

札幌創成橋の構造と力学的特徴

Structure and dynamic feature of "Sapporo Soseibashi Bridge"

北海道大学工学部土木工学科
北海道大学大学院工学研究科
株式会社ドーコン

学生員 工藤 直矢 (Naoya Kudo)
正員 蟹江 俊仁 (Shunji Kanie)
正員 川端 良幸 (Yoshiyuki Kawabata)

1. はじめに

札幌創成橋は、明治43(1910)年に木橋から架け替えられた石造アーチ橋である¹⁾²⁾(写真-1)。同橋は、橋長が短いながらも幅員が広い橋で、従来の和式石橋と比べてもスパンライズ比が大きく(従来の石橋³⁾:3.0-5.8, 創成橋:6.08)、当時としては珍しい路面電車などの重量物の通行を視野に入れた設計となっている。

近年、創成橋が架設されている札幌市街中心部を流れている創成川に沿う幹線道路がアンダーパス化するのに伴い、同橋の保存や移設に関わる検討が始められた。

同橋は北海道内に現存する石造アーチ橋3橋のうちのひとつであり⁴⁾、かつ現役の道路橋として今も供用されているという点で、歴史的価値の見直しと構造的特徴の把握が必要とされている。歴史的価値の検証は機会を改め報告することとし、本論文では、創成橋の構造、ならびに力学的特徴に関する研究成果を報告する。



写真-1 創成橋外観

表-1 創成橋の諸元

構造形式	石造単アーチ
設計者	澤 連蔵
橋長(m)	7.33
幅員(m)	13.25
スパン(m)	6.38
ライズ(m)	1.05

2. 創成橋の構造的特徴

2.1. 架橋時の経緯と構造諸元

運河としても利用されていた創成川はたびたび水害をもたらし、創成橋は幾度も流出の憂き目に遭ってきた。

現在の石造創成橋の架橋直前にあたる明治42(1909)年4月、大規模な豊平川および創成川の氾濫により、木造創成橋は豊平橋と共に流出した。流出から1年後の明治43(1910)年4月に北海道庁札幌土木派出所が工事着工し、同年10月、わずか半年の工期で竣工した²⁾。橋梁台帳によれば、設計者は澤連蔵となっている⁵⁾。創成橋の諸元を表-1に示す。

2.2. 架橋後の経緯と損傷状況

大正7(1918)年8月に路面電車が設置され、昭和48年(1973)3月に撤去されるまで路面電車の供用に耐えた同橋は、昭和53(1978)年に大規模な補修工事が実施された²⁾。しかし高欄などの改修が主であり、橋本体の改修は行われなかった。創成橋の下面から輪石の風化状況を調査したところ、えぐれたような損傷箇所がいくつも見られた(写真-2)。この損傷は特にアーチ端部に多く、えぐれの程度が著しい部分にはモルタルが詰められている。また、この改修工事の際に輪石の一部が脱落、元の位置にモルタルを用いて補修したという報告もある。

2.3. 現地調査結果

創成橋の保存・移設に際し、さまざまな方法で現地調査が行われた。以下にこの調査結果を示す。

(1) 橋面掘削調査

橋面の一部を掘削調査したところ、第一層目は大小の玉石と土砂および少量のモルタルが混在した層となっていた。また第二層目は黄褐色の三和土で構成されていた。この三和土は防水性があり保温に優れているという性質を持っていることから、輪石に水が入り込んで風化しないようにするための止水処理に用いられていると思われる。この層の下に輪石があり、輪石の間(合口)の部分にモルタルが詰め込まれていた(写真-3)。

(2) 水平・鉛直ボーリング調査

水平ボーリング(1箇所)および鉛直ボーリング(2箇所)は図-1に示す位置で行った。但し、鉛直ボーリングは2箇所とも橋側面から橋軸直角方向に1.5mの位置である。この結果、橋台部およびアーチの付け根の部分にコンクリートが使用されていることが明らかとなった。なお、橋台の下には木材が敷き詰められていた。

(3) 石材の物性

アーチ部に用いられている札幌軟石および札幌硬石の物理物性を調査したところ、表-2に示す数値が得られた。

表-2 アーチ石材の物性

	札幌軟石	札幌硬石
石材使用割合	約 80%	約 20%
使用箇所	アーチ橋幅中央	アーチ橋幅端部
圧縮強度	約 20 MPa	約 100 MPa

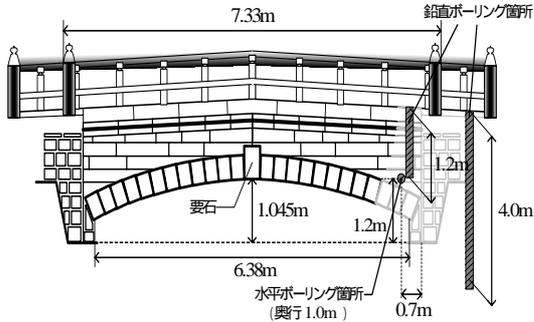


図-1 創成橋側面図



写真-2 損傷箇所の一部



写真-3 輪石の合口に挿入されたモルタル

2.4. 構造的特徴のまとめ

和式石橋の場合、輪石は風雨に耐え、かつ強度の高い石材を用いるのが通例である。創成橋の場合、アーチ部は札幌軟石で形成され、橋軸直角方向の両端部のみ剛性の高い札幌硬石が用いられている合成構造である。特にアーチ部分の約80%を占める札幌軟石は圧縮強度が約20MPaと比較的強度が小さい上、吸水率が高く風化しやすい。また、アーチ構造の中で最も重要な役割を果たす輪石が抜け落ちた状態で、橋がその構造を保ち続けたことが改修工事で確認されており、この点は特筆すべき点として挙げられる。

さらに、合口の部分にモルタルが挿入されている点、橋台およびアーチの付け根部分にコンクリートを使用している点、アーチ石の上面に粘性のある土（三和土）が布置されていた点からも、創成橋は従来の和式石橋とは明らかに異なる構造であると考えられる。

3. 創成橋の力学的特徴

3.1. 当時のアーチ設計法による検証

明治40（1907）年10月、当時としては最先端の西洋のアーチ設計技術をふんだんに紹介した「土木実用アーチ設計法」⁶⁾という専門書が発行された。

この本では、合口にモルタルを使用する方法、橋台およびアーチ付け根の部分に無筋コンクリートを使用する方法が推奨されており、輪石上面の止水処理の重要性などが説かれている。以上のような事実から、筆者らは創成橋が当時の西洋のアーチ設計法を見習って設計された可能性が高いと判断した。

一例として、構造上特に重要と思われる要石の大きさの設計方法を紹介します。実際に創成橋の条件を入力して計算を行う。

「土木実用アーチ設計法」に示されている米国トラウトワイン氏による要石の大きさのスパンライズ比からの算定方法を紹介します。トラウトワイン氏によれば、要石の厚さは、以下の公式によって求めることができる。

$$d = \frac{1}{4} \sqrt{R + \frac{1}{2}S + 0.2} \quad (1)$$

但し、 d ：要石の厚さ(ft)、 R ：円弧の曲率半径(ft)、 S ：径間の長さ(ft)である。

この式に創成橋の基本データを代入し、単位を(ft)から(m)に変換すると、以下の通りとなる。

トラウトワイン氏の方法： $d = 0.465(m)$

実際の要石の厚さ： $d = 0.45(m)$

3.2. はり理論による応力検証

創成橋は合口にモルタルを使用しており、輪石のかみ合わせを期待する従来の和式石橋の構造とは異なり、輪石とモルタルが一体となったアーチばりに近い構造と考えられる。このため創成橋の輪石をアーチばりと仮定して応力度照査を行った。以下に解析結果を示す。

(1) 解析モデル

両端固定の円弧アーチばりとしてモデル化する。モデル図を図-2に示す。また輪石の橋軸直角方向の断面諸元を表-3に示す。

表-3 輪石の断面諸元（橋軸直角方向）

幅(m)	0.92
厚さ(m)	0.45
断面積(m ²)	0.414
断面2次モーメント(m ⁴)	0.0070

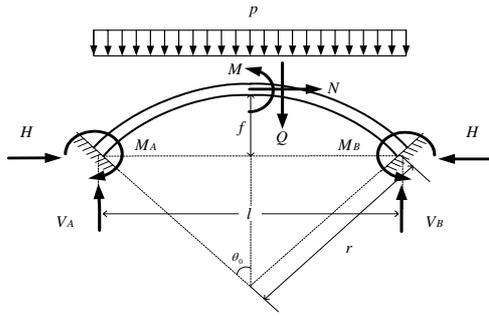


図-2 等分布荷重のかかる固定円弧アーチ

(2) 荷重条件

ここでは、常時における応力度照査のみを行うこととした。死荷重は表-4のデータを用いるものとする。

活荷重の算定は道路橋示方書⁷⁾にしたがうこととし、B活荷重を想定したL荷重を適用し、主載荷荷重が橋面全体に様にかかっているものとして計算した。この結果より、活荷重は13.50kN/m²の等分布荷重となる。

以上の死荷重ならびに活荷重を合計し、38.62kN/m²の等分布荷重がアーチに作用しているものとして計算する。

(3) 計算結果

アーチ端部およびアーチ頂部における断面力は、以下の(5)-(10)式で求められる。断面力の計算結果を表-5に、応力度の計算結果を表-6に示す。また、奥行きを単位長さ1mとする。

アーチ端部の水平反力を H 、垂直反力を V_A 、曲げモーメントを M_A とすると、

$$H = \frac{p}{12} \frac{6e\{rs - l(r-f)\} - l^3}{rs + l(r-f) - 2le + \frac{I}{Ar^2}\{rs + l(r-f)\}} \quad (2)$$

$$V_A = \frac{1}{2} pl \quad (3)$$

$$M_A = H\{e - (r-f)\} - V_A \frac{l}{2} + \frac{pr}{4s}\{l^2\theta_0 + rs - l(r-f)\} \quad (4)$$

アーチ端部の断面力：

$$N = -H \cos \theta_0 - V_A \sin \theta_0 \quad (5)$$

$$Q = -H \sin \theta_0 + V_A \cos \theta_0 \quad (6)$$

$$M = M_A \quad (7)$$

アーチ頂部の断面力：

$$N = -H \quad (8)$$

$$Q = 0 \quad (9)$$

$$M = M_A - Hf + \frac{1}{2} V_A l - \frac{1}{8} pl^2 \quad (10)$$

但し、 N ：軸力、 Q ：せん断力、 M ：曲げモーメント、 p ：分布荷重、 f ：ライズ、 l ：スパン、 r ：曲率半径、 e ：円の中心から弾性重心までの距離、 s ：円弧の長さ、 θ_0 ：アーチ頂部から端部までの角度、 I ：断面2次モーメント、 A ：断面積である。

以上より、輪石には圧縮力のみが作用して、アーチ構造が成立していることがわかる。また、札幌軟石の圧縮

強度が約20MPaであることを考えれば、破壊安全率は20以上となり、通常の使用の範囲では十分な安全性を有していると考えられる。

但し、本計算結果はアーチが札幌軟石だけで構成されていることを前提とし、脱落やえぐれの無い健全な状態を想定したものである。

3.3. 輪石剛性の差異が応力分布に与える影響

創成橋のアーチ部分は主として札幌軟石で形成されているが、橋幅方向両端部のみ、剛性の高い札幌硬石が用いられている。両者の圧縮強度はおよそ1：4程度違うことから、軸方向剛性についても同程度の差異があるものと思われる。

このような剛性の差異は、橋幅両端で札幌硬石の応力負担を増加させるとともに、札幌軟石のアーチ圧縮力が十分に入らず、脱落につながる懸念される。このため、アーチ部分を取り出した三次元FEM解析を行い、静的荷重作用時の変形と応力分布状態を確認した。解析モデルは、構造の対称性を考慮した1/4モデルとし(図-3)、解析諸元は表-7に示すとおりである。

表-4 死荷重

アーチ部材(kN/m ²)	7.64
中詰め土砂(kN/m ²)	15.23
アスファルト舗装(kN/m ²)	2.25

表-5 断面力の計算結果

	アーチ端部	アーチ頂部
軸力(kN)	-206.1	-165.3
せん断力(kN)	0.9	0
曲げモーメント(kN・m)	-12.3	10.6

表-6 応力度の計算結果

	アーチ端部	アーチ頂部
上縁応力(MPa)	-0.090	-0.682
下縁応力(MPa)	-0.822	-0.053

表-7 解析諸元 (1/4 モデル)

モデル	節点数	7,302	要素数	5,726
弾性係数	札幌硬石	100GPa	札幌軟石	20 GPa
荷重	(自重) + (死荷重) + (活荷重: 1.0 tf/m ²)			

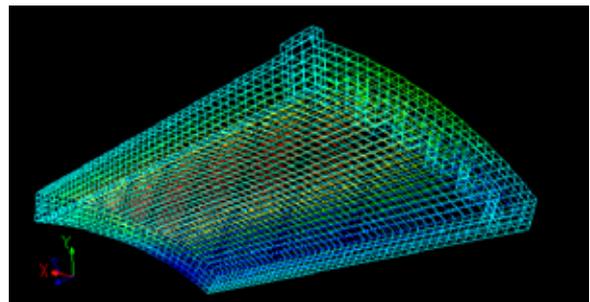


図-3 三次元FEM解析メッシュ図

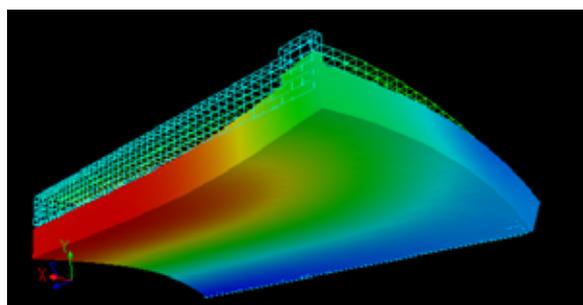
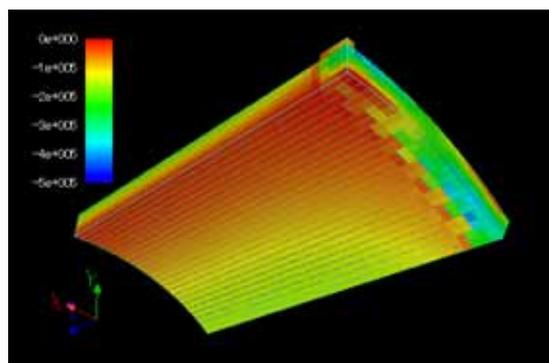
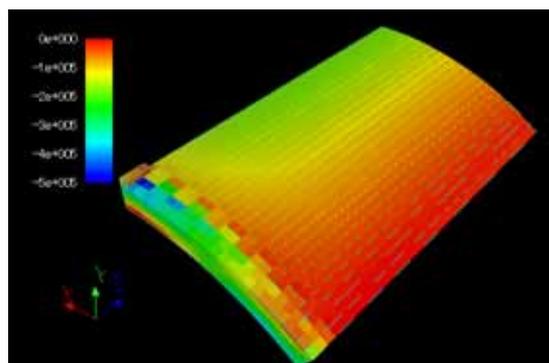


図-4 変形図 (変形を10000倍に拡大)



(a) アーチ背面



(b) アーチ上面

図-5 応力分布図

図-4は、アーチ部分の変形を示したものである。この図から明らかなように、橋幅端部から2.5m程度は札幌硬石の影響が変位に現れ、札幌軟石の剛性のみで応力や変形が評価できるのは、橋の中央部7-8m幅の部分だけである。

図-5は、アーチ背面および上面における橋軸方向応力の分布を示したものである。計算結果によれば、引張応力の発生こそ見られないものの、比較的大きな圧縮応力が導入される札幌硬石付近の軟石では、背面・上面ともにその圧縮応力度が0.1MPaを下回る部分が見られる。したがって、わずかな応力バランスの変化が、札幌硬石に隣接する軟石部分の脱落につながる事が予想される。

4. まとめ

以上の研究結果をまとめると、次のとおりとなる。

- ・創成橋は合口の部分にモルタルが挿入されている点、

橋台およびアーチの付け根部分にコンクリートを使用している点、アーチ石の上面に三和土が布置されていた点などから考えても、従来の和式石橋と明らかに異なる構造様式を持った橋である。

- ・この構造様式には、当時の西洋式アーチ設計法との共通点が多く見られる。
- ・同橋のアーチ部の大半は、圧縮強度が小さく風化しやすい性質を有する札幌軟石によって構成されている。
- ・札幌軟石で構成される橋幅中央付近の一般部は、常時荷重に対して十分な耐力を有していると考えられる。
- ・しかし、目視により現況を調査したところ、輪石の風化が著しく、えぐれや欠落している箇所も多く見られた。
- ・3次元FEM解析によれば、札幌軟石の剛性のみで応力や変形が評価できるのは、橋の中央部だけであり、橋幅端部付近では札幌硬石に応力が多く分担され、軟石の脱落が懸念される。

なお、創成橋の歴史的な位置付けおよびその価値については筆者らがとりまとめを行っているところであり、その報告は機会を改めることとする。

今後は、剛性の異なる札幌軟石と札幌硬石の組み合わせによる応力の照査、脱落部の応力集中、ならびに地震時の耐力評価等を実施し、その力学的特徴をさらに詳細に検討する予定である。

謝辞: 本研究は、札幌市による「創成橋保存技術検討委員会」の委員会活動の一部として行ったものである。データの提供ならびに成果の一部公表にあたってご理解・ご協力を賜った札幌市および関係各位に、この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 札幌市教育委員会: さっぽろ文庫・札幌の橋, 北海道新聞社, 1979.
- 2) 三浦 宏: 札幌のお江戸日本橋「創成橋」, 北の交差点, 財団法人北海道道路管理技術センター, Vol.9, 2001.
- 3) 山口祐造: 拱石橋の設計・施工要領, 1994.
- 4) 葛西 章ほか: 北海道に現存する石橋の現況に関する調査, 土木史研究論文集, Vol.22, 2002.
- 5) 札幌土木派出所:(札幌支庁管内) 假定縣道南海岸線橋梁臺帳, 北海道庁, 1910.
- 6) 松永 工, 飯田耕一郎: 土木実用「アーチ」設計法, 博文館, pp.206-382, 1907.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書(共通編・鋼橋編)・同解説, 丸善株式会社, 2002.
- 8) 札幌市建設局: 創成橋保存技術検討委員会第1回(資料編), 2005.
- 9) 札幌市建設局: 創成橋保存技術検討委員会第2回(資料編), 2005.
- 10) 札幌市建設局: 創成橋保存技術検討委員会第3回(資料編), 2005.