

空隙・ひび割れ中の混相挙動に基づいたコンクリート構造のアルカリ骨材反応-凍害複合劣化評価

Deterioration prediction of the coupled action of freeze-thaw cycles and alkali silica reaction in structural concrete based on the understanding of multi-phase flow in pores, voids and cracks

東京大学 講師 高橋佑弥

(研究計画ないし研究手法の概略)

○研究の目的

寒冷地のコンクリート構造物には、冬季の凍害と夏季のASR膨張といった厳しい複合劣化状況にあるものも多い。コンクリートで生じる単一の材料劣化への対策はそれぞれ概ね確立されているが、複数の事象による複合的材料劣化は劣化進展予測、現象理解でさえ研究の途上にある。本研究は、これまで開発してきた材料-構造応答連成解析システムを基盤技術とし、材料内の空隙・空気泡、ひび割れ中に存在する物質の混相挙動に着目することで、アルカリ骨材反応(ASR)と凍害の複合劣化を受けるコンクリート構造物の劣化予測・耐久性評価手法を確立することを目的とする。

○実験概要

ASR反応性の高い骨材を用いてコンクリート角柱/円柱試験体を作成し、凍結融解温度サイクルとASR促進高温養生を順序を変えて作用させ、複合劣化を生じさせる実験を実施した。表-1に試験シリーズと示方配合を示す。

表-1 試験体シリーズ

	Target air content W/C (%)		W	C	S	G	NaCl	硬化前	硬化後	気泡間隔係数 (μm)
	content (%)	W/C (%)						空気量 (%)	空気量 (%)	
35-1	1	35	175	500	717	914	17.17	1.7	1.3	1156
50-1		50	175	350	836	999	18.87	2.0	0.9	1422
60-1		60	175	292	839	1044	19	1.9	0.8	1154
35-6	6	35	175	500	736	845	17.17	6.6	4.3	273
50-6		50	175	350	777	928	18.87	6.2	2.7	336
60-6		60	175	292	781	971	19	6.5	4.8	302

空気量は1%、6%の2水準、W/Cは35%、50%、60%の3水準とした。ASR促進のため、NaClをNa₂O換算で10.0kg/m³となるように添加した。各配合で10×10×40cmの角柱試験体とφ10×20cmの円柱試験体を作成し、打設2日後脱型、4週間水中養生を行った。養生終了後、試験体を凍結融解試験とASR促進試験に供した。半数の試験体は先に凍結融解試験を、もう半数の試験体は先にASR促進試験を行い、異なる複合劣化順序で試験を実施した。表-1中の硬化後の空気量ならびに気泡間隔係数は養生後の円柱試験体底面より2cm部分を切り出し、ASTM C457に基づき計測した。凍結融解試験は、JIS1148のA法を参考に温度サイクル条件を変え、最高温度7℃最低温度-18℃、冷却・加熱時間50分、温度保持時間70分の1サイクル240分とした。測定された膨張量が1500μになるか150サイクル

経過するまで試験を行った。ASR促進試験は、試験体に水で湿らせた布を巻き付け、ラップで封緘した状態で40 °C、RH95%環境に設置し行った。膨張量が1500 μ になるか促進13週間経過するまで試験を行った。

角柱試験体を用いて膨張量を測定した。各劣化促進試験開始前に基長を測定し、コンパレータによる長さ変化測定によって膨張量を追跡した。円柱試験体を用いて各劣化試験終了後の圧縮強度を測定した。各シリーズ2本ずつ圧縮試験を行い、平均値を算出した。角柱・円柱全試験体に対してJIS11271に基づき共鳴周波数を測定し、相対動弾性係数の推移を測定した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

○実験結果

図-1に、角柱試験体による膨張量推移測定結果を示す。それぞれ(i)凍結融解試験時、(ii)凍結融解後のASR促進試験時、(iii)ASR促進試験時、(iv)ASR試験後の凍結融解試験時の膨張量を示している。結果を見ると、(i)より凍結融解のみが作用した場合は空気量6%の試験体が膨張しないか膨張が遅いことがわかるが、(iv)よりASR後の凍結融解による膨張量を見ると空気量の大小に関わらず全試験体が膨張している。凍結融解前にASRが発生することにより、凍結融解に有効な空気泡の機能が損なわれることが示されており、既往の著者らによる解析的検討結果や事例報告を支持する結果が得られた。一方、ASR膨張については、(ii)および (iii)の膨張傾向に大きな差異が見られない。別途計測を行っていた質量変化率を見てもあまり変化が無かったことから、凍結融解による膨張・損傷は、その後には生じるASR膨張の挙動にはあまり影響を及ぼさない可能性があることが示された。

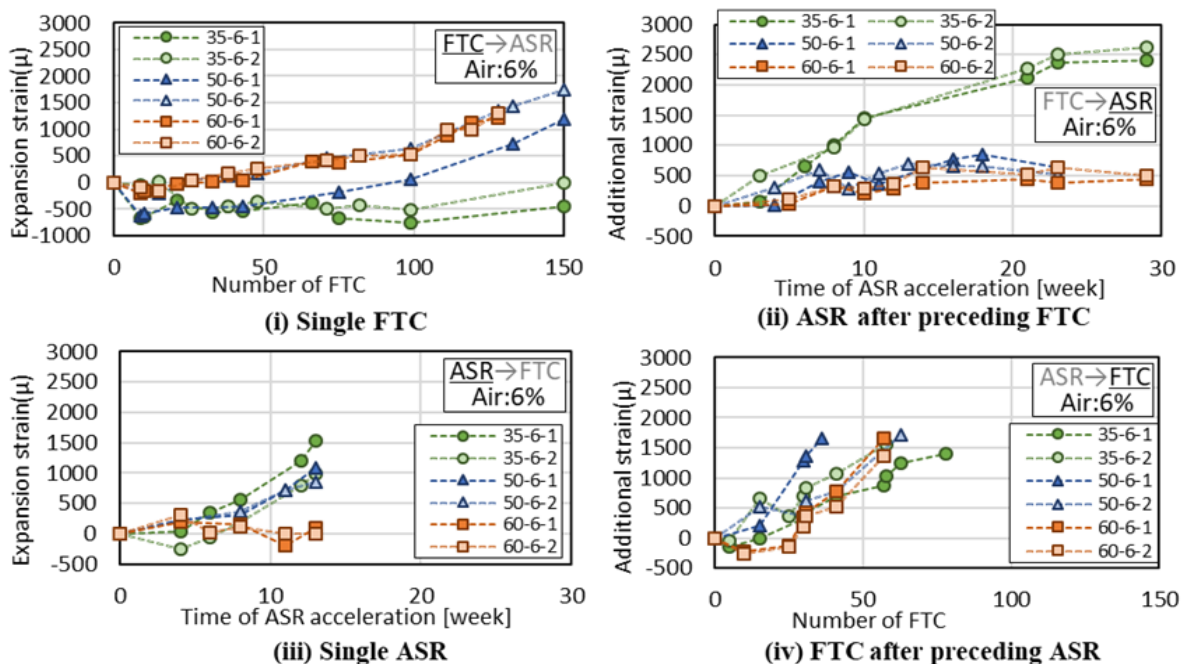


図-1 劣化環境下の角柱試験体の膨張量推移測定結果

実験に供した円柱試験体のうち、劣化なしの試験体、凍結融解を作用させた試験体、凍結融解の後にASR促進を行った試験体の圧縮試験結果より得られた圧縮強度と静弾性係数を図-2に示す。全てのシリーズで、凍結融解作用を受けることで圧縮強度、静弾性係数共に低下しているが、その後ASR促進を行うと、一部の試験体で膨張が進展しているにも拘らず力学的性能が回復しているような

結果（W/C60%Air1%, Air6%とW/C50% Air6%）が得られた。この時に測定された相対動弾性係数を観察すると、力学性能の回復とともに相対動弾性係数も向上していた。ASRと凍害の複合の複合劣化を受けたコンクリートについて、力学性能と相対動弾性係数測定結果とが非常に強く関連していることが考えられる。

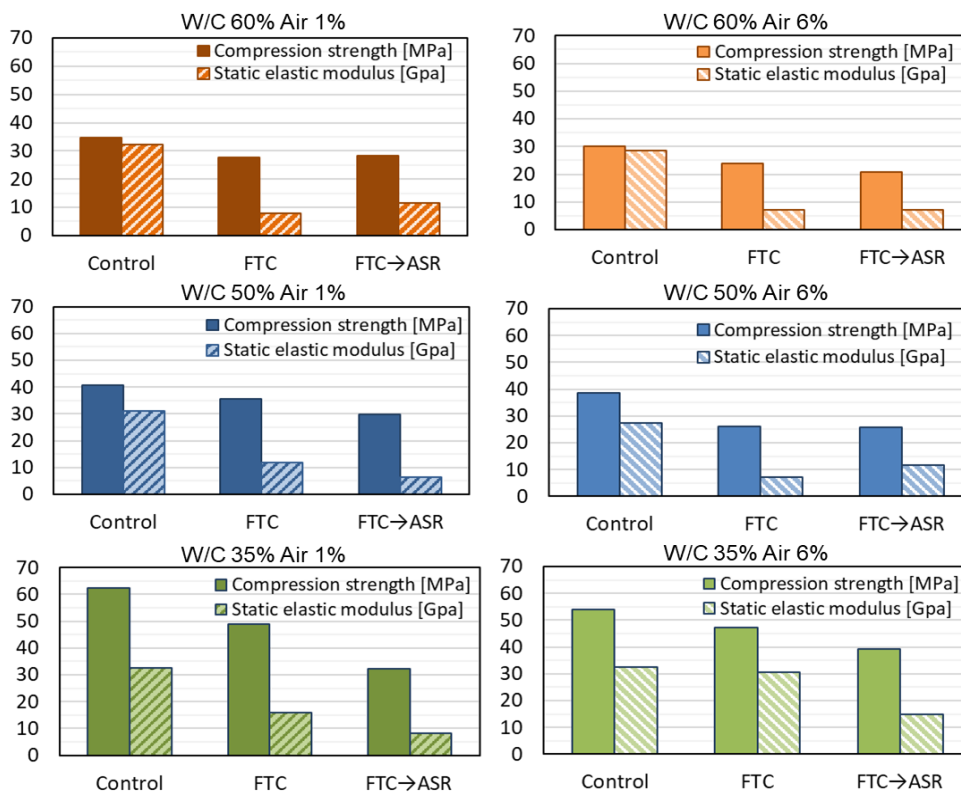


図-2 円柱試験体の圧縮試験結果

そこで、本研究で得られた圧縮強度試験および静弾性係数と、動弾性係数の関係性について調べた。図-3に劣化前の試験体の測定値で正規化した圧縮強度、静弾性係数の値と、相対動弾性係数との関係性をそれぞれプロットした結果を示す。これまでに、凍結融解を受けた場合について相対動弾性係数と力学性能の間に強い相関性があることは種々報告されているが、図-3を見ると、ASRや凍結融解単一の作用を受けたシリーズのみならず、ASRと凍結融解の複合作用を受けたシリーズについても、強い相関性があるようである。このような関係性は前述のASRによる力学性能の回復過程でも損なわれていない。このことは、ASRと凍結融解の複合劣化を受けたコンクリートの力学性能を評価するうえで、相対動弾性係数を測定し、評価することが有用であることを示しているといえる。一方、力学性能の回復過程で膨張が進展を続けていることと考え合わせると、膨張量と力学性能は関連性が小さいと結論づけられる。

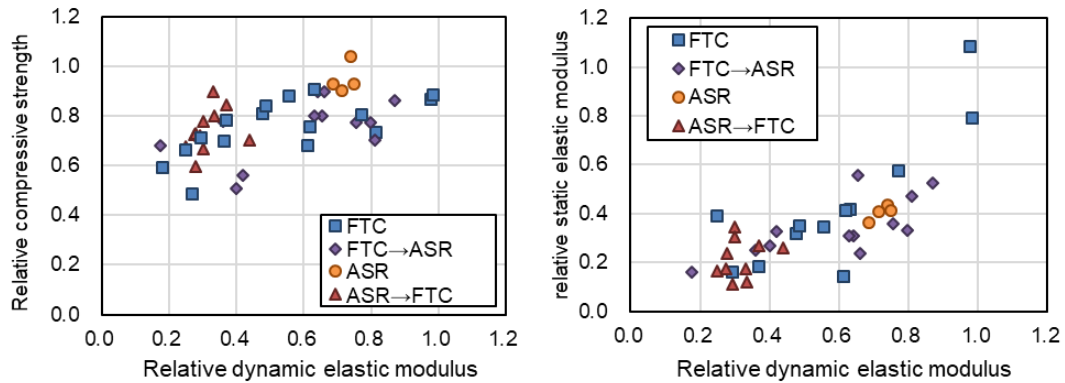


図-3 円柱試験体の力学性能と相対動弾性係数の関係性

○解析モデルによる検討

以上のような複合劣化挙動について、解析モデルを用いて検討を行った。検討には東京大学コンクリート研究室で開発されてきた材料-構造応答連成解析システムDuCOM-COM3を用いた。近年、凍害やASRによる膨張や損傷を再現可能な多孔体力学モデルを構築・実装しており、本研究の着想に基づいて、ひび割れや空隙中の混相挙動に基づいたモデル化を進めている。本モデルによる複合劣化環境の圧縮特性解析結果を図-4に示す。現状モデルによる解析は、実験でも見られた凍結融解を受けた後のASR促進条件下での圧縮強度回復を再現している。しかし、剛性については複合劣化環境でいずれも低下し、実験で見られた回復が再現されていない。ひび割れ中のASRゲルが力学性能へ与える影響についてさらなる検討を行い、モデルの高精度化を進める必要がある。

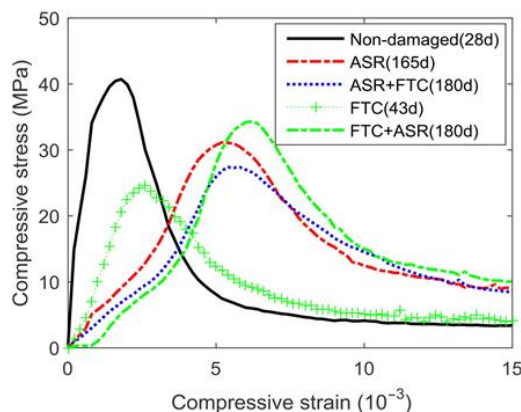


図-4 解析モデルによる様々な暴露環境後の残存力学性能

(発表論文)

- 1) Fuyuan Gong, Yuya Takahashi, Koichi Maekawa, "Multi-scale computational modeling for concrete damage by mixed pore pressures - case of coupled alkali-silica reaction and cyclic freeze/thaw", Engineering Computations, 35(6), pp. 2367-2385, 2018
- 2) 瀬川出, 高橋佑弥, Fuyuan Gong, 前川宏一: コンクリートの凍結融解・ASR複合劣化における膨張・損傷過程の分析, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp.373-374, 2018
- 3) Izuru Segawa, Yuya Takahashi, Fuyuan Gong and Koichi maekawa: Expansions and damage processes of concrete due to coupled alkali silica reactions and freeze-thaw cycles, Proceedings of the 8th International Conference of Asian Concrete Federation, pp.649-658, 2018, Fuzhou, China