

土钉倾角对加筋效果的影响

姜小庆

(南方电网调峰调频发电公司深圳抽水蓄能电站建设管理局,广东 深圳 518115)

摘要 土钉支护机理极其复杂,已有的研究表明其加固效果与插入的倾角密切相关。通过土钉二轴压缩试验和离散单元法数值模拟,研究了土钉加固机理及土钉倾角对边坡加固效果的影响。结果表明,土钉的加固作用是通过土钉与周围材料之间的摩擦力来实现的,当土钉沿最小主应力 σ_3 方向设置时,补强加固效果最好。

关键词 二轴压缩试验;土钉支护;土钉倾角;离散单元法

中图分类号: TU472.99

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2012)S1-0022-04

土钉支护技术由于其经济、可靠、适应性强且施工快速简便,自 20 世纪 90 年代以来在我国得到了迅速推广和应用^[1]。土钉支护的应用范围广,目前已涉及到的有岩土高边坡、深基坑开挖、隧道及地下厂房、堤坝等工程,它所支护的除一般土层外,尚有流砂、软土、厚杂土、强膨胀土和砂砾石等不良地层^[2],但土钉支护技术的理论研究仍然落后于工程实践。在设计施工中,土钉倾角一般根据经验采用 $0^\circ \sim 15^\circ$,这虽然为设计和施工带来方便,但却未能充分发挥土钉的潜力,或为工程埋下安全隐患。

目前,对土钉倾角的影响有不同的看法。文献[3-9]指出:当 $90^\circ > \theta > -\Psi$ (θ 为土钉与破裂面切线方向的夹角; Ψ 为土体的剪胀角)时,土钉主要承受轴向拉力;当 $-\Psi > \theta > 90^\circ$ 时,土钉处于受压剪状态;当 $\theta = 90^\circ$ 时,土钉处于纯剪状态。文献[10]认为在土钉足够长的条件下,土钉最佳入射角为仰角或水平,在土钉比较短时,土钉最佳入射角为倾斜向下,而且应该是从上到下逐层减少。文献[11]指出土钉垂直于潜在滑移面能最大限度发挥其支护能效的结论;文献[12]认为对于直立的挡土建筑物,土钉的最佳倾角应能最大限度地提供向上的分力,即最佳倾角应为仰角,与水平面的夹角为 $45^\circ - \varphi/2$ (φ 为土体的内摩擦角)。文献[13]指出土钉设置的倾斜度应逐层增加向下倾角较好,理由是土钉与潜在滑弧面相交角度较大有利于土钉强度的发挥,有利于提高土坡的稳定性。文献[14]认为土钉的倾角在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 对安全最为有利,过大或过小都不利,那种

认为水平设置最有利的看法可能是不准确的。文献[15]指出:安全系数随着倾角的增加,先达到最大值,然后逐渐降低,当钉长较大时,降低的幅度也较大,当距高比 $L/H < 1$ 时,安全系数在土钉倾角为 $5^\circ \sim 20^\circ$ 范围内最大;当 $L/H > 1$ 时,土钉倾角为 0° 时,安全系数最大,而且增加土钉长度,不管其倾角如何变化,安全系数不再增加。

图 1 为土体单元在小主应力 σ_3 保持一定,逐渐增加大主应力 σ_1 后的变形情况。显然地,土体单元沿着 σ_1 方向产生压缩变形,而沿着 σ_3 方向产生伸长变形。由于土体加固的最终目的就是要限制这样的变形,因此,从理论上讲,沿 σ_3 方向布设加筋材料(土钉),可以最大限度地限制土体沿 σ_3 方向的伸长变形,支护效果应该是最优的。本文通过铝棒的二轴压缩试验,说明沿 σ_3 方向布设加筋材料对试样的加固效果最好,采用离散单元法(DEM)数值模拟二轴压缩试验,分析加筋材料的加固机理,解释沿 σ_3 方向布设加筋材料加固效果最好的原因。

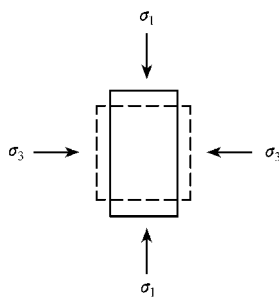


图 1 土体单元在主应力 σ_1 、 σ_3 作用下的变形情况

1 二轴压缩试验

图 2 为本文试验所用的应变控制式二轴压缩仪。试验选用的试样为 50 mm 长的铝棒,由直径为 1.5 mm 和 3 mm 按面积比 3:2 的比例混合。铝棒堆积体是一种很理想的二维粒状体模型材料,因为铝棒的相对体积质量(比重)为 2.69,非常接近土体颗粒的相对体积质量(约为 2.65)。试样的宽 110 mm,高 220 mm,孔隙率均为 0.2,干密度为 2.16 t/m³。加筋材料选用 2 mm 厚的有机玻璃,外面包裹砂纸以增加与铝棒之间的摩擦(试验测得的界面摩擦角为 30°),分 3 层平均厚度布置在试样中,见图 3(图中 BNH 表示无加筋材,BRX1Bar 为沿与 σ_3 方向成 15° 夹角斜向设置加筋材,BRH1Bar 为沿 σ_3 方向水平设置加筋材。

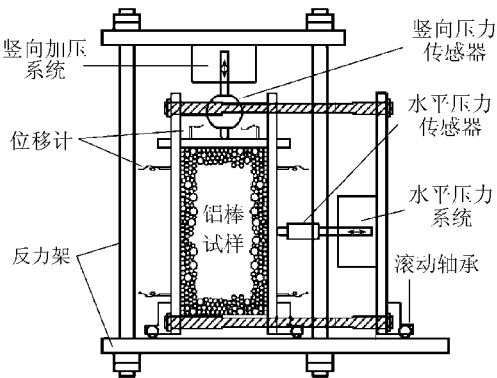


图 2 试验仪器结构示意图

试验分别在 50 kPa、100 kPa、200 kPa 的围压下先进行等向压缩,然后增加轴向应力进行剪切。试验的具体步骤为:①调整加压系统固定试样框;②装样及布置加筋材料;③设置量测装置并清零;④施加

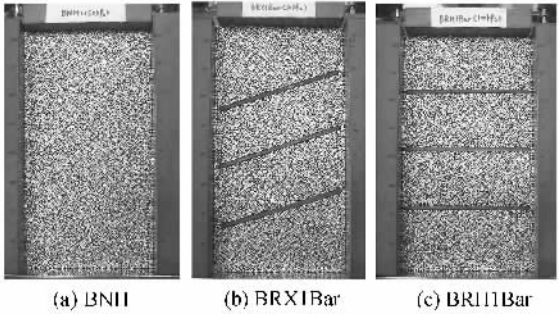


图 3 铝棒二轴压缩试验中加筋材布置

围压进行等向固结并记录数据;⑤施加轴向压力进行压缩并记录数据;⑥还原试验装置,整理数据。

无加筋试样及不同加筋方向试样二轴压缩试验的结果如图 4 和图 5 所示。可以明显看出,在相同的围压下,设置了加筋材料的试样的大主应力 σ_1 的峰值比没有设置加筋材料的试样的 σ_1 的峰值大,并且 BRH1Bar 试样的 σ_1 峰值也比 BRX1Bar 试样的 σ_1 峰值大。这说明,加筋材料的补强加固效果明显,并且沿小主应力 σ_3 方向设置加筋材的补强加固效果比斜向布置加筋材的补强加固效果要好。

2 二轴压缩试验 DEM 数值模拟

2.1 离散单元法(DEM)简介

离散单元法(distinct element method ,DEM)^[17-19]已成为粒状体细观结构研究的一种有效的方法,它能够提供各个粒子的详细信息(位移、接触角度、接触力、发挥的摩擦角等)。

DEM 将每个粒子模拟成刚性体,其形状可以是圆、椭圆或者是多边形,但是最简单与常用的是圆

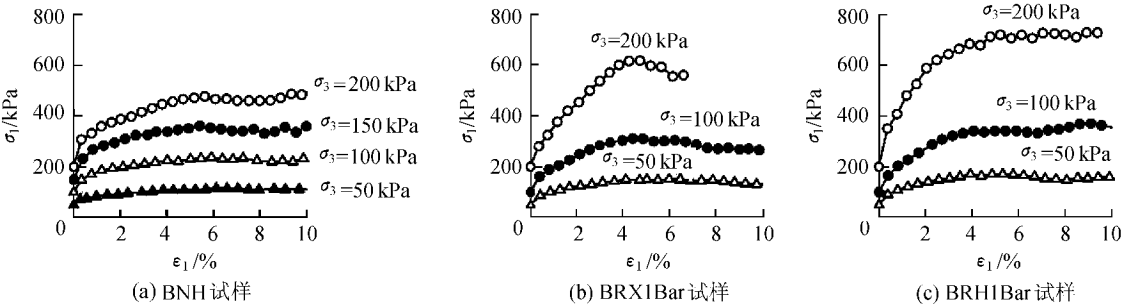


图 4 无加筋试样及不同加筋方向试样二轴压缩试验的应力-应变曲线

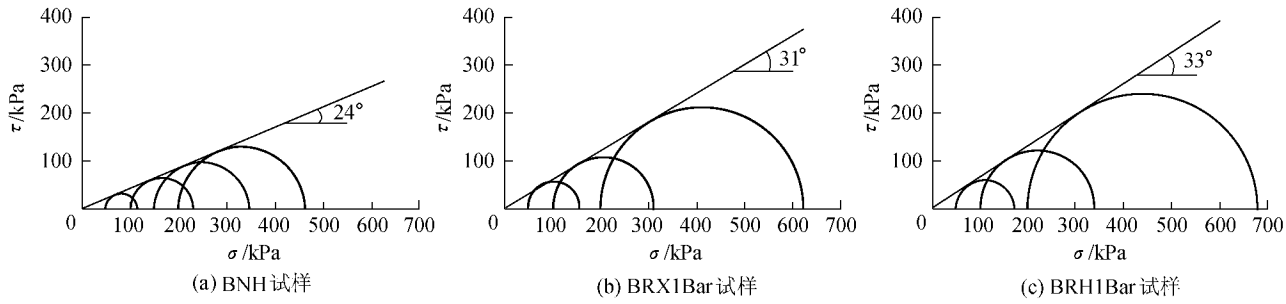


图 5 与图 4 对应的二轴压缩试验强度包线

形。在二维空间,每个刚性粒子有 3 个自由度:两个平移位移和一个旋转位移。每个刚性粒子与其相邻的粒子或刚性边界接触,在接触点的法向和切向分别设置弹簧和阻尼器。法向弹簧不能传递张力,切线方向用库仑摩擦定律来控制,即当切向力 $f_{si} > f_{ni} \tan \varphi_{\mu}$ (f_{ni} 为粒子 i 的法向压缩力, φ_{μ} 为粒子间摩擦角)时,粒子间产生滑动。设置阻尼器的目的是让粒子的微小振动尽快趋向稳定。粒子间的作用力根据粒子的接触重叠量与弹簧的模量大小计算而得。作用于某个例子上的所有接点力叠加形成一合力,再根据牛顿第二定理计算得出粒子的运动加速度,然后用差分法重新计算粒子的速度和位移。在计算得到新的粒子位移后,进行下一时步的循环。计算时步 Δt 的选择对计算的稳定影响很大, Cundall 根据单自由度质点的运动方程的稳定条件建议

$$\Delta t < \Delta t_c = \sqrt{\frac{m}{k}} \tag{1}$$

式中: m 为粒子质量; k 为弹性模量。本文计算中 Δt 取值为 $3.0 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。

2.2 计算模型

为了使数值模拟结果尽可能地和二轴试验匹配, DEM 中设定铝棒粒子为刚性圆,颗粒组成按照二轴试验中铝棒的直径和混合比例随机生成,加筋材料(土钉)用刚性边模拟。

另外,为了增加数值模拟结果的精确性,放大数值模拟试样的尺寸,增加试样中粒子的数量,取试样宽 300 mm,高 600 mm。计算参数见表 1。

2.3 计算结果与分析

围压为 50 kPa 的二轴压缩试验 DEM 计算结果与试验结果对比如图 6 所示。从图 6 可以看出,计

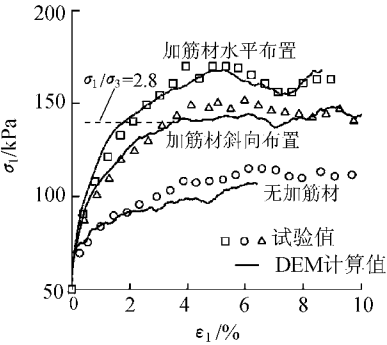


图 6 DEM 数值模拟结果与二轴压缩试验应力-应变曲线对比($\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$)

表 1 DEM 计算所用的材料参数

项 目	法向刚度系数 k_N	切向刚度系数 k_S	法向阻力系数 η_N	切向阻力系数 η_S	$\varphi_{\mu} / (^\circ)$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\Delta t / 10^{-7} \text{ s}$
粒子间接触	1.0×10^{10}	7.9×10^5	3.0×10^9	1.4×10^5	16	2700	3.0
粒子与织物接触	9.0×10^8	7.9×10^3	1.4×10^7	1.0×10^4	30	2700	3.0
粒子与加筋材料接触	1.8×10^{11}	1.1×10^6	6.0×10^9	2.0×10^5	30	2700	3.0
粒子与外框接触	1.8×10^{11}	1.1×10^6	6.0×10^9	2.0×10^5	10	2700	3.0

算结果与试验结果基本吻合,特别是加筋材料水平布置的试样,说明 DEM 可以作为实际物理试验的补充,进行更进一步的分析。

图 7 为主应力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.8$ 时,两加筋材试样的位移分布。可以明显看出, BRH1Bar 试样的位移值比 BRX1Bar 试样的位移值小,中间发生 0.4 mm 以下位移的粒子的区域范围更大。说明加筋材沿 σ_3 方向布置时,对粒子的约束更大,试样的变形小,相应强度增加的就更大。

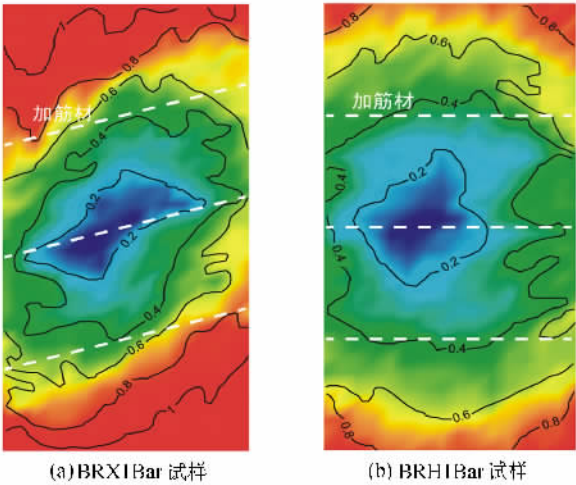
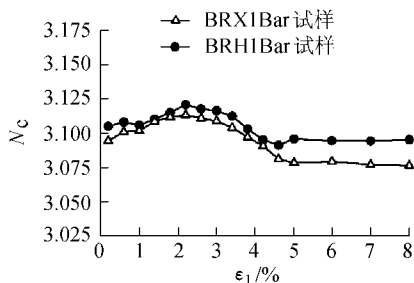


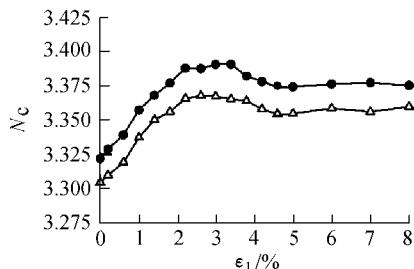
图 7 DEM 模拟得到的两加筋材试样的位移($\sigma_1/\sigma_3 = 2.8$, 单位: cm)

下面从粒子构造稳定性方面说明加筋材料设置角度的影响。通常用平均配位数 N_c 反映粒子构造的稳定性。平均配位数 N_c 越大,则粒子排列越紧密,粒子群体也就越稳定,抗剪切破坏能力越强。图 8 是加筋材水平向布置 BRH1Bar 试样与斜向布置 BRX1Bar 试样 N_c 值的对比。可以看出, BRH1Bar 试样的 N_c 值比斜向布置 BRX1Bar 试样的 N_c 值要大,尤其在试样中心 1/2 宽度范围内。

图 9 是水平加筋材表面设置不同摩擦系数时,试样的应力-应变曲线。从图 9 可以看出,试样的大主应力 σ_1 值随着加筋材摩擦系数的减小而降低,当设置加筋材的摩擦系数为 0 时,试样的应力-应变曲线和无加筋材试样的应力-应变曲线非常接近。这说明,摩擦系数为 0 的加筋材对试样几乎没有补强加固效果,加筋材对试样的补强加固作用是通过加筋材与周围粒子的摩擦力实现的,这就是土钉的工作特点。



(a) 试验整体范围



(b) 试验中心1/2宽度范围

图8 两加筋材试样 N_c 值对比

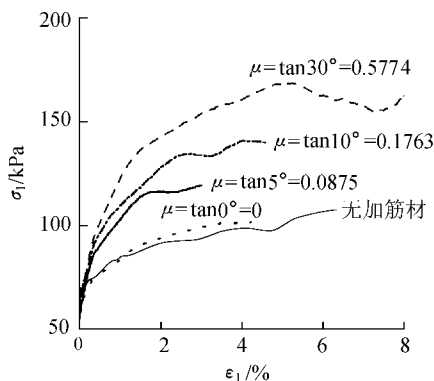
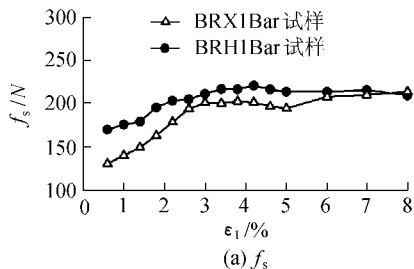
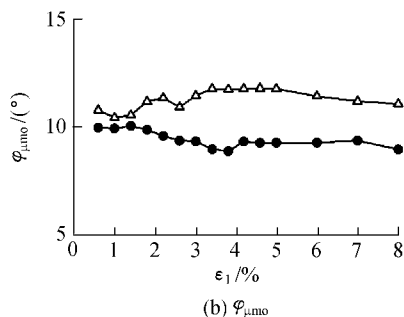


图9 不同表面摩擦系数下 BRH1Bar 试样的应力-应变曲线

图10是BRX1Bar和BRH1Bar试样中加筋材与粒子间的摩擦力 f_s 和发挥的摩擦角 $\varphi_{\mu mo}$ 对比图。



(a) f_s

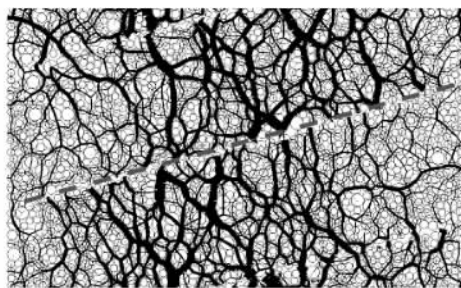


(b) $\varphi_{\mu mo}$

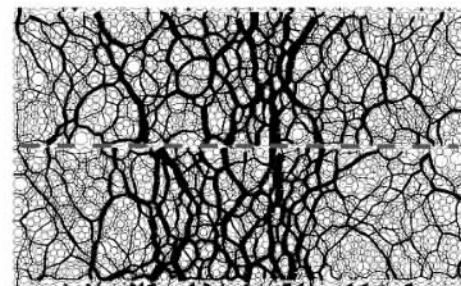
图10 两加筋材试样 f_s 和 $\varphi_{\mu mo}$ 的对比

从图10可以看出,加筋材水平设置(沿小主应力 σ_3 方向)时的 f_s 比斜向设置时要大,而 $\varphi_{\mu mo}$ 要小,说明加筋材沿 σ_3 方向布置能更有效地约束试样的侧向变形,从而更能提高试样的强度。

图11是两试样在峰值时中间加筋材区域粒子接点力。图中黑线表示粒子接点力的大小和方向,黑线越粗表示粒子间接点力越大。可以看出,两试样中间区域黑线较两侧的黑线要粗且密很多,指向大体垂直加筋材,并且BRH1Bar试样中间黑线要比BRX1Bar试样的密集。由于加筋材的存在,加筋材与周围粒子之间的摩擦力限制了粒子的运动,也限制了试样中间粒子的向外扩散,使得粒子更加的紧密,形成了粒子加强区域。在这些加强区域内,粒子接点力很大,形成一条与外荷载相平衡的柱状受力结构^[20]。



(a) BRX1Bar 试样



(b) BRH1Bar 试样

图11 两加筋材试样中间加筋材区域粒子接点力

3 结 论

a. 土钉的加筋效果是通过土钉与周围材料之间的摩擦力来实现的。

b. 沿 σ_3 方向设置土钉,更能有效地限制试样的变形,土钉的加筋效果更好。

参考文献:

- [1] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 曾宪明,黄久松,王作民,等.土钉支护设计与施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [3] JEWELL R A, PEDLEY M J. A large scale experimental study of soil reinforcement interaction[J]. Ground Engineering, 1990, 23(6): 44-50.

(下转第28页)

种现象发生,可以在土工袋施工完后,在其外表面铺上一层土工膜,而后进行衬砌或植草保护。因此,对土工袋组合体下层的膨胀土渠坡进行稳定分析时,可不考虑坡面土体含水量随深度的变化。

3 算例分析

对南水北调中线总干渠河南新乡潞王坟的膨胀土渠坡进行计算分析。底坡长 40 m,高 15 m,渠坡坡度为 1:2。土工袋压坡体直接堆放在开挖的膨胀土渠坡上,水平宽度 2 m。压坡体施工完后,在其外表面铺上一层土工膜,而后进行衬砌保护。试验段渠坡岩体以黏土岩为主计算,取饱和密度为 2.04 t/m^3 ,天然密度为 1.80 t/m^3 ,黏聚力为 20 kPa,内摩擦角为 17° 。不考虑坡顶张拉裂隙,即令 $M_p = 0, q_i = 0$ 。

未经土工袋处理的膨胀土渠坡,其半径 30.15 m,稳定安全系数为 2.86。划弧形状见图 3。经过土工袋处理后的膨胀土渠坡,其半径 26.11 m,稳定安全系数为 3.65,圆弧滑动面形状见图 4。显然,有土工

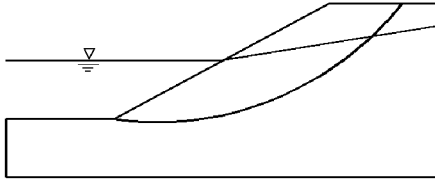


图 3 坡前蓄水圆弧滑动面

袋处理的方案其稳定安全系数比不考虑压坡情况要高,相应的滑弧深度要深。安全系数提高幅度达 27.4%,可见土工袋压坡效果明显。土工袋处理膨胀土渠坡,可以提高渠坡的整体稳定性。

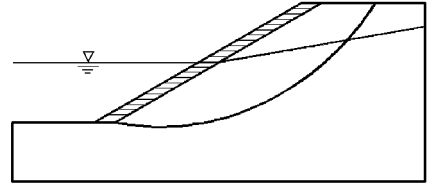


图 4 土工袋处理后圆弧滑动面

参考文献:

- [1] 孙长龙,殷宗泽,王福升.膨胀土性质研究综述[J].水利水电科技进展,1995,15(6):10-11.
- [2] 宁根成.浅谈地区膨胀土的性质[J].西部探矿工程,2003(9):1-2.
- [3] 刘斯宏.土袋技术在膨胀土地基处理中的应用[M].南京:河海大学出版社,2007:21-27.
- [4] 卢廷浩.土力学[M].南京:河海大学出版社,2002:235-255.
- [5] 周资斌.基于极限平衡法和有限元法的边坡稳定分析研究[D].河北:河北理工学院,2004.
- [6] 刘斯宏,汪易森,朱克生,等.有荷条件下南阳膨胀土强度试验及其应用[J].水利学报,2010:361-366.
- (收稿日期 2011-09-15 编辑 熊水斌)
- (上接第 25 页)
- [4] JEWELL R A, PEDLEY M J. Soil nailing design[J]. Ground Engineering, 1990, 23(2): 20-36.
- [5] JEWELL R A, PEDLEY M J. Review of theoretical models for soil nailing[J]. British Geotechnical Society, 1990, 12(2): 17-21.
- [6] SCHLOSSER F, BUHAN P D E. Theory and design related to the performance of reinforced soil structures[J]. British Geotechnical Society, 1990, 12(2): 6-8.
- [7] SCHLOSSER F. The multicriteria theory in soil nailing[J]. Ground Engineering, November, 1991, 23(2): 13-15.
- [8] Schlosser F, Unterrichter P. French research program CLOUTERRE on soil nailing, performance of reinforced soil structures[J]. British Geotechnical Society, 1990, 12(2): 13-16.
- [9] Briddle R J. Soil nailing-analysis and design[J]. Ground Engineering, 1989, 22(6): 52-56.
- [10] 刘大鹏.土钉支护设计中土钉倾角对边坡稳定性影响研究[J].北京交通管理干部学院学报,2005,15(3):24-28.
- [11] 俞季民,邹勇.土钉支护结构模型实验研究[J].土工基础,1998,12(1):14-9.
- [12] 黄汉成.土钉支护设计中几个问题的探讨[J].岩土工程界,2001,4(12):50-55.
- [13] 龚晓南.土钉和复合土钉支护若干问题[J].土木工程学报,2003,36(10):80-83.
- [14] 崔岩,赵国景,吴世红.土钉支护参数的研究[J].特种结构,2001,18(4):36-38.
- [15] 张明聚,宋二祥,陈肇元.土钉支护设计的修正条分法[J].工程勘察,1997(6):1-5.
- [16] 张建民,谢定义.饱和砂土动本构理论研究进展[J].力学进展,1994,24(2):187-201.
- [17] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [18] MATSUOKA H, YAMAMOTO S. A microscopic study on shear mechanism of granular materials by DEM[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(26): 167-175. (in Japanese)
- [19] 王泳嘉,邢纪波.离散单元法及其在岩土力学中的应用[M].沈阳:东北工学院出版社,1991.
- [20] 张孟喜,张石磊. H-V 加筋土性状的颗粒流细观模拟[J].岩土工程学报,2008,30(5):625-631.
- (收稿日期 2011-09-09 编辑 熊水斌)