

DOI: 10.7672/sjgs2025180046

基于荷载重分布的小箱梁承载力提升技术研究*

石杰荣¹, 封明明², 张崇尚¹, 樊松¹, 舒森¹, 汪小鹏², 杨觅¹

(1. 陕西交通控股集团有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 西安公路研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

[摘要] 由于传统的桥梁加固方法对原梁体有较大伤害、施工周期长等弊端,探索了对原梁体无损坏的基于荷载重分布的桥梁承载力提升方法,并在石川河大桥加固中实施,阐明了新增钢板梁与原梁组合基本原理,钢板梁预拱度、钢板梁顶升实现恒载重分布的方式,新增钢板梁与原梁横坡、纵坡的自适应调节,提出基于荷载重分布的桥梁承载力提升施工工艺流程及施工要点。

[关键词] 桥梁;箱梁;加固;承载力;钢板梁;施工技术

[中图分类号] U445.7²

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0046-05

Bearing Capacity Enhancement Technology of Small Box Girder Based on Load Redistribution

SHI Jierong¹, FENG Mingming², ZHANG Chongshang¹, FAN Song¹, SHU Sen¹,
WANG Xiaopeng², YANG Mi¹

(1. Shaanxi Transportation Holding Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Xi'an Highway Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Due to the disadvantages of traditional bridge reinforcement methods, such as great damage to original girder and long construction period, a method is explored for improving the bearing capacity of bridge based on load redistribution without damage to original girder, which is applied successfully in the strengthening of Shichuan River Bridge. In the paper, there are expounded such as the basic principle of the combination of the new steel plate girder and the original girder, the pre-camber of the steel plate girder, the way to realize the dead load distribution by the steel plate girder lifting, and the self-adaptive adjustment of the transverse and longitudinal slopes of the new steel plate girder and the original girder, the construction process and key points are introduced in detail about the bridge bearing capacity enhancement based on load redistribution.

Keywords: bridges; box girders; reinforcement; bearing capacity; steel plate girders; construction

0 引言

近些年来,经济的增长导致公路车辆载重、车速、车流量都大幅度提高,早期修建的公路车辆容量已不能满足要求,高速公路改扩建正是缓和经济增长与公路交通设施资源不足矛盾的重要举措,然而在公路改扩建过程中对现有交通设施进行全部拆除重建或改建,资源消耗大而不易实施,为了在有限的经济下满足逐步增长的交通运输需求,利用旧桥加固使其承载力提升是一种经济的方法,探索

使桥梁加固投入更少、安全性更高、可操作性更强、更大幅度延长现有桥梁使用寿命,并能最大限度地满足现有规范要求的加固技术,是近年来科研工作者的研究热点。

现阶段我国道路、桥梁面临的问题包括两方面,一方面,汽车荷载轴重及交通量不断增大,依据JTJ 021—89《公路桥涵设计通用规范》和JTG D60—2004《公路桥涵设计通用规范》的桥梁都面临承载力不能满足现行规范JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》要求;另一方面,桥梁长期超载运营后,梁体承载力衰退,部分箱梁出现横向裂缝及腹板斜裂缝。JTG/T J22—2008《公路桥梁加固设计规

* 陕西省交通运输厅科技计划(23-106K)

[作者简介] 石杰荣,正高级工程师,E-mail: 2505855609@qq.com

[收稿日期] 2024-09-12

范》推荐的加固方法有体外预应力法^[1-2]、粘贴纤维复合材料法^[3]、增大截面法^[4-5]及改变体系法^[6],以提高原梁体承载力。以上方法有以下不足之处:①传统的加固方法需封道或限载,目前运营高速公路因交通量大,施工交通组织实施难度大;②现有加固方法粘贴的钢板、纤维复合材料等的耐久性不易保证;③现有加固方法因在梁底施工,操作难度大,且对原梁结构损伤较大,施工后质量无法保障,施工工期一般较长;④从加固效果方面看,现有加固方法加固后梁的承载力提高有限。

因此,本文探索了一种无须封闭交通、工期短、对原桥梁无损害、可显著提高桥梁承载力的基于荷载重分布的桥梁承载力提升技术,并在实桥中进行了应用。

1 工程概况

石川河大桥位于 G5 京昆高速公路陕西省境内禹门口—阎良段,为跨越石川河的一座大桥,该桥中心桩号为 K1010+932,全长 706.80m,双向 4 车道,上部结构为 3×20m ~ 8×20m 预应力混凝土箱梁,单幅横向 4 片小箱梁,梁高 1.0m、顶宽 2.6m、底宽 1.0m;下部结构采用双柱墩,钻孔灌注桩基础,埋置式桥台。设计荷载等级为汽-超 20 级、挂-120。2023 年京昆高速公路禹门口—崂峪段进行了改扩建,扩建后设计荷载等级为公路-I 级,双向 8 车道,设计时速 120km。

该桥箱梁底板出现纵向裂缝、腹板斜向裂缝、局部墩顶连续端贯通裂缝等病害,承载力已不满足现行规范要求。按该公路段改扩建规划对该桥 1-5 跨共 10 孔采用原箱梁-钢板梁组合结构提升承载力,从根本上解决该桥承载力不足问题。石川河大桥荷载重分布加固效果如图 1 所示。

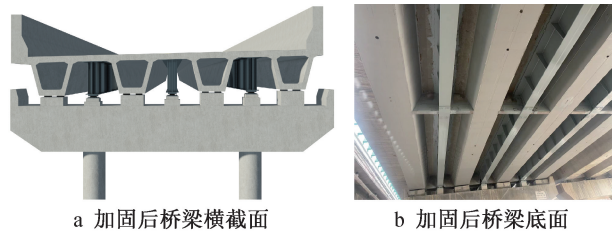


图 1 石川河大桥荷载重分布加固效果

Fig. 1 Reinforcement effect of load redistribution of Shichuan River Bridge

2 荷载重分布提升桥梁承载力

2.1 钢板梁设计

基于荷载重分布提升桥梁承载力技术的基本原理为:通过在原桥两箱梁中间安装设置预拱度的钢板梁,由顶升支撑系统在原梁与新增梁体间形成

装配力,原梁恒载传递至新增梁体,在运营阶段,原梁和新增梁体共同分担汽车荷载,实现恒载和活载重分布,降低原梁荷载效应,提高整桥承载力。

旧桥箱梁梁体长度一般在 16~50m,新增梁由钢板梁组成,钢板梁横截面设置为上部宽、下部窄的等腰梯形结构,在竖向两端每隔 1.2m 设置加劲肋,中部每隔 1m 设置 1 道加劲肋,如图 2 所示;钢板梁底面设预应力钢棒,用于抵消部分梁体的荷载效应。在钢板梁两端头由于有原桥端横隔板,因此根据现场空间设置为大底座形式,便于支座安装。在预应力钢棒锚固区的钢板梁加劲肋侧面设计了斜向加劲肋,保证预应力钢棒张拉后竖向肋板不变形。

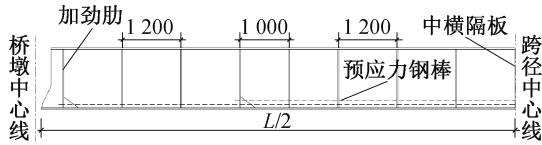


图 2 钢板梁结构

Fig. 2 Structure of steel plate girder

为了使桥梁恒载重新分布,在钢板梁顶面设置预拱度,通过原梁与新增梁间的装配力实现原梁与新增梁间力重分布。预拱度设置方法是按设计安装完成钢板梁后,由钢板梁上部所承受的总荷载计算沿钢板梁纵向挠度分布,按挠度分布图向上反弓制作钢板梁(见图 3),最后安装钢板梁时,在两支点的施加向上力使钢板梁上表面平整,则视为向上力和梁体部分承受荷载效应相平衡。通过施加向上力,使箱梁恒载分布到钢板梁上,中部预拱度最大,用于抵消部分梁体的荷载效应。

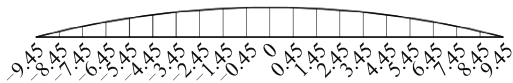


图 3 钢板梁预拱度布置

Fig. 3 Pre-camber arrangement of steel plate girder

新增钢板梁预拱度计算方法如下。

1) 均布荷载计算

$$y = \frac{qL^4}{24EI} (\mu^4 - 2\mu^3 + \mu) \quad (1)$$

式中: q 为单位长度均布荷载 (kN/m); L 为钢板梁长度 (m); μ 为 x 坐标与梁长 L 比值; y 为距梁端 x 位置钢板梁挠度 (m); E 为钢板梁弹性模量 (MPa); I 为钢板梁截面惯性矩 (m⁴)。

2) 二次抛物线荷载计算

$$y = -\frac{qL^4}{90EI} (\mu^6 - 3\mu^5 + 5\mu^3 - 3\mu) \quad (2)$$

顶升荷载计算如下。

1) 新增梁体与原梁按均布荷载传递内力

$$q = \frac{8M_0}{L^2} \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{2}qL \quad (4)$$

式中: q 为单位长度均布荷载 (kN/m); M_0 为跨中需提升抗弯承载力 (N·m)。

2) 新增梁体与原梁按二次曲线荷载传递内力

$$q = \frac{192M_0}{13L^2} \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{3}qL \quad (6)$$

预应力验算方法如下:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_0 - M_y}{I} y \leq [\sigma] \quad (7)$$

式中: N 为预应力产生的压力 (kN); M_0 为跨中转移荷载弯矩 (kN·m); M_y 为预应力在跨中产生弯矩 (kN·m); A 为新增梁截面面积 (m²); I 为新增梁截面惯性矩 (m⁴); y 为中性轴与梁顶底板距离 (m)。

钢板梁设置在原箱梁之间,沿两箱梁间湿接缝纵向安装(见图4),即根据现场地理条件,陆地上采用悬臂式起重机将钢板梁吊装到位,采用设置临时支撑分段吊装。吊装钢板梁所用吊点形式根据吊装设备和起吊方式确定,钢板梁制作前在梁体内设置吊点连接设施,并能保证较大集中荷载传递,以避免钢板梁产生局部变形,吊点位置、吊耳形式根据现场条件及受力分析确定安全后使用。

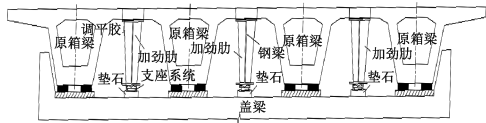


图4 钢板梁桥安装截面

Fig. 4 Installation section of steel plate girder bridge

2.2 钢板梁分段及连接

在相邻盖梁上设置支撑系统支承钢板梁,钢板梁长度大于相邻盖梁内边缘间距离,因此单片钢板梁无法直接安装。在受限空间中,新增钢板梁分2段吊装,在每段梁两端底板设置吊点,分别在桥墩盖梁及跨中设置锚点,采用电动葫芦吊装钢板梁。

为便于钢板梁安装,将钢板梁在横隔板位置分段(见图5),横向通过原梁横隔板与原梁连接,在连接处,钢板梁顶板与原混凝土箱梁(或T梁)翼缘板采用混凝土内植螺栓连接,腹板采用L形钢板通过植于横隔板上螺栓与横隔板连接,L形钢板与钢板

梁连接处采用竖向条形孔,以便钢板梁竖向向原梁施加反向力,钢板梁底板通过横隔板下缘采用拼接板连接,安装时先将钢板梁靠近盖梁两端放在盖梁上,再在中横隔板上设置起吊固定点,将钢板梁中部两端同时提起至水平位置,钢板梁间用螺栓连接,钢板梁底部同时用螺栓连接,预应力钢棒从两端预留钢棒穿梭孔穿入指定位置。

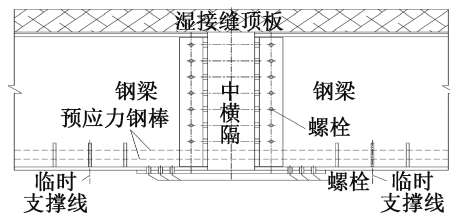


图5 钢板梁中部安装连接结构

Fig. 5 Installing the connection structure in the middle of steel plate girder

为提高钢板梁刚度,在钢板梁底部肋板根部设置无粘结预应力钢棒,钢棒端部锚固区由张拉端和锚固端组成,锚固区按顺序依次由锚垫板、锚固螺母、锚固挡板、锚固螺母组成(见图6),钢棒预应力由穿心千斤顶进行张拉,每根钢棒张拉预应力为185.5kN。预应力钢棒在钢板梁两端千斤顶顶升前先施加40kN的力,使钢板梁底部提前受反向拉力作用,抵抗梁体自重产生的正荷载效应,待梁体安装完成后,再按设计要求将钢棒预应力施加至设计值。

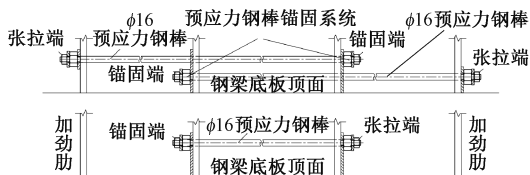


图6 钢板梁预应力钢棒布置

Fig. 6 Prestressed steel bar layout of steel plate girder

2.3 钢板梁与原梁连接

新增钢板梁梁体与原桥梁体的连接包括与原箱梁连接和桥墩连接。与箱梁连接是通过原箱梁翼缘与钢板梁上表面间通过高强聚合物砂浆在外力加压下密实粘贴;钢板梁与桥墩连接是通过自调坡支座系统支撑系统连接,依据设计转移荷载将支撑系统通过千斤顶顶升加压后连接。新增梁与原桥连接成整体,共同承受桥面车辆荷载,同时钢板梁具有自己的独立支撑系统,可将车辆荷载直接传递到桥墩上。

3 荷载重分布加固施工技术

3.1 加固材料

1) 钢材。钢材采用 Q355qD,其屈服强度 $f_y \geq$

345N/mm²,弹性模量 $E_p = 2.06 \times 10^5$ MPa。应具有抗拉强度、伸长率、屈服点和碳、硫、磷含量合格证;此外,钢材强屈比 ≥ 1.2 ,有明显的屈服台阶,伸长率 $> 20\%$;钢材的化学成分和力学性能应符合 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》及有关标准的要求。

2) 改性环氧聚合物砂浆。钢板梁顶面和原桥湿接缝底面采用专用改性环氧聚合物砂浆,其基本性能为:①劈裂抗拉强度 ≥ 5.5 MPa;②与混凝土的正拉黏结强度 ≥ 2.5 MPa,且为混凝土内聚破坏;③抗压强度 ≥ 45.0 MPa;④抗折强度 ≥ 15.0 MPa;⑤收缩率 $\leq 0.1\%$;⑥抗渗压力 ≥ 2.0 MPa。

3) 预应力钢棒。腹板竖向预应力筋采用 $\phi 16$ 无粘结预应力混凝土钢棒,其抗拉强度标准 $f_{pk} = 1420$ MPa,弹性模量 $E = 200$ GPa。钢筋锚下张拉控制应力为 $0.65f_{pk} = 923$ MPa (即每根张拉力为 185.5 kN), 每米理论伸长量为 4.591 mm, 预应力钢棒张拉采用单支单端张拉,钢棒两端采用 PSU16-1 锚具,螺纹公差带采用 6H/6g 组合。公差及配合应符合 GB/T 197—2018《普通螺纹 公差》有关规定。预应力钢棒端部螺纹须采用螺纹环规进行检测。

4) 自调坡支座系统。钢板梁梁体的支撑系统采用自调坡支座系统,支撑系统传递梁体荷载,通过球型铰调节适应原箱梁横坡、纵坡,满足原桥位移要求。自调坡支座系统由预埋钢板、固定锚栓、支座滑槽、橡胶支座及自调坡均压支座垫板组成 (见图 7)。自调坡均压支座垫板通过球型铰设计受力后,根据梁体的横坡和纵坡及梁体各部位配合情况自动调整梁体坡度;固定锚栓在预埋钢板 4 个角通过丝扣进行固定,固定锚栓的作用是在钢板梁支座部位用千斤顶加力顶升后,将 4 个固定锚栓拧紧以保留顶升力;支座滑槽按顺桥向安装,保证桥梁热胀冷缩位移过程中始终在滑槽内移动不会脱出。预埋钢板保证支座下表面接触平整,保证支座传递荷载过程中均匀受力,支座不易损坏。

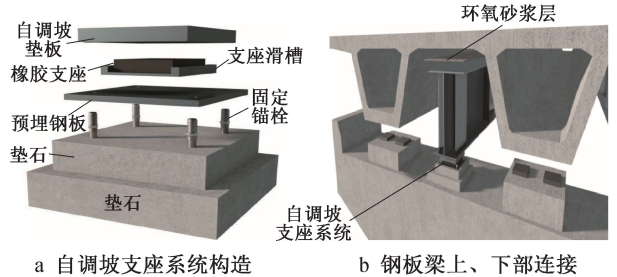


图 7 自调坡支座系统

Fig. 7 Self-adjusting slope bearing system

3.2 加固工艺

加固工艺流程为:钢板梁预制→定位与混凝土表面处理→钢板梁安装→支座安装→预应力钢棒张拉→外观修饰。

3.3 施工要点及注意事项

1) 钢板梁预制。按设计图纸要求的尺寸并结合梁结构实际尺寸完成钢板梁工厂预制,确保各部件加工精确、便于安装。

2) 定位和混凝土表面处理。依据图纸放线钢板梁安装的位置,用带水泥磨片的角磨机将两箱梁间湿接缝下表面钢板梁上表面接触区域的表面浮灰清除干净,混凝土有凸出部位用角磨机打磨平整,露出新的混凝土表面,再用干净抹布擦净打磨过程中的灰尘。

3) 钢板梁安装。钢板梁从中部分成 2 段,先将钢板梁靠近盖梁两端放在盖梁上,再在中隔梁上设置起吊固定点,将钢板梁中部 2 端及钢板梁靠近盖梁两端同时提起至水平位置,钢板梁间用螺栓连接,钢板梁底部同时用螺栓连接,预应力钢棒从两端预留钢棒穿梭孔穿入指定位置。

4) 支座安装。将钢板梁顶面打磨拉毛,涂 10 mm 厚改性环氧聚合物砂浆,中部高、两侧低呈楔形截面,将钢板梁靠近盖梁两端同时用 4 台 30 t 千斤顶分别在钢板梁两侧将其水平撑起, M24 高强螺栓用于底部支撑立模,待支座组合件及钢板梁就位后,在钢板梁垂直下方盖梁上用 30 t 千斤顶顶升钢板梁,直至钢板梁顶板与原箱梁顶板紧靠施加 250 kN 的力,调节高强螺栓高度锁死,撤掉千斤顶,立模用支座灌浆料浇筑支座垫石,支座垫石为 C40 钢筋混凝土,配筋同箱梁底垫石。

5) 预应力钢棒张拉。预应力钢棒张拉设备采用 YGD-350-70 型穿心式千斤顶,设有自锁装置,使用前应与油表配套标定,千斤顶的校正系数 ≤ 1.05 ,油压表的精度 ≥ 0.4 级。千斤顶及油压表应在标定有效期内。预应力钢棒在钢板梁两端千斤顶顶升前,先施加 40 kN 的力。待钢板梁顶面与湿接缝间的粘钢胶固化后,预应力钢棒张拉采取“双控”控制,以张拉力控制为主,伸长值校核。对预应力钢棒按设计力值施加预应力并进行锚固,施加预应力时先两边后中间,每根施加预应力时,按 $0 \rightarrow 0.1\sigma \rightarrow 1.0\sigma_{con}$ (同步旋进锚固螺母) $\rightarrow$ 持荷 2 s 后锁紧锚固螺母进行锚固。实际与理论引伸量差值应控制在 6% 以内,实测伸长值以 10% 张拉力作为测量的初始点。

6) 外观修饰。钢板梁安装完后,切除多余的螺栓头,对钢板梁及钢板梁连接部位刷防锈漆,颜色

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.