

# (132) 基礎-構造物系の非線形動的相互作用に関する研究

京都大学大学院 学生員 永田 和寿  
 京都大学工学部 正 員 渡邊 英一  
 京都大学工学部 正 員 杉浦 邦征  
 京都大学工学部 正 員 宇都宮智昭

## 1. はじめに

近年、沖合海洋空間、大深度地下や軟弱地盤上などの過酷な自然環境での構造物建設ニーズが高まり、これらを技術的に裏付けるための構造解析や構造実験が盛んに行われるようになった。特に、構造物が大規模化するにつれて基礎-構造物系の動的相互作用を考慮し、波力、風力、地震などの動的外力作用下における構造物の終局状態を明らかにすることは、構造物の安全を確保する上で重要である。兵庫県南部地震では、土木構造物も大きな被害を受けた。この地震が設計震度を超えた大地震であったとはいえ、基礎-構造物系などの動的相互作用が大きく関係していると思われる。そこで、本研究は、橋梁構造物を対象として地震力が作用した場合の基礎-構造物系の動的応答解析を行い、構造物の応答に及ぼす基礎-構造物相互の復元力特性の影響について検討を行った。

## 2. 解析手法

基礎-構造物系を Fig. 1 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、構造物の水平運動、基礎のスウェイ運動、およびロッキング運動にモデル化し、式(1)に示すような弾性系に対する運動方程式を誘導した<sup>1)</sup>。

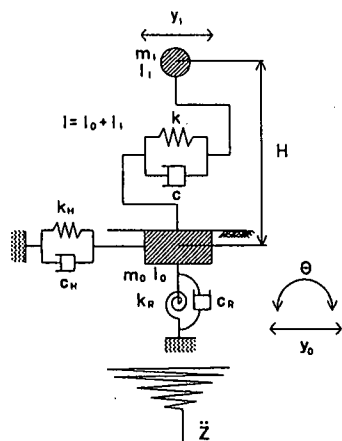


Fig. 1 3 自由度モデル

$$[M]\{\ddot{Y}\} + [C]\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = -[M]\{f\}\ddot{Z} \quad (1)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c & -c & -cH \\ -c & c+c_H & cH \\ -cH & cH & cH^2+c_R \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} k & -k & -kH \\ -k & k+k_H & kH \\ -kH & kH & kH^2+k_R \end{bmatrix}, \{Y\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_0 \\ \theta \end{Bmatrix}, \{f\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

ここで、 $k$ 、 $k_H$ 、 $k_R$ は弾性剛性を表しており、非線形応答解析においては復元力項 $[K]\{Y\}$ をバイ・リニア型でモデル化した。この運動方程式をニューマークの $\beta$ 法( $\beta=1/6$ )を用いて、動的応答解析を行った。さらに、動的相互作用の影響を明らかにするため、地盤種別(I種地盤およびIII種地盤)、地震力レベル(レベル1およびレベル2)、降伏復元力、および、塑性2次勾配を変化させたパラメトリック解析を行った。

## 3. 解析モデル

本研究では、I種地盤およびIII種地盤上に建設される直径8m×深さ10m程度の直接基礎を有する鋼製橋脚の橋梁を対象とした。Fig. 1に示すように構造物は上部工が水平方向に運動する1質点系のバネとダッシュポットでモデル化し、基礎は剛体として見なすことができる直接基礎とし、スウェイおよびロッキングの2方向の運動を考慮した2自由度系にモデル化し、それぞれの動的特性をバネとダッシュポットで表した。構造物および基礎の諸元をTable 1～2に示す。支持地盤は岩盤および軟弱地盤による応答結果の違いを検討するために、N値がおおよそ40のI種地盤(岩盤)とN値がおおよそ10のIII種地盤(軟弱地盤)とした。地盤の物性値をTable 3に、その値から得られた地盤の減衰定数とばね定数、および構造物の減衰定数とばね定数をTable 4に示す。

時刻歴応答解析を行うにあたり、時間刻みは、Table 5 に示す非減衰固有値解析結果に基づき、最小周期が 0.145 (sec) であることから 0.001(sec) とし、復元力モデルには、バイ・リニアモデルを用い、基本塑性 2 次勾配は弾性剛性の 10% とした。入力波形には、道路橋示方書 V 耐震設計編<sup>2)</sup>に地盤種別で与えられている弾性応答解析用 (レベル 1) および保有水平耐力照査用 (レベル 2) を用いた。

#### 4. 解析結果および考察

##### 4. 1 モード解析

モード解析を行った結果を Table 5 に固有周期を Fig. 2 に振動モードを示す。I 種地盤に比べ III 種地盤の固有周期が長くなっている。また、高次モードでは、基礎のスウェイ、ロックイングの成分が構造物の振動に対して逆位相となる。特に、3 次モードでは、基礎の振動が卓越している。

##### 4. 2 弾塑性応答解析

Fig. 3～6 に I 種地盤のレベル 2 の加速度波形を入力した場合の応答解析結果を、基礎を固定した場合の構造物の水平方向、および基礎を固定しない場合の構造物の水平方向、基礎のスウェイ方向、基礎のロックイング方向の応答変位の時刻歴を順に示す。ここで、それぞれの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。構造物の水平変位はいずれの場合も約 2 秒後に最大値に達し、基礎を固定しない場合の水平変位が基礎を固定した場合のそれに比べて 10cm ほど大きくなっている。これは、基礎を固定しない場合、地盤の変形により全体の弾性剛性が 68.8 tonf/cm となり、地盤を固定した場合の弾性剛性の 63% に低減するため、構造物が水平方向に付加的に変

Table 1 構造物の諸元

|            |                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------|
| 重量 $m_1$   | 1500 tonf                                                        |
| 橋脚高 $H$    | 1500 cm                                                          |
| 回転慣性 $I_1$ | $5.21 \times 10^5 \text{ tonf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ |

Table 2 基礎の諸元

|            |                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------|
| 重量 $m_0$   | 1500 tonf                                                        |
| 半径 $r$     | 800 cm                                                           |
| 回転慣性 $I_0$ | $9.31 \times 10^4 \text{ tonf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ |

Table 3 地盤の物性値

| 地盤種別    | 単位重量 $\gamma$ (tonf/m <sup>3</sup> ) | せん断波速度 $V_s$ (m/s <sup>2</sup> ) | ポアソン比 $\nu$ | せん断弾性係数 $G$ (tonf/m <sup>2</sup> ) |
|---------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------|------------------------------------|
| I 種地盤   | 2.0                                  | 250                              | 0.35        | $1.28 \times 10^4$                 |
| III 種地盤 | 1.8                                  | 150                              | 0.45        | $4.13 \times 10^3$                 |

Table 4 減衰定数およびバネ定数

|         |           | 減衰定数 | ばね定数                                          |
|---------|-----------|------|-----------------------------------------------|
| 構造物     |           | 0.05 | 110 tonf/cm                                   |
| I 種地盤   | 基礎のスウェイ   | 0.1  | $2.67 \times 10^3 \text{ tf/cm}$              |
|         | 基礎のロックイング | 0.1  | $4.45 \times 10^8 \text{ tf} \cdot \text{cm}$ |
| III 種地盤 | 基礎のスウェイ   | 0.1  | $9.35 \times 10^2 \text{ tf/cm}$              |
|         | 基礎のロックイング | 0.1  | $1.70 \times 10^8 \text{ tf} \cdot \text{cm}$ |

Table 5 固有値解析(単位:sec)

| 地盤種別   | 固有周期  |         |
|--------|-------|---------|
|        | I 種地盤 | III 種地盤 |
| 1 次モード | 0.946 | 1.222   |
| 2 次モード | 0.188 | 0.275   |
| 3 次モード | 0.145 | 0.210   |

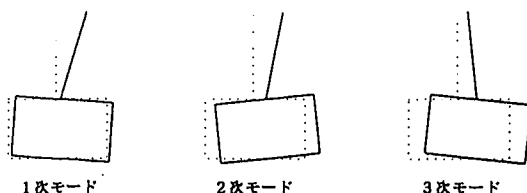


Fig. 2 基礎-構造物系の振動モード

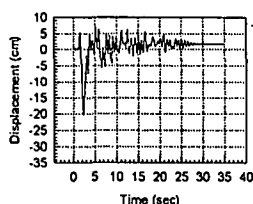


Fig. 3 変位時刻歴曲線 (構造物: 基礎固定)

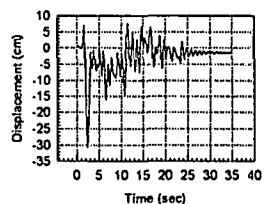


Fig. 4 変位時刻歴曲線 (構造物: 基礎固定しない)

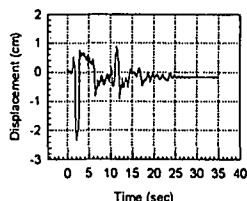


Fig. 5 変位時刻歴曲線 (基礎: スウェイ)

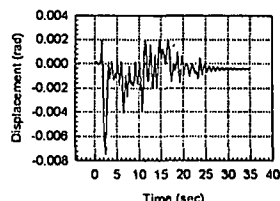


Fig. 6 変位時刻歴曲線 (基礎: ロッキング)

Table 6 解析結果

| 地盤種別         | I 種地盤        |              |                   | III 種地盤      |              |                   |
|--------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------|
| 入力波形         | レベル 1<br>(c) | レベル 2<br>(d) | 応答倍率<br>(c) / (d) | レベル 1<br>(e) | レベル 2<br>(f) | 応答倍率<br>(e) / (f) |
| 基礎を固定 (a)    | 2.74(cm)     | 20.2(cm)     | 7.3               | 4.29(cm)     | 17.8(cm)     | 4.1               |
| 基礎を固定しない (b) | 4.83(cm)     | 30.8(cm)     | 6.4               | 14.4(cm)     | 35.7(cm)     | 2.5               |
| (b) / (a)    | 1.76         | 1.52         |                   | 3.36         | 2.01         |                   |

位するためであると思われる。

これらの動的応答解析のまとめとして構造物の絶対水平変位の最大値を Table 6 に示す。I 種地盤および III 種地盤のいずれにおいても基礎を固定しない場合の変位に対する基礎を固定した場合の変位の比は小さくなる。

一方では、レベル 1 に対するレベル 2 の応答倍率は I 種地盤よりも III 種地盤の方が小さくなっている。

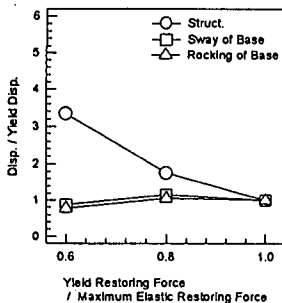
Table 7 塑性率

| 変位         | I 種地盤        |      | III 種地盤     |      |
|------------|--------------|------|-------------|------|
|            | 最大相対変位       | 塑性率  | 最大相対変位      | 塑性率  |
| 構造物の水平方向   | 17.4(cm)     | 5.81 | 14.5(cm)    | 2.77 |
| 基礎のスウェイ方向  | 2.36(cm)     | 13.2 | 7.10(cm)    | 9.82 |
| 基礎のロッキング方向 | 0.00751(rad) | 6.62 | 0.0119(rad) | 2.10 |

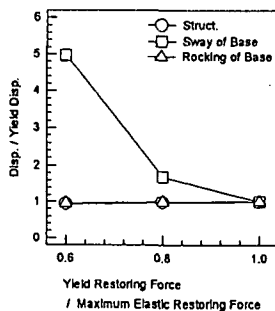
Table 7 に I 種地盤および III 種地盤にレベル 2 の加速度波形を入力した場合の最大相対変位およびこの値を降伏変位で除した値、つまり塑性率（ダクティリティ）を示している。基礎のスウェイ方向の塑性率は、他の塑性率に比べて大きくなっている。このことから、基礎のスウェイ方向に十分な塑性変形能を確保していなければならないと思われる。また、I 種地盤の塑性率が III 種地盤に比べ大きくなっていることが分かる。

#### 4. 3 降伏比強度の影響について

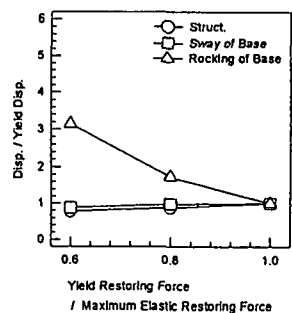
降伏復元力をパラメトリックに変化させた解析結果を Fig. 7 (a) ~ (c) に示す。これらの図は、I 種地盤に対して、レベル 1 の入力波形を用いて弾性応答解析を行ったときの最大復元力を基準値として設定し、それぞれの降伏復元力をこの基準値に対して 8 割、および 6 割と低減させてレベル 1 の波形を入力した応答解析結果を示している。Fig. 7 (a) ~ (c) の順にそれぞれ構造物の降伏復元力、基礎のスウェイの降伏復元力、基礎のロッキングの降伏復元力を変化させたものである。その結果、いずれの自由度を変化させた場合も降伏復元力を低減させた自由度の最大塑性変形が大きくなり、他の自由度は一つの例外を除いて弾性応答していることが分かる。特に、降伏復元力を 6 割に低減させた場合においては、その自由度はおよそ降伏変位の 3 ~ 5 倍の大きな応答変位を生じている。また、基礎のスウェイ振動が構造物の水平振動や基礎のロッキング振動に比べて大きくなっているのが分かる。



(a) 構造物



(b) 基礎のスウェイ



(c) 基礎のロッキング

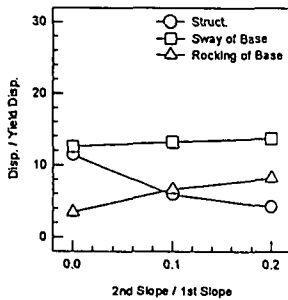
Fig. 7 降伏比強度の影響

#### 4. 4 塑性 2 次勾配の影響について

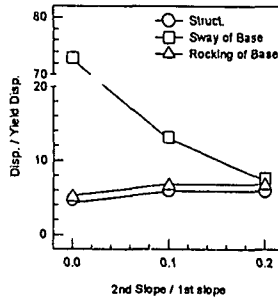
塑性 2 次勾配をパラメトリックに変化させた解析結果を Fig. 8 (a) ~ (c) に示す。これらの図は、I

種地盤に対して、構造物の水平方向、基礎のスウェイおよびロッキング方向の基本塑性2次勾配を10%とし、いずれかの塑性2次勾配のみを0, 10, 20%とパラメトリックに変化させて行った応答解析結果を示している。ここでは、レベル1の波形を入力し降伏レベルを決定した後、レベル2の波形を入力した。Fig. 8(a)～(c)の順にそれぞれ構造物の塑性2次勾配、基礎のスウェイの塑性2次勾配、基礎のロッキングの塑性2次勾配を変化させたものである。構造物の塑性2次勾配を大きくすることによって、構造物の応答変位は低減し、基礎のロッキングの応答変位は増大する。逆に、基礎のロッキングの塑性2次勾配を大きくすることによって、基礎のロッキングの応答変位は低減し、構造物の応答変位は増大する。ここで、基礎のスウェイの応答変位は他の変位の変化に比してあまり変化が見られない。基礎のスウェイの塑性2次勾配を増加することによって、基礎のスウェイの応答変位は低減され、構造物とロッキングの応答変位は基礎のスウェイの変位に対して変化が小さい。以上のことから、構造物の水平運動と基礎のロッキング運動の間に大きな相互作用が存在すると思われる。一方、基礎のスウェイ振動と構造物の水平振動および基礎のロッキング振動との相互作用は小さいと思われる。これは、基礎のスウェイバネとロッキングバネが基礎の重心にとり付けられているため、基礎のロッキング運動は基礎のスウェイ運動により引き起こされず、構造物の水平方向の運動によって引き起こされるためである。

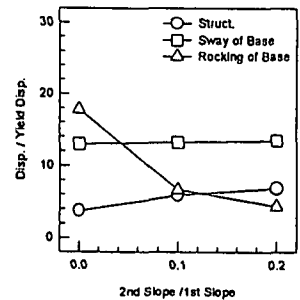
なお、Ⅲ種地盤に対しても同様のパラメトリック解析を降伏復元力と塑性2次勾配について行ったが、定性的にはⅠ種地盤と同じであり、Ⅰ種地盤に比べて応答倍率は小さかった。



(a) 構造物



(b) 基礎のスウェイ



(c) 基礎のロッキング

Fig. 8 2次勾配の影響

## 5. まとめ

本研究は、基礎—構造物系の動的相互作用の影響を検討するために、橋脚・基礎の3自由度モデルを用いて応答解析を行った。以下に示すような結果が得られた。

(1) 基礎を固定するか否かによって応答結果はⅠ種地盤よりもⅢ種地盤で大きく異なり、軟弱地盤などにおいては基礎を考慮した解析が現実的である。

(2) Ⅰ種地盤よりもⅢ種地盤において応答は増大する。しかし、Ⅰ種地盤の応答はⅢ種地盤に比べてパラメータの変化に敏感である。

(3) 基礎のロッキング運動と構造物の水平運動の相互作用が顕著である。

(4) 基礎—構造物系の弾塑性応答において、基礎のスウェイ方向に塑性変形が集中する傾向にある。

(5) 構造物に大きな塑性変形を許容することによって、基礎の応答を低減することができる。

したがって、現行の設計において構造物と基礎の終局状態の取り扱いが統一されておらず、今後は基礎—構造物系の動的相互作用を考慮したバランスのとれた設計法の確立が望まれる。

## 参考文献

- 1) 柴田明徳：最新耐震構造解析，森北出版，1986.6
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編，1990.2