

地中構造物の地震被害解析に及ぼす計算手法の影響 に関する一考察

中村晋¹⁾, 西山誠治²⁾, 酒井久和³⁾

1)正会員 工博 日本大学助教授 工学部土木工学科(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

2)正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

3)正会員 工博 若築建設(株)土木本部技術研究所(〒153-0064 東京都目黒区中目黒2-23-18)

1995年兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の崩壊に基づき、地中構造物、特に開削工法による地中構造物の耐震計算法の見直しが各所で実施されている。ここでは、従来、地中構造物の耐震計算法として用いられてきた応答変位法に加え、有限要素法に基づく地震応答解析法、さらに保有変形能に基づく手法を、大開駅の被災機構に適用し、それぞれの計算手法の適用性及び課題を明らかにした。

Keywords: Daikai Subway Station, Damage Analysis, Seismic Analysis Method,
HYOGOKEN NANBU Earthquake

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の崩壊¹⁾は、地中構造物の構造形式も地上構造物と同様に必ずしも安全ではないことを示した。

地中構造物の耐震設計法には、原子力関連構造物を除き、許容応力度設計法²⁾が用いられてきた。その理由として、地中構造物は常時荷重に対するひび割れ等の使用限界状態、言い換えれば線形弾性体としての応答値を制限することにより、従来の設計地震力に対する構造物の損傷・崩壊に対する安全性が結果として満足するという認識があったこと等が挙げられる。しかし、兵庫県南部地震の被害は、地震力の大きさに関する従来の設計法の前提をくつがえした。このことにより、耐震安全性や現実的な構造仕様を確保するという観点で、地中構造物の耐震設計法は必然的に限界状態設計法へ移行することになった。

一方、地中構造物の耐震計算法には、主に応答変位法²⁾が用いられてきた。その手法の有用性は、許容応力度法つまり弾性構造解析の枠組みで評価されてきた。しかし、限界状態設計法においては、構造物の終局状態に至る過程を評価するため、構造部材や周辺地盤の非弾性挙動を考慮した構造物の応答を評価することが必要となる。しかし、従来手法の適用性については大開駅をはじめ被災した構造物の地震被害解析に基づき個別に実施されているため、各手法の適用性及び課題が明確となっていない。

本論では、既往の耐震計算法のうち、静的解析法として設計指針類で最も多く採用されている応答変位法、間接的に地盤・構造物系の動的相互作用を考

慮した保有変形能に基づく手法¹⁾の2つ、及び逐次非線形地震応答解析法³⁾(以後、動的解析と呼ぶ)による動的解析法の3つの手法による地震被害解析とその比較を踏まえ、各種耐震計算法の適用性及び課題について報告する。また、被害解析の計算手法に応じてモデル化手法の差異により検討の対象とする地盤領域や部材や地盤材料の変形特性は異なるが、それはあくまでもその手法に応じて対象構造物や地盤をモデル化した結果の差異である。モデル化の前提となる地盤や構造条件などは共通の条件としている。

2. 解析手法及び解析条件

(1) 解析手法

応答変位法は、図-1に示す全周に地盤バネを設置したモデルを用いる。外力つまりバネ端より作用する地盤変位は地盤の非線形地震応答解析にもとづく上・下床版間の相対変位が最大となる時刻の変位分布を用いる。また、保有変形能に基づく手法では、まず等価線形化法により地盤の非線形性を考慮した2次元地震応答解析を実施し、上・下床版間の相対変位が最大となる時刻における構造部材に作用する荷重を求める。構造物の応答は、その荷重を50分割程度に分割し、逐次、図-2に示す単純支持された構造物モデルの全節点に作用することにより求める。

(2) 解析対象モデル及び地盤条件

図-3に地震被害解析の対象とする大開駅軌道階のモデルを示す。

また、検討に用いる大開駅周辺の地盤構造モデルは、PS検層結果を基本としてS波速度が330m/sを有

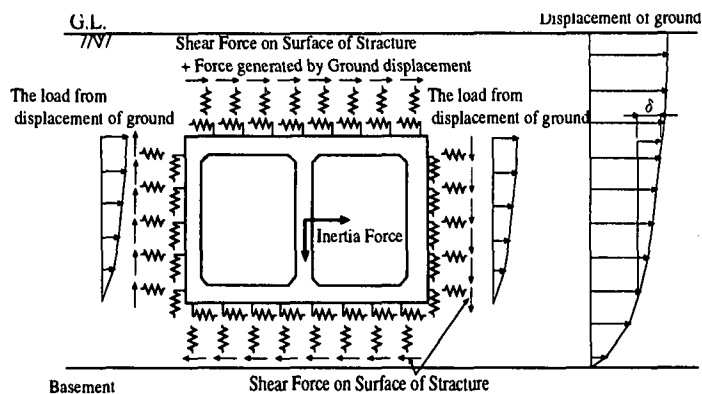


図-1 応答変位法による地盤・構造物系モデル

表-2 地盤モデル(保有変形能に基づく手法)

層	層厚 (m)	単位体積 重量(t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	減衰定数
1	2.040	1.50	100	200	0.020
2	3.060	1.60	140	900	0.030
3	3.110	1.80	220	1400	0.025
4	3.235	1.80	190	1700	0.020
5	5.750	1.70	240	1700	0.020
6	22.00	2.00	330	2100	0.020
7	—	2.10	500	2100	0.020

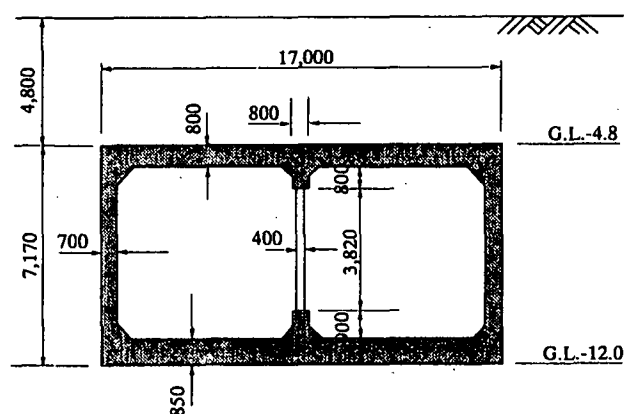


図-3 大開駅の構造モデル

する洪積層の下に500m/s程度の大坂層群が存在すると仮定した表-2に示すモデルを基本とした。応答変位法では設計上の基盤として定義されるN値が50以上の地層つまりS波速度が330m/sを有する層上面、また動的解析による手法では解析領域の制約から、応答変位法と同様の地層を解析上の基盤とした。その2つの手法で用いた地盤モデルを表-3に示す。

応答変位法、保有変形能に基づく手法では等価線形化法により地盤の非線形性を考慮しており、各地層の動的変形特性は図-4に示すモデルを用いた。また、動的解析による手法では破壊基準をMohr-Coulomb基準、塑性ポテンシャルをVon-Misesの基準に従う弾塑性モデルを用いた。

また、動的解析では側方には三浦、沖村ら、底面にはLysmerらの粘性境界を設け、図-5に示す構造物幅の約7倍の領域を解析領域とした

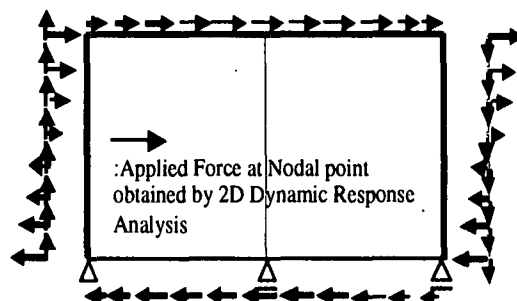


図-2 保有変形能に基づく手法による構造物系のモデル

表-3 地盤モデル(応答変位法、動的解析法)

層	層厚 (m)	単位体積 重量(t/m ³)	S波速度 (m/s)	ポアソン 比	内部 摩擦角 ϕ	粘着力Cu
1	3.4	1.7	140	0.33	0	4
2	2.4	1.9	140	0.49	30	0
3	2.6	2.0	220	0.49	40	0
4	9.1	1.9	190	0.49	0	9.6
5(基盤)	—	2.0	330	0.49	—	—
埋戻土	3.4	1.9	140	0.33	27	0
	14.1	2.0	140	0.33	27	0

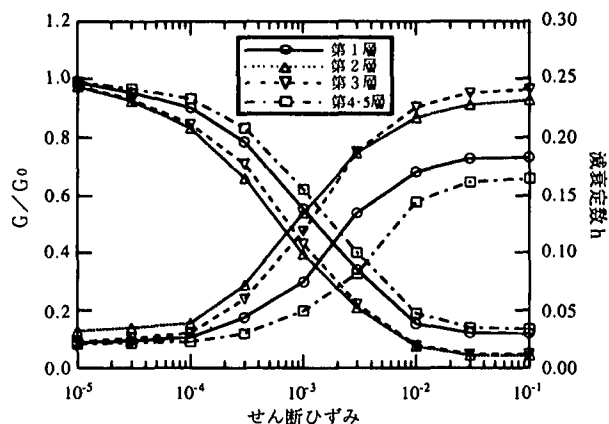


図-4 地盤材料の動的変形特性
(保有変形能に基づく手法、応答変位法)

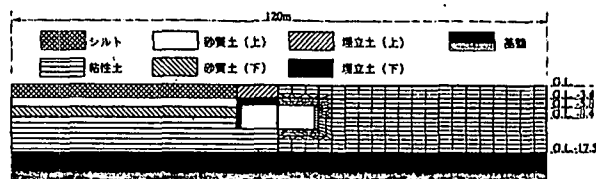


図-5 動的解析に用いる地盤・構造物系モデル

(3) 構造条件

構造部材は、応答変位法、保有変形能に基づく手法がEuler梁、動的解析がTimoshenko梁としてモデル化した。次に、各部材の復元力特性として、保有変形能に基づく手法では、

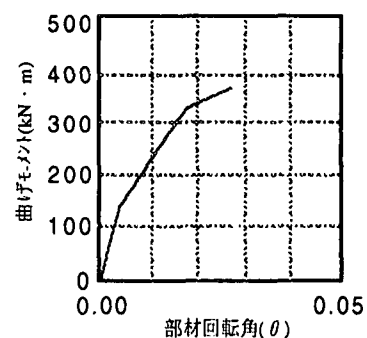


図-6 実験に基づく中柱の変形性能

中柱の曲げモーメントと部材角($M-\theta$)の関係は実験に基づき推定した図-6に示すtri-linearモデル、他部材の特性は曲げモーメントと曲率の関係($M-\phi$)の関係としてtri-linearモデルによりモデル化した。その際、折れ曲がり点は、鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係をそれぞれBi-linear、e関数法にモデル化して算出したひび割れ、鉄筋降伏時の値として評価した。その際、軸力は常時軸力に対して設定した各復元力特性を用いた解析により得られた軸力に基づき設定した。また、応答変位法では、各部材の復元力特性を軸力依存性を考慮した $M-\phi$ 関係としてモデル化し、その設定に必要な軸力-曲げモーメント特性は基準に基づき設定した。動的解析では、復元力特性のうち $M-\phi$ 関係の骨格曲線は「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧仕様(日本道路協会)」、履歴特性はDegrading tri-linearモデル(武藤モデル)を用いて設定した。せん断力とせん断ひずみの関係は大開駅の各部材の耐力を踏まえてbi-linearモデルとして設定した。これら復元力特性を定める際に必要な材料強度特性は既往の実験結果¹⁾に基づき設定した。また、部材端の剛域はいずれの手法でも考慮した。

(4)入力地震動

入力地震動は、大開駅付帯構造物の残留変形解析より同定された大開駅周辺地盤の基盤地震動⁴⁾であるポートアイランドの最深部(GL-83m)で観測された記録を基本として用いた。ただし、保有変形能に基づく手法では表層地盤よりの反射波の影響を除いた水平2成分の入射波成分(2E)より求めた駅軸直交方向成分、他2つの手法では観測された記録のNS成分を入力地震動とした。また、保有変形能に基づく手法及び動的解析法では、水平動のみならず上下動も考慮した。

4.解析結果の比較と考察

(1) 層せん断力と層間変位の比較

地中構造物の応答量の相対評価を行う際に適当と考えられる上・下床版間の層せん断力と層間変位の関係の比較を図-7に示す。ここで、応答変位法および動的解析における層せん断力は側壁及び中柱の剛域端部のせん断力の和として求めるが、上・下端間にも荷重が作用していることから上・下端の平均値として層せん断力を評価した。3つの手法における地盤・構造、入力地震動の特性に係る基本条件は同一であるが、①地盤・構造物系モデル、②地盤また構造物材の非線形性モデル、③常時断面力の評価は、手法自体及びそれに応じた地盤・構造物材の変形特性のモデル化の差異に起因して異なっている。

まず、応答量のうち中柱のせん断破壊時の層間変位を比較すると、保有変形能に基づく手法は29mm、応答変位法は19mm、逐次非線形解析は

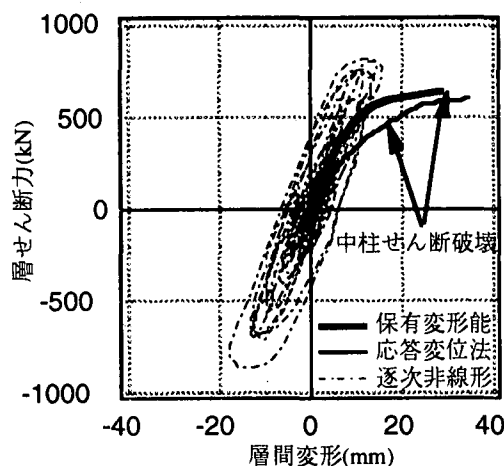


図-7 層せん断力-層間変位の比較

14mmと異なっている。また、層間変位が5mm以上のせん断力は3手法で異なっている。この差異に直接係る中柱の変形性能は、保有変形能に基づく手法では実中柱を想定した実験に基づいたモデル、応答変位法と動的解析では柱自体の弾塑性変形に基づいたモデルを用いている。このことから、中柱の終局部材角の大きくなる動的解析、応答変位法、保有変形能に基づく手法の順に、中柱のせん断破壊時における終局層間変位が大きくなると考えられ、解析結果と調和している。

次に、層間変位が5mm以上の層せん断力は、応答変位法、保有変形能に基づく手法、動的解析の順で大きくなっている。これは、構造部材の変形性能のみならず地盤構造物系のモデルに依存した構造物系自体が保有する水平剛性の差異によって生じたものと考えられる。ここで、保有変形能に基づく手法は構造物に作用する荷重を地盤・構造物系の地震応答解析より求めた値を用いていることから、地盤・構造物の動的相互作用に基づく作用する構造物に作用する荷重を直接求めている動的解析の結果に近い傾向が見られる。一方、応答変位法は、地盤・構造物系の動的相互作用のモデル化の差異に起因して他の手法と異なっていると考えられる。

また、地盤の応答も静的解析と動的解析で材料の非線形モデルの差異に起因して異なっている。特に、動的解析については他の2つの手法より小さく再考が必要である。

(2) 常時断面力が層せん断力と層間変位に及ぼす影響の比較

まず、常時土圧に対して発生する曲げモーメントとせん断力の比較を図-8に示す。また、この断面力算出に用いた構造物に作用する常時土圧の比較を図-9に示す。ここで、動的解析における常時の断面力は、自重解析により求めている。また、応答変位法及び保有変形能に基づく手法では、上床版には上載土荷重、下床版には地盤反力、側壁には側圧係数 K を0.5

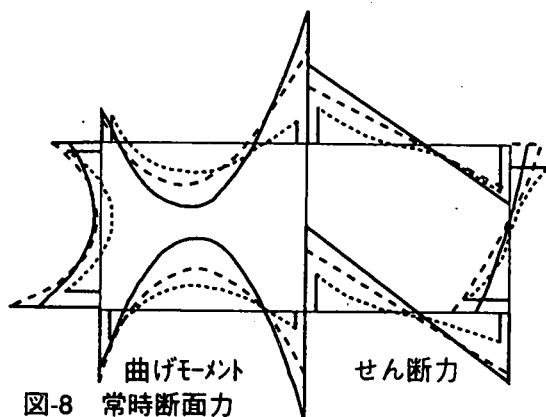


図-8 常時断面力

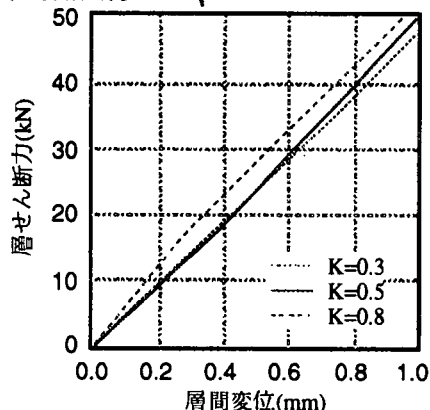


図-10 層せん断力と層間変位の関係
(層間変位1mm以下)

とした静止土圧を作用することにより求めている。2つの静的解析における側圧評価時の鉛直土圧は、保有変形に基づく手法では土水一体、応答変位法では土水分離と地下水の影響の評価が異なっているもののその差異は、動的解析による土圧との差異より小さい。

ここで、上・下床版の各断面力は3手法とも定性的傾向が類似しているが、側壁についてみると、動的解析による断面力が他の2つの手法と異なり側壁中央部で内側が引張り状態となっている。この差異は図-9に示した常時に構造物に作用する土圧の差異に起因している。静的手法では絶対値は異なるものの上・下床版と側壁に作用する土圧の比率は同程度となっていることから、発生断面力の分布傾向は類似している。一方、動的解析では、上・下床版に作用する土圧に比べ側壁に作用する土圧が大きな値となっていることから、側壁に作用する土圧の影響が強く応答に反映したものと考えられる。これは、有限要素解析では、一般に開削工法の施工過程を考慮した常時解析を行っていないため、地盤・構造物系の変形が構造物周辺地盤の鉛直方向の変形が構造物上の変形より大きくなり、構造物側方の影響が強く応答に現れる結果となることに起因している。

次に、この常時断面力の差異が構造物の応答に及ぼす影響を把握するため、応答変位法において側圧係数を0.3、0.5、0.8と変えた際の地震時の応答を比較し、側圧と上積土圧の比率の差異が応答に及ぼす影響を検討した。図-10に層変位が1mm以下の3Case

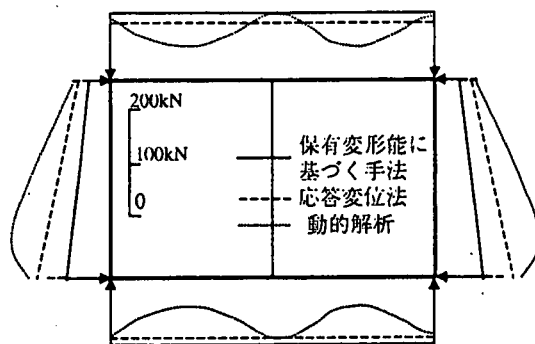


図-9 常時作用土圧分布

における層せん断力と層間変位の関係を示す。ここで、側圧係数を0.8とした場合に側壁に発生する常時断面力は動的解析と同様に側壁中央部で内側が引張り状態となっている。また、側圧係数0.8の場合の初期水平剛性が他の2Caseより大きいことが分かる。これは、側壁の常時曲げモーメントが動的解析と同様な分布となる側圧係数が0.8の場合、側壁端部のせん断力が小さくなることにより水平変形剛性が増加したことによると推定される。この結果は、動的解析の結果とも調和的である。このことは、地盤・構造部材の非線形性を考慮した地中構造物の応答評価に際して常時解析も重要であることを示していると考えられる。

4.あとなぎ

大開駅を対象として応答変位法、保有変形能に基づく手法及び逐次非線形地震応答解析法の3つの手法による地震被害解析を実施し、その比較に基づき各種耐震計算法の適用性や課題について検討を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 計算手法により、層せん断力と層間変位の関係、特に終局時の層間変位が異なっている。この差異は、構造部材特性の差異のみならず、そのモデル化手法にも関連していると考えられる。さらに、その結果は、地盤の応答の評価も重要であることを示している。
- 2) 常時の応答、言い換えれば施工過程に基づく構造物の応答は終局状態の評価に影響を与える。

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, 1995
- 2) 例えば建設省、新耐震設計法(案)、1977.3
- 3) 酒井久和他、埋設地下構造物の横断面の耐震性評価、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.413-420, 1997
- 4) 中村晋、神戸高速鉄道・大開駅周辺地盤における基盤地震動の推定、第10回日本地震工学シンポジウム、pp., 1998