

# 論文 ASR 膨張がコンクリート構造物の鉄筋破断に与える影響

中島 俊和\*1・久保 善司\*2・鳥居 和之\*3

要旨：ASR により劣化したコンクリート構造物は，内部に鉄筋が適切に配置されている場合，その耐荷性能に大きな変化はないものとされてきた。しかし，ASR によって過大な膨張が生じた橋台やフーチングの曲げ加工部において，鉄筋破断を生じた事例が確認されている。そこで，フーチングを模擬した，鉄筋比の異なる供試体を作製し，ASR 膨張にともなうコンクリートの膨張および鉄筋ひずみ挙動を検討した。その結果，ASR 膨張は拘束量の小さい端面に局所化すること，また，ASR 膨張によって曲げ加工部の内側に大きな引張ひずみが発生することが明らかになった。これらが ASR 膨張による鉄筋破断の発生に大きな影響を与えることが確認された。  
 キーワード：ASR 膨張，鉄筋比，鉄筋の曲げ加工部，ASR 膨張の局所化，鉄筋破断

## 1. はじめに

ASR により劣化したコンクリート構造物においては，内部に鉄筋が適切に配置されている場合，ひび割れや変形など外観的な劣化は顕著であるものの，その耐荷性能は大きく低下しないものとされてきた。しかし，近年では ASR によって過大な膨張が生じた場合には，コンクリートの強度低下，鉄筋とかぶりとの付着力の低下，曲げ加工部での鉄筋破断などを生じ，ASR により著しく劣化したコンクリート構造物が確認されている<sup>1)</sup>。鉄筋が破断するとコンクリートに対する拘束効果が発揮されず，大きな内部劣化を生じるとともに，耐荷性や耐震性が低下し，構造物が十分に機能を果たさなくなる可能性がある。このため，ASR により著しく劣化したコンクリート構造物に対する適切な補修・補強法の確立はきわめて重要となっている。本研究では，鉄筋破断を生じたフーチングを模擬した，鉄筋比の異なる供試体を作製し，コンクリートの膨張挙動および鉄筋ひずみ挙動を検討し，ASR 膨張がコ

ンクリート構造物の鉄筋破断に与える影響を明らかにすることとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントとして普通ポルトランドセメントを使用した。骨材として，非反応性骨材には川砂(早月川産)と川砂利(早月川産)を，反応性骨材には火山ガラスおよびクリストバライトを反応性鉱物として含有する両輝石安山岩碎石(能登半島産)を使用した。両輝石安山岩の化学法(JIS A 1145)の結果は， $S_c = 609 \text{ mmol/l}$ ， $RC = 223 \text{ mmol/l}$  であり，「無害でない」と判定される。コンクリートの示方配合を表-1 に示す。ASR を促進させるために，コンクリートの等価アルカリ量を  $8\text{kg/m}^3$  に設定し，NaOH を練混ぜ水に添加した。鉄筋として市販の D6，D10 および D13mm の異形棒鋼を使用した。

### 2.2 実験要因

供試体の概要を図-1 に示す。鉄筋破断の多く

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	非反応性粗骨材	反応性粗骨材
53	42	164	308	784	563	563

：ペシマム混合率を考慮して、川砂利と安山岩碎石の比率を 1:1 とした。

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 (正会員)  
 \*2 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 博(工) (正会員)  
 \*3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

は昭和 40～50 年代の構造物において確認されており、当時の道路橋示方書を参考にして、鉄筋比の低い 0.15% および 0.21% の 2 種類、それより若干大きな 0.4%、0.5% および 0.6% の 3 種類の計 5 種類の供試体を作製した。供試体の寸法を、鉄筋比 0.15% および 0.21% のものは幅 450mm × 高さ 300mm × 長さ 600mm、0.4%、0.5% および 0.6% のものは幅 300mm × 高さ 300mm × 長さ 300mm とした。実構造物においては膨張が卓越する方向が存在し、局所的に大きな膨張を発生することが報告されており<sup>2)</sup>、膨張発生不均一性も鉄筋破断の一因として考えられる。そこで、上下 2 段に配置した鉄筋(軸方向筋とする)のうち上段の鉄筋量を変化させ、上部の膨張が卓越するものを準備した。さらに、軸垂直方向の膨張を拘束し、軸垂直方向に帯筋を配置した。供試体の要因を表-2 に示す。

### 2.3 供試体の概要

膨張挙動を把握するため、供試体の中央部には埋込み型のひずみゲージ(軸方向)を埋設し、表面にはコンタクトゲージ用チップを貼り付け(基長:100mm)、鉄筋にはひずみゲージを貼り付けた(図-1 参照)。コンクリート供試体は打設後、2 週間の湿布養生を行い、金沢大学工学部構内に暴露し、コンクリートおよび鉄筋に発生するひずみを経時的に測定した。なお、鉄筋比 0.15% および 0.21% のものと、鉄筋比 0.4%～0.6% のものとは、暴露期間が異なるため、両者の比較は、主に 0.15% および 0.21% のものの最大暴露期間において比較検討し、長期の挙動については 0.4%～0.6% のものについて検討を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 外観観察

暴露 1 年目の秋季におけるひび割れの発生状況を図-2 に示す。鉄筋比 0.15% のものでは軸垂直方向のひび割れ(図中太線)が発生し、0.21% のものは、軸筋に沿ったひび割れ(図中太線)が上面から端面につながるように発生した。また、0.15% および 0.21% とともに、供試体全面に亀甲状

表-2 供試体の要因

供試体 作製日	供試体の種類		供試体の配筋		
	鉄筋比	横拘束筋比	上段鉄筋	下段鉄筋	帯筋
2002 年 6 月	0.15%	0.95%	D6	D10	D13
	0.21%		D10		
2000 年 6 月	0.4%	1.06%	D6	D13	D13
	0.5%		D10		
	0.6%		D13		

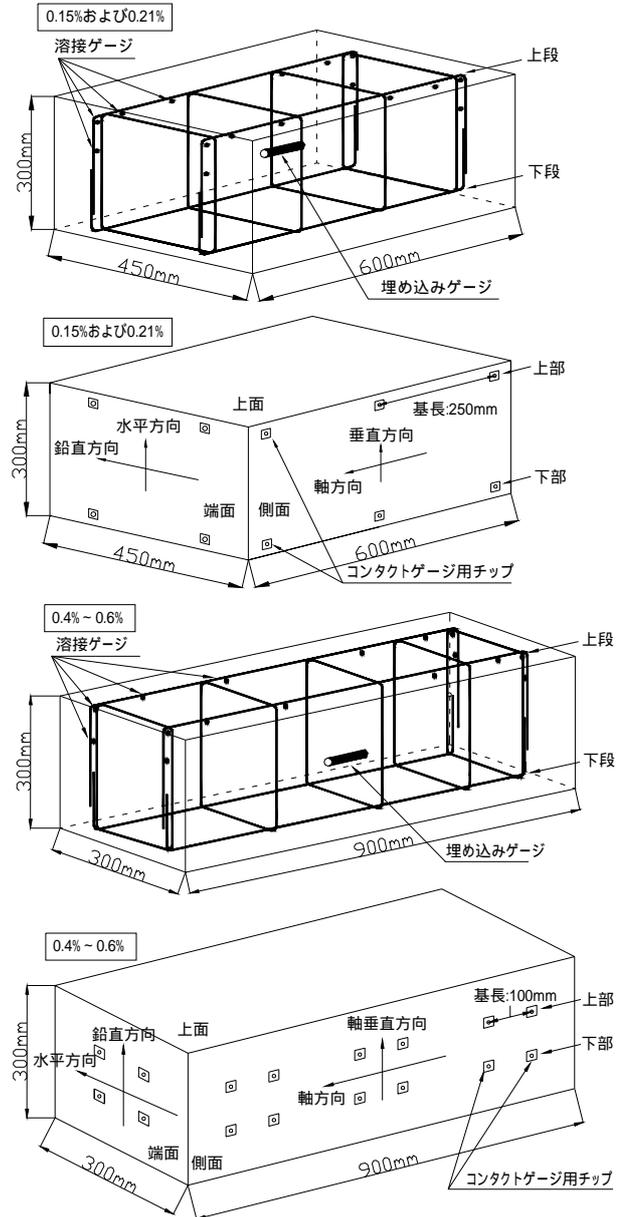


図-1 供試体の概要

のひび割れが発生した。ひび割れ幅は大きいもので 0.1mm 程度となり、ひび割れ本数は 0.15% のものより 0.21% のものの方が多くなった。

鉄筋比 0.4%～0.6% のものについて、0.4% のものでは軸垂直方向にひび割れが発生し、ひび割れ幅は 0.25mm 程度(図中太線)であった。0.5% お

よび 0.6%のものでは軸筋に沿ったひび割れが上面から端面につながるように発生し、ひび割れ幅は 0.1mm ~ 0.25mm 程度(図中太線)であった。

鉄筋比 0.21%および 0.6%のものは、上下段の鉄筋量が等しく、軸方向の膨張が軸筋により拘束されたため、軸筋に沿ったひび割れが上面端部に発生した。一方、鉄筋比が 0.15%および 0.4%のものは、下段より上段の鉄筋量が小さいために、上面の軸方向の膨張が卓越し、軸垂直方向のひび割れが上面端部に生じたと考えられる。

### 3.2 自由膨張量

鉄筋を配置していない角柱供試体(100mm × 100mm × 400mm)の表面ひずみ(自由膨張量)の経時変化を図-3 に示す。夏季の高温多湿下において ASR が促進され、2000 年および 2002 年に作製した角柱供試体とも、暴露約 50 日後で 800 ~ 1000 μ 程度のひずみが生じた。秋季では、2002 年のものより 2000 年のものの方が 1000 μ 程度大きな膨張を示した。2000 年および 2002 年に作製した角柱供試体の自由膨張挙動が異なるのは、作製した年度により、ASR 膨張に大きな影響を与える湿度および降雨などの気象条件が異なったためであると考えられる。したがって、暴露期間が同じであっても、鉄筋比の小さいシリーズ(鉄筋比:0.15%および 0.21%)と若干大きいシリーズ(鉄筋比:0.4% ~ 0.6%)を比較する場合、値そのものを単純に比較できないため、両者の比較を行う場合には、それぞれのシリーズでの鉄筋比が与える影響について主に検討することとした。

### 3.3 内部ひずみ

コンクリートの内部ひずみの経時変化を図-4 に示す。鉄筋比にかかわらず内部ひずみは表面ひずみと同様な季節的変動を示した。鉄筋比による違いは 200 μ ~ 300 μ 程度であり、その影響は比較的小さかったものと考えられる。しかし、鉄筋比が大きいものほど内部ひずみは若干大きくなる傾向が認められた。

### 3.4 表面ひずみ

#### 3.4.1 平均的な膨張挙動

鉄筋比 0.15%および 0.21%のものの表面ひずみ

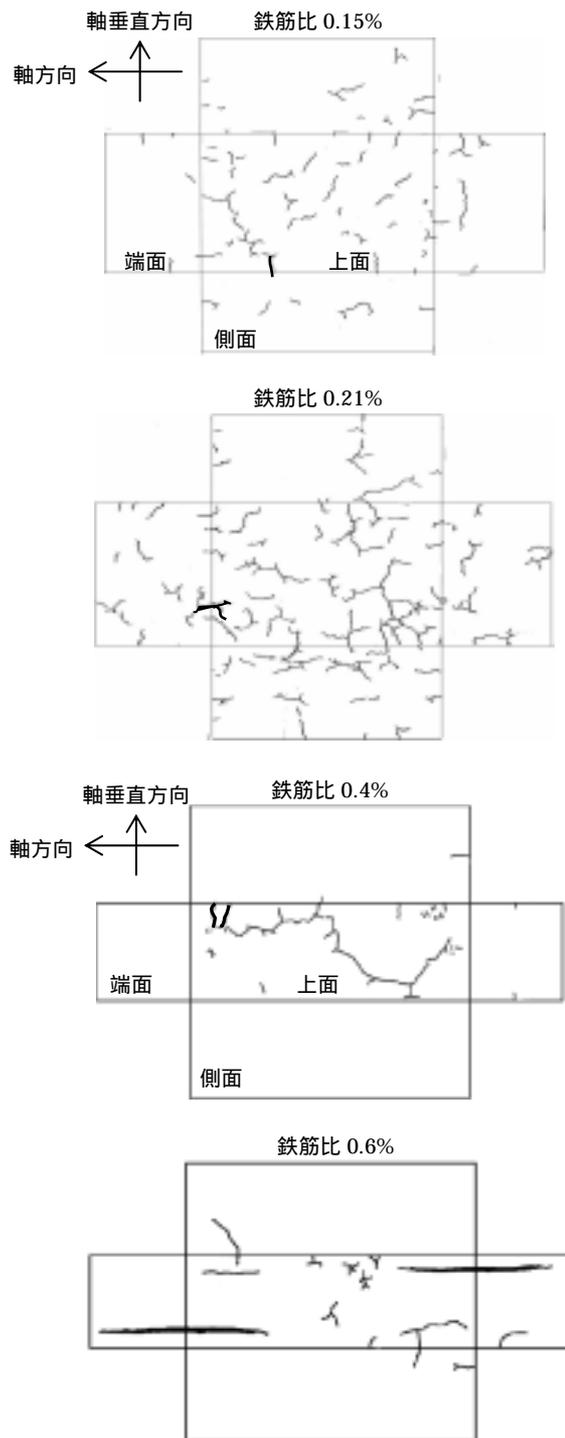


図-2 ひび割れの発生状況

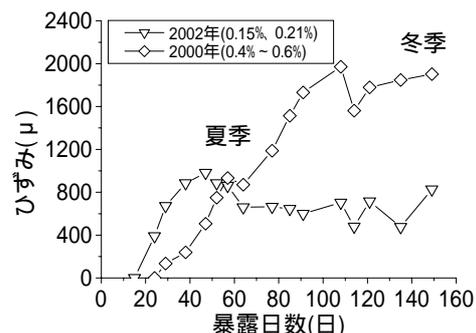


図-3 自由膨張量

が最大値を示した，暴露約 150 日後における表面ひずみ(各方向の平均値)を図-5 に示す。経時的な膨張挙動は，無拘束と同様に季節の変動を示した。全体として，鉄筋比 0.15%および 0.21%のものより 0.4%~0.6%のものの方が大きなひずみとなった。

側面軸方向において鉄筋比の違いは顕著でなかった。側面軸垂直方向および端面鉛直方向においては，鉄筋比 0.4%~0.6%のものでは鉄筋比の違いは顕著でなかった。0.15%および 0.21%のものでは，鉄筋比の大きい 0.21%のものの方が若干大きなひずみを生じた。端面水平方向については，鉄筋比が大きいものほど表面ひずみが大きくなった。

いずれの供試体においても軸筋の両端には曲げ加工部が存在し，このため，鉄筋比にかかわらず，軸方向の膨張に対する拘束が確保され，膨張の初期段階においては，軸方向の膨張に関しては鉄筋比の影響は顕著とならなかったものと考えられる。また，軸方向の膨張を拘束した分，それ以外の方向に影響するため，鉄筋比の若干大きいシリーズの 0.4%~0.6%のものでは端面水平方向において，鉄筋比の小さいシリーズの 0.15%および 0.21%のものでは軸方向以外において，鉄筋比が大きいものほど膨張が大きくなったものと考えられる。

鉄筋比の若干大きい 0.4%~0.6%のもの長期の表面ひずみの経時変化を図-6 に示す。端面鉛直方向および側面軸垂直方向においては，鉄筋比が表面ひずみの差に与える影響は顕著でなかった。側面軸方向では，鉄筋比の大きいものの方が軸方向の膨張が小さくなり，軸方向の拘束量に応じた膨張挙動となった。一方，端面水平方向では，鉄筋比が大きいものほど大きな膨張を示した。鉄筋比が大きいものほど，側面軸方向の膨張が拘束され，端面水平方向のひずみが大きくなったと考えられる。その傾向は 1 年目よりも 3 年目で顕著に現れた。

### 3.4.2 局所的な膨張挙動

局所的な膨張挙動を検討するため，側面軸方

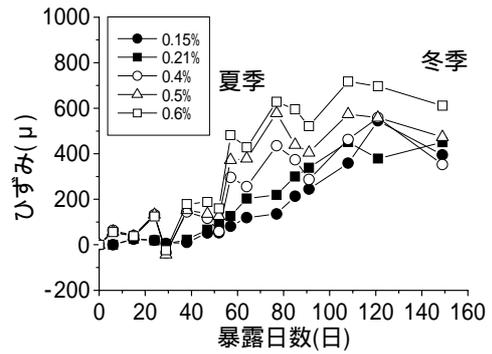


図-4 内部ひずみ

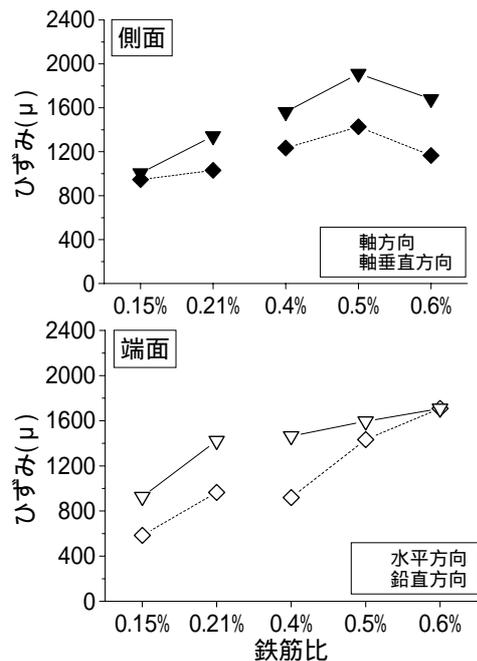


図-5 鉄筋比と表面ひずみの関係

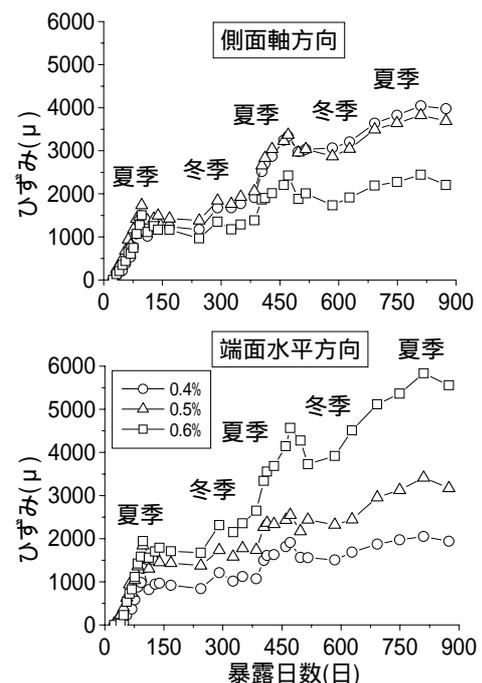


図-6 表面ひずみ

向の表面ひずみを上部と下部に分け、それぞれの平均値を算出した。側面軸方向における上部および下部のひずみ差の経時変化を図-7 に示す。暴露約 150 日後において、鉄筋比 0.15%および 0.4%のものは、他のものに比べてひずみ差が大きくなった。鉄筋比 0.15%および 0.4%のものは、下段より上段の鉄筋量が少なく、上部の膨張が卓越したと考えられる。

鉄筋比 0.4 ~ 0.6%のものの長期における表面ひずみの差を図-8 に示す。側面軸方向では、鉄筋比が小さいものほど、上部と下部のひずみ差が大きくなった。一方、端面水平方向では、鉄筋比にかかわらず、上部と下部のひずみ差は顕著でなかった。したがって、上下段の鉄筋量の差によって生じる、上部と下部のひずみ差は軸方向のみに生じたと考えられる。しかし、端面水平方向においては、上部と下部のひずみ差を生じていないものの、軸方向とは逆に鉄筋比の大きいものほど大きな膨張を示した。

そこで、ASR 膨張によって生じる変形を体積ひずみとして把握することとした。体積ひずみは単位体積あたりの膨張であり、軸方向、水平方向および鉛直方向のひずみの和で算出した。鉄筋比が体積ひずみに与える影響を図-9 に示す。膨張初期において 0.4%のものより 0.5%および 0.6%のものの方が大きな体積ひずみとなった。その傾向は初期よりも長期において顕著となった。すなわち、拘束の大きいものの方が大きな体積ひずみを生じたこととなる。鉄筋比が大きいものは、軸方向の膨張を抑制した反面、端面水平方向に大きな膨張を生じた。したがって、ASR 膨張は拘束の大きい方向の膨張が抑制されたとしても、拘束の小さい箇所に膨張が局所化するものと考えられる。上下段の鉄筋量が等しく、軸方向の拘束が最も大きい 0.6%のものでは、軸方向の膨張は小さいものの、拘束の小さい端面の膨張が大きくなり、一方、上下段の鉄筋量の差が大きい、0.4%のものでは軸方向において拘束の小さい上段に大きな膨張を生じた。実構造物においては、局所的環境条件および拘束条

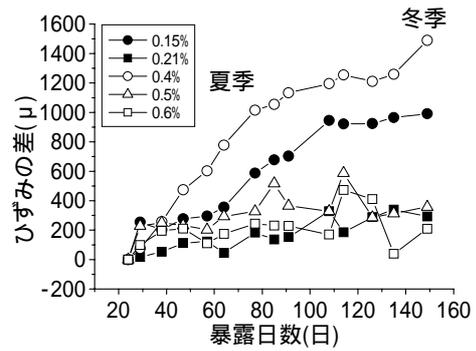


図-7 上部と下部の表面ひずみの差

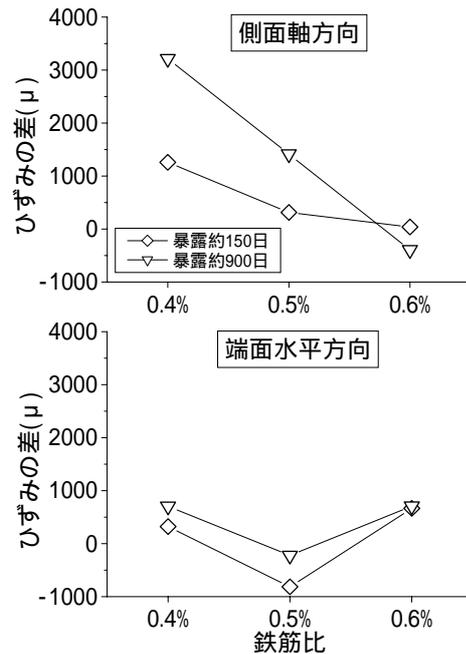


図-8 表面ひずみの差

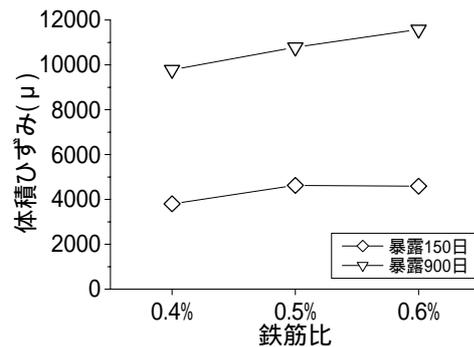


図-9 体積ひずみ

件によって、拘束の小さい端部に大きな膨張が局所的に生じる場合があり、この膨張の局所化は、拘束の小さい端面において鉄筋破断を生じる一因であると推測される。

### 3.5 鉄筋ひずみ

曲げ加工部の鉄筋ひずみが最大値を示した時点(鉄筋比 0.4%~0.6%:暴露約 90 日後, 0.15%お

よび0.21%:暴露約150日後)における鉄筋ひずみを図-10に示す。供試体の側面軸方向の表面ひずみが1000 $\mu$ ~1500 $\mu$ の膨張初期の段階であるにもかかわらず、曲げ加工部(貼付位置: )にはそれ以外の箇所と比べて大きな引張ひずみが生じた。鉄筋比0.15%のものを除いて、鉄筋の降伏ひずみに相当する1800 $\mu$ 程度の引張ひずみが発生しており、鉄筋比にかかわらず、ASR膨張により生じる鉄筋ひずみは曲げ加工部に集中する傾向が確認された。これは、実構造物において発生した鉄筋破断箇所とも一致した<sup>3)</sup>。上述した曲げ加工部の挙動は膨張初期の段階におけるものであり、膨張が進行した場合には、さらに大きなひずみが生じるものと考えられる。したがって、ASR膨張により曲げ加工部には長期にわたり降伏ひずみ、またはそれを上回る大きなひずみが局所的に発生するものと考えられる。

### 3.6 鉄筋破断の機構

ASR膨張は拘束の小さい箇所に膨張が局所化する傾向があり、局所的な環境条件や鉄筋の拘束によって膨張が卓越する箇所あるいは方向が存在する。一方、曲げ加工部にASR膨張が作用した場合には、曲げ加工部の内側には、大きな引張ひずみが局所的に発生する。したがって、実構造物において過大なASR膨張が生じた場合、曲げ加工部の内側には、長期にわたり大きな引張ひずみが局所的に発生し、曲げ加工による鋼材の力学的性能の低下が顕著となり、曲げ加工部の内側から割れを生じ、鉄筋の脆性的な破断を生じるものと推察される。

## 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結論を以下に述べる。

- (1) フーチング模擬供試体において、上下段の鉄筋量の差の大きいものでは、鉄筋量の小さい上部での膨張が卓越し、上下段の鉄筋量が等しく、軸方向の拘束の大きいものでは、軸方向の膨張は抑制できるものの、拘束の小さい端部水平方向の膨張が大きく

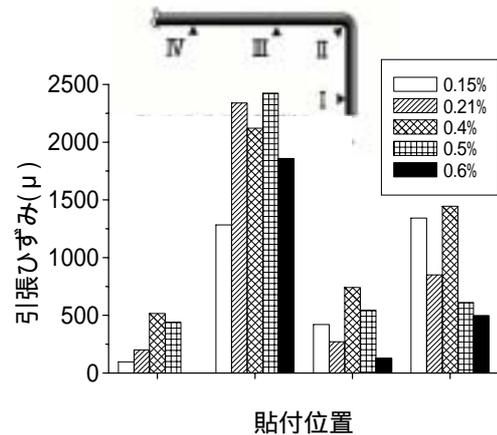


図-10 鉄筋ひずみ

なった。

- (2) ASR膨張は拘束の小さい箇所に局所化する傾向がある。このため、局所的な環境条件および鉄筋拘束によるASR膨張の局所化が、鉄筋破断の一因として考えられる。
- (3) 膨張初期の段階においても、鉄筋比にかかわらず、曲げ加工部の内側には、降伏ひずみに相当する大きな引張ひずみが発生することが確認された。
- (4) ASR膨張によって、曲げ加工部の内側に発生した局所的に大きな引張ひずみが、長期間持続的に作用した場合、曲げ加工部の力学的性能の低下が顕著となり、曲げ加工部の内側から割れを生じる脆性的な鉄筋破断を生じるものと推察される。

## 参考文献

- 1) 久保善司ほか：アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術，コンクリート工学，Vol.40，No.6，pp.3-8，2002.6
- 2) 奥田由法ほか：ASR損傷コンクリート橋脚の補修・補強に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No1，pp.371-376，1998
- 3) 鳥居和之ほか：ASR膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.595-600，2001.6