

含水率对土石混合料力学特性影响试验研究

吕玺琳¹, 程博文¹, 张甲峰², 晏友波¹, 徐柯锋³, 朱长根³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海民航新时代机场设计研究院有限公司, 上海 200335;
3. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941)

摘要: 为研究初始含水率对土石混合料力学特性的影响, 选取典型土石混合料开展大型三轴固结排水剪切试验。结果表明, 随着初始含水率增加, 土石混合料应力-应变曲线呈下降趋势, 且围压越高下降幅度越明显。高围压、高含水率将抑制土石混合料剪胀, 且剪缩特性更明显, 从而应力-应变关系逐渐由硬化软化组合型过渡到持续硬化型。土石混合料剪切强度与正应力呈现非线性关系, 含水率增大将导致土石混合料剪切强度参数减小。通过邓肯-张模型较好地拟合了土石混合料的应力-应变关系, 并得出了材料参数随含水率的变化规律。

关键词: 土石混合料; 含水率; 大三轴试验; 强度; 邓肯-张模型

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0097-08

Experimental study on the influence of moisture content on the mechanical properties of soil-rock mixture

LV Xi-lin¹, CHENG Bo-wen¹, ZHANG Jia-feng², YAN You-bo¹, XU Ke-feng³, ZHU Chang-gen³

(1. Department of Underground Architecture and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Civil Aviation New Era Airport Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China;

3. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 200941, China)

Abstract: In order to study the influence of initial moisture content on the mechanical properties of soil-rock mixture, a series of large-scale triaxial consolidated drained shear tests were carried out on a typical soil-rock mixture material. The results show that with the increase of initial moisture content, the stress-strain curve of soil-rock mixture shows a downward trend. The higher the confining pressure is, the more obvious the downward trend is. High confining pressure and high moisture content inhibit the shear expansion of soil-rock mixture, and the shear induced contractancy is more obvious. The stress-strain relationship gradually changes from the hardening-to-softening type to the pure hardening type. The shear strength and normal stress of soil-rock mixture exhibit a nonlinear relationship. The increase of moisture content will reduce the shear strength parameters of soil-rock mixture. The stress-strain relationship of soil-rock mixture is well fitted by Duncan-Chang model, and the variation law of material parameters with moisture content is obtained.

Key words: soil-rock mixture; moisture content; large-scale triaxial test; shear strength; Duncan-Chang model

0 引言

受复杂地形地貌影响, 在公路、铁路、机场等建设时, 出现大量高填方路基。高填方路基具有高度大、自重大、跨度大等特点, 压实度常难保证, 在长期运营、水位变化或降雨入渗等条件下易导致地基差异沉降、失稳乃至滑坡等安全问题。在山区工程建设中, 为减小环境影响并提高施工效率, 挖方弃料废渣得到广泛采用。弃料废渣是极不均

匀松散的岩土介质^[1], 常呈现为土石混合形式, 常具有强度高、密度大、压缩性低、排水性好等特点。相比土体和岩石, 土石混合料工程性质更复杂, 抗剪强度受土石介质强度、土石配比、级配特征、含水率等多种因素影响。以往研究表明, 土石混合料从干燥到饱和状态变化条件下, 力学性质变化剧烈^[2]。为准确评估高填方路基变形和稳定性, 有必要针对含水率对土石混合填料力学性质影响规律进行深入研究。

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 广西重点研发项目资助 (AB22080032)。

作者简介: 吕玺琳 (1981—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学与工程方面研究工作。E-mail: xilinxu@tongji.edu.cn。

有关土石混合料力学特性的影响因素及演变规律已得到较广泛的关注。土石混合料力学性质影响因素复杂多变,含石量和含水率是最主要的影响因素^[3-6]。含石量对土石混合料力学性质影响主要体现在块石骨架形成、粗颗粒尺寸^[7]及破碎情况、土石强度比等方面。随着含石量增加,土石混合料内部逐渐形成块石骨架,细颗粒能充分填充孔隙,填料强度达到最大。若含石量进一步增加,则块石骨架被架空,土石混合料强度降低^[8],并随含石量增加呈抛物线变化^[9],土石混合料存在最优含石量区间,在此区间内填料干密度、抗剪强度和弹性模量达到峰值^[10-11]。随着填方高度增加,填体深部承受更大压力,进行密实需要更大的击实能量,导致土石混合料粗颗粒破碎^[12],级配和干密度随之改变并导致填料强度^[13]在宏观上表现为沉降变形^[14]。随着块石强度增加,土石混合料的应力-应变关系逐渐由硬化-软化型转变到持续硬化型,剪切面形态趋于复杂,摩擦角随之增大,黏聚力呈现为先增大后减小的趋势^[15]。当前有关含水率对土石混合料特性影响研究还较少,并主要集中在颗粒间作用力、软化效应和湿化变形等方面。不同含水率碎石土强度会因含石量差异呈现不同变化趋势^[16],当干燥试样浸水饱和后,黏聚力明显下降,但这种现象会随含石量的增加而减弱^[17]。一般地,土石混合料含水率越高,抗剪强度越低,且黏聚力对含水率变化更敏感^[18]。除此之外,含水率变化也会导致土石混合料湿化变形,甚至可将湿化看作一种广义荷载^[19],并可采用湿化参数计算其变形^[20]。

为进一步研究土石混合料在不同含水率及围压条件下的力学特性变化规律,基于典型填料开展了一系列大型三轴固结排水剪切试验。根据试验结果分析围压及含水率变化对应力-应变及抗剪强度的影响规律,并通过应力-应变关系数据拟合得出了邓肯-张模型材料参数随含水率的变化规律。

1 土石混合料物理特性

1.1 依托工程概况

以浙江境内某高填方工程为依托,该工程位于碧湖盆地南部边缘,出露基岩主要为白垩系下统馆头组。第四系地层主要为残坡积、坡洪积、冲洪积、塘沼沉积层、人工堆积层等松散层。地质构造基本以断裂为主,北东向和北西向断裂构造十分发育。场区内工程地质条件较差,广泛分布有抗剪强度较

低且深厚的红黏土层,且场地内存在洼地、岩溶漏斗等多种不良地质条件,原地基排水条件不良,现场取样见图1。取得的试样主要由中风化粉砂岩组成,其含水率为5%~14%,密度为2.01~2.13 g/cm³。



图1 现场取样

Fig. 1 Field sampling

1.2 比重试验

取得的土石混合料含有粒径大于5 mm的粗颗粒(含石量)和小于5 mm的细颗粒,且粒径大于20 mm的颗粒占比超过10%。采取比重瓶法和虹吸筒法结合的方式测定土粒比重,依次测得加满蒸馏水的比重瓶质量、干土质量、抽气饱和后比重瓶、水和土的总质量,记录此时比重瓶内的水温,进而通过相关公式^[21]计算得到细粒土比重为2.72。

取适量粗粒料洗净并晾干,将虹吸筒注满清水备用。依次测得量筒质量、晾干粗粒土质量、加入试样后虹吸筒排水及量筒的总质量和试验结束后虹吸筒内试样烘干后的干土质量,并测得此时量筒内的水温,最后计算得到粗粒土比重约为2.75。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],土石混合料试样比重=粗粒土比重×粗粒土的质量权重+细粒土比重×细粒土的质量权重,故本土石混合料试样比重为2.74。

1.3 颗粒级配试验

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],剔除试样中粒径超过60 mm的块石,然后将土样充分晾晒干燥,并封存在密封袋中。将土样搅拌均匀后,采用筛分法测定其颗粒累积级配特征曲线。为减小土石混合料力学性质离散性对试验的影响,开展了多组平行试验。由图2可知,不同区域的土石混合料颗粒级配差异不大,根据3个试样的颗粒累积级配曲线取平均值后,得到试验土样的平均粒径 d_{50} 约为9.84 mm,不均匀系数 C_u 为15.85,曲率系数 C_c 为1.90,可见试样级配良好。土石阈值作为土石混合料定义的关键问题之一,参考以往文献取5 mm作为土石阈值^[5],于是可知试样的含石量约为70%,在该含石量条件下能保证块石骨架强度充分发挥。

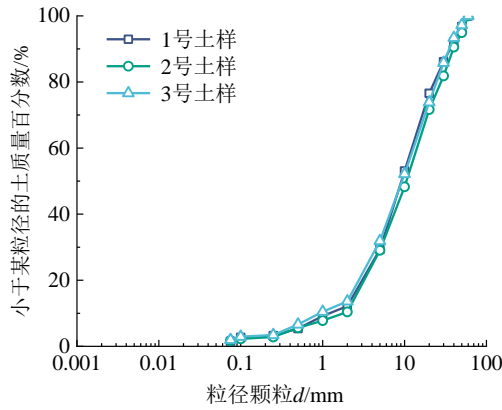


图2 土石混合料颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of soil-rock mixtures

2 土石混合料大型三轴试验

2.1 试验装置

试验采用同济大学 STX-600 大型三轴剪切试验仪开展,试验装置主要由液压站、SCON-2000 通用数字信号调节控制单元、轴向作动器、荷载架和三轴压力室、压力面板和压力-体积控制器组成。试验机最大静荷载为 1000 kN,最大动荷载为 800 kN,轴向加载最大频率 10 Hz,横向加载最大频率 5 Hz,双向同步频率 5 Hz,最大围压 2 MPa。

2.2 试样制备

为保证制样效果,直接在工作台上进行制样,试样直径为 300 mm,高 600 mm。根据现场填料压实度要求,本次试验通过控制试样干密度来控制压实度,干密度控制为 2.1 g/cm^3 。试样总重约 90 kg,分为 6 层压实,每层层高 10 cm,层间采用凿毛处理以减少各向异性。制样过程中确保乳胶膜与制样筒内壁时刻保持紧贴顺直。结合工程现场条件及室内试验条件,开展低含水率(含水率 1.3%)、中含水率(含水率 5%)、高含水率(含水率 8%)和饱和状态(含水率 11.1%)试样的三轴试验。为保证试样含水率一致,每种含水率同时制备 3 个试样,制备好的试样如图 3 所示。制样完成后,分别在 100 kPa、200 kPa 和 400 kPa 围压下开展三轴固结排水剪切试验。

2.3 试验过程

试样制备完成后,开启底座排水阀门,施加围压进行固结,待试样体积变形稳定表示固结完成。开启轴向作动器施加偏应力,试验采用应变控制加载,竖向位移加载速率为 0.6 mm/min 。当试样偏应力-轴向应变曲线趋于平缓或最大轴向应变为 15% 时,停止加载。试样加载前后的形态如图 4 所示。



(a) 制样过程

(b) 制备好的试样

图3 土石混合料大三轴试样制备

Fig. 3 Preparation of a soil-rock mixture specimen for large-scale triaxial test



(a) 加载前

(b) 加载后

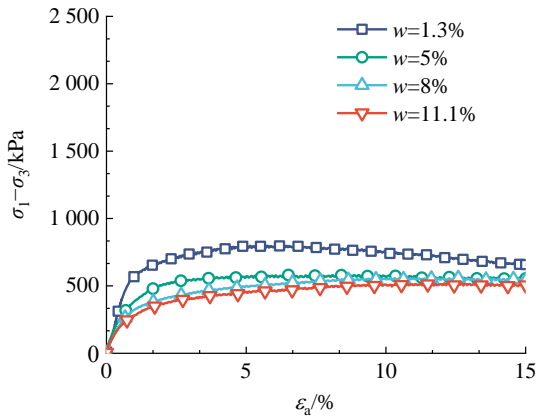
图4 加载前后试样形态

Fig. 4 Specimens before and after loading

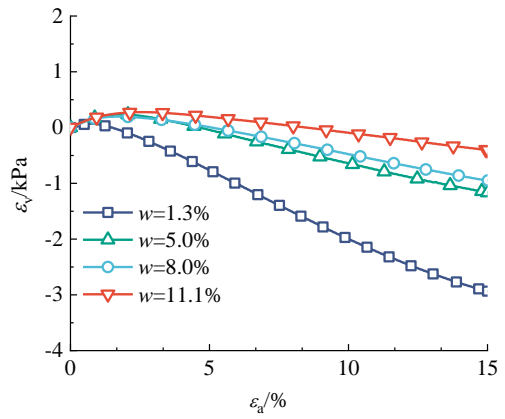
2.4 试验结果分析

(1) 偏应力-轴向应变关系

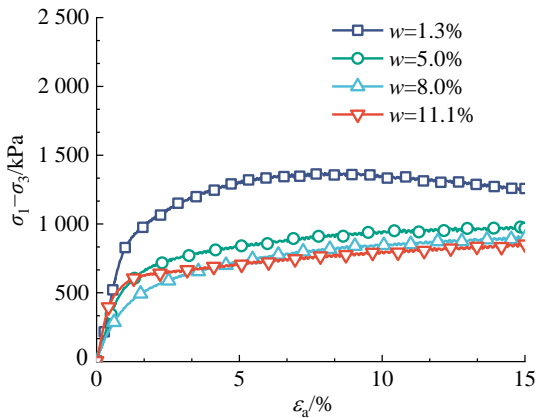
不同含水率试样得到的偏应力-轴向应变曲线如图 5 所示。在剪切初期,应力-应变关系近似表现为线性关系,偏应力随轴向应变增长速率较快。随着偏应力增大,呈现明显的屈服特征^[22],应力-应变关系逐渐转变为非线性,弹性变形逐渐转变为弹塑性变形,但偏应力随轴向应变的增长速率明显减缓。随着偏应力进一步增大,试样表现出较为明显的硬化或者软化。其中,低含水率试样的应力-应变曲线明显区别于其它含水率试样,在各个围压下均表现出不同程度的软化特性,总体上随围压增大软化趋势减弱。其余含水率的试样则仅在低围压($\sigma_3=100 \text{ kPa}$)条件下才表现出不太明显的软化现象,高围压下表现出持续的应变硬化特性。进一步分析表明,当含水率相同时,试样固结围压越大,峰值偏应力越大,说明抗剪强度越高,越不易应变软化。当围压相同时,试样含水率越高,其抗剪强度越低,应力-应变关系从先硬化后软化型逐渐变化为纯硬化型。试样从低含水率($w=1.3\%$)变化到中含水率状态($w=5\%$)后,最大剪应力明显减小,特别是在高围压条件下,降幅达 30.34%。当含水率较低时,含水率增加导致土石混合料力学性质明显弱化,而当含水率较高时,含水率增加导致的土石混合料力学性质弱化效果不明显。



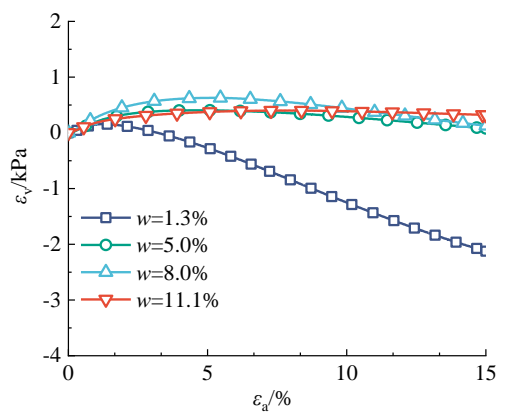
(a) 围压 $\sigma_3=100$ kPa



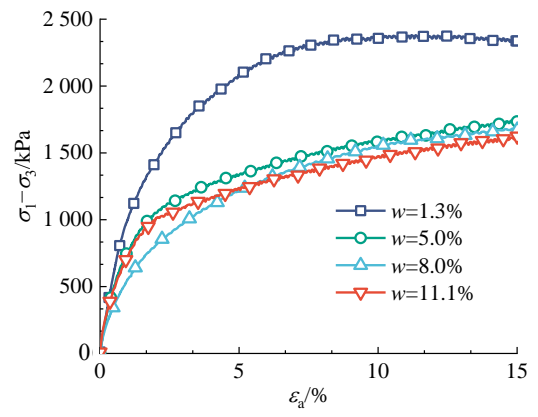
(a) 围压 $\sigma_3=100$ kPa



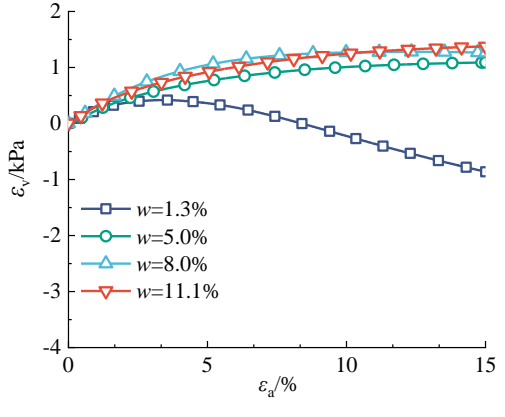
(b) 围压 $\sigma_3=200$ kPa



(b) 围压 $\sigma_3=200$ kPa



(c) 围压 $\sigma_3=400$ kPa



(c) 围压 $\sigma_3=400$ kPa

图5 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 5 Curves of deviatoric stress and axial strain

图6 体积应变-轴向应变曲线

Fig. 6 Curves of volumetric strain and axial strain

(2) 体应变特性

针对4种不同含水率的土石混合料,在不同围压条件下开展试验得到的体积应变-轴向应变曲线如图6所示。从图中可知,含水率变化会造成试样在不同围压条件下的体应变变化规律出现差异,除低含水率状态外,其余试样体应变曲线间的差距不明显。低含水率状态试样在不同围压下最终都发展到剪胀状态,而中、高含水率和饱和状态试样在高围压条件下($\sigma_3=400$ kPa)均表现为剪缩。

当试验围压相同时,随着含水率提高,试样由剪缩转变为剪胀时对应的轴向应变值越大,即越不容易产生剪胀。当围压为100 kPa时,1.3%含水率试样体应变增量由正转负时对应的轴向应变为0.8%,5%含水率试样为1.7%,8%含水率试样为1.8%,11.1%含水率试样为2.9%。当含水率相同时,试样围压越高,试样由剪缩转变为剪胀时对应的轴向应变越大,即越不容易产生剪胀,峰值剪缩量越大,终值剪胀量越小。在高围压条件下,高含水率

试样在剪切过程中始终表现为剪缩。由此可见,高含水率和高围压都会抑制剪胀的发展。其原因可能是在高围压作用下,块石骨架翻转受到约束导致。随着含水率增大,在水的润滑及软化作用下,块石骨架中粗颗粒在高剪切力作用下破碎填充孔隙,细颗粒则更容易在水流拖曳力作用下移动并进一步填充孔隙,因而导致高含水率和高围压土石混合料试样总体上表现为剪缩。

(3) 强度特性分析

根据 100 kPa、200 kPa 和 400 kPa 围压试样的试验结果,采用邓肯-张模型中对内摩擦角的修正方法,将内摩擦角表示为围压的函数:

$$\varphi_i = \varphi_0 - \Delta\varphi \log\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad (1)$$

式中: φ_i 为从原点到某一围压摩尔圆的切线斜率对应的倾角; φ_0 为 $\varphi - \log(\sigma_3/P_a)$ 拟合曲线初始斜率对应的摩擦角; $\Delta\varphi$ 为拟合曲线的斜率变化对应的摩擦角; P_a 为大气压,取 100 kPa。

低含水率状态试样莫尔应力圆和强度包线如图 7 所示,4 种含水率状态试样的抗剪强度参数如表 1 所示,可见含水率对强度参数影响较大。

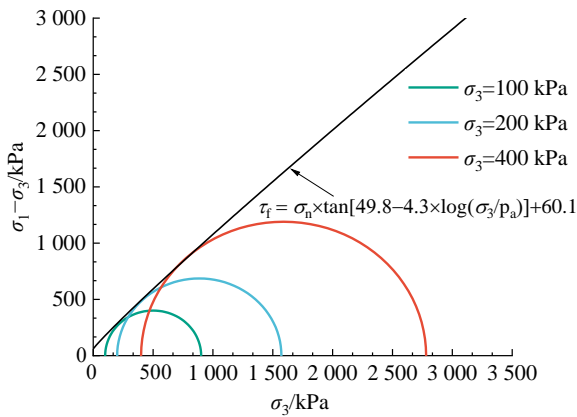


图 7 低含水率试样莫尔圆及强度包线

Fig. 7 Strength envelope and Mohr circles of specimens with low moisture content

表 1 不同含水率试样抗剪强度参数

Table 1 Shear strength parameters of samples with different moisture contents

含水率	w/%	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi$	c/kPa
低	1.3	49.8	4.3	60.1
中	5.0	45.2	3.6	38.6
高	8.0	44.6	2.5	36.1
饱和	11.1	42.4	2.7	33.5

随着含水率升高,黏聚力、内摩擦角^[23] 和内摩擦角变化量均呈不同程度的下降趋势。当含水率从

1.3%增大到 5%时,强度指标表现出较大幅度下降,而含水率从 5%增大到 11.1%的过程中,下降幅度明显趋缓。相较摩擦角而言,土石混合料的黏聚力对含水率变化更敏感。从低含水率到饱和状态,黏聚力 c 减小 44.26%,内摩擦角 φ 减小约 15.54%,内摩擦角变量 $\Delta\varphi$ 减小约 37.2%。

3 应力-应变关系模拟分析

邓肯-张模型^[24] 采用双曲线关系反映土应力-应变的非线性,弹性模量和泊松比均为应力状态的函数。其参数基于常规三轴试验获取且物理意义明确,被广泛用于我国高填土石坝的设计中。采用二次优化法^[25] 拟合,考虑含水率对参数 K , n 的影响^[26],基于天然含水率和 4 个初始 K 值的均值将拟合数据归一化,并采用抛物线形式拟合,得到其方差分别为 0.96 和 0.95,说明 K , n 和不同含水率间存在较好的抛物线关系。拟合得到的初始变形模量 K^* 、 n^* 和 E_i 的表达式如式 (2) ~ (4) 所示。

$$K^* = \bar{K} \left[0.165 \left(\frac{w}{w_0} \right)^2 - 0.578 \left(\frac{w}{w_0} \right) + 1.38 \right] \quad (2)$$

$$n^* = -0.158 \left(\frac{w}{w_0} \right)^2 + 0.462 \left(\frac{w}{w_0} \right) - 0.012 \quad (3)$$

$$E_i = K^* P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n^*} \quad (4)$$

式中: K^* , n^* 为考虑含水率的拟合参数; \bar{K} 为 4 种含水率条件下拟合得到的初始 K 值的均值; w 为含水率; w_0 为天然含水率。

得到 4 组不同含水率条件下的初始邓肯-张参数如表 2 所示。考虑含水率影响的拟合结果与试验结果对比如图 8 所示,总体而言拟合效果较好。1.3% 含水率试样变形后期因软化效应拟合误差较大,8% 含水率试样在试验前期拟合结果与试验数据有一定偏差,分析原因可能是由于试样装填时未充分密实,在剪应力作用下变形较快造成。

表 2 邓肯-张模型初始参数

Table 2 Initial parameters for Duncan-Chang model

w/%	K	n	R_f	G	F	D
1.3	1 122	0.10	0.91	0.51	0.01	3.6
5.0	925	0.26	0.94	0.55	0.01	1.9
8.0	762	0.36	0.96	0.55	0.01	3.1
11.1	822	0.26	0.95	0.55	0.01	2.1

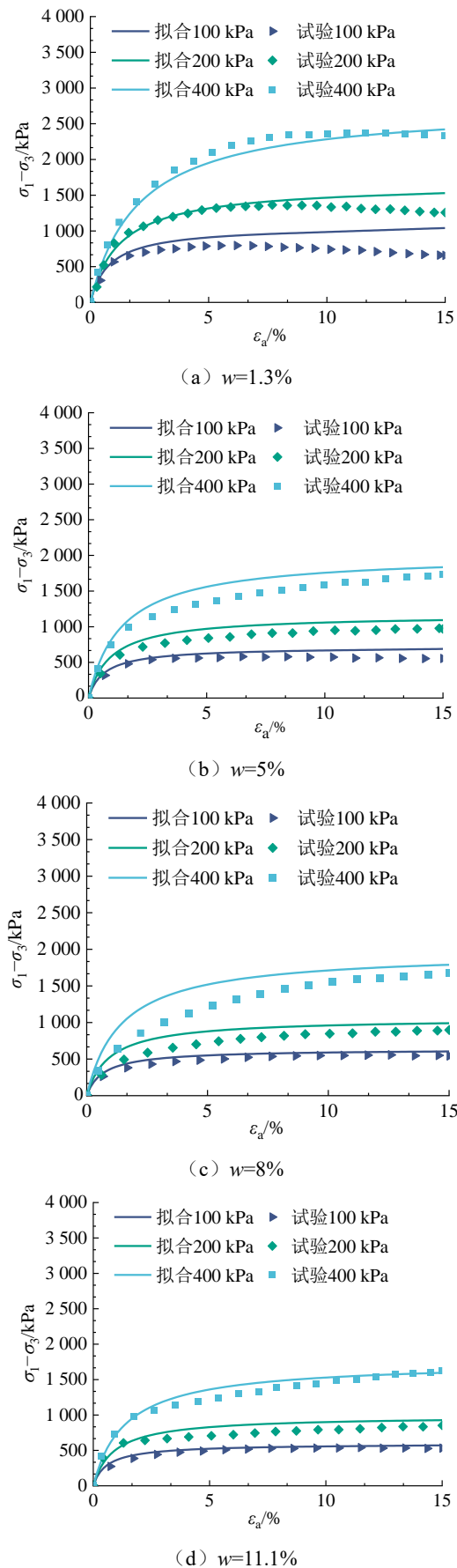


图8 模拟和试验结果对比

Fig. 8 Comparison between simulated and experimental results

4 结论

通过配制不同含水率土石混合料,开展一系列大三轴固结排水剪切试验,探讨了其应力-应变、体应变及强度特性变化规律,所得结论如下。

(1) 当含水率较低时,含水率增加导致土石混合料力学性质变化明显,但随着含水率进一步增加,力学性质变化减弱,且其应力-应变关系逐渐由应变硬化软化组合型过渡到纯应变硬化型。高含水率和高围压均会抑制土石混合料剪胀的发展,使得体积变形最终发展为剪缩。

(2) 随着含水率的提高,土石混合料黏聚力和内摩擦角均减小,且黏聚力减小幅度更大。低含水率条件下,含水率增加导致的强度参数降低效应比高含水率条件下更加明显。

(3) 邓肯-张模型能较好地拟合土石混合料应力-应变关系,并能较合理地体现抗剪强度的非线性和含水率的影响。

参考文献

- [1] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50-56, 70.
XU Wen-jie, HU Rui-lin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56, 70.
- [2] 徐明, 陈金锋, 宋二祥. 陡坡寺中微风化料的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2496-2500.
XU Ming, CHEN Jin-feng, SONG Er-xiang. Large scale triaxial testing of Douposi moderately-to-slightly weathered fill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2496-2500.
- [3] 陶庆东, 何兆益, 贾颖. 基于大三轴试验的土石混合体强度特性与影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 310-318.
TAO Qing-dong, HE Zhao-yi, JIA Ying. Strength characteristics and influencing factors of soil-stone hybrid based on large triaxial test[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 310-318.
- [4] 赵明华, 刘建军, 罗宏, 等. 土石混填体抗剪强度特性及影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 965-972.
ZHAO Ming-hua, LIU Jian-jun, LUO Hong, et al. Experimental studies of shear strength characteristics and

- influencing factors of soil-rock aggregate mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 965-972.
- [5] 钟祖良, 涂义亮, 何晓勇, 等. 土石混合体物理指标及强度特性研究进展[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 1135-1144.
ZHONG Zu-liang, TU Yi-liang, HE Xiao-yong, et al. Research progress on physical index and strength characteristics of bimsoils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1135-1144.
- [6] 吕玺琳, 晏友波, 马一跃, 等. 高铁路基粗粒土填料静力特性大型三轴试验研究[J]. *路基工程*, 2022(1): 39-43.
LV Xi-lin, YAN You-bo, MA Yi-yue, et al. Triaxial experimental study on static characteristics of coarse-grained soil filler on high-speed railway embankment[J]. *Subgrade Engineering*, 2022(1): 39-43.
- [7] OVALLE C, FROSSARD E, DANO C, et al. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data[J]. *Acta Mechanica*, 2014, 225(8): 2199-2216.
- [8] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. *岩土力学*, 2018, 39(1): 93-102.
TANG Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 93-102.
- [9] 董云, 柴贺军. 土石混合料的工程综合分类法研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 179-184.
DONG Yun, CHAI He-jun. Study on engineering synthetic classification of rock-soil aggregate mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 179-184.
- [10] XUE Y, HUANG H, GRIFFITHS D V. Specimen reconstitution and uniaxial compressive strength testing of rock-soil mixtures[C]//*International Symposium on Advances in Ground Technology & Geo-Information*. Singapore, 2011: 289-299.
- [11] 董云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1269-1274.
DONG Yun. Experimental study on strength characteristics of soil and stone mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1269-1274.
- [12] 涂义亮, 刘新荣, 任青阳, 等. 含石量和颗粒破碎对土石混合料强度的影响研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 3919-3928.
TU Yi-liang, LIU Xin-rong, REN Qing-yang, et al. Effects of rock contents and particle breakage on strength characteristics of soil-rock aggregate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 3919-3928.
- [13] 刘丽萍, 折学森. 土石混合料压实特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(1): 206-210.
LIU Li-ping, SHE Xue-sen. Study on compaction property of earth-rock mixture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(1): 206-210.
- [14] 雷晓丹, 杨忠平, 张晓景, 等. 土石混合料剪切特性及块石破碎特征[J]. *岩土力学*, 2018, 39(3): 899-908, 916.
LEI Xiao-dan, YANG Zhong-ping, ZHANG Xiao-jing, et al. Study on shear properties and rock block breakage characters of soil-rock mixtures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 899-908, 916.
- [15] 杨忠平, 赵亚龙, 胡元鑫, 等. 块石强度对土石混合料剪切特性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4): 814-827.
YANG Zhong-ping, ZHAO Ya-long, HU Yuan-xin, et al. Effect of block strength on shear characteristics of soil and stone mixture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 814-827.
- [16] 刘文平, 时卫民, 孔位学, 等. 水对三峡库区碎石土的弱化作用[J]. *岩土力学*, 2005, 26(11): 166-170.
LIU Wen-ping, SHI Wei-min, KONG Wei-xue, et al. Weakening effect of water on gravel-soil in Three Gorges Reservoir area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 166-170.
- [17] 徐文杰, 胡瑞林, 曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(4): 814-818.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(4): 814-818.
- [18] 茆大炜, 杜少华, 李地元, 等. 基于大型三轴试验的蚀变花岗岩力学行为及浸水湿化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1819-1831.
MAO Da-wei, DU Shao-hua, LI Di-yuan, et al. Mechanical behaviors and wetting-induced deformation of meta-morphic granite based on large-scale triaxial test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1819-1831.
- [19] 丁艳辉, 张丙印, 钱晓翔, 等. 堆石料湿化变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 2975-2981, 2988.

