論文 DEF を模擬したセメントペーストの膨張時に生じる骨材周辺の劣化 進展の可視化

殿畑 匠海*1·寺本 篤史*2·大久保 孝昭*3

要旨: DEF 発生時の内部性状の経時変化を明らかにするため, 膨張材を使用して DEF に近い状況を引き起こ し, X線 CT により試験体内部を連続撮影し, DIC を用いて劣化の進展を可視化した。結果として, 1) 膨張 材を多量添加した試験体では DEF の特徴である骨材周辺のギャップが再現された。2) 骨材径とギャップ幅 との関係から,損傷の有無により,膨張の駆動力に変化が起きている可能性がある。3) 実際の DEF で確認さ れている骨材間でのひび割れは X線 CT 画像(0.088mm/pixel) からは確認することができなかったが, DIC および数値解析から骨材同士が近いほど骨材間でのひび割れが発生する可能性が高いという結果が得られた。 キーワード: DEF, ギャップ, X線 CT, 画像相関法,膨張材

1. はじめに

近年,施工性向上のためプレキャストコンクリートの 需要が増している。プレキャストコンクリートでは十分 な水分とともに高温養生されるのが一般的である。しか し、このような条件のコンクリートではエトリンガイト の遅延生成(DEF: Delayed Ettringite Formation)が生じる 可能性がある。DEF はコンクリートにパーセントオーダ ーの膨張を引き起こし、コンクリート構造物の変形や、 機械的特性の著しい低下をもたらす可能性のある劣化現 象である。

コンクリートに生じる DEF に類似の膨張性劣化とし てアルカリシリカ反応 (ASR: Alkali-Silica Reaction) が挙 げられる。ASR も DEF と同じくコンクリート内部に膨 張圧を発生させ微細ひび割れを誘発することにより,コ ンクリート構造物に耐久性や機械的特性の劣化を引き起 こす。しかし ASR によるコンクリートの膨張量は DEF と比較して一桁程度小さい。

この二つの膨張性ひび割れは長期にわたり進展する ため、目視点検等でコンクリート構造物に ASR または DEF と思われる劣化が発見された場合は劣化の主要因 を特定し、残存膨張量を推定する必要がある。しかし DEF, ASR のメカニズムは完全には解明されておらず、 海外では DEF と ASR が併発する事例も多く確認されて いることから劣化原因の特定は困難であるとされている。 そのため、適切な補修、補強工法の選定がなされず劣化 が再発する可能性がある。

そこで本研究では、コアの詳細検査時に観察されるひ び割れ分布から膨張圧の生じる場所と大きさを推定し、 ASR と DEF の発生の挙動を同定する方法を提案するこ とを最終的な目標として研究を実施した。 本論文では、X線 CT を用い試験体内部の劣化進展を 連続的に撮影し、得られた CT 画像に対してデジタル画 像相関法(DIC: Digital Image Correlation)を適用するこ とにより試験体内部の劣化進展を可視化する。しかし、 DEF は長期間にわたって進行する劣化であるため、X線 CT 装置内の同一設置位置で連続的に劣化の進展を観察 することが困難である。そのため本研究では、DEF 劣化 を模擬した試験体を作製した。具体的には、膨張材を多 量添加し、セメントペーストに異常膨張を発生させるこ とで疑似的に DEF に近い状況を引き起こし、その間の骨 材周辺の劣化進展を取得した。

2. DEF のメカニズムとひび割れ進展

DEF の特徴的な劣化として, 骨材周辺に生じるギャッ プとギャップを埋めるエトリンガイトが挙げられる。 DEF の発生メカニズムとして, 骨材とセメントペースト の界面にあらかじめ生じたギャップに局所的にエトリン ガイトが生成・膨張することが原因とする結晶成長圧説 ¹⁾とセメントペースト全体にミクロなエトリンガイトが 生じることでペースト自体が均一に膨張するペースト膨 張説²⁾があるが, ペースト膨張説に則ると, 骨材周辺の ギャップはセメントペーストが膨張することによって生 じる。また, セメントペーストの膨張によって骨材周辺 にギャップが生じるのであれば, ギャップの幅は骨材の 粒径に依存するといわれている³⁾。

加えて、セメントペーストの膨張が骨材に拘束された 場合、骨材の放射方向にひび割れが進展することもあり 得る。

本研究はペースト膨張説に基づき,膨張材によりセメ ントペーストを強制的に膨張させた場合のギャッ

*1 広島大学 先進理工系科学研究科 (学生会員) *2 広島大学 先進理工系科学研究科 助教 工博(正会員) *3 広島大学 先進理工系科学研究科 教授 工博(フェロー会員)

試験体名	W/C	EX : C	骨材径
Ex-20	50	15 : 85	20-25mm
Ex-5			2.5-5mm

表一1 配(調)合条件

W:上水道水 C:普通ポルトランドセメントEX:エトリンガイト-石灰複合型膨張材

表一2 計測条件

走查方式	CBCT	
スライス厚	0.088mm	
X 線検出器	イメージインテンシファイア	
照射線量	100kV and 110µA	
再構成マトリックス	512 x 512 pixel	
有効視野 (XY)	44.9mm	
有効視野 (Z)	38.6mm	



図-1 画像相関法イメージ



因こと「アント・・・」と「「「「「」」」を見ていた。

プの生成および骨材周辺におけるひび割れの発生をX線 CT ならびに DIC により観察する。

3. 実験概要

3.1 使用材料,調合及び養生条件

所定の材齢で劣化が生じるよう配(調)合,および養 生条件を設定した。20体の予備実験から約24時間で試 験体表面にひび割れが入る条件として,以下に示す使用 材料,配(調)合および養生条件を設定した。使用した 材料の調合条件を表-1に示す。セメントペーストは普 通ポルトランドセメントにエトリンガイト-石灰複合型 の膨張材を内割で15%添加したものを使用した。

本実験ではギャップの幅は骨材粒形に依存すること からその違いを見るため、パラメータを骨材粒形とし、 それぞれ 20-25mm と 2.5-5mm の単一粒形の 2 種類を用 いた。

試験体は、練り混ぜから 15 時間後まで封緘養生とし、 脱型後1時間水中養生を行った。これは、試験体表面の 乾燥収縮ひび割れを抑制するため、および膨張材の反応 を継続させるためである。練り混ぜから水中養生が終了 するまでの 16 時間は 20℃の恒温室で作業を実施した。 3.2 X線 CT

本実験で使用した X 線 CT 装置は, [inspeXio SMX-100CT]である。本実験で用いた計測条件を表-2に示す。 本実験装置の都合上, 試験体寸法は 4 32×40mm の円柱 試験体とし, 骨材はこの試験体寸法に収まるように配置 した。そのため, 質量比, 体積比は骨材粒径ごとに異な る。骨材粒径 20-25mm の試験体(記号: Ex-20) と, 骨 材粒径 2.5-5mm の試験体(記号: Ex-5) とでは, 総骨材 量が異なる。

試験体は,3.1 で述べた養生の後,速やかに X 線 CT 装置に設置し,材齢38時間まで1時間ごとに22時間の連続撮影を実施した。

3.3 デジタル画像相関法 (DIC)

本研究では連続的に撮影した X線 CT 画像からひずみ の進展を可視化及び数値化するため DIC を用いた。図-1に画像相関法のイメージを示す。DIC は撮影したデジ タル画像の模様のランダム性を基に輝度値分布から測定 対象物の変位量を求めるものである。変形前の画像に N ×N 画素の任意領域(サブセット)を設定し,変形前の サブセットの輝度値分布と高い相関性をもつサブセット を変形後の画像から探索する。この時のサブセットの中 心点の移動量によりひずみを算出する。

この処理を画像内の全領域に行うことで全体のひず み分布を得ることができる。本研究では、予備検討の結 果、3.2 で得られた X 線 CT 画像 (0.088/voxel) に対して、 サブセットサイズを 41x41pixel と設定した

3.4 セメントペーストの膨張量試験

X線 CT 試験に使用したセメントペーストが,どの程度の膨張量を有しているかを確認するため,同一の材料 および配(調)合を使用して,セメントペーストの膨張 量を測定した。試験体概要を図-2示す。

試験体は ϕ 100×200mmの円柱型枠を用い、型枠による拘束を取り除くため、型枠内周に厚さ20mmのスポンジを設置した。そのため、正味の試験体寸法は ϕ 60×200mmである。また、X線CT用に実施した材齢15-16

時間の水中養生を模擬するため,材齢 15 時間にスポ ンジに給水した。膨張量の測定には埋込み型ひずみ計 (PMFL60)を使用した。試験体は2体作製した。

4. 実験結果及び考察

4.1 セメントペーストの膨張量

3.4 で述べた膨張量試験の結果を図-3に示す。図中に は参考として,注水開始時,X線CT測定開始,及び終 了時を黒線で示した。

2 体の試験体で若干のバラツキがみられるものの,両 試験体ともに材齢5時間以降急速に膨張し,吸水後も材 齢 40 時間まで膨張の継続が確認された。本実験で使用 した調合での膨張量は,X線CT測定開始時にあたる材 齢 17 時間において平均で約 5000µ,終了時において約 9000µであった。そのため,5章で行った数値解析にはセ メントペーストに 9000µの膨張ひずみを与えた。

4.2 骨材周辺のギャップ

図-4および図-5に、取得した X線 CT の撮影画像 の一例として、材齢 38 時間時点における Ex-20 と Ex-5 の断面画像を示す。

図-4および図-5より,材齢38時間時点において, 骨材周辺,特に骨材下端に明確なギャップが確認される。 このギャップ幅は,骨材粒径が大きい Ex-20 の方が明ら かに大きい。図-6は各材齢に取得した X線 CT の断面 画像からギャップ幅の経時変化を読み取ったものである。 観察したギャップの場所は図-4,図-5に示している。

図-6より,ギャップ幅はセメントペーストの膨張に 従い増大し,Ex-20では0.4から0.7mm程度,Ex-5では 0.1mm程度であった。既往の報告³⁾でDEFにおいてギャ ップの幅と骨材径には相関関係が認められていると報告 されているが,本実験はその傾向を再現するものであっ た。一方で,骨材とセメントペーストの付着強度は材齢 初期の養生条件が大きく影響を及ぼす⁴⁾が,本試験では 材齢約1日でひび割れが発生するよう設定しているため, 骨材とセメントペーストの付着力が十分に発現する前に 膨張の駆動力が働いていると考えられ,長期間に渡り進 展する DEF とはその点で大きく異なる点は注意を要す る。

セメントペーストが膨張率 ϵ で均一に膨張する際に, 骨 材とセメントペースト界面に摩擦がない場合, 半径 R の 骨材の周りには幅 ϵ R のギャップが生じるはずであるが, 本実験に当てはめると Ex-20 の場合には $\epsilon \approx 9000\mu$, R \approx 10であり, ϵ R ≈ 0.09 mm, Ex-5 の場合には, $\epsilon \approx 9000\mu$, R ≈ 2.5 であり, ϵ R ≈ 0.0225 mm となるが, この計算結果 は図-6の結果と比較する 1/2 ~ 1/8 程度小さい。つま りギャップ生成時にはセメントペーストのひずみが均一 ではなく集中する可能性を示唆している。



3 0 2 1 1

図-4 X線CT画像によるギャップ幅計測点 (Ex-20 38h)



図-5 X線CT画像によるギャップ幅計測点 (Ex-5 38h)

上記の現象を確認するため,骨材周辺のギャップの変 化量を累積して,試験体高さで除してマクロなひずみ量 として算出したものが図-7である。図より,Ex-20,Ex-5 のいずれもセメントペースト単体のひずみ量を上回る 結果であり,この傾向は骨材粒径の大きい Ex-20 でより 顕著であった。また,後述する DIC による y 方向の全体 ひずみを示した図-8 でもセメントペースト単体のひず み量を上回る結果となった。このことから,損傷(この 場 合 ギ ャ ッ プ) の 有 無 に よ り , 膨 張



図-6 X線CT画像ギャップ幅計測点









材の反応や,反応に伴う膨張の駆動力が変化すると推察 される。

4.3 骨材間でのひび割れ

DEFでは、骨材周囲に発生するギャップ以外に骨材 間を結ぶように放射状のひび割れがみられる場合があ る。これは、骨材間のセメントペーストの膨張を骨材が 拘束した結果生じるものと考えられる。本実験ではいず れの試験体についても目視では骨材間のひび割れを確認 することができなかったが、本実験でひび割れ観察を行 った断面以外にひび割れが生じている可能性や、1 画 素あたりの寸法(0.088mm)以下のひび割れが生じてい る可能性は否定できない。

4.4 外周部のひび割れ

DEF の外観上の特徴である亀甲状のひび割れは、本実



図—9 中心部X線CT画像(Ex-5-38h)



図-10 外縁部 X 線 CT 画像(Ex-5-38h)



図—11 X線CT円周切り取り位置

験の試験体でも確認されている。Ex-5のX線CT画像を 円周状に切り取った中心部を図-9,外縁部を図-10 に示す。また,切り取った位置の概念図を図-11に示 す。これらの図から外縁部には亀甲状のひび割れが確認 されるが中心部では確認できない。既往の報告⁵⁾でも外 観観察で確認されるひび割れは外縁部10mm程度でのみ 確認されている。以上のことから外縁部では骨材による 拘束がなく自由に膨張するが、中心部では骨材による拘 束があるためひび割れが発生していると考えられる。

4.5 DIC

1時間ごとに撮影される X線 CT 画像から, DIC を用

いて断面内のひずみ分布の経時変化を取得した。結果の 一例が図-12,図-13である。図-12,図-13 はそれぞれ,材齢30時間から31時間へのひずみの進展 を示したものであり,ここでは鉛直方向の結果を記載し ている。また,図には骨材の場所を白塗りで示している。

図-12より,解析を行った材齢30時間から31時間 では骨材の下端に膨張ひずみが発生していることがわか る。一般に,骨材の下部はブリージング水の影響により 粗大な遷移帯ができやすくの,骨材径が大きくなるほど 遷移帯の厚みが増すという報告がある⁷⁾。以上のことか ら骨材の下端に遷移帯が形成されており,そこからギャ ップが進展した可能性が高いと考えられる。

また,骨材側面には収縮ひずみがみられることから, 骨材周辺のセメントペーストは均質に膨張しておらず, 脆弱部にひずみが集中している可能性がある。一方,骨 材粒径の小さい Ex-5 におけるひずみ分布が図-12で あるが,この試験体では収縮ひずみが確認できる領域は 比較的少なく, Ex-20 に比べて均質に膨張している。ま た,骨材間距離が小さい Ex-5 では骨材が密集している部 分で,骨材間を結ぶような膨張ひずみがみられる。これ は目視では確認できなかった骨材間のひび割れを示して いる可能性がある。

5. 数値解析による検証

4章で述べたように Ex-20 の試験体は遷移帯の影響や 骨材間距離が比較的離れていることによりセメントペー ストは骨材の拘束をほとんど受けることなく膨張してい ると考えられる。それに対して Ex-5 では骨材間の距離が 小さくセメントペーストの膨張を部分的に拘束している 可能性がある。本章では、骨材同士の距離や骨材寸法が セメントペーストを拘束する程度を数値解析により確認 する。数値解析には、汎用有限要素法ソフトウェア [ANSYS Workbench]を用いた。解析に用いた条件を表-3に示す。

骨材のサイズによる違いを見るため、Ex-5を想定した解 析モデル(記号: Ex-5-model)では骨材の直径は 3mm,





0.0271875 0.024375 0.0215625 0.01875 0.0159375 0.013125 0.0103125 0.0075 0.0046875 0.001875 -0.0009375 -0.00375 -0.0065625 -0.009375 -0.0121875 -0.015

図-12 y方向ひずみコンター図 (Ex-20 30-31h)



図-13 y方向ひずみコンター図 (Ex-5 30-31h)

4mm, 5mmの組合せ, Ex-20を想定した解析モデル(記号: Ex-20-model)では17mm, 20mmとしている。骨材間距離はEx-5-modelでは近いところで約0.25mm-0.5mm, Ex-20-modelでは約2.1mmである。また,解析ソフトの都合上,骨材は球形としているが,骨材同士の距離や寸法の影響を確認する目的に対しては,粒形の影響は小さいと考えている。

本研究では、DEF の膨張機構としてペースト膨張説を 想定しているため、セメントペースト要素に対して、先



骨材径(mm)	Ex-5:3, 4, 5	
	Ex-20:17, 20	
膨張ひずみ	9000μ	
骨材-ペースト界面	摩擦なし	

表一3 解析条件

の図-3で得た膨張量を一様なひずみとして与えて解析 を行った。また、本実験の試験体は打設直後から膨張が 開始していることから骨材-セメントペースト間の接着 力はほぼないと考えられ、セメントペースト要素と骨材 要素の界面は、接着応力を想定せず、摩擦なしとして設 定した。

セメントペースト要素に9000μ膨張ひずみを与えた際 のy方向の応力分布をそれぞれ図-14および図-15 に示す。解析上のギャップの幅を計測した箇所を実線青 枠及び点線赤枠で示した。

数値解析により得られた実線青枠で示したギャップ の幅は, Ex-20 で約 0.15mm, Ex-5 で約 0.05mm ほどであ った。数値解析からも骨材径が大きいほどギャップの幅 が大きいという結果が得られたが, Ex-20 で CT 画像か ら取得したギャップ幅とは大きな差異があり, セメント ペーストが一様に膨張しているという入力では, この実 験結果を再現することはできなかった。図-14および 図-15で示した点線赤枠ではギャップは見られなかっ た。点線赤枠は骨材間距離が近く, 応力が発生している 点であるが, これも骨材による拘束の影響と考えられる。

今回の解析ではひび割れによる損傷を考慮していな いため、この求められた主応力の信頼性は低いが、骨材 の距離が近いほど骨材間にひび割れが生じやすい環境で あると考えられる。

実際に DEF が生じたコンクリートの断面写真を見る と、多くの場合、骨材周辺のギャップと骨材間のひび割 れが同時に発生している。実際のコンクリートは3次元 的に骨材が配置されており、骨材径が様々であるため骨 材間の距離が近くなりやすく、ひび割れが発生している と考えられる。

また,図-9,図-10の結果と同様に図-14では 外縁部に応力の集中がみられた。これも前述したように 中心部は骨材により膨張は拘束されるが,外縁部は骨材 による拘束がなく自由に膨張するため,外縁部に応力が 集中していると考えられる。

6. まとめ

本研究は、試験から得られた知見を以下に示す。

(1) 本実験の膨張材を用いた DEF の模擬試験体では, 骨材径とギャップの幅との相関がみられた。既往 の報告で実際の DEF でも相関がみられることか ら模擬試験体は DEF に近い現象を起こすことが できたと考えられる。ただし、本実験では打設直 後から急激な膨張が始まっているため、骨材界面 の付着強度については再現されていない。

- (2) ギャップの幅から算出したひずみは、セメントペ ースト単体のものより大きい結果となった。この ことから、損傷(本試験ではギャップ)の有無に より、膨張材の反応や反応に伴う膨張の駆動力が 変化している可能性が示唆された。
- (3) 本実験の X 線 CT 画像(0.088mm/pixel) では,骨 材間のひび割れを確認することができなかったが, DIC では骨材の密集している場所に膨張ひずみが 確認された。また数値解析では骨材間の距離が近 いほど主応力が大きくなっているため,骨材間で のひび割れは骨材の距離が近い場合に発生しやす いことが考えられる。

謝辞

本研究は、日本コンクリート工学会 2018 年度研究助 成および、第 32 回セメント協会奨励金から補助を受け て実施した。また、X 線 CT 撮影に際し名古屋大学丸山 教授にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- D.Heinz, U.Ludwig : Mechanism of subsequent Ettringite Formation in Mortars and Concretes After Heat Treatment, Proceedings of the 8th International Congress on Chemistry of Cement, pp.189-194, 1986
- C.Famy : Expansion of heat-cured Mortar, Ph.D.Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1999
- 吉田夏樹:DEFの材料科学的診断に関するレヴュー および共同試験、「DEFのリスクを考える」に関す るシンポジウム、Vol.1、pp.85-86、2019.9
- 4) 岩崎訓明:セメントペーストと骨材の付着機構,コ ンクリート工学, Vol.19, No.11, pp.96-99, 1981
- 5) 与那嶺一秀,川端雄一郎,高野大樹,小川章一,柴 田真仁:DEFによるコンクリートの膨張及びひび割 れ挙動に関する検討,「DEFのリスクを考える」に 関するシンポジウム, Vol.1, pp.85-86, 2019.9
- 6) 加藤佳孝,魚本健斗:構成材料の空間的特性を考慮 したコンクリートの有効拡散係数の予測モデル,コ ンクリート工学論文集, Vol.16, pp.11-21, No.1, 2005
- 7) 加藤佳孝,魚本健斗:細骨材の量と比表面積が遷移
 帯形成に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文報
 告集, Vol.20, No.2, 1998