

堆石料最大指标密度室内试验方法的研究

冯冠庆

杨荫华

(交通部公路科学研究所, 北京) (水利水电科学研究院, 北京)

提 要

基于振动台法及表面振动器法的试验条件参数对测定堆石料最大指标密度影响的室内系统试验研究, 以及对比相应现场碾压试验资料后, 本文提供了这两种试验法试验条件参数的建议值; 试验还证实了原型堆石料室内系列相似级配模型料的最大指标密度与最大粒径之间存在半对数线性关系, 据此外插得到原型堆石料的最大指标密度。此外, 本文推荐采用压实度指标确定堆石料的填筑标准。

一、前 言

测定堆石料的最大指标密度(ρ_{dmax} , Maximum Index Density)^①国内外均采用粗粒土试验规程^[1,2]。试验方法主要为振动台法与表面振动器法。美国国家标准ASNI/ASTM即采用前者, 加拿大、日本等大多数国家都引用此法; 而英国、瑞典等国家标准则采用后者。国内水电系统《土工试验规程》则基本沿用ASTM标准振动台法。自1963年到70年代初, 美国有关标准中规定振动台法的振动加速度(a_p)为 $9.28g$ ($g=9.8m/s^2$), 1974年后至今, 相应的振动加速度呈减小趋势^[3]。国内水电规程也由(SDS01-79)规定的 $9g$ 减至(SD128-87)规定的 $(1\sim3)g$, 但(SD128-87)说明书中却仍规定 a_p 以 $9g$ 作控制, 相互矛盾^[4]。而且对减小 a_p 的原因缺乏专门系统的试验论证; 此外仅规定一个范围会给使用者造成不便。至于附加荷重, 有人提出存在一个对应试验干密度最大值的最佳附重^[5]; 有人认为不加附重时试验干密度最大^[6,7]。表面振动器法与振动碾压工况相似, 操作简便, 也是一种有前途的方法。本文对其作些改进后进行了试验研究。

采用现有振动台法试验规程测定最大指标密度, 有资料表明, 即使室内与现场颗粒级配一致, 室内测定值也低于现场振动碾压实测定结果^[8,9]。因此由室内试验难以确定填筑标准用于设计和指导现场施工, 目前尚只能根据现场碾压试验来确定填筑标准。这即需要试验研究作合理改进。

堆石料最大粒径一般达 $600\sim1000mm$, 故除少数原型料, 在室内通常难以直接测定其最大指标密度。70年代初美国有人提出了剔除超径的系列模型外插法在室内确定原型砂卵石料的最大指标密度^[9], 近年来国内有人提出采用相似级配模型外插法, 因获得现场振动碾压及原位实测资料的印证而具有实用意义^[4,7]。但对堆石料尚未见类似资料报导。

①某次试验所测定的 ρ_{dmax} 是对应其试验条件的相对最大干密度, 未必是试料真正的最大干密度。所以称 ρ_{dmax} 为“最大指标密度”更确切些。于是本文予以采纳。

到稿日期: 1991-01-03.

于是, 本文试验研究了振动台法及表面振动器法的标准化问题; 对原型堆石料试验论证了相似模型外插法; 并与有关现场振动碾压测定资料作了对比。

二、试料及试验装置

(一) 试料

取自某堆石坝料的试料有1*与2*两种, 母岩均系灰质白云岩, 比重为2.79, 抗压强度为130~150MPa。试料1*基本采用原型级配: 因现有试料的60~80mm粒组数量不足, 仅将原级配中60~80mm粒组用40~60mm粒组等量代替(如图1所示)。该料用于两种振动法的标准化试验。对试验2*作相似级配处理, 相似级配模比 M_r 取5, 6.67, 10, 20四种, 相应各模型料级配曲线如图2所示。试料2*用于验证相似模型外插法试验。

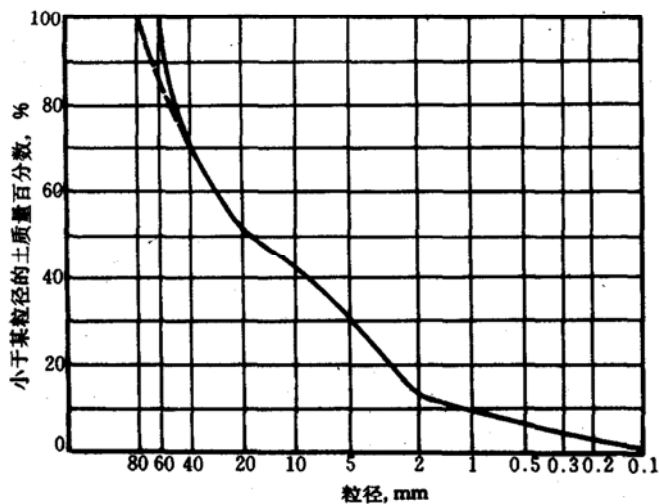


图1 试料1*颗粒级配曲线

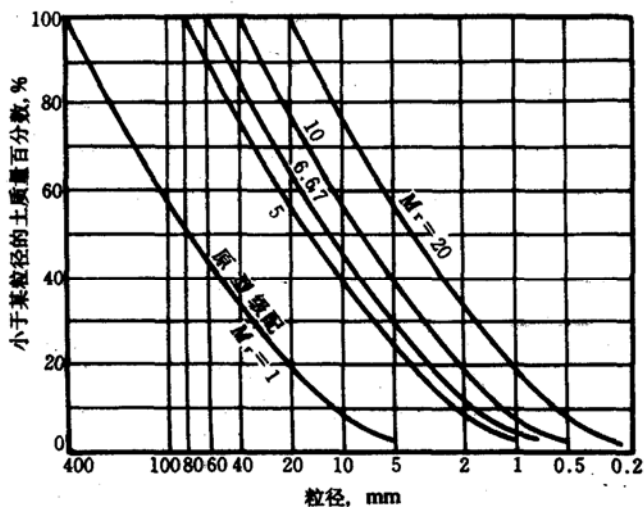


图2 试料2*颗粒级配曲线

(二) 试验装置

1. 振动台

“UBC-10A”型振动台, 最大负荷量250kg取不平衡重锤起振方式作垂直振动。振动频率8.3~55Hz可调, 双振幅0~3mm可调。最大振动加速度为 $\pm 6g$ (连续)。试筒 $\phi 279.4\text{mm}$, 标定容积为 14200cm^3 , 固定于振动台面上; 附加荷重块有三种, 分别在试样表面产生附加静压力为7kPa, 14kPa, 21kPa。

2. 表面振动器

振动器功率1kW, 振动频率47.5Hz, 激振力4214N。用振动台法的试筒, 固定于刚性底板上。改进后的振动器可增减外加砝码块数, 可在试样表面产生三种静压力: 21kPa, 14kPa, 7kPa; 并有一支架, 可保证振动器作垂直振动具有一致性。

三. 试验成果及分析

(一) 振动台法

1. 振动历时(t)

试验表明, 无论是分层装填试料还是施加不同的附加荷重, 振动压实干密度均随振动历时的延长而增大; 且当振动历时达8min以后, 试验干密度基本趋于稳定, 即使分三层振动, 从8至10min时的干密度增量也不显著, 仅 0.013g/cm^3 (如图3)。

2. 附加荷重(p_s)

如图4及3所示, 附加荷重越大, 试验干密度越大。即当附加荷重从7增至14kPa时, 干密度显著增大(如分三层时, $\Delta\rho_d$ 为 0.095g/cm^3), 此后 p_s 再增至21kPa时, 干密度则无显著增大(如分三层时 $\Delta\rho_d$ 为 0.015g/cm^3)。可见, 仅靠附加荷重加得很大, 所获得的压实效果并不显著。文献[7]在试筒不固定于台面情况下发现不加附重时试验干密度最大。这表明试筒固定与否附加荷重对压实效果的影响是不同的。文献[5]发现附重由14增至21kPa时试验干密度反而降低, 极可能与试验用ASTM标准振动台超负荷运行达不到设定的振动加速度有关(其振动台最大负荷量为250lb即114.3kg)。这说明, 附重的选择要受到振动台最大负荷量限制。

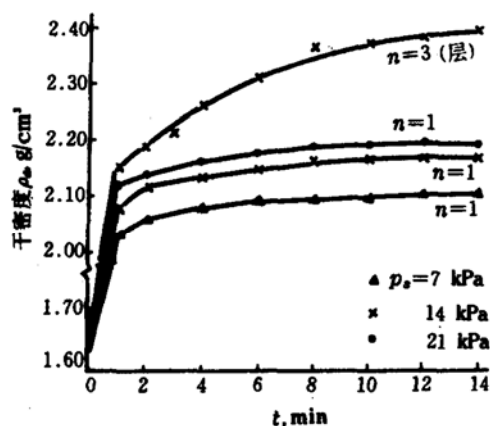


图3 振动历时对干密度的影响

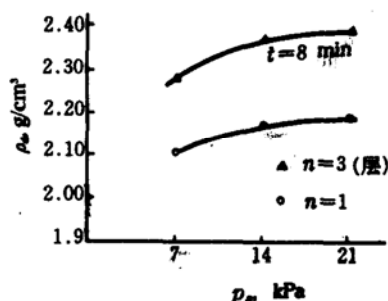


图4 附加荷重对干密度的影响

3. 装填分层数(n)

试验表明, 试样分层装填振压可以显著提高干密度。在本文试验条件下分三层装填振压干密度最大(图5及4)。分层装填, 层厚减小, 所获压实功能增加。如分三层时所获压实功能是分两层时的1.5倍, 分一层时的3倍, 因此分层装填可提高压实干密度。

4. 振动加速度(a_p)

本文试验发现, 在同一频率下, 压实干密度在起初是随着振幅的增加而增大, 当振幅增至最优振幅时(如图6(a)中0.3, 0.5mm), 干密度达到最大, 此后再增加振幅, 干密度反而减小。即在一个振动频率下, 存在一个最优振幅, 及相应的振动加速度值。具体地说, 当振动频率为25~30Hz时, 有一个最优振幅0.50mm, 相应振动加速度为1.81g; 当频率为47.5~50Hz时有一个最优振幅0.30mm, 相应的加速度为2.73g。由图6(b)可见, 为得到较大的干密度值, 应采用振动频率47.5~50Hz, 最优振幅0.25mm, 相应最优加速度为2.5g。

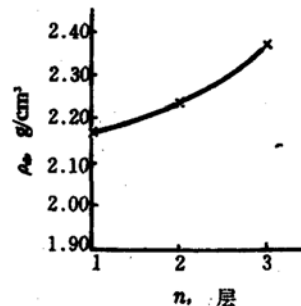


图5 试验装填层数对干密度的影响

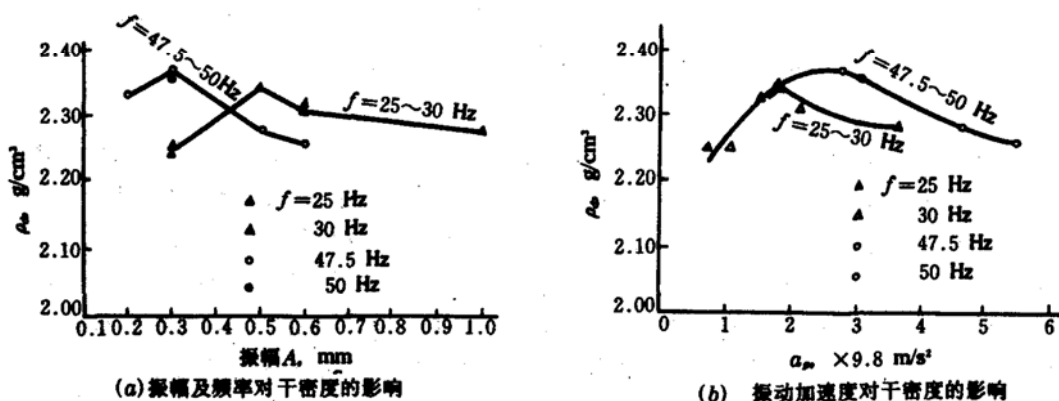


图6 振幅、频率及振动加速度对干密度的影响

5. 颗粒分离及破碎率(B_s)

由表1可见: (1) 当振动加速度超过一定值(如3.63g)时试样会产生分离现象, 因此振动加速度不可太大。(2) 颗粒破碎率随附重或装填分层数的增加而增大。堆石料在施工碾压时也产生破碎, 甚至颗粒破碎有助于提高堆石填方的压实紧密度, 因此室内振动压实试验出现破碎现象是允许的。

(二) 表面振动器法

1. 振动历时(t)

如振动台法, 本法试验干密度随振动历时的增长而增大, 当振至6min时, 干密度变化甚微趋于稳定(图7)。此振动历时与R. J. Frost在巴基斯坦Tarbela坝试验中F(24in)型振动器振动历时5min相近^[9]。

2. 表面静压力(p_s)

如图7所示,当振动器总重量作用在试样表面的静压力从7增至14kPa时,试验干密度随之增大;从14增至21kPa时,干密度反而降低。因此,在本文试验条件下最优表面静压力为14kPa。因振动器振动加速度 a_p 与其总重 Q 及激振力 F 有如下关系: $a_p = \frac{F}{Q}g$ 。又表面静压力与振动器总重具有一一对应关系,且振动器频率及激振力不变,因此表面静压力对试验干密度的影响关系即反映了振动加速度或振幅对试验干密度的影响特性。本文振动器激振力 F 为4214N,当最优表面静压力 p_s 为14kPa时,振动器总重易知 $Q = p_s \cdot (\frac{\phi}{2})^2 \pi = 841.2\text{N}$,相应最优振动加速度 $a_p = \frac{F}{Q}g = 5g$,及最优振幅为0.55mm。

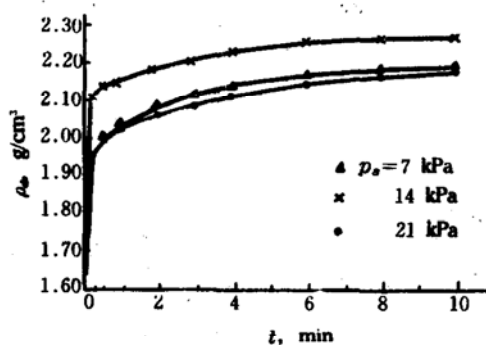


图7 振动历时对干密度的影响

表1

振动加速度 $a_p (\times 9.8\text{m/s}^2)$	附加荷重 $\sigma_a (\text{kPa})$	装填分层数 $n (\text{层})$	颗粒破碎率 $B_r (\%)$	振动加速度 $a_p (\times 9.8\text{m/s}^2)$	分离情况
2.73	7	1	0.5	1.82	无
2.73	14	1	0.93	1.93	无
2.73	21	1	1.50	2.18	无
2.73	14	2	1.93	2.73	无
2.73	14	3	2.53	3.02	无
2.73	7	3	2.30	3.63	分离
2.73	21	3	3.97	3.87	分离
5.45	14	3	4.14	4.55	分离
3.02	14	3	2.37	5.45	分离

3. 装填分层数(n)

与振动台法类似,本法也是当试样分三层装填压实时干密度较大(图8)。

4. 试料的重复作用

本文重复试料是指用过的试样经重筛分后再配制的试样,故可保证其级配不变。如图9所示,随重复使用次数(N_r)的增加,试验干密度呈降低趋势,最后趋于平缓。试验发现试样颗粒尤其是粗大颗粒渐次被磨至亚卵石状即其滚圆度渐次积累,因而试料物理性质变化很大了。

5. 颗粒分离及破碎率(B_s)

表2表明: (1) 试样无分离现象。这与振动台法结果不同, 振动台法是整个试样同时受振动, 颗粒在自由下落完成后受压实时压应力波会在试样顶面以动拉应力波反射。另一方面, 试样任一深度存在附重和自重压应力, 及颗粒间摩阻力。干试样无抗拉强度, 当振动加速度很大时(如 $>3.63g$), 会在试料中产生净拉应力, 颗粒即产生分离现象^[6]。而本法是振动器仅在试样表面作垂直振动压实, 压应力波自上而下传播, 不会产生净拉应力, 即无分离现象。(2) 颗粒破碎率随装填分层数增加而增大; 随表面静压力增大而降低。这与振动台法也有差异。由(二)2已知: $a_p \propto \frac{1}{Q} \propto \frac{1}{p_s}$ 或振幅 $A \propto \frac{1}{p_s}$ 。因此本法当 p_s 较小时, a_p 或 A 较大。试验发现 p_s 为7kPa时振动器跳离试样表面近乎作快速冲击($A=1.1\text{mm}$); 当 p_s 较大时, a_p 或 A 较小。试验发现 p_s 为21kPa时振动器振动不显著($A=0.367\text{mm}$)。而振动台法最大负荷量足够大即 a_p 或 A 不致受 p_s 影响, 因此 B_s 随 p_s 增大而变大。

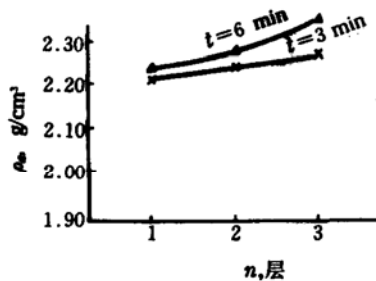


图8 试样装填层数对干密度的影响

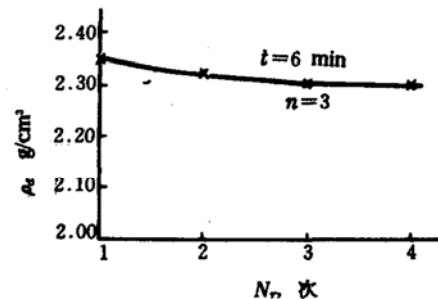


图9 试料重用次数对干密度的影响

表2

振动加速度 $a_p (\times 9.8\text{m/s}^2)$	表面静压力 $p_s (\text{kPa})$	装填分层数 $n (\text{层})$	颗粒破碎率 $B_s (\%)$	分离情况
10	7	1	5.2	无
5	14	1	2.5	无
3.33	21	1	2.17	无
5	14	2	3.27	无
5	14	3	3.73	无

(三) 相似级配模型料最大指标密度与最大粒径的关系

1. 最大指标密度

如图10所示, 试料2*系列模型料, 最大指标密度与相似模比之间存在半对数线性关系。若视原型料为相似模比 $M_r=1$ 的模型料, 则其最大指标密度点也必落于图中直线上, 即将图中 $\rho_{d\max} \sim \ln M_r$ 直线段延长至 $M_r=1$ 处便得原型料最大指标密度 $\rho_{d\max}=2.34\text{g/cm}^3$ 。若用曲线拟合法, 则得:

$$\rho_{d\max} = -0.060 \ln M_r + 2.344 \quad (1)$$

显然 $M_r=1$ 时, $\rho_{dmax}=\rho_{Dmax}=2.344\text{g/cm}^3$, 与作图法一致。又 $M_r=D_{max}/d_{max}$ (式中 D_{max} , d_{max} 分别为原型料与模型料最大粒径), 而 D_{max} 不变, 则(1)式又可写成:

$$\rho_{dmax}=0.06\ln d_{max}+1.981 \quad (2)$$

式中 d_{max} : mm

试料2* $D_{max}=400\text{mm}$, 则当 $d_{max}=D_{max}$ 时有
 $\rho_{Dmax}=2.34\text{g/cm}^3$ 。故对堆石料存在下列式子:

$$\rho_{dmax}=k\ln M_r+l \quad (3)$$

式中 k, l 为试验常数; 或

$$\rho_{dmax}=k'\ln d_{max}+l' \quad (4)$$

式中 k', l' 为试验常数

只要定出上述试验常数, 即可由(3)或(4)式推求原型料最大指标密度。当然用作图法更简捷些。

2. 最小指标密度 (ρ_{dmin} , Minimum Index Density)

如图10所示, 堆石料不存在 $\rho_{dmin} \sim \ln M_r$ 或 $(\ln d_{max})$ 的线性关系, 故其原型料 ρ_{Dmin} 难以测定。对超径的堆石料直接对原型料用松填法测定其最小指标密度也是不现实的。

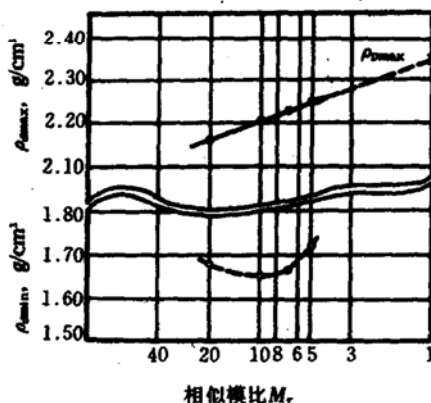


图10 模型料 ρ_{dmax} 与相似模比 M_r 的关系

(四) 本文试验条件参数及相应试验法的实用性

表3

对比 试验 料别	现场TZP—12t牵引式振动碾碾压试验					室内试验, ρ_{dmax} , (g/cm ³)		备注
	最大粒径	层厚	碾压	碾压干密度	设计干密度	本文方法		
	d_{max} (mm)	Δh (cm)	遍数	ρ_d 或 $\bar{\rho}_d$ (g/cm ³)	ρ_{dd} (g/cm ³)	振动台法	振动器法	
试料2#	400	80	6	2.12~2.23 平均2.17	2.10	2.34		
试料1#	80	40	6	2.37~2.40 平均2.39	2.30	2.37	2.35	

1. 由表3可见, 采用本文试验条件参数及方法测定的最大指标密度接近或超过现场振动碾压试验干密度, 高于由碾压试验确定的设计密度值。那么坝料1*填方设计压实度 R_c 为97%, 2* R_c 为90%; 实际碾压平均压实度为: 1* $\bar{R}_c=100.8\%$, 2* $\bar{R}_c=92.7\%$ 。因此按本文方法有可能确定堆石的填筑标准。不断积累室内 ρ_{dmax} 与现场碾压试验 ρ_d 对比资料, 今后便可由室内试验确定堆石现场填筑标准。

2. 由(三)2知, 超径堆石料 ρ_{dmin} 难以测定, 显然采用相对密度指标 D_r 有困难, 如上文可见采用压实度 $R_c=\frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100$ 是可行的。且 R_c 比 D_r 稳定性好, 而 D_r 对三个密度参数误差很敏感, 就误差而言, D_r 在最好时也达 $\pm 15\%$, R_c 在最坏情形仍 $< \pm 7\%$ ^[1,9]。

四、结论与建议

1. 在某一频率下存在一最优振幅及相应最优加速度, 此时可测得最大指标密度; 加速度并非越大越好, 否则会使试样分离。考虑到设备及操作等原因, 建议在频率50Hz下振动加速度以2.5g作控制, 相应振幅为0.25mm。

2. 附重由7增至14kPa时试验干密度显著增大, 再增至21kPa时干密度则无显著增大。考虑到一般振动台最大负荷量的限制, 建议附重仍取14kPa。

3. 振动历时在分一层压实时取8min, 分三层时取8~10min。

4. 分层压实可明显提高振动干密度。为使室内试验确定的填筑标准与现场碾压试验的一致, 对 $\phi 279.4\text{mm}$ 标定容积为 14200cm^3 的试筒及 $d_{\max} \leq 60\text{mm}$ 试料, 建议分三层振动压实。

5. 表面静压力对试验干密度的影响也反映了振幅或振动加速度对干密度的影响。当表面静压力由7kPa增至14kPa时干密度也增大, 再增至21kPa时干密度却降低。故建议振动器最优表面静压力取14kPa, 相应最优加速度为5g, 最优振幅0.55mm。

6. 试验干密度随振动历时延长而增大, 当振至6min时基本趋于稳定。故建议振动历时取6min。

7. 振动台法及表面振动器法均可测定堆石试料最大指标密度, 对超径堆石原型料可借用相似级配外插法。

8. 不宜采用重复料。

9. 现行规程中宜引入压实度 $R_c = \frac{\rho_d}{\rho_{d\max}} \times 100$ 指标作为相对密度 D_r 指标的补充, 以用于超径粗粒料确定填筑标准。

参 考 文 献

- [1] Selig E T, Ladd R S. Evaluation of Relative Density Measurements and Applications. ASTM STP 523, 1973; 487~504.
- [2] ASTM D4253—83, 1987 Annual Book of ASTM. 1987.
- [3] 冯冠庆. 堆石料最大指标密度测定法研究[硕士学位论文]. 水利水电科学研究院岩土工程研究所. 1989-5.
- [4] 水利部、能源部, 《土工试验规程》(SD128—029—87), 第三分册, 1988: 5~8(规程正文), 71~74(说明书).
- [5] Cumberledge G, Cominsky R J. Maximum Density Determination of Subbase Materials. ASTM STP 523, 1973; 141~155.
- [6] Dobry, Ricardo, Whitman R V. Compaction of Sand on a Vertically Vibrating Table. ASTM STP 523, 1973; 156~170.
- [7] 史彦文. 大粒径砂卵石最大干密度的研究. 土木工程学报, 1981, (2): 53~58.
- [8] Stephenson R J. Relative Density Tests on Rock Fill at Carters Dam. ASTM STP 523, 1973; 234~247.
- [9] Frost R J. Some Testing Experiences and Characteristics of Boulder-Gravel Fill in Earth Dam. ASTM STP 523, 1973; 207~233.

Laboratory Test Methods for Maximum Index Density of Rockfill Materials

Feng Guan-qing

(Research Institute of Highway, the Ministry of Communications, Beijing)

Yang Yin-hua

(Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing)

Abstract

Based on investigating the effect of the test condition parameters on maximum index densities determined by vibratory table method and surface vibrating compactor method respectively for rockfill materials, and by comparing the laboratory maximum index densities with the dry densities determined by the current vibrating roller testing method in field, the test condition parameters of these laboratory methods are suggested. In addition, it is confirmed that there is a semilogarithmic linear relation between the maximum particle size and laboratory maximum index density, and the maximum index density of the rockfill prototype can be predicted by extrapolating to the actual maximum particle size of the prototype. It is recommended that the degree of compaction be used to determine the construction compaction criteria of rockfill materials in field.