

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.020

受拉延展型装配式中空注浆锚杆结构 设计及数值分析

黄金坤^{1,2}, 金仁才¹, 段涛¹, 张鹏³, 程安春¹, 赵国辉¹, 姜平伟^{1,4}, 刘瑛⁵

(1. 中国十七冶集团有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
3. 安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 4. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;
5. 皖江工学院 艺术设计学院, 安徽 马鞍山 243001)

摘要: 针对工程中地下水浮力引发的抗浮问题, 提出一种受拉延展型装配式中空注浆锚杆, 该锚杆采用可伸缩节段式结构, 兼具高抗拉强度与延展变形能力, 以提升抗浮性能与地基稳定性。基于正交试验构建拉拔试验方案, 结合有限元数值模拟, 系统研究了注浆孔结构参数(环向孔数、轴向间距、孔径、相邻偏角)与伸缩节布置参数(组数、首端距离、末端距离、相邻间距)对锚杆力学性能的影响规律。结果表明: 当锚杆环向设置4个注浆孔、轴向间距为1000 mm、孔径为6 mm、相邻孔偏角为45°时, 结构承载性能最优; 伸缩节以2组形式布置, 首端与末端距离均为1000 mm, 相邻间距为1000 mm时, 可获得最佳延展效果。通过回归分析建立了关键设计参数的关系模型, 研究成果可为装配式抗浮锚杆的优化设计提供理论依据与参数参考。

关键词: 中空注浆锚杆; 抗浮性能; 结构参数优化; 正交试验; 装配式

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0139-07

Structural Design and Numerical Analysis of a Tensile-extensible Prefabricated Hollow Grouting Anchor Rod

HUANG Jinkun^{1,2}, JIN Rencai¹, DUAN Tao¹, ZHANG Peng³, CHENG Anchun¹, ZHAO Guohui¹,
JIANG Pingwei^{1,4}, LIU Ying⁵

(1. China MCC17 Group Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui 243000, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China;

4. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

5. School of Art and Design, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243001, China)

Abstract: To address anti-uplift problems induced by groundwater buoyancy in engineering practice, a tensile ductile prefabricated hollow grouted anchor is proposed. The anchor adopts a telescopic segmented structure, combining high tensile strength with enhanced ductile deformation capacity, thereby improving anti-uplift performance and foundation stability. Based on an orthogonal experimental design, pull-out tests were conducted in conjunction with finite element numerical simulations to systematically investigate the effects of grouting-hole structural parameters (number of circumferential holes, axial spacing, hole diameter, and angular offset between adjacent holes) and telescopic-segment layout parameters (number of groups, distance from the front end, distance from the rear end, and spacing between adjacent groups) on the mechanical behavior of the anchor. The results indicate that optimal load-bearing performance is achieved when the anchor is configured with four circumferential grouting holes, an axial spacing of 1000 mm, a hole di-

收稿日期: 2025-11-26

修稿日期: 2026-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52409135); 安徽省重点研究与开发计划项目(2023j07020018); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2024-YF094)

作者简介: 黄金坤(1992—), 博士, 高级工程师, 主要从事地下结构工程等方面工作。E-mail: jkunhuang@163.com

iameter of 6 mm, and an angular offset of 45° between adjacent holes. The best ductile performance is obtained with two groups of telescopic segments, with both the front-end and rear-end distances set to 1000 mm and an inter-group spacing of 1000 mm. Furthermore, regression analysis was performed to establish relational models among key design parameters. The findings could provide a theoretical basis and practical parameter references for the optimized design of prefabricated anti-uplift anchors.

Keywords: hollow grouted anchor; anti-uplift performance; structural parameter optimization; orthogonal experiment; prefabricated system

随着中国经济的快速发展,建筑工程开始转入到地下空间的开发^[1-2]。然而,当地下水位较高而建筑物重量不足时,建筑物会受到地下水浮力的作用而导致破坏^[3]。目前工程上通常采用压重抗浮法、结构抗浮法和锚固抗浮法等方案来平衡水浮力,其中锚固抗浮法以其施工方便、成本低廉、不影响建筑功能和后期维护简单等优点得到了广泛的应用^[4-6]。抗浮锚杆是一种埋入岩土体深处的受拉杆件,通过高压注浆固定在基础以下岩土中,注入的水泥浆料在钢筋-灌浆界面处提供抗剪性,以及为钢筋提供一些侵蚀保护,以此抵抗地下水的浮力作用^[7-8]。

针对锚固抗浮,国内外已有专家学者进行了相关研究,白晓宇等^[9]研究了锚固长度、杆体直径对玄武岩纤维增强聚合物(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)抗浮锚杆抗拔承载力的影响,并探究了抗浮锚杆杆体轴力与剪应力随锚固深度的分布规律,随着锚固长度及杆体直径的增加,其极限抗拔承载力略有增加;BFRP抗浮锚杆轴向力最大值在孔口开口处,且随着锚固深度增加而加速降低,而剪应力先沿锚固深度迅速增加,在锚固深度 0.75 m 附近达到峰值后逐渐减小,且剪应力峰值随荷载水平的增加而增大。张晨等^[10]设计了一种扩底抗浮锚杆,并研究了承载特性及载荷传递机理,该结构在软土地基中扩孔效果良好,其承载性能显著优于普通锚杆,扩底抗浮锚杆的荷载传递表现为从顶部到端部逐渐减小,抗拔工作过程是由侧阻力逐步转变为侧阻力和端阻力共同承担,最终发展为端阻力独立承担的过程。Wang 等^[11]对不同锚固长度和不同锚固形式的(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)抗浮锚杆进行了现场拉拔破坏性试验,发现直线型锚杆和弯曲型锚杆的损坏主要是滑动造成的,并提出了一种更合理的锚固长度计算方法。Liu 等^[12]介绍了一种由套管、承压板和拉力型锚杆组合而成的拉压分散型复合锚杆,并将其与传统拉力型锚杆进行了比较测试,发现在等效锚固长度下,其极限承载能

力是传统拉力型锚杆的 1.44 倍。Zhu 等^[13]提出了一种用于预应力抗浮锚杆的新型(Ultra-high-performance Concrete, UHPC)预应力传递装置,并研究了 4 种不同类型的装置在预应力期间的轴向压缩性能,发现在轴向载荷作用下,所有类型的 UHPC 转移装置试件的破坏模式基本一致。

基于现有扩大头锚杆的研究,本文首次设计了一种受拉延展型装配式中空注浆锚杆,该锚杆采用模块化装配式中空结构和可伸缩节设计,相比传统整体式锚杆,不仅实现了快速装配施工和可控延展变形,还通过优化布置的周向注浆孔实现了水泥浆体的三维均匀扩散,从而显著提升了抗浮性能和地基适应性。通过数值计算和正交试验,系统研究了其力学性能优化规律,可为相关工程提供参考。

1 受拉延展型装配式中空注浆锚杆总体方案设计

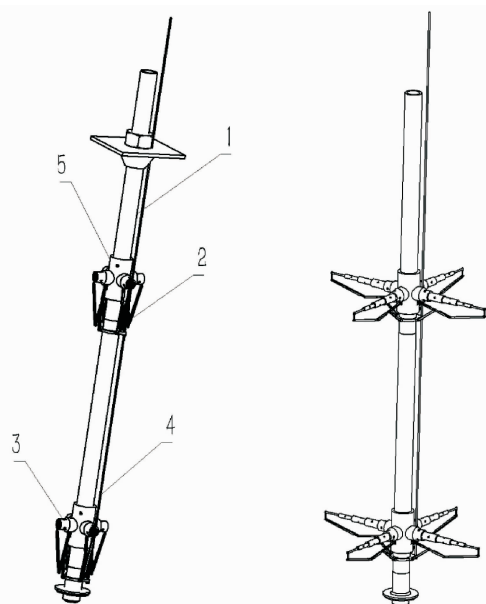
1.1 锚杆零件及配合方式

受拉延展型装配式中空注浆锚杆由锚杆主体、伸缩装置、触发装置组成,其结构如图 1 所示。锚杆主体可结合实际工况由不同数量的锚杆节组合成对应长度的锚杆,最后在尾端通过螺纹配合锚杆头。伸缩装置由多个伸缩节嵌套组成,伸缩节与锚杆节上孔同轴心通过紧定螺钉固定,最外层伸缩节通过螺纹与外套筒相配合,外套筒又通过螺纹与锚杆主体相配合。最内层伸缩头通过连接杆与连杆杆组相连接。触发装置由拉绳和拉盘组合而成,伸缩节与拉盘通过销钉配合,拉绳与拉盘孔间通过打结绑定。

1.2 锚杆施工方法及效果

该锚杆的施工首先定位好注浆土体,以及其支护坡面上锚杆钻孔的位置;移动钻机到指定位置并进行钻孔;当钻机钻孔到达指定深度时,使用高压水枪在目标深度进行扩孔。根据实际需求形成不同扩孔段,并进行清孔工作;结合实际需求将适当长度的装配式可伸缩中空注浆锚杆组装完毕;将注浆锚杆置于锚杆钻孔指定位置并使用注浆管与注浆泵相

连;拉动拉绳,拉盘推动连杆水平向四周伸张,在连接杆的驱动下,各伸缩节自内向外依次展开,直至伸缩节完全展开;注浆泵车通过注浆管对锚杆内部注浆,最终形成注浆固结段。



(a) 锚杆收缩时结构示意图 (b) 锚杆伸张时结构示意图

1. 锚杆主体 2. 连杆杆组 3. 伸缩节 4. 拉绳 5. 外套筒

图 1 受拉延展型装配式中空注浆锚杆结构示意图

相比于常规锚杆或扩大头抗浮锚杆,其地下向四周伸展的伸缩节可以更显著地扩大锚杆的固结区域^[13]。向四周伸展的伸缩节让锚杆在受力时载荷分布更均匀,可以增强其抗拉性能。与此同时更大的固结区域可以对地下水的上浮起到更好的阻挡、截断效果,加强了其抵抗地下水浮力的作用。

2 结构设计及数值计算

2.1 锚杆杆体的结构与数值计算

锚杆承载力的大小与锚固体的失效形式有关,主要包括锚杆体断裂、锚杆体与灌浆体产生滑脱、岩土体与灌浆体界面滑脱和岩土体破坏四种形式,合理的锚杆结构可以加强其锚固性能^[14-15]。为探索锚杆杆体的最佳结构,结合影响其结构的四个因素设计正交试验。

正交试验可以同时研究多因子多水平,以较少的试验次数找到最优水平组合,实现高效率的数据分析^[16]。按照《建筑基坑支护结构构造》(11SG814)进行锚杆强度影响因素设计,确定孔数量、孔距、侧孔孔径及孔偏角的参数选择。随后参照

文献[17]中 $L_9(3^4)$ 正交试验表设计表 1 所示正交试验方案。设置周向注浆孔数量、轴向注浆孔距离、注浆孔孔径及相邻注浆孔之间的偏角(下面简称孔数、孔距、孔径及孔偏角)四个因素 A、B、C、D,每个因素设定三个水平。

表 1 锚杆杆体正交试验方案

试验组别	因素 A (孔数)		因素 B (孔距)		因素 C (孔径)		因素 D (孔偏角)	
	水平	/个	水平	/mm	水平	/mm	水平	/($^{\circ}$)
1	1	2	1	500	1	5	1	0
2	1	2	2	750	2	6	2	30
3	1	2	3	1000	3	8	3	45
4	2	3	1	500	2	6	3	45
5	2	3	2	750	3	8	1	0
6	2	3	3	1000	1	5	2	30
7	3	4	1	500	3	8	2	30
8	3	4	2	750	1	5	3	45
9	3	4	3	1000	2	6	1	0

使用建模软件对锚杆杆体数值计算模型进行结构设计,并采用 ABAQUS 软件对模型进行数值计算。锚杆的外径选用 48 mm、长度 12 000 mm、壁厚为 5 mm。锚杆材料选择 Q420,混凝土选择 C30 混凝土,数值计算使用的材料参数设置如表 2 所示。模型的网格划分采用六面体单元形状,整体网格单元尺寸设置为 5 mm,网格划分结果如图 2 所示。分析步采用动力显式。边界条件为锚杆尾部表面设置完全固定,并对其前段施加轴向的位移载荷。待模型断裂后,对其最大受力单元进行分析。锚杆抗拉强度的数据如表 3 所示,应力云图如图 3 所示,锚杆拉伸过程中的应力位移曲线如图 4 所示。

表 2 材料力学参数

名称	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa
Q420 钢	7850	206	0.3	—
C30 混凝土	3000	30	0.2	9

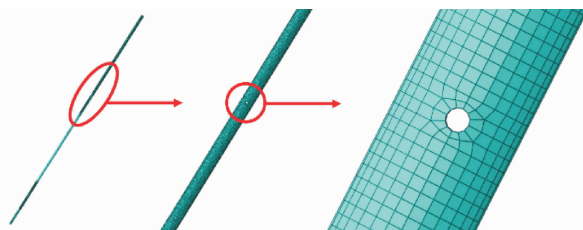


图 2 锚杆网格划分图

表 3 锚杆拉拔试验数据

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
抗拉强度/MPa	714	712	717	730	718	721	722	750	744

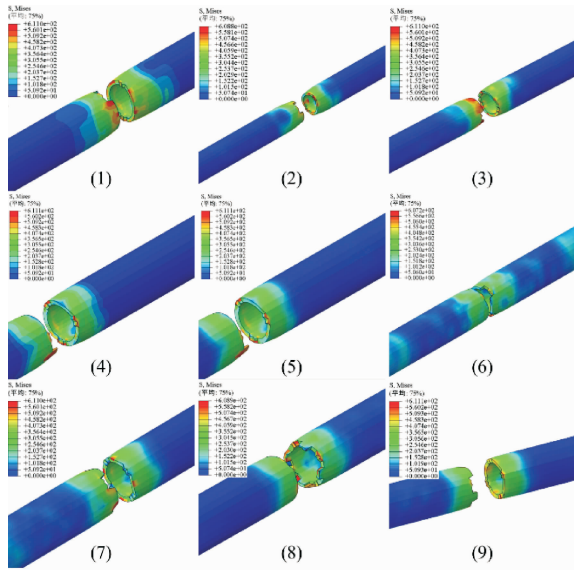


图 3 锚杆不同结构下的应力云图

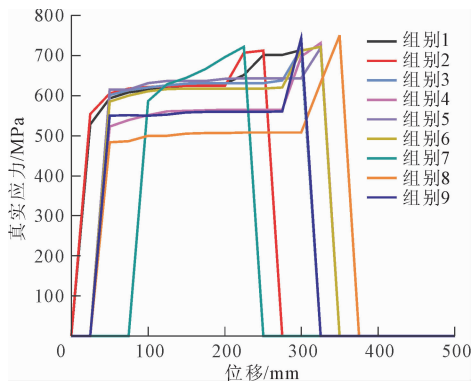


图 4 锚杆的应力位移曲线

由图 4 可知,锚杆在受拉初期随着锚杆位移的增大,锚杆受到的真实应力逐渐增大,当锚杆形变到一定程度后,其真实应力变化趋于稳定。随着锚杆位移和形变量的进一步增大,锚杆材料出现加工硬化,锚杆的真实应力再次增大,最终超过其抗拉强度的允许应力发生断裂,真实应力骤降。

对表 3 的数据进行极差分析,得到的结果如表 4 所示。通过对锚杆拉拔试验结果进行极差分析,可以得到如下关系,影响锚杆拉拔的各个因素主次顺序为:孔数 > 孔偏角 > 孔径 > 孔距。故在设计和优化锚杆主体结构时,应该优先考虑锚杆孔数,并将锚杆注浆孔偏角作为次要因素,而孔径和孔距的影响则较小。

表 4 锚杆拉拔试验极差分析

单位:MPa

参数	孔数	孔距	孔径	孔偏角
K_1	2143	2166	2185	2176
K_2	2169	2180	2186	2155
K_3	2216	2182	2157	2197
\bar{K}_1	714	722	728	725
\bar{K}_2	723	727	729	718
\bar{K}_3	739	727	719	732
R	24	5	10	14

注:表中 K_i 表示的是各个影响因素的第 i 个水平所对应试验结果的总和; \bar{K}_i 则对应的是某影响因素的第 i 个水平所对应试验结果的平均值; R 所对应的就是某一影响因素的各个水平所对应试验结果的平均值的极差,可反映在不同水平下,对应影响因素的试验结果之间的变化程度。

为进一步分析出锚杆的最佳结构参数,将其指标按照同一水平条件进行平均求解的方法进行因素指标分析,结果如图 5 所示。结合图 5 可知,环向注浆孔数量因素:锚杆的抗拉强度随着水平的上升而增大,则其水平 3 为最佳;同理轴向注浆孔距离因素为水平 3 时最佳;注浆孔孔径因素为水平 2 时最佳;相邻注浆孔之间的偏角因素为水平 3 时最佳。故锚杆最佳结构形式为环向注浆孔数量 4 个、轴向注浆孔距离 1 000 mm、注浆孔孔径 6 mm 和相邻注浆孔之间的偏角 45° 。

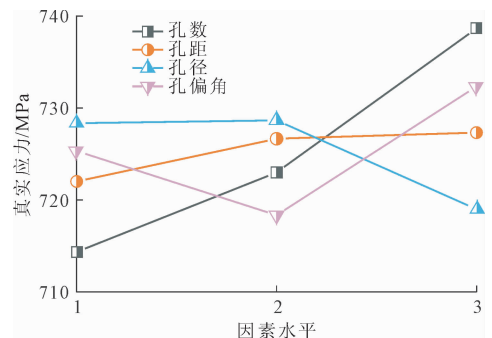


图 5 锚杆因素水平分析

2.2 锚杆伸缩节的结构设计与数值计算

为探究不同锚杆伸缩节组数及其在锚杆上安装的位置对其力学性能的影响,针对锚杆伸缩节的参数设计试验方案如表 5 所示。设置锚杆伸缩节组数、首个伸缩节到锚杆顶端距离、末尾伸缩节到锚杆底端距离和锚杆相邻伸缩节间距(下面简称组数、顶端间距、末端间距和相邻间距)四个因素 E 、 F 、 G 、 H ,每个因素设定三个水平。使用建模软件对锚杆伸缩节进行结构设计并对模型进行简化。采用 ABAQUS 软件对模型进行数值计算。锚杆伸缩节材

料选择 Q420,数值计算的材料参数设置如表 2 所示。

表 5 锚杆伸缩节正交试验方案

试验组别	因素 E (组数)		因素 F (顶端间距)		因素 G (末端间距)		因素 H (相邻间距)	
	水平	/组	水平	/mm	水平	/mm	水平	/mm
1	1	2	1	1000	1	1000	1	1000
2	1	2	2	2000	2	2000	2	2000
3	1	2	3	3000	3	3000	3	3000
4	2	3	1	1000	2	2000	3	3000
5	2	3	2	2000	3	3000	1	1000
6	2	3	3	3000	1	1000	2	2000
7	3	4	1	1000	3	3000	2	2000
8	3	4	2	2000	1	1000	3	3000
9	3	4	3	3000	2	2000	1	1000

模型的网格划分采用四面体单元形状,整体网格单元尺寸设置为 5 mm,网格划分结果如图 6 所示。分析步采用静力通用。边界条件为锚杆自外向内三个伸缩节的外表面设置完全固定,并对其锚杆杆体前段施加轴向的为 60 000 N 的集中力载荷。通过分析伸缩节上的最大应力,得到伸缩节参数对锚杆结构强度的影响,进而总结出锚杆伸缩节的最佳结构参数。锚杆伸缩节应力数据如表 6 所示,应力云图如图 7 所示。

表 6 锚杆伸缩节应力数据

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9
真实应力/MPa	187	358	318	324	294	293	317	305	276

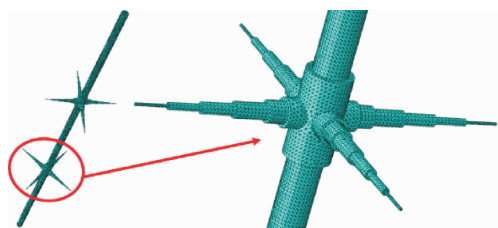


图 6 模型网格划分结果

对表 6 的数据进行极差分析,得到的结果如表 7 所示。对锚杆伸缩节拉拔试验结果进行极差分析,可以得到如下关系,影响锚杆伸缩节强度的各个因素主次顺序为:相邻间距 > 末端间距 > 顶端间距 > 组数。锚杆组数的对锚杆伸缩节强度的影响最弱,这是由于锚杆在拉伸变形的过程中,锚杆轴向力沿向下的方向传递并且呈现出衰减趋势^[18-19]。此外,锚杆最顶端伸缩节的变形程度最大,故锚杆组数的增大对伸缩节处的应力变化影响不大。而相邻间

距对拉拔过程中锚杆的应力分布存在较大的影响,故对锚杆伸缩节强度的影响最大。

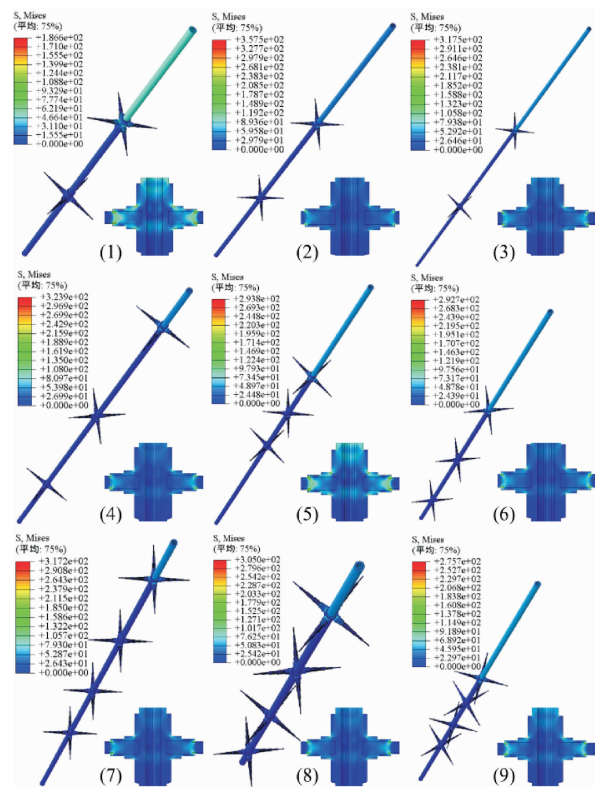


图 7 不同锚杆伸缩节参数下的应力云图

表 7 锚杆伸缩节拉拔试验极差分析 单位:MPa

参数	组数	顶端间距	末端间距	相邻间距
K_4	863	828	785	757
K_5	911	957	958	968
K_6	898	887	929	947
\bar{K}_4	288	276	262	252
\bar{K}_5	304	319	319	323
\bar{K}_6	299	296	310	316
R	16	43	58	70

注:各参数含义同表 4。

为进一步探索各因素对锚杆伸缩节强度的影响方式,将其指标进行因素指标分析,结果如图 8 所示。锚杆在承受相同的拉力下,伸缩节处最大应力的增大表明其对应的锚杆结构更差,应力集中更明显。由表 6 中真实应力可知,在同一拉力下,随着伸缩节的组数、顶端间距、末端间距和相邻间距的增大,伸缩节与套筒连接处的应力呈现先减小后增大的趋势。锚杆伸缩节的组数较少时,锚杆的结构和应力状态较为简单,故其内部应力集中的现象较弱。增加伸缩节的组数,锚杆的结构和应力状态复杂化,锚杆内部的应力集中情况加剧,伸缩节处的最大应

力明显增强。随着伸缩节组数的进一步增多,锚杆伸缩节上的应力分布变得均匀,应力集中得到降低。锚杆首个伸缩节到锚杆顶端距离处于水平 1 时,锚杆自由端的长度较低。伸缩节到顶端间距增大到水平 2 后,锚杆自由端的长度增加,应力集中情况加剧。当伸缩节到顶端间距为水平 3 时,锚杆自由端的长度进一步增长,锚杆的刚度降低,一定程度上降低了锚杆应力集中。随着锚杆末尾伸缩节到锚杆底端距离的增加,锚杆尾端的应力状态复杂化,伸缩节处的应力增大。当伸缩节末端间距处在水平 3 时,应力在锚杆上的分布变得均匀,伸缩节处最大应力相对降低。锚杆主体相邻注浆孔之间的偏角 45° ,相邻注浆孔的间距为 1 000 mm,故锚杆伸缩节的排列方式受到锚杆相邻伸缩节间距的影响,具体排列方式如图 7 所示。结合图 8 可知,当锚杆相邻伸缩节间距处于水平 2,及伸缩节呈现同向排列时,伸缩节处的最大应力较高,而当伸缩节处于交叉排列时,伸缩节处的最大应力较低。

结合图 8 综合分析可知:锚杆伸缩节为 2 组、首个伸缩节到锚杆顶端距离为 1 000 mm、末尾伸缩节到锚杆底端距离为 1 000 mm 和锚杆相邻伸缩节间距为 1 000 mm 时,所设计装配式中空注浆锚杆的强度最高。

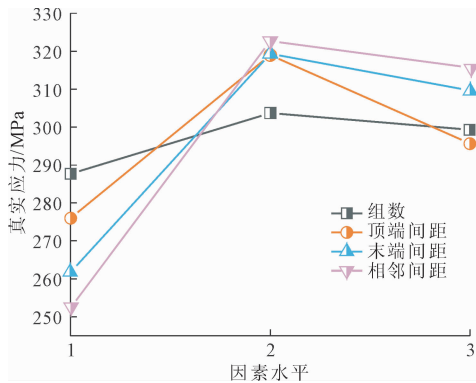


图 8 锚杆因素水平分析

通过对锚杆杆体与伸缩节的结构进行有限元分析,结果表明锚杆孔数对锚杆杆体强度的影响最大,锚杆伸缩节相邻间距对锚杆伸缩节强度的影响最为显著。

当设计锚杆伸缩节排列时,应设定伸缩节的组数、顶端间距和末端间距均处于较低或较高水平,并控制伸缩节间距使伸缩节交错排列,此时锚杆伸缩节的强度较高。

2.3 多元参数回归预测模型

针对锚杆伸缩节的设计参数,如 2.2 节所述,

即:因素 E (组数)、因素 F (顶端间距)、因素 G (末端间距)和因素 H (相邻间距),对应力影响,采用了多元线性回归模型,通过回归分析建立了应力预测模型。其中,因素 E 是一个分类变量;因素 F 、 G 、 H 分别是三个连续变量。试验数据如表 8、表 9 所示。数值计算网格与 2.2 节一致,为节约计算效率,模拟方案与上节不同之处在于:对锚杆杆体前段施加轴向 400 000 N 集中力载荷,分析伸缩节上单元最大应力达到其屈服强度 420 MPa 时对应的集中力数值。

表 8 锚杆伸缩节多元线性回归方案

试验组别	锚杆伸缩节组数		首个伸缩节到锚杆顶端距离		末尾伸缩节到锚杆底端距离		锚杆相邻伸缩节间距	
	水平	组	水平	/mm	水平	/mm	水平	/mm
1	1	2	1	1000	1	1000	1	1000
2	3	4	3	3000	1	1000	3	3000
3	4	5	4	4000	1	1000	4	4000
4	2	3	2	2000	1	1000	2	2000
5	2	3	4	4000	3	3000	1	1000
6	4	5	3	3000	2	2000	1	1000
7	3	4	2	2000	4	4000	1	1000
8	1	2	4	4000	4	4000	3	3000
9	4	5	1	1000	4	4000	2	2000
10	1	2	3	3000	3	3000	2	2000
11	2	3	3	3000	4	4000	4	4000
12	2	3	1	1000	2	2000	3	3000
13	3	4	1	1000	3	3000	4	4000
14	3	4	4	4000	2	2000	2	2000
15	4	5	2	2000	3	3000	3	3000
16	1	2	2	2000	2	2000	4	4000

表 9 锚杆伸缩节屈服强度下对应的集中力

试验组别	集中力/N	试验组别	集中力/N	试验组别	集中力/N	试验组别	集中力/N
1	163384	5	163970	9	155292	13	151913
2	149320	6	163920	10	154116	14	158780
3	147258	7	163496	11	146788	15	153474
4	155117	8	148048	12	149352	16	151526

值得一提的是,由于因素 E 为分类变量,必须先进行虚拟变量处理,以便将其引入回归分析。将因素 E 的不同取值(2、3、4)转化为虚拟变量,具体做法是将 $E_1 = 2, E_2 = 3, E_3 = 4$ 分别映射为三个二元变量: $E = 2 \rightarrow [1, 0, 0], E = 3 \rightarrow [0, 1, 0], E = 4 \rightarrow [0, 0, 1]$ 。这种处理方式使得每个组别都能够能够在回归模型中分别体现其对因变量(应力 Y) 的影响。经过虚拟变量处理后,设计矩阵 X 包括常数项和

所有自变量,包括因素 E 的虚拟变量($E_1 = 2, E_2 = 3, E_3 = 4$),以及因素 F, G 和 H 的值。设计矩阵 X 的构建公式为:

$$X = [b_0, E_{\text{dummy}}, F, G, H] \quad (1)$$

式中: b_0 为常数项; E_{dummy} 为因素 E 虚拟变量; F, G, H 为其对应连续变量。每个因素系数代表该因素对因变量 Y (应力) 变化的影响。

多元回归模型通过最小二乘法拟合数据,得到回归系数 b 。回归模型表达式为:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot E_1 + b_2 \cdot E_2 + b_3 \cdot E_3 + b_4 \cdot F + b_5 \cdot G + b_6 \cdot H \quad (2)$$

式中: b_1, b_2, b_3 分别是虚拟变量 $E_1 = 2, E_2 = 3, E_3 = 4$ 系数; b_4, b_5, b_6 是因素 F, G, H 的回归系数。

回归模型计算得到的向量: $\mathbf{b} = [168.396, -717.50, -1179.25, 891.25, -0.378, -0.11175, -4.87]$,回归模型预测值与数值计算值对比如图 9 所示。

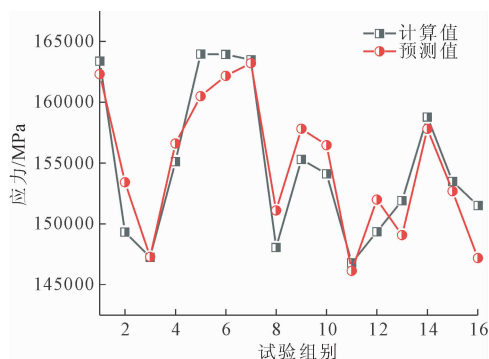


图 9 回归模型预测值与数值计算值

从图 9 中可以看出,通过回归分析得到的回归系数揭示了各个因素对应力 Y 的影响程度,回归模型预测值与数值计算值在不同试验组别下的对比情况,整体趋势一致,说明所构建的回归模型具备良好的拟合精度与预测能力。除个别组(如第 5 组和第 6 组)存在一定偏差外,大部分预测值与计算值高度吻合,验证了有限元模型的可靠性与回归模型的实用性,能够较好地反映“结构参数-应力响应”之间的定量关系,也可为本文所提出的新型锚杆工程试验提供数值借鉴。

3 结 论

(1) 该锚杆注浆前可通过拉拔拉绳实现伸缩节向四周伸张的效果,扩大了其注浆后的固结区域,改善了锚杆的抗拉强度及其抗浮效果。锚杆的触发方式简单可靠,且每次伸张范围及形式固定,有利于对

其进行经验公式总结,方便后续施工时的计算。

(2) 通过 ABAQUS 有限元数值计算并分析了不同参数对锚杆杆体及其伸缩节强度的影响。结果表明,杆体影响因素的影响程度为孔数 > 孔偏角 > 孔径 > 孔距,伸缩节影响因素的影响程度为相邻间距 > 末端间距 > 顶端间距 > 组数。

(3) 通过因素指标分析发现锚杆杆体的最佳结构参数为:环向注浆孔数量 4 个、轴向注浆孔距离 1 000 mm、注浆孔孔径 6 mm 和相邻注浆孔之间的偏角 45° 。锚杆伸缩节的最佳结构参数为:锚杆伸缩节为 2 组、首个伸缩节到锚杆顶端距离为 1 000 mm、末尾伸缩节到锚杆底端距离为 1 000 mm 和锚杆相邻伸缩节间距为 1 000 mm。

(4) 分析了四种参数对锚杆伸缩节强度的影响方式。结果表明,随着伸缩节组数、顶端间距和末端间距的增大,伸缩节处强度呈现先升高后降低的变化趋势。控制相邻伸缩节间距使伸缩节交错排列比伸缩节同向排列时,伸缩节处的强度更高。

参考文献:

- [1] 杨付权. 预应力抗浮锚杆中预应力损失的研究与应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 2285-2289.
- [2] 窦艳玲, 马国栋, 刘晓英. 抗浮锚杆在高层结构地下车库工程中的应用[J]. 施工技术, 2016, 45(1): 109-111.
- [3] Liu Guohui, Jia Pingsheng, Sun Jianping, et al. Research and application of new anti-floating anchor in anti-floating reinforcement of existing underground structures[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1364752.
- [4] 韩彬, 洪枫, 王慧博, 等. 抗浮锚杆设计规范对比分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2289-2294.
- [5] 任向鑫, 刘玮娟, 谷少康, 等. 抗浮设计常见问题及抗浮锚杆应用分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 477-480.
- [6] 罗佑新, 王宁, 张哲. 抗浮锚杆与地下室底板共同工作受力规律研究及设计建议[J]. 建筑结构, 2018, 48(1): 97-100.
- [7] 陆振华. 抗浮锚杆技术介绍及工程特性研究[J]. 地基处理, 2024, 6(2): 185-192.
- [8] Kou Hailei, Guo Wei, Zhang Mingyi. Pullout performance of GFRP anti-floating anchor in weathered soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 408-416.
- [9] 白晓宇, 吴泽坤, 王凤姣, 等. BFRP 抗浮锚杆抗拔性能现场试验与荷载传递特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(6): 1335-1346.

- [3] 崔晓玉,李奇龙,李大贵,等.某闸坝工程跌坎底流消力池体形优化试验研究[J].水力发电,2020,46(10):127-131.
- [4] 俞晓伟,牧振伟,高尚.低弗劳德数梯形墩-悬栅消力池水力特性[J].长江科学院院报,2023,40(1):107-115.
- [5] Zhou Zhao, Wang Junxing, Zhu Zavid D. Energy dissipation in a deep tailwater stilling basin with partial flaring gate piers [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2020,47(5):523-533.
- [6] 高海鹰,马金霞,李贺,等.水力学[M].南京:东南大学出版社:2022:242.
- [7] 周世良,王智,王云莉,等.新三江船闸曹娥江侧局部动床物理模型试验研究[J].水运工程,2025(9):114-122.
- [8] 徐莉平,葛旭峰,李琳.某水电站表孔溢洪道消力池段结构优化的试验研究[J].地下水,2022,44(5):261-263.
- [9] 郭川靖,蒋雷,刁明军.消力坎对跌坎消力池坎控水跃影响的试验研究[J].四川水力发电,2024,43(2):120-127.
- [10] 许有为,何铁炎.坎式消力池在水闸除险加固工程中的应用及水力计算[J].湖南水利水电,2023(3):1-3.
- [11] 王宇,石维,严媛,等.下游极低水位溢洪道消力池布置及优化研究[J].云南水力发电,2023,39(11):87-90.
- [12] Lin Wei, Cai Fulin, Han Changhai, et al. Experimental study on energy dissipation and tailwater wave in two-stage stilling basin with supercritical inflow of low Froude number [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2023,51:25-31.
- [13] 谭高文,韩昌海,韩康,等.低弗劳德数水流二级消力池水力特性试验研究[J].水科学进展,2020,31(1):71-80.
- [14] 黄智敏,陆汉柱,付波,等.溢洪道梯形差动式挑流鼻坎研究和应用[C]//中国水力发电工程学会水工水力学专委会,国际水利与环境工程学会(IAHR)中国分会,中国水利学会水力学专委会.水力学与水利信息学进展 2024——工程水力学.广东省水利水电科学研究院广东省水动力学应用研究重点实验室,2024:2-7.
- [15] 刘欢.某水闸消能加固设计优化研究[J].水利技术监督,2022(12):213-215,236.

(上接第 145 页)

- [10] 张晨,周峰,王旭东,等.扩底抗浮锚杆的抗拔承载特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(6):1888-1893.
- [11] Wang Fengjiao, Bai Xiaoyu, Wu Zekun, et al. Field pullout test and anchorage length calculation for external anchorage of GFRP anti-floating anchors [J]. Structures, 2024,70:107636.
- [12] Liu Yuguo, Xia Kai, Wang Botong, et al. Experimental investigation on the anchorage performance of a tension-compression-dispersed composite anti-floating anchor [J]. Applied Sciences, 2023,13(21):12016.
- [13] Zhu Yi, Li Yi, Tang Zhenxing, et al. Experimental study on and finite element analysis of the axial compression bearing capacity of a UHPC transfer device for prestressed anti-floating anchor rods [J]. Buildings, 2024,14(4):1075.
- [14] 靖洪文,苏海健,孟波,等.巷道锚杆锚固力学特性现场试验研究[J].中国矿业大学学报,2022,51(1):16-23.
- [15] 尤春安,战元宝.预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1976-1985.
- [16] 王宇鑫,汪海波,马守龙,等.巷道锚杆索支护参数敏感性正交数值模拟研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(4):108-113.
- [17] 陶文斌,吴平平,陈铁林,等.基于锚杆拉拔试验优化锚固承载特性研究[J].煤炭科学技术,2022,50(9):10-19.
- [18] Hao Zengming, Liu Honghua, Yan Nan, et al. In-situ test and numerical simulation of anchoring performance of embedded rock GFRP anchor [J]. Buildings, 2023,13(11):2799.
- [19] Bai Xiaoyu, Zhao Xiangmei, Yan Nan, et al. Field test of GFRP bar anti-floating anchor slurry-rock interface bonding performance [J]. Composite Structures, 2024,331:117893.