

実測データに基づく鋼斜張橋モデルにおける鋼製可動支承の非線形性を考慮した地震時挙動

Seismic response of a steel cable-stayed bridge model based on long term monitoring data considering with nonlinearity of steel movable bearing

北見工業大学大学院	○学生員	木村浩士
北見工業大学	正会員	宮森保紀
北見工業大学	正会員	三上修一
北見工業大学	正会員	山崎智之
北見工業大学	F 会員	大島俊之

1. はじめに

吊橋や斜張橋などの橋梁は数Hz程度の比較的低い振動数領域に複数の振動モードが存在し、モードパラメータが振幅や部材の温度に依存するなど、地震時の挙動が複雑なため、動的解析により地震時安全性の照査が必要な橋梁形式である¹⁾²⁾。さらに、近年ではモニタリングデータによる性能評価が提案されており、解析ソフトの性能も向上している。モニタリングデータに基づいて解析モデルを構築することで、既存橋梁では、より正確な地震時応答を評価する事が期待できる。このようなモデル化に際して、常時微動レベルでは支承は動かず、大地震時は支承が可動する事を想定し、非線形特性を用いることで、合理的な評価ができると考えられる。しかし、鋼製支承のモデル化を非線形モデルとして解析を行っている例は少ない³⁾。

そこで、本研究では実橋梁の振動計測結果に基づいて構築した解析モデルの支承バネモデルを、逆行型バイリニアモデルとし時刻歴応答解析を行う。そして、大地震時に支承が非線形化した時の橋梁全体系の挙動について検討し、対象橋梁のより現実的なモデル化を目的とする。具体的には、まず、対象橋梁にて継続して計測している多数の常時微動加速度データから固有振動特性を求める¹⁾。そして、設計報告書³⁾を基に構築した解析モデルを実測の固有振動特性と合致させる。さらに非線形特性については、支承の1次剛性では、小さな力で変位しないよう剛性を大きくし、支承の摩擦力がある値を超えたときに2次剛性として、支承が水平方向に変位するようなモデル化を行い非線形解析モデルとして構築した。そして非線形時刻歴応答解析結果について橋梁各部の動的応答量を比較し、対象橋梁のモデル化について、考察を行ったのでその結果を報告する。

2. 対象橋梁

本研究で対象とした鋼斜張橋は、これまで著者らが遠隔振動計測を行なっている札内清柳大橋とする。本橋は主塔高さ50m、支間長97.7m+132mの非対称支間である。またケーブルは1面吊りの11段ハープ型マルチケーブルで主塔基部と補剛桁は剛結構造となっている。2002年3月に供用が開始され、2004年11月以降主塔や桁、地盤で常時と地震時の加速度や温度等を継続して計測している。本研究では、毎日2時と14時にサンプリング振動数100Hz、計測時間60秒で計測した常時微動加速度データを使用した。

3. 解析モデル

解析モデルは設計報告書³⁾を基に、汎用非線形構造解析プログラムRESP-Tにより節点数61、要素数115の3次元骨組みモデルで構築した。解析モデルを図-1に示す。主桁と主塔、A-1橋台とP-2橋脚は梁要素、また、主塔基部とP-1橋脚は材軸直交分割要素、ケーブルはトラス要素(ケーブル材)、上部構造と下部構造を結合しているのは鋼製支承で、この鋼製支承と基礎はそれぞれ並進・回転バネでモデル化した。支承のバネ定数(1次剛性)は、実測データから求めた固有振動特性を再現するように調整した。

材料非線形は主塔基部(鋼)とP-1橋脚(RC)、各支承(鋼)に設定した。非線形の復元力特性については、主塔基部には標準型トリリニア、P-1橋脚には剛性低減トリリニア型の武田型を用いた¹⁾。P-1橋脚とP-2橋脚上のピボットローラー支承の橋軸方向水平バネには逆行型バイリニアを使用した。なお、大塚ら²⁾は鋼製支承の降伏を表す非線形特性を作成し、時刻歴応答解析を行っている。だが、本研究では、可動支承の摺動時を想定して、支承に作用する鉛直反力を算出し、道路橋支承便覧⁴⁾に記載されている鋼製ローラー支承のころがり係数0.05を乗じて、二次剛性に達する荷重を設定した。図-2に各支承の非線形特性を示す。原点対称であるため負側は省略している。

時刻歴応答解析はNewmark- β 法により $\beta=1/4$ 、積分時間間隔 $\Delta t=1/1000\text{sec}$ として計算した。減衰定数は道路橋示方書の耐震設計編に基づき、上部構造(主桁と主塔)に対して3%、下部構造(A-1橋台、P-1橋脚、P-2橋脚)に対して10%、鋼製支承に対して5%、基礎に対して30%を要素減衰定数として設定した。時刻歴応答解析に用いる減衰マトリックスについては、Rayleigh減衰型を設定した。Rayleigh減衰の係数 (α_0, α_1) は、固有振動解析によりモード毎の固有円振動数と減衰定数、有効質量比を求め、有効質量比が大きい1次と6次の固有円振動数と減衰定数からRayleigh減衰の係数 $(\alpha_0=0.1111, \alpha_1=0.0056)$ を算出した。

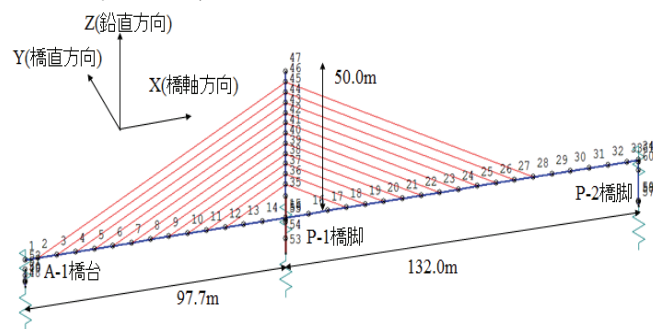


図-1 解析モデル

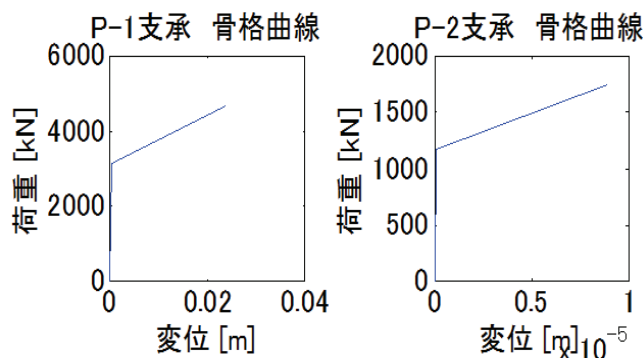


図-2 可動支承の骨格曲線

キーワード：ERA, 支承, 固有振動特性, 時刻歴応答解析

連絡先：〒090-8507 北海道北見市公園町165番地 TEL 0157-26-9472 FAX 0157-26-9472

4. 固有振動解析

実測データに相関関数,ERAを適用して求めた固有振動特性と,解析モデルの固有振動解析により求められた固有振動特性を表-1に,固有振動モード形状を図-3に示す。固有振動数については,概ね一致しているが,減衰定数については,振幅依存性の影響により計測値は小さくなっている。

表-1 固有振動特性

モード	固有振動数 [Hz]		減衰定数 [%]	
	解析	計測	解析	計測
1次	0.617	0.613	2.526	1.596
2次	0.732	0.810	3.777	0.369
3次	1.106	1.130	1.794	0.827
4次	1.561	1.720	2.522	0.743
5次(解析9次)	4.471	4.980	3.471	0.264

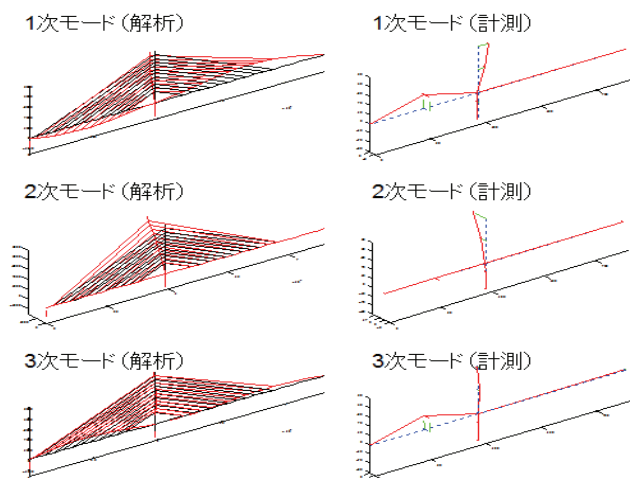


図-3 固有振動モード形状

5. 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析は,材料非線性を考慮した非線形解析モデルと,材料非線形非考慮の線形解析モデルの2つのモデルについて行い,結果の比較,検討を行った。入力地震波は札内清柳大橋で観測された小規模地震波3波と兵庫県南部地震時にJR 鷹取駅構内で観測された地震波,そして十勝沖地震時に十勝河口橋の地中5mの地点で観測された地震波にて解析を行った。結果の一例として図-4に主塔頂部の応答変位(橋軸方向),図-5に主塔頂部の応答変位(橋軸直角方向),図-6に可動支承の荷重変位履歴曲線を示す。

まず主塔頂部の橋軸方向の応答変位については,非線形モデルの方がやや応答変位が大きくなっている。これは,P-1 支承が可動して,支承変位が大きくなったためである。次に,橋軸直角方向については,非線形モデルの応答変位が線形モデルよりも約20%小さくなっている。そして,支承については,P-1 支承,P-2 支承共に非線形領域に達している。また,P-1 橋脚については若干塑性化するものの,P-1 支承の剛性が低下することで,作用する曲げモーメントも減少している。

また,十勝河口橋波の解析結果では,支承に非線形特性を設定していない解析モデルではP-1 橋脚は塑性化していたが,支承に非線形特性を考慮することで塑性化せず,実際の状況と整合した。また,実測の小規模地震波を入力した場合は,支承は移動せず,主塔頂部やP-1 橋脚上部の応答加速度も概ね一致した結果となった。従って,支承に非線形特性を設定した解析モデルを構築し,非線形時刻歴応答解析を行った結果,より実橋梁に近い解析モデルの構築ができたと考えられる。

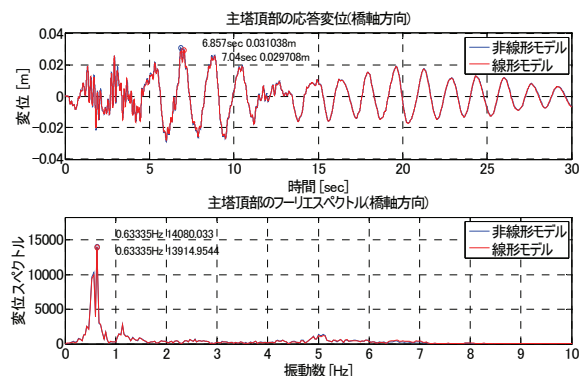


図-4 主塔頂部の応答変位(橋軸方向)

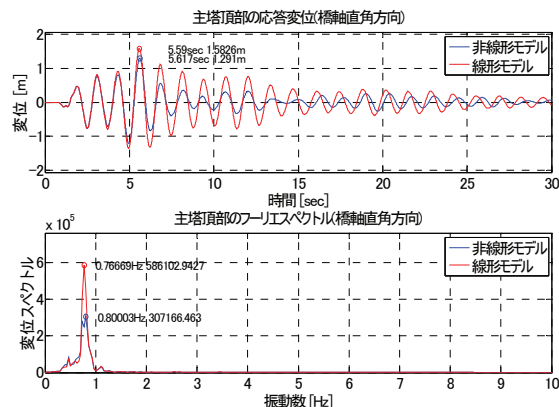


図-5 主塔頂部の応答変位(橋軸直角方向)

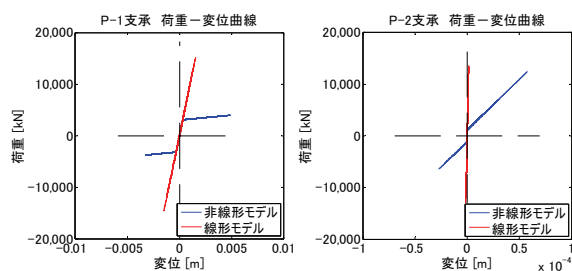


図-6 可動支承の荷重変位履歴曲線

6. おわりに

本研究では,支承に作用する鉛直反力から支承が可動する摩擦力を求め,支承に非線形特性を設定し解析を行った。その結果,大地震により支承が可動した際の,橋梁全体系の動的応答について,橋軸方向の変位が若干増加することを確認した。また十勝沖地震の観測波や小規模地震波を入力した場合の解析結果は,実現象と整合しており,実測データに基づくモデル化を精度良く行う事ができた。

最後に設計資料などをご提供いただいた北海道帯広土木現業所に対し深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 木村浩士,宮森保紀,池田憲俊,大島俊之,三上修一:実測データに基づく鋼斜張橋モデルの構築と動的解析における非線形性の影響,土木学会北海道支部論文報告集 第64号,A-10,2008.
- 2) 大塚久哲,山平喜一郎,小宮有貴:鋼斜張橋の解析モデルおよび耐震補強案に関する考察,構造工学論文集,Vol.52A,pp.397-404,2006.
- 3) 北海道帯広土木現業所北海道開発コンサルタント(株):幕別帯広芽室線第二札内橋新設工事上部工修正設計報告書 1997.
- 4) 日本道路協会:道路橋支承便覧,2004.4.