

報告 羅漢寺橋の劣化現況調査

込山 貴仁^{*1}・青木 孝義^{*2}

要旨：適切な維持保全を行えば数百年以上の耐久性を持つ石橋を、一時的・経済的な理由から放置し、あるいは撤去することは歴史的・文化的に観て大きな損失であり、日本民族の伝統と誇りを放棄することであるといえる。本報は、こうした観点から、羅漢寺橋の劣化現況の把握、補修・補強案の立案を行い、歴史的資産の保全に資することを目的として実施された調査の結果について報じるものである。

キーワード：石橋，組積造，モルタル，劣化，補修，補強，非破壊検査

1. はじめに

貴重な歴史的資産である石橋の優美な姿を将来まで保持するためには、経年的な劣化と自然災害に対する十分な対策が必要である。

羅漢寺橋の概要を、表-1に示す。本橋は、犬走り（名勝耶馬溪）の上流約150mに位置し、耶馬溪3橋の中では一番古い橋である。雄大かつ優美な外観を持つこの橋（写真-1）は、歴史的・構造的に貴重な資産として高く評価され、大分県有形文化財に指定されている。羅漢寺橋の特徴は、国内のほとんどの石橋が15m以下の径間で、拱矢比が2.0~3.0であるのに対し、27mにも及ぶ長大な径間と5.4にも及ぶ大きな拱矢比を持つことにある。大径間かつ拱矢比の大きな石橋では、自重および交通荷重による径間端部への曲げ応力や橋脚・橋台に作用する軸力が大きくなること、また、橋梁の軽微な沈下や変形が拱環石の応力バランスに及ぼす影響が大きくなることなど、構造的には大きな問題を抱えている。事実、その建設は、名工松田新之助・岩渕万吉らによるものであるが、架設工事は難航を極め、完成までに2度の崩壊を経験し、竣工までには3年7ヶ月を要している。

以上を背景として、本稿は、羅漢寺橋の劣化現況の把握を目的として実施した現地調査および材料試験の結果について報じる¹⁾。

2. 調査内容

本調査における調査項目を表-2に示す。石橋の調査については、標準的な調査方法が確立されていないため、調査項目および方法は、コンクリート橋の調査項目および方法²⁾を参考にし、石橋の特殊性を考慮して選定した。また、調査位置を図-1に示す。材料試験に使用するコアサンプルの採取位置は、事前の応力解析の結果から得られた応力の大きな部分や現地調査でひび割れや植生化が認められた部分を避け、橋梁の一部分に偏らないように選定した。また、測定値の誤差は大きくなるが、文化財保護の観点から、コアは直径24mmの小径コアとした。

表-1 羅漢寺橋の構造規模

所在地	大分県下毛郡本
構造	三連石造アーチ橋
橋長	89.0m
径間	26.7m
幅員	4.5m
着工	大正6年3月
竣工	大正9年10月
工費	3万2千円



写真-1 羅漢寺橋の外観

*1(株)コンステック IT 診断技術本部 工博（正会員）

*2 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科助教授 工博（正会員）

石材風化調査および目地劣化調査では、**図－2**に示すように、壁石部の石材および目地から、直径約 24mm、長さ約 350mm の小径コアを切り出し、表層部（表面～50mm 以内）、中央部（50mm～250mm）、深層部（250～350mm）の各部から整形したコア供試体による、圧縮強度試験および静弾性係数の測定を行った（**写真－2**）。圧縮強度試験は、JIS A 1107 に準じて実施した。また、石材コアのうち 2 本は、壁石の厚さを測定するため、石材背面まで貫通させて採取した。

表－2 調査項目

調査項目	調査方法	目的	数量	調査位置
外観変状調査	地表踏査	橋台周辺部、周辺道路、地山について、変状を調査する	1 式	橋梁周辺
	近接目視	石材・目地のひび割れ、欠損、変形等を調査する	1 式	橋梁水上部
	各部寸法調査	橋梁各部の寸法を実測する	1 式	橋梁全体
	ハンマー打診	手摺・束柱・地覆を中心に石材の浮き・ゆるみ等を調査する	1 式	高欄・地覆部
石材風化調査	近接目視	石材の劣化状態を目視観察する	1 式	側面壁石部
	小径コア法	石材の深さ方向の強度分布を調査する	6 本	高欄手摺部
目地劣化調査	近接目視	目地の充填・劣化状態を調査する	1 式	側面壁石部
	小径コア法	小径コアの圧縮試験により、目地モルタルの物理的性能を把握する	4 本	
内部空洞調査	レーダー法	石材の厚さおよび裏込め材の空洞分布を調査する	1 線 8 線	路面 側壁壁石部
	内視鏡法	鉛直方向にドリル窄孔し、空洞寸法を調査する	4 本	各橋脚・橋台
	オールコアリング	橋脚路面上から基礎に達するまで、オールコアボーリングを行い、橋脚内部および基礎地盤の状況を観察する	1 本	P1 橋脚
水中部基礎調査	水中ビデオ	橋脚水中部の損傷、基礎の洗掘状況を調査する	1 箇所	各橋脚

3. 調査結果

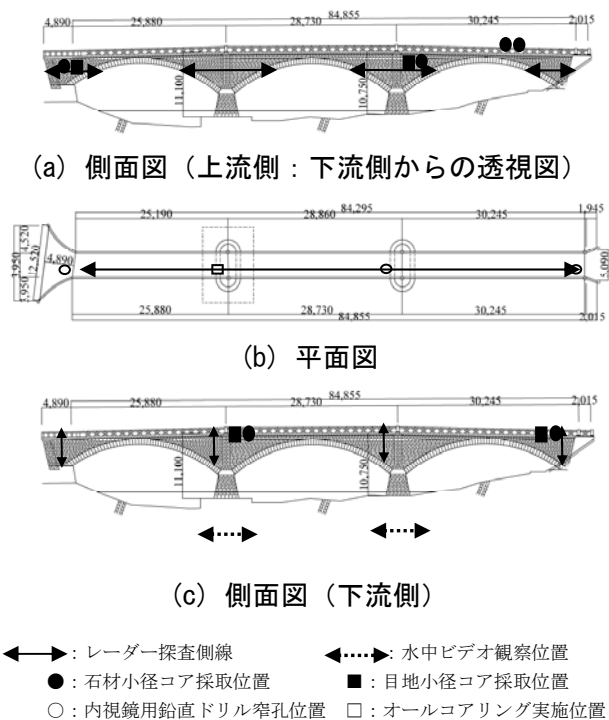
3.1 外観変状調査

(1) 地表踏査結果

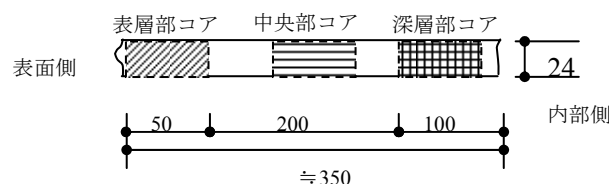
羅漢寺橋、青の洞門、羅漢寺耶馬、擲筆峰、宇曾の景などの一帯は、第四紀更新世前～中期の耶馬溪層の分布域にあたる。耶馬溪層は、全層が安山岩質の火山砕屑物、すなわち火口より放出された火砕流堆積物が固結してできた地層であり、その層厚は、約 300m に達する。

羅漢寺橋付近の基礎地盤は凝灰角礫岩で形成されており、凝灰質に包まれた礫質部分は、安

山岩および溶結凝灰岩により構成されている。岩質は極めて堅硬であり、地盤変状の兆候は認められない。ただし、A2 橋脚（**図－5**）と前面道路の取り付け部付近には、路面上に多数のひび割れが認められた。また A2 橋脚の内視鏡調査により、アスファルトと路盤材料（粘土層）の間に空隙の存在が認められた。後述の 3.5 内部空洞調査に示す路盤下空洞の探查結果より、このひび割れは、交通荷重の作用による路盤材料の圧密沈下にともない、アスファルトに荷重によるひび割れあるいは疲労性ひび割れが発生したものと推定される（**図－3**、**図－4**）。



図－1 調査位置



図－2 小径コア試験体の採取方法（単位：mm）



写真－2 採取した小径コア

(2) 近接目視・打診結果

1) 拱環石・壁石

近接目視・ハンマー打診の結果、拱環石・壁石については、全体的に健全な状態に保たれているものの、P1、P2近傍(図-5)の壁石に鉛直方向の顕著なひび割れが確認された(写真-3, 図-3)。また、これらのひび割れの上方アスファルト路面には、橋軸直角方向のひび割れが認められた(写真-4, 図-4)。これらは、交通荷重およびアーチ自重による引張応力が作用する部分であり、長年にわたる自重の作用により、これらの部分にクリープ的な変形が生じ、ひび割れを生じさせた疑いがある。幸い、これらのひび割れは拱環石には達しておらず、壁石内で収束しているため、橋体の構造耐力に及ぼす影響は小さいものと考えられるが、放置すれば、壁石部の変形が進行し、橋梁の安定性ならびに道路としての機能に影響を及ぼす可能性がある。



写真-3 橋脚近傍の壁石部に発生したひび割れ
写真-4 橋脚上面アスファルトのひび割れ

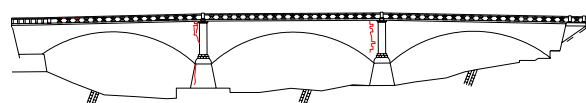


図-3 ひび割れ図(下流側側面)

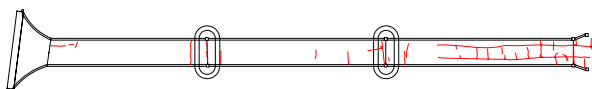


図-4 ひび割れ図(路面)

2) 目地モルタル

目地モルタルは、地覆の近傍を中心に植生による破壊が進行しており、これらの部分については補修が必要である。ただし、ひび割れや植

生による損傷がないアーチ下面に関しては目視で確認できる損傷や空洞は認められなかった。

3) 高欄部

高欄部には、石材の浮き、欠損、ひび割れ等が多数認められるが、石材の落下や倒壊の原因となるような変形や緩みはなく、また、損傷部を除けば石材自体の経年的な劣化も軽微であると考えられる。

4) アスファルト路面

引張応力が作用するP1付近、P2付近およびA2付近(図-5)には、アスファルト路面上の橋軸直角方向に幅1cm前後の顕著なひび割れが発生している(図-4)。このひび割れは、P1、P2付近の壁石に発生していた鉛直方向のひび割れと同様に、橋梁の自重によるクリープ的な変形で発生している可能性が高く、注意が必要である。また、P2～A2間の特にA2寄りの部分には、車両の轍に沿う橋軸方向のひび割れが発生している(図-4)。これは、床版下の粘土層の圧密沈下により、床版と粘土層との間に空隙を生じ、コンクリート床版が橋体から孤立した状態になっているために生じた荷重によるひび割れあるいはアスファルトおよび床版コンクリートの板振動による疲労性ひび割れの可能性が高い。

3.2 各部寸法調査

橋梁外形の測量結果および各部材断面の測定結果をそれぞれ図-5および図-6に示す。壁石の厚さについては、石材の目地割、レーダーによる探查結果および小径コアの採取結果等から推定した寸法を用いている。

3.3 石材風化調査結果

壁石部から採取した6本の石材コアによる試験結果では、気乾密度の平均値は 1.83g/cm^3 、圧縮強度の平均値は 28.5N/mm^2 、静弾性係数の平均値は、 17.224kN/mm^2 となっている。採取コアの断面を目視で観察した限りでは、深さ方向に劣化・損傷度の差異は認められない。

表層部、中央部、深層部別にみた圧縮強度の平均値は、図-7に示すとおり、表層部で

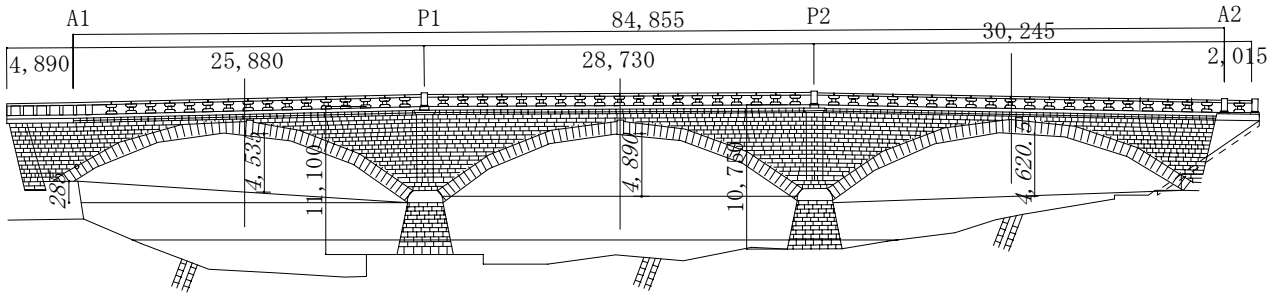


図-5 橋梁外形測量結果（下流側側面）（単位：mm）

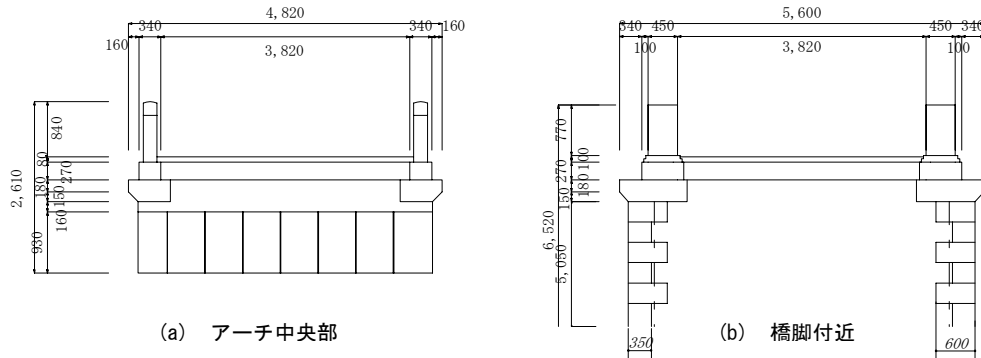


図-6 部材断面測定結果（単位：mm）

27.8N/mm²，中央部で28.2N/mm²，深層部で30.3 N/mm²となっており，若干ながら深層部に行くにしたがって強度が大きくなる傾向が現れているが，逆に，静弾性係数は，表層部で17.502kN/mm²，中央部で17.284kN/mm²，深層部で16.721 kN/mm²と表層部の方が高い値を示している。しかしながら，これらの測定結果は，石材自体の物性にバラツキが見込まれること，試験に用いたコアが直径24mmの小径コアであり，測定値にも誤差が見込まれることを考慮すれば，必ずしも石材の劣化状態を反映しているとは言えないため，本試験結果から石材の風化状態を判断することは困難である。

一方，高欄手摺部より採取した石材コアの気乾密度の平均値は1.78g/cm³，圧縮強度の平均値は26.5N/mm²，静弾性係数の平均値は12.308kN/mm²となっており，いずれの値も壁石部の値より小さいことから，高欄手摺部には，壁石部に比べて軽く，柔らかい石材が使用されたものと考えられる。

3.4 目地劣化調査結果

目地中央部より採取した4本のモルタルコアの試験結果（平均値）を図-8に示す。コアの目視観察結果では，目地モルタルは石材間に密

に充填されており，コア中央部以深では，目視で確認できる損傷は少ない。しかしながら，表面付近のモルタルは，コア採取時に破砕したものが多く，圧縮強度，静弾性係数ともに深層部に比べて表層部の値が低い結果となっている。また，目視調査でも地覆付近の目地モルタル部には，植生化による損傷が確認されており，少なくとも表層部の目地モルタルに関しては，撤去・修復が必要であると考えられる。

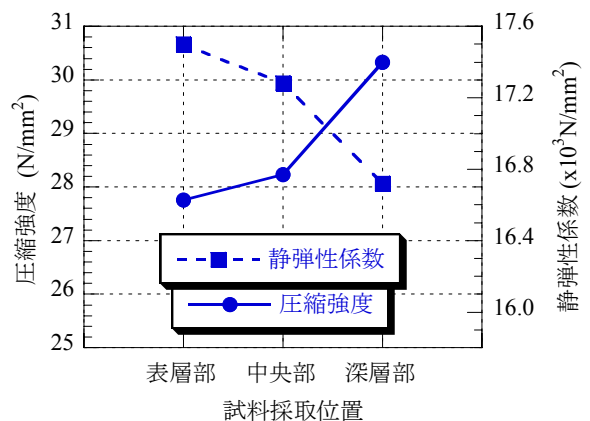


図-7 壁石部石材コアの試験結果

3.5 内部空洞調査

電磁波レーダーによる側面壁石部の探査画像を図-9に示す。同図より，側面壁石の厚さは

約 450mm と推定される。しかしながら、貫通コアにより 2 箇所を実測した石材の厚さは、それぞれ 350mm および 600mm となっており、電磁波レーダーの探査画像では、これらの平均的な厚さが検出されたものと診られる。また、同図の各所に現れている白い三日月状の反射像は、この部分に空隙が存在することを示すものである。

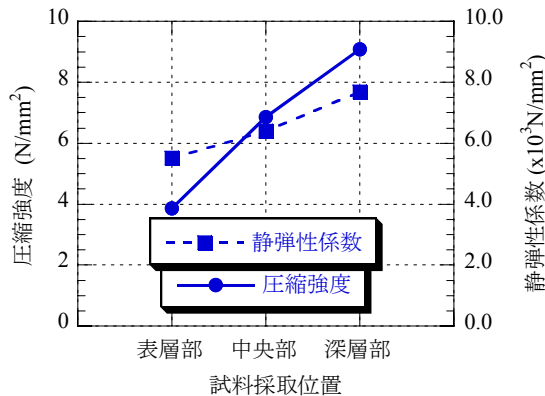


図-8 目地モルタルコアの試験結果

一方、写真-5は、内視鏡を用いて中詰土の状況を観察した映像である。同写真より、中詰土は、極めて空隙が多く、礫質土というよりも、むしろ投入された比較的大きな石材同士が点接触で支持しあっている状態であると判断される。レーダー法、内視鏡法およびオールコアリングの結果から推定される中詰土層の断面図を図-10に示す。

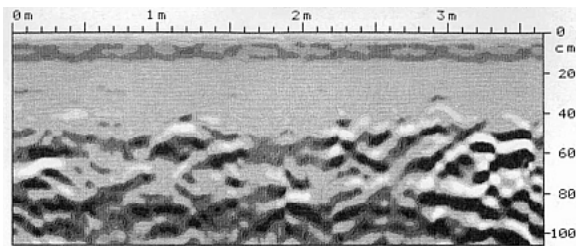


図-9 電磁波レーダーによる壁石の探査画像

アスファルトの厚さは約 80mm, コンクリート床版の厚さは約 120mm, 粘土層の厚さは約 500mm であり、いずれも特筆すべき変状は認められない。粘土層の下は礫質土層となっているが、この部分は、岩石同士が点接触状態で支持

し合い、間隙には多くの空洞が存在する。一方、-5.0m 以深は、溶結凝灰岩や凝灰質安山岩の隙間を礫混じりのモルタルで充填したような状態となっており、間隙は少なく密実である。



写真-5 内視鏡による中詰土の状況写真

3.6 水中部基礎調査

水中ビデオを用いた撮影の結果、橋脚の水中部に目視で確認できる損傷は認められなかった(写真-6)。しかしながら、P1 橋脚のA1側側面には、カメラで根固工の立ち上がり部を確認できない部分があり、この部分は、河床との間に洗掘による間隙が生じている可能性が高い(写真-7)。



写真-6 P2 橋脚(水中部)側面

(損傷は認められない)



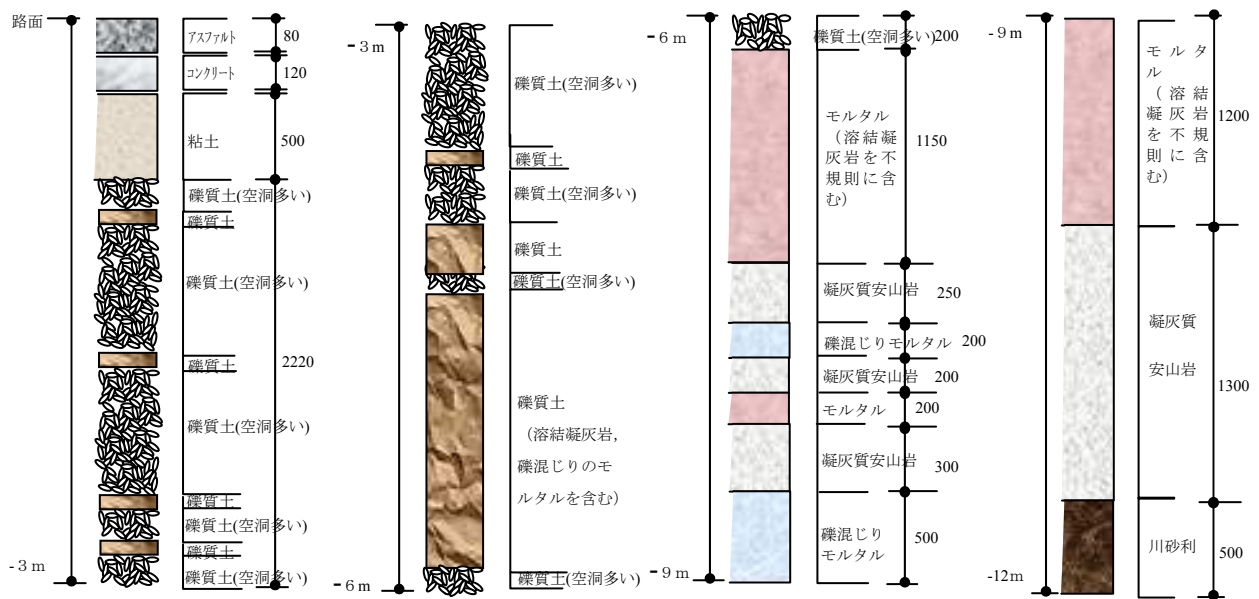
写真-7 P1 橋脚(水中部)側面

(洗掘が認められる)

4. まとめ

本調査で得られた知見は、以下の通りである。

- 1)基礎および周辺地盤は堅固であり、特筆すべき変状は発生していない。
- 2)石材の材料学的劣化は、ごく表層部を除けば、極めて軽微であると判断されるが、目地モルタル表層部の劣化は著しく、撤去・改修が必要である。
- 3)P1, P2 両橋脚付近の側面壁石部および橋脚上の路面には、幅 1~2cm の顕著なひび割れ



(a) 0m(路面) ~ -3m

(b) -3m ~ -6m

(c) -6m ~ -9m

(d) -9m ~ -12m

図-10 中詰土層の推定断面図

が認められる。これらは、長期にわたる引張力の作用で発生した可能性が高く、早期の補強が必要である。

- 4) 中詰土は、極めて空隙が多く、20~30cm 前後の玉石が点接触的に支持しあっている。この状態は、建設当初からのものか、あるいは、長年にわたる土砂の離脱により形成された状態かは判断できないが、中詰土の崩壊による床版の損傷等を防止するため、裏込め注入などの対策が望ましいものと判断される。
- 5) 橋脚水中部に損傷は認められないが、P1の根固工の一部には、洗掘により河床との間に隙間を生じている部分があるため、根固工の増し打ち等の対策が必要であると考えられる。
- 6) 小径コア実験の結果、石材とモルタルの圧縮強度は、それぞれ 28.5N/mm^2 、 $3.86\text{N/mm}^2 \sim 9.09\text{N/mm}^2$ であることが、また静弾性係数は、それぞれ 17.224kN/mm^2 、 $5.5\text{kN/mm}^2 \sim 7.8\text{kN/mm}^2$ であることが分かった。

石橋の劣化原因は、石材や目地の材料学的な経年劣化、過剰な交通荷重による疲労、自重による石材・目地のクリープ的な変形とそれによる石材間のかみ合いの緩み、基礎地盤の沈下や支持力低下、地震や出水による水平力の作用な

ど様々である。アーチ橋の場合、その変状は、スパンおよびライズの変化となって現れることが多いため、本調査における測量結果を初期値としてモニタリングすることが可能である。しかし、構造的安定性の検討には、振動特性のモニタリング等、別の手法が必要となる。

謝辞

羅漢寺橋の調査につきましては、本耶馬溪町役場の小野和彦町長、五郎丸真一課長に多大なる貢献をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。なお本調査・試験は、名古屋市立大学特別研究奨励費、文部科学省科学研究費補助金により進められた研究成果の一部である。

引用・参考文献

- 1) Aoki, T., Komiyama, T., Miyata, S., Miura, M. and Igarashi, Y.: RESEARCH ON DETERIORATION FOR RAKANJI STONE ARCH BRIDGE, HONYABAKEI, OITA, JAPAN, 4th International Conference on Arch Bridges, Barcelona, pp.17-19 Nov. 2004
- 2) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの診断技術' 01, p.79, 2001.3