

論文 ASRと凍害による複合劣化に関する基礎的研究

鹿野 裕*¹・小林 孝一*²六郷 恵哲*³

要旨: ASR と凍害の複合劣化がスケーリングとコンクリートの膨張に与える影響を調査するために、反応性骨材を用いた供試体を高温多湿の ASR 促進室にて劣化、膨張させた後に、急速凍結融解試験を行った。その結果、ASR 劣化度が高いものほど凍結融解繰返しによる劣化が大きくなる結果になった。具体的には、凍結融解繰返し中にも膨張は継続し、また、凍結融解によるスケーリング量が大きくなった。

キーワード: 複合劣化, スケーリング, 凍害, ASR

1. はじめに

近年、構造物の劣化による問題が顕在化している。鉄筋コンクリート構造物の様々な要因による複合的な劣化も増えており、山間寒冷地でアルカリシリカ反応（以下 ASR）と凍害による複合劣化が報告されている^{1) 2) 3)}。これはスパイクタイヤ禁止後に凍結防止剤の散布量が増加し、その中に含まれる Na により ASR, Cl により凍害（スケーリング）が助長されているためであると考えられる。しかし、ASR と凍害による複合劣化については、十分には研究が行われておらず、それらの特性やお互いが及ぼしあう相乗効果についていまだ不明な点が多い。

そこで本研究では、ASR を発生させた後に凍結融解の影響を受けさせた複合劣化供試体を作製し、ASR と凍害の複合劣化について、その劣化特性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1. 使用材料および配合

表-1 にコンクリートの配合を示す。本研究では、ASR による劣化が大きくなるようペシマム量試験を実施して、表-2 に示す反応性骨材の混合比を決定した。反応性骨材は北海道産、非反応性骨材は岐阜県揖斐川産を使用した。

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。また、複合劣化供試体ではコンクリート中のアルカリ量が 12.0kg/m³ となるように練混ぜ時に NaCl を添加した。凍結融解供試体には、NaCl を添加しない以外は、反応性供試体と同一の配合を使用した。

2.2 供試体の種類

実験で用いた供試体を図-1 に示す。供試体には、D10 鉄筋 2 本を断面の下部あるいは中央に配置したものと無筋のものがある。図-1 中の「下）」はコンクリートの膨張が鉄筋により偏心して拘束されることを模擬している。「中）」は拘束が断面に均一に作用することを模擬している。「なし）」は無筋で拘束がない場合を模擬している。本研究では、これら 3 パターンの配筋にそれぞれ凍結融解の影響のみを受けた非反応性のもの、凍結融解及び ASR の影響を受けた反応性のもの（複合劣化供試体）を作製した。

表-2 反応性骨材比

細骨材の骨材比(%)		粗骨材の骨材比(%)	
反応性	非反応性	反応性	非反応性
70	30	50	50

表-1 示方配合

供試体名	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)								
			水	セメント	細骨材	反応性細骨材	粗骨材	反応性粗骨材	AE 減水剤	AE 剤	NaCl
複合劣化供試体	57	3	168	295	253	608	490	487	295	0.59	19.5
		6								3.98	
凍結融解供試体		3								0.59	/
		6								2.66	

*1 岐阜大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授 博 (工) (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

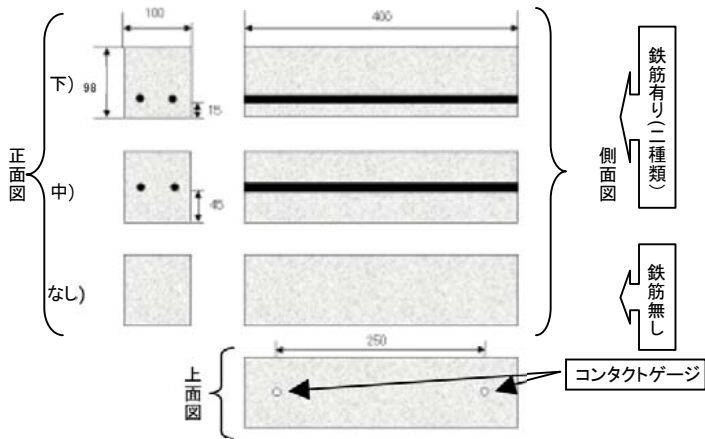


図-1 供試体

表-3 供試体一覧

空気量	供試体名	鉄筋の有無および供試体の数(×本) (図2.1参照)
3.0%	凍結融解	有り(下×2, 中×2)
		無し(×2)
	複合劣化(大)	有り(下×2, 中×2)
		無し(×2)
	複合劣化(中)	有り(下×2, 中×2)
		無し(×2)
6.0%	凍結融解	有り(下×2, 中×2)
		無し(×2)
	複合劣化(大)	有り(下×2, 中×2)
		無し(×2)
	複合劣化(中)	有り(下×2, 中×2)
		無し(×2)

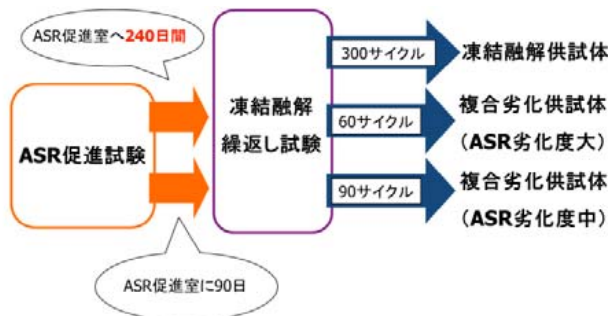


図-2 劣化促進の過程

また、空気量については、一般的なコンクリートの空気量である $4.5 \pm 1.5\%$ の上限下限をとり、3.0%と6.0%の2種類とした。以上の組合せにより、全供試体の種類は計18種となった。同じ種類の供試体を2本ずつ作製したため、実験で作製した供試体は計36体になった。図-1に示すように、供試体の上面と下面に250mmの間隔でコンタクトゲージを埋設した。供試体脱型後、恒温室で28日間の湿布養生を行い、各試験を開始した。各供試体に関するASR促進期間及び凍結融解繰返し回数とその順序を図-2に示す。

2.3 ASR促進

供試体を温度 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 、湿度100%のASR促進室に一定期間置くことにより、ASRを促進させた。ASR促進期間は、複合劣化(ASR劣化度大)供試体は240日間、複合劣化(ASR劣化度中)供試体はASRによりひび割れが発生するまでの約80日間とした。以降、前者を複合劣化(大)供試体、後者を複合劣化(中)供試体と呼ぶ。また、ASR促進期間中、JIS A 1129-2に準拠したコンタクトゲージ法により、長さ変化の測定を数回行った。ひび割れ発生状況とひび割れ幅の計測も同時に行った。また、供試体内部の劣化度を把握するため一次共鳴振動数の測定を行ない、相対動弾性係数を算出した。

2.3 凍結融解繰返し

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A法)」に準拠して実施した。凍結過程は 5°C から -18°C 、融解過程は -18°C から 5°C 、合わせて1サイクルとし、1サイクルは3~4時間とした。本実験では30サイクル毎(複合劣化(大)供試体では20サイクル毎)に相対動弾性係数、コンタクトゲージ法による長さ変化、質量変化を測定した。

以上の配合や劣化促進の組合せを、表-3に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 凍結融解単独の作用

凍結融解供試体の質量変化率を図-3に示す。300サイクル終了後の質量変化率は空気量3%と6%では顕著な差が出ており、より空気量の多い6%の供試体の方が耐凍害性に優れているという、一般的な結果となった。

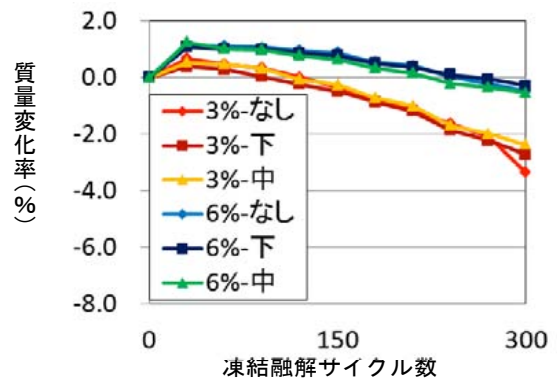


図-3 凍結融解供試体の質量変化率

凍結融解供試体の相対動弾性係数を図-4 に示す。質量変化率の結果と同様に、空気量 6% の供試体に比べ、3% の供試体は相対動弾性係数が大きく低下した。その中でも鉄筋が入っていない供試体の相対動弾性係数の低下は著しく、凍結融解 300 サイクル終了後で 60% まで低下した。鉄筋が配置されている供試体においても低下は確認できたが、鉄筋が配置されていることにより、単一の物質ではなくなっているため、たわみ振動の一次共鳴振動数の値は純粋なコンクリートの品質を表すものではなく、鉄筋とコンクリートの複合構造である RC 部材としての値である。そのため、鉄筋が配置されていることにより、内部劣化が抑制されたか否かは明らかでない。しかし、値の低下からコンクリートの内部劣化を評価するうえでは相対動弾性係数を用いることは有効であると考えられる。凍結融解供試体の長さ変化率を図-5 に示す。凍結融解繰り返し作用による供試体の膨張はほとんど認められなかった。また、空気量が 3% の場合には、供試体表面に、軽度のスケールが認められた。

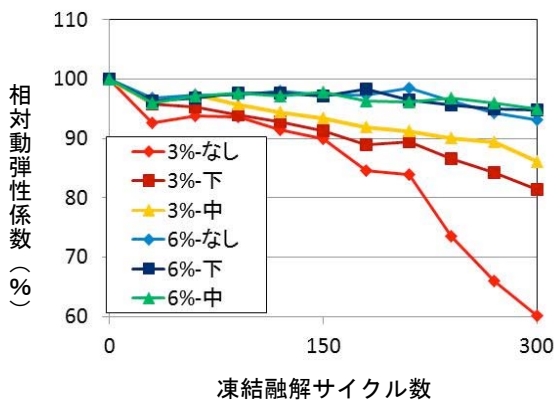


図-4 凍結融解供試体の相対動弾性係数

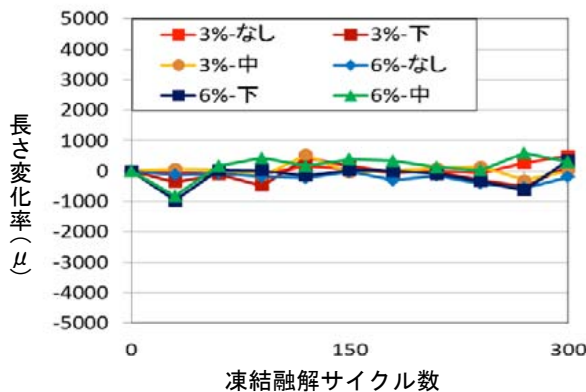
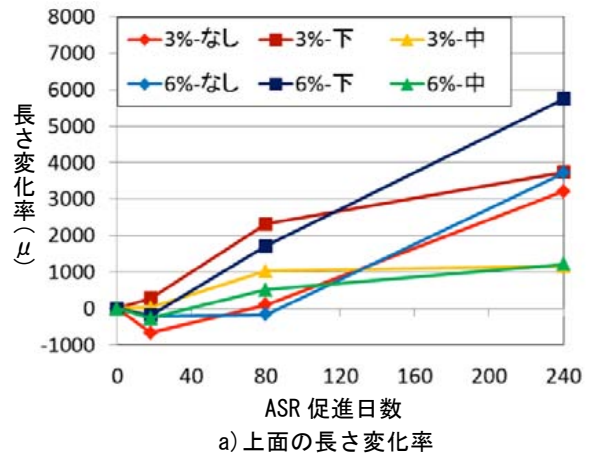


図-5 供試体上面の長さ変化率

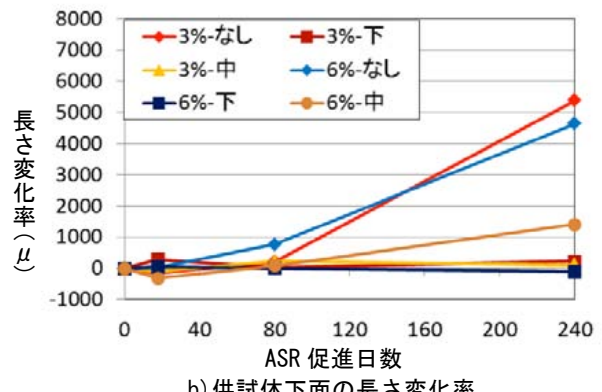
3.2 ASR 単独の作用

劣化促進期間中の複合劣化 (大) 供試体について、240 日間の ASR 促進期間中の劣化状況を以下に記す。ASR による長さ変化率を図-6 に示す。無筋の供試体と断面中ほどに配筋された供試体の上面と下面のひずみを比較すると、膨張量は供試体下面のほうが小さい。これは供試体上面と底面では圧密やブリーディングの影響を受け、水セメント比や気泡組織の違いが生じ、上面が底面に比べ組織が粗であるためと考えられる。供試体上面の長さ変化率は、鉄筋が下部に配置されている供試体で最大となり、約 6000 μ もの膨張を示した。上記で述べたように上面が底面に比べ組織が粗であること、鉄筋が底面から 15 mm の偏心した位置に配置されているため、供試体下部の膨張が拘束され、供試体上面でより膨張したためと考えられる。

ASR 促進 80 日の段階でのひび割れ発生状況の例を図-7 に示す。ここには記していない、劣化促進 240 日までの結果も併せてまとめると、供試体の配筋の観点から分析すると、無筋供試体においては、網目状・亀甲状のひ



a) 上面の長さ変化率



b) 供試体下面の長さ変化率

図-6 ASR による長さ変化率

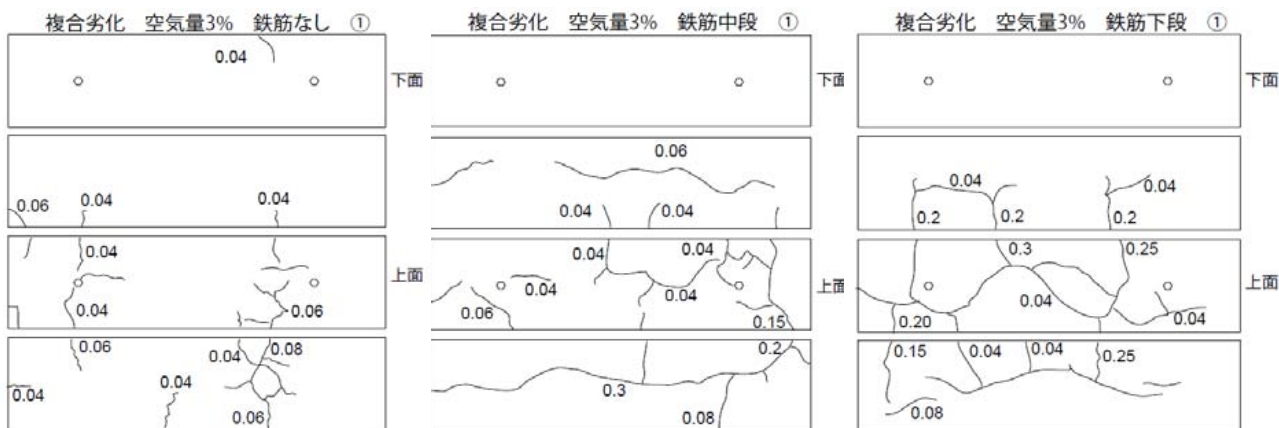


図-7 ASRによるひび割れ発生状況(図中の数字はひび割れ幅(mm))

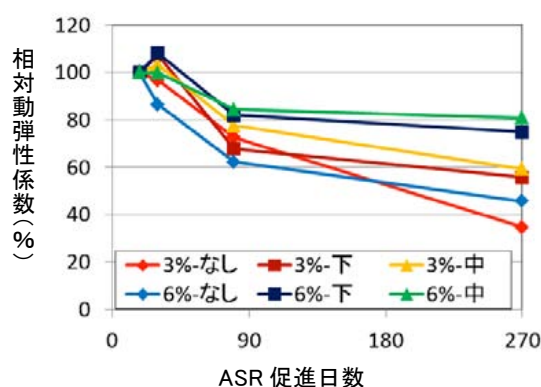


図-8 ASR 供試体の相対動弾性係数

表-4 ASR 供試体の面ごとのひび割れ幅の最大値 (mm)

供試体	上面	下面	側面
3%-鉄筋なし	0.06	0.04	0.06
3%-鉄筋下	0.3	0.1	0.25
3%-鉄筋中	0.15	-	0.3
6%-鉄筋なし	0.25	0.08	0.3
6%-鉄筋下	0.15	0.08	0.12
6%-鉄筋中	0.12	-	0.2

ひ割れが発生し、鉄筋を供試体下部に配置した供試体は、底面および側面のかぶり小さいところでひび割れが発生した。鉄筋を供試体中央部に配置した供試体は、側面の中央付近に鉄筋に沿った軸方向にひび割れが発生した。

表-4に面ごとのひび割れ幅の最大値を示す。どの供試体も打設時下面においてはひび割れ幅が比較的小さい値となり、これは図-6の結果とも一致する。また、図-7の各ASR供試体のひび割れ発生状況とも比較すると、ひび割れ本数が多い面ではその供試体の最大ひび割れが発生している傾向が見られた。

ASR 供試体の相対動弾性係数を図-8に示す。この結果は、ASR 促進開始から18日後の相対動弾性係数の値を基準として評価を行った。全ての供試体においてASRの進行に伴い相対動弾性係数が低下した。したがって、ASRの進展により内部劣化が進行していることが確認できた。鉄筋なしの供試体以外は空気量3%の供試体の方が6%の供試体より相対動弾性係数の低下が大きい傾向がある。これは空気量6%の供試体の方が良質な空気泡であるエントレインドエアを多く含んでおり、その空気泡がASRにより発生する膨張圧を吸収、緩和する役

割を果たしたためだと考えられる。しかし、空気量6%の鉄筋なしの供試体において、他の供試体より相対動弾性係数の低下が顕著である。何らかの原因で内部劣化が進行したと考えられるため、今後検討が必要である。

3.3 凍結融解とASRの複合作用

複合劣化(中)供試体及び複合劣化(大)供試体のASR促進後の凍結融解過程における長さ変化率を図-9、図-10に示す。なお、複合劣化(中)供試体については、ASR促進中の結果も併せて示す。

凍結融解供試体では凍結融解試験300サイクル間で最大で500 μ の膨張にとどまったのに対し、複合劣化供試体では凍結融解繰返し中も供試体の膨張は継続し、無筋の複合劣化(中)供試体では、僅か90サイクルの間で1000 μ 程度の膨張が発生し、無筋の複合劣化(大)においては、60サイクルで最大3000 μ 以上の膨張が見られた。これは、ASRにより緩んだ組織中にひび割れあるいは中に侵入した水分の凍結膨張により、さらに内部膨張が加速したものと考えられる。この結果から、ASRと凍結融解の複合作用が発生した際、大きな相乗効果が発生することが確認できる。

また、凍結融解過程でも配筋の違いによって、供試体の上面、下面の膨張量に大きな差が見られた。

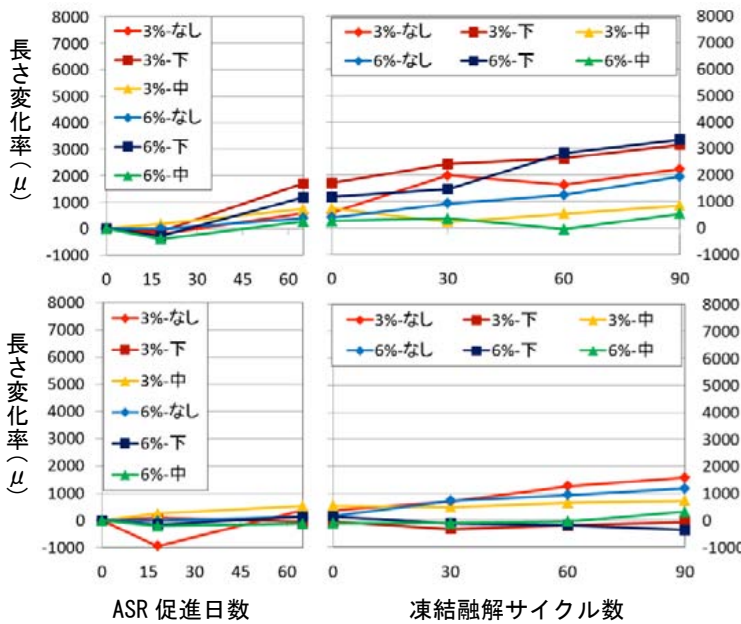


図-9 複合劣化(中)の長さ変化率
(上図：供試体上面，下図：供試体下面)

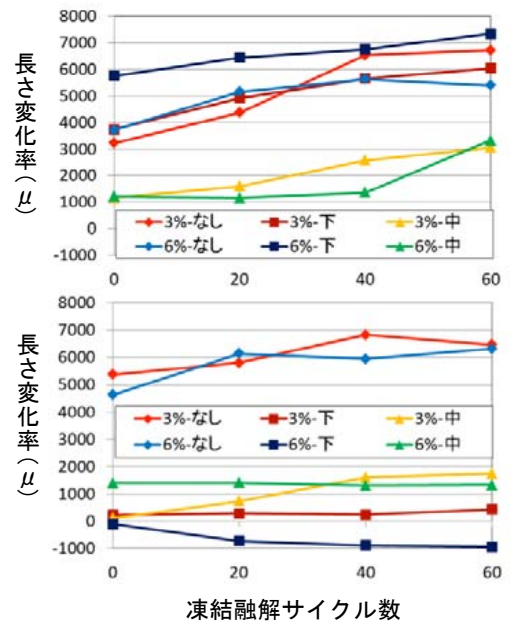


図-10 複合劣化(大)の長さ変化率
(上図：供試体上面，下図：供試体下面)

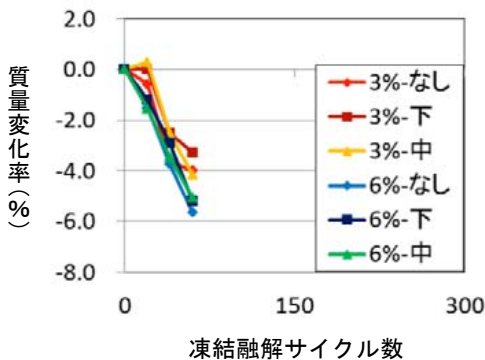


図-11 複合劣化(大)の質量変化率

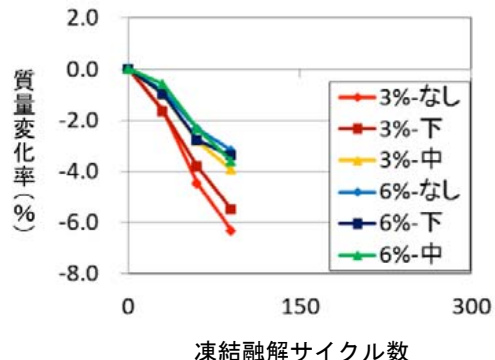


図-12 複合劣化(中)の質量変化率



写真-1 凍結融解繰返し終了後の複合劣化供試体

複合劣化(大)供試体及び複合劣化(中)の凍結融解過程における質量変化率を図-11、図-12に示す。複合劣化供試体は凍結融解供試体よりも質量減少が激しい。これはASRによるコンクリート組織の破壊が、凍結融解繰返しによる凍結膨張に大きく影響を及ぼし、その相乗

作用によってコンクリートのスケーリングが促進されたためであると考えられる。写真-1に複合劣化供試体の凍結融解繰返し終了後の様子を示すが、激しいスケーリングが生じていることがわかる。ただし、複合劣化供試体にはCI⁻が混入されているため、ASRによる組織の破壊ではなく、CI⁻がスケーリングを助長した可能性があるため、現在、亜硝酸ナトリウムによりASRを生じさせた供試体により、スケーリングの原因を調査中である。複合劣化(中)供試体の相対動弾性係数を図-13に示す。ASR促進と凍結融解の両過程を終えた段階で50%を切るものもあり、表層だけではなく内部劣化もかなり進んでいるものと考えられる。なお、複合劣化(大)供試体については、凍結融解試験中の一次共鳴振動数の計測が困難となるレベルまで供試体の劣化が進んだ。

なお、いずれの指標で評価しても、複合劣化の場合には空気量が劣化の程度に与える影響は殆ど認められな

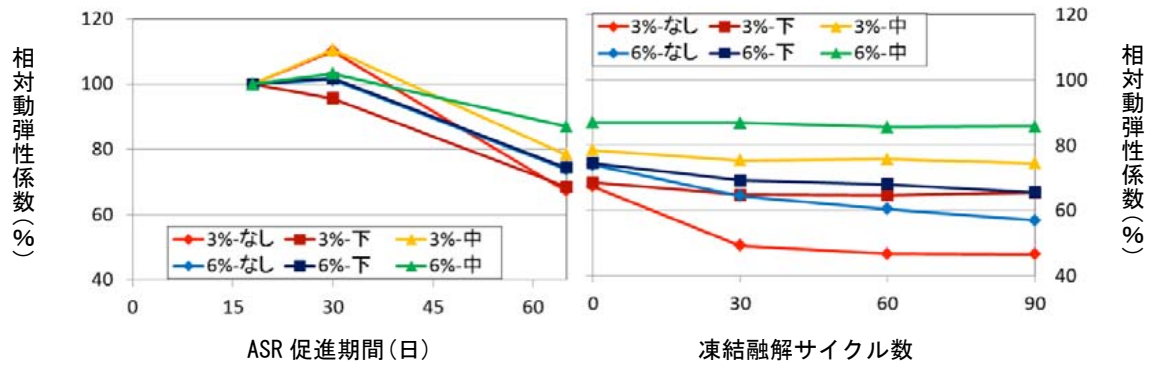


図-13 複合劣化(中)供試体の相対動弾性係数

かった。ASRの進行によって、微小空気泡による膨張圧緩和機構が作用しなくなったものと考えられる。

また、本研究では細骨材、粗骨材ともに反応性骨材を用いたが、ASRが生じた実構造物には粗骨材のみに反応性骨材が用いられている場合も少なくない。この場合にはコンクリート中のモルタル分は比較的健全なままであるため、凍結融解繰返しが作用しても微細組織の破壊が助長されない可能性もあるため、この場合についても現在検討を進めている。

4. 結論

本研究ではASRと凍結融解の複合作用がコンクリートの劣化に与える影響について検討した。

空気量と鉄筋の配置が異なる供試体を用いて、凍結融解とASRの複合作用を検討するため、ASR促進を行った後、急速凍結融解試験を行い、複合劣化させた。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 鉄筋がないASR供試体では、網目状・亀甲状のひび割れが発生し、鉄筋があるものは、かぶり小さい地点で鉄筋に沿った軸方向ひび割れが発生した。
- (2) 凍結融解供試体の相対動弾性係数は、空気量3%の供試体で減少が激しく、特に鉄筋のない供試体では顕著であった。

- (3) 凍結融解供試体の長さ変化率が300サイクル終了後、最大で500 μ であったのに対し、複合劣化(中)供試体では、ASR促進を受けた後に凍結融解を行うと、90サイクルで最大2000 μ もの膨張が発生した。また、複合劣化(大)供試体では凍結融解60サイクルで最大約7000 μ もの膨張が発生した。
- (4) 複合劣化供試体は、凍結融解によりスケーリングが発生し、質量減少が非常に大きくなった。
- (5) 複合劣化(大)供試体の相対動弾性係数は、ASRが促進するのに従い、値が低下した。凍結融解40サイクル時点で測定不能が過半数に達した。

参考文献

- (1) 鍵本広之, 前田哲宏, 川村満紀: アルカリシリカ反応と凍害の複合劣化特性, 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.215-220, 1999
- (2) 鳥居和之, 笹谷輝彦, 久保善司, 杉谷真司: 凍結防止剤の影響を受けた橋梁のASR損傷度の調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.579-584, 2002
- (3) 参納千夏男, 杉森学, 齋藤匠, 鳥居和之: ASRと凍害による複合劣化を生じた電力土木施設の調査事例, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.989-994, 2006