

(123) 幅広地下構造物の地震時挙動と地震荷重

飛鳥建設(株) 正会員 森 伸一郎 正会員○池田 隆明
正会員 松島 健一 正会員 立花 秀夫

1. はじめに

我々は、将来の地下道路・地下街・地下駐車場・地下工場等の地下都市施設を想定し、水平2方向に広がりをもつ、高さに対して幅の広い大規模地下構造物(以後、幅広地下構造物と呼ぶ)の耐震設計法に関する研究を行っている。^{1)、2)}

地下構造物の耐震設計法である応答変位法において考えられている地震荷重は、地盤の変形に起因して構造物側面に作用する地盤と構造物の相対的な変位である。しかし、本来せん断変形する地盤内の構造物の周面(側面および上・下面)には、その面に垂直な成分だけでなくせん断成分も作用しているはずである。特に幅広地下構造物においては、その構造形態から、構造物の上・下面に作用するせん断力が地震荷重の主たる成分であると考えられる。そのため、①幅広地下構造物に対する地震荷重を明らかにすることに加えて、②従来の応答変位法の適用性と改善すべき点を検討することを目的に研究を進めている。

ここでは、地震時の幅広地下構造物および周辺地盤の地震時挙動の特性と、構造物に発生する断面力に対する設置深度と幅高さ比の影響を、2次元動的FEM解析(以後、FEM解析と称する)と一次元重複反射解析により検討した。さらに、FEM解析から得られた地盤の応答と構造物に発生する断面力を基にして、地震時に構造物に作用する荷重を分解し、地盤パネに支持された静的骨組解析の結果と比較検討することにより、幅広地下構造物の耐震設計において考えるべき地震荷重を検討した。なお、解析は全て線形である。

2. 検討対象とした地盤・構造物

幅広地下構造物と周辺地盤の地震時挙動の検討にあたり、厚さ40m、一次固有振動数1Hzの表層地盤とインピーダンス比が約1/3となる弾性基盤からなる2層系の水平成層地盤と、高さ5m、幅10mの箱型中空構造が横に連続して成る多連ボックスカルバート構造物を想定した。想定した地盤を図-1に示す。構造物の設置深度(構造物底版までの深度)が10mの場合について、構造物幅を10m、30m、100m、300mの4種類に変化させて幅高さ比の影響を検討した。また、構造物幅が100mの場合について設置深度を5m、10m、30mの3種類に変化させて設置深度の影響を検討した。図-2に幅高さ比の影響を検討したケースの概略図を示す。なお、構造物の断面厚は、頂版、底版、壁を問わず同一とし、80cmを基準値とした。

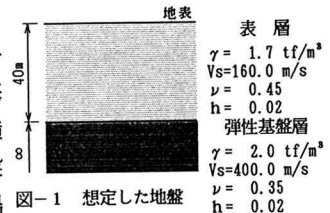
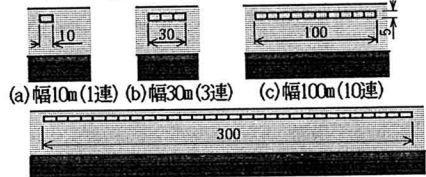


図-1 想定した地盤



(d) 構造物幅300m(30連) 単位(m)
図-2 構造物幅の違いによる検討ケース

解析の対象とした振動数は0~8Hzであり、構造物による周辺地盤の変化はここでは構造物中心直上の地表の応答で議論するものとし、以後「中心地表」と称す。また、応答解析に用いた入力地震波は、El Centro 1940 NS成分、Taft 1952 EW成分、Hachinohe 1968 NS成分の3波を用いた。入力する地震波は鉛直下方より入射するせん断波であり、全て基盤入射波とした。

3. 幅高さ比および設置深度の影響検討

設置深度が10mの場合について幅高さ比の影響を検討した。図-3に構造物幅に対する(a)最大加速度、(b)最大加速度応答スペクトル値、(c)構造物端部の壁の最大曲げモーメントのそれぞれの比の変化を示す。ここで前二者の加速度の基準は自由地盤の地表(自由地表)であり、断面力の基準は、幅10m(1連)の場合である。幅が広がるにつれて、全ての応答は増加すること、断面力の変化の様子は最大加速度よりも最大加速度応答スペクトル値の変化の様子に似ていることがわかる。

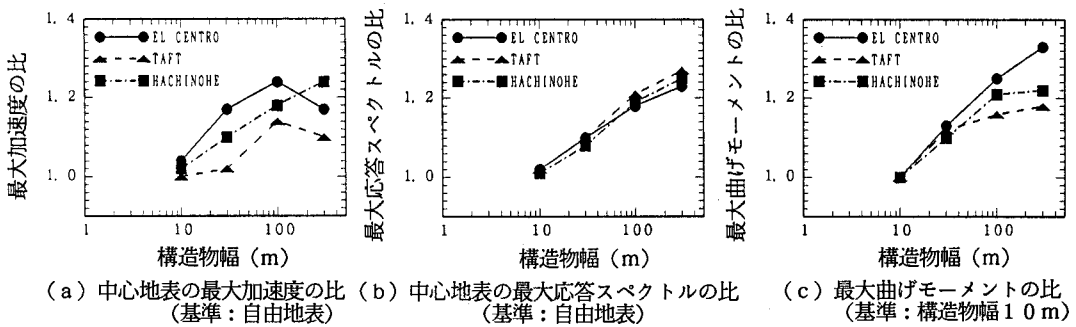


図-3 構造物幅に対する応答の変化

図-4 に中心地表の自由地表に対する加速度応答スペクトル比の3波の平均の構造物幅に対する変化を示す。地盤の2、3次に相当する周期領域で変化がみられる。特に、地表の最大応答は地盤の2次固有周期付近で卓越する。

構造物幅が100mの場合について設置深度の影響を検討した。図-5 に同様の加速度応答スペクトル比の3波の平均の変化を示すが、設置深度によって大きく異なるのがわかる。中心地表の応答が、設置深度によっては増幅される場合と低減される場合とがあるという結果は、設置深度が重要であることを示唆している。

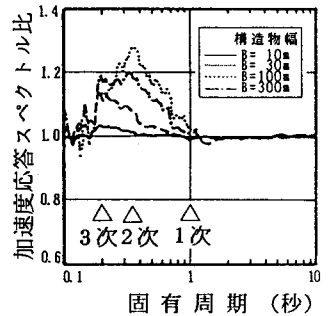


図-4 構造物直上の地表の応答に対する構造物幅の影響 (設置深度 10m)

4. 一次元重複反射解析手法の適用性と構造物の剛性の影響検討

構造物の幅や設置深度が変化することにより、中心地表の応答が変化する現象の原因を探るため、構造物幅が100mの場合を想定して、構造物を構造物のみかけの重量とみかけのせん断剛性を有する層に置換して、一次元重複反射解析により検討した。図-6 に設置深度が5mの場合のFEM解析と一次元重複反射解析で得られた中心地表の伝達関数を示す。なお、このFEMモデルでは32Hzまで考慮できるようにメッシュ分割した。FEM解析では、側壁による地盤拘束に基づく入力損失効果が14Hz以上で顕著に見られるが、対象とする0~8Hzでは両者は良く一致している。このことより、一次元重複反射解析手法が幅広地下構造物と周辺地盤の地震時挙動を検討する有効な手段であることがわかった。

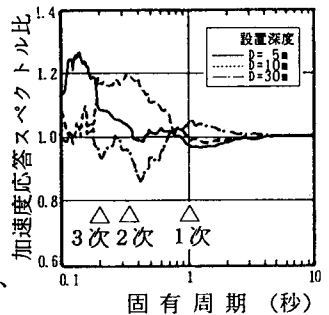


図-5 構造物直上の地表の応答に対する設置深度の影響 (構造物幅 100m)

そこで、中心地表の応答に対する、表層地盤に対する構造物のみかけのインピーダンス比の影響を一次元重複反射解析により検討した。図-7 にインピーダンス比に対して、自由地表に対する中心地表の伝達関数の増幅率の比を示す。これより、上述の増幅現象は、構造物のみかけのせん断剛性が周辺地盤の0.62、インピーダンス比で0.55であることに起因する動的相互作用によるものであると言える。逆に、構造物の断面厚を厚くして、みかけのインピーダンスを表層地盤より大きくすれば、上載土の応答は低減することがわかる。

5. 2次元動的FEM解析による地盤と構造物の挙動の把握

これまで検討してきた構造物は、上述のように設置震度が深い場合には構造物上の地盤の動的応答が増幅すること、設計面から検討するとボックス構造の幅に対して断面厚がうすく、かなりのせん断補強を要す

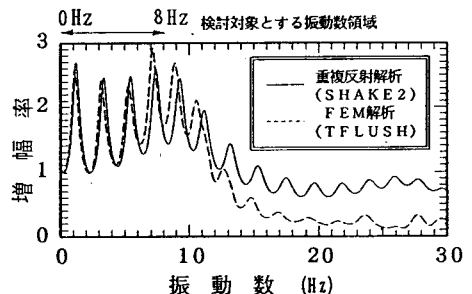


図-6 一次元重複反射解析とFEM解析の伝達関数の比較 (構造物幅100m、設置深度5m)

ることから、みかけのインピーダンス比が 1.0 を下回らないように、また常時の荷重のもとで通常の設計が可能な構造物に変更して、これまでと同様の検討を実施した。新たに設定した構造物は、高さ 5m、幅 7.5m の箱型中空構造が横に連続して成る多連ボックスカルバート構造物で、断面厚はすべて 1.0m とした。構造物幅は 7.5m、22.5m、75m の 3 種類（ボックス数は 1、3、10）とし、設置深度は 10m とした。構造物幅が 75m の場合、みかけのインピーダンス比は 1.25 となり、図-7 によると構造物上の地盤の応答は自由地表を下回ることになる。

構造物幅が 75m の場合の解析モデルを図-8 に示す。地盤-構造物系が対称であるので、右側半断面を解析対象とし、左側境界では鉛直方向の自由度を固定した。また、下方および右側境界には下方粘性境界、エネルギー伝達境界を設け、地盤の半無限性を考慮した。ただし面外方向の波動の逸散は考慮していない。このモデルは、0~8Hz の振動数範囲で十分な精度を有している。FEM 解析を実施し、地盤の応答と構造物に発生する断面力の応答を検討するとともに、構造物に作用する地震荷重を検討した。

6. 静的骨組解析による地震荷重の検討

ここでは地震時に地下構造物を受けるであろう地震荷重を要因と成分に着目して分解し、その分解した各荷重を各節点が垂直方向とせん断方向の地盤パネに指示された平面骨組モデルに作用させ、得られた断面力を FEM 解析の結果と比較し、地下構造物に作用させるべき地震荷重を検討した。

表-1 に要因別に分解した各荷重とその組合せからなる 4 ケースの地震荷重を示す。ケース 1 は地盤の水平変位を構造物側面の地盤パネを介して作用させるものであり、従来の応答変位法に相当する荷重である。ケース 2 はそれに慣性力を加えたものである。ケース 3 はさらに構造物の上・下面にせん断力を作用させるものであり、ケース 4 はさらに側面にもせん断力を作用させるものである。慣性力は、自由地盤の加速度を基に算定し、またせん断力は、対象とする構造物部材の深度において自由地盤に生じるせん断力に、節点の分担面積を乗じて算出した。なお、地盤パネは図-8 のモデルの右側に同様規模の要素を加えた FEM モデルで静的解析を実施して算定した。

図-9 に静的解析から得られた端部隅角部の断面力を、FEM 解析より得られた断面力に対する比で表す。ケース 1 で得られる断面力は FEM 解析の結果の 0.1~0.2 程度でしかない。また、構造物幅が広がるにつれこの割合は低くなる。このことは従来の構造物側面に作用させる地盤の水平変位だけでは、地震荷重として過小評価していることを意味している。側方の水平変位に慣性力を加えても大差はない。ケース 3 で、さらに構造物の上・下面にせん断力を作用させることにより、得られる断面力は FEM 解析に大きく近づく。構造物幅が 7.5m では曲げモーメント、せん断力で 0.7 程度、軸力は 0.9 程度表現できる。これらの値は構造物幅が広がるにつれて 1.0 に近づき、構造物幅が 75m の場合では 0.8 以上になり、構造物上・下面に作用するせん断力が、幅広地下構造物にとっての主要な地震荷重であり、発生する断面力に大きく寄与していると考えられる。また、ケース 4 で地下構造物に作用すると考えられる全ての荷重を作用させることにより、FEM 解析と同程度に表現できることがわかった。なお、この傾向は地震波の種類にはよらないことがわかった。ただし軸力に対しては若干過大評価となっている。

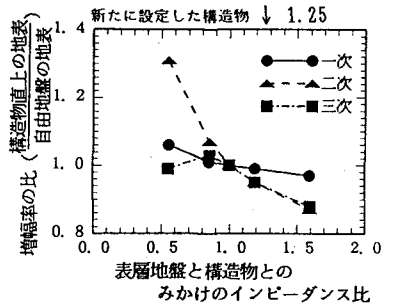


図-7 構造物直上の地盤の動的応答特性におよぼす構造物の影響

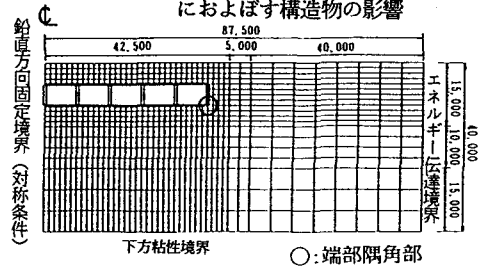


図-8 解析モデル

(構造物幅 75m、設置深度 10m)

表-1 静的解析に用いる地震荷重の組合せ

荷重	地震荷重の内容	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
①	構造物側面に地盤の相対水平変位を作用させる	○	○	○	○
②	構造物に慣性力を作用させる		○	○	○
③	構造物の上・下面にせん断力を作用させる			○	○
④	構造物側面にせん断力を作用させる				○

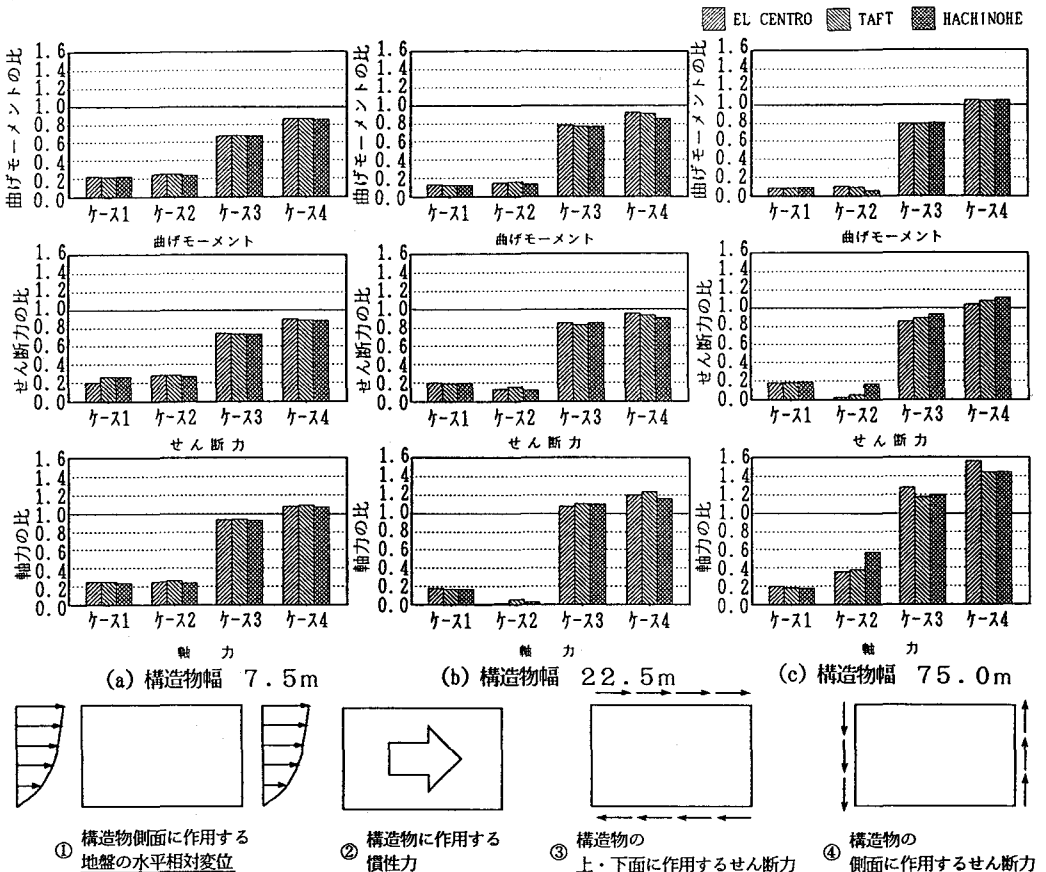


図-9 静的解析から得られた断面力の動的FEM解析に対する比(端部隅角部)

7. 結論

- (1) 構造物の上載土の地震時応答と構造物の断面力の応答は、構造物のみかけのインピーダンスが地盤のインピーダンスより小さいときは増大するが、逆にそれを大きくすることにより低減できる。
- (2) 幅がある程度広い地下構造物の場合、次元重複反射解析で構造物と上載土の応答を評価できる。
- (3) 垂直方向とせん断方向の地盤バネに支持された静的な骨組解析によると、従来の応答変位法で考えられていた構造物側面に作用する水平変位と慣性力だけでは過小評価となり、それに加えて構造物周囲面に作用するせん断力を作用させることにより、FEM解析結果と同程度に断面力が評価できる。
- (4) 幅広地下構造物にとっての主要な地震荷重は、構造物の上・下面に作用するせん断力であり、構造物に発生する断面力は幅が広くなるほどそれに影響される。

謝辞: 本研究は建設省総合プロジェクト「地下空間の建設技術の開発」のうち『地下構造物の耐震設計技術の開発』に関する共同研究の一環として実施したものであり、本論文は平成元年度と二年度の研究をとりまとめたものである。研究においてご指導頂いた建設省土木研究所耐震研究室川島一彦室長はじめご討議頂いた参加各社の委員の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献: 1) 飛鳥建設(株): 第5章2節幅広地下構造物と周辺地盤の地震時挙動と構造物上面に作用する地震荷重, 「地下構造物の耐震設計技術に関する研究平成元年度共同研究報告書」, 1990.3, pp.191-242, 2) 森伸一郎、池田隆明、松島健一: 幅広地下構造物と周辺地盤の地震時挙動, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集I, 1990.10, pp.1174-1175