

DOI: 10.11779/CJGE202108012

含砾滑带土残余强度与剪切面粗糙度的细观响应机制

任三绍^{1, 2, 3}, 张永双^{*1, 3}, 徐能雄², 吴瑞安⁴

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质调查局第四纪年代学与环境水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 含砾滑带土的力学性质与剪切面细观结构紧密相关, 量化表征剪切面的粗糙度对于揭示含砾滑带土残余强度变化的细观机制具有重要意义。基于反复直剪试验和高精度三维激光扫描技术, 对含砾滑带土剪切面的粗糙度进行了定量刻画, 并剖析了其残余强度参数之间的关系, 结果表明: 滑带土剪切面摩擦系数与粗糙度呈较明显的相关性; 砾石是滑带土残余强度变化的内在因素, 垂向应力和水是残余强度变化的外部因素。含砾滑带土的残余强度由剪切面砾石的接触性质和剪切面的起伏程度共同决定: 砾石含量决定了咬合摩擦接触面的数量, 随含石量增大, 剪切面中咬合摩擦接触面增加; 砾石最大粒径控制了接触面积和夹角, 粒径越大, 咬合摩擦越大; 垂向应力的压实作用和水的作用有助于咬合摩擦向滑动摩擦转化, 减小滑带土的残余强度。

关键词: 含砾滑带土; 残余强度; 剪切面粗糙度; 三维激光扫描; 细观机制

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)08-1473-10

作者简介: 任三绍(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: rensanshao123@163.com。

Mesoscopic response mechanism of shear surface roughness and residual strength in gravelly sliding zone soils

REN San-shao^{1, 2, 3}, ZHANG Yong-shuang^{1, 3}, XU Neng-xiong², WU Rui-an⁴

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences,

Beijing 100081, China)

Abstract: The mechanical properties of the gravelly sliding zone soils are closely related to the meso-structure of the shear surface. The quantitative characterization of shear surface roughness is of great significance to revealing the meso-mechanism of change of the residual strength in the gravelly sliding zone soils. Based on the reversal direct shear tests and the high-resolution 3D laser scanning technology, the shear surface roughness of the gravelly sliding zone soils is quantitatively characterized, and the relationship between the roughness and the residual strength parameters is analyzed. The results show that there is a positive linear correlation between the friction coefficient and the shear surface roughness. The gravels are the internal factor of the change of the residual strength of sliding zone soils, and vertical stress and water are the external factors. The residual strength of the gravelly sliding zone soils is determined by the contact properties of gravels on the shear surface and the shear surface undulation. The number of occlusive friction contact surfaces depends on the gravel content, and with the increase of gravels content, the occlusive friction interface increases. The maximum particle size of gravel controls the contact area and angle, and the larger the particle size, the greater the occlusive friction. The soil compaction under normal stress and the softening of fine-grained soil due to water are helpful to the transformation of occlusive friction to sliding friction, thus leading to lower residual strength of the sliding zone soils.

Key words: gravelly sliding zone soil; residual strength; shear surface roughness; 3D laser scanning; meso-mechanism

0 引言

在青藏高原东缘和三峡库区众多古滑坡的滑带土中常含有大量砾石, 其含量可达 30%, 最大粒径超

过 50 mm^[1-6], 这类滑带土在基本性质方面与主要由黏

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41731287); 国家自然科学基金重大专项项目(41941017)

收稿日期: 2020-08-12

*通信作者(E-mail: zhys100@sohu.com)

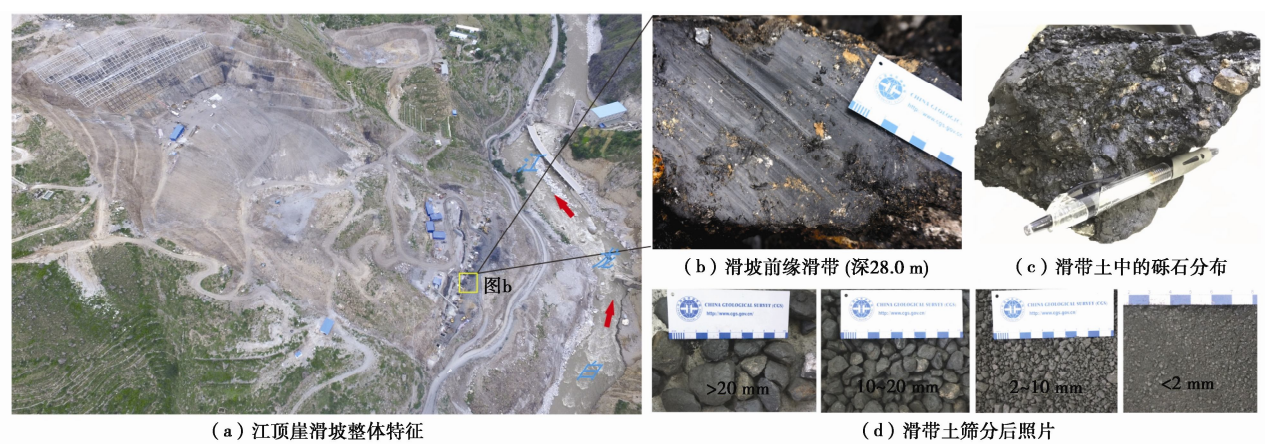


图 1 江顶崖滑坡滑带土发育特征

Fig. 1 Development characteristics of sliding zone soils in Jiangdingya

表 1 滑带土基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes of sliding zone soils

孔隙比 e_0	土粒相对质量密度 G_s	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	塑限 $w_L/\%$	液限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	颗粒级配/%			
						<0.005 mm	0.005~0.075 mm	0.075~2 mm	>2 mm
0.579~0.673	2.72~2.73	1.86~1.96	15.4~16.7	34.2~35.8	18.8~20.4	14~19	26~32	32~36	15~24

性土组成的滑带土有较大不同^[7]。前人基于试验测试、数值模拟等研究了砾石含量、砾石形态、粒径分布等对含砾滑带土残余强度力学性质变化的影响^[2, 7-10], 但很少从滑带土剪切面的细观结构上研究含砾滑带土残余强度的变化机理。经历大位移滑动后, 滑带土中的胶结作用已基本丧失, 土粒之间的分子引力也已很小, 其残余抗剪强度主要由土颗粒之间的滑动摩擦阻力和咬合作用组成^[11], 而滑带土剪切面的宏观摩擦系数与剪切面细观粗糙度紧密相关^[12], 因此定量刻画剪切面的粗糙度对于揭示含砾滑带土残余强度在细观上的变化机制具有重要意义。

国内外学者针对岩体结构面粗糙度定量刻画进行了大量研究, 并提出了一系列岩体结构面粗糙度的表征指标和方法^[13-14]。近年来, 三维激光扫描技术被大量应用于岩体结构面测量中, 通过该技术可以快速获取结构面高精度点云数据, 经过后续软件处理可以精确高效地计算结构面的粗糙度等形貌特征参数^[15-19]。但目前关于滑带土剪切面粗糙度方面的研究还比较欠缺^[20-21], 尤其是利用三维激光扫描技术进行剪切面粗糙度的定量研究更是很少涉及。

本文以 2018 年甘肃省舟曲县江顶崖古滑坡复活事件为例, 基于不同砾石含量、粒径大小、垂向应力、含水率的含砾滑带土反复直剪试验, 采用高精度三维激光扫描仪对试验后的剪切面分别进行三维形貌特征精确扫描, 利用 Zsaner、Surfer 等软件对形貌特征参数进行后处理, 建立了含砾滑带土残余强度和剪切面粗糙度系数之间的关系, 揭示了含砾滑带土残余强度

变化的细观机制, 为基于细观结构参数估算含砾滑带土残余强度提供了可靠依据。

1 试验方法

1.1 含砾滑带土残余强度试验

(1) 试验样品及仪器

2018 年 7 月 12 日, 白龙江中游舟曲县南峪乡江顶崖古滑坡发生复活 (图 1 (a)), 挤压白龙江河道, 形成堰塞湖, 造成严重损失。在野外系统采集江顶崖滑坡的黑色含砾滑带土, 取样深度 26~28 m (图 1 (b)), 滑带土成分为黑色含砾黏土 (图 1(c)~1(d)), 主要由炭质板岩碎屑挤压揉搓泥化形成 (图 1 (b)), 可见明显的擦痕及镜面, 含大量角砾、碎石。滑带土基本物理性质见表 1。

试验采用 YS.IJQ104-1 式中型应变控制式直剪仪, 该仪器分别采用气压机构施加法向力、导轨机构施加剪切力、步进电机进行闭环或开环应变和应力控制, 仪器配备边长 100 mm, 高 100 mm 的方形剪切盒, 对研究含砾滑带土的强度有明显优势。

(2) 剪切试验方案

为了探究砾石对滑带土残余强度的影响, 共设计了不同砾石含量、最大粒径、含水率、垂向应力的重塑样 44 组, 每次剪切试验前固结 24 h, 试验剪切速率为 0.05 mm/min, 单次剪切位移 15 mm, 反复剪切 5 次, 试验过程参照《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》^[22], 试验方案见表 2。

表 2 滑带土剪切试验方案

Table 2 Schemes for shear tests on sliding zone soils

试验 编号	状态	含水 率/%	样品颗粒配比/%				垂向应力 /kPa	试验 编号	状态	含水 率/%	样品颗粒配比/%				垂向应力 /kPa
			<2 mm	2~5 mm	5~10 mm	10~20 mm					<2 mm	2~5 mm	5~10 mm	10~20 mm	
JDY-01	天然	13.5	70	18	12	0	100	JDY-23	饱和	24.7	90	6	4	0	500
JDY-02							300	JDY-24							700
JDY-03							500	JDY-25							100
JDY-04							700	JDY-26							300
JDY-05	饱和	24.7	70	18	12	0	100	JDY-27	天然	13.5	100	0	0	0	500
JDY-06							300	JDY-28							700
JDY-07							500	JDY-29							100
JDY-08							700	JDY-30							300
JDY-09	天然	13.5	80	12	8	0	100	JDY-31	饱和	24.7	100	0	0	0	500
JDY-10							300	JDY-32							700
JDY-11							500	JDY-33							100
JDY-12							700	JDY-34							300
JDY-13	饱和	24.7	80	12	8	0	100	JDY-35	饱和	24.7	70	30	0	0	500
JDY-14							300	JDY-36							700
JDY-15							500	JDY-37							100
JDY-16							700	JDY-38							300
JDY-17	天然	13.5	90	6	4	0	100	JDY-39	饱和	24.7	70	15	15	0	500
JDY-18							300	JDY-40							700
JDY-19							500	JDY-41							100
JDY-20							700	JDY-42							300
JDY-21	饱和	24.7	90	6	4	0	100	JDY-43	饱和	24.7	70	10	10	10	500
JDY-22							300	JDY-44							700

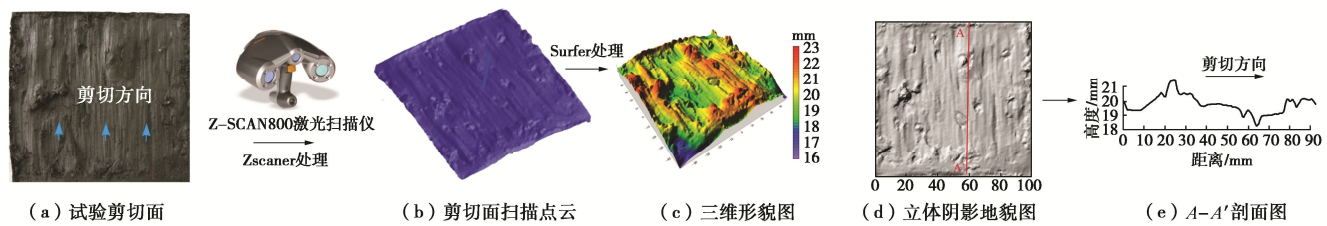


图 2 剪切面三维形貌提取流程

Fig. 2 Extraction process of 3D morphology of shear surface

1.2 剪切面三维形貌扫描及特征参数选取

采用美国 Z-Corporation 的 Z-SCAN800 型手持式激光扫描仪,精确扫描滑带土试验剪切面的起伏形态,扫描数据点精度 50 μm, 点密度 0.2 mm。单个剪切面试样的 x-y 平面尺寸为 100 mm×100 mm。在保持原始数据精度不变的基础上,采用 ZScanner 软件处理后导入 Surfer 软件,以 0.5 mm 为间隔提取平行于剪切方向剖面线,通过多剖面的起伏度、伸长率和相对起伏高度均方根表征剪切面三维粗糙度(图 2)。

已有描述断面形态特征的三维形貌参数可分为高差参数和纹理参数两大类^[23-24],本次选取了高度参数——剪切面起伏度 R , 纹理特征参数——剪切面伸长率 S 和相对起伏高度均方根 Z_2 进行分析。

2 试验结果分析

2.1 砾石对残余强度参数的影响

砾石作为滑带土的重要组成部分,其变化对材料的整体力学特性影响较大。李远耀等^[8]对三峡库区

3000 多组滑带土抗剪强度参数统计分析后认为,砾石对残余强度的影响不可忽视。Wen 等^[25]认为,黏土含量和塑性指数可用于估算粒径小于 2 mm 滑带土的残余强度,但不适用于估算含有大量砾石的滑带土残余强度。Li 等^[26]研究表明,粒径分布与含砾滑带土残余强度有密切关系。

本次试验结果表明(图 3 (a), (b)): ①天然和饱和条件下,滑带土的残余内摩擦角 φ 均随含石量的增加而增大,且存在较好的正线性相关性;②残余黏聚力 c 随砾石含量增加呈现先增长后减小的趋势,但整体上黏聚力值都比较小;③当砾石含量相同时,饱和和 φ 值均低于天然 φ 值,说明含水率对其残余强度也有重要的影响;④天然 φ 值和砾石含量的线性相关曲线与饱和 φ 值和砾石含量的线性相关曲线大致平行,表明虽然含水率不同,但只要滑带土的物质成分和结构不变, φ 值对于砾石含量的增长率几乎是一定值。

残余强度参数 φ 值和 c 值均随砾石最大粒径的增大呈现先快速增长后趋于平缓的趋势(图 3 (c))。说

明随粒径增大,砾石对滑带土残余强度的影响会逐渐衰减,在含砾滑带土试验测试中可以筛除个别大的砾石,整体上对其残余强度影响较小。

上述试验结果反映了江顶崖古滑坡在复活演化过程中各参数之间的变化关系,在上覆压力不变(按滑体厚度确定)的情况下,粒径分布、含水率与含砾滑带土残余强度的关系可以用于指导滑坡防治设计。

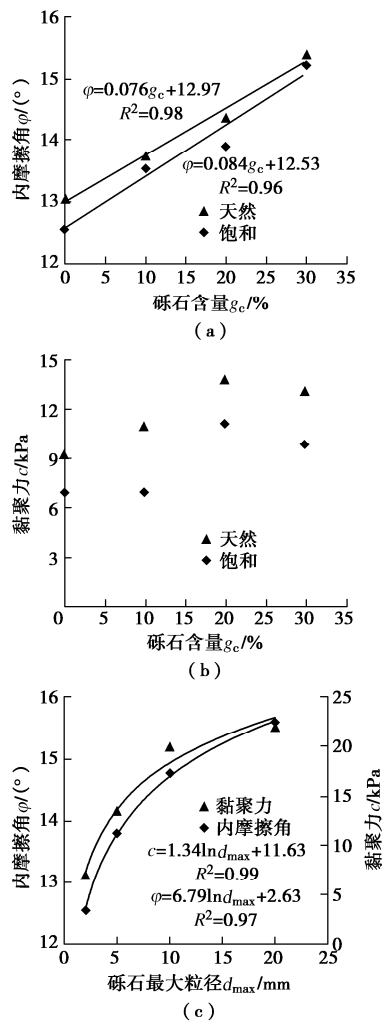


图3 残余强度参数与砾石含量、最大粒径的关系

Fig. 3 Relationship among residual strength parameters, gravel content and maximum particle size

2.2 剪切面摩擦系数与粗糙度的关系

残余摩擦系数 μ 是滑带土力学性质的宏观表现,在剪切试验中用残余剪应力 τ_r 与垂向应力 σ_n 之比来表示 (τ_r / σ_n)。统计分析结果表明,剪切面摩擦系数 μ 与剪切面起伏度 R 、伸长率 S 呈较明显的对数函数关系,与相对起伏高度均方根 Z_2 呈较明显的线性关系(图4),可表示为

$$\mu = 0.087 \ln S + 0.686 \quad (R^2 = 0.833), \quad (1)$$

$$\mu = 0.144 \ln R + 0.756 \quad (R^2 = 0.783), \quad (2)$$

$$\mu = 0.954 Z_2 + 0.196 \quad (R^2 = 0.846). \quad (3)$$

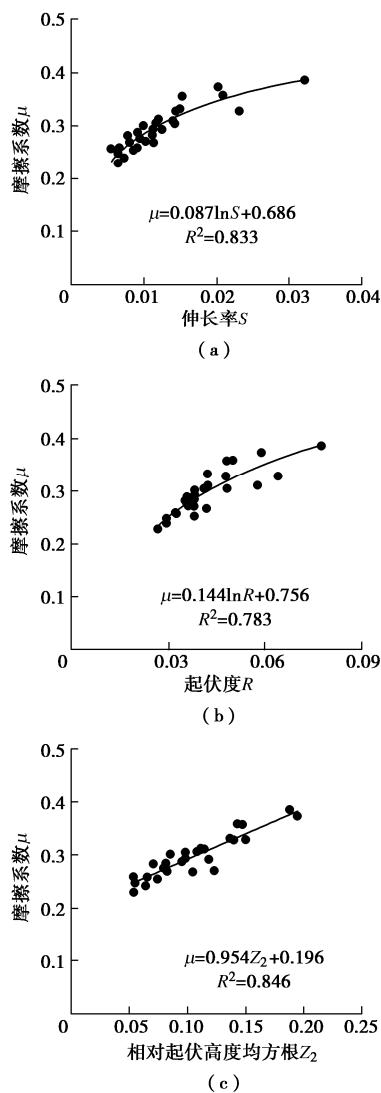


图4 剪切面摩擦系数与粗糙度的关系

Fig. 4 Relationship between friction coefficient and roughness of shear surface

以上分析表明,通过剪切面的粗糙度,可以建立滑带土宏观力学性质与细观结构参数的联系,并为滑带土残余强度基于细观结构的估算提供依据。

2.3 剪切面粗糙度的影响因素分析

(1) 砾石最大粒径

试验结果表明,砾石最大粒径决定了剪切面的最大起伏度,是影响剪切面抗剪强度的重要因素。随最大粒径的增大,剪切面形貌等值线中“凸起”和“凹陷”的直径越来越大,等值线也越来越密集(图5),同时其剪切面最大起伏高度也出现显著的增大。拟合数据发现,剪切面摩擦系数和粗糙度均随砾石最大粒径的增大而增大,但增大趋势由最初的快速增长随粒径不断增大而逐渐减缓,大致呈幂函数关系(图6)。

(2) 砾石含量

统计分析表明,当砾石含量为0%~30%时,随砾石含量增加,剪切面中的“凸起”和“凹陷”越来越

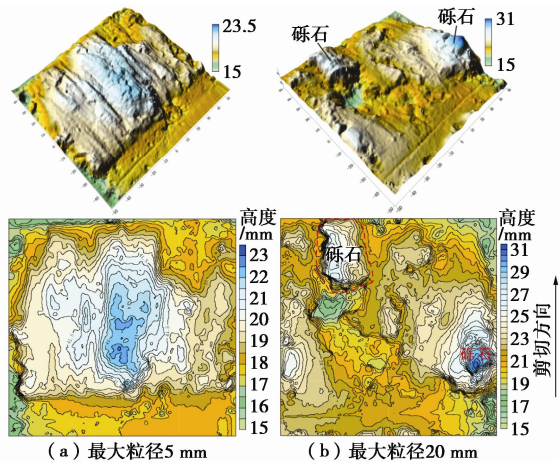


图 5 不同最大粒径下剪切面等值线图 (饱和, 300 kPa)

Fig. 5 Contour map of shear surface morphology under different maximum particle sizes (saturated, 300 kPa)

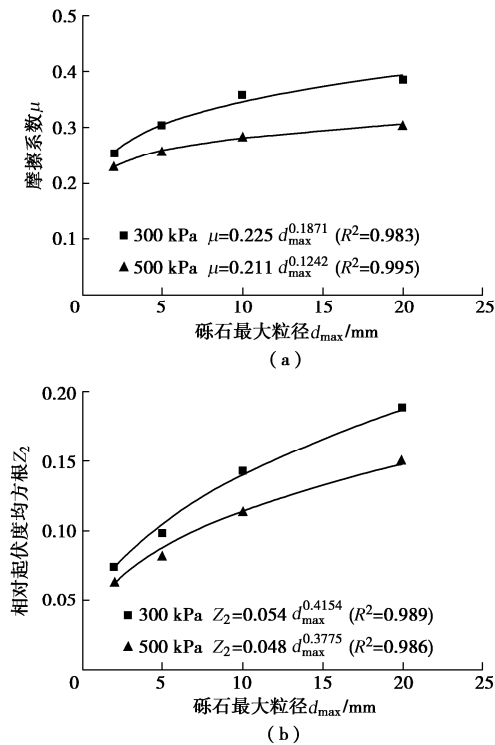


图 6 剪切面摩擦系数、粗糙度与砾石最大粒径的关系

Fig. 6 Relationship among friction coefficient, roughness of shear surface and maximum particle size of gravels

多, 其中“凸起”表示该处为砾石, “凹陷”为另一剪切面中砾石留下的“印痕”; 同时随砾石含量增加, 剪切面最大起伏高度也有一定程度的增长, 这是由多个砾石叠加在一起造成的。拟合数据发现, 滑带土剪切面的摩擦系数与砾石含量呈正线性相关性 (图 7 (a)), 这与细观上剪切面粗糙度和砾石含量之间的关系一致 (图 7 (b))。

(3) 垂向应力

含砾滑带土多出现于大型—巨型的深层滑坡中, 因此不能忽视垂向应力对残余强度的影响。前人研究

表明, 黏性土的残余强度包络线在较低的法向压力下通常表现出弯曲现象, 即从整体上看, 该压力区内的残余强度与法向压力间存在较强的非线性^[27-29], 滑带土残余摩擦系数随垂向应力的增加而减小^[30], Mesri 等^[31]认为, 低法向压力下, 黏土矿物沿剪切方向排列的不彻底性是造成上述现象的原因。

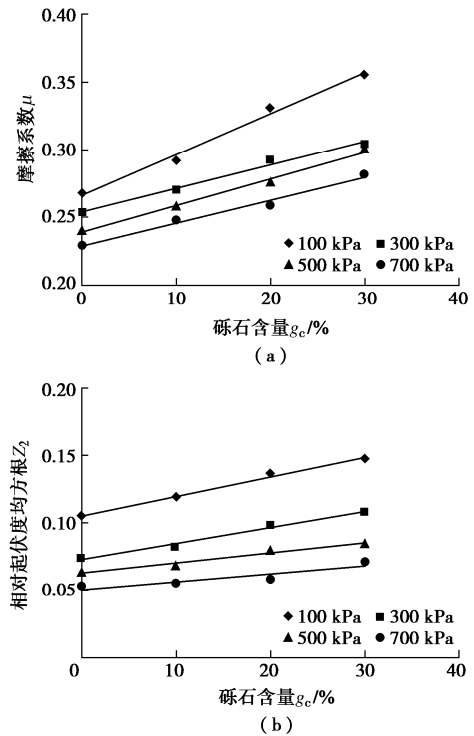


图 7 剪切面摩擦系数、粗糙度与砾石含量的关系 (饱和)

Fig. 7 Relationship among friction coefficient, roughness and gravels content (saturated)

通过细观定量刻画剪切面粗糙度验证了上述观点。从图 8 可以看出, 在垂向应力 100 kPa 时, 剪切面等值线中的“凸起”和“凹陷”基本呈杂乱的点状分布, 当垂向应力达到 700 kPa 时, 等值线图中沿剪切方向的线状排列现象逐渐明显, 说明随垂向应力的增加, 剪切面中砾石的定向排列程度越来越高, 较高的垂向应力有助于滑带土中砾石翻转和定向排列。同时, 剪切面中的最大起伏高度有所下降, 说明垂向应力的压实作用在一定程度上可以降低剪切面的起伏度。通过拟合数据发现, 剪切面的摩擦系数和粗糙度均随垂向应力的增大而逐渐减小, 减小趋势从低应力下的快速下降到高应力下的逐渐趋于稳定 (图 9)。

(4) 含水率

通常, 古滑坡复活以蠕滑或慢速滑动为主, 在充分排水的慢剪试验条件下, 剪切面附近的孔隙水压力效应可以忽略不计^[32], 但水的软化作用依然可以造成含砾滑带土残余强度的降低。试验表明, 饱水工况下的剪切面颗粒定向排列程度要好于天然工况, 剪切面

的摩擦系数和粗糙度也低于天然工况,但其差值会随垂向应力的增加而逐渐减小(图10)。这是因为水对细粒土的软化作用有利于滑带土中砾石的翻转定向排列,该效应在低垂向应力下表现的更加明显。

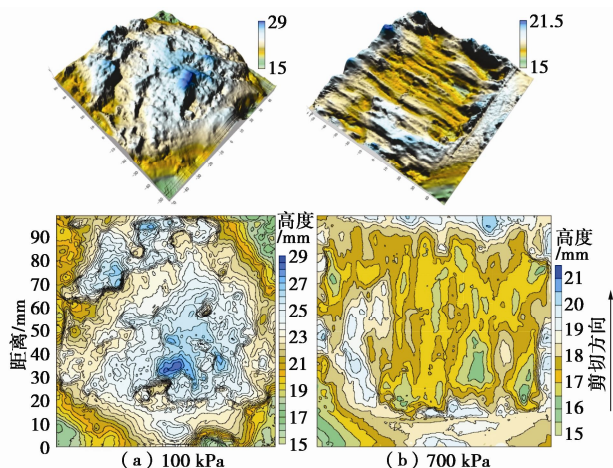


图8 不同垂向应力下剪切面等值线图(饱和,砾石含量30%)

Fig. 8 Contour map of shear surface morphology under different normal stresses (saturated, gravel content of 30%)

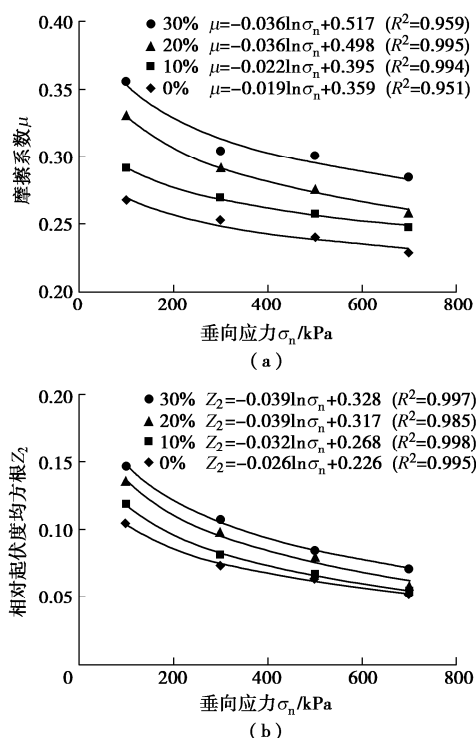


图9 剪切面摩擦系数、粗糙度与垂向应力的关系

Fig. 9 Relationship among friction coefficient, roughness and normal stress of shear surface

3 含砾滑带土残余强度变化的细观机制

3.1 残余强度变化的内外因素

根据图2所示流程,提取平行于剪切方向的剖面

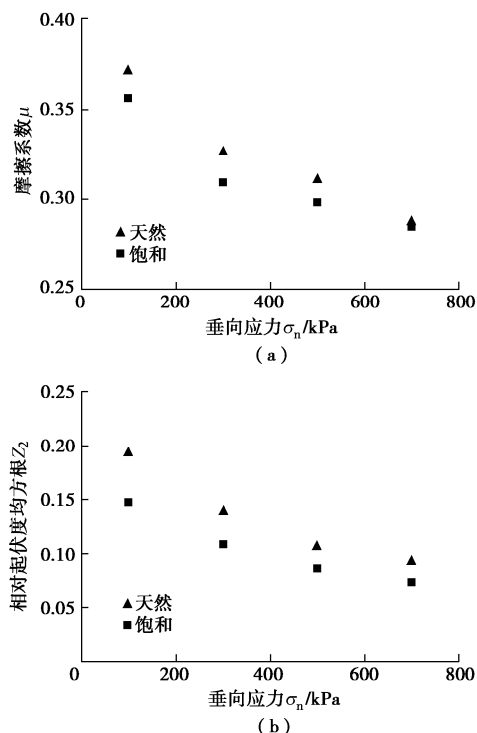


图10 不同状态下摩擦系数、粗糙度与垂向应力的关系(砾石含量30%)

Fig. 10 Relationship among friction coefficient, roughness and normal stress under different states (gravel content of 30%)

线,通过对比分析可将不同砾石含量、最大粒径、垂向应力下的剪切面起伏形态特征概化成图11。砾石是滑带土残余强度变化的内在因素,垂向应力和水是残余强度变化的外部因素。含砾滑带土残余强度变化的影响因素主要表现为:①砾石含量主要影响剪切面“凸起”和“凹陷”的数量,砾石含量越高,“凸起”和“凹陷”的数量也越多(图11(a));②砾石最大粒径主要影响剪切面最大起伏度,粒径越大,剪切面最大起伏度也越大(图11(b));③垂向应力的压实作用和水对细粒土的软化作用可以促进砾石的定向排列,降低剪切面的起伏度,从而减小剪切面的粗糙度(图11(c))。

3.2 残余强度变化的细观力学机制

根据莫尔-库仑强度理论,土的抗剪强度 τ 由摩擦强度 $\sigma \tan \varphi$ 和黏聚强度 c 组成,土粒间的摩擦又包括滑动摩擦和咬合摩擦^[33-34]。

剪切试验结束后,将剪切面中的“凸起”部分用小刀轻轻刮去表层的细粒土后发现,剪切面中“凸起”表层覆盖为细粒土,下部为砾石,且大多数砾石没有被剪断(图12)。这是因为,当滑带土中砾石含量 $g_c \leq 30\%$ 时,土颗粒仍然以粉土、黏土为主,其结构为悬浮密实结构^[35],加之剪切速度很慢,滑带中的砾石有足够的时间和空间通过滑移、错动、翻转来调

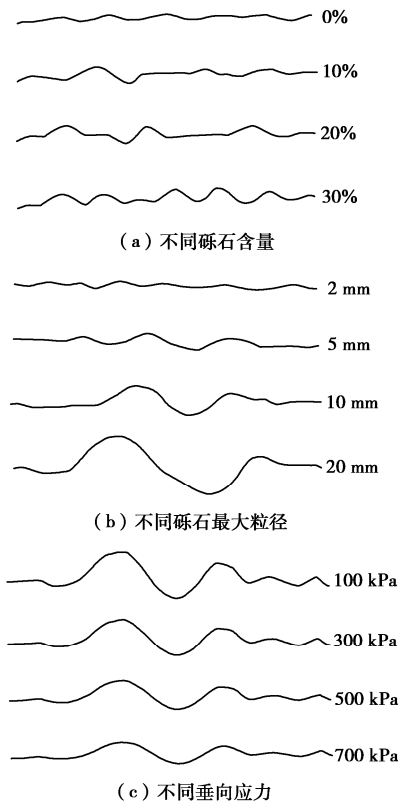


图 11 剪切面起伏形态概化模式图

Fig. 11 Generalized model for shear surface fluctuation

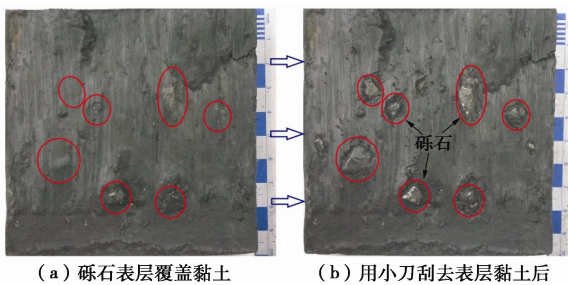


图 12 含砾滑带土剪切面中的砾石分布特征

Fig. 12 Distribution characteristics of gravels on shear surface
整位置重新定向排列以减小摩擦阻力, 在该过程中大多数砾石之间并没有直接接触, 因此砾石被剪断的现象很少。经过长距离剪切滑动后, 含砾滑带土的黏聚强度已基本丧失, 咬合摩擦也大幅度减小, 其残余强度主要由土颗粒之间的滑动摩擦和残余咬合摩擦所致。

图 13 为含砾滑带土在垂向压力 N 和剪切力 T 作用下形成的具有一定起伏度的剪切面示意图。砾石在局部的凸起处形成接触, 通过接触力来平衡外部施加的垂向压力 N 和剪切力 T , 当剪切面的粗糙度发生改变时, 剪切面上颗粒间接触面的角度及总面积发生改变, 从而造成抗剪强度发生改变^[20]。根据接触面与水平面之间的夹角可分为近乎水平方向的滑动摩擦 (A 点、 B 点、 C 点) 和具有一定角度的咬合摩擦 (D 点)。

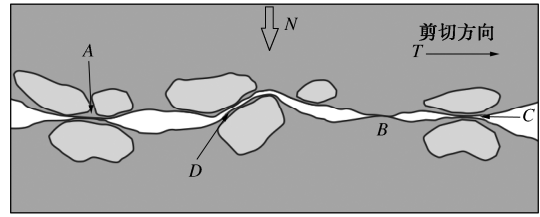


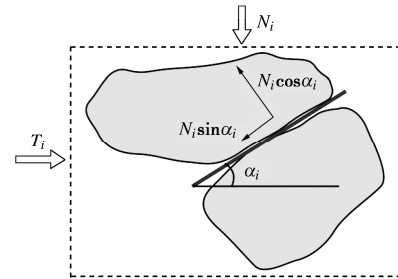
图 13 剪切面摩擦示意图

Fig. 13 Schematic diagram of shear surface friction

如图 14 所示的接触单元 i 在垂向荷载 N_i 作用下, 砾石之间的接触面会形成法向接触力 $N_i \cos \alpha_i$, 法向接触力提供的摩擦力为 $\mu_b N_i \cos \alpha_i$, 垂向荷载 N_i 提供的与剪切方向相反的分力为 $N_i \sin \alpha_i$, 且与外荷载满足力的平衡条件, 在该接触面产生的抗剪力为 F_i :

$$F_i = \mu_b N_i \cos \alpha_i + N_i \sin \alpha_i, \quad (4)$$

$$\mu_b = \frac{\tau_b}{\sigma_b}. \quad (5)$$

图 14 接触单元 i 受力示意图Fig. 14 Stress diagram of contact unit i

根据摩擦学原理^[36]和有效应力原理^[33], 颗粒一般在凸起的接触点达到屈服, 真实接触面积与垂向载荷的关系为

$$A_c = \frac{N}{\sigma_b}, \quad (6)$$

则

$$A_i = \frac{N_i \cos \alpha_i}{\sigma_b}. \quad (7)$$

式中 α_i 为接触面与水平面之间的夹角, 且 $0^\circ \leq \alpha_i \leq 90^\circ$; A_c 为整个剪切面的真实接触面积; A_i 为接触单元 i 的真实接触面积; μ_b , τ_b , σ_b 分别为细粒土的摩擦系数、剪切强度极限和压缩屈服极限。

将式 (5), (7) 代入式 (4) 得到

$$F_i = \tau_b A_i + \sigma_b A_i \tan \alpha_i. \quad (8)$$

当 $\alpha_i = 0$ 时, 式 (8) 取得最小值, 即 $F_i = \tau_b A_i$, 此时该接触面由咬合摩擦转变为滑动摩擦。

由式 (8) 可知, 含砾滑带土的残余强度由剪切面上砾石本身的接触性质和剪切面的起伏程度共同决定。在砾石、水、垂向应力等作用下, 剪切面的粗糙度发生改变, 砾石之间接触面的夹角及面积也随之改

变,从而造成残余强度发生变化:砾石含量决定了咬合摩擦接触面 i 的数量,随含石量增大,剪切面中咬合摩擦接触面增加;砾石最大粒径主要影响接触面积 A_i 和夹角 α_i ,粒径越大, A_i 和夹角 α_i 越大,咬合摩擦也就越大;垂向应力的压实作用和水对黏土的软化作用可以促进剪切面处颗粒发生提升、错动、转动、拔出,使黏土在砾石表面附着,黏土的润滑作用可以促进砾石之间咬合摩擦转变为黏土之间的滑动摩擦,从而减小滑带土的抗剪强度。

4 结 论

基于中型反复直剪试验和高精度三维激光扫描技术对含砾滑带土剪切面粗糙度进行了定量刻画,研究了残余强度变化的细观机制,得到以下3点结论。

(1)含砾滑带土的摩擦系数与剪切面的起伏度、伸长率、相对起伏高度均方根等各粗糙度指标均呈较明显的相关性,通过剪切面的粗糙度,建立了滑带土宏观力学特征与细观结构参数的联系。

(2)含砾滑带土剪切面粗糙度与砾石含量、砾石粒径、垂向应力、含水率密切相关,砾石是滑带土残余强度变化的内在因素,砾石含量主要影响剪切面“凸起”和“凹陷”的分布数量,砾石最大粒径主要影响剪切面最大起伏度;垂向应力和水是残余强度变化的外部因素,垂向应力的压实作用和水对细粒土的软化作用可以促进砾石的定向排列,降低剪切面的起伏度,从而减小剪切面的粗糙度。

(3)含砾滑带土的残余强度由剪切面上砾石本身的接触性质和剪切面的起伏程度共同决定:砾石含量决定了咬合摩擦接触面的数量,随含石量增大,剪切面中咬合摩擦接触面增加;砾石最大粒径控制了接触面积和夹角,粒径越大,咬合摩擦越大;垂向应力的压实作用和水对黏土的软化作用促进剪切面处颗粒发生提升、错动、转动、拔出,使黏土在砾石表面附着,黏土的润滑作用促进砾石之间咬合摩擦转变为黏土之间的滑动摩擦,从而减小滑带土的抗剪强度。

致 谢:感谢中国地质科学院地质力学研究所郭长宝研究员、成都理工大学裴向军教授、崔圣华博士和东华大学杨爱武教授在野外调查和试验过程中给予的指导和帮助,感谢各位专家及编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献:

[1] 张永双,郭长宝,周能娟.金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J].岩土工程学报,2013,35(3):445-453.(ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao, ZHOU

Neng-juan. Characteristics of Chongjianghe landslide at a branch of Jinsha River and its local reactivation mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 445-453. (in Chinese))

- [2] WEN B P, JIANG X Z. Effect of gravel content on creep behavior of clayey soil at residual state: implication for its role in slow-moving landslides [J]. Landslides, 2017, 14(2): 559-576.
- [3] 吴瑞安,张永双,郭长宝,等.川西松潘上窑沟古滑坡复活特征及危险性预测研究[J].岩土工程学报,2018,40(9):1659-1667.(WU Rui-an, ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao, et al. Reactivation characteristics and hazard prediction of Shangyaogou ancient landslide in Songpan County of Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1659-1667. (in Chinese))
- [4] 张永双,吴瑞安,郭长宝,等.古滑坡复活问题研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(7):728-740.(ZHANG Yong-shuang, WU Rui-an, GUO Chang-bao, et al. Research progress and prospect on reactivation of ancient landslides[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(7): 728-740. (in Chinese))
- [5] 黄晓虎,易武,龚超,等.开挖致使古滑坡复活变形机理研究[J].岩土工程学报,2020,42(7):1276-1285.(HUANG Xiao-hu, YI Wu, GONG Chao, et al. Reactivation and deformation mechanism of ancient landslides by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1276-1285. (in Chinese))
- [6] 刘虎虎,缪海波,陈志伟,等.三峡库区侏罗系顺层滑坡滑带土的剪切蠕变特性[J].岩土工程学报,2019,41(8):1573-1580.(LIU Hu-hu, MIAO Hai-bo, CHEN Zhi-wei, et al. Shear creep behaviors of sliding-zone soil of bedding landslide in Jurassic stratum in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1573-1580. (in Chinese))
- [7] CHEN X P, LIU D. Residual strength of slip zone soils[J]. Landslides, 2014, 11(2): 305-314.
- [8] 李远耀,殷坤龙,柴波,等.三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J].岩土力学,2008,29(5):1419-1424,1429.(LI Yuan-yao, YIN Kun-long, CHAI Bo, et al. Study on statistical rule of shear strength parameters of soil in landslide zone in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1419-1424, 1429. (in Chinese))
- [9] 胡瑞林,李 晓,王 宇,等.土石混合体工程地质力学特

- 性及其结构效应研究[J]. 工程地质学报, 2020, **28**(2): 255 - 281. (HU Rui-lin, LI Xiao, WANG Yu, et al. Research on engineering geomechanics and structural effect of soil-rock mixture[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, **28**(2): 255 - 281. (in Chinese))
- [10] LI Y R, AYDIN A. Shear zone structures and stress fluctuations in large ring shear tests[J]. Engineering Geology, 2013, **167**: 6 - 13.
- [11] 刘 动, 陈晓平. 滑带土残余强度的室内试验与参数反分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, **42**(2): 81 - 87. (LIU Dong, CHEN Xiao-ping. Laboratory test and parameter back analysis of residual strength of slip zone soils[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, **42**(2): 81 - 87. (in Chinese))
- [12] 徐文杰, 王 识. 基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(10): 2152 - 2160. (XU Wen-jie, WANG Shi. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(10): 2152 - 2160. (in Chinese))
- [13] 杜时贵. 简易纵剖面仪及其在岩体结构面粗糙度系数研究中的应用[J]. 地质科技情报, 1992, **11**(3): 91 - 95. (DU Shi-gui. Simple profile instrument and its application to study joint roughness coefficient of rock[J]. Geological Science and Technology Information, 1992, **11**(3): 91 - 95. (in Chinese))
- [14] 夏才初, 肖维民, 王 伟, 等. 不同接触状态下节理三维组合形貌的计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(11): 2203 - 2210. (XIA Cai-chu, XIAO Wei-min, WANG Wei, et al. Calculation method for three-dimensional composite topography of joint under different contact conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(11): 2203 - 2210. (in Chinese))
- [15] 葛云峰, 唐辉明, 王亮清, 等. 天然岩体结构面粗糙度各向异性、尺寸效应、间距效应研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(1): 170 - 179. (GE Yun-feng, TANG Hui-ming, WANG Liang-qing, et al. Anisotropy, scale and interval effects of natural rock discontinuity surface roughness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(1): 170 - 179. (in Chinese))
- [16] 邓华锋, 肖 瑶, 李建林, 等. 重复剪切作用下节理强度和形貌特征劣化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 183 - 188. (DENG Hua-feng, XIAO Yao, LI Jian-lin, et al. Degradation laws of joint strength and micro-morphology under repeated shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 183 - 188. (in Chinese))
- [17] 彭守建, 岳雨晴, 刘义鑫, 等. 不同成因结构面各向异性特征及其剪切力学特性[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3291 - 3299. (PENG Shou-jian, YUE Yu-qing, LIU Yi-xin, et al. Anisotropic characteristics and shear mechanical properties of different genetic structural planes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3291 - 3299. (in Chinese))
- [18] 许 江, 瞿佳美, 刘义鑫, 等. 循环剪切荷载作用下充填对结构面剪切特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(5): 1627 - 1637. (XU Jiang, QU Jia-mei, LIU Yi-xin, et al. Influence of filling material on the behavior of joints under cyclic shear loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(5): 1627 - 1637. (in Chinese))
- [19] BAO H, ZHANG G B, LAN H X, et al. Geometrical heterogeneity of the joint roughness coefficient revealed by 3D laser scanning[J]. Engineering Geology, 2020, **265**: 105415.
- [20] 刘新荣, 涂义亮, 王林枫, 等. 土石混合体的剪切面分形特征及强度产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(9): 2260 - 2274. (LIU Xin-rong, TU Yi-liang, WANG Lin-feng, et al. Fractal characteristics of shear failure surface and mechanism of strength generation of soil-rock aggregate[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(9): 2260 - 2274. (in Chinese))
- [21] 杨忠平, 蒋源文, 李诗琪, 等. 土石混合体-基岩界面剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(10): 1947 - 1954. (YANG Zhong-ping, JIANG Yuan-wen, LI Shi-qi, et al. Experimental study on shear mechanical properties of soil-rock mixture-bedrock interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(10): 1947 - 1954. (in Chinese))
- [22] 土工试验方法标准: GB/T50123—2019[S]. 2019. (Standard for Soil Test Methods: GB/T50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [23] 陈世江, 朱万成, 王创业, 等. 岩体结构面粗糙度系数定量表征研究进展[J]. 力学学报, 2017, **49**(2): 239 - 256. (CHEN Shi-jiang, ZHU Wan-cheng, WANG Chuang-ye, et al. Review of research progresses of the quantifying joint roughness coefficient[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, **49**(2): 239 - 256. (in Chinese))
- [24] 李 化, 张正虎, 邓建辉, 等. 岩石节理三维表面形貌精细描述与粗糙度定量确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程

- 学报, 2017, **36**(增刊 2): 4066 - 4074. (LI Hua, ZHANG Zheng-hu, DENG Jian-hui, et al. Precise description of rock joints 3D superficial morphology and the quantitative determination of 3D joint roughness coefficient[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 4066 - 4074. (in Chinese))
- [25] WEN B P, AYDIN A, DUZGOREN-AYDIN N S, et al. Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China[J]. Engineering Geology, 2007, **93**(3/4): 82 - 98.
- [26] LI Y R, WEN B P, AYDIN A, et al. Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area[J]. Engineering Geology, 2013, **154**: 106 - 115.
- [27] 陈传胜, 张建敏, 文仕知. 基于有效垂直应力水平的滑带土强度参数适用性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(8): 1705 - 1711. (CHEN Chuan-sheng, ZHANG Jian-min, WEN Shi-zhi. Study of applicability of strength parameters of sliding zone soil based on effective vertical stress level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(8): 1705 - 1711. (in Chinese))
- [28] EID H T, RABIE K H, WIJEWICKREME D. Drained residual shear strength at effective normal stresses relevant to soil slope stability analyses[J]. Engineering Geology, 2016, **204**: 94 - 107.
- [29] 范志强, 唐辉明, 谭钦文, 等. 滑带土环剪试验及其对水库滑坡临滑强度的启示[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1698 - 1706. (FAN Zhi-qiang, TANG Hui-ming, TAN Qin-wen, et al. Ring shear tests on slip soils and their enlightenment to critical strength of reservoir landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1698 - 1706. (in Chinese))
- [30] 李维树, 邬爱清, 丁秀丽. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的影响因素研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1): 56 - 60. (LI Wei-shu, WU Ai-qing, DING Xiu-li. Study on influencing factors of shear strength parameters of slide zone clay in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 56 - 60. (in Chinese))
- [31] MESRI G, HUVAJ-SARIHAN N. Residual shear strength measured by laboratory tests and mobilized in landslides[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, **138**(5): 585 - 593.
- [32] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Géotechnique, 1985, **35**(1): 3 - 18.
- [33] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [34] 李广信. 漫话土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (LI Guang-xin. Some Thoughts Concerning Soil Mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))
- [35] 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. (YANG Ji-hong, DONG Jin-yu, HUANG Zhi-quan, et al. Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 161 - 166. (in Chinese))
- [36] 刘正林. 摩擦学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. (LIU Zheng-lin. Principles of Tribology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese))