

論文 ごみ溶融徐冷スラグを用いたコンクリートの特性

佐々木 肇^{*1}・喜多 達夫^{*2}

要旨: 都市ごみなどの一般廃棄物焼却灰溶融スラグの有効利用用途拡大の一環として,溶融徐冷スラグのコンクリート骨材としての適用性を検討した。徐冷スラグを骨材として使用したコンクリートの配合試験,フレッシュ性状,硬化性状,耐久性試験などを実施した。その結果,フレッシュ性状,強度特性,施工性など,天然骨材とほぼ同等の性状が得られることが確認できた。

キーワード: 廃棄物, 焼却灰, 溶融スラグ, 徐冷スラグ, 有効利用, 骨材, コンクリート

1. はじめに

コンクリートの骨材は,年間約6億t消費されており,資源の枯渇,環境負荷の低減などの観点から,将来の需給に関して安定供給が危ぶまれることが考えられる¹⁾。このため,代替資源の確保が重要な課題となっている。

一方,都市ごみなどの一般廃棄物は,そのほとんどが焼却による中間処理の後,最終処理場に埋立て処分されているが,新規の最終処分場の立地が困難なことから,年々残余容量が減少している。このため,最終処分場への負担軽減や環境への配慮から都市ごみの発生抑制や焼却灰の減容化・再資源化への取り組みが必要になってきている。

ごみ焼却灰の減容化・再資源化技術として有望な方法の一つに溶融スラグ化がある。この技術は,廃棄物もしくはその焼却灰を1200以上の高温で溶融した後,冷却固化したものである。溶融スラグには,高温溶融物を水中に流し込み急激に冷却する溶融急冷スラグと,高温溶融物を型枠に流し込み,空气中でゆっくりと冷却して得られる溶融徐冷スラグの2種類ある。

溶融急冷スラグは,その製法上,砂状のものしか得られないため,埋戻し材や盛り土材等の土質材料として利用されている。また,一部ではコンクリートの細骨材への適用も行われており,試験例や適用例などの実績もある^{2),3)}。

一方,溶融徐冷スラグは,大きな岩石状の塊が得られるため,これを破碎処理することにより路盤材やコンクリート粗・細骨材など幅広い用途が期待できる。これらの溶融徐冷スラグを建設資材として有効利用することは,建設産業と他産業が一体となり「資源循環型社会」の構築に因るために重要である。

本報告書は,コークスベッド方式により溶融された溶融徐冷スラグのコンクリート用骨材への適用性を検討するため,粗骨材(写真-1)および細骨材の骨材試験とこれらの骨材を用いたコンクリート試験結果について取りまとめたものである。



写真 - 1 溶融スラグの形状

*1 (株)間組 技術研究所技術研究部先端研究室チームリーダー (正会員)

*2 (株)間組 技術研究所技術研究部長 (正会員)

2 . 試験方法

試験に用いた材料を表 - 1 に示す。

溶融徐冷スラグは、コークスベッド方式により溶融されたものを硬化後の大きさが底面 29.5cm，上面 23.0cm，高さ 17.5cm になる円錐台型の型枠に流し込み、約 24 時間かけて冷却したものをディスクコンクラッシャーおよびスター型ローターミルにて破碎し、粒度調整したものを粗骨材および細骨材として試験に用いた。

溶融徐冷スラグの骨材性状確認試験は、ふるい分け試験、密度・吸水率試験および実積率試験を行った。なお、骨材試験方法は、JIS の試験方法に準じて行った。

また、溶融徐冷スラグの安全性に関しては、環境庁告示 46 号による溶出試験を行い、表 - 2 に示すように厚生省通達生衛発第 508 号の溶出基準を満たしていることを確認した。

試験を行ったコンクリートの配合を表 - 3 に示す。溶融徐冷スラグを使用する場合、この配合において細骨材、粗骨材の全量を溶融徐冷スラグに置換した。なお、粗骨材の最大粒径は

表 - 1 試験に用いた材料

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g / cm ³ 高炉セメント B 種 密度：3.14 g / cm ³
細骨材	静岡県大井川産川砂 密度：2.62g/cm ³ ，吸水率：1.49% 溶融徐冷スラグ（表 4 参照）
粗骨材	秩父産砕石（硬質砂岩） 密度：2.69g/cm ³ ，吸水率：0.79% 溶融徐冷スラグ（表 4 参照）
混和剤	A E 減水剤，リグニン系

表 - 2 溶融徐冷スラグの溶出試験結果

対象物質	試験結果	溶出基準
カドミウム	検出下限値未満	0.01 mg /
鉛	検出下限値未満	0.01 mg /
六価クロム	検出下限値未満	0.05 mg /
ヒ素	検出下限値未満	0.01 mg /
総水銀	検出下限値未満	0.0005mg /
セレン	検出下限値未満	0.01 mg /

表 - 3 コンクリートの基本配合

配合名	セメントの種類	骨材		スラグの範囲 (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg / m ³)				
		粗骨材	細骨材				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
N45NN	普通	砕石	川砂	8 ± 2	4.5	4.4	15.8	35.1	7.9	10.3	0.88
N45SN		スラグ	川砂				15.8	35.1	7.9	11.1	1.40
N45SS		スラグ	スラグ				15.8	35.1	8.8	11.0	1.58
N55NN	ポルトランド	砕石	川砂	8 ± 2	5.5	4.6	16.0	29.1	8.4	10.2	0.23
N55SN		スラグ	川砂				16.0	29.1	8.4	10.9	1.02
N55SS		スラグ	スラグ				16.0	29.1	9.4	10.9	1.16
N65NN	ランド	砕石	川砂	18 ± 2	6.5	4.9	18.1	27.9	8.8	9.4	0.70
N65SN		スラグ	川砂				18.1	27.9	8.8	10.8	0.70
N65SS		スラグ	スラグ				18.1	27.9	9.7	10.0	1.00
B45NN	高炉	砕石	川砂	8 ± 2	4.5	4.4	15.8	35.1	7.8	10.2	0.88
B45SN		スラグ	川砂				15.8	35.1	7.8	11.0	1.40
B45SS		スラグ	スラグ				15.8	35.1	8.7	11.0	1.58
B55NN	セメント	砕石	川砂	8 ± 2	5.5	4.6	16.0	29.1	8.4	10.1	0.73
B55SN		スラグ	川砂				16.0	29.1	8.4	10.8	1.15
B55SS		スラグ	スラグ				16.0	29.1	9.4	10.9	1.31
B65NN	B 種	砕石	川砂	18 ± 2	6.5	4.9	18.1	27.9	8.7	9.3	0.70
B65SN		スラグ	川砂				18.1	27.9	8.7	10.0	0.78
B65SS		スラグ	スラグ				18.1	27.9	9.7	10.0	1.12

20mmとした。

コンクリート試験は、フレッシュ性状確認試験として、JISの試験方法に準じてスランプ試験と空気量の測定を行った。また、硬化コンクリート試験としては、圧縮強度試験、乾燥収縮試験、凍結融解試験および暴露試験を行った。なお、圧縮強度試験には 10 × 20cm の円柱供試体、乾燥収縮試験および凍結融解試験には 10 × 10 × 40cm の供試体を使用した。

3. 試験結果と考察

3.1 溶融徐冷スラグの性状

溶融徐冷スラグの骨材試験結果を表 - 4 に示す。溶融徐冷スラグは、密度と単位容積質量が天然骨材よりやや大きく、吸水率が小さいこと以外は天然骨材とほぼ同等の性状を有していた。

また、溶融徐冷スラグの化学分析結果を表 - 5 に示す。コークスベッド方式の溶融徐冷スラグは、他の溶融方式により製造されたスラグと異なり、CaO の含有量が大きく Fe₂O₃、TiO₂ 等の金属類の含有が少ない。これは、溶融過程で塩基度調整のため石灰石または生石灰を添加していること、徐冷の過程で密度差により金属とスラグの分離が進むためである。溶融徐冷スラグの鉱物組成は玄武岩に含まれ

表 - 4 溶融徐冷スラグの物理試験結果

試験項目	細骨材	粗骨材
表乾密度 (g / cm ³)	2.89	2.86
吸水率 (%)	0.74	0.72
単位容積質量 (kg /)	1.87	1.62
実積率 (%)	64.8	56.4
粗粒率 (F.M.)	2.44	6.16

表 - 5 溶融徐冷スラグの化学分析結果

	成分 (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	Cl
細骨材	36.4	14.4	38.8	4.8	1.8	1.3	0.2	0.1	0.10
粗骨材	36.5	13.9	40.9	5.3	2.0	0.8	0.2	0.1	0.06

ている鉱物であるゲーレンナイトであり、他の溶融スラグに多く含まれているガラス質が少ない、針状粒子が少ない等の特長があり、骨材としては扱いやすい。

これらの試験の結果から、溶融徐冷スラグの物理的性状は、天然骨材とほぼ同等の性状を示すため、コンクリート用粗骨材としての有効利用について検討した。

3.2 溶融徐冷スラグを用いた

コンクリートのフレッシュ性状

各配合のスランプ、空気量、練上がり温度の結果を表 - 6 に示す。

A E 減水剤の使用量とスランプの関係を図 - 1 に示す。粗骨材の全量を溶融徐冷スラグに置換した場合、スランプが天然骨材使用の

表 - 6 フレッシュコンクリートの試験結果

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 ()
N45NN	8.5	5.1	21.0
N45SN	7.5	5.2	21.0
N45SS	4.5	5.4	21.5
N55NN	8.0	4.3	21.0
N55SN	5.0	5.3	21.0
N55SS	2.6	5.4	21.0
N65NN	17.0	5.1	21.0
N65SN	15.1	5.5	21.0
N65SS	10.1	5.3	21.0
B45NN	7.2	4.2	21.0
B45SN	4.7	4.2	21.0
B45SS	2.5	4.3	21.0
B55NN	8.5	5.3	21.0
B55SN	8.7	5.0	21.0
B55SS	4.2	3.9	21.0
B65NN	17.5	3.5	20.5
B65SN	18.1	5.0	20.5
B65SS	8.5	5.4	20.5

コンクリートより小さくなることがあったが、
 混和剤の使用量をやや増加させることにより
 所定の範囲に調整することができた。今回の
 試験では、比較検討を行うため、配合は骨材の
 密度の差による骨材量の修正のみとしたが、
 実用的なコンクリートとして利用する場合に
 は、配合の調整により溶融徐冷スラグを粗骨
 材に用いても所定の性状を持つコンクリート
 が得られるものと考えられる。

しかし、細骨材に使用した場合には、所定
 のスランブを得るためには単位水量を185kg
 / m³ まで増加させなければならず、ブリー
 ジング率が6.09%と大きくなってしまった。
 また、混和剤の使用量をセメント量の0.45%
 まで増加させた場合には、スランブはほとん
 ど変化がなかった。さらに、高性能A E減水
 剤や流動化剤を使用してもスランブはそれぞ
 れ4.0cm、2.9cmまでしか改善できなかった。
 このため、溶融徐冷スラグを細骨材に使用す
 る場合には、天然骨材との混合する等何らか
 の対策が必要になるものと考えられる。

溶融徐冷スラグを使用したコンクリートの
 空気量はやや大きくなる傾向が見られたが、
 骨材修正が大きくなるため見かけの空気量は
 大きくなったものと考えられる。水セメント
 比55%の配合における骨材修正は、天然骨材
 の場合0.6%であったのに対して、溶融徐冷ス
 ラグを粗骨材に使用した場合1.1%、粗骨材と
 細骨材の両方に使用した場合1.8%であった。

3.3 溶融徐冷スラグを用いた コンクリートの硬化性状

コンクリートの圧縮強度試験結果を表 - 7
 に示す。溶融徐冷スラグを用いたコンクリー
 トの圧縮強度は、配合・セメント種類によらず
 天然骨材使用のものとはほぼ同等の強度であ
 った。溶融急冷スラグを使用したコンクリー
 トの場合、圧縮強度が低下することが報告され
 ている²⁾。しかし、溶融徐冷スラグの場合この
 ような傾向は見られなかった。これは、溶融急

冷スラグの場合骨材鉱物がほとんど非晶質な
 ガラスであるのに対して、溶融徐冷スラグで
 は骨材鉱物の結晶構造がしっかりしている
 こと、天然骨材に近い性質を持つため骨材と
 セメント水和物との付着がいいことなどが考
 えられる。

普通ポルトランドセメントを使用したコン

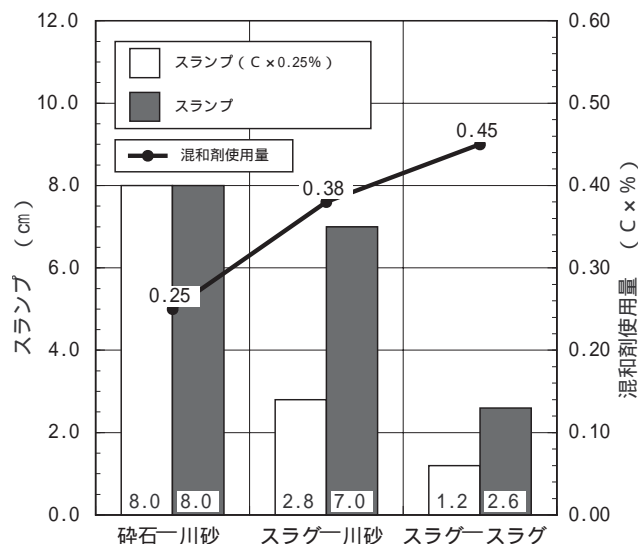


図 - 1 A E 減水剤使用量とスランブの関係
 (普通ポルトランドセメント)

表 - 7 コンクリートの圧縮強度試験結果

配合名	圧縮強度 (N / mm ²)		
	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日
N45NN	35.8	43.8	51.0
N45SN	39.6	48.7	55.8
N45SS	35.1	42.9	49.8
N55NN	31.2	40.5	46.6
N55SN	31.0	38.1	43.8
N55SS	28.0	35.8	45.0
N65NN	21.6	29.4	34.0
N65SN	22.3	29.7	34.8
N65SS	19.6	26.2	33.3
B45NN	31.5	47.3	61.8
B45SN	36.7	56.1	69.2
B45SS	35.5	52.1	60.6
B55NN	21.9	39.1	50.2
B55SN	20.8	36.0	46.6
B55SS	21.8	32.5	42.5
B65NN	15.9	30.1	38.1
B65SN	18.4	31.8	42.7
B65SS	18.4	29.1	39.0

クリートの乾燥収縮試験結果を図 - 2 に示す。溶融徐冷スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮は、天然骨材使用のコンクリートと比較して小さくなる傾向が見られた。この原因については現在調査中である。

普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの凍結融解試験結果を図 - 3 に示す。溶融徐冷スラグを用いたコンクリートの相対動弾性係数は、天然骨材を使用したコンクリートよりもやや小さくなる傾向が見られたが、どの配合においても300サイクル終了時点でも相対動弾性係数 80% を下回るものがなかったため、溶融徐冷スラグを骨材の全量使用したコンクリートでも、耐凍結融解抵抗性は問題がないと考えられる。

暴露試験を行っている供試体は、暴露 3 年目になるがいずれの供試体においても劣化は見られていない。このため、耐久性には問題がないものと考えられる。この供試体は、今後さらに暴露試験を継続し、定期的に非破壊検査を行い、劣化状況を確認していく予定である。

4. まとめ

都市ごみ焼却灰の溶融徐冷スラグの有効利用の一つとしてコンクリート用骨材への適用を検討した結果、以下の事象が明らかとなった。

- 1) 溶融徐冷スラグ粗骨材は、密度がやや大きく、吸水率が小さかった。
- 2) 溶融徐冷スラグを粗骨材として用いたコンクリートのフレッシュ性状は、スランプがやや小さくなる。しかし、細骨材として使用した場合にはスランプが著しく小さくなり、水量の補正や混和剤の添加量の増加では修正できない。
- 3) 溶融徐冷スラグを粗骨材および粗・細骨材として用いたコンクリートの強度は、天然骨材を用いたコンクリートと同程度である。
- 4) 溶融徐冷スラグを粗骨材および粗・細骨材として用いたコンクリートの乾燥収縮は、天然骨材を用いたコンクリートよりも小さくなる傾向が見られた。

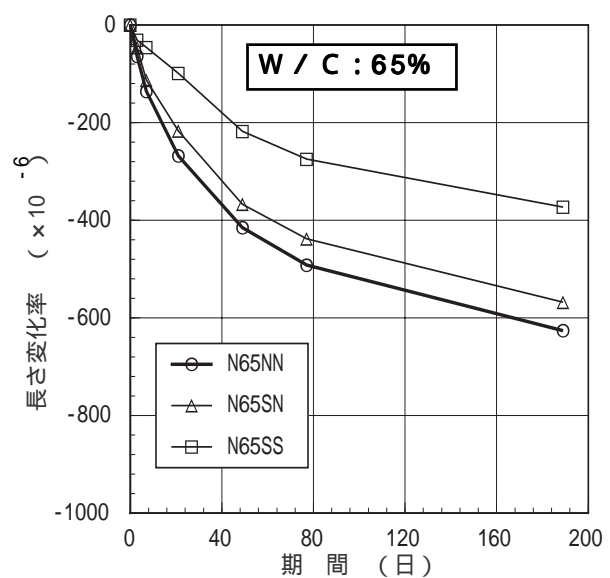
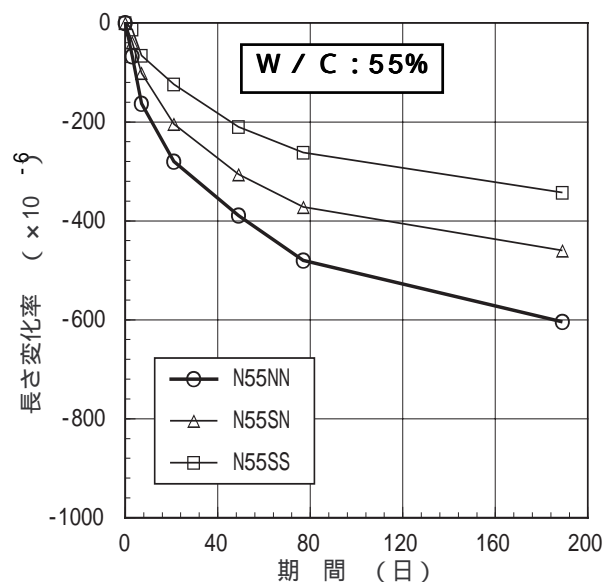
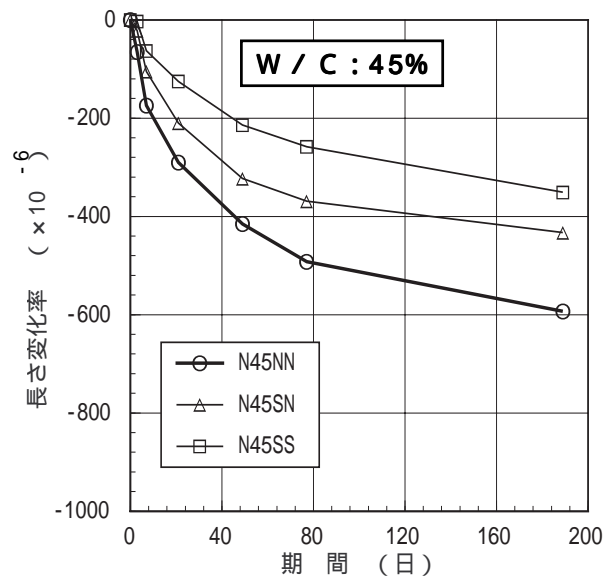


図 - 2 乾燥収縮試験結果
(普通ポルトランドセメント)

る傾向がある。

5) 溶融徐冷スラグを粗骨材および粗・細骨材として用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、天然骨材を用いたコンクリートより小さくなるが300サイクル終了後でも80%以下にはならないため、耐久性を有してる。

これらの結果から、溶融徐冷スラグは、溶融急冷スラグとは異なり、ガラス質や針状粒子がほとんど含まれていないため強度や耐久性の低下は少ない。また、天然骨材によく似た性質を持つため、フレッシュ性状の問題を除いて、骨材の全量を溶融徐冷スラグに置換したコンクリートの製造も可能であり、溶融徐冷スラグを使用することは、廃棄物の最終処分量の低減と貴重な天然骨材の保護に有効な方法と考えられる。

今後は、暴露試験の継続による長期的な耐久性の把握や、溶融徐冷スラグを用いたコンクリートの再利用時の影響の調査などを行うとともに、さらなる溶融徐冷スラグの利用用途の拡大に向け、各種の取り組みを積極的に行い、資源循環型社会の構築に大きく貢献したい。

【謝辞】 本実験にあたり、溶融徐冷スラグの御提供と助言を頂いた新明和工業株式会社およびメルテック株式会社の関係者の皆様方に厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、セメント・コンクリート, No.618, 1998年8月号
- 2) 北辻政文, 藤居宏一: ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質, 農業土木学会論文集, 第200号, pp.223 ~ 231, 1999年4月
- 3) 吉田良勝, 北辻政文, 大西崇夫: ごみ溶融スラグ細骨材のレディーミクストコンクリートへの利用, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第5部門, pp.278 ~ 279, 2000年9月

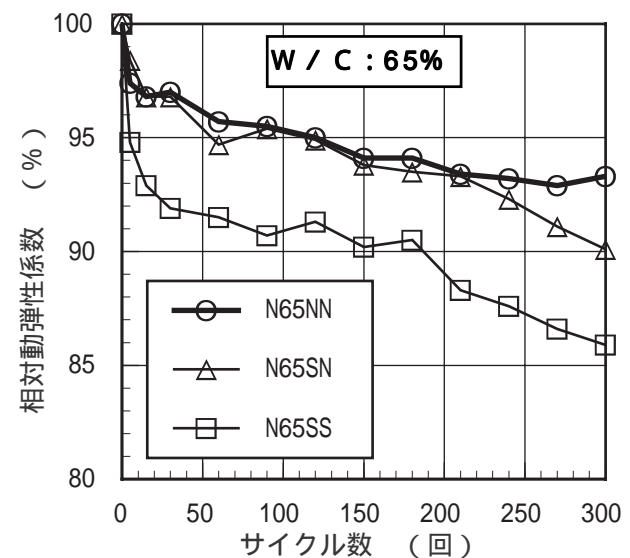
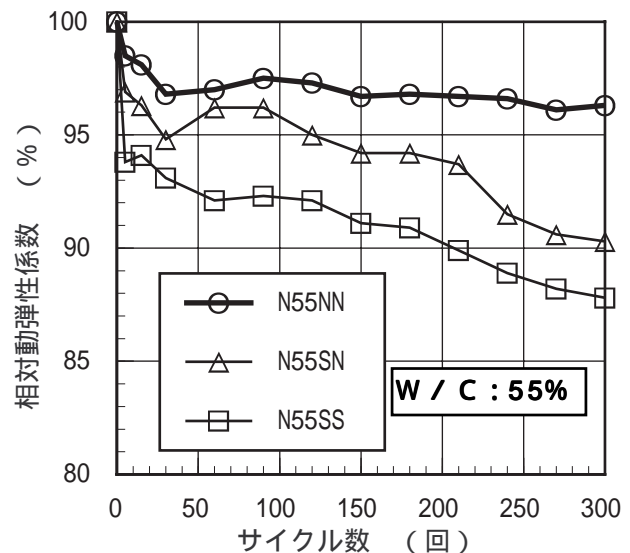
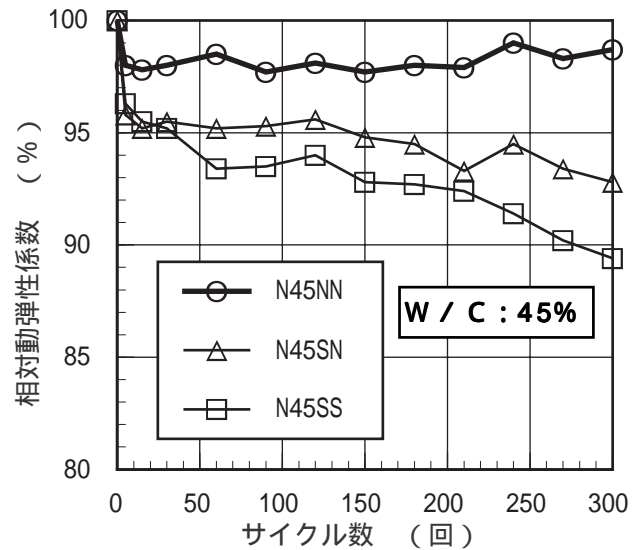


図 - 3 凍結融解試験結果 (普通ポルトランドセメント)