

文章编号: 1000-7598 (2010) 07-2214-05

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

谭峰屹, 姜志全, 李仲秋, 颜惠和

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 附加质量法是粗粒料密度测试的无损检测方法之一, 介绍了附加质量法的基本原理和理论模型, 并成功应用于昆明新机场粗粒料填筑的压实密度检测。试验结果表明: (1) 附加质量法检测得到的地基刚度与灌水法检测得到的干密度呈线性相关, 相关系数为 0.81, 利用率定试验得到的经验关系计算得到的干密度与验证试验的相对误差在-1.78%~1.75%之间, 其检测精度能够满足施工检测精度检测要求, 并给出了昆明新机场粗粒料压实密度检测的经验关系式; (2) 附加质量法具有操作简单、检测速度快捷、被检测粗粒料无损伤等优点, 是一项很有发展前景的无损检测技术。

关 键 词: 粗粒料; 压实密度; 无损检测技术; 附加质量法

中图分类号: TU 472.1

文献标识码: A

Application of additive mass method to testing compacted density of filling material in Kunming new airport

TAN Feng-yi, Jiang Zhi-quan, Li Zhong-qiu, YAN Hui-he

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,
Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The additive mass method is one of nondestructive methods used for the compacted density testing of coarse materials. The theory of it is introduced; then its theoretical model is introduced too. The additive mass method is successfully used in the compacted density testing in Kunming new airport. The result shows: (1) the linear interrelation between foundation stiffness tested by the additive mass method and density tested by the water replacement method is about 0.81, relative error between the density from demonstration test and density from empirical relationship of calibration test is about -1.78%—1.75%, which shows that the testing accuracy of the additive mass method satisfied the requirement of construction testing accuracy; then the empirical relationship of compacted density of coarse material in Kunming new airport is given; (2) because of its advantages, such as convenient operation, fast testing and nondestructive for tested coarse material, etc., the additive mass method is one of the most prospective nondestructive methods.

Key words: coarse material; compacted density; nondestructive testing technique; additive mass method

1 引 言

昆明新机场填挖方总量约 2.2 亿立方米, 其中以陡坡寺组风化料、白云岩、砂岩、灰岩、页岩等为主的粗粒料比例较大, 合理地选择压实密度检测方法能够提高本工程土石方工程的施工进度和施工质量。

粗粒料压实密度的传统测试方法有灌砂法、灌水法等。这些方法应用起来费时、费工, 并且往往对被测土层造成损害, 无法满足工程大规模、快速

施工的需要, 而附加质量法用于粗粒料压实密度检测具有检测速度快、对被测土层无损伤等优点, 广泛地应用在了在水利工程中^[1-5], 但在机场建设中应用该技术仍然比较少见, 因此, 通过开展现场试验研究, 验证该技术是否可用于昆明新机场粗粒料压实密度的检测, 并在此基础上建立适用于本机场粗粒料压实密度检测的经验关系式。

2 附加质量法

附加质量法相较于传统的灌水法具有测速快、

收稿日期: 2008-10-16

第一作者简介: 谭峰屹, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程的加固理论与实施技术研究方面的工作。E-mail: tfy2003@126.com

成果分析快捷、只需在粗粒料填筑表层测试、对填筑层层无损坏等优点，是很有发展前景的无损检测技术。附加质量法已成功应用于大型水利工程，如黄河小浪底、清江水布垭、四川瀑布沟等，并被纳入新编《水利水电工程物探规范》。

附加质量法是在动力参数法之上发展起来的^[1-5]。它以振动理论和现代电子技术为基础，通过建立单自由度线弹性振动系统与测试介质振动系统等效的物理模型，即将一定面积以下的粗粒料等效为单自由度线弹性体系，用附加质量 Δm_i 的方法求解粗粒料的参振质量 m_0 ；同时，利用集中质量 m_0 的动能等于承压板下一定深度以内粗粒料连续介质振动动能的积分，从而导出承压板以下粗粒料密度 ρ_0 的解析式。附加质量法的理论模型如图 1 所示。

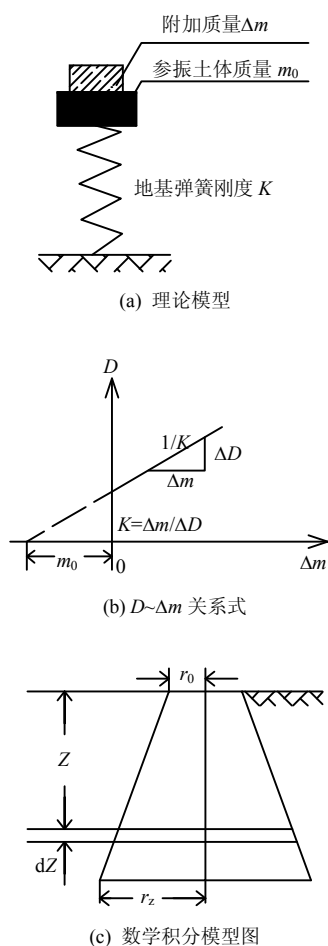


图 1 附加质量法理论模型

Fig.1 Theoretical model for additive mass method

3 测试技术要求及仪器

3.1 检测技术要求

(1) 分别对不同类型的堆石料进行试坑法试验和附加质量测试等密度率定试验，在同一点上进行

平行试验，同一类型的测区试验数量不小于 5 组；

(2) 应选择频带宽、灵敏度高、阻尼适中的附加质量法检测仪器；

(3) 附加质量法测试应选择适宜的观测系统，测试时附加质量 m_i 应多于 4 级，每级自振频率 f_i 的变化宜大于 1.0 Hz。

3.2 检测仪器

激振系统、信号采集系统和信号分析处理系统是附加质量法测试系统的主要组成部分。

激振系统主要组成部分为激振锤，将人为地抬高到某一指定的高度，并让其从该高度自由落体运动，通过激振锤自由落体运动产生的激振力使参振土体质量—地基弹簧系统产生振动。

信号采集系统主要由 3 部分组成，即承重压力板、附加质量检测块、检波器。其中，承重压力板和附加质量检测块构成了附加质量法测试系统的附加质量组成部分。通过增减附加质量检测块的数量来调整附加质量法测试系统的参振质量，满足附加质量法测试系统自振频率调整的目的。

信号分析处理系统主要包括频谱分析系统和附加质量法成果分析系统。激振系统对参振土体质量—地基弹簧系统产生振动后，继而会产生振动波形，该振动波形被频谱分析系统采集到并被分析，以获得系统整体的自振频率；附加质量法测试分析系统通过对各级附加质量下的系统自振频率的分析，得到被测土体的地基刚度。

附加质量法的试验装置组成如图 2 所示。

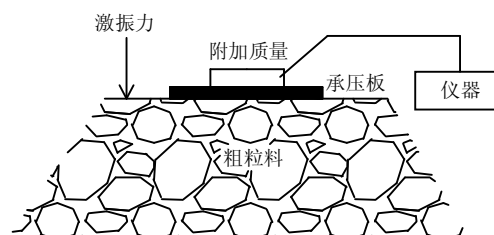


图 2 附加质量法测试系统示意图

Fig.2 Sketch for testing system of additive mass method

WYS2004 附加质量法密度测定仪为本次昆明新机场粗粒料压实密度的附加质量法试验与检测采用的仪器设备。其参数如下：两通道模数采集，模数转换(A/D)精度 16 位；采样频率在 44.1~1.1 kHz 之间进行选择；单道采集点数 2048，并且可以调节所显示的点数。

4 试验步骤

附加质量法压实密度现场试验在昆明新机场东试验区的粗粒料强夯填筑试验小区进行。经过多次试验的反复对比,并结合已有的工程经验,本次现场试验步骤如下:

(1) 在选定试验点铺上薄薄的一层厚约 2.0 cm 的细砂进行找平;

(2) 选取直径(D)为 0.4 m 的承压板(现场粗粒料最大单体粒径为 $0.130\text{ m} \leq D/3\text{ m}$),并将其缓慢平放在已经铺垫平整的试验点上,使承压板与试验点接触完全;

(3) 根据试验需要,将质量块均匀对称布置在承压板上,分级加载;

(4) 检波器的固定,主要用石膏或者其他的耦合剂将其固定在承压板上,并将检波器于采集系统相连接,然后打开采集系统,轻轻敲击检波器附近的土体,如采集系统可以采集到产生的振动波形并显示出来,则可以确认检波器和采集系统充分连接;

(5) 打开 WYS2004 附加质量法密度测定仪,确认检波器和采集系统能正常工作,并进行参数设置,使频谱分析图中频率分辨率达到 0.1 Hz;

(6) 使激振锤自由下落,并采集相应的有效共振频率,完成本级信号采集;

(7) 加载 4~5 级,加载大小要保证每级之间的频率差 $\Delta f = f_{i+1} - f_i$ 足够大,每级荷载下重复步骤(3)~(6),即完成本试验点的测试。

5 成果分析

昆明新机场粗粒料压实密度的附加质量法现场试验由率定试验和验证试验两大部分组成:

(1) 率定试验:选取一定数量的测点,通过附加质量法测试得到该点的地基刚度,同时,在该测点利用传统的灌水法试验获得相应的压实密度,即在同一个测点同时进行采用附加质量法和灌水法两种试验。通过率定试验获得所测点的地基刚度和压实密度的经验关系式。率定试验分别进行附加质量法测试和灌水法密度测试各 10 组,共计 20 组试验。

(2) 验证试验:另外选取一定数量的测点进行附加质量法测试,获取相应的地基刚度,由(1)中的经验关系式计算获得相应测点的压实密度。同时,在进行了附加质量法测试的测点处,仍然通过灌水法测试获取相应的压实密度。通过与附加质量法获得的相应测点的压实密度进行对比分析,验证附加质量法的测试精度。验证试验进行附加质量法测试 20 组,灌水法密度测试 10 组,共计 30 组试验。

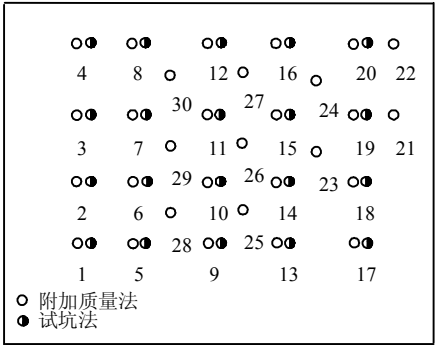


图 3 附加质量法和灌水法检测点平面布置示意图

Fig.3 Layout of test points of additive mass method and water replacement method

附加质量法无损检测点和灌水法检测点布置如图 3 所示。率定试验和验证试验试坑法(灌水法)和附加质量法测试成果如表 1 所示。

表 1 粗粒料附加质量法测试成果表

Table 1 Results of coarse material by additive mass method

率定试验			验证试验		
试坑法			试坑法		
地基刚度 /(kN/m)	干密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	地基刚度 /(kN/m)	干密度 /(g/cm ³)	含水率 /%
146.8	2.181	5.84	139.0	2.159	6.93
152.3	2.210	3.54	143.4	2.161	6.00
153.1	2.213	4.66	133.8	2.170	6.22
157.9	2.224	3.44	137.8	2.151	3.37
134.4	2.151	4.16	148.0	2.185	3.94
148.1	2.227	3.25	138.6	2.165	4.13
138.6	2.127	4.27	138.7	2.184	4.63
131.1	2.118	3.52	135.8	2.172	3.54
141.5	2.188	6.55	143.0	2.133	3.40
138.0	2.136	4.57	134.2	2.153	4.29

表 1 表明,率定试验和验证试验中,各个测点的地基刚度分布在 130.0~160 MN/m 之间,干密度集中在 2.100~2.300 g/cm³ 之间,含水率分布在 3.0%~7.0%之间。粗粒料填筑现场率定试验各测点的地基刚度与灌水法干密度的关系如图 4 所示。

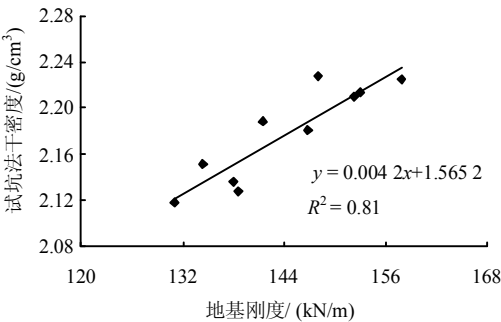


图 4 粗粒料填筑现场率定试验地基刚度与干密度关系图

Fig.4 Relationship between foundation stiffness and density in calibration test of coarse material

图 4 表明, 率定试验中各测点的地基刚度与干密度为线性相关, 相关系数为 0.81, 说明测点的地基刚度与干密度拟合程度较好。利用图 4 的成果得到昆明新机场粗粒料填筑现场率定试验的地基刚度与干密度的经验公式如式 (1) 所示:

$$\rho_d = 0.004 \ 2K + 1.57 \quad (1)$$

式中: ρ_d 为被测土体干密度 (g/cm^3); K 为地基刚度 (MN/m)。

由式(1)计算得到验证试验各测点附加质量法干密度, 成果如表 2 所示。

表 2 粗粒料附加质量法率定试验和验证试验测试成果表
Table 2 results of demonstration test and calibration test of coarse material by additive mass method

率定试验				验证试验			
干密度/ (g/cm^3)				干密度/ (g/cm^3)			
地基 刚度 /(kN/m)	试坑法	附加质 量法	相对 误差 /%	地基 刚度 /(kN/m)	试坑法	附加质 量法	相对 误差 /%
146.8	2.181	2.187	0.27	139.0	2.159	2.154	-0.23
152.3	2.210	2.210	0.00	143.4	2.161	2.172	0.51
153.1	2.213	2.213	0.00	133.8	2.170	2.132	-1.78
157.9	2.224	2.233	0.40	137.8	2.151	2.149	-0.09
134.4	2.151	2.134	-0.80	148.0	2.185	2.192	0.32
148.1	2.227	2.192	-1.60	138.6	2.165	2.152	-0.60
138.6	2.127	2.152	1.16	138.7	2.184	2.153	-1.44
131.1	2.118	2.121	0.14	135.8	2.172	2.140	-1.50
141.5	2.188	2.164	-1.11	143.0	2.133	2.171	1.75
138.0	2.136	2.150	0.65	134.2	2.153	2.134	-0.89

表 2 表明, 验证试验的附加质量法干密度与灌水法干密度之间的最大相对误差为 1.75%, 最小相对误差为 -1.78%, 两者的相对误差在 -1.78%~1.75% 之间, 而平均绝对误差为 0.91%, 利用附加质量法获得的成果较好。

粗粒料的率定试验和验证试验的灌水法干密度和附加质量法干密度的关系如图 5 所示。

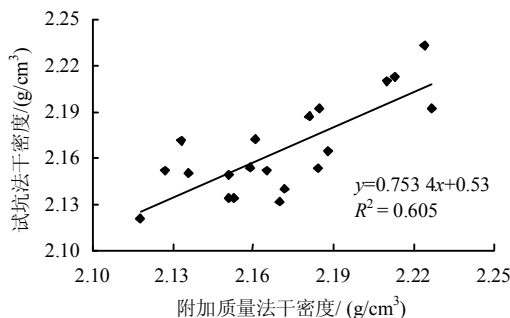


图 5 粗粒料附加质量法干密度与灌水法干密度散点图
Fig.5 Plot of density from additive mass method and water replacement method

图 5 表明, 无论是率定试验还是验证试验, 利用附加质量法获得的各测点的干密度与试坑法干密度体现出了较好的一致性。

因此, 利用附加质量法对粗粒料压实密度进行无损检测的检测精度可以满足施工质量检测要求。

验证试验表明, 昆明新机场东区粗粒料压实密度的检测可以利用附加质量法进行。

图 6 为利用灌水法试验数据建立各测点的地基刚度与干密度的回归曲线。

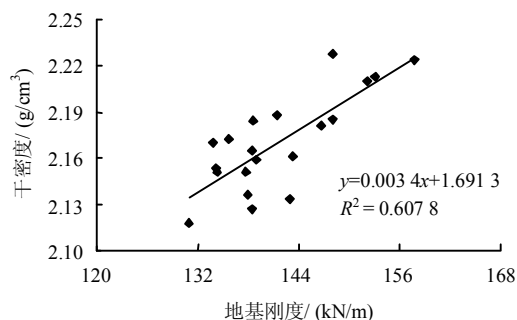


图 6 粗粒料全部测点地基刚度与干密度回归曲线
Fig.6 Regression curve of foundation stiffness and density of tested points of coarse material

图 6 表明, 所有的试验点基本分布在一带状范围内, 地基刚度最大值为 157.9 MN/m , 最小值为 13.1 MN/m ; 干密度最大值为 2.227 g/cm^3 , 最小值为 2.118 g/cm^3 ; 含水率最大值为 6.93%, 最小值为 3.25%。由此建立东区粗粒料地基刚度与干密度的经验关系式如式 (2) 所示。

$$\rho_d = 0.003 \ 4K + 1.69 \quad (2)$$

值得注意的是, 式 (2) 仅仅是建立在 20 组试验数据基础之上。检测中, 随着灌水法试验数据的增加, 应及时对式 (2) 进行修正。

利用式 (2) 计算得到东区粗粒料填筑现场附加质量法各测点的干密度值, 成果见表 3 所示。

表 3 粗粒料附加质量法测试成果表
Table 3 Results of coarse material by additive mass method

地基刚度 /(kN/m)	参振质量 / kg	干密度 /(g/cm^3)	相关系数
132.9	513	2.142	0.986
141.4	559	2.171	0.997
126.9	891	2.121	0.943
124.6	1201	2.114	0.969
126.2	873	2.119	0.969
125.1	913	2.115	0.986
128.5	827	2.127	0.997
122.3	959	2.106	0.881
127.6	709	2.124	0.936
123.6	943	2.110	0.817

经过对现场检测成果分析,粗粒料的地基刚度最大值为 141.4 MN/m,最小值为 122.3 MN/m;干密度最大值为 2.171 g/cm³,最小值为 2.106 g/cm³,80.0%的测点相关系数在 0.936 及以上,说明附加质量法在昆明新机场东区粗粒料填筑现场压实密度的无损检测试验中取得了较好的效果。

6 结 论

(1) 附加质量法作为无损检测技术具有操作简单、检测速度快捷、对被检测土(石)层无损伤等优点,发展前景广阔。

(2) 昆明新机场粗粒料压实密度的无损检测表明,由附加质量法获得的粗粒料地基刚度与灌水法获得的粗粒料干密度成线性相关性,相关性系数为 0.81,利用率定试验得到的经验关系计算得到的干密度与验证试验的相对误差在-1.78%~1.75%之间,其检测精度能够满足施工检测精度要求。

(3) 对于不同的粗粒料,建议进行不少于 6 点的率定试验,如有异常点,应剔除。

(4) 在施工检测时,附加质量法宜与试坑法(灌水法)结合使用,随着对照试验点数的增加,随时修正经验关系。

参 考 文 献

- [1] 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 Pei-wu, LENG Yuan-bao, YUAN Jiang-hua. The density measurement of rockfill object by additive mass method[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1999, 42(3): 422—427.
- [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 Pei-wu. Additive mass method measured dynamically foundation bearing capacity[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1993, 36(5): 683—687.
- [3] 郭国庆,蒋华安. 测原位密度的附加质量法在小浪底工程中的应用与评价[J]. 西北水电, 1999, 69(3): 10—12.
GUO Guo-qing, JIANG Hua-an. Application and evaluation of in situ density by additive mass method in Xiaolangdi project[J]. **Northwest Hydropower**, 1999, 69(3): 10—12.
- [4] 黄荣荣,宋先海. 附加质量法在清江水布垭面板堆石坝堆石体密度测定中的应用[J]. 水利水电快报, 2003, 24(7): 23—25.
HUANG Rong-rong, SONG Xian-hai. Application of method of additive mass to density measurement of rockfill object of rockfill dam in Shuibuya project[J]. **Express of Water Resources & Hydropower Information**, 2003, 24(7): 23—25.
- [5] 宋先海,肖柏勋,顾海明,等. 附加质量法在水布垭堆石体密度测定中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(3): 40—42.
SONG Xian-hai, XIAO Bo-xun, GU Hai-ming, et al. Application of method of additive mass to density measurement of rock-fill object in Shuibuya water control project[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2004, 32(3): 40—42.