



混凝土防渗墙对坝坡稳定 作用机理的有限元分析

马一霖¹, 王武刚²

(1. 云南精诚更善拆除工程有限责任公司, 云南 昆明 650000;

2. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘要: 土石坝中建设防渗墙后, 墙身会对坝体的渗流场和应力场产生一定的隔断作用, 从而改变了相应的渗流场和应力场, 对坝坡的整体稳定产生影响。依托大型非线性有限元软件ABAQUS, 运用有限元强度折减法, 对增建防渗墙前后的上、下游坝坡稳定安全系数进行比较分析, 并引入计算收敛、土体位移、塑性贯通等3种失稳评价标准对比分析坝坡的安全系数。分析得出: 建设防渗墙后, 上游坝坡的稳定安全系数有所降低, 下游坝坡稳定安全系数增加, 从而使得整个坝体的稳定性得到提高。

关键词: 防渗墙; 坝坡稳定; 有限元强度折减法; 安全系数; 评价标准

中图分类号: TV 331

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0052-06

Simulation of working mechanism of concrete cut-off wall on stability of earth-rock dam by FEM

MA Yi-jun¹, WANG Wu-gang²

(1. Yunnan Sincere More Good Demolition Engineering Co., Ltd., Kunming 650000, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstracts: As the lower permeability of the cut-off wall, the stress field and the seepage field of the slope would change after the cut-off wall is built. And the affect of the cut-off wall on the slope stability exists definitely. In order to analyze the mechanism of concrete cut-off wall working on the stability of the earth-rock dam, the strength reduction finite element method is adopted, in accordance with the ABAQUS. Besides, the difference and validity of the evaluating methods are analyzed by comparing to the three kinds of evaluating standard such as calculation, displacement and plastic through areas. The result reveals that the stability safety factor of the downstream slope increases while the upstream slope decreases after building a cut-off wall.

Key words: cut-off wall; slope stability; strength reduction finite element method; safety factor; judgment standard

由于墙体与坝体接触、渗流场与应力场耦合等的复杂性, 采用传统方法很难实现各复杂因素的相互影响及复杂边界条件的模拟。为分析建设防渗墙后对土石坝坝坡稳定的影响, 本文利用有限元强度折减法计算, 对增建防渗墙前后的上、下游坝坡稳定安全系数进行比较, 探讨防渗墙对坝坡稳定的影响机理和规律。同时, 针对有限

元强度折减法计算坝坡稳定安全系数时的关键问题——坝坡失稳, 分别对计算收敛、位移发展趋势和塑性区贯通3种失稳判定依据进行比较, 综合判定坝坡失稳状态及最小安全系数。

关于有限元强度折减法的研究, Zienkiewicz^[1]等首先定义了强度折减系数为边坡实际能提供的最大抗剪强度与外荷载产生的实际剪应力之比;

收稿日期: 2013-04-11

作者简介: 马一霖(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程、水利工程方面的研究工作。

Ugai等^[2-3]利用弹塑性有限元分析了复杂条件下的二维和三维边坡稳定问题,并探讨了有限元强度折减法的使用性;宋二祥^[4]则以边坡某位置的位移作为失稳判据,采用有限元强度折减法进行边坡稳定分析;连锁营等^[5-6]和栾茂田等^[7-8]则分别把广义剪应变和塑性应变作为失稳判据;郑颖人等^[9]通过对边坡达到临界状态时的应力应变机理和特征的分析,认为把力和位移的收敛标准作为失稳判据较为合理。

1 有限元强度折减法分析

1.1 计算模型

本文以正常蓄水工况下的土石坝为分析对象,正常蓄水位25.0 m,墙体深度35.5 m,入岩0.5 m,坝体基础为10 m厚强风化岩和10 m厚弱风化岩,墙

体厚度0.6 m。增建混凝土防渗墙前后的有限元计算模型网格见图1和2。

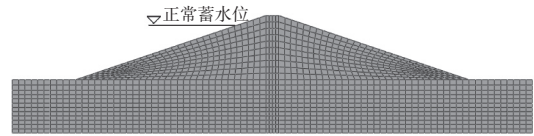


图1 无防渗墙时的有限元网格

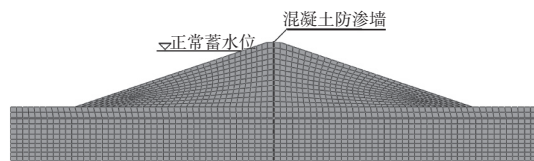


图2 有防渗墙时的有限元网格

1.2 计算参数

相关的有限元计算参数见表1。

表1 有限元计算参数

材料	密度 $\rho_d/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$
坝体	1.6	100	0.30	20.0	20.0	5.0×10^{-5}
覆盖层	1.7	200	0.30	5.0	30.0	1.0×10^{-4}
强风化基岩	2.4	2.0×10^4	0.25			1.0×10^{-4}
弱风化基岩	2.6	2.5×10^4	0.20			1.0×10^{-5}
墙体	2.4	2.0×10^4	0.25			1.0×10^{-7}

1.3 有限元强度折减法原理及其在ABAQUS中的实现

在有限元计算过程中,一般仅对强度指标进行折减,假定弹性模量 E ,泊松比 μ 等值不随 c , φ 值的改变而变化。有限元强度折减法计算原理见图3。

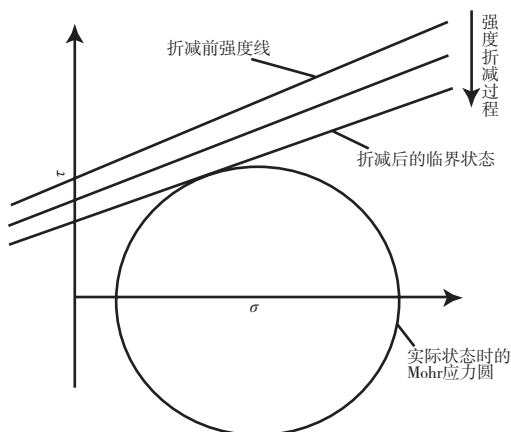


图3 有限元强度折减法原理

在有限元计算中假定不同的强度折减系数 F_r ,根据折减后的强度参数进行有限元分析,观察计算是否收敛。在整个计算过程中不断地增加 F_r ,当达到临界破坏时的强度折减系数 F_r 就是边坡稳定安全系数 F_s 。

在ABAQUS中,判断土坡达到临界破坏的评价标准有以下3种:1)以数值计算收敛与否作为评价标准,与有限元的算法有关;2)以特征部位的位移拐点作为评价标准;3)以是否形成连续的贯通区作为评价标准。

2 有限元强度折减法分析结果

2.1 防渗墙对坝体渗流场和应力场的影响

为分析防渗墙对坝坡稳定的影响作用机理,分别对增建防渗墙前后的渗流场和应力场进行对比分析,探讨渗流场和应力场的变化规律,分析结果见图4~7。

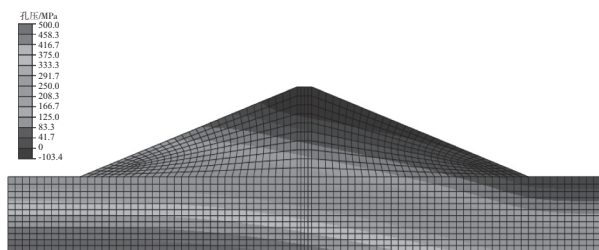


图4 增建防渗墙前的坝体孔压

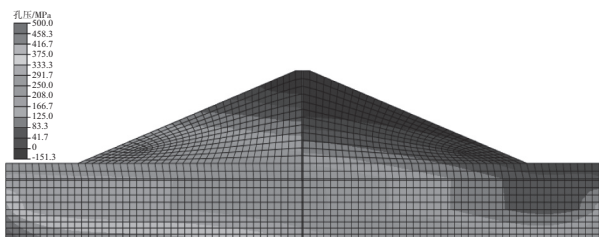


图5 增建防渗墙后的坝体孔压

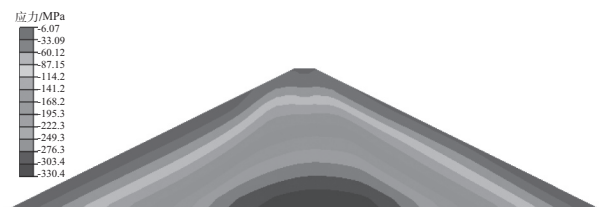


图6 增建防渗墙前坝体竖向有效应力

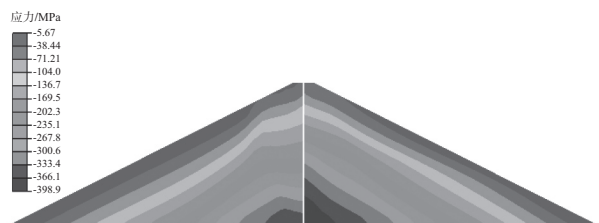


图7 增建防渗墙后坝体竖向有效应力

根据图4和5可以看出,建设防渗墙前后,坝体浸润线的高度发生较大的变化,即防渗墙具有明显的截渗作用。以坝脚位置为基准高程点,墙体位置处为19.8 m,而上游坝坡浸润线有所抬高,下游坝坡浸润线则有明显降低。由图6和7可知,增建防渗墙前后坝体应力分布规律发生明显改变,这是由于坝体土中的孔隙水压力发生变化引起的,因此,增建混凝土防渗墙对坝体应力大小影响相对较小,尤其是对坝坡稳定影响敏感的坝体中上部土体。

2.2 防渗墙对坝坡稳定的影响

2.2.1 增建防渗墙前的下游坝坡稳定情况

利用有限元强度折减法对建设防渗墙之前的坝坡进行计算,下面分别对计算不收敛、塑性区

贯通、位移随折减系数的发展趋势3种失稳判据所确定的坝坡稳定安全系数进行分析,计算结果见图8~10。

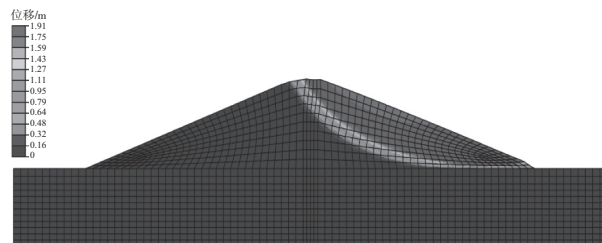
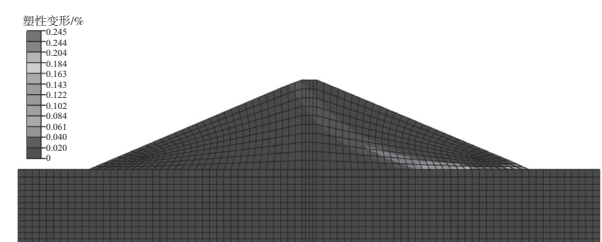
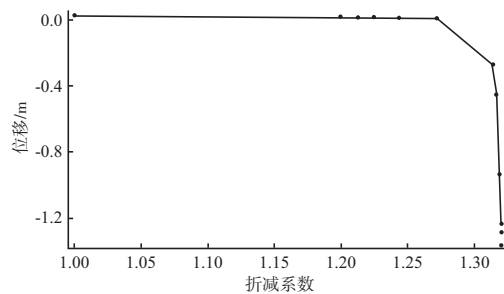
图8 计算不收敛时的坝体位移 ($F_s=1.32$)图9 坝体塑性区 ($F_s=1.31$)

图10 顶点位移—折减系数曲线

由图8可知,当时折减系数 $F_s=1.32$ 时,下游坝坡位移趋势形成典型的圆弧滑动面,呈现出典型的滑坡失稳状态,说明此时坝坡失稳。因此计算不收敛时的坝坡稳定安全系数为1.32。此外,当整个坝体土的强度指标折减到一定程度后,下游坝坡先出现滑坡,说明正常蓄水工况的下游坝坡稳定安全系数小于上游坝坡。

由图9可知,当 $F_s=1.31$ 时塑性区出现贯通现象。因此,根据塑性区贯通来判断坝坡失稳时的安全系数为1.31。由图10可知,当 $F_s<1.27$ 时,下游坝坡顶点位移随强度折减系数的变化很小;当 $F_s=1.27$,坝点位移增速加快,增加至0.26 m;当 $F_s=1.31$ 时,下游顶点位移迅速增大,呈现出不收敛的趋势,说明此时下游坝坡达到失稳状态。因此,根据位移发展趋势判断的坝坡稳定安全系数

为1.31, 与计算不收敛和塑性区贯通计算出的1.32和1.31基本一致。

2.2.2 增建防渗墙后的下游坝坡稳定情况

为分析建设防渗墙后坝坡稳定情况, 同样地, 对计算不收敛、塑性区贯通、位移随折减系数的发展趋势3种失稳判据所确定的坝坡稳定安全系数进行分析, 以综合确定建设防渗墙后的坝坡稳定安全系数, 计算结果见图11~13。

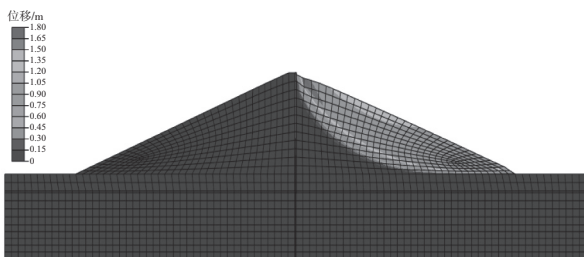


图11 计算不收敛时的坝体位移 ($F_s=1.44$)

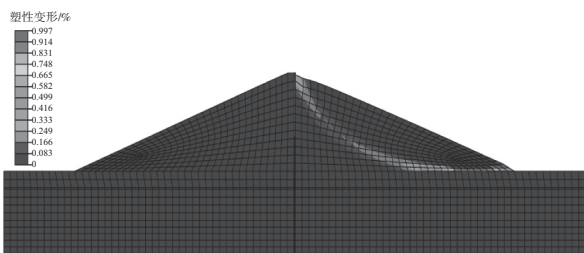


图12 坝体塑性区 ($F_s=1.44$)

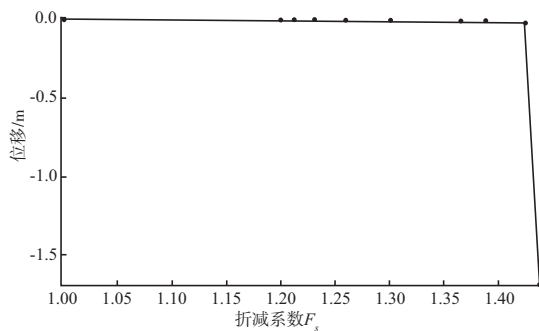


图13 顶点位移-折减系数关系曲线

根据图11可知, 建设防渗墙后, 计算不收敛时的下游坝坡出现明显的滑坡特征, 对应的折减系数为 $F_s=1.44$, 因此, 根据计算不收敛判断的坝坡稳定安全系数为1.44。

由图12可知, 当 $F_s=1.44$ 时下游坝坡塑性区出现贯通。因此, 依据塑性区贯通失稳评价标准, 下游坝坡稳定安全系数为1.44。

由图13可知, 当 $F_s=1.43$ 左右下游坝坡顶点位移呈快速增加趋势, 位移从厘米级迅速增加至1.75 m。

根据坝坡顶点位移发展趋势判断, 增建防渗墙后下游坝坡的稳定安全系数为1.43。

综上所述, 3种失稳判据所确定的安全系数分别为1.44, 1.44和1.43, 结果基本一致。增建防渗墙后, 同样是下游坝坡先出现失稳, 即下游坝坡稳定安全系数小于上游坝坡。

2.2.3 增建防渗墙前上游坝坡的稳定情况

为同时比较防渗墙对上、下游坝坡稳定的影响, 进一步计算上游坝坡的稳定安全系数。有限元强度折减计算时, 仅折减上游坝坡土体强度。同样分别列出3种失稳判据确定的上游坝坡稳定安全系数情况, 见图14~16。

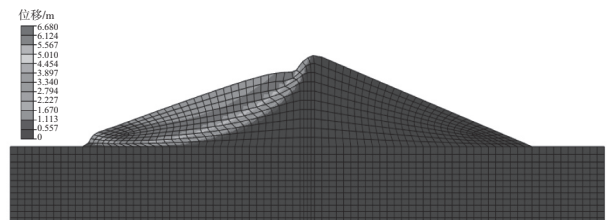


图14 计算不收敛时的坝体位移 ($F_s=2.11$)

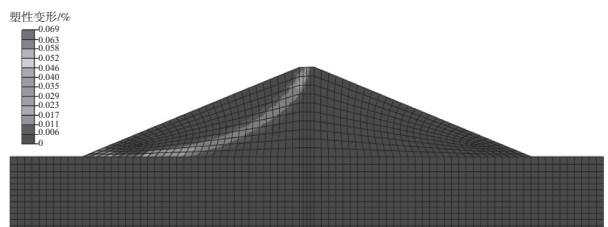


图15 坝体塑性区 ($F_s=2.08$)

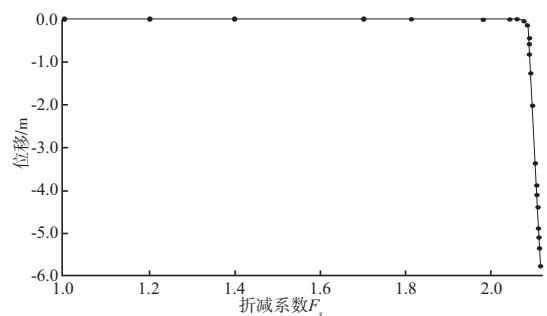


图16 顶点位移-折减系数关系曲线

同理, 由图14~16可知, 计算不收敛、塑性区贯通及位移随折减系数的发展趋势3种失稳判据所确定的坝坡稳定安全系数分别为 $F_s=2.11$, $F_s=2.08$ 和 $F_s=2.07$, 计算结果基本一致, 由此可确定增建防渗墙前坝坡稳定的安全系数为2.07。

2.2.4 增建防渗墙后上游坝坡的稳定情况

为同时比较增建防渗墙后防渗墙对上、下游坝坡稳定的影响,进一步计算上游坝坡的稳定安全系数,有限元强度折减计算时,仅折减上游坝坡土体强度。同样分别列出3种失稳判据确定的上游坝坡稳定安全系数情况,见图17~19。

同样地,由图17~19可知,计算不收敛、塑性区贯通及位移随折减系数的发展趋势3种失稳判据所确定的坝坡稳定安全系数分别为 $F_s=2.03$, $F_s=2.02$ 和 $F_s=2.01$,计算结果基本一致,由此可确定增建防渗墙前坝坡稳定的安全系数为2.01。

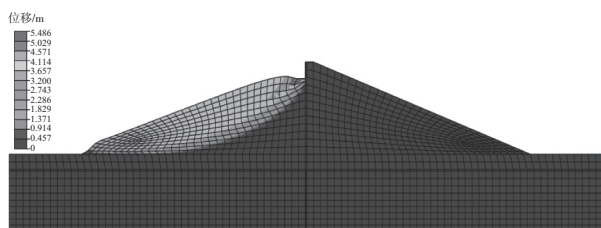


图17 有防渗墙时上游坝坡折减后的位移 ($F_s=2.03$)

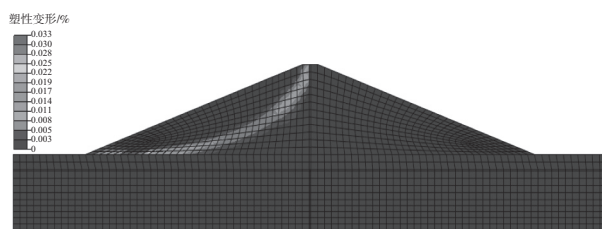


图18 坝体塑性区 ($F_s=2.02$)

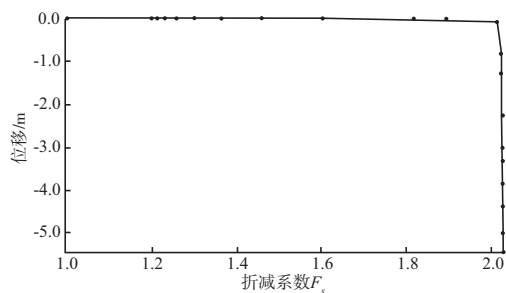


图19 顶点位移-折减系数关系曲线

2.2.5 建设防渗前后坝坡稳定安全系数对比

综合上述分析,增建防渗墙前后的上、下游坝坡稳定安全系数见表2。

表2 上、下游坝坡稳定安全系数

评价标准	建设防渗墙前 (正常蓄水)		建设防渗墙后 (正常蓄水)	
	上游坝坡	下游坝坡	上游坝坡	下游坝坡
计算收敛	2.11	1.32	2.03	1.44
坝顶位移发展趋势	2.07	1.31	2.01	1.43
塑性区贯通	2.08	1.31	2.02	1.44

由表2可知,相同条件下,3种失稳判据所确定的坝坡稳定安全系数相差均较小,计算结果基本一致。

正常蓄水工况下,增建防渗墙前后均为下游坝坡稳定安全系数小于上游坝坡,即下游坝坡稳定安全系数为整个坝体的最小安全系数。增建防渗墙后,上游坝坡稳定安全系数有所降低,从2.07降为2.01,约3%;而下游坝坡稳定安全系数有所增加,由1.32提高到1.44,约9%。

总体上,正常蓄水工况下,下游坝坡稳定安全系数小于上游坝坡,所以对于正常蓄水工况,建设防渗有利于提高整个坝坡稳定安全系数。但由于渗流场对坝坡稳定影响明显,上游坝坡浸润线位置抬高会使得坝坡安全系数降低。由此可以进一步推测,在库水位骤降工况下,由于坝体孔隙不能及时消散,此时浸润抬高对上游坝坡稳定

的影响将更加突出,即在库水位骤降工况下增建防渗墙对上游坝坡稳定的不利影响会更加突出。

3 结论

1) 为分析防渗墙对坝坡稳定的影响机理,分别对增建防渗墙前后的坝体渗流场和应力场进行了对比分析。防渗墙对坝体渗流场影响明显,由于防渗墙的截渗作用,增建防渗墙后上游坝坡墙前水头有所抬高,而下游坝坡墙后水头有所降低。建设防渗墙后坝体内部土体应力分布规律有一定变化,但与坝体滑坡对应范围的土体应力相差很小。与渗流场相比,建设防渗墙对坝体应力场的影响相对较小。

2) 对有限元强度折减法计算中的坝坡失稳判据进行了对比分析,计算结果表明,本文算例中计算是否收敛、土体位移收敛和塑性区贯通3种失

稳判定方法所确定的坝坡稳定安全系数最大偏差不超过2%, 说明在本文算例中3种判断方法具有高度的一致性。

3) 通过对增建防渗墙前后上、下游坝坡稳定安全系数的比较可知, 由于建设防渗墙后, 上游坝坡浸润线抬高, 其坝坡稳定安全系数有所降低, 约3%; 下游坝坡浸润线降低, 其坝坡稳定安全系数有所提高, 约9%。正常蓄水工况下, 有、无防渗墙时的下游坝坡稳定安全系数均小于上游坝坡, 因此, 对于整个坝坡稳定而言, 建设防渗墙后有利于提高正常蓄水工况下的最小坝坡稳定安全系数。然而, 由于坝坡稳定安全系数对于坝体内的浸润线抬高或降低较为敏感, 可以预见, 在库水位骤降工况下, 土体内孔隙水压力未能及时消散时, 对于上游坝坡稳定将更加不利。

参考文献:

- [1] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [2] Ugai K. A method of calculation of total factor of safety of slope by elastic-plastic FEM[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(2): 190-195.
- [3] Ugai K, Leshchinsky D. Three-dimensional limit equilibrium and finite element analysis[J]. Soils and Foundations, 1995, 35(4): 1-7.
- [4] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
- [5] 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.
- [6] 连镇营. 基坑工程三维有限元数值分析中若干问题的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- [7] 栾茂田, 武亚军, 年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1-8.
- [8] 武亚军. 基坑工程中土与支护结构相互作用及边坡稳定性的数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [9] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-326.
- (本文编辑 武亚庆)
-
- (上接第35页)
- [4] 孙士勇. 挡板(透空)式防波堤消浪效果分析[J]. 水运工程, 1998 (1): 11-15.
- [5] 麻志雄. 透空式防波堤消波性能试验研究[J]. 水运工程, 1990 (10): 1-6.
- [6] 谢怀东. 黄岐渔港新型透空式防波堤设计研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1997, 25(4): 42-46.
- [7] 严以新, 郑金海, 曾小川, 等. 多层挡板桩基透空式防波堤消浪特性试验研究[J]. 海洋工程, 1998, 16(1): 67-74.
- [8] 张婷婷, 陈国平, 马小舟. 高桩梁板式透空防波堤透浪特性的研究[J]. 港工技术, 2010, 47(4): 1-4.
- [9] 唐琰林, 张宁川, 刘爱珍. 双层水平板型透空式防波堤消波性能试验研究[J]. 水道港口, 2006 (5): 284-288
- [10] 王国玉, 王永学, 李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005 (6): 865-870.
- [11] 王国玉, 王永学. 新型透空式防波堤结构试验研究[J]. 中国造船, 2003, 44(1): 350-358.
- (本文编辑 郭雪珍)