



有限元在高桩码头岸坡稳定性分析中的应用*

乔保娟¹, 刘天苹¹, 李世海¹, 陆晶晶², 康弘清³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;
3. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司广州分公司, 广东 广州 511442)

摘要: 根据珠海某10万吨级煤炭码头勘察报告提供的土层参数资料和实际码头结构施工图, 建立了高桩码头三维有限元模型, 包括无桩岸坡模型和带桩岸坡模型, 并利用强度折减理论对其进行岸坡稳定性分析, 给出了岸坡安全系数, 并进一步分析了桩基对岸坡稳定性的影响。几何模型和力学模型均较为复杂, 为了尽可能真实地模拟实际情况, 土体屈服准则采用与摩尔-库仑准则相匹配的德鲁克-普拉格准则, 桩土界面采用面面接触模式。同时, 还给出了天然岸坡和考虑桩基影响下的岸坡塑性区和位移场, 从而为高桩码头岸坡的稳定性计算提供参考依据。

关键词: 高桩码头; 岸坡稳定分析; 有限元强度折减法; 德鲁克-普拉格准则

中图分类号: U 656.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2011)06-0061-05

Application of FEM in slope stability analysis of high-piled wharf

QIAO Bao-juan¹, LIU Tian-ping¹, LI Shi-hai¹, LU Jing-jing², KANG Hong-qing³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3. Guangzhou Branch, CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: According to the soil parameters provided by the survey report and the structural construction drawings of a one hundred thousand-ton coal wharf in Zhuhai, this paper establishes a three-dimensional finite element model of the coal wharf, including slope model with piles and slope model without piles. The paper firstly analyzes the slope stability of the two models and gives each model's safety factor, using the theory of strength degradation FEM, and then, further studies the impact of pile foundation on slope stability. The model used in this paper is complex, both geometrically and mechanically, for example, to simulate the real situation as much as possible, the Drucker-Prager and Mohr-Coulomb equivalent area circle yield criterion is used in the slope soil, and the surface-to-surface contact model is used in the pile-soil interface. The paper also figures out the plastic zone and displacement field in both natural slope and pile foundation slope, which may provide references for slope stability analysis of high-piled wharf.

Key words: high-piled wharf; slope stability analysis; strength degradation FEM; Drucker-Prager yield criterion

岸坡稳定问题一直是工程界和学术界十分关注的研究课题。传统的圆弧滑动极限平衡方法使用简便, 在工程中得到了广泛的应用, 但是也有一定的

局限性。首先, 它将土视为刚性体, 只能得到抗力分项系数, 无法获得土体的应力和变形。其次, 它不能计算存在桩基的岸坡稳定安全系数, 在进行岸

收稿日期: 2010-12-20

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731506); 国家自然科学基金重点项目(10632100); 中国科学院重要方向性项目(KJ9X2-YW-L01)

作者简介: 乔保娟(1987—), 女, 硕士研究生, 从事高桩码头桩基与岸坡相互作用研究。

坡设计时，不考虑桩基的抗滑作用，这显然是偏保守的。此外，在高桩码头使用过程中，桩基的变位、桩和梁间的错位等都是经常出现的现象，极大地影响了岸坡稳定，而这些问题是传统的极限分析方法无法解决的。与极限平衡法相比，有限元强度折减法能够自动地求得任意形状的关键滑移面以及对应的最小抗力分项系数，还可以真实地反映坡体失稳及塑性区开展的过程，因此，在岸坡稳定分析中的应用备受重视。目前已有许多学者对有限元强度折减法进行了深入的研究，例如，Griffiths 等^[1]，Dawson E.M.^[2]，Yuan-Liang Chang 等^[3]，连锁营^[4]，张鲁渝、郑颖人^[5-7]等学者进行了研究工作，推导出了基于不同强度准则的计算方法。

笔者根据珠海某煤炭码头勘察报告提供的土体参数资料，建立了码头结构与岸坡三维有限元模型，并利用强度折减理论对其进行稳定性分析。

1 数值分析理论

1.1 岸坡失稳判据

Duncan^[8]将安全系数（现行规范中称为抗力分项系数）定义为使岸坡达到临界破坏时对土的强度指标进行折减的程度，也就是将土体强度参数 c, φ 等同时除以折减系数 F ，得到一组新的 c, φ 值，然后作为新的材料参数输入有限元软件进行试算，当计算正好收敛时，即再稍大一些计算便不收敛，此时对应的 F 称为坡体的临界折减系数，此时土体达到临界状态，发生剪切破坏。可以用公式作如下表示：

$$\begin{cases} c' = c/F \\ \varphi' = \arctan(\tan\varphi/F) \end{cases} \quad (1)$$

有限元强度折减法无法直接用公式计算抗力分项系数，而需根据某种破坏判据来判定系统是否进入极限平衡状态，这样不可避免地会带来一定的人为误差。尽管如此，仍发展了一些切实可行的平衡判据，如：限定求解迭代次数（如 500 次），当超过限值仍未收敛则认为破坏发生；或利用可视化技术，当广义剪应变等值线自坡角与坡顶贯通则定义坡体破坏；或限定节点不平衡力与外荷载的比值大小^[9]。根据赵尚毅和郑颖人的研究^[6-7]，塑性区从坡角到坡顶贯通是岸坡破坏的必要条件而

非充分条件。综合考虑，采用有限元计算不收敛作为岸坡失稳的判断依据，迭代次数 10 000 次，力收敛标准为 10^{-5} ，材料弱化系数步长为 2.5%，依次降低弱化系数的数值直至计算不收敛时，则前一次收敛的数值即为临界弱化系数。

1.2 弹塑性屈服准则选取

用折减系数法求解实际土坡稳定问题时，通常将土体假设成理想弹塑性体，其中本构模型常选用 Mohr-Coulomb 准则、Drucker-Prager 准则等。传统边坡稳定分析的极限平衡条分法采用的是 Mohr-Coulomb 准则，该准则较为可靠，在土体计算中应用十分广泛。但因为 Mohr-Coulomb 准则在三维应力空间中不是一个连续函数，是由 6 个分段函数所构成，在三维应力空间的屈服面为不规则的六角形截面的角锥体表面（图 1），在 π 平面上的图形为不等角六边形，其存在尖顶和菱角，给数值计算带来困难。

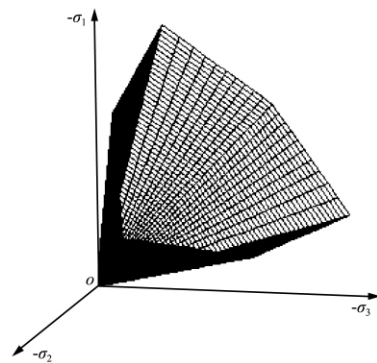


图 1 主应力空间中 Mohr-Coulomb 屈服面 ($c = 0$)

Drucker-Prager 屈服准则在主应力空间的屈服面为光滑圆锥面，在 π 平面上为圆形，不存在尖顶处的数值计算问题。因此，选用与 Mohr-Coulomb 匹配 Drucker-Prager 准则作为土的屈服准则，以利于数值计算。Drucker-Prager 准则表示为：

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (2)$$

式中： I_1, J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量。 α, k 是与岩土材料内摩擦角 φ 和粘聚力 c 有关的常数，不同的 α, k 在 π 平面上代表不同的圆。各屈服准则在 π 平面上的曲线如图 2。

本文采用莫尔-库仑等面积圆 $D-P$ ，此准则 1990 年由徐干成和郑颖人^[7]提出，并成功地运用于边坡稳定性分析中，换算关系如下：

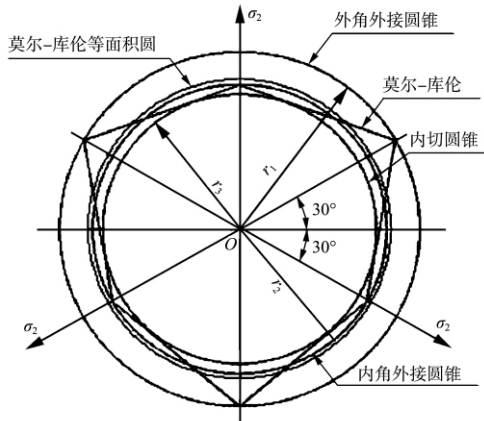


图 2 各屈服准则在 π 平面上的曲线

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\sqrt{3} \sin\varphi}{\sqrt{2\sqrt{3} \pi(9-\sin^2\varphi)}} \\ k = \frac{6\sqrt{3} c \cos\varphi}{\sqrt{2\sqrt{3} \pi(9-\sin^2\varphi)}} \end{cases} \quad (3)$$

本文采用关联流动法则, 即膨胀角和内摩擦角取同值。

1.3 材料参数计算

ABAQUS 中扩展的 Drucker-Prager 模型可以是理想塑性和强化塑性, 其子午线形状可以是直线、双曲线和一般的指数函数, 具有很强的适应性。本文采用子午线为线性性状的扩展 D-P 准则。有如下屈服函数^[10]:

$$F = q - p \tan\beta - d \quad (4)$$

式中: β 为摩擦角; $p = -\frac{1}{3}I_1$; $q = \sqrt{3}J_2$; 凝聚力 d 和输入的硬化参数有关。使用材料单轴受拉屈服应力 σ_t 定义硬化时:

$$d = (1/k + \tan\beta/3)\sigma_t \quad (5)$$

比较式(1)和式(2)可得:

$$\begin{cases} \tan\beta = 3\sqrt{3} \alpha \\ d = \sqrt{3} k \end{cases} \quad (6)$$

则可以通过 4 步求出 ABAQUS 中等面积圆屈服准则的材料参数内摩擦角 β 和屈服应力 σ_t :

- 1) 首先将土体材料参数凝聚力 c 和摩擦角 φ 代入式 (3), 求得一组 α 、 k ;
- 2) 然后将 α 、 k 代入到式 (6) 求得 β 和 d ;
- 3) 将 $\tan\beta$ 、 d 代入式 (5) 求出 σ_t ;
- 4) 将求得的 β 和 σ_t 输入 ABAQUS 即可。

2 珠海码头分析

选取珠海港某 10 万吨级煤炭码头建立模型。码头平台宽度为 35.5 m, 由桩基、及上部结构组成, 码头通过引桥同后方陆域连接。排架间距为 10 m, 每个排架设置 5 根直桩, 2 对 4:1 叉桩, 共 9 根桩。桩基以强风化岩作为持力层。上部结构由钢筋混凝土横梁、轨道梁、纵梁和面板组成。引桥结构采用高桩梁板式结构。每个排架 6 根桩, 全部为直桩。接岸结构离码头前沿距离为 75 m, 采用半直立半斜坡式结构方案。基槽开挖清除上部淤泥和淤泥质粉质黏土, 回填中粗砂形成堤心, 护脚棱体采用 10~100 kg 块石做堤心。挡土墙采用直立浆砌石挡墙。码头与岸坡断面如图 3。

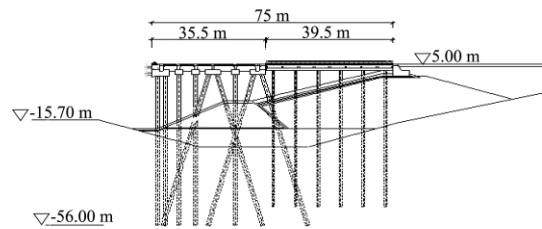


图 3 码头与岸坡断面

选取有限元计算域长 180 m (x 方向), 高 70 m (y 方向), 厚 40 m (z 方向)。根据勘察报告, 将岸坡土体从下到上从左到右分为 8 层, 并根据 c 和 φ 换算得到 β 和 σ_t , 各层土体主要参数见表 1。岸坡有限元模型如图 4。

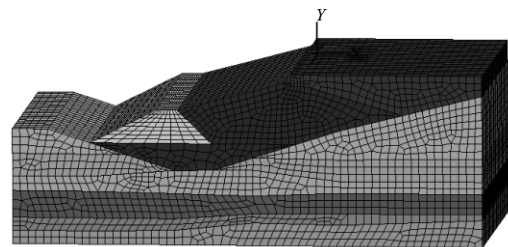


图 4 岸坡数值模型

桩土接触面设为面面接触, 码头结构设为主接触面, 土体设为从接触面。设计荷载如下: 码头面均载 $q = 20$ kPa; 引桥均载 $q = 10$ kPa; 陆域均载 $q = 140$ kPa; 系缆力 $q_x = -362.2$ kN, $q_y = 194$ kN; 撞击力 $q_x = 510$ kN。

2.1 无桩岸坡模型

按 2.5% 的梯度逐级折减土体屈服应力、摩擦

表1 材料参数

序号	桩及土层	密度/(t·m ³)	弹性模量/Pa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	σ_s /kPa(D-P)	β /(°)(D-P)
1	混凝土	2.50	3.25×10 ¹⁰	0.167				
2	堆石体	1.80	4.00×10 ⁷	0.280	0.0	45.0	0.0	62.63
3	回填砂	1.80	3.50×10 ⁷	0.280	0.0	28.0	0.0	62.62
4	回填中粗砂	1.80	4.60×10 ⁷	0.280	0.0	32.0	0.0	62.62
5	淤泥及粉质黏土①	1.60	3.00×10 ⁶	0.340	5.3	3.36	7.5	61.50
6	粉质黏土②	1.90	3.10×10 ⁶	0.300	21.8	11.8	9.9	62.50
7	粉质黏土③	1.91	4.98×10 ⁶	0.280	12.8	10.1	6.7	62.50
8	粉质黏土④	1.79	4.47×10 ⁶	0.250	23.4	13.4	9.3	62.50
9	粗砂	1.95	4.00×10 ⁷	0.250	0.0	30.0	0.0	62.62
10	强风化含砾砂岩	2.10	1.00×10 ⁸	0.200				

角、膨胀角，待计算不收敛或塑性区贯通时视为岸坡失稳，用此时的折减强度参数去除土体真实强度参数即得岸坡安全系数。

对单一黏土材料的岸坡，随着材料参数的折减，可以看到塑性区逐渐发展贯通的过程（图5）。

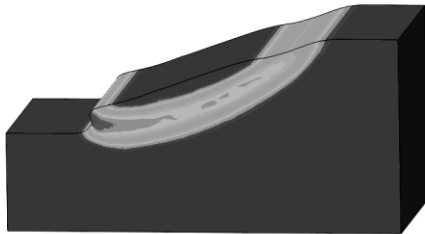


图5 岸坡塑性应变

而对于实际高桩码头，要对天然岸坡进行大面积开挖，回填沙子、块石等，且岸坡坡度较缓，因此不容易出现圆弧塑性带，只是在堆石体与下方软黏土接触区域出现大面积塑性带。

土层参数弱化系数为0.850时模型不收敛，弱化系数为0.875时收敛。可见，土层参数弱化系数为0.875时，岸坡出于失稳的临界状态，因此岸坡安全系数为1/0.875=1.14。

丰海技术TPWD土坡稳定程序的计算得到安全系数为1.02^[11]，可见，采用有限元强度折减方法得到的抗力分项系数略高。

2.2 带桩岸坡模型

本文建立了带有单樁码头结构的岸坡数值模型。为了得到更真实的岸坡位移，采用分阶段计算的数值模拟方法，消除岸坡土体的初始沉降对整体结构内力的影响。

第1阶段：仅仅计算土坡，杀死桩台单元，施加重力荷载，得到初始状态计算结果，如图6和7所示。

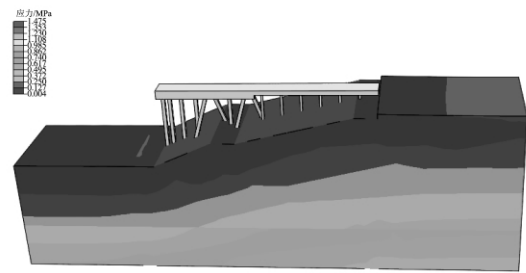


图6 应力

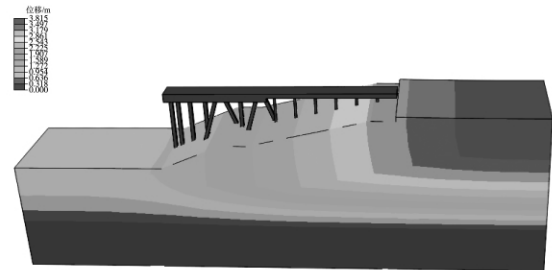


图7 位移

第2阶段：导入第1阶段计算得到的地应力文件，消除带桩结构整体计算时的初始位移，施加工作荷载。强度未折减时计算结果如图8所示。

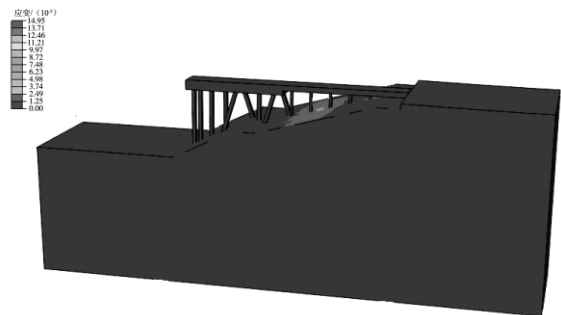


图8 强度未弱化时塑性应变

可见，土体强度参数未折减时，除了桩周极少数区域发生轻微塑性外，岸坡基本无塑性区，岸坡保持稳定。

土体参数弱化系数为0.750时计算收敛，弱化系数为0.725时计算不收敛，由塑性应变图（图

9, 10) 可见, 码头岸坡坡脚全部进入塑性, 岸坡面临危险, 此时岸坡失效, 因此岸坡安全系数为 $1/0.750=1.33$ 。

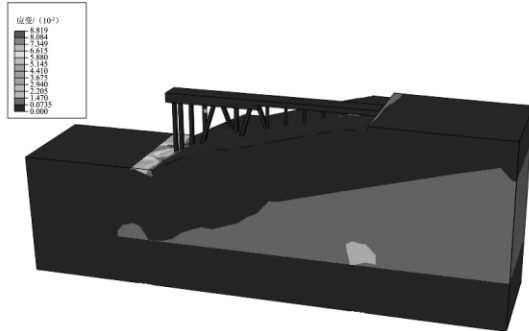


图 9 弱化系数为 0.750 时塑性应变

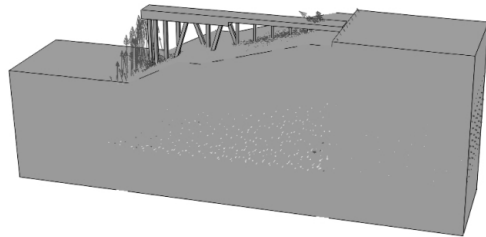


图 10 弱化系数为 0.750 时塑性应变矢量

无桩岸坡安全系数为 1.14, 带桩模型安全系数 1.33, 可见, 桩基大大提高了码岸坡的稳定性, 对安全系数贡献为 0.19。而目前的港口工程地基规范规定, 在进行岸坡设计时, 对于高桩码头中的桩基抗滑作用的利用必须严加限制, 使它在岸坡稳定的计算安全系数中的贡献不得大于 0.10。也就是说, 如果规定码头岸坡的最小安全系数为 1.20, 则岸坡土体本身的抗滑力必须足以使其安全系数达到 1.10 以上, 这样才能使桩基不致承受过大的水平推力而发生破坏。这显然是

表 2 无桩岸坡模型和带桩岸坡模型收敛情况对比

弱化系数	无桩岸坡模型	带桩岸坡模型
1.00	√	√
0.98	√	√
0.95	√	√
0.93	√	√
0.90	√	√
0.88	√	√
0.85	×	√
0.83	×	√
0.80	×	√
0.78	×	√
0.75	×	√
0.73	×	×
0.70	×	×

偏保守的。收敛情况见表 2。

高桩码头岸坡的稳定情况大大优于天然岸坡, 抗力分项系数提高较大, 这显然是由于桩的存在阻碍了岸坡土体的滑动, 即存在所谓桩对岸坡的“遮帘效应”, 从而增加了岸坡的稳定性。对于天然岸坡来说, 潜在滑动面位于淤泥质黏土层, 从坡脚向坡顶方向呈圆弧滑动形态。而高桩码头中桩基的存在使得潜在的滑动面下移, 已经达到了桩端深度, 进入了土质较好的土层, 因此抗力分项系数必定有较大程度的提高。图 11 给出了岸坡在临界状态时的位移场矢量图。对于高桩码头, 随着土体参数弱化系数的降低岸坡土体进入大面积流塑状态, 甚至形成贯通的滑动面, 但由于桩基对土体的限制作用, 岸坡并未失稳, 可以说塑性区的贯通并非岸坡破坏的充分条件, 而是必要条件。因此用有限元计算不收敛作为岸坡稳定的判断标准是合理的。

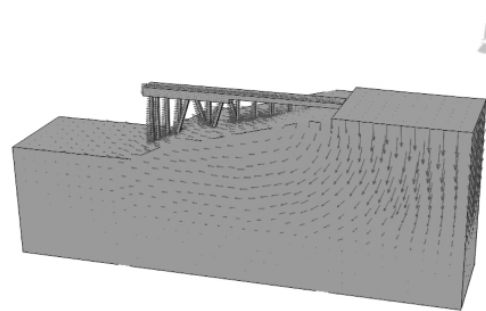


图 11 岸坡临界状态时的位移场矢量

3 结语

根据实际工程资料, 对珠海某码头建立了三维模型, 利用强度折减理论对其进行岸坡稳定性分析。最后, 给出了天然岸坡和考虑桩基影响下的岸坡稳定抗力分项系数、塑性区和位移场。

对比高桩码头岸坡和天然岸坡的计算结果可以看出, 桩基的存在对岸坡稳定起到积极作用, 不仅阻碍了岸坡土体的向下滑动, 而且使岸坡的潜在滑动面明显下移, 达到了桩端土质较好的粉质黏土层, 因此高桩码头岸坡的抗力分项系数明显变大。建议在港口工程岸坡稳定计算时采用结构与岸坡三维协同分析, 合理考虑桩的抗滑作用贡献。

(下转第 76 页)

对于开敞桩基墩式码头，作用于结构上的系缆力大多成为控制性荷载，系缆力的精细选取具有更加重要的意义。

6 结语

泊位运营中，船舶实际系缆力的不确定性非常大，设计人员应采用多种方法优化确定。总体而言，作用于系缆墩结构的系缆力不应大于缆绳破断力之和。系缆设施规格应结合兼顾船型、泊位使用条件等综合确定。在系缆墩结构计算时，对不同工程应区别对待，尤其是当选取脱缆钩最大拉力显著影响结构尺度时，必须慎重选取。文中所列的定性因素可供设计人员参考，对 3 个工程案例的定量分析，有助于对系缆力选取重要性的理解。

参考文献：

[1] JTJ 215—1998 港口工程荷载规范[S].

[2] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

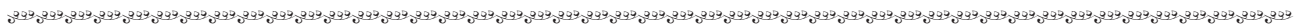
[3] OCIMF Mooring Equipment guidelines[M]. Second Edition. Oil Companies International Marine Forum, 1997.

[4] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].

[5] 中交水运规划设计院有限公司. 大连 30 万吨级进口原油码头工程初步设计报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2003.

[6] 中交水运规划设计院有限公司. 青岛益佳集团燃料油码头工程(码头部分)[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2007.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 65 页)

总之，有限元强度折减法的优点不仅仅在于求出抗力分项系数，还可以求出应力场和位移场，而且对于复杂地质地貌的岸坡也可以分析，这是传统的极限方法无法比拟的。但由于有限元强度折减法的计算精度受网格密度、单元形式等较多条件的影响，如何发挥其优势，将其更方便地应用于岸坡稳定性计算还有待进一步研究。

参考文献：

[1] Giffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Cmotechique, 1999, 49(3): 387-403.

[2] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6): 835-840.

[3] Chang Yuan-Liang, Huang Tien-Kuen. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2005, 28(2): 231-240.

[4] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407-411.

[5] 张鲁渝, 刘东升, 时卫民. 扩展广义Drucker-Prager 屈服准则在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 216-219.

[6] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.

[7] 赵尚毅, 郑颖人, 刘明维, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的边坡安全系数定义及其转换[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S1): 2 730-2 734.

[8] James Michael Duncan. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577-596.

[9] 王元战, 祝振宇, 张宝华, 等. 高桩码头岸坡稳定有限元分析[J]. 海洋工程, 2006, 24(4): 27-31.

[10] 苏凯, 伍鹤皋, 李冲. Mohr-Coulomb 等面积圆屈服准则在围岩稳定分析中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2008 (11): 81-86.

[11] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 珠海煤炭码头接岸结构设计计算书[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.

(本文编辑 武亚庆)