

# 論文 高品質軽量骨材を用いた鉄筋コンクリート梁のせん断性状

松田 学<sup>\*1</sup>・三井 宜之<sup>\*2</sup>・村上 聖<sup>\*3</sup>・武田 浩二<sup>\*4</sup>

**要旨**：高品質および従来型軽量骨材を用いた鉄筋コンクリート梁のせん断性状に関して、圧縮強度が約 40N/mm<sup>2</sup> の軽量 1 種、2 種ならびに圧縮強度が約 40, 30 および 20N/mm<sup>2</sup> の超軽量コンクリートの場合について実験的検討を行ない、終局せん断強度の測定値と既往の計算式による計算値との対応を調べた。その結果、軽量化・高強度化による終局せん断強度の低下は顕著であり、これはコンクリートの圧縮軟化域の脆性化によるアーチ機構における有効圧縮強度の低下に起因すると考えられ、コンクリートの種類、使用骨材の種類および圧縮強度区分に応じた許容せん断応力度の見直しが必要である事を指摘した。

**キーワード**：軽量コンクリート、鉄筋コンクリート梁、終局せん断強度、有効圧縮強度

## 1. はじめに

近年、副産物の有効利用、超軽量化および高強度化などの要求から、原材料や製造方法に工夫がされ、多様な種類の軽量骨材が研究開発されている。その中で、従来型骨材と比較すると高強度・低吸水性といった高品質人工軽量骨材が構造用軽量コンクリートにおける軽量化、高強度化、高耐久化および施工性改善の面で有望視されている。しかし、軽量コンクリートの実用化に際しては、圧縮強度の増加に比して引張強度やせん断強度が相対的に小さくなるために、普通コンクリートに対して終局せん断強度の低下が懸念されている。現行の日本建築学会では、軽量コンクリートの許容せん断応力度を普通コンクリートの 0.9 倍に低減するなどの対応が図られているが、品質の多様化から各種力学的特性も変化しており、低減係数を一律に定めることは合理的ではない。また、既往の研究<sup>1)</sup>では高品質軽量骨材を用いた実験において終局せん断強度が過小評価される場合も報告されている。

そこで、本研究では軽量コンクリートの実用化で問題となる終局せん断強度の低下に関して、高品質および従来型軽量骨材を用いて作製した

鉄筋コンクリート梁（以下、RC 梁）試験体を作製し、高強度（約 40N/mm<sup>2</sup>）を対象とした軽量 1 種、2 種および超軽量コンクリート、また超軽量（1.4t/m<sup>3</sup> 未満）を対象とした圧縮強度区分が異なる場合（約 40N/mm<sup>2</sup>、30N/mm<sup>2</sup> および 20N/mm<sup>2</sup>）について逆対称曲げ載荷試験を実施し、既往の終局せん断強度式との対応を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料

表-1 に実験因子、表-2 に使用材料を示す。軽量コンクリート 1 種には海砂と一般的に用いられている従来型軽量粗骨材 (GL-1)、軽量コンクリート 2 種には従来型軽量細骨材 (SL-1) と高品質軽量粗骨材 (GL-2)、超軽量コンクリート

表-1 実験因子

種類	単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )	骨材の種類		目標とする圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	採用 W/C (%)
		S	G		
軽量1種	1.7~2.1	NS	GL-1	40	40
軽量2種	1.4~1.7	SL-1	GL-2	40	30
超軽量	1.4 未満	SL-2 SL-3	GL-2	40	25
				30	40
				20	60

\*1 (株)ヤマックス 開発研究本部係長 (熊本大学大学院博士後期課程) 工修 (正会員)

\*2 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

\*3 熊本大学大学院助教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 工博 (正会員)

\*4 熊本大学助手 工学部環境システム工学科 工博 (正会員)

表－２ 使用材料

種類	仕様	略記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	N	3.16	
細骨材	長崎県壱岐産海砂	NS	2.56	吸水率 1.0%, FM2.50
	人工軽量細骨材 A (区分 M)	SL-1	*1.70	24h 吸水率 10.0%, FM2.66
	人工軽量細骨材 B (区分 L)	SL-2	*1.15	24h 吸水率 9.0%
	人工軽量細骨材 C (区分 L)	SL-3	*1.05	24h 吸水率 5.2%, FM4.80
粗骨材	人工軽量粗骨材 A (区分 M)	GL-1	*1.26	24h 吸水率 10.0%, FM6.32
	人工軽量粗骨材 B (区分 L)	GL-2	*0.85	24h 吸水率 3.6%, FM6.44
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	1.08	ポリカルボン酸系
	空気調整剤	AE		アニオン系界面活性剤

※絶乾密度

表－３ 軽量コンクリートの計画調合

区分	W/C (%)	s/a (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )										SL (cm)	Air (%)	単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )
			W	C	細骨材				粗骨材		混和剤				
					NS	SL-1	SL-2	SL-3	GL-1	GL-2	SP (%)	AE			
軽量 1	40	44.2	150	375	771				479		0.50	2A	10.5	6.2	1.86
軽量 2	30	42.3		500		456				315	0.80	5A	18.0	6.0	1.48
超軽量	25	42.7		600			180	109				0.90	2A	20.0	4.0
	40	48.7	375				229	139		297	0.65	—	18.0	3.7	1.20
	60	49.4	170	283				235	143		0.45	—	17.0	3.9	1.14

注) 1A は C×1%/1000 を示す。

には 2 種類の高品質軽量細骨材 (SL-2 と SL-3) を容積比 60 : 40 で混合したものと高品質軽量粗骨材 (GL-2) をそれぞれ使用した。

## 2.2 計画調合

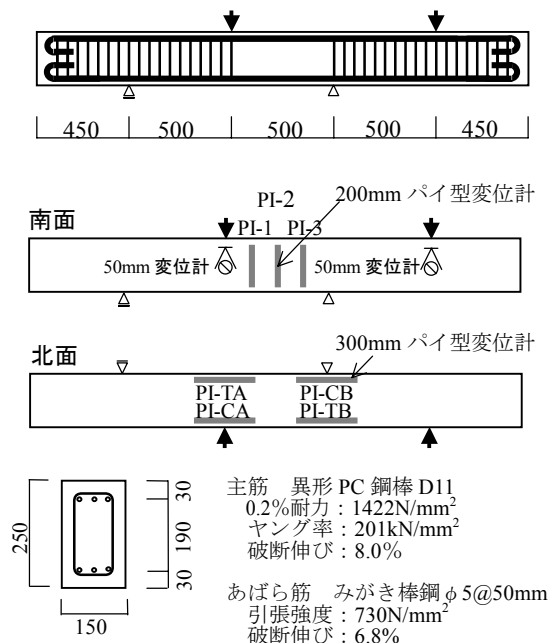
表－３に計画調合を示す。軽量コンクリートの調合は、目標スランプを軽量 1 種で 8±2.5cm, 軽量 2 種および超軽量では 18±2.5cm とし、目標空気量はすべての調合において 5±1.5% とし、コンクリートの種類ごとに 3 水準以上の水セメント比で試し練りを行ない、標準養生材齢 28 日における圧縮強度から回帰式を求め、目標とする圧縮強度が得られる水セメント比を決定した。練り混ぜにはオムニミキサーを用い、従来型軽量骨材では表乾状態のもの、高品質軽量骨材では気乾状態のものを使用した。なお、気乾状態の軽量骨材を使用する場合には、練り混ぜ後のスランプロスを抑制するために、注水後 30 分間で骨材が吸水する水量を見込んで単位水量を補正した。

## 2.3 RC 梁の載荷試験

表－４に RC 梁試験体の仕様、図－１に RC 梁

表－４ RC 梁試験体の仕様

区分	目標強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験体略記号	有効せい (mm)	せん断スパン比	引張鉄筋比 (%)
軽量 1	40	LB-1H	220	1.08	0.818
軽量 2	40	LB-2H			
超軽量	40	SLB-H			
	30	SLB-M			
	20	SLB-L			



図－１ RC 梁試験体の概要図

試験体の形状寸法，配筋および荷重方法を示す。荷重方法は，せん断スパン長さが 500mm の大野式逆対称曲げ荷重とし，中央せん断スパンを除く両側せん断スパン内には 50mm 間隔であれば筋を配置した。RC 梁試験体は，現場湿布養生材齢 28 日後，試験時まで気中養生を行なった。

RC 梁試験体の測定は，荷重点断面における主筋ひずみ，荷重点におけるたわみと中央せん断スパン内の上下主筋間の鉛直方向変位とした。

なお，主筋ひずみは標点距離 300mm のパイ型変位計，鉛直方向変位は標点距離 200mm のパイ型変位計を用いて計測し，鉛直方向変位の計測はせん断ひび割れの発生および拡大を定量的に把握することを目的とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの素材試験

表 5 に各種強度試験結果を示す。強度試験は JIS に準拠して行ない，圧縮強度および引張強度試験には  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体，曲げ強度試験には  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の角柱供試体を用いた。なお，供試体は標準養生材齢 28 日および RC 梁試験体と同一養生条件の現場湿布養生材齢 28 日後気中養生のそれぞれについて各 3 個ずつ作製した。軽量コンクリートの圧縮強度は，水セメント比 60% の超軽量コンクリートについて目標強度を幾分下回ったものの，その他については概ね目標とする圧縮強度が得られた。

#### 3.2 RC 梁のせん断試験

##### (1) ひび割れおよび破壊性状

図 2 に，各 RC 梁試験体の終局時のひび割れ性状を示す。すべての試験体について，ほぼ同等の破壊性状を示し，中央せん断スパン内の斜めひび割れが進展・拡大するとともに主筋に沿った付着割裂ひび割れをとめないながら，終局的破壊に至った。

##### (2) せん断耐力および変形性状

図 3 に荷重－荷重点変位曲線の測定値を示

表 5 各種強度試験の結果

区分	試験項目	標準養生材齢 28 日	現場湿布荷重日
軽量 1 40%	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	40.4	41.2
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	15.9	19.3
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.45	
	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.92	
軽量 2 30%	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	43.0	43.1
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	15.1	16.4
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.57	
超軽量 25%	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	41.4	40.2
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	12.2	14.0
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.58	
超軽量 40%	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	29.5	34.5
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	12.8	11.8
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.01	
	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.61	
超軽量 60%	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	15.5	16.5
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	9.60	8.50
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	1.88	
	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.82	

注) 現場湿布：現場湿布養生 28 日後に気中養生を行なった RC 梁試験体と同一養生条件

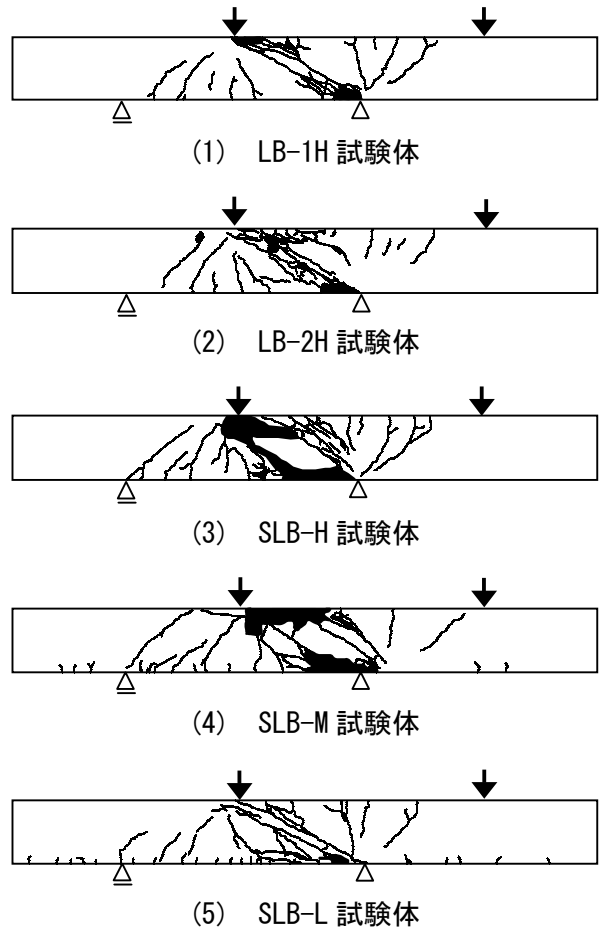


図 2 終局時のひび割れ性状

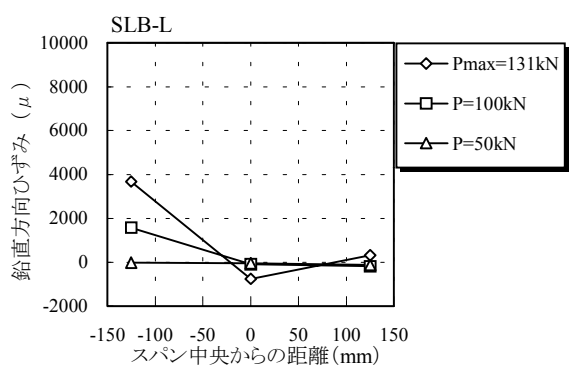
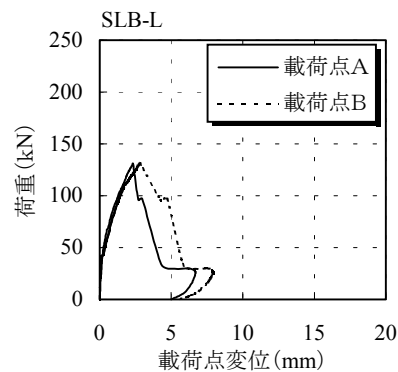
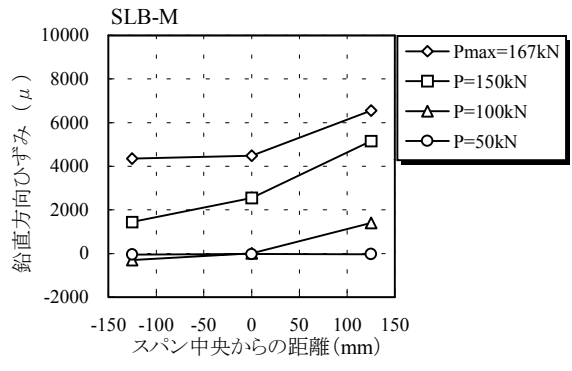
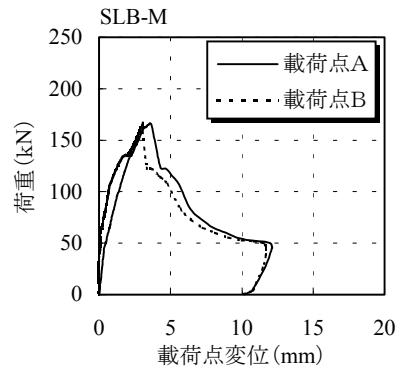
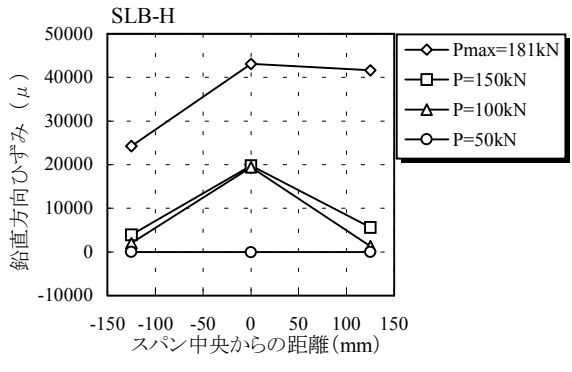
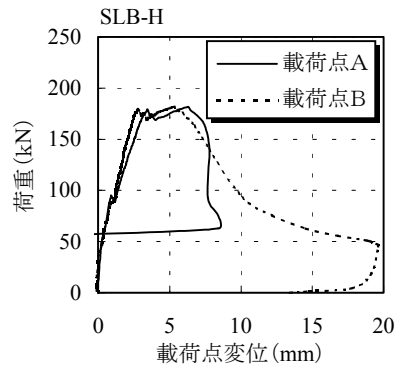
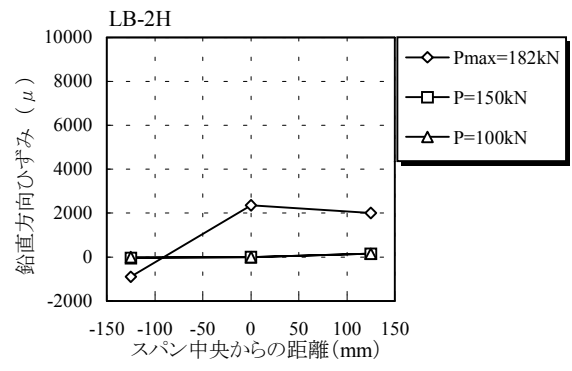
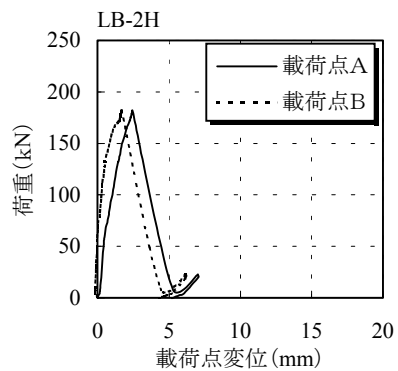
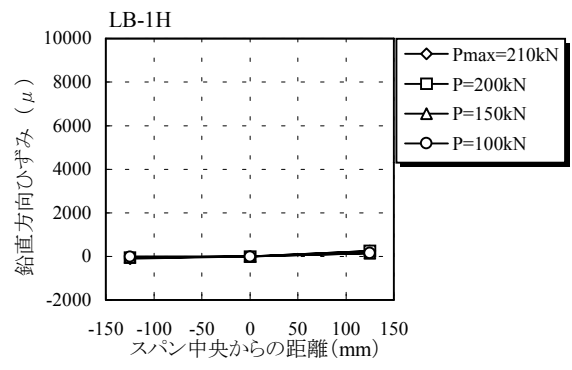
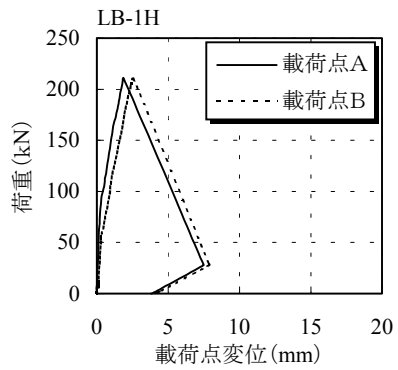
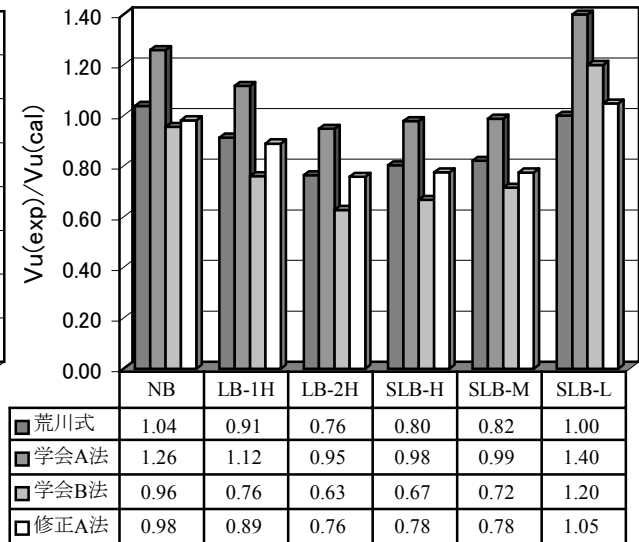
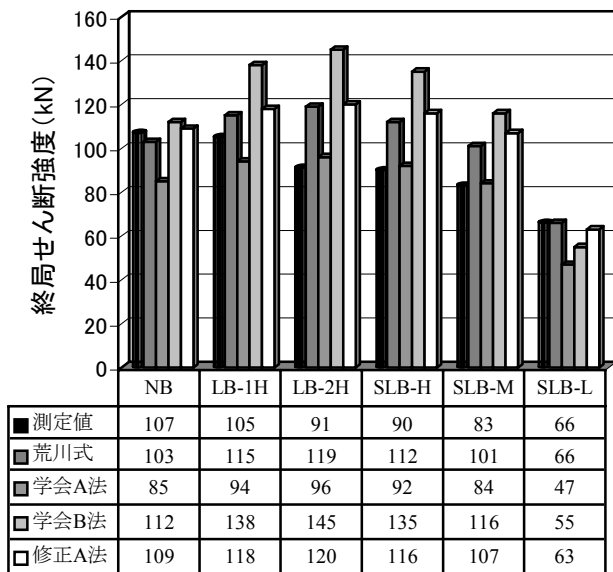


図-3 荷重-載荷点変位曲線

図-4 せん断スパン内の鉛直方向ひずみ



(1) 測定値と計算値

(2) 測定値と計算値の比

図-5 終局せん断強度算定式による計算値と実験値の比較

す。また、図-4には中央せん断スパン内の鉛直方向変位をパイ型変位計の標点距離で除して得られた鉛直方向ひずみ分布を荷重レベル別に示す。LB-1H, LB-2H および SLB-L 試験体では、せん断ひび割れの進展・拡大にともなう典型的な斜張力破壊により、最大荷重以降脆性的な破壊性状を示した。一方、SLB-H および SLB-M 試験体では、その他の試験体に比べてせん断ひび割れの拡大による鉛直方向ひずみがかなり大きい段階でもせん断力を保持し、最大荷重以降の耐力低下も緩やかになっている。これは、超軽量コンクリートの場合、細骨材の一部に硬質パーライト (SL-2) を用いており、せん断ひび割れ面での骨材かみ合い作用が働き、変形能力が増大したものと考えられる。

### (3) 測定値と計算値の比較

図-5に荒川 mean 式、終局強度型耐震設計指針 A 法・B 法<sup>2)</sup>および修正 A 法<sup>3)</sup>による終局せん断強度の計算値と測定値の比較を示す。また、比較として圧縮強度 32.9N/mm<sup>2</sup> の普通コンクリートを用いた既報<sup>4)</sup>の RC 梁試験体 (略記: NB) の実験結果も併記している。

既報の計算式は、普通コンクリートの評価を

対象としているので、NB 試験体の終局せん断強度の測定値と比較的対応が良い荒川 mean 式について、終局せん断強度の計算値に対する測定値の比率をみると、軽量コンクリートの場合には SLB-L 試験体を除いて一様にその比率は小さく、LB-1H で 0.91, LB-2H で 0.76, SLB-H で 0.80, SLB-M で 0.82 および SLB-L で 1.00 となっている。

日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」では、軽量コンクリート 1 種および 2 種の許容せん断応力度を普通コンクリートに対する値の 0.9 倍に一律に低減することが規定されており、軽量コンクリート 1 種の LB-1H 試験体ではほぼ妥当な結果が得られているが、その他については、軽量コンクリートの種類や圧縮強度に応じた低減率の見直しが必要であると考えられる。

NB (普通コンクリート), LH-1H (軽量 1 種) および LB-2H (軽量 2 種) の比較で、単位容積質量が小さくなるほど計算値に対する測定値の比率も小さくなっており、軽量コンクリートの単位容積質量に応じて低減率を考慮する方法も考えられるが、圧縮強度がほぼ同等の LB-2H (軽量 2 種) および SLB-H (超軽量) 試験体の比較

で、SLB-H 試験体は LB-2H 試験体よりも単位容積質量が小さいにもかかわらずほぼ同等の終局せん断強度が得られていることから、単位容積質量だけではなく使用する軽量骨材の種類も低減率に影響するものと考えられる。前述のように、超軽量コンクリートでは軽量細骨材に硬質パーライトを使用しており、せん断ひび割れ面での骨材のかみ合い作用が終局せん断強度の向上に寄与しているものと推察される。また、使用骨材が同じ超軽量コンクリートで圧縮強度区分が異なる SLB-H、SLB-M および SLB-L 試験体の比較で、圧縮強度が大きくなるほど計算値に対する測定値の比率が小さくなっており、高強度になるほど低減率を大きくとる必要があることを示している。逆に SLB-L 試験体のように低強度になると、その比率がほぼ 1.0 となっており、これはマトリックス強度よりも骨材強度の方が大きくなり、せん断ひび割れ面での骨材のかみ合い作用が普通コンクリートと同様に終局せん断強度の向上に寄与するためと考えられ、現に SLB-L 試験体の圧縮強度試験においても骨材の破壊はほとんど認められなかった。

以上の結果から、軽量化、高強度化により軽量コンクリートの破壊性状がより脆性化するにつれて RC 梁試験体の終局せん断強度は低下し、軽量コンクリート RC 梁のせん断設計では、現行のように普通コンクリートに対する許容せん断応力度の低減率を一律に設定するのではなく、軽量コンクリートの種類、使用骨材の種類および圧縮強度区分に応じて適宜低減率を設定する必要があるものと想定される。その方法論として、終局強度型耐震設計指針で示されているアーチ機構におけるコンクリート圧縮強度の有効係数を軽量コンクリートに拡張適用し、既報<sup>3)</sup>に示すように圧縮強度試験で得られる圧縮軟化域の脆性度と圧縮強度の有効係数を関係付ける方法が有効であると考えられる。

また、本実験は、単調載荷について検討しているが、正負交番繰り返し載荷の場合には斜めひび割れゾーンにおける交差ひび割れの形成が

単調載荷の場合よりも終局せん断強度を低下させる可能性があり、これに関しては今後の課題としたい。

#### 4. まとめ

- (1) 高強度を対象に圧縮強度が約  $40\text{N/mm}^2$  とほぼ同等の軽量コンクリート RC 梁試験体の終局せん断強度は、軽量 1 種、軽量 2 種および超軽量の順に小さくなり、荒川 mean 式による計算値に対する測定値の比は、それぞれ 0.91、0.76 および 0.80 となり、普通コンクリートに対する許容せん断応力度の低減を軽量化するほど大きくする必要がわかった。ただし、超軽量コンクリートの方が軽量 2 種よりも単位容積質量は小さいが、低減率はほぼ同程度であり、使用する軽量骨材の種類も終局せん断強度に影響するものと考えられる。
- (2) 圧縮強度区分が異なる超軽量コンクリート RC 梁試験体の終局せん断強度について、荒川 mean 式による計算値に対する測定値の比率は圧縮強度が大きくなるほど小さくなり、普通コンクリートに対する許容せん断応力度の低減率を高強度化するほど大きくする必要がわかった。

#### 参考文献

- 1) 川口哲生，木場美子，二羽淳一郎，岡本亨久：超軽量人口軽量骨材と普通骨材を混合した 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.931-936, 2001
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，丸善，pp.104-142，1990
- 3) 村上聖：鉄筋コンクリート梁の終局せん断強度算定式に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第 533 号，pp.143-150，2000.7
- 4) 村上聖ほか：ネット状ポリエチレン繊維をせん断補強筋代替とした鉄筋コンクリート梁のせん断性状，Cement Science and Concrete Technology, No.54, pp.731-736, 2000