（第24回地震工学研究発表会講演論文集（1997年7月））

地中構造物の保有変形能の評価手法

中村 晋

正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所(〒243-02 厚木市三田47-3)

兵庫県南部地震後，構造物の設計指針類の基本的枠組は土木学会ｺﾝｸﾘｰﾄ標準示方書-耐震設計編-にみられる様に限界状態設計法へ変更されつつあり，その枠組みに沿った適切な耐震計算法を確立することが必要であることは明らかである．著者は既にこれまでの設計計算法にとらわれない構造物が保有する損傷モードに応じた変形性能と地震応答変形の関係に基づいて地中構造物の耐震設計を行う手法を提案している．ここでは，その提案手法のうち構造物が保有する損傷モードに応じた変形性能を評価する手法を兵庫県南部地震により被災した神戸高速鉄道・大開駅を含む3地点の地盤・構造物モデルの挙動を踏まえて示した．

key word: *Underground Structure, Deformation Characteristics maintained in the structure, Nonlinear Frame Analysis*

1.はじめに

兵庫県南部地震による地中構造物の被害は，地上構造物に比べ数は少ないものの，神戸高速鉄道・大開駅の崩壊にみられる様に必ずしも安全ではない構造形式があることを示した．これまでの地中構造物を対象とした設計指針類は許容応力度設計法を基本とし，震度法や応答変位法が主に設計計算法として用いられていた．地震後，それら設計指針類の基本的枠組は，限界状態設計法へ変更されつつある．その際，応答変位法が耐震計算法として用いられようとしているが，構造体の挙動を非弾性とした場合にはその有用性やモデル化等を再検討する必要がある．いずれにしても，限界状態設計法の枠組みに沿った適切な耐震計算法を確立することが必要であることは明らかであり，著者はこれまでの設計計算法にとらわれない構造物が保有する損傷モードに応じた変形性能と地震応答変形の関係に基づいて地中構造物の耐震設計を行う手法を既に提案している[1]．

ここでは，その提案手法のうち損傷モードに応じた保有変形能を評価する手法における地盤－構造物モデル，荷重モデルおよび荷重モデルの選択手法を，兵庫県南部地震により被災した神戸高速鉄道・大開駅を含む3地点の地盤・構造物モデルを用いて検討した結果を示す．

2.地中構造物の損傷ﾓｰﾄﾞ

地中構造物の各部位のうち側壁，上・下床版に要求される構造性能は常時および地震時側圧，上載土荷重の様な部材軸直交荷重に対する耐荷機能，中柱については上載土荷重に対する耐荷機能および水平抵抗機能である．それらの機能が損なわれる状態を地中構造物の終局状態と見なすことが出来る．地中構造物は周辺を地盤で支持されていることから部材端部がﾋﾝｼﾞ状態になってもせん断破壊が生じなければ崩壊することはない．すると，終局状態として図-1に示す2つの状態が考えられる．1つは中柱がせん断また曲げ破壊する状態，他の1つは側壁また上・下床版が3ﾋﾝｼﾞ機構を有する状態である．

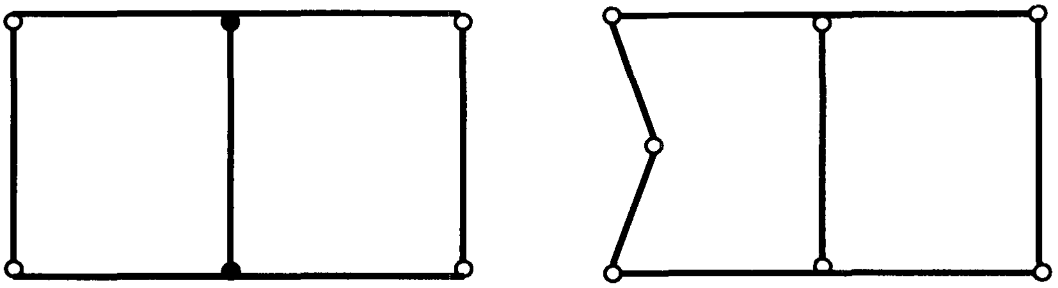
以上の様な地中構造物が終局状態に至る際の各部材の損傷のみならず各部材の引張り鉄筋が降伏した状態，また，構造系によっては，引っ張り鉄筋のひずみ量に応じたひび割れ幅なども損傷モードとして考慮することも必要であると考えられる．

3.損傷ﾓｰﾄﾞに応じた保有変形能の評価手法

1)地盤-構造物系のモデル化

大開駅の様な開削トンネルの横断面はボックス構造を有している．その地震時変形は主として周辺地盤の水平方向のせん断変形に起因して生じ，その変形モードは地盤変形の大きさや方向によって異なるものの図-2に示す横方向のゆがみ変形となる．

既往の耐震設計法では，その変形が一方向に生じるという静的状態に置き換え，地盤－構造物系の動的相互作用のモデル化という観点から構造物の支持条件および作用荷重をモデル化している．その一例として，応答変位法では，構造物を地盤バネで支持し，周辺地盤より構造物に作用する荷重を直接また



a)中柱の崩壊　　　　　　　　　　b)側壁の3ﾋﾝｼﾞ機構

図-1　地中構造物の終局状態

間接的に与えるというモデルを用いている．その手法は，作用荷重や支持条件に対する概念は物理的意味を有しているものの，モデル化の基本となる地盤バネ定数の評価や常時と地震時断面力の評価時における構造物の支持条件が異なること等，境界条件が定量的意味を有しているとはいい難い．

ここでは，構造物の変形が一方向に生じると考える点は既往の設計法と同であるものの，構造物の支持条件および作用荷重は構造物の応答という観点でモデル化する．まず，構造物の支持条件は図-2の様に鉛直部材下端を単純に支持するモデルを用いる．次に，荷重は，構造物の地震応答断面力と同じ断面力が生じる様に構造物に直接作用するモデルを用いる．この荷重モデルは構造物と周辺地盤との境界における土圧などと個別には物理的に対応していないが，簡易で適切なモデル化を行うことにより比較的容易に地震時発生断面力また地震時応答変形と等価な応答を評価することが可能になると考えられる．

2)損傷モードに応じた保有変形能

提案する損傷モードに応じた保有変形能とは，先に示した地盤-構造物モデルを用い，荷重を構造物が終局状態に至るまで増大させながら求めた構造物各部位における損傷と変形の関係として定義し，図-3に示す構造物に作用する水平力の合力との関係により表す．ここで，変形は上・下床版間の相対変位により表し，損傷と関連づけていることから損傷時における部材発生断面力および部材変形，つまり構造物の応答と等価になる．このように，提案手法は想定する地震動に対する地震応答を求めるという従来の設計概念ではなく，構造物が終局状態また所定の損傷度に達する際の応答を求めようとするものである．ここで，構造物の応答は各部材の非線形性を考慮した構造解析により求める．その際，地震荷重に対する解析は，常時荷重と連続して行う必要がある．この保有変形能を用いた構造物の断面力および変形照査は，想定する地震動に対して別途求めた構造物の応答変形[1,2)]と保有変形能との比較により行う．

この手法の大きな特徴は，保有変形能には部材の

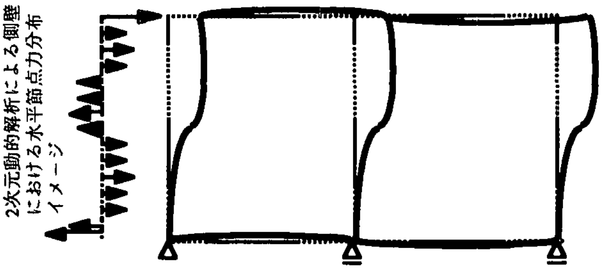


図-2　地震時における地中構造物の変形

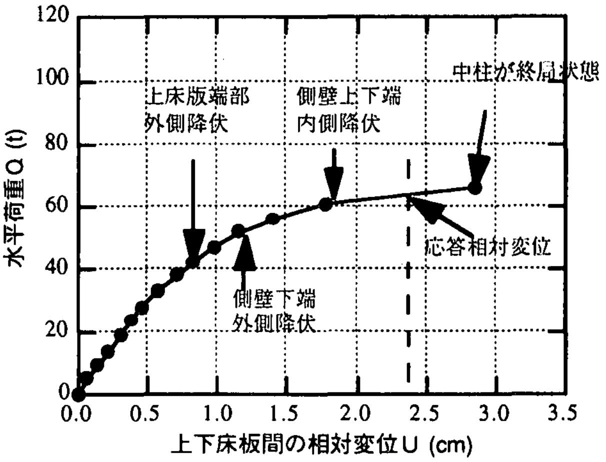


図-3　損傷モードに応じた保有変形

損傷の程度も含まれているため保有変形能と応答相対変位との比較により耐力照査と地中構造物の終局状態に対する裕度が同時に分かるということである．

4.荷重分布のモデル化

提案手法は構造物の地震時応答断面力と同等の断面力を評価することを前提としており，その有意性は荷重分布の評価に依存している．以下に，保有変形能を求めるための荷重分布のモデル化手法を示す．

1)検討に用いた構造物，地盤モデル

兵庫県南部地震により駅部が崩壊した神戸高速鉄道・大開駅，大開駅に比べ被害の小さな高速長田駅および柱のみならず側壁にも被害のみられた大開駅と新開地駅間のﾄﾝﾈﾙ部の3地点[1)]を検討に用いた．

構造物各部位の非線形特性のうち中柱のM-θ関係は，常時軸力に対して算出した．ここで大開駅中柱のM-θ関係は実験[3)]に基づき評価した．また，他部

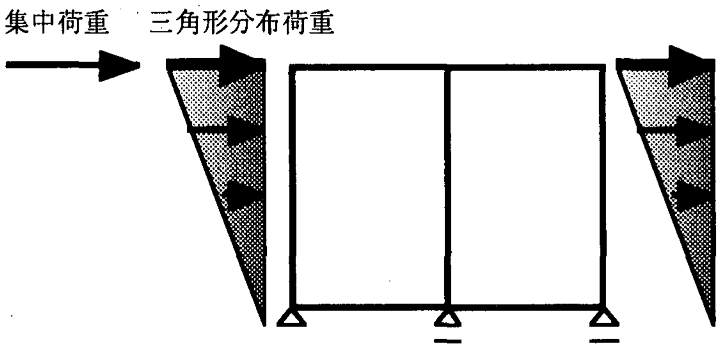


図-5 荷重分布モデル

材のM-θ関係は変形に応じた軸力を考慮してe関数法に基づいて定めた．側壁は，常時および地震荷重が分布荷重として作用することからM-ϕ関係として部材の非線形特性をモデル化した．

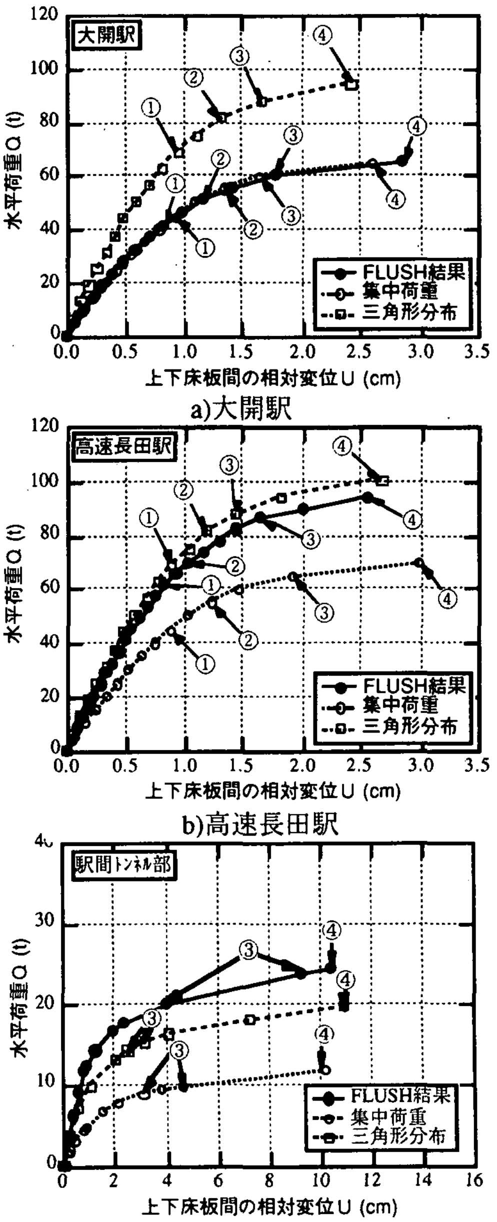
2)荷重分布のモデル化

地震時に於ける構造物の応答と等価な断面力を与えると推定される荷重分布の中で最も精度の高いモデルは，2次元有限要素モデルを用いた地震応答解析により得られる構造物モデルにおける応答節点力の分布であると考えられる．しかし，その荷重分布は簡易なモデルとはいえない．地中構造物の変形を単純化すると上・下床版間のせん断変形であることから，そのような変形が生じる簡易な荷重モデルとして図-4に示す上床版に集中荷重として加えるモデルと側壁の上床版から下床版に三角形分布荷重として作用するモデルの2つが考えられる．この2つの荷重モデルはL.A. Metroの設計でも用いられている．ここでは，この2つの簡易荷重分布モデルと動的解析に基づく応答節点力分布による構造物の保有変形能を先に示した3地点の地中構造物について算出し，それらを比較することにより各荷重モデルの適用性を明かにする．

応答節点力分布は，既に著者らが実施している2次元地震応答解析ｺｰﾄﾞSuper Flushを用いた手法[4]により得られた構造物の応答として評価する．その際，入力地震動には，大開駅付帯構造物の被害[5]を定性的に評価出来る兵庫県南部地震におけるﾎﾟｰﾄｱｲﾗﾝﾄﾞ(GL-83mm)で観測されたNS成分の記録より表層地盤の影響をはぎ取った入射波成分を用いた．

各地点毎の荷重分布に応じた保有変形能の比較を図-6に示す．図中の番号は各損傷ﾓｰﾄﾞを表し，4が中柱の破壊(大開駅および高速長田駅はせん断破壊，駅間ﾄﾝﾈﾙ部は曲げ破壊)を表している．動的解析に基づく荷重分布による保有変形能の形状および損傷ﾓｰﾄﾞ位置は，大開駅では集中荷重分布，他2地点では三角形分布荷重がよく対応している．

簡易荷重分布による断面力の推定精度を把握する



a)大開駅
b)高速長田駅
c)駅間ﾄﾝﾈﾙ部

図-5 地点毎の荷重分布に応じた保有変形能の比較

ため動的解析により得られた断面力と各簡易荷重分布により得られた断面力の比較を図-7に示す．これより，簡易荷重分布は，断面力算定に際して十分な精度を有していることが分かる．

5.荷重分布の選択

対象とする地盤-構造物系に応じた荷重分布の選択手法について検討する．

まず，動的解析により得られた3地点における節点力分布の差異について検討する．荷重分布の差異は，上床版と側壁に作用する水平荷重の比率と関連していると考えられることから，上床版と側壁に作用する水平荷重の合力の比(以後，水平荷重比LRと

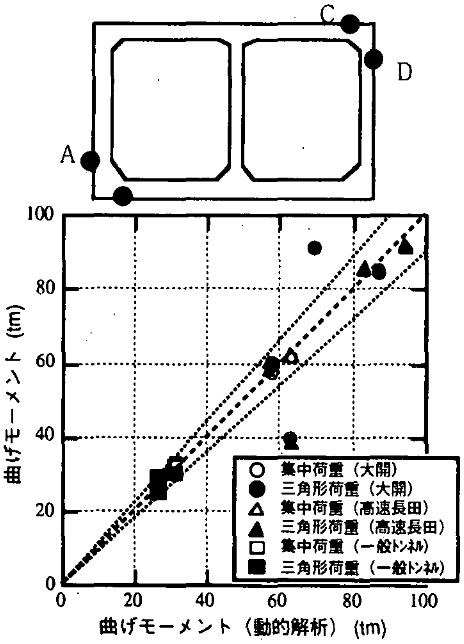


図-6 荷重分布に応じた断面力の比較

呼ぶ)を表-1に示す．これより大開駅では，上床版に作用する荷重が側壁の約1.5倍であるが他の2つの構造物ではいずれも側壁に作用する荷重が大きいことが分かる．この様に，上床版における荷重分担が側壁より大きな場合の荷重分布は集中荷重分布的になると推定され，前項の結果と調和している．集中荷重と三角形分布荷重の境界は，3地点における水平荷重比より1.0であろうと考えられる．

次に，その水平荷重比の評価手法について検討を行う．地中構造物の地震応答に影響を及ぼすと考えられる因子である地盤と構造物のせん断剛性の比，構造物の深度および構造物の形状等は，その水平荷重比にも影響を及ぼすと考えられる．表-1に側壁近傍地盤の初期せん断剛性(Gso)と構造物の初期せん断剛性(Gst:集中荷重による荷重と変位の関係より算出)の比，構造物の深度(D)をN値が50以上またせん断波速度が300m/s以上の層上面までの深度Hで正規化した深度比および構造物の幅Lを高さBで正規化した形状寸法比との関係を合わせて示す．これより，大開駅と高速長田駅ではせん断剛性比，および深度比，大開駅と駅間ﾄﾝﾈﾙ部ではせん断剛性比と形状寸法比が水平荷重比と相関性があることが分かる．検討の対象とした構造物が3つではあるものの水平荷重比LRはそれら影響因子と次式の様に関連付けることが出来る．

$$LR = 1.1\left(\frac{G_{st}}{G_{so}}\right) + 3.3\left(\frac{D}{H}\right) + 0.39\left(\frac{L}{B}\right) - 0.94 \quad (1)$$

この式より得られる水平荷重比を目安とし，1.0以上の場合は集中荷重を用い，1.0以下の場合には三角形分布荷重を用いるものとする．

表-1　各地点における水平荷重比とその影響因子

	水平荷重比 (LR)	せん断剛性比 (Gst/Gso)	深度比 (D/H)	形状寸法比 (L/B)
大開駅	1.47	0.47 (2950/6280)	0.29 (5.0/17.2)	2.37 (17.0/7.17)
高速長田駅	0.92	0.33 (3090/9380)	0.17 (5.0/29.5)	2.40 (17.4/7.24)
駅間ﾄﾝﾈﾙ部	0.45	0.24 (1362/5600)	0.25 (5.0/17.44)	1.41 (8.96/6.37)

6.あとがき

本報では，著者が提案している地中構造物の新しい耐震計算法である保有変形能に基づく手法のうち，地中構造物の損傷ﾓｰﾄﾞに応じた保有変形能を評価するための，地盤－構造物モデル，荷重モデルおよび荷重モデルの選択手法について提案を行った．ここで，保有変形能とは地中構造物の変形の増大に伴う構造物の構成部位の損傷過程および終局状態を構造物の変形と関連付けたものであり，その変形が部材の損傷時の断面力や変形と等価な意味を有する点が大きな特徴である．それらモデルのうち荷重モデルについては，兵庫県南部地震により被災を受けた3地点における地中構造物を対象とした検討に基づいて集中荷重および三角形分布荷重の適用性を明かにし，その選定手法も合わせて提案した．

今後，保有変形能に影響を及ぼす載荷履歴や常時荷重の評価手法について検討を行う予定である．

参考文献

1) 中村晋他,限界状態設計法に基づく地中構造物の耐震計算法の一提案,第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集,pp.421-428,1997

2) 中村晋,1次元動的解析による地中構造物の水平変形の簡易推定法,第32回地盤工学研究発表会,1997(投稿中)

3) 中村晋他,神戸高速鉄道・大開駅の既設及び復旧柱の耐力及び変形性能,ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集,第18巻,第2号,pp.197-202,1996

4) 矢的照夫他,兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析,土木学会論文集,No.537/I-35, pp.303-320,1996

5) 中村晋他,地震被害に基づく神戸高速鉄道・大開駅周辺地盤の変形推定,第31回地盤工学研究発表会,pp.1275-1276,1996