

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

神戸市立工業高等専門学校 ○小寺 一樹
 神戸市立工業高等専門学校 博(工) 水越 睦視
 日立造船(株) 紙田 聖也
 (株)安部日鋼工業 正会員 横畑 勝彦

キーワード：軽量コンクリート，高強度，人工軽量骨材，せん断耐力

1. はじめに

年々大型化するPC構造物に軽量コンクリートを使用することができれば，自重の低減が可能となる。この場合，PC構造物の優位性を最大限に発揮するには，軽量コンクリートの高強度化が求められ，圧縮強度が 40N/mm^2 を超えることが想定される。しかし，JIS A 5308に規定されている軽量コンクリートの呼び強度値は圧縮強度で 40N/mm^2 までであり，高強度域での各種強度特性に関する報告も少なく，実構造物への適用を検討するに際してはさらなるデータの蓄積とPC構造に先立ちRC部材としての挙動を把握す必要がある。そこで，本研究では呼び強度値が圧縮強度で 45N/mm^2 相当の高強度軽量コンクリート1種をレディーミクストコンクリート工場の実機で製造し，各種強度試験とRC梁の曲げせん断試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に使用した材料およびそれらの物理的性質を表-1に示す。また，実験に使用したコンクリートの示方配合を表-2に示す。細骨材はワーカビリティの向上を目的に砕砂の容積の30%を海砂で置換して使用した。コンクリートの練混ぜは実機プラントの二軸強制練りミキサで 1m^3 を練り混ぜ，工場内で排出し，フレッシュ性状を確認したのちに供試体を作製した。

表-1 使用材料

水	工業用水(密度: 1.00cm^3)
セメント	普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm^3)
細骨材①	佐賀県唐津沖産 海砂(表乾密度: 2.57g/cm^3 . 粗粒率:2.60. 吸水率:1.45%)
細骨材②	兵庫県家島産 砕砂(表乾密度: 2.57g/cm^3 . 粗粒率:2.90. 吸水率:1.55%)
粗骨材	構造用人工軽量骨材 (絶乾密度: 1.27g/cm^3 . 粗粒率:6.40. 最大寸法:15mm. 実績率:64.0%. 含水率:30.7%)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-2 コンクリートの示方配合

水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m^3)					
		水	セメント	海砂	砕砂	粗骨材	混和剤
36	46.5	185	514	504	216	409	4.49

目標スランプ23cm，目標空気量5%に対して，練り混ぜ直後のスランプは22.5cm，空気量5.0%と目標範囲内であり，コンクリート温度は 30.1°C であった。また，コンクリートの単位容積質量は約 1900kg/m^3 で軽量コンクリート1種の単位容積質量の範囲内であった。

2.2 供試体および試験項目・方法

2.2.1 高強度軽量コンクリートの各種強度試験

表-3 各種強度試験の計画

各種強度試験の計画を表-3に示す。

ここで、供試体の脱型は2日後に行い、脱型までは現場にて打設面をラップで封緘して養生し、脱型後は供試体を試験材齢まで実験室内にて気中および水中にて養生した。ただし、水中養生は現場水中養生をイメージし、室内養生槽の温度制御は行わなかった。

試験項目	養生方法	試験材齢(日)	準拠した試験方法
圧縮強度 静弾性係数	水中	7. 14. 23. 28. 56. 84	JIS A 1149
	気中	7. 14. 23. 28. 56. 84	
割裂引張強度	水中	28	JIS A 1113
	気中	28	
曲げ強度	水中	28	JIS A 1106
	気中	28	

2.2.2 高強度軽量コンクリートRC梁の載荷試験

載荷試験に用いたRC梁の概要を表-4に、D16-B梁の形状寸法・配筋と載荷状況を図-1に示す。RC梁はD16-B, D19-B, D16-S, D19-Sの4種類であり、各種類で2体、合計8体とした。実験要因は、主鉄筋比のみとし、形状寸法、せん断スパン有効高さ比(a/d)、有効高さ、鉄筋とコンクリートの強度特性は一定とした。また、D16-B, D19-Bは、曲げ耐力に対するせん断耐力の比であるせん断余裕度がD16-Bで2.0程度、D19-Bで1.57程度とせん断破壊よりも曲げ引張破壊が先行するように設計した。また、D16-S, D19-Sには、せん断補強鉄筋であるスターラップは配置せず、せん断余裕度がD16-Sで0.8程度、D19-Sで0.7程度とし、せん断破壊を呈するように設計した。

載荷方法は、図-1に示す4点对称載荷とした。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、全て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。なお、D19-B, D19-Sは図-1に示すD16-Bはりと有効高さのみが異なり、D16-SとD19-Sはスターラップが配置されていない以外はBシリーズと同じである。

表-4 載荷試験に用いた RC 梁の概要

梁の種類		想定される破壊形式	せん断スパン a (mm)	有効高さ d (mm)	a/d	梁幅 b (mm)	引張主鉄筋	スターラップ
Bシリーズ	D16-B	曲げ引張	440	162.0	2.7	150	D16-2	D10 @110mmピッチ
	D19-B			160.5			D19-2	
Sシリーズ	D16-S	斜めせん断		162.0			D16-2	なし
	D19-S			160.5			D19-2	

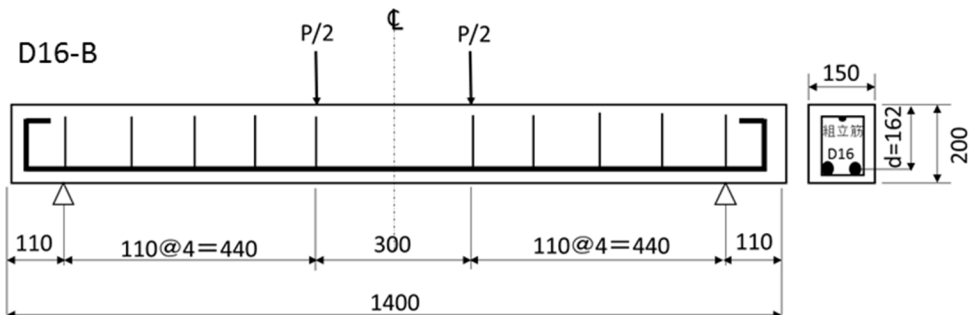


図-1 RC 梁の形状寸法・配筋と載荷状況 (D16-B)

3. 実験結果および考察

3.1 高強度軽量コンクリートの強度特性

実施した強度試験の結果のまとめを表-5に示す。試験材齢28日の圧縮強度は気中養生で51.1N/mm²，水中養生で50.2N/mm²であった。軽量コンクリートJIS規格の呼び強度の上限値40N/mm²と比べると高強度であるといえる。

表-5 強度試験の結果のまとめ

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)		割裂引張強度 (N/mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)	
	気中養生	水中養生	気中養生	水中養生	気中養生	水中養生	気中養生	水中養生
7	42.7	41.8	20.3	19.5	-	-	-	-
14	47.0	45.7	21.1	20.2	-	-	-	-
23	51.2	50.5	21.5	22.1	-	-	-	-
28	51.1	50.2	21.5	21.4	2.18	3.23	3.57	5.55
56	56.4	52.8	20.1	23.2	-	-	-	-
84	58.6	54.4	21.0	23.8	-	-	-	-

普通コンクリートでは一般的に気中養生した場合の圧縮強度は、水中養生の場合に比べて小さくなるが、気中養生の方が若干大きい結果となっていることがわかる。これは、人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、軽量骨材中に吸水している水分がコンクリート硬化後にセメントペースト中に浸出し、セメントの水和反応に必要な水が、長時間にわたって補われるためであると考えられる¹⁾。静弾性係数は気中養生の場合、圧縮強度に関係なくほぼ一定の値となり、水中養生では材齢の経過に伴って若干増加する結果となった。表-5より、養生方法が圧縮強度に及ぼす影響は小さいが、引張強度および曲げ強度に及ぼす影響は比較的大きく、気中養生では水中養生に比べて割裂引張強度で32.5%、曲げ強度で35.7%の強度低下が認められた。これは、軽量コンクリートでは、軽量骨材中に含まれる水分が普通骨材よりも多く、コンクリート内部の乾燥が遅れるため、普通コンクリートに比べて表面部と中心部との乾燥収縮差が大きくなり、表面部に生じる引張応力が大きくなるためと考えられている²⁾³⁾。

3.2 高強度軽量コンクリートを用いたRC梁の曲げ耐力

曲げ破壊を想定したRC梁(Bシリーズ)の降伏荷重と終局荷重(曲げ耐力)の実験値(最大荷重)と計算値の比較を表-6に示す。全てのD16-B, D19-B梁において、典型的な曲げ引張破壊を呈し、主鉄筋が降伏したのちに上縁コンクリートが圧壊した。ここで、降伏荷重の計算は通常のRC理論式により求め、終局荷重は土木学会コンクリート標準示方書の等価応力ブロック法により算定した。また、計算に用いたコンクリートの材料特性値は、載荷試験時の値で圧縮強度56.7N/mm²、ヤング係数20.8kN/mm²であり、主鉄筋(SD345)の材料特性値はD16の降伏強度が405N/mm²、D19の降伏強度は386N/mm²で、D16, D19ともにヤング係数は200kN/mm²である。表-6より、降伏荷重は、一般に用いられているRC理論により算定でき、計算値と実験値はほぼ一致した。終局荷重も通常の等価応力ブロック法で算定でき、実験値に対して10%程度、安全側の結果となった。

表-6 降伏荷重と終局荷重の実験値と計算値の比較 (Bシリーズ梁)

梁の種類	供試体名	降伏荷重(kN)				終局荷重(kN)			
		①実験値	②計算値	①/②	平均	①実験値	②計算値	①/②	平均
D16-B	D16-B-1	105.1	101.6	1.03	1.01	121.8	110.3	1.10	1.11
	D16-B-2	100.1	101.6	0.99		122.9	110.3	1.11	
D19-B	D19-B-1	120.1	135.3	0.89	0.95	158.9	146.0	1.09	1.08
	D19-B-2	135.3	135.3	1.00		156.6	146.0	1.07	

3.3 高強度軽量コンクリートを用いたRC梁のせん断耐力

せん断破壊を想定したRC梁(Sシリーズ)の斜めひび割れ発生荷重と最大荷重およびせん断耐力の計

算値(せん断破壊荷重)を表-7に示す。ここで、RC梁のせん断耐力の算定には、土木学会のスターラップを用いない棒部材のせん断耐力式の基である二羽らのせん断耐力式を用いた⁴⁾。計算に用いたコンクリートの材料特性値は、曲げ耐力の算定と同じ値を用いた。表より、斜めひび割れ発生荷重は、せん断破壊荷重の計算値の76~89%と低くなっている。一方、実験で得られた最大荷重とせん断破壊荷重の計算値は、ほぼ一致している。したがって、せん断破壊時の最大荷重は、普通コンクリートを用いたRC梁のせん断耐力算定式で推定されるものと考えられる。

表-7 斜めひび割れ発生荷重と最大荷重およびせん断耐力の計算値 (S シリーズ梁)

梁の種類	供試体名	斜めひび割れ発生荷重(kN) ①実験値	最大荷重(kN)		せん断破壊荷重(kN) ③計算値	実験値/計算値		実験値/計算値	
			②実験値	③計算値		①/③	平均	②/③	平均
D16-S	D16-S-1	70.0	87.1	87.7	0.80	0.84	0.99	1.03	
	D16-S-2	77.9	94.2	87.7	0.89		1.07		
D19-S	D19-S-1	75.1	90.8	98.4	0.76	0.79	0.92	1.06	
	D19-S-2	80.0	117.9	98.4	0.81		1.20		

しかしながら、図-2に示すようにD19-S-2を除く全てのRC梁で斜めひび割れ発生直後に約15%の荷重低下が認められ、そののちに再上昇してせん断破壊を呈したことから、普通コンクリートのせん断耐力算定式をそのまま用いることに対しては慎重になる必要がある。また、現行の土木学会コンクリート標準示方書による設計では、軽量コンクリートを用いた場合のせん断耐力は普通コンクリートに対して一律に70%低下させることになっている。しかし、これでは安全側の評価になりすぎることも考えられ、低減係数の妥当性についても検討する必要がある。

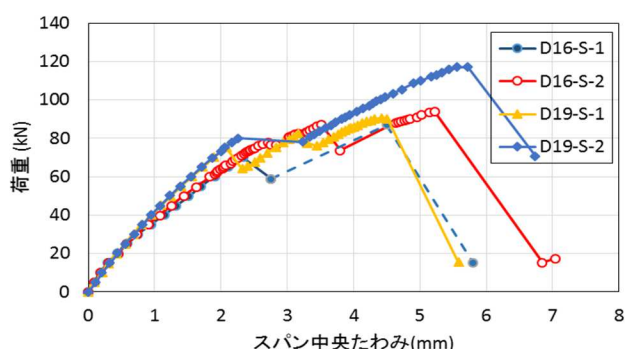


図-2 荷重とたわみの関係 (D16-S, D19-S)

4. まとめ

本実験により得られた高強度軽量コンクリートに対する特記すべき事項について以下に述べる。

- 1) 気中養生した場合、水中養生に比べて引張で32.5%、曲げで35.7%の大きな強度低下が生じる。
- 2) RC部材の曲げ降伏荷重および曲げ耐力は、普通コンクリートと同様のRC理論により算定できる。
- 3) RC部材のせん断耐力は、せん断スパン有効高さ比 $a/d=2.7$ では、斜めひび割れ発生と同時に破壊に至らず、耐荷力が再上昇してせん断破壊を呈するといった現象がみられた。今後、 a/d を変化させた実験を行い、せん断破壊形式と a/d の関係を把握し、二羽らのせん断耐力式⁴⁾の適用性についてさらに検討をすすめたい。

参考文献

- 1) 笠井芳夫：軽量コンクリート，pp.73-91，技術書院，2002
- 2) J.A.Hanson：Effect of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete，J.ACI，Vol-65，pp.535-543，1968
- 3) ACI Committee 213：Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete，J.ACI，Vol.64，pp.433-439，1967
- 4) 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