

論文 銅スラグ細骨材とマンガンスラグ粗骨材およびフライアッシュを使用した重量コンクリートのフレッシュ性状および耐摩耗性の検討

戸松 功祐*1・山田 悠二*2・川崎 佑磨*3・横井 克則*4

要旨: 本研究では細骨材として銅スラグ細骨材を、粗骨材としてマンガンスラグ粗骨材を全量使用し、さらにフライアッシュを混和した重量コンクリートについてフレッシュ性状および耐摩耗性の検討を行った。スラグ骨材を使用した配合のブリーディング量は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下と小さかった。また、振動機を用いたLフロー試験の結果、スラグ骨材を使用した配合は普通骨材を使用した配合よりも振動下における変形量は大きかった。一方で、耐摩耗性は普通骨材を用いたコンクリートより低下し、その一因として粗骨材のすりへり抵抗性の違いが影響していることが分かった。

キーワード: 銅スラグ細骨材, マンガンスラグ粗骨材, 重量コンクリート, 耐摩耗性, フレッシュ性状

1. はじめに

港湾構造物は波力に耐えるうえで、重量が大きいほど有利となる。近年では想定外の津波や高波に耐えるような耐波安定性が必要となってきた。これを実現するためには構造物自体の重量化が効果的である。

特に四国地方では、南海トラフ地震により想定される津波被害は甚大であり、早急の対策が必要とされている。また、副産物をコンクリート用材料として地産地消することは、環境への配慮などに有効である。そこで本研究では、普通骨材よりも密度が大きく、四国地方で金属の精錬時に排出される副産物として供給されている銅スラグ細骨材 (以下, CUS) とマンガンスラグ粗骨材 (以下, MNG) を骨材としてそれぞれ全量使用した重量コンクリートの検討を行っている。CUS は銅を製錬する際に生じる副産物を最大寸法が 2.5mm となるよう破碎して粒度調整したものである。粒子形状は角張っており、表面がガラス質である。また, MNG はマンガン製錬の際に生じる副産物を骨材寸法が 5mm~20mm となるよう破碎して粒度調整したものであり, CUS と同様, 骨材表面はガラス質であり, また, 気泡の痕が多く残っている。スラグ骨材を用いると, 骨材間の密度差が大きくなり, さらに骨材表面がガラス質であることから, 材料分離が生じやすくなり, フレッシュ時の性状に影響を与えることが考えられる¹⁾。一方で, フライアッシュ (以下, FA) も四国地方で供給され, この多量混和により, 塑性粘度が上がることなどから, ブリーディングなどの材料分離現象の抑制が期待される。

また港湾構造物は長期に, 波や海砂の断続的な衝突で摩耗することが予想される。長く重量を保つには, 耐摩

表-1 使用材料

| 材料(記号) | 物性など |
|---------------------|---|
| 高炉セメントB種(BB) | 密度:3.04g/cm ³ ,比表面積:3820cm ² /g |
| 普通ポルトランドセメント(OPC) | 密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3320cm ² /g |
| 硬質砂岩砕砂(S) | 表乾密度:2.58g/cm ³ ,FM:2.98 |
| | 吸水率:1.67%,実積率:63.4% |
| 銅スラグ細骨材(CUS) | 表乾密度:3.56g/cm ³ ,FM:2.55 |
| | 吸水率:0.26%,実積率:65.4% |
| 硬質砂岩碎石(G) | 表乾密度:2.63g/cm ³ ,FM:6.65 |
| | 吸水率:0.86%,実積率:60.2% |
| | すりへり減量:17% |
| マンガンスラグ粗骨材(MNG) | 表乾密度:2.77g/cm ³ ,FM:6.53 |
| | 吸水率:1.42%,実積率:57.6% |
| | すりへり減量:30% |
| フライアッシュ II 種(FA) | 密度:2.30g/cm ³ ,比表面積:3260cm ² /g |
| 増粘剤一液型高性能AE減水剤(Ad1) | ポリカルボン酸エーテル系増粘性高分子化合物の複合体 |
| 高性能AE減水剤(Ad2) | ポリカルボン酸エーテル系 |
| AE剤(Ad3) | アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤 |

耗性の高いコンクリートが望ましいと考えられる。

以上から本研究では, 細・粗骨材として CUS と MNG を全量使用し, FA を多く用いた重量コンクリートのフレッシュ性状, 強度特性, 耐摩耗性の検討を行った。なお, 本研究の主な適用先は消波ブロックを想定している。

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

表-1 に使用材料の物性を示す。CUS は $3.56\text{g}/\text{cm}^3$ と硬質砂岩砕砂よりも表乾密度が大きく, MNG も

*1 立命館大学 理工学部都市システム工学科 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助教 博(工) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博(工) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

| 配合名 | W/C (%) | W/B (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | | 混和剤 | | | 単位容積質量(kg/m ³) | SL. (cm) | Air (%) | C.T. (°C) |
|----------|---------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|----------------------------|----------|---------|-----------|
| | | | | W | OPC | BB | FA | S | CUS | G | MNG | Ad1 | Ad2 | Ad3 | | | | |
| OPC-FA-S | 65 | 38 | 50 | 135 | 208 | - | 150 | - | 1307 | - | 1017 | - | 0.9 | - | 2817 | 3.0 | 4.0 | 19 |
| BB-FA-S | | | | | - | 208 | | - | 1302 | - | 1013 | 0.5 | - | - | 2808 | 2.5 | 3.2 | 15 |
| OPC-FA-N | | | | | 208 | - | | - | 947 | - | 965 | - | 1.3 | - | 2405 | 5.0 | 1.6 | 17 |
| BB-FA-N | | | | | - | 208 | | - | 944 | - | 962 | - | - | - | 2399 | 4.5 | 3.0 | 18 |
| OPC-N | 65 | 65 | 50 | 175 | 269 | - | - | 896 | - | 914 | - | - | 0.75 | 0.3 | 2254 | 9.5 | 5.0 | 19 |
| BB-N | | | | | - | 269 | - | 892 | - | 909 | - | - | 0.6 | - | 0.3 | 2245 | 8.0 | 3.6 |

2.77g/cm³ と硬質砂岩砕石よりも表乾密度が大きいため、コンクリートの重量化に寄与する。また、スラグ骨材は一般に普通骨材よりも硬質であるといわれている。このため、静弾性係数が大きくなることがいわれている。

(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。S はスラグ骨材のみを使用していることを示し、N は普通骨材のみを使用していることを示す。また、SL., Air, C.T.はそれぞれ試験を実施した際のスランプ、空気量、コンクリート温度を示している。本配合は特に消波ブロックへの適用を想定しており、圧縮強度の目標値を 21N/mm² とした。著者らは過去に、消波ブロックへ適用された実績のある配合を参考に W/C を 60%として検討を行ったが、設計基準強度 (21N/mm²) に対して相当に圧縮強度が大きくなった。したがって、本研究では W/C を引き上げても圧縮強度の目標値を満たすことが可能であると考えられ、65%に引き上げることとした。また W/C を引き上げることで、単位セメント量が小さくなり、CUS の使用量が大きくなるため、コンクリートの重量化にもつながる。セメントは一般に公共工事で用いられる高炉セメント B 種(以下、BB) と、著者らの過去の研究で良好な結果を示した普通ポルトランドセメント (以下、OPC) の 2 種類とし、スラグ骨材を全量使用した場合と普通骨材のみを使用した配合水準を設けた。また過去の検討結果から、FA の混和によりブリーディング量の抑制を図るうえで、OPC を用い、かつ CUS および MNG を全量使用する際には 150kg/m³以上混和することが望ましいことが示唆されたため²⁾、FA は 150kg/m³とした。混和剤については、著者らの過去の研究において BB を用いると FA を併用してもブリーディング量が大きくなったため、BB を使用した配合については増粘剤系の混和剤も併用することとした。普通骨材のみを使用した配合については、FA を混和しない場合も設けた。

スラグ骨材を用いた配合では、コンクリートの単位容積重量がなるべく大きくなるよう配合設計すると共に、一般的な W/C65%の配合を想定した OPC-N を参考に、化学混和剤の添加量を調整して目標スランプ 8.0±2.5cm となるよう単位水量や s/a を調整しながら試し練りを繰り返

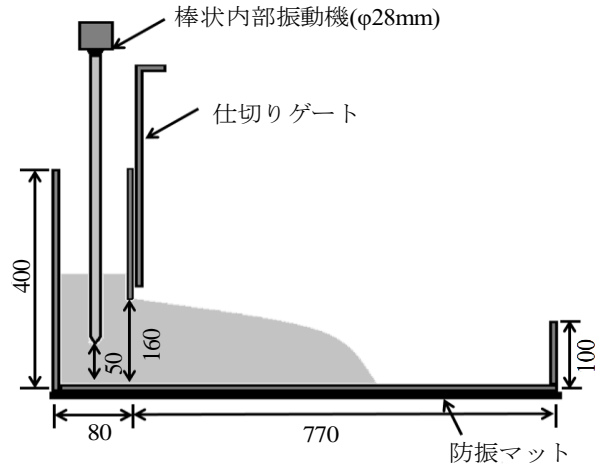


図-1 加振 L フロー試験の概要

返し実施した。しかし、いずれもスランプ試験を行ってコンクリートが拡がる途中でコンクリートが中腹あたりから崩れ、せん断型に崩れやすい傾向にあった。このため、スランプの目標値は定めずに、スランプ試験後にコンクリートが上円を保ったまま、コンクリートの下部のみが自重により拡がり、また練上がり時にブリーディング水が浮いてこない配合のみを実験に供した。空気量については耐凍害性を必要としない地域での適用を想定していることや、FA を多量に使用しているため、未燃カーボンの影響によりエントレインドエアの連行は困難なことから、目標値を定めないものとした。したがって FA を用いた配合における空気量の値は、ほぼエントラップドエアの量であると考えられる。

2.2 試験方法

(1) スランプ試験・空気量試験およびブリーディング

スランプ試験を JIS A 1101, 空気量試験を JIS A1128 に準拠して実施した。また、ブリーディング試験を JIS A 1123 に準拠して実施した。

(2) 加振 L フロー試験²⁾

L 形容器 (JSCE-F514), 棒状内部振動機 (φ 28mm, 周波数 200Hz 程度) を用いて実施した。試験の概要を図-1 に示す。試験手順として、まず、L 形容器を防振マットの上へ水平となるよう設置した。仕切りゲートの挿入後、試料を 3 層に分けて詰めた。このとき、突き棒で 1 層あ

たり5回突いた。試料を詰めた後に上面を均して、停止状態の棒状内部振動機を試料投入側の中央に、底面からの高さが50mmとなるように挿入した。

仕切りゲートを上げて加振を行い、100mm流動するごとにそのときの時間を測定した。振動を与えてもコンクリートが流動しなくなるまで継続して加振した。コンクリートの流動が停止したときのフローを測定し、これを流動停止フローとした。

(3) 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度試験をJIS A 1108, 材齢28日において静弾性係数の測定をJIS A 1149に準拠して行った。また、試験前の円柱供試体の直径、高さ、質量から単位容積質量を算出した。供試体は所定の材齢(材齢7日・材齢28日)まで水中養生(20±2℃)を行った。目標強度は21N/mm²とした。

(4) 摩耗試験

図-2に摩耗試験の概要を示す。ASTM C1138を参考に試験装置を作製した。本試験では、供試体と鋼球の衝突と鋼球によるアブレイジョン作用によって主に摩耗が生じると考えられる。試験装置の底部に円盤供試体(直径300mm,高さ50mm)を、摩耗面を上にして設置した。なお、摩耗面は打設面の対面とした。この時、スクリーンの底部と供試体上面の間隔を50mmとした。鋼球はφ25.4mmを10個、φ19mmを35個、φ12.6mmを25個用い、供試体の摩耗面の上に置いた。水位は摩耗面から165mmとした。トルクの回転数は1300rpmとした。開始から12時間は3時間ごとに供試体の表乾質量を測定し、以降は累計24時間まで6時間ごとに測定した。

結果の整理については、式(1)により累積すりへり係数(mm³/cm²)および平均摩耗深さ(mm)を算出した。

$$\gamma = \frac{W_d - W_{step}}{\rho \times A} \quad (1)$$

ここで、

γ : 累積すりへり係数 (mm³/cm²)

W_d : 試験前供試体表乾質量 (g)

W_{step} : 各時間の供試体表乾質量 (g)

ρ : 供試体表乾密度 (g/mm³)

A : 摩耗面積 (cm²)

また、式(1)のAの単位を(mm²)とすることで平均摩耗深さ(mm)に換算した。

4. 試験結果および考察

4.1 フレッシュ性状の検討

(1) ブリーディング試験結果

図-3にブリーディング量と時間の関係を示す。OPC-FA-Sについてはブリーディング発生時間が長くなったが、累計のブリーディング量は0.1cm³/cm²程度と小さか

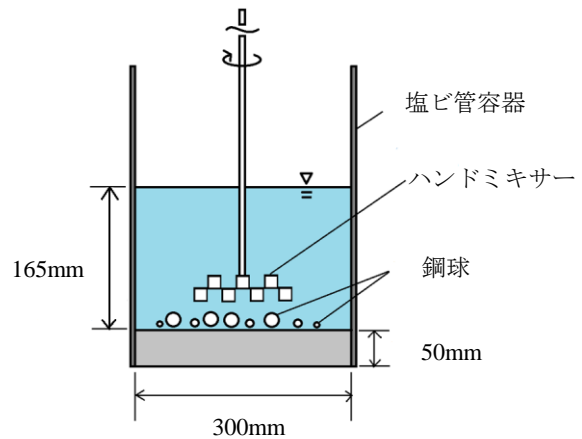


図-2 摩耗試験の概要

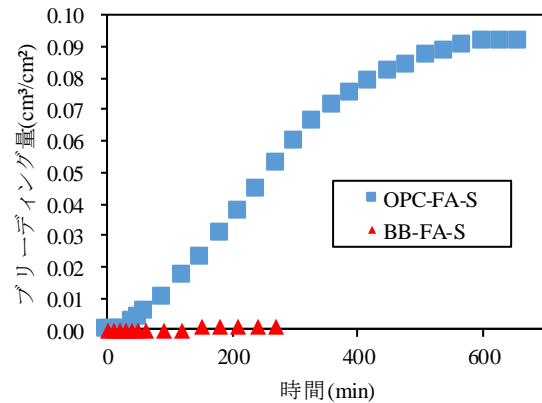


図-3 ブリーディング試験結果

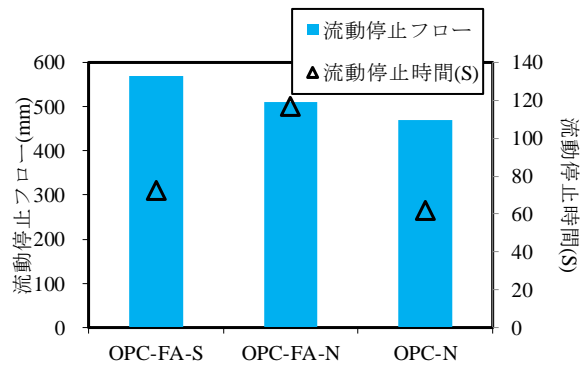


図-4 流動停止フローおよび流動停止時間

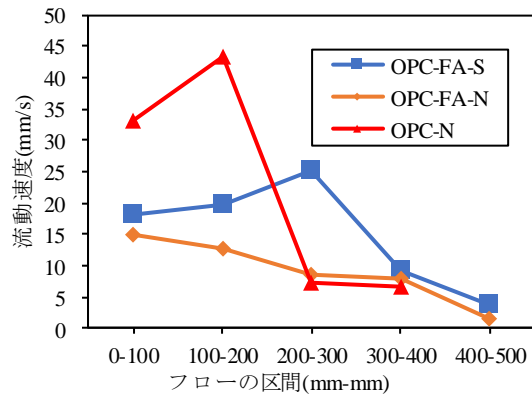


図-5 加振Lフロー試験区間速度

った。また参考までにこの値は鉄筋コンクリートの収縮ひび割れ対策の基準値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と比べても小さい³⁾。

BB-FA-S はブリーディングの発生はほぼなかった。既往の研究では、CUS および MNG、FA と BB の併用によりブリーディングの増大が確認されたが²⁾、増粘剤系の混和剤を使用したことでモルタルの粘性が増大したため、ブリーディングを抑制できたと考えられる。

(2) 加振 L フロー試験結果

図-4 に流動停止フローを示す。本研究では、スランブ値と空気量の目標値は設定しておらず、それらの値が異なることで振動下の変形性に相違が見られた可能性もある。しかし本研究で対象とする消波ブロックは無筋コンクリートであることから、振動下で普通コンクリートと同等以上の変形性を有していれば良い。最もスランブが小さい OPC-FA-S の流動停止フローは最も大きな値を示した。すなわち、固練りのコンクリートではあるが、振動下では普通コンクリートと同等以上の変形性を有していることが分かる。これはスラグ骨材の使用により単位容積質量が増大し、自重によって変形しやすくなったためと考えられる。全体を通して、単位容積質量が大きいほど流動停止フローが大きくなる傾向が見られた。このような傾向は、既往の研究の成果と同様である^{2), 4)}。

図-5 にフロー100mm ごとの流動速度を示す。フロー 0-200mm 区間では OPC-N の流動速度が最も速かった。また、FA を混和した配合において、OPC-FA-N においては加振初期から終局にかけて直線的に流動速度は低下したが、OPC-FA-S では流動速度が 200-300mm 区間までは上昇し 200-300mm 区間では他の配合よりも速くなった。L フロー試験では、特に初期 L フローと粘性において相関があるとされる⁵⁾。OPC-FA-S は OPC-N と比較して単位水量が小さく、FA の混和により粉体量も大きくなっていることから塑性粘度が大きいと考えられ、加振初期のフロー0-200mm 区間では OPC-N よりも流動速度が小さくなったと考えられる。FA の混和により塑性粘度が高くなることで、振動エネルギーが減衰されるが、加振の継続によりペーストの塑性粘度が下がることで、スラグ骨材が硬質であることによる振動エネルギーの伝播のしやすさが顕著になり、流動速度が上昇したと考えられる。

写真-1 に加振 L フロー試験後の OPC-FA-S の様子を示す。OPC-FA-S のフローの先端部は加振後も水走りはなく、十分な材料分離抵抗性を保っていた。

以上のことから、スラグ骨材および FA を使用した場合、スランブが小さい配合(スランブ=3cm)であっても、普通コンクリート(スランブ=9.5cm)と同等以上に型枠内で充填することが期待できると考えられる。また、今回想定している消波ブロックの施工は、バケツ打ちで



写真-1 OPC-FA-S の加振 L フロー試験後の様子

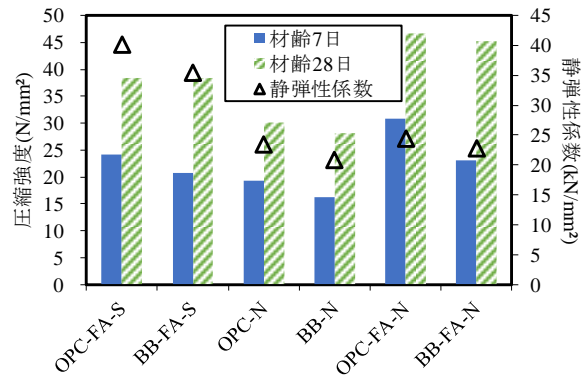


図-6 圧縮強度と静弾性係数

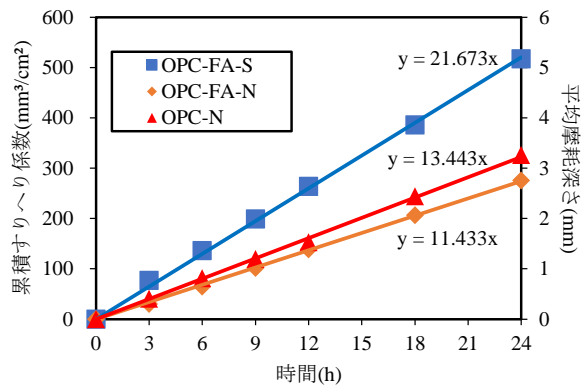


図-7 累積すりへり係数と時間の関係

あるため、本配合のように固練りのコンクリートであっても振動下において十分な変形性を有していれば、打ち込み時の作業性に問題はないと考えられる。

4.2 硬化コンクリートの特性の検討

(1) 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

図-6 に圧縮強度および静弾性係数を示す。OPC-FA-S および BB-FA-S では、圧縮強度、静弾性係数ともに全材齢で OPC-N および BB-N よりも高くなった。FA を用いた配合間で比較すると、全材齢でスラグ骨材を用いた場合、普通骨材を用いた場合よりも圧縮強度は低下した。既往の研究では、CUS を細骨材として全量使用しても圧縮強度への影響は小さいことが示唆されている⁶⁾。したがって、圧縮強度の低下は MNG の骨材表面に空隙が多いため、モルタルと MNG の界面が疎となったためと考

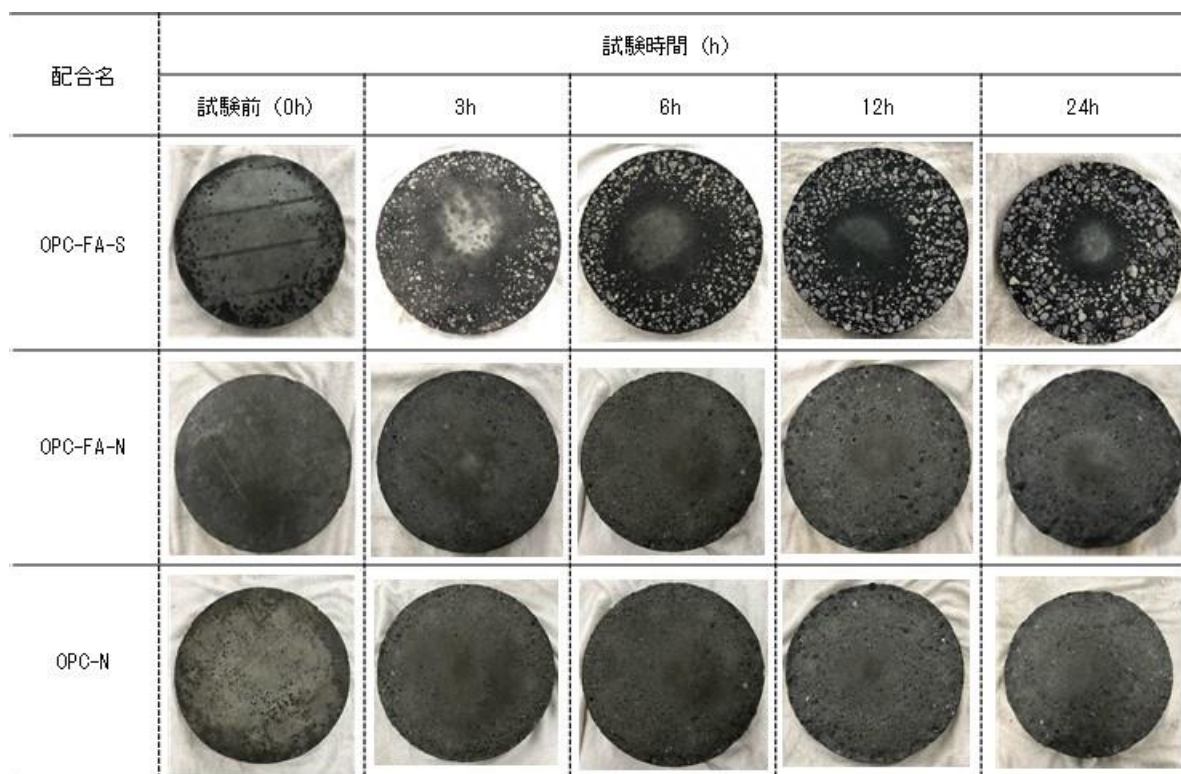


写真-2 摩耗試験における供試体の様子

えられる。また、FA の使用によりポゾラン反応が生じるため、長期強度が大きいことは広く知られているが、本研究では材齢 7 日の初期強度でも大きな値を示している。これは FA の微粒子が物理的に空隙に入り込み充填したことで、より密な構造になったためと考えられる^{2) 7)}。

また、著者らの過去に行った検討では、CUS と MNG を細・粗骨材として全量使用し、さらに FA を多量使用した配合において、普通骨材を使用したものと強度を比較した結果、結合材を BB とした場合に強度低下が大きい傾向にあった。要因としてブリーディングの増大により CUS および MNG の骨材界面が疎となったことを挙げた。本研究ではそれほどの強度低下はなく、これは上述のようにブリーディングが抑制されたため、CUS および MNG の骨材界面が疎となりにくかったと考えられる。

なお、本研究では配合間で空気量に差がある。著者らの過去の研究では、空気量の差を小さかったが、CUS および MNG を使用すると、圧縮強度が低下した²⁾。したがって、空気量の差による影響は小さく、スラグ骨材の使用による影響が大きいと考えられる。

(2) 摩耗試験

図-7 に累積すりへり係数・平均摩耗深さと時間の関係を示す。いずれの配合も時間経過に伴い、累積すりへり係数・平均摩耗深さは線形に増大した。24 時間経過時点での平均摩耗深さは OPC-FA-S が 5mm 程度、OPC-FA-N、OPC-N はともに 3mm 程度となり、スラグ骨材を用い

た配合では摩耗しやすい傾向にあった。写真-2 に摩耗試験における供試体の様子を示す。摩耗の過程においては、モルタル相のみが摩耗し、粗骨材は摩耗しにくいとされる。したがって、摩耗後のコンクリートは粗骨材が表面にその形状を保ったまま露出するとされる⁸⁾。しかし、本実験では OPC-FA-S の場合、MNG の表面が平滑に近い形状で露出しており、モルタル相と共に摩耗していることが確認された。さらに、OPC-FA-S と OPC-FA-N は配合上のモルタル容積が同じであるが、累積すりへり係数・平均摩耗深さに差が生じた。

また、本実験で使用した硬質砂岩砕石と MNG のロサンゼルス試験によるすりへり減量は、それぞれ 17%、30% であり、MNG の方がすりへり減量は 1.8 倍程度大きい。累積すりへり係数・平均摩耗深さは、OPC-FA-S とその他の配合ではいずれも OPC-FA-S の方が 1.6~1.9 倍程度大きく、粗骨材のすりへり減量の傾向とほぼ一致する。また空気量はエントラプトエアの混入により、OPC-FA-S が他配合より大きく、この影響も受けた可能性があるが、本実験では試験体打設時に振動締固めと木槌での型枠の叩きを行っているため、その影響は小さいと考えられる。

以上より、OPC-FA-S において 24 時間経過時点での累積すりへり係数・平均摩耗深さが大きい要因として、MNG のすりへり減量が多いことの影響も大きいと考えられる。しかし、OPC-FA-S は初期から累積すりへり係数・平均摩耗深さが大きく、コンクリート表面のモルタ

ル部の摩耗の速度が速かったと考えられる。そのため、MNG の露出が他の配合よりも早かったと考えられ、写真-2 の 3 時間後の供試体の状況でも、他の配合に比べ OPC-FA-S では MNG の露出が顕著なことが確認できる。

本実験では摩耗の際に生じる摩耗粉を除去していないため、供試体の摩耗面上に摩耗粉が残留する。摩耗粉が摩耗面上に残留する場合、鋼球と摩耗粉、供試体の 3 物体間で摩耗が生じると考えられる。この 3 物体間での摩耗ではすり磨き作用も生じるため、鋼球と供試体の 2 物体間で生じる摩耗よりも供試体の摩耗が進行しやすいと考えられる。摩耗初期には、コンクリートのごく表面を覆うセメントペースト相が摩耗しその後、モルタル相が現れ、さらに進行すると粗骨材が露出すると考えられる。CUS は普通骨材と比較して硬質であるとされることから、CUS を用いたコンクリートの摩耗粉は普通骨材を用いたコンクリートの摩耗粉よりも硬質であることが考えられる。モルタル相が現れてからの摩耗の過程において、CUS を用いた場合にその硬質な摩耗粉がすり磨きの作用を助長させたことで摩耗が進行しやすく、MNG の露出のタイミングが早くなったと考えられる。著者の一人は、過去に CUS と同様に普通骨材と比べて硬質なフェロニッケルスラグ骨材を用いたコンクリートのアブレイジョン摩耗試験を実施し、同様の傾向を報告している⁹⁾。

また、OPC-FA-N は OPC-N よりも配合上、モルタル容積が多いため、摩耗が生じやすい部分が多くなるが、累積すりへり係数・平均摩耗深さは OPC-N よりも僅かに小さい。図-6 で示したように、OPC-FA-N は OPC-N よりも圧縮強度が 15N/mm² 程度高くなっていることから、コンクリートが緻密であることが影響したと考えられる。

5.まとめ

細・粗骨材として銅スラグ細骨材、マンガンスラグ粗骨材を全量使用し、フライアッシュを多量使用した重量コンクリートのフレッシュ性状および耐摩耗性について検討した。本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ブリーディング量はセメントの種類にかかわらず、0.1cm³/cm² 以下と小さかった。
- (2) 加振 L フロー試験の結果、スラグ骨材を用いた場合、スランプが小さい場合でも流動停止フロー、流動速度ともに十分なスランプを持つ普通骨材を用いたコンクリートよりも大きく、材料分離も生じていなかった。したがって、複雑な形状の消波ブロックの施工においても十分な充てん性が期待される。
- (3) 圧縮強度は、スラグ骨材の使用により普通骨材を使用した場合と比べて低下した。これはマンガンスラグ粗骨材の表面形状による影響が懸念される。また、高炉セメント B 種を用いた場合、ブリーディングの

増大と共に強度低下が大きくなることが懸念されたが、増粘剤系の混和剤を使用し、ブリーディング量を抑えたため、強度低下は小さかった。

- (4) 耐摩耗性については、スラグ骨材の使用によって低下した。この要因として、マンガンスラグ粗骨材のすりへり減量が多いことの影響が大きいことが示唆されるが、さらなる検証の必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたり、四国クリエイト協会の研究助成を受けました。また、日本鉱業協会ならびに新日本電工(株)より試料の提供などのご支援を賜りました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針，コンクリートライブラリー，147，2016.7
- 2) 前田 凌，山田悠二，横井克則，近藤拓也：各種スラグ骨材を用いたハイボリュームフライアッシュ重量コンクリートに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1401-1406，2018
- 3) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，pp.88-89，1991.7
- 4) 山田悠二，橋本親典，渡辺 健：非鉄スラグ細骨材の混和による砕石・砕砂コンクリートの施工性能および乾燥収縮特性の改善に関する研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）Vol.74，No.4，pp.234-246，2018
- 5) セメントジャーナル社：フレッシュコンクリートの流動特性とその予測，pp.41-42，2004.9
- 6) 黒岩義仁，高尾 昇，佐々木憲明：銅スラグ細骨材の微粒分の量および実積率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.43-48，2013
- 7) 馬越唯好，武田啓二，楠瀬康公：フライアッシュコンクリートの耐久性評価に関する研究，四国電力，四国総合研究所，研究期報 107，pp.1-10，2017.12
- 8) 高野智宏，寺田哲美，山中 誠：水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.709-714，2009
- 9) 山田悠二，稲葉 諒，橋本親典，渡辺 健：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1659-1664，2016