

V-10

寒冷地コンクリート構造物の健全度とFEMによる性能評価に関する検討

北見工業大学工学部	正員	桜井	宏
北見工業大学工学部	正員	岡田	包儀
北見工業大学工学部	フェロー員	鮎田	耕一
北海道大学工学研究科	フェロー員	佐伯	昇
北見工業大学大学院	○学生員	槌本	卓二

1. 1 研究背景

寒冷地のコンクリート構造物は長年供用すると、冬期間の凍結融解や温度変化のため、凍害による剥離やひび割れが発生し、コンクリート構造物に要求される安全性としての耐荷性、機能性及び第三者影響度等の性能や、これらを保つ耐久性（健全度）が低下する可能性がある。昭和初期の構造物の中には美観に優れ、周囲の環境に調和し、保存を望まれるものもある。これらを維持管理し、長期利用を可能にすることは、公共施設を有効に活用するために重要である。

1. 2 研究目的

本研究は構造物の健全度や性能を可能な限り定量的に評価するために、旧国鉄士幌線のアーチ橋梁を対象として、寒冷地コンクリート構造物の健全度と性能評価に関する検討を調査と解析から総合的に試みる。

2. 1 対象構造物

調査対象として、寒冷地内陸環境下に位置する大雪国立公園内にある昭和 11 年に施工された第三音更川橋梁を選定した。構造形式を図 2-1 に示す。尚、当時の設計資料によると、奇岩を有する峡谷の周囲景観を考慮したとの記述がある。

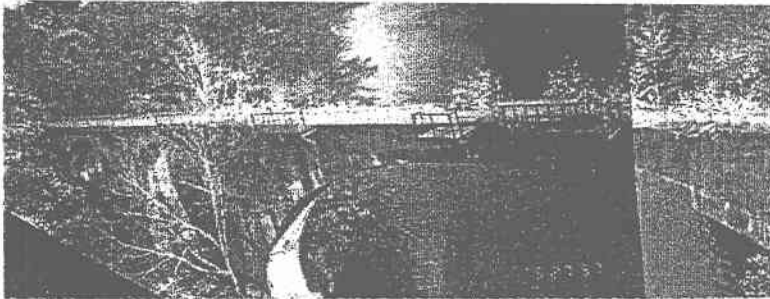


写真 1 全景写真

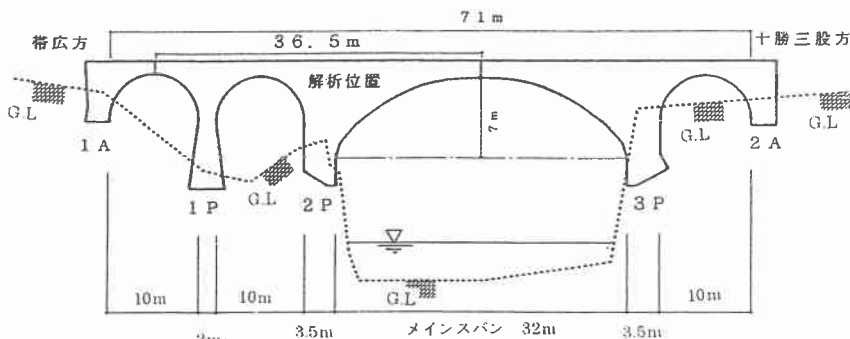


図 2-1 概略寸法図

Evaluation of soundness performance for concrete structure in cold region by some measurment and FEM

H. Sakurai, K. Okada, N. Saeki, K. Ayuta and T. Tsuchimoto

2. 2検討方法

(1)被害状況の観察 現存する設計資料及び現地調査で、設計緒元と経年変化を把握し、目視及び写真撮影による橋梁全体の観察結果から、土木学会コンクリート構造物の維持管理指針(案)等に準拠し判定を行う。

(2)非破壊試験による測定方法 図2-2に示したように橋脚各面の各点に対して超音波伝播速度をパンジットで測定し、シュミットハンマーで反発係数を測定した。両測定結果から Facaoaru 等による方法で、部材内部の強度を推定した。

(3)鉄筋のかぶりの測定 配筋と鉄筋のかぶりの推定には鉄筋探査器を使用した。また、中性深さを1%フェノールフタレイン溶液で測定した。

(4)解析方法 寒冷地のコンクリート構造物は凍結融解作用を受けるため、外的要因である凍結融解回数を部材深さ方向に解析の手法で明らかにする。経年変化が構造物の性能や安全性に与える影響を設計資料とFEM等で可能な限り定量的に評価する為に、現在廃線という状況から、荷重は設計当初の活荷重を考慮せず、死荷重の他に雪荷重を考慮し、橋梁のある糠平の年間積雪量が50cmを超えることから、雪荷重は 300kg/m^2 とし、設計時の弾性係数の他に非破壊試験結果による強度からSAS(統計解析プログラム)により弾性係数を推定し、各ケースで応力解析した。設定したケースを表3-1に示す。更に外気温の初期温度を1991年のアメダスデータの平均気温の 4.13°C として、温度応力連成解析をした。また、冬期間のアメダスデータの外気温を表面温度の境界条件として、非定常境界条件差分プログラムで温度解析し、内部の各深さの年間凍結融解回数を推定した。

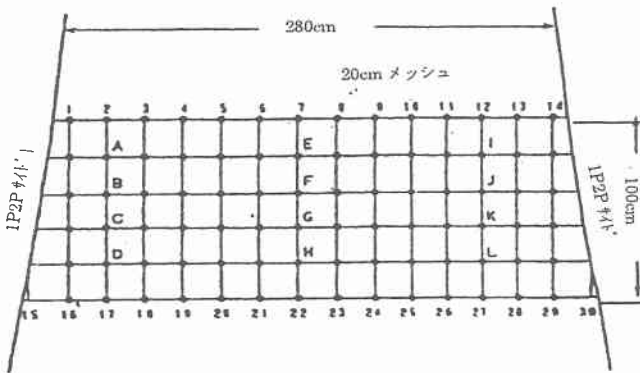


図2-2 非破壊試験測定メッシュ



写真2 測定面(1Pの1A側)

3. 1検討結果

(1)外観の状況 本構造物は積雪寒冷地で60年が経過し、昭和初期の施工のためAE剤が使用されていないこともあり、凍害の影響を著しく受けている。特に日射の影響を受ける側と部材端部の凍害による劣化が著しい。また、軌道面からの排水の処理が十分ではなく、水が表面を伝わった部分も著しく凍害を受けている。更に、アーチ打ち継ぎや側面のひび割れからエフロレッセンスの析出が著しかった。また、3P側橋脚基礎の根固め部分が水位の変動や凍結融解により基礎コンクリートに埋め込まれた石材が脱落し、やや洗掘ぎみである。



写真3 3P側洗掘箇所

(2)非破壊による強度 図 3-1 に橋脚の断面の推定強度を示す。当時の設計基準強度 $180\text{kg}/\text{cm}^2$ を下回っている個所があり、日射の影響を受ける側の低下が特に大きい。これは、外観の目視結果と符合する。図 3-2 は部材の各面の断面方向強度を非線形式で推定したものである。この強度から解析時の弾性係数を表 3-1 の様に推定した。

(3)鉄筋のかぶりと配筋 現存の設計資料によると 32m のメインスパンのアーチ部分は RC である。同資料からは確認できないが、鉄筋探査器によると橋脚の鉄筋の深さが 10～12.5cm で十分にかぶりがあるので、多少の凍害による剥離が生じていても鉄筋腐食の可能性は少ないと考えられる。尚、中性化はひび割れ部分以外では数 mm 以下であり、凍害による鉄筋の露出やひび割れが無ければ、内部の鉄筋は腐食しないと思われる。軸方向の鉄筋の間隔は $\phi 25\text{mm}$ が 24.5cm 間隔、横方向鉄筋は $\phi 19\text{mm}$ が 50cm 間隔で、現行の H8 年版耐震示方書による鉄筋の直径の 12.5 倍よりもやや大きい。

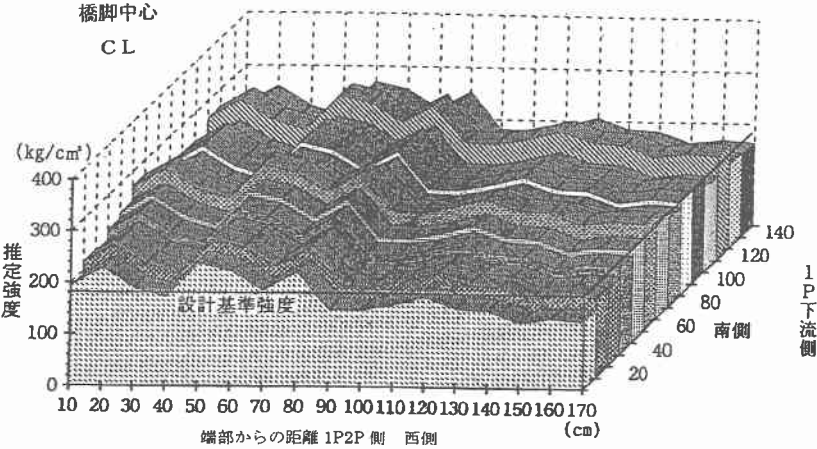


図 3-1 橋脚非破壊測定強度

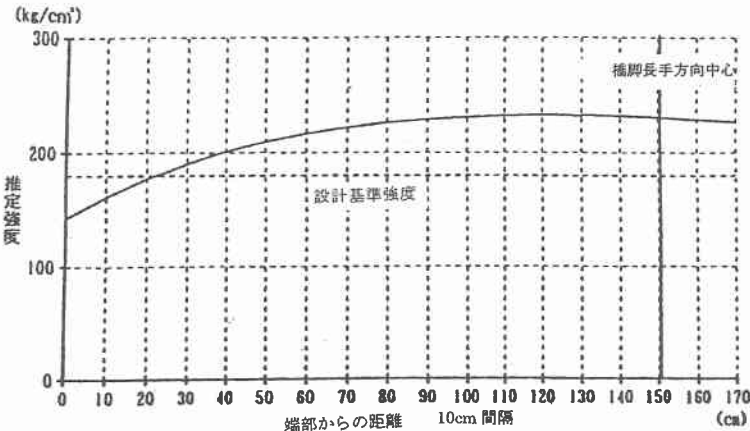


図 3-2 非線形解析による推定強度

(4)解析結果 アーチ部のメインスパンを死荷重と雪荷重を合成して解析した主応力を図 3-3-①、主歪を図 3-3-③に示す。また、解析条件に温度を加えて、温度応力連成解析を行った結果の主応力を図 3-3-②、主歪を図 3-3-④に示す。

表 3-1 材料特性の設定

材料特性	単位	ケース 1	ケース 2	ケース 3
ヤング率	kgf/cm ²	① 2.41×10^5 ② 2.46×10^5 ③ 2.50×10^5	2.34×10^5	2.44×10^5
密度	kg/cm ³	0.0023	0.0023	0.0023
熱伝導率	kcal/cm × s × °C	6.111×10^{-6}	6.111×10^{-6}	6.111×10^{-6}
比熱	kcal/kg × °C	0.25	0.25	0.25

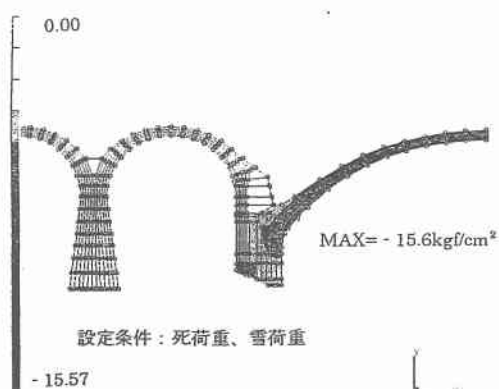


図 3-3-① 解析結果(主応力) ケース 2

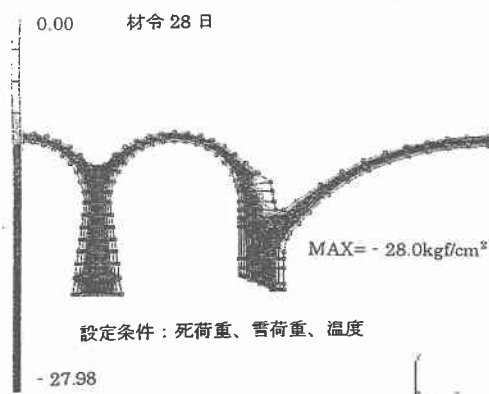


図 3-3-② 温度応力線成解析結果(主応力) ケース 1

色の濃い部分の値が大きい

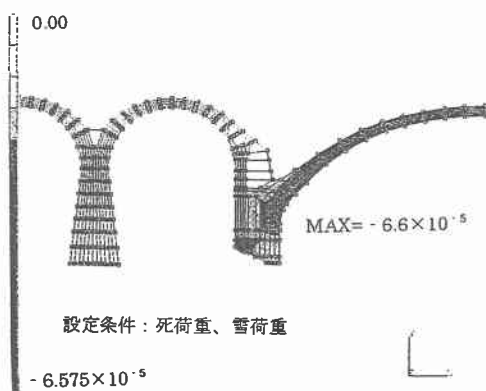


図 3-3-③ 解析結果(主歪み) ケース 2

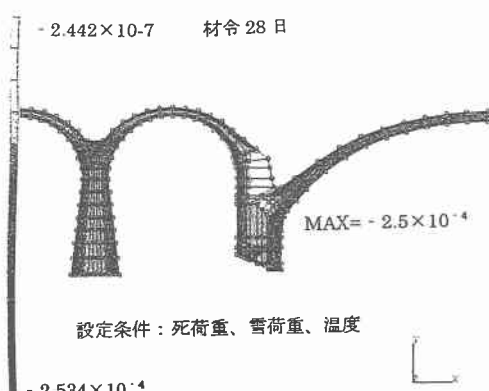


図 3-3-④ 温度応力線成解析結果(主歪み) ケース 1

色の濃い部分の値が大きい

3. 2考察

(1)劣化の要因と程度 本橋梁の耐久性に影響を与えている主な劣化の要因は、氷点下を上下する激しい温度変化と同時に水分の供給を受ける凍結融解作用の繰り返しの外的要因と使用コンクリートが Non AE コンクリートである内的要因である。表層部は凍害による著しい剥離やひび割れ等の劣化を受けている。劣化の状態は剥落等による桁下の通行者への事故の危険性を示す第三者影響度や美観等に影響を与える程度で、劣化の度合いは5段階で表すと3程度で、劣化の加速期であると考えられる。

(2)凍結融解回数と強度の推定 橋脚の様な大きな断面の部材は、外気温より非定常境界条件差分プログラムで温度解析すると表層より 35cm 以上深くなると殆ど凍結したままになり、凍結融解の繰り返しを受けない。この結果は図 3-2 の表面より 35cm 以上深いところでは比較的強度低下が少ないという結果と対応している。一方、アーチ部中心では年数回の凍結融解の繰り返しを受ける。この結果をグラフ化したものを図 3-4 に示す。また、RC の気中凍結融解試験結果を表 3-2-2 に、試験条件を図 3-2-1 に示す。しかし一般的に、室内での実験結果を屋外の構造物に直接適用できない。

その理由としては凍害の発生はある限界量を超えた水分の存在が必要であり、室内実験の場合は融解作用の後すぐにコンクリート内部の水分を凍結させてしまうので、含水率はあまり変化しない。

一方、屋外の構造物は融解したあとにコンクリート内部の水分が乾燥してしまう時期(夏季)があり、含水率が下る。しかし、実際に屋外の構造物が受ける凍結融解作用よりも本室内での凍結融解試験の方が厳しい条件(表 3-2-1)にあると言える。ここで、C/W と圧縮強度の関係式 ($\sigma = -210 + 215 \times C/W$) よりコンクリート内部の圧縮強度を、実測値から推定した表面から 42cm の深さの強度 180 kgf/cm² とすると W/C は約 55% と推測できる。ここで、構造物の飽水度と前述の凍結融解条件の違いを考慮して気中凍結融解試験においての W/C55% の供試体の試験結果を適用する。

よって、本橋梁の現在までの部材内部の凍結融解回数は温度解析より 60 年で 315 回程度なので表 3-2-2 の試験結果と比較すると、部材内部は当分の間はほぼ健全であると考えられる。

表 3-2-1RC の気中凍結融解試験条件

1 サイクル	凍結温度	気中 -17.8±1.7℃
	融解温度	気中 4.4℃±1.7℃
	所要時間	4 時間 (凍結行程 2 時間 45 分、融解行程 1 時間 25 分)
相対湿度	80%以上	
試験サイクル	8000 サイクル	

表 3-2-2 RC の気中凍結融解試験結果

水セメント比	重量変化率	長さ変化率	超音波伝播速度変化率
45%	減少傾向が見られない	6 0 0 0 回まで膨張傾向は見られない	4 5 0 0 回まで増加
55%	減少傾向が見られない	6 0 0 0 回まで膨張傾向は見られない	4 5 0 0 回まで増加
65%	2 8 0 0 回から減少	初期より膨張傾向あり	初期段階より減少

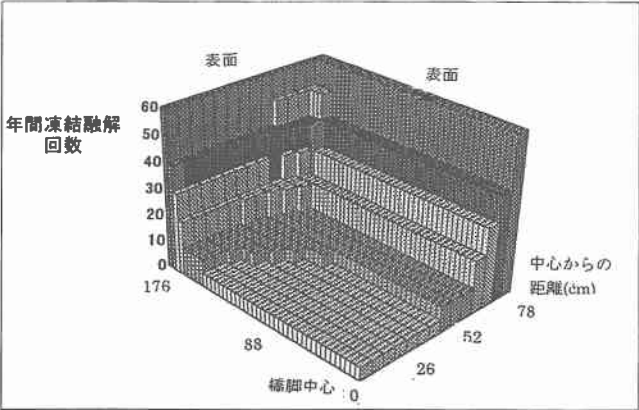


図 3-4 温度解析による凍結融解回数推定結果

(3)耐荷性と性能の推定 現在の強度と応力の関係は、現在既に鉄道が廃止されていることから、死荷重と雪荷重のみが働く条件を仮定した解析結果によると、アーチ部材に働く応力は全て圧縮応力で、応力の大きさは最大でも橋脚より推定したコンクリート表層の圧縮強度に比べ、1/5 以下で、十分に小さい。今後も橋脚内部の強度低下は著しい水の浸透が無ければ少ないと考えられ、死荷重と雪荷重のみの自立に必要な耐荷性は保たれると考えられる。従って、大きな地震や河川が橋脚基礎を洗掘しなければ当分の間は自立し得ると思われる。しかし、文化的遺産として安全に保存、活用される機能性を確保するには、剥落防止や手すりなどを設ける必要がある。また、アーチ部材等の主要構造部材は足場を使用した詳細な非破壊調査や、必要によっては微破壊調査が必要である。

4.まとめ

旧国鉄士幌線第三音更川橋梁を対象として寒冷地環境下のコンクリート構造物の健全度と性能評価に関する検討と行った結果を以下に示す。

- ①寒冷地の内陸で 60 年経過したコンクリートアーチ橋では表層部、特に部材端部や日射の影響を受ける側の凍害が著しい。
- ②橋脚のような大きな断面の部材は 35cm より深い内部は非定常境界条件差分解析より凍結融解の繰り返しをほとんど受けなく、今後も中心部の強度低下は小さいと思われる。
- ③アーチ部材の中心部では年数回の凍結融解を受け、現在までに 300 回程度の凍結融解を受けている為、今後詳細な調査が必要である。
- ④解析による現在の応力と強度の関係は、アーチ部材に働く応力は全て圧縮で、最大のものでもコンクリートの圧縮強度の 1/5 以下で十分に小さい。
- ⑤寒冷地コンクリート構造物の健全度と性能の評価には、非破壊試験と FEM 及び非定常境界条件の差分温度解析で総合的に検討することが有効である。

謝辞 本研究は北海道土木技術会コンクリート委員会、ショールボンド建設温泉部長、城岡部長等、北海道開発コンサルタント花田部長、進藤重役、葛西氏等、JR 北海道南谷氏、山内氏等、上士幌町役場、東大雪鉄道アーチ橋を保存する会、東大雪博物館、国鉄清算事業団、道教育大今助教授、北海道産業考古学会等のご協力を得た。ここに感謝します。

参考資料

- (1)鐵道省北海道建設事務所：音更混凝土拱橋工事概要、昭和 12 年 7 月
- (2)横道 英雄：コンクリート橋、昭和 47 年 11 月
- (3)土木学会コンクリート委員会標準示方書改訂小委員会維持管理部会：コンクリート構造物の維持管理指針（案）、土木学会、コンクリートライブラリー、1995 年 10 月
- (4)土木学会標準示方書（昭和 42 年改版）：土木学会コンクリート委員会、昭和 42 年 5 月
- (5)コンクリート便覧：社団法人日本コンクリート工学協会、昭和 51 年 2 月
- (6)Hiroshi Sakurai, Kaneyosi Okada, Koichi Ayuta, Noboru Saeki and Takahiro Minamiya : Study on Durability evaluation of concrete structure constructed over 60 years ago in cold region, MEMOIRS OF KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY VOL 30 NO.1 September 1998
- (7)Hiroshi Sakurai et al. : Study on prediction of Freeze-Thaw Cycles in concrete structural members in cold regions, MEMOIRS OF KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY VOL 24 NO.1 September 1992
- (8)Hiroshi Sakurai, Kaneyosi Okada, Koichi Ayuta, Noboru Saeki and Jun Yamauchi : Research and evaluation on durability of concrete structures in a cold region after long service, MEMOIRS OF KITAMI INSTITUTE OF TECHNOLOGY VOL 30 NO.2 March 1999