

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.015

新型可回收锚杆不同布置间距的群锚效应

庞有师^{1 2 3}, 刘汉龙^{1 2}, 柯结伟³, 陈志勇⁴

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;
3.解放军理工大学工程兵工程学院,江苏 南京 210007;4.驻宁波航务军代处,浙江 宁波 315020)

摘要:为了分析在岩土体中新型可回收锚杆的布置间距对锚固特性的影响规律,根据 Kelvin 解,推导了锚杆按不同间距布置时锚固段剪应力求解公式;采用一般岩土体参数对锚固段剪应力分布进行了计算,建立了按不同间距布置时该可回收锚杆的三维有限元加固模型,并进行了数值计算,验证了理论分析的正确性。结果表明,推导的锚杆按不同间距布置时锚固段剪应力求解公式的计算结果与数值模拟结果相符;在岩体中锚杆布置间距对锚固特性影响不大,而在土体中锚固特性受锚杆布置间距影响较大,锚杆布置间距越小,锚固段剪应力峰值越小,在实际工程施工中应特别注意。

关键词:可回收锚杆;布置间距;群锚效应;数值模拟

中图分类号:TU457 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2009)06-0685-06

锚固技术是基坑支护、边坡加固等工程中常用技术之一。锚固技术施工速度快,造价低,但锚固工程结束后锚杆将永久留在地下,尤其短期和临时支护工程。大量的锚杆埋置于地下不仅造成材料的浪费,而且将对地下空间造成永久性污染。笔者在现有锚杆设计理论的基础上开发了一种新型可回收锚杆^[1],构造如图 1 所示。

在新型可回收锚杆加固岩土体工程施工中,锚杆锚固特性都受其相近锚杆的影响,即群锚效应。群锚效应是一个比较复杂的问题,目前已有部分学者进行了这方面的研究^[2-8]。但关于锚杆布置间距的研究还未见报道。本文通过

理论分析,推导得出锚杆按不同间距布置时的锚固体剪应力分布计算公式,并通过算例计算,分析了布置间距对可回收锚杆锚固特性的影响规律;建立了锚杆按不同间距布置时的三维有限元加固模型,通过计算验证了理论分析的正确性。

1 理论分析

单根锚杆作用时,锚固体剪应力分布规律与注浆段长度、锚孔孔径、岩土体力学性质(弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角)等有关。很多学者进行了这方面的研究^[9-10],其中卢黎等^[9]根据 Kelvin 解推导出的压力型锚杆锚固段的剪应力和正应力分布方程最为典型,如式(1)和式(2)所示。

$$\tau = \frac{F}{\pi D} \frac{z}{Az + B} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Az + B}{B} \right) - \frac{z}{A} \right] \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Az + B}{B} \right) - \frac{z}{A} \right] \tag{2}$$

其中

$$A = \frac{D\mu}{2\tan\varphi} \quad B = \frac{(1 + \mu)D^2 E_a}{8E}$$

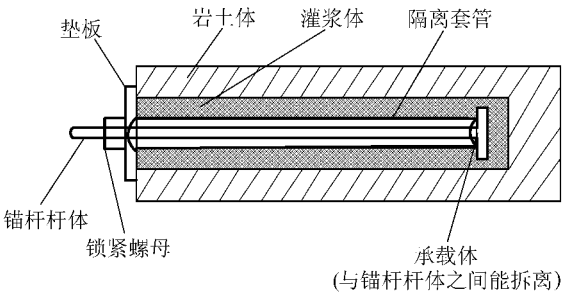


图 1 新型可回收锚杆构造

Fig. 1 Structure of new type of recoverable anchor

式中: F ——锚杆抗拔力; D ——锚固体直径; μ ——泊松比; φ ——内摩擦角; E ——岩土体弹性模量; E_a ——注浆体弹性模量。

在实际坑道支护与边坡加固工程中,单根锚杆解决不了问题,都要布置大量锚杆。当锚杆布置间距较小时,它们之间会相互影响。2根间距为 b 的锚杆都受大小为 F 的抗拔力时,岩土体内任一点的位移情况可借用 Kelvin 模型的解答进行分析,如图 2 所示。

根据 Kelvin 问题在 z 方向的位移解^[11]可得当 $x = y = 0$ 时,在任一位置 z 处 2 个集中力 F 产生的位移为

$$u_z = \frac{F(1+\mu)}{2\pi Ez} + \frac{F(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)+1}{\sqrt{b^2+z^2}} + \frac{z^2}{(b^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad (3)$$

根据位移互等定理,在 o, o' 点集中力 F 引起的 m, m' 点处位移等于在 m, m' 点处的集中力 F 在 o, o' 点处引起的位移。如果将 m, m' 点处微段的黏结剪应力作为集中力 F' :

$$F' = \pi D \tau dz \quad (4)$$

根据三向胡克定律,沿锚杆轴向的应变为

$$\epsilon_z = \frac{1}{E_a} [\sigma_z - \mu(\sigma_\theta + \sigma_r)] \quad (5)$$

式中 ϵ_z 为锚固体的轴向应变。

假定锚固体截面上的正应力 σ_z 均匀分布,则有 $\sigma_\theta = \sigma_r = \sigma$ ^[12]。根据库仑定律,有

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

综合式(3)~(6),可得变形协调方程:

$$\int_0^l \frac{1}{E_a} \left[\sigma_z - 2\mu \frac{\tau}{\tan \varphi} \right] dz = \int_0^l \left\{ \frac{(1+\mu)}{2\pi Ez} + \frac{(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[\frac{(1-2\mu)+1}{\sqrt{b^2+z^2}} + \frac{z^2}{(b^2+z^2)^{3/2}} \right] \right\} \pi D \tau dz \quad (7)$$

式中等号左边为锚固体在锚固端 o 点发生的位移,等号右边为岩土体在 o 点发生的位移,假设锚固体与岩土体没发生脱离破坏,则两者相等。

取锚固体任一微段进行受力分析,如图 3 所示。

易得力的平衡方程为

$$(\sigma_z + d\sigma_z) \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 + 2\tau D dz = \sigma_z \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (8)$$

整理可得

$$\frac{D}{2} d\sigma_z + 2\tau dz = 0 \quad (9)$$

联立式(7)和式(9),并根据边界条件 $z = 0$ 时 $\sigma_z = \frac{4F}{\pi D^2}$,即可求解锚固体剪应力与正应力分布规律计算方程。

设材料泊松比 $\mu = 0.3$,内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,锚杆抗拔力 $F = 70 \text{ kN}$,锚孔直径 $D = 0.15 \text{ m}$,锚固体与岩体弹性模量之比 $E_a/E = 6$,则岩层锚杆布置间距分别为 1 m , 2 m , 3 m 时,锚固体剪应力分布曲线如图 4 所示。

设材料泊松比 $\mu = 0.3$,内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,锚杆抗拔力 $F = 70 \text{ kN}$,锚孔直径 $D = 0.15 \text{ m}$,锚固体与岩体弹性模量之比 $E_a/E = 590$,则土层锚杆布置间距分别为 1 m , 2 m , 3 m , 8 m , 18 m 时,锚固体剪应力分布曲线如图 5 所示。

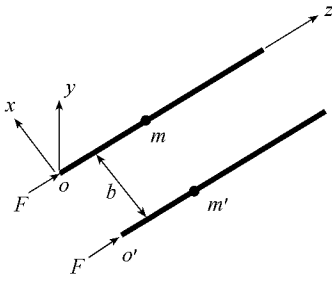


图 2 计算简图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation

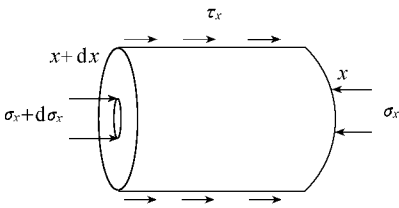


图 3 锚固体受力简图

Fig. 3 Stresses acting on anchoring section

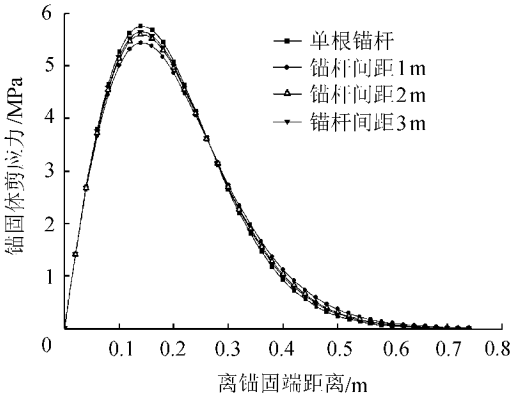


图 4 岩层锚杆按不同间距布置时锚固体剪应力分布曲线(理论分析)

Fig. 4 Distribution of shear stress along anchoring section with different disposing spacings in rock (theoretical analysis)

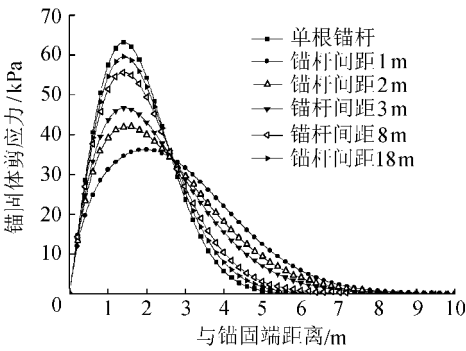


图 5 土层锚杆按不同间距布置时锚固体剪应力分布曲线(理论分析)

Fig. 5 Distribution of shear stress along anchoring section with different disposing spacing in soil (theoretical analysis)

计算中锚固体采用线弹性模型,岩土体采用摩尔库仑材料模型.新型可回收锚杆属于压力型锚杆,计算时在锚固体端部施加圆形均布压力荷载.岩土体和注浆体都采用 4 节点四面体单元,网络由锚固体向外呈星放射状逐渐由密变稀.模型网格划分完成后如图 7 所示,分别按岩体和土体 2 种模型进行计算.

表 1 岩层和土层锚杆计算模型结构尺寸

Table 1 Dimensions of calculation models

for anchors in rock and soil									m
编号	岩 层				土 层				
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>	<i>L</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>	<i>L</i>	
1	4.00	1.00	2.00	4.00	40.00	1.00	20.00	10.00	
2	4.00	1.25	2.00	4.00	40.00	2.00	20.00	10.00	
3	4.00	1.50	2.00	4.00	40.00	3.00	20.00	10.00	
4	4.00	1.75	2.00	4.00	40.00	8.00	20.00	10.00	
5	4.00	2.00	2.00	4.00	40.00	18.00	20.00	10.00	
6	4.25	2.25	2.00	4.00	40.00		20.00	10.00	
7	5.00	3.00	2.00	4.00					
8	5.00		2.00	4.00					

2 加固模型的建立

以上通过理论推导和算例计算得到了在岩体和土体中锚杆按不同间距布置时的锚固体剪应力分布规律.为了验证理论计算的正确性,利用大型通用有限元软件 ADINA 建立三维有限元模型进行计算.锚杆的计算模型如图 6 所示.岩层、土层锚杆计算模型结构尺寸如表 1 所示.

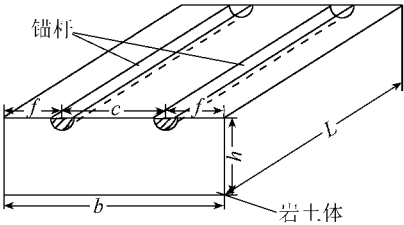


图 6 锚杆计算模型

Fig. 6 Calculation model for anchors

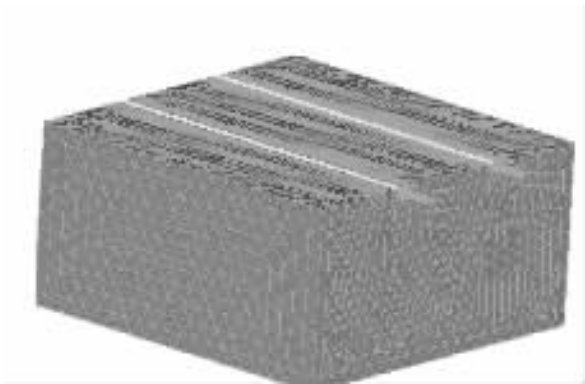


图 7 三维有限元模型

Fig. 7 Three-dimensional finite element model

3 模型参数选取

为了方便对比分析,模型参数选取与图 4 和图 5 相同,在锚固体底端施加的均布荷载大小为

$$\sigma = \frac{F}{\pi D^2/4} = 3.96 \text{ MPa}$$
 (10)

按一般岩体和土体进行计算时结构模型中采用的力学参数和接触面的力学参数如表 2 所示.表中 K_w 为接触面法向接触函数参数, K_v 为接触面摩擦接触函数参数.

表 2 结构模型和接触面力学参数

Table 2 Mechanical parameters for models and anchoring interfaces

结构模型	类 别	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	K_w /MPa	K_v /MPa
岩 体	锚固体	26 000	0.17	2 500	58	2 000	1 000
	岩 体	4 400	0.30	500	35	2 000	1 000
土 体	锚固体	26 000	0.17	2 500	58	200	100
	土 体	44	0.25	44	27	200	100

4 计算结果

通过计算得岩层锚杆和土层锚杆在相同荷载作用下,按不同间距布置时岩体、土体表面位移分布和锚固

体剪应力分布曲线如图 8~11 所示.

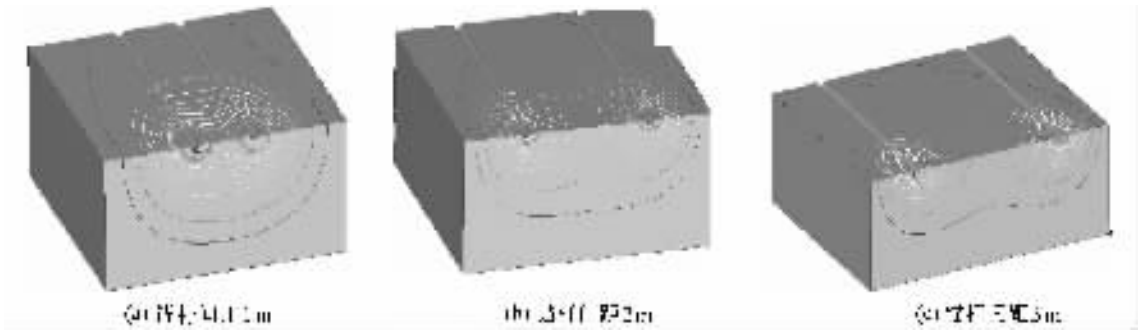


图 8 岩层锚杆按不同间距布置时岩体表面位移分布

Fig. 8 Distribution of surface displacement of rock with different disposing spacings

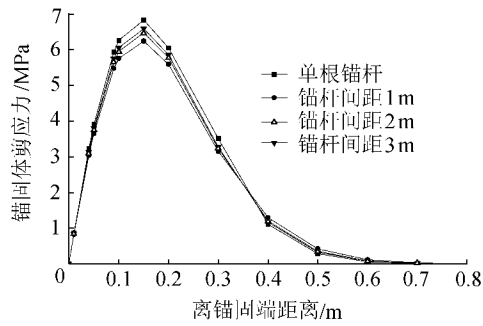


图 9 岩层锚杆按不同间距布置时锚固体剪应力分布曲线(数值计算)

Fig. 9 Distribution of shear stress along anchoring section with different disposing spacings in rock(numerical calculation)

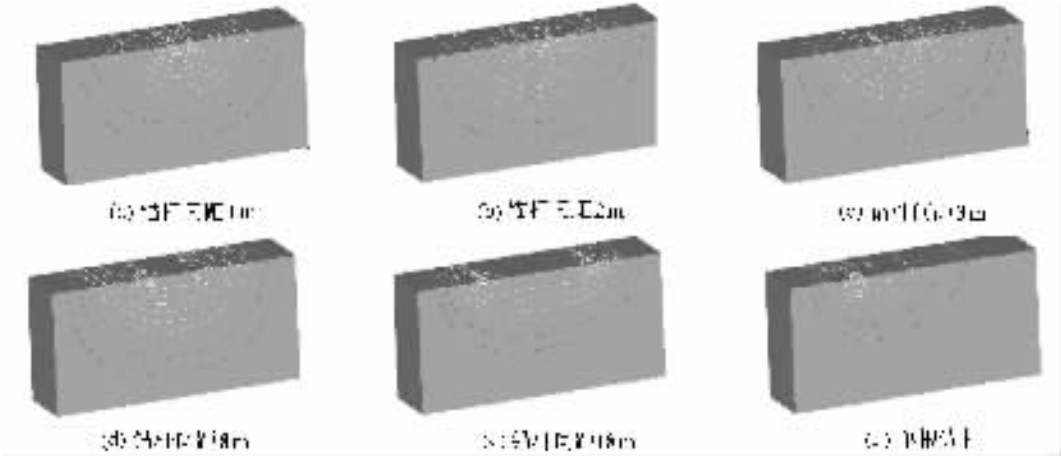


图 10 土层锚杆按不同间距布置时土体表面位移分布

Fig. 10 Distribution of surface displacement of soil with different disposing spacings

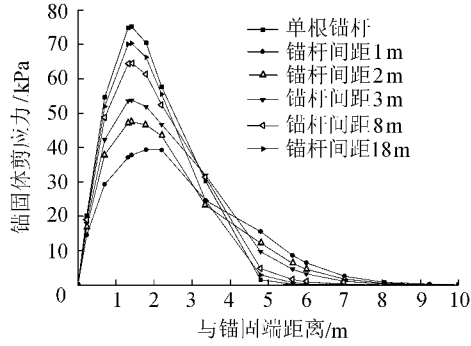


图 11 土层锚杆按不同间距布置时锚固体剪应力分布曲线(数值计算)

Fig. 11 Distribution of shear stress along anchoring section with different disposing spacings in soil(numerical calculation)

5 结果分析

对图 8 和图 10 进行分析 ,可得锚杆按不同间距布置时岩体和土体表面最大位移如表 3 所示 .

从表 3 可以看出 ,岩体表面最大位移随着锚杆布置间距的增大而减小 ,当锚杆布置间距小于 1.75 m 时 ,岩体表面位移的大小受锚杆的布置间距影响很大 ,而当锚杆布置间距大于 2 m 以后 ,岩体表面位移受锚杆的布置间距的影响很小 .在土体中锚杆锚固特性受锚杆布置间距的影响很大 ,土体表面位移随着锚杆布置间距的增大而减小 ,锚杆布置间距由 8 m 增加至 18 m 时 ,土体最大表面位移由 12.31 mm 减小为 9.85 mm .

对图 4 和图 9 ,图 5 和图 11 进行分析 ,可得按不同间距布置时锚杆锚固段内剪应力峰值情况如表 4 所示 .

从表 4 可以看出 ,数值模拟的计算结果整体比理论计算偏大 .2 种方式的计算结果都表明岩层锚杆锚固段剪应力分布受锚杆布置间距的影响不大 ,随着锚杆布置间距的减小 ,锚固段上剪应力峰值有所减小 ,但程度很小 .土层锚杆锚固段剪应力分布受锚杆布置间距的影响很大 ,随着锚杆布置间距的减小 ,锚固体上剪应力峰值大幅度减小 .受相距 18 m 锚杆的影响时 ,锚固体剪应力峰值较单根锚杆都有一定程度的减小 .

6 结 论

- a. 根据 Kelvin 解推导了锚杆按不同间距布置时锚固体剪应力求解公式 ,并通过建立不同的数值模型进行计算 ,验证了本文推导公式的正确性 .
- b. 在岩体中 ,单根锚杆的影响范围非常小 .当锚杆布置间距大于 1.75 m 之后 ,岩土体表面位移、锚固体剪应力分布受相近锚杆的影响非常小 .而在实际工程中 ,除破碎岩体外 ,锚杆的布置间距一般都大于 2 m ,所以在岩体加固工程中可以忽略锚杆之间的相互影响 .
- c. 在土体中 ,单根锚杆的影响范围非常大 .当锚杆布置间距为 18 m 时 ,土体表面位移和锚杆锚固体剪应力峰值受相邻锚杆的影响 ,与单根锚杆相比仍有一定程度的减小 .而在实际锚杆加固土体边坡工程中 ,锚杆的布置间距一般为 2 ~ 4 m ,所以在新型可回收锚杆加固土体工程中 ,应特别注意锚杆布置间距对锚固性能的影响 .

参考文献 :

[1] 刘汉龙 ,戴会超 ,庞有师 .一种可回收式锚杆 :中国 200420080599[P].2005-11-02 .

[2] 汪海滨 ,高波 .预应力群锚根状效应原位试验研究[J].岩土力学 ,2006 ,27(1) :77-83 .(WANG Hai-bin ,GAO Bo .Field testing study on root effect mechanism of prestressed anchor cable group[J].Rock and soil Mechanics ,2006 ,27(1) :77-83 .(in Chinese))

[3] 李寻昌 ,门玉明 ,王娟娟 .锚杆抗滑桩体系的群桩、群锚效应研究现状分析[J].公路交通科技 ,2005 ,22(9) :52-55 .(LI Xin-chang ,MEN Yu-ming ,WANG Juan-juan .Analysis on researcher reality of the effects of pile groups and anchor groups in anchor anti-slide piles[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development ,2005 ,22(9) :52-55 .(in Chinese))

[4] 陆锡铭 ,朱晗迺 .破碎岩质边坡中群锚效应试验研究[J].公路交通科技 ,2005 ,22(6) :66-68 .(LU Xi-ming ,ZHU Han-ya .Experiment and research on multi-anchorage effect in cracked rock slope[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development ,2005 ,22(6) :66-68 .(in Chinese))

[5] 张发明 ,刘宁 ,赵维炳 .岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应[J].岩石力学与工程学报 ,2000 ,19(增刊) :1070-1077 .(ZHANG Fa-ming ,LIU Ning ,ZHAO Wei-bing .Mechanical behaviour and effects of prestressed anchorage for rock slope[J].Chinese

表 3 锚杆按不同间距布置时
岩体和土体表面最大位移

Table 3 Peak values of surface displacement of
rock and soil with different disposing spacings

锚杆间距/m	最大位移/mm	
	岩体	土体
1	27.19	14.17
1.25	23.37	
1.5	23.12	
1.75	22.81	
2	22.74	13.38
2.25	22.73	
3	22.16	12.85
8		12.31
18		9.85
单锚	22.26	8.88

表 4 不同布置间距下锚固段剪应力峰值情况

Table 4 Peak values of shear stress along
anchoring section with different disposing spacings

间距/m	岩层锚杆剪应力/MPa		土层锚杆剪应力/MPa	
	理论分析	有限元分析	理论分析	有限元分析
单锚	5.75	6.83	63.19	75.19
1	5.43	6.24	36.24	39.34
2	5.59	6.47	42.02	47.42
3	5.64	6.59	46.67	53.78
8			55.66	64.57
18			59.59	70.32

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5):1077-1070.(in Chinese))
- [6] 张晗旭. 关于预应力锚索加固效应研究的几点看法[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1999, 27(4):93-96.(ZHANG Han-xu. Comments on the study of reinforcing effect of prestressed anchored steel rope[J]. Journal of Hohai University Natural Sciences, 1999, 27(4):93-96.(in Chinese))
- [7] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6):925-928.(YOU Chun-an, ZHAN Yu-bao. Distribution characters and analysis of stresses in prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6):925-928.(in Chinese))
- [8] 陈中合, 王威强, 张乐义, 等. 全长锚固柔性注浆锚杆锚固力分析[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(2):72-75.(CHEN Zhong-he, WANG Wei-qiang, ZHANG Le-yi, et al. Analysis on anchoring force of full length flexible pressurized grouting bolt[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(2):72-75.(in Chinese))
- [9] 卢黎, 张永兴, 吴曙光. 压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6):1517-1520.(LU Li, ZHANG Yong-xing, WU Shu-guang. Distribution of stresses on bonded length of compression type rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6):1517-1520.(in Chinese))
- [10] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2004.
- [11] 杜庆华, 余寿文, 姚振汉. 弹性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1986:104-1063.
- [12] 张四平, 侯庆. 压力分散型锚杆剪应力分布与现场试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2):41-47.(ZHANG Si-ping, HOU Qing. Study on shear stress distribution and in-situ test of pressure dispersive anchor[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(2):41-47.(in Chinese))

Effects of the new type of recoverable anchor groups with different disposing spacings

PANG You-shi^{1 2 3}, LIU Han-long^{1 2}, KE Jie-wei³, CHEN Zhi-yong⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Engineering Institute of Engineering Crop, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

4. Ningbo Military Navigational Agency of Nanjing Military Command, Ningbo 315020, China)

Abstract: In order to analyze the effects of disposing spacing of the new type of recoverable anchor groups on the anchoring properties, the formulas for the shear stress along the anchoring section with different disposing spacings were first deduced based on Kelvin's solution. Then, the distribution of shear stress along the anchoring section was calculated using the general parameters of rock and soil. Finally, three-dimensional finite element consolidation models for the new type of recoverable anchor groups with different disposing spacings were established, numerical simulations were conducted, and the correctness of the theoretical analysis was validated. The results indicate that the results calculated with the proposed formulas are in agreement with those of the numerical simulation. The effect of different disposing spacings in rock on the anchoring properties is very small, but in soil it is very large. As the disposing spacing is reduced, so is the peak value of the shear stress along the anchoring section. This should receive special consideration in project construction.

Key words: recoverable anchor; disposing spacing; effect of anchor groups; numerical simulation