16

論文

3次元衝撃応答解析による改修前九年橋の剛性評価に関する一考察 A study on the rigidity evaluation of Kunen bridge before repair by 3D-impact response analysis

○菊池	敏文*	大西	弘志**	岩崎	正二***	陳	錚****
Toshifi	umi KIKUCHI	Hiros	shi ONISHI	Shoj	i IWASAKI	Z	heng CHEN

ABSTRACT

Recently, appropriate maintenance is needed to extend the life span of existing bridges in Japan. A way of checking the state of progress about degradation and deterioration is the impulsive vibration test by falling weight on the bridge's slab. In this study, it's stated to do the impulsive vibration test on Kunen bridge, in Kitakami city and simulate this test using the 3D-impact response analysis. We found some analysis models which represent natural frequency and normal mode similar to the result of impulsive vibration test. In this paper, we tried to decide the degree of decrease of rigidities of the RC slab and girders of Kunen bridge through these analysis results.

Keywords: 衝擊応答解析, 3 次元 FEM, 剛性評価 Impact response analysis, 3-D FEM, stiffness evaluation

1. まえがき

近年我が国において、既設橋梁の長寿命化を目 指した適切な維持管理を行うことが求められてい 法や3次元 FEM 解析を用いた衝撃応答解析によ る. そのため, 既設橋梁の健全度調査が必要であ り、劣化、老朽化の進行状況を確認する手法の一 つとして橋梁床版や下部工へ重錘を衝突させて行 う衝撃振動試験がある.特に,鉄道分野において は,下部工の健全度を非破壊で簡易的に評価でき る調査手法として, 軽量な重錘による衝撃振動試 解析結果と衝撃振動試験結果を比較検討すること 験が広く行われている^{1),2),3),4),5)}. また, 上部工全体 系や RC 床版の健全度調査方法として,中量重錘 あるいは小型・大型 FWD 試験機を用いた衝撃振 から明らかにすることである.

動試験の適用も進められている^{6),7),8),9)}. 有限帯板 る RC 床版や主桁の剛性評価の研究も行われてい る.10),11),12),13) 本研究では大規模改修前の北上市九 年橋に重錘衝撃振動試験を行うとともに、3次元 FEM による衝撃応答解析によってこの衝撃振動 試験の再現を試みた.本研究の目的は、それらの で、九年橋の RC 床版や桁部がどの程度剛性低下 しているか、固有振動数や固有振動モードの変化

*岩手大学大学院工学研究科(〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5) **博士(工学)岩手大学理工学部准教授 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5) 第2種正会員 ***博士(工学)(株)昭和土木設計(〒020-0891 紫波郡矢巾町流通センター南 4-1-23) 第2種正会員 ****修士(工学)(株)長大 海外事業部(〒111-0041 東京都台東区元浅草2丁目6番6号)

2. 対象橋梁と点検結果

2.1 対象橋梁の概要

対象橋梁は写真-1 に示す,岩手県北上市の和賀川 に架かる九年橋である.この橋梁は大規模改修前, 橋長 334.000m の 17 連単純鋼鈑桁橋であった.(現在 改修後には連続鋼鈑桁橋となっている.)北側 8 径間 は支間長 21.500m の単純4 主鈑桁橋,南側9 径間は 支間長 16.800m の単純2 主鈑桁橋である.本研究で は南側単純2 種鈑桁橋第8 径間を研究対象としてい る.図-1 にこの橋梁の上部工断面図,側面図,平面 図を示す.



写真-1九年橋全景

2.2 点検結果の概要

FEM 解析に用いる RC 床版の材料定数には九年橋 2 主鈑桁橋の切取コア圧縮強度試験結果(平成 23 年 度九年橋調査設計業務・詳細調査)の平均圧縮強度 を用いた.表-1に RC 床版切取コア圧縮強度試験結 果を示す.また, RC 床版のヤング係数には切取コア 圧縮強度試験で得られた平均圧縮強度から,コンク リート標準示方書(2012 年制定)より式(1)からヤング 係数 Ec (N/mm²)を求めた.

$$Ec = \left(2.2 + \frac{f'c - 18}{20}\right) \times 10^4 \cdot \cdot \cdot (1)$$

ここで Ec: ヤング係数 (N/mm²) f'c: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

なお2主鈑桁橋の床版の切取コア試験は,対象径間 である第8径間が切取箇所ではなかったため,

表-1 RC 床版切取コア圧縮強度試験結果

設計	24.0		
試験結果	平均值 f'c	27.6	
松田は	圧縮強度 fc	27.6	
採用個	ヤング係数 Ec	2.68×10 ⁴	

⁽N/mm)



(1) 断面図





	RC 床版	鋼材
圧縮強度	f'ck=27.6	-
ヤング係数	Ec=2.68×10 ⁴	Es=2.00×10 ⁵
ポアソン比	0.167	0.300
単位体積重量	γc=24.5	γs=77.0

表-2 使用材料定数

RC 床版の平均圧縮強度には第1径間と第9径間の 平均値を用いた.表-2に2主鈑桁橋の床版と鋼材の 材料定数を示す.

また主桁の腐食状況について現地調査により各部 の形状寸法や損傷状況を確認するとともに必要とな る調査を実施した.調査結果から,伸縮装置や床版 端部からの漏水によって桁端部及び支承周りが腐食 していた.既設支承は板支承であるためこの腐食に より支承の水平移動機能が著しく低下していた.床 版内部を浸透した漏水による腐食については,経年 による床版劣化により,雨水等の水分が床版に浸透 して床版下面へ漏水し,主桁が腐食していた.また 本橋の張出床版部と並行して設置されている歩道橋 との隙間からの漏水により主桁ウェブが腐食してい た.2主鈑桁の中でも腐食損傷が著しいのは,主桁ウ ェブであった.浮錆除去による詳細調査を行い,腐 食状況を確認した.写真-2にこれらの詳細調査によ る腐食の状況を示す.

3. 重錘衝撃振動試験

3.1 重錘衝撃試験の概要

本研究では,対象橋梁に対し重錘衝撃振動試験を 行った.これは構造物に衝撃荷重を与えて,その応 答から構造物の周波数応答値を算出し,この関数の 振幅の卓越周波数と位相角から構造物の固有振動数 を把握する試験である.図-2に計測位置および加振 位置を示す.ただし図中の数字は各着目点を示す. これらは橋梁全体の曲げ1,2次振動モードとねじれ 1次振動モードが計測可能な,支間の1/4点,1/2点, 3/4点における主桁(G1,G2)および中央縦桁(ST2) 鋼構造年次論文報告集 第25卷(2017年11月)



(1) 床版下面側



(2) 主桁上フランジ



(3) 主桁下フランジ



(4) ウェブ下面の貫通孔



上の舗装面に位置している.

写真-3 に重錘衝撃振動試験の様子を示す.上部工 RC 床版に対し 400N の円筒形重錘を 50cm の高さか ら落下させ,落下時の上部工床版上の各計測点にお ける応答加速度を橋軸鉛直方向について計測した. 重錘の形状は直径 φ230mm,厚さ L=200mm であり, 重錘を落下させる際には舗装との接触面は高周波数 領域の影響を除去するため,厚さ 12mm のゴムパッ ドを舗装面上に設置した.

測定は、サンプリング周波数 1000Hz で計測し、衝撃による加速度波形が完全に減衰しきるまでの約 10 秒間計測を行った.加速度データは 4096 個サン プリングしている.

3.2 重錘衝撃振動試験の結果と考察

RC 床版への重錘衝撃振動試験から得られた応答 加速度データから FFT により振幅スペクトルと位相 差スペクトルを算出した. なお位相差スペクトルは 重錘による正弦波外力に対する構造物の応答の時間 差であり,加速度波形で計測した場合には270°(-90°) となる.橋梁曲げ1次,ねじれ1次モードを求める ため,支間 1/2 点主桁 G1 上の床版を打撃した時の着 目点4での振幅スペクトルと位相差スペクトルの結 果を図-3に示す.また,橋梁曲げ2次モードを求め るため支間 1/4 点縦桁 ST2 上の床版を打撃した時の 着目点2での振幅スペクトルと位相差スペクトルの 結果を図-4に示す.ただし振幅スペクトルが複数存 在するため、振幅が卓越し、位相差スペクトルが 270°(-90°)を示す振動数を基本とするとともに、各 計測点における振幅スペクトルや位相差スペクトル から固有振動モードを把握することで,構造物上部 工の固有振動数を特定した.

着目点 2,4 における衝撃振動試験により得られた 振幅スペクトル(図-3(1),図-4(1))と実測モーダル 解析の結果から 8.3,11.9,22.2Hz はそれぞれ曲げ 1 次,ねじれ 1 次,曲げ 2 次振動数に対応しているこ とがわかった.これらは橋梁全体系の固有振動数で



写真-3 重錘落下衝撃試験の様子



ある.得られた各モード図を図-5に示す.

図-3 (1)にはこの他にも 30Hz 以上の高次周波数帯 に異なる卓越周波数が確認された.これらの卓越周 波数が,理論上どのようなモードであるかを検討す るために,対象橋梁の3次元 FEM モデルを作成し, 衝撃応答解析を用いて衝撃振動試験の再現を試みた.

4.3 次元 FEM 衝擊応答解析

4.13次元 FEM 衝撃応答解析の概要

本論文では上部工の動的挙動特性を明らかにする ため、図-6に示す橋脚を考慮しない単径間の3次元 FEM モデルを作成した.このモデルは主桁、横桁に Shell 要素,対傾構に Beam 要素,床版に Solid 要素 を使用し,総節点数は78301,総要素数は 66923 で ある.

本研究では劣化を考慮しない健全モデルと、詳細 点検結果に基づく腐食による主桁の断面減少を考慮 した劣化モデル(現状モデル)を作成し比較検討し た. これらのモデルについて支承の拘束状況を判断 するためピン-ピン支承(水平移動完全拘束),ピン-ローラー支承(水平移動拘束なし),橋軸方向に並進 するバネ支承(水平移動一部拘束)をそれぞれモデ ル化し比較検討した. RC 床版内部は目視点検で劣化 の度合いが特定できないため, 各モデルの床版全体 のヤング係数を一律に変化させてモーダル解析、衝 撃応答解析を行った.ここで RC 床版の初期時, 剛 性低下時のそれぞれのヤング係数を E0, E1 とし, このヤング係数比を E1/E0 とする. また RC 床版と 鋼桁の初期状態での材料定数には表-2に示す値を用 いた. 衝撃応答解析の衝撃力には集中荷重の sin 関 数を採用し、この関数の最大値を 50kN、継続時間を 0.03 秒とした. RC 床版への衝撃振動試験同様に得ら れたサンプリング周波数 1000Hz での応答加速度デ ータを 4096 個サンプリングして FFT により振幅ス ペクトルと位相差スペクトルを算出した.





4.2 解析結果と考察

4.2.1 ピン-ピン支承, ピン-ローラー支承の場合

ピン-ピン支承, ピン-ローラー支承によりモーダ ル解析および衝撃応答解析を行った. 衝撃応答解析 の加速度波形を用いた振幅スペクトルは, 支承条 件に関らず健全モデルにおいて実測値と比較して 全体的に異なる値を示した.

それに対し劣化モデルでは曲げ1次,2次モード やねじれ1次モードといった低次周波数に関しては 実測値と異なる値を示したが30Hzから40Hzの間 に見られる卓越周波数は実測値と近い値を示した. モーダル解析の結果より,実測値の35.9Hz,39.8Hz に対応するモードは桁の局部ねじれ2次,3次モード と考えられる.また図-7に示す着目点4におけるピ ン-ピン支承での衝撃応答解析の振幅スペクトルの 結果からも30Hzから40Hzの間に卓越周波数が存在 していることがわかる.健全モデルではこのような 桁の局部モードは明白に表れなかった.桁の劣化が このような卓越周波数を誘発したのではないかと考 えられる.

4.2.2 バネ支承の場合

劣化モデルにおけるピン-ピン支承やピン-ローラ ー支承で解析を行った結果,高次の固有振動数は実 測値に近い値を示したが,低次の固有振動数は実測 値と大きく異なる値を示した.これは支承部の腐食 等による水平移動拘束の度合いが影響しているので はないかと考えられる.

そこで本研究では、橋軸方向に対する並進バネを モデルの支承部分に導入した.橋梁全体のモードで ある曲げ1次モードの振動数が実測値に近い値を示 す時のバネ定数を最適バネ定数 K とし, E1/E0 を変 化させるごとにそれぞれ K を求めた.各 E1/E0 での K の値を表-3 に示す.バネ支承を加えた劣化モデル についてもピン-ピン支承同様に 30Hz から 40Hz の 間に複数の固有振動モードが現れた.表-4 にバネ支 承を導入した劣化モデルにおけるモーダル解析を用







表-3 劣化モデルにおける最適バネ定数

最適バネ定数	K (N/mm)
E1/E0=1.0	104.25
E1/E0=0.9	104.30
E1/E0=0.8	104.35
E1/E0=0.7	104.40



いて求めた固有振動数を示す.この表-4 より E1/E0=1.0 の時に固有振動数は実測値に近い値を示 していることが分かる.図-8 にモーダル解析から求 めた桁の局部ねじれ2次モード図を示す.このよう に劣化モデルを用いたモーダル解析によって 30Hz 以上の高次周波数帯に桁の局部ねじれモードが複数 存在することが明らかになった.

この劣化モデルを用いて E1/E0=1.0 の時の衝撃応 答解析を行った.この結果の一例として,支間 1/2・ 主桁 G1 上に対する打撃時の,着目点4 での振幅ス ペクトル図および位相差スペクトル図を図-9 に示 す.実測値における橋梁全体系のモードに対応す る,8.4Hz,22.5Hz に卓越周波数が現れていること が分かる.また高次周波数帯についても 30.6Hz に 卓越周波数が現れ、実測値の 39.8Hz に対応する卓 越周波数は得られなかった.今回は紙面の都合上 省略するが,着目点2 におけるスペクトル図から も 12.5Hz や 31.3Hz に卓越周波数が存在すること が確かめられた.以上より桁の劣化が高次周波数 帯における卓越周波数を誘発し,桁の局部的なね じれ 2 次,3 次モードを示したのではないかと考 えられる.





固有振動数(Hz)	E1/E0-1.0	E1/E0-0.9	E1/E0-0.8	E1/E0-07	実測値
固有振動モード	E1/E0-1.0	E1/E0-0.9	E1/E0-0.8	E1/E0=0.7	
曲げ1次	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
ねじれ1次	12.8	12.6	12.4	12.2	11.9
曲げ 2 次	22.2	21.9	21.7	21.4	22.2
	30.9	30.5	30.1	29.6	- 35.8
だたいなった	31.8	31.5	31.2	30.5	
1111日に112次	34.8	34.5	34.3	34.0	
	35.6	35.3	35.0	34.6	
	38.0	37.7	37.4	37.1	
桁ねじれ 3 次	41.4	41.1	40.6	39.8	39.8
	41.5	41.3	40.9	40.5	

表・4 バネ支承を導入した劣化モデルにおけるモーダル解析の結果

5. まとめ

3 次元 FEM 衝撃応答解析により既設橋梁の重 錘衝撃振動試験を再現し, RC 床版の剛性低下に よる固有振動数の変化を示すことができた.この 解析結果より,本橋は鋼桁部の劣化によって 30Hz 以上の高次周波数帯に卓越周波数が存在してい る可能性があることが示された.以上の結果から 衝撃応答解析を用いる本手法は既設橋梁の床版 や主桁の剛性評価に有効ではないかと考えられ る.

高次周波数帯における卓越周波数は,桁の劣化 だけでなく床版の局部的な劣化にも影響してい る可能性が考えられるため、今後は床版の局部的 な劣化がどのような影響をもたらすかを確認し, 実測値との整合性を高めたいと考えている.また 今回の衝撃応答解析では構造物の減衰項を考慮 していない.減衰が衝撃応答解析に与える影響に ついても今後検討していきたいと考えている.

参考文献

- 西村明彦,羽矢洋:衝撃振動試験による橋脚の 健全度判定法,土木学会誌,pp.26-28,1993.8
 中川元宏,庄健介,上野勝大,佐藤亮:衝撃振 動試験による構造物の健全度評価に関する一
- 考察, コンクリート工学年次論文集, No.1 (Vol.22), pp.595-600, 2000.
- 3) 庄健介, 平塚元康, 北村泰寿: 重錘打撃試験と ニュートラルネットワークによる橋脚の健全 性一次診断法, 土木学会論文集, No.735, VI-59, pp.105-117, 2003.6
- 4)庄健介、山崎裕史、北村泰寿:重錘打撃試験による立体ラーメン高架橋の損傷探知、土木学会論文集、No.756/VI-62、pp.33-47、2004.3
- 5)関雅樹, 西村昭彦, 佐野弘幸, 中野聡: RC ラー メン高架橋の地震時損傷レベルの評価に関す る研究, 土木学会論文集, No.731, I-63, pp.51-

64, 2003.4

- 6)宮村正樹,岩崎正二,出戸秀明,加藤哲,早坂
 洋平:衝撃振動試験および動たわみ測定による
 実橋 RC 床版の健全度評価,構造工学論文集,
 Vol.58A, pp.1134-1143, 2012.3
- 7) 葛西智文, 岩崎正二, 大西弘志, 出戸秀明, 山 村浩一:静的及び動的載荷試験を用いた九年橋 の剛性評価に関する一考察, 鋼構造年次論文報 告集, Vol.23, pp.174-179, 2015.11
- 8)大西弘志,清水則善,岩崎正二,出戸秀明,宮 村正樹:小型 FWD 試験機による鋼鈑桁橋(九年 橋)衝撃振動試験,鋼構造年次論文報告集,第21
 巻,pp.246-251,2013.11
- 9)山口恭平, 早坂洋平, 曽田信雄, 大西弘志: FWD を用いた既設 RC 床版の健全度評価手法に関 する一提 案, 構造工学論文集 Vol.61A, 2015.3
- 10)宮村正樹, 岩崎正二, 出戸秀明, 大西弘志, 宍 戸洋貴:劣化した道路橋 RC 床版の衝撃応答解 析に関する一考察, 鋼構造年次論文報告集, 第 20巻, pp.377-382, 2012.11
- 11)宮村正樹,岩崎正二,大西弘志,出戸秀明,宍
 戸 洋貴:衝撃応答たわみを用いた道路橋 RC
 床版の健全度評価,鋼構造年次論文報告集,第
 21 巻, pp. 232-237, 2013.11
- 12)陳錚, 岩崎正二, 出戸秀明, 大西弘志: 衝撃応 答解析を用いた既設鋼鈑桁橋の動的挙動特性 の解析的検討, 平成 27 年度土木学会東北支部 技術研究発表会, I-2, 2016.3
- 13) 菊池敏文,大西弘志,岩崎正二,出戸秀明, 陳錚:3次元衝撃応答解析を用いた補修前九年 橋の動的挙動特性の検討,平成28年度土木学 会東北支部技術研究発表会,I-7,2017.3