Japan Concrete Institute

論文　高流動コンクリートの配合設計および製造に関する研究

竹内　博幸*1・浜崎　勝利*1・吉井　一郎*2・福手　勤*3

要旨：密閉空間への充填を目的とした高流動コンクリートを配合設計するにあたり、ハイパフォーマンスコンクリート配合設計法を増粘剤と粉体を併用した系に応用し、材料の選定・使用量の決定を行った。また、製造段階では不可避である骨材の表面水および微粒分の変動がフレッシュ性状に及ぼす影響を緩和するため、練混ぜおよび配合修正による方法を検討し、実工事への適用を図った。

キーワード：併用系、ハイパフォーマンスコンクリート配合設計法、骨材の表面水・微粒分

1．はじめに

密閉空間への充填を目的とした高流動コンクリートの場合、上面材との間に空隙を残さない充填性に加え、製造から施工終了までの一定時間所要の品質を維持することが要求された。このような要求性能に対して配合設計を行うにあたり、コンクリートの沈降量を低減し、かつ品質の変動を抑制するため、増粘剤および各種混和材の量を変化させ、最適配合を検討した。

一方、高流動コンクリートは、一般に単位水量を抑制する方向で配合設計がなされていることもあり、特にスランプフロー試験においては骨材の表面水が比較的大きな影響を及ぼす傾向にある。また、骨材の微粒分については含有量がJISの規格内であってもその影響は無視できない場合もある。特に、生コン工場での製造では、両者の影響は不可避であるため、その緩和策として練混ぜおよび配合修正による方法を検討し、実工事への適用を図った。

2．配合の検討

2．1　前提条件

配合を検討するにあたり使用した材料を表－1に示す。セメント、細・粗骨材については、立地条件、製造能力などから実工事での製造が可能と考えられる複数の工場から1社を選定し、そこで用いられているものを使用した。増粘剤は、高流動コンクリートに対する実績と既存データの有効利用の2点から水溶性メチルセルロース系のものを用いた。混和材については、石灰石微粉末6種類、高炉スラグ微粉末2種類の計8種類を検討対象とした。なお、室内実験は、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室で行った。

配合の検討にあたっては、所要条件に対応する

表－1　使用材料

使用材料	記号	種　類	物性および成分
セメント	C	高炉ｾﾒﾝﾄB種	比重 3.04 比表面積 3750cm²/g
細骨材	S1	大鵬島産海砂	表乾比重 2.52 吸水率 1.8%
	S2	宝塚産砕砂	表乾比重 2.57 吸水率 2.3%
粗骨材	G1	宝塚産砕石（2015）	表乾比重 2.60 吸水率 1.1%
	G2	宝塚産砕石（1505）	表乾比重 2.58 吸水率 1.4%
混和材	LS1	石灰石微粉末	比重 2.71 比表面積 3500cm²/g
	LS2	同　上	比重 2.71 比表面積 5500cm²/g
	LS3	同　上	比重 2.71 比表面積 7500cm²/g
	LS4	同　上	比重 2.71 比表面積 7000cm²/g
	LS5	同　上	比重 2.71 比表面積 4300cm²/g
	LS6	同　上	比重 2.73 比表面積 3500cm²/g
	BS1	高炉スラグ微粉末	比重 2.88 比表面積 5000cm²/g
	BS2	同　上	比重 2.89 比表面積 6000cm²/g
高性能AE減水剤	SP1	ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸ｴｰﾃﾙと架橋ﾎﾟﾘﾏｰ	比重 1.05（標準型）
	SP2		比重 1.05（遅延型）
増粘剤	Ad	低界面活性型水溶性ﾒﾁﾙｾﾙﾛｰｽ系	2%水溶液粘度：10,000cp

*1 五洋建設(株)　技術研究所（正会員）
*2 五洋建設(株)　大阪支店
*3 運輸省　港湾技術研究所　構造部　材料研究室長、工博（正会員）

NII-Electronic Library Service

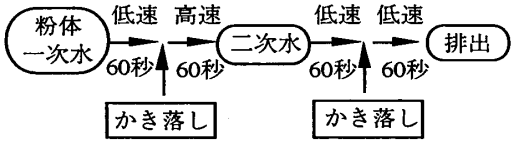
調整因子数を確保し、かつ検討対象を限定しないように、増粘剤と混和材をそれぞれ0から過大量まで変動させ、最適配合を抽出することとした。

2．2　試験方法

試験方法として、東京大学岡村教授らのハイパフォーマンスコンクリート配合設計法（以下HPC法）[1] を増粘剤を用いた系にも準用し、適宜ペースト・モルタル試験を行い、最終的にはコンクリート試験により配合を設定した。それぞれの試験方法は以下のとおりである。

（1）ペースト試験

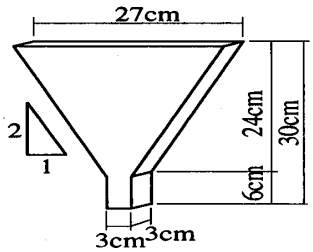
試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定されているミキサおよびフローコーン（ϕ100mm）を用いたフロー試験とし、練混ぜは図－1に示す方法とした。この試験を水粉体体積比（以下Vw/Vp）を変えて行った場合、相対フロー面積比（フローコーン面積より増大したフロー面積をフローコーン面積で除した値）とVw/Vpは非常に高い相関を示し、このとき回帰直線を外挿して得られる拘束水比（βp）およびその傾きである変形係数（Ep）はフレッシュ性状に影響を及ぼす粉体固有の特性値と考えられる [1]。



図－1　ペースト練混ぜ方法

（2）モルタル試験

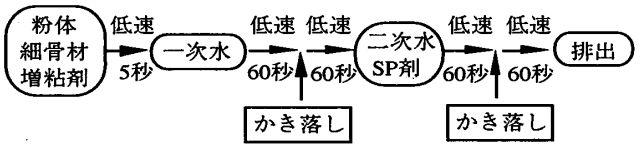
試験は、ペースト試験と同様のミキサおよびフローコーンを用いてフロー値を測定し、さらに図－2に示すロート試験器を用いて流下時間を測定した。練混ぜは、コンクリート中のモルタルの状態を再現するように図－3に示す方法とした。なお、試験の実施は高性能AE減水剤（以下SP剤）の効果が安定する練上がり20分後とした。



図－2　ロート試験器

（3）コンクリート試験

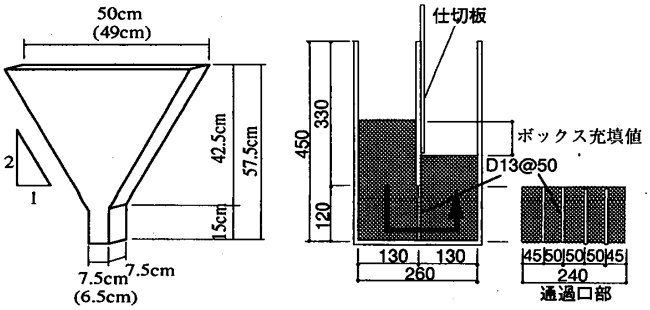
練混ぜは、水平2軸式強制練りミキサ（容量100ℓ）を用いて基本的には一括投入により行い、練混ぜ量は70ℓとした。試験・測定項目を表－2に示す。表中の管理目標値は実工事における所要品質に基づいている。また、Vロートおよびボックス試験に用いた装置を図－4に示す。Vロートは、実工事では75が指定されたが、判定としては一般に危険側とされるので、配合設定の段階では65も用いた。配合は、モルタル試験によりフロー値24.5cm、ロート流下時間8.3秒となるようなVw/Vpを求め、これに所定量の粗骨材を加えてコンクリートとし、SP剤量によりスランプフロー値を調整した。



図－3　モルタル練混ぜ方法

表－2　試験・測定項目

試験・測定項目	試験・測定方法	管理目標値
スランプフロー	JIS A 5201 に準ずる	65±5cm
空気量	JIS A 1128 に準ずる	2.0%
単位容積質量	空気量試験試料より	2.30以上
V75ロート流下時間	HPC 配合設計法による [1]	15±5 秒
V65ロート流下時間	同　上	——
ボックス試験値	ボックス試験装置使用	——



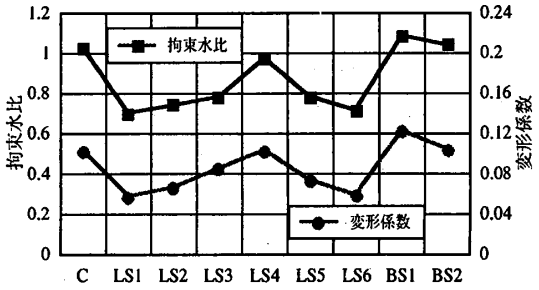
図－4　V75(65)ロートおよびボックス試験装置

2．3　混和材の検討

検討対象の混和材8種類については、

NII-Electronic Library Service

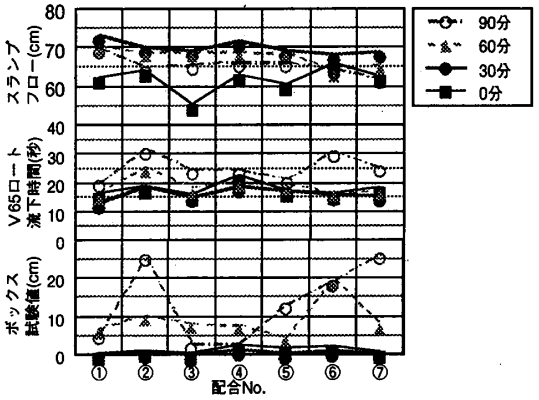
HPC法のペースト試験を準用して検討を行った。その結果を図－5に示す。拘束水比はペーストの変形に要する水量を、また変形係数は変形量の増大の大きさを表わし、高流動コンクリートに用いる粉体としては、これらの値が小さい方が優れていると判断される［1］。そこで、両者ともに小さいLS1とLS6を選定し、これらを用いたモルタル試験により所定のVw/Vpを求め、それに基づきコンクリート試験を行った。試験の対象を表－3に、また、試験結果のうちスランプフロー値、V65ロート流下時間およびボックス試験値の経過時間0～90分の測定結果を図－6にそれぞれ示す。このうち、前2者については、混和材の種類・置換率による明確な差異は認められないが、ボックス試験値については、特に増粘剤使用量0.10%の場合、LS6の置換率20、30%が経時90分まで安定した値を示していた。ただし、置換率30%の配合の方が単位水量が少なく、水粉体比も小さいため耐久性状の面では若干有利であることから、混和材の種類はLS6とし、混合比は30%と決定した。なお、Vロート試験は間隙通過性を評価するのに対し、ボックス試験はコンクリートの変形性能に加えて骨材のアーチングを緩衝する性能も評価していることからこのような差異が生じたものと考えられる。



図－5　ペースト試験結果

表－3　混和材の検討対象

配合No.	水粉体比(%)	単位水量(kg/m³)	粉体種類	混和材置換率(%)	SP剤量(P%)	増粘剤量(W%)
①	32.40	184	LS 1	20	1.10	0.10
②	33.56	186		30	1.20	
③	32.86	185	LS 6	20	1.40	
④	31.82	181		30	1.20	
⑤	36.74	195	LS 6	20	1.65	0.25
⑥	37.86	197		30	1.60	
⑦	34.43	187		40	1.60	



図－6　混和材の検討結果

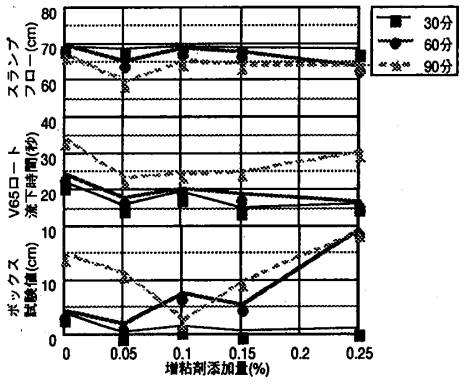
表－4　増粘剤使用量の検討対象

増粘剤量(W%)	水粉体比(%)	単位水量(kg/m³)	SP剤量(P%)	混和材の設定
0	29.24	173	1.40	種類：LS 6 置換率：30%
0.05	29.49	174	1.30	
0.10	31.82	181	1.20	
0.15	34.11	187	1.20	
0.25	37.86	197	1.60	

2．4　混和剤の検討

（1）増粘剤使用量の検討

増粘剤の使用量がコンクリート性状に及ぼす影響を把握し、適切な使用量を求めるために、モルタル試験による最適配合についてコンクリート試験を行った。試験の対象を表－4に示す。なお、細骨材容積比(s/m)は0.45とした。図－7に、練上がり後30、60、90分における試験結果の一部を示す。スランプフロー値については、使用量0.05%の場合経時90分での低下が若干大きく、V65ロート流下時間については、使用量0%の場合が全般的に遅いほかはいずれも大きな差異はみられないが、ボックス試験では使用量0.10%の場合が経時90分でも安定した値を示していた。これらのことから増粘剤の使用量は0.10%とした。



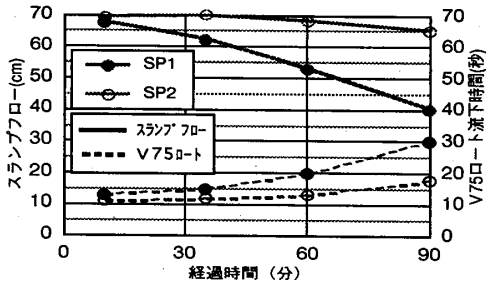
図－7　増粘剤使用量検討結果

（2）高性能AE減水剤の種類の検討

図－8に、SP剤の種類を変えてコンクリートのスランプフロー試験により比較した結果を示す。なお、増粘剤

NII-Electronic Library Service

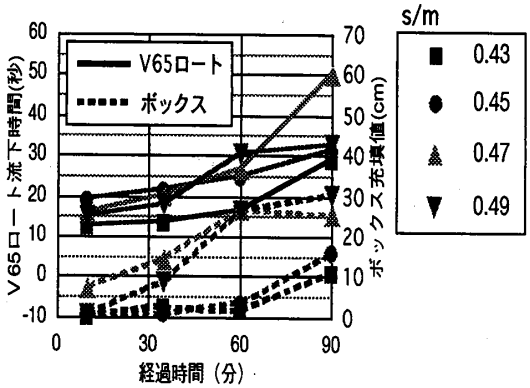
使用量を0.10%としたほかは（1）と同様の設定とし、モルタル試験によりモルタル部分の配合を決定した。また、試験は、練上がり後10分に1回目を行い、以降35、60、90分にそれぞれ行った。試験の結果、SP2を用いた場合、スランプフロー値、V75ロート流下時間ともに経時変化に対し優れた保持効果がみられる。



図－8 高性能AE減水剤の種類による比較

2．5　細骨材量の検討

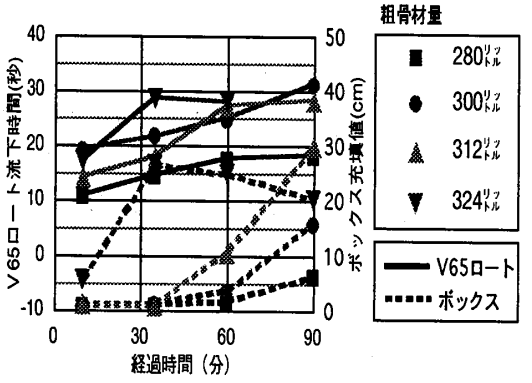
適切な細骨材量を求めるため、モルタル中のs/mを4水準設定し、モルタル試験より求めた最適配合で粗骨材量を一定としたコンクリート試験を行った。試験結果の一部を図－9に示す。V65ロート流下時間についてはs/m＝43%が他に比較して速いほかは大きな差異はみられないが、ボックス試験については s/m＝43、45%とも経時90分まで充填値が小さく、大きな差異がない。しかし、s/m＝43%とした場合、要求性能の1つである単位容積質量2.30以上を満足できないことから、s/m＝45%を標準とした。



図－9　細骨材量によるコンクリート性状の比較

2．6　粗骨材量の検討

これまでに決定した配合に対する最適粗骨材量を求めるため、単位粗骨材量280～324ℓ/m³についてコンクリート試験を行った。試験結果を図－10に示す。これより、V65ロート流下時間では大きな差異はみられないが、ボックス試験では単位粗骨材量が300ℓ/m³を超えた場合、経時60、90分で充填値が著しく大きくなることから単位粗骨材量は300ℓ/m³を標準とした。



図－10　粗骨材量によるコンクリート性状の比較

3．製造段階での変動要因による影響

これまでの検討により決定された配合を表－5に示す。本章では、製造段階で考えられるコンクリート性状の変動要因に対して検討を行った。

表－5　決定配合

水粉体重量比(%)	細骨材容積比	単位量(kg/m³)							増粘剤使用量(W%)
		W	C	LS	S1	S2	G1	G2	
31.8	0.45	181	411	158	619	155	393	393	0.10

3．1　骨材表面水による影響

骨材のうち、特に細骨材については、サンドスタビライザーで表面水量を安定させることができない場合、通常の生コン工場では表面水率は1日の間でも大きく変動する。

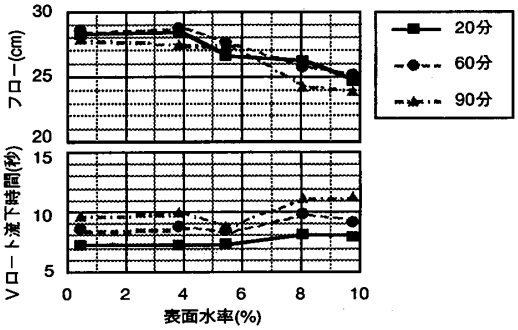
そこで、表－5から粗骨材を除いたモルタル配合により、海砂（S1）の表面水率を0～10%まで変化させてフロー値とロート流下時間の変化をみたところ、図－11の結果が得られた。これより、表面水率が増大するに従いフロー値が小さくなりロート流下時間も若干遅くなる傾向にある。この傾向は、コンクリート試験においても同様であったため、細骨材の表面水量による影響を緩和する方法として、表面水量が一般に大きい海砂を最後に投入して練り混ぜる方法を適用したところ、図

NII-Electronic Library Service

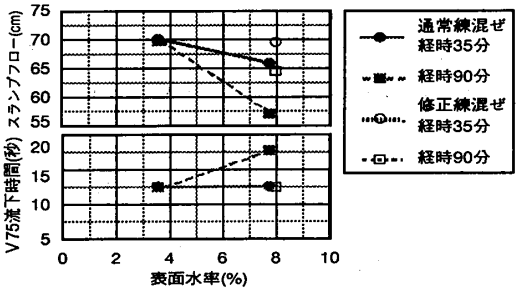
ー12にみられるように、表面水量が大きい場合でも小さい場合と同程度の試験値が得られた。これは、表面水量の影響がロート流下時間よりもフロー値に対して比較的顕著に現われることから、骨材表面水が高性能AE減水剤の接触を阻害し、分散作用を偏在させている可能性が考えられる［2］。

3．2　骨材微粒分による影響

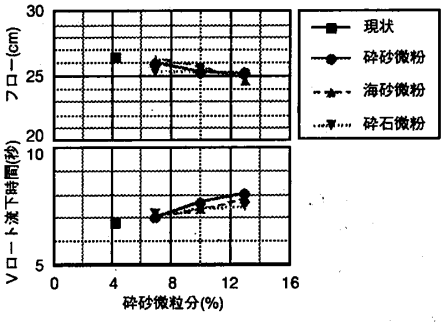
図－13は、表－5のモルタル配合において骨材の微粒分を0.075mmのふるいを通過するものと仮定し、海砂、砕砂、砕石の微粒分を砕砂の容積に対してそれぞれ7～13%まで変化させ、モルタル試験にて比較した結果である。いずれも微粒分が多くなるに従いフロー値が低下しロート流下時間が長くなるが、それぞれ単独ではその変動は小さい。一方、図－14は、海砂、砕石に対してサンドスタビライザー調整、洗いなどの処置をして練り混ぜたものと各骨材の洗い試験のJIS規格値（海砂：5%、砕砂：7%、砕石：1%）の合計分に近い量の微粒分を含有させたものと、さらに後者において含有される骨材微粒分を混和材と置換したものをコンクリート試験により比較したものである。これより、骨材微粒分と混和材を置換した場合、フロー値、ロート流下時間とも骨材を調整した場合の測定値に近づいている。これは、高性能AE減水剤がある粒径以下の骨材微粒分に対しても吸着することがその一因と考えられる［2］。



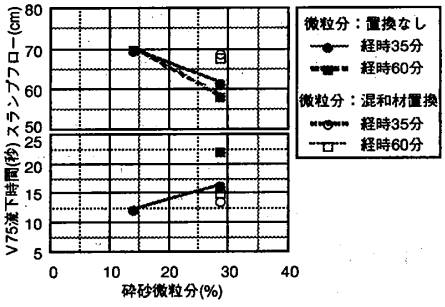
図－11　骨材表面水の影響の検証



図－12　練混ぜ方法の違いによる効果



図－13　骨材微粒分の影響の検証



図－14　骨材微粒分と混和材を置換した場合の効果

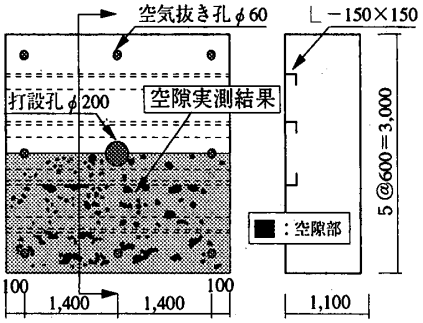
4．大量製造による充填性の検証

4．1　実大打設実験

密閉空間へ高流動コンクリートを大量充填する実工事に先立ち、実構造物を模擬した実大規模の試験体に実機で製造した高流動コンクリートを充填する実験を行い、HPC法を応用して求めた配合によるコンクリートの充填性を検証した。製造にあたっては、骨材表面水・微粒分による影響を緩和する方法を適用した。試験体は、図－15に示す形状・寸法で1体の容積は約10m³である。実験では、計10体の試験体に対し約100m³の高流動コンクリートを充填した。実験前日に洗い試験により求めた骨材の微粒分量を表－6に示す。実験当日の海砂の表面水率は5.9～6.5%であった。図－16に、生コン工場、打設現場におけるスランプフロー値、V75ロート流下時間の測定結果を示す。これらより、骨材表面水は変動は小さいものの比較的高い値で推移し、また骨材微粒分はJIS規格値内であるものの全体でコンクリート1m³あたり9.7ℓ、24.8kgとかなり多くなっていたにもかかわらず、フレッシュコンクリートの試験値は一台目を除き

NII-Electronic Library Service

すべて管理目標値の範囲内であった。また、試験体に対する充填状況を検証するため、打設後上面の鋼板上から放射性同位元素（ＲＩ）法により上面材とコンクリート上面間の空隙量を測定し、さらに硬化後上面材を撤去してコンクリート上面の空隙を実測した。実測結果の一部を図－15に示す。これより、上面の空隙部は、概ね深さ５mm以下のものが点在する程度で密閉空間の充填としては問題ないものと判断された。



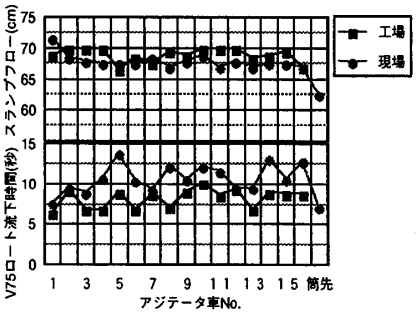
図－15　試験体形状および充填結果

４．２　実工事

密閉空間に高流動コンクリートを大量（約600m³）充填する実工事においても同様の配合にて骨材の影響を緩和する方法を適用し製造を行った。充填は３日間にわたって行ったが、そのうちの１日の工場出荷時におけるスランプフロー値とＶ75ロート流下時間の測定結果を図－17に示す。なお、当日の海砂の表面水率は5.7～7.4%で、骨材微粒分量はコンクリート１m³あたり7.4ℓ、18.9kgであった。試験の結果、スランプフロー値、Ｖ75ロート流下時間はいずれも管理目標値の範囲内であり、その標準偏差は1.11cm、1.61秒で安定した傾向を示していた。。また、ＲＩ法による上面材直下の空隙部の測定の結果、構造体として支障ない充填状況と判断された。

表－６　洗い試験結果

骨材の種類	海砂	砕砂	粗骨材大	粗骨材小
洗い試験で失われる量(%)	2.2	2.9	0.9	0.8



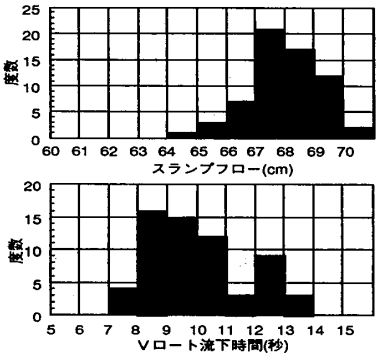
図－16　フレッシュコンクリート試験結果（実大打設実験）

５．まとめ

密閉空間への充填を目的とする増粘剤を用いた高流動コンクリートにHPC法を準用し、骨材の表面水・微粒分の影響に対する緩和策を検討したところ、以下のことが明らかになった。

(1)増粘剤を用いる高流動コンクリートルの配合設計にあたり、HPC法を準用して混和材料の種類・使用量、骨材量について検討したところ、密閉空間に充填可能な最適配合が得られた。

(2)一般に表面水量が大きい細骨材を最後に投入する練混ぜ方法を適用することにより、骨材表面水による影響を緩和することができた。また、骨材微粒分と混和材を置換することにより、骨材微粒分による影響を緩和することができた。



図－17　フレッシュコンクリート試験結果（実工事）

(3)(1)、(2)を実工事に適用したところ、所要性能を有し、かつ経時に伴う品質変動の小さい高流動コンクリートを安定して大量製造することができた。また、充填後の上面材直下の空隙部の測定の結果、構造体として支障ない充填状況と判断された。

なお、本研究は運輸省港湾技術研究所と民間11社の「省力化施工・高信頼性コンクリート研究会」の活動の一環として実施したものである。

参考文献）

［１］岡村甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォマンスコンクリート、技報堂出版、1993

［２］竹内博幸ほか：高流動コンクリートのフレッシュ性状に影響を及ぼす製造過程の変動要因に関する研究、土木学会第50回年次講演会論文集、pp.1124-1125、1995

NII-Electronic Library Service