

# 低摩擦型シングル球面すべり支承の動的挙動に関する研究

勝目 進之介<sup>1</sup>・藤倉 修一<sup>2</sup>・大藪 宏文<sup>3</sup>・Visal THAY<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: mc226286@s.utsunomiya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 宇都宮大学教授 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科

(〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: shuichi.fujikura@cc.utsunomiya-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 宇都宮大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: h.oyabu@civitec.co.jp

<sup>4</sup>正会員 宇都宮大学助教 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科

(〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: vthay@cc.utsunomiya-u.ac.jp

本研究で対象としたシングル球面すべり支承は、凹型球面上をスライダが摩擦の影響を受けながら滑る免震支承であるが、その摩擦特性が動的挙動に与える影響は大きい。また、球面すべり支承は速度・温度・面圧依存性を有しているが、摩擦係数の大きさによって、これらの摩擦特性が異なる。動的挙動を把握するためには、すべり面の摩擦係数の違いによる振動応答特性を明らかにし、さらに、それぞれの摩擦特性を適切に評価する必要がある。そこで、本研究では摩擦係数の異なる2種類のスライダを用いて振動台実験を行った。その結果、低摩擦型は中摩擦型の摩擦係数の概ね1/2となり、相対変位は大きくなった。さらに、摩擦係数の各種依存性を考慮した再現解析を行い、特に速度依存性を考慮することで、実験結果を比較的精度良く再現することができた。

**Key Words:** *spherical sliding bearing, shaking table test, friction coefficient, nonlinear dynamic analysis, velocity dependency*

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、多くの橋梁に被害が生じ、支承、特に鋼製支承において破損や損傷が確認された。この地震によって、免震という考えが広まり、免震支承が広く使われるようになった。免震とは、地震動によって生じる上部構造の慣性力を低減するものであり、その機能を持たせた支承が免震支承である。現在、我が国では、一般的に、免震支承として積層ゴム系支承が用いられている。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震において、経年劣化や地盤変状等の要因も重なり、積層ゴム系支承に破断や亀裂等の被害が生じている<sup>1)</sup>。これらを背景として、積層ゴム系支承だけでなく、異なるタイプの免震支承の開発も進める必要があり、本研究では新たな免震支承として、我が国の橋梁で

は一般的に使用されていない球面すべり支承に着目する。

球面すべり支承は、凹型球面を有するコンケイブプレートにスライダが滑る可動式の免震支承であり、摩擦による減衰機能と振り子運動による復元機能を有している。また、固有周期は上載荷重の影響を受けず、コンケイブプレートの球面半径のみで決まり、積層ゴム系支承に比べ、支承の構造高や平面寸法を小さくすることが可能である<sup>2)</sup>。

これまでに、球面すべり支承の地震時挙動を把握するために、実験的検討として、藤倉らは、ダブル球面すべり支承に対して静的正負交番荷重実験を行い、支承の復元力特性は、バイリニア型の力学モデルであることを確認した<sup>3)</sup>。大藪らはシングル球面すべり支承を用いた振動台実験を行い、コンケイブプレートの上下位置によって下部構造に及ぼす影響を明



表-2 地震波形

地震波 (方向成分)	地震名 (発生年)	振幅倍率 (PGA)
JMA 西原村小森 (EW)	熊本地震 (2016年)	14% ( $1.1\text{m/s}^2$ )

400mm) を設置し、これらを振動台にボルトで固定した。加振方向については、試験体の長手方向を橋軸方向として、この方向に加振した。入力波は、正弦波および地震波である。正弦波には、周波数1.0Hz、加速度振幅 $1.0\text{m/s}^2$ とし、地震波にはレベル2のタイプ2地震として、表-2に示す地震波を用いた。なお、振動台や試験体の性能を考慮し、地震波の振幅倍率を決めた。計測項目は、図-2に示すよう上部構造加速度 ( $a_A, a_B$ )、変位 ( $d_A, d_B$ ) および振動台加速度 ( $a_T$ )、変位 ( $d_T$ ) である。加速度については加速度計を用いて測定し、上部構造および振動台の変位についてはレーザー変位計を用いた。

#### 4. 実験結果

##### (1) 履歴曲線

図-3に各球面半径における荷重と変位に関する履歴曲線を示す。図-3の(a)~(c)は、それぞれ球面半径500mm, 1000mm, 2500mmの結果である。赤線は低摩擦型、青線は中摩擦型の実験結果を示しており、加速度振幅が定常状態に達してから3サイクル程度を示している。横軸の変位は2箇所計測した上部構造の変位 ( $d_A, d_B$ ) の平均から振動台の変位 ( $d_T$ ) を差し引いた相対変位である。縦軸の  $F/W$  は、上部構造重量に対する水平荷重の比で摩擦係数に相当し、上部構造加速度に上部構造質量  $M=1750\text{kg}$  を乗じて求めた水平力  $F$  を上部構造重量  $W=17.2\text{kN}$  で除した値となる。ここで摩擦係数は、相対変位が0の時に履歴曲線のy切片から求めることができる。中摩擦型では、約0.080、低摩擦型では約0.040であり、低摩擦型は中摩擦型の概ね1/2程度となった。また、低摩擦型の方が中摩擦型より低い荷重で滑り出すことから、相対変位が大きく、横に長い形状となる。

##### (2) 球面半径による応答への影響

各球面半径における加速度応答および変位応答について共振曲線から考察する。1自由度系の正弦波地動による共振曲線を図-4に示す。図-4の(a)は低摩擦型、(b)は中摩擦型の結果である。縦軸は動的応答倍率であり、振動台加速度 ( $a_t$ ) に対する上部構造加速度 ( $a_{ave}$ ) の比であるが、振動台変位 ( $d_t$ ) に対する

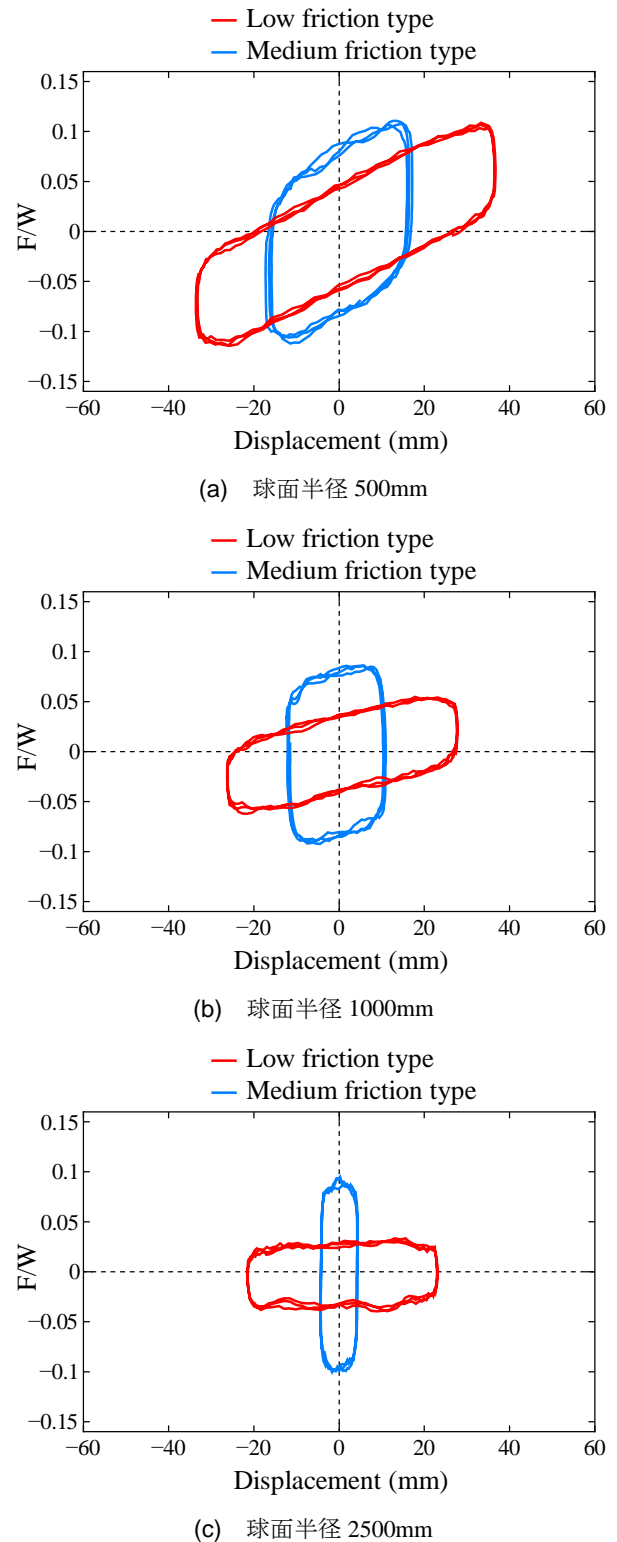
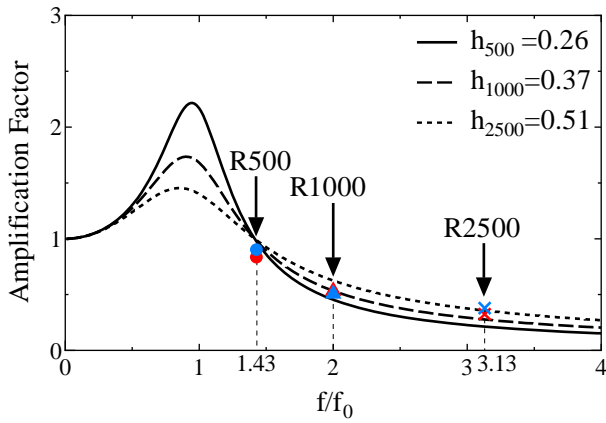
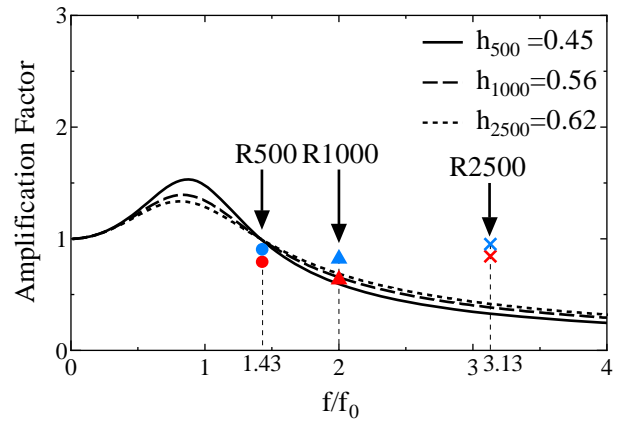


図-3 各球面半径の履歴曲線

上部構造変位 ( $d_{ave}$ ) と等価である。つまり、振動台の加速度または変位に対する、上部構造の応答倍率を示している。なお、( $a_{ave}$ ) および ( $d_{ave}$ ) は、それぞれ2箇所計測した上部構造加速度 ( $a_A, a_B$ ) および変位 ( $d_A, d_B$ ) の平均である。横軸は、各支承の固有振動数  $f_0$  に対する加振振動数  $f$  の比を示しており、 $f/f_0$  が大きくなることは、長周期化することを



(a) 低摩擦型



(b) 中摩擦型

図-4 共振曲線

意味している。ここで、共振曲線の式を以下に示す。

$$\frac{a_{ave}}{a_t} = \frac{d_{ave}}{d_t} = \frac{2h(f/f_0)^3}{1 - (1 - 4h^2)(f/f_0)^2} \quad (1)$$

ここで、 $h$  は減衰定数であり、式(1)より共振曲線は減衰定数によって与えられる。なお、減衰定数  $h$  は各支承における実験結果の履歴曲線から求めた等価減衰定数を用い、それぞれ球面半径に対する結果を図-4中に示す。図-4に示すように、共振曲線は固有振動数と加振振動数が近い  $f/f_0$  が 1 付近の時、動的応答倍率が最大値を取り、この状態が共振である。また、 $f/f_0$  が大きくなると動的応答倍率は小さくなることから、長周期化すると応答倍率は 1 を下回り、応答値は増幅されない。この共振曲線に対して、各球面半径における実験結果の  $a_{ave}/a_t$  を赤いマーカー、 $d_{ave}/d_t$  を青いマーカーで示す。(a)に示す低摩擦型では、実験結果の動的応答倍率と共振曲線は概ね一致している。球面半径が大きくなると固有周期が大きくなり、共振を避けるため、振動台から伝わる加速度および変位は低減される。また、(b)に示す中摩擦型では、球面半径 500mm および 1000mm では、実験結果はある程度共振曲線に近いが、球面半径 2500mm においては、動的応答倍率は実験結果のほうが共振曲線よりも大きい。これは、図-3(c)に示すように、中摩擦型の球面半径 2500mm においては摩擦係数の影響を受けて上部構造がそれほど撓動せず、免震層での変位が小さかったためであると考えられる。

## 5. 数値解析

### (1) 解析モデル

本研究で用いた解析モデルを図-5に示す。解析モデルは、橋脚～支承～上部構造からなる 1 支承モデルを用いた。鋼管柱の基部は振動台に固定されているため剛結とし、上部構造には、上部構造の全体重

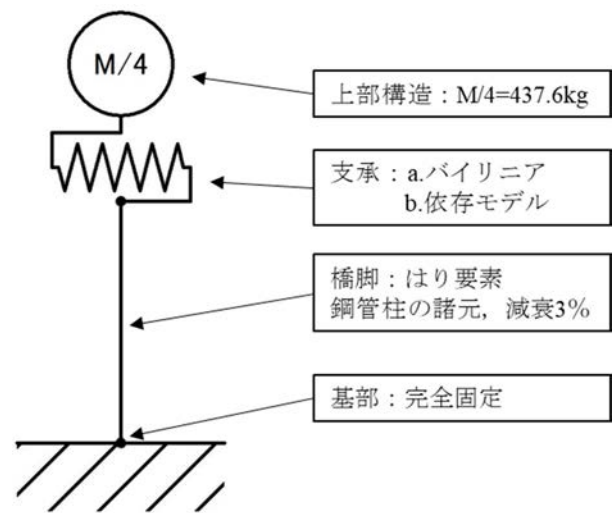


図-5 解析モデル

量の 1/4 である 437.6kg を集中質量として与えた。鋼製橋脚は線形はり要素を用い、要素特性値には鋼管柱の諸元を与え、減衰定数を 0.03 とした。支承部には、鉛直方向に線形バネ要素、水平方向に非線形バネ要素を用いた。

### (2) 球面すべり支承のモデル化

球面すべり支承の力学特性は剛塑性型であることから、摩擦係数を一定とした場合、解析において、非線形特性をバイリニアの剛塑性型でモデル化することが可能である。しかし、すべり系支承は、摩擦係数の速度・温度・面圧依存性を有しており、さらに、中摩擦型と低摩擦型とではそれらが異なる。そこで、本研究では、中摩擦型と低摩擦型の各種依存性を考慮した材料非線形モデルを用いた。中摩擦型は、高橋ら<sup>9)</sup>が用いたモデルを参考に解析を行い、低摩擦型については、新たに低摩擦型の各種依存性を考慮したモデルを作成した。振動台実験に用いた低摩擦型

および中摩擦型の支承の滑り材およびコンケイブプレートは既往の研究<sup>2,8)</sup>の依存性確認実験に用いられたものと同様であるため、摩擦係数の評価式については、それらの研究から求めた式を基に、基準摩擦係数 $\mu_0$ に対して、速度依存係数 $\alpha$ 、温度依存係数 $\beta$ 、面圧依存性 $\gamma$ を乗じる形とした。本研究で用いるシングル球面すべり支承の摩擦係数の速度・面圧・温度依存性を式(2)に示す。

$$\mu(v, t, \sigma) = \mu_0 \alpha \beta \gamma \quad (2)$$

ここで、低摩擦型の速度依存係数 $\alpha$ 、温度依存係数 $\beta$ 、面圧依存性 $\gamma$ は、それぞれ以下の式で表す。

$$\alpha = 1.03 - 0.55e^{-0.015v} \quad (3)$$

$$\beta = 1 \quad (4)$$

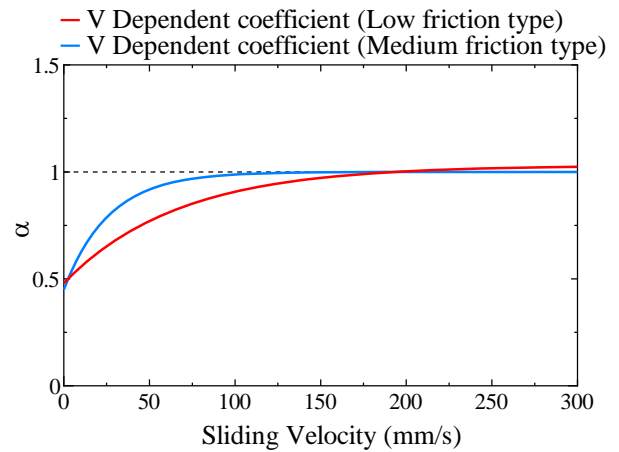
$$\gamma = 11.57\sigma^{-0.58} \quad (5)$$

ここで、基準摩擦係数 $\mu_0$ は、履歴曲線の実験結果から、低摩擦型で0.020、中摩擦型で0.070とした。また、式(3)~(5)に示す本解析で用いた低摩擦型の各種依存性および中摩擦型の各種依存性<sup>8)</sup>による摩擦係数への影響を図-6に比較して示す。本研究では、姫野<sup>9)</sup>や高橋<sup>10)</sup>の研究を参考に、速度依存係数の指数関数の項については $e$ を用いて表されるように、面圧依存係数については指数関数の項のみで表されるように、既往の研究<sup>2,8)</sup>の式に修正を加えた。また、温度依存性を考慮する場合、実験時の平均室温である30°Cを用いた。摺動時の摩擦熱については、摺動前後にコンケイブプレートの表面温度を測定したところ、温度上昇はほとんど確認されなかったため、本研究では、摩擦熱による摩擦係数の変化は考慮していない。本解析のモデルでは、支承部の軸力は変化せず、面圧 $\sigma = 13.6\text{MPa}$ 一定として、摩擦係数の速度依存性のみを考慮したモデル（以下、速度依存モデルと呼ぶ）を用いた。このモデルと速度依存性を考慮しないバイリニアモデルの2つのモデルで比較検討を行う。なお、バイリニアモデルの摩擦係数を、実験条件および履歴曲線の実験結果から低摩擦型では0.050、中摩擦型では0.075とした。

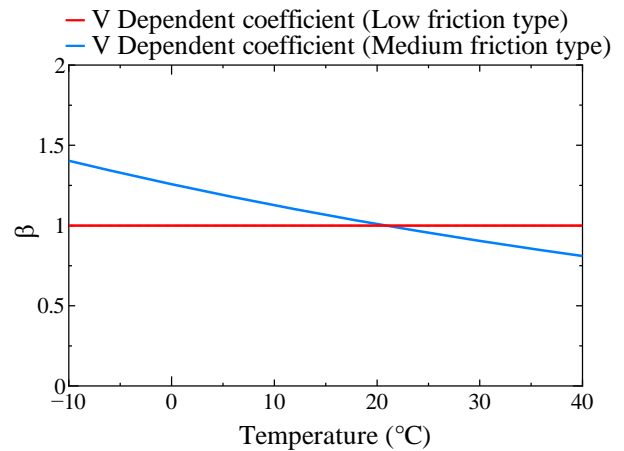
### (3) 解析方法

本研究の解析では、非線形時刻歴応答解析プログラムTDAPⅢを用いた。数値積分法はNewmark $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用いて、積分時間間隔は0.0002秒とした。減衰にはひずみエネルギー比例減衰を用い、橋脚には粘性減衰を考慮したが、支承には粘性減衰を考慮せずに履歴減衰のみを考慮した。解析で入力した加速度には、実験時に振動台で計測した値を用いた。

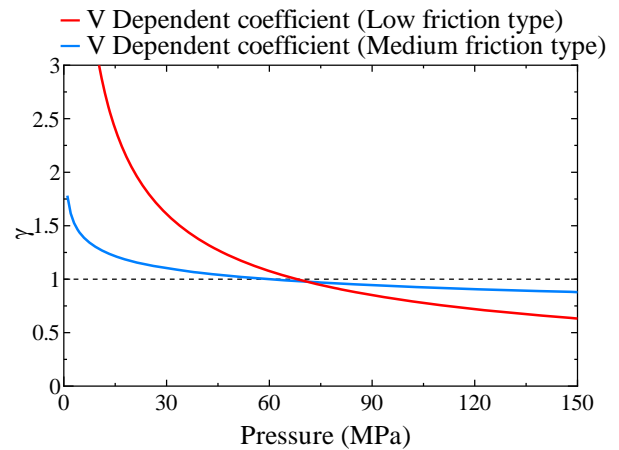
## 6. 解析結果および考察



(a) 速度依存性



(b) 温度依存性



(c) 面圧依存性

図-6 摩擦係数の各種依存性

### (1) 正弦波 (1.0Hz, 1.0m/s<sup>2</sup>)

正弦波加振による履歴曲線について、実験結果と解析結果の比較を図-7に示す。図-7の(a)は低摩擦型、(b)は中摩擦型の結果を示し、黒線は実験結果、青線は速度依存モデル、赤線はバイリニアモデルの解析結果である。また、加速度振幅が定常状態に達してから3サイクル程度を示している。低摩擦型、中摩

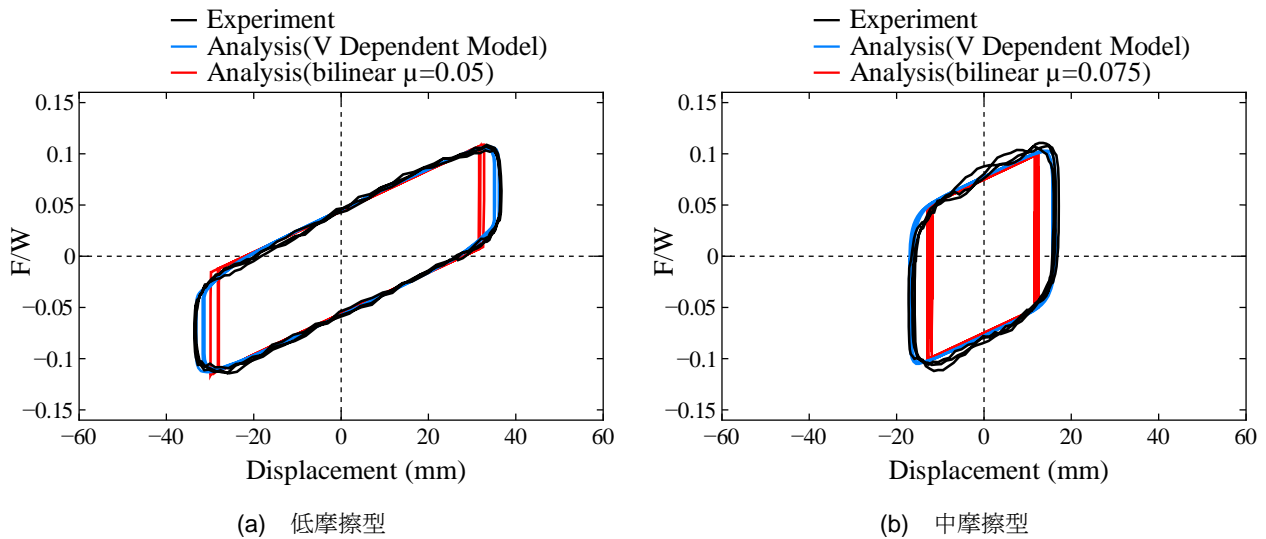


図-7 支承部の履歴曲線（正弦波）

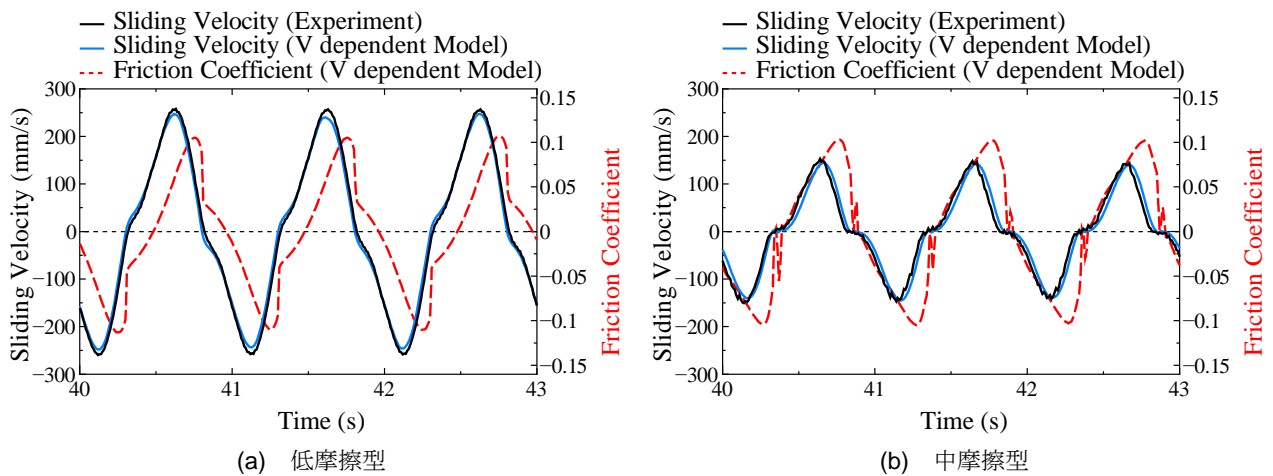


図-8 速度および摩擦係数の時刻歴応答

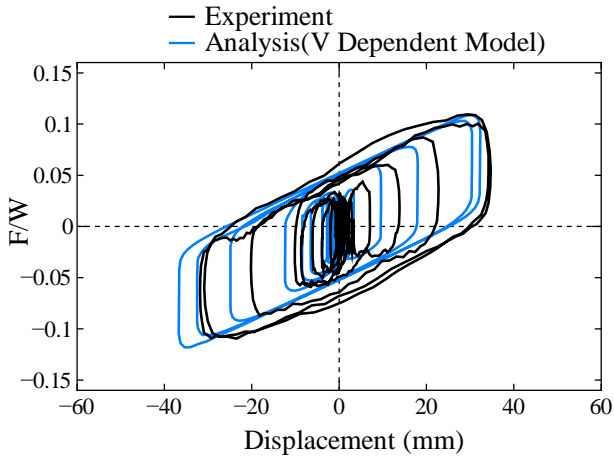
擦型ともに、速度依存モデルの履歴曲線は丸みを帯びており、実験結果の履歴曲線とよく一致している。それに対し、バイリニアモデルでは、載荷時の剛性は合っているものの、相対変位は実験結果よりも小さい。図-6(a)に示すように、中摩擦型では100mm/s、低摩擦型では200mm/s程度以下で、摩擦係数は1から0.5倍まで変化する。そのため、速度によらず摩擦係数が一定としたバイリニアモデルでは、低速度で摺動しても、摩擦係数が大きく評価され、相対変位が小さくなったと考えられる。

支承部の相対速度の時刻歴応答について、実験結果および速度依存モデルによる解析結果の比較を図-8に示す。さらに、図-8には、速度依存モデルによる摩擦係数の時刻歴応答を右側の縦軸に示す。実験結果と速度依存モデルの相対速度はほぼ一致している。また、最大速度については、低摩擦型で約245mm/s、中摩擦型で約150mm/sとなり、このときの摩擦係数を式(2)から算定すると、低摩擦型で約

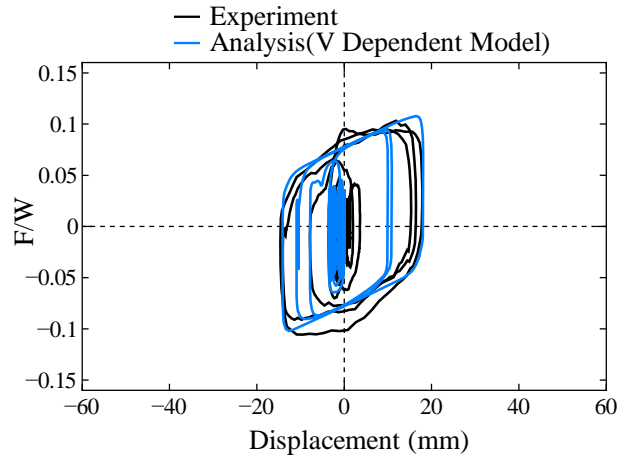
0.052、中摩擦型で約0.078となる。これは、図-7に示すy切片の摩擦係数とほぼ一致している。

## (2) 地震波（JMA 西原村小森）

地震波加振による履歴曲線について、実験結果と速度依存モデルによる解析結果の比較を図-9に、速度依存モデルとバイリニアモデルによる解析結果の比較を図-10に示す。図-9から、速度依存モデルの履歴曲線は低摩擦型、中摩擦型ともに、実験結果の変位振幅は概ね再現できている。また、実験結果と速度依存モデルの履歴曲線では、特に変位が小さい範囲においては、履歴曲線が小さく、小さい摩擦係数で振幅している部分が確認できる。これは、図-6(a)に示したように、低速度で滑ると摩擦係数は小さくなるためである。一方、図-10に示すように、摩擦係数の速度依存性を考慮しないバイリニアモデルでは、低速度でも摩擦係数は変化しないため、変位が小さい範囲においても、実験での履歴曲線よりも大きい。免震層の相対変位時刻歴応答を図-11に示す。低摩擦

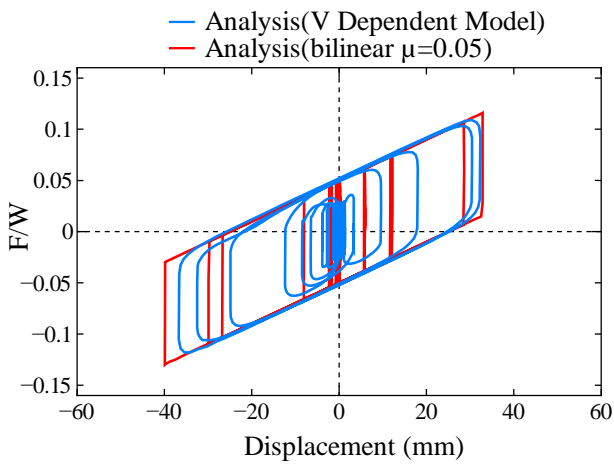


(a) 低摩擦型

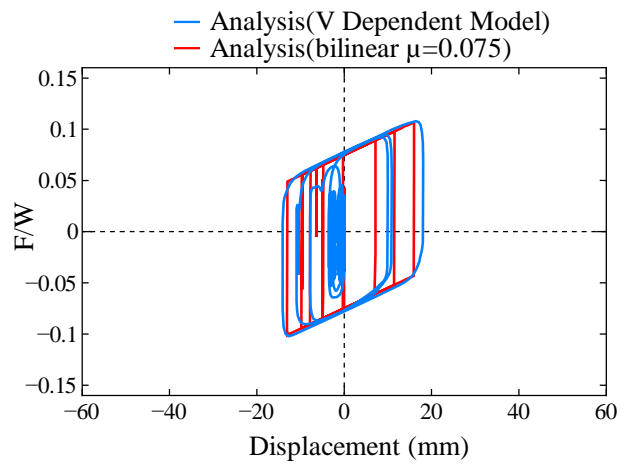


(b) 中摩擦型

図-9 実験結果と速度依存モデルの履歴曲線の比較 (JMA 西原村小森)

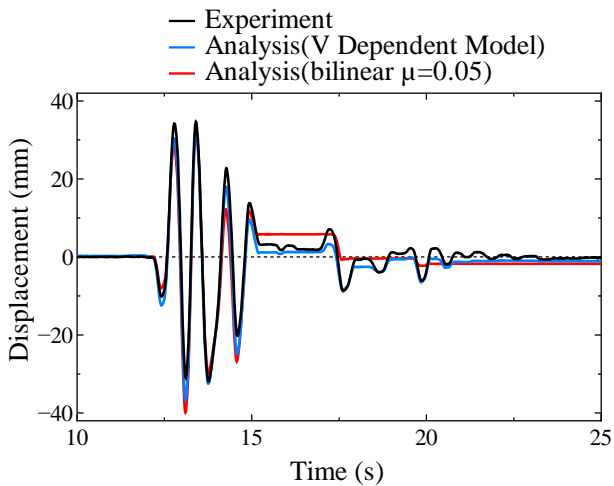


(a) 低摩擦型

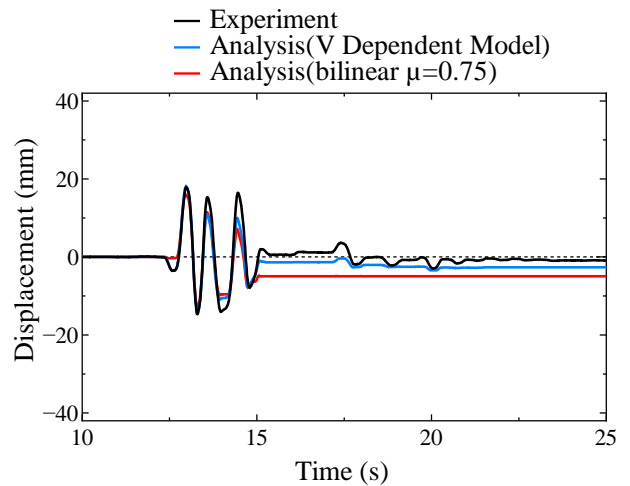


(b) 中摩擦型

図-10 速度依存モデルとバイリニアモデルの履歴曲線の比較 (JMA 西原村小森)



(a) 低摩擦型



(b) 中摩擦型

図-11 免震層の相対変位時刻歴応答 (JMA 西原村小森)

型、中摩擦型ともに、速度依存モデルは実験結果の変位応答を比較的よく再現できている。また、バイリニアモデルでも概ね変位挙動は再現できている

ものの、特に中摩擦型においては、図-11(b)に示すように、地震動の収束に伴い、実験では残留変位がほぼ生じていないが、バイリニアモデルによる解析結

果では 5mm 程度の残留変位が生じている。これは、摩擦の影響によって、相対速度が小さくなると滑りが生じなくなるためである。

## 7. 結論

本研究では、シングル球面すべり支承の動的挙動を明らかにするために、摩擦係数の違いに着目して、低摩擦型と中摩擦型の 2 種類の球面すべり支承を用いて、振動台による加振実験を行った。さらに、シングル球面すべり支承の速度依存性を考慮した再現解析を行った。本研究で得られた結果および知見は以下ようになる。

1. 摩擦係数は低摩擦型で約 0.040、中摩擦型で約 0.080 程度となり、低摩擦型は中摩擦型のおおよそ 1/2 程度であった。また、低摩擦型の方が低い荷重で滑り出すことから相対変位が大きく、履歴曲線は細長い形状となる。
2. 加振振動数 1Hz および加速度振幅  $1.0\text{m/s}^2$  で加振した結果、低摩擦型は、球面半径が大きくなると共振振動数から離れるため、応答値は小さくなる。一方、中摩擦型では、摩擦の影響を受け、同様の結果は確認できなかった。
3. 振動台実験の再現解析において、速度依存性を考慮しないバイリニアモデルでは変位応答を小さめに評価したが、摩擦係数の速度依存性を考慮することで実験結果を比較的精度良く再現できた。特に、低速度で滑る場合、摩擦係数は小さくなるので、変位応答は大きくなる傾向であった。

**謝辞**：本研究は、(株) 高速道路総合技術研究所、宇都宮大学、日鉄エンジニアリング (株) 及び (一社) 日本支承協会の共同研究の一環として実施したものである。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

## REFERENCES

- 1) 藤倉修一, 川島一彦: 2016 年熊本地震による道路橋の

被害概要, 第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-168, 2016.

- 2) 中村秀司, 西本晃治, 富本淳: 球面すべり支承 NS-SSB® の開発～高面圧で周期のばらつきが小さい免震支承～, 新日鉄住金エンジニアリング技報 Vol.6, pp.28-35, 新日鉄住金エンジニアリング株式会社, 2015.
- 3) 藤倉修一, 菊地真紀, Nguyen Minh Hai, 武田龍國, 中島章典: 静的正負交番載荷実験によるダブル球面すべり支承の復元力特性, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 283-292, 2018.3.
- 4) 大藪宏文, 藤倉修一, 高橋健太郎, Nguyen Minh Hai, 中島章典: 下部構造への影響に着目したシングル球面すべり支承を有する橋梁模型の振動台実験, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 77, No.4, I\_414-I\_423, 2021.7.
- 5) 高橋健太郎, 藤倉修一, 大藪宏文, Nguyen Minh Hai: 摩擦係数の速度・面圧依存性に着目したシングル球面すべり支承の振動台実験再現解析, 第41回地震工学研究発表会, C15-2290, 2021.9.
- 6) 藤倉修一, Nguyen Minh Hai, 竹内小織, 中島章典: ダブル球面すべり支承で支持された橋梁桁の活荷重用時挙動に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 178-187, 2019.3.
- 7) 大藪宏文, 藤倉修一, 前鶴菜摘, Nguyen Minh Hai, 中島章典: シングル球面すべり支承で支持された橋梁の活荷重時挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 274-282, 2020.3.
- 8) 新日鉄住金エンジニアリング株式会社: 球面すべり支承NS-SSB®低摩擦タイプ, 住金エンジニアリング技報Vol.9, pp.66-68, 2018.
- 9) 姫野岳彦, 運上茂樹: 支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, 2003.6.
- 10) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和: 各種依存性を考慮したすべり型免震支承の数値モデルに関する一考察, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 701-708, 2005.8.

## A STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF LOW FRICTION TYPE SPHERICAL SLIDING BEARING

Shinnosuke KATSUME, Shuichi FUJIKURA, Hirofumi OYOYABU and Visal THAY

The single spherical sliding bearing in this study is a seismic isolation bearing in which a slider slides on a concave sphere under the influence of friction, and the friction has a significant impact on the dynamic behavior. The spherical sliding bearing has velocity, temperature, and surface pressure dependence, but these frictional characteristics differ between low-friction and medium-friction types. In order to understand

the dynamic behavior, it is necessary to clarify the vibration response due to the difference in the friction coefficient of the sliding surface, and furthermore, it is necessary to evaluate each friction characteristic appropriately and take them into account in the dynamic analysis. In this study, shaking table experiments were conducted using two types of sliders with different friction coefficients, and a replicated analysis was conducted considering the dependence of the friction coefficients on each type of slider. As a result, it was confirmed that the acceleration and displacement responses were smaller for the low-friction type. The experimental results were reproduced with high accuracy by taking into the velocity dependence.