文章编号：1000－7598 (2010)增刊 2－0115－05

土石混合料的压实特性研究

许锡昌[1]，周　伟[1]，韩　卓[1]，秦尚林[1]，李建新[2]

（1．中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，武汉 430071；2．菏泽市产品质量监督检验所，山东 菏泽 274000）

摘　要：基于某大型场平工程填筑质量抽检结果，探讨了粗料含量（粒径大于 5 mm 颗粒含量）、填料最大粒径以及填料级配情况对土石混合料现场压实特性的影响。研究发现：当粗料含量逐渐增加时干密度呈逐渐增大趋势，但达到 90%左右时，干密度离散性较大，建议粗料含量的合理值为 60%～80%；同样，当填料最大粒径逐渐增大时干密度也随着最大粒径的增大而呈逐渐增大趋势，但当超过松铺厚度（800 mm）的 30%以后，干密度则逐渐减小，且离散性较大，建议最大粒径的合理值为松铺厚度的 30%；填料级配良好与否和压实特性无明显的相关性，但级配应连续。该研究对类似工程有一定的借鉴意义。

关　键　词：土石混合料；压实特性；粗料石量；最大粒径；级配

中图分类号：TU 413　　**文献标识码：**A

Research on compaction properties of soil-aggregate mixture

XU Xi-chang[1]，　ZHOU Wei[1]，　HAN Zhuo[1]，　QIN Shang-lin[1]，　LI Jian-xin[2]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Heze Institute of Product Quality Supervision ＆ Inspection, Heze, Shandong 274000, China)

Abstract: Based on the field test results of dry density for a project, the influences of the maximum grain size, coarse material content (percentage of coarse material diameter above 5 mm) and gradation on compaction properties of soil-aggregate mixture are discussed. The results indicate that dry density increases gradually when coarse material content increases; dispersion of dry density is greater when it is about 90%. The reasonable coarse material content which is 60% - 80% is suggested. Dry density increases gradually while maximum grain size increases. Dry density decreases and the dispersion is greater, when the maximum grain size over a certain value. So the maximum grain size which is about 30% of the loose thickness (800 mm) is suggested. There is no obvious correlation between gradation and compaction properties, but the gradation should be continual. This study may have a certain significance to similar projects.

Key words: soil-aggregate mixture; compaction properties; coarse material content; maximum grain size; gradation

1　引　言

随着我国经济的快速发展，山区的重点项目建设，如机场、公路、铁路、水电、核电等越来越多，规模也越来越大，势必存在土石方的深挖高填问题，为避免因弃土而造成的环境污染问题，一般遵循挖填平衡原则。填料主要以爆破产生的石料为主，含少量覆盖层，存在土、石混填问题，土石混合料的概念也逐渐被提了出来，且随着我国行业设计水平、施工技术和材料试验水平的提高，该类料已得到广泛应用。但在实践中发现，由于其颗粒粗大，工程性质介于一般岩石和细粒土之间，其压实特性、力学特性等工程特性已引起岩土工程界的重视，如何控制填筑质量是其中的一大重要研究课题。

从土的分类上看，由于工程用途不同，其划分标准也不尽相同，同一国家的不同部门或行业在划分界限的采用上存在一定差异。比如，美国陆军工程师兵团、垦务局和材料试验学会联合将 d＞0.075 mm 颗粒质量百分含量大于 50%的土称为粗粒土；而美国公路工作者协会将 0.075 mm＜d＜60 mm 颗粒含量大于 50%的土划分为粗粒土[1]。我国水利部、交通部、铁道部等行业标准和国家标准将 0.075 mm＜d＜60 mm 颗粒含量大于 50%的土划分为粗粒土，且细分为粗粒类土、砾类土和砂土[2–4]。

收稿日期：2010-05-12
基金项目：中国科学院知识创新工程青年人才领域前言项目（No. O727031Q01）。
第一作者简介：许锡昌，男，1972 年生，博士，副研究员，主要从事岩土工程灾害治理方面的研究。E-mail: xcxu@whrsm.ac.cn

土石混合料的粒径可达 1 000 mm，甚至更大，远远超出了粗粒土的粒径范围，属于巨粒组的范围，而巨粒土又根据粒组含量细分为巨粒土、混合巨粒土和巨粒混合土。很多情况下，同一填筑场地的填料由于粒组含量不同，可能同时存在巨粒土、混合巨粒土和巨粒混合土。为便于研究，工程上有时又习惯称之为土石混合料。

在填筑施工开始前，首先要确定填筑控制标准，一般可通过室内试验确定最大干密度，再结合压实度控制和现场碾压试验来确定。

对土石混合料的最大干密度，不少专家一直在进行着理论研究和试验研究。目前，理论研究还相对滞后，主要还是开展试验研究。试验研究包括直接法和间接法。直接法主要是通过提升仪器性能来测定最大干密度，受设备性能和粒径范围的限制，使得直接测定法的研究进展缓慢。间接法则是利用现有试验条件，通过测定可测粒径范围内粗粒土最大干密度与粒径的相关关系，来外推填料原型级配的最大干密度[5]。近年来，间接法得到了很好的发展，如史彦文[6]提出了相似级配系列延伸法；田树玉[7]提出了渐近线辅助拟合法；郭庆国和刘贞草[8]又提出了 3 点近似测定法等。

由于室内试验时无法采用原型级配土样，土石混合料的室内试验与现场压实指标之间的对应关系还没完全弄清楚，所以，仅仅依靠室内试验难以掌控现场施工质量。在目前状况下，一些公路、大坝、大型场平工程等填筑工程中，常采用现场碾压试验来确定施工参数，然后再开始大面积施工，取得了较好的效果。在现场碾压试验研究方面，秦尚林等[9]探讨了高填路堤填筑工程中巨粒土的压实机制以及填料级配、含水率以及铺土厚度、碾压机械、碾压遍数等不同施工工艺参数对压实效果的影响，提出巨粒土现场压实质量控制应以沉降差为主。其他学者也就现场碾压试验和质量控制标准等问题进行了探讨，并获得了一些有意义的结论[10–13]。

本文拟以某大型场平工程为依托，结合现场填筑质量抽检结果，探讨了影响土石混合料压实特性的主要因素，取得了某些共性的结论，希望能对相关行业部门在建立健全相应的规范、规程以及推广土石混合料的应用方面具有一定的作用。

2 工程背景

该项目属于山区大面积场平工程，开挖土石方约 1 829 万 m^3，填方约 2 103 万 m^3，多数区域填筑高度超过 20 m，填料岩性复杂，风化程度不均匀。填料主要分为 4 类，其中施工区填料为Ⅱ、Ⅲ类混合料，Ⅱ类料为微风化灰质砾岩，Ⅲ类料为强、中风化砾岩，均通过爆破、解小等手段形成碎石料。施工区填筑质量需要重点控制，设计要求Ⅱ、Ⅲ类混合料的粗料含量（工程上习惯将粒径大于 5 mm 颗粒称粗料，粒径小于 5 mm 颗粒称细料）在 70%左右，干密度不小于 2.12 g/cm^3。

根据设计要求，施工方进行了现场碾压试验，获取的碾压控制参数如下：碾压机械采用 22 t 振动碾，松铺厚度为 800 mm，碾压遍数为 8 遍，含水率为天然状态，控制最大粒径为 30 cm，填料级配要连续，干密度控制标准为 2.12 g/cm^3。

3 压实特性影响因素分析

土石混合料压实特性的影响因素很多，不仅与碾压机械、压实厚度、碾压遍数等施工参数有关，而且还与填料自身的性质有关，包括填料最大粒径、粗料含量、填料级配等。

为保证填筑质量，建设单位委托第三方进行了抽检，主要包括颗分和压实度试验，试验采取灌水法，试坑直径为 1 m，深度约为 0.8 m，前期共抽检了 76 个点。下面利用抽检结果来分析土石混合料自身特征对压实效果的影响。

3.1 粗料含量与干密度的关系

图 1 给出了粗料含量与干密度关系散点图。

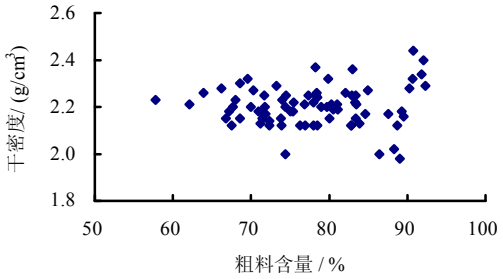

图 1 填料粗料含量与干密度关系散点图
Fig.1 Scatter plot of coarse material content vs. dry density of filling material

由图 1 可以看出，就大部分测点而言，填料的粗料含量在 65%～90%之间，一方面与填筑要求有关，另一方面也与碾压过程中造成颗粒破碎有很大关系。当粗料含量由 60%逐渐增大时，干密度呈现出逐渐增大的趋势，但没有表现出明显的相关性；但当粗料含量达到 90%左右时，干密度的离散性较大。

研究表明，同体积的细料颗粒比粗料颗粒的数

量多，比表面积大、孔隙大、重量小，当粗料含量增大，单位体积土的重量增加，因此，干密度随粗料含量增大而增大；随着粗料含量增加，粗料颗粒逐渐起骨架作用，细料充填空隙，粗细颗粒相互填充得更加紧密，以致当达到临界含量时，粗料颗粒既能形成完整骨架，细料又能填满骨架空隙，粗、细料共同传递外力，颗粒间挤压得更加紧密，干密度达到最大值；当超过临界含量后，随着粗料含量的增加，细料的数量不足以填充满粗料间的空隙，粗料呈架空状态，外力仅被粗料颗粒构成的骨架所承担，而处于空隙中的细料得不到压实，则干密度值减小。所以，当含石量在 90%左右时，干密度的离散性较大，干密度较大说明该处有大粒径块石存在，且周围的空隙被填满，而干密度较小则说明块石周围存在局部架空现象。

因此，当粗料含量在某一合理区间时，填筑质量能够满足要求。对于本工程而言，考虑到颗粒破碎因素，粗料含量的合理区间为 60%～80%。

3.2　最大粒径与干密度的关系

图 2 给出了最大粒径与干密度关系散点图。

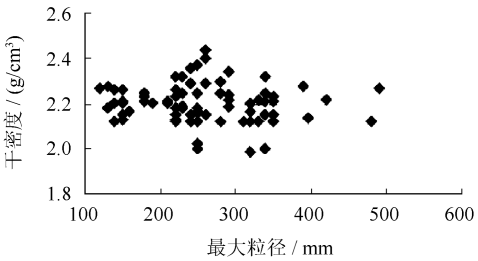

图 2　填料最大粒径与干密度关系散点图

Fig.2　Scatter plot of maximal particle size vs. dry density of filling material

由图 2 可以看出，当最大粒径从 110 mm 逐渐增加到 250 mm 时，干密度呈逐渐增大趋势，随后干密度则逐渐减小，且离散性较大。经分析原因后认为：当最大粒径逐渐增大时，粗料含量也逐渐增加，干密度增大；但当最大粒径超过 300 mm 后，易产生级配不连续现象，导致局部架空，细料处于不密实状态而干密度较小，说明最大粒径对干密度的影响存在交叉作用。对于本工程而言，最大粒径的合理值为 200～300 mm，最佳压实厚度为 250 mm，相当于松铺厚度（800 mm）的 30%左右。

3.3　级配与干密度的关系

填料级配情况主要包括限制粒径 d_{60}、中值粒径 d_{30}、有效粒径 d_{10}、不均匀系数 C_u、曲率系数 C_c 和整体评价情况，图 3～5 分别给出了 d_{60}、d_{30}、d_{10} 和干密度关系的散点图，图 6～8 分别给出了 C_u、C_c 以及填料级配整体评价情况对干密度的影响。

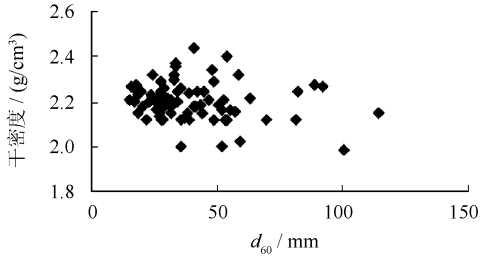

图 3　d_{60} 与干密度关系散点图

Fig.3　Scatter plot of d_{60} vs. dry density

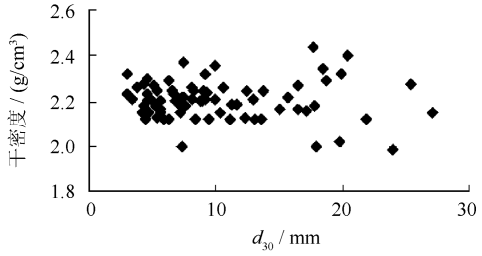

图 4　d_{30} 与干密度关系散点图

Fig.4　Scatter plot of d_{30} vs. dry density

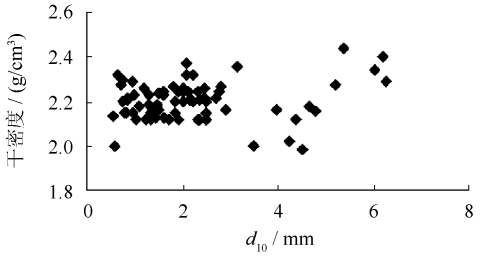

图 5　d_{10} 与干密度关系散点图

Fig.5　Scatter plot of d_{10} vs. dry density

由图 3～5 可知：①d_{60} 主要分布在 30～50 mm 之间，在 40 mm 附近时，干密度最大，当从 40 mm 逐渐增大时，干密度逐渐减小；②d_{30} 主要分布在 3～9 mm 之间，干密度较为稳定，平均值为 6 mm，当 d_{30} 在 20 mm 附近时，干密度离散性较大，中值粒径与含石量在 70%左右是互相验证的；③d_{10} 多数在 3 mm 以下，且干密度数值较为接近，当 d_{10} 超过 4 mm 时，干密度值离散性较大，说明细料含量对土石混合料的压实特性有较大的影响。

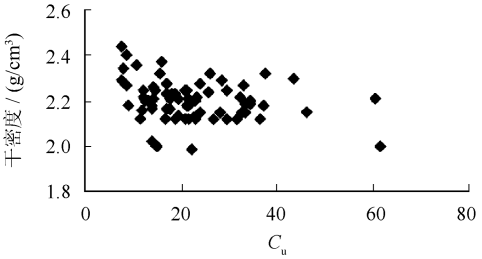

图 6　填料不均匀系数 C_u 与干密度关系散点图

Fig.6　Scatter plot of C_u vs. dry density

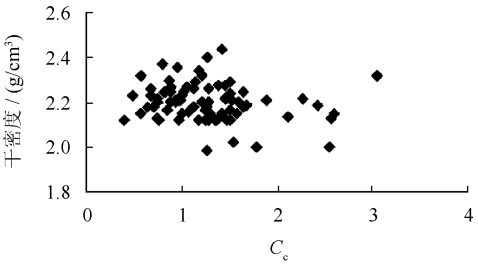

图 7 填料曲率系数 C_c 与干密度关系散点图
Fig.7 Scatter plot of C_c vs. dry density

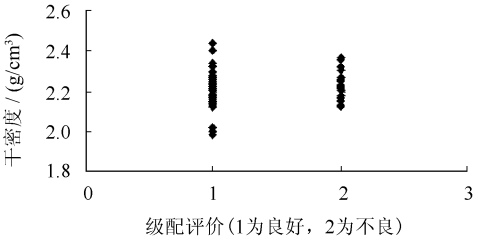

图 8 填料级配评价与干密度关系散点图
Fig.8 Scatter plot of C_c vs. dry density

从图 6 可以看出，C_u 主要在 5～35 之间，在此区间干密度基本满足要求；当 C_u 超过 35 以后，干密度离散性较大。经分析后认为：C_u 反映大小不同粒组的分布情况，即土粒大小或粒度的均匀程度。C_u 越大，表示粒度的分布范围越大，土粒愈不均匀，表示级配愈良好。C_u 越大也说明最大粒径可能较大，当最大粒径超过一定数值时，易产生局部架空现象而难以压实。

从图 7 可以看出，C_c 主要在 0.5～1.5 之间，在此区间干密度基本满足要求；当 C_c 超过 1.5 以后，干密度离散性较大；当 C_c 过大或过小时，干密度均较小。经分析后认为：C_c 主要反映累计分布曲线的整体形态，反映了 d_{60} 与 d_{10} 之间各粒组含量的分布情况。C_c 过大或过小，均说明土中缺少中间粒组，各粒组间空隙的连锁充填效应降低，级配变差。

从图 8 可以看出，在级配不良的情况下，干密度同样可以满足要求，说明土石混合料的压实特性与级配情况不存在直接相关关系。公路行业的现场碾压试验和室内模拟试验结果也证明了这一点。而对粗粒土来说，级配良好时，较粗颗粒间的空隙易被较细的颗粒所填充，这一连锁充填反应，使得土的密实度较好。因此，土石混合料的压实特性与粗粒土有着明显的不同。

4 结 论

通过对土石混合料现场碾压质量抽检数据分析，可以得到如下结论：

（1）粗料含量对干密度的影响较大，当其从65%逐渐增加时，干密度呈现出逐渐增大的趋势；但当含石量在 90%左右时，干密度的离散性较大，建议粗料含量的合理区间为 60%～80%。

（2）当最大粒径从 110 mm逐渐增加到250 mm时，干密度呈逐渐增大趋势，当最大粒径超过300 mm 后，干密度则逐渐减小，且离散性较大，说明最大粒径过大时容易造成局部架空现象，而导致干密度较小，说明最大粒径对干密度的影响存在交叉作用，最大粒径的合理值为 200～300 mm，最佳压实厚度为 250 mm，相当于松铺厚度（800 mm）的 30%。

（3）d_{30} 主要分布在 3～9 mm 之间，平均为 6 mm，与含石量在 70%左右是互相验证的，说明细料含量对土石混合料的压实特性有较大的影响。但填料级配良好与否压实特性无明显的相关性。

（4）土石混合料压实特性的受多方面因素的影响，本文的研究还很不全面，希望能在填料控制标准、影响压实特性的关键因素等方面做进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州：黄河水利出版社，1999.

[2] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京：中国水利水电出版社，1999.

[3] 中华人民共和国交通部. JTG E402007 公路土工试验规程[S]. 北京：人民交通出版社，2007.

[4] 中华人民共和国铁道部. TB10077-2001，J123-2001 铁路工程岩土分类标准[S]. 北京：中国铁道出版社，2001.

[5] 朱崇辉，严宝文，刘俊民，等. 超粒径粗粒土最大干密度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(增 2)：4090－4094.

ZHU Chong-hui, YAN Bao-wen, LIU Jun-min, et al. Experimental study of maximum dry density of overdiameter coarse-grained earth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(supp. 2): 4090－4094.

[6] 史彦文. 大粒径砂卵石最大密度的研究[J]. 土木工程学报，1981，14(2)：53－58.

SHI Yan-wen. A study of maximum density of large sized sandy gravels[J]. **Chinese Civil Engineering Journal**, 1981, 14(2): 53－58.

下转第 148 页