

論文 ASR 劣化した無補強コンクリート部材の表面ひび割れの進行過程

青山 實伸^{*1}・石川 裕一^{*2}・川村 満紀^{*3}

要旨: ASR 劣化の生じたカルバートの無補強コンクリート部材でひび割れ状況を調べた結果、表面に垂直に進行していたひび割れは、ある深さになると方向を約 90°変えてコンクリート表面に平行に進行することを確認した。この特異なひび割れの進行過程の詳細を解明するために、ひび割れ発生箇所近傍から採取したコアを用いて強度性状等を調査した。その結果に基づいてひび割れ進行の 2 次元モデルを構築し、FEM 解析によって部材内部における ASR 膨張とひび割れ進行の関係の解明を試みた。その結果、ASR 膨張の活発な層と膨張が緩やかに継続する領域との境界付近で、巨視ひび割れの進行方向が約 90°変わることが明らかになった。

キーワード: ASR, ひび割れ進行過程, 圧縮強度, 弾性係数, 膨張ひずみ, FEM 解析

1. はじめに

ASR によって劣化した構造物を適切に補修し維持管理を行うためには、ひび割れ発生の特徴や進行過程を含めた劣化現象を把握することが重要である。

温度および湿度を正確に管理した条件下における鍵本らの研究¹⁾では、ASR 膨張はコンクリート内部の相対湿度分布と密接に関係し、高い相対湿度が維持されているコンクリート内部では ASR 膨張が継続するが、表面近傍では徐々に相対湿度が低下するので ASR 膨張ひずみが低減することを大型コンクリート円柱 (φ 450 mm × 900 mm) を用いた実験によって明らかにし、その結果、コンクリート円柱表面近傍に発生する引張応力により表面ひび割れ (巨視ひび割れ) が生じるとしている。また、再飽和過程においては ASR 膨張が低減した表層よりさらに内部の表面からの深さ約 100 mm の中間領域はそれより内部よりも ASR 膨張が活発に進行することを見出している¹⁾。著者らは、自然条件下にあった実際の橋脚パラペット部材の切断面におけるひび割れ発生状況や ASR ゲルの観察、内部の相対湿度の測定を行った結果、鍵本らの研究における表面ひび割れと同様な過程を経て生じたと推察される巨視ひび割れが存在していることを確認している²⁾。

著者らが調査した ASR 劣化の生じたカルバート鉛直壁端面の無補強コンクリート部材中央部には、表面に垂直方向の大きなひび割れが発生していて、ひび割れは約 140 mm の深さまで進行し、その後方向を約 90°変えてコンクリート表面に平行に進行したと推察される特異なひび割れを確認した。このようなひび割れは、ASR 劣化の生じた無補強コンクリートの重力式擁壁の調査においても確認している。そこで、カルバート端面に発生している特異なひび割れの進行過程を、上述のような現地における調査結果と鍵本らの研究結果¹⁾を踏まえてモデル

化し、そのモデルに対する FEM 解析からひび割れの進行過程を追跡した。

すなわち、カルバート端面における種々の調査結果と鍵本らの研究¹⁾を踏まえて 2 次元モデルを構築して、ASR 膨張に伴うひび割れ深さごとのひび割れ先端において発生する応力度と主応力方向を FEM 解析によって求め、ひび割れの進行過程を追跡した。その結果、ASR 膨張の活発な中間領域と緩やかに膨張が継続する内部との境界付近でひび割れの進行方向が約 90° 変化することを解析によって明らかにした。

2. 劣化状況調査

2.1 カルバートの構造概要

調査の対象となった構造物は、富山県東部に位置し建設後 35 年経過し、ASR 劣化が進行している鉄筋コンクリート連続カルバートである (図-1 参照)。コンクリートの設計基準強度は 24 N/mm² であり、工事記録による示方配合を表-1 に示す。調査した部材は、図-1 の赤線



図-1 カルバート構造と検討対象部材

表-1 コンクリートの示方配合

水 W (kg)	セメント C (kg)	W/C (%)	粗骨材 G (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	AE 剤 (kg/m ³)
150	290	52	1,176	744	0.7

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 道路技術部 上席調査役 博士(工)(正会員)

*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 道路技術部 構造技術課 課長代理 博士(工)(正会員)

*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 特別技術顧問 金沢大学名誉教授 工学博士 (名誉会員)

で示す厚さ 1 m の中間の鉛直壁(配置鉄筋:垂直方向 D19 ~D22 mm で 125 mm 間隔, 水平方向 D16 mm で 250 mm 間隔)の端面部材である。この部材は、無補強のコンクリートであり、雨水の影響を直接受けている。

2.2 調査方法および調査結果

(1) ひび割れ発生状況

端面部材(高さ 5.2 m, 幅 1 m)の表面のひび割れ発生状況(目視観察)を図-2 に示す。端面部材には、細かいひび割れもあるが、中央部分には、表面と垂直方向に幅 4 mm 以上のひび割れが発生している。この幅の大きなひび割れの深さを知るため、地盤から 1.4 m の高さの部材中央部分から採取した径 160 mm, 深さ 370 mm のコアから内部のひび割れ状況を観察した。図-3 に示すように、ひび割れは深さ約 140 mm においてその方向が約 90°変化していた。なお、両壁面から 250 mm の位置で採取した径 100 mm 長さ 230 mm のコアにはひび割れは確認されなかった。

コア採取位置の鉛直壁に直交する水平面においてコア採取位置とひび割れ形状の関係を示すと図-4 のようになる。この図から、無補強コンクリート部材に発生した太いひびわれは、深さ約 140 mm の位置で、方向を変えて両側に分岐してコンクリート表面に平行に進行していることがわかる。表面に平行な部分の片側のひび割れ長さは 80~200 mm の間にある。ひび割れ幅はコンクリート表面で 4 mm, 両側に分岐する位置で 3 mm である。

(2) コンクリートの強度性状

コアによるひび割れ深さを調査した部分の近傍で、表面部(深さ 0~100 mm)と内部(100~200 mm)から径 55 mm のコアを採取して圧縮強度と静弾性係数を測定した。それらの結果を表-2 に示す。内部が表層部より圧縮強度および静弾性係数が低下していることがわかる。ASR 劣化が進行すると圧縮強度や静弾性係数が低下することが知られている³⁾。図-5 は、著者らが過去において、主に ASR 劣化が生じた構造物から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度比の関係および道路橋示方書に示される値の近似線を示したものである。道路橋示方書に示される近似線から外れて、打点が原点に近づくにつれ ASR の劣化度が大きいと判断できる。表-2 の結果を図-5 に赤丸印でプロットする。その結果、対象構造物の内部のコアの劣化度は表面部のそれよりも大きいことが明らかとなった。

(3) 湿度分布

コアによるひび割れ発生状況を調査した部分の近傍でコンクリート表面から 150 mm の深さまで、深さ 25mm ごとに、直径 20 mm のドリルで 3 箇所を削孔して採取したコンクリート粉末をプラスチック容器内に密封し、22.5 °C の環境に 24 時間以上静置した後、湿度センサー

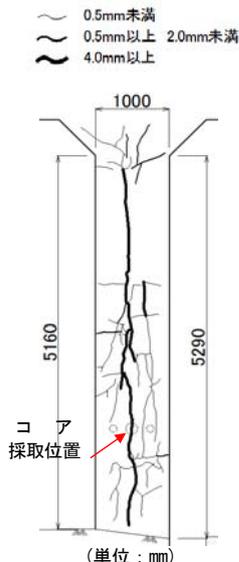


図-2 端面部材のひび割れ発生状況



図-3 コア採取位置とコアのひび割れ状況

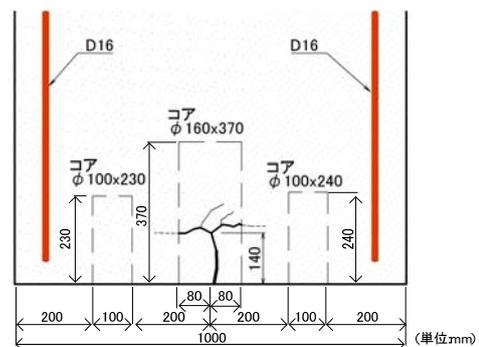


図-4 コア採取位置とひび割れ形状の関係(平面図)

表-2 コンクリートの強度性状

位置	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (10 ⁴ N/mm ²)	圧縮強度ひずみ (×10 ⁻⁶)
表面部	32.1	2.14	3030
内部	23.1	0.72	6400

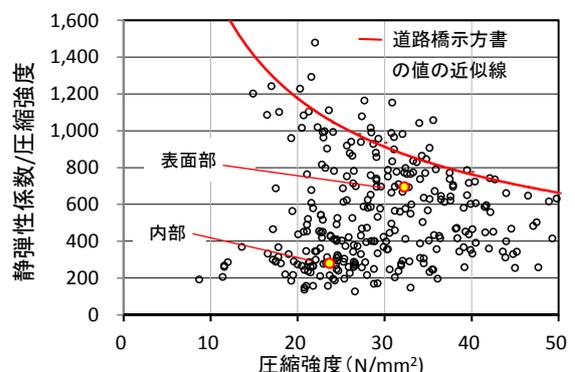


図-5 コアの圧縮強度と静弾性係数の関係

により密閉容器内の相対湿度を測定した(コンクリート粉末法による湿度測定⁴⁾)。また、コンクリート表面からドリルで削孔し(深さ 140 mm)、針状の水分計(HI-800)を削孔に挿入して、深さ 10 mm ごとの水分率(水重量/

コンクリート重量)を測定した。コンクリート表面から各深さにおける相対湿度および水分率の測定結果を図-6に示す。相対湿度は、コンクリート表面から50mmまでが85%、75mm以深が90%程度になっている。水分率は、表面付近で最も小さくなり、深くなるに従い漸増し、100mm以深で一定の値になっている。すなわち、相対湿度や水分率は、コンクリート表層部が内部より小さいことがわかる。

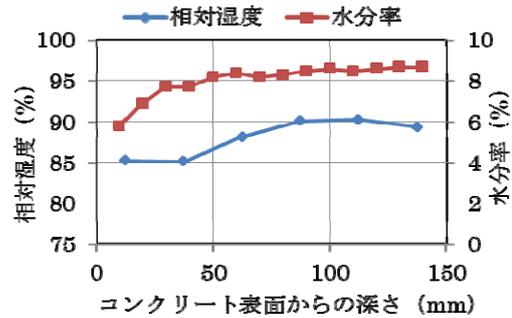


図-6 深さごとの相対湿度および水分率の測定結果

3. ひび割れ進行過程の検討

3.1 概要

カルバートの鉛直壁の水平断面をモデル化し、ASR膨張とひび割れ進行の関係をFEM解析によって追跡する。モデル化にあたっては、現地の調査結果および鍵本らの研究¹⁾を踏まえて、表面近傍の非膨張層、非膨張層に接する膨張の活発な層、膨張が緩やかに継続する内部に区分した。鉄筋の存在も反映したモデルとなっている。要素を取り除くことでひび割れ発生をモデル化して、ひび割れ深さを進行させながらASR膨張に伴うひび割れ先端の応力度と主応力方向をFEM解析で求めて、ひび割れ進行方向を推定する。

3.2 解析モデル

(1) 解析モデルの条件

解析モデルは、鉛直壁に直交する水平面(1m×2m)で表し、図-7に示す領域区分において解析を行う。この領域区分は、劣化状況調査から得られた強度性状および湿度分布の調査結果や、鍵本らの研究¹⁾を踏まえて区分したものである。劣化が進行した段階では、A領域は非膨張層と想定している。非膨張層の厚さは、図-6の相対湿度分布や著者等が橋脚パラペット部材の切断面で実施した相対湿度調査結果²⁾を参考にして60mmと設定した。B領域とC領域は想定した膨張の活発な層であり、鍵本らの研究¹⁾を参考に80mmと仮定した。B領域とC領域では材料の強度性状が異なっている。D領域は膨張が緩やかに継続する内部を想定したものである。鉄筋は、鉛直壁に配置されている水平鉄筋径D16mmと配置間隔250mmから単位容積あたりの鉄筋量を勘案し、要素寸法あたりの鉄筋量に相当するD6mmの鉄筋とみなす。各領域のASR膨張性状や層厚、材料の強度性状を表-3に示す。コンクリートの圧縮強度およびヤング係数は調査で得られた値である。引張強度は、直接引張試験に関する既往の研究より、圧縮強度の1/8.2としている⁵⁾。

FEM解析における要素分割は図-8に示すように1要素を20×20mmとして、解析の対象とする面を5,000要素に区分し、境界条件として線分OPのX方向の変位を拘束する。本研究でのFEM解析は線形解析である。また、本解析では鉄筋とコンクリートを完全付着させた弾

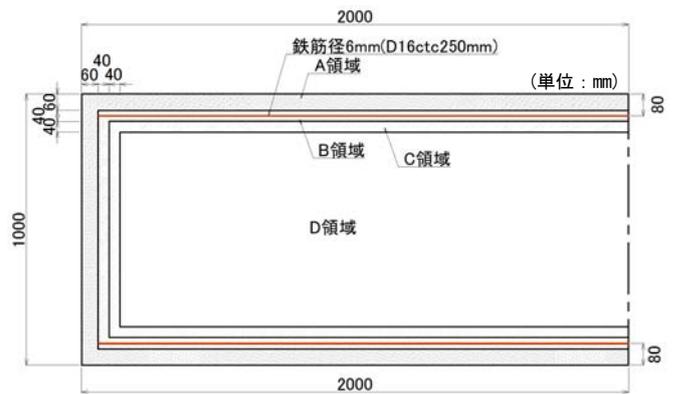


図-7 平面の領域区分

表-3 各領域の材料の諸元

領域	ASR膨張性状	層厚(mm)	強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (10 ⁴ N/mm ²)
			圧縮	引張	
A	非膨張	60	32.1	3.9	2.14
B	膨張活発	40	32.1	3.9	2.14
C	膨張活発	40	23.1	2.8	0.72
D	内部(緩膨張)	—	23.1	2.8	0.72
鉄筋 (SD295)					200

ポアソン比: コンクリート 0.17, 鉄筋 0.3

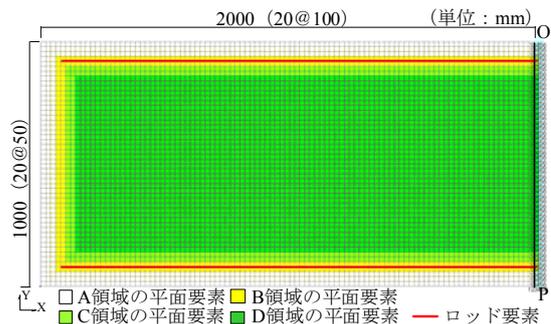


図-8 ひび割れ進行過程のFEM要素分割

性有限要素解析法を用いる。なお、解析ソフトはFemap with NEi Nastranを使用する。

(2) ひび割れ進行過程の解析方法

解析ではひび割れの進行を、ひび割れ深さまで要素を取り除くことでモデル化して、ASR膨張に伴うカルバート端面部材の中央に発生する幅の大きなひび割れの進行過程を、表-4に示す解析条件で各ステップごとに検討

を行う。ステップ1はコンクリート表面からのひび割れ深さ 60 mm, ステップ2はコンクリート表面からのひび割れ深さ 100 mm, ステップ3はひび割れ深さ 140 mm 進行した状況を想定する。ステップ4はコンクリート表面から深さ 140 mm 位置で、ひび割れの進行がコンクリート表面に平行な方向に変化した後の状況を想定する。ステップ5はひび割れがコンクリート表面に平行に片側 80 mm 進行している状況を想定する。

表-3のD領域の設定膨張ひずみは、ひび割れ先端の発生応力度と主応力方向の関係を解析によって求め、ひび割れ先端に隣接する要素のいずれかの発生応力度が引張強度に一致する膨張ひずみを求めた。ASR膨張の活発な領域の膨張ひずみは、鍵本らの研究¹⁾を参考にして内部膨張ひずみの1.3倍とする。また、カルバート端面部材の中央部のひび割れ進行と併せて鉄筋補強された側面の部材のひび割れ進行過程の検討も行う。

3.3 解析結果

各ステップの解析結果を図-9に示す。図-9の左は全体モデルのコンクリートの応力度分布、右はひび割れ部の主応力方向と発生応力度を示す。図-9に示される各解析ステップの解析結果を以下に述べる。

【ステップ1】深さ 60 mm のひび割れ先端でひび割れが到達する時点での内部膨張ひずみは、 101×10^{-6} (以下、 10^{-6} を記号 μ と表す) になる。ひび割れ先端における図中の記号 a の要素 (要素 a, 以下のステップも同様) の主応力方向については、コンクリート表面に平行であり、

ひび割れは表面に垂直に進行する。なお、ロッド要素を配置した鉄筋補強部では、ひび割れ深さ 60 mm になる内部膨張ひずみは 107μ であり、ロッド要素を配置しない無補強部とほとんど変わらない。そのときの鉄筋応力度は 28 N/mm^2 と推定される。

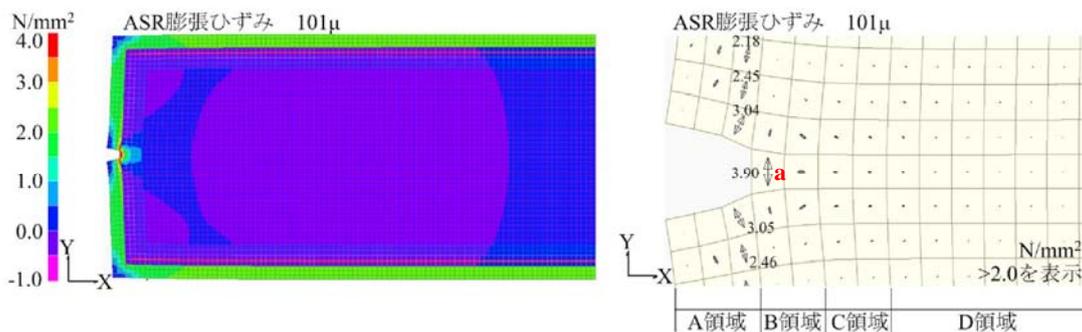
【ステップ2】深さ 100 mm のひび割れ先端にひび割れが到達する時点での内部膨張ひずみは 259μ である。ひび割れ先端部における主応力度については、要素 b が要素 c より大きいので、ひび割れは表面に垂直に進行する。また、鉄筋補強部で鉄筋にひび割れが到達する内部膨張ひずみは 154μ となる。ステップ2でひび割れが鉄筋に到達すると推察される。鉄筋にひび割れが到達する時点での鉄筋応力度は 101 N/mm^2 と推定される。

【ステップ3】深さ 140 mm までひび割れ先端が到達する時点での内部膨張ひずみは 263μ になる。ひび割れ深さ 100 mm に達した後のひび割れ進行が早いことを示している。ひび割れ先端部における主応力度については、要素 d が 2.8 N/mm^2 となり、要素 e の 2.7 N/mm^2 より大

表-4 ひび割れ進行過程のFEM解析条件

ステップ	ひび割れ進行過程	D領域の設定膨張ひずみ(μ)	膨張領域と設定した膨張ひずみ
1	深さ 60mm	101	A: 非膨張領域
2	深さ 100mm	259	B と C 領域の膨張
3	深さ 140mm	263	ひずみは D 領域の
4	水平 20mm	235	1.3 倍
5	水平 80mm	235	

【ステップ1】ひび割れ深さ 60 mm



【ステップ2】ひび割れ深さ 100 mm

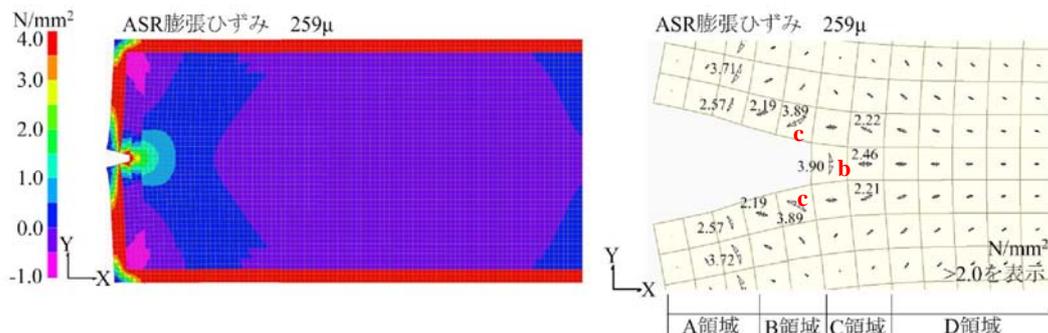
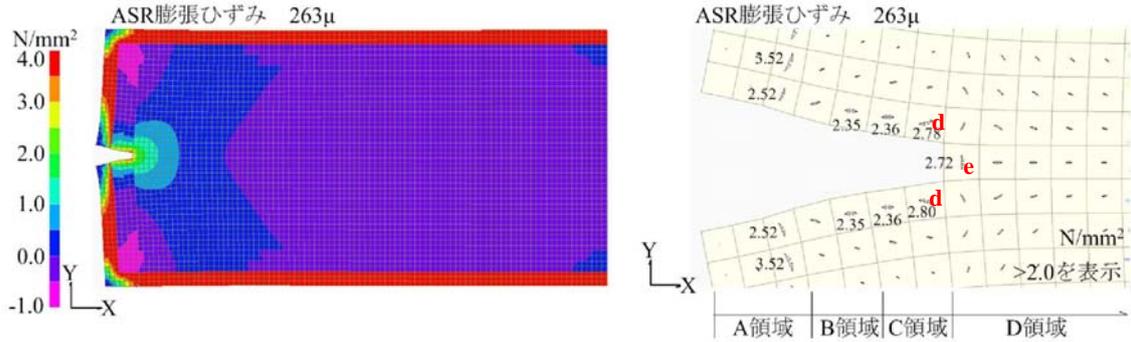
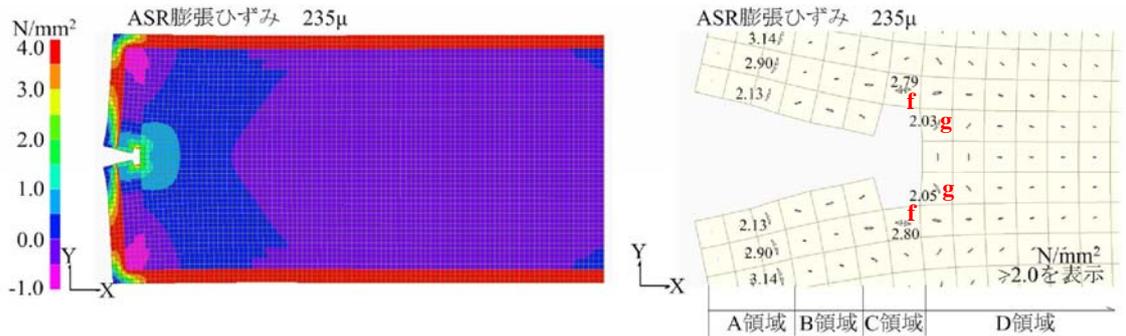


図-9 (1) 各ステップのコンクリート主応力の解析結果 (ステップ1~ステップ2)

【ステップ3】 ひび割れ深さ 140 mm



【ステップ4】 ひび割れ深さ 140 mm & 水平 20 mm



【ステップ5】 ひび割れ深さ 140 mm & 水平 80mm

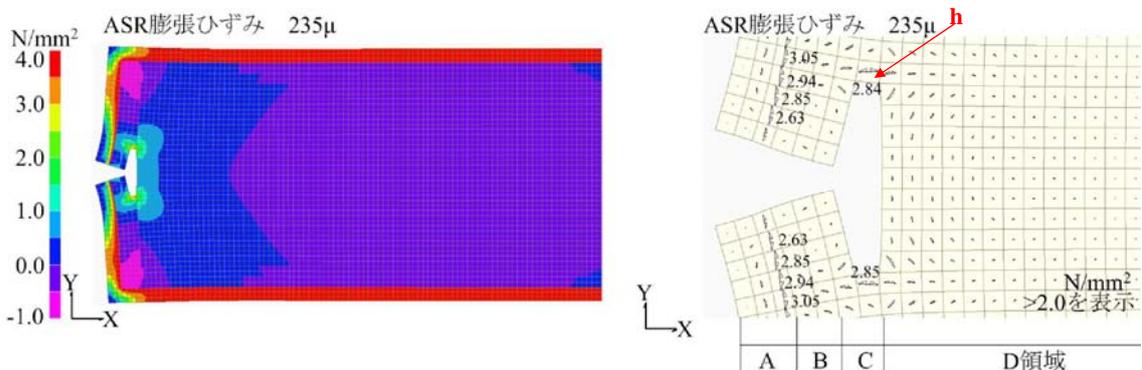


図-9 (2) 各ステップのコンクリート主応力の解析結果 (ステップ3～ステップ5)

きい。このことから、ひび割れ先端が骨材等の位置に達するとひび割れ進行方向は、深さ 140 mm の位置で 90° 変化すると推察する。

【ステップ4】 ひび割れ進行方向が深さ 140 mm の位置で約 90° 変化して、水平方向に 20 mm 進んだ状態での内部膨張ひずみは 235 μm である。内部膨張ひずみはステップ3の場合より小さくなることから、水平方向のひび割れによって応力開放が生じていると想定する。また、方向が約 90° 変化した後のひび割れ先端部における主応力度については、要素 f が要素 g より大きいので、ひび割れはさらに進行すると推定される。C 領域と D 領域では、主応力ベクトルの方向が異なっていて応力度にも差が生じていることから、境界付近に沿ってひび割れが進行すると考えられる。

【ステップ5】 深さ 140 mm の位置でひび割れ進行方向

が約 90° 変化して水平方向に 80 mm 進んだ状態では、内部膨張ひずみはステップ4と同じ 235 μm で、要素 h の応力度は 2.84 N/mm² となりステップ4より少し大きくなる。このことから、水平方向のひび割れは、さらにコンクリート表面に平行な方向に急速に進行すると想定される。また、コンクリート表面に平行なひび割れの内部側の発生応力度は小さく均一な分布であることから、内部中心に向かうひび割れは生じにくい状況にあると推察する。

3.4 ひび割れ進行過程に関する考察

(1) 無補強コンクリート部材の巨視ひび割れの進行

膨張が活発な層の存在を想定した場合、ASR 劣化が進行した無補強コンクリート部材で、内部に向かって進行していた幅の大きなひび割れは、膨張の活発な層と緩やかな膨張が継続する内部の境界付近で方向を約 90° 変え、表面に平行に進行することが解析によって明らかにできた。

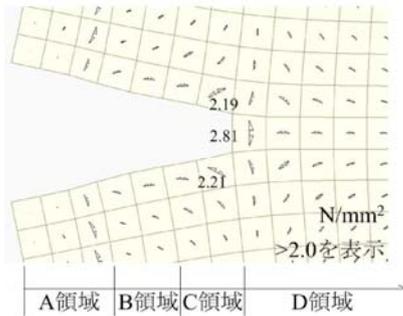


図-10 活発な膨張領域をなくした解析結果

ステップ3と同じくひび割れが深さ140mmまで進行し、膨張の活発な領域をなくしてB領域～D領域が様に膨張するとして解析した場合の主応力ベクトルを図-10に示す。図よりひび割れは内部に向かって進行するというを示している。この結果、膨張の活発な層が存在する場合にのみ、ひび割れ方向が約90°変わるという事象が発生すると推察される。また、ひび割れ方向が変化する位置は、膨張の活発な層と緩やかな膨張が継続する内部との境界付近と考えられる。

(2) 内部の膨張ひずみとひび割れの進行の関係

各ステップの解析結果より内部の膨張ひずみとひび割れ深さの関係を図-11に示す。図より、ひび割れ深さは、内部膨張ひずみに比例して増加する。その後、ひび割れ進行速度は増大し、膨張の活発な層とそれより内部と境界付近でひび割れは進行方向を変え、急激に成長すると推察される。膨張が活発な中間領域があることで、内部中心に向かうひび割れは生じにくいと推察する。なお、ひび割れ進行速度の増大は、ヤング係数を解析で非連続的に変化させたことも影響していると考えられる。

(3) 鉄筋補強部のひび割れの進行

鉄筋補強部はかぶり部が引張り、鉄筋より内部が圧縮応力になっている。鉄筋付近に到達する時点までのASR膨張ひずみとひび割れ深さの関係は、鉄筋無補強部のそれとの間に大きな差はないと推察する。

4. まとめ

無補強コンクリート部材に生じる幅の大きなひび割れの現地調査とひび割れ進行のFEM解析により推定した結果をまとめると次のようになる。

- (1) カルバート端面の無補強コンクリート部材中央にある幅の大きなひび割れは、深さ140mmの位置で進行方向を約90°変えて、コンクリート表面に平行に進行していた。
- (2) 現地調査の結果、コアによる圧縮強度と静弾性係数の測定結果、内部における劣化度は表面より大きくなっていった。相対湿度や水分率は、コンクリート表

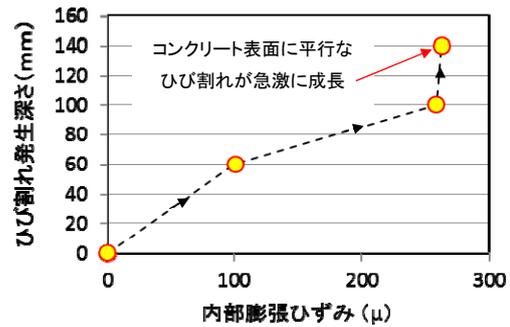


図-11 内部の膨張ひずみとひび割れ進行の関係

面部が内部より小さくなっていった。

- (3) 部材の材料性状を現地調査結果や鍵本らの研究を参考に部材をモデル化してFEM解析を行ってひび割れ進行を追跡したところ、膨張の活発な中間層と膨張が緩やかに継続する内部との境界付近で、ひび割れの進行方向が約90°変わることを明らかにできた。膨張の活発な層の存在が、ひび割れ方向が約90°変わる事象の要因であると推察する。
- (4) 膨張の活発な層と内部の膨張層の境界付近でひび割れ進行方向を変えると、その後ひび割れは急激に成長すると推察される。また、内部中心に向かうひび割れは生じにくいと推察する。
- (5) 鉄筋補強部のひび割れが鉄筋付近に到達す時点までのASR膨張ひずみとひび割れ深さの関係は、無補強部のそれとの間に大きな差はないと推察する。

参考文献

- 1) 鍵本広之, 安田幸弘, 木下 茂, 川村満紀: 大型コンクリート円柱におけるASR表面ひび割れの発生メカニズム, コンクリート工学論文集, 第25巻, pp.201-211, 2014年
- 2) 有馬直秀, 石川裕一, 青山實伸, 川村満紀: 実際のASR劣化部材におけるひび割れ発生過程, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.979-984, 2013.7
- 3) 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応試験の適合性, 土木学会論文集 No.764/v-64, pp.185-197, 2004.8
- 4) Stark, D., The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity, Proceedings of the 2nd Intl. Conf. on Durability of Concrete, Montreal, Canada, pp.973-987, 1991
- 5) 青木優介, 野雄太, 木孝治, 嶋野慶次: 直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.531-536, 2007