

論文 3D-RBSM を用いた ASR 膨張後の拘束圧解放による圧縮特性への影響評価

藤島 実里*1・三浦 泰人*2・中村 光*3

要旨：本研究では3次元剛体ばねモデルを用いて、拘束下でASR膨張したコンクリートを圧縮载荷する前に拘束圧の解放を再現することで、拘束圧解放の有無による圧縮特性への影響を評価した。ASR膨張後、拘束圧を解放すると、拘束方向の膨張量が急増し、拘束直交方向に微細なひび割れが発生した。しかし、拘束圧の解放による圧縮特性の大きな変化は確認されなかった。圧縮载荷中の断面内では、拘束圧解放により生じたひび割れは载荷初期に閉合し、応力が伝達されることを確認した。このことから、拘束圧解放により生じた微細なひび割れが断面内の応力伝達プロセスに大きく影響しないため圧縮特性の変化が小さいと考えられる。

キーワード：ASR、一軸拘束、ひび割れ、圧縮特性、メソスケール離散解析、3D-RBSM、骨材モデル

1. 序論

アルカリシリカ反応（ASR）は、コンクリートの細孔溶液中のアルカリ金属と骨材中の反応性シリカとの反応により、ASRゲルが生成することで骨材内部に膨張圧が蓄積し、コンクリートにひび割れを発生させる現象である。拘束下においてASRが発生すると、拘束方向に平行なひび割れが生じる。さらに、ひび割れが方向性を示すことで、力学特性に異方性が生じることが知られている。既往の研究¹⁾²⁾では、ひび割れが载荷方向に対して直交するとき、平行なときよりも圧縮特性の低下が大きくなることが報告されている。このように、ASRにより生じたひび割れの角度は力学特性の低下と深く関係している。

ASR膨張が生じた実構造物では、コアコンクリートを採取して、コンクリートの力学特性や残存膨張量を調査することがある。実構造物では、鉄筋の拘束や自重の影響によりコンクリートには常に拘束力が作用するため、方向性のあるひび割れが多いと考えられる。しかしながら、採取されたコアは拘束力から解放される。そのため、予め作用していた拘束圧の解放や、コア採取後の無拘束状態での残存膨張により、構造物中では生じていなかったひび割れが新たに発生する可能性がある。このひび割れが力学特性に影響を与える場合、コンクリートの力学特性を過小評価する可能性があるが、拘束圧の解放によ

るひび割れ性状や力学特性への影響は未だ不明瞭である。

そこで本研究では、メソスケール離散解析手法である3次元剛体ばねモデル（3D-RBSM）を用いて、拘束圧解放の有無によるひび割れ性状と圧縮特性への影響を評価した。具体的には、一軸拘束下におけるASR膨張を再現し、圧縮载荷前に拘束圧を解放するケースと解放しないケースを用意することで、それぞれコア採取したコンクリートと構造物中のコンクリートの圧縮特性を評価した。なお、本研究では残存膨張による影響は対象としない。

2. 解析概要

2.1 3D-RBSM

RBSMは剛体要素間の境界面に配置した力学ばねによって、ひび割れなどの離散挙動を直接評価する手法である。要素依存性を低減させるために、voronoi要素が用いられる。図-1にvoronoi要素とばねの配置を示す。力学ばねは一つの垂直ばねと二つのせん断ばねによって構成され、これら三つのばねが一つの積分点に配置される。それらにはマクロな力学応答を再現可能なメソスケールの材料構成則が導入される。メソスケールの構成則や解析パラメータの詳細は参考文献³⁾に示されている。なお、ひび割れ幅は垂直ばねの引張強度以降のひずみと要素の母点間の距離によって定義される。

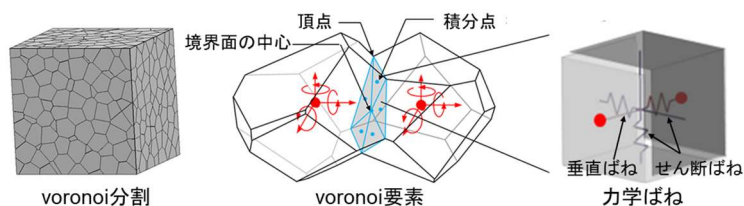


図-1 3D-RBSMによるモデル化の概要

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（学生会員）

*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 工博（正会員）

*3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博（正会員）

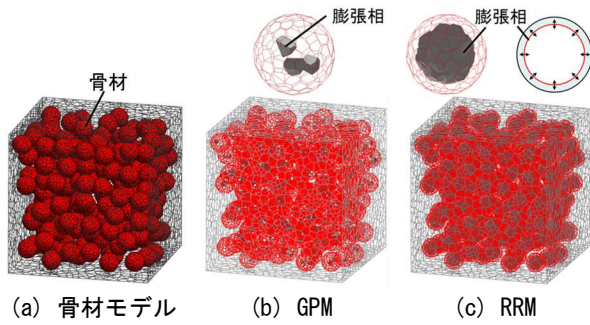


図-2 ASR 膨張モデル

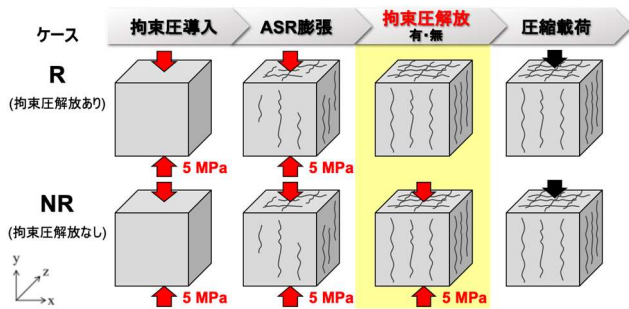


図-3 解析フロー

2.2 ASR 膨張モデル

本解析では、図-2(a)に示すように骨材とモルタルの複合相で構成される骨材モデルを用いた。75×75×75mm のコンクリートに直径 10mm の球形の骨材を 200 個配置しており、コンクリートの全体積のうち骨材の体積は 24.8%であり、一般的なコンクリートと同等である。骨材とモルタルの力学特性を表-1 に示す。マクロスケールにおける力学特性として、骨材の力学特性は参考文献^{4),5)}を参考にした。モルタルの力学特性は、圧縮強度を 55.0MPa と想定し、その他の値は土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）⁶⁾を参考にして設定した。このようにして設定したマクロスケールの力学特性に対して、メソスケール構成則のパラメータ³⁾によりメソスケールの力学特性を算出した。なお、骨材界面の遷移帯の力学特性は不明であるため、本研究では Wang et al.⁴⁾のアプローチを参考に、弾性係数以外はモルタルの力学特性の半分とした。また、このコンクリートの一軸圧縮荷重の再現解析の結果、圧縮強度は 44.5MPa、弾性係数は 34.6GPa であった。

ASR 膨張中の時間依存挙動を考慮するために、式(1)に

示すクリープモデルをモルタル要素の垂直ばねに導入した³⁾。

$$\varepsilon_{i,t} = \alpha \sum_{t_j=0}^t \Delta \sigma_{i,t_j} \cdot \frac{4W(1-RH)+35}{12+f_c} \cdot \log(t - t_j + 1) \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{i,t}$:クリープひずみの総和、 α :メソスケール係数、 $\Delta \sigma_{i,t_j}$: t_1 から t への応力増分、 W : 単位水量 (kg/m^3)、 RH : 相対湿度、 f'_c : 圧縮強度 (MPa)である。示方書⁶⁾のクリープモデルをメソスケール離散解析に適用するために、メソスケール係数 α を導入した。メソスケール係数は拘束下の膨張なしのコンクリートの変形に一致するようにキャリブレーションした。

ASR では骨材岩種によって骨材中の膨張相の配置が異なる。これにより、骨材中のひび割れやマクロな膨張挙動に影響を与える可能性が指摘されている。膨張圧の発生メカニズムとして、骨材内部の gel pocket に反応生成物が蓄積することで膨張圧が発生する gel pocket model (GPM)⁷⁾と、骨材表層に形成される反応リムに骨材内部から膨張圧が蓄積する reaction rim model (RRM)⁸⁾が知られている。これらを再現するために、図-2 (b), (c)に示す膨張モデルを用いた。GPM では全ての骨材要素の中からランダムに 2.5%を選び、その境界面の垂直ばねに膨張ひずみを導入した。RRM では骨材表層の reaction rim と骨材内部との境界の垂直ばねに膨張ひずみを導入した³⁾。

ASR の特徴である、膨張の停滞を表現するために crack effect model を用いた³⁾。これは、ASR ゲルが膨張ひび割れ中に流入することで、膨張圧が解放されることを表現したモデルであり、膨張相の境界面のひび割れがある幅に到達したとき、膨張ひずみをゼロとすることで再現した。

本解析では、自由膨張量が 100 日で 0.40 %となる膨張曲線を想定した。キャリブレーションの結果、一つの膨張相に導入する膨張ひずみは GPM, RRM でそれぞれ 400, 250 μm /日、crack effect model のひび割れ幅の閾値はそれぞれ 0.05, 0.03mm とした。1 ステップで大きな膨張ひずみを導入すると、クリープの影響が小さくなると考えられるため、膨張期間中は 1 ステップを 0.5 日として GPM, RRM でそれぞれ 200, 125 μm /1 ステップの膨張ひずみを導入した。キャリブレーションした自由膨張時の膨張曲線は後述の図-4 に示す。

表-1 骨材およびモルタルの力学特性

スケール	材料	f'_c (MPa)	E (GPa)	f_t (MPa)	c (MPa)	G_f (Nm)
マクロ	骨材	100.0	50.0	11.00	-	-
	モルタル	55.0	35.6	3.33	-	0.0650
メソ	骨材	150.0	70.0	8.80	14.0	0.0005
	モルタル	82.5	49.8	2.66	7.7	0.0325
	遷移帯	41.3	49.8	1.33	3.9	0.0163

2.3 解析フロー

本解析では、図-3 に示すようにコンクリートを一軸拘束下で ASR 膨張させた後、一軸圧縮荷重を行った。拘束圧解放の有無によるひび割れ性状や圧縮特性への影響を評価するために、圧縮荷重前に拘束圧を解放するケース R (release) と拘束圧を解放しないケース NR (not release) を再現した。拘束条件は y 軸方向拘束であり、既往研究^{2),3)}を参考に常に 5MPa の拘束応力を作用させた。膨張後、ケース R では 10 ステップかけて徐々に拘束圧を解放し、ケース NR では拘束圧を解放せず、y 方向に圧縮荷重を行った。なお、拘束圧の解放時にはクリープの影響は無視しており、10 ステップの中で内力計算を行いながら断面内の応力を安定させた。

3. 解析結果

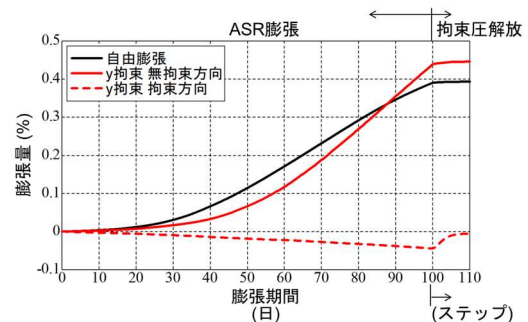
3.1 拘束圧解放による膨張量およびひび割れ性状の変化

(1) 膨張量変化

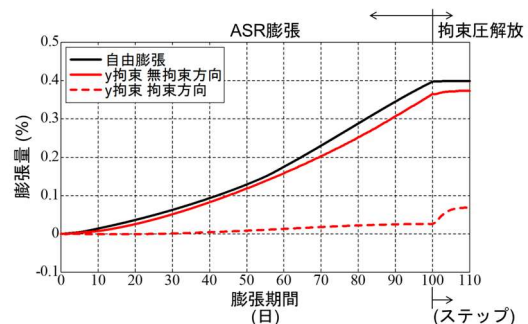
図-4 に GPM および RRM の ASR 膨張中および拘束圧解放時の膨張量変化を示す。自由膨張量は x, y, z 方向のひずみの平均であり、y 軸拘束下の膨張では x, z 方向のひずみの平均を無拘束方向、y 方向のひずみを拘束方向として示した。なお、ASR 膨張中はクリープを考慮したが、拘束圧解放時にはクリープを考慮していないため単位がステップであることに注意されたい。また y 軸拘束ケースでは膨張中はケース R・NR の膨張量は共通であり、拘束圧解放時(図中 100~110 ステップ)はケース R の膨張量を示している。自由膨張では拘束圧解放がないため、収束計算を 10 ステップ行った結果を示した。

拘束圧解放後、拘束方向の膨張量は急増したが、無拘束方向の膨張量はわずかに増加した。また、無拘束方向の膨張量は GPM, RRM とともに自由膨張時とは異なっており、この差は骨材配置のばらつきや、GPM では膨張相のばらつきがあるため生じたと考えられる。

図-5 に y 軸拘束下における ASR 膨張中の変形図を、拘束圧解放前まで示す。膨張量 0.2% 程度までは膨張量の増加に伴ってひび割れが増加したが、ひび割れがある程度発生すると、ひび割れの数は増加せず、幅が増加したことが確認できる。ひび割れは拘束軸に平行な方向性を示しており、これは既往研究^{1),2)}と同様の傾向である。また GPM と RRM では、ひび割れの分布が異なることが確認できる。GPM ではひび割れが局所的に発生し、その幅が大きいが、RRM ではひび割れの数が多く、その幅は小さい。このひび割れ分布の違いは、骨材内部の膨張相の配置によって生じたと考えられる。RRM ではすべての骨材に万遍なく膨張相が配置されたが、GPM では骨材から膨張相をランダムに選んだため空間的なばらつきが大きく、ひび割れが局所的に生じたと考えられる。



(a) gel pocket model



(b) reaction rim model

図-4 膨張量変化

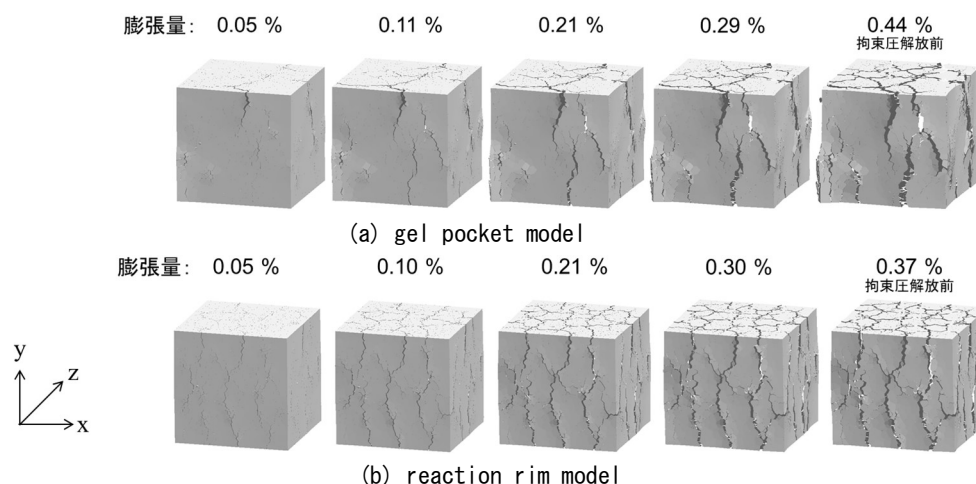


図-5 y 軸拘束下における ASR 膨張中の変形図

(2) ひび割れ数・体積の変化

ASR 膨張後のひび割れについて、拘束圧解放の有無によるひび割れの数および体積の変化をそれぞれ図-6, 7に示す。図には水平方向を基準としたひび割れの角度およびひび割れ幅に基づいて、モルタルと骨材中のひび割れ情報がそれぞれ示されている。GPM と RRM を比較すると、モルタル・骨材ともに GPM ではひび割れ数は少ないが体積は大きく、RRM ではひび割れ数は多いが体積は小さい。これは GPM では局所化したひび割れの幅が大きく、RRM では幅が小さいひび割れが多く分布していることを示しており、図-5 で観察された表面ひび割れの傾向と同様である。

ひび割れの角度について、拘束圧解放の有無に関わら

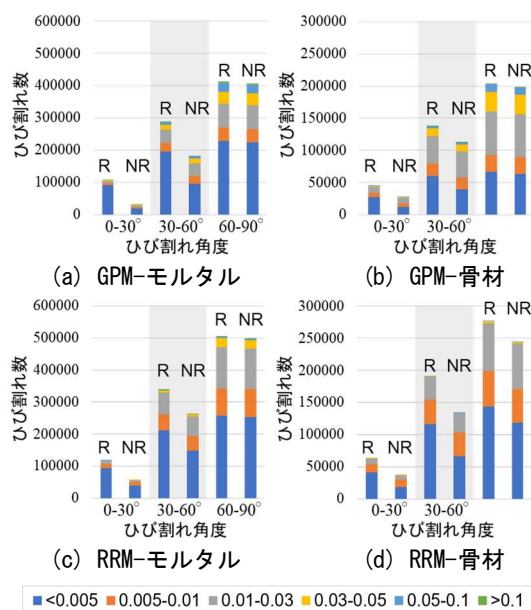


図-6 ひび割れ数の変化

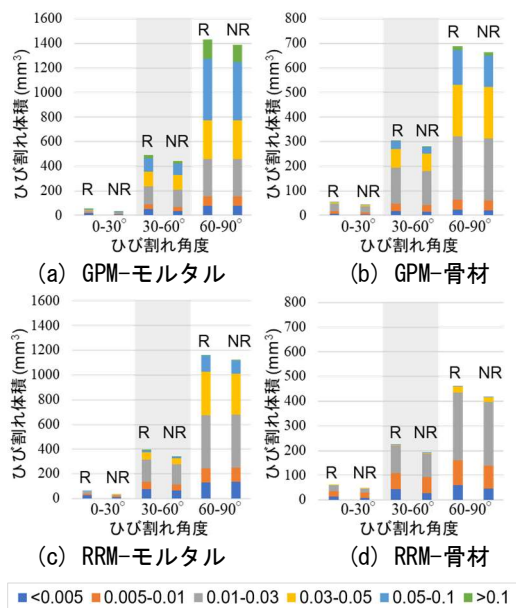


図-7 ひび割れ体積の変化

ずひび割れの数・体積ともに 0-30° が最も少なく、60-90° が最も多いことから、図-5 で確認されたようにひび割れが拘束軸方向に方向性を示したことが確認できる。

ひび割れ数において拘束圧解放の有無を比較すると、ケース R では拘束圧の解放によりひび割れ数は増加し、特に 0-30° のひび割れ数が最も増加した。また、ひび割れ幅の内訳から、拘束圧解放により増加した 0-30° のひび割れは主に幅が 0.005mm 未満の微細ひび割れであることが確認できる。

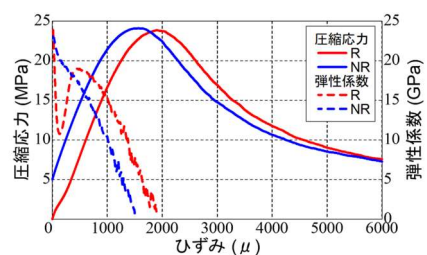
一方、ひび割れ体積では拘束圧解放による 0-30° のひび割れの増加は 30-60° および 60-90° よりも小さく、ひび割れ数とは反対の傾向となった。0-30° のひび割れは膨張中は拘束圧により制限されていたため、拘束圧解放により新たにひび割れが生じたことでひび割れ数は増加したが、ひび割れ幅が非常に小さいためひび割れ体積の増加は小さいと考えられる。反対に、60-90° のひび割れは膨張中にすでに発生しており、拘束圧の解放により新たなひび割れは発生しにくいいためひび割れ数は増加しにくい。ただし、膨張時から存在していたひび割れの幅が大きくなることでひび割れ体積が増加したと考えられる。

3.2 拘束圧解放による圧縮特性への影響

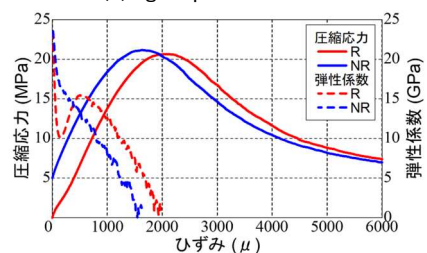
(1) 応力ひずみ関係

図-8 に圧縮载荷中の応力ひずみ関係および接線剛性の変化を示す。なお、ケース NR では 5MPa の拘束圧が作用した状態から圧縮载荷を行ったため、5MPa から開始している。

圧縮強度は GPM では NR: 24.1MPa, R: 23.8MPa, RRM では NR: 21.2MPa, R: 20.7MPa となり、拘束圧解放の有無が圧縮強度に与える影響は小さいことが確認された。接線剛性は载荷直後の大きさおよび最終的な減少傾向が、ケース NR と R で同様であることが確認できる。ケース



(a) gel pocket model



(b) reaction rim model

図-8 応力ひずみ関係

NR では荷重初期から接線剛性が減少し、荷重が進むとその傾向が緩やかになった。これに対して、ケース R では荷重初期に接線剛性が一度大きく減少した後、増加し、再び減少した。

(2) 圧縮荷重中のひび割れおよび応力伝達の変化

圧縮荷重中のコンクリートの中央断面におけるひび割れ分布および y 方向成分の応力分布、変形図を図-9, 10 に示す。ここでは、ケース R・NR 共通の拘束圧解放前、ケース R の拘束圧解放後および圧縮荷重中、ケース NR の圧縮荷重中の分布を示しており、各図の上部にはマクロな圧縮応力と括弧内に各ケースでの応力レベルを示している。なお、ひび割れ分布には骨材位置を破線で示した。

拘束圧解放前には、拘束圧が作用しているだけでなく膨張圧も蓄積しているため、圧縮応力はまばらに分布し、局所的に 10MPa 以上の高い圧縮応力が発生した。このときひび割れ分布では、図-6, 7 で確認されたようにひび割れが y 軸方向 (60-90°) に方向性を示した。

ケース R の拘束圧解放前後を比較すると、GPM と RRM のいずれも、圧縮応力が発生していたモルタル相に引張応力が発生したことがわかる。また、局所的に高い圧縮応力が生じていた骨材内部の領域には圧縮応力が残留した。さらに、コンクリート断面および表面のいずれにおいても水平方向に微細なひび割れが発生したことが確認できる。つまり、圧縮応力が残留したことで、周りの領域には釣り合うように引張応力が生じ、拘束下では発生できなかった水平方向のひび割れが発生したと考えられる。このことから、拘束圧の解放により生じた拘束方向の変形(図-5)は、除荷による弾性変形だけでなく、骨材内部の残留圧縮応力による水平方向のひび割れによって生じたと考えられる。

ケース NR・R とともに、荷重直後は接線剛性が大きいことが確認されている(図-8)。これは荷重直後では弾性係数の高い骨材(表-1)が主として応力負担しているため、これによりマクロなコンクリートの接線剛性が大きくなったと考えられる。拘束下の膨張では、膨張圧が発

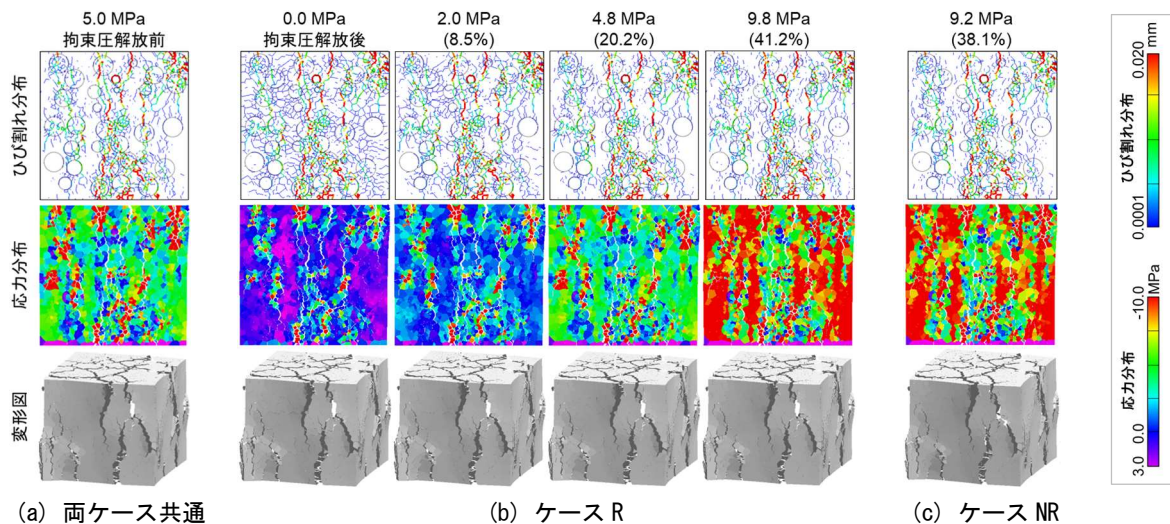


図-9 圧縮荷重中のひび割れおよび応力分布 (GPM)

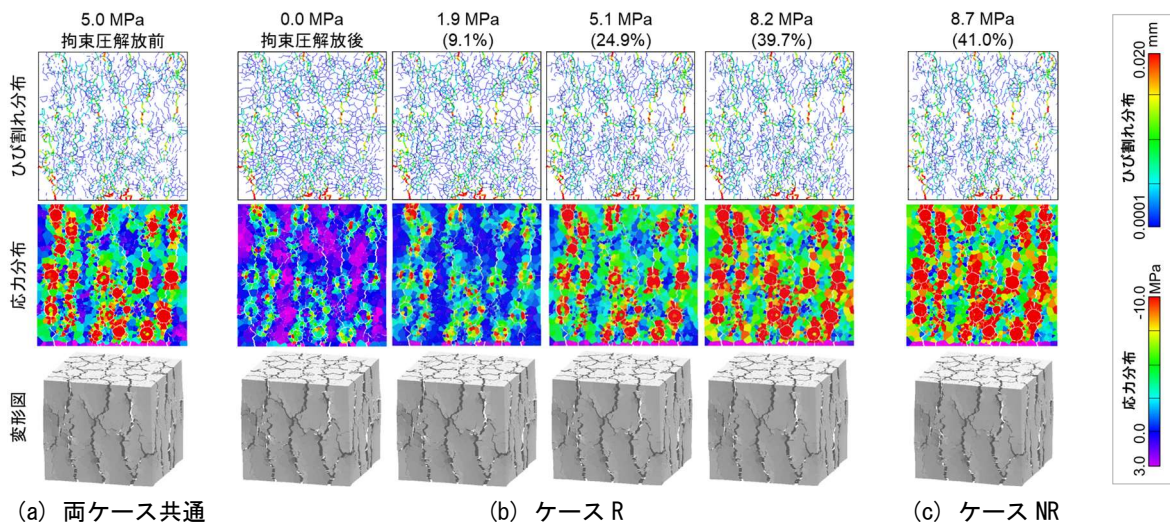


図-10 圧縮荷重中のひび割れおよび応力分布 (RRM)

生している骨材をつなぐように拘束方向の圧縮応力の経路が形成される。そのため、載荷時には骨材が存在する同じ経路で圧縮応力が負担されやすいことから、初期の接線剛性が高くなったと考えられる。このように載荷直後では骨材の応力負担が大きいため接線剛性は大きい、載荷が進みモルタルにも応力が伝達することで弾性係数が減少したと考えられる。

ケース R の載荷による圧縮応力が 2.0 MPa 程度まで増加すると、拘束圧解放により生じた微細なひび割れの多くが閉合したことが確認できる。このひび割れの閉合が大きな変形を伴うため、ケース R では載荷初期の弾性係数の減少が特に大きくなった（図-8）と考えられる。また、圧縮応力 2.0MPa 程度までのひび割れの閉合により応力負担が可能な領域が増加することで接線剛性が増加（回復）したと考えられる。

ケース R の圧縮応力が 5.0 MPa 程度まで増加すると、断面内の多くの領域に圧縮応力が発生しており、これは拘束圧解放前の応力分布と非常に似ている。さらに、応力レベル 40%程度においても、応力分布・ひび割れ分布ともに、ケース R と NR では大きな違いは確認されない。つまり、拘束圧と同程度の圧縮応力が作用すると、拘束圧解放により生じた微細なひび割れは閉合して応力伝達が可能になるため、それ以上の応力レベルでの応力分布にはほとんど影響しないと考えられる。すなわち、ケース R の拘束圧解放時に生じるひび割れは載荷初期に閉合し、ケース NR と同様のひび割れ・応力状態となるため、拘束圧の解放が圧縮載荷中の断面内の応力伝達に与える影響は小さく、前項で確認されたように拘束圧解放の有無による圧縮特性の大きな違いはなかったといえる。また、圧縮応力 8.0MPa では、ケース NR・R とともに載荷によるひび割れが進展したことが確認でき、これにより弾性係数が減少した（図-8）と考えられる。

本解析では、一軸拘束条件を想定して構造物中のコンクリートと拘束圧が解放されるコア採取後のコンクリートの圧縮特性の差が小さいことを確認した。実構造物では多軸拘束条件となることが多いことや、反応が完全に完了した場合にはクリープにより断面内の残留膨張圧が小さくなることで、拘束圧解放前後や載荷中の応力状態が異なる可能性がある。今後、様々な条件におけるコア採取による圧縮特性への影響を検討する予定である。

4. 結論

本研究では 3 次元剛体ばねモデル (3D-RBSM) を用いて、一軸拘束下で ASR 膨張したコンクリートの拘束状態の変化によるひび割れ性状や圧縮特性への影響を評価した。本研究により得られた結論を以下に示す。

1) 拘束下の ASR 膨張ではひび割れが拘束軸方向に方

向性を示した。拘束圧解放時には、拘束方向の膨張量が急増し、拘束直交方向のひび割れ数が大きく増加したが、そのひび割れは微細であった。

- 2) ASR による膨張圧の蓄積により、拘束圧解放後も局所的に圧縮応力が残留した。そのため、周りの領域には引張応力が生じ、ひび割れが発生したと考えられる。このことから、拘束圧の解放により生じる拘束方向の変形は、除荷による弾性変形だけでなく、骨材内部の残留圧縮応力による水平方向のひび割れによって生じたと考えられる。
- 3) 拘束圧作用方向と圧縮載荷方向が同じ場合、拘束圧解放の有無による圧縮特性の大きな変化は確認されなかった。拘束圧解放後の圧縮載荷において、拘束圧解放により生じた微細なひび割れは載荷初期に閉合し、応力伝達が可能になった。そのため、それ以上の応力レベルでの応力伝達に与える影響は小さく、圧縮特性の変化も小さいと考えられる。

参考文献

- 1) Hansen S.G., Hoang L.C.: Anisotropic compressive behavior of concrete from slabs damaged by al-kali-silica reaction. Construction and Building Materials, Vol.267, 120377, 2021
- 2) Anca C.F., Frank J.V.: Mechanical Properties of Alkali-Silica Reaction-Affected Concrete. ACI Materials Journal, Vol.119-M21, pp.251-262, 2021
- 3) Miura T., Multon S., Kawabata Y.: Influence of the expansive sites distribution on alkali-silica reaction expansion under applied stress : Crack orientation as a key factor for expansion transfer, Cement and Concrete Composites, Vol.140, 105300, 2023
- 4) Wang Y. et al.: Expansive cracking and compressive failure simulations of ASR and DEF damaged concrete using mesoscale discrete model. Cement and Concrete Composites, Vol.104, pp.1-17, 2019
- 5) Roubin E. et al.: A nonlinear meso-macro approach to modelling delayed ettringite formation and concrete degradation. Materials and Structures, Vol.47, pp.1911-1920, 2014
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 7) Dunant C., Scrivener K.L.: Micro-mechanical modeling of alkali-silica-reaction induced degradation using the AMIE framework. Cement and Concrete Research, Vol.40, pp.517-525, 2010
- 8) Ichikawa T., Miura M.: Modified model of alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1291-1297, 2007