全視野非接触光学計測技術を活用した マルチロゼット応力解放法の ASR 劣化評価への展開

合田 寛基

九州工業大学大学院工学研究院建設社会工学研究系助教

概要:アルカリシリカ反応(ASR)により劣化したコンクリートを対象に,光学的全視野非接触計測のひとつ であるデジタル画像相関法(DICM)に着目し,同手法による応力解放法を用いた残留ひずみの評価によって試 みた。その結果,DICM によるマルチロゼット解析法の適用の可能性が確認されるとともに,ひずみエネル ギーを用いた ASR 膨張の評価が可能であることを確認した。

1. はじめに

近年の計測機器の高性能化,汎用化にともない, 非接触計測技術が多分野にわたり適用されるよ うになった。建設分野においても、これまで用い られていたアコースティックエミッションや赤 外線計測技術に加え、レーザードップラーやデジ タル画像を用いた計測技術が展開されつつある。 中でも、デジタル画像相関法は、デジタル一眼カ メラ, ラインスキャナ, スティックスキャナとい った計測機器の開発,発展とともに,橋梁のたわ み計測をはじめ、鋼材・コンクリートの応力集中 解析や圧縮破壊特性の計測,径間長さを計測対象 としたマクロ計測などに用いられている 1).2).3).4,).5)。このような積極的な試みの背景として, 長寿命化を主とした維持管理を必要とする建設 構造物が増加する一方,管理者がコスト縮減を求 められており,操作が簡便かつ効率的で面計測が 可能な全視野非接触計測への関心が高まってい る。

これらを踏まえ、著者らは、建設部材を対象と した劣化・損傷メカニズムの解明に対して、全視 野非接触計測技術の適用を試みている。本研究で は、コンクリートの代表的な劣化現象であるアル カリシリカ反応(ASR)の膨張挙動に着目し、マル チロゼット解析による応力解放法の適用性につ いて検討した。図-1に示すアルカリシリカ反応 は、特定の骨材を有するコンクリートで生じる劣 化現象であり、10年以上の長期間にわたり、膨 張とともにひび割れや強度低下を引き起こす。 1980年以降、全国各地でASRによる劣化事例の 報告がなされており、国道・高速橋梁では、全体 の約1.2%がASRであると報告されている。ASR で劣化したコンクリートに対して適切な補修補 強を実施するためには、劣化開始時から測定時ま での膨張量, すなわち履歴膨張を把握することが 重要である。しかしながら, ひずみゲージを用い た応力解放法では, 計測手法が煩雑であることに 加え, 局所的な評価でばらつきが大きいことから, 十分な評価が困難であった。そこで, 内野らの提 案するマルチロゼット解析を用いた応力解放法 によって, ASR の履歴膨張量を評価した⁶⁾。マル チロゼット法は, デジタル画像相関法の特長であ る面的な計測を活かし, 開口部からの距離変化に ともなうひずみを計測する手法である。ひずみゲ ージによる応力解放法と異なり, 削孔時に断線す



(a) 劣化した橋脚



(b) コンクリートの膨張による鉄筋破断 図-1 ASR によって劣化した構造物事例

ることもなく,また開口径がゲージ長の制約を受けないことから,小径コアであってもばらつきの 小さい結果が期待される。

本報では、約 18 ヶ月にわたり暴露した試験体 を対象に、マルチロゼット法による応力解放法を 実施し、鉄筋による拘束条件の相違の判別を試み るとともに、適用の妥当性について検証した。

2. 実験方法

2.1 試験体概要

試験体には、ASR を生じる反応性骨材を粗骨材 として使用した。細骨材には、非反応性の石灰石 砕砂を使用した。セメントには普通ポルトランド セメントを使用した。コンクリートのアルカリ総 量は、練混ぜ水に NaOH 水溶液を添加し、6.0kg/m³ 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 φ 6 を使 用した。

表-1に供試体種別を、図-2に供試体構造一 般図をそれぞれ示す。供試体寸法は、250×250 ×600mm、300×300×600mmの2種とした。Type1 は、コンクリートを拘束する主筋ならびに帯筋を 配置していない。Type2は、主筋方向のみを拘束 するため、主筋を4本配置した。Type3ならびに Type4は、4本の主筋ならびに5本の帯筋によっ て主筋方向および主筋直角方向を拘束した。ASR 膨張にともなって主筋の拘束効果が低減するこ とを抑制するため、50×50×6mmの鋼板プレー トを主筋の両端に溶接定着した。供試体の250× 250mm および 300×300mmの端面には、厚さ約 2mmのエポキシ樹脂を塗布した。

供試体は,打設後 56 日目に(独)港湾空港技術研 究所の海水シャワー暴露試験場に暴露した。暴露 期間は,538 日とした。暴露期間終了後,供試体 表面を洗浄し,表面を十分に乾燥させた。なお, コンクリート打設時,側面に位置していた表面に 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作成した。

2.2 デジタル画像相関法とマルチロゼット解析 法

画像撮影には、解像度 1400 万画素のデジタル 一眼カメラを使用した。撮影面は、油性塗料の塗 布面とした。撮影範囲は、約 285×185mm である。 ここで、1 ピクセルは約 0.06mm に相当する。撮 影では、図-3 に示すとおり、カメラならびに供 試体周辺を暗幕で覆い、卓上ライトによって安定 した照度を確保した。次に高剛性のスタンドに固

表一1 供試体種別

| 供試体 | 主筋 | 帯筋 | 備考 |
|-------|--------|-------|------|
| Type1 | 0. 00% | 0.00% | |
| Type2 | 0.85% | 0.00% | |
| Type3 | 0.85% | 0.19% | |
| Type4 | 0.85% | 0.16% | かぶり大 |



図-2 供試体構造一般図



図-3 撮影状況(コア開孔前)

定したカメラの直下に供試体をセットし, 削孔前 の画像を撮影した。次に,供試体をスタンドから 下ろし,撮影範囲内におけるひび割れの少ない領 域で φ 52mm のコアを削孔した。削孔深さは直径 の 2 倍に相当する約 100mm とした。削孔後,供 試体表面を十分に洗浄,乾燥した後,再度,カメ ラスタンドに供試体をセットし,削孔後の画像を 撮影した。なお,削孔前後で撮影範囲が変化しな いように,カメラスタンドに鋼製アングルを用い たガイドを取り付けた。図-4 は,コア削孔前後 における画像例を示す。

デジタル画像相関法では、内野らの提案するマ ルチロゼット解析法に準じて計測した^の。図-5 に示すように、一軸応力σが作用している場合、 円孔を削孔することによって、開口部外縁では2 σ、無限遠に近づくに従い0に収束する。マルチ ロゼット解析法では、コア外縁を起点とし、同一 円周上に等間隔で64個の計測点を作成し、図-6 に示すとおり、コアの中心を跨ぐ2点間のひずみ を基にロゼット解析を行った。ロゼット解析によ って、式(1)、式(2)にそれぞれ示した最大主ひず み、最小主ひずみについて、同一円周上につき 32 個のひずみデータが得られる。本研究では、 その32 個のデータを平均し、代表値とした。

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{2\left\{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + \left(\varepsilon_y - \varepsilon_z\right)^2\right\}}$$
(1)

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{2\left\{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + \left(\varepsilon_y - \varepsilon_z\right)^2\right\}}$$
(2)

2.3 接触式計測方法

ASR による膨張特性を評価するため,供試体作 成時に主筋へ測定長 2mm のポリエステル製ひず みゲージを貼付した。また,暴露開始時にコンク リート表面に真鍮製コンタクトチップを設置し, ダイアルゲージを用いて,主筋方向,主筋直角方 向ともに標点間距離 100mm における長さ変化を 測定した。ひずみゲージおよびダイアルゲージの 結果は,同一方向について得られた計測結果の平 均値を,それぞれの代表値とした。

また,接触式応力解放法として,測定長 30mm のポリエステル製 3 軸ひずみゲージを用いた計 測を実施した。同計測法は,コア削孔前にコア中 心部におけるひずみの初期値を計測し,削孔後, 再結線してひずみを計測し,その差分から解放ひ ずみを算出するものである。



(a) コア削孔前



(b)コア削孔後 図−4 DICMに使用された画像 ←→ ↑ ↓ ↓





図-6 マルチロゼット解放法によるひずみ分布

| 方向 | 輪方向 | | | | 軸直角方向 | | |
|-------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| 部材 | 主筋 | コンクリート | コンクリート | コンクリート | コンクリート | コンクリート | コンクリート |
| 計測方法 | 履歴膨張 | 履歷膨張 | 応力解放 | 応力解放 | 履歴膨張 | 応力解放 | 応力解放 |
| | ひずみゲージ | ダイアルゲージ | ひずみゲージ | DICM | ダイアルゲージ | ひずみゲージ | DICM |
| 単位 | μ | μ | μ | μ | μ | μ | μ |
| Type4 | 1410 | 2080 | 47 | 1809 | 3570 | -71 | 1653 |

表-2 ひずみゲージと DICM によって計測されたひずみの比較

3. 結果および考察

3. 1 接触式ひずみ計測と DICM の比較

表-2 に, Type4 における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を示す。主筋 方向では,暴露試験期間中に,主筋で発生したひ ずみが 1410 μ を示した。一方,ダイアルゲージ によって接触計測したコンクリート表面のひず みは,2080 μ であった。また,応力解放法による 計測では,ひずみゲージで 47 μ ,DICM で 1809 μ を示した。主筋直角方向におけるコンクリート 表面のひずみは、ダイアルゲージで 3570 μ を示 した。応力解放法による計測では,ひずみゲージ で-71 μ ,DICM で 1653 μ を示した。

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。

暴露期間中におけるダイアルゲージを用いた 膨張量計測では,主筋のひずみよりもコンクリー トの履歴ひずみが大きく,主筋直角方向のひずみ が主筋方向のひずみよりも大きかった。このこと から,暴露期間中の膨張挙動に関して,拘束効果 による膨張の方向性が確認された。

一方,暴露試験後における応力解放法を用いた ひずみ計測結果では、DICM による計測結果が、 鉄筋ひずみやコンクリートの履歴ひずみに近い 値を示しているのに対し、ひずみゲージの値は著 しく小さいことが見てとれる。ひずみゲージによ る計測は、1箇所の測定値に基づいた評価である ことから、局所性を有する。さらに、削孔時のひ び割れ進展による影響を受けやすいことから、得 られるひずみに対する信頼性が低いと推察され る。DICM では、コア内側に比べて、削孔による ひび割れ拡大の影響が少ないコア外側を計測対



図-7 コア中心からのひずみ変化

象としていることから,精度の高い計測結果が得 られると考えられる。以上より,応力解放法によ って得られた解放ひずみは,かぶり部のひび割れ による影響を受けるものの,鉄筋やコンクリート の履歴膨張との相関関係を有する可能性が示唆 された。

3. 2 DICM を用いた応力解放法による ASR 膨張 の評価

図-7は、Type1~Type3における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。ここで、コア外縁はコアの中心から26mmの距離に位置する。いずれの供試体も、最大・最小主ひずみにおいて、計測可能な最小半径であるコア外縁近傍の27mmで最大値を示し、外縁から離れるにしたがって減少している。コア外縁から10mmほど離れた円周上では、各ひずみは最大値の40~50%を示した。

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。

表-3 は、コア中心から 36mm 離れた場所にお ける各供試体の主ひずみを示す。 ϵ_{max} について は、Typel が最小となり、Type3、Type2 となるに つれて大きくなった。 $\epsilon_{max} \ge \epsilon_{min}$ の差について も同様に、Type1 < Type3 < Type2 の順に大きくな った。Type2、Type3 では、主筋や帯筋といった 鋼材によって ASR 膨張が拘束されることから、 膨張力が蓄積され、削孔時の解放ひずみも大きく なったと考えられる。

次に、 $\varepsilon_{max} \ge \varepsilon_{min}$ の差である $\Delta \varepsilon$ については、 理論上、等方性の膨張ではせん断ひずみが存在し ないことから、 $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{min}$ ($\Delta \varepsilon = 0$)となる。一方、 異方性に富む変形では、 $\varepsilon_{max} \ge \varepsilon_{min}$ の差が大き く、 $\Delta \varepsilon$ が増加する。計測結果では、無筋で自由 膨張に極めて近い Type1 が最小値を示し、主筋が 卓越し、変形の異方性に富む Type2 が最大値を示 した。以上より、マルチロゼット解析法を用いた 応力解放法によって、前述に示した理論通り、鉄 筋の拘束によって ASR 膨張の方向性に相違がみ られることが明らかとなった。

3.3 ひずみエネルギーを用いた ASR 膨張の評価

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(3)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。

表-3 最大・最小主ひずみの比較

| | ε _{max} μ | $arepsilon_{min}$ | $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ ($\Delta \varepsilon$) μ |
|-------|-----------------------|-------------------|--|
| Type1 | 240 | 180 | 60 |
| Type2 | 610 | 460 | 150 |
| Type3 | 460 | 390 | 70 |



供試体種別

図-8 履歴ひずみと応力解放法によるひずみエネルギー

$$U = \int_{-\infty}^{x} \sigma \, d\varepsilon + \int_{-\infty}^{x'} \sigma' d\varepsilon$$
$$= \frac{1}{2} E \varepsilon^{2} + \frac{1}{2} E \varepsilon'^{2}$$

(3)

ここで、E:コンクリートの静弾性係数[N/mm²], σ :履歴膨張で生じる応力[N/mm²], σ ':応力解 放時に解放される応力[N/mm²], ϵ :履歴膨張ひ ずみ、 ϵ ':応力解放ひずみ

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。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。これを式で表すと式 (4)となる。

$$U_{sr} = U_{free} - U_{res} \tag{4}$$

ここで、U_{sr}:拘束下におけるコンクリートの応 力解放ひずみエネルギー、U_{free}:自由膨張におけ る履歴膨張ひずみエネルギー、U_{res}:拘束下にお けるコンクリートの履歴膨張ひずみエネルギー

本節では, 拘束された供試体における履歴膨張

ひずみエネルギーと応力解放ひずみエネルギー の相関について,式(3),式(4)をもとに検討した。 なお,コンクリートの静弾性係数は,暴露試験終 了後に採取したコアを対象とする一軸圧縮試験 に基づいた。履歴膨張時における代表ひずみは, 暴露期間終了時における主筋方向ならびに主筋 直角方向のひずみを採用した。応力解放時におけ る代表ひずみは,マルチロゼット解析法による外 縁近傍のひずみを基に算出した。

図-8は、Type1~Type3におけるひずみエネ ルギーを示す。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。これは、 式(3)に示したひずみエネルギーの保存則と一致 した結果であることを示す。以上のことから、 ASR 膨張で生じるひずみエネルギーは、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。

図-9は、UsrとUfree-Uresとのひずみエネルギ ーの比較を示す。Type1~Type3 における両者の 関係は、正の相関を有していることが見てとれる。 このことから、鉄筋拘束によって蓄積されたひず みエネルギーは、応力解放法によって解放された ひずみエネルギーと相関があり、実験において式 (4)に基づいた評価が可能であることが示された.

本研究では、膨張にともなってひび割れが進展 するとともに静弾性係数が低下するコンクリー トを弾性体と仮定していることから、より精度の 高い結果を得るために、ひび割れの発生にともな うエネルギー損失や鉄筋とコンクリート間にお ける付着評価を行うことが今後の課題である。

以上のことから、DICM を用いたマルチロゼッ ト解析は、履歴膨張も含めた ASR 膨張挙動に対 する評価が可能な手法になりうることを明らか にした。

4. まとめ

本研究では、アルカリシリカ反応によるコンク リートの膨張挙動に対して、マルチロゼット法を 用いた応力解放法の適用性を行った。以下に得ら れた知見を示す。

- 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、ひずみゲージ式 応力解放法より高精度の計測結果が得られる。
- 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。



図-9 Ufree - Ures と Usr の関係

 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。

なお,本成果の一部は, IABMAS2012 に登稿中 である.

参考文献

- 米山聡,北側彰一,岩田節雄,谷和彦,北村幸嗣, 菊田久雄:デジタル画像相関法を用いた橋梁の非 接触たわみ分布測定,非破壊検査, Vol.55, No.3, pp.119-125,2006
- 出水享,松田浩,森田千尋,伊藤幸広,合田寛基: 光学的計測法の実橋載荷計測への適用と残存耐荷 力評価,九州建設弘済会研究開発助成事業報告書, 2011
- 野間康隆,渡辺健,二羽淳一郎:画像解析による 高強度コンクリートの圧縮破壊特性の可視化なら びに評価,土木学会論文集E, Vol.66, No.1, pp.68-79,2010
- 出水享,松田浩,伊藤幸広,甲斐靖志:48 年経過したポストテンション PCT 桁橋の各種調査,コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1483-1488, 2011
- H.Goda, M.Uchino, K.Yamaguchi, M.Hibino and H.Matsuda : Base Study on Measure of Transformation of Concrete Structures Used by Digital Image Correlation Method, Proceedings, IABMAS, Vol.5, CD-R, 2010
- 6) 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, Vol.9, No.2, pp.96-102, 2009
- H.Goda, Y.Kawabata, M.Uchino, M.Iwanami and M.Hibino : Application of Digital Image Correlation Method to Strain Release for ASR Deterioration, Proceedings of ICAAR, Vol.14, 2012 (submitted)