

文章编号: 1000-7598-(2006)04-0605-04

锚杆框架梁加固膨胀土边坡的数值模拟及优化

吴礼舟, 黄润秋

(成都理工大学 地质灾害防治国家专业实验室, 成都 610059)

摘 要: 锚杆框架梁是加固膨胀土路堑边坡的一种方式, 能够有效地抑止膨胀土边坡裂隙的扩展和发展, 阻止边坡体的变形。为了研究锚杆框架梁的加固效果及其坡率对膨胀土路堑边坡的影响, 采用了快速拉格朗日差分分析三维软件 FLAC^{3D} 模拟锚杆框架梁加固膨胀土路堑边坡。数值分析及结果表明, 坡率与膨胀土路堑边坡变形密切, 锚杆框架梁参数中锚杆布置角度和间距对膨胀土边坡变形影响较大, 同时对锚杆框架梁的主要参数提出相关的建议, 为工程和设计优化提供了参考。

关 键 词: 锚杆框架梁; 膨胀土; 路堑边坡; FLAC^{3D}; 数值模拟

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Numerical simulation and optimum design of anchor frame beam strengthening expansive soil roadcut slope

WU Li-zhou, HUANG Run-qiu

(State Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610069, China)

Abstract: Anchor frame beam is a method for strengthening the expansive soil roadcut slope. It can effectively prevent cracks and fissures of expansive soil slope from expanding. Thus it can preclude the slope from being destroyed. FLAC^{3D} software is used for simulating anchor frame beam strengthening expansive soil roadcut slope. Main parameters such as length, range interval and angle of anchor frame beam, are investigated so as to acquire how to influence slope deformation. The results show that the ratio of slope has an impact on slope deformation; and that the angle and the range interval of anchors influence slope deformation. The pertinent proposal for design of main parameters of anchor frame beam is put forward so as to offer reference for engineering optimum design.

Key words: anchor frame beam; expansive soil roadcut slope; FLAC^{3D}; numerical simulation

1 前 言

锚杆框架梁是加固膨胀土边坡的一种有效方式, 效果好, 又兼顾绿化, 尤其适用于膨胀势较强和高路堑边坡地区。但是, 它的设计多是根据经验或依据膨胀力^[1], 理论研究比较落后, 虽然在膨胀土地区已开展一些试验段, 也取得一些成果和监测数据, 但仍有待于系统地理论研究和分析。加固膨胀土路堑边坡的锚杆多垂直于边坡, 而基坑中的土钉则近水平分布, 二者的受力机理不同, 设计过多依赖于经验或设计参数选取不合理, 造成浪费或工程事故。对于锚杆框架梁加固的边坡稳定性评价多采用极限平衡法, 该法是从静力和力矩平衡分析锚杆加固边坡后的稳定性, 但不能评估边坡体的变形, 更无法考虑到框架梁对膨胀土边坡变形的抑制作用。

由于极限平衡法难以有效地评价锚杆框架梁的加固效果, 本文采用快速拉格朗日差分分析三维 FLAC^{3D} 软件(fast lagrangian analysis of continua in 3 dimension version 2.0)进行模拟。该软件是一种利用拖带坐标系分析大变形问题的数值方法, 并用差分格式按时步积分求解, 可考虑岩土体的复杂性、可变性以及非均质、不连续、大变形、大应变、非线性和应变软化特性等, 还可以模拟任意形状、任意特性的结构体与岩土体的相互作用和模拟 4 种结构单元(梁、锚杆、桩及板壳单元)^[2]。

与有限元软件相比, FLAC^{3D} 有以下优点: 采用混合离散化法正确模拟了塑性破坏及塑性流动; 采用动态方程求解, 克服了系统模型内的不安定因素; 采用显式解析法, 不需要建立刚性矩阵, 节省内存, 在解决非线性问题时大大提高了运算速度。

收稿日期: 2004-08-11

修改稿收到日期: 2004-11-10

基金项目: 国家自然科学基金“西部生态与环境”重大研究计划(No. 90102002)资助。

作者简介: 吴礼舟, 男, 1975 年生, 博士, 从事地质工程方面的研究。E-mail: wulizhou99@sohu.com

除此之外, 还能模拟地下水的影响。

本文通过 FLAC^{3D} 模拟锚杆框架梁加固膨胀土路堑边坡, 探讨了锚杆长度和角度及其间距对膨胀土路堑边坡变形的影响, 同时考虑地下水的作用。计算的结果对工程及其设计优化有一定的指导意义。

2 FLAC^{3D} 软件及模型的建立

2.1 FLAC^{3D} 介绍

FLAC 是力学计算的数值方法之一, 源于流体动力学, 把拉格朗日法移植到固体力学中, 将所研究的区域划分成网格, 其结点就相当于流体质点, 然后按时步采用拉格朗日法来研究网格结点的运动。该软件可以有效地模拟岩土体及其它材料结构的工程力学行为, 具有能满足岩土工程结构分析的基本单元模式, 包含了进行弹性分析的各向同性和各向异性, 弹性本构模型, 塑性模型有 Mohr-

Coulomb 弹塑性、Drucker-Prager 弹塑性模型等。在 FLAC^{3D} 中, 结构单元的计算模式与其他计算一样, 利用的仍然是与隐式矩阵算法相对应的解全运动方程的显式拉格朗日算法^[2]。

2.2 模型的建立

湖北某高速公路一段膨胀土地区高路堑边坡采用了锚杆框架梁防护, 分两级开挖, 深近 12 m, 其物理和力学参数见表 1。文[3]研究表明该膨胀土经过反复干湿循环后 c 值降低 60%~70% 左右, 故本文计算中采取折减强度, 取 $c = 30 \text{ kPa}$, $\varphi = 18^\circ$ 。本构模型采用莫尔-库仑准则:

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \left(\cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi \right) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0 \quad (1)$$

式中, $-\pi/6 \leq \theta_\sigma \leq \pi/6$; I_1 , J_2 分别为应力张量的第一和应力偏张量的第二不变量。

表 1 膨胀土的物理力学参数

Table 1 Physical parameters of expansive soil obtained from drill

天然含水量 /%	比重 Gs	密度 $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比 e	饱和度 $S_r / \%$	液限 $W_L / \%$	塑限 $W_p / \%$	塑性指数 I_p	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
26.4~34.2	2.74	1.86	0.862~0.966	83.9~97.0	49.0~54.8	21.3~24.5	27.7~30.3	41.7~65.1	13.7~26.4

数值模拟中锚杆采用 CableSel, 框架梁采用 BeamSel, 相应的力学参数见表 2。地下水位通过 fish 函数实现, 梁的边界约束由 Sel node fix 完成, 锚杆和框架梁的连接属节点与节点的连接, 连接类型有 3 种: 自由联接(节点速度与它的联接体无关)、刚性联接(节点与联接体连接在一起, 速度相同)和可变连接(节点与联接体之间为弹性)。通过联接关系来实现力的传递, 进而实现其相互作用^[4]。本文计算中采用的是刚性联接, 模型节点有 20 256 个, 共划分 17 790 个单元, 见图 1。同时考虑到地下水的影响, 计算均采用 SI 单位制。

表 2 锚杆框架梁的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of anchor frame beam

锚杆的力学参数	量值	框架梁的参数	量值
弹性模量/MPa	4.5×10^4	弹性模量/MPa	2.5×10^4
黏结强度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	2.0×10^5	泊松比 ν	0.30
黏结刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	2.0×10^7	I_p / m^4	5.43×10^{-3}
抗拉强度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	1.6×10^6	I_y / m^4	1.78×10^{-3}
周长/m	0.314	I_z / m^4	3.65×10^{-3}
截面积/ m^2	0.79×10^{-2}	截面积/ m^2	0.175

3 模拟结果和分析

影响膨胀土路堑边坡变形的因素颇多, 首当其冲的是膨胀土自身的特性(如 c 和 φ), 膨胀土的裂

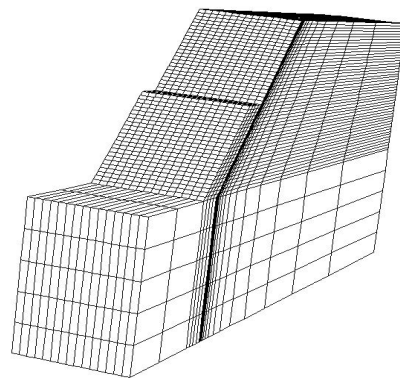


图 1 膨胀土路堑边坡的模型

Fig.1 Model of expansive soil roadcut slope

隙性也是一个重要的因素。干湿反复循环产生的裂隙使边坡体表层(大气影响层)强度大幅度降低, 裂隙性也使膨胀土边坡破坏模式不同于别的土质边坡的破坏模式, 滑坡以浅层小规模多见, 并且滑坡后缘出现在坡中附近, 很少出现在坡顶。锚杆框架梁适于这种变形和破坏特点而被采用, 锚杆增强了边坡体浅层的强度, 而框架梁抑制了边坡体的变形和膨胀土裂隙的发展。锚杆的设计参数涉及到框架梁的配筋、锚杆的间距和长度、锚杆直径以及布设的角度。孔径太大对边坡体扰动较大, 也增加成本, 一般建议为 10 cm ^[1]。以下从坡率、锚杆间距、布设

角度和长度等方面进行分析。

3.1 坡率的影响

图2为膨胀土路堑边坡未防护时的变形图。图中坡率为1:1, 边坡水平向的最大位移为 $4.9921 \times 10^{-2} \text{m}$, 而坡率1:1.75的边坡水平向的最大位移为 $1.3761 \times 10^{-2} \text{m}$, 仅是1:1坡率的最大位移的28%, 从一个侧面验证了规范中1:1.75的坡率(在膨胀土地区)的合理性。由图2可以看出, 高路堑边坡采用二级(或多级)开挖, 其下坡段变形非常明显, 与上坡段的变形差异很大, 相应的锚杆框架梁受力也明显不同。因而上下坡段的锚杆框架梁应分开设计。

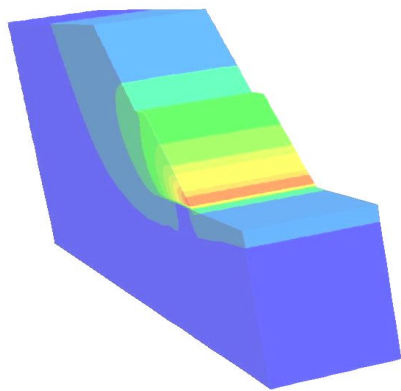


图2 开挖边坡的变形图

Fig. 2 Deformation of excavation slope

3.2 锚杆间距的影响

图3表明, 边坡体水平向位移与框架梁的间距成线性关系曲线, 最大位移多出现在坡中附近, 坡脚应力集中, 且长期处于饱和状态, 易形成塑性软化, 导致边坡坡中附近产生变形, 加剧了裂隙的发展。从图4看出, 锚杆间距增大, 锚杆拉力的增加不太明显, 相对而言, 锚杆布置的间距对边坡体的变形影响较大。

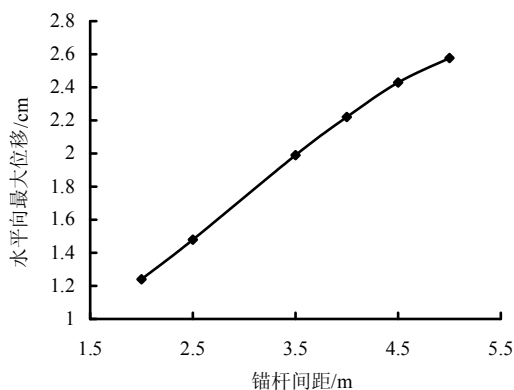


图3 边坡体变形和锚杆间距的关系

Fig.3 The relationship between slope deformation and range interval of anchors

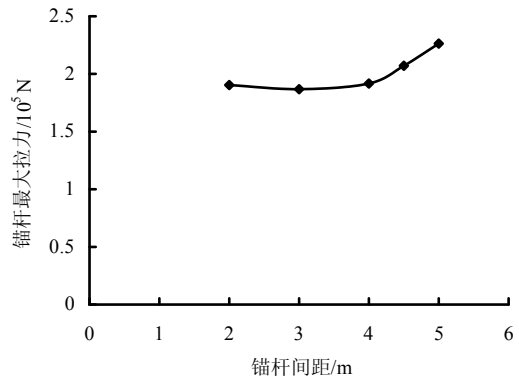


图4 锚杆最大拉力和锚杆间距的关系

Fig.4 The relationship between maximum tension and range interval of anchors

3.3 锚杆布置角度的影响

图5为锚杆布置的角度对边坡体变形的影响曲线, 其他条件(框架梁间距为2.5 m, 锚杆长度为5 m)不变, 边坡体最大变形随角度变化而变化, 角度在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间时, 边坡体的水平向最大位移较小, 此时的锚固效果明显。

图6为其他参数(锚杆间距和长度)不变情况下锚杆最大拉力与角度的关系。由图可见, 在角度为 40° 左右时锚杆受的拉力最大。锚杆框架梁加固膨胀土边坡的机理不同于土钉支护基坑的加固机理, 由于刚性连接的框架梁在重力作用下水平布置的锚杆局部受压, 既抑制了锚杆的力学性能, 又不利于设计的优化。在坡率1:1的情况下, 锚杆垂直边坡的加固效果明显好于其他情况(锚杆水平和竖直布置)。

3.4 锚杆长度的影响

图7为锚杆长度与边坡体水平向最大位移的关系, 其他条件不变时框架梁间距均为2.5 m, 锚杆均为水平布置, 显示出锚杆长度的增加对控制边坡体的变形效果不够明显, 根据膨胀土的膨胀势和大气影响深度来决定锚杆长度, 一般应在3~4 m之间。

图8为其他参数(间距和水平布置)不变的情况下锚杆最大拉力和锚杆长度的关系。锚杆所受的最大拉力并非与锚杆长度成正比, 2~3 m时锚杆最大拉力下降, 表明过短的锚杆加固边坡受力不够稳定, 当锚杆长度为4 m时锚杆拉力最大, 锚杆在4 m之后的拉力又呈现下降的趋势, 说明锚杆并不是越长其锚固效果就越好, 锚杆框架梁是针对膨胀土路堑边坡滑坡浅层的特点, 锚杆过长时其所受的拉力并不增加, 反而增加工程量和材料。

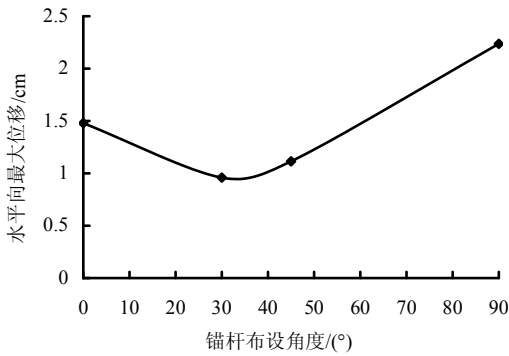


图5 边坡体变形和锚杆布设角度的关系
Fig.5 The relationship between slope deformation and angle of anchor

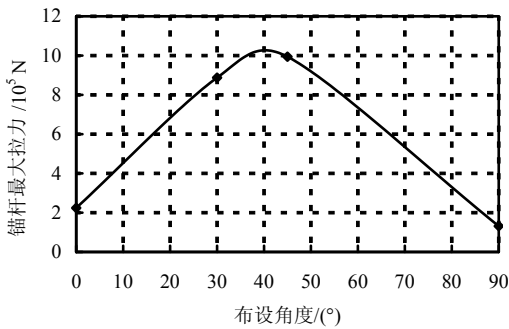


图6 锚杆最大拉力和布设角度的关系
Fig.6 The relationship between maximum tension and angle of anchor

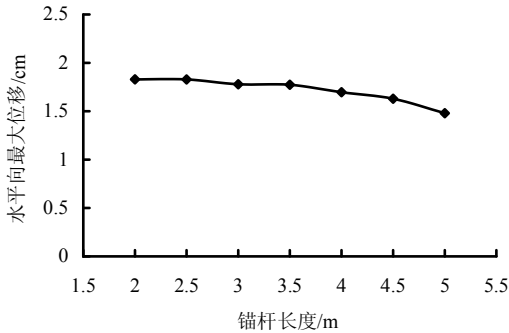


图7 边坡体变形和锚杆长度的关系
Fig.7 The relationship between slope deformation and length of anchor

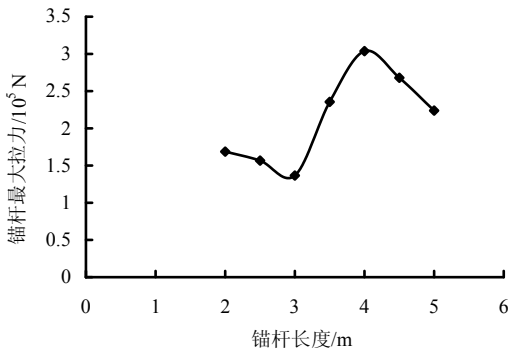


图8 锚杆最大拉力和长度的关系
Fig.8 The relationship between maximum tension and length of anchor

3.4 框架梁形状的影响

框架梁形状多采用矩形（正方形）和菱形等为主，一般根据实际需要做出选择。本文模拟了正方形和菱形对边坡变形等的影响，由表3可知，菱形布设比正方形布设（其他参数相同的情况下）变形小，锚杆受力较大，有效的发挥材料性能，同时矩形纵梁和横梁受力不同，配筋不同。而菱形则不存在这个问题，且有利于美观和稳定。

表3 框架梁形状对边坡体的影响
Table 3 Effect of frame beam form on slope deformation

形状	锚杆间距/m	最大位移/mm	锚杆最大拉力/kN
正方形	2.5	23.62	268.2
菱形	2.5	20.44	292.1

4 结 论

经过以上分析，得出如下结论：

- (1) 数值分析结果验证了膨胀土路堑边坡 1: 1.75 坡率的合理性。对于二级开挖的边坡，上下坡段的锚杆框架梁应分开设计。
- (2) 锚杆的间距对膨胀土边坡的变形影响较大，建议间距为 2.5~3 m。
- (3) 锚杆过长所起的锚固效果并不明显，优化设计中建议锚杆长度为 3~4 m
- (4) 锚杆布设角度对加固效果影响较大，不宜采用近水平或垂直布置，对于坡率 1: 1 的边坡，锚杆布设角度为 30° ~45° 时加固效果较好，锚杆设计以垂直于边坡为宜。框架形状建议采用菱形，既美观又有利于边坡稳定。

莫尔-库仑准则是一种理想模型，但膨胀土的膨胀性在模拟之中无法得到充分体现，这有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 张永防, 王秉勇. 用锚杆框架护坡加固南昆线膨胀土边坡的研究[J]. 铁道工程学报, 2000, 67(3): 92—95.
ZHANG Yong-fang, WANG Bing-yong. Study on strengthening expansive soil cut slope in Nan-kun Railway by using revetment with anchor frame beam[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2000, 67(3): 92—95.

- [2] Itasca. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension version 2.0 User's Manual[Z]. Minneapolis: ICG, 1997.
- [3] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15.
BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 1—15.
- [4] 丁秀美, 黄润秋, 臧亚君. 预应力锚索框架作用下附加应力的FLAC^{3D}模拟[J]. 成都理工大学学报, 2003, 30(4): 339—345.
DING Xiu-mei, HUANG Run-qiu, ZANG Ya-jun. Three dimension simulation with FLAC^{3D} on the subsidiary stress induced by frame beam with pre-stress cable[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)**, 2003, 30 (4): 339—345.