

四国における表面波探査と常時微動特性による道路盛土と河川堤防の耐震性評価

愛媛建設コンサルタント 神野 邦彦
 愛媛大学大学院理工学研究科 森 伸一郎
 愛媛大学大学院理工学研究科 佐伯 嘉隆
 (現 パシフィックコンサルタンツ)

1. はじめに

四国地方では近い将来南海地震が発生すると想定されており、広範囲にわたる強い揺れによって、長い延長を有する河川堤防や道路盛土の崩壊が危惧されている。盛土堤体等の土構造物についての簡便な耐震性評価や危険箇所の抽出手法が望まれているにもかかわらず、道路盛土や河川堤防などの既存盛土の耐震性評価技術は、現状確立されているとは言いがたい。長大な延長を持ち、箇所数の多い盛土構造物に対して、効果的に（時間と手間をあまりかけることなく）危険箇所を抽出することができる技術の開発が求められている。

本研究では、常時微動測定や表面波探査などの現地測定に基づき、既存の盛土構造物の耐震性を簡易迅速に評価する手法を提案し、その評価手法の妥当性を検証するため実施した FEM による地震応答解析や、道路盛土と河川堤防への適用事例について考察する。

2. 評価手法の考え方

図-1 に想定した盛土構造物の耐震スクリーニングの流れを示す。対策技術の原理で、1次と2次の耐震性スクリーニング技術を想定し、耐震指標として、盛土の揺れやすさと盛土堤体・基礎地盤の強度に着目する。その内容は、基礎地盤と土構造物の振動特性を表す固有周期や増幅に関するパラメータと、それらの強度特性を表すせん断波速度に着目し、それぞれ常時微動測定と表面波探査による測定を行い、現地測定することにより振動特性と強度特性を把握する。

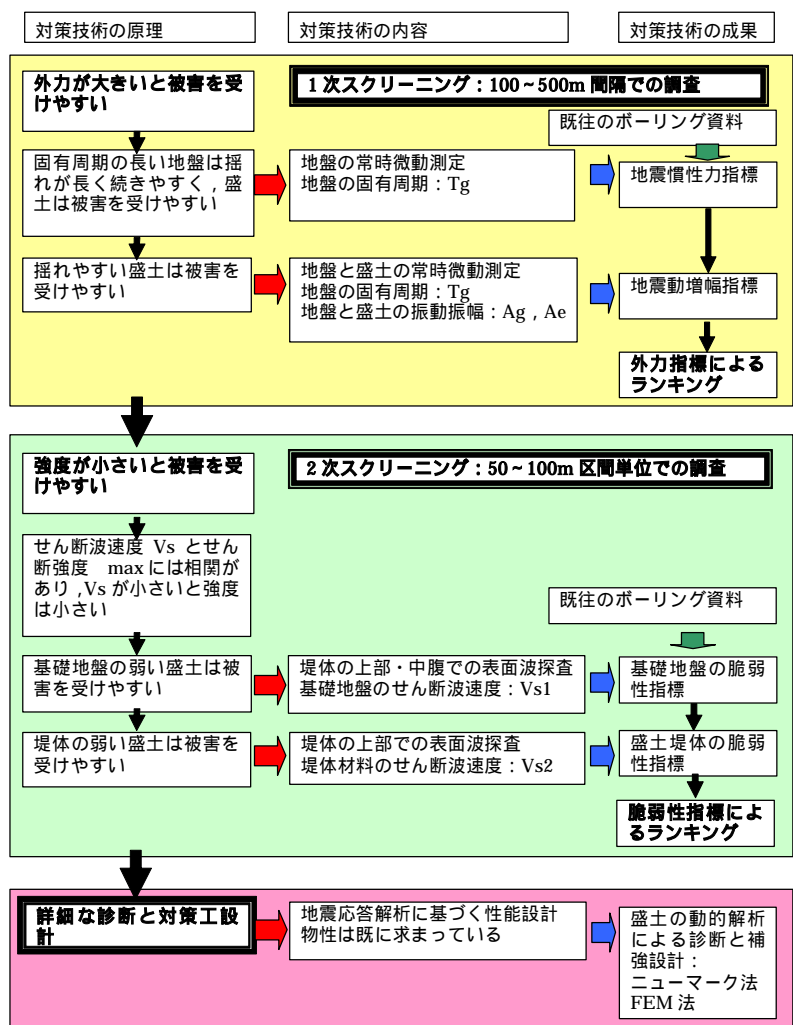


図-1 想定した盛土構造物の耐震スクリーニングの流れ

Evaluation on seismic vulnerability of highway embankment and river levee using surface wave exploration and microtremor measurement in Sikoku region, Kunihiko Kohno (Ehime Kensetsu Consultant), Shinichiro Mori (Ehime University) and Yoshitaka saeki (ditto)

堤体の振動特性は、固有周期（もしくは固有振動数）と自由地盤に対する相対増幅率で表現できる。これを自由地盤と堤体とで同時に常時微動測定を行い評価する。一方、堤体の強度特性は、堤体や基礎地盤のせん断波速度で関連付けられる。たとえば、せん断波速度が N 値と相関が高く回帰式に基づく経験式が多用されている。つまり、せん断波速度から N 値を逆算することができ、強度特性をこの原理に基づいて評価する。

また、堤体の振動特性が常時微動測定から評価できることを、FEM による地震応答解析によって評価・検証するものとする。表面波探査により測定・評価されたせん断波速度は、この動的解析に用いるべき代表的な材料物性として利用できる。このようにして実施される FEM 解析は、耐震スクリーニングの面から見れば、詳細な 2 次スクリーニング技術に相当する。

3. 研究開発の方法

3.1 現場の選定

研究開発に必要な実証のための現場は、構造物の種類と地盤の種別に着目し、構造物別に 2 種、地盤の主たる土質別に 2 種を考えて対象現場を選定する。具体的には、粘性土の卓越する高知自動車道と砂質土の卓越する徳島自動車道、また、徳島自動車道に平行する吉野川の河川堤防と那賀川水系の桑野川の河川堤防である。

3.2 FEM 解析

FEM による地震応答解析は、基盤に入力される地震動に対して自由地盤や盛土がどのように地震応答するか、すなわち、増幅や低減を示す振動特性を把握することができる。自由地盤の地表に対する盛土の法肩の相対的な増幅特性を盛土の揺れやすさをあらわすものとして考える。耐震設計の実務の観点からは、特定の地震波に対する最大応答の比率が重要であるが、地震波に関係なくシステムの特性としての伝達関数で評価する。FEM による周波数応答解析を行うコンピュータコード FLUSH を用いる。

対象として基盤 - 地盤 - 盛土堤体系を考える。地盤（表層地盤）でも、堤体の下方と堤体から離れたところでは、堤体の影響が異なる。特に堤体を上載圧とする圧密とそれに伴う剛性増加については、堤体下方で大きく、離れた場所では小さいと考えられる。そこで、堤体の法尻を通る鉛直面に挟まれた内部を堤体下部地盤と呼び、圧密の影響がある領域と考える。一方、その鉛直面より外側の地盤では堤体の影響は無視できるものとする。すなわち、基盤 - 表層地盤 - 堤体下部地盤 - 盛土堤体の 4 つの領域から成る系を想定し（図-2 (a)）、モデル化した。その目的は次の 2 つである。

[1] 増幅特性を決定づける要因の理論的検討

理想的な条件に対する基盤 - 表層地盤 - 堤体下部地盤 - 堤体の 4 つの領域から成る系の振動特性について検討して、相対増幅係数（図-2 (b)）を決定づけるパラメータについて検討する。

[2] 常時微動や表面波探査により実測された特性の理論的な検証

常時微動測定から得られた盛土の増幅特性や地盤に対する盛土の相対的な増幅特性が妥当かどうかを、表面波探査から求めた物性を用いて FEM 解析により得られた増幅特性に基づき検証する。

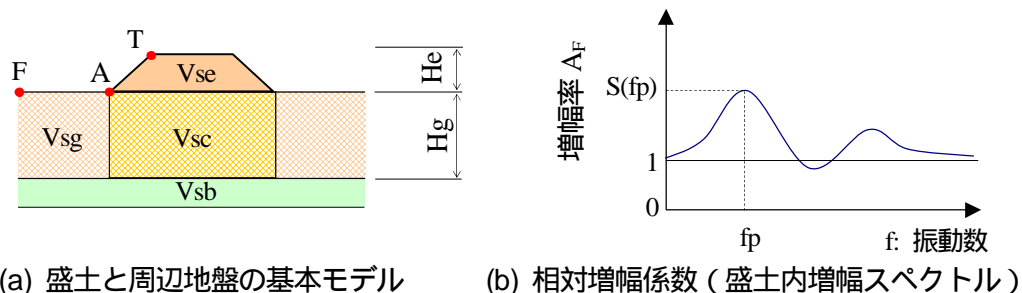


図-2 盛土と周辺地盤の基本モデルと盛土内増幅スペクトルの概念

3.3 常時微動測定の方法

常時微動測定で使用した測定機器は、収録装置 GEODAS、3成分地表用微動計 CR4.5 - 2S (いずれも物探サービス社製): 5 台である。センサーは動コイル式で、CR シャントレギュレーション方式により 4.5Hz の固有周波数を 0.5Hz (固有周期 2 秒) としたもので、感度は 1.0V/cm/s で内蔵アンプ使用、測定周波数は 0.5 ~ 20Hz である。センサーの寸法は、100 × 100 × 105 (mm) であり、重さは約 1.2kg である。速度記録を、サンプリング周波数 100Hz で、25Hz のローパスフィルターを通し、24bit の AD 変換の後、デジタル収録する。速度を 300 秒間(データは 30,000 個)測定しており、2,048 個 (20.48 秒間) の連続データを 1 セグメントとしてフーリエ変換する。14 セグメントが取り出しうるが、通行車両の影響などノイズの少ない部分に限定して、共通して 8 セグメント (16,384 個) 分を抽出して、アベレーシング (平均化) による平滑化を行った。その後、スペクトルやスペクトル比はバンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウ処理を施した。ただし、処理による見かけのピークに間違えないよう生の (ウィンドウ処理を行わない) スペクトルにも注意した。

3.4 表面波探査の方法

表面波探査とは、地表付近を伝わる表面波の分散性を利用し、これを逆解析することで地下構造を探査する方法である。表面波探査には、多チャンネル地震探査装置 McSEIS-SXW (応用地質社製) を用い、4.5 Hz の受信器を 24 個使用し、その設置間隔を 2.0m としたので固定した測線長は約 50m となる。測線上にセンサーを配置して、かけやによる打撃で表面波を発生させた。深度 20m 程度までの地盤の一次元 S 波速度構造を密に得て、それらを基に 2 次元の等値線図を描くことができる。

表面波探査は、常時微動測定による地盤や盛土の振動特性を合理的に解釈することと、その解釈の検証を目的とした FEM 解析のモデル化のため、S 波速度構造を求めることが目的である。そのため、本研究では、盛土堤体、周辺地盤、堤体直下部の各領域の S 波速度を求める。

図-3 に常時微動測定と表面波探査の測線設定の原則を示す。常時微動測定の測点配置と併せて相互関係を示している。盛土天端や盛土小段での測定では、盛土直下の地盤のせん断波速度を得ることができるので、盛土载荷による地盤の剛性増加の有無を把握することを意図している。

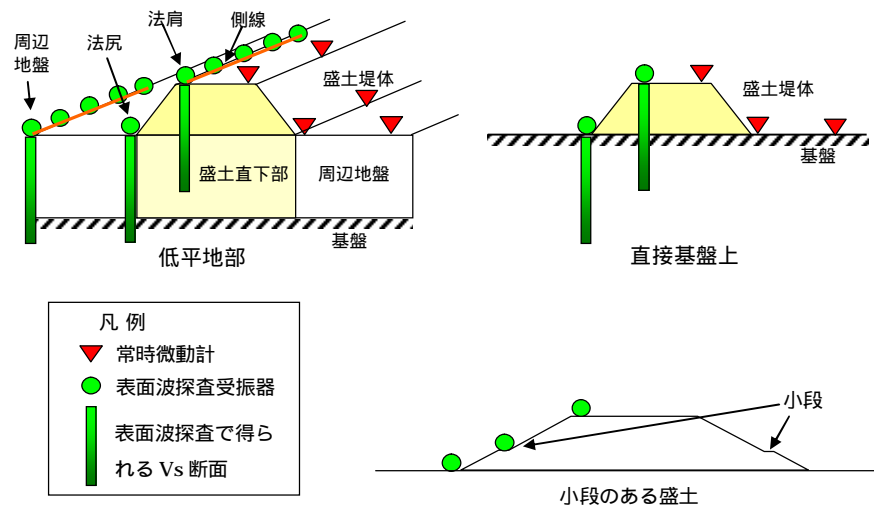


図-3 常時微動測定と表面波探査の測線設定の原則

4. 解析と現場測定の結果

4.1 FEM によるパラメータ解析

解析モデルは、高速道路の盛土の幾何形状と寸法を参考にし、高知知のある区間の断面を採用した。図-4 に解析モデルを示す。盛土形状は、盛土幅 (法尻幅) を 60m、盛土高を 9m、のり面勾配を 1:2 に設定した。盛土周辺の表層地盤の層厚は 20m とし、その下に基盤層の上部 5m を加えたものを有限要素領域としてモデル化し、モデルの水平方向の幅は盛土幅の 3 倍である 180m の範囲とした。モデル領域は、盛土堤体 (e)、堤体下部 (c)、周辺表装地盤 (g) および基盤 (b) の 4 つの領域に分け、地盤のせん断波速度 (V_s) は、それぞれの領域で均質と仮定して設定する。表層と基

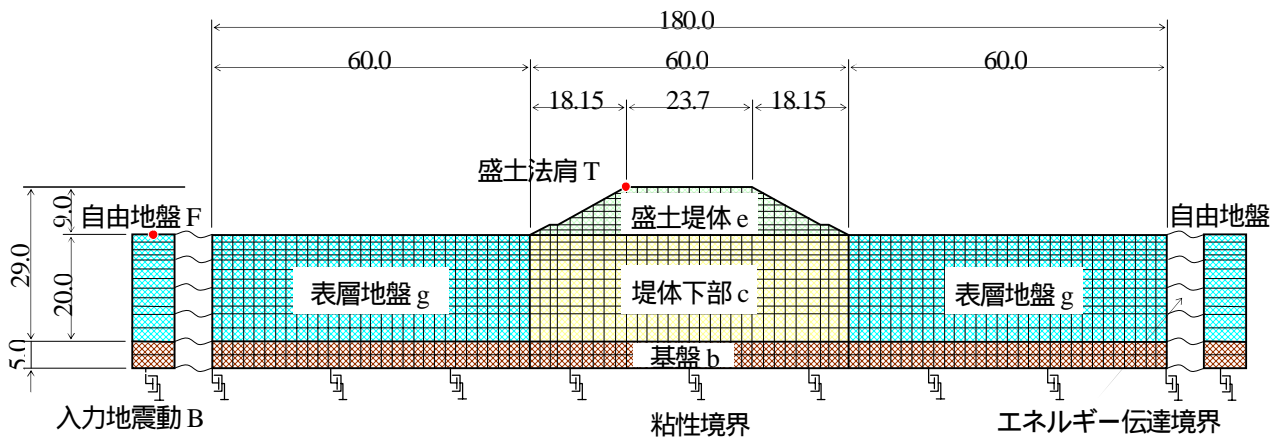


図-4 盛土構造物の解析モデル (単位:m)

盤上部を合わせた層厚 25m の有限要素モデルの下端境界は、基盤物性から評価される 2 次元ダッシュポットとしてモデル化される粘性境界である。また、側方はエネルギー伝達境界である。

3.2 節で前述したように、解析の目的は、[1]増幅特性を決定づける要因の理論的検討と[2]常時微動や表面波探査により実測された特性の理論的な検証である。そこで、解析ケースは次の 3 つの場合についてパラメトリックに検討し、相対的な増幅特性との関わりを考察する。

- (a) 4 領域が均質な場合
(インピーダンス比が 1)
($V_{se}=V_{sc}=V_{sg}=V_{sb}$)
- (b) 基盤以外が均質な場合
($V_{se}=V_{sc}=V_{sg} \neq V_{sb}$)
- (c) 盛土堤体下方地盤 V_s が変化する場合
(V_{se} と V_{sg} は固定)

表-1 に FEM の解析ケースを示す。水平基盤上に一定層厚の均質表層がある地盤 (2 層系地盤) の上に表層と同じ物性の盛土堤体があるという均質表層-堤体系を基本ケースと考え、これを「均質モデル」と呼ぶ。また、現実的な状況を考慮し、表層、基盤、堤体、堤体下部の 4 つの領域内では均質だが領域ごとに V_s が異なる場合を想定し、これを「域別モデル」と呼ぶ。域別モデルでは、高速道路盛土を想定し、2 つの高速道路で盛土堤体の V_s が概ね一定で、 $V_{se}=300$ m/s 程度であることから、盛土堤体の V_s を 300 m/s 一定とする。また、表層地盤を 150 m/s と固定する一方、基盤を 300 m/s (砂礫層想定) と 600 m/s (丘陵地軟岩想定) の 2 ケースを考えるものとし、堤体下部のせん断波速度は、圧密による剛性増加や地盤改良の

表-1 FEM の解析ケース

解析ケース	盛土堤体 V_{se}	堤体下部 V_{sc}	表層地盤 V_{sg}	基盤 V_{sb}	
均質モデル	a150A	150	150	150	
	a150B	150	150	300	
	a150C	150	150	600	
	a300A	300	300	300	150
	a300B	300	300	300	300
	a300C	300	300	300	600
	a600A	600	600	600	150
	a600B	600	600	600	300
	a600C	600	600	600	600
域別モデル	c150B	300	150	150	300
	c180B	300	180	150	300
	c225B	300	225	150	300
	c300B	300	300	150	300
	c450B	300	450	150	300
	c600B	300	600	150	300
	c150C	300	150	150	600
	c180C	300	180	150	600
	c225C	300	225	150	600
	c300C	300	300	150	600
	c450C	300	450	150	600
	c600C	300	600	150	600

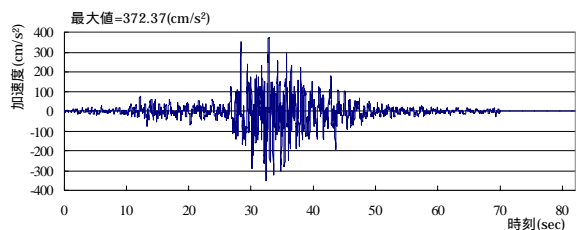


図-5 入力地震動の加速度時刻歴

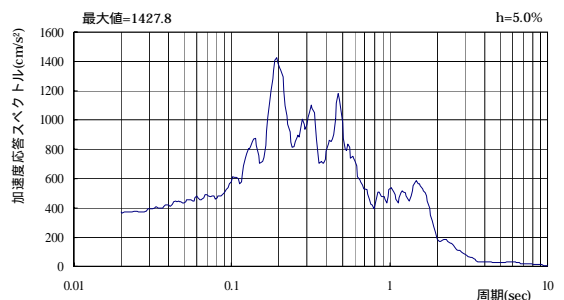


図-6 入力地震動の加速度応答スペクトル (減衰定数: 5%)

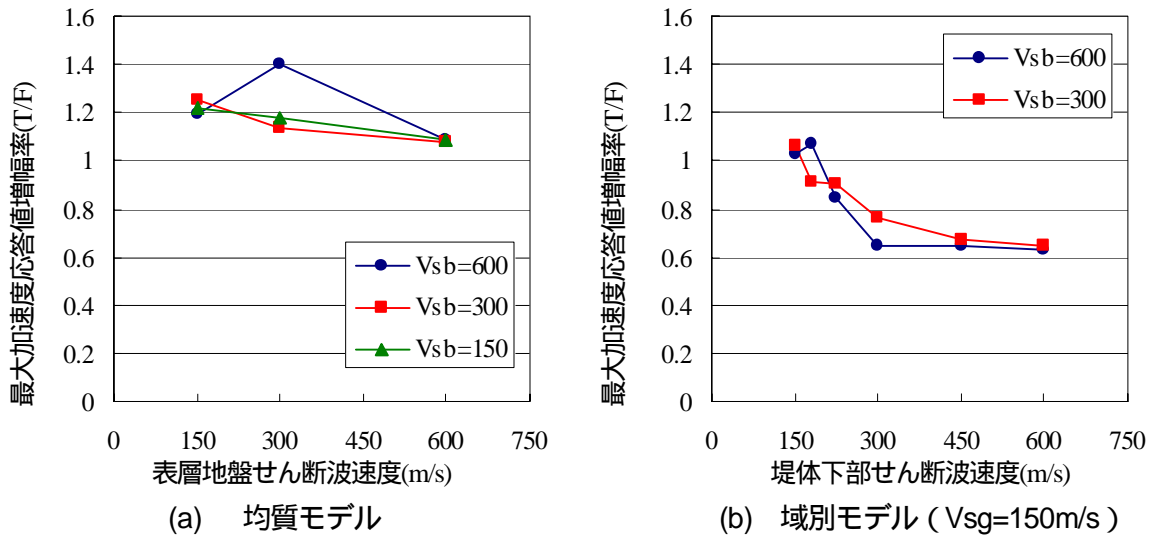


図-7 法肩における最大加速度の増幅率 (T/F)

効果やそれらの効果を無視した場合を想定して、150～600 m/s に設定した。

粘性境界を介して基盤に入射する入力地震動は、中央防災会議が公開している地震動のうち、南海地震を想定して計算された高知道の工学的基盤面における地震動をそのまま用いるものとする。図-5 に地震動の加速度波形を、図-6 にその加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を示す。

図-7 に(a)均質モデルと(b)域別モデル (V_{sg}=150m/s)の自由地盤地表に対する盛土法肩の最大加速度の増幅率を示す。均質モデルでは、相対増幅率が、40%も増大している V_{sb}=600, V_{sg}=300 の場合を除いて 10～20%増大している。それに対して、域別モデルでは、V_{sc}>V_{sg} の場合は V_{sg}/V_{sb} が 0.25 で V_{sc}=180 の場合を除き、ほとんどで相対増幅率 A_{TF} は 1 を下回っている。特に V_{sc} が 300m/s 以上で最大加速度が約 30%低減している。V_{sc}=150 のケースは、均質モデルに比べて堤体が V_{se}=300 に変わったただけなので、堤体だけの影響を表している。相対増幅率が 1.25 から 1.06 に変化しており、堤体の剛性増加は盛土内増幅を 1.06/1.25=0.85 倍に低減する効果があることがわかる。このことから、前述の 1 を下回る相対増幅率は、堤体の剛性増加に加えて、堤体下部地盤の剛性増加が寄与していることが明白である。

次に、自由地盤地表で地震動が与えられた場合を評価するものとして、自由地盤地表に対する盛土法肩の相対的な増幅特性を表す伝達関数比を検討する。図-8 に(a)均質モデル (V_{sb} が変化) と (b) 域別モデル (V_{sb}=300m/s, V_{sc} が変化) の相対増幅特性を示す。均質モデルの場合、概ね焦点となる全振動数範囲で増幅率が 1 以上となる。特に、盛土の 1 次、2 次、3 次に対応する部分で増幅し、その

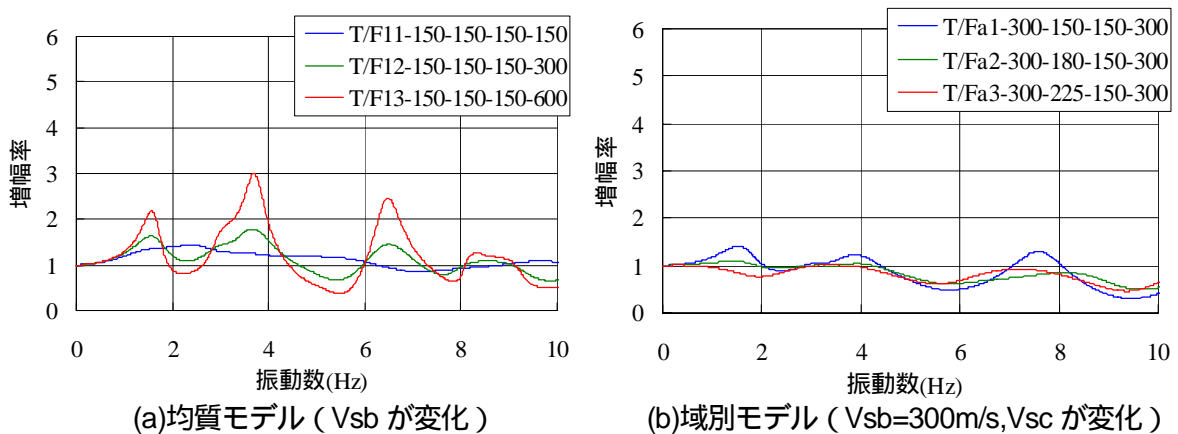


図-8 自由地盤地表に対する盛土法肩の相対増幅係数 (FLUSH による解)

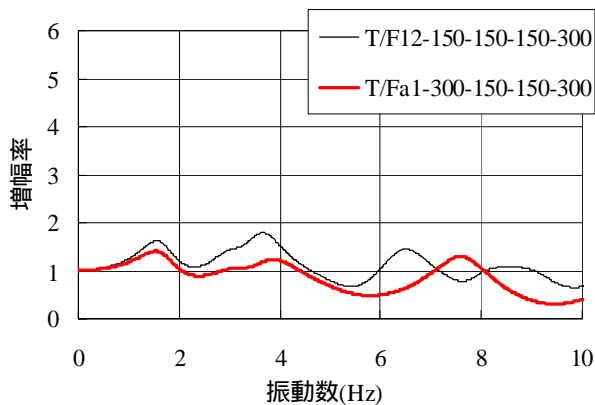


図-9 堤体剛性増加の振動低減効果
(表層 $V_{sg}=150$ 、基盤 $V_{sb}=300$ で堤体 V_{se} が 150 と 300 の場合の比較)

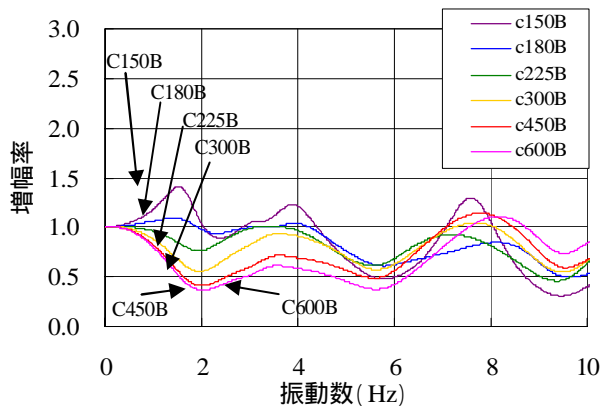


図-10 相対増幅係数スペクトルに見られる堤体下部地盤の剛性増加の振動低減効果
(表層 $V_{sg}=150$ 、基盤 $V_{sb}=300$ 、堤体 V_{se} が 300 の場合)

増幅率はインピーダンス比に依存し、工学的基盤の V_s が 300m/s であれば、ピークで 1.7 倍程度である。このことから、図-7(a)で示した均質モデルにおける最大加速度の相対増幅は増幅係数スペクトルの面から理解することができる。一方、堤体のせん断剛性が $V_{se}=300$ m/s の場合、ピーク高さは小さくなり、堤体剛性増加には振動低減効果があることがわかる。これが、図-7(b)で示した最大加速度の低減効果をメカニズムの面から理解することができる。

図-9 に表層地盤が 150m/s で堤体の V_{se} のみが違う 2 ケースを抽出して比較したものを示す。7-8Hz で逆転しているところもあるが、高振動数ほど低減されている様子が明瞭に見られ、堤体の剛性増加による振動低減効果がよくわかる。

図-10 に $V_{sg}=150$ 、 $V_{sb}=300$ 、 $V_{se}=300$ m/s の場合についての相対増幅特性を堤体下部地盤のせん断波速度 V_{sc} が連続的に変化する場合の相対増幅係数スペクトルを示す。相対増幅係数では、 V_{sc} が 150 と 180 の場合には盛土の 1 次卓越振動数付近にピークがあり、 V_{sc} が大きいほどその振幅が小さくなり、やがて 1 より小さくなり、 V_{sc} が 225 以上では地盤の 1 次卓越振動数に相当する 2Hz 付近にディップが現れる。すなわち、相対増幅係数の場合、自由地盤地表に対する盛土法肩の伝達関数比であるので、相互作用を無視すれば次元でも概要は把握できる可能性がある。

図-11 に最大加速度応答の比と相対増幅係数の 1 次ピーク値の関係を示す。概略の傾向を把握できるに過ぎないが、単なる相関関係ではなくある程度の因果関係があるので回帰式は概略推定式と見なすこともできる。

4.2 現場測定の目的と測定結果の検討方法

現場測定では、常時微動測定と表面波探査を行い、既に述べたように前者の常時微動測定は盛土および周辺の自由地盤の振動特性を把握するとともに自由地盤地表に対する盛土堤体の相対的増幅特性を実測により明らかにすることである。

測定結果の検討は、盛土そのものと自由地盤の振動特性では卓越振動数の検出であり、さらに、主に水平動について自由地盤に対する盛土堤体の相対増幅特性に着目して行う。

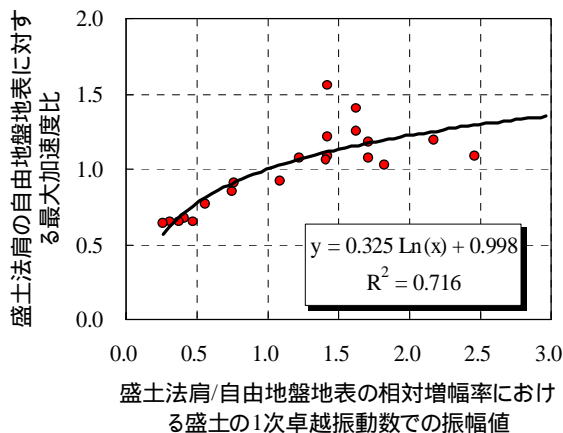


図-11 自由地盤に対する盛土法肩の相対的増幅における最大加速度応答の比と相対増幅係数の 1 次ピーク値の関係

4.3 高知自動車道の道路盛土

測定対象区間は高知自動車道 伊野 I.C. から須崎東 I.C. までの約 10 km の軟弱地盤地帯の盛土を対象に、44 地点において盛土法肩、盛土法尻の 2 箇所、そのうち 8 地点において自由地盤を加えた 3 箇所において常時微動を測定した。この区間は軟弱地盤と丘陵地が交互に現れており、軟弱地盤は N 値が非常に小さい粘土層が卓越しており、丘陵地はほぼ砂岩で構成されている。

図-12 には(a)盛土法肩と(b)地盤の H/V スペクトル比と(c)地盤に対する盛土法肩の水平動のスペクトル比 H/H を示す¹⁾。(a)(b)ではそれぞれの 1 次卓越振動数が明瞭で前者が後者より僅かに低いのがわかる。水平動のスペクトル比 (盛土法肩/自由地盤) にすると不鮮明ではあるが、盛土の 1 次卓越振動数 (2.5Hz) 付近にピークがあり、地盤の卓越振動数 (3Hz) 付近では小さくなる。

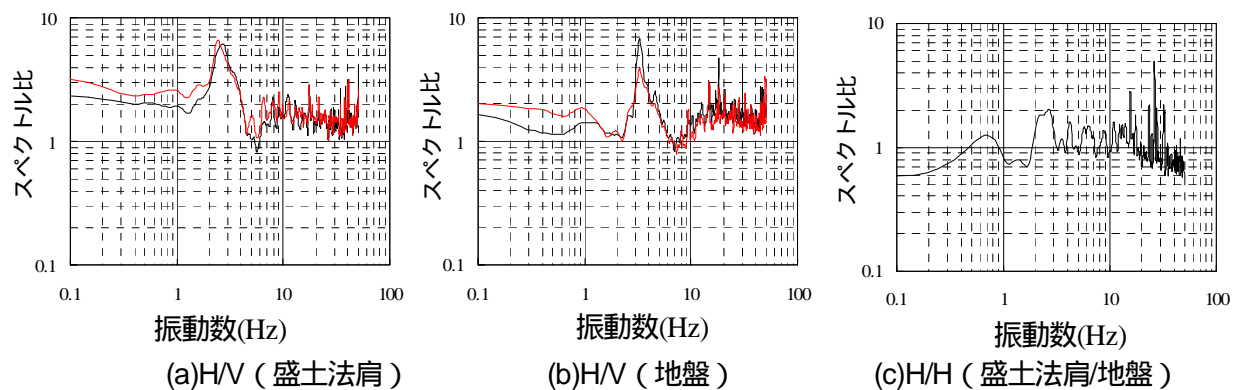


図-12 高知自動車道盛土における常時微動のスペクトル比(140.450KP)

図-13 には、盛土法肩、盛土法尻、自由地盤で行った表面波探査の結果より得られた平均化 S 波速度分布を示す^{2),3)}。深さ 3m 程度から 12m までは N 値 4 以下の軟弱なシルト質粘土が堆積しており、測定されたせん断波速度も 200m/s を下回り軟弱な地盤の様子がわかる。ほぼ水平成層状態の地盤であるにもかかわらず、拘束圧の大きい順にせん断波速度が大きい様子がわかる。また、堤体は Vs が 320m/s でほぼ一定であった。これらのことから、堤体のせん断波速度は周辺地盤よりも大きく、また、堤体下の地盤はもともと同じ土質でありながら、拘束圧の増加によりせん断波速度が増大していることがわかる。

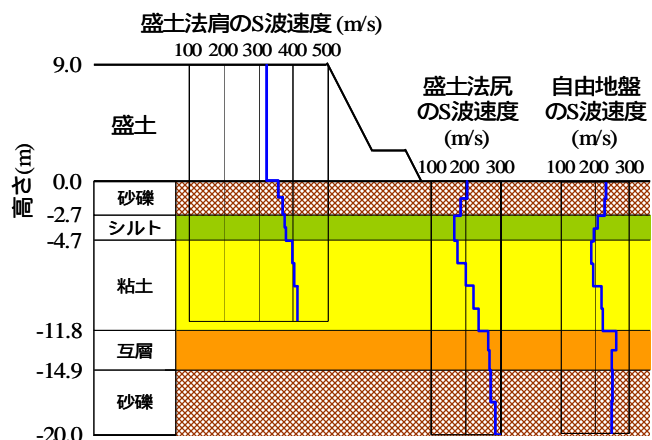
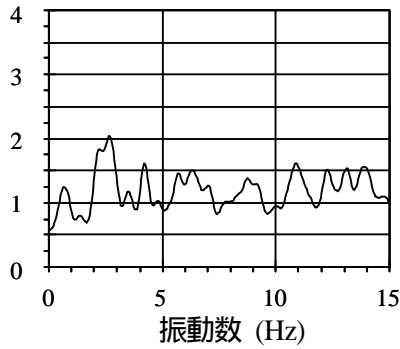
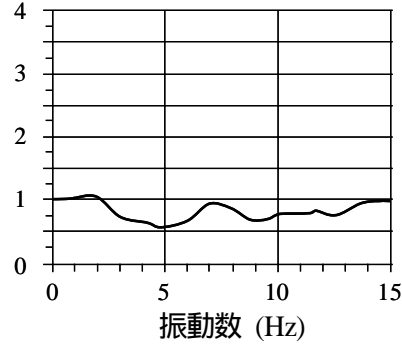


図-13 140.450 KP 地点の盛土法肩，盛土法尻，自由地盤における平均化 S 波速度構造

表面波探査結果などに基づき FEM モデルを作成し、FLUSH により線形の動的解析を行った⁴⁾。図-14 には、(a)常時微動による水平動スペクトル比と(b)線形の二次元 FEM 解析による伝達関数を示す。常時微動によるスペクトル比では余り明瞭ではないが 2Hz 付近の卓越と 5Hz 付近のディップが観察できる。一方、FEM 解析による伝達関数では、2Hz 付近のピークは僅かに確認できるほどで、5Hz 付近のディップが大きい。解析モデルに法肩の直下で測定されたせん断波速度を堤体下の地盤物性に反映させているが、4.1 節での FEM 解析の知見に照らし合わせると、堤体下のせん断波速度を過大評価している可能性があるものの、概ね実測された増幅特性低減効果が評価されている。反



(a)常時微動による水平動スペクトル比



(b)線形の二次元 FEM 解析による伝達関数

図-14 KP140.450 地点の自由地盤地表に対する盛土法肩の水平動スペクトル比と伝達関数

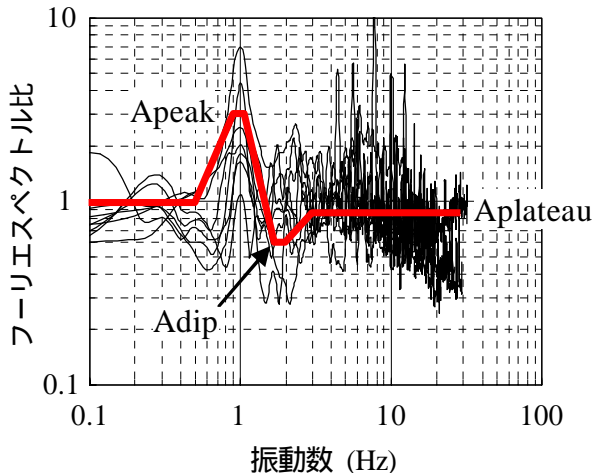


図-15 8 地点全ての振動数正規化スペクトル比(盛土法肩/自由地盤)と相対増幅係数モデルの例示

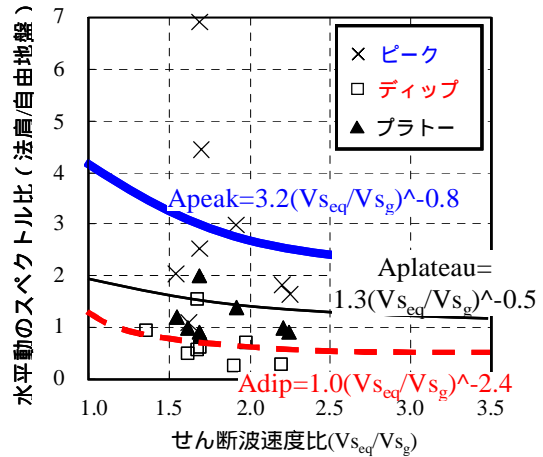


図-16 ピーク、ディップ、プラトーの値を読み取ったものとせん断波速度比 (V_{seq}/V_{sg}) との関係とモデル

映させるべき領域についてより詳細な検討が必要である。

図-15 に 8 地点全ての振動数正規化スペクトル比(盛土法肩/自由地盤)と相対増幅係数モデルを例示する⁵⁾。ここで、正規化振動数で 1 はピーク、2 がディップであり、0.5 から 0.9 までは直線変化、0.9 から 1.1 がピーク幅、3 がプラトー開始点で、ディップからプラトー開始点までは直線変化である(対数軸)。図-16 は 8 点のピーク、ディップ、プラトーの値を読み取り値とせん断波速度比 ($V_{seq}/V_{sg} = r_{eqg}$) との関係を示しており、これらの回帰式から相対増幅係数モデルの各特性値が決定される。

$$A_{peak} = 3.2(V_{seq}/V_{sg})^{-0.8} = 3.2(r_{eqg})^{-0.8} \quad \text{式(4.1)}$$

$$A_{dip} = 1.0(V_{seq}/V_{sg})^{-2.4} = 1.0(r_{eqg})^{-2.4} \quad \text{式(4.2)}$$

$$A_{plateau} = 1.3(V_{seq}/V_{sg})^{-0.5} = 1.3(r_{eqg})^{-0.5} \quad \text{式(4.3)}$$

4.4 徳島自動車道の道路盛土

基礎地盤として砂質土の卓越する徳島自動車道の盛土を対象とした^{6),7)}。図-17 に徳島道における常時微動測定と表面波探査の実施対象地点(合計 6 地点)を示す。

図-18 に盛土法肩と周辺地盤の水平動スペクトル比 H/H (盛土法肩/自由地盤)を示す。高知道と比較して、明瞭な 1 次での増幅とそれより高振動数側での低減が特徴的であり、式(4.1)~(4.3)のモデルが適用できるとも言えるが、現在考慮の r_{eqg} 以外に r_{eqb} や r_{gb} などのパラメータを考慮するなどの改良の余地がある。また、図-18 に描いたように、高知道と同様に相対増幅係数モデルが適用できそうである。すなわち、相対増幅係数のピーク値 A_{peak} は外力指標として利用できるものと考え

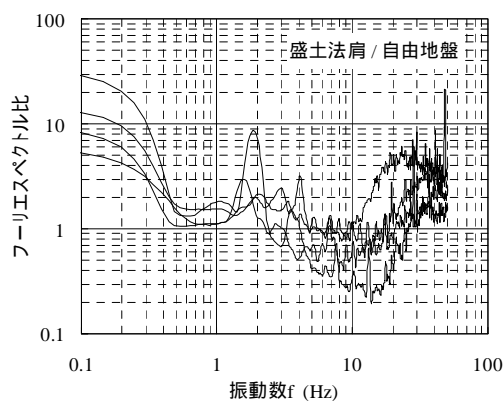
られる。

図-19 に徳島道河口部付近測定地点の内、A-4 における表面波探査によるせん断波速度構造を示す。表層深さ 0~10m では砂層、10~20m ではシルト・粘土層である。A-4 ではN 値は2~10 である。それに対応するように、 $V_s=170\text{-}200\text{m/s}$ である。深さ 10-20m のシルト粘土層は、A-4 では $N=3\text{-}7$ であり、やはりそれに対応するように、自由地盤の V_s は $170\text{-}200\text{m/s}$ であり調和的である。一方、盛土堤体は、A-4 では $320\text{-}260\text{m/s}$ となっており、深い

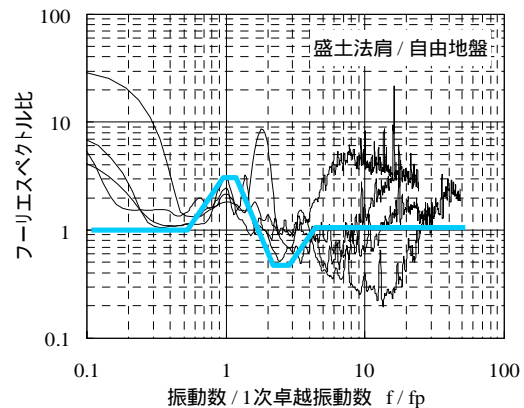
ほどせん断波速度が小さくなるという特徴を持つ。大局的には、高知県での結果と併せ考えると、高速道路盛土の堤体は平均的には V_s で 300m/s 以上が見込めると言える。また、堤体下の地盤では、A-4 で $200\text{-}230\text{m/s}$ である。徳島道では、常時微動による相対増幅スペクトルの1次ピークの振幅は、堤体下地盤のせん断波速度と負の相関があり、4.1 節で得られた FEM 解析の結果と調和的である。



図-17 徳島道における常時微動測定と表面波探査の実施対象地点



(a) 水平動スペクトル比



(b) 正規化振動数での水平動スペクトル比

図-18 盛土法肩と周辺地盤の水平動スペクトル比 H/H (盛土法肩/自由地盤)

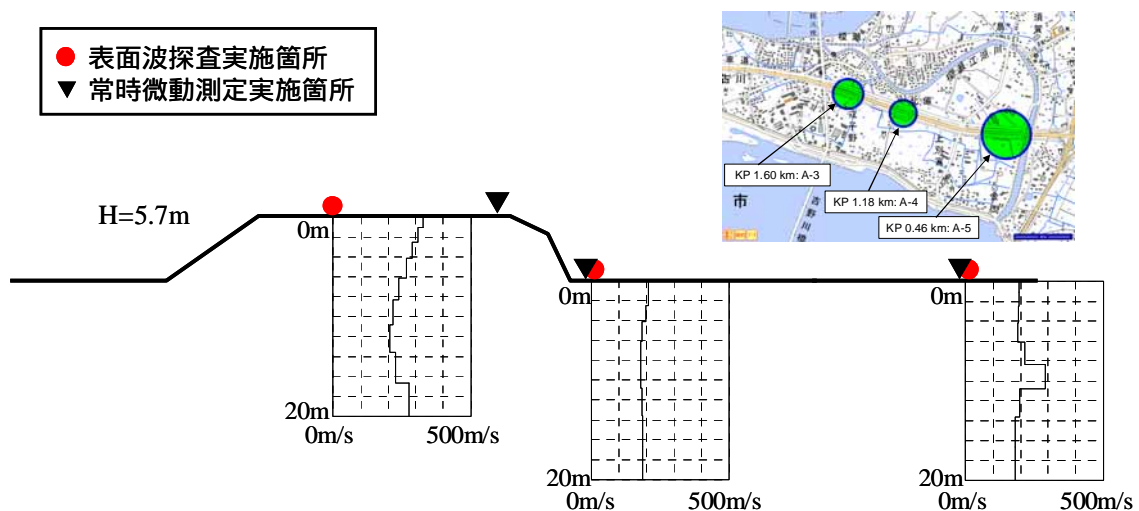


図-19 徳島道河口部付近測定地点 A-4 における表面波探査によるせん断波速度構造

4.5 吉野川の河川堤防

基礎地盤として砂質土の卓越する河川盛土として一級河川吉野川堤防の堤体を対象とし、同じ砂地盤に建設された徳島自動車道の盛土と比較することにより河川堤防の振動特性を検討する。

図-20 に測定位置 (Y-5 地点) を示す。図-21 に Y-5 地点における常時微動測定の様子を示す。

図-22 に Y-5 地点の堤防法肩、堤防法尻および自由地盤の盛土軸直角方向のフーリエスペクトルを示す。いずれにも 0.4Hz、3Hz、14Hz に卓越が見られる。5Hz に卓越が見られるのは堤防法肩のみで、5Hz は堤体特有の振動数であることが推定できる。0.4Hz のピーク値は 3 者で変わらないため、徳島平野の深い構造による卓越した成分であると考えられる。3Hz の成分は自由地盤と法尻は同等であるが、法肩のみが 2 倍ほど大きいので、堤体による増幅である可能性がある。

図-23 に堤防法肩の自由地盤および堤防法尻を基準にした場合の堤防軸直角方向の水平動フーリエスペクトル比 H/H を示す。堤防法肩 / 自由地盤のスペクトル比は、1Hz 以上で振動数とともに緩やかに増加し、5Hz 当たりで倍率 3 程度の緩やかなピークが見られる。これは地盤との相互作用の結果現れた堤防盛土系の励起された固有振動であると見ることができる。

図-24 に自由地盤測線の S 波速度分布 2 次元コンター図を示す。堤体直下は延長方向に大きな変化はなく、深さが 10m 以浅では 190~220m/s、10~20m では 210~230m/s である。一方、自由地盤は表層の 5m は 150~200m/s と速度が小さく延長方向に均質である。10m 以深では 260~310m/s へと急激に変化し延長方向に変化している。

図-25 に各測線の平均化せん断波速度の深度分布を示す⁸⁾。河川堤防の堤体 (堤高 9m) の S 波速度は 190~220m/s 程度で、砂質土であるとして $V_s=80N^{1/3}$ を用いて N 値として逆算すると、 $N=(V_s/80)^3$ より、 $N=13\sim 21$ となりばらつきは大きい。概略 $V_s=200\text{m/s}$ である。堤体下の地盤も砂質土である

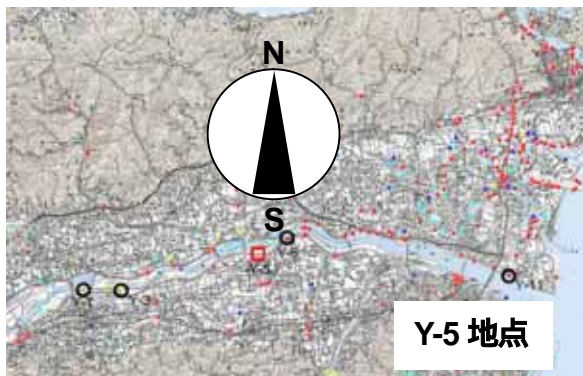


図-20 吉野川河川堤防における測定位置

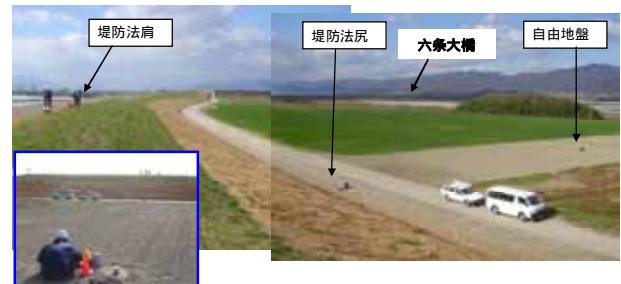


図-21 Y-5 地点における常時微動測定の様子

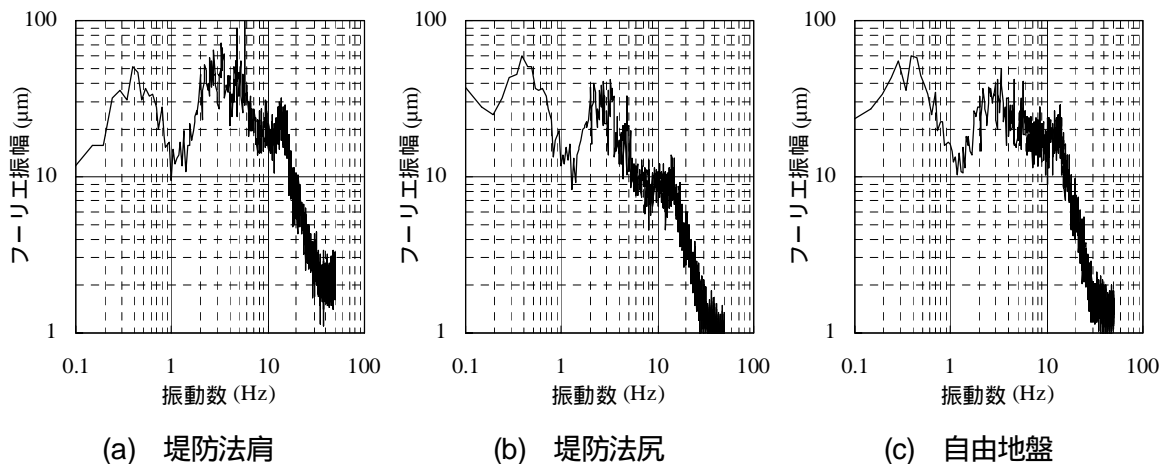
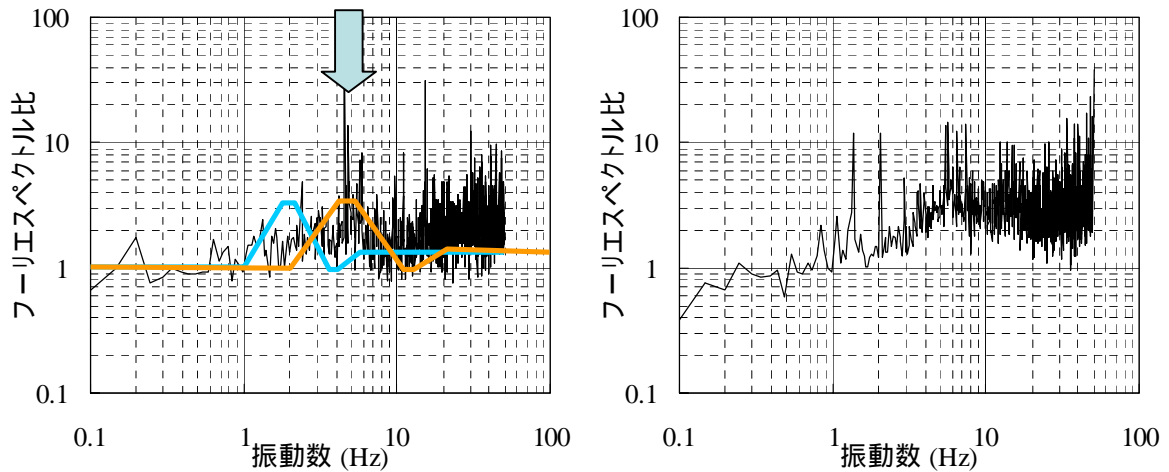


図-22 Y-5 地点におけるフーリエスペクトル (水平動: 盛土軸直角方向)



(a) 堤体法肩 / 自由地盤 (b) 堤体法肩 / 法尻

図-23 Y-5 地点における堤防軸直角方向の H/H スペクトル比

ただし、(a)に示した折れ線は相対増幅係数モデル（青）と改善案（橙）

と考えられるが、深さ方向に僅かに漸増しているがそれほど大きくはない。法尻では、深さ 10m までは、深さ方向に微増し $V_s=220 \sim 240\text{m/s}$ であり、堤体下の地盤と同等のせん断波速度である。一方、堤外地では深さ 6m までは $V_s=150$ から 200m/s で極めて緩いが、それ以深になると、 $V_s=250 \sim 300\text{m/s}$ となり締まった砂地盤となる。この締まった層は自然堤防であると思われる。

以上のことから、堤体と堤体下の地盤およびその周辺地盤は概略 $V_s=200\text{m/s}$ 程度で、深さ 14m 以深で $V_s=270 \sim 300\text{m/s}$ となる。したがって、工学的基盤と表層地盤のインピーダンス比が $2/3$ で、均質地盤系のモデル化ができるとして、4.1 節の FEM 解析の成果を適用すれば、均質地盤の不整形地盤で 1.2 倍、表層のインピーダンスのコントラストで 1.5 倍、それらの積で 1.8 倍、それに相互作用効果を加えれば、2 倍はゆうに超えるであろうと推察される。したがって、吉野川の河川堤防の場合、堤防の堤体には地表の 2 倍に近い地震動が作用する可能性がある。

式(4.1) ~ (4.3)の相対増幅係数モデルを適用すると、 $r_{eq}=1$ なので、

$$A_{peak} = 3.2(r_{eq})^{-0.8} = 3.2$$

$$A_{dip} = 1.0(r_{eq})^{-2.4} = 1.0$$

$$A_{plateau} = 1.3(r_{eq})^{-0.5} = 1.3$$

となり（図-23の青の折れ線）、改善の余地があるが、広い範囲で増幅するという特性は表現できた。堤防が、元来、自然堤防を利用して作られ、かさ上げて築造されてきたと考えると、表層下方のインピーダンスのコントラストと周辺地盤並みの堤体のせん断波速度という 2 つの性質は普遍的であるかどうか検討を要するものと考えられる。

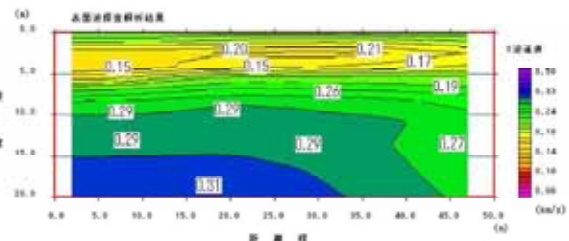
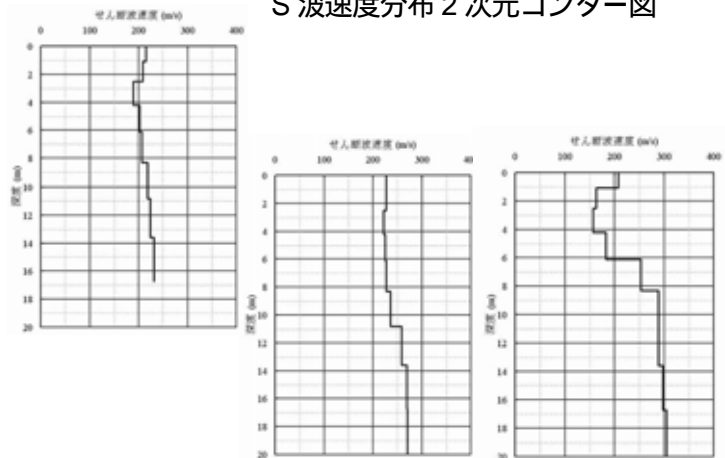


図-24 Y-5 地点における自由地盤測線の S 波速度分布 2 次元コンター図



(a)堤体法肩 (b)堤体法尻 (c)自由地盤（堤外地）

図-25 吉野川堤防 Y-5 地点における各測線の平均化せん断波速度の深度分布

4.6 桑野川の河川堤防

一級河川那賀川水系の支川である桑野川は、大きな平野ではなく山麓を流れる河川の堤防の代表として選んだ。このような地形では、比較的浅くに良好な地盤が出現することが期待される。桑野川中流部の河川堤防（堤高約4m）の3地点5断面で、常時微動測定および表面波探査を実施した^{8),9)}。

図-26 に表面波探査および常時微動測定地点の位置を示す。図-27 に常時微動測定の状況を示す。対象となる旧堤防の堤体は所々で掘削により切断あるいは撤去されており、直線状で断面の等しい比較的最長い（200m以上）堤体を測定対象に選定した。

図-28 に全ての測定断面における自由地盤に対する盛土法肩のスペクトル比で表される相対増幅係数を重ねて示す。卓越振動数は4-5Hz に集中し、また振幅は、ピーク増幅倍率が3~8倍と大きい。式(4.1)~(4.3)の相対増幅係数モデルを適用すると、後述の表面波探査の結果に基づき $V_{sg}=250$, $V_{se}=220$, $V_{sb}=350$, $H_g=8$, $H_e=4$ とすると、 $r_{eqg}=0.96$ となるので $A_{peak}=3.3$, $A_{dip}=1.1$, $A_{plateau}=1.3$ となり、図-28 に描いたモデルは妥当である。

せん断波速度2次元コンターの基となる最終的な分散曲線より得られたせん断波速度に基づいて、信頼度の高いものの平均化によって、平均化せん断波速度構造を求める。図-29 に平均化S波速度構造を示す。図では測定地表面の高低差を考慮して描いてある。これによれば、堤体下の地盤と周辺地盤とはせん断波速度構造がほぼ同じで、地盤構成が同じであると考えられる8m以下では堤体下の方が僅かに大きいようであり、上載圧による拘束圧増加に伴うせん断剛性の増加が認められる。

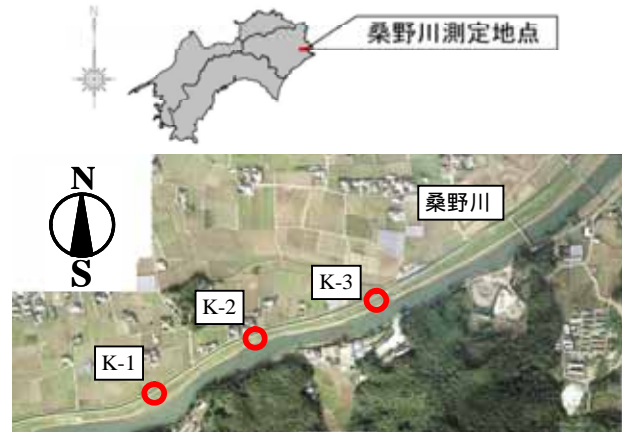


図-26 桑野川河川堤防における表面波探査および常時微動測定地点の位置



図-27 桑野川河川堤防における常時微動測定の状況（表面波探査測線の中央断面に位置）

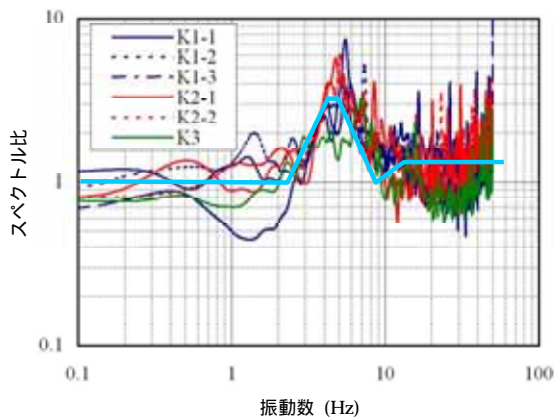


図-28 全測定断面における自由地盤に対する盛土法肩の相対増幅係数(折れ線は提案モデル)

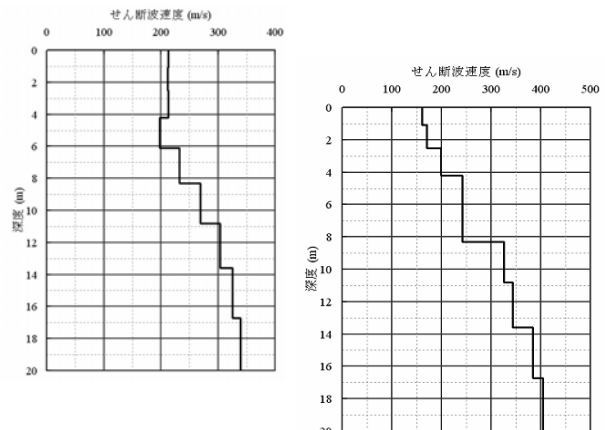


図-29 平均化S波速度構造(左:盛土法肩、右:自由地盤)

5. 結 論

常時微動測定と表面波探査によって提案モデルが有効に利用でき、合理的で簡易な既存盛土構造物の耐震性評価が可能となった。得られた成果と知見は以下の通りである。

- [1] 基盤から地盤・堤体に到る全て均質な物性であれば、盛土の最大加速度増幅率は 1.1 ~ 1.2 であり、不整形の効果であると言える。rgb=が 0.5 では、増幅率は 2 に近くなり、自由地盤地表に対する相対的な増幅率としても 1 から 1.4 となり、不整形の地形の影響は一層大きくなる。
- [2] 盛土堤体の剛性増加は、盛土法肩の加速度応答を抑制させる効果がある。たとえば、1.06 倍 / 1.25 倍 = 0.85 となる。
- [3] さらに、盛土堤体下のせん断剛性の増加は、不整形による増幅効果よりも相互作用特性の変化による増幅低減効果による盛土法肩の加速度応答を自由地盤よりも大きく低減させるような抑制効果がある。また、そのメカニズムは相対増幅係数で理解することができる。
- [4] 盛土の伝達関数からは、1 次ピークの振幅が大きくなっていること、1 次と 2 次の間で 1 以上であり、自由地盤で 1 以下になるのとは比べて広い振動数域で増幅があることなどが動的相互作用の結果、違いとして認められる。また、そのメカニズムは相対増幅係数で理解することができ、 V_{sc} が大きいほどピークの振幅が小さくなり、やがて 1 より小さくなり、次第に地盤の 1 次卓越振動数に相当する 2Hz 付近にディップが現れる。
- [5] 相対増幅係数は、表層地盤や盛土堤体の工学的基盤に対するインピーダンス比が大きく支配する。また、これは一次元土柱による波動論で近似的に捉えられるが、相互作用効果は考慮されず増幅は過小評価される。
- [6] 最大加速度応答の比と相対増幅係数の 1 次ピーク値の関係はおおよそ一義的に決まり、因果関係を概略把握できる。
- [7] 高知道や徳島道では道路盛土の堤体は、施工時に良く管理されたためか、 V_s が 300m/s 以上の締まった地盤となっており、そのことが相対増幅を抑制する効果として認められた。さらに、堤体下地盤の上載圧増加や地盤改良などに起因する拘束圧増加が原因と考えられるせん断剛性増加が確認され、そのことが相対増幅係数を低下させることとして耐震性が高くなっている。
- [8] 河川堤防においては、堤体のせん断波速度は比較的均質で $V_s=200 \sim 220\text{m/s}$ で一定であり、よく管理されていると考えられるが、堤体下の地盤のせん断波速度や周辺地盤のそれと大きく変わらず、相対的増幅係数が大きく、不整形による振動増幅特性が認められた。
- [9] 河川堤防においては、さらに、下方に自然堤防に起源があると考えられる締まった砂層がある場合、表層地盤や堤体と工学的基盤との間のインピーダンス比のコントラストから、増幅が助長されて相対的増幅係数が大きくなる可能性があることが明らかになった。
- [10] 桑野川で見られたように、河川堤防の延長方向で地盤構造が変化する場合、その変化に応じて堤防の振動特性も変化し、相対的増幅係数が大きく変化する。
- [11] 高知道を対象にした実測と FEM 解析によって開発された相対増幅係数のモデルは、徳島道、吉野川堤防、桑野川堤防でも適用できることを確認した。周辺地盤と盛土のせん断波速度構造を明らかにすれば、相対増幅係数モデルにより増幅特性を合理的に評価ができることを明らかにした。ただし、基盤とのインピーダンス比の考慮など改善の余地がある。

なお、[1] ~ [6] は道路盛土や河川堤防などの構造物の種類によらず盛土構造物共通に言える。

謝 辞

本研究は、社団法人四国建設弘済会「平成 19 年度建設事業に関する技術開発支援事業制度」に

よる助成を受けて実施しました。徳島自動車道の測定に当たっては、西日本高速道路株式会社四国支社高松技術事務所の明石達雄所長、富田雄一様には多大なお世話になりました。また、吉野川と桑野川の堤防の測定に当たっては、国土交通省四国地方整備局の関係各部署の皆様には情報の提供を戴き、さらに様々にご指導戴きました。現地測定に当たっては愛媛大学理工学研究科地震工学研究室の皆様には大変お世話になりました。深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯 嘉隆, 森 伸一郎, 河野 幸一, 神野 邦彦: 常時微動による高速道路盛土の地震動増幅特性, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, pp. 1785-1786, 2007.7.
- 2) 森 伸一郎, 佐伯 嘉隆: 異なる拘束圧下における土質のせん断波速度, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, pp. 337-338, 2007.7.
- 3) 田窪 裕一, 神野 邦彦, 佐伯 嘉隆, 森 伸一郎, 河野 幸一: 表面波探査による高速道路盛土堤体のせん断波速度, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, pp. 37-38, 2007.7.
- 4) 神野 邦彦, 西本 健一, 森 伸一郎, 佐伯 嘉隆: 2次元 FEM 解析による水平成層地盤上の高速道路盛土の地震動増幅特性 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, pp. 1711-1712, 2007.7.
- 5) 佐伯 嘉隆, 森 伸一郎: 現場実測に基づく軟弱地盤上の道路盛土の地震動増幅モデルの開発, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, 2008.7.
- 6) 田窪 裕一, 神野 邦彦, 佐伯 嘉隆, 森 伸一郎: 表面波探査による砂質地盤上の道路盛土のせん断波速度構造の評価, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, 2008.7.
- 7) 神野 邦彦, 田窪 裕一, 森 伸一郎, 佐伯 嘉隆: 常時微動測定による砂質地盤上の道路盛土の増幅特性の評価, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集 CD-ROM, 2008.7.
- 8) 田窪 裕一, 神野 邦彦, 森 伸一郎, 佐伯 嘉隆: 表面波探査による河川堤防と周辺地盤のせん断波速度構造, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, 第 3 部門, 2008.9.
- 9) 神野 邦彦, 森 伸一郎, 佐伯 嘉隆, 西本健一: 常時微動測定による桑野川堤防の地震動増幅特性, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, 第 3 部門, 2008.9.