

地基承载力不足时桥梁施工支架变形规律分析

马文龙¹, 吴国华¹, 董舒静¹, 展玉华¹, 赵瑜隆^{1,2*}

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357;

2. 山东省智能建造装备关键技术与系统重点实验室, 山东 济南 250357

摘要:为预测支架稳定状况,实现有效预警,采用有限元软件 MIDAS CIVIL 对桥梁承插形盘扣支架进行建模,模拟单点沉降与区域性沉降工况下支架结构的响应特征。采用现场桥梁原位试验法,将模拟数据与实际测量的支架变形数据进行对比分析,论证采用角度变化阈值进行预压和浇筑过程监控的可行性,并获得支架关键位置的变形规律。结果表明:陀螺仪实际测量的支架变形接近模拟数据,施工过程监控角度变化阈值可行。地基承载力不足导致3种不同的沉降工况:一是单点地基承载力不足时,对支架结构中间部分底部平面的四顶角支撑杆实施节点强制位移,4个测点角度变化明显但未超预警阈值,沉降发生在支座底部受支座反力最大的位置;二是部分区域地基承载力不足时,对支架结构的中间部分、左侧部分和右侧部分实施节点强制位移,对关键监测断面产生显著影响,局部结构位移变化明显,角度变化均在允许阈值内,浇筑工况下部分区域地基承载力不足时的位移折减率和角度递减率变化较小;三是各测点所在杆件底部地基承载力不足时,对监测断面底部节点同步施加节点位移,主要沉降发生在测点底部和周边底部区域,角度阈值随荷载增大而增大,验证了基于角度阈值的沉降识别与预警方法的有效性。

关键词:地基承载力;支架;变形;有限元建模分析;角度阈值

中图分类号:U445;U446.1

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)03-0032-11

引用格式:马文龙,吴国华,董舒静,等.地基承载力不足时桥梁施工支架变形规律分析[J].山东交通学院学报,2025,33(3):32-42.

MA Wenlong, WU Guohua, DONG Shujing, et al. Analysis of deformation patterns of bridge construction support under insufficient foundation bearing capacity[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(3):32-42.

0 引言

桥梁在公路运输网络中发挥着关键作用^[1-3]。支架是桥梁现浇施工中的临时建筑支撑结构,拆装灵活,维护简单,能满足不同项目的要求,在实际施工中应用广泛^[4]。支架的承载能力、刚度、稳定性及变形性能直接关系到施工人员的安全和工程质量。因地基承载力不足、施工不当等原因导致的支架坍塌事故会造成严重的人员伤亡和财产损失^[5-6]。在支架稳定性分析领域, Li 等^[7]提出一种在柱中部和底部无水平和斜撑的独立支撑系统,考虑半刚性节点,采用数值模拟方法分析独立支撑系统的屈曲行为并确定有效长度系数。Çelik 等^[8]为分析半刚性节点,确定建模荷载-位移关系,进行结构分析,采用分析法、经验法、机械法、数值法、信息法、混合法和实验法等7种方法进行节点建模,同时需考虑外部荷载效应如

收稿日期:2024-07-25

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020QE274);山东省重点研发计划(2020RKB01602);山东省交通运输科技计划(2022B102, 2023B92-01, 2023B25)

第一作者简介:马文龙(2001—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:15963120883@163.com。

*通信作者简介:赵瑜隆(1985—),男,山东菏泽人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为道路与铁道工程,E-mail:zhaoyl@chd.edu.cn。

轴向力、剪力和扭矩等,以及半刚性节点的动态行为。宋国芳^[9]通过数值模拟分析立杆间距和立杆高度的变化对盘扣支架承载性能的影响,结果表明:随立杆间距和立杆高度的增大,支架承载性能降低;立杆间距为0.6 m时支架承载能力最强;在强风地带搭设支架时需增设连墙杆件或缩小立杆间距增强支架稳定性。刘锴等^[10]采用大型有限元模型对盘扣式满堂支架在典型工况下的承载性能进行仿真研究,揭示局部缺陷和节点刚度变化对整体承载力和失稳模式的影响规律。

采用支架现浇法建设大跨径连续箱梁桥时,受地质环境和施工不确定性影响,以及现浇箱梁结构自身质量大、地基不均匀沉降及动荷载冲击作用等综合因素影响,成桥后线形与设计线形可能存在偏差,须研究现浇箱梁支架体系的变形规律,及时调整施工方案,否则易引发危害严重的安全事故。在桥梁施工地基承载力不足时,须重视支架这类临时结构,验算支架自身各构件及其组合体系的力学性能,并监测支架的使用过程,确保支架结构安全。郭子毅^[11]采用概率极限状态设计法对支撑上部箱梁结构的盘扣式满堂模板支撑体系进行结构稳定性验算,采用有限元软件 MIDAS CIVIL 建立盘扣式满堂支架有限元模型,分析不同构造因素变化对盘扣式满堂支架稳定性的影响,建立基于物元可拓理论评估方法的盘扣式满堂支架安全风险评估模型,并评估盘扣式满堂支架安全风险等级。桂志敬等^[12]通过节点刚度试验、整架荷载试验及数值分析相结合的方法,揭示盘扣支架在桥梁工程中的破坏模式为顶部立杆局部失稳,并给出构配件和节点的建议刚度和极限承载能力。刘京红等^[13]设计3种不同斜杆布置的单元架体,进行足尺试验研究及有限元计算,结果表明:对角布置斜杆时较合理,不易使单元架体发生水平倾倒及竖向屈曲失稳;立杆主要是受力杆件,竖向斜杆与水平杆主要是构造杆件,增大水平杆步距对架体承载力的影响更显著。李俊德等^[14]通过现场监测承插型盘扣支架立杆的应力和立杆底部反力,采用 MIDAS CIVIL 对该支架进行数值模拟分析计算,对比分析支架底部压力实测结果与理论计算结果,以及支架底压力实测结果与应变片实测结果,形成优化监测方案。曹益^[15]分析高支模坍塌事故原因,对比各种模板支撑体系的计算模型,分析高支模架体节点连接特性,设计验算高支模体系力学性能,适当调整水平杆件步距、立杆间距等可提高其稳定承载力;构建高支模体系安全性评价模型,对承插型盘扣式高支模体系的安全性进行综合性评价。监控盘扣式满堂支架过程中,一般只采用荷载应力和位移等常规监测指标,现有研究中未提出新的监控指标。

本文将节点角度变化量作为桥梁施工监控指标,对盘扣式承插满堂支架建模计算,求得各测点在各方向、不同工况下的角度阈值,通过现场原位试验,论证采用角度变化阈值进行施工过程监控的可行性,通过不同方向的角度变化确定沉降节点,为桥梁建造和支架变形预警提供参考。

1 桥梁工程施工支架工况

影响支架的关键因素包括现场地质条件、地形特征及交通状况。在地势较平坦且地下水位较低时,可采用满堂支架施工方法,并通过换填或灌注混凝土等方式对地面预处理。对处于立交位置且地质条件不佳的箱梁,可选择钻孔桩基础、挖孔桩基础、钢管桩基础或扩大基础等方案,并采用型钢支架或钢管贝雷梁作为支架结构。根据布局位置与结构形态,支架可分为满堂支架、悬挑支架、外支架和里支架等^[16]。

1.1 支架变形分析

1) 支架稳定性

支架稳定性包括整体系统的稳定性和单个构件的局部稳定性两方面。施工时支架失稳破坏的根本原因是施工期间受各种临时荷载影响,支架结构发生过度位移和变形,这种显著的几何非线性效应直接削弱支架的稳定性。若某受压构件稳定性不足,可能突然发生较大位移,导致邻近构件连续失稳,造成整个临时支架结构系统全面崩溃^[17]。

2) 地基承载力不足支架坍塌

模板支架坍塌的主要原因包括施工材料质量问题、设计与施工方案的缺陷、施工组织管理不当以及地基承载力不足等^[18]。为确保地基具有足够的承载力,应进行地质勘察并获取地基勘探报告,据此选择

合适的处理方法加固地基,如换填法或预压法。加固地基后,现浇支架施工过程中消除非弹性变形,经过一定时间的监测分析确认符合文献[19]后,才能继续下一阶段的施工。

3) 支架整体倾斜角度变化

地基承载力不足导致地基不均匀沉降,支架底部支撑点产生位移,引发支架整体倾斜角度变化,改变支架受力状态,原本稳定的支架可能因整体倾斜角度过大而失去平衡,增加倾覆的风险。如不及时处理,支架倾斜角度的变化会进一步加剧支架和上部结构的变形,形成恶性循环,最终导致支架结构破坏。采用多点角度监测技术能敏锐捕捉地基沉降的初期迹象,可迅速采取应对措施,增强整体建筑结构的稳固性。结合挠曲角度与节点角度递减率两项辅助监测指标,能更全面且准确地评估支架结构的变形状态,精确判断支架的稳定性,提高监测的灵敏度和准确性,为后续的支架结构加固与维护工作提供科学依据,确保桥梁结构的长期安全与稳定。

1.2 支架稳定性的主要计算方法

求解支架稳定性主要有两类方法:第一类是基于结构力学与数学的传统求解方法,一般是将复杂的支架系统简化为铰接的杆件模型进行计算,但计算过程繁琐,工作量较大,在实际应用中受到诸多限制;第二类是有限元模拟计算方法,基本原理是将整体结构细分为多个小型单元,通过计算机技术进行独立计算和重新组合,模拟整体结构的力学响应^[20]。

2 有限元建模与分析

2.1 支架模型

采用软件 MIDAS CIVIL 对支架建模。采用盘扣式满堂支架结构的混凝土连续现浇梁总长 18 m,横向 16 个间隔段,间隔 0.6 m,总长 9.6 m;纵向 12 个间隔段,间隔 1.5 m,总长 18.0 m;竖向 4 个间隔段,间隔 1.5 m,总长 6.0 m。采用 3 种梁单元构件:横向方木截面矩形长 150 mm,宽 50 mm,纵向方木截面矩形长 100 mm,宽 120 mm;钢管材料为 Q235A,竖直钢管外径 60.0 mm,壁厚 3.2 mm,水平和斜撑钢管外径 48.0 mm,壁厚 3.2 mm,底模采用厚 15.0 mm 的竹胶板。

构建支架模型时,设置方木的弹性模量为 1.6727×10^5 MPa,泊松比为 0.4,密度为 520.1 kg/m^3 。模型共包括 5 034 个梁单元,对应承受弯矩和剪力的主次梁;1 228 个桁架单元,对应纯轴向受力的斜撑或拉杆;1 920 个板单元,对应承受面内及弯曲作用的模板。

2.2 设置边界条件

1) 外部约束

选用一般支撑条件计算首次标准荷载,通常包括平动支撑(D_x 、 D_y 、 D_z 表示节点在全局坐标系中沿 x 、 y 、 z 轴的平均(位移)自由度)和转动支撑(R_x 、 R_y 、 R_z 表示节点绕全局 x 、 y 、 z 轴的转动(旋转)自由度)。支架模型的底部节点未设置转动限制,即 R_x 、 R_y 、 R_z 均为自由状态,分析支架结构时只需考虑平动的边界条件 D_x 、 D_y 、 D_z 。建立平动的边界条件后,模型中共有 248 个外部支撑约束限制支架结构的移动。

2) 内部约束

在支架模板系统中,内部约束主要体现在不同组件间的相互作用,如上层方木与钢管间、方木与方木间以及方木与底模板间的连接。计算模型的荷载时,采用弹性连接的方式模拟组件内部约束。设定弹性连接的刚度时,若连接的两个节点间材料为 Q235A,平动刚度为 $1 \times 10^7 \text{ kN/m}$;若是 Q235A 与木材间连接,平动刚度为 $1 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 。在实际工程中,调整水平平动刚度为 $1 \times 10^5 \text{ kN/m}$,模拟实际施工中限位装置的作用,保证模型分析结果的准确性和可靠性。设定支座上部杆件绕 y 轴水平转动的刚度为 $10 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 。完成建模后,模型中共有 2 169 个内部约束。

3) 释放梁端约束

构造扣件式支架模型时,依据文献[21]要求,设置框架式结构支撑系统中扣件式、碗扣式、盘扣式节点的转动刚度 K 分别为 35、25、20 $\text{kN} \cdot \text{m/rad}$,确保支架结构的稳定性和安全性。通过试验测试确定其他

未明确类型节点的转动刚度,适应不同工况和设计需求,确保整体结构的稳定性和可靠性。

对支架钢管建模设置的坐标轴 x 、 y 、 z 轴彼此独立且正交。盘扣式满堂支架的各根钢管杆件均以梁单元离散建模,考虑梁单元绕 y 、 z 轴的转动特性时,需在 y 、 z 轴方向上增加梁端约束。确定影响支架行为的因素后,对水平杆和斜杆施加 $20 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 的梁端约束,共生成 6 095 个约束单元,盘扣式满堂支架有限元计算模型如图 1 所示。

2.3 测点的选取

根据文献[22]要求,在支架结构的长度延伸方向上布置系列监测断面,全面评估监测断面在不同位置对应的力学性能表现。选定的监测断面包括支架结构起始的初始跨径处(编号为 T_0 ,代表起点监测断面)、跨度的 $1/4$ 位置(编号为 T_1 ,即 $L/4$ 监测断面, L 为跨径)、跨度的 $1/2$ 位置(编号为 T_2 ,为 $L/2$ 监测断面)、跨度的 $3/4$ 位置(编号为 T_3 ,即 $3L/4$ 监测断面)和整个跨度的终点(编号为 T_4 ,表示全跨径 L 处的监测断面)。桥梁支架纵向监测断面的布设示意图如图 2 所示。

描述断面 T_0 的坐标系统时,在支架结构的整体参照框架下, x 轴为纵向轴, y 轴为横向轴。断面 T_0 监测点布设示意图如图 3 所示,按监测点与 y 轴原点(或起始点)距离递增的顺序依次命名为 T_{01} 、 T_{02} 、 T_{03} 、 T_{04} 、 T_{05} 。

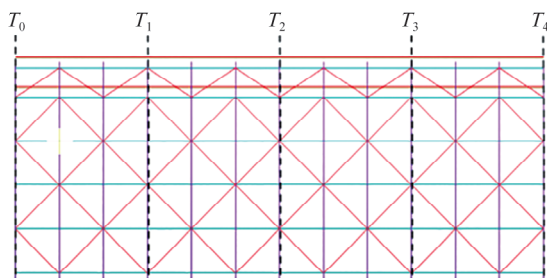


图2 桥梁支架纵向监测断面的布设示意图

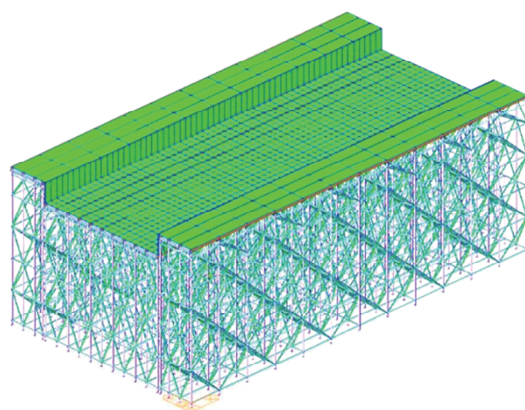


图1 盘扣式满堂支架有限元计算模型

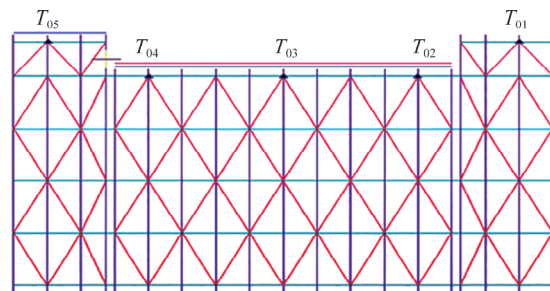


图3 断面 T_0 监测点布设示意图

2.4 正常使用极限状态下支架结构竖直方向变形规律分析

为揭示支架结构在竖直方向施加荷载下的变形规律,通过监测关键节点 $A \sim E$ 在预压与浇筑等不同工况下的角度变化和位移变化,提取支架结构在竖直方向上的变形特征,中间部分的节点与角度布设如图 4 所示。截面①和②、③和④、⑤和⑥、⑦和⑧监测的角度测点分别用 α 、 β 、 δ 、 η 表示,例如布设截面①的角度测点包括 α_{11} 、 α_{12} 、 α_{13} 、 α_{14} ,截面②的角度测点由 α_{21} 、 α_{22} 、 α_{23} 、 α_{24} 构成。其中,下标首位 1、2 分别表示长杆件、短杆件上的角度,下标第二位从 1 到 4 的序号对应同一根杆件在该截面上从底部到顶部依次布设的第 1~4 个测点位置。

特别关注连接节点处矩形截面角度的变化量,并将其转化为角度递减率进行量化;统计竖向位移的折减趋势,计算位移折减率。得到中间部分和右侧部分长、短杆件在不同工况下的节点角度递减率(如表 1 所示)及关键节点的竖向位移折减率(如表 2 所示),为后续支架结构变形预警阈值的设置提供数据基础。

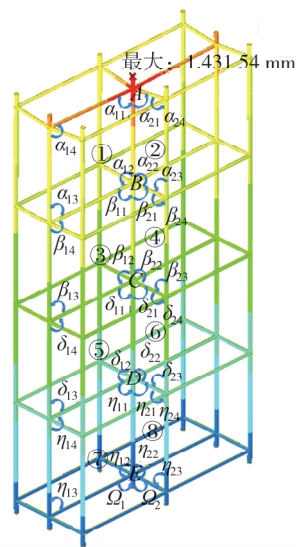


图4 中间部分节点与角度布设

表 1 预压工况和浇筑工况下长、短杆件节点角度递减率

工况	位置	长杆件节点角度递减率/%				短杆件节点角度递减率/%			
		$\alpha_{11}-\beta_{11}$	$\beta_{11}-\delta_{11}$	$\delta_{11}-\eta_{11}$	$\eta_{11}-\Omega_{11}$	$\alpha_{21}-\beta_{21}$	$\beta_{21}-\delta_{21}$	$\delta_{21}-\eta_{21}$	$\eta_{21}-\Omega_{21}$
预压	中间部分	57.26	68.08	73.78	165.33	68.61	61.01	78.23	95.37
	右侧部分	55.24	60.11	37.05	162.34	68.25	58.87	38.02	95.14
浇筑	中间部分	57.24	68.11	73.52	167.27	68.64	60.98	78.26	95.33
	右侧部分	55.29	60.23	37.12	162.51	68.32	58.72	38.13	95.17

表 2 预压工况和浇筑工况下节点位移折减率

工况	位置	节点位移折减率/%				
		顶点-点 A	点 A-点 B	点 B-点 C	点 C-点 D	点 D-点 E
预压	中间部分	4.64	36.75	32.18	47.87	88.17
	右侧部分	4.59	36.27	31.63	45.19	89.32
浇筑	中间部分	4.63	36.74	32.20	47.85	88.17
	右侧部分	4.59	36.38	31.35	45.27	89.33

3 工程验证

3.1 工程概况

依托于采用盘扣满堂支架系统的某公路桥梁进行现场试验验证,跨越形式为一联两孔(18+18)m 的预应力混凝土连续箱梁,总长 36 m;采用纵横交错的双层方木结构设计支架系统,并配合盘扣式满堂支架。从顶部模板开始构建支架系统,选用厚 1.5 cm 的优质竹胶板作为模板面板。布置纵横交错的方木分配梁系统优化荷载传递效率。纵向方木宽 10 cm,高 12 cm,根据箱梁结构的不同区域(如翼缘板下、底板位置及腹板位置)进行差异化间距设置,翼缘板下和底板位置间距 30 cm,腹板位置加密至间距 20 cm,可增强支撑强度。横向方木宽 15 cm,高 5 cm,根据需求调整顺桥向间距为 60 cm 或 90 cm。在分配梁下,选用直径 60 mm 和壁厚 3.2 mm,与直径 48 mm 和壁厚 3.2 mm 两种规格的盘扣钢管支架,通过盘扣连接钢管形成稳定可靠的支撑框架。盘扣支架下部的可调底座支撑在扩大条形基础上沿桥梁长度方向(顺桥向)间隔 60 cm 布置。

3.2 试验方案

搭建支架时,同步部署陀螺仪系统,并在正式试验前进行预运行测试,验证信号传输与接收的稳定性,同时实施故障排查,确保迅速识别并替换任何有缺陷的组件。为精确捕捉盘扣角的角度变化,设定每 5 s 采集一次数据,在 30 d(每天 24 h)的施工周期内,将累积测量盘扣角 320 万次,确保数据的全面性和时效性。

设置盘扣满堂支架系统的关键参数与对应的有限元模型支架一致,即二者在杆件的尺寸规格及整体的布设方案上完全相同,均遵循相同的设计原则与结构细节,严格按预设方案执行仪器布设,如图 2、3 所示,确保仪器的安装位置及连接关系,保证试验数据的准确采集与传输。

采用高性能陀螺仪采集核心角度数据,陀螺仪核心部件为采用高度集成的模块设计,具有较高精度与稳定性的 9 轴姿态角度传感器,结构紧凑,接口设计清晰,安装与调试简便快捷,内置高性能微处理器,通过动力学解算方法与卡尔曼动态滤波算法实时、精确地计算传感器在任意瞬间的运动姿态。该陀螺仪通过数字滤波技术有效降低外界噪声的干扰,使采集到的角度数据更精确。为应对加固碾压、注水和震动等极端破坏场景,此陀螺仪传感器还配备定制化的坚固外壳封装,能有效抵御外部物理冲击与恶劣环

境因素的侵蚀,确保传感器内部精密元件的长期稳定运行与可靠性。该陀螺仪传感器的各项技术指标为:比特率为 2 400~961 200 bits/s(IIC,可支持高速率 400 kHz),供电电压为 3.3~5.0 V,工作电流小于 25 mA,通讯方式为串口 TTL、IIC,加速度量程为 $\pm 16g$ (g 为重力加速度),陀螺仪量程为 $\pm 2\ 000^\circ/\text{s}$,扩展端口为模拟输出(0~VCC)数字输入、数字输出、PWH 输出(周期为 1~65 535 μs),输出加速度、陀螺仪、磁场、四元数、时间、端口状态,动态、静态角度精度为 0.000 0 $^\circ$,磁场精度为 1 mg,输出频率为 0.1~200.0 Hz, x 、 z 轴角度量程为 $\pm 180^\circ$, y 轴角度量程为 $\pm 90^\circ$,加速度、陀螺仪、角度、磁场测量维度为 3 维(x 、 y 、 z 轴)。

为提高施工现场的操作便捷性,对传感器进行特别加工,内置信号传输与采集的数据线,将数据无线、即时、高效地传输至后台电脑云端,提高数据处理的时效性和灵活性。

在后台电脑云端中,处理分析前方传输的数据信号,使用仪器前预先输入计算公式和阈值,阈值作为数据分析的基准和判断依据,可准确识别并提取有价值的信息。陀螺仪经过改造与调试后,进行统一编号与安装。

将盘扣支架结构的每个连接点视为一个核心单元,与之相连的所有杆件为辅助单元。陀螺仪安置于插销后方,精确固定在连接盘与相邻杆件的交汇点处,确保陀螺仪均能精确测量盘扣支架角度的细微变化。陀螺仪布点如图 5 中的绿色标识所示。

需全面监测每个连接点 x 、 y 、 z 轴三个方向的位移变化, x 、 y 、 z 轴方向上的角度转动主要源于相邻节点间的相对位移,可设计一种优化布置方案:根据陀螺仪的高精度测量特性,采用一台陀螺仪同时采集 y 、 z 轴两个方向的角度变化,而另一台陀螺仪监测 x 轴方向的角度变化。

监测点角度原理如图 6 所示,红、绿、蓝色分别表示 x 、 y 、 z 轴方向的旋转角。将陀螺仪放置在角 α 处测量 x 轴方向的角度,能捕捉 x 轴上的微小转动。将另一台陀螺仪安置在角 β 处进行 y 、 z 轴方向的联合监测,利用其在多维空间中的定位优势,同时捕获 y 、 z 轴方向上的角度变化。为方便后续数据处理与统计,陀螺仪编号与测点编号一一对应,确保数据的准确性和可追溯性。

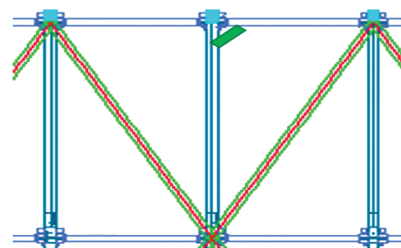


图 5 陀螺仪布点

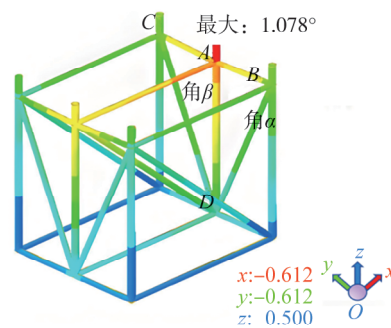


图 6 监测点角度原理示意图

3.3 地基承载力不足

3.3.1 单点地基承载力不足

分析桥梁与支架结构的整体力学行为时,考虑受力分布特性和底杆承受的支撑反力情况,可推断地基承受最大压力的区域为支架结构中间部分底部平面的 4 个角支撑杆位置。对这 4 个关键支撑点采取逐步增大的节点强制位移,4 个支撑点各自向下以 1 mm 为间距移动。在位移作用下,支撑杆的支撑反力如图 7 所示。

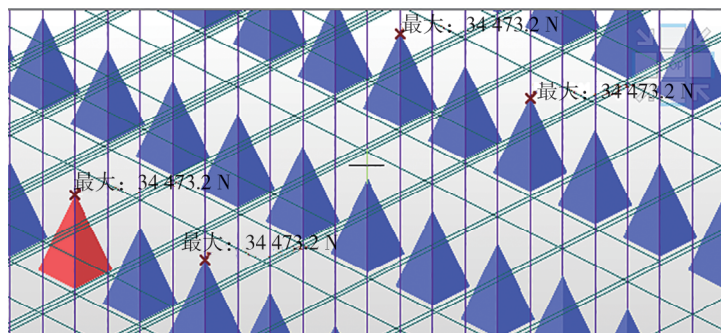


图 7 在位移作用下支撑杆的支撑反力

在支架满荷载工况施加 4 个节点的强制位移后,结构整体保持稳定,仅局部区域发生响应,主要集中在断面 T_2 的测点 T_{23} 附近。此工况下顶托沉降由 1.078 mm 增至 1.260 mm,表明地基局部沉降对结构整体变形的影响有限,测点 T_{23} 在不同工况下的角度阈值如表 3 所示。

表 3 在最大支撑反力处增大节点位移后测点 T_{23} 的角度阈值

工况	预压 60%	预压 80%	预压 110%	浇筑 48.78% ^①	浇筑 100%	张拉 ^②
测点 T_{23} 的角度阈值/(°)	0.017 7	0.023 9	0.031 7	0.015 7	0.029 1	0.029 4

①浇筑 48.78%为选取的一个结构中期荷载状态,反映支架在混凝土浇筑中段的力学响应,是结构监测与有限元模拟中具有代表性且可对比的关键工况之一。

②张拉工况是指混凝土浇筑完成并达到设计强度后施加预应力的结构状态。

采用标准荷载作用下的沉降模拟分析评估该选定区域底部杆件的力学性能。在模拟过程中,特别关注 4 个关键测点(T_{23} 、 T_{33} 、 T_{34} 、 T_{24} ,按逻辑顺序排列)在沉降前相对整体坐标系(x 、 y 轴)的角度变化,模拟结果如表 4 所示。

选定由 4 个测点 T_{23} 、 T_{33} 、 T_{34} 和 T_{24} 构成的区域作为研究重点,合围成特定监测区,能更精确地定位和分析沉降现象。当点 B 发生沉降时,4 个测点在 x 、 y 轴方向的角度变化如表 5 所示。其他测点也受影响,但角度变化量极小,可忽略不计。沉降前后每个测点在 x 、 y 轴两个方向的角度均发生变化。单节点承载力不足时,沉降对结构产生的变形影响如图 8 所示。由图 8 可知:单节点承载力不足时,沉降发生在支座底部受支座反力最大的位置。

当地基承载力不足导致结构沉降时,可先定位角度变化量最大的 4 个相邻测点,据此确定沉降区域,结合人工测量等方法查明发生沉降的杆件位置。

3.3.2 部分区域地基承载力不足

对底座的计算结果解析后发现支架结构中的 3 个关键承载区域,分别是中间部分、左侧部分和右侧部分,此 3 个区域的底座支反力显著高于其他区域,在整体结构中承受最大的荷载或反作用力。在这 3 个关键区域实施节点强制位移的模拟实验,分析此 3 个区域在承受较大底座支反力条件下的结构响应。向此 3 个区域的节点逐步施加间距 1 mm 的位移,模拟实际工况中可能遇到的变形情况,部分支架结构展现的变形形态如图 9 所示。

由图 9 可知:实施节点强制位移对支架结构中的关键监测断面 T_1 、 T_2 、 T_3 产生显著影响,9 个测点 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{14} 、 T_{22} 、 T_{23} 、 T_{24} 、 T_{32} 、 T_{33} 、 T_{34} 的位移均变化明显,支架结构的中间部分、右侧部分与左侧部分底部发生沉降。

由于支架结构的对称性或特定的受力模式,测点 T_{12} 与 T_{14} 、 T_{22} 与 T_{24} 、 T_{32} 与 T_{34} 的角度变化相同, T_1 监测断面与 T_3 监测断面中对应节点角度变化量相等。9 个测点中 T_{23} 达到角度变化阈值,剩下对称成对的 8 个测点可用任意一侧代表,简化分析过程,4 个关键测点 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{22} 、 T_{23} 在 z 轴(即垂直方向)上的角度变化能概括并反映除 T_{23} 以外 8 个测点的角度变化,模拟计算得到

表 4 沉降前测点的角度变化量

角度 方向	测点角度变化量/(°)			
	T_{23}	T_{33}	T_{34}	T_{24}
x 轴	0	0.002 8	0.001 4	0
y 轴	0	0	0.001 2	0.001 4

表 5 沉降后测点的角度变化量

角度 方向	测点角度变化量/(°)			
	T_{23}	T_{33}	T_{34}	T_{24}
x 轴	0.000 1	0.000 1	0.001 3	0.001 5
y 轴	0.000 1	0.001 2	0.000 1	0.001 1

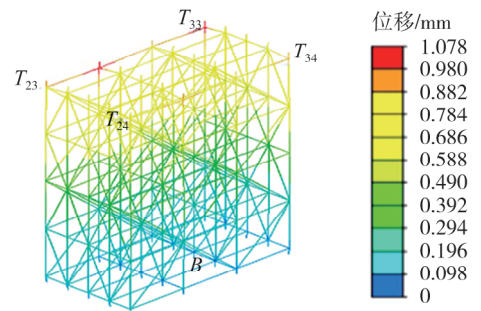


图 8 单节点沉降对结构变形的影响

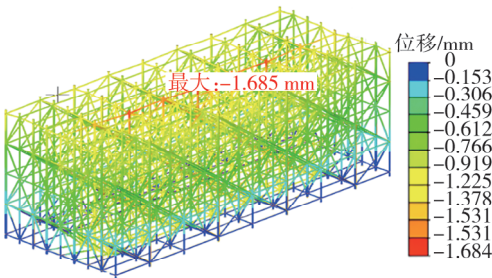


图 9 部分区域节点沉降对结构变形的影响

的角度变化阈值如表6所示。

表6 不同工况下附近节点沉降时测点 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{22} 、 T_{23} 的角度阈值

测点	预压工况下的角度变化阈值/(°)			浇筑工况下的角度变化阈值/(°)		
	预压 60%	预压 80%	预压 110%	浇筑 48.78%	浇筑 100%	张拉
T_{12}	0.013 5	0.017 1	0.022 5	0.011 5	0.020 7	0.021 2
T_{13}	0.018 7	0.023 9	0.031 8	0.015 7	0.029 2	0.030 0
T_{22}	0.009 6	0.011 7	0.015 3	0.008 3	0.014 1	0.014 5
T_{23}	0.022 9	0.029 6	0.039 6	0.019 2	0.036 3	0.020 3

由表6可知:不同工况下,测点 T_{12} 、 T_{13} 、 T_{14} 、 T_{22} 、 T_{24} 、 T_{32} 、 T_{33} 、 T_{34} 的角度变化阈值受到不同程度的影响,但在地基沉降条件下,实际角度变化量均在允许阈值内,表明这些测点的结构发生一定程度的变形后,整体仍安全可控。在沉降模拟中,测点 T_{23} 的角度变化阈值最大,需对该区域给予特别关注和监测,防止未来可能发生更大变形或突然破坏。

支架结构的左侧与右侧部分在变形方面高度对称,变形情况几乎一致。为简化分析过程并提高效率,只探讨支架结构的中间部分和右侧部分。中间部分的节点与角度布设如图4所示。图4中采用相同的节点编号与角度编号,角 α_{11} 与角 α_{14} 间的杆件为长杆,角 α_{21} 与角 α_{24} 间的杆件为短杆。由图8可知:在标准荷载作用下,中间部分的顶托节点与其下部节点在 z 轴上的位移差均小于 1.0 mm。

为量化这种影响,计算并整理支架结构中间部分和右侧部分节点位移的折减率,如表7所示。预压工况和浇筑工况下长、短杆件节点角度递减率如表8所示。

表7 预压工况和浇筑工况下节点位移折减率

工况	位置	节点位移折减率/%				
		顶点-点A	点A-点B	点B-点C	点C-点D	点D-点E
预压	中间部分	3.36	25.94	11.19	12.77	7.74
	右侧部分	4.59	25.87	11.22	12.79	7.76
浇筑	中间部分	3.36	25.93	11.18	12.77	7.73
	右侧部分	3.35	25.88	11.22	12.79	7.76

表8 预压工况和浇筑工况下长、短杆件节点角度递减率

工况	位置	长杆件节点角度递减率/%				短杆件节点角度递减率/%			
		$\alpha_{11}-\beta_{11}$	$\beta_{11}-\delta_{11}$	$\delta_{11}-\eta_{11}$	$\eta_{11}-\Omega_{11}$	$\alpha_{21}-\beta_{21}$	$\beta_{21}-\delta_{21}$	$\delta_{21}-\eta_{21}$	$\eta_{21}-\Omega_{21}$
预压	中间部分	40.29	11.23	48.27	72.83	63.37	2.08	68.39	47.55
	右侧部分	40.31	11.34	49.03	71.27	62.28	2.00	67.79	46.76
浇筑	中间部分	40.30	11.21	48.27	72.85	63.36	2.08	68.39	47.56
	右侧部分	40.33	11.35	49.01	71.29	62.28	1.99	67.79	46.77

由表7、8可知:将浇筑工况下部分区域地基承载力不足时的位移折减率与正常使用极限状态下的位移折减率对比后发现,在浇筑工况下部分地基承载力不足时两相邻节点的位移折减率变化较小,节点位移沿支架高度缓慢递减,从第一层节点过渡到第二层节点时,位移变化量出现相对较大的峰值;将浇筑工况下部分地基承载力不足时的角度递减率与正常使用极限状态下的角度递减率对比发现,短杆件 $\beta_{21}-\delta_{21}$ 的角度递减率也保持较低水平,变化幅度显著小于长杆件 $\beta_{11}-\delta_{11}$ 的变化率。

3.3.3 底部地基承载力不足

上述地基承载力不足模拟表明:在测点所在竖杆底部施加节点位移时,能引起该点最大的角度变化。根据同一监测断面上的测点与相邻节点的位移差计算测点沿 z 轴的角度,单独对测点底部施加沉降而不处理相邻节点,会因忽略节点间的耦合效应产生较大偶然性,得到的角度阈值难以反映真实工程沉降特征,且不具备参考价值。在同一监测断面上对所有底部节点同步施加位移,获得更贴近实际的角度阈值。依托结构的平面对称性,计算 1/4 测点的角度变化阈值,将结果对称应用至其余测点,不同工况下底部节点沉降时,不同测点的角度变化阈值如表 9 所示。

表 9 不同工况下在底部节点沉降时不同测点的角度变化阈值

测点	预压工况下的角度变化阈值/(°)			浇筑工况下的角度变化阈值/(°)		
	预压 60%	预压 80%	预压 110%	浇筑 48.78%	浇筑 100%	张拉
T_{23}	0.022 9	0.029 6	0.039 6	0.019 2	0.036 3	0.020 3
T_{24}	0.010 5	0.013 7	0.018 3	0.008 5	0.016 7	0.017 1
T_{25}	0.009 4	0.012 3	0.017 3	0.007 6	0.015 6	0.016 0
T_{13}	0.018 2	0.024 3	0.034 2	0.015 0	0.030 8	0.031 1
T_{14}	0.016 8	0.023 0	0.031 2	0.013 9	0.028 4	0.028 7
T_{15}	0.014 8	0.020 6	0.027 9	0.012 2	0.025 1	0.025 4
T_{03}	0.015 8	0.021 1	0.029 1	0.013 0	0.026 7	0.027 0
T_{04}	0.016 3	0.017 6	0.024 3	0.010 9	0.022 3	0.022 7
T_{05}	0.011 9	0.016 3	0.022 3	0.009 8	0.020 1	0.020 3

由表 9 可知:对监测断面底部节点同步施加强制位移,测点底部及周边底部区域发生沉降;在不同荷载工况下,测点 T_{23} 的角度变化最敏感,在各工况下均显著高于其余测点,具有较高的预警价值;而测点 T_{25} 等边缘位置测点角度变化较小,反映结构整体刚度的缓冲作用;角度阈值随荷载水平增大而递增,表明该方法能有效捕捉沉降工况下支架结构的变形趋势,所建立的 1/4 测点角度阈值体系具备推广应用于全体测点的合理性与可行性。

4 结论

为预测支架稳定状况,采用有限元软件 MIDAS CIVIL 建立盘扣式满堂支架有限元计算模型,分析地基承载力不足时桥梁施工支架的变形规律,并将模拟数据与实际测量的支架变形进行对比分析,论证采用角度变化阈值进行预压和浇筑过程监控的可行性。

1) 实际测量的支架变形接近模拟数据,施工过程监控角度变化阈值可行。

2) 地基沉降分为 3 种不同的工况:一是单点地基承载力不足时,在支架底部受支座反力最大的支座处发生沉降;二是部分区域地基承载力不足时,在支架中间部分、右侧部分和左侧部分的底部同时发生沉降,局部结构位移变化明显,角度变化量均在允许阈值内,浇筑工况下部分区域地基承载力不足时的位移折减率和角度递减率变化较小;三是底部地基承载力不足时,沉降发生在测点底部及其周边底部区域,分别求得 3 种地基沉降条件下测点的角度阈值。

3) 通过现场试验,验证应用桥梁各测点的角度变化均未超过正常使用极限状态下的角度阈值,表明施工过程中监控角度阈值的可行性,该方法可有效识别因地基承载力不足引发的支架变形风险,进一步完善工程的预警机制,降低施工风险。

参考文献:

[1] BAPORIKAR N. Infrastructure Development Strategies for Empowerment and Inclusion[M]. Hershey, Pennsylvania, USA:

- IGI Global, 2024:1-21.
- [2] HE Z G, LI W T, SALEHI H, et al. Integrated structural health monitoring in bridge engineering[J]. Automation in Construction, 2022, 136:104168.
- [3] LI J, ZHAO R Y, CAO S L. Structural deformation control in bridge construction based on error analysis and correction[J]. PloS One, 2025, 20(4):e0319844.
- [4] 张志强. 公路桥梁工程中满堂支架现浇箱梁施工技术的应用[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(2): 115-117.
- [5] AI X Y, WAN X L, PAN Z D, et al. Deformation, bearing capacity, and reliability of building formwork system based on real-time monitoring[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022(9): 3967734.
- [6] 王欢. 铁路现浇十字连续梁支架稳定性优化方案研究[J]. 工程管理, 2024, 5(4):104-106.
- [7] LI R, TAO Q, LIU Z H, et al. Investigation on buckling behaviour of scaffold independent supporting system considering semi-rigid nodes[J]. Buildings, 2025, 15(3):443.
- [8] ÇELİK H K, ŞAKAR G. Semi-rigid connections in steel structures State-of-the-Art report on modelling, analysis and design[J]. Steel and Composite Structures, 2022, 45(1):1-21.
- [9] 宋国芳. 基于有限元的盘扣支架稳定性及影响因素研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(11):276-279.
- [10] 刘锴,白锋,周千帆,等. 有限元分析在盘扣钢管支撑架承载力计算中的应用[C]//2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册). 北京:中建宏达建筑有限公司, 2023:628-631.
- [11] 郭子毅. 盘扣式满堂支架稳定性分析及安全风险评估研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2022.
- [12] 桂志敬,张建东,冯晓楠,等. 承插型盘扣钢管支架在桥梁工程中的应用[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10):76-81.
- [13] 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.
- [14] 李俊德,冉涛,王寿武,等. 承插型盘扣支架监测关键参数研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(12):251-253.
- [15] 曹益. 承插型盘扣式高支模体系稳定性分析与安全性评价[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2023.
- [16] 董小杰. 桥梁施工支架在线监测体系研究与应用[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2020.
- [17] 李贵,钱猛. 现浇桥梁高支架体系静力稳定性分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(8):103-107.
- [18] 汪德旺. 大跨度钢管混凝土拱桥支架架施工仿真分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(6):104-108.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工质量验收规范:GB 50204—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
- [20] 唐永,么学春,赖旺盛,等. 考虑初始缺陷的桥梁高大施工支架整体稳定性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(1):93-105.
- [21] 刘玉达,杨涛. 盘扣式脚手架在桥梁支架工程中的应用[J]. 工程建设与设计, 2019(23):80-82.
- [22] 任翔,黄杜康,宋飞,等. 满堂支架稳定性分析中的非线性因素研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11):41-45.

Analysis of deformation patterns of bridge construction support under insufficient foundation bearing capacity

MA Wenlong¹, WU Guohua¹, DONG Shujing¹, ZHAN Yuhua¹, ZHAO Yulong^{1,2*}

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Key Laboratory of Technologies and Systems for Intelligent Construction Equipment, Jinan 250357, China

Abstract: To predict the stability conditions of the support structure and achieve effective early warning, finite element software MIDAS CIVIL is used to model the pin-supported disc-type supports of the bridge, simulating the response characteristics of the support structure under single-point settlement and regional settlement conditions. Using in-situ testing methods on the bridge, a comparative analysis is conducted between the simulated data and the actual measurement data of the support deformation, demonstrating the feasibility of using angular change thresholds to monitor the preloading and pouring processes, and acquiring the deformation

patterns at critical positions of the supports. The results show that the deformation data measured by the gyroscope closely match the simulated data, and the angular change threshold for construction process monitoring is feasible. Insufficient foundation bearing capacity leads to three different settlement conditions; first, when the single-point foundation bearing capacity is insufficient, forced displacements are applied to the four corner support rods at the bottom plane of the middle part of the support structure, resulting in significant angular changes at four measurement points, but none exceeds the warning threshold; settlement occurred at the position where the largest reaction force from the support is applied at the bottom of the support; second, when the foundation bearing capacity is insufficient in certain areas, forced displacements are applied to the middle, left, and right parts of the support structure, significantly affecting the key monitoring sections, with noticeable changes in local structural displacements; the angular changes remain within the permissible thresholds, and the reduction rates of displacement and angle during the pouring condition show minimal variation; third, when the foundation bearing capacity at the bottom of the members where each measurement point is located is insufficient, simultaneous node displacements are applied to the bottom nodes of the monitoring sections, with major settlement occurring in the regions around the bottom of the measurement points; the angular threshold increases with the increase in load, validating the effectiveness of the settlement identification and early warning method based on angular thresholds.

Keywords: foundation bearing capacity; support; deformation; finite element modeling analysis; angle threshold

(责任编辑:王惠)

(上接第 21 页)

[27] 张璇, 温惠英. 基于贝叶斯空间有序 logit 模型的高速公路货车事故严重程度分析[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(6): 78-84.

Analysis of factors influencing highway bus accidents frequency considering heterogeneity

CAO Zhen, LIU Hongyu^{*}, TIAN Zhun

Collage of Urban Development and Modern Transportation, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

Abstract: To enhance highway bus traffic safety and reduce accident rates, data from 2,320 samples are collected, including bus accident frequency, traffic volume, road characteristics, weather conditions, and holiday proportions, from three highways in eastern China. Accounting for accident heterogeneity, Poisson-lognormal (PLN), random parameters Poisson-lognormal (RP-PLN), and random effects Poisson-lognormal (RE-PLN) models are established. The Bayesian method and Markov chain Monte Carlo simulation estimate the posterior distribution of model parameters. The modeling results quantitatively assess the impact of various factors on highway bus accident frequency. Findings indicate that the RP-PLN model exhibits superior goodness-of-fit compared to the PLN and RE-PLN models. Road segment length, traffic volume, and holiday proportion show positive correlations with accident frequency, while temperature, relative humidity, and visibility demonstrate negative correlations. Holding other factors constant, a 1% increase in road segment length and traffic volume increases accident frequency by 0.90% and 0.62%, respectively. A one-unit increase in holiday proportion increases accident frequency by 8.30%. Conversely, a one-unit increase in temperature, relative humidity, and visibility reduces accident frequency by 5.72%, 8.82%, and 6.55%, respectively.

Keywords: highway; bus accident; heterogeneity; RP-PLN model

(责任编辑:赵玉真)