

[1024] 高強度・高流動性軽量コンクリートの諸性状に関する基礎的研究

小山明男*1・菊池雅史*2・山川勉*3・早川和良*4

1. はじめに

近年、コンクリート工事において、より良質な施工品質が要求されるようになり、優れた充填性を有する高流動コンクリートについての研究・開発が活発に行われている。[1][2] また、高流動性と高強度を兼ね備えた高強度・高流動コンクリートの研究も盛んに行われている。[3]

今後ともますます進展の傾向にあるRC構造物の超高層化において、軽量コンクリートを用いる意義は大きく、これら構造物の安全性および耐久性を確保する意味でも、軽量コンクリートの高流動化は意義のあることと考える。

本研究は、軽量コンクリートの施工性、高強度、耐久性等の向上を目途とし、高炉スラグ微粉末、分離低減剤、高性能減水剤を組み合わせ、高流動化した軽量コンクリートの、流動性、充填性、強度性状、耐久性状等に関する基礎的性質について総合的に検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

a) 結合材：普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末（以下BFという）を用いた。

b) 混和剤：高性能減水剤（高縮合トリアジン系）、減水剤（リグニン系）、AE剤（レジ系）およびシリカ系分離低減剤（以下LACという）を用いた。

c) 骨材：細骨材として川砂（大井川産）、粗骨材として膨張頁岩系人工軽量骨材を用いた。使用材料の種類および性質等の概略を表-1に示す。

表-1 使用材料の種類および性質

結合材	普通ポルトランドセメント	比表面積：3260 cm ² /g、比重：3.16
	高炉スラグ微粉末 (BF)	比表面積：6420 cm ² /g、比重：2.91
混和剤	高性能減水剤	高縮合トリアジン化合物系
	減水剤	リグニン系
	空気量調整剤	レジ系
	材料分離低減剤 (LAC)	低界面活性の非イオン性セルロースエーテル
骨材	細骨材	大井川産川砂、表乾比重：2.60、FM：2.91
	粗骨材	膨張頁岩系人工軽量骨材 G _{max} ：15mm、表乾比重：1.44、FM：6.25

2.2 試料コンクリートの種類および調査

水結合材比(W/B)を3水準、分離低減剤添加量を5水準、高炉スラグ微粉末混入率を4水準とし、それらを組み合わせたコンクリートと、これに比較用のスランブ18cmの軽量コンクリート（以下Nコンクリートという）3種類の合計26種類の試料コンクリートを作製した。試料コンクリートの種類、調査および試験項目を表-2に示す。

2.3 コンクリートの練混ぜ、成形および養生方法

a) 練混ぜ方法：50ℓ用強制攪拌ミキサを用い、まず細骨材と分離低減剤を予め混入・攪拌した結合材を投入し30秒空練りし、次に予め混和剤を混入・攪拌した水を投入した後30秒練混ぜ、最後に粗骨材を投入し2分間、合計3分間練り混ぜた。

*1 明治大学大学院 工学研究科建築学専攻, 工修(正会員)

*2 明治大学専任講師 理工学部建築学科, 工博(正会員)

*3 信越化学工業(株) 合成技術研究所第一部研究員(正会員)

*4 信越化学工業(株) 有機合成事業部事業部長室主席技術員, 理修(正会員)

b) 成形方法：本実験では、各種強度試験、中性化および塩分遮蔽試験において、振動締固め有りおよび無しの2種類の供試体を作製した。その作製方法を以下に示す。

①振動締固め有り：JIS A 1132に準じた。 ②振動締固め無し：コンクリートを円柱試験体では3層に角柱試験体では2層に分けて投入し、各層ごとに木づちで側面を軽く叩いて成形した。

2. 4 試験項目、試験方法、試験体寸法および養生方法

本実験で行った試験項目、試験方法、試験体寸法、養生方法を表-3、図-1、図-2および図-3に

表-2 試料コンクリート種類および試験項目

試料 コンクリート 記号	水 結 合 材 比 %	分 離 低 減 剤 添 加 量 g/m ³	高 炉 ス ラ グ 混 入 率 %	高 性 能 減 水 剤 添 加 率 %*1	減 水 剤 添 加 率 %*1	細 骨 材 率 %	単 位 水 量 kg/m ³	単 位 量 (kg/m ³)				試 験 項 目																
								結 合 材		細 骨 材	粗 骨 材	ス ラ ン プ 加	V 型 口	鉄 筋 通 過	凝 結	圧 縮 強 度	曲 げ 強 度	引 張 強 度	乾 燥 収 縮	中 性 化	塩 分 遮 蔽	凍 結 融 解						
								セ メ ン ト	高 炉 ス ラ グ														セ メ ン ト	高 炉 ス ラ グ				
LA30-0		0	0	2.0	0		175	583	-	691	531	-	-	-	○	◎	-	-	-	-	-	-	-	○				
LA30-5		0	50				170	283	283	694	533	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	-				
LB30-0	30	200	0	3.0	0.25	45	175	583	-	691	531	○	○	○	○	◎	○	○	○	-	-	-	-	○				
LB30-3			30				170	397	170	698	536	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
LB30-5			50				170	283	283	694	533	○	○	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
LB30-7			70				170	170	397	691	530	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
LC30-5			350				170	283	283	694	533	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
LD30-5	500	170	283	283	694	533	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-					
LA40-0		0	0	1.5	0		180	450	-	816	512	-	-	-	-	◎	-	-	-	-	-	-	-	○				
LA40-5		0	50				175	219	219	820	515	○	○	○	-	○	×	×	×	×	○	○	-					
LC40-0	40	350	0	3.0	0.25	50	180	450	-	816	512	○	○	○	-	◎	○	○	○	-	-	-	-	○				
LC40-3			30				175	306	131	823	517	○	○	○	-	◎	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	
LC40-5			50				175	219	219	820	515	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	
LC40-7			70				175	131	306	817	513	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
LD40-5			500				175	219	219	820	515	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
LE40-5			650				175	219	219	820	515	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
LA50-0							0	0	1.5	0		180	360	-	853	535	-	-	-	-	◎	-	-	-	-	-	-	-
LA50-5		0	50				175	175	175	857	538	○	○	×	-	×	×	×	×	○	○	-	-	-				
LC50-0	50	350	0	3.0	0.25	50	180	360	-	853	535	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○				
LC50-5			50				175	175	175	857	538	○	○	○	-	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	
LD50-0			0				180	360	-	853	535	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
LD50-3			30				175	245	105	860	540	○	○	○	-	◎	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	
LD50-5			50				175	175	175	857	538	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LD50-7			70				175	105	245	855	537	○	○	○	-	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-
LE50-0			650				0	180	360	-	853	535	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○
LE50-5							50	175	175	175	857	538	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) *1：セメント重量に対する百分率(%) ◎：圧縮強度において材齢91日試験を行ったもの ×：材料分艦のため試験体作製が不可能だったもの

表-3 検出特性値、試験体および試験方法の概略

検出特性値	試 験 方 法	試験体寸法	養生方法
スランプフロー	JIS A 1101に準じ、スランプフローを測定した	10φ×20cm	各試験材齢まで 標準水中養生
圧縮強度	JIS A 1108に準じた	10×10×40cm	
曲げ強度	JIS A 1106に準じた	10φ×20cm	
引張り強度	JIS A 1113に準じた	10φ×20cm	材齢1週水中養生 以後20℃、RH60% 気中養生
長さ変化	JIS A 1129のコンパレータ法に準じた	10×10×40cm	
重量減少率	長さ変化試験体における重量減少率を測定した	10×10×40cm	材齢2週水中養生 2週気中養生の 後試験に供した
中性化	・30℃、RH60%、CO2濃度5%促進1ヶ月試験 ・フェノールフタレイン法により図-1に示す位置の中性化深さをノギスにより測定	10×10×19cm	
塩分遮蔽性	・NaCl3%溶液中に12時間浸漬後30℃気中で12時間乾燥を1サイクルとして20、40サイクルで試験 ・フルレイトナトリウム法により図-1に示す位置の塩分浸透深さを測定	10×10×19cm	
凍結融解	・ASTM C 666(水中凍結水中融解)法に準じた ・JIS A 1127法により、動弾性係数を測定	10×10×40cm	

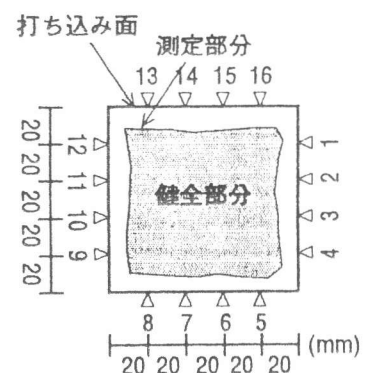


図-1 中性化および塩分遮蔽性試験の測定位置

示す。V型ロート流下時間および鉄筋通過率試験については以下の方法により求めた。

a) V型ロート流下時間：図-2に示す装置内に充填したコンクリートを下部の流出口から流下させその時間を測定した。

b) 鉄筋通過率：図-3に示す装置に試料を約30ℓ投入し、図-3b)に示す鉄筋メッシュを通過するコンクリートの重量を30秒毎3分まで測定し、その量を投入試料の重量で除して求めた。

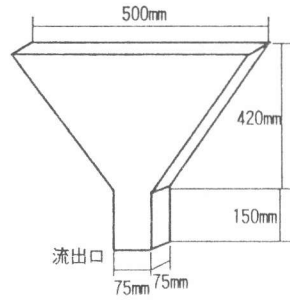


図-2 V型ロート試験装置

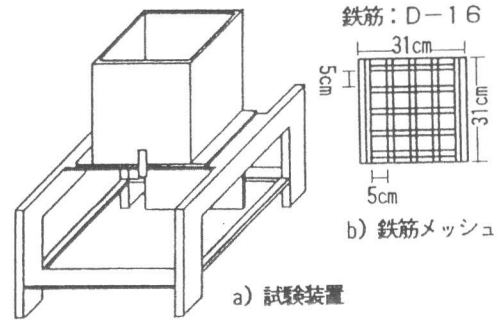


図-3 鉄筋通過試験装置

表-4 スランプフローの評価区分

評価区分	評価基準
A	流動性に優れ、十分な分離抵抗性を持ちモルタルと骨材が一体してフローしたもの
B	粘性が大きすぎて、流動性を損ない、フローの速度が遅いもの
C	分離抵抗性が小さく、モルタルの先走り現象が認められるもの

3. フレッシュコンクリートの性状

3.1 流動性について

スランプフローの流動性の評価区分を表-4に示す。図-4にスランプフローとLAC添加量の関係を示す。LAC添加量を200～350 g/m³とすることで水結合材比30%のような粉体量が多い場合においても水結合材比40、50%と同様に70cm以上のスランプフローが得られた。また、BFの混入率との関係では、混入率の増加に伴いスランプフローは大きくなる傾向がみられた。

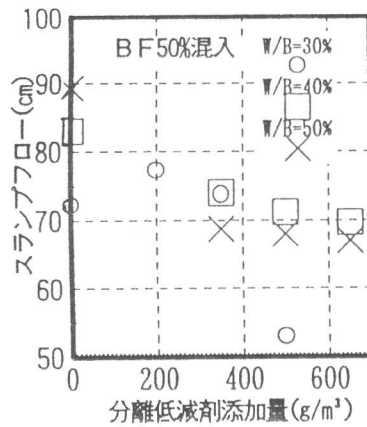


図-4 スランプフローと分離低減剤添加量の関係

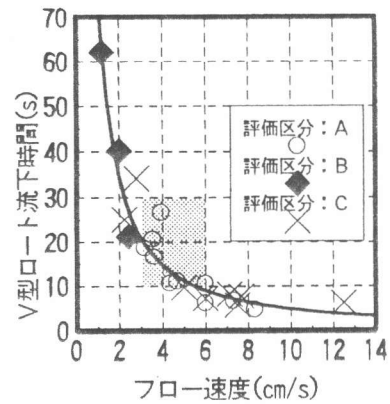


図-5 フロー速度とV型ロート流下時間の関係

図-5にフロー速度（スランプコーンを上げた瞬間からフローが50cmに到達するまでの時間と距離30cmの関係より求めた）とV型ロート流下時間の関係を示す。フロー速度とV型ロート流下時間の間には図中のような高い相関性が認められた。流動性に優れかつ分離現象の見られない範囲（判定区分：A）はフロー速度で3～6 cm/s、またV型ロート流下時間で10～30 sの範囲といえる。

3.2 充填性について

図-6にスランプフローと鉄筋通過率（30秒後における測定値）の関係の一例を示す。判定区分に関係なく、多くの試料で80%以上の鉄筋通過率を示した。粉体量が多く粘性の高い水結合材比30%のコンクリートにおいて80%以下となったものも一

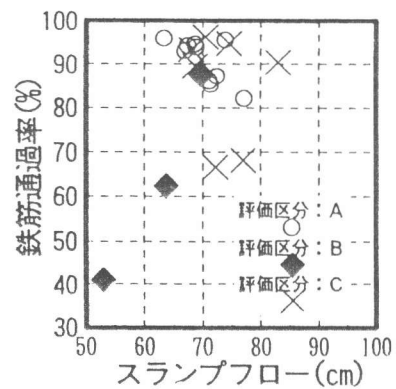
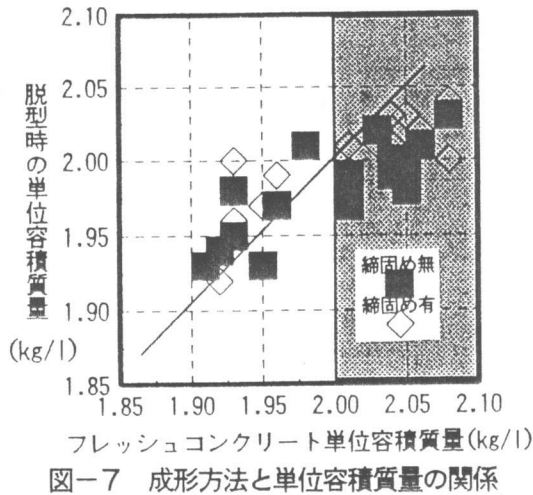


図-6 スランプフローと鉄筋通過率の関係



部みられたが、1分後にはほぼ全量通過しており、軽量骨材を用いた場合でも普通骨材を用いた場合と同等以上の間隙通過性を有しているといえる。

図-7にフレッシュコンクリートの単位容積質量と脱型時の単位容積質量との関係を示す。フレッシュコンクリートの単位容積質量が2.0 kg/l以下の範囲では、締固め有無の差は比較的小さいが、2.0 kg/l以上すなわち水結合材比が小さくなる場合には締固め有りとした方がより密実なコンクリートが得られるといえる。

図-8に凝結時間を示す。高性能減水剤添加率を2.0%とした場合のコンクリートの始結および終結はそれぞれ6時間および8時間程度であった。一方添加率を3.0%とした高流動コンクリートでは、BF混入率によらず始結および終結はそれぞれ10時間および13時間程度であったがいずれも14時間以内で終結した。

4. 硬化したコンクリートの一般性状

4.1 圧縮強度

図-9に材齢28日圧縮強度を示す。水結合材比30%の場合で600 kgf/cm²以上の強度発現が得られた。BF混入率70%では強度発現が遅れる傾向がみられたが、水結合材比50%ではその影響は小さいといえる。また、LAC添加量の影響は小さいといえる。各試料コンクリートにおいて、締固め有無による有意差はみられなかった。

図-10に材齢91日までの圧縮強度発現状況を示す。BFを混入した場合長期材齢での強度発現は良好であり、BF混入率30%とした場合では、材齢91日でNコンクリートを上回る694

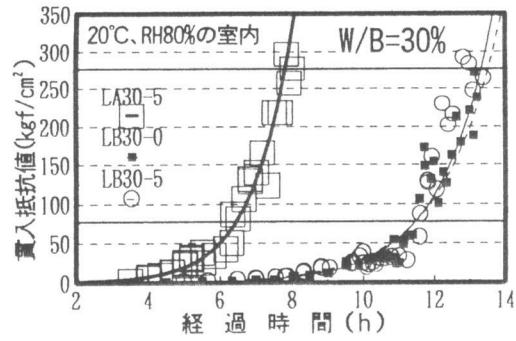


図-8 凝結試験結果

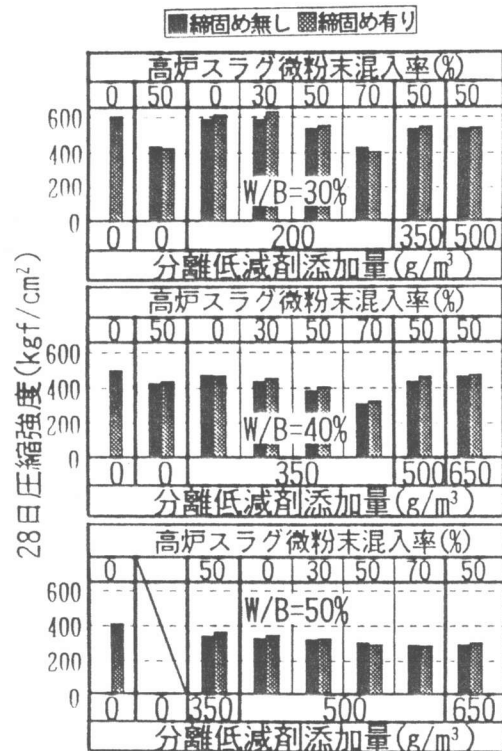


図-9 材齢28日圧縮強度試験結果

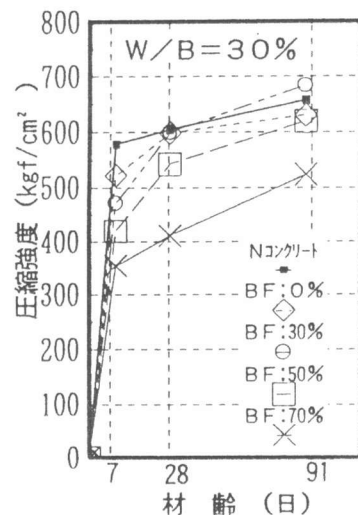


図-10 圧縮強度発現状況

kgf/cm²の強度発現を示した。BF混入率50%の場合でも良好な強度発現を示した。一方、BF混入率を70%とした場合では前二者に比べて低い強度であった。曲げおよび引張り強度は、それぞれ圧縮強度の1/8～1/11および1/12～1/17の範囲内にあり、いずれもLAC添加の影響は認められなかった。

4.2 長さ変化

表-5に材齢13週までの収縮率を示す。水結合材比の減少に伴い収縮率は小さくなる傾向にあり、水結合材比30%では一部に膨張を示すコンクリートもみられた。また、BF混入率が増加するのに伴い収縮率は小さくなる傾向がみられた。水結合材比が小さくLACおよびBFを組み合わせたコンクリートの長さ変化については、さらに詳細な検討が必要といえる。

5. 耐久性状について

5.1 中性化

図-11に促進試験1ヶ月における中性化深さを示す。中性化については水結合材比による影響が大

表-5 長さ変化試験結果

コンクリート 種類記号	収縮率(×10 ⁻⁵)		
	試験材齢(週)		
	1	4	13
LA30-5	2.7	17.5	27.8
LB30-0	-0.9	3.5	15.2
LB30-3	2.1	8.8	14.9
LB30-5	-1.5	5.7	17.7
LB30-7	-3.8	0.0	6.0
LC30-5	-1.8	-0.3	-0.6
LD30-5	-2.1	12.2	20.3
LC40-0	-8.5	5.0	53.2
LC40-3	1.2	19.0	43.1
LC40-5	-1.3	16.0	31.2
LC40-7	-7.5	1.3	9.9
LD40-5	-5.0	8.4	32.8
LE40-5	-11.0	6.2	28.7
LD50-0	7.7	34.0	78.4
LD50-3	3.8	39.3	79.9
LD50-5	3.8	28.7	57.8
LD50-7	1.8	17.2	28.3
LE50-5	1.3	38.5	72.8

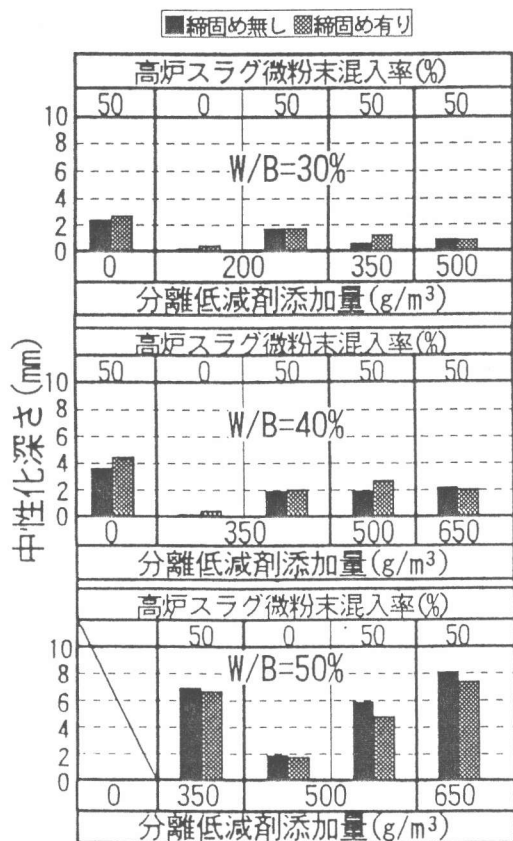


図-11 促進中性化試験結果

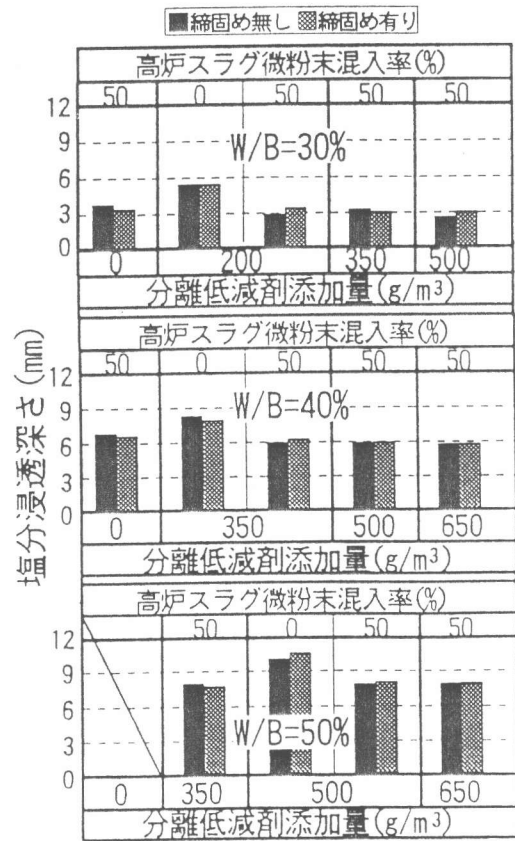


図-12 塩分遮蔽性試験結果

きいといえる。また、BFを混入した場合中性化深さは大きくなる傾向がみられた。LAC 添加量による影響は小さいといえる。

5.2 塩分遮蔽性

図-12に各種コンクリートの40サイクル時の塩分浸透深さを示す。これによると、中性化と類似した傾向を示しており、水結合材比を小さくすることで塩分遮蔽性が向上するといえる。BFによる影響は中性化の場合とは逆にBFの混入により塩分遮蔽性は向上するといえる。また、塩分遮蔽性においてもLAC 添加量の影響は小さいといえる。

5.3 凍結融解性

図-13は180サイクルまでの耐久性指数の経時変化の一例を示したものである。空気量が同程度の場合、水結合材比を小さくすることやBFを混入することにより、若干耐久性指数は大きくなっている。また、空気量6%以上の水結合材比50%のコンクリートは、空気量5%程度の水結合材比30%のコンクリートよりも耐久性指数は大きい値を示した。いずれのコンクリートについても

150サイクルまでに60以下の耐久性指数を示した。

本研究では、人工軽量骨材を含水率20%の状態で使用したが含水率の小さい骨材の使用により幾分の改善は可能と考えられる。

6. まとめ

結合材の一部に高炉スラグ微粉末を使用し、分離低減剤にセルローズ系分離低減剤を用いた高流動性軽量コンクリートの諸性状について検討結果をまとめると、大要次のとおりである。

(1) 結合材量の多い水結合材比30%の場合でも、スランプフロー70cm前後の良好な流動性および充填性を示し、かつ粗骨材の分離が見られないコンクリートが得られた。

(2) また、この種のコンクリートでは、分離低減剤(LAC)および高炉スラグ微粉末(BF)の適切な組み合わせにより、強度および耐久性の面でも問題ないことが確認できた。

【参考文献】

- 1) 小沢一雄・前川宏一・岡村甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp699～pp704，1989.6
- 2) 小山明男・菊池雅史・山川勉・早川和良・恩田吉朗・柿崎正義：セルローズ系増粘剤を用いたコンクリートの基礎的性質に関する検討，1993年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp 727～pp732 1993.9
- 3) 友澤史紀・野口貴文・小野山貴造・陳庭：高強度・高流動コンクリート用バインダーの開発に関する研究，1992年度日本建築学会大会学術講演梗概集，pp 523～pp528 1992.8

【謝 辞】

本実験に際し、株式会社エヌエムビー、日本メサライト工業株式会社、第一セメント株式会社および本学学生犬山昌彦、永田薫の両君に協力を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

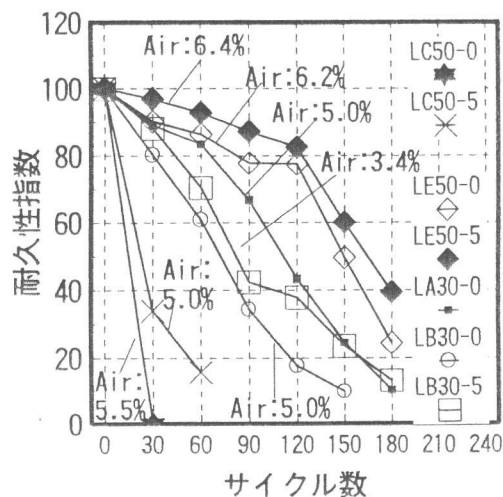


図-13 耐凍結融解性試験結果