

隧道围岩中注浆锚杆的应力分布及影响因素研究

赵立财^{1,2}

(1. 中铁十九局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136; 2. 台湾科技大学 营建工程系, 台湾 台北 10607)

摘要: 为深入研究注浆锚固应力分布变化规律,以圆形隧道开挖为例,将注浆锚杆与周围浆体视作锚固体,分析锚固体受力特征,推导锚固体轴应力和剪应力表达式。通过理论分析和数值模拟对比证明理论解析的合理性,并分析不同影响因素下锚固体应力分布的变化规律,通过数值模拟与理论对比分析验证解析方法的可行性。锚固体两端轴应力均接近0,且在中性点处轴应力最大;锚杆直径越小,中性点越靠近隧洞中心;锚杆长度 L 对应力分布的影响最大,锚固体直径 d_s 、围岩内聚力 c 和初期支护施作时距掌子面的距离 X_1 对应力分布的影响次之。

关键词: 隧道围岩;注浆锚杆;锚固体;中性点;应力分布

中图分类号: U416

文献标识码: A

Study on Stress Distribution and Influencing Factors of Grouting Anchor in Tunnel Surrounding Rock

ZHAO Licai^{1,2}

(1. China Railway 19th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd, Shenyang, Liaoning 110136, China; 2. Department of Civil and Construction Engineering, Taiwan University of Science and Technology, Taipei 10607, China)

Abstract: In order to deeply study the variation of stress distribution of grouting anchor, taking the excavation of circular tunnel as an example, the grouting anchor and surrounding slurry are regarded as anchor solids, the stress characteristics of anchor solids are analyzed, and the expressions of axial stress and shear stress of anchor solids are derived. The rationality of theoretical analysis is proved by theoretical analysis and numerical simulation, and the variation of stress distribution of anchor solids under different influencing factors is analyzed. The feasibility of the analytical method is verified by numerical simulation and theoretical analysis. The axial stress at both ends of the anchor is close to 0, and the axial stress at the neutral point is the largest; The smaller the bolt diameter is, the closer the neutral point is to the center of the tunnel; The length L of anchor has the greatest influence on the stress distribution, and the diameter d_s of anchor, the cohesion c of surrounding rock and the distance X_1 from the working face during the initial support construction have the second influence on the stress distribution.

Key words: tunnel surrounding rock; grouting anchor; anchor solid; neutral point; stress distribution

隧道开挖过程中,岩土体中结构发生变化,原有应力平衡状态遭到破坏,当新应力场中压应力超过岩土体承压强度,开挖洞室周围产生塑性变形区^[1-2]。隧道围岩压力过大还会产生大变形、岩爆等灾害。隧道支护中,注浆锚杆使用广泛,具有显著的经济和社会效应^[3-4]。目前对于注浆锚杆的应用推广已有大量研究成果,但多是采用经验

法和半经验法,尤其是设计过程中未弄清注浆锚杆的锚固机理^[5-6]。由此,本文将注浆锚杆与周围浆体视作锚固体,分析锚固体受力特征,推导锚固体轴应力和剪应力表达式,通过理论分析和数值模拟对比证明本文理论解析的合理性,并分析不同影响因素下锚固体应力分布的变化规律。研究成果为注浆锚杆应力分布规律研究及隧道支护提

收稿日期:2021-04-15

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146);国家自然科学基金资助项目(51879189)

作者简介:赵立财(1985-),男,辽宁盖州人,博士研究生,高级工程师,主要从事地下工程围岩稳定性与灾害防控技术研究。

供一定参考。

1 锚固体应力分布理论解析

隧道施工过程中,锚杆注浆周围形成浆体,可近似看成锚杆外边缘裹了一层混凝土,则可将锚杆与浆体组成复合加固体,即成为“锚固体”。由于锚杆为中空锚杆,故锚固体的材料由锚杆内部浆体、锚杆及锚杆外围覆盖浆体组成,锚固体受力特征图如图 1 所示,“锚固体界面”表示灌浆材料与岩石之间的界面。

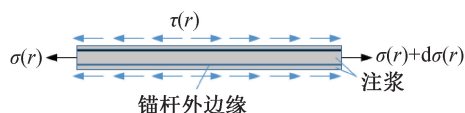


图 1 锚固体受力特征图

Fig. 1 Stress characteristic diagram of anchor

根据锚固体的结构特点,令锚固体的等效弹性模量 E_e 为

$$E_e = \frac{E_a A_a + E_b A_b + E_c A_c}{A_a + A_b + A_c} \quad (1)$$

式中: E_a 、 E_b 分别为锚杆和浆体的弹性模量; A_a 、 A_b 、 A_c 分别为锚杆内部、锚杆外部覆盖层以及锚杆的横截面积。

根据图 1 中锚固体受力特征,锚固体单元受力平衡条件有

$$Ad\sigma(r) = q(r) Ddr \quad (2)$$

式中: $\sigma(r)$ 为锚固体单元轴应力, $q(r)$ 为锚固体单位长度摩阻力, A 、 D 分别为锚固体的截面面积与周长, r 为锚固体任意点到洞室中心距离。

锚固体的本构公式有^[7]

$$\sigma(r) = E_e \frac{du(r)}{dr} \quad (3)$$

式中: $u(r)$ 为锚固体轴线上的径向位移, E_e 为锚固体等效弹性模量。

将式(3)代入式(2)可得

$$\frac{d^2 u(r)}{dr^2} = \frac{q(r) D}{A_e E_e} \quad (4)$$

式中: A_e 为锚固体等效横截面积。

以锚固体任意微元段为研究对象,某段所受摩阻力与该段杆体及其周围岩体之间的相对位移呈正比,则有

$$q(r) = K_l [u(r) - u(m)] \quad (5)$$

式中: K_l 为锚固体剪切刚度, m 代表锚固体中性点, $u(m)$ 为锚固体中性点的径向位移。

将式(5)代入式(4)可得

$$\frac{d^2 u(r)}{dr^2} = \frac{K_l D}{A_e E_e} [u(r) - u(m)] \quad (6)$$

锚固体任意界面上轴向拉力有

$$N(r) = A\sigma(r) \quad (7)$$

式中: $N(r)$ 为锚固体任意界面上轴向拉力。

联立式(2)、(6)和(7)有

$$N(r) = \int K_l D [u(r) - u(m)] dr \quad (8)$$

由岩体力学理论^[8]可知,任意锚固体界面周围岩体的径向位移为

$$u(r) = \frac{1 + \mu}{E} (R_p)^2 [(p_0 - p_c) \sin \varphi + c \cos \varphi] \frac{1}{r} \quad (9)$$

式中: R_p 为塑性区半径, p_0 和 p_c 分别为地应力和支护应力, c 和 φ 分别为围岩的内聚力和内摩擦角, μ 为围岩泊松比, E 为围岩弹性模量。

由式(9)可看出,围岩径向变形沿深度呈非线性变化,且洞壁围岩变形量最大。将式(9)代入式(8)求解可得

$$N(r) = \frac{1 + \mu}{E} (R_p)^2 [(p_0 - p_c) \sin \varphi + c \cos \varphi] K_l \left(\ln r - \frac{r}{r_m} \right) + b \quad (10)$$

式中: r_m 为锚固体中性点到洞室中心距离, b 为常数。

锚固体一般在洞壁添加垫板、螺栓固定,即施加预紧力 F_1 ,则边界容许范围为

$$P(r) |_{r=r_0} = F_1 / A_e \quad (11)$$

式中: r_0 为洞室半径。

将式(11)代入式(10)可得

$$b = F_1 - \frac{1 + \mu}{E} (R_p)^2 [(p_0 - p_c) \sin \varphi + c \cos \varphi] K_l \left(\ln r - \frac{r}{r_m} \right) \quad (12)$$

再联立式(5)和式(9)可得摩阻力

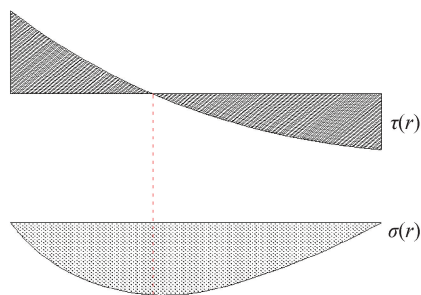
$$q(r) = BK_l \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_m} \right) \quad (13)$$

锚固体内力图如图 2 所示,图中 $\tau(r)$ 和 $\sigma(r)$ 为剪应力和轴应力,虚线表示中性点。

由图 2 可知,锚固体中性点处轴应力连续,则中性点两侧微小单元轴应力相等,于是有

$$\int_{r_0}^{r_m} [u(r) - u(m)] dr = \int_{r_m}^{r_0+L} [u(r) - u(m)] dr \quad (14)$$

式中: L 为锚杆长度。

图2 锚固体内力图^[9]Fig. 2 Internal force diagram of anchor^[9]

联立式(9)、(13)和(14)可得锚固体中性点到洞室中心距离 r_m 为

$$r_m = \frac{L}{\ln(r_0 + L) - \ln r_0} \quad (15)$$

再结合式(10)和(15)可得轴应力表达式

$$\sigma(r) = \left[\frac{B}{E} K_t \left(\ln \frac{r}{r_0} - \frac{r}{r_m} + \frac{r_0}{r_m} \right) + F_1 \right] / A_e \quad (16)$$

式中: B 为待定系数。

锚固体在中性点处轴应力达到最大值,于是有

$$\sigma(r)_{\max} = \frac{B}{E} K_t \left(\ln \frac{r_m}{r_0} + \frac{r_0}{r_m} - 1 \right) \quad (17)$$

一般地,锚固体剪应力计算公式如下^[10]

$$\tau(r) = \frac{q(r)}{\pi d_s} \quad (18)$$

式中: $\tau(r)$ 为剪应力, d_s 为锚固体直径。

再将式(13)代入式(18)可得本文锚固体剪应力为

$$\tau(r) = \frac{B}{\pi d_s} K_t \left(\frac{1}{r_m} - \frac{1}{r} \right) \quad (19)$$

式(16)和(19)分别为本文锚固体轴应力和剪应力表达式。

2 注浆锚杆锚固体应力分析

2.1 模型建立

本文研究背景为沈阳至白河高铁工程新宾隧道,隧道进口里程为 DK123+425,出口里程为 DK133+600,中心里程为 DK128+512.5,全长 10 175 m。依据新建沈阳至白河高铁工程新宾隧道工程地质勘察报告,选取新宾隧道 IV 级围岩作为分析对象,IV 级弱风化砂岩为全断面开挖方式,具体力学参数如表 1 所列。采用 ABAQUS 有限元软件对深埋隧道施工过程进行三维模拟,以隧道

断面为原型,同时为了减小应力边界的影响,上下左右边界选取三倍以上隧道跨度,模型尺寸(长×宽×高)为 100 m×45 m×100 m,将模型左、右、下设置固定约束,上边界为自由面。采用的基本塑性准则为 M-C 准则,单元类型为 C3D8,网格先布置全局种子再布置局部种子,沿边界向洞心由疏变密,网格以四边形为主,三维仿真模型如图 3 所示。

表 1 隧道力学参数取值表

Tab. 1 Table of tunnel parameter values

项目	参数具体值
隧道半径 r_0 /m	6
埋深/m	150
地应力 p_0 /MPa	3
开挖速度/(m·d ⁻¹)	3
支护时距离掌子面的时间 t_0 /d	2
围岩	
重度 γ /(kN·m ⁻³)	22
弹性模量 E /GPa	3.28
泊松比 μ	0.3
内聚力 c /MPa	35
内摩擦角 φ /(°)	30
锚固体	
长度 L /m	3
直径 d_s /m	0.034
剪切刚度 K_t /(N·m ⁻¹)	4×10 ⁶
预紧力 F_1 /kN	50
间距/m	1.0
排距/m	1.0
喷射混凝土	
弹性模量 E_1 /MPa	25
泊松比 μ_1	0.2
喷射混凝土内径/m	5.76
钢拱架	
型号	I120
间距/m	1

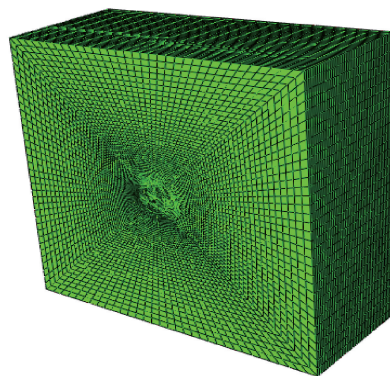


图3 隧道三维模型

Fig. 3 Three dimensional model of tunnel

2.2 模型计算

隧道开挖后的应力云图如图 4 所示。

由图 4 可看出,隧道开挖后拱顶变形最大,故以拱顶位置分析锚固体应力分布,取隧道模型中

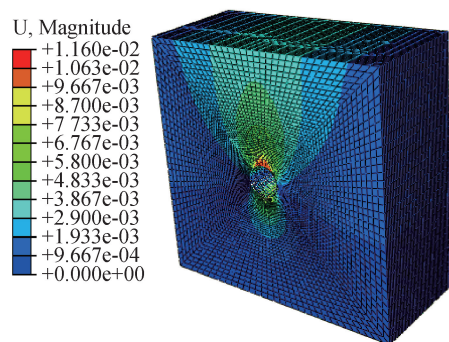


图4 隧道开挖后位移云图

Fig. 4 Displacement nephogram after tunnel excavation

间位置断面为监测断面,并将数值模拟方法得到的锚固体应力与理论分析进行对比,以验证理论方法的可行性,分别得到锚固体的轴应力和剪应力的数值模拟和理论分析对比结果,如图5所示。

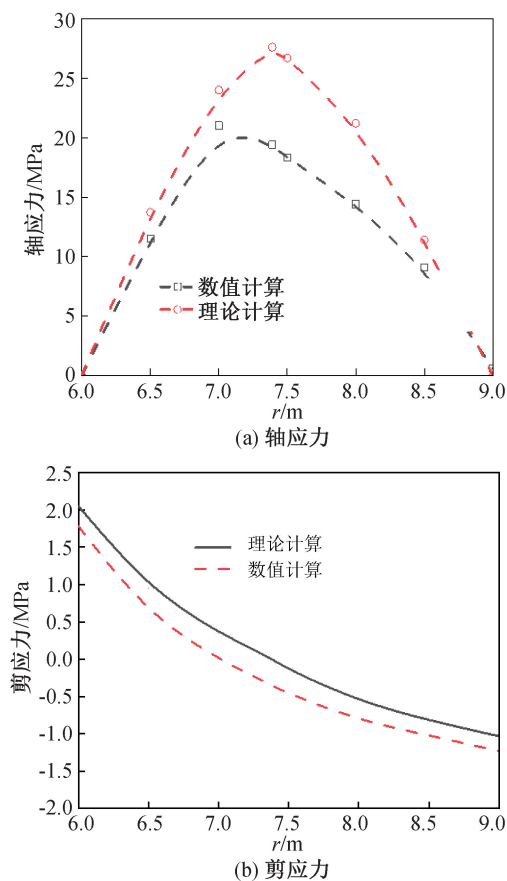


图5 锚固体应力分布曲线

Fig. 5 Stress distribution curves of anchor solid

由图5(a)可看出,理论计算得到锚固体中性点到洞室中心距离 r_m 为7.39 m,数值计算得到 r_m 为7.20 m,两者相差不大。数值计算与理论计算的轴应力均在中性点处达到最大值,锚固体两端轴应力均为0,变化趋势一致。数值计算与理论计算的最大轴应力分别为21.0和27.6 MPa,后者较前者的

数据误差为23.9%,越接近锚固体中性点轴应力误差越大,越接近锚固体两端轴应力误差越小。

由图5(b)可看出,数值计算与理论计算得到的剪应力均随径向半径的增加而逐渐减小,变化趋势一致。理论计算得到的剪应力大于数值计算,数值计算与理论计算得到的最大剪应力分别为2.05和1.78 MPa,后者较前者的数据误差为13.1%,数值计算与理论计算剪应力的误差沿锚固体较为均匀,误差范围为13.1%~15.7%。

综上所述,数值计算与理论计算得到的锚固体应力趋势基本一致,误差在可控范围之内,这也验证了本文理论分析的可行性。

2.3 锚固体应力的影响因素分析

为研究锚固体应力的影响因素,选取不同的锚杆长度 L 、锚固体直径 d_s 、围岩内聚力 c 和初期支护施作时距掌子面的距离 X_1 进行数值计算,如图6—图9所示。

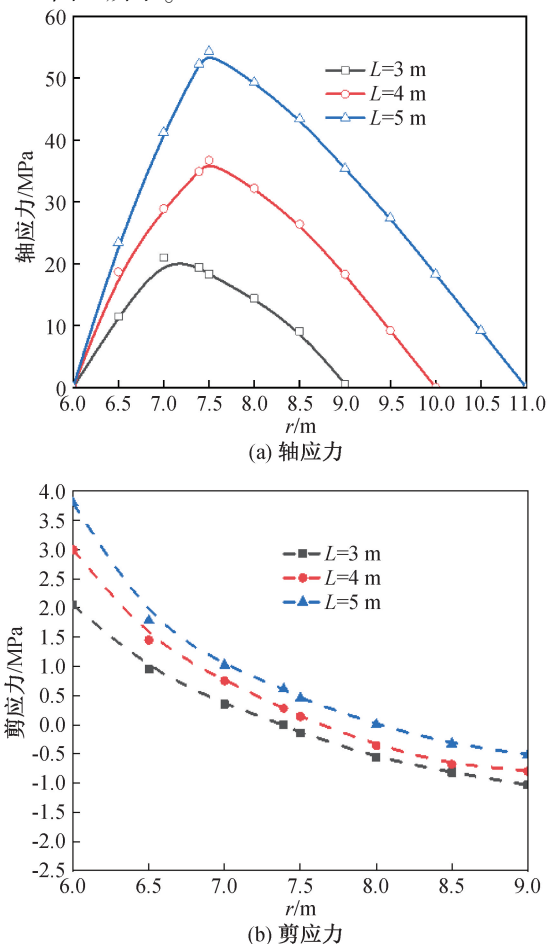


图6 不同锚固体长度下的应力分布

Fig. 6 Stress distribution of different anchor length

由图6(a)可看出,三种锚杆长度 L 取值下的轴应力均在中性点取得最大值,锚杆长度 L 越小,

中性点越靠近隧洞中心。锚固体长度每增加 1 m, 最大轴应力增加约 20 MPa。

由图 6(b) 可看出, 三种锚杆长度 L 取值下的剪应力走势一致, r 越小, 剪应力越大。锚固体长度每增加 1 m, 剪应力增加 0.5~1.0 MPa。

综合图 6 可看出, L 越大, 锚固体的轴应力和剪应力越大, 且最大轴应力总体增幅较大, 而剪应力增幅相对较小, 由此看出锚固体长度对轴应力的影响明显大于剪应力。

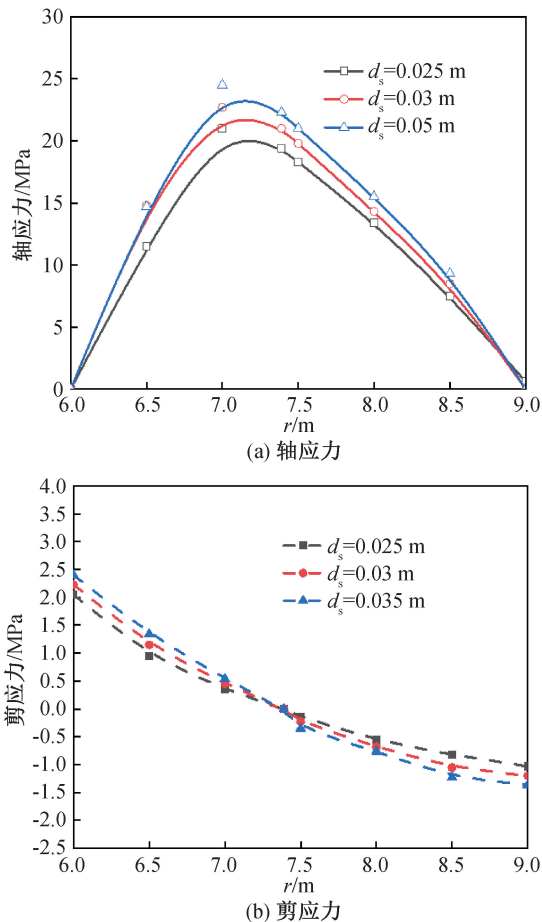


图 7 不同锚固体直径下的应力分布

Fig. 7 Stress distribution of different anchor diameter

由图 7 可看出, 锚固体直径每增加 5 mm, 最大轴应力增加约 2.5 MPa, 剪应力增加在 0.1 MPa 至 0.2 MPa 之间。锚固体直径越大, 锚固体的轴应力和剪应力越大, 且最大轴应力总体增幅较小, 中性点靠近洞中心的一段剪应力越大, 而远离洞中心的一段剪应力越小。

由图 8 可看出, 随着锚固体内聚力的增大, 锚固体的轴应力随着增大, 中性点靠近洞中心的一段剪应力越大, 而远离洞中心的一段剪应力越小。锚固体内聚力每增加 10 MPa, 最大轴应力增加约 3 MPa。

从图 9 可看出, 锚固体施作距离掌子面距离每

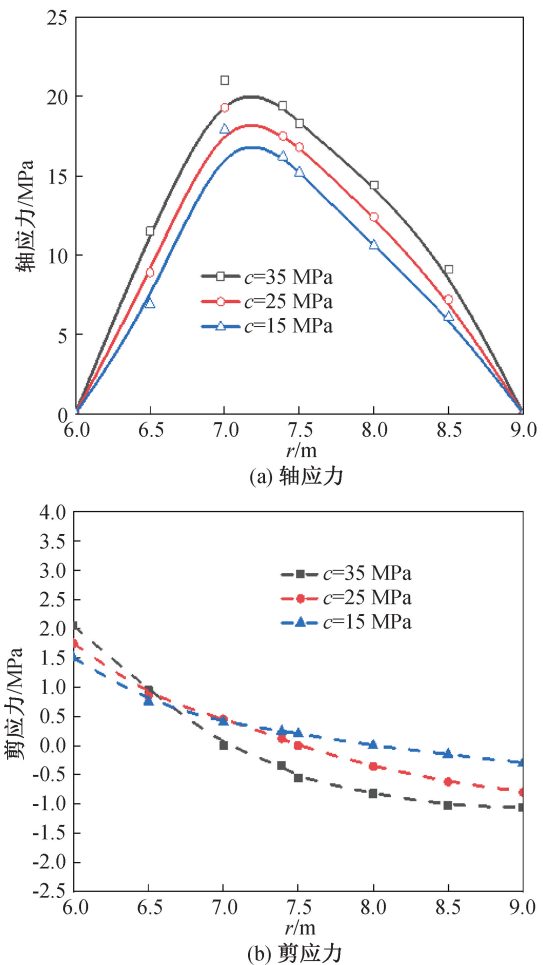


图 8 不同围岩内聚力下的锚固体应力分布

Fig. 8 Stress distribution of anchor under different cohesion of surrounding rock

增加 3 m, 最大轴应力增加约 3 MPa, 剪应力增加 0.25 MPa。支护时机对锚固体应力影响规律与围岩内聚力及锚固体直径对锚固体应力影响规律类似, 支护施作越早, 锚固体轴应力越大。

综合分析图 6—图 9, 锚固体两端轴应力均接近 0, 且在中性点处轴应力最大。锚杆直径越小, 中性点越靠近隧洞中心。锚杆长度 L 对应力分布的影响最大, 锚固体直径 d_s 、围岩内聚力 c 和初期支护施作时距掌子面的距离 X_1 对应力分布的影响次之。隧道设计和施工时, 应合理考虑锚杆长度及其它要素, 根据围岩条件科学选择支护时机, 以免造成注浆锚杆屈服。

3 结论

1) 本文以注浆锚杆为研究对象, 将锚杆内部浆体、锚杆与锚杆外围覆盖浆体组成的复合体视为“锚固体”, 根据锚固体结构特点和受力特征, 结

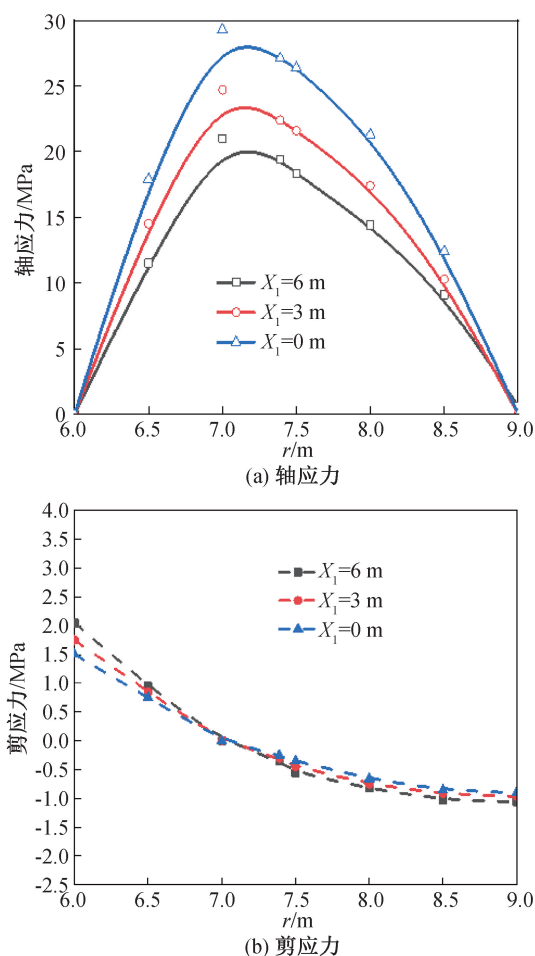


图9 不同 X_1 值的锚固体应力分布

Fig.9 Stress distribution of anchor solid with different X_1 values

合岩体力学理论,得到一种新的锚固体应力分布理论解析方法。

2)构建隧道三维数值模型,通过数值模拟与理论分析对比研究锚固体应力分布规律,两种方式计算得到的锚固体应力趋势基本一致,误差在

可控范围之内,验证了本文锚固体应力分布理论解析方法的可行性。

3)锚杆长度 L 对应力分布的影响最大,锚固体直径 d_s 、围岩内聚力 c 和初期支护施作时距掌子面的距离 X_1 对应力分布的影响次之。隧道设计和施工时,应合理考虑锚杆长度及其它要素,根据围岩条件科学选择支护时机,最大程度发挥注浆锚杆的锚固性能。

参考文献:

- [1] 邵伟. 地铁隧道围岩稳定性分析与锚注支护研究[D]. 青岛:山东科技大学,2008.
- [2] 蒋庆,范宏运,李涛,等. 超大断面小净距隧道应力场演化研究[J]. 中外公路,2021,41(1):197-202.
- [3] 肖旺. 考虑峰后特性的隧道围岩锚杆支护力学机制[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [4] 汪珂. 深埋隧道岩爆预测及防治技术现状综述[J]. 隧道建设:中英文,2021,41(2):212-224.
- [5] 朱训国,杨庆,栾茂田. 全长注浆锚杆的解析本构模型研究[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 2006.
- [6] 宋洋,王贺平,常泳涛,等. 含贯通节理岩体锚固界面应力分布规律分析[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(3):387-394.
- [7] 张培胜. 岩土锚杆的锚固力学特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.
- [8] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [9] 王军,罗章. 受锚岩石的力学特性与时效承载稳定性分析[M]. 北京:化学工业出版社,2020.
- [10] 龙景奎. 深部巷道围岩协同锚固机理研究与应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.

(责任编辑 王利君)

(上接第6页)

- [2] 汪良强,符海龙. 机制砂在干混砂浆中的应用和发展趋势[J]. 工程技术研究,2020,5(06):143-144.
- [3] 王稷良. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.
- [4] TAO W H, LIU C, FU X H, et al. The Performance of Cement-Based Self-Leveling Mortars Affected by Mineral Admixtures[J]. Applied Mechanics and Materials,2015,740:19-22.
- [5] 廖国胜,徐路,廖宜顺. 硅灰对硫铝酸盐水泥水化行为的影响机理[J]. 建筑材料学报,2017,20(06):840-845.
- [6] 姜博,赵壮,刘刚. 硅灰/粉煤灰复掺对水泥砂浆强度

的影响[J]. 北方建筑,2017,2(03):38-41.

- [7] 姚武,吴梦雪,魏永起. 三元复合胶凝体系中硅灰和粉煤灰反应程度的确定[J]. 材料研究学报,2014,28(03):197-203.
- [8] 郑娟荣,卢晓玉. 全机制砂水泥基自流平干混砂浆的试验研究[J]. 混凝土,2016(04):107-109+114.
- [9] 张建隽,靳秀芝. 自流平砂浆流动性的影响因素研究[J]. 中北大学学报:自然科学版,2014,35(05):620-624.
- [10] 李东旭,陈益民,沈锦林,等. 碱对粉煤灰的活化和微观结构的影响[J]. 材料科学与工程,2000(01):52-54+59.

(责任编辑 王利君)