論文 反応性骨材を用いた暴露供試体の長期劣化

上原 伸郎*1·幸左 賢二*2·上園祐太*3

要旨:反応性骨材を用いた複数の鉄筋コンクリート供試体を1.5年から5年間の長期暴露に供し、コンクリートの外観および内部ひび割れを詳細に目視観察することで、外観劣化と内部劣化のそれぞれの特徴と連続性について検討を行った。その結果、外観ひび割れは鉄筋拘束の方向に依存しながら長さを増すことで進展し、内部ひび割れは、劣化が大きく進んだ場合でも骨材粒子界面、および内部に発生するものが主要であった。内部から表面に連続するひび割れは、劣化の進行とともに鉄筋曲げ加工部に対して約45°の角度をもったひび割れが卓越する傾向を示し、鉄筋外側では曲げ戻しに起因すると考えられる付着切れが認められた。 キーワード: ASR、屋外暴露、ひび割れ、経時変化

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下, ASR)が生じた構造物で は、コンクリート内部からの膨張作用に起因して、構造 物外観上にはひび割れ損傷が顕在化する。維持管理にお いては構造物の状態を示す指標として、主にこの外観ひ び割れを観察することで劣化度の判断が行われている。 しかしながら、内部膨張によって二次的に生じた外観ひ び割れ¹⁾は、ASRによる影響を必ずしも正確に表わして いるわけではない。加えて、近年のASR劣化構造物にお ける調査事例では、コンクリート内部において卓越した ひび割れ損傷²⁾や、内部膨張による鉄筋曲げ加工部の破 断など、外観からでは十分に判断できない事例も多数報 告されている。以上を勘案すると、ASRによる構造物の 劣化程度を適切に評価するためには、外観からの情報の みならず、構造物内部における劣化現象も十分に理解し ておく必要がある。

したがって本研究では,鉄筋コンクリートからなる ASR供試体を対象に,外観劣化と内部劣化の関係性につ いて検討することとした。具体的には,複数のASR供試 体を1.5年~5年の暴露試験に供することで,暴露期間の 相違に基づく劣化度の差を評価した。また,これらの違 いをASR劣化の経年的な変化と捉えることで,外観劣化 と内部劣化の経時的な変化,およびその関係性について 比較検討を行った。検討フローを図-1に示す。

2. 供試体概要

2.1 供試体形状および配合

コンクリート配合を表-1に、供試体形状を図-2に 示す。コンクリートの配合は、W/C=46%、s/a=43%、単 位水量175kg/m³であり、セメントには普通ポルトランド セメントを使用した。反応性骨材には、細骨材に長崎県 産砕砂、粗骨材には北海道産砕石、非反応性骨材には、

*1 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所(正会員)

*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D. (正会員)

*3 九州工業大学 工学部建設社会工学科(学生会員)

細骨材に洞海湾産海砂, 粗骨材には福岡県産硬質砂岩を それぞれ使用した。なお, 反応性骨材の岩種はいずれも 安山岩である。反応性骨材の含有比率は, 細骨材におい て反応性骨材と非反応性骨材の比率を 6:4, 粗骨材では 同じく 5:5 とした。ASR の促進を目的として, case4~6 供試体では NaCl, case7~9 供試体では NaOH を添加し, ASR 促進添加剤の添加量は, コンクリート中における等 価アルカリ量(Na₂Oeq)が 8kg/m³となるように調整した。

研究目的							
ASRによる内部劣化と外観ひび割れとの関係把握							
V							
ASR劣化供試体の条件(着眼点)							
1. 反応性骨材を用いた配筋条件下のASR供試体							
2. 長期の屋外暴露(1.5年~5年)							
3. ASR劣化程度の差異							
美施填日							
1. 外観ひび割れ状況の観察							
2. 内部ひび割れ状況の観察							
・供試体軸に沿った大型コア側面(φ190mm×530mm)							
3. 内部から外部に至るひび割れ形態変化の観察							
・供試体軸に直交する切断面(340mm×340mm)							
(
1. 外観ひび割れの経年変化とその特徴							
2. コンクリート内部ひび割れの経年変化とその特徴							
3. 外観と内部のひび割れ傾向の比較							
4. 内部から表面に至るひび割れ損傷の関係性							

図-1 検討フロー

表-1 コンクリート配合

単位量(kg/m ³)								
水	セメント	細骨材		粗骨材		AE	化进用 (Na ₂ Oeq)	
		反応性	非反応	反応性	非反応	減水剤	(kg/m ³)	
175	381	431	287	509	509	1.14	8.0	

供試体は、ASR による損傷及び曲げ加工部での鉄筋破 断が生じた建設後 20 年以上経過した橋脚梁を例に、1/8 スケールのものとした。軸方向鉄筋は、実橋の引張主鉄 筋比と等しくなるように1側面当たり D19 鉄筋を4本配 置することとし、さらに、帯鉄筋の曲げ加工部に作用す る膨張力を等価とするため、各辺の軸方向鉄筋比が同一 となる正方形断面の供試体とした。供試体寸法は、外形 340×340×670mm とし、配筋は図-2に示す通りとした。 帯鉄筋に使用した D16 鉄筋は、鉄筋破断が生じた構造物 が多数報告されている関西地区の橋梁から採取した直線 状の鉄筋(以後、旧鉄筋)を改めて曲げ加工することに よって使用した。曲げ加工半径は、図-2(2)に示す鋭角 フック以外の箇所で、case4~6 では1.5D (D は鉄筋径)、 case7~9 では 1.0D にそれぞれ設定した。

2.2 供試体劣化度

表-2に本研究における実験ケースとして,各供試体 の暴露期間および試験時における幅 0.2mm 以上を対象 とした外観ひび割れ密度を示し,本稿で対象とした各 case のひび割れ密度(上,東,西面の平均)の経年変化 を図-3に示す。なお,供試体は,長軸方向が南北の方 位と一致するよう屋外暴露を行っている。本研究では, 表-2に示す9体の供試体を用いて各項目の検討を行っ ているが,本稿では,外観と内部の比較を主な検討課題 とするため,現在までに試験が終了している case4~ case8 の 5 体の結果から考察を加える。なお,シリーズ IIIでは, case7 (1845日)より前に case8 (1523日)で試 験を実施しており,筆者らの既往の成果報告との整合を 図るために,劣化度(外観ひび割れ密度)と供試体番号 の順序を整えることなく表記する。

3. 外観劣化

3.1 外観ひび割れの経年変化

図-4に case4 から case8 供試体の最終(試験実施)段 階における外観ひび割れ損傷図を示す。図-4では、そ れぞれの供試体の東面を代表例として示しており、東面 のみから算出されたひび割れ密度を併記した。また図中 では、幅 0.20mm 以上のひび割れを 0.20mm 以上 0.40mm 未満と 0.40mm 以上の 2 種類の線で表記している。

図-4より、すべての供試体に共通することとして、 軸方向鉄筋と平行するひび割れが主要となっており、鉄 筋の拘束条件に依存した一般的な ASR による外観ひび 割れの様相を呈している。本研究の供試体では、かぶり 厚さが 20mm 程度と薄いことが一つの要因とも考えられ るが、すべての供試体で軸方向のひび割れ発生箇所は、 概ね軸方向鉄筋直上に多く分布する傾向となった。

続いて、外観ひび割れの形態を比較した 1 例として、 各 case の東面で認められた外観ひび割れの長さを比較し、



長-2 実験ケース

シリーズ	case	暴露期間 (日)	外観ひび割れ密度 幅0.2mm以上(m/m ²)	主な検討項目				
Ι	1	463	1.78	外観損傷				
	2	790	3.98	コンクリート物性				
	3	1149	5.39	鉄筋損傷				
Π	4	550	3.86	内知坦/何				
	5	1168	5.01	21				
	6	1538	5.98	内部損傷				
ш	7	1845	9.14	・いい割れ				
	8	1523	6.72	·44 年4 4 年4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				
	9	1845	9.43 (暴露継続中)	以加加貝爾				







図-5に示す。ここでは、ひび割れ長さを比較する対象 として、幅0.20mm以上で連続的に認められたひび割れ のうち、最長のものを含め5番目の長さのものまで5本 のひび割れを用いることとした。ひび割れ長さは、連続 したひび割れの両端を直線で結んだ際の長さと定義して いる。なお、計測例は、図-4中に併記した。

図-5より,各供試体で比較的長く進展したひび割れ 5本の長さを用いた本稿の比較では,最長のひび割れ,5 本の平均長さともに,ひび割れ密度の推移と同様な傾向 が窺われる結果となった。

最も暴露期間が短い case4 (550 日; 3.90m/m²(東面)) から最も長い case7 (1845 日; 9.07m/m²(東面)) までの差 異を当該 ASR 供試体の経年的な変化と考えると, 外観ひ び割れの形態 (図-4), およびひび割れ長さの延伸傾向

(図-5)より,外観上のひび割れ損傷は,拘束体であ る鉄筋に沿った方向に発生した後,劣化の進展とともに, ひび割れ長さが増大する傾向にあると推察される。

3.2 外観ひび割れと側面変形

ASR 劣化が進行した構造物では,部材表面が丸く膨ら むような膨張変形⁴や,場合によって段差を伴う著しい ひび割れ損傷が認められる。本項では,対象とする5体 のうち最も劣化が進展した case7 供試体を例に外観ひび 割れとコンクリート表面における変形について報告する。

図-6に表面膨張変位量の計測方法を示す。膨張変位 量は、供試体側面に沿って直線状の基準線を設置し、供 試体と基準線の距離を測定することで求めた。測定点は、 供試体の隅角部から20mmの位置を起点とし50mm間隔 で7点とした。なお、測定結果は、測定点の両端にあた る図中a、およびgで計測されたLa、およびLgの計測 値がそれぞれ0mmとなるように、側面全体に一律の傾 斜を与えることで、LbからLfの数値補正を行っている。 case7上面の計測結果を外観ひび割れと併せて図-7





距離を測定

基準線と供試体表面間の

に示す。図-7に示すように、供試体側面は概して丸く 膨らむような変形性状となっており、中央付近を最大と して 1.0mm 程度の膨張変形が認められた。なお、case7 上面では、クラックスケールによる実測値として、図中 (a)の箇所において最大幅 3.0mm, 段差 1.0mm の顕著なひ び割れが供試体南西側で認められており、図-6に示し た測定方法においても,当該箇所を含む測線で同等の変 位量が計測されたことから相応の精度を持って表面の膨 張変位量が計測されていると判断した。

続いて,前述した最大ひび割れを含む case7 供試体上 面の損傷状況をより詳細にトレースし,図-8に示す。

最大幅を示したひび割れは,供試体上面の図中(1)に示 した南西端より82mmの位置から図中(2)の位置までの直 線距離で153mmのひび割れ長さを有しており,ひび割 れ幅は,図中(1)の近傍で3.0mmを呈していた。最大の段 差は,図中(3)に示す西側面から46mmの位置で認められ た。また,当該ひび割れの近傍(図中(4))においても 1.0mmの段差が認められた。ここで,最大の段差が確認 された図-8(3)の位置と図-2に示した配筋条件から 判断すると,最大幅のひび割れは,供試体の端部から概 ね100mmの位置に生じており,帯鉄筋配筋位置と概ね 合致する箇所に生じたものである。

4. 内部劣化

4.1 内部ひび割れの経年変化

内部ひび割れ観察面,およびコア削孔位置を図-9に 示す。内部コンクリートの劣化状況については、φ190 ×525mm コア側面のひび割れ観察,ならびに南面から 145mm の位置で供試体の横断方向に切断した切断面の ひび割れ観察によって評価することとした。

図-10に大型コア側面における内部ひび割れ損傷 図の一例として, case7 供試体の 1/4 面 (東側に位置した 1/4 側面)を示す。なお, case4 については大型コア側面 の観察を行っていないため,本節では case5, 6, 7, およ び case8 を検討の対象とした。

筆者らは、既往の研究⁵⁾において、コンクリート内部 に発生した目視レベルで確認できるひび割れ損傷は、主 に骨材粒子の界面、あるいは内部に生じることを明らか としている。図-10に示した case7 供試体(材齢1845 日、外観ひび割れ密度9.14m/m²)においても骨材周りの ひび割れ長さは、幅0.05mm 以上を対象とした全ひび割 れの約85%を占めており、内部ひび割れの発生形態は既 往の研究と同様であることが確認された。

次に,外観ひび割れ密度と内部ひび割れ密度の関係を 図-11に示す。幅 0.20mm 以上を対象とした内部ひび 割れ密度では, case6 で 7.28m/m²(図中(a))と他の供試 体と比べて高い数値を示した。しかしながら,幅 0.05mm 以上の全てのひび割れを対象とした内部ひび割れ密度の 変化をみると,全体的には,外観ひび割れ密度の増加に 伴って内部ひび割れ密度も増加する傾向となっており, また,外観ひび割れ密度が 6.00m/m²を超えるあたりから は,やや緩やかな増加傾向となっている。

以上から,鉄筋コンクリート供試体に生じた外観ひび



図-9 内部ひび割れ観察面およびコア削孔位置

割れと内部ひび割れの特徴を基に,ひび割れ損傷の傾向 を整理すると次のように推察される。鉄筋コンクリート の外観では,かぶり部分において鉄筋拘束の影響が少な いことから,暴露期間の増加に伴いひび割れ進展が生じ やすく,一方で内部コンクリートは,鉄筋による拘束が 大きいことから目視レベルのひび割れ進展は外観に比べ て抑制されたと考えられる。

4.2 内部ひび割れと外観ひび割れの連続性

本節では, case6 (外観ひび割れ密度 5.98m/m²), case8 (同 6.72m/m²), および case7 (同 9.14m/m²) 供試体の帯 鉄筋近傍における切断面を観察することによって, 内部



[ひび割れ表記] ―― 幅0.4mm以上1.0mm未満 ―― 幅0.2mm以上0.4mm未満 […] 幅0.2mm未満 ● 鉄筋 [ひび割れ密度] 12.43m/m² (幅0.05mm以上の全てを対象) 5.68m/m² (幅0.20mm以上を対象)

図-10 内部ひび割れ状況(case7の外観東面以深に相当する1/4側面)

ひび割れと外観ひび割れの連続性について考察を加える。

図-12に3体の供試体の切断面におけるひび割れ発 生状況を示す。なお、case8は、1本の帯鉄筋に沿って切 断したことからこれを正確にトレースし、case6、case7、 および case8の他の1本については、推定位置を示した。

図-12(1) (case6 供試体切断面) では、外観に生じ ているひび割れは、表面に対して鉛直方向に生じ、その 先端は帯鉄筋の深さで収束していた。一方、帯鉄筋と一 致する深さに生じたひび割れは、概ね帯鉄筋に沿った方 向(供試体表面に対して水平)に卓越する傾向が見て取 れる。

次に、case6より劣化が進んだ case8 供試体(外観ひび 割れ密度 6.72m/m²)の断面を見ると(図-12(2))、図 中(a)に示す箇所において鋭角フック(2.0D)の部分では あるが、曲げ加工部の外側に明確な付着切れが確認され、 かぶりを剥離するようにひび割れが発生していた。また、 図中(b)では、曲げ加工部内側で側面に対して 45°程度の 角度を持つ複数のひび割れが確認された。

続いて、図-12(3)に示した case7 供試体(外観ひび 割れ密度 9.14m/m²)の切断面を見ると、図中(c)では鉄筋 推定位置ではあるものの, case8 と同様に鋭角フック近傍 で付着切れに結びつくようなひび割れ損傷が認められた。 また,前述の図-8に示した段差を伴う幅 3.0mm のひび 割れに相当するものであるが、図中(d)に示す箇所では, コンクリート表面付近で最大幅 2.0mm を示す鉛直方向 のひび割れを呈し、以深では、側面に対して約45°の角 度をもって帯鉄筋位置を貫通するとともに、供試体中心 付近まで延伸する非常に顕著なひび割れが確認された。

ここで, case8 供試体の断面観察から, 図-12(2)(a) に示した部分を拡大して図-13に示す。

case8 供試体では,帯鉄筋を縦方向に2 等分するように 断面切断を行ったことから,帯鉄筋周囲に生じたひび割 れ損傷が直接観察できている。図に示す通り,鋭角フッ



ク部で生じた付着切れは、長さ151mm で最大幅は1.0mm である。コンクリート表面では、隅角部から 60~70mm 付近においてかぶりコンクリートを剥離するように幅 0.4mm を呈するひび割れが生じており、図-13から帯 鉄筋との位置関係をみると、曲げ加工部の概ね 90°区間 に相当する箇所であった。また、曲げ加工の曲線部分に おける鉄筋外縁の長さは、図中に示す通り約 113mm の 設定であることから、付着切れは曲げ加工部分の全域か ら、さらに 40mm 程度を延長した範囲で生じていたこと が確認できる。

ASR 部材では、コンクリート側面が丸く膨らむ変形を 生じ、これと併せて、鉄筋隅角部は曲げ戻されると考え られる⁴⁾。case8 および case7 の切断面で見られた隅角部 の付着切れ(図中(a), (c))や45°方向に発生したひび割 れ損傷(図中(b), (d))は、内部コンクリートの膨張変形、 供試体隅角部で生じた鉄筋の曲げ戻し、ならびに帯鉄筋 とコンクリート表面の変状に伴ったかぶり部分の損傷状 況を再現していると考えられる。



図-12 切断面におけるひび割れ発生

5. まとめ

反応性骨材を用いた配筋条件下のASR供試体を1.5年 から5年に及ぶ暴露試験に供し、外観と内部のひび割れ 損傷を詳細に観察することによって、外観劣化と内部劣 化の特徴、およびその関係性について検討した結果、以 下の知見を得た。

(1) コンクリートの外観上に顕在化する劣化現象のうち, ひび割れ損傷は,鉄筋による拘束条件を反映した方向性 を持つひび割れが長さを増しながら進展していく。また, コンクリート側面が丸く膨らむような変形性状と併せて, 劣化が特に顕著な部分では段差を伴うひび割れが形成さ れる場合がある。鉄筋拘束の内部においても目視レベル のひび割れ損傷が生じており,外観と同じく,ASR 進展 に伴ってひび割れ密度が増加する傾向を示した。

(2) 暴露期間が異なる複数の供試体における外観ひび割れ密度の差をASR劣化の進展と捉え、これらの断面観察から内部ひび割れと外観ひび割れとの経年的な関係について検討した結果、内部から表面に向かうひび割れ損傷は、鉄筋曲げ加工内側において概ね45°の角度をもって進展し、劣化が大きく進んだ場合には、帯鉄筋位置を貫通する連続的なひび割れに成長すると推察された。また、鉄筋曲げ加工部が曲げ戻されることで曲げ加工部外側には付着切れが発生する可能性も示唆した。

参考文献

 小林一輔,白木亮司,河合研至:アルカリシリカ 反応によるコンクリート構造物の膨張とひび割れの 発生機構(I),生産研究, Vol. 40, No. 12, pp. 616-619, 1988



図-13 付着切れ発生箇所(図-12(2)(a)詳細図)

- Ono, K., Taguchi, M. : Long-Term Behavior of AAR Bridge Pier and the Internal Deterioration, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction pp. 1167-1174, 2000
- 3) 阪神高速道路公団:コンクリート構造物の健全度に 関する調査研究業務(その3)報告書,(財)阪神高 速道路管理技術センター,1985.9
- 土肥宏記,幸左賢二,草野昌夫,合田寛基: ASR を 生じた構造物の隅角部の変形性状の評価,コンクリ ート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.983-988, 2010.7
- 5) 草野昌夫,幸左賢二,上原伸郎,柴田綾野:ASR供 試体の配筋条件下における内部劣化性状,構造工学 論文集, Vol.59A, pp. 878-888, 2013.3