

文章编号:1674-2974(2016)03-0142-07

# 土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究<sup>\*</sup>

曹文贵<sup>1†</sup>, 黄文健<sup>1</sup>, 王江营<sup>1,2</sup>, 翟友成<sup>1,3</sup>

(1. 湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410076; 3. 衢州学院 建筑工程学院, 浙江 衢州 324000)

**摘要:**为了进一步研究土石混填体的变形力学特性,全面考虑含水量、含石量、岩性及土性等因素的影响作用,采用YS30-3型应力路径三轴剪切试验机,基于正交试验方法进行了一系列土石混填体大型三轴压缩研究.试验结果表明,在三轴受力条件下,土石混填体在低围压下的应变软化特征不明显,试样的粘聚力普遍较低而内摩擦角则比较高,且内摩擦角更容易受其他因素的影响而发生显著变化.含石量对土石混填体的抗剪强度影响程度最大,随试样中的含石量从25%增加到70%,其内摩擦角从 $34.54^\circ$ 近似线性增长至 $46.39^\circ$ .含石量和围压分别是影响土石混填体体变特性最主要的内因和外因,即在含水率、岩性、土性相同的情况下,含石量越低试样高压剪缩性越明显,含石量越高其低压剪胀性越明显.

**关键词:**土石混填体;正交试验设计;大型三轴试验;含石量;剪切强度;体变特性

**中图分类号:**TU411.7

**文献标识码:**A

## Large-scale Triaxial Test Study on Deformation and Intensity Characteristics of Soil-rock Aggregate Mixture

CAO Wen-gui<sup>1†</sup>, HUANG Wen-jian<sup>1</sup>, WANG Jiang-ying<sup>1,2</sup>, ZHAI You-cheng<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Changsha Univ of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Quzhou Univ, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

**Abstract:** In order to further study the deformation and intensity characteristics of soil-rock aggregate mixture, a series of triaxial tests were conducted by using a YS30-3 large-scale triaxial test machine based on the orthogonal design. These tests took into account various factors such as water content, stone content, rock and soil property, etc. The test results indicate that the soil-rock aggregate mixture under the triaxial stress conditions does not exhibit obvious characteristics of strain softening. The cohesion of soil-rock aggregate mixture is generally low and the internal friction angle is relatively high, while the internal friction angle is more susceptible to the influencing factors. Moreover, it is found that the rock content significantly influences on the strength of soil-rock aggregate mixture. As the rock content increases from 25% to 70%, the internal friction angle increases linearly from  $34.54^\circ$  to  $46.39^\circ$ . The effects of rock content and confining pressure are the internal and external causes on the volumetric strain characteristics of

\* 收稿日期:2014-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378198), National Natural Science Foundation of China(51378198);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130161110017)

作者简介:曹文贵(1963-),男,湖南南县人,湖南大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: cwglyp@21cn.com

the soil-rock aggregate mixture, respectively. That is to say, with the same water content as well as rock and soil property, the lower the rock content, the more obvious the shear contraction of soil-rock aggregate mixture under the higher confining pressure. Meanwhile, the higher the rock content, the more obvious the shear dilatation of soil-rock aggregate mixture under the low confining pressure.

**Key words:** soil-rock aggregate mixture; orthogonal experimental design; large-scale triaxial test; rock content; shear strength; volumetric strain characteristics

山区进行大规模基础设施建设时,出于保护和节约投资的需要,土石混填体被广泛应用于地基和路基填筑<sup>[1-2]</sup>。然而,土石混填体由于颗粒粒径变化较大且难以控制,致使其变形力学性质较为复杂,从而造成施工困难、施工质量难以保证,甚至可能引发工程事故。因此,更加系统深入地研究土石混填体变形力学特性已成为了中国西南山区基础设施建设亟待解决的关键问题之一,具有重要的理论与工程实际意义。

目前,对于土石混填体比较常用的试验方法有大型直剪试验。油新华等<sup>[3]</sup>、Li等<sup>[4]</sup>、Xu等<sup>[5]</sup>通过开展一系列原位水平推剪对土石混填体的强度特性进行了研究,初步掌握了土石混填体的承载机理与破坏模式,但是原位试验具有工作量大、操作复杂、精度有限、现场条件不易控制等缺点,致使有关成果无法进一步推广应用。为此,董云<sup>[6]</sup>、王江营等<sup>[7]</sup>先后在室内采用大型直剪仪对土石混填体进行了更为全面深入的试验研究,有关研究结果揭示了含石量、含水量以及干密度等因素对土石混填体抗剪强度、直剪变形特性等方面的影响,王江营等<sup>[7]</sup>还得到了土石混填体在不同水作用条件下完整的剪切变形特征曲线,这些试验成果可更好地指导工程实践以及有关理论研究。

然而,在大型直剪试验中土石混填体的受力不均匀现象比较严重,试样的破坏面被人为限定在了上下剪切盒之间,且无法掌握试样的体变特征。相比之下,通过开展大型三轴剪切试验可更加合理、全面地对土石混填体的变形力学特性进行研究。因此,武明<sup>[8]</sup>、柴贺军等<sup>[9]</sup>、周勇等<sup>[10]</sup>、高春玉<sup>[11]</sup>采用大型三轴仪对土石混填体进行了试验研究,分析了在三轴条件下含石量、干密度、岩性等因素对土石混填体的抗剪强度及应力应变关系的影响。但是,已有的土石混填体大型三轴试验多数只考虑某一两个因素的影响,试验不够全面,所得到的结果可能存在一定片面性;此外,在上述试验中均未重点对土石混填体的体变特性进行研究,这对其工程应用、理论计算及本

构模型研究均会造成影响。

由上述可知,已有的研究尚存在一定的不足,因此,需要开展更为全面的大型三轴试验,综合考虑含水量、含石量、岩性和土性等因素对土石混填体抗剪强度、应力应变关系以及体变特征的影响,以充分掌握其变形力学特性,为相关的理论研究和工程实践提供一定参考和依据,而这便正是本文试验研究的出发点与核心内容。

## 1 试验设备及试验参数设定

### 1.1 主要试验设备

试验设备:摇筛机、台秤、喷壶、对开制样筒、乳胶膜和YS30-3型应力路径大型三轴剪切试验仪,其中试样直径300 mm,高600 mm。

### 1.2 试验参数设定

由土石混填体定义及已有的研究成果可知,含水量、含石量、岩性、土性等因素均会对土石混填体的变形力学特性产生影响,因此,本文在试验中将综合考虑这4个因素,各个因素的水平设定具体如下。

1) 岩性与土性。由于实际工程中土石混填体在受外荷载作用下岩石不可能发生破坏,故本文不从母岩强度方面来考虑岩性,而从岩石的颗粒形状来考虑岩性。土性则参照土力学教材中土的分类,即粘性土和无粘性土。为了达到参照和对比的目的,本文采用与文献<sup>[7]</sup>中相同的岩性和土性,即土料分别为无黏性砂土(土性I)和南方地区比较常见的红粘土(土性II);石料分别为磨圆度较好的圆砾(岩性I,饱和单轴抗压强度 $R_c=34.1$  MPa)和由山体破碎而成的角砾(岩性II,饱和单轴抗压强度 $R_c=47.5$  MPa)。

2) 含水量。根据文献<sup>[7]</sup>中重型击实试验结果可知,土石混填体的最优含水量 $w_{op}$ 大致为4%~7%,为了反映水对土石混填体变形力学特性的影响,本文在试验中同样考虑4种不同的含水量:0(不含水),4%,7%,饱和。

3) 含石量及相应的级配组成. 已有的土石混填体工程实践和理论研究中, 大多是取 5 mm 作为土石分界粒径, 因此, 本文在试验中亦采用该标准, 共设定了 4 种含石量: 25%, 40%, 55% 和 70%. 考虑到试样直径  $D$  可达 300 mm, 试验中通常要求  $D/d_{\max} \geq 5$ , 所以石料的最大粒径  $d_{\max}$  可取 60 mm. 图 1 为不同含石量土石混填体颗粒级配曲线.

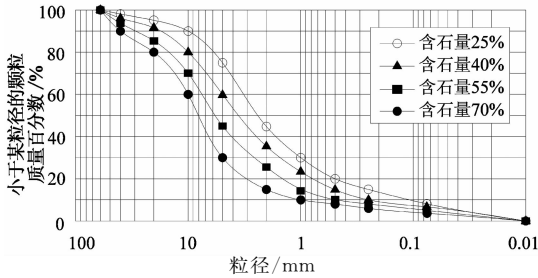


图 1 不同含石量土石混填体颗粒级配曲线  
Fig. 1 Grading curves of different soil-rock ratio mixtures

根据图 1 能够得到各个含石量下试样的有效粒径  $d_{10}$ , 中值粒径  $d_{50}$  和限定粒径  $d_{60}$ , 从而可计算出相应的不均匀系数  $C_u$  与曲率系数  $C_c$ , 结果如表 1 所示, 即所有试样都是级配良好的.

表 1 不同含石量土石混填体的粒径分布特征指标  
Tab. 1 Particle-size characteristics of different soil-rock ratio mixtures

含石量 / %	$d_{10}$ / mm	$d_{50}$ / mm	$d_{60}$ / mm	$C_u$	$C_c$
25	0.21	1.0	3.1	14.76	1.54
40	0.28	1.6	5.0	17.86	1.83
55	0.50	2.5	7.5	15.0	1.67
70	1.0	5.0	10.0	10.0	2.50

## 2 试验方案及试验过程

### 2.1 正交试验方案的建立

由 1.2 节可知, 本文拟对含水量和含石量各取 4 个水平, 对土性和岩性各取 2 个水平, 如果在试验中同时考虑这些因素进行全面试验的话, 则共有  $4^2 \times 2^2 = 64$  种组合 (试样), 每种试样分别在 4 级不同围压下进行剪切, 即应制作 256 个试样进行试验. 对于大型三轴试验而言, 这不仅需要投入大量的时间、人力及物力, 而且效率非常低下. 因此, 亟需一种科学合理的方法来建立出更为高效的试验方案, 而正交试验设计<sup>[12]</sup>便是用于多因素、多水平的一种方法, 它是按照一定数学规律从全面试验中选取部分有代表性的方案进行试验, 这些点具有“均匀分散”

与“整齐可靠”的特性, 有着很高的效率, 同时也非常便于对试验数据进行整理分析.

鉴于此, 本文采用正交试验设计的思想来建立土石混填体大型三轴试验方案, 表 2 为本文所考虑的试验因素及相应的水平.

表 2 大型三轴试验所考虑的各个因素及其水平  
Tab. 2 Factors and levels of large-scale triaxial tests

水平	含水量 / %	含石量 / %	土性	岩性
I	0	25	无黏性土	圆砾
II	4	40	黏性土	角砾
III	7	55	—	—
IV	饱和	70	—	—

由表 2 可知, 根据正交表选择方法, 应采用  $L_{16}$  ( $4^2 \times 2^2$ ), 于是便建立了具体的试验方案, 如表 3 所示, 共有 16 种组合, 为全面试验 (64 种) 的 1/4, 可显著减少工作量.

表 3 正交试验方案  
Tab. 3 Orthogonal test programs

方案	含水量	含石量	岩性	土性
1	I (0)	I (25%)	I (圆砾)	I (无黏性土)
2	I	II (40%)	I	II (黏性土)
3	I	III (55%)	II (角砾)	I
4	I	IV (70%)	II	II
5	II (4%)	I	I	I
6	II	II	I	II
7	II	III	II	I
8	II	IV	II	II
9	III (7%)	I	I	I
10	III	II	I	II
11	III	III	II	I
12	III	IV	II	II
13	IV (饱和)	I	I	I
14	IV	II	I	II
15	IV	III	II	I
16	IV	IV	II	II

### 2.2 土石混填体大型三轴试验过程

1) 试样制作与安装. 根据表 3 中的每一种方案组成以及图 1 中的级配曲线, 准备不同粒径的土石料, 将土石料均匀拌和, 然后按质量分成 6 等分, 分层装入制样桶内并击实, 试样压实度控制在 92% 左右. 制样结束后, 将试样外层的橡皮膜套在试样帽上, 并用橡皮筋扎紧, 将试样帽上的管道与真空泵连接. 打开真空机从试样顶部抽气, 利用负压, 拆除制样桶. 将底座清理干净, 安装压力室.

2) 试样饱和与固结. 对于需要进行饱和的试样, 采用“水头压力+抽真空”的方式使其饱和, 当试样

饱和度 $\geq 95\%$ 后,把围压调整到预设值,打开排水阀,试样开始固结,孔隙水压力逐渐消散,当排水量与时间的关系曲线逐渐趋于水平,且孔隙水压力已经消散基本不再变化时,可认为试样已完成固结。

3)试样剪切. 每组试样均在剪力分别为 200, 400, 600 及 800 kPa 下进行剪切,剪切过程采用应变控制,剪切速率设为 1 mm/min,当出现稳定的残余应力或竖向应变达到 15%时,停止试验. 图 2 为土石混填体试样经三轴试验破坏后典型的照片,从中可以看出,试样破坏后中间部位鼓胀比较明显。



(a) 含石量 40% 三轴  
试验破坏试样

(b) 含石量 55% 三轴  
试验破坏试样

图 2 土石混填体试样剪切试验照片

Fig. 2 Shear test photos of soil-rock aggregate mixture specimens

### 3 试验成果整理与分析

#### 3.1 土石混填体剪切强度指标

根据每种试样在不同围压下的应力-应变曲线便可求得相应的剪切强度指标,不同方案下土石混填体的粘聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$  如表 4 所示。

由表 4 可知,土石混填体在三轴试验条件下其内摩擦角普遍较高,而粘聚力相对较低,这种现象与采用相同土石料的文献[7]中直剪试验的结果是一致的,即土石混填体的抗剪强度主要源于不同粒径颗粒之间的相互嵌入、咬合及摩擦等效应。但是,表 4 中的  $c$  和  $\varphi$  值却明显高于文献[7]中  $c_1$  和  $\varphi_1$ ,这可能由以下几方面原因引起:

1)试样的最大粒径不同. 大型三轴试验中试样的最大粒径  $d_{\max} = 60$  mm,而在文献[7]中由于剪切盒的限制  $d_{\max} = 40$  mm,柴贺军等[9]通过试验发现,颗粒最大粒径对土石混填体的抗剪强度特性及应力-应变关系均存在一定的影响;

2)试验条件不同. 大型三轴试验由于配有专门的制样筒,试样压实度达到了约 92%,且围压  $\sigma_3$  在 200~800 kPa 之间;直剪试验中试样的压实度约为 90%,而且由于仪器限制其最大法向应力  $\sigma_n$  只有

300 kPa;

3)试验方法不同. 三轴试验和直剪试验的原理是不一样的,这在一定程度上也会造成所求得的抗剪强度指标不尽相同。

表 4 土石混填体的抗剪强度指标  
Tab. 4 Shear strength indices of soil-rock aggregate mixture

方案	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	方案	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
1	6.42	35.27	9	8.02	32.04
2	5.14	39.72	10	7.26	37.63
3	4.37	44.36	11	6.35	43.52
4	6.83	46.58	12	5.17	45.91
5	7.35	37.84	13	4.86	32.02
6	6.72	44.49	14	5.37	35.68
7	7.25	46.05	15	6.48	39.48
8	5.63	48.92	16	4.42	43.14

#### 3.2 各个因素对土石混填体抗剪强度的影响

通过对表 4 中试样的抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  值进行分析可知:当试样不含水时,其粘聚力并不为零,这表明在外界压力作用下颗粒之间存在一定的咬合粘聚力;随着试样含水量或含石量等参数的改变,其粘聚力亦会随之有所变化,但是考虑到粘聚力变化的“绝对值”很低,且规律性不明显. 考虑到试样的抗剪强度主要源于内摩擦角,因此,接下来将各个因素对土石混填体的内摩擦角有何影响展开具体的分析。

根据表 4 中的结果,参照正交试验设计的数据处理方法,可求得各个因素在不同水平下的内摩擦角平均值( $\bar{\varphi}_I, \bar{\varphi}_{II}, \dots, \bar{\varphi}_{IV}$ ),以及相应的极差  $R$ ,由于各因素的水平数不相同,需对极差  $R$  进行修正,  $R'$ 即为修正后的结果,具体如表 5 所示。

由表 5 中修正后的极差  $R'$ 值大小可知,大型三轴试验中各个因素对土石混填体内摩擦角影响的主次顺序是:含石量 $\rightarrow$ 含水量 $\rightarrow$ 岩性 $\rightarrow$ 土性. 同时,为了更加直观地了解各个因素的影响趋势,根据表 5 画出各因素与试样内摩擦角平均值的关系图,如图 3 所示,于是可知:

1)不同因素对土石混填体的内摩擦角的影响趋势存在较大的差别,含石量同样是最主要的影响因素,随含石量从 25%增加到 70%,其内摩擦角近似呈线性增长,内摩擦角增量  $\Delta\varphi$  与含石量  $P_5$  之间的关系可大致表示为:

$$\Delta\varphi = 23.7 P_5 - 5.93, 25\% \leq P_5 \leq 70\%.$$

(1)

2)随试样的饱和度从 0 变为 1,其内摩擦角首

先略有升高然后又有较大幅度的降低,而饱和后试样的内摩擦角最大降低约 13%。

3)角砾试样的内摩擦角普遍大于圆砾试样;无黏性土下试样的内摩擦角虽然略高于黏性土,但这两个因素的影响程度均非常有限。

表 5 试样内摩擦角的极差分析

Tab. 5 Range analysis of internal friction angle of soil-rock aggregate mixture

内摩擦角 / (°)	含水量	含石量	土性	岩性
$\bar{\varphi}_I$	42.23	34.54	41.17	40.44
$\bar{\varphi}_{II}$	43.58	39.63	40.66	41.43
$\bar{\varphi}_{III}$	39.78	43.10	—	—
$\bar{\varphi}_{IV}$	38.08	46.39	—	—
R	5.50	11.85	0.51	0.99
R'	11.62	21.33	2.05	3.98

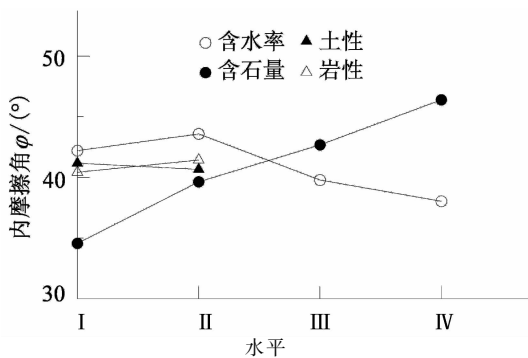


图 3 各因素与试样内摩擦角的关系

Fig. 3 Relationship between every factor and internal friction angle under different water content

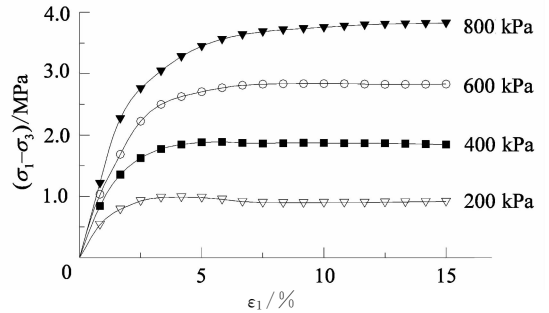
### 3.3 应力-应变关系曲线特征分析

通过对土石混填体的应力-应变关系曲线进行归纳分析后发现,在三轴试验条件下,即使试样的组成或试验条件存在较大差别,但它们变形关系曲线之间的差异性却没有直剪试验条件下那么显著,图 4 为 3 组具有代表性的应力-应变关系曲线,对其分析后可知:

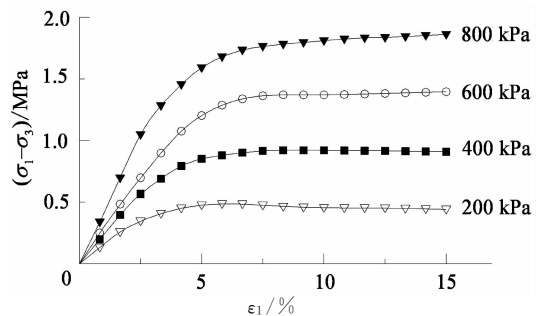
1)当试样处于低围压( $\sigma_3 = 200$  kPa)下时,其应力-应变关系曲线在峰值之后呈现出应变软化的趋势,强度略有降低,但不是很明显,这表明土石混填体具有在峰后依然能承受较大荷载作用的强度特性。

2)当试样的围压逐渐增加到 800 kPa 后,其应力-应变关系曲线不再具有应变软化的趋势,进而转变为应变硬化的特征,但是强度同样增加得非常缓慢。不过可以预测,如果围压进一步增大(如  $\sigma_3 = 2$  MPa),那么土石混填体的应变硬化特性将会变得更为显著。

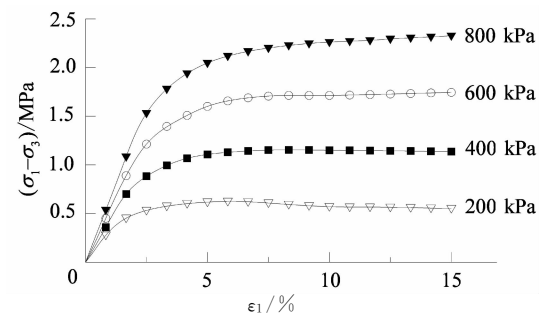
3)在其他因素相同时,相同围压下,试样的含石量越高其变形模量便会越大,且随轴向应变  $\epsilon_1$  的发展,亦会较快地由线弹性变形阶段进入到弹塑性变形阶段。可见,含石量不仅对土石混填体的强度特性存在较大影响,同样还会影响其变形特性。



(a) 方案 3(含石量 55%)的应力-应变曲线



(b) 方案 13(含石量 25%)的应力-应变曲线



(c) 方案 14(含石量 40%)的应力-应变曲线

图 4 不同方案下试样的应力-应变曲线  
Fig. 4 Stress-strain curves of different programs

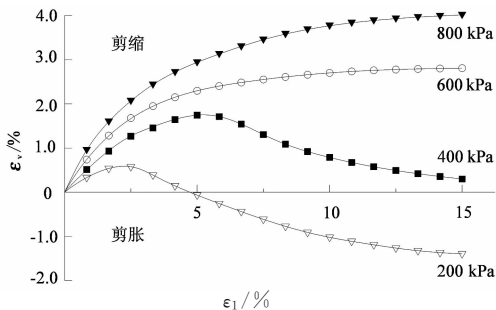
### 3.4 体变特性分析

通过对试样的体积应变-轴向应变( $\epsilon_v - \epsilon_1$ )关系曲线进行分析,发现围压与含石量是对其有较大影响的两个因素。图 5 为 3 组不同含石量试样的  $\epsilon_v - \epsilon_1$  关系曲线,对其分析后可知:

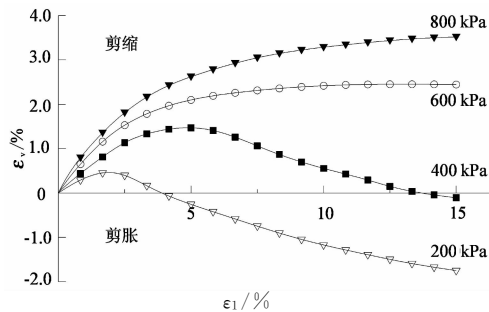
1)不同试样体变特性的基本规律是相似的,即土石混填体在低围压( $\sigma_3 \leq 400$  kPa)下体积应变  $\epsilon_v$  随轴向应变  $\epsilon_1$  发展会先增大然后又不断减小,存在明显的剪胀性;在高围压下( $\sigma_3 \geq 800$  kPa)下体积应变  $\epsilon_v$  始终随轴向应变  $\epsilon_1$  的增加而不断增加,但体变

速率会逐渐减小,最终趋于某一定值。

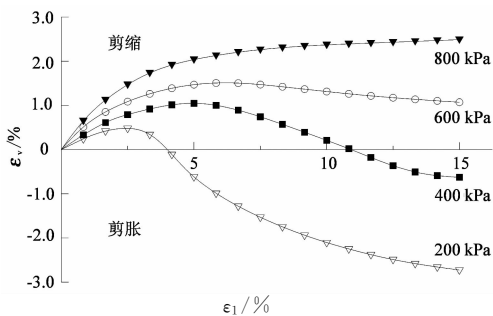
可见,围压 $\sigma_3$ 是影响土石混填体体变特性的一个重要外部因素,随着 $\sigma_3$ 由低到高,试样会逐渐呈现出低压剪胀向高压剪缩转变的特性。



(a) 方案 13(含石量 25%,简称试样 a) $\epsilon_v-\epsilon_1$ 关系曲线



(b) 方案 14(含石量 40%,简称试样 b) $\epsilon_v-\epsilon_1$ 关系曲线



(c) 方案 16(含石量 70%,简称试样 c) $\epsilon_v-\epsilon_1$ 关系曲线

图5 不同方案下试样体积应变-轴向应变关系曲线  
Fig. 5 Curves of volumetric strain-axial strain of different programs

2)随着试样中的含石量由25%(试样a)增加到70%(试样c),当 $\sigma_3=200$  kPa时,试样虽然都表现出剪胀性,但试样a的体变约为1.5%,而试样c的体变则接近3%,且体变速率高于试样a;当 $\sigma_3=400\sim 600$  kPa时,试样c在 $\epsilon_1$ 超过5%之后体变均出现了明显的负增长,而试样a仅在 $\sigma_3=400$  kPa时才有这种现象,且负增长的速率略低于试样c;当 $\sigma_3=800$  kPa时,试样虽然都表现出剪缩性,但试样c的剪缩量及体变速率均小于试样a。

可知,试样含石量越高,其低压剪胀性越明显;

而含石量越低,则高压剪缩性更为显著。

土石混填体在围压和含石量影响下,之所以会表现出上述特性,是因为在试验初始阶段试样内部的石料仍未完全接触,在围压作用下试样体积减小使石料逐渐充分接触,其强度特性亦随之发挥出来;而随着剪切继续进行,粗颗粒需要相互跨越、翻转,于是便会造成试样体积膨胀,当围压较低时难以有效约束这种膨胀性,故表现为低压剪胀高压剪缩。

当试样中含石量增加后,会显著提高粗颗粒之间相互接触的概率,更利于土石混填体结构性的发挥,其低压剪胀性也因此而更加显著;如果含石比较低,那么在剪切过程中粗颗粒相互跨越或翻转的情况将会减少,随细颗粒发生整体移动的情况会有所增加,故其剪胀性会被削弱,剪缩性则变得更为明显。相比之下,含水量、岩性与土性等因素对试样的体变特性影响大不。

## 4 结论

本文通过进行土石混填体大型三轴试验,综合考虑了含水量、含石量、岩性与土性等因素对其变形力学特性的影响,得到如下结论:

1)此次试验中试样存在一定的咬合粘聚力,但是其粘聚力普遍较低,在其他因素影响下变化幅度不大且规律性不明显;而试样的内摩擦角则相对较高,且含水量和含石量对其有较大影响,即土石混填体的强度特性与其所处环境、级配组成等因素密切相关。

2)不同因素对土石混填体的抗剪强度有着不同的影响:含石量是影响程度最大的一个因素,试样的内摩擦角和变形模量均会随含石量的增加而显著增加;随试样的饱和度由0增加到1,其内摩擦角会先略有增加然后又明显降低;而岩性和土性对土石混填体的强度特性影响不大。

3)根据试样的应力-应变关系曲线可知,其应变软化特性不明显,这表明土石混填体在峰值之后依然能承受较大的荷载作用。

4)土石混填体具有低压剪胀性和高压剪缩性,含石量和围压是影响其体变特性的主要因素;试样中含石量越高,其低压剪胀性越明显,而含石量越低,则高压剪缩性更为显著。

## 参考文献

- [1] 曹文贵,胡天浩,罗宏,等. 土石混填路基压实度检测新方法探讨[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(2):22-26.  
CAO Wen-gui, HU Tian-hao, LUO Hong, *et al.* Discussion on a new technique for detecting compactness of soil-rock mixture roadbed[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(2): 22-26. (In Chinese)
- [2] 罗宏,赵明华,曹文贵,等. 基于弹性半空间理论的土石混填路基压实度确定方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2013,40(12):8-13.  
LUO Hong, ZHAO Ming-hua, CAO Wen-gui, *et al.* A determination method for compactness of soil-rock mixture subgrade based on elastic half-space theory[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(12): 8-13. (In Chinese)
- [3] 油新华,汤劲松. 土石混合体野外水平推剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1537-1540.  
YOU Xin-hua, TANG Jin-song. Research on horizontal push-shear in-situ test of soil and rock-mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1537-1540. (In Chinese)
- [4] LI X, LIAO Q L, HE J M. Insitu tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the three gorges reservoir area, china[J]. Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2005, 41(3): 494-495.
- [5] XU W J, HU R L, TAN R J. Some geomechanical properties of soil-rock mixtures in Tiger-leaping Gorge Area, China [J]. Geotechnique, 2007, 57(3): 255-264.
- [6] 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 intensity character of rock-soil aggregate mixture [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1269-1274. (In Chinese)
- [7] 王江营,曹文贵,张超,等. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1849-1855.  
WANG Jiang-ying, CAO Wen-gui, ZHANG Chao, *et al.* Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1849-1855. (In Chinese)
- [8] 武明. 土石混合非均质填料力学特性试验研究[J]. 公路, 1997(1): 40-42.  
WU Ming. Experimental study on mechanical properties of soil-rock mixture[J]. Highway, 1997(1): 40-42. (In Chinese)
- [9] 柴贺军,阎宗岭,贾学明. 土石混填路基修筑技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 33-52.  
CHAI He-jun, YAN Zong-ling, JIA Xue-ming. Soil-stone high embankment construction[M]. Beijing: China Communications Press, 2009: 33-52. (In Chinese)
- [10] 周勇,刘升传. 高填方路基填料的大型三轴试验研究[J]. 路基工程, 2011, 23(4): 107-109.  
ZHOU Yong, LIU Sheng-chuan. Study on large-scale triaxial test for high filled subgrade filling[J]. Subgrade Engineering, 2011, 23(4): 107-109. (In Chinese)
- [11] 高春玉. 土石混合料路用性能的实验研究[D]. 成都: 四川大学, 2004: 13-68.  
GAO Chun-yu. The laboratory study of road property and quality appraisal on earth and rock mixture[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004: 13-68. (In Chinese)
- [12] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35-55.  
FANG Kai-tai, MA Chang-xing. Orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing: Science Press, 2001: 35-55. (In Chinese)