

一般国道2号姫路バイパス曾根高架橋の ASR対策について

田ノ上 誠次¹

¹ショーボンド建設(株) 近畿圏支社 技術部 (〒536-0022大阪府大阪市城東区永田3-12-15)

1974年に竣工した一般国道2号バイパス曾根高架橋(ポステンPCT桁橋)の主桁ウェブや下フランジにアルカリ骨材反応(以下、ASR)によるものと思われる水平方向ひび割れが多数確認された。ひび割れの最大幅は1~1.2mmに達し、漏水や遊離石灰を伴うものも見られるなど早期に補修が必要な状態であった。本工事(下り線P15~P31)では、橋梁ドクター指導のもと調査方法を検討し、最新の知見に基づく詳細調査を実施した。また、調査後に実施した対策工事においては、径間の劣化度に応じて工法のグレード分けを行った事例やスターラップが破断したP16橋脚の補修事例等を紹介し、今後対応すべき項目について考察した。

キーワード ポステンT桁, ASR, グラウト充填不良, 調査および対策工事

1. 曾根高架橋の概要

曾根高架橋は、兵庫県高砂市西部に位置し、1974年に竣工した一般国道2号姫路バイパスに架かる橋長863.4mの全38径間からなる鋼・PC混合橋である。上部工は単純PCポステンT桁(上縁定着構造)や単純PCプレテンT桁、単純合成鉄桁などから構成され、ほとんどの径間に伸縮装置を有する構造である。(写真-1)

下部工は、主なものはPC梁構造で6段のPC鋼棒が配置されている。

1日交通量は約8万台で、大型車混入率は約26%(H27交通センサス)と高い値を示している。

同高架橋は、建設から約45年を経過し、老朽化が進むとともに、ASRによるものと思われる損傷が顕在化し現在対応を行っているところである。



写真-1 曾根高架橋 (P16付近)

2. 損傷状況

(1) 上部工主桁

2012年に下り線、2013年に上り線の定期点検を行ったところ、PCポステンT桁ウェブに水平方向の多数のひび割れが確認された。最大幅は1~1.2mmに達しており(写真-2)、中には漏水や遊離石灰を伴った箇所もあった。ひび割れの発生傾向としては、桁端部が著しい傾向にあった。また、桁単位では、変状が著しい桁と少ない桁があり、径間単位では、変状が著しい径間と少ない径間がそれぞれ見られた。



写真-2 主桁ウェブひび割れ状況(最大幅 1.2mm)

(2) 壁高欄

壁高欄は、ほぼ全線に亘って写真-3に示すような既設保護塗装のかぶりコンクリートのはく落や鉄筋露出、ひび割れなどが多数確認された。



写真-3 壁高欄損傷状況

(3) 下部工 P16

2017 年度に発注された補修工事中において、P16 橋脚 PC 梁側面の浮き箇所をはかり除去したところ ASR によるものと思われるスターラップ鉄筋の破断が確認された。(写真-4)



写真-4 P16 スターラップ破断状況

3. 現場で実施した調査および調査結果

(1) 上部工主桁

2014 年 11 月に神戸大学森川教授，同大学三木准教授，京都大学山本教授，同大学服部准教授に依頼し現地診断を行った。

現地診断の結果，ASR の可能性が高いこと，グラウト充填不良の可能性もあること，さらには凍結防止剤を含んだ水による塩害の影響の可能性もあることが指摘された。

ASR については，かなり以前から進行していたものとされ，局所的に水が供給される部位（伸縮装置部近傍など）は，ASR の進行も局所的であり，膨張が停滞あるいは収束している可能性がある。水は主桁端部や上縁定着部からシース内やシース周囲に伝わって主桁内部に浸入し，損傷が進行する原因になっているとの指摘があった。

橋梁ドクターの指摘を受け，詳細調査は，原因を特定するための調査および PC グラウトの充填状況や PC 鋼

材の腐食度を確認する調査を行った。また，2019 年 8 月および 9 月にも調査内容と施工方法について橋梁ドクターの現地診断を受けた。

a) 原因特定調査

原因特定調査は，変状が著しい径間で実施した。表-1 に原因を特定するために行った調査項目を示す。

①ゲル分析および②岩種判定は劣化要因として ASR を特定する目的で行う。③残存膨張試験は，膨張反応の現状把握と今後の膨張可能性を考察する目的で行う。試験方法としては，JCI-DD2 法に関して「試験中にアルカリ分が溶出する」「膨張しない反応性骨材が確認されている」などの問題点を指摘され，変状が少ない桁についてはアルカリ溶液浸漬法(旧カナダ法)で試験を行った。アルカリ溶液浸漬法は，試験期間でみると JCI-DD2 法の 13 週から 3 週となり短く済むが，JCI-DD2 法より安全側(厳しめ)の結果となることがある。また，反応性骨材として隠微晶質石英(微小石英)が含まれると遅延性の膨張反応を示すため，判定材齢 2 週での結果が「無害」であったとしても，将来的な膨張に対して留意する必要がある。

④一軸圧縮試験および⑤静弾性係数試験は，ASR の影響を受けて低下するといわれる物性値であり，①および②の結果と関連させて考察する目的で行った。調査対象としては「建設当時から品質が悪かった可能性が排除できない」との指摘を受け，変状が少ない桁でも試験を行い確認することとした。また，仮に劣化要因が ASR であった場合，桁内部含水率が膨張反応に影響を及ぼすことが指摘されたことから，⑥桁内部含水率測定¹⁾を行い内部含水率を確認した。

⑦桁端部塩分含有量試験は，伸縮装置からの漏水による影響を受け桁端部での塩分含有量が上昇し劣化要因となっている可能性を確認する目的で行った。

表-1 原因特定の調査項目

| | 試験項目 | 試験方法 | 供試体区分 |
|-------------|------------|---------------------------|---|
| ASR 調査 | ①ゲル分析 | SEMおよび目視 | ④⑤終了後の1本 (変状が著しい桁) |
| | ②岩種判定 | 偏光顕微鏡 | ④⑤終了後の1本 (変状が著しい桁) |
| | ③残存膨張試験 | JCI-DD2 | コアB 1本 (φ100×250) (変状が著しい桁) |
| | | アルカリ溶液 浸漬法 | コアC 1本 (φ50×130) (変状が少ない桁) |
| | ④一軸圧縮試験 | JIS A 1107 | コアA 6本 (φ75×150) (変状が著しい桁) (変状が少ない桁) |
| | ⑤静弾性係数試験 | JIS A 1149 | ④と同じ供試体 |
| | ⑥桁内部含水率測定 | φ6×150mm | - |
| ⑦桁端部塩分含有量試験 | JIS A 1154 | ドリル粉(φ14)8試料 (変状が著しい桁) | |

①ゲル分析の結果を図-1 に示す。コア供試体中に確認された白色析出物は，ゼリー状物質でアルカリ-カル

シウム-シリカ型に分類されるアルカリ骨材反応生成物であることが確認された。続いて図-2 に②岩種判定の結果を示す。反応性鉱物として微小石英(凝灰岩)および火山ガラス(安山岩, 玄武岩)が検出された。これらの反応性骨材を含む骨材のうち, 安山岩には骨材内部やその周囲にクラックが発達し, そのクラックを充填してアルカリシリカゲルが生成していることが確認された。これらの結果から主桁に発生した損傷の主たる劣化要因として ASR の可能性が高いことが確認された。過年度に実施された P16 橋脚の岩種判定結果を基に今回の岩石構成を比較すると, 安山岩, 石英, 砂岩, 花崗岩, 玄武岩が共通しており, 反応性骨材は概ね一致した。この結果から, 同一産地の骨材を使用している可能性が高いと考えられる。

なお, ⑦桁端部塩分含有量の平均値は, 1.66kg/m³であり発錆限界値の 1.75kg/m³より低かったことから, 塩化物イオンによる鉄筋腐食膨張によるひび割れの可能性は低いと推測した。

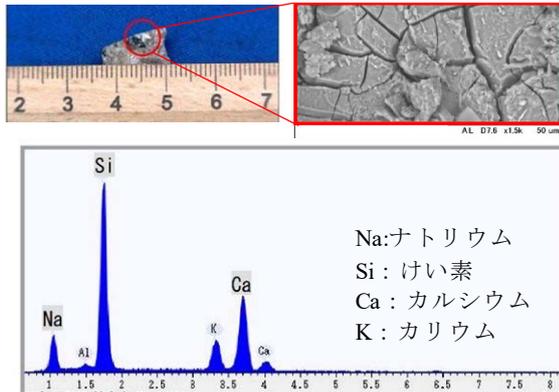
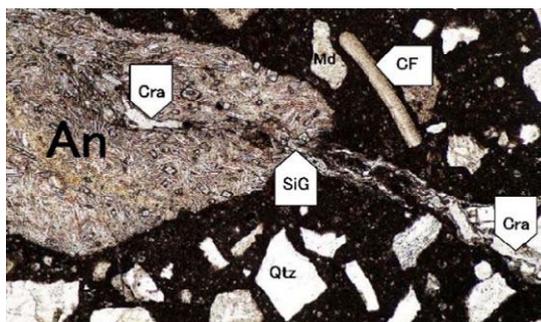


図-1 ゲル分析結果(主桁)



An : 安山岩 Qtz : 石英 CF : 石灰質化石
SiG : シリカゲル Cra : クラック Md : 泥岩

図-2 岩種判定結果

表-2 は桁表面の外観変状と④一軸圧縮強度, ⑤静弾性係数試験, ③残存膨張試験および⑥桁内部含水率測定の結果を関連させたものである。変状が著しい桁の圧縮強度および静弾性係数は ASR により発生したと思われる内部クラックの影響を受けて値が低くなっており, ゲル分析および岩種判定結果と関連する結果となった。

一方, 変状が少ない桁の圧縮強度および静弾性係数は, 設計値以上あるいは標準値²⁾内の結果を示していることから, 建設当時の品質に問題は無く ASR の影響を受けて物性値が下がったことを裏付ける結果となった。

③残存膨張試験の変状が著しい桁の結果は, 全膨張率が閾値である 0.05%を下回っており, 現状で膨張反応は収束しているとみられる。一方, 変状が少ない桁の結果は, 閾値 0.10%をわずかに上回る膨張率が確認され, 条件次第では将来的に膨張する可能性があることが確認された。また, ⑥桁内部含水率測定の結果, 変状が著しい桁, 少ない桁共に閾値を超える状況であることを確認した。ASR はコンクリート内部のわずかな含水率(4~5%程度)でも反応すると指摘されており, 変状が少ない桁の膨張可能性を考慮した場合, 膨張反応を抑制する対策が必要であると考えられる。

b) グラウト充填状況調査

図-3 にグラウト充填調査項目およびフローを示す。

①インパクトエコー法(以下, IE 法)は, 衝撃弾性波法を応用した非破壊試験であり, 探査深さが限られるため対象径間・桁の上縁定着 PC 鋼材を対象に「充填不良の疑い有り・無し」を判定する目的で実施した。②削孔・CCD カメラ調査は, 端部定着 PC 鋼材および IE 法で「充填不良の疑い有り」と判断された箇所を対象に, φ25 程度の小径孔により内部を CCD カメラで観察する調査である。調査対象としては, 「外観変状の程度と内部の空洞は関連がない場合もある」との指摘を受けて, 調査対象径間の変状が著しい桁と少ない桁の両方を調査することとした。削孔調査後に PC 鋼材が目視できた箇所については, シース内への塩分浸透状況を確認する目的で④PC 鋼材表面の簡易塩分含有量試験を行った。また, 「できるだけ全径間, 全主桁について調査を行い, 充填不良が発生している桁については補修を行うべき」との助言を受けて, 当初調査対象箇所を拡大し, 今回の工事範囲で調査可能なすべての桁について削孔調査を行うこととした。

表-2 桁表面の外観変状と各種試験結果

| 桁の変状 | ④一軸圧縮強度(N/mm ²) | | ⑤静弾性係数(kN/mm ²) | | ③残存膨張試験による全膨張率(%) | | | ⑥桁内部含水率(%) | |
|------|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----------|-------------------|-----------|----|------------|-----|
| | 設計値 | 標準値 | 試験方法 | 判定 | 閾値 | 閾値 | | | |
| 著しい | 28.8 | 40 | 6.37 | 16.2~25.8 | 0.011 | JCI-DD2 | 無害 | 4.1 | 4.0 |
| 少ない | 58.5 | 40 | 28.4 | 19.4~34.2 | 0.103 | アルカリ溶液浸漬法 | 有害 | 4.2 | 4.0 |

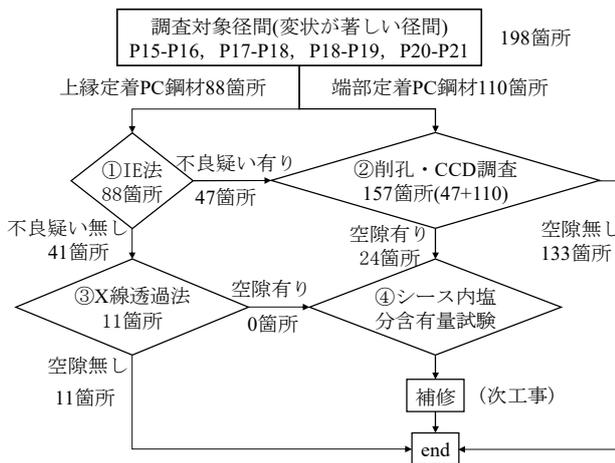


図-3 グラウト充填状況調査のフローおよび結果

IE法によるグラウト充填状況調査結果は、全調査箇所(88箇所)の約53%にあたる47箇所について「充填不良の疑い有り」と判断された。一方、「充填不良の疑い無し」と判断された箇所については、削孔調査を実施しないため内部状況を確認することができない。そのため、「充填不良の疑い無し」と判断された箇所について③X線透過法によるサンプリング調査を行った。その結果、補修が必要な空隙は確認されなかった。

表-3に桁の外観変状とシース内の空隙およびPC鋼材腐食度に関連させたものを示す。変状が少ない桁のシース内空隙およびPC鋼材腐食度Ⅱ(浮き錆程度)以上の割合は、変状が著しい桁より多かった。このことから外観変状の程度とグラウト充填不良は関連が無く、それぞれ別の要因に起因すると考えられる。

なお、全削孔調査の結果、シース内の空隙の割合は約15%(96/638)であった。この割合については、建設年次別で充填不良率をグループングした資料³⁾によると、曾根高架橋の建設年次である1970年代では充填不良率約23%となっており、同年代のPC桁の中では充填不良率が少ない結果となった。

PC鋼材の腐食は大半が腐食度Ⅱ(浮き錆程度)で、その割合も全体の5%程度と軽微であった。また、PC鋼材表面に付着した塩分量としては最大5mg/L(発錆限界3900mg/L)であったことから、シース内は腐食環境ではないと考えられる。

表-3 桁表面の変状と削孔・CCDカメラ調査結果

| 桁の変状 | 削孔による空隙箇所 | | PC鋼材腐食度Ⅱ以上 | |
|------|-----------|----------|------------|--------|
| | 割合 | 箇所数 | 割合 | 箇所数 |
| 著しい | 11% | (11/104) | 3% | (2/73) |
| 少ない | 25% | (13/53) | 5% | (2/41) |

(2) 壁高欄

壁高欄の損傷状況から、劣化要因としてはかぶり不足

による中性化の可能性が疑われた。そのため壁高欄の調査項目としては、かぶり調査を行い設計値との比較を行うて考察する方針であった。しかし、上部工で反応性骨材が確認されたことを受け、骨材産地が上部工と同じ場合は、ASRの可能性を否定できなかったため、上部工で実施したASR調査(①ゲル分析、②岩種判定、③残存膨張試験)についても参考までに実施することとした。壁高欄の調査項目を表-4に示す。かぶり調査は、コンクリート表面から鉄筋の表面までの深さを測定した。ASR調査は③残存膨張試験については、外観変状の程度に関わらずアルカリ溶液浸漬法を適用した。その他の仕様は上部工にて実施したものと同様とした。

表-4 壁高欄の調査項目

| 目的 | 調査項目 | 仕様 |
|----------|---------|-----------------------------------|
| かぶり深さの調査 | かぶり計測 | ノギス等 |
| ASR調査 | ①ゲル分析 | SEMおよび目視(変状が著しい径間) |
| | ②岩種判定 | 偏光顕微鏡観察(変状が著しい径間) |
| | ③残存膨張試験 | アルカリ溶液浸漬法(変状が著しい径間) (変状が少ない径間) |

かぶり調査の結果、計測したかぶり深さの平均値は19.4mmであり、設計かぶりの27.5mmを大きく下回っていることが確認された。このことから、かぶり不足による中性化が劣化要因の一つとして推測された。

次にASR調査結果について考察する。ゲル分析の結果を図-4に示す。骨材以外にエトリンガイトと考えられる針状物質が確認されたが、アルカリ反応生成物と考えられる物質は確認されなかった。図-5に岩種判定の結果を示す。反応性鉱物として微小石英(凝灰岩)、火山ガラス(安山岩)が確認された。これらは上部工と概ね一致した岩種構成であり、壁高欄の骨材についても上部工と同一産地の可能性が高いと考えられる。反応性骨材の内部にアルカリシリカゲルを充填したクラックの分布がみられたがその程度は軽微であった。これらの結果から、ASRの可能性は考えられるものの、その影響は小さいと考えられる。

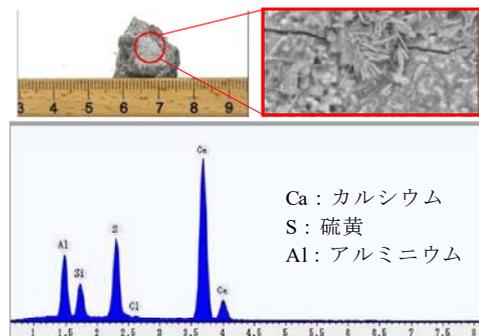
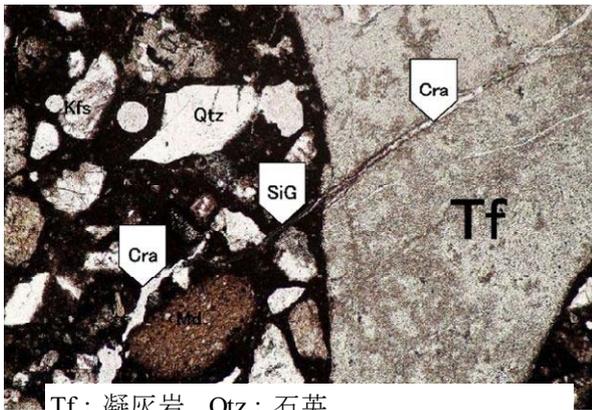


図-4 ゲル分析結果(壁高欄)



Tf: 凝灰岩 Qtz: 石英
SiG: シリカゲル Cra: クラック

図-5 岩種判定結果

表-5 に残存膨張試験の結果を示す。変状が著しい径間、変状が少ない径間共に閾値を下回っており、この結果からも膨張反応として収束あるいは軽微であったと考えられる。

上記の結果をまとめると、岩種判定の結果から ASR による劣化も否定できないが、残存膨張試験の結果からその影響は軽微と判断し、主たる要因はかぶり不足による中性化の可能性が高いと推測される。

表-5 残存膨張試験結果

| 変状 | アルカリ溶液浸漬法による全膨張率(%) | |
|-------|---------------------|------|
| | | 閾値 |
| 著しい径間 | 0.022 | 0.10 |
| 少ない径間 | 0.050 | 0.10 |

(3) P16橋脚

2018年2月に神戸大学森川教授による P16 橋脚梁部スターラップ破断箇所の現地診断が行われた。その結果、損傷程度としては、破断したスターラップ以外に梁部材に曲げやせん断による構造ひび割れは見られないため、緊急措置が必要な状況ではないとしたものの、対策としては、損傷状況を考慮した 3 次元 FEM 解析による安全性照査を行う必要があるとの指摘を受けた。具体的には、PC 鋼材の破断や付着、定着などの状況を詳細に調査して確認し、安全性が確認されれば、直ちに補強するのではなく、モニタリングで構造ひび割れ発生の有無など経過を確認しながら維持管理することで良いとのことであった。

4. 補修工事での対策内容

(1) ひびわれ補修工

ひび割れ補修工(写真-5)は ASR 反応因子の浸入防止を目的として行った。また、内部ひび割れを充填するこ

とによる再一体化の効果を狙った。工法は低圧注入工法としてエポキシ樹脂を注入した。施工手順は、下地処理を行った後、ひび割れ箇所のシール処理、座金設置、樹脂注入を行い注入確認後、注入器を撤去して完了した。



写真-5 ひび割れ注入状況

(2) 表面含浸処理工(シラン系)

表面含浸処理工(写真-6)は、外部からの水の浸入を防ぎ、内部の水分の逸散を阻害しない吸水防止層を形成することで、ASR を進行を抑制させる目的でシラン系を採用した。適用するグレードについては、変状の著しい箇所に合わせたグレードを一律で適用することが慣例化しているが、「様々な詳細調査を行い結果に対してそれぞれ考察しても一律の補修では意味がない。変状に応じた使い分けなどを行い、コストを適正化するべき」との助言を受けて、径間内に発生したひび割れ延長に応じて工法のグレード分けを行った。具体的には、径間内のひび割れ延長 100m 以上の径間にはプロテクトシル CIT(吸水防止層形成+鉄筋保護層)を、ひび割れ延長 100m 未満の径間にはプロテクトシル BHN(吸水防止層形成)を適用した。この 100m の根拠としては、径間毎のひび割れ延長と全径間の総延長を比較して相対的に設定した数値であるため、すべてのケースに当てはまるわけでは無いことに留意する必要がある。

施工手順としては、下地処理を行った後、表面含浸材を必要使用量塗布して養生後完了となる。

なお、本工法の効果を確認する目的で行った施工後の桁内部含水率測定結果によると、補修前の 4.2%から 3.4%まで下がっており、効果を確認することができた。



写真-6 表面含浸処理状況

(3) 壁高欄コンクリート保護塗装工(シート系)

壁高欄のコンクリート保護塗装は、既設保護塗装が再劣化してはく落していたことを考慮し、均一施工が可能で、コンクリートはく落防止性能を備えたシート系の保護塗装(写真-7)とした。特徴としては、施工工程が下地処理、プライマー塗布、シート接着工で完了するため、塗装系より工程短縮が可能である。



写真-7 コンクリート保護塗装工(シート系)

(4) P16橋脚補修工

P16 橋脚は ASR により破断したスターラップを溶接継手により再一体化したのち、ASR の膨張反応を抑制する亜硝酸リチウム入りの修復材にて断面修復を行った。

施工手順としては、カッターによる断面整形、継手長確保のためのはつり、鉄筋組立、フレア溶接・鉄筋防錆(写真-8)、プライマー塗布・モルタル充填を行い完了した。



写真-8 フレア溶接、鉄筋防錆処理完了

5. まとめ

(1) 詳細調査結果について

- ・上部工で見られた著しいひび割れの原因はASRであることを確認した。
- ・ASR 調査においては、なるべく多くの調査・試験を行い多角的な視点から考察することが望ましい。
- ・グラウト充填状況においては、外観変状の程度と内部の空隙および腐食程度に相関がみられなかった。そのため、外観変状にとらわれることなく調査箇所を選定することが重要である。
- ・劣化要因が ASR で膨張反応を抑制する対策を行う場合は、コンクリート内部含水率を測定し、補修後に含水率が下がっていることを確認することが望ましい。

(2) 今後対応すべき項目について

- ・今回の工事で施工できなかった「グラウト充填不良箇所の再充填」が必要である。
- ・上り線についても下り線で実施した対策が必要である。
- ・ASR で劣化している場合は、出来る限り「水分」をコンクリートに入れないことが重要であることから、「水漏れが確認されるジョイントについては更新」, 「舗装の更新時には防水層更新」を行うべきである。
- ・P16 橋脚については、モニタリング計画を作成し定期的な調査を行ったうえで、安全性を確認する。
- ・P16 橋脚以外の下部工についても、P16 同様に現在の「保護塗装」を「表面含浸処理工」へ変更する必要がある。
- ・同様に ASR が生じている橋梁について、今回の調査、補修工事を参考して対策を実施する。

謝辞：森川英典教授 三木朋広准教授(神戸大学大学院)、山本貴士教授 服部篤史准教授(京都大学大学院)には検討会、現場診断会においてご指導・ご助言をいただいた。本稿の場を借り、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会第71回年次学術講演会：含浸材によるコンクリート内部含水率の経時変化と測定時温度に関する考察, 2016.
- 2) 土木研究所：既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果, 2002.
- 3) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針, 2016.