

高強度軽量コンクリートRC梁のせん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響

神戸市立工業高等専門学校	博(工)	○水越	睦視
(株)安部日鋼工業		林	邦憲
(株)安部日鋼工業	正会員	三田	健大
(株)安部日鋼工業	正会員	横畑	勝彦

Abstract : High strength concrete has been used to reduce the dead weight of prestressed concrete structure recently. If high strength lightweight concrete (HL) is used, the weight of it is able to be reduced more. However, there is a problem that the shear strength of lightweight concrete decreases in comparison with normal concrete of the same compressive strength. In this study, the loading tests of the RC beams without shear reinforcement using HL which changed the shear span ratio (a/d) were examined. A shear capacity evaluation expression of RC beam in consideration of use of the lightweight concrete and influence of a/d was suggested by the test results.

Key words : Lightweight concrete, High strength , Shear capacity, Shear span ratio

1. はじめに

近年, 大型化する PC 構造物の軽量化を目的に高強度コンクリートが適用されている。軽量コンクリート (以下, L) を高強度化した高強度軽量コンクリート (以下, HL) が使用できれば, さらなる軽量化が可能となる。しかしながら, L では同じ圧縮強度の普通コンクリート (以下, N) に比べてせん断強度の低下が課題となる。L を PC 部材に用いた場合のせん断耐力に関する研究の報告数は少ないが, 高性能軽量骨材を使用した PC 部材について幾つかある。たとえば, 田村らは, L にプレストレスを与えることで, せん断耐力の低下が小さくなることを報告している¹⁾。本研究では, PC 部材に先立ち, 基礎的データを得るために, 容易に入手できる膨張頁岩系の人工軽量骨材を用いた RC 部材によるせん断耐力の評価方法を検討した。普通コンクリートを用いた RC 梁のせん断特性については, 多くの実験が行われており, 棒部材のせん断耐力の算定には二羽らによって提案された評価式²⁾が土木学会コンクリート標準示方書 (設計編: 標準) (以下, RC 示方書) に採用され, せん断耐力の評価法が示されている。そこでは, コンクリートの圧縮強度の適用範囲を設計基準強度 80N/mm^2 以下とし, L を用いた棒部材のせん断耐力の算定においては, 一律 70% の低減値を設けている。この低減値が L の構造用材料としての普及の妨げとなっているのも事実であり, L の特徴を考慮した設計を行うには, 使用する L の力学的特性がせん断耐力に及ぼす影響を明らかにする必要がある。前田らは, 真珠岩を原料とした独立空隙を有する高品質軽量骨材を用いた普通強度 (圧縮強度 24N/mm^2) の 1 種および 2 種軽量骨材コンクリートを用いた RC 梁のせん断特性について実験的に検討し, 斜め引張あるいはせん断引張破壊する RC 梁のせん断耐力は, コンクリートの脆度係数に大きく依存することを報告している³⁾。舟橋らは, 独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材を用いて製作したせん断補強鉄筋をもたない RC 梁の曲げせん断試験を実施し, コンクリートの単位容積質量により低減係数を変化させて評価するのが適当との結論を得ている⁴⁾。筆者らも既に, せん断スパン比 (以下, a/d) 2.7 の HL を用いた RC 梁のせん断耐力について報告をしている⁵⁾。

このような観点から, 本研究では, a/d を試験要因として, 粗骨材のみに膨張頁岩系の人工軽量骨

材を使用した HL を用いた RC 梁供試体の荷重試験を、N を用いた RC 梁との比較で実施し、N を使用した場合に対する HL を用いた場合のせん断耐力の低減割合とせん断耐力に及ぼす a/d の影響について検討することで、HL の材料特性と a/d の影響を考慮したせん断耐力評価式の提案を試みた。

2. RC 梁供試体および荷重方法

荷重試験に用いた供試体は、HL を用いた RC 梁と比較用の N を用いた RC 梁を用意した。既に試験を実施した a/d=2.7 の RC 梁供試体⁵⁾も併せて RC 梁の形状寸法・配筋と荷重状況を表-1, 図-1 に示す。本実験の試験要因は a/d であり、せん断スパン長 a のみ変化させることにより a/d を L 梁で 4 水準、N 梁で 2 水準とした。RC 梁供試体は、せん断補強鉄筋を配置せず、曲げ破壊よりせん断破壊が先行するように設計し、種類毎に 2 体作製した。使用したコンクリートの配合は、HL, N とともに W/C = 36% の低水セメント比とし、呼び強度 45 を満足することを試験練りにより確認した⁵⁾。HL の粗骨材には、膨張頁岩系構造用人工軽量骨材 (絶乾密度 1.65g/cm³, 最大寸法 15mm, 吸水率 30.8%) を用いた。圧縮強度試験用の供試体 (φ100×200mm の円柱) で測定した HL の気乾単位容積質量は約 1900 kg/m³であった。セメントは、HL, N とともに普通ポルトランドセメントを用いた。RC 梁供試体の荷重試験時のコンクリートの強度特性を表-2 に示す。鉄筋は D16 (SD345) を用いた。鉄筋の機械的性質を表-3 に示す。

荷重方法は、図-1 に示す 4 点対称荷重とした。測定項目は、たわみ、断面上縁のコンクリートひずみおよび主鉄筋ひずみであり、すべての RC 梁供試体のスパンの中央にて測定した。そのほか、ひび割れ進展状況、破壊形式について観察した。

表-1 RC 梁供試体の概要

梁の種類	コンクリートの種類	せん断スパン長 a (mm)	有効高さ d (mm)	a/d	梁幅 b (mm)	引張主鉄筋	主鉄筋比 (%)
D16-2.7-L	軽量1種 (HL)	440	162	2.7	150	D16-2本	1.63
D16-3.0-L		486		3.0			
D16-3.5-L		567		3.5			
D16-4.0-L		648		4.0			
D16-2.7-N	普通 (N)	440		2.7			
D16-3.0-N		486		3.0			

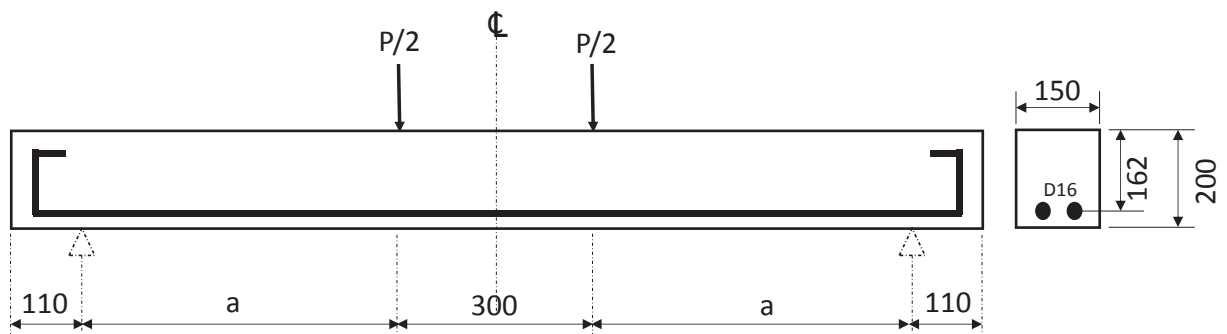


図-1 RC 梁の形状寸法・配筋と荷重状況

表-2 コンクリートの強度特性 (載荷試験時)

梁の種類	コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	気乾単位容積質量 (kg/m ³)
L(a/d=2.7)	軽量1種(HL)	56.7	20.8	3.82	1895
L(a/d=2.7以外)	軽量1種(HL)	56.8	22.6	4.09	1962
N	普通(N)	65.6	35.8	5.36	2338

表-3 鉄筋の機械的性質

梁の種類	鉄筋の種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び率 (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
L(a/d=2.7)	D16(SD345)	405	568	24	200
L(a/d=2.7)以外	D16(SD345)	395	563	23	200

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ進展・破壊性状とたわみ

代表的な載荷試験終了後の各梁供試体の最終的破壊状況を図-2に、荷重スパン中央たわみ曲線を図-3に示す。図-2に示すように、すべての梁で斜め引張破壊が生じた。ただし、L梁において a/d による違いが認められ、a/d=4.0では、N梁と同様に最初に斜めひび割れが発生した荷重を超えることなくせん断破壊に至るが、a/d=3.5以下では、最初に斜めひび割れが発生した後、急激な荷重低下を生じるが、その後荷重が再上昇し、最初の斜めひび割れ発生荷重を超えた後にせん断破壊に至ることがわかった。これらの挙動を図-3より考察すると、D16-2.7-N, D16-3.0-N, D16-4.0-Lでは、2体中1体が斜めひび割れの発生により、荷重が急激に低下した後、最大荷重を超えることなく、斜め引張破壊を呈した。D16-2.7-L, D16-3.0-L, D16-3.5-Lでは、一方のせん断スパンに斜めひび割れが発生すると同時に5%以上の荷重低下が生じた後、荷重が再上昇し、どちらかのせん断スパンの斜めひび割れが進展して、圧縮縁まで達し、それとほぼ同時に支点方向に進展することにより、斜め引張破壊を呈した。この荷重の再上昇は、L梁ではN梁に比べて斜めひび割れが早い段階で発生したためタイドアーチ的耐荷機構に移行しやすかったこと、Lのヤング係数はNに比べて小さいために斜めひび割れの進展が遅くなったことが原因として考えられる。また、すべての梁において、主



図-2 RC梁の破壊状況

鉄筋ひずみと上縁コンクリートのひずみの計測値を確認したところ、鉄筋の降伏および純曲げスパン内のコンクリートの圧壊は認められず、ぜい性的なせん断破壊を呈したといえる。

以上より、L 梁においては、 $a/d=4.0$ を除いて、斜めひび割れ発生と同時に破壊に至らず、荷重が再上昇した後に斜め引張破壊する傾向がN梁に比べて顕著であったが、最初に斜めひび割れが発生した直後に 5%以上の急激な荷重低下が認められたことから、最大荷重をせん断耐力の評価に用いることは危険側であると考え、せん断耐力の照査は最大荷重ではなく最初に斜めひび割れが発生した荷重に対して行うこととした。

3.2 せん断耐力の評価方法の検討

高強度軽量コンクリート RC 梁のせん断耐力の算定には、RC 示方書に採用されている二羽らのせん断耐力式²⁾を用いた。その算定式は式(1)のとおりである。

$$V_c = 0.20f'_c \frac{1}{3} p_w \frac{1}{1000} d^{-\frac{1}{4}} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b_w d \quad (1)$$

ここで、 V_c :せん断耐力(N)、 f'_c :コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 p_w :主鉄筋比(%)、 d :有効高さ(mm)、 a :せん断スパン長(mm)、 b_w :梁幅(mm)

本研究では、計算値と載荷試験で得られた斜めひび割れ発生荷重を比較するため、 V_c の値を2倍にして載荷荷重に換算した値をせん断耐力の計算値(せん断破壊荷重)とした。

$$P_{s.cal} = 2V_c \quad (2)$$

式(1)、式(2)は、Nを用いた RC 梁に対して、斜めひび割れ発生とほぼ同時に破壊する場合に適用される。よって、せん断破壊荷重=斜めひび割れ発生荷重となる。現行の RC 示方書では、Lを用いた場合のせん断耐力は Nを用いた場合に対して一律に 70%低減させることになっている。斜めひび割れ発生荷重の実験値と各種提案式による算出結果の比較を表-4に、これらの梁種類毎の平均値を a/d を横軸として図-4に示す。ここで、 P_s は実験値で最初に斜めひび割れが発生した荷重であり、せん断破壊荷重として評価するものである。式(2)によるせん断破壊荷重の計算値に対する斜めひび割れ発生荷重の比($P_s/P_{s.cal}$)の平均値をみると、N梁では、0.99~1.03と推定精度は高いが、L梁の($P_s/P_{s.cal}$)は0.78~0.90とN梁に比べて小さくなっている。式(2)の計算値に0.7を乗じて70%低減すると、図-4のとおり($P_s/P_{s.cal}$)は1.11~1.28となり、過度に安全側の評価となっていることがわかる。そこで、HLを用いたL梁の場合、式(2)に適当な低減係数を乗じる必要があることがわかった。

ここでは、既に軽量コンクリートに対して提案されている低減係数を乗じた以下の2式、Eurocode⁶⁾式(式(3))と舟橋らの式⁴⁾(式(4))の適用性を検討することとした。さらに、実験より得られた a/d の影響を考慮し、 $a/d=3.5$ 以下では a/d の減少に伴い低減係数が1より大きくなる $1.9(a/d)^{-0.5}$ を乗じた式(5)を提案した。以下に式(3)、式(4)、式(5)を示す。

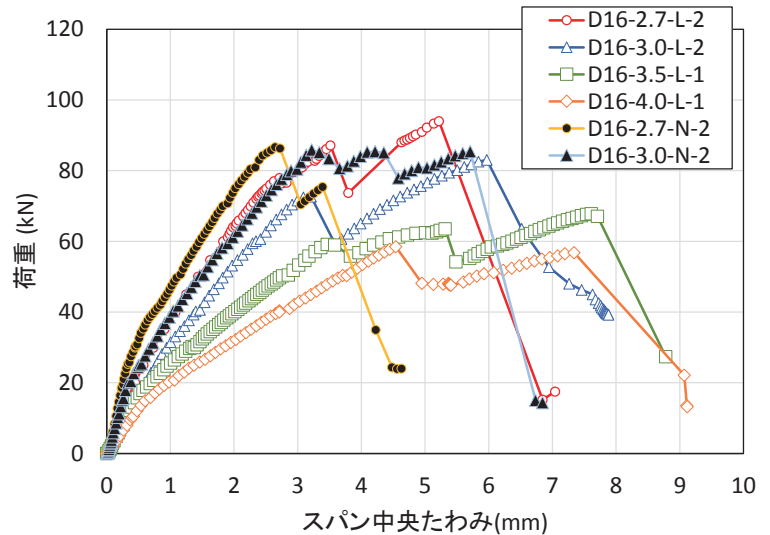


図-3 荷重とスパン中央たわみの関係

$$P_{s.cal} = 2V_c [0.4 + 0.6(\rho/2400)] \tag{3}$$

$$P_{s.cal} = 2V_c(\rho/2300)^{1.5} \tag{4}$$

$$P_{s.cal} = 2V_c \cdot 1.9(a/d)^{-0.5}(\rho/2300)^{1.5} \tag{5}$$

ここで、 $P_{s.cal}$: 斜めひび割れ発生荷重(N), V_c : 式(1)の二羽式より求めたせん断耐力(N),
 ρ : コンクリートの気乾単位容積質量(kg/m³)

表-4 せん断耐力の実験値と各種提案式による算出結果の比較

供試体名	① Ps 実験値 (kN)	② Ps.cal 式(2) (kN)	③ Ps.cal 式(3) (kN)	④ Ps.cal 式(4) (kN)	⑤ Ps.cal 式(5) (kN)	実験値(Ps)/計算値(Ps.cal)							
						Ps/②	平均	Ps/③	平均	Ps/④	平均	Ps/⑤	平均
						D16-S-2.7-L-1	70.0	87.7	76.6	65.6	75.8	0.80	0.90
D16-S-2.7-L-2	87.1	87.7	76.6	65.6	75.8	0.99	1.14	1.33	1.15				
D16-S-3.0-L-1	68.0	84.4	75.2	66.5	72.9	0.81	0.83	0.90	0.94	1.02	1.06	0.93	0.96
D16-S-3.0-L-2	72.6	84.4	75.2	66.5	72.9	0.86		0.97		1.09		1.00	
D16-S-3.5-L-1	59.0	79.8	71.1	62.9	63.9	0.74	0.78	0.83	0.88	0.94	0.99	0.92	0.98
D16-S-3.5-L-2	66.1	79.8	71.1	62.9	63.9	0.83		0.93		1.05		1.04	
D16-S-4.0-L-1	58.5	76.3	67.9	60.1	57.1	0.77	0.78	0.86	0.88	0.97	0.99	1.02	1.04
D16-S-4.0-L-2	60.6	76.3	67.9	60.1	57.1	0.79		0.89		1.01		1.06	
D16-S-2.7-N-1	95.0	92.1	-	-	-	1.03	0.99	-	-	-	-	-	-
D16-S-2.7-N-2	86.7	92.1	-	-	-	0.94		-		-		-	
D16-S-3.0-N-1	95.9	88.5	-	-	-	1.08	1.03	-	-	-	-	-	-
D16-S-3.0-N-2	85.9	88.5	-	-	-	0.97		-		-		-	

これらの適用性を表-4, 図-4より検討する。式(3)は $a/d=2.7, 3.0$ では推定精度は高いが, $a/d=3.5, 4.0$ では, やや危険側の評価となる。一方, 式(4)は $a/d=3.5, 4.0$ で ($P_s/P_{s.cal}$)は 0.99 と実験値を精度良く評価できている。しかしながら, 式(4)は a/d が小さい領域で推定精度が下がり, $a/d=2.7$ では実験値との乖離が大きくなった。そこで, 式(4)に a/d の影響を考慮した係数を乗じた式(5)を提案した。提案式は, a/d に関わらず実験値に近い評価を与えていることがわかる。 $a/d=2.7\sim 4.0$ の実験の範囲で式(5)の算出値 ($P_{s.cal}$) に対する実験値 (P_s) の比 ($P_s/P_{s.cal}$) をすべての L 梁で平均すると, 1.005 となり, 実験範囲内の a/d

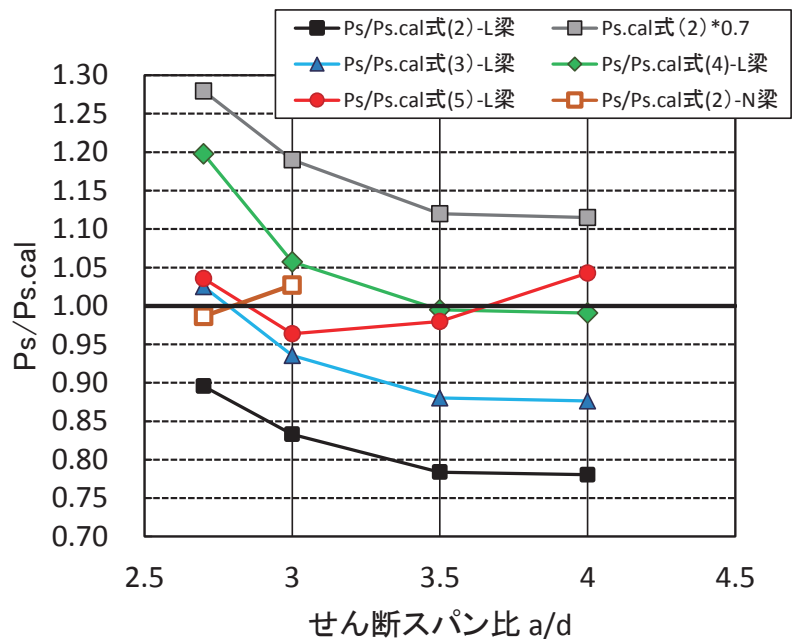


図-4 せん断耐力の実験値/各種計算値

に対して精度の良い評価が可能であると考えられる。また, 図-5に示すように RC 示方書では, 部材係数 $\gamma_b=1.1\sim 1.3$ で除して設計せん断耐力として使用するため安全側の評価を与えることになる。

以上より、本研究で提案した式(5)は斜めひび割れ発生に基づくせん断耐力を評価できると考えられる。

4. まとめ

(1) HL では、N を用いた場合に比べて RC 梁のせん断挙動に以下の特徴が確認された。斜めひび割れ発生荷重は N を用いた場合よりも小さくなり、 a/d が 2.7 から 3.5 の範囲では斜めひび割れ発生とほぼ同時にせん断破壊するのではなく、5%以上の急激な荷重低下の後、荷重が再上昇し、最終的に斜め引張破壊を呈する。

(2) HL を用いた RC 梁では、RC 示方書に採用されている二羽らの提案式によるせん断耐力算定値を一律に 70%低減した場合は、せん断耐力を過度に安全側に評価することになるため、二羽らの式による算定値に別の低減係数を乗じる必要があることが分かった。

(3) せん断スパン比 a/d の違いが斜めひび割れ発生荷重に影響を及ぼすことが明らかになり、二羽らの提案式に低減係数を乗じた舟橋らの提案式においても a/d が 3.0, 2.7 と小さくなるほど、せん断耐力算定値と実験値との乖離が大きくなった。そこで、船橋らの提案式に a/d を考慮した係数を乗じることで、HL を用いた RC 梁のせん断耐力を十分に評価することができるとの結論を得た。

今後、主鉄筋径の異なる RC 梁供試体およびプレストレスを導入した PC 梁の載荷実験を行い、提案式の精度と適用範囲の検証をさらに進めていく予定である。

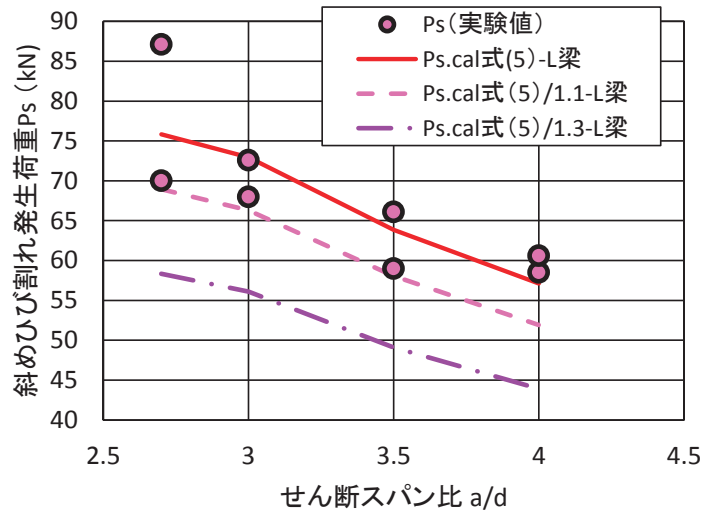


図-5 せん断耐力の実験値と本提案式の比較

参考文献

- 1) 田村聖, 濱田譲, 前堀伸平, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いた大型 PC はりのせん断耐荷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 709-714, 2001
- 2) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No. 372/V-5, pp. 167-176, 1986
- 3) 前田拓郎, 日比野憲太, 高木宣章, 児島孝之: 高品質軽量骨材を用いた RC はりのせん断特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 913-918, 2001
- 4) 舟橋政司, 原夏生, 横田弘, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 919-924, 2001
- 5) 小寺一樹, 水越睦視, 紙田聖也, 横畑勝彦: 高強度軽量コンクリートの PC 構造物への適用に関する基礎的研究, プレストレストコンクリート工学会, 第 26 回シンポジウム論文集, pp. 141-144, 2017
- 6) European Committee for Standardization : EUROCODE2, pp. 186-190, 2004