

## 複合劣化作用を受けるコンクリート構造物の耐久性に関する研究 (その2)

- 凍害, 塩害, 中性化の複合作用 -

竹田 宣典 十河 茂幸

**A Study on Durability of Concrete Subjected to Combined Deterioration (Part 2)**

- Combined Action of Salt Attack, Freezing and Thawing, and Neutralization -

Nobufumi Takeda Shigeyuki Sogo

**Abstract**

The progress of deterioration subjected to combined salt attack, freezing and thawing and neutralization were investigated to establish a durability verification method in combined environments. The following results were obtained. (1) The diffusion coefficient of chloride ion in concrete deteriorated more with freezing and thawing than without freezing and thawing. (2) The diffusion coefficient of chloride ion in concrete increased more with neutralization than without neutralization. (3) When concrete initially incorporating chloride ions was subjected to freezing and thawing, there was a remarkable decrease in dynamic modulus of elasticity. (4) When neutralized concrete was subjected to freezing and thawing, the influence of neutralization on resistance to freezing and thawing was small. (5) When the relative dynamic modulus of elasticity was over 80%, the influence of freezing and thawing on the progress of neutralization was small. However, when the relative dynamic modulus of elasticity was under 80%, neutralization accelerated.

**概 要**

複合劣化環境におけるコンクリートの耐久性照査方法を確立することを目的として、塩害、凍害、中性化の複合劣化の影響を受ける鉄筋コンクリートの劣化の進行について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。(1)凍結融解によって劣化したコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、凍結融解を受けない場合と比べて増大する。その増加程度は、空気量と相対動弾性係数により予測が可能である。(2)中性化が進行したコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、中性化が進行していない場合に比べて増大する。水セメント比が大きい場合は、塩化物イオンの浸透を拡散現象のみで表すことは不適切である。(3)塩化物イオンを含むコンクリートが凍結融解を受ける場合、塩化物イオンを含まない場合に比べて少ない繰り返し回数で、相対動弾性係数が低下する。(4)中性化したコンクリートが凍結融解を受ける場合、中性化の進行が凍結融解抵抗性に及ぼす影響は小さい。(5)凍結融解による劣化程度が、相対動弾性係数で80%以上である場合は、凍結融解作用が中性化の進行に及ぼす影響は小さいが、相対動弾性係数が80%以下の場合は、中性化の進行が速くなる場合がある。

**1. はじめに**

社会基盤を構成するコンクリート構造物に対して、高耐久化や長寿命化が強く望まれている。コンクリート構造物は、実環境において塩害、凍害、中性化などの複合的な劣化作用を受けており、設計時に耐久性照査を行う場合、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、これまでに報告されている事例はあるが<sup>(1), (2), (3), (4)</sup>、劣化予測を行える程には明らかにできてはいない。2002年制定の土木学会コンクリート標準示方書(施工編)においても、個々の劣化機構に対する劣化予測方法については示されているが、複合的な劣化を受ける場合の劣化予測方法については示されていない。

複合劣化環境における耐久性照査を確立するためには、複合的な劣化を受ける場合のコンクリートの劣化進行を定量的に把握する必要がある。そこで、複合的な劣化要因がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について把握することを目的として、凍害、塩害、中性化の3つの劣化作用を対象として、複合劣化の進行について検討を行った。本論文では、凍害、塩害、中性化によって劣化したコンクリートの凍結融解抵抗性、塩化物イオン浸透性および中性化の進行について、促進試験方法により定量的な評価を行った結果について述べる。

**2. 実験方法****2.1 検討内容と劣化要因の組合せ**

コンクリートの複合劣化に関する検討を行った内容は、以下の3種類に大きく分けられる。

- 1) 塩化物イオン浸透性に及ぼす凍結融解および中性化の影響
- 2) 凍結融解抵抗性に及ぼす塩化物イオン浸透および中性化の影響
- 3) 中性化の進行に及ぼす凍結融解作用の影響

検討対象とした複合劣化の組合せをTable 1に示す。コンクリートに与える劣化作用は、凍害に対しては凍結融解繰り返し作用、塩害に対しては塩化物イオンの供給、中性化に対しては二酸化炭素の供給とした。実環境においては、凍結融解作用、塩化物イオンの浸透あるいは中性化による劣化は、同時に作用するが、本研究では、劣化作用の与え方を単純化するために、1次劣化要因により劣化させたコンクリートを、さらに2次劣化要因を作用させ、2次劣化要因による劣化程度を評価した。

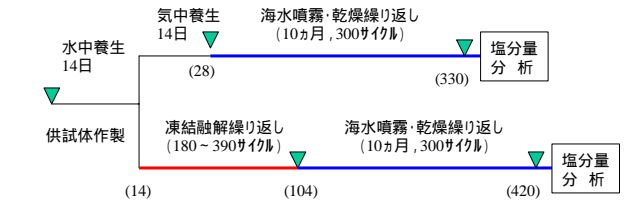
Table 1 劣化要因の組合せ  
Combination of Deterioration Factors

	1次劣化要因	2次劣化要因
実験	凍結融解繰り返し	塩化物イオン浸透
実験	中性化	塩化物イオン浸透
実験	塩化物イオン浸透	凍結融解繰り返し
実験	中性化	凍結融解繰り返し
実験	凍結融解繰り返し	中性化

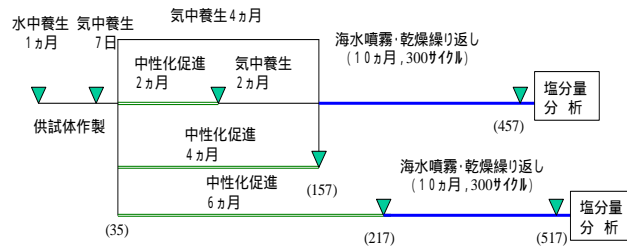
2.2 劣化促進方法

実験は、Table 1に示すように実験 ~ 実験 の5種類について行った。実験の手順をFig. 1に示す。凍結融解繰り返し作用は、土木学会規準 (JSCE G 501) に準拠した凍結融解試験によって与えた。塩化物イオン浸透は、海水噴霧・乾燥繰り返し試験 (以下、海水噴霧試験と略記) により、中性化は中性化促進試験により作用させた。海水噴霧試験は、海水噴霧 (塩素イオン濃度:  $1.8 \pm 0.2\%$  人工海水, 噴霧量:  $200\text{ml/m}^2/\text{hr}$ , 温度:  $30 \pm 2$ ) 12時間、高温乾燥 (温度:  $40 \pm 2$ , 相対湿度:  $60 \pm 3\%$ ) 12時間を1サイクル/日の環境条件とした。また、中性化促進試験は、温度:  $30 \pm 2$ , 相対湿度:  $60 \pm 3\%$ ,  $\text{CO}_2$  濃度  $5.0 \pm 0.5\%$  の環境条件とした。

実験 では、材齢14日より180~390サイクルの凍結融解試験を行い、劣化程度に差があるコンクリートについて、10ヶ月間 (300サイクル) の海水噴霧試験を行った後、コンクリート中の塩化物イオン浸透量を測定した。比較として、凍結融解試験を行っていないコンクリートについても海水噴霧試験を行った。実験 では、28日間の水中養生後、7日間気中養生を行い、その後2ヵ月、4ヵ月、6ヵ月間の中性化促進試験を行い、中性化の進行程度に差があるコンクリートについて、10ヵ月間 (300サイクル) の海水噴霧試験を行った後、塩化物イオンの浸透量を測定した。比較として中性化促進を行っていないコンクリートについても海水噴霧試験を行った。実験 では、初期より塩化物イオンを含むコンクリートについて、材齢14日より凍結融解試験を行った。実験 では、材齢5週より2ヵ月間の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。比較のために、中性化させずに気中養生 (温度  $20 \pm 2$ , 相対湿度  $60 \pm 3\%$ ) したコンクリートについても凍結融解試験を行った。実験 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があるコンクリートに



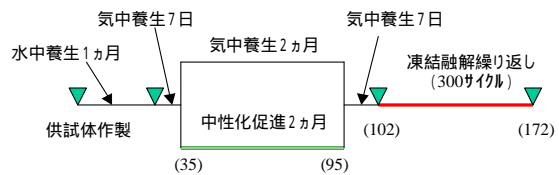
(a) 実験



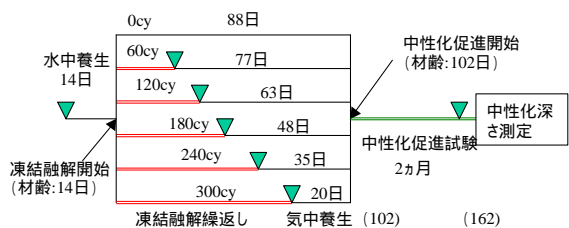
(b) 実験



(c) 実験



(d) 実験



(e) 実験

Fig. 1 実験の手順  
Order of Experiments

ついて2ヵ月間の中性化促進試験を行った。表面の乾燥程度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。

2.3 供試体

供試体は、実験 , , , では、断面100×100mm、長さ400mmの角柱とし、実験 では、側面をエポキシ樹脂によりコーティングした直径150mm、長さ150mm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Table 2に示す。水セメント比(W/C)は40%、50%、60%とし、空気量は、実験 では、2.0±1.0%、4.0±1.0%および6.0±1.0%とし、その他の実験では6±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：2.59~2.60g/cm<sup>3</sup>、吸水率：2.07~2.19%)、粗骨材は碎石(表乾密度：2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.86%)を用い、混和剤はリグニンスルホン酸系AE減水剤を用いた。

2.4 評価項目・評価方法

各試験における評価指標と評価方法をTable 3に示す。凍結融解試験時に動弾性係数、質量変化を測定し、海水噴霧試験終了時にコンクリート中の塩化物イオン量を測定し、拡散係数を求めた。なお、拡散係数は式(1)に示すFickの拡散方程式の解を用いて最小二乗法により求めた。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

- X：表面からの深さ (cm), t：経過時間 (s)
- C：深さxにおける塩化物イオン量 (%)
- C<sub>0</sub>：表面塩化物イオン量 (x=0 における塩化物イオン量 (%))
- D<sub>c</sub>：見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)
- erf：誤差関数

3. 試験結果と考察

3.1 塩化物イオン浸透性に及ぼす凍害、中性化の影響  
 3.1.1 凍害を受けたコンクリートの塩化物イオン拡散係数 実験 における凍結融解試験時の相対動弾性係数 (REd)の変化をFig. 2に示す。凍結融解試験後の海水噴

Table 3 劣化の評価指標と評価方法  
Items and Methods of Estimation

試験方法	評価指標	評価方法
凍結融解試験 土木学会規準 (JSCE G 501)	相対動弾性係数	凍結融解繰り返し回数 30サイクル毎に測定
	質量減少率	
海水噴霧・乾燥 繰り返し試験	塩化物イオンの 拡散係数	塩化物イオン濃度の分析 方法：全塩化物イオン量 (JCI-SC4) 試料：表面から深さ2cm 毎に採取
中性化 促進試験	中性化深さ	供試体の割裂面に、フェ ノールフタレイン溶液 を噴霧し、変色しない部 分の深さを測定

Table 2 コンクリートの配合と性質  
Mix Proportions and Properties of Concrete

No.	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) 材齢28日		
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤				塩化物 イオン	
	40	45.0	166	415	795	998	1.04	0	6.0	2.3	59.4	
					737	925			10.0	6.8	41.2	
	50	47.0	166	332	863	999	0.83	0	9.0	1.3	44.0	
					838	971			10.0	4.2	39.4	
					802	928			16.5	6.6	33.2	
					922	985			7.5	2.3	35.0	
	60	49.0	166	277	858	917	0.69	0	15.0	6.8	26.4	
	40	45.0	166	415	737	925	1.04	0	11.0	6.1	42.1	
	50	47.0		332	802	928	0.83	0	15.0	6.4	36.1	
	60	49.0		277	858	917	0.69	0	15.5	6.1	28.8	
	50	47.0	166	332	817	943	0.83	0	0	10.5	4.8	40.6
									2.5	12.5	4.5	42.2
									5.0	11.5	4.8	38.4
									10.0	15.0	5.2	36.8
	40	45.0	166	415	751	940	1.04	0	10.5	6.7	42.1	
	50	47.0		332	817	943	0.83	0	15.5	6.4	36.1	
	60	49.0		277	847	931	0.69	0	15.0	6.1	28.8	
	40	45.0	166	415	751	940	1.04	0	14.5	6.8	42.5	
	50	47.0		332	817	943	0.83	0	14.0	5.6	37.0	
	60	49.0		277	847	931	0.69	0	13.0	6.2	28.1	

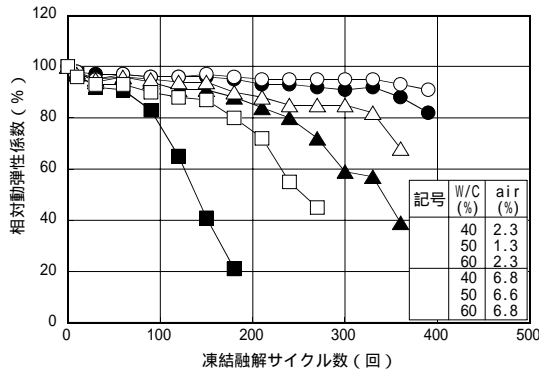


Fig. 2 凍結融解試験時の相対動弾性係数の変化  
Changes in Relative Dynamic Modulus of Elasticity during Freezing and Thawing Test

霧開始時におけるREdは21~91%の範囲にあり、質量減少率は3.8~5.6%の範囲にあった。いずれの配合のコンクリート表面にも、粗骨材が表れる程度のスケールが発生していた。

海水噴霧試験300サイクル終了後の塩化物イオンの浸透量分布をFig. 3に示す。表面部(表面~20mm)の塩化物イオン量は、凍結融解作用を受けた場合、水セメント比(W/C)および空気量に係わらず、凍結融解作用を受けない場合に比べて少ない。深さ30mmより深い位置の塩化物イオン量は、空気量が多い(6~7%)場合は、凍結融解の有無により大きな差はないが、空気量少ない(1~3%)場合は、W/Cが50%以上の時、凍結融解を受けた方が受けない場合に比べて2~3倍程度多くなった。凍結融解作用を受けた場合、表面部の塩化物イオン量が凍結融解作用を受けない場合に比べて小さくなるのは、スケール発生に伴い、コンクリート中の粗骨材の容積比率が相対的に多くなっているためと考えられる。また、深さ30mmより深い位置の塩化物イオン量が多くなるのは、凍結融解作用によって、内部に微細なひび割れが発生し、塩化物イオンが内部まで浸透し易い組織となるためと考えられる。

凍結融解作用を受けた場合と受けない場合の塩化物イオンの拡散係数をFig. 4に示す。W/Cが40%で凍結融解試験後のREdが80%以上のコンクリートでは、凍結融解作用の有無による拡散係数の差異はほとんどないが、W/Cが50%以上で凍結融解試験後のREdが80%以下のコンクリートでは、凍結融解を受けた場合の拡散係数は、凍結融解を受けない場合に比べて大きくなる。W/Cが大きく、空気量が小さく、REdの低下が大きいほど、両者の差異は大きい。凍結融解作用を受けない場合の見かけの拡散係数(Do)に対する凍結融解作用を受けた場合の見かけの拡散係数(Dc)の比と相対動弾性係数(REd)の関係性をFig. 5に示す。空気量が6~7%の場合、REdが40%以上の範囲では、REdが低下しても拡散係数比は著しく大きくなることはないが、空気量が1~3%の場合、REdが低下すると拡散係数比は著しく大きくなる。これら関係を近似式で表すと、式(2)、(3)のようになる。

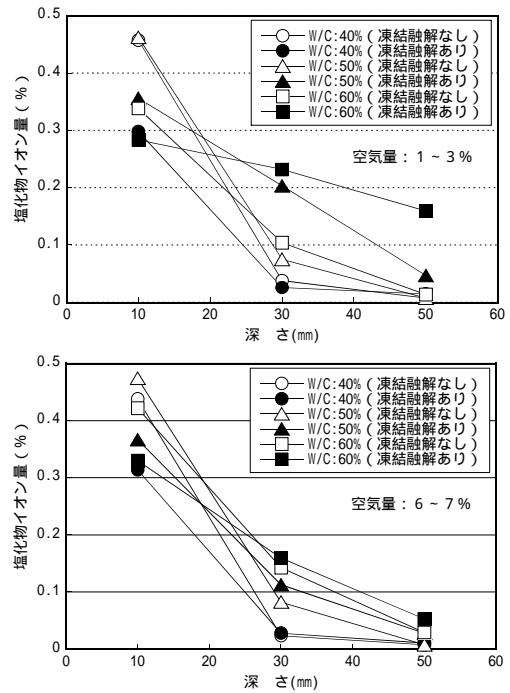


Fig. 3 海水噴霧試験後の塩分分布  
Distribution of Chloride Ion after Sea Water Spray Test (Experiment No.1)

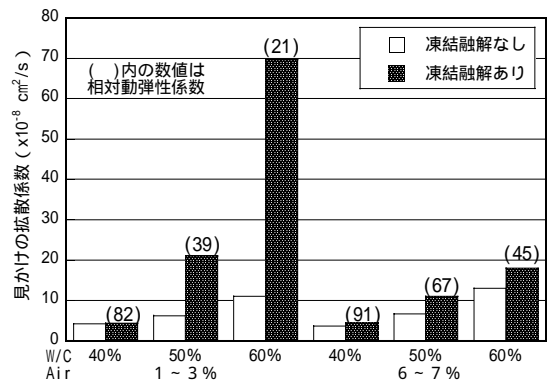


Fig. 4 海水噴霧試験後の塩化物イオン拡散係数  
Diffusion Coefficient of Chloride Ion after Sea Water Spray Test

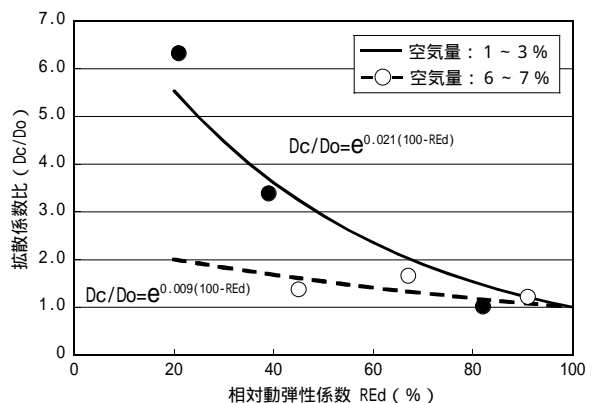


Fig. 5 相対動弾性係数と塩化物イオン拡散係数比の関係  
Relationship Relative Dynamic Modulus of Elasticity and Rate of Diffusion Coefficient of Chloride Ion

$$Dc/Do = e^{0.021(100 - REd)} \quad (\text{空気量1~3\%}) \quad (2)$$

$$Dc/Do = e^{0.009(100 - REd)} \quad (\text{空気量6\%程度}) \quad (3)$$

以上より、凍結融解作用によって劣化したコンクリートの塩化物イオン拡散係数は大きくなるため、このような環境条件における耐久性照査を行う場合には、拡散係数の割増をすることにより、複合劣化の影響を考慮する必要があると考える。

3.1.2 中性化したコンクリートの塩化物イオン拡散係数実験 における海水噴霧試験前の中性化深さをFig. 6に示す。中性化促進期間が長くなるに従い、中性化深さは増加し、促進期間6ヵ月後における中性化深さは、W/C40%の場合約10mm、W/C50%の場合約20mm、W/C60%の場合約30mmであった。気中養生したコンクリートでは、いずれの配合においても中性化は進行していなかった。

中性化促進試験を0,2,4および6ヵ月間行ったコンクリートの海水噴霧試験実施後の塩化物イオン量の分布をFig. 7に示す。いずれの配合においても、中性化が進行しているコンクリートの表面部(表面~20mm)の塩化物イオン量は、中性化していない場合に比べて少なくなった。W/C40%の場合は、中性化の進行程度によって塩化物イオン量に大きな差異はないが、W/C50%および60%の場合は、中性化が進行しているコンクリートほど、表面部の塩化物イオン量は少なくなり、深さ30mmの位置の塩化物イオン量が多くなる傾向が示された。この傾向はW/Cが大きい方が著しく、例えばW/Cが60%のコンクリートを中性化促進を4ヵ月以上行い、中性化が20mm以上進行している場合、深さ30mmの位置の塩化物イオン量は、深さ10mmの位置の塩化物イオン量より大きくなった。小林らは、塩化物イオンを含んだコンクリートにおいて、中性化が進行すると、中性化のフロント部に塩化物イオンが移動し、表面部よりも内部の塩化物イオン量が多くなることを指摘しているが<sup>5)</sup>、中性化が進行したコンクリートに、塩化物イオンが浸透する場合にも、W/Cが大きい場合は、同様な塩化物イオン量の分布となる場合があることが認められた。したがって、W/Cが大

きいコンクリートで中性化が進行した場合には、塩化物イオンの浸透を拡散のみで表すことは不適切である。

中性化深さと塩化物イオンの拡散係数の関係をFig. 8に示す。中性化部分と未中性化部分の塩化物イオン浸透性は異なる可能性があるが、本研究では中性化部分と未

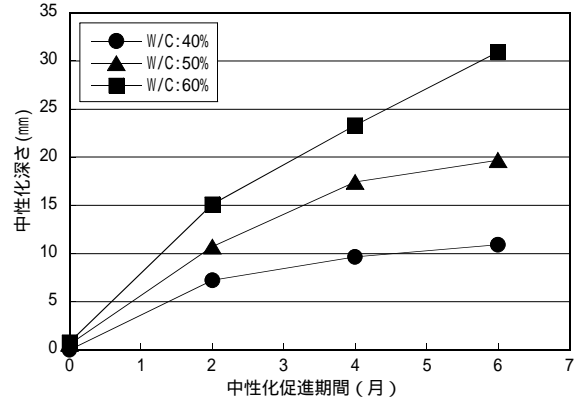


Fig. 6 海水噴霧試験前の中性化深さ  
Carbonation Depth before Sea Water Spray Test

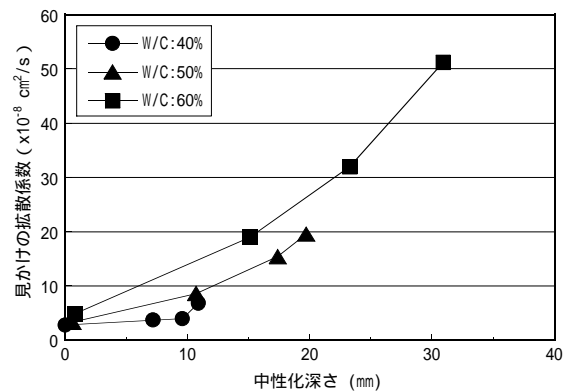


Fig. 8 中性化深さと塩化物イオン拡散係数の関係  
Relationship Carbonation Depth and of Diffusion Coefficient of Chloride Ion

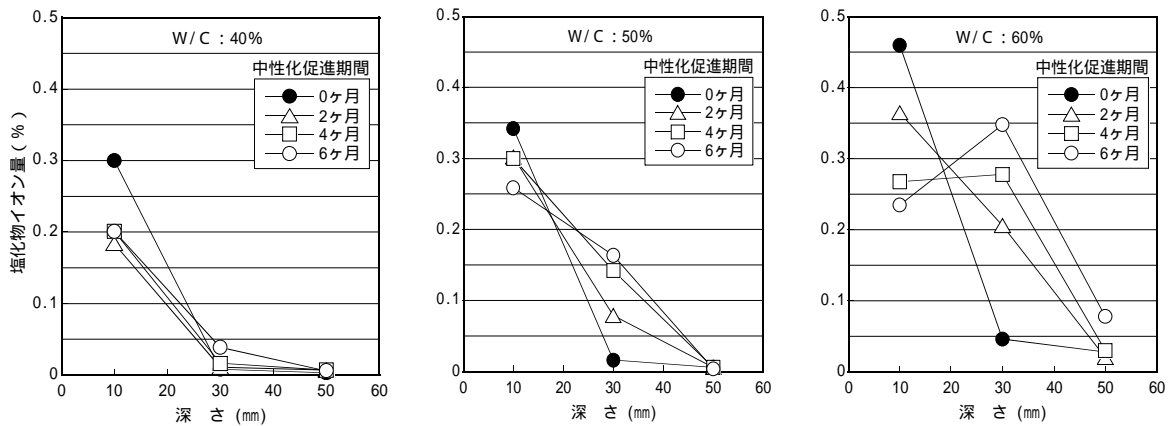


Fig. 7 海水噴霧試験後の塩化物イオン分布  
Distribution of Chloride Ion after Sea Water Spray Test (Experiment No.2)

中性化部分を区別しないで、塩化物イオン量の拡散係数を求めた。Fig. 7に示すように、中性化が進行したコンクリートほど、塩化物イオン量は、表面部で少なく内部で多くなる傾向があるために、拡散係数は増加する。例えば、W/C40%のコンクリートでは、中性化深さが10mm以下の場合、中性化の進行によって拡散係数は大きく変化しないが、W/Cが50%以上のコンクリートでは、中性化深さが20mm程度の時の拡散係数は、中性化していないものの約5倍、中性化深さが30mm程度の時の拡散係数は、中性化していないものの約10倍となった。

3.2 凍結融解抵抗性に及ぼす塩化物イオン、中性化の影響

3.2.1 塩分を含むコンクリートの凍結融解抵抗性 塩化物イオンを初期より混入したコンクリートの凍結融解試験における相対動弾性係数 (REd) の変化を Fig. 9に示す。コンクリート中の塩化物イオン量が多い程、REdの低下が速くなった。これは、初期から混入した塩化物イオンが、細孔径分布に影響を及ぼすためと考えられ<sup>6)</sup>、塩化物イオンの含有により、凍結融解作用による内部の微小ひび割れの発生に差異が生じたものと推察される。また、質量減少率は、REdが低下した場合においても5%以下であった。よって、塩化物イオンを混入したコンクリートが凍結融解作用を受ける場合、コンクリートの劣化はスケーリングよりも、REdの低下として現れる。

塩化物イオンの含有量と相対動弾性係数の低下するサイクル数の関係をFig. 10に示す。土木学会コンクリート示方書 [施工編] では、凍結融解に対して厳しい環境において、許容される相対動弾性係数の値は80%以上とされている。塩化物イオンを含まないコンクリートは、300サイクルの凍結融解繰り返し後も、相対動弾性係数は90%程度であったが、塩化物イオンを2.5kg/m<sup>3</sup>以上含むコンクリートでは、300サイクル以下の凍結融解繰り返しにより、相対動弾性係数が80%以下となった。相対動弾性係数が80%以下となる凍結融解繰り返し回数は、塩化物イオン量が2.5kg/m<sup>3</sup>の時、270サイクル、塩化物イオン量が5.0kg/m<sup>3</sup>の時、90サイクル、塩化物イオン量が10.0kg/m<sup>3</sup>の時、60サイクルであった。

したがって、塩化物イオンが侵入したコンクリートに凍結融解繰り返し作用すると、塩化物イオンを含まない場合に比べて、かなり少ない回数において相対動弾性係数が低下するために、塩化物イオンの侵入と凍結融解繰り返しの複合劣化の影響を考慮して耐久性照査を行う必要がある。

3.2.2 中性化したコンクリートの凍結融解抵抗性 実験 における凍結融解試験開始前の中性化深さを Fig. 11に示す。中性化深さは、W/Cが40%で約7mm、W/Cが50%で約10mm、W/Cが60%で約15mmであった。

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をFig. 12に示す。いずれのW/Cのコンクリートも、中性化の進行に関わらず、凍結融解繰り返

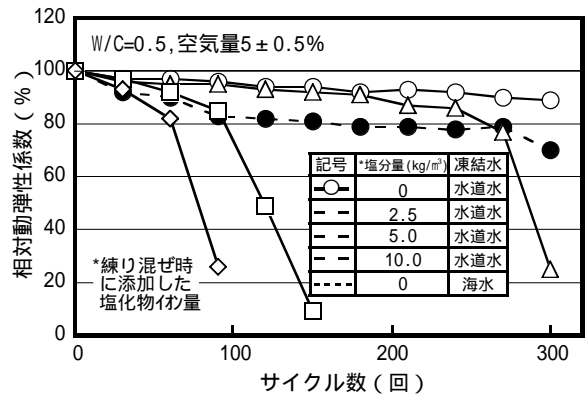


Fig. 9 塩分を含んだコンクリートの相対動弾性係数の変化  
Changes in Relative Dynamic Modulus of Elasticity for Concrete Involved Chloride Ion

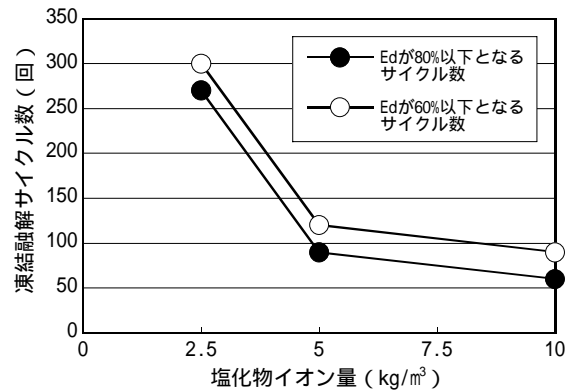


Fig. 10 塩化物イオン量と相対動弾性係数が低下するサイクル数の関係  
Relationship Chloride Ion Content and Reduction of Relative Dynamic Modulus of Elasticity

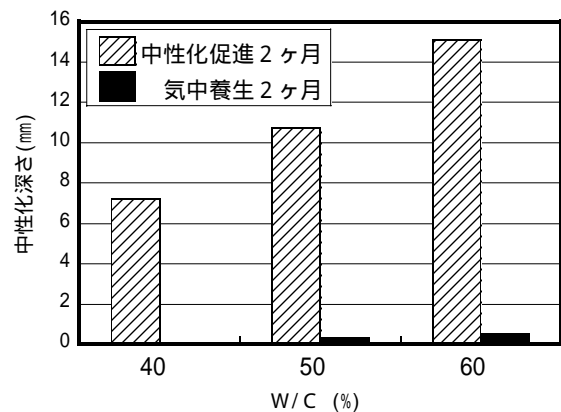


Fig. 11 凍結融解試験前の中性化深さ  
Carbonation Depth before Freezing and Thawing Test

返しによる相対動弾性係数の低下は少なく、また両者の相対動弾性係数の差異は小さい。凍結融解試験開始時中性化深さが15mm程度以内である場合は、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。

また、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をFig. 13に示す。いずれのW/Cのコンクリートも、中性化が進行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は、中性化が進行していない場合に比べて0.5ポイント程度大きくなる傾向が見られた。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、凍結融解作用によるスケ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<sup>7)</sup>。

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、相対動弾性係数および質量減少率は、中性化していないコンクリートと大差ないことから、中性化の進行が凍結融解抵抗性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

### 3.3 中性化の進行に及ぼす凍害の影響

実験における中性化促進試験時におけるコンクリートの相対動弾性係数をFig. 14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%以下に低下したものを含み、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。

凍結融解繰り返し履歴回数と中性化深さの関係を図15に示す。W/Cが50%以下の場合は、凍結融解繰り返しを受けた履歴回数が増加しても、中性化深さの増加は少ない。しかし、W/Cが60%のコンクリートの中性化深さは、凍結融解繰り返し履歴回数が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倍以上となり、凍結融解繰り返し履歴回数が増加するに伴い、中性化深さは著しく増加する。

凍結融解繰り返し後の相対動弾性係数と中性化深さの

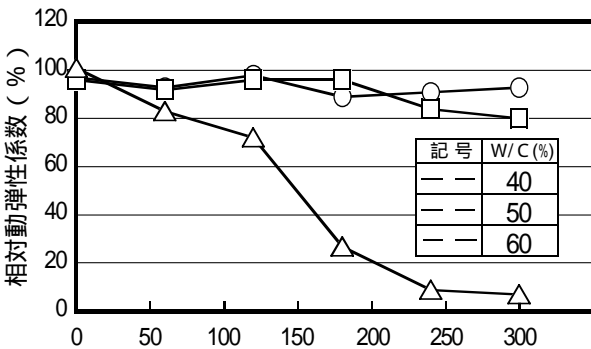


Fig. 14 中性化促進試験前のコンクリートの相対動弾性係数  
Relative Dynamic Modulus of Elasticity before Carbonation Accelerate Test

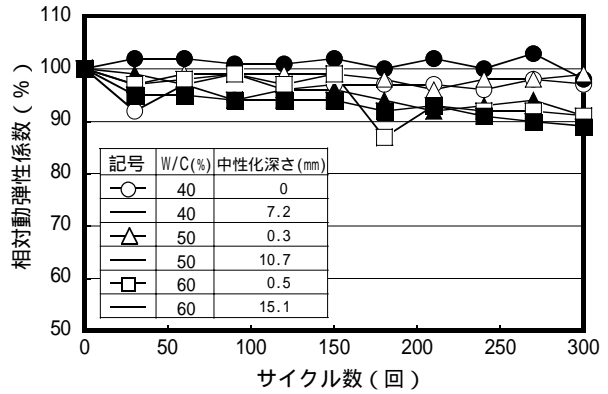


Fig. 12 中性化したコンクリートの凍結融解繰り返しによる相対動弾性係数の変化  
Change in Relative Dynamic Modulus of Elasticity for Carbonated Concrete during Freezing and Thawing Test

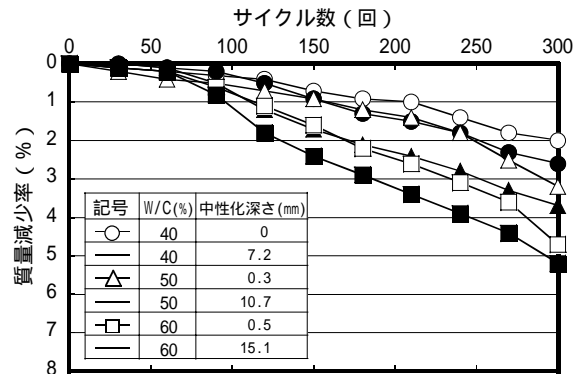


Fig. 13 中性化したコンクリートの凍結融解繰り返しによる質量減少率の変化  
Change in Mass Loss for Carbonated Concrete during Freezing and Thawing Test

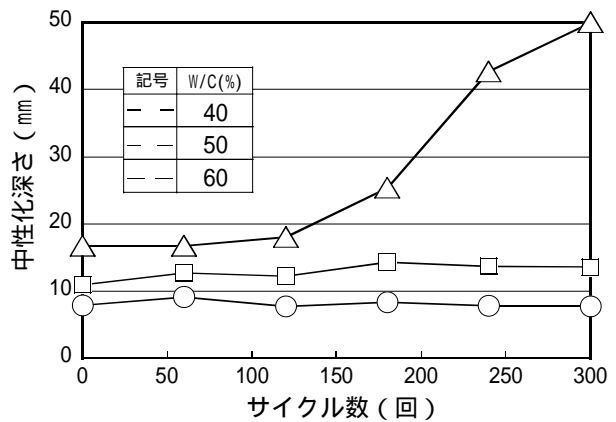


Fig. 15 凍結融解繰り返しを受けたコンクリートの中性化深さ  
Carbonation depth Subjected Freezing and Thawing Action

関係をFig. 16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。しかし、相対動弾性係数が80%程度以下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る。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、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約2.5倍増大した。

凍結融解作用により劣化が進行したコンクリートは、内部に微小なひび割れが発生しているために、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。したがって、凍結融解繰り返しによる相対動弾性係数を80%以下まで許容する場合は、凍結融解と中性化の複合劣化の影響を考慮して耐久性照査を行う必要がある。

#### 4. まとめ

複合劣化に関する実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

1) 凍結融解作用によって劣化したコンクリートの塩化物イオン拡散係数は大きくなるため、このような環境条件における耐久性照査を行う場合には、拡散係数の割増しをすることにより、複合劣化の影響を考慮する必要がある。凍結融解作用による塩化物イオンの拡散係数の増加率は、空気量と相対動弾性係数の低下程度により予測が可能である。

2) 中性化が進行したコンクリートに塩化物イオンが浸透する場合、中性化していないコンクリートに比べて、塩化物イオン量は表面部で少なく内部で多くなり、拡散係数は増加する。W/Cが大きいコンクリートでは、中性化が進行した場合には、塩化物イオンの浸透を拡散のみで取り扱うことができない場合がある。

3) 塩化物イオンが侵入したコンクリートに凍結融解繰り返し作用が作用すると、塩化物イオンを含まない場合に比べて、かなり少ない回数において相対動弾性係数が低下するために、塩化物イオンの侵入と凍結融解繰り返しの複合劣化の影響を考慮して耐久性照査を行う必要がある。

4) 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、相対動弾性係数および質量減少率は、中性化していないコンクリートと大差ないことから、中性化の進行が凍結融解抵抗性に及ぼす影響は小さい。

5) 凍結融解作用による劣化程度が、相対動弾性係数で80%以上である場合は、凍結融解繰り返しによる劣化が

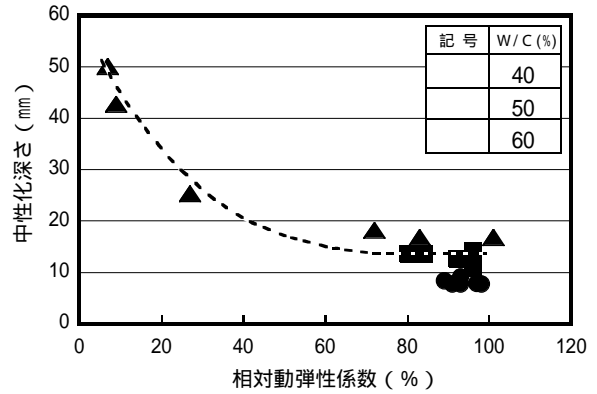


Fig. 16 相対動弾性係数と中性化深さの関係  
Relationship Relative Dynamic Modulus of Elasticity and Carbonation Depth

中性化の進行に及ぼす影響は小さいが、相対動弾性係数が80%以下となったコンクリートは、中性化の進行が速くなる場合がある。したがって、凍結融解繰り返しによる相対動弾性係数を80%以下まで許容する場合は、凍結融解と中性化の複合劣化の影響を考慮して耐久性照査を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 藤田卓, 藤田嘉夫: 硬化セメントペーストのスケーリング劣化に及ぼす塩化物イオンの影響, 土木学会論文集 第360号 / - 3, 1985
- 2) 月永洋一, 庄谷征美, 原忠勝: 塩化物が作用したコンクリートの凍害劣化に関する研究, セメント・コンクリート論文集No.47, 1993
- 3) 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
- 4) 立松和彦, 山崎順二, 山田優: 中性化と塩化物イオンの複合劣化作用に関する実験的研究, 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム論文集, pp.7~14, 2001
- 5) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物およびアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集Vol.1, No.2, pp.69~82, 1990
- 6) 大和竹史, 江本幸雄, 添田政司: 塩化物を含むコンクリートの凍結融解抵抗性, セメント技術年報35, 1985
- 7) 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