

上部構造物のP-Δ効果が基礎-地盤系の応答に及ぼす影響

山下典彦¹・原田隆典²

¹正会員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

²正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

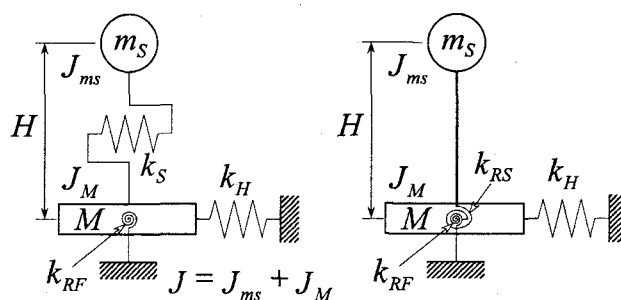
1. はじめに

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¹⁾、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²⁾、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³⁾。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⁴⁾。

重力による復元力の低下をP-Δ効果^{5),6),7)}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-Δ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-Δ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-Δ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-Δ効果を考慮した基礎-地盤-構造物系の3自由度モデル⁸⁾を用いて、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に示し、図-1(b)に示すような上部構造物のP-Δ効果と基礎-地盤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-2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



(a) 上部水平モデル (b) 上部回転モデル
図-1 基礎-地盤-構造物系のモデル化

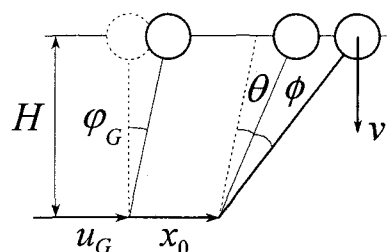


図-2 振動モデルの座標系（上部回転）

動方程式は次式のようにになる。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。

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

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

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

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

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、 $\ddot{v}$ は鉛直入力地震動、 $\ddot{u}_G$ 、 ϕ_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- Δ 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- Δ 効果による付加的な層せん断力が等しくなったときに倒壊（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（Ⅰ・Ⅲ種地盤（N値40・10））、設計地震動レベル（道路橋示方書（1990）¹⁾レベル1およびレベル2、道路橋示方書（1996、2002）^{2,3)}レベル2（タイプⅡ：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

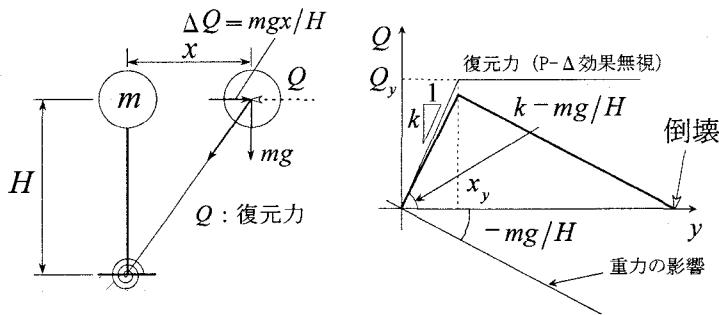


図-2 P- Δ 効果の影響

表-1 上部構造物および基礎の諸定数

上部構造物重量	14715 kN
上部構造物回転慣性	51110 kNm ²
上部構造物橋脚高	15 m
基礎重量	14715 kN
基礎回転慣性	9133 kNm ²

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	107910 kN/m
基礎の並進（Ⅰ種地盤）	0.1	26193 kN/m
基礎の回転（Ⅰ種地盤）	0.1	4.365×10 ⁷ kNm/rad
基礎の並進（Ⅲ種地盤）	0.1	9172 kN/m
基礎の回転（Ⅲ種地盤）	0.1	1.667×10 ⁷ kNm/rad

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⁹⁾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。

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Ⅰ種地盤で0.946、0.188、0.145sec、Ⅲ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Ⅱ）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から0.6Hzで大きくなっている。図-5はⅠ種地盤でP- Δ 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

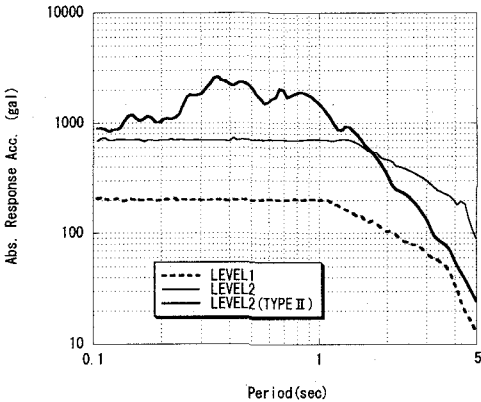


図-3 加速度応答スペクトル

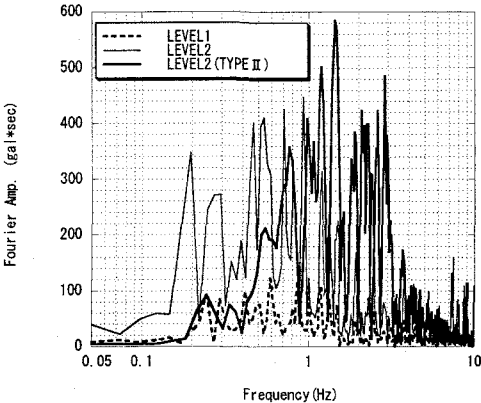
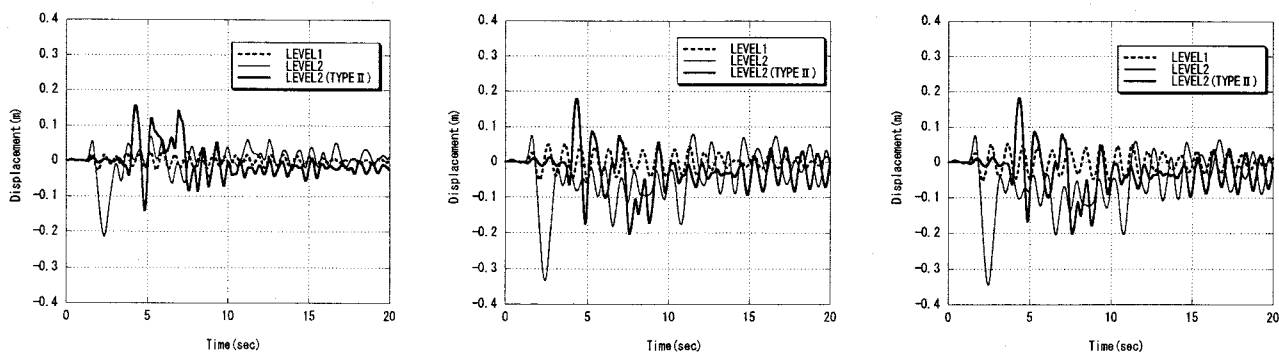
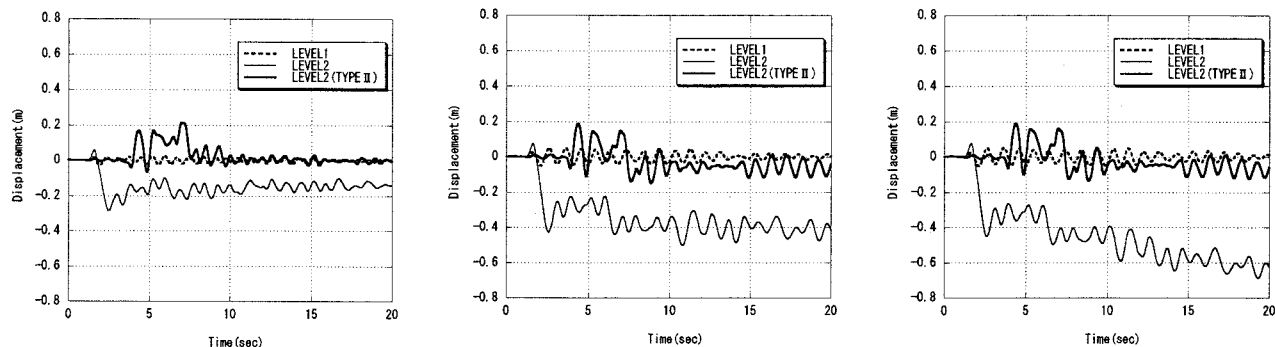


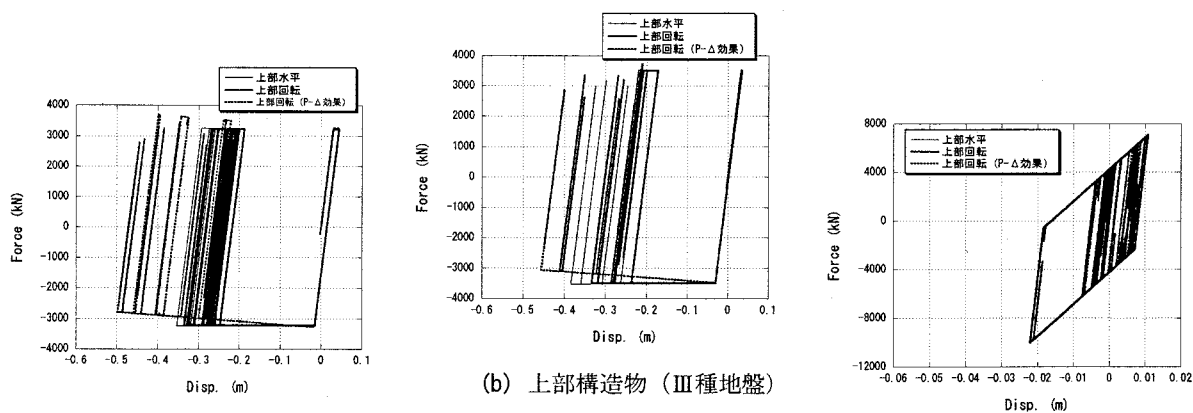
図-4 フーリエスペクトル



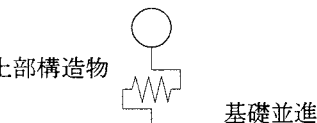
(a) 基礎固定 (上部水平) (b) 基礎固定しない (上部回転) (c) 基礎固定しない (上部回転, P-Δ 効果)
図-5 P-Δ 効果を考慮した上部構造物の時刻歴応答 (第2剛性を初期剛性の10%)



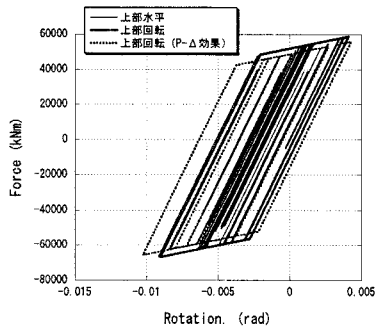
(a) 基礎固定 (上部水平) (b) 基礎固定しない (上部回転) (c) 基礎固定しない (上部回転, P-Δ 効果)
図-6 P-Δ 効果を考慮した上部構造物の時刻歴応答 (完全弾塑性)



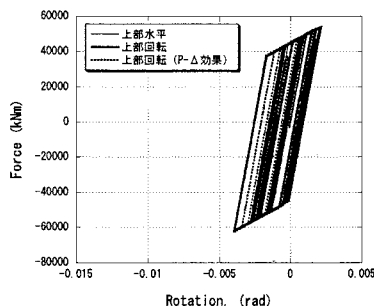
(a) 上部構造物 (I 種地盤)



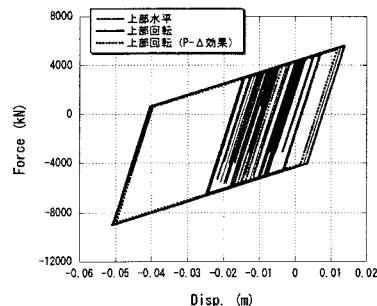
(c) 基礎並進 (I 種地盤)



(f) 基礎回転 (III 種地盤)

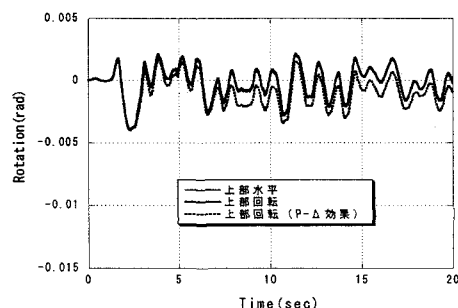


(e) 基礎回転 (I 種地盤)

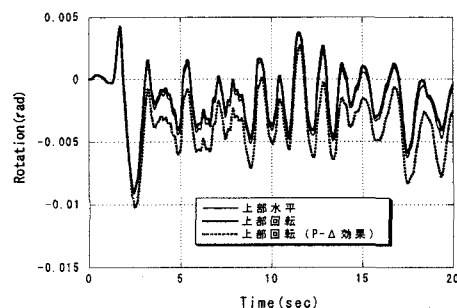


(d) 基礎並進 (III 種地盤)

図-7 基礎-地盤-構造物系の履歴ループの比較 (I・III 種地盤, レベル 2)



(a) I種地盤



(b) III種地盤

図-8 P-Δ効果を考慮した基礎回転の時刻歴応答

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-Δ効果)で34.6cmとなったことから、基礎およびP-Δ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II)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-Δ効果)では60cm程度である。レベル2(タイプII)では、基礎固定の場合、残留変位は生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II)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II)を上回っているためである。

図-7は、図-8で他と比較して残留変位が大きくなったレベル2について基礎-地盤-構造物系の履歴ループをI・III種地盤について示したものである。細線が上部水平モデル、太線が上部回転モデル、太線破線が上部回転モデル(P-Δ効果)である。上部構造物では、P-Δ効果を考慮した場合、復元力の低下が生じ変位応答が大きくなっていることがわかる。さらに、それらはIII種地盤よりI種地盤で大きくなっている。基礎並進および基礎回転では、地盤ばねが軟らかくなることで変位応答がIII種地盤で大きくなり、動的相互作用の影響により上部構造物への入力低下が生じていることがわかる。

図-8は、P-Δ効果が基礎回転の応答に与える影響を調べるために、図-7の基礎回転の変位応答をI・III種地盤について時刻歴で示したものである。これよりP-Δ効果を考慮することにより、基礎の回転の変位応答は大きくなっていることがわかる。

5. まとめ

P-Δ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-Δ効果を考慮した基礎-地盤-構造物系の3自由度モデルを用いて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-Δ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大きくなり、P-Δ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-Δ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V 耐震設計編，1990。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，1996。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 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-Δ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) 山下典彦，原田隆典，長野雄大：P-Δ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，地震工学論文集，pp.1-4 (受付番号149)，2003。
- 9) 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。