

論文 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

宮澤 祐介^{*1}・横室 隆^{*2}・鯉淵 清^{*3}

要旨: 本研究は、硫酸塩や海水の化学作用を受けるコンクリートおよび基礎や地中梁などを想定したコンクリート構造物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の基礎性状について、普通ポルトランドセメントと比較実験した。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は、ワーカビリティは良好、凝結時間は3時間程度遅く、断熱温度上昇量は9~13°C程度低い。また、圧縮強度・ヤング係数は、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などへ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などを明らかにした。

キーワード: 高硫酸塩スラグセメント, 高炉スラグ微粉末, 断熱温度上昇, 圧縮強度, 長さ変化率

1. はじめに

近年、CO₂削減・省資源・省エネルギーおよび地球環境保全等、社会的な要請から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水砕スラグに着目し、高炉スラグの有効利用を図る目的で実施した。

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 8,000g/cm³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 10,000g/cm³以上の品質が安定している高炉スラグ微粉末の供給体制が整いつつある。

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、きわめて微細に粉砕して造られるセメントとしてドイツでは規格されている。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。

そこで、本研究はコンクリート構造物としての基礎や地中梁および地下躯体、さらには硫酸塩などの化学作用をうけるコンクリートなどに使用できるものと考え、写真-1に示す通り、土の中に養生（以下土中養生と略す）した高硫酸塩スラグセメントを用いたコンクリートの基礎的性状について実験したものである。

2. 実験概要



写真-1 土中養生したコンクリート

2.1 使用材料

(1) セメント（記号C）

セメントは、JIS R 5212の4.2に規定されているシリカ質混合材やJIS A 6201に規定されているフライアッシュなどが混合されていない普通ポルトランドセメント（密度3.15g/cm³, MgO 1.4%, SO₃ 2.1%, ig.loss 0.7%）を用いた。

(2) 高炉スラグ微粉末（記号BF）

高炉スラグ微粉末（密度2.92g/cm³, ガラス化率98%, ig.loss 0.55%, insol 0.64%, SiO₂ 32.7%, Al₂O₃ 13.4%, Fe₂O₃ 0.5%, CaO 41.65%, MgO 6.9%, SO₃ 0.34%, 塩基度1.9）は、BF10000（比表面積11,060cm²/g, 平均粒径4.0 μm）を用いた。

(3) 無水せっこう（記号Gy）

フッ酸製造工程で副産される無水せっこう（密度2.92g/cm³, 比表面積4,800cm²/g, 平均粒径5.3 μm, CaSO₄ 97.4%）を用いた。

*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）

*3 (株) デイ・シー 技術情報室長 博士(先端科学技術)（正会員）

(4) 細骨材 (記号 S)

鬼怒川産砂(表乾密度 2.56g/cm³, 吸水率 1.4%, f.m.2.7)を用いた。

(5) 粗骨材 (記号 G)

鬼怒川産砂利(表乾密度 2.61g/cm³, 吸水率 2.1%, Gmax 25mm)を用いた。

(6) 水 (記号 W)

上水道水を用いた。

(7) 化学混和剤

AE 減水剤標準形(主成分がリグニンスルホン化合物とポリオール複合体で、塩化物イオン量 0.06%, 全アルカリ量 0.9%)を用いた。

2.2 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), 2)}から、次に示す割合で実験した。

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

2.3 目標としたコンクリートの割合

コンクリートの強度は材齢 28 日で圧縮強度 24N/mm²を超える強度を目標とした。そのため、試し練りによって割合を定めた。なお、水結合材比 (W/(C+BF)) は、普通ポルトランドセメントコンクリート(以下 N と略す)では 50%, 高硫酸塩スラグセメントコンクリート(以下 S と略す)では 54%とした。スランブは 18±2.5cm, 空気量は 4.5±0.5%を目標とした。なお、これら実際に得られたコンクリートの割合を表-1 に示す。

2.4 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。

2.5 土中養生したコンクリート

土中養生したコンクリートは、コア強度試験用として 80×80×80cm および 60×60×60cm の供試体、圧縮強度試験用として 10φ×20cm, 長さ変化用として 10×10×40cm の各供試体を作製した。前養生としてコンクリート打設後、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。その後、試験材齢まで図-1 に示すような、土中に養生した。なお、土中養生の環境は、平均外気温で 14.8℃ (-4.1~36.4℃), 年間降水量は、1011mm である。

2.6 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) による。

2) 空気量

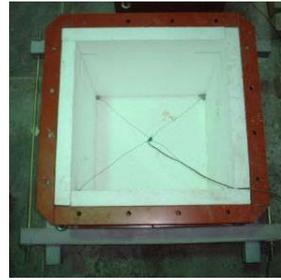


写真-2 発泡スチロールで型枠内面を断熱した状況



写真-3 土中養生した供試体からコアを採取している状況

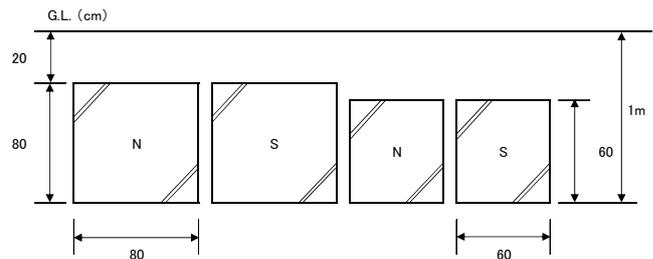


図-1 土中養生したコンクリート供試体の状況

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) による。

3) コンクリートの練上がり温度

棒状温度計を用いて測定した。

4) ワークビリティ

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) による。

6) 断熱温度上昇

コンクリートの温度上昇は、写真-2 に示した通り、鋼製型枠 (100×100×100cm および 80×80×80cm) の 2 種類を用い、厚さ 10cm の発泡スチロールで型枠内面を断熱し、打ち込んだコンクリートの中心温度を銅-コンスタント熱電対を用い、20 分間隔で 7 日間にわたって測定した。

7) 凝結

凝結試験は、ASTM C 403 (Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance) による。

(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、供試体の養生は、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、その後、試験材齢まで 20℃水中養生した。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、強度試験をおこなった。なお、材齢は、7日、28日、3ヶ月、6ヶ月、1年および3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) コア強度

コア強度試験は、写真-3に示すように土中養生した80×80×80cmの供試体から、コア採取機を用いて10φのコアを抜き取り、JIS A 1107(コンクリートからの採取方法及び圧縮強度試験方法)によって、材齢1年および3年で試験した。

3) 引張強度

引張強度試験は、10φ×20cmの供試体を用い、JIS A 1113(コンクリートの割裂引張強度試験方法)に準じて20℃水中養生した材齢28日のみ試験した。

4) 曲げ強度

曲げ強度試験は、10×10×40cmの供試体を用い、JIS A 1106(コンクリートの曲げ強度試験方法)に準じて20℃水中養生した材齢28日のみ試験した。

5) 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。

6) 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と10×10×40cmの2種類の供試体を作製し、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い、試験はいずれも1ヶ月間、3ヶ月間、6ヶ月間、9ヶ月および12ヶ月間で実験した。また、各溶

液は、1週間毎に新しいものと取り換えた。

7) 長さ変化

長さ変化試験は、10×10×40cmの供試体を用い20℃水中養生、土中養生、10%硫酸ナトリウム溶液および人工海水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日とした(供試体の前養生は上記の(2)の6)と同様)。

また、参考のためJIS A 1129-1(モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法)により20℃・60%R.H.の恒温恒湿室に放置した長さ変化についても測定した。なお、基長は材齢7日とし、乾燥期間1年までの長さ変化を測定した。

8) 中性化深さと鉄筋の発錆

中性化深さおよび鉄筋の発錆試験は、10×10×40cmの供試体を用い、供試体の中心に10φの磨き鉄筋を配筋し、屋外自然暴露した材齢1年、3年の中性化深さと鉄筋の発錆について試験した。

中性化深さの測定は、長て方向に10cm厚に切断し、その断面にフェノールフタレインアルコール溶液(1%)を噴霧し、両側面計20ヶ所をノギスを用いて測定し、平均中性化深さを求めた。

また、鉄筋の発錆については、この供試体からコンクリートを研り、鉄筋を取り出し発錆を肉眼で確認した。

3. 実験結果と考察

3.1 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-1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、スランブ試験の際に目視で観察したが、N、Sとも良好であった。

(2) ブリーディング量

最終ブリーディング量は、Nが0.26cm³/cm²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か最終ブリーディング量は認められていないが、施工上、問題はなかった。なお、Nの最終ブリーディング

表-1 フレッシュコンクリートの調査と実験結果

コンクリートの種類	W/(C+BF) (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	結合材 (kg/m ³)			コンクリート温度 (°C)	最終ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	凝結 (h-m)		ワーカビリティ
						C	BF	Gy			始発	終結	
N	50	19.5	4.1	37.3	162	324.0	—	—	13.5	0.26	8-10	12-10	良
S	54	19.5	4.1	37.3	162	16.2	240.1	45.1	12.3	0.00	10-50	14-50	良

表-2 硬化コンクリートの試験結果

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	相対動弾性係数 (%)			平均中性化深さ (mm)	
						100回	200回	300回	1年	3年
材齢 28 日 (20℃水中養生)						100回	200回	300回	1年	3年
N	25.3 (1.00)	23.6	0.16	2.5 (0.10)	5.8 (0.23)	98	95	88	0.4	1.1
S	27.1 (1.00)	24.6	0.17	2.7 (0.10)	6.2 (0.23)	98	95	88	5.7	8.8

量は、JASS 5 の目標値 0.50cm³/cm²以下となっている。

(3) 凝結

凝結は S のほうが N より 2 時間 40 分程度遅くなっている。これは、高炉スラグ微粉末が多量に含まれているため始発・終結ともに長くなったものと考えられる。

(4) 断熱温度上昇

断熱温度上昇の結果を図-2 に示す。コンクリート供試体寸法 80×80×80cm では N で最高温度 43℃、S では 30℃となっており、S のそれは 13℃程度低くなっている。同様に、60×60×60cm では N で最高温度 35℃、S では 27℃となっており、S のそれは 9℃程度低い。

従って、供試体寸法でみると N は 8℃、S は 3℃と供試体寸法の大きいものほど高い温度となっている。

また、セメント別でみると供試体に関係なく、温度上昇は S のほうが低い。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度・ヤング係数およびポアソン比

圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比の結果を表-2 に示す。20℃水中養生した材齢 28 日の圧縮強度、ヤング係数およびポアソン比は、いずれも S のほうが高い値となっている。

(2) 引張強度・曲げ強度

引張強度および曲げ強度の結果を表-2 に示す。20℃水中養生した材齢 28 日の割裂引張強度は、同一材齢における圧縮強度を 1.00 とし算出すると、引張強度比はいずれのコンクリートとも 0.10 倍、曲げ強度比は 0.23 倍となる。

(3) 長期材齢の圧縮強度

各養生による圧縮強度結果を表-3 に示す。20℃水中養生した圧縮強度は材齢の経過に伴ない、いずれのセメントとも強度が増進しているが、N より S のほうが大きい値となっている。

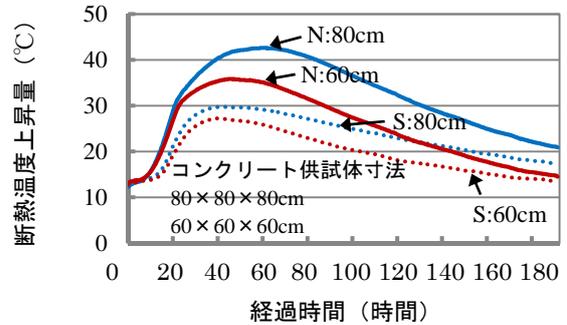


図-2 温度上昇量

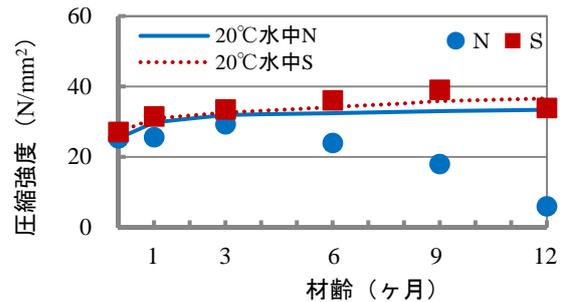


図-3 10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした圧縮強度

ここで、N に対する S の圧縮強度比を算出すると、材齢 91 日では 1.02 倍、材齢 1 年では 1.09 倍、材齢 3 年では 1.09 倍となる。

同様に、土中養生した円柱供試体 (10φ×20cm) の圧縮強度比を算出すると、材齢 1 年では 1.02 倍、材齢 3 年では 1.08 倍となる。

また、コア供試体では、材齢 1 年では 1.13 倍、材齢 3 年では 1.21 倍となった。

円柱供試体の 20℃水中養生と土中養生した圧縮強度の関係を見ると、材齢 1 年では N 及び S とともに 20℃

表-3 各養生によるコンクリートの圧縮強度結果

コンクリートの種類	20℃水中養生					土中養生			
	円柱供試体 (10φ×20cm)					円柱供試体 (10φ×20cm)		コア供試体 (80×80×80cm)	
	7日	28日	91日	1年	3年	1年	3年	1年	3年
N	18.6	25.3	31.9	33.4	36.6	32.6	37.1	27.3	28.6
S	19.0	27.1	32.6	36.6	39.8	33.5	40.2	31.0	34.7

水中養生したものが大きい値となっている。しかし、材齢3年では土中養生のほうが高い圧縮強度が得られる。

(4) 凍結融解作用に対する抵抗性

表-2 に示した通り、300回繰り返した場合の相対動弾性係数は、いずれのコンクリートとも88%であり、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。

(5) 耐薬品性・耐海水性

10%硫酸ナトリウム溶液中に浸せきした圧縮強度結果を図-3 およびコンクリートの劣化状況を写真-4 に示す。10%硫酸ナトリウム溶液中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では、浸せき1ヶ月間では1.01倍、3ヶ月間で1.16倍とピークをむかえ、6ヶ月間で0.94倍となり低下した。写真-4 に示した通り、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0.71倍となり、コンクリートから粗骨材の露出がみられ、12ヶ月間では0.23倍と大きく低下した。

Sでは、浸せき1ヶ月間では1.16倍、3ヶ月間で1.23倍、6ヶ月間で1.33倍、9ヶ月間で1.44倍とピークをむかえ、12ヶ月間では1.25倍と低下しているがコンクリートの劣化はみられない。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。

次に、人工海水に浸せきした圧縮強度結果を図-4 に示す。同様に圧縮強度比を算出すると、Nでは、浸せき1ヶ月間で1.10倍、3ヶ月間で1.08倍、6ヶ月間で1.08倍となりピークをむかえ、9ヶ月間で0.98倍、12ヶ月間で0.73倍と低下しており、コンクリートからペーストの剥がれが確認できた。

Sでは、浸せき1ヶ月間で1.04倍、3ヶ月間で1.11倍、6ヶ月間で1.29倍となりピークをむかえ、9ヶ月間で1.25倍、12ヶ月間で1.12倍と低下しているがコンクリートの劣化はみられなかった。

(6) 長さ変化率

20℃水中養生した供試体の長さ変化率の測定結果を図-5 に示す。材齢52週の膨張率は、Nで 1.0×10^{-4} 、S



写真-4 10%硫酸ナトリウム溶液中に浸せきしたコンクリートの劣化状況（材齢12ヶ月間）

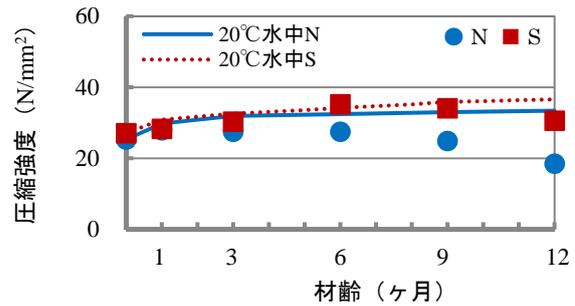


図-4 人工海水に浸せきした圧縮強度

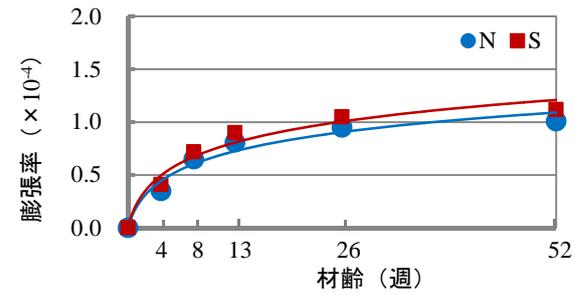


図-5 20℃水中養生における長さ変化率

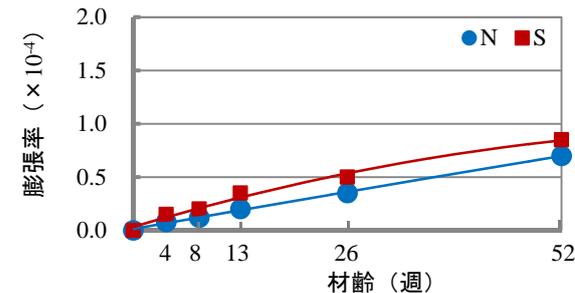


図-6 土中養生における長さ変化率

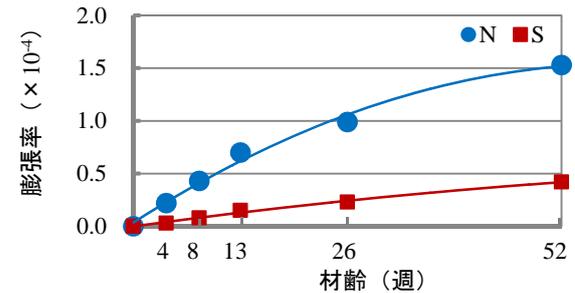


図-7 10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした長さ変化率

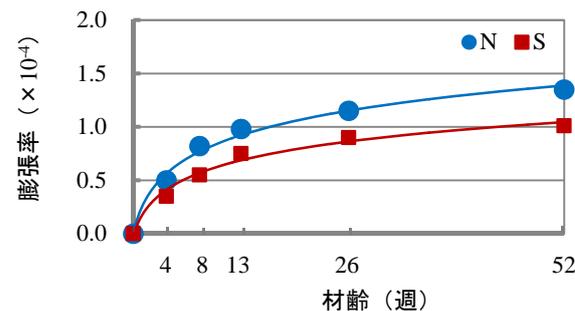


図-8 人工海水に浸せきした長さ変化率

で 1.1×10^{-4} となり、同等の値となる。図に示していないが質量減少率は、Nで1.4%、Sで0.9%となっている。

次に、土中養生した供試体の長さ変化率の測定結果を図-6に示す。材齢52週の膨張率は、Nで 0.7×10^{-4} 、Sで 0.9×10^{-4} となり、同等の値となる。また質量減少率は、Nで0.6%、Sで0.6%となっている。

次に、10%硫酸ナトリウム溶液に浸せきした供試体の長さ変化率の測定結果を図-7に示す。材齢52週の膨張率は、Nで 1.5×10^{-4} 、Sで 0.4×10^{-4} となり、Nの膨張率は極めて大きい。また、質量減少率は、Nで3.7%、Sで0.8%となっている。

次に、人工海水に浸せきした長さ変化率の結果を図-8に示す。材齢52週の膨張率は、Nで 1.4×10^{-4} 、Sで 1.0×10^{-4} となり、若干Sの膨張率が小さい。また、質量減少率は、Nで3.3%、Sで1.2%となっている。

以上のことから、20℃水中養生と土中養生では、N、Sともあまり差異はみられなかったが、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っこうの影響により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。

また、JIS法により測定した長さ変化率を図-9に示す。材齢52週では、Nで 5.5×10^{-4} 、Sで 6.3×10^{-4} と収縮しており、若干Sのほうが大きな値を示している。

この理由としては、比表面積が大きい高炉スラグ微粉末を多量に使用しているため、収縮率が大きくなったものと考えられる。なお、このことはこれまで報告⁴⁾している論文と同様の傾向にある。

(7) 中性化深さ及び鉄筋の発錆

表-2に示した通り、屋外自然暴露した平均中性化深さは、材齢3年でみるとNは1.1mm、Sは8.8mmとなった。このことは高炉スラグ微粉末を多量に使用しているため、Sの中性化が早く進行したものと考えられる。

鉄筋の発錆については、現在のところNでは確認されていないが、Sではわずかの錆が認められている。

4. 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および基礎や地中梁などを想定したコンクリート構造物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土の中に埋めて、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凝結は、

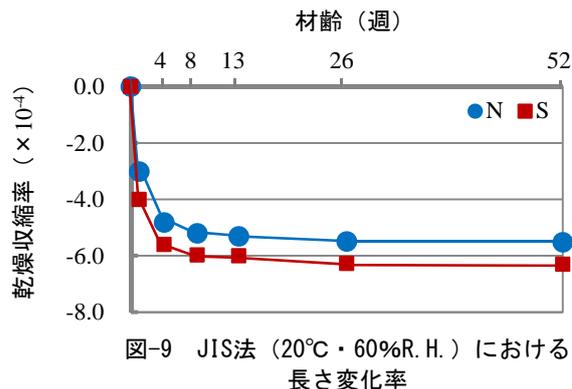


図-9 JIS法 (20℃・60%R. H.) における長さ変化率

高炉スラグ微粉末の分量が多いため、始発・終結ともに長くなる。

(2) 断熱温度上昇量は、高硫酸塩スラグセメントコンクリートでは、9~13℃程度低減できる。

(3) 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。

(4) 高硫酸塩スラグセメントコンクリートの長さ変化率は、20℃水中養生と土中養生では、同程度であるが、10%硫酸ナトリウム溶液と人工海水に浸せきした場合には小さくなる。

(5) 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。

(6) 高硫酸塩スラグセメントコンクリートの中性化深さは、高炉スラグ微粉末を多量に使用しているため早くなる。

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) 宮澤祐介, 横室 隆: 高硫酸塩スラグセメントの圧縮強度について, 第 65 回セメント技術大会, pp.32-33, 2011.5
- 3) 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
- 4) 宮澤祐介, 横室 隆: 比表面積の異なる高硫酸塩スラグセメントの圧縮強度・乾燥収縮について, 第 65 回セメント技術大会, pp.34-35, 2011.5