

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

山下 典彦¹・宮脇 幸治郎²・井口 海都³

¹正会員 博（工） 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）

²博（工） 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）

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）

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べて大きい場合、地盤との動的相互作用の影響も現れやすい³⁾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⁴⁾、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（和差共振とも言われる共振状態）を基礎-地盤-構造物系に取り入れ振動方程式を提案し、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、こ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、鉛直およ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、3つの地盤ばねの非線形特性や上下動の有無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に及ぼす影響について検討を行う。

2. パラメータ励振を考慮した運動方程式

振動モデルは図-1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、回転、上下の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。

図-2に示す上部構造物の質点 i と $i+1$ との局部座標による弾性変形の関係から、両質点間の部材の伸び ℓ_i は、座標 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) と図からマクローリン展開式を用いれば ℓ_i に対する近似式⁵⁾が得られる。

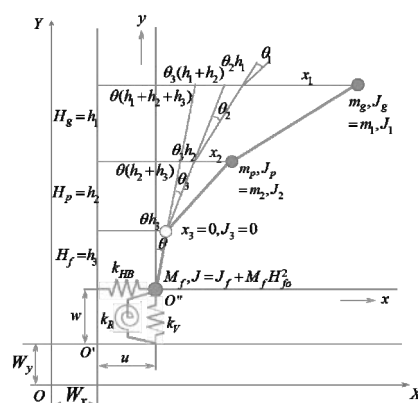


図-1 全体座標系

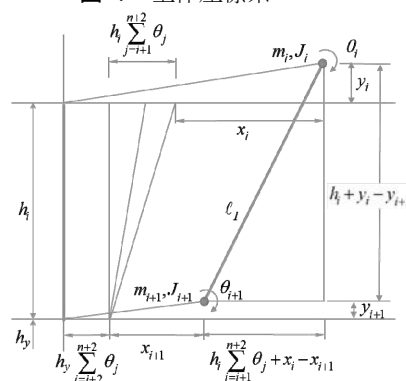


図-2 節点間の座標関係

ここに,

$$\{x\} = \{x_1 \quad x_2 \quad y_1 \quad y_2 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad u \quad w \quad \theta\}^T, \quad H_1 = H_g + H_p, \quad H_2 = H_g + H_p + H_f, \quad H_3 = H_p + H_f, \\ a_1 = \left\{ \frac{(x_1 - x_2)}{H_g} + (\theta_2 + \theta_3) \right\} \left\{ k_g^N (y_1 - y_2) + b_1 \right\}, \quad a_2 = \left(\frac{x_2}{H_p} + \theta_3 \right) \left(k_p^N y_2 + b_2 \right), \quad b_1 = \frac{k_g^N H_g}{2} \left\{ \frac{(x_1 - x_2)}{H_g} + (\theta_2 + \theta_3) \right\}^2, \quad b_2 = \frac{k_p^N H_p}{2} \left(\frac{x_2}{H_p} + \theta_3 \right)^2$$

3. 数值計算例

表-1 道路橋を対象としたパラメータ

- 224 -

表-2 ケース A（レベル 1，線形）の上下動の有無による変位応答

ケースA(上下有)	x1	x2	y1	y2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	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	1.4691E-02	1.3559E-02	4.2391E-04	9.0754E-05	2.6505E-05	1.2293E-03	1.2306E-03	1.1403E-03	1.0998E-03	1.8004E-06
ケースA(上下無)	x1	x2	y1	y2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	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	1.4693E-02	1.3562E-02	4.1582E-05	3.3897E-05	2.6354E-05	1.2296E-03	1.2310E-03	1.1388E-03	1.8337E-06	1.1029E-06

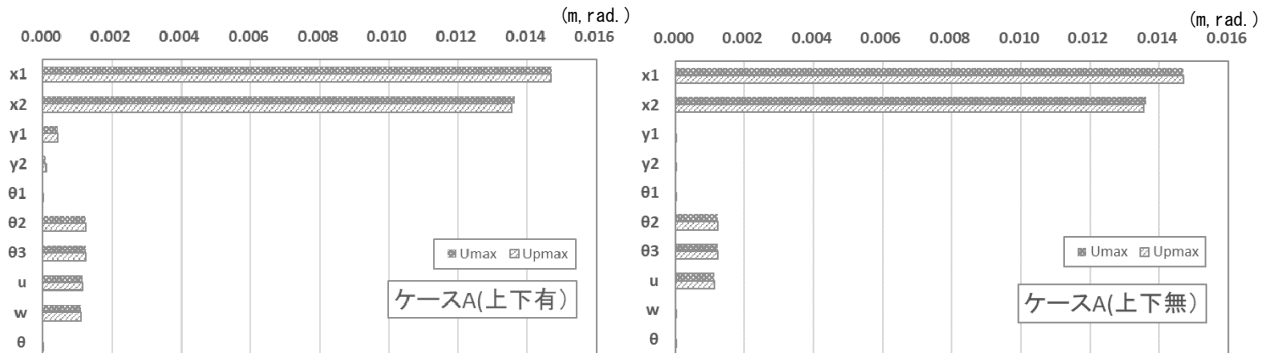


図-3 ケース A（レベル 1，線形）の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

表-3 ケース B（レベル 2，線形）の上下動の有無による変位応答

ケースB(上下有)	x1	x2	y1	y2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	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	3.0797E-02	2.9625E-02	2.6417E-03	5.7528E-04	4.1728E-05	2.6778E-03	2.6811E-03	6.1768E-03	7.2528E-03	3.8890E-05
ケースB(上下無)	x1	x2	y1	y2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	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	3.1194E-02	2.9359E-02	2.0136E-04	1.6246E-04	3.9139E-05	2.6557E-03	2.6584E-03	6.2507E-03	3.4691E-05	9.4092E-06

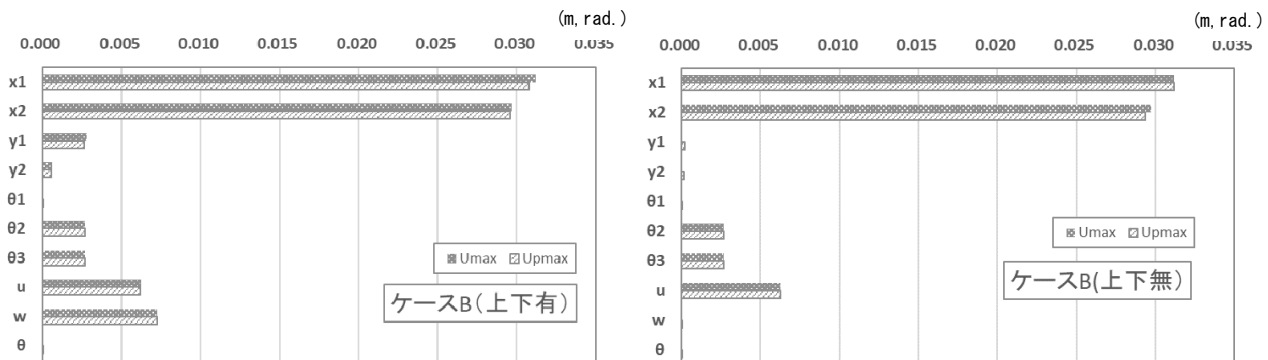


図-4 ケース B（レベル 2，線形）の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

表-4 ケース C（レベル 2，非線形）の上下動の有無による変位応答

ケースC(上下有)	x1	x2	y1	y2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	u	w	θ
Umax	9.9097E-02	8.2986E-02	1.4661E-03	3.3662E-04	4.6653E-05	7.6548E-03	7.5207E-03	4.5419E-02	1.1453E-02	1.3104E-02
Upmax	3.5502E-02	3.3070E-02	2.4513E-03	1.3273E-03	9.1212E-05	2.8591E-03	2.8463E-03	4.5062E-02	1.1589E-02	3.0450E-03
ケースC(上下無)	x1	x2	y1	y2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	u	w	θ
Umax	6.7583E-02	5.9857E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	4.2832E-05	5.5178E-03	5.4781E-03	4.6054E-02	0.0000E+00	7.8657E-03
Upmax	3.5540E-02	3.1051E-02	1.0127E-03	6.5587E-04	8.5899E-05	2.8564E-03	2.8435E-03	4.5186E-02	4.3021E-04	9.3317E-04

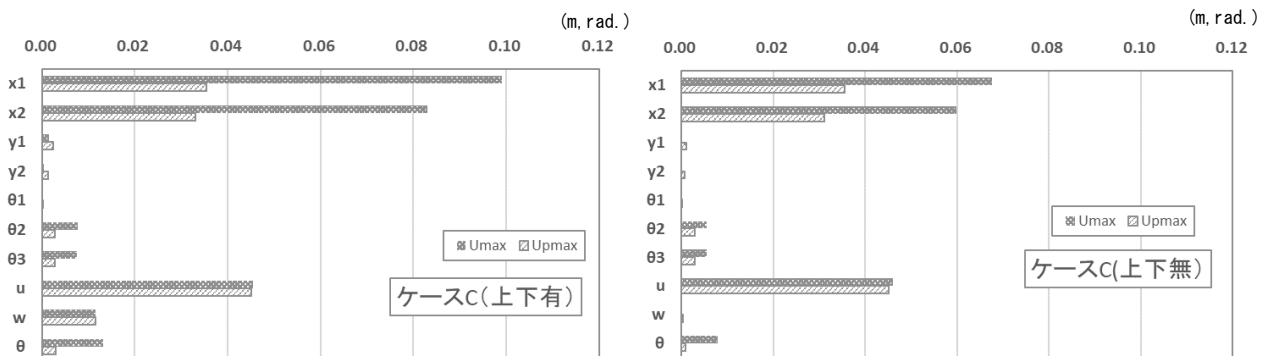


図-5 ケース C（レベル 2，非線形）の上下動の有無によるパラメータ励振の影響

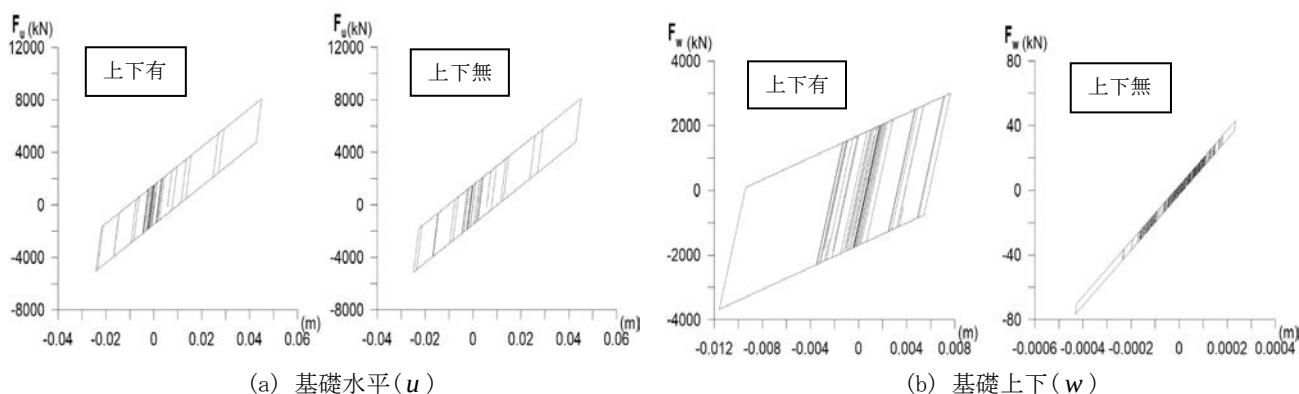


図-6 上下動の有無による基礎の水平・上下の履歴ループ（パラメータ励振有）

さらに、上部構造物のばねは線形とし、応答計算は線形加速度法（ $\beta=1/6$ ）を用い、減衰マトリクスはレーリー減衰、入力地震動は線形補間し微小時間は0.001秒、塑性2次勾配は弾性剛性の10%とした。

表-2から表-4はそれぞれケースAからケースCの上下動の有無による最大応答変位を示し、単位は水平・上下が(m)、回転が(rad.)である。また、図-3から図-5は表-2から表-4の値をそれぞれ棒グラフで描いたものである。なお、添え字pはパラメータ励振を表している。

まず、上下動の有無に着目すると、ケースAでは、上下動有りで上下変位(y_1, y_2, w)に差が生じているが、水平変位には殆ど差が生じていない。ケースBでも同様な傾向が見られるが、入力地震動の振幅が大きくなったことから、ケースAと比較して上下変位(y_1, y_2, w)で大きな差が生じている。ケースCでは、入力地震動の振幅だけでなく地盤ばねの非線形復元力特性が加わったことから、基礎のロッキング θ が大きくなり、それに伴い水平変位(x_1, x_2, u)が大きくなっている。

次に、上部構造物のパラメータ励振の有無に着目すると、全てのケースで上下動無しでパラメータ励振無しの場合、上下変位(y_1, y_2, w)は生じていない。さらに、ケースAとケースBでは上下動の有無による違いは殆ど見受けられない。ケースCでは、パラメータ励振有りの場合で変位($x_1, x_2, \theta_2, \theta_3, \theta$)が小さくなっている。その詳細を比(パラメータ励振無し/パラメータ励振有り)で表すと、上下動有り、2.79, 2.51, 2.68, 2.64, 4.30、上下動無し、1.90, 1.93, 1.93, 1.92, 8.43となっており、両者共に上部構造物のパラメータ励振が基礎のロッキングの応答に影響を与えていることがわかる。

図-6はパラメータ励振有りで上下動の有無による基礎の水平・上下の履歴ループを示しており、上下動無しでパラメータ励振有りの場合もその影響によ

り履歴ループが描かれている。

4. まとめ

道路橋の上部構造物にパラメータ励振を取り入れた基礎—地盤—構造物系の振動モデルに上下動の有無による変位応答を求めた結果、特に、非線形地震応答においてパラメータ励振の影響が生じることがわかった。しかしながら、その特性を概観したのみであり未解明な点も多く、詳細な検討が必要である。

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 and 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 1990.