

増粘剤を添加した高流動コンクリートの 配合設計手法に関する一提案

竹下治之¹・佐原晴也²・町田篤彦³

¹正会員 工博 高松工業高等専門学校教授 建設環境工学科 (〒761-8058 香川県高松市勅使町355)

²正会員 工博 日本国土開発株式会社 技術開発研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1)

³正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-0825 浦和市下大久保255)

本報は、著者らが研究を続けている増粘剤を添加した高流動コンクリートに関して、これまで実施工や実大模型実験などに使用した26の配合を基本に、これまで実施してきた品質管理のための各種の室内実験結果なども考慮して、より実用的な配合設計手法の一提案としてとりまとめたものである。すなわち、これらの各種の実施工データや室内実験データを整理・考察することによって、具備すべき配合条件の設定内容とその設定に際しての考え方、ならびに単位水量、水セメント比などの配合設計のための具体的な基準値を提示した。また、実用の便に供するため、所要の性状が得られない場合や性状を改善したい場合の配合修正方法を示した。更に、本報で述べた手順に従って、実際に配合設計した例を示した。

Key Words : high fluidity concrete, viscous agent, mix proportion data, executions, mix design method

1. はじめに

振動締めをすることなく型枠の隅々まで充填できる高流動コンクリートが提案され約10年が経過し、その間、材料、配合、製造および施工等に関する報告が非常に数多くなされてきた。また、このコンクリートを一般的に使用可能とするために、多くの研究委員会が組織されて指針(案)¹⁾あるいはマニュアル²⁾なども制定されるとともに、土木学会でも近く指針が示されることになっている³⁾。

これまでの通常コンクリートでは、施工者の技術レベルによっても(配合等も要因と考えます)構造体コンクリートの品質が大きく左右されるのに対し、この高流動コンクリートでは、フレッシュコンクリートの品質の良否がそのまま構造体コンクリートの品質に大きく影響する。従って、高流動コンクリートの施工にあたっては、配合設計と品質管理(製造および施工時)が最も重要になってくる。特に後者については、これまで高流動コンクリートの研究の主流となってきたものであり、現在所要の性能を評価するための試験方法として指針等に規定されているものはないが、それぞれの試験方法の特性値と実施工での品質との関係はかなり把握され、現在では

実用上はあまり問題がない状態になりつつある。

しかし、高流動コンクリートをより一般的に使用できるようにするための配合設計手法についての具体的提案はまだ少ない。これは高流動コンクリートが大別して粉体系、増粘剤系および併用系の3種類あり、それぞれ配合の考え方が幾分異なることが1つの要因とも考えられるが、今後広く普及させ信頼性の高いものとするためには、一般的な配合設計手法の提案が待たれるところである。

これまで、多粉体系に対する配合設計手法の試案として三浦ら⁴⁾が、増粘剤を用いない場合の配合理論を岡村ら⁵⁾が、建築構造物に対する配合設計の考え方が「日本建築学会：高流動コンクリートの材料・配合・製造・施工指針(案)・同解説」⁶⁾に、そして主として増粘剤を使用する場合の配合設計の考え方およびその手順が「沿岸開発技術研究センター：港湾の施設を対象とした高流動コンクリート・マニュアル」⁷⁾に示されている。しかし、今後、任意の材料を用いた場合に適用できる一般的な配合設計手法にするためには、まだ十分に解決されていない高流動コンクリートとしての基本的問題、すなわち、粉体粒子間の相互作用、増粘剤や高性能減水剤の作用効果の理論化、充填性評価手法の確立など⁸⁾の問

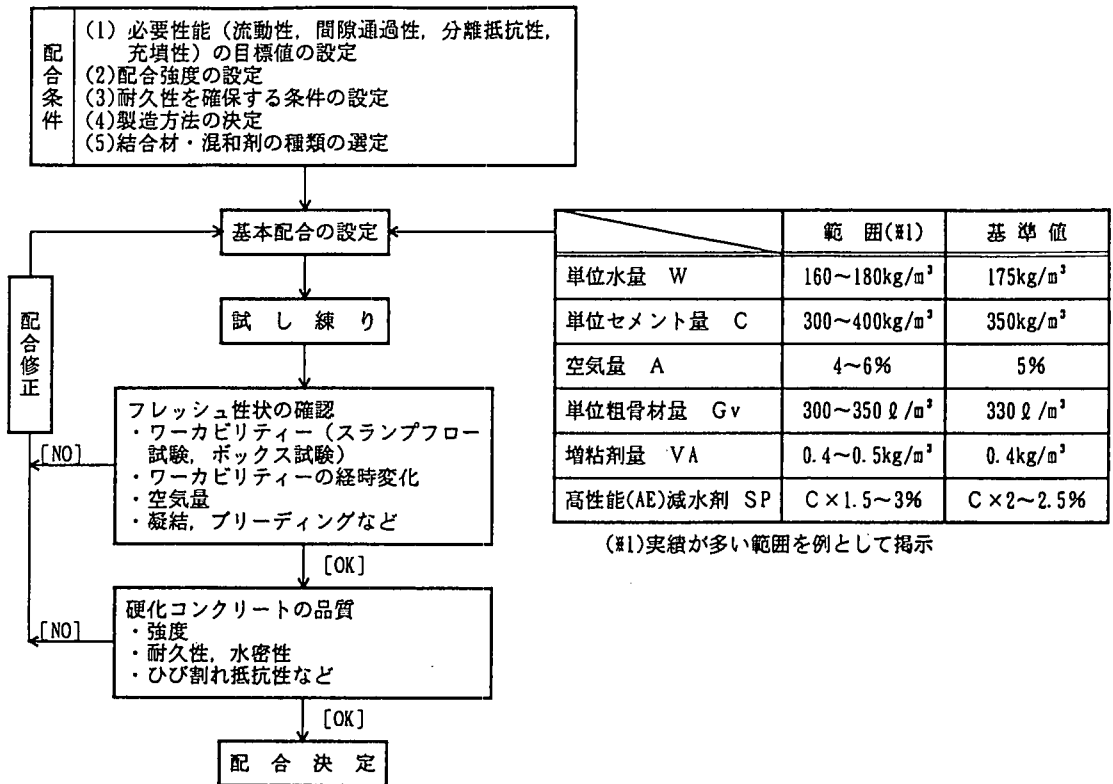


図-1 増粘剤を添加した高流動コンクリートの配合設計フロー

題点の解決を図るとともに、それぞれの高流動コンクリートの種別ごとに、これまでの配合設計事例を取りまとめ、できれば全体的に体系化された、より具体的な配合設計手法として提案していくことが必要であると考えます。

本報はこのような現状に鑑み、今後の高流動コンクリートの配合設計手法確立のための一助として取りまとめたものである。すなわち、著者らがこれまで研究してきた増粘剤を添加した高流動コンクリート⁷⁾に関して、これまで各地あるいは各種構造物ごとに対応してきた実施工、ならびに実大模型実験などに使用してきた26の配合（実施工19例、実大模型実験5例、配合検討のみ2例、以下実施例と称す）について、材料、配合および施工結果などにつき整理、考察を行い、既往の配合設計手法に比べ、より具体的で実用的な配合設計手法を提案した。

なお、本報では、適用される品質管理試験方法が一般化されたものではないこと、実施例が限られた材料や配合に基づく結果であること、特にフレッシュコンクリートの性能評価において直感的判断があることが否めないことなど、幾つかの問題点があることを承知の上で取りまとめている。

また、ここで示す増粘剤を添加した高流動コンク

リートは、結合材や石灰石微粉末などの粉体を多目に用いる粉体系あるいは併用系としても適用可能であると考えますが、本報では主として実施工で適用した呼び強度20~40程度の通常強度のコンクリートを対象として、できる限り元の配合に近くなるように増粘剤を活用して配合設計する場合の手法について述べている。

以下に、配合設計のフロー、配合条件の設定内容とその設定に際しての基本的な考え方、試し練りを行う場合の基本配合の設定方法、および所要の性状が得られない場合の配合修正方法について述べる。また参考として、本報で述べる手法に従って、実際に配合設計した例を述べる。

2. 配合設計フロー

図-1に、著者らが現在実施している増粘剤を添加した高流動コンクリートの配合設計のフローを示す。高流動コンクリートの配合は、基本的には通常のコンクリートと同様に、所要のワーカビリティ（但し、通常のコンクリートとは異なり、図-1に示す流動性、間隙通過性、分離抵抗性、充填性などの特有の性能が必要）、強度、耐久性およびその他

表-1 各種品質管理試験と性能評価項目

試験名	測定値	評価項目				
		流動性		間隙通過性	分離抵抗性	充填性
		硬度 (降伏値)	粘度 (塑性粘度)			
スランプフロー試験	スランプフロー	○			○	
	フロー50cm到達時間		○			
ボックス試験	段差(到達高さ)	○		○	○	○
	所定高さ到達時間		○	○	○	

ひび割れ抵抗性等の必要な性能が得られるように、試験によって定める。

具体的には図-1に示すように、①配合条件の設定、②基本配合の設定、③試し練り、④フレッシュ性状の確認、⑤(必要に応じて)配合修正、⑥硬化コンクリートの品質確認、の順序で配合検討を行えば良い。

3. 配合条件設定の考え方

(1) 必要性能の目標値の設定

施工対象構造物の断面や形状・寸法、配筋状態や配筋量、施工条件(補助的な締め作業の可否、有無)、施工者の技術能力などを考慮して、高流動コンクリートとして必要な性能の目標値を設定する。ここに言う必要性能の目標値は、高流動コンクリートの製造・施工において最も重要となる要求性能を満足するように決定することが必要であり、その性能の評価項目は、①流動性、②間隙通過性、③分離抵抗性および④充填性の4項目である。

この性能評価のための品質管理試験方法は、参考文献1)、2)および8)等に示されているが、まだ学会等で統一されたものはない。将来は、スランプフロー試験をベースとし、その他の試験は信頼性や利便性などの点から次第に統一されるものと思われるが、著者らは開発当初から試行錯誤した中から、主として表-1および図-2に示す品質管理試験方法を採用した。これらの試験方法は規定化されたものではなく問題点もあると思われるが、表-1に示すように、高流動コンクリートの要求性能を評価する試験方法として位置づけ、必要性能の目標値を以下のように設定した。

図-3は、増粘剤量やスランプフローを種々変化させた各種のワーカビリティを有する高流動コンクリートについて、その性能評価をするために行った表-1に示す各品質管理試験の測定結果の相関関

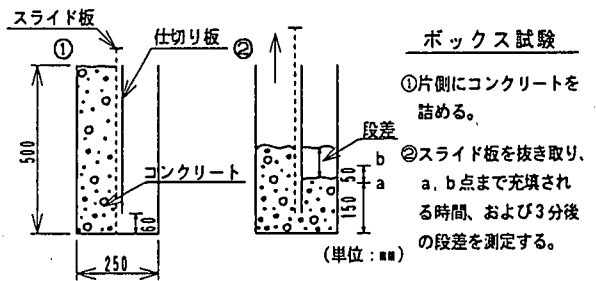


図-2 ボックス試験方法^{9), 10)}

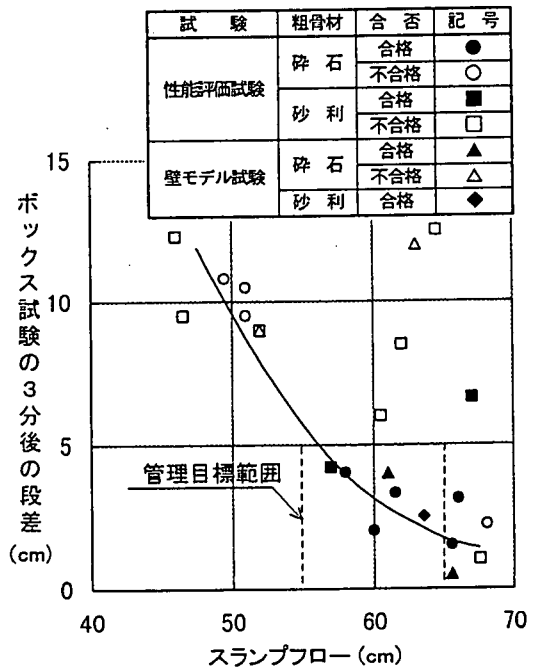


図-3 スランプフローとボックス試験における段差の関係^{9), 10)}

係を示す^{9),10)}。図中に示す合否とは、各高流動コンクリートに対する各試験の流動性、間隙通過性、分離抵抗性および充填性などの有無の判定結果を示しており、高流動コンクリートとして具備すべきこれらの性能が1つでも不足する場合は否として判定した。また、同図中には、増粘剤量やスランプフローを変化させて種々のワーカビリティを有する高流動コンクリートを用いて行った、長さ3m×高さ1m×幅15cmの有筋の壁モデル供試体（壁部材を想定して作成されたもので、縦、横ともにD10を15cmピッチにダブルに配筋し、片面にアクリル板を配置してコンクリートの充填状況を観察できる）の充填性確認試験の結果も示す^{9),10)}。この壁モデル供試体の合否は、同時に行った各品質管理試験の性能評価結果に、供試体の充填状況および洗い試験による骨材分離の調査結果なども考慮して総合的に判定した結果である。

図に示すように、流動性は高いが分離抵抗性や充填性が不足する一部の試験結果（図の右下側および右上側の白抜きのもの）を除き、各試験の結果には相関関係があることが分かる。これらの性能が不足した一部の試験結果を除外のうえ、壁モデルによる試験結果を主に、性能評価試験結果を従にして、各品質管理試験における管理目標範囲の目安を示すと図の破線のようにである。

同図から、ここで対象としているような一般的な強度と配筋を有するコンクリート構造物を対象とした場合、品質管理目標の1つであるスランプフローは、本対象の高流動コンクリートが粉体量が比較的少ないために、これが大きくなると分離抵抗性が不足する可能性があることを考慮し、適用範囲として幾分安全側に55～65cmとし、もう1つの品質管理目標のボックス試験における3分後の段差は、これも幾分余裕を持たせて5cm以下とした。

このような各品質管理試験の管理目標値は、その後に実施した柱や壁部材を用いた実規模供試体による既往の研究結果¹¹⁾や、後述する26の実施例でも妥当であることが確認された。

一方、ボックス試験のa点までの充填時間は、最近高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験として採用される事例が多いV漏斗試験¹²⁾の流下時間と非常に良い相関があることが分かった¹³⁾。このことから、ボックス試験の段差が小さくなることがV漏斗試験で閉塞しないで流下することに相当し、前者のa点までの充填時間が後者の流下時間に相当すると考えると、両試験は高流動コンクリートのほぼ同様な性能を評価しているものと考えられる。

現在、高流動コンクリートのワーカビリティの性能評価方法として、種々のワーカビリティ評価試験方法が各所から提案されており、実施工における品質管理手法も研究開発者や施工者によって異なっているが、将来的には共通の評価試験方法が提案され統一されることが望ましい。しかし、現在ではまだ時期尚早であり、実施工にあたってはこれまで著者らが採用してきた表-1に示す品質管理試験を以下のように考えて採用している。

即ち、試験室内や実機プラントにおける配合検討時には、スランプフロー試験とボックス試験を併用して適切な配合を十分に検討し、実施工時にはスランプフロー試験を中心に品質管理を行い、所定の打設量や性能の変化が認められる場合などに、配合検討時に考えていた所要の性能が得られているかを、補助的にボックス試験によって確認すれば良い。

(2) 配合強度の設定

3章(1)節で述べた性能評価試験や壁モデル試験では単位セメント量は322～348kg/m³、また後述する26の実施例でも単位セメント量は267～427kg/m³であるが、本論文で対象としている増粘剤を添加した高流動コンクリートは、粉体のほかに増粘剤の働きで間隙通過性、分離抵抗性、充填性などを確保することを特長としており、セメントや他の粉体材料が比較的少量でも高流動化が可能である。このため、配合強度が設計基準強度に対して過大にならずに済む点の一つの特長である。従って、基本的には通常のコンクリートと同様の考え方（設計基準強度および現場におけるコンクリートの品質のばらつきを考慮して配合強度を設定）で配合強度を設定できる。

しかし、あまりに貧配合な条件下（単位セメント量270～280kg/m³以下）では、増粘剤と高性能(AE)減水剤の働きのみでは必要な性能が得られない場合がある。また、近年の骨材事情では、生コンプラントによっては「碎石+砕砂または海砂」の条件も多く、細骨材の粒径や粒度分布が悪い場合には、セメントや他の粉体を増やす必要がある。このように、ワーカビリティ確保の面からセメント量等が決まる場合には、設計基準強度から定まる強度以上の配合強度になる。

(3) 耐久性を確保する条件の設定

耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性および鋼材を保護する機能などを確保するための材料、配合、施工などの条件は、土木学会コンクリート標準示方書に準拠する。この外に、既往の研究成果を踏まえて乾燥収縮低減のための水セメント比や粗骨材量¹⁴⁾を、

耐凍害性確保のための空気量¹⁴⁾を必要に応じて規定する。

(4) 高流動コンクリートの製造方法の決定

増粘剤を添加した高流動コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場のプラントミキサで製造する方法と、工事現場においてアジテータ車を用いて製造する方法¹⁵⁾の2通りが可能である。いずれの方法においても、高流動化した状態での所要の性能を満足するように配合設計するため、基本的な配合(単位セメント量, 単位水量, 細・粗骨材量など)はほぼ同じであるが、高流動化後の運搬の有無や時間によるスランプフローの目標保持時間の違いから、使用する混和剤の種類は変わる場合がある。

(5) 結合材および混和剤の種類を選定

著者らのこれまでの実施例では、製造上の制約あるいは簡便性から、結合材は一種類のセメント(普通ポルトランドセメント, 早強ポルトランドセメント, 高炉セメントB種, 高ビーライトセメントなど)のみを使用した例が多い。しかし、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れなどを考慮して、セメントの一部をフライアッシュや膨張材で置き換えた例もあり、必要性能に応じてセメントの種類やその他の結合材の使用の有無, 種類を選定する。

増粘剤は、高界面活性のセルロース系増粘剤を使用すると多量の空気が入り易くなり¹⁶⁾、逆にこれに消泡剤が入った増粘剤を使用すると空気量が減少したり不安定なものとなるため¹⁷⁾、低界面活性のセルロース系増粘剤の使用を基本とし¹⁴⁾、必要に応じて低重合度のアクリル系増粘剤を併用する¹⁴⁾。

また周知のように、高性能(AE)減水剤は、使用する増粘剤との相性やスランプフローの保持性能に大きく関係するため¹⁷⁾、これらの点を十分考慮して選定する必要がある。

4. 基本配合の設定方法

上記の配合条件設定の基本的な考え方に基づき、以下に各配合因子ごとに具体的な設定方法ならびに基準となる数値等を示す。

(1) 単位水量

表-2に、これまでの実施例において、通常コンクリート(スランプ12cm程度)に替え高流動コンクリートを適用した現場等の地域、骨材の産地や種類とその品質、通常コンクリートの呼び強度, 単位水量およびその単位セメント量, 高流動コンクリートとした場合の単位水量および単位セメント量の一覧

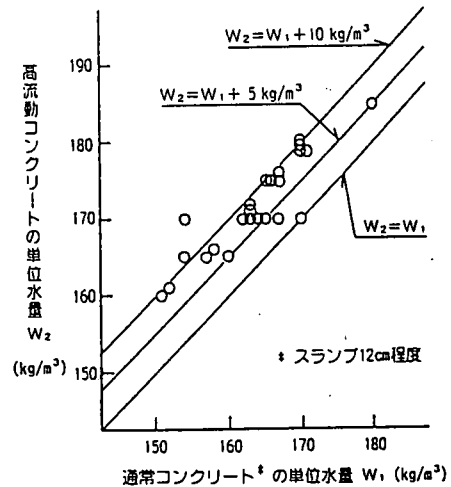


図-4 高流動コンクリートと通常コンクリートの単位水量の関係

を示す。

適用地域は北海道から九州に及び、適用現場数は少ないものの全国各地の骨材を使用した高流動コンクリートの適用結果となっている。一般的に、高流動コンクリートは特に使用骨材の性質, 中でも粒度および粒形の影響を大きく受けるが、このように使用骨材が全国に及ぶことから、十分ではないものの一応、高流動コンクリートを製造する場合の一般性を検討できるデータとなっているのではないかと考えている。適用構造物は、主として通常コンクリートでは打設が困難あるいは施工欠陥が出来易い通常強度の構造物(例えば、背の高い柱や壁式構造物, トンネルの覆工コンクリート, 橋梁等の配筋が密で締め目が困難な構造物, あるいは貯水場, 浄水場, タンク, サイロなどの水密性や気密性を要する構造物等)を対象としているため、呼び強度は20~40程度であり、基本的には高流動コンクリートの強度も元の通常コンクリートとほぼ同等となるように配合設計を行えばよい。

また、図-4に実施例における高流動コンクリートと通常コンクリートの単位水量の関係を示す。同図から、高流動コンクリートの単位水量は、当該レディーミクストコンクリート工場においてスランプ12cm程度の通常コンクリートを得るために必要な単位水量に対して、5~10kg/m³増しになる例が多いことが分かる。なお、硬化コンクリートの品質確保などの点から、単位水量を極力減らして高性能(AE)減水剤の添加量を調整し、所定のスランプフローを得ることも可能であるが、この場合、凝結遅延や乾燥収縮などの硬化後の品質への影響も考慮する必要がある。

表一 2 実施例における適用地域、使用骨材ならびに通常コンクリートと高流動コンクリートの単位水量と単位セメント量の関係

県名	細骨材		粗骨材		通常コンクリートの単位水量 (kg/m ³)			高流動コンクリートの単位水量 (kg/m ³)	
	産地・種類	品質 ^{#1}	産地・種類	品質	呼び名	水	セメント	水 ^{#2}	セメント
北海道	江差産陸砂と七飯産砂の混合	比重 2.63(2.62) F M 2.56(2.50)	七飯産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.68、実積率 61.0	270-12-20-N	163	330	170	350
埼玉	鹿島産砂と葛生産砂の混合	比重 2.62 F M 2.60(2.48)	小山産砂利と田沼産砂の混合	最大寸法 25mm 比重 2.65 実積率 63.2	270-12-25-N	165	318	170	378
東京	桧原産砂と佐原産砂の混合	比重 2.61(2.60) F M 2.76(2.53)	桧原産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.67 実積率 59.0	300-(12-18)-20-N	167	341	175	379
東京	奥多摩産砂と佐原産砂の混合	比重 2.59 F M 2.75	青海産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.64 実積率 60.0	300-12-20-N	162	318	170	378
神奈川	相模川水系砂と市原産砂の混合	比重 2.60 F M 2.82(2.68)	城山産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.64 F M 6.71	270-(12-18)-20-N	170	327	179	333
神奈川	同上	同上	城山産砕石と相模川砂利の混合	最大寸法 25mm 比重 2.65 F M 6.80	240-(12-18)-25-N	163	302	171	302
神奈川	同上	同上	同上	同上	270-(12-18)-25-N	167	363	176	372
千葉	鹿島砂	比重 2.60 F M 2.60	田沼産砂と鬼怒川砂利の混合	最大寸法 25mm 比重 2.61 実積率 63.7	210-(12-18)-25-N	158	295	166	303
新潟	魚野川粗砂と信濃川細砂の混合	比重 2.60(2.61) F M 2.80(2.88)	魚野川砂利	最大寸法 25mm 比重 2.78 F M 6.90	300-12-25-N	152	334	161	354
新潟	長岡砂	比重 2.62 F M 2.77	長岡砂利	最大寸法 25mm 比重 2.73 F M 6.93	400-12-25-N	151	403	160	427
新潟	下濁川産砂	比重 2.57 F M 2.82	下濁川産砂利	最大寸法 25mm 比重 2.60 実積率 64.4	300-12-25-N	160	360	165	388
富山	早月川砂	比重 2.61 F M 2.80	早月川砂利	最大寸法 25mm 比重 2.68 F M 6.89	210-(12-18)-25-N	164	281	170	330
富山	庄川水系陸砂	比重 2.58 F M 2.85	庄川水系砂利	最大寸法 25mm 比重 2.62 実積率64.0	210-12-25-N	157	283	165	330
富山	同上	比重 2.58 F M 2.88	同上	最大寸法 25mm 比重 2.62 実積率 63.1	300-12-25-N	154	324	170	378
愛知	瀬戸産山砂と藤岡産山砂の混合	比重 2.56 F M 2.90	桑名産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.67 実積率 61.0	210-12-20-BB	166	281	175	314
愛知	町屋川産砂と多度産山砂の混合	比重 2.59 F M 2.85	木曾川産砂利と南濃産砂の混合	最大寸法 25mm 比重 2.64 F M 6.85	350-12-25-N	165	363	175	385
大阪	本島産海砂と河内長野産砂	比重 2.56 F M 2.65	旗尾山産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.60	240-12-20-BB	172	319	180	360
岡山	男木島産海砂と男鹿島産砂の混合	比重 2.56 F M 2.71	福南山砕石	最大寸法 20mm 比重 2.64 F M 6.70	350-10-20-BB	167	350	170	387 ^{#3}
岡山	室木島沖産海砂と自社製砂の混合	比重 2.55 F M 2.66	瀬戸町産砂利と御津町産砂の混合	最大寸法 20mm 比重 2.67 実積率 58.5	225-12-20-N	170	310	179	358
山口	宍波産海砂と下松産砂の混合	比重 2.61 F M 2.85	下松産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.74 実積率 59.0	210-12-20-BB	170	299	170	330 ^{#4}
福岡	筑穂町砂、烏帽子海砂、西浦海砂混合	比重 2.65 F M 2.60	甘木市砕石	最大寸法 20mm 比重 2.86 実積率 58.5	210-(12-23)-20-N	180	316	185	358
大分	小屋、松岡混合(山砂、砕砂、海砂)	比重 2.57 F M 2.65	小屋砕石	最大寸法 40mm 比重 2.65 実積率 60.0	160-12-40-BB	154	239	165	267
大分	細粒砂(海砂)と粗粒砂(山+海)の混合	比重 2.58 F M 2.59	津久見産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.70 F M 6.66	210-12-20-BB	163	286	172	278
宮崎	長浜産海砂と宍波産海砂の混合	比重 2.57 F M 2.70	津久見産砕石	最大寸法 20mm 比重 2.70 実積率 61.0	210-12-20-BB	170	293	180	286

#1 ()内は高流動コンクリート用に混合割合を変えた時の値

#2 高性能(AE)減水剤量を含む値

#3 膨張材 30kg/m³を含む

#4 フライアッシュ 30kg/m³を含む

表-2 および図-4 に示す実施例の結果から、高流動コンクリートの単位水量は通常コンクリートの単位水量の5~10kg/m³増しとしたW=160~180kg/m³の範囲に設定することを基本に、材料分離抵抗性、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性などの確保の点からできる限り少なくし、土木学会コンクリート標準示方書に準じて可能な限り175kg/m³以下とすることが望ましいと考えられる。

(2) 水セメント比 (水結合材比)

周知のように(例えば文献8), 高流動コンクリートにおいても、圧縮強度はセメント水比とほぼ比例関係にある。従って、本論文で対象としている増粘剤を用いた高流動コンクリートの水セメント比は、基本的には通常コンクリート同様に、設計基準強度に現場におけるコンクリートの品質のばらつきを考慮して定められる配合強度を満足するように、試し練りにより決定すればよい。

しかし、前述したように、高流動コンクリートとしてのワーカビリティ確保の面からセメントや他の結合材量が決まる例も多い。図-5は、実施例における高流動コンクリートと通常コンクリートの水セメント比の関係を示す。同図から、概ね、高流動コンクリートにすることにより、水セメント比は約5%程度小さくなるのが分かる。これは次節に示されるが、高流動コンクリートとすることにより水量も増加する場合が多いが、その比率以上にセメント量が増加するためである。

(3) 単位セメント量 (単位結合材量)

単位セメント量は、基本的には単位水量と水セメント比から定まるが、前述のように、ワーカビリティ確保の面から、それよりも多くなる例も多い。図-6は、実施例における高流動コンクリートと通常コンクリートの単位セメント量の関係を示す。高流動コンクリートとしての単位セメント量は、通常コンクリートに比べ約50kg/m³程度増加し、270kg/m³前後の例もいくつかあるが、300~400kg/m³の例がほとんどである。

このように、種々の骨材を使用した配合結果では、高流動コンクリートとして必要な性能を保持させるためには、増粘剤を使用した場合でも、石灰石微粉末などを使用する場合を除き、単位結合材量は300kg/m³以上、できれば320~330kg/m³以上あることが好ましい場合が多い。特に、細骨材として砕砂を用いる場合、このような傾向が顕著である。

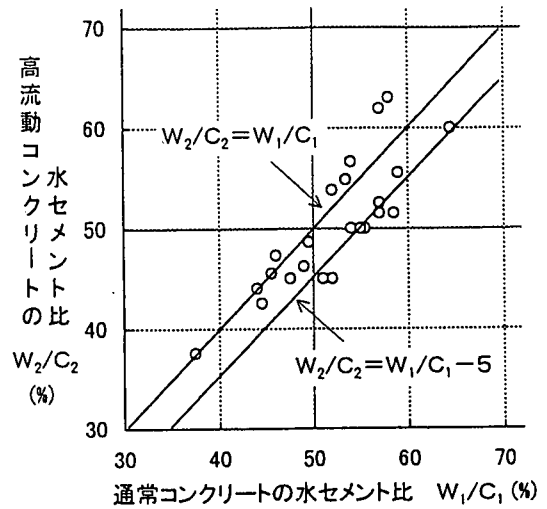


図-5 高流動コンクリートと通常コンクリートの水セメント比の関係

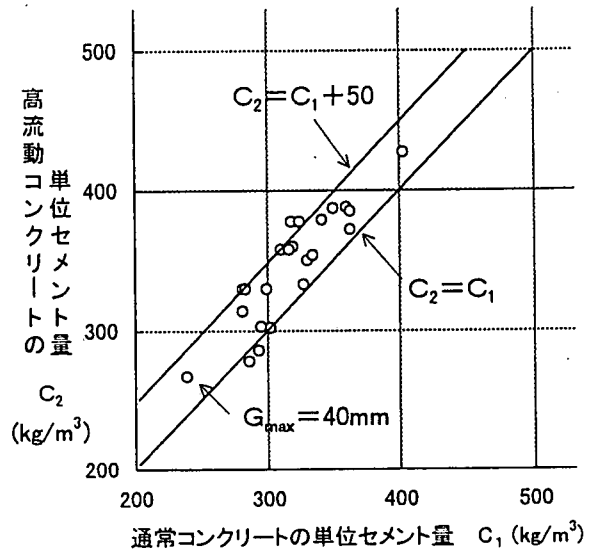


図-6 高流動コンクリートと通常コンクリートの単位セメント量の関係

(4) 空気量

図-7に、硬化コンクリート中の空気量と耐久性指数の関係を示す¹⁴⁾。図に示すように、高流動コンクリートとして十分な耐凍害性を確保するためには、硬化コンクリート中の空気量として4.5%以上、安定的には5%以上が必要である。従って、空気量ロスが少ない天然樹脂酸塩系等のAE剤を使用すればロスを1%以下に抑えることができるので¹⁴⁾、耐凍害性を考慮する必要がある場合、製造直後の空気量は5.5~6.0%程度に設定すればよい。

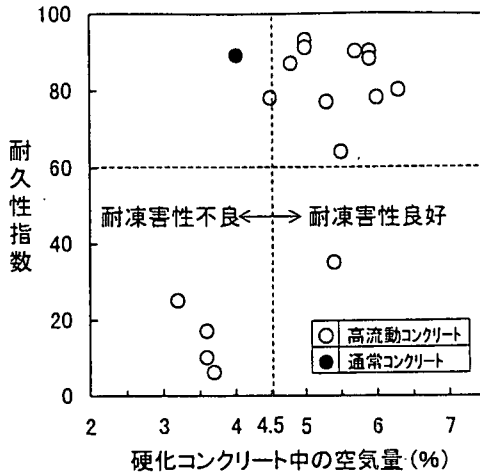


図-7 硬化コンクリート中の空気量と耐久性指数の関係¹⁴⁾

(5) 単位粗骨材量・細骨材率

図-8に、実施例における粗骨材の種類および最大寸法と単位粗骨材量の関係を示す。同図から通常のコンクリート同様に、単位粗骨材量は最大寸法が大きくなる方が、また碎石よりも砂利を使用する方が多くなる傾向にあることが分かる。なお、碎石20mmと混合25mmの粗骨材を使用した場合、その骨材量に比較的大きなばらつきが認められるが、これは主に岩質などの差による碎石の形状に起因しているものと考えられる。同図から、粗骨材の種類に応じた粗骨材量の目安を示すと表-3のようである。

なお、細骨材率は単位水量、単位セメント量、空気量および単位粗骨材量が定まれば自動的に算出されるが、実施例における高流動コンクリートと通常コンクリートの細骨材率の関係を示すと図-9のようである。高流動コンクリートとすることにより、細骨材率は約10%の範囲で増加することが分かる。これは、主に高流動コンクリートとしてのワーカビリティ、中でも間隙通過性や分離抵抗性を確保するために必要となるためである。

(6) 増粘剤量

図-10に、実施例における単位セメント量と増粘剤量の関係を示す。概ね、単位セメント量が増加すると増粘剤量が減少する傾向にあり、また同等の単位セメント量でも実際の使用量にはかなり差異があることが分かる。この主な原因としては、骨材の粒形や粒度分布が考えられる。図中に実際の使用量の平均的な数値を実線で示すが、既往の研究結果^{13), 16)}によれば、乾燥収縮の低減や耐凍害性の向上のためには、増粘剤量は少ない方が好ましいので、これら

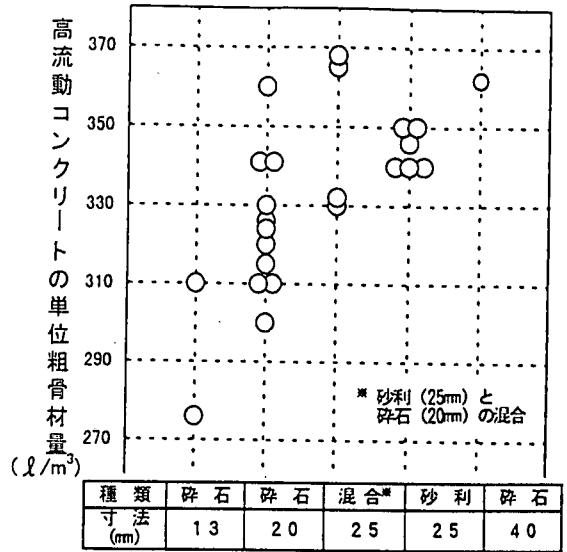


図-8 粗骨材の種類および最大寸法と粗骨材量の関係

表-3 粗骨材種類に応じた粗骨材量の目安

粗骨材種類	最大寸法 (mm)	単位粗骨材量 (l/m³)
碎石	20	300~360, 基本330
碎石と砂利の混合	25	310~365, 基本340
砂利	25	330~350, 基本340

表-4 単位セメント量に応じた増粘剤量の目安

単位セメント量 (kg/m³)	増粘剤量 (kg/m³)
300 前後	0.45~0.60, 基本 0.5
350 前後	0.35~0.55, 基本 0.4
400 前後	0.30~0.45, 基本 0.3

の点も考慮のうえ基本の値を設定し、単位セメント量に応じた増粘剤量の目安を示すと表-4のようである。

(7) 高性能(AE)減水剤の種類と量

周知のように、高性能(AE)減水剤の種類は増粘剤との相性、スランプフローの保持時間、空気量、凝結時間などを考慮して選定する必要がある。例えば、増粘剤として低界面活性のセルロース系増粘剤を使用する場合、ナフタリン系やアミノスルホン酸系の高性能(AE)減水剤とは相性が悪い場合があるため併用は避けるのが望ましい¹⁷⁾。

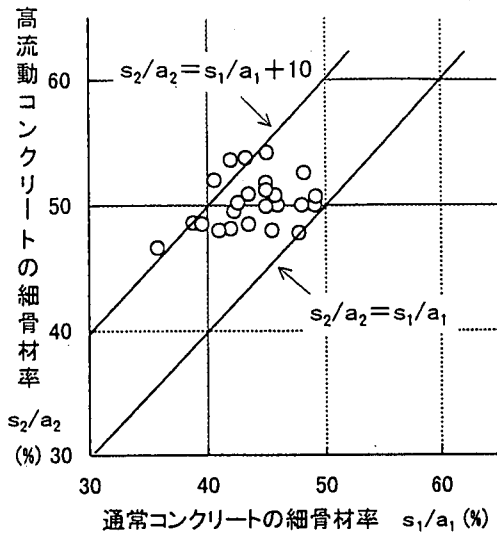


図-9 高流動コンクリートと通常コンクリートの細骨材率の関係

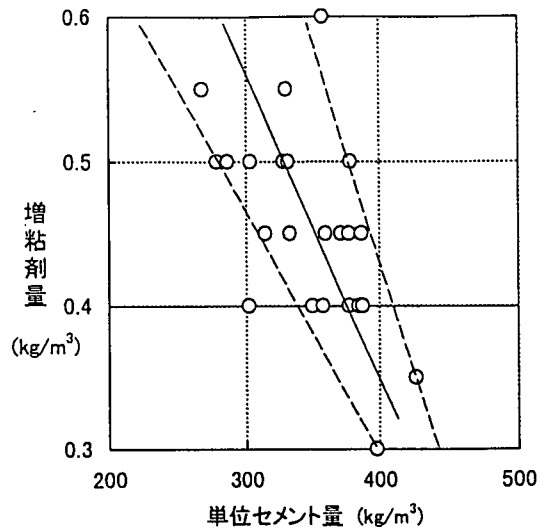


図-10 単位セメント量と増粘剤量の関係

表-5 高性能(AE)減水剤の種類と添加量および使用時の特性

高性能(AE)減水剤		スランプの保持時間	空気連行性	凝結特性
種類	添加量(*1)			
AE減水剤 + メラミン系高性能減水剤	$C \times 0.2 \sim 0.4\%$ + $2 \sim 3 \text{ l} / C = 100 \text{ kg}$	(*2) 1時間程度まで	比較的小さい	比較的速い
ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤	$C \times 1.5 \sim 3\%$	2時間程度まで	比較的大きい	比較的遅い

(*1) 単位水量の一部として換算する。

(*2) 併用するAE減水剤量を標準添加量よりも大幅に増やすとスランプ保持時間も長くなる。しかし、同時に凝結時間も長くなる。

また、実施例の中で主として使用したメラミン系高性能減水剤およびポリカルボン酸系高性能(AE)減水剤について、実際の使用量とこれらを使用した場合のフレッシュコンクリートの特性を述べると表-5のようである。表に示すように、高性能(AE)減水剤の種類により特性が異なるため、高流動コンクリートの製造にあたってはこの点を十分に留意し適用することが重要である。

(8) AE剤量

実施例においてはAE剤量は $C \times 0.005 \sim 0.02\%$ 程度であったが、空気量ロスを少なくするために、できれば天然樹脂酸塩系AE剤を用いて¹⁴⁾、4章(4)節で述べた空気量が得られるように添加量を調

整する。

以上述べた基本配合の設定方法の考え方にに基づき、実施例の各単位量について、配合実績が多い範囲を図-1の配合設計フロー図中に示す。また、一般的な構造物に適用する場合に、現時点で最も適切と考えられる基準値を、乾燥収縮や耐凍害性などの硬化コンクリートの品質も考慮¹³⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾して決定した結果を、併せて同図に示す。

なお、この基準値から求められる水セメント比が配合強度から定まるそれよりも小さくなる場合は、この基準値から求められる水セメント比が優先するが、逆に大きくなる場合は、配合強度から定まる水セメント比が優先する。

表-6 ワーカビリティーが不足している場合の配合修正項目とその影響

修正項目	影 響	参考図
スランプフロー	分離しない範囲で大きくすると、一般に流動性、間隙通過性および充填性が向上	図-3
増粘剤量	少ない方が一般に流動性は向上するが、間隙通過性、分離抵抗性は低下	図-11
粗骨材量	少ない方が一般に流動性、間隙通過性および分離抵抗性が得やすい	図-12
細骨材のFM	ワーカビリティー確保の点からFM2.50±0.1程度が好ましい	図-13
空気量	多くすればボールベアリング効果で流動性が得やすい	-

5. 配合修正方法

前述の4章に示す手法に従い設定した基本配合で試し練りを行った結果、高流動コンクリートとして目標とした性能が得られない場合の配合修正方法について述べる。

図-1に示すように、フレッシュコンクリートの品質の確認項目は、ワーカビリティー（流動性、間隙通過性、分離抵抗性および充填性）とその保持時間、空気量、凝結等である。これらのうち、ワーカビリティーの品質確認は、表-1に示すようにスランプフロー試験とボックス試験で行っているが、前者は流動性と分離抵抗性を、後者はこれらの外、間隙通過性や充填性も併せて評価している。この2種類の試験で所要の品質が得られない場合は、次のように修正する。

スランプフローは、主として高性能(AE)減水剤の添加量に左右される。この外、単位水量、増粘剤量、粗骨材量、空気量および骨材の微粒分や結合材などの粉体量にも影響される。これらの影響とその度合いについては、表-6および図-3や図-11～図-13が参考になる。

これらのうち、表-6はワーカビリティーが不足している場合の配合修正項目とその影響について、図-11は増粘剤量がワーカビリティーの指標であるボックス試験における3分後の段差とスランプフローに及ぼす影響について、図-12は細骨材率が同一の試験値に及ぼす影響について、また、図-13は細骨材のFMがボックス試験における3分後の段差に及ぼす影響について示したものである。なお、これらの図表に示されるように、高流動コンクリートに要求される各種の性能は相互に関係するものであるから、これらの性能を同時に満足するように慎重な配合修正が求められる。

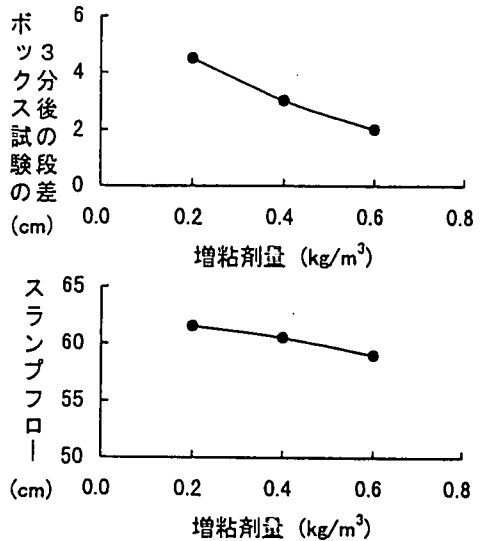


図-1-1 増粘剤がワーカビリティーに及ぼす影響

通常、スランプフローの修正は、まず高性能(AE)減水剤の添加量で行うが、これのみでは修正ができないときは、上記の他の材料等も添加量を調整して、所要の品質を得るようにする。この場合、単位水量が規定値を越えないように留意する。また、本試験では同時にフロー50cm到達時間と流動表面の材料分離状態を観察し、分離抵抗性の評価の参考とする。

一方、ボックス試験は、前述のとおり4つの性能を評価しているが、これらのうち流動性や分離抵抗性の良否については、スランプフロー試験でも概略評価できるため、本試験では間隙通過性と充填性の評価が主となる。これらの性能に最も影響するのは粗骨材量であり、その外、増粘剤量、細骨材率、粉体量等である。しかし、粗骨材量を余り少なくすると、乾燥収縮や弾性係数などにも問題が生じるため、必要に応じて他の材料も修正する。なお、この場合も表-6に示す参考図が有用となる。

また、これら2種類の試験結果から、分離抵抗性が不足していると考えられる場合は、増粘剤の修正が主となるが、併せてブリーディングや空気泡の抜け出しなどがある場合は、単位水量の減少、細骨材率や粉体量の増加などが必要となる場合もある。

ワーカビリティーの保持時間には、特に高性能(AE)減水剤の種類と添加量が影響する外、増粘剤の種類と添加量も影響する。どちらも増加すると保持時間は長くなる傾向にあるが、凝結時間も長くなるため、併せて事前に確認しておくことが好ましい。

空気量の修正はAE剤の添加量の調整により行う。但し、増粘剤やAE剤によっては多量の空気が混入されたり、空気量ロスが大きくなる場合があるので、このような場合は他の適切な材料に変更する。

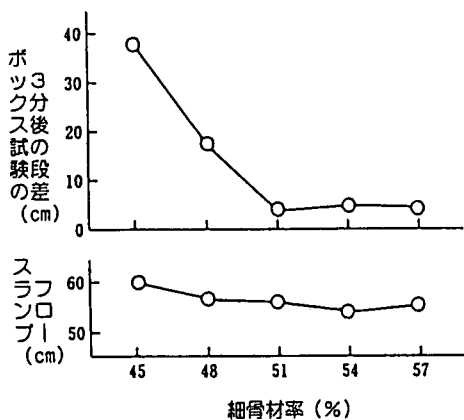


図-12 細骨材率とボックス試験値の関係¹⁰⁾

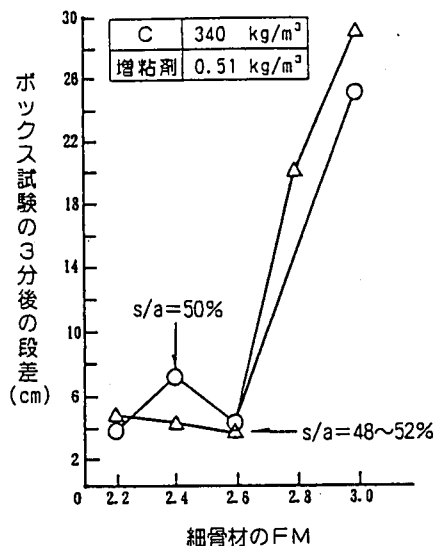


図-13 細骨材のFMとボックス試験値の関係¹⁰⁾

表-7 施工対象構造物の概要と配合条件

施工対象構造物	配合条件
<ul style="list-style-type: none"> 高さ：H=5.5m，部材厚さ：天端15cm，下端25cmのRC壁体 配筋：H=1mまで D13,D10 @100ダブル，H=3mまで D13,D10 @200ダブル，H=5.5mまで D10 @200シングル 設計基準強度：$F_c=20.6\text{N/mm}^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> 必要性能の目標値：ボックス試験の段差5cm以下，スランプフロー $65\pm 5\text{cm}$ 配合強度：割増し係数を1.3として26.8N/mm^2 寒冷地で耐凍害性を考慮して，目標空気量5.5%

6. 配合設計例

ここでは，2章～5章に述べた手法に従って，高流動コンクリートを実際に配合設計した例を述べる。

(1) 施工対象構造物および配合条件の設定

表-7に本配合の施工対象構造物の概要と，これに対応して設定した配合条件を示す。スランプフローは，薄い壁体条件と打込み時の自由落下高さが大きいことを考慮して，大き目の65cmとした。

(2) 基本配合の設定と試し練りによる性状確認および配合修正

表-8に使用材料を，表-9に検討した配合内容を，表-10にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。配合検討の考え方，経緯は以下の通りである。

第1ステップ：基本配合である配合No.1の単位水量は，通常コンクリートにおいてスランプ12cmを得る単位水量が 163kg/m^3 であったことから，その 7kg/m^3 増の 170kg/m^3 に設定した。単位セメント量については，当該レディーミクストコンクリート工場において，上述の配合強度に対応した水セメント比が49.5%であったことを参考に，これとほぼ同程度の値になる量として 350kg/m^3 とした。また，単位粗骨材量に関しては，薄壁を5.5m自由落下させて施工する条件を考慮して，碎石の場合の基準量(330kg/m^3)よりも少ない 320kg/m^3 に設定した。高性能(AE)減水剤量，増粘剤量は基準値を採用し，AE剤については，本施工の材料，配合条件での高性能(AE)減水剤と増粘剤の組み合わせによる空気連行性が不明であったため，添加しないで試し練りを開始した。

表-9 検討した高流動コンクリート配合

配合 No	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³) ()はℓ/m ³					SP (C×%)	AE (C×%)	VA (kg/m ³)	備 考
			W	C	S ₁	S ₂	G				
1	48.6	51.8	170 (170)	350 (111)	538 (206)	366 (138)	858 (320)	2.0	0	0.4	室内配合 (1回目)
2	48.6	52.6	170 (170)	350 (111)	637 (244)	278 (105)	844 (315)	2.0	0.01	0.4	室内配合 (2回目)
3	"	"	"	"	"	"	"	2.2	0.025	"	実機配合

表-10 フレッシュコンクリートの試験結果

配合 No	スランプ 高(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	ボックス試験の 段差 (cm)	目視観察結果
1	66×65	1.7	14	0.5	フロー板上で粗骨材がやや目立つ。SPの浮きや空気の抜け出しが若干みられる。
2	62.5×61.5	5.7	15	1.5	SPの浮きや空気の抜け出しはみられなくなった。
3	65×62	6.2	16	1.5	フロー板上での粗骨材分布良好
	63.5×61.5	6.4	15	2.0	練り上り60分後

以上の基本配合で試し練りを行った結果、表-10に示すように、ボックス試験の段差とスランプフローは1回で目標を満足することができた。しかし、空気量はAE剤で調整する必要があることが明らかになり、また、目視ではフロー板上で粗骨材がやや多く見える状況や、高性能(AE)減水剤の浮きと空気泡の抜け出しが観察され、これらの性状改善が必要であると判断された。

第2ステップ： 配合No.2では、高流動コンクリートの空気量を所要の値に調整するためにAE剤を添加した。また、細砂(表-8の陸砂S₁)の混合割合を60%から70%に多くすることで、空気泡の保持力が大きいとされる径0.15~0.6mmの細粒分を増加し、空気泡の抜け出しの防止を図った¹⁷⁾。さらに、粗骨材量を5ℓ/m³減少した。

以上の配合修正の結果、ボックス試験値およびスランプフローの目標を満足するとともに、基本配合の問題点も改善されたため、これを室内試験における決定配合とした。

第3ステップ： 配合No.3は、No.2の配合の高性能(AE)減水剤とAE剤の添加量を修正した実機プラント用の配合である。ここで、高性能(AE)減水剤については、配合No.2のスランプフローが目標の65cmより若干小さいことを考慮して増量したものである。また、AE剤の使用量は、当該レディーミクストコンクリート工場では、一般に実機製造時には室内試験時に比べて、同程度の空気量を得るための所要量が2~3倍になることを考慮して設定した。

表-8 使用材料

セメント	C	普通ポルトランドセメント 比重3.16
細骨材	S	陸砂S ₁ (比重2.61, FM2.30)と 砕砂S ₂ (比重2.65, FM2.95)を6:4に混合
粗骨材	G	砕石、最大寸法20mm、比重2.68 FM6.68
高性能AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系の化合物
AE剤	AE	天然樹脂酸塩系
増粘剤	VA	低界面活性セルロース系 水溶性高分子化合物

このような配合修正を行って実機試験練りを行った結果、スランプフロー、空気量、ボックス試験値ともに目標を満足することが確認された。また、練り上り後60分間の経時変化が小さいこと、ならびにその後の試験で強度も十分であることなどが確認され、配合No.3を実施工用の配合として決定した。

実施工においては、配合No.3の高流動コンクリートは、流し込むだけで型枠の隅々まで充填できることが観察され、脱型後の検査でも充填不良はみられなかった。さらに、採取したコア供試体強度は強度管理用供試体強度と同等であり、また、ばらつきも少なく、高品質な構造体を構築する面でも優れた性能が確認された。

7. まとめ

著者らが研究を続けている増粘剤を添加した高流動コンクリートに関し、これまで実施工や実大模型実験に適用した呼び強度20~40程度の通常の強度を有する26の配合に基づいて、著者らが実施してきた品質管理のための各種の室内実験結果も考慮して、その配合設計手法について検討したが、主な結論を示すと以下のようである。

① 実施工、実大模型実験および室内実験を通して蓄積したデータを整理、考察して、既往の配合設計手法に比べ、より具体的で実用的な配合設計手法として、2章から5章に示すものを提案できた。すなわち、配合条件の設定内容とその条件設定に際しての基本的な考え方、単位水量や水セメント比等の具体的な基準値、および所要の性状が得られない場合や性状改善したい場合の配合修正方法の具体例を示した。

② 実用における配合検討に際しては、下記④に示す基準値を参考に基本配合を設定して試し練りを行い、必要に応じて各種の品質管理試験を実施し所要の性能の有無を確認する。そして、所要の性状が得られない場合は、本報の例を参考に配合修正を行えばよい。

③ 現状におけるフレッシュコンクリートの品質管理方法としては、試験室内や実機プラントにおける配合検討時には、スランプフロー試験とボックス試験を併用して適切な配合を十分に検討する。そして実施工時には、スランプフロー試験を中心に品質管理を行い、所定の打設量や性能の変化が認められる場合には、配合検討時に考えていた所要の性能の有無を補助的にボックス試験によって確認する必要がある。

④ 本報に示した実施例を基に、さらに乾燥収縮や耐凍害性などの耐久性を考慮の上、一般的な配筋状態の構造物に適用する場合を対象として、現時点で最も適切と考えられる水セメント比や単位水量などの基準値を提示すると、次の通りである。

すなわち、水セメント比50%、単位水量175kg/m³、単位セメント量350kg/m³、空気量5%、単位粗骨材量330g/m³、増粘剤量0.4kg/m³、高性能(AE)減水剤量C×2~2.5%、を単位量の基準値とする。

8. あとがき

本報で示した配合設計手法はあくまでも著者らが現在実施している手順であり、増粘剤を添加した高流動コンクリート全般について述べたものではない。また、使用材料、配合強度、品質管理試験方法、目標性能および適用構造物などの点においても、限られた範囲の実施工の経験を基に取りまとめたものであり、適用範囲には限界があると考えられる。従って、実用にあたっては、この点を十分に理解のうえ、試し練りと必要に応じて施工実験を実施して確認する必要がある。

さらに、本手法の信頼性を高め適用範囲を拡大するためには、今後更に種々の条件の基に配合検討を行い、新たなデータを加えて本手法の改善を行っていく必要があると考えられる。

このように、今後の検討課題も多いと思われるが、本報が増粘剤を添加した高流動コンクリートに対して、一般的な配合設計手法の確立のための一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 高流動コンクリートの材料・配合・製造・施工指針(案)・同解説、日本建築学会、1997.1.
- 2) 港湾の施設を対象とした高流動コンクリート・マニュアル、沿岸開発技術研究センター、1997.5.
- 3) 特集/高流動コンクリートの現状と展望、月刊生コンクリート、1997.11.
- 4) 三浦律彦、近松竜一、十河茂幸：高流動コンクリートの配合設計手法に関する一提案、高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、土木学会、pp.59-64、1996.3.
- 5) 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.
- 6) 小澤一雅、岡村甫：自己充填コンクリートの配合の考え方、コンクリート工学、Vol.32, No.7, pp.56-59、1994.7.
- 7) 例えば、竹下治之、佐原晴也、横田季彦：締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、Vol.1, No.1, pp.143-154、1990.1.
- 8) 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題、土木学会、1996.12.
- 9) 佐原晴也、横田季彦、庄司芳之、竹下治之：高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.1, pp.137-142、1991.6.

- 10) 竹下治之, 佐原晴也, 横田季彦, 庄司芳之: スーパーフローコンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究, 日本国土開発 技術研究報告, No.11, pp. 1-9, 1991.
- 11) 庄司芳之, 竹下治之, 佐原晴也: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの実物大模型による硬化後の品質の検討, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, コンクリート工学協会, pp. 181-188, 1993. 5.
- 12) 坂田昇, 伊藤孔一, 若松岳, 小澤一雅, 岡村甫: フレッシュコンクリートの充填性評価のためのロード試験, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 第5部門, pp. 566-567, 1992. 9.
- 13) 佐原晴也, 竹下治之: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの乾燥収縮低減に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No.1, pp. 145-150, 1995. 6.
- 14) 佐原晴也, 庄司芳之, 竹下治之, 鮎田耕一: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性の向上方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No.1, pp. 1009-1014, 1992. 6.
- 15) 佐原晴也, 庄司芳之, 竹下治之: アジテータ車を用いた高流動コンクリートの製造方法の検討, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, pp. 604-605, 1992. 6.
- 16) 須藤裕司, 鮎田耕一, 佐原晴也, 竹下治之: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No.1, pp. 1003-1008, 1992. 6.
- 17) 庄司芳之, 佐原晴也, 竹下治之, 沼田晋一: 高流動コンクリートのフレッシュ状態の性状に及ぼす使用材料や配合の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No.1, pp. 399-404, 1992. 6.
- 18) 佐原晴也: 増粘剤を添加した高流動コンクリートの実用化に関する研究, 埼玉大学学位論文, 1996. 3.
- 19) 中島良光, 梶田秀幸, 三浦信一, 牧野英久: 二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの配合に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No.1, pp. 173-178, 1991. 6.

(1998.6.3 受付)

A PROPOSAL OF THE CONCEPT OF MIX DESIGN METHOD FOR HIGH FLUIDITY CONCRETE CONTAINING A VISCOUS AGENT ON THE BASIS OF EXECUTED DATA

Haruyuki TAKESHITA, Haruya SAWARA and Atsuhiko MACHIDA

The purpose of this research is to present a practicable mix design method of high fluidity concrete containing a viscous agent. In this report, we arranged the mix proportion data (26 data) applied to the various executions and the real size model experiments. With the knowledge these data, and the data obtained from indoor experiments, a method was given for the mix design.

In addition, the examples of actually mix design of the high fluidity concrete containing a viscous agent, which were designed according to the method shown by this report, were described.