

論文 フェロニッケルスラグ骨材を混合した舗装用スリップフォームコンクリートの施工性能および硬化特性の評価

山田 悠二*1・稲葉 諒*2・橋本 親典*3・渡辺 健*4

要旨: 本研究ではフェロニッケルスラグ骨材を混合した舗装用スリップフォームコンクリートの施工性能と硬化特性について実験的に検討した。スリップフォームコンクリートの施工性能は、充填性と自立性が要求される。流動障害なしの加振ボックス充填試験により充填性を評価した結果、フェロニッケルスラグ骨材の混合により無混合のものよりも充填性は低下した。タッピング試験により自立性を評価した結果、フェロニッケルスラグ粗骨材の混合により、スランブに関係なく自立性を有することがわかった。また、フェロニッケルスラグ骨材を混合することで圧縮強度、曲げ強度およびアブレイジョン摩耗への抵抗性は向上した。

キーワード: コンクリート舗装, フェロニッケルスラグ骨材, スリップフォーム工法, 施工性, 摩耗抵抗性

1. はじめに

コンクリート舗装は高い耐久性を有している反面、初期コストが高くなることなどから、近年では、航空路やトンネル内の舗装などに適用範囲が限られてきた。しかし最近、原油価格の高騰によりアスファルト材料の安定供給が困難になることや、ライフサイクルコストの観点から、一般道への積極的な活用が望まれており、今後は適用範囲が拡大することが予測される¹⁾。さらには、舗装用コンクリートに産業副産物骨材や混和材を混合することで、最終処分場の残余地不足を緩和するだけでなく、混合する材料によっては性状の向上が期待される。

最近では、コンクリート舗装の施工にスリップフォーム工法が多く用いられ、この工法に用いる舗装用コンクリートには振動締め時は十分に流動し、加振を停止すると自立する性能（変形抵抗性）が強く求められる。舗装用コンクリートの施工性能評価試験として、振動台式コンシステンシー試験やその他にも報告がいくつかあるが^{2) 3) 4)}、試験室内での実施を想定したものが多く。そのため、施工現場では技術者の肌感覚によって定性的に評価されるのが実情である。

本研究では、フェロニッケルを精錬する際の副産物を冷却・粒度調整して製造されるフェロニッケルスラグ骨材を混合した舗装用スリップフォームコンクリートに着眼している。フェロニッケルスラグ骨材は絶乾密度が 3.0g/cm^3 程度と高密度であり、また碎石砕砂などの普通骨材と比較して硬質である。したがって、コンクリート用骨材への混合により、アブレイジョン摩耗への抵抗性は向上することが示唆され、舗装のすり減りの低減が期待される。そのため、フェロニッケルスラグ骨材の舗装

用コンクリートへの適用例は多く報告されている。しかしながら、舗装用スリップフォームコンクリートの施工性能や摩耗抵抗性に関する報告は皆無である。

以上から、施工現場での実施が可能であることも考慮したうえで、既往の研究でも報告されている加振ボックス充填試験およびタッピング試験を採用し、フェロニッケルスラグを混合した舗装用スリップフォームコンクリート（スランブ 2.5cm および 6cm ）の充填性および自立性の定量的な評価を試みた。また、硬化特性についても強度とアブレイジョン摩耗への抵抗性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の物性を表-1に示す。細骨材は君津産山砂の他に、フェロニッケルスラグ細骨材（以下、FNSと称

表-1 使用材料

材料名：記号	物性など
普通ポルトランドセメント：C	密度： 3.16g/cm^3 , 比表面積： $3340\text{cm}^2/\text{g}$
君津産山砂：S	表乾密度： 2.67g/cm^3 , FM：2.45, 吸水率：1.06%, 実積率：68.6%
大江山産フェロニッケルスラグ細骨材：FNS1.2	表乾密度： 3.08g/cm^3 , FM：1.63, 吸水率：0.31%, 実積率：58.5%
八戸産フェロニッケルスラグ細骨材：FNS5.0	表乾密度： 3.08g/cm^3 , FM：2.75, 吸水率：1.78%, 実積率：67.4%
青梅産碎石5号：G1	表乾密度： 2.66g/cm^3 , FM：6.99, 吸水率：0.51%, 実積率：61.0%
青梅産碎石6号：G2	表乾密度： 2.65g/cm^3 , FM：6.48, 吸水率：0.34%, 実積率：60.8%
フェロニッケルスラグ粗骨材：FNG	表乾密度： 2.94g/cm^3 , FM：6.51, 吸水率：0.95%, 実積率：61.1%
AE減水剤：Ad1	リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
高性能AE減水剤：Ad2	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE剤：Ad3	アルキルエーテル系

*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 博士後期課程 修士（工学）（学生会員）

*2 オリエンタル白石（株） 大阪支店 施工技術部

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 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エコシステムデザイン部門 准教授 博士（工学）（正会員）

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								混和剤の添加量 (C×%)						
											SL2.5		SL6.0				
			W	C	S	FNS 1.2	FNS 5.0	G1	G2	FNG	Ad1	Ad3	Ad2	Ad3			
N	40	37	140	350	734	-	-	-	-	515	740	-	0.4	0.005	0.8	0.002	
FNS1.2-30					514	254	-	-	-				-	0.5	0.008	0.85	0.004
FNS5.0-50					367	-	424	-	-				-	0.25	0.009	0.8	0.005
FNS5.0-100					-	-	847	-	-	-	0.4	0.008					
FNG-50					734	-	-	257	385	728	0.6	0.006	0.006				
FNG-100					734	-	-	-	-	1456	0.7	0.005	0.005				

する)として最大寸法が1.2mmのもの(以下、FNS1.2と称する)と5mmのもの(以下、FNS5.0と称する)を使用した。それぞれの特徴として、FNS1.2はキルン水砕砂であり、角状の粒形で粒が細かいのに対し、FNS5.0は電炉風砕砂であり、粒形が丸い。粗骨材は青梅産碎石とフェロニッケル粗骨材(以下、FNGと称する)を使用した。

2.2 コンクリートの配合

表-2にコンクリートの配合を示す。Nはスリップフォーム工法による施工実績がある、スランプ2.5cm、呼び強度(曲げ強度)4.5N/mm²の配合を参考にしたものである。FNS配合は、Nに対してFNS1.2を細骨材に30%容積置換したもの(配合名:FNS1.2-30)と、FNS5.0を50%および100%容積置換したもの(配合名:FNS5.0-50、FNS5.0-100)の3水準とした。FNG配合はNに対して粗骨材にFNGを50%および100%容積置換したもの(配合名:FNG-50、FNG-100)の2水準とした。

施工性能に関する検討では化学混和剤の添加量を調整して目標スランプ2.5±1.0cm(以下、SL2.5と称する)と6.0±1.0cm(以下、SL6.0と称する)の2水準のコンクリートを作製し、スランプの違いによる影響を確認した。また、目標空気量はいずれも4.5±1.5%とした。

硬化特性に関する検討では、SL2.5のコンクリートで作製した試験体を試験に供した。

2.3 施工性能評価に関する試験方法

(1) スランプ試験および空気量試験

スランプ試験をJIS A 1101、空気量試験をJIS A 1128に準拠して実施した。また、コンクリートの練上がり温度を測定した。試験結果を表-3に示す。すべての配合で目標スランプおよび目標空気量を満たした。

(2) 加振ボックス充填試験

加振ボックス充填試験(図-1)は土木学会の委員会報告書を参考に実施したが⁵⁾、報告書の試験方法とは流動障害を用いない点が大きく異なる。これは、コンクリート舗装の施工では、鉄筋間をコンクリートが通過する過程があるものの、通常のコンクリート構造物の施工と異なり、配筋密度が小さいため、無筋コンクリートに近いと考えられるためである。また、著者らはこれまでに、スランプ2.5cm程度の普通骨材を用いた舗装用スリップ

表-3 フレッシュ性状

配合名	SL2.5			SL6.0		
	実測SL (cm)	Air (%)	C.T. (°C)	実測SL (cm)	Air (%)	C.T. (°C)
N	2.0	4.7	22.1	5.5	4.0	20.2
FNS1.2-30	1.5	4.6	19.8	5.5	5.0	20.4
FNS5.0-50	2.5	4.6	21.4	6.0	6.0	20.4
FNS5.0-100	1.5	5.3	20.9	6.0	5.3	20.0
FNG-50	2.0	4.2	20.8	5.5	4.0	21.0
FNG-100	2.5	4.4	20.2	5.0	4.6	21.2

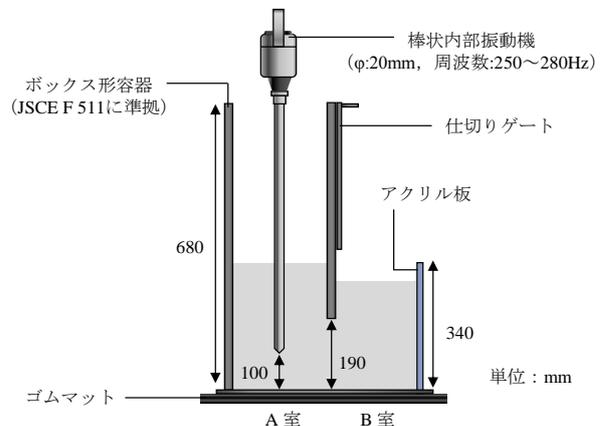


図-1 加振ボックス充填試験の概要

フォームコンクリートの充填性を評価した。その結果、流動障害なしの加振ボックス充填試験での評価に妥当性があることを報告した⁶⁾。以下に試験の実施要領を示す。

まず、ボックス容器(JSCE F 511に準拠)をゴムマットの上へ水平となるよう設置した。仕切りゲートを閉じた状態で試料をA室に3層に分けて詰めた後、A室上面をならし、棒状内部振動機(φ20mm、周波数250~280Hz)をA室中央に底面から棒状内部振動機の先端までの高さが100mmとなるように挿入した。仕切りゲートを引き上げ、棒状内部振動機による加振を行い、B室側に試料を充填させた。加振を開始した直後からB室隅角部側に充填した試料の自由表面における最も高い部分の充填高さが、190mmと300mmに到達するのを目視により確認し、そのときの時間を計測して式(1)より充填速度V_{pass}(mm/s)を算出した。

$$V_{pass}(\text{mm/s}) = \frac{300\text{mm} - 190\text{mm}}{T_{300}(\text{s}) - T_{190}(\text{s})} \quad (1)$$

ここに、

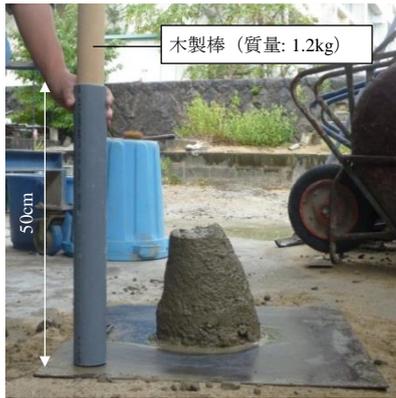


写真-1 タッピング試験の概要

T300 : B 室における充填高さ 300mm 到達時間(s)

T190 : B 室における充填高さ 190mm 到達時間(s)

また、モルタルと粗骨材の分離を評価するため、土木学会の報告書を参考に⁵⁾、加振後のボックス形容器 A 室下部と B 室上部の試料を採取して行った洗い分析試験 (JIS A 1112) により、A 室下部と B 室上部における単位粗骨材量(kg/m³)を求めた。A 室下部と B 室上部の単位粗骨材量の相対変化率を総粗骨材量変化率 (%) とし、これをモルタルと粗骨材の分離状況の評価指標とした。

さらに本実験では、密度の大きい FNS を使用しているため、水と細骨材の分離についても評価することを目的に、A 室の上部・中部・下部 (以降、A 上、A 中、A 下と称する) と、B 室の上部・下部 (B 上、B 下と称する) の 5 箇所から試料を採取して円柱試験体を作製し、圧縮強度試験を行ってボックス形容器内の試料の強度 (以降、ボックス強度と称する) を算出した。

(3) タッピング試験

タッピング試験の概要を写真-1に示す。試験は、土木学会の委員会報告書に示される試験方法を参考に⁵⁾、以下の要領で実施した。

まず、表乾状態の細骨材を約2cmの厚さで敷き均し、その上でスランプ試験を実施した。その後、木製棒 (質量 1.2kg) を 50cm の高さからスランプ板の四隅に順次落下 (以下、タッピングと称する) させた。木製棒を落下させる位置はスランプ板の中心から 30 cm 離れた箇所とした。タッピング 16 回ごとのスランプおよびスランプフローを測定していき、タッピング回数が 112 回に到達したときに終了した。またスランプの崩れ方を目視により確認した。結果の整理については、タッピング回数を横軸に、スランプフローを縦軸にとったグラフ中の要素を最小二乗回帰したときの回帰線の傾きをスランプフロー変形係数 Ksf (mm/回) とし、これを自立性の評価指標とした。

2.4 硬化特性に関する試験方法

(1) 圧縮強度試験および曲げ強度試験

練上がり後のコンクリートで試験体を作製して圧縮強

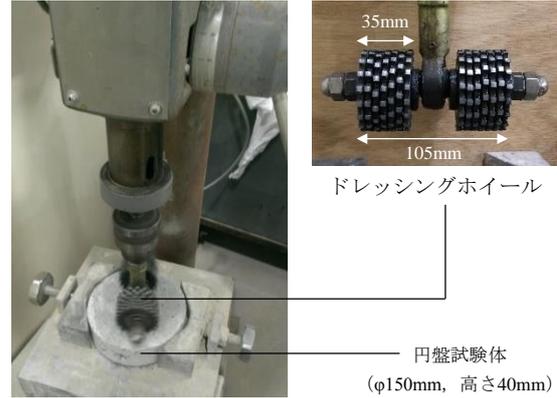


写真-2 アブレイジョン摩耗試験の概要

度試験を JIS A 1108、曲げ強度試験を JIS A 1106 に準拠して実施した。また、試験体はいずれも 28 日間の水中養生を行った後、試験に供した。なお、本節の圧縮強度用試験体と前節のボックス強度用試験体は別途に作製したが、試験方法や養生条件は同じとした。

(2) アブレイジョン摩耗試験

本試験はドレッシングホイールのすべり作用によりコンクリート表面にアブレイジョン摩耗を生じさせるものである (写真-2)。本試験装置は、ASTM C779 を参考としたものであるが、ASTM C779 では、ドレッシングホイールを 3 体有するのに対して、本試験装置は 1 体のみである。また、本試験は主に表面のモルタルを摩耗させることが想定される。試験体は 28 日間水中養生した円盤状 (直径 150mm、高さ 40mm) とした。また、試験体ごとで表面の粗さに差異が生じないように、試験体底面を試験面とした。試験の実施要領を以下に示す。

まず、試験開始前の試験体の質量を小数点以下 1 桁まで測定し、その後、ドレッシングホイールの回転速度を 56 (rpm) で時計回りに回転させ、開始から 30 分 (回転数 : 1680 回)、60 分 (回転数 : 3360 回)、90 分 (回転数 : 5040 回) における試験体の質量を測定した。また試験を開始する前には、ドレッシングホイールに潤滑剤を噴霧した後にウエスで軽く拭いた。結果の整理については、試験前の質量 W_1 から各測定時間における試験体の質量を差し引いたものを摩耗損失量 W_2 (g) とし、以下の式 (1) により摩耗損失率 (%) を算出した。

$$\text{摩耗損失率}(\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

3. 実験結果および考察

3.1 施工性能に関する検討

(1) 加振ボックス充填試験による充填性の評価

図-2 に充填高さ 190mm から 300mm までの加振時間と V_{pass} を示す。スランプによらず、フェロニッケルスラグ骨材を混合した配合は、N よりも V_{pass} は遅くなっ

た。各スランプの中で比較すると、SL6.0の場合では、配合間での加振時間の差は小さく、2~4秒程度であったのに対し、SL2.5の場合では配合間で大きな差が見られ、3~24秒程度の範囲で変化した。またSL2.5のFNS配合では、FNSの種類によらず、混合率の増加にともなって加振時間は長くなる傾向にあり、これはFNG配合でも同様であった。フェロニッケルスラグ骨材の種類で比較すると、FNG配合よりもFNS配合の方が加振時間は長くなる傾向にあった。これらより、フェロニッケルスラグ骨材を混合することで充填性は低下し、またフェロニッケルスラグ骨材が充填性に与える影響はスランプが小さいほど大きく、さらにその影響はFNGよりもFNSの方が強いといえる。

図-3に各種配合における総粗骨材量変化率を示す。SL2.5の場合、いずれの配合も総粗骨材量変化率は、10%前後となった。一方、SL6.0の総粗骨材量変化率は3~6%程度となり、SL2.5よりも小さくなった。これはSL6.0の方が300mmに到達するまでの加振時間が短く、モルタルと粗骨材の材料分離が生じにくくなったためと考えられる。また本実験結果は、普通コンクリート（スランプ8cm以上、単位セメント量300kg/m³程度）に対して加振ボックス充填試験を行った既往の研究と比べると⁵⁾、総粗骨材量変化率は小さくなった。これは流動障害を使用していなく振動時間が短いこと、W/Cが小さくかつ単位セメント量が比較的に多いためであると考えられる。

SL2.5に対して、強度特性から材料分離を評価した結果を図-4および図-5に示す。図-4に示すボックス強度は、いずれの配合もA上では、A中やA下と比べて小さくなる傾向にあった。これは、加振によって水が上昇し、A上の水セメント比が増大したためと考えられる。特に、加振時間が長くなったFNS5.0を混合した配合ではA上とA中やA下との強度差が大きくなり、B上とB下の強度差も大きくなった。また、FNS1.2を混合した場合にはA室側3箇所とB室側2箇所との強度差が大きくなった。図-5に示すA上~B下5箇所のボックス強度の変動係数は、FNSを多く混合するほど大きくなり、FNGの混合により低下する傾向になった。

総粗骨材量変化率とボックス強度の結果を踏まえたうえでSL2.5における充填性を考察すると、モルタルとFNGの分離よりも水とFNSの分離の方が顕著であり、これが充填性により強く影響を与えたため、FNS配合ではFNG配合よりも充填性が低下したと考えられる。

(2) タッピング試験による自立性（変形抵抗性）評価

図-6にスランプフロー変形係数Ksfを示す。SL2.5の場合、FNS1.2-30ではNよりもKsfは大きくなったが、FNS5.0-50、FNS5.0-100、FNG-50では1/2程度、FNG-100では2/3程度となった。一方、SL6.0の場合はFNS5.0-50

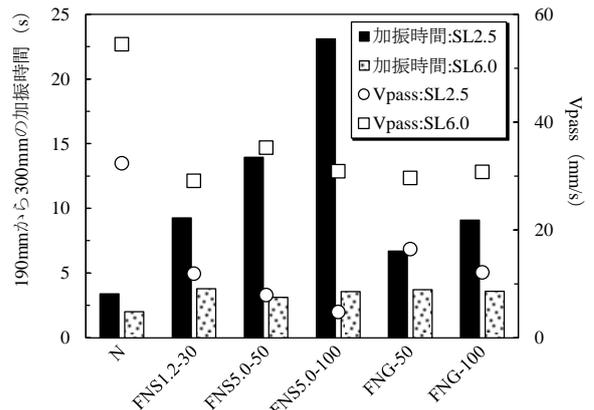


図-2 充填高さ 190mm から 300mm までの加振時間と Vpass

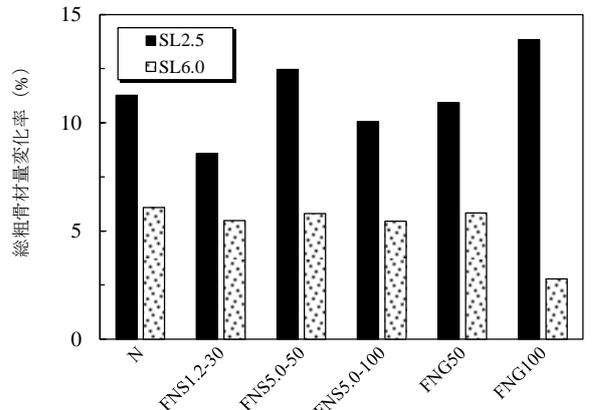


図-3 総粗骨材量変化率

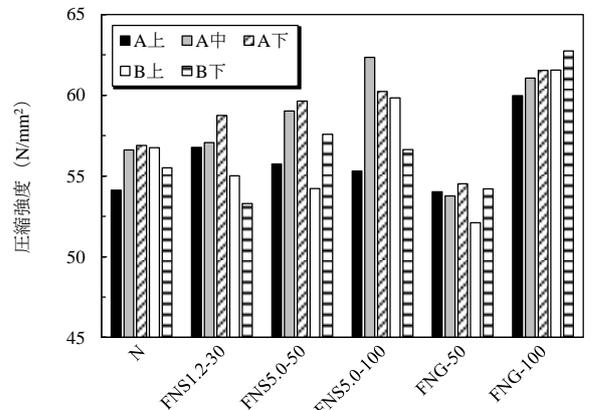


図-4 ボックス強度

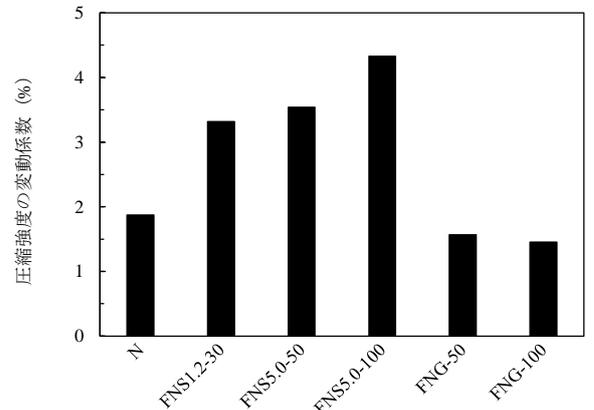


図-5 ボックス強度の変動係数

でも、Nよりも若干大きくなり、また FNS5.0-100 は N より小さいものの、SL2.5 ほどの差はなかった。FNG 配合ではスランプに関係なく、Ksf は 1mm/回程度以下となり、FNS 配合と比べてスランプの影響を受けにくくなった。これは、FNS よりも FNG の方が骨材粒子あたりの自重が大きく、骨材自体の自立性が高いため、その影響がコンクリートの変形性にも強く表れたためと考えられる。

以上から、FNS の混合によりスランプが小さいときは自立性が向上するが、スランプが大きくなると効果は表れにくく、また、FNG を混合する場合ではスランプに関係なくコンクリートの自立性を保持し易いと考えられる。

(3) 充填性と自立性を踏まえた総合的な評価

図-7 に Ksf と 190mm から 300mm までの加振時間の関係を示す。加振ボックス充填試験とタッピング試験にはある程度、正の相関関係が成り立つことが報告されており、基本的には変形性が大きいものは充填性も大きくなるとされる。これは本実験結果においても同様であり、Ksf が大きいものは加振時間が短くなる傾向にあった。また、本研究において、充填性と自立性に優れたコンクリートとは、図-7 において破線で囲んだ領域に示す原点の近くに分布するものであると考えられる。これを踏まえると、他の配合に比べて FNG 配合は、SL6.0 と SL2.5 のどちらも図中の原点近くに分布していることから、本実験の範囲内で相対比較を行った中では、理想的なコンクリートに近いと考えられる。しかし、実施工との比較が行えていないため、今後の展望としては、実施工と加振ボックス充填試験およびタッピング試験の関係について検討し、スリップフォーム工法における充填性と自立性の基準値を算出したうえで評価したいと考えている。

3.2 硬化特性に関する検討

(1) 強度試験結果

図-8 に材齢 28 日における圧縮強度を示す。圧縮強度は、種類によらずフェロニッケルスラグ骨材を混合した配合では N よりも大きくなる傾向にあったが、混合率による影響は明確ではなかった。図-9 に材齢 28 日における曲げ強度を示す。曲げ強度は、いずれの配合も試験体 3 体の平均が呼び強度 4.5N/mm² を満足するとともに、すべての試験体で呼び強度の 85% (3.83N/mm²) 以上となった。また、種類によらずフェロニッケルスラグ骨材の混合によって N よりも大きくなり、さらに、フェロニッケルスラグ骨材の混合率の増大とともに大きくなった。

フェロニッケルスラグ骨材を使用したコンクリートの強度に関しては、無混合のものとは比べて大きくなることを土木学会の指針でも示唆している⁷⁾。

(2) アブレイジョン摩耗試験結果

図-10 に各種配合における摩耗損失率を示す。種類によらず、フェロニッケルスラグ骨材の混合により、試験

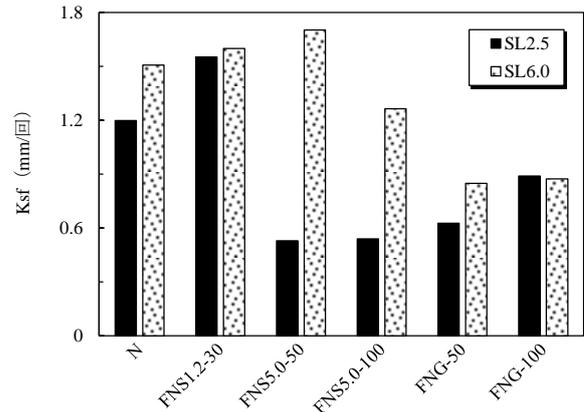


図-6 スランプフロー変形係数 Ksf

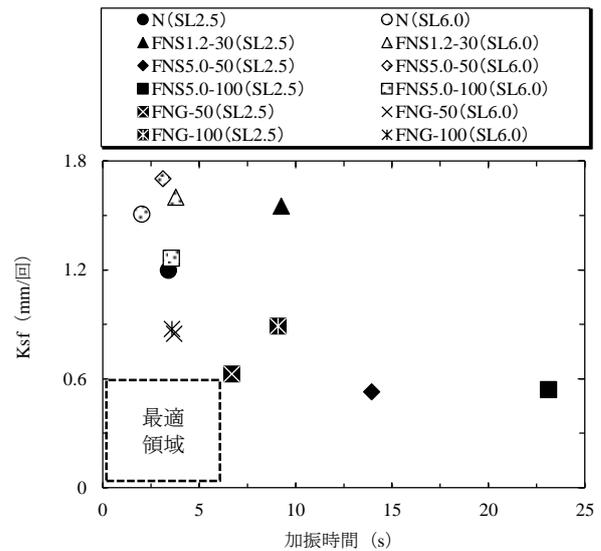


図-7 Ksf と 190mm から 300mm までの加振時間の関係

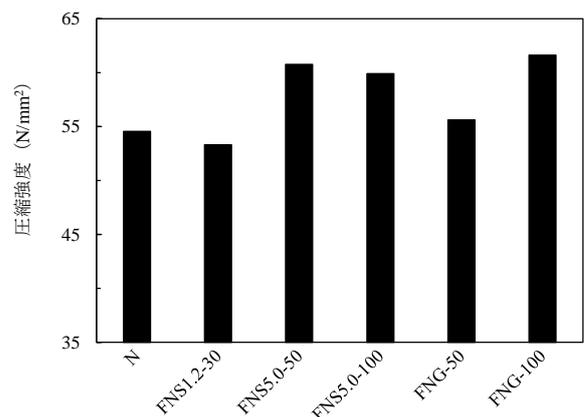


図-8 圧縮強度

時間 30 分から 90 分にかけて摩耗損失率は N より小さくなった。なお、本試験は主に表面のモルタルを摩耗させるが、試験体作製時の振動締め固めにより FNG が底面へ沈降するため、試験体底面を試験面とした本試験において、FNG 配合でも効果が表れたと思われる。また、フェロニッケルスラグ骨材の混合による影響を捉え易くするため、表面性状の影響を受けにくい試験体底面で試験を

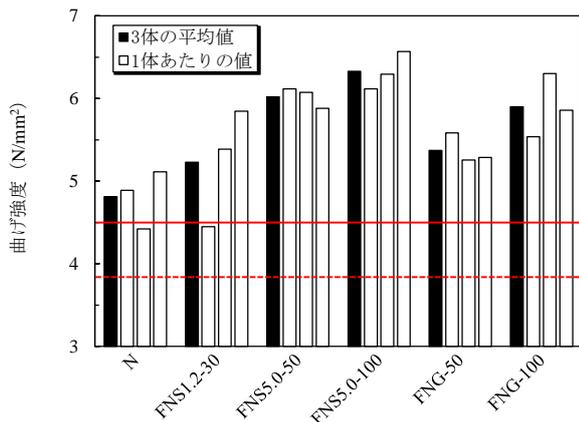


図-9 曲げ強度

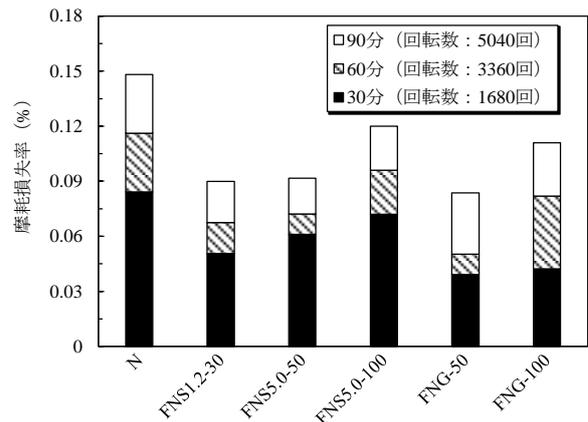


図-10 摩耗損失率

行ったが、実際の舗装では打設面が摩耗するため、表面性状との関係についても今後は検討する必要がある。

フェロニッケルスラグ骨材の混合率に着目すると、混合率 100%の場合に摩耗減少率は増加傾向にあった。コンクリートの摩耗機構は複雑であり、実際の現象は複数の作用が生じるとされる⁸⁾。本試験はドレッシングホイールのすべり作用によりアブレイジョン摩耗を生じさせるものであるが、これにより摩耗粉が発生するため、摩耗粉が押込み作用を生じ、表面疲労摩耗も併発する可能性が示唆される。フェロニッケルスラグ骨材を 100%使用した配合で発生する摩耗粉は混合率がこれよりも低いものに比べ、硬質なもの (FNS および FNG) を多く含むと思われるため、摩耗粉による押込み作用が大きくなり、表面疲労とアブレイジョンの双方の摩耗が同時に生じ易くなったと推察される。したがって、フェロニッケルスラグ骨材の混合率には、最適値が存在すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、フェロニッケルスラグ骨材を混合した舗装用スリップフォームコンクリート (スランブ 2.5cm および 6cm) の施工性能と硬化特性に関する実験的検討を行った。以下に、本研究の範囲で得られた結果を示す。

- (1) フェロニッケルスラグ骨材を混合することで充填性は低下した。
- (2) フェロニッケルスラグ骨材が充填性に与える影響はスランブ 6cm の場合より 2.5cm の方が大きく、さらにその影響は FNG よりも FNS の方が強くなった。
- (3) スランブ 2.5cm 程度のコンクリートでは FNS の混合により自立性は向上した。また、FNG の混合によりスランブに関係なく自立性を保持できた。
- (4) FNG の混合により、充填性と自立性の相反する性能を保持できることが明らかになった。
- (5) FNS, FNG に関係なくフェロニッケル骨材を混合したコンクリートは、無混合よりも圧縮強度、曲げ強度、アブレイジョン摩耗への抵抗性は大きくなった。

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) より試料を提供して頂きました。ここに付記し、深謝いたします。

参考文献

- 1) (社)セメント協会編：コンクリート舗装 新時代、第 1 版第 1 刷、2011.12
- 2) 佐藤聡明, 鎌田 修, 坂本康文：舗装用スリップフォームコンクリートの施工性を考慮したフレッシュ性状評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp1253-1258, 2011.7
- 3) 越澤 哲, 坂田 昇, 渡邊健三, 信田佳延：固練りコンクリートの適切なコンシステンシーの評価方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp1423-1428, 1999.7
- 4) 伊藤康司, 國府勝郎, 久保雅弘, 鈴木一雄：スリップフォーム用コンクリートの品質評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp993-998, 2002.7
- 5) 土木学会編：コンクリート技術シリーズ 102, コンクリートの施工コンクリートの施工性能の調査・検査システム研究小委員会第二期委員会報告書, 2013.11
- 6) 稲葉 諒ほか：加振ボックス充填試験を用いた舗装コンクリートの振動充填性の定量的評価に関する検討, 土木学会コンクリート技術シリーズ, No.102, 第三編 シンポジウム論文集, pp.17-22, 2013.11.
- 7) 土木学会編：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, pp57-60, 1998.1
- 8) 堀口 敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学, Vol.31, No.10, pp17-27, 1993.10