

击实试验标准不同对试验结果的影响

王志坚¹, 叶阳升², 王仲锦²

(1. 北方交通大学 土木学院, 北京 100044; 2. 铁道科学研究院 铁建所, 北京 100081)

摘 要: 分析了土的击实原理和压缩特性对现场碾压试验、室内压缩试验和击实试验的影响, 选用击实功基本相同的大筒和小筒两种重型击实试验标准, 对 9 组填料进行对比试验, 结果表明: 在单击功不变的情况下, 击实次数与土体变形存在着非线性关系。用增加击实次数或改变落锤高度, 使试样的单位体积击实功趋于一致的做法, 与实际试验结果有一定的误差。

关键词: 土工试验; 单位击实功; 击实次数

中图分类号: TU441.3 **文献标识码:** A

1 引言

在路基填筑时, 需对填料进行室内击实试验, 测出土的最大干密度和最佳含水量, 用于控制路堤填筑的压实质量。由于土的最大干密度和最佳含水量与土的粒径组合和单位击实功有关, 目前国内外采用的标准击实试验方法, 均以在试样面上直接施加冲击荷载, 控制其单位击实功, 用定体积法推求土的干密度。击实筒尺寸以试样最大粒径不大于 $1/3 \sim 1/4$ 击实筒内径 (或每层填土高度) 的原则作为选择标准。试验按单位体积击实功的大小分为两种, 即击实筒内径为 100 mm (简称小筒)、单位体积击实功约 $590 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 的轻型击实试验, 另一种是近年来广泛使用的单位体积击实功约 $2700 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 、击实筒的内径为 150 mm (简称大筒) 的重型击实试验, 它们是两套独立的标准, 有关技术人员从操作方便和经济的角度出发, 建议将做轻型击实试验的小筒, 通过增加击实次数可同时用做重型击实试验, 同理, 将做重型击实试验的大筒减少击实次数同时可做轻型击实试验。这样固然增加了击实筒的使用范围, 给试验人员提供了方便, 但用不同的击实筒和试验标准所得出的结果是否一致, 还需进行验证。为了这一目的, 本文用两种不同击实筒尺寸和相同的单位体积击功的大筒和小筒, 对 9

组土样进行重型击实对比试验, 并从土的压实原理和击实试验的影响因素着手, 对其结果的不一致性进行了初步分析。

2 击实试验原理和填土压实影响因素

当填料为细粒土和粗粒土中的粘砂、粉砂时, 路基填筑时的压实质量用压实系数指标控制。压实系数是指填土碾压后的实际干密度与室内击实试验得出的最大干密度之比。室内击实试验是用一定体积的击实筒和锤击功, 用调整试样含水量的方法进行数次击实试验, 测得土的最大干密度和其对应的最佳含水量。击实试验以单位体积击实功的大小划分为轻型击实和重型击实两种, 设计时按工程需要和调整压实系数进行选择。本次所用小击实筒尺寸示意图见图 1, 击实功与击实筒的尺寸、锤重、落高、分层制样的层数和每层锤击数等技术参数有关, 单位体积击实功的表达式为:

$$E_c = \frac{We \times H \times N_b \times N_e}{V}$$

式中, E_c ——单位体积击实功/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$;

We ——击锤重量/ N ;

H ——击锤落高/ cm ;

N_e ——土层数;

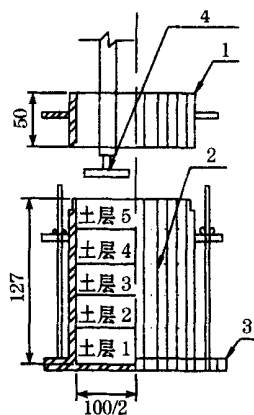
N_b ——每层土的击数;

收稿日期: 2002-11-26

作者简介: 王志坚 (1962—), 男, 山西太原人, 高级工程师, 硕士研究生。

基金项目: 铁道科学研究院科研计划项目 (TY1615)

V —— 击实筒体积/ cm^3 。



1. 套筒; 2. 击实筒; 3. 底板; 4. 击锤

图 1 小击实筒尺寸示意图 (尺寸单位: mm)

土的击实过程有如下特性: 当试验所用的技术参数一定时, 土样的干密度随含水量由少增多呈峰值曲线型变化; 土的干密度随总击实功的增加而增加; 当单击功不变时, 土的压实变形随击实次数的增加而增加, 但击实次数达到一定值后, 土的变形不再增加。因此, 室内试验所得出的最大干密度只是代表土在一定的击实功能和试验条件下所能达到的最大干密度。

2.1 土中含水量对压实的影响

水对粘性土的影响极大, 由于含水量的不同, 土可呈现为固态、半固态、可塑状态和流动状态。一般, 粘性土中的水以三种形式存在, 即强结合水、吸附水和自由水, 用不同的含水量对粘性土填料进行压实试验时可以看出: 当含水量很低时, 土以强结合水和吸附水为主, 土粒间呈分散状, 外力作用不易使其压实, 随着含水量的增加, 土粒间出现了自由水, 土粒的润滑作用增大, 压密时孔隙中的气体逐渐被挤出, 土的孔隙减小、干密度增加, 随着自由水进一步增加, 在外力作用下, 孔隙中气体基本被排除, 填土的干密度达到最大值, 如果含水量继续增加, 由于自由水不能压缩而产生了超孔隙水压力, 压实土体内出现剪切破坏, 土粒间的连接局部消失, 土的干密度又开始减少。这一过程, 在室内击实试验中表现为土的干密度随含水量的增加呈峰值曲线的变化过程, 峰值对应的干密度和含水量即为最大干密度和最佳含水量, 见图 2 中的击实曲线 1 或击实曲线 2, 其中, 曲线 1 为单位体积击实功 $596.9 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 时某工程填料为粘砂土的轻型击实试验曲线, 曲线 2 为该土单位击实功 $2515.5 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的重型击实曲线, 当含水量为 15 % 时,

曲线 1 对应的干密度为 $1.69 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 曲线 2 的干密度为 $1.92 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 而当含水量为 22 % 时, 曲线 1 对应的干密度为 $1.75 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 曲线 2 为 $1.87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

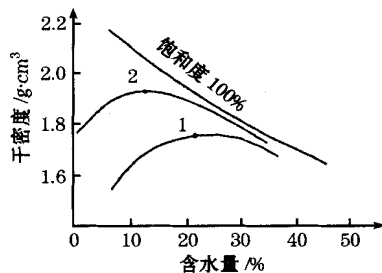


图 2 不同击实能量下的击实曲线

2.2 荷载不变、循环次数增加对土压实变形的影响

由于土是弹、塑性材料, 在外力作用下产生的变形包括两部分, 一部分为弹性变形, 一部分为塑性变形, 弹性变形是由土颗粒的弹性变形、封闭气体的压缩和溶解、薄膜水的变形引起的, 而塑性变形是由土颗粒间的位移、孔隙中水和空气的挤出、土颗粒被压碎等原因引起的, 它是一种不能恢复的变形, 又称残余变形。在多次反复荷载作用下, 开始塑性变较大、随荷载次数的增加而逐渐减少直至消失, 土呈弹性变形状态。此时, 无论如何增加循环次数, 压缩量均不会增加。这一现象从现场碾压试验、室内压缩试验和击实试验均可表现出来。

从现场的碾压实例来看: 在路基填筑时, 首先应根据土质情况、设计压实系数选择碾压机械, 对于某些填料, 如碾压机械的激振力不够, 碾压遍数无论如何增加, 填土都不能压实到要求值。如某工地填料为黄褐色砂粘土, 铺成 $35 \text{ cm} \sim 40 \text{ cm}$ 厚, 用 YZT-12 型、激振力为 50 t 的振动压路碾和用 YZT10B 型、激振力为 20 t 的振动压路碾进行现场碾压试验, 其结果表明, 当要求砂粘土的压实系数为 0.85 时, 50 t 激振力的压路碾需碾压 2 遍, 20 t 的压路碾需碾压 6 遍; 而当要求压实系数为 0.95 时, 用 50 t 的激振力时需碾压 6 遍, 而用 20 t 的激振力需碾压 20 遍以上; 又如, 对填料为夹泥岩块的砂粘时, 当要求的压实系数为 0.85 时, 用激振力 50 t 的压路碾只需碾压 1 遍, 用激振力 17.2 t 的压路碾需 3 遍, 如压实系数提高到 0.95 时, 50 t 激振力时需 6 遍, 而用 17.2 t 的激振力时碾压次数再多也达不到要求的压实度。

从室内压缩试验来看,在固结仪上进行压缩试验,可以得出一条孔隙比与压力之间的 $e \sim p$ 关系曲线,当压力从 0 增至 P_1 时,土样的变形从 e_0 减至 e_1 ,变形量 e_1 由两部分组成,即可以恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形,如将 P_1 卸载至 0 时,由于土的塑性变形部分不能恢复,土样的卸载曲线和压缩曲线不会重合,但塑性变形量比弹性变形要大。如按这一压力重复加载、卸载,每次均会有新的压缩曲线和卸载曲线产生,而弹性变形和塑性变形将随着加荷、卸荷重复次数的增加而逐渐减速减小,其中塑性变形减少得更快,直至全部消失。此时,在最大压力 P_1 作用的范围内,土样压缩完全处于弹性状态,再增加压缩次数变形量不会再增加,只有在压力超过 P_1 后,才会发生新的变形(见图 3)。

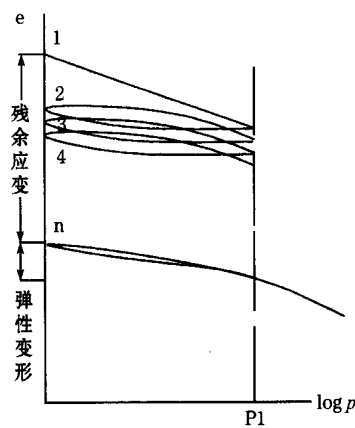


图 3 重复荷载时的压缩曲线

同理,室内击实试验实际上是土样在一定的冲击力下的压缩试验,外力为单击功 $We \times H$,击实次数 N_b 为作用循环加载、卸载的次数,其击实压缩曲线变化过程与图 3 相似,图中 P_1 代表单击功 $We \times H$,每锤击一次,土样变形同样也由可以恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形组成,当锤击到一定的

次数后,土样的塑性变形消失,土呈弹性状态,再增加锤击次数 N_b ,土的孔隙比不再减少、若要使土的变形加大、孔隙比继续减小,必须加大锤重 We 或提高落锤高度 H ,只有在单击功大于 P_1 后,才会产生新的压缩。如图 2 中的 2 根压缩曲线所示,当含水量为 22 % 时,曲线 1 对应的孔隙比为 0.54,增加击实功能至曲线 2 后,孔隙比可降低为 0.44 值。

3 室内击实对比试验

选用 9 组填料进行试验,其中:粉粘土 2 组,砂粘土 2 组,粘砂 1 组,粉砂 2 组,砾砂 2 组。分别用大筒和小筒进行重型击实试验,试验的技术参数、土的物理指标和击实试验结果如下。

3.1 击实试验技术参数

如表 1 中编号 4 所示,小筒击实试验筒内径为 10 cm、高为 12.7 cm;土分 5 层击实,每层土均用底面直径为 5.0 cm、重 4.5 kg、落高 45 cm 的落锤击实,共击实 27 次,由于锤底面积小于筒内土层面积,锤击时,设计击点自动转动,在土面上均匀施加压力。大筒击实试验击实筒内径为 15 cm、高为 12.75 cm;击实锤重和落高与小筒试验相同,每层击实次数为 56 次,这样,小筒与大筒击实试验的单击功均为 0.019 85 kJ,但由于击实总次数不同,小筒单位体积击实功为 2 686 kJ $\cdot m^{-3}$;大筒为 2 515.5 kJ $\cdot m^{-3}$;每层单位面积上的平均击实次数小筒为 6.75 次,大筒为 6.22 次,小筒比大筒多 0.53 次,由于分 5 层填筑,最底层土共多击 2.65 次。

3.2 土样的物理指标

所用 9 组填料最大粒径均小于 19 mm,其中有 3 组小于 5 mm。土的物理指标见表 1,从表中可见,粗粒土中细粒含量较多,粉砂和粘砂土中细粒含量达 34.5 % ~ 45 %,因此土的压实性较好。

表 1 土样的物理指标

编号	比重	塑性指数	级配情况	粒径分配/mm						土名	填料组别
				>5	>2	>0.5	>0.25	>0.075	<0.075		
1	2.70	14.7	不良	/	0.5	0.5	0.5	70.5	29.5	粉粘土	C
2	2.67	11.5	良好	0.0	21.0	34.5	37.0	45.0	55.0	粉粘土	C
3	2.73	11.7	不良	1.0	6.0	11.5	17.5	34.5	65.5	砂粘土	B
4	2.69	10.3	良好	6.0	15.0	22.0	33.0	55.0	45.0	粘砂	B
5	2.69	9.1	良好	7.5	15.5	24.5	32.0	67.0	33.0	粉砂	C
6	2.71	7.1	不良	11.9	21.0	25.0	28.5	39.5	60.5	砂粘土	B
7	2.70	8.7	良好	16.0	21.5	30.0	36.5	65.5	34.5	粉砂	C
8	2.75	/	不良	15.0	27.0	35.0	43.0	59.0	41.0	砾砂	B
9	2.69	/	良好	22.0	44.0	61.0	75.0	88.0	12.0	砾砂	A

3.3 大筒和小筒击实试验结果

小筒击实试验的粒径按规程要求过 5 mm 的筛, 9 组中, 1 组~3 组土样最大粒径基本小于 5 mm, 4 组~9 组土样中粒径超过 5 mm 的重量均不满全重的 30%, 按现行铁路工程土工试验方法规定, 小筒试验结果均不需修正。由于填料均为混合土, 8 组、9 组土虽为砾砂土但细粒含量较多, 击实试验曲线仍较理想。本次试验为防止分样不均匀性的干扰, 用小筒击实方法均做了平行试验, 试验结果最大干密度平均误差为 0.8%, 因此可以认为所用的每组试样是均匀的, 试验操作是准确的。大

筒和小筒的重型击实试验结果列于表 2 中。

从表 2 中可以看出, 大筒试验的最大干密度均比小筒的大, 相差约 1.1%~14.1%, 最佳含水量大筒的比小筒的小, 相差约 2.2%~29.2%。为了表示该差值对设计参数的影响, 表 2 中列举了按路基设计规范要求基床表层部分土的压实系数为 0.91 时, 如用小筒击实试验结果压实系数达到 0.91 时, 大筒击实试验所得的压实系数均不能满足要求; 同样, 对于基床以下部位填料的压实系数为 0.86 时, 大筒相应的压实系数也均不能满足设计要求。

表 2 两种击实筒试验的对比

土样 编号	土名	小筒击实试验		大筒击实试验		小、大筒对比结果		对应的压实系数 K_h		对应的压实系数 K_h	
		最佳含 水量 %	最大干密度 /g cm ⁻³	最佳含 水量 %	最大干密度 /g cm ⁻³	最佳含 水量 %	最大干密度 /g cm ⁻³	小筒	大筒	小筒	大筒
1	粉粘土	16.1	1.840	14.5	1.86	9.9	1.1	0.86	0.85	0.91	0.90
2	粉粘土	18.0	1.626	16.2	1.723	10.0	6.0	-	0.815	-	0.86
3	砂粘土	9.9	1.977	9.3	2.052	6.1	3.8	-	0.82	-	0.88
4	粘砂	9.5	1.974	8.1	2.065	14.7	4.5	-	0.82	-	0.87
5	粉砂	11.3	1.940	8.0	2.108	29.2	8.7	-	0.79	-	0.84
6	砂粘土	13.5	1.750	13.2	1.854	2.2	5.9	-	0.81	-	0.86
7	粉砂	6.9	2.070	6.5	2.186	5.8	5.6	-	0.81	-	0.86
8	砾砂	9.6	1.960	9.2	2.04	4.2	4.1	-	0.83	-	0.87
9	砾砂	8.8	1.920	6.9	2.192	21.6	14.1	-	0.75	-	0.80

4 试验结果的分析及建议

从上述两种标准击实试验结果中看出, 虽然小筒单位体积的击实功比大筒略大, 但试验结果最大干密度反而比大筒的小, 分析这一情况可由多种因素引起, 其中有: (1) 大筒土样粒径控制在 19.1 mm 以内, 而小筒最大粒径为 5 mm, 由于粗颗粒含量多而使得土样的干密度增加, 所以大筒试验结果比小筒的大。(2) 表 1 中的 1 组、2 组、3 组土样粒径均小于 5 mm, 两种标准的试验结果仍然是大筒试验结果比小筒的大, 这一原因可以从它们的锤击方式不同和锤击数不同来分析, 如: 现行的击实标准中, 落锤的直径为击实仪锤底直径的 1/2~1/3, 大筒的落锤底面为扇形, 锤击土面时重叠部位较少, 而小筒的落锤底面为圆形, 重叠部位较多, 土体受力不均匀; 又则, 试验时, 筒中的土样分 5 层夯实, 每层单位面积上计算击实能相同, 但平均击实次数小筒比大筒多 0.53 次, 夯击最顶层

时, 底层土则多击 2.65 次。局部土面实际击实次数是否会超过土的塑性变形范围, 造成单击功不变的情况下, 土的变形不再随夯实次数的增加而增加的现象。总之, 既使计算单位体积击实功相同, 但土样的粗粒含量不同、试验筒尺寸不同、锤击方式不同和击实次数不同, 均会造成土样压实路径不同, 使其试验结果不同。

目前, 我国及世界各国的击实试验标准都是采用增加击数或改变击锤落高、使试样的单位体积击实功趋于一致的做法, 从理论计算来看是合理的, 但从单击功不变、击实次数与土体变形的非线性关系来看, 对试验结果的影响是无法计算的。本次试验虽然土样数组相对较少, 但却反映出一定的规律。建议在今后的工作中注重不同的土性、不同的试验仪器和击实参数试验对结果的影响, 广泛积累资料, 进行综合分析, 用于规范的修改工作中。同时为避免不同试验标准之间的误差, 建议击实试验标准不宜过多, 其中包括击实筒的尺寸和锤底形状。

参 考 文 献

- [1] 土工试验方法标准 (国标 GB/T 50123-1999) [S]. 北京: 中国铁道出版社.
- [2] 铁路路基设计规范 (TB 10001-99) [S]. 北京: 中国铁道出版社.
- [3] 张贵珍, 陈 福. 铁道部现行击实试验标准存在的问题及修订意见 [J]. 2001, 铁道科学技术, 2001, (5).

The Effects of Different Hitting Test Standards on Test Results

WANG Zhi-jian¹, YE Yang-sheng², WANG Zhong-jin²

(1. Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper analyses the effects of hitting theory and compression characteristics of the soil on the field rolling-press test, indoor compression test and hitting test, and compares the test results of nine groups of filled material by adopting two heavy hitting test criterions of big-canister and small-canister with the same hitting work. It is found that there is a nonlinear relationship between the hitting times and the soil distortion with the same single hitting work. That increasing the hitting times or changing the height of dropping hammer to make the hitting work of per unit volume of the sample tend be the same is not identical to the actual testing results.

Key words: Civil engineering test; Hitting-work per unit; Hitting times

(责任编辑 贺振中)

(上接第 33 页)

应当以高的概率使整个桥墩抗剪以及非塑性铰区桥墩抗弯在 1.61 倍的总作用效应下不破坏, 才能保证在预定部位出现塑性铰。

6.2 预定出现塑性铰的矩形截面混凝土构件的斜截面剪切抗力分项系数的增大

钢筋混凝土桥梁设计规范给出了 0.05 分位点 (即大于它的概率为 0.95) 的矩形截面混凝土构件的斜截面剪切抗力 Q , 同时规定了剪切抗力的分项系数 γ_Q 。抗震设计时, 如果仍按钢筋混凝土桥梁设计规范计算塑性铰弯矩, 则在恒载不引起剪力的情况下, 剪切抗力的抗震分项系数 γ_{QS} 应当为

$$\gamma_{QS} = \gamma_Q \quad (19)$$

这样, 可在以 0.95 的概率使预定的塑性铰屈服的前提下, 以 0.90 的概率该构件不发生剪切失效。由于截面设计时除地震效应外, 还包括其它荷载效应, 也会引起剪力, 故式 (19) 略偏于保守。应注意的是: 我国公路混凝土桥设计规范对抗剪能力的

计算公式用于抗震时误差较大, 有待深入研究^[13]。

6.3 预定出现塑性铰的混凝土大偏压构件非塑性铰区的弯曲抗力分项系数的增大

钢筋混凝土桥梁设计规范给出了 0.05 分位点 (即大于它的概率为 0.95) 的钢筋混凝土构件的弯曲抗力 M , 同时规定了弯曲抗力的分项系数 γ_M 。抗震设计时, 如果仍按钢筋混凝土桥梁设计规范计算混凝土桥墩的塑性铰弯矩, 则该构件非塑性铰区弯曲抗力的抗震分项系数 γ_{MS} 应当为

$$\gamma_{MS} = \gamma_M \quad (20)$$

这样, 可在以 0.95 的概率使预定的塑性铰屈服的前提下, 以 0.90 的概率该构件非塑性铰区不发生弯曲失效。由于截面设计时除地震效应外, 还包括其它荷载效应, 也会引起弯矩, 故式 (20) 也略偏于保守。

注: 原文刊于本刊 2002 年第 3 期上。

(责任编辑 贺振中)