

文章编号:1671-8879(2007)05-0011-05

土石混合料路用工程力学性质试验

周志军¹, 南浩林², 张 熠³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 陕西省交通厅, 陕西 西安 710068; 3. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068)

摘 要:为研究土石混合料的工程力学性质,采用自行研制的大型击实仪对不同粗颗粒质量分数、级配、击实方法及击实功情况下的土石混合料进行系统的击实试验,并对不同粗颗粒质量分数的土石混合料开展了无侧限抗压强度、CBR(加州承载比)及回弹模量试验。试验结果表明:土石混合料的级配在泰勒理想级配范围内,其压实性能最好,且压实过程中,击实功不易太大,否则易使土石混合料的级配退化;在实际工程中,最好选用大型击实法来确定土石混合料的最大干密度,否则会降低压实标准;土石混合料的力学性能较好,且浸水后膨胀量小于一般细粒土的膨胀量。

关键词:道路工程;土石混合料;击实试验;无侧限抗压强度;CBR;回弹模量

中图分类号:U414.01

文献标志码:A

Experiment on engineering mechanics property of earth-rock mixtures in road

ZHOU Zhi-jun¹, NAN Hao-lin², ZHANG Yi³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Communications, Shaanxi Province Government, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Province Highway Administration, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the engineering mechanics property of the earth-rock mixtures, this paper made a lot of tests on the earth-rock mixtures in the condition of different coarse aggregate contents, grading, compactive works and compacting methods with the large-scale compaction device, and the unconfined compressive strength test, CBR test, resilience modulus test were made on the earth-rock mixtures with different coarse aggregate contents. When the grading of the earth-rock mixtures is in the range of Taylor grading, the compacting character is good, and the compacting works are too large to make the grading of the earth-rock mixtures degradation in the course of the compaction. In the course of construction, the maximum dry density of the earth-rock mixtures is determined by the large-scale compaction method, otherwise the compacting standard would be reduced. The mechanics property of the earth-rock mixtures is excellent, and the swell increment of the earth-rock mixtures after being immersed in water is smaller than that of the fine-grained soil. 3 tabs, 13 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; earth-rock mixture; compaction test; unconfined compressive strength; CBR; resilience modulus

收稿日期:2006-11-08

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131881207)

作者简介:周志军(1975-),男,江苏泰兴人,讲师,博士,E-mail:zhoujun5588@163.com.

0 引言

土石混合料是由土和石料组成的松散体,土的种类及石料的强度和质数不同,压实成型后,其物理结构和力学特性亦不同。研究资料表明,以往人们对土石混合料的工程力学性质研究主要集中在剪切特性和压实特性方面。关于土石混合料的剪切特性,各个部门结合实际工程,通过三轴试验对其进行了较为系统的研究^[1,2],提出了土石混合料的屈服准则及弹塑性增量本构理论。关于压实特性研究方面,主要是配制不同粗颗粒质量分数的土石混合料进行压实试验,建立土石混合料最大干密度和最佳含水质量分数与粗颗粒质量分数之间的关系^[3,8]。综上所述,土石混合料的剪切特性试验及理论方面研究比较深入,压实特性方面的研究主要集中在最大干密度和最佳含水质量分数与粗颗粒质量分数之间的关系方面,而最大粒径、级配及击实功变化对土石混合料最大干密度和最佳含水质量分数的影响规律研究较少。此外,对于公路路基而言,填料选用时除考虑剪切强度特性和压实特性外,还应考虑土石混合料的无侧限抗压强度、CBR、回弹模量等路用性能及压实过程中粗颗粒的破碎情况。为此,本文对土石混合料进行了详细的工程力学试验研究。

1 原材料基本物理性质试验

在某高速公路沿线4个标段分别取样进行颗粒分析,筛分结果如图1所示。由图1计算出不同土石混合料的不均匀系数 c_u 和曲率系数 c_c ,如表1所示。由表1可见,4种土石混合料均属于级配良好(A、B、C、D为4种土石混合料级配),其中A级配较其他混合料差。

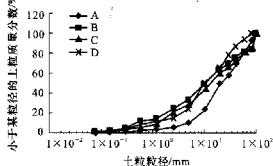


图1 不同土石混合料的级配曲线

表1 土石混合料级配系数

试样级配	不均匀系数 c_u	曲率系数 c_c	级配要求	评定
A	6.6	1.0	$c_u \geq 5$ $c_c = 1 \sim 3$	良好
B	35.0	1.7		良好
C	14.2	1.0		良好
D	19.4	2.1		良好

2 土石混合料击实试验

2.1 大型击实仪的研制

《公路土工试验规程》(JTJ051-93)中规定:击实仪分别为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 127 \text{ mm}$ 和 $\Phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 两种,允许最大粒径为25 mm和38 mm。对于土石混合料,一般情况下最大粒径均大于38 mm。为此,在参照国内外研究成果的基础上,开发了大型击实仪,以供土石混合料压实使用。

试验所用大型击实筒直径为30 cm,高度为35.4 cm,体积为25 000 cm^3 ,击实锤质量为4.5 kg,击锤下落高度为45 cm,击锤直径为5 cm,击实功为600 kJ/m^3 。击实时分5层击实,每层151次。

2.2 试样的选用与制备

将已过80 mm筛的试料用四分法逐次分小,至最后每份试样约60 kg时,按预定含水质量分数配制试样。将试样分成5份依次倒入筒内,整平其表面并稍加压紧,然后按每层151次击实。击实时,击锤应自由竖直下落,落距应为45 cm,锤迹必须均匀分布于试样面上。然后,重复上述步骤,进行其余4层击实,超过高度过大的试件应该作废。扭动并取下套环,齐筒顶小心刮平试样,并拆除底板,取走垫块,擦净试筒外壁,称其质量,质量误差应小于5 g。

从试样内部上下取有代表性样品,测其含水质量分数,计算至0.1%;而后计算每次击实后的干密度,并绘制干密度与含水质量分数的关系曲线,来确定土石混合料的最佳含水质量分数和最大干密度。其中含水质量分数 w 计算公式为

$$w = \frac{w_F P_F + w_G P_G}{100} \quad (1)$$

式中: w 为土石混合料的最佳含水质量分数的计算值(%); w_F 为细颗粒含水质量分数(%); w_G 为粗颗粒含水质量分数(%); P_F 为细颗粒质量分数(%); P_G 为粗颗粒质量分数(%)。

2.3 土石混合料击实试验结果及分析

本文主要开展级配、击实功及击实方法等因素变化时土石混合料的击实试验,以及击实试验过程中土石混合料破碎率变化规律研究。

2.3.1 不同级配土石混合料击实试验结果及分析

针对A、B、C、D 4种土石混合料级配分别进行了 $\Phi 30 \text{ cm} \times 35.4 \text{ cm}$ 的大型击实试验,最大粒径为60 mm,试验结果如图2所示。由图2可见,B、C试样级配良好,其最大干密度较大;而D试样级配良好,其最大干密度却相对较小。根据泰勒(Tailor)提出

的易于压实土的理想颗粒级配经验公式为

$$p = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^n \times 100 \quad (2)$$

式中: p 为小于某粒径的质量分数(%); d 为某粒径尺寸(mm); d_{\max} 为最大粒径(mm); n 为级配指数。

当 $n = 0.25 \sim 0.50$ 时,土料的压实性最好,现将 A、B、C、D 4 种级配与 Tailor 提出的级配范围进行比较(图 3)。由图 3 可见,B、C 试样基本能满足 Tailor 理想级配范围,因此 B、C 试样的压实性较 A、D 试样好。

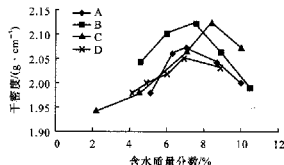


图 2 不同级配土石混合料击实试验结果

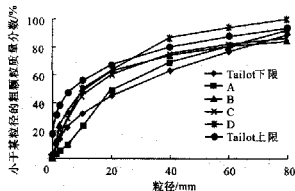


图 3 不同土石混合料与 Tailor 级配比较

2.3.2 不同击实功时击实试验结果及分析

针对 C 试样土石混合料,分别进行了击实功为 600 kJ/m^3 和 960 kJ/m^3 的击实试验,试样最大粒径为 60 mm ,试验结果如图 4 所示。由图 4 可以看出:对于土石混合料,当击实功从 600 kJ/m^3 增大到 960 kJ/m^3 时,由击实试验得到的最大干密度和最佳含水质量分数随粗颗粒质量分数的不同而不同。当粗颗粒质量分数为 70% 时,不同击实功情况下土石混合料的最大干密度变化最小;当粗颗粒质量分数小于 70% 或大于 70% 时,其最大干密度变化较大。

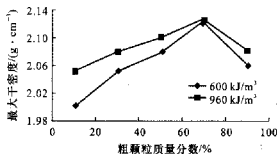


图 4 不同击实功时击实试验结果

2.3.3 不同击实方法的击实试验结果及分析

为了了解不同击实方法对击实结果的影响,采用 3 种击实方法对土石混合料进行击实。第 1 种方法

采用小型击实,将土石混合料采用 5 mm 筛过筛,再对细料进行击实;第 2 种方法采用中型击实,将土石料采用 40 mm 筛过筛,再对混合料进行击实;第 3 种方法采用大型击实,将土石混合料采用 60 mm 筛过筛,再进行击实。击实试验结果如表 2 和图 5、图 6 所示(其中: ρ_{\max} 为最大干密度; w_p 为最佳含水质量分数)。

表 2 不同击实方法下土石混合料击实试验结果

试样级配	小型击实法		中型击实法		大型击实法	
	$\rho_{\max} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$w_p / \%$	$\rho_{\max} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$w_p / \%$	$\rho_{\max} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$w_p / \%$
A	1.93	9.40	2.05	8.30	2.07	5.10
B	1.90	10.10	2.14	8.80	2.12	6.59
C	1.97	10.30	2.11	9.70	2.12	5.20
D	1.94	9.90	2.01	7.80	2.05	6.98

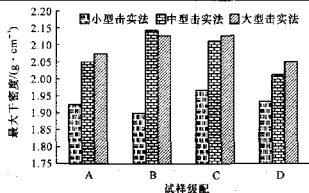


图 5 不同击实方法下最大干密度比较

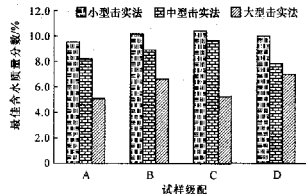


图 6 不同击实方法下最佳含水质量分数比较

由图 5 和图 6 可以看出:对于土石混合料,不同击实方法得到的最佳含水质量分数和最大干密度均相差较大,基本上表现为粒径越大,干密度越大,最佳含水质量分数呈减小趋势。在实际工程中,最好选用大型击实法,若用中型或小型击实法得到控制压实质量的最大干密度,将比实际值要小,因此会降低压实标准。

2.3.4 不同粗颗粒质量分数和破碎率对试验的影响

土石混合料破碎率定义为击实前后大于 5 mm 粗颗粒质量分数之差与击实前大于 5 mm 粗颗粒质量分数的比值。试验前将 C 试样中小于 5 mm 的颗粒筛去,最大粒径为 60 mm ,然后按粗颗粒占 0% 、 10% 、 30% 、 50% 、 70% 、 90% 回配成土石混合料进行大型击实试验。试验结果见表 3 及图 7~图 9 所

示。由图7~图9可见:当粗颗粒质量分数小于(大于)70%时,土石混合物最大干密度随粗颗粒质量分数增加而急剧增大(减小);粗颗粒质量分数越大(越小),土石混合物最佳含水质量分数呈降低(增大)趋势;当粗颗粒质量分数超过70%时,破碎率急剧增加。

表3 粗颗粒质量分数与击实后粗颗粒破碎率的关系

大于5 mm的粗颗粒质量分数/%	最佳含水质量分数/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	击实前大于5 mm粗颗粒质量分数/%	击实后大于5 mm粗颗粒质量分数/%	破碎率/%
0	9.9	1.96	0	0	0
10	8.8	2.00	10	8.74	12.6
30	8.3	2.05	30	25.80	14.0
50	7.2	2.08	50	41.55	16.9
70	5.2	2.12	70	57.96	17.2
90	4.6	2.06	90	63.27	29.7

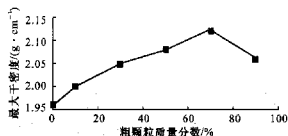


图7 最大干密度与粗颗粒质量分数的关系曲线

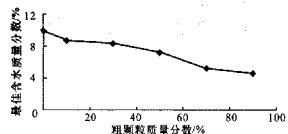


图8 最佳含水质量分数与粗颗粒质量分数的关系曲线

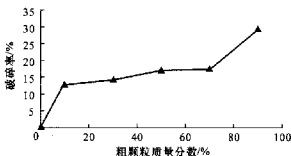


图9 破碎率与粗颗粒质量分数的关系曲线

3 土石混合物力学特性试验

为了评价不同粗颗粒质量分数下土石混合料的力学特性,将土石混合物分别按粗颗粒质量分数为30%、50%、70%、90%制样,进行无侧限抗压强度、CBR、回弹模量试验。试验过程中,针对C试样土石混合物,利用等质量替换法将40 mm以上颗粒替代为5~20 mm,并按《公路土工试验规程》中规定方法成型试件。

3.1 无侧限抗压强度试验

土石混合物无侧限抗压强度试验结果见图10。由图10可看出,粗颗粒质量分数不同,土石混合料的无侧限抗压强度也不同。当粗颗粒质量分数小于70%时,土石混合料的无侧限抗压强度随粗颗粒质量分数增大而线性增大;当粗颗粒质量分数大于70%时,土石混合料的无侧限抗压强度随粗颗粒质量分数增大而减小。其中,当粗颗粒质量分数在30%~70%范围内时,土石混合物无侧限抗压强度与粗颗粒质量分数之间的统计关系为

$$q_u = 0.745P_3 + 5.125, \quad R^2 = 0.9826 \quad (3)$$

式中: q_u 为无侧限抗压强度(kPa); P_3 为粗颗粒质量分数(%); R 为相关系数。

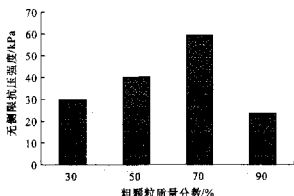


图10 土石混合料的无侧限抗压强度

3.2 土石混合物 CBR 试验

土石混合物 CBR(加州承载比)试验结果如图11、图12所示。由试验结果可以看出:随着粗颗粒质量分数的增加,土石混合物浸水后的膨胀量逐渐减小,且均小于一般细粒土的膨胀量,说明土石混合物具有良好的水稳定性;另一方面,随着粗颗粒质量分数的增加,土石混合物的 CBR 值逐渐增大,且比一般土基的 CBR 值要大得多,说明粗颗粒的掺入有利于提高土基的承载能力,进一步证明土石混合物是一种良好的筑路材料。土石混合物的 CBR 和膨胀量与粗颗粒质量分数之间的统计关系为

$$T_{CBR} = 0.586P_3 + 2.29, \quad R^2 = 0.9323 \quad (4)$$

$$V_H = 1.3977e^{-0.0022P_3}, \quad R^2 = 0.9241 \quad (5)$$

式中: V_H 为膨胀量(%); T_{CBR} 为土石混合物的 CBR 值。

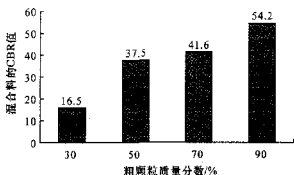


图11 土石混合物的 CBR 值

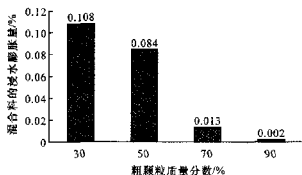


图12 土石混合料的浸水膨胀量

3.3 土石混合料回弹模量试验

土石混合料回弹模量试验结果见图13。由图13可看出,随着粗颗粒质量分数的增加,土石混合料的回弹模量值增大,这与CBR值规律一致。土石混合料回弹模量与粗颗粒质量分数之间的统计关系为

$$E = 0.555P_3 + 10.9, \quad R^2 = 0.9323 \quad (6)$$

式中: E 为回弹模量(MPa)。

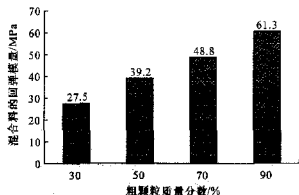


图13 土石混合料的回弹模量值

4 结 语

(1)影响土石混合料压实特性的因素主要包括颗粒级配、粗颗粒质量分数、击实功和击实方法等。土石混合料的级配在泰勒理想级配范围内,其压实性能最好,且压实过程中,击实功不易太大,否则易使土石混合料的级配退化;在实际工程中,最好选用大型击实法来确定土石混合料的最大干密度,否则会降低压实标准。

(2)当粗颗粒质量分数小于70%时,随着粗颗粒质量分数增加,土石混合料的无侧限抗压强度、CBR值和回弹模量逐渐增大;当粗颗粒质量分数大于70%时,土石混合料中粗颗粒虽然能够形成骨架,但骨架内没有足够的细料来填充,从而导致其CBR值和回弹模量增大,而无侧限抗压强度降低。

(3)随着粗颗粒质量分数的增大,土石混合料浸水后膨胀量减小,且小于一般细粒土的膨胀量。

参考文献:

References:

[1] 赵川,石晋旭,唐红梅.三峡库区土石比对土体强

度参数影响规律的试验研究[J].公路,2006,(11):31-35.

ZHAO Chuan, SHI Jin-xu, TANG Hong-mei. Test and research on influence law of soil-rock ratio in three gorges reservoir region on soil strength parameters[J]. Highway, 2006, (11): 31-35.

[2] 徐刚,潘怒,姬美秀,等.粗粒土动强度试验结果的分析方法[J].岩土力学,1998,19(2):63-66.

XU Gang, PANG Nu, JI Mei-xiu, et al. A new method of analyzing the result of dynamic strength test of coarse-grained soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(2): 63-66.

[3] 马松林,王龙,王哲人.土石混合料室内振动压实研究[J].中国公路学报,2001,14(1):5-8.

MA Song-lin, WANG Long, WANG Zhe-ren. Study of compacting properties of soil-aggregate mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 5-8.

[4] Donaghe R T, Torrey V H. Compaction test method for soil-rock mixtures in which equipment size effects are minimized [J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, 17(2): 73-78.

[5] 刘丽萍,王东耀.土石混合料压实质量控制方法[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):35-37.

LIU Li-ping, WANG Dong-yao. Compaction quality control methods of earth-rock mixture [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 35-37.

[6] 张宜洛,郑南朝,顾炳其.中粗粒土路基压实度快速测定方法[J].中国公路学报,2006,19(5):29-33.

ZHANG Yi-luo, ZHENG Nan-xiang, GU Bing-qi. Compactness rapid measurement method on middle coarse grained soil subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 29-33.

[7] 谢春庆,邱延峻,许强.高填方块碎石旁地基变形三维数值模型[J].交通运输工程学报,2003,3(3):21-25.

XIE Chun-qing, QIU Yan-jun, XU Qiang. Three-dimensional numerical simulation of ground deformation of high fill block and detritus [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(3): 21-25.

[8] 张洪亮,胡长顺,刘保健,等.压实石灰黄土力学特性试验[J].交通运输工程学报,2003,3(4):13-16.

ZHANG Hong-liang, [HU Chang-shun], LIU Bao-jian, et al. Mechanical properties experiment of compacted loess-lime [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 13-16.