矮寨大桥施工技术创新

方联民[1], 谢立新[2], 喻 波[3]
(1. 湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省高速公路建设开发总公司, 湖南 长沙 410001; 3. 湖南省交通运输厅, 湖南 长沙 410001)

[摘 要] 矮寨大桥跨越宽约千米的德夯大峡谷,为典型山区峡谷桥梁,其施工过程中面临着诸多难题。通过施工技术创新,发明了"轨索滑移法"加劲梁架设新工艺,解决了山区悬索桥加劲梁架设难题;研发了"CFRP-RPC"高性能岩锚体系施工技术,解决了大吨位碳纤维索的锚固难题和岩锚体系的耐久性问题;开发了悬索桥无压重临时铰合拢施工技术,避免了常规方法装卸配重、体系转换所占用的关键工期,实现了钢桁加劲梁的无应力对接。大桥的施工技术创新保证了施工质量与安全,节约了投资,保护了环境,为国内同类型桥梁提供了参考。

[关键词] 矮寨大桥; 轨索滑移法; 高性能岩锚体系; 无压重临时铰合拢; 施工; 创新
[中图分类号] U 448.25 [文献标识码] A [文章编号] 1674-0610(2016)06-0308-06

Technology Innovation for Construction of Aizhaibridge

FANG Lianmin[1], XIE Lixin[2], YU Bo[3]
(1. Hunan Road & Bridge Construction Group Co., Changsha, Hunan 410004, China; 2. Hunan Expressway Construction and Development Co., LTD, Changsha, Hunan 410001, China; 3. Department of Transportation of Hunan Province, Changsha, Hunan 410001, China)

[Abstract] The Aizhai Bridge across the 1 000 m Dehang Canyonis a typical mountain canyon bridge, whose construction process was confronted with many difficulties. Through the innovation of construction technology, "Girder-Conveying Track Cable Technique" were created to solve the puzzle of how to erecting the stiffening girder of suspension bridges which were located in precarious course or deep ravine. In order to conquer thetechniqueof large tonnage anchorage, "CFRP-RPC" high performance system of rock bolt were developed. Besides, to avoid the key construction period taking up by the conversion loading balancing system, a new construction of non-weight Temporary hinge Closure were invented, this on the other hand realized the stress free butt joint of steel truss stiffening girder. In brief, innovation technology ensured the quality and safety of construction, saved investment and protected the environment. This paper summarizes the construction of innovation technology, for reference.

[Key words] aizhaibridge, girder-conveying track cable technique, high performance system of rock bolt, non-weight temporary hinge closure, construction, innovation

0 引言

随着我国交通建设的深入发展和全国路网的逐步完善,西部地区跨越深切峡谷的大跨度悬索桥日益增多。受复杂地形与地质等建设条件的影响,山区大跨径悬索桥建设往往面临着主梁架设难、体系转换繁琐等施工难题,原有的悬索桥施工技术难以满足发展需要[1-3]。

1 工程概况

矮寨大桥是长沙至重庆西部大通道湖南省吉首至茶洞高速公路上的一座特大型钢桁加劲梁悬索桥,主缆孔跨布置为242 m+1 176 m+116 m,在跨峡谷的悬索桥中居世界第一。该桥跨越"U"字形的德夯大峡谷,桥面距峡谷底部355 m(见图1)。受地形、地质等条件限制,该桥建设面临着施工场地狭小、运输条件困难、气象条件复杂等难题。传统施工

[收稿日期] 2016-12-06
[作者简介] 方联民(1961-),男,湖南岳阳人,研究员级高级工程师,工学硕士,从事公路、桥梁工程建设与管理工作。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

技术难以完全满足安全、耐久、环保、经济等要求。通过对施工关键技术的创新，取得了“轨索滑移法”加劲梁架设新工艺、新型高性能岩锚索施工技术与无压重临时铰合拢施工新技术等一系列施工技术创新，为山区大跨度悬索桥施工积累了经验。

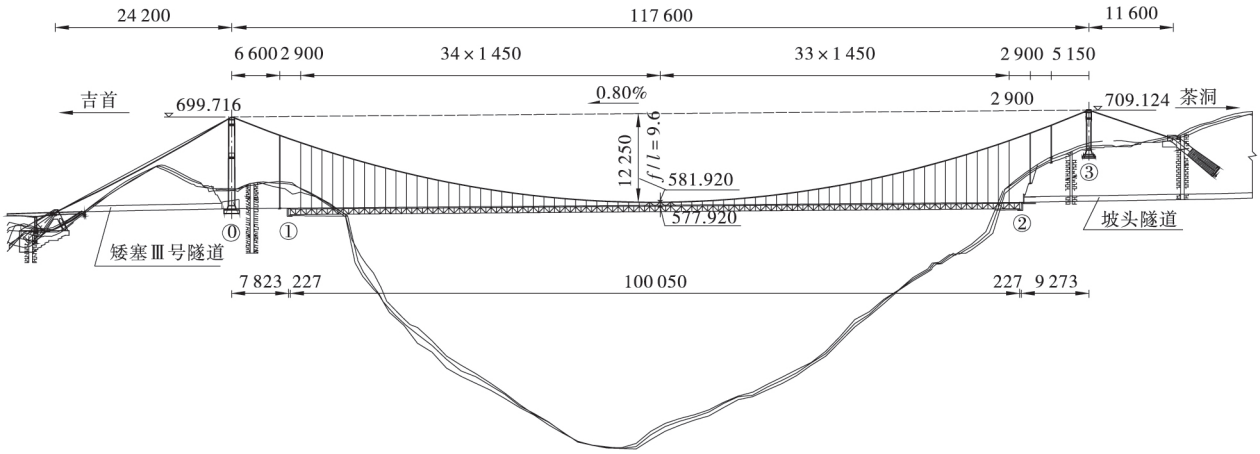


图 1　矮寨大桥桥型布置图(单位: cm)

Figure 1　The general arrangement drawing of Aizhai bridge(unit: cm)

2　加劲梁架设创新技术

悬索桥加劲梁常规的架设方法主要有桥面吊机悬拼法、缆载吊机法、缆索吊装法等。矮寨大桥主跨 1 176 m，桥面离谷底 355 m，两岸悬崖峭立，施工场地极其狭小，运输条件极其困难，常规方法均有很大的局限性，其主梁架设成为技术难题。大桥组织研发了“轨索滑移法”加劲梁架设新工艺，安全、高效、优质地完成了全桥 1 000 m 加劲梁的架设任务[4]。

2.1　“轨索滑移法”技术原理

轨索滑移法的基本原理是: 利用悬索桥的永久结构—主缆和吊索作为承重及传力结构，在吊索下端安装若干根水平钢丝绳作为索轨，将钢桁梁节段沿索轨从岸侧水平滑移至跨中完成安装，由跨中逐段向两岸延伸，直至全部加劲梁贯通。

轨索滑移法架设系统的两条基本力学特性:

① 有张力的索通过变形可以承受横向荷载;

② 索结构不传递横向剪切力。巧妙地利用了双层索系结构的力学特性，充分发挥了悬索桥主缆承受超大荷载的能力，将柔性索网结构的应用创造性地拓展到了承受超重超大荷载范围[5]。

2.2　“轨索滑移法”施工工艺

轨索滑移法架设加劲梁工艺的关键装备主要包括吊鞍、轨索、牵引索、运梁小车等[6](见图 2)，其施工工艺如下:

① 完成桥塔浇筑、主缆架设等施工;

② 安装索夹和吊索;

图 2　轨索滑移法系统的总体构成

Figure 2　The overall composition of“Rail-cable sliding method”system

③ 利用天顶小车下放的工作平台安装吊鞍，将吊鞍安装到吊索上面;

④ 在两岸侧施工轨索锚固系统;

⑤ 将轨索通过卷扬机从桥端牵引至对岸，并安装至锚固系统上，张拉轨索，使其达到所要求的内力和线形状态;

⑥ 布置移梁牵引系统;

⑦ 将在两岸拼装平台上已经完成拼装的梁段提升到运梁小车上，从两岸开始往跨中方向移梁;

⑧ 当梁段移动到位后，利用提升设备起吊梁段，将梁段安装到吊索上;

⑨ 重复第 7、8 步，每次梁段移动到位后，利用提升设备安装梁段，每次梁段安装完成后再对称移动下一对梁段，直至将全部梁段连接、安装完成;

⑩ 解除轨索与吊鞍的连接并拆除轨索，进行桥梁后续施工。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3 “轨索滑移法”理论与试验研究

2.3.1 理论分析

为了分析加劲梁架设过程各施工状态下轨索力的变化、轨索的变形、吊索力、以及桥梁结构的内力与变形，针对全桥施工过程，建立模拟大变形影响的非线性有限元模型进行仿真分析(见图3)。

图3 第6次运梁的计算模型示意图

Figure 3 Calculation model for the 6th shipment beam

分析表明：在轨索滑移法架设过程中，加劲梁最大拉应力为88 MPa，最大压应力75 MPa；主缆最大应力为596 MPa；吊索最大应力为281 MPa；安全系数均较大。轨索竖向最大位移为3.117 m，吊索之间轨索相对挠度最大值0.534 m，引起的坡度变化小于5°，轨索局部变形满足运梁小车行走的需要[2]。

2.3.2 足尺模型试验(见图4)

通过矮寨大桥“轨索滑移法”足尺模型试验研究，可以得到以下结论[7]：

① 轨索运梁系统运行平稳，安全可靠，轨索、吊鞍及运梁车的相关参数合理。

② 设计的轨索力大小和安全系数合理，轨索原始截面形状保持较好。

③ 模型试验中轨索力与轨索线形实测结果与理论计算结果较吻合；

④ 稳定的牵引力对小车的平稳走行有决定性的影响，有必要采用能保持小车前后相对恒定的作用力的牵引系统。

图4 节段足尺试验模型示意图

Figure 4 Segmental model for the full scale test

2.4 实施效果

发明的“轨索滑移法”成功解决了深切峡谷大吨位加劲梁高空水平运输的难题。矮寨大桥采用“轨索滑移法”架设主梁，创下了80 d架设1 000 m悬索桥主梁的世界新纪录，与同类型桥梁相比，工期缩短8～10月，减少钢桁梁永久结构用钢约2 000 t，创造巨大的经济效益。“轨索滑移法”主要特点与优点在于：

① 将加劲梁高空散拼转为地面节段拼装与空中整体安装，大幅减少了峡谷高空作业量，既降低了安全风险，又能提高拼装质量。

② 吊装荷载直接由吊索和主缆承担，钢桁梁不需承担施工荷载，施工过程内力小，可大幅降低用钢量，降低了工程造价，减少了施工措施的投入，经济效益显著。

③ 创造了一种新的且承载能力达到数百吨的索道运输装置(吊鞍和轨索车)，解决了既要给柔性轨索提供支点，且轨索车能平稳通过支点的难题。

④ 系统操作简便，仅用2台卷扬机就可完成梁的水平滑移牵引，主梁架设速度达到15 m/d，速度快，架设周期短，极大提高了工效、缩短了工期，降低了劳动强度。

⑤ 梁段安装不受运输条件的限制，适用范围广，推广应用前景广阔。

3 岩锚索施工创新技术

为克服地形、地质条件的限制，矮寨大桥的设计了塔梁分离式悬索桥新结构。为了解决新结构端吊索索力与应力幅过大、端主梁应力幅过大等问题，提出了无索区设置岩锚索的方案。

传统岩锚体系采用钢绞线或者钢筋传力，利用普通注浆方式锚固。特大桥的岩锚吊索为保证在寿命期内的使用安全，更应该考虑长效的防腐设计施工，项目建设者利用复合绞线CFRP以及超高性能混凝土RPC材料所具有的更高的强度、承载力和耐腐蚀性，研发了一种适用于基于高性能复合材料CFRP与RPC的新型预应力岩锚体系，并提出了相应的施工工艺。

3.1 高性能岩锚体系概况

高性能岩锚体系通过工艺手段对高级复合材料CFRP锚杆的地下锚固段用超高性能砂浆RPC粘结，将拉力传递到岩层或土体的预应力锚固体系中。

体系的组成如图5，分为：地上锚固段，自由段和地下锚固段。地上锚固段采用RPC作为粘结介质的粘结式锚具锚固CFCC锚杆；自由段筋材安装临时套管，保证CFCC筋在RPC灌注后受力状态下能自由伸缩；地下锚固段需采用RPC粘结介质将CFCC锚杆锚固于岩体中[8,9]。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　岩锚体系施工工艺(见图 5)

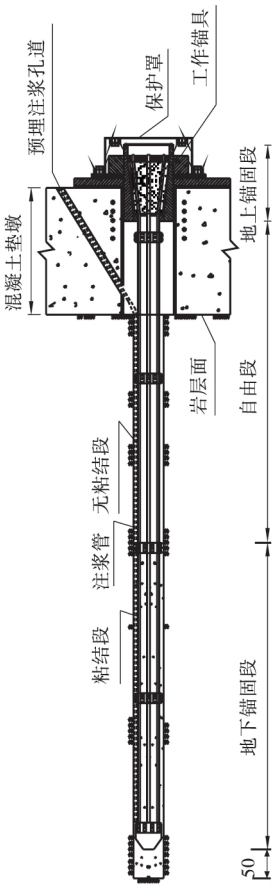


图 5　岩锚索系统组成图

Figure 5　The composition of rock anchor cable system

3.2.1　钻孔及垫墩浇筑

岩锚位置的不良地质需预先进行处理，溶蚀裂隙、溶洞、溶槽应进行充填砼或注浆处理，充填砼需实现地质环境的整体性，以保证岩锚的抗拔稳定性。垫墩浇筑应保证:

① 预埋钢管需与预埋钢板进行焊接，保证孔径中心对正。

② 设置锚索的注浆导管通道。

3.2.2　碳纤维锚索制作与安装

将相应数目的对中架、导向帽定位件安装至锚杆相应位置，并在锚杆端部 1 m 范围内将每根绞线打散成 7 小束; 核对对中架位置后，将锚板端筋材粘结固定，保证各筋材端部平齐，且在锚筒内不发生扭转，再安装定位件、压紧环。

进行灌浆料配比、搅拌，将锚杯固定，灌浆时轻微振动，使灌浆料尽量密实;

按照设计自由段长度安装每根绞线的自由段 PVC 套管并密封，将相应数目的对中架、导向帽定位件安装至锚杆相应位置。

3.2.3　注浆

采用内径 2.0 cm 导管注浆，灌浆过程中，压浆机需持续工作以防堵管，需配备足够容积的搅拌设备; 浆液要随拌随用，待使用的浆体在灌注前需维持搅拌状态，表面结硬或超过初凝时间的浆体要废弃; 注浆时，根据压浆状况可适当上提导管; 对注浆孔及相邻孔情况全程观测并做好记录，出现漏浆及时补浆; 最终灌浆深度接近筋材自由段顶端、且不超过锚杯底。

3.2.4　碳纤维锚索张拉

地下锚固段 RPC 灌浆需在注浆完成后养护 ≥ 14 d; 同期浇注的试件采取标准养护，强度需达 90 MPa—满足以上两个条件，方可进行碳纤维锚索张拉(见图 6) 。

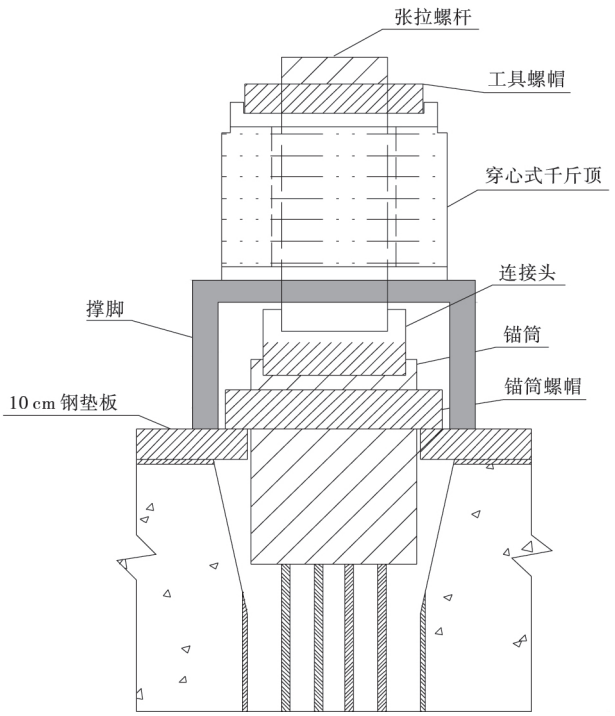


图 6　张拉阶段示意图

Figure 6 Tension phase diagram

整体张拉前需预张拉，应取 0.1 ~ 0.2 轴向拉力设计值(Nt) 对锚杆预张拉 1 ~ 2 次，使杆体完全平直，各部位接触紧密; 最大荷载为 1.2 倍设计荷载; 加荷至最大荷载并观测 10 min，待位移稳定即卸载至 1.0 Nt，然后加荷至锁定荷载锁定。锚索荷载锁定采用旋紧锚筒螺母后放张的方法。

3.2.5　封锚

完成张拉锁定后，拆卸张拉设备及配件; 在地上段外露锚头表面涂涂抹一层防腐油脂(无需填充) ，后盖上保护罩，与底部钢垫板螺栓连接(钢垫板与

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

锚固底座焊接)。

3.3 高性能岩锚体系理论与试验研究

通过界面粘结性能试验,获得了碳纤维筋与RPC以及RPC与围岩等界面的粘接-滑移关系、多锚杆结构不均匀特性、锚固段粘结应力分布特征等锚固体系的受力特点(见图7)。

图7 RPC与围岩粘接性能试验

Figure 7 Adhesive performance test of RPC and surrounding rock

通过足尺模型张拉试验现场张拉至1.8倍设计荷载,结果表明岩锚体系工作状况持续良好。通过长期性能试验观测460 d后,锚索锚固力损失最大不超过5.5%。

最终建立了碳纤维筋与RPC间平均粘结强度计算公式:

$$\tau_{gm}=\left(0.47+0.02\frac{l}{d}\right)\left(1+0.05\alpha\right)f_{cu}^{3/4} \tag{1}$$

得到了地下锚固段的粘结锚固段长度计算公式:

$$L_m=\frac{N_t}{\pi D f_{RPC}} \tag{2}$$

3.4 实施效果

新型高性能岩锚体系采用的CFRP碳纤维复合材料具有抗拉强度高、质量轻、不锈蚀、热膨胀系数低、无磁性、抗疲劳性能好及比钢绞线强度高(比钢绞线高2~3倍)等优点。采用的超高性能混凝土RPC材料具有抗压强度高,韧性高,低孔隙率和优异的耐久性能。

新型高性能岩锚体系可广泛的应用于各类岩土体加固工程,如隧道与地下洞室的加固、岩土边坡加固、深基坑支护、混凝土坝体加固、结构抗浮、抗倾覆,各种结构物稳定与锚固等,不受施工条件限制。

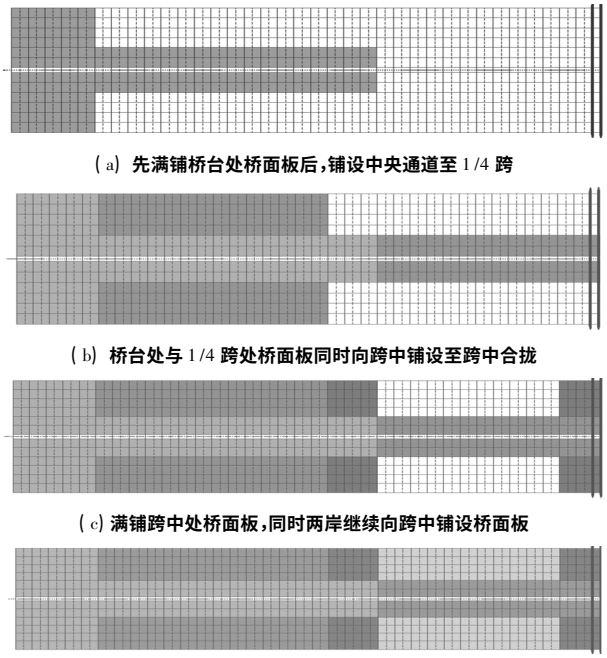
4 加劲梁合拢施工创新技术

悬索桥施工中,钢桁加劲梁段各节间要设置一定数量的铰,以确保主缆线形变化时,主梁结构的内力和变形始终在安全范围内。钢桁梁架设完成后,再通过等代压重法,或通过提升手段,强制使加劲梁铰接口参数合格再加以紧固高拴,即完成铰合拢过程。这样体系转换工作占用大量关键工期,施工效率极其低下。项目建设者在矮寨大桥建设中研发了"悬索桥无压重临时铰合拢施工技术",成功解决了悬索桥主梁铰转刚接时工期长、工效低的难题,仅用27 d就安全、经济、高效、优质地完成了全桥桥面板架设与铰合拢的施工任务。

4.1 悬索桥无压重临时铰合拢施工工艺(见图8)

① 先在两岸桥台处满铺五段加劲梁桥面板,保证岩锚吊索内力在后续施工中满足结构受力要求,同时也为两岸施工创造了两个施工作业面;

② 由两岸向跨中铺设中央通道,至中跨1/4跨位置时,桥台处作业面开始施工,由两岸向跨中施工,同步完成部分铰接梁段的铰固转换,此时桥面板安装同时6个作业面作业,铰固转换2个作业面,全桥同时具备8个作业面;



(a) 先满铺桥台处桥面板后,铺设中央通道至1/4跨

(b) 桥台处与1/4跨处桥面板同时向跨中铺设至跨中合拢

(c) 满铺跨中处桥面板,同时两岸继续向跨中铺设桥面板

(d) 跨中及两岸同时安装桥面板直到铺设完成

图8 桥面板施工工序示意图

Figure 8 Construction process diagram of bridge deck

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

③ 中央通道合拢后，在跨中处满铺 5 个梁段桥面板，再由跨中向两岸施工，加劲梁铰固转换此阶段可增加两个作业面，全桥加劲梁施工作业面增加到 12 个，大幅度提高了施工效率。

④ 在桥面板安装完成前完成全部加劲梁临时铰的铰固转换，桥面板安装完成后即可开展桥面系铺装施工。

4.2　悬索桥无压重临时铰合拢施工受力分析

受力分析结果表明：加劲梁上弦杆在桥面板安装阶段最大应力为 161.7 MPa，最小应力为 -169.0 MPa（见图 9），满足设计要求；桥面板安装阶段 J00 最大内力 3 960 kN，C01 吊索最大内力为 3 972 kN，C00 最大内力为 2 515 kN，均满足设计要求。

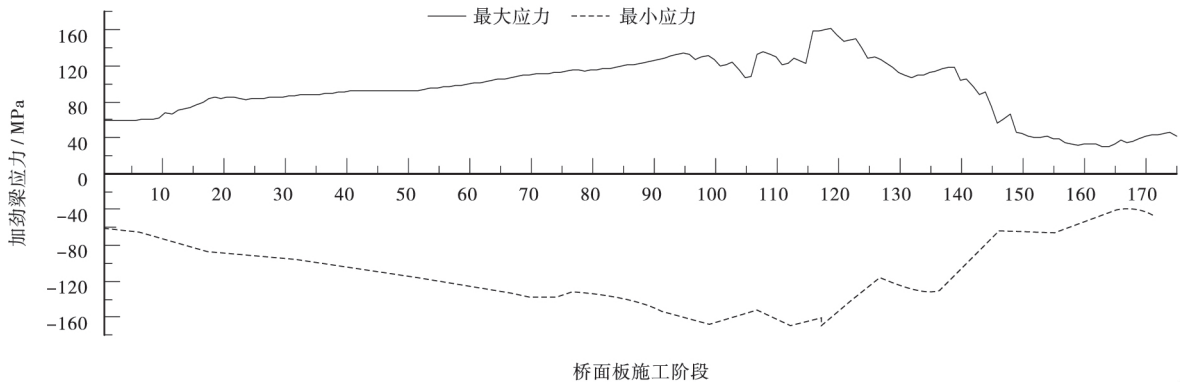


图 9　加劲梁上弦杆施工过程中应力包络图

Figure 9　The upper chord stress envelope in the process of the construction

4.3　实施效果

悬索桥无压重临时铰合拢施工技术在矮寨大桥成功实施，其主要优点在于：

① 减少了在桥面板未形成整体时大量驶入的重载车辆，降低了安全风险。

② 减少零散压重材料的滚动对山下居民区的威胁。

③ 利用了桥面板安装阶段加劲梁段的线形变化，实现了钢桁加劲梁的无应力对接。

④ 避免了常规方法中采用装卸配重进行体系转换所占用的关键工期，加快了施工进度。

⑤ 节约了常规的强制合拢在压重方案中体系转换所需要的配重材料、装卸吊装施工设备和人力资源。

悬索桥钢桁架加劲梁在架设过程中，通过合理的设计加劲梁施工临时铰及施工临时铰铰固转换方案，实现在即有施工条件下，大幅度提高施工效率，加快施工进度，缩短加劲梁架设阶段关键施工工期目标；与传统施工方案相比，在人力资源、机械设备、施工材料方面都具有非常明显的技术优势，为今后钢桁架加劲梁架设施工提供了全新的技术思路。

5　结语

矮寨大桥的建设面临着山路险峻、场地狭小、气象复杂等工程难题，建设者们通过对施工技术创新，成功克服了自然的挑战、保证了施工质量、节约了投资、保护了环境。大桥的成功建成彰显了中国桥梁建设的新实力，凸出了绿色交通的新理念，积累了山区桥梁建设的新经验，可供工程界同仁参考。

参考文献

[1] 赵前进. 山区 V 形峡谷悬索桥关键施工技术[J]. 世界桥梁，2016(6)：23－26.

[2] 胡建华，崔剑峰. 湘西矮寨大桥设计创新技术[J]. 桥梁建设，2011(6)：54－61.

[3] 罗喜恒，肖汝诚，项海帆. 悬索桥施工过程精细化分析研究[J]. 土木工程学报，2015(5)：76－80.

[4] 易继武，盛希，张念来，等. 矮寨特大悬索桥钢桁加劲梁架设方案研究[J]. 施工技术，2013(5)：9－11.

[5] 沈锐利，闫勇，唐茂林，等. 轨索滑移法节段足尺模型试验设计与安装[J]. 桥梁建设，2013(1)：15－22.

[6] 凌胜春. 山区大跨度悬索桥钢桁加劲梁架设方法研究[J]. 城市道桥与防洪，2014(7)：294－296＋22－23.

[7] 闫勇，沈锐利，唐茂林，等. 轨索滑移法节段足尺模型试验研究[J]. 桥梁建设，2013(2)：46－50.

[8] 潘权，颜东煌，许红胜，等. 塔梁分离式悬索桥岩锚索施工过程受力分析及试验研究[J]. 中外公路，2015(2)：120－123.

[9] 陈国平，方志，张旷怡，等. 基于高性能材料大型岩锚体系应用研究[J]. 中外公路，2011(6)：16－19.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net