

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

高橋 祐一* 竹内 博幸*

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基礎検討を室内実験により行った。コンクリートの材料分離抵抗性を確保するための調査は、粉体量を大きく設定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の 2 種類とした。その結果、高流動再生骨材コンクリートは、普通骨材を用いた高流動コンクリートと比較して、圧縮強度はやや小さいものの、遜色ないフレッシュ性状を確保した。また、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は、調合の種類にかかわらず、それぞれの基準値を満足した。さらに、室内実験で得られた結果を基に水セメント比の算定を試みた。

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。しかし、コンクリート塊の再資源化率は 99% と高い値を示している。再資源化されたものの主な利用先は路盤材であり、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⁾。また、地域によっては、路盤材としての需要が頭打ちとなる等、引き続き安定した需要を見込むことは難しいと思われる。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%²⁾ 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、適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 13 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 が適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適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て、基礎的な検討を行った。実験では、コンクリートの材料分離抵抗性を確保する対策として、粉体量を大きく設定した調合（以下、粉体系調合とする）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）について検討した。本報では、フレッシュ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使用し、JIS A 5022 付属書 A に示されている再生粗骨材 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

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% $\rho = 2.63 \text{g/cm}^3$, Q=1.51%
	S2	山砂 (60% ^{*1}) 千葉県市原市産	$\rho = 2.55 \text{g/cm}^3$, Q=2.40% $\rho = 2.54 \text{g/cm}^3$, Q=2.41%
普通粗骨材	G	砕石 2005	$\rho = 2.68 \text{g/cm}^3$, Q=0.91%
		栃木県佐野市産	$\rho = 2.68 \text{g/cm}^3$, Q=0.94%
再生粗骨材	RG	再生粗骨材 M 2005	$\rho = 2.39 \text{g/cm}^3$, Q=4.49%
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

上段は粉体系調合、下段は増粘剤調合で使用した物性値

*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	6	粉体系: 30%・35%・40% 増粘剤系: 35%・40%・45%

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。粗骨材には、再生粗骨材に加えて、比較用の普通粗骨材を使用した。また、材料分離抵抗性を確保するための対策として、単位粉体量を大きくした粉体系調合と増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した増粘剤系調合を設定した。水セメント比は、粉体系調合で30%、35%および40%、増粘剤系調合で35%、40%および45%とした。増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した調合では、水セメント比をもう少し大きく設定しても材料分離抵抗性を確保できると思われるが、再生骨材を使用した調合における圧縮強度の発現を考慮し、最大値を45%とした。

2.3 調合

本実験における調合を表-4に示す。比較用の普通粗骨材を用いた調合は、粉体系調合で W/C=30%と40%、増粘剤調合では W/C=35%と45%で設定した。単位水量は170kg/m³、粗骨材かさ容積は普通粗骨材で0.565m³/m³、再生粗骨材では0.555m³/m³(粉体系)および0.540m³/m³(増粘剤系)に設定した。スランブフローと空気量の目標値および許容差はそれぞれ60±10cm、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。

2.4 練混ぜ

練混ぜは、60L 強制二軸練りミキサーを使用し、図-1に示す手順にて行った。なお、粉体系および増粘剤系ともに水セメント比30%および35%の調合については、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試験では、鋼管充填コンクリートに使用

表-4 調合

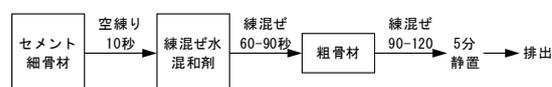
調合名*1	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad*2 (C×%)
			W	C	S1/S2	G	RG	
P30-JJ	30	44.8	170	567	289/432	916	—	1.05
P30-JR						—	841	1.15
P35-JR	35	47.1	170	486	317/475	—	841	1.10
P40-JJ	40	48.7	170	425	338/506	916	—	1.05
P40-JR						—	841	1.15
V35-JJ	35	47.1	170	486	317/475	916	—	1.25
V35-JR		48.7				—	816	1.30
V40-JR	40	50.2	170	425	348/522	—	816	1.40
V45-JJ	45	49.9	170	378	354/529	916	—	1.50
V45-JR		51.3				—	816	1.60

*1 P: 粉体系・V: 増粘剤系、30~45: 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

<W/C=30%・35%>



<W/C=40%・45%>

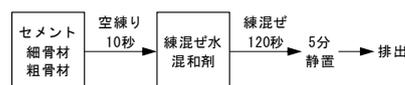


図-1 練混ぜ手順および練混ぜ時間

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	スランブフロー	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 粉体系: 0.213kg/m ³ 増粘剤系: 0.215kg/m ³
	ブリーディング量	JIS A 1123	管理値: 0.1cm ³ /cm ²
	沈降量	CFT 指針 ²⁾	管理値: 2mm 以下
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	材齢: 7・28・91 日
	静弾性係数	JIS A 1149	材齢 28 日のみ
	アルカリシリカ反応性	ZKT-206	管理値: 反応性なし(A)

*1 管理限界値=0.30-(再生骨材の塩化物イオン)×4/5

する際に重要な項目であるブリーディング量および沈降量の試験を再生粗骨材を使用した調合について行った。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

フレッシュコンクリートの試験結果を表-6に示す。同程度のスランブフローを得るために必要な高性能 AE 減水剤の添

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

調査名	スランブフロー (cm×cm)	フロー時間(秒) (50cm/停止)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	塩化物含有量 (kg/m ³)
P30-JJ	60.3×60.0	7.1 / 29.9	1.7	22	0.02
P30-JR	59.1×58.8	7.2 / 22.9	2.2	23	0.02
P35-JR	61.2×60.1	5.5 / 24.7	2.2	22	0.02
P40-JJ	59.2×58.9	6.1 / 25.2	2.3	22	0.02
P40-JR	61.9×61.6	5.0 / 23.5	2.2	22	0.02
V35-JJ	65.4×65.0	5.7 / 34.6	2.1	22	0.03
V35-JR	58.6×57.8	6.9 / 26.9	2.6	22	0.03
V40-JR	64.6×63.8	5.0 / 36.9	2.1	22	0.02
V45-JJ	68.4×66.3	4.0 / 36.4	2.3	22	0.02
V45-JR	69.2×68.5	4.2 / 41.2	2.0	22	0.02

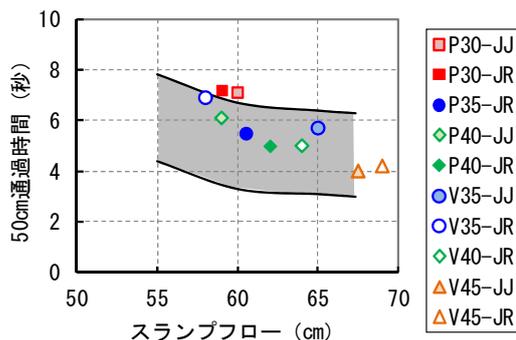


図-2 スランブフローと 50cm 通過時間の関係

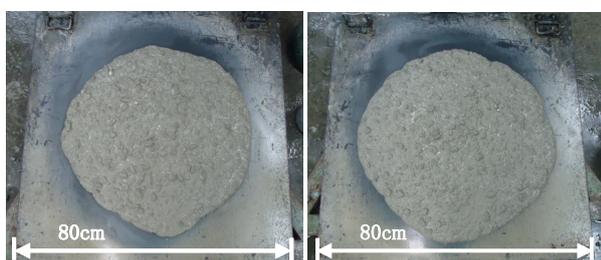


写真-1 スランブフロー試験結果
(左:P40-JJ・右:P40-JR)

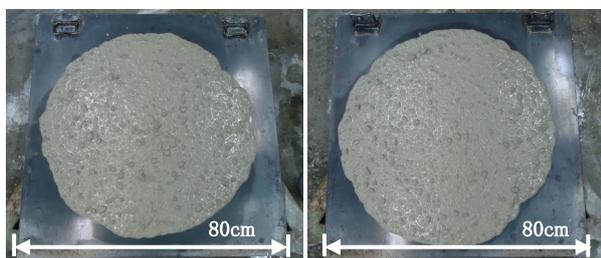


写真-2 スランブフロー試験結果
(左:V45-JJ・右:V45-JR)

加率(B×%)は、粉体系および増粘剤系ともに再生粗骨材を使用した調合の方が 0.05%~0.10%程度大きくなる傾向にあった。また、コンクリートの状態は、粗骨材種類、高性能 AE 減水剤種類にかかわらず、粗骨材の分離もなく、良好であった(写真-1および写真-2)。スランブフローと 50cm 通過時間の関係を図-2に示す。図-2中に示す網掛け部は、既往の研究³⁾において、コンクリートの粘性と材料分離抵抗性の管理値の目安とされているものである。本実験では、W/C=30%の調合で、単位セメント量が大きく粘性がやや高いため、範囲を外れているものの、他は概ね目安となる管理値内に納まっており、粗骨材種類および高性能 AE 減水剤種類による差はほとんどみられなかった。再生粗骨材を使用した調合の塩化物含有量は、粉体系および増粘剤系ともに

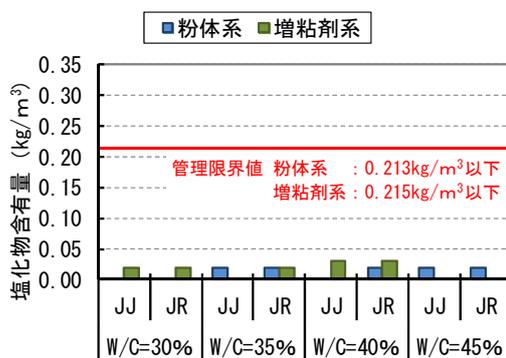


図-3 塩化物含有量試験結果

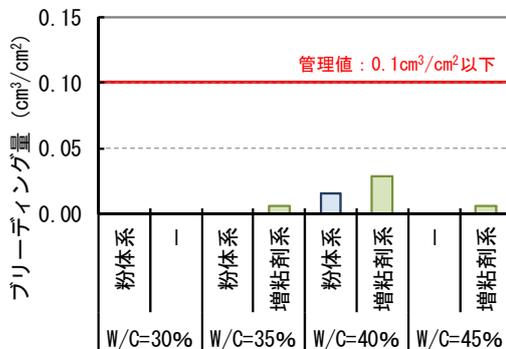


図-4 ブリーディング試験結果

管理限界値として設定した値(粉体系:0.213kg/m³、増粘剤系:0.215kg/m³)を大きく下回った(図-3)。なお、管理限界値は再生粗骨材の塩化物イオンの 4/5 が溶出した場合でも塩化物含有量の基準値である 0.30kg/m³を超えないように設定した値で、式(1)により算定した。なお、式中の 0.013% は表-2に示す塩化物イオンの品質基準値である。

$$C_{lim} = 0.30 \cdot (G \times 0.013\%) \times 4/5 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 C_{lim} : 管理限界値(kg/m³)

G : 単位粗骨材量(kg)

ブリーディング試験結果を図-4に、沈降量試験結果を図

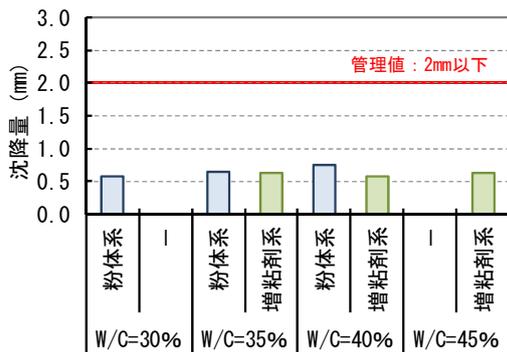


図-5 沈降量試験結果

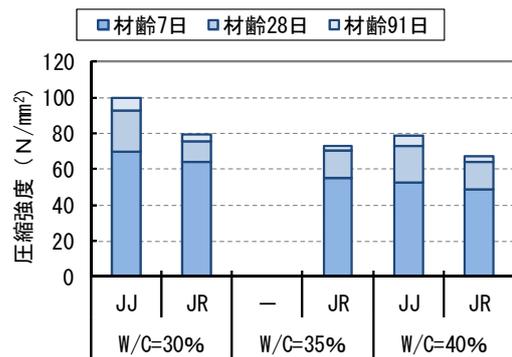


図-6 圧縮強度試験結果(粉体系)

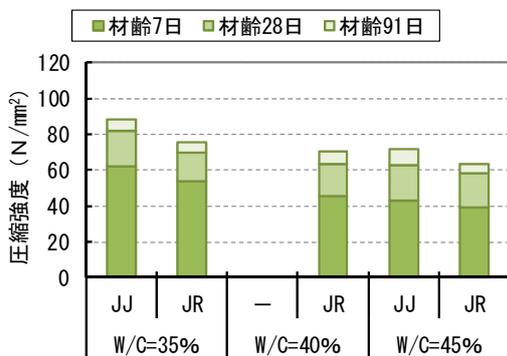


図-7 圧縮強度試験結果(増粘剤系)

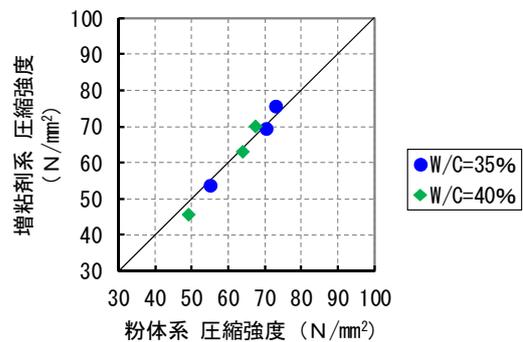


図-8 粉体系調合と増粘剤系調合の圧縮強度の比較

ー5に示す。高性能 AE 減水剤種類によるブリーディング量の違いをみると、増粘剤一液型の方がやや大きくなったものの、いずれの調合についても管理値である $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を大きく下回った。一方、沈降量では、水セメント比および高性能 AE 減水剤種類の違いによる差はみられず、いずれの調合についても、基準値である 2mm 以下を十分に満足した。

3.2 圧縮強度および静弾性係数試験結果

粉体系調合の圧縮強度試験結果を図-6に、増粘剤系調合の圧縮強度試験結果を図-7に示す。粉体系および増粘剤系ともに、普通粗骨材を用いた調合(JJ)と比較して再生粗骨材を用いた調合(JR)の方が小さくなる傾向にあり、水セメント比が小さいほど、その傾向が顕著にみられた。本実験と同様に、再生粗骨材Mを用いた過去の実験⁴⁾では、普通粗骨材を用いたコンクリートとの圧縮強度の差はほとんどみられていなかった。この理由として、本実験で使用した再生粗骨材の品質が再生粗骨材Mの基準の上限に近いのに対し、過去の実験で使用した再生粗骨材の絶対密度および吸水率が、それぞれ $2.45\text{g}/\text{cm}^3$ 、 3.70% と再生粗骨材Hの品質に近いものであったことが考えられる。しかし、実際には再生粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度試験結果から、所定の強度に対する水セメント比を設定するため、実際に使用する際には、問題になることはない。

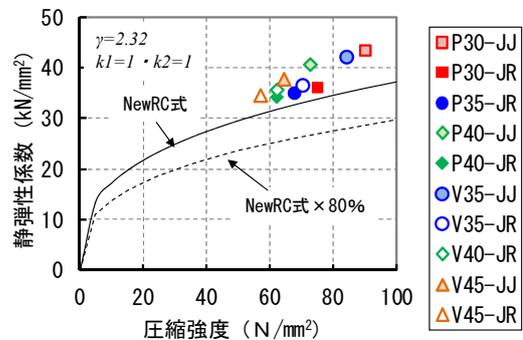


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

粉体系と増粘剤系のW/C=35%と40%の圧縮強度を比較した結果を図-8に示す。ややばらつきはあるものの両者の圧縮強度は概ね同等であることを確認した。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-9に示す。粉体系調合および増粘剤系調合にかかわらずNewRC式⁵⁾で求められる値と同等以上であった。

3.3 アルカリシリカ反応性

アルカリシリカ反応性迅速試験は、単位セメント量が多い調合を対象とし、粉体系調合のP30-JRおよびP35-JR、増粘剤系調合のV35-JRおよびV40-JRの計4調合について実

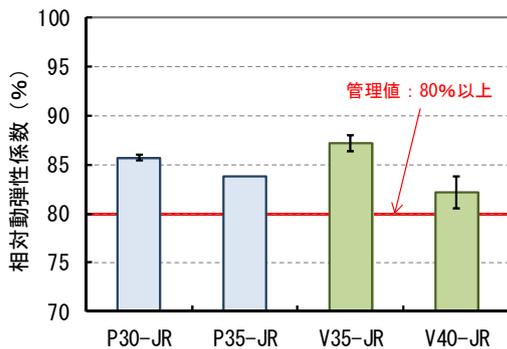


図-10 アルカリシリカ反応性迅速試験結果(ZKT-206)

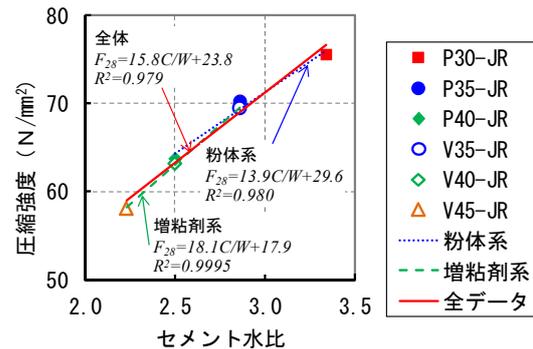


図-11 セメント水比と圧縮強度の関係

施した。結果を図-10に示す。相対動弾性係数 80%以上を合格(反応性なし(A))として判断するが、いずれの調合においても合格であった。

4. 水セメント比の算定

4.1 算定条件

過去に取得した高流動コンクリートの国土交通大臣認定において、粉体系調合の単位粉体量は、材料分離抵抗性を確保するため、500kg/m³以上に設定している。これは、普通骨材を使用した場合と比較してやや多い設定であるが、再生骨材を使用したコンクリートの実績が少ないことを考慮したためである。本検討においても、粉体系調合の単位粉体量を同様に設定すると、水セメント比は 34%以下(単位水量 170kg/m³とした場合)にする必要がある。一方、増粘剤系調合では、十分な材料分離抵抗性を確保することが確認できれば、粉体系調合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、暫定的な水セメント比の算定を試みた。

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-11に示す。セメント水比と圧縮強度の関係は、粉体系調合と増粘剤系調合に大きな差はなく、高性能 AE 減水剤の種類の違いによる影響はみられなかった。以上より、強度算定式は粉体系調合と増粘剤系調合を合わせて求めた直接回帰式の 95%回帰式である式(2)を採用した。

$$F_{28} = 15.0C/W + 22.6 \quad \text{式(2)}$$

ここに、 F_{28} : 材齢 28 日における調合強度 (N/mm²)

C/W : セメント水比

4.3 補正値の検討

鋼管充填コンクリートの内、外ダイアフラム形式の補正値は、通常と同様に構造体強度補正値 ${}_{28}S_{91}$ を採用すればよく、その JASS5⁹⁾における標準値は 3 N/mm² または 6 N/mm² となる。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値 S_d を加えた S_c を採用する必要がある。 S_d の標準値は 7~12N/mm² とされているが、本検討では実績の少ない再生骨材コンクリートを対象としているため、標準値の最大である 12N/mm² を採用することが望ましいと考える。また、粉体系調合では、材料分離抵抗性を確保するため、水セメント比が 34%以下にする必要がある。この場合の調合管理強度(= $F_c + {}_{28}S_{91}$ または $F_c + S_c$)の最低値は、式(2)~式(6)より 56N/mm² となる。

$$F_{28} \geq F_c + {}_{28}S_{91} + 2\sigma \quad \text{式(3)}$$

$$F_{28} \geq 0.85 \times (F_c + {}_{28}S_{91}) + 3\sigma \quad \text{式(4)}$$

$$F_{28} \geq F_c + S_c + 2\sigma \quad \text{式(5)}$$

$$F_{28} \geq 0.85 \times (F_c + S_c) + 3\sigma \quad \text{式(6)}$$

ここに、 F_{28} : 材齢 28 日における調合強度 (N/mm²)

F_c : 設計基準強度 (N/mm²)

σ : 圧縮強度の標準偏差で、

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

$\sigma = 0.1 \times (F_c + S_c)$ とする (N/mm²)

以上より、基礎・地下躯体および外ダイアフラム形式に使用する場合の補正値は ${}_{28}S_{91}$ 、内・通しダイアフラム形式の場合の補正値 S_c は ${}_{28}S_{91} + 12$ とし、粉体系調合では、調合管理強度が 56 N/mm² となるように ${}_{28}S_{91}$ を割り増した。補正値の一覧を表-7に示す。

4.4 水セメント比の設定

これまでの検討を踏まえて式(2)~式(6)より求めた水セメント比および調合管理強度を表-8に示す。粉体系調合では、材料分離抵抗性を確保する観点から調合管理強度が設定されるため、全て 34.0%と一定の値となった。一方、増粘剤系調合では、内・通しダイアフラム形式以外に適用する場合、本実験で設定した水セメント比の最大値である 45%よりも大きく設定できる可能性が示唆された。実際には、実機プラントでの製造や当該生コン工場の実績値、再生粗骨材のロット間のばらつきを考慮すること、さらに構造体強度補正値を確

表一七 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 S_c

適用部位	粉体系調合における $_{28}S_{91}$ および S_c (N/mm ²)				増粘剤系調合における $_{28}S_{91}$ および S_c (N/mm ²)					
	鋼管充填コンクリート		基礎および地下躯体 [$_{28}S_{91}$]		鋼管充填コンクリート		基礎および地下躯体 [$_{28}S_{91}$]			
	外ダイア フラム形式 [$_{28}S_{91}$]	内・通し ダイア フラム形式 [S_c]			外ダイア フラム形式 [$_{28}S_{91}$]	内・通し ダイア フラム形式 [S_c]				
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		$0 \leq \theta \leq 13$	$\theta \geq 13$	暑中期間 *1	通年		$0 \leq \theta \leq 13$	$\theta \geq 13$	暑中期間 *1
設計基準強度 (N/mm ²)	21	—		35 ^{*2}		—				
	24	32 ^{*2}	32(20 ^{*2} +12)	32 ^{*2}						
	27	29 ^{*2}	29(17 ^{*2} +12)	29 ^{*2}						
	30	26 ^{*2}	26(14 ^{*2} +12)	26 ^{*2}		3		15(3+12)		6
	33	23 ^{*2}	23(11 ^{*2} +12)	23 ^{*2}						
	36	20 ^{*2}	20(8 ^{*2} +12)	20 ^{*2}						

*1 日平均気温が 25℃を超える期間

*2 調合管理強度が 56N/mm²以上となるように割り増した値

表一八 水セメント比および調合管理強度(暫定値)

適用部位	粉体系調合の W/C (%) (調合管理強度 (N/mm ²))				増粘剤系調合の W/C (%) (調合管理強度 (N/mm ²))					
	鋼管充填コンクリート		基礎および地下躯体		鋼管充填コンクリート		基礎および地下躯体			
	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		$0 \leq \theta \leq 13$	$\theta \geq 13$	暑中期間 *1	通年		$0 \leq \theta \leq 13$	$\theta \geq 13$	暑中期間 *1
設計基準強度 (N/mm ²)	21	—		—		—				
	24			34.0(56)						
	27	34.0(56)		34.0(56)		45.0 ^{*2} (47)		45.0 ^{*1} (47.0)		
	30					42.8(48)				
	33					38.8(51)				
	36									

*1 日平均気温が 25℃を超える期間

*2 本実験の水セメント比の範囲内となるように設定した値

認した上で設定する必要がある。

5. まとめ

本検討の範囲において、以下の知見を得た。

- フレッシュコンクリートの性状は、粉体系調合および増粘剤系調合ともに、十分な材料分離抵抗性を確保しており、良好な結果であった。
- 粉体系調合および増粘剤系調合ともに、ブリーディング量ならびに沈降量の基準値を十分満足した。
- 再生骨材コンクリートの圧縮強度は、普通骨材を用いたコンクリートよりも小さいものの、それを考慮しても所定の調合管理強度に対する水セメント比を設定することが可能である。

【謝 辞】

本実験を実施するにあたり、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)の各位に多大なる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】

- 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、2014.3
- 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
- 横山他:角形 CFT 柱の実大施工実験 その 1 概要およびコンクリートの性状、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、pp.1205-1206、1999.9
- 高橋他:再生骨材を用いた高流動コンクリートの実用化に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、pp.1510-1515、2012.7
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010.2
- 日本建築学会:建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事、p.235、2015.2