

9. 道路・鉄道における地盤災害と耐震設計

9.1 目的と用語の整理

9.1.1 線状構造物の被害分析の目的

地震による構造物の被害は、震源断層の破壊によって発生しその地点に到達した地盤の振動と、構造物の応答特性、構造物の強度特性などによって左右される。個別の構造物はこれらの要因で被害を説明できても少し広い範囲に目を向けてみると、激甚な被害のところとそれほどでもないところが隣接しているなど、その差違について、表層地質や地形あるいは断層の影響など種々の要因が考えられる。

道路や鉄道は網目状に広範囲に分布しているため、これらの構造物の被害状況を指標として、地形・地質や構造形式との関連性の分析を試みた。しかし高架橋は、高さの違う構造物や個々の構造物で耐力や破壊形態が異なるので、このような分析指標となり難いこともあるため、ここでは土構造物及び抗土圧構造物の被害を分析した。

9.1.2 構造形式の分類

道路構造物と鉄道構造物を扱うため、まず、構造形式を統一的に分類した。土を盛り上げて周辺地盤よりも高い位置に路盤を設けたものを盛土と考えると、盛土は高さの変化する「盛土構造部」とその機能を果たす「盛土路盤部」とに区分することができる。この場合、盛土構造部の構造形式は表

表 9.1.1 盛土構造部による盛土の分類

構造形式	構造上の特徴
土工のり面	土工あるいは植生工によるのり面構造
のり面工	格子枠工等を有するのり面構造
もたれ壁	背面の土がないと自立が困難な壁構造
重力式擁壁	単独で自立し、主に自重で土圧を支える構造物
RC 擁壁	単独で自立し、主に壁の曲げ剛性で土圧を支える構造物
補強盛土	ジオテキスタイルと曲げ剛性のある一体の壁面で構成される構造
テールアルメ	帯状の鋼板と分割した壁面で構成される構造
その他	上記のいずれにも属さない構造

9.1.1 のように分類できる。

ここでは、道路において「ブロッ

ク積（石積）擁壁」あるいは「もたれ式擁壁」と呼ばれている構造²⁾、並びに鉄道において「土留壁」と呼ばれている構造³⁾が、いずれも自立せずに土に支えられる壁であるため「もたれ壁」とした。なお、「重力式擁壁」は自立できる構造であるため、この点でもたれ壁とは異なることに注意が必要である。

9.1.3 損傷形態の分類

次に、設計への反映を容易にするために、損傷形態を表 9.1.2 に示すように分類した。特に設計と対応させて「外的損傷」と「内的損傷」

表 9.1.2 設計を考慮した損傷形態の分類

部 位	構 造	損 傷 形 態
盛土構造部	土工のり面、のり面工	亀裂、沈下、膨れ、滑り崩壊
	抗土圧構造物（内的損傷）	ひび割れ、損壊
	抗土圧構造物（外的損傷）	沈下、傾斜、滑動、倒壊
盛土路盤部	土、アスファルト等	亀裂、沈下、崩壊

とを区別した。即ち、抗土圧構造物のひび割れ、損壊は内部応力に起因する損傷であり、沈下、傾斜、滑動、倒壊は外的安定性に起因する被害である。また、被害状況を集約するに際しては、盛土の機能の阻害状況が重要であるため、被害部位を盛土構造部と盛土路盤部とに分けることが望ましい。9.3 被害データの分析においては、既存のデータにこのような観点から分類されていないものが多く、また、既にトレースできない状態でもあったため、分析に限界があった。

9.2 被害及び復旧の事例

9.2.1 構造形式と損傷形態別の被災事例

図 9.2.1 は地震時に盛土が沈下し、のり面が膨れた状況を示している。図 9.2.2 及び図 9.2.6(a) は擁壁の内部応力による損壊の状況を示しており、重力式擁壁に対する曲げ応力度の検討の必要性を示唆している。図 9.2.3, 図 9.2.4(a), 及び図 9.2.5(a) は、補強盛土, RC 擁壁, 及びもたれ壁が傾斜し、変位が残留した状況を示している。

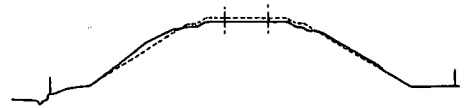


図 9.2.1 のり面の膨れ
(阪急武庫の荘～西宮間)

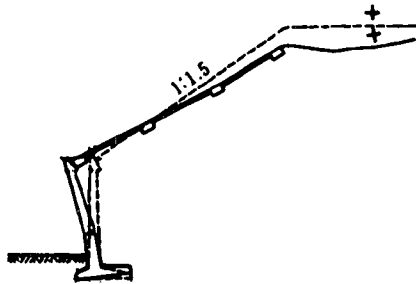


図 9.2.2 RC 擁壁の損壊 (JR 新長田付近) ⁴⁾

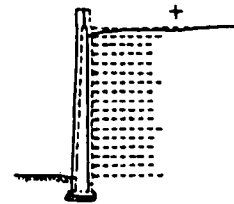


図 9.2.3 補強盛土の沈下・傾斜
(JR 甲南山手付近) ⁵⁾

9.2.2 道路及び鉄道構造物の復旧事例

道路においては、被害の大部分が路面の亀裂であることから、早期に交通機能を確保するため原形復旧を基本とした。テールアルメ工法と大型ブロック積工法の組合わせによる復旧事例を図 9.2.4 に示す。

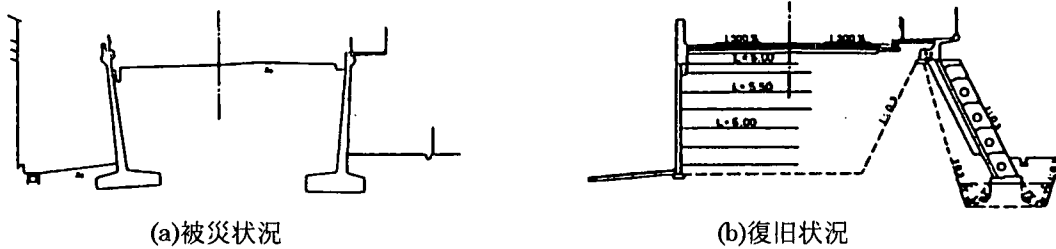


図 9.2.4 特殊擁壁による盛土の復旧例 (神戸市道西灘原田線・六甲道三宮線)

鉄道において復旧工程を短縮するために仮線状態で一旦復旧させた事例を、図 9.2.5, 図 9.2.6 に示す。

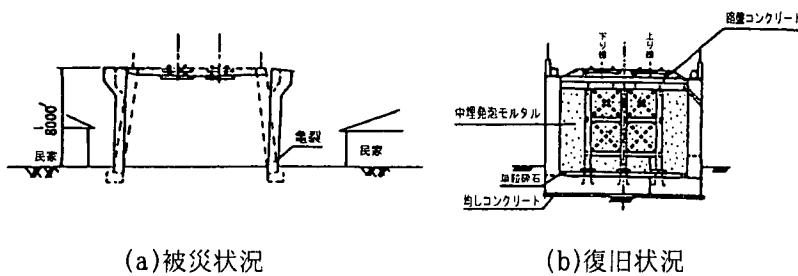
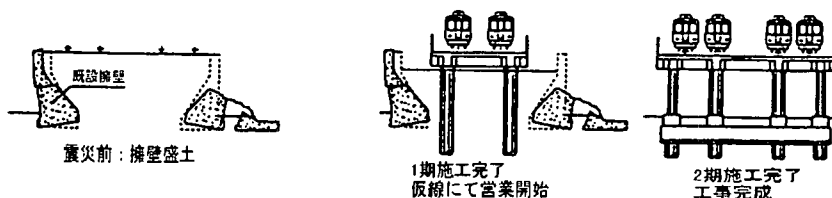


図 9.2.5 エアモルタルを用いた中埋め U 型擁壁による復旧 (阪急住吉川付近)



(a)被災状況 (b)復旧状況

図 9.2.6 パイルベント・ラーメン高架橋による復旧 (阪神石屋川付近)

9.3 被害データの分析

9.3.1 被害データの分析方法

被害と地形地質あるいは構造形式との関連性を把握すること、耐震設計上の課題を把握すること、並びに、被害のメカニズムを捉えることを目的として被害データを分析した。

9.3.2 被害データと地形地質との関連性

被害データと表層地質との間には、若干の傾向は見られるものの、顕著な関係は見出せなかった⁶⁾。

9.3.3 強震地域における鉄道被害の分析

震度7地帯でJR、阪急、阪神の三線が並行する区間において、総延長7984.7mの被害データを分析した。図9.3.1に構造形式別、盛土高さ別の被害状況を示す。これらの分析から次のことが分かった⁶⁾。

- ・5m程度以下の高さの盛土に対しては、のり面、補強盛土、及びRC擁壁の被害が重力式擁壁やもたれ壁に比べて小さかった。
- ・RC擁壁には内的損壊の事例はあるが、外的倒壊の事例は見られなかった。
- ・補強盛土は損壊、倒壊には至らなかった。
- ・盛土高さ5m以上の重力式擁壁は崩壊しやすいが、盛土高さ7m以上のもたれ壁で崩壊を免れた事例が多かった。
- ・のり面の下部を重力式擁壁やもたれ壁で支える複合構造は、同程度の高さでのり面を設けない重力式擁壁やもたれ壁のみの構造よりも耐震性に劣る。

一方、重力式擁壁と分類すべき形状の練積石擁壁の損傷状況を、無被害のデータも含めて分析した結果、図9.3.2に示すように、のり面工を有する擁壁の被災割合(%)が非常に高いことが報告されている⁷⁾。

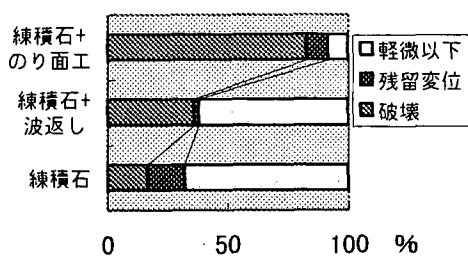
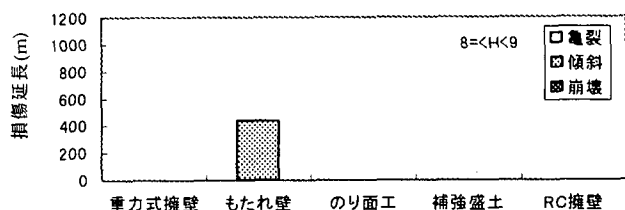
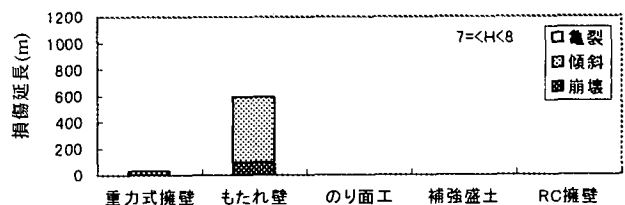
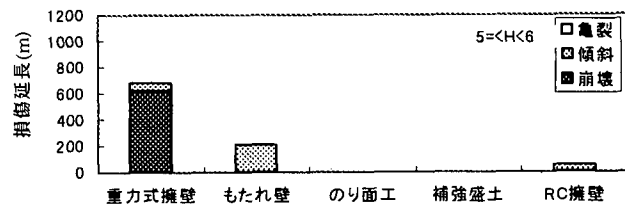
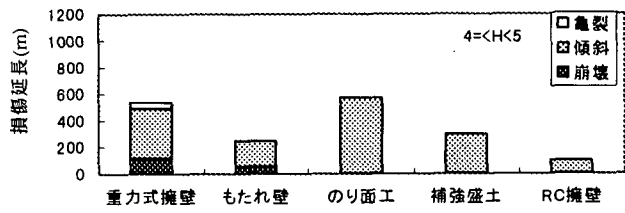
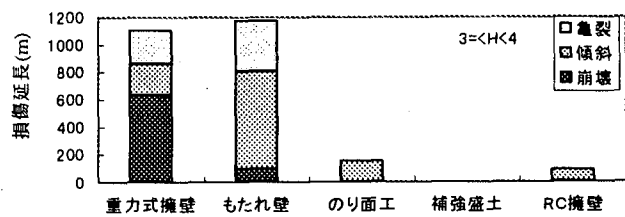
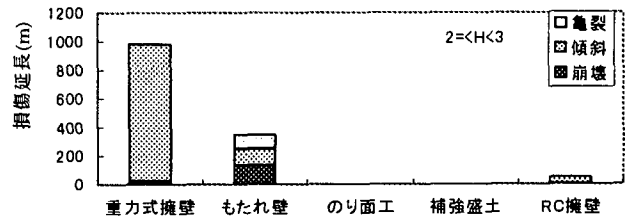
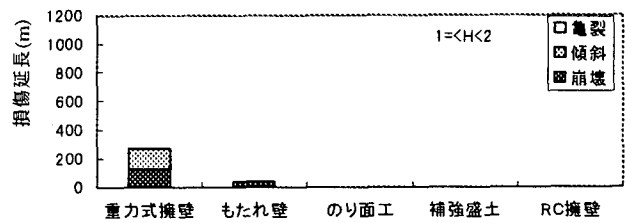


図9.3.2 練積石擁壁の被災割合



H=盛土高さ(m)

図9.3.1 盛土の損傷形態

9.3.4 国道の被害分析⁸⁾

道路構造物について、国道のルート別、構造形式別、高さ別に被害を分析した。図 9.3.3 に構造形式別、盛土高さ別の被害状況を示す。これらの結果から、盛土高さが高くなると被害率が高くなる傾向があったこと、及び、通常採用される範囲ののり勾配では被害率に有為な差はなかったことが分かった。

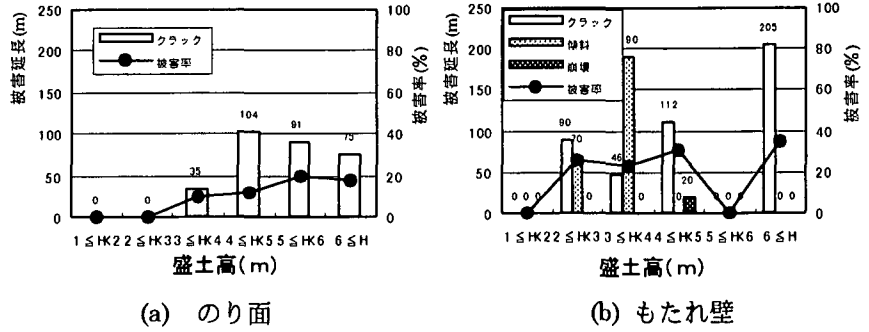


図 9.3.3 国道盛土の形式別被害状況

9.4 数値解析による被害メカニズムの分析

9.4.1 時刻歴応答解析による擁壁構造別の応答⁹⁾

高さ 5 m の重力式擁壁、もたれ壁、並びに補強盛土について、地盤の材料非線形、地盤・構造物接触面における剥離及び滑動を考慮した時刻歴非線形応答解析を行った。解析対象を図 9.4.1 に示す。

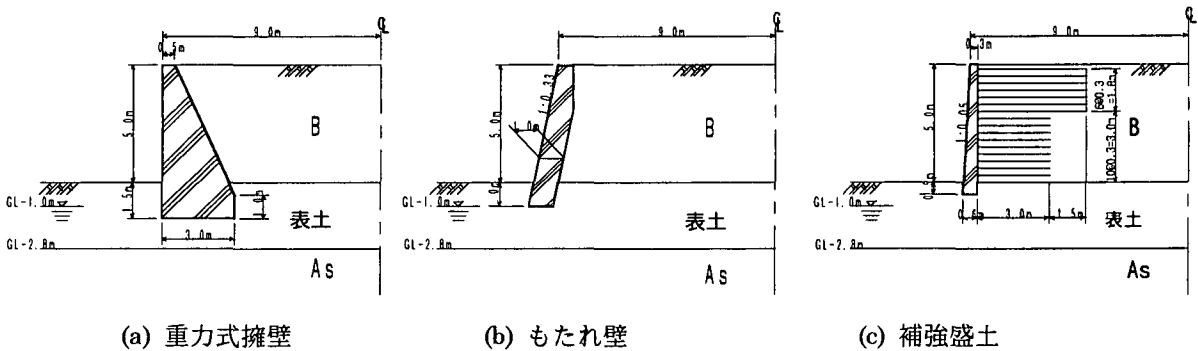


図 9.4.1 時刻歴非線形解析の対象構造物

地盤構成は、重力式擁壁の被災地点におけるボーリング調査結果を用いて沖積層以浅を作成し、それ以深は周辺の深いボーリング結果に基づいて作成した。補強盛土におけるジオテキスタイルは、引張り力に対してのみ抵抗する非対称バイリニア型相対ばね要素でモデル化した。入力地震動は、神戸大学観測点の加速度波形 (NS 成分) を底面粘性境界下端の半無限基盤に入力した等価線形解析を予め実施し、得られた粘性境界上端における加速度波形を解析モデル底面に水平入力した。この解析により次の事が分かった。

- ・擁壁と盛土はほぼ同位相で振動する (図 9.4.2)。
- ・重力式擁壁ともたれ壁は、擁壁と盛土との間で滑動や剥離が生じており、重力式擁壁は盛土よりも応答変位が小さく盛土の変形を抑制するように動く (図 9.4.3) が、もたれ壁は盛土側面に乗っているかのように動いて転倒に至った (図 9.4.4)。
- ・補強盛土は、盛土の沈下に伴いジオテキスタイルに引張り力が発生し、擁壁の傾斜や移動を抑制する働きがある (図 9.4.5, 図 9.4.6)。

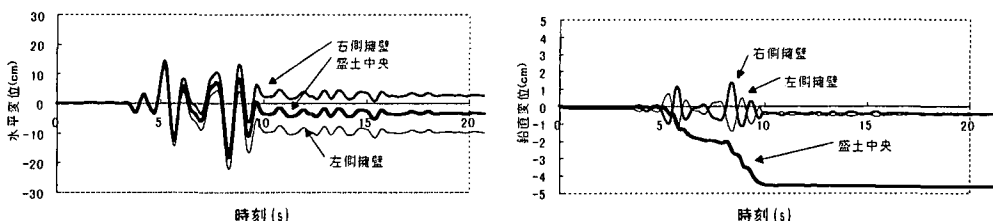
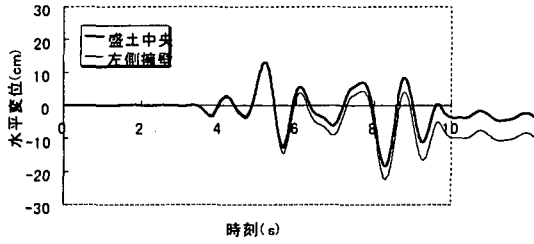
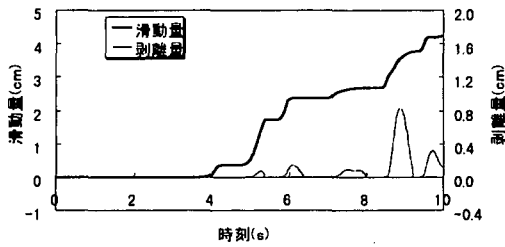


図 9.4.2 盛土中央と擁壁天端の応答変位波形 (重力式擁壁)



(a)擁壁と盛土天端の応答変位



(b) 左側擁壁背面のジョイント要素の相対変位

図 9.4.3 重力式擁壁と盛土の応答変位と相対変位

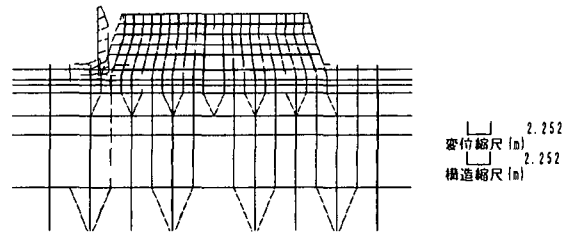


図 9.4.4 もたれ壁の変形状況

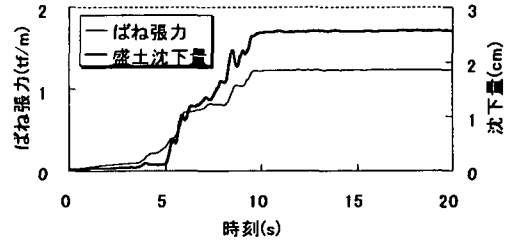
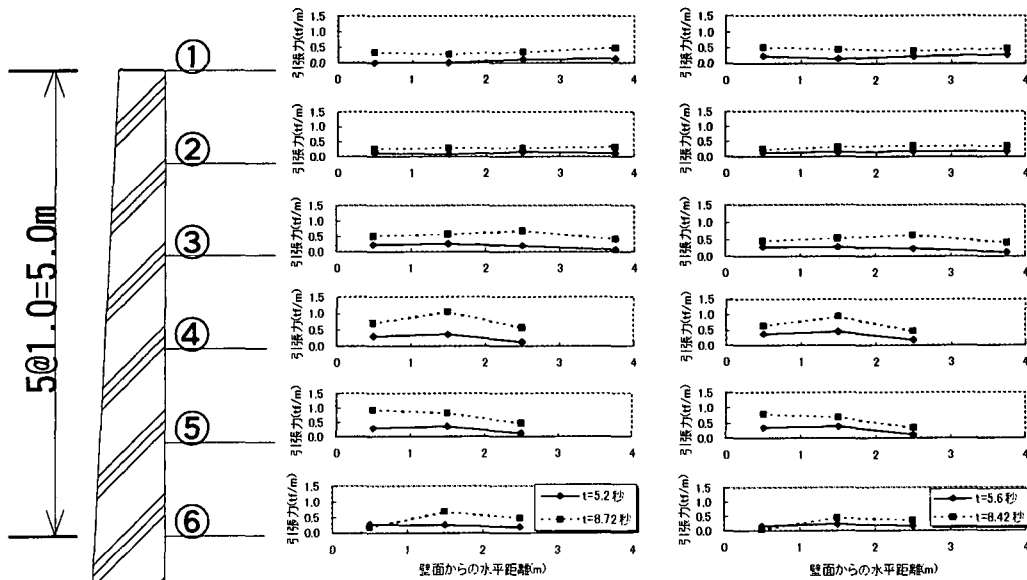


図 9.4.5 ジオテキスタイルの張力と盛土沈下



(a) 右方向変形時

(b) 左方向変形時

図 9.4.6 ジオテキスタイルの張力分布

9.4.2 等価線形地震応答解析によるもたれ壁の応答特性^{10) 11)}

もたれ壁について、高さを 3 m, 5 m, 8 m と変え、等価線形化手法により地盤の材料非線形を考慮した複素応答解析法による地震時応答解析を行った。図 9.4.7 に盛土高さ 8 m の場合の解析モデルを示す。

入力地震動は、神戸大学観測点の加速度波形 (NS 成分と UD 成分) の振幅を 1.1 倍に調整して、底面の半無限基盤に入力した。この解析から得られた水平方向加速度に関する伝達関数

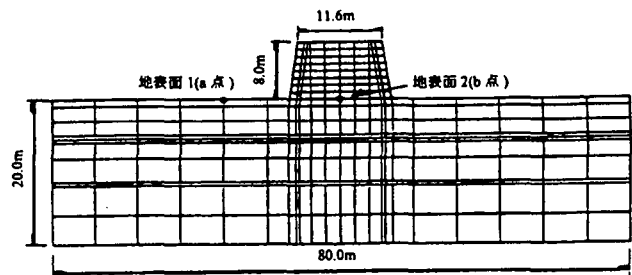


図 9.4.7 等価線形地震応答解析のモデル

を図9.4.8に示す。伝達関数とは、基盤への入力地震動に対する応答倍率曲線を意味し、そのピーク点は卓越振動数を表わす。この図から、もたれ壁を有する盛土は周辺地盤とほぼ同じ振動数で揺れ、高さが高くなるに従って地表面の応答よりもやや増幅し、基盤への入力地震動に対する応答倍率曲線のピーク振動数が僅かに低下する傾向があることが分かった。

9.5 今後の課題

阪神・淡路大震災に関して、土構造物及び抗土圧構造物の被害・復旧事例の収集、被害データの分析、数値解析による被害メカニズムの推定を行った結果、今後の耐震設計に対する幾つかの知見が得られたが、次のような課題が残った。

- ・高さの高いもたれ壁が転倒を免れたメカニズムの想定
- ・のり面を有する擁壁の地震時土圧の設定方法の提言
- ・のり面がない場合のRC擁壁の現行設計法の検証

参考文献

- 1) 土木学会関西支部(1998)：大震災に学ぶ——阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書——，第II巻，p.32
- 2) 日本道路協会(1999)：道路土工—擁壁工指針，p.10
- 3) 鉄道総合技術研究所編(1997)：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，p.334
- 4) F.Tatuoka et al.(1996)：Performance of reinforced soil structures during the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *IS-Kyushu '96 Special Report*, p.6.
- 5) 前出4) p.15.
- 6) 長山喜則・溝端一博・久保田晃司・庄健介・佐俣千載(1998)：阪神・淡路大震災における鉄道盛土の被害分析，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.431-436
- 7) 金澤芳信(1999)：阪神・淡路大震災における盛土・抗土圧構造物の被災について，土木学会第3回鉄道力学シンポジウム（投稿中）
- 8) 国富和真・小林育夫・松井保・山崎聡一・安川郁夫(1998)：阪神・淡路大震災による道路盛土被害の要因分析，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.437-442
- 9) 河西寛・福田尚晃・松井保・長山喜則・庄健介(1998)：抗土圧構造物の地震時挙動と被害メカニズム，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.1569-1574
- 10) 山村真由子・望月秋利・松元秀亮(1998)：兵庫県南部地震時におけるもたれ擁壁の加速度伝達関数による検討，第33回地盤工学研究発表会
- 11) 山村真由子・望月秋利・庄健介(1997)：兵庫県南部地震時におけるも鉄道盛土の破壊メカニズムの検討，第52回土木学会年次学術講演会概要集，第3部(A)，pp.212-213

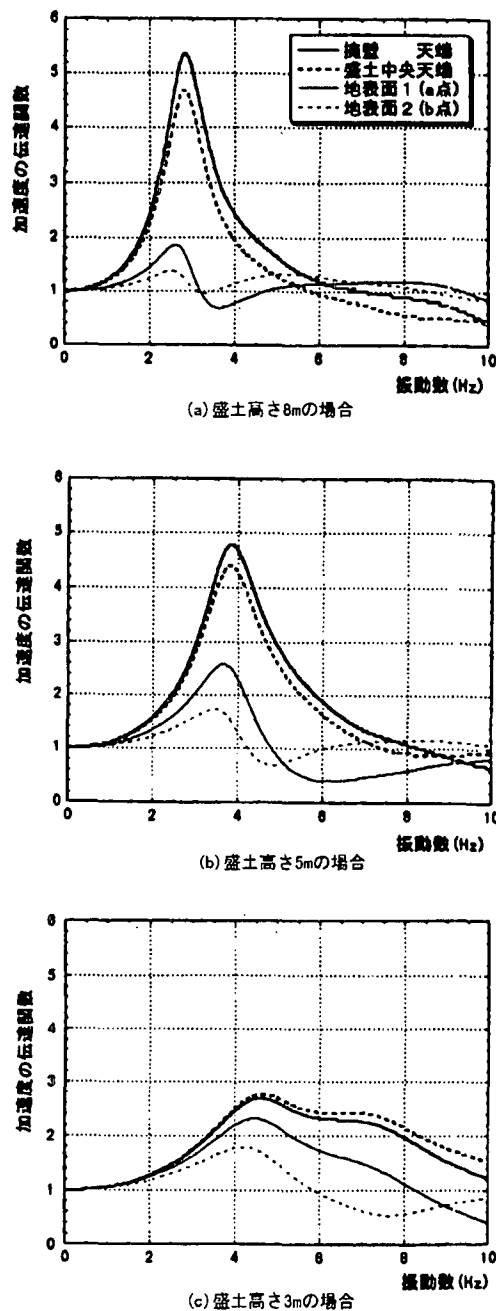


図9.4.8 盛土天端の加速度伝達関数