

DOI: 10.11779/CJGE2023S10022

附加质量法在土石混合料密度检测中的适用性研究

徐思远^{1,2}, 陈生水^{1,2}, 傅中志^{*1,2}, 刘斯宏³, 次仁云旦⁴

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京 210024; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏南京 210024;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210024; 4. 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院, 西藏拉萨 850004)

摘要: 附加质量法已经在多座土石坝工程的不同筑坝料密度检测中得到了应用, 随着近年来水利水电工程的发展, 宽级配高细粒含量的土石混合料也逐渐被应用在坝体填筑中, 而附加质量法在土石混合料中的适用研究开展的仍较少。依托某抽水蓄能电站工程, 对不同风化玢岩含量的混合填筑料开展了附加质量法试验和坑测密度试验, 并对附加质量法密度求解的准确性进行了讨论和分析。经过研究发现: 附加质量法在玢岩含量较低的试料中表现良好, 但随着混合料玢岩比例的提高, 试料的实测干密度以及附加质量法测得的频率和刚度均表现出一定的随机性, 部分测点结果的合理性较差, 需要开展 $\omega^2-\Delta m$ 相关性分析来验证测点结果合理性才能取得准确的密度结果。

关键词: 土石混合料; 附加质量法; 压实密度检测; 刚度相关法; 压实质量

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0001-05

作者简介: 徐思远(1993—), 男, 工程师, 主要从事土石坝渗漏病害探测、岩土原位测试等方面的研究工作。E-mail: syxu@nhri.cn。

Applicability of additive mass method in density tests on soil-mixture materials

XU Siyuan^{1,2}, CHEN Shengshui^{1,2}, FU Zhongzhi^{1,2}, LIU Sihong³, CIREN Yundan⁴

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 4. Tibet Hydraulic Waterpower Planning and Designing Institution, Lasha 850000, China)

Abstract: The additive mass method (AMM) has been applied in the density tests on different materials of many earth-rockfill dams. With the development of hydropower projects in recent years, the soil-rock mixtures (S-RM) with wide gradation and high fines content have been used for dam construction. While the researches on the applicability of the AMM in the soil-rock mixtures are insufficient. In this study, the AMM is adopted to evaluate the compaction densities of the S-RM composed of fresh dolomite and strongly weathered diorite porphyrite in a pumped storage power station in China. The compaction densities evaluated by the AMM are compared with those measured by the pit tests. The results demonstrate that for the S-RM containing low contents of diorite porphyrite, the compaction densities can be reasonably evaluated by the AMM. For the S-RM with high contents of diorite porphyrite, the analysis of the $\omega^2-\Delta m$ correlation obtained by the AMM in advance is required to conduct reasonable compaction density evaluation.

Key words: soil-rock mixture; additive mass method; compaction density evaluation; stiffness-density correlation; compaction quality

0 引言

土石坝的施工质量是工程安全运行的关键, 筑坝材料的压实密度是压实质量评价的基础参数, 具有重要的作用^[1]。工程实践中, 附加质量法以其简洁高效的特点在筑坝料压实密度检测中得到了较为广泛的应用^[2-3]。经过大量学者的研究和应用, 附加质量法已经在土石坝的黏土、砂砾、堆石等典型填筑料中得出了较好的密度检测准确度^[4-5]。近年来, 部分工程开始采用具有一定工程尺度且同时含有一定数量的细颗粒材

料的土石混合料进行填筑^[6]。《水利水电物探规程》(SL 326—2005) 规定: 当堆石(土)体分层碾压施工、粒径较大(0.2 m以上)、堆石(土)体成分相对均一时,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3090101); 国家自然科学基金面上项目(52279135); 江苏省卓越博士后计划项目(2022084); 水力发电工程学会青年人才托举工程项目(水电学秘字(2023)15号); 南京水利科学研究院青年基金项目(Y323004)

收稿日期: 2023-07-05

*通信作者(E-mail: fu_zhongzhi@yahoo.com)

可选用附加质量法。但是土石混合料的颗粒粒径跨度大, 岩性成分复杂, 现阶段附加质量法在土石混合料中的适用性尚不明确。

以某在建抽水蓄能电站工程为依托, 开展了现场坑测密度试验和附加质量法试验, 讨论了附加质量法在不同混合比例混合料的密度检测中的适用性。该工程上水库料源中以岩性良好的白云岩为主, 但在不同区域混合有比例不一的闪长玢岩。料源中的玢岩风化程度高, 岩性较差, 混合料的整体工程性能较差, 不均匀性强, 呈现出较为典型的土石混合料特征。

1 附加质量法

李丕武等^[7]将附加质量的概念引入堆石体密度测量中, 通过在小浪底土石坝工程开展的一系列现场探索性试验, 确定了现场密度测试的方法及基于质弹($m-K$)模型假定的基础理论, 图 1 为附加质量法的假定模型。将测点处的堆石体等效为一根具有固定刚度 K 的线性弹簧, 将堆石体自身的质量等效为弹簧顶端质量为 m_0 的质点。在试验过程中施加的不同级附加质量 Δm 与测点堆石体的质量一起构成振动弹簧系统中的振子质量 m , 根据振动方程即可推导出振动频率 f 与附加质量 Δm 之间的关系为

$$D = (2\pi f)^{-2} = (m_0 + \Delta m)/K \quad (1)$$

将 $(2\pi f)^{-2}$ 记为 D 即可得到 D 与 Δm 的线性关系, 从而可得到受测堆石体的刚度 K 和堆石体参振质量 m_0 。

基于弹性半空间模型, 可推导出受测堆石体的密度解析式为

$$\rho = (1 - \mu)K / 4V_s^2 r \quad (2)$$

式中: μ 为堆石体泊松比; V_s 为堆石体的横波波速。

由于波速和泊松比的精确测量受到的限制较大, 因此, 工程中多采用刚度相关法、数字量板法和人工神经网络法等分析刚度 K 和参振质量 m_0 与压实密度的统计关系进而求解压实密度, 本文采用刚度相关法。

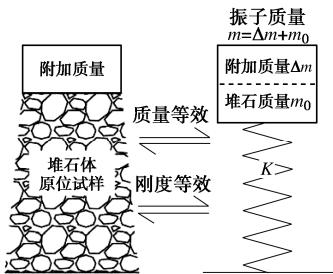


图 1 附加质量法的假定模型

Fig. 1 Assumed model for additive mass method

2 现场试验

2.1 试验设置

现场试验所用开挖料料源主体为白云岩类石料,

分布有易风化崩解的闪长玢岩脉。依照岩脉的分布情况, 开挖料按玢岩含量分为 0%, 5%, 25%, 33%4 种典型料源, 分别记作 DC-0, DC-5, DC-25, DC-33。开挖料中小于 5 mm 的细料含量指标 C5 随着玢岩含量的增加而增大, 随着玢岩含量的提高, C5 数值分别为 6.7%, 14.2%, 30.2%, 39.3%, 4 种典型开挖料级配曲线如图 2 所示。

现场试验中对不同试料各开展一个场次的试验, 每场试验分散布置 18 个测点, 每个测点位置在测量附加质量法参数后立即开展坑测灌水试验和含水率试验以测定实际干密度。附加质量法试验采用直径 50 cm, 重 75 kg 的圆盘形砝码分级施加附加质量, 每个测点施加 5 级不同附加质量, 最大附加质量 525 kg。

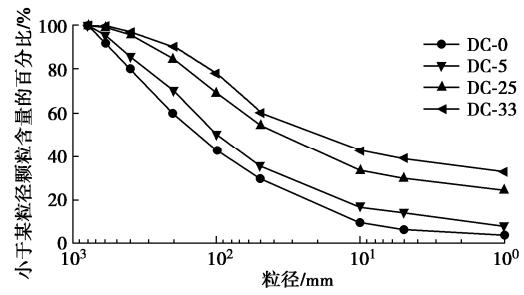


图 2 4 种混合料的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of four different mixtures

2.2 试验结果

现场通过附加质量法采集响应频率并求得的刚度参数 K 以及通过坑测法得到的压实密度 ρ_d 。试验结果采用概率密度函数的形式进行可视化, 如图 3 (a), 4 (a) 所示。同时, 不同开挖料刚度与密度的平均值随玢岩含量的变化也绘制在图 3 (b), 4 (b) 中。

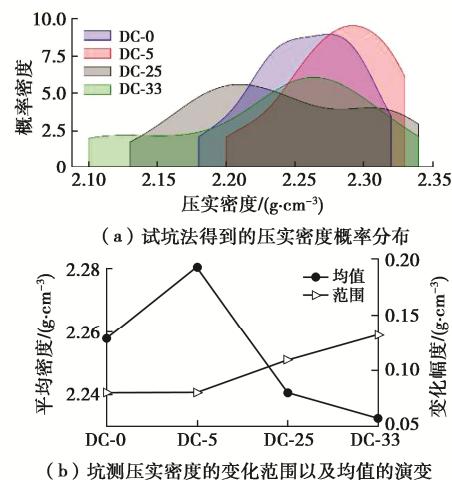


图 3 现场坑测密度的概率分布以及其均值随玢岩含量的变化

Fig. 3 Distribution of compaction densities obtained from field tests and their variation ranges

图 3 (a) 所展示的 4 种不同开挖料的压实密度分布规律大致呈现正态分布的形态, 符合土石材料的一般规律^[8]。此外可以看出, 对于 DC-0 和 DC-5 的开挖

料, 干密度的分布范围更加集中, 峰值段较为明显; 但是在 DC-25 和 DC-33 的开挖料中, 干密度分布范围较宽, 同时曲线形态整体较为扁平。如图 3(b) 所示, 在 DC-0 的开挖料试验结果中, 压实密度的平均值为 2.26 g/cm^3 , 随着玢岩含量的提高, 密度均值先在 DC-5 中增加至 2.28 g/cm^3 后, 后续分别在 DC-25 和 DC-33 中减小至 $2.24, 2.23 \text{ g/cm}^3$ 。玢岩含量的增加直接导致了开挖料中小于 5 mm 细料含量的增加, 这也正是开挖料干密度均值随玢岩含量升高而呈现出先增大后减小的根本原因。上述试验中密度的变化与 Wang 等^[9]、Chang 等^[10]和 Yin 等^[11]在混合料孔隙率-细料含量方向的试验和数值模拟研究中得到的结论相吻合。这一变化可以通过骨架孔隙比的概念来进行解释, 基于这一理论, 本文中不同玢岩含量的开挖料呈现出了不同的主要骨架承力结构, DC-0 以石(粗颗粒)骨架为主, 而 DC-25 和 DC-33 以土骨架为主, DC-5 则处于两种骨架结构的变化转折点位置。同时, 可以从图 3(b) 中看出, 干密度的变化幅度在 DC-0 和 DC-5 开挖料中基本一致, 约为 0.08 g/cm^3 , 之后随着玢岩含量的增加而增大至 $0.11, 0.13 \text{ g/cm}^3$ 。在玢岩含量较高的土石混合料中, 较宽的压实密度变化幅度反映了土石混合料的较强的变异性。

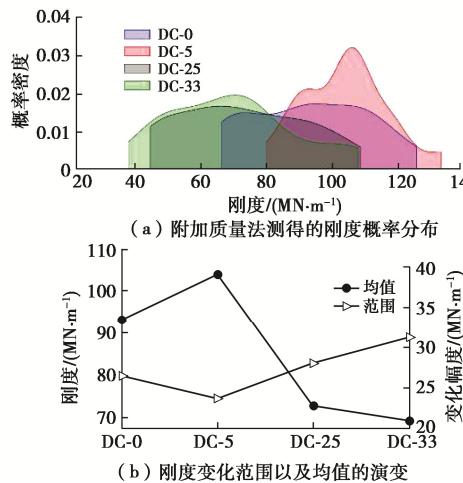


图 4 现场刚度结果的概率分布及其均值随玢岩含量的变化

Fig. 4 Distribution of stiffness obtained from field tests and their variation ranges

与压实干密度结果对比, 不同玢岩含量开挖料的刚度结果在分布规律、分布范围以及均值变化趋势上均与密度结果的特性保持一致, 说明附加质量法测得的刚度结果与试坑法测得的密度结果存在潜在的相关性, 将二者绘制在同一平面上可得图 5, 其中横坐标采用刚度参数 K/r , 对照本文试验, 承载板半径 r 值为 0.25 m 。图 5 中不同颜色的散点代表 4 种开挖料每个测点的密度与刚度试验结果; 对应颜色的色块为试

验结果在 $\rho_d - K/r$ 平面的散布范围; 斜线是密度与刚度参数的拟合直线。

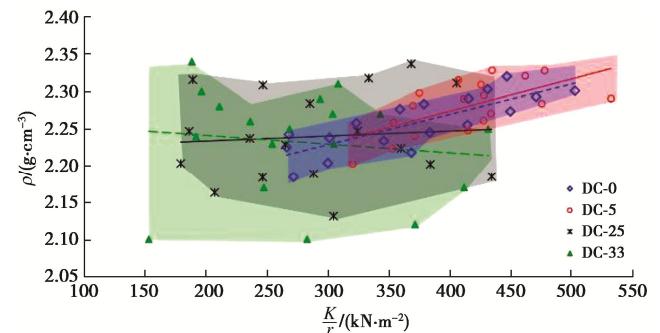


图 5 压实干密度 ρ_d -刚度参数 K/r 关系图

Fig. 5 ρ_d plotted against K/r and fitting lines

通过图 5 可以看出, 在 DC-0 和 DC-5 中, 色块的形态较为狭长, 干密度随着刚度增加而变大的趋势较为明显, 符合土石料的特性。对比而言, DC-25 和 DC-33 的色块形态较为宽大, 干密度随刚度增加而增加的趋势并不明显, 在 DC-33 中甚至出现了相反的趋势, 说明在这两组试验中的试验结果较为分散。

3 适用性分析

现行规范中并未对附加质量法测得密度的误差范围进行明确限定, 但在多数研究案例中, 测点密度的相对误差一般能控制在 3% 以下。因此, 本文选取 3% 作为密度相对误差的控制范围, 以开展压实密度与响应频率的相关性分析。

为了直观展示采用附加质量法分析响应频率参数而得的压实密度相对误差, 将密度求解结果 ρ' 与现场坑测结果 ρ_d 绘制在平面坐标系中, 如图 6 所示, 图中相对误差小于 3% 的区域标记为灰色。可以看出, 在 DC-0 和 DC-5 中, 所有测点的 ρ' 均落在可以接受的误差范围之内; 而 DC-25 和 DC-33 中, 部分测点的 ρ' 落在 3% 范围以外, 最大相对误差分别为 5.1%, 6.99%。同时可以看出, 在 DC-25 和 DC-33 中, ρ' 变化范围 ($2.21 \sim 2.24 \text{ g/cm}^3$) 明显小于 ρ_d 的变化范围 ($2.10 \sim 2.34 \text{ g/cm}^3$)。这说明, 在玢岩含量较高、细料比例较大的土石混合料中, 以响应频率分析为基础, 通过附加质量法检测密度的准确性与常规堆石料具有较大的差距。

前文已介绍过, 密度求解值是通过刚度相关法得到的, 密度求解的准确性是建立在刚度计算的准确性之上的。通过附加质量法的基本原理不难看出, 刚度反映的是由现场施加的不同级附加质量 Δm 以及对应响应频率参数 ω^{-2} 之间的关系, 刚度计算的合理性可以通过 $\omega^{-2} - \Delta m$ 的相关系数 r^2 进行评判。试验中各场

次测点的 r^2 的样本统计学变化由图 7 的箱型图表示。可以看出, 在 DC-0 和 DC-5 中, 所有测点的决定系数均在 0.98 以上, 且不存在离群点。而在 DC-25 和 DC-33 中, 箱型图范围出现明显的扩展, 且离群点数值分别达到了 0.958, 0.786。但是, DC-25 和 DC-33 测点决定系数的中位数仍然较接近于 0.98, 说明仍有半数的测点决定系数不小于 0.98, 具有较好的 ω^{-2} - Δm 相关性, 仍有可能进行较为准确的密度分析。

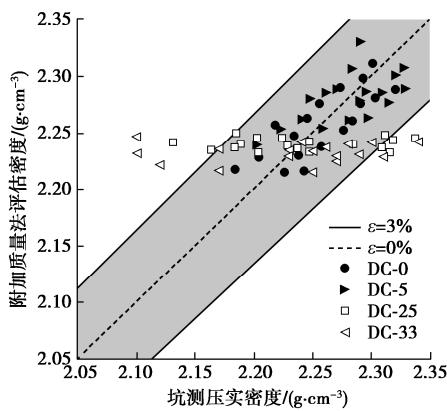


图 6 压实密度求解值-坑测值

Fig. 6 Compaction density: evaluated from AMM vs. measured by pit tests

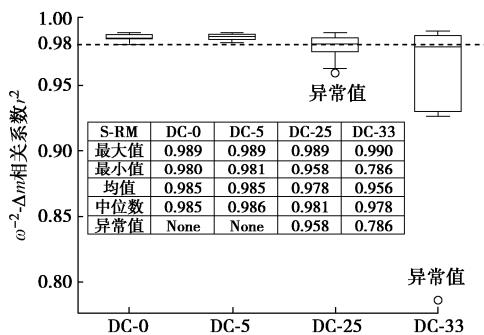


图 7 ω^{-2} - Δm 相关系数决定系数 r^2

Fig. 7 Determination coefficient r^2 between ω^{-2} and Δm

通过参考 DC-0 和 DC-5 的决定系数分布, 本文选择 $r^2 \geq 0.98$ 作为条件, 对 DC-25 和 DC-33 中具有较好 ω^{-2} - Δm 相关性的测点进行筛选, 并对通过筛选的测点再次进行密度求解, 结果如图 8 所示。

可以看出, 对比未筛选的 DC-25 和 DC-33 测点, 筛选过程提升了压实密度求解值与坑测值间的相关性, 使得 ρ' 的变化范围与 ρ_d 更加接近, 且筛选后的所有测点均能满足 3% 的相对误差要求。同时, 筛选后的 DC-25 和 DC-33 试料压实密度求解的平均误差由 2.21% 降至 1.17%, 最大误差由 6.99% 降至 2.53%。这表明, ω^{-2} - Δm 相关性差的测点是影响高粉岩含量, 即高细料含量的土石混合料整体密度分析的根本原因。

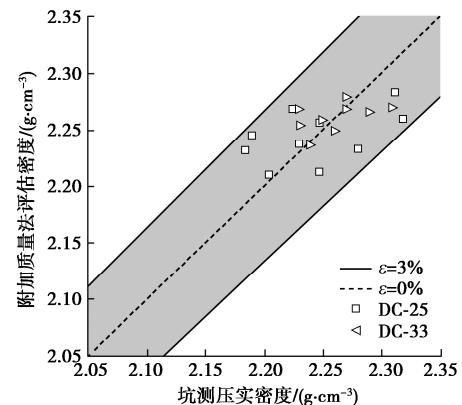


图 8 压实密度求解值-坑测值 (筛后 DC-25, DC-33 测点)

Fig. 8 Determination coefficient r^2 between ω^{-2} and Δm (DC-25 and DC-33 Screened)

4 结 论

以某抽水蓄能电站上水库料源中 4 种不同粉岩含量的土石混合填筑料为对象, 开展了附加质量法检测和坑测密度检测, 对附加质量法在土石混合料密度检测中的适用性进行了讨论, 得到 3 点结论。

(1) 随着风化料比例的增加, 筑坝料的细料含量升高。在相同的碾压参数下, 细料含量较高的土石混合料压实密度变化范围宽、随机性强。

(2) 在细料含量较低的土石混合料中, 附加质量法能较为准确的评价其压实密度。而在细料含量较高的土石混合料中, 附加质量法测得的刚度与干密度的相关性较差, 难以准确评价其压实密度。

(3) 对高细料含量土石混合料的附加质量法测点采用 ω^{-2} - Δm 相关系数的决定系数进行筛选后即可满足 3% 的相对误差要求, 表明, ω^{-2} - Δm 相关性差的测点是影响高细料含量的土石混合料整体密度分析的根本原因。

参 考 文 献:

- [1] 朱晟. 粗粒筑坝材料现场压实质量的控制标准研究[J]. 水力发电, 2011, 37(12): 22-26, 30. (ZHU Sheng. Study on on-site compaction quality control standard of coarse-grained materials[J]. Water Power, 2011, 37(12): 22-26, 30. (in Chinese))
- [2] 李丕武. 地基承载力动测的附加质量法[J]. 地球物理学报, 1993, 36(5): 683-687. (LI Peiwu. Additive mass method measured dynamically foundation bearing capacity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1993, 36(5): 683-687. (in Chinese))
- [3] 谭峰屹, 姜志全, 李仲秋, 等. 附加质量法在昆明新机场填料压实密度检测中的应用研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7):

- 2214-2218. (TAN Fengyi, JIANG Zhiqian, LI Zhongqiu, et al. Application of additive mass method to testing compacted density of filling material in Kunming new airport[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(7): 2214-2218. (in Chinese))
- [4] 薛云峰, 崔琳, 李丕武, 等. 刚度相关法测试堆石体密度[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 987-990. (XUE Yunfeng, CUI Lin, LI Peiwu, et al. Density measurement of rockfill by use of rigidity correlation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 987-990. (in Chinese))
- [5] 张智, 凡友华, 蔡加兴, 等. 测定堆石体密度的附加质量法理论分析研究[J]. 地球物理学报, 2015, **58**(1): 257-266. (ZHANG Zhi, FAN Youhua, CAI Jiaxing, et al. Theoretical analysis on density measurement of rockfill body by additive mass method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, **58**(1): 257-266. (in Chinese))
- [6] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, **36**(4): 50-56, 70. (XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, **36**(4): 50-56, 70. (in Chinese))
- [7] 李丕武, 冷元宝, 袁江华. 堆石体密度测定的附加质量法[J]. 地球物理学报, 1999, **42**(3): 422-427. (LI Peiwu, LENG Yuanbao, YUAN Jianghua. The density measurement of rockfill object by additive mass method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, **42**(3): 422-427. (in Chinese))
- [8] SHEN C M, YU J D, LIU S H, et al. A unified fractional breakage model for granular materials inspired by the crushing tests of dyed gypsum particles[J]. Construction and Building Materials, 2021, **270**: 121366.
- [9] WANG T, LIU S H, WAUTIER A, et al. Updated skeleton void ratio for gravelly sand mixtures considering effect of grain-size distribution[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, **59**(1): 12-23.
- [10] CHANG C S, YIN Z Y. Micromechanical modeling for behavior of silty sand with influence of fine content[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, **48**(19): 2655-2667.
- [11] YIN Z Y, HUANG H W, HICHER P Y. Elastoplastic modeling of sand-silt mixtures[J]. Soils and Foundations, 2016, **56**(3): 520-532.

(编校: 胡海霞)