

論文 凍結融解と中性化の複合劣化作用を受けるコンクリートの耐久性に関する研究

竹田 宣典*1・十河 茂幸*2

要旨：凍結融解作用と中性化の複合劣化を受ける場合のコンクリートの劣化進行を把握することを目的として、凍結融解繰り返しを受けたコンクリートの中性化の進行および中性化が進行したコンクリートの凍結融解抵抗性について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。(1) 凍結融解繰り返しによる劣化程度が、相対動弾性係数で 80%程度以上あるいは質量減少率で 3%程度以下である場合は、凍結融解による劣化が中性化の進行に及ぼす影響は小さい。(2) 中性化したコンクリートが、凍結融解繰り返しを受ける場合の相対動弾性係数は、中性化が進行していない場合と大差ないが、質量減少率は若干増加する傾向を示した。
 キーワード：凍結融解, 中性化, 複合劣化, 耐久性, 劣化予測, スケーリング, 動弾性係数

1. はじめに

コンクリート構造物は、建設後、多くの場合、複合的な劣化作用を受けると考えられるため、耐久性の照査を行う場合、これらの環境条件を考慮した劣化予測を行う必要がある。しかしながら、複合的な劣化要因を受ける場合の劣化の進行については、未だ十分に明らかにされていない。凍結融解作用と中性化の影響を受ける場合の劣化現象に関しては、これまでに報告されている例があるが¹⁾、劣化予測を行うために十分なデータの蓄積がなされているとは言えない。そこで、凍結融解作用と中性化の複合要因が、コンクリートの耐久性に及ぼす影響について定量的に把握し、耐久性照査に資することを目的として、凍結融解繰り返しを受けたコンクリートの中性化の進行速度、および中性化を進行させたコンクリートの凍結融解抵抗性について検討を行った。凍結融解繰り返し作用および中性化は、いずれも促進的方法により劣化を進行させ、劣化程度を評価した。

実験は表 - 1 に示す 2 シリーズについて行った。実環境では、凍結融解繰り返しと中性化は同時に作用するが、本研究では、相互の影響を把握するために、まず劣化作用の与え方を単純化することが必要と考え、凍結融解繰り返し作用あるいは中性化のいずれか一方の劣化を促進的に進行させた後、他方の劣化要因を作用させた。試験順序を図 - 1 に示す。

表 - 1 実験シリーズ

シリーズ	検討内容
実験 A	凍結融解繰り返しを受けたコンクリートの中性化の進行の把握
実験 B	表面部が中性化したコンクリートの凍結融解抵抗性の把握

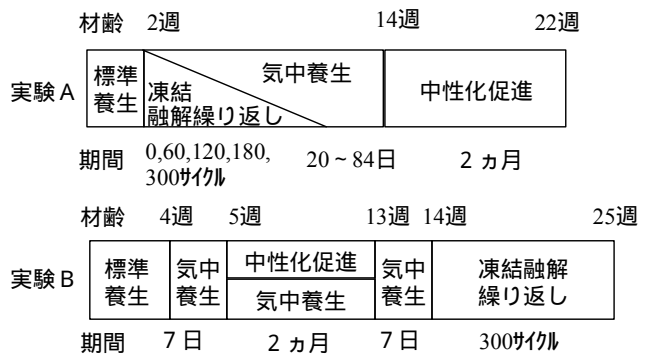


図 - 1 試験順序

2. 実験方法

2.1 実験概要

* 1 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室主任研究員 博士(工学)(正会員)

* 2 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室室長 工博(正会員)

実験Aでは、材齢14日より凍結融解試験を開始し、繰り返し回数0, 60, 120, 180, 300サイクルまで行い、凍結融解による劣化程度に差をつけたコンクリートについて2ヵ月間中性化促進試験を行った。表面の乾燥程度の差異を少なくするために、凍結融解試験終了後、最低20日の気中養生を行った。実験Bでは、材齢5週より2ヵ月間中性化促進試験を行い、中性化したコンクリートについて凍結融解試験を行った。実験Bでは比較のために、中性化させずに気中養生(温度 20 ± 2 , 相対湿度 $60 \pm 3\%$)したのも、凍結融解試験を行った。凍結融解試験は、土木学会規準(JSCE-G501)に準拠し、中性化促進試験は、温度 30 ± 2 , 相対湿度 $50 \pm 3\%$, CO_2 濃度 $5 \pm 0.5\%$ の条件で行った。

2.2 供試体

いずれのシリーズにおいても、複合的劣化作用を与える供試体は、断面 100×100 mm、長さ400mmの角柱とした。圧縮強度試験は、直径100mm、長さ200mmの円柱供試体を用いた。コンクリートの配合および性質を表-2示す。水セメント比は40%, 50%, 60%とし、空気量は $6 \pm 1\%$ とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は陸砂(表乾密度: 2.60 g/cm^3 , 吸水率:2.07%), 粗骨材は碎石(表乾密度: 2.66 g/cm^3 , 吸水率:0.86%)を用いた。混和剤は、リグニンスルホン酸系のAE減水剤を用いた。

2.3 評価項目, 評価方法

評価項目および評価方法を表-3に示す。実験Aでは、凍結融解試験時に、動弾性係数, 質量変化, スケーリング深さを測定し、中性化促進試験終了後に中性化深さを測定した。実験B

では、中性化促進試験終了時に中性化深さと圧縮強度を測定し、凍結融解試験では、動弾性係数, 質量変化を測定した。スケーリング深さは、図-2に示すようにレーザ式非接触変位計を用いて表面の凹凸を測定することにより求めた。

表-3 評価項目・評価方法

試験	評価項目	評価方法	実験A	実験B
凍結融解試験	動弾性係数	土木学会規準 凍結融解試験方法(JSCE G501)に準拠し, 3.5時間/1サイクルの凍結融解繰り返しを行い, 30サイクル毎に測定		
	質量			
	スケーリング深さ	凍結融解開始時と終了時に, 非接触型レーザ変位計により, コンクリート表面の凹凸を測定し, 試験前後における平均値の差を, 「平均スケーリング深さ」とした。(図-2参照)		
中性化促進試験	中性化深さ	中性化促進試験2ヵ月後, 割裂した供試体の断面に, フェノールフタレイン溶液を噴霧し, 凍結融解試験後のスケーリングした表面を基準として, 変色しない部分の深さを測定。供試体の上面, 側面, 底面において測定。		
	圧縮強度	中性化促進試験2ヵ月間実施後, JIS A 1108に準拠し実施。	-	

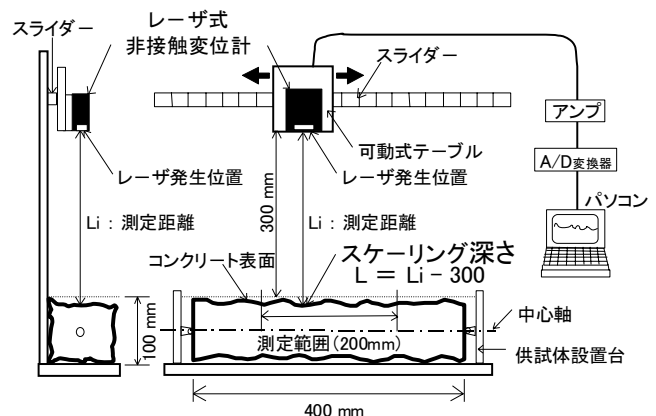


図-2 スケーリング測定装置

表-2 コンクリートの配合及び試験前の性質

配合	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (k g / m ³)					実 験 A			実 験 B		
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²) 材齢14日	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²) 材齢28日
a	20	40	45.0	166	415	751	940	1.04	14.5	6.8	36.8	10.5	6.7	42.1
b		50	47.0	166	332	817	943	0.83	14.0	5.6	33.9	15.5	6.4	36.1
c		60	49.0	166	277	847	931	0.69	13.0	6.2	26.0	15.0	6.1	28.8

3. 実験結果

3.1 凍結融解繰り返しによる劣化が中性化の進行に及ぼす影響

(1) 凍結融解繰り返しによる劣化程度

実験Aにおける凍結融解作用を受けたコンクリート中性化促進試験開始時の相対動弾性係数, 質量減少率, 平均スケーリング深さを図-3に示す。凍結融解繰り返し回数を変えることにより, 相対動弾性係数, 質量減少率および平均スケーリング深さを変化させ, これらの劣化程度の異なるコンクリートについて促進的に中性化を進行させた。中性化促進試験開始時の相対動弾性係数は, W/C が60%のコンクリートでは, 10%以下に低下したのを含み, W/C が40%と50%のコンクリートでは, いずれも80%以上であった。また, 中性化促進試験開始時の質量減少率は, W/C が40%の場合2.3%以下, W/C が50%の場合4.3%以下, W/C が60%の場合8.7%以下であり, 平均スケーリング深さは, W/C が40%の場合2.5mm以下, W/C が50%の場合2.8mm以下, W/C が60%の場合4.6mm以下であった。なお, 凍結融解作用を受けない場合にも, 質量が減少しているのは, 凍結融解作用による劣化のためではなく, 凍結融解試験後の気中養生期間中の乾燥によるものと考えられる。

(2) 凍結融解作用を受けたコンクリートの中性化深さ

実験Aにおける凍結融解繰り返し回数と中性化深さの関係を図-4に示す。W/Cに係わらず, 中性化は, 供試体の上面において最も進行しており, 続いて側面, 底面の順であったが, 凍結融解繰り返し回数と中性化深さの関係は, 測定面に関わらず同様の傾向であった。凍結融解作用を受けた場合の中性化深さは, 凍結融解作用を受けない場合に比べて, 供試体側面において, W/C が40%の場合, 最大10%程度, W/C が50%の場合, 最大30%程度, W/C が60%の場合, 最大300%以上増加した。W/C が40%の場合, 凍結融解繰り返し回数が増加しても, 中性化深さの増加は少ないが, W/C が大きくなるにした

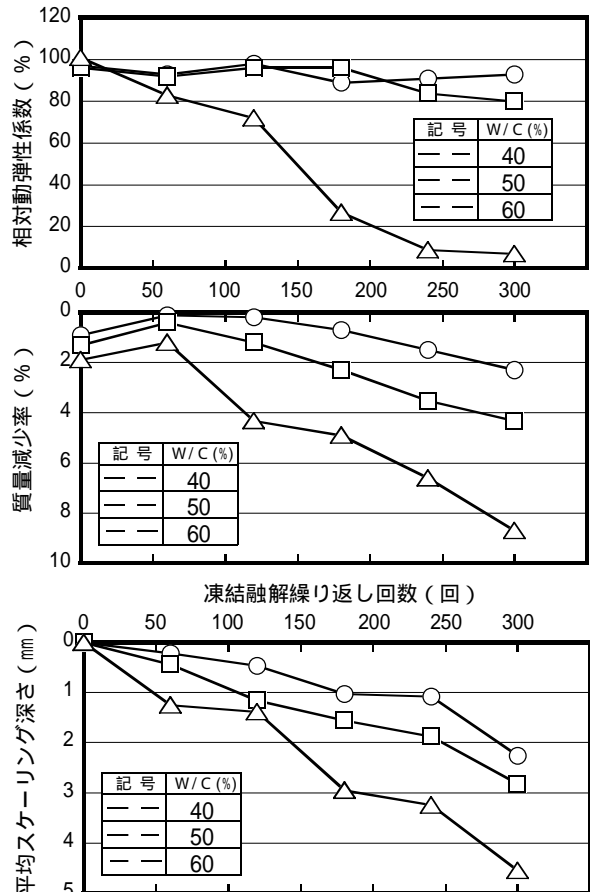


図-3 中性化促進試験開始時の相対動弾性係数, 質量減少率, 平均スケーリング深さ

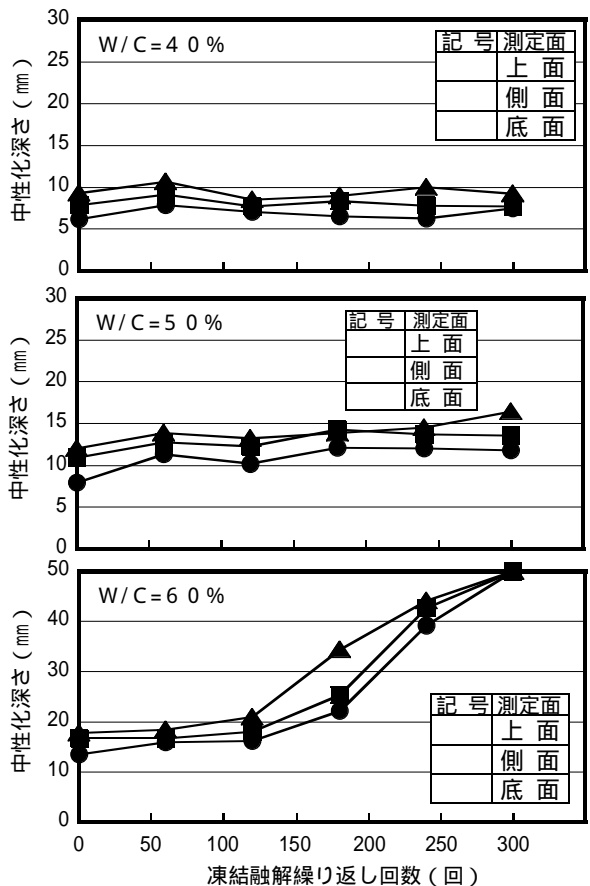


図-4 凍結融解を受けたコンクリートの中性化深さ

がい、凍結融解繰り返し回数が増加するに伴い、中性化深さの増加が顕著となった。例えば、W/C が60%のコンクリートの中性化深さは、凍結融解繰り返し回数が180回の場合、凍結融解作用を受けていない場合の1.5倍となり、240回では2.5倍、300回では3倍以上となった。

(3) 凍結融解作用による劣化と中性化の関係

凍結融解繰り返し後の劣化指標（相対動弾性係数、質量減少率、平均スケーリング深さ）と中性化深さの関係を図-5に示す。W/Cが40%と50%のコンクリートの相対動弾性係数が80%以下のデータはないが、相対動弾性係数が80%以上の場合は、W/Cに係わらず、相対動弾性係数の差異による中性化深さの変化は少ない。同様に、質量減少率が3%以下の場合あるいは平均スケーリング深さが2mm以下の場合は、W/Cに係わらず、質量減少率の差異、平均スケーリング深さの差異による中性化深さの変化は少ない。しかし、相対動弾性係数が80%以下、あるいは質量減少率が3%以上、平均スケーリング深さが2mm以上となったコンクリートは、凍結融解作用による劣化が中性化の進行に及ぼす影響が大きくなる傾向が見られた。例えば、W/Cが60%のコンクリートでは、相対動弾性係数が30%以下となった場合、あるいは質量減少率が6%以上、平均スケーリング深さが3mm以上となった場合、中性化深さは、凍結融解作用を受けていない場合に比べて2.5倍程度になった。

以上より、凍結融解作用を受けて劣化が進行すると、内部に微小なひび割れが発生するために、中性化の進行が速くなる場合があるが、凍結融解作用による劣化程度が、相対動弾性係数で80%以上、あるいは質量減少率で3%以下、平均スケーリング深さで2mm以下である場合は、凍結融解繰り返しによる劣化が、中性化の進行に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.2 中性化の進行が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

(1) 中性化促進試験後のコンクリートの性質

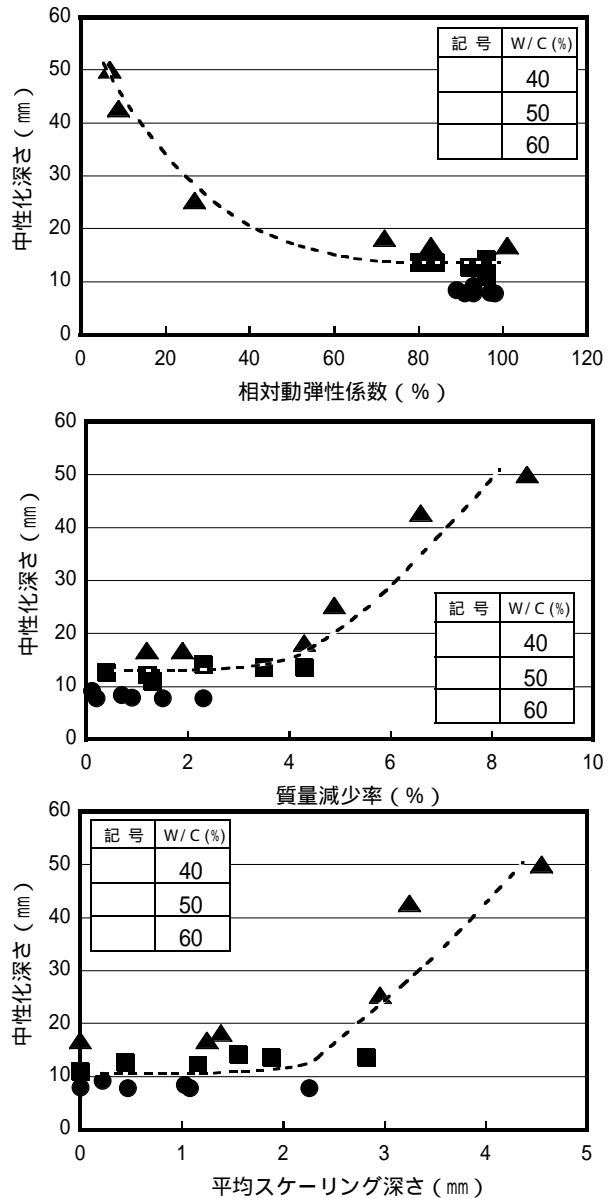


図-5 凍結融解繰り返し後の劣化指標と中性化深さの関係

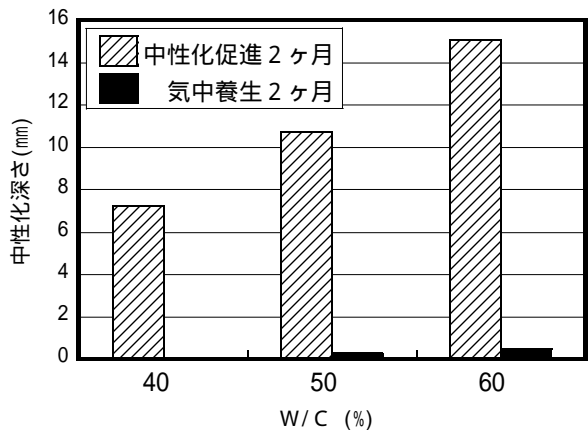


図-6 凍結融解試験前の中性化深さ

実験Bにおける凍結融解試験開始時（中性化促進試験2ヵ月後あるいは気中養生2ヵ月後）の中性化深さを図-6に示す。中性化促進試験2ヵ月後の中性化深さは、W/Cが40%の場合7.2mm、W/Cが50%の場合10.7mm、W/Cが60%の場合15.1mmであった。気中養生を行ったコンクリートの中性化深さは、いずれのW/Cにおいても0.5mm以下であった。

また、凍結融解試験開始時の圧縮強度を図-7に示す。中性化が進行したコンクリートの圧縮強度は、W/Cに関わらず、中性化が進行していないものに比べ5~10%大きい。

(2) 中性化したコンクリートの凍結融解繰り返しによる相対動弾性係数の変化

中性化したコンクリートの凍結融解試験時の相対動弾性係数の変化を図-8に示す。いずれのW/Cにおいても、中性化が進行した場合と中性化が進行していない場合の、凍結融解繰り返しによる相対動弾性係数の変化の差異は極めて小さい。中性化が進行していないコンクリートでは、W/Cに関わらず、凍結融解繰り返し300サイクル終了時においても、相対動弾性係数の低下は少ないが、このことは、中性化したコンクリートにおいても同様であった。凍結融解試験開始時の圧縮強度が40N/mm²以上で、かつ中性化深さが15mm程度以下である場合、中性化の進行が、凍結融解作用による相対動弾性係数の低下に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(3) 中性化したコンクリートの凍結融解繰り返しによる質量減少率の変化

中性化したコンクリートの凍結融解試験時の質量減少率の変化を図-9に示す。いずれのW/Cにおいても、中性化が進行したコンクリートの質量減少率は、中性化が進行していないコンクリートに比べて大きい傾向が見られた。中性化深さと凍結融解繰り返し300サイクル終了時における質量減少率を図-10に示す。中性化が進行していないコンクリートの凍結融解繰り返し300サイクル終了時の質量減少率は、W/Cが40%の場合2.0%、W/Cが50%の場合3.2%、

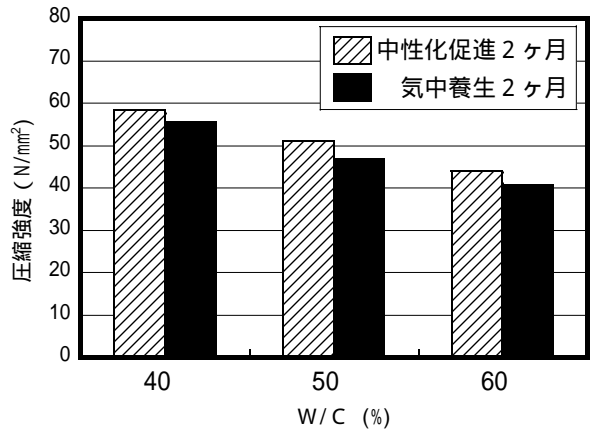


図-7 凍結融解試験前の圧縮強度

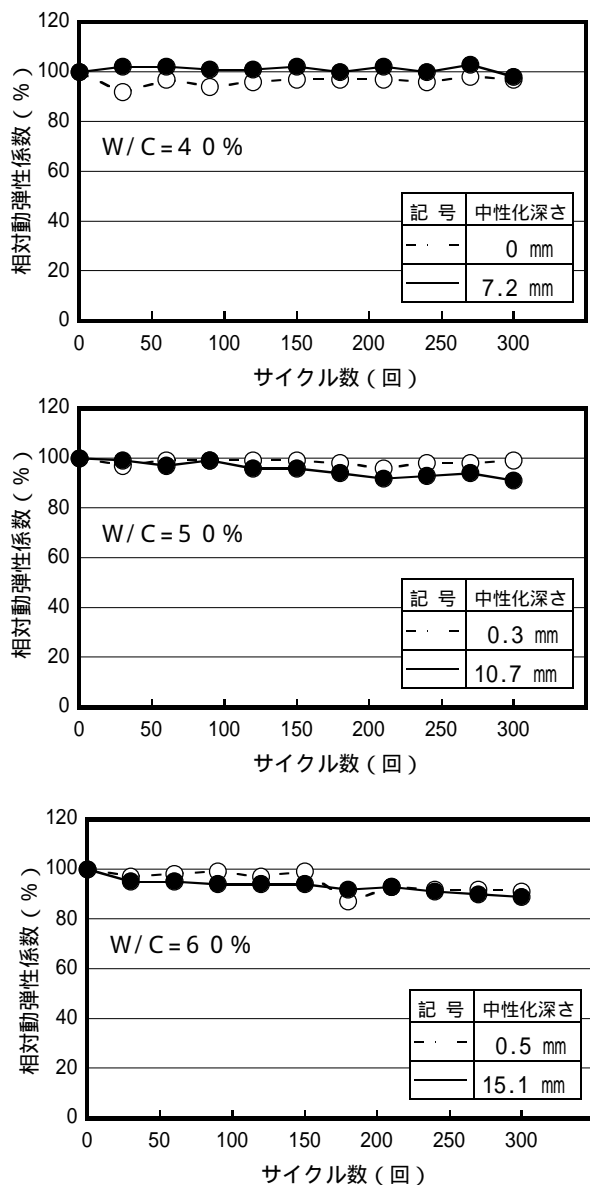


図-8 中性化したコンクリートの相対動弾性係数の変化

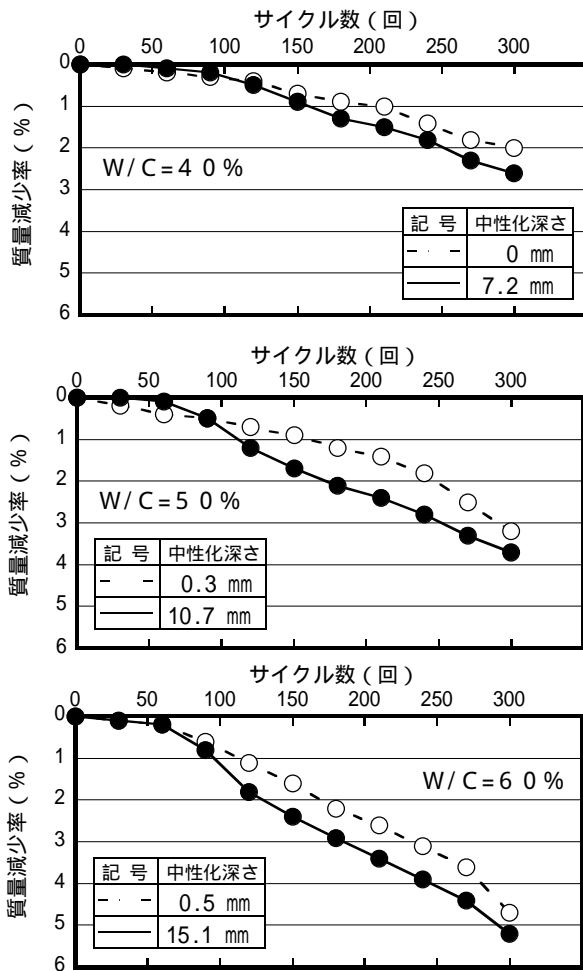


図 - 9 中性化したコンクリートの質量減少率の変化

W/C が 60% の場合 4.7% であったが、中性化が進行したコンクリートの凍結融解繰り返し 300 サイクル終了時の質量減少率は、W/C が 40% の場合 2.6%、W/C が 50% の場合 3.7%、W/C が 60% の場合 5.2% となった。いずれの W/C においても、中性化が進行したコンクリートの凍結融解繰り返し作用による質量減少率は、中性化が進行していない場合に比べて 0.5% 程度大きくなった。これは、中性化によって凍結融解抵抗性に寄与する径の細孔が減少し、これが凍結融解作用によるスケーリングの進行に影響を与えた可能性があると考えられる²⁾。

4. まとめ

実験の結果以下のことが明らかになった。

(1) 凍結融解作用による劣化程度が、相対動

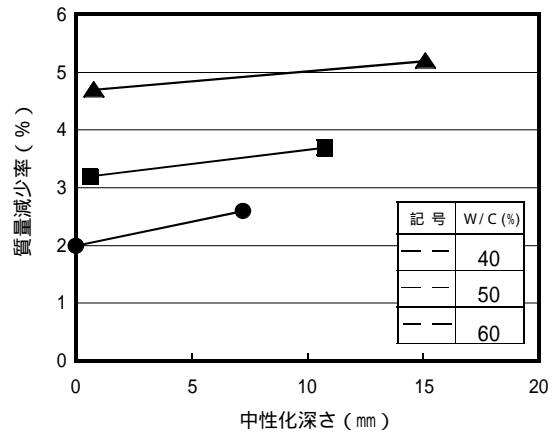


図 - 10 中性化深さと質量減少率の関係

弾性係数で 80% 以上、あるいは質量減少率で 3% 以下、平均スケーリング深さで 2mm 以下である場合は、中性化の進行は、凍結融解作用を受けない場合と大差ないことが確認された。したがって、劣化程度が上記の範囲である場合は、凍結融解作用による劣化が、中性化の進行に及ぼす影響は小さいと考えられ、凍結融解作用と中性化の複合劣化の影響を考慮しなくても良いと考えられる。

(2) 中性化したコンクリートが凍結融解繰り返しを受ける場合、相対動弾性係数の変化は、中性化が進行していないコンクリートとほぼ同等である。

(3) 中性化したコンクリートが凍結融解繰り返しを受ける場合の質量減少率は、中性化が進行していないコンクリートに比べて 0.5% 程度増加した。

参考文献

- 1) 古江一臣, 添田政司, 大和竹史: 凍害と中性化および塩害の複合劣化に関する一考察, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, pp.626-627, 2001.10
- 2) 三浦律彦, 芳賀孝成, 中根 淳: 空気量、気泡分布、細孔分布が高強度コンクリートの耐凍結融解性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.679-684, 1990.6