

# P- 効果を考慮した 3 自由度モデルの 非線形応答解析に関する研究

山下典彦<sup>1</sup>・原田隆典<sup>2</sup>・長野雄大<sup>3</sup>

<sup>1</sup>神戸市立工業高等専門学校都市工学科助教授 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)

E-mail:yamasita@kobe-kosen.ac.jp

<sup>2</sup>宮崎大学工学部土木環境工学科教授 (〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail:harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

<sup>3</sup>神戸大学理学部地球惑星科学科学生 元神戸高専学生 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:0163485s@y03.kobe-u.ac.jp

重力に伴う復元力の低下をP- 効果と呼んでおり、水平復元力が弾塑性応答をする場合は重力の影響により負勾配の復元力特性が生じ、激震による構造物の倒壊の原因の1つとも考えられる。さらに、基礎の存在がその応答に大きく影響を与えることは言うまでもない。本研究では、P- 効果を考慮した上部構造物と基礎から構成される3自由度モデルを用いて地盤種別および設計地震動レベルについてパラメトリック解析を行いP- 効果が応答に与える影響について検討した。その結果、基礎を固定するか否かによって、さらにP- 効果を考慮するか否かによって変位応答は地盤ばねの設定で大きく異なり、P- 効果を考慮した解析が現実的であることがわかった。

**Key Words :** P- effect, non-linear response analysis, foundation, three degree of freedom system

## 1. はじめに

道路橋示方書は、平成2年に鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の導入<sup>1)</sup>、平成8年には、兵庫県南部地震による道路橋の甚大な被害を踏まえてマグニチュード7級の内陸直下で発生する地震に対して耐震性を確保<sup>2)</sup>、平成14年の改訂では性能規定型の技術基準を目指して見直しが行われている<sup>3)</sup>。しかしながら、この性能規定型の設計法を実現するためには、コンクリート構造物や鋼構造物の塑性域での動的挙動や終局強度を精度良く評価する手法の開発が必要である<sup>4)</sup>。

重力による復元力の低下をP- 効果<sup>5),6),7)</sup>と呼んでおり、構造物の倒壊の原因の1つと考えられる重要な量である。このP- 効果を考慮すると負の剛性分だけ構造物の剛性が低下する。塑性域においては完全弾塑性の復元力特性の場合、剛性が負になり地震時の塑性変形が片側に偏りやすくなり、最大変形量も増大する。1995年に発生した兵庫県南部地震においても、阪神高速道路3号神戸線で実際に構造物の倒壊が発生するなど構造物に甚大な被害が生じた。それ以降、構造物の非線形効果も考慮した時刻歴応答解析による照査が義務付けられたが、その際、P- 効果は考慮されず、通常的设计では無視されている。さらに、その破壊過程を詳細に検討した研究も

少ないのが現状である。本研究では、P- 効果による水平復元力低下の影響とそれが基礎の応答に与える影響を調べるために、P- 効果を考慮した基礎-地盤-構造物系の3自由度モデルを提案し、地盤ばねの設定を変えることで時刻歴応答解析を行った。

## 2. 解析手法

基礎-地盤-構造物系を図-1(a)に示すような基礎と構造物の動的相互作用を考慮した3自由度系、つまり上部構造物の回転運動、基礎の並進運動および回転運動にモデル化し、図-1(b)のように振動モデルの座標系を定めると減衰項を省略した振動方程式は次式ようになる。なお、振動方程式の誘導にあたっては、連成項を無視している。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{I_1\}\ddot{u}_G - [M]\{I_2\}\ddot{\phi}_G \quad (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_s H^2 & m_s H & m_s H^2 \\ m_s H & m_s + M & m_s H \\ m_s H^2 & m_s H & m_s H^2 + J \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{RS} - m_s H(g + \ddot{v}) & 0 & -m_s H(g + \ddot{v}) \\ 0 & k_H & 0 \\ -m_s H(g + \ddot{v}) & 0 & k_{RF} - m_s H(g + \ddot{v}) \end{bmatrix}$$

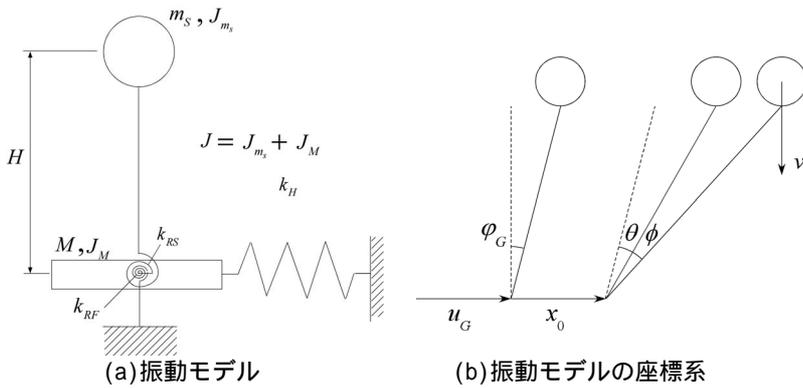


図-1 基礎-地盤-構造物系のモデル化

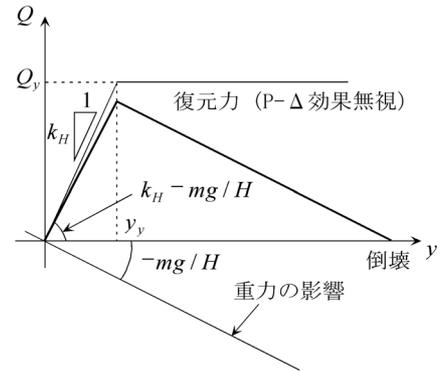


図-2 P- 効果の影響

表-1 上部構造物および基礎の諸定数

上部構造物質量	153.06t
上部構造物回転慣性	532t・m・s <sup>2</sup>
上部構造物橋脚高	15m
基礎質量	153.06t
基礎回転慣性	95 t・m・s <sup>2</sup>

表-2 減衰定数およびばね定数

	減衰定数	ばね定数
上部構造物	0.05	1.12 × 10 <sup>3</sup> t/m
基礎の並進(種地盤)	0.10	2.72 × 10 <sup>4</sup> t/m
基礎の回転(種地盤)	0.10	4.54 × 10 <sup>5</sup> t・m
基礎の並進(種地盤)	0.10	9.54 × 10 <sup>3</sup> t/m
基礎の回転(種地盤)	0.10	1.73 × 10 <sup>5</sup> t・m

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \phi \\ x_0 \\ \theta \end{Bmatrix}, \{I_1\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \{I_2\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

ここに、 $m_s$ 、 $M$  は上部構造物および基礎の質量、 $J = J_{ms} + J_M$  は回転慣性で、 $J_{ms}$ 、 $J_M$  は上部構造物、基礎の回転慣性、 $k_{RS}$ 、 $k_H$ 、 $k_{RF}$  は上部構造物の回転ばね剛性、基礎の並進および回転ばね剛性、 $\ddot{y}$  は鉛直入力地震動、 $\ddot{u}_G$ 、 $\dot{\phi}_G$  は有効入力地震動を表している。 $[K]\{y\}$  は上部構造物と基礎の復元力項で、復元力特性として上部構造物は完全弾塑性型およびバイリニア型、基礎はバイリニア型のモデルとした。さらに上部構造物の復元力特性については図-2に示すようなP- 効果による復元力の低下を考慮している。図において $Q=0$ になる時、つまり構造物の復元力とP- 効果による付加的な層せん断力が等しくなったときが倒壊(終局状態)である。時刻歴応答解析は増分法を用いて行い、動的相互作用の影響を考慮するために、地盤種別(種地盤(N値40・10))、設計地震動レベル(道路橋示方書(1990)<sup>1)</sup>レベル1およびレベル2、道路橋示方書(1996, 2002)<sup>2),3)</sup>レベル2(タイプ: 神戸海洋気象台観測地震記録のNS成分)、復元力特性の第2剛性を変化させた場合についてパラメトリック解析を行った。

### 3. 解析モデル

地盤ばねの設定幅が、応答にどのような影響を与えるかを調べるために、直径8m×深さ10m程度の基礎を有する鋼製橋脚<sup>8)</sup>を解析対象とした。上部構造物および基礎の諸定数を表-1に示す。なお、地盤ば

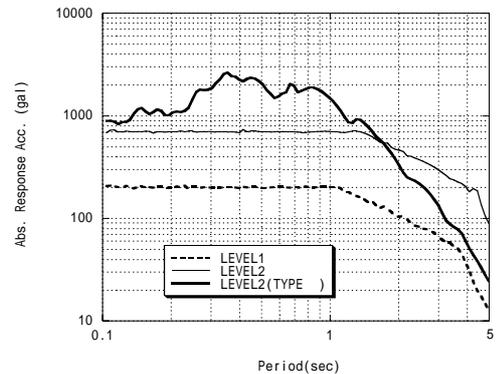


図-3 応答スペクトル

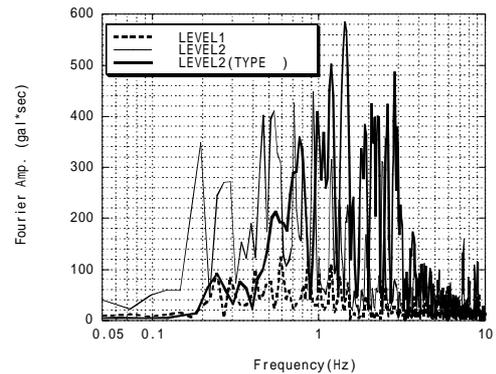
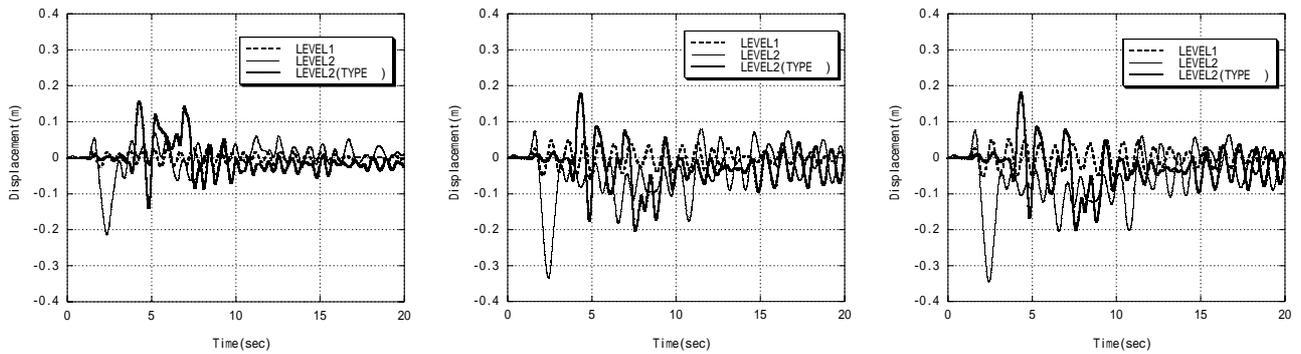
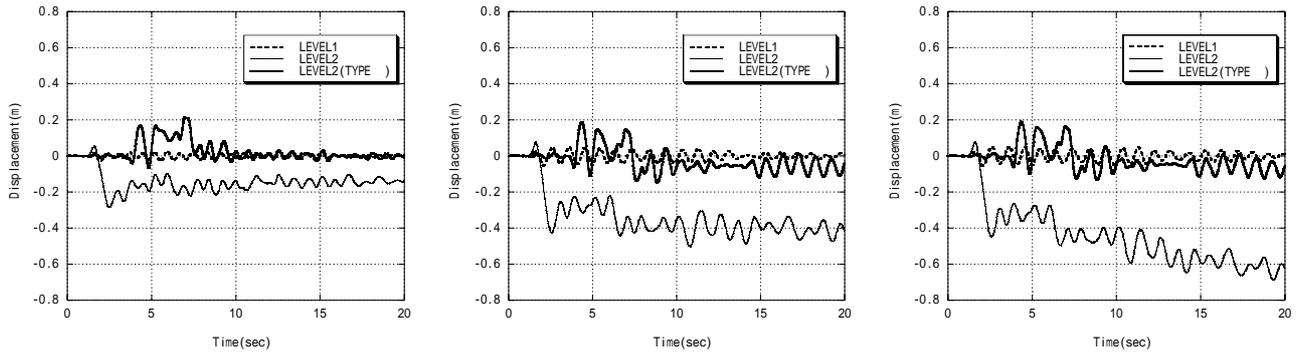


図-4 フーリエスペクトル

ねの影響のみを調べるため入力地震動(基礎重心位置に作用)、基礎寸法、鋼製橋脚の諸元、基礎-地盤間の減衰定数については地盤種別の影響を考慮していない。上部構造物および地盤の減衰定数とばね定数を表-2に示す。計算時間間隔を0.001秒とし、バイリニアモデルの第2剛性は初期剛性の10%とした。さらに、降伏復元力はレベル1の加速度波形を入力して弾性応答解析を行ったときの最大復元力とした。



(a)基礎固定(上部水平) (b)基礎固定しない(上部回転) (c)基礎固定しない(上部回転, P- 効果)  
 図-5 P- 効果を考慮した上部構造物の時刻歴応答(第2剛性を初期剛性の10%)



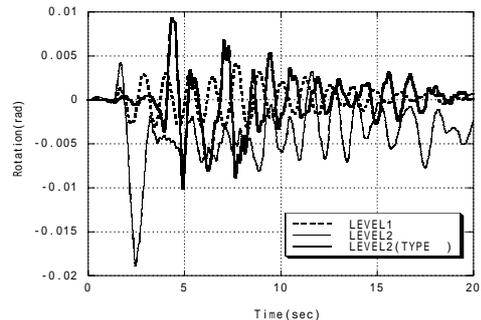
(a)基礎固定(上部水平) (b)基礎固定しない(上部回転) (c)基礎固定しない(上部回転, P- 効果)  
 図-6 P- 効果を考慮した上部構造物の時刻歴応答(完全弾塑性)

#### 4. 解析結果

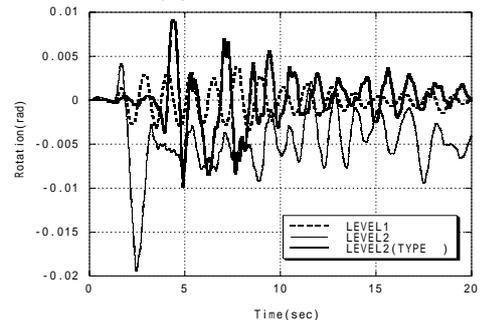
対象とした系の固有値解析結果は、固有周期が1次モードより種地盤で0.946, 0.188, 0.145sec, 種地盤で1.222, 0.275, 0.210secとなった。図-3に各入力地震動の減衰定数を5%とした場合の絶対加速度応答スペクトルを示す。レベル2のスペクトルが1.7秒以上の長周期側でレベル2(タイプ)より大きくなっていることが読み取れる。図-4にフーリエスペクトルを示す。他の入力地震動と比較してレベル2のフーリエ振幅の値が0.15~0.6Hzで大きくなっている。

図-5は種地盤でP- 効果を考慮した上部構造物の変位応答を入力地震動ごと、さらには基礎の状態によって示したものである。なお、3自由度モデルの上部構造物の応答変位を比較する際には、回転運動を水平運動に変換している。レベル1については、ほとんど変化は見られないが、レベル2において、基礎の固定で21.4cm, 基礎固定しないで33.3cm, 基礎固定しない(P- 効果)で34.6cmとなったことから、基礎およびP- 効果の影響が上部構造物の変位応答に表れている。レベル2(タイプ)では、レベル2と比較して変位応答の最大値には大きな変化は見られない。

図-6は、第2剛性が上部構造物の応答に与える影響について調べるために、図-5の場合の第2剛性をゼロとした上部構造物の変位応答である。レベル2については、すべての場合で残留変位が生じ、基礎固定しない(P- 効果)では60cm程度である。レベル2(タイプ)では、基礎固定の場合、残留変位は生



(a)P- 効果無視



(b)P- 効果考慮

図-7 P- 効果を考慮した基礎(回転)の時刻歴応答

じていないが他の場合では5cm程度生じている。レベル2(タイプ)の最大応答値および残留変位がレベル2と比較して小さくなったのは、図-3および図-4からわかるようにレベル2では長周期側でスペクトル値がレベル2(タイプ)を上回っているためである。

図-7は、種地盤でP- 効果が基礎の回転に与え

表-3 解析結果（上部構造物の第2剛性を初期剛性の10%）

地盤種別	種地盤					種地盤				
	レベル1 (a)	レベル2 (b)	レベル2 (タイプ)(c)	応答倍率 (b)/(a)	応答倍率 (c)/(a)	レベル1 (g)	レベル2 (h)	レベル2 (タイプ)(i)	応答倍率 (h)/(g)	応答倍率 (i)/(g)
基礎固定(d)	2.7 (cm)	21.4 (cm)	15.8 (cm)	7.84	5.79	2.8 (cm)	21.7 (cm)	24.2 (cm)	7.75	8.64
基礎固定しない(e)	5.2 (cm)	33.3 (cm)	20.5 (cm)	6.43	3.96	10.5 (cm)	37.4 (cm)	20.5 (cm)	3.56	1.95
基礎固定しない (P-効果考慮)(f)	5.3 (cm)	34.6 (cm)	20.6 (cm)	6.51	3.88	10.4 (cm)	38.2 (cm)	20.5 (cm)	3.67	1.97
応答倍率(e)/(d)	1.90	1.56	1.30			3.75	1.72	0.85		
応答倍率(f)/(d)	1.95	1.62	1.30			3.71	1.76	0.85		

る影響を調べるためにP-効果を無視した場合と考慮した場合について基礎回転の変位応答を示したものである。P-効果を考慮することにより、特にレベル2の8～20秒の間で基礎の回転の変位応答は大きくなっている。

表-3は、第2剛性を初期剛性の10%とした場合の時刻歴応答解析の上部構造物変位の最大値と応答倍率をまとめたものである。種地盤および種地盤の殆どの場合で基礎を固定しない場合(P-効果考慮)の応答が基礎固定、基礎を固定しないと比較して大きくなった。さらに、種地盤の応答が種地盤に比べて大きくなっていることがわかる。

## 5. まとめ

P-効果による水平復元力低下の影響とそれが基礎の応答に与える影響を調べるために、P-効果を考慮した基礎-地盤-構造物系の3自由度モデルを提案し、時刻歴応答解析を行った。しかしながら、地盤ばねの硬い場合と軟らかい場合の影響のみを検討しただけであり、入力地震動、基礎寸法、鋼製橋脚の諸元、基礎-地盤間の減衰定数については地盤の影響を考慮できていない。

P-効果を考慮した場合の基礎回転の応答は、地盤が軟らかい場合で僅かであるが大きくなり、P-効果を考慮した解析が現実的であることがわかった。今後は、さらに基礎の応答を含めたP-効果の影響

を考慮した破壊過程を詳細に検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，1990.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，1996.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2002.
- 4) 濱田政則：巨大地震への対応 -兵庫県南部地震が提起した課題はどこまで解決されたか-，東海，東南海，南海地震 必ずくる巨大地震に我々はどう対処するか，土木学会平成14年度全国大会研究討論会 研-18資料，2002.
- 5) G. W. Housner: The Plastic failure of Frames During Earthquakes, Proceedings of 2nd WCEE Vol.II, pp.997-1012, 1960.
- 6) 石鍋雄一郎，半貫敏夫，秋山宏：地震下における骨組みの変形応答に及ぼす P-効果の影響，日本建築学会構造系論文集，第559号，pp.79-83，2002.
- 7) M. N. Aydinoglu, Y. M. Fahjan: A unified formulation of the piecewise exact method for inelastic seismic demand analysis including the P-delta effect, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.32, pp. 871-890, 2003.
- 8) 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。  
(2003. 6. 30 受付)

## A STUDY OF NON-LINEAR RESPONSE ANALYSIS OF THREE DEGREE OF FREEDOM MODEL CONSIDERING P- EFFECT

Norihiko YAMASHITA, Takanori HARADA and Takehiro NAGANO

Over the past few decades a considerable number of studies have been made on the problems of P-effect on structural performance. The P-effect is caused by the weight and lateral deformation of the structure. In this study, in order to establish the seismic design method considering of P-effect. Assuming the non-linear model, three degree of freedom model which consists of the upper part single degree of freedom system and sway-rocking model taking into account the non-linear characteristic for soil, we performed non-linear response analysis. In addition, we calculated displacement and acceleration to establish influence of P-effect.