

DOI: 10.7672/sjgs2025180030

标准型盘扣式支撑架整体力学性能分析及 设计方案优化*

张新, 张放, 吕家翰

(山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101)

[摘要] 承插型盘扣式支撑架现已广泛应用于建筑施工模板体系中, 目前针对盘扣式支撑架节点刚度、架体构造研究较多, 而对不同搭设条件下支撑架整体力学性能研究尚显不足。针对标准型盘扣架立杆间距、悬臂端高度(a 值)、支模高度和主、次龙骨材料等不同影响因素, 分别建立 40 组无主、次龙骨纯架体搭设方案和有主、次龙骨支撑架模板搭设方案。基于有限元软件 ANSYS, 对比分析不同影响因素对盘扣式支撑架整体力学性能的影响。分析结果表明: 悬臂端高度对单根立杆极限承载力的影响最大, 规范中悬臂端最高和最低限制立杆承载力相差约 2 倍; 立杆间距对次龙骨跨中挠度影响最大, 抗弯强度高的龙骨可充分发挥盘扣式支撑架整体力学性能。根据理论计算结果给出混凝土楼板支模建议参考表并进行了实践验证。

[关键词] 盘扣式支撑架; 力学性能; 龙骨; 极限承载力; 挠度; 有限元分析; 优化

[中图分类号] TU731.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0030-07

Overall Mechanical Property Analysis and Design Scheme Optimization of Standard Plate-type Support

ZHANG Xin, ZHANG Fang, LÜ Jiahan

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: The socket plate-type support has been widely adopted in the formwork system of construction projects. While extensive research has been conducted on the joint stiffness and structural configuration of socket plate-type support, there remains a lack of studies focusing on the overall mechanical performance of the plate-type support under varying erection conditions. This paper addresses this gap by investigating key factors such as the spacing of the vertical standards, cantilever height (a value), formwork height, and materials used for primary and secondary keels. A total of 40 group schemes are established, including configurations with purely support structures without primary and secondary keels, as well as those incorporating beam-supported formwork. Using finite element software ANSYS, the study conducts a comparative analysis of the influence of these factors on the overall mechanical performance of the plate-type support. The analysis results show that the cantilever height has the most significant impact on the ultimate load-bearing capacity of a single vertical standard, with the load-bearing capacity varying by a factor of two times between the maximum and minimum limits specified in the standards. Additionally, the spacing of the vertical standards has the greatest effect on the mid-span deflection of the secondary keels, with higher bending strength keels allowing the plate-type support system to fully utilize its mechanical performance. Based on theoretical calculations, this paper provides a reference table for support formwork in concrete slab construction, which is validated through practical application.

Keywords: plate-type supports; mechanical properties; keels; ultimate bearing capacity; deflection; finite element analysis; optimization

* 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2021CXGC011204)

[作者简介] 张新, 副教授, 硕士生导师, E-mail: 15969698504@

163.com

[收稿日期] 2024-09-18

0 引言

承插型盘扣式支撑架模板支撑体系是一种临

时搭设的钢结构体系,由于强度高、安装方便、耐腐蚀强等优点,现已广泛应用于建筑模板工程中。建筑模板施工中,盘扣式模板支撑架搭设方案多采用“双钢管作为主龙骨,木枋作为次龙骨”的龙骨体系,但由于木枋易变形、易老化和钢管材质不均等缺点,“以钢代木”施工方法现广泛应用于支模工程中。现如今,我国对承插型盘扣式支撑架已有较多研究,多数学者对盘扣式支撑架节点处竖向立杆和水平横杆的连接进行研究,并对规范给出的节点转动刚度进行了优化^[1-5]。王军等^[6]、刘京红等^[7]通过研究斜杆节点刚度和斜杆布置对盘扣式支撑架体承载力的影响,给出最优的盘扣式支撑架斜杆布置。周继忠等^[8]通过研究不同搭设方案的单跨两步的盘扣式支撑架,得出不同立杆布局对整体盘扣式支撑架承载力的影响。孙伯禹等^[9]设计出盘扣式脚手架和三角撑组合的架体结构,表明该结构完全满足楼板施工的支撑需求。田鹏刚等^[10]研究了横杆插头楔紧度对架体承载力的影响,指出施工过程中模板支撑架纵横方向刚度不宜相差过大。

综上所述,我国对盘扣式支撑架的研究主要集中在其节点刚度和架体构造上。本文采用有限元软件 ANSYS 对比分析支模不同跨度、不同主次龙骨材料、不同高度和悬臂端高度(a 值)对盘扣式支撑架承载力的影响,给出实际工程中盘扣式模板支撑搭设方案建议,并以实际支模工程为依托进行相关验证。

1 盘扣式支撑架计算方案

1.1 计算方案设计

传统的盘扣式支撑架模板体系自下而上由可调底座、立杆、横杆、竖向斜杆、水平斜杆、可调托撑、钢管、木枋和面板组成,如图 1 所示。

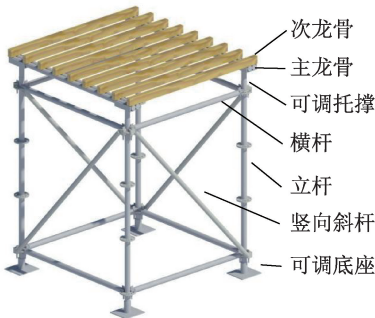


图 1 盘扣式支撑架模板体系构造

Fig. 1 Structure of the plate-type support formwork system

影响盘扣式支撑架模板体系整体力学性能的因素较多,本文以立杆间距、 a 值、搭设高度和主、次

龙骨材料为计算方案中主要变量:①5 组立杆间距,分别为 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$, $600\text{mm} \times 900\text{mm}$, $900\text{mm} \times 900\text{mm}$, $900\text{mm} \times 1\,200\text{mm}$, $1\,200\text{mm} \times 1\,200\text{mm}$;②4 种 a 值,分别为 350, 450, 550, 650mm;③2 种搭设高度,分别为 5.5, 8.5m;④2 种主、次龙骨材料,一种为主龙骨双钢管、次龙骨木枋,另一种主、次龙骨均为方钢管。

根据以上 4 种变量设计了 2 种分析方案:①无主、次龙骨的纯架体搭设方案,即为得到不同影响因素对标准型盘扣式支撑架单根立杆极限承载力的影响,以立杆间距、 a 值和搭设高度为变量,组合出 40 组无主、次龙骨纯架体搭设方案,无主、次龙骨架体搭设方案如表 1 所示;②含有主、次龙骨的模板体系搭设方案,即在纯架体搭设方案基础上,改变主、次龙骨材料,组合出 40 组有主、次龙骨支撑架模板搭设方案,得到不同立杆间距、 a 值和主、次龙骨材料对支撑架极限承受荷载的影响,有主、次龙骨模板体系搭设方案如表 2 所示。

本文致力于对实际现场施工支模体系进行设计优化,实现变量统一和模拟试验搭设面积应趋近施工现场,保证架体搭设面积一致,取 0.6, 0.9, 1.2m 的最小公倍数 7.2m 为搭设范围,依此得出立杆间距为 600mm,立杆跨数为 12 跨;立杆间距为 900mm,立杆跨数为 8 跨;立杆间距为 1 200mm,立杆跨数为 6 跨。依据规范中对布距为 1.5m 的标准型支撑架斜杆布置要求,竖向斜杆布置形式为间隔 2 跨。以 $a=450\text{mm}$ 悬臂端高度, $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 架体(架体方案 1- a_2)为例,立杆布置如图 2 所示。

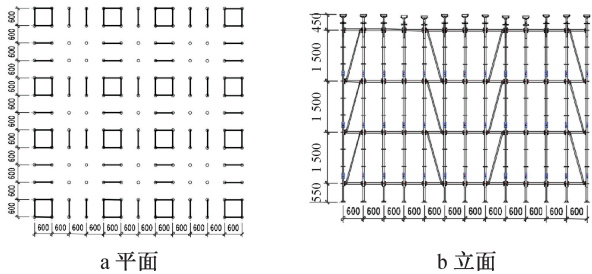


图 2 立杆布置

Fig. 2 Layout of the standards

1.2 模型建立假定

采用有限元软件 ANSYS 进行模拟分析,有限元模型建立基于以下假定。

1) 立杆底部与地面、立杆顶部与主龙骨和主龙骨与次龙骨间的接触均为铰接,次龙骨顶部不设置约束。

2) 立杆与立杆间的连接为理想刚接,斜杆与立杆间的连接为理想铰接,水平杆与立杆间的连接为

表 1 架体搭设方案设计

方案	立杆间距/ mm	水平杆步距/ mm	搭设高度/ m	a/mm				竖向斜杆布置
				a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	
方案 1	600×600	1 500	5. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 2	600×900	1 500	5. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 3	900×900	1 500	5. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 4	900×1 200	1 500	5. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 5	1 200×1 200	1 500	5. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 6	600×600	1 500	8. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 7	600×900	1 500	8. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 8	900×900	1 500	8. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 9	900×1 200	1 500	8. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨
方案 10	1 200×1 200	1 500	8. 5	350	450	550	650	间隔 2 跨

表 2 模板体系搭设方案设计

方案	立杆间 距/mm	水平杆步 距/mm	搭设高 度/m	a/mm				主龙骨/ mm	次龙骨/ mm	竖向斜杆 布置
				a ₁	a ₂	a ₃	a ₄			
方案 1	600×600	1 500	5. 5	350	450	550	650	φ48. 3×3. 6 双钢管	40×70 木枋	间隔 2 跨
方案 2	600×900	1 500	5. 5	350	450	550	650	φ48. 3×3. 6 双钢管	40×70 木枋	间隔 2 跨
方案 3	900×900	1 500	5. 5	350	450	550	650	φ48. 3×3. 6 双钢管	40×70 木枋	间隔 2 跨
方案 4	900×1 200	1 500	5. 5	350	450	550	650	φ48. 3×3. 6 双钢管	40×70 木枋	间隔 2 跨
方案 5	1 200×1 200	1 500	5. 5	350	450	550	650	φ48. 3×3. 6 双钢管	40×70 木枋	间隔 2 跨
方案 6	600×600	1 500	8. 5	350	450	550	650	80×60×3 方钢管	50×50×3 方钢管	间隔 2 跨
方案 7	600×900	1 500	8. 5	350	450	550	650	80×60×3 方钢管	50×50×3 方钢管	间隔 2 跨
方案 8	900×900	1 500	8. 5	350	450	550	650	80×60×3 方钢管	50×50×3 方钢管	间隔 2 跨
方案 9	900×1 200	1 500	8. 5	350	450	550	650	80×60×3 方钢管	50×50×3 方钢管	间隔 2 跨
方案 10	1 200×1 200	1 500	8. 5	350	450	550	650	80×60×3 方钢管	50×50×3 方钢管	间隔 2 跨

半刚性连接。

3) 施加荷载采用均布荷载布置, 均匀布置在次龙骨上端。

4) 立杆与水平杆间的半刚性节点设置在水平杆单元两端。半刚性计算模型如图 3 所示。

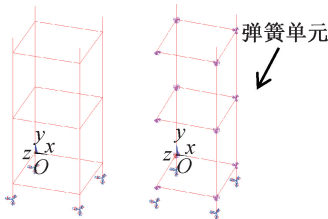


图 3 半刚性计算模型

Fig. 3 Semi-rigid calculation model

1.3 模型材料及参数

由规范给出的构件材料规格可知, 立杆采用 Q355 钢, 水平杆、斜杆采用 Q235 钢, 主龙骨为双钢管时选择 Q235 钢, 次龙骨为木枋时选择含水率≤20% 的杉木, 主、次龙骨为方钢管时选择 Q235 钢。立杆、水平杆、斜杆和主、次龙骨均采用梁单元 beam188, 水平杆与立杆的半刚性连接采用在水平杆起点两端设置转动弹簧单元 combin39 模拟实现, 节点转动刚度取值为 50(kN·m)/rad^[4]。盘扣式支撑架体材料参

数依据相关规范取值, 各材料参数如表 3 所示。

2 架体分析

屈曲分析模式下, 无主、次龙骨的纯架体和有主、次龙骨的支撑架模板体系呈现的破坏形式不同。无主、次龙骨的纯架体结构立杆承受的荷载直接施加在各立杆顶部, 而支模体系立杆承受的荷载由主、次龙骨间接传递给立杆。在整个体系中立杆为受压构件, 主、次龙骨为受弯构件。立杆受压状态下, 单根立杆达到极限承载力时架体发生破坏, 此时不再计算并将此承载力作为架体单根立杆极限承载力; 而主、次龙骨受弯状态下, 荷载作用下使得主、次龙骨发生弯曲, 次龙骨发生破坏时的荷载即为支撑架模板体系的极限承受荷载。

根据有限元模拟分析数据可知, 盘扣式支撑架单根立杆具有较高承载力。架体模拟结果如图 4 所示, 单根立杆极限承载力模拟结果如表 4 所示。

对比表 4 中各方案架体承载力数据可得以下结论。

1) 相同立杆间距下, 可调托撑到架体顶层水平杆距离每增加 100mm, 单根立杆极限承载力下降 18%~20%。其原因在于当悬臂长度增加时, 立杆顶部承受的荷载会产生更大偏心距, 偏心距增大会

表 3 盘扣式支撑架材料参数

Table 3 Material parameters of plate-type support								
项目	外径(边长/高)/mm	壁厚(宽)/mm	面积/cm ²	惯性矩/cm ⁴	截面模量/cm ³	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/(N·mm ⁻²)	泊松比
立杆	48.3	3.2	4.53	11.58	4.80	7 850	2.06×10 ⁵	0.30
水平杆	48.3	2.5	3.60	9.46	3.92	7 850	2.06×10 ⁵	0.30
斜杆	48.3	2.5	3.60	9.46	3.92	7 850	2.06×10 ⁵	0.30
双钢管	48.3	3.6	5.06	12.71	5.26	7 850	2.06×10 ⁵	0.30
方钢管	50.0	3.0	2.40	16.94	6.78	7 850	2.06×10 ⁵	0.30
木枋	70.0	40.0	28.00	256.00	64.00	550	9.50×10 ³	0.45

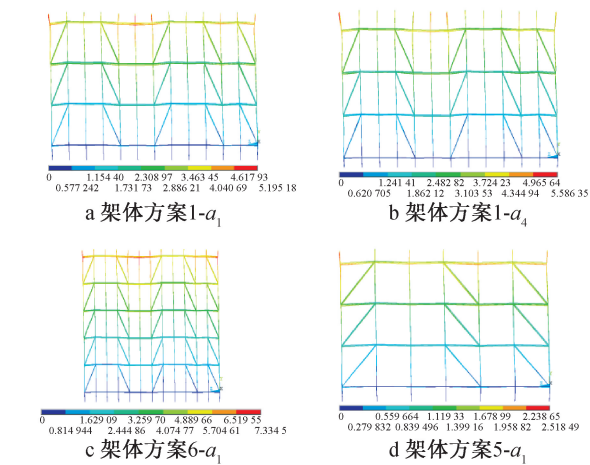


图 4 架体有限元位移云图

Fig. 4 Finite element displacement of plate-type support

表 4 架体单根立杆极限承载力

Table 4 Ultimate bearing capacity of single standard of plate-type support					kN
方案	单根立杆极限承载力				
	a ₁ = 350mm	a ₂ = 450mm	a ₃ = 550mm	a ₄ = 650mm	
方案 1	120.07	97.74	79.61	65.28	
方案 2	116.47	94.92	76.09	62.39	
方案 3	113.63	92.49	75.84	62.2	
方案 4	111.60	91.11	73.11	59.59	
方案 5	108.25	86.60	70.49	57.80	
方案 6	118.75	96.66	79.26	68.32	
方案 7	114.95	93.75	76.87	61.50	
方案 8	111.50	90.86	72.82	59.64	
方案 9	109.97	89.73	72.33	57.86	
方案 10	107.55	87.37	70.77	56.62	

导致立杆截面上的应力分布更加不均匀,从而降低单根立杆承载力。对比图 4a 和图 4b 可得,架体悬臂端是影响立杆极限承载力的关键, a 值越大,屈服位置越易发生在立杆顶部。

2)架体支模高度增加会使单根立杆极限承载力减小,支模高度增加 3m 单根立杆极限承载力下降 0.5%~1.6%。分析原因为,支模高度增加会影响支撑体系稳定性、荷载分布及架体高宽比,从而影响单根立杆的极限承载力。对比图 4a 和图 4c 可

得,支模高度增加,架体屈服位置大致相同。

3)随着立杆跨度间距增大,单根立杆极限承载力逐渐减小。架体立杆间距单向每增加 300mm,单根立杆极限承载力下降 1%~3.4%;架体立杆间距双向每增加 300mm,架体竖向极限承载力下降 3.1%~3.5%。立杆间距增大,削弱了相邻立杆间约束,不利于控制立杆侧向变形,降低了立杆的屈曲稳定性。对比图 4a 和图 4d 可得,立杆间距增大,架体屈服位置大致相同。

综上可得, a 值增加对单根立杆极限承载力的影响相比于架体高度和立杆间距较大。降低 a 值可有效分散盘扣式支撑架结构上荷载,减小结构整体摇摆和倾斜程度,减小盘扣式支撑架体顶部位移。因此在实际支模施工中应谨慎设计悬臂端长度。

3 整体分析

3.1 模板体系主、次龙骨分析

盘扣式支撑架模板体系中荷载传递路径依次为面板→次龙骨→主龙骨→盘扣式支撑架体。有限元模型施加荷载时,上部传递的荷载全部作用在次龙骨上,即对次龙骨施加竖向均布荷载。当计算结果表示为不收敛状态时,将此时的荷载视为模板体系极限承受荷载。

双钢管为主龙骨、木枋为次龙骨时,有限元分析结果如表 5 所示;方钢管为主、次龙骨时有限元分析结果如表 6 所示;以 $a=450\text{mm}$ 为例,不同跨度次龙骨有限元位移云图如图 5 所示。

表 5 钢管+木枋模板体系极限承载力

Table 5 Ultimate bearing capacity of the steel pipe + wood brace formwork system (N·mm ⁻¹)				
方案	主龙骨材料:		次龙骨材料:	
	双钢管(φ48.3×3.6)		木枋(40mm×70mm)	
	a ₁ = 350mm	a ₂ = 450mm	a ₃ = 550mm	a ₄ = 650mm
方案 1	23.35	18.68	15.69	12.55
方案 2	15.32	11.80	9.32	7.55
方案 3	10.35	7.97	6.37	4.91
方案 4	8.23	6.51	5.21	4.17
方案 5	5.83	4.49	3.59	2.73

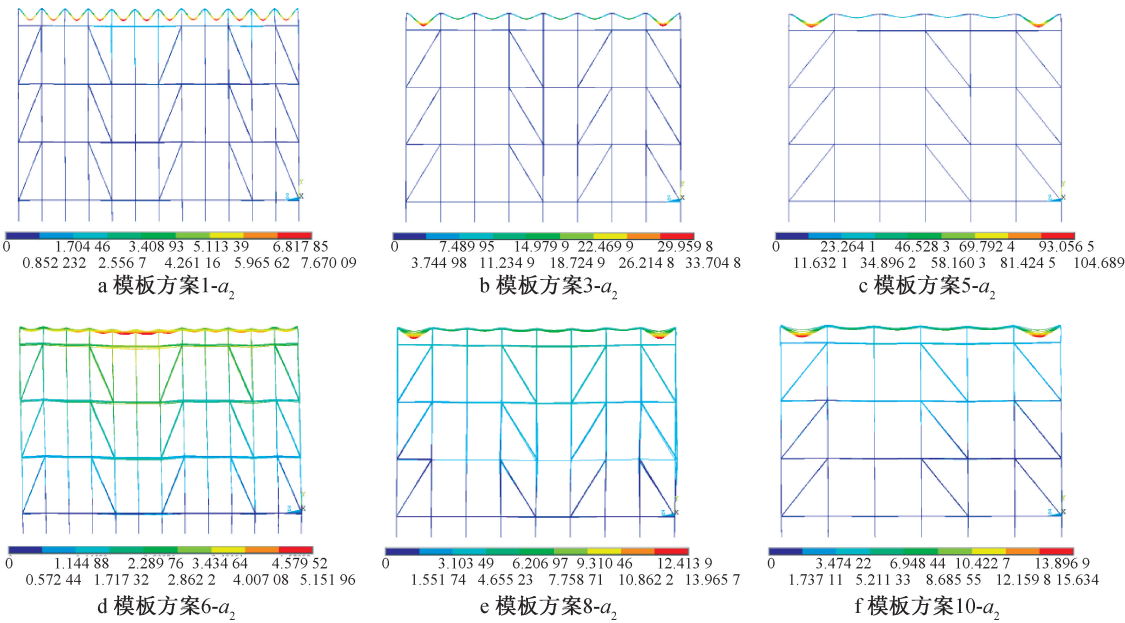


图 5 模板体系次龙骨有限元位移云图

Fig. 5 Finite element displacement of secondary keels of the formwork system

表 6 方钢管模板体系极限承载力

Table 6 Ultimate bearing capacity of the square steel pipe formwork system (N·mm ⁻¹)				
方案	主龙骨材料:方钢管 (100mm×50mm×3mm)		次龙骨材料:方钢管 (50mm×50mm×3mm)	
	$\alpha_1=350\text{mm}$	$\alpha_2=450\text{mm}$	$\alpha_3=550\text{mm}$	$\alpha_4=650\text{mm}$
方案 6	88.91	70.24	55.49	42.73
方案 7	58.22	44.24	34.06	26.91
方案 8	38.96	30.54	24.13	18.82
方案 9	31.95	25.24	19.56	15.45
方案 10	20.33	16.26	12.83	9.99

1)随着立杆跨度间距增大,次龙骨极限承载力逐渐减小。架体立杆间距单向每增加 300mm,次龙骨极限承载力下降 17%~25%;架体立杆间距双向每增加 300mm,单根次龙骨极限承载力下降 44%~56%。其原因在于,立杆间距大小直接关系到次龙骨支撑稳定性,并直接影响到次龙骨是否能得到有效支撑,立杆间距过大会导致次龙骨因支撑不足使其跨中出现变形或失稳,进而影响整个模板体系的稳定性和安全性。

2)当龙骨为“钢管+木枋”时,可悬臂端每增加 100mm,次龙骨极限承载力下降 20%~24%;当次龙骨为方钢管时,悬臂端每增加 100mm,次龙骨极限承载力下降 21%~23%。悬臂段越大,偏心受力越明显,次龙骨极限承载力越小。

3)支撑架龙骨为方钢管的极限承载力明显优于龙骨为木枋的极限承载力,极限承载力可提升约 4 倍。其原因在于,方钢管的抗弯和抗剪性能远远优于传统木枋,这使得其在承受荷载时更加稳定

可靠,进而使整个模板支撑架体系力学性能更加优异。

4)分别对比图 5a~图 5f,结果共同表明:同次龙骨材料下,立杆间距越大,次龙骨破坏时跨中挠度越大;分别对比图 5a 和图 5d、图 5b 和图 5e、图 5c 和图 5f,结果共同表明:相同立杆间距下,方钢管作为龙骨的抗弯性能明显优于“钢管+木枋”。当跨度>600mm 时,次龙骨破坏时最大挠度均发生在两侧边跨。2 种模板体系的次龙骨发生破坏时,主龙骨均无明显位移,该现象表明:当次龙骨发生破坏时,传递到主龙骨上的荷载远小于其最大承受荷载,不足以使其破坏。

3.2 实际工程搭建建议

由架体有限元模拟分析可知,立杆间距过大会导致次龙骨因支撑不足而出现变形或失稳,进而影响整个模板体系的稳定性和安全性;相反,如果立杆间距过小,虽可增强支撑稳定性,但会增加材料成本和施工难度。在实际施工过程中,合理选择支模材料、架体间距和悬臂端高度可有效提高模板支撑架工程的安全性和经济性。本文致力于为实际工程支模提供参考,根据有限元分析结果,给出楼板支撑架既可靠又经济的立杆间距、可调托撑至架体顶层水平杆距离(a 值)和次龙骨材料的组合,不同混凝土楼板厚度支模情况如表 7、8 所示。

4 工程应用

4.1 工程概况

某商贸迁建项目位于山东省济南市崔寨北片

表 7 混凝土楼板支模建议参考(钢管+木枋)

Table 7 Reference for formwork support of concrete floor (steel pipe + wood brace)				mm
项目	混凝土楼板厚度			
	$h \leq 200$	$200 < h \leq 300$	$300 < h \leq 500$	$500 < h \leq 600$
支撑架体系	承插型盘扣式支撑架模板体系			
支撑架体规格	立杆 ($\phi 48.3 \times 3.2$)		水平杆和斜杆 ($\phi 48.3 \times 2.5$)	
主、次龙骨规格	主龙骨材料: 双钢管 (48.3×3.6 , 计算按 2.7 壁厚)			
	次龙骨材料: 木枋 (40×70) , 间距 200			
立杆间距	900×1 200	900×900	600×900	600×600
可调托撑至架体顶层水平杆距离	350 ~ 650			

表 8 混凝土楼板支模建议参考(方钢管)

Table 8 Reference for formwork support of concrete floor (square steel pipe)				mm
项目	混凝土楼板厚度			
	$h \leq 300$	$300 < h \leq 600$	$600 < h \leq 1\ 000$	
支撑架体系	承插型盘扣式支撑架模板体系			
支撑架体规格	立杆(φ48.3×3.2)		水平杆和斜杆(φ48.3×2.5)	
主、次龙骨规格	主龙骨材料:方钢管(80×60×3) 次龙骨材料:方钢管(50×50×3),间距200			
立杆间距	1 200×1 200	900×1 200	900×900	
可调托撑至架体顶层水平杆距离	350~650			

区,黄河大道以东,英才学院南路以北,规划路以西,地上部分1~3号楼呈现C字形并相互串联,地上建筑面积61 998.74m²,地下建筑面积32 452.97m²,主要建设内容1号楼为商业建筑,2号楼为办公建筑,3号楼为酒店建筑。选取该项目中300mm厚楼板,支模高度4.6m,该楼板属于支模荷载超限的高支模范畴,应按高支模安全专项施工方案要求进行设计。

4.2 搭设方案

将本文结论应用于300mm楼板支模搭设方案,根据表7、8设计2种支模搭设方案,采用承插型盘扣式支撑架体系,立杆规格为φ48.3×3.2,水平杆和斜杆规格均为φ48.3×2.5,面板规格为12mm厚木胶合板模板。

搭设方案如下。

1)方案1。立杆间距为900mm×900mm。次龙骨采用40mm×70mm木枋,次龙骨间距200mm,板底模主龙骨采用φ48.3×3.6(计算按2.7mm壁厚)双钢管,间距为900mm,主龙骨跨度为900mm;立杆步距为1 500mm,立杆顶部加密为1 000mm;立杆伸出扫天杆至可调顶托长度为300mm,立杆扫地杆与持力层距离为300mm;竖向斜杆沿纵横向每隔2跨布置。

2)方案2。立杆间距1 500mm×1 500mm。次龙骨采用50mm×50mm×3mm方钢管,间距200mm,主龙骨采用80mm×60mm×3mm方钢管,间距为1 200mm,主龙骨跨度为1 200mm;立杆步距为1 500mm,立杆顶部加密为1 000mm;立杆伸出扫天杆至可调顶托长度为300mm,立杆扫地杆与持力层

距离为300mm;竖向斜杆沿纵横向每隔2跨布置。

4.3 计算结果

根据GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》进行荷载取值,荷载取值计算如下:

$$S_d = \sum_{j=1}^m \gamma_{c_j} S_{c_{j_k}} + \sum_{i=1}^n \gamma_{q_i} \gamma_{L_i} \psi_{c_i} S_{q_{i_k}} \tag{1}$$

式中: S_d 为永久荷载效应标准值; γ_{c_j} 为第 j 个永久荷载的分项系数,取1.3; γ_{q_i} 为第 i 个可变荷载的分项系数,取1.5; γ_{L_i} 为第 i 个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数; $S_{c_{j_k}}$ 为按第 j 个永久荷载标准值 G_{j_k} 计算的荷载效应值; $S_{q_{i_k}}$ 为按第 i 个可变荷载标准值 Q_{i_k} 计算的荷载效应值; ψ_{c_i} 为第 i 个可变荷载的组合值系数。

作用在次龙骨上的荷载由钢筋混凝土永久荷载、12mm厚面板永久荷载和施工人员及设备活荷载组成。经计算得到作用在次龙骨上的线荷载取值为2.84kN/m。方案立杆平面如图6所示,有限元计算结果如图7、表9所示。

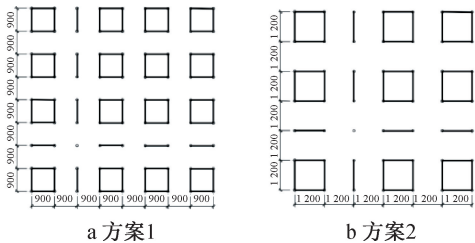


图 6 各方案立杆平面

Fig. 6 Standard plan for each scheme

上述二者有限元分析验算结果均满足规范要

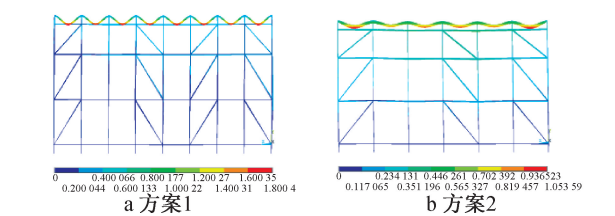


图 7 各方案有限元位移云图

Fig. 7 Finite element displacement for each scheme

表 9 搭设方案有限元结果
Table 9 Finite element results for construction schemes

有限元分析验算参数	方案	
	方案 1	方案 2
次龙骨挠度 $\nu_{\text{次}}/\text{mm}$	1.80	1.00
次龙骨抗剪强度 $\tau_{\text{次}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	0.91	9.68
次龙骨强度 $\sigma_{\text{次}}/\text{MPa}$	8.14	60.67
主龙骨挠度 $\nu_{\text{主}}/\text{mm}$	1.45	0.55
主龙骨抗剪强度 $\tau_{\text{主}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	29.47	34.49
主龙骨强度 $\sigma_{\text{主}}/\text{MPa}$	189.79	196.86
立杆稳定性 $\sigma_{\text{立}}/\text{MPa}$	87.18	146.14

求,且方案 2 支撑架展示出的力学性能均优于方案 1。根据表 9 可得以下结论。

1)从结构变形层面分析,方案 2 主、次龙骨跨中变形均小于方案 1,方案 2 结构刚性更好,变形控制更优。

2)从结构强度层面分析,对比分析方案 1 和方案 2 主龙骨强度,方案 1 和方案 2 主龙骨应力均接近极限应力 205MPa,且方案 2 主龙骨应力大于方案 1;对比分析方案 1 和方案 2 立杆稳定性,方案 2 立杆应力大于方案 1。由此可得,方案 2 立杆材料利用率高于方案 1,能发挥出材料更好的力学性能。

3)从经济效益层面分析,对比分析方案 1 和方案 2 材料使用量可得,每 100m² 的满堂支撑架搭设区域,方案 2 较方案 1 减少立杆 53 根,大大降低了立杆使用量。并且方钢管作为龙骨可重复使用,达到环保施工要求。

综上所述,方案 2 在变形控制、材料利用率及经济效益和环保性方面均优于方案 1,是更优选的施工方案。因此,在实际施工中可优先选择方钢管作为支撑架体系的龙骨,使用少量模板支撑架材料发挥出更优力学性能,且提高了支撑架整体力学性能、减少立杆使用数量。

5 结语

通过不同搭设方案有限元模拟对比得出,悬臂端高度对单根立杆极限承载力影响最大。架体 $a=350\text{mm}$ 的单根立杆承载力约为 $a=650\text{mm}$ 的 2 倍;相同龙骨材料下,立杆跨度对支撑架承载力影响最大。立杆间距 $600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 与立杆间距 $1\,200\text{mm}\times$

$1\,200\text{mm}$ 相比,支撑架极限承载力提高约 4 倍;相较于传统木枋,方钢管作为次龙骨可将次龙骨极限承载力提升约 4 倍。设计合理的支模搭设方案可有效提高立杆承载力和龙骨承载力。现浇板支模搭设方案采用标准型盘扣式支撑架体可参照混凝土楼板支模建议表进行设计,为实际工程中楼板模板搭设提供了参考。

参考文献:

[1] 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): 1224-1231.
ZHANG L B, LIU J H, LI B B, et al. Study on joint rotational stiffness and stable bearing capacity of disk lock steel tubular scaffold [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43 (12): 1224-1231.

[2] 刘哲,刘战伟,张兆龙,等. 重型承插型盘扣式钢管脚手架连接节点抗弯性能研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(2): 110-116.
LIU Z, LIU Z W, ZHANG Z L, et al. Bending performance of heavy-duty socket-type disk lock steel tubular scaffold connection joints [J]. Construction technology, 2024, 53 (2): 110-116.

[3] 郭晨,杨政,岳炎超,等. 不同杆件间节点转动刚度对盘扣式支架力学性能影响分析[J]. 建筑结构, 2023, 53 (S2): 1205-1209.
GUO C, YANG Z, YUE Y C, et al. Analysis on the influence of rotational stiffness of joints between different members on the mechanical properties of disk-buckle support [J]. Building structure, 2023, 53 (S2): 1205-1209.

[4] 肖明葵,徐灿,段军,等. 承插型盘扣式模板支撑体系节点半刚性研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(12): 228-233.
XIAO M K, XU C, DUAN J, et al. Research on the semi-rigid joint of disk lock steel tubular type for support system [J]. Science technology and engineering, 2017, 17 (12): 228-233.

[5] 陈桂香,郭泽群,胡德平,等. 承插型盘扣式钢管支架盘扣节点抗扭刚度影响因素[J]. 科学技术与工程,2020,20(8): 3231-3237.
CHEN G X, GUO Z Q, HU D P, et al. Influence factor of the disk-pin joint node torsional stiffness of the disk lock steel tubular scaffold [J]. Science technology and engineering, 2020, 20 (8): 3231-3237.

[6] 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.
WANG J, GUO Z Q. Influence of axial stiffness of diagonal brace on stability bearing capacity of disk lock steel tubular scaffolds [J]. Construction technology, 2019, 48 (22): 97-100.

[7] 刘京红,李文坡,张凌博,等. 承插型盘扣式钢管支撑脚手架试验及有限元分析[J]. 北京理工大学学报,2023,43(5): 478-484.
LIU J H, LI W P, ZHANG L B, et al. Experiment and finite element analysis for disk lock steel tubular scaffold [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43 (5): 478-484.

和桥梁整体颜色一致。

3.4 质量标准及验收

1) 钢板梁上表面和原梁桥面间湿接缝下表面必须紧密贴实,上部荷载才能有效传递;自调坡支座系统通过上部荷载受力自动调整坡度,使钢板梁上部结构表面与原梁湿接缝底部接触更紧密,支座应正确安装,发挥传力效果。

2) 钢板梁底板无粘结预应力钢棒对钢板梁整体刚度贡献较大,因此预应力钢棒张拉强度是一个关键,张拉力必须达到设计要求,工程中采用专用张拉器进行预应力张拉,张拉强度采取张拉力和钢棒伸长量“双控制”。

3) 利用荷载重分布桥梁承载力提升技术加固完后,按国家桥梁承载力评定规范利用 6 辆 40t 加载车进行了桥梁承载力测试,结果显示:增梁后,箱梁承受自重、汽车荷载效应均降低,箱梁底板最大正弯矩降低 20.9%~29.9%,墩顶负弯矩降低 42.4%~49.9%。通过和原桥箱梁抗弯弯矩相比较,边跨承载力提升 47.5%,中跨承载力提升 50.2%。增加钢板梁后,边梁最大影响线系数由 0.456 7 降为 0.360 5,降幅 21.1%;中梁最大影响线系数由 0.321 降为 0.237 7,降幅 26.0%;边跨箱梁应变平均下降 54.4%,中跨平均下降 30.0%;边跨箱梁挠度平均下降 37.90%,中跨平均下降 33.96%。测试结果满足桥梁荷载等级公路-I 级的要求。

4 结语

1) 荷载重分布技术是通过在原桥两箱梁湿接缝正下方安装钢板梁,通过支撑系统将桥梁恒载和汽车活载重分布后传递到桥梁下部结构,桥梁承载力检测结果表明,该承载力提升方法可有效提高桥梁承载力,满足桥梁耐久性及方便安装要求。

2) 荷载重分布小箱梁承载力提升技术的关键点是钢板梁设计和支撑系统使用,使钢板梁能有效分担分配恒载和活载效应并将该荷载效应传递到

桥梁下部结构。

3) 荷载重分布承载力提升所使用的钢板梁可工厂化预制,精度和工期有保证,且加固程序流水化作业,该桥梁承载力提升技术有望得到推广。

参考文献:

[1] 汪小鹏,封明明,张国强,等. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁力学破坏模式研究[J]. 建筑结构,2017,47(21):84-89.
WANG X P, FENG M M, ZHANG G Q, et al. Study on mechanical failure modes of concrete beams reinforced by pre-stressed CFRP plate [J]. Building structure, 2017, 47(21): 84-89.

[2] 封明明,汪小鹏,郭祥伟,等. 预应力 CFRP 板加固曲面混凝土梁施工工艺研究[J]. 施工技术,2016,45(16):61-64.
FENG M M, WANG X P, GUO X W, et al. Analysis of construction technology on pre-stressed CFRP reinforced concrete bridge[J]. Construction technology, 2016, 45(16): 61-64.

[3] 汪小鹏,封明明,张国强,等. 预张紧钢丝绳网片—聚合物砂浆加固混凝土梁研究[J]. 公路,2016,61(12):105-114.
WANG X P, FENG M M, ZHANG G Q, et al. Study on strengthening concrete beams with pre-tensioned wire mesh and polymer mortar[J]. Highway, 2016, 61(12): 105-114.

[4] ZHANG Y, LI X L, ZHU Y P, et al. Experimental study on flexural behavior of damaged reinforced concrete (RC) beam strengthened by toughness-improved ultra-high performance concrete (UHPC) layer[J]. Composites part B: engineering, 2020, 186: 107834.

[5] 邓珺,刘昀,栗森,等. 配筋-UHPC 加固受损混凝土箱梁腹板抗剪性能试验研究[J/OL]. 中外公路, 2024: 1-11. (2024-05-20).
DENG J, LIU Y, SU M, et al. Experimental study on the shear performance of damaged PC box girder webs reinforced with reinforced-UHPC[J/OL]. Journal of China & foreign highway, 2024: 1-11. (2024-05-20).

[6] 封明明,汪小鹏,郭祥伟. 自调坡均压支座垫板系统结构性能分析[J]. 公路,2020,65(5):82-86.
FENG M M, WANG X P, GUO X W. Structural performance analysis of self-adjusting slope uniform pressure support cushion system[J]. Highway, 2020, 65(5): 82-86.

(上接第 36 页)

[8] 周继忠,吴培良,郑永乾,等. 盘扣式钢管承重支架力学性能试验研究[J]. 工业建筑,2019,49(11):119-124,130.
ZHOU J Z, WU P L, ZHENG Y Q, et al. Experimental research on the mechanical properties of disc-buckled steel tube formwork supports [J]. Industrial construction, 2019, 49(11): 119-124, 130.

[9] 孙伯禹,邵志兵,金蕾,等. 预制叠合板模块化盘扣式支撑脚手架试验研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(14):140-144.
SUN B Y, SHAO Z B, JIN L, et al. Experimental research on a

modular disk lock supporting scaffold under prefabricated monolithic slabs [J]. Construction technology, 2023, 52 (14): 140-144.

[10] 田鹏刚,胡长明,张凤亮,等. 插口式钢管模板支撑架基本受力单元架承载力数值分析[J]. 施工技术,2015,44(2):102-105.
TIAN P G, HU C M, ZHANG F L, et al. Numerical analysis on the bearing capacity of the unit frame in socket-type formwork supporting system [J]. Construction technology, 2015, 44 (2): 102-105.