

盘轮扣复合型钢管支撑架体系稳定承载力试验研究

冯晓晓¹, 刘卫然^{2,3}, 杜旭冉⁴, 吴昊天², 于海丰^{2,3}

(1. 石家庄市市政工程有限公司, 石家庄 050011; 2. 河北科技大学 建筑工程学院, 石家庄 050018;
3. 河北省房屋建筑工程更新技术创新中心, 石家庄 050018; 4. 中冶检测认证有限公司, 北京 100088)

摘要: 为研究盘轮扣复合型钢管支撑架的失稳机理与破坏模式, 开展了7组足尺模型试验, 研究连接方式、水平杆步距、立杆间距及斜杆布置等因素对其力学性能的影响。结果表明: 采用盘扣式连接、减小水平杆步距、缩小立杆间距以及合理布置斜杆均可提高支撑架体系的稳定承载力; 将试验结果与现行规范计算值进行对比发现, 试验值为规范值的1.36~2.53倍, 表明现行规范在总体上能够保证架体的安全, 且具有一定的安全储备。研究成果可为盘轮扣复合型钢管支撑架安全设计与施工优化提供重要试验依据。

关键词: 盘轮扣复合型钢管支撑架; 足尺试验; 稳定承载力

中图分类号: TU371.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0139-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.023

Experimental Study on Stability Capacity of Composite Disk-lock and Wheel-coupler Type Steel Scaffold Support Systems

FENG Xiaoxiao¹, LIU Weiran^{2,3}, DU Xuran⁴, WU Haotian², YU Haifeng^{2,3}

(1. Shijiazhuang Municipal Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China;
2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
3. Hebei Province Housing Construction Projects Regeneration Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050018, China;
4. Inspection and Certification Co., Ltd. MCC, Beijing 100088, China)

Abstract: To investigate its instability mechanism and failure mode, seven full-scale model tests were conducted to examine the effects of connection type, horizontal step distance, vertical post spacing, and diagonal bracing arrangement on its mechanical performance. The results indicate that adopting disk-lock connections, reducing the step distance and post spacing, and rationally arranging diagonal braces can effectively enhance the stability capacity of the support system. A comparison of the test results with the calculated values from current codes shows that the test values are 1.36 to 2.53 times the code values, indicating that the current codes generally ensure the safety of the scaffold and provide a certain safety margin. The research findings offer important experimental references for the safety design and construction optimization of composite disk-lock and wheel-coupler

项目来源: 河北省高等学校科学技术研究项目产学研合作专项 (CXY2024045)。

作者简介: 冯晓晓 (1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 结构施工。

通信作者: 刘卫然 (1977—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 结构施工。

收稿日期: 2026-02-26

建筑结构

type steel scaffolds.

Key words: composite disk-lock and wheel-coupler type steel scaffold; full-scale test; stability capacity

0 引言

脚手架作为建筑施工过程中不可或缺的临时支撑体系,其结构性能与承载能力直接关系到施工安全及结构稳定性,因而持续受到广泛关注^[1-2]。其中轮扣式与盘扣式钢管支架因具有装拆便捷、承载力强、适应性好等优点,在现浇混凝土结构施工中得到广泛应用。

国内外相关学者围绕该领域开展了深入研究,取得了一系列研究成果^[3-4]。刘卫然等^[5]对4个轮扣式支撑架体系进行承载力试验研究,表明减小水平杆步距与设置剪刀撑均能提升承载力,其中竖向剪刀撑的作用最大;闫晓等^[6]通过14组轮扣式脚手架足尺试验,发现其失稳模式均为立杆整体失稳,承载力随跨距增大而减小;陈孟等^[7]通过开展2组足尺轮扣式钢管模板支架的稳定承载力试验,表明承载力随立杆间距增大而显著下降;王坦等^[8]通过足尺试验与有限元分析,研究了轮扣式脚手架的极限承载力、节点半刚性特征及其在不均匀沉降下的抗连续倒塌性能,并提出增设斜撑与水平杆等构造优化措施;白万民等^[9]通过试验与有限元模拟,研究了斜杆布置对盘扣式模板支架承载性能的影响,表明斜杆对角布置的承载力最优,因其传力路径明确,能有效抑制水平位移与屈曲失稳;刘京红等^[10]通过6种工况的盘扣式模板支架单元架试验,研究了斜杆形式与立杆对接方式对承载能力的影响,表明斜杆布置形式显著影响承载力,每步斜杆相交点越多,承载力越高;王红卫^[11]通过足尺试验与数值模拟,研究承插盘扣式模架承载性能,提出了单立杆平均支撑1 m³混凝土的安全经验值,并确立了倾角、轴力及竖向位移的监测预警阈值;王军等^[12]通过荷载试验,研究斜杆对承插型盘扣式钢管支架稳定承载力的影响研究,表明斜杆轴向刚度对结构稳定承载力影响显著;张凌博等^[13]建立了盘扣节点三维精细化有限元模型,获取了完整的节点力矩-转角曲线,揭示了节点转动刚度对架体稳定承载力的影响机理。杨兴宇等^[14]则通过构件力学性能试验,系统

比较了盘扣式与轮扣式钢管脚手架构件的承载能力差异,为连接方式优选提供了基础数据。

盘轮扣复合型钢管支撑架体系是一种新型的承插型脚手架,兼备轮扣式与盘扣式两种连接方式。鉴于该新型支撑体系的稳定承载力尚未经过系统的承载能力试验验证。为此,在已有研究成果^[15]的基础上,设计7组不同参数盘轮扣复合型钢管支撑架模型,开展稳定承载力试验,系统研究其失稳机理与破坏模式,并分析连接方式(轮扣式与盘扣式)、水平杆步距、立杆间距以及斜杆布置等参数对其稳定承载力的影响。将试验所得承载力与相关规范计算值进行对比,评估现有设计方法的安全储备与适用性;为盘轮扣复合型钢管支撑架的科学设计、规范修订及工程应用提供试验依据与理论参考。

1 试验概况

1.1 试验模型设计

为研究连接方式、立杆间距、水平杆步距及斜杆布置等不同搭设参数对盘轮扣复合型钢管支撑架承载力性能的影响,设计了7组足尺模型。所有模型高度均为2.80 m,平面尺寸根据立杆间距相应调整,具体搭设参数见表1。试验中材料基本力学性能见表2。

表 1 试验模型搭设参数						
Table 1 Geometric parameters of test models						
试验模型	连接方式	立杆间距 /m	步距 /m	步数	斜杆布置	平面尺寸 /m
1	轮扣式	0.9	1.2	2	无	1.8×1.8
2	盘扣式	0.9	1.2	2	无	1.8×1.8
3	轮扣式	0.9	0.6	4	无	1.8×1.8
4	盘扣式	0.9	0.6	4	无	1.8×1.8
5	轮扣式	0.9	1.2	2	有	1.8×1.8
6	盘扣式	0.9	1.2	2	有	1.8×1.8
7	盘扣式	1.2	1.2	2	有	2.4×2.4

表 2 材料的基本力学性能			
Table 2 Basic mechanical properties of the materials			
类型	屈服强度 f_y /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 E /×10 ⁵ MPa
盘轮扣立杆、连接盘	275.24	454.87	2.11
轮扣水平杆、直插头	265.17	385.44	2.05
盘扣水平杆、扣接头、插销	273.39	402.65	2.09

1.2 加载装置与加载制度

如图 1 所示, 试验加载装置由反力架、2 000 kN 液压千斤顶和三层分配梁组成。为防止架体在试验过程中发生倾覆, 架体搭设完成后, 将工字钢、分载梁和箱型梁等用吊带固定于反力架纵梁上。

试验采用荷载控制进行加载, 每级荷载为 50 kN, 以模型荷载-位移曲线出现拐点作为失稳标志。试验前, 进行预加载, 预加载为 50 kN, 检查采集仪器正常工作后, 再进行正式加载。每级荷载持荷时间 5 min, 记录相关数据后继续进行下一级加载。

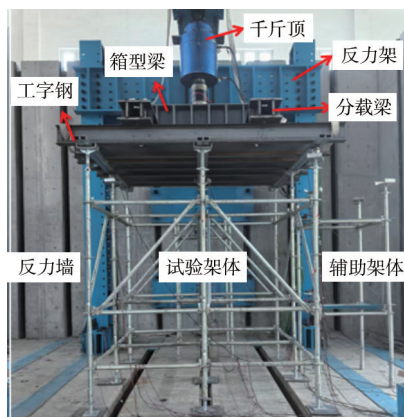


图 1 试验加载装置
Fig. 1 Loading setup

1.3 试验测点布置

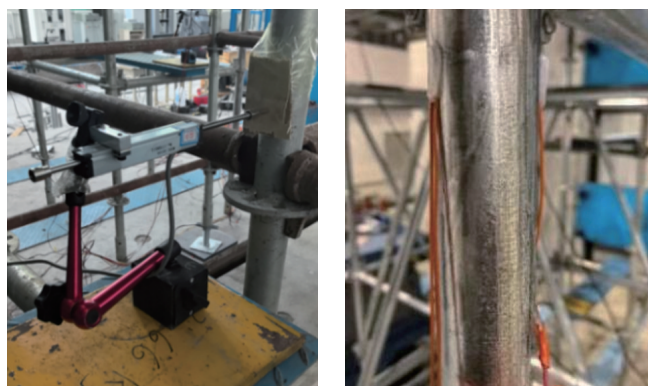
为测量加载过程中支撑架体各杆件的轴力, 每根立杆粘贴 2 个应变片, 共计 36 个应变片。为测量体系在加载过程中的水平位移情况, 东北两侧每侧 2 个共 4 个水平位移计 (w-1、w-2、w-3 和 w-4)。使用东华测试 DH3816N 静态测试分析系统连接应变片和位移计, 分别测量杆件的应变和架体的位移。测试装置如图 2 所示。

2 结果与分析

2.1 试验现象

2.1.1 模型 1

试验模型 1~4 未布置斜杆, 均发生扭转失稳, 以模型 1 为例进行试验现象描述。当总荷载加载至 240.26 kN 时, 架体无明显变化。随着荷载加载至 280.09 kN 时, 架体先后出现异常响声, 此时架体



(a) 位移计 (b) 应变片

图 2 位移计与应变片布置图

Fig. 2 Arrangement of displacement transducers and strain gauges

最大位移发生在顶部, 其中偏北位移为 0.96 mm, 偏西为 5.49 mm。当荷载增至 360.28 kN 时, 支撑架体有持续细微嘶嘶响声, 架体最大位移发生在顶部, 其中偏北的位移增加较快, 位移值为 10.34 mm, 偏西的位移变化较小, 位移值为 3.28 mm, 但架体中部东西方向的位移变化较大, 由偏西 2.35 mm 转变为偏东 3.14 mm。荷载达到 403.39 kN 时, 架体整体位移急剧增大, 最大位移位置由顶部移至中部 (偏北 31.98 mm、偏东 8.89 mm), 并出现掉载, 荷载骤降至 263.08 kN。卸载后检查发现, 架体呈逆时针扭转失稳。如图 3 (a) 所示。

2.1.2 模型 6

试验模型 5~7 布置斜杆, 均发生弯曲失稳, 以模型 6 为例进行试验现象描述。荷载加载至 270.29 kN 时, 架体无明显变化; 此时顶部出现位移 (偏北 0.83 mm、偏西 6.00 mm)。随着荷载增加, 架体持续向西北方向偏移, 且多次伴随响声。荷载达到 590.34 kN 时, 位移显著增大, 顶部偏北位移达 11.87 mm, 偏西 19.21 mm, 且荷载曲线出现波动, 表明架体已进入失稳前状态。继续加载至 611.06 kN 时, 顶部位移急剧增加 (偏北 58.82 mm、偏西 22.09 mm), 随后发生掉载, 荷载降至 452.14 kN。卸载后检查确认, 架体发生偏西向弯曲失稳, 且立杆底部出现明显弯曲, 反映该模型在较高荷载下因立杆抗弯能力不足而发生整体失稳。如图 3 (b) 所示。

建筑结构

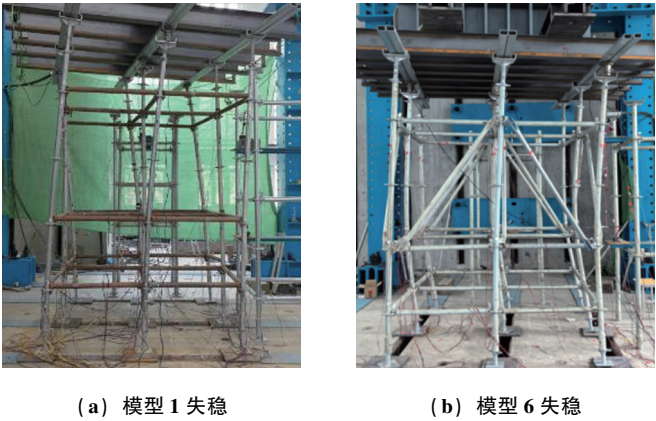


图 3 模型破坏模式

Fig. 3 Failure mode of model

2.2 失稳模式及稳定承载力

7 个模型的失稳模式及稳定承载力见表 3。其中体系稳定承载力是千斤顶测得最大荷载加上分配梁和加载梁总自重 (19.80 kN) 得到, 单杆稳定承载力是由体系稳定承载力除以有效立杆根数来确定。除了模型 5 在加载过程中由于西北角杆件 G7 底撑旋扭断裂导致有效立杆变为 8 根外, 其他有效立杆数量均为 9 根。

表 3 模型失稳模式及稳定承载力

Table 3 Failure modes and stable bearing capacity of the models

试验模型	失效模式	体系承载力/kN	单杆承载力/kN
1	逆时针扭转失稳	423.19	47.02
2	顺时针扭转失稳	449.61	49.96
3	顺时针扭转失稳	485.03	53.89
4	顺时针扭转失稳	551.22	61.25
5	架体偏北弯曲失稳	446.12	55.77
6	架体偏西弯曲失稳	630.86	70.10
7	架体偏南弯曲失稳	599.45	66.61

根据 7 个模型的试验现象及破坏模式可知, 加载早期, 支撑体系无明显变化; 加载到中期过程中架体均发生轻微响声, 表明节点或杆件开始发生微滑移或局部微变形。各模型的失稳模式明显区分为两类: 扭转失稳与弯曲失稳。其中, 未设置斜杆的模型 1~4 均发生扭转失稳 (模型 1 为逆时针扭转, 模型 2~4 为顺时针扭转), 表明在缺乏斜向约束的条件下, 架体易发生整体扭转; 而模型 5~7 则呈现为不同方向的弯曲失稳 (偏北、偏西、偏南), 说明在具备一定斜杆布置或构造条件下, 架体的破坏更可能表现为整体弯曲,

且稳定承载力均高于未布置斜杆的模型。说明斜杆的布置可以影响支撑架体的失效模式。

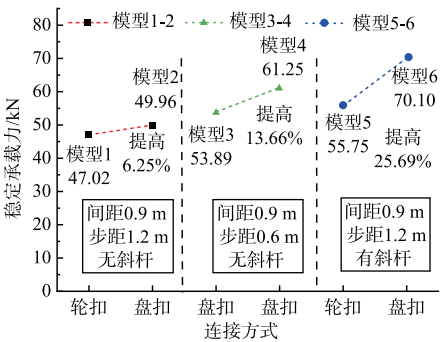
2.3 搭设参数对单杆稳定承载力影响

由图 4 (a) 可知, 盘扣式连接在单杆稳定承载力方面均高于轮扣式连接, 其提升幅度与步距和斜杆设置均有关。在未布置斜杆时, 当步距为 1.2 m、立杆间距为 0.9 m×0.9 m 时, 盘扣式连接比轮扣式连接提高 6.25%; 步距减小至 0.6 m (立杆间距不变) 时, 提升幅度增至 13.66%。在布置斜杆后 (步距 1.2 m, 立杆间距 0.9 m×0.9 m), 盘扣式连接的优势进一步增大, 承载力提升达 25.69%。主要是由于盘扣式连接节点转动刚度更大, 能更有效地约束杆件变形。

由图 4 (b) 可知, 减小水平杆步距可显著提高单杆稳定承载力。当立杆间距为 0.9 m×0.9 m 时, 步距从 1.2 m 减小到 0.6 m, 轮扣式连接的承载力提高 14.36%, 盘扣式连接的承载力提高 22.60%。主要原因在于步距减小使立杆计算长度减小, 降低了长细比, 从而提高稳定承载力。

由图 4 (c) 可知, 水平杆步距为 1.2 m 时, 立杆间距由 1.2 m×1.2 m 减小到 0.9 m×0.9 m, 盘扣式连接的承载力提高 5.24%。立杆间距减小对提升单杆稳定承载力具有一定的影响, 但提升幅度相对较小。

由图 4 (d) 可知, 布置斜杆对单杆稳定承载力具有显著提升作用。在步距为 1.2 m, 立杆间距为 0.9 m×0.9 m 的条件下, 轮扣式连接架体布置斜杆后承载力提高 18.61%, 盘扣式连接架体提高 33.40%。斜杆的设置对支撑体系提供了有效的侧向约束, 抑制整体扭转失稳并提升其稳定承载力。



(a) 不同连接方式对比

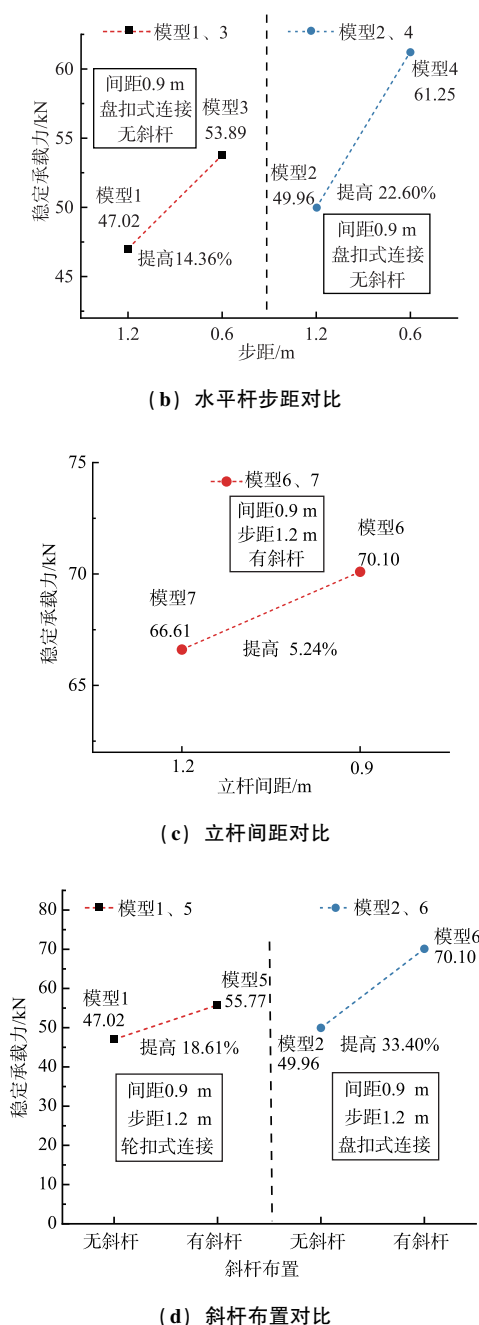


图4 搭设参数对单杆稳定承载力影响

Fig. 4 Effect of erection parameters on stability capacity of single members

2.3 承载力与规范值对比

为验证现行相关规范的适用性,将获得的试验支撑架体承载力转换为单根杆件的极限承载力与JGJ 300—2013《建筑施工临时支撑结构技术规范》及CFSA/T08—2022《盘轮扣复合型支撑架安全技术标准》计算承载力进行了对比分析。对比结果见

表4。

表4 规范计算值与试验结果对比
Table 4 Comparison between standard calculation values and test results

序号	N_t /kN	N_c /kN	N_j /kN	N_t/N_j	N_t/N_c
1	47.02	28.27	18.62	2.53	1.66
2	49.96	28.27	20.66	2.42	1.77
3	53.89	39.16	39.68	1.36	1.38
4	61.25	39.16	44.58	1.37	1.56
5	55.77	28.27	28.54	1.95	1.97
6	70.10	28.27	31.53	2.22	2.48
7	66.61	28.27	36.56	1.82	2.36

注: N_t 为试验承载力; N_j 为采用JGJ 300—2013中公式得到的承载力; N_c 为CFSA/T08—2022得到的承载力。

所有试件的试验承载力均明显高于两个规范计算值。对于JGJ 300《建筑施工临时支撑结构技术规范》规范,试验值与规范计算值之比为1.36~2.53,平均比值约为1.93。对于CFSA/T08标准,试验值与规范计算值之比为1.38~2.48,平均比值约为1.88。表明盘轮扣式模板支撑架在试验中表现出良好的实际承载性能,均高于现行主要规范的计算值。其中,对于步距为0.6 m的模型3与模型4,其试验值与规范计算值的比值偏低(1.38~1.56),安全储备相对较小。建议在后续相关设计方法修订与完善过程中,可针对此类步距的支撑架体,适当提高其设计安全系数,以进一步保障结构在实际工程中的安全可靠。

3 结论

对盘轮扣复合钢管支撑架体系进行了7组足尺模型试验,研究连接方式、水平杆步距、立杆间距及斜杆布置等因素对支撑架力学性能的影响,以及将试验结果与现行规范计算值进行对比,得到以下结论:

(1) 对于盘轮扣复合钢管支撑架体系,优先选用盘扣式连接方式,并合理控制水平杆步距,避免使用过大步距;应在支撑体系中布置斜杆,尤其在步距较大或荷载较高区域,以显著提升整体稳定性与承载能力。

(2) 由试验现象可知支撑架体在未布置斜杆时易发生扭转失稳,布置斜杆后则为弯曲失稳,表明斜杆是控制支撑架体破坏形态的关键因素。

(3) 试验与规范值对比分析表明,步距0.6 m

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.