

論文 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能および強度に関する実験的検討

岡 友貴*1・山田 悠二*2・橋本 親典*3・渡邊 健*4

要旨: 密度が普通骨材より大きい非鉄スラグ細骨材 (FNS および CUS) は, 重量コンクリートとして防波堤のコンクリート工事に利用されているが, 施工性能に関する研究は皆無である。本研究では, タンピング試験および加振ボックス充填試験を用いて, 非鉄スラグ細骨材コンクリートの施工性能の評価を行った。その結果, 通常のコンクリートの間隙通過速度と比較して, FNS 骨材コンクリートでは速くなり, CUS 骨材コンクリートでは遅くなった。しかしながら, 非鉄スラグ細骨材容積混合率 50%以下であれば, 種類に関係なく, 普通コンクリートと同等以上の施工性能を有することが明らかになった。

キーワード: 加振ボックス充填試験, タンピング試験, 間隙通過速度, 非鉄スラグ細骨材

1. はじめに

近年コンクリート分野では, 天然骨材の枯渇や産業廃棄物の低減のため, 産業副産物の有効利用が期待されている。産業副産物のうち, コンクリート材料として JIS に制定されているものとしては, 高炉スラグ骨材, フライアッシュ, 再生骨材, 非鉄スラグ骨材, 電気炉スラグ骨材がある。フライアッシュや再生骨材については関心が高く研究報告も多くなされている。一方, 非鉄スラグ細骨材に関しては報告が少ない。非鉄スラグ細骨材としては, フェロニッケルスラグ細骨材 (以降 FNS と称す) や銅スラグ細骨材 (以降 CUS と称す) が存在し, これらはフェロニッケルや銅を生成する際に産業副産物としてそれぞれ年間 200 万 t 排出されている¹⁾²⁾。コンクリート塊の年間排出量は 3000 万 t と多い印象を受けるが, これらの約 90%は道路地盤材や埋め戻し材に用いられていることを考えれば, FNS や CUS の排出量も決して看過できる数字ではない。またこれらの非鉄スラグ骨材はコンクリート用骨材としてや道路用材としての実績はあるものの, 実際には報告事例が少ない。また施工性能に関する報告は極めて少ないのが現状である。

非鉄スラグ細骨材を用いた場合の特徴としては, 密度が大きいことや吸水率が小さいこと, また微粒分量が多いことなどが挙げられる。FNS や CUS は JIS に制定されているが, 非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針では, CUS を使用する場合に, 過大なブリーディングによる沈下ひび割れを懸念して, 普通細骨材に対する混合率を, FNS を用いたコンクリートでは 50%, CUS を用いたコンクリートでは 30%以下にすることを推奨している。しかしながら, それらの混合率を推

奨しているのはブリーディングについて懸念されているからであり, その他の施工性能に関しては明記されていない¹⁾²⁾。今後, 非鉄スラグ骨材の用途拡大を図るうえでブリーディング性状以外の施工性能についても検討する必要がある。

本研究では, 非鉄スラグ細骨材を使用したコンクリートに対し, ブリーディング性状だけでなく鉄筋間の間隙通過性や振動条件下での変形性についても検討を行った。間隙通過性や振動条件下での変形性を評価するにあたり, 土木学会の報告書で提案されているタンピング試験および加振ボックス充填試験を行った。³⁾また, 従来の指針¹⁾²⁾が制定・発刊されたころは, 砕石砕砂コンクリートが主流ではなく, 砕石砕砂コンクリートに非鉄スラグ骨材を用いた場合の強度発現特性についての報告例は少なかった。現在, 全国的に広く普及している砕石砕砂コンクリートを対象に非鉄スラグ細骨材コンクリートの強度発現特性の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用骨材を表-1 に示す。セメントは製造会社が異なる 3 社の普通ポルトランドセメントを 1:1:1 の割合で混合して用いた。細骨材は普通細骨材として千葉県君津市産砕砂を, 非鉄スラグ細骨材として京都府大江山産 FNS と青森県八戸市産 FNS, 愛媛県東予市産 CUS, 福島県いわき市産 CUS を用いた。非鉄スラグ細骨材は, 粒度および粒径調整されており, JISA5011-2 および JISA5011-3 に規定される FNS および CUS を用いた。表の記号の後に続く数字は各細骨材の最大寸法を表しており, CUS に関して

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 (学生会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 准教授 博 (工) (正会員)

表-1 使用骨材

材料名	記号	産地	物性値
砕砂	N	君津	密度2.67g/cm ³ , 吸水率1.06%, F.M.2.45, 実積率61.2%
フェロニッケル スラグ細骨材	FNS1.2	大江山	密度3.08g/cm ³ , 吸水率0.31%, F.M.2.08, 実積率59.7%
	FNS5.0	八戸	密度3.08g/cm ³ , 吸水率1.78%, F.M.2.75, 実積率67.1%
銅スラグ細骨材	CUS2.5a	小名浜	密度3.53g/cm ³ , 吸水率0.10%, F.M.2.57, 実積率63.4%
	CUS2.5b	東予	密度3.60g/cm ³ , 吸水率0.11%, F.M.2.76, 実積率61.7%
5号砕石	G1	青梅	密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.51%, F.M.6.99, 実積率57.8%
6号砕石	G2		密度2.66g/cm ³ , 吸水率0.34%, F.M.6.48, 実積率58.6%

は、最大寸法が2種類とも2.5mmであるため、小名浜産のものをa、東予産のものをbとした。混和剤は、アルキルエーテル系AE剤およびリグニンスルホン酸化合物AE減水剤、ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤を用いた。

コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの配合は、既往の報告⁴⁾より普通コンクリートにおいて充填不良のリスクおよび材料分離のリスクが最小になるように単位セメント量を350kg/cm³とし、目標スランブを10±1.0cm、目標空気を5.0±1.0%とした。また単位水量を165kg/cm³に設定した。同一スランブおよび空気を得るために細骨材率は細骨材の粗粒率によって調整した。

FNSと普通細骨材を混合したコンクリートの混合率は、30%、50%、100%の3水準、CUSと普通細骨材を混合したコンクリートの混合率は、50%、100%の2水準とした。FNSに関しては、それぞれの粒度分布を土木学会が推奨する標準粒度分布の範囲内に納まるようにするため、混合率30%のものはFNS1.2を用いて混合し、混合率50%および100%のものはFNS5.0を用いて混合した。粗骨材は粒径が10mm~20mmの5号砕石(G1)と粒径が5mm~10mmの6号砕石(G2)を施工編に示される普通骨材の標準粒度曲線に収まるように4:6の割合で用いた。小名浜産CUSを混合したコンクリートについてはAE減水剤を用いても目標スランブに達しなかったため、高性能AE減水剤を用いた。またFNS、CUSの混合率50%および100%の配合の空気量に関しては、それぞれJIS1128

に従い骨材修正係数を算出し、実測値から引いた値を表記している。

2.2 試験方法

(1) フレッシュ性状試験

各配合に対し、コンクリートのフレッシュ性状試験としてスランブ試験をJIS A 1011に従い、空気量試験をJIS A 1128に従い、ブリーディング試験をJIS A 1123に従って行った。それぞれ目標スランブ、目標空気量を満たしたことを確認し、施工性能評価試験としてタンピング試験および加振ボックス充填試験を行った。各配合の空気量およびスランブ実測値は表-2に示す。

(2) タンピング試験

タンピング試験の試験状況を写真-1に示す。タンピング試験は既往の研究³⁾を参考とし、以下の手順で行った。

厚さが1~2cmになるように表面乾燥状態の砂を敷き詰め、その上にスランブ板を置き、スランブ試験を行う。スランブおよびスランブフローを測定後、目標スランブを満たしたことを確認し、質量1.2kgの木製棒をスランブコーンの中心から30cmの四隅に1回ずつ順次落下させる。四隅に1回ずつ落下させる動作を1サイクルとし、2サイクル、合計8回落下させる動作を行った後、再度スランブおよびスランブフローを測定する。この手順を木製棒の合計落下数が48回となるまで繰り返し行い、48回の時点で試験終了とした。またスランブおよびスランブフロー変形量を測定する際、コンクリートが材料分離していないかを目視確認により行う。

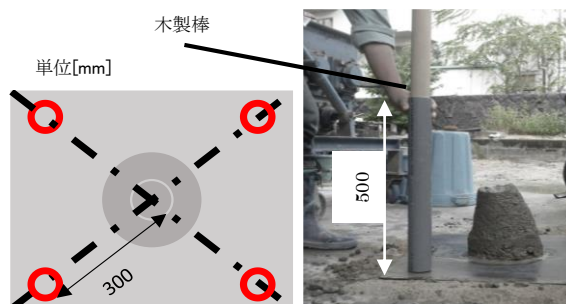


写真-1 タンピング試験

表-2 実験に供した各コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤			スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリートの密度(g/cm ³)	
			W	C	S			G		SP剤	AE減水剤				AE剤
					N	FNS	CUS	G1	G2						
N	47	45.5	165	350	810	-	-	390	584	-	0.514	0.002	10	5.0	2.38
FNS30		43			536	266	-	407	611	-	0.650		10	5.0	2.39
FNS50		46			409	470	-	386	579	-	0.450		9.0	5.5	2.44
FNS100		47			-	959	-	379	568	-	0.400		11	5.5	2.50
CUS50a		46			409	-	542	386	579	-	0.450		10	5.0	2.54
CUS100a		48			-	-	1131	372	557	-	0.450		10	6.0	2.66
CUS50b		46			409	-	540	386	579	0.20	0.400		10	6.0	2.52
CUS100b		47			-	-	1104	379	568	0.25	0.400		10	6.0	2.66

木製棒の落下回数 1 回当たりのスランブ増加量をスランブ変形係数、木製棒の落下回数 1 回当たりのスランブフロー増加量をスランブフロー変形係数とした。

(3) 加振ボックス充填試験

本実験で用いるボックス形試験器を写真-2 に示す。加振ボックス充填試験は既往の研究³⁾を参考とし、以下の手順で行った。試験器具は JSCE-F 511 高流動コンクリートの充填装置を用いた間隙通過性試験方法(案)に記載されているボックス形容器(以降充填装置と称す)、高周波棒状バイブレータ(周波数: 220~270Hz 程度、直径: 28mm 程度、以降バイブレータと称す)を用いた。

まず充填装置を防振用ゴムマットの上に水平になるように設置し、充填装置に仕切りゲートおよび流動障害 R II (D13×3 本)を取り付けた仕切り板を取り付ける。なお、充填装置の内面および仕切りゲート、流動障害は十分に湿らせておく。仕切りゲートを閉じた状態で A 室にコンクリートを 3 層に分けて詰める。この時、1 層ごとに充填装置を左右に 1 往復程度揺らし、大きな空隙を作らないようにする。上面をこてでならし、上面の中央にバイブレータを底面から 100mm の位置まで静かに挿入する。次に仕切り板を引き上げる。このとき、コンクリートの流動条件を目視により確認し、B 室へのコンクリートの流入がないこと、または流入が停止したことを確認し、バイブレータを加振する。バイブレータの加振と同時に時間の計測を開始する。B 室の底面から 190mm および 300mm 高さに到達するまでの時間を記録し、コンクリートの充填高さが 300mm に到達した時点で加振を停止し、試験終了とした。

充填高さ 190mm から 300mm までのコンクリートの速度を間隙通過速度(以降 V_{pass} と称す)とした。

(4) 強度性状試験

強度性状試験として、JIS A 1108 に従って、コンクリートの圧縮強度試験を材齢 7 日、28 日、91 日の 3 水準で行った。各材齢でそれぞれ 5 本の円柱供試体(高さ 200mm、直径 100mm)を作製し、それぞれ平均した値を圧縮強度

とした。

また材齢 28 日の供試体については、流動障害通過前後の強度のばらつきを確認するため、A 室側の上層、中層、下層、B 室側の上層、下層から各層毎に 1 本ずつの供試体を作製し、圧縮試験を行った。同時に供試体の質量と容積から見かけ密度を計測し、ボックス内の見かけ密度分布を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 タンピング試験

図-1 に各配合のスランブ変形係数を、図-2 に各配合のスランブフロー変形係数を示す。

タンピング試験を行う際に材料分離の有無を目視確認により行ったが、全ての配合において材料分離が確認されることはなかった。

スランブ変形係数、スランブフロー変形係数ともに FNS30 が最も大きな値を示した。FNS30 に用いた FNS は最大寸法が小さい骨材であるため、変形抵抗性が小さくなり、スランブ変形係数およびスランブフロー変形係数が大きくなったと考えられる。

図-3 にスランブ変形係数およびスランブフロー変形係数の関係を示す。既往の研究³⁾より普通コンクリートである場合、スランブ変形係数とスランブフロー変形係数には一定の関係がある。CUS を混合したコンクリートは N と比べ、FNS30 以外は、産地や混合率に関わらずスランブ変形係数とスランブフロー変形係数は、N よりも小さい。また、スランブ変形係数の増加量に対して、スラ

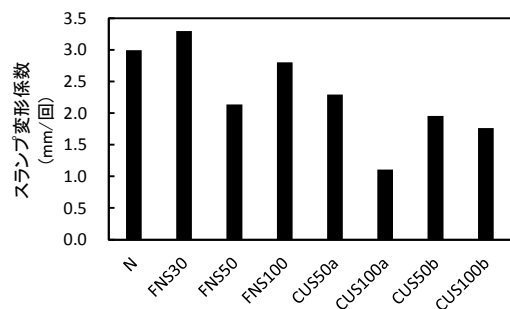
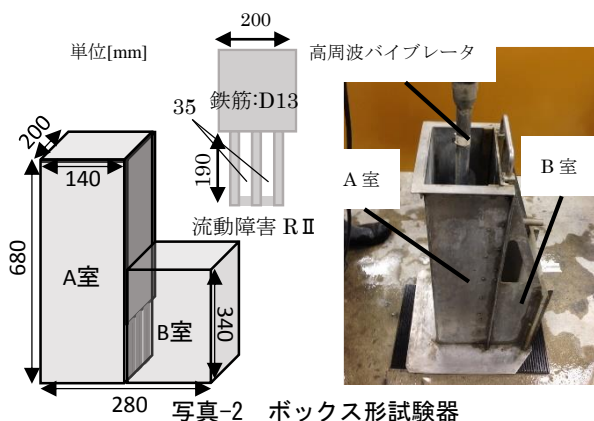


図-1 各配合のスランブ変形係数

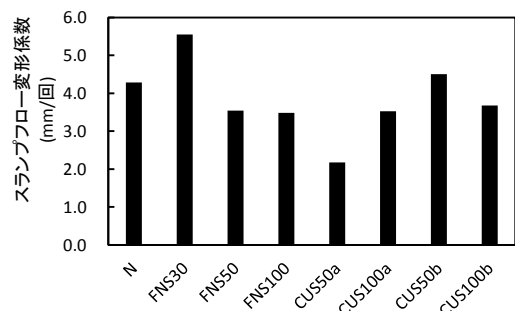


図-2 各配合のスランブフロー変形係数

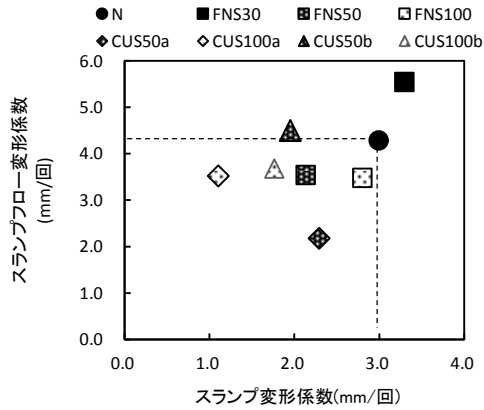


図-3 スランプフロー変形係数とスランプ変形係数の関係

ンプフロー変形係数の増加量の方が大きくなる傾向を示した。これはNのコンクリート密度と比較してコンクリート密度が大きいことで、コンクリートの自重によりフローが広がりやすくなったと考えられる。

3.2 加振ボックス充填試験

図-4 に各配合の V_{pass} を、図-5 に各配合の充填高さ190mm および 190~300mm までの到達時間を示す。

非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートは混合率が大きくなるに従い、 V_{pass} は遅くなる傾向にあった。これは各コンクリートの比重が原因だと考えられ、比重が大きい程、 V_{pass} は遅くなる傾向にあった。

FNSを混合したコンクリートはNよりも比重が大きいにも関わらず V_{pass} は速く、混合率が小さくなるに従い、 V_{pass} は速くなる傾向にあった。これはFNSの骨材形状が丸みを帯びており、鉄筋間で閉塞することなくB室に充填されたためと考えられる。

CUSを混合したコンクリートの V_{pass} は、混合率に関わらずNよりも遅くなった。充填高さ190mm および190~300mm までの到達時間を見ると、CUSを混合したコンクリートについて、190mm までの到達時間はFNS100と大差ないが、190~300mm までの到達時間はCUSを混合したコンクリートの方が長くなる傾向にあった。これは比重が大きくなることやCUSの形状が角張っていることでCUS自体のせん断抵抗性が大きくなり、コンクリートが流動し難くなったと考えられる。これらが原因でB室下部にコンクリートが停滞し、到達時間が長くなったと考えられる。

NおよびFNSを混合したコンクリートの190mm および190mm~300mm までの到達時間にほとんど差はなかったが、CUSを混合したコンクリートは、190mm 到達時間よりも190mm~300mm までの到達時間の方が長くなった。

図-6 に各配合の V_{pass} とスランプフロー変形係数の関係を、図-7 に各配合の V_{pass} とスランプ変形係数の関係を示す。

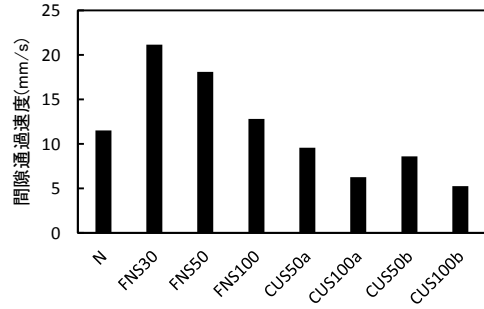


図-4 各種配合の間隙通過速度

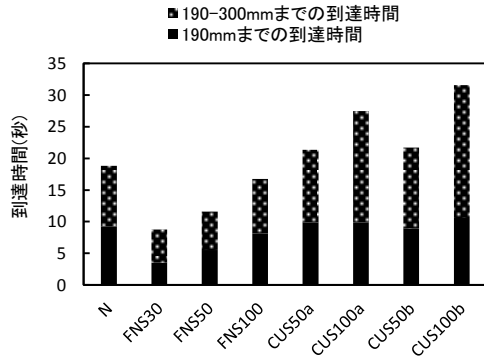


図-5 充填高さ190mm および190~300mm までの到達時間

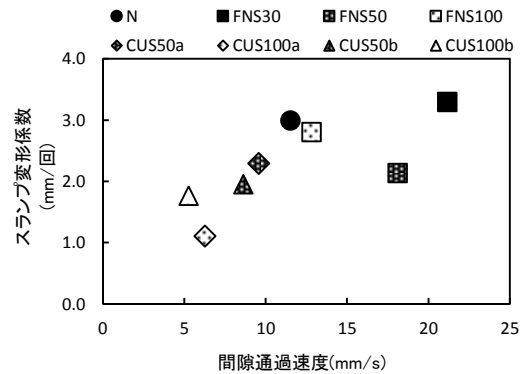


図-6 間隙通過速度とスランプ変形係数の関係

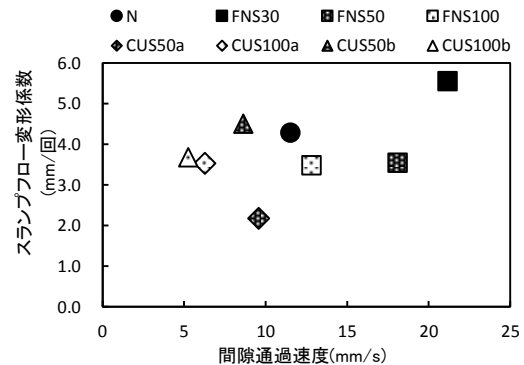


図-7 間隙通過速度とスランプフロー変形係数の関係

V_{pass} とスランプフロー変形係数には、ある程度の相関性があることが土木学会の報告書³⁾で示されている。しかしながら、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートでは両者にあまり相関性は見られなかった。加振ボック

ス充填試験は高周波バイブレータによる振動を行うが、それに対してタンピング試験は木製棒を落下させ、スランプ板を振動させる。また加振ボックス充填試験は直接的にコンクリートの内部から振動を与え、タンピング試験はスランプ板を通して間接的に振動を与える。これらの振動条件の違いが要因で V_{pass} とスランプフロー変形係数に相関が認められなかったと考えられる。また FNS30 および FNS50 の配合を除くと、スランプフロー変形係数と V_{pass} の相関性よりもスランプ変形係数と V_{pass} の関係の方が、相関性が強い。よって、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートの V_{pass} はスランプ変形係数で定性的に評価できる可能性があると考えられる。

FNS を混合したコンクリートと CUS を混合したコンクリートで、 V_{pass} に大きく違いが現れた理由として、非鉄スラグ細骨材自体の形状の相違もあるが、密度による振動伝達の違いが影響したと考えられる。すなわち、FNS では、密度が N より大きく CUS より小さいことで振動伝達しやすくなり、 V_{pass} が速くなった。一方、CUS では、密度が著しく大きいことで、振動伝達するまでの外力がバイブレータでは足りずに、十分に振動伝達されなかったことで、結果として V_{pass} が遅くなったと考えられる。

3.3 圧縮強度試験

図-8 に各配合の材齢 7 日、28 日、91 日の圧縮強度を示す。材齢 7 日の各配合の圧縮強度は概ね同程度であった。材齢 28 日における圧縮強度について、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートは N と比べ、大きくなる傾向にあった。また非鉄スラグ細骨材の混合率が大きくなるに従い、圧縮強度は大きくなる傾向を示した。また材齢 91 日においても、材齢 28 日の圧縮強度と同様の傾向を示した。従来の指針¹⁾と同様な傾向であることが確認された。

図-9 に各配合のボックス容器内 A 室下部および B 室上部のコンクリートの見かけ密度を、図-10 に圧縮強度を示す。

ほとんどの配合で、B 室上部のコンクリート密度よりも A 室下部のコンクリート密度の方が大きな値を示す傾向にあった。B 室上部より A 室下部のコンクリート密度の方が大きいのは、加振時に密度の重い骨材よりも密度の軽いモルタル分が優先的に上部に浮上するためと考えられる。

圧縮強度に関しては、B 室上部の圧縮強度よりも A 室下部の圧縮強度の方が大きな値を示す傾向にあった。コンクリート密度が大きな値を示した配合は、圧縮強度も同様に圧縮強度が大きくなった。しかしながら、いずれの配合も B 室上部の圧縮強度は A 室下部の圧縮強度の 8 割程度を満たしていた。既往の研究⁵⁾では強度のばらつきが 8 割程度を満たしていれば材料分離による影響は普

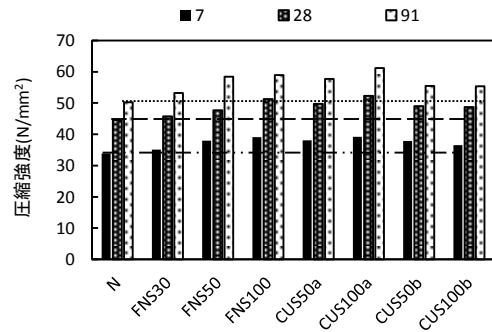


図-8 各種配合の圧縮強度

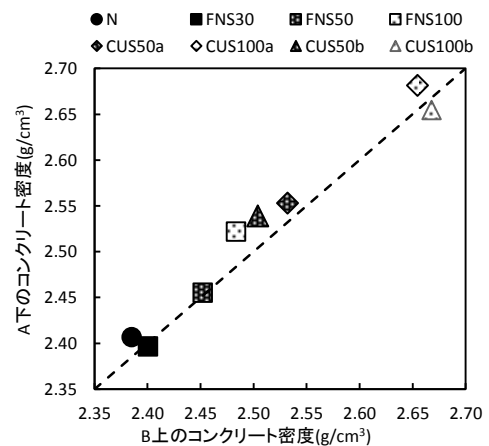


図-9 ボックス容器内の見かけ密度分布

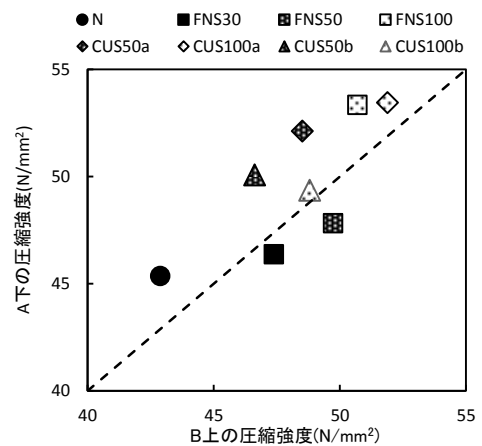


図-10 ボックス容器内の圧縮強度分布

通骨材を使用したコンクリートと相違がないとされているために全ての配合において施工性に問題はないと考えられる。

以上から、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートは N と比べ、材齢 28 日および 91 日では混合率が大きくなるに従い、圧縮強度は大きくなる傾向にあった。また加振ボックス充填試験後の A 室下部と B 室上部の圧縮強度のばらつきは N とほとんど相違なく、非鉄スラグ細骨材を混合したことによる材料分離に関する影響は N と同程度であると考えられる。

3.4 ブリーディング試験

図-11 に各配合のブリーディング量を示す。

非鉄スラグ細骨材の混合率が 50%の配合の終局ブリーディング量および終局時間は N と同程度の値を示した。FNS30 および FNS100 は N と比べ、ブリーディング量および終局時間は増加する傾向にあった。

CUS100 では産地に関わらず、終局ブリーディング量は N よりも大きい傾向を示したが、終局時間では N 配合とそれほど大きな差はなかった。CUS100 は比重が全配合の中でも 1 番大きいので、ブリーディングが短時間で多く出たと考えられる。また東予産の CUS を混合したコンクリートは小名浜産の CUS を混合したコンクリートよりも終局時間が長く、ブリーディング量もやや多くなる傾向があった。

FNS および CUS を用いたコンクリートのブリーディング性状は、産地の影響を受けやすいと考えられる。非鉄スラグ細骨材は産業副産物であり、コンクリート用骨材に加工する際、各工場で製造過程や水洗の程度、微粒子量の調整量は異なっており、FNS 自体の品質が異なるため、産地間でこのような差が出たと考えられる。

実施工に用いる場合、ブリーディング量の上限値は $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ である。上限値を超える配合もあったが、混合率やその他の配合条件を調整することでブリーディング量を上限値以下に抑えられると考えられる。

以上から、非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートの終局ブリーディング量は増加する傾向にあり、従来の研究報告⁹⁾と同様の傾向を示した。しかしながら、終局時間に関しては FNS を混合したコンクリートは延長し、CUS を混合したコンクリートは N と同程度であった。

非鉄スラグ細骨材の混合率が 100%の場合のブリーディング量は、極端に多くなるわけではなかった。しかしながら、コンクリートの比重が大きくなることから打込み高さや打込み速度の影響が大きくなる可能性があるため、これらの影響について今後検討していきたい。非鉄スラグ細骨材を混合したコンクリートは、配合を調整することでブリーディング量を低減できると考えられる。

4. まとめ

- (1) FNS を混合した場合の V_{pass} は混合率に関わらず普通コンクリートよりも速くなった。また CUS を混合した場合は普通コンクリートよりも遅くなった。
- (2) 加振ボックス充填試験において、試験後の A 室および B 室のコンクリートの圧縮強度のばらつきはそれぞれの 8 割以内であり、材料分離による影響は N と相違ないと考えられる。
- (3) 非鉄スラグ細骨材の混合率 50%以下のコンクリートのブリーディング量および終局時間は普通コン

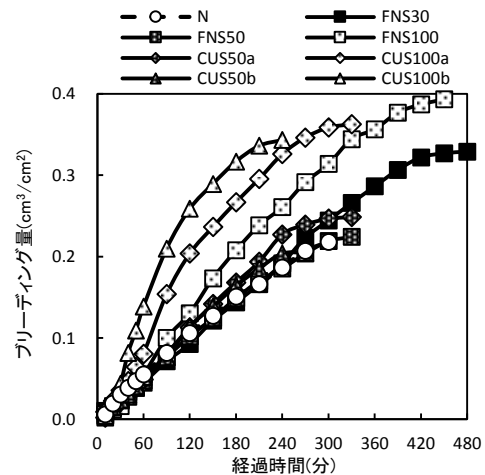


図-11 各配合のブリーディング量

クリートと同程度だった。

- (4) 非鉄スラグ細骨材の容積混合率が 50%以下の配合の施工性能および圧縮強度は、普通コンクリートと同程度であった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、土木学会コンクリート委員会 2 種委員会「非鉄スラグ骨材コンクリート研究小委員会」(委員長 宇治公隆 首都大学東京大学院教授) から各試料の提供を受けました。ここに付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー 91，1998.1
- 2) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー91，1998.1
- 3) 土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会（341 委員会）委員会報告書，コンクリート技術シリーズ 94，2011.5
- 4) 土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会（341 委員会）第 2 期委員会報告書，コンクリート技術シリーズ 102，2013.11
- 5) 原勝哉，橋本親典，渡邊健，石丸啓輔：配筋条件がコンクリートの施工性および硬化性状に与える影響，土木学会四国支部第 20 回技術研究発表会講演概要集，pp247-248，2014.5
- 6) 石丸啓輔，水口裕之，橋本親典，上田隆雄，藤田和博，近江正明：銅スラグおよびⅡ種フライアッシュを細骨材の一部に置換して用いたコンクリートの性状，材料/日本材料学会[編]，第 54 巻，第 8 号，pp828-833，2005.8