

文章编号: 1001-4888(2019)03-0413-14

## 浅表风化混杂土石体特定比对物 的力学特性试验研究<sup>\*</sup>

董辉<sup>1,2</sup>, 胡引<sup>1</sup>, 蒋秀姿<sup>1,2</sup>, 罗正东<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105; 2. 岩土力学与工程安全湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411105)

**摘要:** 在土石混合体力学特性研究中, 试验样本通常取自实际工程, 所含物质成分复杂多样, 使得试验结果离散程度较高、可验证性较差, 所得结论尤其是其结构性与宏观力学行为间的关联对工程实际的指导意义体现不足。为此, 从物质组成的角度设计一种特定土石混合体材料: 块石均为未风化的同种岩石, 基质土为矿物组成相同的同种土。该材料物质成分均一、稳定, 具有可验证性。本文以此为比对物试样, 基于室内大型三轴试验, 在验证试验结果可重现性的基础上, 重点分析块石级配、制样干密度、块石分布三种宏观尺度结构性指标对特定土石混合体应力—应变特性、强度特征参数、初始弹性模量的影响规律; 将试验结论与已有研究成果进行了对比; 对昭山残坡积堆积体力学特性进行了推定与验证。结果表明: 特定土石混合体在同一工况下的试验具有较好的可重现性; 粗粒含量较高时, 应力—应变曲线存在锯齿状波动, 并呈现“台阶状”走势; 试验得出两类典型应力—应变曲线; 不同块石空间分布下试样出现不同的变形破坏特征; 细粒含量与 10~40mm 粗粒粒组含量对强度指标影响较大; 试验得出已有研究共性成果之外的结论, 有利于区分试验结果中的现象与规律, 能够为类似工程实践提供更可靠的理论指导。

**关键词:** 土石混合体; 特定比对物; 力学特性; 宏观尺度结构性

**中图分类号:** TU411

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-17-205

### 0 引言

土石混合体是一种介于土体与破碎岩体之间的特殊地质体, 在自然界中广泛分布。它既可以用于诸如土石坝、公路、桥墩等工程的建设, 也会诱发各种地质灾害。明确土石混合体的物性指标是基本要务, 相应试验手段以大型三轴试验为主, 也包括大型直剪试验和原位试验。国内外学者开展大型三轴试验获得的研究结论既有一致性, 也存在差异甚至是矛盾。Shuling Huang 等<sup>[1]</sup>得出粘聚力随含石量增大无规律可循, 其试样取自金坪子滑坡区, 块石为白云石; 而陈志波等<sup>[2]</sup>得出粘聚力随含石量增大近似呈线性减小, 其试样由黏土与花岗岩组成; 刘建锋等<sup>[3]</sup>得出粘聚力随干密度增大几乎不变, 其试样取自渝黔高速公路路堤示范工程, 由无黏性粗粒土和钙泥质胶结细粒砂岩组成, 这与陈志波等<sup>[2]</sup>所得粘聚力随干密度增大近似呈线性增大的结论有较大差异。上述结论差异可能取决于混合体中块石母岩不同, 但这种判断是否正确或者块石岩类差异对土石混合体力学特性量化影响的程度, 目前尚未明确或有专门研究。姜景山等<sup>[4]</sup>从金沙江塔城水电站取样, 试样为砂砾石, 通过试验得出粘聚力随干密度增大而增

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-10-13; 修回日期: 2017-11-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(51108397); 湖南省自然科学基金(2015JJ2136); 湖南省教育厅优秀青年项目基金(16B255)

**通讯作者:** 董辉(1976—), 男, 副教授, 硕士研究生导师。研究方向: 环境地质与地质灾害。Email: donghui@xtu.edu.cn

大,内摩擦角则无明显变化的结果;褚福永等<sup>[5]</sup>从大渡河双江口水电站心墙堆石坝覆盖层取样,试样为砂卵砾石料,测试得出粘聚力随干密度增大无规律可循,内摩擦角则近似线性增大;两者研究对象所属分类基本一致,但结论差异明显,归纳指导性规律将变得无所适从。这种差异性研究成果仍有较多: Haiyang Zhang 等<sup>[6]</sup>从汶川地震形成的崩积土取样,试验得出块石尺寸是控制土石混合体力学特性的重要因素,而 Eldine 等<sup>[7]</sup>发现碎石尺寸对土石混合体力学特性影响不显著,其试样由枫丹白露区的砂土与碎石混合而成;黄斌等<sup>[8]</sup>试验发现内摩擦角随含石量增大近似呈线性增大,其试样取自大浏高速公路路基填筑工程,这与刘建锋等<sup>[3]</sup>所得内摩擦角随含石量增大呈缓慢减小趋势相矛盾;Zuliang Zhong 等<sup>[9]</sup>从重庆铁路运输线某隧道回填土区域取样,试样由泥岩和细粒土组成,发现随含石量由 0% 增大到 50% 左右,抗剪强度无明显增大趋势,这与曹文贵等<sup>[10]</sup>所得抗剪强度随含石量(25%~55%)增大近似线性增大的结论相左,其试样由砾石及砂土/红黏土组成。

上述众多学者的研究工作中,土石混合体取自现场实地工程,其深层次的物性研究结论能够为对应研究区个体提供针对性指导,并揭示工程问题的内因。然而,块石的岩类、风化程度以及基质土矿物成分的差异对力学特性有显著影响,差异的存在增加了鉴别试验结果中的个体现象与本质规律的难度,削弱了提炼普适规律并用于指导类似工程的可行性。此外,试验中多将土石体视为均质体,较少考虑不同工程中浅表层土石体在自然堆沉积环境下的宏观结构性因素对力学行为的影响,即在较浅深度范围内块石空间分布对其力学性质的作用规律。

基于此,设定物质状态理想的土石混合体材料作为研究对象,即块石均为未风化的同类岩石,基质土确保矿物特征相同,且由块石的近源风化残积而成。考虑浅表堆积的成层结构特征,基于室内大型三轴试验,在验证试验结果可重现性的基础上,分析块石级配、制样干密度、块石分布三种宏观尺度结构性指标因素,以及剪切速率、围压两种试验条件因素对理想状态土石混合体应力—应变特性、强度特征参数、初始弹性模量的影响规律;并将试验结论与已有研究成果进行比对,试图获得风化及母岩类别差异对力学行为的定性与定量影响,并初步建立推定浅表风化土石体力学性质的特定比对(标的)物体系。

## 1 力学特性研究方案

### 1.1 土石混合体特定比对物的理想预设

土石混合体物质组成不同,岩性成分不同,其工程性质也有不同<sup>[11]</sup>。现场所取的土石混合体往往成分组成复杂,且块石风化程度不一,必然会对其物理力学性质产生影响,造成试验结果离散程度高,可验证性差。本文选择同一地点未风化的石灰岩(Limestone)块石和碳酸盐岩风化而成的红黏基质土作为物质成分理想状态的特定土石体(图 1,表 1),同时也作为建立浅表风化差异混杂土石体力学性质研究的系列比对物之一。

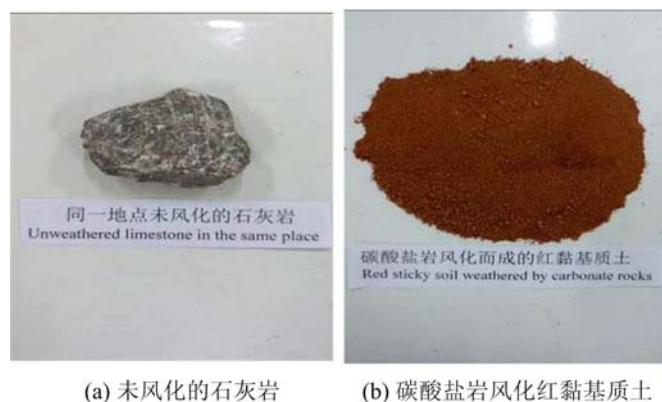


图 1 特定土石体:未风化的石灰岩+碳酸盐岩风化红黏基质土

Fig. 1 Rock of specific soil-rock mixture: unweathered limestone & red sticky soil weathered by carbonate rocks

表 1 特定土石体基本物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical parameters of specific soil-rock mixture

| 红黏<br>基质土  | 最大干<br>密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 最大<br>含水率/%   | 比重        | 液限<br>/% | 塑限<br>/%                    |
|------------|--------------------------------|---------------|-----------|----------|-----------------------------|
|            | 1.81                           | 17.3          | 2.74      | 38.8     | 19.0                        |
| 未风化<br>石灰岩 | 饱和单轴<br>抗压强度<br>/MPa           | 点荷载<br>强度/MPa | 吸水率<br>/% | 饱水<br>系数 | 密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) |
|            | 184.0                          | 9.2           | 0.10      | 0.36     | 2.73                        |

1.2 宏观尺度结构性指标

结构特征是土石混合体的重要特征,对其物理力学特性影响巨大。宏观尺度即指土工单体尺度,本文将用于认识土石混合体的抗剪强度、应力—应变关系等基本力学特性。在土石混合体研究中,由于块石的存在,进行微观尺度试验往往比较困难与复杂,相较而言,从宏观尺度出发则更简单与明晰。本文选取宏观尺度下的结构性指标,可直接或间接反映土石混合体微观或细观尺度下的结构性。

(1)块石级配

从宏观尺度上看,块石级配指的是各种尺寸的块石的含量分布情况,可通过筛析试验确定;从细观尺度上看,块石级配反映的是粗颗粒组成情况,包括粗颗粒粒度、粒径界限。本文试验级配参考了湖南昭山某具有级配代表性的堆积碎石土斜坡,以 5mm 作为土石粒径界限值,配置了三种不同块石级配,详见表 2。

表 2 特定土石混合体级配含量(单位: %)

Tab. 2 Gradation content of specific soil-rock mixture (unit: %)

| 粒径<br>含量<br>编号 | 2~5   | 5~10  | 10~20 | 20~40 | 40~60 | 合计  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|                | mm    | mm    | mm    | mm    | mm    |     |
| G <sub>1</sub> | 21.87 | 19.58 | 17.42 | 20.83 | 20.30 | 100 |
| G <sub>2</sub> | 28.76 | 14.85 | 20.38 | 25.15 | 10.86 | 100 |
| G <sub>3</sub> | 39.28 | 16.98 | 12.51 | 16.84 | 14.39 | 100 |

(2)制样干密度

从宏观尺度上看,制样干密度指的是试样的密实程度,通过控制试样的质量与体积确定;从微观与细观尺度上看,制样干密度对土石混合体的孔隙排列特征、颗粒间的紧密程度有较大的影响。不同密实程度的土石混合体的强度和稳定性差异很大,会对边坡造成不同程度的影响。本次试验分 5 层装样,干密度分别为 1.77g/cm<sup>3</sup> (D<sub>1</sub>)、1.89g/cm<sup>3</sup> (D<sub>2</sub>)、2.02g/cm<sup>3</sup> (D<sub>3</sub>),分别代表土石混合体的松散、天然和密实三种状态。

(3)块石分布

块石分布直接反映了土石混合体粗颗粒的分布情况。在实际工程中浅表层土石体在自然堆沉积环境下会形成多种多样的空间结构特征,不完全是均质体,但大多数试验将土石体简化为均质体进行研究,忽略了其内部块石的分布特征对宏观力学行为的影响,这势必会削弱试验结果指导实际工程的可行性。因此,为使研究成果更好地指导现实工程,有必要考虑块石分布的结构性特征对其力学特性的作用规律。在参考欧阳振华等<sup>[12]</sup>、邵帅等<sup>[13]</sup>对块石空间分布设计思路的基础上,从工程尺度出发,结合试样的制备流程,考虑构建结构复杂度差异明显的三种土石体典型空间结构性,如图 2 所示。其中,S<sub>1</sub> 型块石分布较为均匀,粗、细颗粒相互填充,试样整体性最好,结构最简单;S<sub>2</sub> 型块石分布较为杂乱,试样整体性最差,结构最复杂;S<sub>3</sub> 型块石分布密集,试样整体性一般,结构复杂度居中。

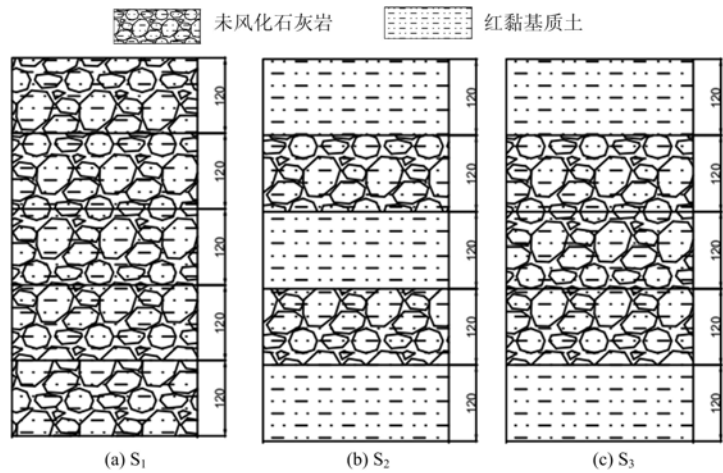


图 2 浅表混杂土石成层的典型空间结构性

Fig. 2 Space structural distribution of shallow hybrid earth-rock

1.3 试验设计及过程

为便于与已有研究成果进行比对,本次试验条件选定 0.5mm/min( $V_1$ )、1.0mm/min( $V_2$ )与 1.5mm/min( $V_3$ )三种剪切速率,200kPa、300kPa 与 400kPa 三种围压。考虑到在土石混合体的概念中含石量应位于 25%~75%范围内<sup>[14]</sup>,选取的含石量偏下限值,为 30%。采用 SZ30-4D 型三轴剪切试验机。试样直径 300mm,高 600mm。在保证室温稳定在 23℃左右条件下,用抽气和水头饱和相结合的方法饱和试样,每个工况分别在三组围压下进行各向等压固结排水剪切试验。试验选用 4 因素 3 水平的正交设计方案  $L_{18}(3^4)$ ,见表 3。

表 3 特定土石比对物力学特性三轴试验工况

Tab. 3 Triaxial test conditions for the mechanical properties of specific soil-rock comparison object

| 工况 | 块石级配  | 制样干密度 | 块石分布  | 剪切速率  |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 1  | $G_1$ | $D_1$ | $S_1$ | $V_1$ |
| 2  | $G_1$ | $D_2$ | $S_2$ | $V_2$ |
| 3  | $G_1$ | $D_3$ | $S_3$ | $V_3$ |
| 4  | $G_2$ | $D_1$ | $S_2$ | $V_3$ |
| 5  | $G_2$ | $D_2$ | $S_3$ | $V_1$ |
| 6  | $G_2$ | $D_3$ | $S_1$ | $V_2$ |
| 7  | $G_3$ | $D_1$ | $S_3$ | $V_2$ |
| 8  | $G_3$ | $D_2$ | $S_1$ | $V_3$ |
| 9  | $G_3$ | $D_3$ | $S_2$ | $V_1$ |

2 特定土石比对物三轴试验力学表征

土石混合体的力学特性极为复杂和特殊,受到许多因素的影响,主要包括岩性、土性、含石量、密实度、块石形状及空间分布等。已有研究多以大型三轴试验为手段进行研究,明确了具体工程实践中研究对象的基本物性特征,为解决工程问题提供了数据基础。本文以理想状态土石混合体规避同种物质的差异性,能够排除物质组成“不理想”对试验结果造成的干扰,有利于区分试验结果中的现象与规律。在以特定土石混合体进行三轴试验的基础上,与已有研究成果印证比对,能更好地提炼其相关规律,为类似工程实践提供更可靠的理论指导。

2.1 试验可重现性验证

为了验证特定土石混合体三轴试验同一工况测试结果的可重现性,按照上述试验方法,将工况 1 在 200kPa 围压下进行两组平行试验。由图 3 可知,两组平行试验的应力—应变关系曲线吻合很好,弹性

模量分别为 170.9 kPa 和 166.7 kPa, 峰值强度分别为 431.9 kPa 和 429.5 kPa。由于试验过程中存在不可避免的误差因素的影响, 可认为两组试验的结果具有较好的一致性。通过对块石和基质土的同—性进行严格的限定, 确保了相同工况测试数据的可重现性。

## 2.2 试验结果分析

### 2.2.1 应力—应变关系曲线特征分析

土石混合体应力—应变特性十分复杂, 是反映变形、强度特征的具体形式。通过对试验所得应力—应变关系曲线进行分析, 发现在不同指标因素组合下, 其关系曲线的差异并不十分显著。

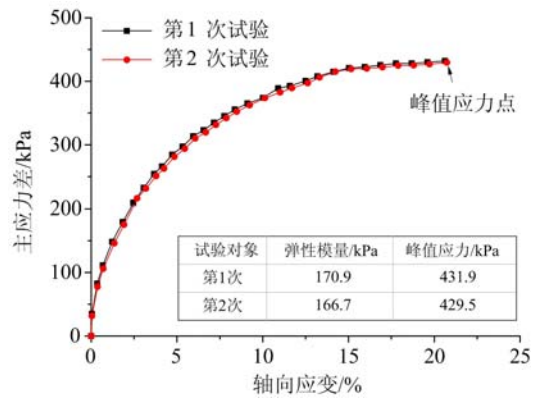


图3 工况1应力—应变关系曲线

Fig. 3 The stress-strain curves of condition 1

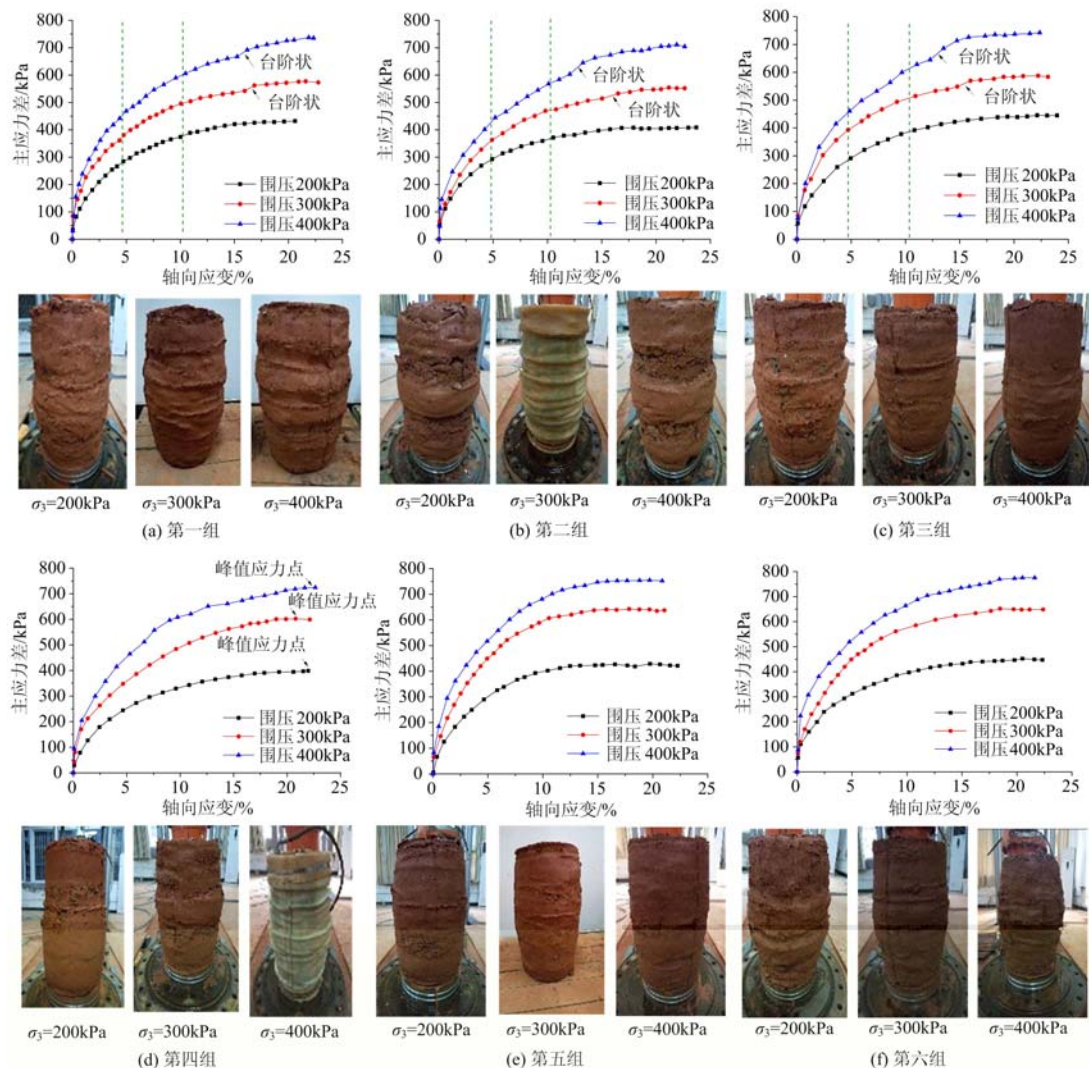


图4 各工况应力—应变关系曲线及试样破坏形态

Fig. 4 Stress-strain curves of each condition and specimen failure pattern

由图4分析可得: (1) 曲线初始阶段较为平滑, 在轴向应变达到5%左右之后, 曲线出现锯齿状波动, 大概在10%左右后, 曲线波动渐缓, 并出现“台阶状”走势。上述规律在级配为G<sub>1</sub>时较为明显。分析原因, 可能是初期加载阶段主要由细粒间的粘结强度承受剪切力, 表现为曲线平滑上升, 随后细粒间的粘结强度逐渐遭到破坏, 粗粒发生滑移、转动, 相互接触, 剪切力逐渐由粗粒间的摩擦与咬合作用承担, 曲



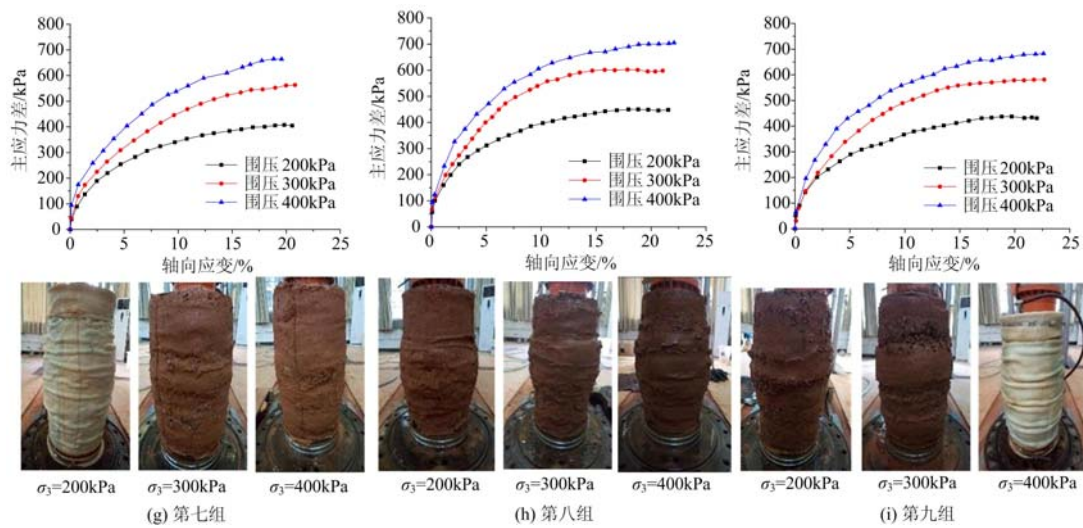


图 4(续) 各工况应力—应变关系曲线及试样破坏形态

Fig. 4 Stress-strain curves of each condition and specimen failure pattern

线出现锯齿状波动,当轴向应变继续增加,粘结强度完全破坏,粗粒间的摩擦与咬合作用不断增强,曲线出现“台阶状”走势,随着粗粒逐渐破碎,曲线将下降,强度将降低;(2)围压较大时,土石混合体的非线性应力—应变曲线较好地符合 Duncan 等人提出的双曲线规律<sup>[15]</sup>;(3)除粗粒本身强度较高外,粗粒含量越大,粗粒间接触的概率越大,随着粗粒位置的调整,局部将形成稳定的骨架结构,剪切力将由粗粒间的骨架结构承担,表现为曲线更陡峭,切线弹性模量更大,更快进入到弹塑性变形阶段;(4)制样干密度越大,孔隙排列越紧密,细粒间接触面积增大,粘结强度增大,同时也会增强粗粒间的咬合与摩擦作用,表现为曲线更陡峭,更快进入到弹塑性变形阶段。当剪切力超过峰值应力,土体变得疏松,强度降低,曲线

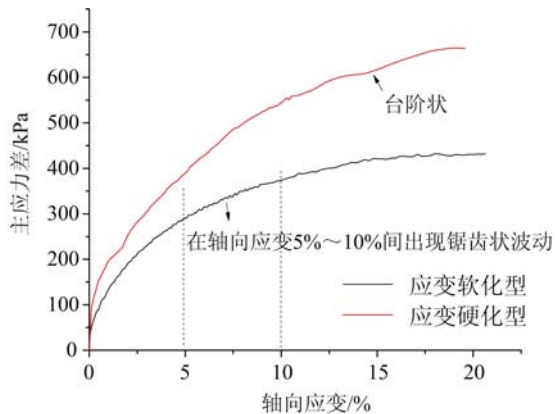


图 5 特定土石比对物典型应力—应变关系曲线

Fig. 5 Typical stress-strain curves of specific soil-rock comparison object

呈应变软化趋势;(5)200kPa 围压下,不同级配的土石混合体抗剪强度差别不大,当围压增大后,级配为  $G_2$  的抗剪强度最大,表明粗细颗粒在  $G_2$  级配时发挥了更好地联合抗剪效应,存在一个最佳级配使得土石混合体具有最佳的力学性能;(6)土石体的变形破坏特征受到块石分布结构特征的显著影响,大致可分为三种破坏模式。当块石分布均匀,试样呈均匀变形破坏特征,中部鼓胀最明显,随后向两端鼓胀程度均匀减弱。当块石按照  $S_2$  型分布,试样呈不均匀变形破坏特征,中间纯土层向外发生小型扩张,而由于块石嵌入到相邻纯土层,造成块石层向内收缩,试样两端无明显变形。当块石按照  $S_3$  型分布,试样近似均匀变形破坏特征,与  $S_1$  相比,变形程度较小;(7)如图 5 所示,试验得出两种典型应力—应变曲线。其一为低围压下应变软化型,曲线较为粗糙,在轴向应变达 5% 左右至 10% 左右,曲线出现锯齿状波动。其二为高围压下应变硬化型,曲线相对平滑,具有明显“台阶状”走势。

### 2.2.2 强度指标特征

粘聚力和内摩擦角决定了土石混合体的强度,也是工程设计的重要参数。对试验数据进行整理分析,采用最小二乘法对包络线进行线性回归求值,得到抗剪强度指标详见表 4。对各因素与粘聚力、内摩擦角之间的关系进行了极差分析,结果详见表 5 和表 6。

由表 5 与表 6 分析:(1)由极差  $R$  值大小可知,各因素对粘聚力与内摩擦角影响的主次顺序为:块

石级配,制样干密度,块石分布,剪切速率;(2)随着细粒含量逐渐增大,粘聚力首先略有减小然后大幅增大,当块石级配取  $G_3$ ,粘聚力为 61.933kPa,增幅达到 82%。内摩擦角则随细粒含量的增大先略微增大,随后快速减小。这体现了颗粒粒度对土石混合体强度指标的影响。粘聚力主要来源于细粒间的粘结,内摩擦角主要来源于粗粒间的摩擦与咬合。10~40mm 粗粒粒组含量增大,将会削弱细粒间的粘结,增强粗粒间的摩擦与咬合,引起粘聚力下降,及内摩擦角上升,所以出现上述粘聚力先减小后增大、内摩擦角先增大后减小的情况。分析可知,细粒粒组(2~5mm)与粗粒粒组(10~40mm)影响较大,且细粒粒组占主导地位;(3)随着制样干密度增大,粘聚力近似呈线性增大,内摩擦角无明显变化。分析原因,可能是干密度增大,使得孔隙排列更紧密,细粒间的接触面积相应增大,导致细粒间的粘结力增强,使得粘聚力上升。干密度对内摩擦角的影响与粗粒含量有关,当粗粒含量达到一定程度,粗颗粒将形成密实的骨架结构,干密度的增大才会对粗颗粒间的摩擦阻力和咬合作用的增强产生显著影响,从而引起内摩擦角上升;(4)当块石分布均匀时,粗细颗粒相互填充,试样整体粘结度高,粘聚力较大。当块石集中分布于剪切带附近时,在轴向荷载作用下,粗粒间始终紧密接触,且部分直接承受剪力作用,使粗粒间的摩擦与咬合作用增强,造成内摩擦角增大。

表 4 抗剪强度指标计算结果  
Tab. 4 Results of shear strength parameters

| 试验工况 | $\sigma_1$ /kPa | $\sigma_3$ /kPa | $c$ /kPa | $\varphi$ /(°) | 试验工况 | $\sigma_1$ /kPa | $\sigma_3$ /kPa | $c$ /kPa | $\varphi$ /(°) |
|------|-----------------|-----------------|----------|----------------|------|-----------------|-----------------|----------|----------------|
| 1    | 631.9           | 200             | 38.9     | 25.66          | 6    | 652.1           | 200             | 42.4     | 26.68          |
|      | 877.1           | 300             |          |                |      | 951.4           | 300             |          |                |
|      | 1137.3          | 400             |          |                |      | 1175.3          | 400             |          |                |
| 2    | 608.5           | 200             | 32.8     | 25.53          | 7    | 607.1           | 200             | 51.8     | 23.14          |
|      | 854.2           | 300             |          |                |      | 863.1           | 300             |          |                |
|      | 1111            | 400             |          |                |      | 1064.1          | 400             |          |                |
| 3    | 645.3           | 200             | 46.4     | 25.21          | 8    | 650.1           | 200             | 68       | 22.89          |
|      | 887.4           | 300             |          |                |      | 902.4           | 300             |          |                |
|      | 1142            | 400             |          |                |      | 1105.3          | 400             |          |                |
| 4    | 598.6           | 200             | 25.1     | 26.81          | 9    | 637.1           | 200             | 66       | 22.40          |
|      | 902.2           | 300             |          |                |      | 881.3           | 300             |          |                |
|      | 1124.6          | 400             |          |                |      | 1082.7          | 400             |          |                |
| 5    | 628.7           | 200             | 34.5     | 26.94          |      |                 |                 |          |                |
|      | 942.4           | 300             |          |                |      |                 |                 |          |                |
|      | 1154.7          | 400             |          |                |      |                 |                 |          |                |

表 5 试样粘聚力极差分析  
Tab. 5 Range analysis of cohesion

| 粘聚力 $c$ /kPa | 块石级配(G) | 制样干密度(D) | 块石分布(S) | 剪切速率(V) |
|--------------|---------|----------|---------|---------|
| 均值 I         | 39.367  | 38.600   | 49.767  | 46.467  |
| 均值 II        | 34.000  | 45.100   | 41.300  | 42.333  |
| 均值 III       | 61.933  | 51.600   | 44.233  | 46.500  |
| 极差 R         | 27.933  | 13.000   | 8.467   | 4.167   |

表 6 试样内摩擦角极差分析  
Tab. 6 Range analysis of internal friction angle

| 内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$ | 块石级配(G) | 制样干密度(D) | 块石分布(S) | 剪切速率(V) |
|---------------------------|---------|----------|---------|---------|
| 均值 I                      | 25.467  | 25.203   | 25.077  | 25.000  |
| 均值 II                     | 26.810  | 25.120   | 24.913  | 25.117  |
| 均值 III                    | 22.810  | 24.763   | 25.097  | 24.970  |
| 极差 R                      | 4.000   | 0.440    | 0.184   | 0.147   |

### 2.2.3 初始弹性模量分析

弹性模量是土石混合体一个重要的力学参数,影响弹性模量的因素多种多样,合理分析主要因素及其产生的特殊影响,能够为弹性模量的测定和选取提供一定依据,而正确测定和选取合适的力学参数,对于实际工程的指导有重要意义。参考 Duncan 和 Chang 等人的研究成果<sup>[15]</sup>,计算出 9 组工况的初始弹性模量,然后求出各指标因素影响下的平均初始弹性模量,详见表 7。由表 7 可得:(1)随着粗粒含量的增加,颗粒粒度整体增大,粗粒间相互接触的概率增大,除了粗粒本身强度高外,克服粗粒间相对运动的阻力增大,土体抵抗变形的能力相应增强,使得初始弹性模量增大;(2)随着制样干密度的增大,孔隙排列更紧密,颗粒间嵌入与咬合作用增强,抵抗外荷载能力增强,表现为初始弹性模量增大;(3)当块石分布较均匀,粗细颗粒能较好地相互填充、接触,颗粒排列紧密,试样整体性较好,初始弹性模量较大。当块石分布杂乱,在剪切带附近较少时,试样整体性最差,剪切面更易形成,随着轴向荷载的增大,块石群将会缓慢嵌入到土层中,造成初始弹性模量减小。综上所述,土石混合体的结构性(颗粒粒度、颗粒分布、孔隙排列)对初始弹性模量的影响显著。

表 7 不同围压下各宏观结构性指标的平均初始弹性模量

Tab. 7 The average initial elastic modulus of macro-scale structural indexes under different confining pressure

| $\sigma_3/\text{kPa}$ | 初始弹性模量 $E_i/\text{kPa}$ |     |     |       |     |     |      |     |     |
|-----------------------|-------------------------|-----|-----|-------|-----|-----|------|-----|-----|
|                       | 块石级配                    |     |     | 制样干密度 |     |     | 块石分布 |     |     |
|                       | I                       | II  | III | I     | II  | III | I    | II  | III |
| 200                   | 186                     | 181 | 176 | 149   | 209 | 215 | 199  | 170 | 174 |
| 300                   | 259                     | 240 | 199 | 207   | 251 | 259 | 252  | 203 | 243 |
| 400                   | 290                     | 278 | 243 | 248   | 293 | 300 | 313  | 248 | 280 |

### 2.3 土石混合体力学特性研究成果比对

为进行成果比对,选取了国内外 20 篇有代表性的文献,试验方法均为室内大型三轴试验,主要针对与研究内容相关部分进行了简要的总结和比对,以期提炼出相关规律,为类似工程实践提供更可靠的理论指导。

#### 2.3.1 干密度对土石混合体力学特性的影响

根据对文献[2—5,17,22,23,25,26]中干密度对土石混合体力学特性的影响规律进行比较和总结,可以得到以下结论。

(1) ①低围压( $<800\text{kPa}$ )下,随着干密度增大,应力—应变曲线应变软化特征越来越明显,在高围压( $\geq 800\text{kPa}$ )下,无论干密度多大或多小,曲线均呈应变硬化特征。这说明土石混合体的软化特性与密实度及围压大小有关。当围压较小,密实度较大时,颗粒间接触紧密,一旦剪切力超过了峰值应力,土体变得疏松,颗粒间接触面积减小,曲线呈应变软化趋势。当围压较大时,颗粒受到较大约束而不能发生移动,剪切力增大使颗粒发生破碎,破碎颗粒填充孔隙,颗粒间接触面积增大,曲线呈应变硬化趋势;②相同围压下,随着干密度增大,曲线初始切线斜率增大,峰值应力增大,达到峰值应力时的应变减小;③随着干密度增大,弹性模量快速增大,且围压越高,弹性模量增幅越大。

(2) 图 6 为干密度与粘聚力、内摩擦角的关系曲线,各文献所得结论存在一定差异,文献[5]的结论



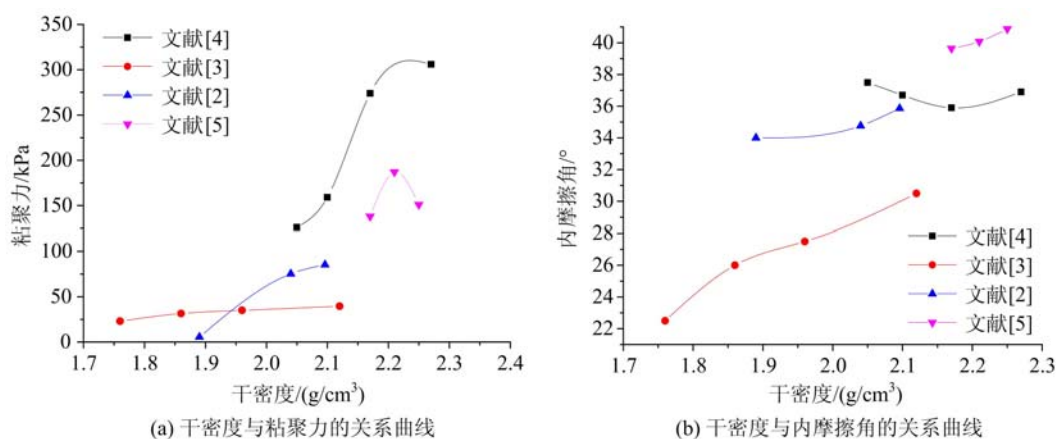


图6 干密度与粘聚力、内摩擦角的关系曲线

Fig. 6 The curves of cohesion, friction angle vs dry density

甚至与其他相矛盾,但秉承“求同存异”的原则,从整体走势可分析出一些共性研究成果:①随着干密度增大,粘聚力近似线性增大;②内摩擦角受干密度影响较小,整体上呈缓慢增大趋势。

(3) 通过与本文结论进行比对,可归纳得出:①干密度对土石混合体力学特性的影响,可归结于孔隙的排列特征及颗粒间的接触面积对其宏观力学特性的影响。当孔隙排列紧密,颗粒间接触面积较大时,对土石混合体的力学性能有强化作用;②颗粒的破碎对土石混合体力学特性的影响受到围压的影响。本文的围压较低( $<800\text{kPa}$ ),颗粒破碎导致土石混合体强度降低,而当围压增加到一定程度( $\geq 800\text{kPa}$ )时,颗粒破碎使得强度增大;③图6中极个别文献所得结论与共性研究成果有所差异,表明该文献在研究过程中得到的可能仅是一种现象,并不能作为规律进行提炼与应用。

### 2.3.2 级配对土石混合体力学特性的影响

根据对文献[1-3,7,9,10,16]中粗粒含量对土石混合体力学特性的影响规律进行比较和总结,可以得到以下结论。

(1) ①随着粗粒含量增大,曲线初始斜率增大,初始弹性模量近似线性增大,峰值应力增大,将更快达到弹塑性阶段。分析原因,除粗粒本身强度更大外,粗粒间接触机会增多,粗粒间的摩擦与咬合作用相应增强,在轴向荷载作用下,粗粒调整位置,在局部易形成稳定的骨架结构;②随着粗粒含量增大,曲线出现锯齿状特征,存在应力不连续跳跃现象。分析原因,粗粒增多,粗粒间接触概率增大,由于粗粒间多以点接触为主,随着轴向荷载不断增大,粗粒间发生应力集中,粗粒被压碎,造成应力释放现象,表现出上述曲线特征。

(2) 图7为粗粒含量与粘聚力、内摩擦角的关系曲线,由图可知各文献所得结论存在一定差异,部分结论存在相矛盾的情况,从整体趋势分析可以得到一些共性研究成果:①随着粗粒含量增大,粘聚力整体呈减小趋势,且粗粒含量为40%~70%时,粘聚力减幅最大;②随着粗粒含量增大,内摩擦角整体呈增大趋势,且粗粒含量为40%~70%时,内摩擦角增幅最大。

(3) 通过与本文结论进行比对,可归纳得出:①对于级配的研究,大多分成细粒( $<5\text{mm}$ )与粗粒( $\geq 5\text{mm}$ )两个粒组考虑,缺乏对不同粒组含量的全面研究。本文研究发现细粒含量对土石混合体强度指标的影响规律,会受10~40mm粗粒粒组含量的干扰。因此,对颗粒级配的研究应该细化到不同粒组的含量中去;②颗粒级配对土石混合体力学特性的影响,可归结于颗粒粒度及粗粒间的骨架效应对其宏观力学特性的影响。当颗粒粒度整体提高,粗粒形成稳定的骨架结构时,对土石混合体的力学性能有强化作用;③根据本文研究发现,粗粒含量越高,土石混合体抗剪强度并非越大,而是存在一个最佳级配使得土石混合体具有最佳的力学性能;④图7中极个别文献所得结论与共性研究成果有所差异,如文献[1]关于粗粒含量与粘聚力的关系曲线,及文献[3]关于粗粒含量与内摩擦角的关系曲线与其他文献的研究成果有较大的不同。这就说明在土石混合体的研究过程中,对试验的现象与规律应该重点区分,不能把某些试验现象作为规律进行总结与应用。

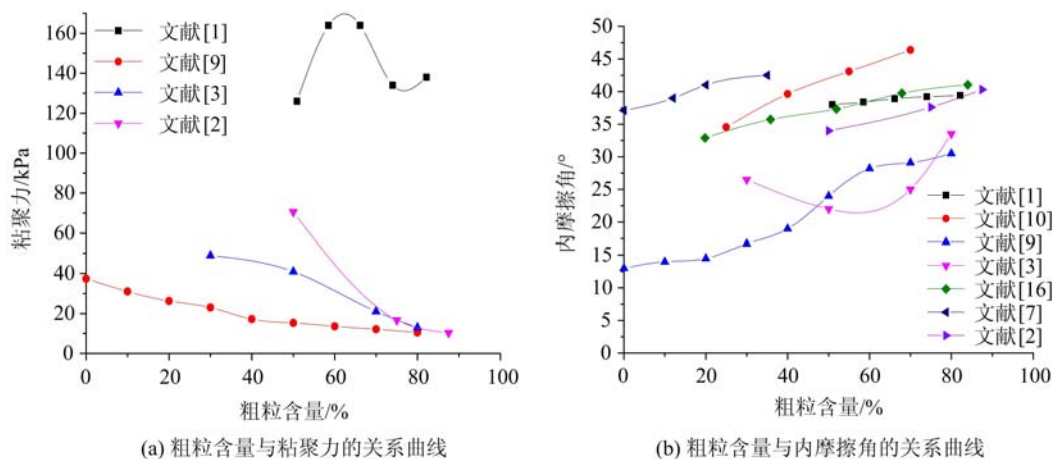


图 7 粗粒含量与粘聚力、内摩擦角的关系曲线

Fig. 7 The curves of cohesion, friction angle vs coarse particle content

### 2.3.3 分析与小结

以上各文献所得结论存在诸多不同,通过与特定土石比对物进行比较,从以下三个方面分析差别产生的原因。

#### (1) 风化差异对土石混合力学性质的影响

在土石混合体三轴试验中,块石的抗压性能对试样力学性质影响较大。风化作用会使岩石的整体性遭到破坏,降低其抗压强度。从应力—应变关系曲线特征分析,当块石风化严重时,曲线将更快达到峰值应力,随着围压的增大,块石更易发生破碎,在高围压下反而发生应变软化现象。于此同时,风化程度也会对研究诸如干密度、含石量等因素与土石混合力学性质间的影响规律产生干扰,如文献[3]母岩为强风化砂岩,使得含石量对内摩擦角增强作用产生“滞后”现象,得出的结论与其他研究有较大不同。因此,若在取样过程中无法保证块石风化程度的一致性,则易对试验产生影响,得到的结论与其他研究成果存在差异,甚至相矛盾。

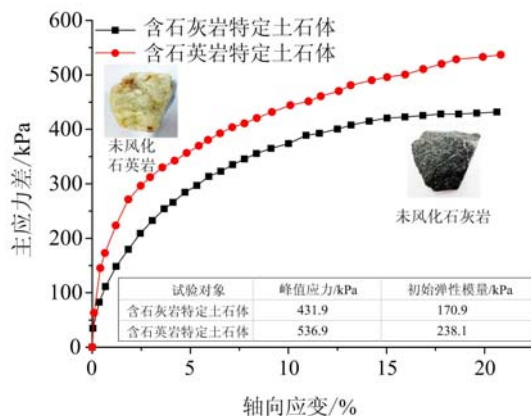


图 8 含石灰岩特定土石体与含石英岩特定土石体的应力—应变关系曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of specific soil-rock mixture composed of limestone and quartzite

#### (2) 块石母岩差异对力学性质的影响

为探究块石母岩差异对力学性质的影响,将特定土石体比对物(石灰岩+黏土)中块石,用石英岩进行替换,未风化石英岩饱和单轴抗压强度为 266MPa,按照相同试验方法,将工况 1 在 200kPa 围压下进行二次试验。由图 8 可知:含石灰岩特定土石体呈弱应变软化趋势,而含石英岩特定土石体在低围压下呈应变硬化趋势,两者峰值应力相差 105kPa,初始弹性模量相差 67.2kPa。其原因可能是,土石体强度主要来源于母岩强度、细粒间粘结力、粗粒间摩擦与咬合效果的综合作用,在保证基质土及块石的形状、表面粗糙度大体一致的情况下,上述试验结果的差异可归因于母岩强度的影响,即石英岩饱和单轴抗压强度比石灰岩高出 82MPa,使得两类土石体的力学性质产生较大差异。

#### (3) 结构差异对力学性质的影响

不同工程中土石体在自然堆沉积环境下可能具有各种各样的结构特征,往往不是均质体,需要考虑块石的空间分布情况对力学性质的影响。从 2.2 节的分析可知,块石分布对土石体抗剪强度指标、变形破坏特征、弹性模量均有重要影响,这里不再赘述。因此,为能更好地指导相关工程实践,需要对所研究

区域土石体的土石分布情况有充分的了解,并在试验中尽可能还原其实际结构形态。

正是由于以上三方面存在差异,使得各学者研究的结果从表现形式上看不尽相同,但在本质上又可以归纳出研究的共性成果。通过与本文研究成果比对,可以发现与已有研究的共性成果具有较好的一致性,并可从土石混合体的结构性出发,对其本质进行统一探讨。针对个别文献得出的不同结论,可以认为仅是研究过程中产生的一种现象,而不是规律。同时,本文得出了共性成果之外的一些结论,既可以作为一种有益的补充,也体现了理想状态土石混合体能为相关工程实践提供更细致、可靠的理论指导。

3 昭山浅表风化土石力学特性的推定与验证

选取湖南昭山斜坡残坡积土石混合体作为研究对象,参考本文研究所得特定土石体基本指标参数,以及风化、母岩差异对力学特性影响的总结,对其力学特性进行初步推定及试验验证。

3.1 昭山残坡积堆积体力学特性的推定

昭山浅表残坡积堆积土石体主要组成为强风化且棱角尖锐的粉质砂岩块石,基质土主要为母岩近源风化土(图 9)。根据表 8 中昭山残坡积堆积体的宏观尺度结构性指标及试验条件指标,选取本文特定土石混合体的所得试验结果作为参照,从定性的角度推断:从初期加载阶段起两者应力—应变关系曲线差异显著,理想物质状态的特定土石混合体的曲线初始斜率更大,随着荷载不断增大,昭山堆积体整体强度偏低,曲线呈弱应变软化趋势。

表 8 昭山残坡积堆积体基本指标参数

Tab. 8 Basic parameters of residual slope accumulation of Zhaoshan

| 粗粒含量/% | 制样干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 块石分布           | 剪切速率/(mm/min) | 围压/kPa |
|--------|----------------------------|----------------|---------------|--------|
| 70     | 1.80                       | S <sub>1</sub> | 1             | 400    |

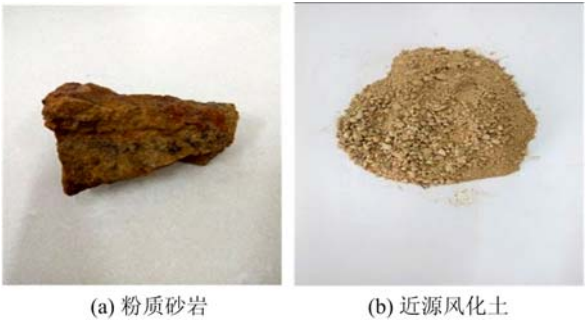


图 9 湖南昭山残坡积土石混合体:  
粉质砂岩及近源风化土

Fig. 9 Soil-rock mixture in Zhaoshan,  
Hunan Province: strong  
weathered silty sandstone and near  
source weathered soil

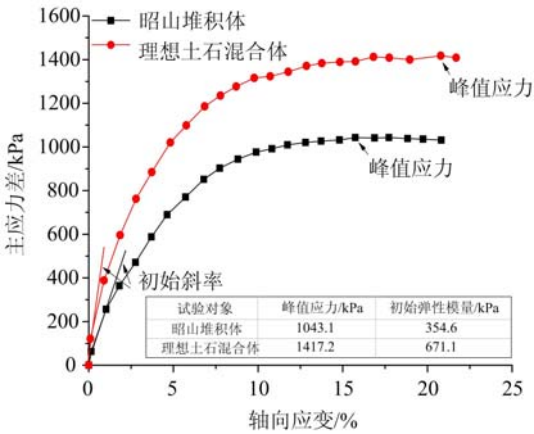


图 10 昭山残坡积体与理想土石  
混合体应力—应变关系曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of Zhaoshan  
accumulation and ideal soil-rock mixture

3.2 昭山残坡积堆积体力学特性的验证

在相同试验条件下对昭山残坡积堆积体进行三轴试验。由图 10 可知:两者应力—应变关系曲线从初始阶段起有较大差异,特定土石混合体曲线更陡峭,随着荷载不断增大,曲线差异更显著,整体强度更大。昭山残坡积堆积体峰值应力达 1043.1kPa,初始弹性模量为 354.6kPa,曲线呈弱应变软化趋势;特定土石混合体峰值应力为 1417.2kPa,初始弹性模量为 671.1kPa,曲线呈弱应变硬化趋势。两者的差异主要是由块石风化程度与母岩差异引起的。昭山堆积体母岩为强风化粉质砂岩,其抗压强度远小于

未风化的石灰岩,导致抗剪强度降低了 374. 1kPa,初始弹性模量降低了 316. 5kPa,应力—应变关系曲线产生较明显的应变软化趋势。

## 4 结 论

(1) 特定土石混合体在同一工况下的试验具有较好的可重复性。通过对块石、基质土的同质性进行严格限定,能够确保在相同工况下测试数据的可重现性。

(2) 当粗粒含量较高时,曲线初始阶段较平滑,随后出现锯齿状波动,最后波动渐缓,并呈现“台阶状”走势。制样干密度越大,曲线越陡峭,进入到弹塑性变形阶段越快,曲线应变软化趋势越明显。当围压较大时,级配为  $G_2$  时的抗剪强度最大,表明粗细颗粒在  $G_2$  级配时发挥了更好的联合抗剪效应,存在一个最佳级配使得土石混合体具有最佳的力学性能。粗粒含量与制样干密度增大,均使初始弹性模量增大。当块石分布均匀时,其初始弹性模量较大,而密集分布在剪切带附近时,初始弹模则较小。

(3) 各宏观尺度结构性指标对粘聚力与内摩擦角影响的主次顺序为:块石级配,制样干密度,块石分布,剪切速率。细粒含量越大,粘聚力越大,内摩擦角越小,10~40mm 粗粒粒组含量增大,会削弱细粒含量的这种影响,但细粒含量对强度指标的影响仍占主导地位。制样干密度对强度指标的影响受粗细颗粒含量的比例限制。当块石分布均匀时,粘聚力较大,当块石集中分布于剪切带附近时,内摩擦角较大。

(4) 宏观尺度结构性指标对土石混合体力学特性的影响规律,反映了土石混合体的结构性(颗粒粒度、颗粒分布、孔隙排列)对其力学特性具有本质的联合影响效应。

(5) 试验结论与已有研究的共性成果具有较好的一致性。同时,本文得出共性成果之外的结论,既有利于区分试验结果中的现象与规律,也体现了理想土石混合体能为相关工程实践提供更细致、可靠的理论指导。

## 参考文献:

- [1] Shuling Huang, Xiuli Ding, Yuting Zhang, et al. Triaxial test and mechanical analysis of rock-soil aggregate sampled from natural sliding mass[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015:1—14.
- [2] 陈志波, 朱俊高. 宽级配砾质土三轴试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6):704—710 (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2010, 38(6):704—710 (in Chinese))
- [3] 刘建锋, 徐进, 高春玉, 等. 土石混合料干密度和粒度的强度效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S1): 3304—3310 (LIU Jianfeng, XU Jin, GAO Chunyu, et al. Study on strength effects of dry density and granularity on earth and rock mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S1):3304—3310 (in Chinese))
- [4] 姜景山, 刘汉龙, 程展林, 等. 密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8):46—50 (JIANG Jingshan, LIU Hanlong, CHENG Zhanlin, et al. Influences of density and confining pressure on mechanical properties for coarse-grained soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(8):46—50 (in Chinese))
- [5] 褚福永, 朱俊高. 砂卵石料强度及变形大型三轴试验研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(6):209—214 (CHU Fuyong, ZHU Jungao. Large-scale triaxial test study of strength and deformation behaviors of sand-grained materials[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(6):209—214 (in Chinese))
- [6] Haiyang Zhang, Wenjie Xu, Yuzhen Yu. Triaxial tests of soil-rock mixtures with different rock block distributions [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(1):44—56.
- [7] Eldine B S, Dupla J C, Frank R, et al. Mechanical characterization of matrix coarsegrained soils with a large-sized triaxial device[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4):425—438.
- [8] 黄斌, 曾宪营. 含石量对大浏高速土石混合体强度影响研究[J]. 公路与汽运, 2011, 148:107—109 (HUANG Bin, ZENG Xianying. Study on influence of stone content on strength of earth-rock mixture of Da-Liu expressway [J]. Highways & Automotive Applications, 2011, 148:107—109 (in Chinese))

- [9] Zuliang Zhong, Jian Xu, Xinrong Liu, et al. Large-scale triaxial tests on deformation and mechanical behavior of soil-rock mixture in mountain area[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016(21):10325—10336.
- [10] 曹文贵, 黄文健, 王江营, 等. 土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3):142—148 (CAO Wengui, HUANG Wenjian, WANG Jiangying, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and intensity characteristics of soil-rock aggregate mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3):142—148 (in Chinese))
- [11] 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 Zuliang, TU Yiliang, HE Xiaoyong, et al. Research progress on physical index and strength characteristics of bimsoils[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4):1135—1144 (in Chinese))
- [12] 欧阳振华, 李世海, 戴志胜. 块石对土石混合体力学性能的影响研究[J]. 实验力学, 2010, 25(1):61—67 (OUYANG Zhenhua, LI Shihai, DAI Zhisheng. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1):61—67 (in Chinese))
- [13] 邵帅, 季顺迎. 块石空间分布对土石混合体边坡稳定性的影响[J]. 工程力学, 2014, 31(2):177—183 (SHAO Shuai, JI Shunying. Effects of rock spatial distributions on stability of rock-soil-mixture slope[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2):177—183 (in Chinese))
- [14] 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(4):50—56, 70 (XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009(4):50—56, 70 (in Chinese))
- [15] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. ASCE, JSMFD, 1970, 96(5):1629—1652.
- [16] 石熊, 张家生, 孟飞, 等. 改良粗粒土填料大型三轴试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(2):645—652 (SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Large-scale triaxial test on modified coarse-grained fillers [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(2):645—652 (in Chinese))
- [17] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7):1104—1111 (LIU Mengcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of rockfill materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7):1104—1111 (in Chinese))
- [18] 田堪良, 张慧莉, 骆亚生. 堆石料的剪切强度与应力—应变特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4):657—661 (TIAN Kanliang, ZHANG Huili, LUO Yasheng. Shear strength and stress-strain properties of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4):657—661 (in Chinese))
- [19] 杨松, 程勇俊, 吴珺华, 等. 粗粒土粒径变化对强度和压缩特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2014, 29(4):562—565 (YANG Song, CHENG Yongjun, WU Junhua, et al. Influence of coarse granular soil particle size on the strength and the compression characteristic[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 29(4):562—565 (in Chinese))
- [20] 夏加国, 胡瑞林, 祁生文, 等. 含超径颗粒土石混合体的大型三轴剪切试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8):2031—2039 (XIA Jiaguo, HU Ruilin, QI Shengwen, et al. Research on large-scale triaxial shear testing of soil rock mixtures containing oversized particles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8):2031—2039 (in Chinese))
- [21] 徐志华, 孙大伟, 张国栋. 堆石料应力应变特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6):1—8 (XU Zhihua, SUN Dawei, ZHANG Guodong. Stress-strain behavior of rockfill in large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6):1—8 (in Chinese))
- [22] 姜景山, 程展林, 左永振, 等. 粗粒土剪胀性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11):3129—3138 (JIANG Jingshan, CHENG Zhanlin, ZUO Yongzhen, et al. Dilatancy of coarse-grained soil in large-scale triaxial tests study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11):3129—3138 (in Chinese))
- [23] 郑瑞华, 张建民, 张嘎, 等. 积石峡面板堆石坝材料大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1):184—188 (ZHENG Ruihua, ZHANG Jianmin, ZHANG Ga, et al. Large-scale triaxial tests on rockfills of Jishixia CFRD[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1):184—188 (in Chinese))



- [24] Yang Xiao, Asce S M, Hanlong Liu, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. I: influences of density and pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(12):1–16.
- [25] 冷伍明, 梅慧浩, 聂如松, 等. 重载铁路基床粗粒土填料的静力特性研究[J]. 铁道工程学报, 2016(11):23–28, 50 (LENG Wuming, MEI Huihao, NIE Rusong, et al. Static characteristic research on coarse grained soil filling in heavy haul railway subgrade bed[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016(11):23–28, 50 (in Chinese))
- [26] Charles J A, Watts K S. The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill[J]. Gkotechnique, 1980, 30(4):353–367.

## Experimental study of mechanical properties of specific comparison object for shallow weathered mixed soil and rock

DONG Hui<sup>1,2</sup>, HU Yin<sup>1</sup>, JIANG Xiu-zi<sup>1,2</sup>, LUO Zheng-dong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Hunan, Xiangtan 411105, China;

2. Hunan Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** In the study of mechanical properties of soil-rock mixture, the samples are usually taken from practical engineering, and the material composition is complex and diverse, which makes the experimental results more discrete and less verifiable. The obtained conclusions, especially the relationship between its structure and macroscopic mechanical behavior, are insufficient in guiding engineering practice. Therefore, from the point of view of material composition, a special mixture of soil and rock is designed. Its rock block is the same rock with unweathered rock, and the matrix soil is the same soil with the same mineral composition. The material is homogeneous, stable and verifiable. In this paper, taking this specific comparison object as samples, based on lab large-scale triaxial tests and verification of reproducibility of test results, the influence laws of stone gradation, dry density and stone distribution on the stress-strain behavior, strength characteristic parameter and initial elastic modulus were explored. The test conclusions were compared with the existing research results. The mechanical properties of the Zhaoshan residual-slope accumulation were estimated and verified. The results showed: The test of the specific soil-rock mixture under the same conditions had good reproducibility. When the coarse grain content was high, the stress-strain curve had a jagged fluctuation and ladder-like trend. Two typical stress-strain curves were obtained. The specimen had different deformation and damage characteristics under different stone distribution. The content of fine particles and the content of 10~40mm coarse grained group had a great influence on the strength index. Conclusions different from common results, were conducive to distinguish between the phenomena and laws in the test results, but also provided more reliable theoretical guidance for similar engineering practice.

**Keywords:** soil-rock mixture; specific comparison object; mechanical properties; macro-scale structural indicators