

模板支撑系统承载性能的试验研究

胡长明, 郭 艳, 梅 源, 鲍晓强

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究模板支撑体系的承载力和稳定性等承载性能, 介绍一种足尺试验研究方法和一种单元架试验研究方法. 以足尺试验方法对扣件式模板支撑系统展开研究, 通过数值模型预分析得到模板整架的主要受力构件以及架体屈曲时的承载力、位移和失稳模式, 确定试验应变片的粘贴位置和加载机制, 并运用经纬仪和铅锤测量加载过程中架体的位移变化. 以单元架试验方法对插口式模板支撑系统展开研究, 结合有限元预分析确定试验加载方案和监测内容, 对比了试验结果之间的异同, 分析了差异原因. 为研究模板支撑体系的应用性能提供了可靠的测试方法, 为后续研究奠定了试验基础.

关键词: 高大模板支撑体系; 足尺试验; 单元架试验; 数值模型预分析; 加载机制; 失稳模式

中图分类号: TU733

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0179-08

Experimental research on the bearing capacity of fastener tubular steel scaffold

HU Changming, GUO Yan, MEI Yuan, BAO Xiaoqiang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: A full scale experiment method and a unit frame experiment method is introduced to research the bearing capacity of tubular steel scaffold. The full scale experiments on steel tubular scaffold with couplers were made to obtain the main bearing components of the scaffold, the bearing capacity, displacement, and buckling mode when destroyed, by numerical analysis. Then, the location of strain gauge, the loading mechanism were determined and the displacement was by level and plumb during the experiment. The unit frame experiments on socket-spigot scaffold was made to determine the loading mechanism and monitoring contents by combining the numerical analysis, contrasting the similarities and differences between experimental results. The reasons about the differences were analyzed. This paper introduced an experiment about the fastener tubular steel scaffold, and laid the foundation for further research.

Key words: tubular steel scaffold; full scale experiment; unit frame experiment; numerical analysis; loading mechanism; buckling mode

近年来随着我国经济不断发展, 出现了越来越多的高层建筑和大跨度结构以及超厚现浇梁板的建筑结构形式, 这对混凝土结构施工过程中的临时承重构件——模板支撑系统提出了更高的要求. 以经验为主的模板支撑系统施工方式的弊端也逐渐显露, 计算和设计理论的不足直接导致了频发的模板支架坍塌及失稳事故. 近年来, 模板支架从业及国内外学者们对模板支撑系统的承载力及稳定性开展了一系列研究, 以充分掌握其承担荷载时的力学性能. 胡长明等^[1-2]对传统扣件式模板支撑系统的承载性能、稳定性、节点半刚性及初始缺陷等影响因素进行了深入的研究; 郭艳^[3]对西安地区广泛应用的新型插口式模板支撑系

统进行了承载力、稳定性及位移发展模式的研究; L. B. Weesner^[4]对门式脚手架进行了试验研究及数值分析, 经对比指出数值分析可近似确定模板支架极限承载力的上确界, 使用有限元做预分析时应考虑安全系数; J. L. Peng^[5]对不同平面形式的模板支架进行研究, 指出在进行理论研究时应根据混凝土的浇筑顺序和每层浇筑厚度确定计算模型荷载作用形式及每级荷载增量. 在研究过程中学者们也涉及到不同类型模板支架的试验研究方法, 为后续研究提供了指导和参考.

本课题组针对扣件式模板支撑系统进行了一系列的足尺试验, 通过对五种不同工况的测试, 得到不同工况下模板支撑系统的位移发展模式、破坏模式和极

收稿日期: 2016-06-25

修改稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978219); 陕西省社会发展科技攻关基金资助项目(2015SF290)

作者简介: 胡长明(1963—), 教授, 博士生导师, 主要从事土木工程造价与管理研究. E-mail: hu_tm@163.com

限承载力;针对插口式模板支撑系统开展基本受力单元架的竖向承载力试验,进行了四种不同工况单元架的测试,得到其位移发展模式、破坏模式和竖向极限承载力,并分析了立杆间距和横杆插头楔紧度对插口式模板支架的影响程度。

1 扣件式模板支撑系统试验设计

为了研究剪刀撑对模板支撑系统稳定性的影响,以及横杆、立杆和剪刀撑在架体承力过程中的受力特点,测试了扣件式模板支撑系统的不同杆件在承力过程的内力响应及架体失稳时的临界荷载值和位移值,对扣件式钢管模板支架进行了整体稳定承载力试验^[6-8]。

为了保证试验结果的可靠性和通用性,反映施工现场搭设模板支架的应用性能,试验中采用

与施工现场相同规格的钢管,在搭设模板支撑系统的模型前对钢管进行排查,避免使用变形或者表面有严重损伤的钢管,为保证扣件连接可靠,在模型搭设完毕后,用力矩扳手抽检扣件,以保证扣件拧紧力矩在 $40\sim 60\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,防止因扣件的连接螺栓滑丝或拧紧力矩不够而连接失效。

1.1 试验模型

本试验选用 $\Phi 48\text{ mm}\times 3.21\text{ mm}$ 的钢管搭设模板支架来模拟模板支撑系统,试验中扣件重量为 $10.2\sim 11.1\text{ N}$,为研究不同纵横距、步距和剪刀撑情况对模板支撑系统承载力的影响,在架体总高度为 6 m 、扫地杆高度为 0.15 m 、立杆顶端伸出长度为 0.1 m 的相同情况下,共设置了5个不同工况的试验,不同工况的搭设参数见表1,试验现场搭设情况如图1所示。

表1 模板支撑架体的搭设参数

Tab. 1 Parameters of erection formwork

工况	横距/m	纵距/m	步距/m	架体四周剪刀撑	
				纵向	横向
1	1.20	1.16	1.436	无	无
2	1.20	1.16	1.436	无	有
3	1.20	1.16	1.436	有	有
4	1.20	1.16	1.148	有	有
5	1.20	0.90	1.148	有	有

设计方案时考虑到不同变量对模板支架承载力的影响^[9],故表1所示的5种工况在搭设参数上具有对比性,工况1为基础设置,工况2—工况5在其上进行变化,具体对比如下:

(1)工况1的架体不设置纵横向剪刀撑,立杆横距为 1.20 m ,立杆纵距为 1.16 m ,步距为 1.436 m ,总尺寸为 $5.8\text{ m}\times 3.6\text{ m}\times 5.994\text{ m}$,扫地杆高度为 0.15 m ,立杆顶端伸出距离为

0.10 m ;

(2)工况2在工况1的基础上增加横向剪刀撑;

(3)工况3在工况1的基础上增加纵横向剪刀撑均;

(4)工况4在工况3的基础上将步距变为 $1\,148\text{ mm}$;

(5)工况5在工况4的基础上将纵距变为 900 mm 。

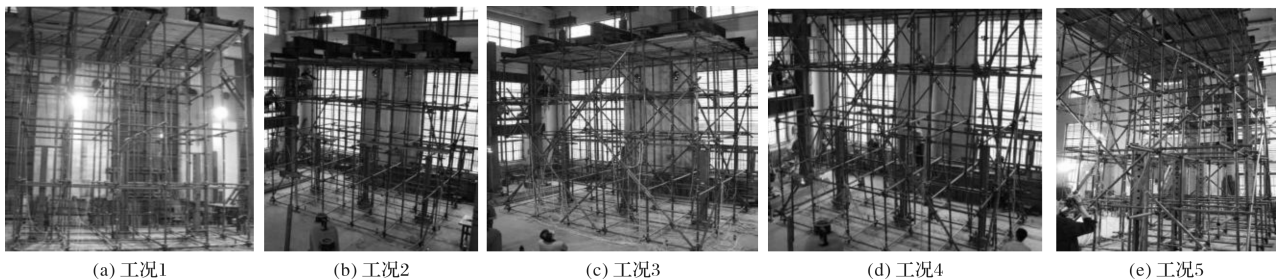


图1 模板支架的现场搭设情况

Fig. 1 Scenarios of each experiment

1.2 试验测试内容及测点设置

(1)模板支架的侧移:测定模板支架横向边缘沿纵向的位移和纵向边缘沿横向的位移,测点位

置设置在4个不同的立杆上如图2(a)所示。试验采用重锤测量的测试方法,在测试立杆顶部设置重锤架,试验前使重锤击到地面,标记初始点,

架体变形后测量该点与重锤的距离，即为模板支架的侧移，在测量时重锤保持静止。

(2)立杆的轴力：在测试立杆的底部设置两片串联的应变片来测量立杆轴力。测试立杆的位置

见图 2(b)，每根立杆上应变片的位置如图 2(c)所示，试验中采用静态应变仪采集立杆的应变数据，进而得到立杆的轴力。

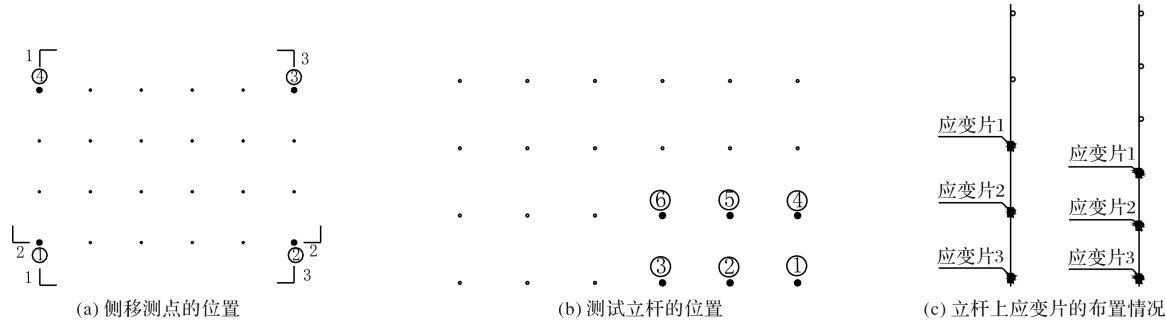


图 2 测试杆件的位置及应变片布置情况

Fig. 2 The location of test poles and strain arrangement

(3)横杆的应力：在模板支架底部和中间的纵横向横杆的中点上设置应变测点，横向设 4 个应变测点，纵向设 6 个应变测点，如图 3、图 4(图 2(a) 的 1-1 和 2-2 截面)所示，同一应变测点应分别在钢管圆周的平面内和平面外两个方向上各设置一个

应变片，从而测定横杆的弯曲应变。进而分析横杆的应力对立杆的作用(包括弯矩、剪力、扭矩等)，依据作用力与刚度的关系求出各横杆上节点刚度的分配情况。

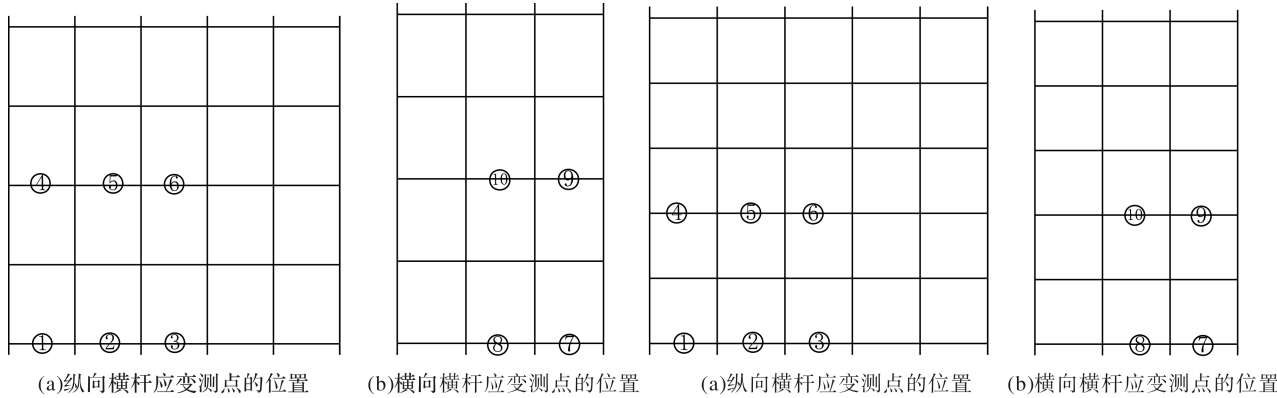


图 3 工况 1—工况 3 横杆测点的布置情况

Fig. 3 Strain arrangement of bars in test 1—3

图 4 工况 4—工况 5 横杆测点的布置情况

Fig. 4 Strain arrangement of bars in test 4—5

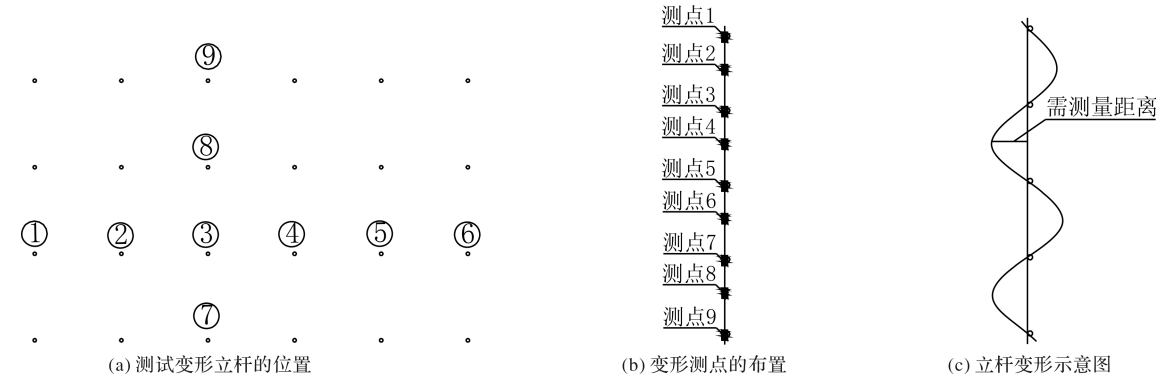


图 5 立杆变形测点的布置情况及变形示意

Fig. 5 Arrangement of deformation measuring point and deformations of poles

(4)立杆的变形：模板支架试验的位移测量精度较低，而且立杆的变形方向无法确定，故在结构失稳后采用刻度尺直接测量立杆的变形。试验中用经纬仪进行变形监测，为了便于观测，在观测点上贴白色胶纸。共设置 9 个立杆变形测点如图 5(a)所示，沿立杆通长设置观测点如图 5(b)所示，从而可描绘出不同荷载下立杆的变形曲线，立杆变形示意如图 5(c)所示，最终变形模式需通过试

验确定。

(5)剪刀撑的应力：在模板支架相邻两个外立面(图 2(a)中 2-2 和 3-3 剖面)的剪刀撑上布置应变测点，测点设置在剪刀撑两节点的中点，每个测点在平面内和平面外两个方向上各设置一个应变片，各工况下的剪刀撑应变测点布置位置如图 6 所示。

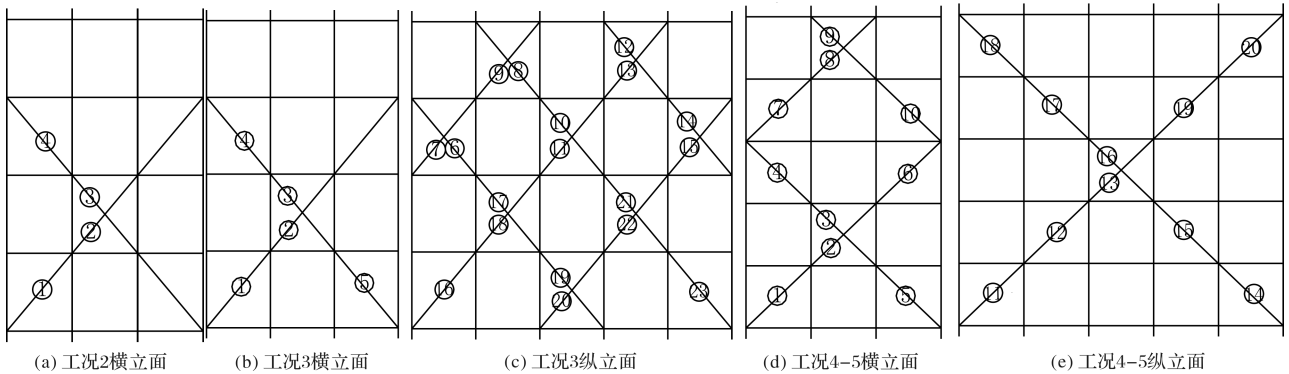


图 6 各工况下剪刀撑应变测点的布置情况

Fig. 6 Strain arrangement of braces of each test

1.3 试验设备及加载方式

1.3.1 预分析

有限元软件 ANSYS 对各工况的模板支架进行仿真模拟，对试验的测试方法、研究内容等所涉及的条件、参数、因素、技术及其可能存在的关

系、变化等进行有限元预分析，根据其结果制定

具体的试验研究方案。
根据试验工况，运用 ANSYS 有限元软件建立三维模型，该模型为完善的结构形式，不考虑初始缺陷，且假设各构件之间的相互连接均为刚接。对各数值模型其进行非线性屈曲分析得到不同工况的稳定承载力，结果见表 2。

表 2 数值模型的稳定承载力预分析结果

Tab. 2 Numerical results of each model

工况	1	2	3	4	5
单根立杆稳定承载力/kN	45.922	50.258	75.387	86.632	87.874
整架预估承载力/kN	367.376	402.064	603.08	693.056	702.99

经计算五个工况中整架的最大预估承载力约为 703 kN，故选取三个千斤顶，共 1 000 kN。

但实际结构并不完善，存在节点非刚性及架管初始缺陷等问题，故对模型施加不同水平力来模拟初始缺陷^[10-13]，运行结果汇总于表 3。

表 2 所示数据为理想弹塑性模型的模拟结果，

表 3 不同试验工况下模板支撑的极限承载力

Tab. 3 Numerical results of each model

工况	极限承载力/kN		
	计算值/半刚性	计算值/1%水平力	计算值/无水平力
1	35.30	58.07	67.32
2	34.96	60.71	72.42
3	71.98	72.00	118.09
4	91.16	100.40	133.37
5	105.43	109.38	154.20

1.3.2 加载方式

试验中用到的仪器、材料及工具有: 静态应变测试仪、荷载传感器、位移传感器、静态数据自动记录仪、经纬仪、力矩扳手, 应变片、卷尺、重锤等。

试验加载系统由千斤顶、反力架和分配梁组成, 采用千斤顶在模板支架顶部施加集中荷载, 然后荷载由分配梁均匀地传递给每根立杆, 加载过程分为预加载和正式加载两个阶段。

(1)预加载阶段: 为了确保所有测量设备都能够正常工作, 在开始试验时先进行预加载, 每个千斤顶预加载 15 kN 的荷载。

(2)正式加载阶段: 正式加载时采用分级加载的方式, 每个千斤顶每级加载 60 kN; 前一级荷载稳定后(荷载间歇为 5 min, 使施加荷载的变化不超过 0.1%, 否则, 继续间歇 5 min)再施加下一级荷载; 当达到预分析中极限荷载的 80%时, 每级荷载调整为每个千斤顶 20 kN; 当模板支架临近破坏时, 密切关注所有仪表读数的变化, 并观察试验现象, 直至模板支架整体破坏丧失承载力时停止加载。

(3)加载装置

试验采用自平衡加载系统加载, 模板支架上部的千斤顶分配梁系统如图 7 所示。

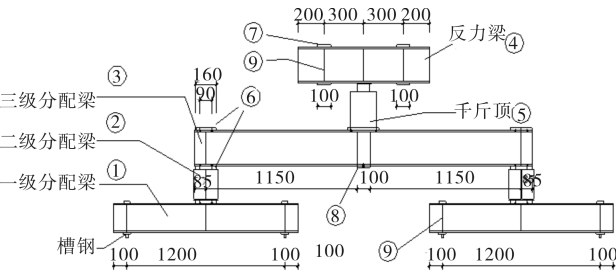


图 7 加载梁详图(侧立面)
Fig. 7 Details of lateral load beam (elevation)

2 插口式模板支架单元架试验设计

2.1 试验模型

插口式模板支架的立杆和横杆的长度具有固定的模数, 所以选择空间受力单元架的搭设规格为: 600 mm×600 mm×1 200 mm(立杆横距×立杆纵距×步距)、600 mm×1 200 mm×1 200 mm, 分别记为 1、2 号试件, 立横杆均采用 Φ48 mm×2.75 mm 的钢管。

由于横杆接头的楔紧度对节点刚度具有一定

程度的影响, 所以对试件 1 和试件 2 进行不同楔紧度工况的试验, 分别为正常楔紧度(用榔头以 50cm 的高度自由落体敲击横杆插头 7~10 次)和最小楔紧度(用榔头以 50cm 的高度自由落体敲击横杆插头 1~3 次), 两种楔紧度工况对应插头正常使用状况和最小楔紧的使用状况, 其中横杆插头正常楔紧度的试件编号为 1-1 和 1-2, 横杆插头最小楔紧度的试件编号为 2-1 和 2-2。

各试件的搭设参数见表 4。

表 4 试验单元架规格汇总
Tab. 4 Specification of each unit frame

编号	步距/mm	横距/mm	纵距/mm	节点连接楔紧度
1-1	1200	600	600	正常楔紧
1-2			600	最小楔紧
2-1			1 200	正常楔紧
2-2			1 200	最小楔紧
备注	单元架的扫地杆高度均为 360 mm、立杆伸出长度均为 200 mm. 杆件均为 Φ48 mm×2.75 mm 钢管, 节点连接楔紧度以敲击强度及次数为准, 1-3 次为最小楔紧, 7-10 次为正常楔紧.			

2.2 测试内容及测点设置

为了测试加载过程中单元架各杆件的内力变化, 对立杆两端以及中间布置应变测点进行应变监测, 每个应变测点设置 4 片应变片, 可测得各立杆的平面内外弯曲应变和轴向应变。应变测点的布置位置见图 8。共设 4 个位移测点, 每个位移测点设置在立杆跨中处, 用两只电子位移计分别量测 X 向和 Y 向的平面侧移, 见图 9。

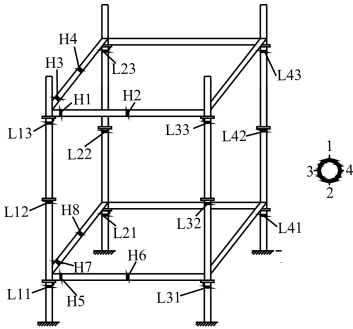


图 8 应变测点布置图
Fig. 8 Arrangement of strain measuring points

2.3 试验设备及加载方式

2.3.1 预分析

根据各个基本受力单元架的构造, 利用有限元软件 ANSYS 建立三维数值模型进行仿真模拟,

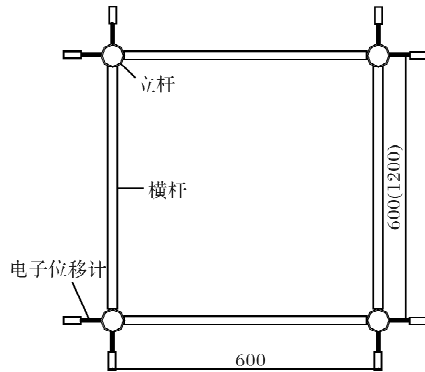


图 9 电子位移计布置图

Fig. 9 Arrangement of displacement meters

对数值模型进行特征值屈曲分析和非线性屈曲分析, 得到不同规格的单元架在节点刚接和铰接情况下的极限承载能力, 但该模型未考虑初始缺陷的影响, 仅作参考使用. 现将数值分析中各单元架的极限承载力结果汇总于表 5, 通过预分析为试验时选取千斤顶和制定加载方案提供参考.

表 5 单元架承载力预分析结果

Tab. 5 Numerical results of each model

单元架规格-横距 \times 纵距 \times 步距/mm \times mm \times mm	单元架极限承载力	
	特征值屈曲分析/kN	非线性屈曲分析/kN
600 \times 600 \times 1200-刚接	409.642	378.781
600 \times 600 \times 1200-铰接	394.716	361.157
600 \times 1200 \times 1200-刚接	301.214	275.055
600 \times 1200 \times 1200-铰接	291.588	252.836

根据预算结果知, 若单元架的各构件均为理想弹性材料则最大承载力为 410 kN, 故试验中选用 50 t 千斤顶进行加载.

2.3.2 加载制度

正式开始加载试验前先进行预加载, 预加载时每级荷载为 20 kN, 每级荷载结束进行观察当位移不再增加时进行下一级加载, 加载至 60 kN 后按每级 20 kN 卸载至 0, 若预加载中单元架材料弹性性能较好, 卸载后残余应变和残余变形不大, 则按上述方案正式加载.

每级荷载加载过程中连续记录承载力、位移和应变数据, 每级荷载加载结束后立即纪录试验数据, 持荷 5 min 后再次纪录试验数据, 结构破坏瞬间连续纪录试验数据. 破坏后分级平均卸载, 卸载过程中连续纪录数据, 不持荷, 卸载至 0 后立即纪录数据.

单元件竖向加载装置如图 10 所示.

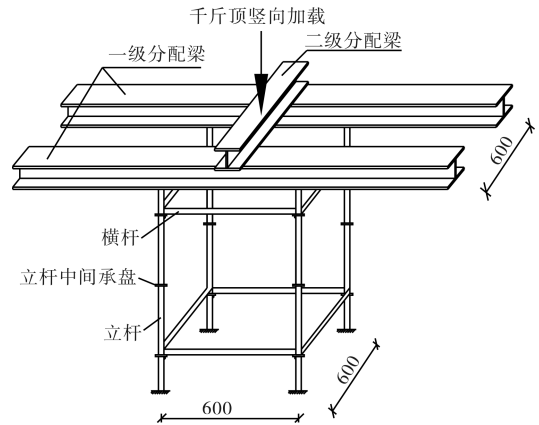


图 10 加载装置示意图

Fig. 10 Details of lateral load beam

3 试验结果

3.1 扣件式模板支撑系统试验结果

使用千斤顶对试验模型施加竖向荷载, 随着荷载的不断增大, 千斤顶出现回油现象, 结构的变形也迅速增大, 直至模板支架丧失继续承载的能力, 各工况下模板支架的极限承载力见表 6.

表 6 模板支架的极限承载力

Tab. 6 Bearing capacity of each tested scaffold

工况编号	1	2	3	4	5
极限承载力/kN	31.25	37.5	72.5	82.5	85

下面将以工况 4 为例, 列举试验过程中得到的立杆轴力、横杆应力以及剪刀撑应力. 工况 4 的模板支架中立杆测点 1 的轴力如图 11 所示, 横杆测点 8 的应力如图 12 所示, 剪刀撑测点 2 的应力如图 13 所示. 单根立杆加载到 15 kN, 30 kN, 45 kN, 60 kN, 70 kN 时测量了立杆的变形, 其中 X 方向的变形如图 14 所示.

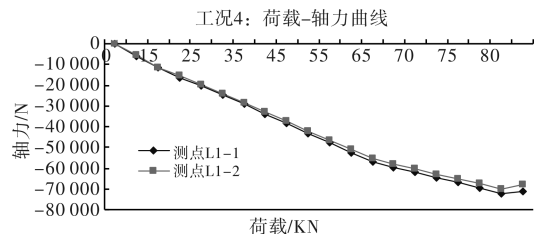


图 11 立杆测点 L1 的荷载-轴力图

Fig. 11 Load-axial force of L1

由上述列举的工况 4 的试验结果可知, 工况 4 的模板支架发生了弯曲失稳, 整架呈“S”型屈曲. 由立杆轴力结果知在试验加载过程中, 加载相同荷载时, 各立杆的轴力值略有不同, 而且结构屈曲时各杆件的应力值存在较大差异, 这种现象不

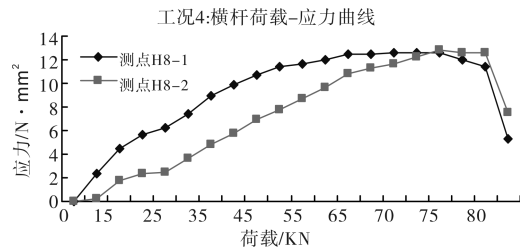


图 12 横杆测点 H8 的荷载-应力图

Fig. 12 Load-strain of H8

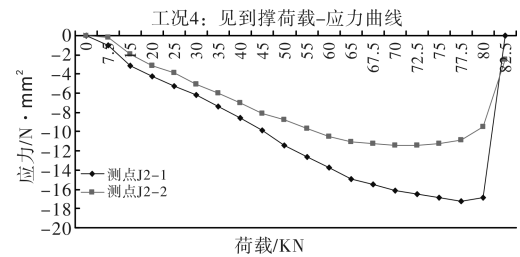


图 13 剪刀撑测点 J2 的荷载-应力图

Fig. 13 Load-strain of J2

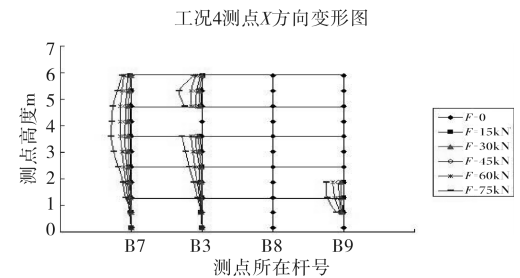


图 14 立杆 X 方向变形图

Fig. 14 X-deformation of poles

利于整体结构的承载。模板支架失稳时横杆与剪刀撑的应力都比较大, 说明其充分发挥了拉结作用, 对结构的稳定贡献较大, 有利于结构的整体稳定。

3.2 插口式模板支撑体系试验结果

通过竖向加载试验得到四组单元架试件的竖向承载力极限值, 在不同立杆间距和横杆插头楔紧度对承载力影响的对比结果汇总于表 7。

表 7 承载力极限值

Tab. 7 Ultimate bearing capacity

项目	①	②	③	④
试件编号	1	2	3	4
承载力/kN	350.93	282.97	233.54	153.15
对比项	(①-②)/②	(③-④)/④	(①-③)/③	(②-④)/④
对比值/%	24.02	43.14	50.27	73.44

由表 7 知, 在对比立杆纵距和横杆插头楔紧程度两个因素的不同组合时发现: 试件 1 因其立杆纵距小且横杆插头楔紧度大而极限承载力最大, 而试件 4 因其立杆纵距大且横杆插头楔紧度小而极限

承载力最小; 经比较可知立杆纵距相同的情况下, 横杆插头楔紧度减小时两种不同搭设规格单元架的承载力分别降低 24.02% 和 43.14%, 而在增加立杆纵距时, 横杆插头正常楔紧和最小楔紧两种工况下单元架的承载力分别降低 50.27% 和 73.44%。由此可知横杆插头楔紧度越大竖向承载力越大, 立杆纵距越大竖向承载力越小。

试验中在单元架破坏后测量了完全卸载后立杆顶端及中间承盘处的平面位移, 将架体失稳后各试件立杆中点及顶端的位移情况汇总于图 15, 图中实线边框为单元架的初始平面位置示意, 图中各坐标点为相对位置, 但可直观地表示出架体各立杆的位移, 且由图 15 知在竖向承载力试验中单元架呈明显的扭转位移趋势。

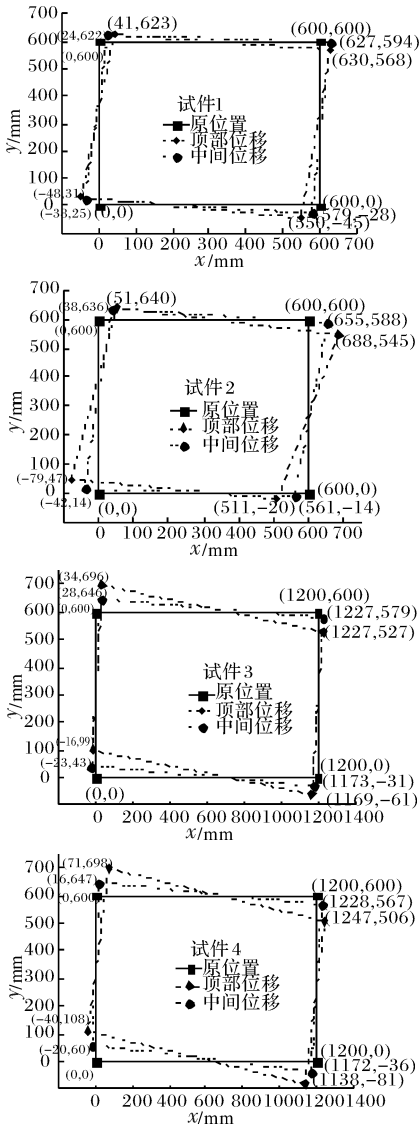


图 15 完全卸载后单元架各立杆的平面位移示意图

Fig. 15 Displacement in unit frames after completely unloaded

插口式模板支架试验中的四个试件均发生了

顺时针扭转破坏,各试件因其立杆间距及横杆插头楔紧度的不同导致了失稳时扭转角度的不同。

4 结论

介绍了扣件式模板支撑系统承载性能的足尺试验研究和插口式模板支撑系统承载性能的单元架试验研究,对架体规格的选取、测点的布置、加载制度及试验结果等都做了详细的阐述。通过试验设计和结果的分析可以得出以下结论:

(1)足尺试验研究方法和单元架试验研究方法的试验材料为建筑工地上的常用材料,监测设备为结构试验中的常用仪器,操作方便灵活,适用性强,可用于模板支撑系统承载性能的试验研究。

(2)有限元预分析是模板支撑系统承载性能研究中不可缺少的环节,它能够为试验研究中的加载制度和千斤顶的选择提供依据,保证试验过程安全顺利的进行。

(3)对试验结果的分析知文中的试验方法能够较完善的研究模板支撑系统的承载力、位移发展模式及破坏模式,并且试验条件与现场施工相似,可指导模板支架现场施工,为后续研究提供参考。

在实验室内进行试验研究受场地大小及测试环境的影响较大,所得的试验测点数据较少,后期研究时还需要进行大量试验数据的分析和统计。

参考文献 References

- [1] 胡长明. 扣件联接钢结构的试验及其理论研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
HU Changming. Studies on experiment and theory of steel construction connected with fasteners[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Techno., 2008.
- [2] 胡长明,宋方方,范小周,等. 扣件式钢管高大模板支架足尺模型稳定性实验研究[C]//文明工地建设理论与实践—第二届中国西部地区土木建筑学术年会论文集. 西安:陕西省土木建筑学会,2012.
HU Changming, SONG Fangfang, FAN Xiaozhou, et al. A full scale experiment method of stability on high steel tubular scaffold with couplers[C]// The construction theory and practice of site civilization - The second academic essays to civil engineering and construction in western China. Xi'an; Shanxi Civil construct Society, 2012.
- [3] 郭艳. 插口式钢管模板支撑架承载能力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
GUO Yan. Study on the bearing capacity of socket-type template supporting system[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2014.
- [4] Weesner, L, B, Jones. H, L, Experimental and

- analytical capacity of frame scaffolding[J]. Engineering Structures, 23 (2001): 592-599.
- [5] Peng, J, L, Chan, S, L, Wu. C, L, Effects of geometrical shape and incremental loads on scaffold systems[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007(63): 448-459.
- [6] 胡长明. 高大模板扣件式支撑体系施工技术研究报告[R]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
HU Changming. Experimental study of the lofty formwork support system [R]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [7] 胡长明,董攀,沈勤,等. 扣件式钢管高大模板支架整体稳定试验研究[J]. 施工技术,2009,38(4): 70-72.
HU Changming, DONG Pan, SHEN Qin, et al. Experimental research of global stability of fastener-style steel tube high-formwork-support [J]. Construction Technology, 2009, 38(4): 70-72.
- [8] 张化振. 扣件式高达模板支架的节点半刚性和整体承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009.
ZHANG Huazhen. Semi-rigid joint and global stability capacity research of high-formwork supports with couplers[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Techno., 2009.
- [9] 胡长明,梅源,王雪艳,等. 构造因素对高大模板支撑体系稳定承载力影响的研究[J]. 建筑技术,2009,40(3): 143-146.
HU Changming, MEI Yuan, WANG Xueyan, et al. Study on effect of construction factors for supporting system for tall and large formwork[J]. Architecture Tecnology, 2009, 40(3): 143-146.
- [10] 胡长明,曾凡奎,王静,等. 广义初始缺陷对模板支架稳定性的影响[J]. 工业建筑,2010,40(2): 17-19.
HU Changming, ZENG Fankui, WANG Jing, et al. Influence of generalized initial imperfections on steel construction connected with fasteners[J]. Industrial Construction, 2010, 40(2): 17-19
- [11] 胡长明,车佳玲,张化振,等. 节点半刚性对扣件式钢管模板支架稳定承载力的影响分析[J]. 工业建筑,2010,40(2): 20-23.
HU Changming, CHE Jialing, ZHANG Huazhen. Influence of semi-rigid joint on stability capacity of coupler steel tube formwork[J]. Industrial Construction, 2010, 40(2): 20-23.
- [12] 周奎,宋启根. 钢结构几何缺陷的直接分析方法[J]. 建筑钢结构进展,2000,9(1): 57-61.
ZHOU Kui, SONG Qigen. A direct imperfection analysis method for steel structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2000, 9(1): 57-61.
- [13] 侯和涛,李国强. 初始几何缺陷对非强支撑钢框架柱性能的影响[J]. 工程力学,2008,25(3): 85-90.
HOU Hetao, LI Guoqiang. Influence of initial geometric imperfections on behavior of partially braced steel frame columns[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (3): 85-90.

(编辑 沈波)