

# 高強度軽量コンクリートの施工性と耐久性に及ぼす骨材の影響

長谷川聖史\*<sup>1</sup>・伊達重之\*<sup>2</sup>・笠井哲郎\*<sup>3</sup>

## Effect of aggregate on workability and durability of high-strength lightweight concrete

by

Kiyoshi HASEGAWA, Shigeyuki DATE and Tetsuro KASAI

(Received on Jul. 25, 2006 & accepted on Nov. 22, 2006)

### Abstract

In general, the water-cement ratio of high-strength lightweight concrete (HSLWC) is low compared with that of conventional concrete (CC). HSLWC shows a tendency to have a higher plastic viscosity compared with CC of the same slump value. Therefore, it is difficult to evaluate workability on the basis of the slump value. In this study, new methods of evaluating workability other than that based on the slump value were examined, and the relationship between the material and its mix proportion was evaluated quantitatively using an orthogonalization table. In addition, the resistance of concrete to freezing and thawing, as well as its permeability, were evaluated.

**Keywords:** High-strength lightweight concrete, Lightweight concrete, Lightweight aggregate, Workability, Durability

## 1. 諸言

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、近年では、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いる。それに伴い、コンクリート構造物に対するニーズの多様化や低コスト化へ向けて、構造材としての軽量コンクリートの活用が注目されている。その一つである橋梁関係においては、死荷重の軽減によるスパンの長大化や、低コスト化などが期待され、部材の耐久性に関する研究も行われている。なかでも道路橋床版については、適用研究の事例が増えつつある<sup>1)</sup>。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

Table 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

シリカヒ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 2500cm<sup>2</sup>/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。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 Fig.1 に示す。

また、細骨材の含水率は 16%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 Table 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。

### 2.3 練混ぜ方法

練混ぜは、60 リットル 2 軸強制練りミキサを用いて 120 秒間（材料一括投入）を行った。各配合とも、練上りのスランプが 22 ±2cm 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

(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

\*1 石川島建材工業（株）技術研究所研究員

\*2 石川島建材工業（株）技術研究所主任研究員

\*3 東海大学工学部土木工学科教授

Table 1 Materials

	Type	Caption	Remarks	Specific gravity
Binders	B-lite cement	BLC	High performance on fluidity and strength	3.22
	Silicafume cement	SFC	Silicafume is pre-mixed by about 10%.	3.08
Admixture	Lime stone powder	LP	ss=2500cm <sup>2</sup> /g	2.7
Light weight aggregate	Made in CHINA (granulated)	CN	water absorption in 24h <sup>*1</sup> 15.2%, moisture percentage=10.4%	1.36 <sup>**2</sup>
	Made in USA-1 (non granulated)	A1	water absorption in 24h <sup>*1</sup> 18.2%, moisture percentage=14.0%	1.10 <sup>**2</sup>
	Made in USA-2 (non granulated)	A2	water absorption in 24h <sup>*1</sup> 3.5%, moisture percentage=8.4%	1.48 <sup>**2</sup>
	Asanolite (non granulated)	JP	water absorption in 24h <sup>*1</sup> 9.9%, moisture percentage=27.3%	1.26 <sup>**2</sup>
Light weight fine aggregate	Asanolite (non granulated)	S	water absorption in 30min <sup>*1</sup> 8.0	1.69 <sup>**2</sup>
Superplasticizer	made by poly-carboxylic acid	Ad		—

\*1 ref. JIS A 1134 and 1135  
\*2 in the state of absolute dry

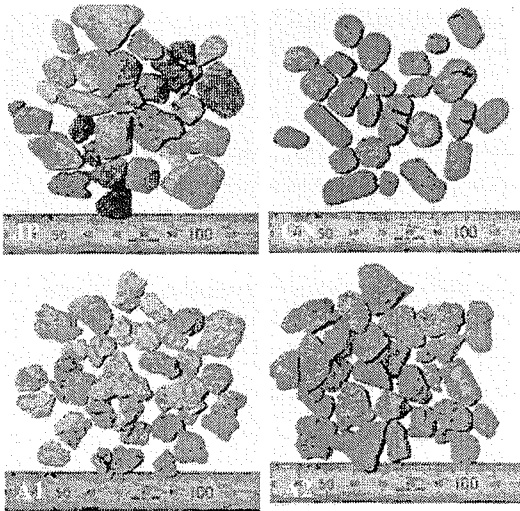


Fig.1 Lightweight aggregate

Table 2 Factor and level of experience

Factor	Level		
	1	2	3
A Type of cement	BLC	SFC	—
B Substitution rate of lime stone powder (%)	0	30	—
C W/P (%)	28	30	32
D Unit weight of binder (kg/m <sup>3</sup> )	500	530	560
E s/a (%)	46	51	—

Table 3 Allocation of experiment factor

Type of cement	s/a (%)	Unit weight of binder (kg/m <sup>3</sup> )	Substitution rate of lime stone powder (%)	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

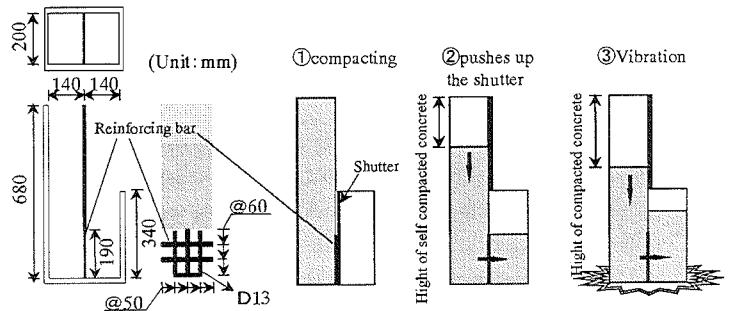


Fig.2 Box-type filling test

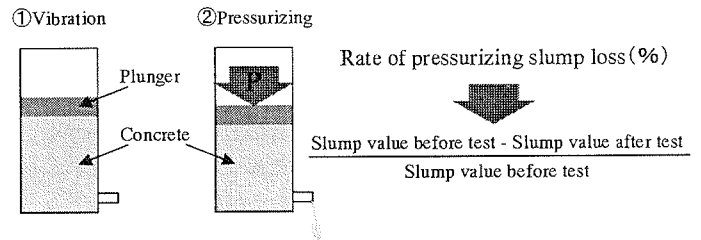


Fig.3 Pressurizing slump loss test

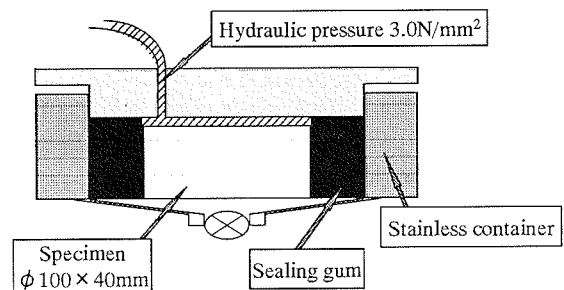


Fig.4 Schematic of permeability testing apparatus

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 (22cm) 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、Fig.2 に示すボックス型の充填試験器<sup>2)</sup>を用いた振動充填試験を行った。

実験の手順として、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 30cm 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 50Hz とした。

(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 (Φ12.5×60cm) 中に充填したのち、2分間所定の圧力 (2.5N/mm<sup>2</sup>: 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。

Fig.3 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。

(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 Fig.4 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: 3.0N/mm<sup>2</sup>-48h)による「拡散係数」で評価した。

(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

Table 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 Table 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。

自己充填高さに関する分散分析の結果、有意と判定された配合要因とその効果について、Fig.5 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%)、シリカフェュームの添加(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 Table 6 および Fig.6 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影響が突出しており、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。

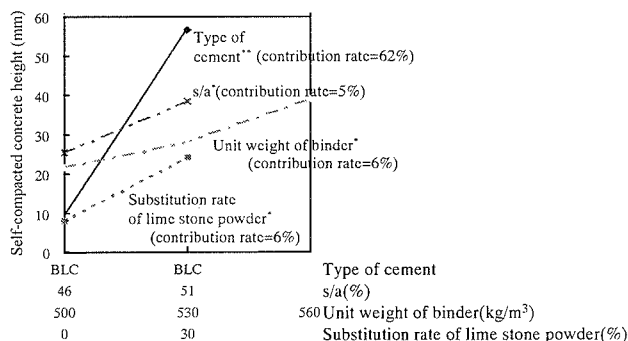
加振条件下での充填時間は、コンクリート中の振動エネルギーの伝搬効率によって左右される。すなわち、コンクリートの粘性が低いほど、振動の減衰が小さく、充填しやすいものと考えられる。

シリカフェ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<sup>3)</sup>。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(Fig.7 参照)」を用いて評価した。

**Table 5** Results of decentralized analysis on height of self-compacted concrete by box-type filling test apparatus with vibration

Factor	S	f	V	V/Vc	Judgment	Contribution rate
Type of cement	7069	1	7069	50.9	**	62%
Substitution rate of lime stone powder	772	1	772	5.6	*	6%
Unit weight of binder	945	2	473	3.4	*	6%
s/a	698	1	698	5.0	*	5%
error	1667	12	139	0.0		21%



**Fig.5** Influence of mix proportion on height of self-compacted concrete

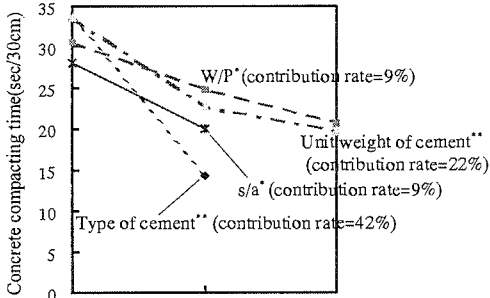
**Table 4** Results of experiment

	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: Height of self-compacted concrete by box-type filling test apparatus without vibration(mm)
- ②: Concrete compacting time by box-type filling test apparatus(sec/30cm)
- ③: Rate of pressurizing slump loss(%) → (Slump value before test - Slump value after test)/Slump value before test
- ④: Diffusion coefficient in water penetration test(×10<sup>-5</sup>cm<sup>2</sup>/sec)
- ⑤: Durability factor(at 300cycle)

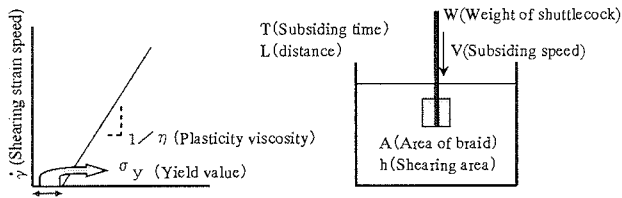
**Table 6** Results of decentralized analysis on concrete compacting time by box-type filling test apparatus with vibration

Factor	S	f	V	V/Ve	Judgment	Contribution rate
Type of cement	1117	1	1117	40.0	** *	42%
W/P	293	2	146	5.2	*	9%
Unit weight of binder	644	2	322	11.5	** *	22%
s/a	261	1	261	9.4	*	9%
error	307	11	28	0.0		18%

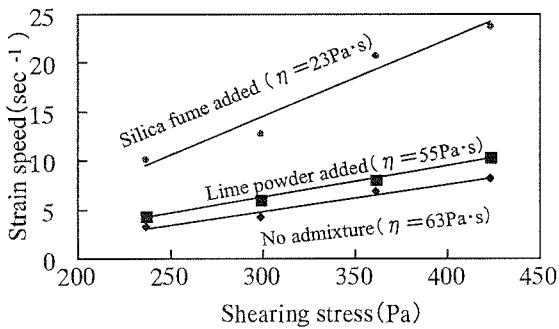


BLC	SFC	Type of cement
46	51	s/a(%)
500	530	560 Unit weight of binder(kg/m <sup>3</sup> )
28	30	32 W/P(%)

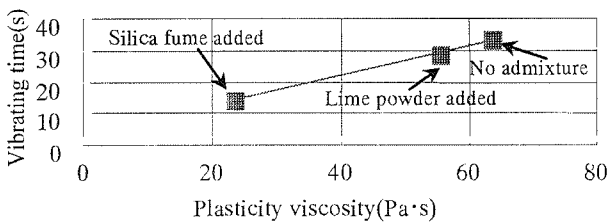
**Fig.6** Influence of mix proportion on concrete compacting time



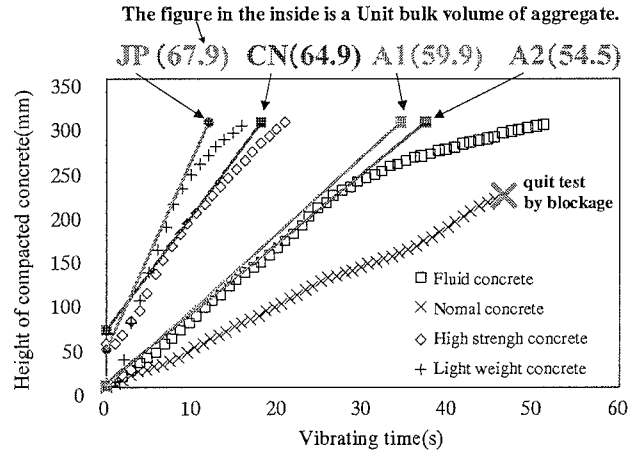
**Fig.7** Testing apparatus for plastic viscosity of mortar



**Fig.8** Influence of admixtures on plastic viscosity of mortar



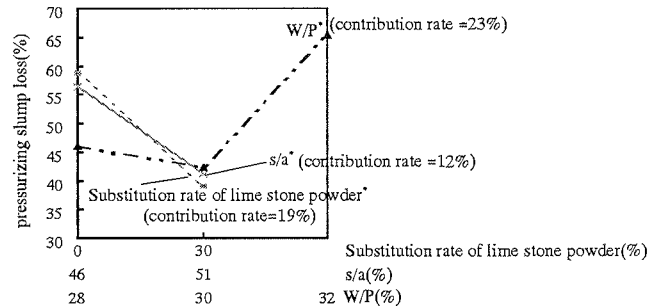
**Fig.9** Relation between Plastic viscosity and Compacting time with vibration



**Fig.10** Influence of unit bulk volume of aggregate on compacting performance

**Table 7** Results of decentralized analysis on pressurizing slump loss of concrete

Factor	S	f	V	V/Ve	Judgment	Contribution rate
Substitution rate of lime stone powder	1376	1	1376	7.9	*	19%
W/P	1840	2	920	5.3	*	23%
s/a	930	1	930	5.3	*	12%
error	2276	13	175	0.0		46%



**Fig.11** Influence of mix proportions on pressurizing slump loss

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 Fig.8 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 (Fig.9 参照)。

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 Fig.10 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。

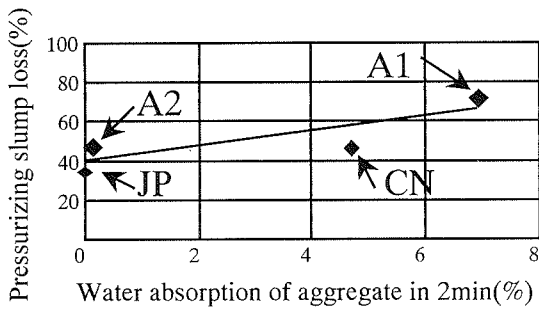


Fig.12 Influence of water absorption of aggregate on pressurizing slump loss

Table 8 Results of decentralized analysis on diffusion coefficient of concrete ing

Factor	S	f	V	V/Vc	Judgment	Contribution rate
Type of cement	2.792	1	2.792	79.8	**	59%
Unit weight of binder	1.184	2	0.592	16.9	**	24%
s/a	0.227	1	0.227	6.5	*	4%
error	0.455	13	0.035	0.0		13%

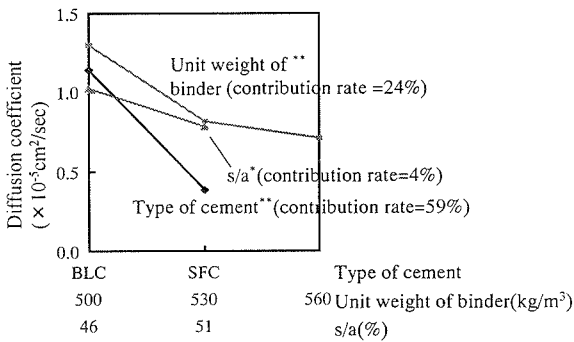


Fig.13 Influence of mix proportions on diffusion coefficient

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 Table 7 および Fig.11 にそれぞれ示す。

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<sup>4)</sup>によるものと考えられる。

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、スランプロスが增加する傾向にあった（Fig.12 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品（A1）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 Table 8 および Fig.13 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。シリカフェュ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。

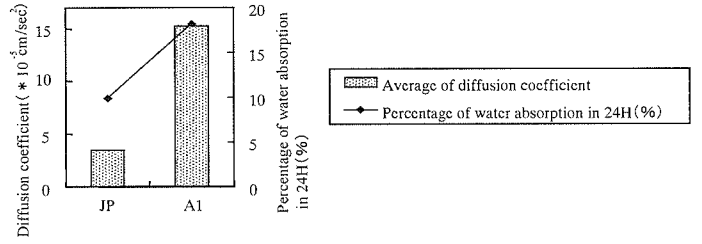


Fig.14 Relation between water content of aggregate and durability index of concrete

Table 9 Results of decentralized analysis on durability factor of concrete lysis

Factor	S	f	V	V/Vc	Judgment	Contribution rate
Type of cement	20571	1	20571	74.85	**	81%
error	4397	16	274.8	0		19%

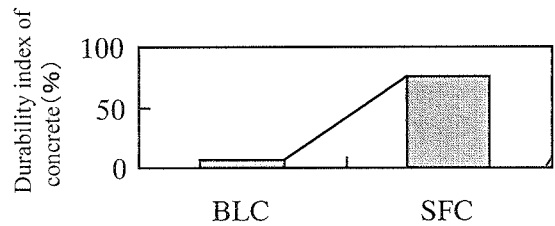


Fig.15 Relation between type of cement and durability index of concrete

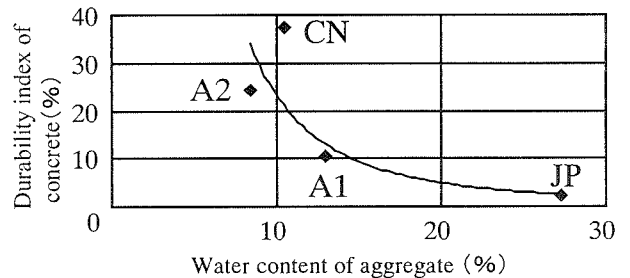


Fig.16 Relation between water content of aggregate and durability index of concrete

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。

拡散係数に及ぼす使用骨材の影響を Fig.14 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。

しかしながら Fig.14 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 Table 9 および Fig.15 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

すようにシリカフュ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 Fig.16 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<sup>3)</sup>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。

## 5. 結 言

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うち、とくに充填性能の定量的な評価が可能と推定される。
- 2) シリカフュ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。

### 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：シリカフュ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