

1. 研究開始当初の背景

我が国の社会インフラを支えるコンクリート構造物の長寿命化を実現する上で、アルカリシリカ反応(以下、ASR)、塩害、中性化といったコンクリートの劣化現象を適切に評価し、健全度評価に反映させることは極めて重要である。中でも、ASRにおいては、かつては認識が極めて低かった劣化であったものの、1980年代以降、全国的に被害が報告されるようになってるとともに、1990年代後半からは、コンクリート構造物の耐荷特性に深刻な影響を及ぼす鉄筋破断が報告されるようになった。このASRの劣化現象に関する課題として、ASRの判定、経時性を考慮したひび割れ進展メカニズムの解明、履歴膨張量の評価、残存膨張量の評価、定量的な劣化度評価ならびに補修補強方法の提案などがあげられる。

目下、ASRの判定法としては、化学法、JCI-DD2法をはじめとして国内外の規格に準じた汎用性の高い試験法が採用される一方、専門性が極めて高いコンクリート組織の薄片観察による観察も普及しつつある。岩石学・鉱物学的評価では、ASRの反応性について評価可能である一方、構造物の管理においては膨張挙動ならびに膨張に準じて生じる材料学的、構造的変状に関する評価も重要となる。ASRは反応、膨張期間がいずれも長期間にわたり、膨張挙動、中でも履歴膨張の評価が大変困難とされる。

通常の点検手法では、コンクリート表面の劣化を対象としていることが多いが、ASRはコンクリート内部の劣化が表面に顕在化することが指摘されており、内部の劣化状況がコンクリート表面に及ぼす影響について適切に評価することが求められる。しかしながら、構造物からのコンクリートコアの採取や超音波伝播評価では不十分であり、空間性や着目した評価手法の提案が望まれる。さらに、構造物の長寿命化を推進していくうえで、構造物の健全度について経年的に評価することが重要とされており、経時性に着目したASRの劣化度評価が期待されている。

このような課題の解決に当たり、本研究では光学計測技術に着目した。光学計測技術とは、レーザー測距や図-1に示すデジタル画像創刊法を用いて、対象物の長さ変化を計測する手法である。1990年以降のデジタル技術の発達によって、安価で高性能なデジタル製品、例えば2000万画素程度の解像度を有するデジタル一眼カメラや、1億画素超のラインセンサなどが入手可能となった。光学的全視野計測技術は、こういったデジタル画像をもとに対象物の変形を面的に評価することのできる手法であり、医学、機械、農学、土木分野等で広く活用されている技術である。光学計測技術の多くは、対象物に非接触の状態での計測が可能なることから、接触計測にない種々の優位性を有し、接触計測との併用により、より詳細で多種にわたる知見や成果



(a) ASRで劣化した橋脚



(b) コンクリート膨張による鉄筋破断

写真-1 ASR劣化した構造物事例

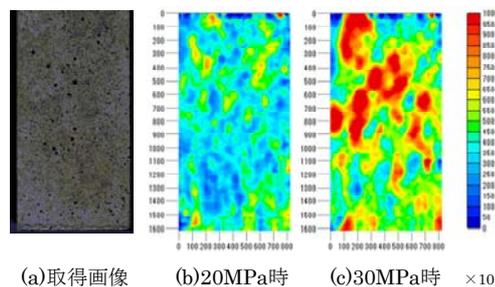


図-1 デジタル画像相関法適用事例
(一軸圧縮応力を受けるコンクリート角柱の最大主ひずみ分布)

を得ることが可能となる。

以上より、光学的全視野計測技術によって、経時的なASRによる膨張進展機構を明らかにすることが期待できると考えられる。さらに、環境条件によっては、これまで未解明であった骨材周辺からのひび割れ進展機構を明らかにできると考えられる。これらのデータを用いて、面的なひずみエネルギー評価に基づいた空間的な膨張挙動を定量評価することで、経時性を考慮したASRの劣化進展メカニズムの提案が可能である。

2. 研究の目的

前述の学術的背景を踏まえ、本研究は以下の点を明らかにすることを目的とする。

(1) 光学的全視野計測技術による応力解放法を活用したASRにおける履歴膨張量の定量

評価

(2)棒形スキャナによって空間性を考慮した ASR における膨張挙動の評価

(3) 光学的全視野計測技術に基づいたひずみエネルギーによる ASR の膨張特性評価

3. 研究の方法

本研究では、アルカリシリカ反応の劣化状況の把握と、劣化にともなう変形ならびに材料特性の変化について評価を行う。そこで以下に示す手法を用いて、研究を展開した。

(1)実構造物を対象としたアルカリシリカ反応の内部劣化状況の把握

まず、実構造物におけるアルカリシリカ反応の劣化状況を把握することで、空間的な変状の把握を行うことが可能であると考えられることから、アルカリシリカ反応を呈したコンクリート構造物を対象に、棒形スキャナを用いた内部観察を実施し、劣化の特徴について評価した。対象は、架設から 30 年以上が経過した鉄筋コンクリート部材とした。この観察結果に基づいて、大型コンクリート供試体における供試体条件ならびに測定内容等を決定することとした。

(2)屋外曝露を行った大型供試体による履歴膨張量の評価

ASR の劣化は 10 年以上の長年月に及ぶことから、短期間での曝露環境では、十分な検討が行えない。そこで、ASR を呈した既設の実験供試体を対象に、円形コアを削孔し、応力解放によって生じる変形量をデジタルカメラにて撮影し、デジタル画像相関法によって、最大主ひずみと最小主ひずみを用いて解放時のエネルギーを計測した。

供試体は、反応性粗骨材と非反応性細骨材を使用したコンクリートとした。水セメント比は 47% である。主筋として SD295 の D13 を、帯筋として SD295 の $\phi 6$ を使用した。アルカリシリカ反応が顕著に進行するように、練混ぜ水に水酸化ナトリウムを溶解させた。供試体は作製後 8 週間後に曝露を開始し、約 2 年後、応力解放法を実施した。応力解放時には、撮影対象面にあたるコンクリート表面を洗浄・乾燥させた後、油性塗料を塗布し、デジタル画像相関法を適用するためのランダムパターンを形成した。その後、 $\phi 50 \sim \phi 100 \text{mm}$ の削孔を行い、削孔前後の画像をもとにデジタル画像相関法により応力解放量を計測した。

応力解放量の計測では、マルチロゼット法を採用し、円周方向の変形量を複数箇所計測した²⁾。同手法は、1 つのデータのみを収集することが多いひずみゲージ法と比較して、32 箇所計測のデータを基に算出することから、空間性について評価することが可能となる。

(3)棒形スキャナを用いた内部変化の空間的評価

促進養生した大型供試体を対象に、作製直



(a)棒形スキャナ



(b)棒形スキャナ削孔箇所



(c)棒形スキャナ撮影画像

写真-2 棒形スキャナを用いた ASR 劣化コンクリートの内部状況

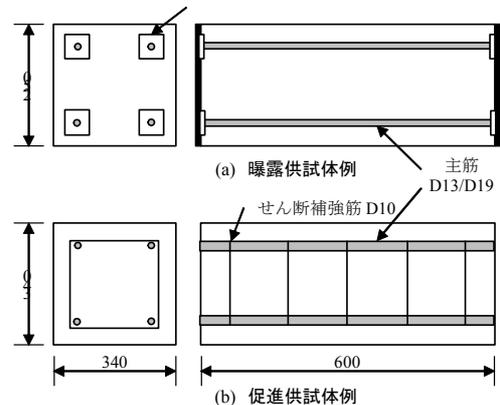
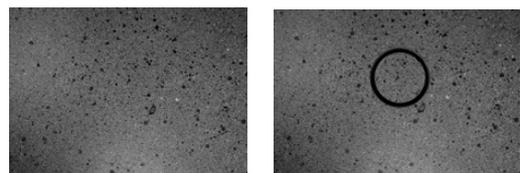


図-2 供試体例



(a) コア削孔前 (b) コア削孔後

写真-3 デジタル画像相関法に用いたコア削孔画像例

後から劣化時に至るまでのコンクリートの内部変化について、棒形スキャナで経時的に計測し、内部の変状ならびに、空間的な変形の把握を試みた。供試体は、曝露供試体と比較して、かぶり部と内部の空間を十分に確保するため、断面を大きくするとともに、主筋径を大きくし、鉄筋による拘束効果が大きくなるように配慮した。材料として、反応性粗骨材を粗骨材容積の約40%使用し、変状を呈する粗骨材と変状を呈さない骨材を混入させ、その相違を観察することとした。水セメントは50%とした。曝露供試体と同様に、水酸化ナトリウムを練混ぜ水に入れて劣化が顕著になるように配慮した。促進環境は、60℃相対湿度90%以上の養生槽内への静置とし、計測に際しては、事前に20℃前後の環境に1日以上静置させた。

棒形スキャナで取得する画像は、長期間にわたる計測となる。削孔前後で撮影する応力解放法の画像取得と異なり、経時的な変化による表面模様の変化が考えられる。このことから、2週間程度と、計測間隔を短くして変形量を計測し、積算することとした。

(4) ひずみエネルギーに着目した ASR の劣化度評価

ASR の膨張挙動によってコンクリートに発生する単位体積当たりのエネルギーを、膨張に対するひずみエネルギー U と定義した場合、コンクリートを弾性体と仮定すると、 U は式(1)に示すとおり、履歴膨張時におけるひずみエネルギーと応力解放時におけるひずみエネルギーの和で表される。

$$U = \int \sigma d\varepsilon + \int \sigma' d\varepsilon \quad \text{式(1)}$$

理論上、同一材料・配合・環境であれば、拘束条件に関わらず、ひずみエネルギーは同じであると考えられる。自由膨張では、応力解放時ひずみエネルギーが0であることから、履歴膨張によるひずみエネルギーのみとなる。一方、拘束されたコンクリートに蓄積されるひずみエネルギーは、自由膨張におけるひずみエネルギーから拘束下における履歴膨張ひずみエネルギーを差し引いた分となる(式(2))。このエネルギーは、応力解放時にすべて解放されることとなる。

$$U_{sr} = U_{free} - U_{res} \quad \text{式(2)}$$

この手法を用いて、応力解放時のエネルギーについて評価した。

4. 研究成果

写真-2(c)は、アルカリシリカ反応を呈した実構造物を削孔し、棒形スキャナで観察した際の内部写真を示す。一般に外観観察では、コンクリート表面のみに着目した評価がなされる。コンクリート表面周辺では、白線で示すように表面から深部に向け、配力鉄筋と

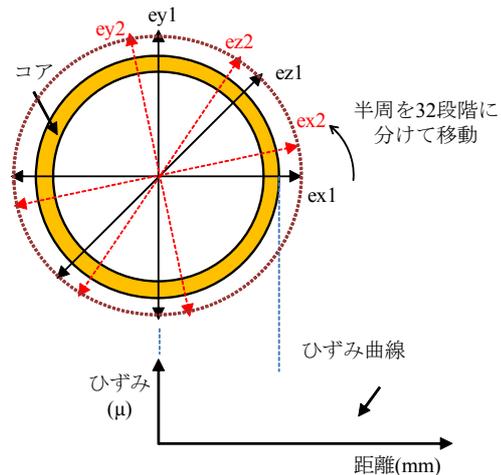


図-3 マルチロゼット法

方向	軸方向			
部材	主筋	コンクリート		
計測方法	履歴膨張		応力解放	
	ゲージ		DICM	
単位	×10E-6			
データ	1410	2080	47	1809
方向	軸直角方向			
部材	コンクリート			
計測方法	履歴膨張		応力解放	
	ゲージ		DICM	
単位	×10E-6			
データ	3570	-71	1653	

表-1 曝露供試体のひずみデータ例

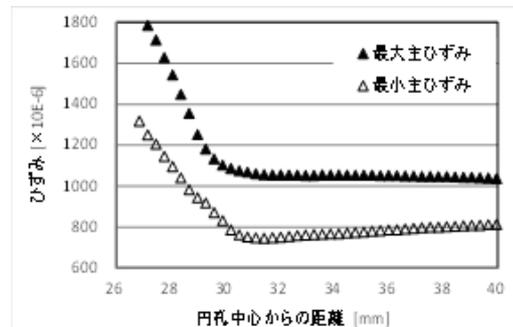


図-4 マルチロゼット法による応力解放ひずみ(最大・最小主ひずみ)



写真-4 促進試験供試体(促進64日目)
(42日時点：棒形スキャナ用コア2箇所)

直行する伸びるひび割れが確認された。一方、配力鉄筋より深部では、配力鉄筋と平行なひび割れが確認された。この傾向は他の複数構造物の内部観察でも同様であった。このことから、コンクリート内部と表面近傍のひび割れの進展方向が相違するケースの存在が確認された。内部では、骨材の膨張により、外部では、内部からの膨張作用により、それぞれ美割れが発生し、その要因の相違が、ひび割れの進展に影響したものと推察される。

表-1 は、曝露供試体を対象に、曝露終了後の主筋方向および主筋直角方向で計測した各ひずみの結果例を示す。表中のゲージ表記は、ひずみゲージ、ダイヤルゲージによる曝露期間中計測値、DICM は応力解放法時にデジタル画像相関法によって算出したひずみを示す。一般に、コンクリートの主筋内側と外側(かぶり部)では、鉄筋による拘束効果の有無により、ASR 膨張にともなう膨張挙動に相違があると考えられる。このため、コンクリート表面は、鉄筋による拘束効果が少なく、膨張にともなうひび割れが発生しやすい。さらに、主筋量が帯筋量よりも卓越している場合には、主筋に沿ったひび割れが多くみられ、主筋直角方向における見かけのひずみが大きくなると考えられる。

図-4 は、マルチロゼット解析による最大主ひずみと最小主ひずみの距離変化を示す。コアの外縁近傍では、削孔時における応力集中の緩和により、計測されるひずみが大きくなる。一方、外縁から離れるにしたがい、応力集中による影響が低減することでひずみが減少したと考えられる。以上より、本計測方法によって、応力解放にともなうコンクリート表面におけるひずみの変化を平面的に評価可能であることが示された。

写真-5 は、促進試験供試体を対象に実施した棒形スキャナの内部観察結果を示す。促進試験粗骨材のうち、色の薄い反応性骨材では、材齢の経過とともに表面がより薄い色になるとともに、一部では白色析出物が骨材表面の周囲に発生した。色の濃い非反応性骨材では変状は確認されていない。長期的に計測された棒形スキャナの画像を基に、劣化の変状を目視にて確認可能であることが示された。

図-5 は、曝露供試体を対象に、履歴膨張によるひずみと応力解放法によって得られたひずみを基に算出したひずみエネルギーを示す。鉄筋がない場合と、主筋のみの場合、主筋と帯鉄筋が配筋された場合について比較した。いずれの供試体も、履歴膨張ひずみエネルギーと応力解放ひずみエネルギーの和が概ね一致していることが見てとれる。図-6 は、履歴膨張から得られるひずみエネルギーと応力解放から得られるひずみエネルギーとの関係を示す。自由膨張に近い場合は、履歴膨張が少なく、拘束されている場合には、解法膨張が大きい傾向がみられる。

以上のことから、ASR 膨張で生じるひずみ

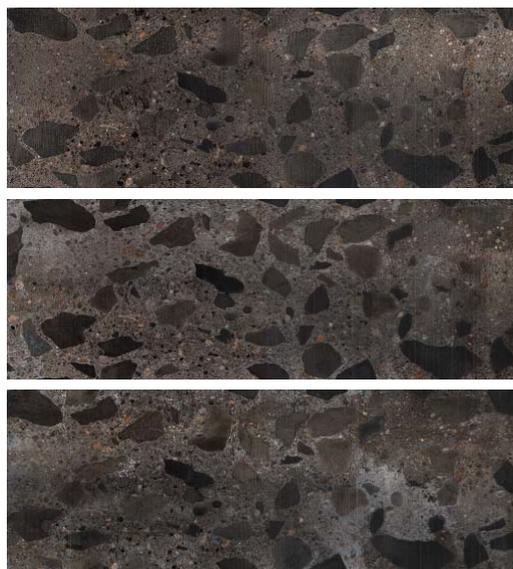


写真-5 棒形スキャナによる内部観察 (上: 1日目、中: 28日目、下: 42日目)



図-5 履歴ひずみと応力解放法によるひずみエネルギー(曝露試験供試体)

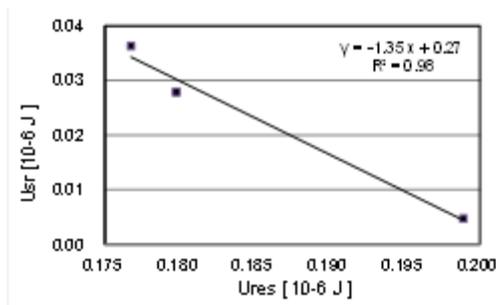


図-6 アルカリシリカ反応によって生じるひずみエネルギー評価 (曝露試験供試体)

0

エネルギーは、ひずみエネルギーの保存則に基づき、履歴膨張エネルギーと応力解放ひずみエネルギーの和として評価可能であることが示唆された。

まとめとして、本研究で得られた知見を示す。

(1)アルカリシリカ反応に対して、デジタル画像相関法による応力解放法は、ひずみゲ-

ジ式応力解放法より高精度の計測結果が得られる。

- (2) マルチロゼット法による最大・最小主ひずみを基に、拘束されたコンクリートに対する ASR 膨張の等方性・異方性を評価可能である。
- (3) 棒形スキャナにより、コンクリート表面から内部への劣化の程度を評価可能である。
- (4) マルチロゼット法によるひずみエネルギーに基づいて、ASR 膨張の評価が可能である。

<引用文献>

- ① 日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿委員会報告書、2014
- ② 内野正和、岡本卓慈、肥田研一：デジタル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法による円孔周辺のひずみ解析手法の検討、実験力学、9-2、2009、96-102

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hiroki GODA, et al :Evaluation on expansion characteristics of concrete by the stick scanner and stress release method、Proceedings of The International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics、vol.15、2015 (Submitted)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.civil.kyutech.ac.jp/pub/goda-h/conken_hp/Material/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

合田 寛基 (GODA、Hiroki)

研究者番号：20346860

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

川端 雄一郎 (KAWABATA、Yuichiro)