

論文 高密度スラグ骨材を用いた水中不分離性コンクリートの基本性能および施工性

宮根 正和*1・福手 勤*2・森田 浩史*3・審良 善和*4

要旨: 筆者らはこれまでに、銅スラグおよび電気炉酸化スラグ骨材を用いた水中不分離性コンクリートの配合および室内実験規模での水中での流動性について検討してきた。その結果、いずれのスラグ骨材を使用しても水中気中強度比は0.8以上を有しており、単位容積質量 $3.0t/m^3$ の重量コンクリートの製造が可能であった。本研究ではポンプ圧送試験を実施し、ポンプ圧送前後の品質変化においては、スランプフローやスラグ骨材の種類によって、強度や懸濁物質量に影響を与えることがわかった。コア供試体では各配合での差異は見られたが、流動性に留意することで、スラグ骨材は水中不分離性コンクリートに適用可能と考えられた。

キーワード: 銅スラグ, 電気炉酸化スラグ, 水中不分離性コンクリート, 重量コンクリート, ポンプ圧送

1. はじめに

産業副産物である高密度のスラグ骨材の利用は、産業副産物の再資源化とともにコンクリートの重量化を図ることができる。この重量コンクリートを水中不分離化させることで、水中の基礎や構造物の安定性向上や、施工性が向上するものと考えられる。既往の研究¹⁾では、銅スラグを大量混合した普通コンクリートのポンプ圧送試験が行われているが、銅スラグ細骨材の全量置換までは至らず、使用量が制限されることが確認されている。そこで筆者らはこれまでに、スラグ骨材を全量置換した水中不分離性コンクリートの配合検討および小型の水中流動試験を実施し、スラグ骨材を全量置換した水中不分離性コンクリートの品質および流動性は、天然骨材を使用した一般的な水中不分離性コンクリートと同等の品質および流動性を得られることを確認してきた²⁾³⁾。

本研究では、これまでの基本性能および室内での小型の水中流動性試験結果を基に、高密度スラグ骨材を使用した水中不分離性コンクリートのポンプ圧送による実大規模の水中流動性実験を行い、施工性の確認および水中流動に伴う品質安定性の確認を行った。また、型枠に打ち込んだ後にコア供試体を採取し、フレッシュ・硬化性状、施工性の観点からスラグ骨材が水中不分離性コンクリートの骨材として適用可能であるかの検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。細骨材には単一粒径の銅スラグ(CuS5-0.3)、粒度調整された銅スラグ(CuS2.5)ならびに電気炉酸化スラグ(EFS)を使用した。粗骨材には電気炉酸

化スラグ粗骨材(EFG)を使用した。なお、混和剤としてセルロース系水中不分離性混和剤(Ad1)、水中不分離性混和剤助剤(Ad2)、およびAE減水剤(Ad3)を使用した。

表-2 に骨材試験の結果を示す。実験に用いたスラグ骨材は天然骨材(NS)と比較し、約1.3倍の密度であった。また、CuS5-0.3は粗粒率が他の細骨材と比較して大きく、また微粒分量が少ない等の結果が見られた。

(2) 配合

表-3 にコンクリートの示方配合を示す。全ての配合において水結合材比は55%、粗骨材容積一定で、設計基準強度は $18N/mm^2$ とした。目標スランプフローは $500 \pm 50mm$ 、目標空気量は4.0%以下とした。

2.2 室内における小型水中流動試験

後述する実機による検討の前に、異なるスラグ骨材を用いた水中不分離性コンクリートの流動特性を確認するため、L型の型枠(W:200mm×L:800mm×H:500mm)を用いた検討を実施した。以下に検討項目を示す。

表-1 使用材料

	記号	種類	備考
練混ぜ水	W	上下水道	-
セメント	C	高炉セメントB種	密度 $3.04g/cm^3$
細骨材	NS	陸砂	
	CuS5-0.3	銅スラグ(単一粒径)	水砕処理 産地:S
	CuS2.5	銅スラグ(粒度調整)	水砕処理・破砕処理 産地:O
	EFS	電気炉酸化スラグ	急冷・破砕処理 産地:A
粗骨材	NG	碎石	
	EFG	電気炉酸化スラグ	急冷・破砕処理 産地:A
混和剤	Ad1	水中不分離性混和剤	セルロース系
	Ad2	水中不分離性混和剤助剤	ポリアミドエラストマー系
	Ad3	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体 遅延型

*1 東洋大学大学院 工学研究科 環境デザイン専攻 (学生会員)

*2 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科 教授 工博 (正会員)

*3 東洋建設(株) 美浦研究所 研究員 (正会員)

*4 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 工博 (正会員)

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の確認はスランブフロー、空気量、懸濁物質量、pHを測定した。なお、試験は水中不分離性コンクリート設計・施工指針（案）「以下、施工指針」⁴⁾を参照とした。また、水中でのL型フロー試験では、打込み開始から10分経過後の充填状況を確認した。

(2) 硬化性状

施工指針に準拠し、気中・水中打設の圧縮強度および水中気中強度比を確認した。なお、脱型後は材齢28日目で標準養生を行った。

2.3 実機によるポンプ圧送試験

実機によるポンプ圧送試験を行った。生コンプラントでは、特殊骨材を用いたコンクリート製造ができなかったため、生コンプラントで製造したセメントペーストを積載したアジテータ車のホッパー部からスラグ骨材およびその他材料を投入後、アジテータ車内で練り混ぜを行った。練混ぜ時間は6分とした。これは、練混ぜ効率等を考慮して決定した。以下に検討項目を示す。

(1) フレッシュ性状

ポンプ圧送前後でのフレッシュ性状の変化を確認した。検討項目は室内試験と同様にスランブフロー、空気量、懸濁物質量、pHである。

(2) 水中流動性状

写真-1にポンプ圧送試験の打込みの状況を示す。写真-1に示す型枠(B:0.6m×L:5.0m×H:0.9m)を用いて、ポンプ圧送による実規模での水中流動性状試験を行った。検討項目は打込み時から流動停止後（硬化後）までの流動勾配とした。なお、型枠の寸法は施工指針を参考に決定し、型枠内は水で満たした状態で圧送試験を行った。打込みに使用したポンプ車は最大吐出量 100m³/h×6.1Mpa、シリンダー径×ストローク長はφ205×1700mmである。配管には5B(125A)、先端ホースには4B(100A)を使用した。なお、ポンプ圧送は標準圧送とし、ブームの姿勢は先端ホースの振れ幅が最小限となるよう、施工指針⁵⁾を参考に設置した。打込み方向は一方のみとし、型枠端部より片押しで打込みを行った。打込み方法は示方書に準拠し、静水中で水中落下高さが50cm以下となるようした。

(3) 硬化性状

型枠脱型後にコア採取を行い、材齢28日の圧縮強度および単位容積質量を測定した。コア採取位置は、ポンプ圧送地点から1m間隔で型枠末端部まで6ヶ所をそれ

ぞれ上段、中段、下段で採取した。上段は天端から10cm下部、中段は型枠下部から45cm、下段は型枠下部から10cmの位置にコアビットの中心を取り、長手方向および高さ方向のコンクリートの性状を確認できるようにφ100mm×600mmのコア供試体を1試験体あたり18本採取した。また、後述する写真-2にコア採取位置を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 室内試験における小型水中流動性状試験

(1) フレッシュ性状

表-4に室内試験でのコンクリートのフレッシュ性状を示す。スランブフローが大きくなると、懸濁物質量も大きくなるという相関性があるものの、C2E配合はその他の配合よりもスランブフローは小さかったが、懸濁物質量が大きくなる結果となった。これは、CuS5-0.3が単一粒径であり粗粒率が大きいこと、また銅スラグの特徴であるガラス質の表面によって、セメントペーストとの付着性が他の配合よりも低いことが起因したと考えられる。一方、同材質である粒度調整された銅スラグ(CuS2.5)

表-2 骨材試験

	NS	CuS5-0.3	CuS2.5	EFS	NG	EFG
表乾密度(g/cm ³)	2.60	3.53	3.54	3.91	2.66	3.73
吸水率(%)	1.86	0.28	0.41	1.31	0.58	1.33
微粒分量(%)	1.2	0.7	5.6	10.5	0.1	0.7
単位容積質量(kg/L)	1.73	2.07	-	2.63	1.61	2.10
実積率(%)	64.8	58.7	-	68.3	62.8	57.0
粗粒率(%)	2.66	3.81	2.53	2.76	6.71	6.59

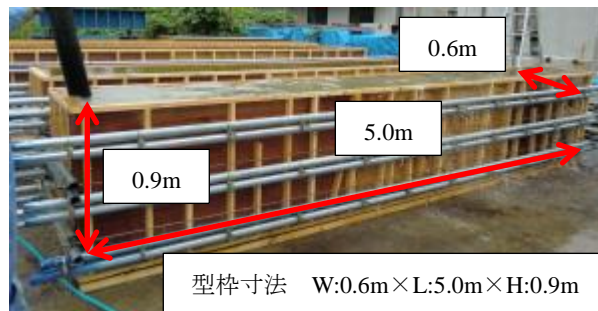


写真-1 ポンプ圧送試験の打込み状況

表-4 フレッシュ性状

配合名	SF (mm)	空気量 (%)	懸濁物質量 (mg/L)	pH
NN	517.5	2.6	15.0	9.4
C2E	476.5	3.9	84.7	10.6
C3E	485.0	3.6	11.0	11.0
EE	565.0	3.1	9.0	9.0

表-3 コンクリート配合

配合名	使用骨材		W/C (%)	s/a	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Ad1 (kg/m ³)	Ad2 (C×%)	Ad3 (C×%)
	S	G									
NN	NS	NG	55	41.0	220	400	647	966	2.5	0.6	0.8
C2E	CuS5-0.3	EFG		39.0	233	424	808	1339	3.0	1.6	1.0
C3E	CuS2.5	EFG		41.0	220	400	867	1339	2.5	1.4	1.0
EE	EFS	EFG		41.6	216	393	1001	1339	3.0	1.6	1.0

を使用した C3E 配合の懸濁物質量が少なかったのは、CuS5-3.0と比較して粗粒率が小さかったことが要因と思われる。これは、EE 配合にも言えることであり、CuS5-3.0以外の細骨材はいずれも同等の粗粒率であり、懸濁物質量も同等の値を示している。C2E 配合以外に関しては懸濁物質量が施工指針の基準である 50mg/L 以下であり、pH は C2E 配合も含めて 11.0 以下であったため、施工指針の基準である 12.0 以下を満たすこととなった。C2E は、ポンプ圧送試験を行う際懸濁物質量が基準内に収まるよう、スランプフローを小さくする必要があると思われる。

(2) 水中流動性

図-3 に L 型フロー試験の結果を示す。なお、図の①②③は型枠の測点を示す。C2E 配合以外に関しては、NN 配合と同等かそれ以上の流動性が確認でき、10 分経過時点で流動勾配はほぼ水平となり、良好な流動性がえら得ることが確認された。C2E 配合の充填性が若干低下した要因は、CuS5-0.3 は粗粒率が 3.81 であり、天然骨材の粗粒率 2.66 程度と比べ非常に大きいことで、細骨材同士のかみ合わせ効果が作用し、流動性が若干低下したと考えられる。

(3) 硬化性状

図-4 に材齢 28 日の圧縮強度を示す。なお、図中の数字は水中気中強度比を示している。気中強度に関してはスラグ骨材を使用しても、普通骨材を使用した配合と同程度またはそれ以上の圧縮強度となった。EE 配合の強度増加に関しては、潜在水硬性により、NN 配合よりも高い圧縮強度となったと考えられるが、本検討の範囲内では明らかにはできなかった。水中打設の強度に関しては、銅スラグを使用した配合の強度が小さくなったものの、水中気中強度比は 0.8 以上を示した。これは、銅スラグ表面がガラス質であるため、セメントペーストとの付着が低下したものと考えられ、細骨材の粗粒率の違いにより低下割合が変化しているものと推察される。

図-5 に材齢 28 日の単位容積質量を示す。スラグ骨材を使用したことによって、NN 配合の約 1.3 倍の単位容積質量となった。

3.2 実機によるポンプ圧送試験

(1) フレッシュ性状

表-5 にポンプ圧送前後のフレッシュ性状を示す。ポンプ圧送前後でフレッシュ性状に変化が見られ、いずれもスランプフローが大きくなる傾向にあった。EE 配合を除く配合に関しては、3.1 で示した室内試験と概ね同等のフレッシュ性状を示したが、EE 配合のスランプフローは小さな値となった。原因は不明であるが、このコンクリートを用いて水中流動性試験を実施した。

図-6 にポンプ圧送前後のスランプフローと懸濁物質量との関係を示す。ポンプ圧送することでスランプフロ

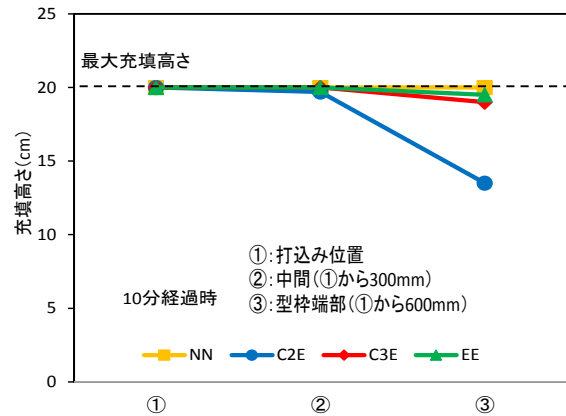


図-3 L 型フロー試験結果

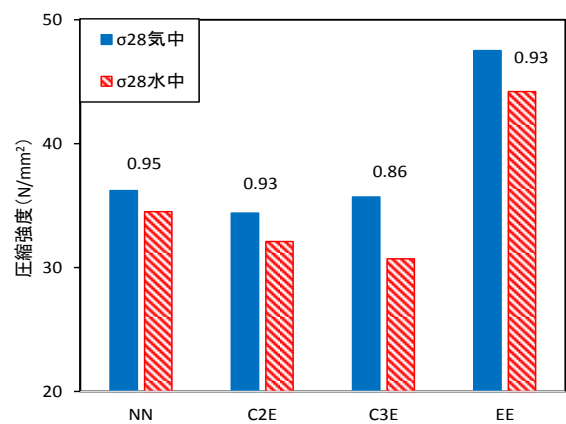


図-4 材齢 28 日圧縮強度

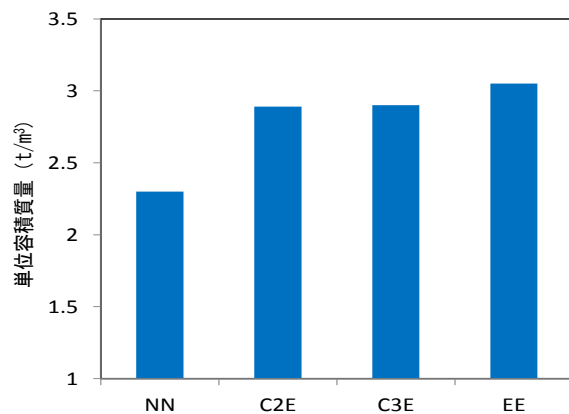


図-5 材齢 28 日単位容積質量

表-5 ポンプ圧送前後フレッシュ性状

配合名	圧送	SF (mm)	空気量 (%)	懸濁物質量 (mg/L)	pH
NN	前	517.5	2.6	10.0	10.67
	後	552.5	1.8	18.0	10.92
C2E	前	450.0	3.4	27.3	11.32
	後	510.0	3.1	53.7	11.71
C3E	前	485.0	2.8	35.3	11.25
	後	485.0	2.8	45.3	11.34
EE	前	435.0	3.0	17.0	11.06
	後	445.0	2.9	22.3	11.24

一と懸濁物質量がともに増大し、これらに相関性が認められた。また、スラグ骨材を用いたことで、NN 配合よりも懸濁物質量の増加割合が大きい傾向にあると推察される。

(2) 水中流動性

図-7 に各配合の流動勾配の経時変化を示す。なお、凡例に示した打込み量の%表示は、各配合のポンプ圧送の最高ストローク回数の割合によって定め、時間は打込み完了からの時間を示す。また、図中の数字は各測定時の平均の流動勾配(%)を示している。打込み時のコンクリートの流動性は、スランプフローが大きかった NN 配合が最もよく、スラグ骨材を用いた配合は若干低下する傾向にあった。NN 配合の場合、打込み完了と同時にほぼ充填が完了する状態であった。一方、銅スラグを用いた C2E および C3E 配合は、30 分経過後にほぼ充填が完了している。また、特にスランプフローが小さかった EE 配合は打込み時からの流動勾配も大きく、最終的な勾配も4%と最も大きな値となった。このことから、スラグ骨材を用いたことにより流動速度が若干遅くなる傾向があるが、基本的にはコンクリート自体の流動性（スランプフロー値）が影響していると考えられる。また、図-8 に圧送後のスランプフローと流動勾配の関係を既往の研究⁶⁾と併

せて示す。EE 配合を除くコンクリートの流動勾配は良好な結果であると考えられる。またこの結果から、スランプフローの低下に伴い流動勾配が大きくなる傾向が認められ、異なる骨材を使用した場合も流動勾配はスランプフローに依存すると推察される。このことから、材料分離を抑制する範囲内でスランプフロー値を大きく設定することで充填性向上を図ることができると考えられる。

(3) 硬化性状

図-9 にコア供試体の流動距離と単位容積質量の関係

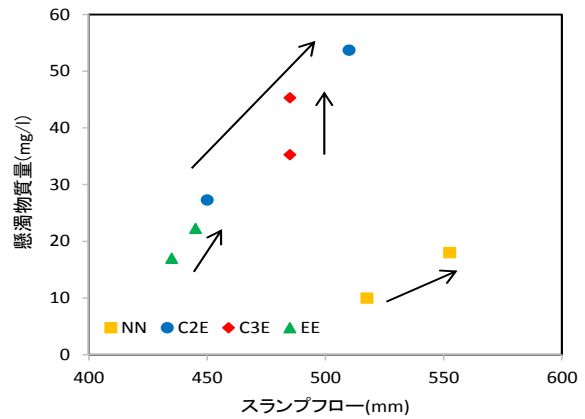


図-6 圧送前後のスランプフローと懸濁物質量の変化

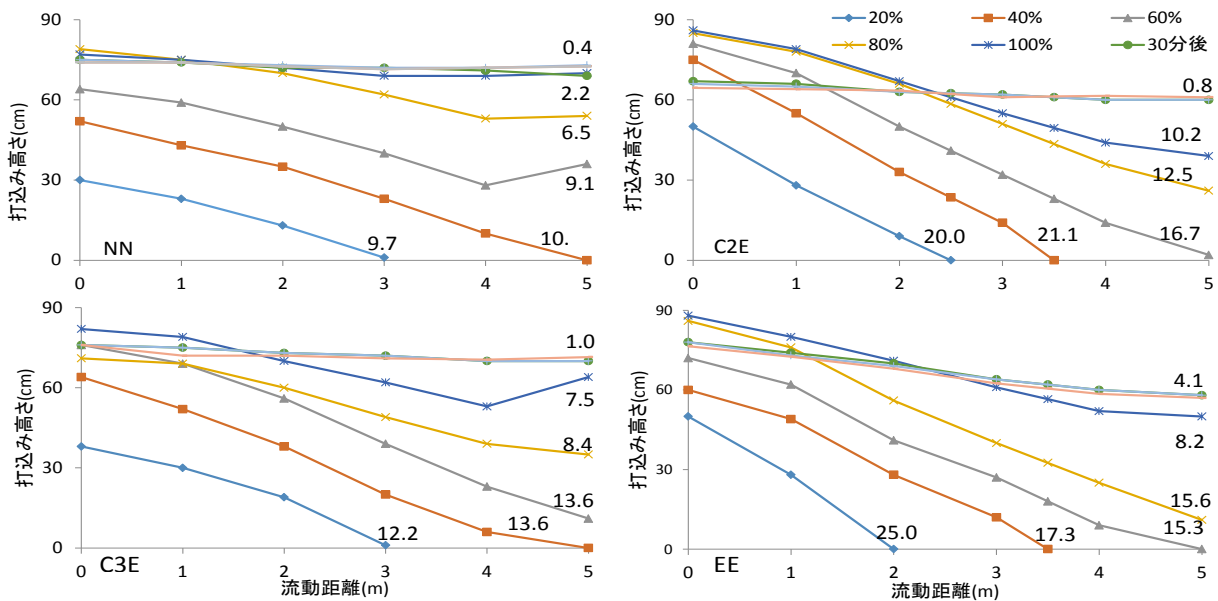


図-7 流動勾配

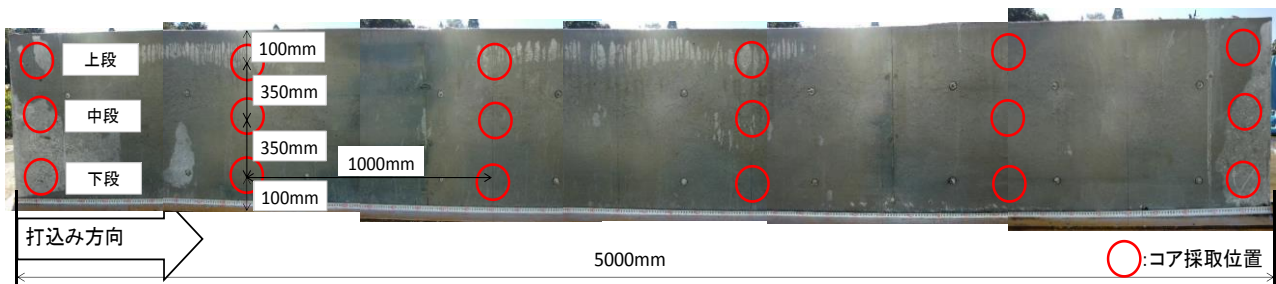


写真-2 型枠脱型後の全景 (C2E)

を示す。なお、図中の赤破線は配合から求めた理論単位容積質量を示している。NN 配合は流動距離に応じて単位容積質量が低下していることが分かる。また、打込み位置から 3m 以降は徐々に単位容積質量が低下する傾向が認められた。C2E 配合は全体的にばらつきが少なく、全域において単位容積質量の減少量が小さかったことから、良好な結果が得られた。C3E 配合は NN 配合と同様に、打込み位置から 3m 以降は徐々に単位容積質量が低下する傾向が認められた。従って CuS2.5 を使用する際には流動距離に留意する必要がある。EE 配合は打込み位置から 3m 以降で上段の単位容積質量の低下がみられたが、流動距離に応じた単位容積質量の著しい低下はみられず、ばらつきも少ない結果となった。NN 配合および C3E 配合の密度の低下は、骨材の粗粒率や、Ad1 の添加量が他の 2 配合と比べて少ないことから、分離抵抗性が若干低下していたためと推察される。一方、微粒分量が多い EFS を使用した EE 配合は単位容積質量の減少は少なかった。これは、Ad1 の添加量が 3.0kg/m^3 と多かったことが要因であると考えられる。また図-6 より、スランプフローを減少させることで懸濁物質量を抑制させることができるため、他の配合と比較して単位容積質量の減少量が小さかったものと推察される。また、水を巻き込んだコアの単位容積質量は 2.92t/m^3 であったため、水の巻き込みは圧縮強度に大きく影響するものと考えられる。従って、高密度スラグ骨材を使用する際の単位容積質量の減少は、Ad1 の添加量の増加とスランプフローの減少によって抑制できるものと考えられる。

図-10 にコア供試体の流動距離と圧縮強度の関係を示

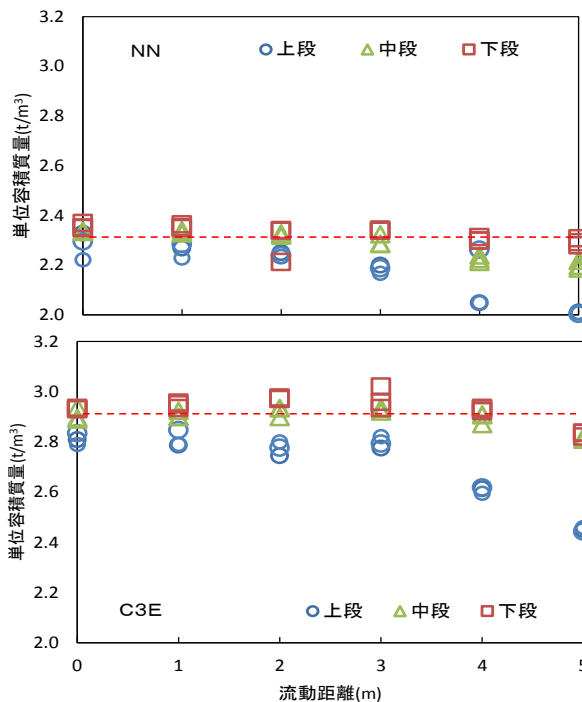


図-9 コア採取による単位容積質量

す。なお、図の赤破線は設計基準強度 18N/mm^2 を仮定したもので、黒線は別途作製した圧送後の水中打設供試体(円柱、標準養生)の圧縮強度を示している。また、写真-2 に脱型後の外観の一例(C2E)と、コア採取位置を示す。NN 配合においては全体的に強度にばらつきがあり、打込み位置から遠くなるにつれて強度もやや低下する傾向が見られた。しかし、採取したコアの外観を目視調査したところ、側面の外観には充填不良等は確認されず、他の配合と比較しても良好な外観であったことから、スランプフロー500mm 時の通常の品質であると考えられる。C2E 配合は他の配合と比較すると圧縮強度のばらつきが少なく、打込み位置からの距離によっても圧縮強度はほとんど変化していないことがわかった。また、同材齢の水中打設の品質管理用供試体の圧縮強度と比較して、採取したコア供試体の圧縮強度は大きかった。これは EE 配

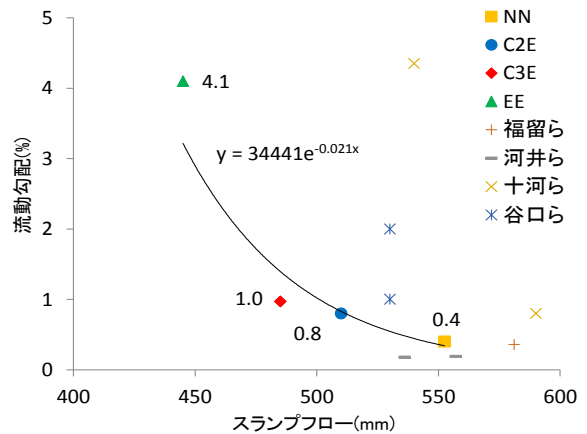
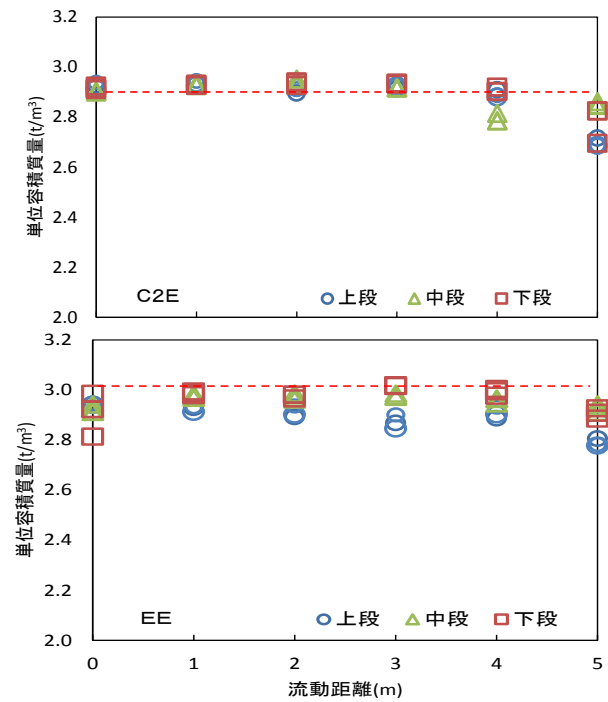


図-8 スランプフローと硬化後の流動勾配



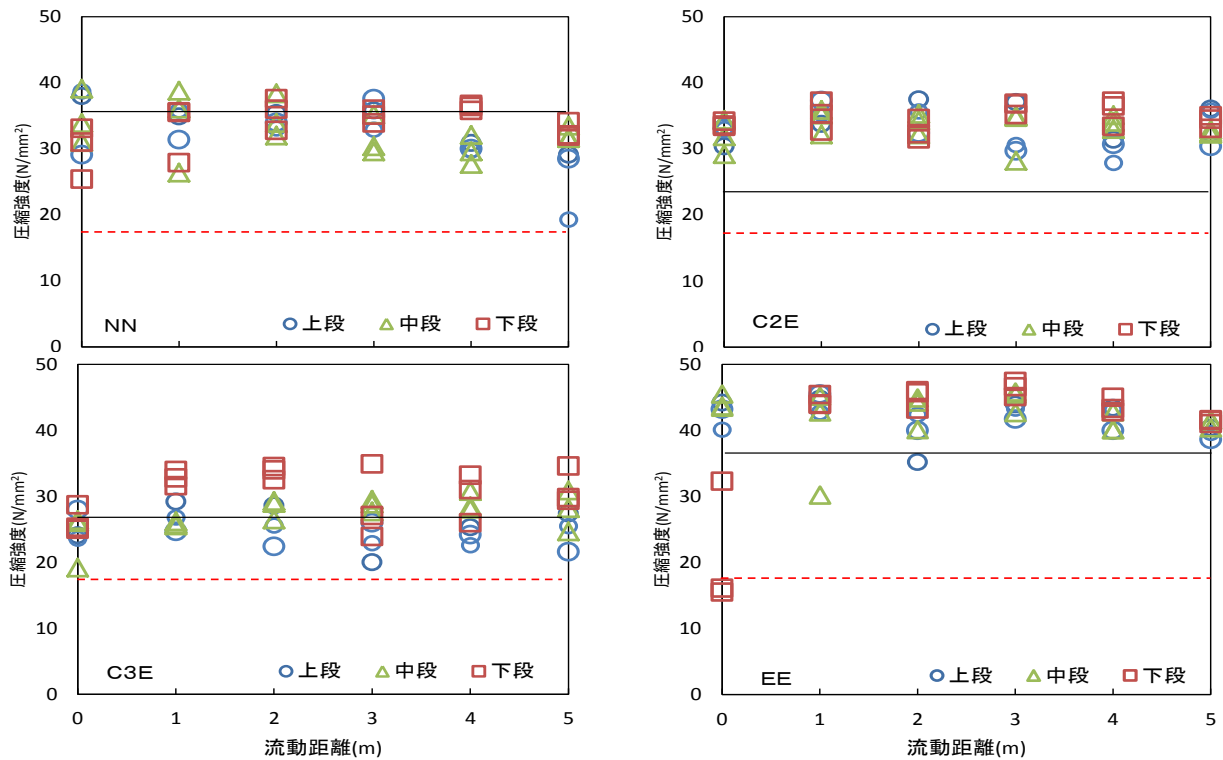


図-10 コア圧縮強度

合でも認められたため、スランプフローを増加させることで打込み中の流動勾配が小さくなり、自己充填性が向上したことで圧縮強度が増進したと考えられる。下段の圧縮強度は上段や中段と比較し、やや増加する結果となった。これはスラグ骨材を使用したすべての配合において認められ、コンクリートの高密度化によって下部の方がより緻密になったためであると考えられる。C3E配合は他の配合よりも圧縮強度が全体的に低下する傾向が見られた。また、ばらつきも大きく、安定した強度発現性は見られなかった。これは、ガラス質の微粒分が多く含まれる銅スラグを用いたことで、さらにセメントペースト分との付着が低下したためと考えられる。EE配合は電気炉酸化スラグの潜在水硬性によって他の配合よりも圧縮強度が増加したと考えられるが、主要要因は明らかとならなかった。打込み位置の下部においては圧縮強度が著しく低下している箇所があるが、これは打込み時に巻き込んだ水が残留したであろう部分を測定したためである。このことから、水中不分離コンクリートの打込みには水の巻き込みを極力抑えるように注意する必要があると思われる。

4. 結論

本研究では高密度スラグ骨材を使用した水中不分離コンクリートのフレッシュ性状、硬化性状および施工性について検討を行った。その結果、懸濁物質量が大きくなり範囲でスランプフローを大きくすることで普通骨材を用いた水中不分離性コンクリートと同等の性能とな

ることが確認された。また、単位容積質量は概ね 3.0t/m^3 程度が得られた。以上より、水中不分離性コンクリート用骨材として適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 川端雄一郎ほか：銅スラグを大量混合したコンクリートの施工性と品質変化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp1541-1546，2010
- 2) 宮根正和ほか：リサイクル材料を用いた水中不分離性重量コンクリートの強度特性，第40回土木学会関東支部技術研究発表会，V-37，2013
- 3) 宮根正和ほか：スラグ骨材を使用した水中不分離性重量コンクリートの基本性能，土木学会第69回年次学術講演会，V-605，2014
- 4) 水中不分離性コンクリート設計施工指針（案），土木学会，コンクリートライブラリー67，1991
- 5) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針，コンクリートライブラリー，No.135，2012.
- 6) 例えば福留和人ほか：特殊水中コンクリートの長距離流動実験について，コンクリート工学年次論文報告集，9-1，1048，pp277-280，1987