

論文 軽量コンクリートの力学的特性および耐久性に及ぼす粗骨材容積の影響

長谷川 聖史*1・伊達 重之*2・室賀 陽一郎*3

要旨： 軽量粗骨材の強度は一般的に脆弱であるため、その容積が軽量コンクリートの性能に大きく影響を及ぼす。とくに高強度軽量コンクリートにおいては、マトリックスの強度が高いため、その影響が顕著に現れる。本研究では、高強度軽量コンクリートの力学的性質および耐久性について、単位粗骨材絶対容積との関係を調査し、定量的に評価した。また、C.Ramos式ならびにHansen式と、本実験結果との比較を行なった。

キーワード： 軽量コンクリート, 力学的特性, 耐久性, 粗骨材容積

1. はじめに

近年、軽量骨材に関して、高強度あるいは低吸水性といった高付加価値が開発されており、著者らは高強度軽量コンクリートの基礎的研究として、施工性および耐久性に及ぼす使用材料の違い、特に人工軽量粗骨材の種類の違いによる影響について検討した¹⁾。その結果、軽量粗骨材の種類の違いによる諸性状が把握できたものの、今後軽量コンクリートを実製品へ適用するためには、単位粗骨材絶対容積の違いによる影響を明確にし、力学的特性および耐久性の優れた配合を設定する必要がある。

そこで本研究では、軽量コンクリートの力学的特性および耐久性の改善に向けた基礎的研究として、圧縮強度や凍結融解抵抗性等に及ぼす、単位粗骨材絶対容積の影響について検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

表-1に使用材料を示す。セメントは長期強度の発現、低発熱、良好な施工性が期待される、シリカフェュームセメントを用いた。

粗骨材は、非造粒型膨脹頁岩である国内産の軽量粗骨材を使用した。含水率については、実際の施工を想定し、出荷状態そのままのものを用いた。この時の含水率は14%であった。

細骨材は茨城県鹿島産の陸砂を、混和剤はポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。

軽量粗骨材の外観と物性を写真-1に示す。



写真-1 軽量粗骨材の外観と物性

表-1 使用材料

材料	種類	記号	備考	密度 (g/cm ³) ^{※2}
セメント	シリカフェュームセメント	SFC	シリカフェュームを10%程度プレミックス	3.08
粗骨材	国内産軽量粗骨材 (非造粒品)	LG	24hr吸水率 ^{※1} 9.9%, 含水率14%	1.25
細骨材	陸砂	S	茨城県鹿島産, 吸水率1.19%	2.62
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	Ad		—

※1 吸水率試験方法はJIS A 1134および1135参照

※2 絶乾状態

*1 石川島建材工業(株)技術本部技術研究所 (正会員)

*2 同上

*3 同上

2.2 配合

配合条件を表-2に示す。すべての配合において、単位粗骨材絶対容積の影響を明確にするため、水セメント比ならびに細骨材モルタル比を一定とし、それぞれ $W/C=25\%$ 、 $s/m=46\%$ とした。

粗骨材は、打設後吸水するため、打設後の骨材吸水率を5%とし、その水量をあらかじめ練混ぜ水に加えた。

2.3 練混ぜ

練混ぜは60リットル2軸強制練りミキサーを用いた。細骨材、セメント、水を投入して60秒練混ぜ後、粗骨材を加えて充分練混ぜた。なお、高性能AE減水剤により、スランプを $22\pm 2\text{cm}$ 、空気量を $4.5\pm 1\%$ に調整した。

2.4 評価項目

2.4.1 力学的特性

力学的特性は、圧縮強度、ヤング係数、引張強度、せん断強度により評価した。評価項目および方法の一覧を表-3に示す。

2.4.2 耐久性

凍結融解抵抗性は、ASTM C-666（水中凍結

表-2 配合条件

単位粗骨材 絶対容積 (kg/m^3)	W/C (wt.%)	s/a (vol.%)	単位量(kg/m^3)				Ad 添加率 (C%)
			W	C	S	G	
0	25	100	225	900	1157	0	0.80
100		79.8	202	807	1036	125	0.85
200		63.6	178	713	916	250	0.92
300		50.3	155	619	795	375	0.98
400		39.2	131	525	675	500	1.05

表-3 評価項目と方法

評価項目	試験方法/条件
単位容積質量	JIS A 1116に準拠
圧縮強度	JIS A 1108に準拠
ヤング係数	JSCE-G 502に準拠
せん断強度	二面せん断試験
引張強度	JIS A 1113に準拠
凍結融解抵抗性	ASTM C-666に準拠
透水性	input法、水圧 $3\text{N}/\text{mm}^2-48\text{H}$
塩分透過性	AASHTO T-277に準拠、直流電圧15V
促進中性化	炭酸ガス濃度7%、温度 40°C 、湿度50%

水中融解)に準拠し、相対動弾性係数による耐久性指数で評価した。

コンクリートの透水性は、一定の圧力の水を作用させ、一定時間内に供試体に浸透した深さによって評価するインプット法による拡散係数を用いた。供試体の養生は水中で28日とし、加圧条件は $3.0\text{N}/\text{mm}^2-48$ 時間とした。透水試験の概念図を図-1に示す。

塩分透過性は、ASTM C-1202 (AASHTO T-277)に準拠した。

本実験では、直流電圧60Vを電極間に印加し、6時間後に得られるクーロンによって評価した。AASHTO T-277による一般的な Cl^- イオンの透過性評価を表-4に示す。また、電気的手法を用いた実験装置の概略図を図-2に示す。

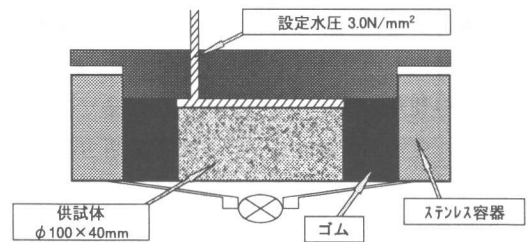


図-1 透水試験概念図

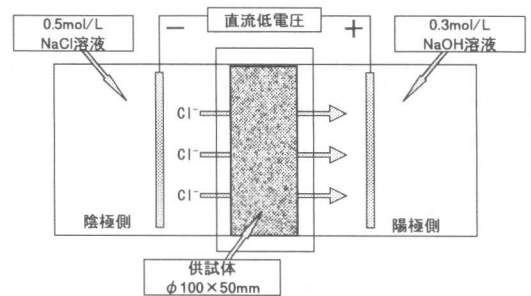


図-2 塩分透過試験試験概略図

表-4 Cl^- 透過性評価

クーロン	透過性	備考
4000~	High	$W/C > 60\%$ 普通セメント使用
2000~4000	Moderate	$40\% \leq W/C \leq 60\%$ 普通セメント使用
1000~2000	Low	$W/C < 40\%$ 普通セメント使用
100~1000	Very Low	ラテックス混入コンクリート
~100	Negligible	ポリマー含浸コンクリート ポリマーコンクリート

促進中性化試験は、水中養生 28 日、その後 5 ヶ月間気中養生した供試体を、炭酸ガス濃度 7%、温度 40℃、相対湿度 50% の条件下で促進養生をおこなった。

3. 実験結果および考察

表-5 に、実験結果をとりまとめて示す。

3. 1 力学的特性結果

3. 1. 1 単位容積質量

単位容積質量試験の実測値と配合表により求めた計算値を表-6 に示す。打設後の骨材の吸水を無視した場合、実測値との誤差が大きかった。これは、軽量粗骨材の吸水によるものと考えられるが、本実験では、骨材の吸水は練混ぜ時に大きく、打設後は水がセメント粒子と細骨材に拘束されると考え、骨材の 10 分吸水率を補正水として練混ぜ水に加えた。その結果、実測値と同様の単位容積質量を得ることができた。

3. 1. 2 圧縮強度

単位粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係について図-3 に示す。モルタル（単位粗骨材絶対容積 0%）の圧縮強度が 80N/mm² を超えるような高強度であるため、単位粗骨材絶対容積が大きくなるほど圧縮強度は低下し、軽量粗骨材の強

度がコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼしていると考えられる。

そこで、式-1 に示す C.Ramos 式により粗骨材の強度を推定した。

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} = \frac{V_a}{1000} + \frac{1-V_a/1000}{\sigma_m} \dots\dots\dots \text{式-1}$$

ここに、 σ_a ：粗骨材の強度、 σ_m ：モルタル圧縮強度、 σ_c ：コンクリートの圧縮強度、 V_a ：単位粗骨材絶対容積（%³）

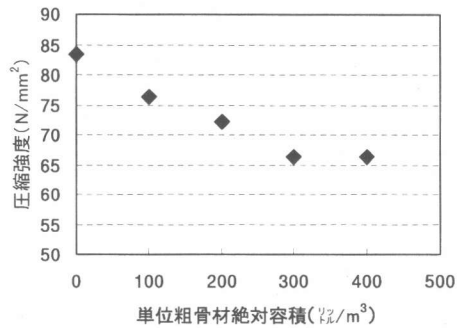


図-3 単位粗骨材絶対容積と圧縮強度の関係

表-6 単位容積質量の実測値と計算値

単位粗骨材絶対容積 (% ³)	実測値 (ton/m ³)	計算値(ton/m ³)	
		骨材の吸水を無視	骨材の吸水を考慮
0	2.20	—	—
100	2.15	2.12	2.14
200	2.07	2.05	2.08
300	2.02	1.97	2.02
400	1.95	1.89	1.95

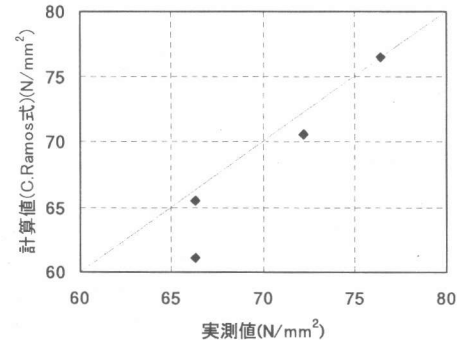


図-4 実測値と圧縮強度推定モデルによる計算値

表-5 実験結果

単位粗骨材絶対容積 (% ³)	単位容積質量 (ton/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	拡散係数 (×10 ⁻⁵ cm ² /sec)	耐久性指数 (%)	塩分透過性 (クーロン)
0	2.20	83.5	35.8	8.72	4.65	2.80	98	647
100	2.15	76.4	32.8	7.42	4.30	3.56	92	520
200	2.07	72.2	31.1	6.71	3.35	5.00	72	720
300	2.02	66.3	28.3	6.26	2.94	7.13	54	680
400	1.95	66.3	27.1	5.04	2.17	8.72	50	890

* 圧縮強度、ヤング率、せん断、引張強度は材齢4週目の値

式-1により、モルタル強度が40N/mm²から90N/mm²程度までの測定値から粗骨材強度を推定すると、平均値で43.5N/mm²であった。

この推定値を用いた圧縮強度推定モデルによる計算値と実測値の関係を図-4に示す。

3. 1. 3 ヤング係数

単位粗骨材絶対容積とヤング係数の関係を図-5に示す。圧縮強度と同様に、単位粗骨材絶対容積が大きくなるほどヤング係数は低下する傾向が見られ、粗骨材強度がヤング係数に及ぼす影響は大きいと考えられる。

ヤング係数の推定モデルである Hansen 式を式-2に示す。

$$\frac{E_a}{E_c} = \frac{(1 - V_a/1000)E_m - (1 + V_a/1000)E_c}{(1 - V_a/1000)E_c - (1 + V_a/1000)E_m} \quad \dots\dots \text{式-2}$$

ここに、 E_a ：粗骨材のヤング係数、 E_m ：モルタルのヤング係数、 E_c ：コンクリートのヤング係数、 V_a ：単位粗骨材絶対容積(ℓ/m³)

式-2により粗骨材のヤング係数を推定すると、14.7kN/mm²であった。この推定値を用いたヤング係数推定モデルによる計算値と実測値の関係を図-6に示す。実測値は Hansen 式による推定値に近似しており、母材より強度の低い軽量骨材の場合にもこの理論式の適用は可能であると考えられる。

3. 1. 4 せん断強度および引張強度

単位粗骨材絶対容積とせん断強度および引張強度の関係を図-7に示す。

せん断強度、引張強度とも圧縮強度と同様の傾向が見られ、単位粗骨材絶対容積の増加に伴い直線的に強度は低下した。

3. 2 耐久性状

3. 2. 1 透水試験

拡散係数に及ぼす単位粗骨材絶対容積の影響を図-8に示す。

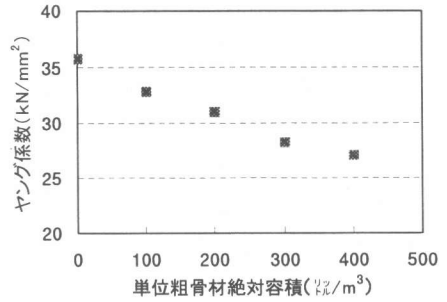


図-5 単位粗骨材絶対容積とヤング係数の関係

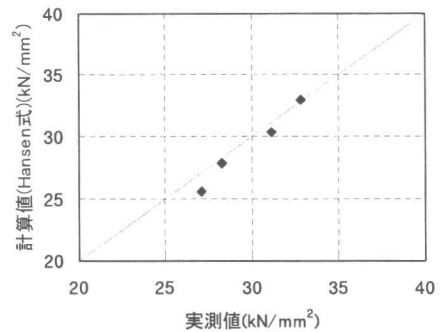


図-6 実測値とヤング係数推定モデルによる計算値

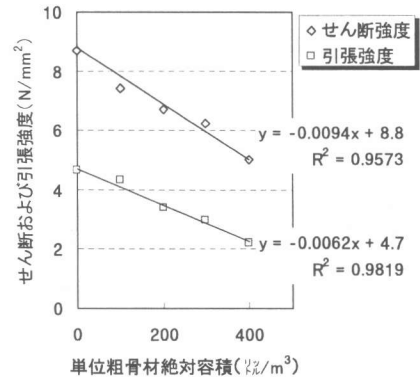


図-7 単位粗骨材絶対容積とせん断強度および引張強度の関係

本実験では、透水性に最も影響を及ぼすとされる水セメント比を一定としているため、単位粗骨材絶対容積の影響が顕著に現れる結果となった。このことは、粗骨材が比較的空隙を多く

含むためと考えられる。

しかしながら、図に示すようにその傾きは緩やかであり、今回の実験のように低水セメント比であれば、粗骨材の容積が透水性に致命的な欠陥を及ぼすことはないと考えられる。

3. 2. 2 塩分透過性試験

塩化物透過性に及ぼす単位粗骨材絶対容積の影響を図-9に示す。

図に示すように、明確な傾向は見られなかったものの、モルタルの場合と比較して、単位粗骨材絶対容積 400 %²のものは 1.4 倍のクーロンであり、粗骨材中の間隙水の増加により、抵抗値が低くなると考えられる。

3. 2. 4 凍結融解試験

耐久性指数に及ぼす単位粗骨材絶対容積の影響を図-10に示す。

単位粗骨材絶対容積が増すに従い、耐久性指数は低下しており、単位粗骨材絶対容積 300 %²以上で 60%を下回る結果となった。

田沢らの研究²⁾で、10%から 20%の間で性能を左右するクリティカルな含水率が存在するとされているように、本研究でも粗骨材の含水率が 14%であったため、単位粗骨材絶対容積が増すごとに性能が落ちたものと考えられる。

透水性や透気性の場合と異なり、粗骨材自体の含水率が高ければ、マトリックス強度が高くても凍結融解抵抗性を維持するのは難しいため、吸水性の低い骨材の選定または低含水率での使用が望ましいと考えられる。

3. 2. 3 促進中性化試験

10 週間所定の促進養生を行ない、切断面にフェノールフタレイン溶液を吹き付けた後の供試体断面図を写真-2に示す。

写真を見るとおり、全ての供試体の全面に変色が起こっており、10 週程度では中性化の問題は生じないことが判明した。これは、中性化速度に大きく影響を及ぼすとされる水セメント比

が、本研究では 25%と小さかったことが原因と考えられ、透水性と同様に、透気性に関してもマトリックス強度の影響に比較して、粗骨材容積の影響は小さいと考えられる。

今後、継続して試験を行ない、単位粗骨材絶対容積による影響の差別化を図る予定である。

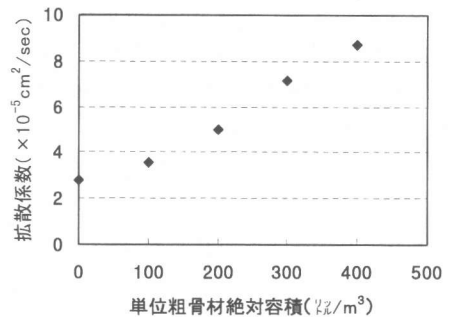


図-8 単位粗骨材絶対容積と拡散係数の関係

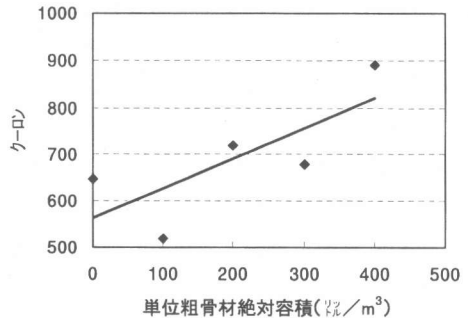


図-9 単位粗骨材絶対容積と塩化物透過性の関係

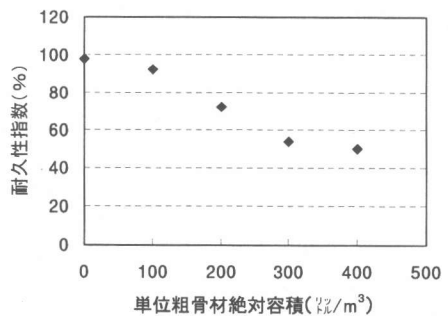


図-10 単位粗骨材絶対容積と耐久性指数の関係

3.3 単位粗骨材絶対容積と各物性の関係

図-11に、力学的特性ならびに耐久性に及ぼす単位粗骨材絶対容積の影響の推定値を示す。

この結果から、単位粗骨材絶対容積が増すに従って軽量コンクリートの性能は大きく低下することがわかり、容積の設定は重要であると言える。しかしながら、耐久性に関して、透水性や塩分浸透性はマトリックスが強固なものであれば、単位粗骨材絶対容積の影響は小さいのに対して、凍結融解抵抗性は単位粗骨材絶対容積が大きく影響を及ぼす結果となった。

より高性能なコンクリートを開発するためには、低吸水性の骨材あるいは含水率の低い状態での骨材の使用により単位粗骨材絶対容積の設定を行う必要がある。

4. まとめ

本実験では、軽量コンクリートの力学的特性ならびに耐久性に及ぼす単位粗骨材絶対容積の影響について研究した。本実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 単位粗骨材絶対容積の増加とともに力学的性質ならびに耐久性とも低下し、単位粗骨材絶対容積と各種物性の関係の推定値を得ることができた。
- (2) 圧縮強度と単位粗骨材絶対容積の関係は、C.Ramosモデルにより推定できる。また、ヤング率と単位粗骨材絶対容積の関係もHansenモデルにより推定することが可能である。
- (3) 透水性および透気性に関して、モルタル部分の影響と比較すると粗骨材の影響は低く、軽量粗骨材の場合でもマトリックス強度を高めることによりある程度性能の低下を防ぐことができる。
- (4) 凍結融解抵抗性に関して、マトリックス強度を高めただけでは高含水率骨材を含むコンクリートの耐久性指数を高めるのは難しいため、低吸水性の骨材の使用、

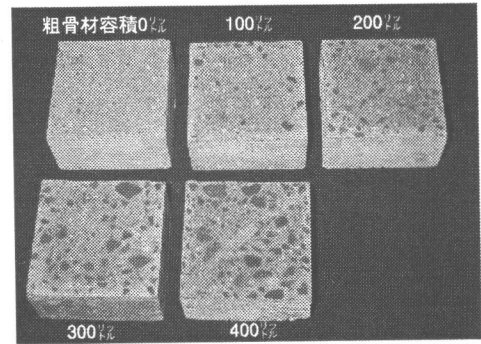


写真-2 中性化試験結果

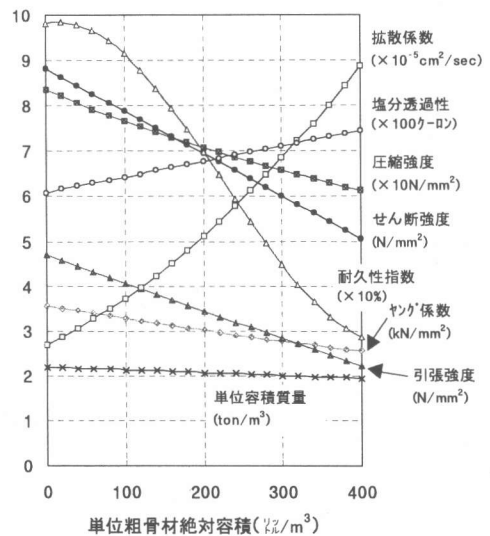


図-11 単位粗骨材絶対容積と各種物性の関係

もしくは低含水での使用が望ましい。

参考文献

- 1) 伊達重之ほか：高強度軽量コンクリートの施工性および耐久性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.1027～1032，2000
- 2) 田沢雄二郎ほか：高強度軽量コンクリートの強度・耐凍結融解性に関する研究，鹿島建設技術研究所年報，Vol.33，pp.9～14，1985.5