

ウェランガムを増粘剤として用いた併用系高流動コンクリートの配合設計方法と実工事への適用

万木正弘¹・坂井吾郎²

¹ 正会員 工修 鹿島 技術研究所 (〒182 調布市飛田給 2-19-1)

² 正会員 鹿島 広島支店 (〒730 広島市中区中町 6-13)

高流動コンクリートではフレッシュコンクリートの性質及び硬化後の品質を確保するために、様々な材料を用いるとともに、配合上の工夫がなされている。しかし、使用する材料の種類が多いことや、実施工において要求される性質が明確に定まっていないこと等から、配合設計も経験的に行われていることが多い。本論文では、これまでの現場実験等を整理し、それぞれの構造物で高流動コンクリートに要求される性質を明らかにするとともに、ウェランガムを増粘剤として用いた併用系高流動コンクリートの配合設計法を提案し、実際の工事に適用してその実用性を示した。

Key Words : highly fluidized concrete, fresh concrete, mix proportion, viscosity modifying admixture

1. はじめに

近年、施工の省力化及び耐久性の優れた構造物の建設を目的として高流動コンクリートに関する研究開発が活発に行われ、実際の構造物への適用も積極的に行われつつある。

高流動コンクリートを実現させるためには、高い流動性と材料分離抵抗性を同時に満足させる必要があり、さらに硬化後の品質を確保するために様々な材料を用いるとともに、配合上の工夫がなされている。すなわち、従来のコンクリート材料に加えて高性能(AE)減水剤や各種の微粉末、増粘剤等を使用し、これらの材料を組合せることにより高流動コンクリートを作成している。しかし、材料種類の増加から配合を決めるにあたっての組合せが従来のコンクリートに比べて幾何級数的に増加すること、高流動コンクリートの流動性等のフレッシュ時の性状が、使用する材料の品質や状態の僅かな違いによって大きく変化すること、高流動コンクリートに要求される材料分離抵抗性等の性質についての評価方法が未だ明確には定まっていないこと、さらには実構造物における配筋条件や施工条件と要求されるフレッシュコンクリートの性質との関係があまり明確にされていないこと等から、フレッシュコンクリートの性質に対する支配要因やその影響程度も十分解明されているとはいはず、配合設計も経験的に行われている

場合が多い。

高流動コンクリートのフレッシュ時の性状が種々の条件によって大きく変化することは、実際の施工においてはフレッシュコンクリートの性質が大きくばらつくことを意味しており、実用上でも大きな問題となる。高流動コンクリートの施工では、締め固め作業を行わないことが原則であるため、流動性等のばらつきが大きくなると構造物に未充填部等の欠陥を形成する可能性が高くなる。したがって、高流動コンクリートのフレッシュ時の性質の変動を一定範囲に抑えることが高耐久性を有する構造物の構築において極めて重要なポイントとなる。

このような問題に対し、筆者等はグルコース系の増粘剤であるウェランガムを用いることにより、各材料の変動が高流動コンクリートのフレッシュ時の性状に及ぼす鋭敏な作用を緩和でき¹⁾、実際の施工においては流動性などのばらつきを抑制できることを明らかにした²⁾。ウェランガムを用いた場合のフレッシュコンクリートの性質がこれを用いない場合と異なることは、配合設計法もウェランガムの有無によって異なったものになることを意味している。

本論文では、高流動コンクリートが適用される構造物に関し、これまでの現場実験や実施工の結果を整理し、それぞれの構造物で高流動コンクリートに要求される性質を明らかにするとともに、今まで得られた研究成果^{3), 4), 5)}を基にウェランガムを用い

表-1 各種構造物における流動状況

番号	構造物の種類	使用コンクリートの種類	施工条件	流動条件	配筋条件	フレッシュコンクリートの性質	
						スランプフロー(cm)	Vロート値(秒)
1	マッシブなコンクリート構造物 ^①	併用系	打込み時間50分(36m ³ /h) コンクリート量 30m ³ 温度 22~23°C	扇型型枠への流動実験 流動距離 : 14m 打込み厚 : 60cm	無筋	59.5~64.5 平均 61.6	11.2~18.0 平均 14.6
2	マッシブなコンクリート構造物 ^②	粉体系	打込み速度 25~45m ³ /h コンクリート量 約300m ³ 温度 12.5~15.5°C	幅 12m, 高さ 1.5m 長さ 18.4m 流動距離 : 15m	水平筋D25, Φ150mm (一部L-100 Φ4m) 鉄筋量0~25kg/m ³	44.0~57.0 平均 49.0	—
3	部材厚の厚い壁 ^③	併用系	コンクリート量 75m ³ , 打込み時間 7h (10m ³ /h) 温度 20~22°C	W=1.15m, L=25m H=2.6m 土留め壁 流動距離 : 6~12.5m	水平筋 D29Φ150mm 垂直筋 D25Φ100~300mm (1~2段) 鉄筋量 90~160 kg/m ³	62.5~69.5 平均 66.8	5.7~9.6 平均 7.3
4	部材厚の薄い壁 ^④	粉体系	コンクリート量 8m ³ (1供試体) 打込み速度 25m ³ /h 施工時期 10月中旬	壁厚 18、21cm 高さ 3.6m 長さ 10m	D13mm 200×100 ダブル配筋 鉄筋量 70~150 kg/m ³	66~67 61~65	—
5	高密度配筋モデル供試体 ^⑤	併用系	コンクリート量 400/(1供試体) 打込み時間 1.5~2.5分 (10~15m ³ /h) 温度 12~15.5°C	壁厚 50cm 高さ 1 m 長さ 3 m の流動実験	流動方向に直角に格子状鉄筋を30~50cmピッチに配置 鉄筋量 135~330 kg/m ³	72.0 61.5 54.5	7.2 5.5 9.3
6	高密度配筋の壁 ^⑥	粉体系	コンクリート量 180/(1供試体) 打込み時間 7分 (1.5m ³ /h) 温度 14~18°C	壁厚 35cm 高さ 60cm 長さ 150cm の流動実験	D25mm 125×250 2段+D29mmΦ125 1段 鉄筋量 460kg/m ³	72 62~67 55~61	14.8 7.3~8.5 6.1~9.8
7	鋼殻構造中詰め (沈埋函縫手部) ^⑦	併用系	コンクリート量 170m ³ 打込み時間11h (15m ³ /h) 温度 30~31°C	長さ 40m 高さ 1.44m 幅 3.0m 注入施工	D19, D25mm Φ250 3段配筋 鉄筋量 110~140 kg/m ³	66.5~68.5 平均 67.2	7.6~8.7 平均 8.2

*1) : 配合時のコンクリートの理論粗骨材量に対する流動後のコンクリート内に存在する粗骨材量の質量比

た高流動コンクリートの配合設計法を提案し、実際の構造物に適用してその実用性を示した。

2. 適用構造物と高流動コンクリートに要求される品質

高流動コンクリートといつてもそのフレッシュコンクリートの性質は一定ではなく、かなり長い距離を流動させても粗骨材の分離が認められないものから、流動化コンクリートに近いものまで様々な性質を有するコンクリートがある。一方、高流動コンクリートを適用する構造物にも様々な形状、配筋条件のものがあり、高流動コンクリートを現場で使用していくためには、適用部位に応じて要求されるフレッシュコンクリートの性質を明確にする必要がある。

高流動コンクリートの施工では、フレッシュコンクリートの性質として流動性だけでなく、材料分離抵抗性も同時に評価する必要がある。これらの性質

に対し、いくつかの評価試験方法が開発されているが、ここでは流動性に関しスランプフロー試験を、材料分離抵抗性（コンクリートの粘性）に関してはVロート試験の2つの試験で評価することとした。しかし、これら品質評価試験の値と実際の施工における型枠内の流動性状や鉄筋周りの充填性との関連付けがあまりなされていないのが現状である。そこで、種々の構造物に流動性の異なる高流動コンクリートを打ち込んだ場合の流動勾配や粗骨材の分布状況等について、施工実験や実施工結果をもとに既往の文献も含めて調査を行い、構造物の条件の整理を行うとともに、それらの構造物に使用する高流動コンクリートの目標値について検討を行った。その結果を表-1に示す。これらのケースは、モデル供試体への打込み実験から実構造物の施工まで含まれております、施工速度や時間等も広い範囲にわたっている。しかし、種々の構造物に対しての要求品質を適切に定めるためにはまだ不十分な面もあり、今後より多

流動勾配	粗骨材の分離状況 品質変化等
1/60～1/146	流動距離 2～14m の範囲で粗骨材量は 95～98% ¹¹⁾ を確保 圧縮強度は 94～99%
1/10～1/30	流動による強度変化は無し 流動距離 10m で粗骨材の沈降傾向有り
1/30～1/80	流動距離 1～12m で粗骨材量 90～100%
1/10～1/13	流動距離 0.5～5m で粗骨材量 85～110%
1/7～1/10	流動距離 8m まで粗骨材量 85～110% に変化
1/4～1/5	流動距離 8m まで粗骨材量
1/55～1/143	3m の流動で粗骨材量は 80% に減
1/25～1/43	〃 90～98% に減
1/9～1/20	〃 85～100% に減
1/40	—
1/15～1/16	—
1/9～1/10	—
1/25～1/30	—

くの実施工データを収集・蓄積していく必要がある。また表-1にはフレッシュコンクリートの性質の経時変化が問題となるようなものは含まれておらず、長時間にわたる流動性の保持が必要な場合については別途検討が必要と思われる。

(1) マッシブな構造物

No.1のケースは、併用系の高流動コンクリート30^{m³}を、平面の二次元の流動が可能な扇型の模型型枠内(中心角30°, 半径15m, 高さ50cm)に、流動に対する障害がほとんどない状態で打込んだ場合の流動距離と品質の変化との関係を調べたものである。スランプフロー59.5～64.5cm, Vロート値(本論文では開口部は全て75×75mmを用いた)11.2～18.0秒のコンクリートを流動させた場合の勾配は1/60～1/150であり、流動距離14mの範囲では圧縮強度、粗骨材量ともほとんど変化していない結果であった。

また、No.2に示した明石海峡大橋のアンカレッジ

の施工実験では、粗骨材最大寸法40mmの高流動コンクリートを使用しており、スランプフローが50～60cm程度であれば1/10～1/30の勾配で流動し、流動距離8m以下の範囲で粗骨材の分離もなく、十分な充填性が確保できたことが報告されている。

(2) 壁体構造物

No.3～6は壁体構造物に高流動コンクリートを用いた例であり、自重で流動するコンクリートに対し鉄筋及び壁面が障害になるケースである。壁厚が35～115cmの壁体中のコンクリートの流動勾配は、スランプフローが大きいほど小さくなる傾向が認められ、スランプフロー55～60cmで1/10～1/20, 65cm程度で1/15～1/80, 70cm以上では1/40～1/150の結果であった。これに対して壁厚18, 21cmの壁部材では、スランプフローが61～67cmであっても流動勾配は1/10より大きく、流動に対する壁面の影響が大きいことを示している。また、流動による品質変化を調べたNo.3の結果では、スランプフローが65cm程度では12mまで流動させても品質の低下は少なかったこと、スランプフローが55cm程度では流動勾配がきつくなるためコンクリートの上表面の凹凸が大きくなり、これを避けるためにはコンクリートの投入口を10m間隔以下にする必要があること等が報告されている。

(3) 密封された空間への打込み

鋼殻中詰め等密封された空間に逆打ちでコンクリートを充填する場合、コンクリート面をフラットに打上げる必要がある。No.7に示した沈埋函継手部の例は、スランプフロー66.5～68.5cm, Vロート値7.6～8.7秒のコンクリートを、高密度な配筋部分に複数の注入管から片押しで注入施工したものであり、その場合の流動勾配は1/25～1/30であった。

スランプフローが66cmとほぼ同じで、Vロート値が13.7秒と6.8秒であった二つの配合を、鉄筋がほとんど入っていない箇所に6～12m流動させた場合の勾配はそれぞれ1/50, 1/120であり¹³⁾、流動勾配を小さくするためにはVロートの目標値をできるだけ小さくする必要のあることを示している。

(4) 各構造物における目標品質の概略値

フレッシュコンクリートの性質と適用する構造物の種類、流動性状との間には密接な関係があり、高流動コンクリートを用いて施工する場合、構造物の種類に応じて所定の流動勾配を確保するようスランプフローやVロート値を設定するとともに、その流動勾配に適した施工計画を立てる必要がある。

表-2 構造物の分類とフレッシュコンクリートの目標品質の推奨値

構造物の条件	鉄筋量の概略	スランプフロー(cm)	Vロート値(秒)	流動勾配の概略値	推奨される最大流動距離
流動障害が少ないマッシュな構造物	100kg/m ³ 以下	50~55	7~20	1/10以下	8m以下
		55~65		1/50以下	12m以下
鉄筋による流動障害が主一般的な土木構造物	100~200kg/m ³	60~70	7~12	1/20以下	10m以下
		65~70		1/10以下	10m以下
壁厚20cm程度で密な配筋建築構造物等	100~150kg/m ³	65~70	7~12	1/25~1/100*	8m以下
密封空間の中詰め等平坦性が必要な構造物	0~200kg/m ³	65~70			

*:内部の鉄筋量によって異なる。

表-3 配合設計で対象にした基本的材料

セメント	普通ポルトランドセメント
微粉末	石灰石粉
高性能減水剤	βナフタレンスルフォン酸カルシウム塩
増粘剤	ウェランガム
細骨材	実積率65%程度、FM:2.6~2.9の川砂
粗骨材	実積率60~62%の碎石

構造物の分類としては、表-1に示す調査結果から、マッシュな構造物、壁体等の一般的構造物、密封された空間への打込みに分け、さらに一般的な構造物を部材厚の厚いもの（厚さ35cm程度以上）と薄いもの（35cm程度以下）とに分けて考えることにした。

スランプフローは、鉄筋量がそれほど多くなく（100~200kg/m³程度）、形状も複雑でない一般的な土木構造物の場合の目標値を60~70cmとし、流動性がそれほど要求されないマッシュな構造物ではこれより小さな値を、逆に高い流動性の要求される場合には大きめの値を設定した。ただし、スランプフローを70cm以上とするとコンクリートの流動中に粗骨材の分離する傾向が見られる¹⁰⁾ことから、最大値を70cmとした。

Vロート値については、これが小さすぎると流動中の粗骨材の分離傾向が顕著となり、逆に大きすぎると流動速度が遅くなり、間隙通過性が悪くなる。今回の調査結果やこれまでの実施工結果などから判断して、Vロート値が5秒程度となると粗骨材の分離が見られる場合が多く¹⁰⁾、7秒以上のVロート値を確保することが望ましい。Vロートの上限値については、これが大きくなる原因として、試験装置をコンクリートが流下する時点で生じる粗骨材同士の噛合による場合と、コンクリート自体の粘性が

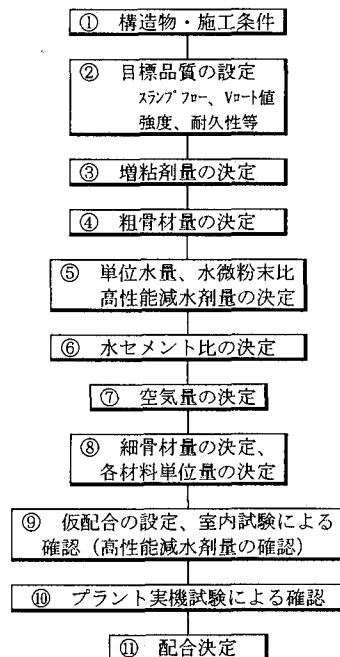


図-1 配合設計フロー

大きくなることによる場合とがある。前者の場合にはVロート試験中のコンクリートの流下が間欠的になり、Vロート値が極端に大きくなる傾向を示す。そのような場合を含めても、事例1（表-1）の流動実験における観察結果やこれまで行った室内実験の結果¹¹⁾から判断し、Vロート値が20秒以下であれば十分施工可能と考えられる。ただし、表面の平坦性が求められる場合にはVロート値を小さく抑える必要があり、最大値としては5秒程度の試験値のばらつきを考慮して12秒とするのが良いと思われる。

以上のことから、各構造物に高流動コンクリートを用いる場合の目標品質の概略値として表-2に示すものが提案できるものと思われる。

3. 配合設計フロー

高流動コンクリートの総合的な配合設計方法を提案するにあたっては、材料上の要因も全て考慮できることが望ましい。しかし、材料の種類も一般的なコンクリートより多く、特に化学混和剤等は各材料ごとフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響程度も異なる。そこで、本検討では対象とする使用材料を表-3に示すものを基本として併用系高流動コンクリートの配合設計法を整理するとともに、細・粗骨材についてはその種類が異なった場合の配合修正法を検討した。

配合設計のフローを図-1に示す。①、②において、表-2等を参考に目標品質を選定し、それを満足すると考えられる仮配合を定め、最終的には試験室の試験練り及び実機を用いた試験練りにより、修正・確認を行って配合を定めることとなる。

普通コンクリートでは単位水量により、適正な流動性を確保していたが、高流動コンクリートでは単位水量を一定とした上で高性能減水剤量を調整する方法が一般的に採用されている。一方、優れた材料分離抵抗性や間隙通過性を得るためにモルタルの粘性を適度に増大させるとともに粗骨材量を減少させて流動時に生じる粗骨材同士の接触の機会を少なくし、接触した場合でも摩擦を少なくするようしている。このようなフレッシュコンクリートの性質を安定的に得るために増粘剤としてウェランガムを使用する。ウェランガムはコンクリート中の水や高性能減水剤の作用に対して大きな影響を有している¹⁾ため、単位水量や水微粉末比をウェランガムの影響も加味して定める必要がある。

また、硬化コンクリートの性質について、強度を確保するためには水セメント比を適切に定めること、所定の弾性係数や収縮特性を得るために、粗骨材量をある程度以上とすること等が必要となる。

4. 各種配合要因の定め方

(1) 増粘剤の影響

併用系高流動コンクリートにおいて増粘剤は、流動性等のフレッシュコンクリートの性質の安定及び材料分離抵抗性の向上を目的として用いられる。前者に関して筆者等は、ウェランガムを単位水量の0.05%用いることで、細骨材の表面水率や粒度、セメントの鉛錠、温度等の変動に対して安定した性質を有する高流動コンクリートの製造が可能となることを示した²⁾。

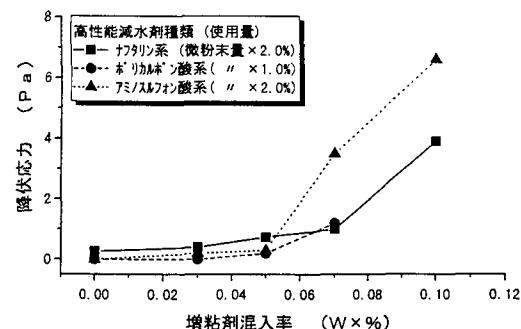
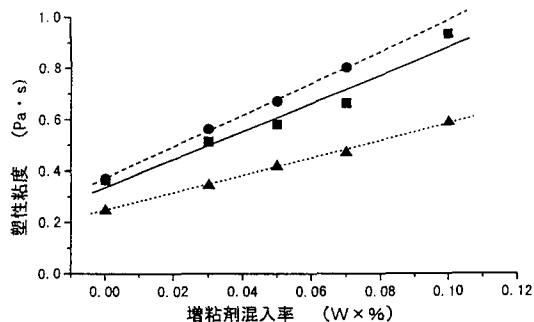


図-2 各種高流動ペーストのレオロジー特性

また後者に関し、フレッシュコンクリートの流動性を高めるためには、モルタルのレオロジー定数のうち降伏値を小さくすること必要であるが、流動中の分離抵抗性を与えるためにはある程度高い塑性粘性を確保する必要がある。水微粉末比95%のセメントペーストにウェランガムを混入した場合のレオロジー定数の変化を測定した結果は図-2のとおりであり、ウェランガム混入率の増加とともに塑性粘度は直線的に増加するのに対し、降伏応力は混入率が単位水量の0.05%まではほとんど増加しない結果が得られた。すなわちウェランガムを単位水量の0.05%混入することにより降伏応力の大幅な増加なしに塑性粘度を高めることが可能であることが分かった。これらのことから、ウェランガムの混入率は、単位水量の0.05%とすることとした。

(2) 粗骨材量

高流動コンクリート中の粗骨材量はフレッシュ及び硬化後のコンクリートの性質に大きな影響を及ぼすものであり、これを適切に選定する必要がある。筆者等は、水微粉末比 95~110%，砂ペースト比75%の10種類のモルタルに、硬質砂岩碎石 (G max=20 mm, 実積率 60%) を 290~370 l/m³ 混入した場合の

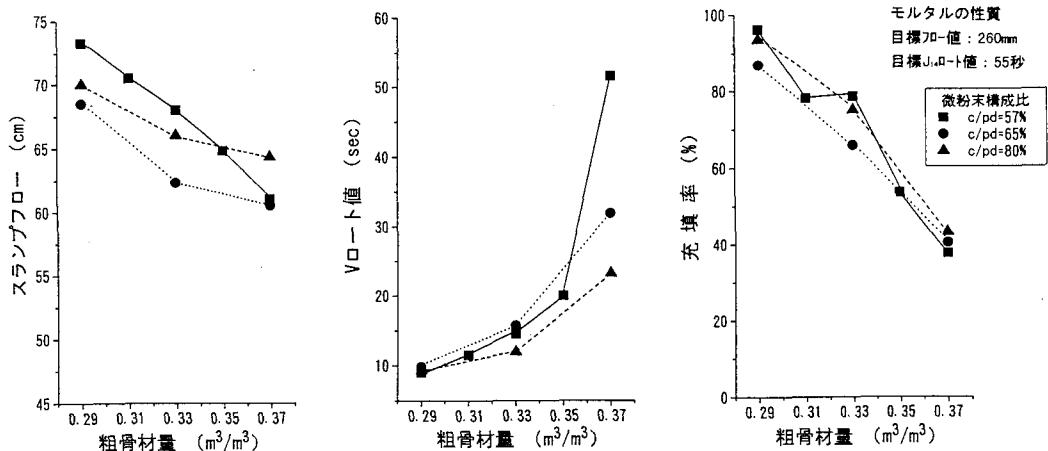


図-3 フレッシュコンクリートの性質に及ぼす粗骨材の影響

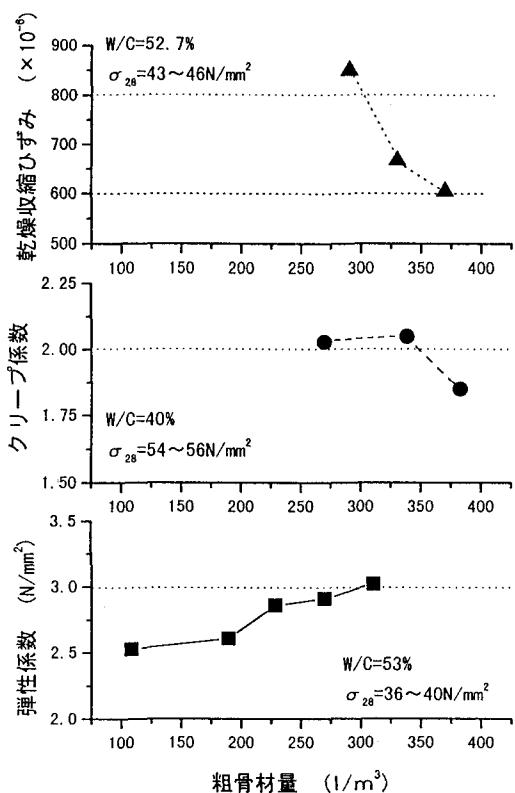


図-4 硬化コンクリートの性質

フレッシュコンクリートの性質の変化について検討を加え、結果の1例として図-3を得ている¹⁾。それによれば、粗骨材量の増加にともないVロート値は大きく、間隙通過性が悪くなるが、粗骨材量が

$350\text{ l}/\text{m}^3$ より多くなると、モルタルの性質によってはこれらの傾向が顕著になり間隙通過性が極端に悪くなる場合がある。したがってフレッシュコンクリートの性質を確保するためには粗骨材量は $350\text{ l}/\text{m}^3$ 以下とすることが望ましいとしている。

また、高流動コンクリートの硬化後の性質に関し、これまでの研究^{3), 4)}から粗骨材量の影響が比較的大きいことが示された各特性についての試験結果を図-4に示す。普通コンクリートの一般的な性質として、弾性係数 $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、クリープ係数2.0、乾燥収縮ひずみ $600 \sim 800 \times 10^{-6}$ 程度を考えると、これらとほぼ同等の性質を得るために少なくとも $300\text{ l}/\text{m}^3$ 以上の粗骨材量が必要となる。ただし、コンクリートの配合としては、硬化コンクリートの品質の向上や経済性の観点から、要求品質を満足する範囲で粗骨材量を多くすることが望ましい。

これらのことから、鉄筋量がそれほど多くない(200 kg/m^3 程度以下)の一般的な土木構造物を対象にした高流動コンクリートでは、粗骨材量を $330\text{ l}/\text{m}^3$ (1 m^3 中の粗骨材の実容積に対する比は55%となる、以後「実容積比」と記す)とし、流動性や間隙通過性等が特に要求されるケースではこれを $300\text{ l}/\text{m}^3$ (実容積比は50%)、逆に間隙通過性はあまり要求されず、硬化コンクリートの高品質を確保する必要のある場合にはこれを $350\text{ l}/\text{m}^3$ (実容積比58%)とすることとした。

(3) 単位水量、水微粉末比及び高性能減水剤量

粗骨材量を一定とした場合、コンクリートの流動性、分離抵抗性に影響を及ぼす要因としては、単位水量、水微粉末比、高性能減水剤量、微粉末の種類

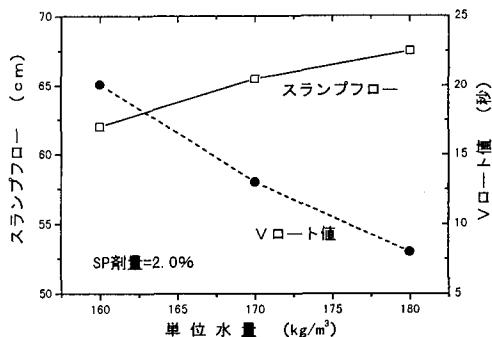


図-5 フレッシュコンクリートの性質に及ぼす
単位水量の影響

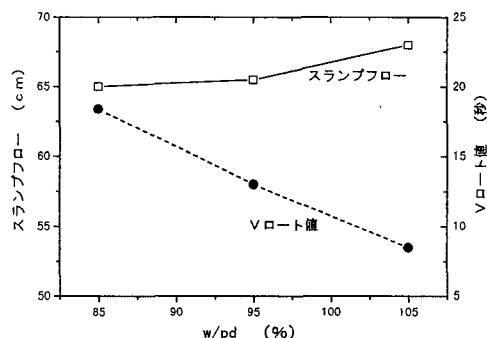


図-6 フレッシュコンクリートの性質に及ぼす
水粉体比の影響

及び細骨材量等がある。これらのうち、微粉末の種類及び細骨材量がスランプフローやVロート値に及ぼす影響については、ウェランガムを用いることによりあまり大きくない範囲に押さえることができる^{1), 14)}。したがって、所要のスランプフロー及びVロート値を確保するためには単位水量、水微粉末比、高性能減水剤量の3要因を適切に組み合わせればよい。

高流動コンクリートのフレッシュ時の性状としては、単位水量や高性能減水剤量等が多いほどスランプフローは大きく、Vロート値は短くなる傾向を示すが、ウェランガムを用いた場合にはスランプフローに対する単位水量や水微粉末比の影響は図-5、6に示すようにそれ程大きくはなく、むしろ高性能減水剤混入量の影響を大きく受ける(図-7参照)。また、Vロート値はこれと逆に、高性能減水剤量の混入量が1.7~1.8%以上となるとその影響はあまり顕著ではなく(図-8参照)、単位水量や水微粉末の影響の方が大きい(図-5、6参照)。このようなことから、Vロート値は単位水量と水微粉末比の組合せにより、またスランプフローは高性能減水剤の

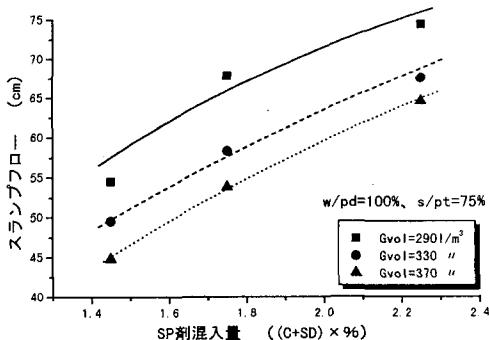


図-7 スランプフローに及ぼすSP剂量の影響

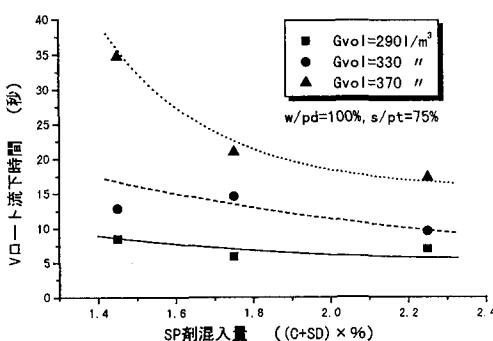


図-8 Vロート値に及ぼすSP剂量の影響

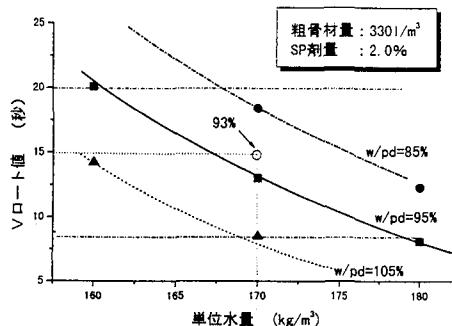


図-9 単位水量とVロート値との関係

混入量によって定まると考えて配合設計を行うことが、方法の簡略化のためには実用的と考えられる。すなわち、まずVロート値が所定の値になるよう単位水量及び水微粉末比の組合せを選定し、その後に所定のスランプフローが得られるよう高性能減水剤の混入量を決定することとなる。

図-9は単位粗骨材量 330 l/m^3 、高性能減水剤混入率 2%の場合の、単位水量、水微粉末比とVロート値の関係を示したものであり、この図を参考に、

表-4 配合条件

要求品質	設計基準強度 (N/mm ²) : 30 目標強度 (N/mm ²) : 36 目標スランプフロー (cm) : 60 目標Vロート値 (秒) : 15 目標空気量 (%) : 2	材 料 比 重	セメント: 3.15 石粉: 2.70 細骨材: 2.60 粗骨材: 2.65
------	--	------------------	--

表-5 各材料の単位量

材 料	単位質量(kg/m ³)	単位容積(l/m ³)	備考
水 量	170	170	図-9
セメント量	170/0.587=290	→ 290/3.15=91.9	式-1
粉体量	—	170/0.93=182.8	
石粉量	90.9×2.7=245	← 182.8-91.9=90.9	
粗骨材量	330×2.65=875	← 330	図-3, 4
細骨材量	297.2×2.60=773	← 1000-170-182.8 -330-20=297.2	
混和剤量	(C+SD) × 1.9% = 10.16 kg/m ³		図-7

所定のVロート値が得られるよう単位水量と水微粉末比の組合せを選定する。Vロート値の変動許容範囲として±5秒程度を考えれば、一般的の場合配合設計時の目標Vロート値は12~15秒と考えられ、例えば単位水量を170kg/m³とすると水微粉末比を95%前後に選ぶこととなる。また、粗骨材量のVロート値に及ぼす影響としては、図-3, 8から粗骨材量の50/l/m³の増減に対してVロート値5~7秒の増減と考えてよい。

高性能減水剤の添加量は、最終的に定めた配合のコンクリートが所定のスランプフローを有するよう試験練りを行ってこれを定める。添加量は使用する高性能減水剤の種類や単位水量によって異なるが、ナフタレン系の高性能減水剤を用いた場合の添加量とスランプフローの関係は図-7に示すとおりである。

(4) 水セメント比の決定

水セメント比は、所定の圧縮強度、水密性、耐久性が得られるように決定する。強度に関しては、従来のコンクリートと同様にセメント水比と圧縮強度との間にはほぼ直線関係があることを利用し、所定の強度を確保するセメント水比を決定する。筆者等がこれまで実施した実験や実施工で、普通ポルトランドセメント及びナフタレン系高性能減水剤を用いた30例のデータを統計処理して得られた結果は次のとおりである。

$$F = -5.73 + 24.5 \cdot C/W \quad (1)$$

F:材齢28日強度 (N/mm²)

(適用範囲 W/C: 37~70%, 相関係数: 0.91)

また、耐久性や水密性に関しては、高流動コンクリートは従来のコンクリートに比較して組織が緻密であり、劣化因子の浸透は少ないものと考えられ、土木学会コンクリート標準示方書に示された耐久性や水密性から定まる水セメント比以下に定めることにより、これらの性質は確保できるものと考えられる。ただし、現時点では高流動コンクリートの耐久性等に関するデータは極めて少なく、今後更なる研究の実施、データの蓄積が望まれる。

(5) 空気量の設定

ウェランガムを用いた高流動コンクリートでは、空気量を増加してもスランプフローはあまり変化せず、Vロート値は多少短くなるが、その程度はこれまでの実験⁴⁾によれば空気量1%の増に対してVロート値約1秒減であり、それほど大きくはない。したがって、使用材料の特性等によりコンクリートの粘性が高すぎる場合を除き、フレッシュコンクリートの性状改善を目的として空気を連行する必要性はありません。しかし、耐凍害性を確保するためには、高強度の得られる配合であっても4%程度の空気量の確保が必要である。

(6) 各材料の単位量の算定

以上定められた配合要因により、各材料の単位量を計算することができる。細骨材量は1m³から他の全ての材料の容積を差し引いて求められる。

今、高流動コンクリートに対する要求品質を表-4のように定めた場合の各材料の単位量を計算する。図-9から、目標Vロート値15秒に対して単位水量を170kg/m³とすると水微粉末比は93%となる。また(1)式から、配合強度36N/mm²に対応する水セメント比を求めると58.7%となる。粗骨材量は、一般的な高流動コンクリートを対象に330l/m³を仮定して、各材料の単位量を計算した。結果は表-5のとおりである。

このようにして定めた仮配合について、室内及び実機を用いた試験練りにより高性能減水剤量を決めるとともに配合修正を行い、最終的に配合を定める。

5. 骨材の特性に応じた配合修正方法

前章までに示した配合設計法は細骨材、粗骨材とも一般的な品質を有するものを対象にしている。しかし良質の骨材の枯渇から、最近では必ずしも品質

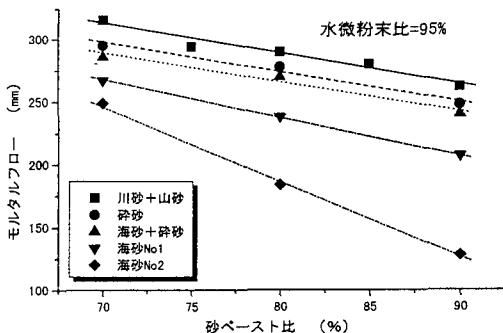


図-10 砂ペースト比とモルタルフローの関係

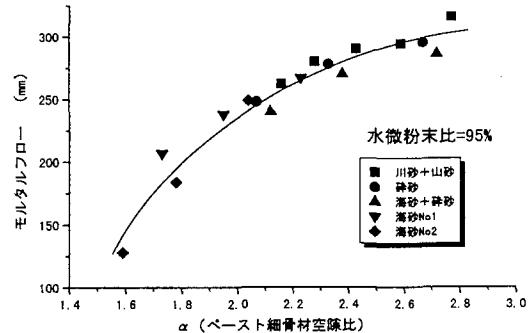


図-12 α とモルタルフローの関係

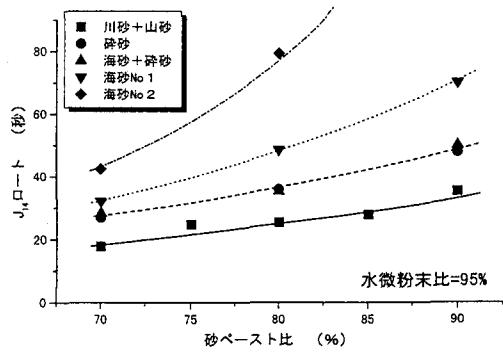


図-11 砂ペースト比とJ14ロート値の関係

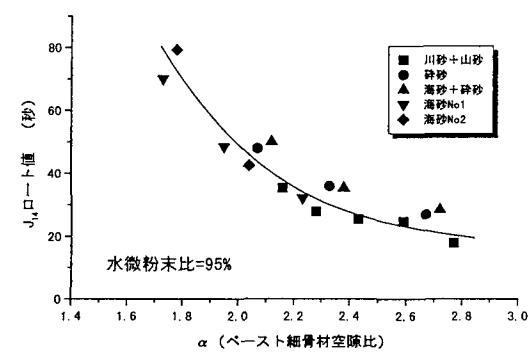


図-13 α とJ14ロート値の関係

の良い骨材が使用できるとは限らず、品質の多少劣る骨材も使用しなければならない場合も少なくない。特に、西日本方面では一般的に海砂が多く使用されており、そのような傾向が強い。

また、高流動コンクリートのフレッシュ時の性状には粗骨材量が大きな影響を及ぼすが、その影響程度は粗骨材の種類によって異なるものと考えられる。そこで本章では、使用する細骨材、粗骨材の品質が、フレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響について実験的に検討するとともに、骨材の特性に応じた配合修正方法の提案を行った。

(1) 細骨材の品質に関する検討

ウェランガムを用いた併用系高流動コンクリートの場合、細骨材の粗粒率の違いがコンクリートの流動性に及ぼす影響はそれほど大きくなことが明らかにされている²⁾。ここでは、表-6に示すように、実積率の大きく異なる5種類の細骨材を用いてモルタルを練混ぜ、フレッシュモルタルの性状への影響について検討を行った。試験データを、モルタル中

表-6 細骨材の品質

種類	川砂+山砂	海砂+碎砂	碎砂	海砂1	海砂2
产地	上野原産	広島県産	広島県産	大三島沖	大三島沖
比重	2.59	2.55	2.57	2.55	2.55
吸水率 (%)	2.20	1.46	1.24	2.07	2.39
単重 (kg/m^3)	1,672	1,647	1,649	1,522	1,463
実積率 (%)	66.0	65.7	65.1	61.3	58.8
粗粒率	2.65	2.82	2.81	2.83	2.70
粒径0.05mm以下(%)	3.0	2.5	4.0	1.5	0.5

の細骨材量とペースト量の容積比(s/pt)を用いて整理した。結果を図-10, 11に示す¹⁵⁾。細骨材の混入率を増加させるとモルタルフローは小さく、J14ロート値は大きくなるが、その程度は使用する細骨材の特性によって異なり、実積率の小さい方が大きな影響を与える結果であった。

細骨材の実積率がモルタルの性状に与える影響を

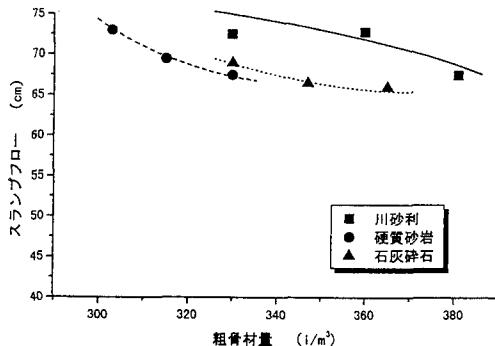


図-14 粗骨材量とスランプフローの関係

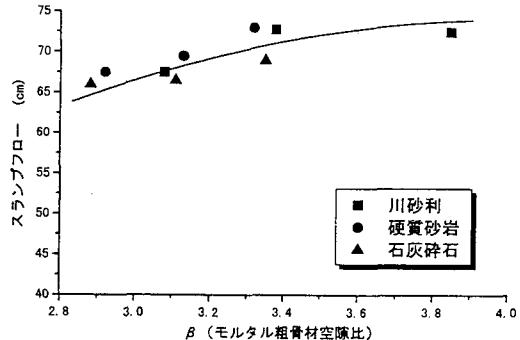


図-16 モルタル粗骨材空隙比とスランプフローの関係

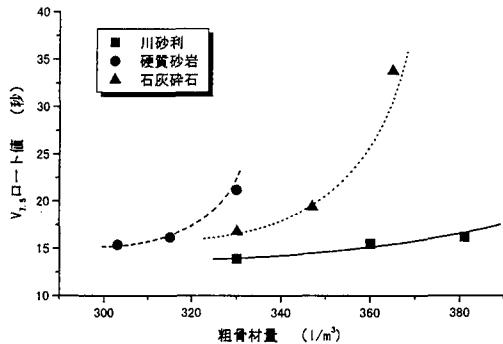


図-15 粗骨材量と $V_{1.5}$ ロート値の関係

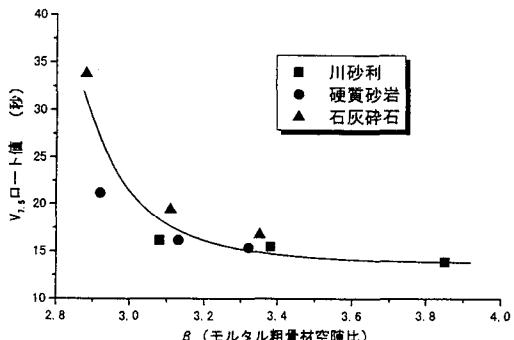


図-17 モルタル粗骨材空隙比と $V_{1.5}$ ロート値の関係

表-7 粗骨材の品質

粗骨材種類	硬質砂岩	石灰碎石	川砂利
産地	青梅産	葛生産	天竜川産
最大寸法 (mm)	20	20	25
比重	2.65	2.72	2.66
吸水率 (%)	0.69	1.05	0.73
実積率 (%)	59.0	62.3	65.5
単位容積質量 (kg/m^3)	1,553	1,677	1,730
粗粒率	6.49	6.35	6.88

一では、細骨材の空隙に対するペースト容積の比 (α) が用いられている¹⁶⁾。ここでも α を用いてデータの整理を行った。結果を図-12, 13に示す。多少のばらつきが認められるものの、モルタルのフ

検討する指標として、R C D 等の超硬練りコンクリー一及び J_{1.4}ロート値は細骨材の種類が異なっても、 α によりほぼ一義的に定まる。つまり、細骨材の品質が異なる場合でも、 α が一定になるように配合修正を行えば、同じフレッシュ時の性質を有するモルタルが得られる。

細骨材の品質に対する配合修正方法として、岡村等¹⁷⁾は粉体系の高流動コンクリートを対象に、0.09mm以下の微粒分が 2% を越える場合には、微粒分量 (0.06mm以下) の部分を粉体の一部と考えて配合を修正することを提案している。今回使用した細骨材の 0.09mm以下の量は 0.5~4.0% の範囲にあり、2% 以上のものも 2% 以下のものも含まれているが、図-12, 13の結果は、全ての細骨材に対してほぼ一本の線形で表されることから、ウェランガムを用いた場合には微粒分も細骨材として取扱い、配合修正を行っても良いことを示しているものと思われる。

(2) 粗骨材の品質に関する検討

硬質砂岩碎石、石灰碎石及び川砂利の 3 種類の粗

表-8 目標品質

項目	試験等	目標値
流動性	スラングホール (cm)	65±5 (60分間の流動性保持)
分離抵抗性	Vロート値 (秒)	12±5
空気量	空気量試験(%)	4.5±1.5 (JIS生コンによる)
設計基準強度	圧縮強度 (N/mm ²)	24 (材齢28日)
水密性	水セメント比 (%)	55%以下

以上のことから、実積率の異なる細骨材や粗骨材を用いる場合の配合修正方法は次のようになる。

一般的な実積率（細骨材で65%、粗骨材で60～62%程度）の骨材を用いた場合の配合を選定し、その配合における α 、 β を算出する。次に、使用予定の骨材を用いた場合、まず粗骨材量だけを調整して同じ β の値となるようにし、次に細骨材量だけを調整して同じ α の値となるようにする。このようにして得られた配合を1m³換算することで、所定の配合が得られる。

6. 配合設計例

表-9 使用材料の品質

セメント	普通ポルトランドセメント 比重:3.15
石灰石粉	JIS A 5008 規格品 比重2.70
細骨材	君津産山砂 比重:2.58, FM:2.58, 実積率:64.0%
粗骨材	津久見産石灰砕石 比重:2.67, 実積率:63.6%
高性能減水剤	βナフタレンスルフォン酸塩
増粘剤	ウェランガム

骨材を用いて高流動コンクリートを練混ぜ、それぞれの骨材量がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響について検討を行った。使用した骨材の品質を表-7に示す。コンクリートの配合は、単位水量168kg/m³、水微粉末比95%、高性能減水剤量2.0%とし、粗骨材量は330l/m³を中心にそれぞれ3水準に変化させた。すなわち、同じ品質を有するモルタルに粗骨材を混入した場合の、粗骨材の種類及び量がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響について検討を行った。

粗骨材量とフレッシュコンクリートの性質との関係を図-14、15に示す。それぞれ粗骨材量の影響を受けて変化するが、その影響程度は粗骨材の種類によって異なる。そこで、細骨材の影響を検討したと同様の方法として、超硬練りコンクリートで使用されている、粗骨材空隙に対するモルタルの容積比(β)を用いてデータの整理を行った。図-16、17に示すように、 β とフレッシュコンクリートの性質との間には一義的な関係が得られた。このことは、粗骨材の品質が大きく異なった場合でも、同じフレッシュコンクリートの性質を得るために β が一定になるよう配合を修正すれば良いことを示している。

本工事は、海上に構築される外径18.0m、高さ64.5m、壁厚1.7～2.5mの鋼殻ケーソンの内部にコンクリートを充填するものである。ケーソン内部は鋼材や鉄筋が高密度に配置され、締固め作業を行うことが困難なことやコンクリートの落とし口が限られること、等の施工条件から高流動コンクリートを採用したものであり、構造物の分類としては表-2の「一般の土木構造物」に対応すると考えられる。高流動コンクリートの配合条件は、10m程度の流動距離が必要であること、鋼材の間隙まで充填できる十分な間隙通過性を有すること、水密性を確保すること等であった。これらのことから、配合設計における目標品質を表-8のように定めた。また使用材料の品質を表-9に示す。

本工事では必要流動距離が10mと比較的長いことを考慮し、目標Vロート値を12秒とするとともに、一般的な品質の骨材(細骨材の実積率65%、粗骨材の実積率62%)を用いた場合の粗骨材量を315l/m³とした。次に単位水量(W)と水微粉末比(w/pd)の組み合わせを、Vロート値12秒を得られるよう定めるが、ここでは図-9等を参考にW=175kg/m³、w/pd=95%の組み合わせを選定し、配合計算を行った。結果を表-10①に示す。この配合の α 及び β を、仮定した骨材の実積率を用いて計算すると、 $\alpha=2.34$ 、 $\beta=3.55$ となる。本工事で用いる骨材の実積率を用い、同じ α 、 β が得られるよう配合修正を行った。

①粗骨材の修正

1m³中の粗骨材の実容積をGv、空隙容積をBとする。

$$Gv/0.636 - Gv = B$$

$$(1000 - Gv)/B = 3.55 \quad \text{より}, Gv=330l/m^3$$

$$\text{単位粗骨材量} = 330 \times 2.67 = 881\text{kg/m}^3$$

他の材料を修正した結果を表-10②に示す。

②細骨材の修正

1m³中の細骨材の実容積をSv、空隙容積をAとする。

表-10 配合表

番号	水セメント比 (%)	水微粉末比 (%)	α	β	単位量 (kg/m^3)					高性能減水剤 (P×%)	増粘剤 (W×%)
					水	セメント	石粉	細骨材	粗骨材		
①	53.0	95.0	2.34	3.55	175	330	215	737	841	2.5	0.05
②					171	322	210	720	881	2.5	0.05
③					175	330	215	697	881	2.5	0.05

表-11 試験練り結果

項目	練混ぜ量	試験時期	高性能減水剤量 (P×%)	試験結果			
				スランプフロー (cm)	Vロート値 (秒)	空気量 (%)	圧縮強度 (28日, N/mm ²)
室内試験	50l	直後	2.5	67.5	12.0	3.0	40.6
実機試験	2.5m ³	直後	2.0	65.0	14.0	4.4	38.8
		60分後		63.5	14.2	4.1	

$$Sv/0.64 - Sv = A$$

$$(1000 - 330 - 45 - Sv)/A = 2.34 \text{ より,}$$

$$\begin{aligned} Sv &= 270l/\text{m}^3, \quad \text{単位細骨材量} = 270 \times 2.58 \\ &= 697\text{kg/m}^3 \end{aligned}$$

他の材料を修正した結果を表-10 ③に示す。

高性能減水剤の添加量 2.5% として室内試験練りを行った結果及び実工事に用いるコンクリートプラント船を用い、高性能減水剤を室内試験練りの80%（微粉末量の 2 %）とした場合の実規模試験練り結果を表-11 に示す。いずれも所要の品質を満足しており、提案した配合設計方法により、目標品質を有する高流動コンクリートを比較的簡単に得ることができた。また、実工事でこの配合を用い、約4,000m³ のコンクリートを無事施工することができた。

7. まとめ

高流動コンクリートが適用される種々の構造物に關し、これまでの現場実験や実施工結果を整理し、それぞれの構造物で高流動コンクリートに要求される性質を明らかにするとともに、高流動コンクリートの各種配合要因がフレッシュ及び硬化コンクリートに及ぼす影響についての研究結果をもとに、配合

設計法の確立を図った。得られた結果の概要は次のとおりである。

- (1) 高流動コンクリートのフレッシュ時の性質をスランプフローとVロート値で評価することとし、配合設計において目標となる、各構造物毎に要求される品質基準の推奨値として、表-2 に示す値を提案した。
- (2) ウェランガムを用いた高流動コンクリートの配合設計法として以下のよう提案を行った。
 - ①フレッシュコンクリートの性質の安定性及び粘性の付与から、ウェランガムの添加量は単位水量の0.05%とする。
 - ②粗骨材量のフレッシュ及び硬化コンクリートの性質に及ぼす影響から、一般の高流動コンクリートでは粗骨材容積を330l/m³、間隙通過性が特に要求される場合には300l/m³、硬化コンクリートの高品質が要求される場合には350l/m³とするのがよい。
 - ③ウェランガムを用いた高流動コンクリートでは、Vロート値は主として単位水量と水微粉末比により、またスランプフローは主として高性能減水剤の添加量により大きく影響を受ける。したがって、配合設計においては、まず適切なVロート値が得られるよう単位水量と水微粉末比の組み合わせを選択し、次に所定のスランプフローが得られるよ

う高性能減水剤量を定めればよい。

④水セメント比は、所定の硬化コンクリートの性質が得られるように決定する。

(3) 実積率の異なる細骨材及び粗骨材を用いる場合、細骨材の空隙に対するペースト容積の比 (α) 及び粗骨材空隙に対するモルタル容積の比 (β) が同じ値になるよう細骨材量及び粗骨材量を修正することで、ほぼ同じフレッシュ時の性質を有する高流動コンクリートが得られる。

(4) 提案した高流動コンクリートの配合設計及び修正方法を実際の工事に適用し、その実用性を示すことができた。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、早稲田大学理工学部 関 博教授、鹿島技術研究所 中原 康博士にご指導を受けるとともに、終始有益なご助言を頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 万木正弘、坂田 昇、坂井吾郎：ウェランガムを用いた高流動コンクリートのフレッシュな性状に及ぼす各種要因の影響、土木学会論文集 No. 538/V-31, 1996-5.
- 2) 坂井吾郎、重松和男、万木正弘、坂田 昇：特殊増粘剤が高流動コンクリートの流動性を安定させる効果、第37回日本学术会議材料研究連合講演会前刷集、1993. 9.
- 3) 万木正弘、坂井吾郎：併用系高流動コンクリートの硬化後の諸特性、セメントコンクリート論文集、No. 50, 1996.
- 4) 万木正弘、末吉隆信、坂井吾郎：高流動コンクリートの配合要因が乾燥収縮に及ぼす影響、セメントコンクリート論文集、No. 50, 1996.
- 5) 万木正弘、坂田 昇、岩井 実：特殊増粘剤を用いた締固め不要コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 14, No. 1, 1992.
- 6) 横関康祐、吉田好孝、鈴木健一：高流動コンクリートの人工島内部構築工への適用、第22回関東支部技術研究発表会講演概要集、1995年3月。
- 7) 糸日谷淑光、古屋信明、新開千弘、近松竜一：三成分系低発熱セメントを用いたマスコン用高流動コンクリートの施工性、土木学会第47回年次学術講演会概要集、1992. 9.
- 8) 坂田 昇、中下兼次、深田敦宏、万木正弘：高流動コンクリートの配合が施工性及び充填性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 1, 1993.
- 9) 安田正雪、樹田佳寛、杉山 央、荒金直樹：高流動コンクリートの実大壁部材への打込み実験：コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 1, 1994.
- 10) 重松和男、万木正弘、坂田昇、坂井吾郎、六本木信久：高流動コンクリートの流動特性に関する実験研究、鹿島技術研究所年報第41号、1993-10.
- 11) 高橋秀樹、西田徳光、小澤一雅、平原光彦、明石幸三：超流動コンクリートの施工における流動性管理方法、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、1993-5.
- 12) 坂井吾郎、万木正弘、坂田 昇、岩城 実：品質保証を考えた高流動コンクリートの施工について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 1, 1995.
- 13) 坂井吾郎、神生幹夫、富岡武彦：軌道下間詰め部への高流動コンクリートの適用、土木学会第50回年次学術講演会概要集、1995. 9.
- 14) Yurugi,M. Sakai,G. and Sakata,N. : Viscosity Agent and Mineral Admixtures for Highly Fluidized Concrete. Proc. of the International Conference on Concrete under Severe Condition, August, 1995.
- 15) 万木正弘、坂井吾郎：細骨材の特性に応じた高流動モルタルの配合修正方法の検討、土木学会第51回年次学術講演会概要集、1996. 9.
- 16) 中原 康：振動ローラで締固める超かた練りコンクリートの配合設計方法に関する研究、東京工業大学博士論文.
- 17) 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、1993-9.

(1997. 1. 23 受付)

MIX PROPORTION FOR HIGHLY FLUIDIZED CONCRETE WITH WELANGUM

Masahiro YURUGI and Goro SAKAI

Highly fluidized concrete is now coming to a practical stage of use and its applicability has been verified through various kinds of concrete constructions. In this paper, the authors proposed the slump-flow value and V-shaped funnel value that should be required for each structure based on data obtained from actual construction works. And also we proposed the procedure for selecting mix proportion of the concrete with viscosity modifying agent of welan gum from the results of experiments both on fresh and hardened properties of the concrete. The procedure were used successfully in actual construction works.