

基于 ABAQUS 的南水北调高填方边坡稳定性分析

罗全胜^{1,4}, 陈晓楠², 付新航³

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475003; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038;
3. 开封第一黄河河务局, 河南 开封 475002; 4. 小流域水利河南省高校工程技术研究中心, 河南 开封 475003;)

摘要: 利用大型有限元软件 ABAQUS 建立了高填方渠段某一断面的二维有限元数值模型, 根据有限元强度折减法的基本原理以及土体特性, 对高填方渠道边坡的稳定性进行了分析, 再利用有限元强度折减法的失稳判定依据确定了合理可行的边坡稳定安全系数。结果证明, 有限元强度折减法所获得的临界滑动面结果与极限平衡法的结果几乎一致。可见, 以特征点的位移突变性和塑性区的贯通性来分析边坡的临界破坏可以减少误差并得到合理唯一的边坡安全系数, 因此是合理可行的。

关键词: 高填方渠道; 边坡; 强度折减法; 安全系数

中图分类号: TV 223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0747-04

Slope stability analysis of high fill canal in the Middle Route of South to North Water Diversion Project based on ABAQUS

LUO Quansheng^{1,4}, CHEN Xiaonan², FU Xinhang³

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475003, China; 2. Construction and Administration Bureau of South to North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China; 3. First Kaifeng Yellow River Engineering Bureau, Kaifeng 475002, China; 4. Small Watershed Conservancy Engineering Technology Research Center of Universities of Henan Province, Kaifeng 475003, China)

Abstract: A two-dimensional finite element model of a section of the high fill canal reach was established using the finite element analysis software ABAQUS. Based on the principle of strength reduction FEM and soil mass characteristics, the slope stability of the high fill canal reach was analyzed, and the reasonable stability and safety factor of slope was determined using the instability judgment basis of the strength reduction FEM. The simulation results showed that the critical sliding surface obtained from the strength reduction FEM is almost consistent with that determined by the limit equilibrium method, which suggested that using the displacement mutation of feature points and interconnectivity of plastic zone to analyze the critical damage of slope can reduce the estimation error and provide the reasonable and unique slope safety factor.

Key words: high fill canal; slope; strength reduction FEM; safety factor

南水北调中线干线工程焦作段干渠地处太行山前冲洪积倾斜平原, 其渠道大部分为全填方段, 并且与多个左排建筑物交叉, 是通水运行风险最高的渠段。当渠道发生边坡失稳破坏时, 会对附近的村庄村民造成生命财产安全威胁, 也会对重要建筑物造成严重的危害, 所以有必要对全填方段渠道边坡进行稳定性分析。

本文运用有限元强度折减法来分析渠道边坡的稳定性。与极限平衡分析法相比, 强度折减法原理简单, 思路清晰, 应用于边坡的稳定性分析有其独特的优点。有限元强度折减

法不但满足力的平衡条件, 而且还考虑了材料的应力应变关系, 计算的时候不需要做任何假定, 不需要事先假设滑动面的形式和位置, 便能够自动地求得任意形状的临界滑动面以及对应的最小安全系数, 同时它还可以真实的反映坡体失稳及塑性区的开展过程, 使得计算结果更加精确合理。

1 实例工程的岩土体特性

南水北调中线干线工程焦作段有府城西和西待王北等多个土料场, 根据土料场力学参数建议值, 焦作段高填方渠

收稿日期: 2014-04-21 修回日期: 2015-06-28 网络出版时间: 2015-7-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.1442.013.html>

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目(122300410001)

作者简介: 罗全胜(1970-)男, 河南南阳人, 副教授, 主要从事水力学与水利工程方面研究。E-mail: 1552871547@qq.com

段回填土渗流系数取为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

根据焦作段典型断面的地质剖面, 勘探范围的地层主要为第四系全新统冲洪积地层及中更新统坡洪积层, 其岩性从上至下分别为: 黄土状重粉质壤土、粉质黏土、重粉质壤土、

轻粉质壤土、细砂、重粉质壤土。

根据焦作段施工土料场试验成果, 结合《水利水电天然建筑材料勘察规程》(SL 251-2000) 质量要求, 选取的高填方渠道回填土渗流系数

表 1 焦作典型断面(李河渠道倒虹吸)各层土的力学性设计指标建议值

Tab. 1 Jiaozuo typical section (inverted siphon of Li river channel) mechanical design index of each layer of soil

土体单元编号	岩性	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E_s /MPa	抗剪强度(饱快)		抗剪强度(饱固快)		基础底面与地基土的摩擦系数 f	渗透系数 K /(cm · s ⁻¹)	承载力标准值 f_k /kPa
				C /kPa	φ (°)	C /kPa	φ (°)			
1	黄土状重粉质壤土	0.56	4.00	20	18	19	19	0.23	4.0×10^{-5}	100
°	粉质黏土	0.49	5.10	28	13	25	16	0.25	1.0×10^{-6}	130
»	重粉质壤土	0.38	5.60	20	15	18	17	0.30	3.5×10^{-6}	150
¼	轻粉质壤土	0.24	6.63	13	22	16	23	0.30	4×10^{-5}	160
½	细砂							0.42	2.3×10^{-2}	180
¾	重粉质壤土	0.23	7.94	26	16	24	18		4.95×10^{-6}	200

2 有限元强度折减原理

有限元强度折减法在 ABAQUS 中实现的基本原理是通过不断降低边坡岩土体抗剪切强度参数, 即将土体参数和值同时除以一个折减系数, 得到一组新的 \hat{c} 和 $\hat{\varphi}$ 值, 然后作为新的材料参数带入有限元进行试算, 当计算正好收敛时(折减系数再稍大一些, 数量级一般为 10^{-3} , 计算便不收敛), 对应的折减系数被称为坡体的最小安全系数, 土体达到极限破坏状态。程序自动根据弹塑性有限元计算结果得到破坏滑动面, 同时得到边坡的强度储备安全系数, 土体达到临界状态, 发生剪切破坏。当土体材料的抗剪强度参数 c 和 φ 分别用其临界抗剪强度 c_f 和 φ_f 所代替后, 结构将处于临界破坏状态, 其中:

$$c_f = c/F_s, \quad \varphi_f = \arctan(\tan \varphi / F_s) \quad (1)$$

有限元强度折减法进行边坡稳定弹塑性分析时, 需要求解一系列折减后的强度参数 \hat{c} 和 $\hat{\varphi}$ 的值:

$$\hat{c} = c/R, \quad \hat{\varphi} = \arctan(\tan \varphi / R) \quad (2)$$

有限元强度折减法的基本思想是: 在外荷载不变的情况下, 将土体强度参数按(2)式进行折减, 从而得到新的土体强度参数 \hat{c} 和 $\hat{\varphi}$ 进行有限元分析, 通过不断增加折减系数 R , 反复分析边坡内的应力应变情况, 直至土坡达到极限状态, 此时的折减系数 R 就是所要解的边坡稳定安全系数。

可以莫尔应力圆来表达强度折减过程(图 1)。在图 1 中, 莫尔圆表示其中的一点的实际应力情况, 而 AA、BB 和 CC 三条直线分别表示土体实际的强度包线、强度指标通过折减后所得到的强度包线, 以及剪切破坏时所得到的极限强度包线, 莫尔圆的所有的部分都处于土体实际强度包线之内, 表明了该点并未发生剪切破坏。通过折减系数的逐渐增大, 莫尔圆与强度的安全系数为 $F_s = 1.01$, 所得这个数值与极限平衡法给出的 $F_s = 1$ 相近。随着强度指标折减后得到的土体实际强度包线(图 1 中的直线 BB) 逐渐靠近, 土体的强度也逐渐得到发挥。当折减系数逐渐增大到某一个特定的值时, 莫尔圆会与折减之后得到的强度包线相切(图 1 中的直线 CC), 则此时所发挥的抗剪强度与实际剪应力达到临界平衡。

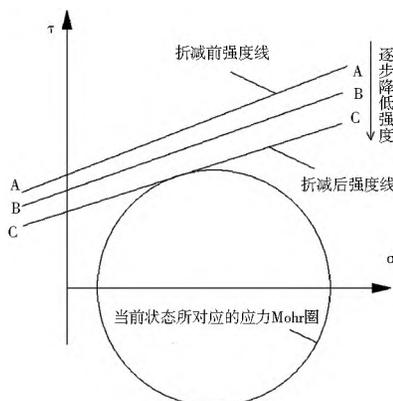


图 1 强度折减法原理

Fig. 1 The principal of strength reduction principle

3 模型建立及参数选取

南水北调中线干线工程焦作段干渠地面高程一般在 95~110 m, 覆盖层由冲洪积物构成, 以壤土、黏土、细砂及泥卵石为主。在该渠段的全填方渠段取一均质渠道断面, 其渠底高程是 95.7 m, 渠堤高程 106.32 m, 填高 10.62 m, 边坡坡度为 1:1.75。填筑渠道土体容重为 20 kN/m³, 黏聚力为 12.38 kPa, 摩擦角 φ 是 20°, 弹性模量取为 10 000, 泊松比取 0.3, 密度为 2。地基土容重为 20 kN/m³, 黏聚力 φ 为 20 kPa, 摩擦角 φ 是 15°, 弹性模量取为 10 000, 泊松比取 0.3, 密度为 2。

利用 ABAQUS 有限元软件建立渠道模型, 见图 2。其中地基面向下取 9.38 m, 对模型设置截面特性并赋给相应的区域; 通过对渠道边坡所有区域施加体力为 -5, 以此来模拟边坡的重力荷载; 边界条件设置是对模型两侧的水平位移和模型地基地部两个方向的位移进行约束。采用四节点平面应变单元对模型进行网格划分, 见图 3。

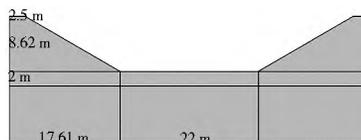


图 2 渠道模型

Fig. 2 Schematic diagram of channel model diagram

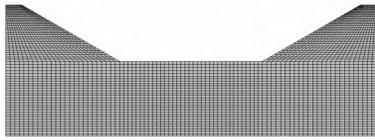


图3 渠道有限元网格划分

Fig. 3 Finite element mesh discretization of channel model

4 计算结果分析

4.1 安全系数与破坏区塑性应变的变化过程

本文通过对边坡顶点、坡脚处的水平位移、竖向位移与折减系数的关系曲线的特征进行分析,同时以塑性区贯通作为此判据的补充。采用了有限元强度折减法获得该边坡所需稳定的安全系数,强度折减系数 $F = 1.0$ 为边坡初始位置,即由土体的抗剪强度的参数值 $c, \tan\phi$, 代入软件 ABAQUS 中进行计算,从而获得所需初始的位移场和应力场;接着以 0.1 的增幅逐渐增大折减系数,相应得到了一系列不同折减系数时的位移场和应力场。通过观察坡脚、坡顶的两处竖向位移、水平位移随强度折减系数的增加的变化趋势,从而得到了强度折减系数 F 与位移之间的关系曲线(见图 4 和图 5)。

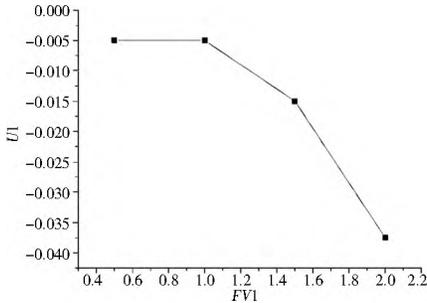


图4 坡脚处 $FV1$ 随 $U1$ 的变化关系

Fig. 4 Relationship between $FV1$ and $U1$ in the slope bottom

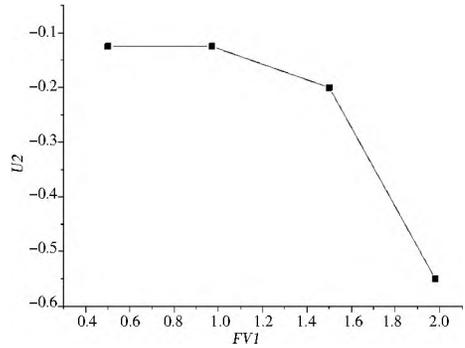


图5 坡顶处 $FV1$ 随 $U2$ 的变化关系

Fig. 5 Relationship between $FV1$ and $U2$ in the slope top

图 4、图 5 显示,如果以数值计算不收敛作为高填方渠道边坡稳定的评价标准时,所对应的场变量 FV 分别为 1.99、1.98,即安全系数为 $F_e = 1.99$ 或 1.98,所得这个数值与极限平衡分析方法给出的 $F_e = 1$ 的相差甚远,均过高地估算了高填方渠道边坡的安全性。但是,图 4 中特征点水平位移有一个明显的拐点,如果以该拐点作为高填方渠道边坡稳定的评价标准,则对应的场变量 FV 为 1.01。

而图 5 中若以特征点竖向位移的拐点作为高填方渠道边坡稳定的评价标准,所对应的场变量 FV 为 0.97,即安全系数为 $F_e = 0.97$ 。这两个数值与极限平衡分析方法给出的 $F_e = 1$ 比较接近。可见,本文采用有限元强度折减法以特征部位的位移拐点来确定边坡稳定的安全系数,是合理可行的,而且明显高于以数值计算收敛判方法的计算结果。

在自重应力作用下的塑性应变的发展过程见图 6。边坡失稳时边坡内存在塑性区相互贯通情况,能真实地反映坡脚和河床的破坏情况,这个破坏是一个局部扩展以至贯通后形成滑裂面的渐进破坏过程。

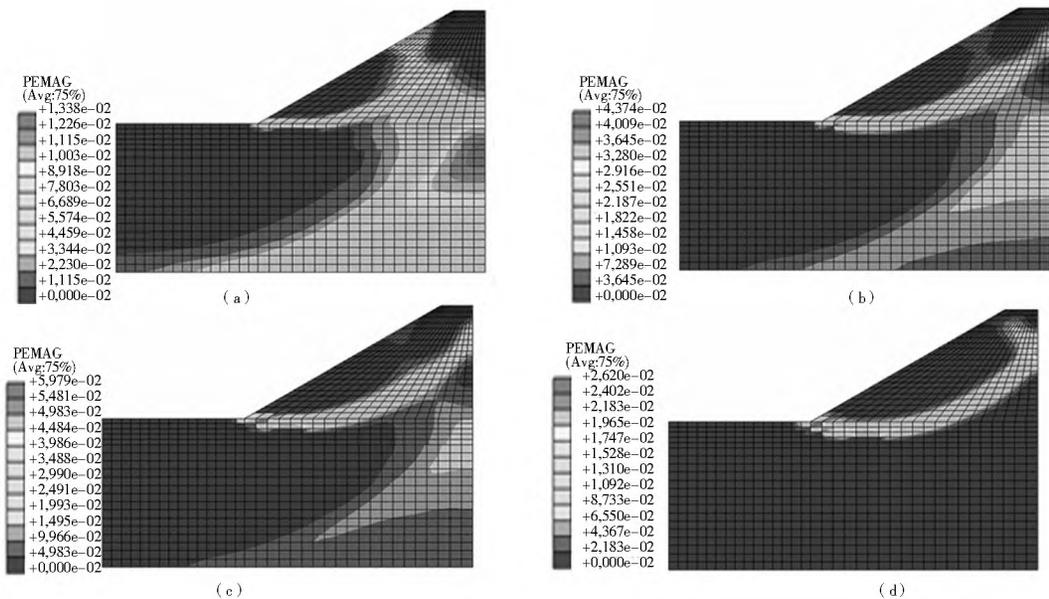


图6 等效塑性应变区破坏面的发展过程

Fig. 6 Development process of damage surface in the equivalent plastic strain zone

4.2 不同土体参数对安全系数的影响

4.2.1 土体弹性模量值与泊松比的影响

采用不同的弹性模量值 E 、不同的泊松比 μ , 分别对高填

方渠道边坡进行稳定性分析,计算结果见图 7、图 8。

从图 7、图 8 可知,随着土体弹性模量 E 、土体泊松比 μ 的变化,高填方渠道边坡稳定的安全系数并没有发生明显变

化,均维持在 0.97 左右,可见土体参数弹性模量 E、的变化对边坡稳定安全系数的影响很小,可以忽略不计。

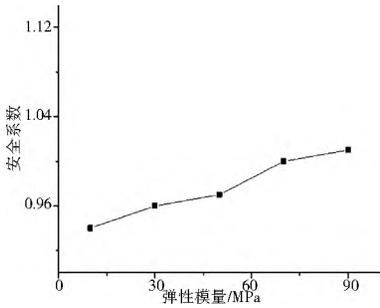


图 7 弹性模量与安全系数变化关系
Fig. 7 Relationship between the eElastic modulus variation of theand safety factor

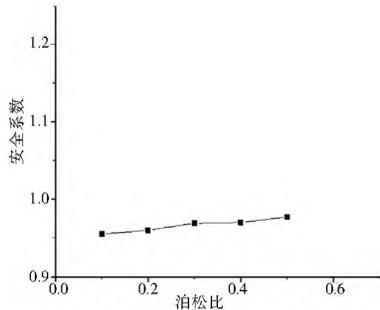


图 8 泊松比与安全系数变化关系

Fig. 8 Relationship between the Poisson's ratio and safety factor

4.2.2 土体黏聚力和内摩擦角的影响

采用不同的黏聚力参数、不同的内摩擦角参数分别对边坡稳定性进行分析,结果见图 9、图 10。

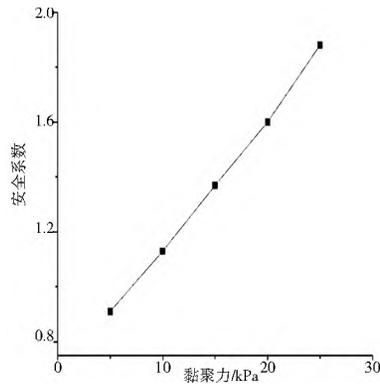


图 9 黏聚力与安全系数变化关系

Fig. 9 Relationship between the cohesion and safety factor

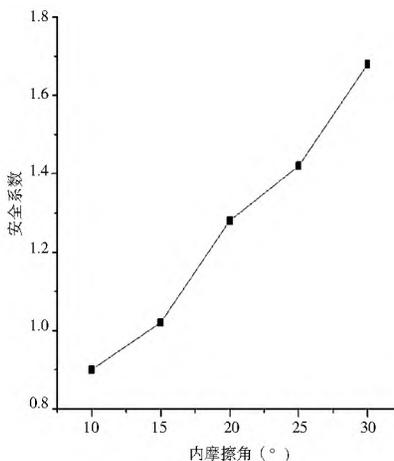


图 10 内摩擦角与安全系数变化关系

Fig. 10 Relationship between the internal friction angle and safety factor

从图 9 和图 10 可知,随着土体抗剪强度参数黏聚力和内摩擦角的增大,高填方渠道边坡稳定安全系数也明显增大,可见土体的抗剪强度参数黏聚力和内摩擦角对高填方渠道边坡稳定安全系数有很大影响。

5 结论

(1) 渠道边坡稳定性分析中的塑性应变发展过程表明,土坡破坏是一个局部破坏逐渐扩展以至贯通后形成滑裂面的渐进破坏过程。

(2) 土体参数分析当中弹性模量和泊松比对边坡稳定安全系数的影响很小,可以忽略不计;黏聚力和内摩擦角对边坡稳定安全系数有很大影响,选取时需慎重考虑。

(3) 有限元强度折减法不仅适用于高填方渠道边坡的稳定性分析等复杂情况,而且在实际工程当中也具有实在的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jianwei. ABAQUS in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))
- [2] 王中发. 有限元强度折减法在边坡稳定计算中的应用[J]. 湖北水利水电职业技术学院学报, 2009, 5(3): 27-30. (WANG Zhongfa. Application of strength reduction FEM in slope stability calculation[J]. Hubei Water Resources Technical College, 2009, 5(3): 27-30. (in Chinese))
- [3] 甘桂其. 有限元强度折减系数分析边坡稳定性[J]. 甘肃科技纵横建筑设计, 2008, 37(2): 112. (GAN Guiqi. Finite element analysis of slope stability strength reduction factor[J]. Architectural design aspect Gansu Science and Technology, 2008, 37(2): 112. (in Chinese))
- [4] 刘杰,姜军涛,姜晓峰,等. 边坡稳定性的有限元强度折减分析法[J]. 低温建筑技术, 2010(11): 79-80. (LIU Jie, JIANG Juntao, JIANG Xiaofeng, ZHAO Can. Finite element strength reduction slope stability analysis[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010(11): 79-80. (in Chinese))
- [5] 王琛,石湛. 基于有限元强度折减法的连拱隧道洞口边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技应用技术版, 2011(1): 165-168. (WANG Chen, SHI Zhan. Even the hole slope stability analysis based on strength reduction FEM arch tunnel[J]. Highway and Transportation Research and Application Technology Edition, 2011(1): 165-168. (in Chinese))
- [6] 唐晓松,赵尚毅,郑颖人,刘汉龙. 渗流作用下利用有限元强度折减分析法的边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(9): 6-10. (TANG Xiaosong, ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, LIU Hanlong. Slope stability under seepage strength reduction finite element analysis method of analysis[J]. Highway and Transportation Research, 2007, 24(9): 6-10. (in Chinese))
- [7] 宿金成,杨林. 基于有限元强度折减法的边坡稳定分析[J]. 低温建筑技术, 2008, (6): 86-87. (SU Jincheng, YANG Lin. Finite element analysis of slope stability based on strength reduction[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008, (6): 86-87. (in Chinese))