

固化土回填深基坑工程施工技术

杨 涛¹, 覃辉凤², 殷晓三³, 黄剑新⁴

(1. 广西物流职业技术学院, 贵港 537100; 2. 广西北投交通养护科技集团有限公司, 南宁 530000;
3. 中原工学院, 郑州 451197; 4. 广西地矿建设集团有限公司, 南宁 530000)

摘要:为解决深基坑回填中固化土材料配比缺乏量化依据、狭小空间施工扰动难以有效控制及过程质量缺少在线反馈等问题, 构建固化土回填施工质量控制技术体系。采用室内试验与现场验证相结合的方法: 制备不同配合比固化土试件, 开展3、7、28 d无侧限抗压强度试验确定工程适用配比; 研发分层回填防扰动限位装置, 并在施工过程中对含水率、密实度与地基应力进行连续监测, 根据监测结果实施工艺参数与装置位置的动态调整, 形成“材料精准制备—受控施工—监测反馈”的闭环控制流程。结果表明: 推荐配比条件下固化回填体28 d抗压强度达到2.75 MPa; 在90 d跟踪监测中, 回填至6.0 m且变形趋于稳定阶段的累计沉降控制在4.0 mm, 较常规回填方式表现出更优的沉降收敛特征。研究表明, 该闭环控制体系能够提升深基坑回填过程的可控性与稳定性, 为深基坑回填工程质量控制提供可操作的技术路径。

关键词: 固化土; 深基坑回填; 质量控制; 扰动控制; 工后沉降

中图分类号: TU753 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0127-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.021

Construction Technology for Deep Foundation Pit Backfilling with Solidified Soil

YANG Tao¹, QIN Huifeng², YIN Xiaosan³, HUANG Jianxin⁴

(1. Guangxi Logistics Vocational and Technical College, Guigang 537100, China ;
2. Guangxi Beitou Transportation Maintenance Technology Group Co. , Ltd. , Nanning 530000, China;
3. Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou 451197, China;
4. Guangxi Geological and Mineral Construction Group Co. Ltd. , Nanning 530000, China)

Abstract: To address the lack of quantitative guidance for mix proportioning, the difficulty in controlling construction-induced disturbance in confined spaces, and the absence of online feedback during deep foundation pit backfilling with solidified soil, a quality-control technology system was established. Laboratory tests and field verification were combined. Solidified-soil specimens with various mix proportions were prepared, and unconfined compressive strength tests at curing ages of 3 d, 7 d, and 28 d were performed to determine an engineering-applicable proportion. An anti-disturbance limiting device for layered backfilling was developed, and continuous monitoring of moisture content, compaction density, and foundation stress was implemented during construction. Process parameters and device positions were adjusted according to monitoring feedback, thereby forming a closed-loop workflow integrating precise material preparation, controlled construction, and monitoring-based

作者简介: 杨 涛 (1979—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 工程管理, 工程技术等。

通信作者: 覃辉凤 (1984—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 工程造价。

收稿日期: 2024-12-10

岩土力学

regulation. The results show that the 28 d unconfined compressive strength reached 2.75 MPa under the recommended proportion. During a 90 d monitoring period, the cumulative settlement was controlled to 4.0 mm at the stage when the backfill depth reached 6.0 m and deformation tended to stabilize, and a more favorable settlement convergence behavior was observed compared with conventional backfilling approaches. The proposed closed-loop control system improves the controllability and stability of deep foundation pit backfilling and provides an implementable technical route for construction quality management.

Key words: solidified soil; deep foundation pit backfilling; quality control; disturbance control; post-construction settlement

0 引言

深基坑回填施工会改变坑内土体荷载状态,其施工过程与回填质量直接关系基坑及邻近结构的变形安全。深基坑回填阶段的再加载过程易引起坑内外土体应力重分布,进而影响邻近隧道及周边结构变形^[1]。开挖砂质土流态固化后用于基坑侧壁回填时,其工程适用性与施工控制效果需结合具体工况评价^[2]。因此,针对受限空间下固化土深基坑回填开展材料、施工与监测协同控制研究,具有保障施工安全和提高回填质量的意义。

围绕固化土材料性能与工程应用,已有研究主要从材料体系、外加剂改性、配合比优化及施工工艺等方面展开。预拌流态固化土回填效率高、均匀性好,但在狭窄基坑中施工空间受限,搅拌与压实困难,易影响密实度和强度^[3]。水泥、石灰等固化剂可改善土体物理力学性质,提高承载能力和稳定性,但土性差异及掺量控制复杂,易导致施工质量波动^[4]。掺减水剂可改善流态固化土流动性和流变特性,并影响强度形成^[5]。水亮亮等^[6]分析了粒径、灰土比、水固比及温度对流态固化土性能的影响;杜俊彪等^[7]采用响应面法优化固化材料配比,证实工业废渣协同反应可提升强度和耐久性;倪寅等^[8]验证了GS土体硬化剂在深层软土中的加固效果;於德美等^[9]研究了纤维种类、掺量与长度会影响固化土力学性能和变形特性,指出界面作用与长期服役性能仍是重要研究方向;王朝辉等^[10]围绕多源固废基固化土的组成设计与性能调控开展研究;吴章平等^[11]分析了高含水量土体固化后的强度增长规律;袁保军等^[12]进一步研究了固化土强度增长规律及预测方法,为固化材料性能评价与配比优化提供了参考;胡建林等^[13]基于碱激发矿渣—粉煤灰体系构建固化土强度预测模型,为材料配比优化与性能调控提供了理论支撑。然而,从深基坑回填施工

控制角度看,现有研究仍存在不足。李敏等^[14]研究了基坑固化土回填方法,但是对于施工控制多停留在单工序优化层面,缺少从材料配比到在线监测与反馈调整的闭环流程设计;汪焕锋等^[15]采用复合外加剂对工程渣土进行流态固化处理,分析了其工作性能、强度和干缩性能,但研究重点偏向材料改良与配合比设计,对受限空间扰动控制及监测反馈涉及不足。同时,回填过程中的侧向移动与隆起控制仍需进一步研究。

综上所述,围绕固化土深基坑回填施工质量控制开展研究。将室内配比试验确定的工程适用配比作为前端质量控制参数,并与分层回填防扰动限位装置及现场监测反馈相结合;通过对回填过程中密实度、侧向位移和地基应力等指标的跟踪,动态调整施工参数及限位装置位置,形成材料适配—扰动约束—监测反馈—参数调整的深基坑回填质量控制闭环。

1 固化土深基坑回填施工控制技术体系

1.1 固化土回填材料配合比优化

在深基坑回填工程的施工过程中,回填材料的沉降和变形会对施工质量产生直接影响。为确保回填工程的质量与安全性,结合固化土施工工艺,对回填材料的配比进行优化,改善回填材料的力学性能和稳定性,从而有效控制回填体的沉降和变形。

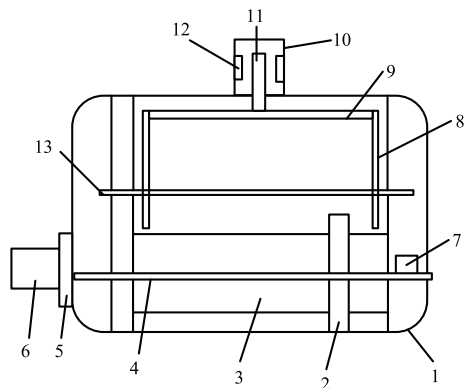
在固化土原材料选择上,优先选择黏土、粉质黏土、砂粉土等作为基本材料,这类土壤不仅具有良好的可塑性和压实性,能够有效提升回填体的整体稳定性,同时需对原料土壤中的有机质含量进行严格控制,确保其不超过5%,以防止有机质分解引发的体积变化影响回填体的长期稳定性;此外,还需严格把控原料颗粒的粒径,确保其在50 mm以内,从而保证土壤颗粒的均匀性及施工效果。在固化剂选取上,主要采用工业废渣(例如粒化高炉矿渣、

粒化电炉磷渣等)作为核心原料,这些废渣因具备潜在水硬性而能与水反应生成坚固化合物;同时添加适量石膏和激发剂,通过精细研磨制成新型水硬性胶凝材料。

为筛选工程适用配比,按室内试验流程制样。土样在 105 ℃ 下烘干至恒重并测得含水率;依据拌和容器有效容积,确定土壤、水与固化剂的目标掺量。各种材料按量称取后,先进行干混(土壤+固化剂),再逐步加水搅拌,直至拌合料均匀一致。为了评估固化土的性能,将拌合均匀的固化土填充进尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试模中。在填充过程中,使用振动台进行振动以确保试件内部密实,随后对试件表面进行抹平处理。待试件经过适当的养护期后,对比不同配合比下试件的强度、稳定性等关键性能指标,从而精确确定出最优的配合比。

1.2 防扰动限位装置安装

在完成回填材料配比优化后,安装防扰动限位装置,对回填土的扰动以及位移进行限制,优化施工质量。限位装置的具体结构如图 1 所示。



1-壳体, 2-导线板, 3-线轴, 4-约束板, 5-行星减速器, 6-驱动电机, 7-约束开关, 8-挡板, 9-推杆, 10-限位器壳, 11-触发块, 12-行程开关, 13-导杆。

图 1 防扰动限位装置具体结构

Fig. 1 Specific structure of anti-disturbance limiting device

根据回填区域的大小和形状,安装相应数量的支撑框架,确保框架之间连接牢固,形成稳定的支撑体系。然后将约束板安装在支撑框架的内侧,通过连接件将约束板与支撑框架连接成一个整体。同时,根据回填土的高度和压实要求,调整约束板的位置。

安装前,需根据基坑尺寸和回填层数进行精确测量放线,明确支撑框架的安装位置及约束板的布置方式。按放线结果逐个安装支撑框架,利用水平仪和垂直仪校正框架的水平 and 垂直度,确保安装准确稳定。

由于基坑受限空间的复杂应力状态,单纯的力学等难以适用。因此,通过内置传感器实时监测约束板承受的侧向土压力与位移量,并与设计允许的最大侧向附加应力及最大位移阈值进行比对。当监测数据接近预警阈值(通常取设计允许值的 85%)时,意味着回填土体侧向挤压已接近临界状态。此时,通过千斤顶或电动推杆等驱动装置,微调约束板的位置与高度,以提供有效的反向刚性支撑,从而在动态反馈中抑制回填土的侧向挤出,确保回填区域的应变协调与整体稳定。

当深基坑固化回填土所承受的应变力已接近其极限状态时,根据回填土的高度以及压实要求,调整约束板的位置,防止回填土在压实过程中发生侧向移动和隆起,确保回填区域稳定。

1.3 深基坑回填工程施工控制流程优化设计

针对上述提出的回填材料配比优化以及扰动限位装置安装等内容,对深基坑回填施工质量控制流程进行优化,由此得到优化后的施工控制流程如图 2 所示。

基于土壤的物理力学特性与工程实际需求,对固化土材料配比进行细致优化,以确保回填土具备优异的强度与稳定性。随后,依据基坑尺寸与形态确定防扰动限位装置的安装位置与数量,并完成装置布置。回填过程中,严格遵循设计标准与施工规范,自基坑周边分层向中心回填,控制层高以保证填土的均匀性与一致性。每层回填后,采用小型压路机或振动压实机械进行压实,以提高土体密实度与稳定性,并根据填料类型与压实要求确定压实次数。每层压实后即刻开展质量检测,重点监测含水率与密实度指标,若不达标,则采取排水或加水等调整措施;同时实时监测密实度,必要时增加压实遍数。

通过上述步骤,可实现对深基坑固化土回填工程施工控制流程的系统优化。施工过程中应对回填层数进行动态监测,及时判断并调整限位装置;同

岩土力学

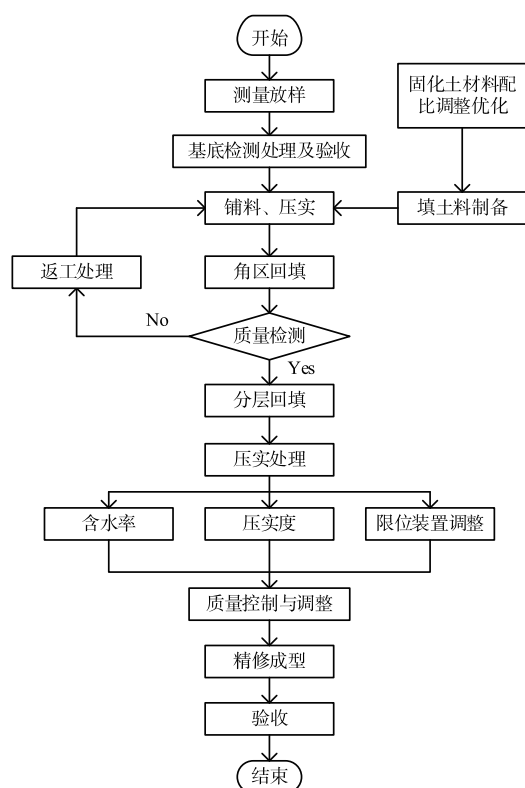


图2 深基坑回填施工控制流程

Fig. 2 Control flow of deep foundation pit backfilling construction

时以含水率与压实度为关键质量指标,对回填质量实施全过程控制与修正。结合前述固化土回填材料配比优化及限位装置安装等措施,最终形成基于固化土施工工艺的深基坑回填工程施工控制技术体系。

2 试验论证

为了验证提出的基于固化土施工工艺的深基坑回填工程施工控制技术在实践中的效果优于传统技术,在完成相关算法设计后,进行对比试验,检验方法的实际控制效果。

2.1 试验说明

为验证提出的施工控制技术在实际工程中的优越性,采用室内配比寻优+现场实体工程验证相结合的方法。第一阶段在实验室完成不同固化材料掺量的配比筛选;第二阶段依托实际深基坑工程,划分三个地质条件与基坑深度完全相同的相邻回填区作为现场试验段。分别设置三个对照组进行实体回填与持续监测对比:

(1) 传统工艺组:采用传统分层填筑压实工艺;

(2) 单一控制组:采用常规经验配比辅以防扰动限位装置控制;

(3) 协同优化组(本文工法):采用优化的固化土配比辅以本文防扰动限位装置控制。

2.2 工程概况及材料试验

试验选取的深基坑回填施工工程位于某城市核心区域。由于基坑周边存在重要的市政设施与建筑物及地下管线,环境较为复杂,对回填工程的施工质量和稳定性要求较高。该区域地质结构复杂,基坑开挖范围内的地层自上而下依次为:表土层(厚约1 m)、黏土层(厚约4 m)以及粉质砂土层(厚约7 m),其下卧层为强风化岩层。此外,由于场区地势较低,地下水位标高处于回填区域中下部,导致深层土体长期处于非饱和向饱和状态的过渡区间。不同土层的容重也有所差异,表层土容重为 18.0 kN/m^3 ,黏土层为 19.5 kN/m^3 ,粉质砂土层为 20.1 kN/m^3 。

在试验中,确定固化土回填材料的最佳配比,在室内试验条件下根据不同配比要求,采用包含砂土、黏土、固化剂和水等多种混合材料作为回填土。

为分析固化土回填材料的最佳配比,制备了不同比例的材料试件,并对试件的抗压强度进行测试,不同配比下的试件抗压强度见表1。

表1 不同配比下固化土试件抗压强度
Table 1 Compressive strength of solidified soil specimens with different ratios

砂土:黏土:固化剂:水	无侧限抗压强度		
	3 d	7 d	28 d
10.5 : 1.0 : 1.5 : 2.6	0.58	1.27	2.75
12.0 : 3.0 : 1.5 : 2.6	0.61	1.22	2.64
11.25 : 3.75 : 1.5 : 2.6	0.50	1.11	2.42
7.5 : 7.5 : 1.5 : 2.6	0.41	0.98	2.06
7.5 : 5.5 : 1.0 : 2.4	0.38	0.93	2.04
5.5 : 1.5 : 1.2 : 2.2	0.35	0.93	1.91
5.0 : 1.5 : 2.5 : 2.4	0.32	0.92	1.95

基于上述试件测试结果设定的回填材料配合比为(砂土:黏土:固化剂:水) 10.5 : 1.0 : 1.5 : 2.6,使用优化后的配比制备回填材料后,采用轻型静力压实设备实施回填土的压实作业。考虑到基坑内受限空间及围护结构的动力敏感性,为防止共振效应引起土体剪切破坏或支护位移,严格控制压路机以静压模式进行。采用分层回填方式,每层回填土厚度控制在约30 cm,在压实过程中,根据每层压实度

实测值确定最终压实遍数，并且每层回填土至少被压实四遍，以确保回填土达到预期的密实度和稳定性。

在施工过程中，分别对比了传统工艺组、单一控制组以及协同优化组下的力学响应。在回填区域中心轴线及基坑周边设立了多个观测点，用于持续跟踪和记录回填过程中的竖向总应力、沉降和水平位移数据，以确保施工过程的稳定性和安全性。同时，使用湿度计和密度仪对回填土的含水率和密度进行实时监测，从而为实现试验对比分析提供依据。

2.3 施工质量控制效果对比

2.3.1 地基应力场响应特征分析

根据土力学基本理论，地基内部的垂直自重应力与埋深之间遵循如下线性分布关系：

$$\sigma_z = \gamma_i \cdot h_i$$

式中： σ_z 为地基垂直自重应力，kPa； γ_i 为土体的平均重度，kN/m³； h_i 为计算点自地表向下的垂直深度，m。

式（1）为均质土、未分层且忽略地下水影响时的近似关系；当存在地下水或分层土时， γ 应按分层/浮重度取值。

由图3可知，三种试验组在不同深度下的地基应力分布对比结果。监测点布设于回填体内部0.5~6.0 m深度范围内的不同位置，上部承载6 m厚恒定填方荷载。

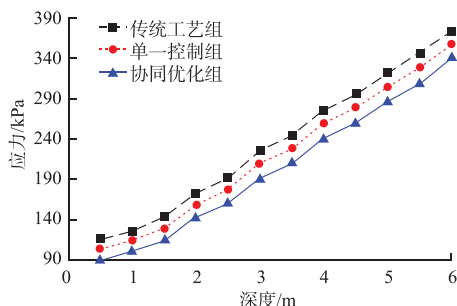


图3 应力对比结果

Fig. 3 Comparison of stress distribution

监测数据表明，三种工况下的地基应力 $95 \leq F \leq 372$ kPa区间内，整体随深度呈现非线性增长趋势。相比于传统工艺组，单一控制组在全深度范围内的应力响应有所降低，说明防扰动限位装置的刚性支撑改变了应力传导路径，实现了向侧向的有效扩散；而

协同优化组的减载效果最为显著，在浅层（0.5 m）与深层（6.0 m）的绝对降幅分别达到20、27 kPa，应力降低率随深度由17.39%收窄至7.26%。

从荷载传导路径来看，协同优化通过优化配比提升了回填体的早期刚度，并结合限位装置的刚性约束，在填筑体内部形成了明显的应力扩散效应。这种效应改变了荷载的传递方向，使上部压力不再完全依赖纵向向下传递，而是通过填筑体与限位体系的界面摩擦及整体刚性向侧向转移，从而在浅层核心区表现出显著的减载效果。

从力学构成来看，深层地基所承受的总压力是土体自重与地下水重量共同叠加的结果。随着监测深度的增加，上方覆盖的土层变厚、水头高度增加，导致地基内部的原始压力基数呈线性剧增。相比之下，协同优化通过优化填筑工艺所实现的减载量是一个相对固定的数值。当这个固定的减载值面对随深度不断膨胀的原始压力基数时，其在总比例中的权重会被显著稀释。这一力学规律揭示了应力降低率在宏观上表现出向深部收敛的特征——即深度越深，人工干预对整体受力场的影响占比就越小。

边界条件的影响不容忽视。工程基坑底部为强风化岩层，属于典型的刚性底层边界。根据半无限弹性体理论，当附加应力向深部传递并接近刚性界面时，会产生明显的应力集中现象。这种由底部刚性边界引发的回弹负载在一定程度上抵消了上部工法实施的卸荷效益。因此，深层监测点的应力读数受地质固有特性的约束更强，使得人工干预对核心受力层位以外的调控效能随距离增加而呈现物理性衰减。

综上所述，应力降低率的收窄并非工法失效，而是地基自重应力支配地位提升与刚性边界效应共同作用下的力学必然结果。

2.3.2 累积沉降控制效果评估及对照试验

沉降变形的控制效果是衡量回填技术优劣及评估地基长期稳定性的关键准则。为量化表征协同优化控制体系对地基形变抗性的提升程度，研究设计了为期90 d的持续跟踪监测实验。在监测周期内，提取并拟合了三个对照组的累积沉降曲线，不同施工控制方法下的地基沉降量对比结果如图4所示。

岩土力学

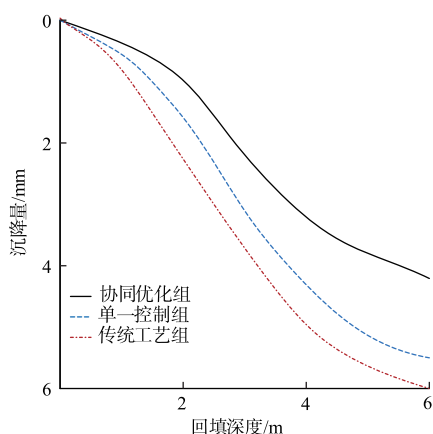


图4 不同控制方法下地基沉降量对比结果

Fig. 4 Comparison results of foundation settlement under different control methods

当回填深度达到 6.0 m 且位移曲线趋于平稳收敛时,其中协同优化组的最终累积沉降量为 4.0 mm;单一控制组的最终沉降量为 5.5 mm;传统工艺组的最终沉降量为 6.0 mm。进一步计算显示,在进入沉降稳定期后相比单一控制组,先进控制工法的沉降控制效能提升 8.3%;相比传统工艺组,先进控制工法提升 33.3%。该差异表明,先进控制工法能够缩短地基固结时间并降低次生形变,从而为工程长期服役提供更可靠的安全冗余。这一显著的形变抑制效果并非单一因素的作用,而是材料改性与边界约束共同诱导的力学结果。从材料组成视角分析,推荐的固化土配比确保了回填体具备优异的早期与后期强度。固化剂中的活性组分在激发下生成大量的凝胶与晶体,这些水化产物在微观层面发挥了胶结与填充的双重作用。这种微观结构的重组使得回填体从散体状态向具有显著抗剪能力的胶结结构体转化。结构性的发育不仅增强了填筑体的抗变形能力,还使内部应变分布更趋均衡,避免了局部应力集中引发的突发性沉降。更为重要的是,这种胶结结构在长周期服役环境下表现出极高的抗蠕变稳定性,通过水化产物的持续填充作用,锁定了土颗粒间的相对位移,从而有效抑制了次生形变的发展。

构建的“监测—反馈—调整”闭环控制体系,实现了施工过程中的主动变形管理。限位装置通过为回填材料提供稳定的侧向刚性边界,显著改善了

土体的受力环境。通过内置传感器对侧向压力与位移进行实时监测并与阈值比对,装置能够动态优化支撑刚度,确保回填区域的应变分布始终处于受控状态。这种强化的边界约束不仅抑制了侧向扰动,更通过形变场的整体协调作用,有效减小了最终竖向沉降。相比传统工艺,该机制缩短了地基的固结稳定周期,显著提升了复杂受限空间下回填工程的可靠性。

3 结论

通过构建并验证了深基坑固化土回填的全过程质量控制体系,实现了从材料制备到施工调控的闭环管理,主要得出以下结论:

(1) 砂土:黏土:固化剂:水为 10.5:1.0:1.5:2.6 的配比可使固化体 28 d 抗压强度达到 2.75 MPa。此配比下生成的水化物通过胶结与填充作用,促使回填体由散体结构向准胶结结构体转化,从本构层面提升了抗变形能力。

(2) 揭示了防扰动装置对应力传导路径的重塑效应。研发的限位装置通过构建侧向刚性边界,诱导荷载向侧向有效扩散,成功将地基核心区应力降幅提升至 17.39% (0.5 m 深度处)。该机制打破了传统回填中的荷载直接叠加效应,实现了对下卧地基的有效减载保护,解决了受限空间扰动难以抑制的难题。

(3) 验证了闭环控制体系对沉降收敛的显著增效作用。依托监测反馈进行的动态应变管理,使回填区最终累积沉降控制在 4.0 mm 以内,较传统工艺组显著提升了 33.3% 的沉降控制效能。研究表明,通过侧限强化产生的形变场协调效应可有效缩短地基固结周期,降低次生形变,显著提升了复杂环境下工程的服役可靠性。

参考文献

- [1] 马玉刚,陈华斌,俞建君. 大面积土体加卸载对基坑与邻近隧道变形的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 44-49.
- [2] 林泓民,曹天赐,彭劼. 流态固化开挖砂质土回填基坑侧壁的应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 14-19.
- [3] 李明月,陈少军,郑巍,等. 深基坑狭窄肥槽预拌流态固化土回填施工技术 [J]. 建筑施工, 2024, 46 (2): 169-172.

(下转第 144 页)

建筑结构

的架体试验值与规范值比值最小 (1.36~1.56), 安全储备偏低; 其余支撑架体的比值整体较高, 与 JGJ 300-2013 规范比值为 1.82~2.53, 与 CFSA/T08-2022 规范比值为 1.66~2.48, 具有较高的安全储备。建议在步距 0.6 m 架体的设计中, 适当提高安全系数以保证其可靠性。

参 考 文 献

- [1] 任雪萍, 刘琛, 张成. 装配式脚手架结构整体稳定承载力分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 1-7.
- [2] JAKE L Y, CHAN S H. Stability design of system scaffold with differential settlement [J]. Structures, 2020, 27: 1467-1478.
- [3] 崔郁龙, 康赞, 高文巧, 等. 模板工程安全计算软件对比分析及计算研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 1-7.
- [4] CHEN Z, LV J, LIU H, et al. Experimental and analytical studies on stability of ultra - strong thin - walled steel tube and coupler scaffolds [J]. Engineering Structures, 2023, 275: 115255.
- [5] 刘卫然, 于海丰, 黄俊, 等. 轮扣式模板支撑架稳定承载力试验研究及有限元分析 [J]. 建筑结构学报. 2022, 43 (1): 219-227.
- [6] 闫晓, 宋沙沙, 陈驹. 轮扣式钢管脚手架稳定承载力的试验研究 [J]. 低温建筑技术. 2022, 44 (3): 102-118.
- [7] 陈孟, 闫相明, 赵瑞, 等. 承插型轮扣式钢管模板支架承载力试验的研究 [J]. 建筑技术. 2022, 53 (1): 63-66.
- [8] 王坦, 罗坤, 袁志仁, 等. 轮扣式脚手架足尺架体试验及抗连续倒塌性能研究 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2022, 23 (4): 1-6.
- [9] 白万民, 李文坡, 张凌博, 等. 盘扣式模板支架安全承载试验及数值模拟研究 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (7): 2528-2535.
- [10] 刘京红, 郭振乾, 张凌博, 等. 盘扣式模板支架受力性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (4): 121-126.
- [11] 王红卫. 组合型承插盘扣式模架体系承载性能研究 [J]. 建筑施工, 2025, 47 (5): 787-792.
- [12] 王军, 郭泽群. 斜杆轴向刚度对承插型盘扣式钢管支架稳定承载力的影响 [J]. 施工技术, 2019, 48 (22): 97-100.
- [13] 张凌博, 刘京红, 李兵兵, 等. 盘扣式钢管脚手架节点转动刚度及稳定承载力研究 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43 (12): 1324-1332.
- [14] 杨兴宇, 黄得杨, 张海辉, 等. 不同钢管脚手架构件力学性能差异性试验研究 [J]. 广东土木与建筑, 2022, 29 (3): 115-118.
- [15] 刘卫然, 吴昊天, 于海丰, 等. 盘轮扣节点转动刚度试验及有限元研究 [J/OL]. 建筑钢结构进展, 1-7 [2026-06-26]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1893.tu.20251124.1723.020>.

(上接第 132 页)

- [4] 田晓鹤. 公路沥青路面固化土基层施工技术分析 [J]. 交通世界, 2023, (31): 76-78.
- [5] 赫明胜, 秦庆金, 高慧, 等. 减水剂对镁渣-粉煤灰基流态固化土流变性及强度的影响 [J]. 硅酸盐报, 2025, 44 (7): 2710-2719.
- [6] 水亮亮, 郑晓光, 戴腾, 等. 流态固化土流动性和强度的影响因素及固化机理 [J/OL]. 建筑材料学报, 2026, 29 (2): 242-250.
- [7] 杜俊彪, 杜运兴, 周芬, 等. 工业废渣复合固化洗砂泥的强度及耐久性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (4): 1525-1534, 1545.
- [8] 倪寅, 陈麒宇, 刘晓. GS 土体硬化剂的现场非原位试验研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (增刊2): 253-256, 305.
- [9] 於德美, 陈书杰, 张峰, 等. 纤维加筋固化土研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2024, 38 (增刊2): 139-146.
- [10] 王朝辉, 张同浩, 问鹏辉, 等. 多源固废基浇筑式固化淤泥质土组成设计及性能调控 [J/OL]. 复合材料学报, 2026, 43 (4): 2307-2322.
- [11] 吴章平, 邓海, 唐昌意, 等. 高含水量淤泥固化土强度增长规律试验研究 [J/OL]. 建筑结构, 2025, 55 (11): 155-160.
- [12] 袁保军, 曾远, 贾磊. 淤泥固化土强度增长规律研究及预测 [J]. 港口航道与近海工程, 2025, 62 (3): 72-76.
- [13] 胡建林, 赵天怡, 冷发光, 等. 碱激发矿渣-粉煤灰地质聚合物固化土力学特性及强度预测 [J/OL]. 复合材料学报, 2026, 43 (4): 2376-2386.
- [14] 李敏, 朱晏礼, 李磊, 等. 基坑肥槽液态固化拌和土回填技术 [J]. 安装, 2023 (增刊2): 90-91.
- [15] 汪焕锋, 吴安平, 刘志强, 等. 固化土路堤填筑施工工艺研究 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4 (16): 162-164.