

被害程度の差異に着目した地下鉄の被害要因分析

佐藤工業(株) 中村 晋
 ○江崎順一
 末富岩雄

本論では、まず地下鉄の被害状況のうち中柱の被害の地域性を示し、次い最も損傷の大きな神戸高速鉄道・大開駅、及び大開駅と同様な構造形式を有しているが被害の少ない神戸高速鉄道・高速長田駅を対象とし、その2駅における被害状況に差異が生じた要因を明かにするための検討を実施した。その結果、(1)中柱の被害は地域性があること、(2)高速長田駅の被害が大開駅に比べ少なかったのは、高速長田駅近傍の地盤が大開駅に比べ硬質であったため、変位自体は高速長田駅の方が大きいもの上下床版間の地震時の変形が大開駅に比べ小さいことに起因していることなどが明らかとなった。

1 はじめに

兵庫県南部地震による神戸高速鉄道の大開駅をはじめとする地下鉄の被害は、近代様式の地中構造物の地震被害として初めてといえるほど大きなものであった。それらの復旧作業は驚くべき早さで実施され、地震発生より1年後の1996年1月17日の大開駅の開業により全て終了した。さらに、地震後に各機関が実施した被害調査もほぼ終了し今年度内に各機関の報告書が出版¹⁾また出版される予定となっている。このように地震後の緊急性の要求される作業が終了した現在、被災要因の解明という今後の設計、耐震補強を行う上で重要な課題に着手することが急務であると考えられる。

被災要因の解明については、被害の著しかった神戸高速鉄道・大開駅²⁾や神戸市営地下鉄・上沢駅^{3,4)}等の個別の構造物を対象とした試みが実施されている。しかし、その様な個別の取組では、面的な広がりやを有し、地点毎に異なる被災状況を総合的に評価することは困難である。そのことから、ミクロ・マクロ両面で地中構造物の被害をとらえ、その要因を総合的に解き明かすための研究を行うことが必要であると考えられる。

本論では、まず被災状況の内中柱の被災地域を概観し、マクロ的特徴を示す。次に、被災地域の中で被災の程度が異なり、被害要因を検討するために必要な情報が比較的そろっている神戸高速鉄道・大開駅と同・高速長田駅に着目し、両駅の被害機構およびその差異について検討を行った結果を示す。

2.地震被害の概要

地下鉄の被害は、中柱の破壊また損傷、側壁の亀

裂等の様に地下鉄構造物を構成する各構造部位に発生している^{5,6)}。ここでは、それら損傷部位のうち、構造物の崩壊につながると思われる中柱に着目する。中柱が被災した地域は、神戸市営地下鉄・三宮駅から新神戸駅間を除くと図-1に示す様に、神戸高速鉄道関連路線では西代駅から大開駅の東部、神戸市営地下鉄では新長田駅から湊川駅の間、及び大倉山駅と限定されていることが分る。また、図より除いている神戸市営地下鉄・三宮駅から新神戸駅間も1つの地域であることから、中柱が被災した地域は大きく2つに分けられることが分る。

次に、神戸高速鉄道・高速長田駅から新開地駅までの駅部及び駅間トンネル部における中柱の被害状況を表-1に示す。被害率についてみると、大開駅、大開駅から高速長田駅間の駅間トンネル部、大開駅から新開地駅間の駅間トンネル部、高速長田駅の順

表-1 神戸高速鉄道における中柱の被災状況

		総本数	被災柱数	
			破壊・崩壊	軽微な損傷
駅部	大開駅	35	31(89)	4(11)
	高速長田駅	40	5(13)	11(28)
駅間 トンネル部	新開地駅から大開駅	335	54(16)	-
	大開駅から高速長田駅	375	175(47)	74(18)
	高速長田駅から西代駅	180	-	8(4)

になっている。構造が類似している大開駅と高速長田駅間の被害の差異は顕著でありその差異を明かにすることは、中柱の被災地域が限定されているこ

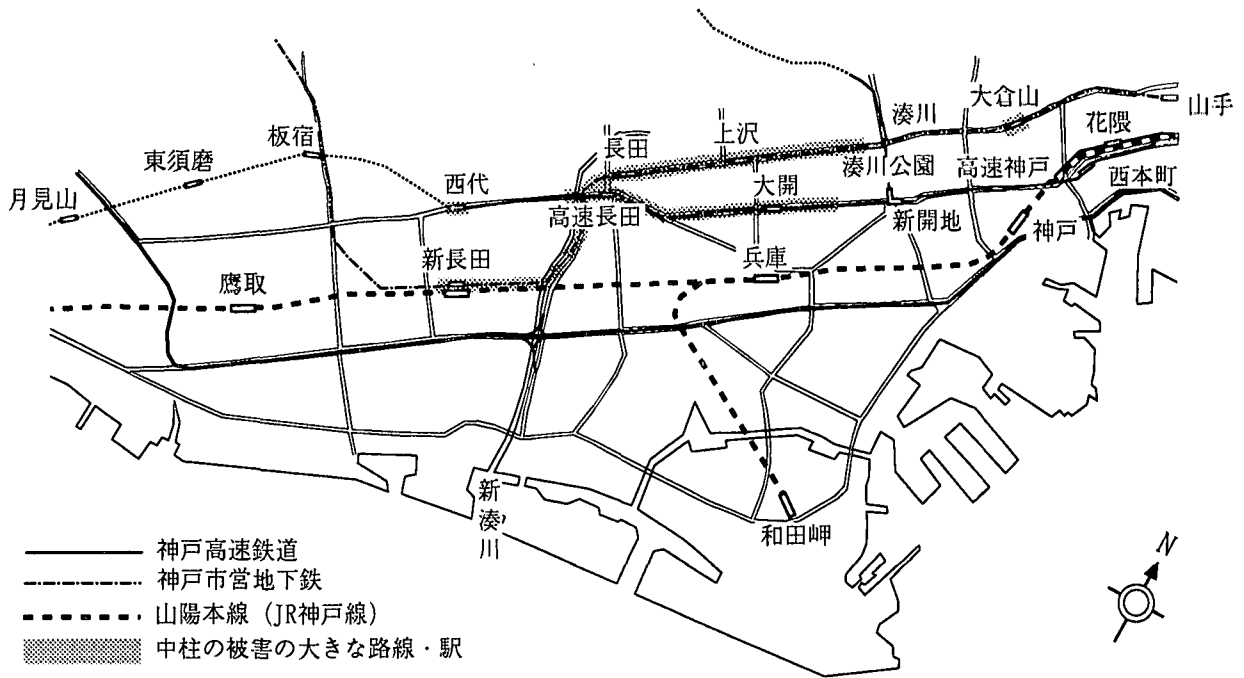


図-1 地下鉄・中柱の被災地域(神戸市営地下鉄・三宮駅と新神戸駅間を除く)

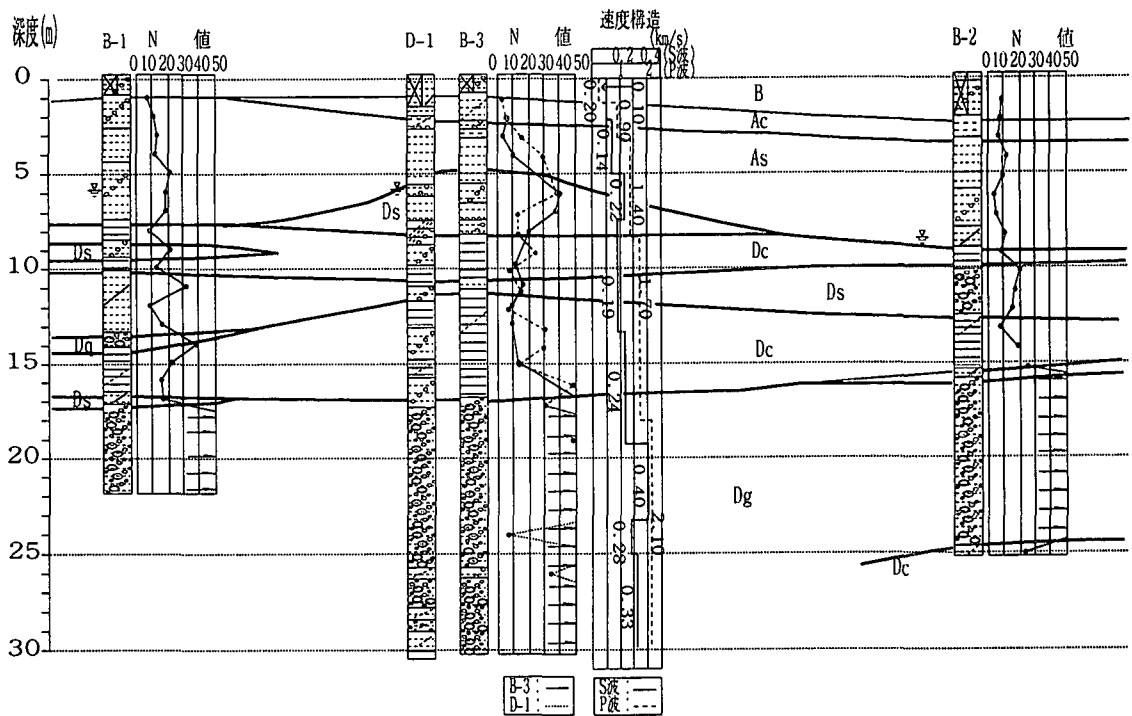


図-2 大開駅周辺地盤構造

との要因を明かにすることにもなると考えられる。

3. 神戸高速鉄道・大開駅及び高速長田駅周辺の地盤構造の比較

神戸高速鉄道・大開駅と高速長田駅の周辺の地盤構造を図-2, 3に示し、比較する。

まず、プラットホームのある地下2階(以後一般駅部と呼ぶ)の土被り厚についてみると、大開駅は約4.8m、高速長田駅は約3.75～5.35mであり、平均的

な土被り厚は高速長田駅が小さな値となっている。次に、駅下の地盤構造のうちS波速度280～400m/sを有するN値50以上の砂礫層の深度についてみると、大開駅はGL-15～17m以深、高速長田駅はGL-25m以深に存在すると推定され、高速長田駅の方が深い位置に存在していると推定される。さらに、高速長田駅周辺では、粘土層と砂礫層が互層を成すN値が10～20程度の大開駅下層部に比べ軟質な層が6～7m程度存在している。また、駅側面の地盤についてみ

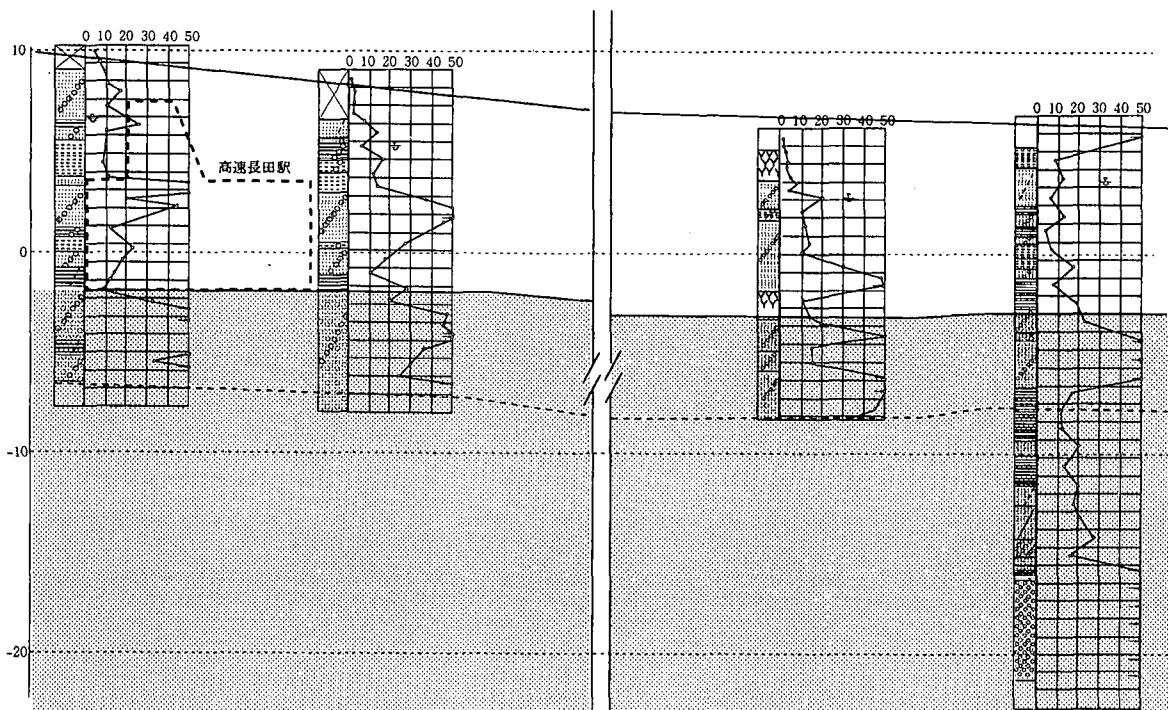


図-3 高速長田駅周辺地盤の構造

ると、大開駅ではN値20~40程度の砂礫層がレンズ状に介在しているものの中柱の崩壊が著しい高速長田側ではN値が10~20の砂、粘土および砂礫の互層となっている。一方、高速長田駅についてみると、上層部にはN値が20~40程度の比較的硬質な砂礫層、下層部にはN値が10~20程度の粘土層と砂礫層の互層が存在している。これより駅側面つまり構造物位置では、高速長田駅周辺地盤が大開駅に比べ硬質であり、構造物下の地盤は大開駅が高速長田駅より硬質であろうと推定される。

4. 被害要因分析に基づいて推定される神戸高速鉄道・大開駅及び高速長田駅の被害状況比較

(1) 検討手法

大開駅及びそれとほぼ同様な構造形式、土被り厚を有する高速長田駅の被害状況の差異を明かにするための検討を行う。両駅の一般駅部はRC構造からなる1層のボックス形式を有している。その様な形式の地中構造物が破壊する際の部材の損傷モードとして(a)側壁が3ヒンジ構造になる場合と(b)中柱が破壊する場合の2つが考えられるが、ここで検討の対象とする損傷モードは大開駅に象徴されるような中柱の破壊とした。被害要因分析とは、その様な破壊モードの生じる可能性について解析的な検討を行うことを意味する。

分析は、図-4のフローに示す様に構造物の損傷時における中柱位置の上下床版間の水平相対変位

(U_{max})と地震時に生じる中柱位置の上下床版間の水平相対変位(U_{dmax})の比較により行う。ここで、 U_{max} は構造物の保有する変形能(以後、水平保有変形能と呼ぶ)に相当し、 U_{dmax} は構造物の地震時応答変位(以後、応答変位と呼ぶ)に相当する。一方、このように間接的に構造物の損傷を評価する手法に対して直接的に構造物の損傷を評価する手法として、Shawkyら⁷⁾や田尻ら⁴⁾による地盤及び構造物の非線形性を考慮した2次元有限要素法を用いた地震応答解析による方法ももちろん有用であるが、モデル化等の容易さや設計・診断への適用性という観点から図-4に示した手法を用いた。

この手法は矢的らによる2次元有限要素法を用いた地震応答解析と静的弾塑性解析を組み合わせた2段階解析手法²⁾を基本としている。これより、 U_{max} は地盤~構造物系の2次元地震応答解析により構造物への作用外力を求め、それを構造部材の非線形性を考慮した構造モデルに静的に作用することにより求めることができる。一方、その特性を応答変位法により求めることも可能であるが、構造物へ作用する外力を地盤バネを介して間接的に評価することに課題あり、その設計法としての有用性は否定するものではないが被害要因の分析という観点では必ずしも適切ではないと考えられる。また、 U_{dmax} は地盤~構造物系の2次元地震応答解析により直接得られる。その際、構造部材の非線形性が応答に及ぼす影響を考慮するため、側壁の剛性を低減している。

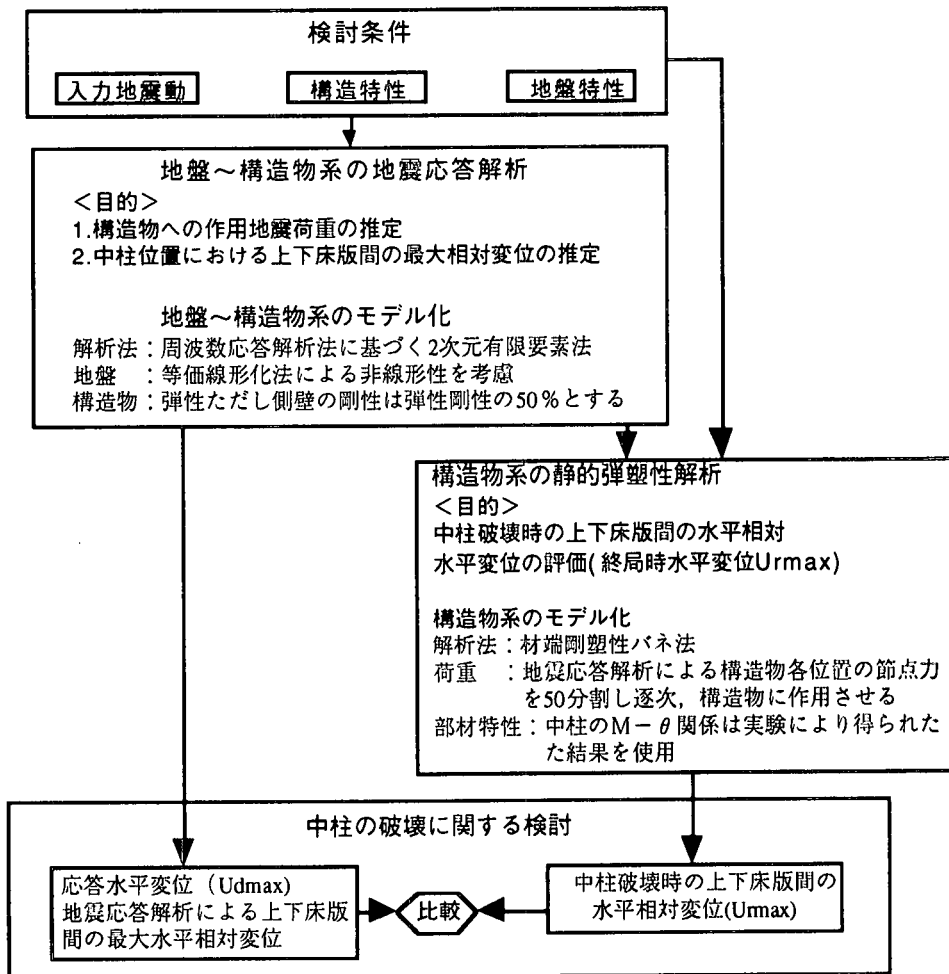


図-4 被害要因分析フロー

この被害要因分析より適切な結果を得るためには、被害地点における入力地震動、地盤特性、さらに被災構造物における構造部材特性が適切に評価されていなければならない。入力地震動については、大開駅の付帯設備である換気塔の被害によりポートアイランドの地中観測波(GL-83m)が適切であろう(この検討は被害を定量的に説明づける分析が実施されていない等の課題もある)との推定結果⁸⁾に基づいて設定した。地盤特性についてみると、大開駅周辺ではPS検層等の動的地盤定数を決定するための比較的詳細な地盤調査²⁾が実施されている。一方、高速長田駅周辺では表層の地盤構造やN値分布に関する情報はあるものの動的物性に関する情報がないことから、大開駅周辺地盤の情報に基づいて動的地盤定数を設定した。最後に、構造部材特性についてみると、中柱については構造実験が実施され非線形特性が明らかとなっている大開駅・中柱の特性⁹⁾を用い、他部材についてはファイバー解析を用い部材の非線形性を設定した。

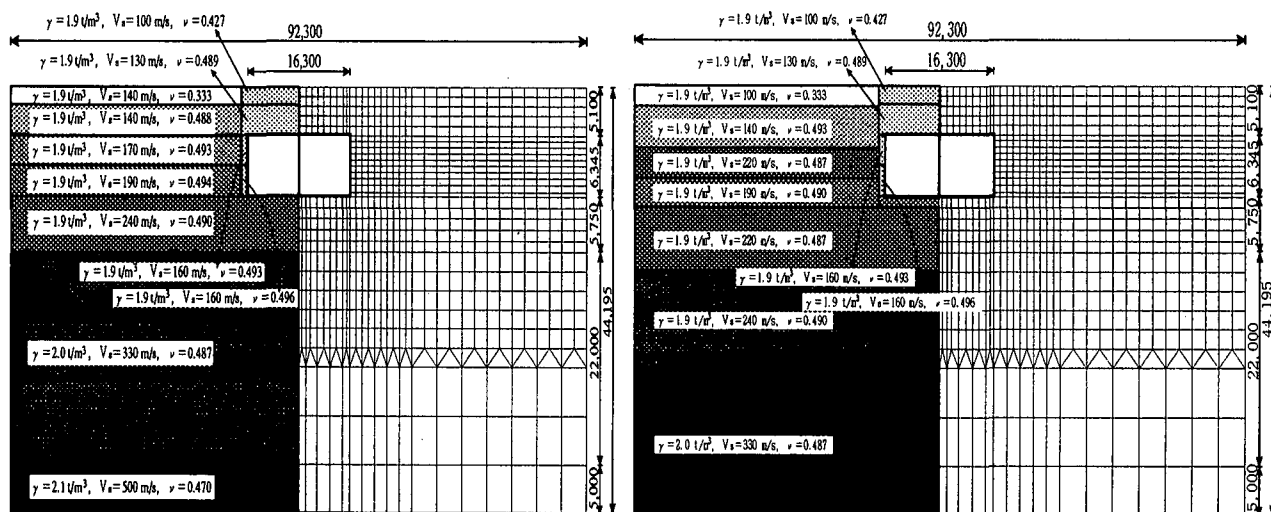
(2)地盤～構造物系の地震応答解析

大開駅及び高速長田駅の地盤～構造物系モデルを

図-5に示す。大開駅のモデルは既に著者らが大開駅の被害要因分析に用いたモデル²⁾を用いている。高速長田駅における構造物モデルについてみると、構造寸法、上下床版及び側壁の剛性は大開駅と同じモデルを用いた。また、中柱の剛性は、中柱の配置が大開駅より0.5m小さな3.0mピッチとなっていることから、大開駅より17%ほど大きな値とした。

次に、地盤モデルのうち地盤構造は、図-3に示した駅周辺地盤の構造に基づき設定し、地盤物性は大開駅周辺地盤の土質・N値との対比により推定した。さらに、解析上の基盤である大阪層群はGL-44m以深に存在すると仮定した。入力地震動には、前述の様にポートアイランドの地中観測波(GL-83m)の水平成分及び上下成分を用いた。ただし、水平成分については、水平2成分より求めた大開駅の横断方向成分を用いた。

まず、解析により得られた最大加速度及び最大水平相対変位の深度方向分布の比較を図-6、7に示す。これより、駅部近傍の最大加速度は大開駅の方が大きな値となっているが、変位についてみると高速長田駅の方が大きな値となっている。これは、3章で



a)大開駅

b)高速長田駅

図-5 地盤～構造物系の解析モデル

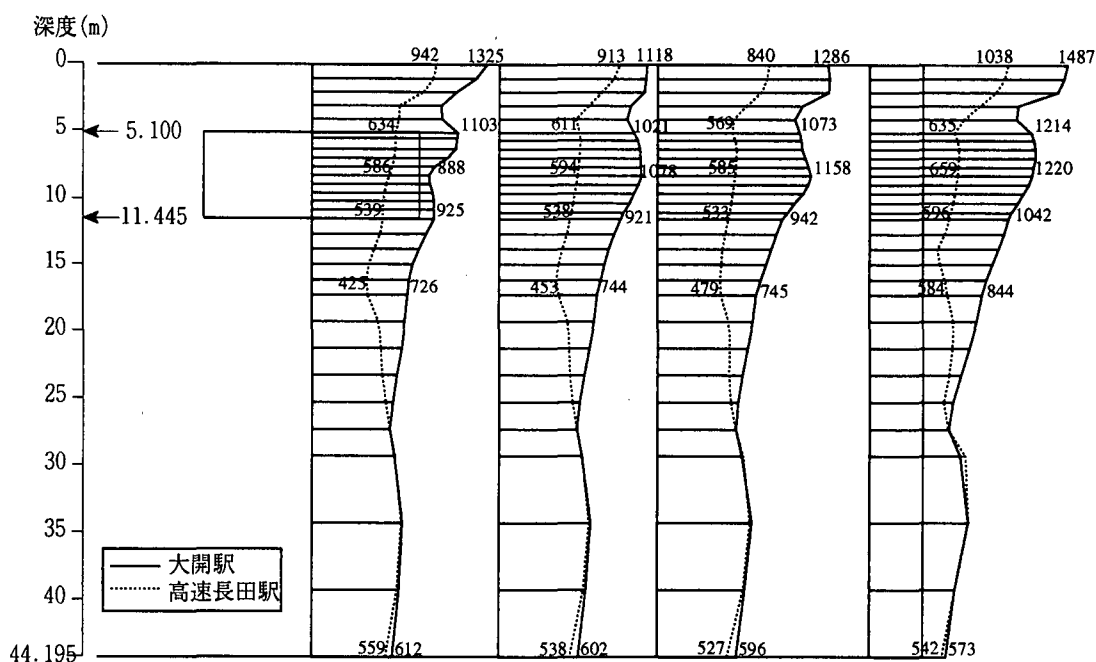


図-6 最大水平加速度の深度分布の比較

指摘した様に高速長田駅の下部にN値が10～20程度の大開駅周辺地盤に比して軟質な層が存在していることに起因している。

次に、構造物位置の変形に着目し、両駅における中柱位置における上下床版間の水平相対変位の時刻歴を図-8に示す。ここでプラス側は上床版が下床版に対して六甲山の方に变形していることを示す。これより、上下床版間の最大水平相対変位は大開駅で3.9cm、高速長田駅で2.7cmとなり、高速長田駅の方が大開駅に比べ小さな値となっている。これも3章で指摘したように、高速長田駅の駅部側面の地盤が大開駅に比べ硬質となっていることに起因していると考えられる。

(3)構造物系の弾塑性解析

2次元地震応答解析により得られた中柱位置における上下床版間の水平相対変位が最大となる時刻の構造物各節点の節点力を用い、両駅の水平保有変形能 U_{max} を求める。駅部は図-9に示す様に部材の剛域端にバネを設けることによりモデル化した。中柱の部材特性の設定には、先に示した様に中柱の配置が大開駅3.5m、高速長田駅3.0m、柱高さ(上床版梁下から下床版ハンチ上面までの高さ)が大開駅3.8m、高速長田駅4.4mと異なっていることを考慮した。各部材に作用させる荷重は、自重場における荷重、動的荷重の2つである。動的荷重は、解析により得られた各部材端の水平及び鉛直方向の節点力を50分割した値を増分値とし、荷重を逐次増加させながら作用した。

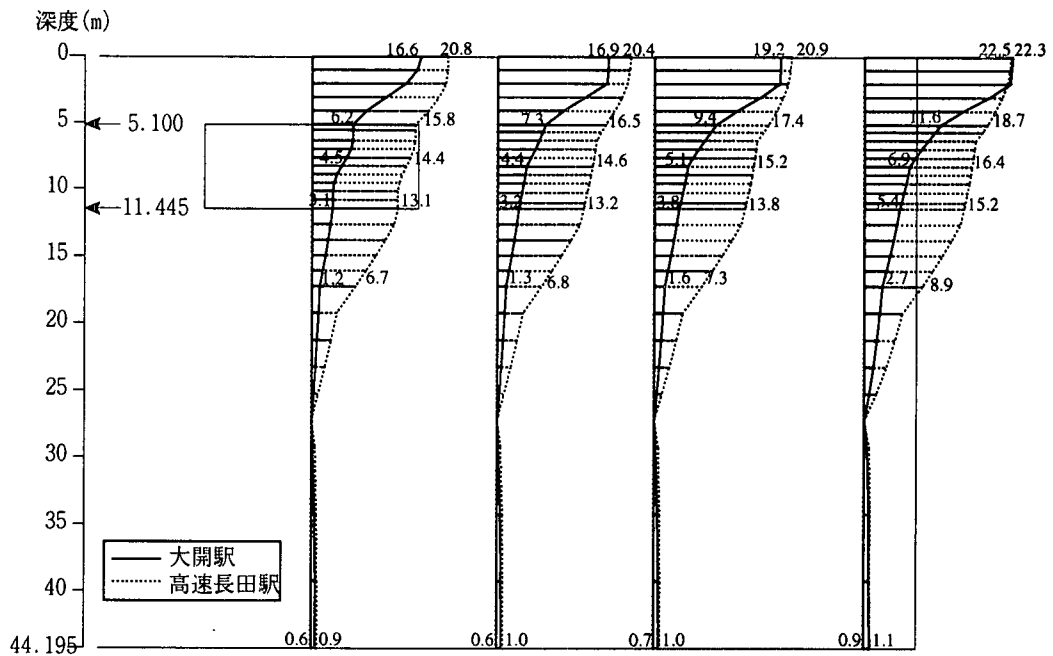


図-7 最大水平相対変位の深度分布の比較

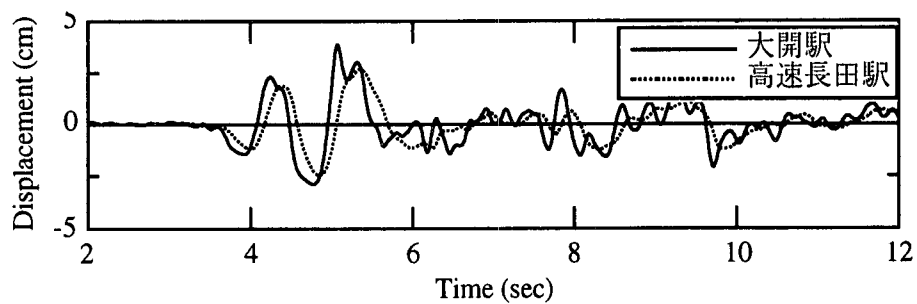


図-8 中柱位置における上下床版間の最大水平相対変位時刻歴の比較

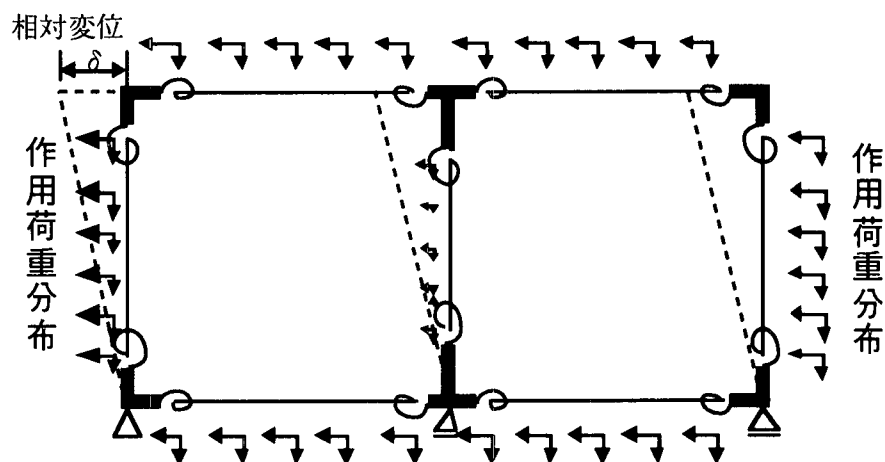
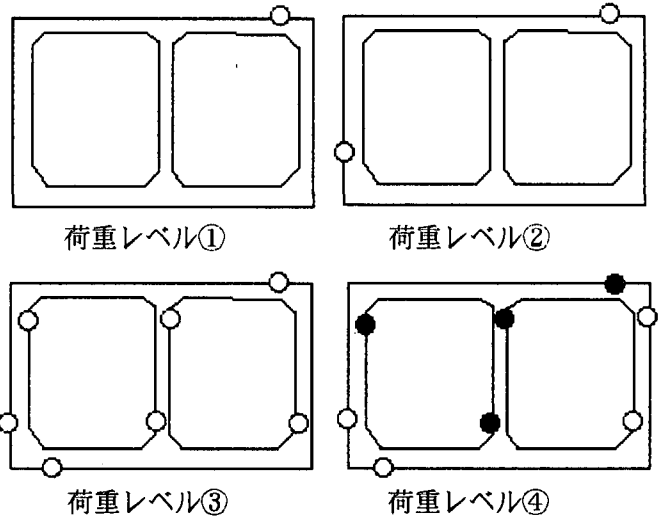
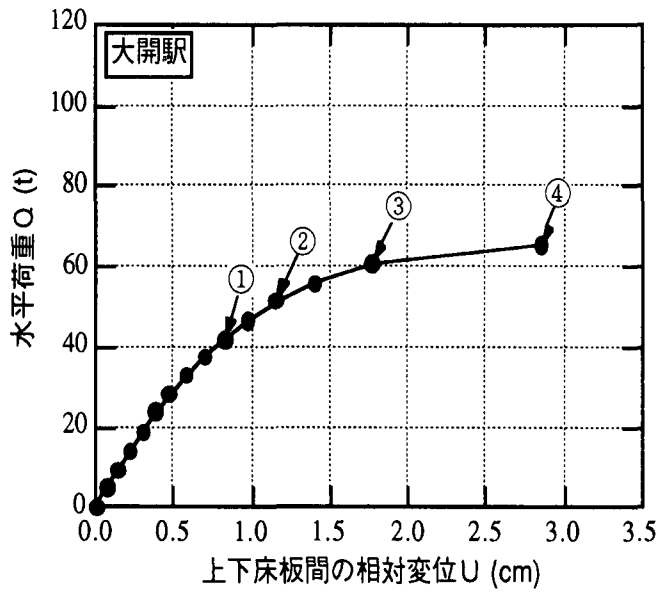


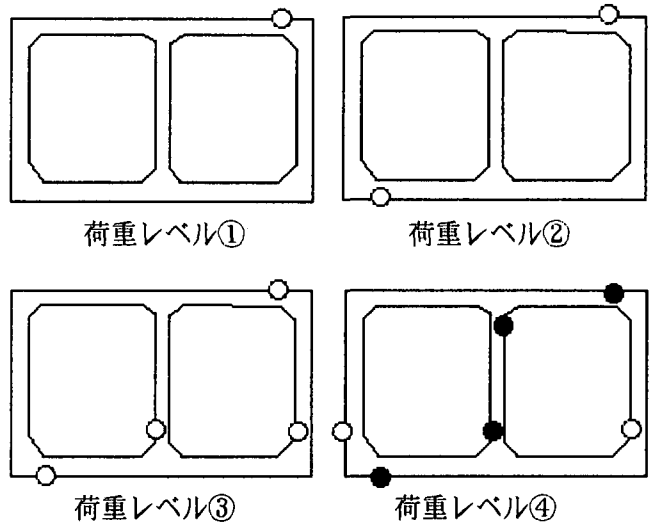
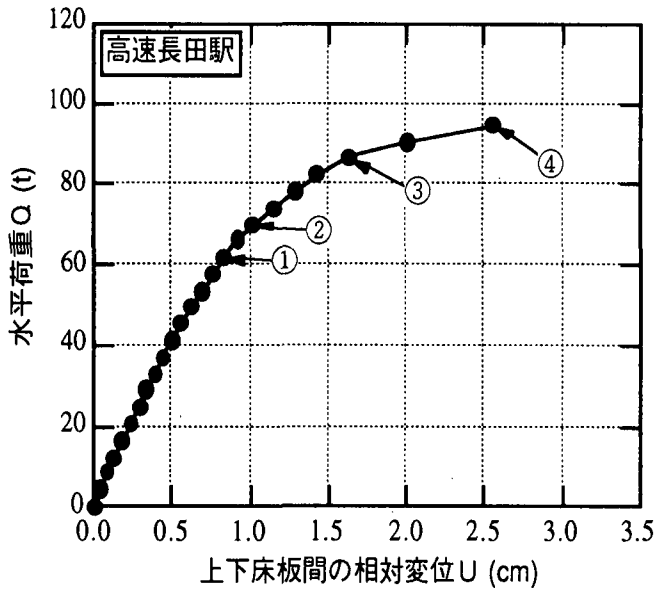
図-9 材端剛塑性バネ法に基づく構造及び荷重作用モデル

動的荷重を増加させた際の、荷重と上下床版間の相対変位の関係を図-10に示す。図中の荷重軸は中柱の終局時における部材各位置に作用する水平荷重の合計値により各荷重段階における水平荷重の合計値で正規化している。また、中柱の終局時とは部材特性(M- ϕ 関係)の終局状態に達した時点の意味する。

実験における終局状態は大開駅と同様のせん断破壊であることから、その終局状態は中柱のせん断破壊を意味する。これより、両駅における水平保有水平変形能は、大開駅が3.46cm、高速長田駅が2.73cmと大開駅の方が大きな値となっている。この差異は、両駅における中柱の剛性の差異及び構造物の作用す



a)大開駅



b)高速長田駅

図-10 作用荷重と上下床版間の相対変位の関係

る荷重の分布形状の差異に起因していると考えられる。ここで前者は中柱の配置やその特性の差異，後者は構造物近傍の地盤特性の差異に起因していると考えられる。

(4)大開駅と高速長田駅における中柱の損傷に関する検討

まず，大開駅についてみると，動的応答変位3.7cmに比べ水平保有変形能は2.85cmと小さく中柱は地震時に破壊したといえる。さらに，その破壊は上床版が下床版に対して六甲山側に変形している際に生じたものと推定され，大開駅中柱の破壊のうち上床版が崩壊していない新開地側の破損状況と良く対応している。

次に，高速長田駅についてみると，動的応答変位2.7cmは水平保有変形能2.55cmとほぼ同程度の値となっている。この検討は1断面のみ検討であり，駅軸の沿った地盤の構造が必ずしも均一でないことや高速長田駅が曲線部を有していることなどから，構造物の水平保有変形能が動的応答変位に比べ大きい場合も小さい場合もあり得ると考えられる。また，高速長田駅における中柱の被災状況と比較してみると，破壊及び損傷した中柱は曲線部の16本と全体の34%であり大開駅に比べ被害が少く，この結果は被害状況にも対応していると考えられる。

最後に，これまでの検討により大開駅と高速長田駅の被災状況の差異がほぼ定量的に評価できたもの

と考えられる。

5 あとがき

本報告では、まず地下鉄の被害状況のうち中柱の被害の地域性について示し、次いで被害が集中している地域の中で最も損傷の大きな神戸高速鉄道・大開駅、及び大開駅と同様な構造形式を有しているが被害の少ない神戸高速鉄道・高速長田駅を対象とし、その2駅における被害状況に差異が生じた要因を明かにするため解析的な検討を実施した。その結果、以下のことが明かとなった。

(1)中柱の被害は三宮駅から新神戸駅間の地域と神戸市営地下鉄の湊川駅から新長田駅間及び新開地駅から高速長田駅間の地域の二つに分けられ、地域性があることが明かとなった。

(2)高速長田駅の被害が大開駅に比べ少なかったのは、高速長田駅近傍の地盤が大開駅に比べ硬質であったため、変位自体は高速長田駅の方が大きいもの上下床版間の地震時の変形が大開駅に比べ小さいことに起因している。

これらの結果のうち後者は地下鉄の被害に地域性があるという最初の結果と関連しており、以下の点に着目した被害機構の分析が必要であることを示しているものと考えられる。

i. 構造物近傍の地盤特性の差異(構造物近傍の地盤変形性状)

ii. 中柱自体及び中柱と他構造部材との変形性能や耐力の差異

また、本論で用いた検討方法は、地下構造物の保有する変形能と地震時における応答変形を比較するという上部構造物の限界状態設計また耐震診断に用いられている考え方を採用している。当然のことながら、地盤や構造物の非線形性を考慮した解析また従来の設計で用いられている応答変位法等のような

種々の手法による検討も踏まえた総合的考察に基づき最終的な結果を述べる必要があると考えている。さらに、それらの前提となる被災地域における地盤震動性状の評価、地盤特性、構造特性についても、より多くの情報を収集し、より現実的な特性にモデル化する試みも行う必要があると考えている。

参考文献

- 1)(社)地盤工学会阪神大震災調査研究委員会編、阪神・淡路大震災調査報告書(解説編),1996
- 2)矢の照夫他,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,
- 3)田尻勝他,地下鉄駅舎の被害に関する一考察,,阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集,pp.255--262,1996
- 4)田尻勝他,地震応答解析による地下鉄駅舎の被災メカニズムの考察,阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集,pp.239--246,1996
- 5)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
- 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)Ashraf SHAWKY et al, Nonlinear Response of Underground RC Structure under Shear, Proc. J.S.C.E., No.538/V-31,pp.195-206,1996
- 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

Evaluation of Damage Mechanism of Subway Station based on the Difference Damage between Two Damaged Subway Stations

Susumu Nakamura, Jyunich Ezaki and Iwao Suetomi

The objective of this paper is to indicate the locality of the damage area with respect to center column and to make clear the damage mechanism based on the difference damage between Daikai Subway Station and Kosokunagata subway station by use of the two step analysis proposed by authors. It is found that the damage degree of center column is depend on the location of the subway station. The reason why the damage at Kosokunagata station is less than that at Daikai station is found that the shear deformation at Kousokunagata station is less than that at Daikai station because the stiffness of ground around kousokunagata station is harder than that around Daikai station.