

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 内藤 英晴
 * 浜崎 勝利 ** 下石 誠
 *** 吉井 一郎

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、現時点では粉体系を主な適用対象としている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定量的に把握するとともに、それ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た。

本研究では、これら配合設計および製造に関する手法を実工事へ適用したところ、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。

1. まえがき

フルサンドイッチ構造などの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場合、基本性能として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にわたり所要性能を維持する性能が要求される。このような要求性能に対して、沈降量を低減し、かつ品質の変動を抑制するため、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⁾を準用し、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、測定値に対して骨材の表面水量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、生コン工場における製造段階では、骨材表面水・微粒分による影響は不可避であるため、その影響を定量的に把握するとともに、その緩和策を検討する必要がある。今回は、前者に対しては練混ぜ、後者に対しては配合修正による方法をそれぞれ検討した。

本研究では、これらの配合設計および製造に関する手法を室内から実大規模までの実験で検証するとともに、最終的には、密閉空間への高流動コンクリートの充填を対象とする実工事へ適用した。

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一 1 に示す。なお、セメント、細骨材、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。ただし、増粘剤には、高流動コンク

表一 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 3750cm ² /g
細骨材	S1	大磯島産海砂	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	宝塚産碎石 (2015)	表乾比重 2.60 吸水率 1.1%
	G2	宝塚産碎石 (1505)	表乾比重 2.58 吸水率 1.4%
混和材	LS 1	石灰石微粉末	比重 2.71 比表面積 3500cm ² /g
	LS 2	同 上	比重 2.71 比表面積 5500cm ² /g
	LS 3	同 上	比重 2.71 比表面積 7500cm ² /g
	LS 4	同 上	比重 2.71 比表面積 7000cm ² /g
	LS 5	同 上	比重 2.71 比表面積 4300cm ² /g
	LS 6	同 上	比重 2.73 比表面積 3500cm ² /g
	BS 1	高炉スラグ微粉末	比重 2.88 比表面積 5000cm ² /g
	BS 2	同 上	比重 2.89 比表面積 6000cm ² /g
高性能 AE減水剤	SP1	ポリカルボキシル酸エーテルと 架橋ポリマー	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 水溶性アクリル系	2%水溶液粘度：10,000cp

* 東北支店 石巻工事事務所 ** 本社 技術本部 第一技術部 *** 大阪支店

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℃、湿度60%の恒温恒湿室で行った。また、使用材料は、コンクリート練り上がり温度がほぼ20℃となるように、あらかじめ24時間以上恒温恒湿室内に保存した。

配合の検討にあたっては、所要条件に対応する調整因子数を確保するため、増粘剤と混和材を併用することを前提とし、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

試験方法は、HPC法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。

2.2.1 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 V_w/V_p ）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 V_w/V_p 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切片である拘束水比（ β_p ）およびその傾きである変形係数（ E_p ）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-2）。

2.2.2 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-3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、コンクリート中に実現されるモルタルの状態を再現するように図-4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り上がり20分後とした。

モルタル中の細骨材中の適量を判定する方法として、岡村らが考案したピストン試験がある²⁾。試験は、図-5に示す装置によりシリンダー（直径10cm）内に一定量（1500cm³）のモルタル試料を詰め、上面から有孔ピストンを一定速度（0.5cm/秒）で降下させ、モルタルが間隙孔を通過する状況により細骨材量の適否を判定するものである。

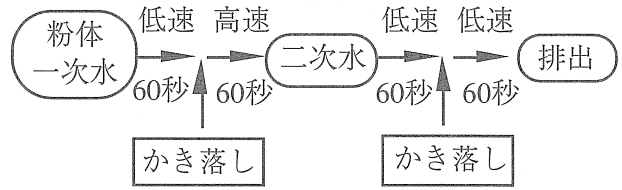


図-1 ペースト練混ぜ方法

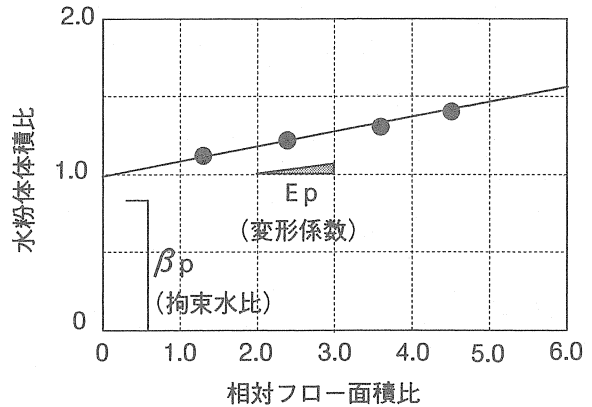


図-2 拘束水比と変形係数

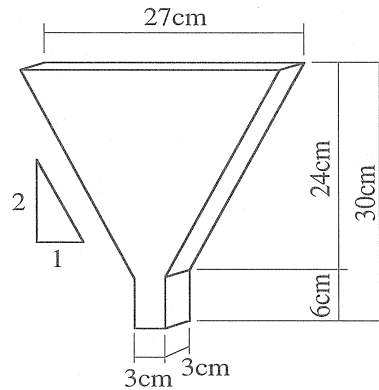


図-3 モルタルロート試験器

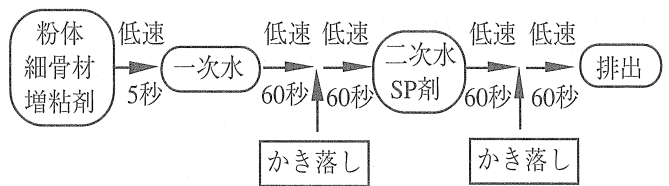


図-4 モルタル練混ぜ方法

2. 2. 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)を用いて基本的に図-6に示すように一括投入により行い、練混ぜ量は70ℓとした。試験・測定項目および管理目標値を表-2に示す。なお、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。

Vロートおよびボックス試験に用いた装置を図-7および8に示す。Vロートは、実工事では排出口の見付け寸法が7.5cmのもの(以下V75ロート)が指定されていたが、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見付け寸法6.5cmのもの(以下V65ロート)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。なお、ロート流下時間については、事前の予備実験で今回用いた細骨材がロート流下時間が遅くなる傾向にあったため、若干速くなる設定とした。

また、今回の高流動コンクリートは、基本性能として上面材との間に空隙を残さない充填性が求められた。そこで、密閉空間での高流動コンクリートの沈下量をできるだけ実構造物に即した状態で測定するため、図-9に示した装置により沈下測定を行った。試験は、塩ビパイプに打ち込んだコンクリートの上面に薄いアクリル板を敷き、その上に設置した変位計により測定した。上面は乾燥防止のためラッピングにより封かんした。塩ビパイプ側面には、はく離剤を塗付してコンクリートとパイプ側面間の摩擦による抵抗を低減させた。なお、試料面の高さは、実構造物の鉛直断面高さとも一致させた。

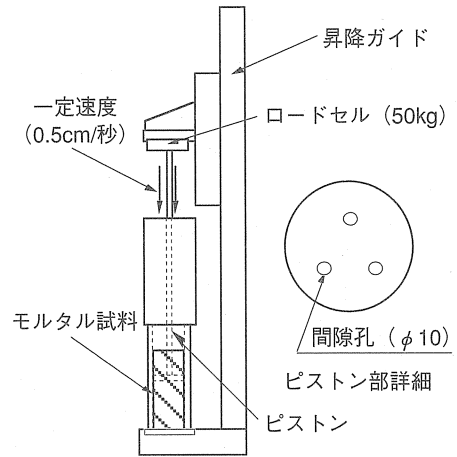


図-5 ピストン試験機

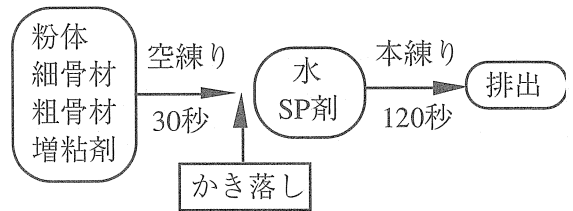


図-6 コンクリート練混ぜ方法

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]	10±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	—

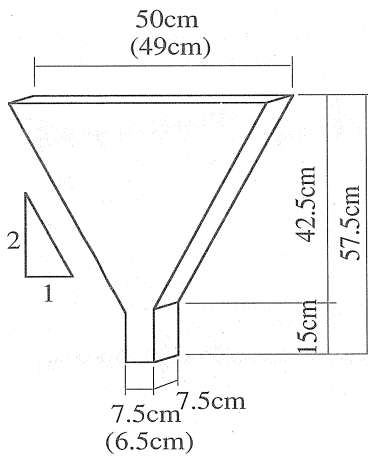


図-7 コンクリートV75(65)ロート試験器

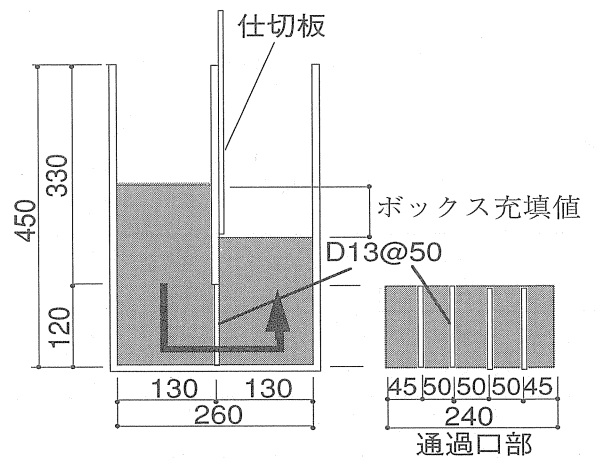


図-8 ボックス試験器

2.3 混和材の検討

検討対象の混和材 8 種類については、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-10に示す。拘束水比はペーストの変形に要する水量を、また変形係数は水量の増大に伴う変形量の増大の大きさをそれぞれ表わしていることから、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、混和材に変形係数、拘束水比ともに小さい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-11にそれぞれ示す。このうち、スランプフロー値、V65ロート流下時間については、混和材の種類・置換率による差異は明確ではないが、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および30%が経時90分まで安定した値を示していた。

両者を比較した場合、単位水量については後者の方が少なく、水粉体比も小さいため耐久性の面では若干有利である。また、後者の方が安価な混和材の量が多くなり経済的でもある。これらのことから、混和材の種類はLS6とし、置換率は30%と決定した。

なお、V65ロートおよびボックス試験の評価にこのような差異が生じたのは、Vロート試験は間隙通過性を評価しているのに対し、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ためと考えられる。

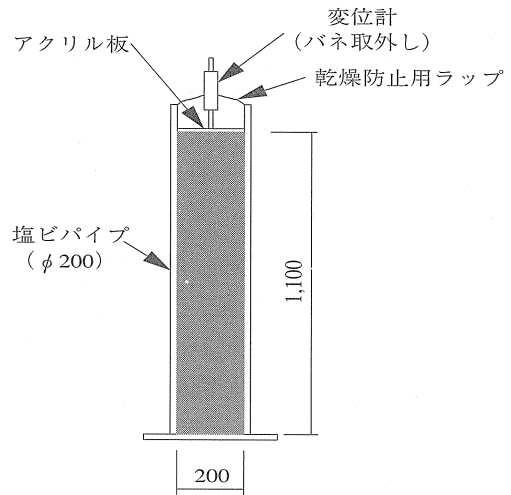


図-9 沈下試験装置

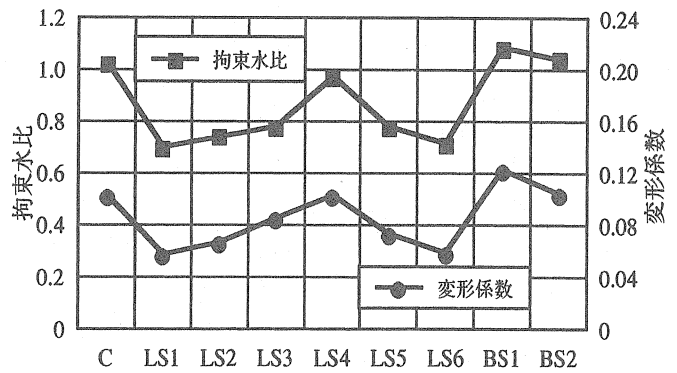


図-10 ペースト試験結果

表-3 混和材の検討対象

配合 No.	水粉体比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	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	

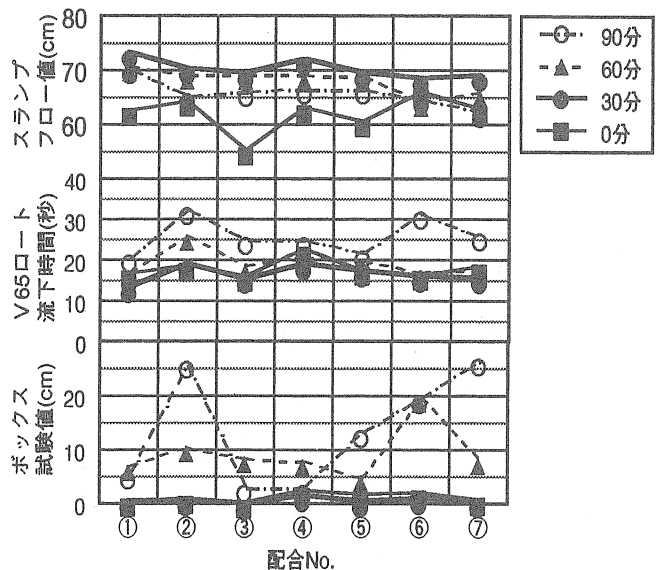


図-11 混和材の検討結果

2. 4 混和剤の検討

2. 4. 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。試験の対象を表一4に示す。なお、混和材はLS6を置換率30%で、細骨材容積比 (s/m) は0.45とした。

図一12に、練り上がり後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ル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。

2. 4. 2 高性能AE減水剤使用量の検討

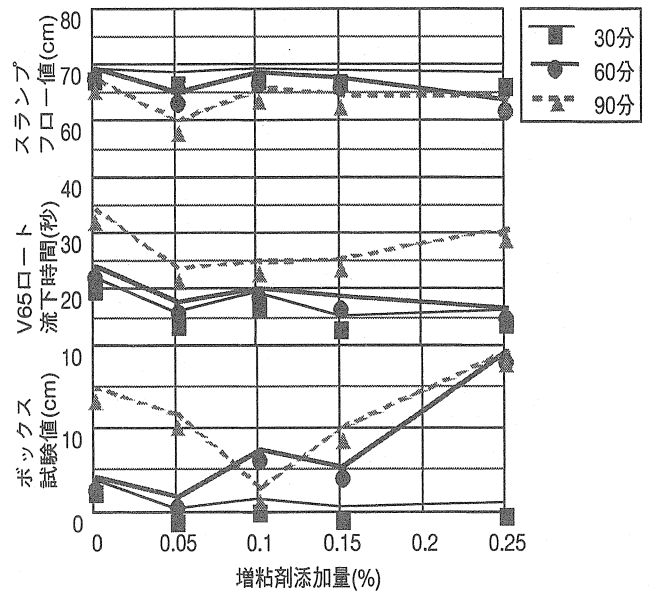
図一13に、SP剤の種類を変えてコンクリート試験により比較した結果を示す。なお、増粘剤使用量を0.10%としたほかは2.4.1と同様の設定とし、モルタル試験によりモルタル部分の配合を決定した。また、試験は、SP剤の効果が発現し、ほぼ安定する練り上がり後10分に1回目を行い、以降35、60、90分にそれぞれ行った。検討対象のSP剤であるSP1、SP2はほぼ同一の成分を有しているが、前者は標準型、後者は遅延型である。

試験の結果、SP2を用いた場合、スランプフロー値、V65ル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。

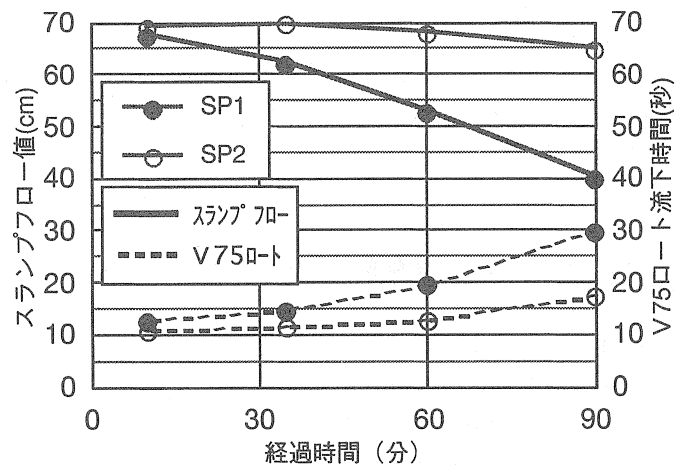
2. 5 細骨材量の検討

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ピストン試験およびコンクリート試験により評価を行った。

ピストン試験の結果を表一5に示す。これより、s/m=43%の場合のみ閉塞することなくシリンダー底部までピストンを押下することができたが、s/mがそれ以上の場合



図一12 増粘剤使用量検討結果



図一13 高性能AE減水剤の種類による比較

表一4 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/m ³)	SP剤量 (P%)	混和材の設定
0	29.24	173	1.40	種類 : LS6 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	

表一5 ピストン試験結果

配合 No.	細骨材容積比 (s/m)	モルタルフロー (cm)	Vルート流下時間 (秒)	閉塞状況	閉塞時間 (秒)
①	0.43	24.6	7.90	○	—
②	0.45	25.2	8.09	△	7.8
③	0.47	25.0	8.14	×	3.9
④	0.49	24.9	8.20	×	2.3

閉塞が生じ、また s/m が増大するに従い閉塞までの時間が短くなった。

同じモルタル配合で粗骨材量を一定としたコンクリート試験結果の一部を図-14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、両者の間に大きな差異はない。

一方、s/m=45%についてはピストン試験で閉塞が生じたが、コンクリート試験では s/m=43%とした場合と大きな差異がみられず、また 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。

2. 6 粗骨材量の検討

高流動コンクリートの配合設計の場合、モルタルの性能と粗骨材量のバランスを考慮しなければならないため、モルタル分の配合を決定した後に粗骨材量を決定することになる。これまでに決定したモルタル配合に対する最適粗骨材量を求めるため、単位粗骨材量が280~324 l/m³についてコンクリート試験を行った。

図-15に試験結果の一部を示す。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300 l/m³を超えた場合、経時60、90分では充填値が著しく大きくなることから単位粗骨材量は300 l/m³を標準とした。

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-6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。

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が1日の間でも大きく変動する。図-16は、今回実工事で用いた工場における1ヵ月間の海砂の表面水率の変動を示している。

そこで、表-6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%近傍まで変化させて、フロー値とロート流下時間の変化をみたところ、図-17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とがわかった。

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

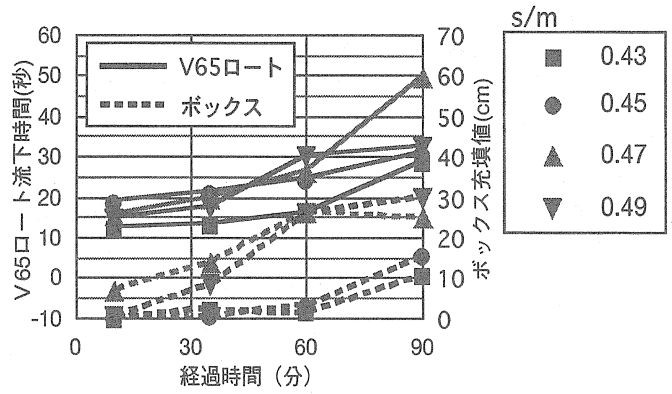


図-14 細骨材量によるコンクリート性状の比較

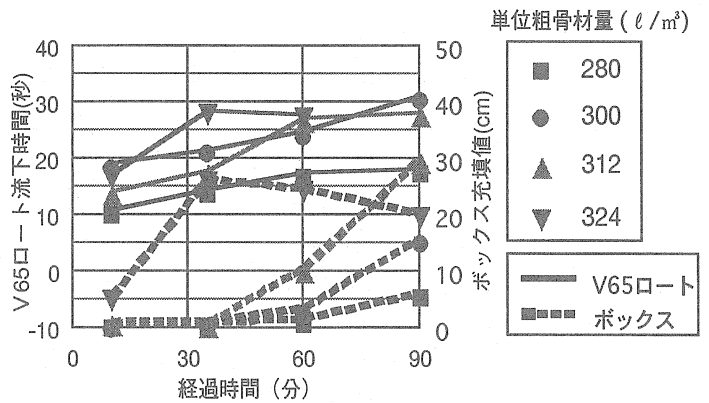


図-15 粗骨材量によるコンクリート性状の比較

表-6 決定配合

水粉体重量比 (%)	細骨材容積比	単位量(kg/m ³)							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

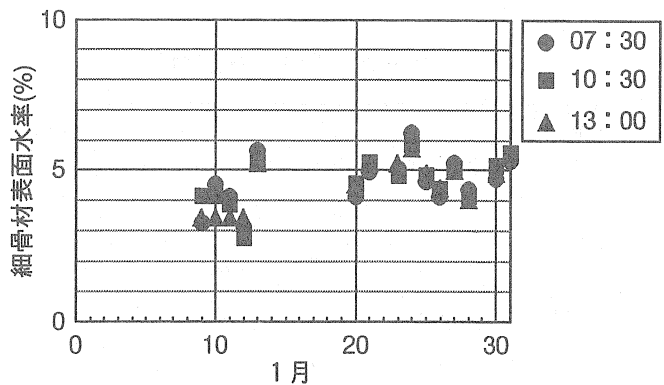


図-16 使用工場の海砂の表面水率の変動

練り混ぜる方法(図-18参照)を適用したところ、図-19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様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³⁾。

3. 2 骨材微粒分による影響

高流動コンクリートの性能は、増粘剤を用いない場合、微粉末が水と練り混ぜられることにより得られる粘性に大きく依存していることから、骨材の微粒分のうち微粉末の領域に近いものがその性能に影響を及ぼす可能性が考えられる。

図-20は、表-6から粗骨材を除いた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、採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-21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て比較したものである。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³⁾。

なお、洗い試験による骨材微粒分と混和材を置換したところ、0.075mm以下の骨材微粒分を除く細骨材容積比は約0.44となったことから、生コン工場での製造ではこの値を標準とした。

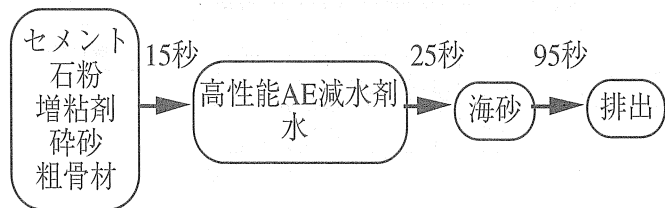


図-18 骨材表面水の影響を緩和する練混ぜ方法

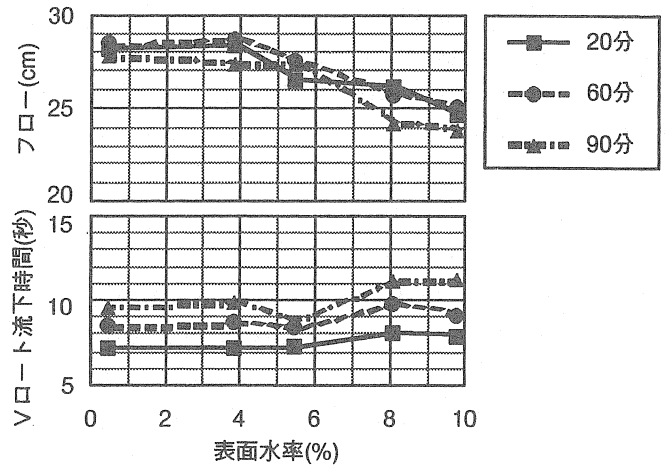


図-17 骨材表面水の影響の検証

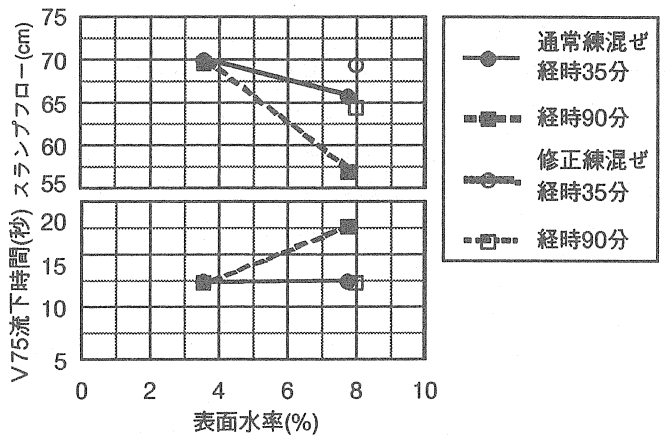


図-19 練混ぜ方法の違いによる効果

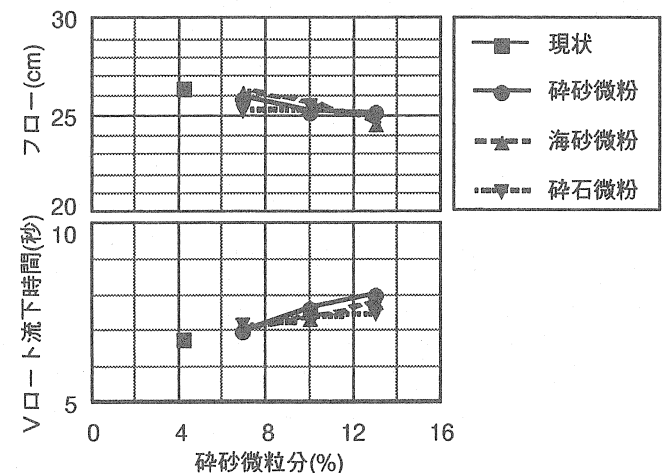


図-20 骨材微粒分の影響の検証

4. 大量製造による検証

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を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表-6に示す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練混ぜおよび配合修正による方法を適用した。試験体は、図-22に示す形状で1体の容積は約10m³ (3×3×1.1m)である。実験では、120m³の高流動コンクリートを製造し、計10体の試験体に対し約100m³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-7に示す。

図-23に、生コン工場、打設現場におけるスランプフロー値、V75ルート流下時間の測定結果を示す。なお、図中には海砂の表面水率の実測値も示している。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、骨材微粒分はJIS規格値内であるものの全体で9.7ℓ、24.8kgとかなり多くなっていた。このような条件下でもフレッシュコンクリートの試験値は、コンクリート温度の変動に伴う若干の変動はみられるものの、運搬車1台目のスランプフロー値が70cmを超えたのを除き他はすべて管理目標値の範囲内であった。

また、高流動コンクリートの密閉空間での充填性状とフレッシュコンクリート性状との対応を確認する1方法として沈下試験を行った。その結果を図-24に示す。図中には、他の密閉型実構造物に適用された高炉スラグ微粉末を混和材として用いた粉体系高流動コンクリートの同様の試験結果も示している。これより、今回の配合設計および製造に関する手法を適用した高流動コンクリートは、いずれの試験体においてもすでに実績のある粉体系高流動コンクリートと同等以下の沈下量であることが確認された。

表-7 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

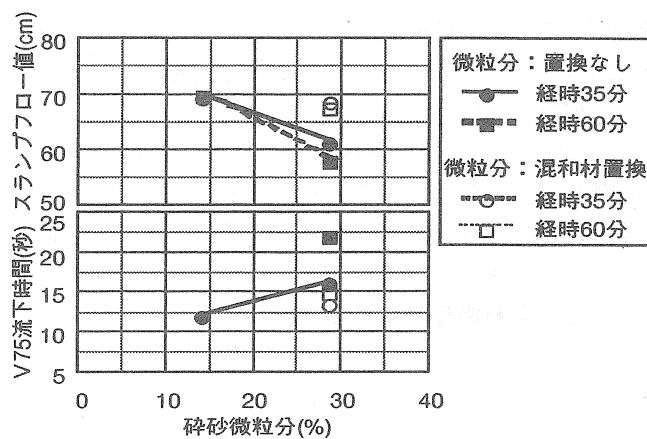


図-21 骨材微粒分と混和材を置換した場合の効果

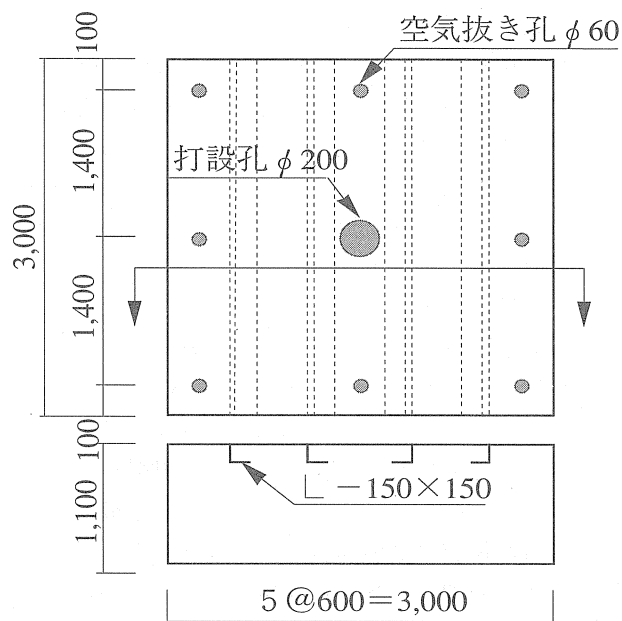


図-22 試験体形状

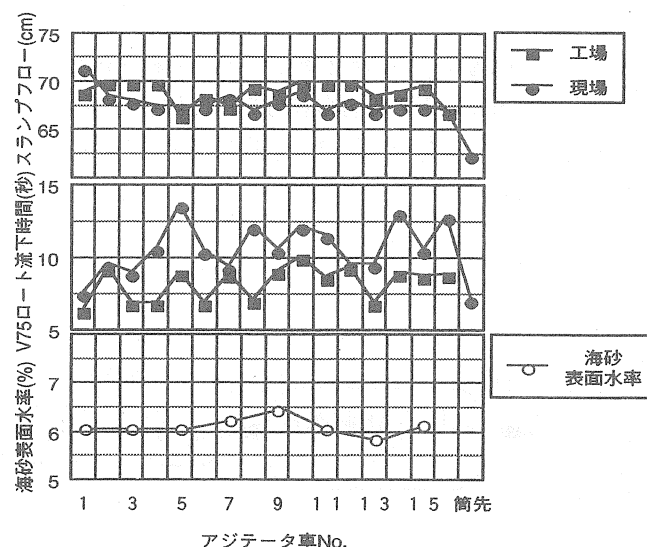


図-23 フレッシュコンクリート試験結果 (実大打設実験)

さらに、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線同位元素（R I）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た。また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-25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あり、鋼コンクリートの合成構造としては問題ないものと判断された。

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日間にわたって行われたが、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-26、27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、その標準偏差はそれぞれ1.11cm、1.61秒でいずれも安定した傾向を示していた。

また、同日の現場荷卸時における同様の試験結果を図-28、29に示す。これより、試験値は運搬車1台分のスランプフロー値が70cmを若干超えていたのを除き、他はすべて管理目標値の範囲内であり、その標準偏差はいずれも小さかった(スランプフロー:1.84cm、V75ロート流下時間:1.30秒)。この傾向は、3日間の充填期間中一定してみられた。

充填後に行ったR I法による上面材直下の空隙部の測定の結果、鋼コンクリートの合成構造として支障のない充填状況と判断された。

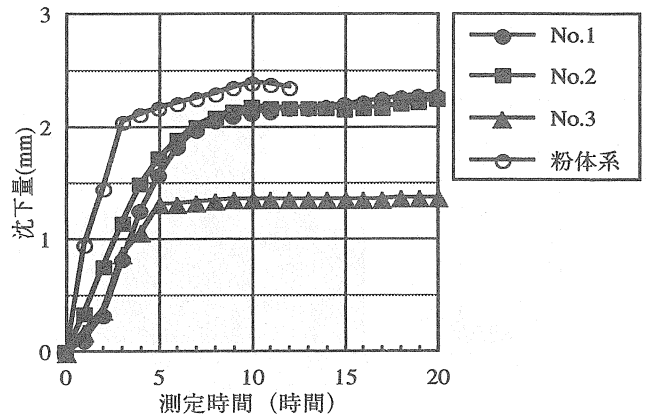


図-24 沈下試験結果(実大打設実験)

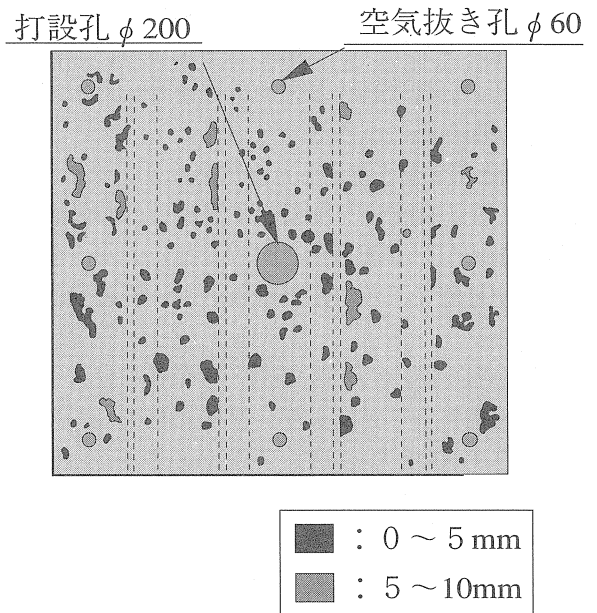


図-25 試験体上面空隙実測結果(実大打設実験)

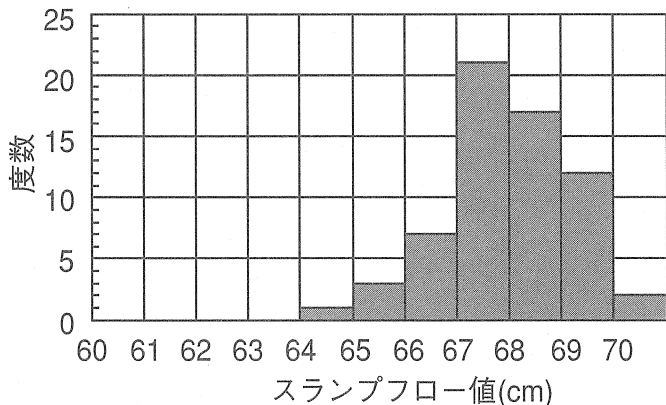


図-26 スランプフロー試験結果(実工事:出荷時)

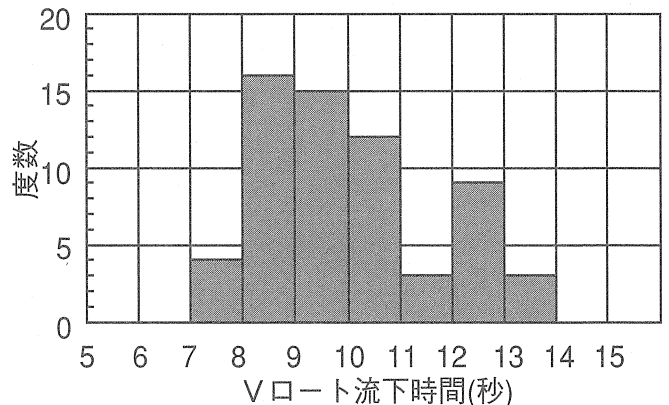


図-27 V75ロート試験結果(実工事:出荷時)

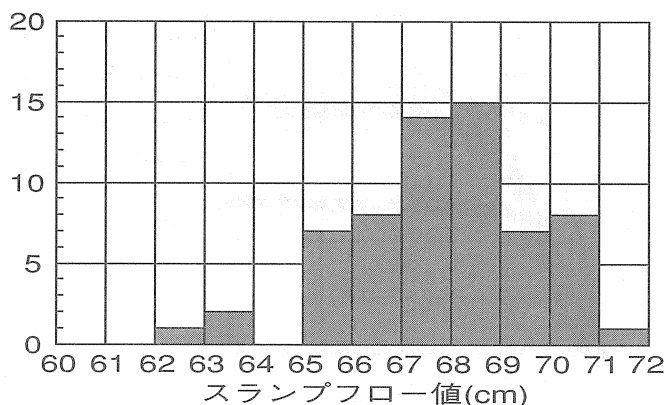


図-28 スランプフロー試験結果 (実工事：荷卸時)

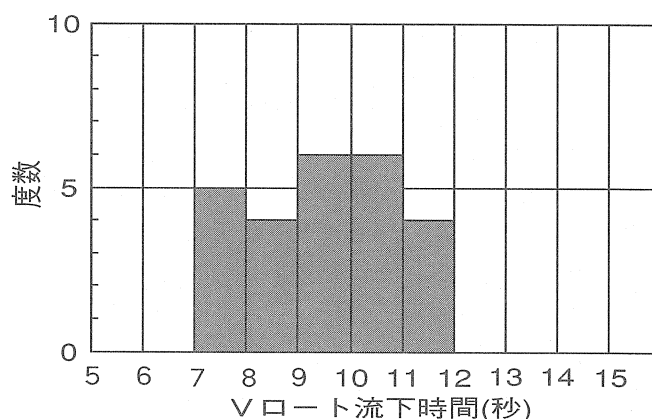


図-29 V75ロート試験結果 (実工事：荷卸時)

5. まとめ

密閉空間への充填を目的とする増粘剤と混和材を併用し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) 増粘剤と混和材を併用した高流動コンクリート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、骨材量について最適化を図ることにより、密閉空間への充填が可能で、かつ沈下量の小さい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、0.075mmのふるいを通過する骨材微粒分を粉体と仮定し、これを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。

(3) (1)、(2)を実工事に適用したところ、所要性能を有し、かつ経時変化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。

参考文献

- 1) 岡村甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- 2) 小澤一雅、山田浩司、Tangtermsirikul Somnuk：狭い間隙を通過するモルタルの閉塞に及ぼす砂の粒度の影響、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、第5部、1987
- 3) 竹内博幸、濱崎勝利、竜野三生：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回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.1124～1125、1995