

(117) 応答変位法による箱型地中構造物の耐震計算に関する研究

大成建設(株) ○正会員 渡辺和明
同 上 正会員 志波由紀夫

1. はじめに

地中構造物は、その大まかな形状によって線状、箱型、堅型など、いくつかのタイプに分類することができる。ここで箱型地中構造物とは、地下駐車場や地下街といった3次元的な箱型の形状を持つ地中構造物である。このような構造物の耐震計算法としては、わずかに「駐車場設計・施工指針 同解説」¹⁾があるのみである。そこでは応答変位法の適用が規定され、3次元的な構造物の形状を十分考慮した上で、短手および長手方向の横断面に対して2次元的な検討を実施することが原則とされている。

しかしながら、筆者らが数値実験を実施して、箱型地中構造物に作用する地震力や発生応力など基本的な地震時挙動について検討した結果では、構造物の3次元的な形状の影響を考慮する必要性が認められた³⁾。本研究は、この検討結果をもとに、応答変位法に基づいた箱型地中構造物の基本的な耐震計算モデルを考案し、その適用性を検討したものである。

2. 耐震計算モデルの試案

均質な地盤中の箱型地中構造物を対象に3次元動的FEMによる解析を実施した結果によると、その地震時挙動について下記の点が明らかになっている³⁾。

- ・地震時の変形は、断面のせん断変形に抵抗する壁体があるために、ボックス・カルバートなどの2次元断面の変形に比べて、剛体的な挙動を示す。
- ・作用する地震力としては、地盤変位による力のほか、周面せん断力も影響が大きい。
- ・壁～床版の取付部や、加振方向に対して面内となる壁部材(せん断壁と呼ぶ)において、発生するせん断応力が大きい。このような応力は耐震計算において重要な検討項目となると思われるが、2次元的な解析では十分に検討できない。

以上の結果より、箱型地中構造物の地震時挙動を合理的に評価できる耐震計算モデルとして次のモデルを考えた。

1) ボックス・ばねモデル

図1に示すように、箱型地中構造物をシェル要素で立体的にモデル化する。シェル要素の各節点には地盤ばねを設けて、地盤と構造物との間の相互作用を表現する。構造物の3次元的な変位の影響を考慮するため、ここで地盤ばねは、シェル要素の直交方向だけでなく、面内のせん断方向にも設ける。地震力としては、図2に示す自然地盤の応答変位、地盤内応力(地震時周面せん断力)、および構造物の質量に起因する慣性力である。ここで、地盤変位による地震力では、せん断壁を擦る方向の成分も考慮する。

2) せん断壁評価モデル

せん断壁に生じるせん断応力だけを単独に計算するための、応答変位法による簡便な評価モデルを提案した。図3に示すように、箱型構造物のせん断壁のみを取り出し、これをシェル要素でモデル化し地盤ばねで支持する。構造物に作用する全地震力の半分のそれぞれをせん断壁で分担すると考え、構造物の半幅($L/2$)に作用する地震力の合計を作用させる。

3. 計算モデルの適用性の検討方法

3次元動的FEMとの解析比較により、上に示した耐震計算モデルの計算精度と問題点を検討した。3次元動的FEM解析では、表1に示す地盤および構造物の物性値を用い、図4に示す構造系の対称性を利用した1/4領域をモデル化した。また構造物の埋設深さとしては2ケース考え、図4に示した深いケースのほかに、土被りのない浅いケースの解析も実施した。地震動としては、地盤の1次固有振動数をもつ調和波を入力し、地盤が1次固有振動モードで振動するようにした。その解析結果の一部として、各部材の最大応力

値を表2にまとめた。ここで構造物の部材名称と応力の成分表示を図5のように定義した。

提案したモデルにおいては、地盤ばねのばね定数の設定が必要である。3次元形状を考慮した地盤ばね定数については、現在のところ合理的な評価方法が確立されていないため、ここでは次の2種類の方法で設定し、それぞれのばね定数を用いた場合の解析結果を比較検討することとした。

(a) 道路橋示方書²⁾の規定に従った方法(道示ばねと呼ぶ)

6面体の各面ごとに、表1に示す地盤の物性値と部材面積を用い、面に直交する方向のばね定数を示方書に示されている算定式より計算した。せん断ばねのばね定数は、直交方向のばね定数の1/3の値とした。

(b) 2次元静的FEMを用いた方法(FEMばねと呼ぶ)

加振方向の地盤横断面を切欠き地盤として2次元FEMでモデル化し、切欠き部分の4辺に単位の分布荷重を作用させ、それによる変位量を求めた。各節点における荷重と変位の関係よりばね定数を算定した。このためFEMばねでは各節点ごとにばね定数が異なる。

地震力については、表3に示す組合せを設け、地震力の各成分が応力に寄与する割合に関しても検討した。

4. 検討結果

耐震計算モデルによる計算結果は、表2に示した3次元動的FEMによる計算値との比率という形で評価した。箱型構造物の耐震設計では、図5に示す上・下床版の曲げ(My)と側壁の曲げ(Mx)のほか、壁～床版の取付部およびせん断壁に生じるせん断応力が、重要な検討項目となる。

1) ボックス・ばねモデル(図6、図7参照)

深いケース：上・下床版のせん断応力については、地盤ばね定数の評価法による違いに関係なく、3次元FEMの結果との対応が良い。上床版と側壁の曲げ応力についても同様の傾向がみられる。しかし下床版の曲げ応力については、道示ばね、FEMばねのいずれを用いた場合でも計算結果の誤差が大きい。この原因としては下床版のばね定数の問題が考えられる。道示ばねでは基盤層に近い下床版付近でばね定数を小さく評価し、FEMばねではばね定数が下床版と側壁の取付部付近で急激に増加する分布となっているため、下床版の曲げ変形を十分表現できなかったものと思われる。せん断壁についてはせん断応力の計算結果のみを図7にまとめたが、道示ばねに比べてFEMばねの方が対応が良い。

浅いケース：FEMばねでは、上・下床版のせん断応力や各部材の曲げ応力を過小に評価する結果となった。これは2次元FEMによる地盤ばねの評価では、特に土被りのない浅いケースにおいて、側壁の地盤ばね定数を小さく算定してしまうためであろう。せん断壁のせん断応力については、FEMばねに比べて道示ばねの方が良い結果が得られている。

以上より、いずれの埋設深さについても、地震力として地盤変位、地震時周面せん断力、および慣性力の3つ(荷重③)を考慮することで、3次元FEMの結果を概ねシミュレートできることが明らかになった。しかし地盤ばね定数の設定方法が計算結果に大きな影響を与えるため、合理的なばね定数の評価方法が今後の課題として残る。

2) せん断壁評価モデル(図8参照)

せん断壁のみをモデル化した簡便な評価モデルにおいては、FEMばねを用いた場合に良好な結果が得られた。このモデルについても、地盤ばね定数を合理的に評価し、さらに、せん断壁を擦る方向の地震力も考慮できれば、せん断壁に生じるせん断応力を十分に計算できる見通しが得られた。

5. まとめ

箱型地中構造物の耐震計算を行うための基本的な計算モデルを提案した。応答変位法に基づいた簡便な計算手法により、箱型地中構造物の地震時挙動を概ねシミュレートできた。また、せん断壁に生じるせん断応力を計算するための、簡便な計算モデルについても提案した。構造物の1/2幅に作用する地震力を考慮することで、せん断壁のせん断応力を概算できた。今後の課題としては、本提案モデルの計算精度に大きな影響を与える地盤ばねについて、その合理的な評価方法を確立することである。

(参考文献) 1) 日本道路協会：「駐車場設計・施工指針
同解説」、1992年

2) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説 I 共通編・
IV 下部構造編」、1980年

3) 渡辺、志波：箱型地中構造物に作用する地震力と耐震
計算法に関する研究、第9回日本地震工学シンポジウム、
pp1105-1110、1994年

表3. 考慮する地震力の組み合わせ

	地盤変位	周面せん断力	慣性力
荷重①	○		
荷重②	○	○	
荷重③	○	○	○

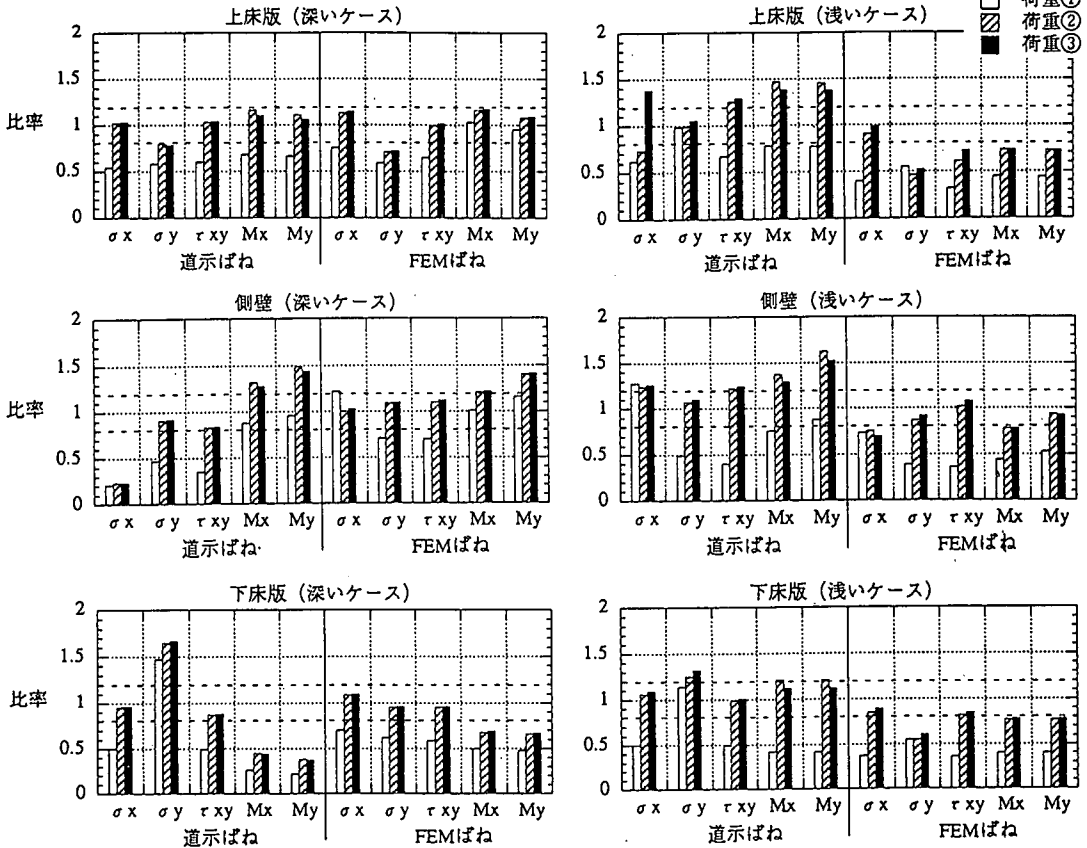


図6. ボックス・ばねモデルの比較結果

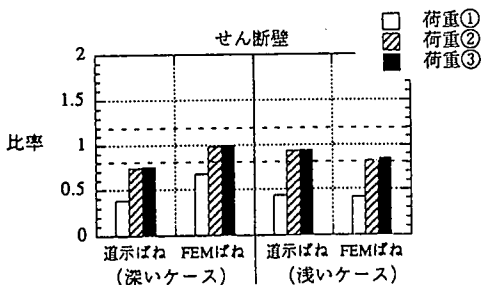


図7. ボックス・ばねモデルの比較結果
(せん断壁)

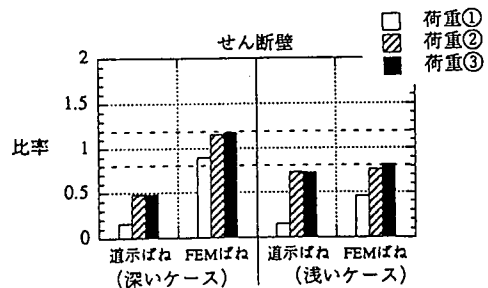


図8. せん断壁評価モデルの比較結果

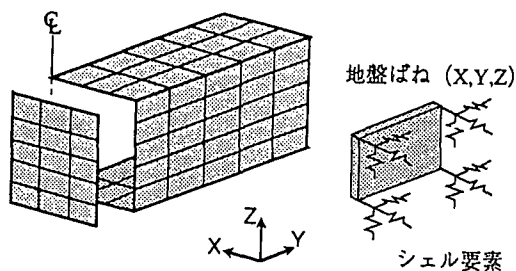


図1. ボックス・ばねモデル

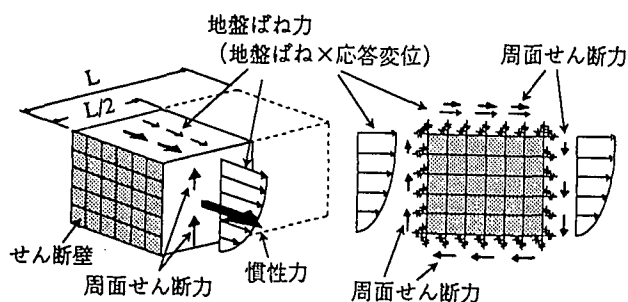
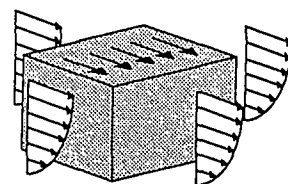
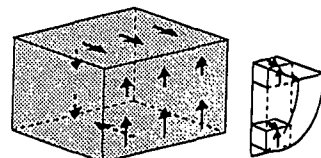


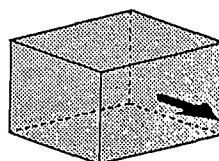
図3. せん断壁評価モデル



(a) 自然地盤の応答変位



(b) 地震時周面せん断力



(c) 慣性力

図2. ボックス・ばねモデルの地震力

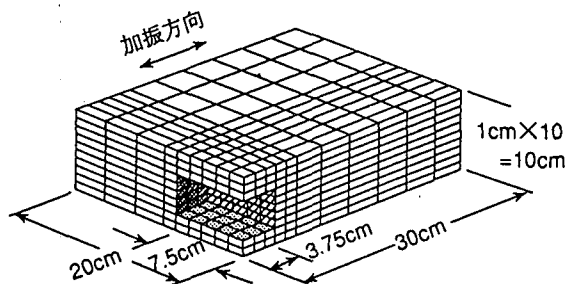


図4. 3次元FEMモデル (深いケース)

表1. 地盤と構造物の物性値

	地 盤	構造物
単位体積重量 (gf/cm ³)	1.00	2.89
ヤング率 (kgf/cm ²)	0.42	16,800
ポアソン比	0.490	0.403
減衰定数 (%)	5.5	3.0
壁 厚 (cm)		0.1

表2. 地震時の最大応力 (3次元動的FEMによる)

	σ_x	σ_y	τ_{xy}	M_x	M_y
深いケース	gf/cm ²	gf/cm ²	gf/cm ²	gf · cm	gf · cm
下 床	2406	210	1291	2.50	6.10
側 壁	314	2446	943	5.30	2.20
上 床	2212	311	1008	1.30	3.40
せん断壁	237	292	1263	2.50	2.50
浅いケース	σ_x	σ_y	τ_{xy}	M_x	M_y
下 床	908	106	534	1.70	4.00
側 壁	88	903	274	6.10	2.50
上 床	676	139	292	1.70	4.10
せん断壁	87	249	509	1.30	2.40

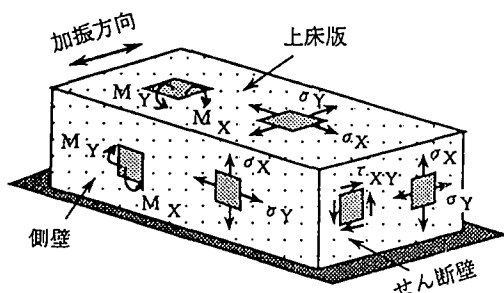


図5. 構造物の応力成分