

論文 固液二相モデルを用いたASR膨張モデルと床版疲労解析への応用

高橋 佑弥^{*1}・田中 泰司^{*2}・前川 宏一^{*3}

要旨:本研究では、鉄筋コンクリート床版において、アルカリシリカ反応(ASR)による膨張が耐疲労性に及ぼす影響を評価することを試みた。既存の解析システムにASRゲル生成・膨張・応力場形成のモデルを導入することで、異方的な振る舞いを取り扱い可能としている。既往の床版輪荷重疲労実験を用いて提案したモデルの実規模への適用性を検証した。載荷前の膨張挙動について実験と解析で同等の異方的挙動を示すこと、疲労載荷時の挙動について実験と同様にASRが生じても必ずしも寿命が短くならない傾向があることを示した。また、収縮とASR、水の存在が複合的に疲労寿命に及ぼす影響について解析的に検討した。

キーワード:アルカリシリカ反応, RC床版, 疲労, 乾燥収縮, 輪荷重移動試験

1. はじめに

道路橋RC床版は、スパン長に比べて部材厚さが小さく、また自動車による移動荷重を直接受ける部材であり、環境作用と疲労が複合的に作用すると非常に劣化が促進されやすい部材である。特に北日本では厳しい低温環境と凍結防止剤の散布による深刻な橋梁床版の劣化も報告されている¹⁾。凍結防止剤は塩分だけでなくアルカリも含んでいるため、アルカリシリカ反応(以下、ASR)を促進する可能性が高く、ASRの危険性についても十分に認識する必要がある。橋梁床版へ複合的に作用するASR、降雨と高サイクル疲労は、構造性能劣化に大きな影響を及ぼす可能性がある。これらの複数の要因の相互作用について調査しRC床版の長期性能を知ることが重要である。

ASR予測のモデルは多くの研究者によって検討されている(例えば^{2),3)}。Saoumaら²⁾は、化学反応を考慮したASR有限要素モデルを開発しており、ダムをはじめとした構造コンクリートへの適用を試みているが、ASRに特徴的な異方的な挙動については、経験的な換算式を用いている現状にある。橋梁床版などの多方向配筋環境下では、複雑な異方性を示すことが考えられ、単純な経験則はその適用範囲を超えてしまうことが懸念される。

著者らの所属する研究室は、構造コンクリートの三次元マルチスケール解析が可能な計算システムを開発してきた⁴⁾。近年には、上記の背景に基づき、Biotの固液二相モデルの計算スキーム⁵⁾の中でASRとその多方向ひび割れに伴う物理作用とをモデル化してきた⁶⁾。本研究では、本システムを構造物スケールへ適用することを試みる。ASR膨張が生じたRC床版の疲労寿命を対象とし、提案したモデルを既往の実験や知見を元に検証する。また、凝縮水、収縮、ASRが複合的に疲労性能に与える影響について解析的に検討する。

2. 解析モデルについて

2.1 ASR膨張モデル

解析プラットフォーム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-COM3⁴⁾である。本システムの中でASRによる膨張モデルは土の液状化など土質力学に用いられてきた多孔体力学⁷⁾に基づいて構築されている⁵⁾。ASRゲルはひび割れ間および細孔中に存在する物体として扱われる。図-1はASR生成と応力形成モデルの概要を示した図である。ゲル生成・膨張の化学反応式に基づいて、ASRゲル生成に関する反応速度がアルカリ濃度、自由水、反応性骨材量の関数として定式化されている(式(a))。反応速度係数kは反応性骨材、粒形分布毎に異なるため、現状試験体の膨張試験より同定する必要がある。湿度・温度依存性については、式(b)と式(c)にて定式化されている。生成されたASRゲルの質量はNa、Kのアルカリそれぞれについて分子式X₂Si₂O₅(H₂O)_{8.4}(X=Na or K)を仮定して計算している(式(d))。質量保存の観点から、消費される凝縮水の量やアルカリの量についても計算がされる(式(e)および式(f))。反応速度に関する制御因子である空隙水量や空隙水中のアルカリ量は熱力学連成解析システムDuCOMと3次元構造応答解析システムCOM3⁸⁾の間でグローバル変数として扱われており、この点において、ASRに関する化学-物理の強連成が達成されている。

生成したゲルの体積に基づいて応力が計算される。ここでゲルの一部は毛細管空隙に吸収され、応力形成には寄与しないと考えている。吸収されるゲル量はゲル圧に応じて式(h)によって計算される。残りのゲルが応力計算に用いられるが、ゲル性に基づいた内部応力についてASRゲルの半固体-半液体のような物性をモデル上で以下のように考慮している。固体液体混在状態を考慮す

*1 東京大学 大学院工学系研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 特任准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 大学院工学系研究科 教授 工学博士 (正会員)

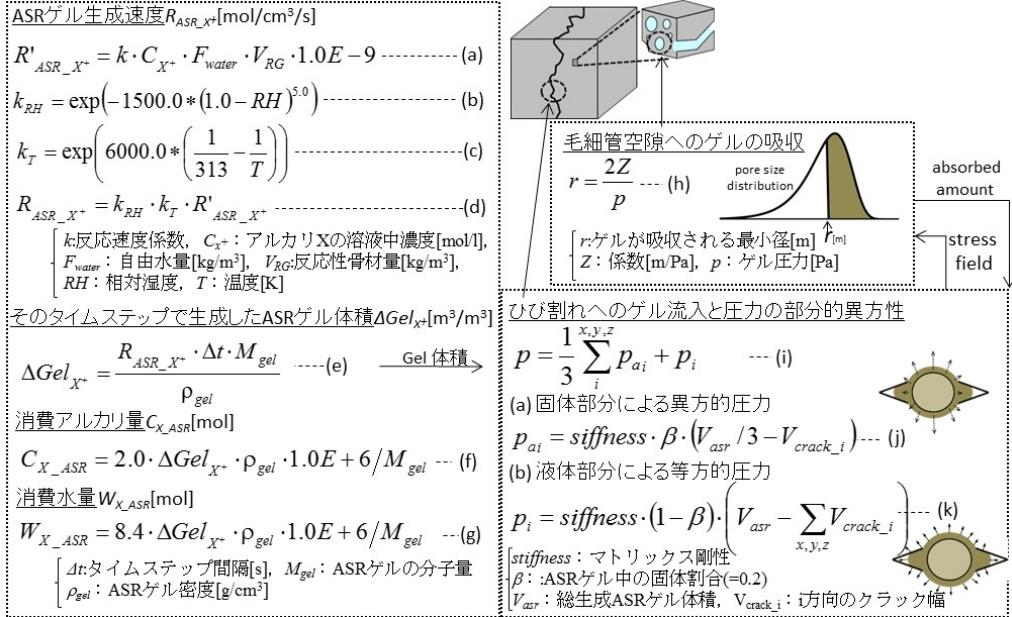


図-1 ASR ゲル生成・応力形成モデルの概要

るためにゲル全体に占める固体部分の割合を示すパラメータ β を導入している。ある応力環境下で、生成 ASR ゲルの固体部分は骨材周りにとどまるが、液体部分は圧力に応じて移動しうる。この移動と圧力の異方性が ASR 膨張の異方性の一因となる。パラメータ β の値は、感度解析より第一次近似として 0.2 を与えることとした。また ASR ゲルの体積剛性は液体部固体部共に暫定的に凝縮水と同じとした。以上のモデルの適用性について一軸拘束試験などの要素試験体寸法では既に確認されている⁶⁾。

なお図-1 左側に示した、熱力学解析によりゲル生成量を計算する方法のほかに、計算負荷軽減のために ASR ゲル生成量を入力値として与える計算方法もオプションとして用意している。

2.2せん断伝達に関わるひび割れ幅の低減

以下、実構造物の疲労を扱うに際して考慮すべきモデルを示す。計算されたゲル体積と圧力はコンクリート骨格の構成モデルへと引き渡される。ほぼ全ての構成則は ASR が生じない場合と同じであるが、別途行った一軸圧縮強さに関する感度解析より、せん断伝達については、せん断伝達力が ASR 生成物を通して伝達されるために、ひび割れ中に存在する ASR ゲル生成物を考慮する必要があると考えられた。それら検討より接触密度関数内のひび割れ幅をひび割れ中の ASR ゲル占有割合によって減じるモデルを以下式(1)のように定式化した。

$$\delta' = (1 - \alpha * R_{asr}) \cdot \delta \quad (1)$$

ここで、 δ : 修正ひび割れ幅、 α : 低減パラメータ、 R_{asr} : ひび割れ中の ASR ゲル占有割合、 δ : ひび割れ幅である。低減パラメータは ASR 膨張が生じたコンクリートの一

軸圧縮挙動より逆推定し 0.7 を暫定的な値とした。0.7 という値はひび割れ中の ASR ゲルがひび割れのせん断伝達に部分的なながら貢献することを意味する。

2.3 土砂化モデル

コンクリート複合構造において疲労に水が伴う場合には、骨材とセメントペーストの間で生じる土砂化による平均剛性低減が長期性能に大きく影響を及ぼす。コンクリート中の間隙水圧が上昇した際に、粗大な空隙が集中している骨材周りの遷移体付近で局所的な圧力上昇が引き起こされる。周期的な間隙水圧の上昇は遷移体付近で骨材とセメントペーストを引き剥がす力を生じさせる。この劣化が進むと、セメントペーストが洗い流され骨材のみが残り、最終的にコンクリートが土砂のようになることが知られている。この作用は、凍結融解作用と、物理的な駆動力は異なるものの、機構上似ているものと考えられる。よって、この土砂化の作用について既往の凍結融解作用の研究⁹⁾より、低減パラメータ K を水圧の大きさに応じて決定される細孔溶液圧力の履歴 Z (初期値 0)により以下式(2)から式(4)のように表している。

$$Z = \int_{path} dZ \quad (2)$$

$$dZ = -10^n \cdot (1 + f_n) \cdot p_{ampl}^{f_n} \cdot dp \quad (3)$$

$$K = \exp(-Z) \quad (4)$$

ここで、 f_n , n : それぞれ S-N カーブの傾きと切片に関わる係数、 p_{ampl} : 水圧に関する増幅係数である。

土砂化によって、鉄筋とコンクリートの定着は失われる。 K の初期値は 1.0 であり土砂化が完全に進むと 0.0 となる。この時、内部鉄筋が地震応答に対するかぶり近傍

の鉄筋のように直交方向への安定性を失うことが考えられる。土砂化の場合にも、地震作用下で鉄筋がはらみだした際と似たように軸圧縮に対する耐荷力が低下することを仮定し、以下のような定式化を行っている。

$$\sigma_i = K \cdot \sigma_{ci} + \sqrt{K} \cdot \sigma_{si} + (1 - K) \cdot \sigma_{agg} \quad (5)$$

ここで、 σ_i ：応力の和、 σ_{ci} ：コンクリート部で負担する応力、 σ_{si} ：鉄筋部で負担する応力、 σ_{agg} ：骨材の集合体で負担する応力である。土砂化が進むとセメントペーストは侵食されコンクリート部の応力負担は減り、最終的に K が0になると応力負担も0となる。しかしそのような状況でも骨材の集合体は体積圧縮には耐えることが出来る。式(5)の右辺第三項は、セメントペーストによる接着が全く無くなった骨材の集合体の寄与分を表している。骨材の集合体による応力は、通常のコンクリートの1/100の剛性を持つと仮定して計算している。このようなモデルにより、ひび割れ中の高圧力の水が疲労荷重下の床版の劣化を促進することを考慮した。

3. 床版の輪荷重移動試験の再現解析

3.1 試驗概要

五島ら¹⁰⁾は、疲労載荷が可能な輪荷重移動載荷試験装置を用いて、実物大の供試体による床版の疲労寿命についての実験的検討を行っている。ASR が疲労寿命に及ぼす影響について調べるために、同じ諸元で RC 床版を作成し、厳しい ASR 促進条件に暴露する実験を行った。供試体諸元を図-2 に示す。供試体サイズは 3000mm × 2000mm × 160mm であり、スパン長は 1800mm である。上面下面のかぶり深さはどちらも 30mm である。主鉄筋は 150mm 間隔、配力筋は 120mm 間隔で配置されている。

表-1 に配合表を示す。骨材のうち粗骨材が反応性骨材である。ASR を促進するため、追加で NaCl が加えられている。Case I から Case III まで 3 つの異なる ASR の程度が用意されている。Case I は比較用として ASR 促進を行わないもの、Case II は 41 日間 ASR 促進養生(50°C RH80% 環境で、床版上面に飽和 NaCl 水溶液を常に供給する養生)を行ったもの、Case III は 87 日間 5%NaCl 水溶液中に浸漬した後に、59 日間前述の ASR 促進養生環境に供したものである。ASR 促進の結果得られた膨張挙動の様子を図-3 に示す。Case II は鉛直方向に 2800 μ 、水平方向に 800 μ 、Case III は鉛直方向に 4900 μ 、水平方向に 700 μ の膨張が表れた。圧縮強度は Case I が 34 日時点で 25.5 MPa、Case II が 97 日時点で 34.3 MPa、Case III

表-1 RC 床版のコンクリート配合¹⁰⁾

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	单位量(kg/m ³)				Admixture (C×%)		NaCl (kg/m ³)
			W	C	S	G	AD	AE	
65.0	4.5±1.5	45.0	175	269	818	1032	1.5	0.06	18.9

が 177 日時点で 34.6 MPa であった。

このようなRC床版供試体へ輪荷重疲労試験が行われた。実際の交通荷重を元に基本荷重が98kNに設定され、決められた荷重サイクル数の後に、段階的に29.4kNずつ荷重を増やす荷重条件となっている。載荷サイクル数はマイナーフレクチュレーションによって基本荷重の等価サイクル数へと換算されて結果に表示される。Case IIIにおいては、疲労に及ぼす水の影響を検討するために載荷中に床版上面に水が湛水されている。

図-4 に五島ら⁹⁾の実験で得られた活荷重たわみの結果を示す。ASR が生じた Case II は ASR のない Case I と比べて初回の活荷重たわみは大きいものの、疲労寿命は 1 オーダーほど大きい。ASR 膨張によるケミカルプレストレスが活荷重たわみを抑える可能性があると言及されている¹⁰⁾。Case II と Case III の結果の比較から水の影響はあまり無いように見える。ASR が起きていないコンクリートでは、疲労寿命に及ぼす水の影響が大きいことが知られている¹¹⁾にも関わらず、本実験ではあまり見られていない。また、水を湛水した Case III の試験後の試験体を見ると、高サイクルの水の圧力作用による土砂化が見られていたと報告されている¹⁰⁾。

3.2 床版膨張量の解析

五島らによる実験を、提案したモデルによって計算す

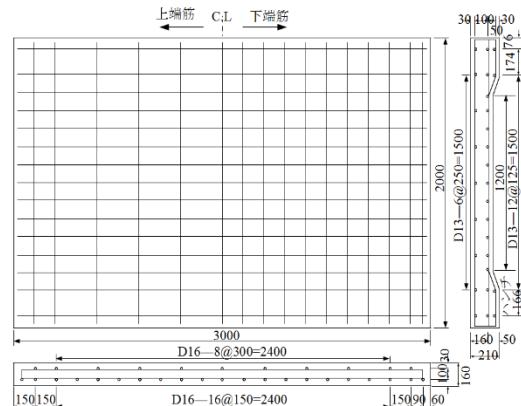


図-2 RC床版供試体諸元¹⁰⁾

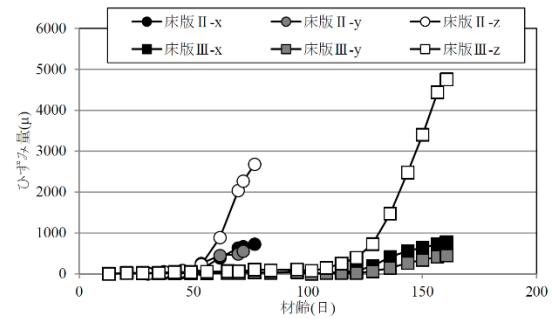


図-3 床版膨張挙動¹⁰⁾

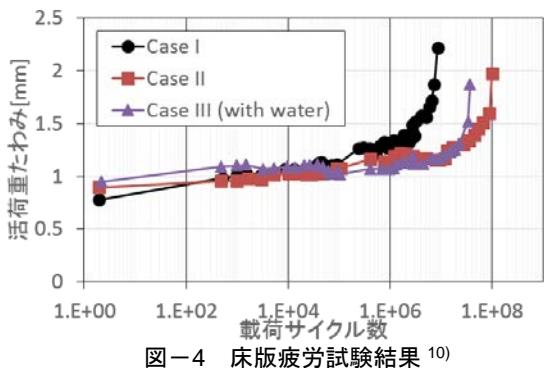


図-4 床版疲労試験結果¹⁰⁾

ることを試みた。計算メッシュは図-5に示すように、対称性を考慮して、1/2モデルを用意し、鉄筋配置に応じた要素分割とした。床版部は鉛直方向に5層に分割し、上下端から2層目に水平2方向の鉄筋をRC要素によって表現した。これまでの検討で、このような要素分割で計算結果が安定することが確認されている。まず、材料構造応答連成による解析を行い、打ち込みからの膨張挙動の推移をシミュレーションした。配合条件および養生条件は、実験と同一の条件を設定した。反応性骨材の反応速度については、別途供試体の膨張推移を元に感度解析を行って $k=0.5E-8$ に設定した。

結果を図-6に示す。多方向配筋下の膨張挙動をよく再現していると考える。膨張を拘束する水平方向の鉄筋量が多いため、鉛直方向の膨張が卓越する様子が捉えられている。促進養生開始直後の膨張速度が大きく、膨張曲線の形が実験と異なっているが、現状簡易な膨張速度式であるところを修正することで、膨張速度の解析精度が向上するものと考えている。

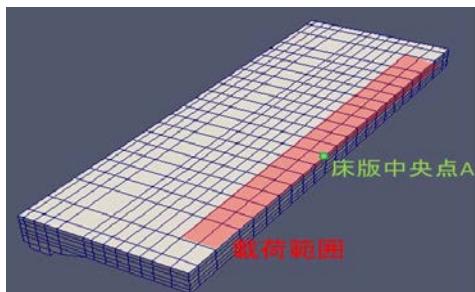
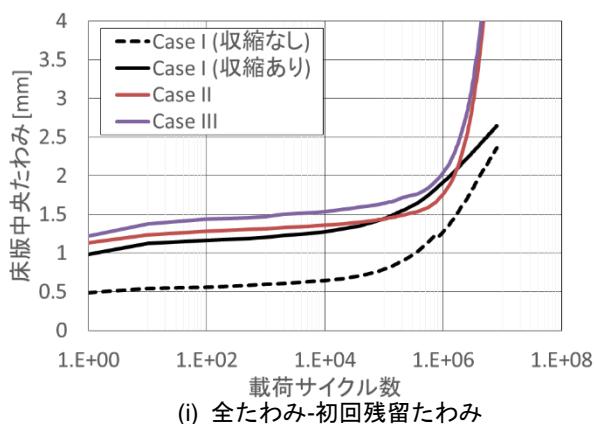


図-5 計算メッシュ



(i) 全たわみ-初回残留たわみ

図-7 床版疲労解析結果

3.3 輪荷重疲労試験に関する解析

実験と同様の支持条件を設定し、輪荷重疲労試験の再現解析を行った。疲労解析は計算負荷が極めて大きいため、ASR ゲル生成量を直接入力する計算方法を採用した。数値解析上の移動荷重値は 98kN の一定値とし、載荷範囲に実験同様毎分 28 往復の速度で作用させた。Case Iについて、収縮の影響を見るために、乾燥収縮が有る場合と無い場合の両方の計算を行った。乾燥収縮の入力値は、床版上面と下面で 500μ, 床版中央で 0μ とし、その間を線形で補完した値を設定し、ASR 膨張前に導入した。Case II と Case III については、載荷前に、1800μ の自由膨張を 100 日かけて導入する条件とした。鉄筋による拘束を受けて、結果として、解析上 3000μ の垂直方向膨張と 800μ の水平方向膨張が表れている。ASR が生じた場合のケースでは、常に水が供給される養生条件のため、収縮を考慮することはしなかった。

図-7 に床版中央の全たわみから初回載荷残留たわみを引いた値と活荷重たわみの解析結果を示す。結果より、Case I の解析から、収縮の影響が確かにあることがわかる。収縮がない場合には初回載荷のたわみは実験値の半分ほどであるが、収縮がある場合にはほぼ同じである。Case I の試験中に乾燥収縮が起こっている可能性があると考えられる。活荷重たわみの解析結果を実験結果と比較すると、実験結果と同様の傾向が見て取れる。初回載荷のたわみは Case II の方が Case I よりも大きいが、100

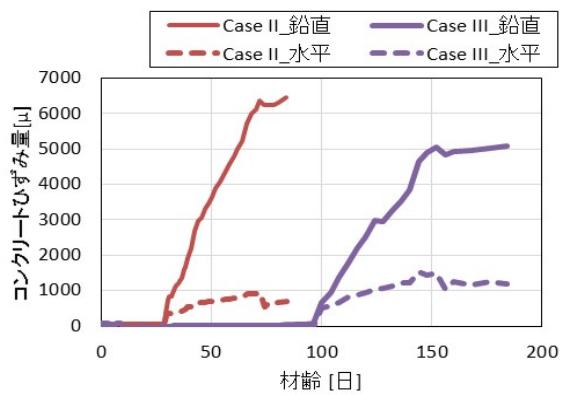
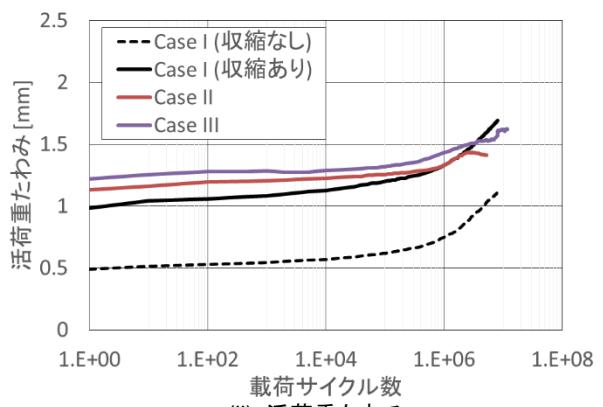


図-6 床版膨張量解析結果



(ii) 活荷重たわみ

表-2 解析ケース

	ASR	収縮	凝縮水
Case A	—	—	—
Case B	—	—	有
Case C	—	有	—
Case D	—	有	有
Case E	有	—	—
Case F	有	—	有
Case G	有	有	—
Case H	有	有	有

万サイクルを超えると、Case I の方がたわみが大きくなる。全たわみと活荷重たわみの両方の結果から総合的に見ると、ASR の有無で床版の疲労寿命はさほど変わっていない。これらの解析と実験より、ASR の発生は RC 床版の構造性能に対して、損傷などの負の影響だけではなく、有益な効果もある可能性が示唆される。

5. 収縮と水の関係についての感度解析

前章では橋梁床版の疲労寿命において、ASR 膨張が凝縮水による損傷速度を減じる可能性があることが示された。また乾燥収縮が橋梁床版の構造性能に影響を与えることも示された。これらの要因（ASR、乾燥収縮、凝縮水）の複合作用について検討することが必要であると考え、本章にて解析的な検討を行った。**表-2** に解析シリーズを示す。ASR、乾燥収縮、水の影響をそれぞれるために、Case A から H まで 8 シリーズの解析を行った。ASR を考慮するものは 1800 μ の自由膨張量を設定した。乾燥収縮を考慮するものは 4.3 項にて述べた収縮量と同じ収縮量を ASR 膨張前に導入した。**図-8** に解析によって得られた床版中央のたわみを示す。**図-7(i)** と同様、全たわみから初回載荷の残留たわみを引いた値を示す。

結果を見るとそれぞれの要因の疲労挙動への影響が見て取れる。ASR 膨張とそれに伴うひび割れによって、たわみは大きくなるものの、疲労寿命はそれほど変わらない。ASR 膨張によるひび割れは当然 RC 床版の剛性と疲労寿命を損なうが、同時に、膨張によるケミカルプレストレス力が導入されるため、さらなる変形を妨げる作用も生じるのではないかと考えられる。結果として、疲労寿命は ASR がない場合と比べてもそれほど変わらないと思われる。**図-9** は Case A と Case E の載荷サイクル 100 万回目の主ひずみ分布を示している。なお、ASR

のある Case E は、ASR 膨張によって生じたひずみを差し引いた、荷重作用によって生じたひずみ分の値を示している。Case E では Case A に比べてひび割れが広範囲に広がっており、耐荷機構が変化していることがわかる。

ここで特筆すべきは、Case E と Case F が疲労寿命にはほぼ差がないことである。ASR のみが生じた場合には水の有無がほぼ影響しない。一方で乾燥収縮は疲労寿命に大きく影響するようである。載荷前の乾燥収縮の発生は床版たわみを増加させ、疲労と共に水が作用すると床版の疲労寿命を大きく低減させる。ひび割れ中に存在する水による疲労寿命低下の程度は収縮の無いケースでは 1 オーダー程度であるのに対し(**図-8(i)**)、収縮が起きた条件では 2~3 オーダーにもなっている(**図-8(ii),(iv)**)。これらの計算より、ASR は水が疲労寿命に与える影響を小さくする一方で、乾燥収縮は水が疲労寿命に与える影響を大きくすることがわかった。またこれら相反する影響の内では、乾燥収縮の負の影響の方が勝るようである。

水の影響をさらに見るために、土砂化の状況を用いて解析結果を比較する。2.3 節で示した通り、水が存在する条件では土砂化が起こり、長期疲労性能にも大きく影響する。劣化パラメータ K が土砂化の指標として計算され

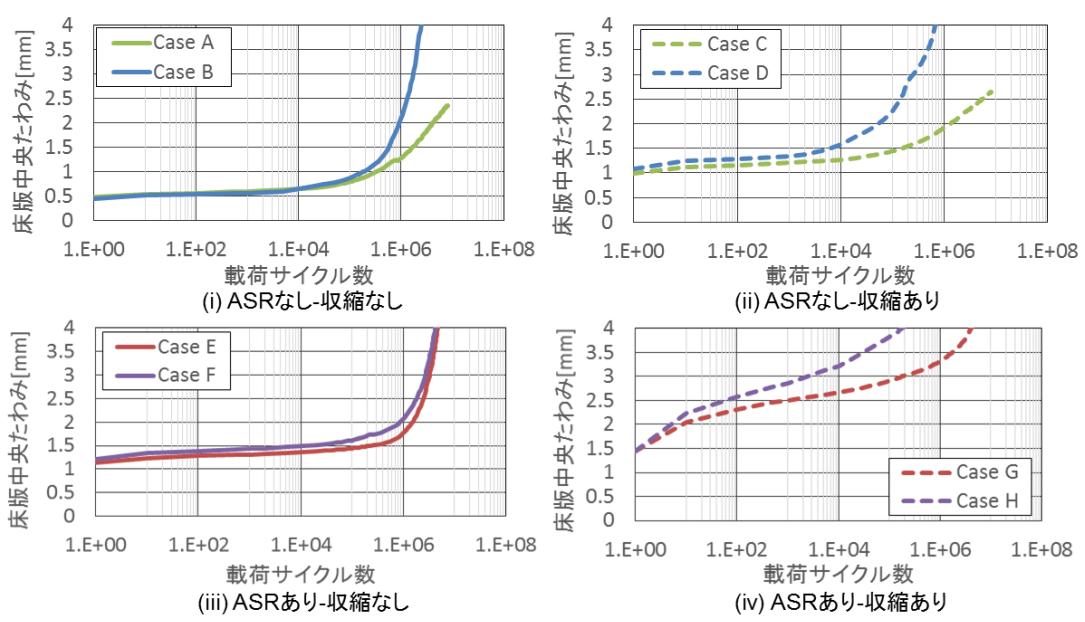


図-8 各要因が疲労挙動に与える影響に関する解析結果

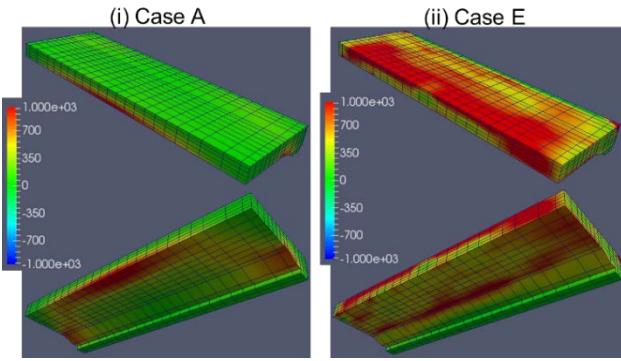


図-9 主ひずみ分布

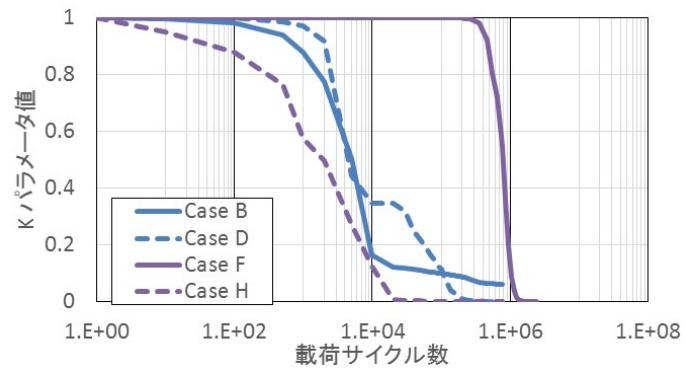


図-10 床版中央の土砂化の推移

ているので、土砂化の度合いを K の値によって議論することが出来る。図-10 に、水を考慮した Case B, D, F, H について、土砂化が最も厳しい床版上面の中央（図-5 内の点 A）での K 値の時間変化を示す。 K の初期値は 1.0 であり、高サイクルで作用する凝縮水圧により次第に低下し最終的に 0 となる。 K の値は、その時点での水圧作用履歴を示しているともいえる。図を見ると、Case F だけ、 K 値が載荷後期まで 1 のまま保たれている。これはひび割れ中の水圧があまり上がっていなことを意味する。ASR による膨張ひびわれが大きいために荷重によって生じる水圧が逃げやすくなっていると理解できる。一方、他のひび割れ要因の場合には、水を逃がしにくく、水圧が大きくなるため、土砂化が促進されるものと思われる。これらの結果より、床版の土砂化さらには耐疲労性に関して、ひび割れの種類によってその影響度が異なることが示されたと考える。

6. 結論

本研究は、ASR 膨張とひびわれが、橋梁 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響について数値解析的に評価することを試みた。ASR 生成物が空隙やひび割れ中へ移動することによって異方的な膨張を考慮しうるモデルを示し、またせん断伝達に関わるひび割れ幅をひび割れ中のゲル占有率に応じて減じるモデルを提案した。提案したモデルを含む解析システムを、既往の輪荷重移動試験を用いて検証した。膨張挙動と疲労挙動において提案モデルの妥当性を確認すると共に、ASR が生じても疲労寿命があまり変わらない場合があるという結果が実験と解析の両者であることを示した。また、乾燥収縮とそれに伴うひび割れは土砂化を促進し、疲労性能を大きく低下させる可能性があることを解析的検討から示した。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 15H05531 ならびに SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)の助成を受けたもののです。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集, 1999
- 2) Saouma, V. E.: Numerical Modeling of AAR, CRC press, 2014
- 3) Multon, S., Sellier, A. and Cyr, M.: Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion, Cement and Concrete Research, 39, pp.490-500, 2009
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008
- 5) Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, Engineering Computations, 30(6), pp.825-841, 2013
- 6) Takahashi, Y., Shibata, K. and Maekawa, K.: Chemo-hygral modeling and structural behaviors of reinforced concrete damaged by alkali silica reaction, Proceedings of ACF2014, pp.1274-1281, 2014
- 7) Biot, M. A.: Theory of stability and consolidation of a porous media under initial stress, Journal of Mathematics and Mechanics, 12(2), pp.521-541, 1963
- 8) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Taylor & Francis, 2003
- 9) T. C. Powers: A Working Hypothesis for Further Studied of Front Resistance of Concrete, Proceedings of ACI, Vol.41, pp.245-272, 1945
- 10) 五島孝行, 岸良竜, 大野晃, 前島拓: 反応性粗骨材を用いた道路橋床版の輪荷重走行試験, 第 8 回道路橋シンポジウム論文報告集, pp.55-60, 2014
- 11) Hiratsuka, Y., Maekawa, K.: Multi-scale and multi-chemo-physics analysis applied to fatigue life assessment of strengthened bridge decks, Proceedings of XIII COMPLAS, pp.596-607, 2015