

再生粗骨材 M を用いた高流動コンクリートの開発

靄見 淳也* 高橋 祐一*

要 旨

再生骨材 M を用いたコンクリートの使用部位の拡大を目的として、鋼管充填コンクリートとして使用できる高流動再生骨材コンクリートの実用化に向けた検討を行った。室内実験では、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの各性状に加えて、再生粗骨材 M を用いた鋼管充填コンクリートとして使用する場合に重要となるブリーディング量および沈降量の基準値を満足することを確認した。本実験では、次の段階として、製造ロットの異なる 3 種類の再生粗骨材 M を対象として、実際の生コンプラントにて練混ぜを行い、フレッシュコンクリートの経時変化、材料分離抵抗性、圧縮強度のばらつきおよび構造体強度補正值を確認した。その結果、粉体量を大きくした調合と増粘剤一液型の高性能 AE 減水剤を使用した調合ともに十分な流動性および材料分離抵抗性を確保した。また、再生粗骨材のロットの違いがコンクリートの品質におよぼす影響は小さいことを確認した。以上より、先に実施した室内実験および本実験の結果から、鋼管充填コンクリートとして必要な品質を確保していることを確認した。なお、これらの成果を基に、2016 年 7 月に国土交通大臣認定を取得した。

1. はじめに

近年、建設廃棄物に占めるコンクリート塊の割合が増大しており、平成 24 年度においてはその 43%程度を占めている。コンクリート塊の再資源化率は 99%と高い値を示しており、その主な利用先は路盤材である。一方、コンクリート用骨材として利用されたのは、再資源化されたコンクリート塊の 0.2%程度に留まっている¹⁾。高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物が、更新の時期を迎えており、その解体によって生じる大量のコンクリート塊の利用先が懸念されている²⁾。さらに、平成 30 年度におけるコンクリート塊の再資源化率の目標値は 99%¹⁾と現状維持となっており、今後もこの高い再資源化率を維持していくためには、コンクリート用骨材としての利用を増大していく必要がある。

このような中、筆者らは、再生骨材コンクリートの普及を図ることを目的に、製造コストや回収率、使用部位の範囲といった観点から、品質の高い再生骨材 H ではなく、再生骨材 M に着目して検討を行い、これまでに延べ 14 件の国土交通大臣認定を取得し、実際の工事に適用している。しかし、再生骨材 M を用いたコンクリートは、再生骨材 H が使用部位の制限がないのに対し、場所打ち杭や乾燥収縮の影響を受けにくい地下躯体に限定されているのが現状であり、使用部位の拡大が望まれる。

そこで、再生骨材 M を用いたコンクリートの使用部位の拡大を目的として、乾燥収縮の影響を受けないコンクリート充填鋼管造の鋼管充填コンクリートとして使用できる高流動再生骨材コンクリートの実用化に向けた検討を行った。本検討では、コンクリートの材料分離抵抗性を確保する対策として、

粉体量を大きくした調合(以下、粉体系)と増粘剤と高性能 AE 減水剤を一液化し、過度な粘性を有しない化学混和剤(以下、増粘剤一液型高性能 AE 減水剤)を使用した調合(以下、増粘剤系)を対象とした。既報³⁾では、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの各性状に加えて、鋼管充填コンクリートとして使用する場合に重要となるブリーディング量および沈降量の試験結果、ならびに水セメント比の試算結果について報告した。本報では引き続き、原コンクリートの違いによる再生粗骨材の品質の差がコンクリートにおよぼす

表-1 使用材料

名称	記号	銘柄・産地	物性*2
セメント	C	高炉セメントB種	$\rho = 3.04 \text{g/cm}^3$
水	W	上水道水	—
普通細骨材	S1	砕砂(40% ^{*1}) 栃木県佐野市産	$\rho = 2.63 \text{g/cm}^3$, $Q = 1.52\%*3$ $\rho = 2.63 \text{g/cm}^3$, $Q = 1.51\%*4$
	S2	山砂(60% ^{*1}) 千葉県市原市産	$\rho = 2.54 \text{g/cm}^3$, $Q = 2.47\%*3$ $\rho = 2.54 \text{g/cm}^3$, $Q = 2.40\%*4$
普通粗骨材	G	砕石 2005 栃木県佐野市産	$\rho = 2.67 \text{g/cm}^3$, $Q = 0.97\%$
再生粗骨材	RG	再生粗骨材M 2005	$\rho = 2.39 \text{g/cm}^3$, $Q = 4.47\%*3$ $\rho = 2.39 \text{g/cm}^3$, $Q = 4.50\%*4$ $\rho = 2.39 \text{g/cm}^3$, $Q = 4.80\%*5$
化学混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤	—
		増粘剤一液型 高性能 AE 減水剤	—
	—	AE 剤	—

*1 質量比

*2 ρ : (絶乾)密度 Q : 吸水率

*3 実機実験 1 回目で使用

*4 実機実験 2 回目で使用

*5 実機実験 3 回目で使用

* 技術研究所 建築技術開発部

表-2 再生粗骨材の品質基準

項目	品質基準	JIS A 5022 付属書A
絶乾密度 (g/cm ³)	2.3 以上	
吸水率 (%)	5.0 以下	
微粒分量 (%)	2.0 以下	
塩化物イオン (%)	0.013 以下 (Cl ⁻ として)	0.04 以下 (NaClとして)
アルカリシリカ反応性	無害*1	—

*1 ZKT-206 において反応性なし(A)を無害とした

表-3 要因と水準

要因	水準	
	数	内容
粗骨材種類	2	普通粗骨材・再生粗骨材
材料分離抵抗性の確保	2	粉体系:単位粉体量大 増粘剤系:増粘剤一液型高性能AE減水剤
水セメント比	7	粉体系:30%・35%・40% 増粘剤系:35%・40%・45%・50%

影響を確認するため、製造ロットの異なる3種類の再生粗骨材 M を使用し3回の実機実験を行っており、そこで得られたコンクリートの材料分離抵抗性ならびに水セメント比の算定結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。セメントはアルカリシリカ反応抑制効果のある高炉セメント B 種を使用した。再生骨材は粗骨材のみに使用し、JIS A 5022 付属書 A に示される再生粗骨材 M の品質基準値の上限に近い品質の再生粗骨材を使用した。本実験ならびに JIS A 5022 付属書 A における品質基準を表-2に示す。

2.2 要因と水準

要因と水準を表-3に示す。粉体系の水セメント比は、一般に高流動コンクリートで用いられる 35%を中心に 30%と 40%の 3 水準とした。増粘剤系は、当初は再生骨材コンクリートの圧縮強度の発現を考慮して、40%を中心に 35%と 45%の 3 水準としたが、特に問題のない性状であることが確認できたため、実機実験の 3 回目のみ 50%を追加した。

2.3 調合

本実験に用いた調合を表-4に示す。比較用の普通骨材を用いた調合は、粉体系で W/C=35%、増粘剤系で W/C=40%とした。また、単位水量は V50-JR で 175kg/m³、他の調合では 170kg/m³で一定とした。粗骨材のかさ容積は、P35-JJ・V40-JJ および V50-JR で 565ℓ/m³、他は 555ℓ/m³とした。スランプフローと空気量の目標値および許容差は、それぞれ 60±10 cm、3.0±1.5%として、高性能 AE 減水剤および AE 剤を用いて調整した。

表-4 調合

調合名*1	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad*2 (C×%)
			W	C	S1/S2	G	RG	
P30-JR	30.0	44.8	170	567	289/432	—	841	1.05
P35-JJ*3	35.0	47.1	170	486	317/475	916	—	1.40
P35-JR	35.0	47.1	170	486	317/475	—	841	1.10
P40-JR	40.0	48.7	170	425	338/506	—	841	1.45
V35-JR	35.0	47.1	170	486	317/475	—	841	1.55
V40-JJ*4	40.0	48.7	170	425	338/490	916	—	1.60
V40-JR	40.0	48.7	170	425	338/506	—	841	1.70
V45-JR	45.0	49.9	170	378	354/529	—	841	1.75
V50-JR*5	50.0	49.3	175	350	352/526	—	856	1.80

*1 P:粉体系・V:増粘剤系、30~50:水セメント比

JJ:普通細骨材+普通粗骨材、JR:普通細骨材+再生粗骨材

*2 増粘剤系は増粘剤一液型高性能AE減水剤を使用した

*3 実機実験(1回目)のみ実施 *4 実機実験(2回目)のみ実施

*5 実機実験(3回目)のみ実施

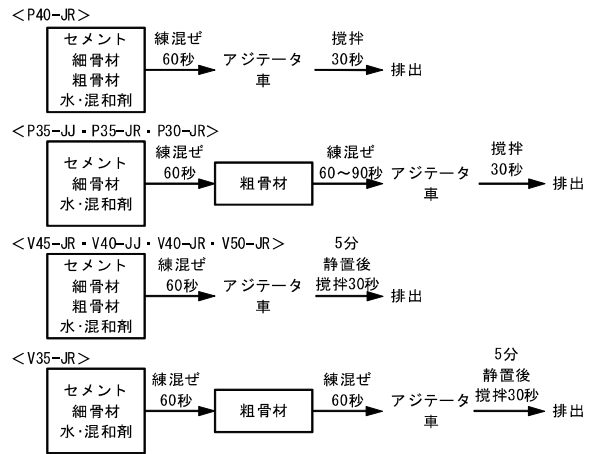


図-1 練混ぜ手順

表-5 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ コンクリート	スランプフロー	JIS A 1150	管理値:60±10cm
	空気量	JIS A 1128	管理値:3.0±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	管理値:5~35°C
	塩化物含有量	JASS5T-502	管理限界値*1: 0.213kg/m ³ 以下
	間隙通過性(U型)*2	JSCE-F511	経時60分で実施 管理値: 充填高さ30cm以上
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	経時60分採取 <標準養生> 材齢:7・28・56*2・91日 <簡易断熱養生*3> 28・56・91日
	静弾性係数	JIS A 1149	<標準養生> 材齢:28日 <簡易断熱養生*3> 材齢:91日
	アルカリシリカ反応性	ZKT-206	管理値: 相対動弾性係数 80%以上

*1 管理限界値=0.30-(再生骨材の塩化物イオン)×4/5

*2 実機実験(2回目)のみ実施

*3 実機実験(1回目、2回目)のみ実施

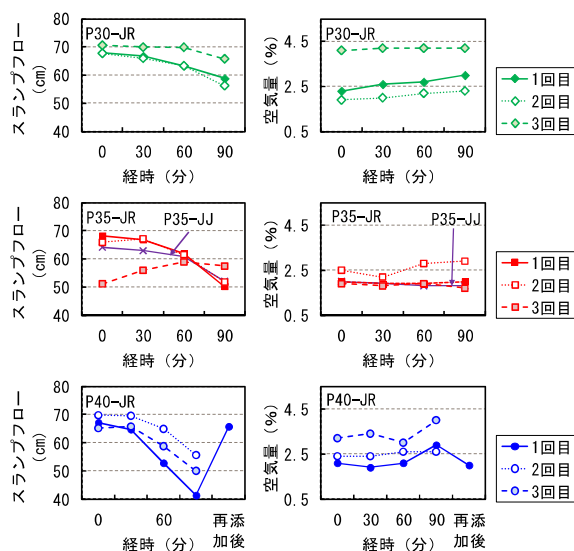


図-2 スランプフローおよび空気量と経時変化の関係 (粉体系)

2.4 練混ぜ

練混ぜは、公称容積 3.0m³の強制二軸練りミキサを使用し、図-1に示す手順にて行った。なお、粉体系の水セメント比 30%および 35%、増粘剤系の水セメント比 35%の割合については、モルタル先練りとした。

2.5 試験項目

本実験における試験項目を表-5に示す。フレッシュコンクリートを対象とした間隙通過性試験では、実機実験(2回目)の再生骨材を用いた各割合と普通骨材を用いた割合の内、V45-JJについて行った。また、硬化コンクリートについては、圧縮強度試験および静弾性係数試験の他、アルカリシリカ反応性迅速試験を行った。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート

粉体系におけるスランプフローと空気量の経時変化を図-2に、増粘剤系におけるスランプフローと空気量の経時変化を図-3に示す。スランプフローおよび空気量ともに、練上がり直後から荷卸しを想定した経時 60分まで管理値内に納まった。しかし、経時 90分において、V45-JR(1回目・3回目)、V40-JR(1回目)および P40-JJ(1回目)では、スランプフローのロスが大きく、管理値を下回ったが、高性能AE減水剤を再添加することで、管理値の範囲内まで回復した。

3.2 間隙通過性試験

間隙通過性試験の結果を図-4に示す。いずれの割合も目標値である充填高さ 300mm を超え、粗骨材の分離もみられず、水セメント比が大きい割合においても良好な材料分離

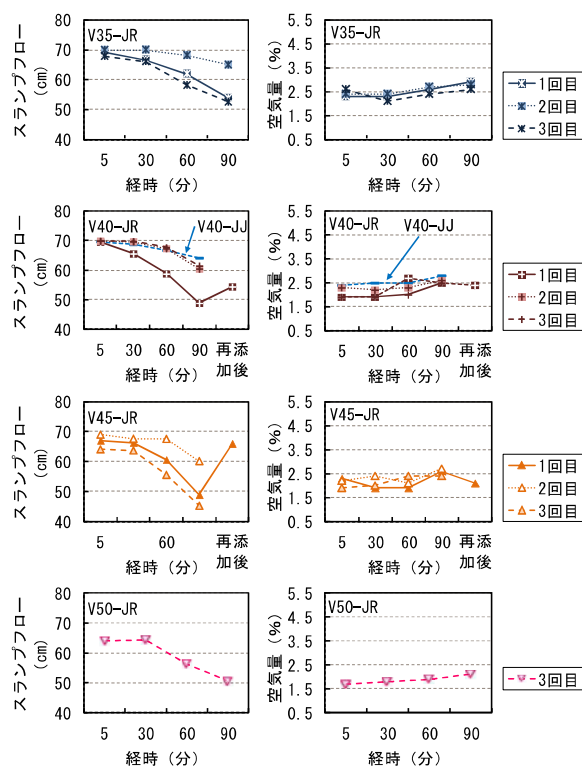


図-3 スランプフローおよび空気量と経時変化の関係 (増粘剤系)

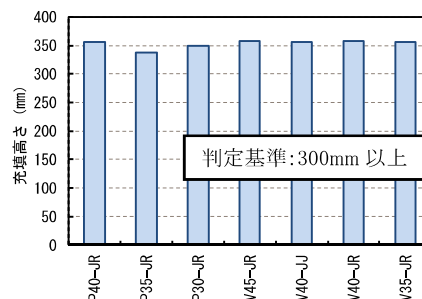


図-4 間隙通過性試験結果

抵抗性を示した。

3.3 塩化物含有量

塩化物含有量試験の結果は、粉体系で 0.02~0.03kg/m³、増粘剤系で 0.01~0.02kg/m³であり、いずれの割合においても、あらかじめ溶出ししない再生骨材の塩化物イオンを考慮して設定した、品質基準である管理限界値を大きく下回った。

4. 硬化コンクリート

4.1 圧縮強度および静弾性係数

粉体系および増粘剤系における標準養生ならびに簡易

断熱養生の圧縮強度試験結果を図-5および図-6に示す。標準養生材齢 28 日の圧縮強度では、普通粗骨材を使用した P35-JJ および V40-JJ に比べ、再生粗骨材を使用した P35-JR および V40-JR の方が 10~20%程度小さくなった。ただし、簡易断熱養生材齢 91 日での圧縮強度は、 $1.7\text{N/mm}^2 \sim 2.4\text{N/mm}^2$ 程度の差であり、概ね同等の結果であった。一方、再生骨材のロットの違いによる品質の差の影響をみると、P30-JR と P40-JR の標準養生材齢 28 日の圧縮強度で 1 回目と 3 回目 6.6N/mm^2 、 6.0N/mm^2 と比較的大きかった。しかし、その他の調合の差は大きくなかった。そこで、P30-JR と P40-JR の 1 回目および 3 回目の空気量を比較すると $1.1\% \sim 1.8\%$ の差がみられた。このことから、圧縮強度に差がみられた原因は、再生粗骨材のロットの影響ではなく、空気量の影響と推察される。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、概ね「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説⁴⁾」の NewRC 式より求められる値と同等の結果であり、粉体系と増粘剤系の違いはみられなかった。

3.3 アルカリシリカ反応性

アルカリシリカ反応静迅速試験は、増粘剤系 V35-JR にて実施した。の結果、相対動弾性係数が 80%以上を合格(反応なし(A))として判断するが、合格であった。

4. 水セメント比の算定

4.1 算定条件

粉体系の単位粉体量は、材料分離抵抗性を確保するため、また、再生骨材を使用した高流動コンクリートの実績が少ないことを考慮して 500kg/m^3 以上に設定している。一方、増粘剤系では、十分な材料分離抵抗性を確保することが確認できれば、粉体系よりも単位粉体量を小さくすることができ、より効率的な調合が設定できると考えられる。これらを考慮して、水セメント比を算定した。

4.2 強度算定式

本実験におけるセメント水比と標準養生材齢 28 日圧縮強度の関係を図-8に示す。図中には粉体系(記号:P)と増粘剤系(記号:V)におけるそれぞれの 3 回の試験結果を併せて求めた実験回帰式(記号:P+V)を示している。また、95%信頼下限は本実験で実施した各調合における 9 本(3本×3回)の圧縮強度試験結果から求めた標準偏差の最大値を使用して、実験回帰式(P+V)から傾きを変更せずに切片を 1.64σ 低減した式を示している。工場式(JIS)は、当該生コン工場の高炉セメント B 種(高性能 AE 減水剤を使用した調合(スランプ管理))の強度算定式(呼び強度 45、セメント水比 2.8 まで)である。本実験にて確認した圧縮強度は、全て 95%信頼下限および工場式(JIS)と比較してもこれらを上回っている。以上より、本実験による強度算定式は、セメント水

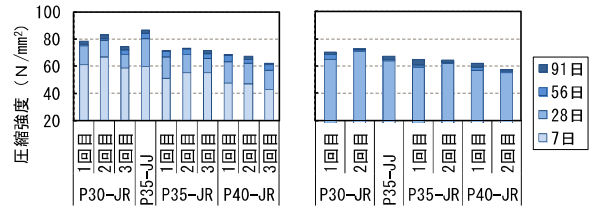


図-5 圧縮強度試験結果(粉体系)

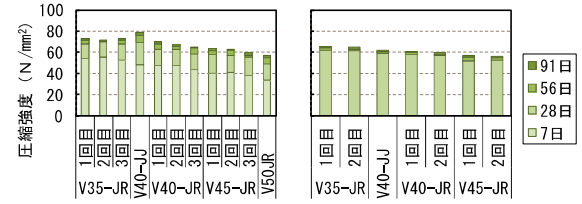


図-6 圧縮強度試験結果(増粘剤系)

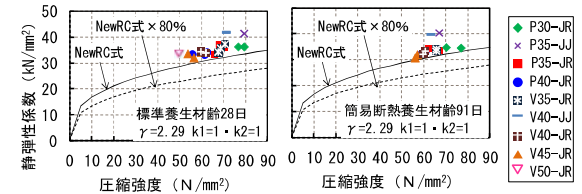


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

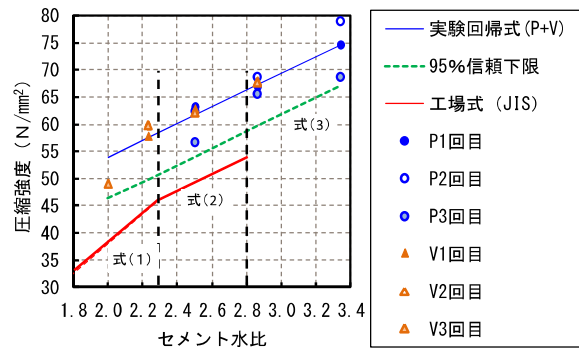


図-8 セメント水比と圧縮強度の関係

比 ≤ 2.29 は式(1)(工場式(JIS))、 $2.29 < \text{セメント水比} \leq 2.8$ は式(2)(工場式(JIS))、セメント水比 > 2.8 は式(3)(95%信頼下限)とした。

$$F_{28} = 27.0C/W - 15.9 \quad \text{式(1)}$$

$$F_{28} = 15.7C/W + 9.99 \quad \text{式(2)}$$

$$F_{28} = 15.8C/W + 13.9 \quad \text{式(3)}$$

ここに、

$$F_{28} : \text{材齢 28 日における調合強度 (N/mm}^2\text{)}$$

$$C/W : \text{セメント水比}$$

表一六 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ およびコンクリート強度の補正值 Sc

		粉体系 ^{*1} における $_{28}S_{91}$ および Sc (N/mm ²)		増粘剤系 ^{*2} における $_{28}S_{91}$ および Sc (N/mm ²)	
使用部位		鋼管充填コンクリート		鋼管充填コンクリート	
		外ダイアフラム形式 [$_{28}S_{91}$]	内・通し ダイアフラム形式 [Sc ^{*3}]	外ダイアフラム形式 [$_{28}S_{91}$]	内・通し ダイアフラム形式 [Sc ^{*3}]
コンクリートの打込み から28日までの予想 平均気温 θ の範囲		通年		通年	
設計基準強度 (N/mm ²)	24	27 ^{*4}	27(15+12) ^{*4}	6	18(6+12)
	27	24 ^{*4}	24(12+12) ^{*4}		
	30	21 ^{*4}	21(9+12) ^{*4}		
	33	18 ^{*4}	18(6+12)		
	36	15 ^{*4}	18(6+12)		

*1 単位粉体量を単位粉体量の下限値を 500kg/m³として材料分離抵抗性を確保する場合

*2 増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用して材料分離抵抗性を確保する場合

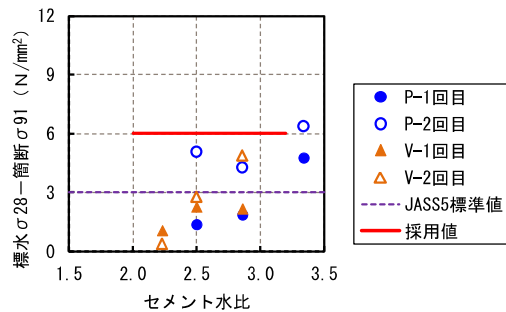
*3 $Sc = _{28}S_{91} + Sd$ *4 調合管理強度が 51N/mm²となるように割り増した値。

4.3 構造体強度補正值のおよび鋼管充填コンクリートに 適用する場合のコンクリート強度の補正值 Sc の設定

本実験におけるセメント水比と標準養生材齢 28 日圧縮強度と簡易断熱養生材齢 91 日圧縮強度との差の関係を図一9に示す。また、図中に「建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2015⁵⁾」(以下、JASS5-2015 とする)における構造体強度補正 $_{28}S_{91}$ の標準値(標準期)を併せて図中に示す。本実験の結果をみると、JASS5-2015 における構造体強度補正值 $_{28}S_{91} = 3\text{N/mm}^2$ (標準期)よりも若干大きくなっている。そこで、本検討における構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、標準値に 3N/mm^2 を加えた値とした。

また、鋼管充填コンクリートの内、外ダイアフラム形式の補正值は、通常と同様に構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ を採用すればよい。しかし、内ダイアフラム形式や通しダイアフラム形式の場合には、 $_{28}S_{91}$ にダイアフラム近傍における強度のばらつきを考慮した補正值 Sd を加えたコンクリート強度の補正值 Sc とする必要がある。コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等⁶⁾によると、設計基準強度が 60N/mm^2 以下であれば、 Sd の標準値は $7\sim 12\text{N/mm}^2$ とされており、本検討では安全側となる 12N/mm^2 を採用した。以上より、鋼管充填コンクリート(内・通しダイアフラム形式)に適用する場合の Sc は、 $Sc = _{28}S_{91} + Sd = 6 + 12 = 18\text{N/mm}^2$ とした。一方、粉体系では、材料分離抵抗性を確保するため、単位粉体量の下限値を 500kg/m^3 としていることから、単位水量を 170kg/m^3 とすると、水セメント比は、34%以下にする必要がある。水セメント比 34%に設定した場合の調合管理強度(= $F_{c+28}S_{91}$ 、または= F_{c+Sc})は「5.2 強度算定式」に示す式(1)～式(3)と下記に示す式(4)～式(7)より 50.8N/mm^2 となる。

$$F_{28} \geq F_c + _{28}S_{91} + 2\sigma \quad \text{式(4)}$$



図一9 セメント水比と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係

$$F_{28} \geq 0.85 \times (F_c + _{28}S_{91}) + 3\sigma \quad \text{式(5)}$$

$$F_{28} \geq F_c + Sc + 2\sigma \quad \text{式(6)}$$

$$F_{28} \geq 0.85 \times (F_c + Sc) + 3\sigma \quad \text{式(7)}$$

ここに、

F_{28} : 材齢 28 日における調合強度 (N/mm²)

F_c : 圧縮強度の基準値(設計基準強度) (N/mm²)

$_{28}S_{91}$: 構造体強度補正值 (N/mm²) (表一六)

Sc : コンクリート強度の補正值 ($Sc = _{28}S_{91} + Sd$) (N/mm²) (表一六)

Sd : ダイアフラム近傍での強度のばらつきを考慮した補正值 (N/mm²)

σ : 圧縮強度の標準偏差で、

$$\sigma = 0.1 \times (F_c + _{28}S_{91}) \text{ または}$$

$$\sigma = 0.1 \times (F_c + Sc) \text{ とする (N/mm}^2\text{)}$$

したがって、粉体系の構造体強度補正值は、調合管理強度が 51N/mm^2 以上となるように割り増しすることとして設定した。構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ およびコンクリート強度の補正值 Sc を表一六に示す。

表-7 水セメント比および調合管理強度

		粉体系の W/C(%) (調合管理強度(N/mm ²))		増粘剤系の W/C(%) (調合管理強度(N/mm ²))	
使用部位		鋼管充填コンクリート		鋼管充填コンクリート	
		外ダイアフラム形式	内・通し ダイアフラム形式	外ダイアフラム形式	内・通し ダイアフラム形式
コンクリートの打込みから 28日までの予想 平均気温 θ の範囲		通年		通年	
設計基準強度 (N/mm ²)	24	33.8(51.0)	33.8(51.0)	50.0(30.0)	38.8(42.0)
	27			48.6(33.0)	35.6(45.0)
	30			45.6(36.0)	35.0(48.0)
	33			43.0(39.0)	—
	36		31.3(54.0)	38.8(42.0)	—

4.4 水セメント比の設定

これまでの検討を踏まえて式(1)～(7)より求めた水セメント比および調合管理強度を表-7に示す。粉体系では、材料分離抵抗性を確保する観点から調合管理強度の最低値が設定されたため、水セメント比は33.8%と31.3%の2調合となった。一方、増粘剤系では、内・通しダイアフラム形式に適用する F_c33 および F_c36 を除いて、粉体系よりも効率的な水セメント比の設定が可能であった。

5. まとめ

本検討の範囲において、以下の知見を得た。

- 1) フレッシュコンクリートの性状は、再生粗骨材の製造ロットに拘わらず、粉体系および増粘剤系ともに良好であり、十分な材料分離抵抗性を確保した。
- 2) 再生骨材コンクリートの圧縮強度は、再生粗骨材のロットの違いによる品質の差の影響はみられなかった。
- 3) 粉体系では、材料分離抵抗性を確保する観点から水セメント比が設定されるが、増粘剤系では、粉体系よりも効率的な水セメント比の設定が可能であった。
- 4) 先に実施した室内実験および本実験の結果、再生粗骨材 M を用いた高流動コンクリートは、鋼管充填コンク

リートとして必要な品質を確保していることを確認し、上記の成果を基に、2016年7月に国土交通大臣認定を取得した。

【謝辞】

本実験をするにあたり、東京コンクリート(株)砂町工場、立石建設(株)葛西工場、BASF ジャパン(株)の各位の多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土交通省:平成24年度建設副産物実態調査結果参考資料、2014
- 2) 東京都資源循環・廃棄物処理計画、p.24、2016.3
- 3) 高橋他:高流動再生骨材コンクリートの実用化に向けた基礎検討、五洋建設株式会社技術年報、2016、p.15-1-15-6
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、p.51、2010
- 5) 日本建築学会:建築工事標準仕様書 JASS 鉄筋コンクリート工事、p.235、2015.2
- 6) 新都市ハウジング協会:コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等、p.2-39、平成24年8月