

第4章 被災構造物周辺での地震動特性の把握

4.1 概説

1995年兵庫県南部地震により神戸高速鉄道・大開駅は中柱が圧壊したため上床版が折れ曲がり沈下し、直上の国道28号線が最大で2.8mに及ぶ陥没が生じるという大きな被害が生じた。他の地下鉄においては中柱の破壊という構造的被害はみられるもの機能的損傷はみられなかったことから、地下構造物は地上構造物に比べ耐震性能が優れているという従来からの認識が確認出来たとも言える。しかし、この大開駅を含む被災した地下鉄構造物は損傷の程度が場所ごとに異なっており、それらの損傷機構を明かにすることは地中構造物の耐震設計の体系を見直すという意味で極めて重要である。その様な検討は一般に有限要素法等の地盤-構造物系モデルを用いた応答解析を通して実施される。その際、地盤・構造特性のモデル化に加えて基盤地震動の評価が必要となる。

入力地震動の評価手法には自然現象としての地震動つまり地震の発生機構に基づく推定手法および構造物の地震被害機構が再現可能なレベルとしての地震動の推定方法等があり、両者が調和出来る地震動が最適な基盤地震動の推定量であるといえる。ここでは、前者の手法による地震動の推定には、佐藤らにより提案されている断層震源モデルに基づく手法²⁾を用いた。また、後者として、大開駅の付帯施設である換気塔の被害を評価出来る地震動として基盤地震動の推定を実施した。その際、被災構造物の地震に対する時刻歴応答は測定されていないことから、構造物の応答から直接的に基盤地震動を評価することは出来ない。そのため、被災構造物周辺の基盤で観測された幾つか地震記録を基盤地震動とし、被災機構を解析するモデルというフィルターを通して得られた結果が被災と適合する基盤地震動を選択するという過程で推定を行った。推定された基盤地震動の有用性は、それを用いた損傷機構解析により推定された神戸高速鉄道・大開駅およびそれに近接する高速長田駅の被災程度と実被害状況との比較により明らかにした。

最後に、推定された基盤地震動を用い、大開駅近傍地盤の震動性状、特に局所的な地盤の不整形がそれに及ぼす影響について検討を行った。

4.2 大開駅近傍の基盤地震動の推定

4.2.1 断層震源モデルに基づく推定

佐藤らは、断層面上に仮定した小地震の重ね合わせにより大地震の理論的な基盤におけるフリエスペクトルを求め、基盤上の地盤の増幅を評価することにより地表面における地震動のスペクトル特性を評価する手法を提案している²⁾。さらに、その手法を兵庫県南部地震における地震動のスペクトル特性の推定に適用した結果、推定値と観測値は概ね一致することを示している。その断層破壊過程を考慮した手法を大開駅近傍の工学的基盤(大阪層群上部上面、 $V_s=500$ m/s 相当)の推定に用いた。その際、兵庫県南部地震における断層破壊過程は、佐藤らと同様に菊地、入倉らの震源モデルを用いた。

推定された加速度応答スペクトルと、神戸大学、ポートアイランドの地中観測波(GL-83m)及び神戸海洋気象台およびにおける工学的基盤における加速度応答スペクトルとの比較を図-4.2.1に示す。ここで、神戸海洋気象台の工学的基盤波は、林・川瀬による地震基盤波を算出する際に用いた地盤モデル化³⁾のうち、浅い部分のみをモデル化して算出した。これより、佐藤らの手法により推定された工学的基盤における応答スペクトルは、ポートアイランドにおける工学的基盤波と比較的よく対応している。

4.2.2 大開駅付帯構造物の被害に基づく推定

1)付帯構造物の被害状況

大開駅の復旧工事において、大開駅の付帯施設である換気塔が写真-4.2.1(口絵参照)および4.2.2(口絵参照)に示す様にトンネル上床版上面より1.86m、地表より3.34mの施工継手位置で上部が山側へ約4.0cm移動している被害が発見された。その換気塔は、図-4.2.2に示す様に大開駅より高速長田駅側に6.9m

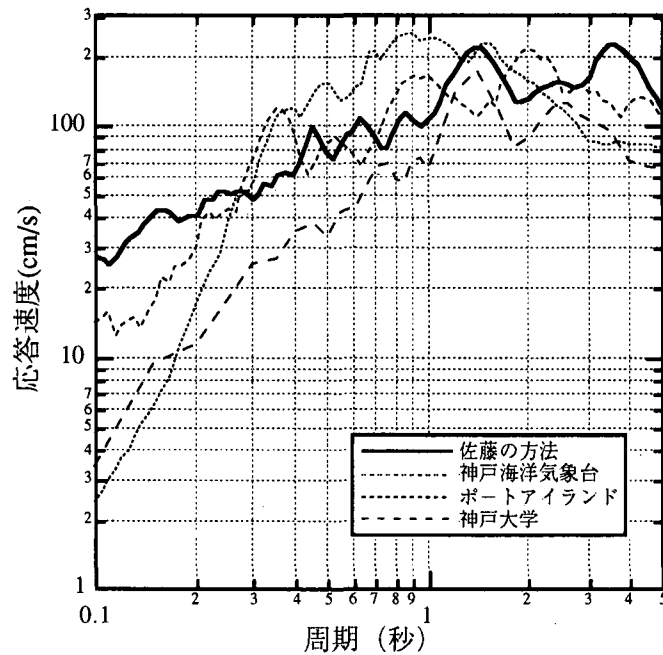


図-4.2.1 震源モデルおよび既往観測記録の速度応答スペクトル ($h = 5\%$) の比較

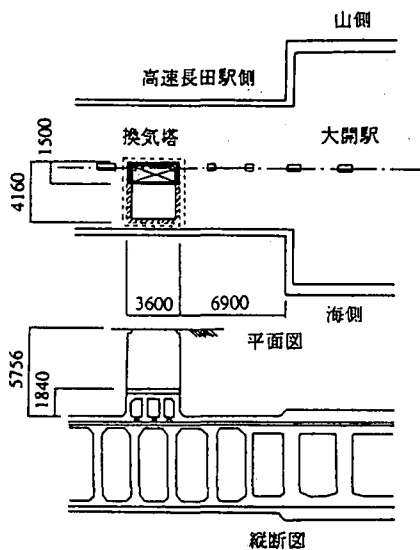


図-4.2.2 換気塔の位置および形状

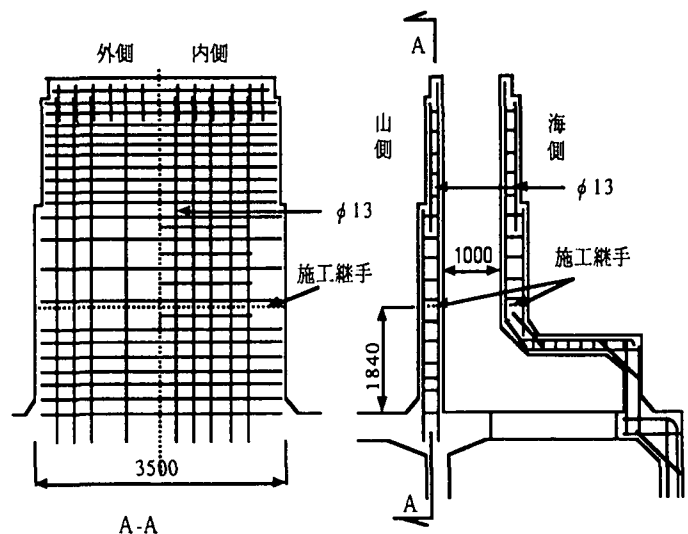


図-4.2.3 換気塔の配筋

離れた駅間トンネル部の中央に位置している。その構造は図-4.2.3 に示す様に線路軸方向に 3.3-3.6 m、直交方向に 1.3-1.6 m の長方形断面を有する RC 構造となっている。この周辺地盤の土質は、埋め戻し材料のマサ土である。換気塔にずれが生じた位置の下部は、地震時においてトンネル上床版と同様の動きをしていると考えられることから、換気塔上部周辺地盤とトンネル上床版位置の間の地震時地盤変位の差異は少なくともずれ量である 4.0 cm 以上発生していたものと推定される。

2) 選択の対象とする基盤地震動

検討には、兵庫県南部地震で観測された硬質地盤また地中で観測された記録のうち、神戸大学で観測された波(最大加速度: 328 gal、関西地震観測連絡協議会観測)と、ポートアイランドの地中観測波(GL-83 m、神戸市観測)を修正した波の2つを用いた。後者は、鉛直アレー観測で得られた観測記録より同定された動的地盤定数を用い重複反射理論より推定した工学的基盤波(最大加速度: 708 gal)である。ここ

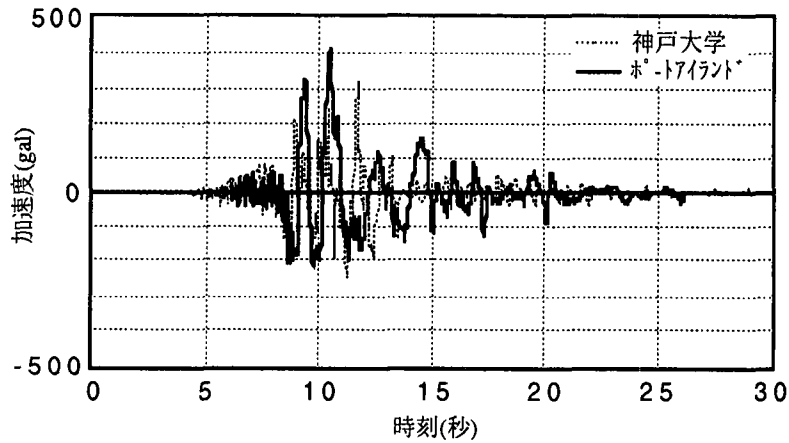


図-4.2.4 検討に用いる基盤地震動の水平成分

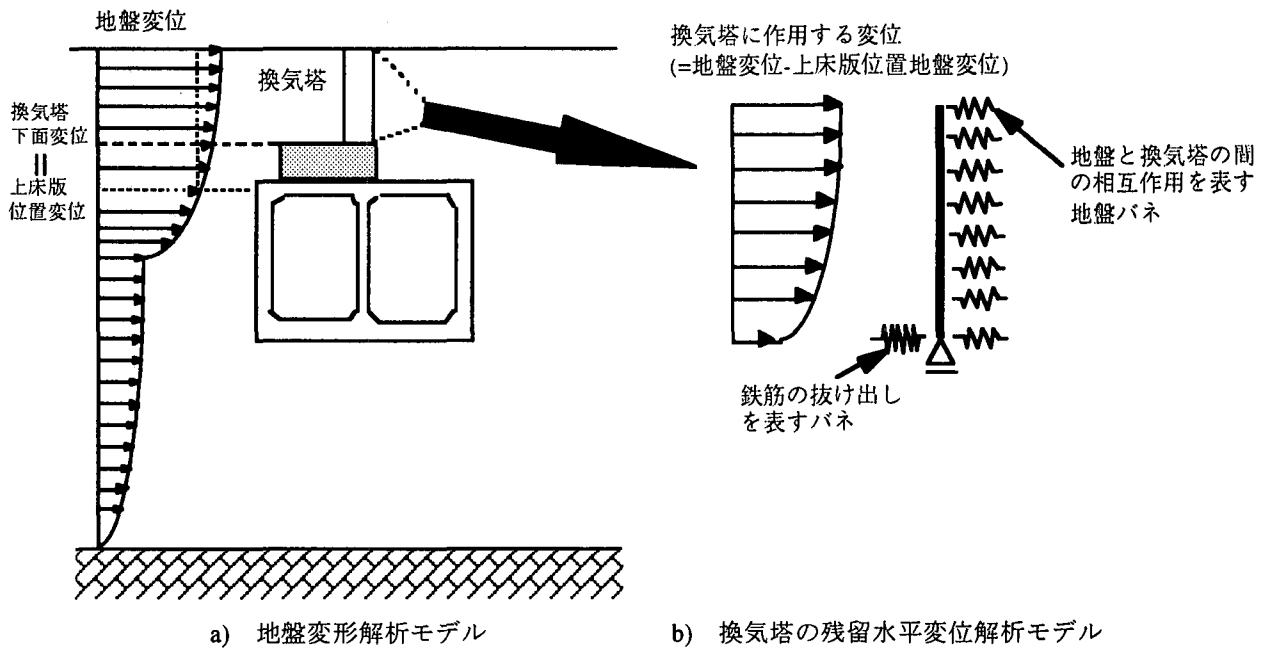


図-4.2.5 換気塔の水平残留変位機構の解析モデルの概要

で工学的基盤とは大阪層群上層のせん断波速度 500 m/s 程度の層とした。図-4.2.4 に 2 つの地震波の水平成分のうち大開駅軸直交方向成分を示す。

3)被害に基づく基盤地震動の推定手法

基盤地震動に応じた換気塔の被害つまり残留水平変形機構の解析は図-4.2.5 に示す様な地盤の変形解析と換気塔-地盤系の残留変形解析の 2 段階解析により検討を行う。

それは、まず地盤のみの地震応答解析を実施し、基盤地震動に応じた換気塔に作用する地盤変位の算出を行う。その際、次の 2 つの仮定を設ける

- i) 残留水平変位の生じた位置より下の換気塔部の変位は駅間トンネル部上床版位置の変形に等しい。
- ii) 駅間トンネル部及び換気塔部を含まない側方地盤の地震応答解析により得られる構造物位置の変形は、換気塔に作用する 地盤変位と等しい。

ここで、i)の仮定は換気塔下部が上部に比べ剛性が大きいことから支持されるものと考えられる。一方、

ii)の仮定は、地盤のみの変形は構造物含む地盤の変形に比べ、構造物が地盤の変形を拘束することから全体的に小さいと考えられる。しかし、駅間トンネル部上床版と地表との間の相対変形はトンネル部が地盤の変形を拘束していることから、構造物を含まない地盤における地表とトンネル部上床版相当位置間の相対変位より大きくなると考えられる。これら2つのことより、構造物を含まない地盤におけるトンネル部上床版相当位置に対するその上層地盤の相対変位は概ね換気塔に作用する変位と見なせるものと考えられる。

つぎに、地盤系の地震応答解析より得られた換気塔各位置のトンネル部上床版相当位置に対する相対変位時刻歴を用いた地盤-換気塔系モデルの地震応答解析を実施し、換気塔下部の残留水平変位を算出する。ここで、換気塔-地盤系モデルにおける換気塔は水平残留変位の生じた位置より上部のみをモデル化し、その側方には換気塔と地盤系の相互作用を表す水平方向の地盤バネを設けた。さらに、換気塔上部と下部の接合についてはバネ特性でモデル化した。その特性は換気塔の残留変形が生じた機構と関連することから、バネ特性について言及する前に、その機構についての考え方を以下に示す。

- ・ 接合部はコンクリートの打ち継目であり強度、特に引っ張り強度が他の部分より小さいことから、換気塔に作用する水平土圧に起因する曲げ引っ張りにより亀裂発生し、その亀裂が換気塔側壁を貫通した。
- ・ その後、以下に示す水平土圧に対する土圧の作用方向に応じた抵抗力の差異から、海側から山側に土圧が作用した際に、水平方向の移動つまり鉄筋の抜け出しが生じる。

<山側から海側へ土圧が作用した場合>

曲げ抵抗は山側側壁の引張り鉄筋と海側側壁のコンクリート部が抵抗し、換気塔下端部のせん断力に対しては圧縮部コンクリートおよび引張り鉄筋が抵抗する。

<海側から山側へ土圧が作用した場合>

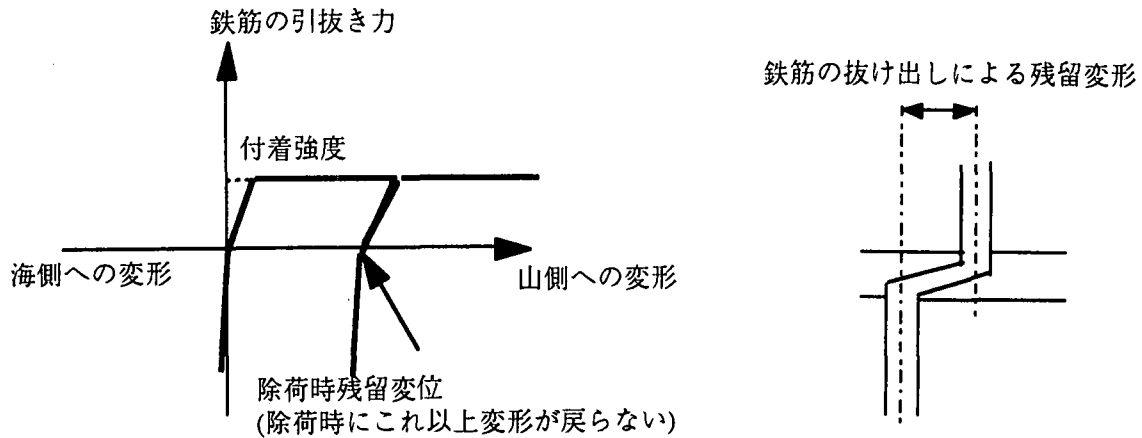
曲げ抵抗は海側側壁の引張り鉄筋が十分に定着されていないことから抵抗要素として期待されずと海側側壁のコンクリート部のみが抵抗し、換気塔下端部のせん断力に対しても山側側壁中の圧縮鉄筋とコンクリートのみが抵抗する。

このような機構により、換気塔上部が山側へ移動言い換えれば換気塔上部と下部のコンクリートの打ち継位置で残留水平変位が生じたものと考えられる。このことから、換気塔上部と下部の接合部を表すバネ特性は、海側に土圧が作用した場合は上・下一体となるような剛な特性を有し、山側に土圧が作用した場合は、山側側壁における鉄筋の抜け出しの特性を有するバネとしてモデル化する。その特性は図-4.2.6に示す通りである。この様に、山側へ土圧が作用した場合においても除荷時には鉄筋のKinking 的変形により残留変形が生じるものとした。換気塔の残留変形は以上の様な2段階の解析により評価を行う。

4)地盤の地震応答解析

地盤の地震応答解析は1次元地震応答解析コード「yusa-yusa2」を用いて実施した。その際、換気塔側方の地盤構造は図-4.2.7に示した大開駅縦断方向の地層構造より高速長田駅が側の地層構造よりモデル化し、動的地盤定数のうちせん断波速度は大開駅近傍で実施されたPS検層結果より推定した。それらは表-4.2.1に示す通りである。また、地盤材料の非線形性はHardin-Drenvichモデルを用いた。そのモデルのパラメータのうちせん断強度は、図-4.2.7に示した大開駅近傍の地盤調査結果のうち高速長田駅側の地盤におけるN値分布より評価した。

2つの基盤地震動に対する最大相対変位分布を図-4.2.8に、駅間トンネル部上床版位置に対する換気塔上部各位置の相対変位時刻歴を図-4.2.9に示す。ここで、相対変位のプラス側が山側への変形を表す。これより、地盤、特にせん断波速度が240 m/s以浅の地盤における応答変位はポートアイランド波に対する応答が神戸大学波の3倍程度の値となっている。一方、駅間トンネル部上床版に対するそれ以浅の地盤の相対変位という観点では神戸大学の卓越変形方向が海側であり、しかもノイズ的な変位成分が認められ



a) 換気塔接合部のバネ特性 b) 接合部バネ特性における除荷時残留変形時の鉄筋の変形イメージ

図-4.2.6 換気塔接合部のバネ特性

表-4.2.1 解析に用いた地盤構造・定数

No.	層 圧 (m)	単位体積重量 (t/m^3)	せん断波速度 (m/s)
1	1.0	1.5	100
2	3.0	1.6	140
3	3.5	1.8	170
4	6.0	1.8	190
5	3.5	1.7	240
6	22.0	2.0	330
7	-	2.1	500

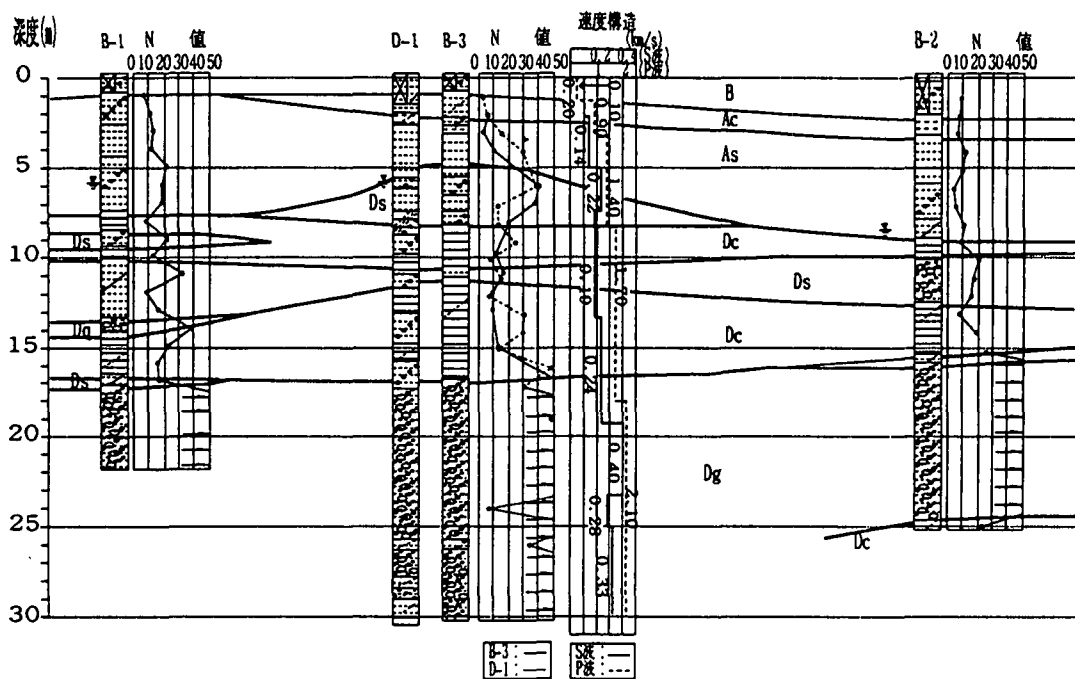


図-4.2.7 大開駅縦断方向の地盤構造

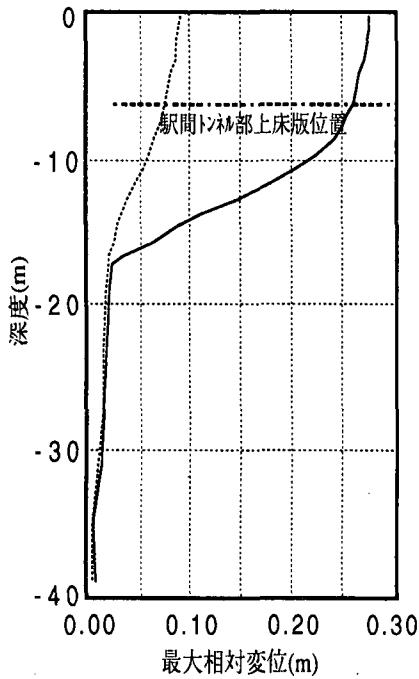
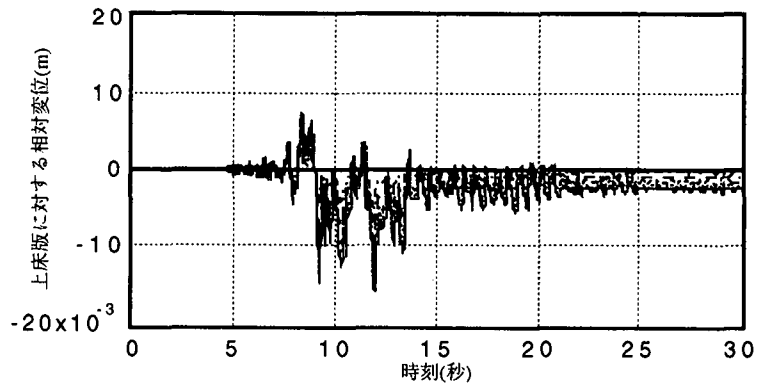
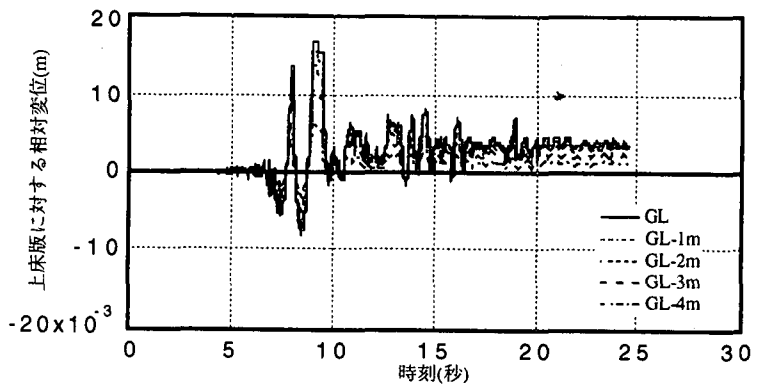


図-4.2.8 最大相対変位分布



a) 神戸大学波



b) ポートアイランド波

図-4.2.9 駅間トンネル部上床版に対する換気塔上部の相対変位時刻歴

るものの、神戸大学のノイズ的な変位成分を除く最大相対変位は 1.2 cm 程度、ポートアイランド波に対しては 1.6 cm 程度と地盤変位自体の差異ほど大きくないことが分かる。しかし、ポートアイランド波に対する相対変位が神戸大学波に比べ山側に偏る傾向は大きいと分かる。

5) 換気塔-地盤系の地震応答解析に基づく基盤地震動の推定

まず、図-4.2.5 に示した換気塔-地盤系モデルのモデル化について示す。地盤と換気塔間の動的相互作用を表す地盤バネ定数のうち水平方向地盤バネ定数 ($=5.12 \text{ tf/m}^3$) は道路橋示方書-下部構造編(平成8年度版)-の考え方にに基づき埋め戻し土であるマサ土の N 値 ($=10$) より算出した。また、図-4.2.6 に示した換気塔上部と下部の間の残留変形機構を表すバネ特性のうち、山側への変形時の弾性バネ特性は山側側壁の鉄筋 ($\phi 13 \times 20$) の軸剛性より算出した。

図-4.2.9 に示した換気塔下部つまり駅間トンネル部上床版に対する換気塔部頂部より 1 m 毎の深度における相対地盤変位を換気塔に作用させ、換気塔下部端における残留水平変位を算出した。その際、神戸大学波に対する相対地盤変位は海側に卓越しているが、ポートアイランド波と同様に山側に卓越するものと見なした。図-4.2.10 に解析により得られた残留水平変位の時刻歴を示す。この結果、ポートアイランド波に対する残留水平変位は約 3.2 cm 、神戸大学波に対しては約 2.3 cm であり、地震時に生じた残留変位 4.0 cm に比べいづれも小さい。しかし、ポートアイランド波に対する解析結果は地震時の残留変位の 8 割程度であり、神戸大学波の 6 割に比べ概ね対応しているといえる。

4.2.3 基盤地震動の推定

ここでは、次の2つの手法により大開駅近傍での基盤地震動の推定を実施した。

- i) 入力地震動の評価手法には自然現象としての地震動つまり地震の発生機構に基づく推定
- ii) 建造物の地震被害機構が再現可能なレベルの地震動としての推定

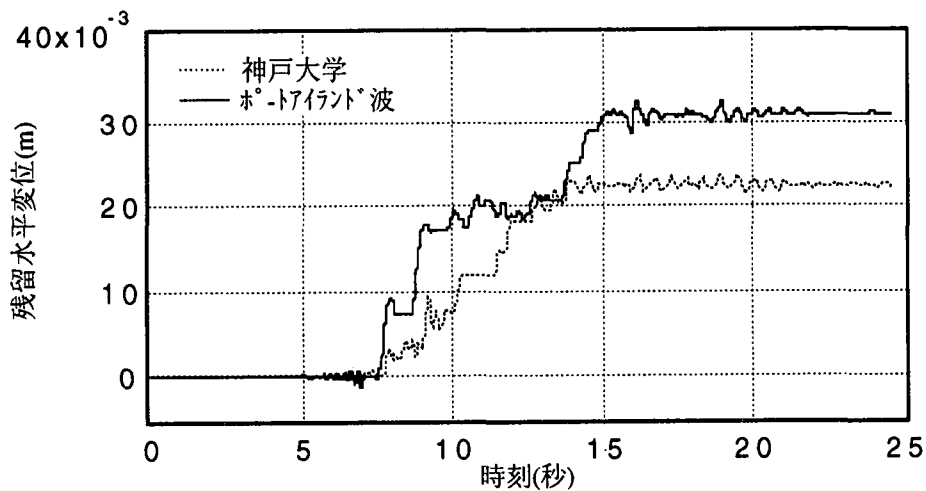


図-4.2.10 換気塔下端部残留水平変位時刻歴

その際、地震波形自体を推定するのではなく、兵庫県南部地震における硬質地盤上、中での観測記録のうち、ポートアイランドの地中で観測された記録を工学的基盤に修正した記録と神戸大学で観測された記録の2つを対象とし、i)項では推定されたスペクトル特性との対応、ii)においては被害機構解析による結果と実被害との対応という観点での検討を実施した。

これら2つの項目に対する推定結果が整合している地震動が大開駅近傍で推定された最適な基盤地震動であるといえる。その様な観点でみると、検討に用いた2つの記録のうちポートアイランド波は両項を満足する。このことから、ポートアイランド波は波形自体はならずしも兵庫県南部地震の際の基盤地震動波形とは一致しているとはいえないが、その特性は大開駅近傍地盤の地震応答や大开駅等の建造物の被害機構の評価を行う際に基盤地震動として用いてもよいものと推定される。

4.3 被災駅部の被災機構に基づく基盤地震動の検証

推定された基盤地震動の妥当性を検証するため、神戸高速鉄道・大开駅及び高速長田駅の被害機構解析を実施した。

4.3.1 被災機構の分析手法

分析は、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¹⁾を用い、建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_{rmax}) 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_{rmax} は建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} は建造物の地震応答変位に相当する。このうち、 U_{rmax} は地盤～建造物系の2次元地震応答解析により建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。また、 U_{dmax} は地盤～建造物系の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、側壁の剛性を弾性剛性の5割に低減した。

4.3.2 大开駅および高速長田駅の地盤・構造条件

神戸高速鉄道・大开駅と高速長田駅の周辺の地盤構造を図-4.3.1 (図-4.2.7と同様) および4.3.2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、大开駅は約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280~400 m/sを有するN値50以上の砂礫層の深度についてみると、大开駅

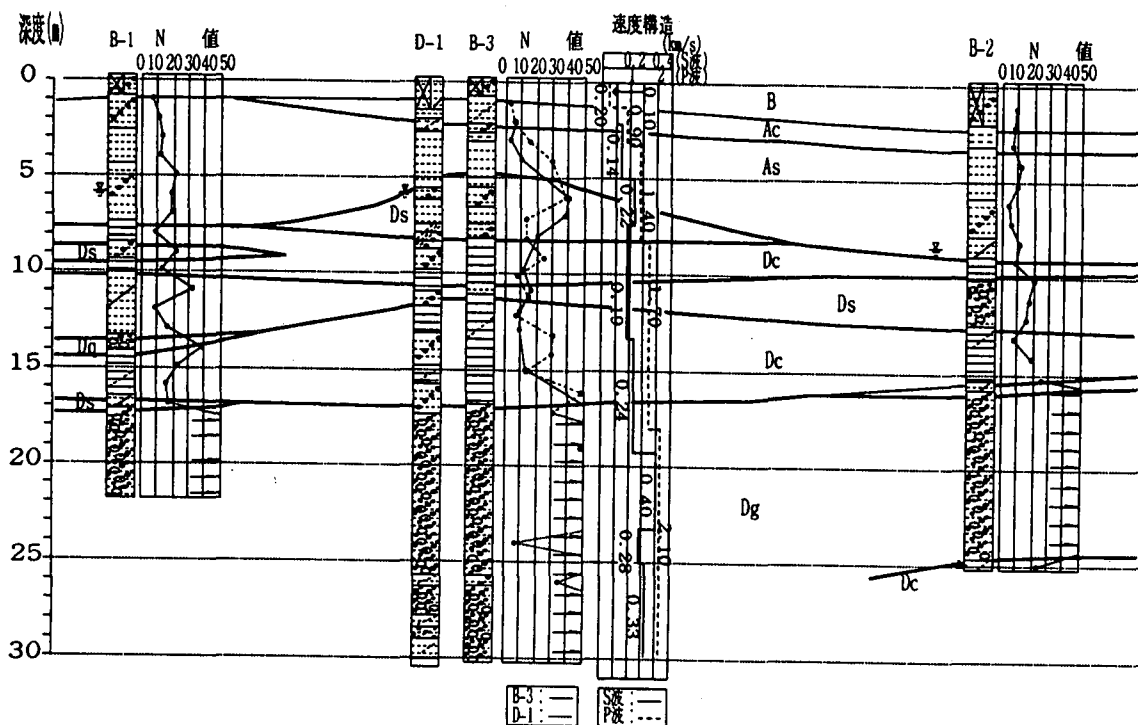


図-4.3.1 大開駅縦断方向の地盤構造

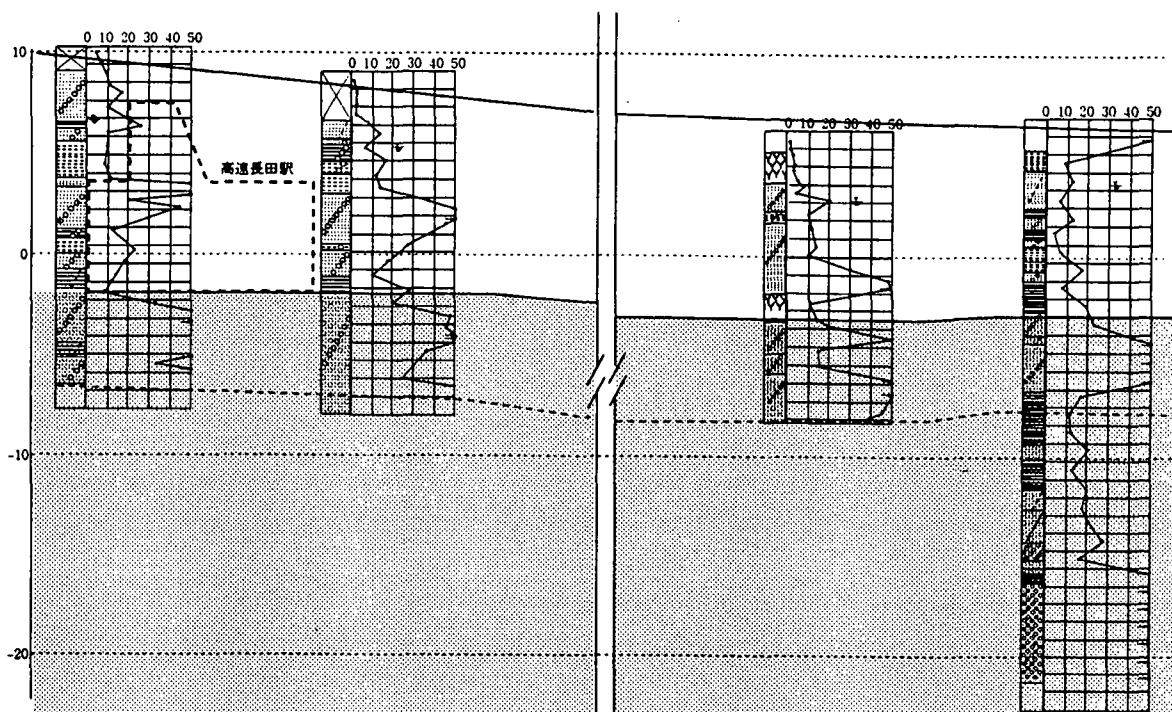


図-4.3.2 高速長田駅縦断方向の地盤構造

はGL-15~17 m以深、高速長田駅はGL-25 m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6~7 m程度存在している。また、駅側面の地盤についてみると、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。高速長田駅を対象とした動的解析に用いる地盤定数は、大开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、大开駅及び高速長田駅の構造モデルは既往の文献⁴⁾で示されたモデルを用いた。また、中柱の変形性能は構造実験が実施され非線形特性が明かとなっている大开駅・中柱の特性⁵⁾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。

4.3.3 2次元地震応答解析による地震応答変位

大开駅及び高速長田駅の地盤～構造物系モデルのうち地盤構造は図-4.3.1、4.3.2に示した駅周辺地盤の構造に基づき設定し、解析上の基盤である大阪層群はGL-44 m以深に存在すると仮定した。また、基盤地震動には、水平成分のみならず上下成分も用いた。

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-4.3.3、4.3.4に示す。これより、駅部近傍の最大加速度は大开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、前項で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。

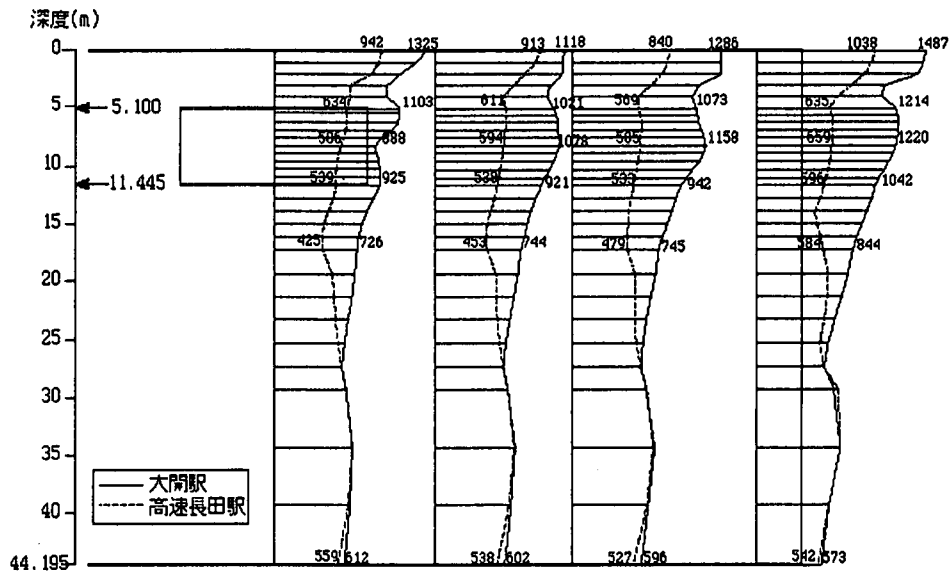


図-4.3.3 最大加速度の深度分布

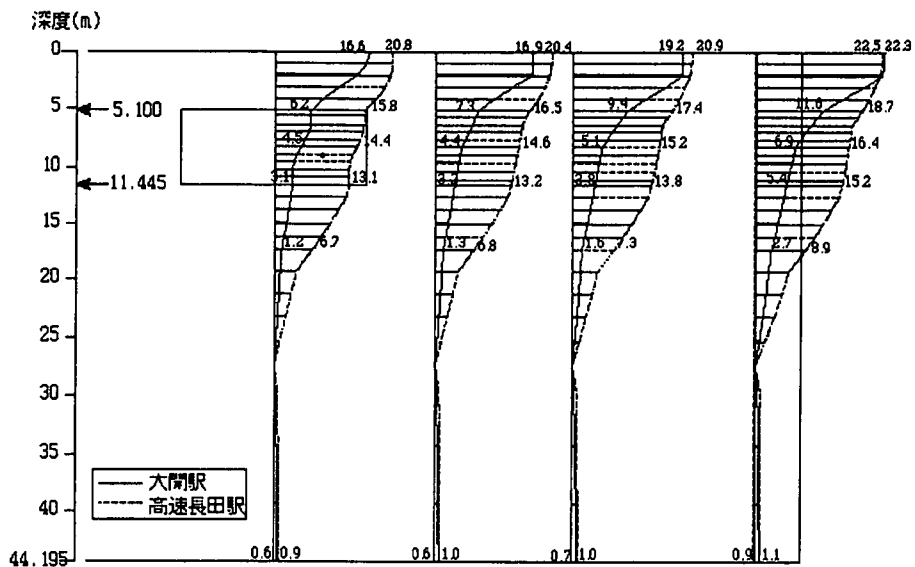


図-4.3.4 最大相対変位の深度分布

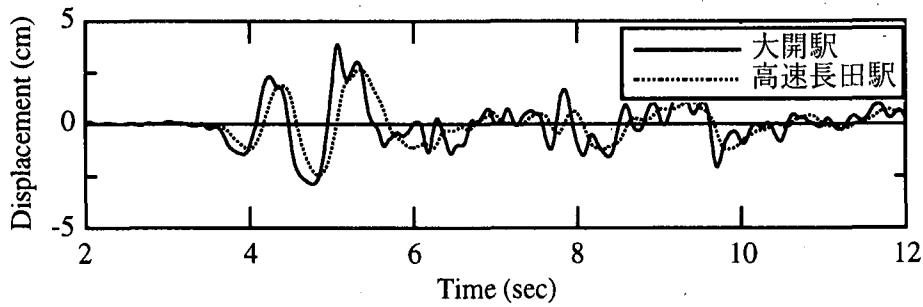


図-4.3.5 中柱位置における上下床版間の最大水平相対変位時刻歴の比較

次に、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-4.3.5 に示す。これより、大開駅の最大水平相対変位は 3.9 cm、高速長田駅では 2.7 cm と高速長田駅の方が大開駅に比べ小さな値となっている。これは、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。参考までに、神戸大学波に対する大開駅の中柱位置における上下床版間の最大水平相対変位は 2.7 cm であり、ポートアイランド波の 7 割程度の値となっている。

4.3.4 構造物の弾塑性解析による基盤地震動の推定

大開駅及び高速長田駅における保有変形能（水平荷重と中柱位置の上・下床版間の相対変位の関係）と地震時における上・下床版間の応答相対変位の関係を図-4.3.6 に示す。ここで、保有変形能算出時における両駅の終局状態は中柱の破壊時とした。これより、大開駅は終局状態に至るが、高速長田駅では地震時の応答相対変位が構造物の終局時変形能と同程度となっている。特に、大開駅に比べ被害程度のかかなり小さな高速長田駅の被災機構は、その被災形態より構造また地盤特性等の不均質性等に起因し、相対的に弱い部材が損傷したものと推測され、解析結果はその推測と整合している。これらの被災程度の異なる地下鉄駅部の被災機構解析という観点でも、ポートアイランド波は被災状況を適切に評価出来る。このことから、ポートアイランド波は前述の様に地盤応答また被災機構解析に用いる基盤地震動として妥当であると考えられる。

4.4 被災構造物周辺地盤の震動性状

大開駅縦断方向の地盤は、図-4.3.1 に示す地質構造から分る様に砂礫層がレンズ状に介在している。駅上の道路の陥没は高速長田駅側の 1 層部にて砂礫層から沖積砂層に変化する位置にて顕著となっている。

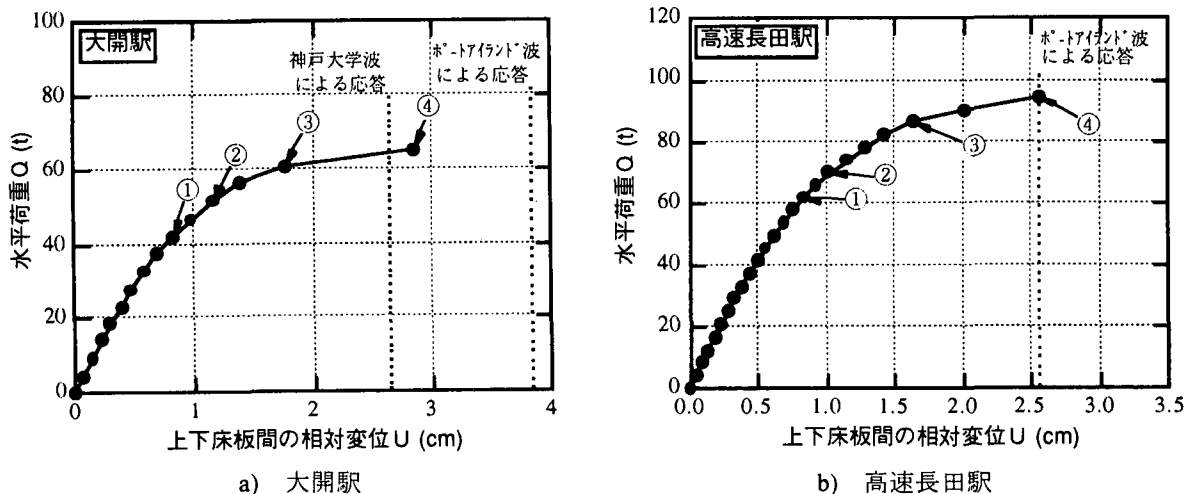


図-4.3.6 大開駅および高速長田駅における保有変形能と地震応答の比較

そのような大開駅の周辺地盤にみられる局所的な不整形性が被害状況に及ぼす影響を把握するため、大開駅に沿った地盤の震動性状について検討を行った。その際、駅縦断方向の局所的な不整形性を考慮した2次元有限要素モデルを作成し、駅横断方向つまり面外方向の非線形地震応答を等価線形化法による2次元地震応答解析 (Super FLUSH-SH) により実施し、SHAKEによる1次元地震応答解析との比較を行った。解析には、駅縦断方向の120 m 区間に新開地および高速長田駅側の30 m 加えた180 m 区間の地盤をモデル化した。基盤深度は常時微動特性に基づいて設定したGL-45 m とし、せん断波速度は500 m/s とした。入力地震動には、神戸大学波、ポートアイランドにおける工学的基盤推定波の2つを用いた。

各入力波に対する地表面最大応答加速度・変位の分布を2次元解析および1次元解析について図-4.4.1に示す。これより、砂礫層部における変位応答はその周辺地盤より小さな値となっている。特に、ポートアイランド波に対しては砂礫層の層厚変化部で応答が増大し、その層厚が一定部で応答が層厚変化部の1/2程度となっている。また、1,2次元解析の差異についてみると、神戸大学波に対しては加速度、変位応答とも両者には差異がみられない。しかし、ポートアイランド波に対しては砂礫層部で1次元解析が2次元解析に比べ大きな値となっている。これらより、ポートアイランド波に対しては地盤構造の変化が応答に及ぼす影響、さらに解析次元(モデル)の影響も大きいことが分かる。また、地震被害との対応でみると、大開駅の中で被害の軽微であったコンコース部の応答、特に変位応答は被害の著しかった軌道階に比べ小さく、被害状況と地盤構造は関連しているものと考えられる。

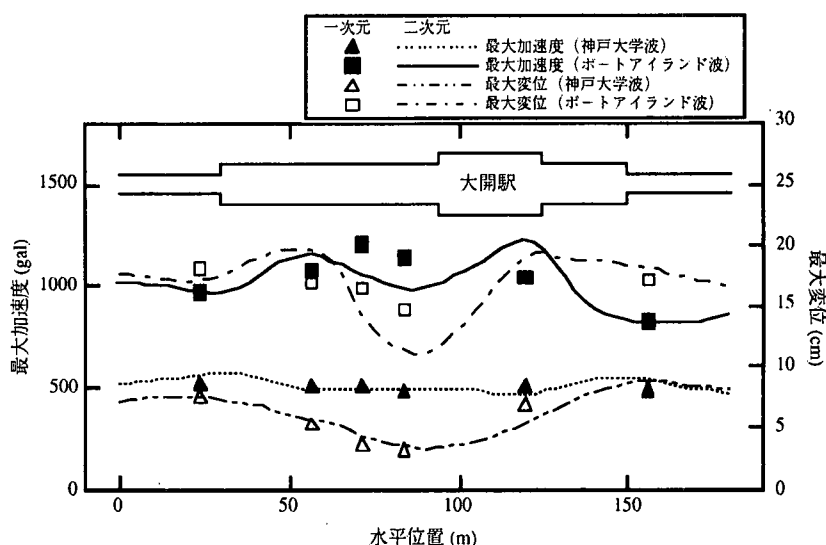


図-4.4.1 基盤地震動に応じた大開駅縦断方向の地表面応答

4.5 あとがき

本章では、大開駅近傍地盤の地震応答や大開駅等の被害機構を適切に評価出来るという観点で基盤地震動の推定を行った。それは波形自体を推定するのではなく、兵庫県南部地震における硬質地盤上、中で観測された幾つかの記録より、次の2つの条件を満足する記録を選択するという手法を用いた。ここで、選択の対象とした観測記録は、ポートアイランドの地中で観測された記録を工学的基盤に修正した記録と神戸大学で観測された記録の2つである。

- i) 入力地震動の評価手法には自然現象としての地震動つまり地震の発生機構に基づく推定スペクトルとの対応
- ii) 大開駅の付帯構造物である換気塔の地震被害解析による結果と実被害との対応

さらに、推定された基盤地震動の妥当性を検討するため、それを用いた被害程度の異なる大開駅および高速長田駅の被害機構解析の結果と実被害状況との比較を行った。

その結果、ポートアイランド波は2つの選択条件を満足するとともに、大開駅及び高速長田駅の被害程度の差異を適切に評価出来ることから、基盤地震動として適当であることが分かった。さらに、それを用いた大開駅近傍地盤の地震応答解析を行った結果、地盤の応答に及ぼす地層構造の局所的な不均質性の影響が大きく、それが被害状況ともよく対応していることが明かとなった。

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, 1996.4.
- 2) 佐藤忠信他：兵庫県南部地震における強震域での加速度応答スペクトルの推定、土木学会論文集、No.563/I-39, pp. 149-159,1997.4.
- 3) 林康裕,川瀬博：1995 年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価、日本建築学会構造系論文集、第 481 号, pp. 37-46, 1996.
- 4) 中村晋他：被害程度の差異に着目した地下鉄の被害要因分析、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp. 247-254, 1997.
- 5) 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.