

反重力すべり支承を用いた振動系の 応答周期特性

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 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

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 大阪管理部 保全技術課長 (〒552-0006 大阪市港区石田3-1-25)

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 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

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

反重力すべり支承は平面すべりと斜めすべり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。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。この履歴は非線形性が極めて大きいため、卓越周期を特定することが難しい。そこで、本論文では UPSS の周期特性を分散支承や免震支承と共に、最大応答時の変位と抵抗力より求めた固有周期と、フーリエスペクトルおよびウェーブレット変換により求めた応答周期帯を比較し評価した。この結果、フーリエスペクトルおよびウェーブレット変換結果は概ね卓越応答周期が一致し、さらに時刻歴応答結果と対比することにより、ウェーブレット変換結果では時間軸に沿った卓越応答周期帯が明確となり、入力地震動によっては卓越応答周期が変化することを確認した。

Key Words : *uplifting slide shoe, response period, Fourier transform, wavelet transform, non-linear time history analysis*

1. まえがき

反重力すべり支承 (Uplifting Slide Shoe : 以下, UPSS) は平面すべりと斜めすべり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。これに摩擦の影響が加味されるが、基本的な周期特性はこの履歴で支配される。しかし、平面すべりでは無周期特性を有し、斜めすべりに達した時点で固定された状態になり、斜めすべり状態になると再び無周期の特性を発現するために、全体での応答周期帯が広範囲になり、一義的に応答周期を定義することは難しい。

そこで、本論文では UPSS の周期特性を分散支承や免

震支承の周期特性と比較することにより、相対的な評価として述べる。

2. UPSS支承の基本構造と特徴

UPSS 支承の基本構造は図-1 に示すように、平面すべり部と斜めすべり部で構成される。基本的な履歴特性は図-2 に示すような非線形弾性履歴であり、斜面角度による幾何学的な履歴となるので、不変のものである。動的挙動時には同図に示すようにすべりによる摩擦力が加わって抵抗力が大きくなるが、同時に摩擦減衰が発現される。この摩擦力は斜めすべり時の面圧に依存し、面圧は動的挙動時には変化する。このため、正弦波のような

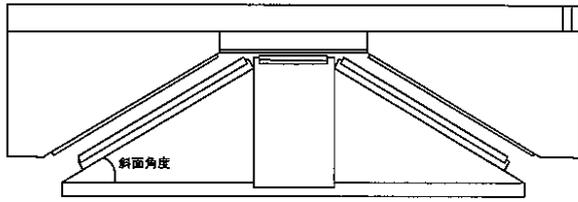


図-1 反重力すべり支承

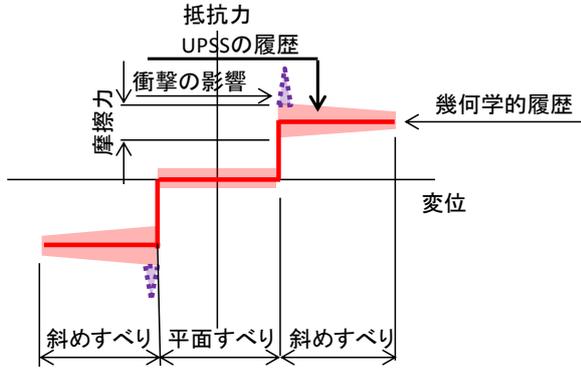


図-2 抵抗力-変位関係

動きに対しては同図のように変位が大きくなるにしたがい面圧が低下して摩擦力が小さくなる。さらに、平面すべりから斜めすべりに移行する時点では、変位方向が急激に変化することにより衝突が生じる。

UPSS 支承はこのように非線形性が極めて強い履歴であり、変位することにより動的特性が変化する。ここで、遊間量を大きくすると応答周期は長周期となり、小さくすると短周期となる。また、斜面角度を小さくすると変位性能が増大して長周期化し、大きくすると変位性能が低減して短周期化する。すなわち、UPSS 支承では、斜面角度や遊間量の設定によって、応答周期特性が自在に変化する。

一方、摩擦係数を大きくすると摩擦力が大きくなるので、抵抗力は増大するが摩擦減衰による慣性力が低減する。実用的な範囲での摩擦係数であれば、応答周期に及ぼす影響は小さいと考えられるが、摩擦係数を大きくしすぎると摩擦減衰は増加するものの、スティックスリップ現象が生じて応答が乱れることに留意が必要である。

このような UPSS 支承の周期特性を確認するために非線形時刻歴応答解析を行い、応答値から卓越する周期

(以下、卓越応答周期と呼ぶ) を検討する。

3. 卓越応答周期の算定手法

時刻歴応答解析結果に基づく卓越応答周期を評価するにあたり、最大応答変位から求まる固有周期、フーリエ変換により求まるフーリエスペクトルおよびウェーブレット変換を用いた変換結果の3つ手法を用いた。以下に各手法について概要を述べる。

最大応答変位から求まる固有周期の算定法は、道路橋示方書¹⁾ に示される水平方向加速度 1.0 G 作用時の上部構造の時刻歴応答変位に着目し、最大応答変位量 δ_{max}

と同時刻に生じている加速度 $\alpha_{\delta_{max}}$ を用いて式 (1) により算定する (以下、簡易算定と呼ぶ)。

$$T = 2.01 \sqrt{\delta_{max} / \alpha_{\delta_{max}}} \times G \quad (1)$$

フーリエ変換は、変化する信号波形の周波数特性の把握に一般的に用いられている手法であるが、この手法は全計測時間領域に対する周波数分析であり、時間に関する情報が失われてしまうため、時間的変化が把握できない。

一方、1980年代に開発されたウェーブレット変換²⁾は、周波数に応じて分析領域を変化させることにより、時間軸に対して波の特性が途中から変化するような波形についても分析が行える。

4. 解析モデルと解析条件

解析モデルは、著者らがこれまでの検討に用いてきた高架橋モデル³⁾⁻⁵⁾である。図-3に示すような基本設計は分散ゴム支承を適用した支間 40 m、橋脚高さ 10 m の PC12 径間連続箱桁橋から 1 橋脚とそれが支持する上部構造質量を取り出し、上部構造を 1 質点として支承部に UPSS を設置した図-4に示す離散系モデルである。橋脚躯体には弾性梁を、塑性ヒンジには武田モデルを設定し、基礎を固定とした。UPSS を固定支承に替えた場合の固

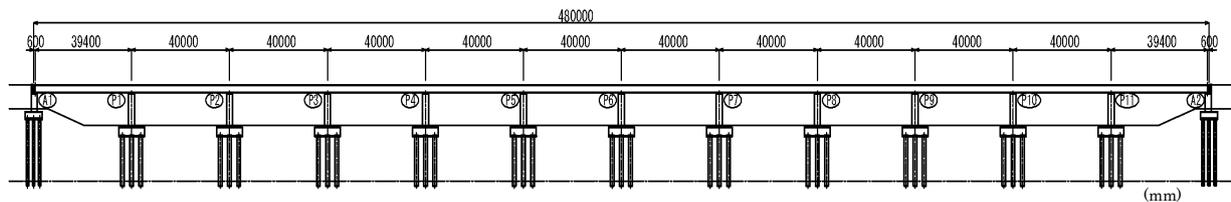


図-3 検討対象橋

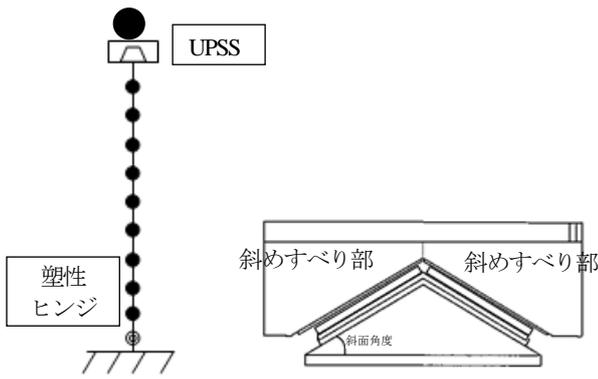


図-4 解析モデル 図-5 検討に用いたUPSS例
(平面すべりなし)

有周期は0.28 secである。

本検討で採用するUPSSは、図-5に示すような平面すべり部のない斜めすべり部のみで構成し、斜面角度は5, 10, 15度、摩擦係数は0.05, 0.10, 0.15とした。

また、比較検討のために用いる分散ゴム支承は、平面寸法1,620×1,620mm、総ゴム層厚は48mmを5層であり、橋脚上に2基設置した。このばね定数は26,244kN/mである。一方、免震支承は、上部工に初速度120kine程度が生じた場合、履歴1ループでエネルギーを吸収できる支承を想定し、1次剛性は213,632kN/m、降伏荷重1543.7kN、2次剛性は1次剛性の1/10としたモデルを採用している。

なお、構造減衰は、上部構造に0.03、橋脚に0.02を見込み、各モデルに対して固有値解析を実施した。さらに時刻歴応答解析においてはRayleigh減衰を適用し、その係数は、固有値解析結果から得られた第1基準振動数および50Hzに1次のモード減衰定数を設定し求めた。

最後に、入力地震波はI～III種地盤に対し道路橋示方書に規定されているレベル2地震動タイプIIの標準波加速度波形(II-I-1, II-II-1, II-III-1)を用いた。これらの解析条件を表-1にまとめた。

5. 時刻歴解析結果と応答周期

各モデルに対する解析結果を図-6～10に示す。図-6は分散支承モデル、図-7は免震支承モデル、さらに、図-8は斜面角度5度を有し摩擦係数を0.05としたUPSSモデル、さらに、図-9および10は斜面角度10度および15度としたUPSSモデルの結果である。各図ともに上段から時刻歴応答変位、応答変位より求めたフーリエスペクトルおよびウェーブレット変換結果であり、最下段は支承の水平力-相対水平変位関係結果を示している。上段から3つのグラフは、橋脚を含む応答変位に対する結果であり橋梁系としての周期特性を評価するものであ

表-1 解析条件

上部工重量	10,244kN
分散支承モデル	ばね剛性
免震支承モデル	1次剛性 213,682kN/m
	降伏荷重 1543.7kN
	2次剛性 21,368kN/m
UPSS 支承モデル	斜面角度 5度, 10度, 15度
	遊間 微小値(1mm)
	摩擦係数(μ) 0.05, 0.10, 0.15
入力地震動	道路橋示方書標準波 レベル2タイプII地震動
	II-I-1, II-II-1, II-III-1

るが、最下段のグラフは支承単体での結果である。また、同図は、左から順にI種・II種・III種地盤の入力波形を与えた場合の結果となっている。

ここで、フーリエスペクトル図には、時刻歴応答変位結果に基づくスペクトルに加えて、3章で示した最大応答変位による算定結果も示している。

さらに、UPSSの摩擦係数に関する検討結果として、UPSS斜面角度5度のモデルに対し、摩擦係数を0.10および0.15とした結果を図-11および12に示した。

6. 考察

(1) 時刻歴応答変位

各結果最上段に示される時刻歴応答変位では、図-6に示す分散支承結果は、地震動によらず円滑な応答を示し、主要動以降も長時間にわたり応答している。免震支承(図-7)では、その非線形性より主要動付近では大きな応答を示すが、小振幅時には小刻みな応答となっている。

UPSS支承の角度による違い(図-8～10)では、例えばII-II-1の結果に着目すると、主要動までは角度による差異は小さいが、7秒以降を見ると、角度が大きくなるにつれ、小刻みな振動となり応答も早期に終了している。また、5度の摩擦係数に関する検討では、特にII-II-1およびII-III-1結果において、摩擦係数が大きくなるにしたがい顕著に応答が小さくなっている。

(2) フーリエスペクトル

先述のように、フーリエスペクトル結果には簡易算定結果も示しているが、分散支承と、免震支承およびUPSS支承結果で顕著な差が見られる。分散支承結果は、フーリエスペクトルは特定の周期1カ所でのみ立ち上がり、簡易算定結果も同周期であることが示されている。

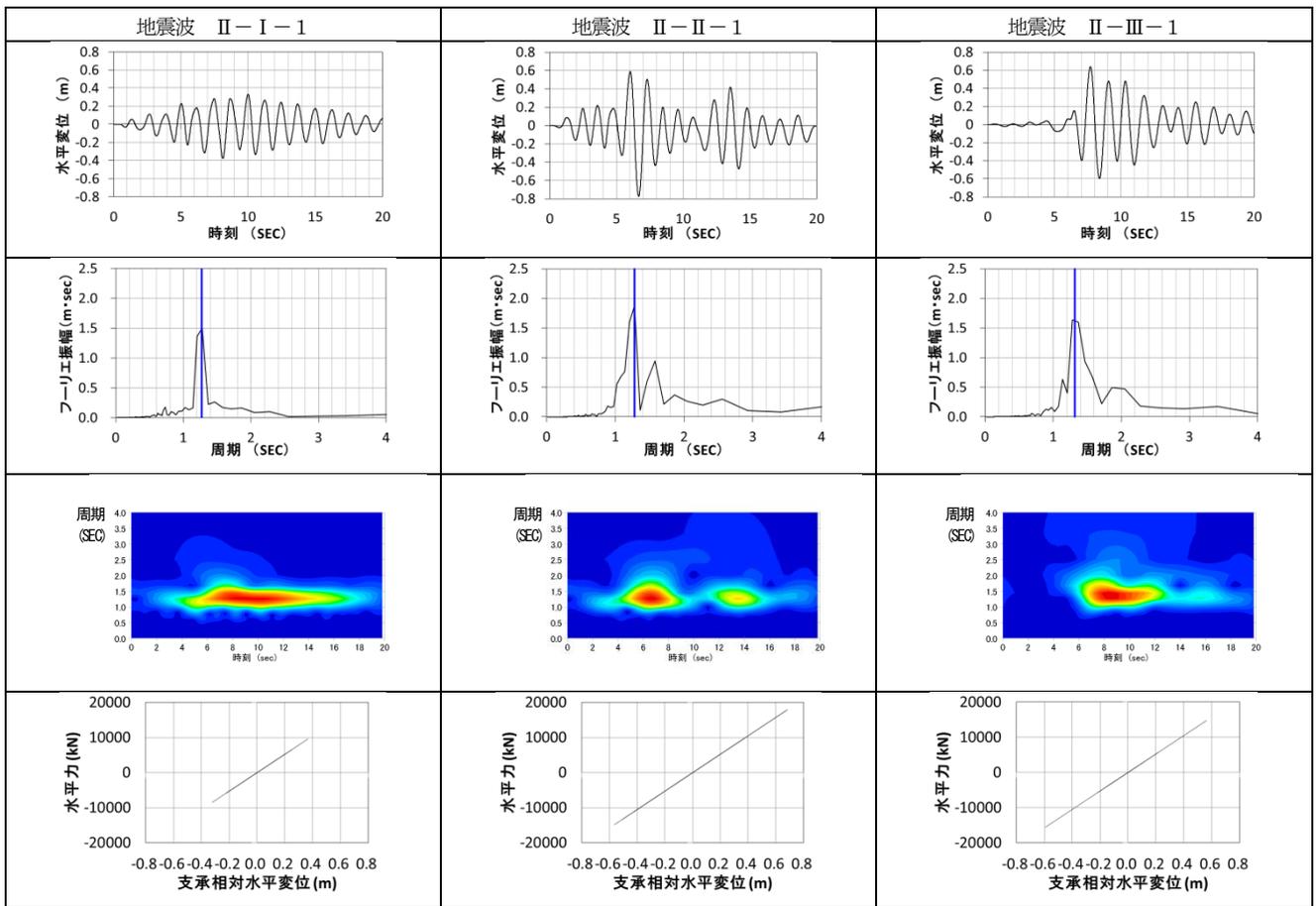


図-6 分散支承

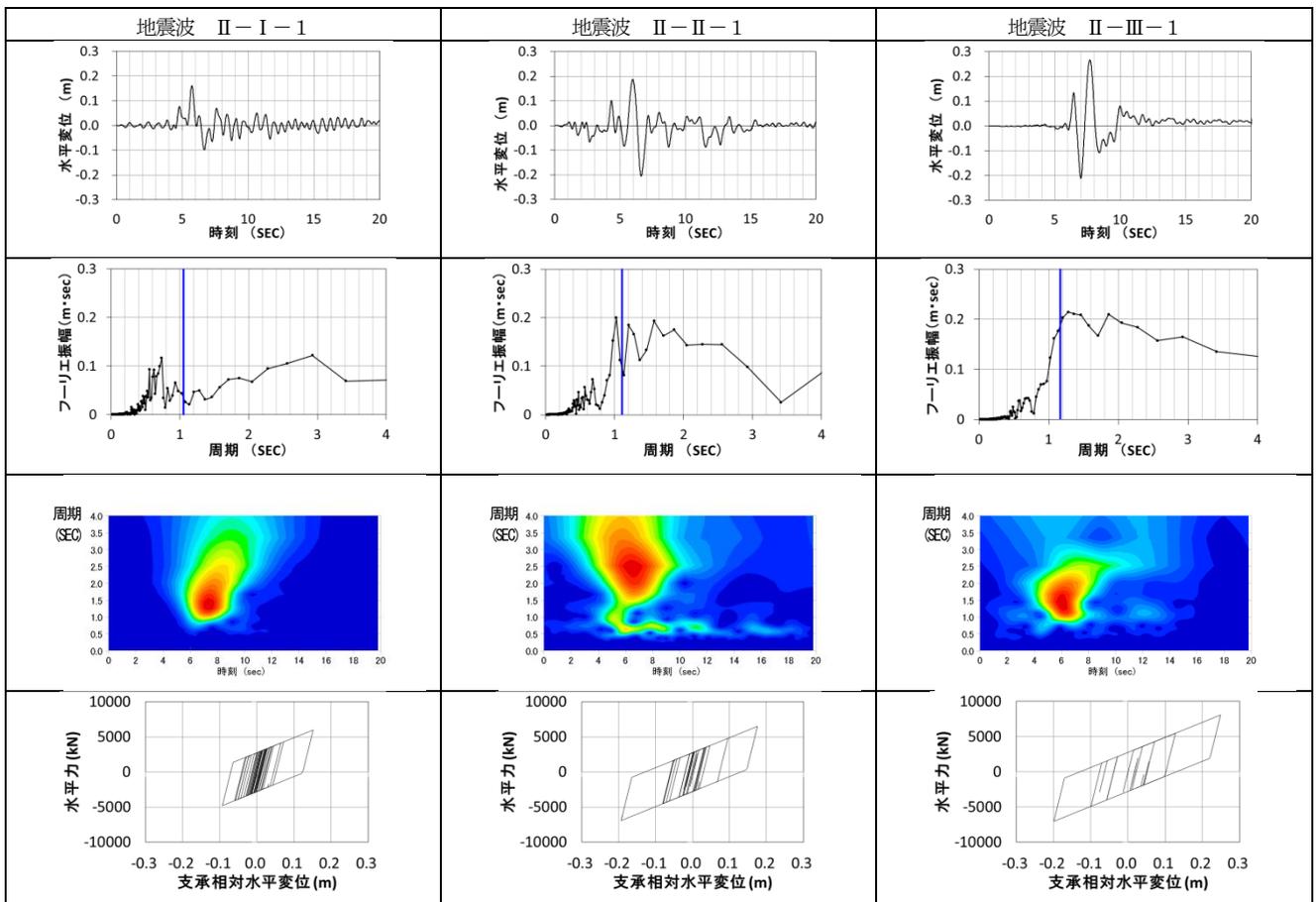


図-7 免震支承

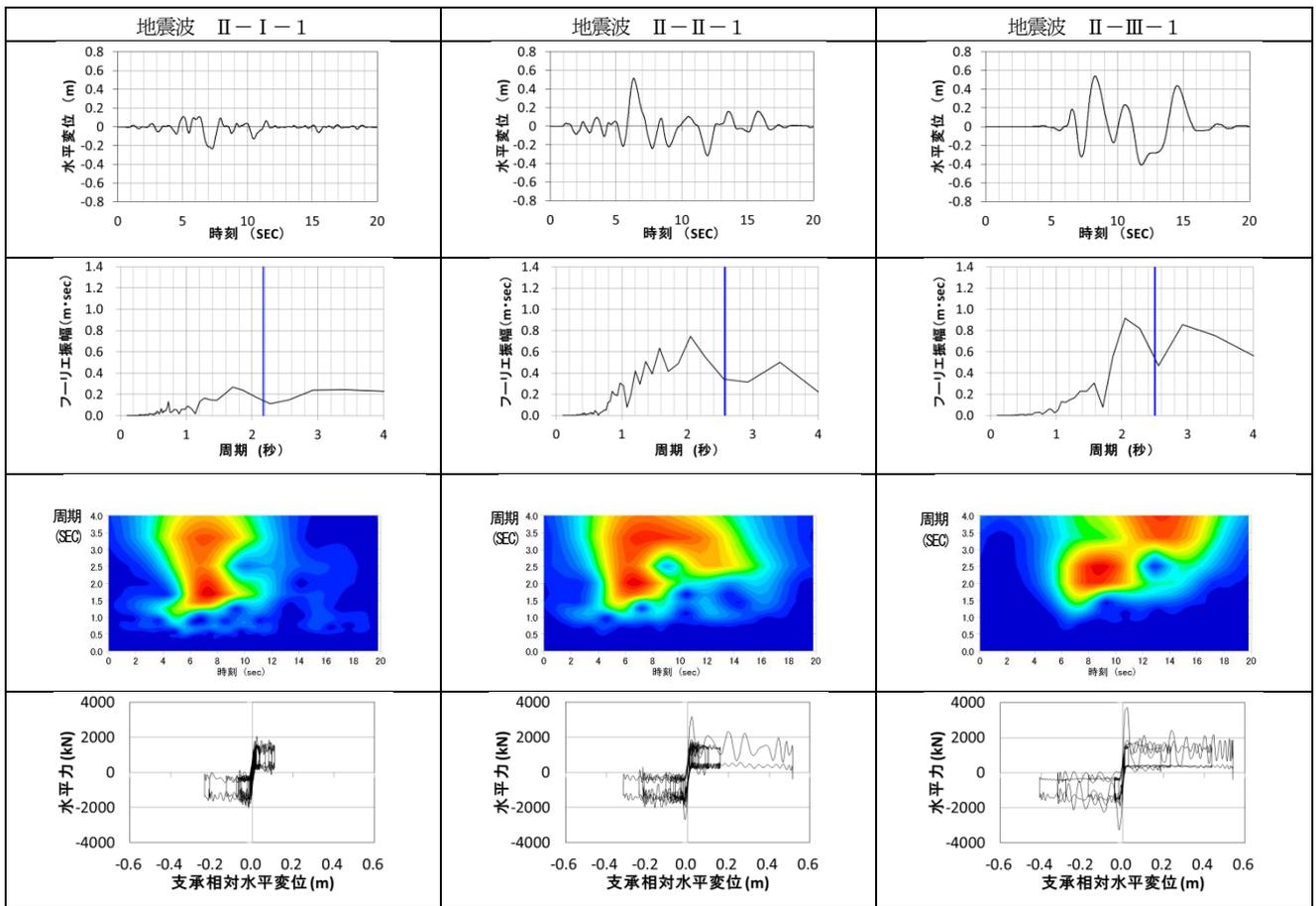


図-8 UPSS 支承 (斜面角度 5 度, $\mu = 0.05$)

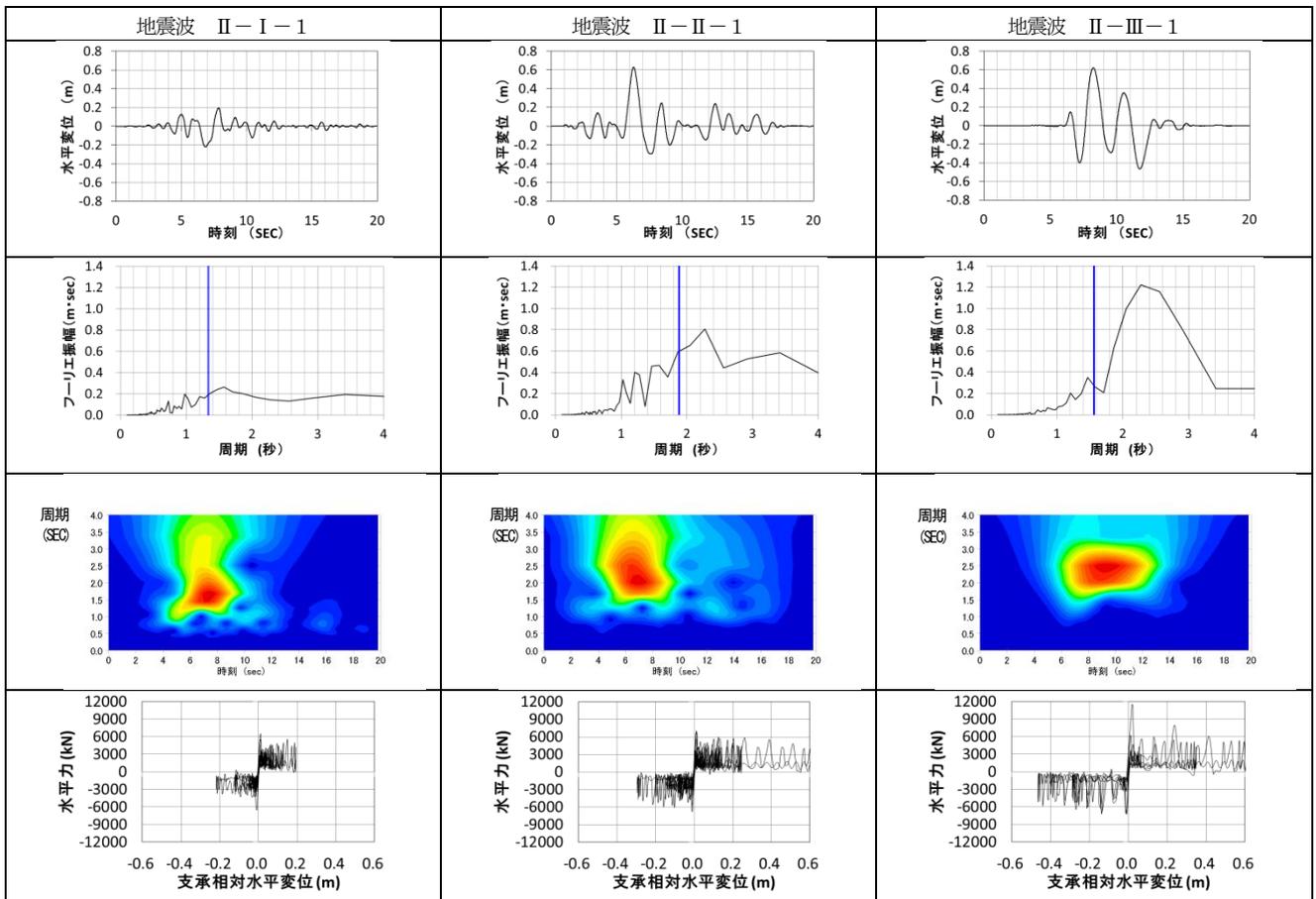


図-9 UPSS 支承 (斜面角度 10 度, $\mu = 0.05$)

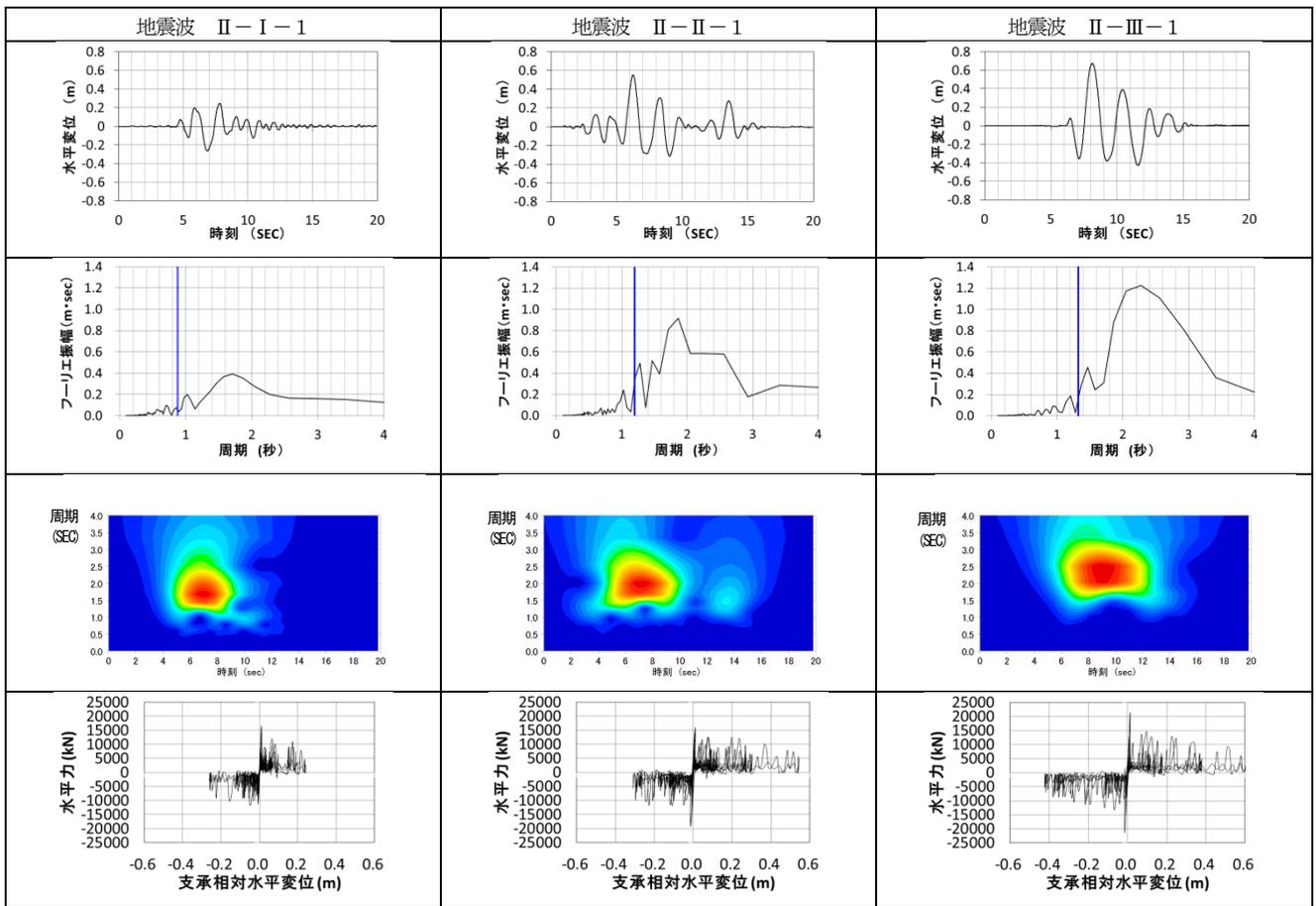


図-10 UPSS 支承 (斜面角度 15 度, $\mu=0.05$)

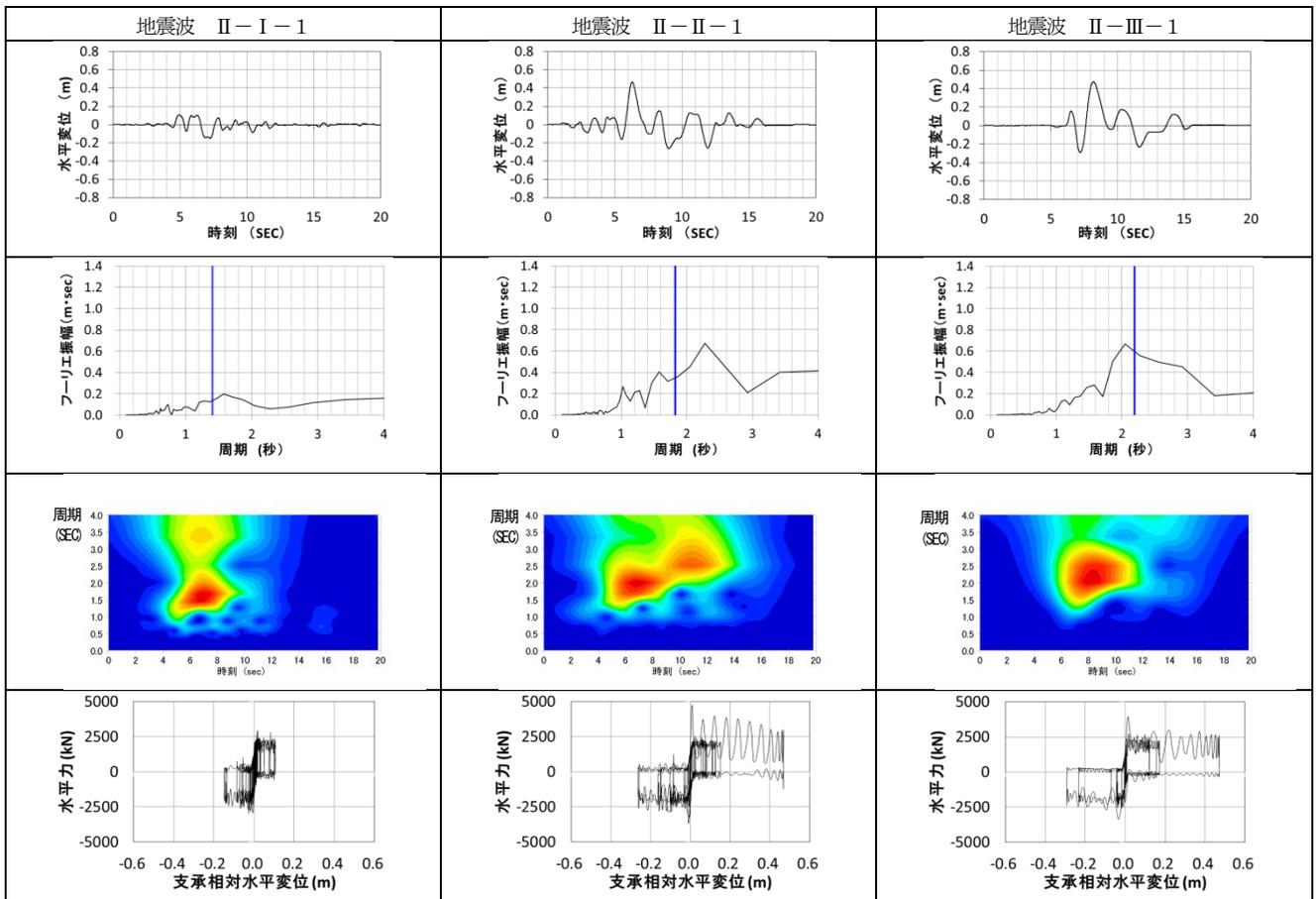


図-11 UPSS 支承 (斜面角度 5 度, $\mu=0.10$)

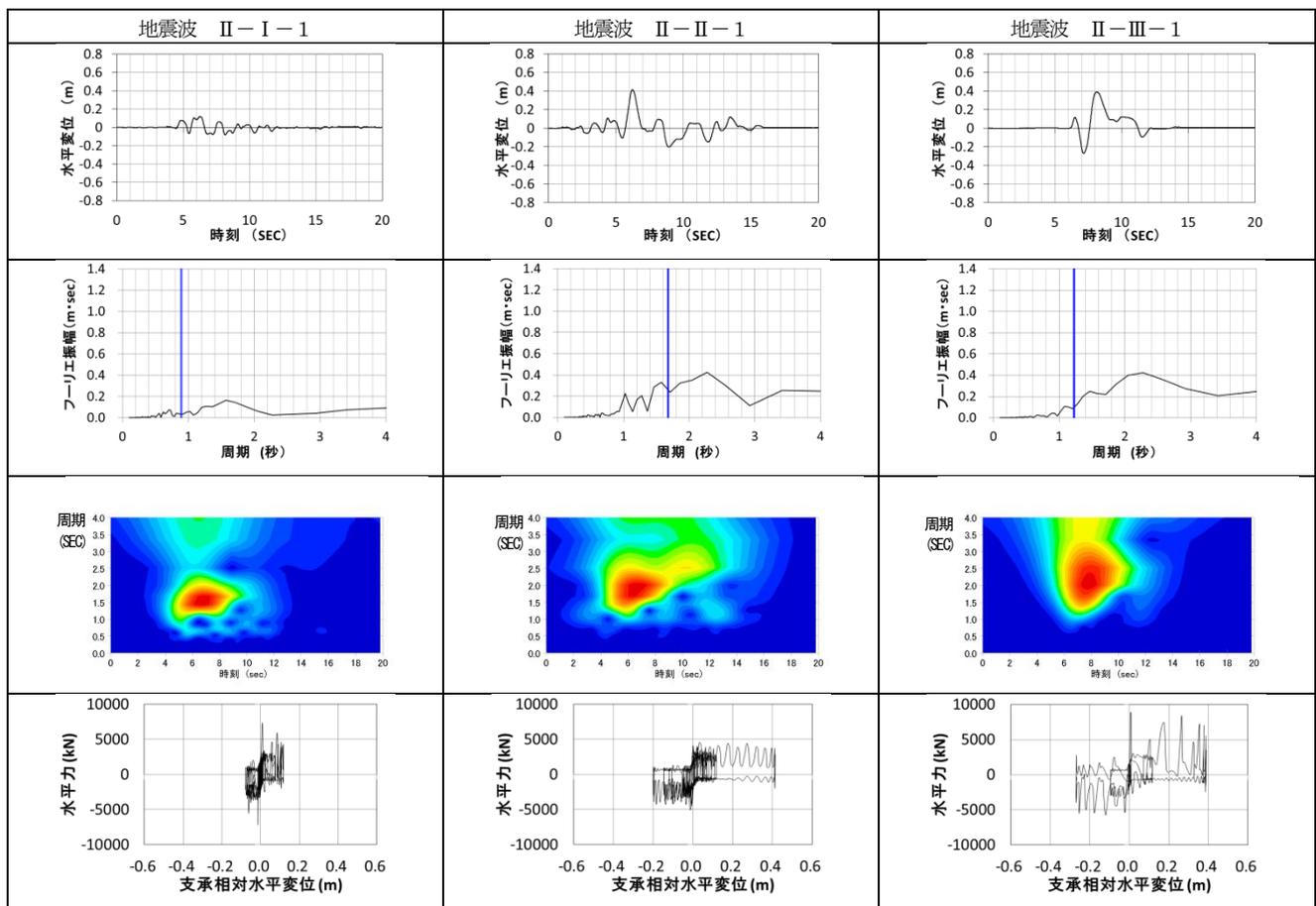


図-12 UPSS 支承 (斜面角度5度, $\mu=0.15$)

一方、免震支承および UPSS 支承結果では、フーリエスペクトルは卓越応答周期が幅広く分布している。また、簡易算定結果はフーリエスペクトルのピークとは一致せず、概ねスペクトルが高くなり始める周期帯付近に求まっている。これは、今回の簡易算定法が最大変位時の変形および加速度の瞬間値を使って計算しているのに対し、フーリエスペクトルの卓越応答周期は、最大変位時から復元する状態も含んだ形で算定されるためであると考えられる。

また、UPSS 支承の斜面角度の違いに着目すると、概して、斜面角度が小さい場合には卓越応答周期帯が広くなり、角度が大きくなるにつれ狭くなっている。

(3) ウェーブレット変換結果

ウェーブレット変換結果は、卓越する周期帯とその発生時刻が同時に表現されるものであるが、まず分散支承結果からは、地震波によらず同一の周期帯で長時間にわたりコンター色が強くなっている。この周期帯は簡易算定結果とも一致しており、さらに発生時刻は、時刻歴応答変位の振動の強弱にも対応が見て取れる。

次に、免震支承結果では、各地震波における主要動発生時刻付近で、幅広い周期が同時にコンター色が強くなっている。これは、支承剛性が第2勾配に移行し急激に

長周期化したことによるものと考えられる。また、主要動発生以降は、応答値が小さくなっていった。

一方、UPSS 支承の結果を見ると、斜面角度が小さい場合には、免震支承と同様に主要動発生時に幅広い周期が卓越している。さらに特徴的なものとして、図-10 に示す斜面角度5度 $\mu=0.05$ 結果では、高くなった周期帯が時間方向に継続する現象が見受けられる。これは、構造系自身の応答周期帯が長周期に移行したことを示している。このことは、UPSS 支承を用いると応答周期特性を調整できる可能性を示している。

(4) 支承復元力特性

最下段に示される支承の水平力 - 相対水平変位関係を見ると、分散および免震支承では一般に見られる応答結果である。一方、UPSS 支承の各結果には、衝撃にともなう大きな水平力が生じているが、今回の検討モデルでは平面すべり区間を微小値として設定したためであり、通常の平面すべりを有するモデルでは、平面すべり区間の滑動においても摩擦により応答速度が低下するため、斜めすべりへの移行時に発生する衝撃力は低減させるものと考えている。

表-2 卓越応答周期

卓越応答周期 (発生時刻)	II - I - 1			II - II - 1			II - III - 1		
	簡易 算定法	フーリエ スペクトル	ウェーブ レット変換	簡易 算定法	フーリエ スペクトル	ウェーブ レット変換	簡易 算定法	フーリエ スペクトル	ウェーブ レット変換
分散	1.27 (8.05)	1.28 (---)	1.25 (9.42)	1.28 (6.60)	1.28 (---)	1.25 (6.68)	1.29 (7.60)	1.28 (---)	1.25 (8.63)
免震	1.05 (5.65)	2.92 (---)	2.50 (6.51)	1.10 (6.53)	1.02 (---)	1.25 (6.15)	1.17 (7.58)	1.28 (---)	1.25 (7.33)
UPSS 5度 $\mu=0.05$	2.17 (6.98)	1.71 (---)	1.67 (7.30)	2.57 (6.22)	2.05 (---)	2.22 (6.55)	2.50 (8.12)	2.05 (---)	6.67 (6.55)
UPSS 10度 $\mu=0.05$	1.34 (6.69)	1.57 (---)	1.67 (7.38)	1.88 (6.17)	2.28 (---)	2.22 (6.77)	1.56 (8.08)	2.28 (---)	2.22 (9.19)
UPSS 15度 $\mu=0.05$	0.88 (6.67)	1.71 (---)	1.67 (6.96)	1.19 (6.13)	1.86 (---)	2.22 (7.09)	1.23 (8.01)	2.28 (---)	2.22 (9.16)
UPSS 5度 $\mu=0.10$	1.41 (6.93)	1.58 (---)	1.67 (7.01)	1.82 (7.00)	2.28 (---)	2.22 (7.07)	2.19 (8.10)	2.05 (---)	2.22 (8.48)
UPSS 5度 $\mu=0.15$	0.89 (5.99)	1.58 (---)	1.67 (6.85)	1.68 (---)	2.28 (---)	1.67 (6.28)	1.23 (8.01)	2.28 (---)	2.22 (7.98)

(5) 卓越応答周期

各手法による卓越応答周期を表-2 に整理した。表中の上段の数値は卓越応答周期であり、下段 () 内の数値はその発生時刻である。概ねフーリエスペクトル結果とウェーブレット変換結果の卓越振動数は同程度であり、簡易算定法が異なる周期を求めている。

7. まとめ

分散支承，免震支承および UPSS 支承を用いた橋脚モデルに対して非線形時刻歴応答解析を実施し，その応答変位を基に，最大応答変位から求まる固有周期（簡易算定による固有周期），フーリエ変換により求まるフーリエスペクトル，ウェーブレット変換を用いた変換結果の3つの手法により卓越応答周期を評価した。その結果，

- 1) 分散支承モデルはいずれの手法によっても卓越応答周期が明確であった。また，経過時刻に関わらず卓越応答周期は一定となることが確認された。
- 2) 免震支承モデルは，フーリエスペクトル結果およびウェーブレット変換結果では卓越応答周期が大きな幅を持っていた。さらにウェーブレット変換結果からは，主要動以降には大きな振動となっていないことがわかった。
- 3) UPSS 支承結果は免震支承結果と似た卓越応答周期を示したが，ウェーブレット変換結果において，時

間軸方向に卓越応答周期帯が推移していくケースも見受けられた。

8. あとがき

橋梁全体系に対する卓越応答周期を把握することは，耐震設計を行ううえで重要な項目のひとつである。卓越応答周期を把握することにより，地震時挙動が推定できる。さらに地震波自身をもつ周期特性との相関を考慮することで，卓越周期帯を避ける設計も可能となってくるものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 2) P. S. アジソン: 図説ウェーブレット変換ハンドブック，朝倉書店，2005
- 3) 佐藤，五十嵐ら: 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，A1S，Vol.69，No.4，p.I-609-I-621，2013.6.
- 4) 五十嵐，白石ら: 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
- 5) 佐藤，五十嵐ら: 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 -090，2013.9.

(??? 受付)

THE RESPONSE CHARACTERISTIC OF A VIBRATION SYSTEM WITH THE UPLIFTING SLIDE SHOE

Tomoaki SATO, Akira IGARASHI, Taiji MAZDA, Yukio ADACHI, Hiroshige UNO and Masahiro KITA

The Uplifting Slide Shoe (UPSS) is a kind of sliding bearing composed by a horizontal plane and two inclined planes. The restoring force of UPSS is caused by a gravitational potential energy. The time-

history characteristics is uniquely determined by the slope angle.

In this paper, a predominant period of UPSS is evaluated in comparison with rubber bearing and isolation bearing using the natural period based on the maximum displacement and the restoring force at that time, and the result of Fourier transformation and wavelet transformation. As a result, the predominant period of Fourier transformation results and wavelet transformation results, were generally consistent. Furthermore, by comparing the time history response result, the predominant period along the time axis becomes clear in the wavelet transform result.