

せん断波速度の変化に着目した地盤の健全度診断技術に関する基礎的研究

A Basic Study on Ground Health Monitoring Based on Variations in Shear Wave Velocity

河野真弓	Mayumi KAWANO	(広島大学大学院工学研究科)
村上陽平	Yohei MURAKAMI	(広島大学大学院工学研究科)
湯浅香織	Kaori YUASA	(元広島大学工学部)
柴尾 享	Susumu SHIBAO	(元広島大学大学院工学研究科)
北出圭介	Keisuke KITADE	(中電技術コンサルタント株式会社)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)

本研究では、低コスト・短期間での地盤の健全度診断手法の提案を行うため、水の影響による地盤の劣化とせん断波速度の関係性を室内実験により検討した。また、試験結果から得られるせん断波速度と含水比の関係から地盤の湿潤密度、ヤング率、せん断剛性を求め、動的 FEM 解析を実施し、擁壁背面土の含水比の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化について検討した。その結果、排水性が低下し、含水比が増加した地盤と、排水により細粒分の抜け出しが生じた地盤では、せん断波速度が低下することを示した。また、このせん断波速度の低下により、擁壁の固有振動数が低下することを示した。

キーワード：せん断波速度，含水比，地盤の健全度診断，表面波探査 (IGC : C-2)

1. はじめに

盛土等の土構造物に擁壁が併設されている場合、盛土の降雨時における安定性は、擁壁の排水機能に依存している。例えば、2009年8月の駿河湾の地震(M6.5)では東名高速道路牧之原サービスエリア近くの上り線の盛土法面が崩落した。この盛土の崩落原因の検討において、当該地は、道路横断方向に凸、道路縦断方向に凹の地山形状で水が集まりやすい地形・地質条件であったことや、盛土の下部には風化しやすい泥岩が使用されていたこと等が報告されている¹⁾。また、ここで崩落した盛土の法尻部には擁壁が存在しており、地震前の雨水が擁壁背面から抜けきらず、不安定な状態で揺れを受けたことが崩壊の誘引になったという指摘もある²⁾。

また、河川堤防や岸壁では水流や潮汐の影響で、土構造物の被覆に問題がある場合、土の抜け出しが生じて問題が起こることがある。例えば、吸出しによる人工砂浜の陥没事例として、2001年12月30日、兵庫県明石市大蔵海岸東地区において、4歳の少女が、突堤際の砂浜に突然発生した陥没穴に転落し、生き埋めとなる事故が発生している。陥没穴が生じた原因としては、ケーソンの目地部に設置された砂止め用の防砂板が破損したためと推定された。防砂板が破損することで、波が押し寄せる時に海水が破損部か

ら侵入し、波が引くときに海水とともに防砂板背後の砂が流出し、陥没穴が生じたものと推定された³⁾。これらのことから、盛土、岸壁などの土構造物においては、地盤の健全性を定期的に確認し、必要な対処を講じておく必要がある。

この目的で定期的に行える調査としては、目視による調査や標準貫入試験、簡易動的コーン貫入試験等が行われてきた。しかし、目視による点検では十分な精度は得られず、また、貫入試験では時間とコストが多くなるという問題点がある。これに対し、表面波探査は、低コスト、短時間での地盤調査が可能であり、健全度診断技術として有望である。しかし、表面波探査で把握できるせん断波速度と地盤の状態の関係は明らかになっていない。そこで、本研究では、水の影響による地盤の状態変化とせん断波速度の関係性について明らかにすることを目的とする。

また、試験結果から得られたせん断波速度と含水比の関係に基づき、擁壁の固有振動数のモニタリングにより、要注意箇所の抽出が可能であるか検討した。具体的には、試験結果から得られたせん断波速度と含水比の関係から算出したパラメータを用いて動的 FEM 解析を実施し、擁壁背面土の含水比の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化を定量的に示した。

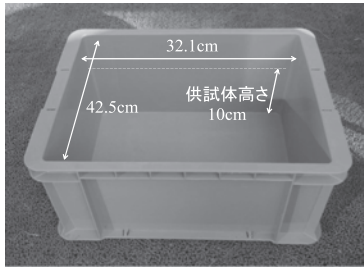


写真-1 実験用土槽

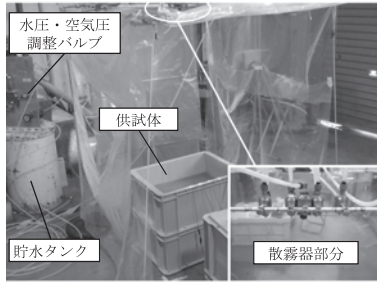


写真-2 降雨装置

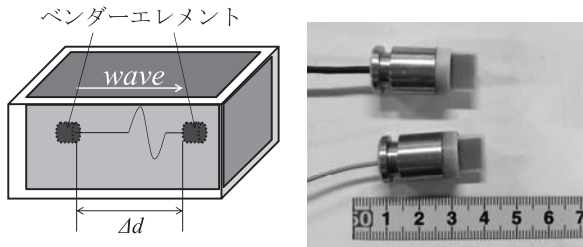


図-1 せん断波速度の伝播の模式図

表-1 実験ケース

ケース	降雨強度	間隙比	目標含水比
	mm/hr		
Case-A	6.6	0.787	14.25
Case-B	13.65		
Case-C	25.13		

表-2 豊浦砂の物理特性

土粒子密度 ρ_s g/cm ³	2.634
最大密度 ρ_{dmax} g/cm ³	1.655
最小密度 ρ_{dmin} g/cm ³	1.345
最適含水比 w_{opt} %	14.25
最大間隙比 -	0.972
最少間隙比 -	0.602

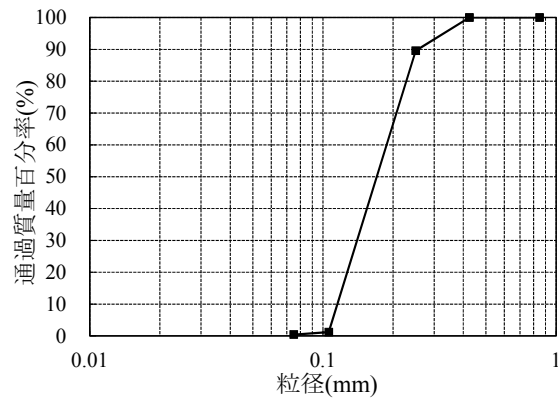


図-3 豊浦砂の粒径加積曲線

表-3 解析に用いた各パラメータ

飽和体積含水率 θ_{sat}	0.450
残留体積含水率 θ_r	0.006
飽和透水係数 K_s cm/s	0.0052
α	0.031
n	6.940

2. 含水比とせん断波速度の関係

2.1 実験概要

まず、擁壁の排水機能が低下した状態として、含水比が上昇した状態でのせん断波速度の変化について検討を行う。写真-1 に示すような小型コンテナに土試料を締め固めて供試体を作製した。供試体作製法は静的締め固め法とし、3層にわたり締め固めた。本研究では、供試体内部に設置間隔 4cm、深度 6cm に床に対して平行に設置したベンダーエレメント⁴⁾により、土中のせん断波速度 V_s を測定した。ベンダーエレメントとは、圧電セラミックの薄板を2枚貼り合わせたバイモルフ型振動子の呼称であり、土中の弾性波速度測定を目的として使用される。

ベンダーエレメント試験では、一方のベンダーエレメントに電圧を加えて土中にせん断波を発生させ、もう一方のベンダーエレメントでせん断波を受信する。図-1 にせん断波速度の伝播の模式図を示す。土中を伝播するせん断波速度 V_s は式(1)から求めることができる。

$$V_s = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 V_s はせん断波速度[m/sec]、 Δd は伝播距離[m]、 Δt は伝播時間[sec]である。

また、この時の供試体のせん断剛性 G_0 は式(2)から求めることができる。

$$G_0 = \rho_t \cdot V_s^2 \quad (2)$$

ここで、 ρ_t は湿潤密度[g/cm³]である。 Δt の同定法は T.D 法(peak-to-peak 法)とした。

実験では、写真-2 のような降雨装置を用いた。実験ケースを、表-1 に示す。試料には豊浦砂を用いた。表-2 に豊浦砂の物理特性、図-3 に粒径加積曲線をそれぞれ示す。

本実験では、ベンダーエレメント試験によるせん断波速度の測定と合わせて、降雨による含水比の変化も時間経過ごとに評価する必要がある。ここで、土の含水比試験としては、炉乾燥法や電子レンジ法が一般的であるが、サンプリングが必要なため、時間経過ごとの含水比の変化を調べることはできない。そこで、浸透解析ソフト HYDRUS⁵⁾ (以下 HYDRUS) により含水比を推定した。

解析による推定値の妥当性については、予備実験により、概ね実験値に対して±10%程度の精度で評価できることを確認した。具体的には、実験は、本章で使用される土槽(写真-1)に豊浦砂で同様の供試体を作製し、それに一定時間降雨を行い、降雨終了後のある一定深度の含水比を、電子

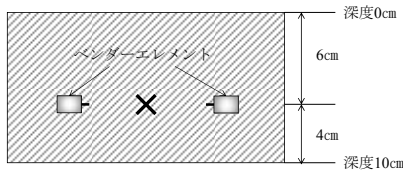


図-4 サンプル位置 (×印)

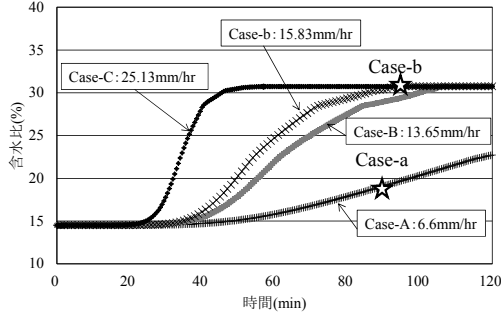


図-5 ベンダーエレメント設置位置の含水比の時間的推移 (HYDRUS による推定値)

レンジ法により測定した。降雨強度は 6.6mm/hr, 15.83mm/hr とした。また、深度は、図-4 に示すようにベンダーエレメントの設置深度と同様である。降雨終了時間はそれぞれ 90 分, 95 分とした (図-5☆印)。

これに対し、解析の境界条件は供試体側部および底部は不透水、上端を Constant Flux とした。表-3 に解析に用いた各パラメータを、図-6 に豊浦砂の水分特性曲線を示す。なお、この水分特性曲線は中川ら⁶⁾が VG モデルに対してフィッティングしたものである。フィッティングは、体積含水率と不飽和透水係数の実験値と式(3), 式(4)に示す VG モデルによる体積含水率と不飽和透水係数の近似値の差の二乗の和が最小となるように行われている⁷⁾。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \{1 + |\alpha\psi|^n\}^{-m} \quad (0 \leq S_e \leq 1, \alpha \geq 0) \quad (3)$$

$$K_\theta / K_s = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度, θ_{sat} : 飽和体積含水率, θ_r : 残留体積含水率, ψ : サクシオン, α : 定数, n : 定数, $m = 1 - 1/n$ ($0 < m < 1, n > 1$) K_θ : 体積含水率 θ の時の不飽和透水係数, K_s : 飽和透水係数である。

HYDRUS による含水比の推定値の妥当性を実測値と解析値の比較により検討した結果を表-4 に示す。両ケース共に実測値と解析値の値は近い値を示した。この結果から、HYDRUS による含水比の推定結果はほぼ妥当であるといえる。

2.2 実験結果

図-5 にベンダーエレメント設置位置の含水比の時間的推移 (HYDRUS による推定値), 図-8 に含水比 (推定値) とせん断波速度の関係をそれぞれ示す。図-8 に示すように、含水比とせん断波速度の関係は、Case-2 と Case-3 に

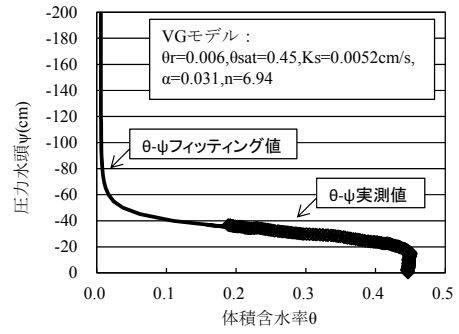


図-6 豊浦砂の水分特性曲線⁶⁾

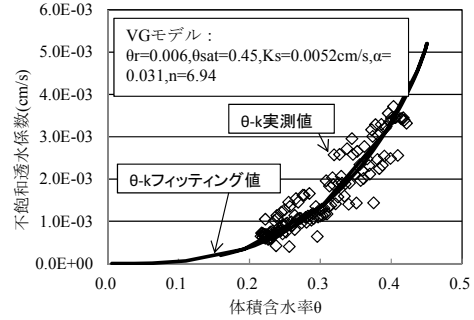


図-7 不飽和透水係数フィッティング結果⁶⁾

表-4 実測値と解析値の比較

ケース	降雨強度	実測値 w (%)	解析値 w (%)	誤差 (%)
Case-a	6.6mm/hr	20.44	19.08	6.65
Case-b	15.83mm/hr	28.08	30.73	9.44

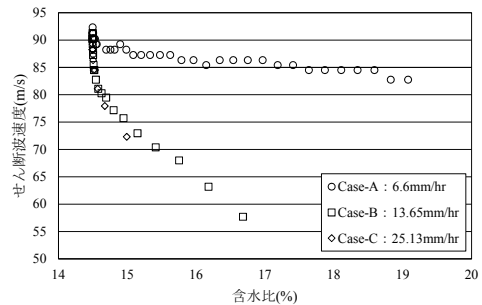


図-8 含水比 (推定値) とせん断波速度の関係

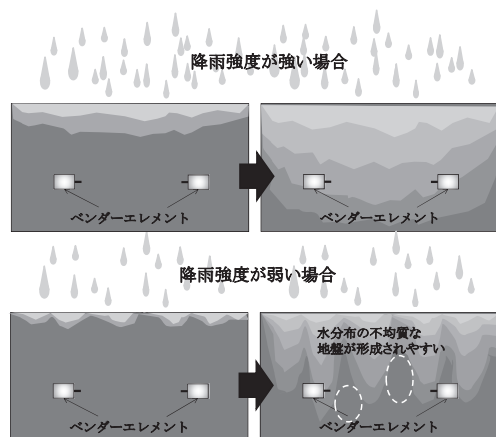
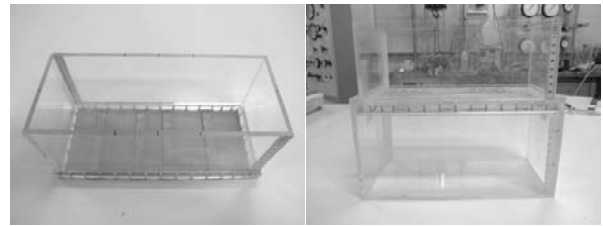


図-9 降雨強度の違いによる地盤内の水分状態の例

において、ほぼ同じ値を示している。しかし、Case-1は、他のケースとは異なり、含水比が増加してもせん断波速度が急激に落ちることなく緩やかに低下する結果となった。Case-1のみが他のケースとは違う挙動を見せた要因としては、図-9に示すように、降雨強度が弱い場合は供試体内に浸透する水の速度が遅く、地盤内の水分分布が不均質になりやすいためと考えている。すなわち、局所的に残留する地盤内の水が少ない箇所においては地盤は固いままであり、せん断波が固い部分を選択的に通ることで平均より大きなせん断波速度が計測されたと考えられる。



(a)実験用土槽上部 (b)実験用土槽全体
写真-3 実験用土槽

3. 細粒分含有率とせん断波速度の関係

3.1 実験概要

本実験では、写真-3に示すような底に網を設置した小型コンテナに土試料を締め固めて供試体を作製した。そして、供試体内部にベンダーエレメントを設置することによりせん断波速度を計測した。土槽の底部には、供試体内を浸透した水と共に流出した細粒分を捕捉するための水槽を設けた。供試体上部には水をポンプにより汲み上げ、土槽上端より水がオーバーフローするようにして水位を一定に保ち、供試体に一定の水圧を加えて、細粒分流出を促した。細粒分の抜け出し量はろ紙によるろ過で毎日計測した。なお、細粒分の抜け出し量は、初期供試体内の細粒分の質量に対する割合(%)で評価する。試料には中国地方に広く分布するまさ土を使用した。まさ土は、破碎性があり、細粒分を生じやすい土である。また、水を含むと強度が大きく低下するという性質と、風化にも弱く、劣化が進行しやすいという性質も持つ。表-5に本実験で使用したまさ土試料の物理特性、図-10に粒径加積曲線をそれぞれ示す。試料作製は、間隙比 $e=0.85$ 、初期含水比 $w_{opt}=12.5\%$ とした。

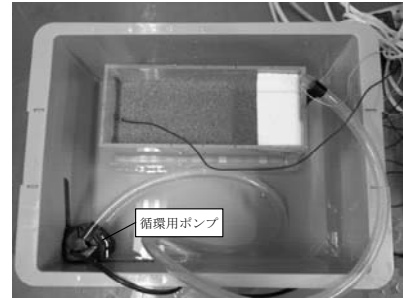


写真-4 実験の概要

表-5 まさ土試料の物理特性

土粒子密度 ρ_s g/cm ³	2.670
最大密度 ρ_{dmax} g/cm ³	1.517
最小密度 ρ_{dmin} g/cm ³	1.194
最適含水比 w_{opt} %	12.50
細粒分 %	13.0
透水係数 k cm/sec	3.088×10^{-3}

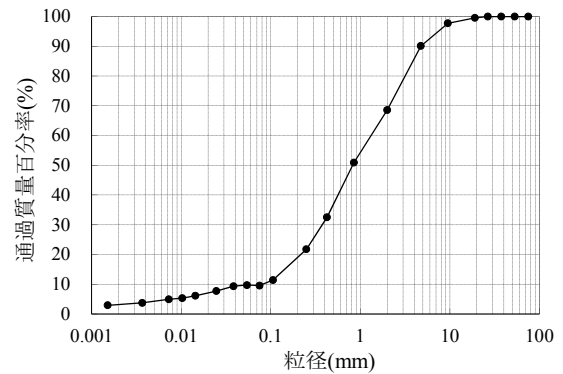


図-10 まさ土の粒径加積曲線

3.2 実験結果

図-11に細粒分抜け出し量とせん断波速度の関係をそれぞれ示す。図-11に示すように、細粒分の抜け出し量が増加すると、せん断波速度も低下するという結果が得られた。この要因としては、細粒分により拘束されていた大きい粒子が、土中の細粒分が抜けることで動きやすい状態となった可能性があげられる。

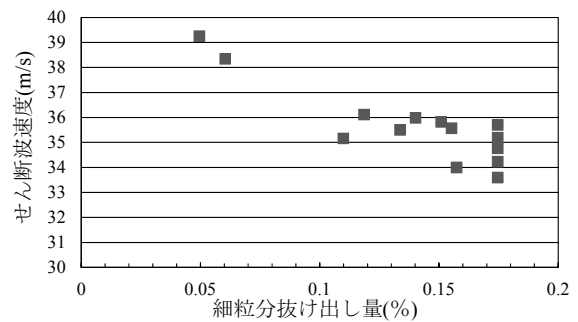


図-11 細粒分抜け出し量とせん断波速度の関係

4. 表面波探査による地盤の健全度診断手法の提案

4.1 表面波探査による地盤の健全度手法のイメージ

ベンダーエレメントによる室内実験から、排水機能が低下して含水比が増加した地盤及び排水により細粒分が抜け出した地盤では、せん断波速度は低下するということがわかった。このことから、せん断波速度の変化に着目することで地盤の健全度を診断できる可能性があることがわかる。以下に表面波探査を用いた地盤の健全度診断手法の

イメージを示す。図-12に示すように、まず、盛土等の構造物を新設したときに、表面波探査により初期状態のせん断波速度を計測する。既存の盛土等に適用する場合も、最

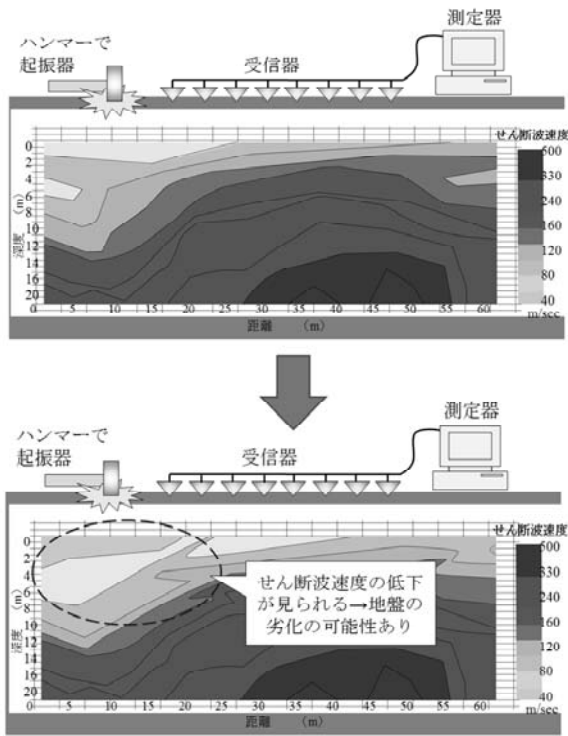


図-12 表面波探査による地盤の健全度診断手法のイメージ図

初に計測したデータを初期状態とする。その後、毎月、毎年、あるいは大雨が長期にわたり続いた後など、定期的にせん断波速度の計測を行う。これにより初期状態からのせん断波速度の変化を確認する。せん断波速度の低下が見られた箇所は、水による何らかの影響（含水比の増加や細粒分の抜け出し）により劣化している可能性が高い箇所と推測できる。この手法の大きな利点としては、広範囲の調査範囲から、地盤の劣化の疑いがある地点を簡便に抽出することができる点である。この手法により低コスト、短期間での調査が可能になると考えられる。

4.2 提案手法の適用性の検討例

実際に、晴天時と降雨終了後に表面波探査を実施し、地盤のせん断波速度の測定を実施した例を示す。図-13に今回対象とした地盤の概略位置を示す。当該地点は、広島大学構内がら道沿いの地点である。測定長は25mとした。

表-6に測定日時と天候、図-14に測定日の降雨量をそれぞれ示す⁸⁾。測定時間はいずれも14時から15時の間とした。図-15に晴天時のせん断波速度分布をそれぞれ示す。降雨がない場合、せん断波速度の分布は一定値(350m/sec)を示していることがわかる。図-16に5月15日の降雨終了直後および1日後(5月16日)のせん断波速度分布を示す。晴天時と比べると、降雨後のせん断波速度の変化は明らかであり、最も変化の大きな東側A'地点で約200m/sec低下していることが確認できた。また、降雨終了1日後においては、せん断波速度の回復が確認された。今回のせん断波速度の低下は含水比上昇による低下と考えられる。また、当該地点は、排水機能に問題がない地盤と考えられ、降雨終了から1日後は排水が終了し、元の状態に戻ったと



図-13 測定対象地盤位置 (A-A')

表-6 測定日時と天候

測定日	天気
2012/4/25	快晴
2012/5/23	快晴
2012/5/30	快晴
2012/5/15	曇り (降雨終了直後)
2012/5/16	快晴(降雨終了1日後)

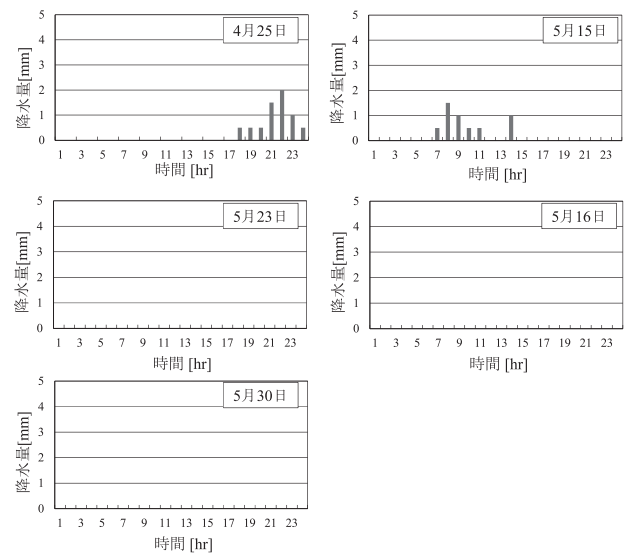


図-14 測定日の降雨量⁸⁾

考えられる。もし、排水機能に問題があれば、回復が遅くなると考えられる。

この様に、実フィールドにおいてもせん断波速度の低下を確認することができた。よって、提案手法には一定の適用性があるといえる。

5. 擁壁の固有振動数の変化

表面波探査は手軽ではあるが、測線が長大になると起振位置が多く、多大な労力が必要となる。そこで、擁壁がある場合は、擁壁の固有振動数の把握によって健全度診断することを考えた。

このため、解析プログラム FLIP (Ver.7.1.3)⁹⁾を用いて

実スケールの盛土擁壁をモデル化し、擁壁背面土の湿潤密度の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化について検討した。解析では、簡単のため盛土・擁壁は全て線形弾性体と仮定している。図-17に土層区分及び参照節点の位置を示す。参照節点を擁壁部の上端下端とし、それぞれの上端下端における各応答加速度時刻歴を求め、それを高速フーリエ変換して上端下端のフーリエスペクトルを求めた。そして、上端下端のフーリエスペクトルの比を伝達関数とし、そのピーク振動数を擁壁の固有振動数とした。本解析では、上述の試験結果（図-18）から得られたせん断波速度と含水比の関係を用いて、湿潤密度、せん断剛性、およびヤング率を変化させたケースについて解析を行い、固有振動数の変化について検討を行った。

図-19に基盤に入力した加速度時刻歴を示す。解析では、基盤に入力加速度として、様々な周波数を均一に含むホワイトノイズを81.92秒間入力した。表-7に擁壁の解析定数、表-8に基盤の解析定数、表-9に盛土の解析定数をそれぞれ示す。擁壁の解析定数は、擁壁の設計事例集¹⁰⁾に記載されているものを用いた。盛土のせん断剛性およびヤング率は実験で得られたせん断波速度と含水比の関係から算出した。

解析では、重力加速度を作用させ、地盤を初期応力状態にする初期自重解析を行った後、その結果を用いて地震応答解析を行った。両解析フェーズは同じ構成則を用いており、与えた解析地盤定数も同じである。底面は粘性境界とし、側面は粘性境界により自由地盤部と結合している。また、地震応答解析での時間積分法はWilsonの θ 法($\theta=1.4$)を用いている。

表-10に各ケースの解析結果を示す。また、図-20及び図-21に擁壁の上端と下端の応答波形のフーリエスペクトルと伝達関数を示す。また、図-22に、固有振動数と含水比の関係を示す。降雨により含水比が上昇すると、擁壁の固有振動数は低下するという結果が得られた。固有振動数の変化量は5%と32%と大きく、常時微動計測による評価が可能なレベルである。

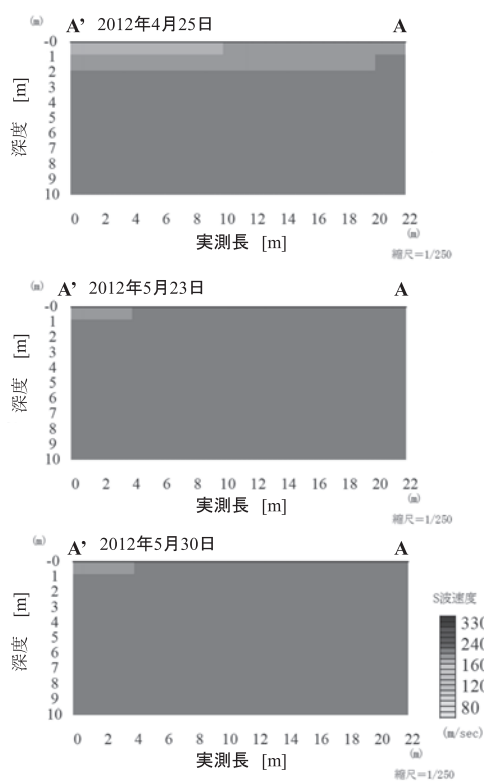


図-15 晴天時のせん断波速度分布

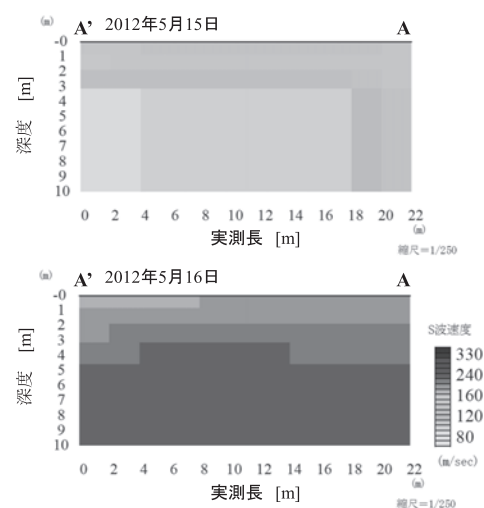


図-16 降雨終了直後および1日後のせん断波速度分布

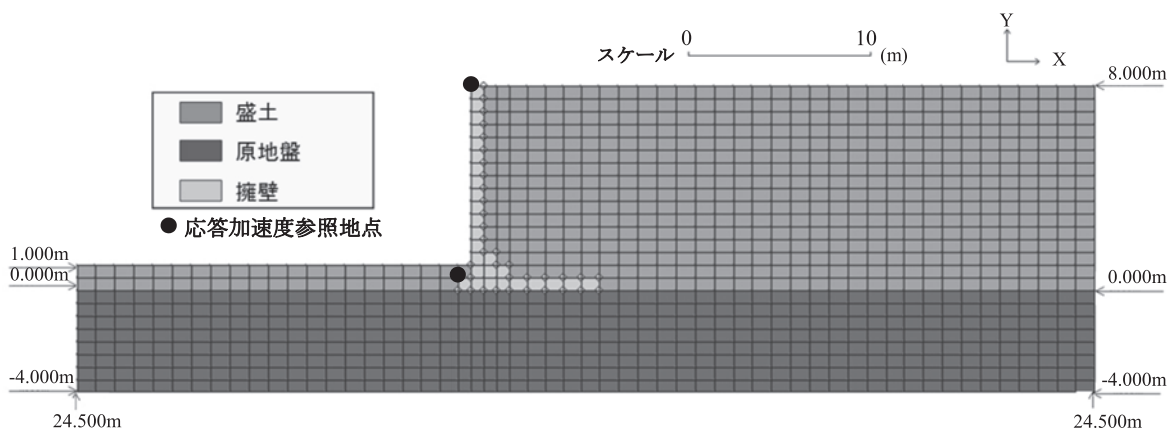


図-17 土層区分及び参照節点の位置

表-7 擁壁の解析定数

ヤング率 E[kPa]	ポアソン比 ν [-]	密度 ρ [g/cm ³]
2.20E+07	0.2	2.3

表-8 基盤の解析定数

せん断波速度 V _s [m/s]	ヤング率 E[kPa]	せん断剛性 G[kPa]	ポアソン比 ν [-]	湿潤密度 ρ [g/cm ³]
300	4.75E+05	1.78E+05	0.333	1.98

表-9 盛土の解析定数

	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	水の密度 ρ_w [g/cm ³]	間隙比 e	せん断波速度 V _s [m/s]	含水比 w[%]	湿潤密度 ρ [g/cm ³]	せん断剛性 G[kPa]	ヤング率 E[kPa]
Case-1	2.634	1	0.787	90.23	14.61	1.688	1.37E+04	3.65E+04
Case-2				57.69	15.36	1.755	5.72E+03	1.52E+04
Case-3				82.76	16.87	1.720	1.20E+04	3.20E+04

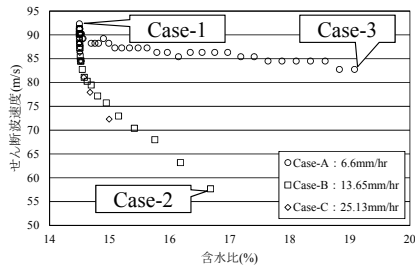


図-18 解析ケース

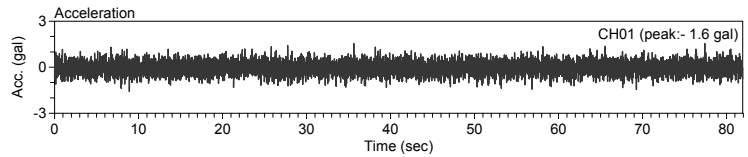


図-19 基盤に入力した加速度時刻歴

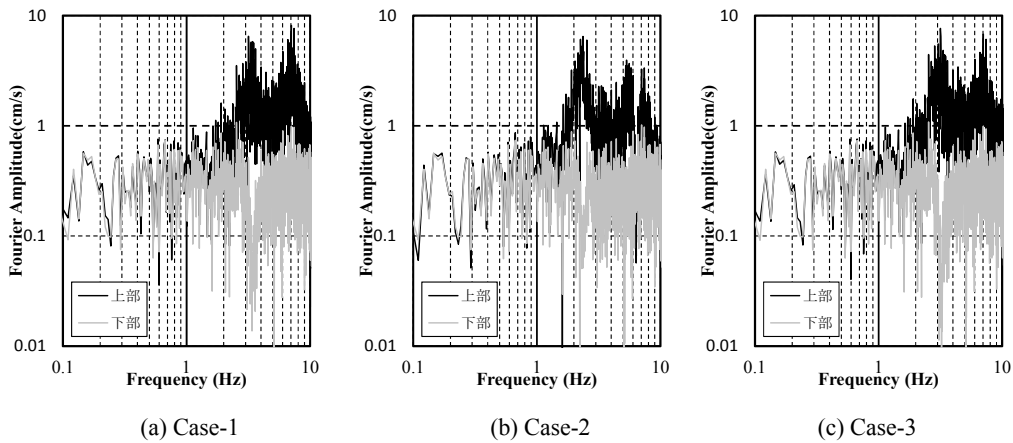


図-20 フーリエスペクトル

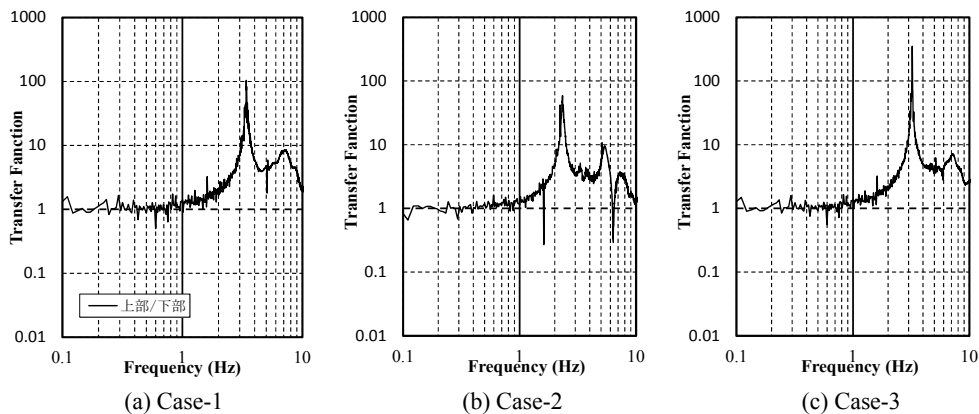


図-21 伝達関数

表-10 各ケースの解析結果

	解析条件				解析結果	
	含水比 w[%]	湿潤密度 ρ_i [g/cm ³]	せん断剛性 G[kPa]	ヤング率 E[kPa]	固有振動数 f[Hz]	降雨なし(Case-1)からの変化量 Δf [%]
Case-1	14.61	1.688	1.37E+04	3.65E+04	3.406	-
Case-2	15.36	1.755	5.72E+03	1.52E+04	2.332	31.53
Case-3	16.87	1.720	1.20E+04	3.20E+04	3.235	5.02

以上の検討から、擁壁が存在する地盤においては、表面波探査よりも簡便に常時微動による固有振動数の計測によっても、簡便な健全度診断は可能であるといえる。この手法は、要注意地点の絞り込みに用いることができると期待される。

6. まとめ

本研究では、水の影響による地盤の劣化とせん断波速度の関係性についてバンダーエレメントによる室内実験により検討し、表面波探査を用いた地盤の健全度診断手法を示した。さらに、試験結果から得られるせん断波速度と含水比の関係から地盤の物性値を求め、動的FEM解析を実施し、擁壁背面土の含水比の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化についても検討した。以下に、それらの結果から得られた知見を示す。

- 1) 含水比の上昇および細粒分率の低下により、地盤のせん断波速度は低下することがわかった。
- 2) 降雨終了時と晴天時での表面波探査によるせん断波速度計測には、降雨終了後のせん断波速度の低下が確認された。このことから、地盤のせん断波速度の変化を実フィールドにおいても確認できることが確認できた。
- 3) 動的FEM解析において、降雨による地盤物性の変化として湿潤密度・ヤング率・せん断剛性の変化を考えると、擁壁の固有振動数は小さくなる結果となった。また、この固有振動数の変化量は、5%および32%であり、常時微動等による振動モニタリングによる予測が可能なレベルである。よって、手軽に行える擁壁背面土の健全度診断手法として、振動モニタリングを使用できる可能性がある。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究(B)課題番号22760358の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 中日本高速道路株式会社：東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会資料，2009，

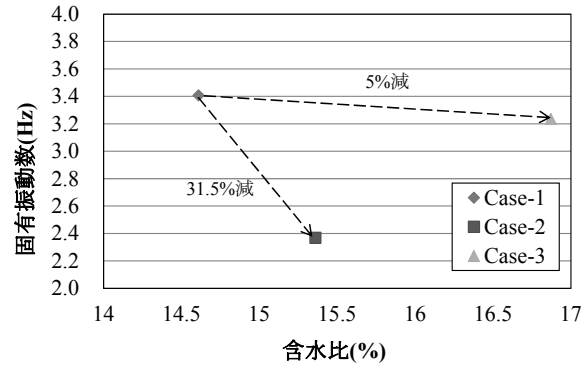


図-22 固有振動数と含水比の関係

http://www.c-nexco.co.jp/images/press_conference/44/12797178954e004ffa764cb.pdf, 2012.10.22.

- 2) 小長井一男, 有田毅, 松村有見子: 2009年8月11日駿河湾を震源とする地震の被害調査, 生産研究, 調査報告, vol.61, No.6, pp.73-82, 2009.
- 3) 土木学会海岸工学委員会: 大蔵海岸 陥没事故調査報告書, 2002, <http://www.jsce.or.jp/committee/cec/active/okura/memo/siryuhokoku/hokoku.pdf>, 2012.10.22.
- 4) 山下聡: バンダーエレメント試験, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.55, No.4, pp47-48, 2007.
- 5) PC-PROGRESS: HYDRUS 取扱説明書, <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx>, 2012.1.16.
- 6) 中川翔太: 降雨浸透過程と排水パイプによる崩壊リスク低減効果に関する研究, 広島大学工学研究科修士論文, 2012.
- 7) 中川翔太, 土田孝, 梅田賢也, 川端昇一, 花岡尚: 降雨浸透過程と排水パイプによる斜面崩壊リスク低減効果に関する研究, 第64回土木学会中国支部研究発表概要集, III-44, 2012.
- 8) 気象庁: 広島県東広島市2012年4-5月の気象データ, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>, 2011.11.30.
- 9) FLIP 研究会: FLIP (Ver.7.1.3) 取扱説明書, <http://www.meisosha.co.jp/flip/index.html>, 2012.1.20.
- 10) 村上有誠: 擁壁の設計と施工計画—解説と実務計算例, 理工図書, 384p, 2002.

(2012年6月25日 受付)