

基于边坡锚固荷载监测数据的反分析

赵明阶¹, 谢 鑫², 汪 魁¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 江西省峡江水利枢纽工程管理局, 江西 吉安 343000)

摘要: 对于施加锚固作用的边坡处治工程,其监测数据主要是以锚固荷载为主,通常的位移监测只是针对边坡表面结构,不能客观反映边坡内部岩土体的力学效应.故基于锚固荷载监测数据的反分析方法将成为位移反分析方法的有益补充.通过分析预应力锚杆的力学效应,将锚固荷载转化为锚杆轴力,利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 对边坡锚固荷载进行优化反分析.根据反演获得的岩土体力学参数可用于边坡稳定性分析.实例计算结果表明,基于锚固监测数据建立反分析的途径是可行的.

关 键 词: 反分析; 预应力锚杆; 锚固荷载; ANSYS 参数化设计语言

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)01-0044-05

在实际工程中,岩土体是一个不确定和复杂的系统,如何正确给定岩土体的力学参数较为棘手.因此,通过量测信息来确定各类计算参数的反分析方法自提出以来得到了迅速发展,目前已成为解决复杂岩土力学问题的重要方法^[1-3].现阶段岩土工程反分析方法中,对于采用位移量测信息进行反分析的研究较多,理论也较成熟.这是由于人们普遍认为结构的位移是岩土工程受地质、荷载、施工等因素影响的综合反映,加上位移量测特别是相对位移的测定具有方便性和经济性等特点,所以位移量测成了反分析方法的主要测试项目.但由此也造成了目前反分析方法中利用数据单一的问题^[4-6].

对于施加锚固作用的边坡处治工程,其监测数据主要以锚固荷载为主,通常的位移监测也只是针对边坡表面结构,不能客观反映边坡内部的岩土相互作用.在这种情况下若还是采取单一的位移反分析,不仅缺少量测数据,还可能使理论计算值和实测数据的反分析对应值具有很大的不稳定性,严重时反演结果与实际工况有较大的误差而使反分析完全丧失指导意义.因此,对于采用锚固措施的边坡、隧道等工程,由于荷载监测数据较丰富且荷载值也能很好地反映工程岩土体结构特性等,应积极开展锚固荷载反分析方法研究.

1 荷载反分析理论模型的建立

1.1 预应力锚杆应力分析

预应力锚杆从结构上可分为锚固段和自由段两部分.锚固段由于离岩(土)体表面较远,在受力分析上可认为是位于无限体中,不受表面边界的影响,并假设岩体与黏结材料为性质相近的弹性材料^[3].

在无限体内一点 O 受集中力 P 的作用(如图1),求解不计重力作用时体内应力和位移的分布情况,这个问题称为 Kelvin 问题^[7].

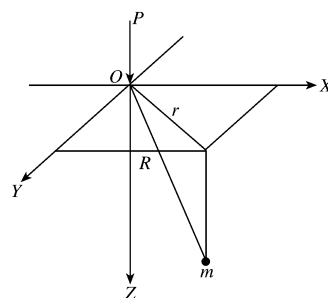


图1 Kelvin 问题示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Kelvin problem

收稿日期: 2010-04-09

基金项目: 教育部重点科技项目(03113)

作者简介: 赵明阶(1967-),男,四川广元人,教授,主要从事岩土动力学与监控量测技术、水工建筑物健康诊断与加固技术方面的研究. E-mail: njzhao@163.com 通信作者: 汪魁(E-mail: anhuiwk@163.com)

沿 Z 方向的位移为:

$$u_z = A \left[\frac{2(1-2\mu)}{R} + \frac{1}{R} + \frac{z^2}{R^3} \right] \quad (1)$$

式中: $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; $A = \frac{P}{16\pi G(1-\mu)}$; μ, G 为岩体的泊松比和剪切模量.

根据荷载-位移互等定理,在 O 点作用力 P 产生 M 点的位移等于 M 点作用力 P 产生 O 点的位移. 同时,取锚固体与 Z 轴重合,这时 $x=y=0$,因此,在锚固段任意一点 z 处作用力 P 产生的锚固外端点 O 的位移为:

$$u_z = \frac{P(1+\mu)}{2\pi E z}, E, \mu \text{ 分别为岩体的弹性模量和泊松比.}$$

假设锚固段从锚固外端点 O 开始为半无限长^[8],而锚固段与岩体的变形都处于弹性状态,两者的变形满足变形协调条件. 设锚固段沿 Z 轴对岩体产生的剪应力为 $\tau(z)$,则 $\tau(z)$ 引起的锚固外端 O 点的位移应等于锚固段的总伸长量,即

$$\int_0^\infty \frac{(1+\mu)}{2\pi E z} 2\pi \tau(z) dz = \int_0^\infty \frac{1}{E_a A} (P - 2\pi a \int \tau(z) dz) dz \quad (2)$$

式中: a 为锚固体半径; A 为锚固体的截面积; E_a 为锚固体的弹性模量.

式(2)通过对 z 三次求导可得关于 $\tau(z)$ 的二阶齐次常微分方程:

$$\tau'' + kz\tau' + 2k\tau = 0 \quad (3)$$

$$\text{式中: } k = \frac{2\pi E}{(1+\mu)E_a A}.$$

通过求解方程(3),可获得在锚固段中沿锚固体的剪应力分布:

$$\tau = \frac{Pt}{2\pi a} z \exp\left(-\frac{1}{2}tz^2\right) \quad (4)$$

式中: $t = \frac{1}{2(1+\mu)a^2} \left(\frac{E}{E_a}\right)$, 对上式积分,即得锚固段的轴力分布函数:

$$N = P \exp\left(-\frac{1}{2}tz^2\right) \quad (5)$$

1.2 目标函数及待反演参数的确定

边坡工程中锚固荷载值体现的是锚杆(索)本身的受力情况,无法直接表征周围岩土体的特性,因此很难实现通过岩土体参数推求锚杆荷载值的正分析,也无法直接选择锚固荷载值为基础信息来进行反演. 根据边坡锚固力作用机理,可以知道锚杆锚固段的受力不仅反映锚杆自身的状况,同时也体现周围岩土体的特性. 所以,锚固荷载的反分析不直接选用锚固荷载值为基础信息,而是考虑锚杆锚固段的受力情况再通过正演优化法反演边坡土体的参数.

结合预应力锚杆应力分布规律的研究,可通过考虑 Kelvin 问题推导的锚固段应力计算式(4)和(5)得到锚杆锚固段的剪力、轴力分布情况. 当施加锚固荷载较小时,以此计算出的锚固段应力分布与实测情况基本吻合^[9-10].

本文拟采用拉力型锚杆锚固段轴力计算式(5)来得到反演基础信息. 因此,基于边坡锚固荷载的反分析就把问题转化为以锚杆锚固段轴力值为基础信息反演边坡土体参数的过程,锚杆锚固段轴力分布情况可以通过锚固荷载值求得.

在此,反演中以平均差作为参数估计的目标函数. 建立以锚杆锚固段轴力为基础信息的目标函数:

$$F(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [N_i(X) - N_i] \quad (6)$$

式中: $X = \{X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_m\}$, X_k 为待反演的岩体参数; m 为待反演的岩体参数个数; n 为轴力量测点的总数,必须大于等于 m ; $N_i(X)$ 为锚杆锚固段在第 i 个量测点上产生的轴力计算值, N_i 为相应位置的轴力实测值. 计算值 $N_i(X)$ 是通过正分析来实现,实测值 N_i 则直接选用式(5)计算得到.

对边坡工程而言,选择待反演参数应考虑参数的敏感性,即参数的变化对边坡稳定性的影响程度^[9-11].

本文反演对象选取岩土体的弹性模量 E , 黏聚力 c 和内摩擦角 φ .

1.3 基于 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 的优化反分析

运用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 的设计优化技术, 设置优化参数也就是对所选择的待反演参数进行优化分析. 采用 ANSYS 有限元优化分析原理逐步迭代使目标函数最小, 力求得到符合实际情况的岩土体等效力学参数. 当反演目标函数最小时所对应的待反演参数就是符合实际情况的岩土体等效力学参数.

2 荷载反分析算例

某圆弧滑动面边坡高 20 m, 滑坡体为黏质土体, 视边坡岩土层分布均匀、结构单一. 边坡采用预应力锚索加固, 锚固段长度 5~6 m (见图 2). 以基于锚固荷载反分析的方法反演边坡土体的弹性模量 E , 黏聚力 c 和内摩擦角 φ . 各材料力学参数见表 1. 经监测得锚索锚固荷载 P 为 200 kN. 依据式 (6) 可得出锚索锚固段任意位置的轴力值, 以此为反分析基础信息的实测值. 锚固段轴力分布见图 3, 由图可以看出: 锚固段锚索轴力主要分布在距孔口 1.0 m 范围内的区域, 沿深度逐渐减小, 1.0 m 以下轴力值很小. 因此, 考虑到反演计算的收敛性及真实性, 取孔口 1.0 m 范围内的轴力值为实测值 N_i .

表 1 材料的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of materials

材 料	参 数					
	E / GPa	μ	c / MPa	φ / ($^{\circ}$)	φ_j / ($^{\circ}$)	γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
岩 体	5	0.25	0.8	40	20	25
锚 索	210	0.3	/	/	/	75
喷射混凝土	20	0.2	1	/	/	22
土 体	待反演	0.3	待反演	待反演	12	17

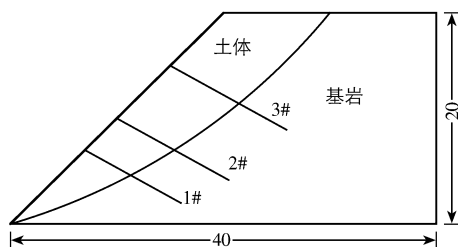


图 2 边坡断面 (单位: m)
Fig. 2 Slope section (unit: m)

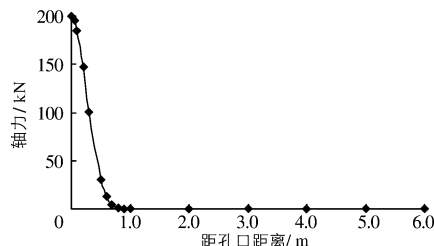


图 3 锚固段轴力分布
Fig. 3 Axial force distribution of anchored segment

对边坡工程采用 ANSYS 软件进行数值模拟正分析, 以得到锚索锚固段轴力的计算值 $N_i(X)$. 模型中岩体和土体部分都是采用二维平面单元 Plane 42, 锚索采用一维杆单元 Link 1, 喷射混凝土支护采用 Beam 3 梁单元, 锚索与岩体的连接采用非线性弹簧单元 Combination 39 模拟. Combination 39 单元具有 2 个节点, 只需通过定义弹簧单元的实常数 $F-D$ 曲线来定义非线性弹簧的受力性质. 考虑到锚固段砂浆黏结材料的尺寸相对整个模型来说太小, 且砂浆的力学性质与岩体的力学性质比较相似, 将砂浆黏结材料等效为岩体. 有限元模型划分网格如图 4 所示.

在 ANSYS 中建立要反演的模型, 将欲反演的变量如滑坡土体弹性模量 E , 黏聚力 c 和内摩擦角 φ 以参数形式加至模型中, 参数形式需要满足 APDL 参数化语言的命名规则^[12]. 各参数初值为: 弹性模量 $E=1$ GPa, 黏聚力 $c=20$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=25^{\circ}$. 利用 * get 命令提取边坡锚固段锚索上测点位置的轴力值 $N_i(X)$. 由于本文的实测轴力值 N_i 并非实

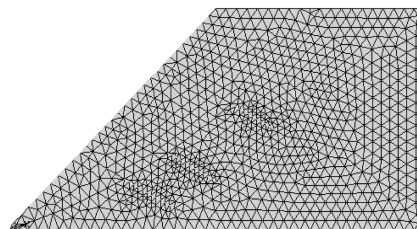


图 4 网格划分示意图
Fig. 4 Schematic diagram of mesh

际测点监测到的,而是由锚固荷载计算得到,所以测点的位置可以任意选定.考虑到反演计算的收敛性及真实性,在孔口以下 1.0 m 范围内布置 3 个计算测点,沿锚索深度方向分别为 $z_1 = 0.1$ m, $z_2 = 0.3$ m, $z_3 = 0.7$ m. get(* get)命令为: * get, Ny11, node, 152, s, y. Ny11 为定义的参数变量,用以储存 152 号节点的沿锚杆轴力方向的应力值.依此类推可以提取 1#,2#,3#锚索共 9 个点的轴向应力值.

根据式(5)建立反分析目标函数,有:
$$MBHS = \text{abs}(N_{yij} - N_{ij}) \quad (7)$$

式中: N_{yij} 为 i 号锚索 j 点位置轴力有限元计算值; N_{ij} 为 i 号锚索 j 点位置轴力实测值.

采用 ANSYS 参数优化设计语言 APDL 来进行优化设计,反演待分析参数.参照规范并结合工程经验选定待反演参数的取值范围:弹性模量 $E = 0.5 \sim 2.0$ GPa,黏聚力 $c = 15 \sim 40$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 15^\circ \sim 35^\circ$.根据反演程序运行后的结果信息,整理反演参数见表 2.根据目标函数最小为最优解的原则,可得边坡土体反演的参数为:弹性模量 $E = 1.28$ GPa,黏聚力 $c = 22.39$ kPa,内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$.

表 2 边坡反演参数

Tab. 2 Slope parameter inversion

输出组	弹性模量/ GPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	目标函数
SET1	1.000	20.00	25.00	15.36
SET2	1.251	21.35	24.26	19.22
SET3	1.463	23.41	26.15	21.37
SET4	0.968	22.06	23.92	19.75
SET5	1.315	19.96	26.33	16.54
SET6	1.126	22.58	25.92	12.62
SET7	1.325	24.85	27.56	13.38
* SET8	1.280	22.39	22.50	8.23
SET9	1.062	19.95	22.59	10.38
SET10	1.130	20.69	22.96	10.52

注: * 项为最优解.

上述边坡荷载反演中得到了能较客观反映实际工程状况的力学参数,可以利用相同的反分析方法得到不同时段的力学参数,从而进行边坡动态稳定性分析,适时评价锚固工程的加固效果.

3 结 语

(1)建立了基于锚固荷载监测数据反分析边坡岩土体力学参数的途径.通过锚固荷载值计算锚杆锚固段的轴力分布情况,以轴力分布情况为基础信息反演岩土体参数.反分析基本过程为:锚固荷载监测数据→锚固段受力→力学参数.

(2)基于 ANSYS 参数优化设计理论实现反演过程,采用正反分析法以锚固段轴力值反演边坡岩土体力学参数.通过工程算例可反演出边坡滑体的弹性模量、黏聚力、内摩擦角的最优解,表明通过建立锚固监测数据建立反分析途径是可行的.

(3)将锚固荷载有限元优化反分析方法应用于工程实际,用监测到的锚固荷载来反演目标参数.在得出参数的反演结果后,可将其用于正分析,评价边坡的稳定性.总之,基于锚固荷载的反分析是现有位移反分析的有益补充,具有一定的工程应用价值.

参 考 文 献:

- [1] 卿三惠,黄润秋.乌鞘岭特长隧道软弱围岩大变形特性研究[J].现代隧道技术,2005,42(2):7-14. (QING San-hui, HUANG Run-qiu. Study on the large deformation characteristics of the soft rocks in Wushaoling tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2005, 42(2): 7-14. (in Chinese))
- [2] 祝志恒,阳军生,董辉.双洞隧道施工引起地表移动的多参数反分析研究[J].岩土力学,2010,31(1):293-298. (ZHU Zhi-heng, YANG Jun-sheng, DONG Hui. Multi-parameter back analysis of surface movement induced by double tube tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 293-298. (in Chinese))

- [3] 张钦喜, 樊绍峰, 周予启. 深基坑桩锚支护侧土压力反分析及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 28(增1): 3214-3220. (ZHANG Qin-xi, FAN Shao-feng, ZHOU Yu-qi. Back analysis and numerical simulation of earth pressure around pile-anchor supporting structures in deep pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Suppl1): 3214-3220. (in Chinese))
- [4] 刘志宝, 宁海龙, 张海涛. 岩土工程中位移反分析方法及其进展[J]. 路基工程, 2006, 128(5): 7-9. (LIU Zhi-bao, NING Hai-long, ZHANG Hai-tao. Development of the displacement back analysis in geotechnical engineering [J]. Roadbed Engineering, 2006, 128(5): 7-9. (in Chinese))
- [5] 杨林德, 朱合华, 冯紫良, 等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (YANG Lin-de, ZHU He-hua, FENG Zi-liang, et al. Back analysis of geotechnical engineering and engineering practice [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [6] 吉林, 赵启林, 冯兆祥, 等. 岩土工程中反分析的研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2002(4): 57-63. (JI Ling, ZHAO Qi-ling, FENG Zhao-xiang, et al. Development of back analysis in geotechnical engineering [J]. Hydro-Science and Engineering, 2002(4): 57-63. (in Chinese))
- [7] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2004. (YOU Chun-an. Theory and application study on stress-transfer mechanism of anchoring system [D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese))
- [8] MASSARSCH K R, OIKAWA K, ICHIHASHI Y, et al. Design and practical application of soilex anchors[C] // International Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures, London: United Kingdom, 1997: 20-21.
- [9] 孔宪宾. 土-锚杆界面模型的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2001, 29(5): 103-105. (KONG Xian-bin. Experimental research on anchor rod-soil interface models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(5): 103-105. (in Chinese))
- [10] 邓华峰, 李建林, 黄建文, 等. 影响卸荷岩体边坡稳定性的参数敏感性分析[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2004, 26(4): 517-519. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, HUANG Jian-wen, et al. Sensitivity analysis of some parameters that affected the stability of unloading rock mass slope [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2004, 26(4): 517-519. (in Chinese))
- [11] 谭晓慧. 平面滑动边坡的可靠度计算及敏感性分析[J]. 安徽地质, 2001, 11(1): 49-53. (TAN Xiao-hui. Reliability calculation and sensitivity analysis of a plane sliding slope [J]. Geology of Anhui, 2001, 11(1): 49-53. (in Chinese))
- [12] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (Game Studio. APDL parametric finite element analysis techniques and application [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2004. (in Chinese))

Back analysis based on slope anchor load monitoring data

ZHAO Ming-jie¹, XIE Xing², WANG Kui¹

(1. Department of River & Sea, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Jiangxi Xiajiang Hydro Project Authority, Ji'an 343000, China)

Abstract: For the slope with the anchor, the anchor load is the main monitoring data, and usually displacement monitoring is only for the slope surface structure, which can not objectively reflect mechanical effects of rock and soil in the slope. Therefore, the back analysis method based on anchor load monitoring data will become a useful supplement against the displacement back analysis method. In this paper, by analyzing the mechanical effect of prestressed anchor and by expressing the anchor load as the axial force, the optimum back analysis of slope anchor load is carried out using ANSYS parametric design language (APDL). By back analysis, we have obtained the parameters of rock and soil slope that can be used for slope stability analysis.

Key words: back analysis; prestressed anchor; anchor load; ANSYS parametric design language