

論文 軽量細骨材を用いたRC梁部材のせん断耐力に関する研究

竹下 永造^{*1}・大塚 久哲^{*2}・Ha Ngoc TUAN^{*3}・杉山 彰徳^{*4}

要旨: 構造物への地震時慣性力を低減する方法として、コンクリートの軽量化が挙げられる。コンクリートを軽量化する方法には、軽量粗骨材が用いられることが多い。しかし、軽量骨材として軽量粗骨材のみを用いたコンクリート（軽量コンクリート1種）は骨材強度が十分でないため高強度化が望めず、また、引張強度やせん断耐力が普通コンクリートに比べ小さくなる問題がある。そこで、上記影響が小さいと考えられる軽量細骨材を用いたRC梁のせん断試験により、普通コンクリートとの比較を行ない、その効果を確認した。

キーワード: 軽量細骨材, せん断, RC 梁部材, 破壊モード

1. はじめに

人工軽量骨材は、構造物の軽量化を目的として、高層建築物のスラブや外壁材に主に使用されてきた。しかし、近年では橋梁の桁や床版、橋脚等の土木構造物にも徐々に使用されており、使用用途が広がってきている。

しかし、軽量骨材コンクリートの土木構造物への適用には様々な問題があり、引張強度・せん断耐力・付着強度等が普通コンクリートと比較して劣るとされている。特にせん断耐力に関しては、同一圧縮強度において、細骨材・粗骨材全てに軽量骨材を使用した軽量骨材コンクリートは、普通コンクリートのせん断耐力の70%とするとコンクリート標準示方書（構造性能照査編）に規定されている¹⁾。一方、ヨーロッパでは、軽量骨材コンクリートのせん断耐力の低下は、コンクリートの単位容積質量の関数である低減係数で表現する方法を検討している²⁾。

また、最近の土木業界の傾向として、高強度材料の使用が多くなってきている。軽量骨材コンクリートは、細骨材・粗骨材共に軽量骨材を使用する「軽量コンクリート2種」と、普通細骨材と軽量粗骨材を使用した「軽量コンクリー

ト1種」の2種類が存在する。しかし、軽量粗骨材は、普通粗骨材に比べ骨材強度が十分でないため、軽量骨材コンクリートは、圧縮強度が約60N/mm²程度で頭打ちとなることが知られている³⁾。

そこで、本研究では軽量粗骨材を使用せず、軽量細骨材と普通粗骨材を使用したコンクリート（以下、軽量細骨材コンクリートと称す）に着目した。供試体は、実構造物の1/4モデルとなるRC梁部材を作製し、比較水準として、コンクリートの種類、コンクリートの圧縮強度、せん断スパン比を選択した。試験は、RC梁の曲げせん断試験を実施した。その結果を踏まえ、普通コンクリートと軽量コンクリート1種との比較により、軽量細骨材コンクリートのせん断特性を明らかにした。

2. 試験概要

2.1 使用材料

試験に使用した材料及び基本物性を表-1に示す。軽量骨材はプレウェットティングしたものを使用した。高性能減水剤（SP）の使用により、練り上がりのスランプを18±2(cm)となるよう

*1 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 建設技術G 工修（正会員）

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 工博（正会員）

*3 九州大学 工学府 建設システム工学専攻 工修（正会員）

*4 太平洋マテリアル（株） 開発研究所 建設技術Gリーダー 工修（正会員）

表－１ 使用材料一覧

材料	記号	種類	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16(g/cm ³), 比表面積 3300(cm ² /g)
細骨材	S _N	普通細骨材 (小笠産陸砂)	表乾密度 2.61(g/cm ³), F.M2.64
	S _L	軽量細骨材 (人工軽量骨材)	絶乾密度 1.70(g/cm ³), 吸水率 14%, F.M2.73
粗骨材	G _N	普通粗骨材 (岩瀬産碎石)	表乾密度 2.63(g/cm ³), F.M6.09
	G _L	軽量粗骨材 (人工軽量骨材)	絶乾密度 1.25(g/cm ³), 吸水率 28%, F.M6.39
混和材	LS	石灰石微粉末	密度 2.70(g/cm ³), 比表面積 3960(cm ² /g)
	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AF	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

表－２ コンクリートの配合表

記号	配合強度 (N/mm ²)	石灰石 微粉末 置換率 (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤		
					W	C	LS	S _N	S _L	G _N	G _L	SP C×(%)	AF C×(%)
普通 コンクリート	25	64	83	48	165	199	190	879	-	960	-	1.1	0.2
	40	42	60			274	126					1.5	
	55	21	47			349	62					1.8	
軽量1種 コンクリート	40	30	56		165	293	109	879	-	-	584 (365)	1.1	
	55	0	39			421	0					1.3	
軽量細骨材 コンクリート	25	46	72		165	228	165	-	653 (337)	960	-	1.1	
	40	23	51			324	83					1.5	
	55	0	39			421	0					1.8	

に調整した。空気量はその増減による強度のばらつきを小さくするため、消泡剤 (AF) を用い 2.0%以内に設定した。

2.2 コンクリートの配合

各種コンクリートの配合を表－２に示す。表中の括弧は、軽量骨材の絶対容積を示す。石灰石微粉末 (LS) は、コンクリート中の粉体量が同じとなるように配合した。粉体量が全て等しいため、s/a を同じにすることで、粉体・細骨材・粗骨材の体積比は全て同一となっている。

2.3 比較水準

表－３に比較水準を示す。比較水準は、コンクリートの種類、コンクリートの圧縮強度、せん断スパン比となっている。コンクリートの種類は、普通コンクリートと比較することで、その耐力差を確認でき、またせん断スパン比は、

表－３ 比較水準

				せん断スパン比	
				3.0	2.0
コンクリートの種類	普通コン	25	配合強度	NSNG-25-B	NSNG-25-S
	軽量細骨材			LSNG-25-B	LSNG-25-S
	軽量1種			—	—
	普通コン	40		NSNG-40-B	NSNG-40-S
	軽量細骨材			LSNG-40-B	LSNG-40-S
	軽量1種			NSLG-40-B	NSLG-40-S
	普通コン	55		NSNG-55-B	NSNG-55-S
	軽量細骨材			LSNG-55-B	LSNG-55-S
	軽量1種			NSLG-55-B	NSLG-55-S

せん断引張破壊とせん断圧縮破壊 (ディープビーム形状) となるように、それぞれ 3.0 と 2.0 を選択した。

2.4 強度試験結果

表－４にコンクリートの強度試験結果を、表－５に鉄筋の強度試験結果を示す。多少のばら

表-4 コンクリート強度試験結果（左：圧縮強度 右：引張強度）単位：N/mm²

				せん断スパン比	
				3.0	2.0
コンクリートの種類	普通コン	配合強度	25	24.4	24.9
	軽量細骨材			25.6	23.7
	軽量1種			—	—
	普通コン			41.7	42.7
	軽量細骨材		40	46.4	37.9
	軽量1種			37.8	42.4
	普通コン			52.8	59.6
	軽量細骨材		55	51.0	53.7
	軽量1種			54.8	55.9

				せん断スパン比	
				3.0	2.0
コンクリートの種類	普通コン	配合強度	25	2.2	2.3
	軽量細骨材			2.2	2.3
	軽量1種			—	—
	普通コン		40	3.3	3.1
	軽量細骨材			3.3	3.1
	軽量1種			3.4	2.6
	普通コン		55	3.6	3.7
	軽量細骨材			3.5	3.7
	軽量1種			3.3	3.4

表一 5 鋼材試驗結果

つきはあるものの、目標強度に近い値となっていることが分かる。

2.5 供試体概要

図-1に供試体概要(せん断スパン比3.0の試験の場合)を示す。供試体は全長1600(mm)で、主鉄筋による端部破壊を防ぐために、主鉄筋にフックを設け、端部に帯鉄筋を設置し主鉄筋を固定した。載荷は幅100(mm)、厚さ30(mm)の金属板を載荷装置との間にはさんで行なうことにより、左右均等に力の伝達が行なわれるようにした。また支持板は、供試体が固定しないようにローラー支持とした。

2.6 試験方法

梁の載荷方法は、せん断スパン(a)=516 と 344(mm), 有効高さ(d)=172(mm)とし、せん断スパン比 3.0 と 2.0 となるように設置し、左右対称 1 点載荷により行なった。載荷は、供試体中央に油圧式の載荷装置により行ない、ロードセルにより、供試体中央荷重を測定した。また、供試体中央下縁に変位計を設置し供試体中央変位

(※1：フックつきのもの ※2：フックなしのもの)

	降伏点	引張強さ	伸び	曲げ試験
	(N/mm ²)		(%)	
D6	323	504	26	Good
D10※1	404	572	26	Good
D10※2	378	557	25	Good



写真-1 試験状況

を測定した。ただし、載荷位置真下の変位計で測定した値を中央変位とするが、荷重が偏心した場合、中央から 160mm 左右に離れた変位計の値の平均値を中央変位とした。せん断スパン比 2.0 の試験を行なう場合は、支持板を移動するこ

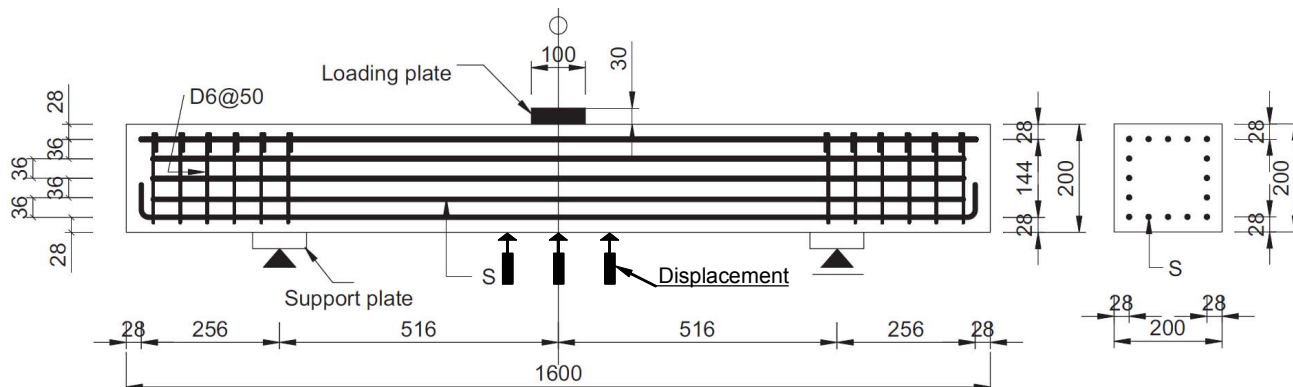


図-1 供試体概要

とにより試験を行なった。曲げ／せん断試験状況を写真－１に示す。

3. せん断試験結果

3.1 供試体ひび割れ状況

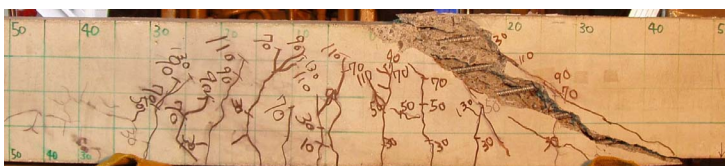
写真－２～７に载荷終了後の供試体ひび割れ状況を示す。写真は、圧縮強度 40N/mm^2 でせん断スパン比が 3.0 と 2.0 のものを示している。写真中に示している数値は、ひび割れ進展時の供試体中央荷重の値である。

写真より、せん断スパン比が 3.0 のものは片面でのみだがせん断引張破壊を生じており、主鉄筋のダウエル効果が目視で確認できるほどひび割れ幅が大きいことが分かる。しかし、せん断スパン比が 2.0 のものは、せん断圧縮破壊を生じており、载荷位置であるコンクリート上縁の圧壊が確認できた。コンクリートの種類が及ぼす

影響は、曲げひび割れの進展の違いが顕著に現れており、曲げひび割れの数が、普通コンクリート、軽量細骨材コンクリート、軽量 1 種コンクリートの順に小さくなっていることが分かる。これは、離散ひび割れ型と局部集中ひび割れ型の違いによるもので、静弾性係数の違いにより生じているものと考えられる。斜めひび割れの状況は、コンクリートの種類により違うということは確認できなかった。

3.2 中央荷重－中央変位関係

表－６に中央荷重最大値結果とせん断破壊モード結果、図－２～図－４に供試体中央荷重－中央変位関係を示す。表より中央荷重最大値は、低強度 (25N/mm^2) では大きな差はないことが分かる。しかし、中強度 (40N/mm^2) では、供試体中央荷重が、普通コンクリート、軽量細骨材コンク



写真－２ NSNG-40-B ひび割れ状況



写真－３ NSNG-40-S ひび割れ状況



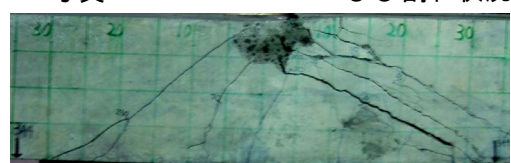
写真－４ LSN-40-B ひび割れ状況



写真－５ LSN-40-S ひび割れ状況



写真－６ NSLG-40-B ひび割れ状況



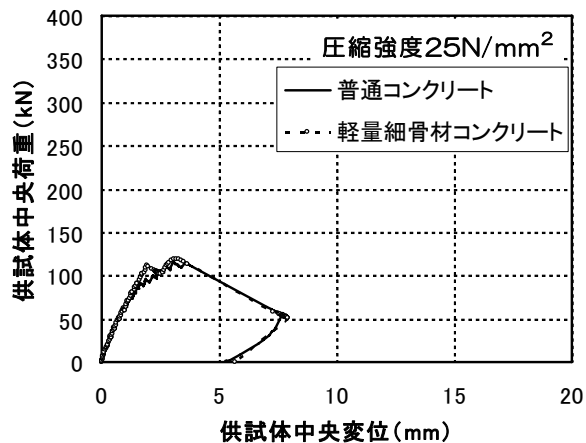
写真－７ NSLG-40-S ひび割れ状況

表－６ 中央荷重最大値結果とせん断破壊モード結果

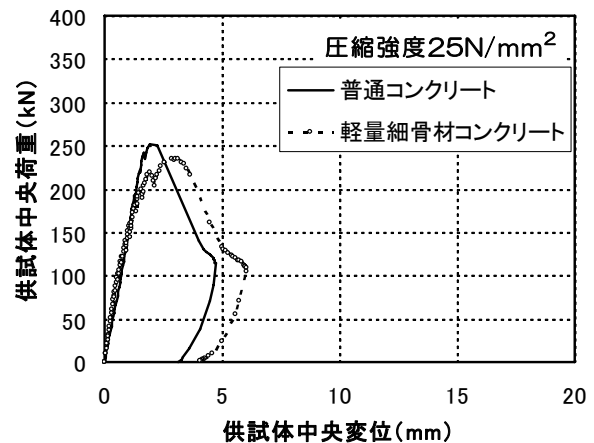
			せん断スパン比			
			3.0		2.0	
			最大値(kN)	破壊モード	最大値(kN)	破壊モード
コンクリートの種類	普通コン 軽量細骨材 軽量1種	25	115.3	せん断引張破壊	251.2	せん断圧縮破壊
			119.4	せん断引張破壊	235.0	せん断圧縮破壊
			—	—	—	—
	普通コン 軽量細骨材 軽量1種	40	155.5	せん断引張破壊	321.0	せん断圧縮破壊
			145.0	せん断引張破壊	279.5	せん断圧縮破壊
			132.5	せん断引張破壊	254.8	せん断圧縮破壊
	普通コン 軽量細骨材 軽量1種	55	156.0	せん断引張破壊 (せん断耐力頭打ち)	335.7	曲げ降伏先行型 せん断破壊
			189.1	せん断引張破壊	325.0	せん断圧縮破壊 (せん断耐力頭打ち)
			161.4	せん断引張破壊	315.7	せん断圧縮破壊

リート, 軽量1種コンクリートの順に小さくなっており, 普通コンクリートに比べ軽量細骨材コンクリートは約 90%に低下, 軽量1種コンクリートは約 80%に低下となっていることが分かる。これは, 骨材破壊の有無が要因であると考えられ

る。つまり, 低強度では, 骨材強度の方がコンクリート中のモルタル強度よりも大きいため, 骨材破壊が発生せず, せん断耐力が同等となったと考えられるが, 中強度では, 骨材強度がモルタル強度と同等程度なので, 骨材破壊が発生し, せん断

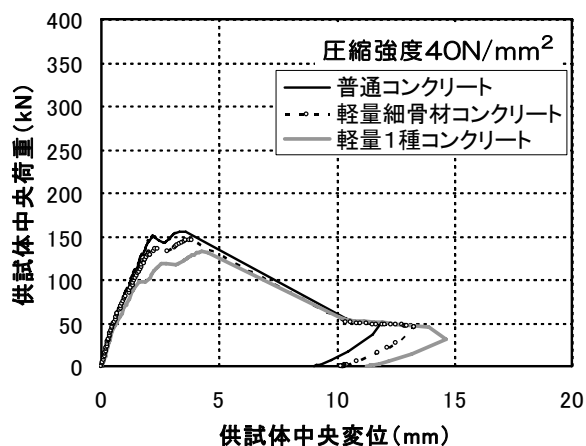


(a) せん断スパン比 3.0 の供試体

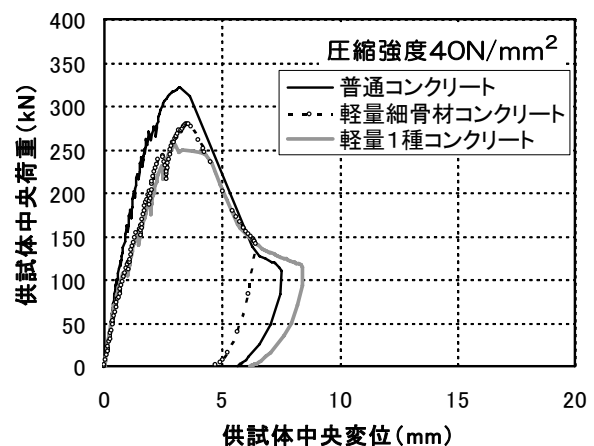


(b) せん断スパン比 2.0 の供試体

図-2 供試体中央荷重—中央変位関係 (圧縮強度 25N/mm²)

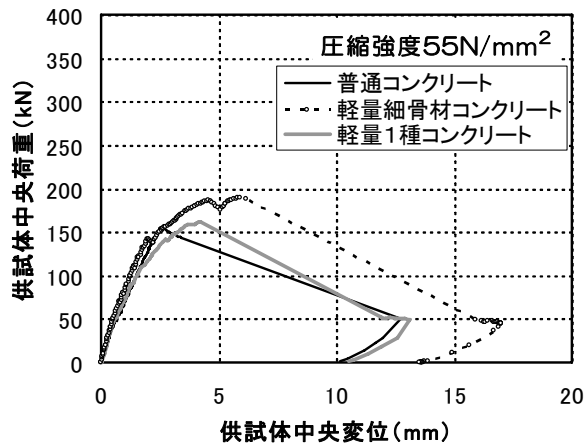


(a) せん断スパン比 3.0 の供試体

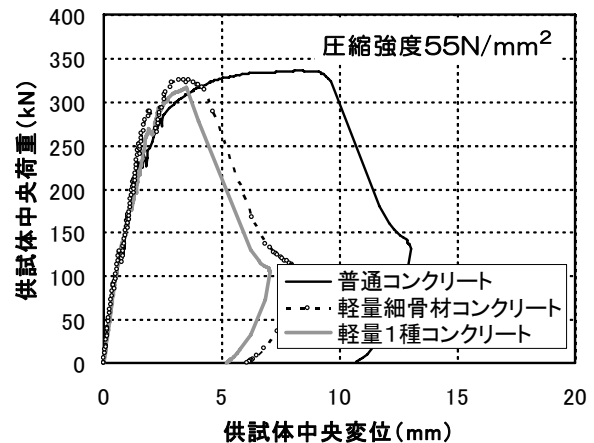


(b) せん断スパン比 2.0 の供試体

図-3 供試体中央荷重—中央変位関係 (圧縮強度 40N/mm²)



(a) せん断スパン比 3.0 の供試体



(b) せん断スパン比 2.0 の供試体

図-4 供試体中央荷重—中央変位関係 (圧縮強度 55N/mm²)

耐力に差が生じたと考えられる。高強度（ 55N/mm^2 ）では、せん断スパン比 3.0 の軽量細骨材コンクリートが普通コンクリートの最大荷重を大きく上回る結果となっているが、ひび割れ状況が他の供試体と違い、片面破壊ではなく両面破壊を生じたためだと考えられる。また、高強度の供試体に関しては、せん断耐力の頭打ち現象が発生しており、普通コンクリートでは、供試体中央荷重の最大値が増加していないことが分かる。さらに、普通コンクリートでせん断スパン比 2.0 の供試体は、供試体最下縁の主鉄筋が降伏し、その後、断面耐力が低下することによりせん断破壊を生じる曲げ降伏先行型せん断破壊を生じており、この現象は図-4 より推察できる。上記より、高強度域の軽量骨材コンクリートは、同一強度における普通コンクリートの水準で生じたせん断耐力の頭打ち現象により、普通コンクリートと同程度のせん断耐力まで追いつくことが分かる。しかし、高強度域に関しては、更なる検討が必要であると考えられる。

6. まとめ

人工軽量骨材コンクリートのせん断特性を明らかにする目的で、人工軽量骨材を用いた RC 梁のせん断試験を実施した。それにより得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) せん断スパン比の違いは、コンクリートの種類によらずせん断破壊モードに影響を与える。
- (2) 各種コンクリートの静弾性係数の違いにより、ひび割れの進展状況が大きく違う。
- (3) 圧縮強度が 25N/mm^2 程度の低強度では、軽量細骨材を用いた軽量細骨材コンクリートのせん断特性は、普通コンクリートとほとんど変わらない。
- (4) 圧縮強度が 40N/mm^2 程度の中強度では、せん断耐力の大小は、普通コンクリート、軽量細骨材コンクリート、軽量 1 種コンクリートの順に小さくなっており、普通コンクリートに比べ軽量細骨材コンクリートのせん断耐力は約 90%に低下、軽量 1 種コンクリートのせん断耐力は約 80%に低下となった。これは、軽量骨材の骨材破壊の有無が影響していると考えられる。
- (5) 圧縮強度が 55N/mm^2 程度の高強度では、普通コンクリートと軽量細骨材コンクリートの供試体に、せん断強度の頭打ち現象が発生した。
- (6) 高強度域の軽量骨材コンクリートは、同一強度における普通コンクリートの水準で生じたせん断耐力の頭打ち現象により、普通コンクリートと同程度のせん断耐力まで追いつく。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002
- 2) J. Walraven：Design of structures with lightweight concrete：Present status of revision of EC-2，pp.57-70，2000.6
- 3) 石川寛範，藤木栄一，成川史春：軽量細骨材と碎石を用いたコンクリートの基礎的研究，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，2000.8
- 4) 土屋智史，三島徹也，前川宏一：高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価，土木学会論文集，No.697/V-54，pp.65-84，2002.2
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いない RC 梁のせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 6) 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.3，2001
- 7) 石川雄康，國分勝郎，森大介，岡本享久：高性能軽量骨材を用いたコンクリートの破壊挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.725/V-58，pp.1-13，2003.2