

論文 二軸拘束下の DEF 膨張したコンクリートの膨張—ひび割れ—力学特性の異方性評価

岡本 真実*1・藤島 実里*1・三浦 泰人*2・高橋 佑弥*3

要旨: 本研究では、拘束下の DEF 膨張において、ひび割れの方向性による力学特性の異方性を評価することを目的とした実験を行った。二軸拘束下の DEF 膨張試験を実施し、膨張後の試験体の圧縮特性を同定した。二軸拘束条件ではひび割れを一方向に制御できるため、ひび割れに対する載荷方向を変化させることで力学特性の異方性を評価した。また、ひび割れを定量化し、膨張量・力学特性との関係性を評価した。その結果、ひび割れに対して直交方向に載荷した場合、力学特性が大きく低下することが確認された。そして、載荷直交方向のひび割れ密度と力学特性の低下に相関関係があることが確認された。

キーワード: DEF 膨張, 二軸拘束, 異方性, ひび割れ, 圧縮特性

1. 序論

コンクリートの内部膨張劣化の一つに遅延エトリンガイト生成 (DEF) がある。これは、コンクリートが水和初期に 70°C 以上の高温履歴を受けることにより、エトリンガイトが分解され、硬化後に再生成する現象である。DEF によりセメントペーストが膨張し、その膨張量は最大で 2% 程度と非常に大きい。また、コンクリート内部には、骨材界面を引き裂くひび割れが発生することが知られている。そのため、DEF 膨張では力学特性は大きく低下し、特に弾性係数は著しく低下することが多くの研究者^{たとえぱり}によって確認されている。

ASR や DEF では、一般に自由膨張量と力学特性の関係性によって力学特性の評価がなされる。しかしながら、実構造物では完全に自由膨張条件となるケースは少なく、自重や配筋、プレストレスなどの影響でコンクリートは拘束されている。そのため、自由膨張量と力学特性の関係性の有用性についてはしばしば議論がなされており、内部膨張劣化の耐久性照査手法の確立を妨げる最大の要因の一つである。

DEF は拘束応力下において膨張の異方性を示すことが知られており、無拘束方向の膨張量が自由膨張より小さくなり、一軸拘束下における体積ひずみが自由膨張より 20% 程度減少することが確認されている²⁾。さらに、拘束応力下において、DEF および類似の内部膨張反応であるアルカリシリカ反応 (ASR) では、ひび割れが拘束方向に対して平行に発生することが知られている。そして、ASR ではこのひび割れの方向性により力学特性に異方性が生じることが明らかになってきた。Hansen らの研究³⁾では、ASR によるひび割れに対して直交方向に載荷する場合、平行方向の場合よりも圧縮

強度および弾性係数が大きく低下することが確認された。しかしながら、拘束下の DEF 膨張ひび割れの方向性による力学特性の変化に関する実験データはなく、力学特性の異方性が生じるかは不明である。

そこで、本研究では、拘束応力下の DEF 膨張による圧縮特性の異方性を評価するとともに、表面および内部ひび割れ情報を用いて、膨張—ひび割れ—力学特性の関係性を実験的に評価することを目的とした。具体的には、二軸拘束下の DEF 膨張試験を実施し、膨張後の圧縮特性を同定した。二軸拘束条件ではひび割れを一方向に制御できるため、ひび割れに対する載荷方向を変化させることで、力学特性の異方性を評価した。

2. 実験概要

2.1 試験体の作製

本実験では、125×125×125mm のコンクリート試験体を表-1 に示す配合で作製した。自由膨張 (目標膨張量 0.0, 0.5, 1.2%) で各 3 体、二軸拘束 (目標膨張量 0.5%) で 6 体用意した。DEF 膨張を促進するため、硫酸カリウムを SO₃ 量が内割で 2.0% となるように添加した。試験体は打設から 3 時間後に 80°C まで升温し、12 時間高温養生を行った。その後、14 日間水中養生を行った。また、材齢による強度増進を評価するため、DEF 膨張しないケースとして、DEF 膨張試験体と同配合で硫酸カリウム添加をしない高温履歴を与えない試験体を 6 体作製した。

表-1 示方配合 (kg/m³)

W	C	S	G	K ₂ SO ₄
175	343	825	918	15.236

*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 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻准教授 博 (工) (正会員)

2.2 二軸拘束条件

養生後、二軸拘束試験体に拘束治具を取り付けた(図-1)。試験体と接する拘束板として I 型鋼に 10×100×100mm の鋼板を溶接したものを用いた。試験体を拘束板で挟み、I 型鋼の端部にねじ切り加工した Φ9mm の丸鋼を通し、ナットで絞めて拘束した。丸鋼にはひずみゲージを貼付し、鉄筋 1 本あたり 750μ のひずみを導入することで、試験体に約 3.8MPa の拘束圧をかけた。また、拘束板と試験体との摩擦により無拘束方向の膨張が拘束される可能性があるため、テフロンシート 2 枚の間にシリコングリースを塗布したものを、拘束板と試験体の間に挿入し、摩擦の影響を低減した。

2.3 膨張試験

膨張試験では、自由膨張および二軸拘束の条件下で DEF 膨張させることで、膨張挙動を評価した。自由膨張試験体は図-2 に示す環境下で膨張試験を実施した。DEF 膨張を促進させるために、市販の加湿器を用いて、温度 22±2℃、相対湿度 100%に近い環境とした。二軸拘束試験体は膨張試験開始から 208 日まで、自由膨張試験体と同様の環境下で膨張試験を実施した。その後、水中に浸漬し、より多くの水分供給を行うことで、さらに膨張を促進した。

膨張量の計測は、試験体に長さ変化測定用チップを貼付し、チップ間の長さ変化をコンタクトゲージで測定した。具体的には、自由膨張では 3 方向にそれぞれ 4 つの測定点、二軸拘束では拘束 2 方向および無拘束 1 方向にそれぞれ 4 つの測定点を設けた(図-1)。測定した長さ変化を膨張前のチップ間の長さで除すことで膨張量を算出した。また、拘束治具に用いた丸鋼のひずみゲージから、拘束圧導入以降のひずみ変化を計測した。ひずみ変化を丸鋼の固定部間の長さで乗じることによって鉄筋の長さ変化を推定し、この長さ変化を試験体長さで除すことで拘束方向の膨張量を算出した。

2.4 ひび割れ評価

目標膨張量に到達後、表面および内部のひび割れ性状を確認し、画像解析によってひび割れを定量化した。表面ひび割れ評価では、膨張試験後の試験体の各面を観察し、表面のひび割れ性状を撮影した。その後、試験体を 2 つに切断し、一方を内部ひび割れ評価、もう一方を圧縮試験に用いた。内部ひび割れ評価ではひび割れを可視化するために、蛍光塗料で着色したエポキシ樹脂を試験体断面に含浸させた。このとき、樹脂が硬化するまで、試験体はデシゲーター内の減圧環境に 24 時間静置した。硬化後、ひび割れ内に樹脂が残る程度に試験体表面を研磨して観察面を作製した。その後、観察面にブラックライトを当てることで可視化した内部ひび割れを撮影した。

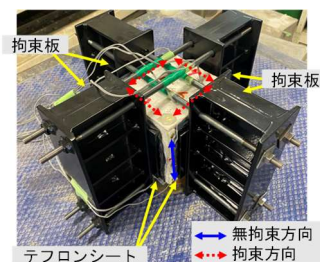


図-1 拘束試験体概要

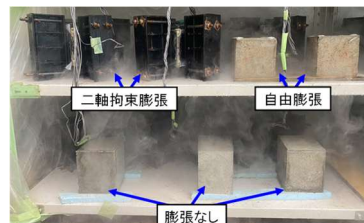


図-2 曝露環境

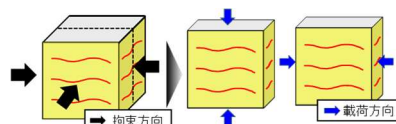


図-3 二軸拘束試験体の載荷・拘束・ひび割れ方向

表面および内部ひび割れの画像からひび割れをなぞることでひび割れ図を作成した。そのひび割れ図から、画像解析ソフト (Image J) を用いて、ひび割れの長さおよび角度を抽出した。ひび割れ角度は、水平方向 (0~30°)、斜め方向 (30~60°)、鉛直方向 (60~90°) に分類することとした。また、ひび割れ長さを観察面の面積で除した値をひび割れ密度 (mm/mm²) と定義した。

2.5 圧縮試験・DIC

切断後の一方の試験体を用いて圧縮試験を行った。二軸拘束条件では、拘束の影響により膨張が一方に制御され、拘束方向に平行にひび割れが発生すると想定される。そこで、ひび割れに対して直交および平行方向に載荷することで(図-3)、ひび割れの方向性による圧縮特性への影響を評価した。また、圧縮載荷中に DIC (デジタル画像相関法) を用いて、試験体断面の圧縮主ひずみを可視化することで、圧縮応力下における内部ひび割れの挙動を把握した。

3. 実験結果

3.1 膨張量変化

膨張量変化を図-4 に示す。自由膨張試験体は曝露開始から 152 日の時点で最初の目標膨張量である膨張量 0.50%に到達し、412 日で膨張が収束した。この時の膨張量は 1.23%であった。二軸拘束試験体は曝露開始から 100 日の時点から緩やかに膨張し、417 日の時点で無拘束方向の膨張量が 0.46%、拘束方向が 0.34%となった。また、拘束に用いた丸鋼のひずみ変化から算

出した拘束方向の膨張量は0.00%であった。

既往の研究²⁾では、拘束下のDEF膨張では拘束方向の膨張が制限され、無拘束方向に膨張が進行することが確認されている。ただし、この無拘束方向の膨張量は自由膨張と比べて小さくなるのが明らかになっている。本実験の自由膨張と二軸拘束の膨張量変化を比較すると、既往研究と同様に二軸拘束の無拘束方向の膨張量は自由膨張より明らかに減少したが、拘束方向の膨張量が無拘束方向の膨張量と同程度になった。これは拘束方向のチップの貼付位置が拘束板の当たっていない端部であることが原因だと考えられる。すなわち、試験体端部では拘束の影響が小さく、局部的に自由膨張に近い挙動を示したと考えられる。したがって、チップから測定した拘束方向の膨張量変化は妥当性の乏しい結果である可能性が高いため、丸鋼のひずみ変化より算出した膨張量を拘束方向の膨張量とした。

3.2 表面・内部ひび割れ性状

膨張量1.2%の自由膨張試験体における表面・内部ひび割れ性状および内部ひび割れ図を図-5(a)に示す。なお、内部ひび割れ図の黒線は骨材界面およびモルタルにおけるひび割れ、赤線は骨材内部のひび割れを示している。表面では網の目状のひび割れ、内部では骨材界面を引きはがすひび割れが発生しており、試験体切断時の骨材の欠落も確認できる。また、骨材内部のひび割れは非常に少なく、DEFは骨材を破断するといった報告はこれまでないことから、骨材の初期欠陥や切断時の損傷に樹脂が滲入したものと考えられる。

次に、膨張量0.5%の二軸拘束試験体における表面・内部ひび割れ性状および内部ひび割れ図を図-5(b)に示す。表面では、拘束の影響により拘束方向に対して平行なひび割れが多く発生している。一方、試験体端部では、拘束方向に関係なくひび割れが発生している。このことから、前述した通り、試験体端部では拘束板が当たっておらず、拘束の影響を受けずに局部的に自

由膨張に近い挙動を示したことが確認できる。内部では、骨材界面および骨材内部において、拘束方向に平行なひび割れが多く発生している。自由膨張条件より骨材内部のひび割れが増加していることについては、拘束方向の骨材界面は剥離するひび割れが発生しないことから、DEF膨張による膨張圧が骨材に伝達した可能性がある。ただし、現時点では、単に骨材の初期欠陥や切断時の損傷であるかは判断できない。

3.3 表面・内部のひび割れ密度

自由膨張試験体および二軸拘束試験体の表面・内部

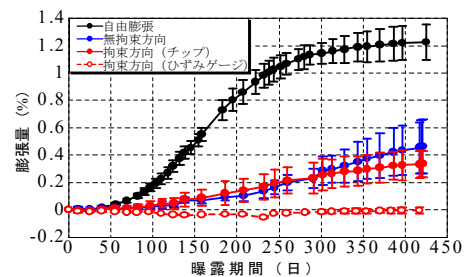
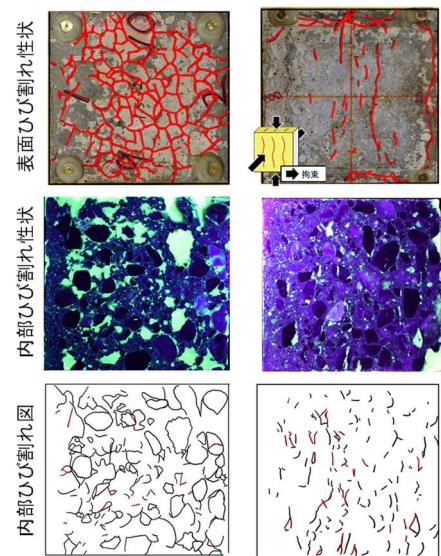
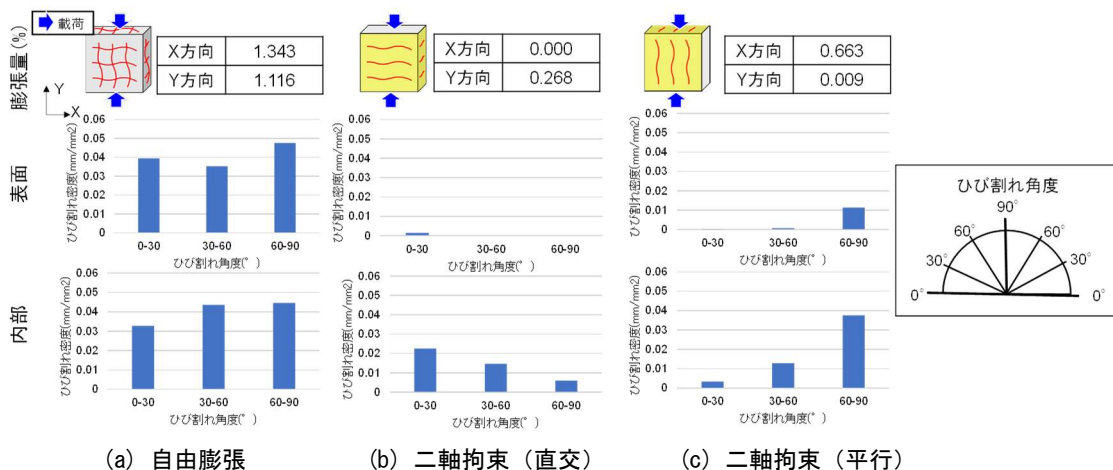


図-4 膨張量変化



(a) 自由膨張 1.2% (b) 二軸拘束 0.5%

図-5 ひび割れ性状



(a) 自由膨張 (b) 二軸拘束 (直交) (c) 二軸拘束 (平行)

図-6 表面・内部ひび割れ密度

ひび割れ密度を図-6に示す。なお、ひび割れ角度は載荷方向に直交する方向を基準(0°)とし、以降水平方向とする。また、二軸拘束の表面ひび割れ密度において、拘束の影響を受けない試験体端部のひび割れは除外した。自由膨張ではひび割れ角度がほぼ均一に分布しており、表面と内部におけるひび割れ密度が同程度である。一方、二軸拘束では拘束方向に対して平行に分布するひび割れ密度が大きいことから、拘束の影響が確認できる。また、X、Y方向の膨張量に関連してひび割れ密度が変化していることが確認できる。表面と内部を比較すると、表面のひび割れ密度が非常に小さい。これは、拘束板の摩擦の影響を完全に低減できておらず、表面の膨張がある程度拘束されているためと考えられる。

3.4 圧縮特性変化

曝露期間と圧縮特性の関係を図-7に示す。なお、膨張しないケースにおいて、表面ひび割れが発生し、高温履歴がないにも関わらず膨張が生じており、試験体内部において水和熱が高くなりDEFが生じた可能性がある。したがって、明らかに大きなひび割れが生じている試験体は実験結果から除外した。これをみると、曝露期間0日と比較して、最大で10MPa程度圧縮強度が増加していることがわかる。したがって、材齢によりコンクリート自体の強度が増進していることが確認できる。そこで、二軸拘束の試験体において材齢が同程度の膨張しない試験体と比較すると、明らかに圧縮強度が低下していることが確認できる。一方で、弾性係数については、膨張なしのケースにおいても弾性係数の低下が確認された。膨張ひび割れによる力学特性の低下は弾性係数の方が顕著であることが知られている。したがって、膨張なしのケースでは、圧縮強度は水和による強度増進の方が大きい、ひび割れの影響によって弾性係数は低下したと考えられる。

次に、各試験体の無拘束方向の膨張量と圧縮特性の関係を図-8に示す。なお、膨張しないケースでは試験体表面に膨張ひび割れが発生しているものの、圧縮強度は増加していることから、圧縮強度については同じ材齢の膨張しないケースの圧縮強度で正規化した。一方、弾性係数については、前述の通り、膨張しない試験体において弾性係数の低下が確認されたことから、膨張量0.0%のときの弾性係数で正規化した。

自由膨張では、既往の研究¹⁾と同様に、膨張量の増加とともに圧縮特性が顕著に低下した。これは、DEF膨張による圧縮特性低下の典型的な傾向であり、Miuraら⁴⁾は、DEF膨張による骨材界面を剥離するひび割れが生じることによって、骨材が応力負担できなくなるためであると説明しており、本実験においても同様で

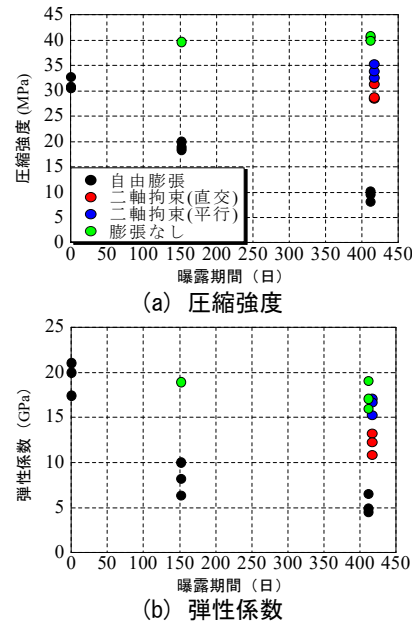


図-7 曝露期間と圧縮特性の関係

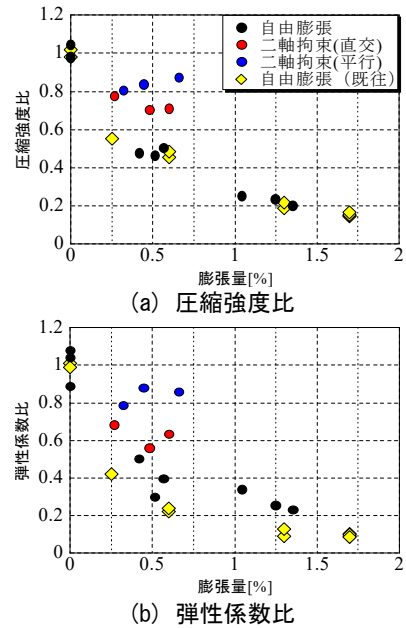


図-8 膨張量と圧縮特性の関係

あると考えられる。

二軸拘束の圧縮強度と弾性係数をみると、無拘束方向の膨張量が0.25%程度では、載荷方向によらずに同程度に低下した。しかしながら、さらに膨張量が増加すると、ひび割れに対して直交方向に載荷した場合は圧縮特性、特に弾性係数が大きく低下するが、平行方向のケースではこれ以上の圧縮特性の低下はみられなかった。また、直交方向のケースと自由膨張を比較すると、圧縮強度の低下は自由膨張のそれより小さかったが、弾性係数については自由膨張と概ね同程度であった。このことから、ひび割れの方向性により圧縮特性に異方性が生じており、既往の研究^{3),5)}で確認されたASRの圧縮特性の異方性と同様の傾向である。

4. 考察

4.1 DICによる内部ひび割れの挙動

DICによって得られた各応力レベル(10, 30, 60, 90%)における圧縮主ひずみ分布を図-9に示す。なお、応力レベルは各試験体の圧縮強度を基準としているため、各ケースで圧縮応力は異なることに注意されたい。

膨張量0.0%の健全な試験体では、弾性領域である応力レベル30%の時点において圧縮主ひずみは非常に小さい。応力レベル60%では弱層部である骨材界面からひずみが明らかに生じており、ひび割れが発生し始める様子が確認できる。

二軸拘束試験体では、ひび割れの方向に対する載荷方向により、内部ひび割れの挙動に差が生じることが確認された。ひび割れに対して直交方向に載荷した場合、応力レベル10%の時点から、骨材界面およびモルタルで載荷直交方向に圧縮ひずみが分布した。これは、拘束下のDEF膨張によって発生した載荷直交方向のひ

び割れが閉合する様子を示している。その後、応力レベルが上がるにつれ、ひび割れが進展・連結する様子が確認できる。一方、ひび割れに対して平行方向に載荷した場合、応力レベル30%の時点で骨材界面において圧縮ひずみが分布し、ひび割れが閉合する様子が確認できるものの、局所的に分布しているひずみは直交方向に載荷した場合と比べて極めて少ない。これは、拘束の影響により載荷平行方向に分布するひび割れが多く発生しているため、ひび割れが閉合しなかったと考えられる。

以上から、ひび割れに対して直交方向に載荷する場合、このひび割れは低応力レベルから載荷方向の圧縮応力の伝達を阻害することで圧縮特性が顕著に低下すると考えられる。一方で、ひび割れに対して平行方向に載荷する場合、載荷方向の応力伝達を阻害するひび割れが少ないため、圧縮特性の低下は小さかったと考えられる。著者ら¹⁹⁾は、膨張ひび割れが生じたコンク

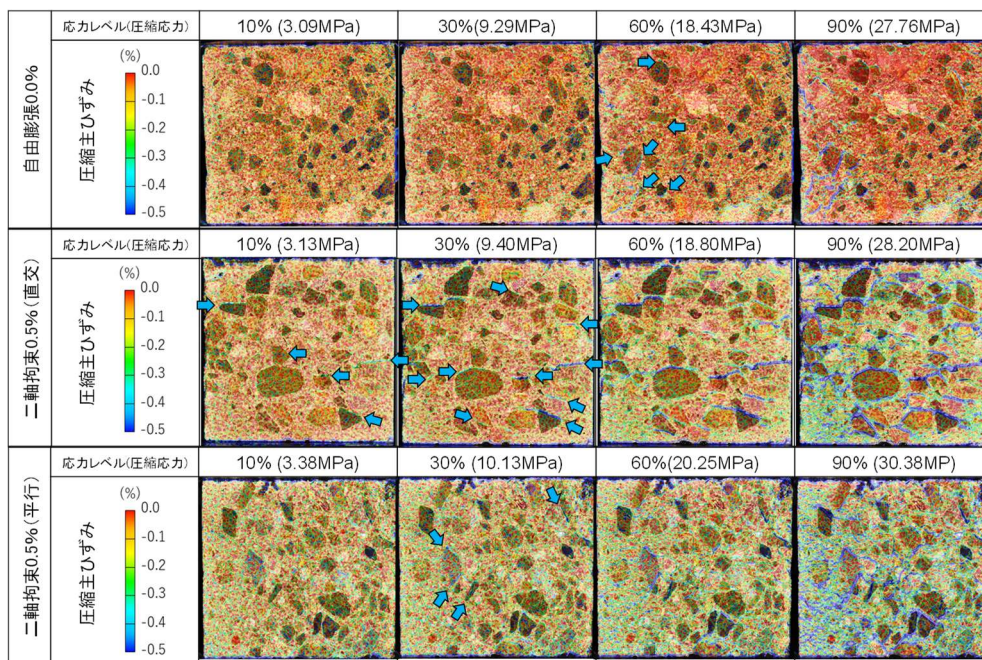


図-9 各応力レベルにおける圧縮主ひずみ分布

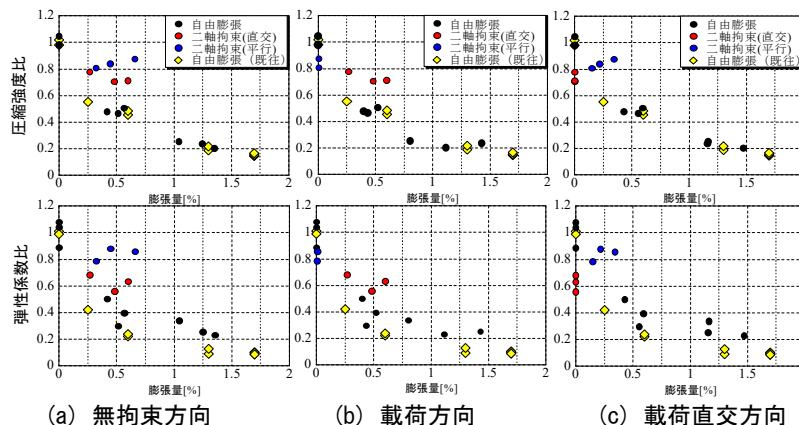


図-10 各膨張量と圧縮特性の関係

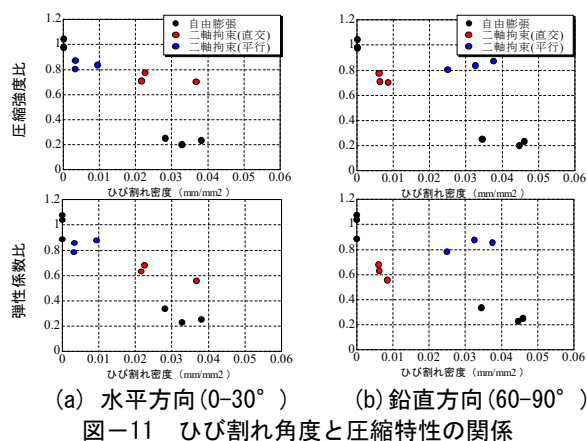


図-11 ひび割れ角度と圧縮特性の関係

リートの圧縮特性の低下メカニズムを、断面内で載荷方向の圧縮応力の負担領域の大小によって説明しており、本実験結果においても説明可能であるといえる。

4.2 膨張ひび割れと圧縮特性の異方性の関係

様々な方向の膨張量およびひび割れ密度の指標を用いて、圧縮特性との関係性を評価した。膨張量・ひび割れ角度と圧縮特性の関係をそれぞれ図-10、図-11に示した。膨張量については、無拘束方向、載荷方向、載荷方向に対して直交する方向の膨張量を指標とした。ひび割れ密度については、水平方向および鉛直方向のひび割れ密度を指標とした。

図-10によると、載荷方向の膨張量が圧縮強度・弾性係数と相関が強いことが確認された。しかしながら、二軸拘束に着目すると、ひび割れに対して平行方向に載荷した場合(●)，載荷直交方向の膨張は生じているが、載荷方向の膨張量が0%となるため、見かけ上膨張量が0%にもかかわらず圧縮特性が低下しているようにみえている。

ひび割れ密度では、0~30°のひび割れが圧縮強度・弾性係数との相関が強く、平行方向に載荷した場合も正しく評価できていることが確認できる。一方で、いずれの角度においても、自由膨張時のひび割れ密度が過小評価されている。これは、本研究で用いたひび割れ密度ではひび割れ幅を考慮していないためである。DEF膨張では、膨張初期でひび割れが入り、膨張の進行とともにひび割れ幅が増大する。自由膨張試験体は1.2%まで膨張しており、ひび割れ幅が大きかったが、これを考慮していないためひび割れの定量値が過小評価されたと推察される。以上から、水平方向のひび割れ密度と圧縮特性の相関が強く、ひび割れ幅を考慮することでより正確な評価ができる可能性が示唆された。

5. 結論

本研究では、二軸拘束下のDEF膨張において、ひび割れの方向性による力学特性の異方性を実験的に評価

するとともに、ひび割れの角度を考慮した定量値を使って、膨張量・力学特性との関係性を評価した。本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 二軸拘束下のDEF膨張では、無拘束方向の膨張が制限され、無拘束方向に膨張が進行することで、ひび割れが拘束方向に対して平行に発生し、ひび割れが方向性を示すことが確認された。
- 2) 二軸拘束試験体では、ひび割れに対して直交方向に載荷した場合、平行方向の場合よりも、力学特性、特に弾性係数が低下し、力学特性の異方性が確認された。
- 3) ひび割れの定量値として、ひび割れ密度を算出し、膨張量との相関が確認された。また、力学特性の異方性を評価する指標として、載荷直交方向のひび割れ密度が最も相関が強いことが確認された。

参考文献

- 1) Fujishima, M., Miura, T. and Kawabata, Y.: Stress-bearing Mechanism of Concrete Damaged by Delayed Ettringite Formation under Compressive Stress with Various Loading Patterns, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.21, pp.294-306, 2023
- 2) Kawabata, Y., Ueda, N., Miura, T. and Multon S.: The influence of restraint on the expansion of concrete due to delayed ettringite formation, Cem. Concr. Compos., Vol.121, 2021
- 3) Hansen, S. G. and Hoang, L. C.: Anisotropic compressive behavior of concrete from slabs damaged by alkali-silica reaction, Constr. Build. Mater, Vol.267, 2021
- 4) Miura, T., Sato, K., Fujishima, M., Nakamura, H. and Kawabata, Y.: Mechanism for reduction in compressive properties of cementitious materials in relation to internal crack patterns due to ASR and DEF expansion, Cem. Concr. Compos., Vol.128, 2022
- 5) Takahashi, Y., Li, Z., Ji, X., Joo, H.E., Fujishima, M., Nagao, R. and Miura, T.: Experimental study on compressive behaviors of concrete exposed to alkali-silica reaction under multidirectional restrains, Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.211-218, 2024
- 6) Farooq, S., Aoki, G., Fujishima, M., Miura, T. and Nakamura, H.: Development of elastic and plastic strains in concrete damaged by alkali-silica reaction during various compression loading tests, Constr. Build. Mater, Vol.393, 2023