

論文 山間部に位置する早期劣化した道路橋床版の現状と剛性評価

牧 祐之*1・深田 宰史*2・鳥居 和之*3・小野 凌平*4

要旨：鉄筋コンクリート床版の早期劣化が確認された北陸地方の山間部に位置する橋梁に対して、コア採取による劣化要因の分析、および、試験車を用いた載荷試験を行い、化学的および力学的特性を明らかにした。偏光顕微鏡観察や圧縮試験の結果から、ゲルの充填や圧縮強度の低下など特徴的な状況が確認されたことから、当該床版での主要な劣化原因は ASR であると推察した。また、コア採取によって得られた試験結果をもとにして、走行試験と数値解析結果と比較することにより、早期劣化した道路橋床版の載荷荷重と変位の関係、および、対象橋梁における床版剛性を明らかにした。

キーワード：床版, 変位, アルカリシリカ反応, 荷重

1. はじめに

地方の橋梁では老朽化が進む一方で、人口減少による税収の減少、少子高齢化による社会保障費拡充に伴う橋梁の維持管理費の縮減の財政状況のなかで、5年に1回の近接目視点検の義務化により、橋長2m以上の橋梁を対象とした点検を順次行っているが、予算制約の中で補修、補強まで計画的に実施できていないのが現状である。また、点検が終了してもその橋梁の残存耐力をどのように評価すればよいのか検討できていないなかで、対症療法的に補修を繰り返している状況にある。

そのような全国的な背景のもと、北陸地方では経年劣化と違い、凍結防止剤による塩害、ASR および山間部の凍害など、早期劣化を生じている橋梁¹⁾があり、これらの橋梁の剛性評価や耐荷力評価が喫緊の課題となっている。塩害、ASR、凍害による損傷を受けた鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)を対象とした研究事例として、三田村ら²⁾は、積雪寒冷地である北海道地方で凍害を受けたRC床版の破壊プロセスに着目し、凍結融解が疲労寿命に与える影響を報告している。また、石川ら³⁾は、北陸地方の高速道路で、疲労と凍結防止剤による塩害が

要因で取替えに至ったRC床版の損傷状況を報告している。さらに、前島ら⁴⁾は、実物大に近い供試体を用いた実験により、ASRの促進方法とRC床版の疲労耐久性との関係について報告している。このように早期劣化したRC床版の疲労耐久性に着目した研究事例が多い。山間部の国道では疲労の影響は小さいと考えられるが、重車両の通行による影響を受けている可能性が大きい。早期劣化、特にASR劣化を生じたコンクリートはヤング係数が大きく低下することが明らかとなっているが、ASR劣化したコンクリート床版に大きなダメージを及ぼす常時での重車両通過時における変形特性や剛性評価に着目した研究は少ない。

そこで本研究では、ASRによる劣化の疑いのある山間部の橋梁群の中から、図-1に示すある鋼道路橋のRC床版を選定し、コア採取による各種の分析から劣化要因を特定した。また、コアの分析結果は代表点での評価であるため、版としての剛性を評価するために、大型試験車を用いた載荷試験を行い、その試験結果をもとにして、数値解析による結果と比較することにより、ASRが生じたRC床版の剛性を明らかにした。

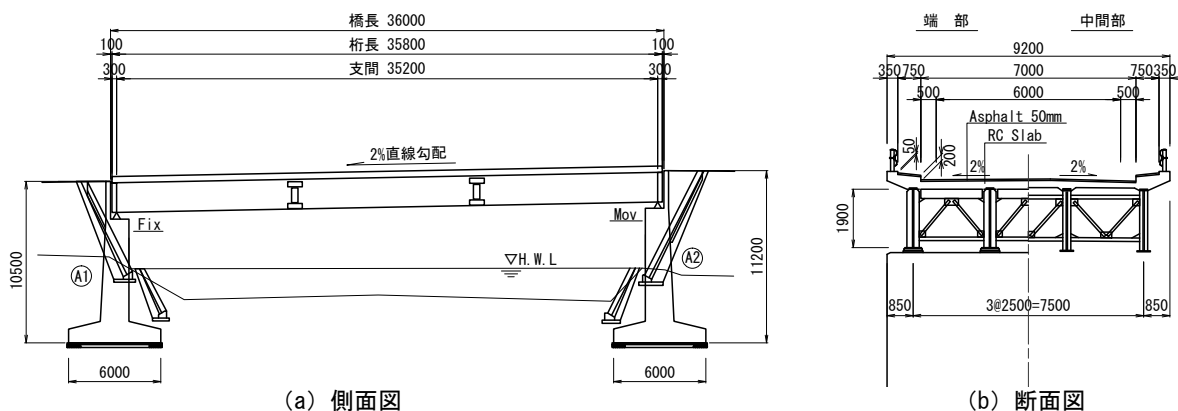


図-1 対象橋梁概要図

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 博士後期課程 (学生会員)
 *2 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系教授 博士(工学) (正会員)
 *3 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系教授 工博 (フェロー)
 *4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学類 学士課程

2. 対象橋梁

山間部に位置し、RC 床版の早期劣化が見られる橋梁群の中から、载荷試験の制約条件（変位計測方法や規制条件など）を満足する対象橋梁を選定した（写真-1）。

対象橋梁は、山間部（標高 559m）の国道に位置する橋長 36.0m、4 主桁を有する鋼単純合成桁橋（1973 年竣工、供用後約 45 年経過）である。概要図を図-1 に示す。斜角 60 度、縦断勾配が 2%あり、A1 側が低くなっている。主桁間隔は 2.5m、標準断面の床版厚は 180mm である。また、対象橋梁上を走行する交通量（小型車+大型車）および大型車混入率（H27 センサス）はそれぞれ 1,177 台/日および 20%となっており、交通量は非常に少なく、疲労が劣化原因になることは考えにくい状況であった。



(a) 上面



(b) 下面

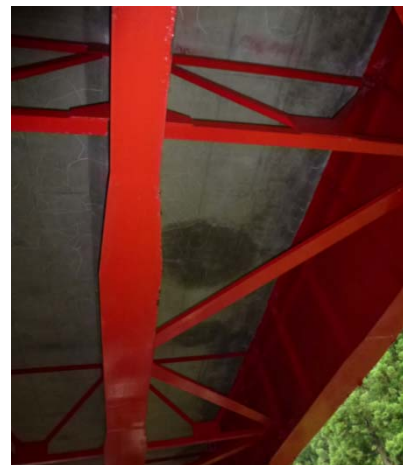
写真-1 対象橋梁



(a) ジョイント近傍の舗装面



(b) ジョイント近傍のRC床版裏面



(c) 支間中央部付近のRC床版裏面



(d) 地覆部

写真-2 劣化状況

3. 外観調査

外観調査の影響として、ジョイント近傍において何度か補修されたと思われる舗装路面のパッチングの状況が見られ（写真-2(a)）、この写真以外に橋面上では何か所かパッチングが確認された。また、そのジョイント近傍の RC 床版裏面（写真-2(b)）では漏水が見られ、白色の析出物（エフロレッセンスと ASR ゲルが混在したもの）が多数確認された（H26 点検要領の損傷程度評価区分：床版ひびわれ c、漏水・遊離石灰 d 相当）。また、支間中央部付近の RC 床版（写真-2(c)）では、水掛かり部と 0.1~0.2mm の 2 方向ひび割れが散見される状態であった（損傷程度評価区分：床版ひびわれ c 相当）。さらに、橋面上の地覆部（写真-2(d)）では、橋軸方向の水平ひび割れが多数存在している状況であった。

4. コア採取による調査

4.1 調査概要

対象橋梁の床版コンクリートから貫通コア（φ55mm）を採取し、中性化深さ、圧縮・静弾性係数、含有塩分分析を行った。

劣化状況が異なるコア試験結果を用いて床版剛性を評価するため、コアの採取位置は、床版裏面からの漏水の有無により、2箇所を選定した（図-4 参照）。裏面に水掛かりがあり、ひび割れと遊離石灰の析出が認められる箇所を「漏水部」、水掛かりがない箇所を「乾燥部」とした。なお、乾燥部の床版厚は180mm、漏水部にあたる床版端部は190mmとなっている。舗装厚はいずれも50mmである。

漏水箇所から採取したコンクリートの偏光顕微鏡（単ニコル）観察により、安山岩粒子からひび割れが進展し、ひび割れには ASR ゲルが充填していることが確認された（写真-3 四角枠）ことから、当該 RC 床版での主要な劣化原因は ASR であると推察した。

4.2 圧縮・静弾性係数

乾燥部と漏水部の2箇所で作成したコアを用いて圧縮試験を行うことにより、圧縮強度および静弾性係数を算出した。その結果を表-1 にまとめた。なお、乾燥部はφ55mmの貫通コアを採取できたが、漏水部は床版内部に水平ひび割れが発生していた。

これより、圧縮強度については乾燥部に比べて漏水部では3割程度低下していた。対象橋梁は合成桁橋であり、竣工時の橋梁台帳より床版設計に用いている設計基準強度は35.0N/mm²であることから、乾燥部、漏水部ともに圧縮強度の低下が橋梁全体の耐荷力に影響を及ぼしていると推察される。

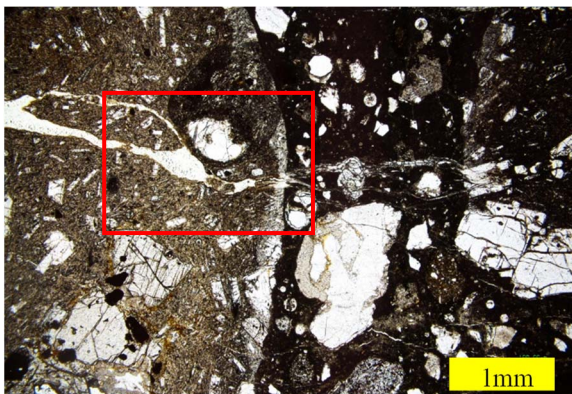


写真-3 偏光顕微鏡（単ニコル）観察により確認された安山岩粒子と ASR ゲル（観察薄片 25mm×25mm, 厚さ 20μm）

表-1 圧縮強度および静弾性係数

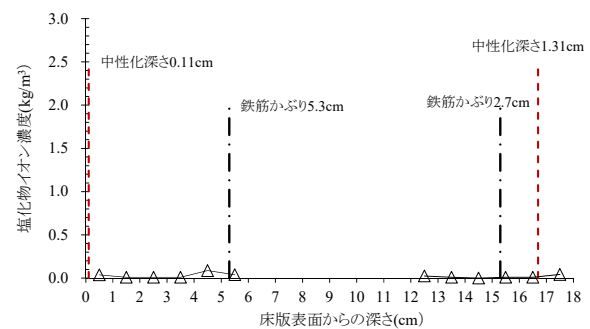
	乾燥部	漏水部
静弾性係数 (kN/mm ²)	21.5	10.0
圧縮強度 (N/mm ²)	32.3	21.2

また、乾燥部と漏水部で弾性係数を比較すると漏水部では乾燥部の半分程度に低下する結果であった。ASR による劣化では弾性係数の大幅な低下が指摘⁵⁾されており、対象橋梁の RC 床版でも確認された。

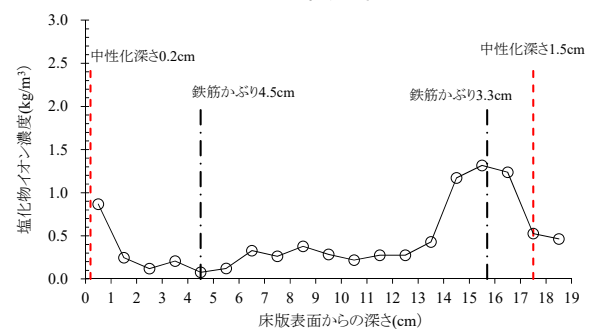
4.3 含有塩分分析

乾燥部と漏水部の含有塩分分析として、採取したコアを10mmピッチでスライスしたあと、全塩化物イオン量を電位差滴定法により求め、塩化物イオン濃度分布を図-2 にまとめた。これより、乾燥部では塩化物イオン濃度がほとんどゼロに近いが、漏水部では、下側鉄筋のかぶり位置で1.32kg/m³となっており、下面側の濃度が高い結果となった。また、コンクリート標準示方書による鋼材腐食発生限界値（-3.0(W/C)+3.4）と比較しても発生限界を上回ることにはないと考えられる（推定水セメント比 W/C: 55~60%）。なお、コア抜き作業時に漏水部コアに接していた鉄筋の状態を確認したところ、鉄筋の腐食は観察されなかった。

また、同図には中性化深さについても記載した。下面側では乾燥部で1.3cm、漏水部で1.5cmであり、40年以上経過した床版としては中性化が進んでいなかった。その理由としては、北陸地方の山間部では降雨や降雪の日が多く、湿度が高い状態が続き、湿潤な環境が中性化の進行を遅らせているものと考えられる。また、1970年代に架設された橋梁では防水層がないため、その湿潤な環境が ASR を継続的に進行させる原因になっており、結果的に RC 床版の劣化を促進させたと推察される。



(a) 乾燥部



(b) 漏水部

図-2 含有塩分分析の結果

5. 試験車走行試験

5.1 試験概要

コア採取による結果は、代表点での評価であるため、対象橋梁のRC床版の版としての剛性を評価することを目的として、既知荷重の試験車を用いた走行試験を行い、RC床版の静的な変位を確認することにした。

試験車両は、**図-3**に示す総重量約245kNのリーフサスペンションを有する3軸トラックを用いた。試験車の各寸法を同図に付記した(試験に用いた車両はユニック車であるが、寸法図は平ボディ車として記載した)。また、工場に設置してある車両重量計の上に積載有無の状態で車両の各軸を1軸ずつ順番に載荷させることにより、各軸における重量を求め、**表-2**にまとめた。

試験車走行試験における測点配置を**図-4**に示す。図中に二重丸で示したものが床版変位と主桁変位を計測した箇所であり、**写真-4**に示すように計測した。床版変位は主桁間(位置:上フランジ直下)に両端ピンの不動梁を設置し、その梁を不動点とした床版との相対変位を

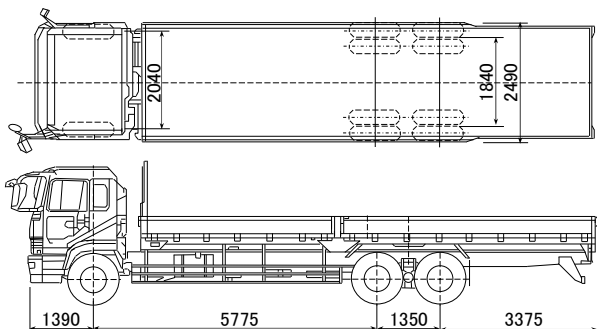


図-3 試験車両の寸法(単位: mm)

表-2 軸重計測の結果(単位: kN)

	無積載時	積載時
前輪	64.14	70.41
後輪 前軸	39.79	84.67
後輪 後軸	37.30	84.33
総重量	141.2	239.4

計測した(**写真-4(a)**)。また、その不動梁から地面にスチール製の伸縮棒を下げ、それを使用して地面との変位を計測した(**写真-4(b)**)。なお、床版変位および主桁変位は、それぞれCDP-10およびCDP-25(東京測器製)にて計測した。床版変位と主桁変位を計測した箇所の劣化状況は、いずれも水掛かりしている状況であった。

試験車走行試験では、試験車が20km/h、40km/h、60km/hでそれぞれの方向を走行したときの各測点における変位やひずみを計測した。なお、走行試験は片側車線を規制しながら行ったため、輪荷重が必ずしも床版支間中央に載荷できる状況ではなかった。



(a) 床版変位



(b) 主桁変位(床版変位計測で固定している不動梁からスチール製の伸縮棒を垂らして主桁変位を計測)

写真-4 床版変位と主桁変位の計測方法

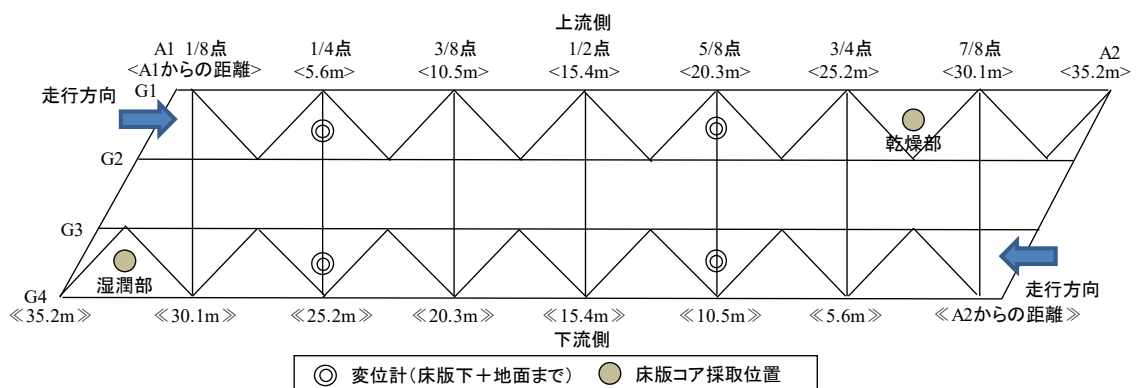


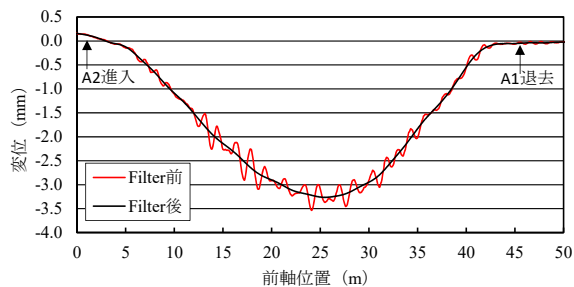
図-4 測点配置図

5.2 走行試験による変位応答

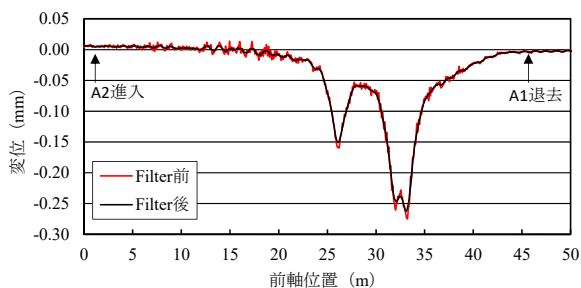
試験車が約 20km/h で下流側車線 (A2 から A1 方向) を走行したときの 1/4 点における主桁変位と床版変位を図-5 に示す。なお、20km/h でも動的な成分が見られるため、主桁変位については、車両のばね上 3Hz 付近の振動を除去するために 2.0Hz のローパスフィルタを施し、ばね下振動 10-20Hz が卓越する床版変位については、移動平均 (3.5Hz 相当のローパスフィルタ) によるフィルタ処理を施した。

これより、主桁変位は一つの大きな山型の波形となり、その最大値はフィルタ処理により 3mm 程度であった。一方、床版変位については、前輪と後輪 2 軸 (後輪前軸と後輪後軸) 分の大きな二つの山型の波形が確認できる。後輪側の最大変位は 0.25mm であった。

床版変位は、観測点の概ね前後 2 パネル分の範囲で変位が生じており、後輪 2 軸分が観測点上を通過したときに床版変位 (フィルタ処理後) の最大が生じており、床版変位に大きな影響を与えているのは、後輪 2 軸分の荷重であることがわかる。



(a) 主桁変位 (試験車 20km/h 走行)



(b) 床版変位 (試験車 20km/h 走行)

図-5 走行試験による変位応答(下流側 1/4 点)

6. 数値解析によるパラメトリック解析

6.1 解析モデル

対象橋梁の床版剛性を解析的に同定するため、汎用線形および非線形構造解析システム DIANA 10.1 を用いた数値解析を行った。図-6 に解析モデルを示す。解析モデルでは、実際の走行車線に応じた荷重載荷状態を実験と解析により比較するため、床版変位を計測した断面を含む対傾構間をモデル化した。また、荷重載荷位置は、試験車の車両走行位置からモデル化した。なお、主桁および補剛材を 4 節点シェル要素、対傾構および横構を梁

要素、床版、舗装および地覆は 8 節点ソリッド要素、鉄筋は埋め込み鉄筋要素としてモデル化し、橋軸方向の境界条件として、対称条件を適用した。本解析では弾性計算のみとし、コンクリートの弾性係数は後述する 4 つのケースで解析を行った。

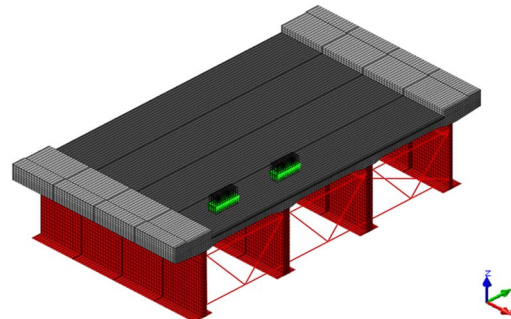


図-6 解析モデル

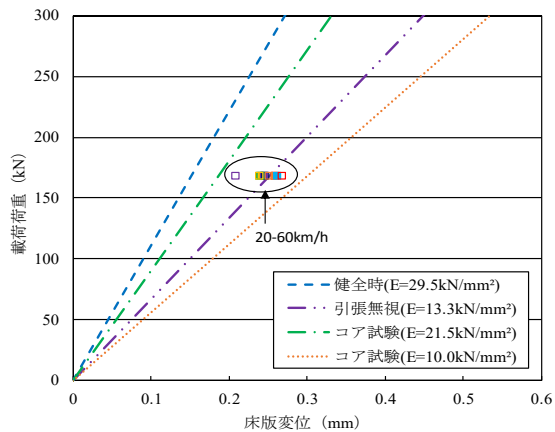
6.2 試験車走行による結果と解析結果の比較

対象橋梁の RC 床版の版としての剛性を評価するため、既知荷重の試験車を用いた走行試験によって得られた床版変位と数値解析による結果を比較することにした。図-7(a) および図-7(b) に示したものは、それぞれ下流側車線の 1/4 点と上流側車線の 5/8 点における試験と解析の載荷荷重と床版変位との関係である。1/4 点付近は水掛りがあるものの乾燥部の状態に近く、5/8 点付近は遊離石灰が生じている箇所もあり、漏水部に近い状態であった。ここで、載荷荷重とは図-5(b) に示したように、床版変位に影響を及ぼしている 2 つの変位のピーク値のうち、3 軸の大型車両の場合、後輪 2 軸分の 4 車輪合計の荷重 (169kN) を示している。

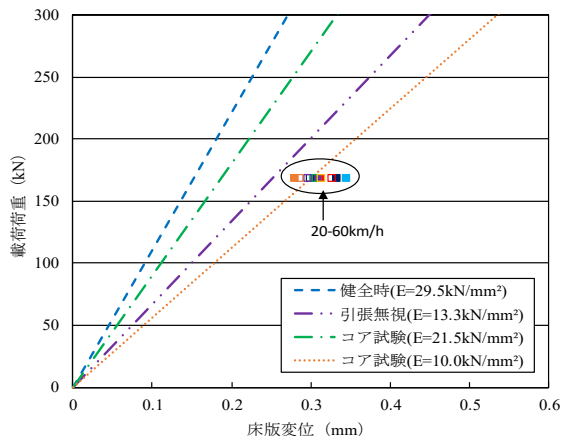
また、解析ではコンクリートの弾性係数として、竣工図書から得られる設計基準強度 35N/mm² の弾性係数を健全時とした 29.5kN/mm²、弾性係数比 n=15 の場合とした 13.3kN/mm²、コア採取による試験結果として 21.5kN/mm² (乾燥部)、10.0kN/mm² (漏水部) を用いた解析を行い、その結果を付記した。試験走行による結果については、各走行速度で走行した場合の床版変位波形には動的な成分が含まれ、その影響で評価にばらつきが生じたため、移動平均によるフィルタ (3.5Hz 相当のローパスフィルタ) を施して準静的な成分の最大値で評価した。

これより、どちらの測点においても計測結果に若干のばらつきがみられるものの、フィルタ処理を施すことで試験車両の走行速度の影響は少ないことがわかる。また、数値解析による結果と比較すると、乾燥部の状態に近い下流側車線の 1/4 点では、試験車走行による結果は、採取したコアから得られた弾性係数の範囲に概ね分布していたが、漏水部の状態に近い上流側車線の 5/8 点では、床版変位が大きく、漏水部採取コアから得られた弾性係

数(10.0kN/mm²)に近い結果が得られた。このことから、コア分析結果は、代表点での評価となるが、走行試験と数値解析との比較より、RC床版の版としての剛性は、採取コアの試験結果に相当していることがわかった。床版変位の計測技術には非接触で高精度な機器が開発されており、それらの技術を用いることにより、床版変位による剛性評価が維持管理において有効な評価指標となり得ると考える。



(a) 下流側車線の1/4点



(b) 上流側車線の5/8点

図-7 試験と解析における載荷荷重と床版変位の関係

7. まとめ

本研究では、北陸地方で早期劣化が確認された山間部の橋梁群の中から、ある鋼道路橋のRC床版を選定し、その橋梁において、コア採取による劣化要因の分析、試験車を用いた載荷試験を行った。また、数値解析と試験結果と比較することにより、現状でのRC床版の剛性を明らかにした。

本研究より明らかになった知見は以下の通りである。

- (1) RC床版から採取したコンクリートの偏光顕微鏡観察により、安山岩粒子からひび割れが進展し、ひび割れにはASRゲルが充填していることが確認されたことから、当該RC床版での主要な劣化原因はASRであると推察した。また、塩化物イオン濃度の分布を調べ

た結果、漏水部では鋼材の腐食発生限界を超えておらず、鉄筋の腐食も確認されなかった。

- (2) RC床版から採取したコアの力学的な特性を調べた結果、圧縮強度については乾燥部に比べて漏水部では3割程度低下し、弾性係数については漏水部では乾燥部の半分程度になっていた。
- (3) 試験車走行試験による荷重と床版変位計測の結果、対象とした床版に影響を及ぼす載荷荷重と変位の関係について明らかにし、解析値と比較をすることで対象床版の剛性を評価できた。
- (4) 試験車走行による結果は、採取コアから得られた弾性係数の範囲に概ね分布しており、高精度な計測技術と組み合わせることにより、床版変位による剛性評価が維持管理において有効な評価指標となり得ると考える。

謝辞

本研究は、試験車走行試験など力学試験においては、科学研究費助成事業(課題番号16K06463)の助成を受けて研究を行いました。また、化学的な分析においては、内閣府・科学技術振興機構による戦略的イノベーション創造プログラム、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術における「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発」(研究責任者:鳥居和之教授)の支援を受けて行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鳥居和之, 大代武志, 山戸博晃, 平野貴宣: 石川県の反応性骨材とASR劣化構造物のデータベース化, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1017-1022, 2008.7.
- 2) 三田村裕, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1420-1431, 2009.3.
- 3) 石川裕一, 足立嘉文, 青山實伸, 長井正嗣: 疲労と凍結防止剤による塩害を受けた鋼橋RC床版の特徴と健全度評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1263-1272, 2011.3.
- 4) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集E2, Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016.
- 5) 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1691-1696, 2006.7.