

文章编号:1000-582X(2011)01-110-06

不同泥皮粗粒土与结构接触面力学特性实验

彭凯^{1a,1b}, 朱俊高^{1a,1b}, 伍小玉², 张丹²

(1. 河海大学 a. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室;

b. 岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098; 2. 成都勘测设计研究院工程分院, 四川成都 610072)

摘要:进行了粗粒土与结构面分别在夹膨润土泥皮、粘土泥皮以及无泥皮条件下的大型单剪试验, 揭示了不同泥皮情况下接触面的力学特性与机理。试验结果表明, 不同泥皮种类对粗粒土与结构面的强度有重要影响, 夹有膨润土泥皮时, 粗粒土与结构面的剪切强度显著减小, 最大减幅可达 45%, 而夹有粘土泥皮时其最大减幅只有 10%, 远小于膨润土泥皮; 试验测定的夹有膨润土泥皮时的摩擦角仅为夹有粘土泥皮时的 60% 左右。剪切破坏时, 同一高度处, 切向位移随法向应力的增大而增大; 同样的法向应力及高度处, 夹有膨润土泥皮时的切向位移小于夹有粘土时的切向位移, 而法向位移相对要大些。此外, 无泥皮低法向应力下, 出现明显的剪胀现象, 而泥皮条件下均表现为剪缩。

关键词:接触面; 单剪试验; 抗剪强度; 剪胀

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

Experiments on influence of slurry kinds on mechanical behavior of interface between gravel and concrete

PENG Kai^{1a,1b}, ZHU Jun-gao^{1a,1b}, WU Xiao-yu², ZHANG Dan²

(1a. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering;

1b. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, P. R. China;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, Chengdu, Sichuan 610072, P. R. China)

Abstract: The mechanical behavior and mechanism of the interface between structure and coarse grained soil are investigated through simple shear tests on the conditions of bentonite slurry, clay slurry and without slurry, respectively. The results indicate that different kinds of slurry have important influence on shear strength. Compared with the interface without slurry, the shear strength with bentonite slurry reduces by 45% approximately, significantly more than clay slurry which reduces by 10%. The value of the friction angle with bentonite slurry is about 60% of that with clay slurry. Shear displacement increases as upright stress increases when reaches its failure states at the same height, and shear displacement with bentonite slurry is smaller than that with clay slurry when with the same upright stress and height. The upright displacement with bentonite slurry is greater than that with clay slurry under the same upright stress. In addition, shear dilatation is apparent under the low normal stress when without slurry. Otherwise, it appears as shear contraction.

Key words: contact interface; simple shear test; shear strength; shear dilatation

收稿日期: 2010-08-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010B14814); 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金项目(50639050); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200801133); 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金(GH200804)

作者简介: 彭凯(1981-), 男, 河海大学博士研究生, 主要从事土体本构关系研究。

朱俊高(联系人), 男, 河海大学教授、博士生导师, (E-mail) zhujungao@163.com。

多年来, 土与结构物相互作用的问题一直是岩土工程重要研究课题之一^[1-3]。如桩基工程^[4-5,9], 挡土墙与墙后土体^[6,8], 大坝工程中面板与垫层料, 防渗墙与地基覆盖层, 心墙与反滤料等^[7,10]。由于土体与结构物两者性质的差异, 除了力的传递, 还会产生相对位移等非连续变形行为, 在设计中应予以重视, 以避免因应力显著集中或相对位移过大而导致结构物丧失承载能力或使用功能。

目前, 较多研究者对土与结构接触面力学特性的基本规律^[11-12]、影响因素^[16-17]及模拟分析^[6,13-14]方法进行了多种接触面的实验研究, 取得了一系列的成果^[6,11-14]。如 Clough-Duncan^[6]的双曲线模型; Brandt^[11]对土和混凝土接触面的研究表明, 钢塑性模式可能是最真实的接触面破坏模式; 殷宗泽等^[13]采用微型“潜望镜”对接触面土体的变形进行了观察, 认为接触面的破坏是一个由边缘向内部逐渐发展的过程; 张嘎等^[15,18-20]研究了接触面的静动力学特性及不同的剪切方式对其的影响。

泥皮的存在会改变粗粒土与结构面的力学特性, 使得粗粒土与混凝土的荷载分担发生变化。实际工程中, 由于施工工艺的影响, 防渗墙与覆盖层(粗料土)之间存在的泥皮的成分是非单一且不均匀的。因此, 进行不同泥皮种类条件下接触面应力变形特性研究对准确分析模拟力的传递, 保证设计科学合理有重要意义。

笔者采用大型单剪仪对粗粒土在无泥皮、膨润土泥皮以及粘土泥皮的情况进行了实验, 分析研究了不同泥皮对粗粒土-混凝土接触面的影响, 并对接触面的强度、变形机理进行了初步的分析和讨论。为深入研究接触面特性提供试验基础。

1 接触面试验

1.1 试验仪器

试验设备为河海大学岩土工程研究所和四川大学华西岩土仪器研究所联合研制的大型单剪直剪仪。该设备采用先进的加载控制及量测技术, 具有试样尺寸大(直径 30 cm)、施加荷载大(法向 200 kN, 切向 150 kN)、可直接施加常应力及常刚度等法向边界等特点。因此, 适用于粗粒土和结构面的试验研究。试验时采用自制的长×宽×高为(400 mm×370 mm×110 mm)的钢盒, 钢盒里面浇筑 C30 混凝土底座作为下盒。单剪试验时上层采用一系列光滑带滚珠的叠环, 每个叠环厚度为 20 mm, 内径为 300 mm, 最上层采用一个高 50 mm 的剪切盒, 内径为 300 mm, 盒内装样高度为 20 mm, 试样总有效高度为 100 mm。试验

时剪切上盒固定不动, 通过下盒移动形成剪切。单剪仪示意图如图 1 所示。

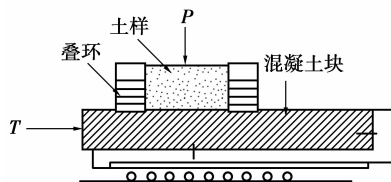


图 1 单剪仪示意图

1.2 试验条件

试验粗粒土采用长河坝覆盖层粗粒料, 最大粒径为 60 mm。根据击实试验的结果, 粗粒土最大、最小干密度分别为 2.29, 1.93 g/cm³。试验控制干密度为 2.25 g/cm³, 相对密度 0.9。级配曲线如图 2 所示。试验膨润土泥皮干密度为 1.28 g/cm³, 含水量 40%; 粘土泥皮的干密度为 1.64 g/cm³, 塑限 20%, 液限 34%, 塑性指数 14, 含水量 30%, 比重 2.75。2 种泥皮厚度均为 10 mm。制备泥皮时, 按规定厚度将其平铺在底座混凝土上, 然后轻轻抹平, 其上再分 3 层铺放粗粒土, 振捣至试验设计密度, 以此来模拟粗粒土与结构物之间存在泥皮的情况。

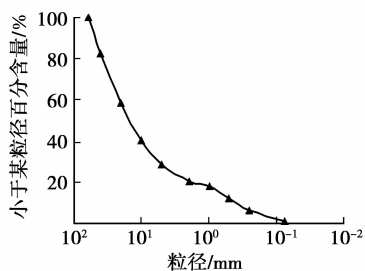


图 2 粗粒料粒径累计级配曲线

需要指出的是, 为了保持泥皮的含水量, 对混凝土底座以及第 1 层粗粒土洒水充分进行湿润。

接触面试验包括不同法向应力下存在膨润土泥皮(不同含水量)、粘土泥皮及无泥皮 3 种方案的剪切试验, 剪切速率 0.3 mm/min, 试验具体方案详见表 1。

表 1 长河坝覆盖层料剪切试验方案

试验方案	试样条件	法向压力/kPa
方案 1	膨润土泥皮	200, 500,
方案 2	粘土泥皮	1 200, 2 000
方案 3	无泥皮	

2 接触面试验结果及分析

2.1 抗剪强度

剪切过程中,既有粗粒土内部的剪切变形,也有沿着粗粒土与混凝土界面的相对错动位移,从根本上讲,破坏面最终总是沿着剪切强度最小的面发生。

为了分析不同的泥皮土料对粗粒土剪切强度的影响,分别对膨润土泥皮以及粘土泥皮进行了对比试验研究。图3、4分别给出了不同法向应力作用下粗粒土与混凝土存在膨润土泥皮与粘土泥皮的两种剪切试验与无泥皮剪切试验的剪应力 τ 与剪应变 γ 的对比关系曲线,图5则为膨润土泥皮与粘土泥皮剪切试验的剪应力 τ 与剪应变 γ 的对比关系曲线。

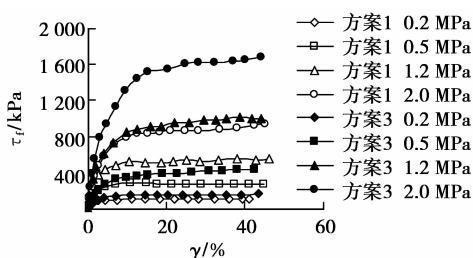


图3 有无膨润土泥皮单剪试验 τ - γ 曲线

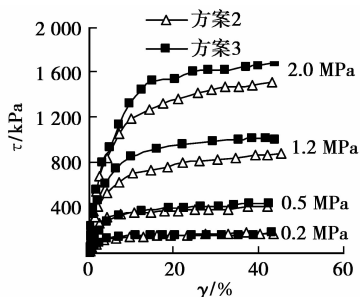


图4 有无粘土泥皮单剪试验 τ - γ 曲线

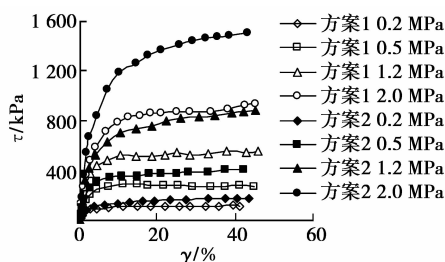


图5 膨润土与粘土泥皮单剪试验 τ - γ 曲线

可以看出,有无泥皮存在对粗粒土与混凝土接触面的剪应力与剪应变的关系曲线没有影响, τ - γ 曲线均没有出现应变软化现象。但有无泥皮对剪应力的峰值有影响。有膨润土泥皮时剪应力的峰值较无泥

皮下降了25%~45%,法向应力越大,峰值下降幅度越大;相比之下,粘土泥皮对于粗粒土与结构接触面的剪应力峰值的影响要小得多,当法向应力水平较小时,其影响几乎可以忽略,而当法向应力较大时(如2000 kPa),与无泥皮相比,其峰值强度下降了10%。

可以认为,夹有泥皮的粗粒土与结构接触面力学特性介于无泥皮以及厚泥皮(结构物与泥皮接触面)两种情况之间。泥皮不太厚时,由于粗粒料的几何尺寸较大,在剪切过程中,泥皮一部分挤进粗粒土的孔隙里面,一部分从叠环的界面处挤出来,不能形成有一定厚度的一完整层来隔离粗粒土与结构面的接触,只是部分程度的减少这种接触,从而在接触面附近形成粗粒土、泥皮、结构面3者的相互作用,如图6所示。

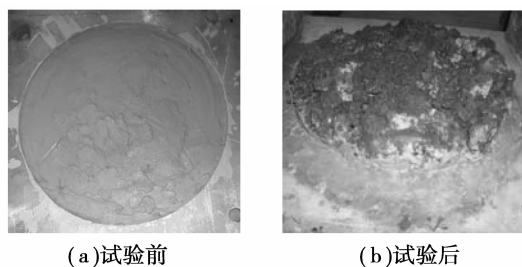


图6 方案1试验前后照片

如上所述,同样厚度的膨润土泥皮(方案1)与粘土泥皮(方案2)对于阻隔粗粒土与结构面的接触上所发挥的作用是不一样的,这与泥皮材料的矿物成分、塑性指数等因素有关。矿物成分亲水性越强、塑性指数越大,可塑性越好,其对粗粒土的包裹就越好,所起的连续“阻隔-润滑”效果就越好,抗剪强度相应的就越低。

图7给出了各方案的法向应力与抗剪强度的拟合曲线,由图可知,其线性拟合程度很好,因此,接触面的抗剪强度可用摩尔-库仑准则来描述,接触面参数见表2。有膨润土泥皮时,摩擦角较无泥皮减小了46.1%;有粘土泥皮的只下降了8.1%。膨润土泥皮的粘聚力最大,粘土泥皮次之,无泥皮最小。

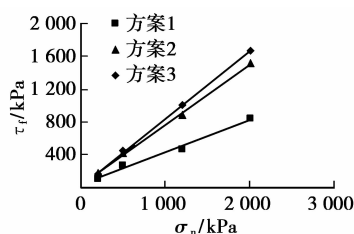


图7 各方案抗剪强度拟合曲线

表 2 各方案抗剪强度指标

编号	指标	
	C/kPa	$\phi/(\circ)$
方案 1	40.74	21.24
方案 2	29.68	36.20
方案 3	16.43	39.44

2.2 变形特性

图 8 给出了方案 1-3 在不同的法向应力作用下试样剪切破坏时剪切位移沿高度方向的分布图。其中, 竖轴“0”代表绝对零点, “1~5”自上而下依次代表叠环序数, “6”代表混凝土底座。试验结果表明, 有泥皮时(如图 5 中方案 1、2), 接触面表现出与无泥皮时(如图 5 中方案 3)类似的特性。在结构交界面附近, 剪切变形呈不均匀或非连续的变化, 说明这个区域存在剪切变形相对集中的剪切带, 当应力达到接触面的抗剪强度时, 剪切变形集中发生在界面附近, 形成集中的剪切面, 从而导致在这一区域位移出现非连续变形现象。

图 8 试验结果同时表明, 法向应力越大, 同一高度处, 叠环的水平位移越大; 相同的法向应力作用下, 同一高度处, 方案 3 叠环的水平位移最大, 方案 2 次之, 方案 1 最小, 这表明方案 1-3 接触面形成的剪切所带来的扰动依次增强, 发生在试样内部的扰动越大, 剪切所需要克服的阻力也就越大, 剪切能相应的也大, 故剪切强度也随之提高, 这也正好解释了图 3-5 试验结果的内在本质。

接触面破坏前, 各叠环所产生的水平位移的大小与各环间的剪切刚度以及交界面处的接触特性等有关。法向应力较小时, 方案 1-3 的剪切变形主要发生在结构交界面处, 说明此时控制接触面的剪切强度主要取决于结构交界面的剪切模量; 随着法向应力的增大, 结构交界面的剪应力逐渐增大, 发生在试样内部的扰动也随之增大, 随着扰动的增大, 在试样内部也可能出现剪切位移相对集中的区域, 当发生在试验内部的剪切强度与交界面的剪切强度接近时, 结构面附近一定区域的泥皮和粗粒土发生了和原来不同的力学响应(如图 8(d) 方案 3 所示), 此时与结构面共同构成了有厚度的接触面。

接触面的变形存在着结构面与泥皮或粗粒土的相对滑移以及界面约束作用而导致的在交界面上试样内部一定高度范围内因扰动产生的变形, 这 2 种变形机制的相互关系是决定接触面力学行为变化的主要因素, 与交界面处的接触特性(如无泥皮、粘

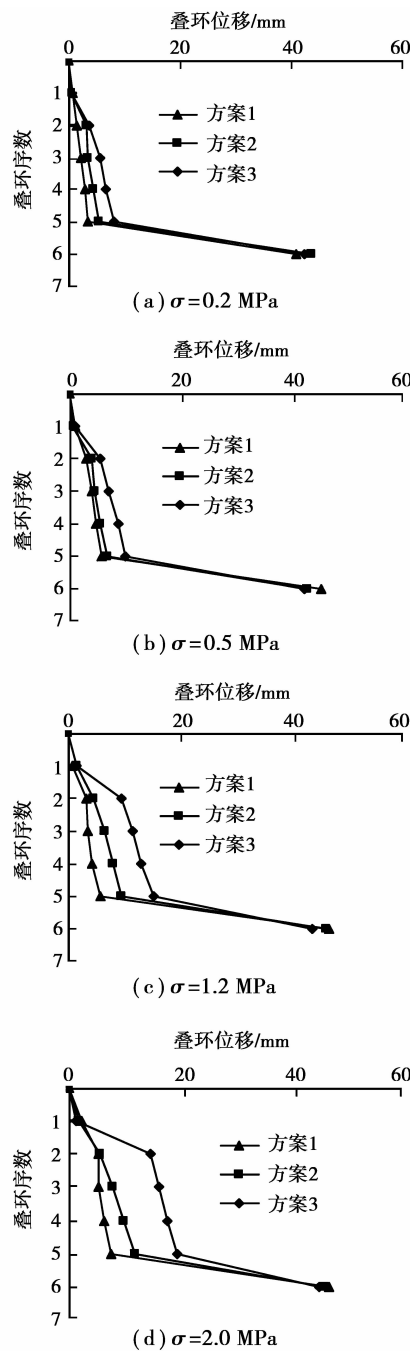


图 8 方案 1-3 剪切位移沿试样高度分布

土泥皮、膨润土泥皮等)、土样自身的剪切刚度、法向应力的 大小等有关。

方案 1 与方案 2 的法向-切向位移关系如图 9, 取位移以剪缩为正, 剪胀为负。

由图可知, 法向应力越大, 剪切过程中法向位移也随着增大, 但是总的法向位移量不大, 最大不过 2 mm。在本次试验的法向应力范围内, 法向应力相同时, 膨润土泥皮较粘土泥皮的法向位移要大些, 随着法向应力的增大, 其 2 者的差值也有所增大。有泥皮的接触面试验都表现为剪缩, 没有出现剪胀现

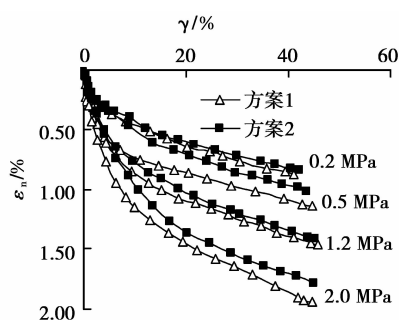


图 9 方案 1 与方案 2 法向-切向位移关系图

象。这主要有两方面的原因,一是剪切过程中,泥皮一部分嵌入粗粒料的孔隙当中,一部分从缝隙中挤出来;另一方面由于泥皮的存在,使得剪切表现出“滑动型”,试样内部一定高度范围内因扰动产生的体积膨胀变形较小,从而导致了这一现象的出现。

与有泥皮时不同,无泥皮时,低法向应力下剪切呈现剪胀型,法向应力越大,相应的法向变形越大,如图 10 所示。无泥皮时,发生在试样内部的扰动最大,因粗颗粒之间的翻滚、爬越导致一部分体积膨胀;此外,当有剪切变形发生后,试样顶部水平向固定导致试样叠环一边上翘(如图 11 所示),从而导致类似于剪胀的体积膨胀。

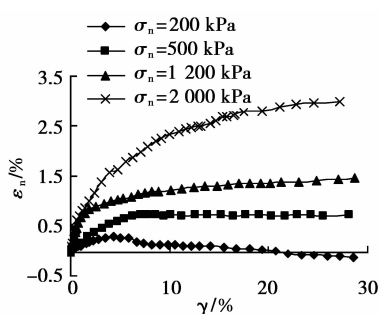


图 10 方案 3 法向-切向位移关系图

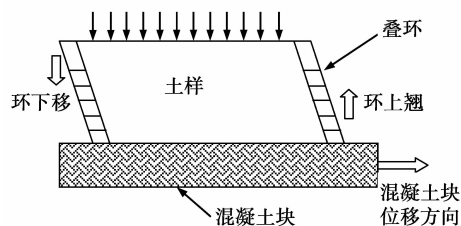


图 11 单剪仪剪切受力示意图

值得注意的是,泥皮材料以及其物理状态(如厚度、含水量)在实际过程中会受到很多因素的影响,从而改变了泥皮原来的状态,而状态的变化反过来会影响泥皮-粗粒土-结构面的接触力学特性。

上述的分析还可以看出,剪切过程中,由于叠环一边上翘会使得体积发生膨胀,导致试验结果出现误差,如何消除上述影响,也是值得研究的问题。

因此,粗粒土与结构面存在泥皮情况下的接触力学特性是一个随时间和空间同时变化的作用过程。笔者只是在相对简单和理想的条件下对泥皮材料的变化所带来的影响进行了初步研究,结合现场实际情况下的更进一步的研究有待进行。

3 结 语

采用大型单剪仪,进行了粗粒土与结构面在不同泥皮条件下的剪切试验,通过比较分析,揭示了不同泥皮接触面力学特性的规律,并初步探讨了膨润土泥皮与粘土泥皮在粗粒土结构面剪切变形中的作用机理,得到了以下结论:

1) 有无泥皮存在,对粗粒土与混凝土接触面的剪应力与剪应变的关系曲线没有影响,其均呈双曲线关系;

2) 膨润土泥皮条件下,粗粒土与结构面的剪切强度下降了 25%~45%;而夹有粘土泥皮时,其剪切强度只降低了 3%~10%。这说明泥皮的矿物成分及塑性指数对接触面的剪切强度有很大影响;

3) 剪切破坏时,同一法向应力下,相同高度处的切向位移无泥皮时最大,有粘土泥皮时次之,膨润土泥皮条件下最小。这与其 3 者的剪切应力与剪切位移的关系曲线具有一致的规律。

4) 在本文的法向应力范围内,剪切过程中,2 种泥皮接触面表现为剪缩现象,无泥皮低法向应力时则呈剪胀现象;且膨润土泥皮较粘土泥皮的法向位移要大些。

参考文献:

- [1] 张嘎, 张建民. 夹有泥皮粗粒土与结构接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1374-1378. ZHANG GA, ZHANG JIAN-MIN. Experimental study on monotonic behavior of soil-structure interface with slurry [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1374-1378.
- [2] 张治军, 饶锡保, 王志军, 等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2433-2438. ZHANG ZHI-JUN, RAO XI-BAO, WANG ZHI-JUN, et al. Experimental study on influence of slurry thickness on mechanical behavior of interface between gravel and concrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2433-2438.

- [3] FROST J D, DEJONG J T, RECALDE M. Shear failure behavior of granular-continuum interfaces[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69 (17): 2029-2048.
- [4] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 45-52.
- [5] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 等. 土与混凝土接触面反向剪切单剪试验[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1303-1306. WANG WEI, LU TING-HAO, ZAI JIN-MIN, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1303-1306.
- [6] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(sm4): 1347-349.
- [7] TUNCER B, EDIL M G I, PETER J B, et al. Soil-structure interface shear transfer behavior geomechanics[J]. ASCE, 2006, 156(2): 528-543.
- [8] DOVE J E, JARRETT J B. Behavior of dilative sand interfaces in a geotribology framework[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 25-37.
- [9] CHANDRA S D, SHASHANK K P, DAVID C. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 286-294.
- [10] MILLER G A, HAMID T B. Interface direct shear testing of unsaturated soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(3): 182-191.
- [11] BRANDT J R T. Behavior of soil-concrete interfaces [D]. Edmonton, Canada: University of Alberta, 1985.
- [12] 周小文, 龚壁卫, 丁红顺, 等. 砾石垫层-混凝土接触面力学特性单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 28(7): 876-880. ZHOU XIAO-WEN, GONG BI-WEI, DING HONG-SHUN, et al. Large-scale simple shear test on mechanical properties of interface between concrete face and gravel underlayer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 28(7): 876-880.
- [13] 殷宗泽, 朱弘, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14-22. YIN ZONG-ZE, ZHU HONG, XU GUO-HUA. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structure material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16 (3): 14-22.
- [14] 高俊合, 于海学, 赵维炳. 土与混凝土接触面特性的大型单剪试验研究及数值模拟[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 42-46. GAO JUN-HE, YU HAI-XUE, ZHAO WEI-BING. Characteristics study of interface between soil and concrete by using large size single shear apparatus and numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 42-46.
- [15] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 288-292. ZHANG GA, ZHANG JIAN-MIN. Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (2): 288-292.
- [16] 张治军, 饶锡保, 丁红顺, 等. 不同含水率泥皮对接触面力学特性影响的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 60-67. ZHANG ZHI-JUN, RAO XI-BAO, DING HONG-SHUN, et al. Influence of slurry with different water capacities on behavior of gravel-structure interface[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(5): 60-67.
- [17] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (4): 431-435 . HU LI-MING, PU JIA-LIU. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435.
- [18] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21-25. ZHANG GA, ZHANG JIAN-MIN. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 21-25.
- [19] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 254-258. ZHANG GA, ZHANG JIAN-MIN. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (2): 254-258.
- [20] 张嘎, 张建民. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (2): 149-153. ZHANG GA, ZHANG JIAN-MIN. Development and application of a cyclic shear apparatus for soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 149-153.