# 強制加振実験による十勝河口橋の固有振動特性評価

An Evaluation of Vibration Characteristics of Tokachikako Bridge by Means of Forced Vibration Test

(Hiroaki Nishi)	弘明	西	)正員	北海道開発土木研究所(
(Norimitsu Kishi)	徳光	岸	フェロー	室蘭工業大学
(Ryuta Kobayashi)	竜太	小林	正員	株式会社ドーコン

# 1. はじめに

構造的に特殊性を有する橋梁や規模の大きな長大橋梁 に対して現行耐震設計基準を満足する恒久的な耐震補強 を想定した場合,大規模な補強工事とそれに伴う莫大な 工事コストの投資が避けられず,社会資本投資の観点か らも現実的に困難または不可能と判断される場合が多い。 従って,このような長大橋梁に対しては,各橋梁の個々 の特性(地域区分特性,橋梁の重要度,緊急時迂回路の 有無等)に応じた耐震性能評価や補強方法,補強レベル および維持管理手法の検討が必要不可欠となる。

この中で,既設長大橋梁の耐震性能を評価する場合に は、対象橋梁の実際の固有振動特性(固有振動数,固有 振動モード等)を把握しておくことが重要である。これ は一般的には机上における動的応答解析等の数値解析法 を用いた評価が行われるが、実挙動との乖離が存在する 中での評価はそれが危険側となる可能性も否定できない からである。また、構造物の固有振動特性は部材の損傷 や材料の経年劣化の影響により変化することから、予め 当該構造物の固有振動特性に関する初期値が得られてい れば地震等の突発的な異常時における供用の可否や構造 物の安全性評価の判断基準にも成り得るためである。

このような観点から、本研究では北海道内における 代表的な長大河川橋梁の1つである十勝河口橋に着目し、 本橋の固有振動特性を把握することを目的として、トラ ッククレーンを用いた重錘上下法による強制加振実験を 実施した。また、三次元有限要素法を用いた固有振動解 析も試み、実験結果との整合性を確認することによって 数値解析手法の妥当性を検証している。

## 2. 十勝河口橋の概要

図-1に十勝河口橋の全体一般図を示す。十勝河口 橋は、十勝川の河口上流約 4km に位置する国道 336 号 線の豊頃町長臼~浦幌町豊北を結ぶ橋長 928.0m の長大 橋であり、平成4年12月に竣工している。上部構造は 主橋梁区間が3径間連続有ヒンジ PC ラーメン箱桁、側

北海道開発土木研究所	正員	佐藤	京	(Takashi Sato)
室蘭工業大学	正員	小室	雅人	(Masato Komuro)
株式会社ドーコン	正員	工藤	浩史	(Hiroshi Kudo)

橋梁区間は3径間連続PC箱桁が3連で構成されている。 下部構造は箱式橋台および小判型壁式橋脚である。基礎 構造はP-4~P-6橋脚で鋼管矢板基礎,それ以外では鋼 管杭基礎であり,いずれも砂岩およびシルト岩から構成 される岩盤層を支持地盤としている。ここで,耐震設計 上の地盤種別は過去に実施された地質調査結果による地 盤の特性値から判断すると概ねⅢ種地盤に相当する。

本橋は昭和 55 年道路橋示方書に準拠して詳細設計が 行われており,耐震設計には修正震度法が適用されてい る。なお,本橋は平成 15 年(2003 年)十勝沖地震(気 象庁マグニチュード 8.0)で被災しており,支承部の損 傷に伴う橋軸直角方向への主桁水平移動等の変状が生じ た。現在は損傷した支承部は全て交換されており,橋軸 直角方向への変位制限構造の設置や沓座部の補強対策が 施されている。写真-1に十勝河口橋の現況写真を示す。

#### 3. 振動実験の概要

振動実験は、主橋梁区間および P-6~P-9 橋脚の側橋 梁区間を対象として実施することとした。強制加振実験 はトラッククレーンを用いた重錘上下法(5,000kg 重 錘)により行い、橋梁の振動と共振状態にある段階で重 錘の上下動を急停止させて減衰自由振動を励起させた。 また、本実験では常時微動観測も同時に実施しており、



写真-1 十勝河口橋の現況写真



図-1 十勝河口橋の全体一般図



風によって励起された振動を強制加振実験と同じ位置に 配置した加速度計を用いて計測を行っている。ここで, 本振動実験では車両の走行性に影響を与える桁の鉛直方 向に対する曲げあるいは捻り振動に着目している。

# 3.1 加振位置および計測位置

図-2に加振位置および加速度計の設置位置を示す。 加振位置は主橋梁,側橋梁ともに中央径間の上流側また は下流側とし,中央径間スパン長をLとした場合のL/2 点およびL/4点とした。ここで,L/2点加振は対称振動 モードを,L/4点加振は逆対称振動モードの励起を想定 している。なお,曲げ振動を励起させる曲げ加振ではト ラッククレーンのブームを橋軸方向に,捻り振動を励起 させる捻り加振では橋軸直角方向に張り出すことにより 効率よく強制振動が励起されるように設定している。

計測する振動成分は全て加速度成分とし、桁上にデジ タルサーボ型の加速度計を設置した。主橋梁区間の計測 は上下流合わせて 34ch (24ch+10ch) とし、側橋梁区 間は 26ch (13ch+13ch) を上下流側で均等に配置した。 なお、データは 5msec のサンプリングタイムでメモリ ーレコーダ/アナライザーを用いて一括収録している。

#### 3.2 固有振動数の抽出および振動モードの決定法

実測加速度波形を用いた低次固有振動数の抽出および 各固有振動モードの決定は,以下に示す過程に基づいて 実施した。すなわち,

- 1) 重錘を断続的に上下させて上部工に振動を励起させ、 減衰自由振動状態に至る全加速度波形を収録する。
- 2) 収録された全測点の加速度波形に対して、振動励起後の20秒間の減衰自由振動波形について高速フーリエ変換(FFT)を施してフーリエスペクトルを求める。
- 主要な測点に関するフーリエスペクトルから低次固 有振動数であると考えられる卓越振動数を抽出する。
- 4)固有振動モードを求めるために、各測点において 3)で求めたフーリエスペクトルを用いて各卓越振 動数域に関する帯域(バンドパス)フィルター処理 を施し、さらにフーリエ逆変換を行って各卓越振動 数域に限定した加速度波形を求める。

5)4)で求められた各卓越振動数域の加速度波形に関して、振幅の大きい測点の波形を基準にして1/2振幅毎の時間における各測点の振幅から振動モードを求め、モード分布の節および腹の位置が各振動で変動せず、振動モードが連成していないことを確認して固有振動モードを決定する。

### 4. 三次元有限要素法を用いた固有振動解析

振動実験の対象とした主橋梁区間と P-6~P-9 橋脚の 側橋梁区間に対して,三次元有限要素法(以下,FEM 解析)を用いた固有振動解析を実施し,実験結果と比較 することにより本数値解析手法の妥当性を検証した。

#### 4.1 有限要素モデル

図-3に有限要素モデルを示す。適用した有限要素タ イプは6節点あるいは8節点の三次元固体要素とし、コ ンクリート内部の鋼材(PC 鋼材,鉄筋)のモデル化は 行っていない。総節点数および総要素数は、主橋梁では 41,165, 27,526, 側橋梁では31,074, 20,752 である。

#### 4.2 解析条件

数値解析には汎用構造解析コード ABAQUS を用いて, サブスペース法に基づいた固有振動解析を実施した。境 界条件は,杭基礎フーチング下面または鋼管矢板基礎頂 版下面を完全固定とし,支承およびゲレンク(主橋梁部 の中央ヒンジ)は橋軸直角方向軸回りの回転を許容させ ている。ここで,可動支承に関しては,設計上は橋軸方 向に対して移動可能であるが,微小変形領域では上部工 重量による摩擦力の影響により固定に近い状態にあるも のと考えられる。従って,本数値解析では橋軸方向の並 進方向変位成分を拘束させることとした。表-1には本 数値解析で用いた材料物性値を一覧にして示している。

表-1 数値解析に用いた材料物性値

<b>**</b> *1	弹性係数	ポアソン比	密 度
19 19	E(GPa)	$\nu$	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )
鉄筋コンクリート	30.0	0.2	24.5
鋼材	206.0	0.3	77.0



図-3 有限要素モデル(左図:主橋梁モデル,右図:側橋梁モデル)



図-4 加速度波形から得られたフーリエスペクトルの一例(強制加振実験, L/2 点曲げ加振時)

	1 Z 土1	同未应间の回行	水刧致に因りる	天殿和木と舟柳	帕木の比較	【辛凶、112】
		強制加	冶咕沙乱			
振動モード	曲げ加振		捻り加振		市 时 做 勤 組 測	FEM 解析
	加振点 L <sub>1</sub> /2	加振点 L <sub>1</sub> /4	加振点 L <sub>1</sub> /2	加振点 L <sub>1</sub> /4	[月九1]只]	
曲げ対称1次	0.928	0.952	_	_	0.927	1.072

主播沙区間の固有振動数に関する実験結果と解析結果の比較

曲げ逆対称1次	—	1.630	—	—	1.660	1.570
曲げ対称2次	1.904	—	—	—	1.977	1.912
曲げ逆対称2次	—	2.580	—	—	2.514	2.498
曲げ対称3次	—	—	—	—	3.410	3.553
捻り対称1次	—	—	4.541	—	—	—

表-3 側橋梁区間の固有振動数に関する実験結果と解析結果の比較 【単位:Hz】							
		強制加	強制加振実験				
振動モード	曲げ加振		捻り加振		相測	FEM 解析	
	加振点 L <sub>2</sub> /2	加振点 L <sub>2</sub> /4	加振点 L <sub>2</sub> /2	加振点 L <sub>2</sub> /4	電光识り		
曲げ対称1次	2.197	2.197	—	—	2.026	2.164	
曲げ対称2次	3.560	3.850	—	—	3.637	3.581	

# 5. 実験結果および解析結果

強制加振実験は,加振装置を上下流側車線のいずれに 配置した場合についても実施しているが,本検討は下流 側に配置した場合の計測結果を用いて行うものとする。

0

図-4には、実験結果の一例として、強制加振実験に おける L/2 点曲げ加振時の測点 A および測点 B で計測 された加速度波形から求めたフーリエスペクトルを振動 数 10Hz までに限定して示している。ここで、本検討で は低次の固有振動数に着目していることから、5Hz 以下 の卓越振動数を抽出してその振動数を求めることとした。 **表-2**, **3**には、それぞれ主橋梁区間および側橋梁区間に関する固有振動数を実験結果と解析結果で比較して示している。

【畄位、ロッ】

表-2より,主橋梁に着目すると,強制加振実験では 曲げ振動は対称1次および2次,逆対称1次および2次 の低次固有振動数が特定でき,常時微動観測ではこれら に加えて曲げ対称3次の固有振動数が特定されている。 一方,捻り振動に関しては,強制加振 L<sub>1</sub>/2 点加振時に おいて対称1次の振動数が特定できたのみであり,これ は橋長に比較して幅員が小さいこと等に起因するものと



推察される。強制加振実験と常時微動観測結果を比較す ると、両者の差は0.1Hz以内であり良く一致しているこ とが分かる。また、FEM 解析と実験結果を比較すると、 曲げ対称1次では解析結果が若干大きく、曲げ逆対称1 次では若干小さく評価されているが、その他の振動モー ドでは両者の差は4%以内であり、FEM 解析は実験結果 と比較的良く一致しているものと考えられる。

表-3より,側橋梁に着目すると,実験では曲げ対称 1次および2次の振動数は特定できたが,捻り振動およ びその他の振動モードに関しては特定されていない。 FEM 解析と実験結果の固有振動数は良い一致を示して おり,L<sub>2</sub>/4点加振を除けば両者の差は2%以内である。

図-5,6には、正規化された各固有振動モードに関 するモード分布を実験結果とFEM解析で比較して示し ている。なお、紙面上の都合により、主橋梁に関しては 曲げ対称1次および逆対称1次モードを、側径間に関し ては曲げ対称1次および2次モードの分布図を示してい る。これより、主橋梁区間の曲げ逆対称1次モードにお ける P-3~P-4橋脚間で一部差異が見られるものの、そ の他のモードでは実験結果と良く一致していることが分 かる。従って、三次元有限要素法を用いた固有振動特性 の評価方法は工学的に妥当であるものと判断される。

# 6. まとめ

本研究は,長大河川橋梁である十勝河口橋の固有振動 特性を把握することを目的として,トラッククレーンを 用いた重錘上下法による強制加振実験,常時微動観測お よび三次元有限要素法を用いた固有振動解析を実施した。 これより,強制加振実験および常時微動観測からは低次 の固有振動数および振動モードを抽出することができ, また,固有振動解析結果は実験結果とほぼ一致すること が確認できた。

本研究では、車両の走行性に影響を与える桁の鉛直方 向に関する曲げ振動および捻り振動に着目したが、橋梁 構造物の耐震性能評価という観点からは橋軸方向または 橋軸直角方向に関する固有振動特性の検証が必要となる。

現在,十勝河口橋には地震情報伝達システム(WISE: 国土交通省 北海道開発局)に直結した加速度計が設置さ れており,地震動観測が可能な体制となっている。従っ て,今後は実際の地震動における観測記録を用いた振動 特性評価が可能となることから,構造物の地震応答を含 めたより詳細な検討を行っていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島 出版社, 1994.
- 三田村 浩,岸 徳光,小室雅人,巽 治,加藤 剛: 美原大橋の強制加振実験と固有振動特性評価,土木 学会北海道支部論文報告集,第 61 号, I-36, 2004.3.
- 新山 惇,佐藤昌志,小室雅人,岸徳光:供用後 27 年経過した三径間連続鋼床版斜張橋の自由振動 特性,構造工学論文集 Vol.47A, 2001.3.