

DOI: 10.11779/CJGE2016S2026

# 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

杨继红, 董金玉\*, 黄志全, 郑珠光, 齐 丹

(华北水利水电大学资源与环境学院, 河南 郑州 450045)

**摘 要:** 由土石混合介质组成的堆积体边坡在中国有着广泛的分布, 尤其是库区巨型、大型松散堆积体边坡的变形及稳定性更是水电工程建设中极为关注的问题。针对该类边坡物质组成和结构的复杂多变性, 选择三峡库区典型堆积体边坡进行现场调查和取样, 通过室内大型直剪试验, 系统地研究了含石量对堆积体剪应力-位移曲线和抗剪强度的影响规律。含石量对土石混合介质堆积体的强度和变形特性具有控制作用, 随着含石量的变化, 堆积体剪应力-位移关系曲线可拟合为指数模型、双曲线模型和应变软化介质模型3种形式; 随着含石量的增加, 堆积体抗剪强度逐渐增大; 黏聚力随含石量的增加呈现出先增大后减小的趋势, 即存在一个临界含石量约为60%, 黏聚力-含石量变化曲线为二次多项式形式; 内摩擦角与含石量关系呈现一直增大趋势, 其变化曲线近似为指数形式。

**关键词:** 土石混合介质堆积体; 含石量; 室内大型直剪试验; 剪应力-位移关系曲线; 抗剪强度

中图分类号: TV223

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0161-06

**作者简介:** 杨继红(1976-), 女, 河南巩义人, 副教授, 博士, 主要从事地质工程方面的教学和科研工作。E-mail: yjh04616@126.com。

## Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents

YANG Ji-hong, DONG Jin-yu, HUANG Zhi-quan, ZHENG Zhu-guang, QI Dan

(School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** The accumulation bodies composed of soil-rock mixture are widely distributed in China. The deformation and stability of huge and large-scale loose accumulation bodies in reservoir areas are extremely concerned during construction of hydroelectric projects. Aiming at the complex property and material composition of accumulation slopes, the typical accumulation slopes in Three Gorges Reservoir region are studied through field investigation, sampling and laboratory tests. The influences of stone contents on the relationship between shear stress and displacement and soil strength parameters are analyzed by using the large-scale direct shear tests. Mechanical properties and deformation of accumulation bodies are controlled by the stone contents. With change of the stone content, the relation curves of shear stress and displacement are classified into three types: exponential curve, hyperbolic form and strain softening. The cohesion of accumulation body increases with the increment of the stone content in the form of quadratic polynomial curve, and generally it reaches the peak value when the stone content is about 60%, then it decreases as the stone content increases. The internal friction angle increases with the increment of the stone content in the form of exponential curve.

**Key words:** soil-rock accumulation body; stone content; lab large-scale direct shear test; shear stress-displacement relation; shear strength

## 0 引 言

关于土体、岩体的力学性质及其边坡的变形破坏机理国内外已做过许多研究, 并取得了较系统的研究成果。而对于土石混合介质组成的堆积体边坡, 由于它具有物质组成的复杂性、结构分布的不规则性以及试样难以采集性等内在独特的性质, 相关的研究工作较为困难, 取得的研究成果也很有限。Patwardhan等<sup>[1]</sup>、

Shakoor等<sup>[2]</sup>通过大型直剪试验研究了含石量对含砾石质黏土的抗剪强度和无侧限抗压强度的影响规律;

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(41102203); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2014GGJS-067); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301034); 华北水利水电大学2014年“青年科技创新人才支持计划”项目(70430)

**收稿日期:** 2016-05-19

\*通讯作者(E-mail: dongjy0552@126.com)

Savely等<sup>[3]</sup>通过大型现场试验研究了卵砾石含量对宏观抗剪强度的影响；田永铭等<sup>[4]</sup>通过室内三轴试验研究了宏观各向同性混杂岩土体的宏观细观力学特性；董云等<sup>[5]</sup>采用自行研制的大尺度直剪试验系统研究了含石量、岩性及含水率等因素对土石混合介质强度特征的影响；Lindquist等<sup>[6-7]</sup>、Medley<sup>[8]</sup>、Sonmez等<sup>[9-10]</sup>分别采用水泥土等作为填充材料、用块石作为骨料按照一定的含石量及定向性制作试验进行三轴剪切试验研究；时卫民等<sup>[11]</sup>采用室内直剪试验对三峡地区分布的碎石土抗剪强度与含石量、含水率等特征的关系进行了研究；李晓等<sup>[12]</sup>在长江三峡地区进行了土石混合体的原位推剪与压剪试验，获得了土石混合体的剪应力与剪切位移曲线、剪切强度曲线、破坏模式以及相应的抗剪强度；侯红林等<sup>[13]</sup>利用大型原位直剪试验研究了黄河二级阶地上发育的冲洪积成因碎石土的剪胀性特征；李维树等<sup>[14]</sup>研究了三峡库区水位涨落引起的土石混合介质堆积体在不同含水率状态下抗剪强度参数的变化规律；徐文杰等<sup>[15]</sup>进行了土石混合体的大尺度直剪试验。

已有的研究成果表明，堆积体中碎石或块石的含量即“含石量”其强度和变形特性具有控制作用，但目前对不同含石量条件下堆积体结构的变化以及剪应力-位移曲线的特征及强度研究甚少。本文通过室内大型直剪试验，深入系统地研究了不同含石量条件下堆积体剪应力-位移关系和其抗剪强度特性的变化规律。

## 1 室内大型直剪试验

### 1.1 堆积体滑坡基本特征

三峡库区某典型堆积体滑坡，滑坡前缘已达江边，高程60~65 m，宽570 m，后缘高程560~584 m，宽440 m，纵向长1250 m，平面上总体呈长条形，面积约0.7 km<sup>2</sup>，估算体积为2.3×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>，属于大型堆积体滑坡。滑坡体物质平均厚度为30~35 m，滑坡中部最厚达70 m，滑床基岩在高程440 m以下为T<sub>2b</sub><sup>4</sup>层的紫红色粉砂岩及泥岩，在高程440 m以上为T<sub>2b</sub><sup>3</sup>层的灰黄色泥灰岩。

滑坡堆积体主要为土夹碎块石或块石夹土，厚约15~30 m，土石比约为3:7，含水率11%~14%，容重为19 kN/m<sup>3</sup>。高程180 m以下至前缘，主要为紫红色的黏土夹紫红色碎块石，少量为灰黄色黏土夹碎块石，岩性为粉砂岩；高程180 m至后缘一带，主要为灰黄色黏土夹灰黄色灰岩碎块石，岩性为泥灰岩。

在滑坡的上游侧，由于冲沟切割，堆积体和基岩出露，堆积体为紫红色的黏土夹紫红色碎块石，土石比约3:7，碎块岩性为粉砂岩，粒径主要为1~8 cm，

在此点对堆积体进行了取样（图1）。



图1 堆积体出露特征

Fig. 1 Characteristics of accumulation body

### 1.2 试验方案及试验仪器

仪器适用的最大控制粒径为80 mm，对于实际野外堆积体中超过80 mm的颗粒用5~80 mm等量替代。试验中定义颗粒粒径大于5 mm的为“石”，小于5 mm的为“土”，因此定义5 mm<碎块石粒径<80 mm所占堆积体总质量的百分比为“含石量”，试样尺寸为φ504.6 mm×400 mm，制备不同含石量的试样10%，30%，40%，45%，50%，60%，70%，80%，试样含水率为12%。利用大型应变控制式直剪仪，采用重塑样进行室内大型直剪试验，试验中施加的竖向压力分别为100，200，300 kPa，剪切速率0.4~1.2 mm/min，数据是自动采集，主要包括4个垂直位移传感器和1个水平位移传感器，如图2所示。不同含石量的典型试样如图3所示。

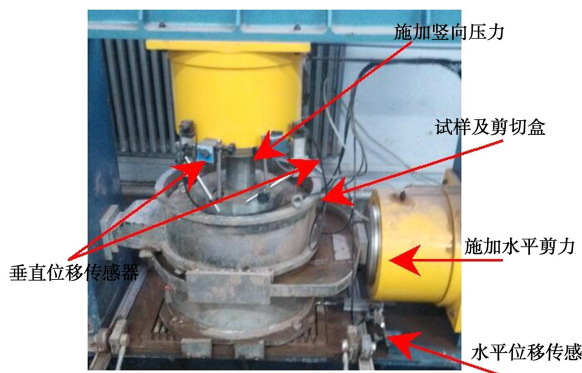


图2 大型应变控制式直剪仪

Fig. 2 Large strain-controlled direct shear apparatus



(a) 含石量30%的试样



(b) 含石量 60% 的试样



(c) 含石量 80% 的试样

图 3 不同含石量的典型试样

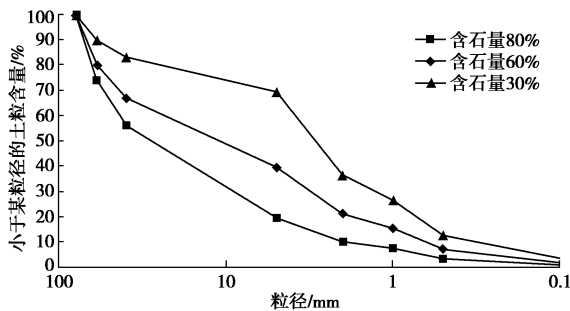
Fig. 3 Typical remodeling samples with different stone contents  
配置的不同试样的级配曲线如图4所示。

图 4 不同含石量试样的级配曲线

Fig. 4 Particle-size distribution under different stone contents

## 2 不同含石量下堆积体抗剪强度特性

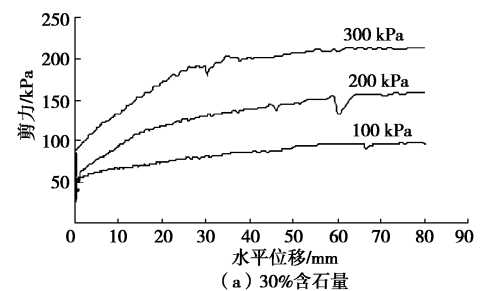
### 2.1 直剪试验结果

图 5 为不同含石量下堆积体的剪应力 - 位移关系曲线, 由图 5 (a) 可以看出, 堆积体含石量处于 30% 的低含石量状态时, 在初始剪切阶段即水平位移在 0~35 mm 之间时, 曲线弯曲程度较大, 反映了材料依靠自身硬化抵抗变形的能力较大, 而在大于 35 mm 之后, 曲线变化趋于平缓, 在强度基本保持不变的情况下变形可以有很大的发展, 表现出较强的变形适应能力; 在较高竖向压力下, 由于部分碎块石被压碎, 在剪应力 - 位移关系曲线上会出现一些跳跃。

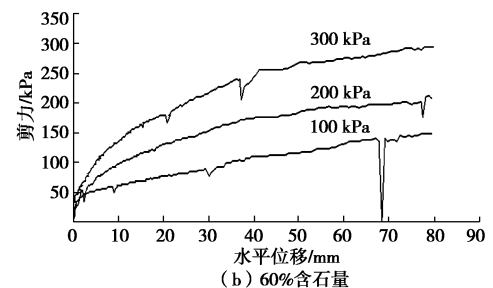
由图 5 (b) 可以看出, 堆积体含石量处于 60% 的

中等含石量状态时, 其剪应力 - 位移关系曲线非线性应变硬化特征较为明显, 也反映了随着含石量的增加堆积体依靠自身硬化抵抗变形的能力较大; 由于剪切增加了接触面的粗糙程度, 其抗剪强度显著提高; 由于部分碎块石被压碎, 剪应力 - 位移关系曲线上亦出现一些跳跃。

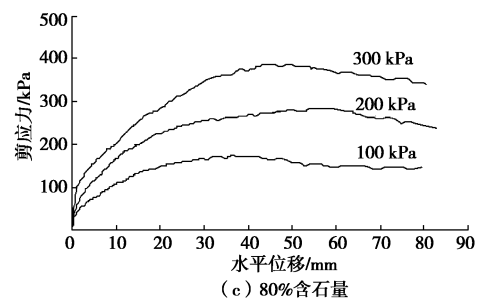
由图 5 (c) 可以看出, 堆积体含石量处于 80% 的高含石量状态时, 其剪应力 - 位移关系曲线具有轻微的应变软化特征, 这是因为作为胶结质或充填物的土体结构在屈服后虽然已基本破坏, 但随之土体与碎块石又形成新的交错结构, 堆积体的整体结构性尚未丧失, 故其抗剪强度降低不太明显。



(a) 30% 含石量



(b) 60% 含石量



(c) 80% 含石量

图 5 不同含石量及不同竖向压力下剪应力 - 位移曲线

Fig. 5 Relation curves between shear stress and displacement  
under different stone contents

由图 6 可以看出, 含石量作为土石混合介质堆积体的一个重要指标, 其变化对材料的整体力学特性影响较大, 即随着含石量的增加, 堆积体整体抗剪强度是增大的, 且在含石量小于 30% 的情况下, 随含石量增加堆积体抗剪强度变化不显著; 而在 30% < 含石量 ≤ 60% 时, 随含石量增加堆积体抗剪强度增大的较为显著; 当含石量 > 60% 时, 随含石量增加堆积体抗剪强度显著提高。

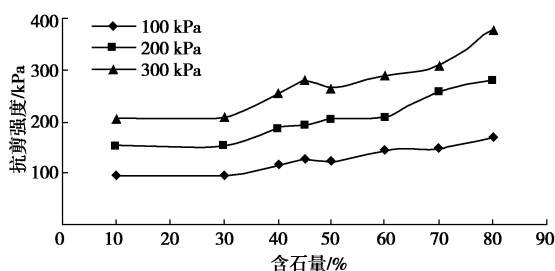


图6 不同竖向压力下抗剪强度-含石量关系曲线

Fig. 6 Relationship between shear strength and stone content under different normal stresses

根据莫尔-库伦抗剪强度理论,对不同含石量下的竖向压力和剪应力进行线性回归,得到抗剪强度线,并按图解法求得堆积体的抗剪强度指标如表1所示。

表1 不同含石量下堆积体的黏聚力和内摩擦角

Table 1 Cohesions and internal friction angles of accumulation body with different stone contents

含石量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
10	40.60	32.26
30	46.82	32.18
40	55.18	37.44
45	62.91	37.85
50	72.16	38.00
60	81.23	38.57
70	67.34	40.40
80	65.32	47.63

## 2.2 剪应力-位移关系曲线的拟合

直剪试验剪应力-位移即 $\tau-u$ 关系描述的常用函数主要有双曲线模型与指数模型。以含石量30%,60%,80%的堆积体在300 kPa竖向压力下的剪应力-位移关系曲线为例进行双曲线模型与指数模型的拟合分析。

从图7(a)可以看出,含石量30%的剪应力-位移关系曲线符合指数模型形式,即

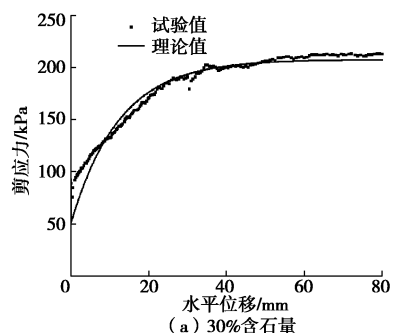
$$\left. \begin{aligned} \tau &= -155.40e^{-\frac{u}{12.48}} + 208.51, \\ r &= 0.932. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

从图7(b)可以看出,含石量60%的剪应力-位移关系曲线符合双曲线模型形式,相关性很好。

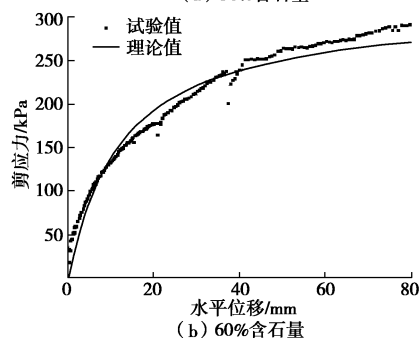
$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{u}{(1/25.19 + u/314.48)}, \\ r &= 0.983. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从图7(c)可以看出,试验得到的含石量80%的剪应力-位移关系曲线具有弱应变软化的特征,因此采用应变软化介质模型对其进行拟合,具有很好的相关性。即

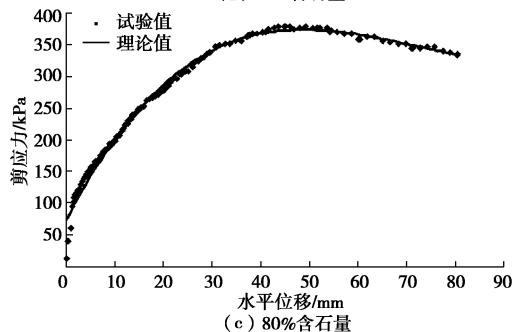
$$\left. \begin{aligned} \tau &= 78.79u \exp \left[ -\left( \frac{u}{5.14} \right)^{0.38} \right], \\ r &= 0.986. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



(a) 30%含石量



(b) 60%含石量



(c) 80%含石量

图7 不同含石量下剪应力-位移拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves between shear stress and displacement under different stone contents

## 2.3 黏聚力(内摩擦角)-含石量关系曲线

由图8可以看出,堆积体黏聚力随含石量的增加先增大后降低,其变化关系是非线性的,可用二次多项式表示,相关性较好,即

$$\left. \begin{aligned} c &= -1.363R_c^2 + 16.589R_c + 21.552, \\ r &= 0.88. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $c$ 为黏聚力, $R_c$ 为含石量, $r$ 为相关系数。

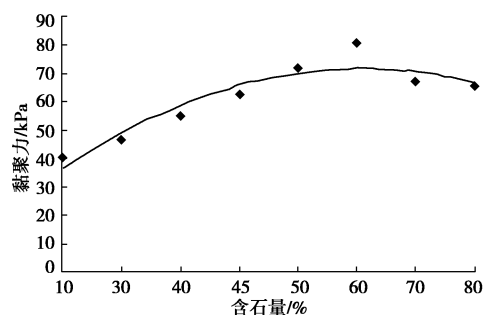


图8 黏聚力-含石量关系拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves between cohesion and stone content

由图9可以看出,堆积体内摩擦角随含石量的增加逐渐增大,其变化关系趋近指数形式,相关性较好,

即

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 30.56e^{0.0471R_c} \\ r &= 0.85 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $\varphi$  为内摩擦角,  $R_c$  为含石量,  $r$  为相关系数。

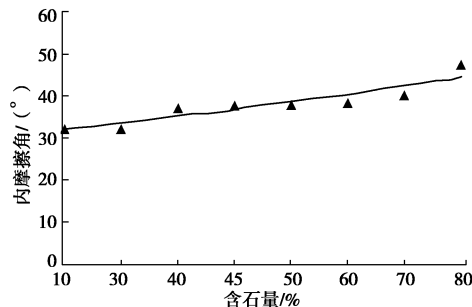


图 9 内摩擦角 - 含石量关系拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves between internal friction angle and stone content

含石量对堆积体强度的影响反映了堆积体结构形式对强度指标的影响, 随着含石量的增加, 堆积体的结构从典型的悬浮密实结构逐步转变为骨架孔隙结构, 并最终变为骨架密实结构, 如图 10 所示。不同结构形式的堆积体强度存在明显的差异, 堆积体黏聚力和内摩擦角随含石量的变化曲线大致分为 3 个阶段: 在  $R_c \leq 30\%$  即低含石量时, 堆积体中以粉土为主, 其结构为典型的悬浮密实结构,  $c$ ,  $\varphi$  值主要取决于粉土的密实度和粉土的含量; 当  $R_c$  在  $30\% \sim 60\%$  之间即处于中等含石量状态时, 堆积体处于骨架孔隙结构, 随着含石量的增大,  $c$ ,  $\varphi$  值均增大, 剪切面上碎块石起到骨架主导作用, 在剪力作用下土体首先破坏, 碎块石之间相互接触和咬合, 明显增大摩擦力; 当  $R_c > 60\%$  即处于高含石量状态时, 堆积体为骨架密实结构, 基本上为碎石, 碎石之间在剪力作用下, 互相摩擦和咬合, 使强度低的碎石首先被挤压破坏, 强度高的起骨架作用, 因此  $\varphi$  值明显增大; 由于少量的土不能充分填充空隙, 而碎石之间基本上没有黏结强度, 因此  $c$  值显著下降。总之, 随着含石量的增加, 堆积体黏聚力呈现出先增大后减小的趋势, 即存在一个临界含石量约为  $60\%$ ; 而随着含石量的增加, 堆积体内摩擦角一直呈现增大的趋势, 内摩擦角-含石量关系曲线近似为指数形式。

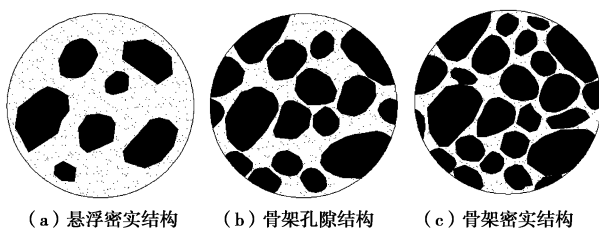


图 10 不同含石量堆积体的结构图

Fig. 10 Composition diagrams of accumulation body with different stone contents

### 3 结 论

(1) 含石量  $< 30\%$  时, 堆积体剪应力 - 位移关系在初始剪切阶段曲线弯曲程度较大, 之后趋于平缓, 含石量  $30\%$  的剪应力 - 位移关系曲线符合指数模型;  $30\% < \text{含石量} < 60\%$  时, 剪应力 - 位移关系曲线非线性应变硬化特征较为明显, 含石量  $60\%$  的剪应力 - 位移关系曲线符合双曲线模型; 含石量  $> 60\%$  时, 剪应力 - 位移关系曲线具有轻微的应变软化特征, 含石量  $80\%$  的剪应力 - 位移关系曲线可用应变软化介质模型拟合。

(2) 在含石量小于  $30\%$  的情况下, 随含石量增加堆积体抗剪强度变化不显著; 在  $30\% < \text{含石量} \leq 60\%$  时, 随含石量增加堆积体抗剪强度增大的较为显著; 当含石量  $> 60\%$  时, 随含石量增加堆积体抗剪强度显著提高。

(3) 堆积体黏聚力和内摩擦角随含石量的增加呈非线性变化, 大致可分为 3 个阶段: 在  $R_c \leq 30\%$  即低含石量时, 堆积体中以粉土为主, 其结构为典型的悬浮密实结构, 随含石量增加其  $c$ ,  $\varphi$  值变化不显著; 当  $R_c$  在  $30\% \sim 60\%$  之间即处于中等含石量状态时, 堆积体处于骨架孔隙结构, 随着含石量的增大,  $c$ ,  $\varphi$  值均增大; 当  $R_c > 60\%$  即处于高含石量状态时, 堆积体为骨架密实结构,  $\varphi$  值明显增大,  $c$  值显著下降。堆积体黏聚力 - 含石量的关系曲线近似为二次多项式形式, 内摩擦角 - 含石量关系曲线近似为指数形式。

(4) 以上成果为固定含水率下含石量对堆积体强度特性的影响, 所得结论还需更多试验资料来验证, 含水率的作用和影响在另文中讨论。

### 参考文献:

- [1] PATWARDHAN A S, RAO J S, GAIDHANE R B. Interlocking effects and shearing resistance of boulders and large size particles in a matrix of fines on the basis of large scale direct shear tests[C]// Proc 2nd Southeast Asian Conference on Soil Mechanics. Singapore, 1970: 265 - 273.
- [2] SHAKOOR A, COOK B D. The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1990, 27: 245 - 253.
- [3] SAVEDY J P. Determination of shear strength of conglomerates using a Caterpillar D9 ripper and comparison with alternative methods[J]. International Journal of Mining and Geological Engineering, 1990, 8: 203 - 225.
- [4] 田永铭, 郭明传, 古智君. 宏观各向同性混杂岩石力学特

- 性及性状研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 364 - 371. (TIAN Yong-ming, GUO Ming-chuan, GU Zhi-jun. Mechanical properties and behaviors of macroscopically isotropic mélange[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 364 - 371. (in Chinese))
- [5] 董云, 柴贺军, 杨慧丽. 土石混填路基原位直剪与室内大型直剪试验比较[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(2): 235 - 238. (DONG Yun, CHAI He-jun, YSNG Hui-li. Comparison of shear test in site and lab large-scale shear test for rock-soil aggregate of roadbed[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **28**(2): 235 - 238. (in Chinese))
- [6] LINDQUIST E S, GOODMAN R E. Strength and deformation properties of a physical model mélange[C]// Proceeding 1st North America Rock Mechanics Symposium(NARMS). Balkema, 1994: 843 - 850.
- [7] LINDQUIST E S. The strength and deformation properties of mélange[D]. California: University of California at Berkeley, USA, 1994.
- [8] MEDLEY E W. Observation on tortuous failure surface in bimrocks[J]. Felsbau, Rock and Soil Engineering Journal for Engineering Geology Geomechanics and Tunneling, 2004, **22**(5): 35 - 43.
- [9] SONMEZ H, TUNCAY E, GOKCEOGLU C. Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**: 717 - 729.
- [10] SONMEZ H, GOKCEOGLU C, MEDLEY E, et al. Estimating the unbiaxial compressive strength of a volcanic bimrock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**: 554 - 561.
- [11] 时卫民, 郑宏录, 刘文平. 三峡库区碎石土抗剪强度指标的试验研究[J]. 重庆建筑, 2005, **17**(2): 30 - 35. (SHI Wei-min, DENG Hong-lu, LIU Wen-ping, et al. Experiment research on shear strength index of gravel-soil in Three-Gorge reservoir area[J]. Chongqing architecture, 2005, **17**(2): 30 - 35. (in Chinese))
- [12] 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-min, 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))
- [13] 侯红林, 赵德安, 蔡小林, 等. 黄河二级阶地洪积碎石土剪胀特性分析[J]. 西部探矿工程, 2006(3): 22 - 24. (HOU Hong-lin, ZHAO Dean, CAI Xiao-lin, et al. Study on dilatancy characteristics of alluvial gravel soil in the secondary step of Yellow River[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(3): 22 - 24. (in Chinese))
- [14] 李维树, 丁秀丽. 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. 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))
- [15] 徐文杰, 胡瑞林. 基于数字图像分析及大型直剪试验的土石混合体块石含量与抗剪强度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(5): 996 - 1007. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi. Research on relationship between rock block proportion and shear strength of soil-rock mixtures based on digital image analysis and large direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(5): 996 - 1007. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)