(55) 3次元FEM衝撃応答解析による合成鋼鈑 桁橋の振動特性に関する検討

菊池 敏文1・大西 弘志2・岩崎 正二3

¹土木学会学生会員 岩手大学大学院 工学研究科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5) E-mail:t2516005@iwate-u.ac.jp

²土木学会正会員 岩手大学准教授 理工学部 (〒020-8551岩手県盛岡市上田4-3-5) E-mail:onishi@iwate-u.ac.jp

³土木学会正会員 (株) 昭和土木設計 (〒020-0891 岩手県紫波郡矢巾町流通センター南 4-1-23) E-mail:iwasaki@iwate-u.ac.jp

近年,我が国の市町村部では大規模橋梁の維持管理が問題となっている.現在,大規模橋梁は目 視点検により健全度を評価しているが,より適切な評価を可能とする簡易的な手法が求められてい る.橋梁性能や健全度の評価の指標の一つに振動による特性があり,その調査手法の一つに重錘落 下衝撃振動試験がある.本論文は岩手県北上市に設置されている合成鋼鈑桁橋を研究対象としてい る.この橋梁の床版上面に重錘衝撃振動試験を行うとともに3次元FEM衝撃応答解析によりこの重 錘衝撃振動試験の再現を試みる.本研究では,この実験結果と解析結果から固有振動数と固有振動 モードを特定することで,対象橋梁がどのような振動特性を有しているのかを検討する.

Key Words : impact response analysis, 3-D FEM, structural health 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 る.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に重錘を衝突させて行う衝撃 振動試験は,既設橋梁の健全度調査の手法の一つ として用いられている.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 験が広く行われている^{1),2),3),4),5)}.また,上部工や RC床版の健全度調査方法として,重錘あるいは 小型・大型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験の 適用も進められている^{0,7),8),9)}. 三層板有限帯板法 や3次元 FEM 解析を用いた衝撃応答解析による 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)}.本研究では対象橋梁に重錘衝撃振動 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、重錘衝撃振動試験結果と3 次元 FEM 衝撃応答解析結果とを比較検討するこ とで、改修前九年橋の 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 ドの変化から明らかにすることである.

2. 対象橋梁と橋梁点検

(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,桁高 1.45mの単純2 主鈑桁橋 である.本研究では南側単純2 主鈑桁橋の第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.

(2) 橋梁点検結果の概要

主桁の腐食状況について浮錆除去により詳細調査 を行い,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.写真-2にこれらの 詳細調査による腐食の状況を示す.調査結果から, 腐食について要因別に分類すると3通りの腐食形態 が存在した.1つ目は写真-2(1)に示すような支点部 の腐食である.腐食により支承部の固着が確認され, 水平方向の滑動ができない状況であることが確認で きた.この腐食の原因は床版端部や伸縮装置付近か らの漏水である.これらの漏水が橋座部に滞水し腐 食を促進している.2つ目は張出床版からの漏水に よる腐食である.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.歩道橋が設置されている主桁 G2側面の損傷が著しく,写真-2(2)に示すような貫



写真-1九年橋全景







(3) 平面図

図-1 対象橋梁図



(1) 支承部の腐食状況





(3) 主桁 G2 下フランジの腐食状況

写真-2 詳細点検による腐食の状況

通孔が確認された.3 つ目は床版内部を浸透した漏 水による腐食である.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.写真-2(3)に主桁 G2 下フランジ の腐食の様子を示す.

また、3 次元 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 Ec (N/mm²)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)の式(1)を用いて求めた.

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

ここで、Ec: ヤング係数 (N/mm²)fc: 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,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.

3. 重錘衝撃振動試験

(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.写真-3 に重錘衝撃振動試験の実施状況を示 す.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.また図-2 に計測位置,重錘落下 位置を示す.ただし図中の数字は各着目点を示す. これらの着目点は橋梁全体の曲げ 1,2 次振動モー

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	
坂田 は	圧縮強度 fc	27.6	
休用他	ヤング係数 Ec	2.68×10 ⁴	

 (N/mm^2)

表-2 使用材料定数

	RC 床版	鋼材
圧縮強度 (N/mm ²)	f'ck=27.6	-
ヤング係数 (N/mm ²)	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 (N/m ³)	γc=24.5	γs=77.0



写真-3 重錘落下衝撃試験の様子



図-2対象橋梁床版上の着目点

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)上の舗装面に位置している.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 @230mm, 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 波形が十分に減衰しきるまでの約 10 秒間計測を行 った.加速度データは重錘落下による外力の影響を 除いた時間から 8192 個サンプリングしている. 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.

(2) 重錘衝撃振動試験結果と考察

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,図2に 示す着目点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.

実測振動モード図の描画に際しては、同時測定を 実施した各測点における振幅スペクトルと位相差ス ペクトルを用いて、重錘落下位置における位相角 270°付近を示す振動数から振幅 anを読み取り、さら に位相差スペクトル図から位相角 bnを読み取り、式 (2)で算定した各測点の比率に基づいて求めた、得



(2) 位相差スペクトル

図-4 支間 1/4·縦桁 ST2 上打撃時

55-4

られた各モード図を図-5に示す.

 $a_1 \sin(b_1) : a_2 \sin(b_2) : \cdots : a_n \sin(b_n)$ (2)

着目点 2,4 における衝撃振動試験により得られ たスペクトル図(図-3,図-4)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.これらは橋梁上部工全体系の固有振動数で ある.また図-3,図-4 やその他の着目点におけるス ペクトル図より,30から40Hz付近の高次周波数帯 に複数の卓越周波数が確認された.これらの卓越周 波数が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,モーダル 解析や衝撃応答解析を用いて衝撃振動試験の再現を 試みた.



(1)曲げ1次振動モード図(8.3Hz)



(2)曲げ2次振動モード図(22.2Hz)

4.3 次元 FEM 衝撃応答解析

(1)3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) と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





図-5 実測振動モード図



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 0.001 秒刻みの応答加速度 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.

(2) 解析結果と考察

a)モーダル解析結果と考察

モーダル解析を用いてピン-ピン支承を用いた健 全モデル,劣化モデルついて解析を行った.表-3に モーダル解析における各条件での結果の一例を示す. 健全モデルについて E1/E0を1.0から0.7まで変化さ せたが実測値と比較して全体的に異なる値を示した. 劣化モデルでは,曲げ1次,2次モードやねじれ1次 モードに関しては実測値と異なる値を示したが,高 次周波数帯では E1/E0=0.8 の時に実測値に近い卓越 周波数を示した.このモーダル解析の結果より高次 周波数帯での卓越周波数は桁の局部ねじれ2次,3次 モードであることが分かった.図-7に桁の局部モー ド図を示す.健全モデルではこのような桁の局部モ



図-7 桁の局部ねじれ2次モード図

表-4 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

支承条件		ピン-ピン支承		バネ支承			
モデル形態		健全	劣化	健全	劣化		中间体
E1/E0		E1/E0	E1/E0	E1/E0	E1/E0	E1/E0	夫測旭
固有振動数(Hz)		=1.0) =0.8 =1.0	=1.0	=0.8		
固有振動モード	曲げ1次	11.2	10.0	8.3	8.3	8.3	8.3
	ねじれ1次	14.7	13.6	13.9	12.8	12.4	11.9
	曲げ 2 次	28.3	26.0	23.9	22.2	21.7	22.2
	桁局部 ねじれ 2 次	-	29.3	- - -	30.9	30.1	30.1
			30.5		31.8	31.2	32.2
			31.4		34.8	34.3	32.9
			34.5		35.6	35.0	35.8
	桁局部 ねじれ 3 次	-	37.8		38.0	37.4	38.9
			40.0		41.4	40.6	39.6
			40.7		41.5	40.9	39.8

表-3 3次元 FEM によるモーダル解析の固有振動数(Hz)結果の一例

ードは明白に表れなかったため、桁の劣化がこのような高次周波数帯に卓越周波数を誘発したのではないかと考えられる.しかし、橋梁全体系に関するモードは実測値に近い値を示していない.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-4に示す.バネ支承を導入することで、E1/E0=1.0の時に、卓越周波数は全体として実測値に近い値を示した.

b) 衝撃応答解析結果と考察

モーダル解析の結果からバネ支承による解析によ って,橋梁全体系のモードは実測値に近い値を示す ことが明らかとなったため、衝撃応答解析において はバネ支承を用いたモデルで衝撃応答解析を行っ た. 健全モデルでは橋梁全体系卓越周波数は実測値 に近い値を示す結果となったが, 高次周波数帯での 卓越周波数は確認することができなかった. 同様に 劣化モデルを用いて衝撃応答解析を行った. 結果の 一例として着目点 4 に対する打撃時の,E1/E0=1.0 に おける着目点 4,着目点 2 でのスペクトル図を図-8、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、8.3Hz、11.9Hz に近い値を示してい ることがわかる.また、健全モデルでは確認するこ とができなかった高次周波数帯においても,劣化モ デルでは30.6Hz, 31.3Hzに卓越周波数を確認するこ とができた.他の着目点においても同様に高次周波 数帯に卓越周波数を確認することができたが,図は 紙面の都合上省略する.以上の結果より,桁の劣化 がこのような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.



(2) 位相差スペクトル





図-9 着目点2におけるスペクトル図

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,実 測値が示す 30Hz 以上の高次周波数帯での卓越周波数は, 鋼桁部の劣化に起因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.しかし今回の課題として,本研究で行わ れた衝撃応答解析では構造物の減衰項を考慮していな いということがあげられる.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,実測値との整合性を 高めたいと考えている.

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
- 2)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

第12回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム

- 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 Vol61A, 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,
 1-2,2016.3
- 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

A STUDY ON THE VIBRATION CARACTERISTICS OF THE COMPOSITE STEEL PLATE GIRDER BRIDGE BY 3D-FEM IMPACT RESPONSE ANALYSIS

Toshifumi KIKUCHI, Hiroshi ONISHI and Shoji IWASAKI

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.