

論文 再生骨材 L を用いた再生コンクリートの材料分離に伴う再生骨材 L の割合変化に関する研究

山田 悠二*1・石川 祥太*2・江本 幸雄*3

要旨：本研究では、配合上の再生粗骨材 L の容積混合率を 50%として再生粗骨材 L と普通砕石を混合使用した再生コンクリートにおける、振動締固めに伴う再生粗骨材 L の分布状況の変化に関する基礎的な知見を得ることを目的に、ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験を実施し、間隙通過性の評価とともにボックス形容器内での再生粗骨材 L の分布状況の変化について検討した。その結果、振動締固めに伴い再生粗骨材 L の単位量が多くなる箇所や、再生粗骨材 L の混合率が配合上の混合率よりも大きくなる箇所が生じることを明らかとし、その変化の度合いについても示した。

キーワード：再生骨材, 再生コンクリート, 間隙通過性, 材料分離

1. はじめに

JIS A 5022 の改定により、混合割合の上限を 50%かつ骨材の平均的な吸水率を 5%以下とした条件の下、所定の品質を満たすことができれば、再生骨材 L を用いた再生コンクリートを再生コンクリート M として取り扱い可能となった。再生コンクリート M の適用範囲は、現場打ちコンクリートでは乾燥収縮や凍結融解作用の影響を受けにくい基礎部分や杭などであるが、工場製品では、寸法が小さく現場打ちコンクリートと比較して乾燥収縮によるひび割れ発生の可能性が小さい。したがって、再生コンクリート M1 種（粗骨材にのみ再生骨材を用いたもの）であれば鉄筋コンクリート製品に適用可能とされる。そのため、再生粗骨材 L（以下、RGL と称す）を再生コンクリート M1 種に使用することで、限定的な範囲ではあるが、再生骨材 L を鉄筋コンクリートに適用可能となり、再生骨材 L の用途拡大が期待される。

一方で、コンクリートは水、粉体、骨材で構成される複合材料であるため、材料分離が生じるという特性を持つ¹⁾。特にコンクリートの施工過程においては、現状、広く行われている振動締固めにより、コンクリート中で骨材は大きく沈降する²⁾。この際、物性が異なる骨材を混合使用した場合には、それぞれの骨材で沈降の速度が異なることの影響から、骨材種類が偏って分布する可能性も考えられる。RGL と普通粗骨材（普通砕石など）を混合使用した場合、それらの骨材の沈降速度の相違や、鉄筋が配筋された条件下においては鉄筋間隙の通過性の相違によって、RGL が集中して存在する箇所が生じる可能性も考えられ、均質なコンクリートとならない可能性がある。RGL を使用したコンクリートの強度や耐久性に関してはこれまでに多くの検討がなされ、近年でも行わ

れているが^{例えば 3), 4), 5)}、低品質の再生骨材を多く用いた場合、普通骨材のみを使用した場合に比べ強度や耐凍害性が低下しやすいことなどが懸念され^{例えば 4), 5)}、再生骨材の割合はコンクリートの品質に影響することも考えられる。そのため、振動締固めによって部材中で RGL が均質に分布せず、集中して存在する箇所がある場合、当該箇所は配合上の RGL の混合率よりも高くなるため、目標とするコンクリートの品質を得られない可能性も考えられる。

したがって、RGL を混合使用した再生コンクリートをより信頼性の高いものとしてより積極的に利用できるようにしていくためには、RGL と普通粗骨材を混合した再生コンクリートにおける振動締固めによる RGL の分布状況の変化を把握しておくことは、今後、重要になると考えられる。

以上を踏まえ本研究では、RGL と普通砕石を混合使用した再生コンクリートにおける、振動締固めに伴う RGL の分布状況の変化に関する基礎的な知見を得ることを目的に、「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験」を実施し、間隙通過性の評価とともに振動締固めによるボックス形容器内での粗骨材量および RGL の分布状況の変化について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

(1) 使用材料

本実験で使用した材料の緒元について表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は海砂を使用した。粗骨材としては、普通砕石および RGL を使用した。本研究で使用した RGL は、建築コンクリート廃材

*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 博（工）（正会員）

*2 福岡大学大学院 工学研究科（学生会員）

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 工博（正会員）

表-1 使用材料

種類	材料名：記号	物性など
結合材	普通ポルトランドセメント：C	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3270cm ² /g
細骨材	玄界灘産海砂：S	表乾密度：2.59g/cm ³ ，吸水率：0.85%，F.M.：2.38，実積率：65.0%
粗骨材	下関市産砕石：G	表乾密度：2.83g/cm ³ ，絶乾密度：2.86g/cm ³ ，吸水率：0.90%，粗粒率：6.57，実積率：59.8%，微粒分量：0.81%
	再生粗骨材L：RGL	表乾密度：2.34g/cm ³ ，絶乾密度：2.86g/cm ³ ，吸水率：5.78%，粗粒率：6.57，実積率：60.4%，微粒分量：1.16%
混和剤	高性能AE減水剤：Ad1	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE剤：Ad2	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合

配合No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)
			W	C	S	G	RGL	Ad1	Ad2		
No.1	45	45	170	378	770	519	450	3.78	0.3	11.5	5.3
No.2	55		175	318	786	530	460	2.55	0.22	12	4.9
No.3	65		175	269	804	542	470	2.15	0.19	11	5

をジョークラッシャーにより一次破碎，インパクトブレイカーにより二次破碎し，木くずや鉄くずなどを送風および磁力により排除したものを回転ふるいで水洗いし，粒径を 20～5mm に調整したものとした。本研究で使用した RGL は密度，吸水率などから，再生骨材 L に相当するものである。

(2) コンクリートの配合

本実験で使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。RGL は粗骨材の単位容積に対して 50%使用した。水セメント比については 45，55，65%の 3 水準とした。また，目標スランプは 12.0±1.0cm，目標空気量は 5.0±0.5%とした。スランプおよび空気量の実測値を表-2 に併せて示す。

2.2 試験方法

(1) スランプ試験および空気量試験

スランプ試験を JISA 1101，空気量試験を JISA 1128 に準拠して実施した。

(2) 間隙通過性と間隙通過後の粗骨材分布の評価

JSCE F 701-2016「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験 (案)」(以下，間隙通過性試験と称す)を参考に，ボックス形容器内の開口部に流動障害 R2 (D13 鉄筋を 3 本配置)を設置した場合と，流動障害を設けない場合でも行い，充填条件の相違による影響も確認した。

間隙通過性 (充填性) は，流動障害の使用の有無によらず，ボックス形容器 B 室における充填高さ 190mm と 300mm 到達を目視確認してその時間を計測し，式 (1) より算出した間隙通過速度 V_{pass} (mm/s) により評価した。

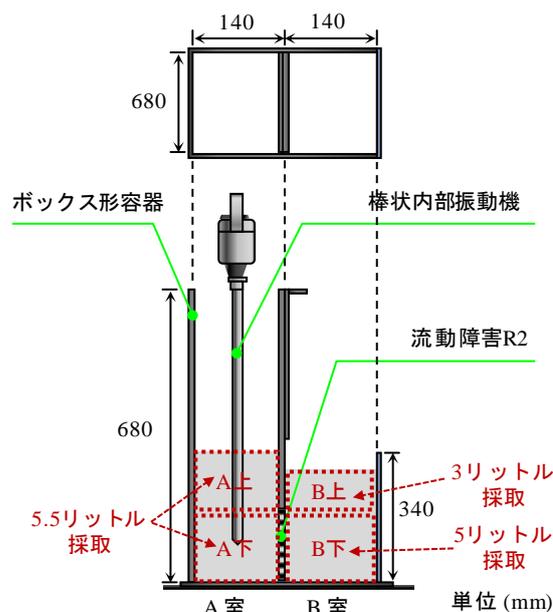


図-1 ボックス形容器内での試料の採取箇所



写真-1 RGLと普通砕石の比較

なお、予備実験により流動障害を使用しない場合、300mm 到達時間が非常に早いことを確認したため、到達時間の計測は2名で行い、2名の計測値の平均を到達時間として採用した。

$$V_{pass} = \frac{110}{T_{300} - T_{190}} \quad (1)$$

ここで、 T_{190} 、 T_{300} ：B室における充填高さ190mmおよび300mm 到達時間 (s)

到達時間の測定後は、図-1に示すように、A室の上部(A上)および下部(A下)、B室上部および下部から試料を採取した。各箇所の試料の採取量については、ボックス形容器内の試料全て(合計約19リットル)を採取することを目的に、A室においては5.5リットルずつ採取し、B室上部(B上)の試料は、充填高さ300mmに到達した試料の自由表面から流動障害までの高さ分の容量に相当する3.0リットル、B室下部(B下)の試料は、その残りである5.0リットルとした。採取した試料に対し、JIS A 1112に従って洗い分析試験を行い、粗骨材をコンクリート中から取り出した。取り出した粗骨材は、乾燥炉に入れて110℃で24時間乾燥させ、絶乾状態にして碎石とRGLを目視確認により選別した後、各粗骨材の質量を測定した。なお、目視によるRGLと碎石の選別にあたっては、写真-1に示すように、各粗骨材を絶乾状態とした場合にRGLは付着モルタルにより本研究で使用した碎石と比べて外観が白くなったため、碎石との選別が容易であった。粗骨材の絶乾状態での質量を絶乾密度で除して各箇所の粗骨材容積(リットル)を求めた。また、求めた粗骨材容積と各箇所での採取量から、以下の式(2)より単位粗骨材容積(リットル)を求めた。

$$\text{単位粗骨材容積} = \frac{m_i}{\rho_{dry}} \times \frac{1000}{V_i} \quad (2)$$

ここで、 m_i ：普通碎石およびRGLの絶乾質量(g)、 ρ_{dry} ：普通碎石およびRGLの絶乾密度(g/cm^3)、 V_i ：各採取箇所での試料の採取量(リットル)

3. 実験結果および考察

3.1 間隙通過性の評価

図-2に間隙通過性試験における190mm、300mm 到達時間の計測結果を示す。なお凡例について、流動障害を使用せずに試験を実施した結果については配合No.の末尾に「無」と記載している。流動障害の有無によらず水セメント比65%とした配合では、充填高さ300mm 到達時間が水セメント比45%および55%としたものと比べて相当に長くなった。また、流動障害を用いていない場合には、流動障害R2を用いた場合に比べて到達時間が大幅に短くなっていることから、流動障害の有無により容器内での充填条件が大きく異なっていることがわかる。

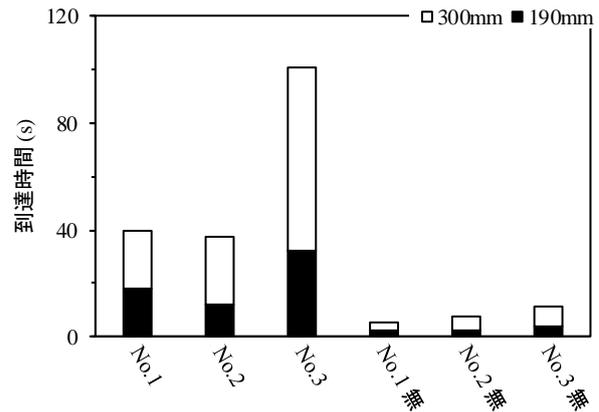


図-2 間隙通過性試験における190mmおよび300mm到達時間

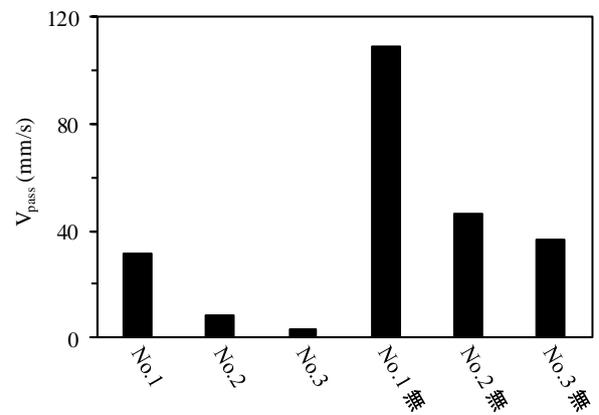


図-3 各配合における間隙通過速度 V_{pass}

また流動障害の有無によらずいずれの配合もB室における充填高さ190mm~300mm間の充填時間は長くなった。これは、ボックス形容器内の開口部の高さ190mmを超えない範囲までは水平方向にのみコンクリートが流動するのに対し、190mm以降は上向きへのコンクリートの流動が支配的となり、流動の条件が厳しいものとなるためであると考えられる。

この流動の条件が厳しくなる190mm~300mm間での充填しやすさを表す指標である間隙通過速度 V_{pass} について図-3に示す。流動障害条件の有無によらず、 V_{pass} は水セメント比が小さい配合ほど速いことがわかる。これは水セメント比が小さい配合ほどモルタルの粘性が高く、粗骨材粒子が群を成してかぶり側であるB室へ流動しやすくなるためであることが考えられる。これについては、次節でボックス形容器内での粗骨材の分布状況の結果とも合わせて示す。

3.2 粗骨材量およびRGL混合率の検討

(1) 粗骨材量の変化

図-4にボックス容器内における各採取箇所の粗骨材の単位容積を示す。配合上の単位粗骨材容積は、配合No.1, No.2, No.3それぞれ367リットル, 371リットル,

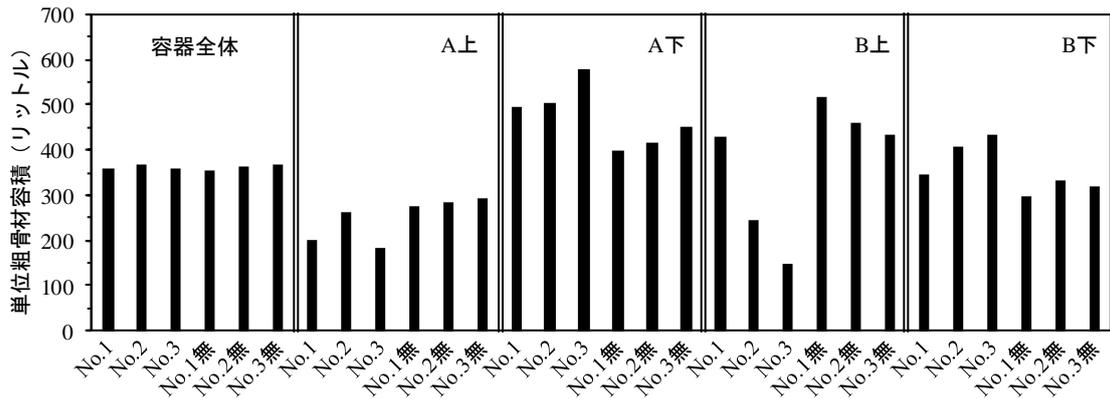


図-4 各採取箇所における単位粗骨材容積

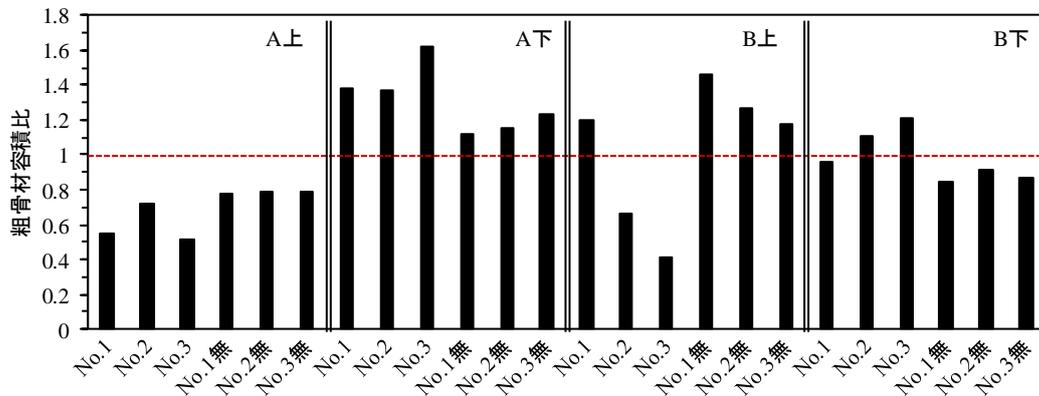


図-5 容器全体の単位粗骨容積に対する
材各採取箇所における単位粗骨材容積の比

379 リットルであるが、ボックス形容器から試料を取り出した各箇所の粗骨材量の合計から求めた、容器内の単位粗骨材容積(図-4 左から1番目)は、配合上の単位粗骨材容積と3~20リットル程度の乖離があった。この要因としては、試料を練舟からボックス形容器内に投入する際、完全に均質な状態での試料投入が困難であったことなどが考えられる。したがって、実際に投入された試料内での粗骨材容積と各採取箇所の単位粗骨材容積の比較を行うこととし、実際にボックス形容器に投入されたコンクリート中の粗骨材の単位容積と各採取箇所での粗骨材の容積の比についても図-5に併せて示す。

配合や流動障害の有無によらず、A室上部(A上)では容器全体の粗骨材量から求めた粗骨材容積よりも小さく、A室下部(A下)では高くなった。これはA下に内部振動機の先端があるためA下において骨材が沈降しやすくなったためと考えられる。B室上部(B上)では、流動障害の有無ごとに見ると、 V_{pass} が速く間隙通過性が高い配合ほど粗骨材容積が大きくなった。また流動障害の有無で比較すると、流動障害を無しとした条件の方が粗骨材容積は大きい結果となった。これらの結果は、充填しやすい配合や試験条件であるほど粗骨材がB上に多く流動していることを表している。

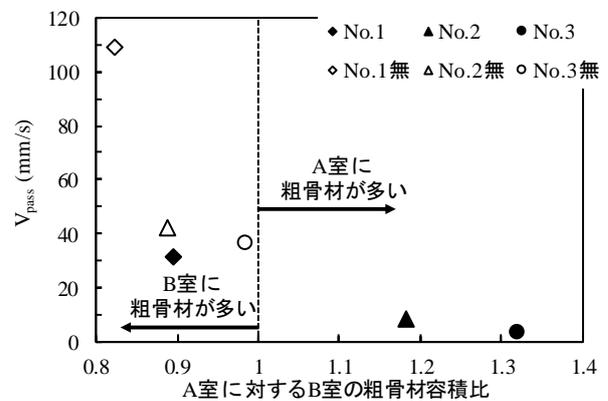


図-6 A室に対するB室の単位粗骨材容積比と V_{pass} の関係

図-6はA室全体の粗骨材容積に対するB室全体の粗骨材容積の比と V_{pass} の関係について示したものである。なお、A室全体に対するB室全体の粗骨材容積比は、その値が小さいほど、B室への粗骨材の流動が多いことを表す。また、粗骨材容積比が1より大きい場合はA室側に粗骨材が多く、1より小さい場合はB室側に粗骨材が多いことを表す。

流動障害の使用の有無によらず、 V_{pass} が速いほど粗骨材量変化率の差が小さくなっており、 V_{pass} が速いほどB

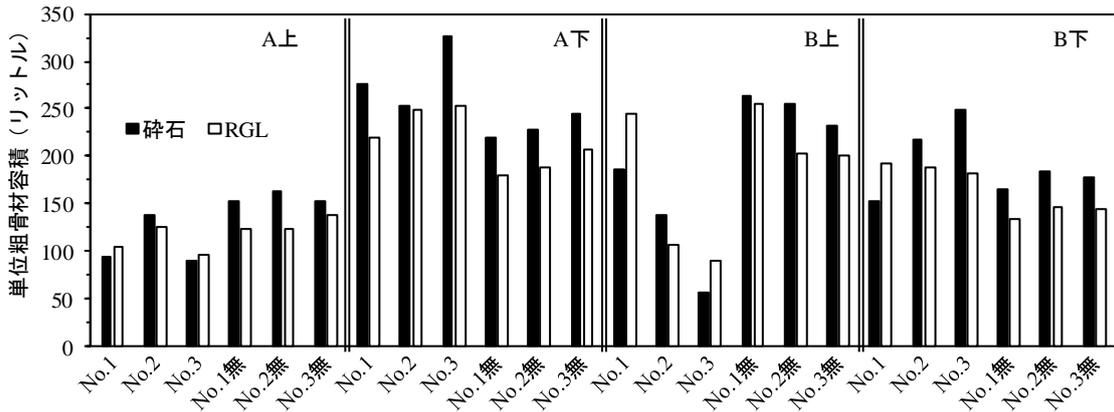


図-7 各採取箇所における粗骨材の単位容積

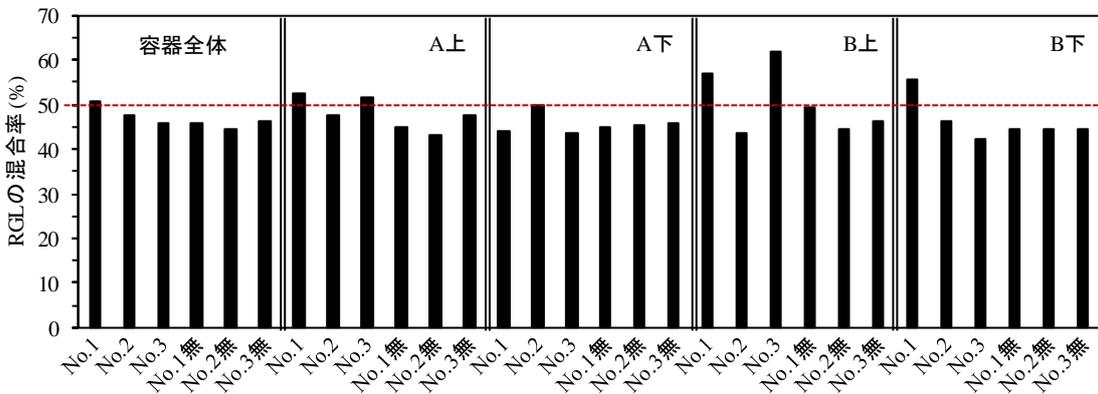


図-8 各採取箇所におけるRGLの混合率

室に多く粗骨材が流動していることがわかる。また流動障害の使用の有無で比較すると、流動障害無しで実施したものは同じ配合で流動障害を使用して実施した結果と比べて、 V_{pass} は大幅に増大し、粗骨材容積比は小さい値を示した。また、流動障害無しで実施したものはいずれもA室に対するB室の粗骨材容積比が1よりも小さくなった。全体を通してみると、 $V_{pass}=30\text{mm/s}$ 以上となるものではA室に対するB室の粗骨材容積比が1よりも小さくなっており、B室側に粗骨材が多く分布していることがわかる。これらのことから、配合条件的、充填条件的にコンクリート間隙通過性(充填性)が良好となる場合には、かぶり側(B室)で粗骨材が多く分布することがわかる。

これは実構造物に置き換えて考えた場合、配合上の単位粗骨材量よりもかぶりコンクリートの粗骨材量が多くなることを示唆する。かぶりコンクリートで単位粗骨材量が多くなると、かぶりコンクリートでは設計した配合よりもモルタル量が少なくなると考えられるため、設計した配合よりも貧配合になるものと考えられる。また、かぶり部では設計した配合よりもRGLの単位量が多くなることも考えられ、次項ではRGLの混合率の変化と共にこの点も踏まえて考察する。

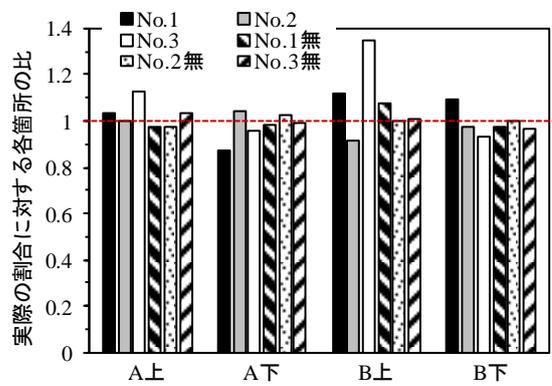


図-9 実測混合率に対する各採取箇所のRGL混合率の比

(2) 粗骨材中のRGL混合率の変化

図-7にボックス容器内における各箇所のRGLと普通砕石の単位容積を示し、図-8にはこの単位容積から求めたRGLの混合率を示す。図-8中の左から1番目は、ボックス形容器内の各箇所の粗骨材量をすべて足し合わせて求めた、実際にボックス形容器内に投入されたコンクリート中のRGLの混合率(以下、実測混合率と称す)である。実測混合率は、配合上のRGLの混合率50%に対して $\pm 5\%$ 程度の範囲で値が変動している。そこで、この実測混合率に対する各採取箇所でのRGLの混合率の

変化を比として表したのも図-9に併せて示す。これによると、B上において、配合No.3に対し流動障害を使用して試験を実施したもので実測混合率に対する各採取箇所RGLの混合率の比は最大となり、その比は1.3となった。図-8によるとこの配合No.3のRGLの混合率は60%程度であり、実測混合率は45%程度であることから、15%程度高いものとなった。また、B上では実測混合率に対する比が高いものも多く見受けられた。これは、振動締め固めによって密度の大きい普通砕石がRGLよりもA室下部に沈降しやすいために、密度の小さいRGLがB室上部側に集中した可能性が考えられるが、その他にもボックス形容器内でのRGLの初期の分散状況などの影響も考えられるため、この理由については今後の検討課題としたい。また配合No.1では特に流動障害を用いた場合にB上やB下で実測混合率に対するRGL混合率の比が高くなっており、図-8よりその置換率は55～60%の間となっている。配合No.1では単位粗骨材容積でもB室側で多くなる傾向にあり、RGLの単位量および混合率ともに大きくなる結果となった。

4. まとめ

本研究では、再生粗骨材L(RGL)と普通砕石を混合使用した再生コンクリートの振動締め固めによるボックス形容器内でのRGLの分布状況の変化について検討した。本研究の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ボックス形容器内でコンクリートが充填しやすい場合には、粗骨材がかぶり側であるB室に多く流動する結果となった。
- (2) ボックス形容器内のRGLの混合率は、ボックス形容器内に投入されたコンクリート中のRGLの混合率の最大で1.3倍程度まで大きくなり、混合率としては15%程度の差が生じたものもあった。またRGLの混合率が大きくなる傾向はかぶり側にあたるB室上部で多くみられた。
- (3) 先述の(1)と(2)より、充填性状によってはRGLと普通砕石を混合使用した場合、かぶりコンクリート中のRGLの占める割合や単位量が配合上のものよりも大きくなる可能性があることが示唆された。

今後は、再生コンクリートをより信頼性の高いものとし、より積極的に利用されることを目標に、今後は骨材の偏在の機構やその抑制方法、再生骨材の偏在による部材内での強度や耐久性のバラつきへの影響など、さらに詳細な検討を継続して行っていく予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、樋口産業(株)から再生骨材を提供して頂いた。また元福岡大学工学部社会デザイン工学科の中村蒼氏(現在、株式会社熊谷組に所属)には実験の実施にあたり多大なご協力を頂いた。ここに付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) A.M.Neville, 三浦尚訳:ネビルのコンクリートバイブル, 技術堂出版, pp.257-258, 2004
- 2) 徳田 弘, 加賀谷 誠, 川上 洵:振動締め固めによるコンクリート骨材の分離程度の測定と二, 三の考察, 材料, Vol.35, No.397, pp.101-107, 1986
- 3) 道正 泰弘:低品質再生骨材を置換したコンクリートの諸性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1393-1398, 2015
- 4) 平田 大希, 橋本 親典, 横井 克則, 渡邊 健:多量のフライアッシュおよび高炉スラグ細骨材の使用による低度処理再生粗骨材コンクリートの耐凍害性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.1785-1790, No.1, 2016
- 5) 辻本和敬, 山田悠二, 橋本親典, 近藤拓也:高炉スラグ細骨材と低度処理再生粗骨材を用いたコンクリートの施工性能および急速凍結融解抵抗性に関する検討,セメントコンクリート論文集,Vol.71,No.1,pp.595-602, 2018
- 6) 原 勝哉, 橋本 親典, 渡邊 健, 石丸 啓輔:可視化手法によるボックス形充填試験装置を充填するフレッシュコンクリートの流動挙動に対する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1027-1032, 2015