

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.010

土石地基剪切波测试实验建模

徐金¹ 张宇辉^{1,2}

(1. 中国民航大学机场学院, 天津, 300300; 2. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016)

摘要: 土石混填材料室内标准击实实验中, 由于试筒尺寸限制, 边界效应相对集中, 无法对现场大面积土石混填材料的力学性能和压实状态进行准确模拟。文中对砂土、粉质粘土、低液限黏性土 3 种土样的细粒土试件及土石混填试件开展变含水量及变土石比大型振动压实实验, 对工程现场大范围土石混填地基力学性能进行模拟。基于不同压实程度, 研究并建立混填试件整体剪切波速、碎石剪切波速与碎石间隙细粒土剪切波速之间的相关模型。实现定石料条件下, 混填料整体剪切波速与间隙细粒土剪切波速的相互推算。并通过变石料应力波实验进行验证。结果表明: 大型振实实验数据能准确反映现场土石混填料的压实特性, 模型对变石料和变土样混填料都有很好的实用性。

关键词: 土石混填料; 剪切波速; 石料间隙土; 压实度

中图分类号: TU458+4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2015)04-0539-08

Laboratory Model of Shear-Wave Test of Soil-Stone Mixture

Xu Jin¹, Zhang Yuhui^{1,2}

(1. School of Airport, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In indoor standard compaction test of soil-stone mixture, the simulation of mechanical properties and compaction state of large-area mixture in construction site could not be carried out accurately, because of the intensive boundary effect resulting from the limitation of bucket size. The large vibration compaction test is carried out to simulate the mechanical properties of mixture, under the condition of different water contents and soil-stone proportions for sandy soil, silty clay and low liquid-limit clay. The model of correlation among the macro shear-wave velocity of the soil-stone mixture, the shear-wave velocity of stone and the representation shear-wave velocity of interval soil in crushed stone in different compaction degrees of mixture is proposed, through which the relationship between the macro shear-wave velocity of the soil-stone mixture and the representation shear-wave velocity of interval soil in crushed stone is deduced when the stone content is constant. The model is verified by shear-wave velocity test of changed stone. The results show that compaction properties can be reflected accurately by large vibration compaction data. The model is practicable for changed soil-stone mixture.

Key words: soil-stone mixture; shear wave velocity; interval soil in crushed stone; compaction degree

土石混填材料作为山区机场、铁路等高填方地基的主要材料, 其施工地基压实性能对工后地基变

形及上部建筑物安全至关重要。目前工程现场对土石混填地基压实度的测试方法主要为灌水法、灌

基金项目: 中央高校科研基金(3122014D028)资助项目; 博士科研启动资金(2012QD24X)资助项目。

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2015-06-11

通信作者: 徐金, 女, 讲师, E-mail: xuexingshuang@163.com。

砂法等传统密度测试方法,但受限于施工场地巨大及土石地基开挖困难,其测试结果对大面积地基压实质量的评价往往偏差较大,导致工后地基沉降,上部结构物塌陷事故屡屡发生。有鉴于此,很多学者对土及土石材料开展进一步研究,并提出了新的测试及评价方法,包括:基于混填材料剪切特性的原位实验和数值模拟结合的方法^[1-5],但由于土石混填材料参数随不同试件波动较大,该方法的数值模拟结果稳定性较差,难以用于工程实际;基于地基土模量参数与剪切波模型的测试方法^[6-8],以及基于地基土强度与地基剪切波相关关系的测试方法^[9-11]对于地基土均有较好应用,但在土石混填地基中,由于材料颗粒不均匀特征,其应用效果较差;采用等效模量原理计算地基土剪切波速进而评价地基压实性能的测试方法^[12],对土石混填材料进行等效模量计算,换算为性质较均匀的等效地基土,进而开展地基测试评价,但由于等效模量模型中的换算误差难以避免,计算结果与实际情况偏差较大。综上所述,相关研究成果均有较大参考价值,但由于土石混填体本身的颗粒不均匀特性及复杂的力学性能^[13-14],这些方法的实用性能均受到限制。

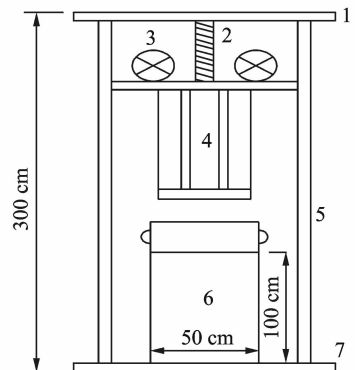
关于地基土剪切波与压实度的相关关系已有很多研究成果^[15-16],地基土的压实质量与地基剪切波速密切相关这一结论已取得相关领域的一致认可。在土石混填地基中,由于剪切波速可表征一定范围内地基土的平均压实质量,这在一定程度上克服了传统压实度方法中由土石颗粒分布不均和复杂力学特性引发的测试结果误差。本文对不同含水量、不同含石量情况下的土石材料进行大量实验室标准击实,分析相关数据,并确立混填料整体剪切波速与间隙细粒土剪切波速的关系^[17],相关结论对采用剪切波速评价混填料压实度有重要参考意义。该实验中采用室内标准击实,击实试筒直径为15 cm。采用此实验数据评价土石混填料压实度时,实验试件边界效应集中,不能准确地模拟现场大面积土石混填料力学性能。

为此,本文设计大型振动击实装置,如图1所示,对不同细粒土种类、不同土石比混填料进行大型振动压实剪切波测试实验,研究不同压实状态下,碎石剪切波速、间隙土剪切波速与混填料整体剪切波速相关关系。由于试件尺寸变大,边界效应相应减小,且采用与现场类似的振动压实方式,此

实验能较好地体现实际工程中混填料压实状态中各参数变化。分析不同压实情况下,混填料剪切波速变化规律,采用新方法对实验数据进行建模,确立石料剪切波速、间隙土剪切波速与混填料整体剪切波速相关模型,为采用石料间隙土剪切波速评价混填料压实度提供依据。

1 振动压实剪切波实验

土石混填料剪切波测试设备采用工程测试仪,型号GJY-1,传感器激发及接受频率28 Hz,实验振动击实仪见图1,击锤重380.7 kg,击实频率50 Hz,最大激振力9.6 kN,最小激振力5.4 kN,试筒尺寸50 cm×100 cm。



1:顶板; 2:升降螺栓; 3:振动电机; 4:振动击实锤;
5:导杆; 6:击实筒; 7:底板。

(a) 实验仪器示意图



(b) 实验现场图

图1 大型振动击实仪器

Fig. 1 Large vibration compaction machine

实验方案如图2所示,采用首至波判断的方法计算混填料剪切波速。碎石剪切波速、间隙细粒土剪切波速与混填料剪切波速的采集原理相同,都是利用首波到达时间进行计算。石料剪切波速测试时采用电信号自动激发,而进行细粒土剪切波速与

混填料剪切波速测试时,将两个传感器探头分别置于试件上下两端,在试件上表面放置方形木块,轻压木块以使木块与试件上表面间具有一定的摩擦系数。通过侧击木块产生剪切波,两个传感器分别采集信号。测得首至波到达时间 t_1, t_2 。二者之差为剪切波通过试件的时间,则可计算得出混填料试件整体剪切波速。具体实验中,在试件表面激发横波时,由于激发点距离 1 号传感器很近,激发瞬间对试件表面造成的扰动对 1 号传感器的精度造成影响,则 t_1 可能存在误差。为解决这一问题,设计第二步实验确定准确的 t_1 。如图 2 所示,虚线所示位置为第二步实验。传感器布置位置不变,在压实试件的基础上覆盖 l_1 厚度的土层,激发点上移至土层表面,传感器采集到的时间为 t'_1, t'_2 。此时由于试件的压实状态并未发生改变,剪切模量不变,则剪切波速不变,可得 $\Delta t = \Delta t'$ 。 $t_1 = t_2 - (t'_2 - t'_1)$ 。此时,混填料整体剪切波速: $v_s = l_2 / \Delta t$ 。实验相关测试材料参数见表 1,其中 ω_L 为液限, I_P 为

塑限, ω_{opt} 为最佳含水率, ρ_{max} 为最大干密度。实验含水率为 4%~22.5%,含石量为 35%~75%,碎石级配为泰勒标准级配,实验时,每种土配置的土石混填料采用 6 个含水率参数和 9 个含石量参数,每次击实过程中选取 6 个不同的压实度采集相关数据,实验总数据为 972 组。

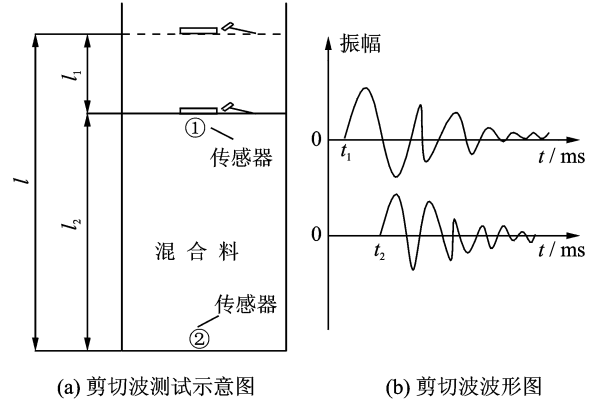


图 2 试筒内剪切波测试方案

Fig. 2 Test method of shear wave velocity

表 1 实验相关材料参数

Tab. 1 Material parameters of test

材料种类	相关参数				$\omega_{opt} / \%$	$\rho_{max} / (g \cdot cm^{-3})$
	粗砂	中砂	细砂	粉土		
砂土	10.26%	44.71%	38.63%	6.40%	10.73	1.93
低液限粉质粘土	$\omega_L = 25.9\%$		$I_P = 13.26$		11.54	1.99
低液限粘土	$\omega_L = 45.12\%$		$I_P = 18.68$		11.17	2.07
蓟县大青石	剪切波速 1 795.4~2 143.1 m/s				最大粒径 70 mm	

2 碎石间隙土表征剪切波定义

在理想状态下,假设土石混填料中石料与细粒土均匀分布,则可根据土石含量,将混填料看做土柱体和石柱体的组合^[18],依据波的传播特性,混填料各组成成分剪切波速的理论计算公式已知。但由于实际中碎石料的不均匀分布性,含石量发生变化,土石混填料的性质也随之改变。在混填料中,细粒土可看做是填充于碎石嵌索而成的空隙中,当石料含量很大时,混填料孔隙增多,细粒土填充于石料间隙。混填料受压变形后,因碎石分布不匀,其嵌索空隙形状各异,碎石间隙中各土体小单元压实度各不相同,其剪切波速也不同。间隙土表征剪切波速定义为混填料中全部碎石间隙填充土单元剪切波速的代表量。

图 3(a)为土石分层实验,按含石量不同选取固定量细粒土,并将块石进行加工使之符合试筒尺

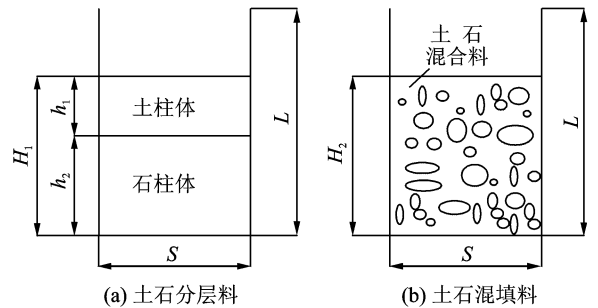


图 3 土石混填料等效柱体示意图

Fig. 3 Equivalent model of soil-stone mixture

寸。如图 3(a)所示,土柱体位于石柱体上方,避免块石被振锤击碎,土体高度 h_1 ,采集细粒土剪切波速和土石分层料整体剪切波速。分层实验完成后,如图 3(b)所示进行土石混合实验,实验碎石料与图 3(a)中块石等质量同性质,实验细粒土与图 3(a)中的实验细粒土等量同性质。对土石混合材

料进行压实实验,当混填料高度 H_2 等于 H_1 时,采集混填料整体剪切波速 v_s 。由于混填料中碎石材料具有刚体性质,所以图 3(b)中的混填料碎石间隙土压实度可近似认为与图 3(a)中土柱体压实程度相同。在实验室中确定细粒土与石料种类条件下,混填料剪切波速 v_s 主要受细粒土剪切波速 v'_{s2} 、石料剪切波速 v_{s1} 、含水率 ω 及含石量 n 的影响。则土石混填料整体剪切波速 v_s 可表示为

$$v_s = f(\omega, n, v_{s1}, v'_{s2}) \quad (1)$$

式中, v'_{s2} 为混填料中裂隙土表征剪切波速,而剪切波传播可看做一定范围内土石混填料颗粒的综合振动,则混填料中剪切波速是传播路径四周一定范围内材料剪切波速的综合反映。依据压实度的定义,土体变形过程中的体积变化可反映土体压实度的大小。为更直观地显示土体体积变形,定义体积参数,即细粒土体积膨胀率 γ_v

$$\gamma_v = \frac{V_s - V_{s,\min}}{V_{s,\min}} \quad (2)$$

式中: V_s 为混填料中碎石间隙土体积, $V_{s,\min}$ 为纯土在最大干密度下的体积。通过体积膨胀率的桥梁作用,可建立混填料整体剪切波速与裂隙土表征剪切波速的相关关系。在固定含水率不变的前提下,细粒土剪切波速 v'_{s2} 与细粒土体积膨胀率 γ_v 单相关,则式(1)可表示为

$$v_s = f(\omega, n, v_{s1}, \gamma_v) \quad (3)$$

由于石料的刚体特性,图 3(a)中分层混填料的压实可视为细粒土的压实,压实土柱体高度为 h_1 。而在图 3(b)中,虽然碎石料与细粒土混杂在一起,但石料孔隙间填充着细粒土,对实验状态下土石混填试件进行开挖观测,当含石量低于 65% 时,细粒土小单元基本均匀地分布于碎石间隙中,此状态下混填料的压实变形基本等效为碎石间隙细粒土单元的压缩变形;当含石量超过 65% 时,混填料中石料嵌锁形成骨架,嵌锁空隙中细粒土分布出现不均匀;当含石量过大时,碎石间隙土单元体积明显小于间隙体积,甚至碎石间隙中未存在填充土单元。如图 3 所示,当含石量小于 65% 时,若 H_2 等于 H_1 ,则图 3(b)中间隙土压实总体积与图 3(a)中相同,体积膨胀率 γ_v 也相同,定义此时图 3(a)中土柱体剪切波速为图 3(b)中混填料间隙土表征剪切波速。当含石量大于 65% 时,由于混填料中碎石含量过大,图 3(b)中 γ_v 中不仅包括细粒土的体积膨胀,还包括石料嵌锁空隙的因素,此时的混填料间隙土表征剪切波速的详细计算过程将

在后续小节中描述。

3 实验数据分析及建模

实验过程中 3 种土石混填料土样含水率为:低液限粘土 (7.1%, 10.14%, 13.8%, 16.1%, 18.7%, 22.6%), 砂土 (6.18%, 7.5%, 8.7%, 10.8%, 12.9%, 14.2%), 低液限粉质粘土 (5%, 7.3%, 9.6%, 11.9%, 13.4%, 15.4%)。图 4 为 3 种土料部分实验结果,低液限粘土编号为 1#, 砂土编号为 2#, 低液限粉质粘土编号为 3#。

由图 4 可得,由于实验室状态下混填料中土石分布不均匀性,剪切波速 v_s 检测数据出现离散而导致曲线图中部分曲线发生交汇。实验剪切波速总体随体积膨胀率 γ_v 增大呈减小趋势。含水率固定条件下,混填料整体剪切波速随含石量增大呈增大趋势,同时 $v_s - \gamma_v$ 曲率呈减小变化,当土体体积膨胀率固定的情况下, v_s 随含水率的增大有减小趋势,这是因为随着材料中水份的增多,材料剪切刚度降低,则 v_s 降低。

以低液限粘土实验数据为例,建立混填料整体剪切波速、碎石剪切波速和碎石间隙土剪切波速相关模型。图 4(a)所示为低液限粘土混填料含水率 ω 为 7.1% 时的剪切波速曲线。分析数据相关情况,选取相关系数最大的指数模型进行曲线描述,可得 9 种不同含石量下 v_s 和 γ_v 的指数关系,对应 9 个指数算式,其关系形式为

$$v_s = m e^{-k\gamma_v} \quad (4)$$

此时含水率固定, m, k 的不同可认为是由于含石量 n 的不同而引起的,分别对 m, k 与 n 的关系进行拟合分析,选取相关系数最大的公式模型,可得到 m, k 随 n 的变化算式

$$m = 657.89 e^{0.682n} \quad (5)$$

$$k = 1.729 e^{-2.957n} \quad (6)$$

将其代入式(4)可得

$$v_s = 657.89 e^{0.682n - 1.729 e^{-2.957n} \gamma_v} \quad (7)$$

对图 4(b)的数据进行拟合分析,可得体积膨胀率与细粒土剪切波速 ($\gamma_v - v'_{s2}$) 关系为

$$v'_{s2} = f(\gamma_v) = 678.93 e^{-1.6873\gamma_v} \quad (8)$$

因碎石剪切波速不随水分的多少发生改变,则在含石量确定的条件下,混填料整体剪切波速 v_s 的变化可认为是由含水率变化引发的。式(8)为含水率 7.1% 的 $\gamma_v - v'_{s2}$ 关系式,对细粒土其余 5 个含水率实验数据做同样处理,可得到细粒土 6 个 $\gamma_v - v'_{s2}$ 关

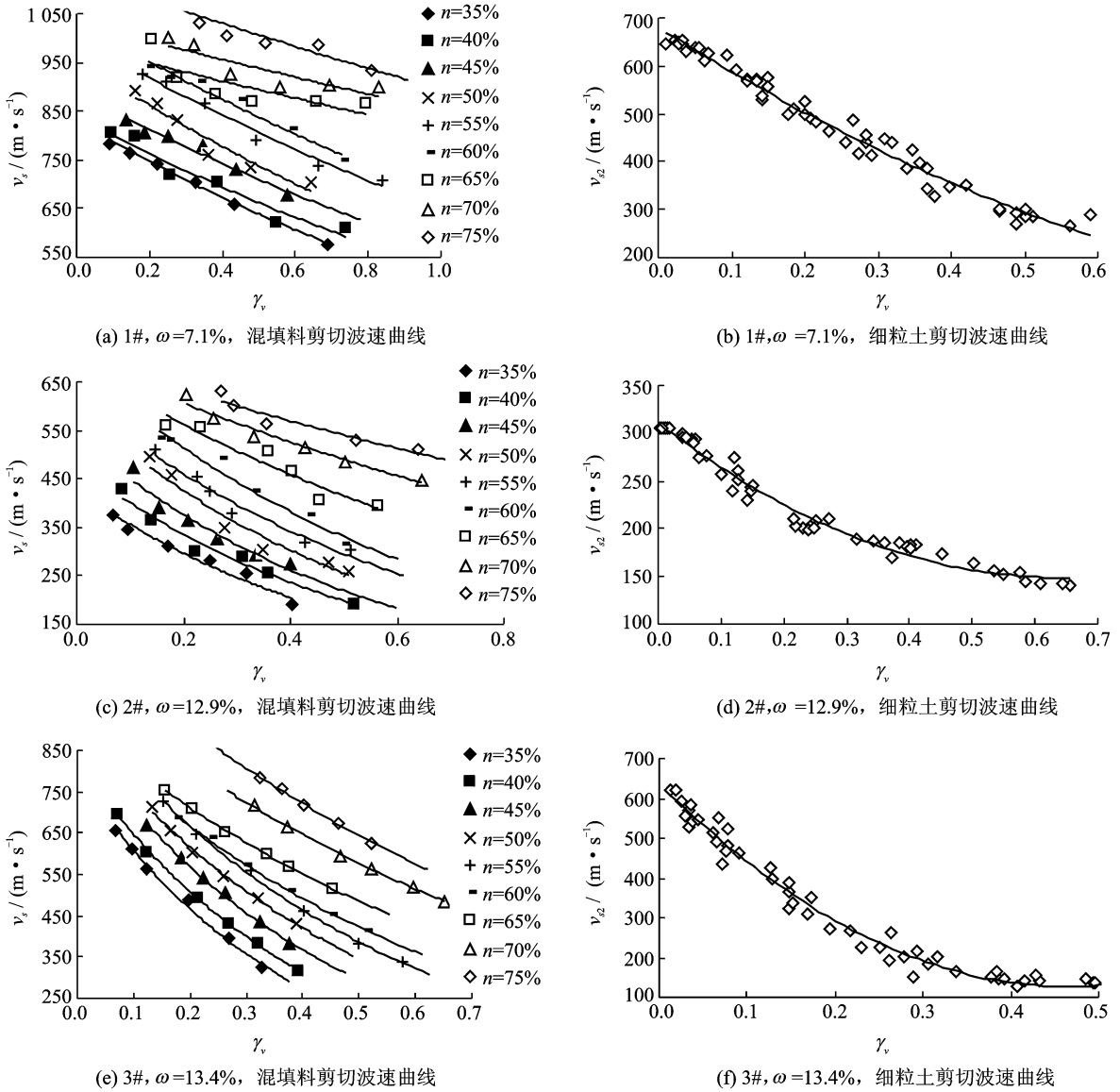


图 4 不同压实程度各土样剪切波速变化曲线图

Fig. 4 Shear-wave velocity curves of three soil samples in different compaction degrees

系式。不同关系式的系数差别均为含水率不同而导致。提取 γ_v-v_{s2} 关系式各参数, 对其进行与含水率最大相关系数分析可得

$$v_{s2} = f(\gamma_v) = (-1.45\omega^2 + 23.26\omega + 615.81)e^{(-0.004\omega^2 + 0.123\omega - 2.409)\gamma_v} \quad (9)$$

设

$$f_1(\omega) = -1.45\omega^2 + 23.26\omega + 615.81 \quad (10)$$

$$f_2(\omega) = 0.004\omega^2 - 0.123\omega + 2.409 \quad (11)$$

则将式(10,11)代入式(9), 整理可得

$$v_s = 657.89e^{\left[0.682n + \frac{1.729e^{-2.957n}}{f_2(\omega)} \ln\left(\frac{v_{s2}}{f_1(\omega)}\right)\right]} \quad (12)$$

理论上, 当含石量 $n=1$ 时, 有 $v_s = v_{s1}$, 此时

$$v_s = 657.89e^{\left[0.682 + \frac{0.09}{f_2(\omega)} \ln\left(\frac{v_{s2}}{f_1(\omega)}\right)\right]} = v_{s1} \quad (13)$$

当含石量 $n=0$ 时, 有 $v_s = v_{s2}$, 此时

$$\frac{1.729}{f_2(\omega)} \ln\left(\frac{v_{s2}}{f_1(\omega)}\right) = \ln v_{s2} - 6.49 \quad (14)$$

联立式(13,14)并化简可得

$$v_{s2} = \frac{(\ln v_{s1} - 6.49)v_{s2}}{0.682 + \frac{0.09}{f_2(\omega)} \ln\left(\frac{v_{s2}}{f_1(\omega)}\right)} = g(v_{s1}, v_{s2}) \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)可得

$$v_s = 657.89e^{\left[0.682n + \frac{1.729e^{-2.957n}}{f_2(\omega)} \ln\left(\frac{g(v_{s1}, v_{s2})}{f_1(\omega)}\right)\right]} \quad (16)$$

此时由低液限粘土混填料剪切波速经式(16)可计算出碎石间隙土表征剪切波速。同理, 对砂土混填料和低液限粉质粘土混填料实验数据处理后,

式(9)变为

砂土:

$$v_{s2} = f(\gamma_v) = (-0.32\omega^2 - 0.76\omega + 357.34)e^{(-0.0003\omega^2 + 0.037\omega - 1.645)\gamma_v} \quad (17)$$

低液限粉质粘土:

$$v_{s2} = f(\gamma_v) = (-1.06\omega^2 - 1.34\omega + 766.54)e^{(0.016\omega^2 - 0.250\omega - 2.581)\gamma_v} \quad (18)$$

在工程现场,混填料整体剪切波速与碎石剪切波速可方便测得,经上述模型计算可得混填料间隙粒土表征剪切波速,而细粒土的剪切波速与细粒土压实程度密切相关,则可据此评价混填料中细粒土压实效果。模型中,含石量大于65%时,间隙细粒土单元在碎石嵌索空隙中的分布出现不匀,且随含石量的继续增大而愈发严重,此种状态下剪切波通过碎石空隙时,已不符合剪切波在连续介质中的分层传播特性,而是沿空隙边缘曲折传播,剪切波路径增大,剪切波速实验测试值偏小,由模型计算的混填料整体剪切波速也偏小,反映此时间隙土单元松散不匀,压实度低,而这种状态的混填体极易由外力扰动而引发塌陷,压实效果较差,这与模型计算结论相一致,所以模型对任意含石量条件下的混填料均有较准确的评价效果。

对比室内标准击实实验结果^[17],对小桶压实及大型振动压实后的试件进行分步开挖,开挖方案为:将压实后试件沿高度范围分为5层,对每一层开挖后的混填料进行土石分离,测定其含石量,对每个试件5次开挖层含石量数据进行方差计算,该方差可反映土石混填试件中土石颗粒的分布均匀性,分别对小桶模型和大型振实模型开挖方差数据进行分析可得:在15 cm小桶压实开挖中,由于试筒尺寸限制,当含石量大于50%时,混填料中的细粒土分布不均匀,且石料嵌锁空隙明显增加,混填料压实困难。而大型振实结果将此界限提高至65%,此数据也比较符合施工现场开挖目测所得。所以大型振实实验能更准确地反映现场大面积混填料压实力学性能。小桶实验建立的混填料剪切波速与间隙细粒土剪切波速模型如下

$$v_s = 711.75e^{0.651n - 1.814e^{-2.175n}f^{-1}(v_{s2})} \quad (19)$$

在上述模型基础上,变化土样为粉土, $\omega_L = 19.7\%$, $I_p = 10.15$, $\omega_{opt} = 13.4\%$;变化石料为连云港黄石,剪切波速1387.3~1476.6 m/s,中心值为1432 m/s。对其土石混合材料进行8种含水率、9种含石量正交大型振压实验,每个试件测量

计算6组干密度和波速值。将小桶模型计算结果和大型振实模型计算结果进行对比,其结果如表2所示。

表2 相对误差数据统计百分表

Tab.2 Statistical percentage of relative error datas

模型分类	细粒土含水率 $\omega/\%$	数据总数	实测与计算数据相对误差/ $\%$		
			$>7\%$	$7\% \sim 3\%$	$<3\%$
小桶击实	≤ 13.4	270	24.1	58.6	17.3
	> 13.4	162	18.7	68.4	12.9
大型振实	≤ 13.4	270	13.9	64.3	21.8
	> 13.4	162	16.2	71.3	12.5

从表2可以看出,大型振实模型计算数据在小于细粒土最佳含水量时,计算结果中误差小于7%的占数据总数的86.1%;该数据在大于细粒土最佳含水量时,计算结果中误差小于7%的占数据总数的83.8%;综上,计算结果中误差小于7%的占数据总数的平均值为85.2%。小桶击实模型在小于细粒土最佳含水量时,计算数据误差小于7%的占数据总数的75.9%;在大于细粒土最佳含水量时,其占数据总数的81.2%;综上,其占总数据总数的平均值为77.9%。对比结果分析表明:由于剪切波在混填料中的传播速度是传播路径一定范围内的综合反映,则小桶实验中由于试件尺寸限制,实验数据在模拟现场大范围混填料压实时受边界效应影响较大,从表2数据可以看出,小桶击实模型的计算精度明显小与大型振实模型,大型振实混填料剪切波速模型具有更高的可靠度。

4 结 论

本文通过对3种细粒土混填料进行大型击实剪切波实验,采集相关数据,分析混填料整体剪切波速、碎石剪切波速与间隙细粒土剪切波速的相关关系,并建立相关性模型。同时设计验证实验,对该模型和实验室土石混填料小筒标准击实实验模型进行精度研究。结论如下:

(1)混填料中剪切波速是传播路径上一定范围内土石混填料的综合反映,大型振动压实实验能有效地消除小桶模拟实验中边界效应的影响。对比二者数据,大型振动压实实验将混填料中间隙土单元分布不匀界限提高至65%。

(2)大型振压实验数据对现场大面积土石混填地基参数具有一定代表意义。对比小桶压实模型验证结果,大型振实模型计算结果有85.2%的数

据误差小于7%,由大型振实数据建立的间隙土剪切波速与混填料剪切波速相关模型具有较高的计算准确性。

(3)本文在得出混填料中石料间隙土剪切波速运算模型的过程中,各影响因素系数修正误差对最终模型的判别带来误差。为提高本研究结果的准确性,尚需要在以上环节进一步开展研究工作。大尺寸试件虽然可对现场大范围土石地基压实进行模拟,但还存在一定的不足,后续需要对实验方法进一步进行改进。文中实验的石料级配只是泰勒理论级配,后续会针对级配、压实方式等因素对混填料整体剪切波速的影响开展大量实验,以期对模型进一步完善。

(4)本文得出的石料间隙土剪切波速运算模型为采用面波和剪切波方法评价土石混填料压实程度提供参考依据。由于面波的现场易测性,后续将对实际土石混填地基的面波、纵波及剪切波相关关系进行研究,以期实现混填料面波到剪切波的精确推定,从而实现面波法评价地基压实度的目的。

参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林,岳中琦,等. 土石混合体微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 Wenjie, Hu Ruilin, Yue Zhongqi, et al. Meso-structural character and numerical simulation of mechanical properties of soil-rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(2):300-311.
- [2] 李晓,廖秋林,赫建明,等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2377-2384.
Li Xiao, Liao Qiulin, He Jianming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(12):2377-2384.
- [3] 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 Qingyuo. Classification for structure [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2001.
- [4] 何兆益,吴国雄. 山区高填方土石混合填路堤压实质量控制研究[J]. 公路交通科技,2002,19(3):28-31.
He Zhaoyi, Wu Guoxiong. Study on compaction effect control of high embankment in mountain area highway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002,19(3):28-31.
- [5] 董云,柴贺军. 土石混填料的工程分类研究[J]. 路基工程,2006(3):38-41.
Dong Yun, Cai Hejun. Study on classification for soil-stone mixtures[J]. Subgrade Engineering, 2006(3):38-41.
- [6] Rathje E M, Chang W J, Stokoe K H. Development of an in situ dynamic liquefaction test[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005,28(1):50-60.
- [7] Klein K, Santamarina J C. Soft sediments: Wave-based characterization[J]. International Journal of Geomechanics, 2005,5(2):147-157.
- [8] Fernandez A L, Santamarina J C, Rlee J-S. S-wave velocity tomography: Small-scale laboratory application[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005,28(4):336-344.
- [9] Chen Yunmin, Ke Han, Chen Renpeng. Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005,25(6):461-468.
- [10] 王建华,程国勇. 饱和砂土的剪切波速与抗液化强度相关性研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(4):369-373.
Wang Jianhua, Cheng Guoyong. Study of correlation between the shear wave velocity and the liquefaction resistance of saturated sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(4):369-373.
- [11] 程国勇,张立,王建华. 用扭剪波测试土样剪切波速的新技术[J]. 岩土工程学报,2005,27(3):358-359.
Cheng Guoyong, Zhang Li, Wang Jianhua. A new technique of the shear wave velocity measurement of soil samples by torsion wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(3):358-359.
- [12] 赵明阶. 根据波速计算多相土石地基压实度的理论模型[J]. 水利学报,2007,38(5):618-623.
Zhao Mingjie. Theoretical model for calculating compactness of soil-stone mixture foundation according to wave propagation velocity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(5):618-623.
- [13] 张宇辉,张献民. 地震映像技术在地下工程透水事故中的应用[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(2):266-272.
Zhang Yuhui, Zhang Xianmin. Application of seismic image technology in water accident of underground project [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. 2012,44(2):266-272.
- [14] 张献民,董倩,吕耀志,等. 水泥混凝土跑道边缘区域

- 力学响应[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 693-699.
- Zhang Xianmin, Dong Qian, Lv Yaozhi. Mechanical responses of edge of rigid airport pavement under aircraft loadings[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(5): 693-699.
- [15] 李少波, 张献民, 智胜英. 路基压实度剪切波测试新技术[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 32-37.
- Li Shaobo, Zhang Xianmin, Zhi Shengying. Detecting subgrade compactness by direct shear wave method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 3237.
- [16] Thaleia T, George G. On the linear seismic response of soils with modulus varying as a power of depth-The maliakos marine clay[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(5): 85-93.
- [17] 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 Yuhui, Zhang Xianmin, Cheng Guoyong. 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.
- [18] 李少波, 张献民, 王建华. 土石混填路基压实质量无损检测技术[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 59-61.
- Li Shaobo, Zhang Xianmin, Wang Jianhua. Nondestructive detection for compaction quality of soil-stone embankment[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2007, 38(6): 59-61.

