたっては、部材の挙動を正確に把握する必要があるものと考えられる。なぜならば、コンクリート比重(ρ)の値が軽量骨材コンクリートの力学的特性ならびに部材の曲げ、せん断挙動に影響を与えるものと考えられるからである。

本実験では3種類のコンクリート(普通コンクリート、軽量骨材コンクリート、超軽量骨材コンクリート)を用いて作製したせん断補強鉄筋を用いないアンボンド PC はりのせん断載荷試験を実施し、それぞれのせん断性状を比較検討した。さらにそれぞれの PC はりのせん断耐力について、設計せん断耐力式の適用性の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を表-1に示す。本実験で使用した造粒型人工軽量粗骨材は、従来の非造粒型人工軽量粗骨材に比べて骨材自体の剛性が高く、また骨材内部組織を微細な独立気孔で形成されているため、吸水率が極めて小

さい特性をもつ高性能人工軽量骨材である¹⁾。軽量細骨材には、低吸水率の造粒型人工軽量細骨材および硬質パーライトの2種類を用いた。なお、本実験で使用した人工軽量粗骨材は比重が小さいことから、材料分離を起こす可能性があるものと考えられる。そこで材料分離抵抗性の向上を図ることを目的とした高炉スラグ微粉末を使用した。使用したコンクリートは、普通骨材コンクリート(NC シリーズ、 $\rho=2.30$)、粗骨材に人工軽量粗骨材を置換した軽量骨材コンクリート(LC シリーズ、 $\rho=1.68$)、さらに細骨材に軽量細骨材を置換した超軽量骨材コンクリート(SL シリーズ、 $\rho=1.26$)の3種類である。各シリーズの圧縮強度は35N/mm²を目標とした。供試体の養生方法は、湿潤養生7日間、その後気中に放置した。

表-1 使用材料

使用材料	種類	摘要
セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.15、比表面積 3400cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末	比重 2.90、比表面積 8000cm ² /g
細骨材	小貝川産川砂	表乾比重 2.58、吸水率 1.40%
	造粒型人工軽量細骨材	絶乾比重 0.73、24hr 吸水率 3.97%
粗骨材	硬質パーライト	絶乾比重 1.04、24hr 吸水率 5.70%
	鬼怒川産川砂利	Gmax 25mm、表乾比重 2.57、吸水率 0.78%
混和剤	造粒型人工軽量粗骨材	Gmax 15mm、絶乾比重 0.77、24hr 吸水率 5.1%
	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	AE 助剤	変形アルキルカルボン酸化合物

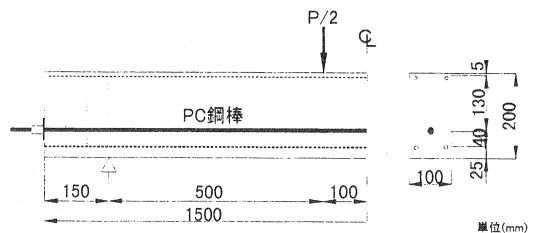


図-1 PC はりの形状

2.2 はり供試体概要と実験方法

PC はりの形状を図-1に示す。載荷方法はせん断破壊を先行させるため、せん断スパン比(a/d)を2.85とした対称2点載荷である。引張鉄筋にD-13、圧縮鉄筋にD-6を用いた。鉄筋の材質はSD295であった。PC鋼棒($\phi 9.2$ mm、 $f_{py}=1256$ N/mm²)の配置は直線配置とした。PC はりはポステンション方式のアンボンド PC

はりであり、せん断補強鉄筋は用いていない。導入プレストレス力(Pt)は、0kN、40kN、および 80kN の 3種類である。なお導入プレストレス力 80kN は、SC シリーズ(超軽量骨材コンクリート PC はり)のフルプレストレスリングとなる状態である。コンクリートのクリープや乾燥収縮、および PC 鋼棒のリラクゼーションの影響を極力少なくするためにプレストレス導入後、ただちに PC はりの載荷を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 各種硬化コンクリートの力学的特性

使用したコンクリートの力学的特性を表-2 に示す。また、ぜい度係数(圧縮強度/引張強度)とコンクリート比重の関係を図-2 に示す。図-2 によると、ぜい度係数はコンクリート比重が大きくなるにしたがい、小さくなっている。一般にぜい度係数は、コンクリート中に生成するマイクロクラックの存在を示す指標と考えられている。軽量骨材コンクリートおよび超軽量骨材コンクリートのぜい度係数は、普通コンクリートに比べて 1.4 倍~2.0 倍と大きくなっている。このためコンクリート内部に存在するマイクロクラックは、普通コンクリートに比べて多く存在しているものと思われる。従来の研究においても、軽量骨材コンクリートの強度試験結果から、コンクリートが高強度になるにしたがいぜい度係数は大きくなると報告されている²⁾。一方、普通コンクリートにおいて、圧縮力がマトリックスを介して骨材から骨材へと伝達されている。軽量骨材コンクリートにおいては、普通コンクリートと比較してマトリックスが骨材よりも剛性が大きい。このため軽量骨材コンクリートは、骨材の上部および下部のモルタル内に横方向引張力が生じ、さらに骨材内にも横方向引張力が生じて骨材自体を割裂すると考えられている³⁾。したがって、軽量骨材コンクリートおよび超軽量骨材コンクリートは普通コンクリートと比較して、マイクロクラックが多く存在し、さらに骨材自体が割れてしまうために引張強度およびヤング係数が低下する傾向にあるものと思われる。

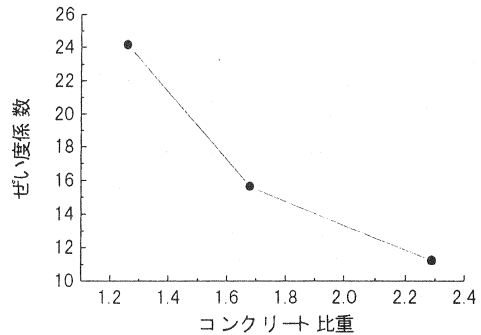


図-2 ぜい度係数とコンクリート比重の関係

表-3 に体積膨張から体積収縮をはじめめる点(臨界応力点)における体積ひずみと応力比の値を示した。この応力比とは圧縮強度に対する応力比である。表-3 より、臨界応力点における軽量骨材コンクリートおよび超軽量骨材コンクリートの応力比は、普通骨材コンクリートと比較して 1.1 倍~1.2 倍と大きくなっている。これは従来の研究⁴⁾と同様な結果となり、コンクリート内部のモルタルクラックの発生が比較的遅いことを示している。さらに、臨界応力点における軽量骨材コンクリートおよび超軽量骨材コンクリートの体積ひずみは、普通コンクリートと比較して 1.5 倍~2.0 倍の収縮を示した。

図-3 に圧縮強度に対する応力比と体積ひずみの関係を示した。図-3、表-3 により、コンクリート比重が小さくなるにしたがい、臨界応力点から圧縮破壊までの体積ひずみの膨張は小さくなっていることがわかる。

表-2 使用したコンクリートの力学的特性

シリーズ	コンクリート比重 ρ	圧縮強度 $f'_c(N/mm^2)$	引張強度 $f_t(N/mm^2)$	曲げ強度 $f_b(N/mm^2)$	ヤング係数 $E_c(kN/mm^2)$	ポアソン比
NC	2.30	36.4	3.24	5.71	28.3	0.20
LC	1.68	36.5	2.34	4.46	15.5	0.21
SC	1.26	37.4	1.27	1.85	11.5	0.24

表-3 臨界応力点における体積ひずみと応力比

シリーズ	体積ひずみ($\times 10^{-6}$)	応力比
NC	712	0.81
LC	1072	0.92
SC	1361	0.97

圧縮応力下のコンクリートにおいては、荷重方向に微細なひび割れが発生し、応力の増加に伴ってその数と大きさが増大し、それらが連結してモルタルクラックへと成長すると考えられている。超軽量骨材コンクリートの体積ひずみは、ほとんど膨張することなく破壊したことからも、モルタルクラックが連結したのとほぼ同時に破壊するものと思われる。

3.2 PC はりのせん断性状

代表的な PC はりの破壊後のひび割れ状況図を図-4 に示す。いずれの PC はりもせん断圧縮破壊により破壊した。NC シリーズの曲げひび割れは、いずれもはり高さ(h)の約 3/4 まで達した。しかしコンクリート比重が小さくなるにしたがい、曲げひび割れ本数は少なくなり、ひび割れ長さも LC シリーズで約 h/2、SC シリーズで約 h/5 と短いものとなった。これは軽量骨材コンクリートと超軽量骨材コンクリートの引張強度およびヤング係数が普通コンクリートに比べて小さいため、低い荷重の段階で主引張応力およびせん断応力が引張強度以上となり、斜めひび割れが発生したためと思われる。

斜めひび割れは、コンクリート比重が小さくなるにしたがい斜めひび割れの発生直後に載荷点付近まで達した。さらに荷重の増加により、斜めひび割れの本数は数多く生じ、発生領域も広範囲で、ひび割れ幅も大きくなった(図-4 参照)。これは 2.1 で述べたように超軽量骨材コンクリートはモルタルクラックの連結とほぼ同時に破壊へとつながることや軽量骨材自体が割れてしまうために骨材のかみ合い効果が普通骨材に比べて小さいためと思われる。したがって、人工軽量骨材を用いた PC はりは、普通骨材コンクリート PC はりと破壊形式が相異なるものと考えられる。

本実験で得られた PC はりの実験結果を表-4 に示す。また PC はりの斜めひび割れ発生時および最大荷重時における平均せん断応力度(V/bd)と導

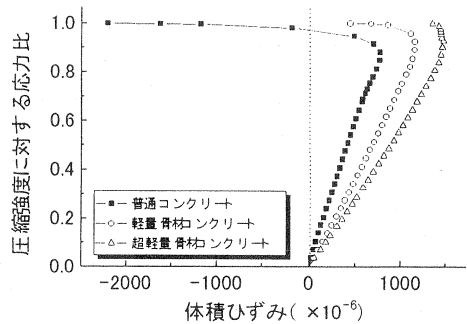


図-3 圧縮強度に対する応力比と体積ひずみの関係

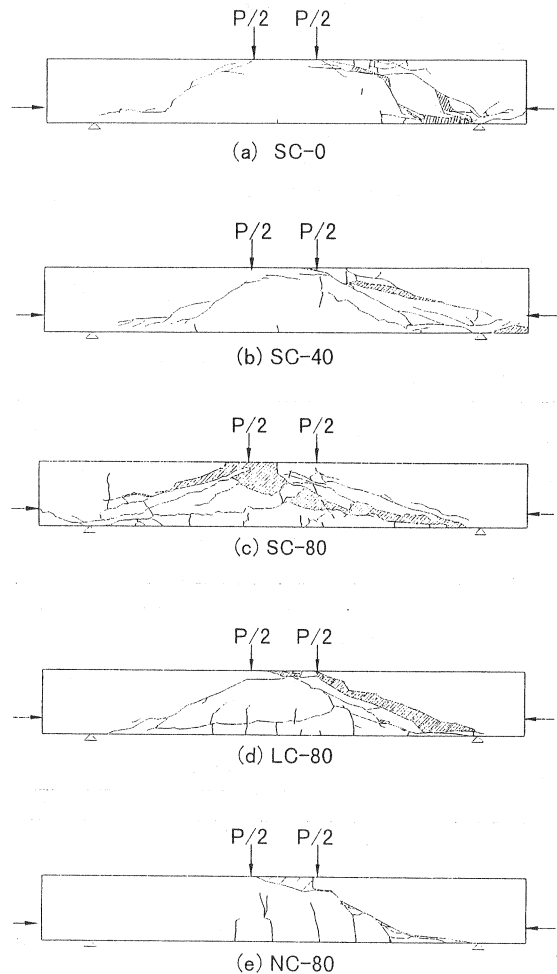


図-4 PC はりの破壊後のひび割れ状況図

表-4 PC はりのせん断断荷試験結果

供試体名	コンクリート比重 ρ	導入プレストレス力 P_i (kN)	曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	斜めひび割れ発生荷重 P_{cs} (kN)	最大荷重 P_{max} (kN)	破壊形式
NC-0	2.30	0	12.8	35.2	65.1	SC
NC-40		41.7	27.9	50.4	81.8	SC
NC-80		80.6	46.4	64.8	92.1	SC
LC-0	1.68	0	9.87	27.3	27.9	SC
LC-40		41.9	22.8	40.4	70.2	SC
LC-80		80.6	36.6	55.4	71.9	SC
SC-0	1.26	0	4.64	11.5	21.0	SC
SC-40		41.7	7.95	26.9	54.7	SC
SC-80		80.9	30.6	40.4	65.4	SC

備考) 破壊形式の SC はせん断圧縮破壊を示す。供試体名 NC-0 は引張鉄筋降伏後にせん断圧縮破壊した。

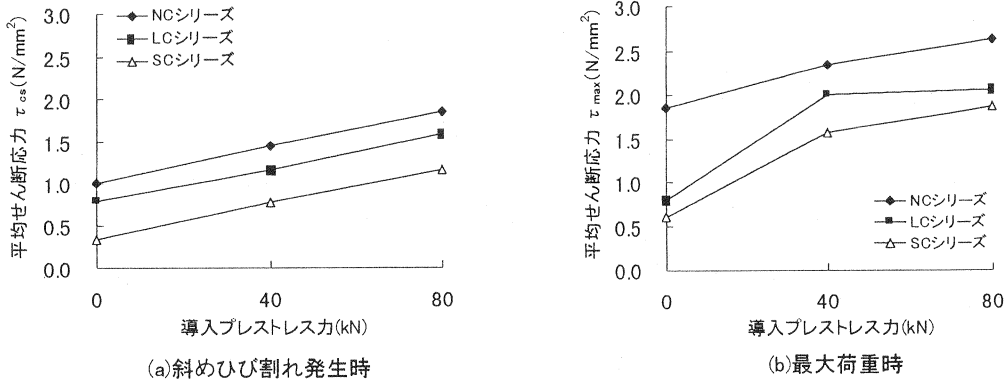


図-5 斜めひび割れ発生時および最大荷重時の平均せん断応力と導入プレストレス力の関係

入プレストレス力の関係を図-5 に示す。図-5 より、斜めひび割れ発生時の平均せん断応力度(τ_{cs})は、いずれの PC はりにおいても導入プレストレス力を増加するにしたがい増大した。同様に、最大荷重時の平均せん断応力度(τ_{max})においても、導入プレストレス力が増加するにしたがい増大した。

導入時のプレストレス力を変化させたときの SC シリーズの荷重とスパン中央のたわみの関係を図-6 に、導入時のプレストレス力を 80kN としたコンクリート比重の異なる PC はりの荷重とスパン中央のたわみの関係を図-7 に示した。図-6 より、最大荷重時のたわみはほぼ同程度であるが、導入時のプレストレス力を増加させることで最大荷重は増加した。これは LC シリーズにおいても同様な傾向であった。図-7 では、コンクリート比重が小さくなるにしたがい、プレストレス力を導入しても、最大荷重およびスパン中央のたわみはともに小さいものであった。

したがって普通コンクリート PC はり同様に軽量骨材コンクリートおよび超軽量骨材コンクリートのせん断耐力は、導入プレストレス力の増加量と密接に関連しているものと考えられる。

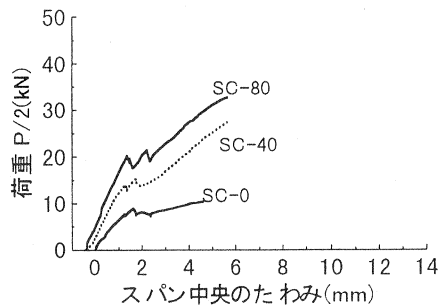


図-6 荷重とスパン中央のたわみ(SCシリーズ)

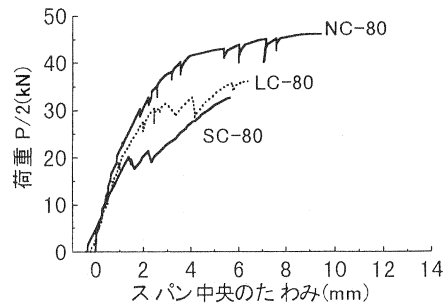


図-7 荷重とスパン中央のたわみ($P_i=80$ kN)

4. 設計せん断耐力式の計算値と実験値の比較

せん断補強鉄筋を用いない PC はりの斜めひび割れ発生荷重について、実験値(V_{test})と各設計式による計算値(V_{calc})を比較して、その結果を図-8 に示した。設計せん断耐力式は、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾(以下、標準示方書と称す)および ACI 規準⁶⁾を用いた。標準示方書において、軽量骨材コンクリートはりのための V_{calc} は、軽量骨材コンクリートと同様の圧縮強度を有する普通骨材コンクリートはりの V_{calc} の 70%に低減しなければならないと規定している。なお、比重の小さい超軽量骨材コンクリートはりの取扱については明確にされていないので、軽量骨材コンクリートはりと同様に V_{calc} の 70%に低減して計算した。ACI 規準においても、普通コンクリートはりの V_{calc} を低減して軽量骨材コンクリートはりの設計せん断耐力を求めている。その低減値は、粗骨材に軽量骨材を用いたコンクリートはりの場合は 85%とし、細・粗骨材に軽量骨材を用いたコンクリートはりにについては 75%としている。ここでは、設計式の安全係数はすべて 1.0 として設計せん断耐力を計算した。

破壊時までのプレストレス力の増加量は、NC シリーズ

で 30~45kN、LC シリーズで 15~25kN、SC シリーズで約 15kN であるが、この増加量を考慮せずに導入プレストレス力の値を用いて計算した。図-8 より、標準示方書において、LC シリーズは導入プレストレス力の増加にしたがい V_{test}/V_{calc} が 1 より大きくなり、すなわち V_{calc} は V_{test} を上回り、かなり安全側に評価された。また SC シリーズにおいては、導入プレストレス力が小さいときは危険側であるが、導入プレストレス力を大きくすることで安全側へととなっている。本実験の結果から、超軽量骨材コンクリート PC はりは、普通コンクリート PC はりの V_{calc} を 70%低減したが、導入時のプレストレス力によっては危険側に評価される。ACI 規準においては、LC シリーズは導入時のプレストレス力が増加しても、 V_{calc} と V_{test} がほぼ一致している。しかし SC シリーズは、 V_{test}/V_{calc} が 1 以下となり、危険側に評価された。

5. ストラットタイモデルによるせん断耐力の計算値と実験値の比較

Tan⁷⁾は、外ケーブル方式の PC はりのせん断耐力を明確にするために、ストラットタイモデルを提案した。これはせん断圧縮破壊の場合に適用することができ、コンクリートの圧縮域と引張鉄筋位置の引張力の釣合いによってせん断耐力を推定するものである。このストラットタイモデルの特徴は、コンクリートの圧縮域が荷点から放射状に広がって作用していることで、せん断応力の方向は 45° のときに最大になることを考慮して、圧縮部の角度を 45° と定めている。本実験で

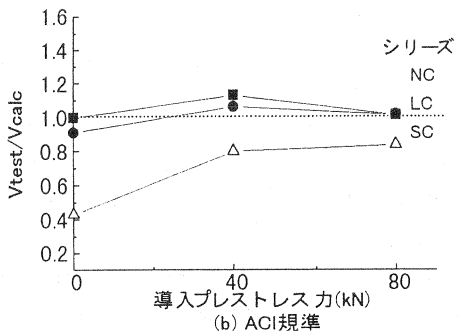
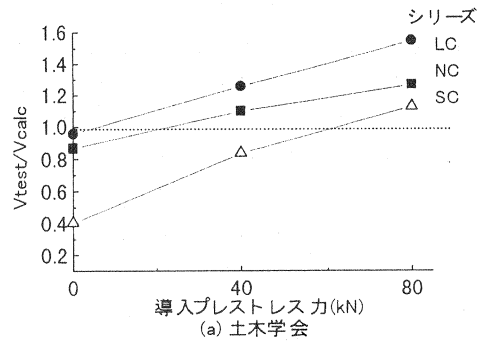


図-8 各設計式の計算式と実験値の比較

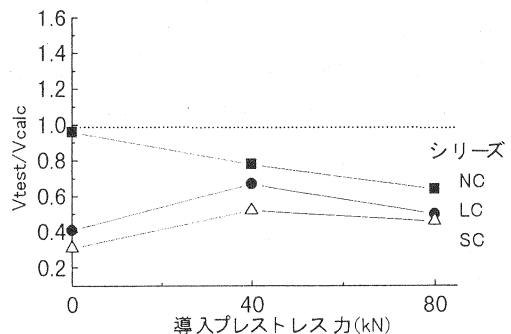


図-9 せん断耐力の V_{test}/V_{calc} と導入プレストレス力

は、内ケーブル方式の PC はりにストラットタイモデルを適用させて、せん断耐力の計算値(V_{calc})と実験値(V_{test})とを比較検討した。その結果を図-9 に示す。図-9 より、いずれのシリーズにおいても V_{test}/V_{calc} が 1 以下となり、危険側に評価された。 V_{calc} が V_{test} よりも大きく計算されたのは、次の理由によるものと思われる。実験での PC はり寸法の小さいこと、斜めひび割れの角度をストラットタイモデルでは 45° と一定と仮定しているが、本実験での斜めひび割れの角度が 45° とは異なること、LC シリーズおよび SC シリーズにおいては斜めひび割れが 1 本ではなく数本生じていたこと、シース径($\phi 25\text{mm}$)の影響を考慮していないことなどが挙げられる。

6. 結論

本実験では比重が異なる 3 種類のコンクリートを用いて、せん断補強鉄筋を用いない PC はりのせん断載荷試験を実施した。せん断スパンを一定として導入プレストレスを変化させることで、せん断破壊性状の差異を比較検討した。さらに各設計式についての比較も行った。

本実験で得られた結果を以下に示す。

- 1) 斜めひび割れはコンクリート比重が小さくなるにしたがい、斜めひび割れの発生直後に載荷点付近に達した。比重の小さい SC、LC シリーズの PC はりに生じた斜めひび割れの本数は数多く、その発生領域も広範囲であり、ひび割れ幅も大きいものであった。
- 2) 比重の小さな SC、LC シリーズの PC はりにおいて、導入時のプレストレスを増加させるにしたがい、斜めひび割れ発生時ならびに最大荷重時の平均せん断応力は増大した。
- 3) 標準示方書における軽量骨材を用いた PC はりのせん断耐力について、LC シリーズの設計せん断耐力はかなり安全側に評価されている。しかし SC シリーズにおいて、導入プレストレスが小さい場合は危険側となり、導入プレストレスが大きくなるにしたがい安全側になる。

以上により、軽量骨材コンクリートを用いたはりにプレストレスを導入することで、せん断性状が改善されるものと考えられる。

参考文献

- 1)岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp48-52, 1998.1.
- 2)大倉真人: 人工軽量骨材を用いた高強度コンクリートの有効利用に関する研究, 日本大学修士論文, 1984.
- 3)F.Leonhardt, E.Monmig: レオンハルトのコンクリート講座① 鉄筋コンクリートの設計, 鹿島出版会, pp4-76, 1986.
- 4)セメント協会: 人工軽量骨材コンクリート, pp60-63, 1974.
- 5)土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, pp66-64, 1996.
- 6)K.H.Tan and C.khoo Ng: Effect of Shear in Externally Prestressed Beam, ACI Structural Journal, pp.116-128, March-April 1998.
- 7)K.H.Tan and A.E.Naaman: Strut-and-Tie Model for Externally Prestressed Concrete Beams, ACI Structural Journal, pp.683-690, November-December 1993.