

論文 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

伊達 重之*1・長谷川 聖史*2

要旨: 高強度軽量コンクリートは、比較的水粉体比が小さく、同一スランプの普通骨材を用いたコンクリートと比較して粘性が高い傾向にある。したがって、スランプ値では施工性を評価することは困難である。本研究では、スランプ値以外の施工性評価方法を検討し、使用材料や配合との関係について、直交表を活用し定量的かつパラメトリックに評価した。また、硬化後の耐久性性能（凍結融解抵抗性、水密性）についても同様に評価した。

キーワード: 高強度コンクリート、軽量コンクリート、施工性、耐久性

1. はじめに

従来、軽量コンクリートの用途は、主としてビルの外壁（カーテンウォール）などの非構造材が主流であった。一方、近年、軽量骨材に関しては強度の増加、あるいは吸水率の低下といった高付加価値品が開発されており、それに伴い道路橋床版や浮体構造物向けの構造部材への適用研究の事例が増えつつある¹⁾。しかしながら、それらはいずれも既往の軽量コンクリートと比較して高い圧縮強度が要求されるため、水結合材比が低くなる傾向となり、そのため施工性にやや難点があった。

そこで本研究では、高強度軽量コンクリートの施工性の改善に向けた基礎的研究として、充填性やポンプ圧送性に及ぼす、使用材料（特に人工軽量粗骨材の違い）および配合の影響につ

いて述べる。また、同時に凍結融解抵抗性や透水性などの耐久性指標についても併せて比較・検討する。

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、高ビーライトセメントおよびシリカフェュームセメントを用いた。さらに、流動性の向上をはかるため、石灰石微粉末（粉末度 2500cm²/g）を内割りで置換した。

軽量粗骨材は、国内産1種、および海外産3種の計4種類を用いて比較を行った。それぞれの軽量粗骨材の含水率に関しては、実際の施工を想定し、出荷状態そのままのものを用いた。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	備考	比重
セメント	高ビーライトセメント	BLC	流動性・長期強度良好	3.22
	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
混和材	石灰石微粉末	LP	2500cm ² /g品	2.7
粗骨材	中国産軽量粗骨材(造粒品)	CN	24hr吸水率 ^{※1} 5.2%, 含水率10.4%	1.36 ^{※2}
	米国産軽量粗骨材1(非造粒品)	A1	24hr吸水率 ^{※1} 18.2%, 含水率14.0%	1.10 ^{※2}
	米国産軽量粗骨材2(非造粒品)	A2	24hr吸水率 ^{※1} 3.5%, 含水率8.4%	1.48 ^{※2}
	国内産軽量粗骨材(非造粒品)	JP	24hr吸水率 ^{※1} 9.9%, 含水率27.3%	1.26 ^{※2}
細骨材	国内産軽量細骨材	S	30min吸水率 ^{※1} 8%	1.69 ^{※2}
混和剤	ホ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 絶乾状態の比重

*1 石川島建材工業(株)技術本部技術研究所 (正会員)

*2 同

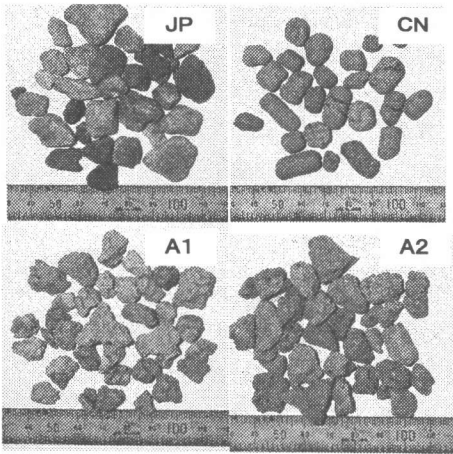


写真-1 各種軽量粗骨材の外観

したがって、骨材の種類によって含水状態は異なる。骨材の外観を写真-1に示す。

また、細骨材の含水率は1.6%であった。

2.2 実験要因と割付け

実験の要因として、セメントの種類、単位粉体量（石灰石微粉末も含む）、粗骨材の種類、細骨材率および石灰石微粉末の容積置換率を取り上げ、L₉直交表に割りつけた。なお、割付け方法は擬水準法と組合せ法を活用した。実験の要因と水準および直交表への割付け結果（実験条件）をそれぞれ表-2, 3に示す。

なお、実験は4種類の骨材それぞれについて行った。

表-2 実験要因と水準

実験要因	水準		
	1	2	3
A セメントの種類	BLC	SFC	—
B 石灰石粉末置換率(%)	0	30	—
C W/P(%)	28	30	32
D 単位結合材量(kg/m ³)	500	530	560
E 細骨材率(%)	46	51	—

表-3 実験要因の割付け

	セメントの種類	細骨材率(%)	単位結合材量(kg/m ³)	石灰石粉置換率(%)	W/P(%)
L1	BLC	46	500	0	28
L2	BLC	51	530	0	30
L3	BLC	46	560	0	32
L4	SFC	46	530	0	28
L5	SFC	46	560	0	30
L6	SFC	51	500	0	32
L7	BLC	51	560	30	28
L8	BLC	46	500	30	30
L9	BLC	46	530	30	32

2.3 練混ぜ

練混ぜは、60% 2軸強制練りミキサを用いて120秒間（材料一括投入）行った。各配合とも、練上りのスランプが22±2 cmとなるように、混和剤添加量を適宜調整した。

2.4 評価項目

2.4.1 ボックス型振動充填試験

従来から、型枠への充填性能の指標としてスランプ値が用いられている。しかしながら、今回設定した配合のコンクリートは、同一スランプ（22 cm）の普通骨材を用いたコンクリートと比較した場合、その高い粘性のため充填の挙動が異なる。そこで、型枠への充填性能を評価するため、図-1に示すボックス型の充填試験器²⁾を用いた振動充填試験を行った。

実験の手順として、まずはじめに振動を与えない状態で自己充填高さを測定する、次にテーブルバイブレータ上で振動を付与し、充填高さが30 cmに到達するまでの時間を計測する。

なお、このときの振動数は一般の型枠振動機を用いた打設を想定し50 Hzとした。

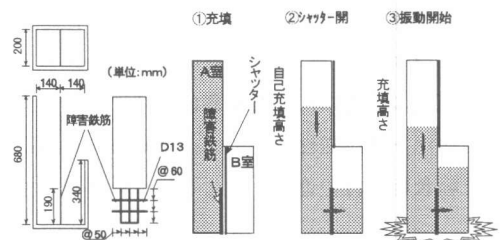


図-1 ボックス型充填試験器および実験手順

2.4.2 加圧スランプロス試験

ポンプ圧送を想定し、コンクリートを耐圧円筒容器（Φ12.5×60 cm）中に充填したのち、2分間所定の圧力（2.5N/mm²：窒素圧を利用）で加圧する。このとき、加圧前後のスランプを測定しそのロス率で、ポンプ圧送性の評価を試みた。

図-2に加圧スランプロス試験器の外観と実験手順を示す。なお、実際のポンプ圧送時の配

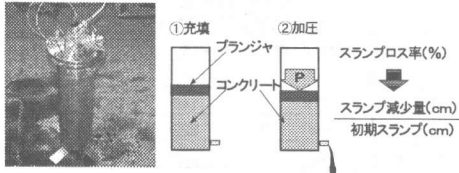


図-2 加圧スランプロス試験器および実験手順

管継ぎ目などからのノロ漏れを想定し、実験は図のような「排水可能」条件にて行った。

2.4.3 透水試験

コンクリートの水密性評価のための透水試験を行った。透水試験の概念図を図-3に示す。

なお、評価対象のコンクリートの透水性は、普通コンクリートのそれよりも大幅に小さい。よって、水密性はインプット法（加圧条件：3.0 N/mm²-48h）による「拡散係数」で評価した。

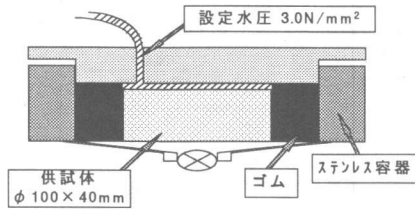


図-3 透水試験概念図

2.4.4 凍結融解試験

相対動弾性係数による耐久性指数で評価した。

実験条件は ASTM C-666（水中凍結-水中融解）に準拠した。

3. 実験結果および考察

表-4に、実験結果をとりまとめて示す。

3.1 ボックス型振動充填試験結果

ボックス型充填試験における自己充填高さ（無振動時）をスランプと同様、コンクリートの変形性能の指標のひとつとして見なした。実測値と各配合パラメータの影響度について、分散分析を行った。その結果を表-5に示す。なお、4種の骨材を使用したコンクリートのデータ4個を平均した値について分散分析を行ったため、ここでは骨材の違いによる物性への影響は無視した。

表-5 ボックス型充填試験における自己充填高さの分散分析結果

要因	変動	自由度	分散	分散比	判定	寄与率
セメントの種類	7069	1	7069	50.9	**	62%
石灰石粉置換率	772	1	772	5.6	*	6%
単位結合材量	945	2	473	3.4	*	6%
細骨材率	698	1	698	5.0	*	5%
誤差	1667	12	139	0.0		21%

**：危険率1%で有意 *：危険率5%で有意

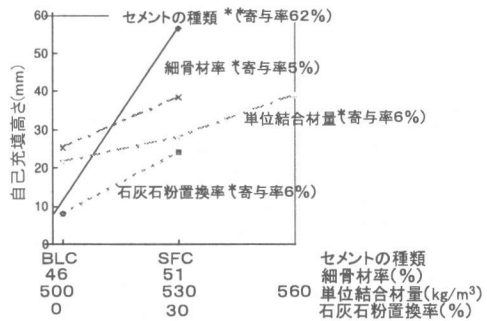


図-4 自己充填高さに及ぼす配合要因の影響

表-4 実験結果

	JP					CN					A1					A2				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(5)		
L1	1	18	17	3	0	0	55	91	4	0	72	86	29	4	0	51	66	3		
L2	6	10	0	3	0	19	20	51	12	0	30	40	15	3	2	39	91	3		
L3	3	11	89	10	0	63	12	23	14	2	39	93	9	3	2	43	57	8		
L4	146	4	53	2	4	48	9	62	101	0	27	86	4	24	4	40	33	69		
L5	103	5	-3	2	14	102	4	58	98	4	12	80	4	26	15	20	56	40		
L6	81	5	72	1	4	165	5	54	102	0	12	83	11	35	12	28	43	90		
L7	51	18	2	8	0	102	14	0	3	20	24	38	9	0	4	35	20	2		
L8	2	26	29	2	0	0	28	0	0	0	54	60	33	0	0	50	48	2		
L9	5	9	48	1	0	94	14	90	2	0	40	95	25	0	13	31	39	2		
AVE.	44	12	34	4	2	66	18	48	37	3	34	73	15	11	6	37	50	24		

①: ボックス型振動充填試験における無振動時の自己充填高さ(mm)

②: ボックス型振動充填試験における加圧直後から充填高さ30cm到達までに要した時間(sec)→充填時間

③: 加圧スランプロス率(%)→加圧によるスランプ減少量/試験開始時のスランプ(%)

④: 透水試験による拡散係数(×10⁻⁵cm²/sec)

⑤: 耐久性指数(300サイクル)

(各項目の測定データは2回の平均値)

自己充填高さに関して、分散分析の結果有意と判定された配合要因とその効果について、図-4に示す。この結果、今回取り上げた要因のなかでは、セメントの種類の影響差が圧倒的に大きく（寄与率62%）、シリカフュームの添加（SFCの使用）により変形性能が大幅に改善されることが判明した。

一方、ボックス型振動充填試験（加振時）における充填時間（充填高さ300mm到達するまでの時間）は、コンクリートの振動締固め性能と位置づけた。分散分析結果および有意と判定された配合要因の効果を、表-6および図-5にそれぞれ示す。

この結果、4つの配合要因が有意と判定された。ここでもセメントの種類の効果が突出しており、無添加品に比べ2倍以上の充填速度が確認された。次に大きい効果が、W/Pであった。

加振条件下での充填時間は、コンクリート中の振動エネルギーの伝搬効率によって左右される。すなわち、コンクリートの粘性が低いほど、振動の減衰が小さく、充填しやすいものと考えられる。

シリカフュームの添加ならびにW/Pの増加により、いずれもコンクリートの塑性粘度は低下する³⁾。したがって、今回の解析結果はこの事象を良く反映している。

ここで、モルタルの塑性粘性に及ぼす混和材の添加効果を、「羽根沈入型モルタル（ペースト）粘度計（図-6参照）」を用いて評価した。

試験用のモルタルは、水粉体比0.25、砂粉体比1.2で、15打フローが230±10mmとなるように、混和剤添加量を調節したものをを用いた。

試験結果を図-7に示す。この図より、混和材の添加による粘性低減作用を定量的に評価することができる。今回の配合では、シリカフュームの添加により粘性（塑性粘度； η 値）が約1/3に低下することが確認された。

また、加振器を用いた場合のコンクリートの充填に要する時間は、その塑性粘度に比例することが推定される（図-8参照）。

表-6 ボックス型振動充填試験における充填時間の分散分析結果

要因	変動	自由度	分散	分散比	判定	寄与率
セメントの種類	1117	1	1117	40.0	**	42%
W/P	293	2	146	5.2	*	9%
単位結合材量	644	2	322	11.5	**	22%
細骨材率	261	1	261	9.4	*	9%
誤差	307	11	28	0.0		18%

**：危険率1%で有意 *：危険率5%で有意

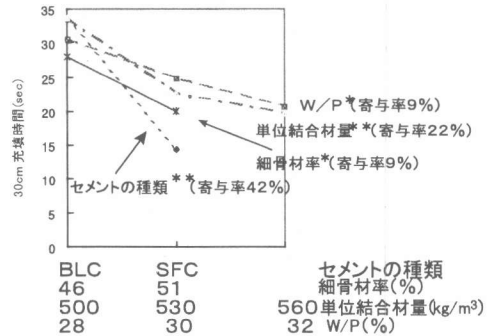


図-5 充填時間に及ぼす配合要因の影響

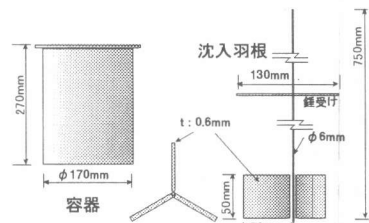


図-6 羽根沈入型粘度計

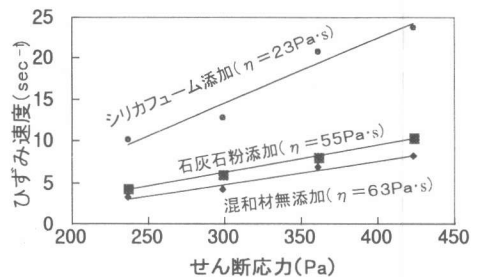


図-7 モルタル粘度に及ぼす混和材の影響

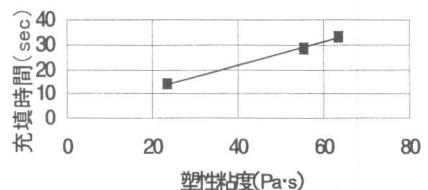


図-8 コンクリートの塑性粘度と振動締固め性能の関係

一方、骨材別の充填性能について一般のコンクリートのそれと比較した結果を図-9に示す。4種の中では国産品が最も良好な施工性を示した。4種の骨材は実積率が異なるため、単位粗骨材かさ容積も異なる。したがって普通コンクリートと同様に、単位粗骨材かさ容積が大きくなるにつれて充填困難となる傾向が見られる。

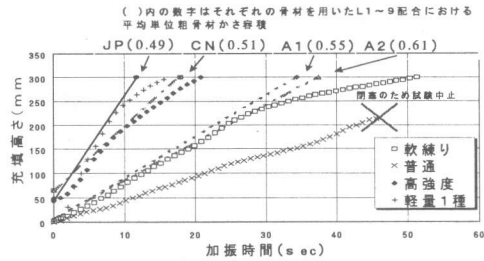


図-9 各種骨材の単位粗骨材かさ容積と充填性能の関係

3.2 加圧スランプロス試験結果

加圧スランプロス（以降単に“ロス”と表記）と配合要因の関係について、分散分析の結果および有意と判定された配合要因の効果を表-7および図-10にそれぞれ示す。

表-7 加圧スランプロスの分散分析結果

要因	変動	自由度	分散	分散比	判定	寄与率
石灰石粉置換率	1376	1	1376	7.9	*	19%
W/P	1840	2	920	5.3	*	23%
細骨材率	930	1	930	5.3	*	12%
誤差	2276	13	175	0.0		46%

*:危険率5%で有意

W/Pの増加および細骨材率の減少によるロスの増加は、いずれも自由水の損失（絞出および骨材への浸透）によるものと考えられる。一方、石灰石微粉末の増加によるロスの減少は、保水性の向上⁴⁾によるものと考えられる。

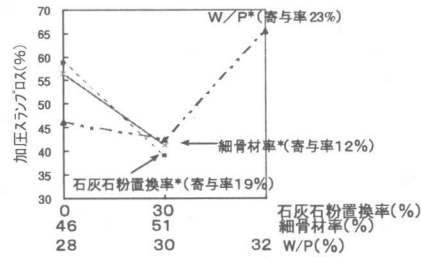


図-10 加圧スランプロスに及ぼす配合要因の影響

また、本試験条件下で浸透する水量（2分間加圧吸水率で表示）が多い骨材ほど、ロスは増加の傾向にあった（図-11参照）。

3.3 透水試験結果

拡散係数と配合要因の関係（国産品および米国産1を用いた供試体のみを対象）について、分散分析の結果および有意と判定された配合要因の効果を表-8および図-12にそれぞれ示す。拡散係数は、ペーストの部分が大きく影響することが判明した。シリカフェームの添加による組織の緻密化およびペースト分の増加による透水経路の減少の効果が確認された。

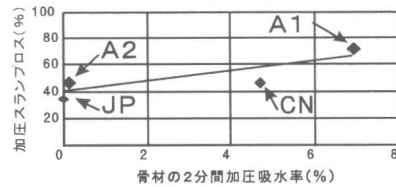


図-11 骨材の吸水と加圧スランプロス

一方、細骨材率の増加に伴う拡散係数の低下は、比較的孔隙を多く含む粗骨材の減少によるものと推定される。

表-8 拡散係数の分析結果

要因	変動	自由度	分散	分散比	判定	寄与率
セメントの種類	2.79	1	2.79	79.8	**	59%
単位結合材量	1.18	2	0.59	16.9	**	24%
細骨材率	0.23	1	0.23	6.5	*	4%
誤差	0.46	13	0.04	0.0		13%

**：危険率1%で有意 *：危険率5%で有意

拡散係数に及ぼす使用骨材の影響を図-12に示す。国産品（JP）と米国産品（A1）の飽和吸水率（1時間煮沸吸水により推定）は、それぞれ29%と26%と国産品の方が高い。

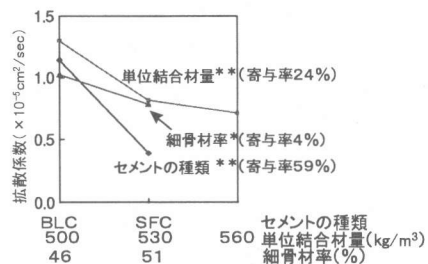


図-12 拡散係数に及ぼす配合要因の影響

しかしながら図-13のように、24h吸水率の増加に伴い、拡散係数も増加する傾向にある。

3.4 凍結融解試験結果

耐久性指数と配合要因の関係について、分散分析の結果および有意と判定された配合要因の効果を表-9および図-14にそれぞれ示す。セメントの種類のみが“有意”となり、図に示すようにシリカフェームの効果により凍結融解抵抗性が大幅(約10倍)に改善されることが判明した。前項で述べた水密性の向上が寄与しているものと考えられる。

粗骨材別のデータを図-15にまとめた。この図のように、使用時の含水率の増加に伴い耐久性指数が低下する傾向にある。特に、含水率が10%を超えるものは耐久性指数の大幅な低下が見られる。田沢らの研究⁵⁾によれば、骨材の含水率と耐久性指数は線形関係になく、10~20%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。しかしながら、今回の結果では明らかなクリティカルポイントは見い出せなかった。耐凍結融解抵抗性を求められる実工事への適用の場合は、この点について更なる検討を要する。なお、骨材の種類が異なっても、吸水率が同一の骨材を使用した場合、耐久性指数はほぼ等しくなることが予想される。

4. まとめ

高強度軽量コンクリートの充填性やポンプ圧送性に及ぼす使用材料および配合の影響を主体に実験した結果、次のことが言える。

- ① ボックス型振動充填試験により、従来のスランプ値のみでは困難なコンクリートの施工性能の定量的な評価が可能と推定される。
- ② シリカフェームセメントと高ビーライトセメントを比較した場合、施工性(変形性能・振動伝搬性能)および耐久性(水密性・凍結融解抵抗性)のいずれについても前者が大きく上回った。
- ③ 石灰石微粉末の添加により変形性能および保水性が向上し、ポンプ圧送によるスランプロスの低減が可能となる。

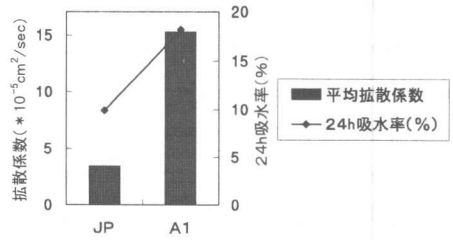


図-13 骨材別の吸水率と拡散係数

表-9 耐久性指数の分析結果

要因	変動	自由度	分散	分散比	判定	寄与率
セメントの種類	20571	1	20571	74.85	**	81%
誤差	4397	16	275	0		19%

**：危険率1%で有意

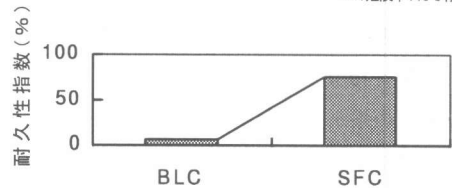


図-14 耐久性指数とセメントの種類

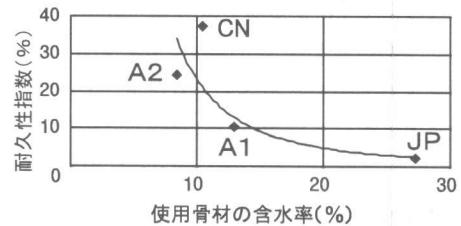


図-15 使用骨材含水率と耐久性指数の関係

謝辞

本研究を遂行するにあたり、群馬大学工学部建設工学科 辻 幸和 教授より貴重なご指導・ご助言を頂いた。紙面を借りて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Düring, H. S. et al. : Potentials in the Use of Low Density / High Performance Concrete, 4th Int. Symposium on Utilization of High-strength / High-performance concrete, Paris, pp.1261-1270, 1996
- 2) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー，Vol.93，pp.17-19，1998.7
- 3) 日本建築学会：シリカフェームを用いたコンクリートの配合設計・施工ガイドライン，pp. 21-24，1996
- 4) JCI 石灰石微粉末研究委員会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム委員会報告・論文集，pp.12-15，1998.5
- 5) 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