

温泉地におけるRCアーチ橋の耐震補強工事 大分自動車道 別府明礬橋

オリエンタル白石(株)

○ 森 省吾

オリエンタル白石(株)

三浦 泰博

西日本高速道路(株)

小原 富徳

西日本高速道路(株)

城戸 靖彦

1. はじめに

別府明礬橋は、大分自動車道の湯布院 IC～別府 IC 間（図－1）の別府八湯の一つである明礬温泉から別府湾を遠望する景勝地に位置する橋である。本橋は、強酸性の温泉ガスや温泉水を噴出する幅約 400mのU字形の谷に建設されることから、下流域の温泉脈への影響、温泉によるコンクリートおよび支持地盤劣化への対応を含めた構造的・経済性に加え、観光資源としての景観性が考慮された結果、建設当時では東洋一の規模となるアーチ支間 235 m となる RC アーチ橋が選定されている。

本橋は、建設当時の基準に従って、設計水平震度 0.2 程度（レベル 1 地震動）に対して橋としての健全性を損なわないように設計されている。しかし、現在一般的に行われている、東北地方太平洋沖地震や兵庫県南部地震のようなレベル 2 地震動で耐震性能の照査を行ったところ、橋脚部において炭素繊維による補強が必要となった。本稿では、主に炭素繊維補強工事やその他の関連工事に関して報告する。



図－1 大分自動車道と別府明礬橋の位置

2. 橋梁概要

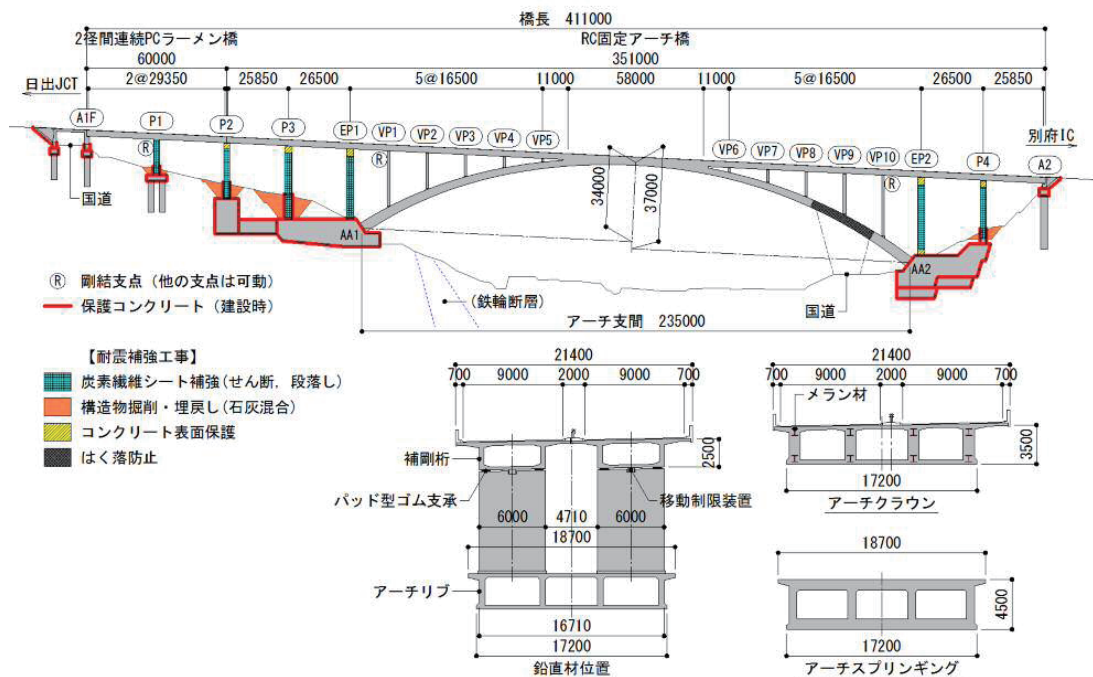
本橋の橋梁概要を表－1 に、一般図を図－2 に示す。本橋は、RC 固定アーチ橋と 2 径間連続 PC ラーメン橋で構成されている。このうち、RC 固定アーチ橋は、補剛桁は上下線が分離された PRC 構造の 1 室箱桁断面であり、一方、アーチリブは上下線一体の 3 室中空断面となっている。また、下部構造は、温泉ガスや温泉水による強酸性の腐食性環境（pH 4～6 の土質）を考慮して、コンクリートの増厚（保護コンクリート）と表面の防食ライニング、土壌のアルカリ性化処理を施している。

表－1 橋梁概要

工 事 名	大分自動車道 別府明礬橋耐震補強工事
工事箇所	自) 大分県別府市明礬 (KP109.104)
	至) 大分県別府市明礬 (KP109.515)
工 期	自) 平成23年11月26日
	至) 平成26年 7月12日
発 注 者	西日本高速道路株式会社 九州支社
	(監督事務所 大分高速道路事務所)
構造形式	RC固定アーチ橋 (補剛桁PRC構造)
	+PC連続ラーメン橋
橋 長	411.000m
支 間 長	235.0m (アーチ支間)
幅 員	2×9.000m

3. 耐震性能の照査

本橋のような長大 RC アーチ橋は補強事例が少ないことから、耐震性能の照査ではアーチ特有のねじりを考慮するためにファイバーモデルを用いた非線形動的解析や実験結果をもとに、補強範囲を決定することとした。なお、ねじり非線形を考慮した挙動を把握するためアーチリブについては九州大学で実施された 3 室中空断面供試体を用いたねじり交番荷重実験²⁾を、補剛桁については大塚らによる 1 室箱桁試験体を用いたねじり交番荷重実験を参考とした。その結果、アーチリブおよび補剛桁については耐震補強が不要となった。補強範囲を図－2 に示す。



図－2 別府明礬橋の一般図

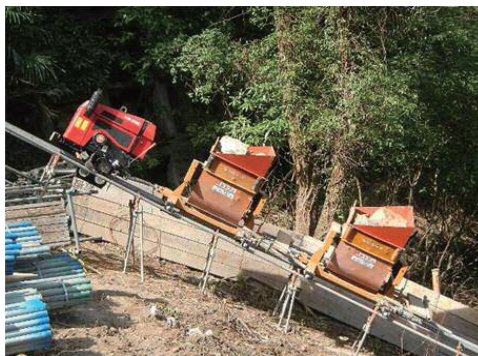
4. 耐震補強工事

4.1 耐震補強工事概要

橋脚のせん断および段落しに対する補強は、温泉熱水により脆弱化している基礎への影響や、施工条件の制約、景観への配慮などから、炭素繊維シートによる補強を採用した。本工事では炭素繊維シート貼り付けのため下部構造周辺の土砂掘削・運搬を行い、埋戻し土について、下部構造の温泉腐食対策としてアルカリ化処理を実施した。ここではこれらの工事概要について説明する。

4.2 下部構造周辺の土砂掘削・運搬

本橋では、橋脚基部の耐震補強のため土砂掘削を行っているが、特に切土法面をコンクリート法枠で補強され急峻な斜面上に設置されたP4橋脚については、掘削機械の搬入方法や掘削土の仮置きスペースの確保が課題であった。そこで、掘削土運搬として、①掘削位置から標高差約30mの高速道路本線上の規制内にラフタークレーンを配置し、本線上でダンプトラックに土砂を積み込み仮置き土場まで運搬する方法、②急斜面に支保工を組みモノレール台車を用いてA2橋台裏の土場に土砂を仮置きした後に市道へ運搬する方法の2案を計画した。その検討の結果、高速道路および一般道への土運搬による影響、長期間の高速道路規制による一般通行車両への安全性、悪天候による工程の遅延等のリスクを軽減できる後者を採用した（写真－1）。



写真－1 モノレール台車による運搬

4.3 炭素繊維シート補強

本橋は高い温泉腐食環境にあることから、炭素繊維シート補強にも耐酸性を有する仕様とした。炭素繊維シートそのものは、高い耐酸性を有する素材であるが、それをFRP化させるエポキシ樹脂の硬化剤の種類によっては、耐酸性の低いものが存在する。そこで、本工事で使用するエポキシ樹脂の耐酸性を、pH 1～3 の硫酸溶液浸漬後の重量変化率による確認を行った³⁾。

炭素繊維シート補強の施工では、本橋の橋脚にはコンクリート表面に多量の小さい気泡跡がある部位があり、気泡跡からピンホールが生じて炭素繊維シートに浮きなどが生じることが懸念された。そこで、コンクリート表面の地下処理として、エポキシ樹脂系のパテを粘度調整し細骨材を混合した材料を使用した。また、本橋は霧の多発区間に位置することから、温湿度計を常設して、湿度 84 %以下、温度 6℃以上、34℃以下で施工した。

さらに、本橋の橋脚には、写真－2に示すように、建設時に温泉腐食対策として、地中部と地表から 500 mm の範囲でかぶり厚を 50 mm 増加させた上に、保護コンクリート (210 mm または 140 mm 厚) を施している。この増厚による段差により、鉄筋の段落しに対する炭素繊維シートを連続して貼付けできないため、炭素繊維シートの連続性を確保する構造が必要となった。

そこで、温泉腐食環境に対する耐久性、経済性および施工性から、図－3に示す CFRP ロッドと波形状の CFRP プレートを使用した定着構造を採用した⁴⁾。この構造の採用においては、定着体の引張試験を行い、設計強度を確保していることを確認した。保護コンクリート上端での炭素繊維シート定着状況を、写真－3に示す。

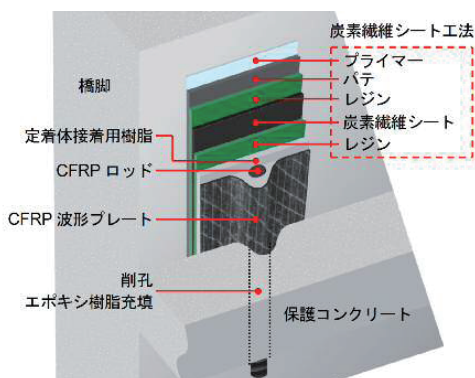
4.4 埋戻し土のアルカリ性化処理

本橋では、建設時に温泉腐食対策として、土質をアルカリ性化するために石灰混合した土砂で埋戻しを行っている。この埋戻し部の pH を測定したところ (供用後 25 年経過)、P3 橋脚付近の表土で pH 7.7、土中で pH 8.6 であった。この測定値と建設時のアルカリ性化による pH 11 を用いて指数曲線で近似し、土壌の pH 変化を推定した結果を図－4に示す。掘削土をそのまま使用して埋戻すと、今後 75 年経過すると pH 4 以下となる。

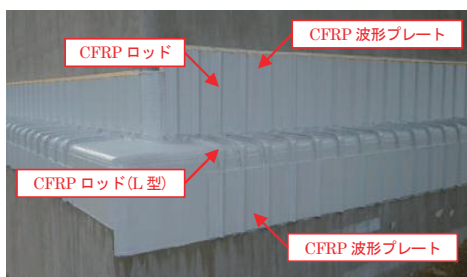
本橋で使用する炭素繊維シート補強は、前述のように pH 4 程度に対しても耐酸性を有する仕様を採



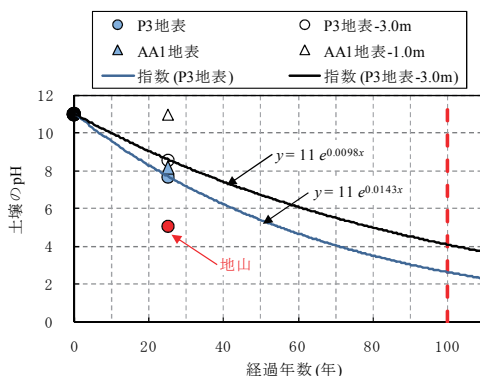
写真－2 建設時の橋脚の温泉腐食対策



図－3 採用した炭素繊維シートの定着構造



写真－3 保護コンクリート上端のCFRP定着状況



図－4 土壌 pH 変化の推定結果

用しているが、安全側の配慮として、建設時と同様に埋戻し土に石灰混合を行った。石灰混合は、pH 11 以上となることを室内試験で確認し、土の単位体積重量（自然含水比）の 1 % の生石灰を混合した（写真－4）。

4.5 景観対策

本橋は、明礬温泉街から見える湯けむりのある別府市街と別府湾の眺望に、雄大さを付加するような存在となっている。そこで、使用材料や仕様、施工方法などにおいても、その景観の阻害を低減するように配慮した。

橋脚やエンドポストへの炭素繊維シート補強では、足場に白色の防災メッシュシートを設置することにより施工時にも景観へ配慮した。また、炭素繊維シート補強を行わない橋脚やエンドポストの頂部に対しては、冬期の凍結防止剤散布による塩害に対する予防保全としてコンクリート表面保護を行い、その塗膜色は炭素繊維シート補強部と差が無いように調整した（写真－5）。

5. おわりに

写真－6 に本橋の補強後の全景を示す。本工事は、景勝地に位置する大規模 RC アーチ橋の耐震補強であることから、橋の意匠を極力損なわないように、実験や解析により合理的な耐震性能の照査を行った。また、耐震補強では、温泉腐食環境に配慮した仕様を採用した。本工事での耐震性能照査方法や施工方法、各種の仕様が、今後の RC アーチ橋および温泉地帯の橋の耐震補強工事の参考になることを期待するものである。

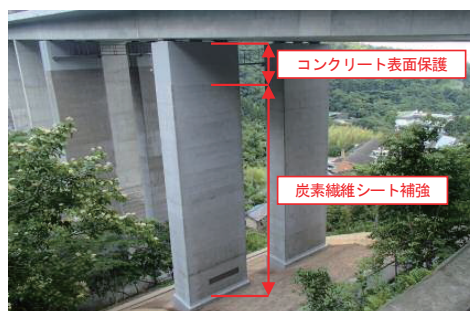
最後に、本工事の耐震性能照査にあたって、多大なご指導を頂いた大塚久哲九州大学名誉教授をはじめとする九州大学関係各位に、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤野彦・一瀬久光・栄捷利・和田信秀：別府橋（仮称）の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol. 31，No. 5，pp. 43～56，1989. 9
- 2) 服部匡洋・大塚久哲 他：実存 RC アーチ橋に対するねじりと曲げの相関曲線及びねじり非線形を考慮した地震応答解析，第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 91～96，2014. 7
- 3) 山本貴士・嘉指成詞・服部篤史・宮川豊章：酸性環境における連続繊維シートを用いたコンクリート補強，コンクリート工学年次論文集，Vol. 19，No. 1，pp. 1237～1242，1997. 7
- 4) 加藤貴久・久部修弘・三井宜之・武田浩二：炭素繊維シートと CFRP 定着体による部材接合部の曲げ補強に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No. 1，pp. 337～342，2005. 7



写真－4 埋戻し土への石灰混合



写真－5 橋脚補強の表面色調整



写真－6 耐震補強後の別府明礬橋