

冲沟路基稳定性影响因素的三维有限元分析

静声¹, 吴国雄¹, 刘先义¹, 罗杰²

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074 2 重庆市设计院, 重庆 400015)

摘要: 冲沟地形的特殊性决定冲沟路基稳定性应该借助于三维方法进行分析, 三维有限元方法能够对复杂地貌、地质条件的各种岩土工程进行分析计算. 本文结合强度折减技术, 利用三维有限元方法分别对不同的岸坡坡度、沟底宽度和沟底纵坡条件下冲沟路基进行稳定系数的计算, 计算结果表明冲沟路基稳定性存在明显的三维效应问题, 两岸的坡度越陡、沟底越窄对路基的稳定就越有利, 过陡的沟底纵坡不利于路基的稳定. 因此, 评价冲沟路基稳定性时应适当考虑三维效应的影响.

关键词: 冲沟; 路基稳定性; 三维有限元法; 强度折减法; 三维效应

中图分类号: U416.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2010)03-0057-05

3D Finite Element Analysis of Influencing Factors of Gully Embankment Stability

DING Jing-sheng¹, WU Guo-xiong¹, LIU Xian-yi¹, LUO Jie²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2. Chongqing Architectural Design Institute, Chongqing 400015, China)

Abstract The specificity of gully terrain requires that the gully embankment stability should be analyzed by three dimensional methods. 3D finite element method can be used to calculate and analyze various geotechnical projects with complicated terrains and geology conditions. Combined with strength reduction technique in this paper, stability coefficients of the gully embankment are calculated by 3D FEM for different side grade, bottom width and bottom grade. The computing results show that there is an obvious 3D effect in the gully embankment stability. The embankment is more stable when the gully side grade is steeper and the bottom width is narrower. Oversteep longitudinal gradient is against the stability of embankment. It is therefore argued that 3D effect should be properly considered when evaluating the gully embankment stability.

Key words gully; embankment stability; 3D FEM; strength reduction method; 3D effect

0 引言

与平坦地带的路基边坡稳定性问题不同, 冲沟地带的路基边坡在进行稳定性分析时, 不能简单地将其视为平面应变问题看待. 因为冲沟地带的路基稳定性问题不满足二维平面应变的基本假设, 采用二维平面方法对其进行稳定性计算, 得到的稳定系数结果与实际可能差别较大. 另外, 冲沟地带的路基受冲沟两岸的约束, 位于河沟中心的土体会受到两侧土体的挤压, 这种挤压作用不仅会直接关系到路基的整体稳定程度, 而且会决定着失稳路基体的滑动方向和滑动面的形状. 为了能够较为深入地了解冲沟地带这种复杂地形条件下的路基稳定性问题, 本文借助于三维有限元并结合强度折减法对影响路基稳定比较明显的几个因素进行数值计算分析, 为正确评价这类特殊路段的路基稳定性提供理论支持, 为工程建设决策时提供参考.

收稿日期: 2009-08-26 基金项目: 重庆市交通委员会科技项目 (2007CQJJK023).

作者简介: 丁静声 (1972-), 男, 在读博士, 讲师. 主要研究方向: 路基工程. E-mail: djs6688788@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 路基土的本构关系

土的本构关系, 或者叫土的本构模型, 是指土的应力 - 应变关系^[1]. 影响土体变形的因素有很多, 因此土的应力应变关系十分复杂, 要在应力应变关系中全部考虑这些因素是不可能的, 也是不必要的. 在实际应用中, 应根据工程的实际和受力情况等主要特征去建立其应力应变关系模型. 一般而言, 根据模型建立的假定不同, 土体应力应变模型分为两类: 弹性非线性模型和弹塑性模型^[2].

1.1 弹性非线性模型

弹性非线性模型侧重反映土体在应力作用下表现出来的非线性, 它认为全部变形都是弹性变形, 通过改变弹性常数来表达其非线性. 弹性非线性模型是根据广义虎克定律建立刚度矩阵 $[D]$, 但考虑到非线性特性, 矩阵中的弹性模量 E 和泊松比 μ 不再视为常数, 而是看作随着应力状态而改变的变量. 弹性非线性模型主要有邓肯 - 张双曲线模型、K - G 模型等.

1.2 弹塑性模型

弹塑性模型则把土体总的变形分为弹性变形和塑性变形两部分, 用虎克定律计算弹性变形部分, 用塑性理论来解释塑性变形部分. 对于塑性变形, 要作三方面的假定: (1)破坏准则和屈服准则; (2)硬化规律; (3)流动法则. 不同的弹塑性模型, 这三个假定的具体形式也不同. 弹塑性模型主要有: Mohr-Coulomb 模型、Ducker-Prager 模型、剑桥模型、清华模型等.

2 有限元强度折减法

2.1 有限元强度折减法的原理

所谓有限元强度折减法^[3-4], 就是在理想的弹塑性有限元计算中将边坡岩土体的抗剪强度参数: 粘聚力 c 和内摩擦角 φ 按照稳定系数的定义同时除以一个 k 得到一组新的 c' 、 φ' 值, 然后作为一组新的参数输入, 再进行试算, 当计算不收敛时, 所对应的 k 被称为坡体的稳定系数, 此时坡体达到极限状态, 发生剪切破坏, 同时可以得到坡体的滑动面. 其中 c' 、 φ' 为:

$$c' = c/k \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan\varphi/k) \quad (2)$$

2.2 强度屈服准则

目前流行的大型有限元分析软件多数采用的广义米塞斯 (Mises) 准则^[5], 即 Ducker-Prager 准则 (DP 准则), 其屈服函数表达式为:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (3)$$

式中: I_1 —— 应力张量的第一不变量; J_2 —— 应力偏张量的第二不变量; α 、 k —— 与材料内摩擦角和粘聚力有关的常数.

式 (3) 是一个通用的式子, 通过变化 α 、 k 的表达式就可以在有限元中实现不同屈服准则, 各个屈服准则的参数换算关系见表 1^[6-7].

表 1 屈服准则参数换算表

Tab 1 The relationship of different yield criterions

编号	准则种类	α	k
DP1	外角点外接 D - P 圆	$\frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$	$\frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)}$
DP2	内角点外接 D - P 圆	$\frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin\varphi)}$	$\frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin\varphi)}$
DP3	等面积 D - P 圆	$\frac{2\sqrt{3}\sin\varphi}{\sqrt{2}\sqrt{3\pi(9 - \sin^2\varphi)}}$	$\frac{6\sqrt{3}\sin\varphi}{\sqrt{2}\sqrt{3\pi(9 - \sin^2\varphi)}}$
DP4	内切 D - P 圆	$\frac{\sin\varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2\varphi)}}$	$\frac{3c\cos\varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2\varphi)}}$

DP3 为徐干成、郑颖人 (1990 年) 提出的莫尔 - 库伦等面积圆^[8]屈服准则. 采用此屈服准则的计算结果与传统的莫尔 - 库伦屈服准则计算结果比较接近.

2.3 边坡失稳破坏的判据

强度折减有限元方法考察边坡稳定性的过程中, 需要依据一定的失稳判据来判定边坡是否达到极限平衡状态.

这种有限元失稳判据的选取, 目前在边坡稳定性分析中并没有取得统一, 常用的主要有三种失稳判据:

1)特征点位移发生突变^[9]

边坡体内位移场的变化是边坡失稳最直观的表达. 建立特征点处的水平位移或竖向位移与强度折减系数之间的关系曲线, 并以曲线上的拐点或突变点作为边坡处于临界破坏状态的判据.

2)有限元计算的收敛性^[10-11]

该失稳判据认为非线性有限元计算中, 在给定的求解迭代次数和收敛标准内仍未收敛则认为边坡的临界破坏已达到. 如 Ugal^[11]指定迭代上限为 500 次, 残差位移的收敛标准为 10^{-5} , 如果迭代次数达到 500 次残差位移仍未小于 10^{-5} , 则判定边坡已经失稳, 此时的折减系数可作为边坡稳定系数.

3)广义剪应变或塑性应变的贯通^[12]

边坡的破坏过程总是伴随着一些物理量的出现和发展, 如塑性应变区域、广义剪应变区域的发生、发展直到贯通. 该失稳判据认为, 当边坡体内的塑性应变或广义剪应变达到某一值或其分布基本贯通时, 此时相对应的折减系数即可作为边坡的稳定系数.

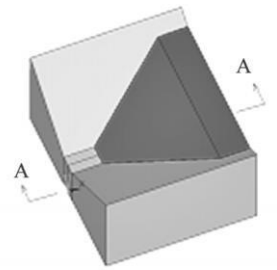


图1 三维有限元计算模型
Fig.1 3D finite model

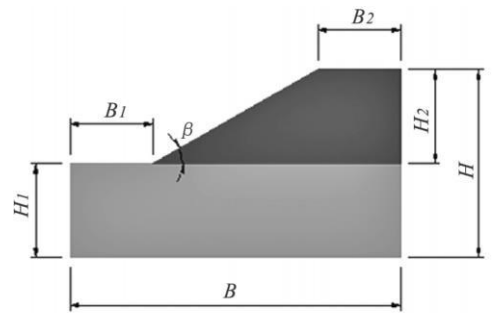


图2 A-A剖面
Fig.2 The cross section A-A

3 三维有限元模型的建立

由于冲沟基岩对路基体具有多向约束的特性, 对冲沟地带路基的稳定性进行分析时, 选择分析方法就显得十分重要. 三维有限元方法由于具有不受工程的几何形状、边界条件以及材料不均匀等限制的优点, 能够对复杂地貌、地质条件的各种岩土工程进行计算, 三维有限元结合强度折减法, 完全能够适用于冲沟地带的路基稳定性分析. 在数值计算时, 有必要将复杂的冲沟地形进行规则化, 为此, 建立如图 1 所示的冲沟地带路基的三维计算模型, 计算时, 坡脚至左边界 B_1 与坡顶至右边界 B_2 的距离均取 30m, 路基坡角为 β 取 30° , 沟底至下边缘的厚度 H_1 与坡高 H_2 均取 30m, 冲沟长度 B 通过计算确定: $B = B_1 + B_2 + H_1 / \tan\beta$, 如图 2 所示.

数值分析时计算程序采用大型有限元软件 ANSYS10.0 三维有限元计算单元采用 20 节点实体单元 SOLID95, 有限元模型的边界条件是底面为固定约束, 侧面为水平约束, 荷载只考虑重力荷载, 屈服准则采用莫尔-库伦等面积屈服准则 (DP3 准则), 并采用有限元计算是否收敛作为边坡失稳的判据. 路基填料与基岩材料计算参数见表 2

表 2 计算分析参数表

Tab 2 Calculation parameters for analysis

	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c / MPa	内摩擦 角 $\varphi / (^\circ)$	泊松比	弹性模量 E / MPa
填料	21.5	40	17	0.3	38
基岩	26.5	-	-	0.14	800

4 三维有限元模拟的工况和计算分析

冲沟地带路基稳定的影响因素有很多, 不仅有路基自身的因素, 如坡高、坡率、填料性质等, 也有路基所处的环境因素, 如地形、地质、水文条件等. 地形变化对冲沟地带的路堤稳定的影响不容忽视, 针对冲沟岸坡坡度 (以坡角表示)、沟底宽度及沟底纵坡的变化, 选取以下三种工况进行计算, 计算结果见表 3 ~ 5

表 3 岸坡坡度变化时的稳定系数

Tab 3 Safety factors by different gully bank gradients

$\beta_1 / (^\circ)$	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	90
k	1.441	1.524	1.606	1.654	1.707	1.765	1.833	1.916	2.020	2.166	2.390

工况 1 沟底无坡度, 沟底宽度 $B_3 = 20\text{m}$, 两侧岸坡坡角 β_1 相等并同时变化;

工况 2 沟底无坡度, 岸坡坡角 $\beta_1 = 25^\circ$ 冲沟底部宽度 B_3 相等并同时变化;

工况 3 沟底宽度 $B_3 = 20\text{m}$, 岸坡坡角 $\beta_1 = 25^\circ$ 冲沟沟底纵坡 i 变化.

4.1 岸坡坡度

岸坡的多向约束对冲沟路基稳定性的影响是比较明显的(表 3 图 3), 随着冲沟两侧岸坡坡角逐渐增大, 路基的稳定系数也逐渐增大, 表明岸坡越陡路基越稳定. 冲沟地带无岸坡(即坡角为 0°)时, 岸坡对路基无水平向的反力, 路基侧向受相同材料的土体约束, 显然, 这种约束效果与岸坡基岩材料的约束效果相比要差得多, 因此, 无岸坡的路基没有反映出冲沟的三维效应, 对比图 4 与图 5 也能说明这一问题.

随着岸坡坡角的增大, 岸坡逐渐变陡, 岸坡对路基土体的侧向作用也越来越明显. 随着斜坡坡角的增大, 岸坡处土体下滑力的水平分力也逐渐增大, 两侧土体的“挤压”使得整个冲沟路基的稳定性得以提高, 稳定系数相应的也越来越大. 坡角从 0° 变化到 5° , 稳定系数提高 5.76%; 坡角从 5° 变化到 75° , 每增加 10° , 稳定系数的提高在 3.0% ~ 5.5% 之间; 坡角从 75° 变化到 85° , 稳定系数提高 7.23%; 而从 85° 到 90° , 稳定系数提高 10.34%. 这表明提高幅度大的坡角变化出现在岸坡较缓和较陡处.

表 4 冲沟底宽变化时的稳定系数

Tab 4 Safety factors by different gully bottom widths

B_3 / m	0	10	20	30	40	50	60
k	1.801	1.711	1.654	1.608	1.576	1.553	1.540

表 5 沟底纵坡变化时的稳定系数

Tab 5 Safety factors by different gully bottom grade

$i/\%$	0	2	4	6	8	10
k	1.801	1.660	1.587	1.517	1.489	1.452

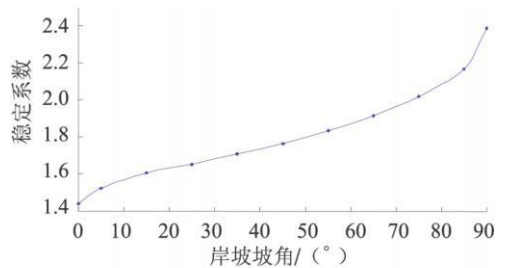


图3 岸坡坡度与稳定系数曲线
Fig.3 Correlation between safety factor and gully bank gradient

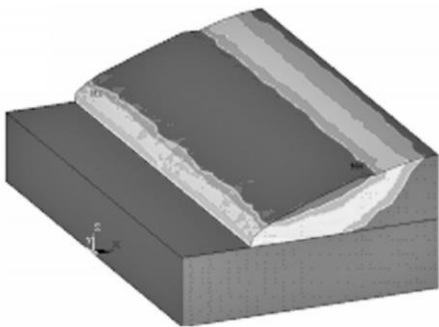


图4 三维等效塑性应变云图 ($\beta_1=0^\circ$)

Fig.4 3D equivalent plastic strain contour ($\beta_1=0^\circ$)

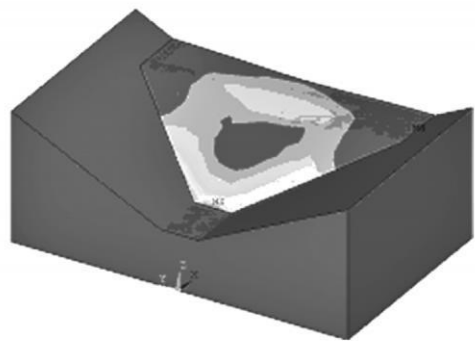


图5 三维等效塑性应变云图 ($\beta_1=30^\circ$)

Fig.5 3D equivalent plastic strain contour ($\beta_1=30^\circ$)

4.2 沟底宽度

河沟越宽, 岸坡之间的路基土体所占的空间越大, 岸坡对沟心处土体的侧向作用将逐渐减弱, 稳定系数随着沟底宽度的增大也将逐渐变小. 从表 4 可以看出, 沟底宽度在 60 m 内, 宽度每增加 10 m, 其减幅从开始的 5% 到最后的 0.84%, 以这种趋势来看, 随着沟底宽度的增加, 稳定系数将趋于一个固定值, 将不再减小. 此时的路基稳定系数将与岸坡无水平时的路基稳定系数相当. 这表明沟底宽度达到一定程度时, 岸坡对沟心土体的约束将可以忽略不计, 或者说沟底宽度超高这个“临界宽度”时, 岸坡对路基的三维效应可以不予考虑.

4.3 沟底纵坡

在相同的条件下, 沟底无坡度时的稳定系数比有坡度时的都要大, 如表 5 所示, 随着沟底坡度的增大, 稳定系数将逐渐减小。沟底纵坡变陡, 路基下滑力的水平分力增大会造成土体在水平方向上的拉力增大, 路基内部土体的塑性应变会提前发生, 稳定系数将会越来越小。

5 结论与建议

1) 三维有限元强度折减法不需要作任何假定, 计算模型不仅满足力的平衡方程, 而且满足土体的应力应变关系, 能适应复杂地形条件的路基稳定性分析。

2) 冲沟地带的路基明显存在三维效应问题, 在进行路基变形和稳定性分析时应该尽量采用三维方法。

3) 冲沟岸坡坡度、沟底宽度和沟底纵坡皆对路基稳定有明显的影响: 冲沟两岸的坡度越陡, 沟底越窄对路基的稳定就越有利, 过陡的沟底纵坡不利于路基的稳定。

4) 本文仅是讨论了影响冲沟路基稳定的冲沟地形因素问题, 对类似特殊地形的路基稳定性应做进一步的探讨, 力求全面了解复杂地形条件下路基的变形和稳定性实际问题。

参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土上原理与分析 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996 44-106
- [2] 关立军. 基于强度折减的土坡稳定分析方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构内力 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552-3558
- [4] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座 - II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 26(2): 332-336
- [5] 刘祚秋, 周翠英, 懂立国, 等. 边坡稳定及加固分析的有限元强度折减法 [J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 558-561
- [6] 宋雅坤, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在三维边坡中的应用研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 822-827
- [7] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数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
- [8] 徐干成, 郑颖人. 岩土工程中屈服准则应用的研究 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 93-99
- [9] 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
- [10] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346
- [11] Ugai K A. Method of calculation of total factor of safety of slopes by elastoplastic FEM [J]. Soil and Foundation, 1989, 29(2): 190-195
- [12] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 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