

堆积碎石土剪切特性的三轴试验

董 辉^{1,2}, 陈玺文¹, 傅鹤林³, 陈 铖¹, 胡自然¹

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 流变力学研究所, 湖南 湘潭 411105;
3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要:堆积碎石土是不同于土和岩体的一种不连续非均匀介质,以其作为坡体物质的滑坡广泛分布于中国西南及西北地区。考虑连续强降雨雨后滑坡的失稳机理,分析不同含石量、含水率和周围压力状态下堆积碎石土的主应力差-应变曲线、孔压-应变曲线、破坏形态以及相应的抗剪强度指标的变化规律。研究结果表明:由于碎石的存在,堆积碎石土的主应力差-应变曲线大多呈“台阶状”分布并具有应变硬化现象;含石量和含水率是影响堆积碎石土剪切特性的关键因素,当含水率不变,随含石量增大,黏聚力减小,内摩擦角增大;当含石量不变,随含水率增大,黏聚力先增大后减小,内摩擦角减小;存在某一最佳含石量和最优含水率组合下的堆积碎石土抗剪强度最大,该组合指标特征可作为判断连续强降雨雨后堆积碎石土滑坡失稳临界状态的理论支撑依据之一。

关键词:道路工程;堆积碎石土;剪切特性;三轴试验;含石量;含水率

中图分类号:U411 **文献标志码:**A

Triaxial test of shear properties of eluvial gravel soil

DONG Hui^{1,2}, CHEN Xi-wen¹, FU He-lin³, CHEN Cheng¹, HU Zi-ran¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;
2. Institute of Rheological Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;
3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: Eluvial gravel soil is a kind of noncontinuous and inhomogeneous material, which is different from soil and rock mass. Besides, as slope or landslide material of landslide, it is widely distributed in southwest and northwest of China. Based on instability mechanism of landslide failure after continuous heavy rainfall, this paper analyzes the changing rules of curves of principal stress difference-strain, curves of pore water pressure-strain, failure mode, and shear strength parameters of eluvial gravel soil with different stone contents, moisture contents and confining pressures. The research results show that, most of curves of principal stress difference-strain demonstrate the ladder-like distribution and eluvial gravel soil has a strain hardening phenomenon. Stone content and moisture content are the critical factors for shear properties of eluvial gravel soil. When the moisture content remains the same, with the increase of stone content, cohesion decreases and internal friction angle increases; when the stone content remains the same, with the increase of moisture content, cohesion first increases and then decreases, and internal friction angle decreases. And shear strength of eluvial gravel soil is the largest under the

combination of the best stone content and the optimum moisture content, the characteristics of composite index can be used as a theory judgment for landslide failure after continuous heavy rainfall. 2 tabs, 8 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; eluvial gravel soil; shear properties; triaxial test; stone content; moisture content

0 引言

堆积碎石土是风化卸荷、残坡积和冲洪积等复杂成因形成的第四纪土与石块的二重介质混合物,是介于土体与碎裂岩体之间的一种特殊地质体。对于碎石土的定义没有统一的说法,目前更广泛的说法将碎石土定义为粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土石混合物,土与石粒径的界限值为 2 mm^[1-2]。由于碎石土具有物质组成的复杂性,结构分布的不规则性,给其工程性质与剪切特性的研究带来了极大的困难。而以其作为坡体物质或滑体物质的滑坡,却广泛分布于中国西南及西北地区,往往因连续强降雨或工程活动致滑成灾造成了巨大的经济损失甚至人员伤亡。因此,有必要对堆积碎石土的剪切特性开展专门的研究。

近年来对碎石土的研究方法主要集中在现场试验、室内试验和数值模拟 3 个方面。油新华等通过对土石混合体的原位水平推剪试验,得到不同含石量、含水率、尺寸大小和应力状态下土石混合体的破坏形态,以及抗剪强度和抗剪强度参数的变化规律^[3-5];李维树等通过原位直剪试验,研究了土石混合物在不同含水状态下抗剪强度参数的变化规律,并在大量的试验基础上建立了抗剪强度指标与含水率之间的关系式,得到不同含石量下抗剪强度指标随含水率变化的弱化公式^[6];胡明鉴等通过对土石混合体的室内大型三轴试验,得到碎石土的抗剪强度指标和抗剪强度随含石量、含水率、围压等因素的变化规律^[7-9],其中李兴瑞通过对比应力应变曲线的走势差异提出了一种破坏方式转折点界定的方式,宁金成通过改变这些指标得到土石混合物抗剪强度的衰变规律;欧阳振华等采用柔性边界条件下的大型剪切试验,得到含石量、块石尺寸和块石排列 3 个因素对土石混合物抗剪性能的影响中,块石尺寸的影响最大,含石量次之,块石排列的影响最小^[10];王家成通过室内大型直剪试验,研究了含水率和颗粒级配对碎石土抗剪强度参数的影响^[11];胡显明通过室内环剪试验,研究了含水量与剪切速率处于不同条件下的碎石土残余强度,并基于宾汉模型建立了不同剪切速率下的碎石土残余强度准则^[12];丁秀丽

等利用 PFC 程序进行了不同试样的双轴数值试验,得到土石混合体的应力-应变关系曲线大多呈“台阶状”分布特征^[13]。

然而,目前对堆积碎石土的研究还不够全面,大多学者在进行三轴试验时考虑的是不固结不排水剪切试验,但现实中存在一些在连续强降雨影响下的雨后滑坡,需考虑降雨滑坡的滞后性,堆积碎石土存在一定的固结。为此,本文采用固结不排水剪切试验,并结合具有级配代表性的湖南省昭山区某边坡母岩为粉质砂岩的堆积碎石土,分析不同含石量、含水率和周围压力状态下堆积碎石土的主应力差-应变曲线、孔压-应变曲线、破坏形态以及相应的抗剪强度指标的变化规律,为进一步研究这种复杂的不连续非均匀介质剪切特性提供科学数据,该研究结果可为类似工程的滑坡防治提供理论依据。

1 试验方案

室内三轴试验是测定土体抗剪强度的一种较为完善的方法^[14]。本试验采用 TSZ-3S 全自动应变控制式三轴仪。其原理是根据摩尔-库伦强度理论,用多组试样(每组 3~4 个试件),分别在不同的、恒定的周围压力下施加轴向压力,进行剪切直至破坏。

首先在现场采样、拍照并取土带回实验室进行含水率的测定(下页图 1),然后对土样依次进行风干、碾散、烘干、筛分。堆积碎石土的天然含石量为 83%,含黏粒量为 17%,天然含水率为 11.4%,母岩为粉质砂岩,黏粒为红粘土,最大碎石粒径为 84 mm。试验以 2 mm 为土石颗粒界限值,将大于 20 mm 的土颗粒视为超粒径颗粒^[15],采用等量替代法进行超粒径颗粒的处理。将筛分后的堆积碎石土按照设计含石量和含水率配置试样。

考虑孔隙水压力消散速度及仪器采集点的最大个数,将试验的剪切速率设为 1 mm/min,采样步长设为 1 mm;参照前人研究成果,并考虑全自动三轴仪的最大位移量程为 65 mm 及堆积碎石土的特质,将剪切轴向应变设为 30%,即当剪切应变达到 30% 时自动结束试验;加荷级数设为 1 级;钢环系数设为 60 N/mm。

针对含石量(质量分数)、含水率、周围压力 3 个



图 1 堆积碎石土现场照片
Fig. 1 Photo of eluvial gravel soil

变量影响下碎石土试样的试验情况,在含石量的设计时考虑到含石量过大将导致橡胶模被碎石割破影响试验结果,及细粒土过少将导致试样不能很好的黏结,确定 20%、40%、60%为试验的 3 种含石量。结合原状土特征,为保证试样的变形与成型,确定 7%、9%、11%、13%为试验的 4 种含水率。试验中选用100、200、400kPa这3种围压。试验工况如

表 1 所示。

表 1 试验工况

Tab. 1 Test conditions

| 试样 编号 | 含石 量/% | 含水 率/% | 围压 /kPa | 剪切速率/ (mm·min ⁻¹) | 干密度/ (g·cm ⁻³) | 孔隙 率/% | 最大轴向 应变/% |
|----------|-----------|-----------|------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|
| 1 | 20 | 11 | 100 | 1 | 1.907 | 18.3 | 30 |
| 2 | 20 | 11 | 200 | 1 | 1.926 | 18.3 | 30 |
| 3 | 20 | 11 | 400 | 1 | 1.899 | 18.3 | 30 |
| 4 | 40 | 11 | 100 | 1 | 1.959 | 11.7 | 30 |
| 5 | 40 | 11 | 200 | 1 | 1.958 | 11.7 | 30 |
| 6 | 40 | 11 | 400 | 1 | 1.960 | 11.7 | 30 |
| 7 | 60 | 11 | 100 | 1 | 2.001 | 16.7 | 30 |
| 8 | 60 | 11 | 200 | 1 | 1.977 | 16.7 | 30 |
| 9 | 60 | 11 | 400 | 1 | 1.995 | 16.7 | 30 |
| 10 | 60 | 7 | 100 | 1 | 1.937 | 13.3 | 30 |
| 11 | 60 | 7 | 200 | 1 | 1.905 | 13.3 | 30 |
| 12 | 60 | 7 | 400 | 1 | 1.924 | 13.3 | 30 |
| 13 | 60 | 9 | 100 | 1 | 1.991 | 11.7 | 30 |
| 14 | 60 | 9 | 200 | 1 | 1.986 | 11.7 | 30 |
| 15 | 60 | 9 | 400 | 1 | 2.003 | 11.7 | 30 |
| 16 | 60 | 13 | 100 | 1 | 1.907 | 21.7 | 30 |
| 17 | 60 | 13 | 200 | 1 | 1.896 | 21.7 | 30 |
| 18 | 60 | 13 | 400 | 1 | 1.911 | 21.7 | 30 |

2 试验结果分析

试验得到的主应力差-应变曲线、孔压-应变曲线分别如图 2、下页图 3 所示。

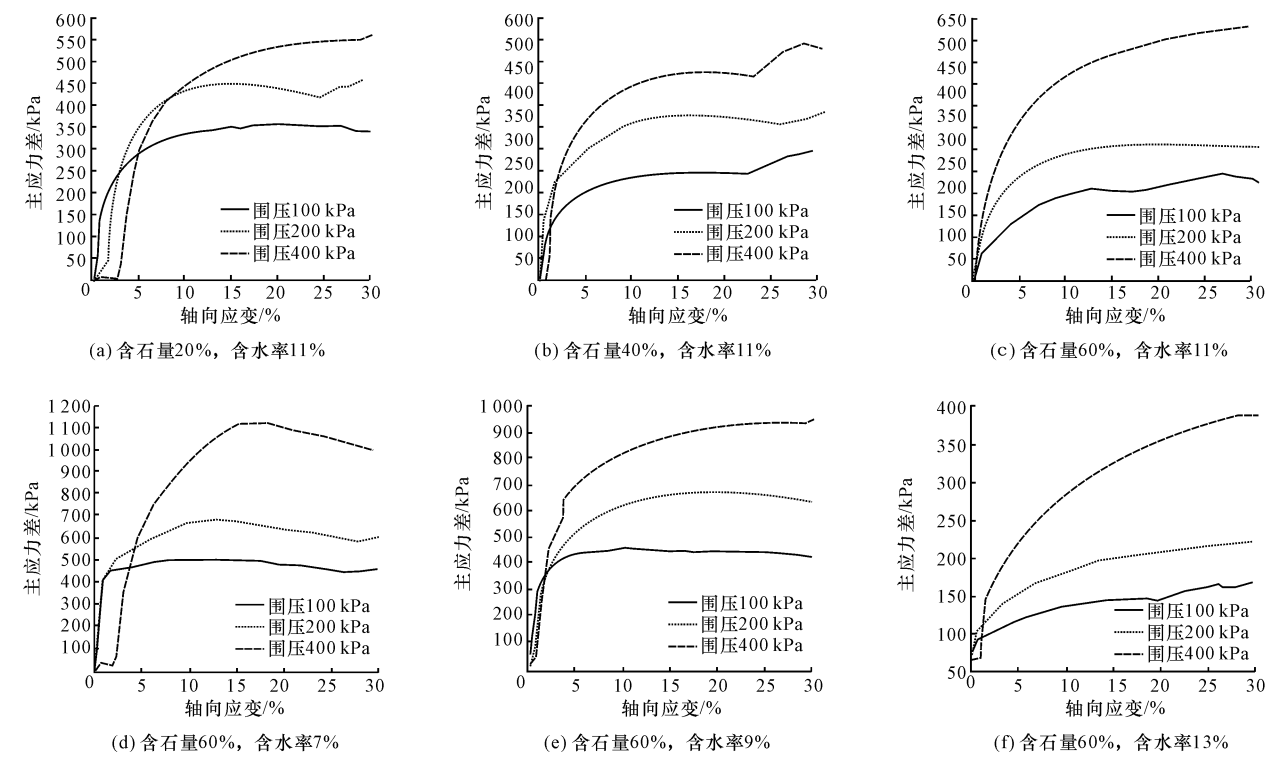


图 2 主应力差-应变曲线
Fig. 2 Curves of principal stress difference-strain

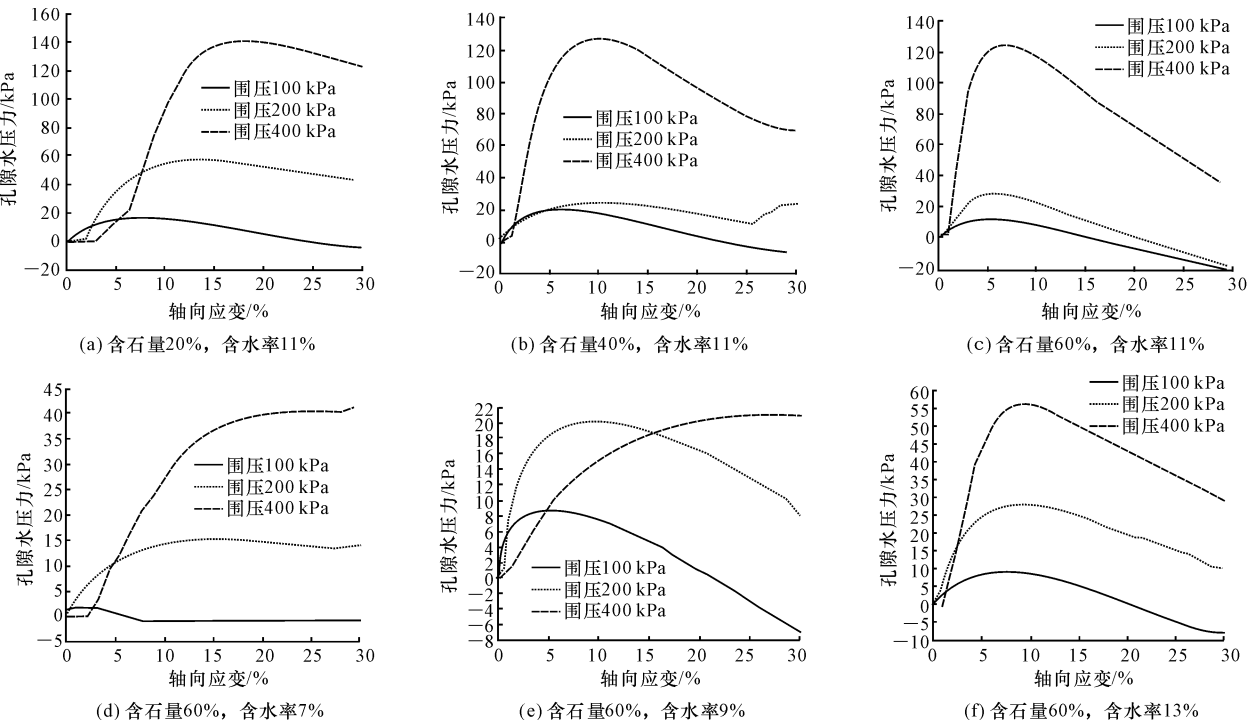


图 3 孔压-应变曲线

Fig. 3 Curves of pore water pressure-strain

2.1 应力应变特性

2.1.1 含石量对应力应变特性的影响

由图 2 分析:①含水率不变、低围压时,主应力差峰值随含石量的增大而减小,但高围压时,主应力差峰值随含石量的增大而增大②随应变的增大,应力应变曲线几乎没有或仅有小段线性变化阶段,即试样从受到轴向荷载开始后,几乎没有弹性变形而很快进入塑性变形阶段,尤其在含水率不变含石量增大的情况下,这种趋势愈加明显;③曲线有明显的“台阶状”走势,在达到第 1 个剪切峰值后,残余应力保持相对平缓,一段时间后出现第 2 个剪切峰值,比第 1 个峰值大,表现为应变硬化,第 2 个峰值后的曲线有下降的趋势,表现为应变软化。由此可知,在轴压作用下,首先是土颗粒间的黏结强度发生破坏,强度相对较低的土颗粒进入塑性阶段,表现为出现第 1 个峰值。达到第 1 个峰值后,碎石之间逐渐接触并发生相互抵抗、转动和滑移等作用,导致碎石土整体强度有所提高,形成应变硬化阶段,表现为出现第 2 个峰值,之后进入应变软化阶段,表现为曲线下降。

2.1.2 含水率对应力应变特性的影响

图 2 含水率曲线特征表明:①含石量不变时,主应力差峰值随含水率的减小而增大;整体强度增大;②含石量不变、含水率越小,初期应力水平越显著,达到第 1 次剪切峰值越快。③含石量不变、低含水

率时,曲线达到第 1 次剪切峰值后,出现应变软化现象,而后达到第 2 次剪切峰值,且第 2 次峰值小于第 1 次峰值。

2.1.3 围压对应力应变特性的影响

由图 2 分析:①围压越小,应力应变曲线“台阶状”走势越明显,这是因为高围压限制了试样内碎石的移动而不能使其发挥骨架效应;②相同含石量和含水率的碎石土的主应力差峰值随围压的增大而增大,且呈线性增长的规律。

2.2 孔压应变特性

由图 3 分析:含水率不变、含石量越大,孔压增长速率越快,越快达到孔压峰值,孔压峰值越小,孔压消散越快,消散程度越大。

当含石量为 60% 不变,存在一个界限含水率(本试验为 11%),在此含水率之前随含水率的增大,孔压增长速率增大,孔压峰值增大,超过此含水率后随含水率的增大,孔压增长速率减小,孔压峰值减小。

含石量和含水率相同的试样随围压的增大,孔压峰值越大,越迟达到孔压峰值,孔压消散程度越小,这是因为围压越大,试样整体强度越大,越不易破坏,孔压越不易消散。

2.3 强度指标特征

对试验数据进行分析,并采用最小二乘法进行

包络线的线性回归求值,从而得到堆积碎石土的抗剪强度指标,计算结果如表 2 所示,其中 σ_1 、 σ_2 为应力。含石量和含水率变化对堆积碎石土抗剪强度指标的影响如图 4、图 5 所示。试样的摩尔应力圆及抗剪强度包络线如下页图 6 所示。

表 2 抗剪强度指标计算结果
Tab. 2 Results of shear strength parameters

| 试样编号 | σ_1 /kPa | σ_2 /kPa | c /kPa | φ /(°) |
|------|-----------------|-----------------|----------|----------------|
| 1 | 457.7 | 100 | | |
| 2 | 655.1 | 200 | 117.16 | 14.45 |
| 3 | 961.8 | 400 | | |
| 4 | 419.1 | 100 | | |
| 5 | 614.6 | 200 | 84.42 | 17.98 |
| 6 | 988.1 | 400 | | |
| 7 | 377.2 | 100 | | |
| 8 | 554.1 | 200 | 41.87 | 22.97 |
| 9 | 1 048.1 | 400 | | |
| 10 | 601.8 | 100 | | |
| 11 | 877.9 | 200 | 79.71 | 30.67 |
| 12 | 1 519.2 | 400 | | |
| 13 | 556.1 | 100 | | |
| 14 | 869.3 | 200 | 97.30 | 26.45 |
| 15 | 1 346.2 | 400 | | |
| 16 | 224.2 | 100 | | |
| 17 | 390.4 | 200 | 8.89 | 18.06 |
| 18 | 788.5 | 400 | | |

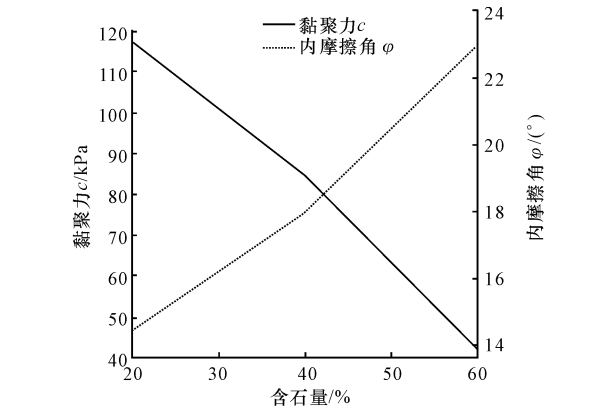


图 4 含石量对堆积碎石土抗剪强度指标的影响
Fig. 4 Impact of stone content on shear strength parameters of eluvial gravel soil

2.3.1 含石量对黏聚力的影响

由图 4 分析:当含水率不变,随含石量的增大,黏聚力减小,黏聚力的减幅增大。这是因为堆积碎石土的黏聚力主要由试样的密度和细粒土含量这 2 个因素决定。随密度增大,黏聚力增大,随细粒土含量(质量分数)减小,黏聚力减小。由于随含石量增大,细粒土含量减小引起的黏聚力下降程度远大于

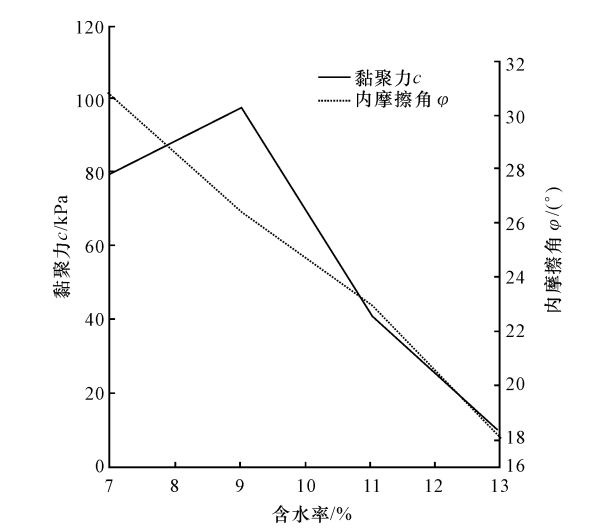


图 5 含水率对堆积碎石土抗剪强度指标的影响
Fig. 5 Impact of moisture content on shear strength parameters of eluvial gravel soil

密度增大引起的黏聚力上升程度,因而总体上呈现随含石量增大,黏聚力下降的趋势。且随含石量增长,密度涨幅减小,密度增大引起的黏聚力涨幅减小,因而表现为随含石量增大,黏聚力的减幅增大。

2.3.2 含石量对内摩擦角的影响

由图 4 分析:当含水率不变,随含石量的增大,内摩擦角增大,内摩擦角的增幅增大。这是因为堆积碎石土中碎石起到骨架作用,细粒土包裹在碎石表面,起到润滑作用。当含水率不变,随含石量增大,细粒土含量减小,使得更多的碎石直接接触,增大了摩阻力,因而总体上呈现随含石量增大,内摩擦角增大的趋势。

2.3.3 含水率对黏聚力与内摩擦角的影响

由图 5 分析:当含石量不变,随含水率的增大,黏聚力先增大后减小,这是因为在击实功相同的情况下,试样随含水率的增大逐渐压实,密度逐渐增大,黏聚力增大,当达到最优含水率(本试验为 9%)时,密度为最大,黏聚力最大,当含水率超过最优含水率后,压实性能减弱,密度减小,黏聚力减小。

当含石量不变,随含水率的增大,内摩擦角减小,这是因为随含水率的增大,细粒土变得很软,黏结在碎石表面,起到了润滑作用,降低了碎石之间的摩阻力,再者随含水率的增大,部分碎石被软化,因而也降低了摩阻力。

总体上,含石量与含水率对堆积碎石土抗剪强度的影响较为复杂,但存在某一最佳含石量和最优含水率的组合下的碎石土抗剪强度最大。其中最佳含石量需考虑在相同含水率和击实功的情况下,压

实后的碎石土具有较高的密实度,能充分发挥碎石的骨架作用及细粒土的填充与咬合作用,主要体现在碎石土密度和内摩擦角都较高,本试验中最佳含石量为 60%。最优含水率则在相同含石量和击实功的情况下,实现碎石土的压实密度,充分发挥土与石之间的黏结作用,宏观物理指标表现为碎石土的密度与黏聚力。本试验中最优含水率为 9%。鉴于发生连续强降雨后,堆积碎石土边坡通过一段时间

的雨水入渗和土体固结,土体含水率超过最优含水率甚至饱和,堆积碎石土的黏聚力和内摩擦角急剧降低,大大降低了抗剪强度,这种情况下如再对边坡施以其他形式扰动,如工程活动、地震等,将极有可能失稳甚至发生滑坡,给人民生命财产安全带来极大的危害。因此该组合指标特征可作为判断连续强降雨雨后堆积碎石土滑坡失稳临界状态的理论支撑依据之一。

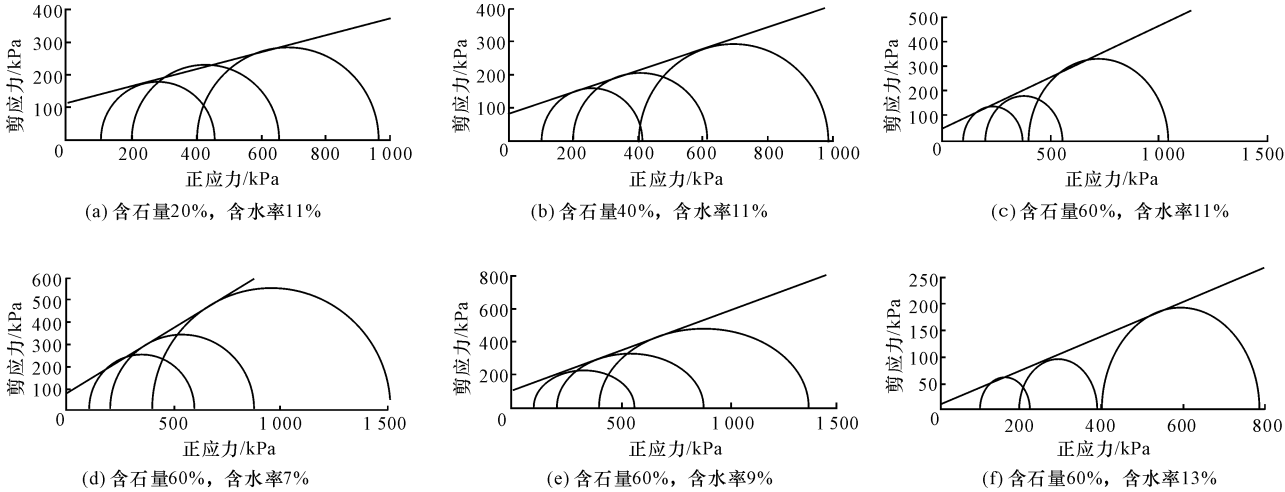


图 6 摩尔应力圆及抗剪强度包络线

Fig. 6 Mohr's stress circle and shear strength envelope curves

2.4 破坏形态特征

由于碎石的存在以及碎石土的不均匀性,使其破坏形态与一般均质土有明显破裂面相比更为复杂。堆积碎石土的破坏形态为不规则鼓胀型破坏,破坏试样周围有明显的裂纹,且大多有弯曲变形。

2.4.1 含石量对破坏形态特征的影响

当含石量较小(含石量 20%)时,破坏试样出现较明显的未贯通的剪切破裂带,此时的破坏形态与均质土的破坏形态更相近,当含石量 40%时,破坏试样中部弯曲且出现一条深裂缝,随含石量的增大,试样鼓胀越明显,破坏形态由剪切型向鼓胀型转化。含水率 11%,围压 200 kPa,含石量分别为 20%、40%、60%的试样的破坏形态如下页图 7 所示。

2.4.2 含水率对破坏形态特征的影响

当含水率较小(含水率 7%)时,试样周围有大量裂纹,局部有小孔洞,鼓胀极不均匀,可见少量碎石裸露在外,随含水率的增大,裂纹明显增多,鼓胀越均匀,鼓胀区域由上部转向底部,底部裂缝发展迅速。含石量 60%,围压 400 kPa,含水率分别为 7%、11%、13%的试样的破坏形态如下页图 8 所示。

2.4.3 围压对破坏形态特征的影响

当含石量和含水率不变,围压越大,破坏试样的

弯曲度越小,鼓胀越均匀;围压越小,鼓胀越大。

3 结 语

(1)堆积碎石土的主应力差-应变曲线大多呈“台阶状”分布特征,其第 1 个剪切峰值基本反映了细粒土的屈服强度,之后强度的提高与碎石间逐渐接触并发生相互抵抗、转动和滑移等作用有关,呈现应变硬化现象,第 2 个剪切峰值基本反映了碎石间接触强度的破坏,第 2 个峰值后曲线有下降的趋势,呈现应变软化现象。

(2)含石量和含水率是影响堆积碎石土剪切特性的关键因素。当含水率不变,随含石量的增大,黏聚力减小,内摩擦角增大,堆积碎石土由“土”性向“石”性转化;当含石量不变,随含水率的增大,黏聚力先增大后减小,内摩擦角减小。存在一个最佳含石量和最优含水率的组合使堆积碎石土的抗剪强度最大。

(3)由于碎石的存在以及碎石土的不均匀性,堆积碎石土的破坏形态为不规则鼓胀型破坏,破坏试样周围出现明显裂纹且大多有弯曲变形。当含石量和含水率不变,围压越大,破坏试样弯曲度越小,鼓胀越均匀;随含石量的增大,鼓胀越明显,破坏形态



(a) 含石量20%



(b) 含石量40%



(c) 含石量60%

图 7 不同含石量试样的破坏形态

Fig. 7 Failure mode of samples with different stone contents
由剪切型向鼓胀型转化;随含水率的增大,鼓胀越均匀,鼓胀区域由上部转向底部,孔隙减小,裂纹增多。

参考文献:

References:

[1] 李镜培. 土力学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
LI Jing-pei. Soil mechanics [M]. 2nd ed. Beijing:



(a) 含水率7%



(b) 含水率11%



(c) 含水率13%

图 8 不同含水率试样的破坏形态

Fig. 8 Failure mode of samples with different moisture contents
Higher Education Press, 2008. (in Chinese)

[2] 张常光, 赵均海, 杜文超. 岩石中间主应力效应及强度理论研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 6-19.
ZHANG Chang-guang, ZHAO Jun-hai, DU Wen-chao. Advances in rock for intermediate principal stress effect and strength theory[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 6-19.
[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] Hu L Q, Hao J X, Wang L B. Laboratory evaluation of cement treated aggregate containing crushed clay brick[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(5): 371-382.
- [5] 李 晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2377-2384.
- LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-ming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2377-2384. (in Chinese)
- [6] 李维树, 丁秀丽, 邹爱清, 等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1338-1342.
- LI Wei-shu, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges reservoir bank slopes under influence of impounding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1338-1342. (in Chinese)
- [7] 胡明鉴, 汪 稔, 张平仓. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1831-1834.
- HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang. Cause of frequent occurrence of gravel slope landslide and experiment simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1831-1834. (in Chinese)
- [8] 李兴瑞. 土石混合体的变形特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- LI Xing-rui. Experimental study on deformation Characteristics of earth-rock aggregate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 宁金成, 孙久民. 土石混合体的力学性能影响因素研究[J]. 中外公路, 2012, 32(2): 207-210.
- NING Jin-cheng, SUN Jiu-min. Study on influence factors of mechanical properties of soil-rock mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(2): 207-210. (in Chinese)
- [10] 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 Zhen-hua, LI Shi-hai, DAI Zhi-sheng. On the influence factors of mechanical properties for soil-rock mixture[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 61-67. (in Chinese)
- [11] 王家成. 巴东高切坡碎石土抗剪强度参数试验研究及工程应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.
- WANG Jia-cheng. Experimental research on shear parameter of high cut slope gravel soil in Badong and its engineering application [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2011. (in Chinese)
- [12] 胡显明. 不同剪切速率下碎石土滑坡滑带土残余强度特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- HU Xian-ming. Residual strength variation of debris landslide slip soils under different shear rates [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese)
- [13] 丁秀丽, 李耀旭, 王 新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477-484.
- DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 477-484. (in Chinese)
- [14] 王星辉. 三轴剪切总应力强度指标的回归求值[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 52-54.
- WANG Xing-hui. Regression solution for general stress intensity of the tri-axis shearing[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(1): 52-54. (in Chinese)
- [15] SL237—1999, 土工试验规程[S].
- SL237—1999, specification of soil test[S]. (in Chinese)