

国道26号堺高架橋ASR対策 ～供試体試験による健全度評価～

平野 広史¹

¹近畿地方整備局 大阪国道事務所 管理第二課 (〒536-0004大阪府大阪市城東区今福西2-12-35)

一般国道26号堺高架橋(延長2,837m)は、大阪府堺市に位置し、大阪側が阪神高速15号堺線と接続している自動車専用道路の高架橋である。1975年(S50年)に竣工したが、1980年(S55年)には原因不明のひび割れが多数発見された。当時、アルカリ骨材反応のメカニズムや被害の発生状況等は未知であり、当面の措置として防水塗装による補修が行われたが、補修後もひび割れの進行や鉄筋破断など損傷が確認された。そのため、損傷を受けた部材の耐力力評価、補修方法検討を行うため、現地モニタリング及び供試体による短期試験、長期試験を行いその結果をもとに健全度評価を行ったので報告するものである。

キーワード アルカリ骨材反応, ASR, 維持管理, 健全度評価

1. はじめに

コンクリート中のセメントに含有されている成分は、水和反応の過程で水溶液に溶解し、強アルカリ性の水溶液を生成する。アルカリ骨材反応とはコンクリート中の骨材のある種の成分とアルカリが反応して生成物が生じ、これが吸水膨張してコンクリート(コンクリート構造物)にひび割れが発生する現象である。

アルカリ骨材反応には従来、“アルカリシリカ反応(ASR=Alkali Silica Reaction)”と“アルカリ炭酸塩岩反応”の2種類あるとされていたが、近年の研究によるといずれも骨材中のシリカ分が反応するASRであると言われている。¹⁾

シリカ分を含む鉱物は、安山岩、玄武岩、流紋岩、チャート、砂岩等多種多様なものが存在する。

ASRによるコンクリート構造物の変状は、

- i) コンクリート表面の網目状のひび割れ
- ii) 主鉄筋やPC鋼材の方向に沿ったひび割れ
- iii) 微細なひび割れにおける白色のゲル状物質の析出のような特徴が見られる。そのためこのような外観変状が見られた場合はASRと考えてよいと言われている。²⁾

ASRは1940年頃アメリカで発見された現象で、我が国においてはきわめて希な現象であり、ほとんどないと思われていたが、1979年(S54年)阪神高速道路の橋脚で異常なひび割れが確認され、1980年(S55年)堺高架橋においても同様のひび割れが確認された。

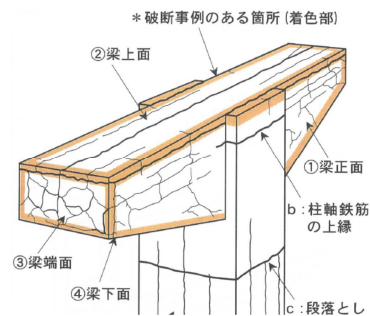


図-1 ASR損傷事例図

2. 堺高架橋のASRに対するこれまでの取り組み

1980年(S55年)に一般国道26号堺高架橋の橋脚において、原因不明のひび割れが多数確認され、それが阪神高速道路の橋脚に発生したものと酷似したものであることからASRの疑いが強くもたれた。当時、ASRのメカニズム、被害の状況や損傷程度は未知数のところが多く、当時の阪神高速道路公団及び土木研究所と協議・調整を行い、1984年(S59年)より当面の措置として樹脂塗装による防水補修を行った。

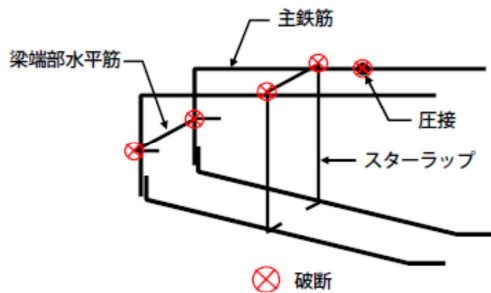
補修後の1991年(H3年)においても進行が認められることから「浜手バイパス、宿院高架橋(現：堺高架橋)におけるアルカリ骨材反応の対策に関する検討委員会(京大：藤井委員長)」を設置し詳細調査・補修方法の検討を行い、防水補修、ひび割れ注入を行った。

1999年(H11年)、橋脚梁からのコンクリート片落下を

うけ「国道26号堺高架橋補修検討委員会(京大：宮川委員長)」が設置され、委員会成果に基づき2000年に橋脚梁部のコンクリート剥落防止のため、両側面と下面の3面鋼板被覆工を行うべく工事発注を行った。工事に先立ち、委員会の指摘に基づく詳細調査を行ったところ、P2,P3橋脚梁において主鉄筋の圧接部や水平鉄筋、スターラップの折り曲げ加工部で破断が発見されたため(写真-1、図-2)、合わせて補修を行った(写真-2)。なお、ASRが見受けられる箇所については、鉄筋はつり出しを行い、異常が無いか調査を行っている。また、当委員会において、2000年より損傷の進行状況確認のため現地モニタリングを開始、2001年にはASRによる耐荷力低下や補修効果確認のため模擬供試体による試験が行われた。



写真-1 鉄筋破断の状況 (はつり出し後)



破断箇所	単位	P2	P3	補修
主鉄筋 (圧接部)	箇所	0	2	エンクロースド
スターラップ (曲げ加工部)	箇所	1	45	7L7
梁端部水平筋 (曲げ加工部)	箇所	0	34	7L7
合計	箇所	1	81	

図-2 鉄筋破断箇所図

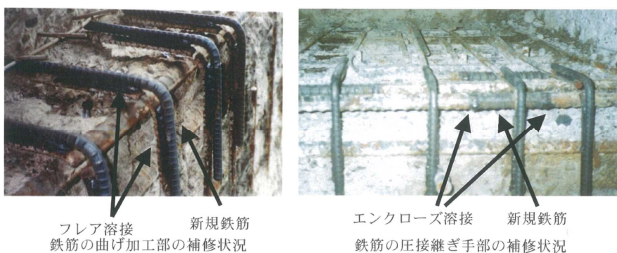


写真-2 鉄筋補修状況

2002年(H14年)には近畿地方整備局が「ASR橋脚等に関する対策検討委員会(京大：宮川委員長)」を設立し劣化進行に応じた調査、進行抑制のための補修補強方法、維持管理方針策定が行われた。維持管理方針については2003年(H15年)に「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)」として公開された。本検討会は2004年より全国のASR問題に対処するため「ASRに関する対策検討委員会(京大：宮川委員長)」に移行、その成果として補修補強の検討方法が「アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案)」とし2008年に公開されている。

これら委員会の成果をもとに、これまで随時、上部工の伸縮装置の取替や橋面防水層の設置、下部工ではひび割れ注入や防水塗装を行っている。

3. 現地モニタリング、供試体試験及び結果

コンクリート構造物にASRが生じた場合、ASRの進行に伴いコンクリートが膨張して著しいひび割れが発生するとともに、圧縮強度、引張強度、静弾性係数等のコンクリートの力学的特性が極端に低下するため、構造物としての耐荷力や変形性能が著しく低下することが懸念されてきた。実構造物では、力学的特性の低下に加え、著しいひび割れによる有効断面の低下や付着力の低下が生じて、深刻な状態になることが考えられる。2001年に検証のため、ASRを模擬して強度、弾性係数を低下させた供試体を使用した短期試験は行っていたが、反応性骨材を使用しASRの実劣化を生じさせた供試体を用いた長期試験での検証行っていなかったため、今回確認を行った。また、2000年より現地の橋梁の状態を把握、補修効果の確認を行うため、現地モニタリングを行っている。

(1) 現地モニタリング

高架橋全体のASR損傷状況を把握し、適切な維持管理を行っていくため、2000年より代表的な橋脚において以下の調査を行っている。(図-3)

① 超音波伝播速度調査

...コンクリート内部の劣化状況調査

② コンタクトゲージによる鋼板変状調査

...コンクリート表面のひずみ(膨張量調査)

③ ひずみゲージによる鋼板変状調査

...補強鋼板のひずみ(応力度)調査

④ ロードセルによる鋼板変状調査

...PC鋼棒の張力増加からの補強鋼板応力度調査

⑤ ひずみ計による鋼板応力調査

...補強鋼板のひずみ調査

調査対象の12橋脚のうち、2基(P2、P3橋脚)は継続中であるが、残りの10橋脚は調査結果より学識経験者か

ら「ASR劣化の進行が終息しつつあると考えられる」との意見を頂き、今後の維持管理について「水分供給が生じないよう伸縮装置等から漏水が生じないようにする」「定期点検でひび割れの状態を経過観察する」ことが確認されている。

P2、P3橋脚については応力の増加が認められるためロードセルによる変状調査が行われている。なお、鋼鉄の応力増加が大きいP3橋脚では2010年にひずみ計、2011年にはひずみゲージがそれぞれ設置されている。(図-4)

橋脚	P2	P3	P41	P55	P56	P65	P70	P75	P78	PW6	PW7	PW9
梁	RC	RC	PC	PC	PC	RC	RC	RC	RC	PC	PC	PC
柱	鋼板補強	鋼板補強	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立	鋼板巻立
2000	(4)	(4)		(3)	(3)	(1)	(1)	(2)	(1)	(3)	(1)	(2)
2001	(4)	(4)	(1)	(1)	(2)	(3)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)
2002	(4)	(4)		(3)	(3)							
2003	(4)	(4)		(3)	(3)							
2004	(4)	(4)	(1)	(1)	(2)	(3)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)
2005	(4)	(4)		(3)	(3)							
2006	(4)	(4)	(1)	(1)	(2)	(3)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)
2007	(4)	(4)		(3)	(3)							
2008	(4)	(4)		(3)	(3)							
2009	(4)	(4)		(3)	(3)							
2010	(4)	(4)		(3)	(3)							
2011	(4)	(4)		(3)	(3)							
2012	(4)	(4)		(3)	(3)							
2013	(4)	(4)		(3)	(3)							
2014	(4)	(4)		(3)	(3)							

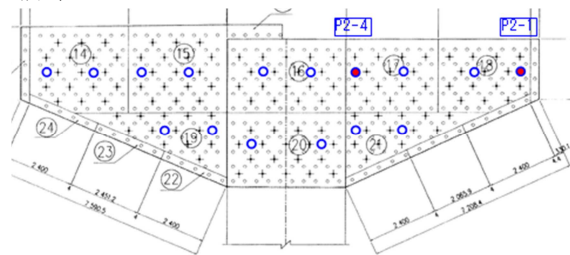
凡例 (1) 超音波伝播速度計測、(2) コンタクトゲージ計測、(3) ひずみゲージ計測
(4) ロードセル計測、(5) ひずみ計測

図-3 橋脚計測位置図



写真-3 堺高架橋の現況

P2 橋脚



P3 橋脚



図-4 橋脚計測位置図

P2,P3 橋脚の計測の結果、PC 鋼棒の張力は全ての計測点とも増加傾向にある。コンクリートの膨張は継続し、ASR が終息状態にあるとはいえない。

PC鋼棒張力の増加率をもとに推定された補強鋼板の応力度は、P2橋脚は管理基準値に比べて十分小さいが、P3橋脚のP3-4は管理基準値(SM400 t=6mm)の許容応力度140N/mm2)を超え、検討が必要な状態にある(図-5)。供試体試験結果をもとに対策検討を行うが、P2橋脚(中間支点)に比べP3橋脚(かけ違い)の方がASRの進行が大きい理由は、伸縮装置およびその周辺からの漏水の影響を受け、水分供給がされているためと考えられる。

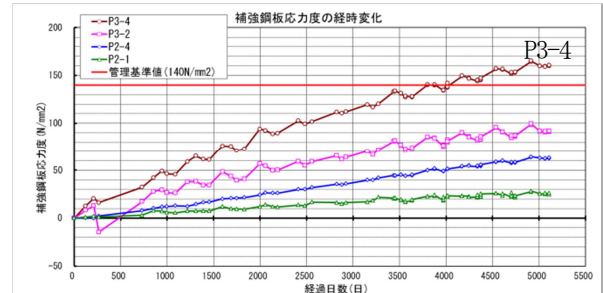
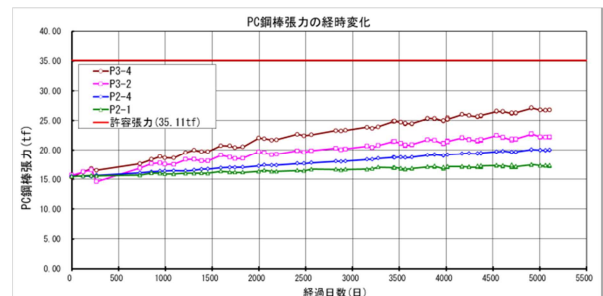


図-5 ロードセル計測調査による鋼鉄変状経時変化

(2)供試体試験

2001年、普通コンクリート使用の「標準供試体」、ASR を模擬した気泡コンクリート使用の「模擬供試体」による荷重試験(以下、「短期試験」という)が実施された。

2007年、「短期試験」で得た知見の妥当性を検証するため、反応性骨材を使用し、かつNaClでアルカリ量を調整した「ASR 供試体（主鉄筋やスターラップの鉄筋比は堺高架橋P3橋脚を想定）」が製作され、暴露養生及び供試体モニタリング調査が開始された(以下、「長期試験」という)。(図-6)

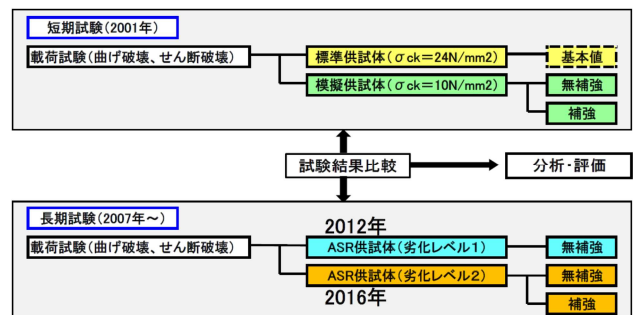


図-6 短期・長期試験概要図



写真-1.1.2 近畿技術事務所に保管されている ASR 供試体の全景



写真-4 長期試験供試体

供試体 No. (M-)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
鉄筋破断 有無	主鉄筋 4-D13	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	スターラップ 2-D13ctc240	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	補強鋼板下フック	有	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
備考	劣化レベル1 (2012 年)	載荷試験済み			無補強			補強済み				
	劣化レベル2 (2016 年)							載荷試験				

○ : 劣化レベル2 供試体試験

供試体 No.	7	8	9	10	11
補強断面 概念図					
引張主鉄筋 D13×4	破断	破断	破断	破断	破断
スターラップ D13ctc240	健全	健全	健全	破断	破断
補強鋼板下フック	あり	なし	なし	あり	あり
PC 鋼棒 φ11×11	初期緊張力 10kN	初期緊張力 10kN	初期緊張力 20kN	初期緊張力 10kN	初期緊張力 10kN
対応する構造	堺高架橋 P2(両面), P3(片面)	堺高架橋 P3(片面)	堺高架橋 P2(両面), P3(片面) (横断効果確認)	堺高架橋 P3(片面)	堺高架橋 P2(両面), P3(片面)

図-7 長期試験 曲げ供試体の概要

供試体 No. (S S-)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
鉄筋破断 有無	主鉄筋 6-D25	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	スターラップ 2-D13ctc240	無	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	スターラップ 配筋	なし	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
備考	劣化レベル1 (2012 年)	載荷試験済み			無補強			補強済み				
	劣化レベル2 (2016 年)							載荷試験				

○ : 劣化レベル2 供試体試験

供試体 No.	9	10	11
補強断面 概念図			
引張主鉄筋 D25×6	破断	健全	健全
スターラップ D13ctc240	破断	なし	なし
補強鋼板下フック	あり	なし	あり
PC 鋼棒 φ11×5	初期緊張力 10kN	初期緊張力 10kN	初期緊張力 10kN
対応する構造	堺高架橋 P2(両面), P3(片面)	堺高架橋 P3(片面)	堺高架橋 P2(両面), P3(片面)

図-8 長期試験 小型せん断供試体の概要

長期試験供試体(写真-4、図-7、図-8)は、補修を行わず ASR による劣化進行にまかせるという実橋ではあり得ない状況下で暴露養生されている。さらに、反応性骨材に加えて、アルカリ量を調整するために大量の塩分が使用されており(塩分含有量: 19.5kg/m³、発錆限界値の16.3 倍)、塩害との複合劣化も生じている。すなわち ASR 劣

化を受けた RC 構造としては最悪の状態にある。

2012 年、長期試験における劣化レベル1での試験が実施され、残りの供試体の一部には実橋(堺高架橋 P2、P3)の梁と同じように、3 面鋼板接着が施された。

2016 年、鋼板接着を施した供試体を含む全供試体を対象として、長期試験における劣化レベル2での試験を実施した。

なお、劣化レベル1とは、外観上、鉄筋破断が想定されるひび割れ幅まで劣化が進行した段階、もしくはこれに相当する段階。劣化レベル2とは膨張反応が鈍化する状態に達した段階のことである。

a) 短期試験結果

コンクリート構造物に ASR が生じた場合、ASR の進行に伴いコンクリートが膨張して著しいひびわれが発生するとともに、圧縮強度、引張強度、静弾性係数等のコンクリートの力学的特性が極端に低下するため、構造物としての耐荷力や変形性能が著しく低下することが懸念されてきた。

短期試験(2001 年)によると、模擬供試体(力学的特性の低下を模擬した供試体)は、標準供試体(健全なコンクリートを使用した供試体)に比べて、初降伏曲げ耐力については問題となるほどの低下はないものの、曲げ変形性能の低下やせん断耐力の著しい低下が生じると報告された。(図-9、図-10)

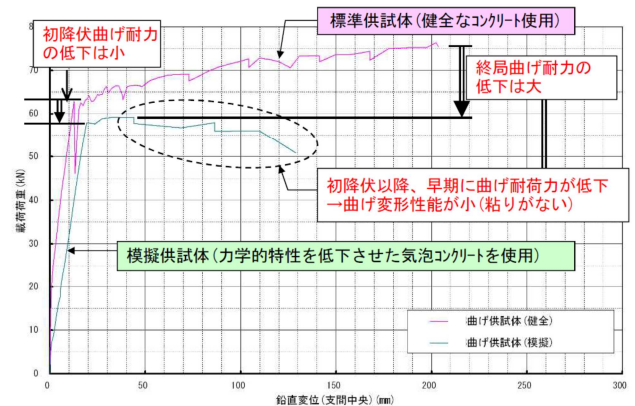


図-9 短期試験 曲げ供試体載荷試験結果

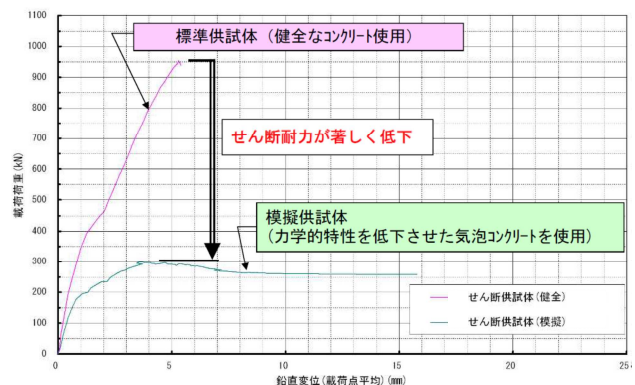


図-10 短期試験 小型せん断供試体載荷試験結果

b)長期試験結果

劣化レベル1の試験(2012年)によると、

- ①設計規格値に対して、圧縮強度が1/1.8に、引張強度が1/1.9に、静弾性係数が1/3.4にそれぞれ低下しているにもかかわらず、荷重～変位関係は、健全なコンクリートを使用した供試体による結果とよく合った。(図-11、図-12)
- ②模擬供試体による試験で見られたような曲げ変形性能の低下やせん断耐力の急激な低下は全く認められなかった。
- ③主鉄筋やスターラップの破断による過度の耐力低下は認められなかった。
- ④鉄筋の付着性能の低下は認められなかった。

劣化レベル2の試験(2016年)によると、

- ①荷重～変位関係について、曲げ供試体では、劣化レベル1試験とほぼ同一傾向で推移することが認められた。(図-13)
- ②一方、小型せん断供試体でも、同等の耐荷力があることが認められた。(図-14)

この結果は、ASRが進行しているRC構造物に対する過度な懸念を払拭するものとなった。

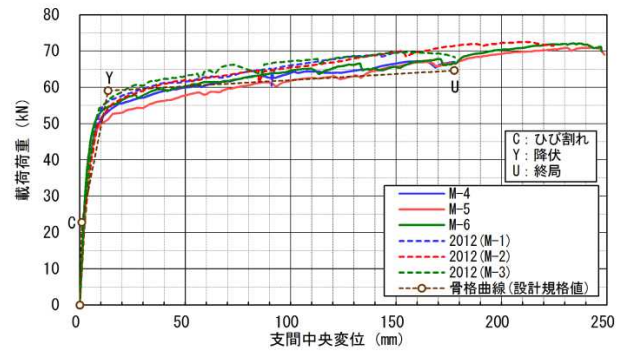


図-13 曲げ供試体荷重試験結果
(長期試験劣化レベル1と劣化レベル2の比較)

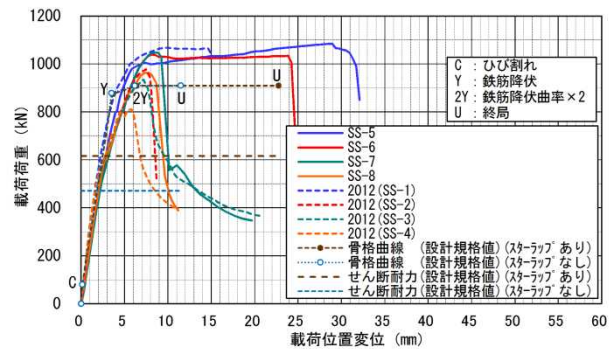


図-14 小型せん断供試体荷重試験結果
(長期試験劣化レベル1と劣化レベル2の比較)

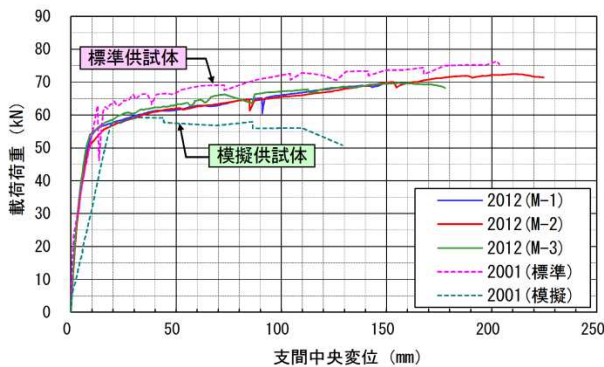


図-11 曲げ供試体荷重試験
(短期試験と長期試験劣化レベル1との比較)

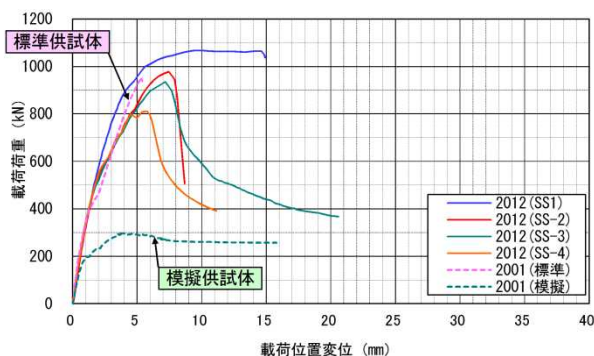


図-12 小型せん断供試体荷重試験結果
(短期試験と長期試験劣化レベル1との比較)

c)付着確認試験 (引き抜き試験、カンチレバー試験)

すべり量0.002・D時の付着応力度は全て、コンクリート標準示方書の付着強度($\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ で 2.3N/mm^2)を満足している。

引き抜き試験、カンチレバー試験結果を比較すると、両試験ともバラツキは大きい、特異値を除く下限値に着目した付着応力度は、以下のとおりである。

- ①引抜き試験：D13が 6.0N/mm^2 、D25が 3.1N/mm^2 、D32が 4.3N/mm^2 である。
- ②カンチレバー試験：D13が 6.3N/mm^2 、D25が 2.6N/mm^2 、D32が 2.6N/mm^2 である。

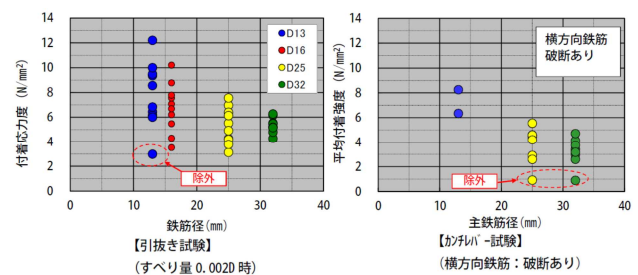
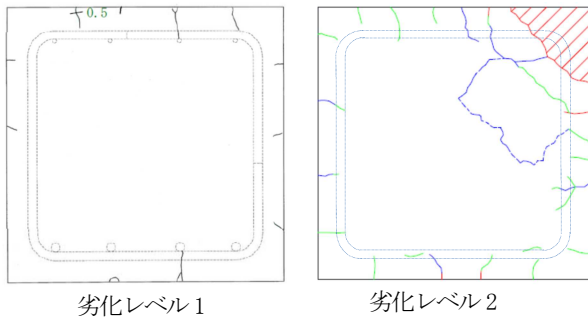


図-15 付着確認試験結果

付着強度の低下は、ケミカルプレストレス消失という致命的な結果に結びつくが、安全性が問題となるような付着強度の低下が生じていないことが分った。

d)ひび割れ進行（深さ方向）状況の確認

載荷試験が終了した曲げ供試体について、ワイヤーソーを用いて端部から1m位置で切断を行った後、切断面の状況を目視観察した。



破線は、吊り用鉄筋の影響と考えられるひび割れを示す。
斜線は、欠損部を示す。

図-16 供試体切断面ひびわれ状況図

切断位置は曲げ破壊による影響が少なく、載荷試験前の性状が比較的残存している断面であるが、吊り金具付近のため、その影響によると思われるひび割れが認められる。このようなひび割れを除外し、結果を整理した。

- ①劣化レベル1では、スターラップや主鉄筋のかぶりよりも深い位置にひび割れは認められなかった。
- ②劣化レベル2では、表面に認められるひび割れの多くはスターラップや主鉄筋のかぶり付近に止まっているが、一部で内部に進展している傾向が認められた。これは、供試体レベルとはいえ、塩害も同時に進行している状況(外観調査、はつり調査で確認)かつ、全く手当てを施さずに暴露養生していた結果である。

実橋では、このような状態で放置されることはなく、何らかの対策が講じられている。適切な対策を講じた実橋のRC構造物の場合、多くのひび割れは、かぶり付近に止まり、スターラップや主鉄筋の内側深くまで及んでいないと考えられる。

4. 供試体試験結果による健全度評価

長期試験供試体は、ASRによる劣化進行にまかせるとい実橋ではあり得ない状況下で暴露養生されていた。

反応性骨材に加えて、アルカリ量を調整するために大量の塩分が使用されており(塩分含有量：19.5kg/m³、発錆限界値の163倍)、塩害との複合劣化も生じ、ASR劣化を受けたRC構造としては最悪の状態にあった。

以上の事を踏まえ、堺高架橋の健全度を以下のとおり評価する。

○1975年の竣工から40年以上経過していること、また、これまでの補修効果もありASRの進行は全体として終息

に向かっていると考えられるが、一部P2,P3橋脚のようにASR劣化の漸増が認められるため注意が必要である。
○ASRにより、コンクリートの力学的特性は低下している可能性は高いが、試験結果より耐荷力や変形特性は、健全なコンクリートを使用したRC構造より若干低下する程度と考えられる。

○かぶりコンクリートの剥離・剥落が広がり、そこから新たにコンクリート内部に向かうASRの進行を生じさせない限り、すなわち、ASRに対する適切な対策を講じ維持管理を行っていく事で、ASRの進行により耐荷力性能が橋の安全性を損なうまで極端に低下することはないと考えられる。

○ASRの対策としては、①進行抑制を目的とした補修、②耐荷性能回復を目的とした補強(解体・撤去、再構築含む)がある²⁾が、本橋においては撤去再構築のような抜本的な対策をとることは困難である。また、既に橋脚柱は耐震補強の鋼板巻立を、橋脚梁(P2、P3のみ)は3面鋼板接着補強が施されている。

○そのため、今後さらに大規模な補強を必要とすることのないよう、①進行抑制を目的とした補修としてASRの進行に不可欠な水の供給を遮断し劣化進行を抑制する対策を講じることで健全性が保たれるものとする。

5. 最後に

今回の結果は、ASRが進行中のRC構造物に対する過度な懸念について、ひとまず安心するものとなった。

ただしこれは、ASRに対する適切な補修補強を行っていることが前提である。「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)」、「アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン(案)」をもとに、点検を行い劣化進行を見逃さず、適切な補修を行う。このサイクルを確実に行う事で通常の維持管理が行えるものと思う。

この報告が他のASR構造物の維持管理に対する一助となれば幸いである。

謝辞：宮川豊章先生をはじめとした学識経験者の方々、試験場をお借りした大阪工業大学、供試体の保管をお願いした近畿技術事務所にこの場を借りて感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書(維持管理編)
- 2) ASRに関する対策検討委員会：アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン (案)