構造体における高強度コンクリートの材料分離と各種性状

PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE WITH
MATERIAL SEGREGATION IN STRUCTURE西田 朗*, 斉藤 丈士**, 名和 豊春***, 山崎 庸行****
Akira NISHIDA, Takeshi SAITO, Toyoharu NAWA
and Nobuyuki YAMAZAKI

In this study, we investigated the influence of material segregations on the behaviors of high-strength concrete. The test results indicate that the mechanical properties of structural concrete more easily influenced by the material segregation.

Material segregation may result in inadequate other performances of the structure using high-strength concrete, besides the degradation of mechanical properties, due to the significant differences in temperature rise and shrinkage. 90%, which is a ratio of actual coarse aggregate area to be the planed one, may be considered as an allowable limit of material segregation. Also, there is no great difference in the performances of structural concrete if the material segregation index of upper layer is not more than 20%.

Keywords: high-strength concrete, segregation limit, temperature history, mechanical properties, shrinkage

高強度コンクリート、材料分離限界、温度履歴、力学性能、収縮

1. はじめに

筆者らは、既報¹⁾で設計基準強度48～54N/mm²程度に相当する高強度コンクリートを対象として、振動締固めによる施工を前提とし、スランブフローの目標値の異なる場合のフレッシュコンクリートの性状から材料分離程度を推定する方法を報告した。

コンクリートの材料分離に関しては、許容される材料分離の程度を硬化コンクリートの要求と関連させて明確にしておく必要があるとの指摘もあり²⁾、本論文では、既報と同様な高強度コンクリートを対象として構造体中におけるコンクリートの各種性状と材料分離抵抗性の関係を検討し、さらに材料分離抵抗性の観点から構造体コンクリートが所要の品質を満足するための材料分離の指標を提案した結果を述べる。

コンクリートの材料分離は、岩崎によると³⁾施工作業中に起こるものと打込み後において起こるものに分けることができ、前者は主として粗骨材粒の分離であり、後者は固体粒子の沈下にとまう水の遊離現象すなわちブリーディングである、としている。ここで、施工作業中に起こる材料分離を粗骨材粒の分離としているのは、固体粒子の大きさや密度の異なるセメント、混和材料、細骨材および粗骨材等の粒状固体と水との

混合物であるコンクリートでは、各々の粒子が受ける粘性抵抗がストークスの法則³⁾によるとすれば、コンクリート中の各粒子の分布状態の変化は粒径の2乗および粒子の密度に比例するため、主として粗骨材において起こることになるためである。本論文では、以上の考え方からコンクリートの材料分離を粗骨材とモルタルの材料分離、細骨材とセメントペーストの材料分離、セメント粒子と水の材料分離に分けて考えた場合に、粗骨材とモルタルの材料分離に着目した検討が合理的であるものと判断して検討を行った。また、ブリーディングに関しては、既往の検討^{4) 5)}等で水セメント比35%以下のコンクリートではほとんど発生しないことが指摘されており、本研究で対象とするコンクリートもこれに該当するため、ブリーディングについては考慮していない。なお、本論文で使用したデータの一部は日本建築学会大会で報告したものである^{6) 7)}。

2. 実験概要

実験は、実機プラントで練り混ぜたコンクリートを模擬試験体に打ち込み、そのフレッシュコンクリートの性状が構造体コンクリートの各種性状に及ぼす影響を把握するために以

* 清水建設(株)技術研究所 主任研究員・工修

** (株)内山アドバンス中央技術研究所 研究員・博士(工学)

*** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

**** 清水建設(株)技術研究所 副所長・工修

Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
Research Engineer, Research Institute of Technology, Uchiyama Advance Co., Ltd., Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Deputy Director, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

下の通り行った。

2. 1 使用材料および調査

使用材料および調査は既報¹⁾と同じで、表1、2に示した通りである。なお、粗骨材は5mmふるいを通る過小粒を7%、細骨材は5mmふるいに留まる過大粒を3%含むものをそのまま使用した。コンクリートの目標スランブフローは、50、60、70および75cmの4水準とし、混和剤の添加量で調整した。

2. 2 実験方法

コンクリートはレディーミクストコンクリート工場で練り混ぜ、実験場までアジテータ車で約50分かけて輸送して、打込みを行った。練混ぜ量は各目標スランブフローのコンクリートとも2.5m³×2パッチとし、練混ぜ時間は全材料投入後90秒とした。

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートは、荷卸し時にスランブフロー、50cmおよび停止フロー時間、空気量、単位容積質量およびコンクリート温度の各項目について測定を行い、目標スランブフローに達しなかったコンクリートは高性能AE減水剤を再添加し、スランブフローを調整した。この時点で、φ15×30cmの型枠および振動テーブルを用いて既報と同様に材料分離指数SIの測定を行い、さらに上部材料分離指数siを算出した¹⁾。また、模擬試験体へのコンクリート打込み終了時点で、フレッシュコンクリートの経時変化を確認するために、再度スランブフローの測定を行った。

(2) 打込み・締固め

フレッシュ性状を確認したコンクリートを図1に示す1000×1000×3150mmの柱を模擬した無筋の型枠に打ち込んだ。打込みは容量2.5m³のバケツを用いて、1回の打込み高さがおおよそ1m以内になるようにして行った。打込みごとに、φ40mmの高周波棒状パイプを下部に先端が入るようにして20～25cm間隔に挿入して締固めを行った。1か所での振動時間は、10秒程度とした。

(3) 温度および硬化コンクリートの測定

模擬試験体の打込み直後から、図1に示すように柱高さ方向の500、1500、2600mmの各断面において中心部および側面部（表面から50mm）の位置でコンクリート温度の測定を行った。また、同じく図1に示す位置で試験材齢の3～4日前に鉛直方向にコア採取を行い、材齢28、56、91日で気乾単位容積質量、圧縮強度およびヤング係数の測定、ならびに画像処理に

表1 使用材料

材料	種類	内容
セメント	N 普通ポルトランド	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3300cm ² /g
粗骨材	G 島形山産砕石	表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 実積率 61.2%
細骨材	S ₁ 君津産山砂	表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.12%, 粗粒率 2.28
	S ₂ 田沼産砕砂	表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.74%, 粗粒率 3.00
混和剤	AD 高性能AE減水剤	標準形 1種, 密度 1.052g/cm ³

表2 コンクリートの調査

W/C (%)	目標スランブフロー (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)					AD量 (C×%)
					W	C	S ₁	S ₂	G	
35.0	50～75	2.0	45.1	0.558	165	472	503	335	922	1.15～1.625

よるコア端面の粗骨材面積率の測定⁴⁾を行った。さらに、材齢6日で図1に示す位置で水平方向のコア採取を行いφ10×30cmの供試体を各3本成型して材齢7日を基長として、コンタクトゲージ法により20℃、60%R.H.の環境でコアの長さ変化試験を実施した。なお、フレッシュコンクリートの性状測定時に、JIS A 1132に準じてφ10×20cmの供試体採取を行い、標準養生した後、材齢28、56、91日で圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。表3に測定項目および測定方法の一覧を示す。

3. 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリート

表4にフレッシュ性状の一覧を示す。

図1 柱模擬試験体の概要

表3 測定項目および方法

測定項目	測定方法
スランブフロー	JIS A 1150 (50cmおよび停止フロー時間も併せて測定)
空気量	JIS A 1128
単位容積質量	JIS A 1116
コンクリート温度	棒状温度計による
材料分離指数	φ15×30cmの型枠にコンクリートを詰め、v=50Hz、a=1.1mmの振動テーブルを用いて30秒間締固め。上下各2リットルのコンクリートを採取し、それぞれに含まれる粗骨材量の差から材料分離指数SIを算出。さらに上部の試料中の粗骨材量と調査上の粗骨材量との差から上部材料分離指数siを算出。文献1)参照
模擬試験体温度履歴	T熱電対とデータロガーを使用 30分毎に測定
圧縮強度	JIS A 1107, 1108 端面研磨 コアの高さ補正なし。
ヤング係数	JIS A 1149 コンプレッションメーター使用
気乾単位容積質量	φ10×20cm供試体質量と寸法測定値から算出。
コア長さ変化	φ10×30cmコアを材齢6日で採取。材齢7日を基長とし、20℃、60%R.H.でJIS A 1129-2に準じ測定。
粗骨材面積率	圧縮強度試験終了後のコア下端面をデジタルカメラで撮影（最上部コアは上端面も撮影）。画像処理で粗骨材を特定し、面積率を算定。さらに、画像上で目視により5mm以上の骨材粒を粗骨材と判断して面積率を補正。

目標スランブフロー70cmおよび75cmとしたコンクリートについては荷卸し時、模擬試験体打込み終了時とも目標に近いスランブフローの値を保持していた。目標50cmおよび60cmのコンクリートでは荷卸し時で目標値より10～15cm程度スランブフローが小さくなったため、高性能AE減水剤を再添加してそれぞれ50.0cm、62.0cmのスランブフローを得た。しかし、打込み終了時点では再添加直後に比較して目標60cmで14.0cm、同じく50cmで5.5cm小さくなった。空気量は、1.0～2.3%で目標値に近い値となった。また、コンクリート温度は、実験を7月に行ったため31.0～32.5℃となった。

(2) 使用したコンクリートの材料分離性評価

目視による材料分離の観察では、写真1に示すように目標スランブフロー50cmのコンクリートでは材料分離は認められず、60cmでも同様の傾向となった。目標70cmのコンクリートでは表面にモルタルが浮き若干分離ぎみで、同じく75cmのコンクリートでは、写真1に示すように周辺部にモルタルの先走りが確認でき、材料分離しているものと判断された。

各スランブフローのコンクリートの上部材料分離指数 si を表4に示す。ここで、既報¹⁾と同様にスランブフローの値から si 値を推定し、表4の実測値との比較をした結果を図2に示す。図には、既報の室内実験による推定値と実測値の対応も示してある。この図に示すように、本実験における si 値の実測値は室内実験に比較して大きく、推定値との対応も室内実験の場合とは異なり、実測値は推定値の概略2倍程度となった。

上記の傾向の違いについては、以下の考察を行った。

図3は、本実験のコンクリートのスランブフローと50cmフロー時間の対応を既報の室内実験の結果¹⁾と併せて示したものである。この図に示すように、本実験に用いたコンクリートの50cmフロー時間は室内実験の同程度のスランブフローに対する50cmフロー時間に比較して概ね小さくなった。50cmフロー時間は塑性粘度と良好な対応を示す¹⁾ことから、本実験に用いたコンクリートは室内実験のコンクリートより相対的に粘性が小さいコンクリートであったものと判断される。こうした違いは、環境温度および練上がりからの経過時間の違い、試験室ミキサと実機ミキサの練混ぜ性能の違い、あるいは既往の研究で指摘されている材料の品質変動⁸⁾等が影響しているものと考えられる。このうち、練上がりからの経過時間がコンクリートの粘性に及ぼす影響に関しては、セメントペーストを用いた確認実験を行った。実験は、コンクリートと同様

写真1 スランブフローの状況

図2 上部材料分離指数の推定値と実測値の対応

図3 スランブフローと50cmフロー時間の対応

表4 フレッシュコンクリートの性状

目標 スランブ フロー	AD量 (C×%)	スランブ フロー (cm)	50cm 時間 (sec)	停止時間 (sec)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	C温度 (℃)	上部材料 分離指数 (si)	備考
75cm	1.625	72.0	3.5	47.3	1.1	2394	31.5	81.8	荷降し
		74.5	3.7	56.0	-	-	-	-	打込み後
70cm	1.325	68.5	3.2	30.6	1.0	2380	31.5	42.5	荷降し
		66.5	3.6	27.8	-	-	-	-	打込み後
60cm	1.100	51.5	-	4.8	1.4	2367	31.0	-	荷降し
	+0.05	62.0	2.8	14.7	1.0	2371	31.0	37.4	再添加後
		48.0	-	6.0	-	-	-	-	打込み後
50cm	1.000	34.5	-	2.4	2.3	2340	32.0	-	荷降し
	+0.15	50.0	-	6.8	1.8	2351	32.5	23.2	再添加後
		44.5	-	7.0	-	-	-	-	打込み後

に水セメント比を35.0%とした普通ポルトランドセメント使用のセメントペースト（高性能AE減水剤をセメント量の0.16%添加）をハンドミキサーで90秒間練り混ぜ、練上がりから120分経過までの粘性をJASS 15 M-103セルフレベルング材の品質基準⁹⁾に準じて求めたフロー値と振動式粘度計を用いて計

測した粘度から評価した。フローおよび粘度の測定はそれぞれの測定時に試料をゴムべらで60秒間切り返してから行った。この結果から、図4に示すように時間の経過に伴いフロー値が若干低下あるいはほぼ一定でも、振動式粘度計による粘度が低下する傾向を捉えることができた。経過時間に伴う粘性の低下は既往の研究でも報告されており^{10) 11)}、本実験でも、練上がりから60分程度経過したコンクリートを使用したことが、粘性が小さくなった原因の1つと考えることができる。

つぎに、図5は寺田らのデータ¹²⁾を用いて求めたコンクリート中のモルタル降伏値と上部材料分離指数 si の実測値から逆算して求めた振動時のモルタル降伏値の対応を示したものである。モルタル降伏値は、コンクリートのスランプフローから(1)式で示すことができ、また、振動時のモルタル降伏値は、振動時に粗骨材に付着するモルタル量を(2)式とすると、上部材料分離指数 si と付着モルタル量には(3)式が成り立つことから、上部材料分離指数 si から求めることができる¹⁾。

$$\tau_f = 23.59 - 0.27SF \quad (1)$$

$$M_S = (0.0162\tau_f' + 0.0593)G \quad (2)$$

ここに、

- τ_f : モルタル降伏値 (Pa)
- SF : コンクリートのスランプフロー (cm)
- M_S : 粗骨材 G に付着するモルタル量 (g)
- τ_f' : 振動時のモルタル降伏値 (Pa)

図4 ペーストでの粘度とフローの経時変化

図5 モルタル降伏値と振動時のモルタル降伏値の対応

$$si = \frac{\frac{\rho_G}{\rho_M} (1172.3 - 3.2M_S)}{G_0} \times 100 \quad (3)$$

ここに、

G_0 : 振動前の上部粗骨材量 (g)

ρ_G : 粗骨材の密度 (g/cm³)

ρ_M : モルタルの密度 (g/cm³)

図5から、室内実験に用いたコンクリートでは既報¹⁾で仮定した振動による降伏値の低減率74% (低減による係数=0.26)はほぼ妥当な数値であったことがわかる。これに対して、本実験に用いたコンクリートは、粘性が小さかったことによる降伏値の低減がさらに大きかったものと判断される。つまり、振動によるせん断応力により粗骨材とモルタルの付着が室内実験に比較して小さくなり、 si の実測値が推定値に比較して小さくなったものと考えられる。また、モルタル降伏値が小さいコンクリートの一部で、振動時のモルタル降伏値の計算値がマイナスとなった。これは、締固めを前提としたコンクリートの材料分離の評価には降伏値だけでなく粘性を考慮した評価が必要であることを示すものであり、スランプフロー管理のコンクリートの場合、モルタル降伏値が小さいときには降伏値や粘性に応じて振動を与えなければ、構造体に打ち込むコンクリートの材料分離を想定以上に増大させる可能性があることを示唆するものである。

(3) 材料分離と模擬試験体の粗骨材面積率

表5は図1に示した模擬試験体に打ち込んだ各コンクリートから採取したコア端面の粗骨材面積率を画像処理によって求めた結果の概要を示したものである。調合計算上は過大粒および過小粒を考慮すると5mm以上の骨材容積が327リットル/m³であり、多少のばらつきはあるがいずれのコンクリートも粗骨材面積率の平均値はこれに近い値となった。しかし、目標スランプフローが大きいコンクリートほど柱上部の粗骨材面積率が小さくなり、高さ方向のばらつきが大きくなった。

図6は、柱頭位置の高さを0cmとした各位置における粗骨材面積率を各コンクリートの平均粗骨材面積率で除した値(粗骨材面積率比と称す)で示したものである。図に示すように、いずれのコンクリートでも測定値を基に粗骨材面積率比を(4)式で表すことができる。

$$y = a + b \log(x) \quad (1 \leq x \leq 315) \quad (4)$$

ここに、

y : 粗骨材面積率比

x : 高さ位置 (cm) ただし、柱頭=0

a, b : 定数

つぎに、各コンクリートの(4)式の係数 a, b は図7に示す

表5 粗骨材面積率測定結果の概要

目標スランプフロー (cm)	粗骨材面積率		
	平均 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)
75	32.7	10.3	31.5
70	31.5	4.7	14.8
60	34.0	3.3	9.6
50	35.4	1.9	5.5

ように上部材料分離指数 si の実測値を用いて一義的に求めることができる。したがって、使用するコンクリートの材料分離抵抗性を既報¹⁾で示した上部材料分離指数 si で定量的に求めることにより、柱状部材の部材内部における高さ方向の材料分離の程度を推定することができるものと考えられる。

(4) 模擬試験体の温度履歴

図8に、各目標スランブフローのコンクリートの打込みから材齢7日までの温度履歴を示す。

目標スランブフロー50cmのコンクリートでは、部材側面の下部でノイズによると思われる若干のデータのばらつきが見られるが、その他の測定位置では上下方向による温度の差はほとんどなかった。また、断面側面部の最高温度は上部および中部でほぼ同等の温度となり、中心部との温度差は約15℃であった。目標スランブフロー60cmおよび70cmのコンクリートでは、中心部で上下方向に若干差があるものの50cmのコン

クリートに近い傾向となった。これに対して、目標スランブフロー75cmのコンクリートでは、中心部最高温度の差が上下方向で10.3℃となった。同様に側面部でも最高温度の上下方向の差は5.8℃となった。目標スランブフロー75cmのコンクリートでは上下方向で粗骨材とモルタルの材料分離により上部のコンクリートでは下部のコンクリートに比較して実際の単位セメント量が増加したことにより大きな温度差となったものと考えられる。既往の研究¹³⁾では、普通ポルトランドセメントを使用した場合に本実験と同程度の寸法の柱部材で単位セメント量10kg/m³の増減で部材中のコンクリートの最高温度が1℃程度異なるとの報告があることから、これを本実験の結果に当てはめると目標スランブフロー75cmのコンクリートでは柱の上部と下部のそれぞれで単位セメント量が100kg/m³程度異なることに相当する結果が得られたことになる。

図6 高さ位置と粗骨材面積率比

図7 上部材料分離指数と係数 a, b の関係

図8 温度履歴測定結果

図9 柱高さ位置と粗骨材面積率比、単位容積質量比、圧縮強度比、ヤング係数比の関係

表6 単位容積質量、圧縮強度およびヤング係数

目標スランブフロー (cm)		単位容積質量 (kg/ℓ)			圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		
		28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日
50	標準養生平均	2.43	2.42	2.42	76.7	80.8	84.2	3.97	4.09	4.13
	コア平均	2.37	2.35	2.36	56.0	58.7	60.9	3.58	3.57	3.61
60	標準養生平均	2.44	2.44	2.43	71.1	77.6	81.1	4.03	4.08	4.23
	コア平均	2.35	2.35	2.34	54.5	57.3	58.3	3.47	3.47	3.39
70	標準養生平均	2.45	2.45	2.44	77.0	83.6	87.6	3.92	4.06	4.21
	コア平均	2.38	2.38	2.38	59.4	61.9	63.6	3.61	3.61	3.67
75	標準養生平均	2.49	2.48	2.48	63.3	66.2	68.3	4.42	4.41	4.60
	コア平均	2.40	2.40	2.40	57.5	60.9	63.9	3.48	3.74	3.69

(5) 柱模擬試験体における粗骨材面積率、単位容積質量、圧縮強度およびヤング係数

図9は各コンクリートの粗骨材面積率の平均値に対する比率、材齢91日に試験を行ったコア供試体の気乾単位容積質量、圧縮強度およびヤング係数のそれぞれの平均値に対する比率を高さ方向に示したものである。なお、それぞれの実測値の一覧を表6に示す。

粗骨材面積率比は、(3)で示した通り高さ位置が高くなるほど小さくなる傾向を示し、その傾向はスランブフローが大きくなるほど顕著となった。これは、単位容積質量比においてもほぼ同様の傾向となり、また、それほど顕著ではないがヤング係数比も類似の傾向となった。このことは、単位容積質量およびヤング係数がコンクリート中に含まれる粗骨材量に依存することを示し、材料分離により構造体中においてこれらの均質性が大きく損なわれる可能性があることを示唆している。一方、圧縮強度比は単位容積質量およびヤング係数と異なる傾向を示した。柱最下部では、圧密によると考えられる影響から平均値に比較していずれのコンクリートも15%程度大きな値となり、概略の傾向としては高さ位置が高くなるとともに圧縮強度比は漸減するが、最上部の50cmの範囲では、粗骨材面積率比の最も大きな50cmのコンクリートの圧縮強度比が最も小さくなり、粗骨材面積率が小さくなるほど圧縮強度比が大きくなる結果となった。これは、目標フロー75cmのコンクリートで最も顕著となり、最上部のコア強度は平均値に比較して20%以上大きな値となった。この傾向は、部材上層部の強度が最も低く下層部になるにつれて大きくなるという一般のコンクリートを使用した柱部材の強度傾向¹⁴⁾とは異なり、高流動コンクリートおよび流動化コンクリートで得られた結果¹⁵⁾

¹⁶⁾ ¹⁷⁾と一致するものである。

(6) コアの長さ変化

表7は各コンクリートから採取した水平方向コアの試験材齢52週における長さ変化率を示したものである。また、図10は目標スランブフロー75cmおよび50cmのコンクリートの水平方向コアの長さ変化の経緯を示したものである。

表7に示す通り、平均的な長さ変化は設定スランブフロー50cmのコンクリートが最も小さく、続いて75cmとなり、目標スランブフロー70cmおよび60cmのコンクリートで若干大きな値となった。しかし、高さ方向での長さ変化率の相違は目標スランブフロー50～70cmのコンクリートでは平均値±5%程度であったのに対し、75cmのコンクリートでは上部と中間部では長さ変化率の差が30%程度となった。中間部での長さ

表7 高さ位置における長さ変化率の違い

コア位置	長さ変化 ($\times 10^{-4}$)			
	75cm	70cm	60cm	50cm
上部	-3.28(1.15)	-3.25(1.06)	-3.21(1.02)	-2.58(0.96)
中間部	-2.43(0.85)	-2.89(0.94)	-3.00(0.96)	-2.81(1.04)
下部	-2.83(0.99)	-3.06(1.00)	-3.21(1.02)	-2.68(1.00)
平均	-2.85	-3.07	-3.14	-2.69

()内は平均値に対する比率

図10 コアの長さ変化測定結果

変化が若干小さかったことは、粗骨材面積率の値がそれほど大きく変動していないことからその原因は明確ではないが、上部の長さ変化が大きくなったことは、図8に示した温度上昇時の最高温度と同様に、材料分離による粗骨材の沈降が大きく影響しているものと考えられる。したがって、材料分離はコンクリートの力学性状だけでなく長期的な耐久性に関しても影響を及ぼす可能性があるものと判断される。

4. 材料分離の定量的評価

図11は、(1)式から計算で求めた粗骨材面積率比の推定値と各材齢でのコア供試体の平均値に対する単位容積質量比、圧縮強度比およびヤング係数比の関係を示したものである。この図に示すように推定した粗骨材面積率と、単位容積質量およびヤング係数の高さ方向の分布は正の相関があり、粗骨材面積率から単位容積質量およびヤング係数の傾向を推定することは可能と考えられる。しかし、圧縮強度については、粗骨材面積率比0.9付近を境界として、それより小さく場合に負の相関が認められる。これは材料分離により粗骨材とモルタルの構成比が計画した調合と大きく異なったことに起因しており、ヤング係数を圧縮強度から推定しようとする場合などに問題が生じる可能性がある。したがって、本実験に用いたコンクリートでは部材中の硬化コンクリートの力学性状の評価に大きな影響を及ぼさない材料分離は、粗骨材面積率が平均の90%程度以上の範囲と考えることができる。本実験で製作し

図11 粗骨材面積率と単位容積質量、圧縮強度、ヤング係数の関係

た柱模擬部材に(4)式を用いて粗骨材面積率比0.9以下の位置を計算すると、設定スランブフロー75cmで上部約63cm、70cmで同じく35cm、60cmで20cm、50cmで4cmとなる。また、最上部位置(柱頭から1cmの位置)での粗骨材面積率比を0.90として、図4を用いて上部材料分離指数 si を求めると22%となり、(4)式から柱脚での粗骨材面積率比は1.02となる。部材内の粗骨材面積率比が0.90~1.02の範囲にあるとすれば、図11から材料分離に起因する粗骨材面積率比の違いによる単位容積質量、圧縮強度およびヤング係数の傾向の違いは小さく、硬化コンクリートの力学性状を評価する際は材料分離を考慮する必要のない範囲にあるものと考えられる。

一方で、温度上昇量、長さ変化の測定結果から材料分離に対するコンクリートの性能を判断すると、図12に示すように上下方向の最高温度差は上部材料分離指数 si で表すことができ、 si 値が20%以下では上下方向の最高温度差はほとんどないものと考えられる。また、長さ変化については、高さ方向のコンクリートの品質の違いは図13に示すように温度と同様に si 値で評価することができる。長さ変化率の差が0%に対応する si 値は30.6%となり、これ以下の上部材料分離指数であれば構造体に打ち込まれたコンクリートの長さ変化についての品質は均質なものであると判断することができる。

以上の試算から、上部材料分離指数を20%程度以下にすれば振動締固めを行って施工を行っても、構造体コンクリートとしては均質で十分な性能が得られるものと判断される。

5. まとめ

振動締固めを前提とした高強度コンクリートの材料分離が硬化性状に及ぼす影響を、実大の模擬試験体を用いて検討し

図12 上部材料分離指数と中心部最高温度差の関係

図13 上部材料分離指数と長さ変化率差の関係

た。本検討の範囲での知見をまとめると以下の通りとなる。

- 1) 材料分離を起こしたコンクリートを構造体に打ち込んだ場合、材料分離を起こした範囲でその力学性状の傾向が健全なコンクリートと大きく異なる。
- 2) 材料分離を起こしたコンクリートは、力学性状以外に、温度上昇や長さ変化の変動が大きくなり、構造体として均質な性能を保証できない可能性がある。
- 3) 材料分離の許容限界として、粗骨材面積率が平均値の90%を得た。本実験に用いたコンクリートでは上部材料分離指数を20%以下とすることで、均質な構造体コンクリートを得ることができるものと考えられる。

謝 辞

本研究を行うに際して、故 奈良禧徳 内山アドバンス中央研究所・所長に多大な協力を戴いた。ご冥福を祈念致します。

参考文献

- 1) 西田 朗, 斉藤丈士, 名和豊春, 山崎庸行: 高強度コンクリートの材料分離性の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.585, pp.39 ~ 44, 2004.11
- 2) 黒川善幸, 谷川恭雄, 森 博嗣: フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性に関する一考察, フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 43 ~ 48, 1996.4
- 3) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版, pp. 34 ~ 38, 1975
- 4) 飛坂基夫: 低水セメント比コンクリートのフレッシュ状態における物性, セメント技術年報41, pp. 261 ~ 264, 1987
- 5) 内田清彦: 建築の高性能化を目指して, セメント・コンクリート, No. 605, pp. 28 ~ 38, 1997.7
- 6) 西田 朗, 小澤貴史, 奈良禧徳, 飯生昌之: 高強度コンクリートの材料分離と構造体における硬化性状 (その1 材料分離指数による評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集A (関東), pp.269 ~ 270, 2001.10
- 7) 西田 朗, 奈良禧徳, 飯生昌之: 高強度コンクリートの材料分離と構造体における硬化性状 (その2 粗骨材面積率による評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集A (北陸), pp.1065 ~ 1066, 2002.8
- 8) 和美広喜, 柳田克巳: 高強度コンクリートの流動特性に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.1, pp.123 ~ 131, 1993.1
- 9) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事, pp.353 ~ 355, 1998.1
- 10) 明石外世樹, 角田 忍, 森本登志也: Two-Point Workability Test によるフレッシュコンクリートの物性値測定, フレッシュコンクリートの物性とその施工への適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.7 ~ 12, 1986.3
- 11) 李 柱国, 谷川恭雄, 森 博嗣: 高流動コンクリートのフレッシュ性状の経時変化およびチクトロピーに関する理論的考察, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.15 ~ 22, 2002.8
- 12) 寺田謙一, 佐藤孝一, 山川 勉: 高流動コンクリートの各種コンシステンシー評価方法に関する研究 (その9: モルタルのレオロジー試験(1)), 日本建築学会大会学術講演梗概集A (東海), pp.495 ~ 496, 1994.9
- 13) 立部正則, 田中伸幸, 今井 実: 超高強度コンクリートの実用化に関する実験的研究 (その3 構造体打込み実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集A (関東), pp.269 ~ 270, 1988.10
- 14) 日本建築学会: 構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点, pp.82 ~ 91, 1987.11
- 15) 葉賀忠昭, 柴田辰正, 寺西浩司: 高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法 (その5: 圧縮強度、ヤング係数および粗骨材面積率の分布), 日本建築学会大会学術講演梗概集A (北海道), pp.191 ~ 192, 1995.8
- 16) 寺西浩司, 佐藤孝一, 柴田辰正: 高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法 (その6: 圧縮強度およびヤング係数と粗骨材分布の関係), 日本建築学会大会学術講演梗概集A (北海道), pp.193 ~ 194, 1995.8
- 17) 島 弘, 水口裕之, 和田寿夫, 河野 清: 材料分離が流動化コンクリートの硬化後の諸性質に及ぼす影響, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.5 ~ 8, 1984

(2006年6月27日原稿受理, 2006年11月7日採用決定)