

免震ゴム支承の鉛直剛性が 橋梁の地震応答に及ぼす影響

川原林 浩¹・伊津野 和行²

¹ 学生員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

² 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

すべり摩擦型支承を用いた橋梁の地震応答では、桁の浮き上がりに対する照査が重要になる。桁が地震応答中に浮き上がると、すべり摩擦による減衰効果が見込めなくなる。桁の鉛直応答には、橋脚の高さと横梁の長さの比や、支承部鉛直剛性が影響するものと考えられる。本研究では、これらの影響を定量的に評価することを目的に非線形地震応答解析を行い、桁の浮き上がりに関する要因について考察した。

Key Words : rubber bearing , vertical stiffness , highway viaduct , vertical response of girder

1. はじめに

阪神・淡路大震災後に改訂された平成8年度版道路橋示方書以降、橋梁の支承はゴム支承を基本とするようになった。従来の金属支承と比較すると、ゴム支承の鉛直剛性は小さいものが多く、用いるゴム支承の種類によっても異なることが考えられる。鉛直剛性の違いは、支承部に生じる地震時発生応力等、支承設計にも関わってくる。最近ではすべり摩擦型免震支承も採用され始めているが、これらの支承では、摩擦係数の面圧依存性の考慮や桁の浮き上がりが生じた場合への対処等、特に鉛直挙動に対する照査が重要である。橋軸直角方向の応答を考えた場合、水平入力地震動によっても鉛直方向の慣性力、ロッキング振動、桁のたわみ振動により、特に耳桁の支承部には鉛直反力の大きな変動が生じることが報告されている¹⁾。そのため、ゴム支承の鉛直剛性の違いによって桁応答が異なり、さらには橋脚応答にも影響が出ることが考えられる。

すべり摩擦型免震支承の鉛直挙動に影響を与える要因としては、橋脚の橋軸直角方向の挙動による鉛直変位、鉛直加速度による慣性力などが考えられる。本研究では橋脚の高さと横梁の長さの比がすべり摩擦型免震支承の鉛直応答に与える影響について検討した。また、水平荷重分散装置の鉛直剛性を変えたときの支承の鉛直挙動の差異について比較検討した。

2. 解析モデルと解析方法について

(1) 検討対象橋梁とそのモデル化

本研究における検討対象橋梁は、単柱 T 型 RC 橋脚と 5 本の主桁によって支持された鋼 I 桁で構成されている橋梁とした。図-1 に検討対象橋梁とその

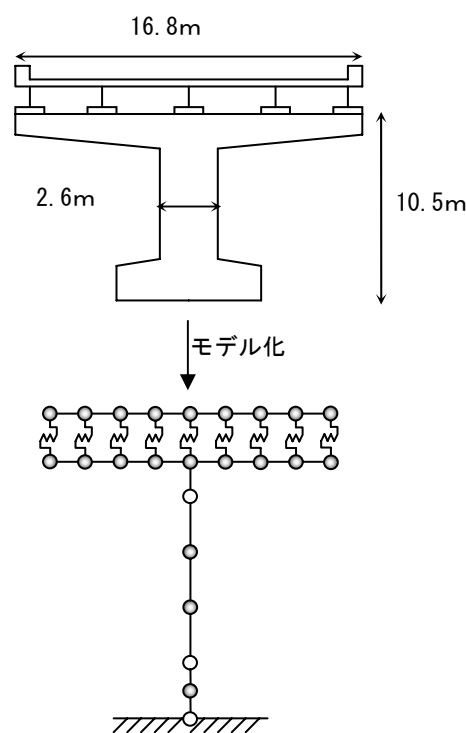


図-1 解析モデル

解析モデル図を示す。この橋脚の、橋軸直角方向及び鉛直方向の地震応答について考える。検討対象橋梁は、高さ 10.5m、幅員 16.8m、上部構造質量は 466 ton、下部構造質量は 516 ton である。解析において部材のモデルは次のように設定した。単柱 T 型 RC 橋脚は塑性化することが予想されることから、非線形特性を考慮した履歴復元モデルとして武田モデル

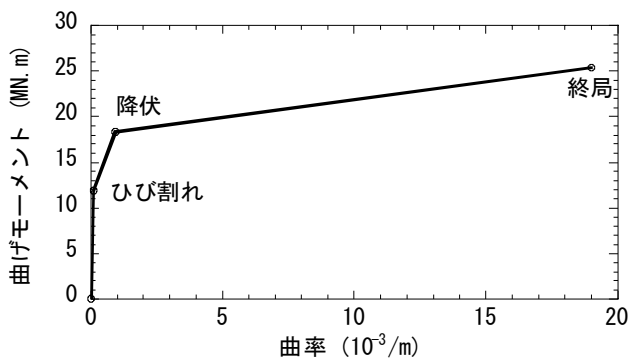


図-2 橋脚の骨格曲線

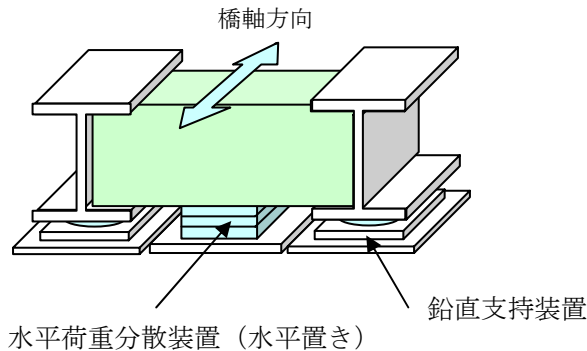


図-3 すべり免震支承システム

を採用した。橋脚の $M-\phi$ 関係の骨格曲線を図-2 に示す。減衰定数は 2% とし、地盤は固定とした。

(2) 支承のモデル化

すべり免震支承システムは図-3 に示すように、鉛直支持装置、すべり装置（鉛直支持装置の上面）及び水平荷重分散装置で構成されている。鉛直支持装置は常時の鉛直荷重を支持するとともに、桁の回転変位を吸収する機能を有する。すべり装置は上部構造と下部構造の分離をはかる機能を有し、PTFE とステンレスのすべり面が用いられることが多い。

一般にゴム支承は圧縮剛性よりも引張り剛性が小さい。支承のモデル化は、鉛直方向における支承は図-4 に示す圧縮-引張非対称の線形モデルを用いたばねでモデル化した。桁の自重を支持する支承では、自重による支承の沈み込みを考慮した。水平荷重分散装置では桁の自重は支持しないので、沈み込みが生じない原点非対称の線形モデルを用いたばねでモデル化した。減衰定数は 2% とした。また、支承部分の橋軸直角方向は固定とした。

(3) 解析方法

非線形地震応答解析には、市販のソフトウェア TDAP III²⁾ を利用した。今回の解析においては水平方向にも鉛直方向にも地震波を入力するため、入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で観測された補正を行っていない地震波³⁾を用いた。

動的解析における積分法には Newmark β 法を用い、積分時間刻みは 0.002 秒とした。なお、固有値

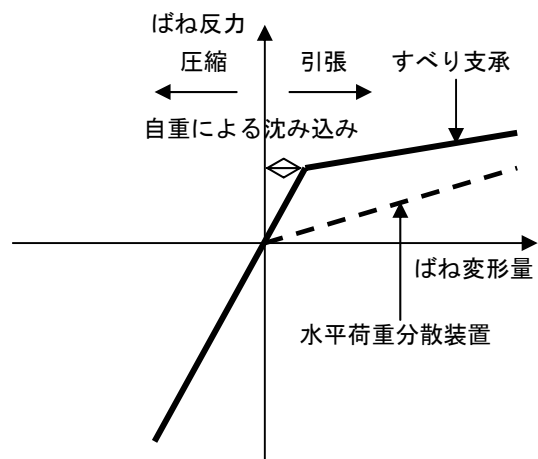


図-4 支承のモデル化

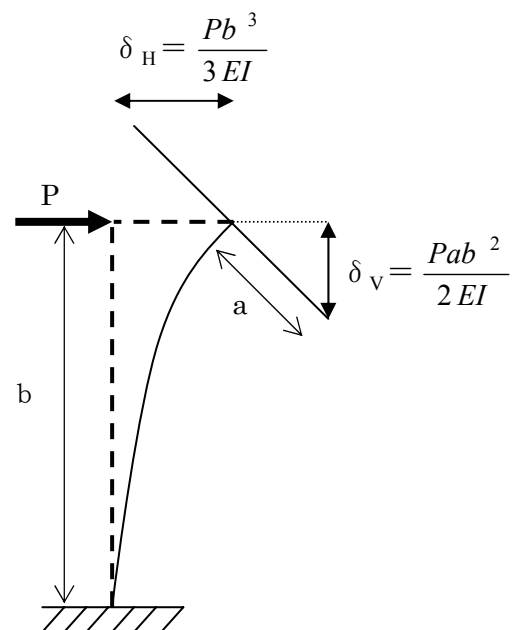


図-5 鉛直変位と水平変位の相関図

解析を行った結果、1 次モードの固有周期は 0.30 秒 (3.1Hz) であった。

3. 橋脚高と横梁長の比が支承部鉛直応答に及ぼす影響

支承部の鉛直応答は、橋脚形状によって異なることが考えられる。横梁の長さが長いほど、梁先端部の鉛直変位は大きくなり、支承部の鉛直変位も大きくなることが考えられる。よって、ここでは支承の鉛直挙動に与える橋脚形状の要因について検討した。支承の鉛直挙動に影響するのは、橋脚の橋軸直角方向の挙動に対する桁端部の鉛直挙動、それに伴う加速度による慣性力が考えられる。橋脚柱部分を弾性体、横梁部分を剛体として考えた場合、構造力学の理論より水平力が作用した時の桁端部の橋軸直角方向の変位 δ_H と鉛直方向の変位 δ_V には図-5 のよう

表－１ 鉛直バネの剛性値

	圧縮剛性(kN/m)	引張剛性(kN/m)
すべり支承	4.0×10^5	4.0×10^3
水平荷重分散装置	4.0×10^5	1.0×10^5

表－２ 解析結果

橋脚高さ (m)	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5
a / b	0.88	0.80	0.73	0.67	0.62
水平変位 (mm)	200	263	307	339	360
鉛直変位 (mm)	265	310	325	326	321
想定鉛直変位 (mm)	240	316	337	342	336
最大浮上量 (mm)	2.5	2.5	1.8	1.0	0.7
固有周期(sec)	0.30	0.34	0.39	0.45	0.48

表－３ 水平荷重分散装置の剛性値

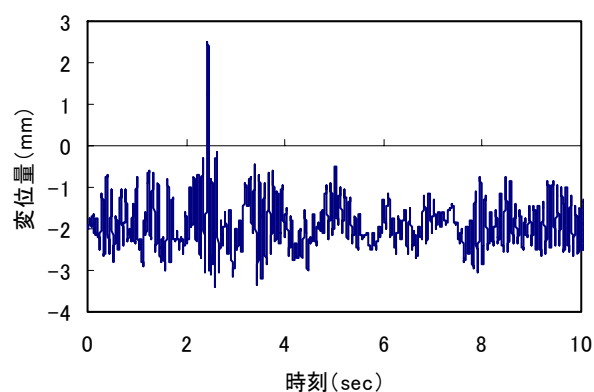
	圧縮剛性(kN/m)	引張剛性(kN/m)
単層ゴム支承	2.0×10^4	5.0×10^3
積層ゴム支承	4.0×10^5	1.0×10^5

な関係がある。そして、図－５ から桁端部の橋軸直角方向の変位 δ_H と鉛直方向の変位 δ_V は、式（１）の関係がある。（ a ：横梁の長さ、 b ：橋脚高さ）

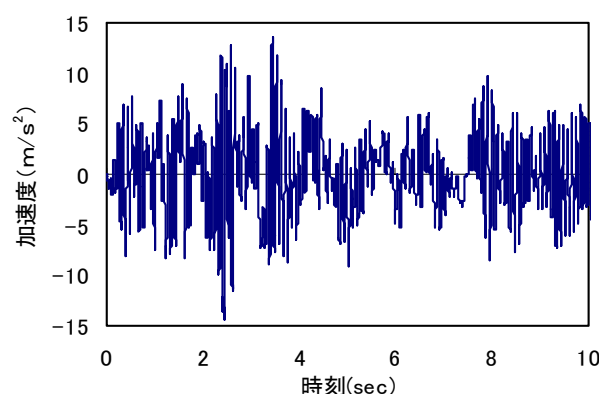
$$\frac{\delta_V}{\delta_H} = \frac{3a}{2b} \quad (1)$$

本研究では橋脚の高さを 1.0m ずつ変化させて（図－１の橋脚を基本とし橋脚の高さを－1m～+3mまで変化させた）解析を行った。固有周期は 0.3～0.5 秒程度である。またすべり支承と水平荷重分散装置の圧縮剛性、引張剛性は表－１に示す値を採用した。圧縮剛性は、荷重支持と回転機能等を十分に満たすよう試設計で与えられた剛性値を設定した。引張剛性に関しては、すべり支承の場合は圧縮剛性の 1/100 を引張剛性とし、水平荷重分散装置部分の支承の場合は圧縮剛性の 1/4 を引張剛性とした。地震応答解析を行ったところ、それぞれのケースにおいて支承部分で 0.7～2.5mm の浮き上がりが確認された。例として橋脚の高さ 10.5m の場合の耳桁部の支承の鉛直変位量の時刻歴応答波形を図－５に示す。図－５より 2.8 秒付近で一度支承の浮き上がりが生じているが、それ以外では圧縮側で支承が挙動している。表－２に示すように固有周期が長くなるにつれ桁端部の水平、鉛直変位量が大きくなっていることがわかる。しかし、鉛直変位量が大きい場合の方が支承の浮き上がりが小さい。これは橋脚の鉛直応答が長周期化することによって桁端部の鉛直加速度が小さくなっており、それに伴う慣性力が小さくなることにより支承の浮き上がり量が小さくなっていると考えられる。例として橋脚の高さ 10.5m の場合の耳桁部の加速度の時刻歴応答波形を図－６に示す。図－６より橋脚の上下運動により桁には 1 G (9.8m/s²) を越える加速度が作用していることがわかる。

また、表－２より（１）式を使い水平変位から鉛直変位を計算した値と、解析結果はほぼ等しい値を



図－６ 支承の鉛直変位の時刻歴応答波形



図－７ 桁端部の鉛直加速度の時刻歴応答波形

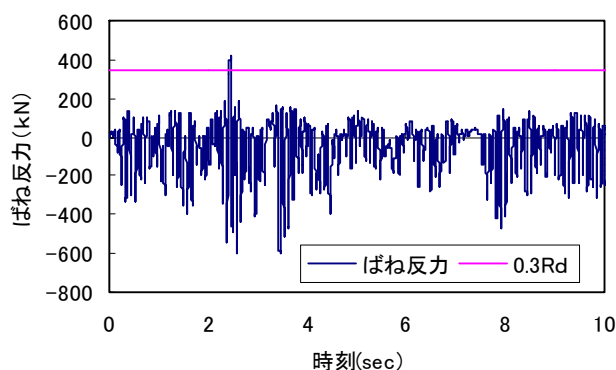
示している。しかし本研究では鉛直変位量と支承の浮き上がり量について明確な関係はみられなかった。

４．水平荷重分散装置の鉛直剛性を変えたときの地震応答解析

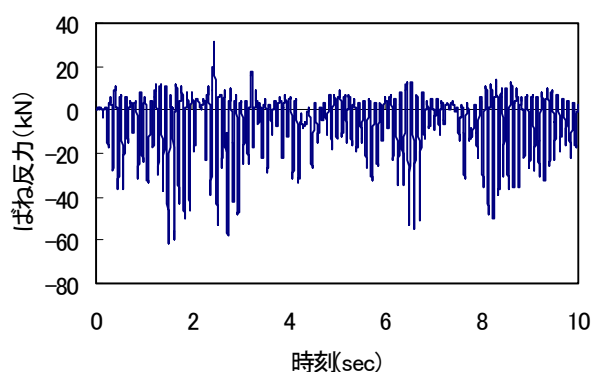
次に水平荷重分散装置の鉛直剛性を変えたときの支承の鉛直挙動の差異について比較検討した。水平荷重分散装置に関して、積層ゴムと単層ゴムを採用した場合について解析を行った。圧縮剛性は表－３に示す値を採用した。水平荷重分散装置の引張剛性は前章と同様に圧縮剛性の 1/4 とした。解析を行った結果、耳桁部におけるすべり部分の支承において、積層ゴムでは最大約 2.5mm の浮き上がりを 1 回、単層ゴムでは最大約 5.0mm の浮き上がりを 11 回、それぞれ確認した。また、積層ゴムと単層ゴムに作用する力の時刻歴応答波形はそれぞれ図－７，８に示すとおりである。

現在、支承部の引張りに関する設計鉛直地震力は道路橋示方書⁴⁾で $0.3R_D$ と規定されている。ただし、 R_D は死荷重反力である。積層ゴムでは図－７より 2.5 秒付近で生じている最大の引張力は道路示方書で規定されている $0.3R_D$ を越えている。このことより装置を取り付けているボルトの抜けや、装置の損傷という可能性が考えられる。

しかし、図－８が示すように単層ゴムでは積層ゴ



図－8 積層ゴムの時刻歴応答波形



図－9 単層ゴムの時刻歴応答波形

ムに比べて引張力が非常に小さい。支承の引張剛性を一律に $0.3R_D$ とするのではなく、地震応答を考慮に入れて設計すべきである。

今回の解析では、積層ゴムに最大約 2.5mm、単層ゴムでは最大約 5.0mm の浮き上がりが生じており、単層ゴムでは積層ゴムに比べて支承の浮き上がり量は 2 倍になっている。しかし、浮き上がり量は非常に小さいので浮き上がりによるすべり面や橋脚に与える影響は小さい可能性もある。これらのことより支承の浮き上がりが高架橋に地震応答に与える影響が少なければ水平荷重分散装置部分の鉛直剛性を低く設定することによって幅広い支承の設計が可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究では支承の鉛直挙動の要因と水平荷重分散装置の鉛直剛性を変えたときの地震応答解析による基礎的研究を行った。ある特定の入力地震波のみでしか確認しておらず、今後のさらなる検討が必要で

あるが、本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 支承の浮き上がりは橋脚の地震応答変位量に依存するのではなく、固有周期が大きく影響している。

(2) 支承の設計引張耐力を一律に設定するのではなく、支承の鉛直剛性と地震応答を考えて設計すべきである。

参考文献

- 1) 足立幸郎, 鈴木威, 長澤光弥, 西森考三:機能分離支承を用いた橋梁の支承鉛直反力の変動検討, 第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 297-300, 2002.
- 2) 株式会社アーク情報システム: TDAPⅢ, Ver2.11, 理論説明書, 2002.
- 3) 震災予防協会: 強震動アレー観測, No. 3, 1998.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計編, 2002.

(2003.9.11 受付)

EFFECT OF VERTICAL STIFFNESS OF SEISMIC ISOLATOR ON EARTHQUAKE RESPONSE OF BRIDGES

Hiroshi KAWARABAYASHI and Kazuyuki IZUNO

The verification of vertical response of girders is important especially for the seismic isolated bridges with sliding bearings, because the friction damping is not expected during the girder floats up from the sliding bearing. The characteristics of the bridge pier and the vertical stiffness of the seismic isolator might affect on the seismic response of the girder. This paper studied the floating of the girder during huge earthquakes through the numerical simulations. The results showed that the vertical capacity of the sliding bearing should be determined from the earthquake response analysis.