

論文 DEF 膨張が生じたコンクリートの圧縮応力下での内部損傷進行の検討

松本 歩*1・Nirmal Raj Joshi*2・浅本晋吾*3・川端雄一郎*4

要旨: DEF 膨張が生じた供試体について、複数の圧縮荷重パターンを施したのちの内部損傷の進行と破壊に至るプロセスについて検討を行った。約 2%の DEF 膨張を計測した供試体の圧縮強度は、材齢 28 日での強度の約 15%まで低下した。DEF 膨張による内部損傷によって、圧縮ピークひずみおよび塑性変形は一般的なコンクリートより大きくなった。ポアソン効果によって荷重方向のひび割れが広がり、隣接する骨材間でひび割れが荷重方向に進展し破壊に至った。また、繰返し荷重を施すと、DEF によって生じた荷重直交方向のひび割れや骨材界面のギャップが閉塞する状況が観察された。

キーワード: エトリンガイト遅延生成, X線 CT, 力学的挙動, 内部損傷

1. はじめに

エトリンガイト遅延生成 (以下, DEF) は, コンクリートが若材齢時に高温作用 (70°C以上) を受け, 配合, 環境条件によってエトリンガイトがセメントペーストマトリクス中で再生成し膨張する劣化現象である。DEF は高温で蒸気養生を行うコンクリート二次製品やセメントの水和熱による内部温度上昇で高温になるマスコンクリートにおいて発生リスクがあり, 国内外において DEF による劣化事例が報告されている^{1),2)}。

DEF と類似する膨張劣化として, アルカリシリカ反応 (以下, ASR) がある。ASR に関して, その膨張メカニズムや ASR 劣化したコンクリートの力学挙動, 構造物の構造性能などは, 古くから広範な研究が行われている。一方で DEF に関して, 膨張の発生メカニズムに関する研究は国内外で精力的な検討がなされているが, DEF 膨張が発生した後のコンクリートの微細損傷の状態や力学特性はあまり検討されていない。また, DEF による自由膨張は ASR と比較すると大きい傾向がある。過大な DEF 膨張が今後発生したときの適切な性能評価, 数値解析によるモデル化のためにも, DEF による膨張ひび割れが生じたコンクリートの損傷進行や破壊挙動を検討すること

は工学的に重要と言える。

本研究では, DEF 膨張によるひび割れ (セメントペースト中のひび割れ) や骨材界面のギャップ (骨材周囲の隙間) といった内部損傷に着目し, 圧縮応力下でこれらの内部損傷の進行と破壊に至るプロセスについて, 基礎的な検討を行うことを目的とした。2%以上という過大な DEF 膨張が生じた供試体について, 複数の荷重パターンを施したのちに X線 CT で撮影し, 内部損傷の進行と破壊によるひび割れを観察, 比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

コンクリートの配合と材齢 28 日での物理特性を表-1 に示す。後述のように材齢 21 日まで封緘養生を施し, DEF 膨張に必要な水分を十分に供給していないので, 材齢 28 日時点では膨張による損傷は皆無であると考えられる。セメントには早強セメントを使用し, 化学成分を表-2 に示す。細骨材は大井川系陸砂, 粗骨材は青梅産碎石を使用した。DEF を促進させるため, セメントの質量比で SO₃ が 2.5wt%になるように K₂SO₄ を添加した。

表-1 配合と材齢 28 日の物理特性

| 配合 | | | | | | | 材齢 28 日強度 | |
|------------|----------|-------------------------|--------|--------------------------|-------|-------|------------|-----------------------------|
| 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | 圧縮強度 (MPa) | 静弾性係数 (kN/mm ²) |
| | | 水 W | セメント C | SO ₃ (セメント内割) | 細骨材 S | 粗骨材 G | | |
| 50 | 46 | 173 | 337 | 8.65 | 798 | 965 | 32.3 | 28.6 |

*1 埼玉大学 大学院理工学研究科環境システム工学系専攻 (学生会員)

*2 埼玉大学 大学院理工学研究科 環境科学・社会基盤コース

*3 埼玉大学 理工学研究科 環境科学・社会部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 港湾空港技術研究所 構造新技術研究グループ グループ長 博士 (工学) (正会員)

2.2 供試体の作製および養生方法

100mm×200mm の円柱供試体を 10 体作製し、そのうち 8 体（供試体名：D-1～D-8）については長手方向の膨張を経時的に計測した。ND-1 と ND-2 については膨張を計測していないが、配合、養生条件などはすべて同じである。

供試体を打ち込んだ直後に型枠ごと恒温槽に入れ、高温養生を行った。高温養生は、恒温槽内の温度を 20℃で前養生を 4 時間、その後 2 時間で 90℃まで上昇させ、90℃で 12 時間加熱後、10 時間で 20℃まで降下させた。恒温槽内温度を図-1 に示す。材齢 1 日で脱型後、材齢 21 日まで封緘養生し、温度制御のない室内で約 3 年間水中に浸漬した。

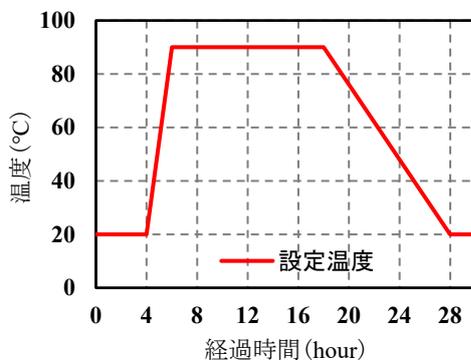


図-1 高温養生条件

2.3 試験項目

(1) 膨張試験

封緘養生後、8 体の円柱供試体の膨張量を経時的に計測した。膨張量はコンタクトゲージ（精度 0.001mm、基長 100mm）によって約 3 年間計測した。

(2) 圧縮試験と CT 撮影および動弾性係数の計測

約 3 年の DEF 膨張の計測の後に、圧縮応力下での内部損傷の進行を検討するため、複数の圧縮載荷試験とマイクロフォーカス X 線 CT スキャナ (μ -XCT) による撮影、共振周波による動弾性係数の計測を行った。

圧縮試験では、コンプレッソメータを用いて軸ひずみ、荷重はロードセルを用いて計測した。静的圧縮試験によって圧縮強度を計測した後、損傷の進行を様々な圧縮応力下で検討するため表-3 に示す載荷を施し、除荷したのちに X 線 CT 撮影、動弾性係数の計測を行った。漸増載荷試験は、除荷時の塑性変形と漸増載荷による損傷の進行を、繰返し載荷試験は同一応力レベルの塑性変形の進展を、また持続載荷は持続応力下でのクリープひずみの挙動をそれぞれ把握することを目的に試験を行った。

μ -XCT による撮影は、マイクロフォーカス型 X 線 CT スキャナーの ScanXmate-D200RSS900X 線 CT スキャナーシステム³⁾を使用した。 μ -XCT の撮影条件を表-4 に示す。透過した X 線は、解像度 1504×1504 ピクセルの 418×418mm フラットパネルで検出した。

動弾性係数は JIS A1120 規格に準じて計測を行った。共振周波数機器は PC オートスキャン型動ヤング率測定器を使用し、振動は縦振動で以下に示す式で動弾性係数

表-2 セメントの化学成分

| ig.loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | MnO | SrO |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|------|
| 1.15 | 20.16 | 5.05 | 2.52 | 65.00 | 1.35 | 3.04 | 0.26 | 0.36 | 0.31 | 0.65 | 0.07 | 0.05 |

表-3 載荷パターン

| No. | 載荷パターン | 供試体 | 載荷および CT 撮影、動弾性係数計測順序 |
|------|-----------------------------------|------|--|
| No.1 | 圧縮強度試験 | D-1 | 圧縮強度試験 |
| No.2 | 漸増載荷試験 | ND-1 | CT 撮影→1.2N/mm ² 載荷→除荷→CT 撮影→2.4N/mm ² 載荷→除荷→CT 撮影→3.6N/mm ² 載荷→除荷→CT 撮影→破壊→CT 撮影 |
| | | D-2 | 動弾性係数計測(以下、計測)→0.6N/mm ² 載荷→除荷→計測→1.2N/mm ² 載荷→除荷→計測→2.4N/mm ² 載荷→除荷→計測→3.6N/mm ² 載荷→除荷→計測→4.8N/mm ² 載荷→除荷→計測 |
| No.3 | 繰返し載荷+持続載荷 (圧縮強度〈D-1〉の 80%で載荷) | D-3 | CT 撮影→3.6N/mm ² 載荷→除荷→CT 撮影→3.6N/mm ² サイクル 4 回→除荷→CT 撮影→3.6N/mm ² 持続(持続時間：約 1500 秒)→除荷→CT 撮影 |
| No.4 | 段階的持続載荷 | ND-2 | CT 撮影→1.8N/mm ² 持続載荷(持続時間：約 350 秒)→3.6N/mm ² 持続載荷(持続時間：約 500 秒)→5.5N/mm ² 持続(持続時間：約 150 秒)→除荷→CT 撮影 |

を算出した。

$$E_d = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f^2 \quad (1)$$

E_d :動弾性係数(N/mm²)

L :供試体長さ

A :供試体の断面積(mm²)

m :供試体の質量

f :縦振動の一次共振振動数(Hz)

CT 画像は、本稿の議論に必要なもの以外は省略する。

表-4 CT 撮影条件

| | |
|----------------|-------|
| X線管電圧(kV) | 160 |
| X線管電流(mA) | 0.2 |
| ビニングモード | 2*2 |
| フレーム積算レート(fps) | 3 |
| プロジェクション数 | 2000 |
| 分解能(μm/pixel) | 163.6 |

3. 実験結果及び考察

3.1 膨張試験

円柱供試体の材齢約3年での表面状態と膨張ひずみの経時変化を図-2、図-3に示す。DEF膨張によって、供試体表面には亀甲状のひび割れが目視で確認され、マイクロスコープ(最大拡大倍率:230倍)で計測したところ、ひび割れ幅は0.2mm~2mmであった。膨張はいずれも材



図-2 円柱供試体 材齢約3年の表面状態

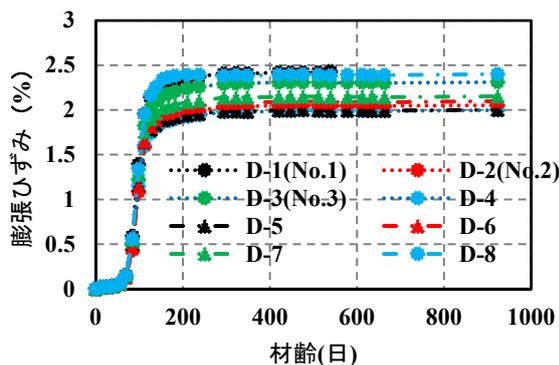


図-3 膨張ひずみの経時変化

齢50日から100日付近で急激に進行しており、最終的に約2~2.4%の膨張ひずみを呈した。供試体8体が概ね同様の膨張挙動を示し、ひび割れ性状も類似していたことから、膨張ひずみを計測していない供試体も約2%程度の膨張が発生していると考えられる。

3.2 圧縮試験とCT撮影および動弾性係数の計測

(1) 圧縮強度試験

静的圧縮強度試験の応力-ひずみ曲線を図-4に示す。圧縮強度は約4.4N/mm²であり、表-1に示す材齢28日圧縮強度の約15%となり、図-2に示すようなDEF膨張によるひび割れの影響で強度が大きく低下したと考えられる。また、圧縮ピークひずみは約6500μであり、一般

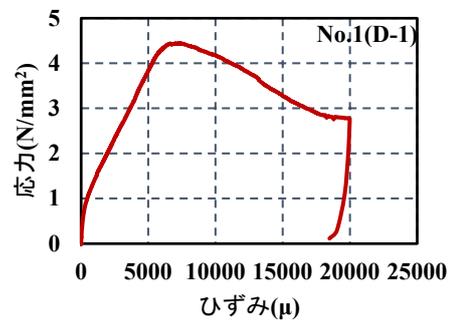


図-4 圧縮強度試験 応力-ひずみ曲線

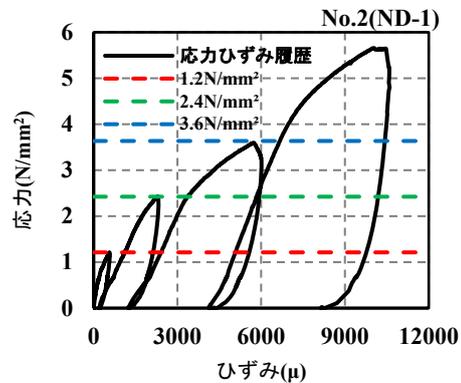


図-5 漸増載荷 応力-ひずみ履歴曲線

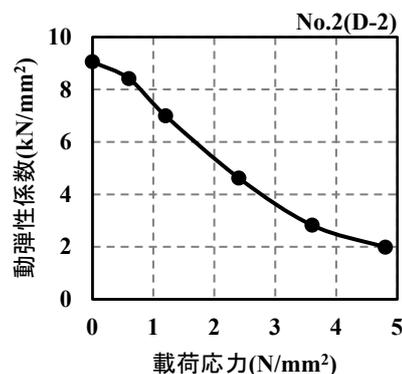


図-6 載荷履歴に伴う動弾性係数変化

的な圧縮ピークひずみ(=約 1500~2000 μ)⁴)より大きくなった。次節の漸増荷試験で示されるように、DEF 膨張によるひび割れや骨材界面のギャップが荷前存在することで、塑性変形が非常に大きくなったために、ピークひずみが増加したと考えられる。

(2)漸増荷試験

漸増荷の応力-ひずみ履歴曲線を図-5 に示す。荷応力が増加すると塑性ひずみが大きくなっていることが除荷後の残留ひずみでわかる。一般的なコンクリートでは、圧縮強度の 40%の応力レベルは弾性領域と考えられるため、塑性ひずみはほとんど発生しない。しかしなが

ら、DEF 膨張が生じたコンクリートでは、DEF 膨張による影響で圧縮強度 (ND-1) の約 40% (2.4N/mm²) の応力レベルであっても、除荷後に約 1200 μ の残留塑性ひずみが生じた。なお、本供試体の圧縮強度 (ND-1) は圧縮強度試験の供試体 (D-1) よりわずかに大きく (5.7N/mm²)、膨張による損傷が少なかったと推察された。

各荷応力で除荷したのちに動弾性係数を計測した供試体の荷履歴と動弾性係数の変化を図-6 に示す。荷応力が大きくなるほど動弾性係数は低下する傾向を示した。この低下率は、荷応力が 0.6N/mm² までと 3.6~4.8 N/mm² の間では小さく、0.6~3.6 N/mm² の間では大き

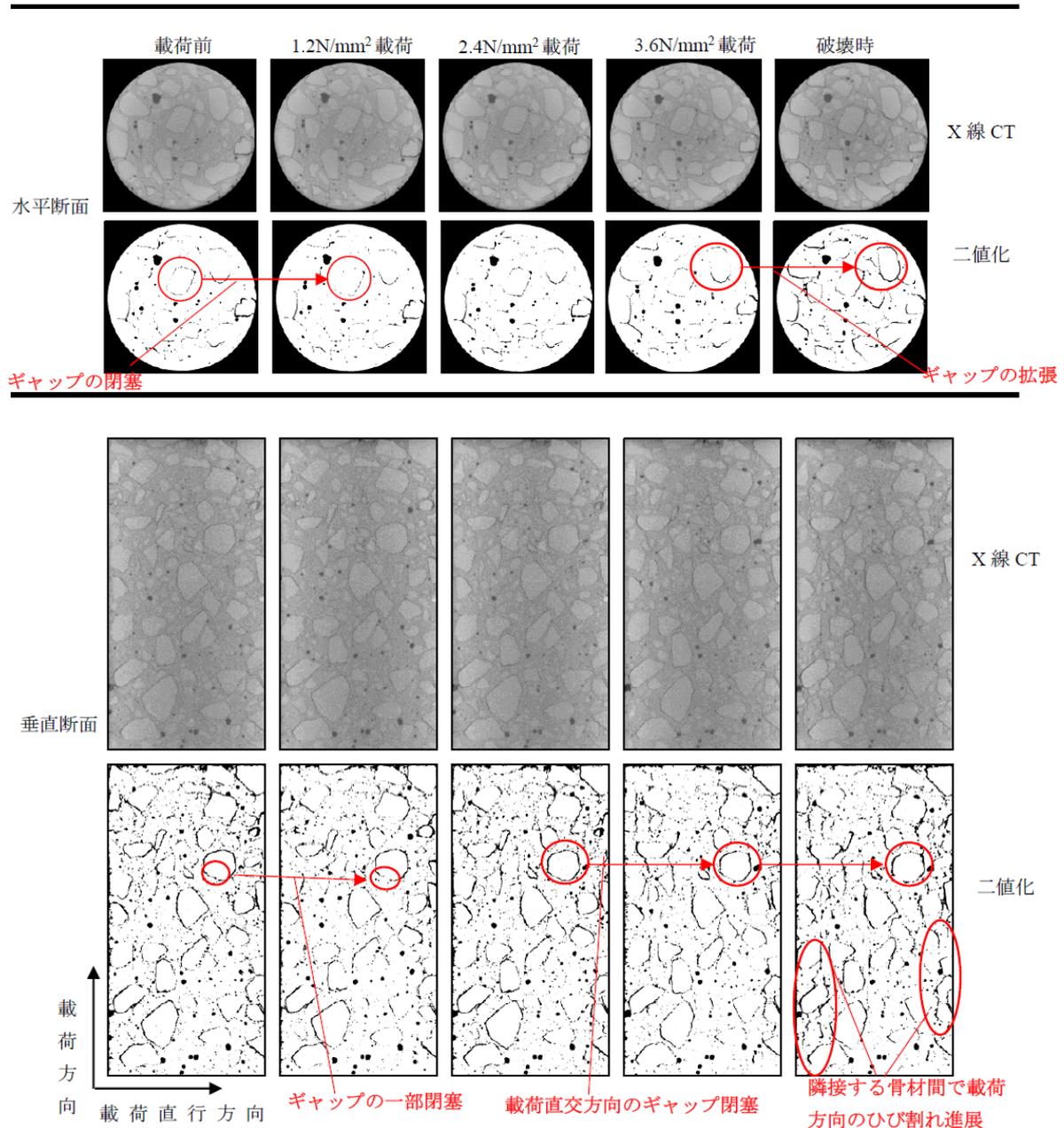


図-7 漸増荷試験の CT 画像と二値化画像

く、かつ直線的であった。圧縮強度 (D-1) の約 30% (1.2N/mm²) の応力でも動弾性係数は低下しており、DEF 膨張で生じたひび割れの存在によって、比較的小さな載荷応力でも損傷が進行したと考えられる。

X 線による CT 画像と CT 画像を画像処理で二値化した結果を図-7 に示す。CT 画像は、同じ位置情報の画像を抽出したが、載荷の増加とともにひび割れの進行や塑性ひずみの増加で大きく変形したため、骨材の位置などに若干の違いがある。なお、CT 画像は、分解能が約 200 μ m であり、それ以下のひび割れは検出できないため、より微細な領域のひび割れの検討は今後の課題とする。

2.4N/mm², 3.6N/mm², 破壊載荷後の水平断面の CT 画像では、DEF 膨張による骨材界面のギャップが水平断面で徐々に広がっていることが確認できる。一方で、垂直断面の骨材界面のギャップに着目すると、載荷直交方向ではひび割れの進行が少なく、ギャップが閉じているものも観察された。また、垂直断面では、3.6N/mm² から破壊にかけて骨材界面から載荷方向にひび割れの進展が確認できる。これより、載荷直交方向の骨材界面のギャップは圧縮され、ポアソン効果によって載荷方向のひび割れは広がり、さらに、荷重が大きくなると、隣接する骨材間でひび割れが載荷方向で進展し破壊に至ったと考えられる。

(3)繰返し載荷+持続載荷 (圧縮強度 <D-1> の約 80%で載荷)

圧縮強度 (D-1) の約 80%である 3.6N/mm² で載荷と除荷を 5 回繰返した後、3.6N/mm² 持続荷重 (持続時間:約 1500 秒) を施したときの応力-ひずみ履歴の結果を図-8 示す。5 回繰返し載荷すると、コンクリートの塑性変形が増加し、ひずみは 6000 μ に達したが、載荷を繰り返すごとにひずみ増加量は減少した。これは、DEF 膨張によるひび割れやギャップが繰返し載荷によって載荷直交方向で徐々に閉塞し、塑性変形の増大量が減少したためだと考えられる。

載荷前と繰返し載荷後の垂直断面の CT 画像を二値化処理した画像を図-9 に示す。圧縮強度 (D-1) の約 80% の応力での繰返し載荷によって載荷方向の骨材界面のギャップが広がっており、隣接する骨材間をつなぐひび割れの進展が見られた。繰返し載荷後の持続載荷については、次節で後述する。

(4)段階的持続載荷

段階的持続載荷のひずみ応力履歴曲線を図-10 に示す。段階的持続載荷は表-3 に従って持続載荷を施し、圧縮応力 5.5N/mm² を約 150 秒保持したところ、最終的に応力を維持できず、破壊した。5.5N/mm² でほぼ圧縮強度に達しており、高い持続応力下のもとひび割れが時間依存進展し、破壊に至ったと考えられる。

単位クリープひずみの経時変化を関係を図-11 に示す。乾燥収縮の影響などもあるが、経過時間が非常に短いため、持続応力下でのひずみの増加を便宜上クリープひずみとした。単位クリープひずみは、所定の応力に達した後のクリープひずみをその応力で除すことで算出した。また、前節の 3.6N/mm² 繰返し載荷履歴を受けた後の持続載荷における単位クリープひずみも付記した。

持続載荷応力が大きくなるとともに単位クリープひずみは大きくなり、弾性域を超えた非線形クリープ挙動を示している。また、前節の繰返し載荷後に 3.6N/mm² の持続載荷を与えた供試体の単位クリープひずみが最も小さくなった。前述のように DEF 膨張によるひび割れやギャップが繰返し載荷によって載荷直交方向で徐々に閉塞したことで塑性変形の増大量が減少し、除荷後もそれら

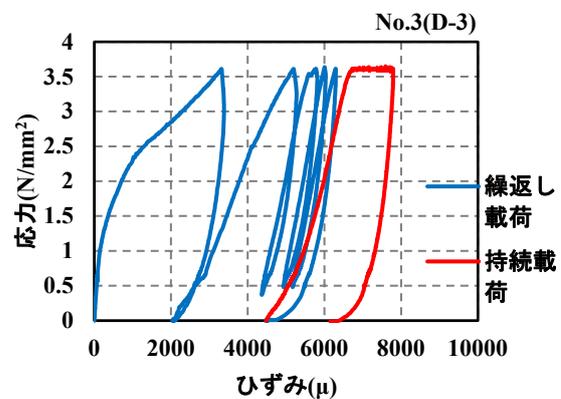


図-8 繰返し載荷+持続載荷 応力-ひずみ曲線

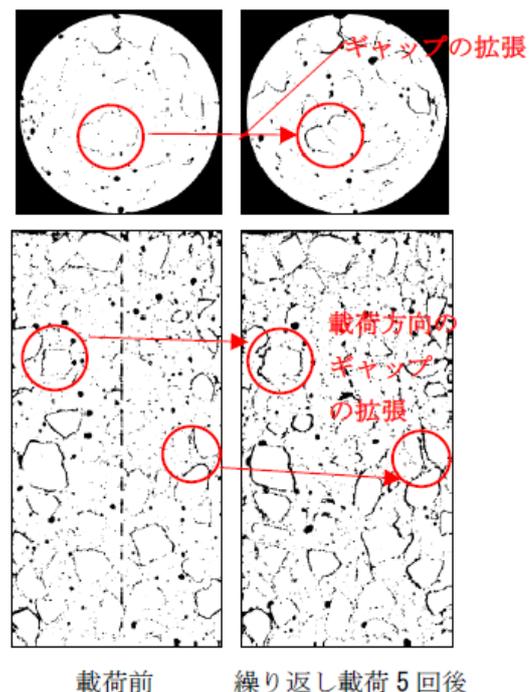


図-9 載荷前と繰返し載荷後の二値化画像

が戻らないために、同一応力でのひび割れ進展やギャップの閉塞に伴う単位クリープひずみが小さくなったと推察される。

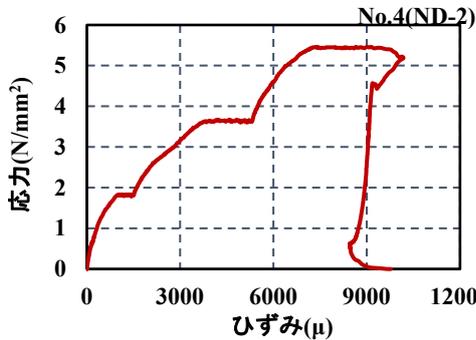


図-10 段階的持続荷重 応力-ひずみ履歴曲線

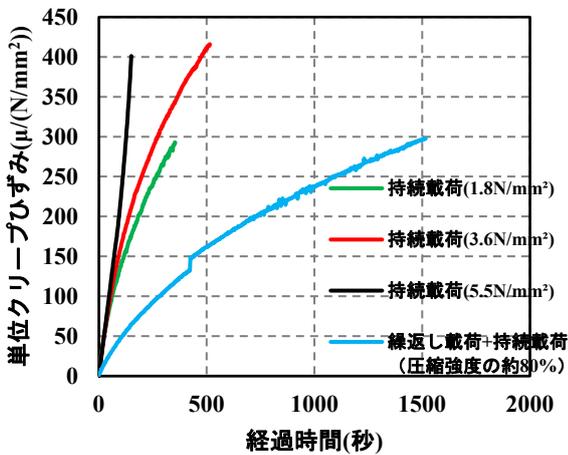


図-11 単位クリープひずみの経時変化

4. まとめ

本研究では、DEF 膨張が発生した円柱供試体の圧縮応力下での内部損傷及び破壊の進行について、複数の荷重パターンでの応力ひずみ関係や X 線 CT 撮影、また動弾性係数を用いて検討した。以下、本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 約 2% の DEF 膨張が発生した円柱供試体において、圧縮強度は材齢 28 日の約 15% まで低下した。また、一般的なコンクリートの圧縮ピークひずみと比較すると大きなピークひずみが計測された。漸増荷重試験において

比較的小さい荷重応力（圧縮強度の約 40%）でも除荷後の残留ひずみが大きく、DEF 膨張による損傷で塑性変形が大きく進行することが分かった。

(2) X 線による CT 画像から、DEF 膨張した供試体は圧縮応力下では荷重直交方向の骨材周りのギャップは圧縮され、ポアソン効果によって荷重方向のひび割れが広がることが確認された。さらに、応力が大きくなると、隣接する骨材間でひび割れが荷重方向で進展し破壊に至ることが CT 画像から確認された。

(3) 単位クリープひずみは、持続荷重に比べ繰返し荷重の履歴を受けた供試体の方が小さくなった。繰返し荷重を受けた場合、荷重直交方向のひび割れ、もしくは DEF による骨材界面のギャップが閉塞し、除荷後もそれらが戻らないために、同一応力でのひび割れ進展やギャップの閉塞に伴う単位クリープひずみが小さくなったと推察された。

謝辞

本研究の実験と考察に関して、名古屋大学三浦泰人准教授には、多大な協力を頂いた。また、本研究は、JSPS 科研費 20H02219, 20H02227 の助成を受け、実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 川端 雄一郎, 松下 博通: 高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 67 巻, 4 号, pp. 549-563, 2011
- 2) Godart, B., Divet, L: Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy, 5th international conference on Forensic Engineering, 2013
- 3) 松村 聡, 水谷 崇亮, 篠永 龍毅: マイクロフォーカス X 線 CT スキャナを用いた地盤工学への新たなアプローチ, 港湾空港技術研究所資料, No.1313, p21, 2015
- 4) 町田篤彦, 関博, 薄木征三, 増田陳紀, 姫野賢治: 大学土木 土木材料, オーム社, p86, 1999