

# レベル2地震時における地盤—地中構造物の 相互作用力に関する検討

福嶋研一<sup>1</sup>・志波由紀夫<sup>2</sup>・渡辺和明<sup>1</sup>・立石章<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計計画部 (〒163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 大成建設株式会社 土木設計計画部 (〒163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

レベル2地震動に対する各種構造物の耐震設計法の見直しが急がれている。しかしながら、地盤と構造物の相互作用力が大きな問題になるような構造物については、強震時の挙動が明らかになっていないのが現状である。本研究では、レベル2地震動の下での地中構造物を対象として動的2次元FEM解析を行った。ここでは動的FEM解析を行う際に、地盤要素の非線形モデルとしていくつかのモデルを用いて計算を行い、このモデルの違いが地盤—地中構造物相互作用系の応答に及ぼす影響について検討を行った。この結果により、従来の地中構造物の耐震設計法をレベル2地震動へ適用することの妥当性と問題点を検討した。

*Key Words:* underground structures , level-2 ground motions , soil-structure interaction

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災において地中構造物が受けた被害の特徴のひとつとして、大開駅のように横断面方向に大きな地震力を受けて部材がせん断または曲げにより破壊したことが挙げられる。現在、レベル2地震動に対する地中構造物の耐震設計法の見直しが急がれているところである。

ところで、強震時における地盤と地中構造物の相互作用についてはその挙動が十分に解明されていないことが問題点として指摘される。そこで本研究は、地中構造物を対象として動的2次元FEM解析を行い、地盤との相互作用力について検討を行った。このとき、強震時の下では地盤の応力～ひずみ関係が強非線形となることや、構造物周辺地盤の局所的な非線形性が問題となることが予想されるので、地盤要素についてはいくつかの非線形モデルを用いてその影響について比較をした。

その結果、強震時においても地中構造物の挙動は地盤のせん断変形による影響が支配的な要因となることが明らかになった。これにより、従来より地中構造物の耐震設計法として用いられている応答変位法などの手法を、レベル2地震動に対して適用することの妥当性や問題点について、いくつかの知見が

得られたので、以下に報告する。

## 2. 地盤の非線形モデル

地盤の非線形モデルは大別すると、Camclayモデルのように塑性理論より導かれる構成則と、修正Ramberg-Osgoodモデルのように応力～ひずみ関係を簡単な関数で表したものとなる。前者に比べて後者は取扱いが簡単なので、数値解析を行う場合に広く採用されている。

しかしながら、後者の非線形履歴モデルの多くは、せん断応力とせん断ひずみとの関係のみを規定したものであるために、要素に垂直応力が作用することで生じる剛性低下の効果が表現されていない。例えば、図-1に示すようにせん断応力のみが作用する要素(a)と、水平方向と鉛直方向から相反する向きで垂直応力のみが作用する要素(b)において、その応力状態を考えると、両者とも(c)のようなモールの応力円で表される。しかし、要素剛性の低下をせん断応力とせん断ひずみの関係のみで定義している非線形履歴モデルでは、応力状態(b)の下での剛性低下を表現することが出来ない。この問題に対して Shaway は修正 R-O モデル<sup>1)</sup> におけるせん断応力とせん断ひずみの関係を、各々のテンソル第2不変量  $J_2$ 、 $J_2'$  を用いて表記することにより、垂直ひずみによる剛

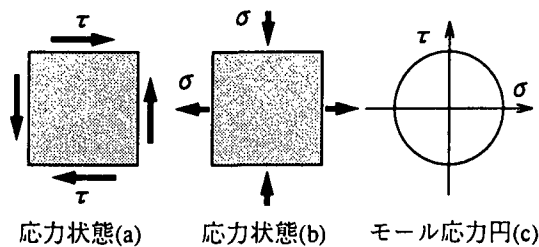


図-1 要素に作用する応力とそのモールの応力円

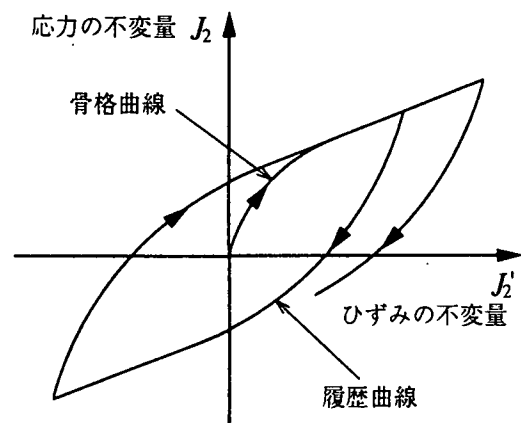


図-2 Shawkyモデルにおける応力-ひずみ関係

性低下を表現する方法（以下 Shawky モデルと記述）を提案している<sup>2)</sup>。このモデルによる  $J_2$  と  $J_2'$  の関係は、図-2に示される Masing 基準に準拠する骨格曲線と履歴曲線で表される。

本研究では、地盤の非線形モデルとして修正 R-O モデルと Shawky モデルの2種類を使用し、同一条件下での解析を行い両者の比較を行った。これにより、地盤-地中構造物の相互作用系において、垂直ひずみによる地盤の剛性低下が地中構造物の応答や相互作用力に及ぼす影響について評価する。加えて等価線形解析を行い、一般に広く用いられている簡便な計算手法による結果との比較を行った。

### 3. 検討方法

検討モデルの概要を図-3に示す。工学的に基盤と考えられる固い地盤の上に、厚さ 30m の砂質シルト層が堆積している地盤を想定した。この表層の比較的浅い所に RC 製の 2 連ボックスカルバートを設置して、レベル 2 地震時における地盤-構造物の挙動を動的 2 次元応答解析により検討する。

地盤物性は深さ方向に均質とみなし、単位体積重量  $1.8 \text{ tf/m}^3$ 、ポアソン比 0.49、せん断波速度  $220 \text{ m/s}$  と設定した。また非線形解析を行う上で必要となるパラメータとしては、基準ひずみ 0.2%、最大減衰定数 15% とした。これらの諸元を用いて修正 R-O

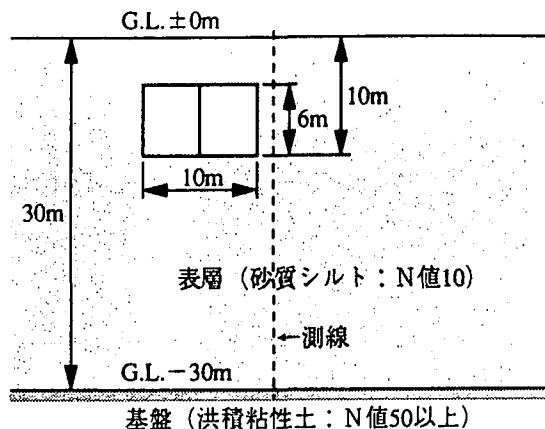


図-3 検討モデル

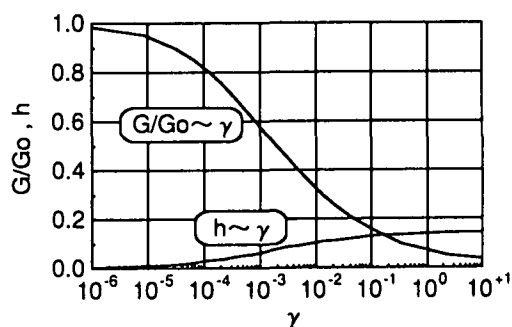


図-4 剛性低下率  $G/G_0$ 、減衰定数  $h$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係

モデルで地盤の剛性低下率  $G/G_0 \sim$  せん断ひずみ  $\gamma$  の関係と、減衰定数  $h \sim$  せん断ひずみ  $\gamma$  の関係を表わすと、図-4のようになる。等価線形解析においても、これと同じ非線形特性を用いる。ここで、修正 R-O モデルと Shawky モデルのパラメータは、基準ひずみと最大減衰定数により設定している。

入力地震動としては、神戸海洋気象台で観測された 1995 年兵庫県南部地震の加速度記録を、道路橋示方書に規定される標準加速度応答スペクトル (タイプ II、I 種地盤) に近い特性を有するように振動数領域で振幅調整した波形を用いた<sup>3)</sup>。

### 4. 検討結果

#### (1) 1次元自由地盤の応答

まず、地盤のみの地震応答特性を調べるために、構造物が存在しない水平方向に無限に広がる 1 次元自由地盤の地震応答解析を行った。

解析手法としては逐次非線形解析を行い、地盤の非線形特性として修正 R-O モデルと Shawky モデルを用いた。また、1次元地盤応答解析手法として広く用いられている等価線形解析手法も加えた。

図-5は地震時における自由地盤の水平応答加速度ならびにせん断ひずみの最大値分布を示したものである。修正 R-O モデルと Shawky モデルについて

比較をすると、加速度分布とせん断ひずみ分布は完全に一致している。これは Shawky モデルにおいて単純せん断が作用する場合は、その構成則が理論的に修正 R-O モデルと一致することから容易に理解できる。

また、これらの逐次非線形解析の結果と等価線形解析の結果を比較すると、大きな差異が生じない結果となっている。これは図4に示した  $G/G_0 \sim \gamma$  の関係がなだらかな曲線を呈しているために、強い地震動で大きなせん断ひずみが発生しても地盤剛性が急激に低下することなく、等価線形解析においても安定した解が得られたためであろうと考えられる。

しかしながら、図6に示した地表面における水平方向応答加速度の時刻歴波形を比較すると、等価線形解析による結果においては短周期成分が減衰しているなど、両手法間での違いが見られる。

## (2) 地盤—地中構造物相互作用系の解析

図3に示した表層内の比較的深度の浅い所に位置する地中構造物と周辺地盤を有限要素でモデル化し、動的応答解析を行った結果を以下に示す。地中構造物の部材厚は頂版 60cm、底版 80cm、側壁 70cm、隔壁 50cm とした。

図3の中で破線で記した測線における地震時応答の最大値分布をまとめた結果を図7に示す。それぞれ水平加速度、水平方向軸ひずみ、鉛直方向軸ひずみ、せん断ひずみの最大値を示したものである。

これらの結果によると、非線形性のモデル化の仕方に拘わらず、3ケースとも非常によく一致しており、地震動によって励起される地盤内のひずみは構造物周辺においてもせん断の成分が卓越していることがわかる。逐次非線形解析である修正 R-O モデルと Shawky モデルの結果を比較しても、せん断ひずみ量に対して軸ひずみ量が小さいために、これによる地盤の剛性低下が起こらず、両モデルによる計算結果に差異が見られなかった。

次に、地震力によって発生する構造物の曲げモーメントと構造物周面にかかる相互作用力の分布を図8に示す。図は構造物の右側半断面を模式的に描き、地震動によって隔壁上下間の水平相対変位が最大となった瞬間で、各々の応答値を表したものである。

曲げモーメント、垂直土圧、せん断土圧について3ケースの分布を比較してもほとんど差異が見られない。このことから、今回検討した地中構造物については、レベル2地震動に対する特別な対応を施さなくてもその耐震設計を応答変位法などの従来からの考え方で適用しても差し支えない結果となった。ただし、応答変位法を用いて耐震設計を行う場合に

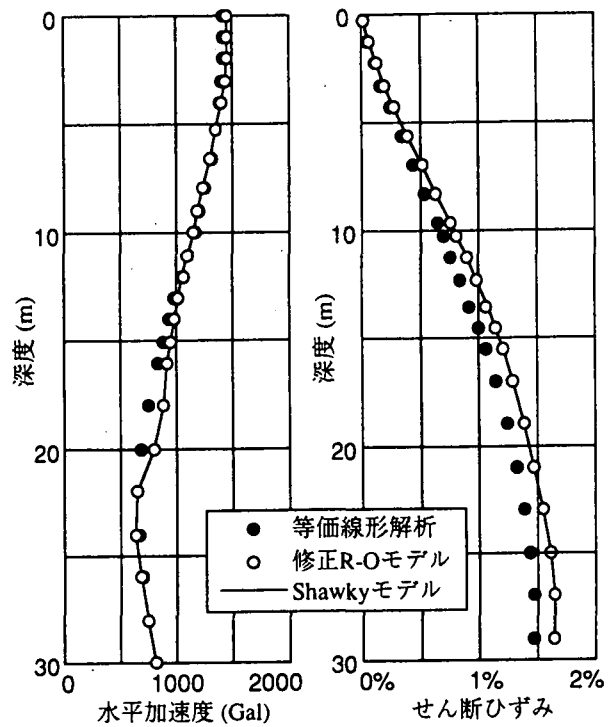


図5 自由地盤における水平加速度とせん断ひずみの最大値分布

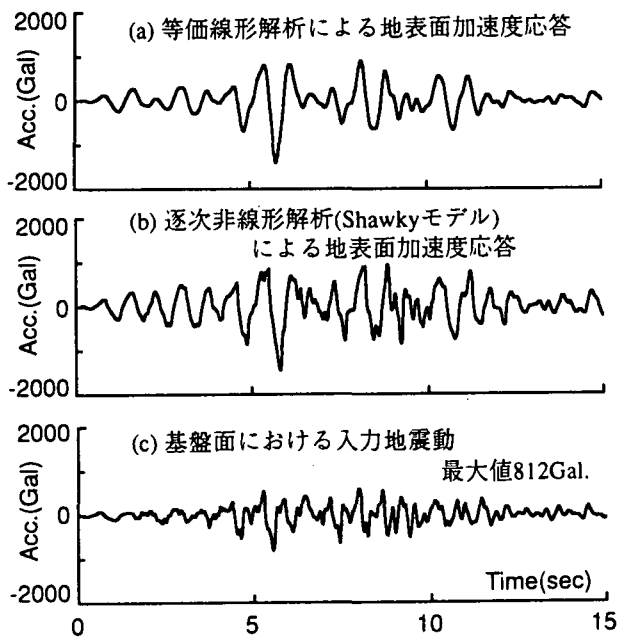


図6 自由地盤の加速度応答時刻歴波形

は、地盤ばねの剛性を適切に評価しなければならないが、この問題点に関しては今後、十分に検討を行う必要がある。

## 5. まとめ

基盤と表層からなる2層地盤において、1次元自由地盤の地震時応答を逐次非線形解析と等価線形解析により行い、両者の比較を行った。その結果は応答加速度の時刻歴波形に差異が見られるものの、両

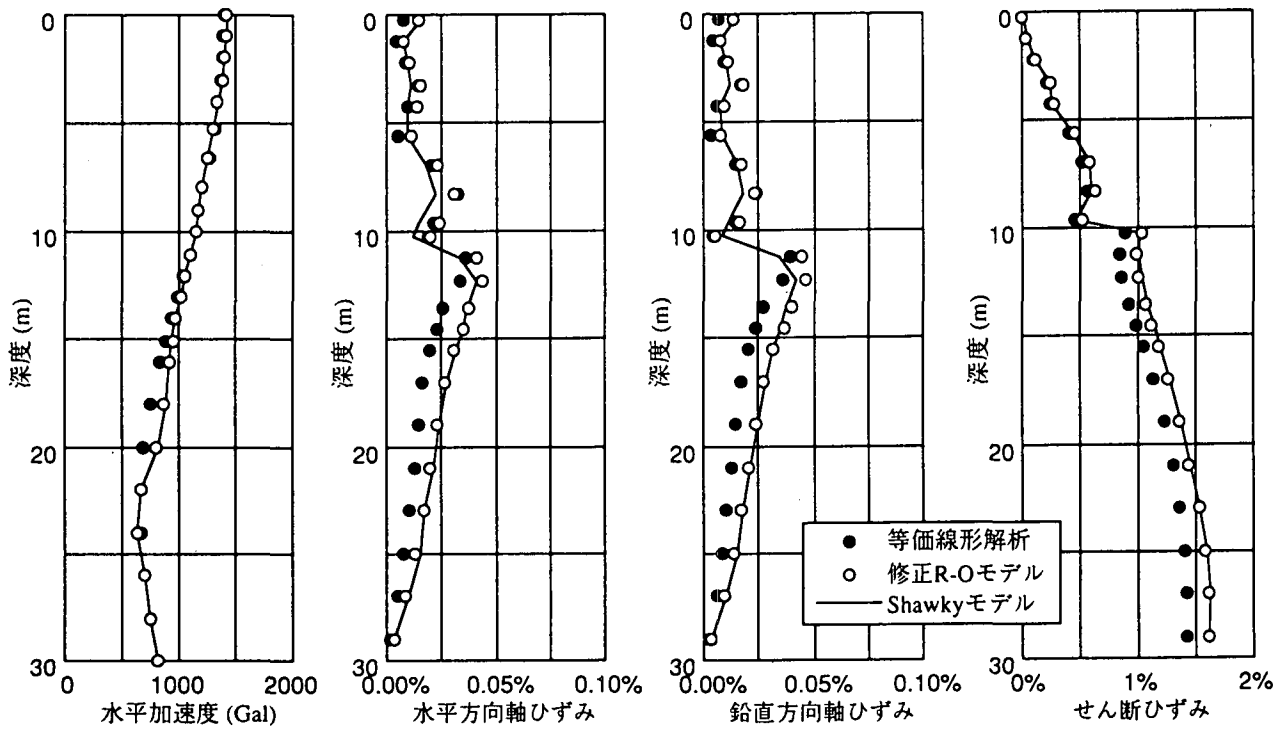


図-7 地盤-構造物相互作用系における構造物側壁位置での水平加速度とひずみの最大値分布

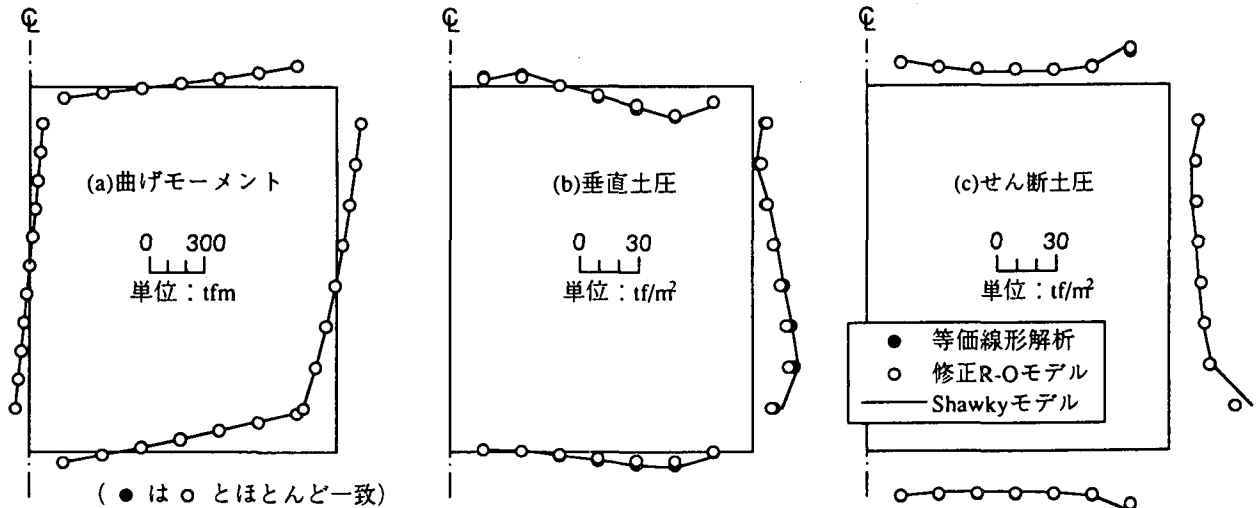


図-8 地震力によって生じる構造物の曲げモーメントと相互作用力の分布

手法間でかなりよい一致を示した。これは修正 R-O モデルにより設定した剛性低下率～せん断ひずみ関係がひずみの変化に対して緩やかな曲線となったためである。

また、地盤-地中構造物相互作用系について動的 2次元 FEM 解析を行い、相互作用力について検討を行った。この結果は地盤の非線形性のモデル化の方法に拘わらず、地盤と構造物の挙動はせん断変形による影響が支配的な要因となっていることが明らかとなった。これは、レベル 2 地震動に対する地中構造物の耐震設計法として、地盤ばねの剛性を適切に評価することが出来るのならば、従来の応答変位法などの考え方をそのまま適用することが出来る可能性を示唆するものである。

今後の課題として、レベル 2 地震動も含めた地震

時における地盤ばねの適切な評価方法について検討を行う必要がある。また、地震時において地盤の軸ひずみが卓越するような地盤-構造物相互作用系に関しても、その応答について検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 大崎順彦、原昭夫、清田芳治：地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案、第 13 回土質工学研究発表会講演集 pp.1057～1060、1978。
- 2) Ashraf Adel SHAWKY：“Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete”、東京大学博士論文、1994。
- 3) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997。