

石橋アーチ橋の載荷試験と構造特性について *

Loading Tests on a Stone Masonry Bridge

高橋 洋一¹⁾ 迹目 英正²⁾ 長谷場 良二³⁾ 吉原 進⁴⁾

By TAKAHASHI Youichi NIGEME Eisei HASEBA Ryouji YOSHIHARA Susumu

甲突川に架かる西田橋は、全長49.9m、幅員 6.3mの4連石造アーチ橋である。西田橋のような石造アーチ橋では、架橋技術や離散した石材による構造特性は不明な点が数多く残っており、今後詳細な解体調査が行われる計画であるが、調査の一環として現橋における載荷試験が実施された。

載荷試験では、ダンプトラックを載荷荷重として使用し、アーチ基礎センターから1/4アーチ間隔で車両を静止させたときのアーチ各部分の変位や石材のひずみ及び合端の変位を計測し、荷重の伝達や変位特性について調査した。

載荷試験の結果、橋梁の変位特性が即時的でかつ弾性的であることなどが判明した。また、本試験に対するコンピュータシミュレーションと構造特性の解析は、別途報告される。

1. はじめに

鹿児島市を流れる甲突川には、玉江橋、新上橋、西田橋、高麗橋、武之橋と計5橋の石橋が架かっていた。

平成5年8月6日に鹿児島地区を襲った集中豪雨は、甲突川を氾濫させ、「甲突川五石橋」のうちの西田橋と武之橋を流失させた。この災害後、鹿児島県は甲突川に対して河川激甚災害対策特別緊急事業を導入し、本格的な河川改修を行うことと、流失を免れた玉江橋、西田橋、高麗橋の3橋を移設保存することを決定した。

移設保存が決定した3橋のうちの西田橋は、全長49.9m、幅員6.3mの4連石造アーチ橋で、1846年に岩永三五郎により架けられ、県の有形文化財に指定

されている。

西田橋のような石造アーチ橋では、建設時における記録や文献等がほとんど無く、当時の架橋技術や離散した石材による構造特性について不明な点が数多く残っている。今後、解体時において詳細な調査が行われる予定であるが、調査の一環として現橋における載荷試験が実施された。

本稿では、載荷試験方法と試験結果について紹介するとともに、試験結果を基に西田橋の構造特性について考察する。

2. 載荷試験

(1) 測定項目と計器配置

載荷試験における測定項目を表-1に示す。

表-1 測定項目と計測装置

測定項目	使用計器	計器仕様
アーチ部変位	変位計 (CDP-50)	容量: 50mm 感度: 0.005mm
石材のひずみ	ひずみゲージ (PL-30-1L)	抵抗値: 120Ω 寸法: 43×8mm
合端の変位	亀裂変位計 (BCD-5R)	容量: ±5mm 感度: 0.0025mm

*keyword: 西田橋、載荷試験、構造特性、技術史

¹⁾ 正会員 (株) 計測リサーチコンサルタント

²⁾ 正会員 ほつま土木計画(株)

³⁾ 正会員 鹿児島県土木部都市計画課

⁴⁾ 正会員 工博 鹿児島大学工学部海洋工学科
西田橋解体復元調査委員会 委員長

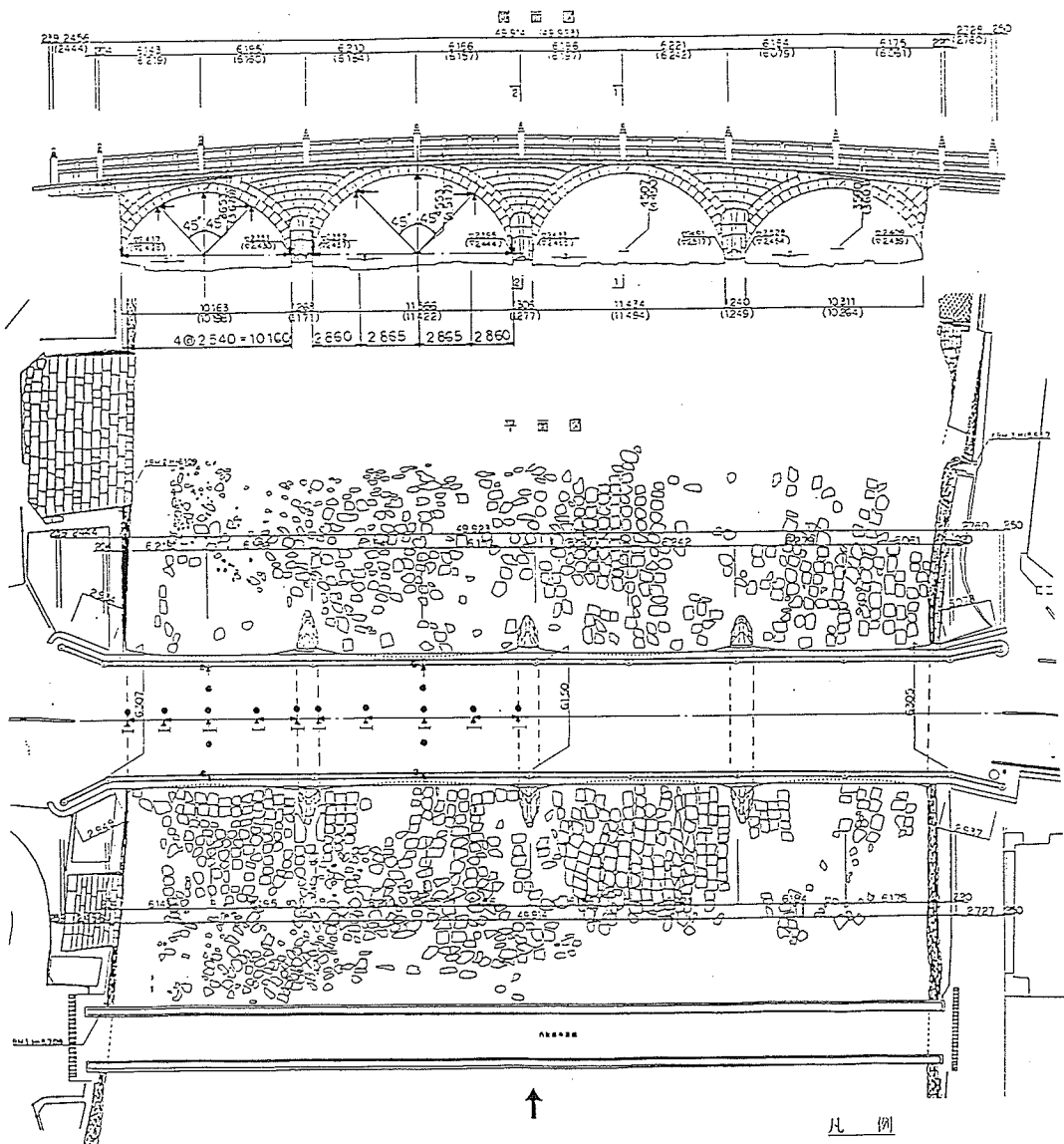


図-1 計器配置位置図

(2) 基準梁の設置

基準梁の条件としては、

- ① 敷石（文化財）の中に位置するため、搬入、仮設、撤去とも人力で施工できること。
- ② 護床の敷石は不陸が激しく、これに柔軟に対応出来ること。
- ③ 石橋に荷重が載荷されたときの基礎の変位量は、0.1mm オーダーと予測されたため、載荷による

影響を受けない部分に支持点を置く必要がある。

④ 流水、風による振動は、荷重による変位より2オーダー低いレベルに抑えることが望ましく、基準梁の剛性を高くする必要がある。等が必要であると考えられた。そこで、単管枠組足場を基準梁に採用することで、人力での施工性を向上にさせるとともに、トラス構造にすることで剛性の向上に努めた。

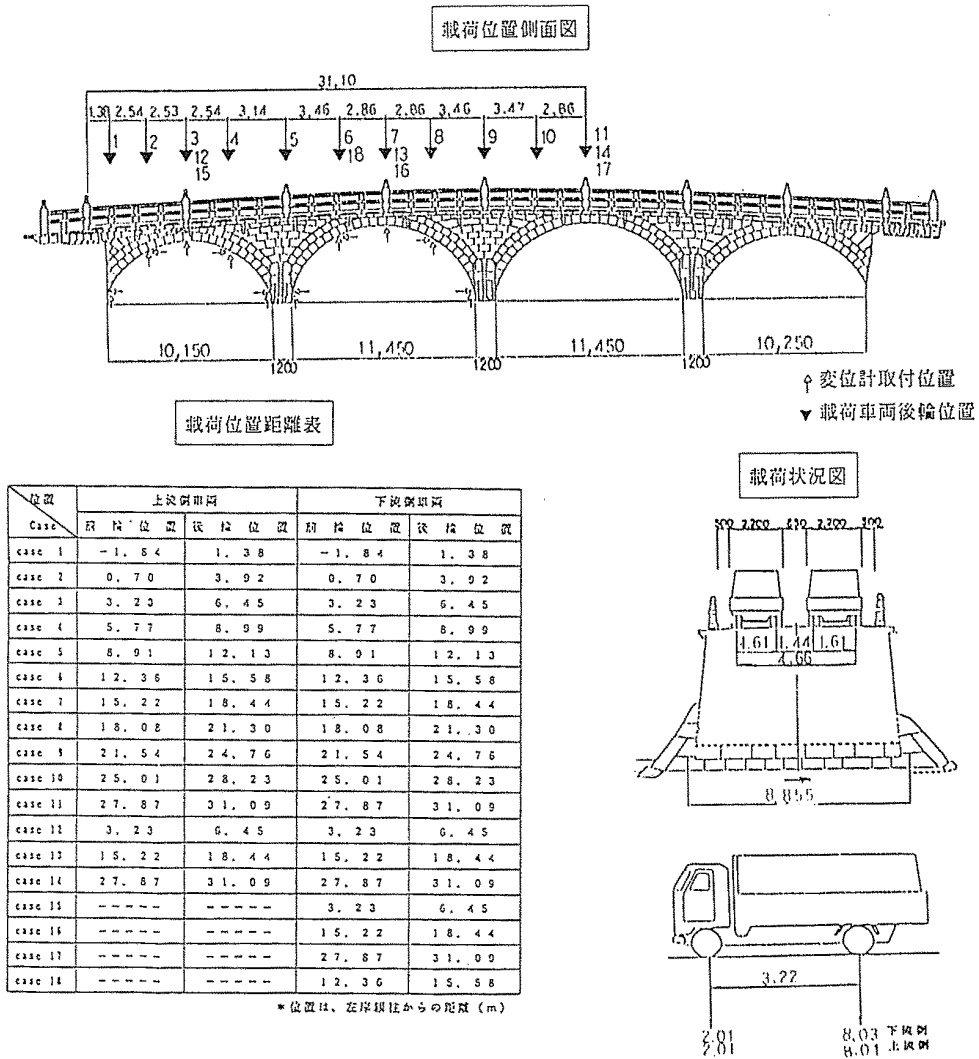


図-2 載荷位置図

(3) 載荷荷重

載荷荷重は、ダンプトラックを載荷車両として使用し、載荷試験に先立ち、載荷車両の重量を測定するとともに、車両重量を土壌により調整した。

載荷車両の重量は、車両の片側の前後輪の下にロードセルをセットし車両の重量を測定しながら後輪の軸上に土壌を追加して調整した。

調整後の車両重量は、

上流側載荷車両：前輪2.01、後輪8.01 計10.02t

下流側載荷車両：前輪2.01、後輪8.03 計10.04t
である。

(4) 載荷位置

載荷位置は、荷重及び変位の伝達状況が把握できるように、アーチの基礎センターから1/4 アーチ間隔で載荷することとし、載荷車両の後輪をマーキングに合わせて静止させた。

また、3次元的な挙動状況を把握するため、上下流両路線同時載荷と下流側路線のみの載荷を実施した。さらに、再現性をチェックするために、アーチクラウンにおける両側載荷を2回行った。

載荷ケースは、図-2に示す計18ケースである。

(5) 荷重方法と荷重保持時間

荷重方法は、荷重状態と無荷重状態を1セットとした多サイクル方式を採用し、事前に調整した荷重車両の後輪を4連アーチのうちの1連から3連までの所定の位置に静止させて荷重した。

また、荷重保持時間の設定に際しては、基準梁の構造上、荷重中において測定データに振動等の影響が出現する可能性が考えられたため、影響の程度を把握するために必要な時間を5分間と仮定して荷重保持時間を5分間とした。

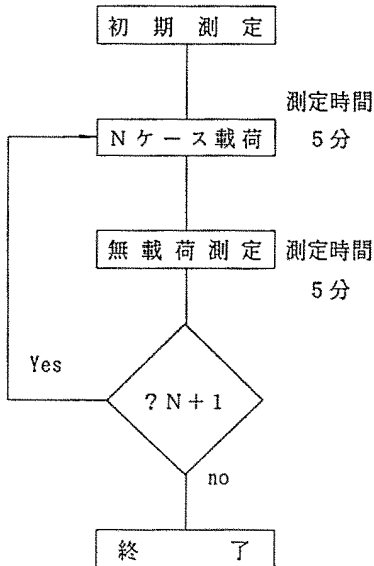


図-3 荷重フロー図

(6) 測定システム

計測は、右図の計測システムブロック図に示される自動計測システムとした。橋梁の各部分に配置した計器からの信号は、ケーブルを介してスイッチボックスに入力され、データロガーにより測定された後コンピュータに入力される。コンピュータでは、データの物理量への変換を行うとともに経時変化図の作成及び一覧表の作成を行った。

また、荷重保持時間内の測定は、基準梁の振動の影響状況や挙動の安定性を把握できるように、最小サンプリングピッチである5秒間隔でのスキャンを行い、計測画面に表示するとともに、ディスクに保存するシステムを採用した。

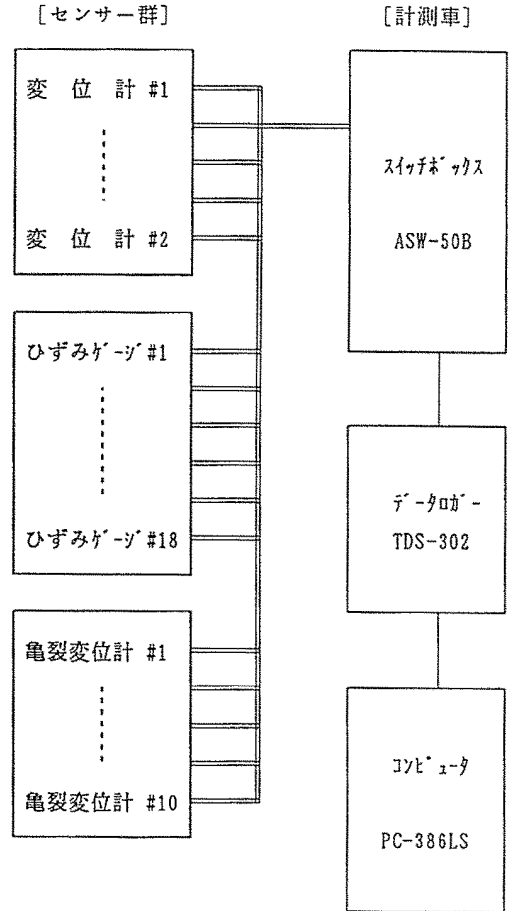


図-4 測定システムブロック図

3. 荷重試験結果と考察

荷重試験結果の一覧表を表-3～表-5に示す。

図-5に荷重前後における計測値の変化図、図-6に2連アーチに荷重した場合における計測値の分布図、図-7に両側荷重と下流側荷重での変位及びひずみの比較図を示す。

図-5に示されるように、アーチ部の変位及び合端の変位は、測定時間内においてはほぼ一定の値を示し、風や流水による振動の影響による値のばらつきは認められない。変位計及び亀裂変位計の測定データは、数 $\times 10^{-6}$ ～数十 $\times 10^{-6}$ であることと、測定時間内における変化がデータロガーの最小表示精度で

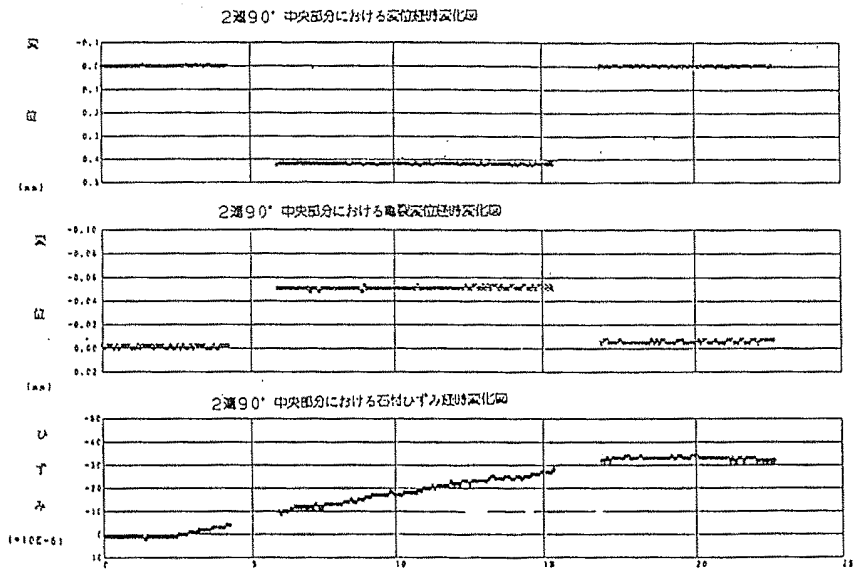


図-5 載荷前後における変化図

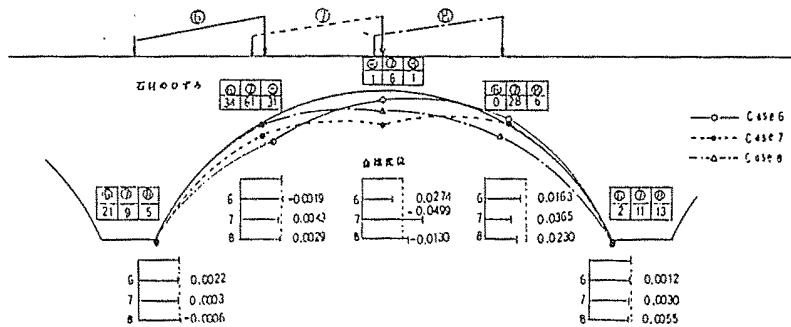


図-6 計測値の分布図例 (6~8 ケース)

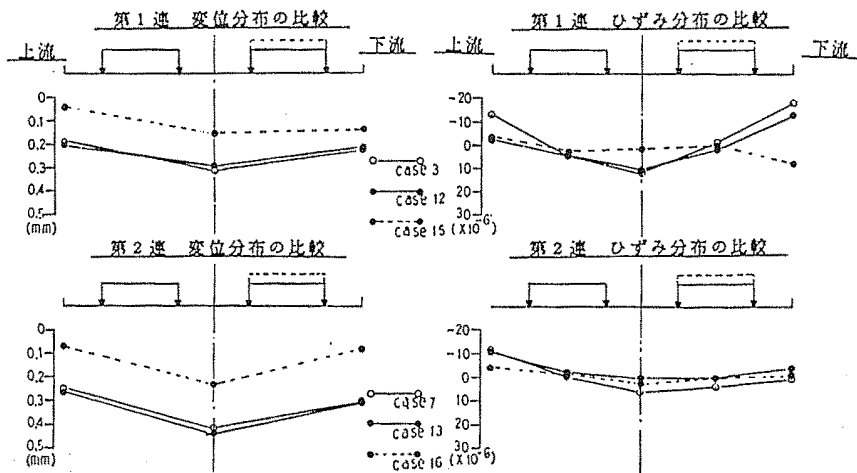


図-7 両側載荷と下流側載荷での比較図

ある 1×10^{-6} であることから有意な値であると判断できる。また、石材のひずみは、時間の経過とともに徐々に圧縮ひずみが増加する傾向を示している。この挙動の要因としては、試験までの放置期間が長く、石材への雨水の浸透による接着剤の劣化に起因するクリープやダミーゲージの設置場所が計測場所に近く、照明灯の影響を受けた結果、アクティブゲージとの温度変化に違いを生じたことなどが挙げられる。

載荷によって生じたひずみは、載荷前の最終測定ひずみと載荷後の初期ひずみとの差を代表値として採用した。

各計測項目の最大値をまとめると、下表のような結果が得られた。

表-2 試験結果の最大値

計 測 項 目	載荷ケース	部 位	最 大 値
鉛直方向変位	ケース13	2連90°	0.441 mm
水平方向変位	ケース6	2連45°	0.111 mm
合端の縮み	ケース7	2連135°	0.0365 mm
合端の開き	ケース7	2連90°	-0.0499 mm
圧縮ひずみ	ケース7	2連45°	61×10^{-6}
引張りひずみ	ケース3	1連90°	-18×10^{-6}

表に示されるように、最大のたわみは載荷車両が2連中央にある時、その直下で0.44mm沈下し、また、水平変位では、載荷車両が2連目1/4 地点にある時に0.11mm中央部側へ変位している。

次に、合端の伸縮に着目すると、載荷車両が2連中央にある時にその直下で0.05mm開き、135°の地点で0.037mm縮んでいる。

石材のひずみでは、2連45°の地点で 61×10^{-6} の圧縮ひずみが生じ、1連中央に後輪が来たときその直下では、 18×10^{-6} の引張りひずみを発生している。

試験で得られた最大値から判断すると、20 t fの荷重を石橋に載荷しても、アーチの変位や合端の変位は非常に小さく、静的荷重に対して強固であると考えられる。

次に、計測項目毎の挙動状況についてまとめる。

(1) 変位特性

経時変化図に示されるように、橋梁の変位は、載荷と同時に変位し、除荷により載荷前の変位までほぼ復元する挙動を示すことが解る。また、変位分布

から読み取れることとして、荷重の推定伝達方向と変位の出現方向がほぼ一致していることと、変位を生じる位置が概ね 1/4アーチまでであり、袴石部分での変位が小さいことが挙げられる。

図-7の両側載荷と下流側載荷での変位の比較図に着目すると、1連、2連ともに、同一条件下での変位量がほぼ等しいことから、再現性があると判断できる。また、橋軸横断方向の変位分布では、変位が全断面に及んでおり、石橋が3次元的に挙動していると判断されるが、上下流では変位特性が異なっている。

(2) 石材のひずみ特性

図-6のひずみ分布に示されるように、アーチ部に載荷した場合、発生ひずみは45°及び135°の部分で卓越した値を示し、袴石部分ではほとんどひずみが生じていない。また、計測されたひずみの最大値は 61×10^{-6} で、石材の弾性係数を 55000 kg/cm^2 と仮定する¹⁾と、発生緑応力は約 3 kg/cm^2 と非常に小さい値である。

両側載荷と下流側載荷でのひずみの比較図に着目すると、変位特性と同様に、1連、2連ともに同一条件下におけるひずみ分布はほぼ等しいことから、再現性があると判断される。また、橋軸横断方向のひずみ分布では、ひずみの発生が全断面に及び、石橋が3次元的に荷重を伝達することが窺える。

(3) 合端変位特性

経時変化図に示されるように、合端の変位は、載荷と同時に変位を生じ、除荷により載荷前の変位にほぼ復元する挙動を示している。また、分布図に示されるように、合端の変位は、45°、90°及び135°の部位において大きく出現し、袴石部分ではほとんど変位を生じていない。

以上の挙動特性から、石橋に荷重を載荷すると、石橋の各部分は即時的に変位を生じ、荷重が作用しなくなると、載荷前の状態に復元する挙動を示すことが解る。また、載荷された荷重は、数カ所の合端の変位により吸収され、橋梁基礎まで載荷荷重が伝達されにくいと判断される。これらのことは、通常の交通荷重程度では、石橋を弾性理論により解析できることを示すものと考えられる。

表-3 変位計計測結果一覧表

計測位置	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7	ケース 8	ケース 9	ケース 10	ケース 11	ケース 12	ケース 13	ケース 14	ケース 15	ケース 16	ケース 17	ケース 18
第一連	0° Y	0.034	0.037	0.020	0.001	0.002	-0.007	-0.008	-0.005	-0.001	-0.003	0.000	0.018	-0.001	-0.000	0.011	-0.001	-0.001
	0° H	-0.003	0.002	0.032	0.023	0.015	-0.003	-0.004	0.003	0.012	0.002	-0.000	0.031	-0.000	0.005	0.016	-0.001	0.002
	45° Y	0.063	0.137	0.081	0.014	-0.005	-0.005	-0.019	-0.018	-0.010	0.002	-0.001	0.079	-0.017	-0.003	0.043	-0.003	0.001
	45° H	0.022	0.040	-0.016	-0.048	-0.037	-0.004	-0.006	-0.009	-0.021	-0.004	-0.011	-0.015	-0.020	-0.007	-0.011	-0.017	-0.013
	90° Y	0.011	0.062	-0.192	0.119	0.047	-0.018	-0.034	-0.029	-0.015	0.002	0.002	0.202	-0.026	-0.001	0.046	-0.015	0.003
	90° H	0.019	0.120	0.312	0.175	0.026	-0.017	-0.042	-0.033	-0.020	-0.015	-0.012	0.292	-0.041	-0.004	0.149	-0.022	-0.001
	90° Y	0.019	0.094	-0.221	0.137	0.035	-0.012	-0.024	-0.024	-0.011	-0.002	-0.004	0.216	-0.034	-0.001	0.137	-0.026	-0.003
	135° Y	-0.008	-0.017	0.035	0.131	0.100	0.031	0.015	0.009	-0.002	-0.003	-0.001	0.041	0.017	0.001	0.017	0.003	0.000
	135° H	0.020	0.056	0.070	-0.009	-0.047	-0.035	-0.035	-0.032	-0.009	0.006	-0.010	0.082	-0.043	-0.006	0.036	-0.028	-0.011
	180° Y	-0.004	0.000	0.023	0.043	0.041	0.029	0.027	0.012	-0.001	0.001	0.001	0.025	0.027	0.003	0.009	0.005	0.000
第二連	180° H	0.008	0.021	0.041	0.040	0.006	-0.024	-0.033	-0.019	0.004	0.010	-0.003	0.045	-0.039	0.000	0.020	-0.022	-0.001
	45° Y	0.005	0.003	-0.106	0.005	0.047	0.268	0.199	0.027	-0.006	-0.001	-0.007	-0.007	0.200	-0.018	-0.007	0.107	-0.008
	45° H	0.032	0.021	0.028	0.015	0.016	0.111	-0.019	-0.087	-0.051	0.005	-0.015	0.029	-0.015	-0.005	0.017	-0.005	-0.011
	90° Y	-0.002	-0.000	-0.019	-0.012	0.006	0.083	0.249	0.167	0.038	-0.011	-0.025	-0.032	0.260	-0.038	-0.008	0.072	-0.018
	90° H	-0.004	-0.005	-0.011	-0.003	0.005	0.117	0.420	0.251	0.038	-0.001	-0.024	-0.026	0.441	-0.031	-0.007	0.235	-0.007
	90° Y	-0.007	-0.006	-0.025	-0.002	0.020	0.101	0.299	0.197	0.038	-0.001	-0.032	-0.030	0.304	-0.028	-0.006	0.179	-0.011
	135° Y	-0.003	-0.013	-0.014	-0.006	-0.002	-0.023	0.040	-0.192	0.119	0.017	-0.001	-0.020	0.052	-0.001	-0.002	0.019	-0.001
	135° H	0.003	0.008	0.009	-0.001	0.011	0.065	0.084	-0.016	-0.049	-0.005	-0.035	0.013	0.102	-0.027	0.009	0.054	-0.012
	180° Y	0.000	-0.001	-0.001	0.003	0.001	-0.004	-0.001	0.034	-0.038	0.042	0.034	-0.008	0.017	0.029	0.004	0.004	0.014
	180° H	0.006	0.003	-0.007	-0.003	0.001	0.020	0.041	0.040	0.011	-0.024	-0.044	0.004	0.047	-0.048	-0.001	0.027	-0.005

*1: 沈下及び右岸側への変位を(+)で表示した。*2: 単位: mm

表-4 石材のひずみ計測結果

計測位置	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7	ケース 8	ケース 9	ケース 10	ケース 11	ケース 12	ケース 13	ケース 14	ケース 15	ケース 16	ケース 17	ケース 18
第一連	0°	3	6	3	3	-1	0	1	1	1	2	1	5	0	0	2	2	0
	45°	-2	0	4	4	0	0	2	1	2	1	6	0	-1	2	0	0	1
	90° -1	2	6	-13	-1	4	1	6	5	4	1	2	-2	3	1	-3	2	0
	90° -2	1	9	5	10	4	2	5	6	2	1	1	5	4	0	3	4	0
	90° -3	2	7	12	13	5	1	3	4	3	2	1	11	2	0	2	1	0
	90° -4	1	-2	-1	3	2	1	2	2	3	2	3	2	2	-1	0	1	1
	90° -5	5	9	-18	-4	2	4	9	5	5	2	3	-13	8	0	8	5	1
	135°	2	5	3	15	1	0	1	1	1	3	1	16	1	0	6	0	1
	180°	0	-3	-2	5	7	5	7	6	5	1	2	2	5	-1	-2	3	0
	0°	1	3	4	3	11	21	19	5	0	5	-1	8	15	-2	2	11	0
第二連	45°	0	1	1	4	-3	34	61	31	6	4	-1	10	57	-3	0	39	-1
	90° -1	2	1	1	6	1	4	-12	-2	4	5	3	6	-11	1	2	-4	1
	90° -2	2	1	1	4	1	5	0	0	3	4	2	4	-2	-1	0	0	0
	90° -3	1	0	2	4	0	1	6	1	1	5	1	6	0	0	-1	1	2
	90° -4	1	0	1	3	1	0	4	1	4	4	1	5	0	1	2	0	1
	90° -5	1	1	0	2	1	2	-1	-1	3	4	2	7	-4	0	1	0	0
	135°	2	0	0	5	1	1	28	6	0	5	1	6	22	0	0	0	1
	180°	0	-1	-1	1	0	0	11	13	16	17	1	5	8	-2	-2	5	1

*1: 90° の番号は上流よりナンバリングした。*2: 圧縮ひずみを(+)で表示した。*3: 単位: $\times 10^{-4}$

表-5 合端の変位計測結果

計測位置	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6	ケース 7	ケース 8	ケース 9	ケース 10	ケース 11	ケース 12	ケース 13	ケース 14	ケース 15	ケース 16	ケース 17	ケース 18
第一連	0°	0.37	0.72	0.42	0.09	-0.01	-0.01	-0.08	-0.15	-0.23	-0.14	-0.15	0.42	-0.07	-0.02	0.28	-0.06	-0.01
	45°	0.80	0.52	2.32	1.67	0.39	-0.02	-0.21	-0.12	-0.43	-0.32	-0.13	2.02	-0.02	-0.05	1.03	-0.14	-0.04
	90°	0.06	0.55	0.08	0.39	0.05	0.08	0.05	0.02	-0.13	-0.13	-0.10	0.06	0.16	0.00	0.02	0.02	-0.07
	135°	0.08	0.36	0.80	0.23	-0.15	-0.01	-0.09	-0.05	-0.25	-0.06	-0.06	0.73	0.02	0.02	0.43	0.00	0.01
	180°	-0.15	0.05	0.17	0.48	0.60	0.05	-0.11	-0.08	-0.16	-0.12	-0.07	0.10	-0.10	-0.00	0.13	-0.01	0.02
第二連	0°	0.06	0.13	0.14	-0.04	0.20	0.22	0.03	-0.06	-0.15	-0.13	-0.06	0.06	0.02	-0.02	0.04	0.02	-0.01
	45°	-0.05	0.04	0.09	0.00	-0.10	-0.19	0.43	0.29	-0.01	-0.17	-0.05	-0.07	0.48	-0.04	0.00	0.36	-0.01
	90°	0.08	0.25	0.48	0.23	0.17	2.74	-4.99	-1.30	0.86	0.01	0.29	0.26	4.97	0.49	0.27	-3.77	0.12
	135°	0.03	0.00	-0.04	-0.01	0.12	1.63	3.65	-2.30	-0.67	0.05	0.25	-0.18	3.73	0.39	-0.08	2.68	0.23
	180°	-0.02	0.00	-0.03	-0.07	-0.03	0.12	0.30	0.55	-0.42	-0.14	-0.13	-0.01	0.26	-0.23	0.00	0.07	-0.06

*1: 合端の変位は、縮みを(+)で表示した。*2: 単位: $\times 10^{-4}$ mm* 各表において、 は後輪荷重位置を示す。

4. おわりに

西田橋における載荷試験の結果から、石造アーチ橋は、一般的に考えられているよりも強固であることが判明した。また、石橋は荷重に対して弾性的な挙動を示し、通常交通荷重の範囲では、弾性理論での解析の可能性が裏付けられた。

現在、石造アーチ橋は一般的な橋梁型式でなく、石材の離散構造や合端の特性等などに対する詳細な

構造解析がなされていないが、本試験の結果が解析手法確立のための一資料となり、石橋の保存や建設に役立てば幸いである。

おわりに、この貴重な載荷試験についてご指導とご示唆を賜った関係の皆様方に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)土木学会：建設資材としての凝灰岩の特性についての基礎調査，1995