

压力分散型锚索作用效果的数值模拟分析

夏元友, 范卫琴, 芮 瑞, 王艳丽

(武汉理工大学, 武汉 430070)

摘 要: 通过 FLAC^{3D} 程序, 用实体单元模拟了岩体和砂浆体, 用结构单元来模拟锚索, 在砂浆体和岩体间设置接触面, 对锚索施加预应力时采用新的建模方法, 即通过结构单元来模拟压力分散型锚索的承压板, 代替在承压板的位置施加均布力的方法, 建立预应力锚固数值仿真模型。通过模拟试验, 分析了接触面单元、岩体单元以及砂浆体单元的应力云图等, 更加清晰地显示了压力分散型预应力锚索作用下岩体沿锚索轴向的应力、砂浆体与孔壁之间的粘结应力分布等情况。

关 键 词: 压力分散型锚索; 数值模拟; 锚固机理

中图分类号: TU 45; O 241

文献标识码: A

Numerical simulation analysis of pressure diffusion anchor cable's effect mechanism

XIA Yuan-you, FAN Wei-qin, RUI Rui, WANG Yan-li

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, the rock and mortar is simulated by solid mass element, the cable is simulated by structural element, the interface is setted between the rock and mortar, and the prestress is applied to the cable according to the new method in FLAC^{3D} program, that is to say, the board in pressure diffusion anchor cable is simulated by structural element rather than the distributed loads gained by the theoretical analysis are applied to the board. And then the numerical simulation model of prestress anchorage is established. After that, the stress nephogram of the interface, rock and mortar mass is analysed; and then the axial stress along cable in rock mass, bond stress distribution between mortar mass cell and membrane, which is affected by pressure diffusion anchor cable are displayed more clearly.

Key words: pressure dispersion-type cable; numerical simulation; anchoring and reinforcing mechanism

1 引 言

现有对锚索施加作用力时采用的建模方法中, 刑占清^[1]等利用有限元分析软件 ANSYS, 针对岩体、砂浆体、内锚头和外锚头等材料的不同特点, 分别采用不同的实体单元进行模拟, 将砂浆体和岩体之间的接触界面采用目标单元和接触单元模拟, 在模拟过程中直接在内锚头和外锚头上施加锚固力, 按照不同的砂浆体与岩体界面摩擦特性, 研究了沿锚索轴向砂浆体和岩体的应力、应变的分布规律以及砂浆体和岩体界面上的剪应力分布特征。王树仁等^[2]在利用有限差分程序 FLAC 对压力分散型锚索的锚固机制进行数值模拟研究时, 将压力分

散型预应力锚索的内锚固段按等间距分成 3 个承载体, 在内锚固段左端头每个承载体上施加轴向均布力实现对锚索的加载过程, 得到了这种锚索的作用效果。徐前卫^[3]等根据预应力锚索中自由段和锚固段不同的作用机制, 建立了一种新的能够施加预应力的三维数值模拟方法, 即锚固段用空间杆单元来模拟, 而自由段则采用一种三维杆单元。在锚索预应力施加的过程中, 采用的是等效应变法和等效降温法, 即前者是通过位移约束的方法加载, 使结构中产生与预应力加载相当的应变; 而后者是通过设置各向异性的温度应变系数, 在给定的温度变化下获得给定的应变, 从而产生想要达到的预应力加载效果。朱合华^[4]在总结了几种预应力施加方法的不

足之处后, 针对“锚固体表面的轴向力和剪应力的普遍规律是类似于指数分布”这一特点, 提出 1 种新的加载方法, 即作用在锚梁上的预应力用均布面荷载模拟, 在锚固体则用三角形的分布荷载模拟。

以上数值分析中, 对于预应力的处理基本相似, 即均在锚头、锚固端或承压板处施加与理论值相等的轴力或均布荷载, 或与该荷载效果相同的应变, 从而实现预应力的加载过程, 但却是在模拟预应力作用时均施加与理论分析相一致的预应力作用效果值, 这样一来, 虽然比较清晰地分析了岩体在压力分散型锚索锚固下的受力及变形特点, 其间承压板的作用却显得过于理想化。

本文针对上述特点, 利用有限差分软件 FLAC^{3D} 对压力分散型锚索作用效果进行了模拟分析。

2 数值模拟研究

2.1 模型中的主要单元

模拟采用 FLAC^{3D} 快速拉格朗日差分程序, 该程序可以模拟任意形状、任意特征的结构体与岩土体的相互作用以及力作用在结构体上或岩土体时结构体和岩土体的力学反应, 可以模拟梁、锚索、桩、壳体、土工格栅以及衬砌单元。

本文计算中应用的结构单元有 2 种: 锚索和壳单元。锚索单元: 为 2 节点的线单元, 只允许轴向变形, 1 个自由度, 只能承受拉力或压力, 而不能承受弯矩。壳单元: 为 3 节点的平面有限单元, 可以模拟没有屈服极限的线弹性材料, 必要时, 壳体单元要与周围的结构或实体单元严格结合起来, 这样当周围的单元产生变形时壳体单元内部会出现相应的应力, 可以对壳体的节点或平面加载, 这种单元适合模拟横截面变形可以忽略的薄板结构, 由于这种特点, 本文采用壳单元来模拟承压板。

砂浆和岩体均采用实体单元模拟, 对于砂浆体和岩体之间的接触面, 本文用 FLAC^{3D} 程序中接触面来模拟, 该接触面可以用来模拟可能会产生滑动和分离的不同性质单元之间的滑面。

2.2 模型尺寸

相关研究^[5]发现, 压力分散型锚索单锚的变形影响范围为 1.5~2 m, 锚索间距根据工程惯例一般取 4~6 m, 因此模型以锚索体为中心, 在垂直于锚索体的平面上向上下左右各取 2.5 m, 最终将岩体尺寸设为 5 m×21 m×5 m, 见图 1, 而锚固段长度由式 (1) 和式 (2) 的计算值中取大值。

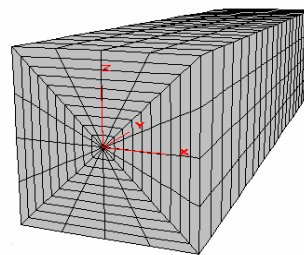


图 1 模型
Fig.1 The model



图 2 承压板实体
Fig.2 Entity of bearing plate

钢绞线与水泥浆胶结体粘着结合而不被拔出所需的锚固段长度按式 (1) 计算。

$$L = P / S\tau_a \quad (1)$$

式中: L 为要求的锚固段长度; P 为锚索设计拉力; S 为锚索的折算周长; τ_a 为钢绞线与水泥浆体的容许平均结合力, 由试验确定。

水泥浆体与岩石孔壁粘结而不被拔出所需的锚固段长度按式 (2) 计算。

$$L = P / \pi d \tau \quad (2)$$

式中: L 、 d 为锚固段孔径; τ 为水泥浆体与岩石孔壁的允许平均结合力, 需试验确定。

从理论分析和实测数据^[6]可知, 压力分散型锚杆摩阻应力分布较均匀, 峰值较小, 在较大荷载作用下, 粘结应力即砂浆与孔壁之的结合力传递长度在 3.5 m 以内, 国内其他有关资料^[7-8]也得出相同的结论。

本模型中取锚索总长为 20 m, 其中自由段长 12 m, 锚固段长 8 m。钻孔直径为 150 mm, 锚固段共设置了 3 个相互独立的承载体, 每个承载体钢板间隔均为 3 m, 根据如图 2 所示的承载体实际模型, 本模型中的钢绞线设置如图 3 所示, 其中编号为 1 的钢绞线和承载板 1 钢接, 其穿过承压板 2 和承压板 3 的部分与钢板无粘结。同样, 编号为 2 的钢绞线与承压板 2 钢接, 其穿过承压板 3 的部分与钢板无粘结, 编号为 3 的钢绞线与承压板 3 钢

接(图 1 模型内部中钢板从前至后编号依次为 1, 2, 3)。

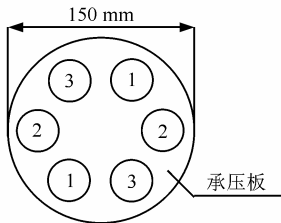


图 3 实体模型钢绞线布置图
Fig.3 Steel strand layout plan of entity model of bearing plate

为了对比压力分散型与拉力型锚索的作用效果, 本文另外建立了拉力型锚索的模型, 其唯一与以上压拉分散力型锚索模型的区别是整个模型采用一根锚索, 且无承压板, 其上施加的预应力是分散型锚索的总和为 900 kN, 其余参数及边界条件等均与压力分散型相同。

2.3 模型参数

为模拟上覆岩体的重力及围岩应力, 除锚头所在的岩体表面为自由面外, 其他各面均施加法向约束, 如图 4 所示, 图中 OA 为自由段; AB 为锚固段; O 点为坐标原点; X 轴垂直于纸面向外。

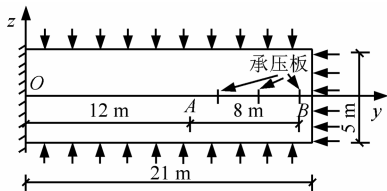


图 4 模型及边界条件
Fig.4 Boundary condition of entity model

具体计算时, 按式 (3) 和式 (4) 将弹性模型转换为剪切模量和体积模量:

$$G = \frac{E_0}{2(1 + \nu)}$$
(3)

$$K = \frac{E_0}{3(1 - 2\nu)}$$
(4)

式中: G 为剪切模量; K 为体积模量; ν 为泊松比; E_0 为弹性模量。

换算后模型各种基本材料参数见表 1, 按弹性介质来考虑, 其中承压板采用壳体单元模拟, 砂浆体与孔壁间的界面的法向刚度按式 (5) 确定, 整个过程采用 Mohr-Coulomb 破坏准则, 即刚度为

$$\max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right]$$
(5)

式中: $\Delta z_{\min}$ 为单元法向的最小宽度。

表 1 模型相关参数
Table 1 Parameters of the model

参数	材料			
	岩体	砂浆体	钢绞线	承压板
弹性模量 E_0 /kPa	3.12	2.81	19.5	21.0
泊松比 ν	0.3	0.175	0.28	0.28
体积模量 K /kPa	2.6	1.44	14.8	15.9
剪切模量 G /kPa	1.2	1.2	76.2	82.0
凝聚力 c /MPa	52.4	20		
内摩擦角 φ /(°)	19.0	32.5		
密度 γ /(g·cm ⁻³)	1.90	2.55	7.80	7.80

2.4 计算结果

对锚索施加 900 kN 的预应力, 建模先对 1 号钢绞线端头施加 1/3 的力, 即每根钢绞线施加 150 kN 的预应力, 而每个承压板上有 2 根钢绞线, 这样施加力的结果是: 与每个承压板连接的钢绞线上施加 300 kN。如前所述, 压力型锚索索体采用无粘结钢绞线, 通过孔底的承压板使锚索长拉力转化成为压力作用在水泥芯柱上。由于钢绞线是无粘结的, 锚索张拉后任一截面索体的轴向力是相等的, 基于这一前提条件, 现在只研究水泥芯柱受压应力在轴向分布规律和水泥芯柱与钻孔壁间剪应力分布规律。

岩体的剪切应力见图 5, 再将接触面剪应力图单独显示出来, 得到的云图如图 6 所示。由于此图 Y 轴方向相对于 Z 轴方向的尺寸过大, 只节选了锚固段部分。即水泥芯柱与钻孔壁间粘结应力云图, 图 7 为相应的剪应力值曲线。

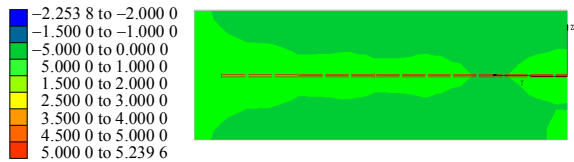


图 5 岩体剪切应力图 (单位: kPa)
Fig.5 Shearing strength of rock mass (unit: kPa)

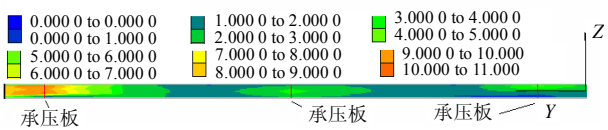


图 6 水泥芯柱与钻孔壁间剪应力云图 (单位: kPa)
Fig.6 Shearing strength nephogram between cement stem and drill hole wall (unit: kPa)

图 7 中横坐标方向上 2, 5, 8 点处分别为模型中的 3 个承压板位置。由于模型锚索轴向方向的尺寸相对较长, 特选取图 6 中第 2 块承压板位置处放大, 得到图 8。单独显示砂浆体单元的应力云图如图 9 所示, 即得水泥芯柱受压的主应力云图, 同样得到图 9 的第 2 块承压板位置处的局部放大图 10。

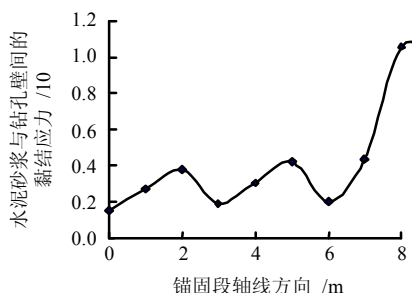


图 7 水泥芯柱与钻孔壁间剪应力沿锚固段轴线分布情况

Fig.7 Shearing strength distribution between cement stem and drill hole wall along anchor axes

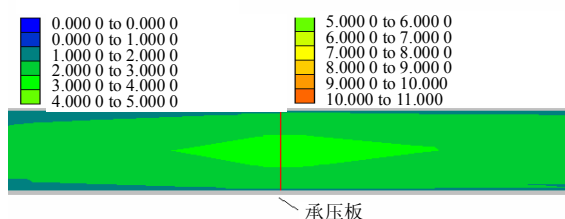


图 8 第 2 个承压板位置水泥砂浆与钻孔壁间剪应力局部放大图 (单位: kPa)

Fig.8 Drawing of partial enlargement between cement stem and drill hole wall in the second bearing plate (unit: kPa)

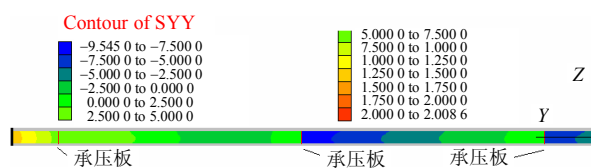


图 9 砂浆体主应力图 (单位: 10 kPa)

Fig.9 Drawing of principal stress of the mortar (unit: 10 kPa)

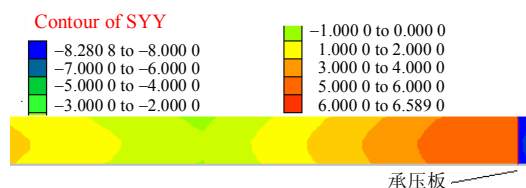


图 10 第 2 块承压板处砂浆体主应力 (单位: 10 kPa)

Fig.10 Drawing of principal stress of the mortar in the second bearing plate (unit: 10 kPa)

为了简单对比两种类型的锚索, 在相同的岩体条件和施加相同的预应力条件下拉力型锚索岩体剪应力分布如图 11 所示。

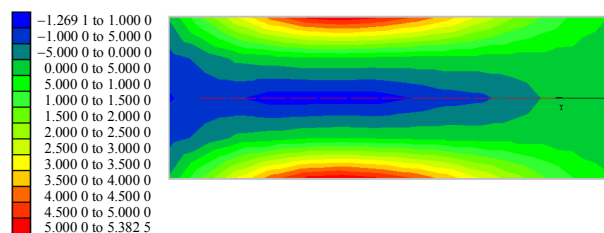


图 11 拉力集中型锚索岩体剪应力图 (单位: kPa)

Fig.11 Shearing strength of rock mass in prestressed anchor cable (unit: kPa)

2.5 结果分析

模拟结果分析如下:

(1) 由图 5 可见, 对锚索施加预应力增加了岩体内部应力, 离锚索锚固段距离较近的和远离锚固段的岩体剪应力方向相反, 相接触表面呈抛物线形。

(2) 由砂浆主应力云图可以看出, 压力分散型锚索锚固段浆体在每个相互独立的承压板近端为受压状态, 远端为受拉状态, 且每个承压板处砂浆的主应力峰值相差较小, 即整个锚固段砂浆的受力比较均匀。

(3) 从水泥芯柱与钻孔壁间剪应力沿锚固段轴线分布云图及相应的曲线可以看出: 锚固段剪应力在承压板处最大, 随着距离增大而逐渐减小, 这与文献[9]推导的理论公式计算值比较符合。从图 7 可以看出, 剪应力值较均匀地分布于整个锚固长度, 可以充分发挥整个锚固段浆体的抗剪作用。

(4) 因压力分散型锚索钢绞线采用全长无粘结, 计算结果显示锚索轴力全长相等, 且拉力型锚索的自由段轴力也相同, 这与文献[10]的试验结论相吻合。

(5) 对比图 5 与图 11, 从应力值的大小以及分布情况可以看出, 压力分散型锚索充分发挥了岩体的抗剪强度, 而拉力型锚索主要靠锚索承担大多数的应力。

3 结 论

本文采用 3 维显式有限差分方法, 在 FLAC^{3D} 程序中采用与以往不同的建模方法——表现在对承

压板处应力的处理并不是直接施加假设的均布力,而是通过结构单元模拟压力分散型锚索的承压板、锚索等主要构件,并结合具体施工步骤,建立了预应力锚固数值仿真模型,通过计算机模拟试验,给出了模型中岩体单元、砂浆体单元、岩体和砂浆体单元之间的接触面的应力云图,获得了压力分散型预应力锚索作用下岩体沿锚索轴向的应力、砂浆体与孔壁之间的粘结应力分布情况。结果表明,压力分散型锚索的砂浆体在锚固段上的轴力及砂浆体与锚孔壁之间的粘结应力分布比较均匀,2个应力图均在承压板处出现峰值。

通过对已有的试验结果和理论分析公式计算结果^[9-10]的比较,从多方面揭示了压力分散型锚索独特的荷载传递机制,即在外力作用下,由于这种锚索中每个单元都有自己的杆体和锚固段,张拉时分别承受相同的工作荷载;能将锚固荷载分散到内锚段砂浆体中,这样它能较均匀的将应力分布在整个锚固段上,因而能充分利用土体的抗剪强度及抗压强度大的优点,显著地提高锚索的承载力。

参考文献

- [1] 刑占清,杨健,杨晓东. 压力分散型无粘结预应力锚索作用机理及内锚固段长度研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, (6): 88—92.
XING Zhan-qing, YANG Jian, YANG Xiao-dong. Study on anchoring mechanism of distributed pressure-type unbonded prestressed cable and its length in inner-anchoring section[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2006, (6): 88—92.
- [2] 王树仁,何满潮,金永军. 拉力集中型与压力分散型预应力锚索锚固机理[J]. 北京科技大学学报, 2004, (7): 4 941—4 945.
WANG Shu-ren, HE Man-chao, JIN Yong-jun. Anchoring mechanism of prestressed anchor cables under concentrated tension and dispersive pressure[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2004, (7): 4 941—4 945.
- [3] 徐前卫,尤森安,朱合华. 预应力锚索的三维数值模拟及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (6): 278—282.
XU Qian-wei, YOU Chun-an, ZHU He-hua. Study of 3D numerical simulation of prestressed anchor cable and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, (6): 278—282.
- [4] 朱合华,郑国平,刘庭金. 预应力锚固支护的数值模拟[J]. 西部探矿工程, 2003, (6): 17—19.
ZHU He-hua, ZHENG Guo-ping, LIU Ting-jin. Numerical simulating of pre-stressed anchored structure[J]. **West-China Exploration Engineering**, 2003, (6): 17—19.
- [5] 李国正. 压力(分散)型锚索锚固作用的现场试验及数值模拟[硕士学位论文D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [6] 金永军,何满潮,王树仁,等. 适用于软岩边坡加固的压力分散型预应力锚索锚固机理研究[J]. 土木工程学报, 2006, (4): 63—67.
JIN Yong-jun, HE Man-chao, WANG Shu-ren, et al. Study on the anchoring mechanism of pre-stressed anchor cable with dispersive pressure suitable for soft-rock slope reinforcing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, (4): 63—67.
- [7] 孙学毅. 压力分散型和拉压分散型锚索若干问题讨论[J]. 预应力技术, 2006, (3): 20—21.
SUN Xue-yi. The discuss on compression dispersion and prestress dispersion-type cable[J]. **Prestress Technology**, 2006, (3): 20—21.
- [8] 曹兴松,周德培. 压力分散型锚索锚固段的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2005, (9): 1 033—1 036.
CAO Xing-song, ZHOU De-pe. Design method of fixed anchor unit for compression dispersion-type anchor [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, (9): 1 033—1 036.
- [9] 尤春安. 压力型锚索锚固段的受力分析[J]. 岩土工程学报, 2004, (6): 828—831.
YOU Chun-an. Mechanical analysis on anchorage segment of pressure-type cable[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, (6): 828—831.
- [10] 刘致彬,孙志恒,孙金刚. 岩锚新的锚固方式及锚固体系的研究[J]. 水力发电, 1997, (3): 48—52.
LIU Zhi-bin, SUN Zhi-heng, SUN Jin-gang. Study of anchoring type and anchorage system of rock bolt[J]. **Water Power**, 1997, (3): 48—52.