

岩体初始地应力场的反演回归分析

邵国建

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

TV 223.31

36-38

摘要:初始地应力场主要由自重场和构造场产生,根据山体的地质条件及岩体的地质构造情况和实测地应力资料,在分析初始地应力场形成的可能因素的基础上,提出一种初始地应力场反演回归的实用分析方法,并建立了初始地应力场的多元回归模型,通过实测点地应力值用逐步回归分析方法求出回归系数,从而得到岩体初始地应力场。文末用一个工程实例对这一方法作了说明。

关键词:地应力;初始地应力场;多元回归模型;逐步回归分析 岩体

中图分类号:TV233.3+1

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2000)05-0036-03

地下工程的失稳主要是由于开挖过程中引起的应力重分布超过围岩强度或造成围岩过分变形而造成的,而应力重分布是否会达到危险的程度要看初始地应力场的具体情形而定,所以地应力是影响地下洞室等工程稳定的最重要的基本因素之一。随着我国诸多大型工程项目建设的进行,需要搞清楚工程现场岩体的各种复杂状态,其中岩体的初始地应力场就是一个首要的问题。地应力场是地质力学与岩体力学研究的基本内容之一,工程建筑地区的区域稳定性能否合理解决,取决于是否提供了一个较符合实际情况的地应力场。而其中初始地应力场是地下工程从开挖到支护等仿真全过程分析计算的基础,对于合理地进行地下工程设计与施工具有很大的现实意义,如何合理地提供工程中可用的三维初始地应力场,是地下工程中面临的一个现实问题。

1 地应力场的成因分析及计算模型的建立

所谓初始地应力场,就是岩体中的应力状态,它由重力和历次地质构造作用而产生,又由于岩石的物理特性、风化、剥蚀等作用而变化,其应力不断地释放和重分布,而成为当前的残留应力状态,并且它使施工开挖后造成的应力重分布。而地应力,从地质年代看,它是随时间、空间而变化的非稳定场^[1]。对于一般工程建设而言,初始地应力场可视为忽略时间因素(地质年代)的相对稳定的应力场,且认为地应力场主要由自重场和构造场组成,这就为问题的解决提供了方便。

地应力场是地球发展运动的结果,它决定于历

次构造运动而产生的应力,地球升降运动引起的加荷、卸荷、岩浆活动的温差应力,岩体物理力学性质的变化等。世界各地实测资料表明,垂直应力往往与覆盖层深度成正比,水平应力分散性很大,这就论证了地应力的形成不仅决定于岩体自重,而且与地球的运动及发展密切相关,但目前还不能做到以地球发展的历史为根据去求解可供工程应用的初始地应力场。

60年代以前,由于受到岩体应力量测技术的限制,无法确切取得可靠的初始地应力资料。目前,岩石力学量测技术发展很快,可以相当准确地测得岩体某些测点的初始应力值,对如何通过实测点的地应力资料,回归反演出整个考察域的地应力场,文献[2]列举了几种分析方法,但各种分析方法均存在某些局限性。

本文根据地应力实测资料、山体的地形状况及岩体的地质构造、岩体的力学性质等因素,建立大范围山体的计算区域,对三维离散点的初始地应力值是由大区域网格下计算所得。由于形成初始地应力场的主要因素有岩体自重和地质构造运动等,对于自重因素,计算时采用岩体实测密度获得自重应力场 σ_g ,对于构造应力场 σ_k 获取比较困难,需考虑多种因素,本文通过选取足够大的区域在边界上加法向、切向分布荷载来实现。

对图1所示考察域,若取 z 向为垂直向上, x, y 分别取水平方向,对此构造场 σ_k 无非由下列几种因素组合而成:由垂直于 z 轴的面加沿 x 方向的法向分布荷载引起的 σ_{kx1} ;由垂直于 y 轴的面加沿 y 方

向的法向分布荷载引起的 $\sigma_{\text{构}2}$;由垂直于 x 轴的面加沿 y 方向的切向分布荷载及由垂直于 y 轴的面加沿 x 方向的切向分布荷载引起的 $\sigma_{\text{构}3}$;由垂直于 y 轴的面加沿 z 方向的切向分布荷载引起的 $\sigma_{\text{构}4}$;由垂直于 x 轴的面加沿 z 方向的切向分布荷载引起的 $\sigma_{\text{构}5}$ 。

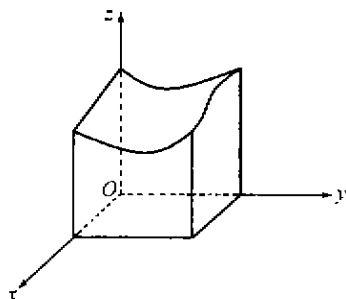


图1 计算域坐标选取

由于实际所在不同的面沿不同方向分布荷载的具体量值是未知的,可通过对计算域边界加相应单位分布荷载,利用常规有限元法对各种因素单独作用下进行计算,即先求得 $\sigma_{\text{构}1}, \sigma_{\text{构}2}, \sigma_{\text{构}3}, \sigma_{\text{构}4}, \sigma_{\text{构}5}$,再按照现实的可行性,根据地应力实测点的应力值,建立初始地应力场与各影响因素之间的回归方程,由测得的地应力资料,用统计分析方法,使残差平方和达到最小,可求得各影响因素的唯一解,进而得到可供工程使用的三维地应力场。

2 岩体地应力场的多元回归分析

对三维初始地应力场,可看作由自重应力场和各种构造场的组合,写出整个考察域中初始应力场表达式如下:

$$\sigma_{\text{地}} = b_1' \sigma_{\text{自}} + b_2' \sigma_{\text{构}1} + b_3' \sigma_{\text{构}2} + b_4' \sigma_{\text{构}3} + b_5' \sigma_{\text{构}4} + b_6' \sigma_{\text{构}5} + \epsilon_k \quad (1)$$

式中, $b_i' (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为回归系数, ϵ_k 是随机变量,对于有 N 个观测点,三维问题有 $6N$ 个观测地应力分量,则有:①误差 ϵ_k 的数学期望值全为零,即 $E(\epsilon_k) = 0, k = 1, 2, \dots, 6N$;②各次观测误差服从正态分布;③各次观测值相互独立,并有相同的精度,即 ϵ_k 之间的协方差可表示为

$$\text{COV}(\epsilon_k, \epsilon_h) = \begin{cases} = 0 & k \neq h \\ \sigma^2 & k = h \end{cases} \quad (2)$$

$(k, h = 1, 2, 3, \dots, 6N)$

协方差反映了各实测点误差 (ϵ_k, ϵ_h) 间的关联程度,如 $k = h$,即为方差,如 $k \neq h$,由于各观测值是相互独立的,所以为零。

用回归方法解决初始地应力场问题,可把式(1)视为回归方程。若现场有 N 个初始地应力测点,对于三维应力测点,可视为有 $6N$ 个独立的观测值。在式(1)中基本初始应力因素(或称自变量),对于第 k

个观测值,可写成 $\sigma_{k1}, \sigma_{k2}, \sigma_{k3}, \sigma_{k4}, \sigma_{k5}, \sigma_{k6}$ (即 $\sigma_{\text{自}}, \sigma_{\text{构}1}, \sigma_{\text{构}2}, \sigma_{\text{构}3}, \sigma_{\text{构}4}, \sigma_{\text{构}5}$ 在第 k 观测点的值),这些变量是有限元法在数学模型的“观测”值。

回归分析主要依据是 $6N$ 个实测值 (σ_k) 和数学模型的“观测”值,给出各回归系数 $b_1', b_2', b_3', b_4', b_5', b_6'$ 的估值 $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ 。根据估值可以写出:

$$\sigma_k = b_1 \sigma_{k1} + b_2 \sigma_{k2} + b_3 \sigma_{k3} + b_4 \sigma_{k4} + b_5 \sigma_{k5} + b_6 \sigma_{k6} + e_k \quad (3)$$

式中 e_k 为 ϵ_k 的估值, $k = 1, 2, 3, \dots, 6N$ 。取 σ_k' 为 σ_k 的估值,那么

$$\sigma_k' = b_1 \sigma_{k1} + b_2 \sigma_{k2} + b_3 \sigma_{k3} + b_4 \sigma_{k4} + b_5 \sigma_{k5} + b_6 \sigma_{k6} \quad (4)$$

则有 $\sigma_k = \sigma_k' + e_k$ 或 $e_k = \sigma_k - \sigma_k'$ 。

根据实测地应力资料,就可由式(3)求解回归系数估值 b_i 。关于求解回归系数估值 b_i 可采用多种方法,常见的有最小二乘法。由于构造场在考察域边界是通过施加各种法向及切向分布荷载来实现的,它们之间是相容的,其中一个因素的引入必将造成其余因素的退化。因此,本文采用逐步回归分析来求解回归系数的估值。

逐步回归的思想即将变量的逐个引入,引入变量的条件是其偏回归平方和经检验是显著的,同时每引入一个新的变量后,对已选入的变量要逐个检验,将不显著变量剔除,保证最后所得的变量子集中所有变量都是显著的,这样经若干步便得“最优”的变量子集。关于逐步回归方法求解的步骤可参阅文献[3]。在求得式(3)中回归系数后,再代入式(3)就得到考察域内的离散应力场。

3 三维地应力场的拟合

对具体地下工程结构,由于文中三维离散点的初始地应力场是由大区域网格下计算反演回归所得,不便于对具体的地下工程中小区域精细网格下三维有限元非线性分析计算,这就需通过大区域网格下离散点的应力值拟合求得小区域精细网格下任意一点的地应力值。给定的任意一点坐标值,总可在大区域网格下找到对应的单元,将该单元再细分成若干小单元,就可由给定的任一点坐标值找到此点在大区域网格下单元位置,即找到任一点在大区域网格的局部坐标。有了局部坐标值,再利用大区域下单元8个角结点的地应力回归值通过形函数来插值求得任一点的地应力值,最后得到整个计算域内的地应力场。

表1 测点处地应力值及回归结果

MPa

测点	应力分量	自重场 $\sigma_{\text{自}}$	构造场					回归值	实测值	绝对误差
			$\sigma_{\text{构1}}$	$\sigma_{\text{构2}}$	$\sigma_{\text{构3}}$	$\sigma_{\text{构4}}$	$\sigma_{\text{构5}}$			
I	σ_x	-5.078	-0.894	-0.03	-0.103	0.07	0.18	-12.99	-13.15	-0.16
	σ_y	-4.814	-0.06	-0.85	-0.215	0.04	0.09	-11.40	-10.39	-1.01
	σ_z	-10.013	-0.07	-0.07	-0.34	0.12	0.04	-12.66	-12.79	-0.12
	τ_{xy}	0.193	0.06	0.01	0.02	-0.02	-0.16	-1.06	-1.15	-0.09
	τ_{yz}	0.660	0.05	0.13	-0.25	-0.001	-0.01	-1.41	-2.45	-1.03
	τ_{zx}	1.324	0.05	0.003	0.06	0.08	-0.05	0.77	0.66	-0.11
II	σ_x	-4.660	-0.83	-0.05	-0.116	0.03	0.16	-12.34	-12.57	-0.23
	σ_y	-4.845	-0.04	-0.88	-0.20	0.03	0.04	-11.70	-12.18	-0.47
	σ_z	-10.030	-0.02	-0.07	-0.48	0.08	0.01	-12.89	-12.97	-0.07
	τ_{xy}	0.124	0.07	0.01	0.00	-0.02	-0.24	-1.61	-1.17	0.44
	τ_{yz}	0.480	0.04	-0.09	-0.37	-0.003	-0.03	-1.91	-1.45	0.46
	τ_{zx}	0.388	0.08	-0.004	0.04	0.02	-0.09	0.70	0.50	-0.20
III	σ_x	-2.180	-0.39	-0.014	0.11	-0.03	-0.07	-6.54	-5.96	0.58
	σ_y	-1.860	0.09	-0.63	0.112	-0.02	-0.09	-5.96	-6.37	-0.41
	σ_z	-3.960	0.03	0.07	0.028	-0.01	-0.03	-4.26	-4.17	0.09
	τ_{xy}	-0.017	0.02	-0.03	0.06	-0.01	-0.05	-1.02	-1.91	-0.89
	τ_{yz}	0.500	-0.02	0.08	-0.01	0.003	-0.02	-0.013	—	—
	τ_{zx}	0.225	0.02	-0.008	-0.04	0.007	0.03	-0.45	—	—

注:测点 III 处 τ_{yz} 、 τ_{zx} 实测地应力缺。

4 算例分析

利用本文提出的方法对某水电站地下厂房初始地应力场进行反演回归分析,对 I、II、III 三个测点实测地应力进行回归分析,求得式(3)中的各回归系数分别为: $b_1 = 0.986$, $b_2 = 8.596$, $b_3 = 5.997$, $b_4 = 3.188$, $b_5 = 0.0$, $b_6 = 6.084$, $e_k = -0.904$,则该水电站地下厂房岩体的初始地应力场回归结果为:

$$\sigma = 0.986\sigma_{\text{自}} + 8.596\sigma'_{\text{构1}} + 5.997\sigma'_{\text{构2}} + 3.188\sigma'_{\text{构3}} + 6.084\sigma'_{\text{构5}} - 0.904 \quad (5)$$

式中: σ 为初始地应力场回归值; $\sigma_{\text{自}}$ 为岩体自重引起的应力场; $\sigma'_{\text{构1}}$ 为由垂直 x 轴的面加沿 x 方向的单位法向分布荷载引起的应力场; $\sigma'_{\text{构2}}$ 为由垂直 y 轴的面加沿 y 方向的单位法向分布荷载引起的应力场; $\sigma'_{\text{构3}}$ 为由垂直 x 轴的面加沿 y 方向的单位切向分布荷载及由垂直 y 轴的面加沿 x 方向的单位切向分布荷载引起的应力场; $\sigma'_{\text{构5}}$ 为由垂直 x 轴的面加沿 z 方向的单位切向分布荷载引起的应力场。

回归分析中得到的复相关系数为 0.096,表明回归公式相关性较好,实测点处地应力值和回归应力值及绝对误差见表 1,结果表明回归应力值合理,且较接近于实测点的地应力值。

5 结 语

a. 岩体初始地应力场主要由重力和历次地质构造作用而产生,同时随着岩石的物理特性、风化、剥蚀等作用而变化,其应力不断地释放和重分布,而成为当前的残留状态,即是相对于施工开挖时的岩

体应力状态。

b. 岩体自重是产生初始地应力场的基本因素之一,它对岩体初始地应力场的影响是相对确定的,只需精确测出岩体密度即可,而构造场的影响对于不同的地区差别很大,通过本文分析,表明自重场和构造场是形成岩体初始地应力场的基本因素。

c. 本文对岩体初始地应力场的分析,主要考虑了自重场和构造场的影响,并建立起计算模型,结果表明所采用的分析岩体初始地应力场法是一种较为合理、可用的分析方法,此法根据实测点的各实测值求解工程建筑地区的初始地应力场,保证了解的可靠性,使引入和剔除形成初始地应力场的各种因素有了根据,这有利于对形成初始地应力场复杂因素的认识,通过本文分析表明,逐步回归法求解多元线性回归系数是一种比较适用的方法。

参考文献:

- [1] 朱维申,何满潮.复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M].北京:科学出版社,1995.
- [2] 张有天,胡惠昌.地应力场的趋势分析[J].水利学报,1984(4):31~38.
- [3] 周纪芾.实用回归分析方法[M].上海:上海科学技术出版社,1990.

(收稿日期:1998-12-17 编辑:熊水斌)

