

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

佐藤工業(株) 中村 晋
江寄順一
末富岩雄

本論では、地上構造物と同様に構造物の保有する変形性能に着目した地中構造物の耐震設計手法を提案した。この手法の大きな特徴は、構造物の保有変形能を各部材の損傷モードを関連づけることにより構造物の応答変形との比較という変形能の照査により耐力との比較についても満足するという点である。さらに、構造物の地震時応答を評価する手法についても、簡易な応答係数法、2次元動的解析による手法および1次元動的解析手法の3つの手法を示した。この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、高速長田駅の一般駅部および大開駅と新開地駅間の駅間トンネル部の3つの構造物に適用した結果、本手法の有用性が明らかとなった。さらに、構造物の地震時応答の評価についても、1次元解析法が有効であることが明らかとなった。

1.はじめに

兵庫県南部地震による地中構造物の被害は鉄道高架橋・道路橋などの様な地上構造物に比べ数は少ない。しかし、地中構造物の中には、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が明らかとなった。大開駅の崩壊は上載土荷重に対する上床版の耐荷力の損失をもたらした中柱の破壊に起因している¹⁾。さらに、神戸市営地下鉄・上沢駅等の他の地下鉄駅部また一般トンネル部においても上床版の崩壊には至らないものの中柱にはせん断破壊が生じていた²⁾。それら被災構造物の復旧は完了しているが、地下鉄構造物の被害は人的災害に直結する可能性が極めて高いことから地震活動度の高い他地域における地下鉄では中柱の耐震補強が現在実施されている³⁾。

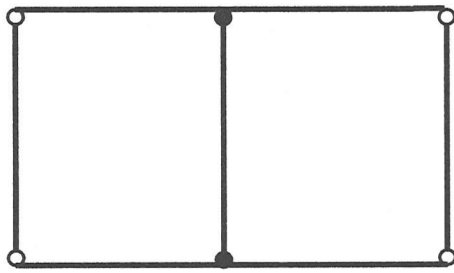
地下鉄中柱の耐震補強は(1)破壊モードの改善(せん断破壊先行から曲げ破壊先行型へ)、(2)兵庫県南部地震クラスの地震に対して耐えることの2つを目標として実施されている。地下鉄中柱の耐震補強を行う際、補強方法のみならず耐震診断および補強設計手法が必要となるのは言うまでもないことである。これまでの地中構造物を対象とした設計指針類では、設計計算法として震度法、応答変位法、設計法として許容応力度設計法が主に用いられていた。地震後、それら設計指針類の見直し、また独自の耐震診断法等の作成作業が各所で実施されている^{3,4)}。それらで用いられている設計計算法は応答変位法、設計法は限界状態設計法である。その中で、増田ら⁴⁾は従来の部材の破壊モードに関する断面力照査に加え、変形量

に基づいた耐震診断および設計法を示している。一方、1993年Northridge地震による被害の報告されていない地下鉄LA Metroでは、構造物の応答荷重を簡易にモデル化し、その荷重を地盤変位より推定された構造物の応答変位となる様に与えた際に得られる構造体の応答と断面耐力の比較を行うという設計法を用いている⁵⁾。これは構造物の応答荷重に着目した計算法を用いており、我が国で主に用いられている応答変位法で必要となる地盤バネ定数の設定が不用となる等の優れた点がみられる。しかし、増田らの提案を除き、いずれも断面力照査の枠組みを設計の基本としていることから、耐力に近い応答に対する裕度の評価が困難となる。また、増田らの手法においても部材の保有する変形能と構造物の応答変形の評価する際にかなり簡易なモデル化を行っており、より一般的な手法の確立が望まれるものと考えられる。

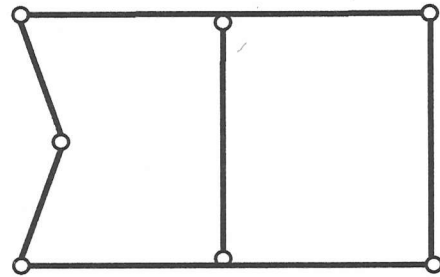
本論では、地上構造物と同様に構造物の保有する変形性能に着目した地中構造物の耐震設計手法を提案する。ここで構造物の保有変形能とは、変形能と各部材の損傷モードを関連づけられた特性と定義する。このことにより構造物の応答変形との比較という変形能の照査により耐力との比較についても満足することが出来るという点が本手法の大きな特徴である。さらに、構造物の地震時応答を評価する手法についても簡易な手法の提案を行う。この手法における各評価項目のモデル化手法さらに適用性の検討には、兵庫県南部地震により被災した地中構造物の中で被災程度および損傷モードの異なる神戸高速鉄道・大開駅、高速長田駅の一般駅部および大開駅と新開地駅間の駅間トンネル部の3地点⁶⁾の地盤・構造物モデルを用いた。

キーワード: 地中構造物, 耐震設計法, 保有変形能
損傷モード

佐藤工業(株)中央技術研究所土木研究部,0462(41)2171



a)中柱の崩壊



b)側壁の3ヒンジ機構

図-1 地中構造物の終局状態



写真-1 大開駅中柱の崩壊

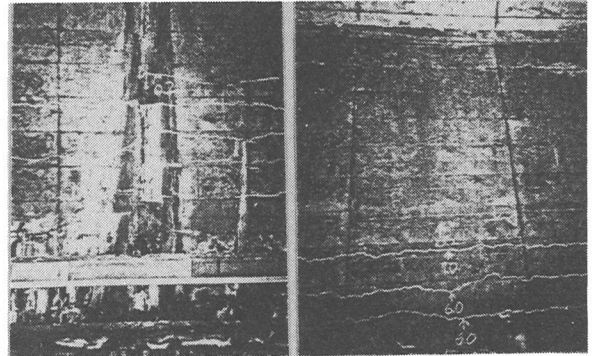


写真-2 大開駅と新開地駅間のトンネル部側壁のひび割れ

2. 損傷モードに応じた保有変形能に基づく地中構造物の耐震設計法の提案

(1) 損傷モード

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を有すること、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それぞれの部材端部がヒンジ状態になってもせん断破壊さえ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ヒンジ機構を有する状態である。中柱の破壊は、写真-1に示す大開駅の中柱の崩壊の様に上床版の上載荷重に対する耐荷機能を損失し、駅部の崩壊につながる。側壁が3ヒンジ機構に近い状態となった事例として写真-2の大開駅と新開地駅間の一般トンネル部があるが、側壁中央部で最大24mmほどはらみ出したとの報告があるものの側圧および上載荷重に対する耐荷機能を失っていなかったため崩壊には至らなかったものと考えられる。すでにこのような考えはLos Angeles(U.S.A.)における地下鉄(L.A. Metro)の設計に際して考慮されており、兵庫県南部地震と同様の都市直下型地震であるNorth Ridge地震による被害は報告されていない。

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もここでは損傷モードとして定義する。

(2) 提案手法の流れとその特徴

提案する設計計算法の流れは図-2に示すとおりであり、以下にこの計算手法の概要を示す。

- (i)他の計算手法と同様、地盤および構造特性に基づき常時断面力の算出を行う。ただし、常時荷重に対しても各部材の非線形性を考慮した構造解析を行う。
- (ii)地震時の検討として、構造物の各部材の損傷モードに応じた保有変形能を評価する。ここで、変形能とは、損傷モードに応じた上・下床版間の相対変位とする。それは、地震時に於ける構造物の応答節点力分布を簡単な節点力分布にモデル化し、対象とする地中構造物が終局状態に至るまで徐々にその節点力分布の値を大きくしながら求める。その過程において、各部材の端部および中央部の応答断面力と各損傷モードに対応する部材強度との比較を行い損傷の程度を明かにする。図-3には、作用節点力のうち水平方向の力の合計である水平荷重と相対変位の関係を示している。以後、この関係を損傷モードに応じた保有変形能と呼ぶ。
- iii)地震時に於ける上・下床版間の応答相対変位を算出する。
- iv)地震時に於ける上・下床版間の応答相対変位と損傷モードに応じた保有変形能を比較し、対象とする地中構造物の各部材の損傷の程度および地中構造物の

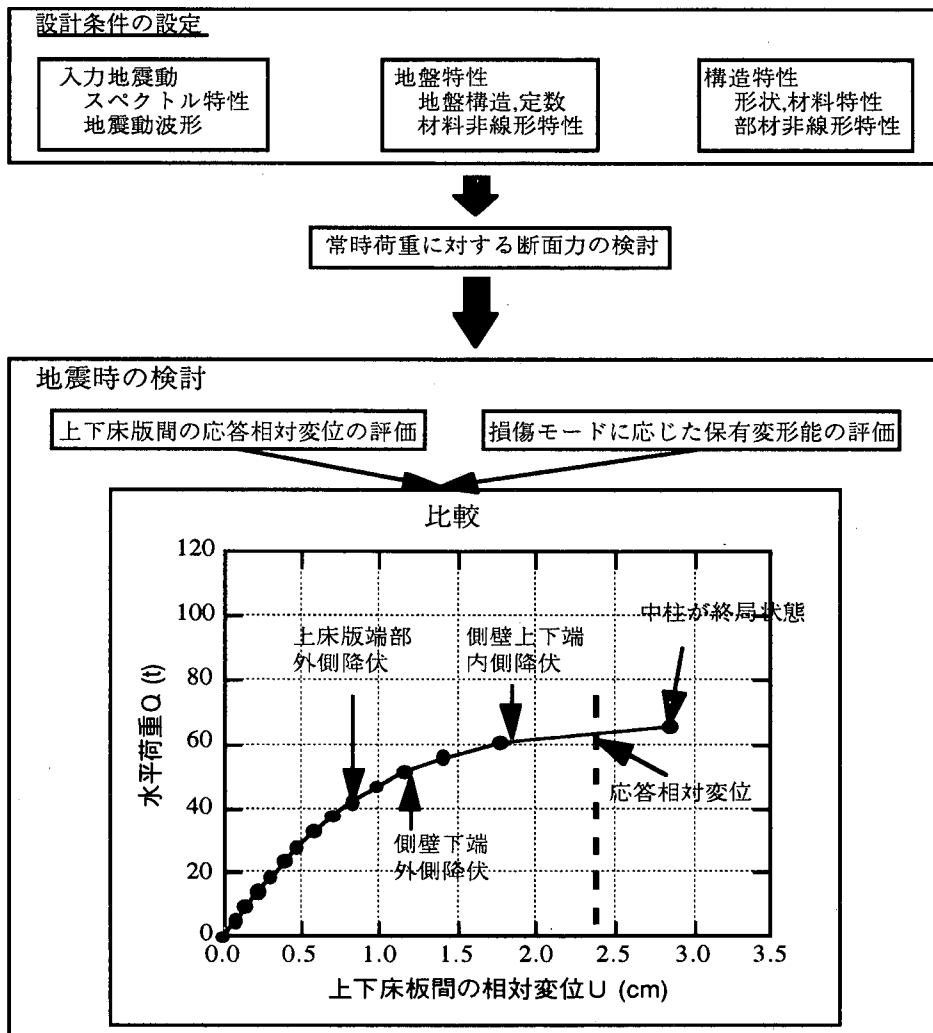


図-2 提案計算手法の流れ

終局状態に対する裕度の判定を行う。ここで裕度は上・下床版間の終局相対変位と応答相対変位の比として定義する。

この手法の大きな特徴は、保有変形能には部材の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の比較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。さらに、類似の地盤・構造特性を有する地中構造物に対しては損傷モードに応じた保有変形能が共通であることから、地震動レベルに応じた応答相対変位を求めることにより容易に耐震診断および設計を行うことが可能となる。以下に損傷モードに応じた保有変形能および地震時に於ける上・下床版間の応答相対変位の評価手法を示す。

(3) 損傷モードに応じた保有変形能

損傷モードに応じた保有変形能は、地震時に於ける地中構造物の挙動を地上構造物と同様に静的な挙動に置き換えることにより求める。

その際の構造物モデルおよび作用荷重は図-3に示すモデルを用いる。作用荷重分布は、構造物の地

震時挙動に基づきモデル化した図-3に示す上床版に集中荷重として加える場合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場合のいずれかとする。荷重分布の選択手法については、後述するように地盤と構造物の剛性比、構造物の形状および構造物の深度に依存している。構造解析においては、各部材の非線形性を考慮する。

図-3に示した解析モデルを用い、荷重を逐次増加させることにより得られる荷重と上下床版間の水平相対変位の関係を求める。その際、各荷重段階にお

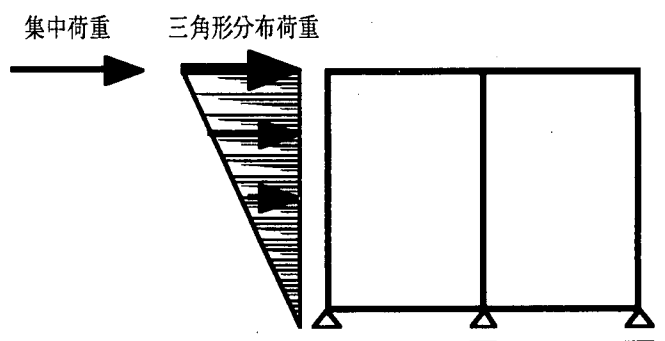


図-3 保有変形能の評価モデル

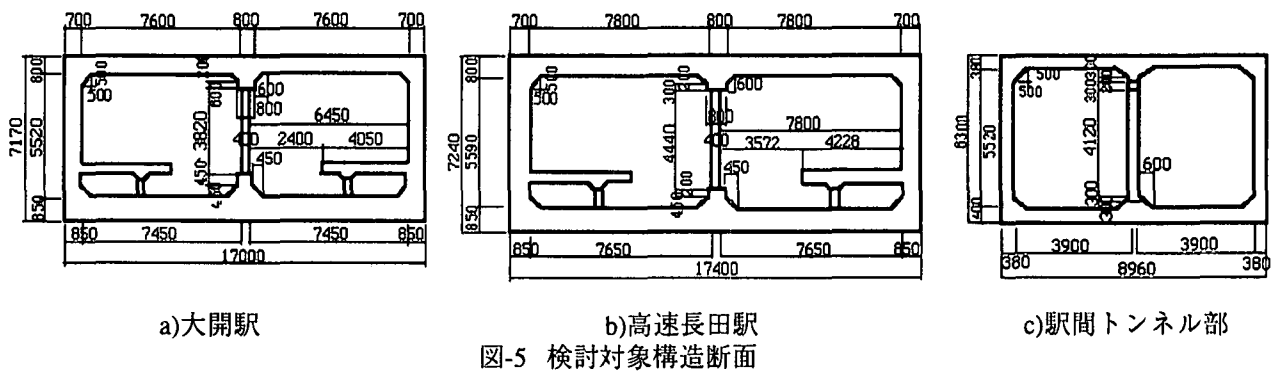


図-5 検討対象構造断面

ける変位と損傷部材位置およびその損傷モードの関係を図-3の様に記述する。

(4)地震時に於ける上・下床版間の応答相対変位

対象とする地盤構造に応じ、以下の3つの手法により評価する。

- i) 応答係数法
- ii) 2次元動的解析に基づく手法
- iii) 1次元動的解析に基づく手法

ここで、応答係数法はJaw-Nan Wang³⁾により提案されている手法であり、基盤上の地盤が一様な均質地盤と見なせる場合に適用出来る手法である。それは、現行指針類で用いられている基盤スペクトルと地盤のせん断波速度構造に基づく地盤変位の推定法を用い上・下床版間の相対地盤変位 U_{so} を求め、それに地盤と構造物のせん断剛性比 F より図-4を用いて得られる応答係数 α を乗じることにより構造物の上・下床版間の応答相対変位を推定しようとする手法である。

2次元動的解析に基づく手法は、原子力構造物を対象とした安全照査マニュアル⁷⁾に基づく手法¹⁾である。この手法では、地盤は非線形性を考慮しているものの構造物は地震時に於ける剛性低下を考慮した等価剛性により線形材料としてモデル化されている。

1次元動的解析に基づく手法は、構造物を1つの土要素と見なし(1)で得られた構造物の水平耐力と変形の関係よりそのせん断剛性のひずみ依存特性を求め、地盤のみならず構造物も非線形性を考慮した解析を行うものである。その際、その土要素のせん断剛性

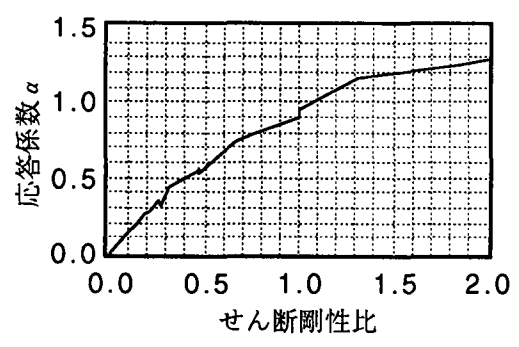


図-4 地盤と構造物のせん断剛性比と応答係数の関係

のひずみ依存特性は側方地盤と構造物の平均とし、減衰特性および質量は側方地盤の特性を用いる。地盤が水平成層構造と見なせる場合には2次元解析より簡易に応答相対変位を求めることが出来る。

3. 検討に用いる地盤・構造物モデル

提案手法の検討には、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を用いた。それらの断面形状を図-5、それら構造物位置での地盤調査結果に基づく地盤構造モデルを図-6に示す。いずれの地点でも土被り厚さは5.0mである。大開駅と高速長田駅はほぼ同様な全体形状を示すが、中柱の高さが大開では3.82m、高速長田駅が4.44m、そのピッチが大開駅では3.5m、高速長田駅では3.0mと異なっている。また駅間トンネル部の中柱は曲げせん断耐力比が1.0以上であり、破壊モードは曲げ型である。

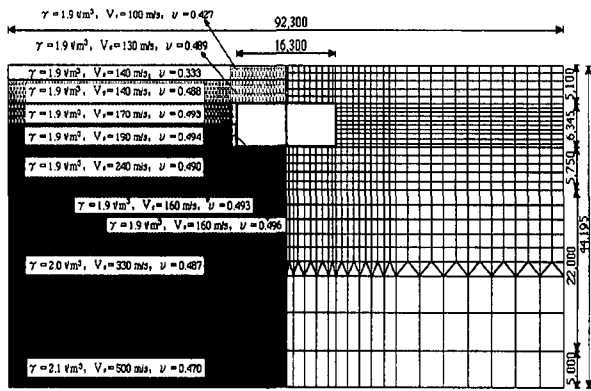
次に、常時軸力に対して求めた3つの構造物の中柱のM- θ 関係を図-7に示す。ここで大開駅中柱のM- θ 関係は実験⁸⁾に基づき評価した。その他部材のM- θ 関係は、変形に応じた軸力を考慮し、e関数法に基づいて定めた。

4. 損傷モードに応じた保有変形能の評価手法

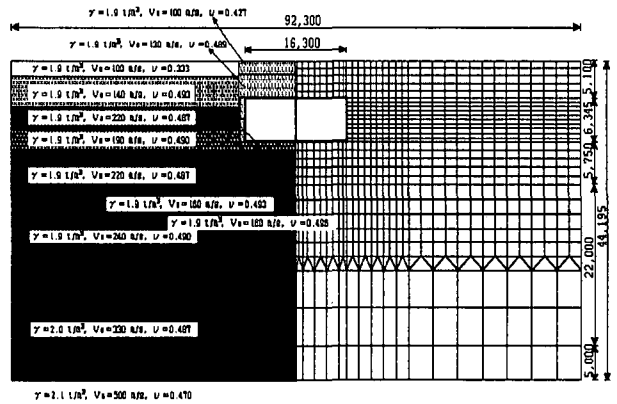
保有変形能を評価する際に用いる荷重分布は図-4に示したように集中荷重また三角形分布荷重といった極めて簡易な荷重分布を用いている。その荷重分布の妥当性さらに選択手法について検討する。

(1) 荷重分布の検討

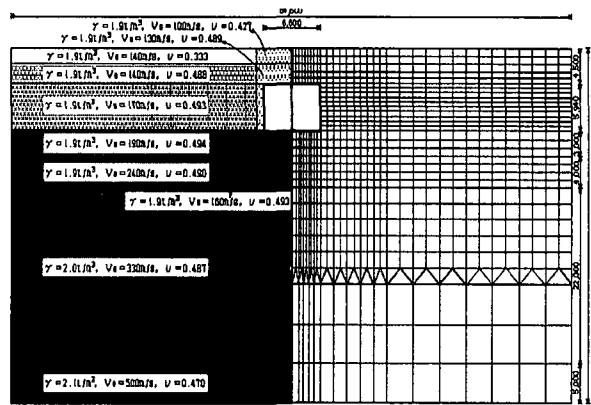
まず、図-6に示した地盤モデルを用いた2次元地震応答解析を行い地震時における構造物の応答荷重を評価する。解析は既に著者らが実施している2次元地震応答解析ソフト「Super Flush」を用いた手法¹⁾により行う。入力地震動には、大開駅付帯構造物の被害⁹⁾を定性的に評価出来る兵庫県南部地震における θ -17イベント(GL-83mm)で観測されたNS成分の記録より表



a)大開駅



b)高速長田駅



c)駅間トンネル部

図-7 解析地盤-構造物モデル

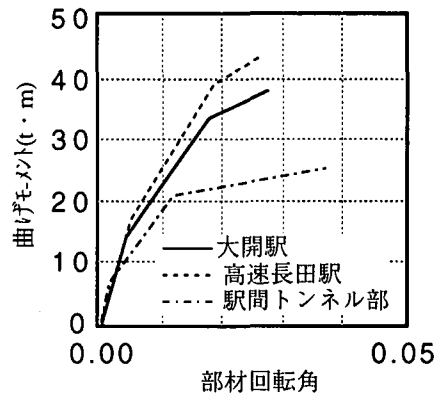


図-8 各地点における中柱の特性

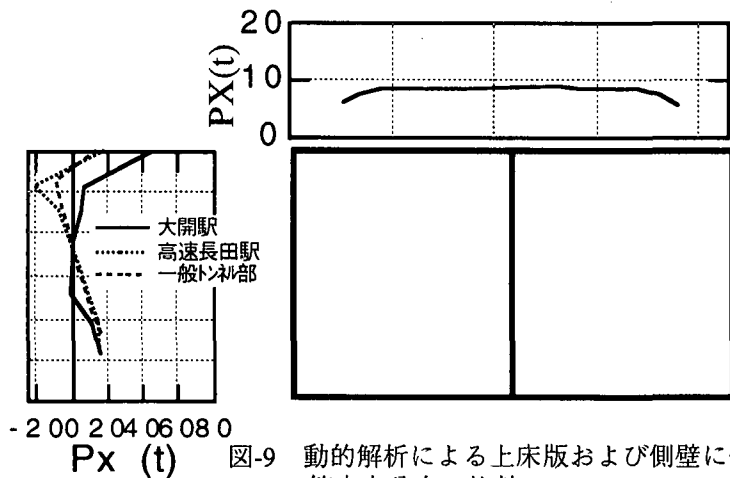
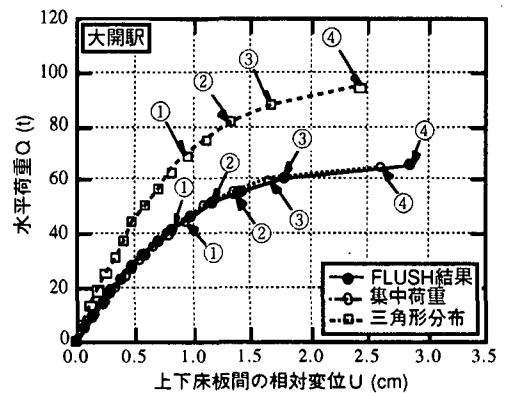
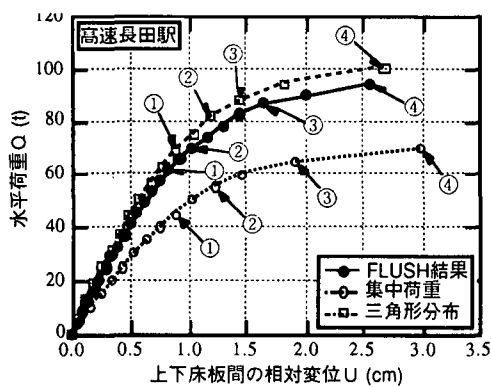


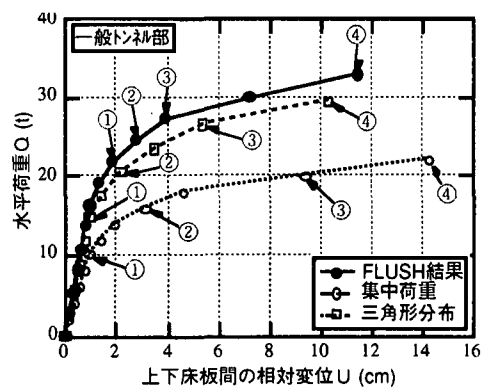
図-9 動的解析による上床版および側壁に作用する節点力分布の比較



a)大開駅



b)高速長田駅



c)駅間トンネル部

図-10 動的解析および簡易荷重分布による損傷モードに応じた保有変形能の比較

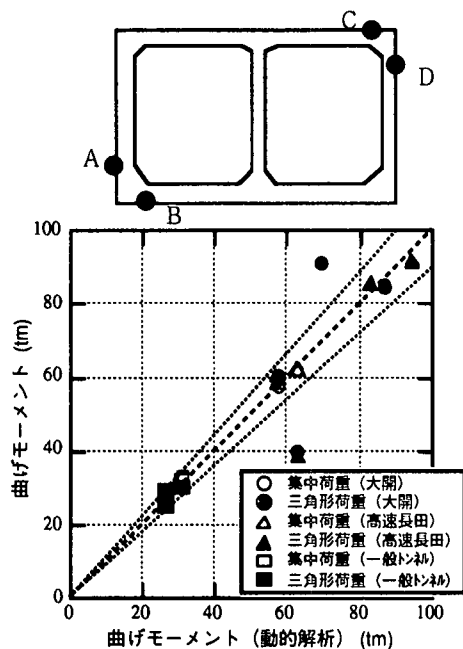


図-11 荷重分布に応じた断面力の比較

層地盤の影響をはぎ取った入射波成分を用いた。

解析により得られた各構造物における中柱の相対変位が最大となる時刻における側壁および上床版に作用する節点力分布を図-9に示す。ここで、上床版における値は地点によらず同様な分布となっていることから大開駅における節点力分布のみを示し、側壁においては3地点で得られた節点力分布の比較を示している。側壁においては、大開駅では上床版位置における節点力が最も大きな値となっているが、他2地点では上床版位置と下床版位置における値は同程度の値となっている。

次に、動的解析により得られた節点力分布に基づく保有変形能と図-3に示した集中荷重および三角形分布荷重を節点力分布とすることにより得られる保有変形能の比較を図-10に示す。図中に示した番号は各損傷モードを表し、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。動的荷重による保有変形能の形状および損傷モード位置は、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。ただし、駅間トンネル部の終局状態はその被害形態より中柱の破壊に至る前に側壁中央部が曲げ耐力に至る状態であろうと推定されるが、側壁の部材特性としてM-θ関係を用いたためその状態を評価出来なかった。

簡易荷重分布による断面力の推定精度を把握する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-11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。

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	0.37 (3090/ 8150)	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)

(2)荷重分布の選択

対象とする地盤と構造物系によって用いるべき設計用荷重分布が異なることから、設計用荷重分布の選択手法について検討する。

動的解析により得られた荷重分布のうち上床版と側壁に作用する水平荷重の比(以後、水平荷重比LRと呼ぶ)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。

その水平荷重比に影響を及ぼす因子として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が考えられる。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。

$$LR = 0.62 \left(\frac{G_{st}}{G_{so}} \right) + 4.1 \left(\frac{D}{H} \right) + 0.39 \left(\frac{L}{B} \right) - 1.0 \quad (1)$$

この式より得られる水平荷重比を目安とし、1.0以上の場合には集中荷重を用い、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。少なくとも、駅間トンネル部の様に形状寸法比が1.0に近い構造物は三角形分布荷重と見なせるものと考えられる。

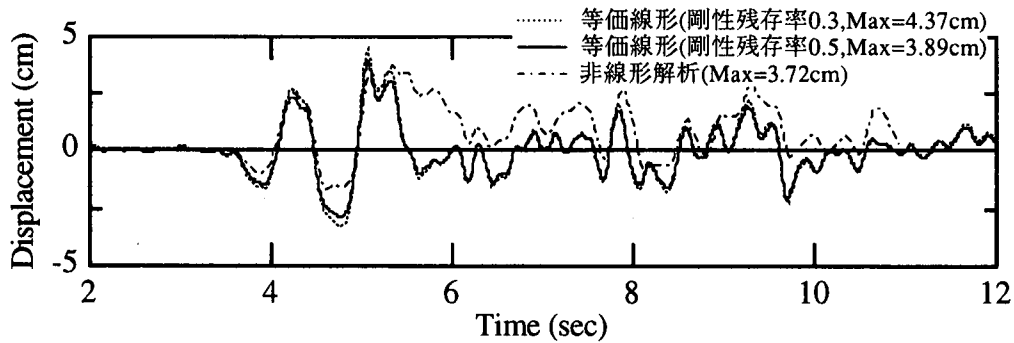


図-12 2次元動的解析による中柱位置上・下床版間の相対変位時刻歴

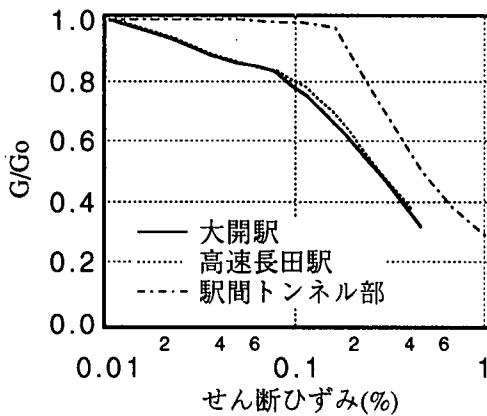


図-13 各地点における構造物のせん断剛性のひずみ依存特性

表-2 各手法による地震時における上・下床版間の最大相対変位の推定値の比較

	上・下床版間の相対変位(cm)		
	応答係 数法	2次元動的 解析	1次元動的 解析
大開駅	7.99	3.89	3.99
高速長田駅	2.33	2.67	2.44
駅間トンネル部	2.83	5.18	4.99

5.地震時応答変形の評価

2章で示した3つの手法により推定した構造物の上・下床版間の相対変位を比較する。

応答係数法では、表-1に示した地盤と構造物間のせん断剛性比を用い図-4より応答係数(大開駅:0.55, 高速長田駅:0.45, 駅間トンネル部:0.35)を求め、2次元動的解析より得られる自由地盤の構造物の上・下床版位置間の相対変位(大開駅:14.52cm, 高速長田駅:5.18cm, 駅間トンネル部:8.08cm)より算出した。

2次元動的解析では、地震時における構造物部材の剛性低下を側壁の剛性低下により考慮している。その際、側壁の剛性低下率を0.5としているが、その妥当性を検討するため、中柱位置における上・下床版間の相対変位を側壁の剛性低下率を0.3(側壁端部の降伏時に相当)とした場合および構造物の各部材の非線形性および地盤材料の非線形性を考慮した解析と比較し図-12に示す。後者の解析では、構造物部材の変形特性(M- ϕ 関係)の非線形性にはDegrading Tri-linear(武田モデル)モデルを用い、地盤材料の非線形性には2次元動的解析で用いたせん断剛性のひずみ依存特性に基づくH-Dモデルを用いた。その結果、非線形解析では最大相対変位が3.72cmであり2次元動的解析では剛性低下率が0.5の場合が3.89cm, 0.3の場合が4.37cm

と剛性低下率が0.5の場合がよく対応している。よって、他の2つの構造物については側壁の剛性低下率を0.5として算出した。

1次元動的解析において、構造物を土要素にモデル化する際に用いる構造物のせん断剛性のひずみ依存特性は図-11に示した保有変形能に基づき算出し、図13に示す。

これら3つの手法により得られた構造物の上・下床版間の最大相対変位の推定値の比較を表-2に示す。これより応答係数法による値は、他の二つと大きく異なっているものの、2次元動的解析と1次元動的解析による値の差異は9%以下と小さいことが分かる。このことから、1次元動的解析によっても構造物の地震時応答を適切に評価出来ることが分かる。

6.適用性

ここでは2章で示した設計手法の妥当性を明かにするため、中柱破壊時の構造物の保有変形能と地震時応答変形の比較を表-3に示す。保有変形能は、大開駅については集中荷重分布、他の2つの構造物では三角形荷重分布による値を用いた。この結果をみると、大開駅では地震時応答変形が保有変形能の1.5倍と大きな値となっているが、高速長田駅では両者が同程度の値となっており、両駅の被害状況とよく対応している。駅間トンネル部では保有変形能が地震時応答変形

表-3 各地点における保有変形能と地震時応答変形の比較

	中柱破壊時の 保有変形能 (cm)	地震時 応答変形 (cm)
大開駅	2.59 (2.85)	3.89
高速長田駅	2.67 (2.55)	2.67
駅間トンネル部	10.28 (11.41)	5.18

の約2倍となっており、中柱は破壊に至っていないことが分かる。前述したように、駅間トンネル部では側壁中央部は弾性部材としているが、3cm程度の変形で駅間トンネル部の側壁中央部における応答断面力が内側鉄筋が降伏曲げモーメントに達している。ひび割れの発生に伴う剛性の低下を考慮すれば地震応答変形程度の変形に側壁中央部が降伏したものと推定される。このことから駅間トンネル部の被害状況を適切に評価のみならず保有変形能の評価において、周辺地盤と接する部材の特性はM- ϕ 関係にてモデル化することが適切であると考えられる。

いずれにしても、本論で示した手法は地震被害状況ともよく対応し、設計手法として妥当であると考えられる。

7.あとなぎ

本論では、地上構造物と同様に損傷モードと関連づけられた構造物の保有する変形性能と構造物の地震時応答変形の比較に基づく地中構造物の耐震設計手法を提案した。本手法は、変形能の照査により耐力との照査も満足することが出来るという点が大きな特徴である。さらに、構造物の地震時応答を評価する手法についても簡易な手法の提案を行った。

この手法を兵庫県南部地震による被災程度および損傷モードの異なる神戸高速鉄道・大開駅、高速長田駅および大開駅と新開地駅間のトンネル部に適用した結果、駅間トンネル部を除き被害状況も適切に評価出来ること、さらに構造物の地震時応答変形の評価手法として1次元動的解析に基づく手法は有用であることから、設計手法としての有用性が明らかとなった。

駅間トンネル部の保有変形能の評価において、周辺地盤と接する部材の特性をM- ϕ 関係にてモデル化した結果については発表時に報告する予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 佐俣千載, 兵庫県南部地震での地下鉄構造物の被害と復旧, 土木学会論文集, No.534/VI-30, I-17, pp.1-17, 1996, 3
- 3) 石川幸彦他, 震災に備えた営団地下鉄構造物の耐震診断と補強工法, 基礎工, pp.22-28, 1996.10
- 4) 増田達他, 鉄道地下構造物の耐震診断と耐震設計の考え方, 基礎工, pp.16-21, 1996.10
- 5) Jaw-Nan Wang, Seismic Design Tunnels, Parsons Brickerhoff Inc., 1993
- 6) 神戸高速鉄道株式会社, 平成7年1月17日兵庫県南部地震-阪神大震災による鉄道施設の被害状況-, 1995.2
- 7) 土木学会編, 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, 1992.3
- 8) 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
- 9) 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

Proposal of New Asismic Design Method of Underground Structure based on the Deformation Characteristics maintained by the Structure

Susumu Nakamura, Jyunich Ezaki and Iwao Suetomi

New seismic design method with respect to underground structure is proposed taking note of the deformation characteristics maintained by the structure as well as the superstructure. The major characteristic of this method is to satisfy with the examination of the section forces by comparison of the dynamic response deformation characteristics of the structure with the deformation characteristics associated with the damage mode of each member. This method was applied to evaluate the damage mechanism of Daikai station, Kousokunagata station and connecting tunnel between Daikai station and Shinkaich station at KOBE Rapid Transit Railway which was seriously damaged by HYGOKEN NANBU earthquake. It is found that this method is useful.