

DOI: 10.11779/CJGE2015S1032

卵砾石土抗剪强度指标原位直剪试验研究

汤劲松^{1,2}, 刘松玉³, 童立元³, 沈才华⁴

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 现场大型原位直剪试验是测定卵砾石土强度指标的一种有效方法。通过对江南低山丘陵区典型卵砾石土4个试样的现场大型原位直剪试验, 在获取卵砾石土抗剪强度指标的同时, 还在试样剪切破坏后的破坏面上取样进行卵砾石土的颗粒粒径分析。试验结果表明: 级配良好的卵砾石土原位直剪试验的剪切应力和剪切位移之间的关系曲线具有明显的峰值强度, 并出现较稳定的残余强度; 试验场地卵砾石土的黏聚力较低, 而内摩擦角较高, 卵砾石土的这种强度特性不同于一般的均质土体和碎裂岩体, 与组成材料的性质、颗粒大小、粒径组成、粗糙程度、充填物的胶结程度和密实程度等因素有关。

关键词: 卵砾石土; 现场试验; 抗剪强度指标; 直剪试验; 粒径分析

中图分类号: TU413.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0167-05

作者简介: 汤劲松(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土与地下工程方面的教学和科研。E-mail: tangjssjz@163.com。

In-situ direct shear tests on shear strength indices of pebble and gravelly soil

TANG Jin-song^{1,2}, LIU Song-yu³, TONG Li-yuan³, SHEN Cai-hua⁴

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As an effective method to determine strength indices of pebble and gravelly soil, the field large-scale direct shear test on four typical samples of pebble and gravelly soil in the area of low mountains and hills Southern to the Yangtze River is conducted. At the same time, the particle size analysis test on pebble and gravelly soil is done in laboratory by sampling in the failure surface after shear failure. The test results show that there are obvious peak strength and steady residual strength at the relation curve between shear stress and shear displacement by direct shear test on well graded pebble and gravelly soil. The cohesive strength is lower and the internal friction angle is higher for pebble and gravelly soil in test site. The strength characteristics of pebble and gravelly soil are different from those of common homogeneous soil and cataclastic rock mass, which are related to many factors such as property of component materials, particle size, size grading, coarseness degree, cementation of cement and dense degree.

Key words: pebble and gravelly soil; field test; shear strength indices; direct shear test; particle size analysis

0 引言

卵砾石土是由一定数量的卵石、砾石和土体混合而成的一种土石混合物, 具有不均匀、非连续的特性, 它既不同于一般的碎裂岩体, 又有别于一般的均质土体, 是一种介于岩体和土体之间的特殊地质材料。油新华等^[1]在对三峡库区白衣庵滑坡的地质调查以及三峡地区其他滑坡进行资料收集的过程中, 遇到了大量由滑坡、崩塌、岩溶等组成的复杂成因的第四系松散堆积体, 其物质成分以土夹碎石或碎块石、碎石或碎块石夹土等土石混合物为主, 为了突出其物质组成和

结构特性, 把它命名为“土石混合体”, 在工程分类上是与岩体、土体并列的一种地质材料。土石混合体在我国分布很广, 其工程实践涉及交通、水利、水电、建筑等许多方面, 有着重要的研究和应用价值。

卵砾石土的物理力学性质与组成材料的卵砾石和土体的性质、颗粒大小、粒径组成、粗糙程度、充填物的胶结程度、密实程度和含水率等多种因素有关。

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2014210021)

收稿日期: 2015-03-26

以前, 卵砾石土的强度参数通常是通过单独对其中的土体取样进行室内试验, 根据土体的强度再乘以一定的折减系数得到的^[2-3]。由于卵砾石土本身的复杂性, 这样得到的参数是不可靠的, 很难满足工程设计的需要。卵砾石土现场取样困难, 室内试验仪器的尺寸受颗粒大小的限制难以满足试验要求, 因此, 一般很难进行室内试验。即使可通过加大仪器尺寸来尽量模拟实际粒径分布状况, 但重塑试样的室内剪切试验结果与现场原状试样相比也会存在误差。为了较准确地获取工程区域卵砾石土的强度参数, 有必要进行现场原位试验。

测定卵砾石土强度指标的现场原位试验通常有水平推剪试验和大型直剪试验。在土石混合体的边坡稳定分析时, 大多采取原位水平推剪试验来测定其强度参数^[3-9]。试验结果表明, 土石混合体的抗剪强度在很大程度上取决于其内部含石量特征, 随着含石量的增加其内摩擦角呈明显增大趋势, 并在含石量30%~70%时呈明显的线性增大趋势, 而黏聚力随着含石量的增加呈现降低趋势^[10-11]。水平推剪试验由于很难准确确定滑动破坏面, 结合的理论简化计算方法也存在一些误差^[9, 12]。这里, 在分析卵砾石土地层隧道的施工稳定时, 通过现场大型直剪试验来测定其强度指标, 为数值模拟与理论分析提供合理的计算参数。目前, 这方面的研究成果还不多见。

现场大型直剪试验的场地选在江苏省句容县境内, 某高速公路隧道下行线西侧出口附近的卵砾石土地层, 由于距离隧道西侧出口不远(水平距离约20 m), 这一地区的卵砾石土强度参数实测结果可以为浅埋的隧道施工稳定分析提供依据。

1 试验设备

(1) 剪切框1个: 为了准确获得卵砾石土的强度指标, 现场试验的剪切框尺寸要求不小于卵砾石土最大粒径的5倍。本试验根据现场调查情况, 选取剪切框的尺寸为80 cm×80 cm×80 cm(内净距), 采用厚度为3 cm钢板在工厂制作, 现场安装。

(2) 传压板3块: 采用厚度为3 cm的正方形钢板, 边长分别为80, 60和30 cm。

(3) 加载千斤顶1套: 千斤顶型号QYL50, 量程为500 kN, 配有压力表; 最大压强100 MPa(300格), 精度0.4级。

(4) 反力墩: 通常采取打入钢板的方式或现浇混凝土墩的方式提供试验反力。现场试验实际采用了打入钢板的方式作为反力墩。

(5) 变形观测百分表和秒表各4只, 百分表的量

程不低于100 mm; 另备一只卡尺, 量程200 mm。

(6) 其它工具: 粗筛和土壤筛各一套(取样回室内做筛分试验)、磅秤200 kg、水平尺、拌和工具、撬棍、镐、锹、抬筐等。

2 试验操作过程

(1) 确定试验场地: 现场踏勘, 选定距离隧道不远处附近的空地作为试验场地。

(2) 试样开挖和修理: 在选定的试验场地上清除表面浮土, 按试样尺寸大小放线, 共准备4个剪切试样; 并进行试样开挖, 经仔细修理成尺寸为80 cm×80 cm×80 cm的土柱; 修边时采用人工方式小心处理, 一定要少扰动土样; 用水平尺找平, 以水泥砂浆抹平试样。

(3) 安装剪切框: 剪切框与土样之间用砾石或细砂充填密实, 保证剪切框与土样之间紧密接触。

(4) 打入反力钢板: 试验时提供反力。

(5) 安装千斤顶: 应使千斤顶的轴线对准传压板中心点。

(6) 安装压力表和百分表: 在试样的前后位置, 水平和垂直方向各安装一个测位移的百分表(共4个)。

(7) 直剪试验: 施加垂直荷载, 待试样稳定后施加水平推力, 直至土样剪坏为止。

图1为现场大型直剪试验的设备安装示意图。

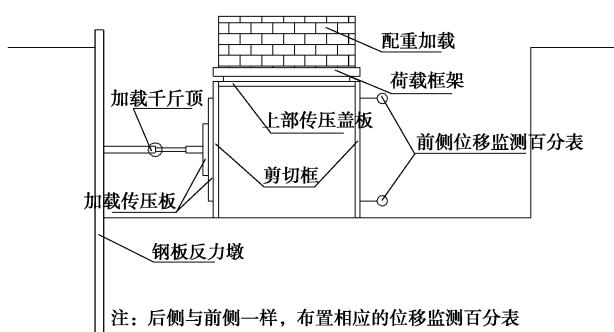


图1 设备安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment installation

由于受垂直加载能力所限, 试验过程中, 4个试样施加的配重荷载分别为: ①试样1: 不加配重, 仅考虑传压盖板和土样自重, 剪切面上的垂直应力约为1.56 kPa。②试样2: 加10块预制混凝土块配重, 配重+上部传压板+土样自重, 剪切面上的垂直应力约为12.50 kPa。③试样3: 加20块预制混凝土块配重, 配重+上部传压板+土样自重, 剪切面上的垂直应力约为23.44 kPa。④试样4: 加30块预制混凝土块配重, 配重+上部传压板+土样自重, 剪切面上的垂直

应力约为 34.38 kPa。

每个试样垂直加载达到稳定后, 测试系统处于起始状态。缓慢启动千斤顶, 当各仪表开始显示正常时停止加载, 所有仪表归零, 准备工作结束。现场试验指挥员指令各试验人员就位, 宣布试样剪切正式开始。如果刚开始变形较快(水平位移 1.5 mm 的时间不超过 30 s)时, 每 1.5 mm 记录一次时间及水平、垂直变形; 当水平位移 1.5 mm 的时间超过 30 s 时, 每 30 s 记录数据一次。当水平推力达到稳定值时认为剪损, 每个试样以千斤顶不能再有行程而终止试验。

试验时要注意观察试样的变形情况, 卸载时同样要正常记录。

3 试验结果分析

现场共进行了 4 个试样的原位直剪试验, 在获取卵砾石土抗剪强度指标的同时, 还在试样剪坏后的破坏面上取样进行了卵砾石土的颗粒粒径分析。

3.1 卵砾石土的粒径分析

卵砾石土是一种土石混合物, 其粒径级配状况是影响卵砾石土强度特性的一个重要指标, 也是划分卵砾石土类型的主要依据。室内筛分试验采用的标准筛的孔径分别为 20, 10, 5, 3, 1, 0.5, 0.25, 0.1 mm。每一个试样直剪试验破坏后, 均在剪切破坏面上取样进行了筛分试验, 共计 4 组, 筛分试验的成果汇总如图 2 所示。与此同时, 计算了 4 组试样的颗粒粒径含量百分比的平均值, 也在图中绘制了该场地的平均粒径含量的粒径级配曲线。

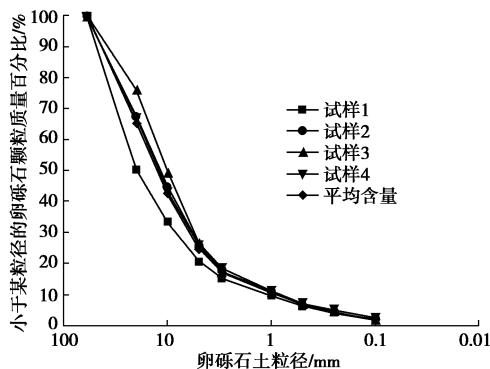


图 2 卵砾石土粒径级配曲线

Fig. 2 Grading curves of pebble and gravelly soil

由图 2 可知: 试验场地的岩土体中粒径小于 2 mm 的颗粒含量均不超过 17%, 也就是说粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过总重的 83%, 根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001) 的分类标准, 应该属于碎石土。

进一步分析粒径级配状况, 除了试样 1 中粒径大于 20 mm 的颗粒含量约为 50% 以外, 其它试样粒径大

于 20 mm 的颗粒含量约为 24%~33%, 4 个试样平均粒径大于 20 mm 的颗粒含量约占总重的 35%。而粒径大于 2 mm 的颗粒含量基本接近, 均超过 80%, 平均约为 85%。可见, 试验场地的岩土材料中砾石含量约为 37%~60%, 平均约为 50%。根据 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》的分类标准, 这种碎石土应该称为砾石土。

试验结果还表明, 虽然试验场地岩土体以粒径 2~20 mm 的砾石含量最多, 平均占总重的 50% 左右。但是, 粒径大于 20 mm 的块石含量仍然占总重的 35%, 而粒径小于 2 mm 的细粒土含量约占总重的 15%。现场调查发现, 大粒径的块石主要是表面磨圆度较好的卵石。因此, 综合来看, 把这种岩土材料命名为卵砾石土就更为贴切, 因为它包含了组成这种材料的所有颗粒名称。

由图 2 的平均粒径级配曲线可知, 试验场地卵砾石土的有效粒径 d_{10} 约为 0.9 mm, 限定粒径 d_{60} 约为 17.7 mm。则其不均匀系数为 $C_u = d_{60} / d_{10} = 17.7 / 0.9 = 19.7$ 。

试验场地卵砾石土中小于某粒径的颗粒含量累计百分比为 30% 时的粒径 d_{30} 为 6.5 mm, 则其曲率系数为 $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = \frac{6.5^2}{0.9 \times 17.7} = 2.65$ 。

由以上分析结果可知, 该试验场地卵砾石土的不均匀系数 $C_u = 19.7 > 5$, 表明组成材料的颗粒粒径分布范围较大; 而曲率系数 $C_c = 2.65$, 介于 1~3 之间, 说明各粒径的含量分布合理, 属于级配良好的卵砾石土。

根据油新华等^[1]关于土石混合体的建议分类方法, 土石混合体的分类以粒径为 5 mm 作为其中土与石的颗粒粒径界限值。由图 2 土石混合体的粒径级配累积曲线可知, 粒径大于 5 mm 的石质颗粒含量约为 75%, 粒径组成在 70%~90% 之间, 应该把这类土石混合体称为土质石。对于土质石来说, 其级配状况仍然是根据粒径级配曲线来计算不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c , 当不均匀系数 $C_u \geq 5$, 曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 时, 称为级配良好。由上述计算结果可知, 试验场地的这种土石混合体是级配良好的。现场调查发现, 充填其中的细粒土为粉砂质黏性土, 胶结较好。根据上述分析结果, 试验区的这种土石混合体属于级配良好的黏质土质石。

以上根据岩土体的粒径级配累积曲线, 采用不同的分类和评价方法对试验区岩土体进行了命名和级配状况评价, 其结论是基本一致的。为了学术交流的方便, 并与现有的 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》相一致, 这里仍然称试验场地这种岩土材料为级配良好的卵砾石土。

3.2 卵砾石土的强度指标

图 3 为卵砾石土在不同正应力条件下原位直剪试验的剪切应力与剪切位移之间的关系曲线。曲线显示, 4 个试样的剪切试验结果均出现明显的峰值强度, 并出现较稳定的残余强度。

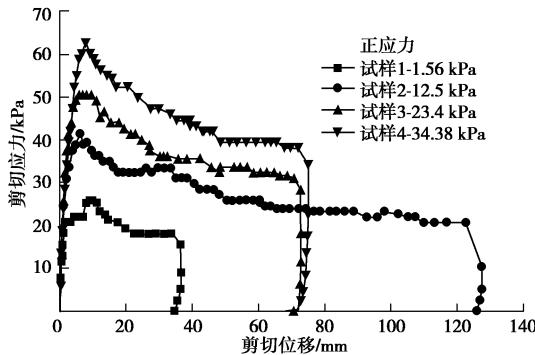


图 3 剪切应力与剪切位移之间的关系曲线

Fig. 3 Relation between shear stress and shear displacement

根据卵砾石土在不同正应力条件下剪切破坏时的试验数据, 整理得出卵砾石土现场直剪试验的剪应力与正应力之间的关系曲线。其中, 作用在试样上的正应力 $\sigma = G/A$, 式中, G 为作用在试样上的垂直荷载, A 为剪切面的横截面积(即剪切试样的横截面积); 试样剪切破坏时的剪应力 $\tau = T/A$, 式中, T 为试样剪切破坏时千斤顶的水平推力。根据莫尔-库仑强度理论的表达式 $\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$, 通过数据拟合推求卵砾石土的强度指标 c , φ 值。

图 4 为 4 个卵砾石土试样剪切破坏时的峰值剪应力与对应的正应力之间关系曲线。由于试样 1 在没有配重荷载的最小正应力作用下, 剪切破坏时竖向位移量相对较大, 试验结果存在较大误差, 故取后 3 个试样现场直剪试验的峰值强度进行数据拟合。实际上, 由前述卵砾石土剪切破坏面取样的粒径分析结果可知, 试样 1 中粒径大于 20 mm 的颗粒含量约为 50%, 明显大于其它 3 个试样 24%~35% 的含量, 因此, 在确定卵砾石土的强度指标时, 只取颗粒含量相近的后 3 个试样的剪切试验结果进行分析也是比较合理的。

由图 4 可知, 后 3 个试样的峰值剪切试验数据展示了较好的线性关系。通过对这 3 个数据的线性拟合, 得到如下关系:

$$\tau_{\text{峰值}} = 28.73 + 0.978 \cdot \sigma$$

根据抗剪强度的表达式 $\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$, 试验场地的卵砾石土峰值强度参数拟合结果分别为: 峰值黏聚力 $c_{\text{峰值}} = 28.73 \text{ kPa}$; 峰值内摩擦角 $\varphi_{\text{峰值}} = 44.36^\circ$ 。

4 个试样现场大型直剪试验的残余剪应力与正应力之间的关系曲线见图 5 所示, 同样, 后 3 个试样的试验结果也表现出较好的线性相关性。对后 3 个试样

卵砾石土残余强度的试验结果进行线性拟合分析, 得到卵砾石土残余抗剪强度的关系式为

$$\tau_{\text{残余}} = 11.29 + 0.80 \cdot \sigma$$

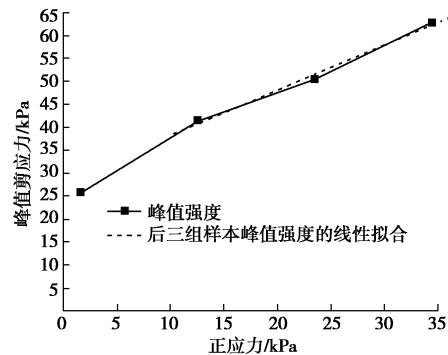


图 4 峰值剪切应力与正应力之间的关系曲线

Fig. 4 Relation between peak shear stress and normal stress

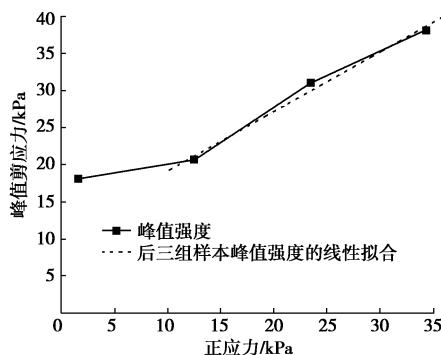


图 5 残余剪应力与正应力之间的关系曲线

Fig. 5 Relation between residual shear stress and normal stress

故试验区卵砾石土的残余强度参数分别为: 残余黏聚力 $c_{\text{残余}} = 11.29 \text{ kPa}$; 残余内摩擦角 $\varphi_{\text{残余}} = 38.66^\circ$ 。

由现场调查可知, 试验场地卵砾石土的充填物为黏性土混砂粒, 硬可塑状, 部分具铁质胶结。现场大型直剪试验的结果发现其峰值强度具有一定的黏聚力, 达到 28.73 kPa; 即使是残余强度, 其黏聚力仍然有 11.29 kPa。卵砾石土由于含有一定数量的卵石和砾石, 并且级配良好, 其现场直剪试验得到的峰值内摩擦角达到 44.36° , 试验破坏后的残余内摩擦角也高达 38.66° 。可见, 卵砾石土的强度特性有其特殊性, 通常情况下, 它具有较高的抗剪强度; 并且, 当卵砾石土剪切破坏后, 其残余内摩擦角仍然较高。现场直剪试验结果表明, 卵砾石土的黏聚力较低, 而内摩擦角较高。卵砾石土的这种强度特性与其组成物质的成分、大小、含量、胶结程度和密实程度等因素有关。

4 结 论

(1) 试验场地级配良好的卵砾石土试样现场大型直剪试验的剪切应力与剪切位移之间的关系曲线均具有明显的峰值强度, 并出现较稳定的残余强度。

(2) 试验场地卵砾石土的充填物为黏性土混砂粒, 硬可塑状, 部分具铁质胶结, 现场大型直剪试验的结果发现其峰值强度具有一定的黏聚力, 达到 28.73 kPa; 即使是残余强度, 其黏聚力仍然有 11.29 kPa。卵砾石土由于含有一定数量的卵石和砾石, 并且级配良好, 其现场直剪试验得到的峰值内摩擦角达到 44.36°, 剪切破坏后的残余内摩擦角也高达 38.66°。

(3) 试验场地卵砾石土的黏聚力较低, 而内摩擦角较高, 卵砾石土的这种强度特性与组成材料的性质、颗粒大小、粒径组成、粗糙程度、充填物的胶结程度和密实程度等因素有关。

参考文献:

- [1] 油新华, 何 刚, 李 晓. 土石混合体的分类建议[J]. 工程地质学报, 2002, 10(增刊): 448 - 452. (YOU Xin-hua, HE Gang, LI Xiao. The classification suggests of earth-rock aggregate[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(S0): 448 - 452. (in Chinese))
- [2] 廖秋林, 李 晓, 郝 刨, 等. 土石混合体的研究现状及研究展望[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 800 - 807. (LIAO Qiu-lin, LI Xiao, HAO Zhao, et al. Current status and future trends of studies on rock and soil aggregates(RSA)[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6): 800 - 807. (in Chinese))
- [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] LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-min. In-situ tests and stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges Reservoir area[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 494.
- [5] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1270 - 1277. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of Longpan Tiger-leaping Gorge area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1270 - 1277. (in Chinese))
- [6] 徐文杰, 胡瑞林, 曾如意. 水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 814 - 818. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, ZENG Ru-yi. Research on horizontal push-shear in-situ test of subwater soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 814 - 818. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 吴旻硕, 李 晓, 赫建明. 土石混合体原位水平推剪试验[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(4): 184 - 189. (WU Min-shuo, LI Xiao, HE Jian-min. In-situ direct-shear test on rock-soil aggregate[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(4): 184 - 189. (in Chinese))
- [9] 徐文杰, 胡瑞林. 循环荷载下土石混合体力学特性野外试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 63 - 69. (XU Wen-jie, HU Rui-lin. Field horizontal push shear test for mechanical property of soil-rock mixtures under cyclic loading[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 63 - 69. (in Chinese))
- [10] XU Wen-jie, XU Qiang, HU Rui-lin. Study on the shear strength of soil-rock mixture by large scale direct shear test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1235 - 1247.
- [11] 徐文杰, 张海洋. 土石混合体研究现状及发展趋势[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 80 - 88. (XU Wen-jie, ZHANG Hai-yan. Research status and development trend of soil-rock mixture[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 80 - 88. (in Chinese))
- [12] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟. 三维极限平衡法在原位水平推剪试验中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006(6): 43 - 47. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao. Application of 3D limit-equilibrium method for in-situ horizontal push-shear test[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(6): 43 - 47. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)