論文　実際のＡＳＲ劣化部材におけるひび割れ発生過程

有馬　直秀[*1]・石川　裕一[*2]・青山　實伸[*3]・川村　満紀[*4]

要旨：本研究は，ASR 膨張によって一部の鉄筋が曲げ加工部で破断している実際の構造部材を用いて，表面ひび割れと内部湿度分布の関係を明らかにすることを主な目的としたものである。ASR 劣化部材において発生している表面ひび割れは約 100 mm 深さにまで達しており，内部には局部的に多数の ASR ゲルの滲出部分や骨材粒子内部のひび割れが見られた。鉄筋が破断している隅角部においては，部材中心に向かう幅広いひび割れが確認された。部材表層部の相対湿度は約 83%であり，表面から約 100 mm 以深における相対湿度は 90%を超えていた。FEM 解析によって，鉄筋破断部から中心に向かうひび割れが発生することを確認した。

キーワード：ASR，表面ひび割れ，湿度分布，鉄筋破断，　FEM 解析

1. はじめに

ASR によって劣化した構造物の適切な維持管理を行うにあたって，ひび割れ発生過程や構造物内部の応力状態を含めた劣化の進行度を把握することが重要であると考える[1)]。

ASR による表面ひび割れの発生は，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 膨張量が低減する。その結果，コンクリート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）が生じると考えられている[2, 3)]。主に骨材粒子内部に見られる微視ひび割れは，ASR ゲルの膨張よって生じたものであり，それらの幅は，10μm～20μm 程度である（微視ひび割れ）。コンクリート表面において肉眼で観察できる幅広いひび割れ（巨視ひび割れ）の発生には，コンクリート表層部からのアルカリの漏出も関係している[4)]。一方，ASR 劣化の進行した実際の構造物中の鉄筋には，1,500μを超えるひずみが発生している場合があり[5)]，鉄筋に大きな応力が作用するために，鉄筋曲げ加工部が破断している事例が報告されている[6)]。

本研究は，ASR により一部分の鉄筋が破断している掛け違い橋脚のパラペット部において，各種調査を実施するとともに，部材の切断面におけるひび割れ発生状況の観察や内部の相対湿度の測定を行う事によって，ASR によるひび割れ生発過程を検証することを目的としている。

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

さらに，FEM 解析によって，ASR 膨張量と鉄筋に発生する応力の関係や，鉄筋破断がひび割れ発生におよぼす影響に関して考察を加えるものである。

2. 劣化状況調査

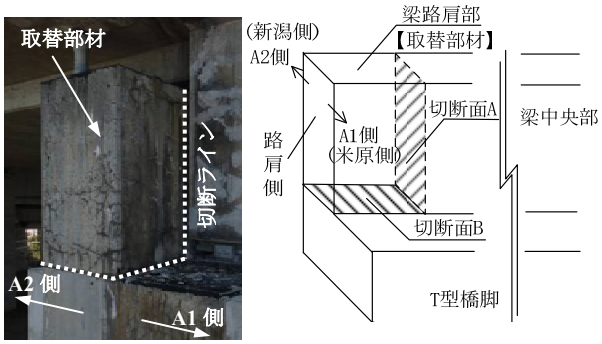
2.1 調査対象構造物の概要

対象構造物は，富山県東部に位置し建設後 35 年経過しており，冬季には凍結防止剤が散布される塩害環境にある。コンクリートの設計基準強度は 24 N/mm^2 であり，推定される示方配合を**表－1** に示す。この ASR 劣化構造部材は，建設後約 30 年経過した時点で曲げ加工部において鉄筋破断が確認されている。**図－1** に示すように補修のために取替えた部材と切断面（幅 1.1 m，高さ 1.9 m）を調査の対象としている。なお，取替部材の一部は名古屋大学構内に設けられた橋梁保全研修用施設（ニュー・ブリッジ）において ASR 劣化部材として展示している。

2.2 調査方法

(1) 表面ひび割れの発生状況

A1 側，A2 側および路肩側の 3 面においてひび割れ



図－1 調査構造部材の概要図

*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　構造技術課 (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　係長 (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　道路技術部　上席調査役　工博 (正会員)
*4 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　工博 (名誉会員)

発生状況の調査を行った。切断面では，ひび割れ以外にASR ゲルの滲出状況の観察も実施した。

(2) コンクリート内部の湿度分布

コンクリート内部の湿度分布を明らかにするために，コンクリート表面から種々の深さにある部分より採取した試料を用いて相対湿度を測定した。測定方法は，ハンマドリルで切断面Aにおいて両端から水平方向に表面からの深さ 25，50，75，100，150，200，350，550 mm の位置で，直径 20 mm 範囲で削孔して採取した粉をプラスチック容器内に密封し，22.5℃の環境に 24 時間以上静置した後，湿度センサー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 [3]）。

(3) コンクリート中の鉄筋の応力度測定

幅が 1 mm を越える水平ひび割れが発生している躯体天端の隅角部から鉄筋をはつり出し，鉄筋の破断状況を観察した。鉄筋に発生している応力度は，躯体の中央部の鉄筋を露出させ，鉄筋を切断したときの鉄筋のひずみ変化量を計測することによって推定した [5]。ひずみの計測では，切断箇所の両側鉄筋表面に合計 8 枚（4 枚×2 組）のひずみゲージを貼り付けた。別途，補修時に回収した鉄筋を用いて引張試験を行った。

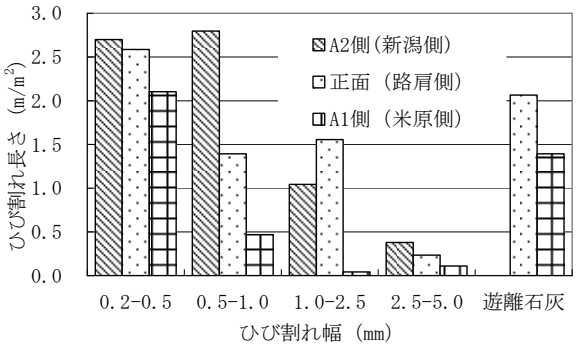
(4) その他の調査

ASR 劣化部材の劣化状況を把握するため，圧縮強度・静弾性係数試験を実施するとともに，塩化物イオン（以下，塩分）濃度およびコアによる残存膨張量を測定した。梁路肩部(劣化部)から貫通コア（φ55 mm×1,100 mm）2 本とひび割れが少ない梁中央部(健全部）からコア（φ55 mm×300 mm）2 本を採取し，JIS A 1108 および JSCE-G502 に準じて圧縮強度・静弾性係数試験を行った。コンクリート内部の塩分濃度分布を見るために，切断面 A において 15 ヶ所でドリル法によって水平方向に試料を採取し，JIS A 1154 に準じて全塩分量を電位差滴定法によって求めた。コアによる残存膨張量は，切断面 A の表層部（表面より 100 mm）と内部（中央部）からコアを採取し，JCI-DD2 法，デンマーク法による促進膨張試験を行った。

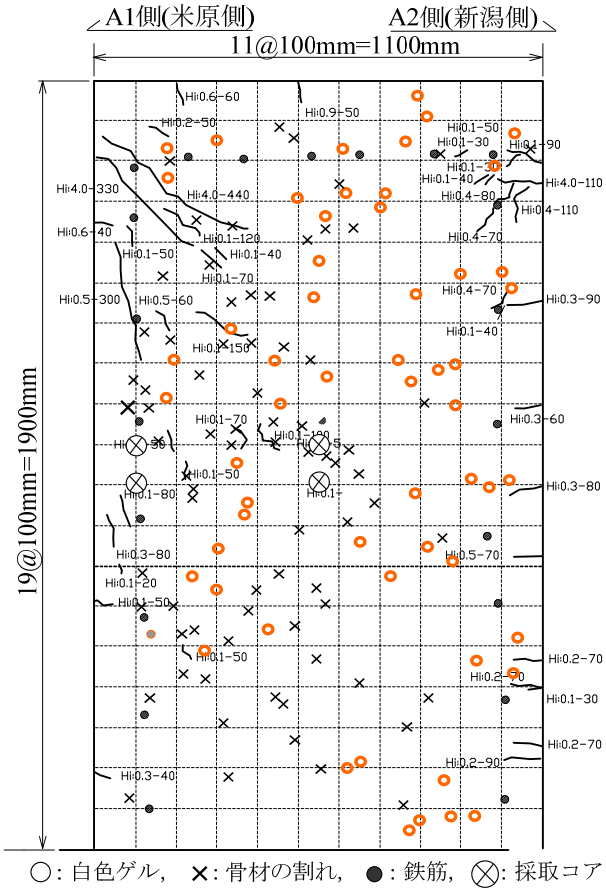
2.3 調査結果

(1) 表面ひび割れ発生状況

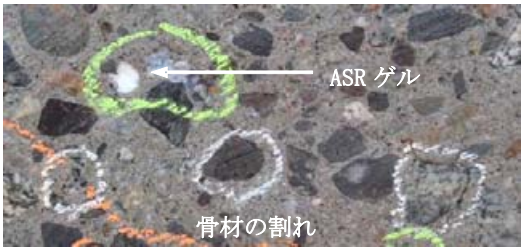
表面ひび割れの調査結果をまとめて**図－2** に示す。切断面内に見られるひび割れ，ASR ゲルの滲出部分や割れを有する骨材粒子の分布状況を**図－3** および**写真－1** に示す。**図－2** より，表面ひび割れは，伸縮装置から常に漏水の影響を受けている A1 側に比べ，乾湿の繰り返しの影響を受ける A2 側の方が多くなっている。**図－3** より表面ひびわれ割れは，コンクリート表面から約 100 mm 深さにある鉄筋付近で止まっていることがわかる。内部には幅広いひび割れは少なく，ASR ゲルの滲出部分が多数見られ，一部の骨材粒子では割れが発生していた。



図－2 表面の巨視ひび割れの調査結果のまとめ



図－3 切断面のひび割れ，ゲルや骨材割れの分布状況



写真－1 切断面の状況（ASR ゲル，骨材の割れ）

A1 側の隅角部には鉄筋破断に伴って，破断部より部材中心に向かって長さ 400 mm 程度の幅広いひび割れが発生していた。この部分のコンクリート表面には，連続する幅 4 mm～5 mm の水平ひび割れが発生していた。

(2) コンクリート内部の湿度分布

コンクリート粉末法によって得られた湿度分布を**図－4** に示す。A1 と A2 側の間で多少差違はあるが，内部に向かって急に湿度が高くなる点は，コンクリート表面から 80 mm～150 mm 深さの位置にあり，それより内部では 90%以上の相対湿度値を示した。この結果は，深さ約 100 mm 前後までの表層部ではそれ以深の内部より膨張量が小さいことを示している [2)]。

(3) 鉄筋の破断状況と鉄筋応力度

梁天端付近のコンクリートを部分的にはつり取った後の鉄筋破断状況を**写真－2** に示す。鉄筋破断は，曲げ加工部で生じていることがわかる。鉄筋(SD295)の応力測定の結果を**表－2** 示す。鉄筋に生じている応力度は，291 N/mm^2～370 N/mm^2 と非常に大きく，降伏点（380 N/mm^2 程度）に近い。採取した鉄筋を用いて行った引張試験の結果では，降伏点および引張強度は，それぞれ 380 N/mm^2, 555 N/mm^2 であった。

(4) その他の調査

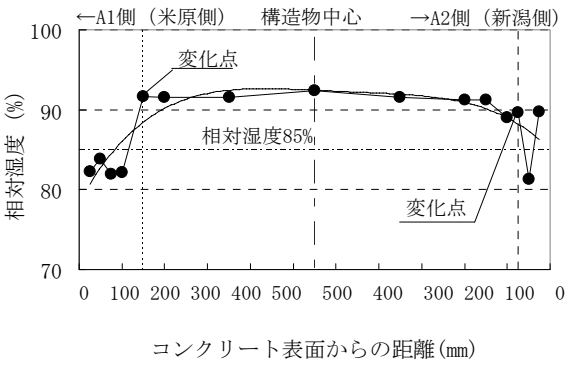
採取コアの静弾性係数と圧縮強度の関係を**図－5** に示す。コアの圧縮強度は，設計基準強度 24 N/mm^2 より低いものが多く，その静弾性係数／圧縮強度比は健全なコンクリートのそれを下回っている [7)]。塩分濃度測定の結果からは，伸縮装置からの漏水の影響を受ける A1 側のコンクリート中の塩分濃度は，A2 側より高く表面付近では 2 kg/m^3 程度で鉄筋付近では 1 kg/m^3 程度であった。なお，破断部分の鉄筋の腐食度は局部的ではあるが全周にわたって錆が生じていた。残存膨張試験の結果を**図－6** に示す。劣化部材は，残存膨張率が 0.02%程度と小さく ASR 膨張は収束していると考えられる。表層部と内部との間の残存膨張率を比較すると，いずれの試験方法においても，内部の残存膨張率の方が大きくなっていた。

2.4 調査結果に関する考察

(1) 表面ひび割れの観察

前述のように，切断面に対する湿度調査結果では，コンクリート表面付近（80～150 mm）では相対湿度が 85%より低く，それ以深では湿度 90%を超えていた。**図－3** に示すように表面に見える幅広いひび割れは，深さ方向には，鉄筋位置付近まで達していた。また，内部には大きなひび割れは少なく，多くの箇所で ASR ゲルの存在や骨材粒子内部のひび割れが確認できた。一方，表層部分では，ほとんど ASR ゲルの滲出部分は存在しなかった。すなわち，このことから，表層部では ASR の発生は内部ほど顕著ではないと言える。一方，高い湿度状態にある内部では，多くの箇所で ASR ゲル滲出部分が見られることより，表層部を除く内部のコンクリートでは ASR 反応が活発に進行していたと推察される。

以上の結果から，ASR による表面ひび割れ発生は，表

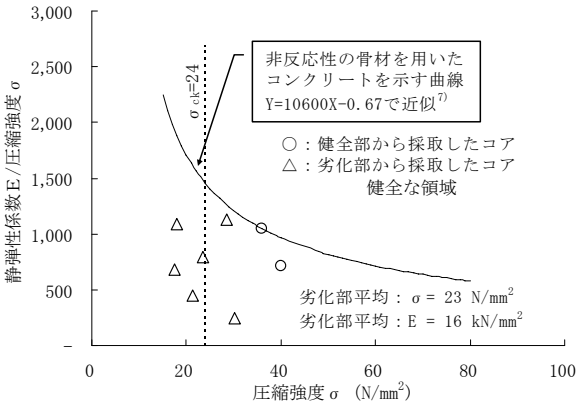


図－4 コンクリート粉末による湿度分布調査の結果

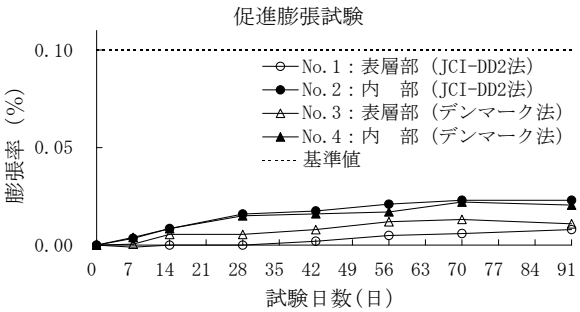
写真－2 ASR 膨張による曲げ加工部の鉄筋破断状況

表－2 応力開放による鉄筋応力度（D16）

No	対象鉄筋	鉄筋応力度（N/mm^2）	破断の有無
No.1	D16 縦筋	370	有
No.2	D16 縦筋	291	無
No.3	D16 縦筋	298	有



図－5 静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係



図－6 残存膨張量の結果（JCI-DD2 法，デンマーク法）

面近くに形成される非膨張層（表層部）により，中央部分の ASR 膨張が拘束されるために表層部に内部拘束応力が発生し，表面ひび割れが生じるとする考え方 [2]の妥当性を，実構造物において検証できたと言える。

曲げ加工部の鉄筋破断位置には，表面水平方向に連続する幅 4 mm～5 mm のひび割れが確認されるとともに，切断面において部材中心に向かって長さ 400 mm 程度の幅広いひび割れが確認された。このひび割れは部材の性能を大きく低下させるものであると考えられる。

(2) ASR 膨張に伴う鉄筋応力度

鉄筋の応力測定の結果，鉄筋に生じている応力度は降伏点に近い値を示した。鉄筋に発生する応力度は，ASR によるコンクリートの膨張量や鉄筋量に依存すると考えられる。したがって，鉄筋が破断に至るときのコンクリートの膨張量と鉄筋に生じる応力の関係を，定量的に把握することが重要である。

3. FEM 解析によるひび割れ発生に関する検討

3.1 目的

鉄筋に生じる応力が降伏点近くになるときのコンクリートの ASR 膨張量と鉄筋の曲げ加工部の破断に伴って部材中心に向かうひび割れの発生との関係を明らかにするために，取替部材をモデル化した FEM 解析によってコンクリート内部に発生する応力状態を検討した。

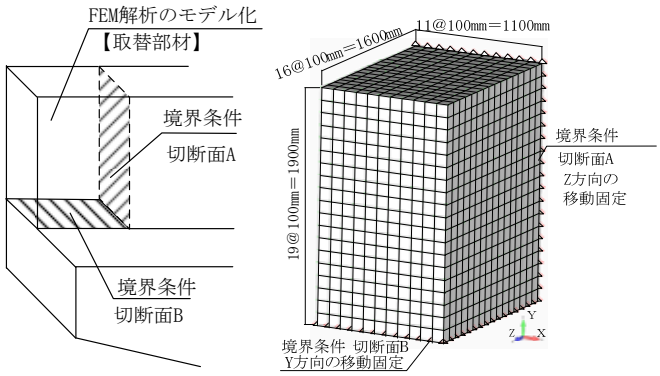
3.2 解析方法

図－7 に示すように取替部材をモデル化した。モデル化の要点を**図－8** に示す。境界条件は，鉛直面を Z 方向，底面を Y 方向で拘束するものである。モデル要素は，コンクリート体を躯体内部（膨張域）と表層部（非膨張層）に分け，ソリッド要素を用いた。ASR 膨張を拘束する鉄筋をロッド要素でモデル化し，鉄筋量は，993 mm^2/m(D16@200 mm)と設定した。材料諸元を**表－3** に示す。コンクリート強度および弾性係数の値は，実測の平均値を参考にして設定した。

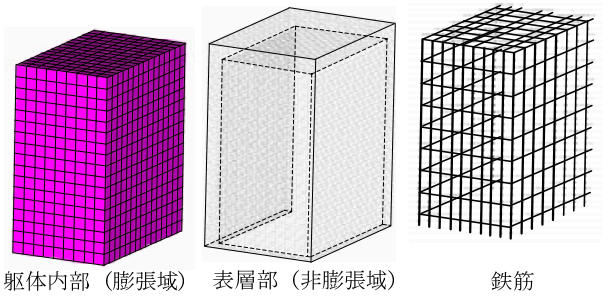
解析では，躯体内部に 0.01%の膨張ひずみを発生させ，コンクリート内部における応力を求めた。鉄筋曲げ加工部の破断に起因すると考えられる斜めのひび割れに関する解析では，**図－9** に示すように鉄筋破断によって表層部の拘束効果が一部無くなったとして解析モデルを構築した。ASR 劣化部材では，鉄筋とコンクリートの付着強度が変化するとされているが [8]，本研究における解析では，鉄筋とコンクリートを完全付着させた弾性有限要素解析法を用いた。なお，解析ソフトは Femap with NX Nastran を使用した。

3.3 解析結果

躯体内部（膨張域）を 0.01%膨張させた際の躯体内部および表層部（非膨張層）の最大主応力分布図を**図－10**



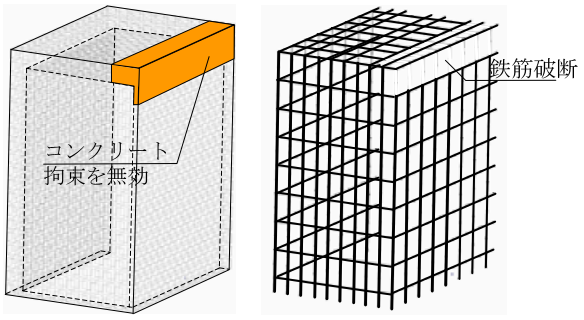
図－7 解析モデルと境界条件



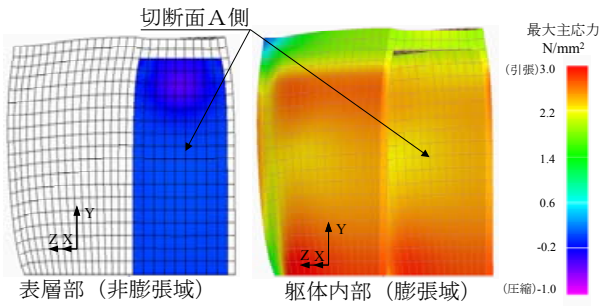
図－8 ASR 劣化部材のモデル化

表－3 材料諸元

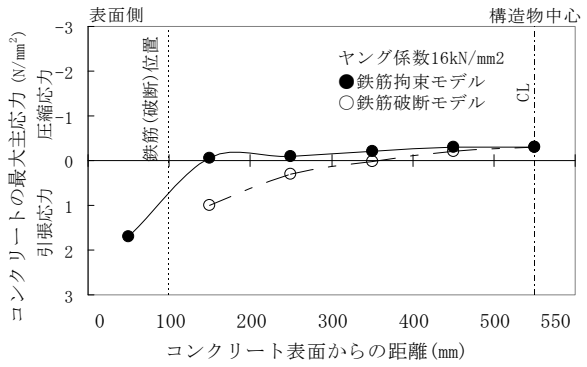
材料（仕様）	弾性係数 kN/mm^2	ポアソン比
コンクリート（σ_{cd}= 23N/mm^2）	16	0.17
鉄　筋（SD295）	200	0.3



図－9 層部の拘束効果をなくした解析モデル



図－10 躯体内部と表層部の最大主応力図



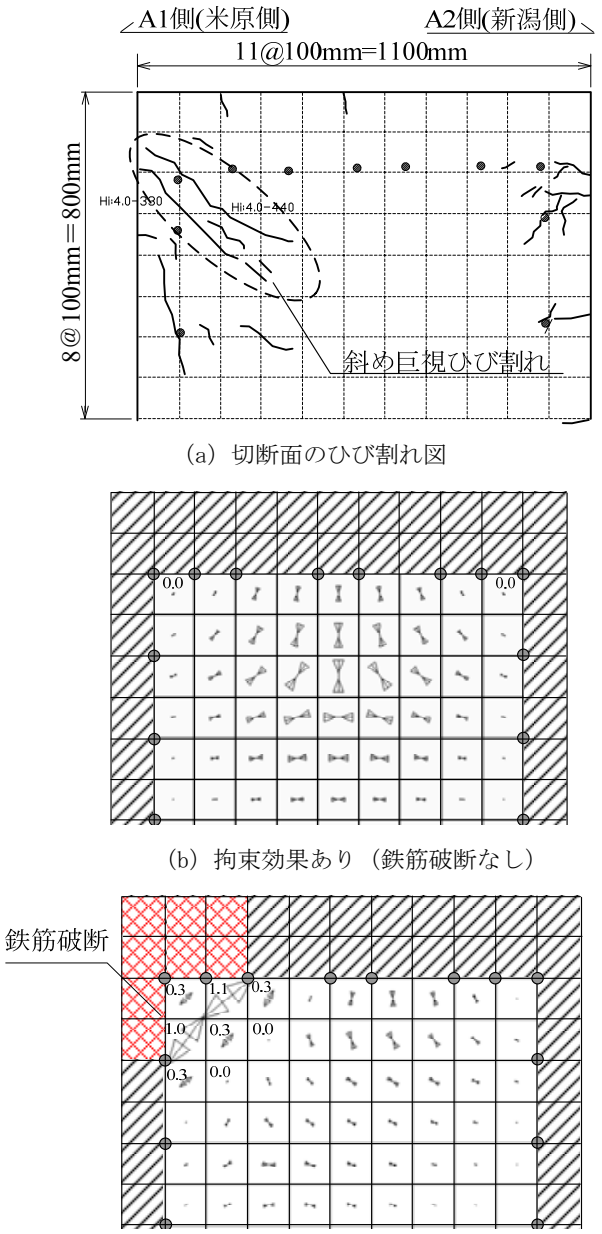
図－11 構造物天端から 0.4m位置の切断面 A での コンクリートの最大主応力分布（膨張率 0.01%）

に示す。これは取替部材を切断面 A 側から見た図である。図より，躯体内部には，圧縮応力が作用し（左），表層部には最大主応力が 2.0/mm^2 程度の引張応力（右）が作用していることがわかる。コンクリートの引張強度は，圧縮強度の 1/12～1/16 と仮定すると，ASR 劣化部材の圧縮強度が 23 N/mm^2 であることから引張強度は 2.0 N/mm^2 程度となり，ASR 膨張は，0.01%程度でコンクリート表面にひび割れが発生すると推察される。

ASR 膨張が 0.01%における任意の観察面（天端から 400 mm の位置）のコンクリートの最大主応力の分布(左右対称)を**図－11** に示す。図には，鉄筋破断によって表層部の拘束効果の一部が無くなったとした場合のコンクリートの最大主応力の分布を併せて示している。ASR 膨張に伴うコンクリートの最大主応力は，コンクリート表面からの深さによって異なるが，鉄筋位置付近である表面から 100 mm 以深ではコンクリートにわずかな圧縮力が作用し，理論的にはコンクリート躯体内部にひび割れが生じないと考えられる。鉄筋破断が生じた場合，コンクリートの最大主応力は，コンクリート表面から 250 mm の位置で，圧縮領域（0.1N/mm^2）から引張領域（0.3N/mm^2）に変化することがわかる。

図－12 は，実際の切断面のひび割れのスケッチ図（上段）と，鉄筋破断前後の拘束効果の有無による解析結果の最大主応力図（中段，下段）を示す。この図より，表層部の拘束がある場合，最大主応力ベクトルは圧縮応力が作用すること分かるが，表層部の拘束効果が一部無くなった場合，非膨張層の拘束効果をなくした部分における最大主応力ベクトルは角度斜め 45° の引張となっている。斜めひび割れが生ずると考えられる範囲は，コンクリート表面から 300 mm 程度であり，切断面位置におけるひび割れ状況と概ね一致する。

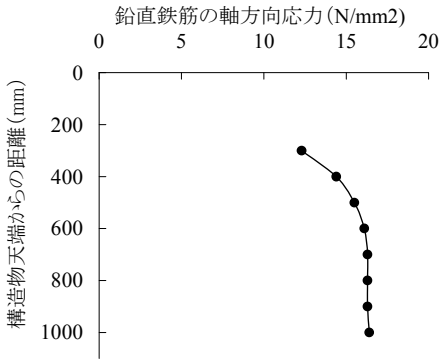
構造物側面（路肩側）から 1 m 位置における鉛直方向の鉄筋軸方向応力を**図－13** に示す。解析結果から鉄筋応力は 16N/mm^2 程度であり，鉄筋の降伏点（377N/mm^2）は，



※引張応力が生じた要素のみ数値を表示する。

※格子部分：コンクリート拘束を無視，斜線部分：表層部

図－12 拘束効果の有無による解析結果



図－13 構造物側面から 1m位置における鉄筋応力分布

解析値の 24 倍になる。実際には ASR 膨張が進行すると微細なひび割れの発生によって弾性係数が低下するが，一定とすると 0.01%の膨張量を与えているので，約 0.24%の ASR 膨張量で鉄筋は降伏するということになる。鉄筋の引張試験の結果，引張強度が 555 N/mm^2 であることから，鉄筋曲げ加工時のひび割れ発生により有効断面積が 68% 未満（降伏強度 377N/mm^2／引張強度 555 N/mm^2=0.68）であるとすると，曲げ加工部の鉄筋は容易に破断すると推察される。

3.4 解析結果に関する考察

ASR が生じる構造物は，一般に中央に近い部分の膨張が，表層部（非膨張層）により拘束され内部拘束応力（圧縮応力）を受け，コンクリート躯体中央部分に近いほどひび割れが生じにくい状況にあると言える。一方，表層部では引張応力が作用し，ASR の膨張率が 0.01%になると引張限界ひずみに達し，ひび割れが生じると推察される。ただし、コンクリートのクリープの影響を考慮すると表面ひび割れ発生限界ひずみは 0.01%より大きくなる。

鉄筋破断が生じた場合，鉄筋破断位置から部材中心に向かってひび割れが進展することが，解析によっても明らかにされた。このひび割れは，部材のせん断抵抗断面の減少や曲げに抵抗する有効幅の減少を伴い，構造物の耐荷力を低下させると推察される。このことは，ASR 劣化部材の点検においては，鉄筋破断の有無だけでなく鉄筋破断位置から部材の中心に向かうひび割れの状況や深さを把握する必要があることを示している。

本研究において設定した条件下での解析から，躯体内部（膨張域）の ASR 膨張が 0.01%になるとコンクリート表面にひび割れが発生し，0.24%になると鉄筋が降伏することが明らかになった。結論として，本研究において適用した解析モデルおよび解析手法は，鉄筋の応力状態を含めて定量的に ASR の劣化進行度を評価するための有効な手段になると言える。

4. まとめ

ASR 劣化によって曲げ加工部で鉄筋が破断している部材の各種調査，切断面のひび割れや ASR ゲルの有無に関する調査およびコンクリートや鉄筋に生じる応力に関する FEM 解析から得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 切断面の湿度分布調査の結果，コンクリート表面付近（深さ 8～15 mm）では相対湿度が 85%より低く，それ以深では 90%を超えていた。

(2) コンクリート表面に発生する表面ひび割れは，表面から約 100 mm 深さ（鉄筋位置）まで達していた。内部では，ひび割れは少ないが，多数の ASR ゲル滲出部分が見られた。

(3) ASR の表面ひび割れ発生メカニズムについては，表面近くに形成される非膨張層（表層部）により，中央部分の ASR 膨張が拘束されるために内部拘束応力が発生し，その結果，表面ひび割れが生じるとする考え方の妥当性が実構造物で検証できた。

(4) 鉄筋の曲げ加工部の破断箇所には，表面に連続する幅 4 mm～5 mm の水平ひび割れの発生とともに，部材中心に向かって長さ 400 mm 程度のひび割れの発生が確認された。

(5) ASR 劣化部材の鉄筋には，降伏点近い応力が発生していた。

(6) 取替部材をモデル化した FEM 解析の結果，コンクリート内部は鉄筋拘束によって圧縮力が作用し，ASR の膨張率が 0.01%になるとコンクリート表面にひび割れが発生し，ASR の膨張率が 0.24%になると鉄筋応力は降伏点に達すると推定された。

(7) ASR 膨張により鉄筋破断が生じると，部材中心に向かってひび割れが進展し，部材のせん断抵抗断面の減少や曲げに抵抗する有効幅が減少し，構造物の耐荷力が低下すると推察された。

(8) ASR 劣化部材の点検では，鉄筋破断の有無だけでなく鉄筋破断位置から部材の中心に向かうひび割れの状況や深さを把握する必要があると考えた。

参考文献

1) 土木学会：2007 制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.155-176, 2008.3

2) 川村満紀：現場技術者のための ASR 対策ノート，中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)，pp.36-54, 2010.9

3) Stark, D., The Moisture Condition of Fild Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity, Proceedings of the 2nd Intl. Conf. on Durability of Concrete, Montreal, Canada, pp973-987,1991

4) Hagelia, P., Origin of map cracking in view of the distribution of air voids, strength and ASR-gel, Proceedings of the 12th Intl. Conf. on AAR in Concrete, Beijing, China, pp.870-881, 2004

5) 野島昭二，竈本武弘，宮原茂禎，丸屋剛：ASR を生じたコンクリート構造物の鉄筋ひずみとコアの残存膨張，コンクリート工学，Vol.31, No.1,2009

6) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，コンクリートライブラリー124，pp.I-26-I-77, 2005.8

7) 小林一輔，丸貴夫，立松英信：アルカリ骨材反応の診断，森北出版株式会社，pp14-15,2004,1

8) 山本貴士，成清公平，服部篤史，宮川豊章：ASR 膨張ひび割れを模擬したコンクリートと鉄筋の付着性，コンクリート工学，Vol.29, No.1,2007