

# 土石混填料纵、横波速与泊松比的相关性分析

张宇辉,张献民

(中国民航大学 机场学院,天津 300300)

**摘 要:**高填方土石混填地基泊松比现场测试困难,缺乏便捷准确的方法。对粉土、砂土、粘土 3 种土样的土石混填试件进行大型振动压实试验,分析不同含水率、不同含石量条件下,混填料的纵波波速  $V_P$ 、横波波速  $V_S$ 、纵横波速比 ( $V_P/V_S$ ) 等应力波参数随混填料干密度的变化机理;研究混填料泊松比随含水率、含石量的变化规律。建立土石混填料泊松比与纵横波速比的相关分析模型,实现由混填料纵横波速比到泊松比的推定计算,并对该模型进行实验室精度验证。研究结果表明:混填料纵横波速比随干密度的增大而减小;纵横波速比曲线总体呈随含石量增大而下移、随含水率增大而上移的变化趋势;混填料泊松比-干密度曲线总体呈随含水率增大上移、随含石量增大下移的趋势;模型计算平均相对误差,砂土混填料为 0.045,粉土混填料为 0.042,粘土混填料为 0.034,工程应用误差较小。在此基础上,提出采用应力波方法测试土石混填地基泊松比的新技术。

**关键词:**道路工程;土石混填地基;泊松比测试;应力波;振动压实

中图分类号:U416.6

文献标志码:A

## Correlation analysis between Poisson's ratio and velocity of longitudinal wave and shear wave in soil-stone mixture

ZHANG Yu-hui, ZHANG Xian-min

(Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The Poisson's ratio of highfill soil-stone foundation was difficult to be field tested due to the lack of convenient and accurate method. Then, large vibration compaction test of soil-stone mixture was conducted with silt soil, sandy soil and clay soil. The change mechanism of stress wave parameters including longitudinal wave velocity ( $V_P$ ), shear wave velocity ( $V_S$ ), velocity ratio of longitudinal wave to shear wave ( $V_P/V_S$ ) in soil-stone mixture with different dry density of soil-stone mixture was analyzed under different water contents and different stone contents. The change rule of mixture Poisson's ratio with different water contents and different stone contents was studied. Analysis model of correlation between Poisson's ratio and  $V_P/V_S$  in mixture was built, then Poisson's ratio could be calculated by  $V_P/V_S$  in soil-stone mixture. Precision of the model was verified in laboratory. The results show that  $V_P/V_S$  in mixture increases with the decrease of dry density. Curves of  $V_P/V_S$  moves down with the increase of stone content but moves up with the increase of water content. Curves of Poisson's ratio and dry density moves up with the increase of water content but moves down with the increase of stone content; the average

收稿日期:2015-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(60879021);博士科研启动项目(2012QD24x);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3122014D028);机场工程科研基地开放基金项目(KFJJ2014JCGC06)

作者简介:张宇辉(1984-),男,山西吕梁人,讲师,工学博士,E-mail:xueyingshuang@163.com。

relative errors of the model are 0.045 for sandy mixture, 0.042 for silt mixture and 0.034 for clay mixture, and the engineering application errors is small. On this basis, the new technology of Poisson's ratio test with stress wave in soil-stone mixture is proposed. 1 tab, 7 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; soil-stone mixture foundation; Poisson's ratio test; stress wave; vibration compaction

## 0 引言

土石混填料由碎石材料与细粒土混合而成,由于其取材方便,且填筑地基承载性能较高,其在高填方地基的填筑工程中大量使用。但其本身的颗粒形状特异,碎石分布不均匀,混填料力学及工程性质与细粒土地基差别极大,且混填料中碎石相互嵌锁形成骨架空隙作用,当混填料配合比不佳或压实质量不高时,后期使用中出現上部扰动,因此,极易出現碎石空隙坍塌引发上部工程沉陷。通过对混填料相关工程力学参数及性质参数的研究,可以明确土石混填料的受力特性及强度特征,对保障施工地基的稳定性与强度及后期沉降预防有重要意义。由于混填料成分构成的特殊性,对其细部的研究难以有广泛代表性。目前工程中应用的研究成果多为针对大范围混填地基的表征参数检测,其中混填料应力波的研究已成为较集中的热点问题<sup>[1-6]</sup>。剪切波在土体中传播时,土体颗粒进行与波速传播方向垂直的振动,其蕴含丰富的地下填料层信息,此外,由于面波的易测性,瞬态瑞雷面波测试在工程中得到大量应用。很多学者对土体剪切波、瑞雷面波的变化规律进行理论研究,取得了丰富的研究成果<sup>[7-13]</sup>,但同时土石混填料纵波特性及其反应材料多方向变形性能的纵横波速比的相关研究较少,混填料纵横波速比随含水率与含石量的变化规律有待进一步探讨。

采用应力波或其他试验方法分析土石混填料相关性能时,往往需要依据已标定的一个或多个已知的混填料参数进行推算。其中,泊松比作为反映地基材料在受压状态下,横向变形与纵向变形性能的参数,在相关分析和计算研究中被广泛使用。但由于泊松比室内试验的复杂性及土石混填试件的制作困难,目前对土地基的泊松比取值多基于经验,或直接采用细粒土地基、岩石地基的相关数值,为工程中混填料相关性能评测带来误差。土石混填料泊松比随含水率和含石量的不同而发生变化,即使材料含水率、含石量等条件参数固定,混填料泊松比随材料压实质量的变化依然处于持续变动中。目前对土体、岩石体和地基材料的泊松比研究已有很

多<sup>[14-18]</sup>,但这些成果多针对单一材料,对土石混填材料的泊松比研究尚有不足。分析和测量泊松比的方法呈现多样化<sup>[19-20]</sup>,但多数方法都基于室内状态进行试验测定,泊松比的原位测试及现场取值目前尚无快速有效的方法。为此,本文采用砂土、粉土、粘土3种土样制备土石混填料,选取多个含水率和含石量参数进行混填料试件的大型正交压实试验,研究其剪切波、纵波、纵横波速比及泊松比随含水率、含石量、压实程度等的变化规律,并进一步探讨反映混填料纵向、横向变形性能的纵横波速比与泊松比的相关关系,建立二者相关性模型,提出采用纵横波速比来测试现场土石混填地基泊松比的新方法。

## 1 试验设计

混填料压实试验不能简单采用细粒土试验设备,因为土石混填料中碎石颗粒分布不均匀,而细粒土试验中试件尺寸较小,其试验参数不具有混填料的表征性。为最大限度对现场土石混填料的压实特性进行模拟研究,设计大型振动压实仪对土石混填料试件进行振动压实,并测试其固定状态下的剪切波、纵波、泊松比等参数。剪切波及纵波测试分别采用横波传感器和纵波传感器接通 GJY-1 工程测试仪进行采集。大型振动击实仪具体参数为:振动击锤质量为 380.7 kg;振力为 5.4~9.6 kN;频率为 50 Hz;试桶为圆柱型,规格为  $\Phi 500\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ ,如下页图 1 所示。

土石混填料压实试验时,试件的上下两端布置透水垫,模拟现场土体受压时的短时间透水与固结过程。波速测试如下页图 2 所示,采用首波判断方法计算不同压实条件下混填料的剪切波速,图中振幅  $A$  表示应力波的振动能量。混填料剪切波速和混填料纵波波速采集原理相同,都是利用首波到达时间进行计算。剪切波速测试时,将 2 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,使木块与试件上表面间具有一定的摩擦因数。通过侧击木块产生剪切波,2 个传感器分别采集信号。测得首波到达时间分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 。 $t_1$ 、 $t_2$  之差为  $\Delta t$ ,是剪切波通过试件的时间。压实试件长度为  $l_2$ ,

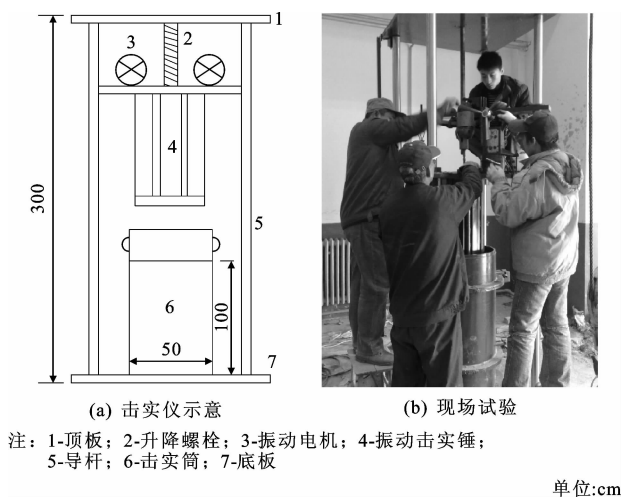


图1 振动击实仪

Fig. 1 Vibration compaction equipment

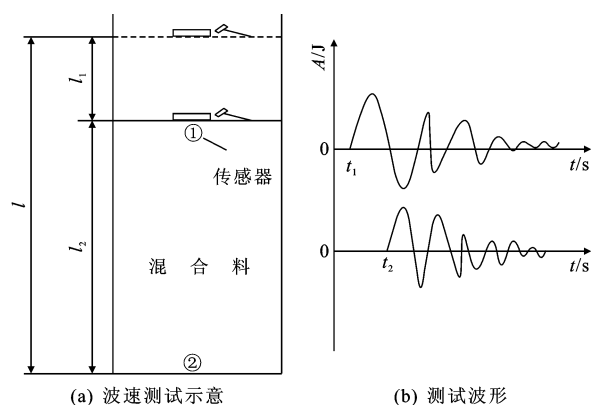


图2 纵、横波速测试方法

Fig. 2 Test method of velocity of longitudinal wave and shear wave

则可计算得出混填料试件宏观剪切波速。具体试验中,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2步试验确定准确的 $t_1$ ,如图2(a)所示,虚线所示位置为第2步试验。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 $t'_1$ 、 $t'_2$ , $\Delta t' = t'_1 - t'_2$ 。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,混填料宏观剪切波速(横波波速) $V_s = l_2 / \Delta t$ 。纵波测试与剪切波类似,激发时击打木块正面产生纵波。土石混填料泊松比测试过程中,在试件中布置量测混填料横向和纵向压力的振弦式土压力计,在试件的不同振压时间,采集压力计数值。然后根据压力计自带计算公式计算出该试件在对应压力状态下的横向及纵向应力,据此可求得混填料侧应力系数 $K_0$ ,则混填料在此压实状

态下的泊松比可计算得出。

压实试验所用原料为3种土石混填材料,其细粒土分别为粉土、砂土、粘土。粘土液限为45.12%,塑性指数为18.68,干密度最大值为 $2.01 \text{ g/cm}^3$ ,对应含水率为13.28%;粉土液限为19.7%,塑性指数为10.15,干密度最大值为 $1.95 \text{ g/cm}^3$ ,对应含水率为11.05%;砂土含砂量为94.05%。碎石料种类为大青石,产自天津蓟县,石料剪切波速范围为 $1795.4 \sim 2143.1 \text{ m/s}$ ,最大粒径70 mm,级配依据Talbot基本理论选取配备。各类混填料采用9种不同含石量、6种不同含水率正交制备试件进行压实试验,每个试件在振动压实过程中,选取6个不同振动时间进行相关数据采集,其中最后一个采样时间对应为该含水率、含石量条件下试件最密实状态。试验共测试数据972组。试验材料配备参数:含石量为35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%;粘土含水率为7.1%、10.14%、13.8%、18.7%、22.6%、26.6%;粉土含水率为5%、7.3%、9.6%、11.9%、13.4%、15.4%;砂土含水率为6.18%、7.5%、8.7%、10.8%、12.9%、14.2%。

## 2 混填料纵横波速比机理分析

混填料纵横波速比记为 $V_P/V_s$ ,其中 $V_P$ 为混合料纵波波速, $V_s$ 为混合料剪切波速(横向波速)。纵横波速比是指某一压实状态下,混合料纵波波速与剪切波速的比值。混合料纵波波速可一定程度反映混合料的压缩特性,而混合料剪切波速可反映混合料的剪切特性,二者之比是对材料综合受力变形的体现。目前对土石混填料中剪切波速变化规律的研究成果较多,但对纵波及纵横波速比的研究较少,其变化机理仍未明确<sup>[7]</sup>。分析纵横波速比 $\epsilon$ 随含水率、含石量的变化规律,研究试验数据。由于数据量较大,下页图3、图4中仅列出砂土混填料的部分纵横波速比数据曲线。

图3为不同含水率 $\omega$ 的砂土混合料纵横波速比随含石量 $n$ 的变化曲线。在含水率 $\omega$ 、含石量 $n$ 固定的条件下,随着试件的不断压实,混合料干密度不断增大,材料空隙率不断减小,混合料中细粒土剪切模量快速增大,混合料剪切模量变大,剪切波速随之增大。混合料的弹性模量也随密实度的增加而增大,但增大幅度较小,纵波波速增加速度较慢。此时纵横波速比减小,但在含水率过大而含石量较小时,如图3(d)中所示,含水率为14.2%的砂土混合料中,含石量小于45%的纵横波速比曲线呈现不同的变化趋势。这是由于当混合料中含水率过多时,导

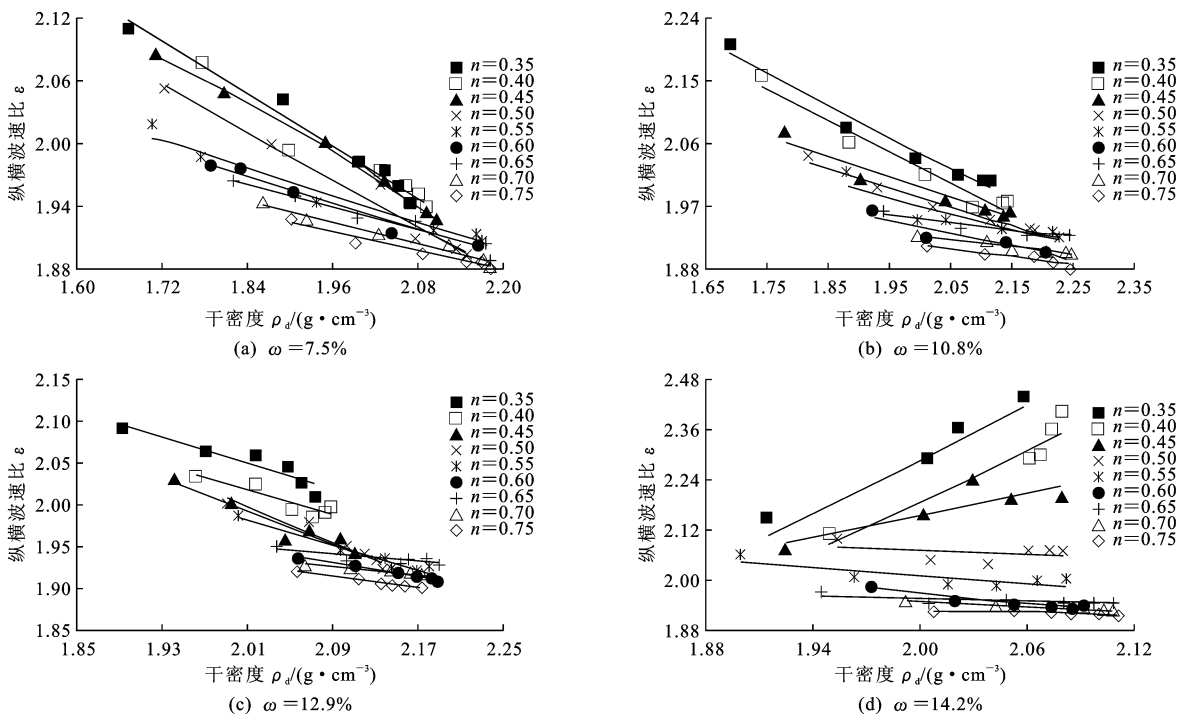


图 3 砂土混填料在不同含石量  $n$  下的纵横波速比

Fig. 3 Ratio of S to P wave velocity of sandy mixture in different soil-stone proportions

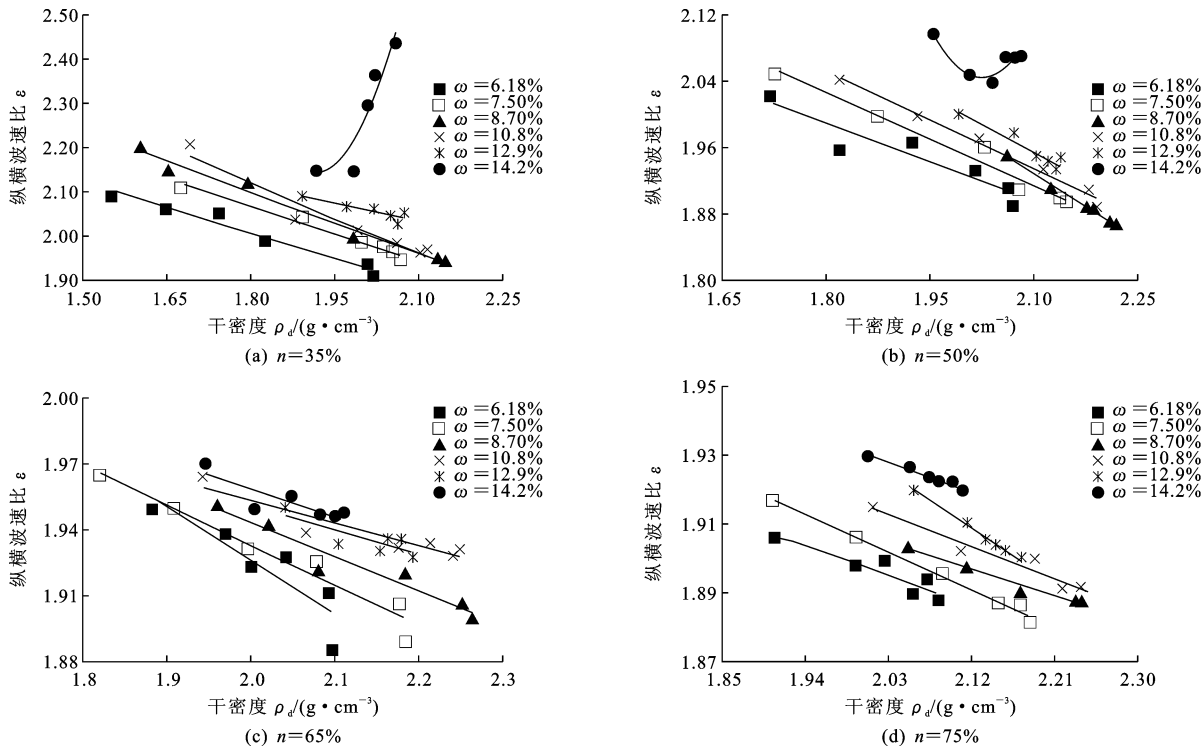


图 4 砂土混填料在不同含水率  $\omega$  下的纵横波速比

Fig. 4 Ratio of S to P wave velocity of sandy mixture in different water contents

致混合料整体剪切刚度下降,随着试件的压实,材料空隙中含水量相对增多,颗粒间摩擦因数降低,剪切刚度急剧下降,剪切波速随之迅速降低,纵横波速比随之增大。从图中还可以看出,随着含石量的增加,

纵横波速比曲线趋于平缓,因为在混合料中碎石含量较大时,石料形成骨架充当混合料受力的主要承载者,石料嵌锁形成的空隙中细粒土难以压实,混合料波速受碎石料波速的影响较大,而由于碎石料的

刚体特性,碎石料波速随混合料干密度变化较小,则混合料剪切波速增幅速度变小,纵横波速比降低趋势趋于平缓。固定干密度条件下,随着混合料中碎石含量的增大,混合料纵横波速比随之降低。这是由于当混合料中含石量增加时,碎石料波速对混合料波速的影响增大,混合料剪切波速和纵波波速都会随之增大。但剪切波速增大的速度大于纵波波速,则纵横波速比降低。

图 4 给出了含石量  $n$  分别为 35%、50%、65%、75% 时的砂土混合料纵横波速比曲线。由图 4 可知,混合料纵横波速比曲线随含水率的增大而上移。在固定干密度条件下,混合料泊松比随含水率的增大而增大,这是由于在同等密实条件下,随着混合料含水率的增大,材料中水分增多,混合料颗粒间摩擦因数降低,剪切波速降低,则纵横波速比增大。

随着含水率的增大,曲线的曲率变小,曲线降低趋势逐渐趋于平缓。混合料试件干密度增大时,纵横波速比降低,如果此时混合料中含水量增加,则导致剪切刚度变小,剪切波速减小。由含水率的增大产生的剪切波速减小在一定程度上抵消了由于干密度增大而导致的剪切波速增大,且含水率越大,这种抵消作用越明显,则纵横波速比降低的速度变小,所

以当含水率较大时,曲线的下降趋势变小,曲线趋于平缓。当含石量较小,含水率过大时,混合料中细粒土含量较大,混合料整体呈现细粒土性质。如图 4 (a)所示,其含水量为 14.2% 的曲线呈增大趋势,此时混合料中水分含量过大,随着混合料的压实,混合料孔隙中的相对含水量迅速增大,混合料剪切波速急剧变小,材料呈液化趋势,纵横波速比迅速增大。当含石量增大时,混合料中石料含量变大,此时混合料性质受碎石料影响较大。如图 4(b)、(c)所示,含石量为 65% 时,含水率为 14.2% 的纵横波速曲线恢复正常下降趋势。粉土混填料及粘土混填料的变化特性与砂土混填料类似。

3 混填料泊松比规律分析

混填料纵横波速比反映混填料受压时纵横向变形特性,而泊松比也是描述材料受压时纵横向变形特性的参数,为明确二者之间的相关关系,必须明确混填料泊松比随含水率、含石量和干密度的变化规律。图 5 给出了粘土混填料泊松比的部分试验数据曲线。

从图 5 可以看出,混填料泊松比随干密度增大总体呈下降趋势。图 5(a)、(b) 给出了固定含石量

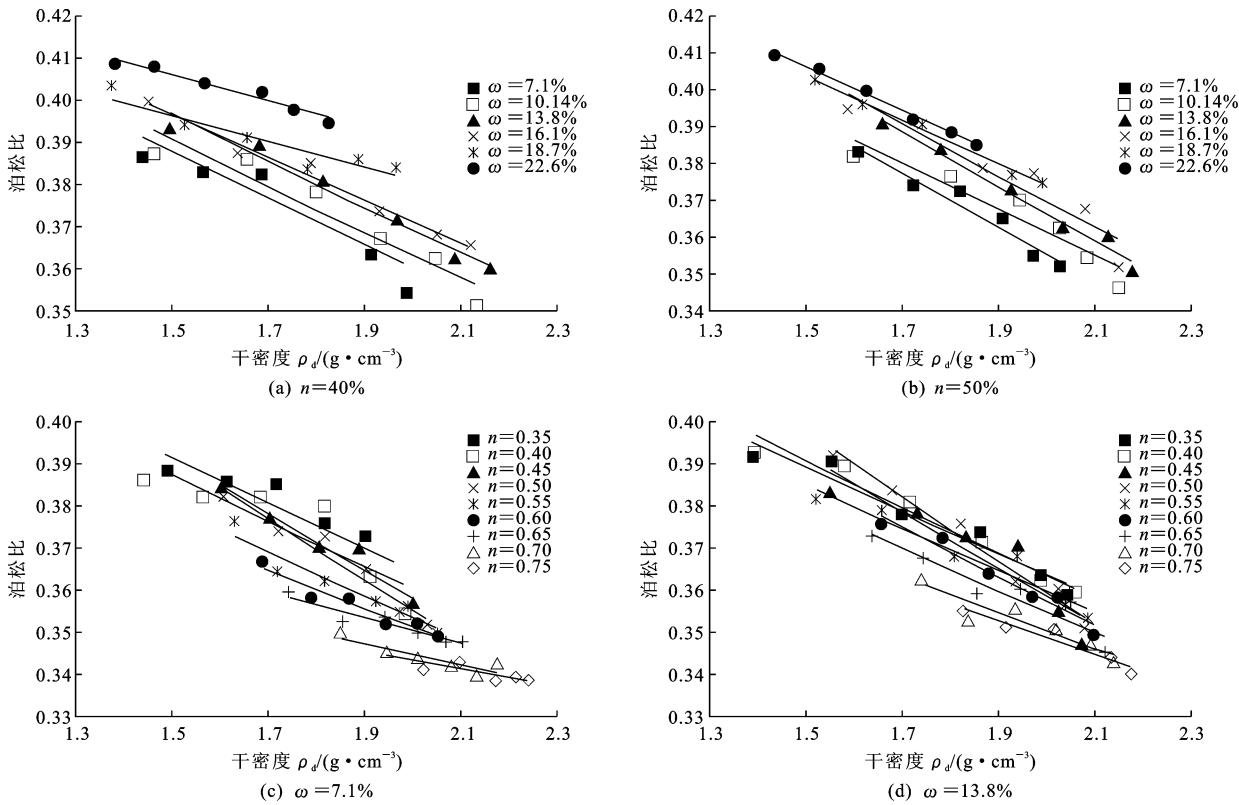


图 5 粘土混填料泊松比的变化曲线

Fig. 5 Change curves of Poisson's ratio in clay mixture

下粘土混填料泊松比随含水率和干密度变化的曲线簇。可以看出:在固定含石量和某一固定压实状态下,混填料泊松比随含水率的增大而增大;仅固定含石量条件下,混填料泊松比-干密度曲线随含水率增大而上移,曲线曲率未显示明显变化趋势。

图 5(c)、(d)给出了固定含水率下粘土混填料泊松比随含石量和干密度变化的曲线簇。可以看出:在固定含水率和某一固定压实状态下,混填料泊松比随含石量的增大而减小;仅固定含水率条件下,混填料泊松比-干密度曲线随含石量增大而下移,且曲线曲率有明显变化趋势,混填料泊松比随干密度增大的减小速率下降,幅度变小。土石混填料由碎石料和细粒土两部分组成,其中细粒土泊松比随细粒土本身的干密度增大而显著下降,这是由细粒土本身的特性决定的;而碎石料的泊松比与其本身的泊松比及碎石颗粒的组成和嵌锁结构有关,对碎石料干密度的敏感性较差。当混填料中含石量较小时,碎石颗粒无法嵌锁形成骨架作用。此时,混填料的变形性能与强度取决于细粒土,混填料泊松比反映为细粒土特性,随着混填料干密度的增大,其泊松比下降较明显。当混填料中含石量较大时,碎石颗粒嵌锁形成石料骨架,此时混填料的变形性能与强度取决于石料骨架,骨架空隙中填充的细粒土往往难以压实,此时混填料的压实过程很大程度反映为颗粒骨架构型的变化,细粒土泊松比对混填料整体干密度的敏感性降低,混填料泊松比中碎石料泊松比的贡献作用占主要地位。所以混填料整体泊松比随干密度增大而降低的幅度变小,下降速率降低。粉土混填料及砂土混填料中的泊松比变化规律类似。

#### 4 混填料纵横波速比与泊松比相关性

混填料泊松比在地下土层探测及地球物理相关研究中是一个很重要的参数,理论上当材料为均匀的半无限弹性介质时,泊松比  $\mu$  与纵横波速比  $\epsilon(V_p/V_s)$  存在以下关系

$$\mu = \frac{0.5\epsilon^2 - 1}{\epsilon^2 - 1} \tag{1}$$

在土石混填材料中,由于碎石颗粒的特殊性及分布不均匀性,二者之间的相关关系发生变化,已不符合式(1)。在试验中实测砂土混填料的含水率为 6.18% 的泊松比与纵横波速比,并分别给出按式(1)计算的理论数据,如图 6 所示。

由图 6 可知,实测纵横波速比与泊松比相关关系虽然变化趋势类似,但不能简单按理论关系式进

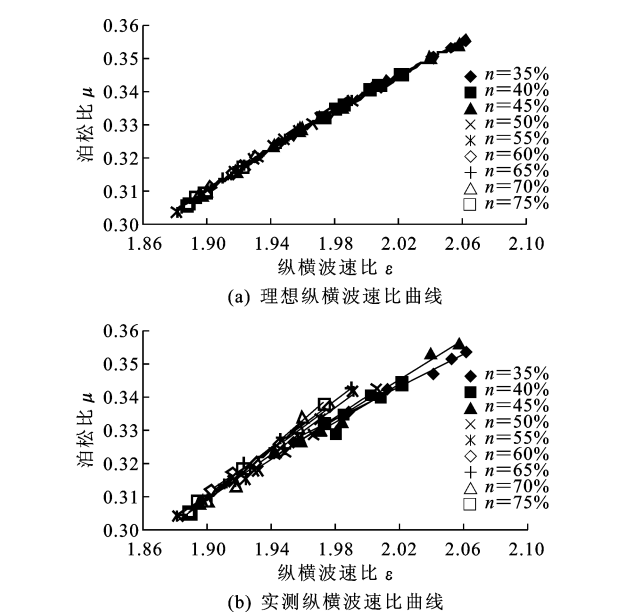


图 6 砂土混填料纵横波速比与泊松比的关系曲线  
Fig. 6 Curves of relationship of  $\mu\epsilon$  in sandy mixture

行相互间的计算与推导。图 6(b)中曲线随着含石量增加,其斜率不断增大,而截距持续变小。如能建立符合土石混填料中实际纵横波速比与泊松比的相关关系,则工程中可依据纵波与剪切波测试得出纵横波速比,进而推断土石混填料实际泊松比数值。以下以粉土混填料为例,研究构建纵横波速比与泊松比的相关性模型。

粉土混填料测试试件参数为 6 种含水率、9 种含石量,以试件松填入击实试桶、振压至最密实状态为 1 组,共进行 54 组。每组试验过程中采集包括最密实状态参数在内的 6 个不同压实状态参数,共得到数据 324 组,将其纵横波速比数据与对应的泊松比数据进行不同方式曲线拟合,相关系数见表 1。

表 1 拟合相关系数对比

Tab. 1 Contrast of correlation coefficient					
拟合方式	指数	二次多项式	幂函数	对数	线性
回归系数均值	0.904	0.912	0.885	0.645	0.745

从表 1 可看出,相关系数最高的为指数与二次多项式。当采用二次多项式描述混填料纵横波速比与泊松比关系时,可能出现泊松比随纵横波速比的增大而降低的变化趋势,这种情况与实际不符,所以采用指数方式构造其相关性函数,即

$$\mu = ae^{b\epsilon} \tag{2}$$

式中:参数  $a$ 、 $b$  均为含水率和含石量的二元函数。

对每个试件的纵横波速比与泊松比试验数据进行指数描述,则可得随含水率、含石量变化的 54 组参数  $a$ 、 $b$  的值,其变化曲线见下页图 7。

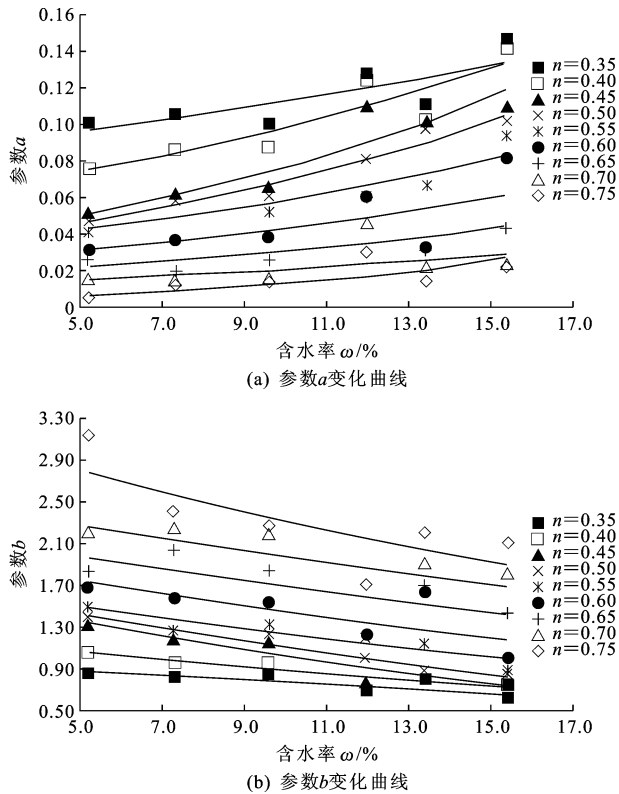


图7 不同含石量下参数  $a, b$  随含水率的变化曲线

Fig. 7 Parameters  $a$  and  $b$  change curves with moisture contents in different stone contents

由图7可知,采用四次多项式构造参数  $a, b$  随含水率的变化关系;采用二次多项式构造参数  $a, b$  随含石量的变化关系,  $a$  或  $b$  关系构造式为

$$a = x_1 n^2 + x_2 n + x_3 \omega^4 + x_4 \omega^3 + x_5 \omega^2 + x_6 \omega + x_7 \quad (3)$$

式中:  $x_1, x_2, \dots, x_7$  为待定系数。

用 MATLAB 对式(3) 进行非线性高次拟合系数求解,可得

$$a = 0.22n^2 - 0.50n + 2492.29\omega^4 - 1028.25\omega^3 + 153.99\omega^2 - 9.48\omega + 0.46 \quad (4)$$

$$b = 6.99n^2 - 3.93n - 32739.4\omega^4 + 13892.68\omega^3 - 2094.32\omega^2 + 126.48\omega - 1.034 \quad (5)$$

同理,对砂土混填料及粘土混填料进行求解可得

砂土混填料

$$a = 0.25n^2 - 0.47n - 76948.6\omega^4 - 28891\omega^3 - 3975\omega^2 + 237.18\omega - 4.93 \quad (6)$$

$$b = 1.23n^2 + 0.49n + 884943\omega^4 - 330504\omega^3 + 45176\omega^2 - 2674\omega + 58 \quad (7)$$

粘土混填料

$$a = 0.07n^2 - 0.34n - 638.57\omega^4 + 377.02\omega^3 - 78.3\omega^2 + 6.98\omega + 0.07 \quad (8)$$

$$b = 1.8n^2 - 0.7n + 3806.14\omega^4 - 2250.11\omega^3 + 470.67\omega^2 - 42.11\omega + 1.88 \quad (9)$$

在上述模型基础上,采用3种土样,随机采用3种含水率、3种含石量进行土石混填料试件压实试验,对比理论模型计算结果与试验数据误差,可得模型相对平均误差:砂土混填料为0.045,粉土混填料为0.042,粘土混填料为0.034。

## 5 结 语

(1)在含水率、含石量固定的条件下,混填料纵横波速比随干密度增大而减小。含水率固定,纵横波速比曲线随含石量的增大而下移且渐趋于平缓,即固定干密度条件下,混填料纵横波速比随含石量增大而降低。含石量固定,混填料纵横波速比曲线随含水率的增大而上移,同时曲线曲率变小,曲线降低趋势趋于平缓。在含水率过大而含石量较小时,由于混填料中水分过多,导致混填料整体剪切刚度随空隙率的减小急剧下降,剪切波速降低过快,纵横波速比随之增大。

(2)混填料泊松比随干密度增大总体呈下降趋势。固定含石量条件下,混填料泊松比-干密度曲线随含水率增大而上移,曲线曲率未显示明显变化趋势。固定含水率条件下,混填料泊松比-干密度曲线随含石量增大而下移,且曲线曲率变小,曲线降低趋势渐缓。

(3)土石混填料泊松比与纵横波速比相关性不再符合均匀介质理想状态,在研究二者变化机理的基础上,建立土石混填料泊松比-纵横波速比非线性回归关系模型,并进行实验室验证,效果较好。工程中可以通过纵波与剪切波测试得出纵横波速比,进而依据该模型计算土石混填料实际泊松比数值。提出依据应力波测试方法测定现场土石混填地基泊松比的新技术。

(4)模型的实际应用误差包括其自身的回归拟合误差及现场测试数据误差,对模型的验证仅在实验室状态下进行了试验验证,其具体应用误差有待进一步深入。

(5)基于土石混填地基应力波的现场易测性提出泊松比推算的新算法,但模型的实际应用研究有所不足,下一步拟开展大批量的现场试验分析,对已建立模型进行修正,以使该测试方法尽快进入实际应用阶段。

## 参考文献:

## References:

[1] CHEN Y M, KE H, CHEN R P. Correlation of shear

- wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(6): 461-469.
- [2] 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 Jian-hua, CHENG Guo-yong. 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. (in Chinese)
- [3] 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 Guo-yong, ZHANG Li, WANG Jian-hua. A new technique of shear wave velocity measurement of soil samples by torsion wave[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(3): 358-359. (in Chinese)
- [4] 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 Ming-jie. 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. (in Chinese)
- [5] 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 Shao-bo, ZHANG Xian-min, ZHI Sheng-ying. Detecting subgrade compactness by direct shear wave method[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2008, 25(3): 32-37. (in Chinese)
- [6] TRAVASAROU T, GAZETAS 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.
- [7] 王平,王强,王峻,等. 黄土场地剪切波速影响因素模糊灰关联分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增2): 4299-4304.  
WANG Ping, WANG Qiang, WANG Jun, et al. Research on loess site's shear wave velocity influencing factor based on fuzzy-gray relational analysis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 4299-4304. (in Chinese)
- [8] KAYEN R, MOSS R E S, THOMPSON E M, et al. Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(3): 407-419.
- [9] 孔梦云,陈国兴,李小军,等. 以剪切波速与地表峰值加速度为依据的地震液化确定性及其概率判别法[J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1239-1252, 1260.  
KONG Meng-yun, CHEN Guo-xing, LI Xiao-jun, et al. Shear wave velocity and peak ground acceleration based deterministic and probabilistic assessment of seismic soil liquefaction potential[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(5): 1239-1252, 1260. (in Chinese)
- [10] 曹振中,袁晓铭. 砂砾土液化的剪切波速判别方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 943-951.  
CAO Zhen-zhong, YUAN Xiao-ming. Shear wave velocity-based approach for evaluating gravel soils liquefaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 943-951. (in Chinese)
- [11] 刘红帅,郑桐,齐文浩,等. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(7): 1142-1149.  
LIU Hong-shuai, ZHENG Tong, QI Wen-hao, et al. Relationship between shear wave velocity and depth of conventional soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(7): 1142-1149. (in Chinese)
- [12] 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. Evaluation of compactness degree of interval soil in soil-stone mixtures by use of shear-wave[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(6): 909-915. (in Chinese)
- [13] 罗亨俊,龚芳媛,王清华. 土石混填路基材料最大干密度的影响因素研究[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2014, 31(8): 57-61.  
LUO Heng-jun, GONG Fang-yuan, WANG Qing-hua. Study on influence of maximum dry density on subgrade filled with earth-rock mixture[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2014, 31(8): 57-61. (in Chinese)
- [14] 潘华,陈国兴,孙田. 原状海洋土动泊松比的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增1): 346-350.  
PAN Hua, CHEN Guo-xing, SUN Tian. Experimental research on dynamic Poisson's ratio of undisturbed marine soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 346-350. (in Chinese)
- [15] 吴世明,陈龙珠. 饱和土的泊松比及含气量对它的影响[J]. *水利学报*, 1989(1): 37-42.  
WU Shi-ming, CHEN Long-zhu. Poisson's ratios of saturated and highly-saturated soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989(1): 37-42. (in Chinese)
- [16] 王学滨. 泊松比对岩样破坏模式及全部变形特征的影响[J]. *地质力学学报*, 2007, 13(3): 220-225.  
WANG Xue-bin. Effects of Poisson's ratio on failure mode and overall deformation characteristics of a rock specimen[J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13(3): 220-225. (in Chinese)