

## ベンダーエレメント法を活かした土質材料の減衰比と透水係数の相関性について

九州大学 学○ 林田 典也

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 伊藤 寛之 福味 尊

## 1.はじめに

堤防には、歴史的経緯等から、その堤体土は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も多い。さらに、多様な地形・地質上に築堤されてきていることより、堤防内部は三次元的に不均一に形成されていることが珍しくない<sup>1)</sup>。

また、現在の堤防照査・設計手法は「地質・地盤特性を一次元的でしかおさえられないボーリング土質調査」、「物理探査」が主に用いられている。しかし近年、締固めが十分でない堤体のり面上でのすべり破壊、矢部川などに見る浸透決壊<sup>2)</sup>などが発生してきており、ボーリングによる調査では十分に抑えきれない局所的弱部（＝高透水性によるゆるみ部など）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、堤防内に内包する弱部を事前に把握し、適切な対策をするために、堤防内部の弱部を高精度でかつ簡便に探し出せる実務に活用しえる技術の開発が期待されている。本研究では、表面波探査（図2）から得られる「せん断波速度 $=V_s(m/s)$ 」に加えて、「波の減衰（S波振幅の減衰）」に着目し、減衰特性と透水性との関係性を供試体レベルで分析し、減衰特性と土質材料の透水性の相関性について実験的に考察した。具体的には、三軸供試体を用いた要素試験から粒度の異なる各試料「熊本珪砂（K-0・K-4・K-7）、現場試料、カオリン粘土」においてS波振幅がどれだけ減衰しているのかを確認する。得られた結果より、減衰と土質特性の関係（今回は透水係数）を理解し、減衰特性と土質による透水係数の相関性について調べる。

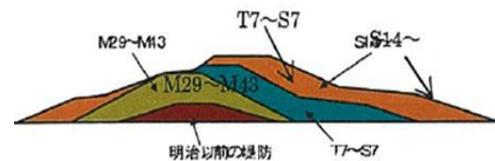
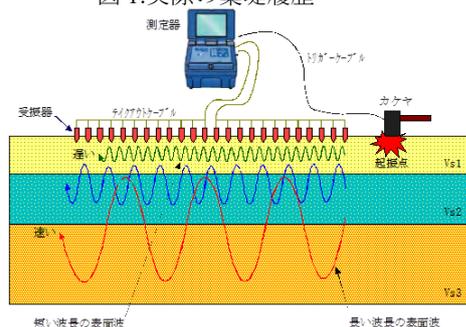
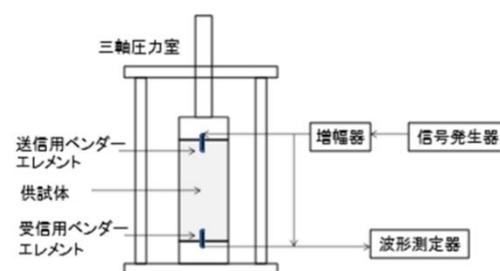
## 2. 実験方法

要素実験として、表面波探査で得られる情報と関連付けることを想定し、ここではベンダーエレメント法<sup>4)</sup>（図3）を用いる。ベンダーエレメント法はせん断波を供試体端で送信し、他端で伝播したせん断波を受信した後、せん断波速度 $V_s$ を求め、求めた $V_s$ から供試体のせん断弾性係数 $G(MN/m^2)$ を算出するものである。

実験条件として、供試体の寸法は直径5cm、高さ10cm、作成方法は締固め回数を各層0回、50回、100回×5層の3種類、拘束圧は20kPa、50kPa、100kPa、周波数は2kHz、5kHzである。

減衰については、減衰特性を表す係数として、減衰比 $\zeta$ を用いる。減衰比とは、粘性減衰を有する自由振動系における粘性減衰係数（減衰係数）と臨界減衰係数の比のことで、対数減衰率 $\delta$ （隣り合う振幅の比の自然対数）より減衰比を求める<sup>6)</sup>。本実験では送信波と受信波の減衰比を用いて検討を行った。

実験に用いた各試料「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)}カオリン粘土」の基本的性質を表1、図4に示す。

図1:実際の築堤履歴<sup>1)</sup>図2:表面波探査測定様子<sup>3)</sup>図3:ベンダーエレメント法装置概要<sup>4)</sup>

キーワード 表面波探査、ベンダーエレメント法、テルツァーギの式、S波振幅の減衰

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 ウェスト2号館 11階 1108号室 地盤工学研究室

表1：各試料の基本性質<sup>5)</sup>

	K-0	K-4	K-7	現場試料(攪乱)	現場試料(不攪乱)	カオリン粘土
最大粒径	mm 19	2	0.85	4.75	4.75	0.063
D <sub>60</sub>	mm 5.5	0.72	0.17	0.16	0.16	0.0075
D <sub>50</sub>	mm 4.75	0.68	0.15	0.075	0.11	0.006
D <sub>30</sub>	mm 3.35	0.56	0.12	0.012	0.044	0.0036
D <sub>20</sub>	mm 2.95	0.51	0.091	0.0036	0.022	0.0025
D <sub>10</sub>	mm 2.3	0.48	0.058	0.001	0.0065	0.0014
均等係数U <sub>c</sub>	2.39	1.5	2.93	160	24.6	5.36
曲率係数U <sub>c'</sub>	0.89	0.91	1.46	0.9	1.86	1.23
細粒含有率F <sub>cc</sub>	% 0	0.37	15.6	50.25	43.25	100
含水比	% 0.42	0.33	0.72	21.7	29.7	42.7
土粒子密度ρ <sub>s</sub>	(g/cm <sup>3</sup> ) 2.645	2.657	2.558	2.584	2.628	2.695
透水係数k(推定値)	(m/s) 10 <sup>1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>
透水係数k(実験値)	(m/s)	1.97E-03	5.72E-05			1.24E-08

表-1 に示す透水係数の推定値は「テルツァーギの式」(式(1))

より算出した値である。これはベンダーエレメント試験の供試体毎の透水係数を求めるために用いている。また、実験値は推定値により求めた透水係数の妥当性評価の為にいった。

K-4、K-7は「定水位透水試験」、カオリン粘土は「段階载荷による圧密試験」によりそれぞれ求めた値である。

### 3.減衰比と透水係数の関係性に関する考察と相関

図5に減衰比とテルツァーギの式による透水係数推定値の関係を示す。全体を見ると、透水係数が大きくなると減衰比も大きくなる傾向が読み取れる。また、一方でK-4、K-7、現場試料の砂質土のみに着目すると、わずかではあるが透水係数が小さくなると減衰比は大きくなる傾向を示している。以上より、マクロの視点では、土質材料による透水性の違いを評価できる可能性を示している。しかし、減衰比のみを用いて、同材料の相対密度の違いを判断するのは現状では適切ではなく、せん断速度との組み合わせで求められるものと判断される。これにより、要素レベルの結果ではあるが、「せん断波速度」から堤体の剛性評価に用いられる表面波探査に、同探査から得られる「S波振幅の減衰特性」に関する評価を加えることができれば、1種類の探査方法で土質材料の剛性だけでなく、土質材料の違いに依拠したマクロな視点からの浸透性評価の可能性が示唆される。

図6に透水係数の推定値と実験値の比較図を示す。この結果から、全ての試料において今回用いた推定値は、実験値より大きく算出されることが読み取れる。一方で、推定値の傾向(カオリン<K-7<K-4)は実験値同様になっており、定性的には減衰比と透水係数の相関性の傾向は変わらないと言える。今後は実際の堤体度による実験や、現地での表面波探査を行い減衰と土質特性の相関について更なる検討を行う予定である。

### 4.まとめ

本研究では、減衰比と透水係数の相関について要素レベルでの検討を行った。主要な知見を以下に示す。

- ✓ 地盤材料全体の傾向から、透水係数が大きくなると比例して減衰比も大きくなる。同質材料において相対密度が大きいと、減衰比もわずかではあるが大きくなる傾向が見られる。
- ✓ 透水係数について、テルツァーギの式による推定値と実験値はそれぞれ異なるが傾向は等しい。
- ✓ 実測値がない場合、テルツァーギの式を用いることで土質傾向を把握できる可能性がある。

「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)表面探査説明資料(平成29年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)、6)笠修平ら：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(令和元年度 西部支部研究発表会)

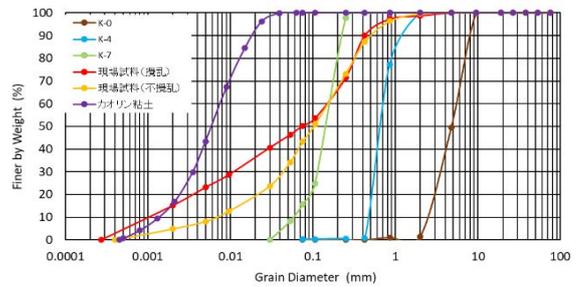


図4：粒径加積曲線<sup>5)</sup>

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

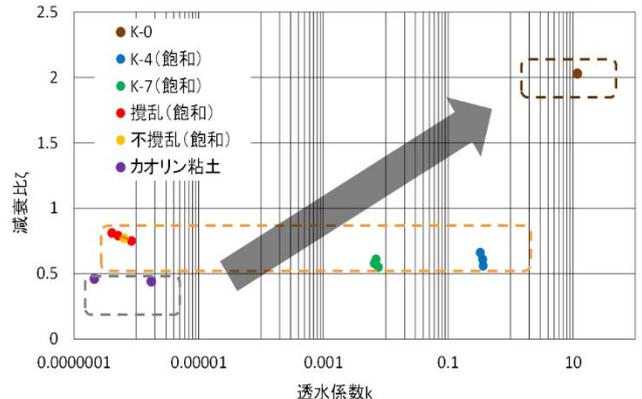


図5：減衰比-透水係数(推定値)

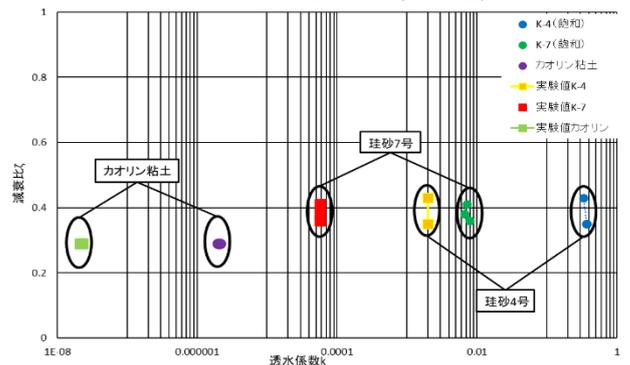


図6：減衰比-透水係数(推定値と実験値)