

水平・上下動同時入力時の基礎-地盤-構造物系の非線形地震応答に関する基礎的検討

山下 典彦¹・宮脇 幸治郎²・井口 海都³

¹正会員 博士(工学) 大阪産業大学教授 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)
E-mail: yamasita@ce.osaka-sandai.ac.jp

²博士(工学) 大阪府立工業高等専門学校名誉教授 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)
E-mail: catfish0@zeus.eonet.ne.jp

³大阪産業大学学生 工学部都市創造工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)
E-mail: s16k004@ge.osaka-sandai.ac.jp

耐震設計の標準的手法として動的相互作用の効果を設計に取り込むには多くの課題が残されている。さらに、兵庫県南部地震以降、上下動が大きい地震動が観測され、それに起因すると思われる構造物の被害事例が存在するようになったことや、上部構造物の鉛直剛性は水平剛性と比較して大きいため、地盤との動的相互作用の影響も現れやすいことから検討が必要である。本研究では、道路橋の全体系を対象に、パラメータ励振の効果を上部構造物に曲げせん断型のはり要素でモデル化し、水平、鉛直及び回転の地盤ばねと剛体基礎に支持される基礎-地盤系の動的相互作用を考慮することで非線形地震応答解析を行う。そして、上下動やパラメータ励振の有無及び3つの地盤ばねの非線形特性が上部構造物の水平と上下の振動特性に及ぼす影響について検討する。

Key Words: horizontal and vertical earthquake motions, foundation-soil-structure system, Non-linear earthquake response, parametric excitation, dynamic soil-structure interaction

1. はじめに

動的相互作用の研究は、1954年の Housner ら¹⁾の研究をスタートとすると、60年以上の長い歴史を有している。しかしながら、耐震設計では基礎や地盤を無視した基礎固定で行われることが少なくない上に、未解明な点が多くモデル化や現象そのものの難解さから、標準的手法として動的相互作用の効果を設計に取り込むにはまだ多くの課題が残されている²⁾。さらに、兵庫県南部地震以降に上下動が大きい地震動が観測され、それに起因すると思われる構造物の被害事例³⁾が存在するようになったことや、上部構造物の鉛直剛性は水平剛性と比較して大きいため、地盤との動的相互作用の影響も現れやすい⁴⁾ことから検討が必要である。

一般に水平・上下動同時入力の応答計算は、水平動と上下動の応答計算を別個に行い、それらを合成することにより行っている。政尾は⁵⁾⁶⁾、水平動入力によって構造物が水平変位した瞬間に質点間の上下ばねによる上下振動が存在し、その上下振動が水平振動を励起するパラメータ励振(和差共振や係数励振振動とも言われ、機械

工学の分野では、近年、成書⁷⁾により数学理論とこれまでに明らかにされたさまざまな近似解手法が紹介されている。)を基礎-地盤-構造物系に取り入れた振動方程式を提案し、基礎固定とした線形地震応答解析を行っている。

本研究では、道路橋の全体系を対象に、パラメータ励振の効果を上部構造物に曲げせん断型のはり要素でモデル化し、水平、鉛直及び回転の地盤ばねと剛体基礎に支持される基礎-地盤系の動的相互作用を考慮することで非線形地震応答解析を行う。そして、上下動やパラメータ励振の有無及び3つの地盤ばねのバイリニア型復元力モデルの塑性2次勾配を初期剛性の0、5、10%と変化させた非線形特性が上部構造物の水平と上下の振動特性、さらには地盤変形によって生じる基礎の応答が上部構造物の応答に及ぼす影響について検討する。

2. パラメータ励振を考慮した運動方程式

ここでは、図-1に示す動的挙動を検討する道路橋の簡

略なばね-質点モデルを設定する。振動モデルは図-2に示すように上部構造物は曲げせん断型で各質点において水平、上下、回転の3自由度を持ち、基礎の部分も同様に3自由度を持つもので、質点の回転に伴う上下変位は無視している。全体座標系を耐震基礎地盤上面に $O-XY$ と設定し、入力地震波は水平に W_x 変位し、上下に W_y 変位する。基礎の底面中心に対する局所座標を $O'-x_f y_f$ とし、水平に u 変位し、上下に w 変位し、局所座標 $O''-xy$ に移動する。さらに、基礎は θ だけ回転する。

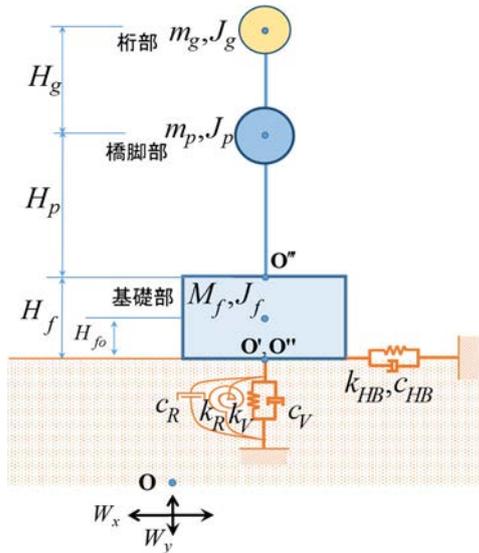


図-1 ばね-質点系モデル

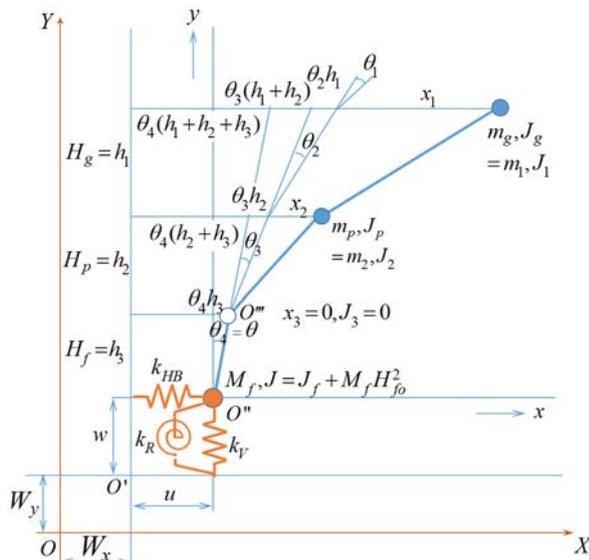


図-2 全体座標系

次に、橋脚の各質点の局所座標は、水平、上下、回転の変位をするが、該当質点より下部の質点の変位量の影響を受けた位置に質量重心が移動している。また、図-2から橋脚の質点を上から順に番号付け ($j=1\sim 3$) する

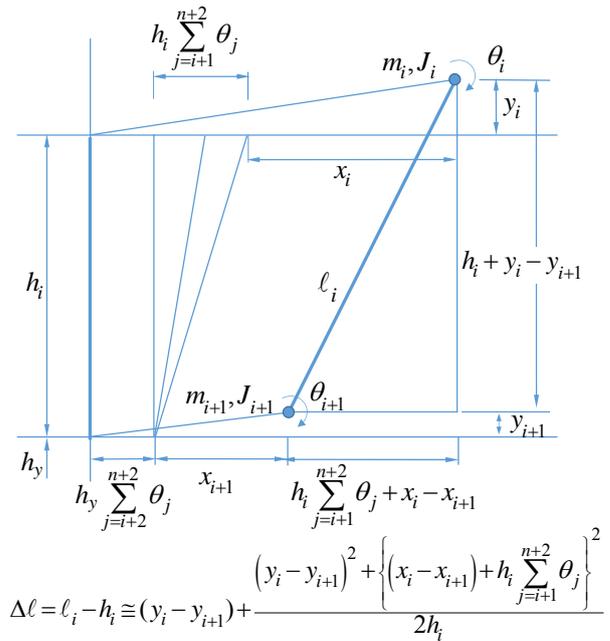


図-3 節点間の座標関係と軸伸縮量

と、図-3に示すように上部構造物の質点 i と $i+1$ との局所座標による弾性変形の関係より、座標 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) の部材長 l_i はピタゴラスの定理により求められ、両質点間の部材の伸び Δl は、マクローリン級数展開を利用すれば近似式⁹⁾から得られる。

そして、座標 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) を図-2に示す上部構造物の質点の座標系にもどし、系全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギー（基礎ばね、橋脚ばね、橋脚の軸伸縮によるばね）を算定すると、減衰項を省略したラグランジュ方程式による運動方程式⁹⁾は式(1)となる。 $\{m\}$ と $\{R\}$ はそれぞれ地震外力と補正外力で、後者の要素から上下変位応答と水平変位応答が互いに関連を持っており、これがパラメータ励振の効果を表現している。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = -\{M\} - \{R\} \quad (1)$$

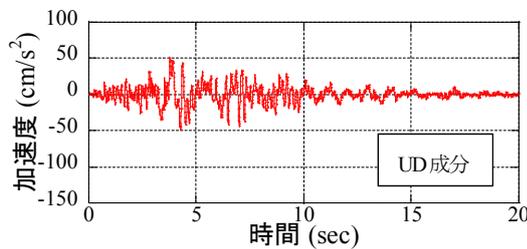
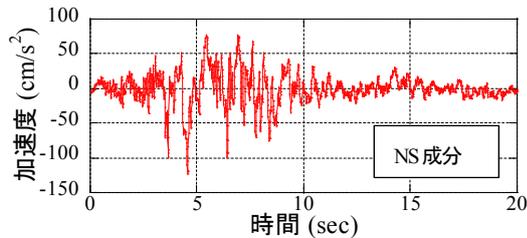
3. 解析手法と解析モデル

式(1)の地震応答解析は、ニューマークの β 法を利用し、変位 $\{x\}$ の絶対値の総和を計算し、相対誤差（ある時間断面における時刻 t の総和と時刻 $t-1$ の総和の差）が設定した値より小さければ次のステップに進む方法⁹⁾で実施した。解析モデルは、表-1に示す道路橋を対象としたパラメータを用い、ケース A（レベル1、線形）、

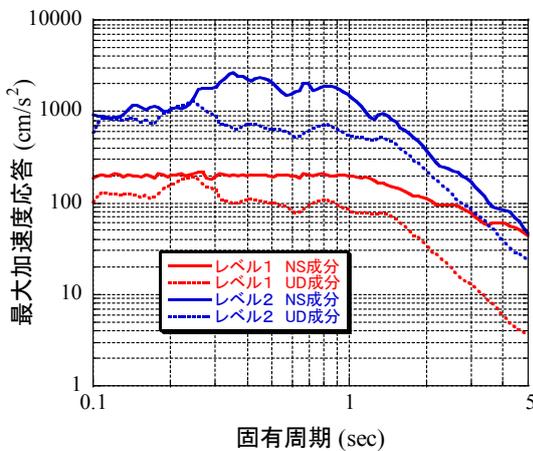
表-1 道路橋を対象としたパラメータ

上部 構造 物 及 び 基 礎	質量 m ($\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)	m_g	m_p	M_f	
		407.89	169.88		899.39
	弾性係数 E (kN/m^2)	E_g	E_p		
		2250000	8799738		
	断面2次 モーメント I (m^4)	I_g	I_p		
		0.0043279	9		
	せん断弾性 係数 G (kN/m^2)	G_g	G_p		
		900000	3519895		
断面積 A (m^2)	A_g	A_p			
	1.44	12			
部材長 H (m)	H_g	H_p	H_f		
	1.6	11	2.5		
慣性 モーメント J ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)	J_g	J_p	J_f		
	54472	177.55	12666		
地盤	ばね k (kN/m) or ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	k_{HB}	k_V	k_R	
		1459955	1713212		54225414

ケース B (レベル 2, 線形), ケース C (レベル 2, 非線形) の 3 種類を設定した. レベル 1 とは神戸海洋気象台の NS 成分を道路橋示方書⁹⁾の標準加速度応答スペクトル準拠 (I 種地盤) とした成分と, その NS 成分の振幅に観測波の UD 成分と NS 成分の最大値の比を乗じて作成した UD 成分の入力波形である. 図-4 にレベル 1 の NS 成分と UD 成分の入力波形とその加速度応答スペクトルを示し, スペクトルには比較のためレベル 2 (神戸海洋気象台) の各成分を併せて示している. ケース C の非線形地震応答解析は, 上部構造物は線形とし, 地盤ばねの復元力特性はバイリニア型を用いて行った. その際, 降伏変位¹⁰⁾はケース A の最大変位応答値 (後述する表-2 の u, w, θ) から設定し, 塑性 2 次勾配は初期剛性の 0, 5, 10% とした. さらに, 数値積分法は線形加速度法 ($\beta=1/6$) を用い, 減衰項はレーリー減衰とし, 固有値解析の 1 次と 3 次モードから定め, 微小時間間隔は 0.001 秒とした.



(a) レベル 1 の NS 成分と UD 成分の入力波形



(b) 応答スペクトル

図-4 レベル 1 の NS 成分と UD 成分の入力波形とその加速度応答スペクトル

4. 数値計算例

線形のケース A, B, 非線形のケース C で分けて数値計算例を示す.

(1) 線形解析

表-2 と表-3 はケース A とケース B の上下動の有無による最大変位応答値を示し, 横軸の単位は水平・上下が (m), 回転が (rad) である. また, 図-5 から図-6 は表-2 と表-3 の値をそれぞれ棒グラフで描いたものであるが, 単位が異なっているため, 回転が水平・上下と比較し相対的に小さく表示されている. なお, U_{max} の添え字 p は上部構造物のパラメータ励振を表している. まず, 上下動 (表-2 から表-3 の上下) の有無に着目すると, 上下有りて変位応答が大きくなったのは, ケース A のパラメータ励振無しで 3 つの変位 (y_1, y_2, w), パラメータ励振有りて 7 つの変位 ($x_1, y_1, y_2, \theta_1, u, w, \theta$), ケース B のパラメータ励振無しで 3 つの変位 (y_1, y_2, w), パラメータ励振有りて 7 つの変位 ($x_2, y_1, y_2, \theta_2, \theta_3, w, \theta$) である.

次に, パラメータ励振の有無に着目すると, パラメータ励振有りて変位応答が大きくなったのは, ケース A の上下有りて 4 つの変位 (θ_1, u, w, θ), 上下無しで 4 つの変位 (y_1, y_2, w, θ), ケース B の上下有りて 2 つの変位 (θ_1, θ), 上下無しで 6 つの変位 ($y_1, y_2, \theta_1, u, w, \theta$) である.

これより, 線形の場合, 上下動の有無及びパラメータ励振の有無によらず応答変位に与える影響は小さいことがわかる.

表-2 ケース A (レベル1, 線形) の上下動の有無による最大変位応答値

ケースA(上下有)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	1.4711E-02	1.3637E-02	4.2498E-04	9.1930E-05	2.6256E-05	1.2356E-03	1.2372E-03	1.1388E-03	1.0997E-03	6.4497E-07
Upmax	1.4708E-02	1.3614E-02	4.2391E-04	9.0754E-05	2.6385E-05	1.2338E-03	1.2354E-03	1.1392E-03	1.0998E-03	8.2153E-07
ケースA(上下無)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	1.4711E-02	1.3637E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	2.6256E-05	1.2356E-03	1.2372E-03	1.1388E-03	0.0000E+00	6.4497E-07
Upmax	1.4706E-02	1.3618E-02	4.1582E-05	3.3897E-05	2.6237E-05	1.2341E-03	1.2357E-03	1.1388E-03	1.8337E-06	6.4782E-07

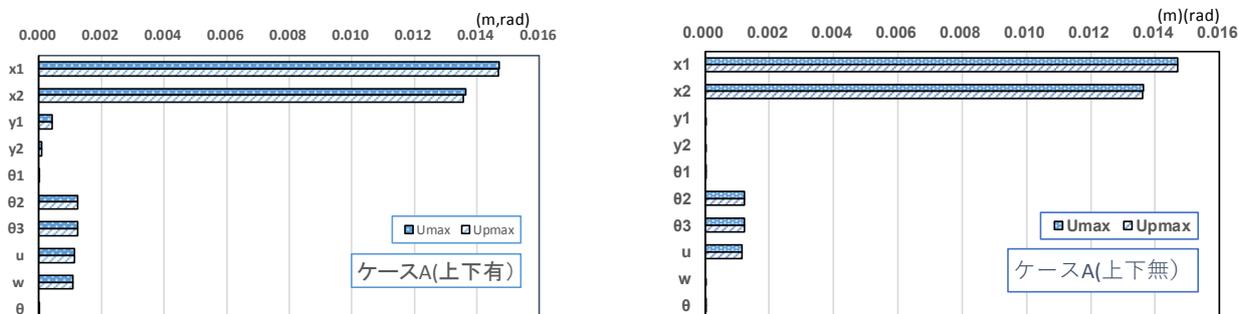


図-5 ケース A (レベル1, 線形) の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

表-3 ケース B (レベル2, 線形) の上下動の有無による最大変位応答値

ケースB(上下有)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	3.1183E-02	2.9723E-02	2.8122E-03	6.0832E-04	3.0812E-05	2.6858E-03	2.6896E-03	6.2398E-03	7.2767E-03	4.6966E-06
Upmax	3.1157E-02	2.9709E-02	2.6417E-03	5.7528E-04	3.2197E-05	2.6843E-03	2.6881E-03	6.2029E-03	7.2528E-03	9.6702E-06
ケースB(上下無)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	3.1183E-02	2.9723E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	3.0812E-05	2.6858E-03	2.6896E-03	6.2398E-03	0.0000E+00	4.6966E-06
Upmax	3.1181E-02	2.9633E-02	2.0136E-04	1.6246E-04	3.2707E-05	2.6782E-03	2.6818E-03	6.2425E-03	3.4691E-05	4.8326E-06

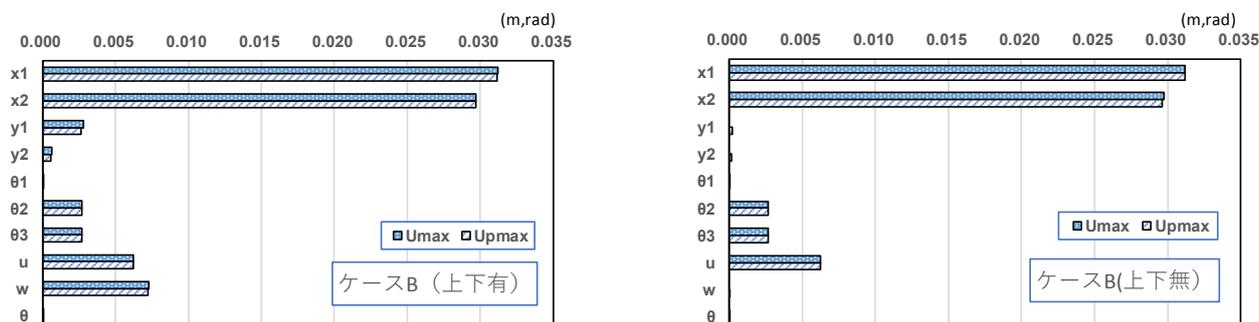


図-6 ケース B (レベル2, 線形) の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

(2) 非線形解析

表-4 から表-6 はケース C の塑性 2 次勾配をそれぞれ初期剛性の 0, 5, 10% で示し, 表示は線形解析と同様である.

まず, 上下動 (表-4 の上下) の有無に着目すると, 線形と同じく 3 つの上下変位 (y_1, y_2, w) 以外の応答変位に殆ど差は生じていない.

次に, パラメータ励振の有無に着目すると, 上下動の有無によらず 5 つの変位 ($x_1, x_2, \theta_2, \theta_3, u$) がパラメータ励振の影響により小さくなっている. また, 上下動の有無, パラメータ励振の有無によらず地盤ばねの非線形特性から基礎水平変位 (u) が大きくなっている.

塑性 2 次勾配の変化に着目すると, 塑性 2 次勾配 5% (表-5 の上下) は, 塑性 2 次勾配 10% と比較して上下動

の有無及びパラメータ励振の有無によらず基礎水平変位 (u) が大きくなっている以外, 同じ傾向をしている. 塑性 2 次勾配 0% (表-6 の上下) は, 塑性 2 次勾配 5, 10% と比較すると, 上下動の有無にかかわらず 8 つの変位 ($x_1, x_2, y_1, y_2, \theta_2, \theta_3, w, \theta$) でパラメータ励振の影響で変位が大きくなり, 上部構造物の水平変位 (x_1) では, 上下有り で約 1.2 倍大きくなっている. また, 基礎水平・回転変位 (u, θ) は, 上下動の有無及びパラメータ励振の有無によらず大きくなっている.

これより, 応答変位は塑性 2 次勾配を小さくすると, 上下動の有無によらずパラメータ励振の影響が大きく, 基礎の水平・回転変位は大きくなる.

図-10 は, ケース C (塑性 2 次勾配 0, 5, 10%) の水平・上下の履歴ループを示しており, 基礎水平は上下動

表4 ケースC (レベル2, 非線形, 塑性2次勾配10%) の上下動の有無による最大変位応答値

ケースC(上下有)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	3.6065E-02	3.2072E-02	1.0381E-03	2.0042E-04	3.8632E-05	2.9424E-03	2.9320E-03	4.5446E-02	1.1602E-02	5.1250E-05
Upmax	3.5889E-02	3.1811E-02	8.7385E-04	1.9841E-04	4.1553E-05	2.9204E-03	2.9093E-03	4.5347E-02	1.1589E-02	5.4060E-05
ケースC(上下無)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	3.6065E-02	3.2072E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	3.8632E-05	2.9424E-03	2.9320E-03	4.5446E-02	0.0000E+00	5.1250E-05
Upmax	3.5931E-02	3.1815E-02	2.4942E-04	1.8919E-04	4.1171E-05	2.9208E-03	2.9097E-03	4.5377E-02	8.1971E-05	5.6744E-05

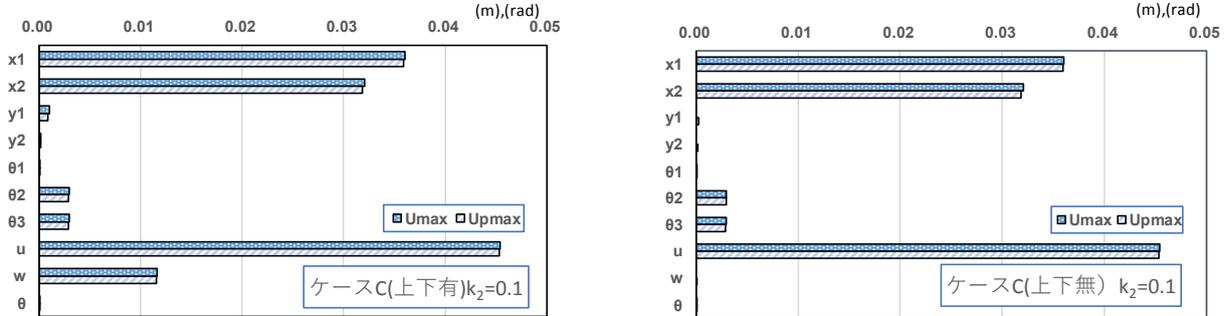


図7 ケースC (レベル2, 非線形, 塑性2次勾配10%) の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

表5 ケースC (レベル2, 非線形, 塑性2次勾配5%) の上下動の有無による最大変位応答値

ケースC(上下有)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	3.0524E-02	2.7139E-02	8.7476E-04	1.7442E-04	3.2874E-05	2.4849E-03	2.4780E-03	5.5731E-02	1.1783E-02	6.3508E-05
Upmax	3.0350E-02	2.6935E-02	8.8643E-04	1.8739E-04	3.5038E-05	2.4665E-03	2.4597E-03	5.5629E-02	1.1775E-02	5.3668E-05
ケースC(上下無)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	3.0524E-02	2.7139E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	3.2874E-05	2.4849E-03	2.4780E-03	5.5731E-02	0.0000E+00	6.3508E-05
Upmax	3.0429E-02	2.6966E-02	1.7753E-04	1.3519E-04	3.4681E-05	2.4702E-03	2.4629E-03	5.5674E-02	4.5886E-05	6.3825E-05

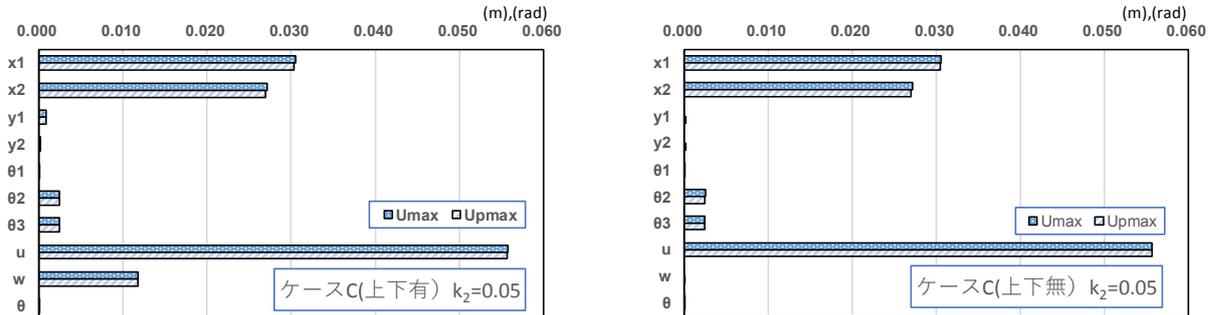


図8 ケースC (レベル2, 非線形, 塑性2次勾配5%) の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

表6 ケースC (レベル2, 非線形, 塑性2次勾配0%) の上下動の有無による最大変位応答値

ケースC(上下有)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	5.1949E-02	4.8602E-02	9.4506E-04	1.8075E-04	5.7291E-04	4.4061E-03	4.4112E-03	1.1028E-01	1.2626E-02	2.1506E-04
Upmax	6.2021E-02	5.7726E-02	1.1402E-03	5.2402E-04	3.2626E-04	5.2362E-03	5.2418E-03	1.0905E-01	1.2633E-02	1.1707E-02
ケースC(上下無)	x1	x2	y1	y2	θ_1	θ_2	θ_3	u	w	θ
Umax	5.1949E-02	4.8602E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	5.7291E-04	4.4061E-03	4.4112E-03	1.1028E-01	0.0000E+00	2.1506E-04
Upmax	6.8806E-02	6.3972E-02	5.2362E-04	4.2942E-04	3.8022E-04	5.8038E-03	5.8097E-03	1.0915E-01	4.3199E-05	1.2732E-02

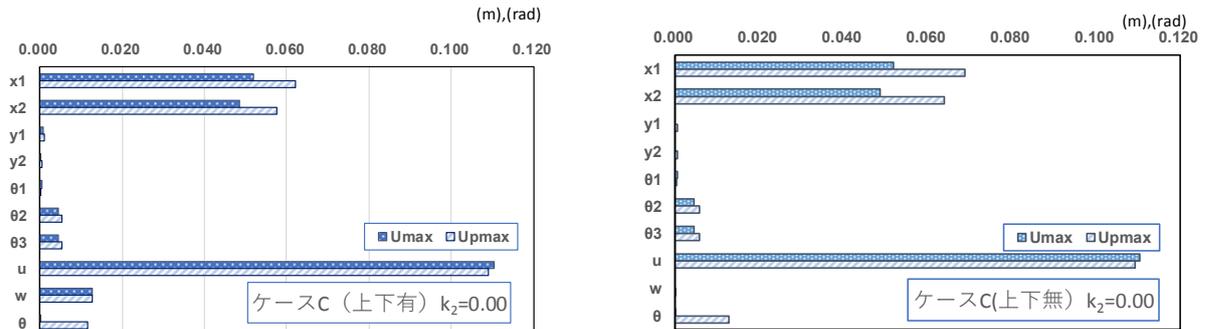


図9 ケースC (レベル2, 非線形, 塑性2次勾配0%) の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

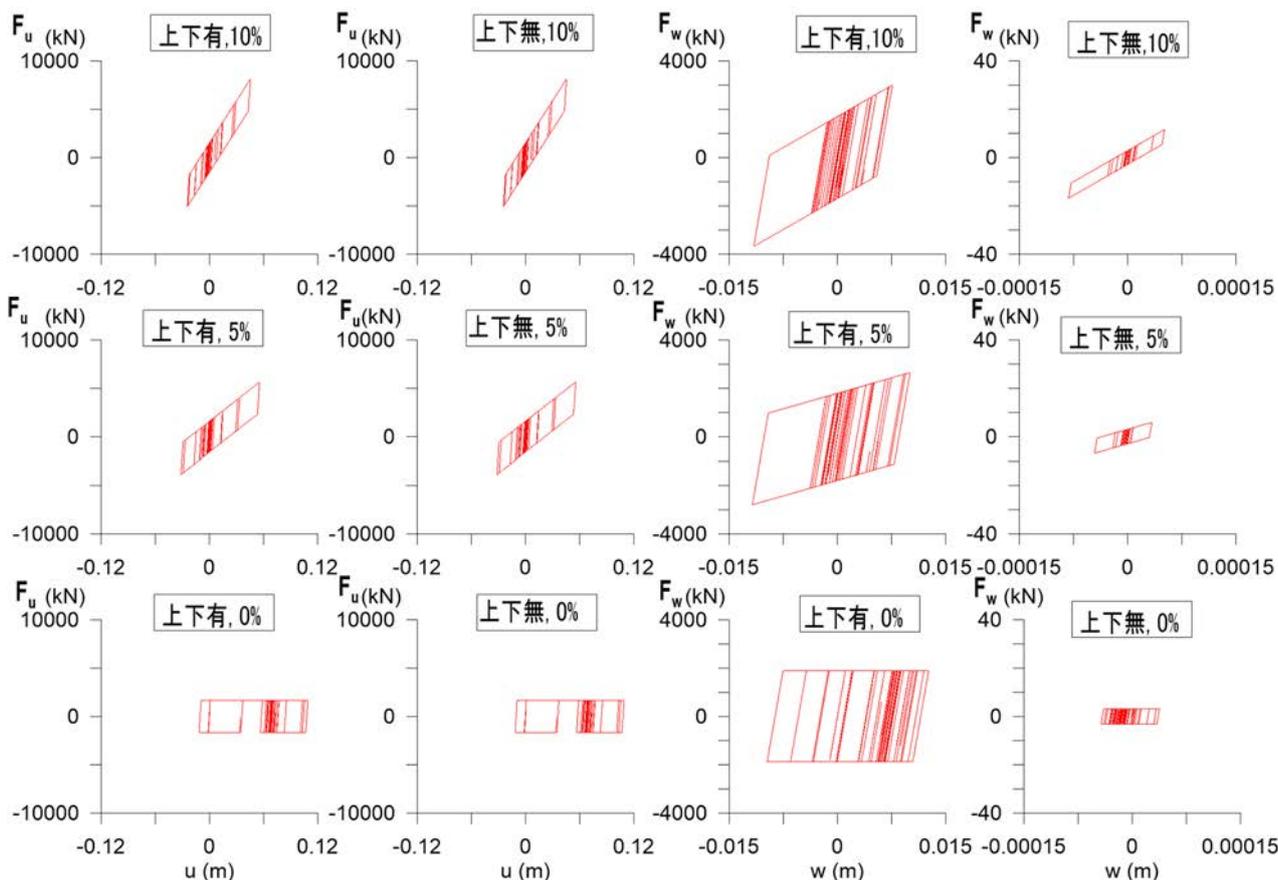


図-10 上下動の有無による基礎の水平・上下の履歴ループ (パラメータ励振有, 塑性2次勾配0,5,10%)

表-7 基礎上端から桁部の質点位置での水平変位 (m)

塑性2次勾配 (%)	上下有		上下無	
	パラメータ励振有	パラメータ励振無	パラメータ励振有	パラメータ励振無
10	0.7713E-01	0.7763E-01	0.7741E-01	0.7759E-01
5	0.6508E-01	0.6553E-01	0.6563E-01	0.6579E-01
0	0.1362E+00	0.1143E+00	0.1124E+00	0.1156E+00

の有無で殆ど変化はなく、塑性2次勾配が小さいほど変位が大きくなっていることがわかる。基礎上下は上下動の有無で大きな差を生じ、上下有りでは変位が塑性2次勾配10から5%で大きくなり、5から0%で小さくなっており、上下無しでは変位が塑性2次勾配が小さいほど変位が小さくなっており、さらに、線形関係ではなく履歴ループが描かれている。これは、補正外力 $\{R\}$ の要素から上下変位応答と水平変位応答が互いに関連を持っていることがわかる。

表-7は、上下動の有無、パラメータ励振の有無による基礎上端から桁部の質点位置での水平変位を塑性2次勾配0, 5, 10%ごとに示したもので、上下動の有無、パラメータ励振の有無で殆ど差はなく、塑性2次勾配10%から5%で0.85倍程度小さくなり、5%から0%で2倍程度大きくなっていることがわかる。つまり、上部構造物の水平変位への影響は、上下動の有無及びパラメータ励

振の有無によらず小さく、塑性2次勾配の変化で大きいことがわかる。

5. まとめ

本研究では、道路橋の全体系を対象に、パラメータ励振の効果を上部構造物に曲げせん断型のはり要素でモデル化し、水平、鉛直及び回転の地盤ばねと剛体基礎に支持される基礎-地盤系の動的相互作用を考慮することで非線形地震応答解析を行い、上下動やパラメータ励振の有無及び3つの地盤ばねのパイリニア型復元力モデルの塑性2次勾配を初期剛性の0, 5, 10%と変化させた非線形特性が上部構造物の水平と上下の振動特性、さらには地盤変形によって生じる基礎の応答が上部構造物の応答に及ぼす影響について検討した。

本検討の数値計算例から得られた結果は以下の通りで

ある。

- (1) 塑性2次勾配を変化させた非線形特性の変位応答への影響は、上下動の有無及びパラメータ励振の有無で異なる。
- (2) パラメータ励振有りで上下動の有無による基礎の水平、上下の履歴ループは、基礎水平で殆ど差は生じていないが、パラメータ励振の影響により基礎上下で大きな差が生じる。さらに、上下無しでパラメータ励振の影響により非線形履歴ループが描かれている。
- (3) 上部構造物の水平変位への影響は、上下動の有無及びパラメータ励振の有無によらず小さく、塑性2次勾配の変化で大きい。

本検討により、特に、塑性2次勾配を変化させた非線形特性による上部構造物の変位への影響が大きいことがわかったが、その特性を概観したのみであり、未解明な点も多く、今後は、全体系だけでなく上部構造物の非線形特性を含む詳細なモデル化による検討が必要である。

謝辞：本研究の一部は一般財団法人レントオール奨学財団の研究助成によった。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) R.G.Merritt, G.W.Housner: Effect of Foundation Compliance on Earthquake Stresses in Multistory Buildings, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.44, No.4, pp.551-569, 1954.

- 2) 日本建築学会構造委員会振動運営委員会地盤基礎系振動小委員会：ワークショップ 地盤と建物の動的相互作用の現象解明と耐震設計－SSI研究の現状と2016年熊本地震の検討事例－, 2017.
- 3) 土木学会関西支部調査研究委員会：都市直下地震での鉛直方向の免震構造に関する調査研究委員会成果報告書 2019 https://www.jsce-kansai.net/wp-content/uploads/2019/06/chosa_chokka_2017-2018.pdf (2019年9月5日閲覧)
- 4) 木下貴博, 佐藤利昭, 永野正行, 北村春幸：強震観測に基づく免震構造の上下解析モデルの検証と動的相互作用の簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第709号, pp.391-400, 2015.
- 5) 政尾 亨：水平・上下動同時入力時の構造物の応答の特性について－パラメータ励振を考慮した地震応答解析－, 構造工学論文集, Vol.44B, pp.349-357, 1998.
- 6) 政尾 亨：水平・上下動同時入力時の構造物の地震応答特性, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.2585-2590, 1998.
- 7) 小寺 忠：パラメータ励振, 森北出版, 2010.
- 8) 山下典彦, 宮脇幸次郎, 井口海都：水平・上下動同時入力時の基礎-地盤-構造物系の非線形地震応答解析, 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.223-226, 2019.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1990.
- 10) 永田和寿, 渡邊英一, 杉浦邦征, 宇都宮智昭：基礎-構造物系の非線形動的相互作用に関する研究, 第23回地震工学研究発表会講演概要, pp.473-476, 1995.

BASIC STUDY ON NON-LINEAR EARTHQUAKE RESPONSE OF FOUNDATION-SOIL-STRUCTURE SYSTEM DURING HORIZONTAL AND VERTICAL EARTHQUAKE MOTIONS

Norihiko YAMASHITA, Kojiro MIYAWAKI and Kaito IGUCHI

Many problems remain in incorporating the effects of dynamic soil structure interaction into the design as a standard method for seismic design. There are many unexplained points, and because of the difficulty in modeling and in the phenomenon itself, many problems remain for incorporating the effects of dynamic interaction into design as a standardized method. In addition, large vertical ground motions, including the vertical rigidity of the upper structure compared to the horizontal rigidity, have been observed since the Hyogoken-Nanbu Earthquake, there have been cases of damage to structures that are thought to be due to this event. As such, the influence of the dynamic soil-structure interaction with the ground is likely to be present and therefore needs to be studied.

In this study, the effect of parameter excitation was modeled on a superstructure by bending shear type beam elements, the foundation-soil system was also supported by a rigid foundation with horizontal, vertical and rotating soil springs. Nonlinear seismic response analysis was performed by considering the dynamic soil-structure interactions of the system. The effect of the vertical motion, parameter excitation and the non-linear characteristics of the three soil springs on the horizontal and vertical vibration characteristics of the superstructure, as well as the response of the foundation caused by soil deformation by the response of the superstructure were investigated.