•土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400237

本刊网刊

含石量及块石球度对土石混合体剪切特性的影响

刘宝臣[1,2],张　辉[1,2],林志南[1,2*],王家全[1,2]

(1.广西科技大学 土木与建筑工程学院,广西 柳州 545000;2.广西壮族自治区岩土灾变与生态治理工程研究中心,广西 柳州 545000)

摘　要:为探究土石混合体在颗粒球度、含石量、压实度等多因素影响下的剪切力学性能演变规律,本文使用自主研发的颗粒加工设备加工4种不同球度颗粒,并利用DW1280型大型直剪测试系统开展了24组不同含石量、压实度、球度的土石混合料的大型室内直剪试验。试验结果表明:1)随球度S增大,颗粒棱角逐渐减少,土石混合体的抗剪强度逐步从颗粒间咬合嵌固及错动摩擦共同提供转变为以错动摩擦为主,土石混合体的抗剪强度、剪胀量及黏聚力c随之降低,内摩擦角呈现先增大后减小的趋势,在球度$S=0.953$时,内摩擦角取得最大值55.22°,并且,内摩擦角φ与球度S的关系可用指数函数描述。2)当颗粒形状及压实度相同的情况下,随含石量从60%增加至100%,土石混合体的内部结构发生变化,剪切应力–剪切位移曲线由应变软化转为应变硬化,抗剪强度、内摩擦角φ均呈现先增大后减小的趋势,而黏聚力c则在含石量大于80%后基本保持不变;在剪切过程中颗粒发生了翻转、破碎,试验曲线出现“波动跳跃”现象。3)随压实度不断提高,土、石颗粒间的咬合嵌固效果逐步增强,试样的抗剪强度显著提升,但抗剪强度的增大幅度逐渐降低。研究成果对实际工程中土石混合体的颗粒形状选择具有重要意义,有助于更准确地控制土石混合体的力学性能,确保工程的安全性和稳定性。

关键词:颗粒形状;土石混合体;抗剪强度;含石量;压实度

中图分类号:TD313　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0176-12

土石混合体(S–RM)作为一种介于土和石之间的特殊工程材料,由明显高于土体强度的块石、粒径不同的土体颗粒以及其中的孔隙组成,是一种构成含量不均匀的散体介质[1],且广泛分布于自然界(如斜坡、滑坡坝、地基等)。其中,岩石颗粒形状对结构强度和承载能力具有重要影响。因此,深入研究颗粒形状如何影响土石混合体的抗剪强度,对于了解颗粒材料的内部强度和空间变异性至关重要。

颗粒形状是影响土石混合体强度的重要因素之一。已有研究表明:数值模拟在针对颗粒形状进行表征时所需方法太过繁琐且需要大量参数计算来确定某一指标[2–5];在室内试验中,针对颗粒形状的研究往往难以将颗粒形状的特征变量独立出来。因此,至今尚没有确切的研究结果表明颗粒形状因素会对试验结果产生怎样的影响[6]。在实际工程中,颗粒形状各异且表面凹凸不平,为形状的定量分析带来了巨大的挑战。Carrasco等[7]指出块石在缩放过程中不考虑颗粒形状,仅基于截断或平行粒度分布的常见小尺度方法,可能会导致剪切强度过高或过低。尽管数值模拟方法在研究过程中需要对某些变量进行假设推导以简化模拟过程,但它仍是一种重要的研究手段。华文俊等[8]通过PFC数值模拟探究了颗粒形状参数对于堆积体强度指标的影响。涂义亮等[9]通过数值模拟及室内试验研究了块石形状随球形度变化对土石混合体的黏聚力、摩擦角及试样抗剪强度的影响。然而,数值模拟相较于传统室内试验而言并不具有很强的信服力。传统的室内试验能更真实、直接地反映出某些宏观现象[10]。吴杨等[11]对不同形状炉渣颗粒开展一系列试验,通过采用多形状因素指

收稿日期:2024 – 04 – 07　**修回日期**2024 – 06 – 10　**网络出版日期:**2024 – 06 – 13

基金项目:广西自然科学基金项目(2023GXNSFAA026185;2021GXNSFBA196043);国家自然科学基金项目(41962017);广西科技大学博士基金项目(校科博19Z42);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人才[2020]6号);广西科技大学研究生教育创新计划项目(GKYC202464)

作者简介:刘宝臣(1968—),男,教授. 研究方向:特殊岩土体特性. E-mail:bc0608@163.com

* **通信作者:**林志南,副教授,E-mail:zhinan_lin@gxust.edu.cn

标，建立了多因素临界状态经验公式。赵书辉等[12]通过三维扫描及传统室内试验探究了不同长径比、圆度及扁平度颗粒对于抗剪强度的影响。为探究颗粒形状对土石混合体抗剪强度的影响，试验中，需采用形状统一且形状特征被参数量化的颗粒。然而，目前众多学者对于颗粒形状的研究受限于无法制备大小、形状均相同的岩石颗粒，因此，常采用规则玻璃球等代替物进行研究[13]。综上，目前关于颗粒形状的研究主要集中在数值模拟、不规则块石及玻璃珠等方面，而使用统一形状的岩石颗粒进行室内试验的研究仍较为少见。

因此，在已有研究基础上，本文进一步探索了颗粒形状对土石混合体宏观剪切特性的影响。为此，利用自主研发的颗粒加工设备，批量制备了大小一致、不同形状的岩石颗粒。以此开展了多因素（颗粒形状、含石量、压实度）影响下的大型室内直剪试验，从而揭示颗粒形状对土石混合体的宏观剪切特性影响机制。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

试验所用材料均来源于实际工程，主要包括花岗岩碎石、砂。制备了 4 种不同形状的颗粒，这 4 种颗粒包括正六面体（形状 1）、球体（形状 2），以及两种不同球度的颗粒（形状 3、4）。不同含石量试样的级配曲线如图 1 所示。根据《土工试验方法标准》[14]，将最大颗粒尺寸定为 10 mm[15–16]，并取 5 mm 为区别土、石颗粒的阈值。

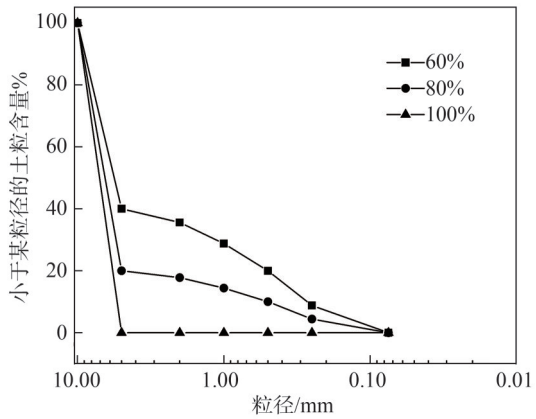


图 1　不同含石量试样的级配曲线

Fig. 1　Gradation curves of specimens with different stone contents

图 2 为本文制备的 4 种不同形状的花岗岩颗粒。不同球度的花岗岩颗粒的制备步骤如下：

1）将现场取回的花岗岩块石统一切割成尺寸（长×宽×高）为 190 mm×190 mm×10 mm 的石板。随后，将这些石板依次通过切条机和切粒机进行精确的切条和切粒处理，最终得到如图 2(a) 所示形状 1 的正六面体颗粒。

2）为了制备不同球度的颗粒，首先，将形状 1 的正六面体颗粒装填至倒角机中，去除明显的棱角，得到形状 2（图 2(b)）的颗粒。在此基础上，将形状 2 的颗粒装入粗磨机中进一步加工，得到形状 3（图 2(c)）的颗粒。最后，将形状 3 的颗粒放入精磨机中进行加工，直至其成为规则的球体（图 2(d)），即形状 4 的颗粒，这一系列的加工步骤确保可得到具有不同球度的花岗岩颗粒。

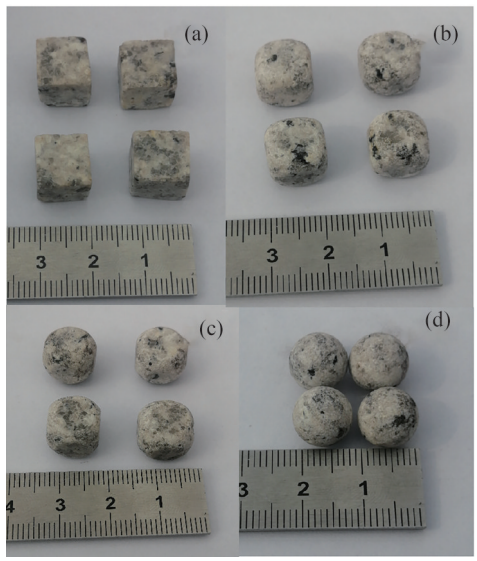


图 2　不同球度花岗岩颗粒

Fig. 2　Granite particles of different shapes

1.2　试验设备

本次试验在 DW1280 型大型直剪测试系统上完成（图 3），该设备可开展粗粒土及土与土工合成材料的大型直剪及拉拔试验。仪器主要由上下剪切盒、水平加载装置、法向力液压系统和数据采集系统 4 部分组成。上剪切盒的尺寸（长×宽×高）为 600 mm×400 mm×400 mm，下剪切盒的尺寸（长×宽×高）为 800 mm×400 mm×400 mm。法向加载装置应力范围为 0～300 kPa，水平加载装置通过计算机控制可在 0.2～20.0 mm/min 内灵活调节剪切速率，试验最大剪切位移限制值为 120 mm。直剪仪安装有一个水平位移传感器和两个竖向位移传感器（LVDT），传感器量程为 100 mm，其精度为 0.001 mm。

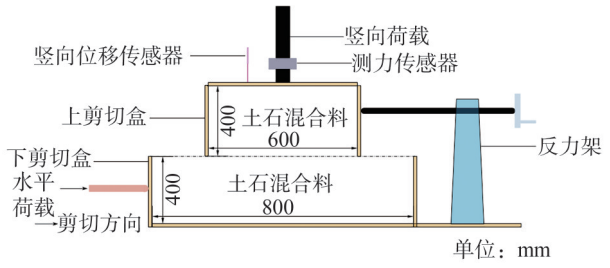


图 3　直剪试验设备

Fig. 3　Direct shear test equipment

1.3　试验方法及步骤

1）将土石混合料装填进下剪切盒内，并按照分层填筑[17]的方式进行压实，在剪切盒内分 3 层进行填筑，每

层填筑完成后，用小型电动平板进行夯实，以确保物料密实均匀，并进行刮毛处理，防止物料出现分层现象。

2）使用磁性表座将竖向位移传感器固定于竖向反力框架上，并将竖向位移传感器设置于上剪切盒压力顶板上，以测量在剪切时压力顶板相对于上剪切盒的竖向剪胀位移。

3）装样完成后，降下竖向压力顶板进行预压，调节法向应力至目标值（50、100、150 kPa）后稳定 30 min，剪切速度设定为 2 mm/min，当位移加载至 80 mm 时停止加载（达到仪器设定的水平位移警戒值）。

具体的直剪试验方案如表 1 所示。

表 1　直剪试验方案

Tab. 1　Direct shear test scheme

含石量/%	压实度/%	颗粒形状编号	法向应力/kPa
60	90	形状 1（图 2(a)）	50、100、150
80	90	形状 1（图 2(a)）	
100	90	形状 1（图 2(a)）	
80	86	形状 1（图 2(a)）	
80	94	形状 1（图 2(a)）	
80	90	形状 2（图 2(b)）	
80	90	形状 3（图 2(c)）	
80	90	形状 4（图 2(d)）	

2　试验结果与讨论

2.1　颗粒球度对土石混合体强度参数的影响

由图 2 所示的 4 种不同形状花岗岩颗粒的高清图像可以直观看出花岗岩颗粒形状由正六面体到球体过程中的明显差异。为了准确量化这些差异，采用式（1）中球度 S 作为量化指标[11]。虽然，已有研究多通过计算样本数据库的平均值来表征颗粒样貌[11,18]，但是，鉴于本文中的花岗岩颗粒是采用统一标尺加工而成，因此，无需采用取平均值的方式进行量化。

$$S=\frac{P_{\mathrm{C}}}{P} \tag{1}$$

式中，P 为颗粒周长，P_{C} 为颗粒等效面积的圆周长。球度 S 逐渐从 0.886 趋向 1.000 代表颗粒逐步从正六面体向球体变化；每种形状颗粒的球度如表 2 所示。

表 2　不同形状花岗岩颗粒的球度

Tab. 2　Granite particle sphericity of different shapes

球度	形状 1	形状 2	形状 3	形状 4
S	0.886	0.953	0.981	1.000

图 4 为 80% 含石量、90% 压实度的不同球度颗粒组的剪切应力–剪切位移曲线。由图 4 可看出：当法向应力分别为 50、100、150 kPa 时，不同球度颗粒组的剪切应力曲线在初始阶段的斜率分别为 11.05、13.19、12.72，基本保持一致。随剪切位移增大，试样进入剪密阶段（Ⅰ），此时剪切应力迅速增大，并在达到峰值后逐渐衰减，进入应变软化阶段（Ⅱ）。在剪切过程中，抗剪强度主要由土、石间的嵌固作用及错动摩擦共同提供。随颗粒球度 S 逐渐增大，主要抗剪强度由嵌固作用主导逐渐转变为错动摩擦主导。随球度 S 进一步增大，剪切应力–剪切位移曲线的波动有所缓解。这说明颗粒棱角越明显，在翻越、转动、破碎等过程中所产生的能量波动就越大。这一结果与涂义亮等[9]通过数值模拟从细观力链变化角度得出的规律一致。

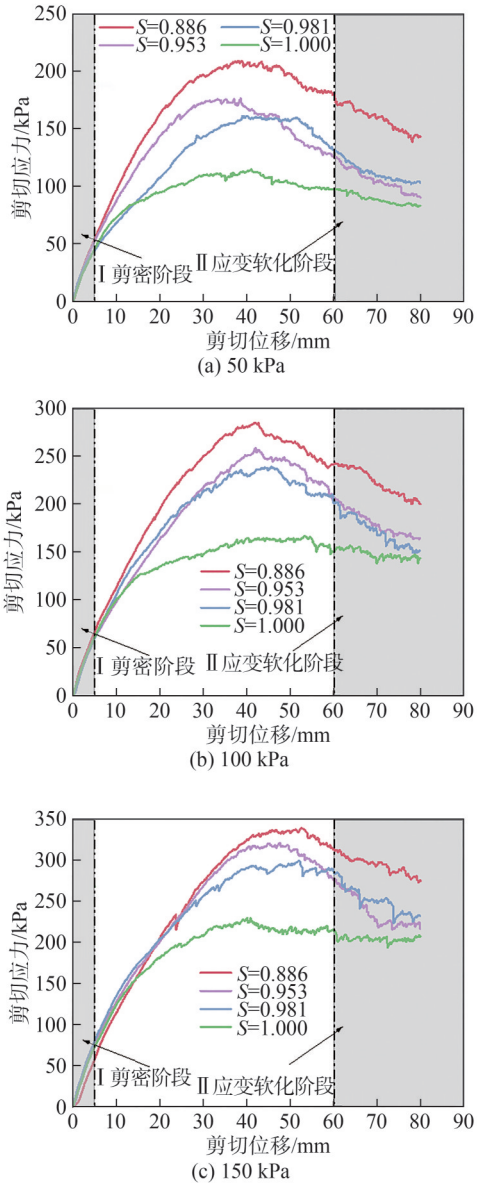


图 4　不同球度颗粒组的剪切应力–剪切位移曲线

Fig. 4　Shear stress–shear displacement curves of different sphericity particle groups

图 5 为不同球度下颗粒组的应力峰值随法向应力变化曲线。由图 5 可见：在不同法向应力条件下，当球度 $S=0.886$ 时，其应力峰值明显高于其他 3 个球度的应力

值[3]。从整体趋势来看，应力峰值随球度的增大而减小。以球度S=0.886的剪切应力峰值为基准，当球度增加至0.953时，土石混合体试样的应力峰值分别下降15.56%、9.23%和5.43%；当球度继续增加至0.981时，降幅分别为22.84%、16.06%和11.80%；当球度增加至1.000时，应力峰值的降幅显著增大，分别为45.09%、41.50%和32.24%。

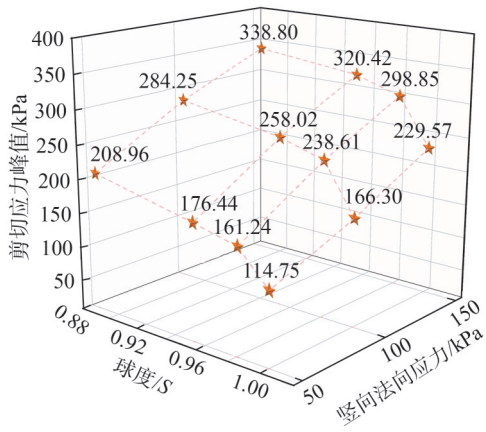


图5　不同球度下颗粒组的应力峰值随法向应力变化曲线

Fig. 5　Variation curves of peak stress of particle group with normal stress under different sphericity

上述现象的根本原因是颗粒间存在相互作用机制。当球度较小时，试样的抗剪强度主要依赖于内部颗粒之间的嵌固作用。当球度为1.000时，颗粒间无法形成有效的嵌固骨架[9]。此时，抗剪强度转而依赖于颗粒间的错动摩擦，使土石混合体试样的抗剪强度显著下降。

根据上述剪切–位移曲线分析可知，土石混合体试样的破坏过程可划分为不同阶段。从剪密阶段开始，试样的剪切–位移曲线呈非线性增大，说明土石混合体在直剪作用下存在损伤演化过程。通过损伤变量τ_d[19]可以直接反映土石混合体在直剪作用下的损伤演化过程，τ_d的计算式为：

$$\begin{cases}\tau_d=k_s u, F<0;\\ \tau_d=(k_s u-\tau_r)\exp\left[-\left(\dfrac{F}{F_0}\right)^m\right]+\tau_r, F\geq 0\end{cases}\tag{2}$$

式中，k_s为土石混合体剪切刚度，u为剪切相对位移，F为微元体强度，τ_r为剪切残余强度，m、F_0为分布参数。并且，将土石混合体的破坏视为一种连续的损伤过程，在直剪作用下的损伤模型为：

$$\begin{cases}F_0=F_f\left[\ln\left(\dfrac{k_s u_f-\tau_r}{\tau_f-\tau_r}\right)\right]^{-1/m},\\ F_f=k_s u_f-(c+\sigma\tan\varphi),\\ m=F_f\left[(k_s u_f-\tau_r)\ln\left(\dfrac{k_s u_f-\tau_r}{\tau_f-\tau_r}\right)\right]^{-1}\end{cases}\tag{3}$$

式中，F_f为剪切试验曲线峰值点处的微元体强度，τ_f为剪切试验曲线峰值点处的剪切应力，u_f为剪切试验曲线峰值点处的剪切位移，φ为内摩擦角，σ为法向应力，c为黏聚力。

通过应用式(2)对图4中不同球度颗粒组的12组试验剪切强度进行预测，对比试验结果与理论结果，如图6所示。由图6可知，本文试验所得结果与式(2)所得结果基本吻合，验证了本文试验模型的准确性，同时，证明该模型能够较好地模拟土石混合体的剪切过程。

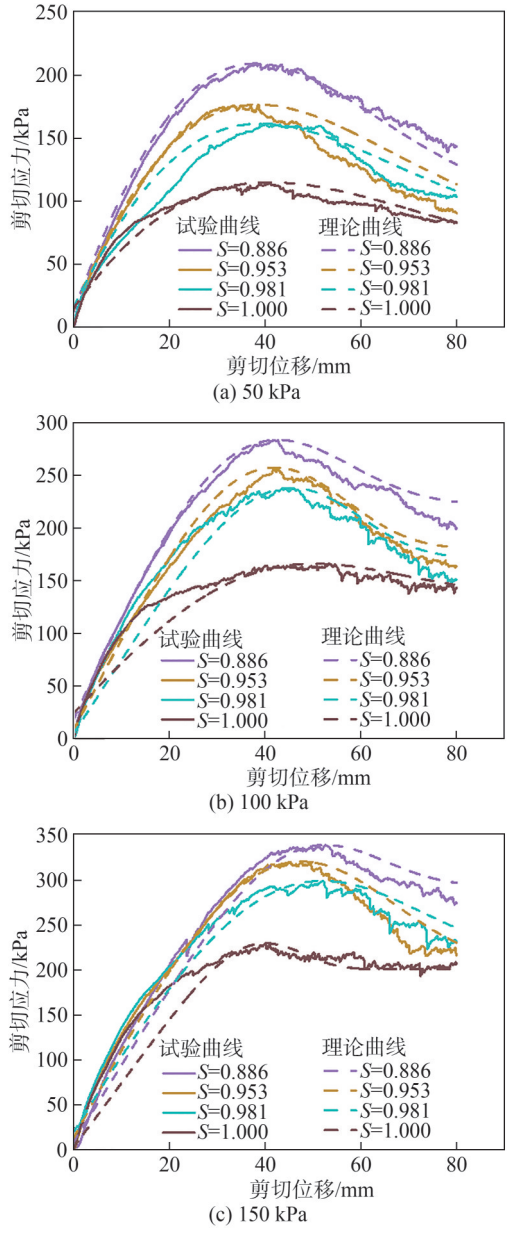


图6　不同球度的理论与试验的剪切强度对比曲线

Fig. 6　Comparison curves of shear strength between theoretical and experimental values for different sphericities

图7为不同球度下颗粒组的水平位移与竖向位移关系曲线。图7中，当竖向位移为负值时，代表试样

发生剪胀。

由图 7 可知：随颗粒球度逐渐增大，在同一法向应力下，颗粒组的竖向位移呈现出不同程度的减小。其原因是，随球度的增大，颗粒棱角逐渐减少，颗粒间的接触关系逐步由点-面接触转变为点-点接触。这种接触方式的转变导致颗粒间的咬合作用逐渐减弱，荷载力链的传导效率下降，从而使竖向传递变得更加困难[9]，试样剪胀特性明显受到削弱。

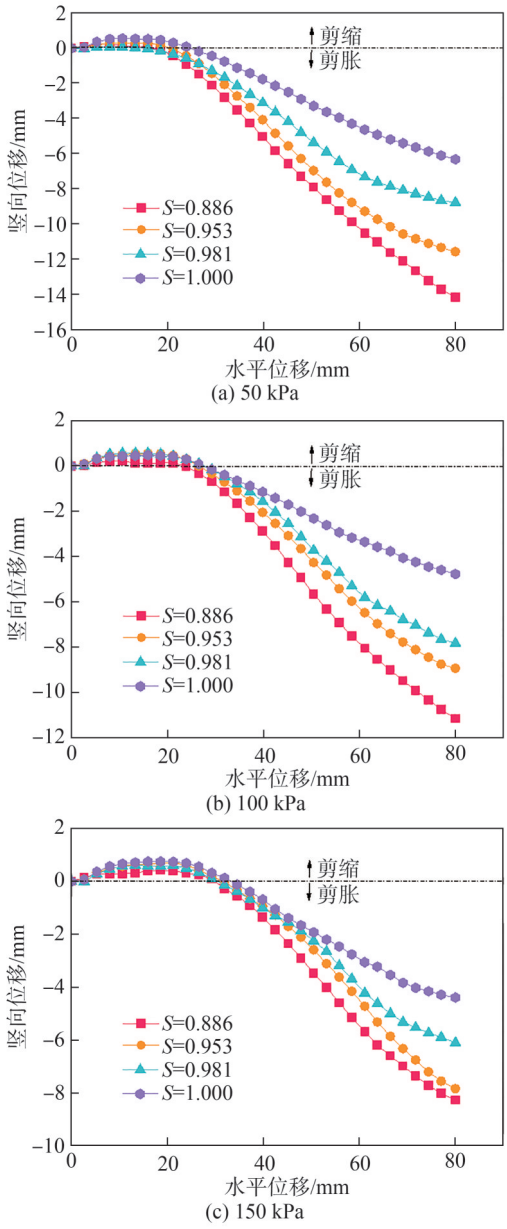


图 7　不同球度的颗粒组水平-竖直位移关系曲线

Fig. 7　Horizontal-vertical displacement relationship curves of particle groups with different sphericities

截取图 4 中不同球度颗粒组剪切曲线的峰值强度进行拟合，其 R^2 均大于 0.98，拟合效果良好，具体拟合曲线如图 8 所示。

由图 8 可直观看出：试样的抗剪强度随颗粒球度 S 的增大而减小；反之，随法向应力的增大而增大。因为随球度 S 的增大，试样内部颗粒骨架结构发生“嵌固失稳”现象，使形状 1 至形状 4 的不同球度土石混合体试样的抗剪强度下降。

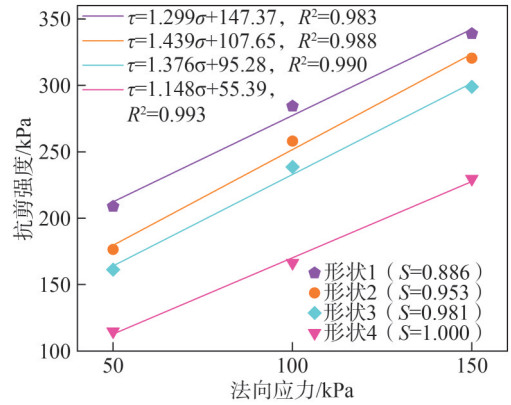


图 8　不同颗粒球度下土石混合体的参数拟合曲线

Fig. 8　Parameter fitting curves for soil-rock mixtures with different particle sphericity

通过对图 8 中不同颗粒球度下土石混合体的抗剪强度进行拟合，得到颗粒球度与内摩擦角 φ、黏聚力 c 的关系曲线，如图 9 所示。

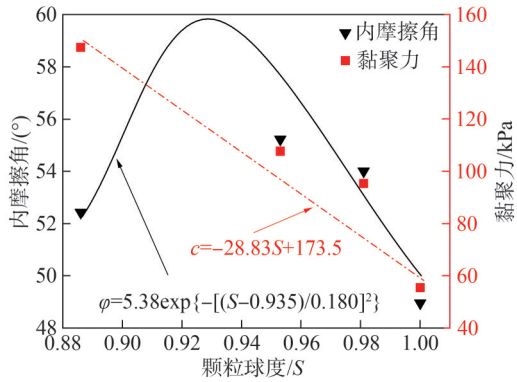


图 9　颗粒组的内摩擦角、黏聚力与颗粒球度的关系曲线

Fig. 9　Relationship curves of internal friction angle, cohesion and particle sphericity of particle group

使用 Gauss 拟合公式(4)对图 9 中内摩擦角进行拟合。

$$\varphi = a\exp\{-[(S-b)/d]^2\} \tag{4}$$

式中，φ 为内摩擦角，a、b、d 为拟合参数，$a=55.38$，$b=0.935$，$d=0.180$。

由式(4)及图 9 中内摩擦角变化曲线可知，内摩擦角随颗粒球度增大呈现先增大后减小的变化规律。究其原因，主要是因为形状 1 的正六面体颗粒骨架结构稳定，因此，法向应力增大对抗剪强度的影响相对较小。然而，随颗粒形状从形状 2 到形状 3 逐渐趋近于球体，颗粒间的嵌固效果逐渐减弱，导致抗剪强度相应下降。尽管法向应力的增大可以在一定程度上强化颗粒间的嵌固行为，使得抗剪强度增大[20]，但随颗粒球

度的进一步增大，法向应力的增强效果变得有限，无法有效增强颗粒间的嵌固作用，从而导致抗剪强度逐渐下降。这一规律也在图 8 中得到了直观体现，不同球度颗粒组拟合曲线斜率（1.299、1.439、1.376、1.148），直观反映出 4 种球度颗粒下抗剪强度的增大幅度会随法向应力的增大而呈现先增后减的趋势，导致内摩擦角随之呈现先增后减的趋势。

图 9 中，黏聚力与球度的拟合公式为：

$$c=-725.1S+793.9 \tag{5}$$

通过式（5）及图 9 中黏聚力变化曲线可以看出，黏聚力随颗粒球度的增大而减小，其颗粒球度增大，表观棱角减少，颗粒间难以形成稳定的骨架结构，导致黏聚力呈下降趋势。

2.2　含石量对土石混合体强度参数影响

图 10 为不同含石量及法向应力下 90% 压实度的正六面体土石混合体的剪切应力–剪切位移曲线。

当试样的含石量为 60% 时，伴随试验开始，土石混合体试样进入剪密阶段（Ⅰ）。在这一阶段，剪切应力呈现出迅猛增大的态势。观察图 10（a）可知：仅当法向应力为 150 kPa 时，剪切应力曲线出现显著的峰值；在低法向应力（50、100 kPa）时，该曲线并未呈现明显的峰值特征，反而展现出应变硬化的特点，即应变硬化阶段（Ⅲ）。这意味着，在低法向应力下，试样的剪切过程更接近于塑性破坏。这主要是由于土石混合体在含石量较低时，细集料占比相对较大，在低法向应力作用下，试样整体强度较低，难以形成明显的贯穿破坏面。然而，随法向应力的升高，试样的强度和整体性得到显著提升。此时，随试验继续进行，试样的整体性遭到破坏，剪切面位置形成明显的贯穿破坏面[21]，剪切应力随之下降，进入残余应力阶段。

观察图 10（b）可知：随含石量增加至 80% 时，正六面体颗粒之间形成紧密的咬合嵌固关系，构筑起稳定的骨架结构[22]。此时，仅有少量的细集料填充在孔隙之中，因此，土石混合体的抗剪强度主要由颗粒间的咬合嵌固作用及部分摩擦力共同提供。在剪切过程中，剪切应力经历了剪密（Ⅰ）、峰值强度及应变软化（Ⅱ）3 个阶段。此工况下，在剪切位移达到 30～60 mm 范围内，剪切应力曲线出现明显峰值，且整体展现出典型的应变软化破坏特征。

观察图 10（c）可知：当含石量增加至 100% 时，试样完全由正六面体颗粒组成，且存在大量孔隙未被有效填充。由于缺少细集料提供的摩擦作用，正六面体间的咬合嵌固能力有所下降，土石混合体试样的抗剪强度显著降低，法向应力分别为 50、100、150 kPa 时其具体降幅分别为 7.04%、7.10% 和 11.3%。

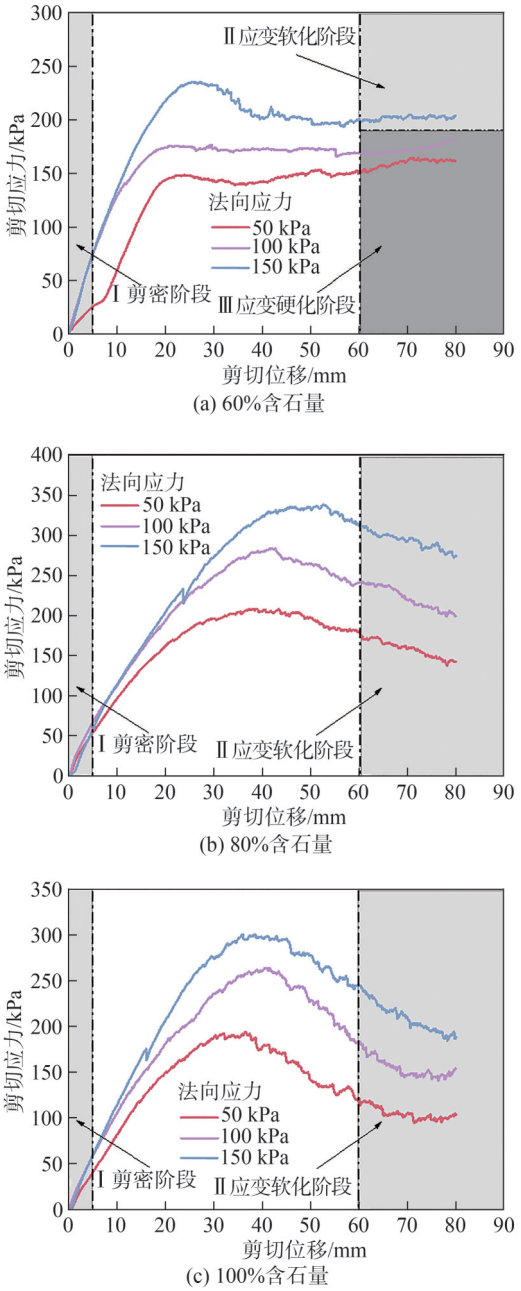


图 10　不同含石量下正六面体粒组的剪切应力–剪切位移曲线

Fig. 10　Shear stress–shear displacement curves of regular hexahedron grain group under different stone content

观察图 10 还可以发现，由于土石混合体为一种不均匀材料，不同含石量的剪切应力–剪切位移曲线都呈现不同程度的“波动跳跃”现象[23]，尤其在破坏阶段，这种现象尤为显著。深入分析其原因，主要有以下两方面[21]。一是，仪器加载系统的影响不容忽视；二是，在试样的剪切过程中，花岗岩颗粒会发生翻转、爬升、破碎等一系列复杂的动态行为。在试验初期，由于土石混合体试样处于压密和变形阶段，颗粒间的应力集中现象并不明显，不会出现大面积的颗粒运动。然而，随试验进行到一定程度，颗粒间咬合嵌固强度达到顶峰，颗粒

运动受到限制。随剪切位移继续增大，颗粒间开始出现动态行为，导致原有骨架结构遭到破坏，抗剪强度随之下降。随后，破碎、滑移的颗粒会重新组合形成新的嵌固骨架[24]，抗剪强度又会有所回升。这种颗粒的无数次破碎与重组过程，导致试验曲线出现“波动跳跃”现象。综上，仪器加载系统的不稳定性和试样剪切过程中颗粒的动态行为共同导致剪切应力–剪切位移曲线出现“波动跳跃”。试验过程中，该波动现象普遍存在[21,24–25]，对于准确评估土石混合体的力学特性具有重要意义。

图 11 为 90% 压实度的形状 1 土石混合体的含石量与抗剪强度关系曲线。分析图 11 可知：土石混合体中含石量是极其重要的参数之一，含石量变化对土石混合体的整体强度影响显著。总体趋势表现为抗剪强度随含石量增大呈明显上升趋势。当含石量超过 80% 后，土石混合体内部骨架结构开始发生变化，嵌固咬合能力逐渐减弱，导致抗剪强度呈下降趋势。该变化过程充分说明了含石量在土石混合体抗剪强度中的重要作用。

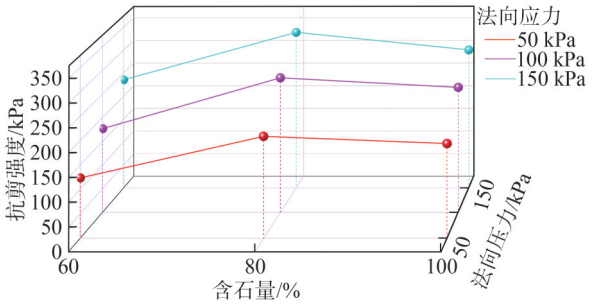


图 11 含石量与抗剪强度关系曲线

Fig. 11 Relationship curves between stone content and shear strength

取图 10 中不同含石量下剪切应力–剪切位移关系曲线的峰值强度为该工况下抗剪强度，若曲线无明显的峰值强度，则取剪切位移为试样长度 10% 位置处的剪切应力，作为该工况下抗剪强度[26]。不同含石量下土石混合体的抗剪强度 τ 与法向应力 σ 关系曲线如图 12 所示。

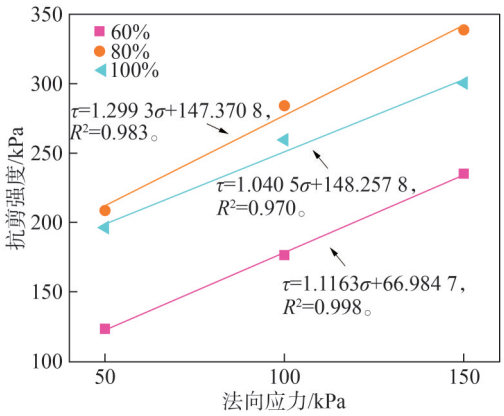


图 12 不同含石量下土石混合体的 σ–τ 曲线

Fig. 12 $\sigma-\tau$ curves of soil–rock mixtures with different rock contents

通过线性拟合，该曲线呈现较好的线性关系（$R^2>0.97$），符合莫尔–库仑准则。观察图 12 可看出：在含石量保持不变情况下，抗剪强度随法向应力增大而增大。在同一法向应力下，土石混合料的抗剪强度随含石量的增大呈先增大后减小的规律。值得注意的是，当含石量为 80% 时，土石混合料的抗剪强度达到最大值。

图 13 为不同含石量下内摩擦角、黏聚力的关系曲线。结合图 12、13 综合分析发现：抗剪强度和内摩擦角随含石量的增加，都呈先增大后减小的总体趋势；在含石量超过 80% 后，黏聚力基本保持不变。由土和石共同组成的土石混合体内部必然存在大小不等的孔隙，随含石量的增加，孔隙率呈现先减小后增大的规律，在理想条件下会出现最小孔隙率[27]。究其原因是：当含石量在 60%～80% 范围内时，土石混合体的整体孔隙较少，细粒物料能够有效填充这些孔隙，使结构整体间的嵌固咬合更加充分，摩擦力也更为显著；在这些因素共同作用下，抗剪强度、内摩擦角及黏聚力都得到了显著提升。当含石量超过 80% 时，正六面体颗粒的数量增多，而细粒含量相应减少，导致大量孔隙无法被有效填充；此时，土石混合体的结构整体间由原本充分的土、石嵌固咬合转变为颗粒骨架结构，主要表现为颗粒间的面–面、点–面的接触；这种结构使嵌固能力下降，且颗粒间的黏聚力几乎可以忽略不计。因此，抗剪强度与内摩擦角呈下降趋势，而黏聚力则基本保持不变。

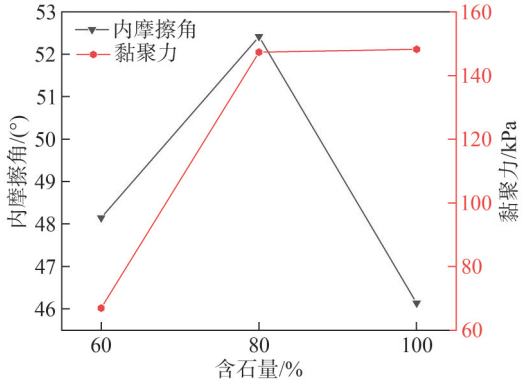


图 13 含石量与内摩擦角、黏聚力关系曲线

Fig. 13 Curves of stone content versus angle of internal friction and cohesive force

2.3 压实度对土石混合体强度参数影响

图 14 为不同法向应力和压实度下 80% 含石量的土石混合体剪切应力–剪切位移曲线，图 14 中，粉色阴影区域为剪切应力达到峰值的区域。

由图 14 可以看出：随压实度从 86% 提升至 94%，试样的抗剪强度有明显提升。同时，在达到剪切应力峰值的过程中，所需的剪切位移随法向应力的增大而逐渐增大[28]。

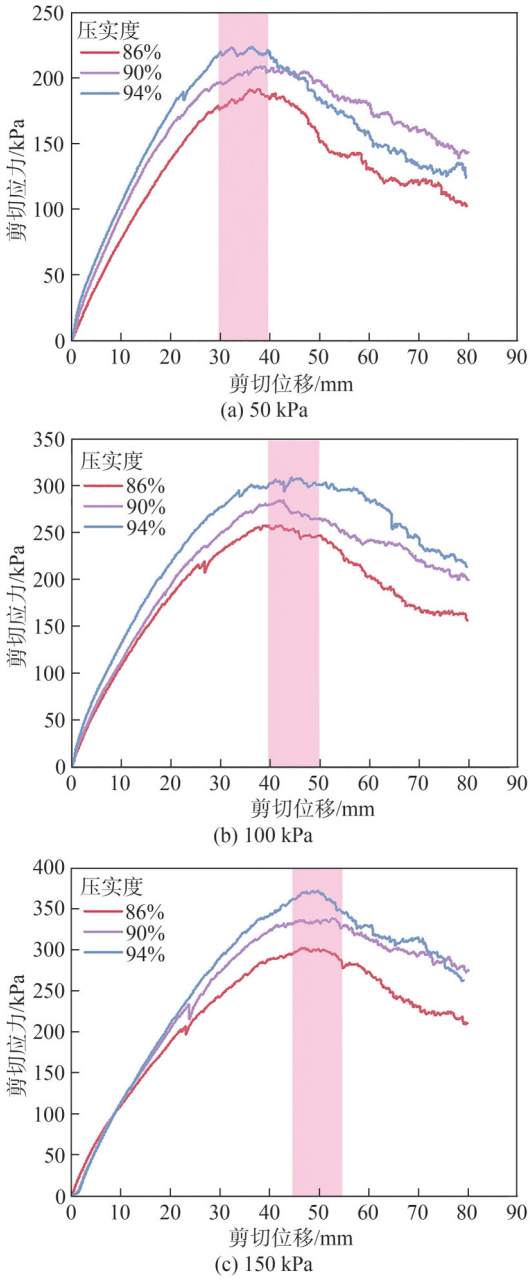


图14　不同法向应力下剪切应力–剪切位移曲线

Fig. 14　Shear stress–shear displacement curves under different normal stresses

图 15 展示了压实度、法向应力与抗剪强度关系曲线。

由图 15 可以看出：在不同法向应力的作用下，当压实度从 86% 提升至 90% 时，土石混合体试样的抗剪强度分别提升了 8.3%、9.3%、10.9%。当压实度进一步从 90% 升高到 94% 时，抗剪强度的提升幅度分别为 6.6%、7.9%、8.9%。这一现象表明，随压实度的逐渐升高，试样的抗剪强度也有所提升，但是，随压实度进一步提高，抗剪强度的提升幅度会逐渐减小。这一规律与刘飞禹等[29]的研究结论相吻合，进一步验证了压实度对于土石混合体抗剪强度的影响。

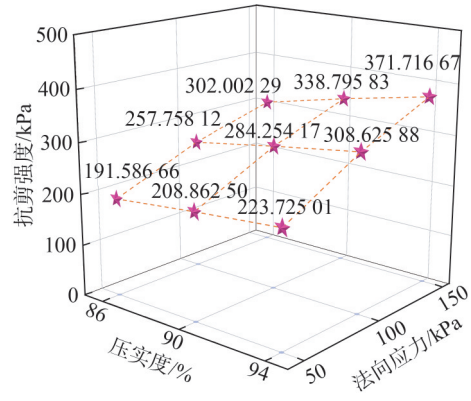


图15　压实度、法向应力与抗剪强度关系曲线

Fig. 15　Relationship curves between compaction degree, normal stress and shear strength

图 16 为颗粒破碎形式示意图，图 16 中，a、b、c 是在试验填筑时按照水平、竖直等间距布设在剪切面上提前进行喷漆染色的花岗岩颗粒。

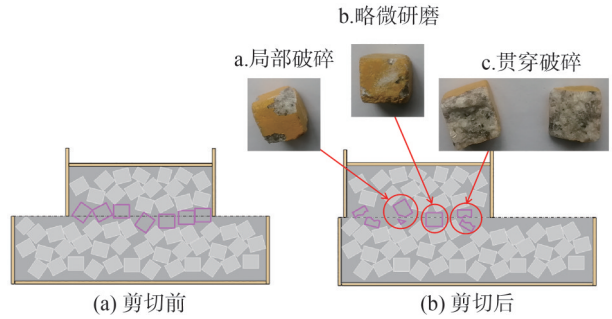


图16　颗粒破碎形式示意图

Fig. 16　Schematic diagram of particle breakage form

试验过程中，颗粒的破坏模式主要呈现以下 3 种情况[29]：首先，当颗粒内部主要结构保持完整，仅有局部结构遭到破坏时，表现为颗粒局部破碎（如图 16 中 a 所示）；其次，若颗粒内部结构几乎没有受到破坏，仅表面出现轻微磨损，则称为表面略微研磨（如图 16 中 b 所示）；最后，当颗粒内部结构沿着某一破坏面完全断裂时，称之为颗粒贯穿破碎（如图 16 中 c 所示）。

随法向应力增大，土石混合体内部孔隙逐渐减少，使得试样愈发密实。在这一过程中，颗粒间形成了稳定的骨架结构，而细粒则填充在骨架孔隙之中，土石混合体试样的宏观特性主要由岩石颗粒决定[1]。随法向应力进一步提升，花岗岩颗粒间面–面接触增多，导致颗粒的翻转、移动行为受到抑制。这种应力集中现象使得岩石颗粒在高应力状况下更易破碎，进而导致颗粒破碎率随之增大[23]。

图 17 为不同压实度和法向应力下 80% 含石量的土石混合体（正六面体颗粒）的水平位移与竖向位移的关系曲线。由于剪切过程中剪切面积保持不变（下剪切盒长度大于上剪切盒），因此，顶板竖向位移为负值代表试样发生了剪胀现象，而正值代表剪缩。

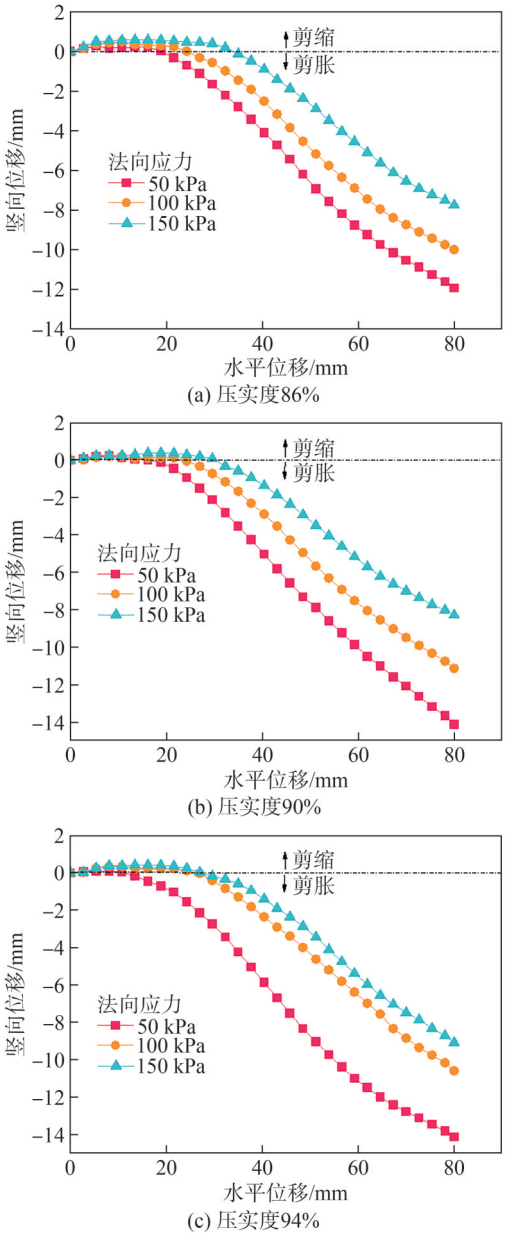


图17 不同压实度下竖向位移–剪切位移关系曲线

Fig. 17 Vertical displacement–shear displacement relationship curves under different compaction degrees

观察图17发现：在低压实度(86%)下，法向应力越大，试样在剪切初期表现出的剪缩现象越明显。这是因为原本相对松散的颗粒排列，在剪切进行过程中，颗粒通过滚动和压密填充了原有的孔隙，导致试样在剪切过程中高度下降，试样整体变得更加密实。相比而言，在高压实度(94%)情况下，由于试样本身已经相当密实，孔隙较少，因此，在剪切初期剪缩行为并不明显。在法向应力分别为50、100、150 kPa的情况下，86%压实度的土石混合体试样在剪切停止后的竖向位移分别为−11.9、−10.0、−7.7 mm；94%压实度的土石混合体试样在剪切停止后的竖向位移分别为−14.1、−10.6、−9.1 mm，相对于其他试验组，随压实度的增加，此时的土石颗粒的翻转、错动变得愈发困难；在持续的剪切作用下，颗粒的翻转和错动会导致更显著的剪胀特性，从而抬升竖向压力顶板。尽管所有试验组的试样最终均表现出剪胀现象[30]，但剪胀行为并非从试验初期一直持续到试验结束。实际上，在剪切初期往往先表现出剪缩现象，随试样逐渐变得密实，剪胀特性才开始显现。并且，剪胀量随法向应力的增加而减小，符合粗粒料低压剪胀、高压剪缩的特性[31]。

图18为施加不同法向应力时压实度与最大轴向变形关系曲线。图18中最大轴向位移为图17中最大竖向位移的绝对值。由图18可见：随法向应力的减小，不同压实度的土石混合体的最大轴向位移呈现出增加的趋势。以压实度为86%的土石混合体为例，当施加法向应力分别为50、100、150 kPa时，剪切过程中的最大轴向位移分别为11.9、10.0、7.7 mm。同样地，其他压实度的土石混合体试样也表现出了相似的特性。这一现象表明，法向应力的增大对土石混合体的剪胀特性起到了抑制作用[22]。

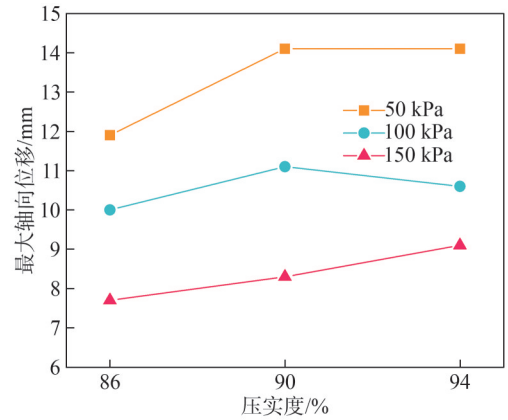


图18 不同法向应力下压实度与最大轴向变形关系曲线

Fig. 18 Relationship curves between compaction degree and maximum axial deformation under different normal stresses

3 结 论

本文通过开展一系列室内大型直剪实验，深入研究了颗粒形状、含石量、压实度等因素对土石混合体性能的影响。经分析得出了土石混合体在抗剪强度、剪胀剪缩、内摩擦角、黏聚力等方面的变化规律。基于试验结果可得以下结论：

1)随球度S的逐渐增大，土石混合体内部难以形成有效嵌固骨架结构。因此，土石混合体的抗剪强度和剪胀特性均呈现出随颗粒球度增大而减小的趋势。进一步分析发现，内摩擦角与球度之间的关系可用指数函数式(4)描述。当球度为0.953时，内摩擦角达到最大值55.22°。此外，黏聚力与球度的关系可用式(5)描述。总体

而言，内摩擦角及黏聚力整体随球度增加而下降。

2）在压实度及颗粒形状保持一致条件下，土石混合体的剪切行为随含石量的变化呈现出明显的差异。当含石量处于较低水平（60%）时，土石混合体主要表现出应变硬化特征。随含石量增加至80%和100%时，剪切应力–剪切位移曲线表现为应变软化特征，并且，峰值强度随含石量增加呈现为先增大后减小的规律。在剪切过程中，伴随颗粒的运动和破碎，剪切应力–剪切位移曲线出现了“跳跃”现象。

3）在相同的压实度和颗粒形状条件下，随含石量增加，土石混合体内部结构发生变化，导致抗剪强度、内摩擦角呈现先增大后减小趋势；当含石量超过80%之后，黏聚力基本保持不变。

4）在保持含石量和颗粒形状不变的条件下，随试样压实度增大，剪切应力达到峰值所需的剪切位移也相应增大，同时，抗剪强度也呈现出增大的规律。随压实度逐渐增大，抗剪强度的提升幅度逐渐降低。在剪切过程的初期阶段，低压实度的工况相较于高压实度的工况更容易表现出剪缩行为。相反地，高压实度的工况则主要展现出剪胀特性。此外，随法向应力的增大，土石混合体的剪胀特性得到了有效的抑制。

参考文献：

[1] Xu Wenjie,Hu Ruilin.Conception,classification and significations of soil－rock mixture[J].Hydrogeology & Engineering Geology,2009,36(4):50–56.[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.]

[2] Thomas M C,Wiltshire R J,Williams A T.The use of Fourier descriptors in the classification of particle shape[J].Sedimentology,1995,42(4):635–645.

[3] Chen Chunhui,Gu Jiayu,Peng Zesen,et al.Discrete element modeling of particles sphericity effect on sand direct shear performance[J].Scientific Reports,2022,12:5490.

[4] Cho G C,Dodds J,Santamarina J C.Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2006,132(5):591–602.

[5] Liu Qingbing,Xiang Wei,Budhu M,et al.Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(Supp1):190–197.[刘清秉,项伟,M Budhu,等.砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J].岩土力学,2011,32(增刊1):190–197.]

[6] Kang Xin,Chen Zhixin,Lei Hang,et al.Effects of particle shape on mechanical performance of sand with 3D printed soil analog[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(9):1765–1772.[康馨,陈植欣,雷航,等.基于3D打印研究颗粒形状对砂土宏观力学性质的影响[J].岩土工程学报,2020,42(9):1765–1772.]

[7] Carrasco S,Cantor D,Ovalle C.Effects of particle size-shape correlations on steady shear strength of granular materials: The case of particle elongation[J].International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2022,46(5):979–1000.

[8] Hua Wenjun,Xiao Yuanjie,Wang Meng,et al.Discrete element modeling(DEM) study on effect of gradation and morphology on shear strength behavior of rock debris as embankment fill materials[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2021,52(7):2332–2348.[华文俊,肖源杰,王萌,等.级配与颗粒形状对复杂堆积体路基填料剪切性能影响的离散元模拟研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2332–2348.]

[9] Tu Yiliang,Li Lushan,Fang Zhong,et al.Effect of rock block shape on macro-meso-shear mechanical properties of soil－rock mixture[J].Engineering Mechanics,2025,42(6):126–136.[涂义亮,李璐珊,方忠,等.块石形状对土石混合料宏细观剪切力学特性的影响[J].工程力学,2025,42(6):126–136.]

[10] Kang Xing,Cambio D,Ge L.Effect of parallel gradations on crushed rock-concrete interface behaviors[J].Journal of Testing and Evaluation,2012,40(1):119–126.

[11] Wu Yang,Huang Jinsheng,Cui Jie,et al.Influences of particle shape and degree of compaction on shear response of clinker ash[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(12):2220–2229.[吴杨,黄锦盛,崔杰,等.颗粒形状和压实度对炉渣颗粒土力学特性的影响[J].岩土工程学报,2021,43(12):2220–2229.]

[12] Zhao Shuhui,Wei Houzhen,Wu Yongjie,et al.Influence of particle shape on the direct shear properties of coarse sand samples[J].Soil Engineering and Foundation,2020,34(6):740–744.[赵书辉,魏厚振,吴永洁,等.颗粒形状对粗砂直剪特性影响研究[J].土工基础,2020,34(6):740–744.]

[13] Afzali-Nejad A, Lashkari A, Shourijeh P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces[J].Geotextiles and Geomembranes,2017,45(1):54–66.

[14] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T50123—2019[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建筑部,2019.

[15] Yang Zhongping, Lei Xiaodan, Wang Lei, et al. Impact of stone content to shear properties of soil－rock mixture using particle flow code simulation[J].Journal of Engineering Geology,2017,25(4):1035–1045.[杨忠平,雷晓丹,王雷,等.含石量对土石混合体剪切特性影响的颗粒离散元数值研究[J].工程地质学报,2017,25(4):1035–1045.]

[16] Liu Yong,Sun Shaorui,Wei Jihong,et al.Mechanical characteristics of soil－rock mixtures containing macropore structure based on 3D modeling technology[J].Journal of Mountain Science,2020,17(9):2224–2240.

[17] Lu Yang, Liu Sihong, Zhang Yonggan, et al. Experimental study and mechanism analysis of permeability perfor-

mance of clayey soil−rock mixtures[J].Rock and Soil Mechanics,2021,42(6):1540–1548.[鲁洋,刘斯宏,张勇敢,等.黏质土石混合体渗透特性试验及演化机制探讨[J].岩土力学,2021,42(6):1540–1548.]

[18] Lashkari A,Falsafizadeh S R,Shourijeh P T,et al.Instability of loose sand in constant volume direct simple shear tests in relation to particle shape[J].Acta Geotechnica,2020,15(9):2507–2527.

[19] Luo Yaqiong,Zhang Chao,Ma Tingting.Study on shear strength characteristics and deformation simulation method of soil−rock aggregate based on large-scale direct shear test[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5):295–301.[罗亚琼,张超,马婷婷.基于大型直剪试验的土石混合体剪切强度特性及剪切变形模拟方法研究[J].中外公路,2020,40(5):295–301.]

[20] Li Shiqi,Yang Zhongping,Tian Xin,et al.Influencing factors of scale effects in large-scale direct shear tests of soil−rock mixtures based on particle breakage[J].Transportation Geotechnics,2021,31:100677.

[21] Jiang Qiangqiang,Xu Yangqing,Wang Hao.Research on shear deformation characteristics of soil−rock mixtures under different stone contents[J].Journal of Engineering Geology,2020,28(5):951–958.[江强强,徐杨青,王浩.不同含石量条件下土石混合体剪切变形特征的试验研究[J].工程地质学报,2020,28(5):951–958.]

[22] Liu Feiyu,Yao Jiamin,Kong Jianjie.Study on shear characteristics of soil−rock mixture−geotextile interface[J].China Journal of Highway and Transport,2024,37(1):35–43.[刘飞禹,姚嘉敏,孔剑捷.土石混合料–土工织物界面剪切特性研究[J].中国公路学报,2024,37(1):35–43.]

[23] Yang Zhongping,Li Jin,Jiang Yuanwen,et al.Influences of stone content on shear mechanical properties of soil−rock mixture−bedrock interface[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(8):1443–1452.[杨忠平,李进,蒋源文,等.含石率对土石混合体–基岩界面剪切力学特性的影响[J].岩土工程学报,2021,43(8):1443–1452.]

[24] Yang Zhongping,Liu Haoyu,Li Jin,et al.Study on shear mechanical properties and deformation characteristics of shear zone of soil−rock mixture−bedrock interface[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(2):292–306.[杨忠平,刘浩宇,李进,等.土石混合料–基岩接触面剪切力学特性及剪切带变形特征研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(2):292–306.]

[25] Yang Jihong,Dong Jinyu,Huang Zhiquan,et al.Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(Supp2):161–166.[杨继红,董金玉,黄志全,等.不同含石量条件下堆积体抗剪强度特性的大型直剪试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(增刊2):161–166.]

[26] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.水电水利工程粗粒土试验规程:DL/T 5356—2006[S].北京:中国电力出版社,2006.

[27] Tang Jianyi,Xu Dongsheng,Liu Huabei.Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J].Rock and Soil Mechanics,2018,39(1):93–102.[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.]

[28] Yang Sheng,Li Xiaoqing.Simulation analysis of large direct shear test of soil and rock mixture based on PFC3D[J].Advanced Engineering Sciences,2020,52(3):78–85.[杨升,李晓庆.基于3维离散元颗粒流的土石混合体大型直剪试验模拟分析[J].工程科学与技术,2020,52(3):78–85.]

[29] Liu Feiyu,Kong Jianjie,Yao Jiamin.Effects of rock content and degree of compaction on interface shear characteristics of geogrid−soil−rock mixture[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(5):903–911.[刘飞禹,孔剑捷,姚嘉敏.含石量和压实度对格栅–土石混合体界面剪切特性的影响[J].岩土工程学报,2023,45(5):903–911.]

[30] Xiao Haobo,Qi Tianqi,Yang Shuhan,et al.Macro and micro-behaviors of ellipsoidal particle system using 3D DEM simulation[J].Advanced Engineering Sciences,2023,55(6):78–86.[肖浩波,漆天奇,杨舒涵,等.椭球颗粒体系宏、细观特性的3维离散元分析[J].工程科学与技术,2023,55(6):78–86.]

[31] Tu Yiliang,Chai Hejun,Liu Xinrong,et al.An experimental investigation on the particle breakage and strength properties of soil−rock mixture[J].Arabian Journal of Geosciences,2021,14(10):840.

Effect of Stone Content and Particle Sphericity on the Shear Characteristics of Soil–rock Mixtures

LIU Baochen[1,2], *ZHANG Hui*[1,2], *LIN Zhinan*[1,2*], *WANG Jiaquan*[1,2]

(1.School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545000, China;
2.Guangxi Zhuang Autonomous Region Geotechnical Disaster and Ecological Management Engineering Research Center, Liuzhou 545000, China)

Abstract:

Objective The DW1280 large-scale direct shear test system is utilized to conduct a series of large-scale indoor direct shear tests, including 24 groups of soil−rock mixtures with different stone contents, compactness levels, and particle sphericities to explore the evolution law of the shear mechanical properties of soil−rock mixtures under the influence of multiple factors, such as particle sphericity, stone content, and compactness.

Methods Self-developed rock particle processing equipment was utilized to produce four types of particles with uniform size but different sphericity values (*S*) to ensure the rigor of the experimental study and accurately investigate the influence of rock particle shape on the test results. This approach

ensured that the effect of particle shape could be analyzed independently during the experiment, overcoming the limitations of previous studies that unified block stone shapes through numerical simulation and enabling experimental research using real rock particles. In addition, the shear characteristics of soil−rock mixtures under multiple influencing factors were investigated. Through comparative analyses from various perspectives, the variation patterns of soil−rock mixtures under the influence of different factors were identified. Finally, 12 groups of test conditions were predicted using the soil−rock mixture damage model, and the prediction results were compared to the experimental data to ensure the reliability of the predictions. This step not only enhanced the scientific rigor of the research but also further verified the validity and accuracy of the soil−rock mixture damage model.

Results and Discussions Analysis of the shear stress−shear displacement curves for particle groups with different sphericity values indicated that, under normal stresses of 50, 100, and 150 kPa, the initial slopes of the shear stress curves were 11.05, 13.19, and 12.72, respectively, which were generally consistent. During the shearing process, the shear strength was mainly governed by the interlocking effect between soil and stone particles and by dislocation friction. However, with the gradual increase in particle sphericity *S*, the primary contribution to shear strength gradually shifted from the interlocking effect to dislocation friction. Therefore, the fluctuation of the test curves was reduced. These results indicate that the more pronounced the particle angularity, the greater the energy fluctuation generated during turning, rotation, and crushing processes. When the sphericity value reached *S*=0.886, the peak stress was significantly higher than that of the other three sphericity groups. In contrast, with the increase in sphericity *S* (*S*=0.953, 0.981, and 1.000), the peak stress decreased by 15.56%, 9.23%, and 5.43%, respectively, as well as by 22.84%, 16.06%, and 11.80%, and 45.09%, 41.50%, and 32.24%, respectively. This trend demonstrates that the reduction in peak stress gradually increased with increasing particle sphericity. In addition, under the same normal stress, the vertical displacement of the particle groups decreased as the sphericity increased. In addition, the internal friction angle initially increased and then decreased with increasing particle sphericity, whereas the cohesion decreased continuously with increasing particle sphericity. The stone content in the soil−rock mixture is one of the key parameters significantly affecting the overall strength of the mixture. Through detailed analysis of the shear stress−shear displacement curves of the hexahedral particle group under different stone contents, it was observed that the shear strength of the soil−rock mixture increased with increasing normal stress when the stone content remained constant. Under the same normal stress, the shear strength of the soil−rock mixture first increased and then decreased as the stone content increased. When the stone content reached 80%, the shear strength of the mixture attained its maximum value. At this stage, the shear strength and internal friction angle first increased and then decreased with increasing stone content. However, when the stone content exceeded 80%, the cohesion remained essentially unchanged. In addition to the above factors, the compaction degree of the soil−rock mixture was also identified as an important parameter affecting its shear strength. The influence of compaction degree on the strength parameters of the soil−rock mixture showed that, under different normal stresses, when the compaction degree increased from 86% to 90% and 94%, the shear strength of the soil−rock mixture samples increased by 8.3%, 9.3%, and 10.9%, respectively, as well as by 6.6%, 7.9%, and 8.9%, respectively. As the compaction degree gradually increased, the shear strength of the samples also increased. However, when the compaction degree was further improved, the rate of increase in shear strength gradually decreased. Accordingly, these findings further confirm that the factors discussed in this study, including stone content and particle shape, have significant effects on the shear strength of soil−rock mixtures.

Conclusions 1) With the increase in sphericity *S*, the angularity of the particles gradually decreases. The shear strength of the soil−rock mixtures gradually changes from being provided by a combination of intergranular occlusal embedding and interparticle friction to being dominated by frictional resistance. Therefore, the shear strength, shear dilatancy, and cohesion *c* of the soil−rock mixtures decrease. The relationship between the angle of internal friction φ and sphericity *S* can be described by an exponential function. In addition, the angle of internal friction initially increases and then decreases, reaching a maximum value of 55.22° when the sphericity *S*=0.953. 2) When the particle shape and compaction remain constant, and the stone content increases from 60% to 100%, the internal structure of the soil−rock mixture changes significantly. The shear stress−shear displacement curve transforms from strain softening to strain hardening. In addition, the shear strength and angle of internal friction φ exhibit a trend of initially increasing and then decreasing, whereas the cohesion *c* remains basically unchanged after the stone content exceeds 80%. During the shearing process, the particles overturn and crush, and the test curves exhibit a “fluctuating and jumping” phenomenon. 3) With increasing compaction, the interlocking and embedded effects between soil particles and stone particles gradually increase; however, the increase in shear strength gradually decreases. The research results are of great significance for selecting appropriate particle shapes for soil and stone mixtures in practical engineering projects, helping to control the mechanical properties of soil and stone mixtures more accurately and ensure the safety and stability of engineering structures.

Key words: particle shape; soil−rock mixture (S–RM); shear strength; stone content; compaction degree

（编辑　赵　婧）

引用格式：Liu Baochen, Zhang Hui, Lin Zhinan, et al. Effect of stone content and particle sphericity on the shear characteristics of soil–rock mixtures[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(3): 176–187. [刘宝臣，张辉，林志南，等. 含石量及块石球度对土石混合体剪切特性的影响[J]. 工程科学与技术，2026，58(3)：176–187.]