

論文 超軽量骨材の性質がコンクリート強度に及ぼす影響

依田和久*¹, 桜本文敏*¹, 池田賢悟*²

要旨：本研究では、超軽量骨材について、骨材の物理的性質、及びこれらを用いたモルタル又はコンクリートの強度を調べ、超軽量骨材の性質がモルタル又はコンクリートの強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。実験の結果、モルタル又はコンクリートの強度は、骨材の絶乾比重との間に概ね正の相関が見られ、マトリックス強度が増加するほど骨材の性質の影響が大きくなることなどが明らかになった。

キーワード：超軽量骨材，軽量コンクリート，絶乾比重，吸水率，強度

1. はじめに

建築物の高層化に伴い、コンクリートは高強度化とともに、軽量化が求められてきた。軽量化の利点として建物重量の低減や、PCカーテンウォール部材の大型化などによる施工性の向上が挙げられる。コンクリートの軽量化には気泡の連行及び軽量骨材の使用が考えられるが、比強度や弾性係数の確保の点から軽量骨材の使用が一般的に有効であるとされている。

絶乾比重1.2～1.7程度の従来の人工軽量骨材を細・粗骨材に用いた軽量2種コンクリートの気乾単位容積質量は1.4～1.7t/m³である。これに対し、近年、より一層の軽量化の要請に対し絶乾比重1以下で比重の割に強いとされる軽量骨材（以下、超軽量骨材という）が開発されてきており、これらを用いた気乾単位容積質量1.4t/m³以下のコンクリートの研究が見られる [1] ～ [4]。

しかし、これらの研究では特定の骨材について気乾単位容積質量と圧縮強度の関係などを実験的に明らかにしたものが多く、網羅的な超軽量骨材の検討は行われていない。

本研究では、市販若しくはサンプルで入手可能な超軽量骨材を網羅的に集め、骨材の物理的性質、及びこれらを用いたモルタル又はコンクリート強度を実験的に検討し、超軽量骨材の性質が強度特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。

2. 実験計画

2. 1 実験概要

実験に用いた超軽量骨材は、微粉2種類、細骨材7種類、粗骨材8種類であり、計17種類とした。試験項目は、骨材の物理的試験とそれらを用いたモルタル又はコンクリートの強度である。骨材の物理的試験としては、絶乾比重、1時間・24時間吸水率、単位容積質量、実積率及びふるい分けとした。また、微粉・細骨材ではこれら骨材を除く材料の容積比を同一としたセメントペーストを、コンクリートでは粗骨材を除く材料の容積比を同一とした陸砂モルタルをマトリックスとして試験を行った。

2. 2 使用材料

超軽量骨材の種類を表-1に示す。これらの骨材のうち同一種類の骨材で粒度調整できるものはJIS A 5002の標準粒度の概ね中間値を取るように調整したものをを用いた。超軽量骨材以外の使

*1.鹿島建設（株）技術研究所 第四研究部 主任研究員，工修（正会員）

*2.鹿島建設（株）技術研究所 第四研究部 研究員

表-1 軽量骨材の種類と物理的性質，フレッシュ時のモルタル又はコンクリートの性状

材料	骨材記号*1	粒径(mm)	原料	骨材の物理的性質					種類	フレッシュ時の性状*2					
				絶乾比重	吸水率1時間(%)	吸水率24時間(%)	単位容積質量(kg/ℓ)	実積率(%)		粗粒率(%)	モルタル又はコンクリートの記号	フロー(mm)又はスランプ(cm)	重量法による空気量(%)	単位容積質量(kg/m ³)	
微粉	FSB	0.045~0.3	シラス(火山灰)	0.52	0.5	1.6	0.25	48.1	—	モルタル	FSB2	213	0.5	1652	
	FMC	0.02~0.3	特殊鉱産物	0.67	0.5	0.5	0.43	64.2	—		FMC2	227	0	1698	
	SNL	0.6~5	耐火石	0.71	10.3	11.9	0.47	66.2	3.55		FMC4	229	2.2	1402	
	SNE	0.15~5	耐火石	0.72	4.8	7.3	0.43	59.8	2.87		SNL	204	1.1	1443	
	SSE	0.15~4	シラス(火山灰)	0.74	7.2	9.4	0.48	64.9	4.12		SNE	207	2.2	1454	
	SGL	0.3~5	廃棄ガラス	0.68	7.4	8.3	0.47	68.1	3.40		SSE	204	2.3	1458	
	SGLh	0.15~5		0.80	9.6	10.6	0.55	68.8	2.41		SGL	211	1.8	1434	
	SSBg	0.6~2.5		膨張粘土	0.94	29.7	37.3	0.61	64.7		3.64	SGLh	204	1.4	1502
	SSBk	2.5~5		膨張頁岩汚泥	0.98	11.4	15.6	0.63	64.7		4.87	SSBg	208	2.5	1628
	SLC	0.6~5	膨張粘土	1.04	10.5	13.0	0.67	64.8	4.64		SSBk	219	1.7	1621	
SRS	0.15~5	川砂(比較用)	2.51	—	2.92	1.74	69.1	2.43	SLC	210	0.2	1722			
粗骨	GNEL	5~15	耐火石	0.44	8.3	10.5	0.28	63.6	6.57	SRS	180	1.8	2168		
	GLP3	4~16	膨張粘土	0.56	19.5	24.7	0.35	62.5	6.44	GNEL	5.3	0	1555		
	GLC	5~15	膨張粘土	0.69	10.6	16.1	0.46	67.2	6.20	GLP3	5.5	0	1676		
	GLP4	4~16	膨張粘土	0.72	18.5	25.3	0.43	60.4	6.45	GLC	7.6	0	1759		
	GSB	5~15	膨張頁岩汚泥	0.82	14.7	18.9	0.54	65.9	6.50	GLP4	3.1	0	1721		
	GNEA	5~15	耐火石	0.83	1.1	1.6	0.53	64.4	6.57	GSB	3.8	0	1752		
	GLP5	4~16	膨張粘土	0.92	16.9	20.1	0.57	62.0	6.30	GNEA	6.9	0.7	1669		
	GSM	5~15	膨張頁岩	1.00	6.2	9.5	0.65	65.0	6.46	GLP5	4.6	0	1834		
	CGC	5~20	砕石(比較用)	2.64	—	0.66	1.62	61.4	6.61	GSM	5.4	0.4	1820		
										CGC	6.5	1.0	2384		

*1. SGLhの0.15~0.3mmの微粒分は同一種類の骨材を破碎して得たものである。
 *2. 練り上り温度は18.1~21.0℃であった。また、負の値となった空気量は0と表示した。

用材料を表-2に示す。

2. 3 調合・練り混ぜ・養生

(1) 調合

モルタル又はコンクリートの調合は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」中の水セメント比及び細骨材率を参考にして決めた。モルタル又はコンクリートの調合を表-3に示す。このうち微粉FMCを用いたモルタルはFMC2及びFMC4の2種類とした。FMC2はFSB2と、FMC4は超軽量細骨材を用いたモルタルと比較した。

(2) 練り混ぜ

微粉は絶乾状態で使用し、練り混ぜ時に1時間吸水量を外割りで加えた。また細・粗骨材は表乾状態で用いた。

モルタルはホバート型モルタルミキサーを用いた。練り混ぜ手順はペーストを30秒先練りし、その後

表-2 使用材料

材料	銘柄, 主成分等	メーカー・産地	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	N社製	比重3.16
細骨材	陸砂	上野原：香取郡産 混合比8：2(質量)	表乾比重2.58, 吸水率2.92%
粗骨材	砕石(硬質砂岩)	奥多摩産	表乾比重2.66, 吸水率0.66%
増粘剤	セルロース系	S社製	比重1.26~1.31
高性能減水剤	メラミン系	N社製	比重1.13
消泡剤	ホリアルキレン [®] リコル誘導体	N社製	10倍に希釈
水	上水道水	調布市	—

表-3 調合表 (上段：kg/m³, 下段：ℓ/m³)

種類*1	骨材	目標空気量	W/C	s/a	水	セメント	微粉又は細骨材	粗骨材
モルタル	微粉	2.1%	40%	—	435	1087	104, 134*2	—
					435	354	200	—
	微粉又は細骨材	1.6%			326	815	268~ 1030*2	—
					326	258	400	—
コンクリート	粗骨材	1.0%	41%	—	175	438	陸砂 715	196~ 1060*2
					175	139	276	400

*1.モルタルの目標フローは200mm程度とし、コンクリートの目標スランプは8cm程度とした
 *2.各骨材の表乾比重に応じた質量とした

に微粉又は細骨材を投入し120秒（計150秒）混練して行った。コンクリートは強制二軸ミキサを用いた。練り混ぜ手順はモルタルを30秒先練りし、その後に粗骨材を投入し120秒（計150秒）混練して行った。

（3）成形・養生

フレッシュ試験を実施後、モルタルはφ5×10cmの軽量モールドに、コンクリートはφ10×20cmの軽量モールドに詰めて供試体を成形し、所定の材齢まで20℃の封緘養生を行った。

2. 4 試験項目及び方法

試験項目及び方法を表-4に示す。フレッシュ時の試験のうち、モルタルはフロー試験を、コンクリートはスランプ試験を行った。また、硬化時の単位容積質量は封緘状態の供試体を脱型後直ちに測定した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 超軽量骨材の物理的性質

超軽量骨材の物理的性質を前掲の表-1に示す。軽量骨材の絶乾比重は0.44~1.00であ

った。24時間吸水率は微粉や粗骨材GNEAが1.6%以下と小さく、細骨材SSBgが37.3%と極端に大きかった。24時間吸水率に対する1時間吸水率は、微粉が31%と100%、細骨材が65~91%、粗骨材が65~88%であり、1時間吸水率の大きい骨材は24時間吸水率も概ね大きかった。

骨材の絶乾比重と骨材の吸水率の関係を図-1に示す。骨材の絶乾比重と骨材の24時間吸水率の間には明瞭な相関は見られなかった。ただし、基本的な製造方法が同一な骨材、GLP3~GLP5、及びGNELとGNEAにそれぞれ絞ってみると、絶乾比重の増加に伴い吸水率が小さくなる傾向が見られた。また、骨材の絶乾比重が同等な場合でもSSBgとSSBkのように吸水率に差が見られる骨材があった。これは骨材の空隙の性質に起因すると考えられる。吸水率が小さい骨材は内部に独立して存在する空隙（closed pore）の量が多いのに対し、吸水率が大きい骨材は内部の空隙が毛細管で外部につながっている空隙（open pore）の量が多いことによると推察される。

3. 2 モルタル又はコンクリートのフレッシュ時の性状

モルタル又はコンクリートのフレッシュ時の性状を前掲の表-1に示す。モルタルやコンクリートは、良好な練上り性状を有し、ブリーディングもほとんど見られなかった。

3. 3 圧縮強度

（1）圧縮強度

表-4 試験項目及び試験方法

分類	時点	試験項目	試験方法
骨材	-	比重	微粉・細骨材：JIS A 1134, 粗骨材：JIS A 1135
		吸水率	同上（吸水時間 1, 24時間）
		単位容積質量	JIS A 1104
		実積率	同上
		ふるい分け	JIS A 1102（微粉は除く）
モルタル コンクリート 硬化	フレッシュ	フロー	JIS R 5201（モルタルのみ）
		スランプ	JIS A 1101（コンクリートのみ）
		単位容積質量	JIS A 1116
		空気量（重量法）	同上
	練上り	温度	デジタル温度計による
		単位容積質量	供試体質量／体積（材齢7, 28日）
		圧縮強度	JIS A 1108（材齢7, 28日）
硬化	静弾性係数	JIS原案（材齢28日）	

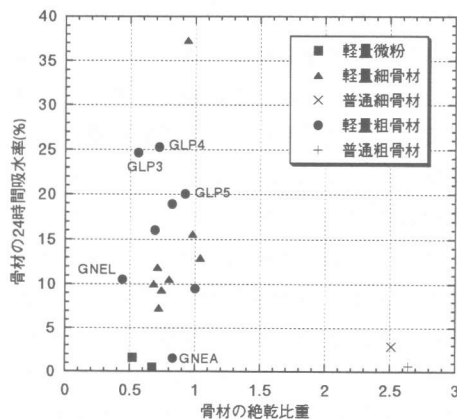


図-1 骨材の絶乾比重と骨材の吸水率の関係

材齢7日及び28日のモルタル又はコンクリートの強度を図-2に示す。いずれも材齢7日に対し、材齢28日の強度は増加していた。

骨材間の比較を材齢28日強度で行うと、微粉ではFSB2はFMC2に対し 9 N/mm^2 小さかった。細骨材では比較用の川砂モルタルに対し超軽量細骨材を用いたものは $24\sim 34\text{ N/mm}^2$ 小さく、骨材間の差は 10 N/mm^2 であった。粗骨材では比較用の碎石コンクリートに対し超軽量粗骨材を用いたものは $15\sim 33\text{ N/mm}^2$ 小さく、骨材間の差は 18 N/mm^2 と細骨材よりも大きかった。

微粉又は細骨材を用いたモルタルのマトリックス強度に対する比率（以下マトリックス強度比と称す）を図-3に示す。マトリックス強度比は、比較用のSRS（川砂）及び単位骨材量 200 l/m^3 のFMC2を除き、マトリックス強度の増加に伴い低下している。これよりマトリックス強度の増加に伴い、モルタル強度に及ぼす骨材の影響が大きくなっていると考えられる。また、単位骨材量 200 l/m^3 のFMC2のマトリックス強度比は、 400 l/m^3 のFMC4よりも大きかった。これは単位骨材量がモルタル強度に影響を与えることを示唆しているものと思われる。

粗骨材を用いたコンクリートのマトリックス強度比を図-4に示す。粗骨材を用いたコンクリートのマトリックス強度比は、微粉や細骨材と同様にマトリックス強度の増加に伴い低下しており、超軽量粗骨材を用いたマトリックス強度比は、比較用のGCG（碎石）を用いたものに比べ小さかった。

骨材種類別のマトリックス強度比の低下の割合は、粗骨材が最も大きく、細骨材、微粉の順であった。これは骨材の性質が強度に影響しているものと考えられる。

(2) 骨材の絶乾比重と圧縮強度の関係

骨材の絶乾比重と圧縮強度の関係を図-5に示す。細骨材の絶乾比重とモルタル強度、及び粗骨材の絶乾比重とコンクリート強度の

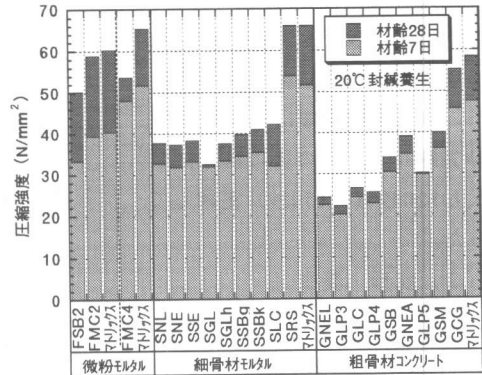


図-2 圧縮強度

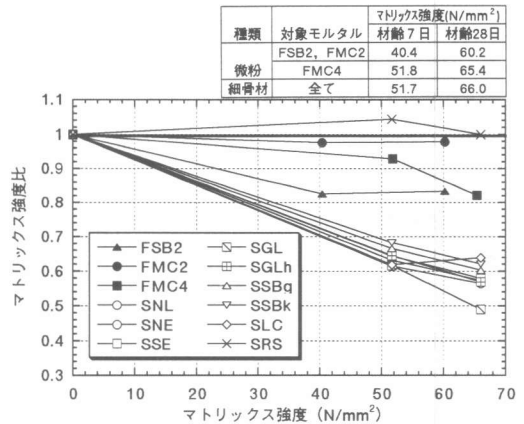


図-3 モルタルのマトリックス強度比

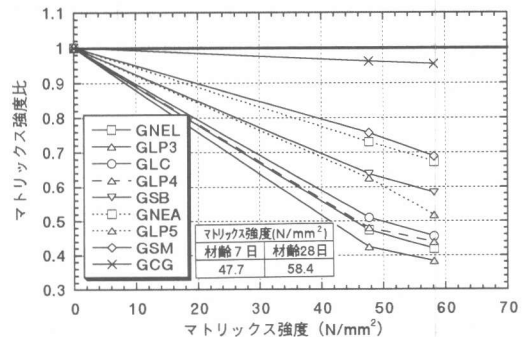


図-4 コンクリートのマトリックス強度比

間には正の相関が見られた。これより骨材の比重が大きくなるほど、強度の発現には有利になるといえる。また、粗骨材において絶乾比重の割にコンクリート強度が高かった骨材の吸水率は、GSBを除き、10%程度以下と比較的小さかった。

(3) 骨材の吸水率と圧縮強度の関係

骨材の24時間吸水率と圧縮強度の関係を図-6に示す。細骨材の24時間吸水率とモルタル強度の間には明瞭な相関は見られなかった。粗骨材の24時間吸水率とコンクリート強度の間にも相関は見られなかったものの、吸水率の増加に伴い強度が低下する傾向が窺われた。

(4) 単位容積質量と圧縮強度の関係

モルタル又はコンクリートの単位容積質量と圧縮強度の関係を図-7に示す。モルタルの単位容積質量とモルタル強度の間には正の相関が見られたものの、コンクリートの単位容積質量とコンクリート強度の間には明瞭な相関は見られなかった。

3.4 静弾性係数

(1) 静弾性係数

モルタル又はコンクリートの静弾性係数を図-8に示す。微粉を用いたモルタルの静弾性係数は13.4~15.8kN/mm²、細骨材を用いたモルタルの静弾性係数は11.9~15.9kN/mm²及び粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は14.2~19.8kN/mm²であった。これらの値は、概ね普通コンクリートの半分であった。

(2) 圧縮強度と静弾性係数の関係

モルタル又はコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-9に示す。粗骨材を用いたコンクリートのプロットは、強度30N/mm²を境に30N/mm²未満では単位容積質量別RC規準式よりも上側に、30N/mm²を超える場合では下側に位置した。30N/mm²未満の場合超軽量粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数はRC規準式の値に比べ大きい結果を示した。

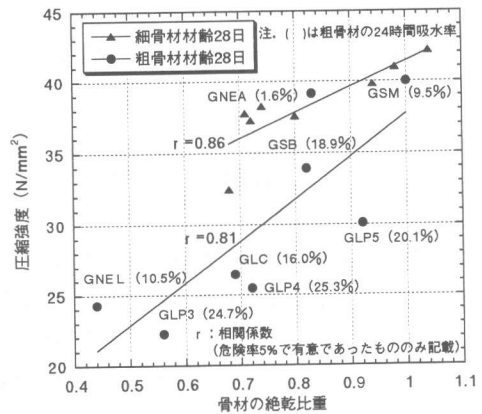


図-5 骨材の絶乾比重と圧縮強度の関係

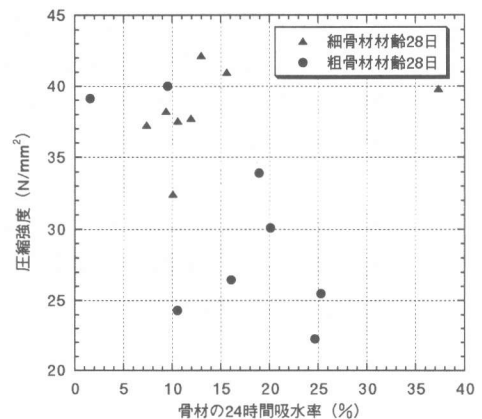


図-6 骨材の24時間吸水率と圧縮強度の関係

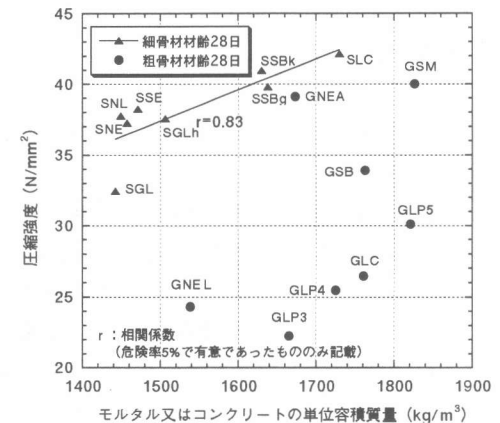


図-7 単位容積質量と圧縮強度の関係

4. まとめ

本実験の結果、超軽量骨材の性質がコンクリートの強度特性に及ぼす影響について以下のことが明らかになった。

- (1) 骨材の絶乾比重と圧縮強度の間には概ね正の相関が見られた。
- (2) 粗骨材において絶乾比重の割にコンクリート強度が高かった骨材は膨張頁岩汚泥を原料としたもの(記号GSB)を除き、吸水率は10%程度以下と比較的小さかった。
- (3) 骨材の混入によりコンクリート強度はマトリクス強度に対して低下するが、その割合はマトリクス強度が高いほど大きい。また、低下の割合は骨材種類において粗骨材が最も大きく、細骨材、微粉の順であった。
- (4) コンクリートの圧縮強度が 30N/mm^2 未満の場合、粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数はRC規準式の値に比べ大きい結果を示した。

謝辞

本実験を行うに当たり、軽量骨材メーカーの方々をはじめ関係各位にご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

例えば、

- [1] 藤原浩巳ほか：軽量コンクリートの強度特性に関する研究 第45回セメント技術大会講演集, pp.358-363, 1991
- [2] 中西正俊ほか：超軽量骨材を用いたコンクリートの比強度の向上 コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No. 1, pp.417-420, 1995
- [3] 小川春果, 三谷一房ほか：超軽量高強度PCカーテンウォールの開発(その1, 2) 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.541-544, 1995
- [4] 山田哲夫：超軽量骨材たコンクリートの開発 セメント・コンクリートNo.577, pp.32-36, 1995

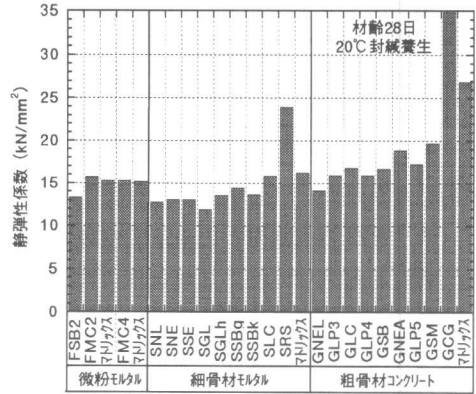


図-8 静弾性係数

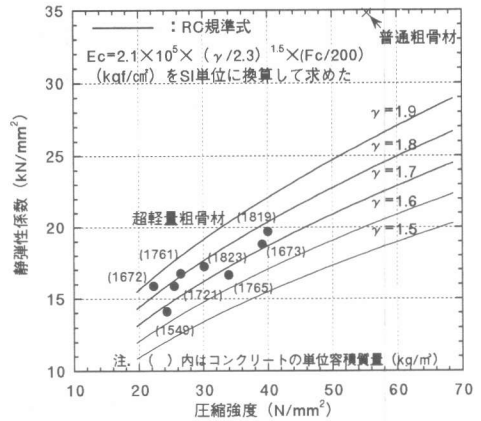


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係