

論文 ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証

鳥居和之*1・池富 修*2・久保善司*3・川村満紀*4

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) により, 長期にわたり過大な膨張力が作用するコンクリート構造物では, 鉄筋が破断するという事例が報告されている. 今回実施したフーチングの調査でも, フーチング端部の折り曲げ加工部にて鉄筋の破断が確認された. 鉄筋の破断により拘束効果がなくなったコンクリート構造物は, 内部まで大きな損傷を受けていた. フーチングを模擬したモデル試験体の ASR 膨張と鉄筋のひずみとの関係を調べた結果, 実際に鉄筋破断が発生した折り曲げ加工部にて鉄筋の降伏ひずみをこえるひずみが発生することが判明した.

キーワード: ASR, 調査・診断, コンクリートの膨張力, 鉄筋破断, 環境条件

1. まえがき

アルカリシリカ反応により発生したコンクリートのひび割れは, 表面のかぶりまでで, 鉄筋の内部へのひび割れの進展は少なく, コンクリート中に鉄筋が適切に配置されている場合には, ASR がコンクリート構造物の耐荷力に与える影響は小さいとされてきた. しかし, 過大な膨張が発生した場合には, 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の破断, などの大きな損傷事例が確認されている¹⁾. また, わが国で損傷事例の多い, 安山岩や流紋岩などの火山岩系の砕石を使用したコンクリートでは, ASR による膨張が 20~30 年の長期にわたり継続し, 常に水の影響を受ける構造物では過大な膨張が発生することも最近の調査で分かってきた²⁾. 著者らは, 大きな膨張が発生した, 基礎構造物 (フーチング), 橋台, トンネル坑門, 橋脚の梁などで, 10 例ほどの鉄筋破断の事例を調査している. 特に, フーチングおよび橋台の事例では, 鉄筋比の小

さい側面端部で, 鉄筋がすべて破断しており, 拘束がなくなった破断箇所から大きな割れが構造物の内部に発生するとともに, コンクリートが内部で破壊しているのが観察されている.

本研究は, ASR による鉄筋破断が確認されたフーチングにて現地調査およびコアによる詳細調査を実施するとともに, フーチングを模擬したモデル試験体のコンクリートの膨張量と鉄筋のひずみとの関係を調べることにより, ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断のメカニズムを検証するものである.

2. 調査および試験概要

2. 1 鉄筋破断が発生したフーチングの調査

フーチング (直接基礎) は幅 5 m × 高さ 1.8 m × 長さ 5 m の断面形状であり, 上面には D16 (SD295A) ・ 17 本, 下面には D22 (SD295A) ・ 32 本の鉄筋が配置されていた. 橋軸方向および橋軸直角方向の鉄筋比はそ

*1 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

*2 (株) 中研コンサルタント (正会員)

*3 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

れぞれ 0.21 % および 0.08 % である。フーチングは建設後 20 数年が経過しており、橋脚部は ASR の損傷に対して表面被覆処理が実施されていた。コンクリートの設計基準強度は 21 N/mm^2 であり、細骨材には川砂、粗骨材には両輝石安山岩碎石（骨材最大寸法: 25 mm, 反応性鉱物: クリソバライトおよび火山ガラス）が使用されていた。この地域は冬期に凍結防止剤が散布されているが、土中にあるフーチングはその影響を受けていなかった。しかし、フーチングは地下水の影響を常時受けており、ASR が促進された可能性があった。フーチングは掘削後、コンクリート表面のひび割れを測定するとともに、大きなひび割れが発生した数箇所ではつり点検を実施し、鉄筋の腐食状況および破断の有無を確認した。コア（直径: 55mm, 長さ: 2m）は橋軸方向の側面中央部より採取し、内部の破断状況および ASR ゲルの生成状況を観察するとともに、切り出した試験体にて圧縮強度、弾性係数および超音波パルス速度を測定した。

2.2 フーチングモデル試験体による 検証試験

フーチングのモデル試験体は幅 0.3m × 高さ 0.3m × 長さ 0.9m の断面形状である。フーチング建設時の道路橋示方書（最低鉄筋比 0.4%）を参考にして、上面の鉄筋（SD295A, D6, D10, D13・各2本）および下面の鉄筋（SD295A, D13・各2本）を選定することにより、鉄筋比を 0.4%, 0.5% および

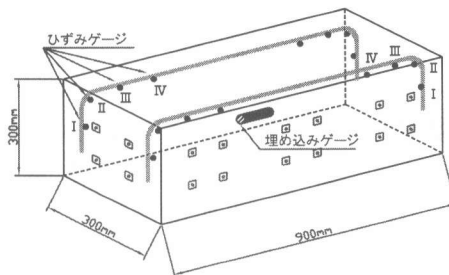


図-1 フーチングモデル試験体の概要

0.6% の 3 種類に設定した。フーチングモデル試験体の概要を図-1 に示す。コンクリートの中心部にはカールソン型の埋め込みゲージ、表面部にはコンタクトゲージ用チップを埋設するとともに、鉄筋の曲げ加工部でのひずみの分布を調べる目的で、鉄筋の裏面に焼き付け処理した特殊ゲージを貼付けた。コンクリートの配合を表-1 に示す。反応性粗骨材は両輝石安山岩碎石（化学法（JIS A5308）: $Sc=609 \text{ m mol/l}$, $Rc=223 \text{ m mol/l}$ ）であり、実際のフーチングに使用されたものとはほぼ同じものである。モデル試験体は 2 週間の湿空養生後、平成 12 年 6 月より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毎週計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋破断が発生したフーチング の調査

表-1 コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	非反応性 粗骨材	反応性 粗骨材	NaOH
8±2	53	2±1	42	164	308	784	563	563	7.54

* 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。

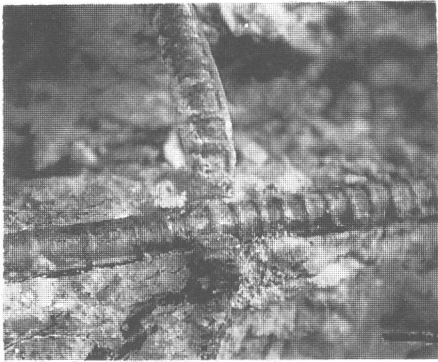


写真-1

フーチング側面端部の鉄筋の破断状況

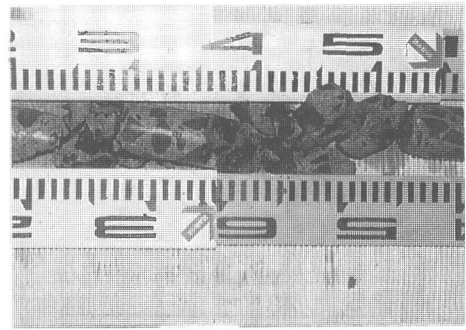


写真-2

フーチング内部のコアの破損状況

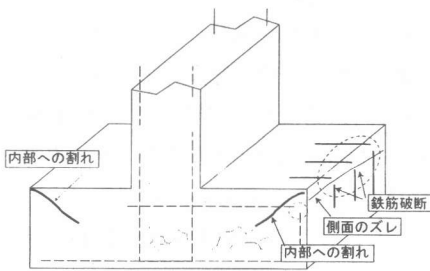


図-2

フーチングのひび割れおよび損傷状況

フーチングのひび割れおよび損傷状況を図-2に示す。フーチングの側面には鉄筋に沿った水平方向のひび割れ(数mm幅)が発生するとともに、側面および上面の中央部には亀甲状のひび割れ(1mm幅)も発生していた。上面の鉄筋位置ではズレが見られたので、その部分をはつり取ったところ、写真-1に示すように橋軸方向の上面の鉄筋が曲げ加工部、またはそのすぐ下の箇所ですべて破断していた。ASR膨張により破断した鉄筋には腐食は観察されず、鉄筋は絞りがないう状態で脆性的に破断していた。フーチングの上面では鉄筋の破断によりASR膨張を拘

束できなくなったので、鉄筋の破断部より斜め45度の方向にコンクリートの割れが発生していた。側面中央部から採取したコアの破損状況を写真-2に示す。コアの破損は表面部だけでなく内部でも発生しており、骨材の割れや骨材とセメントペーストの剥離なども観察された。コア試験体の強度試験結果を表-2および図-3に示す。コア試験体は比較的良好な箇所から採取されているにもかかわらず、大部分のコアの強度が設計基準強度を下回り、弾性係数も大きな低下を示していた。このことは、鉄筋破断が発生した構造体ではその後のASR膨張によりコンクリートの強度低下も同時に生じていることを示している。このため、フーチングの耐荷力はかなり低下しているものと判断され、フーチングでは補強対策が実施された^{3),4)}。

表-2 コアの強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	パルス速度 (m/sec)
最小値	13.0	8.8	4100
最大値	27.6	36.9	4800
平均値	20.3	16.1	4380

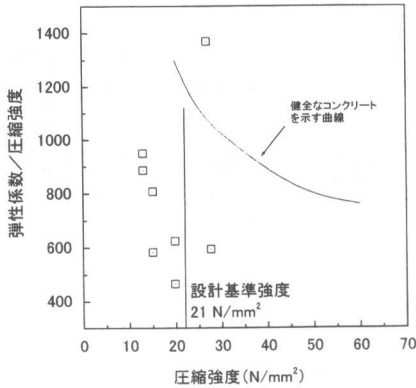


図-3 フーチングより採取したコアの
圧縮強度と弾性係数の関係

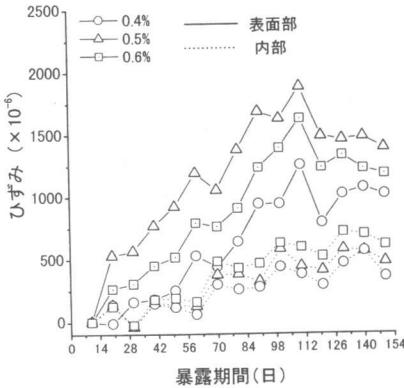


図-4
コンクリートのひずみの経時変化

3. 2 モデル試験体のコンクリートのひずみとひび割れ状況

モデル試験体のコンクリートのひずみ計測結果を図-4に示す。コンクリート打設後すぐに膨張が開始し、温度が上昇する夏季から秋季にかけて、大きな膨張ひずみが発生した。膨張ひずみの値は鉄筋の拘束の影響を受け、コンクリートの表面で1300~1900 μ 、内部で500~600 μ となった。しかし、本試験で設定した鉄筋比の範囲では、鉄筋比の相違がコンクリートの膨張ひずみ量におよぼす影響は明確ではなかった。

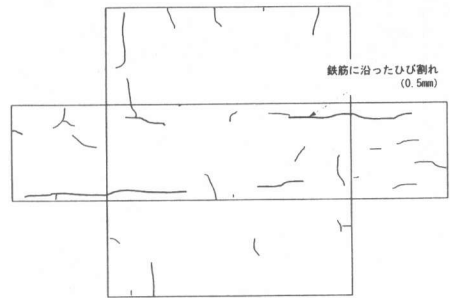


図-5

モデル試験体のひび割れ発生状況
(暴露期間：160日、鉄筋比：0.5%)

モデル試験体のひび割れ発生状況を図-5に示す。モデル試験体のコンクリートのひび割れは、両端部の対称的な位置に発生した軸方向鉄筋に沿う卓越したひび割れ(幅0.5mm)と側面および上面に発生した不規則なひび割れ(幅0.2~0.3mm)から成っていた。このようなひび割れの発生状況は鉄筋比が大きなものほど顕著であった。

3. 3 モデル試験体の鉄筋のひずみ

モデル試験体の鉄筋のひずみ計測結果を図-6に示す(鉄筋のひずみは4箇所位置にてほぼ同様な挙動を示したので、4箇所位置の平均値とした)。コンクリートの膨張に伴い鉄筋の折り曲げ部には引張ひずみが発生するが、鉄筋のひずみ量は隅角部からの距離により大きく相違した。すなわち、隅角部(II)は鉄筋比に関係なく比較的早期に降伏ひずみ(SD295Aの降伏ひずみの計算値は1800 μ 程度)をこえる大きなひずみが発生したが、隅角部より少し離れた位置(I, III)では鉄筋のひずみの値が大きく減少した。一方、隅角部より離れた位置(IV)では鉄筋比の小さいもの(0.4%)は鉄筋比の大きいもの(0.5%および0.6%)と比較してひずみの値が増大した。この

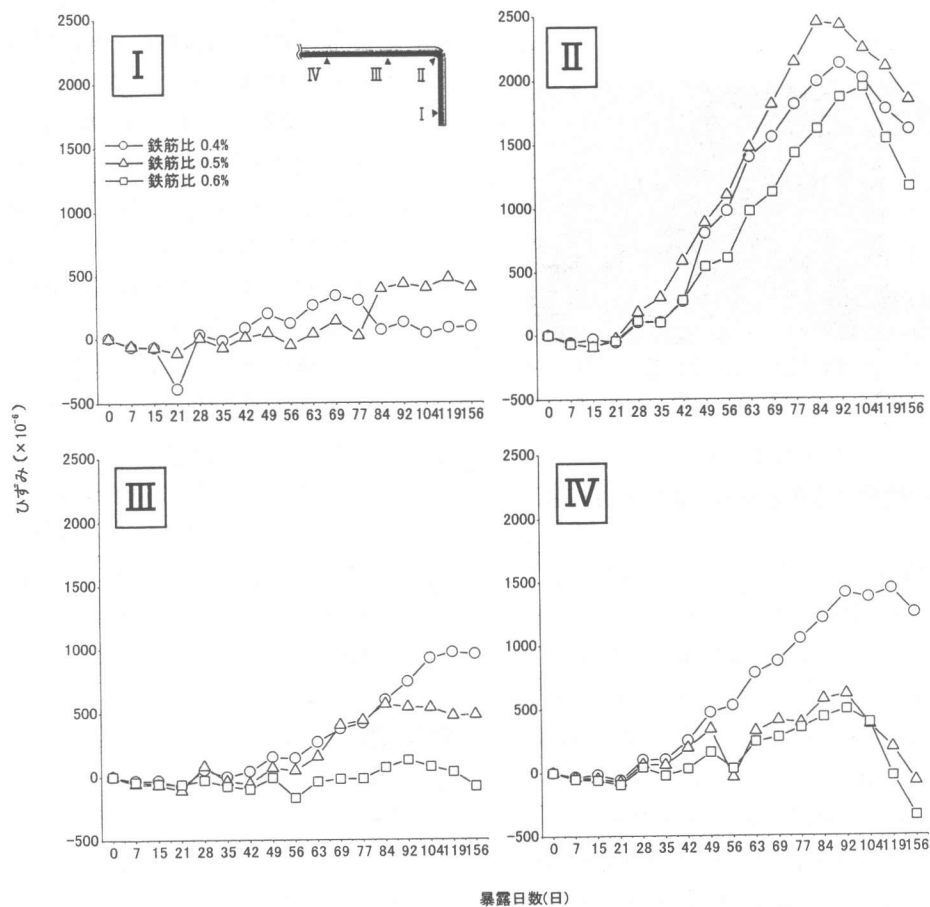


図-6 モデル試験体の鉄筋に発生するひずみの経時変化

ように,ASR膨張による鉄筋のひずみは隅角部に集中する傾向があり,この結果は実構造物で発生した鉄筋破断の位置とも一致した。

3. 4 鉄筋破断の機構

フーチングで鉄筋破断が発生したのは,構造物の側面端部であり,曲げやせん断の影響を受けていない箇所であった。従って,ASRによるコンクリートの過大な膨張により発生した鉄筋の引張力によるものと推定された。

実験の測定結果が示すように,大きな引張ひずみが発生した曲げ加工部では,水平方向の配筋が支点となり,ASRによるコンクリートの膨張力が集中的に作用したようである。

一方,鉄筋の破断面に観察される腐食は軽微なものが多く,腐食が直接に参与している可能性は小さかった。また,鉄筋破断面は脆性的であり,伸びの形跡はまったく見られなかった。鉄筋の破断面の内側には,写真-3に示すように半月状の割れが観察される場合があり,高い引張応力が作用している鉄筋の曲げ加工部の内側で年月をかけてまず割れが発生し,その後急速に破断へと進展したものと推測された。ASR膨張が長期にわたって持続している時には,一本の鉄筋が破断すると,他の鉄筋が引張応力を受け持つことになり,継続的に鉄筋破断が発生し,同時にコンクリートの劣化が内部へと進行したようである。

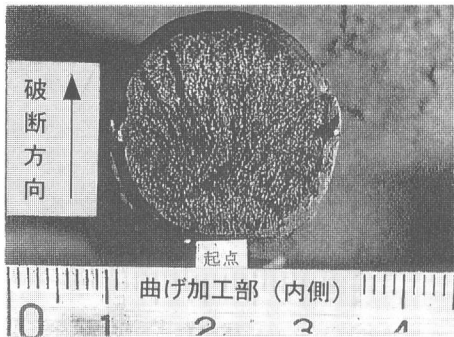


写真-3

脆性的破壊が発生した鉄筋の破断面

鉄筋の割れの形状は、ステンレス鋼などの応力腐食割れに類似しているが、コンクリート中の鉄筋が応力腐食割れをおこす環境条件は特定されていない。鉄筋の曲げ加工による局所的な降伏強度や伸び能力の低下、微細なひび割れや残留応力の発生など、鉄筋に関する様々な要因も検討する必要がある。しかし、個別の要因のみで鉄筋の破断機構を説明することは困難であり、上記の要因が複合し、鉄筋の破断が発生したと考えるのが妥当である。

4. 結論

鉄筋破断が発生したフーチングの調査およびモデル試験体の実験結果をまとめると次のようである。

- (1) コンクリート構造物が長期にわたり水の影響を受ける環境下にある場合、ASRによる過大な膨張により、鉄筋が曲げ加工部で破断する事例が確認された。
- (2) 鉄筋が破断した場合には、コンクリートの拘束効果がなくなり、大きな内部損傷が発生した。
- (3) 鉄筋の破断面は脆性的であり、伸びの形跡は認められなかった。
- (4) モデル試験体の鉄筋ひずみの計測より、鉄筋の折り曲げ加工部には降伏ひずみをこえる大きなひずみが発生するのが確認された。
- (5) 折り曲げ加工部の鉄筋破断は、ASR膨張による引張力によるものであるが、鉄筋の曲げ加工時の残留応力の発生や降伏強度、伸び能力の低下も影響していると推測された。
- (6) ASR膨張が持続する場合には、一本の鉄筋が破断すると、他の鉄筋が引張応力を受け持つことになり、連続的に鉄筋破断が進行すると考えられた。

参考文献

- 1) 大深伸尚, 鳥居和之, 池富修, 川村満紀: 鉄筋コンクリート堤体の耐久性調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.43-48, 2000.
- 2) 池富修, 大深伸尚, 久保善司, 鳥居和之: ASRが発生したコンクリート構造物の耐久性調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, 2001.
- 3) Wood, J.G.M. and Wickens, J.P: Structural Effects of AAR on Reinforced Concrete and Consideration of Residual Action, Proc. of 6th Inter. Conf. on Alkalis in Concrete, pp.487-494, 1983.
- 4) 鳥居和之, 奥田由法, 石井浩司, 佐藤健一: PC 鋼材により補強したASR損傷コンクリート柱の交番載荷試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1051-1056, 1999.