

竣工後40年経過したRC橋脚の有効活用

武藤大和¹, 加藤幸男, 山本高由, 樋口雅友, 小澤拓也

¹中日本建設コンサルタント(株) 建設技術本部第1部第2課

五条高架橋は、PC単純プレテン床版桁とPC3径間連結プレテン床版桁で構成された橋長60.34mの高架橋（避溢橋）で昭和50年代に1期線（暫定2車線）が供用されている。本稿は、1期線と同時に施工され竣工後40年以上を経過した2期線のRC橋脚を有効に活用するために行った補修・補強工法の検討結果を報告するものである。補修工法の検討では、近接目視点検により損傷程度の評価と対策区分を判定し、判定結果に基づき詳細調査を実施して損傷の評価を行い工法を選定した。補強工法については、現行の基準による耐震性能の照査を行うとともに、点検で確認したアルカリシリカ反応（以下、ASRと呼ぶ）の影響を踏まえた工法を提案した。

Key Words : RC橋脚, アルカリシリカ反応, 補修・補強

1. はじめに

五条高架橋は、一般国道155号の五条川に架かる五条大橋西側の取付道路の一部である。本橋は昭和54年に1期線上下部工および2期線下部工が竣工された高架橋である。構造高が低く、写真-1に示すように隣接する五条川が氾濫した際にも、氾濫水の滞留抑止が可能な高架橋構造（避溢橋）となっている。

本業務は一般国道155号の4車線化に向けた2期線上部工の詳細設計および既設1・2期線下部工の耐震補強設計を行うものである。

本稿では、既設2期線RC橋脚の活用方法について報告する。



写真-1. 2017年7月14日の五条川氾濫状況

2. 橋梁概要

橋梁諸元（2期線）

- ・適用示方書
 - 上部工：平成29年道路橋示方書
 - 下部工：平成24年道路橋示方書
- ・道路規格：第3種2級
- ・上部工形式
 - PC単純プレテン床版桁橋（A3～P1）
 - PC3径間連結プレテン床版桁橋（P1～A4）
- ・下部工形式
 - 逆T式橋台（A3橋台）
 - 重力式橋台（A4橋台）
 - 壁式橋脚（P1～P3橋脚）
- ・基礎形式：直接基礎
- ・橋長：60.340m
- ・支間長：9.845m（単純床版桁橋）
+ 15.82m + 15.83m + 15.845m（3径間連結）
- ・斜角：90°
- ・全幅員：11.750m
- ・活荷重：B活荷重
- ・橋の重要度区分：B種の橋
- ・地盤種別：1種地盤
- ・竣工時期：S54年10月（下部工のみ）

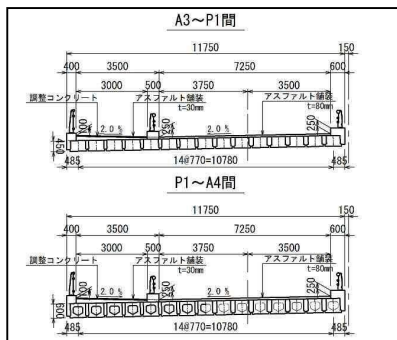


図-1. 上部工断面図

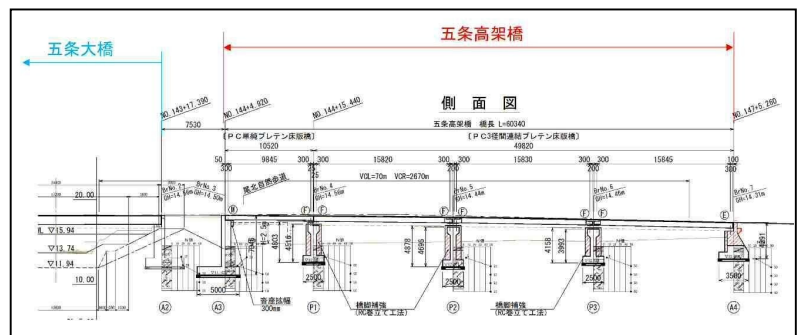


図-2. 橋梁側面図

3. 問題点と課題

(1) 問題点

①既設構造物の健全性の把握

現地調査では、写真-2に示すように既設RC橋脚すべての躯体表面にASRの影響とみられる亀甲状のひび割れやひび割れから白色のゲルの析出が確認された。



写真-2. RC橋脚躯体の表面写真

②既設橋脚の耐震性能の把握

本橋の橋脚は、昭和54年に竣工している。竣工図に基づき、配筋や断面を復元し、現行基準である平成24年道路橋示方書で照査した結果、表-2に示すとおり柱断面においてはLv2地震時での地震時保有水平耐力および残留変位の許容値を満足しなかった。

また、底版下面に作用する曲げによる押し込みにおいても許容値を満足しないことを確認した。

表-2. 既設RC橋脚（P2橋脚）のLv2地震時照査結果

L v 2 地震時	柱	照査項目	橋軸方向		直角方向	
			タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅠ	タイプⅡ
			D16@250			
断面			基準を満足していないため考慮しない			
主鉄筋						
帯鉄筋						
破壊形態			曲げ破壊型	曲げ破壊型	せん断破壊型	せん断破壊型
耐力						
終局水平耐力 (P _u) (kN)			514.00	514.00	8091.99	8091.99
せん断耐力 (P _s) (kN)			976.73	1302.30	538.11	717.48
許容塑性率			20.12	20.12	1.00	1.00
耐力の照査						
設計に用いる設計水平震度			0.40	0.40	1.40	2.00
等価重量 (kN)			2622.01	2622.01	3074.02	3074.02
地震時保有水平耐力 (kN)			1048.8 > 514 (NG)	1048.8 > 514 (NG)	8092.0 > 896.9 (NG)	8092.0 > 896.9 (NG)
応答塑性率 (kN)			35.911	72.768	18.131	36.481
残留変位の照査 (mm)			66.1 > 39.0 (NG)	66.1 > 39.0 (NG)	1.2 ≤ 50.0 (OK)	2.5 ≤ 50.0 (OK)
底版						
曲げ						
浮上り側 (kN・m)			20 ≤ 156 OK			
押込み側 (kN・m)			237 > 156 NG			
せん断						
浮上り側 (kN)			24 ≤ 703 OK			
押込み側 (kN)			362 ≤ 687 OK			

(2) 課題

課題①：既設RC橋脚の劣化対策及び有効活用

現地調査により、既設RC橋脚にASRの影響とみられる損傷が確認されたため、詳細調査によりASRの進行度を確認するとともに、ASR以外の複合的な劣化要因を追及してRC橋脚を活用するための適切な補修工法を検討する必要がある。

課題②：現行基準に対する耐震性能の確保

RC橋脚は、昭和41年道路橋下部工構造設計指針を適用して設計されている。平成24年道路橋示方書の耐震性能を満足させるため、耐震補強を検討する必要がある。

4. 課題①に対する解決策

(1) 劣化主要因の追究

ひび割れの発生要因としては、表-3に示すとおり「進行性のないひび割れ」など初期損傷の多くは一般的に施工直後（供用後2年以内）に発生する。竣工から40年以上経過した既設RC橋脚では、劣化の主要因ではないものと判断した。また、「進行性のひび割れ」の発生要因の内、現地の状況等を考慮すると、ASR以外に中性化による劣化の確認が必要である。

表-3. ひび割れの分類および発生要因

ひび割れの分類	ひび割れ発生要因
一般的に供用後2年以内で起る現象 施工から40年経過しているため該当しない	<ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮 セメントの水和熱 コンクリートの沈下、ブリーディング 温度ひび割れ
進行性のひび割れ	<ul style="list-style-type: none"> 中性化 → 確認 凍害 → 該当しない 塩害 → 該当しない ASR → 確認 疲労 → 該当しない

(2) 調査の実施

①ASRに対する詳細調査

ASRに対する詳細調査として、写真-3に示すようにコア採取による圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。



写真-3. 詳細調査の実施

②中性化に対する試験

図-3および写真-4に示すように中性化の進行度を把握するため、またASRとの複合劣化の可能性があるためドリル法による中性化深さの確認をおこなった。



図-3. 中性化の調査方法



写真-4. 中性化に対する試験の実施

(3) 調査結果

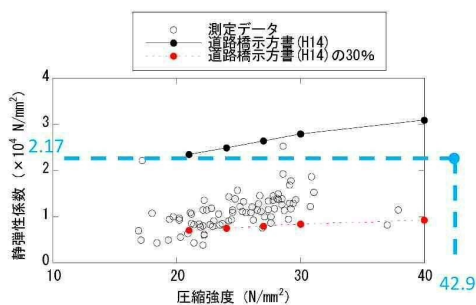
①ASRに対する調査結果

圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を表-4に示す。圧縮強度は $\sigma_{ck}=42.9\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数 $E_c=2.169 \times 10^4\text{N/mm}^2$ であることが確認された。

表-4. 圧縮強度および静弾性係数試験結果

供試体番号	1	2	3
材 齢 (日)	—		
養生方法・温度	—		
直 径 (mm)	73.6	73.6	73.6
高 さ (mm)	114.4	127.7	125.5
質 量 (g)	1,161	1,244	1,217
単位容積質量 (kg/m^3)	2,385	2,289	2,279
最大荷重 (kN)	208.0	177.0	178.0
h/dによる補正係数	0.96	0.98	0.98
圧 縮 強 度 (N/mm^2)	46.9	40.8	41.0
平均 値 (N/mm^2)	42.9		
静 弾 性 係 数 (KN/mm^2)	25.97	17.92	21.17
平均 値 (KN/mm^2)	21.69		

図-4に示すグラフより、ASRコンクリート（赤点）は、健全なコンクリート（黒点）と比較して、静弾性係数が $2.0 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 程度低下する傾向がみられる。詳細調査で確認された圧縮強度は、 42.9N/mm^2 となるため、表-5より静弾性係数： $3.10 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 相当が見合った値である。しかし、計測値では静弾性係数は $2.169 \times 10^4\text{N/mm}^2$ に留まる。このことから、ASRの劣化による静弾性係数の低下が認められるものの、設計基準強度相当（ $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ ）の静弾性係数が確認できるため、補強することが可能だと判断した。



※近畿地方整備局管内における80のコアの試験結果をプロットしたものである。
※当初の設計基準強度は、 21N/mm^2 または 24N/mm^2 である。

図-4. ASRコンクリートの静弾性係数

表-5. コンクリートのヤング係数

設計基準強度	21	24	27	30	40	50	60	70	80
ヤング係数	2.35×10^4	2.50×10^4	2.65×10^4	2.80×10^4	3.10×10^4	3.30×10^4	3.50×10^4	3.70×10^4	3.80×10^4

②中性化に対する試験結果

表-6に示すように、中性化深さは純かぶり93.5mmに対し、2.3~2.6mmと十分余裕がある。

よって、本橋で発生した劣化の主要因はASRと判断した。

表-6. 試験結果

	P1橋脚	備考
中性化深さ (mm)	2.3~2.6 OK	純かぶり 93.5mm

なお、ASRコンクリートに対する残存膨張量試験については、一般的に竣工後40年以上経過した構造物が、今後急激に変状の程度が変化するとは考えにくいと省略した。

(4) 補修工法の検討

ASRの残存膨張量は少ないものと推定されるが、ASRによる劣化はアルカリシリカゲルの吸水膨張によって進行するため、RC橋脚の補修工法としては、劣化因子の抑制効果を目的としたひび割れ注入工および表面処理工法を提案した。

1) ひび割れ注入について

ひび割れ注入の工法は今後のASRによるひび割れの進行に追従するエポキシ樹脂（3種：伸び率100%以上）を用いることとした。

表-7. 注入材の種類

項目	材料の種類		
	土木補修用 エポキシ樹脂 注入材1種	土木補修用 エポキシ樹脂 注入材2種	土木補修用 エポキシ樹脂 注入材3種
ひび割れ進行区分 ^{*1}	B		A
ひび割れ幅 (mm)	0.2~5.0		
粘度 (mPa·s)	1000以下	4 ± 1 ^{*2}	1000以下
可使時間 (分)	30以上	30以上	30以上
硬化時間 (時間)	16以内	16以内	24以内
硬化収縮 (%)	0.1以下	0.1以下	0.1以下
伸び率 (%)	—	50以上	100以上
モルタル付着強さ (乾燥面) (N/mm^2)	6以上	6以上	6以上
付着耐久性保持率 (%) ^{*3}	60以上	60以上	60以上

*1: Aはひび割れが進行している状態、Bはひび割れの進行がとまった状態

*2: チキントロビック係数 2rpm/20rpmの粒度で表わす

*3: 30サイクルの乾燥繰返し後の付着力が、規格に対する百分率で表中の値以上であること。乾燥繰返し等の条件は、JIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」による。なお、現行のJIS A 6024では、「接着強さ」として記述されている。

2) 表面処理について

外部からの水分供給を抑制する効果が期待できる表面処理対策としては、以下の2つが挙げられる。

- ・被覆系表面保護工法：シート系
- ・含浸系表面保護工法
 - ①撥水系（シラン系）
 - ②遮水系（ケイ酸塩系）

ASRの対策工法としては、外部からの水分供給の抑制と併せ、コンクリート内部の水分蒸発が可能な工法が望ましい。よって梁側面部の表面保護工法は内部の水分蒸発が可能な撥水系（シラン系）表面保護材を採用した。

5. 課題②に対する解決策

(1) 耐震補強工法の検討

既設RC橋脚は、Lv2地震時の耐力不足の他に、平成24年道路橋示方書に基づいて照査した結果、端支点橋脚の落橋防止システムとして必要桁かかり長も不足している。よって、躯体断面の増加と併せ橋座拡幅を実施した。表-8および図-5に示すとおり耐震補強後の照査結果は、桁かかり長含めすべて満足する結果となった。

表-8. P2橋脚耐震補強後のLv2地震時照査結果

L v 2 地震時	柱	照査項目	橋軸方向		直角方向		
			タイプ I	タイプ II	タイプ I	タイプ II	
		断面	主鉄筋 帯鉄筋	D16@250(既設) D25@250(補強)			
耐力	破壊形態	曲げ破壊型	曲げ破壊型	せん断破壊型	せん断破壊型		
	終局水平耐力 (P _u) (kN)	3031.70	3031.70	22294.60	22294.60		
	せん断耐力 (P _s) (kN)	4546.83	5281.30	8951.66	7382.48		
	許容率	17.41	17.41	1.00	1.00		
	設計に用いる設計水平震度	0.40	0.40	1.40	2.00		
耐力の照査	等価重量 (kN)	2837.00	2837.03	3504.06	3504.06		
	地震時保有水平耐力 (kN)	1134.8 ≤ 3031.7	1134.8 ≤ 3031.7	4905.7 ≤ 7813.3	7008.1 ≤ 7813.3		
	応答塑性率	1.922	3.403	0.714	0.936		
	残留変位の照査 (mm)	0.59 ≤ 35.0 (OK)	2.08 ≤ 35.0 (OK)	0.0 ≤ 46.0 (OK)	0.0 ≤ 46.0 (OK)		
底板	曲げ	浮上り側 (kN・m)	20 ≤ 122	OK	-		
		押込み側 (kN・m)	223 ≤ 247	OK	-		
	せん断	浮上り側 (kN)	15 ≤ 966	OK	-		
		押込み側 (kN)	379 ≤ 1205	OK	-		

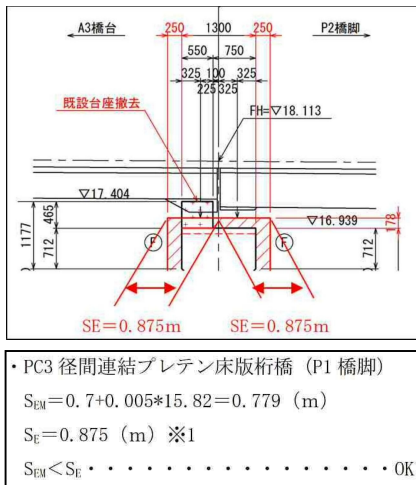


図-5. 端支点橋脚における桁かかり長の照査

(2) 耐震補強形状の検討

柱部の耐力増加のための増厚補強、梁部の桁かかり長確保のための増厚、フーチング押込み曲げに対する増厚をそれぞれ個別で補強した場合、図-6(左図)に示す形状となり、下部工の補強が複雑化する。よって、図-6(右図)に示すように施工性の容易化と雨水の侵入防止対策も兼ねて梁天端まで巻立てた補強工法を提案した。

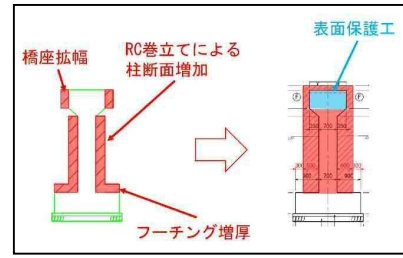


図-6. 補強方法の変更 (左：個別，右：一体)

6. 結論

劣化の主要因は、外観検査、詳細調査、簡易調査の結果により、損傷程度や進行が小さいASRであると判断される。

ASRに対してはひび割れ注入工や表面保護工により、劣化因子(水分)の侵入を抑制し、長寿命化を図ることができたと考えられる。

また耐震補強については、梁天端までのRC巻立て工法を採用することにより、ASR劣化因子の侵入抑制につながっている。またRC巻立て工法により耐力の増強および必要桁かかり長を確保することで耐震性能を満足する結果となった。

これらのASR対策や適切な補修・補強を実施することで、竣工後40年以上経過したRC橋脚を有効活用することができた。

ASRについては確実な収束期を判断することが困難であり、含有するシリカ成分や環境状況の変化によって、膨張が進行する可能性もある。よって、ASRと判断された構造物については今後も定期点検による経過観察を行うことが望ましい。

さらには、盛土などへの構造変更を要しなかったため、避溢橋としての機能を担保することができたと考えている。



写真-5. RC橋脚の全景 (左：施工前，右：施工後)

謝辞

最後に本論文の発表にあたり、検討業務の発注者である愛知県一宮建設事務所の方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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) H20年3月
- 2) 国土交通省：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案) 平成15年3月
- 3) 国土交通省：橋梁定期点検要領 平成26年6月
- 4) 平成24年道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート橋編