

# 報告 ASR の影響を受けた構造物におけるコンクリートの力学的特性

野村 倫一\*1・松田 好史\*2・葛目 和宏\*3

**要旨:** アルカリ骨材反応 (以下「ASR」という) の影響を受けた構造物は、コンクリートの力学的特性を明らかにすることで、耐荷性能を適切に評価することができるが、実構造物におけるコンクリートの力学的特性に関する報告事例は少ない。今回、ASR の影響を受けた構造物を撤去する機会を得たので、コンクリートの力学的特性に関する各種試験を実施し、既往の研究との比較を行った。各種試験の結果は、既往の研究と比較を行い ASR による影響の傾向を確認することができた。一方で、付着強度や鉄筋残留ひずみは実構造物における事例が少なく、評価手法の確立が今後の課題である。

**キーワード:** ASR, RC 構造物, 力学的特性, 圧縮強度, 引張強度, 付着強度, 鉄筋ひずみ

## 1. はじめに

近年、ASR によるコンクリートの過大な膨張によってコンクリート構造物中の鉄筋の曲げ加工部等で破断する事例が報告されている<sup>1)</sup>。鉄筋破断により構造物あるいは部材の耐荷性能が低下する可能性があり、これまで様々な研究・検討が行われている<sup>2)3)</sup>。一方で、ASR による膨張が生じたコンクリートの力学特性に関しても、供試体レベルでの研究が多くなされており、ASR の進行と圧縮強度、弾性係数などの関係について明らかになりつつある<sup>4)5)</sup>。更に最近、実構造物から採取した供試体を用いた試験結果が報告されるようになり、鉄道橋、道路橋に関して、幾つかの事例が報告されている<sup>6)7)</sup>。

このように、ASR の影響を受けた構造物は、鉄筋破断の影響やコンクリートの力学的性能を明らかにすることで、耐荷性能を適切に評価することができるが、いまだ、実構造物での事例報告は少ない。

本報告では、ASR の影響を受けた構造物を撤去する機会を得たので、コンクリートの力学的特性に関する各種試験を実施し、既往の研究との比較を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 対象構造物

試験対象構造物は、北陸地方に位置する建設後 31 年の跨線道路橋の T 型 RC 橋脚である。構造物の配筋図やコンクリートの配合などの資料は現存していなかった。

構造物を撤去する際に、ASR による劣化が最も顕著な橋脚張出部先端ブロックを切断し調査対象とした。切断したコンクリートブロックから貫通コアを採取し、試験用にコアを成形し、圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度を測定した。また、コンクリートブロックの鉄筋を切断し、鉄筋の残留ひずみを測定した。更にコンクリート

ブロックを厚さ 300mm に切断し、鉄筋の付着強度を測定した。撤去前の構造物について外観調査した結果を図-1 に示す。また、切断したコンクリートブロックを写真-1 に示す。

張出部側面には全体的に水平ひび割れや白色析出物が見られ、P1 側面の柱付近では最大幅が 1.8mm のひび割れが認められた。ひび割れは張出部先端妻面において白色析出物を伴って亀甲状に発生しており、最大ひび割れ幅は 2.0mm に達するものも認められ、ASR 特有のひび割れ形状を呈していた。



写真-1 切断したコンクリートブロック  
(中央の 2 孔は貫通コア採取箇所)

### 2.2 試験方法

#### (1) 圧縮強度試験

試験に用いるコアは切断したコンクリートブロックから橋軸方向水平に 2 本と橋軸直角方向に水平に 1 本それぞれ貫通して採取した。

\*1 西日本旅客鉄道 (株) 構造技術室 コンクリート構造 サブリーダー 工修 (正会員)

\*2 西日本旅客鉄道 (株) 構造技術室 室長 工博 (正会員)

\*3 (株) 国際建設技術研究所 社長 工修 (正会員)

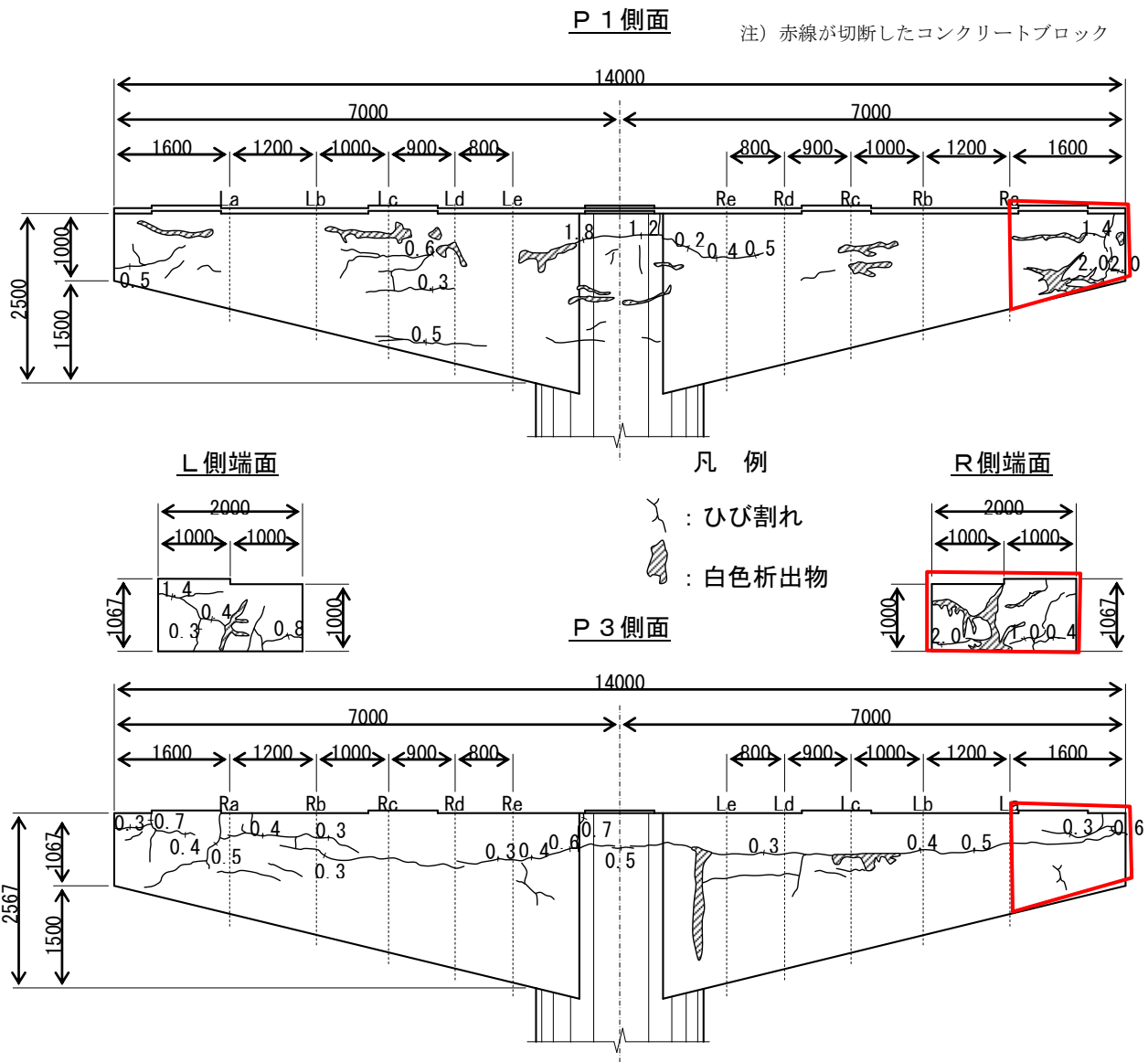


図-1 外観変状図

圧縮強度試験は、直径約 100mm の貫通コアを採取した表面部「採取部」と内部の「中央部」、コアが貫通した表面部「貫通部」に区分し、高さ約 200mm となるように切断・成形したコアを計 8 本用いた。

**(2) 静弾性係数**

静弾性係数は圧縮強度試験と同時に測定した。

**(3) 割裂引張強度試験**

割裂引張強度試験は、採取した貫通コアから圧縮強度試験用に切断したコアと隣り合う部分を直径約 100mm 高さは極力 200mm となるように 8 本成形したが、採取上、一部高さが 150mm と 170mm のものもある。

**(4) 鉄筋とコンクリートの付着強度試験**

鉄筋とコンクリートの付着強度試験は、撤去運搬したコンクリートブロックを更に切断して実施した。付着強度試験は、上縁側の引張主鉄筋 (D32) 3 本、側方鉄筋 (D25) 3 本、下縁側の圧縮主鉄筋 (D32) 3 本の合計 9

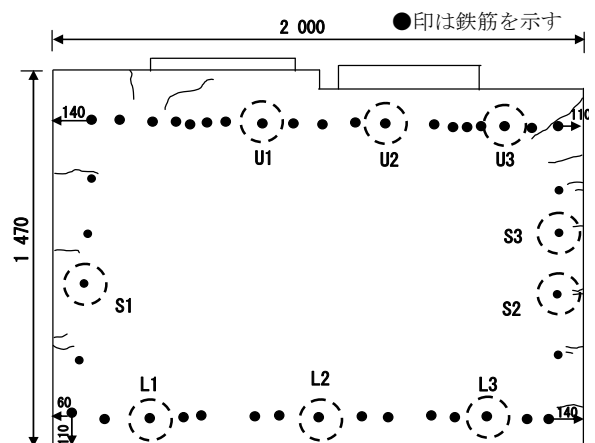


図-2 鉄筋の付着強度試験位置図

本について実施した。図-2 に付着強度試験対象鉄筋の位置図を示す。

試験方法は、土木学会規準「引抜き試験による鉄筋と

コンクリートとの付着強度試験方法（案）（JSCE-G503）」に準拠して実施した。試験片は、コンクリートブロックから必要定着長および、引抜き試験用の鉄筋が圧接できる長さの範囲（約300mm）で切り出して製作した。

試験は、撤去切断面側に露出した鉄筋を載荷端側とし、鉄筋周囲のコンクリートをはつり取って、引抜き試験用の鉄筋を試験対象鉄筋に圧接し、撤去切断面コンクリートにジャッキの反力を取って行った。

図-3 と写真-2 に付着強度試験の実施状況を示す。

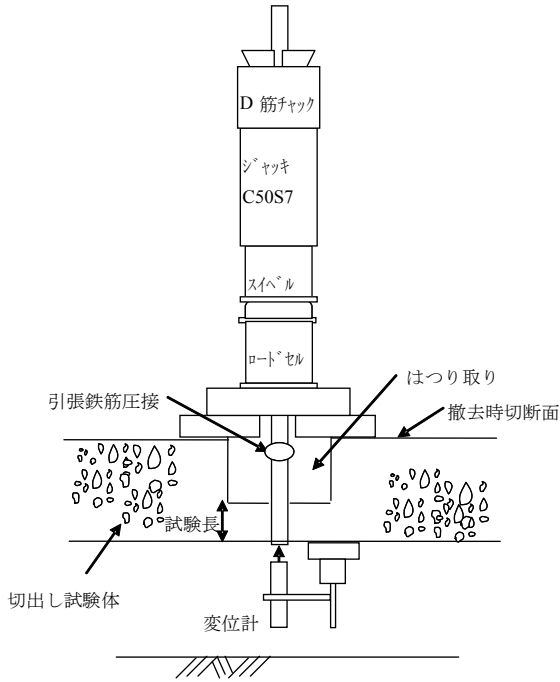


図-3 付着強度試験実施図



写真-2 付着強度試験の実施状況

### (5) 鉄筋残留ひずみ測定

鉄筋（スターラップ）残留ひずみ測定は、橋脚張出部のスターラップに作用している ASR に起因する膨張応力を確認することを目的として実施した。

図-4 にスターラップ残留ひずみの測定位置図を示す。

赤線がスターラップの切断位置で、ハッチングで示した箇所がゲージ貼付時にあらかじめかぶりコンクリートをはつり取った部分である。

写真-3 にスターラップ残留ひずみの測定状況を示す。

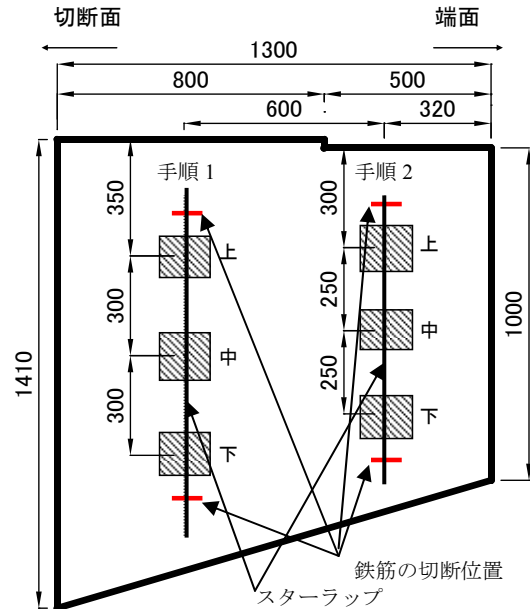


図-4 スターラップ残留ひずみ測定位置図



写真-3 スターラップひずみ測定状況

スターラップひずみ測定を行う際の手順は、手順により差が生じるか確認するために、付着コンクリートを除去してから鉄筋切断を行う方法と鉄筋を切断してから付着コンクリートを除去する方法と2通り行った。

手順1は、ゲージ貼付後、鉄筋切断位置（上ゲージ上部）、上中間、中下間、鉄筋切断位置（下ゲージ下部）の順にはつり取りによってコンクリートの除去を行い、鉄筋とコンクリートの付着を完全に除去した後、下部、上部の順に鉄筋を切断した。

手順2は、ゲージ貼付後、鉄筋切断位置のみコンクリートの除去を行い、鉄筋の上部、下部の順で切断した後、

コンクリートを上ゲージ上部，上中間，中中間，下ゲージ下部の順にはつり取った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を表-1 に示す。同表には同時に測定した静弾性係数の測定結果も併記している。当該橋脚のコンクリートの設計基準強度は、同年代の他の橋脚を参考に 24N/mm<sup>2</sup> と推定されるが、平均圧縮強度は 22.4N/mm<sup>2</sup> と下回っており、個別でも 2 サンプルを除いて、設計基準強度の 77~97% と下回っていた。

一方、コア採取位置での差異は、直角方向で採取したコアが橋軸方向で採取したコアと比べて低い傾向が認められるものの、「採取部」、「中央部」、「貫通部」とコンクリート断面内での明確な分布特性は見られない。

表-1 採取コアによる圧縮強度試験結果と静弾性係数

種別	部位	寸法 (mm)		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
		高さ	直径		
		測定値	平均値		
橋軸方向①	採取部	195.2	99.9	23.2	9.5
	中央部	197.8	98.7	19.7	16.6
	貫通部	198.1	99.2	22.4	16.6
橋軸方向②	採取部	197.3	99.4	23.3	11.1
	中央部	197.4	99.8	24.2	7.2
	貫通部	198.3	99.6	26.5	16.0
直角方向	採取部	174.7	99.7	18.5	10.3
	中央部	198.3	99.4	21.1	20.9

圧縮強度に関して既往の研究では、久保らは、ASR 膨張がコンクリートに与える影響について円柱供試体 (φ 100×200mm) を用いて実験<sup>4)</sup>し、膨張量 3000μ 程度までは圧縮強度の低下は顕著でなかったが、その後の実験<sup>5)</sup>で、膨張が進展した 5000μ 程度においては 30% 程度の圧縮強度の低下が認められたとしている。これは、ASR 膨張により劣化した鉄道 RC 部材における圧縮強度が 28 日強度に対して 50~70% 程度とした報告<sup>6)</sup>や海外の既往の研究<sup>8)</sup>における、膨張量 5000μ 程度で約 60% 程度まで強度が低下するとの報告やと同様の傾向である。このことから、当該構造物の膨張量は不明であるが一部を除いて圧縮強度は若干の低下にとどまっているため、膨張量もそれほど大きくなく、少なくとも 3000μ 程度までと推定される。

また、道路橋の実構造物の事例<sup>7)</sup>では、竣工後 10 年程度までは圧縮強度の低下が著しいが、その後は低下勾配が緩やかになり、竣工後 25 年が経過しても設計基準強

度に対して 2 割程度の低下であったと報告されており、当該構造物の圧縮強度の推定低下率は妥当な値であるといえる。

#### 3.2 静弾性係数

静弾性係数は、表-1 の測定結果から最大値で 20.9 N/mm<sup>2</sup> であり、コンクリート標準示方書で用いられている設計基準強度 24 N/mm<sup>2</sup> に対応する静弾性係数 25 kN/mm<sup>2</sup> に対して、全体的に低い傾向にある。平均値は 13.5 kN/mm<sup>2</sup> で示方書値の 54% と著しく低下している。

これは、静弾性係数に関する既往の研究で、久保らが膨張初期における低下が大きく、膨張量 1000μ 程度で 60% に低下し、それ以降は緩やかに低下したと報告<sup>4)</sup>や鉄道 RC 部材における静弾性係数が 6~60% 程度まで低下したとの報告<sup>6)</sup>と同程度の値である。

#### 3.3 割裂引張強度

割裂引張強度試験の結果を表-2 に示す。割裂引張強度は、橋軸方向では、1.00~2.05 N/mm<sup>2</sup>、直角方向では、1.45~1.76 N/mm<sup>2</sup> の範囲にあり、平均引張強度は 1.59 N/mm<sup>2</sup> であった。引張強度は圧縮強度から推定することができるが、本試験では、設計基準強度から求まる引張強度 1.91 N/mm<sup>2</sup> だけでなく、採取コアの平均圧縮強度から求まる引張強度 1.83 N/mm<sup>2</sup> に対しても平均値で下回っていた。

表-2 採取コアによる割裂試験結果

種別	採取表面からの位置 (コア中心) (mm)	寸法 (mm)		引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		高さ	直径		
		測定値	平均値		
橋軸方向①	採取部	840	19.70	9.94	1.00
	中央部	1,240	19.92	9.92	1.39
	貫通部	1,440	19.84	9.96	1.80
橋軸方向②	採取部	310	19.80	9.94	1.83
	中央部	1,260	19.80	9.97	1.55
	貫通部	1,660	19.77	9.98	2.05
直角方向	採取部	388	15.07	9.98	1.45
	中央部	1,020	17.02	9.90	1.76

これは、割裂引張強度が 28 日圧縮強度から推定される引張強度以上であったとする鉄道 RC 部材における報告<sup>6)</sup>と異なる結果となったが、筆者らが以前、実構造物から採取したコアで実施した割裂引張試験<sup>9)</sup>で一部を除いて、引張強度が圧縮強度の 1/8~1/13 といわれている値を下回る結果と同様となった。更に筆者らは、割裂引張強度より直接引張強度の方が低くなる傾向にあることを確認している。

また、採取位置による強度分布をみると、表層側である「採取部」、「貫通部」に比べて内部の「中央部」方が

若干低い傾向が認められた。ASRの影響によりかぶりコンクリートと鉄筋より内側のコアコンクリートに何らかの差異が生じている可能性がある。

### 3.4 鉄筋とコンクリートの付着強度

表-3 に引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験結果を示す。U-1 は適切な計測ができなかったため除外している。また、図-5 に付着強度-すべり量との関係を示す。

表-3 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験結果

No.	鉄筋径	0.002Dにおける付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大荷重時すべり量 (mm)
U-2	D32	1.3	6.5	4.32
U-3	D32	0.4	5.6	2.94
S-1	D25	2.4	13.0	1.21
S-2	D25	2.5	12.6	1.21
S-3	D25	1.1	10.6	2.11
L-1	D32	6.0	20.0	0.91
L-2	D32	4.1	14.2	0.77
L-3	D32	6.5	12.6	0.66

自由端すべり量が、0.002D時における付着強度は、上縁側の引張鉄筋 (U-2,U-3) で 0.4~1.3N/mm<sup>2</sup>、側方鉄筋 (S-1~S-3) で、1.1~2.5 N/mm<sup>2</sup>、下縁側の圧縮鉄筋 (L-1~L-3) で、4.1~6.5 N/mm<sup>2</sup>であった。コンクリート標準示方書の式に平均圧縮強度を代入して求めた付着強度は 2.22 N/mm<sup>2</sup>であり、側方鉄筋の 0.002Dにおける平均付着強度 2.00 N/mm<sup>2</sup> とほぼ同じ値である。

上縁側が下縁側に比べて最大付着強度の平均値で約 38.8%と著しく小さくなったが、健全なコンクリートにおいてもブリーディングの影響により、上縁側の鉄筋が小さくなるのが既往の研究<sup>10)</sup>により明らかにされている。付着強度とすべり量との関係では、側方と下縁については最大荷重のピークが見られたが、上縁側の鉄筋は、最大荷重を保持したまま自由端変位が増大している。

なお、いずれの試験においても割裂破壊ではなく、鉄筋の抜け出し破壊であった。

これまで実構造物レベルでの付着強度試験は、鉄道RC部材で実施された事例<sup>6)</sup>があるが、ASRの影響を受けた試験体は ASR の影響を受けていない試験体よりも最大付着強度は 13%低い値となっている。

一般に、付着強度は多くの要因の影響を受けるため、絶対値での比較評価は難しい。また、既往の研究では、

上田ら<sup>11)</sup>が行った実験のように膨張量によって付着強度は変化することから、今回の試験が鉄筋位置によるブリーディングの影響か、ASRの影響であるかの評価は明確にすることができなかった。

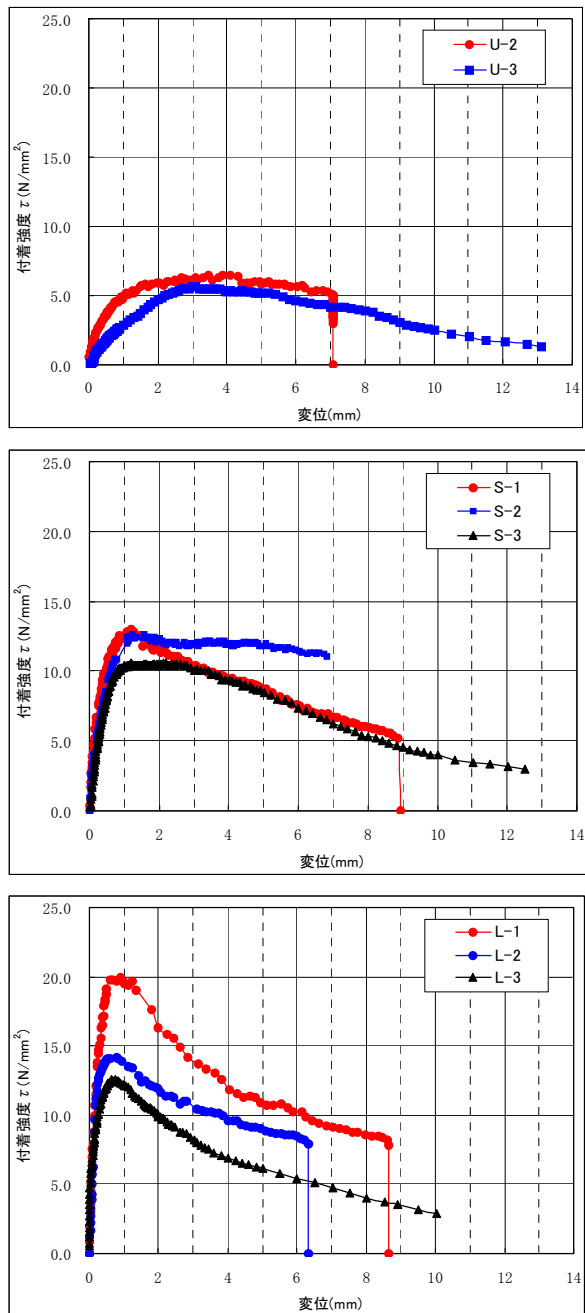


図-5 各鉄筋の付着強度-すべり量との関係

### 3.5 鉄筋残留ひずみ (スターラップ残留ひずみ)

図-6 と図-7 に試験時のスターラップひずみの経時変化図を示す。上部工が除去された後で荷重がない状態であることから、発生したひずみは ASR 膨張による影響であると考えられる。スターラップ切断直後のひずみは、手順 1、手順 2 ともに 1000~1400μ程度発生しており、付着コンクリートを除去した直後のひずみはいずれの手

順とも 500 $\mu$  以下なので、かぶりコンクリートよりもスターラップ内部のコンクリートのケミカルプレストレスの方が鉄筋に与えるひずみの影響は大きいと考える。

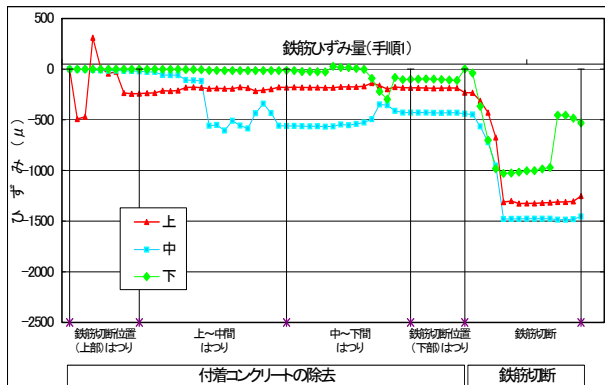


図-6 手順1のスターラップひずみの経時変化

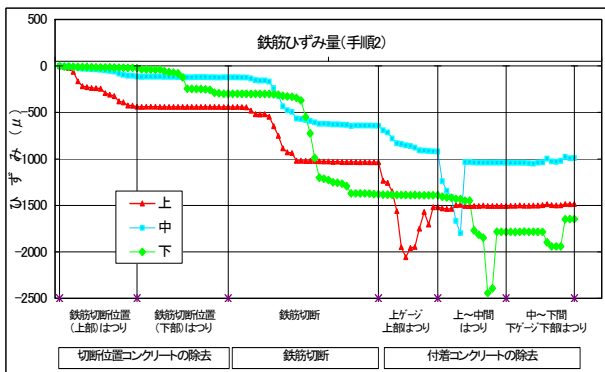


図-7 手順2のスターラップひずみの経時変化

#### 4. まとめ

実構造物から切り出した供試体の力学特性に関する試験結果を以下にまとめる。

- (1) 圧縮強度は、劣化部では設計基準強度の 77~97%に低下していた。
- (2) 静弾性係数は、設計基準強度から定まるヤング率よりも平均 54%と著しく低下していた。
- (3) 割裂引張強度は平均 1.59 N/mm<sup>2</sup> で、採取コアの平均圧縮強度から推定される引張強度 1.83 N/mm<sup>2</sup> に対して下回っていた。
- (4) 鉄筋とコンクリートの付着強度試験は、上縁鉄筋が下縁鉄筋の 39%程度であったがブリーディングの影響か、ASR の影響を明確にすることができなかった。
- (5) 鉄筋残留ひずみは、1,000~1500 $\mu$  程度発生しており、上部工が除去された後で荷重がない状態であることから、ASR 膨張による応力の影響が大きいと考える。

各種試験の結果と既往の研究との比較を行い、ASR による影響の傾向を確認することができた。一方、実構造

物における付着強度や鉄筋残留ひずみは報告事例が少なく、評価手法の確立が今後の課題であると考え。

#### 謝辞

最後に、本研究を実施するにあたり、故 北後征雄博士にご尽力と懇切丁寧なご指導いただき、感謝の意を表するとともに、哀悼の意を捧げ、ここに謹んでご冥福をお祈りする次第である。

#### 参考文献

- 1) 久保善司, 鳥居和之: 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) 土木学会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たなる対応, コンクリートライブラリー124, pp.II-1-II-129, 2005.8
- 3) 野村倫一, 荒巻智, 竹原和夫, 谷村幸裕, 森川英典: ASR により劣化したディープビームの力学的挙動に関する解析的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第 8 巻, pp.413-418, 2008.11
- 4) 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.1691-1696, 2006.7
- 5) 東原直, 久保善司, 上田隆雄, 野村倫一: 過大な ASR 膨張にともなうコンクリートの力学的性能の変化, 土木学会年次講演概要集 V, pp.127-128, 2006.9
- 6) 田附伸一, 津吉毅, 松田芳範, 今井勉: ASR 膨張により劣化した RC 部材の耐荷性能について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.1765-1770, 2004.7
- 7) 三浦正嗣, 幸佐賢二, 久利良夫, 川島恭志: ASR を生じたコンクリートの圧縮強度劣化特性, 土木学会年次講演概要集 V, pp.877-878, 2007.9
- 8) The institute of Structural Engineering: Structural effect of alkali silica reaction, pp.12-14, 1992.7
- 9) 野村倫一, 北後征雄, 大江崇元: ASR 劣化構造物から採取したコンクリートコアの引張強度, 土木学会年次講演概要集 V, pp.875-876, 2007.9
- 10) 岡田清: 鉄筋コンクリート工学, 朝倉書店, pp.138-139, 1972.10
- 11) 上田隆雄, 山口圭亮, 渡邊健, 西畑清華: ASR で劣化したコンクリート中の鉄筋とコンクリートの付着挙動, セメントコンクリート論文集, No.60, pp.396-402, 2006