

基于主缆预配重的悬索桥主梁架设工艺研究^{*}

汪杰¹, 颜东煌¹, 周大庆², 廖万辉², 许红胜¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.贵州公路工程集团有限公司, 贵州 贵阳 550008)

摘要: 为提升悬索桥主梁架设的施工效率, 提出一种基于预配重的主梁架设工艺。在介绍该主梁架设工艺主要施工流程的基础上, 采用有限元软件对悬索桥主梁架设过程建立模型, 并利用重力刚度原理验证该模型的可靠性; 对比分析梁段间不同连接方式和预配重逐段刚接下的主梁应力、变形和主缆控制点位移, 结果表明对主缆预先进行配重可以有效改善主梁架设过程中结构的受力和变形; 通过配重荷载大小和布载位置双参数分析, 对配重进行优化, 并验证该主梁架设工艺的可行性。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 主梁架设; 主缆预配重

中图分类号: U445.46

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0105-06

悬索桥以其成桥刚度大、跨越能力强的特点成为跨越江河、山区峡谷的主要桥型, 但受制于通航条件和复杂的山区峡谷地形, 主梁运输和架设成为一个难题^[1-3]。现有悬索桥主梁架设方法根据梁段间连接方式的不同主要分为逐段刚接法、全铰法和刚铰混合法等^[4-6]。梁段逐段刚接会使主梁在架设前期就参与结构受力, 为减小主缆非线性变形引起的弯曲应力, 须在梁段间设置临时连接, 由此出现全铰法和刚铰混合法^[7]。但设铰会降低主梁施工过程的稳定性, 导致临时连接受力过大, 还涉及后期刚铰体系转换的问题^[8-9]。主梁在架设过程中一直处于受主缆变形影响的被动状态, 传统工艺一般通过上述改变梁段节间连接的方式降低施工附加应力, 对调整主缆变形, 改善主梁施工过程受力状态的研究较少。本文从提高主缆前期刚度以限制架梁过程中变形的角度出发, 提出一种基于预配重的悬索桥主梁架设方法^[10]。

1 工程概况

某主跨 1 080 m 的双塔单跨悬索桥, 全长 1 840 m, 跨度布置为 (265+1 080+435) m, 主梁由正交异性桥面板、主桁、主横桁通过焊接和高强螺栓连接, 形成主梁受力体系。桥梁整体布置见图 1。

1.1 预配重法简介

预配重法通过配重方式增大主缆刚度, 减小施

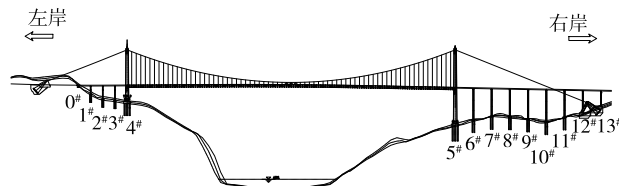


图 1 某山区大跨度悬索桥的整体布置

工过程对主梁的影响, 从而使主梁从主塔向跨中连续施工。如图 2、图 3 所示, 其施工步骤如下:

(1) 在悬索桥主缆施工完成后进行体系转换, 将猫道改挂到主缆上。

(2) 在改挂后的猫道上配置荷载, 通过改吊索将荷载传递至主缆, 使主缆获得较大的应力刚度。

(3) 取消缆索吊装系统, 利用桥面运输梁段并依次从主塔向跨中对称连续刚接架设主梁, 施工过程遵循“边架设, 边卸载”的原则, 将已架设完成梁段范围内的配重荷载卸除, 使主缆变形相对稳定。

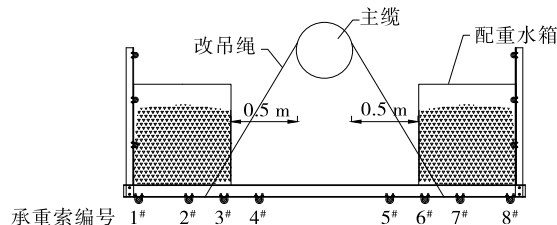


图 2 猫道配重示意图

1.2 配重荷载

在理想施工状态下, 配重荷载选用一期恒载, 即

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878073)

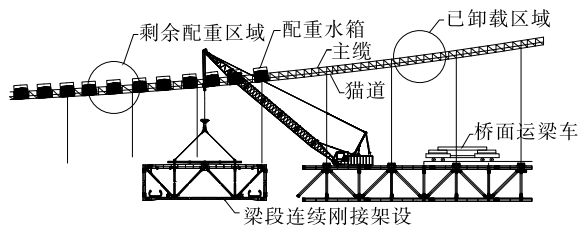


图3 预配重法施工示意图

主梁自质量 G , 将其以等效荷载的方式沿纵向均匀布置于猫道两侧, 配重物沿桥纵向并非完全连续, 在一定间距内进行切断处理, 其仅作为荷载施加, 不参与结构受力。此外, 考虑到配重荷载过大会导致施工难度增大、材料费用增加等问题, 以理想配重下状态与传统施工方法进行对比分析, 并通过参数影响分析得到最优配重荷载大小及布载方案。

2 有限元模型及验证

采用 MIDAS/Civil 有限元软件对该悬索桥整体结构建立图 4 所示模型。主塔采用变截面梁单元模拟; 主梁杆件采用梁单元模拟, 组合拼接为主桁架和主横桁架; 正交异性桥面板采用板单元模拟, U 形加劲肋考虑形状和厚度以等效厚度的方式计入模型中; 主缆采用索单元模拟, 不考虑空隙率, 以每根丝股的面积组成主缆的实际面积; 吊索采用索单元模拟, 将同一吊点处的双吊索等效为单根吊索, 等效面积的方式与主缆相同。

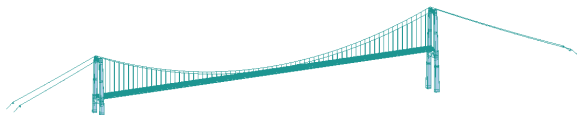


图4 全桥有限元模型

运用悬索桥重力刚度原理对有限元模型进行验证。将空缆阶段视作恒载状态, 主缆自质量在全跨范围内作用均布荷载 q , 其产生的水平分力为 H_q ; 将标准梁段视作活荷载, 以集中荷载 P 的形式作用在主缆上, 其产生的水平分力增量为 H_P ; 主缆水平分力 $H = H_q + H_P$ 。考虑集中荷载作用在中跨 $x_c = L/8, L/4, L/2$ 位置时的情况。结构中跨部分在 x 方向沿 z 轴对称, 故取集中荷载仅施加于半跨范围内。在施加集中荷载时, 主索鞍处于固结状态, 不考虑塔偏对主缆竖向位移的影响。分别采用式(1)和式(2)^[11]、式(3)和式(4)^[12] 计算主缆在集中荷载作用下作用点处的挠度和水平分力增量, 并与有限元模拟结果进行对比。主缆自质量均布荷载

根据索的面积与密度等效为 $q = 30.178 \text{ kN/m}$; 产生的初始水平分力 $H_q = 43\ 326.780 \text{ kN}$; 集中荷载 P 取单根主缆一半标准梁段质量, $P = 1\ 006.859 \text{ kN}$; 作用位置 x_c 分别为 $135 \text{ m}, 270 \text{ m}, 540 \text{ m}$ 。将上述取值分别代入式(1)~(4), 计算得到主缆竖向位移和水平分力增量的理论解。理论解与有限元模拟结果的对比见表 1、表 2。

$$v_{xc} = \frac{Px_c(L-x_c)}{H_q L [1 - 3x_c(L-x_c)/L^2]} \quad (1)$$

$$H_P = \frac{6x_c H_q (L-x_c)}{qL^3} P \quad (2)$$

式中: v_{xc} 为主缆在集中荷载作用点处的竖向位移(m); P 为集中荷载, 即活载(kN/m); x_c 为集中荷载作用位置(m); L 为中跨跨度(m); H_P, H_q 分别为集中荷载作用下主缆的水平分力增量和均布荷载作用下主缆的水平分力(kN)。

$$v_{xc} = \frac{PL(1-3\alpha\bar{\alpha})\bar{\alpha}\bar{\alpha}}{H_q(1+9\alpha\bar{\alpha}\lambda+6\alpha\bar{\alpha}\lambda^2)} \quad (3)$$

$$H_P = \frac{6\alpha\bar{\alpha}(1+\lambda)\lambda}{1+3\alpha\bar{\alpha}\lambda} H_q \quad (4)$$

式中: $\alpha, \bar{\alpha}$ 分别为 x_c/L 和 $(L-x_c)/L$, 是集中荷载 P 作用点的无量纲参数; λ 为 P/qL , 是活载与恒载比。

表1 主缆竖向位移理论解与有限元模拟结果对比

荷载作用位置	竖向位移有限元结果/m	竖向位移理论解/m			
		文献[11]	文献[12]	文献[11]误差/%	文献[12]误差/%
$L/8$	1.603	1.844	1.789	15.0	11.6
$L/4$	1.840	2.059	1.955	11.9	6.3
$L/2$	0.954	1.032	0.986	8.2	3.4

注: 竖向位移误差 = |(竖向位移理论解 - 竖向位移有限元模拟结果)| / 竖向位移有限元模拟结果 × 100。

表2 主缆水平分力增量理论解与有限元模拟结果对比

荷载作用位置	水平分力有限元结果/kN	水平分力理论解/kN			
		文献[11]	文献[12]	文献[11]误差/%	文献[12]误差/%
$L/8$	871.3	878.4	896.4	0.8	2.9
$L/4$	1 485.9	1 505.8	1 525.8	1.3	2.7
$L/2$	1 297.3	1 320.8	1 327.4	1.8	2.3

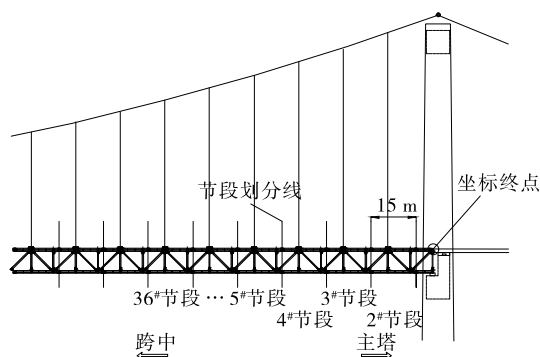
注: 水平分力误差 = |(水平分力理论解 - 水平分力有限元模拟结果)| / 水平分力有限元模拟结果 × 100。

由表 1、表 2 可知: 有限元模拟结果与式(3)计

算所得主缆竖向位移更接近,集中荷载在跨中时有限元模拟结果与两种理论解的误差最小,为3.4%,随着作用点向主塔处靠近,两种公式的计算结果出现一定偏差,该规律与文献[12]中结论相同。这是由于计算公式忽略了主缆各点的水平位移,而有限元模拟考虑了水平位移。水平分力增量的有限元模拟结果与两种理论解的误差均在3.0%以内。根据主缆竖向位移误差产生规律和水平分力增量误差大小,上述有限元模型可靠,可采用该模型进行后续研究。

3 预配重法与传统施工方法对比分析

主梁整体变形、杆件受力、吊索张力及主缆位移是悬索桥主梁施工中须重点关注的因素。通过对比分析逐段刚接法、全铰法、刚铰混合法和预配重法施工过程中上述关键因素的响应结果,分析预配重法的可行性。为方便施工阶段的定义和计算分析,设:1) 逐段刚接法和预配重法自主塔向跨中架设,全铰法和刚铰混合法自跨中向主塔架设;2) 刚铰混合法的合理设铰位置确定方法为逐段刚接梁段至某一位置时,若出现对应处吊索力和整体主梁应力超限,则在该位置设铰^[13],通过多次试算,确定合理设铰位置在32#~33#梁段间;3) 计算共分为36个阶段,两岸对称架设一片梁段为一个施工阶段。梁段编号和主梁纵向坐标见图5。



定义主梁跨中点为坐标原点,主塔处为坐标终点,半跨长540 m

图5 梁段编号及坐标定义

3.1 施工过程中各构件受力分析

成桥运营状态下,活载对拥有巨大重力刚度的悬索桥的影响十分有限,但在主梁施工过程中,梁段、吊索、主缆之间的交互影响不可忽略。对逐段刚接法、全铰法、刚铰混合法和预配重法4种梁段架设施工方法进行模拟计算,得到图6~8所示各施工阶段吊索内力和主梁应力。

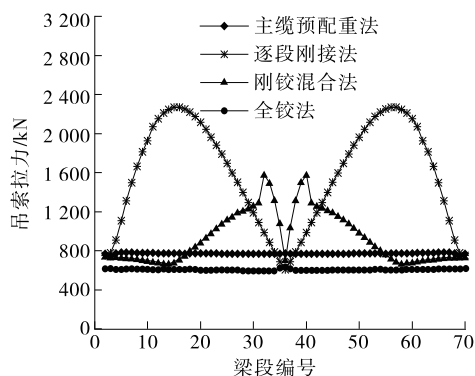


图6 吊索索力包络图

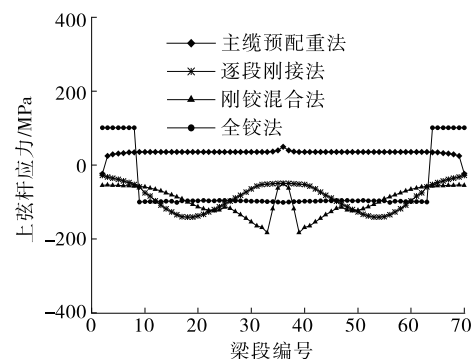


图7 上弦杆应力包络图

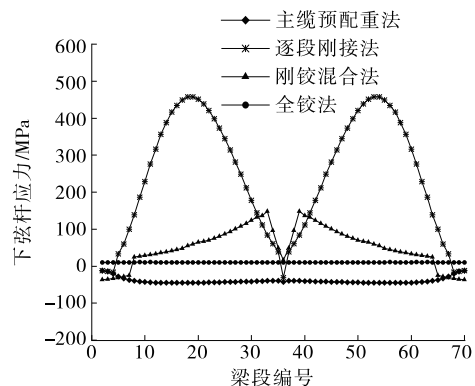


图8 下弦杆应力包络图

由图6可知:采用逐段刚接法和刚铰混合法时,吊索拉力在梁段架设初期出现最大值,且大于成桥索力;全铰法的吊索拉力在4种施工方法中最小;采用预配重法,施工阶段吊索拉力小于成桥索力,其分布规律与全铰法相同,都是在梁段架设前期出现微小变化,在架设后期基本处于恒定状态。主梁变形是引起索力增大的一个因素,因配重增大了主缆刚度,随之减弱了梁段架设过程变形对吊索拉力的影响。

由图7、图8可知:采用逐段刚接法和刚铰混合法时,主梁各杆件的应力随梁段架设而增大,逐段刚接法在架设第19#梁段时出现应力峰值,已影响结

构安全,刚铰混合法通过设铰明显改善弦杆的受力情况;采用全铰法时,整个施工过程中应力较小;在预配重法施工过程中,主梁各构件的应力水平比其他 3 种施工方法小,上下弦杆的受力状态反映主梁基本仅承受自质量荷载。由于先期配重调整了主缆变形,降低了其对梁段架设过程的影响,逐段刚接下主梁受力状态得到改善,同时由于是自主塔向跨中架设,还能避免设铰产生局部吊索内力增大和铰接点剪力过大对上弦杆产生不利影响。

3.2 施工过程中主梁变形分析

主梁施工过程中受主缆位移影响产生被动变形,主梁线形不仅决定成桥后线形是否满足设计要求,还能反映梁结构大致受力情况,在边跨向中跨架设时线形变化过大会影响梁段的运输和拼装。因此,有必要对施工过程中主梁变形进行分析。为更直观地反映梁段架设过程中整体变形规律,列出部分典型工况下数据,不同施工方法下主梁变形见图 9,典型工况下主梁局部最大纵坡见表 3。

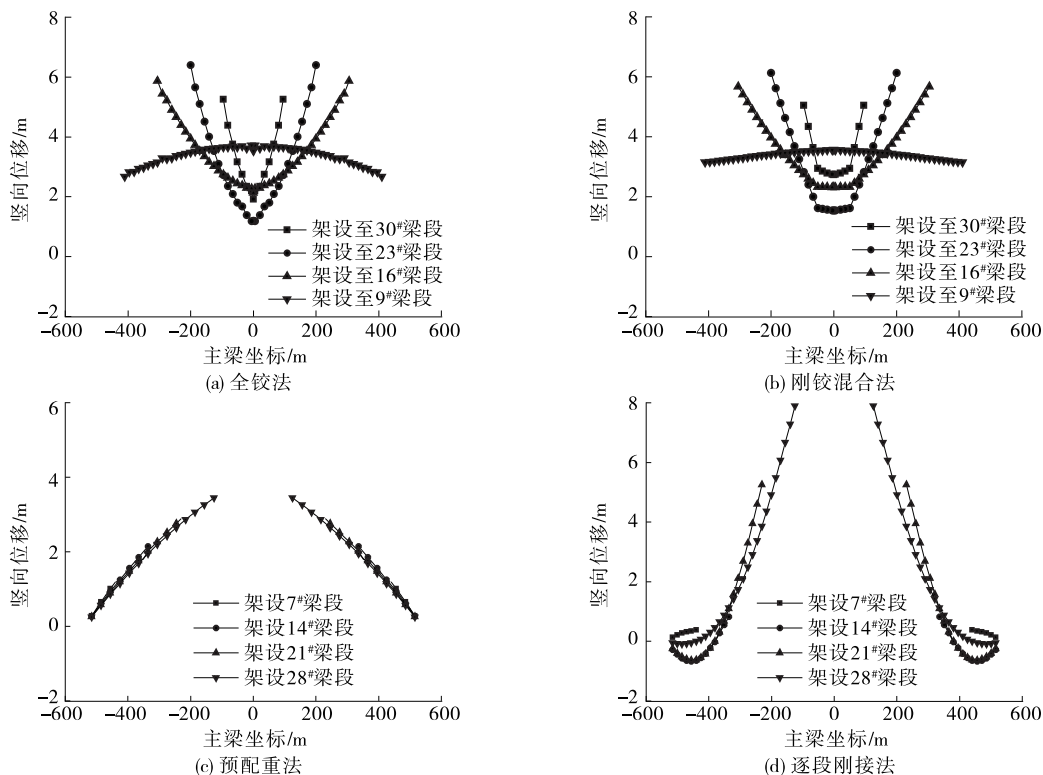


图 9 不同施工方法下主梁竖向位移

表 3 典型施工工况下主梁局部最大纵坡

施工方法	典型工况下主梁纵坡/%			
	架设 7 [#] 梁段	架设 14 [#] 梁段	架设 21 [#] 梁段	架设 28 [#] 梁段
预配重法	0.7	1.0	0.9	0.7
逐段刚接法	0.5	2.0	4.4	4.1

注:未计入主梁预拼纵坡。

由图 9 可知:采用全铰法和刚铰混合法时,架设过程中主梁的变形规律基本一致,施工前期结构整体刚度小、主缆位移量大,引起主梁线形出现较大变化,呈下凹形状;采用刚铰混合法时,在通过铰处后位移开始增大,这是由主缆变形使主梁在铰点转动所致,但整体变形小于全铰法。采用预配重法和逐

段刚接法时主梁线形均出现上抬趋势,其中预配重法在各典型施工阶段的变化规律基本一致,呈类似线性变化。这是因为预先通过配重增大了主缆刚度,并随着梁段架设和同步卸除配重荷载使主缆刚度在较小范围内变化,从而减小结构整体的非线性变形程度。逐段刚接法则因为主缆本身的抗弯刚度不足以抵抗大吨位荷载作用引起的变形,在从主塔向边跨架设的同时,跨中部分主缆出现上抬,带动主梁前端出现向上的位移,梁段间处于刚接状态,主塔附近梁段为抵抗变形向下弯曲。

由表 3 可知:逐段刚接法下最大变形纵坡出现在架设 21[#] 梁段时,为 4.4%,远大于预配重法下主梁坡度。

综上所述,与全铰法和刚铰混合法相比,预配重

法施工过程中主梁线形的连续性好,不会出现正负曲率交替变化的情况,同时具有较大的整体刚度。与逐段刚接法相比,预配重法有效降低了主缆变形对主梁线形的影响,施工过程中变形纵坡小,便于桥面运输和梁段架设。

3.3 施工过程中主缆竖向位移分析

由于索结构的特性,主缆自身抗弯刚度十分小,

索夹等荷载给其提供的重力刚度有限,当梁段荷载通过吊索作用于主缆时,其线形会不断变化,从而对主梁架设产生影响。通过分析架梁过程中主缆位移的主控点(中跨跨中点)、辅控点(中跨四分之点、中跨八分之点)的变形,对比分析预配重法与其他 3 种施工方法在主缆变形特征上的差异及对主缆位移的改善情况。各施工阶段主缆控制点的变形见图 10。

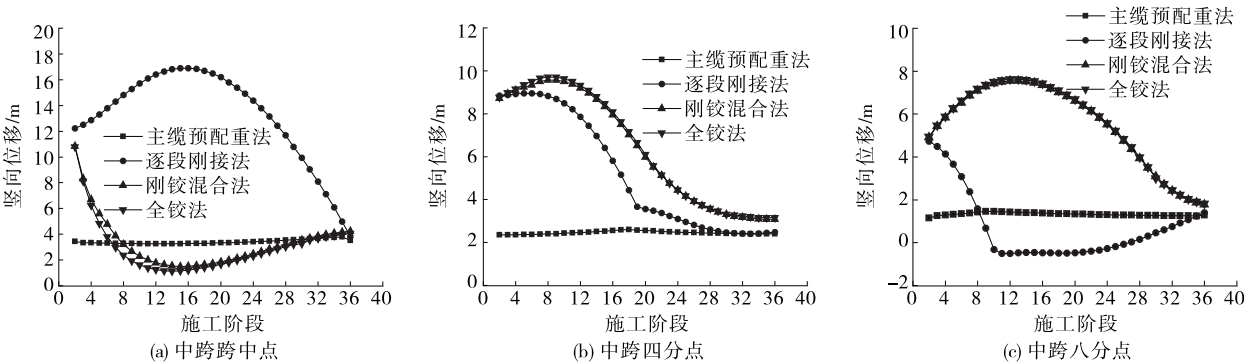


图 10 主缆中跨各控制点的竖向位移

由图 10 可知:采用逐段刚接法、刚铰混合法、全铰法时,主缆各控制点的位移在梁段架设前期快速增大,在施工阶段完成 1/3 时达到位移峰值,随后逐渐减小至接近相同;在中跨四分之点位置,3 种施工方法的位移变化趋势基本一致,而在中跨跨中点和八分之点位置,逐段刚接法的位移变化趋势与其他 2 种施工方法相反,这是由梁段架设方向不同所致;从主塔向跨中逐段刚接架设时,主缆的非线性变形最强烈,跨中部分主缆出现明显上抬,这也是导致该施工方法下主梁整体线形大幅上抬的原因。采用预配重法时,主缆位移在架设前期出现微小浮动后基本处于恒定状态,配重提供给主缆的重力刚度抵抗了梁段自质量引起的变形,位移的减少反过来也改善了主梁的变形和受力状态,因而可以满足主塔向跨中逐段刚接架设的需要。

4 预配重法参数影响分析

上述分析结果表明,将一期恒载作为等效荷载进行预配重的方式能使主梁架设达到理想状态,但考虑到配重荷载过大会大量占用猫道施工作业面,且材料需求大、施工难度高,对配重荷载进行优化,使工艺具有一定的可行性。

4.1 配重荷载变化影响分析

在预配重法中,施工阶段结构的整体刚度受配重荷载大小的影响,当主缆因荷载作用具有足够的张力时,可以有效减小梁段吊装产生的影响,进一步调整主梁受力状态。为此,将配重荷载大小作为影响参数,计算结构在该参数变化下的应力和位移情况,结果见表 4。

由表 4 可知:配重荷载大小变化会对主梁受力

表 4 配重大小变化下结构的响应

配重大小	上弦杆应力峰值/MPa		下弦杆应力峰值/MPa		主缆跨中点最大位移/m		主缆跨中点最小位移/m	
	施工过程中	合龙后	施工过程中	合龙后	施工过程中	合龙后	施工过程中	合龙后
1.00G	50.0		-45.3		3.799		3.265	
0.75G	-39.8	41.1	57.4	-34.0	5.493	3.413	4.099	3.413
0.50G	-44.9		161.5		8.133		4.381	

状态产生影响。1.00G 配重为理想状态,此时结构的应力和位移接近合龙状态;配重减小时,主缆位移增大,主梁产生位移,导致梁段间处于刚接状态,出

现主梁构件应力反号和弯曲应力增加的情况。以应力作为控制条件,当配重减小至 0.50G 时,施工过程中主梁应力仍在容许范围内,因此可考虑将配重

荷载优化为 $0.50G \sim 0.75G$ 。

4.2 配重位置变化影响分析

为进一步优化配重荷载,以配重大小和布载位置双参数分析主缆竖向位移和主梁应力变化规律。取消部分位置的荷载,采用全桥均布下每延米质量

设置 3 种配重方案,配重施加位置分别为跨中 $345 \sim -345$ m(方案一)、 $255 \sim -255$ m(方案二)、 $165 \sim -165$ m(方案三)。3 种方案下主缆竖向位移和主梁应力见图 11、图 12。

从图 11 可以看出:配重荷载越大,对主缆位移

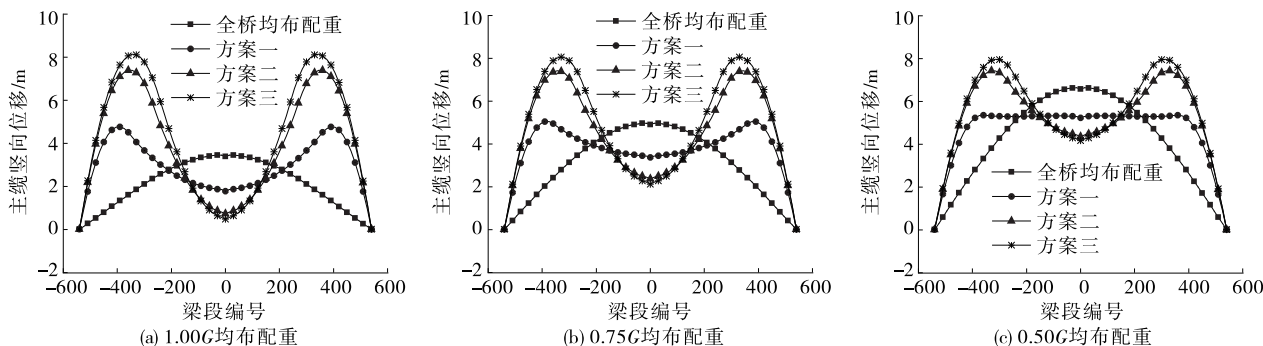


图 11 配重位置改变引起的主缆竖向位移

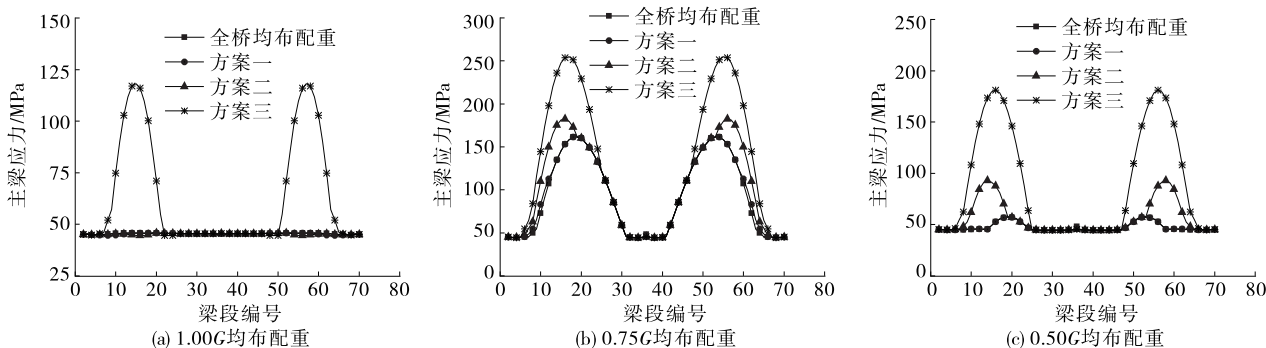


图 12 配重位置改变下主梁应力包络图

的调整越明显,全桥均布的主缆线形变化规律与一期恒载相同。布载位置向跨中调整后,相对于全桥均布,主缆整体变形呈现跨中下沉、靠近主塔附近上抬的趋势,不配重情况下,梁段自主塔向跨中逐段刚接架设会使主梁线形出现负曲率,对弦杆受力不利,而在跨中部分施加荷载后,主缆变形对该状态有修正作用,从而限制应力随着梁段刚接数量的增加而继续发展。布载位置改变后,配重减少使主缆产生较大非线性变形,对主缆刚度的贡献相比于全桥均布时小,还须对比分析主梁的受力情况选择合适的方案。

由图 12 可知:1) 主梁的应力峰值出现在梁段架设前期,并随着布载位置向跨中移动而增加。采用 $1.00G$ 配重时,3 种方案的主梁应力水平较小,配重减小后应力增大,在 $0.75G$ + 方案三组合下已超过 250 MPa,但其他配重大小 + 位置方案组合下主梁应力均在 180 MPa 以内,可作为布载方案的选项。2) 从控制应力至最小值来看,采用方案一最合适,其与全桥均布下的应力包络值基本一致,且在任

一配重大小下均可行。但从经济实用角度考虑,适当放大应力控制条件,可选择 $0.75G$ + 方案二组合,该组合下总荷载仅为一期恒载配重($1.00G$) + 全桥均布组合的 $1/3$ 。

5 结论

(1) 预配重法可有效改善主梁架设过程中的主梁应力、位移和主缆变形,在结构大变形得到控制的情况下,可以实现自主塔向跨中连续逐段刚接架设主梁。

(2) 为增加预配重法的可行性,对配重荷载进行优化,将配重荷载减小并将布载位置向跨中调整,仍能通过选择合理的荷载 + 布置组合控制架梁期间结构的受力和变形,从而达到主梁自主塔向跨中逐段刚接架设的目的。

但本文没有考虑配重状态下猫道受力情况和风载影响,后续将继续进行研究。

(下转第 117 页)

过大的现象,需规范伸缩缝变形要求。3 种连接方式中,铰接方式的受力最简单,但桥梁整体性较差,影响行车;刚接方式下结构和受力最复杂,对结构形变非常敏感,在收缩徐变和基础沉降荷载作用下易产生非常大的次内力而导致结构破坏,但拼接后桥梁整体受力性能最佳,利于交通;半刚接方式下受力性能、结构整体性介于铰接和刚接之间,是拼宽桥梁设计中常用的上部结构连接方案。

参考文献:

- [1] 沈汉,沈莲芬.高速公路上桥梁设计的几个问题[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会,广东省公路学会,广东虎门技术咨询公司,等.中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十二届年会论文集(下册).北京:人民交通出版社,1996:4.
- [2] 霍文棠.公路桥梁拼宽设计[J].公路,2019,64(5):131-134.
- [3] 王宗华.高速公路桥梁加宽拼接技术优化研究[D].西安:长安大学,2009.
- [4] 景国庆.新旧箱梁拼接部位的设计与研究[D].南京:东南大学,2012.
- [5] 何琨,朱军.中国高速公路建设历程与发展战略[J].筑路机械与施工机械化,2004,21(10):8-10.
- [6] WEST R.The use of grillage analogy for the analysis of slab and pseudo-slab bridge decks[R].Cement & Con-

crete Association Res Repts,1973.

- [7] ROWE T E. Concrete bridge design [M]. London: Applied Science Publisher,1962.
- [8] 王玉娜.改扩建高速公路现状评价及设计优化[D].郑州:郑州大学,2014.
- [9] 胡晓晔.高速公路桥梁拼宽设计[J].交通世界,2021(5):123-124.
- [10] KOVLER K.Interdependence of creep and shrinkage for concrete under tension[J].Journal of Materials in Civil Engineering,1995,7(2):96-100.
- [11] 王亚东.T 梁桥加宽中几个问题的研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [12] 郑本辉,黄亮生,仲健.新老桥拼缝连接的有限元分析[J].中国勘察设计,2017(1):98-101.
- [13] 高向玲,张业树,李杰.基于 ABAQUS 梁单元的钢筋混凝土框架结构数值模拟[J].结构工程师,2013,29(6):19-26.
- [14] 林峰,顾祥林,匡昕昕,等.高应变率下建筑钢筋的本构模型[J].建筑材料学报,2008,11(1):14-20.
- [15] 温庆杰,叶见曙.新旧混凝土梁横向拼接的收缩徐变效应[J].中国公路学报,2007,20(4):53-57.
- [16] 茹毅,刘其伟.收缩徐变作用下混凝土连续箱梁拼宽桥拼接段受力性能研究[J].中外公路,2016,36(2):196-200.

收稿日期:2022-11-30

(上接第 110 页)

参考文献:

- [1] 徐元孝,颜俊.山区特大跨径悬索桥钢桁梁架设工艺探讨[J].公路交通技术,2018,34(4):63-67+75.
- [2] 纪为详,陶路.山区大跨度悬索桥钢桁梁施工技术[J].桥梁建设,2012,42(3):107-113.
- [3] 许红胜,彭东晗,吴佳东,等.山区悬索桥钢主梁施工新工艺研究与应用[J].湖南交通科技,2022,48(1):130-133.
- [4] 张海顺.大跨度钢桁梁悬索桥临时连接方式分析研究[J].土木工程学报,2020,53(12):98-105.
- [5] 刘吉晗.大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [6] 朱红明,程海潜,李清,等.大节段钢桁梁悬索桥主梁架设的窗口铰接法研究[J].中外公路,2021,41(6):120-123.

- [7] 任仁,罗亨文,陶路.坝陵河大桥钢桁梁施工方法比选[J].桥梁建设,2013,43(3):114-119.
- [8] 陈浩,潘权,韩伟威.悬索桥主梁施工过程设铰数量对结构体系的影响分析[J].公路与汽运,2022(3):104-109.
- [9] 张海顺.大跨度钢桁梁悬索桥合理刚接时机的研究[J].铁道建筑技术,2021(1):49-53.
- [10] 许红胜,何任珂,周大庆,等.一种大跨度悬索桥拼装施工方法:CN112853993A[P].2021-05-28.
- [11] 徐君兰,向中富.关于悬索桥的重力刚度[J].重庆交通学院学报,2000(2):71-74.
- [12] 刘钊,刘厚军.悬索桥主缆变形及重力刚度新算法[J].工程力学,2009,26(6):127-132.
- [13] 陶路,陈雷,黄盛.坝陵河大桥临时铰设置与施工技术研究[J].中外公路,2012,32(6):199-202.

收稿日期:2023-03-15