

测原位密度的附加质量法 在小浪底工程中的应用与评价

郭庆国 蒋华安

(国家电力公司西北勘测设计研究院 西安 710043)

摘要 依据小浪底工程中测堆石密度的实践,简述附加质量法的基本原理及应用。对比分析认为,用附加质量法测定堆石密度具有原理合理、快速、无损、劳动强度小、参与体积大等特点,对测定大粒径堆石密度是一种值得参考和应用的方法。

关键词 堆石坝;密度;附加质量;参振体积;参振质量 测量。

小浪底水利枢纽工程大坝为粘土斜心墙堆石坝,最大坝高154m,填筑工程量5185万 m^3 ,其中堆石料3778万 m^3 ,占73%。堆石主要开采石门沟砂岩,最大粒径1000mm,填筑层厚100cm,用17t振动平碾碾压6遍。压实后的密度,既是反映压实效果的重要数据,又是坝体稳定(堆石为坝壳棱体,主要担负抗滑稳定)分析的重要力学指标,由此可见测定密度的重要性。

测定密度的方法,一般用试坑灌水法,因堆石最大粒径达1000mm,颗粒互相交错咬合,开挖试坑中大颗粒难以挖出,劳动强度大,费力、费时,往往挖出的颗粒偏小,使其测试结果不能反映实际情况。用机械开挖,一是对周边扰动严重,二是挖的试坑太大和不规整,难以测定体积,并且粒径500~1000mm石块现场称重困难,亦得不到满意的结果。因此国外工程多采用测沉降量(压实前后高程差)或压实计(在震动碾安装加速计)等方法来反映压实效果,虽满足了机械化施工需要,但不能提供压实后密度指标。为了解决此问题,在小浪底大坝施工中采用一种新的、快速无损的测原位密度附加质量法(以下简称附加质量法)测定堆石密度。本文

简要介绍该方法的基本原理和特点。

1 附加质量法的基本原理

土石体的密度是单位体积中土石料的质量 $\rho = m/(Sh)$,测定密度的实质是测体积和质量。同样附加质量法虽然不挖试坑,仍然是以测定体积 Sh 和质量 m 为中心。

1.1 理论基础

附加质量法是以振动理论和现代电子技术为基础,一方面通过建立单自由度线弹性振动体系与测试介质(土石体)震动体系等效的物理模型,求得参振介质的质量;另一方面利用集中质量的动能等于承压板下介质的动能,得出密度的解析式。

1.2 理论模型

求解密度的测试装置如图1(a),振动体系与测试介质等效理论模型如图1(b),波形如图1(c)。依据自由度线弹性体系,有如下关系:

$$mZ'' + K_0Z = 0 \quad (1)$$

$$K = \omega^2 m \quad (2)$$

其中

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

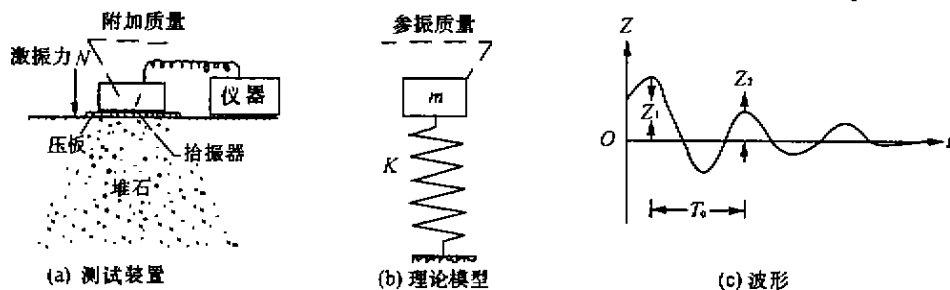


图1 附加质量法的测试装置与理论模型

第一作者简介:郭庆国,男,教授级高级工程师,从事岩土工程及岩土试验研究。

$$Z = A \sin(\omega + \varphi) \quad (4)$$

$$Z' = dZ/dt = A\omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$Z'' = d^2 Z/dt^2 = -\omega^2 Z \quad (6)$$

式中: ω, f 分别为无阻尼振动圆频率、频率; m, K 分别为参振体质量、体系动刚度; A, φ, t 分别为质点振动的最大位移、初相位、时间。

1.3 求解 m_0

求土石体参振质量 m_0 需加一块刚性承压板(面积 S)覆盖测点,并在承压板上加一定的附加质量块 Δm ,由式(2)得式(7),

$$K = \omega^2(m_0 + \Delta m) \quad (7)$$

$$1/\omega^2 = (m_0 + \Delta m)/K \quad (8)$$

令 $D = 1/\omega^2, K' = 1/K$, 有

$$D = K'(m_0 + \Delta m) \quad (9)$$

$$m_0 = KD_0 \quad (10)$$

$$K = \Delta m/\Delta D = m_0/D_0 \quad (11)$$

式中: m_0, K' 为常量, K' 为体系刚度 K 的倒数, D 与附加质量 Δm 为线形关系,当 $\Delta m = 0, D = D_0$, 如图 2 所示。

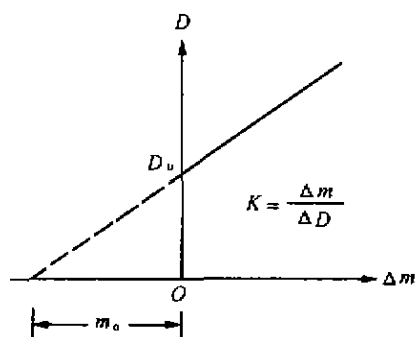


图 2 $D - \Delta m$ 关系

1.4 求解 h_0, ρ

h_0 为承压板下参振体有效深度,按集中质量 m_0 的动能 T_0 等于地表下连续介质(土石体)深度 Z 处、厚度为 dZ 薄片介质质量的动能 dT_0' 的一个无穷积分(积分模型见图 3),即

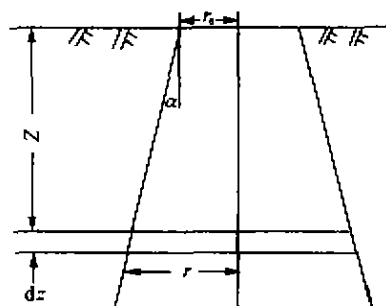


图 3 积分数学模型

$$T_0 = \int_0^\infty dT_0' \quad (12)$$

$$T_0 = m_0 v_0^2/2 = m_0 (Z_0 \omega_0)^2/2 \quad (13)$$

$$dT_Z = v_Z^2 dm_Z/2 \quad (14)$$

$$dm_Z = S_Z \rho v_Z^2 dZ \quad (15)$$

式中: T_0, v_0, Z_0, ω_0 分别为介质质量 m_0 的动能和纵波速度、深度和圆频率; dT_Z, dm_Z, S_Z, V_Z 分别为地表下 Z 深处厚度为 dZ 的介质薄片动能、质量、面积、纵波速度。

积分可得^①

$$h_0 = \frac{\lambda}{2K} \quad (16)$$

$$\rho = \frac{m_0}{Sh_0} \quad (17)$$

$$\rho = \frac{2Km_0}{S\lambda} \quad (18)$$

当承压板为方形时, $S = b^2$, 则有

$$\rho = \frac{2Km_0}{b^2\lambda} \quad (19)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{2Km_0 f_0}{b^2 v_p} \quad (20)$$

当承压板为圆形时, $S = \pi r^2$, 有

$$\rho = \frac{2Km_0}{\pi r^2 \lambda} \quad (21)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{2Km_0 f_0}{\pi r^2 v_p} \quad (22)$$

式中: K 为系数(可通过实验率定得到); ρ, v_p, λ, f_0 分别为介质密度、纵波速度、波长和频率; m_0, S, b, r 分别为介质质量及承压板面积、宽度、半径。

2 附加质量法在小浪底工程中的应用与比较

2.1 在正常压实条件下的应用与比较举例

在小浪底大坝填筑压实过程中曾应用附加质量法测定堆石料压实后的原位密度,同时也测定了粘性土和砂砾石料压实后的原位密度。用附加质量法同时也用常规试验方法测定了压实后土石体的原位密度,现举例如表 1、表 2 所示。

由表 1 可以看出,堆石 A 料用附加质量法测得的密度平均值,与 XECC 试坑灌水法试验资料相差 0.025 g/cm^3 , 与 YRC 试坑灌水法试验资料相差 0.019 g/cm^3 。砂砾石 1 用附加质量法测得的密度平均值,与 XECC 试坑灌水法试验资料相差 0.003 g/cm^3 , 与 YRC 试坑灌水法试验资料相差 0.015 g/cm^3 。砂砾石 2 用附加质量法测得的密度平均值与试坑灌水法测的相差 0.045 g/cm^3 。

①李丕武,堆石体密度测定的附加重量法,黄河水利委员会设计院

表1 砂砾石、堆石原位密度几种方法测试结果比较

测试方法	原位密度/(g·cm ⁻³)					
	砂砾石 1		砂砾石 2		堆石 A	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
附加质量法 ^①	2.314~ 2.351	2.336	2.245~ 2.400	2.343	2.049~ 2.279	2.167
试坑灌水法 ^②	2.338~ 2.339	2.339	2.373~ 2.403	2.338	2.190~ 2.193	2.192
试坑灌水法 ^③	2.338~ 2.364	2.351	2.373~ 2.403	2.338	2.172~ 2.191	2.186

注:①由黄河水利委员会设计院物探总队测定;②由 XECC 试验室测定;③由 YRC 试验室测定。

表2 粘性土原位密度几种方法测试结果比较

测试方法	原位密度/(g·cm ⁻³)					
	粘性土 CL4		粘性土 CL5		粘性土 CL6	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
附加质量法 ^①	1.872~ 2.159	2.016	2.001~ 2.128	2.065	2.037~ 2.075	2.056
环刀法 ^②	1.995~ 2.045	2.022	2.071~ 2.137	2.104	2.000~ 2.070	2.035
核子密度仪法 ^③	2.002~ 2.047	2.030	2.036~ 2.156	2.046	1.990~ 2.043	2.017
水袋法 ^④	1.915~ 1.985	1.950	2.057~ 2.057	2.057	2.032~ 2.068	2.048

注:①由黄河水利委员会物探总队测定;②由 XECC 试验室测定;③由 YRC 试验室测定。

由表2粘性土测试资料可看出,CL4土用附加质量法测试密度平均值,与环刀法测试资料相差0.006 g/cm³,与核子密度仪测试资料相差0.014 g/cm³,与水袋法测试资料相差0.066 g/cm³. CL5土用附加质量法测试密度平均值,与环刀法测试资料相差0.039 g/cm³,与核子密度仪测试资料相差0.019 g/cm³,与水袋法测试资料相差0.008 g/cm³. CL6土用附加质量法测试密度平均值与环刀法测试资料相差0.021 g/cm³,与核子密度仪测试资料相差0.039 g/cm³,与水袋法测试资料相差0.008 g/cm³.

上述资料表明,无论是用附加质量法测定堆石原位密度,还是测砂砾石、粘性土料原位密度,其测试结果,皆在常规方法测试结果的变化范围之内,既满足精度要求,又有无损填筑面、参与体积大等特点,尤其是用作测堆石密度,比常规试坑灌水法快速、省力、省时、劳动强度小,与测沉降量法、压实计法相比不仅能及时地反映压实效果,还能提供定量的密度指标值。

2.2 在较特殊条件堆石体中的应用与比较

为了更进一步了解附加质量法的特点,特选用了两种特殊条件下的堆石料,一种是堆石料在推土机铺平中,大颗粒边缘较多,特选定了边部大块石比较集中,表面观察有明显架空现象的堆石B.另一种堆石C,是洞挖石渣料,不曾碾压,堆放在堆渣场的石渣料.分别用附加质量法和常规试坑灌水法测定

了原位密度,如表3所示。

表3 两种堆石料原位密度的测试结果例

测试方法	测点序号	原位密度/(g·cm ⁻³)			
		堆石 B		堆石 C	
		测试值	平均值	测试值	平均值
附加质量法 ^①	1	2.372	2.320	2.186	2.076
	2	2.242		1.976	
	3	2.422		2.056	
	4	2.244		2.084	
试坑灌水法 ^②	1	2.012	2.063	2.324	2.276
	2	2.013		2.327	
	3	2.065		2.156	
	4	2.162		2.287	

注:①由黄河水利委员会物探总队测定;②由 YRC 试验室测定。

由表3中堆石B资料可以看出,在每个测点,附加质量法测定的密度值均大于试坑灌水法测定的密度值,就平均值而言,附加质量法要大0.257 g/cm³,究其原因,一是该堆石料大块石集中,表面明显有架空现象,试坑灌水法开挖约1m的试坑,往往颗粒相互咬合,粒径为500~1000mm及以上的块石,人工不易挖出,一般挖出的石块偏小,不能反映粒径为500~1000mm及以上石块,致使测试的密度值低.二是附加质量法承压板的面积为2m²,参与体积约3m³,在这样大的体积范围内,包含了粒径为500~1000mm的石块,测试的密度值高.三是本来这种堆石料细粒较少,在重型振动碾碾压过程中,震动力使小颗粒充填孔隙,加上重力作用,深部填充的较上部稍密实些,附加质量法测试的密度值大是合理的,参与体积大,能较好地反映堆石体的实际情况。

由堆石C资料可以看出,在每一个测点,附加质量法测试密度值皆比试坑灌水法测试的密度值小,就平均值而言,要小0.200 g/cm³.其原因一是该堆石料原是工程中开挖的石渣料,堆放的过程没有进行专门碾压,但表面有载重自卸汽车的来往,表层密实,下部疏松,二是试坑灌水法开挖的试坑一般小于等于1m,多反映了表层,故而测试的密度值大,而附加重量法包括了表层和下层,因而测试的密度值小.由此认为,用附加质量法,参与体积大,代表性好,测试的密度值小,较为合理,能较好地反映堆渣场堆石体的实际情况。

3 结 语

测定堆石原位密度的附加质量法,在理论上是合理的,经小浪底大坝工程应用,实践证明该方法与常规方法测试结果比较接近,满足精度要求,不用开挖试坑,不损坏填筑面,劳动强度小,省力、省时、快速,参与体积大,能较好反映大粒径堆石料的密度特性.为解决测试堆石原位密度提供了一个新方法,在今后的应用中还需积累经验,使这一方法得到进一步的验证与完善。(收稿日期:1998-05-21 编辑:熊水斌)