

# 論文 ステンレススラグの高流動コンクリート用材料としての有効利用に関する研究

高海 克彦\*1・岡 祐太郎\*2・片山 賢一\*3・王 亮\*4

**要旨:** ステンレススラグを高流動コンクリート用材料として利用するために、ステンレススラグの物性、当該コンクリート細骨材置換率の影響、ステンレススラグ粉体混入の影響、およびその長期性状を実験的に確かめた。その結果、対象としたステンレススラグは、物性的に砕砂と大差なく、これを用いたコンクリートは、強度特性では、従来の高流動コンクリートと同等の性能、および中性化抵抗性能においては優れた特性を有することを明らかにした。

**キーワード:** 高流動コンクリート、ステンレススラグ、骨材物性、フレッシュ性状、長期性状

## 1. はじめに

近年、循環型社会の構築を目的とした一般および産業廃棄物の有効利用の観点から、各種廃棄物をスラグ化しコンクリート用骨材として利用する努力が続けられてきた。本研究で対象とするステンレススラグもその一つである。日本におけるステンレス鋼の年間生産量はほぼ300万トンで、その製造過程から約50万トンのステンレススラグが排出されている。こうした状況の中、筆者らは、ステンレススラグを細骨材として使用する研究を行い、その結果これを用いたコンクリートは、従来の普通コンクリートと同等の性能を有することを示したり。

また近年、大型のコンクリート構造物を建設する際に、複雑な鉄筋構造を使用する機会が増えており、作業効率の向上のため締め固め不要で自己充填可能な高流動コンクリートの需要が高まっている。

本研究ではステンレススラグの用途拡大のため、これを高流動コンクリートの細骨材および粉体として用いて自己充填性ランク1の高流動コンクリートの開発を目指した。ステンレススラグの材料物性を確かめた後、本高流動コンクリートの基礎特性を把握することを目的としている。

## 2. 実験項目および概要

### 2.1 ステンレススラグの物性試験

#### (1) 対象としたステンレススラグ

本研究で対象とするステンレススラグは、N社の製鋼所で排出されるもので、有効利用のために水洗により5mm以下に分級されたものである。また、ステンレススラグの粉体は、細骨材とするステンレススラグをミルにより

パウダー化したものである。NSSを高流動コンクリート用の細骨材および粉体として使用するために、その基礎物性の把握を行った。写真-1にNSS細骨材(以下:NSS)を、写真-2にNSS粉体(以下:NSSP)をそれぞれ示す。



写真-1 NSS 細骨材



写真-2 NSS 粉体

\*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻准教授 (正会員)

\*2 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (学生会員)

\*3 日新製鋼株式会社周南製鋼所

\*4 大和クレス株式会社開発部

## (2) 試験項目および方法

試験項目および試験方法は以下の通りである。

- ・NSSP の比表面積 (JIS R 5201)
- ・NSSP の粒度分布分析 (レーザー回折式分布計)
- ・密度および吸水率試験 (JIS A 1109)
- ・ふるい分け試験 (JIS A 1102)
- ・微粒分量試験 (JIS A 1103)
- ・粒形判定実積率試験 (JIS A 1104)
- ・水和反応性検証試験 (後述)

## (3) 水和反応性検証試験

高流動コンクリートに使用する NSS それ自身が水和反応し水和生成物が発生するかを確認するため、水和反応試験<sup>2)</sup>を行った。最大粒径を 2mm 以下に篩い分けた NSS を用意し、コンクリート内を模擬するため、水酸化カルシウム飽和水溶液に浸して養生し、水和反応を促進させた。NSS と飽和水溶液の比率は、後述する高流動コンクリートの配合における水セメント比 (W/C) 45% と、比較のため 40% および 50% の質量比とした。水セメント比 W/C の 40%, 45%, 50% は、養生時の NSS : 飽和水溶液の質量比率 (固液比) がそれぞれ 1.000 : 0.633, 1.000 : 0.610, 1.000 : 0.588 であることを示す。養生日数は初期の傾向の把握とコンクリートの基本材齢日を想定して 1, 3, 7, 14, 28, 91 日とし、試験は以下の手順で行った。まず、所定の材齢日で NSS を 110°C で炉乾燥させる。乾燥させた NSS 1.0g を秤量し  $m_d$  とする。秤量した NSS をアセトン 70mL, メタノール 30mL にサリチル酸 5.0g を溶解させた混合溶液とともに共栓付き三角フラスコに投入する。その後、マグネチックスターラーを用いて 1 時間攪拌して約 24 時間静置する。静置後、孔径 1 $\mu$ m の定量ろ紙を用いて吸引ろ過し、得られた残渣をメタノールで洗浄する。残渣をろ紙とともにろ紙に移し、750°C で約 2 時間強熱してろ紙を灰化させ、その時の質量  $m_h$  を秤量する。測定データから水和反応率  $R$  (%) を次式(1),(2)により算出した。

$$R_i = \frac{m_h}{m_d \times (1 - L_i / 100)} \times 100 \quad (1)$$

$$R = 100 - R_i \quad (2)$$

ここに、 $R_i$  : 未反応率 (%)

$m_h$  : 強熱後の NSS の質量(g)

$m_d$  : 混合溶液浸漬前の NSS の質量(g)

$L_i$  : 強熱減量(%)

## 2.2 高流動コンクリート使用材料

本研究で使用した材料の品質を表-1 に示す。高流動コンクリートの粉体として、従来よく用いられている炭酸カルシウム (LS) も比較のために用いた。

表-1 使用材料

材料	種類	品質
粉体	普通ポルトランドセメント	密度 : 3.16g/cm <sup>3</sup>
	ステンレススラグ (NSSP)	密度 : 3.05g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 5868cm <sup>2</sup> /g
	炭酸カルシウム (LS)	密度 : 2.71g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 5189cm <sup>2</sup> /g
細骨材	硬質砂岩砕砂	密度 : 2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 : 0.87% 粗粒率 : 2.78, 粒形判定実積率 : 56.0%
	ステンレススラグ (NSS)	密度 : 3.08g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 : 1.53% 粗粒率 : 2.96, 粒形判定実積率 : 55.9%
粗骨材	硬質砂岩砕石 1505	密度 : 2.71g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 : 1.26% 最大寸法 : 15mm
混和剤	高性能減水剤 (SP)	主成分 : ポリカルボン酸系化合物
	空気連行助剤 (AE)	主成分 : オキシカルボン酸塩

## 2.3 基礎性状

### (1) 高流動コンクリート配合

配合条件はスランプフロー 60.0~70.0cm, 50cm フロー到達時間 5~20 秒, 空気量 4.5 $\pm$ 1.5%, 水セメント比 W/C = 45%, 水粉体比 W/(C+P)=30%, 単位水量を 175kg/m<sup>3</sup> に統一し、細骨材率 s/a は各配合で粗骨材絶対容積が 760kg/m<sup>3</sup> になるように調整した<sup>3)</sup>。表-2 に高流動コンクリートの配合を示す。配合名の前半は NSS の置換率を、カッコ内は粉体の種類を表す。表-2 中の SP の単位はセメントと粉体の合計量に対する質量%を、また AE の単位 (A) は (C+P)  $\times$  0.002% を表す。

表-2 高流動コンクリート配合表

配合名	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							SP (C+P) (%)	AE (A)
	水	セメント	LS	NSSP	砕砂	NSS	砕石 1505		
NSS 0% (LS)	175	389	200	0	785	0	758	0.75	2.50
NSS 0% (NSSP)	175	389	0	200	805	0	759	0.85	2.50
NSS 30% (NSSP)	175	389	0	200	564	287	759	1.00	3.00

### (2) 試験項目および方法

表-2 の配合でコンクリート用二軸ミキサーを用いてコンクリートの練り混ぜを行った。試験項目および準拠方法を以下に示す。

- ・スランプフロー試験 (JIS A 1150)
- ・空気量試験 (JIS A 1128)
- ・圧縮強度試験 (JIS A 1108)
- ・割裂引張強度試験 (JIS A 1113)
- ・静弾性係数試験 (JIS A 1149)

材齢 1 日で脱型後、強度試験は材齢 7, 14, 28, 91 日で行い、試験までは水中養生とした。

## 2.4 長期的性状

NSS および NSSP を用いた高流動コンクリートの長期的性状を確認するため、中性化および乾燥収縮、凍結融解作用に対する抵抗性の確認を行った。

### (1) 促進中性化試験

NSS および NSSP を置換することによる中性化抵抗性への影響を実験的に明らかにするために、促進中性化試験を行った。試験方法は JIS A 1153 に準じて行った。

10cm×10cm×40cm の角柱供試体を各配合で 3 本ずつ作製し、材齢 1 日で脱型後、材齢 28 日（4 週）まで水中養生を行い、材齢 56 日（8 週）まで室温 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室にて静置し、その後、促進中性化試験機にて促進中性化を行った。試験機内温度は 20±2℃、湿度 60±5%、二酸化炭素濃度は 5±0.2% とした。中性化深さの測定日に供試体を切断し、その断面にフェノールフタレイン溶液を塗布後、断面の下から端面から赤紫色に呈色している部分までの距離を中性化深さとして測定した。測定日は促進中性化試験機に供試体を静置した後、1 週、4 週、8 週、13 週、26 週とした。測定データから、中性化深さおよび中性化速度係数を算出した。

### (2) 乾燥収縮試験

NSS および NSSP を置換することによる乾燥収縮量変化を実験的に明らかにするために、コンクリートの乾燥収縮試験を行った。試験は JIS A 1129-1 のコンパレータ方法に準じて行った。

10cm×10cm×40cm の角柱型枠の内部側面（上端から 5cm、左右端からそれぞれ 3cm の位置）にガラス板（幅 15mm、高さ 15mm、厚さ 1～2mm）を貼り、ガラス板が剥がれないように注意しながら供試体を作製した。角柱供試体は各配合で 3 本ずつ作製し、材齢 1 日で脱型後、材齢 7 日まで水中養生を行い、その後乾燥を開始した。乾燥は室温 20℃、湿度 60±5% の恒温恒湿室にて行った。測定初日はコンパレータの受け台にガラス製の標準尺を置き、左右の顕微鏡を覗いて標準尺の目盛線と顕微鏡のレンズに描かれたクロスワイヤをそれぞれ正確に一致させた。左右の顕微鏡を覗いてガラス板の刻線とクロスワイヤをそれぞれ正確に一致させ、その時のコンパレータの表示目盛を読み取り、乾燥収縮による長さ変化率を算出した。所定の材齢で測長後、乾燥による逸散水量を算出するために質量を秤量した。

### (3) 凍結融解試験

NSS および NSSP を置換することによる凍結融解作用に対する抵抗性への影響を実験的に明らかにするために、凍結融解試験およびたわみ振動による動弾性係数試験を行った。試験は JIS A 1140 の A 法および JIS A 1127 に準じて行った。

10cm×10cm×40cm の角柱供試体を各配合で 3 本ずつ作製し、材齢 1 日で脱型後、材齢 28 日（4 週）まで水中養生を行い、その後は凍結融解試験用の供試体容器に入れ、-18℃の凍結と 5℃の融解を繰り返す（供試体を凍結させて融解させるまでを 1 サイクルとする）養生水槽内

に静置した。水槽および容器から供試体を取り出し、供試体表面の剥離片をよく水洗した。水洗後、供試体表面の水分を吸水性の布で拭き、質量を秤量した。全ての供試体の秤量を終えた後、共鳴振動装置の支持台に供試体を静かに載せ、共鳴振動端子を供試体の端から 10mm の位置に載せた。発振器のつまみを回して振動数を変えながら、指示器の振れが最大の時の振動数をたわみ振動の一次共鳴振動数とした。以上の手順で 0 サイクルから 300 サイクルまで、30 サイクル毎に質量と一次共鳴振動数を測定した。測定データから、相対動弾性係数、耐久性指数、供試体の質量減少率を算出した。

## 3. 実験結果

### 3.1 物性試験結果

図-1 に炭酸カルシウム微粉末（LS）の粒度分布を、図-2 にステンレススラグ粉体（NSSP）の粒度分布をそれぞれ示す。

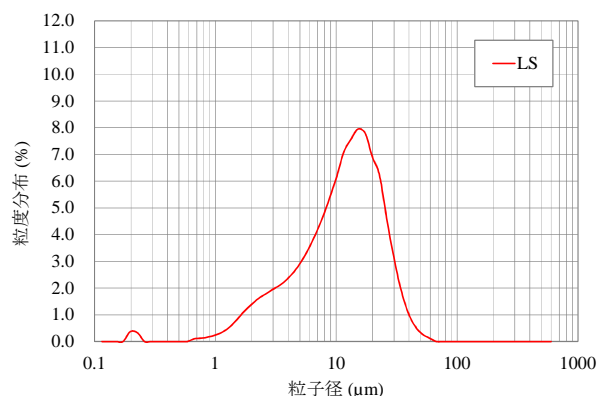


図-1 LS の粒度分布

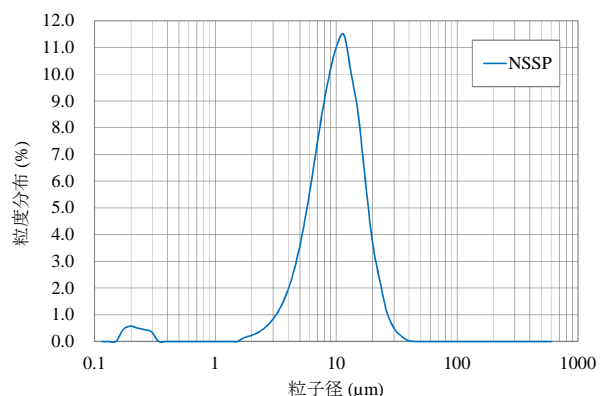


図-2 NSSP の粒度分布

NSSP は LS と比較して粒子径の分布にばらつきが少なく、粒径が 8~15μm の範囲に集中していることが分かった。

図-3 に細骨材のふるい分け試験結果を、表-3 に NSS の物性試験の結果を示す。

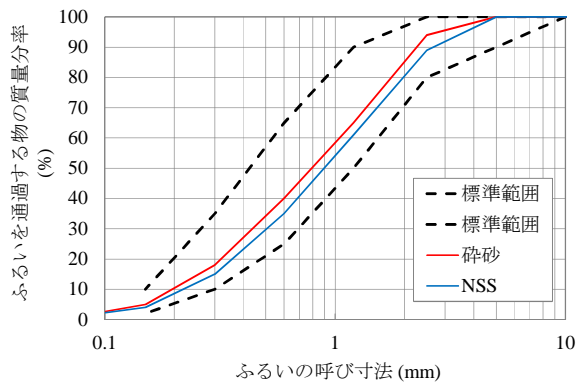


図-3 細骨材のふるい分け試験結果

表-3 使用骨材の材料物性

細骨材の種類	砕砂	NSS
絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.59	3.08
吸水率 (%)	0.87	1.53
粗粒率	2.78	2.96
微粒分量 (%)	7.5	2.0
粒形判定実積率 (%)	56.0	55.9

NSSの粒度分布は標準粒度範囲内であり、砕砂と比較しても大きな差異はなかった。また、NSSの絶乾密度は3.08g/cm<sup>3</sup>、吸水率は1.53%といずれも砕砂より大きい値を示した。ステンレススラグはもともと密度が約8g/cm<sup>3</sup>のステンレス鋼の残渣であり、排出過程で急激に冷却される。そのため、砕砂に比べて密度と吸水率が大きいと考えられる。粗粒率については砕砂と同等である。NSSの粒形判定実積率は55.9%と砕砂同様に低く、粒形が扁平で角張っていることが分かった。NSSの微粒分量は2.0%と砕砂に比べて少ない。

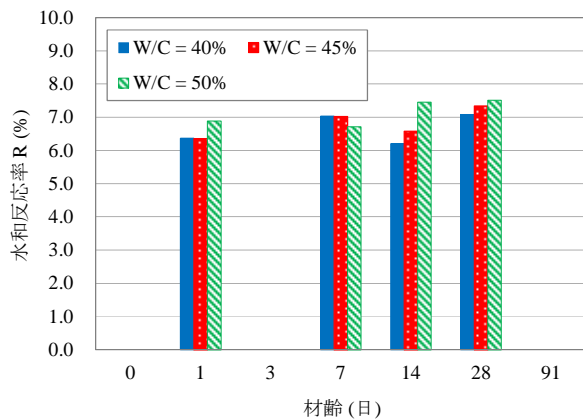


図-4 水和反応率の経時変化

図-4に水和反応率の経時変化を示す。1つの試験体に対して測定までに長時間を要するため、実験の都合上、材齢0、3、91日のデータは未測定である。図-4より、水和反応率は材齢1日時点で6%を超えており、その後の時間経過による増加は少ない。この値は、高炉水砕スラグに対して実施された結果<sup>2)</sup>の3~4%に比べると大きい。また、基本的には養生時の固液比が小さいと、水和反応率は若干高い値を示した。しかし、水和反応物が強度発現に寄与するかは不明である。

### 3.2 フレッシュ性状試験結果

表-4、図-5に置換率変化による各配合の練り混ぜ終了後5分間静置後のフレッシュ性状を示す。この5分間は混和剤の時差影響を減らす目的で設けた時間である。

表-4 フレッシュ性状結果

配合	スランブフロー (cm)	50cmフロー到達時間 (s)	空気量 (%)
NSS 0% (LS)	69.5	5.0	4.3
NSS 0% (NSSP)	67.5	6.0	5.3
NSS 30% (NSSP)	66.5	7.0	5.5

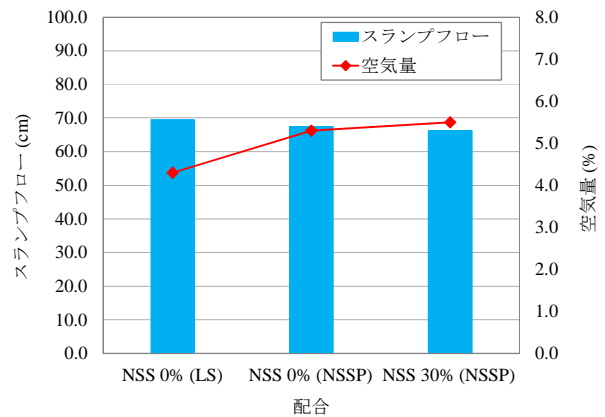


図-5 フレッシュ性状試験結果

スランブフローは各配合の間で大きな変化は見られなかった。フロー時間についても、各配合での差異はほとんど見られなかった。また、空気量についてはAE剤を配合条件に合うように調整したが、同量を配合したNSS0%(LS)とNSS0%(NSSP)では、後者の空気量が多く、これは粉体に対するAE剤の利き方の差と考えられる。

### 3.3 長期性状試験結果

#### (1) 強度試験

図-6、図-7、図-8に圧縮強度試験、割裂引張強度試験、静弾性係数試験の結果をそれぞれ示す。

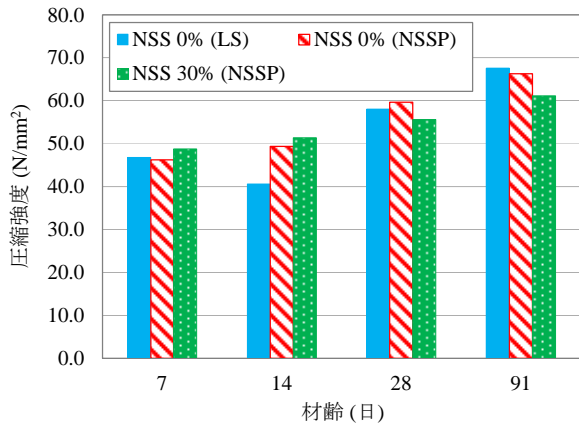


図-6 圧縮強度試験結果

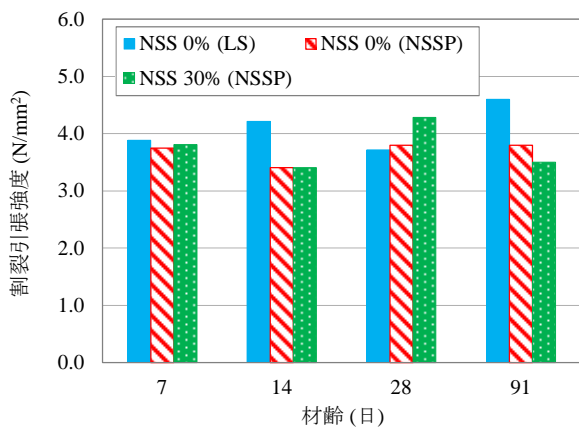


図-7 割裂引張強度試験結果

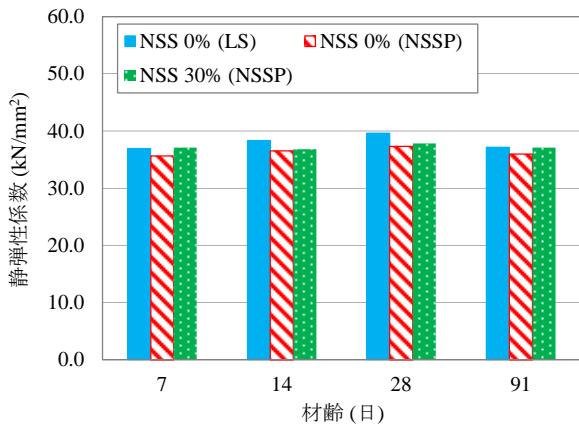


図-8 静弾性係数試験結果

力学特性は各配合で似たような傾向を示した。しかし、圧縮強度では、材齢による増加傾向があるものの、材齢14日強度が材齢7日強度より低下したり、引張強度および静弾性係数では、材齢による増加が見られなかったりむしろ低下した。これらは一般的な材齢経過の傾向と異なっており、その理由の解明には至らなかった。再実験等により検証を実施したい。

(2) 促進中性化試験

図-9、図-10 に中性化深さおよび中性化速度係数の経時変化を、写真-3 に8週目時点での促進中性化試験状況をそれぞれ示す。現在のところ、促進中性化試験は継続中であり、結果は促進期間13週までのものとなっている。

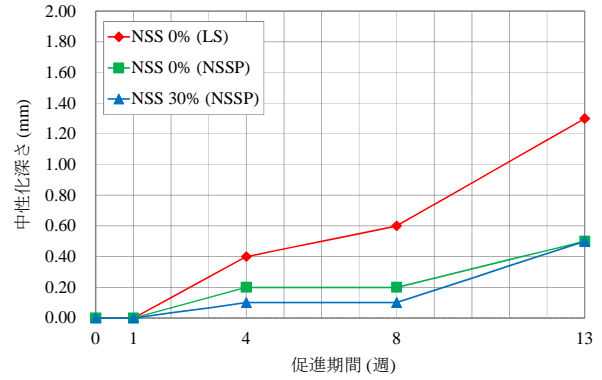


図-9 中性化深さの経時変化

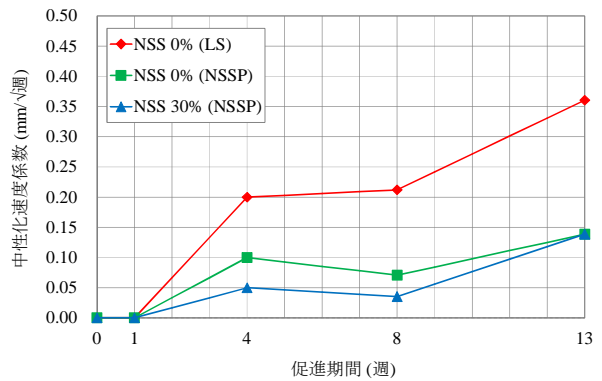


図-10 中性化速度係数の経時変化

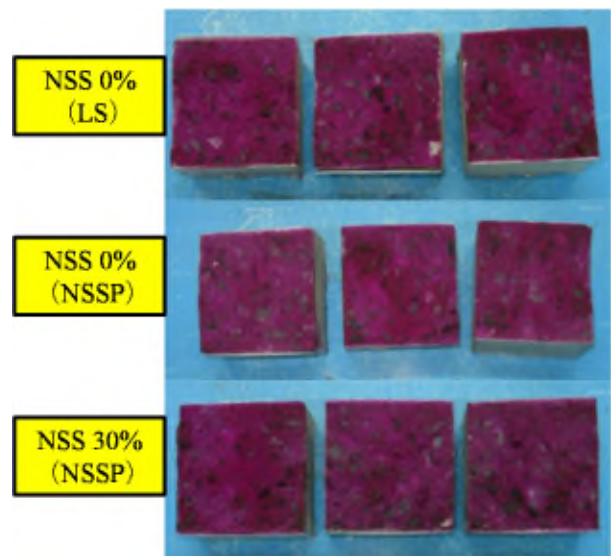


写真-3 促進中性化試験状況 (8週)

図より基本配合である NSS0%(LS) と比較して、NSS0%(NSSP) と NSS30%(NSSP) は中性化が進行していないことが分かる。これは、先に示した NSS の水和生成物によりコンクリート内部が緻密化したためと考えられる。このことから、NSS および NSSP を使用することで中性化深さを抑制することが可能であると思われる。

### (3) 乾燥収縮試験

図-11、図-12 に長さ変化率および逸散水量の経時変化をそれぞれ示す。全ての配合で収縮量、逸散水量共に大きな差は見られず、収縮ひずみが 800 $\mu\text{m}$  以下であるため、NSS30% 置換や NSSP 使用の高流動コンクリートは普通コンクリートと同等の乾燥収縮抵抗性を有していると言える。

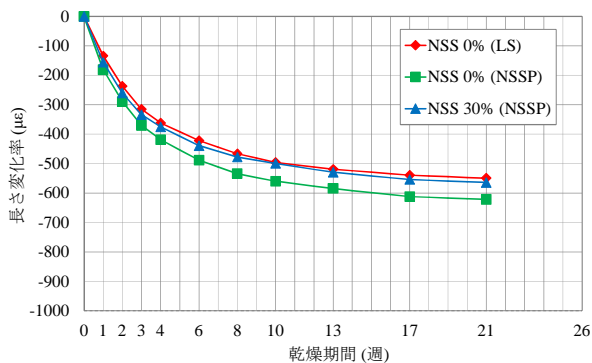


図-11 長さ変化率の経時変化

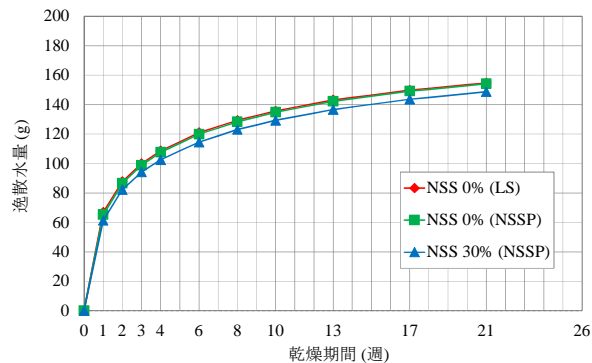


図-12 逸散水量の経時変化

### (4) 凍結融解試験

図-13 に相対動弾性係数の経時変化を示す。また、表-5 に各配合の耐久性指数と質量減少率を示す。300 サイクルを終えたところ、全ての配合で相対動弾性係数が 100% 前後を維持し続けた。さらに、耐久性指数がほぼ 100、質量減少率が 0.0% であったため、NSS 高流動コンクリートは粉体を LS としたものと同等の凍結融解作用に対する抵抗性を十分に有していると言える。

表-5 耐久性指数と質量減少率

配合	耐久性指数 DF	質量減少率 (%)
NSS 0% (LS)	99	0.0
NSS 0% (NSSP)	99	0.0
NSS 30% (NSSP)	100	0.0

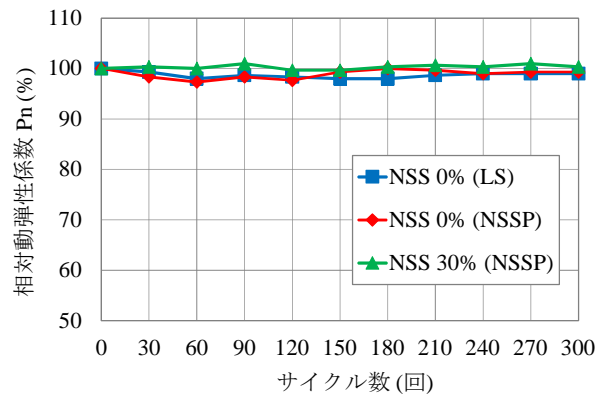


図-13 相対動弾性係数の経時変化

## 4. まとめ

本研究から、以下のことが明らかとなった。

- (1) NSS は早期的な水和反応性を有しているのは明らかになったが、これが強度発現に寄与するかは不明である。
- (2) NSS を高流動コンクリートの材料に用いても、混和剤や AE 剤を調整することで従来の砕砂を用いたものと同等のフレッシュ性状を得ることが可能である。
- (3) 本研究の範囲では、NSS を用いた高流動コンクリートは粉体を LS としたものより高い中性化抵抗性を有している。
- (4) 乾燥収縮および凍結融解に対する抵抗性は NSS を用いた高流動コンクリートと粉体を LS としたものと同等である。

## 5. 参考文献

- 1) 岡祐太郎, 高海克彦, 浦木大資, 松尾栄治: ステンレススラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.76-81, 2014
- 2) 和田正寛, 松田博, 原弘行, 井川尚之, 中村奨哉: 水和反応に着目した高炉水砕スラグの自己修復特性に関する基礎的研究, 材料, Vol.64, No.7, pp.573-578, 2015
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】2012
- 4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS (5) 鉄筋コンクリート工事 2009