高次振動モードを用いた地震後の 構造物健全度判定の高度化のための基礎的検討

伊藤 公二1·坂井 公俊2·室野 剛隆3

¹正会員 ジェイアール東海コンサルタンツ(株) 土木事業部 (〒450-0002 名古屋市中村区名駅 5-33-10) E-mail: ko-itou@jrcc.co.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 研究開発推進部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38) E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

本検討では、従来の1次モード固有周期の変化を指標とした構造物の健全度判定手法の高度化に向けた 基礎的な検討を行った.具体的には、構造物の損傷発生位置を変化させた固有値解析を実施することで、 高次モードまでを含んだ固有周期の変化と損傷発生位置の関係を把握した.その結果、今回対象とした杭 基礎 RC 橋脚については、地上部材の損傷は1次モード固有周期への影響が相対的に大きく、基礎部材の 損傷は2次、3次モード固有周期への影響が相対的に大きくなることが確認された.本検討で得られた知 見を一般化することで、高次モードを含む固有周期の変化から、より高精度な損傷発生位置の特定、損傷 程度の把握が実現される可能性がある.

Key Words : evaluation of bridge integrity, earthquake damage, eigenvalue analysis, higher mode response

1. はじめに

地震発生後に、各種土木施設の健全性を適切かつ迅速 に把握することは各設備の使用性、復旧性等の観点から 非常に重要である.このような観点で、地震発生後に各 施設の健全度を即時的に判定するシステムが、道路構造 物¹⁾、鉄道構造物²⁾、配電設備³⁾等において構築され、実 運用されている.これとともに、地震発生後に構造物の 固有振動数を把握し、この結果をもとに構造物の健全度 を判定する手法も存在する.この健全度判定法の一つで ある衝撃振動試験⁴⁹は、重錘を用いた打撃によって構造 物へ衝撃荷重を与え、その応答波形から水平1次モード の固有振動数を同定するとともに、地震前の固有振動数 からの変化を指標として構造物の健全度判定を行うもの である.この衝撃振動試験は、試験・計測の実施、結果 の分析等が比較的簡易であるため、鉄道構造物の健全度 判定手法として以前から活用されている.

この時に、構造物の水平1次モードは隣接構造の影響 を強く受けることが確認されている^{例えばのの}.また、鉄道 構造物の構造形式として一般的な単柱橋脚やラーメン高 架橋の振動を考えた場合には、地中部の振動と比較して、 地上部の振動が相対的に卓越すると考えられる.そのた め、水平1次モードの固有振動数の変化のみから、地中 部材の局所的な損傷の発生を適切に把握するには限界が ある.その一方で、地上部の損傷は目視によってある程 度の判断ができるものの、地中部の損傷把握を目視で実 施することは困難であり、このような箇所に対する適切 な健全度判定手法の構築は重要である.

こうした中で近年,計測器の分解能や計測技術,デー タ分析手法の向上もあり,多数のセンサーを設置するこ とで構造物全体系の高次モードも含む振動特性を推定す るような試みも実施されている^{例えば 899}. 高次モードの振 動は,1次モードと比較してモード形状が複雑であり, 局所的な剛性の変化が固有周期の変化に比較的大きな影 響を与える可能性も考えられる. そのため,従来の水平 1次モードのみを考慮した健全度判定手法に,高次モー ドの影響を加味することで,構造物の損傷検知,健全度 判定の高度化が期待される.

そこで本検討では、構造物の振動計測結果を用いた健 全度判定手法の高度化のための基礎的な検討を行う.具



図-1 対象構造物の構造一般図,地盤条件の概要

表-1 固有値解析結果(水平方向の振動が卓越するモードを抽出)

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	有効質量比 (水平方向)	刺激係数 (水平方向)
1	1.399	0.715	0.8295	-31.504
2	7.777	0.129	0.1628	13.957
3	20.095	0.050	0.0076	3.013

体的には、杭基礎を有する単柱橋脚を対象として、部材 の各位置が損傷した状態を模擬した場合の固有振動数の 変化を解析的に把握する.この時には、1次モードの固 有振動数だけでなく、より高次の振動数の変化も含めた 検討を行うことで、損傷部位と各モード固有振動数の変 化に着目した整理を行う.さらに、地上部の部材剛性と 地盤剛性の関係が変化した場合に、損傷の発生が固有振 動数の変化に与える影響についても検討を行う.最後に、 これらの結果を総括することで、高次モードを把握する ことによる構造物の健全度評価の高度化の可能性につい て議論を行う.

2. 対象構造物の概要, 健全な状態での固有振動 モードの把握

本検討において対象とする構造物の概略寸法,地盤条件を図-1に示す.今回は,鉄道構造として一般的に用いられている杭基礎RC橋脚(柱高さ8m,杭長19m)を対象とすることとし,検討方向は衝撃振動試験において主な対象としている線路直角方向とする.解析モデルは2次元の梁とばね要素で構築することとし,各部材,ばねの設定を行う際には,鉄道構造物の設計基準¹⁰¹¹に従ってモデル化,諸数値を算定した.この構造物は,地震時に要求される各種性能を満足している.

この構造物を対象として固有値解析を実施した.この 時の部材剛性は,弾性時の値を設定している.固有値解 析結果の中で,水平方向の振動が卓越するモードを抽出 した結果を表-1に,水平方向1-3次のモード形状を図-2 に示す.これらの結果から,水平方向の1次モードでは 構造物全体が同一方向に変形しており,主に地上部と杭 頭付近が大きく変形していることが分かる.一方で,2 次,3次とより高次モードになるほど複雑な振動形状を 示すとともに,地中部の変形が顕著になっていることが 確認できる.この結果を健全な状態での固有振動モード として,次章以降の検討を行う.

3. 部材各位置に損傷が発生した場合の固有振動 モードの変化

(1) 検討の方法

前章で構築した構造物モデルを対象に、部材の各箇所 で局所的な損傷が発生した状態を想定し、この損傷が固 有振動モードの変化に与える影響を解析的に把握する. この時には、部材が損傷した状況を各要素の剛性を低下 させることで簡易的に表現するとともに、この損傷発生 箇所を様々に変化させた状態で固有値解析を実施する.

損傷部材の剛性は,無損傷時の 0.1 倍を仮定して設定 する. 柱部材の非線形特性を図-3 に,杭部材の非線形特



性を図-4 に示すが、この 0.1 倍という数字は、各部材が 降伏した後の最大耐力以前における等価剛性に相当して いる.これは、大規模地震発生後の構造物の健全性を判 断するという観点から、概ね対象とする損傷程度である. 当然のようにこの剛性低下倍率が変化することで、以降 の各結果は変化するが、この時には固有周期の変化率が 変化するだけで、今回得られた全体的な傾向は変わらな いことを別途確認済である.

(2) 局所的な損傷が固有振動モードの変化に与える影響

まず,全ての杭要素および柱下端が1要素ずつ損傷した状態を想定して,網羅的な固有値解析を実施した.その結果得られた水平方向1次~3次モードの固有周期を,前章で算定した無損傷時の固有周期との比率によって評価し,固有周期変化率と定義した.この固有周期変化率を損傷発生位置に対してプロットした結果を図-5にまとめて示す.

まず図-5(a)を見ると、柱下端の損傷が1次モード固有 周期の変化に最も感度が高いことが分かる.この結果に 対して、地中部材の損傷が1次モード固有周期に与える 影響は相対的に小さい.また、杭の損傷が1次モード固 有周期の変化に与える影響の大きさは、損傷が発生する 深度によって変化しており、特に深度 6m 位置における 杭部材に損傷が発生した場合に相対的に影響が大きくな ることが分かる.この深度は、図-2(a)を見ても分かる通 り、固有振動モードにおいて変形が急激に大きくなる箇 所に相当するとともに、この構造物のプッシュオーバー 解析により得られた杭部材の曲げモーメント分布を図-6 に示すが、地震時にモーメントが集中する箇所であるこ とも確認できる.

続いて図-5 (b),(c)を見ると,2,3 次モードとも柱下端の 損傷が固有周期の変化に与える影響は大きいが,これ以 上に杭頭部の損傷の発生が固有周期に大きな影響を与え ている.図-2 (b),(c)より,いずれの振動モードにおいて も杭頭部において大きな変形が見られる.また,2 次モ





ードにおいては地中部の深度 8.5m 位置の部材損傷が全体系の固有周期に与える影響も相対的に大きくなっているが,図-2(b)ではこの箇所付近の変形が大きくなっていることも見て取れる.

以上の結果より、対象とする次数によって各部材の損 傷が全体系の振動特性に与える影響度が変化すること、 健全時の振動モード形状において大きく変形している箇 所が損傷した場合にこの影響度が大きくなることが確認 された.そのため、事前に振動モード形状が把握できて いる構造においては、計測によって固有周期の変化が大 きな次数を特定するとともに、高次モードを含む各振動 モードの形状と比較することで、従来よりも高い精度で 損傷発生箇所を特定できる可能性が考えられる.

(3) 杭の損傷進展を考慮した条件における固有振動モ ードの変化

前節ではモデル化を行った1要素毎の損傷を考慮した 場合の各モードの固有周期の変化について検討を行った が、本節では杭部材の損傷がより広範囲に進展した場合 の固有振動モードの変化について検討を行う.ここでは 損傷の進展として、以下に示す5ケースを設定した.

- Case1:第1層内の杭部材の上端から下端に損傷が進展 した場合
- Casel':第1層内の杭部材の下端から上端に損傷が進展 した場合(Caselの逆から損傷が発生した場合)
- Case2:第2層内の杭部材の上端から下端に損傷が進展 した場合
- Case3:第3層内の杭部材の上端から下端に損傷が進展 した場合
- Case4: 図-6 において杭の曲げモーメントが大きい要素 から順に損傷した場合

検討の方法としては,前節までと同様の条件で実施す ることとし,損傷の進展とともに剛性低下を考慮する部 材の範囲を増加させた固有値解析を実施することで,固 有振動モードの変化を把握した.最終的に得られた結果 を図-7に示すが,これらの図における横軸は健全な状態 からの固有周期変化率,縦軸は損傷した部材の長さ(m) を示している.これらの図より,以下の傾向が確認でき る.

- ・水平1次モード(図-7(a))においては、損傷範囲が広くになるに従って、固有周期変化率が徐々に大きくなる.また、Case2=Case4>Case1'>Case1>Case3の順で固有周期の変化に与える影響が大きくなっている.これは、図-5(a)において第2層内の杭、第1層内の杭、第3層内の杭の順で各部材の局所的な損傷発生時の固有周期変化率が大きい傾向と一致している.
- ・水平2次モード(図-7(b))は、Casel,Casel'における固 有周期の変化が大きくなっている.これに対して、 Case2,Case3の条件下では固有周期の変化が小さい.
- 水平3次モード(図-7(c))においても、2次モードと
 同様に、第1層内の杭部材が損傷した場合(Casel, Casel')の固有周期の変化が大きい.これらは、図-5



表-2 橋脚躯体、地盤バネの剛性を変化させた解析モデル

No.	橋脚躯体 の剛性	地盤バネ の剛性	備考		
1	1.0倍	1.0倍	基本モデル		
2	0.5倍	10.0倍	橋脚躯体が柔、地盤が剛		
3	10.0倍	0.4倍	橋脚躯体が剛、地盤が柔		



図-8 各ケース構造物のプッシュオーバー解析結果



図-9 橋脚躯体が損傷した場合の固有周期変化率

(b),(c)において杭頭部付近が損傷した場合の固有周期 変化率が大きい傾向と一致している.

以上の結果を総括すると,損傷が広がることに伴って 固有周期の変化が大きくなるが,この固有周期の変化が 顕著に現れる部材位置,振動モード次数については,1 要素のみの損傷で影響が大きかった箇所とほぼ同様の傾 向を示すことが確認された.また,地震時の橋脚躯体の モーメント分布,地盤変位分布等を勘案すると,地上部 材の損傷は柱下端等に集中する場合が多いと考えられる が,杭部材については,ある程度広い範囲で損傷が発生 する可能性もあり,この時には,杭部材の損傷による固 有周期の変化も比較的大きな値となる可能性も考えられ る.そのため,前節の結果も含めて高次モードを含む固 有周期の変化を把握することで,損傷発生位置,損傷範 囲の高度化が期待される.

4. 地盤と構造物の剛性の関係の変化が固有振動 モードの変化に与える影響

前章では、図-1に示した構造、地盤を対象として、各部材の損傷が高次モードを含んだ固有周期の変化に与える影響を確認した.しかし当然のように、道路・鉄道構造物は様々な地盤条件を有する箇所で建設されるとともに、構造物高さにも様々なバリエーションが存在する. 各地点の地盤、構造物条件が異なることで振動モードの特性が変化し、結果として部材の損傷が固有周期の変化に与える影響も変化する可能性が考えられる.そこで本章では、地中部と地上部の剛性の関係を模擬的に変化させた構造物を対象として、3章と同様の検討を行うことで、健全時の地上部、地中部の振動特性の違いが損傷時の振動特性の変化に与える影響について整理を行う.

検討の方法としては、まず前章で検討を行った図-1の 構造物を基本モデルとして、橋脚躯体の剛性、地盤バネ の剛性を表-2に示すように一律で変化させた解析モデル



を構築した.この時の各構造物のプッシュオーバー解析 により得られる構造物全体の荷重一変位関係を図-8に示 すが、いずれの構造物も降伏震度0.45、降伏変位138mm であり、降伏周期は1.1秒となる.そのため、従来の固 有周期の変化を指標とした健全度の判定法^{例えば 4}を用い る場合には、いずれの構造物においても同一の閾値が設 定されることになる.

この3種類の構造物を対象に,前章(3)と同様の検討を 実施した.具体的には,基礎の各位置に損傷を考慮した 場合の固有周期を算定するとともに,健全な状態におけ る固有周期との比率を算定した.また,橋脚躯体のみに 損傷が発生した場合についても固有周期変化率を算定し た.以上の検討結果のうち,橋脚躯体の損傷を考慮した 場合の結果を図-9に,杭基礎部材の損傷を考慮した場合 の結果をケース毎に図-10(Casel) ~図-14(Case4)に 示す.

これらの結果を見ると、全体的な傾向としては、前章 で得られた知見と同様の結果となっている.つまり、1 次モードにおいては橋脚躯体の損傷の影響が大きい一方 で、高次モードでは基礎部の損傷による感度が相対的に 高くなっているケースが多い.また,杭基礎の損傷範囲 が広くなるほど固有周期変化率も大きくなるとともに, 固有周期の変化が顕著に現れる振動モード次数は,基本 ケースにおける1要素のみの損傷で影響が大きかった箇 所とほぼ同様の傾向を示している.

一方で、表-2の各モデルごとに比較すると、橋脚躯体の損傷を考慮した図-9では、1次モードについては固有周期変化率の大きさが No.2>No.1>No.3の順となっており、橋脚躯体の剛性が相対的に小さいほど橋脚の損傷の影響が顕著になっているのに対して、2次モード以降ではその傾向が変化していることが分かる.また、モデルNo.3の橋脚躯体の剛性が相対的に高い構造では、1次モード、2次モードともに柱部材の損傷が固有周期の変化に与える影響が非常に小さいことも確認できる.

次に、杭部材の損傷を考慮した結果(図-10~図-14) の全体的な傾向としては、モデル No.3 の地盤剛性が相 対的に低い構造ほど基礎部の損傷が全体の固有周期の変 化に与える影響が大きくなっていることが分かる.よっ て、例えば軟弱地盤上に建設された背の低い構造物と硬 質地盤上に建設された背の高い構造物等において、仮に



建設時の固有周期が同一であった場合には、同一部材が 同一程度の損傷となった場合にも、固有周期の変化に与 える感度が変化することが確認された.そのため、従来 の衝撃振動試験を用いた健全度判定手法にこの効果を考 慮することで、損傷程度の把握をより高度化できる可能 性が考えられる.

5. 高次モードの固有周期変化率を用いた損傷発 生箇所の推定

これまでの検討により、構造物の損傷部位の違いによって、高次モードまでを含む各モード固有周期の変化の 大小が変わること、地盤と構造物の剛性比率が変化する

	固有周期(秒)			固有周期変化率 (損傷時/健全時)			固有周期変化率 の比率	
	1次	2次	3次	1次	2次	3次	2次/1次	3次/1次
健全時	0.715	0.129	0.050	-	-	-	-	-
柱下端の損傷	0.844	0.147	0.052	1.180	1.144	1.052	0.97	0.89
杭頭部の損傷	0.754	0.159	0.054	1.055	1.233	1.082	1.17	1.03
杭曲げモーメント 最大箇所の損傷	0.769	0.130	0.051	1.075	1.010	1.015	0.94	0.94

表-3 損傷発生箇所が変化した場合の固有周期変化率,モード毎の固有周期変化率の比率

と、同程度の損傷が発生した場合にも、固有周期に与える影響が変化すること等の知見が得られた.本章では、 これらの結果を活用して、損傷発生箇所の同定をより高 度化する手法について整理を行う.

まず,鉄道構造物を設計する際には、本検討と同様に 2次元の梁とばね要素によるモデル化を実施している. この時には、通常の耐震設計では1次モードの固有周期

(実際には降伏剛性を考慮した等価固有周期)のみに着 目しているが、これに加えて弾性時の高次モードの情報 も把握しておく.これとともに、近年建設される鉄道構 造物においては、完成時に衝撃振動試験によって1次モ ード固有周期を把握している場合があるが、この検討対 象もさらに高次モードまで広げて実施する.そしてこれ らのデータを建設時の初期情報として保存しておく.

続いて、3章の検討を実施することで得られる構造物 の無損傷時、柱下端損傷時、杭頭部損傷時、杭の曲げモ ーメント最大位置の損傷時の各モードの固有周期(秒), 固有周期変化率,1次モードに対する高次モードの固有 周期変化率の比率をまとめる. 今回の構造物に対して整 理した結果を表3に示す.この結果から、例えば1次モ ードと2次モードの固有周期変化率の大小は、杭の損傷 発生位置により異なっていることが分かる. そのため, 地震発生後に振動計測を実施し、1次、2次モードの固 有周期変化率を把握する. これから1次モードに対する 2次モードの固有周期変化率の比率を算定し、これが1.0 より大きければ杭頭部, 1.0 より小さければ杭の曲げモ ーメント最大位置が損傷していると推定される. なお, 今回の構造の場合は柱下端損傷時も固有周期変化率の比 率が 1.0 を下回るため、固有周期の情報だけではどちら が損傷しているか判断できないが、目視点検等の併用に より、どちらが損傷しているか推定できると考えられる. このような対応を行うことで、基礎部を含む各位置の損 傷発生の有無を従来よりも高度化できると考えられる.

なお4章で示したように,表-3の関係は地盤や構造物の剛性の大きさによって変化する.そのため,現時点では対象とする構造物毎に3章と同様の検討を実施し,各部材の損傷と固有周期変化率の関係を把握する必要があ

る. これについては、今後多様な条件を有する構造物に 対して同様の検討を実施することで、構造形式、構造高 さ、地盤条件等によって標準的な傾向を整理することも できると考えられる. これら結果を活用することで、地 震発生後の健全度判定に関して、損傷部位、損傷程度把 握の高度化が期待される.

6. まとめ

本検討では、衝撃振動試験による健全度評価の高度化 を目指して、基礎的な検討を行った.本検討で得られた 知見を以下にまとめる.

- ・杭基礎を有する単柱橋脚を対象に、損傷部位の変化が 固有周期の変化に与える影響を解析的に検討した。その結果、1次モードの固有周期は柱下端の損傷の影響 が大きい一方で、高次モードの固有周期の変化には地 中部材の損傷が大きな影響を与える場合があることが 確認された。つまり、高次モードまでを含んだ固有周 期の変化を把握することで、損傷発生箇所の推定を従 来よりも高度化できる可能性が考えられる。
- ・地中部材の損傷範囲が広がった場合には、固有周期変 化率も徐々に大きくなる.この時に、上記の局所的な 損傷による固有周期の変化が大きな箇所付近で損傷が 広がることで、より固有周期の変化が顕著になること が確認された.
- ・構造物の地上部材と地盤の剛性比率を変化させた場合の損傷と固有周期変化率の関係の整理を行った。その結果、相対的に地盤の剛性が低い構造物においては、杭部材の損傷が固有周期の変化に与える影響が顕著になることを確認した。
- ・以上の結果を踏まえ、高次モード固有周期を把握することで、損傷発生位置を特定する方法を整理した。この方法は、現時点では今回対象とした構造物のみに適用可能な方法であるが、今後はより多様な構造条件に対し同様の検討を実施しこれを一般化することで、各種構造物の損傷位置を適切に同定可能な手法が構築で

きる可能性がある.

参考文献

- 長屋和宏,片岡正次郎,日下部毅明,松本幸司:震 後対応における意思決定を支援する即時震害推測シ ステムの開発,土木学会論文集 A1 (構造・地震工 学), Vol.72, No.4, pp.I_966-I_974, 2016.
- 岩田直泰,坂井公俊,山本俊六,室野剛隆,青井 真:鉄道地震被害推定情報配信システム(DISER) を利用して素早く運転を再開する,RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020.
- 3) 朱牟田善治,石川智巳:地震後の災害情報を逐次処理する配電設備被害推定の基本モデル ベイジアンネットワークを適用した被害推定システムの開発 -, 電力中央研究所報告,N07027,2008.
- 西村昭彦,棚村史郎:既設橋梁橋脚の健全度判定法 に関する研究,鉄道総研報告, Vol.3, No.8, pp.118-127, 1989.
- 5) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価法の研究, 鉄道総研報告, Vol.4, No.9, pp.14-21, 1990.
- 6) 中島章典,中野喜代美,中村晋:常時微動に基づく

独立橋脚および橋梁完成系の振動特性の把握,構造 工学論文集 Vol.56A, pp.305-315, 2010.

- 徳永宗正,曽我部正道,谷村幸裕,小野潔:常時微 動測定に基づく鉄道高架橋の等価固有周期の推定手 法,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71, No.1, pp.72-86, 2015.
- 8) 飯山かほり,栗田哲,源栄正人,千葉一樹,櫻田佑太,三辻和也:2011年東北地方太平洋沖地震で損傷した鉄筋コンクリート造3階建て建物のモード特性と損傷階の推定,日本地震工学会論文集,Vol.12,No.5, pp.207-224, 2012.
- Chen, P.Y., Iiyama, K., Morikawa, H., Sakai, K. and Kitamura, H.: Modal Identification of Elevated Bridge through Microtremor and Impact Tests using Frequency Domain Decomposition, JSCE 2019 Annual Meeing, No.CS12-63, 2019.
- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解
 説(耐震設計),丸善出版,2012.
- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解 説(基礎構造物),丸善出版,2012.

FUNDAMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT BY USING HIGHER MODE RESPONSE

Koji ITO, Kimitoshi SAKAI and Yoshitaka MURONO

The damage level of railway structures after earthquakes was judged by the change in eigenvalues of the first-order modes. In this study, we investigated the improvement of this method for the structural integrity assessment. At first, an eigenvalue analysis was carried out by changing the damage location of the structure. From this analysis, the relationship between the location of damage and the change in natural frequencies including higher-order modes was evaluated. In the case of the RC piers, damage to the piers has a significant effect on the first mode natural frequencies. On the other hand, damage to the foundation has a significant effect on the higher mode natural frequencies. In other words, it is possible to identify the location of damage to a structure by understanding the change in natural frequencies of the higher modes.