

論文 締固めを必要とする高流動コンクリートにおける粗骨材の沈下量評価試験方法に関する検討

片平博*1・古賀裕久*2

要旨：締固めを必要とする高流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価する試験方法として、土木学会 358 委員会において粗骨材の沈下量評価試験が提案されている。この方法は容積 20L の試料に棒状バイブレータによる振動を 10 秒間与えた後、上部 2L 中の粗骨材残存率を洗い出して測定するもので、洗い出し作業に手間を要する。そこで、試料をエアメータに採取し、空気量と質量を測定して粗骨材残存率を推定する方法を考案した。なお、本検討の範囲では、粗骨材の残存率が低下するのは打込み上面からごく浅い範囲であること、振動締固めによる空気量の損失は比較的少ないことを確認した。

キーワード：締固めを必要とする高流動コンクリート、材料分離、空気量、エアメータ

1. はじめに

耐震基準の見直し等により、コンクリート構造物中の鉄筋量が増加しており、従来の土木用の硬練りコンクリートでは十分な充填締固めが困難な事例が散見される。

締固めが困難な場所でも適用できる自己充填性を有する高流動コンクリートの研究は古くから行われているが、流動性を高めるには、粉体量を増やす必要があり、また、製造には高い技術力と設備が必要で、広く普及するには至っていなかった。

近年、増粘成分を含有する高性能 AE 減水剤（以下、増粘一液型という）が開発された。これを用いることで、従来の普通コンクリートの配合に比較して、粉体量を必要以上に増加させなくとも、比較的高い流動性と材料分離抵抗性を有した「締固めを必要とする高流動コンクリート」（以下、中流動コンクリートという）の製造が可能となった。現在は主にトンネルの覆工コンクリート等に適用されている。

中流動コンクリートは、自己充填性高流動コンクリートほどの流動性はないものの、軽微な締固めで十分な充填が可能であることから、今後、その他の締固めが困難な箇所への適用も期待される。一方で締固めが過剰になると材料分離を引き起こす可能性があり、材料分離抵抗性を簡易に評価する試験方法が求められている。

土木学会では締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会（358 委員会）を発足させた。358 委員会では、中流動コンクリートの材料分離抵抗性のうち、特に、振動締固め時の粗骨材の沈降によって生じる分離に着目し、粗骨材の沈下量評価試験が検討された¹⁾。

この試験方法は、円筒容器内のコンクリート試料に棒状バイブレータの振動を 10 秒間与え、その後、試料上部から 2 リットルの試料を採取して、その試料中の粗骨材量を洗い出しによって求めるものであり、中流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価する一つの指標として検討された。しかしその一方で、洗い出しに手間と時間を要することが課題の一つとなっていた。

そこで、より簡易に粗骨材残存率を求める方法として、エアメータに採取した試料の空気量と質量を測定し、粗骨材残存率を推定する方法を考案した。また、中流動コンクリートの粗骨材残存率や空気量の分布についても、あわせて検討した。

2. 実験方法

2.1 材料とコンクリート配合

コンクリートに使用した材料を表-1 に示す。化学混和

表-1 コンクリート材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
水(W)	上水道水
細骨材(S)	川砂, 絶乾密度: 2.53g/cm ³ , 吸水率: 1.60%, 粗粒率F.M.: 2.67
粗骨材(G)	硬質砂岩碎石, 絶乾密度: 2.66g/cm ³ , 吸水率: 0.50%, G _{max} : 20mm
化学混和剤	・AE減水剤 (リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体) ・増粘成分含有の一液型高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体) ・AE助剤 (変性ロジン酸化某物系陰イオン界面活性剤)

*1 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 総括主任研究員 (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 (正会員)

表-2 コンクリートの配合とフレッシュ性状

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤の 種類	フレッシュ性状		
			W	C	S	G		スランブ(cm)	スランブフロー(cm)	空気量(%)
1. 55-S13-A4.3	55	50	172	313	810	985	AE減水剤	13.4	-	4.3
2. 55-F43-A4.2	55	50	180	327	864	897	増粘一液	22.4	44.8×40.8	4.2
3. 45-S9 - A4.2	45	50	172	382	750	991	AE減水剤	9.0	-	4.2
4. 45-F44-A3.0	45	50	180	400	833	865	増粘一液	22.7	45.2×43.2	3.0
5. 45-F56-A3.5	45	50	180	400	833	865	増粘一液	24.9	57.3×54.5	3.5

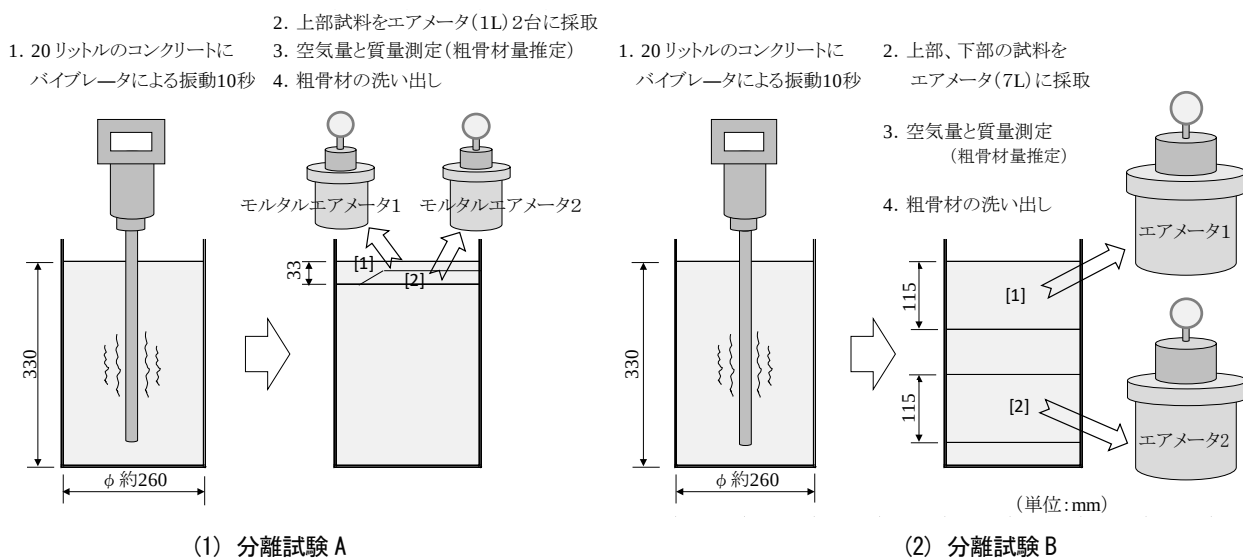


図-1 粗骨材沈下量試験の概要



写真-1 配合4のスランブフローの状態

剤としては、スランブ 8~15cm 程度のコンクリート（普通コンクリートという）には AE 減水剤，中流動コンクリートには増粘一液型を使用した。AE 助剤は空気量を調整するために全ての配合に使用した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合 1 および 2 は W/C=55%，配合 3,4 および 5 は W/C=45%とした。配合 1 および 3 は普通コンクリートであり，配合 2,4 および 5 は混和剤に増粘一液型を用いることでスランブを大きくし，中流動コンクリートとした。配合名は（水セメント比）－（スランブまたはスランブフロー）－（練上り直

後の空気量）を表している。

一例として配合 4 のスランブフロー試験の状況を写真-1 に示すが，ペーストの分離等は見られなかった。

2.2 粗骨材沈下量試験の方法

試験の概要を図-1 に示す。358 委員会提案の試験方法は，円筒形の容器（バケツ）内に約 20 リットルのコンクリート試料を入れ，そこに棒状パイプレータを鉛直に挿入して 10 秒間の振動締固めを行った後，試料上部から 2 リットルの試料を採取する。その試料中の粗骨材を 5mm ふるい上での洗い出しによって採取し，計画配合上の粗骨材量に対する粗骨材残存率を求める。

これに対して，今回実施した分離試験 A では，試料上部 2 リットルの試料をモルタル用エアメータ（容量 1 リットル）2 台に採取した。その試料の空気量と質量を測定し，2.3 に示す方法で推定粗骨材残存率を求めた。なお，確認の意味で，エアメータに採取した試料中の粗骨材を 5mm ふるい上での洗い出しによって採取し，その表乾質量から粗骨材残存率を求めた。

なお，2 台のモルタルエアメータに採取される試料は打込み上面から深さ 33mm 程度の範囲である。この打込み上面からごく浅い位置には，振動によって浮上した空

気泡が密集するペースト層が形成される傾向にあったので、まず、深さ 10mm 程度までの試料をモルタルエアメータ 1 に採取した。それより深い位置は、粗骨材の影響で試料を薄く採取できないので、深め (20mm 程度) に試料を採取して、エアメータ 1 および 2 に分けて詰めた。

分離試験 B では、コンクリート用の容量 7 リットルのエアメータを用いて、10 秒間の振動を与えた後の上部と下部の試料をそれぞれ採取し、分離試験 A と同様の方法 (2.3 に示す方法) でエアメータによる推定粗骨材残存率と、洗い出しによる粗骨材残存率を求めた。普及品である 7 リットルのエアメータによる評価が可能となれば、試験の汎用性が大幅に高まると考えられる。

なお、今回の実験で、振動締め固めに使用した棒状バイブレータは、振動部が $\phi 28\text{mm} \times 475\text{mm}$ 、振動周波数 250Hz、振幅 1.0mm のものであり、起振した状態で、鉛直に容器中央に挿入して先端が容器の底から 50mm の深さまで挿入し、10 秒後に鉛直に引き上げた。

2.3 エアメータによる粗骨材残存率推定方法

エアメータの測定空気量と質量から粗骨材残存率を推定する方法について述べる。原理としては、一般に粗骨材の密度は、モルタルの単位容積質量よりも大きく、試料中の粗骨材が増えると、コンクリートの単位容積質量が大きくなることを利用している。コンクリートの単位容積質量を計画配合上の単位容積質量と比較することで、粗骨材量を推定するものである。

ただし、空気量の変化もコンクリートの単位容積質量に影響を与えるので、単位容積質量は空気量を除いて算出する。この考え方は、「エアメータ法による単位水量推定マニュアル (土木研究所法)」²⁾と同様である。なお、コンクリートは粗骨材とモルタルの 2 相で構成されており、モルタルの単位容積質量は振動締め固めによって変化しないと仮定した。

計算式を以下に示す。

まず、配合計画上の空気量を除いたモルタルの単位容積質量 γ_m は式(1)で求められる。

$$\gamma_m = \frac{W + C + S}{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} - 0.01C} \quad (1)$$

ここに、 γ_m : 配合上の空気量を除いたモルタルの単位容積質量(g/cm³)

W, C, S: 計画配合上の 1m³あたりの単位水量, 単位セメント量, 単位細骨材量 (kg/m³)

ρ_w, ρ_c, ρ_s : 水, セメント, 細骨材の密度(g/cm³)

なお、式(1)中で、C に 0.01 を乗じているのは、セメントに水が吸水されて僅かに容積が減少する分の補正である²⁾。

次に、計画配合上の空気量を除いた容積に対する粗骨材容積率 g_1 は式(2)で求められる。

$$g_1 = \frac{G/\rho_g}{1,000 - 10Air - 0.01C} \quad (2)$$

ここに、 g_1 : 配合上の空気量を除いた容積に対する粗骨材容積率

G: 配合上の 1m³中の粗骨材量(kg)

ρ_g : 粗骨材の密度 (g/cm³)

Air: 配合上の空気量 (%)

一方、エアメータ中に採取されたコンクリート試料の空気量を除いた単位容積質量 γ_2 は次式で求められる。

$$\gamma_2 = \frac{M_2}{V(1 - 0.01Air_2)} \quad (3)$$

ここに、 γ_2 : エアメータ中に採取されたコンクリート試料の空気量を除いた単位容積質量(g/cm³)

M_2 : コンクリート試料の質量(g)

V: エアメータの釜容器の容積(cm³)

Air₂: 測定空気量(%)

(骨材修正係数で必ず補正する)

また、 γ_2 を粗骨材の密度 ρ_g と空気量を除いたモルタルの単位容積質量 γ_m との関係で示すと式(4)となる。

$$\gamma_2 = \rho_g \cdot g_2 + \gamma_m(1 - g_2) \quad (4)$$

ここに、 g_2 : 空気を除く試料中の粗骨材容積率
式(4)を g_2 に対して解くと式(5)となる。

$$g_2 = \frac{\gamma_2 - \gamma_m}{\rho_g - \gamma_m} \quad (5)$$

粗骨材残存率 X は式(6)より表される。

$$X = \frac{g_2}{g_1} \times 100 \quad (6)$$

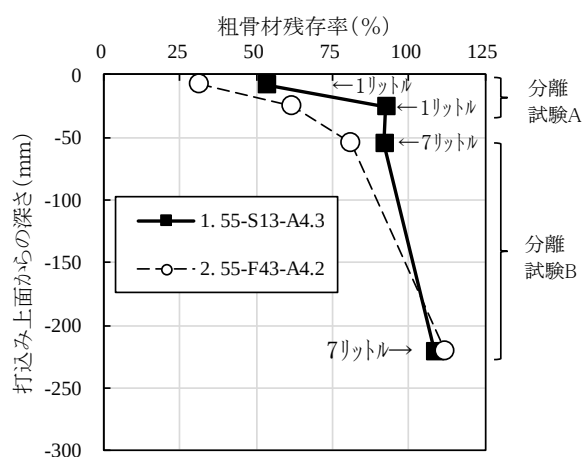
ここに、X: 粗骨材残存率 (%)

3. 実験結果

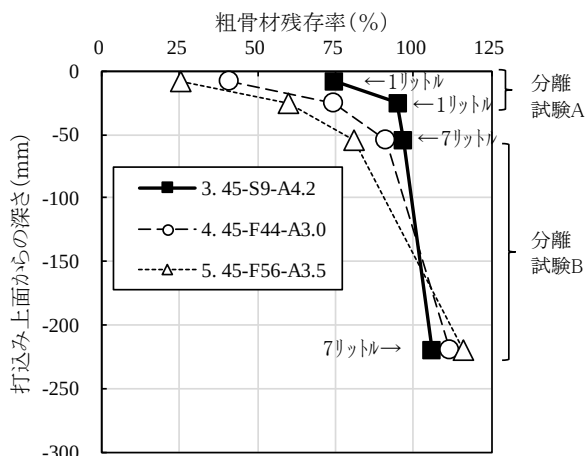
3.1 洗い出しによる粗骨材残存率

まず、洗い出しによって求めた粗骨材残存率の結果を図-2 に示す。今回、図-1 に示すように分離試験 A と B の 2 とおりの方法で実施しているが、図-2 ではまとめて示した。この図において、縦軸の打込み上面からの深さについては、エアメータに採取した試料の平均深さの位置にデータをプロットした。従って、必ずしもプロットの位置での粗骨材残存率ではないが、およその分布傾向を掴むには有効と考えられる。

図-2 より、まず、普通コンクリート (図中の■) については、最上部で粗骨材残存率がやや少ないものの、それ以降はほぼ 100%に近い分布を示し、粗骨材の沈降による分離は比較的少ない結果が得られた。これに対して中流動コンクリート (図中の○, △) は、打込み上面か

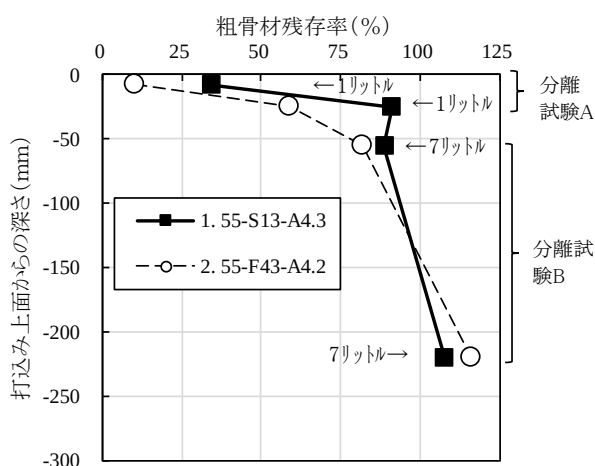


(1) W/C55%の結果

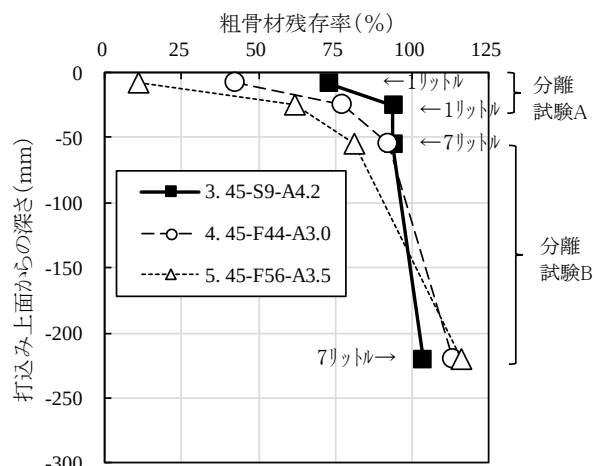


(2) W/C45%の結果

図-2 洗い出しによる粗骨材残存率の測定結果



(1) W/C55%の結果



(2) W/C45%の結果

図-3 エアメータによる推定粗骨材残存率の分布

らの深さが浅い範囲での粗骨材残存率がより小さくなる傾向を示しており、その傾向はスランプフローが大きいほど、また、W/C が大きいほど顕著であった。

ただし、20 リットルの試料に対して、棒状パイプレータによる 10 秒間の振動締固めは明らかに過剰である。このような過剰な締固めを行っても、粗骨材残存率が大きく低下する範囲は打込み上面からごく浅い範囲であり、7 リットルのエアメータに採取した上部（平均深さ 5.8cm）の粗骨材残存率は概ね 80%以上となった。

3.2 エアメータによる推定粗骨材残存率

次にエアメータで測定した空気量と質量から、2.3 の方法で求めた推定粗骨材残存率の分布を図-3 に示す。図-3 と図-2 は極めて類似した結果が得られた。図-4 に洗い出しによる推定粗骨材残存率とエアメータによる粗骨材残存率を比較した結果を示す。双方の値には高い相関

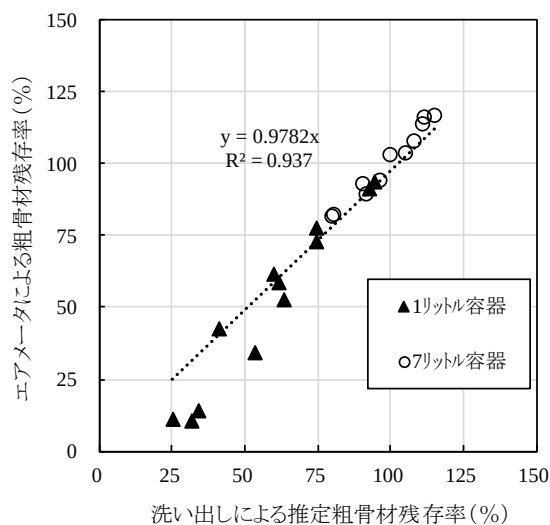


図-4 洗い出しによる推定粗骨材残存率とエアメータによる粗骨材残存率の比較

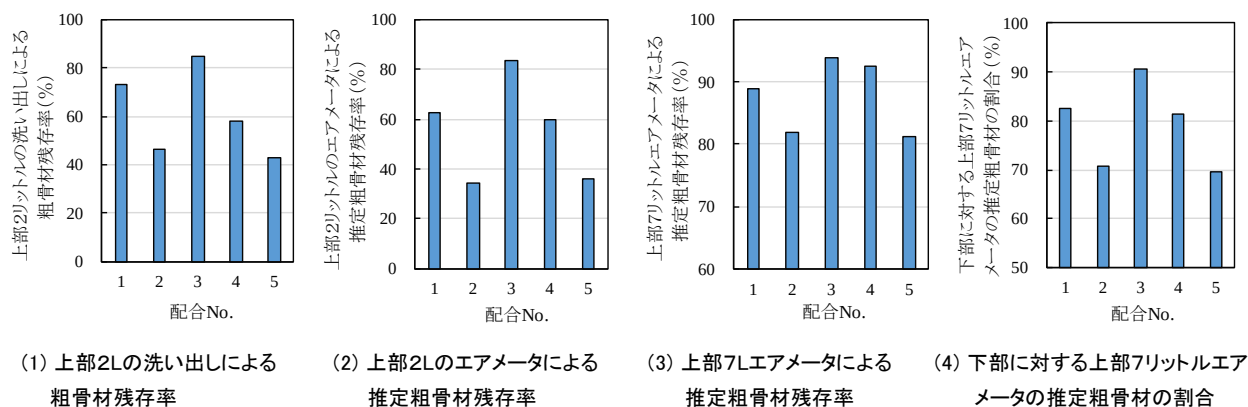


図-5 粗骨材残存率推定方法の比較

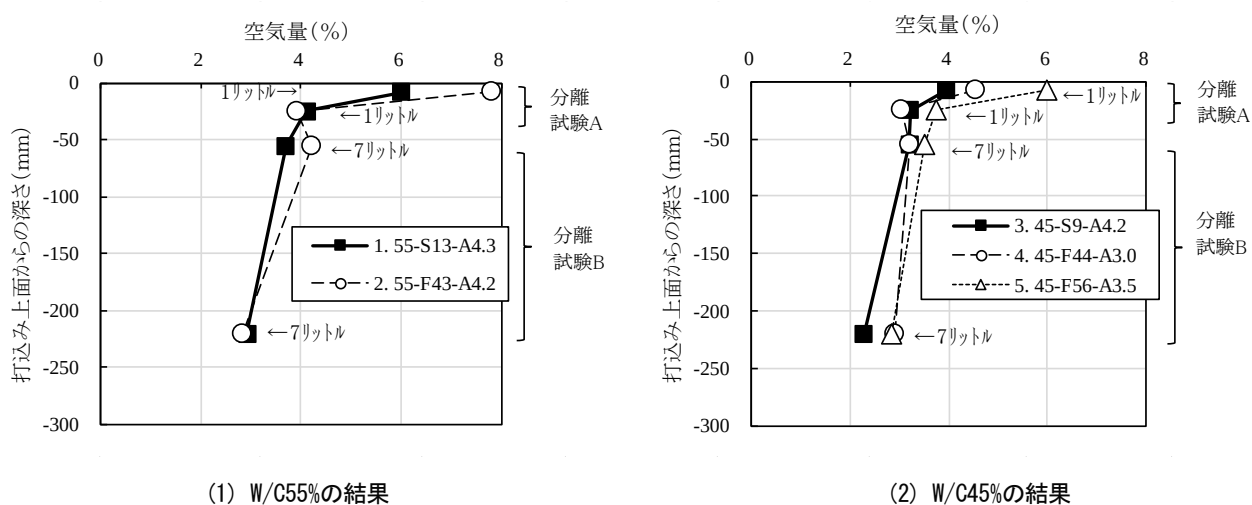


図-6 コンクリート中の空気量の分布

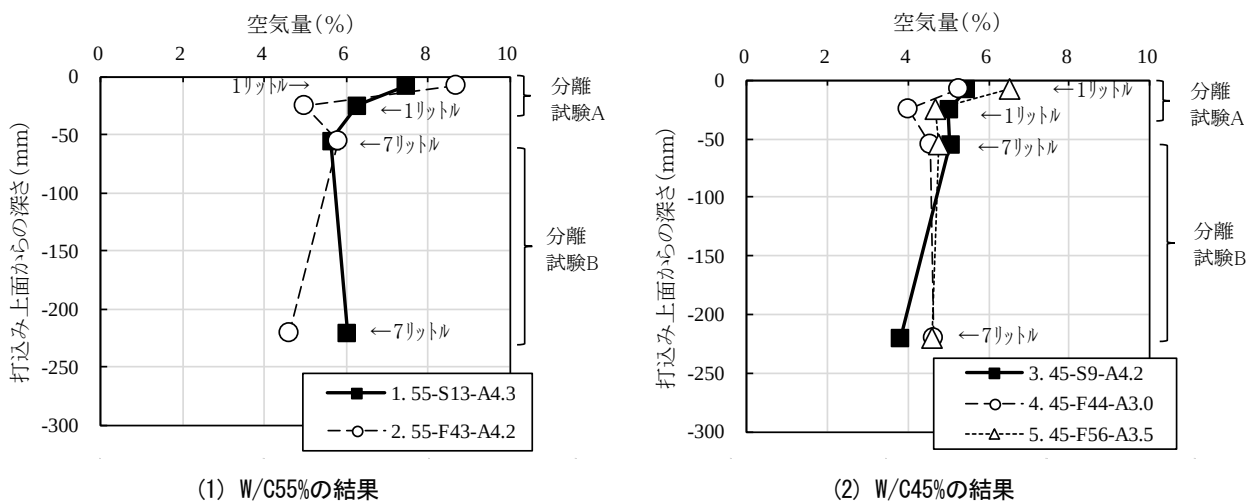


図-7 モルタル中の空気量の分布

関係が認められ、エアメータで測定した空気量と質量から、粗骨材残存率を精度良く推定できていた。この方法では、洗い出し作業が不要で、試験に掛る手間を削減できると考える。

なお、図-4 では、粗骨材残存率が小さい領域でやや対応が悪くなっている。この理由としては、打込み上面付近では水の上昇があり、モルタルの単位容積質量が配合上の値よりも小さくなっていることが想定されるが、今

回の推定ではモルタルの単位容積質量は変化しないと仮定しているため、その差が誤差の要因と考えられる。ただし、粗骨材の分離をより厳しく評価する観点からみればエアメータを用いた推定は安全側の評価となる。

土木学会 358 委員会で提案された評価方法は、締固め後の試料の上部 2 リットル中に含まれる粗骨材量に着目している。今回の分離試験 A でも同様に合計 2 リットルの試料を採取している。その洗い出しによって得られた粗骨材残存率を図-5(1)に示す。これに対して、エアメータによる推定によって求めた推定粗骨材残存率は図-5(2)に示すようであり、(1)とほぼ同様の結果が得られた。

一方、今回の分離試験 B では 7 リットルのエアメータを使用した。図-5(3)は分離試験 B で上部のエアメータによる推定によって求めた粗骨材残存率である。配合 No.3 と 4 の差が明確でないなど、図-5(1)に比較して配合の違いによる差がやや不明瞭となった。そこで、上部の粗骨材が減少すると下部の粗骨材量が相対的に増加することに着目し、下部の推定粗骨材量に対する上部の推定粗骨材量の割合を求めた。この結果を図-5(4)に示す。図-5(4)のように試料下部の粗骨材量を基準として比を算出することで、各配合の材料分離抵抗性の大小について、図-5(1)に類似した傾向を得ることができた。

以上、限られた試験回数での検討ではあるが、7 リットルのエアメータでも、粗骨材の分離を評価できる可能性を示した。

3.3 空気量の分布

振動締固め後に、エアメータに採取した試料の空気量の測定結果を図-6 に示す。いずれの配合でも上部は空気量が多く、下部ほど空気量が低下する傾向を示した。

ただし、粗骨材の分離により、コンクリート中に占めるモルタルの体積も変化している。そこで、これを考慮し、モルタル中の空気量の分布を求めた結果を図-7 に示す。空気量は、最上部で多いものの、それ以外の高さでは概ね同等の量となった。表-2 に示した練上り直後の空気量をモルタル中の空気量に換算すると概ね 5~7% となるが、図-7 中の空気量は最上部を除いて概ねその 0.7~1.0 倍程度となった。

中流動コンクリートは普通コンクリートに比較して流動性が高いことから、空気泡が抜けやすいことが懸念されたが、今回の配合では、締固めによって極端に空気量が減少することはなかった。

練上り直後のフレッシュコンクリートについて、ハンドスコープをこすりつけることで均したコンクリート表面を観察したところ、普通コンクリートでは、気泡の発泡が多く見られたのに対して、中流動コンクリートでは、発泡が肉眼ではあまり確認できず、発生する気泡径が細かいことが予想される。細かい空気泡は振動締固めによって抜けにくい傾向があり³⁾、中流動コンクリートの空気量が減少しにくかった一因と考えられる。

4. まとめ

中流動コンクリートの粗骨材沈下量試験について検討し、以下の結果を得た。

- (1) 中流動コンクリートの打込み上面から浅い部分の粗骨材残存率の値は、普通コンクリートに比較すると小さく、スランプフローが大きいほど、また、W/C が大きいほど、加振による材料分離が生じやすくなる傾向が確認された。
- (2) 試料の洗い出し作業を行わなくても、エアメータに採取し、測定した空気量と質量の値から、計算によって粗骨材残存率を比較的高い精度で推定できることが確認できた。
- (3) モルタル部分に着目すると、今回用いた中流動コンクリートは、振動締固め後の空気量の減少が普通コンクリートと同等であった。

謝辞：本稿の執筆において、358 委員会の後継である土木学会「締固めを必要とする高流動コンクリートの施工に関する研究小委員会（256 委員会）」の委員の方々に貴重な助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術研究小委員会（358 委員会）委員会報告書、コンクリート技術シリーズ、No.123, 土木学会, 2020.5
- 2) エアメータ法による単位水量推定マニュアル（土木研究所法）、コンクリート標準示方書【規準編】、pp.555-557, 2018.10
- 3) 片平博, 古賀裕久：空気量、振動締固め時間および細骨材の品質がスケーリング抵抗性に与える影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.771-776, 2018.7