

波の減衰を活用した新たな地盤探査システム開発に向けた基礎的研究

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

(株)建設技術研究所 伊藤 寛之 福味 尊

大和探査技術(株) 内藤 好裕 羽佐田 葉子

(株)地圏総合コンサルタント 佐渡 耕一郎

1.はじめに

河川堤防は、歴史が古く複雑な断面を構成していることが多いため、堤防縦断方向・断面と、三次元的に不均一な地質が形成されている¹⁾。このような堤防に対し、「ボーリング調査」や「物理探査」を用いて調査及び評価を行っているが、近年、矢部川での浸透破壊²⁾等に見る、従来の調査では捉えきれない堤防内の局所的弱部（＝高透水性によるゆるみ部など）が要因となり、決壊に至るといった事例がある。

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探し出せる技術の開発が求められている。本研究では、表面波探査³⁾から得られる「せん断波速度=Vs(m/s)」に加え、同探査の波形から得られる「波の減衰（S波振幅の減衰）」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・分析の精度向上を目的としている。本年度は、室内および現地試験を通し減衰特性と土質材料の関係性について実験的に考察を行った。

2.実験概要

室内試験は、ベンダーエレメント法⁴⁾(以下、BE法)を実施した。BE法の追加実験の条件は、「寸法：直径10cm、高さ10cm」、「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について、笠ら⁵⁾と同様に減衰比 ζ (式1参照)を用いて相関性の評価を行った。

現地試験は表面波探査を実施し、通常解析と減衰に着目した解析を行った。「測定距離：60m、固定展開方式測定」にて測定した。また、減衰係数(任意の2地点間の波の振幅比より算出した値(式2を参照))により減衰の程度を算出した。

3.実験に用いた試料の基本的性質

本研究の室内試験では、笠らが検討した試料「熊本珪砂（K-4・K-7）、筑後川豆津橋にて採取した現場試料⁶⁾(攪乱・不攪乱)」に加え、佐賀県神埼市にある筑後川支川の

城原川(右岸 7k800 地点)にて採取した試料にてBE法を実施し、考察を行う。図-1中に記述の通り、本地点は昨年度の雨により崩落した地点である(図-1中の②を上段、③を下段試料としている)。図-2より、筑後川にて採取した試料は、筑後川豆津橋付近の試料と比較すると、全体的に粒形が大きく、細粒分は少ないことが読み取れる。(城原川上段・下段は粘性土まじり礫質砂⁷⁾)。また表-1に検討試料の基本的性質についてまとめている。



図-1 サンプルング地点

(図中の数字はサンプルング位置)

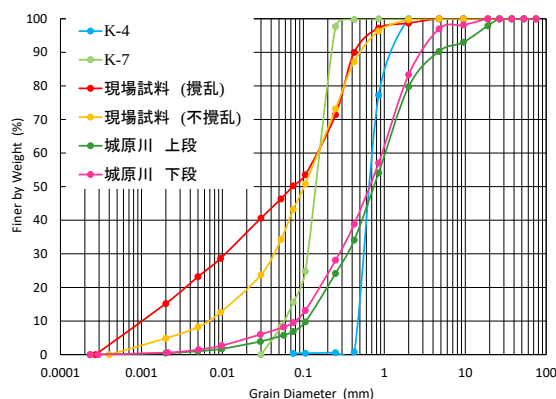


図-2 粒形加積曲線

表-1 各試料の基本的性質

		K-4	K-7	豆津橋 (攪乱)	豆津橋 (不攪乱)	城原川 上段	城原川 下段
最大粒径	mm	2	0.85	4.75	4.75	19	9.5
D50	mm	0.68	0.15	0.075	0.11	0.75	0.65
均等係数Uc		1.5	2.93	160	24.6	8.33	11.88
細粒分含有率Fc	%	0.37	15.6	50.25	43.25	6.89	9.51
含水比	%	0.33	0.72	21.7	29.7	17.93	24.29
土粒子密度ps	(g/cm3)	2.657	2.558	2.584	2.628	2.71	2.69

$$\delta = \frac{1}{m} \times \ln \frac{a_n}{a_{n+m}} \Rightarrow \zeta = \frac{\delta}{2\pi} \dots (1)$$

(m=振動回数、 a_n =n回目の振幅)

$$\text{減衰係数}\alpha(\omega) = -\frac{\ln \left[\frac{D(x_2, \omega)}{D(x_1, \omega)} \right]}{x_2 - x_1} \dots (2)$$

(x=任意の地点、D=x地点の振幅、 ω =周波数)

4.室内試験における実験結果と考察

4-1.せん断弾性係数と減衰比

図-3 に BE 法から得たせん断弾性係数(供試体の剛性を示す係数)と減衰比 (係数が大きい程、波の減衰も大きい)の相関について示す。図から、本研究にて新たに追加した土質材料(実際の築堤土)においても、2つのパラメータは比例に似た相関を持っていることが読み取れる。このことから供試体サイズの土質材料は、減衰の大きさと伝播材質の剛性が比例することを示すマックスウェル型モデル⁸⁾(図-4 参照)を満たすことが考えられ、減衰比は地盤の減衰特性を表せることが示された。

4-2.土質特性と減衰比

図-5 に減衰比と細粒分含有率 F_c の相関図を示す。図より、築堤土においても、細粒分が増加すると減衰もともに大きくなる傾向が確認できる。ただし、城原川上段の試料にいたっては、大きく他を下回っている。図-3 にも見られるが、上段試料において減衰やせん断弾性係数が、他の砂質土より著しく低い傾向が見られる。十分に圧密ができていなかったこと等が要因と考えられるが、今後は実験数及びデータ量を増やし、再度検討及び考察する予定である。

5.現地試験の結果及び考察

図-5 に表面波探査の解析結果を示す。図-5 中の上の図は、縦軸に位相速度、横軸に水平距離(測定開始地点を 0 と設定)を示しており、下の図は縦軸に減衰係数をとっている。図の赤丸部分に着目すると、波の速度と減衰は同様の相関(赤丸内の左側が小、右側が大)があることが確認できる。このことから、供試体サイズだけでなく、実地盤上においても剛性と減衰においては「剛性 $\propto$ 減衰」の相関を有していることが考えられる。

6.まとめ

本研究では、減衰という新たなパラメータを表面波探査及び BE 法にて分析し、以下の知見を得た。

1. 供試体、実地盤に関わらず、土質材料は「減衰と剛性が比例の相関を持つ、マックスウェル型」の減衰モデルを満たす。
2. 室内試験において、減衰と土質特性との相関として細粒分含有率 F_c が比例相関を持つことが示唆される。

今後は、室内試験にて試料の追加、また現地試験結果を基に F_c との相関を確認し実用化に向けて分析を行っていく。

謝辞：本研究の一部は、研究室技術員（中島通夫）の支援と筑後川河川事務所のフィールド提供を得て実施した。

「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 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)笠ら：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)、6)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）、7)城原川浸透対策検討設計（城原川右岸 7k700 地質調査結果）(令和 3 年度筑後川及び矢部川護岸等測量設計業務)、8)信州大学五十田研究室 竹内：振動学特論 9 章、pp1-12

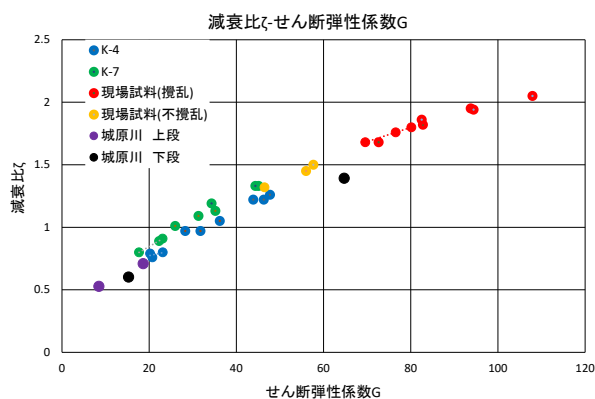


図-3 減衰比と [せん断弾性係数 $G(\text{MN/m}^2)$]

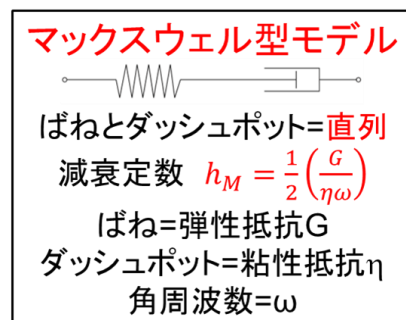


図-4 マックスウェル型モデルの式及び概念図

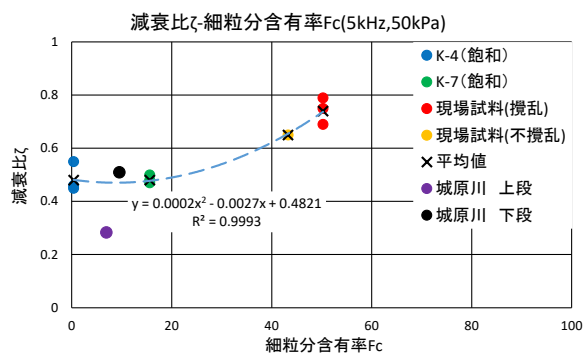


図-5 減衰比と [細粒分含有率 $F_c(\%)$]

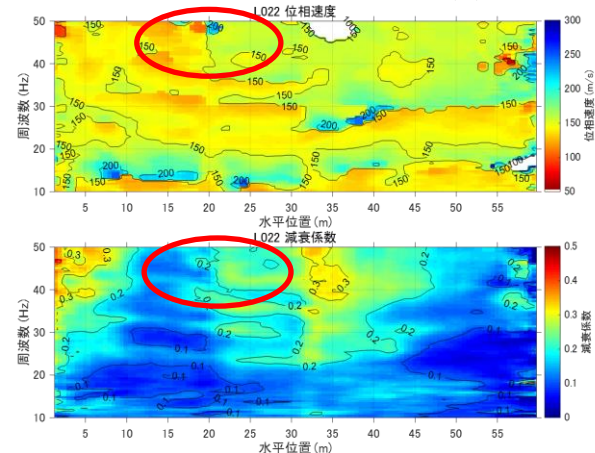


図-6 城原川 7k800 付近表面波探査解析結果