

# 高盛土地盤における物性評価と地震動増幅特性

沖村孝<sup>1</sup>・南部光広<sup>2</sup>・篠原秀明<sup>3</sup>・桜井秀憲<sup>4</sup>・前田 修<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 理博 神戸大学 都市安全研究センター (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 応用地質(株) 神戸支店 (〒652-0807 神戸市兵庫区浜崎通10-20)

<sup>3</sup>正会員 応用地質(株) 技術本部 (〒330-8632 さいたま市土呂町2-61-5)

<sup>4</sup>神戸市役所 みなと総局 (〒650-8570 神戸市中央区加納町6-5-1)

<sup>5</sup>神戸市役所 建設局 (〒650-8570 神戸市中央区加納町6-5-1)

本論文では、高盛土地盤における動的性質の把握を目的として、盛土材の各種物性試験ならびに盛土地盤築造後にPS検層、S波トモグラフィ、常時微動測定などを行うとともに、それらの結果を利用して、地盤物性や微動特性の検討を行った。あわせて、鳥取県西部地震の観測波形を用いて盛土地盤における動的解析を行い、実測値との対比を行った。その結果、盛土地盤のS波速度より求めた地盤の初期せん断弾性係数は盛土材の土質試験結果とほぼ同程度の値を示していた。また、それらの値を使って動的解析より求められた波形は、観測波形と概ね良く一致していた。常時微動と地震波形との比較では、卓越周波数特性は異なるものの、盛土地盤における増幅特性が両者ともほぼ同じような傾向を示していた。

**Key Words :** high bank, geological property, dynamic analysis, seismic swing, amplification degree

## 1. まえがき

兵庫県南部地震や宮城県沖地震が発生した際、古い年代に築造された盛土地盤において、のり面の崩壊や液状化に伴う流動性の変状など各種変状が発生した<sup>1), 2)</sup>。のり面の変状では、高さが15m以上の高盛土のり面において発生したところが多く、地震時における地盤の挙動やのり面の耐震性などが問題点として浮かび上がってきた。

元来、高盛土のり面は宅地造成地よりも広い平坦面が必要とされる空港盛土などで計画されることが多く、これら高盛土のり面の耐震性については動的解析等による検討が行われてきた。しかしながら、完成した盛土地盤に対して各種調査・試験が行われることは少なく、地震時における盛土のり面の挙動についても地震時の観測データが得られている例は、極く限られたものとなっている。

地震動記録について、これまでに公表された資料のうち、盛土のり面で実測地震動記録が示されている例としては、釧路沖地震による釧路空港の例<sup>3)</sup>、千葉県名取市における宅地造成地での観測例<sup>4)</sup>などが挙げられる。釧路空港の盛土地盤は泥岩等の第三紀堆積岩切土材を用いたものであり、盛土高さは約65mである。一方、千葉県の例では、盛土地盤が凝灰岩や安山岩などの切土材を用いて造成されており、盛土の高さが約40mである。観測された地震動の大きさは、最も大きい

のり肩部で釧路空港の例が100gal、千葉県名取市の宅地造成地において福島県東方沖地震で観測された例が約10galであり、波の特性としては釧路沖が海洋型、千葉県での例でも海洋型の観測例が多い。

本論文で対象とする盛土のり面は、第三紀鮮新世～第四紀更新世に堆積した大阪層群の礫質土主体の切土材を用いて築造された盛土地盤であり、のり面の高さは約25mである。前述したように高盛土のり面の地震時挙動については実測例が少なく、十分に解明された状態ではないのが現状である。

本論文においては、盛土材料試験や高盛土地盤築造後の各種測定結果について述べるとともに、それらの結果を利用して、地盤物性や微動特性の特徴について述べる。鳥取県西部地震での観測波については、常時微動測定結果との比較検討を行うとともに、観測波を用いての動的解析を通じて、高盛土のり面における地震動増幅特性について検討した結果を述べる。

## 2. 盛土地盤

### (1) 盛土造成地

本論文で対象とした盛土地盤は、神戸市街地より西へ約15kmのところの位置する宅地造成地内に存在している。造成地全体は丘陵地に位置しており、対象となる盛土のり面は、図-1に示すように谷を埋めて築造さ

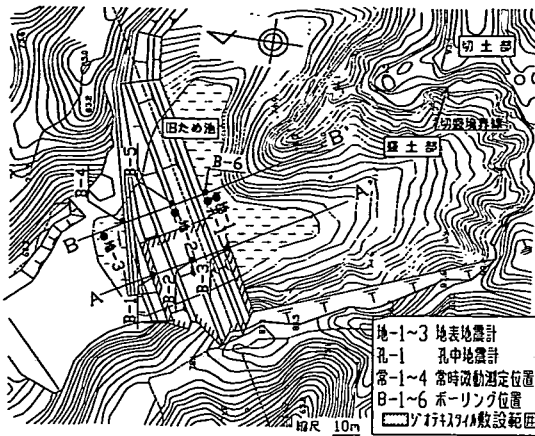


図-1 調査ならびに地震計設置位置

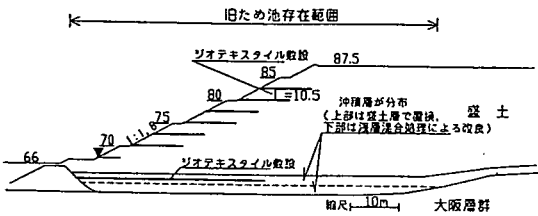


図-2 代表横断面図 (A-A'測線)

れた盛土地盤の端部に位置している。丘陵地に分布する地質は、新生代第三紀鮮新世～第四紀更新世に堆積した大阪層群よりなっており、礫質土、砂質土、粘性土の各層がほぼ水平に堆積している。地層分布の割合としては、礫質土層が優勢であり、次いで砂質土、粘性土となっている。このため、発生する切土材も礫質土が主体であり、造成によって築造された盛土地盤も礫質土主体である。

図-1に示す谷筋やため池部では、沖積層が分布しており、盛土築造に先立って、ため池底に堆積している地層を確認したところ、N値が2以下の軟弱な粘性土が約4mの厚さで堆積していることが判明した。「宅地防災マニュアル」<sup>5)</sup>に基づく安定解析の結果、この軟弱粘性土を未改良のまま盛土を行うと盛土のり面が不安定になる可能性の高いことがわかり、盛土に先立って一部は浅層混合処理により改良し、他の一部は盛土材によ

って置換した。

盛土のり面については、ジオテキスタイル敷設の有無による地盤性状の差異を把握するため、図-1に示すように西側半分の区域においてジオテキスタイルを盛土高さ2.5m間隔で水平に敷設した。敷設長はのり表面より10.5mである。なお、盛土のり面の勾配は図-2に示すように1:1.8であり、高さ5m毎に1.5m幅の小段を設けている。

## (2) 盛土材料特性

### a) 物理特性ならびに静的力学特性

表-1に当地区で発生する大阪層群切土材よりなる盛土材料の土質試験結果を示す。これによると細粒分含有率が約12%であり、粗粒分では砂分比べて礫分がやや優勢である。均等係数は88と大きく、土質分類では粒度組成の良い礫質土となる。自然含水比は9.8%、最大乾燥密度が1.914g/cm<sup>3</sup>、三軸圧縮(CD)試験結果より得られたせん断抵抗角が35.03°、粘着力が9.8kN/m<sup>2</sup>、湿潤密度が1.996g/cm<sup>3</sup>である。盛土材料としては自然含水比が最適含水比に比べてやや低い値を示すものの、それに近い値を示しており、良く締め固まる材料であることがわかる。

### b) 動的力学特性

盛土材料の動的力学特性を把握するために、直径30cm、高さ12cmの大型試験機を用いて動的変形試験を実施した。試料の締め固め度は最大乾燥密度の90%として、有効拘束圧が147kN/m<sup>2</sup>と392kN/m<sup>2</sup>の条件下で試験を行った。試験結果は図-3に示したが、同図に示す等価ヤング率Eeqは下記に示す式(1)より求めた。

$$E_{eq} = 2(1 + \nu)G \quad (1)$$

Eeq : 等価ヤング率

G : せん断弾性係数

$\nu$  : ポアソン比

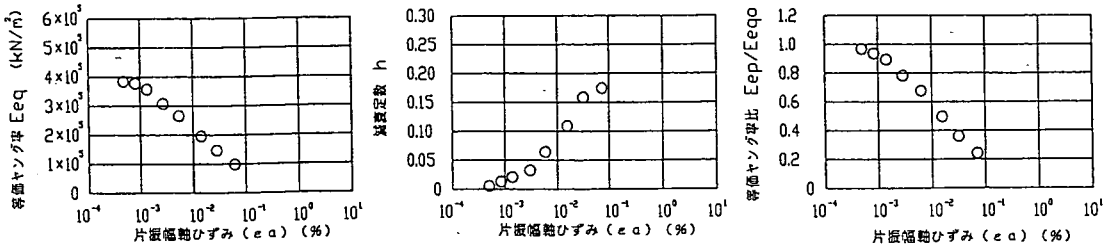
(ここでは、 $\nu = 0.3$ とした)

また、この試験に先立って、等価ヤング率の拘束圧依存性を調べるために等方圧密を行い、側圧 $\sigma_3$ を順次上げていった場合の等価ヤング率を求めた。その結果が図-4である。同図によると拘束圧を上げる毎に等価

表-1 盛土土質試験結果一覧

材料	粒度組成(%)				自然含水比(%)	締固め特性		三軸圧縮試験(CD)結果		湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )
	礫分	砂分	シルト分	粘土分		最適含水比 $W_{opt}$ (%)	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	ca(kN/m <sup>2</sup> )	$\phi_d$ (°)	
礫質土	44.5	43.1	8.7	3.7	9.8	12.0	1.914	9.8	35.03	1.996

(有効拘束圧: 147kN/m<sup>2</sup>)



(有効拘束圧: 392kN/m<sup>2</sup>)

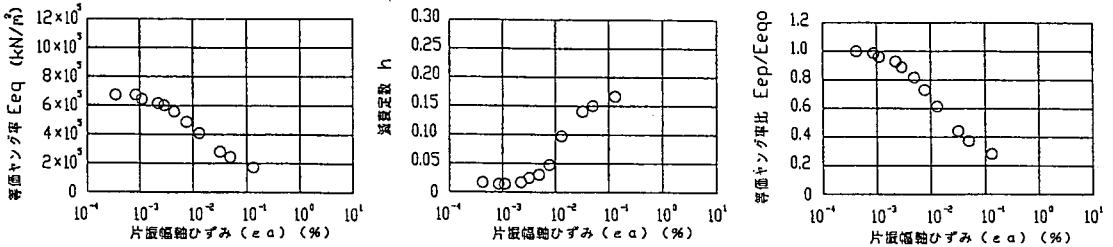


図-3 大型動的変形試験結果

(注) Eeqoの値は片振幅軸ひずみが10<sup>-4</sup>(%)での値である。

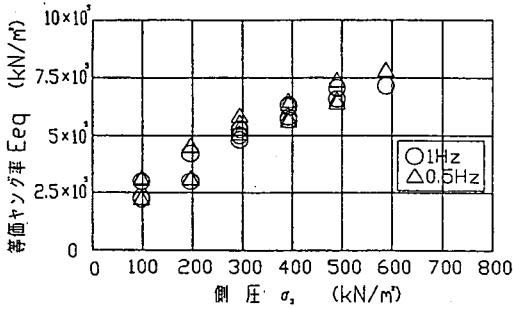


図-4 側圧と等価ヤング率との関係

ヤング率が大きくなっているのがわかる。盛土造成前の動的解析では、これらの試験結果より後述する図-13に示すように、べき乗近似によって以下の式を導き適用した。

$$G_m = 11300 \times (\sigma'_m)^{0.56} \quad (2)$$

$G_m$ : 初期せん断弾性係数

$\sigma'_m$ : 有効拘束圧

### (3) 盛土地盤特性

盛土が完成してより約0.5ヶ月経過後、地震の動的特性を評価するためにPS検層、S波トモグラフィー、高密度電気探査、常時微動測定を行った。

#### a) PS検層・S波トモグラフィー

##### (1) PS検層

図-1に示すB-1孔～B-6孔でPS検層を行った。表-2に各地層のP波およびS波速度を一覧表にして示す。また、図-5に一例としてB-6孔における調査結果を示す。これらによれば、S波速度が盛土の表層部(G.L～G.L-2～3m)においては、130～180m/secで

表-2 各地層の弾性波速度

地層名		弾性波速度(m/sec)	
		P波速度	S波速度
盛土	表層部(G.L～G.L-2～3m)	240～600	130～180
	G.L-2～3m以深	500～1500	230～350
改良土		570～1500	250～310
大阪層群		1100～1500	590～610

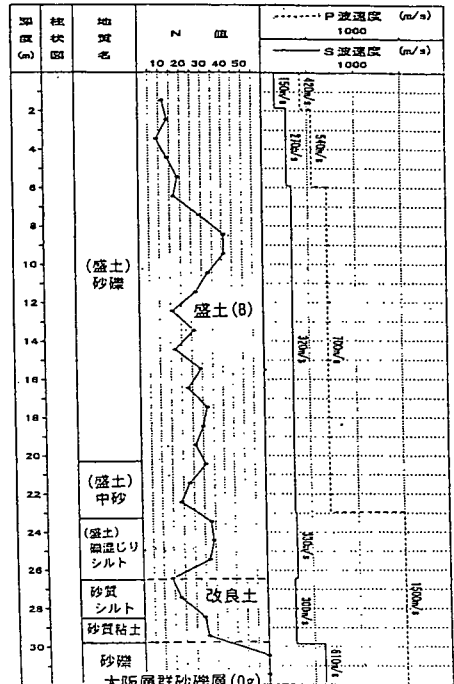


図-5 総合柱状図 (B-6孔)

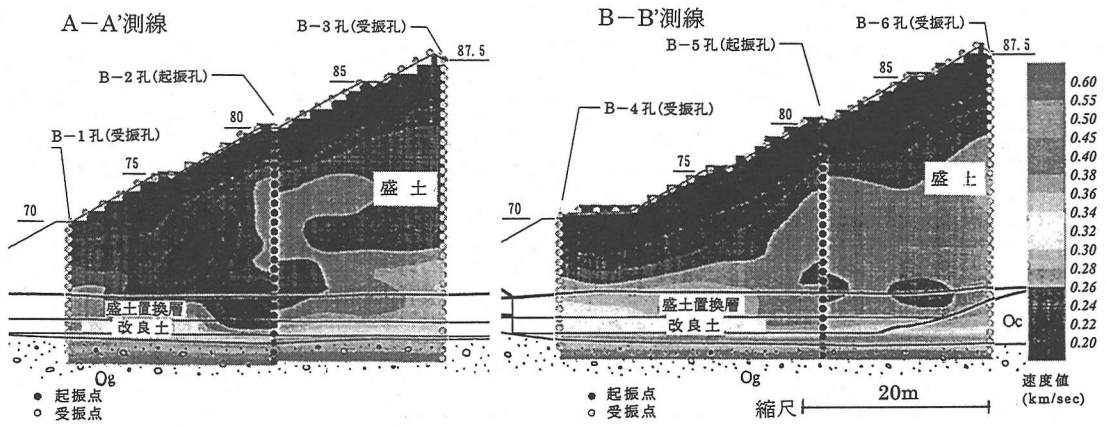


図-6 S波トモグラフィ結果

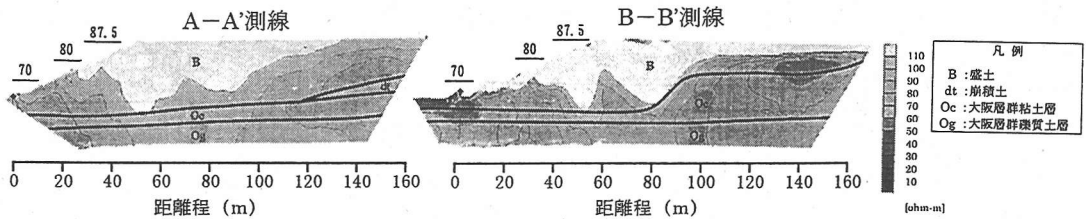


図-7 高密度電気探査結果

あるが、それ以深では礫質土主体のところでは270～350m/sec、細粒分を多く含むところで230～330m/secとなっている。一方、大阪層群のS波速度は590～610m/secと大きい値を示しており、工学的基盤面として取り扱うことができる地層と判定できる。沖積粘土を改良したところのS波速度は250～310m/secである。

表-2にはP波速度も示しているが、盛土内には地下水位が存在していなかったために、ほとんどのところで水のP波速度(1500m/sec)よりも小さい値を示すとともに、幅のある数値となっている。なお、ジオテキスタイル有無によるP波速度、S波速度の有意な差は認められていない。

(2) S波トモグラフィ

解析結果図を図-6に示す。それによると各測線における盛土地盤の特徴は以下の通りである。

(a) A-A'測線

S波速度は地表面よりG.L-3～5mまでは180～220m/secであるが、それより下部になると240～300m/secになっており、表層部に比べると速い速度となっている。ただ、図-6の断面左側盛土部に低速部が認められる。一方、盛土下部の大阪層群礫質土層は550～650m/secと大きい値を示している。

(b) B-B'測線

S波速度は、A-A'測線と同様に、表層部においては180～220m/secであるが、それより下部になると180～

300m/secになっている。この測線においても、盛土下部の大阪層群礫質土層は、550～650m/secと大きい値を示している。

S波トモグラフィで求められた速度値とPS検層によって得られた速度値とを比較すると、表層の低速度部がPS検層結果に比べて1～2m程度厚く出ているものの、それ以深では全体的に良く一致している。

図-6によると盛土体内部でS波速度分布の差が多少認められるが、分布の形状より推察すると、これらはジオテキスタイル有無による差異ではないと思われる。

b) 高密度電気探査

図-7にA-A'測線、B-B'測線の高密度電気探査の結果を示す。以下に各測線における測定結果の特徴を示す。

(1) A-A'測線

全体に地表から深度が深くなるにつれて比抵抗値が低くなっている。大局的には盛土部分の比抵抗値が高く、大阪層群の比抵抗値が低いという結果になっている。地盤が同じ材質であれば、飽和度が高いほど比抵抗値は低くなる。図-7において測線右側の盛土部分で比抵抗値の低い部分があるが、この部分は飽和度が高いものと推察される。

(2) B-B'測線

A-A'測線と同様に、測線全体にわたって地表から深度が深くなるにしたがって比抵抗値が低くなっている。

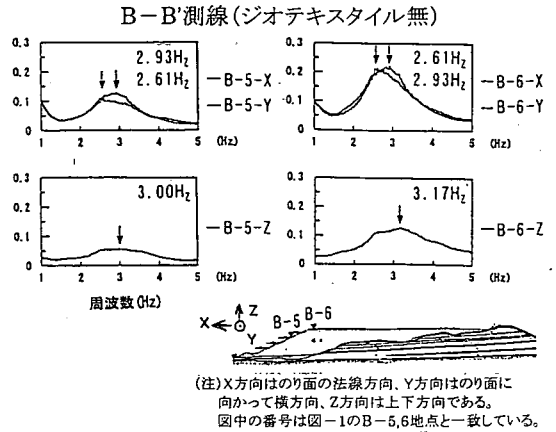
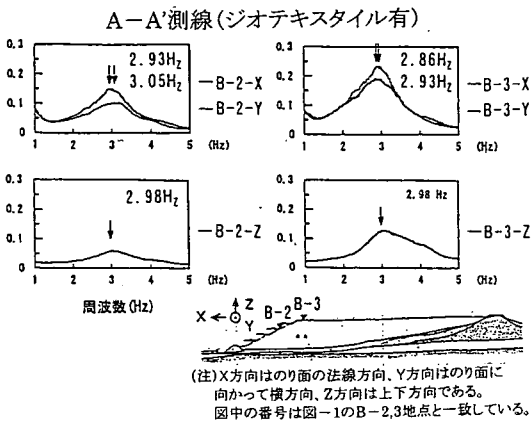


図-8 常時微動測定結果

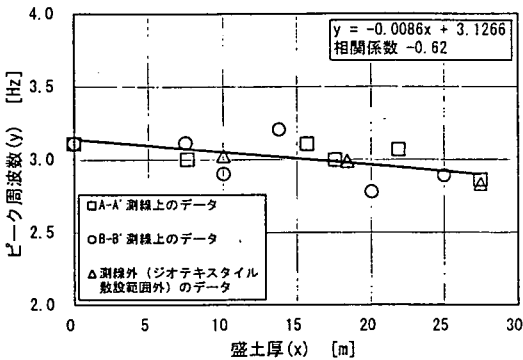


図-9 ピーク周波数と盛土厚の関係

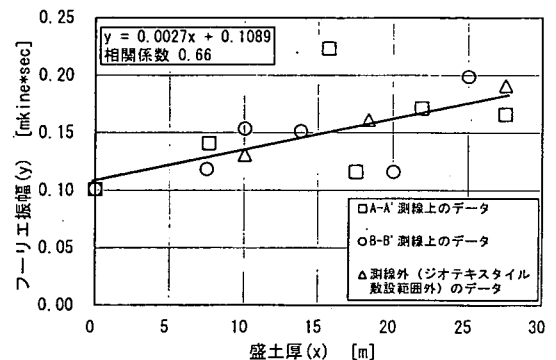


図-10 ピーク周波数のフーリエ振幅と盛土厚の関係

比抵抗値の低下割合はA-A'測線に比べて大きくなっている。大局的には盛土部分の比抵抗値が高く、大阪層群の比抵抗値が低いという結果になっている。図-7において距離程20～40m付近と測線後半の距離程120～180m付近では、G.L-5～10mで明瞭な比抵抗境界があり、地下水位が存在している可能性がある。

c) 常時微動測定

盛土地盤における振動特性を把握するために、常時微動の測定を行った。測定にあたっては、

- ① 盛土厚さの違いによる振動特性の違い
- ② 盛土の増幅特性
- ③ ジオテキスタイルの有無による振動特性の違い

を把握することを目的とした。

測定は図-8に示すように、のり肩を含む盛土上面、のり面の中段、のり尻部の地表面とのり肩孔中部の大阪層群中で行った。各観測点では水平動2成分(X:のり面直交方向, Y:のり面平行方向)および上下動1成分(Z)を測定した。測定された波形記録に対してスペクトル解析を行い、フーリエ振幅スペクトルを算出して地

盤の卓越周波数を求めた。あわせて、盛土完成後に測定されたPS検層結果を用いて、重複反射理論による各観測点での増幅率を求め、観測結果との比較を行った。

以下に測定・解析結果を示す。なお、スペクトルは周波数0～10Hzの範囲で計算したが、図-8では1～5Hzの結果を示す。

(1) 盛土厚さの違いによる振動特性の違い

図-8で見られるように、盛土地盤表面各地点のスペクトルは、水平動、上下動ともに3Hz付近にピークが見られる。特に水平動ではこの傾向が顕著である。図-9は盛土厚とピーク周波数との関係を示したものであるが、盛土厚さが厚くなるとピーク周波数が低くなる傾向が認められる。

図-8によると、卓越周波数における振幅では、A-A'測線、B-B'測線とも盛土厚の厚いのり肩部(図-8のB-3, B-6地点)では振幅が大きく、盛土厚が少し薄くなるB-2, B-5地点では、振幅がそれよりも少し小さくなっている。このことより、盛土厚さとフーリエ振幅

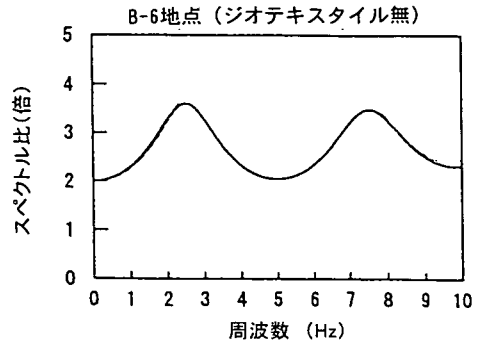
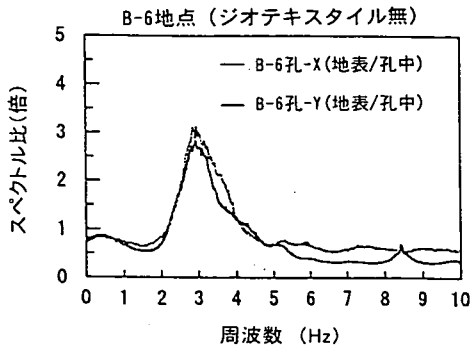
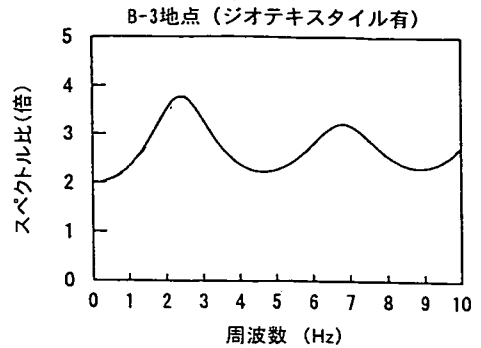
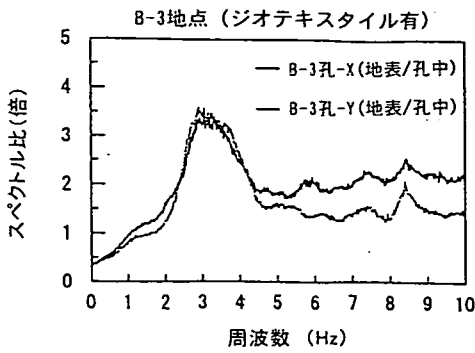


図-11 実測(地表/孔中)のスペクトル比

図-12 解析で得られた(地表/孔中)のスペクトル比

の関係を図-10にまとめたが、これによれば盛土厚が厚くなるとフーリエ振幅も大きくなる傾向が認められる。図-9, 10には回帰直線式も示しているが、両図における相関係数は-0.62と0.66である。

## (2) 盛土の増幅特性

のり肩部に位置するB-3, B-6地点ではボーリング孔が掘削されており、このボーリング孔を利用して孔底の大阪層群中と盛土地表面で同時測定を行った。孔中スペクトルに対する地表のスペクトル比を求めることで、盛土地盤での増幅特性を求めることができる。このようにして求めたスペクトル比を図-11に示す。同図より3Hz前後にピークの見られることがわかる。

一方、一次元重複反射理論より求めたスペクトル比を図-12に示す。解析にあたっては、B-3, B-6孔のPS検層結果より地盤物性を求めた。ここで、PS検層結果そのものがジオテキスタイルの有無を反映した結果であるので、解析モデルではジオテキスタイル材そのものを部材としては取り入れなかった。解析より求められたピーク値は、B-3, B-6地点とも3Hz付近と7~8Hz付近に認められ、増幅率も3~4である。一方、図-11に示すように観測値も3Hz付近にピークが認められ、振幅比も3程度であり両者はほぼ一致している。7~8Hz付近の増幅については、B-3地点で増幅比が大きくなっている傾向が認められているが、B-6地点ではそ

の傾向が認められていない。

## (3) ジオテキスタイル有無による振動特性の違い

A-A'測線ののり面にはジオテキスタイルが敷設されているが、B-B'測線には敷設されていない。図-8によると両測線のスペクトルには明瞭な差が認められていない。図-11によってもスペクトル比のピークを示す周波数は3Hz前後とほぼ一致しており、ピークスペクトル比も3前後と明瞭な差は認められていない。ただ、B-3地点では5~10Hzの領域でスペクトル比が2前後の値を示しているが、B-6地点では1以下となっている。一方、図-12に示す解析結果では両者ともほとんど同じ結果であり、ジオテキスタイル有無による差がほとんど認められていない。図-11と図-12より観測値と解析値との一致度ではB-3地点の方が高くなっている。後述する鳥取県西部地震時のスペクトル比(図-20)ではB-6地点近傍の地-1地点(ジオテキスタイル無)において、図-11のB-3地点に近い記録が得られている。これらのことより振動レベルが極めて小さい段階では高周波帯域でスペクトル比に差が認められるもの、振動レベルが少し大きくなるとジオテキスタイル有無による振動特性に差はないものと推察される。

## d) 盛土地盤の物性評価

ここでは、後述する動的解析にあたって、盛土地盤における物性値の評価を行う。

(1) 初期せん断弾性係数

(i) 盛土

等価線形解析法であるSuper FLUSH<sup>®</sup>においては、動的解析に先立って初期応力解析(線形弾性)を行い、そこで得られた有効拘束圧の分布からグループ分けして、式(3)より初期せん断弾性係数を設定する。

$$G_m = G_{ma} \cdot (\sigma'_m / \sigma'_{ma})^{mG} \quad (3)$$

ここに、

- $G_m$  : 初期せん断弾性係数
- $\sigma'_m$  : 有効拘束圧
- $G_{ma}$  :  $\sigma'_m = \sigma'_{ma}$ における初期せん断弾性係数
- $\sigma'_{ma}$  : 基準応力
- $mG$  : 有効拘束圧依存パラメータ

本研究においては、当初、土取場から採取した試料を用いて実施した室内土質試験結果より $G_{ma}$ 、 $\sigma'_{ma}$ 、 $mG$ を設定していた。その値は、 $G_{ma} = 11300 \text{ kN/m}^2$ 、 $\sigma'_{ma} = 98 \text{ kN/m}^2$ 、 $mG = 0.56$ であり、これらの値を用いて式(3)により初期せん断弾性係数を求めていた。

次に盛土造成完成後に行ったPS検層結果のS波速度から初期せん断弾性係数を求め、室内土質試験とあわせてプロットしたものを図-13に示す。ここで得られたPS検層結果は盛土高約25mまでには適用できるが、それよりも高い盛土地盤に対しては、結果を外挿することになり適用することができない。これを補うために、盛土材料から $\phi 300\text{mm} \times \text{H}120\text{mm}$ の供試体を作成し、有効拘束圧を98~588 $\text{kN/m}^2$ の6段階に変化させて等方圧密試験を行い、各段階での圧密終了後の微小ひずみレベルで動的変形試験を実施した。その結果も図-13に示す。これらのデータを加えて、べき乗近似をさせると以下の式となる。

$$G_m = 13700 \times (\sigma'_m)^{0.5} \quad (4)$$

当地区における盛土材料は、大阪層群の礫質土が主体の材料であるが、盛土材料が異なった場合に初期せん断弾性係数と有効拘束圧の関係がどの程度変わるのを見ることにする。比較データとしては、神戸層群の粘土質材料試験結果と井合<sup>3)</sup>がまとめた釧路空港で用いている釧路層群の礫質土と大楽毛類層の砂質土の混合材料結果を取り上げる。これらも図-13に示した。同図によると釧路空港では砂質土と礫質土との混合比を1:4としており、礫分の配合が多いことから初期せん断弾性係数が大きくなっている。一方、神戸層群の粘土質材料では、当地区における盛土材料の初期せん断弾性係数の5割程度となっている。

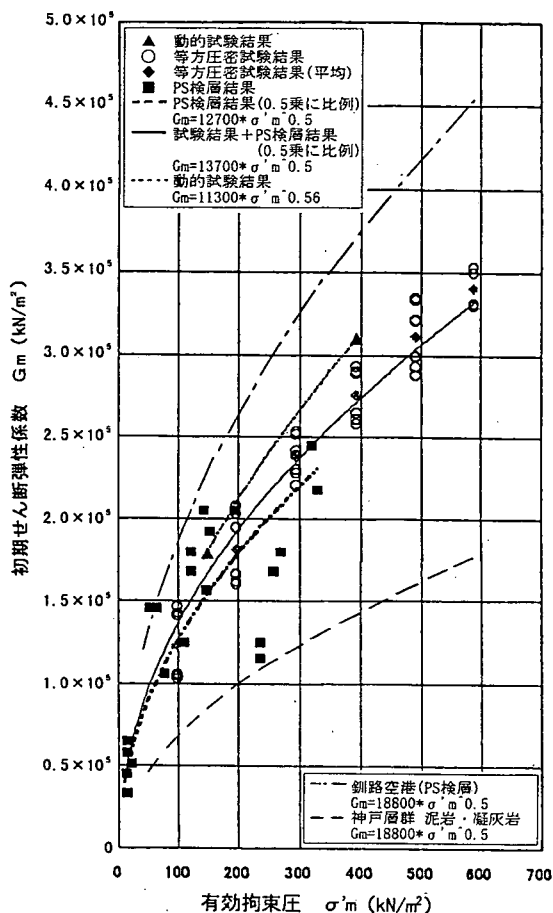


図-13 各種方法による初期せん断弾性係数と有効拘束圧の関係

(ii) 改良土

盛土下部に分布する沖積層の改良土については、盛土施工途中のボーリングにおいてサンプリングを実施し、この試料を用いた室内土質試験結果より物性値を設定した。試験結果から求めた初期せん断弾性係数は127400 $\text{kN/m}^2$ である。

(2) S波速度

(i) 盛土

a) 基準応力における比較

S波速度については、初期せん断弾性係数から次式を用いて求めることができる。

$$V_s = \sqrt{G_0 \cdot g / \rho} \quad (5)$$

ここに、

- $V_s$  : S波速度
- $G_0$  : 初期せん断弾性係数
- $\rho$  : 密度
- $g$  : 重力加速度

表-3 ソーニングした盛土の物性値

盛土ソーニング	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma'_m$ (kN/m <sup>2</sup> )	Go (kN/m <sup>2</sup> )	V <sub>s</sub> (m/s)
No.1	2.0	17	5290	165
No.2		49	97020	220
No.3		90	137200	260
No.4		139	176400	295
No.5		196	215600	325
No.6		262	245000	350
No.7		326	274400	375

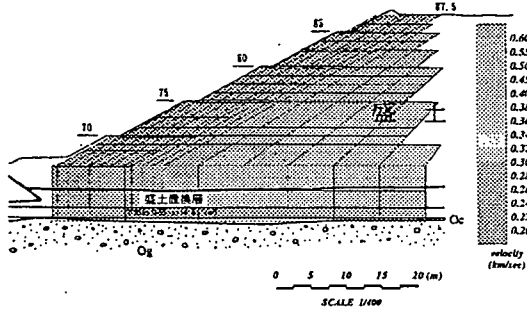


図-14 初期せん断弾性波係数より求めたS波速度分布

表-3に、後述する等価線形解析における盛土の物性値を、初期応力解析より7つ有効拘束圧グループに分けて設定したものを示す。それらの値と盛土完成後に実施したPS検層結果より得られたS波速度との比較を行った。

盛土は正規圧密土と考えられ、当該盛土地盤で得られている $\phi'$ の値であれば、既往の研究結果より静止土圧係数( $K_0$ )をほぼ0.5と見なすことができるので、 $K_0 = 0.5$ としてPS検層結果より $\sigma'_m = 98\text{kN/m}^2$ となる深度のS波速度を読みとると、B-1孔、B-2孔、B-3孔において、それぞれ $V_s = 270\text{m/s}$ 、 $300\text{m/s}$ 、 $280\text{m/s}$ となる。

一方、式(4)より基準応力 $\sigma'_{ma} = 98\text{kN/m}^2$ における初期せん断弾性係数を求めると $137200\text{kN/m}^2$ であり、これを式(5)に代入するとS波速度が $260\text{m/s}$ となる。同様に式(4)と式(5)を使って、各有効拘束圧( $\sigma'_m$ )より求めたS波速度を表-3に示す。

b) S波トモグラフィ結果との比較

S波トモグラフィで得られた結果は図-6に示す通りである。一方、A-A'測線について式(4)から初期せん断弾性係数を求め、式(5)よりS波速度に変換して分布を求めたものが図-14である。両者を比較すると、S波トモグラフィは盛土地盤の不均質性を示す分布があるものの、地表面で速度が遅く、深度が深くなるにつれて速度が速くなるという傾向を示しており、図-14に示し

た傾向と概ね対応している。また、速度値についても概ね20~40m/secの違い内に収まっている。

(ii) 改良土

盛土完成後に実施したPS検層結果では、B-1孔、B-2孔、B-3孔ともそれぞれ250m/s、250m/s、270m/sとなっている。S波トモグラフィ結果でも260~340m/sとなっている。一方、初期せん断弾性係数より式(5)を使って求めた値は、250m/sであり、PS検層結果、S波トモグラフィ結果と概ね一致している。ただ、S波トモグラフィの結果でS波速度が340m/s程度と若干大きい部分があることについては、改良土の厚さが1.5m程度と薄いことと、測定の最下部にあたっていることより、測定誤差が多少含まれ、このことによりS波速度値が大きく表われている可能性もある。

3. 鳥取県西部地震による観測波

(1) 地震動観測装置

当該盛土のり面における地震動増幅特性やそれを表現できる解析モデルならびに物性値を検討するために、当該のり面に地震計を設置して地震動の観測を行っている。地震計は、図-1、図-15に示すようにB-B'測線沿いの4ヶ所に設置した。図-16にはシステム構成の概念を示す。使用した地震計は、地表型感震器「FBA-23」3台および孔中地震計「FBA-23DH」1台である。孔中地震計にはフラックスゲート型磁力計からなる方位計も内蔵されており、設置時に正確な方位が確認できるものである。処理器としては、応用地震計測社製の「アルタスK2」を使用した。「アルタスK2」の特徴は、高分解能の24ビットA/D変換よりなり、遠隔操作も可能な多機能な地震計である。あわせて、GPSも内蔵しており、高精度な時刻を記録することができる。「アルタスK2」は、記録装置にメモリーカードを内蔵しているため、これに地震波形記録を貯めておき、必要な時にメモリーカードで回収する方法を採用した。なお、地震観測には電源が必要であるが、地震計近くに電源がなかったため、ソーラー電源システムにより電源を確保した。

(2) 地震の諸元と波形記録

当該盛土のり面については、平成12年10月6日に発生した鳥取県西部地震による波形記録を採取することができ、その波形記録に対して以下の処理を行った。

- ① 加速度波形の最大値を読みとる。
- ② 加速度波形より速度波形や変位波形を求める。
- ③ 気象庁計測震度を求める。
- ④ 応答スペクトルを積分したSI値を求める。



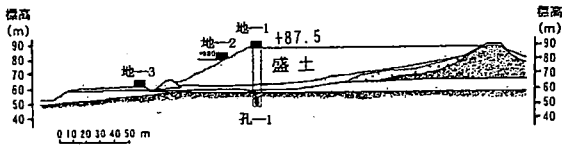


図-15 地震計の設置位置

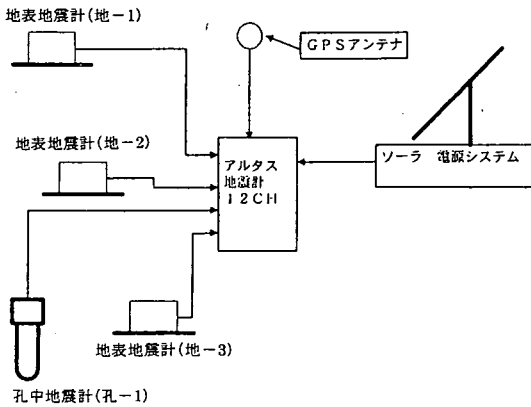


図-16 地震観測システム

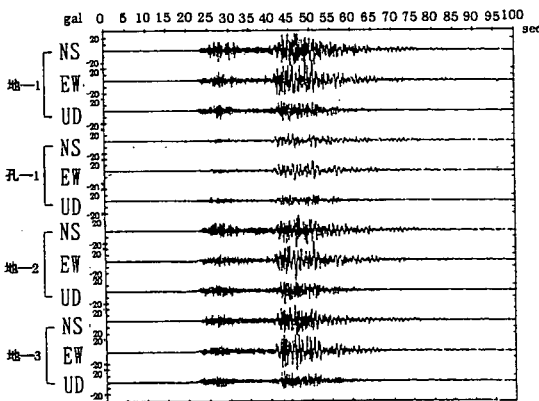


図-17 加速度波形記録

表-4 鳥取県西部地震のデータ一覧

位置	方向	最大加速度 (gal)	最大速度 (kine)	最大変位 (cm)
のり肩地表 (地-1)	NS	32.2	3.27	0.347
	EW	31.6	4.07	0.545
	UD	17.7	1.56	0.255
のり肩直下孔中部 (孔-1)	NS	12.7	2.11	0.316
	EW	16.5	2.85	0.486
	UD	10.0	1.42	0.232
のり中段地表 (地-2)	NS	27.7	2.82	0.336
	EW	33.4	3.72	0.564
	UD	24.3	1.56	0.246
のり尻地表 (地-3)	NS	25.3	2.30	0.315
	EW	31.2	3.16	0.565
	UD	17.2	1.23	0.239

表-5 スペクトルのピークに相当する卓越周波数

地震計設置箇所	成分	卓越周波数
のり肩地表	南北(NS)	0.9, 2.2, 3.8
	東西(EW)	0.9, 3.9
	上下(UD)	1.6, 3.9
のり肩直下孔中	南北(NS)	0.9, 3.9
	東西(EW)	0.9, 4.1
	上下(UD)	1.6, 3.9
のり中段地表	南北(NS)	0.9, 2.2, 3.8
	東西(EW)	0.9, 4.0
	上下(UD)	1.6, 4.1
のり尻地表	南北(NS)	0.9, 2.2
	東西(EW)	0.9
	上下(UD)	1.6, 3.9

応答スペクトルには、加速度、速度、変位スペクトルなどがあり、このうち、速度応答スペクトルは、地震動が構造物に与える最大のエネルギーを表わしている。通常の建物では、主要な周期が0.1秒～2.5秒間にあるので、この間のエネルギー総量を表わす積分値

$$I_h = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dT \quad (6)$$

をもって地震動の破壊力をあらわす1つの指標とし、これをスペクトル強度 (Spectrum Intensity (SI値))と呼んでいる。このSI値は盛土地盤上に存在する建物等の揺れを評価する上で重要な値であり、本論文においてもこの値を求めることとした。

表-4に鳥取県西部地震の観測概要と地震データ、図-17に加速度波形記録を示す。当該地で観測された加速度、速度、変位の最大値ならびに計測震度、SI値はそれぞれのり肩部で観測されており、その値は、33.4(gal), 4.07(kine), 0.565(cm), 3.6, 5.0である。

### (3) フーリエスペクトル特性

のり肩地表部、のり肩直下孔中部、のり中段地表部、のり尻地表部で得られた波形記録に対してフーリエスペクトルを計算したものの一例を図-18, 19に、これらのスペクトルピークに相当する卓越周波数をまとめたものを表-5に示す。

これらの結果からのり肩地表部、のり中段地表部、のり尻地表部での水平成分(NS, EW)卓越周波数は0.9Hz, 2.2Hz, 3.8～4.0Hzである。一方、上下成分(UD)の卓越周波数は1.6Hz, 3.9～4.1Hzである。

### (4) 盛土地盤における地震動増幅率

のり肩地表部とその直下孔中部で得られたフーリエスペクトル(図-18, 19)を用い、成分毎の比を取ることに

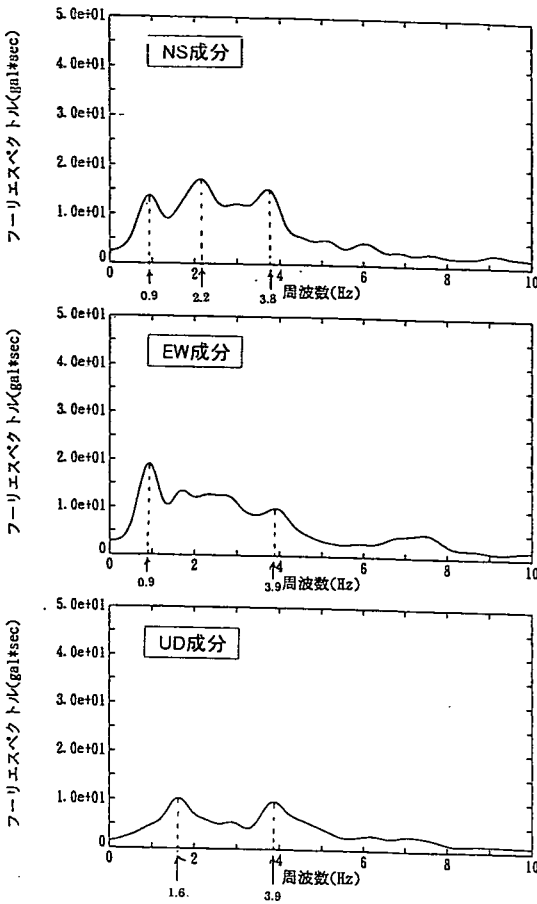


図-18 フーリエスペクトル(のり肩地表部)

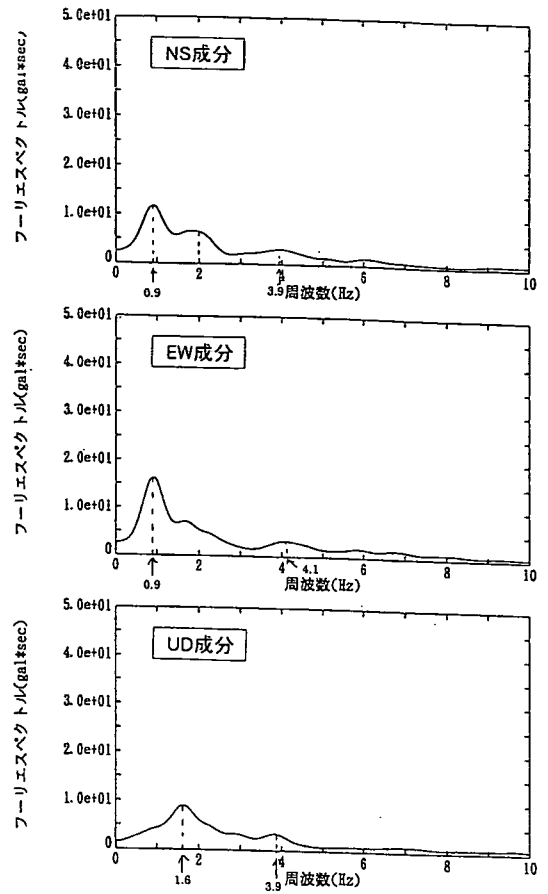


図-19 フーリエスペクトル(のり肩直下孔中部)

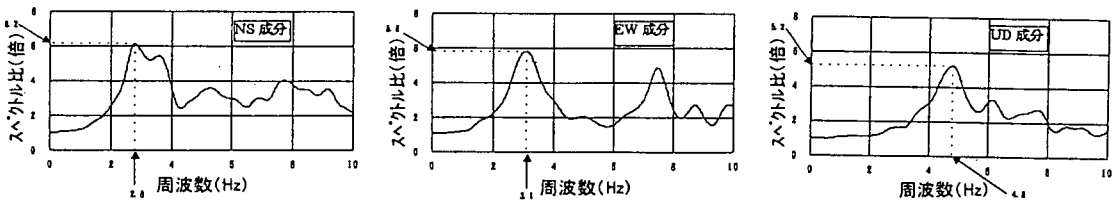


図-20 のり肩地表部と直下孔中部スペクトル比

表-6 スペクトル比が最大値となる卓越周波数

成分	最大値(倍)	卓越周波数(Hz)
南北(NS)	6.1	2.8
東西(EW)	5.8	3.1
上下(UD)	5.2	4.8

よって盛土の増幅率を計算した。NS成分比, EW成分比, UD成分比を取ったものを図-20に, また, これら

の比の最大値とその卓越周波数をまとめたものを表-6に示す。

この結果より, 盛土の増幅率は水平成分で約6倍, 上下動成分で約5倍である。卓越周波数はそれぞれ約3Hz, 約5Hzである

#### (5) 地震観測波と常時微動との比較

フーリエスペクトルならびにスペクトル比について, 鳥取県西部地震による地震動観測結果と常時微動測定

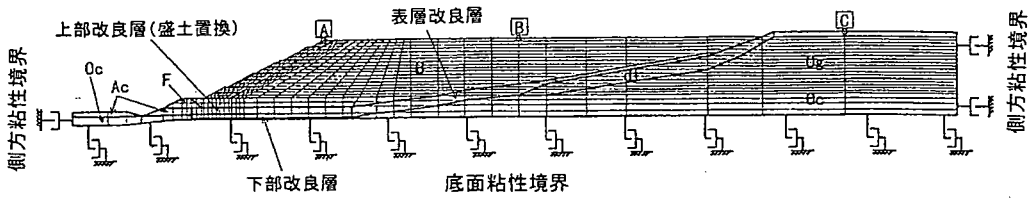


図-21 解析モデル(A-A'測線)

表-7 解析モデルの物性値一覧

	$\rho t$ ( $g/cm^3$ )	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	$c$ ( $kN/m^2$ )	$\nu$	$G_{ma}$ ( $kN/m^2$ )	$\sigma'_{ma}$ ( $kN/m^2$ )	$m_c$	$h_{max}$
盛土層 (B)	2.0	35	0	0.3	135240	98	0.56	0.185
既存堤 (F)	2.0	0	83.3	0.4	45080	—	0.0	0.151
既存堤下沖積粘土	1.8	0	39.2	0.4	51940	—	0.0	0.165
沖積粘土 (Ac)	1.8	0	19.6	0.4	25480	—	0.0	0.141
大阪層群粘土(Oc)	1.9	0	49.0	0.4	362600	—	0.0	0.154
大阪層群砂礫(Og)	2.0	40	0	0.3	147000	98	0.5	0.247
崖錐堆積物 (dt)	1.9	30	0	0.3	196000	98	0.5	0.255
盛土置換層	2.0	35	0	0.3	135240	98	0.5	0.185
改良土	1.8	0	142.1	0.4	127400	—	0.0	0.203
表層4m改良	1.8	0	68.6	0.4	65660	—	0.0	0.203
表層1m改良	1.8	0	68.6	0.4	65660	—	0.0	0.203
基盤層 (Og)	2.1	45	0	0.3	784000	—	—	—

ここに、

$G_{ma}$  : 基準有効拘束圧  $\sigma'_{ma}$  における初期せん断弾性係数

$m_c$  : 初期せん断弾性係数の有効拘束圧依存パラメータ

$h_{max}$  : 減衰定数の上限値

注1) 大阪層群粘土(Oc)は線形弾性体とする。

注2) 有効拘束圧依存性を考慮する層は、B層、Og層、dt層、盛土置換層とする。

注3) Oc層を除く粘性土層については、有効拘束圧依存性がないと仮定する。

結果とを比較した。なお、水平成分については鳥取県西部地震記録がNS, EW方向に地震計を設置した記録であるのに対して、常時微動のX, Y成分はのり面直交ならびに平行方向の記録である。両者の測定方向には30°の開きがあるが、図-8における水平2成分に大きな違いが認められず、図-18~20においても同様であるので、30°の測定方向差が有意な差にはならないものと考え、両者の比較を行った。

#### a) フーリエスペクトル

図-8と表-4、図-18とを比較すると鳥取県西部地震による地震動では南北(NS)成分、東西(EW)成分、上下動(UD)成分の卓越周波数はそれぞれ主に、0.9Hz、2.2Hzおよび3.8Hz付近、0.9Hzおよび4.0Hz付近、1.6Hzおよび4.0Hz付近であるのに対して、常時微動ではいずれも3Hz付近であり、低周波数における特性の異なることがわかった。これは鳥取県西部地震の震源が当該地点よりもかなり離れているのに対して、常時微動で測定されている振動が比較的近い位置より

発生していることによるものと思われる。

#### b) スペクトル比

図-11と図-20とを比較すると水平成分のスペクトル比はいずれも3Hz付近で最大ピーク値を示している。このことより、当該のり面における卓越周波数は3Hz付近にあるものと推察される。ただ、スペクトル比は地震動の方が少し大きい値を示している。

### 4. 動的解析波形と観測波形との比較

#### (1) 動的解析手法ならびに解析モデル

鳥取県西部地震時にのり肩直下の大阪層群中で観測された地震動波形を入力値として、のり肩、のり中央、のり尻で観測された地震動波形がどの程度再現できるかを検討した。解析にあたっては等価線形モデル(Super FLUSH)<sup>6)</sup>を使い、工学的基盤と見なせる大阪層群上面地盤にのり肩直下孔中の記録を入力地震

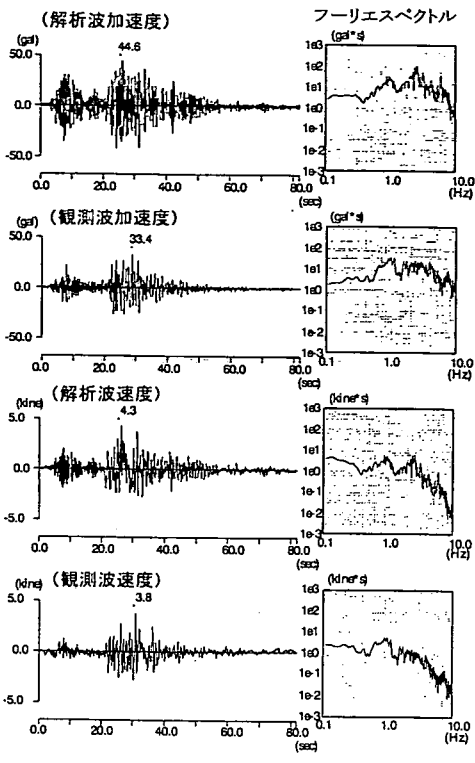


図-22 2次元解析結果の波形と観測波形の比較(のり肩)

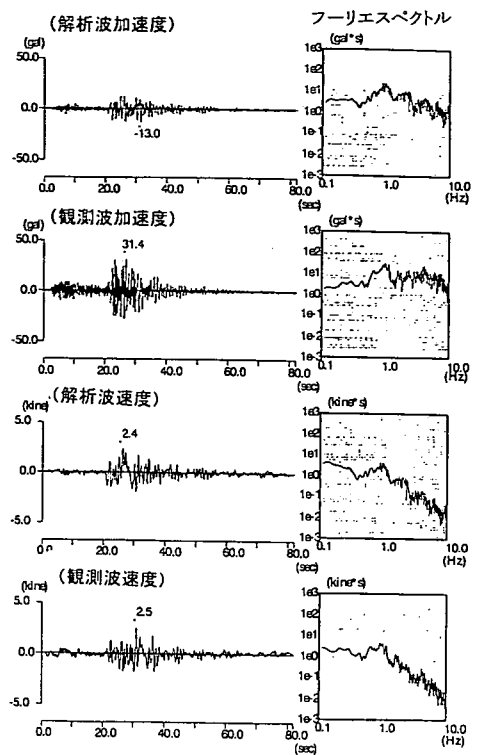


図-24 2次元解析結果の波形と観測波形の比較(のり尻)

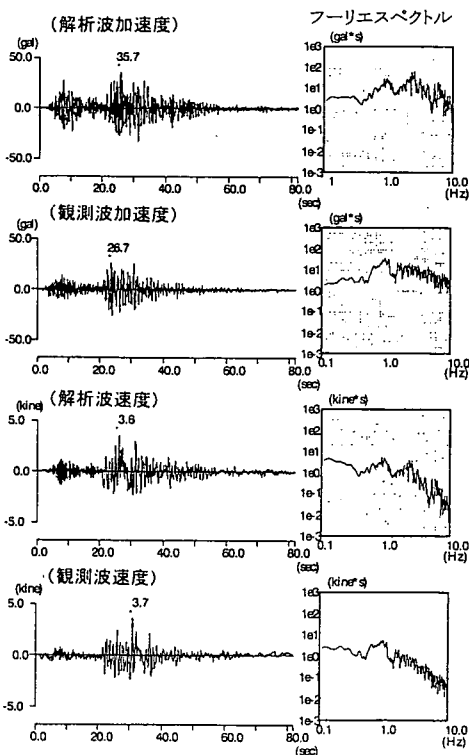


図-23 2次元解析結果の波形と観測波形の比較(のり中央)

動として入力させた。なお、解析にあたっては、以下のことを考慮した。

- ① 表-2より大阪層群のS波速度が590~610m/secと、一般的に解放基盤面と見なせる500m/secを上回っているので、解析モデルの底面は大阪層群上面に設定した。なお、モデルの設定にあたっては、底面を固定とした。
- ② 解析に用いる入力波は、のり肩直下孔中で観測された波形をローテーションして解析断面方向成分の波形を求めた。

当地区においては、盛土築堤前に盛土設計断面の地震時の安定性を検討するため、のり面直交方向の2次元断面に対して解析モデルを作成していた。図-21にその時の解析断面を示す。地盤の初期剛性率は盛土完成後に実施した各種調査結果より得られた値を用いることとした。それを表-7に示す。

## (2) 動的解析結果と観測値との比較検討

図-22~24に動的解析による波形と観測波形を並べて示す。同図では、上部に加速度波形、下部に速度波形を示し、右にはフーリエスペクトルを示している。これらより、特徴をまとめると以下ようになる。

- ① 加速度波形は、最大値に着目すると、のり肩で解析波形が観測波形の約1.3倍の大きさとなっており、

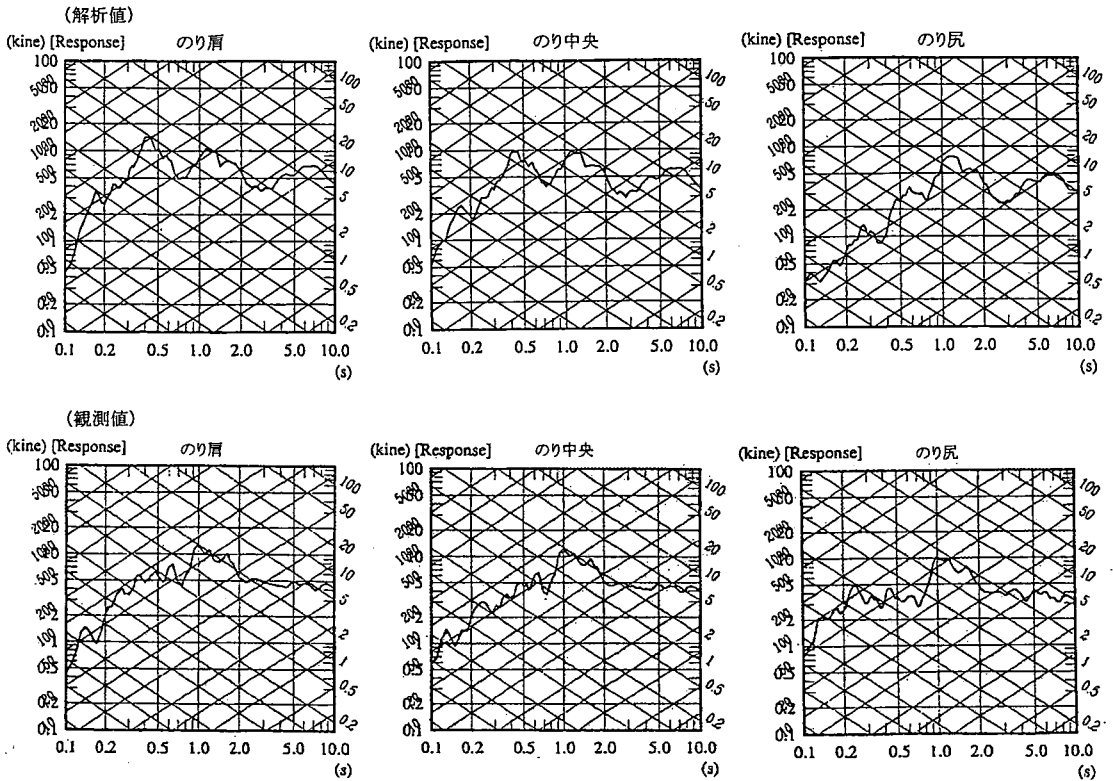


図-25 解析波形ならびに観測波形から求めた速度応答スペクトル ( $h=5\%$ ) の比較

のり中央でも約1.3倍、のり尻では逆に約0.4倍となっている。

- ② 速度波形は、どの地点においても観測波形と解析波形とは良い一致を示している。
- ③ 加速度フーリエスペクトルは、2Hz以下で観測波と解析波とが同じスペクトル形状を示している。2Hz以上では、のり肩およびのり中央の解析波が2.5Hz付近および6Hz付近にピークが出て観測波よりも大きくなっているのに対して、のり尻では観測波の方が大きい値を示している。
- ④ 速度フーリエスペクトルは両者がほぼ一致する傾向を見せている。

次に、図-25に速度応答スペクトル ( $h=5\%$ ) を示す。これによると各地点とも周期0.8秒以上では、解析値と観測値とがほぼ一致している。一方、周期0.8秒以下ではのり肩とのり中央において解析値の方が観測値よりも少し大きな速度応答スペクトル値を示しているのに対して、のり尻では観測値の方が少し大きな速度応答スペクトル値を示している。すなわち、短周期成分については、盛土上部になるにしたがって解析値の方が観測値よりも少し増幅度が高い結果となっている。

本論文では、鳥取県西部地震の観測波形を用いて

検討したが、他の地震波が作用した場合でも、盛土地盤における増幅特性については、概ね今回得られた結果に類似する可能性が高いものと推察される。この理由としては、鳥取県西部地震による増幅特性と常時微動の増幅特性とが類似していることが挙げられる。

## 5. まとめ

本論文で得られた結果をまとめると以下のようになる。

### (1) 盛土地盤特性

- ① 盛土完成後に実施したPS検層結果より、当該盛土地盤のS波速度は地表面よりGL-2~3mまでが130~180m/secであるものの、それ以深では270~350m/secであり、盛土地盤としては全体に大きい値を示している。盛土下部に存在する改良土では250~310m/sec、大阪層群では590~610m/secであり、大阪層群はS波速度が大きく、工学的基盤と見なせる地盤である。
- ② 盛土完成後に実施したPS検層結果とS波トモグラフィ結果とを比較すると表層の低速度部や内部の一部で一致しないところが認められるものの全

体としては良く一致している。

- ③ 高密度電気探査結果では、全体に地表から深度が深くなるにしたがって比抵抗値が低くなっている。盛土と大阪層群との比較では盛土の方が比抵抗値が高くなっている。
- ④ 施工に先立つ室内試験結果より得られた初期せん断弾性係数( $G_m$ )と有効拘束圧( $\sigma'_m$ )の関係は $G_m = 11300 \times (\sigma'_m)^{0.56} \text{ kN/m}^2$ であったが、盛土完成後に行ったPS検層結果を加えた評価では $G_m = 13700 \times (\sigma'_m)^{0.5} \text{ kN/m}^2$ である。
- ⑤ 常時微動測定結果では3Hz付近にピークが見られ、盛土厚が厚くなるとフリーエ振幅の大きくなる傾向が認められる。のり肩部の増幅度は水平成分スペクトルで約3倍であり、その時の卓越周波数は約3Hzである。
- ⑥ ジオテキスタイル敷設有無の差については、PS検層、S波トモグラフィーではほとんど差がなかった。ただ、常時微動測定結果において振動レベルの低い高周波帯域の増幅度に多少差が認められたが、鳥取県西部地震の記録等より、振動レベルがある程度大きくなるとほとんど差はないものと推察される。

## (2) 鳥取県西部地震による地震波形

- ① 鳥取県西部地震による地震動のフリーエスペクトルの水平成分(NS, EW)卓越周波数は0.9Hz, 2.2Hz, 3.8~4.0Hzである。一方、上下成分(UD)の卓越周波数は、1.6Hz, 3.9~4.1Hzである。
- ② のり肩部の増幅度は、水平成分スペクトルで約6倍、上下動成分で約5倍程度である。その時の卓越周波数は約3Hzと約5Hzである。

## (3) 地震波形記録と常時微動記録との比較

- ① フリーエスペクトルでは常時微動が3Hz付近に卓越周波数があるのに対して、鳥取県西部地震による地震動では3Hz以下の低周波数帯域においても卓越周波数が認められている。これの原因としては震源域の距離差が考えられる。
- ② 水平成分スペクトル比が最大ピークを示す周波数は、3Hz付近にあり、両者はほぼ一致している。ただ、スペクトル比は地震動の方が少し大きい値を示していた。

## (4) 動的解析波形と観測波形との比較検討

- ① 最大値で見ると加速度波形では少し違いが認められるが、速度波形では良い一致を示している。
- ② 加速度フリーエスペクトルは、2Hz以下ではほぼ同じ形状を示している。一方、2Hz以上では、のり肩、のり中央では解析波の方がピーク値が認められて少し大きい値を示しているのに対して、のり尻では逆に小さくなっている。

- ③ 速度フリーエスペクトルは両者がほぼ一致する傾向を見せている。
- ④ 速度応答スペクトルは解析値と観測値とが周期0.8秒以上ではほぼ一致している。一方、周期0.8秒以下ではのり肩とのり中央では解析値の方が少し大きな値を示しているのに対して、のり尻では観測値の方が大きな値を示している。

以上のことより、盛土地盤の地盤物性評価にあたっては、室内土質試験、PS検層、S波トモグラフィー、高密度電気探査などが有効な手法であり、これらの結果より地盤特性の評価を適切に行えば、盛土地盤における地震動増幅特性が動的解析によって適正に評価できることがわかった。あわせて、常時微動の測定が地震動増幅特性を調べる上で有効な手法であることがわかった。

謝辞：本論文をまとめるにあたって終始ご指導いただきました関係各位に厚く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)，(社)地盤工学会，pp. 315 - 322, 1996.
- 2) 沖村孝，二木幹夫，岡本敦，南部光広：兵庫県南部地震による宅地地盤被害と各種要因との関係分析，土木学会論文集，No.623/V I - 43，pp. 259 - 270, 1999.
- 3) 近藤司，吉村隆，竹脇尚信，清水勝美，田蔵隆，柳澤栄司：地震観測記録に基づく高盛土斜面の動的挙動の検討，地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集，(社)地盤工学会，pp. 225 - 230, 1989.
- 4) 井合進，一井康二，佐藤幸博，桑島隆一：高盛土の地震応答解析，第10回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 1557 - 1562, 1998.
- 5) 宅地防災研究全編集：宅地防災マニュアルの解説<改訂版>〔1〕，(株)ぎょうせい，pp. 7 - 89, pp. 119 - 133, 1998.
- 6) 構造計画研究所，地盤工学研究所：Super FLUSH/2D使用説明書，Ver.3, 1992.
- 7) 最上武雄他：土質力学，技報堂，pp. 555 - 556, 1969.

(2001.8.31受付)

EVALUATION OF PHYSICAL PROPERTY AND AMPLIFICATION  
DEGREE OF SEISMIC FREQUENCY ON HIGH BANK

Takashi OKIMURA, Mitsuhiro NAMBU, Hideaki SHINOHARA,  
Hidenori SAKURAI and Osamu MAEDA

The objective of the present paper is to investigate the dynamic property on the high bank. The physical and tremor property were investigated with the data of the various soil tests of the bank material, of PS logging etc., and the dynamic analysis with the observational seismic wave of Tottoriken Seibu Earthquake. As the result, the initial shear modulus calculated from secondary wave velocities roughly agreed with them got by the laboratory test, and the wave calculated by the dynamic analysis making use of these modulus roughly agreed with the observational wave very well. The amplification degree of the earthquake wave tended to agree with it of the micro-tremor.