

文章编号: 1000-7598-(2007) 09-1861-05

基于强度分区的膨胀土路堤稳定性 及土工格栅处治效果分析

胡明鉴, 孔令伟, 郭爱国, 刘观仕

(中国科学院 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 由于填筑密实度、含水率的差异, 整个膨胀土路堤内存在以含水率和干密度为特征的强度分区, 且路堤表层土体由于直接受大气、降雨作用, 温度、湿度变化频繁, 胀缩变形剧烈, 裂隙发育, 强度将剧烈衰减。但该实际存在的强度分区一般在稳定性计算中多被简化为均质体而不能反映实际情况。强度分区法则考虑大气和气候影响以及路堤内压实度差异, 并综合考虑土工格栅的作用。基于强度分区的膨胀土路基边坡稳定性的分析结果表明, 强度分区法更能反映路堤土体强度差异的实际情况, 能真实地体现改性处治和铺设土工格栅对路堤稳定的贡献, 具有显著的优点。对于素填土膨胀土路堤, 边坡表层容易发生局部浅层滑动, 进而诱发和牵引发生深部滑动破坏; 石灰改性后虽能提高路堤稳定性, 但表层局部稳定性安全储备并不宽裕, 尚未彻底根除安全隐患。土工格栅虽对整体稳定性贡献不大, 但可显著提高局部稳定性, 并有效地消除膨胀土路堤边坡浅表滑塌的隐患。

关 键 词: 强度分区; 膨胀土路堤; 整体稳定性; 局部稳定性; 土工格栅

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Expansive soil embankment stability and geogrid treatment effect analysis with strength zoning method

HU Ming-jian, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, LIU Guan-shi

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the whole expansive soil embankment, there exist different strength zones due to different water content and dry density caused by the construction course, atmosphere and rainfall. Soil strength in the surface zones usually be strongly attenuated by the alternately wetting and drying, expanding and shrinking. But this condition usually is ignored in the embankment stability analysis. Strength zoning method takes the climate and weather into consideration. Based on the strength zoning method, expansive soil embankment stability and geogrid treatment effect analysis results show that the expansive soil embankment will easily slide in superficial layer if the embankment is constructed by full expansive soils. Stability will increase if the embankment be constructed by lime modified expansive soil, but the emergency capacity is insufficient and the incipient fault is also existence. Superficial stability will increase evidently while the resistance to overturning only increase a little if embankment being treated by geogrid, incipient fault has been effectually reduced or eradicated. All of these show the superiority of the strength zoning method for expansive soil embankment stability analysis.

Key words: strength zoning; expansive soil embankment; resistance to overturning; superficial stability; geogrid

1 引 言

膨胀土路堤系指以膨胀土或经改性处治后的土体为填料, 由人工或机械填筑, 并压实至足够的密实度, 以承托公路路面和汽车动荷载的土工建筑物。由于膨胀土具有显著胀缩性、裂隙性、超固结

性与强度衰减特性, 且在大气、地下水作用下反复胀缩, 加剧裂隙作用导致强度大幅衰减。经压实后的膨胀土由于黏土扁平、颗粒高度定向排列, 受大气和地下水作用后胀缩性则更强。因此膨胀土地区经常出现房屋建筑开裂变形, 路基边坡大量塌方、滑坡、路面波浪变形、翻浆冒泥等工程灾害。不少

收稿日期: 2006-08-21

修改稿收到日期: 2006-11-06

基金项目: 中国科学院岩土力学重点实验室开放课题 (No.Z000606)、武汉市科技晨光计划 (No.20065004116-42) 资助。

作者简介: 胡明鉴, 男, 1974 年生, 博士研究生, 助研, 现主要从事岩土力学与岩土工程方面的工作。E-mail: humingjian@yeah.net

学者对其物理力学性质和工程特性进行了研究。孔令伟^[1]在室内开展了原状土在脱湿吸湿过程的无侧限抗压强度演化特征与击实土的胀缩性状及力学效应试验,研究了荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应,发现原状膨胀土的工程性状同时受含水率与裂隙性的耦合影响;陈善雄^[2]探讨了膨胀土判别与分类方法;郭爱国^[3,4]介绍了对弱膨胀土路堤采用“膨胀土+石灰土+土工网”分层交错填筑的综合处治方法,并开展膨胀土路堤处治效果原位试验,研究和探讨了半刚性基层沥青路面高速公路上路床顶层采用石灰稳定均匀级配砾石土的问题;刘特洪等^[5]对膨胀土路堤边坡稳定性问题进行了研究;姚海林^[6]考虑裂隙和降雨入渗的影响,对膨胀土边坡进行了稳定性分析,研究表明:考虑裂隙影响的边坡降雨入渗和稳定性分析较为合理和实用。实际上,在膨胀土路堤填筑过程中,由于填筑部位、填筑密实度的差异,整个路基范围内存在受控于填筑含水率干密度的强度分区,但这种实际存在的强度分区在一般的膨胀土路堤稳定性计算中往往被忽视,而将整个路堤当作一种均质体,给定某一强度参数值。显而易见,这种处理是值得商榷的,因其不能反映路基真实情况。并且在大气、地下水作用的区域内,膨胀土强度也将发生衰减,路堤边坡稳定性分析中土体强度取值也宜分类、分区。为此根据襄樊—十堰高速公路膨胀土路段的研究成果,分析了基于强度分区下的膨胀土路堤稳定性和土工格栅的处治效果。结果表明,强度分区符合膨胀土路堤边坡现状,稳定性分析结果更为合理。

2 土体强度分区和取值

膨胀土具有典型的变动强度特性:峰值强度很高,残余强度很低;初期强度高,干湿循环后强度大幅度衰减。处于路堤边坡表层的土体直接受大气作用,湿度、温度变化频繁,土体胀缩变形剧烈,裂隙发育,强度剧烈衰减。顶部基床受干湿循环和汽车荷重的双重影响,强度将发生一定程度的衰减。路堤内部土体是构成路堤的主要部分,由于受大气和地下水作用较小,若施工过程中严格控制碾压含水率和压实度,并做好路基排水、排渗,土体强度一般衰减不大。表层和路堤内部土体之间的部分,其强度衰减幅度将随其离表层和地下水的远近而逐步衰减。

据已有的资料,表层土体 1.0~1.5 m 范围内受大气和风化作用比较明显。所以本次膨胀土路堤稳

定性计算在选择土体强度参数时,大气和风化影响深度内(1.5 m)的这部分土体,因土体湿度、温度随气候变化频繁,胀缩变形剧烈,裂隙发育,强度衰减非常显著,计算指标采用干湿循环后的强度衰减值。路堤内部土体,其强度虽然受大气和地下水影响较小,受控于压实度和含水率。所以,堤心部分强度则按压实度为 95%, 93%, 90% 共 3 个强度等级和不同土性室内试验结果分别取值。

计算时考虑非饱和与饱和两种情况,土体强度参数如表 1^[7]。

表 1 某高速公路路堤稳定性计算土体强度参数

Table 1 Mechanical parameters of expansive soils

路堤部位	填料	填筑部位	密度 /g·cm ⁻³	非饱和		饱和	
				c/kPa	$\phi/(^\circ)$	c/kPa	$\phi/(^\circ)$
基床	改性土	95 区	1.96	48.0	14.0	42.0	12.5
		93 区	2.00	82.0	25.5	50.0	22.5
堤心填土	膨胀土	90 区	1.96	66.0	24.0	33.0	21.0
		93 区	1.93	120.0	32.0	105.0	31.0
	改性土	90 区	1.90	110.0	29.5	100.0	28.0
		93 区	2.00	20.5	7.0	12.5	5.0
边坡表层	膨胀土	90 区	1.96	16.5	6.0	8.2	4.0
		93 区	1.93	30.0	10.0	25.5	9.0
	改性土	90 区	1.90	26.0	9.0	22.5	8.0
基底	原状土	原状土	1.95	55.0	25.0	41.0	23.0

3 计算方案和剖面

共进行 4 个方案的计算:

(1) 不考虑大气影响范围和强度分区,将整个路堤视为均质体,土体强度取平均值。

(2) 除上下路床为 6% 的石灰改性土外,全用素填土进行填筑。

(3) 上下路床用 6% 的石灰改性土,上下路堤用 6% 的石灰改性土和素填土分层填筑(每 3 层弱膨胀土夹 1 层石灰改性土,每层 20 cm)。

(4) 在方案 3 基础上,每层素填土边缘铺设宽 2.5 m 的土工格栅。

计算填高为 6 m,坡比为 1: 1.75。除第 1 种方案外,其余 3 种以竖向厚度 1.5 m 范围内受气候和风化作用比较显著的表层土体将路堤分成表层和堤心部分,并根据压实度分层,剖面如图 1 所示。进行不同方案、不同饱和程度下的稳定性计算,并计算饱和状况下不同影响深度的路堤局部稳定性,以分析气候和风化作用引起的膨胀土路堤局部稳定性的变化。

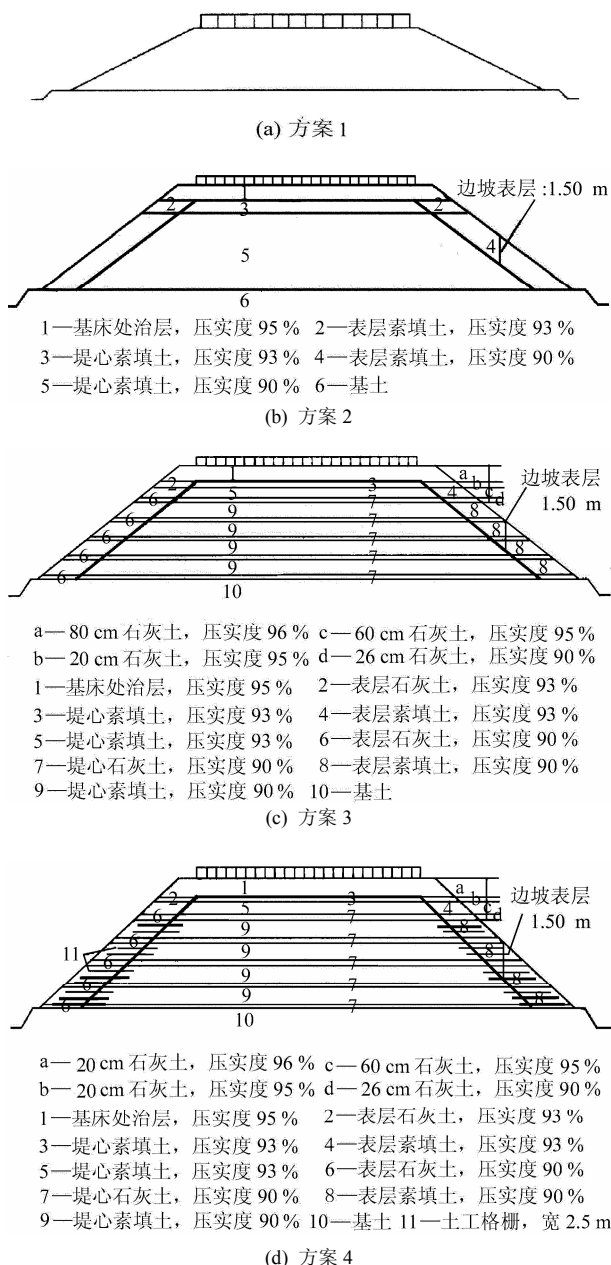


图1 膨胀土路堤稳定性计算剖面图

Fig.1 Section map of expansive soil embankment

4 土工格栅和汽车荷载

4.1 土工格栅

土工格栅是经机械拉伸形成的具有方形、矩形或其他多边形格栅的聚合物板材, 常用作土结构加强。由于制造过程中经过定向拉伸, 聚合物分子沿拉伸方向定向排列, 加强了分子链间的联接力, 大大提高了抗拉强度, 而延展率却只有原板材的 10 %~15 %。由于土工格栅使土体互锁力、摩擦咬合力增强, 土体间摩擦系数显著增加 (可达 0.8~1.0), 所以在土体中加入土工格栅, 可以提高格栅周围土体的抗剪强度。襄樊—十堰高速公路膨胀土路堤土工格栅每填筑一层素填土后在路堤边缘铺设, 宽 2.5 m, 垂直间距同每层填筑厚度, 一般为

20~25 cm。现场取回的 CET131 土工格栅按《土工合成材料测试规程》^[8]进行室内拉拔试验的结果如表 2 所示。实际上, 当土工格栅达到表中的延伸率时, 土体应早已开裂。因此, 在计算中土工格栅抗拉强度取保守值 $T = 3.5 \text{ kN/m}$, 并假定土工格栅各部位同时达到了许可拉力 T 。按照瑞典条分法检算安全系数(F_s)_r, 计算示意图见图 2。

表2 CET131 土工格栅技术指标

Table 2 Technical parameters of the CET131 geogrid

单位面积质量 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	径向每延米 抗拉强度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	径向延伸率 / %	维向每延米 抗拉强度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	维向延伸率 / %
29.21	6.98	30.0	5.09	33.8

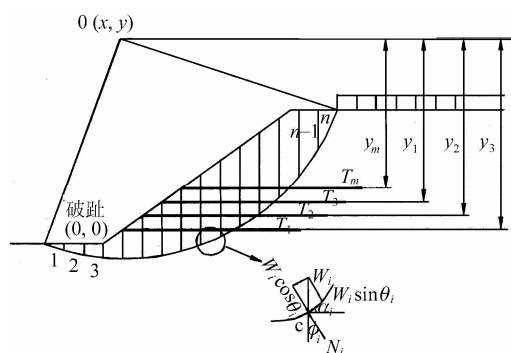


图2 铺设土工格栅路堤稳定性计算示意图

Fig.2 Sketch map of embankment stability with geogrid

$$(F_s)_r = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cos \theta_i \tan \phi_i + c \Delta l_i) R + \sum_{i=1}^m T_{ai} y_i}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \theta_i) R} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 土条重量; θ_i 为第 i 土条底弧的仰角; l_i 为第 i 土条底弧长; R 为最危险滑弧的半径; T_i 为第 i 层土工格栅的抗拉强度。

4.2 汽车荷载

路基除承受土体自重作用外, 同时承受行车荷载作用。在路基稳定性计算时按车辆最不利的情况排列, 采用与设计标准车相当的加重车布置, 将车辆的设计荷载换算成土层厚度 h_0 , 称之为车辆荷载的当量高度或换算高度。 h_0 的计算式为

$$h_0 = \frac{NQ}{\gamma B l} \quad (2)$$

式中: N 为横向分布的车辆数, 单车道 $N=1$, 双车道 $N=2$; Q 为每辆车的重量 (kN); γ 为路基填料的密度 (kN/m^3); B 为横向分布车辆最外轮中心之间的宽度加轮胎的着地宽度 (m)。经计算得出后期路堤稳定性换算中汽车荷载 $Q = 20 \text{ kPa}$ 。

5 计算结果对比分析

计算程序为商用程序 Geoslope 的 SLOPE/W^[9], 分析方法为 Bishop 圆弧法。不同方案、不同饱和度下的整体和局部稳定性计算结果见表 3, 饱和状态、不同大气影响深度下的局部稳定性分析结果见表 4、图 3。图 4 为部分滑面形状及对应的稳定系数。从计算结果可以看出:

(1) 4 种计算方式, 不论路堤处于饱和还是非饱和状态, 路堤整体均是稳定的, 除满足规范要求 (F_s 不小于 1.25) 外, 还有安全储备。如果排水、防渗措施到位, 膨胀土路堤处于非饱和状态时, 各方案下路堤局部也不会出现稳定性问题。

(2) 将整个路堤当作一种均质体 (方案 1), 各状况下其稳定性计算结果与全素土填筑方式 (方案 2) 相差很小, 且饱和状态下两者的局部稳定性 ($F_s=1.17$ 和 1.12) 均不能满足规范要求, 易于发生局部溜滑、滑坡等灾害。这种简化处理其计算结果

表 3 稳定性分析结果

Table 3 Result of the stability analysis

计算方案	非饱和条件下		饱和条件下	
	整体稳定系数 F_s	局部稳定系数 F_s	整体稳定系数 F_s	局部稳定系数 F_s
1	4.68	2.55	2.91	1.17
2	4.63	2.51	2.86	1.12
3	4.95	2.75	3.42	1.38
4	4.95	3.31	3.42	1.61

表 4 饱和条件下不同气候影响深度下表层 F_s

Table 4 Superficial stability with different thickness in condition of saturation

计算方案	不同气候影响深度 (cm) 下边坡表层稳定系数 F_s				
	175	150	125	100	75
2	1.04	1.12	1.26	1.47	2.02
3	1.32	1.38	1.62	1.84	2.44
4	1.34	1.61	2.07	3.22	3.32

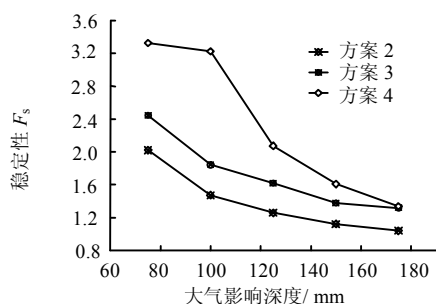
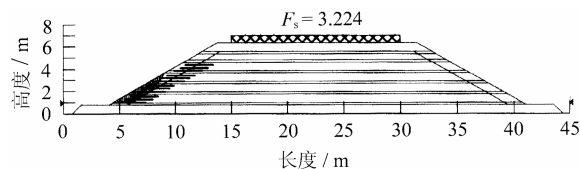
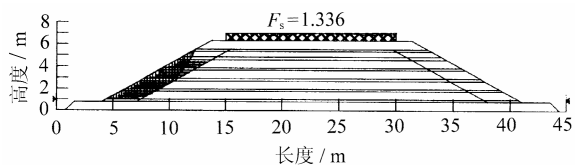


图 3 F_s 随气候和风化影响厚度而变化

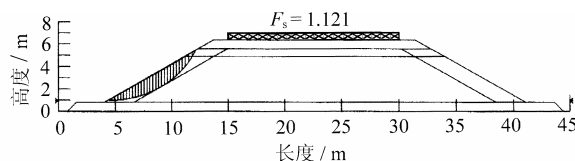
Fig.3 F_s change with climate affected thickness



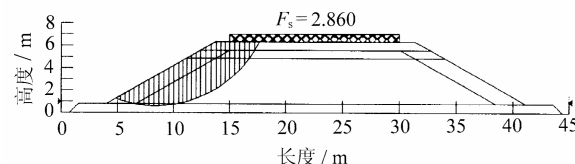
(a) 大气影响、深度为 1.0 m、饱和状态下的局部稳定性



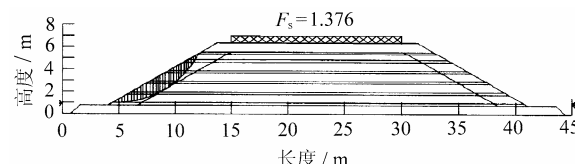
(b) 大气和风化作用、深度为 1.75 m、饱和状态下的局部稳定性



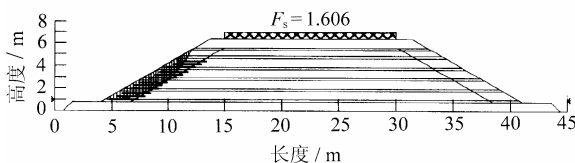
(c) 素土填筑饱和状态下的局部稳定性



(d) 素土填筑饱和状态下的整体稳定性



(e) 素土、石灰土分层填筑、饱和状态下的局部稳定性



(f) 素土、石灰土、土工格栅、饱和状态下的局部稳定性

图 4 不同计算条件下的滑面形状和稳定系数

Fig.4 Slide surface and F_s in different conditions

未能反映改性处治和铺设土工格栅的作用。采用石灰改性土与素填土分层填筑后 (方案 3), 稳定系数升高, 饱和状态下局部稳定性系数最小值上升到 1.38, 虽满足规范要求, 但安全储备并不宽裕, 安全隐患尚未彻底根除。加铺土工格栅后 (方案 4), 虽然整体稳定性变化微小, 但不论路堤处于非饱和还是饱和状态, 表层局部稳定性提升非常显著

($F_s=1.61$), 说明土工格栅虽然不能提高路堤整体稳定性, 却能明显提高膨胀土路堤边坡表层稳定性, 有效地减少和预防膨胀土路堤常见的浅表层溜滑、滑坡病害的发生。这对于整体稳定性普遍较高, 局部稳定性存在一定问题的膨胀土路堤边坡来说是非常有用的。

(3) 饱和状态下膨胀土路堤边坡表层局部稳定性随着风化和气候影响深度的增加而降低。因此, 在雨水充沛、地下水发育的膨胀土地区, 除对膨胀土路堤进行科学处治外, 全面、及时地进行坡面防护和设置完善的排水设施是尤其必要的。

6 结 论

(1) 严格依据规范进行膨胀土路堤施工, 一般整体稳定性问题不大, 但采用素填土填筑的膨胀土路堤, 边坡表层受大气降雨、地下水等影响, 容易发生浅层滑动, 诱发和牵引深部滑动破坏。石灰改性后与素土交错填筑, 虽能提高路堤浅表层的局部稳定性, 但安全储备并不宽裕, 未能彻底根除安全隐患。土工格栅包边处治虽对整体稳定性贡献不大, 但可显著提高膨胀土路堤浅表层局部稳定性, 有效地预防和消除灾害隐患。

(2) 饱和状态下膨胀土路堤边坡表层局部稳定性随着风化和气候影响深度的增加而降低。因此, 全面、及时地进行坡面防护和设置完善的排水设施尤其必要。

(3) 强度分区法较之以前的简化计算处理方法更能反映路堤土体强度的实际情况, 计算结果能真实地体现改性处治和铺设土工格栅对路堤的作用, 具有显著的优点。

参 考 文 献

- [1] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6):727—732.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Jingmen expansive soils and their mechanical effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(6): 727—732.
- [2] 陈善雄, 余 颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1 895—1 900.
CHEN Shan-xiong, YU Song, KONG Ling-wei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12):1 895—1 900.
- [3] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 膨胀土路堤处治效果原位试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8):1 263—1 268.
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian et al. Research on in-situ tests of disposal effect of expansive soil embankment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8):1 263—1 268.
- [4] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰稳定均匀级配砾石土的路用性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (增刊 2):5 641—5 647.
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, HU Ming-jian, et al. On the pavement performance test of stabilized uniformly-graded gravel soil with lime[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (Supp.2):5 641—5 647.
- [5] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [6] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606—609.
YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, CHEN Shou-yi. Analysis of the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(5):606—609.
- [7] 孔令伟, 郭爱国. 湖北省襄十高速公路膨胀土的工程特性与土质改良试验研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.
- [8] SL/T235-1999, 土合成材料测验规程[S].
- [9] GEO-SLOPE International Ltd. SLOPE/W and SEEP/W Version 4.2[R]. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., 1998.