

論文 人工超軽量骨材コンクリートの物性に関する基礎的研究

池上浩太郎*1・尼崎 省二*2

要旨：本研究は、比重 0.5～0.9 の人工超軽量骨材を構造コンクリート用骨材として適用することを目的とし、天然骨材を全部人工超軽量骨材に置換した場合のコンクリートの基礎的な諸物性を調べたものである。その結果、コンクリート比重の低下に伴い強度、弾性係数、弾性波伝播速度も低下するが、比重 1.2 程度で圧縮強度 30～35MPa を得られた。また梁供試体の曲げ破壊試験を行い、破壊性状についての検討をしたが、普通コンクリートとは異なった破壊をすることがわかった。

キーワード：人工超軽量骨材, 人工超軽量骨材コンクリート, 強度, 比重, 破壊性状

1. はじめに

近年コンクリート構造物は、超大スパン橋梁、多層高架道路橋、超高層ビルなど巨大化、高層化が進んでいる。それに伴いコンクリート構造部材の断面は複雑化するとともに自重も膨大なものになりつつある。従来、コンクリートは耐久性、経済性に優れた構造材料であるが、比強度が小さいという難点がある。この難点を克服する手段の一つに、“軽い弱い”という一般的通念を打破し、“軽くて強いコンクリートをつくる”ことがある。コンクリートの軽量化を最も効果的に行える方法の一つに軽量骨材を用いるという方法があり、一般的な軽量人工骨材は比重の小さいもので 1.2 程度であり、それを使用した軽量コンクリートも軽いもので単位容積質量が 1.5t/m³ 程度である。

本研究では、最近新たに開発された膨張粘土を用いた比重 0.45～0.9 の人工超軽量骨材を使用した単位容積質量 1.1～1.2t/m³ のコンクリート供試体を作製し、その基礎的な物性を調べるとともに構造用軽量コンクリート骨材としての適用性及び RC 梁供試体の破壊性状について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び混和剤

本実験に使用した人工超軽量骨材は、膨張粘土を造粒し焼成したもので、内部に無数の微小独立気泡を有する球形に近い骨材である。人工超軽量骨材の化学組成を表-1 に、諸物性を表-2 に示す。

本実験に用いた人工超軽量骨材は主成分が SiO₂ であるため、化学的な付着があると考えられ、また表面は滑らかである。

細骨材は図-1 に示すように JIS A 5002 (構造用軽量コンクリート骨材) の粒度分布の範囲に可能な限り入るよう混合して使用した。

表-1 人工超軽量骨材の化学組成

組成成分	質量 (%)
SiO ₂	72.0～78.0
Al ₂ O ₃	12.0～17.0
CaO+MgO	0.8～1.6
K ₂ O+Na ₂ O	5.0～10.0

表-2 人工超軽量骨材の諸物性

	N-1	N-2	N-3	G-3
粒径 (mm)	4.75 ～2.36	2.36 ～1.18	1.18 ～0.59	9.50 ～4.75
実積率 (%)	60.31	61.16	62.56	58.28
絶乾比重	0.62	0.68	0.86	0.87
24h 吸水率 (%)	7.0	6.1	6.5	5.3
骨材修正係数* (%)	0.10	0.11	0.43	0.75

*: 容積法による

*1 ピーシー橋梁株式会社 工修 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

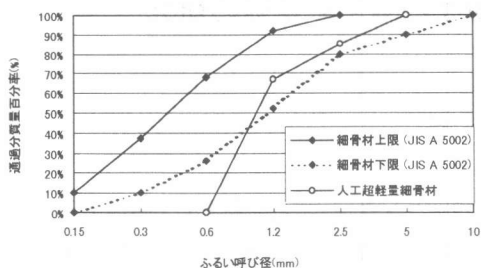


図-1 人工超軽量細骨材の粒度分布

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。予備実験より、締固め可能で材料分離を抑制するにはスランプフローが45~55cmの範囲にする必要があり、消泡剤を用いても空気量は6~7%より低減させられないことが判明した。そこで本実験ではフレッシュコンクリートのスランプフローが50±5cm、空気量6~7%の範囲になるよう高性能AE減水剤(ポリカルボン酸・エーテル系の複合体)を用いるとともに材料分離を抑制するために分離低減剤(水溶性セルロースエーテル)を使用した。

2.2 水セメント比が人工超軽量骨材コンクリートの諸物性に与える影響(実験1)

水セメント比の変化が、人工超軽量骨材コンクリートの諸物性に与える影響を調べるために、単位水量が一定でW/C = 35, 40, 45%のコンクリート供試体を作製し諸物性試験を行った。表-3に示方配合を示す。

なお、人工超軽量骨材は絶乾状態で使用し、24時間吸水量に相当する水を補正水として単位水量に加えた。練混ぜは、強制練りミキサーを用い30秒間空練り後、2分間練り混ぜた。

供試体は圧縮試験及び1/3割線弾性係数試験用にφ10cm×20cm、引張試験用にφ15cm×15cm、曲げ試験及び動弾性係数試験用に10cm×10cm

表-3 示方配合

記号	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	N-1	N-2	N-3	G-3
WC35	35	175	515	27	32	160	286
WC40	40		438	28	33	168	309
WC45	45		389	29	34	173	310

×40cmを作製し、試験材齢に達するまで水中養生とした。圧縮強度試験はJIS A 1108、引張強度試験はJIS A 1113、曲げ強度試験はJIS A 1106に準じて行った。弾性波伝播速度は、飽増幅式による超音波試験機を用いて測定した。コンクリート比重は、圧縮試験用供試体を水からあげた直後の質量から算定した。

2.3 人工超軽量骨材の品質がコンクリート物性に与える影響(実験2)

本実験に用いた人工超軽量粗骨材は試作段階のもので、焼成が過多で膨張しすぎている骨材、あるいは焼成不十分で粒径が小さく表面が滑らかな骨材が含まれ品質は安定していない。そのため24時間浸水後、水に浮いている骨材を焼成良好品、沈んでいる骨材を焼成不良品として選別した。焼成不良品の10%破砕値は約95kN、良好品の10%破砕値は約100kNであった。焼成不良品の比重、吸水率はそれぞれ0.89, 4.5%であった。なお、焼成不良品には浸水直後に沈下したものと浸水後24時間までに沈下した骨材が含まれている。焼成良好品と焼成不良品を10:0, 5:5, 0:10(体積比)で混合し供試体を作製した。その示方配合を表-4に示す。

表-4 示方配合

記号	単位量 (kg/m ³)						
	W	C	N-1	N-2	N-3	G-3 良	G-3 不良
(10:0)	175	438	28	33	168	309	0
(5:5)						155	179
(0:10)						0	358

2.4 超軽量RC梁の曲げ載荷試験(実験3)

超軽量コンクリートの部材としての挙動を調べるため、RC梁供試体による曲げ載荷試験を行い、同程度の圧縮強度を有する普通骨材コンクリート梁(普通RC梁)と比較、検討した。供試体は図-2に示す長方形単鉄筋断面を有する240mm×150mm×2000mmの梁とした。配合は表-3のWC40とし、主鉄筋にはSD295のD16を用い、鉄筋比は1.10%とした。組立鉄筋及びス

ターラップは同じく $\phi 9\text{mm}$ の丸鋼とし、スターラップは10cm間隔で配した。载荷は図-3に示すように $a/d = 3.6$ で行った。

供試体は打設48時間後に脱型し、1週間散水養生した後、気中養生とした。

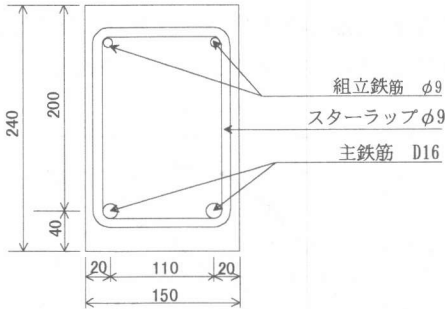


図-2 梁断面図

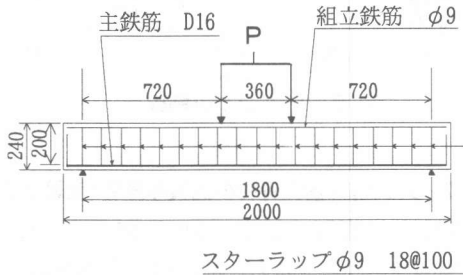


図-3 梁側面図

3. 実験結果及び考察

3.1 水セメント比の影響(実験1)

実験結果を表-5に示す。WC35, WC40, WC45の28日圧縮強度を比較すると、WC35とWC40の間にはほとんど差がなく、WC45だけが低い値になっている。一般に、コンクリートの圧縮強度

表-5 コンクリートの物性試験結果(実験1)

記号	WC35	WC40	WC45	
ρ_c	1.20	1.17	1.11	
3days				
fc(MPa)	28.3	27.5	17.2	
7days				
fc(MPa)	28.6	28.8	21.1	
28days				
	fc(MPa)	28.7	29.8	24.6
	ft(MPa)	1.67	2.25	1.41
	fb(MPa)	4.56	3.37	3.95
	Vc(m/s)	3390	3480	3330
E_c (GPa)	23.8	18.7	17.9	
E_d (GPa)	11.6	12.1	9.96	

は水セメント比の低下に伴い増加するが、軽量コンクリートの場合、W/Cがある値以下になるとその影響はほぼなくなるといわれる¹⁾。従ってその影響がなくなる水セメント比が本実験の骨材の場合にはW/C=40%であると推測できる。また本実験で使用した人工超軽量骨材では、最大圧縮強度は30MPa程度と考えられる。

WC40とWC45の圧縮強度は材齢28日まで増進しているが、WC35は材齢3日以降の圧縮強度の増進はない(図-4)。これは、W/C=35%の材齢3日の時点でモルタル強度が骨材の強度を上回り、骨材の破壊によりコンクリートが破壊するためと考えられる。つまり本実験で用いた人工超軽量骨材コンクリートは長期強度があまり望めないことになる。このことは、供試体破壊面の粗骨材がすべて破断していたことから明らかである。

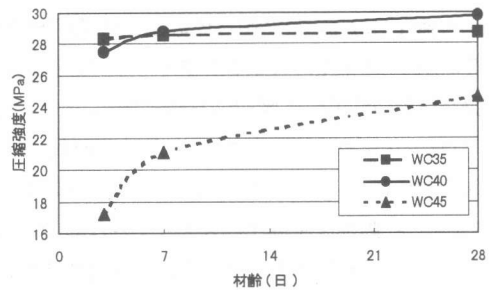


図-4 材齢と圧縮強度

破壊後の断面を観察するとWC35は供試体底部に若干のセメントペーストが沈殿し、上部には人工超軽量粗骨材と空気泡の集中がみられ、コンクリート内部が不均質な状態であった。これは分離低減剤の量を増加しても解消できなかった。つまり単位セメント量が多かったにも関わらず、また分離低減剤を用いても材料分離を十分に抑制できなかったものと考えられる。超軽量コンクリートは普通コンクリートのような界面ひび割れからモルタルひび割れに進展して破壊するのではなく、骨材の破壊からコンクリート全体が破壊するものと考えられる。従って、セメントが硬化し、骨材強度を上回った時点からコンクリートの

強度は増進しないものと考えられる。

W/C=35~45%の範囲では、引張強度は圧縮強度の 1/13~1/18 と普通コンクリートに比べて小さくなっている。圧縮強度と同様、引張強度も WC35 より WC40 の方が大きな値を示しているが、これも前述と同様の理由であると考えられる。

曲げ強度試験結果は特にばらつきが大きく、変動係数は約 12%であった。曲げ強度も圧縮強度の 1/6~1/9 と引張強度同様、普通コンクリートに比べ低くなっている。これは曲げ強度が供試体の局所的弱点に起因し、超軽量コンクリートの場合は人工超軽量粗骨材そのものが局所的弱点になったものと考えられる。

弾性波伝播速度は、W/C の変化による影響はほとんどなく、約 3400m/s となっている。この値は、動弾性係数を用いた、棒の弾性波速度

$$v = \sqrt{E_d / \rho}$$

によく一致している。

静弾性係数 E_c と動弾性係数 E_d の関係を図-5 に示す。従来型の軽量コンクリートの静弾性係数及び動弾性係数は図-5の斜線部分にある²⁾といわれる。しかし超軽量コンクリートでは、静弾性係数は従来と同程度あるいは大きな値になっているが、動弾性係数が従来より小さなものになっている。これはコンクリートが富配合であり、また空気量が普通コンクリートよりも多いためであると考えられる。また人工超軽量骨材の弾性係数が特に小さいことが推測できる。

超軽量コンクリートの応力ひずみ曲線は図-6

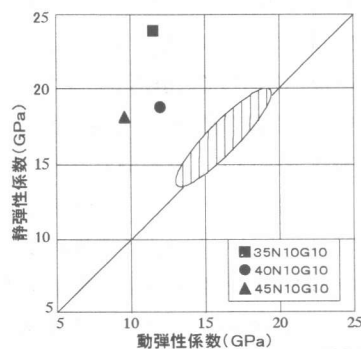


図-5 超軽量コンクリートの弾性係数

に示すように普通コンクリートの場合とは大きく異なり、初期勾配が小さく、ほぼ直線となっている。普通コンクリートの最大ひずみが 2000~2500 μ で破壊するのに対して超軽量コンクリートの最大ひずみは 3000~3500 μ であった。さらに、超軽量コンクリートは、普通コンクリートとは異なり、最大荷重時に完全に破壊したことから非常にぜい性的であることがうかがえる。

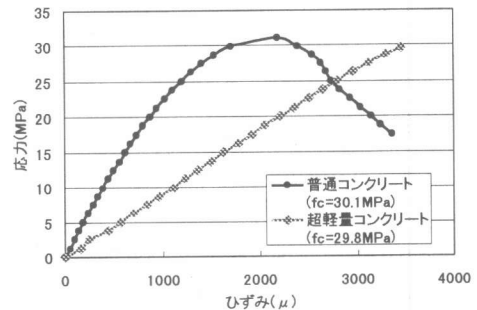


図-6 応力ひずみ曲線

3.2 人工超軽量粗骨材の品質の影響(実験2)

実験結果を表-6 に示す。(10:0)、(5:5)、(0:10)の圧縮強度を比較すると、材齢 28 日ではほぼ差はない。しかし、材齢 3 日及び 7 日では、(10:0)に比べ、(5:5)、特に(0:10)は低い値となっている。図-7 からわかるように(5:5)と(0:10)は材齢に伴う強度発現が(10:0)に比べ大きい。(5:5)及び(0:10)の初期強度が低い理由は、焼成不良品の影響が考えられる。焼成不十分のものは表面が滑らかすぎるので付着性状が劣ると考えられる。超軽量コンクリートは、界面ひび割れの発生前に粗骨材が破断すると考えられるが、セメントの硬化

表-6 コンクリートの物性試験結果(実験2)

記号	(10:0)	(5:5)	(0:10)	
ρ	1.17	1.18	1.19	
3days	f_c (MPa)	27.5	20.3	18.2
	f_c (Mpa)	28.8	24.7	22.5
28days	f_c (Mpa)	29.8	29.0	28.2
	f_t (Mpa)	2.25	2.60	2.34
	f_b (Mpa)	3.37	3.80	3.78
	V_c (m/s)	3480	3450	3400
	E_c (GPa)	18.7	15.1	13.1
	E_d (GPa)	12.1	11.5	11.2

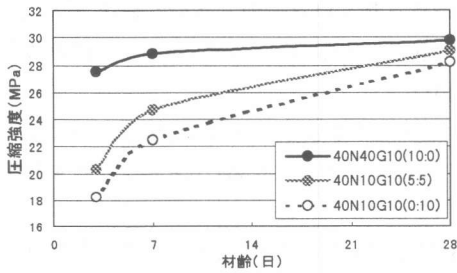


図-7 材齢と圧縮強度

が十分でない場合には、付着性状の悪い部分に界面ひび割れが発生し、コンクリートの破壊につながると思われる。

粗骨材の品質に関わらず、W/C=40%では引張強度は圧縮強度の 1/11~1/14 と普通コンクリートと変わらない範囲にある。すなわち、人工超軽量粗骨材の品質が引張強度に与える影響はないと考えられる。

弾性係数は、実験 1 と同じくいずれの場合においても動弾性係数よりも静弾性係数の方が大きな値となった。コンクリートの圧縮強度及び比重に差はなかったが、弾性係数は比較的大きく異なるものとなった。

また、図-8より、焼成不良骨材の使用量に比例して動弾性係数及び静弾性係数は小さくなっている。このことから、10%破壊値には焼成良好品と焼成不良品ではそれほど大きな差はなかったが焼成不良品の弾性係数は焼成良好品よりも低いと考えられる。

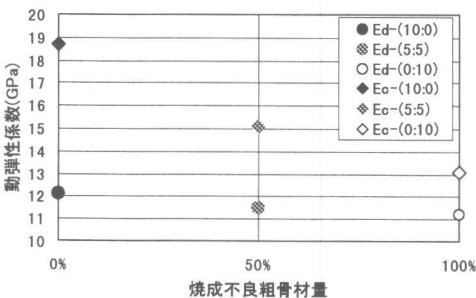


図-8 焼成不良粗骨材の使用量と弾性係数の関係

3.3 超軽量 RC 梁の曲げに対する挙動

普通コンクリートの理論計算に用いられる次式で梁のひび割れ発生曲げモーメント M_{cr} を求めひび割れ発生荷重 P_{cr} を算出した。

$$M_{cr} = I_f \cdot f_b / y_l$$

ここで I_f : 梁全断面を有効としたときの中立軸に関する断面二次モーメント、

f_b : コンクリートの曲げ強度、

y_l : 梁底面から中立軸までの高さである。

梁と同バッチの供試体の各強度試験結果を表-7に、計算値と載荷試験の結果を表-8に示す。超軽量 RC 梁は実験 2 の(10:0)と同配合であるが、圧縮強度 33.4MPa と大きくなっている。これは、水分蒸発によるセメントゲルの凝集力の増加によるものと思われる。

超軽量 RC 梁の目視によるひび割れ発生荷重は理論値の 1/2 以下となった。この原因についてはさらに検討する必要があるが、超軽量 RC 梁コンクリートの引張強度が圧縮強度あるいは曲げ強度に比較して小さいことが原因している

表-7 梁供試体コンクリートの物性

	普通 RC 梁	超軽量 RC 梁
f_c' (MPa)	30.7	33.4
f_t (MPa)	2.64	2.25
f_b (MPa)	2.86	3.37
E_d (GPa)	25.5	18.7

表-8 梁のひび割れ発生荷重

	理論値(t)	BEAM1(t)	BEAM2(t)
超軽量 RC 梁	1.68	0.60	0.75
普通 RC 梁	1.92	2.00	1.90

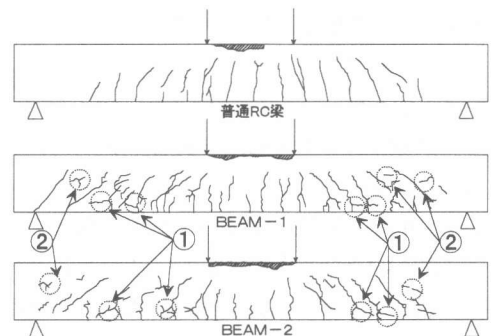


図-8 梁のひび割れ状況

と思われる。

図-8には BEAM 1, BEAM 2 及び普通 RC 梁のひび割れ状況を示す。BEAM 1 は 0.6t, BEAM 2 は 0.75t でひび割れ発生し, その荷重は同程度の圧縮強度を有する普通 RC 梁のひび割れ発生荷重が約 2.0t であったのに比べかなり低い値である。ひび割れの進展にともない, 特にせん断スパンでのひび割れが普通 RC 梁に比べ多く, また主鉄筋位置において, 軸方向にひび割れ (図-8の①) が発生している。これは高強度コンクリート梁によく似たひび割れ状況である³⁾。超軽量コンクリートの引張強度が小さくコンクリートの受け持つせん断力に対する抵抗力が小さいため, せん断ひび割れが発生したと考えられる。

また, せん断力が作用する区間には, 曲げせん断ひび割れとは異なる独立した短いひび割れ (図-8の②) が多く発生した。このひび割れは発生位置及び進展方向は決まっておらず, 全方向に発生している。

鉄筋降伏後, 曲げスパン圧縮縁全体 (図-8の斜線部分) が激しく圧壊して完全に梁が破壊した。これも高強度コンクリート梁の破壊性状とよく似ているものであった。

本実験での超軽量コンクリートは, 引張強度が低いため, ひび割れ発生荷重が小さく, せん断力に対する抵抗力も低い。従って RC 部材として適用するよりも, ひび割れの発生を抑制できる程度のプレストレスを導入して, PRC 部材としたほうが, 軽量であるという利点を活かすために有効であると考えられる。

4. まとめ

本実験で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 本実験での超軽量コンクリートは水セメント比 40%付近で最大強度を示し, これ以上 W/C を低減させても強度の上昇は望めないと考えられる。
- (2) 本実験に用いた人工超軽量粗骨材は, 良好

に焼成されているものでないと弾性係数を大きく低下させる。特に静弾性係数への影響は著しい。

- (3) 超軽量コンクリートは引張強度が普通コンクリートに比べ低いため, せん断力に対する抵抗力が低い。
- (4) 構造部材として超軽量コンクリートを使用する場合, RC 部材として適用するよりも, ひび割れの発生を抑制できる程度のプレストレスを導入して, PRC 部材としたほうが, 有効であると考えられる。

謝辞

最後に, 本研究を実行するにあたり, 人工超軽量骨材を提供していただきました内外セラムックス株式会社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊東茂富: 新編コンクリート工学, 森北出版株式会社, 1981
- 2) 岡田清: 人工軽量骨材コンクリート—土木構造物への応用—, 朝倉書店, 1969
- 3) 藤田嘉夫, 横道英雄: 鉄筋コンクリート工学, 共立出版株式会社, 1972