

論文 中流動コンクリートの合理的な配合設計方法に関する一提案

桜井 邦昭*1・近松 竜一*2

要旨：中流動コンクリートの合理的な配合設計方法を確立するため、産地や種類の異なる骨材を用いて選定した中流動コンクリートの配合と、レディーミクストコンクリート工場における普通コンクリートの配合を比較し整理した。その結果、レディーミクストコンクリート工場のスランブ 15cm の単位水量、スランブ 21cm の単位粗骨材かさ容積を用いることで、スランブフロー45cm 程度の中流動コンクリートが得られること、中流動コンクリートが適切な材料分離抵抗性を有していることを確認するために、配合選定時に漏斗流下試験を行うことが望ましいことを示した。

キーワード：中流動コンクリート、配合設計、単位水量、単位粗骨材かさ容積、漏斗流下時間

1. はじめに

自己充填性は有しないものの、補助的な締固めを行うことで型枠の隅々まで充填可能な加振併用型の高流動コンクリート(以下、中流動コンクリートという)の適用事例が増加している^{1), 2)}。建設設備投資が抑制される中、より経済的にかつ耐久的な構造物の構築が要求されるとともに、耐震規準類の制定に伴い補強鉄筋が高密度に配置された部材が増加していることが背景にあるものと推測される。

中流動コンクリートと自己充填性を有する高流動コンクリート(以下、高流動コンクリートという)および従来のコンクリート(以下、普通コンクリートという)との関係の概念図を図-1に示す。中流動コンクリートは、セメント量(粉体量)を強度や耐久性の確保に必要な最小量としつつ、流動性を高めたコンクリートである。高流動コンクリートに比べ材料コストを低減できるなどの利点を有する。

普通および高流動コンクリートの配合設計方法は、それぞれ、土木学会のコンクリート標準示方書【施工編】、高流動コンクリートの配合設計・施工指針³⁾(以下、指針という)に詳述されており、それらを参考にすることで適切な配合を選定できる。一方、中流動コンクリートの配合設計方法に関する体系的な検討はほとんどなされておらず、現場の施工条件や使用するレディーミクストコンクリート工場の材料の品質に応じて、その都度、配合を選定している現状にある。

そこで、本論文では、中流動コンクリートの合理的な配合設計方法を確立することを目的とした。まず、中流動コンクリートと普通および高流動コンクリートの関係を整理した上で、普通および高流動コンクリートの配合設計で用いられている手法のうち、中流動コンクリートの配合設計に活用できる項目を考察した。そして、中

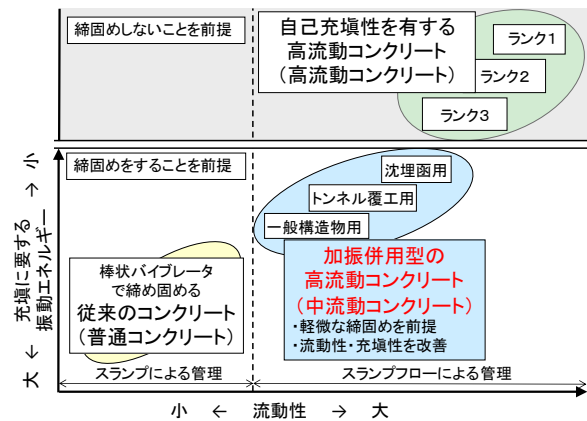


図-1 各種コンクリートの位置づけの概念図 (文献³⁾に示される図を引用し一部加筆)

流動コンクリートの合理的な配合選定方法を提案した。次に、産地や種類の異なる材料を用いて選定した中流動コンクリートの配合と各レディーミクストコンクリート工場の普通コンクリートの標準配合とを比較するなどして、提案した配合選定方法の妥当性を検討した。

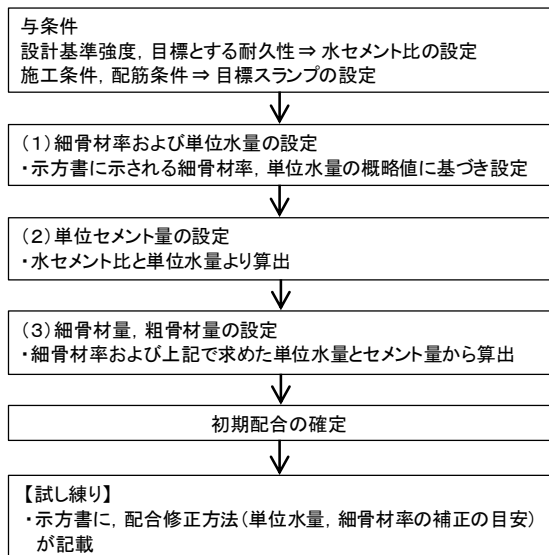
2. 中流動コンクリートと各種コンクリートの関係

中流動コンクリートは、図-1に示すように、流動性のレベルが、普通コンクリートと高流動コンクリートの中間に位置するコンクリートである。そのため、中流動コンクリートの配合設計方法は、普通コンクリートあるいは高流動コンクリートと共通している項目もあると考えられる。

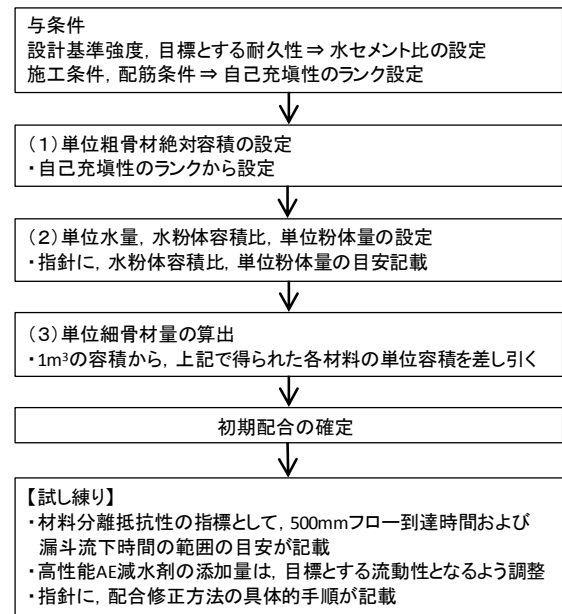
そこで、本章では、まず、普通および高流動コンクリートの配合設計方法を整理した。次に、流動性の管理方法や締固め方法に関する中流動コンクリートとその他のコンクリートとの関係から、中流動コンクリートの配合設計方法に活用できる各種コンクリートの配合設計方法の項目を抽出した。

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上席研究員 博士(工学) (正会員)



普通コンクリート
(コンクリート標準示方書【施工編】)



高流動コンクリート
(高流動コンクリートの配合設計・施工指針)

図-2 普通コンクリートおよび高流動コンクリートの配合設計方法の概要

2.1 普通および高流動コンクリートの配合設計方法

普通コンクリートおよび高流動コンクリートの配合設計方法の概要を図-2に示す。

(1) 普通コンクリート

普通コンクリートの配合は、コンクリート標準示方書【施工編】に示される水セメント比55%、スランブ8cm程度のコンクリートにおける「単位粗骨材かさ容積ならびに細骨材率と単位水量の概略値」に基づき、使用材料あるいはコンクリートの品質の違いに対して細骨材率と単位水量を補正する方法が一般に用いられている。要求性能や施工条件に応じて水セメント比や目標スランブ、空気量等を設定した後、上記の概略値に基づき単位水量および細骨材率を設定することで、各材料の単位量が算出できる。また、日本建築学会のJASS5には、目標スランブに応じた単位粗骨材かさ容積の標準値が示されており、この値を目安に粗骨材量、細骨材量を定める方法も広く用いられている。

レディーミクストコンクリート工場では、土木学会もしくは日本建築学会の方法で配合を選定し、呼び強度や目標スランブごとに標準配合を設定している。

(2) 高流動コンクリート

高流動コンクリートの場合は、自己充填性を確保する観点から、まず目標とする自己充填性のレベルに応じて、単位粗骨材絶対容積を設定する。次に、単位水量、水粉体容積比および単位粉体量を設定する。最後に、1m³の容積から、水、粉体および粗骨材の単位容積を差し引いて単位細骨材量(容積)を求める。また、目標とする流動性が得られるように、高性能AE減水剤の添加量を適宜

表-1 各種コンクリートの流動性の管理方法と締固め方法の概要

コンクリート種類	普通コンクリート	中流動コンクリート	高流動コンクリート
流動性の管理方法	スランブ(SL)	スランブフロー(SLの場合もある)	スランブフロー
締固め方法	パイプレータによる締固め	補助的にパイプレータで締固め	締固めをしないことを前提
使用する標準的な混和剤	AE減水剤(標準添加量)	高性能AE減水剤	高性能AE減水剤(添加量は、流動性に依りて調整)

調整すると示されている。

なお、指針¹⁾では、高い流動性に対応した適切な材料分離抵抗性をコンクリートに付与する観点から、配合設計段階で参考となる水粉体容積比や単位粉体量(容積)の目安が示されている。また、試し練りや日常の品質管理に活用できる500mmフロー到達時間および漏斗流下時間の範囲が示されている。これらを参考にすれば、目標性能を有する高流動コンクリートの配合が比較的容易に選定できる。

2.2 各種コンクリートの配合設計方法の中流動コンクリートへの適用性の検討

中流動コンクリートと普通および高流動コンクリートの流動性の管理方法、締固めの方法などを整理して表-1に示す。また、本稿で提案する合理的な中流動コンクリートの配合選定手順の概要を図-3に示す。以下に、その理由を述べる。

(1) 単位水量

中流動コンクリートは、粉体量を強度や耐久性の確保に必要な最小量としつつ、流動性を高めたコンクリートである。高い流動性の確保のため、高性能AE減水剤の

使用が不可欠であるが、その添加量が過剰となるとペーストの粘性が低下し、材料分離が生じる危険性が高まる。そのため、中流動コンクリートは、高性能 AE 減水剤の添加量をメーカーの推奨する標準範囲程度(混和剤メーカー・銘柄により差異はあるものの、粉体量の 0.8~1.2%程度であることが多い)とし、普通コンクリートと同様に、目標とする流動性のレベルに応じて単位水量を設定することが望ましいと考えられる。

普通コンクリートの手法を用いるとした場合、高性能 AE 減水剤を標準量程度用いて所要の流動性を満足する中流動コンクリートの単位水量が、AE 減水剤を用いた普通コンクリートのどの程度のスランプと対応しているかを把握できれば、レディーミクストコンクリート工場の保有する標準配合一覧表を参考に単位水量を設定できることになる。

(2) 単位粗骨材かさ容積

中流動コンクリートは、補助的であれ締め固めを行うことを前提としている。そのため、粗骨材の単位容積の設定方法は、流動性のレベル(スランプ)に応じて粗骨材かさ容積を調整する普通コンクリートの手法を用いることが適当と考えられる。

この場合、各レディーミクストコンクリート工場の保有する標準配合一覧表に示されるスランプと単位粗骨材かさ容積の関係を用いることが合理的である。各地域の工場において、所要の品質を確保した中流動コンクリートの単位粗骨材かさ容積が、普通コンクリートのどの程度のスランプの単位粗骨材かさ容積と対応しているかを把握できれば、中流動コンクリートの配合選定を効率よく行うことができる。

(3) 単位粉体容積および単位細骨材容積

単位粗骨材かさ容積および単位水量が設定できれば、一般に与条件として与えられる空気量を除くと、未知数は粉体と細骨材の容積になる。

高流動コンクリートの場合、指針¹⁾に単位粉体容積の目安が示されており、粉体系高流動コンクリートでは 160~190L/m³である。また、水粉体容積比は 1.0 前後となる。単位細骨材容積は、1m³の容積から各材料を差し引いて求める。一般に、その容積は 250~290L/m³で、モルタル中の細骨材容積比に換算すると 0.4 程度となる。この値は、文献^{4), 5)}によれば、単位水量や粉体量の増加を招かない範囲で、高い充填性を確保できる値であるとされている。

一方、中流動コンクリートの粉体量は、普通コンクリートと同程度と少ないため、水粉体容積比は高流動コンクリートに比べて大きくなる(後述する表-2を参照)。結果として、モルタル中の細骨材容積比は上記の値より必然的に大きくなり(概ね 0.5 以上)、細骨材の品質が中流

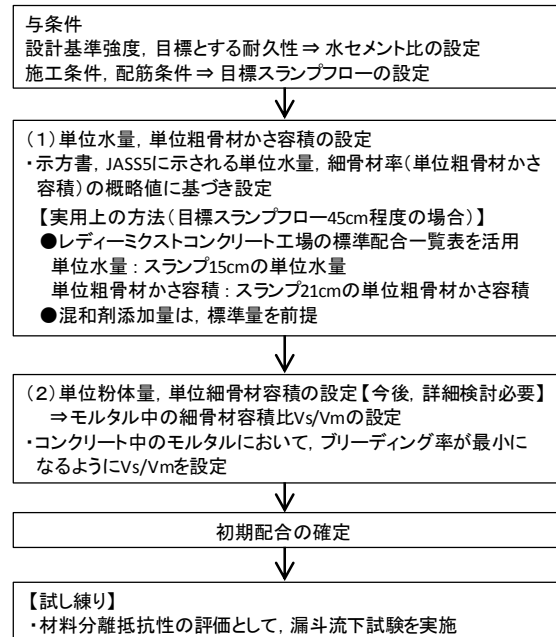


図-3 提案する中流動コンクリートの配合選定手順の概要

動コンクリートの品質に大きく影響することになる。

著者は、中流動コンクリートの配合条件が材料分離抵抗性に及ぼす影響を検討した既報^{6), 7)}にて以下の事項を確認した。

- ① 中流動コンクリートを構成するモルタルのブリーディング率は、モルタル中の細骨材容積比(Vs/Vm)によって相違し、水セメント比によらずある一定のVs/Vmの場合にブリーディング率が最小となる
- ② ブリーディング率の小さいモルタルから構成される中流動コンクリートは、ブリーディング率が少なく、充填性に優れる

この実験は、特定の骨材を対象とした結果であり、今後の追加検討が必要であるが、中流動コンクリートの単位粉体容積と単位細骨材容積の設定方法は、これまでの普通および高流動コンクリートとは異なった独自の手法を用いる必要があることを示していると考えられる。

(4) 材料分離抵抗性の評価

中流動コンクリートが高い流動性に見合った材料分離抵抗性を有しているかを試し練りの段階で確認することは重要である。1つの方法として、高流動コンクリートの配合設計で用いられる漏斗流下時間を準用することが考えられる。

3. 中流動コンクリートの配合事例による検証

本章では、産地や種類の異なる骨材を用いて選定した中流動コンクリートの単位水量および単位粗骨材かさ容積が、各レディーミクストコンクリート工場の標準配合一覧表に示される各値とどのような関係にあるか、お

表-2 中流動コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの品質試験結果

工場 No.	中流動コンクリートの種類*1	W/P (%)	W/C (%)	Vw/Vp	Vs/Vm	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (P×%)		フレッシュコンクリートの品質			
							W	P		S		G	SP	VA	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	充填高さ (cm)	ブリーディング率 (%)
								C	LS	S1	S2							
1	粉体系	45.1	45.1	1.4	0.50	45.3	155	344	—	814	—	978	0.8	—	45.0	4.3	32.0	2.0
2	粉体系	44.9	44.9	1.4	0.47	44.3	168	374	—	756	—	962	1.2	—	44.5	4.4	未測定	2.5
3	増粘剤系	50.0	50.0	1.5	0.50	51.1	175	350	—	451	440	878	—	0.9	46.0	4.0	33.4	1.3
4	粉体系	46.6	46.6	1.5	0.51	52.5	174	373	—	682	224	834	1.0	—	43.0	4.5	32.8	2.0
	増粘剤系	57.4	57.4	1.8	0.54	54.1	174	303	—	725	238	834	—	1.2	42.5	4.3	30.5	2.8
5	粉体系	39.8	51.5	1.2	0.45	47.2	175	340	100	789	—	898	0.9	—	44.0	5.0	33.4	0.8
6	粉体系	41.7	51.5	1.3	0.50	56.0	175	340	80	576	377	848	0.9	—	47.0	4.4	32.5	1.1
	増粘剤系	47.3	51.5	1.5	0.53	57.2	175	340	30	606	396	848	—	1.1	44.5	5.1	32.0	1.2
7	粉体系	46.1	46.1	1.4	0.49	49.9	173	375	—	849	—	894	0.9	—	46.0	4.2	32.5	1.9
	増粘剤系	54.1	54.1	1.6	0.52	51.3	173	320	—	888	—	894	—	1.0	43.0	5.0	33.0	1.5
8	粉体系	46.8	46.8	1.4	0.50	52.8	175	374	—	368	545	819	1.0	—	44.5	4.6	30.3	2.1
	増粘剤系	55.6	55.6	1.7	0.53	54.1	175	315	—	380	563	919	—	1.1	46.0	4.8	32.1	2.2

*1 粉体系：材料分離抵抗性の確保のためセメント量増加もしくは混和材を混入 増粘剤系：混和剤に増粘型高性能AE減水剤を使用
Vw/Vp：水粉体容積比 Vs/Vm：モルタル中の細骨材容積比

表-3 使用材料

種類	工場No.	工場の地域	記号	物理的性質など
セメント	—	—	C	工場No.1, 4, 5, 6 普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³ 工場No.2, 3, 7, 8 高炉セメントB種, 密度3.04g/cm ³
混和材	—	—	LS	石灰石微粉末, 密度2.71g/cm ³ 工場No.5および6で使用
骨材	1	北海道	S	陸砂, 表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.16%, 粗粒率2.55
			G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率0.88%, 実積率57.0%, 混合比率50% 山砂利, 最大寸法15mm, 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.50%, 実積率64.5%, 混合比率50%
			G	山砂利, 最大寸法15mm, 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.50%, 実積率64.5%, 混合比率50%
	2	北陸	S	山砂, 表乾密度2.56g/cm ³ , 粗粒率2.80
			G	砂利, 最大寸法25mm, 表乾密度2.60g/cm ³ , 実積率65.0%
	3	関東	S1	砕砂, 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率1.26%, 粗粒率3.11, 混合比率50%
			S2	山砂, 表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率2.42%, 粗粒率1.70, 混合比率50%
			G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.70g/cm ³ , 粒径判定実積率59.0%
	4	関東	S1	陸砂, 表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.86%, 粗粒率3.07, 混合比率75%
			S2	山砂, 表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率2.44%, 粗粒率1.66, 混合比率25%
			G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.95%, 粒径判定実積率60.3%
	5	関東	S	砕砂, 表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率1.99%, 粗粒率2.76
			G	碎石, 表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率1.04%, 粒形判定実積率59.0%
	6	東海	S1	砕砂, 表乾密度2.67g/cm ³ , 吸水率1.25%, 粗粒率2.95, 混合比率60%
			S2	陸砂, 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.30%, 粗粒率2.60, 混合比率40%
			G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.99g/cm ³ , 吸水率0.68%, 粒径判定実積率58.1%
	7	九州	S	海砂, 表乾密度2.56g/cm ³ , 吸水率1.54%, 粗粒率2.72
			G	碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.71g/cm ³ , 吸水率0.35%, 粒径判定実積率60.9%
	8	九州	S1	砕砂, 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率0.77%, 混合比率40%
			S2	海砂, 表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率1.56%, 粗粒率, 混合比率60%
G			碎石, 最大寸法20mm, 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.88%, 粒径判定実積率58.8%	
混和剤	共通	—	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
			VA	増粘型高性能AE減水剤(減水剤成分:ポリカルボン酸系, 増粘剤成分:グリコール系, 高分子系)

よび漏斗流下試験により中流動コンクリートの材料分離抵抗性が評価可能であることを検討した。

3.1 コンクリートの配合および使用材料

国内各地域の骨材を用いた中流動コンクリートの配合の一覧をフレッシュコンクリートの品質と合わせて表-2に示す。また、使用材料の概要を表-3に示す。

いずれの中流動コンクリートとも、スランブフローは45cm程度であり、充填試験(ランク3)において充填高さ30cm以上を満足するとともに、ブリーディング率が3%以下の充填性および材料分離抵抗性に優れたコンクリートである。また、高性能AE減水剤および増粘型高性能AE減水剤の添加量は1%前後で、概ね混和剤メーカー

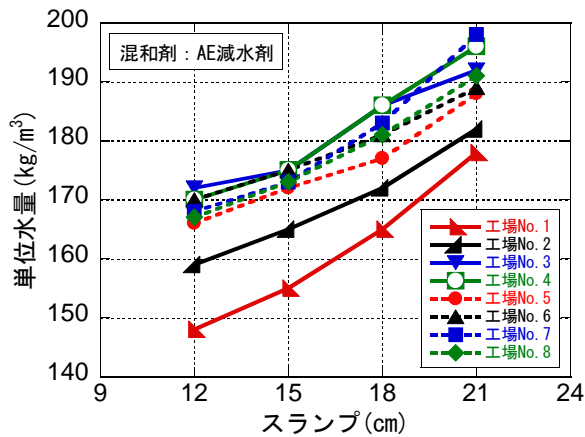


図-4 各工場の標準配合一覧表に示されるスランプと単位水量の関係

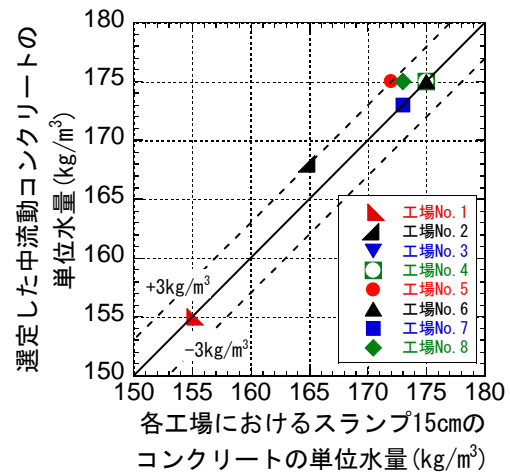


図-5 各工場のスランプ 15cm のコンクリートと中流動コンクリートの単位水量の関係

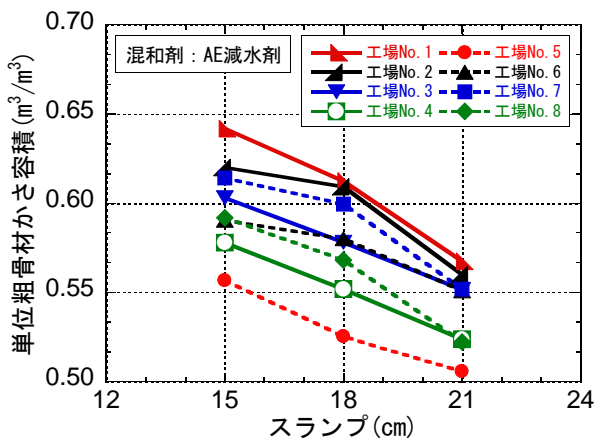


図-6 各工場の標準配合一覧表に示されるスランプと単位粗骨材かさ容積の関係

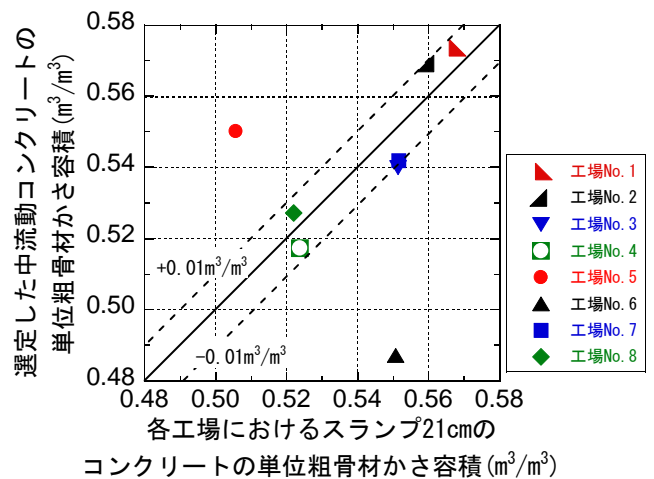


図-7 各工場のスランプ 21cm のコンクリートと中流動コンクリートの単位粗骨材かさ容積

の推奨する標準添加量である。いずれも複数回にわたる試し練りの結果をもとに選定された配合である。なお、高性能 AE 減水剤の種類は、レディーミクストコンクリート工場の立地条件や設備条件等を勘案して選定した。

また、選定した中流動コンクリートの適用対象とした構造物の設計基準強度は 18~40N/mm²であった。

3.2 単位水量

各レディーミクストコンクリート工場の標準配合一覧表に示されるスランプと単位水量の関係(混和剤に AE 減水剤を使用した場合)を図-4に示す。工場によって差異はあるものの、スランプが 1 ランク(3cm)大きくなるごとに、単位水量を 5~7kg/m³ 増大させている。

選定した中流動コンクリート配合の単位水量と工場の標準配合のスランプ 15cm の単位水量の関係を図-5に示す。

高性能 AE 減水剤をほぼ標準量使用した場合、45cm 程度のスランプフローを確保するのに必要な中流動コンクリートの単位水量は、配合一覧表に示されるスランプ

15cm のコンクリートの単位水量とほぼ一致している。レディーミクストコンクリート工場の標準配合一覧表を参考にして、中流動コンクリートの単位水量を設定できる可能性がある。

3.3 単位粗骨材かさ容積

各レディーミクストコンクリート工場の標準配合一覧表に示されるスランプと単位粗骨材かさ容積の関係(混和剤に AE 減水剤を使用した場合)を図-6に示す。工場により違いがあるが、スランプを 1 ランク(3cm)大きくさせるごとに、単位粗骨材かさ容積を 0.03m³/m³ 程度少なく設定している。

選定した中流動コンクリート配合の単位粗骨材かさ容積と工場の標準配合一覧表におけるスランプ 21cm の単位粗骨材かさ容積の関係を図-7に示す。

中流動コンクリートの単位粗骨材かさ容積は、工場 No.5 および No.6 を除き、普通コンクリートのスランプ 21cm の単位粗骨材かさ容積とほぼ一致している。

工場 No.5 は、細骨材の全量に砕砂を用いている。次節

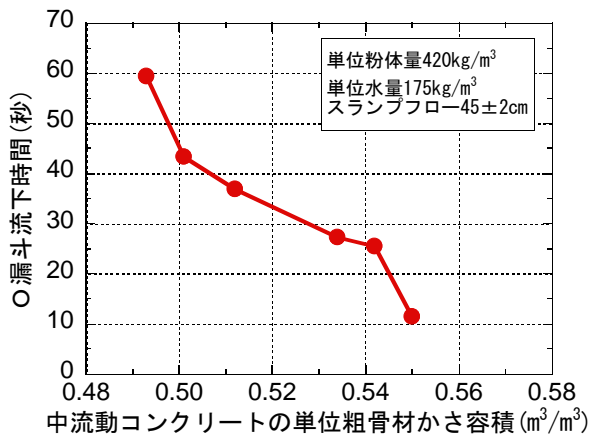


図-8 工場 No. 5 における中流動コンクリートの単位粗骨材かさ容積と○漏斗流下時間の関係

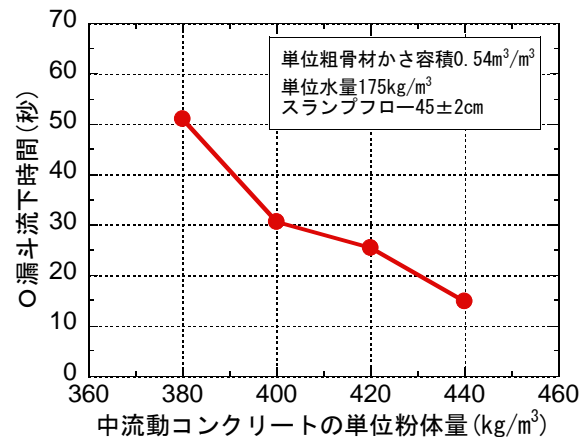


図-9 工場 No. 5 における中流動コンクリートの単位粉体量と○漏斗流下時間の関係

に示すように、材料分離抵抗性を確保しつつ、目標とする流動性を確保するには、砕砂の使用量をできるだけ少なくさせる必要があり、結果として単位粗骨材かさ容積が大きくなった。

工場 No.6 は、表乾密度が 3.00g/cm^3 と大きい重量粗骨材を使用している。モルタルと粗骨材との密度差が大きくなり材料分離が生じ易くなるため、単位粗骨材かさ容積を小さく設定した。

このように、使用する細骨材および粗骨材の品質により、設定すべき単位粗骨材かさ容積は変化させる必要があるが、配合設計における初期配合の設定として、レディーミクストコンクリート工場の配合一覧表に示される値を活用することは可能と考えられる。

3.4 漏斗流下時間による材料分離抵抗性の評価

工場 No.5 の中流動コンクリートの配合選定過程における配合条件と漏斗流下時間の関係を図-8 および図-9 に示す。

単位粗骨材かさ容積や単位粉体量の違いにより、同一の流動性を付与した場合にも漏斗流下時間が相違する結果が得られている。適切な漏斗流下時間の設定に関しては今後検討が必要であるが、中流動コンクリートの材料分離抵抗性を判断する上では、試し練りの際に漏斗流下試験を実施することが望ましいと考えられる。

4. まとめ

各地域の骨材を用いて選定したスランプフロー45cm程度の中流動コンクリートの配合とレディーミクストコンクリート工場が保有する標準配合一覧表とを比較し、中流動コンクリートの合理的な配合設計手法に関して考察した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) 高性能 AE 減水剤を標準量程度用いた場合、レディーミクストコンクリート工場におけるスランプ 15cm の単位水量、スランプ 21cm の単位粗骨材容積を用い

ることで、スランプフロー45cm程度の中流動コンクリートが得られる。

(2) 同一の流動性を有する中流動コンクリートでも、単位粗骨材かさ容積や単位粉体量の違いにより、漏斗流下時間は大きく相違する。適切な材料分離抵抗性を有する中流動コンクリート配合を選定するには、試し練りの際に漏斗流下試験を併用することが望ましい。

参考文献

- 1) 中間祥二ほか；中流動コンクリートを用いたトンネル覆工の施工—北海道横断自動車道久留喜トンネル—, コンクリート工学, Vol.48, No.6, pp.25-30, 2010.6
- 2) 諏訪菌和彦ほか；増粘剤系中流動コンクリートによるトンネル覆工の施工—南九州西回り自動車道 津奈木トンネル(仮称)—, コンクリート工学, Vol.50, No.4, pp.366-371, 2012.4
- 3) 土木学会；コンクリートライブラリー136 高流動コンクリートの配合設計・施工指針【2012年版】, 2012.6
- 4) 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, 技法堂出版, 1993.9
- 5) 岡村甫, 小澤一雅；自己充填コンクリートの配合設計法の現状と課題, 土木学会論文集, No.496/V-24, pp.1-8, 1994.8
- 6) 桜井邦昭, 近松竜一；加振併用型の高流動コンクリートの材料分離抵抗性の評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1180-1185, 2012
- 7) 桜井邦昭, 近松竜一；加振併用型の高流動コンクリート中のモルタルの材料分離抵抗性に関する一考察, 土木学会第67回年次学術講演会講演集, V-597, pp.1193-1194, 2012