# 反重力すべり支承等の非線形履歴 における解析安定性に関する一考察

佐藤知明1・宇野裕恵2・五十嵐晃3・松田泰治4・足立幸郎5・八ツ元仁6・篠原聖二7

<sup>1</sup>正会員 JIPテクノサイエンス株式会社 システム技術研究所 研究員 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島2-12-11) E-mail: tomoaki\_sato@cm.jip-ts.co.jp

<sup>2</sup>正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 技師長 (〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町4-6-7 本町スクウェアビル9階) E-mail: h.uno@oiles.co.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学防災研究所 教授(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄) E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 社会環境工学専攻 教授(〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1) E-mail: mazda@kumamoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 保全交通部 保全企画課 課長(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3) E-mail: yukio-adachi@hanshin-exp.co.jp

<sup>6</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室 主任(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3) E-mail: hitoshi-yatsumoto@hanshin-exp.co.jp

<sup>7</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室 主任(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3) E-mail: masatsugu-shinohara@hanshin-exp.co.jp

非線形履歴特性を有する振動系では、入力波形のデータ設定や積分時間間隔により応答が異なることが ある.反重力すべり支承は平面すべり面と斜めすべり面で構成されたすべり支承であり、特に強い非線形 履歴特性を有する.そこで、本論文では反重力すべり支承のほか、代表的な支承形式を含めて、正弦波変 位による調和入力および実地震波形を用いた時刻歴応答解析を実施し、差異を確認した. 検討の結果、同じ周期と振幅が繰り返される調和入力では、積分時間間隔を適正に設定しなければ解析 が収束しにくいことがあることがわかった.しかし、実地震波形を入力する場合には、積分時間間隔を一 般的に行われている 2/1000 秒とすれば非線形の大きい履歴を用いた場合でも、解析結果の差異が小さく、

弾性ばねを用いた場合にはほとんど生じないことを確認した.

*Key Words : uplifting slide shoe, time increment, analytic stability, harmonious wave, seimic wave, non-linear time history analysis* 

# 1. まえがき

反重力すべり支承(Uplifting Slide Shoe:以下,UPSS) は平面すべり面と斜めすべり面で構成されたすべり支承 であり、斜めすべりにより復元力が発現される.この復 元力は位置エネルギーに起因するものであり、履歴形状 の基本骨格は斜面角度により一義的に決定される.一方, すべり面における摩擦係数は小さいものの不安定な挙動 も想定され、すべり面が切り替わる際には衝撃力が発生 するなど、解析が不安定になることがある.

そこで、本論文では UPSS に加えて、線形履歴を有す る分散ゴム支承<sup>1)</sup>、非線形履歴を有する免震支承<sup>1)</sup>、すべ り支承<sup>1)</sup>、反重力すべり支承<sup>2,3)</sup> および制震ダンパー<sup>4)</sup> を 対象に、正弦波変位による調和入力および地震波形を入 力し、積分時間間隔の違いに着目して、解析結果への影 響を検討した.



表-1 分散ゴム支承と免震支承の設定

	鉛プラグ			水平ばね		
	形状	面積比率	降伏荷重	1次剛性	2次剛性	
	本一mm	%	kΝ	kN/m	kN/m	
分散ゴム支承	□1620×1620×240(5層-48mm)					
		-	-	13,122	0	
免震支承	□1990×1990×240(5層-48mm)					
	5-φ 329	12	3,544	131,585	13,158	

表-3 反重力すべり支承の設定

	斜面角度 $ heta$	"佐 明	すべり面	
		迎间	圧縮ばね	摩擦係数
	度	mm	kN/m	-
	5		4,719,700	0.05
反重力すべり支承	10	30		
	15			

# 表-2 すべり支承の設定 摩擦係数 f すべり支承 0.02 0.05 0.1

<b>表-4</b> 制震	制震ダンパーの設定						
	速度指数 n						
制震ダンパー	0.1	0.3	1.0				



図-4 反重力すべり支承のばね

# べり面および両側に斜めすべり面を有するすべり 支承とする力学モデルを設定する.

⑤ 制震ダンパーの抵抗力は式(1)で求められ、50 kine
 時の抵抗力が摩擦係数 0.10 のすべり支承の摩擦力
 512 kN に一致する仕様とする.ここで、速度が 1 cm/sec 以下を線形とした<sup>6</sup>.

$$F(\mathbf{v}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{v}^n \tag{1}$$

v·读库(m/sec)

n:速度指数

# (2) 入力変位波形

本検討では,非線形履歴特性を有する振動系の動的 挙動を確認するために,つぎの2つ波形を入力した. ① 正弦波変位

# 2. 解析条件

## (1) 検討対象モデル

検討対象モデルは、図-1 に示す PC12 径間連続箱桁橋 <sup>5)</sup>を想定し、下部構造 1 基を図-2 に示す 1 質点(W = 5,122 kN) ばねモデルとした.図-3 に示すそれぞれの支 承部は、以下の考えに基づき表-1 ~表-4 のように設定 した.

- ①分散ゴム支承は既往文献<sup>5</sup>に同一とする.
- ② 免震支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承とし、二次 剛性を分散ゴム支承のばねに合わせて、大変形域 での等価剛性を分散ゴム支承に漸近させる。
- ③ すべり支承は, 摩擦係数 0.1 以下の低摩擦を対象と する.
- ④ 反重力すべり支承には、左右それぞれ 30 mm の遊 間を設ける. 解析モデルは、図-4 のように平面す



図-5 入力変位の漸増を考慮した入力変位波形

#### ② 地震波形

道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>7</sup> には地震動の標 準加速度応答スペクトルとして、0.1 秒から 5 秒までを 対象周期として示されている.そこで、調和入力波形と して設定する正弦波の周期  $T_w$  には、一般的な橋梁構造 物を想定し $T_w=1.0$ 秒を対象とした.

さらに、実地震動による応答を把握するためレベル2 地震動<sup>®</sup>の地震波を入力した.入力波形は地震動特性に より2つのタイプに、さらに地盤特性値に基づき3つの 地盤種別に区分され、それぞれ3波ずつが提供されてお り、本検討ではそれぞれの1波目を用いた.

#### (3) 解析条件

道路橋の耐震解析に用いる地震波形データは,001 秒 刻みの離散データである.特殊な橋梁構造物を除くと, 積分時間間隔 $\Delta T$ は地震波形の時間刻みを 1/5 した $\Delta T =$ 2/1000 秒が多用されている.本検討でもこれを基本とす るが,1/10 した $\Delta T = 1/1000$ 秒での応答値を検証し,応 答結果に対して差異を確認する.

#### (4) 調和入力方法

本解析では,1 質点系モデルの基盤面に式(2)の正弦 波を強制変位として入力した.

$$Y(t) = \delta_{w} \cdot \sin \frac{2\pi}{T_{w}} \cdot t \tag{2}$$

ここに、Y(t):基盤面の入力変位(m)  $\delta_w$ :入力波の片振幅変位(m)  $T_w$ :入力波の周期(sec) t:時間(sec)

一般論として、静止状態の物体に対し入力開始より急激に設定変位を入力すると、過渡応答を引き起こすことがある。そこで、図-5に示すように入力変位を漸増させて、10秒後に所定の入力変位になるように設定した。



図-6 地震波形を 0.01 秒刻みで定義した場合

# 3. 正弦波の離散化データによる応答への影響

道路橋示方書<sup>7,8</sup>では,地震波形は 0.01 秒刻みの離散 データであり,地震動の標準加速度応答スペクトルは 0.1 秒から5 秒までの周期に対して示されている.

これまで筆者らは、これらの周期帯における正弦波を 作成し、各支承における共振現象の把握を検討した<sup>9~11)</sup>. この検討において、短周期の正弦波の離散化によっては 想定と大きく異なる解析結果が得られることを確認した. この結果より、図-6 (a)-(c) は、すべり支承に対して 入力波の周期  $T_w$ =0.10 秒、0.15 秒および 0.20 秒の正弦波 を 0.01 秒刻みの離散データを与えた質点の応答変位であ る. 0.10 秒および 0.20 秒では安定した解が得られたが、 その 0.15 秒では応答変位が時間の経過にしたがい正側に シフトしていった. この原因として、入力波形の離散化



図-7 地震波形を 0.01 秒刻みで定義したときの正弦波



に問題があることがわかった.

すなわち,正弦波を 0.01 秒刻みの離散データで与える と、0.10 秒や 0.20 秒周期のように小数点以下第 2 位の数 値が偶数の場合には、1/2 サイクルの時刻において入力 変位 Y = 0 の強制変位量をもつ( $\square$ 印)が、0.15 秒周期 のように奇数の場合には、Y = 0 の値が定義されていな い( $\triangle - \triangle$ 印間).これを図示したものが図-7 であり、 図中青色が  $T_w = 0.10$  秒、赤線が  $T_w = 0.15$  秒の周期波であ る.これを解消すべく、Y = 0 の強制変位量が定義され るように離散データ間隔をさらに 1/2 して 0.005 秒刻みと したところ、図-8 のように安定した解が得られた.こ のような漸増中の正弦波の周期に起因する問題は短周期 のみで発生し、 $T_w = 0.5$  秒以上では問題とならないこと が確認できた.

## 4. 正弦波の調和入力による応答の安定性

調和入力に対する検討では、正弦波を定義する離散デ ータは、道路橋示方書の地震波のデータに準拠し、0.01 秒刻みで作成した.以下に各支承に対する結果を示す.

#### (1) 分散ゴム支承

図-9 に入力波の周期 1.0 秒に対する分散支承の最大および最小相対変位を示す.応答状態を区別するため,入



図-9 分散支承



**図-10** 免震支承

カ開始から漸増入力終了を過ぎた 20 秒までの漸増入力 区間と、応答が安定すると考えられる 40 秒から 50 秒ま でを定常応答区間と区分した.

この結果,分散ゴム支承のような線形ばねでは,積分時間間隔の違いによる差異はほとんど生じないことを確認した.

#### (2) 免震支承

免震支承に対して,周期 1.0 秒の正弦波を入力した検討結果を図-10 に示す.図-9 と同様に、支承の最大および最小相対変位を示しており、分散ゴム支承と同様に積分時間間隔による有意な差異は見られない.ただし、応答変位を詳細にみると、0.05%の差異が生じている.しかしながら、これらの誤差は非常に小さく、免震支承程度の非線形特性を有する履歴では積分時間間隔の違いによる応答への影響はほとんどないと考えられる.

#### (3) すべり支承

すべり支承を用いた検討結果を図-11 (a)-(c) に示す. すべり支承に明確に現れていないことから、免震支承と 同様に、応答相対変位を詳細に比較した.各摩擦係数に おいて発生した最大誤差は、免震支承よりは大きく発現 し、(a)摩擦係数 $f=0.02 \approx 0.22$ %, (b)摩擦係数f=0.05では2.03%, (c)摩擦係数 $f=0.10 \approx 0.16\%$ の誤差が漸



#### 増入力状態で最大誤差が生じていた.

これらの結果では積分時間間隔の違いによる応答変位 の差異は小さく、また、摩擦係数と最大誤差とに明確な 関係は特に見られなかった.

#### (4) 反重力すべり支承(UPSS)

反重力すべり支承を用いた検討結果を図-12(a)-(c) に示す.すべり支承と同様に,詳細に評価するため応答 相対変位で比較する. 各斜面角度において生じた最大誤 差は, (a) 斜面角度  $\theta$ =5 度で 0.01 %, (b)  $\theta$ =10 度で 0.07 %, (c)  $\theta$ =15 度で 0.48 % の最大誤差が定常応答状 態で生じている.

このように、非線形特性が強い反重力すべり支承においても、他の支承と同様に大きな誤差が発生しないことが確認できた.



図-15 地震波入力による相対変位の誤差

#### (5) 制震ダンパー

制震ダンパーを用いた検討結果を図-13 (a)-(c) に示 す.3 種類の制震ダンパーのうち、もっとも非線形性が 強い (a) 速度指数 n=0.1 では、この程度の時間刻みでは 差異がやや大きい、一方、(b) n=0.3 の結果では差異は 小さく確認されず、また、(c) n=1.0 では速度と抵抗力 の関係が線形であることから、誤差が生じなかったもの と考えられる.

#### 5. 地震波入力による応答の安定性

2章(2) ②で示したレベル2地震動のタイプ I および タイプ II それぞれ3つの地震波形を用いて、各支承に対 する地震応答解析を実施した.地震波形の入力は基盤へ の強制変位ではなく、質点への加速度入力である.積分 時間間隔 $\Delta T$  は正弦波での検討と同様に、地震波形の時 間刻み0.01 秒を1/5 する $\Delta T = 2/1000$  秒ならびに1/10 する  $\Delta T = 1/1000$  秒とし、それぞれの時刻歴応答結果から最 大および最小応答相対変位を抽出し、時間刻みによる差 異に着目した.

図-15 にタイプ I およびタイプ II それぞれの各地震波 形による最大差異を示す. もっとも大きな差異はタイプ II 地震動に対する反重力すべり支承で発現しており,斜 面角度 θ = 15 度で 0.2 %程度と非常に小さなものであっ た. 反重力すべり支承に対する調和入力では最大 0.48 % の差異が生じていたのに対し,地震波の入力では 1/2 程 度に低減した. これは地震波には,短周期から長周期ま での成分が広範囲にわたって含まれ,正弦波のような特定の周期での繰り返し波形成分を有さないためであると考えられる.また、タイプIIの地震波による応答差異はタイプIより大きく、これはタイプII地震動では直下型地震であることで、入力周期1.0秒では応答が大きくなることに起因していると考えられる.ただし、分散ゴム支承では全ての地震波での差異はほとんど無いものの、 非線形性の履歴特性を有する場合には、地震波によって差異が現れやすいことがわかった.

これらのことから、0.01 秒刻みで定義された実際の地 震波形に対する検討では、地震波形を 1/5 する $\Delta T = 2/1000$ 、もしくは 1/10 する 1/1000 秒を用いれば、応答値 には積分時間間隔に起因する差異は生じないものと考え られる.

#### 6. まとめ

本論文では、反重力すべり支承に加えて、線形である 分散ゴム支承、非線形挙動を示す免震支承、すべり支承、 反重力すべり支承および制震ダンパーを対象に、正弦波 変位による調和入力および地震波形を入力し、積分時間 間隔の違いによる応答への影響を明らかにした.以上の 結果を以下まとめる.

- 正弦波による調和入力波形を作成する場合,短周期の入力周期において,離散データの時間間隔によって,応答に影響することを例示した.
- 2) 調和入力では、分散支承・免震支承・すべり支承は、

積分時間間隔 2/1000 秒と 1/1000 秒の違いによる応答 への影響はわずかであるのに対し,反重力すべり支 承では最大 0.48%の差異が生じた.ただし、制震ダ ンパーではやや大きい差異が生じた。

 地震波形を入力する場合では、いずれの地震波形で も ΔT = 2/1000 秒の積分時間間隔を用いれば解析結 果に問題が生じないことを確認した.

# 7. あとがき

本論文では、非線形履歴特性を有する振動系に調和入 力すした場合、応答変位に差異が現れることがあり、積 分時間間隔が影響していることを示した.一方、実橋の 耐震設計における動的解析に用いる地震波で検証したと ころ、このような現象は確認されなかった.これは、地 震波は調和入力のように同じ周期で同等の振幅が継続す ることはなく、時刻歴で変化する様々な周期と振幅を有 する波形の組み合わせであることによると考えられる. したがって、実設計においては積分時間間隔を 2/1000秒 とすることにより、解析精度を確保できると考えられる.

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋支承便覧, 2008.
- 佐藤知明,五十嵐晃,松田泰治,足立幸郎,宇野裕惠: 反重力すべり支承を用いた振動系における動的挙動時の エネルギー評価,土木学会論文集A1, Vol.68, No.4, pp. I \_660-I\_671, 2012.
- 3) 白石晴子,五十嵐晃,足立幸郎,宇野裕惠,加藤祥久,

佐藤知明: UPSS 支承と制震ダンパーの組合せ系による橋梁の地震応答の制御,土木学会論文集A1, Vol.68, No.4, pp. I\_672-I\_682, 2012.

- 4) 宇野裕惠・葛漢彬・野口陽平:粘性ダンパーの速度依存 性が橋の応答に及ぼす影響,第13回地震時保有水平耐力 法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム 講演論文集,2010.
- 5) 松田泰治, 宇野裕惠, 宮本宏一, 柚木浩一: 温度による 桁の伸縮を考慮した橋梁の応答評価に関する一考察, コ ンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1039-1044, 2008.
- 6) 篠田隆作,松田泰治,宇野裕惠,宮本宏一,柚木浩一: 抵抗力-速度の関係でモデル化した制震ダンパーの積分時間間隔と線形区間の範囲が応答に及ぼす影響評価,土木 学会西部支部研究発表会講演概要集,vol. 54, pp. 107-108(I-54), 2010.
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書·同解説V耐震設計編, 2012.
- 日本道路協会:道路橋の耐震設計における動的解析に用いる加速度波形,https://www.road.orjp/dl/tech.html,(参照2015.94).
- 9) 佐藤知明,五十嵐晃,松田泰治,足立幸郎,宇野裕 恵,北聖大:反重力すべり支承等を有する振動系の 共振現象,第34回地震工学研究発表会講演論文集, 原稿番号 680番, 2014.10.
- 10) 宇野裕惠,佐藤知明,五十嵐 晃,松田 泰治,足立 幸郎,八ツ元 仁:支承部の非線形に着目した調和入力に対する応答評価,第18回応用力学シンポジウム発表論文,2015.5.
- 11) 宇野裕惠,佐藤知明,五十嵐 晃,松田 泰治,足立 幸郎:分散ゴム支承,免震支承,すべり支承,反重力すべり支承の調和入力による応答,第70回土木学会年次講演概要集,I-130,2015.9.(投稿中)

(???受付)

# A STUDY ON ANALYSIS STABILITY IN THE VIBRATION SYSTEM WITH THE NONLINEAR HYSTERETIC CHARACTERISTICS OF UPSS ET AL.

# Tomoaki SATO, Hiroshige UNO, Akira IGARASHI, Taiji MAZDA, Yukio ADACHI, Hitoshi-YATSUMOTO and Masatsugu SHINOHARA

Vibration systems with non-linear bearings often show difference results by setting the data of input waves or time increment of analysis. The Uplifting Slide Shoe (UPSS) is composed of horizontal and inclined sur faces, and has a particularly strong non-linear hysteresis characteristic. So, in this paper, time history response analyses were carried out by using the harmonic input sine wave and real seismic waveform to UPSS and the other typical bearings

From the examination, it was found that the analyses were sometimes difficult to converge unless properly set the integration time interval. However, in the case of inputting the actual seismic waveforms,

it is confirmed that no problem arises in the analysis result with integration time interval equals 2/1000 seconds which is generally carried out.