

DOI: 10.11779/CJGE201511016

# 基于弹性波理论的土石混填地基压实质量评价研究

张献民<sup>1</sup>, 吕耀志<sup>2</sup>, 董倩<sup>1, 3</sup>, 张宇辉<sup>1</sup>

(1. 中国民航大学机场学院, 天津 300300; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300201; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 为了准确、高效地评价土石混填地基的压实质量, 提出了一种基于弹性波理论的压实质量评价新方法。通过理论与试验分析, 建立了土石混合料的剪切波速模型, 实现了由土石混合料宏观剪切波速推定出其中石料间细粒土的压实度, 并以此来表征混合料整体压实质量。通过室内大型振动压实试验, 得到在不同含石量与含水率时, 混合料中细粒土所能达到的最大干密度(或压实度), 以此作为土石混合料表征压实度评价的参考标准。研究了土石混合料剪切波速与瑞雷面波波速的关系, 使得利用现场瞬态面波测试所得到的频散曲线来反演计算剪切波速成为可能。最后通过对某机场跑道填筑工程土石混填地基压实质量的评价, 验证了评价方法的可行性。

**关键词:** 土石混合料; 压实质量; 剪切波速; 瑞雷面波; 无损检测

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2051-07

**作者简介:** 张献民(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程及其结构无损检测的教学与科研。E-mail: cauczxm@126.com。

## Evaluating compaction quality of soil-rock mixture based on theory of elastic waves

ZHANG Xian-min<sup>1</sup>, LÜ Yao-zhi<sup>2</sup>, DONG Qian<sup>1, 3</sup>, ZHANG Yu-hui<sup>1</sup>

(1. College of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300201, China; 3. School of Civil engineering Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A new method based on the theory of elastic waves is founded to evaluate the compaction quality of soil-rock mixture accurately and efficiently. Based on large numbers of laboratory tests and analyses, the model for shear wave velocity propagation in soil-rock mixture is established. Then the compaction of fine-grain soil between rocks can be calculated, and it can represent the compaction quality of soil-rock mixture. In the end, the maximum dry densities of the fine-grained soil in different kinds of the soil-rock mixture with different quantities of water and rock are presented according to the results of a lot of vibration compaction tests in laboratory, and the criteria for the nominal compaction quality of soil-rock mixture are constituted. The relationship between the shear wave velocity and the Rayleigh wave velocity is analyzed, and the results can give a hand to get shear wave velocity by Rayleigh wave tests. Finally, the proposed method is used to evaluate a program of airport runway soil-rock mixture foundation to verify its feasibility.

**Key words:** soil-rock mixture; compaction quality; shear wave velocity; Rayleigh wave; nondestructive detection

## 0 引 言

土石混填地基常见于山区机场、公路、铁路等土木工程建设中, 这些工程大都具有填方高度大、土石方工程量大等特点。对这类工程, 地基压实质量的好坏将影响地基的强度与稳定性, 直接关系到这些大型基础设施的使用寿命乃至运营安全, 成为决定工程建设质量的关键因素之一。目前对地基压实质量的评价标准主要针对细粒土, 实际运用于土石混填地基时存在着很多局限和不足。随着土石混合材料在工程中的大量应用, 国内外对土石混合材料的工程性质、力学特性、压实质量等方面已有不少研究<sup>[1-5]</sup>。尤其是其压

实质量的检测与控制已成为研究的热点与难点问题。近年来, 有学者开始重视借助弹性波来研究土石混填地基压实质量的评价方法<sup>[6-10]</sup>, 由于土石混合料的多样性及弹性波在混填料中传播的复杂性, 目前的研究成果多是针对具体工程或某一问题进行波速试验, 尚未给出具有大范围实际推广价值的压实质量评价体系。

针对以上问题, 基于理论与大量的试验分析,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60879021); 中国民航局科研基金项目(MHRD07Z11); 中央高校基本科研基金项目(ZXH2009D019)  
**收稿日期:** 2014-08-20

提出了一种基于弹性波理论的土石混填地基压实质量评价技术: 首先通过建立土石混合料剪切波速与混合料石料间细粒土密实度之间的关系和建立不同土石混合料石料间细粒土最大密实度标准, 达到通过分析土石混填料的宏观剪切波速得到石料间细粒土的压实程度的目的。考虑到现场波速测试的实用性与可行性, 研究了土石混合料剪切波速与面波波速的关系, 使得瞬态 Rayleigh 面波法现场测试剪切波速成为可能。本方法为土石混填地基的压实质量评价提供了新的思路和手段, 具有重要的理论和实际意义。

## 1 评价体系原理

### 1.1 弹性波与土石混合料压实质量的关系

岩土介质中, 瞬态扰动产生的波为小应变应力波, 其最大应变幅值一般小于  $10^{-6}$ 。由于这种波动行为与其应变幅值无关, 且只有少量源于材料阻尼的能量消散, 故在岩土材料里这样的应变量级称为“弹性”<sup>[12]</sup>, 剪切波和面波就是两种典型的弹性波。岩土体的剪切波速与物理力学指标具有高度的相关性, 是体现岩土体物理力学性质的重要原位测试参数。土石混合料剪切波速与压实度的关系方面, 赵明阶等<sup>[9]</sup>、Richefeu 等<sup>[10]</sup>、张宇辉等<sup>[11]</sup>、张献民等<sup>[13]</sup>的研究成果均证实运用剪切波速测试土石混合料的压实质量是可行的。

根据规范<sup>[14]</sup>, 目前衡量路基土的压实质量使用压实度指标, 压实度  $K$  (%) 是经压实后现场实际达到的干密度  $\rho_d$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 与室内标准击实试验所得的最大干密度  $\rho_{dmax}$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 的比值, 即

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \quad (1)$$

由于粗颗粒的存在, 对于混合料干密度  $\rho_d$  及最大干密度  $\rho_{dmax}$  的准确测定一直是难以解决的问题。因此式 (1) 并不适用于土石混填地基的评价。

研究成果显示<sup>[15-16]</sup>, 按照混合料的含石量不同土石混合料可以分为三类: 第一类为多土类混合料 (含石量不大于 30%); 第二类为过渡类混合料 (含石量为 30%~70%); 第三类为多石类混合料 (含石量大于 70%)。对于过渡类混合料, 其混合料的工程性质由土和石料共同决定。而石料与土相比, 可以认为是刚体, 只有其中土的压实达到良好状态, 才能保证土石混合路基的压实质量。应该说是混合料中细粒土的压实程度决定了混合料整体的压实质量, 但混合料不同位置间隙土的压实度也存在差别, 为此定义混合料中间隙土的平均压实程度为“表征压实度”, 以此来反映土石混合料的压实质量。表征压实度具体表示如下:

$$K_b = \frac{\rho_b}{\rho_{dmax}} \quad (2)$$

式中,  $\rho_b$  为表征干密度, 即土石混合料中细粒土的平均干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_{dmax}$  为相应细粒土室内标准击实试验所得的最大干密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $K_b$  为表征压实度 (%)。

若要实现表征压实度的工程应用, 测得土石混合料中细粒土的干密度 (表征干密度)  $\rho_b$  是关键。使用目前的土工试验手段很难直接较为准确地测得表征干密度  $\rho_b$ , 而细粒土的干密度与其剪切波速具有良好的相关性, 故可以利用剪切波在细粒土中的传播速度来间接得到其干密度。由于石块随机分布于混合料中, 无法直接测得石块间隙土的剪切波速, 较为容易测得的是土石混合料的宏观剪切波速, 所以必须在大量试验的基础上建立土石混合料的剪切波速模型, 以便由混合料的宏观剪切波速得到石料间隙土的剪切波速。

### 1.2 现场测试手段

建立了基于剪切波的评价方法后, 若要运用于土石混填地基的现场实测还需解决测试手段的问题。目前剪切波的现场测试手段主要有钻孔法和面波法<sup>[9]</sup>。钻孔法优点是原理简单, 测试结果可靠; 但是钻孔会对地基产生局部破坏, 而且对于土石混填地基来说, 钻孔费时、费力, 难以满足现代化施工的要求。用面波法进行测试无须钻孔, 振源和检波器均布置在地基表面, 其特点是属于无损测试, 测试效率高, 是较为有前景的一种测试方法。

### 1.3 评价流程

根据以上测试原理的分析, 总结出评价体系流程图, 详见图 1。评价方法主要借助于室内试验建立的

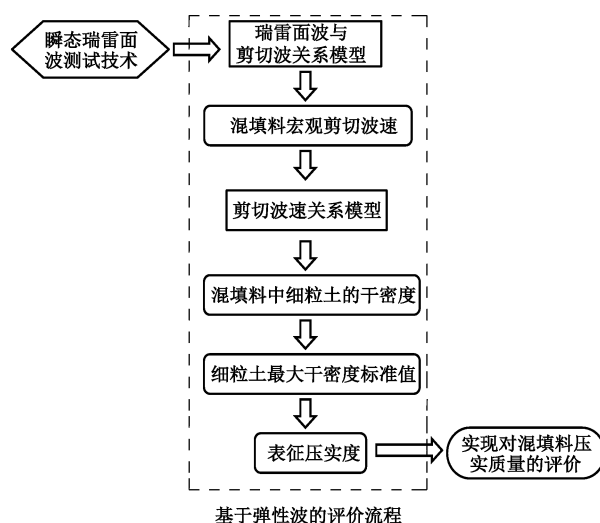


图 1 评价体系流程图

Fig. 1 Process for evaluating compaction quality of soil-rock mixture by nominal compaction quality

剪切波传播理论和现场面波测试。面波测试难以在室内进行却适合工程大范围测试; 剪切波室内测试简单但现场测试效率低。本文提出的评价方法将剪切波测试与面波测试相结合, 可以较好地解决弹性波测试土石混合料的技术难题。

## 2 关键技术问题

### 2.1 土石混合料剪切波速模型

张宇辉等<sup>[11]</sup>经过大量室内试验与理论分析, 在引入体积膨胀率  $\gamma_v$  后得到土石混合料宏观剪切波速  $v_s$  与含石量  $n$ 、体积膨胀率  $\gamma_v$  之间的关系:

$$v_s = 711.75e^{0.651n-1.814e^{-2.175n}\gamma_v}, \quad (3)$$

式中,  $v_s$  为土石混合料的宏观剪切波速 (m/s),  $n$  为含石量,  $\gamma_v$  为体积膨胀率, 即土石混合料中间隙土的体积相对同性质细粒土最佳压实状态下体积 (即标准压实状态体积) 的增量与最佳压实状态下体积的比值。根据文献[11], 细粒土剪切波速  $v_{s2}$  与体积膨胀率  $\gamma_v$ 、含水率  $w$  满足以下的关系:

$$v_{s2} = f(\gamma_v) = (-1.45w^2 + 23.26w + 615.81)e^{(-0.004w^2 + 0.123w - 2.409)\gamma_v} \quad (\text{低液限黏土}); \quad (4)$$

$$v_{s2} = f(\gamma_v) = (-0.32w^2 - 0.76w + 357.34)e^{(-0.0003w^2 + 0.037w - 1.645)\gamma_v} \quad (\text{砂土}); \quad (5)$$

$$v_{s2} = f(\gamma_v) = (-1.06w^2 - 1.34w + 766.54)e^{(0.016w^2 - 0.250w - 2.581)\gamma_v} \quad (\text{低液限粉质黏土}), \quad (6)$$

由此可得土石混合料的剪切波速模型, 将式 (3) 分别代入式 (4) ~ (6), 经过处理可得

$$v_{s2} = (-1.45w^2 + 23.26w + 615.81) \cdot \left( \frac{711.75}{v_s} \right)^{\frac{-0.004w^2 + 0.123w - 2.409}{1.814e^{-2.175} - 0.651n}} \quad (\text{低液限黏土}); \quad (7)$$

$$v_{s2} = (-0.32w^2 - 0.76w + 357.34) \cdot \left( \frac{711.75}{v_s} \right)^{\frac{-0.0003w^2 + 0.037w - 1.645}{1.814e^{-2.175} - 0.651n}} \quad (\text{砂土}); \quad (8)$$

$$v_{s2} = (-1.06w^2 - 1.34w + 766.54) \cdot \left( \frac{711.75}{v_s} \right)^{\frac{0.016w^2 - 0.250w - 2.581}{1.814e^{-2.175} - 0.651n}} \quad (\text{低液限粉质黏土}). \quad (9)$$

由此可以得到以低液限黏土、砂土以及低液限粉质黏土为细粒土的土石混合料的剪切波速模型, 从而实现了由土石混合料宏观剪切波速推断出其石料间隙

土剪切波速。

### 2.2 细粒土压实质量与剪切波速关系

对于土石混和料中的细粒土, 其干密度与剪切波速的相关分析模型可以通过室内击实试验来建立, 这方面虽有一些研究<sup>[7-8]</sup>, 但尚需完善。由于土质千差万别, 不同地区建立的相关模型具有一定的差别, 不能盲目互相套用。细粒土干密度与剪切波速相关分析模型的主要影响因素包括土质、含水率等, 含水率的变化直接导致细粒土剪切刚度的变化, 也就必然引起剪切波速的变化<sup>[13]</sup>。因此必须研究不同土质的细粒土中含水率对剪切波速的影响, 这将直接影响对细粒土压实度分析的精度。

以低液限粉质黏土 ( $w_L=25.9\%$ ,  $I_P=13.26$ ) 为例, 通过测量不同含水率与干密度时土样所对应的平均剪切波速来建立干密度与剪切波速之间关系。试验步骤: 配制 7 种不同含水率试样 (5.14%, 7.47%, 8.64%, 10.53%, 13.28%, 15.73%, 17.95%) 根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)<sup>[16]</sup>对其进行标准击实试验, 并测出在不同干密度时剪切波通过试样的波速值。含水率为 7.47% 和 10.53% 时干密度与剪切波速的关系见图 2 (其他含水率时具有类似结果)。

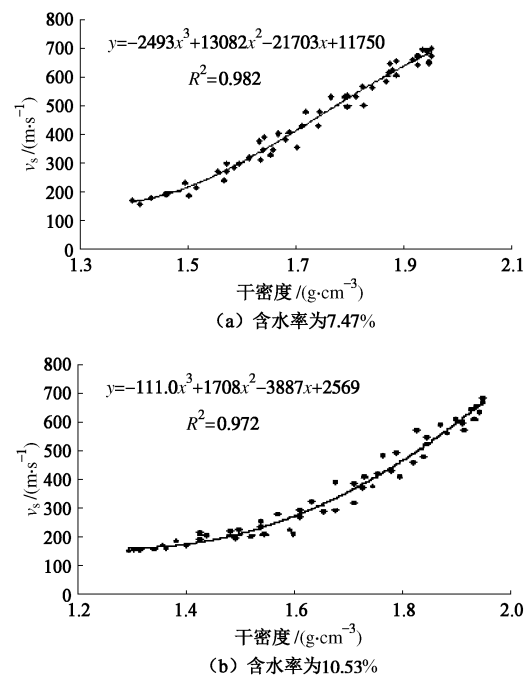


图 2 不同含水率时干密度与剪切波速的相关关系

Fig. 2 Relations between shear-wave velocity and dry density of mixture with different water contents

从图 2 可以直观地看到, 不同含水率时细粒土的干密度与剪切波速具有很好的相关性。首先对数据进行一元回归分析, 选取 4 种典型的函数形式 (指数、对数、幂函数、多项式) 进行拟合, 确定相关系数最

大的三次多项式为拟合函数；然后对回归后的函数与原始波速做残差分析，剔除离散性过大的点（残差大于 30 m/s）。对初步处理后的数据进行二次回归分析，拟合函数仍然选取 3 次多项式，得到结果见表 1。最后可以做出不同含水率时，低液限粉质黏土干密度与剪切波速的关系，即可以实现在已知含水率和剪切波速情况下较为准确地推断出干密度的目的。

表 1 试验数据处理结果

Table 1 Analyzed and processed data of experiment					
序号	含水率 /%	剔除点 个数	所占比 例/%	回归关系	R <sup>2</sup> 值
1	5.14	5	9.3	$y = -5907x^3 + 30118x^2 - 49944x + 27349$	0.991
2	7.47	10	18.5	$y = -2520x^3 + 13226x^2 - 21952x + 11891$	0.982
3	8.64	10	18.5	$y = -1092x^3 + 6016x^2 - 9966x + 5319$	0.985
4	10.53	11	20.3	$y = 119.7x^3 + 569.8x^2 - 2022x + 1559$	0.972
5	13.28	9	16.7	$y = -656.6x^3 + 4213x^2 - 7684x + 4446$	0.993
6	15.73	7	13.0	$y = 756.1x^3 - 2583x^2 + 2996x - 1056$	0.992
7	17.95	3	5.6	$y = 1485x^3 - 6042x^2 + 8317x - 3735$	0.985

2.3 “表征压实度”评价指标的建立

如同用压实度评价细粒土路基压实质量需要知道最大干密度一样，用“表征压实度”来衡量土石混填路基压实质量时，首先需要通过大量试验研究确定土石混合料表征压实度的评价标准（即不同情况下混合料间隙土的最大压实度）。在理想情况下，当土石混合料中细粒土的压实度达到 100%时，其强度与稳定性处于最佳状态，但实际工程中这是难于实现的，由于其压实度与土石比例、石料级配等因素有关，当含石量较高时，石料间隙中细粒土的压实度不可能达到较高水平。为分析土石混合料最大密度时石料间隙土的压实度，就必须首先获得土石混合料的最大密度及其对应的宏观剪切波速，然后才可能利用土石混合料宏观剪切波速理论模型与细粒土压实度剪切波速分析模型分析表征压实度。

对不同含水率和含石量的土石混合料用振动压实法，根据规范<sup>[17]</sup>，选取合适的试验参数对其进行振动压实。普通压实仪主要适用于细粒土，运用于土石混合料时压实筒过小，难以满足要求，故采用自制大型振动压实仪对其进行振动压实试验。振动压实设备采

用自制大型振动压实仪（见图 3），具体参数为：电压为 380 V，功率小于 3000 W，振动频率为 50 Hz，激振力 5.4~9.6 kN，锤质量 380 kg，压实筒高为 100 cm，直径为 50 cm。混合料由低液限粉质黏土和天津蓟县大青石按照 Talbot 理想级配组成。混合料试件剪切波速值的测量采用 GJY-1 工程检测仪。为了定义“表征压实度标准值”首先明确两个概念混合料的干密度  $\rho_d$  和单位比能  $E$ （混合料单位质量获得的压实功）：

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad , \quad (10)$$

$$E = \frac{W}{m} \quad . \quad (11)$$

式中  $\rho$  为天然密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $w$  为含水率 (%)； $\rho_d$  为混合料的干密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $W$  为压实功 (J)； $m$  为混合料质量 (kg)。



图 3 试验压实设备

Fig. 3 Compaction equipment in tests

混合料的干密度不可能随单位比能的增加而无限增大（即混合料体积不可能无限压缩），故混合料干密度不再随单位比能的增加而变化时所对应的混合料干密度即为该混合料试样的最大干密度，所对应的单位比能为最大单位比能。图 4 为含水率 15.12%，含石量为 65%理想级配情况下，混合料干密度单位比能的变化情况。从图中可见，当单位比能达到一定值（约 6.0）后，混合料的干密度几乎不再变化，即混合料间隙土不能再被继续压实。将此时隙土的压实度定义为“表征压实度的标准值”。

对振动压实后的土石混合料进行干密度测试及剪切波速测试，并结合土石混合料宏观剪切波速模型和细粒土压实度剪切波速分析模型进行分析，得到“表征压实度的标准值”。通过大量试验，做出每组试件的孔隙率 - 单位比能关系曲线，找出孔隙率不再变化时的单位比能，相应的孔隙率即为最小孔隙率、密度为土石混合料的最大干密度，而此时分析获得的土石混合材料中间隙土的压实度可确定为良好压实状态表征压实度的标准。统计发现，含石量越低，“表征压实度

标准值”越高,即石料间隙土所能达到的压实度越高;而随含水率的不断升高,每种含水率下的最大“表征压实度标准值”先增后减,说明若想达到较好的压实状态,控制含水率是关键因素。

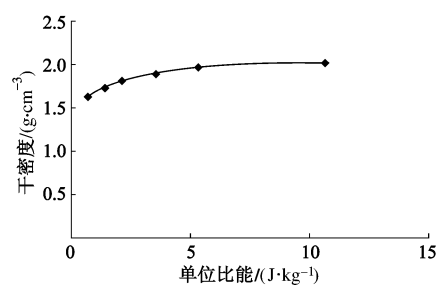


图 4 单位比能 - 混合料干密度变化曲线

Fig. 4 Relation curve between unit energy and dry density of mixture

2.4 混合料面波与剪切波关系

根据弹性波理论,均匀介质的地基土中面波与剪切波存在以下关系:

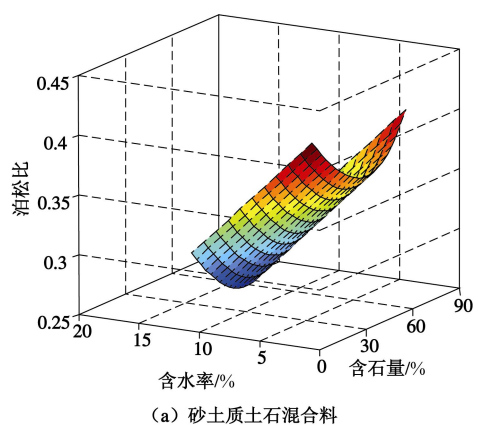
$$v_s = \frac{1 + \nu}{0.87 + 1.12\nu} \cdot v_R \quad (12)$$

式中,  $v_s$  为剪切波波速,  $v_R$  为瑞雷面波波速,  $\nu$  为泊松比。假设土石混合料中碎石料均匀地分布于细粒土中且土石混合料的压实程度在一定区域内较稳定,则在已知填筑料泊松比的情况下,可以很方便地实现由面波计算出剪切波。根据已有研究成果<sup>[17]</sup>,过渡类土石混合料的泊松比随含石量的增加而减少,随含水率的增加先变小后增大(见图 5),其关系为

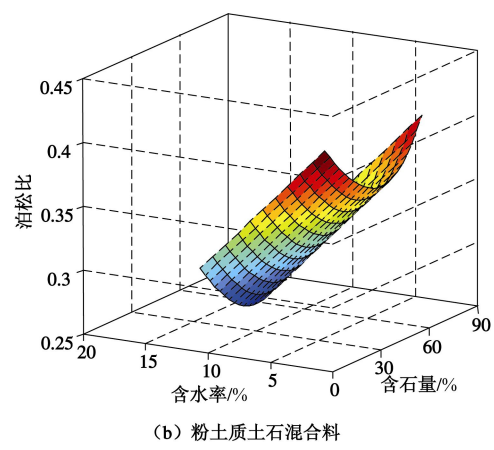
$$\nu = -0.107 \times n + 12.96 \times w^4 + 6.46 \times w^3 + 1.475 \times w^2 - 0.688 \times w + 0.42 \quad (\text{砂土质混合料}) \quad (13)$$

$$\nu = -0.11 \times n + 14.38 \times w^4 + 6.84 \times w^3 + 1.43 \times w^2 - 0.695 \times w + 0.43 \quad (\text{粉土质混合料}) \quad (14)$$

根据面波与剪切波之间的关系就可以通过瞬态瑞雷面波测试得到的频散曲线来反演计算出混合料的剪切波速<sup>[18-20]</sup>。



(a) 砂土质土石混合料



(b) 粉土质土石混合料

图 5 土石混合料泊松比与含石量及含水率关系三维图<sup>[17]</sup>

Fig. 5 Relationship between Poisson's ratio and water content stone content<sup>[17]</sup>

3 评价体系应用实例与验证

笔者结合云南某机场跑道高填方土石混填地基压实工程,采用瞬态 Rayleigh 面波法来获取土石混填地基内不同深度的剪切波传播速度,据此来评价土石混填地基的压实程度。在沿跑道方向布置 3 条平行测线,其中一条沿跑道中心线,另外两条测线与其间距 15 m。测线布置见图 6, 7。

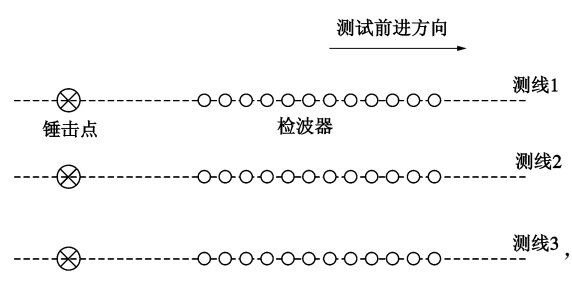


图 6 测线及传感器布置示意图

Fig. 6 Sketch map of testing lines and sensors



图 7 测线及传感器布置现场

Fig. 7 Worksite of deploying testing lines and sensors

根据民航部门颁发的《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH5004—2009)中对机场飞行区道床和



土基压实度的要求<sup>[21]</sup>,不同深度及不同施工类型压实度的控制在 92%~95%不等,详见表 2。

表 2 土基填方压实度标准

Fig. 2 Compaction quality standards of airdrome area (%)		
土基顶面以下 深度/m	飞行区指标 II	
	A、B	C、D、E、F
0.8~2.0	94	95
2.0~4.0	93	94
4.0 以下	92	93

图 8 显示了测试段 10 m 深度以内土石混填地基的现场实测瑞雷面波波速分布二维剖面图,从图 18 中可以看出深部波速较浅部高,且测试段中间部分的波速高于前后部分。经过计算后的地基压实质量二维剖面图见图 9,从图 9 中可以看出,测试段最后 40 m,深度 1~4 m 范围内的压实质量偏低,应当采取适当措施予以处理。

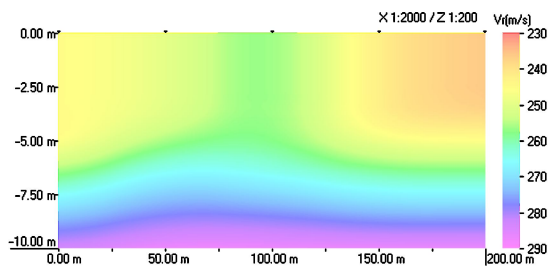


图 8 测试断面二维瑞雷波速分布图

Fig. 8 Profile of two-dimensional Rayleigh wave velocity

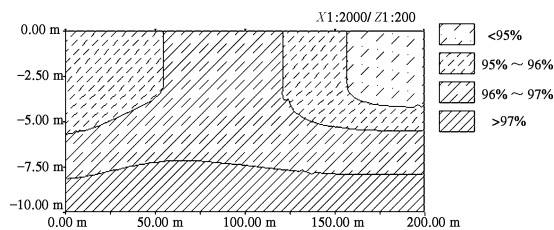


图 9 测试断面二维压实度分布图

Fig. 9 Profile of two-dimensional degree of compaction

从整体测试结果来看,测区内的土石混填地基的总体压实质量良好,绝大部分区域远高于规范要求,发现了部分压实质量偏低的区域,测试取得了较好的效果。

4 结论与展望

结合土石混合料的结构特点和弹性波在土石混填地基中的传播理论,提出了基于弹性波的土石混填地基压实质量评价方法,主要得到以下研究成果:

(1) 提出以土石混合料“表征压实度”来反映土石混填地基的压实质量,并论证了以此来反映土石混合料的压实质量具有可行性与合理性。

(2) 利用土石混合料的剪切波速模型及细粒土剪

切波速与其密实度的关系,实现了利用土石混合料宏观剪切波速推算其“表征压实度”的目标。

(3) 通过大量室内试验,得到了不同含石量和含水率时混合料在压实过程中变形趋于稳定时石料间隙土的压实度,即“表征压实度的标准值”,为评价混合料压实质量提供了参考标准;

(4) 在以上成果的基础上研究建立了基于“表征压实度”的土石混合料压实质量评价体系,实现了利用剪切波对土石混合料压实质量的无损检测与评价。

虽然本文为土石混合料压实质量的评价提供了新的思路与手段,但新的评价方法尚未经过大量的工程实践的检验,其精确性和适用范围还不能过早地下定论,需要后续深入研究不断将其发展完善。

参考文献:

[1] FRANCK B, FRANCOIS N, FÉLIX D. Physical processes within a 2D granular layer during an impact[J]. Granular Matter, 2008(10): 415 - 437.

[2] JAROSLAV F. Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behavior[J]. Engineering Geology, 2002, 63: 93 - 98.

[3] LEE J S, FERNANDEZ A L, SANTAMARINA J C. S-wave velocity tomography: small-scale laboratory application[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(4): 336 - 344.

[4] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 土石混合体细观结构及力学特性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 300 - 311. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi, et al. Mesostructural character and numerical simulation of mechanical properties of soil-rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 300 - 311. (in Chinese))

[5] 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 Transport, 2001, 14(1): 5 - 8. (in Chinese))

[6] 董 云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 235 - 238. (DONG Yun, CHAI He-jun, YANG Hui-li. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 235 - 238. (in Chinese))

[7] 韦 刚, 赵明阶, 黄卫东. 土路堤模型试验及压实度的波动测试[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(4): 49 - 53. (WEI Gang, ZHAO Ming-jie, HUANG Wei-dong. Soil-stone

- embankment models and wave testing of compaction degree[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, **23**(4): 49 - 53. (in Chinese))
- [8] 张献民, 王建华. 公路工程瞬态激振无损检测技术[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(10): 105 - 110. (ZHANG Xian-min, WANG Jian-hua. Nondestructive detection technique for transient vibration used to highway engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, **36**(10): 105 - 110. (in Chinese))
- [9] 赵明阶, 黄卫东, 韦 刚. 公路土石混填路基压实度波动检测技术及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (ZHAO Ming-jie, HUANG Wei-dong, WEI Gang. Highway soil-rock subgrade compaction wave detection technology and application[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [10] RICHEFEU V, RADJAI F, YOUSSEFI M S El. Stress transmission in wet granular materials[J]. The European Physical Journal E, 2006, **21**: 359 - 369.
- [11] 张宇辉, 张献民, 程国勇. 土石混合介质中石料间隙土压实度剪切波速评价研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 909 - 915. (ZHANG Yu-hui, ZHANG Xian-min, CHENG Guo-yong. The study on interval soil compactness evaluation by the shear-wave velocity of soil-stone mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 909 - 915. (in Chinese))
- [12] 周燕国. 土结构性的剪切波速表征及对动力特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (ZHOU Yan-guo. Shear wave velocity-based characterization of soil structure and its effects on dynamic behavior[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [13] 张献民, 庄旭瑞, 张宇辉, 等. 含水率对土石混合介质剪切波传播速度的影响分析[J]. 公路交通科技, 2010, **27**(12): 16 - 20. (ZHANG Xian-min, ZHUANG Xu-rui, ZHANG Yu-hui, et al. Study of influence of water content on shear wave velocity of soil-stone mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, **27**(12): 16 - 20. (in Chinese))
- [14] JTG F10—2006 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (JTG F10—2006 Construct methods of subgrade and pavement for highway engineering[S]. Beijing: China communications Press, 2006. (in Chinese))
- [15] 王 龙, 马松林, 徐德新, 等. 土石混合料的结构分类[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, **33**(6): 129 - 132. (WANG Long, MA Song-lin, XU De-xin, et al. The constructive classification of the soil-aggregate mixture[J]. Journal of harbin university of C. E. & architecture, 2000, **33**(6): 129 - 132. (in Chinese))
- [16] 郭庆国. 粗粒土的工程性质及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. (GUO Qing-guo. Engineering property and application of coarse grained soil[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2001. (in Chinese))
- [17] JTG E 40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (JTG E 40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China communications Press, 2007. (in Chinese))
- [18] ZHANG Xian-min, LÜ Yao-zhi, ZHAO Yi-ming, et al. Study on poisson ratio of soil-rock mixture in low strain[J]. Applied mechanics and materials, 2011(90/91/92/93): 1921 - 1925.
- [19] 崔建文, 廖振鹏, 黄振平. 反演工程场地剪切波速剖面的简化剥层法[J]. 土木工程学报, 1994, **27**(3): 50 - 58. (CUI Jian-wen, LIAO Zhen-peng, HUANG Zhen-ping. Simplified stripping method for inversing shear wave velocity in situ[J]. China Civil Engineering Journal, 1994, **27**(3): 50 - 58. (in Chinese))
- [20] 刘志丰, 黄茂松. 瑞利波法试验研究和理论综述[J]. 同济大学学报, 2004, **32**(3): 312 - 316. (LIU Zhi-feng, HUANG Mao-song. Survey of theoretical and experimental aspects on surface waves testing method[J]. Journal of Tongji University, 2004, **32**(3): 312 - 316. (in Chinese))
- [21] MH 5004—2009 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 2009. (MH 5004—2009 Specifications for airport cement concrete pavement design[S]. 2009. (in Chinese))