論文 ASR を生じた実構造物の長期的な損傷度評価

三浦 正嗣*1・幸左 賢二*2・久利 良夫*3・川島 恭志*4

要旨:本研究はアルカリシリカ反応(ASR)により損傷した実構造物の経年的な調査データを基に分析を行っている。既往の検討や調査報告により、コアの物性値は長期的に低下していくことが知られているが、その低下推移やひび割れとの関係性について検討された例は少ない。したがって、本検討では、長期的に進展する ASR ひび割れとコンクリートの物性低下率との関係性評価を目的として、実構造物の調査データの分析および供試体実験によって検討を行った。その結果、橋脚全体のひび割れ損傷度から内部コアの物性低下率を推定できる可能性を示し、ASR ひび割れが物性低下に及ぼす影響を明らかにした。 キーワード: ASR、実構造物、円柱供試体、ひび割れ密度、コアの圧縮強度・静弾性係数

1. はじめに

現在までの多機関の調査報告により、アルカリシリカ 反応(以下,ASRと表記)により劣化を生じたコンクリ ートは、長期的にその力学的特性が低下することが知ら れている。しかし、実構造物レベルで、ASRによる劣化 進展とそれに対応した力学的特性の低下率の関係を経 年的に調査された事例は少ない。

したがって、本稿では適切な維持管理対策,損傷度評価の一指標を得ることを目的として,1)実構造物の調査 データの分析および2)供試体実験によってASRによる 劣化進展とコンクリートの物性値の関係性を検討した

(図-1 参照)。まず,1) 実構造物の調査データの分析 では、過去25年もの間、比較的継続的に調査が実施さ れている実構造物の調査データを基に橋脚外観のひび 割れと採取コアの物性値に着目し、両者の関係性を分析 した。また、2)供試体実験では、 $\phi100 \times 200 \text{mm}$ の無筋 円柱供試体を作製し、ASR ひび割れの程度が圧縮強度低 下に及ぼす影響を定性的に表すことを試みた。

2. 実構造物調査データの分析

2.1 検討対象橋脚および調査概要

検討対象は、関西地区でASR と判定された橋脚 87 基 のうち、損傷度が大きく、経年的にデータが多くとられ ている橋脚 21 基を対象とした。ASR の判定は、橋脚外 観のひび割れ発生状況やコア採取調査によるゲルの分 析等によって判定している¹⁾。

表-1 に検討対象橋脚の概要を示す。検討対象橋脚21 基は,鉄筋コンクリート製のT型単柱式橋脚(以下,RC 橋脚と表記)が7基と,梁部にプレストレスを導入した 橋脚(以下,PC梁橋脚と表記)が14基あり、すべて竣 工後27~37年が経過している。これらの橋脚は、いず

*1 九州工業大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (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 阪神高速道路株式会社 技術管理室 技術開発グループ (正会員)

*4 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)



ASRによるひび割れ損傷とコンクリート物性低下率との関係性評価

図-1 検討フロー

表-1 検討対象橋脚概要

	橋脚数	供用年数	$f'ck(N/mm^2)$	補修回数
RC橋脚	7基	07 07年	27	. –
PC梁橋脚	14基	2/~3/年	35	max:4 回 ave :2 2回
合計	21基			ave . 2.2 🖂

表-2 採取コアの一軸圧縮試験回数による内訳

	採取って冬	コアの一軸圧縮試験回数				
	과씨의가또	3回以上	3回未満	/		
RC橋脚	A 75	3基	4基			
PC梁橋脚	φ /5mm	3基	11基	max:7 回 ave :2 1回		
合計	/	6基	15基	ave . 2.1 円		

れも ASR が社会的に問題となった昭和 58 年以降より継 続的に調査・診断が行われている。今回の検討では,経 年的な調査データの中でも特にコアの物性値(圧縮強度, 静弾性係数)に焦点を当てて検討を行った。

ASR の補修としては、ひび割れ注入および表面保護工 による補修が最大で4回、平均2.2回実施されている。 表-2に採取コアの一軸圧縮試験回数による内訳を示 す。表より,橋脚 21 基において,圧縮試験を行う目的 で詳細調査が行われた回数は平均で 2.1 回であり,最大 で 7 回実施されている。橋脚 21 基のうち継続的にコア 試験が 3 回以上実施されている橋脚 6 基(橋脚 A, C, D, H, J, N) は,竣工後初期の段階からひび割れ損傷が著 しかったため,今回は特にこの橋脚 6 基を重要視するこ ととした。

2.2 橋脚外観のひび割れ

(1) 代表的なひび割れ損傷例

図-2 に橋脚 H の外観のひび割れ損傷例を示す。図より、主なひび割れは梁の天端および側面に主鉄筋方向に沿って発生しており、ASR によるひび割れの特徴が認められる。また、橋脚 H は、竣工後 10 年においてひび割れ注入および表面保護工による補修が実施されたが、その後も膨張が進展し、竣工後 24 年調査時には表面被覆材の上にひび割れの再発生が確認されている。

(2) 累積ひび割れ密度

本検討では、図-2 に示すような橋脚の定期点検や補 修時の調査で作成されているひび割れ損傷図を用いて ひび割れ密度を算出し、ASR による損傷度の評価を行う ²⁾。ひび割れ密度は、経年的なひび割れ損傷度を把握す るために、補修前の値に補修後に発生した表面塗膜上の 新たなひび割れ密度を加算し、累積ひび割れ密度として 評価している。検討対象面積は、ひび割れ損傷図が多く 取られている梁側面(2 面)および上面とした。また、 対象とするひび割れ幅は、実構造物の調査時に RC 橋脚 で 0.3mm 以上、PC 梁橋脚は 0.2mm 以上の主鉄筋方向の ひび割れに着目していることから、RC 橋脚と PC 梁橋脚 ともに 0.2mm 以上のひび割れを対象に検討した。

図-3に ASR による劣化が顕著であった橋脚 21 基の 累積ひび割れ密度の経年変化を示す。図より,特徴的な のは,劣化が特に顕著で累積ひび割れ密度の突出した RC 橋脚(橋脚 C, D)2基であり,竣工直後より急激にひび 割れ密度が増加し,竣工後8年でひび割れ密度が7 m/m² と大きくなっている。その他の橋脚では,膨張速度や累 積ひび割れ密度の進展量に差があるものの,全体的な傾 向としては,累積ひび割れ密度は竣工後10年程度で大 きく増加し,その後は漸増していく傾向にある。

2.3 採取コアの力学的特性

(1) コア採取位置とコアのひび割れ性状

コア採取位置は、図-2 に示すように橋脚梁部の側面 において梁付け根部付近および梁端部から橋軸方向に φ75mm で採取されている。一度の調査で採取されるコ アの本数は、平均3本程度であり、その後成型され、各 種試験(一軸圧縮試験,促進膨張試験,ゲル分析など) に供されている。

コアのひび割れ性状の代表例として、N橋脚の貫通コ



アのひび割れ展開図(竣工後21年調査時)を図-4に示 す。図より,採取コアにはコアの円周方向に沿った幅0.10 ~0.35mmのひび割れが卓越しており,なかにはコアが 破砕している箇所も見受けられた。コアのひび割れの方 向性の特徴はASRによる劣化が顕著な他の橋脚や既往 の調査報告からも同様の傾向が確認されている。このよ うなひび割れが発生するメカニズムは明らかとなって いないが,主鉄筋による拘束圧が影響していると思われ る。

(2) 圧縮強度と静弾性係数

図-5 および図-6 にコア試験が継続的に 3 回以上行 われている橋脚 6 基に着目した圧縮強度および静弾性係 数の経年変化を示す。コア試験値は各調査年で複数本コ アが採取されているため、それらの平均値を用い、設計 基準値で除すことでその低下率を算出している。図より、 圧縮強度および静弾性係数は、コア採取位置による影響 からばらつきが見られるものの、初期(竣工後10年程度) の低下が著しく、その後は低下勾配が緩やかになる傾向 にある。設計基準値に対する低下率は、従来からの報告 からも明らかであるが、静弾性係数の低下が著しく、損 傷が著しい橋脚において圧縮強度で2~3割程度、静弾性 係数で6~7割程度の低下率であった。

2.4 累積ひび割れ密度とコアの力学的特性の関係

以上より,図-3 および図-5 で,橋脚外観の累積ひ び割れ密度とコアの物性値は,竣工後10年程度まで劣化 が大きく進行し,それ以降はほぼ横ばいとなるような同 様な劣化進展を追っている傾向が見られたため,両者の 関係性の分析を行うこととした。

図-7 に ASR 橋脚 21 基の各調査年データにおける累 積ひび割れ密度と設計基準強度に対する圧縮強度平均値 の圧縮強度比の関係を示す。図より,圧縮強度比は累積 ひび割れ密度が大きくなるに従って比例的に低下してい く傾向が得られた。よって,図中には全データを用いて 算定した近似直線(平均式)と5%超過式を示し関係性の 評価を行っている。5%超過式は信頼性解析によって導か れた信頼性区間 90%,下側超過確率 5%を示している。

図-7 中の平均式より、膨張前の時点(ひび割れ密度 0m/m²)でのコア圧縮強度は、設計基準強度に対して1.24 倍の値を示しているが、累積ひび割れ密度が3m/m²以上 になると、圧縮強度比は全て1.0以下となっており、 2m/m²程度以上になると設計基準強度に対して2割程度 低下する傾向となっている。

3. 供試体実験

図-8に円柱供試体実験の検討内容を示す。

実構造物の分析結果より,橋脚外観のひび割れ損傷度 と内部コンクリートの力学的特性の低下はある程度相関 があることが明らかとなった。しかし,圧縮強度がASR の劣化進展に伴って漸減していく現象やその低下率が基 準値に対して2割程度で収束している原因は明確でない。 ここでは,現象の一要因を検討する目的として,試験体 自体に発生しているASR ひび割れに着目し,円柱供試体



図-8 円柱供試体実験の検討内容

表-3 円柱供試体のコンクリートの配合

供試体	W/C	a/a	単位量(kg/m ³)					AE		
	(%)	5/a	W	С	S1	S2	G1	G2	NaCl	減水剤
N(健全)	50.0	44.0	172	246	212	402	509	515	0	0.965
SG(ASR)	30.0	44.0	173	340	312	492	508	515	11.8	0.805

※ セメント:普通ポルトランドセメントNa₂O量=0.50wt%, AE減水剤:ポゾリスNo.70 (リグニンスルホン酸)
 細骨材S1:滋賀県野州川産川砂(非反応性),細骨材S2:長崎県島原産砕砂(反応性)
 粗骨材G1:兵庫県西島産(非反応性),粗骨材G2:北海道産(反応性)

を用いて膨張が進展していく各段階での供試体の ASR ひび割れと物性値の関係について検討を行った(図-8 参照)。

3.1 実験概要

表-3 に円柱供試体のコンクリートの配合を示す。表 より、コンクリートの配合は、水セメント比 50%で、反 応性細骨材を 60%、反応性粗骨材を 50%の割合で混入し ている。また、添加アルカリには NaClを用い、SG 供試 体 (ASR) は、コンクリートの等価アルカリ量 (Na₂Oeq) が 8kg/m³となるように設定し、N 供試体(健全) はアル カリを添加しない比較用として作製した。円柱供試体の 形状は φ 100×200mm の無筋供試体である。

実験条件は、コンクリート打設後1日で脱型し、材齢 28日まで20℃水中養生を行い、膨張が進展する前の初期 値(供試体の物性および基長)を測定した。初期値測定 後は、40℃, R.H.95%以上の環境で促進養生を行い、ASR によって膨張が進展していく4材齢(500,1000,1500, 2000µ)で一軸圧縮試験および縦カット断面のひび割れ性 状確認試験を各材齢3本ずつ実施している(表-4参照)。 また、膨張率測定用のコアはN供試体とSG供試体それ ぞれ3本の平均値を用い、膨張量はコンタクトストレイ ンゲージ(測定精度:1/1000mm)を用いて測定した。

3.2 供試体の膨張量と力学的特性

図-9に、供試体の膨張量測定結果を示す。図より、N 供試体では膨張量は進展していないが、SG供試体では材 齢 50 日程度より膨張が進展しはじめ、材齢 110 日で約 2000µ まで膨張が進展する結果となった。一軸圧縮試験 は図に示すように、500µ 程度進展ごとに N 供試体、SG 供試体それぞれで実施している。

図-10 に SG 供試体の膨張量と物性値の関係を示す。 SG 供試体のデータは、同材齢時の N 供試体のデータで 除すことで、健全供試体からの低下率を算出している。 図より、円柱供試体においても実構造物の分析結果およ び従来からの報告同様、膨張が進展していく初期段階

(1000µ 程度まで)では物性値の低下は顕著に現れない が,膨張量が1500µ 程度まで進展すると大きく低下し, 低下率は健全供試体に対して圧縮強度で2割程度,静弾 性係数で6割程度となった。

3.3 供試体のひび割れ性状確認試験

ASR 供試体による物性値の検討は,現在までに多機関 により数多く実施されているが,その中で供試体自体に 発生しているひび割れと物性値の関係性を詳細に検討さ れた例は極めて少ない。よって,本実験では,供試体に 発生する ASR ひび割れと載荷試験後に発生する破壊ひ び割れに着目し,両者の重なる割合から圧縮強度の低下 が収束する要因について検討を行った。

表-4 供試体の種類と供試体数量





圧縮試験

(緑色)

(1) 供試体のカットおよびひび割れ観察方法

(赤色)

図-11 に供試体のひび割れ観察方法を示す。

供試体内部の ASR ひび割れの発生状況を確認するために,供試体を軸方向にカットしてひび割れ観察を行った。コアのカットにはコンクリートカッターを使用し, その後カット断面を研磨処理後,ブラックライト蛍光顔料(赤色)を混入した樹脂を含浸させてひび割れの観察 を行った。また,ASR によるひび割れ観察後,縦断面に カットした供試体を元の円柱形状になるように合わせた 状態で圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験後,再び 同様の方法でカット面を蛍光顔料(緑色)樹脂で含浸し,

縦カット

載荷試験による破壊ひび割れを観察している。

(2) カット面のひび割れ観察結果

図-12に代表例として、SG供試体 1000µ膨張時(図 -12(a))とSG供試体 2000µ膨張時(図-12(b))の供試 体縦カット断面のひび割れ観察状況を示す。図には、蛍 光樹脂によるブラックライト照射写真および断面のひび 割れトレース図を示している。ひび割れの観察は、幅 0.3mm以上のひび割れから約0.5mm以下の微細なものま で目視可能なひび割れを対象としている。図より、ASR によるひび割れは、特に反応性と思われる粗骨材周辺に 多く発生する傾向にあり、1000µおよび 2000µ時でも、 ひび割れ長さが平均 10~12.4mm 程度と細かいひび割れ が不連続に分布している。しかし、2000µ まで膨張が進 展した供試体では、ひび割れ長さが最大 49.2mm の連続 したひび割れも一部分で見られることから ASR による 膨張の進展によって細かなひび割れが繋がっていくと推 察される。

また,各材齢での ASR ひび割れの観察後,一軸圧縮試 験を実施し,内部の破壊ひび割れを観察した結果を以下 に示す。破壊ひび割れは,図中の写真より,コアに対し て斜め方向の連続したひび割れへと発展しており,各供 試体ともせん断破壊様相を示した。一軸方向のみの圧縮 試験では,このようにせん断型の破壊が起こると言われ ているが,本実験では,このせん断方向のひび割れを結 んだ破壊線と ASR ひび割れとの関係性を2次元的に評価 することを試みた。

(3) 破壊線に対する ASR ひび割れの影響

ASRによるひび割れがコンクリートの物性低下への関 与程度を評価するために,破壊線に重なる ASR ひび割れ の割合:M(%)を算出して物性低下率との関係性を検 討した。圧縮試験によって発生する破壊線の設定は,図 -13(a)に示すように,圧縮試験後に発生している軸直角 方向の破壊ひび割れを結ぶことで設定している。圧縮試 験の載荷条件は,最大荷重の2%低下まで軟化した時点で 除荷している。ここで,圧縮試験後に観察された破壊ひ び割れは,連続せずに分散している特徴が各供試体で見 られたため,設定した破壊線に近い領域で同一方向に生 じている ASR ひび割れも破壊に影響を及ぼすと仮定し て,破壊線に対して±10mm 範囲に入る ASR クラックも 考慮して M(%)を算定した(図-13(b)参照)。

$M = \frac{破壊線に重なる ASR クラックの総延長}{破壊線の総延長} (%)$

図-14にSG供試体の各膨張段階における破壊線に重なるASR ひび割れの割合(M)の算定結果を示す。図より,500µ時点では破壊線に対してASR ひび割れが18.4% 重複しており,その後,膨張が進展していくにつれてASR ひび割れが破壊線と重なる率が増加していく傾向が読み



(a) SG 供試体 1000 µ 時



(b) SG 供試体 2000 *μ* 時





取れる。破壊線と重なった割合 M(%)と物性値の低下 率の関係をみると、1500μ時で破壊線と28.0% ASR ひび 割れが重なった状態で圧縮強度の低下が基準値に対して 2割程度となり、2000μ時の56.2%重なった状態でも低下 率は2割程度と低下が頭うちになっていることが分かる。 以上より、破壊線と重なる ASR ひび割れの割合と圧縮 強度低下率の関係は比例関係ではなく、例えば ASR ひび 割れにより破壊線が既に形成された状態で圧縮強度試験 を実施した場合でも極端に圧縮強度値が低下する可能性 が低いことが推測される。

(4) N 供試体の繰返し圧縮試験

破壊線に重なる既存のひび割れが 100%となるような 損傷が著しい状態を模擬し、その時の圧縮強度との低下 率を比較する目的で、N 供試体の繰返し圧縮試験を実施 した。圧縮強度試験時の載荷速度は 0.3 N/mm²/s とし、荷 重除荷のタイミングは、最大荷重に対して 2%荷重が戻っ た時点で自動的に除荷されるように設定している。また 繰返し載荷方法は、上記の作業を反復するとともに各試 験時の最大荷重を求めている。

図-15 に N 供試体の繰り返し圧縮試験 3 体の各試験 段階の圧縮強度結果を示している。図より,繰り返し圧 縮強度試験の回数が増加する度に圧縮強度の値が低下 しており,初回の圧縮強度値に対する強度比は,1~4回 でそれぞれ 1.00, 0.86, 0.72, 0.61 と比例的に低下して いる。

試験時の供試体側面の目視観察結果では,1回終了後 に載荷方向の微細ひび割れが発生,2回目終了時点に部 分的な斜め方向ひび割れが発生,3回終了後に明らかに 目視可能なせん断型の破壊線が確認できた。

そこで、この 100%の破壊線が発生した時点のコンク リート内部のひび割れ発生状況を縦カットによる蛍光 樹脂含浸によって観察した(図-16 参照)。破壊線は、 骨材とモルタルの界面やモルタル中に生じており、この 状態から4度目の載荷試験をした場合には、この破壊線 両側の骨材の噛み合いやめり込みで、せん断伝達が行わ れることによって相応の強度に耐えることができると 考えられる。

今回の試験では、破壊線が形成された状態で初期値の 60%程度の強度が残存していることが確認できた。

したがって、ASR により内部ひび割れが卓越した場合 には、ひび割れ密度やひび割れ長さがが増加し、上記の 破壊線に近い状態になると考えられるが、そのような場 合でも ASR ひび割れ間の骨材の噛み合いや摩擦によっ て ASR が生じなかった場合の 60%程度の強度が確保で きると考えられる。

今回の円柱供試体実験では,2000μ程度の膨張量で生 じる ASR ひび割れで健全時の 80%程度の強度であり, 強度低下は20%程度であったが,このときの ASR ひび 割れの状態はひび割れ長さが比較的短く,連続していな いような微細なひび割れであったことから,1~2回繰り 返し載荷試験した時に発生するひび割れに近い状況で あったと考えられる。





図-16 破壊線に重なる割合が 100%の状態

4. まとめ

- (1) ASR を生じたコアの力学的特性の低下率は、既往の 報告通り圧縮強度と比較して静弾性係数の低下が大 きく、その低下率は設計基準値に対して圧縮強度で 2割程度、静弾性係数で6割程度となった。
- (2) コアの物性値は ASR によるひび割れの進展に伴って 低下する傾向にあり、実構造物の調査データから橋 脚外観の累積ひび割れ密度が 2m/m²程度以上になる と設計基準強度に対して 2 割程度低下する傾向が確 認された。
- (3) 供試体実験の結果より,破壊線に重なる ASR ひび割 れの割合が 58.2%の時,圧縮強度の低下率は健全供 試体に対して 2 割程度となった。また,既存のひび 割れが破壊線に対してほぼ 100%入っている状態で も低下率は 4 割程度となったことから,供試体実験 で見られるひび割れ長さが比較的短く連続していな いような微細な ASR ひび割れが多数生じたとして も,圧縮強度低下に影響を与える割合は 2 割程度で 定常状態になると考えられる。

参考文献

- 阪神高速道路公団:アルカリ骨材反応に対するコン クリート構造物の管理指針(暫定案),1985.6
- 川島恭志ほか:実構造物における ASR 損傷度の定量 的評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, N0.1, pp.737-742, 2006