

ベンダーエレメント法による減衰を活かした地盤特性の新たな評価手法に関する研究

九州大学 学〇笠 修平

九州大学 大学院 F 安福 規之 九州大学 大学院 正 石蔵 良平

建設技術研究所 松下 俊樹 福味 尊

1.はじめに

堤防は、歴史的特徴があり、複雑な断面構成となっていることが多い。また、昔は使用材料（運搬）や締固めの技術等が充実しておらず、現在の堤防に求められるような材料・締固めに至っていないことが多い。多様な地形・地質上に築堤されてきていることより、堤防縦断方向・断面と、三次元的に、不均一性が形成されている¹⁾。

このような堤防に対し、地質を一次元でしかおさえられない「ボーリング土質調査」、二次元で地質をおさえられるものの精度が十分でない「物理探査」を用いて調査を行っている。しかし近年、締固めが十分でないのり面上でのすべり破壊、矢部川などに見る浸透決壊²⁾などが発生しており、ボーリング調査ではおさえきれない局所的弱部（ゆるみ部:高透水性など）が決壊にいたる懸念部分となる可能性がある。

上記のことから、局所的に存在する弱部を事前に把握し、対策するために、堤防内部の弱部を高精度でかつ簡便に探し出せる技術の開発が求められている。本研究では、物理探査の内、現在評価に用いられている表面波探査（図2）から得られる「せん断波速度=Vs(m/s)」だけでなく、同探査から得ることができる「波の減衰（S波振幅の減衰）」、この2つのパラメータを用いて分析することで、堤防内調査の精度を高めることに着目する。ここでは初段階として、要素実験から各試料「熊本珪砂（K-0・K-4・K-7）、現場試料」においてS波振幅がどれだけ減衰しているのかを確認し、得られた結果より、減衰と土質特性の関係を理解し、減衰から情報（土質の違い等）を得られる可能性を調べる。

2.研究方法 —ベンダーエレメント法・減衰について—

要素実験として、複合地盤を調査する表面波探査に対して、単一材料を用いた要素実験が可能なベンダーエレメント法（図3）を用いる（ベンダーエレメント法⁴⁾=せん断波を供試体端で送信、他端で伝播したせん断波を受信し、せん断波速度Vsを求め、せん断弾性係数G(MN/m²)（式(1)）を算出）。

実験条件は、「寸法：直径5cm、高さ10cm」、「供試体作成方法（締固め回数）：0回×5層、50回×5層、100回×5層」「拘束圧：20kPa、50kPa、100kPa（それぞれの拘束圧で圧密）」「周波数：2kHz、5kHz」である。

減衰特性を表す係数として、減衰比ζ（式(3)）を用いる。対数減衰率δ {δ=波形の隣り合う振幅の比の対数をとると、常に一定の値となる。この振幅の比の自然対数のこと}より減衰比ζ及び損失係数ηを次式より求めることができる。

（式(2)、(3)、(4)を参照。）

$$G = \frac{\rho_t \times V_s^2}{1000} \quad (1) \quad \delta = \frac{1}{m} \times \ln \frac{a_n}{a_{n+m}} \quad (2) \quad \zeta = \frac{\delta}{2\pi} \quad (3) \quad \eta = 2\zeta = \frac{\delta}{n} \quad (4)$$

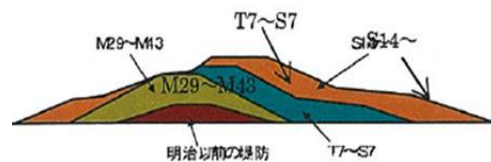
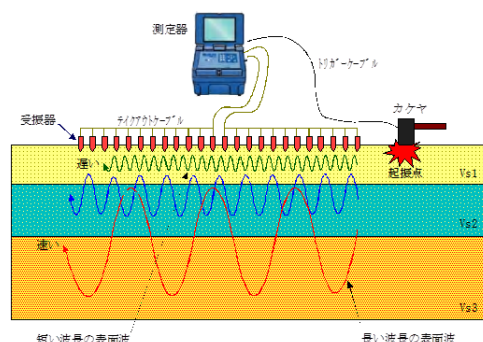
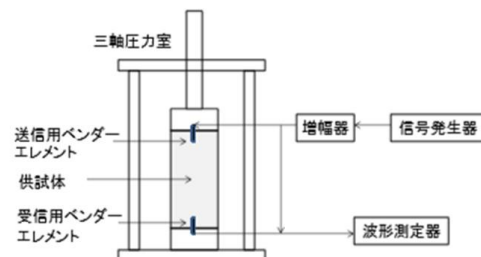
図1: 実際の築堤履歴¹⁾写真1: 平成24年九州北部豪雨矢部川決壊²⁾図2: 表面波探査測定様子³⁾図3: ベンダーエレメント法装置概要⁴⁾

写真2: 実験実施様子

3.実験に用いた試料の基本的性質

各試料「熊本珪砂 (K-0・K-4・K-7)、現場試料 {攪乱・不攪乱 (ブロックを残した)}」の基本的性質を示す。(現場試料は、筑後川豆津橋崩壊部付近で採取→細粒分質砂)

表 1：各試料の基本的性質 5)

		K-0	K-4	K-7	現場試料(攪乱)	現場試料(不攪乱)
最大粒径	mm	19	2	0.85	4.75	4.75
D ₆₀	mm	5.5	0.72	0.17	0.16	0.16
D ₅₀	mm	4.75	0.68	0.15	0.075	0.11
D ₃₀	mm	3.35	0.56	0.12	0.012	0.044
D ₂₀	mm	2.95	0.51	0.091	0.0036	0.022
D ₁₀	mm	2.3	0.48	0.058	0.001	0.0065
均等係数U _c		2.39	1.5	2.93	160	24.6
曲率係数U _{c'}		0.89	0.91	1.46	0.9	1.86
細粒分含有率F _c	%	0	0.37	15.6	50.25	43.25
含水比	%	0.42	0.33	0.72	21.7	29.7
土粒子密度ρ _s (g/cm ³)		2.645	2.657	2.558	2.584	2.628
透水係数k(約)	(m/s)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹

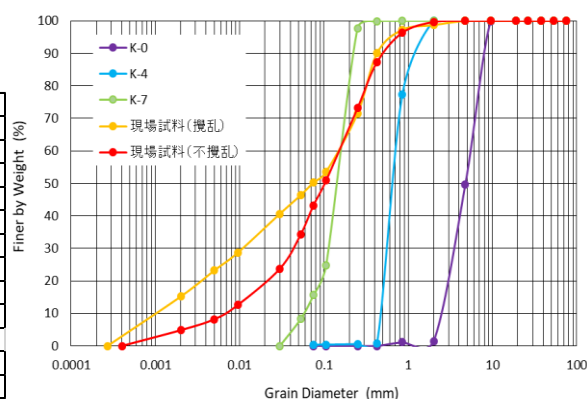


図 4：粒径加積曲線 5)

上記の図に示した透水係数は、ベンダーエレメント試験中の供試体から直接透水係数を求めることができないため、「テルツァーギの式」(式(5))より算出した値である。

$$k(m/s) = \frac{\gamma_w}{\eta} \times C_t \times \left\{ \frac{\frac{n}{100} - 0.0013}{\sqrt[3]{1 - \frac{n}{100}}} \right\}^2 \times D_{10}^2 \times \frac{1}{10^4} \quad (5)$$

4.減衰についての実験結果と考察

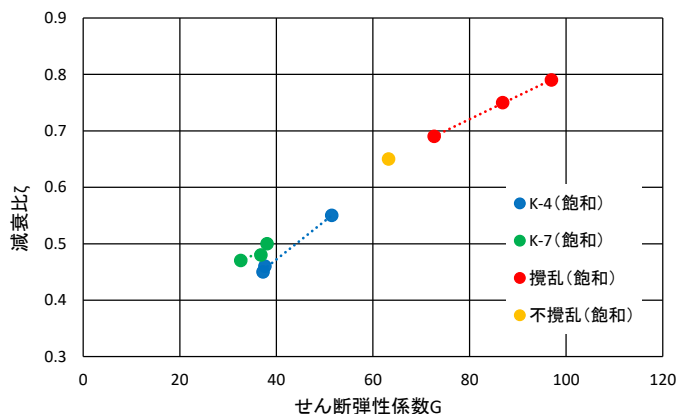


図 5：減衰比と [せん断弾性係数 G(MN/m²)]

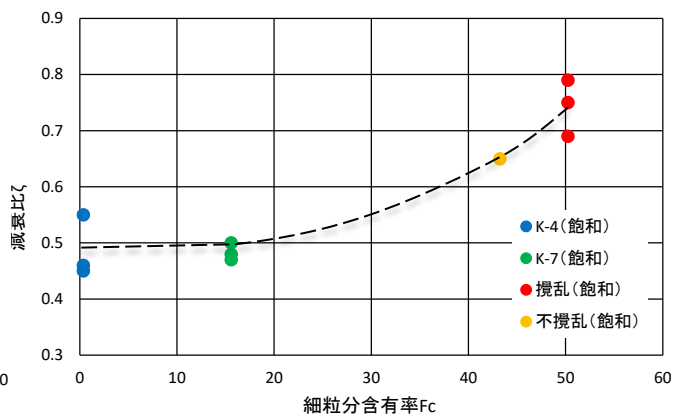


図 6：減衰比と [細粒分含有率 Fc(%)]

図 5 と図 6 に本実験から得られた結果「K-4・K-7・現場試料 (条件は飽和=B 値 0.95 以上)」を示す。(K-0 は、粒子一つ一つが非常に大きく、ベンダーエレメント試験の結果が現在うまく取り出せていない。)

本実験から得られた結果より、「減衰は、せん断弾性係数 G(MN/m²)に比例関係にあるが、試料毎に関係性が異なる」、「同じせん断弾性係数 G(MN/m²)でも、粒径が小さい＝減衰が大きくなる」ことが読み取れる。(図 5) また細粒分含有率 Fc(%)が大きくなるにつれ、減衰も大きくなることも読み取れる。(図 6)

上記のことから、せん断波からせん断弾性係数 G だけでなく、減衰の大きさの違いを得ることで、対象となる土の剛性だけでなく、土の性質の違い (細粒分含有率 Fc(%)など) を得られる可能性を示した。

5.まとめ

主要な知見を以下に示す。

1. 本実験で得られた減衰は、「せん断弾性係数 G(MN/m²)と比例関係だが試料毎に関係性が異なる」と「細粒分含有率 Fc(%)が大きくなるにつれ、増加する (ゆるやかな曲線)」という結果を示した。
2. 減衰の大きさを得ることで、土の性質の違い (細粒分含有率 Fc(%)など) を得られる可能性を示した。

謝辞：本研究の一部は、気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT)、研究室技術員 (中島通夫) の支援を得て実施した。

「参考文献」1)河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント (平成 25 年 6 月・独立行政法人土木研究所)、2)矢部川堤防調査委員会報告書 (平成 25 年 3 月・矢部川堤防調査委員会)、3)表面波探査説明資料 (平成 29 12 月・大和探査技術株式会社)、4)ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法 {地盤工学会基準 (案)} 5)筑後川豆津橋下流右岸川表堤防法面崩壊について概要版 (令和 1 年 9 月・筑後川河川事務所))