

反重力すべり支承等を有する振動系の共振現象

佐藤 知明¹・五十嵐 晃²・松田 泰治³・足立 幸郎⁴・宇野 裕恵⁵・北 聖大⁶

¹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

²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

³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

⁴正会員 阪神高速道路株式会社 保全企画課長 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

E-mail: yukio-adachi@hanshin-exp.co.jp

⁵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

⁶学生会員 京都大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: kita.masahiro.73x@st.kyoto-u.ac.jp

支承を有する道路橋では支承の特性により、地震時に共振が生じ応答が増大することがある。本論文では、分散ゴム支承、免震支承および反重力すべり支承を対象に共振現象に着目して分析を行った。その結果、免震支承は二次剛性を分散ゴム支承に合わせることで共振周期および応答倍率は分散ゴム支承に大変形領域において一致する。小変形領域においては、免震支承のバイリニア履歴に基づく減衰性能により応答変位は一致しない。また、免震支承の共振周期は70%有効変位の等価剛性による固有周期とよく一致している。一方、反重力すべり支承の履歴は完全弾塑性履歴に類似するため二次剛性はほぼ零であり、共振周期は顕著に表れにくい。ただし、斜めすべり面との接触時には短周期応答が生じることになる。

Key Words : resonance, response period, Uplifting Slide Shoe, Lead Rubber Bearing, Non-linear time history analysis

1. まえがき

支承部にデバイスを有する振動系は動的外力に対して、それぞれのデバイスの履歴や減衰機能の特性に依存して共振する。そこで、本論文ではデバイスとして分散ゴム支承 (RB)、免震支承 (LRB) および反重力すべり支承 (UPSS)^{1)~4)}を対象に振動系の共振状態を把握する^{5),6)}。分散ゴム支承の履歴は線形ばねとして評価されているの

に対し、免震支承の履歴はバイリニアの非線形ばねとして定義されており、減衰性能が高いため、共振しにくいと考えられる。一方、反重力すべり支承の履歴は完全弾塑性型であり、斜めすべり状態では変位の増大に対して抵抗力の変化が小さく、長周期挙動を呈し極めて非線形性が高いことに特徴がある。

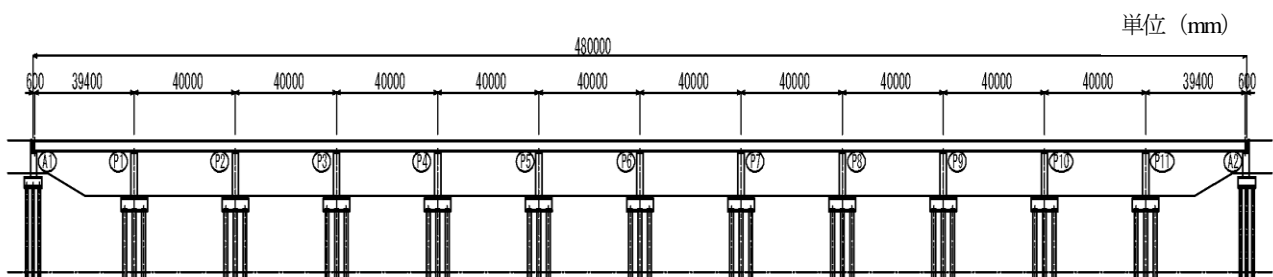


図-1 検討対象モデルの設定に用いたPC12径間連続桁

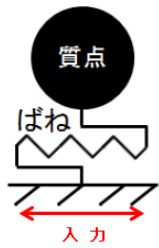


図-2 検討対象モデル

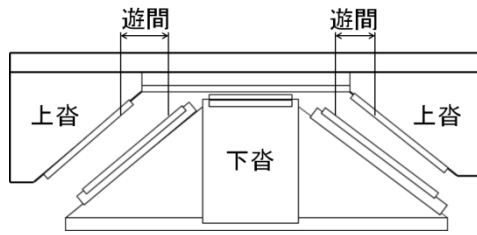


図-3 反重力すべり支承 (UPSS)

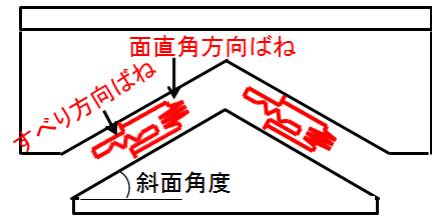


図-4 反重力すべり支承のばね

表-1 支承部デバイスの設定

支承形状	鉛プラグ		水平ばね		鉛降伏荷重	
	形状	面積比率	1次剛性	2次剛性		
	本—mm	%	kN/m	kN	kN	
RB	□1620×1620×240(5層—48mm)	—	—	13,122	0	0
LRB	□1714×1714×240(5層—48mm)	5-φ283	12	97,745	9,774	2,622
UPSS	斜面角度 5, 10, 15度 遊間 30mm	—	—	—	—	—

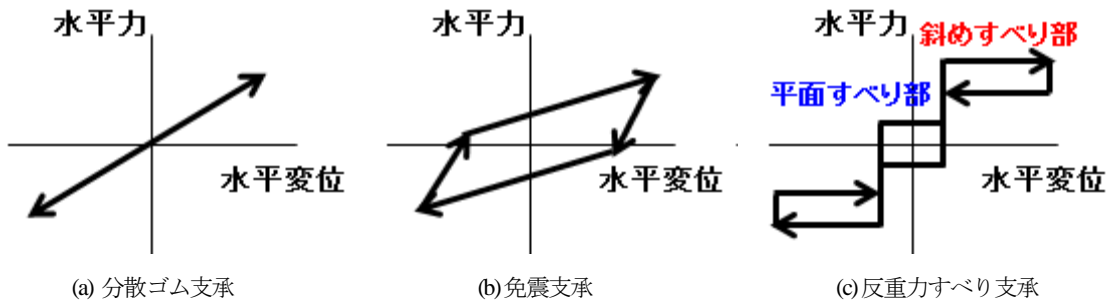


図-5 デバイスの履歴

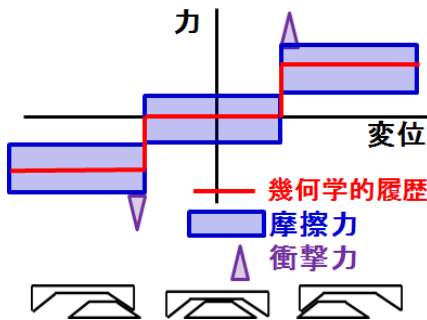


図-6 反重力すべり支承の変位状態と履歴の関係

2. 検討対象モデルとデバイス

検討対象モデルは、図-1 に示す PC12 径間連続桁⁷⁾の下部構造 1 基が支持する死荷重を用いて、図-2 に示す 1 質点 (W=5,122 kN) ばねモデルとした。支承部に適用する分散ゴム支承、免震支承および反重力すべり支承は、以下のように設定した。

① 分散ゴム支承は既往文献⁷⁾ に用いたゴム層構成とする。

② 免震支承は鉛面積比を 12 % とする鉛プラグ入り積層ゴム支承であり、大変形域での等価剛性が分散ゴム支承のばねに漸近するゴム層構成とする。具体的には、免震支承の二次剛性を分散ゴム支承の線形ばねに合わせた。

③ 分散ゴム支承は斜面角度を 5 度、左右の遊間を 30 mm とする。

ここで、反重力すべり支承は図-3 に示す平面すべりと斜めすべりを有するすべり支承であり、本支承のばねは斜めすべり面では図-4 のように設定される。支承部のデバイスそれぞれの設定形状を表-1 に示す。粘性減衰は全てのデバイスに 0.03 を与えた。一般に、免震支承を用いた設計では粘性減衰を考慮しないが、大変形時に免震支承の履歴は分散ゴム支承の履歴に漸近するので、その場合の応答が整合性するように同じ粘性減衰を与えている。

支承部のデバイスの履歴形状を図-5 に示す。ここで、反重力すべり支承の動的挙動時の履歴を変位状態と対比して図-6 に表しているが、斜めすべり面に接触する際に履歴が急変し、抵抗力が大きくなる⁸⁾。

表-2 変位入力の解析パラメータ

	入力周期	入力変位
RB	0.05～5.0秒 (0.05秒刻み)	30 mm
LRB		0.015, 0.030・・0.300 m および 最大 100 m まで
UPSS		0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 m

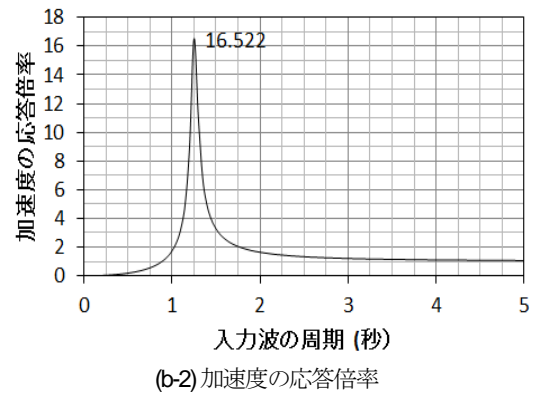
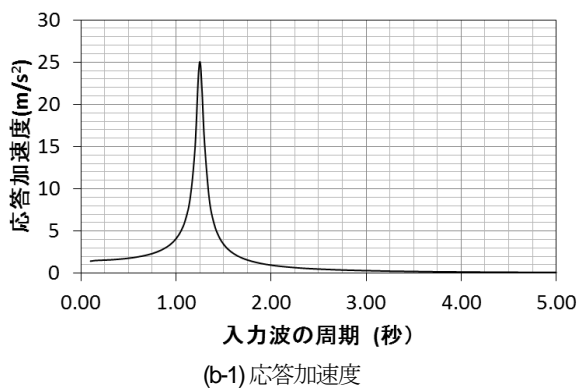
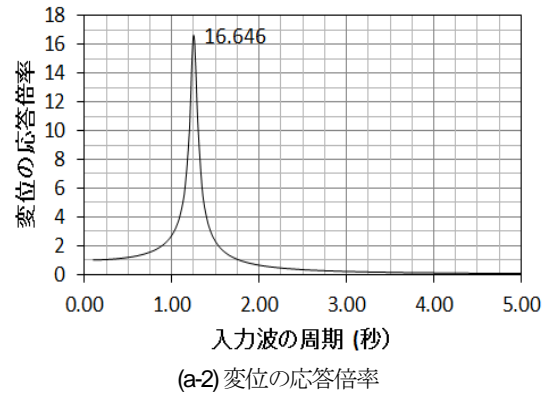
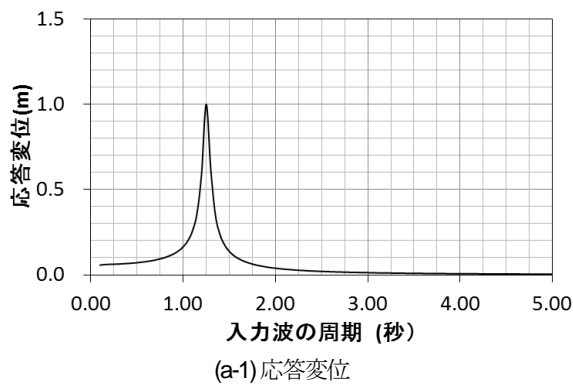


図-7 分散ゴム支承の共振曲線

3. 解析条件

加振は、式 (1) に示す正弦波による強制変位入力により行った。表-2 に示すように、最大入力振幅は分散ゴム支承では 30 mm、免震支承では 0.015 m から対象橋脚の降伏変位である約 0.3 m までは 0.015 m ピッチとし、応答倍率が分散ゴム支承に極力漸近するように最大 100 m まで与えた。一方、反重力すべり支承では 0.05 m から 0.05 m ピッチで最大 0.50 m とした。また、入力正弦波の周期 T は 0.05 秒から 5.0 秒までを 0.05 秒刻みとした 100 ケースである。

$$Y = \delta \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t \quad (1)$$

ここに、 δ : 最大入力振幅
 T : 入力波の周期
 t : 時間

4. 解析結果

(1) 分散ゴム支承

分散ゴム支承を用いた振動系の固有周期 T は、式 (2) により算定され、 $T = 1.254$ 秒となる。

$$T = 2\pi \sqrt{(M/K)} \quad (2)$$

ここに、 M : 質点の質量

$$= 5,122 / 9.80665 \text{ kN} \cdot \text{sec}^2 / \text{m}$$

$$K : \text{振動系のばね} (= 13,122 \text{ kN/m})$$

また、分散ゴム支承は線形ばねであるため、共振時の最大応答倍率は式 (3) により近似され、分散ゴム支承の粘性定数は 0.03 であるので、共振時の最大応答倍率 η は約 16.667 となる。

$$\eta \doteq 1 / (2 \cdot h) \quad (3)$$

ここに、 η : 最大応答倍率

$$h : \text{粘性減衰} (= 0.03)$$

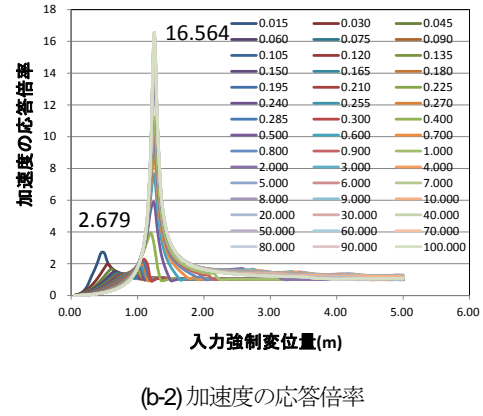
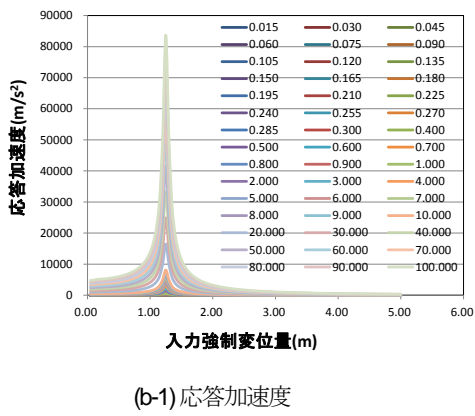
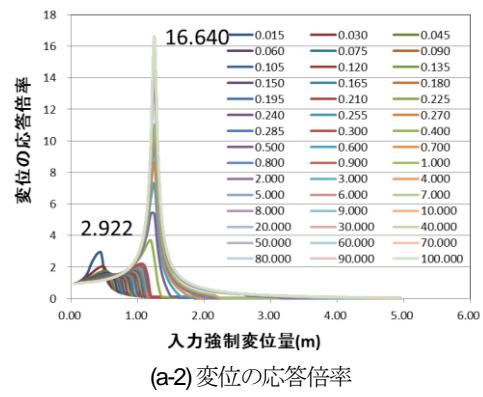
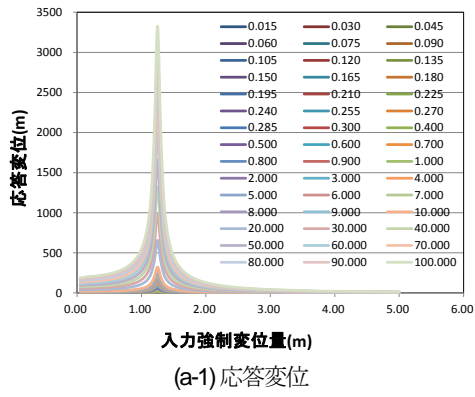


図-8 免震支承の共振曲線 (入力変位 ≤ 100 m)

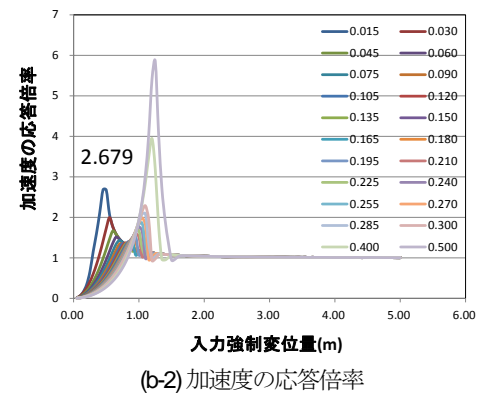
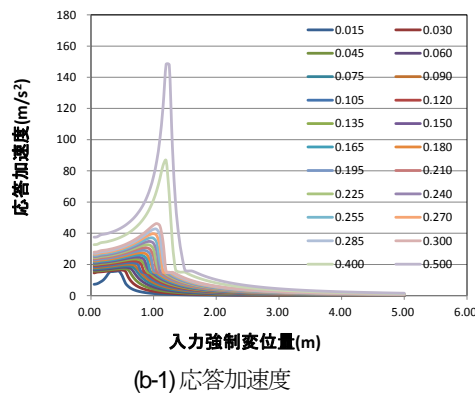
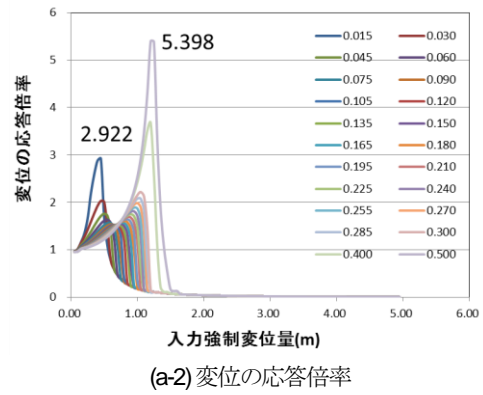
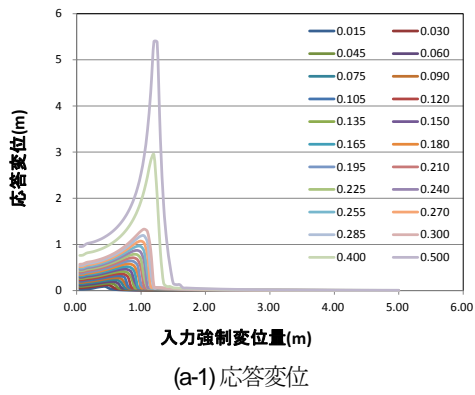


図-9 免震支承の共振曲線 (入力変位 ≤ 0.5 m)

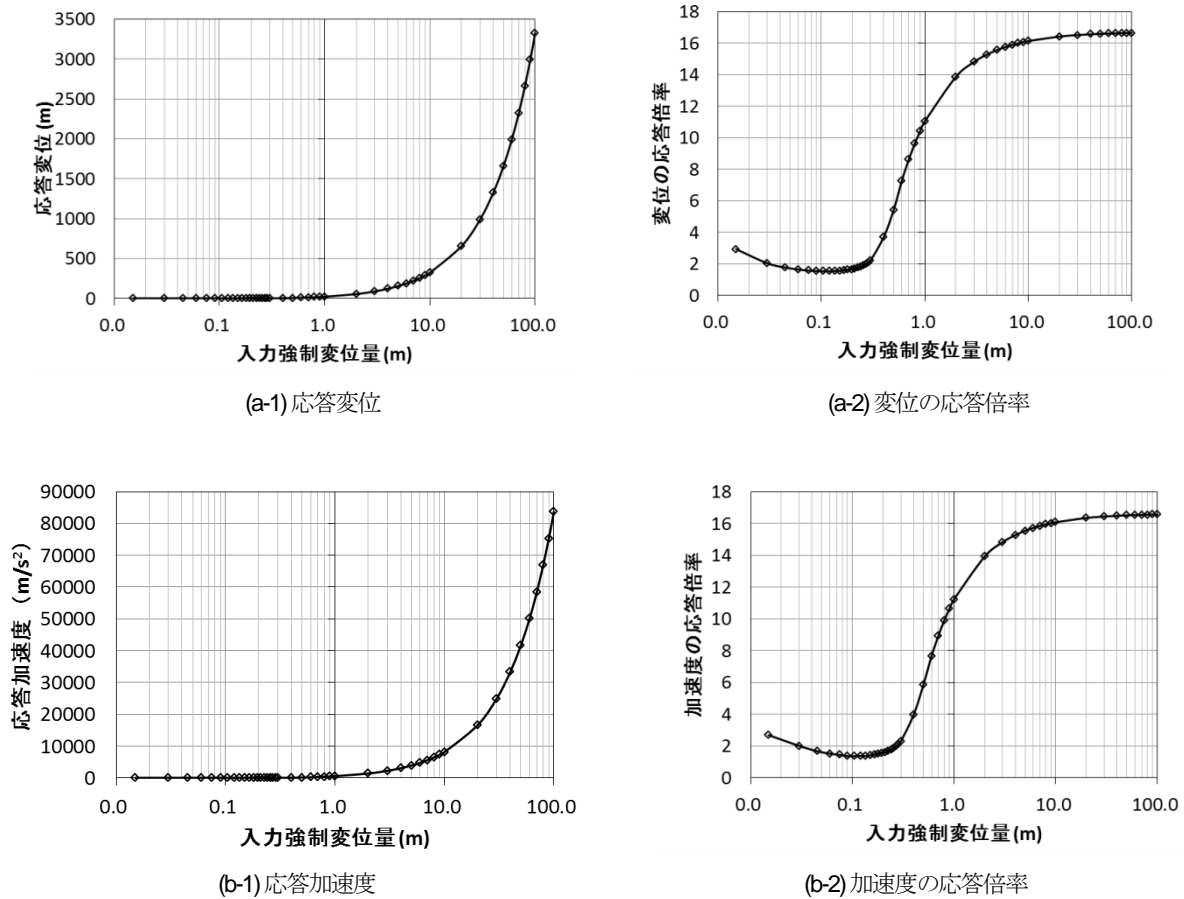


図-10 免震支承の入力変位量に対する応答の変化 (入力変位 $\leq 100\text{m}$)

分散ゴム支承の応答変位、応答加速度およびそれらの応答倍率の共振曲線を図-7 に示す。同図では共振時の周期は 1.25 秒、変位の応答倍率は 16.646、加速度の応答倍率は 16.522 であり、理論値の共振時の周期 1.254 秒、応答倍率 16.667 秒とよく一致している。ここで、分散ゴム支承は線形ばねであるため、共振時の入力変位レベルに影響を受けないので応答倍率は理論値に一致する。

(2) 免震支承

免震支承の応答変位および応答加速度ならびにそれらの応答倍率の共振曲線を、入力変位レベル 100 m までと 0.5 m までの 2 とおりでそれぞれ図-8 および図-9 に示す。ここで、入力変位レベルを 2 とおりで示したのは、免震支承の履歴はバイリニアの非線形履歴であり、大きな減衰性能を有しているため、それが応答に及ぼす影響を把握しやすいようにしたためである。すなわち、入力変位レベルを 0.5 m までとした図-9 から、入力変位レベルを大きくするにしたがい共振周期は長周期にシフトし、かつ応答変位倍率が大きくなっている。これに対して、入力変位レベルを 100 m までとした図-8 では入力レベルが大きくなると共振周期や応答倍率の変化は小さくなり、応答倍率は応答変位では 16.562、応答加速度では 16.564

と若干異なるものの分散ゴム支承の理論値である 16.667 に近似してくる。これは、免震支承の応答変位が大きくなると履歴減衰の影響が小さくなり、応答解析で設定した粘性減衰 ($=0.03$) が支配的な減衰性能となるためである。これに対して、免震支承の応答変位を実地震動レベル程度の 0.5 m とすると、応答倍率は応答変位では 5.490、応答加速度では 5.853 とその値は若干異なるものの、分散ゴム支承の応答倍率 16.667 に比べると格段に小さい。このことより、免震支承は分散ゴム支承に比べて共振に近い状態であっても地震時の応答が小さくなることを理解できる。そこで、入力変位レベルを横軸にし、応答変位、応答加速度およびそれらの応答倍率を図-10 に示す。これより、免震支承では入力変位レベルを大きくするにしたがい、応答変位および応答加速度は飛躍的に大きくなるが、応答倍率の増加は緩やかである。図より 100 m を超す大きな入力変位レベルにしなければ、分散ゴム支承の応答倍率 16.667 の一定値に収束しない。

一方、図-8 および図-9 の応答倍率 (a-2) および (b-2) を見るとから周期 0.5 秒あたりでも共振している。これは、入力変位レベルが小さい状態では、免震支承の一次剛性で共振するためである。しかし、入力変位レベルが大きくなると応答変位が大きくなるため一次剛性で共振しな

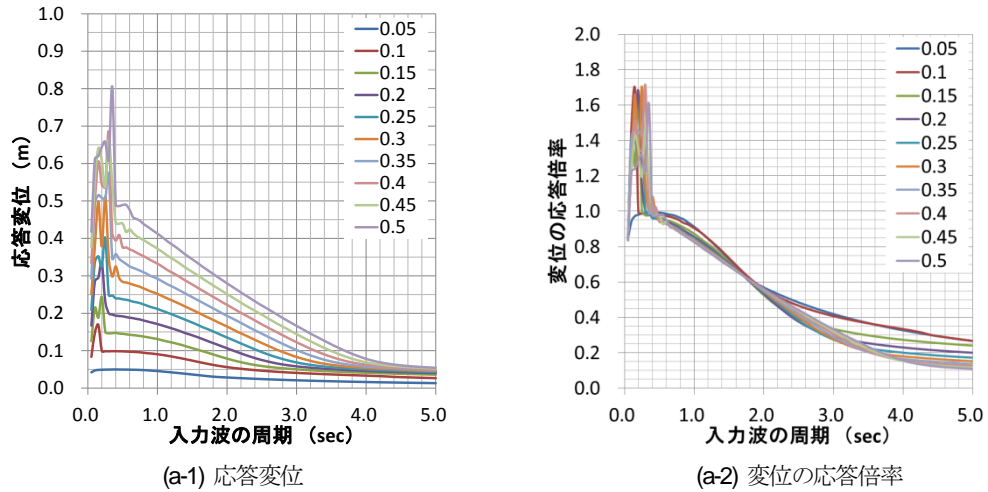


図-11 斜面角度5度の応答変位と応答倍率

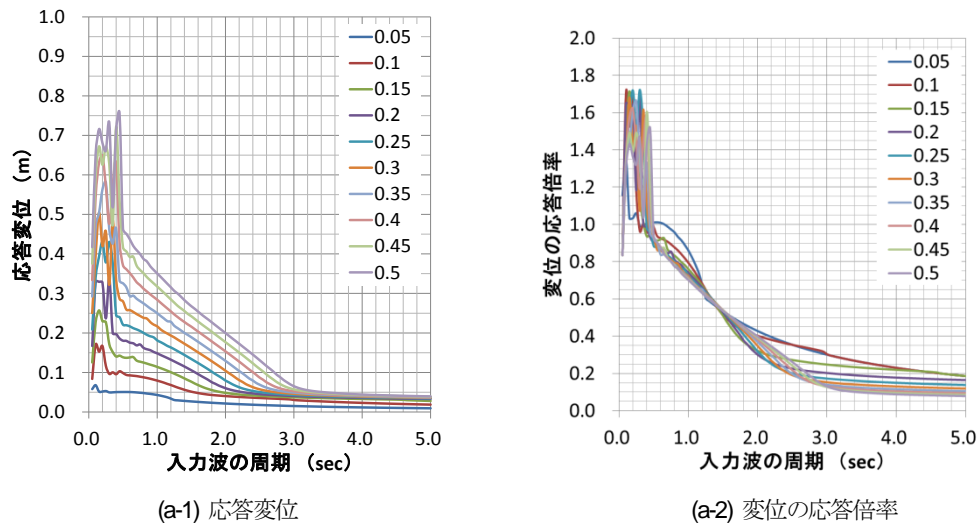


図-12 斜面角度10度の応答変位と応答倍率

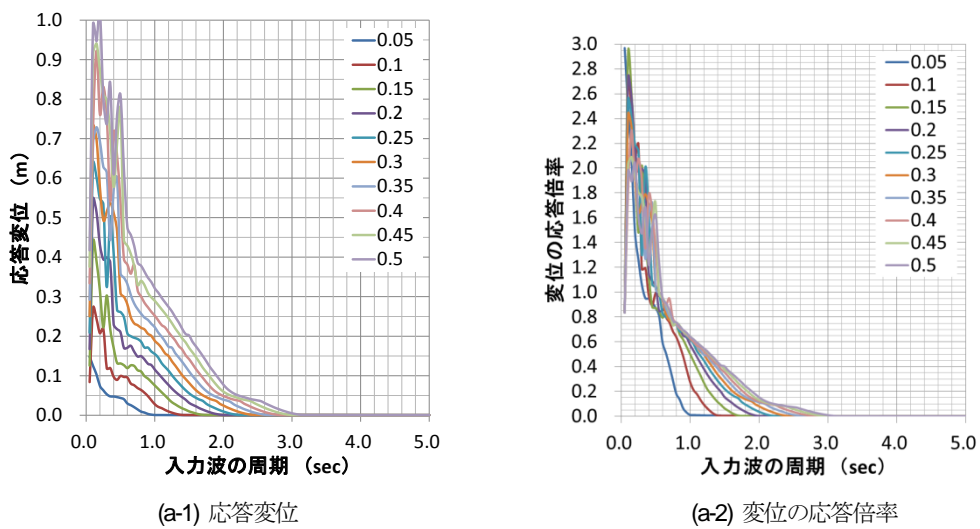
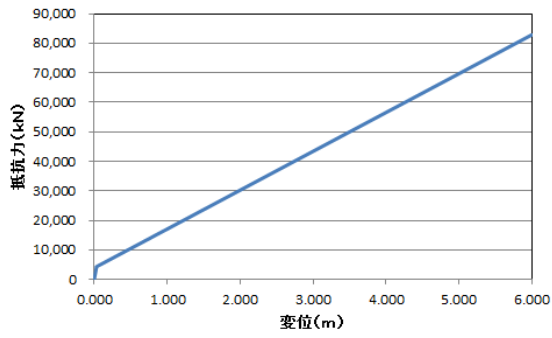
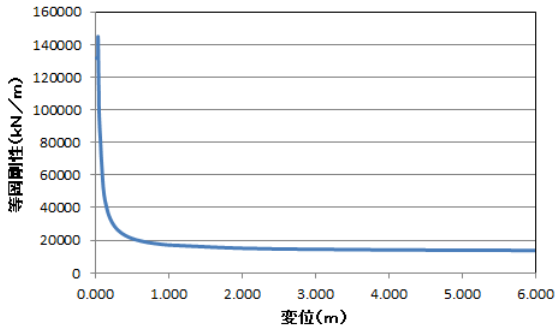


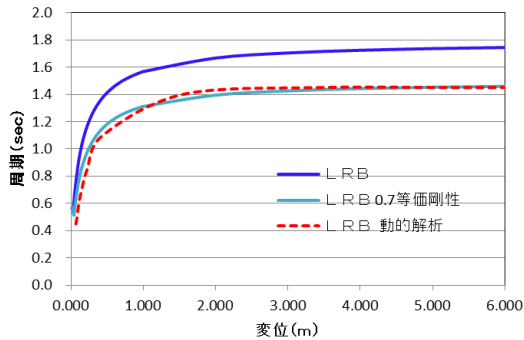
図-13 斜面角度15度の応答変位と応答倍率



(a) 変位-抵抗力



(b) 等価剛性



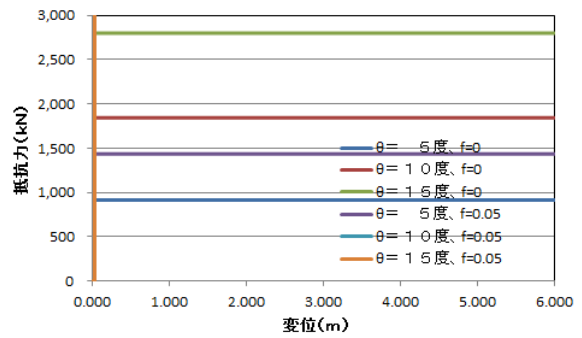
(c) 固有周期

図-14 免震支承の静的解析による固有周期

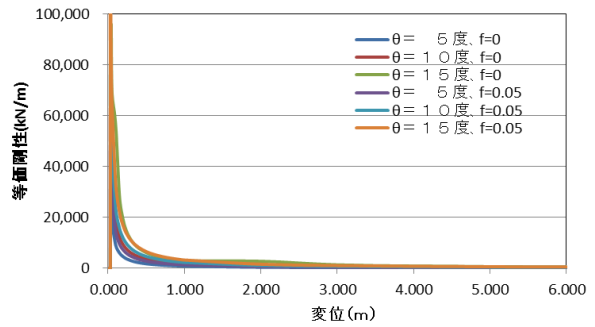
くなり、二次剛性で振動するようになる。このため、応答変位は増加するものの応答倍率は低下し、さらに入力変位レベルが大きくなると二次剛性での共振点に近づく。本来、免震支承の動的挙動⁹⁾において、一次剛性での共振を励起する応答変位はレベル2地震動では想定しておらず、レベル1地震動で一次剛性で共振することがあったとしても減衰も増加するため応答が極端に増大することはない。

(3) 反重力すべり支承

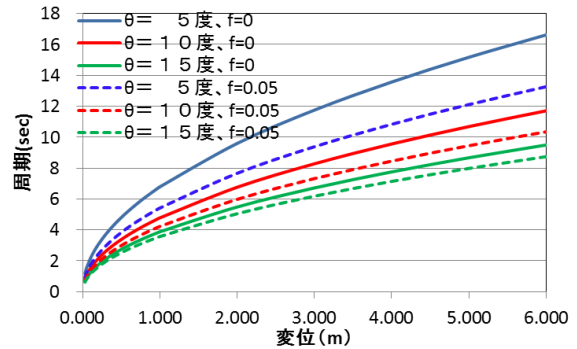
斜面角度5度、10度および15度の反重力すべり支承の応答変位およびその応答倍率を、それぞれ図-11、図-12および図-13に示す。同図より、入力周期が0.5秒程度以下では応答変位が大きくなるが、入力周期が0.5秒程度以上では応答変位が入力周期と共に低減しており、かつ斜面角度が大きくなるほど早く低減する傾向にある。



(a) 変位-抵抗力



(b) 等価剛性



(c) 固有周期

図-15 反重力すべり支承の静的解析による固有周期

これは、入力周期が長くなると入力加速度が小さくなるため反重力すべり支承に作用する力が小さくなり、応答変位が小さくなるためである。さらに、反重力すべり支承では図-6に示したように斜めすべりの境界で履歴が急激に変化するが、斜めすべり状態では抵抗力はほぼ一定となり、変位と共に長周期となる。すなわち、入力周期が短い場合の大きな応答変位は、大きな入力加速度になることに加え履歴の急変に由来するものである。後述する等価剛性を用いて静的に求めた固有周期と考え合わせると、入力変位が小さい場合の応答変位は共振ではない。このように、いずれの入力周期でも卓越する応答周期が発現しないと言うことは、反重力すべり支承では明確な共振周期が現れにくく、入力変位レベルを大きくしても応答変位が大きくなるだけで、明確な共振は見当たらないことを示している。

5. 応答周期の推定

つぎに、共振周期は静的解析でも求めることができることから、等価剛性を算定して静的に固有周期を求めた。対象は免震支承および反重力すべり支承とし、履歴特性、等価剛性および固有周期をそれぞれ図-14 および図-15 に示す。ここでは、動的解析による応答変位の共振曲線である図-9 に合わせて、変位を 6m までとした。免震支承では、変位による等価剛性と変位の 70% を有効変位とした等価剛性を用いた場合の 2 通りで設定した。反重力すべり支承では、斜面角度 5、10 および 15 度に対し摩擦係数を無視した場合と 0.05 とした場合の 2 通りで設定した。

免震支承の変位に基づく固有周期の傾向は、動的解析による共振周期によく一致しており、有効変位とした等価剛性による固有周期は動的解析の結果とよく一致している。

一方、反重力すべり支承では静的履歴を図-5 と仮定し、降伏荷重を $W \cdot \tan \theta$ (θ : 斜面角度) とした完全弾塑性履歴としているため、斜めすべり状態の剛性は零になり、変位が大きくなると等価剛性は一義的に漸減する。このため、応答変位が大きくなると共に単調に長周期化する。すなわち、動的解析で入力変位レベルを大きくすると応答変位は顕著に増大し、応答周期も顕著に増大するため、特定の共振周期を把握しがたいと考えられる。

6. まとめ

本検討により、以下のことが明らかとなった。

- ① 免震支承の二次剛性を分散ゴム支承に合わせれば大変位時には共振周期と応答倍率は同じになるが、入力変位レベルを相当大きくしなければ共振周期、応答倍率共に分散ゴム支承の結果に一致しない。これは、免震支承は応答変位に応じて履歴減衰が発現し、応答変位が大きくなるにしたがい、履歴減衰の効果が低下するためである。
- ② 免震支承は一次剛性および二次剛性の履歴状態でそれぞれ共振するが、一次剛性で共振していても応答変位が大きくなると減衰が増加して応答倍率は大きくならない。
- ③ 反重力すべり支承の基本的な履歴特性は、一次剛性が無限大の完全弾塑性履歴となるため、斜めすべりの開始点で応答が大きくなるが、これは履歴の急変の影響であり、共振状態ではない。
- ④ 反重力すべり支承は、斜めすべり状態である二次剛性では剛性が零となるため変位が大きくなりやすい

が、顕著な共振周期は発現しない。

- ⑤ 反重力すべり支承の等価剛性により静的に求めた固有周期は、変位と共に長周期化する。このため、動的解析では顕著な共振周期が発現しにくいと考えられる。

7. あとがき

本検討により、分散ゴム支承を用いる場合に比べて免震支承を用いると共振しても応答が大きくなりにくいことが明らかになり、免震支承が共振しにくいという事象を確認することができた。また、反重力すべり支承は二次剛性がほぼ零となることから特定の周期で共振しにくいデバイスであると考えられ、橋への適用が有望と考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤知明, 五十嵐晃, 松田泰治, 足立幸郎, 宇野裕恵: 反重力すべり支承を用いた振動系における動的挙同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.
- 2) 白石晴子, 五十嵐晃, 足立幸郎, 宇野裕恵, 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.
- 3) 佐藤知明, 五十嵐晃, 松田泰治, 足立幸郎, 宇野裕恵, 二木太郎, 白石晴子, 土田智: UPSS を適用した橋梁における橋脚の弾塑性吸収エネルギーに基づく耐震性能の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.4, pp. I_609- I_621, 2013.
- 4) 松田泰治, 足立幸郎, 宇野裕恵, 佐藤知明, 五十嵐晃, 土田智: UPSS を用いた橋梁における不静定力が耐震性に及ぼす影響評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.4, pp. I_571- I_582, 2013.
- 5) 佐藤知明, 五十嵐晃, 松田泰治, 足立幸郎, 宇野裕恵, 二木太郎, 白石晴子, 土田智: UPSS 支承を有する橋梁の周期特性に関する考察, 第 68 回土木学会年次講演概要集, I-090, 2013.
- 6) 宇野裕恵, 佐藤知明, 五十嵐晃, 松田泰治, 足立幸郎, 北聖大: 反重力すべり支承を用いた振動系の周期特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4(地震工学論文集第 33 巻) I_419- I_432, 2014.
- 7) 松田泰治, 宇野裕恵, 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, 2008.7
- 8) 五十嵐晃, 白石晴子, 足立幸郎, 宇野裕恵, 佐藤知明, 二木太郎, 松田泰治: UPSS 支承のすべり面垂直抗力変動と衝撃力が橋梁の地震応答に及ぼす影響, 第 68 回土木学会年次講演概要集, I-089, 2013.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.

The resonance phenomenon of the vibration system of Uplifting Slide Shoe

Tomoaki Sato, Akira Igarashi, Taiji Matsuda, Yukio Adachi,
Hiroshige Uno, and Masahiro KITA

Generally, the vibration system with devices on the bearings is vibrated sympathetically during shaking. In this paper, it is certified about the resonance phenomena for the rubber bearing, isolation bearing and Uplifting Slide Shoe. By matching the second stiffness of isolation bearing to the rubber bearing, the resonance period of isolation bearing equals to the period of rubber bearing. But, unless the displacement of bearing is not large, it will not reach to the same value due to bi-linear hysteresis and reduction ability. In addition, the resonance period of isolation bearing is fitted to the natural period by calculation using equivalent rigidity at the 70% of displacement. On the other hand, as the second stiffness of Uplifting Slide Shoe is nearly zero due to similar to perfect elast-plastic hysteresis, the resonance period will not appear clearly. However, the response with the short period occurs at the time of attaching to the inclined sliding surface.