

短锚抗拔试验的模拟分析及改进研究

赵飞涛¹, 钱进中², 刘刚², 曹际宝¹, 刘东², 朱梦萍¹

(1. 日照市地矿岩土工程有限公司, 山东 日照 276800; 2. 襄阳市建筑设计院有限公司, 湖北 襄阳 441000)

摘要:短锚固段抗拔试验是获取锚固界面力学特性的重要方法,但受锚固段长度、刚度及周长等因素影响,试验结果易偏离真实界面行为,难以准确评估锚固性能。为提高短锚固段抗拔试验的精度与可靠性,本文通过理论分析、数值模拟及位移测点响应研究,系统分析了锚固段长度、刚度及周长对试验结果的影响规律。研究表明:位移测点的选取对试验精度有显著影响,采用锚固段中点位移与平均剪应力相匹配的方法可有效提升测试精度;锚固长度的增加将导致试验误差显著增大,而提高锚固段刚度有助于减小误差;尽管锚固周长对试验结果的影响较为有限,但其增加仍会导致误差增大。本文成果可为锚固界面力学特性的精准测试提供理论依据与优化方向。

关键词:短锚试验; 锚固界面; 剪应力-位移关系; 位移测点; 误差分析; 参数优化

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)09-0045-06

doi: 10.13402/j.gcs.2025.09.113

Simulation analysis and improvement research of short anchor uplift test

ZHAO Feitao¹, QIAN Jinzhong², LIU Gang², CAO Jibao¹, LIU Dong², ZHU Mengping¹

(1. Rizhao Geological and Geotechnical Engineering Co., Ltd., Rizhao 276800, Shandong, China;

2. Xiangyang Architectural Design Institute Co., Ltd., Xiangyang 441000, Hubei, China)

Abstract: The uplift test of the short anchor section is an important method to obtain the mechanical properties of the anchor interface, but the test results are easy to deviate from the real interface behavior due to such factors as the length, stiffness and circumference of the anchor section, and it is difficult to accurately evaluate the anchorage performance. In order to improve the accuracy and reliability of the uplift test of the short anchor section, the influence of length, stiffness and perimeter on the test results of the anchor section is systematically analyzed through theoretical analysis, numerical simulation and displacement measurement point response research. The results show that the selection of displacement measuring points has a significant impact on the test accuracy, and the method of matching the midpoint displacement and average shear stress of the anchor section can effectively improve the test accuracy. The increase of anchor length will lead to a significant increase in the test error, and increasing the stiffness of the anchor section can help reduce the error. Although the anchor perimeter has a limited effect on the test results, its increase will still lead to an increase in error. The accurate test of surface mechanical properties provides a theoretical basis and optimization direction.

Key words: short anchor test; anchor interface; shear stress-displacement relationship; displacement measurement point; error analysis; parameter optimization

锚杆作为一种重要的岩土工程加固手段,其承载与变形特性直接影响工程的安全性和经济性。

根据相关研究,锚固界面的力学特性对锚杆的承载与变形性能具有重要影响,因此,开展锚固界

收稿日期: 2025-04-29

作者简介: 赵飞涛(1988—),男,高级工程师,从事岩土工程相关工作。

面的相关研究具有重要意义^[1]。现场短锚固段抗拔(简称短锚)试验能够直接测定锚固界面的力学特性,对研究锚杆的抗拔性能具有重要意义。

目前,众多学者通过多种研究手段针对锚杆及锚固界面展开了系统探索。陈昌富等^[1]创新提出锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法,自主研发了一种室内锚-土界面摩擦性能测试装置,成功获取了包含界面剪切残余段的剪应力-位移全过程曲线。李强等^[2]针对残积土层开展不同长度锚杆抗拔试验,结果表明:锚固段有效长度需不少于 18 m,且黏结强度平均值约为 103.70 kPa。刘宏波等^[3]通过拉拔试验分析钢筋与灌浆料的界面力学特性,发现随着黏结长度增加,黏结强度呈现降低趋势。杨庆光等^[4]借助自制室内试验设备,深入研究了预压条件、土体含水率和压实度对锚固界面剪切特性的影响规律。胡建林等^[5]采用室内试验研究了围压、含水率及土体强度对锚固界面力学特性的影响机制,并对比分析了预制锚杆和现浇锚杆力学特性上的差异。

现有研究多采用试验方法测定锚固界面的力学性质,但由于锚固系统具有较高的复杂性,如何量化和评估锚固尺寸、锚固长度、锚固段自身特性等因素对锚固界面力学试验的影响,目前尚未见相关学者进行系统研究。此外,现有研究多采用锚固段平均剪应力与起始端位移来近似表征界面剪应力-位移关系,但由于剪应力分布具有非均匀性,平均剪应力与加载端位移之间往往存在显著的匹配错位,从而导致试验结果不可避免地存在设计误差。

本文通过理论分析与数值模拟,分析位移测点对试验精度的影响,并将在此基础上系统分析锚固段长度、刚度及周长等因素对试验结果的影响,以期锚固界面力学特性测试提供理论依据与优化方向。

1 短锚试验的模拟分析

1.1 基本原理

短锚固段抗拔试验(以下简称短锚试验)是评估锚杆、锚栓或锚固构件在较短锚固长度条件下抵抗荷载能力的关键试验方法,其主要目的是确

定锚固段与周围介质(如混凝土、岩体或土体)之间界面的力学性质,短锚试验示意如图 1 所示。在短锚试验中,荷载控制主要包括力控制和位移控制两种模式。力控制模式操作相对简单,只需控制油泵加载设备的力输出,适用于确定极限承载力的情况。但该模式对变形的控制能力较弱,在张拉荷载接近锚杆极限承载力时,可能引发突然破坏,导致锚杆承载力下降区段的数据缺失。相比之下,位移控制模式能够精确控制锚杆的变形过程,减少突然破坏的风险,更适用于研究锚固界面的黏结滑移行为^[3]。在加载过程中,可采用分级加载或连续加载的方式。分级加载通过逐级增加拉拔力,并记录相应的位移和荷载数据;连续加载则通过匀速加载直至试件破坏,以便捕捉极限承载力。试验过程中,通常采用荷载传感器和位移计对荷载和位移的变化进行实时监测。

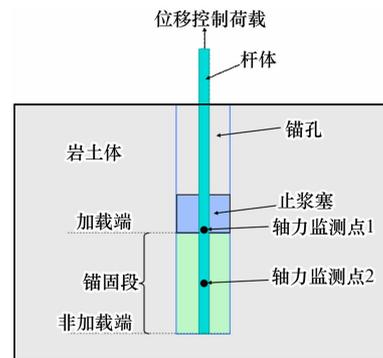


图 1 短锚固段抗拔试验示意

在获得短锚固段的荷载-位移曲线后,可先计算得到锚固界面的平均剪应力,然后将该平均剪应力与锚固段顶端位移进行匹配,进而得到锚固界面的剪应力-位移曲线[式(1)]。

$$\tau = \frac{T}{2\pi bl} \quad (1)$$

式中: τ 为锚固界面的平均剪应力, kPa; T 为锚固段顶部的荷载, kN; b 为锚固段的半径, m; l 为锚固段的长度, m。

1.2 力学模型

短锚固段的荷载传递机制与锚杆整体相似。当锚杆受到拉拔荷载时,荷载通过杆体传递到注浆体及周围岩土体,并引起注浆体及周围岩土体沿拉拔方向产生位移。在土体中进行短锚固段抗拔试验时,锚杆的破坏模式主要为注浆体与岩土

体界面的滑移破坏,而杆体与注浆体界面以及注浆体与岩土体之间的剪切变形通常较小。为简化分析,仅考虑注浆体与岩土体界面的滑移破坏,并忽略锚固段及杆体的自重。

选取长度为 dx 的锚固微段作为研究对象,对锚杆与周围岩土体之间的相互关系进行分析(图2)。其中: r 为以杆体中心点为圆心的径向距离, m ; R 为锚固段的影响半径, m ; a 为杆体半径, m ; $\tau_{r,x}$ 为 x 横截面上半径 r 处的剪应力, kPa ; $\tau_{a,x}$ 为 x 横截面上杆体-注浆体界面处的剪应力, kPa ; $\tau_{b,x}$ 为 x 横截面上注浆体-岩土体界面处的剪应力, kPa ; T_x ($0 \leq x \leq l$) 为沿锚固段轴向分布的拉力, kN ; σ 为围压, kPa ; dT_x 为锚固微段上的拉力减小值, kN ; Δx 为锚固微段长度, m 。

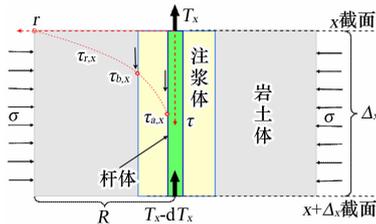


图2 锚固段与岩土体的相互作用示意

根据荷载传递规律,锚固微段上的拉力减小值等于注浆体周围的界面剪应力,如式(2)所示。

$$dT_x = -2\pi b\tau_{b,x} dx \quad (2)$$

通过对拉力段应变进行积分,并考虑锚固段末端位移,可得到拉力段任意部位的位移 s_x :

$$s_x = \int_x^l \frac{T_x}{EA} dx + s_1 \quad (0 \leq x \leq l) \quad (3)$$

式中: s_x 为锚固段上 x 位置处的位移, mm ; s_1 为锚固段末端处的位移, mm ; E 为拉力段的综合变形模量, MPa ; A 为拉力段的横截面积, mm^2 。

2 计算原理、计算方案及参数选择

2.1 计算原理

在计算张拉荷载作用下锚固段的剪应力分布时,可将锚固段离散为若干微段,并对加载端位移进行初始假设。根据荷载传递原理,逐步推导锚固段各微段的轴力、剪应力和位移,并通过迭代调整加载端位移的假设值。当锚固段两端的轴力、剪应力与位移计算结果协调一致时,即可得到合理结果。

为求解短锚固段的承载变形特性,基于 Python 语言编写计算程序,将锚固段离散为 $0.001 m$ 的微段,并通过迭代计算得到不同张拉荷载下锚固段的轴力、剪应力及位移分布。

2.2 计算方案及参数选择

2.2.1 计算方案

(1) 方案1:为分析不同位移测点对试验结果的影响,分别计算锚固段在顶部位移和中部位移条件下的荷载-位移曲线;然后,根据式(1)由荷载-位移曲线推导得到相应的剪应力-位移曲线;通过对比分析两种位移测点选择下的计算结果,分析其对试验精度的影响。

(2) 方案2:在方案1的基础上,对锚固段长度、变形刚度和锚固周长等进行参数变化分析,以观察不同因素对剪应力-位移关系及试验结果的影响。

2.2.2 参数选择

(1) 基准参数设置(问题1):为开展参数影响分析,首先设定一组基准参数,具体取值:锚固段长度取 $0.20 m$;锚固段轴向刚度取 $1.6 \times 10^4 kN$;锚固段周长取 $0.47 m$;锚固界面剪应力-位移关系函数:

$$\tau(s) = 120 (1.8s + 0.15s^2) / (1.8^2 - 1.8s + 1.15s^2) \quad (4)$$

(2) 参数影响缝隙方法(问题2):在分析某一参数对计算结果的影响时,保持其他参数与基准参数(问题1)一致,仅改变该参数的取值。

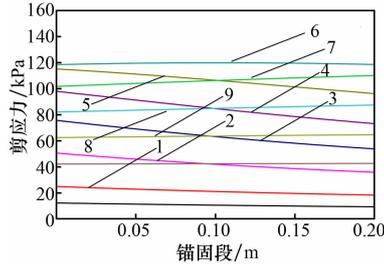
(3) 参数变化范围与间隔设置:1)锚固段长度:取值范围为 $0.20 \sim 3.00 m$,间隔建议值取 $0.20 \sim 0.50 m$ 或按需设定步长;2)锚固段轴向刚度:取值范围为 $5.0 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^5 kN$,间隔可取 5.0×10^3 、 1.0×10^4 、 $3.0 \times 10^4 kN$ 等;3)锚固段周长:取值范围为 $0.10 \sim 0.80 m$,间隔取 $0.10 m$ 。

3 计算结果

3.1 锚固段位移点的选取分析

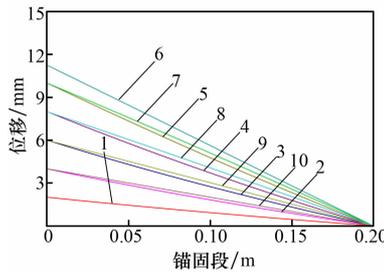
不同张拉荷载下锚固段的剪应力和位移分布如图3、4所示。由图3可知:随着荷载增加,锚固段起点位置与中点位置的位移差逐渐增大;当

荷载达到峰值后, 该位移差逐渐减小。由图 4 可知: 随着荷载增加, 锚固段位移基本随荷载呈线性增长, 剪应力也基本随之增大。但锚固段起始点与末端的剪应力存在差异, 使得基于平均剪应力计算的位移与起始点位移之间存在一定偏差。



峰前阶段杆顶拉力荷载/kN: 1—2.00; 2—4.00; 3—6.00; 4—8.00; 5—10.00; 6—11.26。峰后阶段杆顶拉力荷载/kN: 7—10.00; 8—8.00; 9—6.00。

图 3 不同张拉荷载时锚固段的剪应力分布

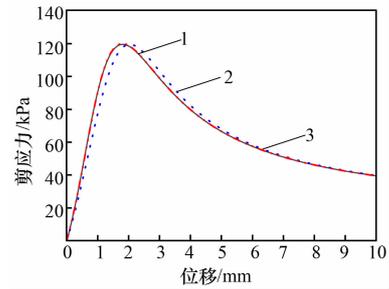


峰前阶段杆顶拉力荷载/kN: 1—2.00; 2—4.00; 3—6.00; 4—8.00; 5—10.00; 6—11.26。峰后阶段杆顶拉力荷载/kN: 7—10.00; 8—8.00; 9—6.00; 10—4.00。

图 4 不同张拉荷载时锚固段的位移分布

在短锚固段试验中获取剪应力 - 位移关系时, 通常采用锚固段的平均剪应力。当锚固段内的剪应力呈线性分布时, 该平均剪应力可近似代表中点位置的界面剪应力。但若位移测点位于锚固段起点, 剪应力和位移的对应关系将产生偏差, 导致匹配时出现系统性差异, 从而引入一定的试验误差。

基于锚固段的荷载 - 顶部位移和荷载 - 中部位移曲线, 可得到锚固界面的剪应力 - 顶部位移和剪应力 - 中部位移曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知: 剪应力 - 顶部位移曲线与原始剪应力 - 位移曲线之间存在较大误差; 采用锚固段的平均剪应力与中点位移来表征锚固界面的剪应力 - 位移关系, 可在一定程度上提高试验精度。



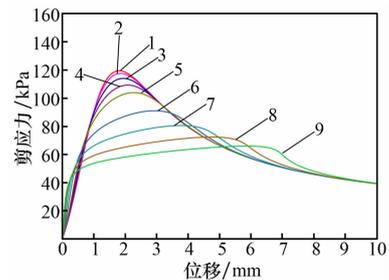
1— $\tau-s$ 函数; 2—平均剪应力 - 锚固段起点位移; 3—平均剪应力 - 锚固段中点位移。

图 5 锚固界面的剪应力 - 位移关系

3.2 相关参数对试验结果的影响分析

3.2.1 锚固长度对试验结果的影响

在其他锚杆参数不变的情况下, 通过数值模拟绘制不同锚固长度下锚固界面的剪应力 - 位移关系曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知: 随着锚固段长度的增加, 剪应力 - 位移曲线逐渐与逐渐偏离 $L=0.20$ m 时的参考曲线, 试验误差逐渐增大。



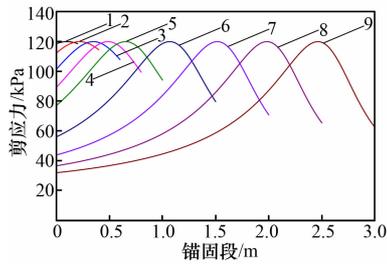
L/m : 1—0.20; 2—0.40; 3—6.00; 4—0.80; 5—1.00; 6—1.50; 7—2.00; 8—2.50; 9—3.00。

图 6 不同锚固长度时锚杆的剪应力位移关系

为分析误差来源, 进一步计算不同锚固长度在峰值荷载作用下的剪应力分布, 如图 7 所示。由图 7 可知: 随着锚固段长度增加, 剪应力的变化幅度逐渐增大, 分布的均匀性逐渐降低; 平均剪应力难以准确反映锚固界面的实际剪应力分布; 同时, 将锚固段中点处位移与平均剪应力进行匹配时, 误差逐渐增大。因此, 在试验条件与精度允许的情况下, 建议优先选用较短的锚固段进行试验, 以减小误差, 提高试验结果的可靠性。

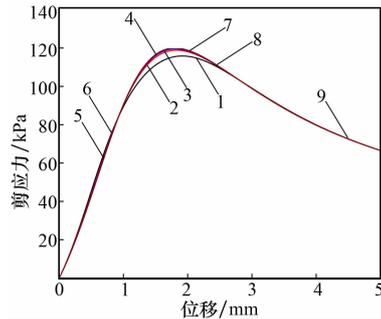
3.2.2 锚固段刚度对试验结果的影响

在其他锚杆参数不变的情况下, 通过数值模拟绘制不同锚固刚度时锚固界面的剪应力 - 位移关系曲线, 如图 8 所示。由图 8 可知: 当锚固段



L/m : 1—0.20; 2—0.40; 3—0.60; 4—0.80; 5—1.00;
6—1.50; 7—2.00; 8—2.50; 9—3.00。

图7 不同长度的锚固段在最大抗拔力时的剪应力分布



锚固段轴向刚度/ (10^3kN) : 1—5; 2—10; 3—15;
4—20; 5—25; 6—30; 7—60; 8—90; 9—120。

图8 不同刚度时锚杆的剪应力位移关系

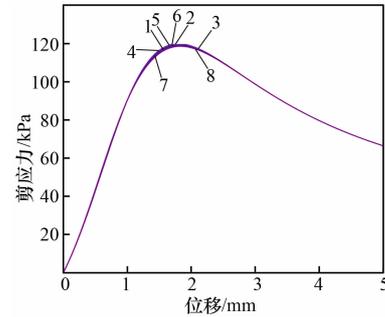
刚度为 $5.0 \times 10^3 \text{kN}$ 时曲线存在显著偏离,其余刚度对应的曲线几乎完全重合,说明锚固段刚度对试验误差的影响较小;且随着锚固段刚度增大,误差呈现递减趋势。

3.2.3 锚固周长对试验结果的影响

在其他锚杆参数不变的情况下,通过数值模拟绘制不同锚固周长时锚固界面的剪应力-位移关系曲线,如图9所示。由图9可知:当仅考虑注浆体-岩土体界面滑移时,不同锚固段周长对应的剪应力-位移曲线基本重合,说明锚固段周长对计算误差影响较小;但随着锚固段周长的增加,试验误差呈现递增趋势。

4 试验改进分析

(1) 本文在分析过程中,仅考虑注浆体-岩土体界面的滑移失效模式,且忽略锚固段及杆体的自重效应。这一简化假设需满足:短锚试验中,锚固段的破坏面应沿着注浆体-岩土体界面发生。注浆体-岩土体界面破坏是土体锚杆最常见的破坏模式,在均质土体中进行试验时具有一定的适用性;但受岩土体和锚固系统复杂性的影响,若



锚固段周长/ m : 1—0; 2—0.20; 3—0.30;
4—0.40; 5—0.50; 6—0.60; 7—0.70; 8—0.80。

图9 不同锚固周长时锚杆的剪应力位移关系

实际破坏形式与假设不符,则需结合具体工况对相关参数进行重新校核。

(2) 相关计算结果表明,短锚试验中,位移测点位置对试验结果有显著影响。当锚固长度较短时,采用锚固段中点部位的位移能更准确地反映锚固段平均剪应力分布,相较于锚固段起点部位的位移,其中点位移的测试精度更高。

(3) 根据锚固段荷载传递机制和相关计算成果,锚固段剪应力分布受外部荷载水平、锚固界面力学特性及锚固段内力协调机制共同控制。当承受相同荷载时,锚固段刚度越小,锚固微段在相同界面剪应力作用下产生的应变越大,整体拉伸变形越显著;锚固段越长,剪应力分布越不均匀;锚固段周长越大,锚固微段受到的界面剪应力越大,锚固段的应变和整体拉伸变形越显著。理论上,试验误差主要来源于剪应力和位移的非均匀分布。因此,在试验条件允许的情况下,应尽量选择较大刚度、较短长度、较小周长的锚固段以降低误差、提高精度。例如,在试验中增加钢筋直径即可提高锚固段刚度,易于实现且对试验花费影响较小,具有较强的可行性。

(4) 锚杆抗拔试验是评估锚杆抗拔能力的关键试验方法。大量已有抗拔试验表明,随着锚固段长度增加,锚杆的平均摩阻力(极限荷载对应的平均剪应力)呈衰减趋势,导致传统设计需基于锚固长度对平均摩阻力进行经验系数修正,缺乏系统的理论支撑。短锚试验可更精确地获取锚固界面的剪应力-位移关系,为锚杆承载力的计算与评估提供更直接的参数依据。但当前短锚试验成果的可靠性尚缺乏系统的评价方法。本文提出一

种计算评估方法,可用于评价试验条件是否能满足短锚抗拔试验的精度要求。

5 结 论

(1) 为提高短锚试验精度,通过理论分析和数值模拟相结合的方法,对短锚固段剪应力和位移分布展开研究。分析发现,位移测点的选择对试验精度具有显著影响,采用锚固段中点位移与平均剪应力匹配的方法,可有效降低剪应力和位移非均匀分布导致的测量偏差,从而提升试验精度,为完善短锚试验方法提供了依据。

(2) 锚固段越长,试验误差越大;锚固段刚度越大,试验误差越小;锚固周长越大,试验误差越大。其中,锚固长度对试验结果的影响最为显著。理论上,各因素导致的试验误差主要源于锚固段剪应力和位移的非均匀分布,其根源在于锚固界面的力学性质和锚固段的内力协调机制。

(3) 短锚试验设计需综合考虑锚固段长度、刚度及周长的综合影响,优先采用“短锚固段、

高刚度、小周长”的参数组合,以确保试验数据的可靠性。同时,通过本文提出的计算方法可初步评估试验条件的合理性,为锚固界面力学特性测试参数的优化提供了明确方向。

参考文献:

- [1] 陈昌富,梁冠亭,汤宇,等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(6): 1115 - 1122.
- [2] 李强,付文光,李波. 拉力型黏性土层锚杆抗拔力现场试验[J]. 现代隧道技术,2020,57(5):210 - 217.
- [3] 刘宏波,叶晓旭,魏鲁彬,等. 钢筋锚粗半灌浆套筒黏结性能试验[J]. 工程建设,2024,56(11):15 - 21.
- [4] 杨庆光,梁凌川,杨诒飞,等. 填土中锚固体 - 土接触面剪切特性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(增刊2): 235 - 239.
- [5] 胡建林,薛金昊,郭江峰,等. 不同围压下锚杆 - 土体界面剪切特性影响因素的试验研究[J]. 工业建筑,2024,54(3):200 - 205.