

論文 高硫酸塩スラグセメントコンクリートの耐薬品性について

宮澤 祐介*1・横室 隆*2

要旨：本研究は、高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリートの耐薬品性などの諸性質を把握するため、普通ポルトランドセメントと比較検討した。その結果、高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリートの圧縮強度・静弾性係数は、材齢の経過とともに増進する。さらに、10%硫酸ナトリウム溶液および人工海水溶液に浸せきしたコンクリートは、耐硫酸性および耐海水性に優れていることを明らかにした。

キーワード：高硫酸塩スラグセメント、高炉スラグ微粉末、圧縮強度、長さ変化率、耐薬品性

1. はじめに

我が国のCO₂の排出量は、年間1,200万トン程度であり年々増加傾向にある。CO₂削減・省資源・省エネルギーならびに地球環境保全を図るため、我が国で発生する産業副産物のうち、年間2,000万トン程度副産される高炉スラグに着目し、高炉スラグの有効利用を図る目的で実施した。

高含有量のスラグを利用した既往の研究^{1), 2)}では、高硫酸塩スラグセメントを実際のコンクリート構造物等に使用できるかを検討している。筆者らは、これまでに高硫酸塩スラグセメントモルタルの基礎物性や調合および比表面積などについて検討し、耐薬品性の効果を明らかにしてきた^{3), 4)}。さらには、これらの結果を基に、高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリート実験からも検討してきた⁵⁾。

一般にコンクリートの耐薬品性を向上させる方策のひとつとして、水セメント比を低く抑えて高品質なコンクリートとするのが有効とされている。しかし、低水セメント比のほうが劣化進行が著しいとの報告⁶⁾もあり、いまのところ解明されていない。

そこで、本研究は硫酸塩および海水などの化学作用

を受けるコンクリートについて、高硫酸塩スラグセメントを用い、水セメント比を変化させたコンクリートの耐薬品性について、普通ポルトランドセメントと比較検討したものである。

2. 高硫酸塩スラグセメント

高硫酸塩スラグセメントとは、水砕スラグを80%以上含み、刺激剤としてせっこうをSO₃として3%以上、さらにポルトランドクリンカや水酸化カルシウムのようなアルカリ性を与える物質を4%以下として、きわめて微細に粉碎して造られるセメントとして知られている。このセメントは、硫酸塩や海水に対する化学抵抗性に優れており、コンクリート硬化時の水和熱も低く、長期強度も高いことなどが知られている。また、高炉スラグを多量に使用したコンクリートは初期強度が小さく、中性化速度も早いなどの問題点が指摘されている。この高炉スラグ微粉末は、1995年5月にJIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」が制定され、比表面積に応じて、4,000、6,000および8,000cm²/gの品質が規格化されている。

最近では、粉体技術の発達により比表面積10,000cm²/g以上の品質が安定している高炉スラグ微

表-1 使用材料および品質

使用材料 (記号)	種類	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3,390cm ² /g
高炉スラグ微粉末 (BF)	高炉スラグ微粉末 10000	密度 2.92g/cm ³ , 比表面積 11,060cm ² /g, 平均粒径 4.0μm
無水せっこう (Gy)	無水せっこう	密度 2.92g/cm ³ , 比表面積 4,800cm ² /g, 平均粒径 5.3μm, CaSO ₄ 97.4%
細骨材 (S)	鬼怒川産砂	表乾密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.4%, f.m. 2.7
粗骨材 (G)	鬼怒川産砂利	表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 2.1%, Gmax 25mm
水 (W)	上水道水	—
化学混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤	塩化物イオン量 0.065%, 全アルカリ量 0.9%

*1 足利工業大学 工学部建築学科非常勤講師 (正会員)

*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 高炉スラグ微粉末の化学成分

名称	化学組成 (%)							
	ig.loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fl ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
BF	0.55	0.64	32.7	13.4	0.5	41.6	6.9	0.34

粉末の供給体制が整っている。

3. 実験概要

3.1 使用材料

本実験で使用した材料の種類および品質を表-1 に示す。また、高炉スラグ微粉末の化学成分を表-2 に示す。

3.2 高硫酸塩スラグセメントの混合割合

高硫酸塩スラグセメントの混合割合は、従来の研究報告¹⁾および筆者らの研究³⁾から3成分の混合割合を圧縮強度から検討した結果、次に示す割合で実験した。

C : BF : Gy = 0.05 : 0.80 : 0.15 (質量比)

3.3 実験に供したコンクリート

実験したコンクリートの割合を表-3 に示す。普通ポルトランドセメントコンクリート(以下Nと略す)と高硫酸塩スラグセメントコンクリート(以下Sと略す)の水結合材比(W/(C+BF))は、60, 50, 40%の3水準とし、いずれのコンクリートともスランブは18±2.5cm、空気量は4±1.5%を目標とした。

3.4 コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、容量100ℓの一軸強制ミキサに細骨材、粗骨材、結合材としてのセメント、高炉スラグ微粉末、無水せっこうの順に投入し、1分間空練りし、そこに水とAE減水剤標準形を加えて合計3分間練り混ぜた。

3.5 実験項目および試験方法

(1) フレッシュコンクリートの試験方法

1) スランブ

スランブ試験は、JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験) によった。

2) 空気量

空気量試験は、JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法) によった。

3) コンクリートの練上がり温度

コンクリートの練上がり温度は、棒状温度計を用いて測定した。

4) ワーカビリティ

ワーカビリティについては、スランブ試験の際、スランブしたコンクリートの形状や、くずれ方などから目視によって判断した。

5) ブリーディング量

ブリーディング量試験は、JIS A 1123 (コンクリートのブリーディング試験方法) によった。

(2) 硬化コンクリートの試験方法

1) 圧縮強度・静弾性係数およびポアソン比

圧縮強度の供試体は、JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) によって、10φ×20cmの供試体を作製した。なお、脱型は材齢2日で実施した。また、圧縮強度試験はJIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) により、標準養生(20℃水中)し強度試験をおこなった。なお、材齢は、7日、28日、91日、1年および5年で試験した。

また、圧縮強度時にコンプレッソメータを用いて、ひずみを測定し、最大荷重の1/3の静弾性係数およびポアソン比を求めた。

2) 凍結融解作用に対する抵抗性

凍結融解作用に対する抵抗性試験は、ASTM C 666 A 法 (Resistance of Concrete rapid Freezing and the wing) により、300 サイクルまでの相対動弾性係数を測定した。

表-3 フレッシュコンクリートの割合と実験結果

コンクリートの種類	W/(C+BF) (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	質量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (℃)	最終ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
				結合材			細骨材 S	粗骨材 G				
				C	BF	Gy						
N-60	60.0	40.0	160	266.7	—	—	738	1120	22.0	4.0	22.0	0.32
S-60		36.0	160	13.3	213.4	40.0	658	1185	21.0	4.5	21.5	0.00
N-50	50.0	37.3	162	324.0			668	1138	22.0	4.5	21.0	0.24
S-50		33.3	162	16.2	259.2	48.6	591	1195	20.0	4.0	21.0	0.00
N-40	40.0	30.0	179	447.5			495	1167	22.0	4.5	21.0	0.15
S-40		26.0	179	22.4	358.0	67.1	421	1214	17.5	4.0	21.0	0.00

※化学混和剤の使用量はC×0.25%である。

3) 耐薬品性・耐海水性

耐薬品性試験は、(財)建材試験センターのJSTM C 7401(溶液浸せきによるコンクリートの耐薬品性試験方法)による10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした。なお、供試体は10φ×20cmの円柱供試体を作製し、材齢7日まで20℃水中養生した後、材齢28日まで20℃・90%R.H.の恒温恒湿室にて封かん養生した。

耐海水性試験は、JIS A 6205(鉄筋コンクリート用防せい剤)の付属書1表2に示されている塩分組成の人工海水に浸せきした。

なお、供試体および養生方法は耐薬品性試験と同様の条件でおこなった。耐薬品性試験の浸せき期間は、3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月および1年で圧縮試験した。また、耐海水性試験の浸せき期間は、1年および5年で圧縮試験した。また、各溶液は、1週間毎に新しいものと取り換え、供試体表面を水洗いした後に所定の容器に浸せきした。

4) 質量変化率

質量変化は、圧縮強度試験時に用いた同一の供試体3本の質量を測定し、(1)式により各々の質量変化率を算定し、その平均値を求めた。

$$\text{質量変化率(\%)} = \frac{\text{浸せき前の質量} - \text{試験時の質量}}{\text{浸せき前の質量}} \times 100 \quad (1)$$

5) 長さ変化

長さ変化試験は、10×10×40cmの供試体を用い10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきしたものを、JIS A 1129に定められているコンパレータ法により測定した。なお、基長は浸せき開始前の材齢28日とし、浸せき期間1年までの長さ変化を測定した(供試体の前養生は上記の(2)の3)と同様)。

4. 実験結果と考察

4.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの実験結果を表-3に示し、以下に検討する。

(1) ワーカビリティ

ワーカビリティは、スランプ試験の際に目視で観察したが、いずれのコンクリートとも化学混和剤を用いて調整しているため、高炉スラグ微粉末が増加しても問題はなく、全て良好であった。

(2) ブリーディング量

最終ブリーディング量は、N-60で0.32cm³/cm²、N-50で0.24cm³/cm²、N-40で0.15cm³/cm²となっており、水結合材比が小さくなるにつれてブリーディング量も少くなっている。なお、Nの最終ブリーディング量は、3

水準ともJASS 5の目標値0.50cm³/cm²以下となっている。これに対してSは高比表面積の高炉スラグ微粉末とせっこうを用いたため最終ブリーディング量は3水準とも認められていない。

4.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

20℃水中養生した圧縮強度の結果を図-1に示す。材齢の経過に伴い順次強度の増進が見受けられる。水結合材比が小さいものほど、いずれのコンクリートとも強度が高くなっている。セメント別で見ると全ての材齢において、Sのほうが高い値となっている。

ここで、各材齢におけるNに対するSの圧縮強度比を算出すると、N-60の材齢7日では1.04倍、材齢28日では1.15倍、材齢91日では1.21倍、材齢1年では1.12倍、材齢5年では1.14倍となる。N-50の材齢7日では1.32倍、材齢28日では1.20倍、材齢91日では1.11倍、材齢1年では1.21倍、材齢5年では1.15倍となる。N-40の材齢7日では1.02倍、材齢28日では1.06倍、材齢91日では1.03倍、材齢1年では1.07倍、材齢5年では1.08倍となる。

(2) 静弾性係数およびポアソン比

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2に示す。また、圧縮強度とポアソン比の関係を図-3に示す。N、Sコンクリートの静弾性係数は、図-2に示した通り、日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」

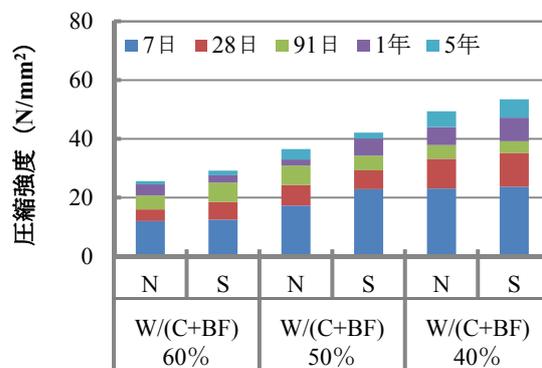


図-1 コンクリートの圧縮強度

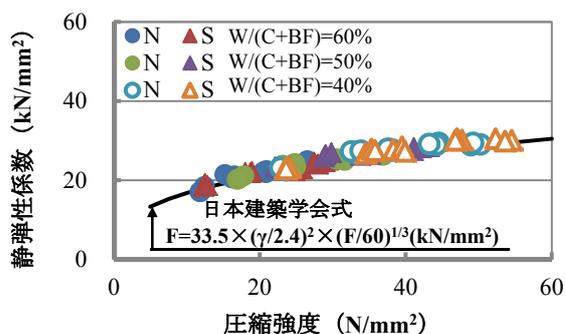


図-2 圧縮強度と静弾性係数の関係

に示されている式をいずれのコンクリートとも上回っており、問題はない。

一般にコンクリートの静弾性係数はコンクリートの圧縮強度および使用する粗骨材ならびに混和材の種類に影響され、強度が高いほど静弾性係数は大きな値を示すと考えられている。

本実験での静弾性係数は 17.1~30.5kN/mm² の範囲にあり、圧縮強度が高いほど静弾性係数は大きい値となっている。

次に、各種コンクリートのポアソン比の値は 0.08~0.24 の範囲 (図-3 参照) にあり、材齢の経過に伴ないポアソン比も大きな値を示している。

従って、圧縮強度と同様に水結合材比の小さいものほど静弾性係数およびポアソン比も高くなる。

(3) 凍結融解作用に対する抵抗性

各種コンクリートの相対動弾性係数の結果を図-4 に示す。300 回繰り返した場合の相対動弾性係数は、N では 90~94%、S では 93~95% の範囲にあり、日本建築学会の JASS 5 で目標値としている 80% を大きく上回っている。

(4) 耐薬品性・耐水溶性

10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした後の圧縮強度結果を図-5 およびコンクリートの劣化状況の一例を写真-1 (a) に示す。10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした各材齢ごとの圧縮強度比 (浸せき後の圧縮強度を浸せき前の圧縮強度で除した値) を算出すると、N-60 の浸せき 3 ヶ月間では 0.82 倍、6 ヶ月間では 0.41 倍と材齢の経過とともに強度低下し、9 ヶ月間では崩壊した。また S-60 の浸せき 3 ヶ月間では 1.08 倍、6 ヶ月間では 1.03 倍、9 ヶ月間では 1.03 倍、12 ヶ月間では 1.02 倍と徐々に強度低下したものの浸せき前の初期値を下回ることには無かった。

同様に、N-50 の浸せき 3 ヶ月間では 1.20 倍、と強度増進が見られたが、6 ヶ月間では 0.98 倍となり、コンクリートからペーストの剥がれが確認できた。さらに、9 ヶ月間では 0.74 倍となり、コンクリートから粗骨材の露出がみられ、材齢の経過とともに強度低下し、12 ヶ月間では 0.24 倍と大きく低下した。また S-50 の浸せき 3 ヶ月間では 1.16 倍、6 ヶ月間では 1.23 倍、9 ヶ月間では 1.34 倍と強度増進し、12 ヶ月では 1.20 倍と強度低下したものの、浸せき前の初期値を下回ることには無く、コンクリートの劣化も見られなかった。

同様に、N-40 の浸せき 3 ヶ月間では 1.08 倍、と強度増進が見られたが、6 ヶ月間で 0.91 倍、9 ヶ月間では 0.75 倍、12 ヶ月間では 0.67 倍と材齢の経過とともに強度低下した。また S-40 の浸せき 3 ヶ月間では 1.07 倍、6 ヶ月間では 1.17 倍、9 ヶ月間では 1.24 倍と強度

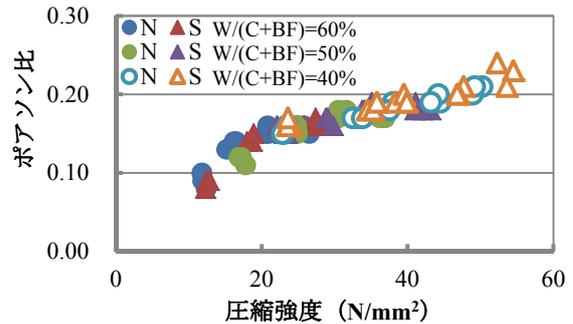


図-3 圧縮強度とポアソン比の関係

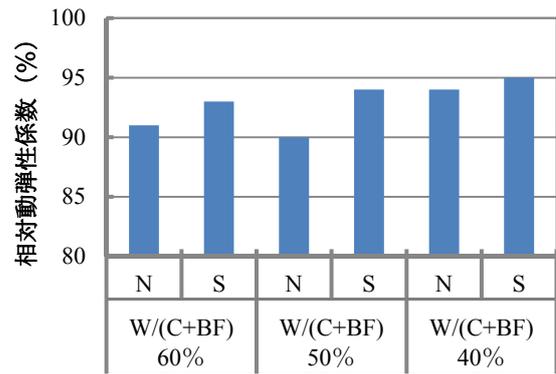


図-4 コンクリートの相対動弾性係数

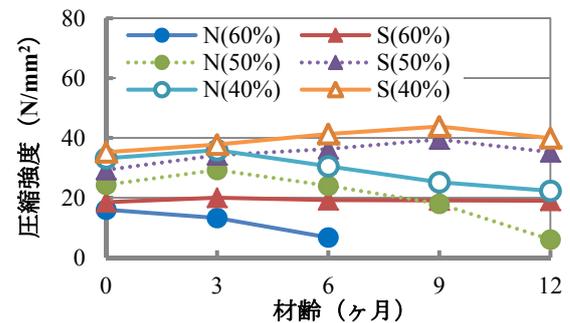


図-5 10%硫酸ナトリウム溶液に浸せき後の圧縮強度

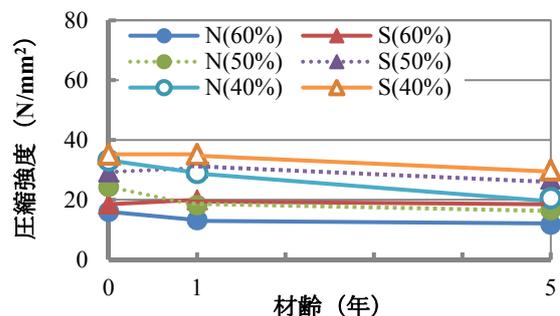


図-6 人工海水溶液に浸せき後の圧縮強度



写真-1 各溶液に浸せきしたコンクリートの劣化状況の一例 (材齢 12 ヶ月)

増進がみられたが、12ヶ月では1.13倍と強度低下したものの浸せき前の初期値を下回ることは無かった。

次に、人工海水に浸せきした後の圧縮強度結果を図-6およびコンクリートの劣化状況の一例を写真-1(b)に示す。同様に圧縮強度比を算出すると、N-60の浸せき1年間では0.82倍、5年間では0.73倍と材齢の経過に伴ない強度低下している。またS-60の浸せき1年間では1.08倍、5年間では1.07倍と徐々に強度低下したものの浸せき前の初期値を下回ることは無かった。

同様に、N-50の浸せき1年間では0.74倍となり、コンクリートからペーストの剥がれが確認できた。さらに、5年間では0.67倍と材齢の経過とともに強度低下している。またS-50の浸せき1年間では1.04倍、5年間では0.91倍と材齢の経過とともに強度低下し、コンクリートの劣化は見られなかった。

同様に、N-40の浸せき1年間では0.87倍、5年間では0.61倍と材齢の経過とともに強度低下した。またS-40の浸せき1年間では1.00倍、5年間では0.84倍と強度低下した。

次に、20℃水中養生と各溶液に浸せき後の圧縮強度の関係を図-7に示す。10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきしたN-60は、0.00~0.92倍、S-60は0.68~0.98倍、同様にN-50は、0.18~0.91倍、S-50は0.87~1.11倍、同様にN-40は、0.50~0.94倍、S-40は0.84~1.00倍の範囲にある。いずれの水結合材比においてもSの方が薬品に対する抵抗性があり、浸せき期間9ヶ月までのS-50およびS-40は、20℃水中養生より同等もしくは高い値を示しており、耐薬品性に対する抵抗性が高いことがわかった。なお、このことはこれまで報告³⁾している論文と同様の傾向にある。

同様に、人工海水溶液に浸せきしたN-60は、0.45~0.53倍、S-60は0.68~0.72倍、同様にN-50は、0.45~0.55倍、S-50は0.63~0.76倍、同様にN-40は、0.41~0.65倍、S-40は0.55~0.74倍の範囲にある。このことから、いずれの水結合材比においてもSの方が海水に対する抵抗性があり、水結合材比の小さいものほど海水に対する抵抗性が高いことがわかった。

(5) 質量変化率

10%硫酸ナトリウムに浸せきした後の円柱供試体の質量変化率を図-8に示す。N-60の浸せき3ヶ月間では0.86%増加しており、9ヶ月間では78.2%減少し、その後崩壊した。S-60は、材齢の経過に伴ない質量は増加した。浸せき12ヶ月間では0.91%増加し、劣化は認められていない。同様にN-50は、材齢の経過とともに徐々に増加しており、浸せき6ヶ月間では1.81%増加し、12ヶ月間は82.4%減少した。S-50は、材齢の経過とともに質量は増加しており、浸せき12ヶ月間

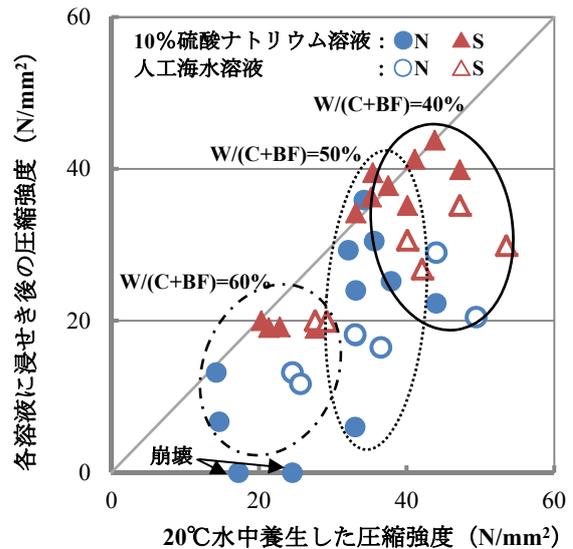


図-7 20℃水中養生と各溶液に浸せき後の圧縮強度の関係

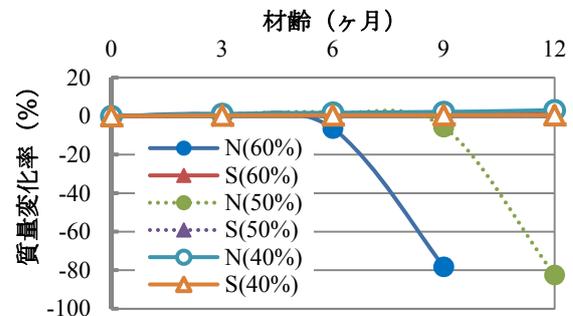


図-8 10%硫酸ナトリウム浸せき後の質量変化率

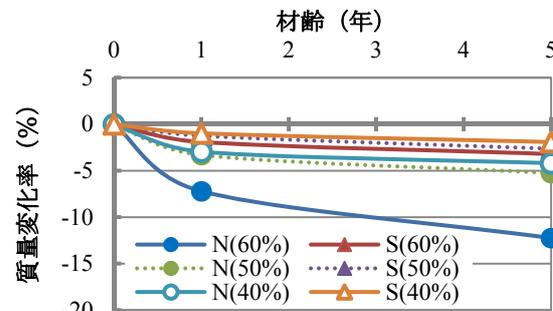


図-9 人工海水浸せき後の質量変化率

では0.79%増加し、劣化は認められていない。同様にN-40は、材齢の経過とともに徐々に増加しており、浸せき12ヶ月間では3.08%増加し、劣化は認められていない。S-40は、材齢の経過とともに質量は増加しており、浸せき12ヶ月間で0.55%増加し、劣化は認められていない。

次に、人工海水溶液に浸せきした後の円柱供試体の質量変化率を図-9に示す。浸せき5年間でみると、N-60は、12.25%、S-60は、3.21%、同様にN-50は5.25%、S-50は2.64%、N-40は4.20%、S-40は1.92%と、いずれの水結合材比においても質量は減少した。セメン

ト別でみるとSのほうがその値は小さい。Nは水結合材比の高いものでは粗骨材が露出し劣化しているが、Sは表面のセメントペーストの剥がれが確認できる程度であった。

(6) 長さ変化率

10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした後の供試体の長さ変化率の測定結果を図-10に示す。これをみると、N-60では、浸せき6ヶ月間の膨張率は 1.89×10^{-4} となり、以降崩壊したため測定不能。同様にN-50では、浸せき12ヶ月間で 1.53×10^{-4} となり、以降崩壊したため測定不能。浸せき期間15ヶ月間の膨張率は、S-60は 1.10×10^{-4} 、S-50は 0.54×10^{-4} となった。同様にN-40では 1.11×10^{-4} 、S-40は 0.42×10^{-4} となり、水結合材比が小さいほど膨張率も小さくなっている。セメント別ではSのほうが小さくなった。

次に、人工海水に浸せきした後の長さ変化率の結果を図-11に示す。浸せき5年間の膨張率は、N-60では 1.73×10^{-4} 、Sで 1.24×10^{-4} となっている。同様にN-50では 1.62×10^{-4} 、Sで 1.15×10^{-4} となっている。同様にN-40では 1.45×10^{-4} 、Sで 0.84×10^{-4} となり、いずれの水結合材比においてSの膨張率が若干小さい。

以上のことから、10%硫酸ナトリウム溶液や人工海水に浸せきしたものは、Nと比較してSの長さ変化は小さい。この理由としては、高炉スラグ微粉末やせつこうの影響により10%硫酸ナトリウムや人工海水に対する抵抗性があるものと考えられる。なお、このことはこれまで報告⁶⁾している論文と同様の傾向にある。

5. 結論

本研究は、硫酸塩や海水などの化学作用を受けるコンクリートに使用することを目的として、高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリートを10%硫酸ナトリウムおよび人工海水に浸せきし、普通ポルトランドセメントコンクリートと比較検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 高硫酸塩スラグセメントコンクリートの長期圧縮強度は高くなる。また、このセメントは高炉スラグ微粉末の分量が多く、さらに、比表面積が大きいため、耐硫酸性および耐海水性なども期待できる。

(2) 高硫酸塩スラグセメントコンクリートの長さ変化率は、10%硫酸ナトリウム溶液と人工海水に浸せきした場合では小さくなる。

(3) 高硫酸塩スラグセメントコンクリートの耐凍害性は期待できる。

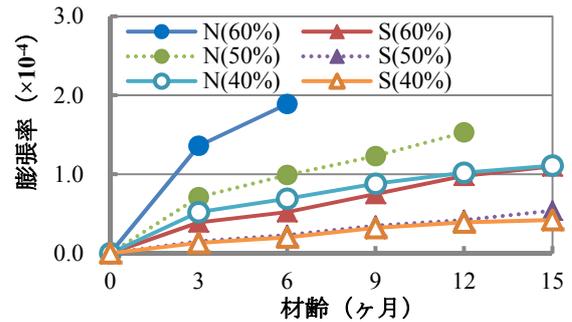


図-10 10%硫酸ナトリウム溶液に浸せき後の長さ変化率

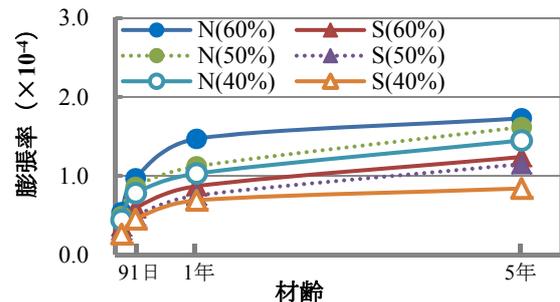


図-11 人工海水溶液に浸せき後の長さ変化率

参考文献

- 1) 長尾之彦, 近田孝夫, 富沢年道: 35年暴露したスラグ高含有セメントコンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, 12-1, pp.633-638, 1990.8
- 2) 山内俊吉, 近藤連一, 中島節治: 高硫酸塩スラグセメントの構成成分の粉末度がその性能におよぼす影響, 窯協 66, pp.77-82, 1958
- 3) 横室 隆, 宮澤祐介: 高硫酸塩スラグセメントモルタルの基礎的性状について, 硫酸と工業, Vol.64.No.10, pp.1-6, 2011.10
- 4) 宮澤祐介, 横室 隆: 高硫酸塩スラグセメントを用いたモルタルの基礎物性 (耐薬品性について), 日本建築学会大会学術講演会(関東), pp.191-192, 2011.8
- 5) 宮澤祐介, 横室 隆, 鯉淵 清: 高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリートの基礎性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.64-69, 2012.9
- 6) 田中 斉, 榎田佳寛: 硫酸および硝酸によるコンクリートの化学的腐食進行に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.625, pp.355-361, 2008.3