

基于全对称悬拼施工的斜拉桥结构优化

严任苗

(安徽交通职业技术学院 土木工程系, 安徽 合肥 230051)

摘要:随着斜拉桥跨径的不断突破,斜拉桥应用范围不断扩大,大跨径斜拉桥设计计算理论也逐步完善。其施工工艺与工序也较为成熟,传统斜拉桥施工一般在边跨设置支架安装段,支架安装长度一般略大于锚固跨长度。在芜湖二桥设计、施工过程中,初始施工方案制定及结构设计均采用了传统的施工工艺。但是实际工程实施过程中,为了节约深水基础搭设临时支架的高额费用,拟将施工方案调整为边跨梁段均采用悬臂拼装施工,但施工方案调整对结构合理状态的影响不可忽略。该文以主跨 806 m 的芜湖长江公路二桥为依托,研究了不同施工工艺对结构受力状态的影响,并结合桥梁施工工艺,分析了对超大跨径斜拉桥构造设计优化的思路。通过合理的结构构造和施工工艺优化,确保了结构受力状态的合理。

关键词:斜拉桥; 施工控制; 结构优化; 对称悬拼; 合理状态

1 引言

随着苏通大桥、香港昂船洲大桥等多座桥梁的建成,标志着中国超大跨径斜拉桥设计计算理论与建造技术已逐步完善。超大跨径斜拉桥施工过程中,常通过设置边跨支架安装段减小双悬臂施工长度,以减小大悬臂施工过程中因体系非线性、稳定性等导致结构发生破坏的风险,其支架安装段长度一般略大于锚固跨长度。但是实际工程建设中,深水基础搭设临时支架的费用过高,大幅增加了桥梁施工成本,故超大跨径斜拉桥施工中是否可取消边跨支架安装段,采用全悬臂拼装施工成为该类桥梁施工技术突破及发展的关键,如荆岳长江公路大桥北岸边跨主梁采用悬臂施工法,黄冈公铁两用长江大桥、安庆长江铁路大桥主桥也采用了对称悬臂施工的工艺。

超大跨径斜拉桥采用全跨悬臂拼装施工和部分悬臂拼装工艺施工,其对成桥阶段结构受力状态的影响不可忽略。此外,超大跨径斜拉桥采用全跨悬臂对称施工工艺时,需尽量确保各施工阶段及成桥阶段主塔、主梁变形较小,以减小结构施工控制的风险,保证实际成桥阶段主梁线形及结构受力状态与理论成桥状态基本一致。因此,超大跨径斜拉桥采用全跨悬臂拼装施工工艺时,结合桥梁悬臂施工过程控制,对结构构造设

计、施工工序等进行优化,进而确定合理成桥状态是结构设计阶段工作的重难点。

该文以主跨 806 m 的芜湖长江公路二桥为依托,开展不同施工工艺对结构受力状态影响的研究,并结合施工过程结构受力特点分析,对结构构造设计进行优化,通过结构构造优化和施工工序优化,最终保证成桥状态结构受力状态合理。

2 工程概况

芜湖长江公路二桥起点位于安徽省无为县的石涧,在矾头山过长江与南沿江高速公路相接。芜湖长江公路二桥主桥跨径布置为 $(100+308+806+308+100)$ m,采用全漂浮式分肢柱式塔四索面分离式钢箱梁斜拉桥。主梁为分离式扁平流线形封闭钢箱梁,单幅箱宽 18 m,两幅箱梁间距 17 m。主塔采用分肢柱式塔结构,塔高 262 m。

在施工方案编制时,采用了施工图推荐的传统架设方式,见图 1。主要施工步骤为:①主塔附近搭设支架,吊装塔根支架段钢梁;②桥面吊机对称吊装钢箱梁梁段至 3# 梁段;③吊装边跨 1# 梁段至边墩墩顶;④对称吊装 2# 梁段至安装位置,顶推边墩墩顶 1# 梁段并与 2# 梁段对接,完成边跨合拢。

在项目实施过程中考虑到边跨支架区域多处于河

收稿日期:2019-03-04

基金项目:安徽省自然科学基金重点资助项目(编号:K2015A369);安徽高校学科拔尖人才资助项目(编号:gxbjZD2016099)

作者简介:严任苗,男,副教授.E-mail:2564124857@qq.com

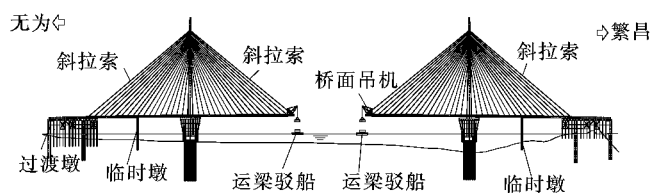


图 1 原来施工方案

道范围内,搭设支架造价过高。拟对钢箱梁架设方案进行调整,改为全悬臂吊装施工,取消边跨支架安装区段,见图 2。主要施工步骤为:①主塔附近搭设支架,吊装塔根支架段钢梁;②桥面吊机对称吊装钢箱梁梁段至 24[#]梁段;③吊装边跨 26[#]梁段至边墩墩顶;④对称吊装 25[#]梁段,顶推边墩墩顶 26[#]梁段并与 25[#]梁段。

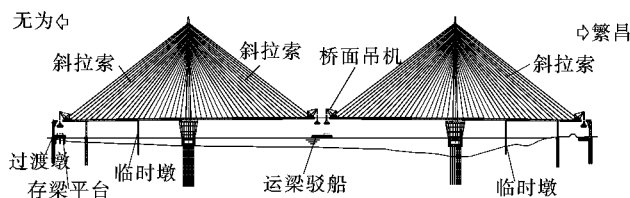


图 2 调整后施工方案

施工方案的调整势必会对结构带来一定的影响,该文以芜湖二桥为依托开展基于全悬臂安装施工方法的施工监控优化。

3 施工方案调整对结构的影响

采用相同的斜拉索张拉方案对两种施工过程分别进行模拟,以分析调整施工方案对结构的影响。分析结果表明:两种施工方案下结构在成桥阶段的主梁位移如图 3 所示。由图 3 可知:采用边跨搭支架的施工方法得到的主梁位移整体较小且线形比较平顺;而改用对称悬臂拼装以后,由于施工时边跨边界条件发生较大改变,导致主梁线形发生非常大的变化,成桥阶段主梁位移绝对值非常大,中跨跨中下挠达 1.1 m,边跨最大下挠接近 1.08 m,最大上拱 0.6 m,成桥主梁线形具有非常大波动极不平顺。

成桥状态下主梁弯矩如图 4 所示。由图 4 可知:由于两种施工方法中采用了相同的斜拉索张拉力,所以成桥阶段主梁在中跨范围内的弯矩分布几乎重合;而在边跨尤其是辅助墩至边墩范围内,由于施工过程中边界条件改变,导致该范围内主梁弯矩发生了非常大的变化,主梁负弯矩急剧增大,尤其是在辅助墩墩顶截面负弯矩达到约 $-100\ 000\ \text{kN} \cdot \text{m}$,几乎是其他

位置主梁弯矩的 3 倍。

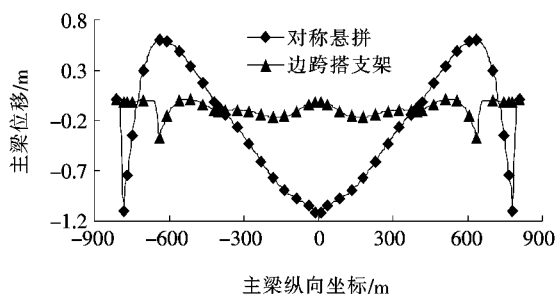


图 3 不同施工方案成桥阶段主梁竖向位移

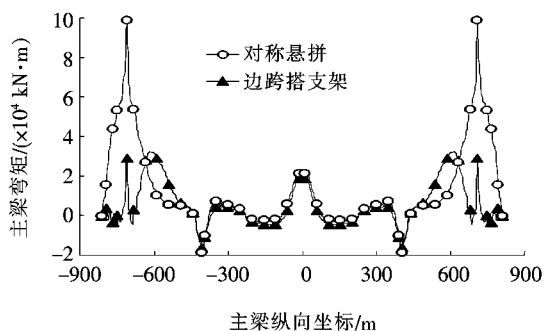


图 4 不同施工方案成桥阶段主梁弯矩

成桥阶段主梁应力分布具有与弯矩分布类似的规律,在边跨辅助墩至边墩范围的主梁应力发生了显著变化,采用对称悬臂施工的主梁上下缘应力都急剧增大,上缘应力最大达到 58 MPa,下缘应力最大达到 140 MPa,这对主梁的受力非常不利。

成桥阶段,两种施工方案下桥塔顺桥向位移及弯矩分布如图 5、6 所示。

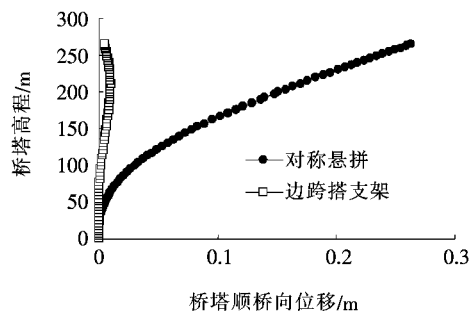


图 5 不同施工方案成桥阶段桥塔顺桥向位移

由图 5 可知:①按照原定边跨搭设支架的方案进行施工时,成桥阶段主塔基本保持“正直”状态,塔顶最大位移仅 5 mm;②采用对称悬臂拼装方案进行施工时,成桥阶段主塔发生了明显的偏位,塔顶位移增大到 263 mm。可见改变边跨主梁施工方案后,边跨斜拉索的索力发生了显著变化,主梁悬臂施工后,梁段重量全部由斜拉索承担,使得边跨斜拉索索力增加,同时中跨

侧索力未发生显著变化,导致桥塔两侧斜拉索水平分力不平衡进而产生了较大偏位。

由图6可知:两侧斜拉索索力的不平衡性大大增加,导致主塔弯矩也显著增大。

运营过程中,在荷载标准组合作用下,两种不同施工方案进行施工的结构主梁上、下缘应力包络如图7、8所示。

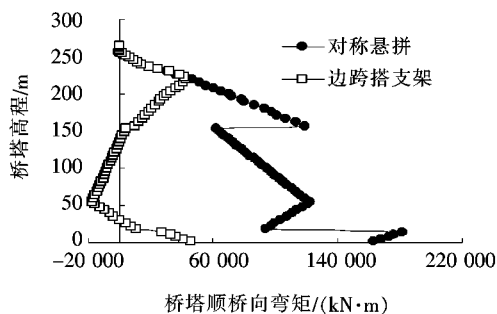


图6 不同施工方案成桥阶段桥塔弯矩

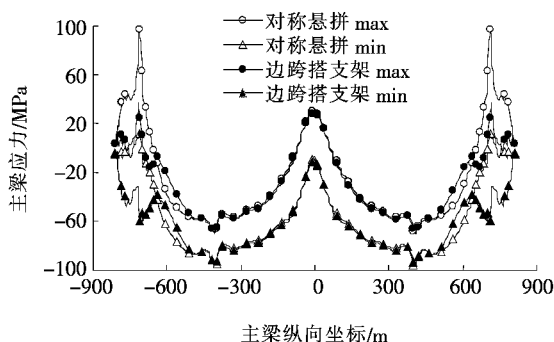


图7 标准组合下主梁上缘应力包络图(半桥)

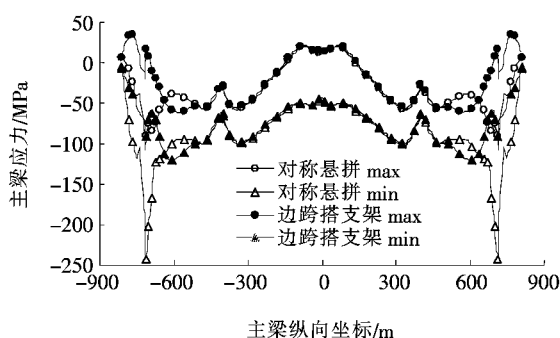


图8 标准组合下主梁下缘应力包络图(半桥)

由图7、8可知:中跨主梁上下缘的应力分布几乎没有差异,边跨辅助墩至边墩范围内,采用对称悬臂拼装施工的主梁应力产生了显著的增大,主梁下缘最大应力达到250 MPa,已经超过了材料的容许应力限值。

可见,对于斜拉桥这种高次超静定结构,成桥阶段结构的受力状态与施工过程密切相关,如果在设计阶段不进行周密的考虑,一旦实际施工过程与设计施工过程出现差别,就有可能导致结构达不到理想的成桥

状态,甚至出现危险。通过该文的分析比较及时发现了一问题并开展了相关优化研究。

4 基于全对称悬拼的结构优化

4.1 边中跨梁段重量匹配度分析

上文分析表明:不同施工方案导致结构受力产生显著改变,其原因在于施工时边跨主梁的边界条件发生了变化,进而导致结构的受力状态恶化。从结构位移及内力的变化趋势可知,边跨主梁采用悬臂拼装时,原设计索力不能平衡边跨悬臂段主梁自重,导致边跨主梁大量下挠并在辅助墩处产生了非常大的负弯矩。问题的根源应该出在边跨梁段的重量上。

原设计方案中,边中跨主梁梁段重量分布如图9所示,边跨主梁在辅助墩之前的范围内各梁段重量与中跨主梁各梁段的重量完全对称;边跨主梁在辅助墩到边墩范围内的梁段重量比中跨对应位置处梁段重量重,尤其是辅助墩墩顶及附近梁段的重量要远远重于中跨对应梁段重量。这样的设计主要是考虑辅助墩墩顶负弯矩的需求,墩顶配重构造的需要及梁段加劲的构造要求。图中钢梁节段编号按照由边跨第一个梁段至中跨合龙段依次编号为1~53号梁段。

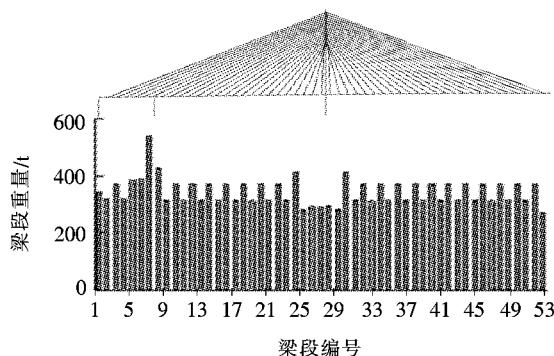


图9 主梁节段重量分布

4.2 结构优化原则

4.2.1 结构的力学概念分析

该桥的桥塔结构形式为分肢柱式桥塔,桥塔刚度相对较小,在施工过程中需要使边中跨两侧斜拉索在桥塔处的水平分力尽量平衡,以确保桥塔处于比较好的受力状态。该桥边中跨比为0.506,故边、中跨斜拉索的倾角几乎相等,若两侧斜拉索水平分力可以相互平衡,则两侧斜拉索的索力需基本保持相等。这是芜湖长江公路二桥纵桥向分孔布跨的特点对斜拉索索力分布的内在要求。

当采用边跨搭支架施工方案时,边跨主梁预先放

置在支架上。在中跨施工至与边跨辅助墩至边墩区域相对应的梁段时,斜拉索索力由中跨梁段的受力及变形确定,以桥塔受力平衡为原则反推出边跨斜拉索索力。由于中跨主梁相对较轻,反推出的边跨斜拉索索力不足以完全承担边跨主梁的重量,多余的重量将由支架和辅助墩承担,拆架后对边跨主梁的线形和受力仅有细微的影响。这就使得施工过程中可以使中跨主梁和桥塔处于比较理想的状态,同时成桥阶段边跨及辅助墩墩顶梁段的受力也可以满足要求。

但采用对称悬臂拼装的施工方案时,边跨较重的梁段也要与中跨梁段一同悬臂吊装。若要保证主梁线形平顺、受力合理就需要大大增加边跨斜拉索索力导致桥塔变形及受力不利;若要保证桥塔线形及受力合理,则边中跨斜拉索索力需要基本对称,那么边跨辅助墩至边墩范围内的梁段就会在悬臂的过程中过度下挠,并在辅助墩墩顶截面产生非常大的负弯矩,导致主梁线形、内力不合理。

为验证以上推论,分别从以下两种工况进行验证:

- ① 保持原设计方案不变,以主梁主塔线形及内力为目标优化施工索力;
- ② 将边跨所有梁段截面均替换为与中跨对称的标准截面,即边中跨主梁重量基本对称。

4.2.2 单独索力优化效果

保持原设计截面不变,优化施工索力使成桥阶段主梁主塔的线形及内力达到最优。优化后的结果与原施工方案结果的对比如图 10、11 所示。

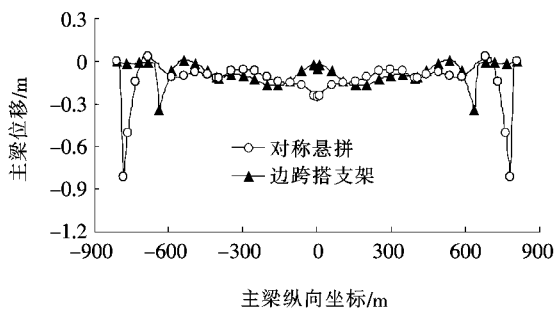


图 10 优化索力后不同施工方案主梁成桥位移

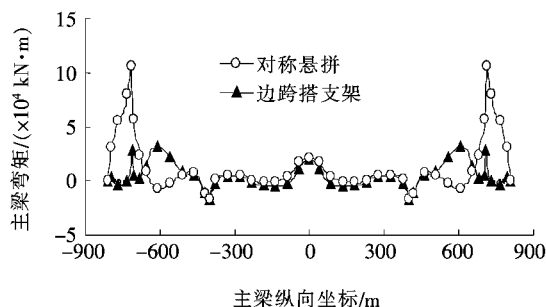


图 11 优化索力后两种施工方案主梁成桥弯矩

从图 10 可知:索力优化后,中跨及边跨大部分主梁位移得到显著改善,成桥累计位移较小,主梁线形较平顺,与原方案成桥线形比较接近。但是对采用对称悬拼施工方案的主梁,索力优化后,边跨辅助墩至边墩范围内的主梁仍有非常大的下挠,说明在确保大部分主梁线形合理的前提下,较难改善边跨辅助墩至边墩范围内主梁的线形。

由图 11 可知:索力优化后,边跨主梁的弯矩并未得到显著改善,在辅助墩墩顶截面仍有约 $100\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的负弯矩。可见,在确保主梁线形、中跨内力及主塔线形及内力的前提下,主梁边跨辅助墩至边墩段的弯矩难以得到改善。

索力优化后,成桥阶段桥塔的位移如图 12 所示。与原设计方案相比,采用对称悬臂拼装施工的结构在成桥状态下桥塔的位移及弯矩都有了显著增大,单独通过索力优化无法使得主塔受力达到较合理状态。

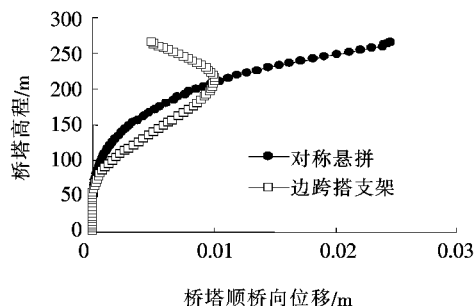


图 12 优化索力后两种施工方案主塔成桥位移

4.2.3 梁重匹配优化效果

将边跨辅助墩至边墩范围的梁段全部改为与中跨对应位置的梁段相同的标准截面,这样在进行悬臂拼装施工时,边跨中跨两悬臂端的荷载将基本对称,从理论上可以消除原设计中边跨过重所带来的问题。

成桥阶段,替换主梁截面并采用悬臂施工的主梁位移比较平顺,在边跨辅助墩至边墩范围内的主梁未产生过量下挠,从线形上看,甚至优于最初设计方案。成桥阶段两种方案主梁的弯矩分布如图 13 所示。改变主梁截面后,成桥状态下边跨主梁的弯矩得到显著改善,从原来的最大 $100\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 减小至 $55\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$,降幅接近 50%,主梁受力状态显著改善。

替换边跨梁段截面后,成桥阶段主塔位移大大减小,桥塔基本处于竖直状态,塔顶最大位移仅 12 mm ,基本与原设计塔顶偏位一致。替换截面后主塔的弯矩图如图 14 所示,从主塔弯矩分布中也可以看出,改变边跨主梁截面后,桥塔弯矩大大减小,分布更加均匀,受力得到显著改善。

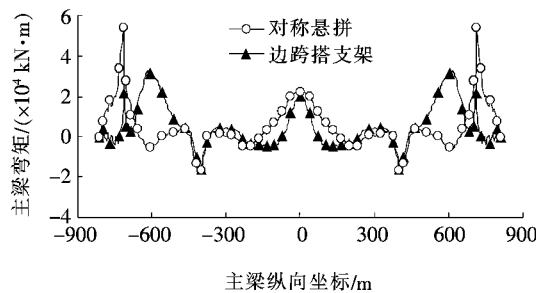


图 13 成桥阶段主梁弯矩

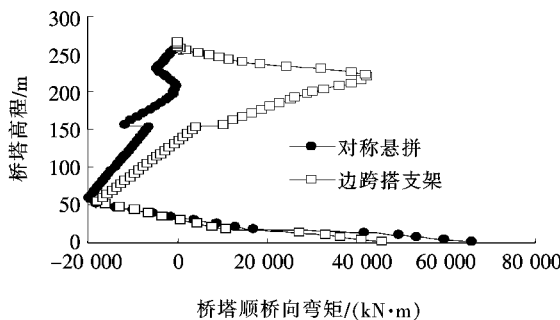


图 14 成桥阶段主塔弯矩

若保持原设计边跨主梁截面不变,在确保中跨主梁和桥塔在成桥阶段线形和内力合理的前提下,难以改善边跨辅助墩至边墩范围内主梁的位移和弯矩,辅助墩顶主梁截面受力仍无法满足要求;若将边跨主梁截面全部替换为与中跨对称的标准截面,则成桥状态下主梁和主塔的线形及内力均能达到非常理想的状态。因此,边跨梁段重量过重是造成悬臂施工方案无法实施的主要原因,后续优化也应以此为重点进行考虑。

4.2.4 边跨压重优化效果

为改善结构在运营阶段的受力,需要在辅助墩及边墩附近进行压重。原设计方案中边跨压重布置如图 15 所示,辅助墩顶压重共 1 281 t,纵桥向压重范围达

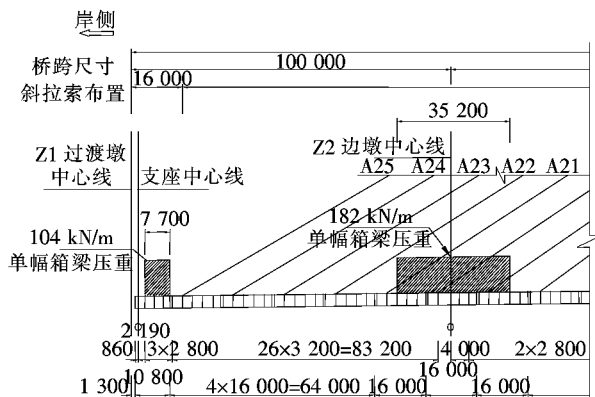


图 15 原设计方案压重布置(单位:mm)

35.2 m;边墩压重 160 t,纵桥向压重范围 7.7 m。

辅助墩墩顶压重范围在纵桥向达 35.2 m,压重荷载将在辅助墩墩顶产生非常大的负弯矩,该负弯矩将与施工过程中辅助墩墩顶积累的负弯矩相叠加,使该区域内主梁的受力状态进一步恶化。仅压重荷载单项在辅助墩墩顶截面处就会导致主梁下缘产生 37.6 MPa 的压应力。

可见边跨压重在纵桥向分布过于分散也会对主梁受力产生非常不利的影响,因此需要在确保不出现负反力的前提下,尽量缩减压重在纵桥向的分布范围。

4.3 结构优化方案

从以上分析可见,辅助墩顶负弯矩大导致主梁截面需要加强,进而使得边中跨梁段重量不平衡性增加,进一步增加负弯矩,进而又需要增加截面,由此形成恶性循环。在充分认识该桥跨径布置和结构体系特点的基础上,依据主梁不合理受力状态产生的根本原因,从以下几点出发提出优化方法:

(1) 优化边跨主梁截面,使边中跨对应梁段重量尽量一致。对主梁辅助墩至边墩范围内梁段构造进行优化,除辅助墩、边墩墩顶梁段外,其余梁段均改为与中跨对称的标准梁段。

(2) 主梁一期、二期恒载计算准确,并以主梁自重为基础进行调索,斜拉索竖向分力与梁段重量分布相匹配。

(3) 对称悬臂拼装施工方案中,辅助墩墩顶梁段需要提前采用浮吊安放至墩顶,调整索力使施工过程中辅助墩的对应拉索索力与中跨匹配。

(4) 优化边跨压重配置,改变压重块放置方式,尽量减小纵桥向的压重范围。维持压重总重量不变,改变梁段内压重槽设计,增加压重槽宽度及高度,使压重范围限制在辅助墩墩顶梁段范围内,在纵桥向压重长度为 13 m(图 16)。

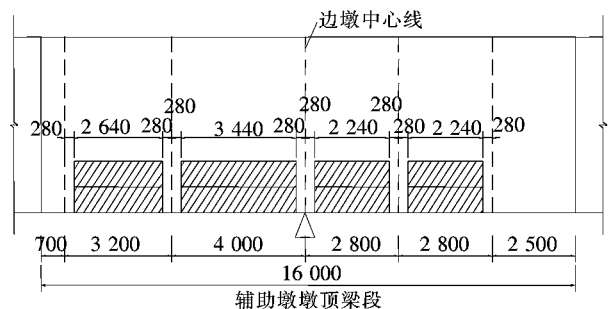


图 16 调整后纵桥向压重范围(单位:mm)

5 结构综合优化成果

依照上述优化思路对设计及施工方案进行改进后,对优化后结构的受力性能进行分析。

图 17 为设计、施工方案优化后与最初的设计、施工方案下,成桥阶段主梁位移的对比。

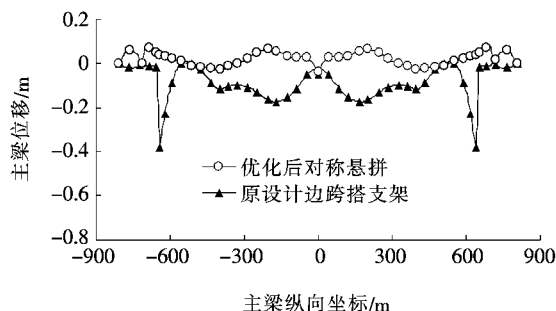


图 17 优化前后主梁成桥位移

由图 17 可知:优化后,主梁位移绝对值很小且线形比较平顺,边跨主梁位移过大的问题得到了解决。优化后主梁在成桥状态下弯矩显著减小,在边跨辅助墩墩顶截面,负弯矩仅为 $25\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$,比优化前减小了 75%,甚至已经小于最初的设计方案结果。优化后主梁内力状态得到显著改善。

图 18、19 为设计、施工方案优化后与最初的设计、施工方案下,成桥阶段主梁上下缘应力的对比。

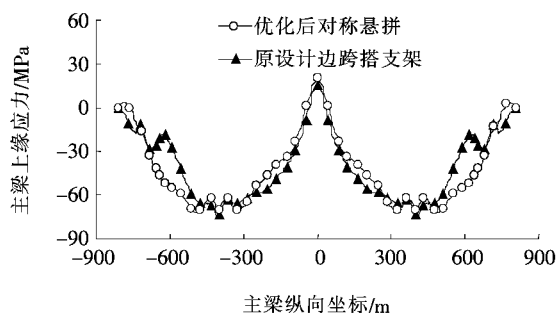


图 18 优化前后主梁上缘应力对比

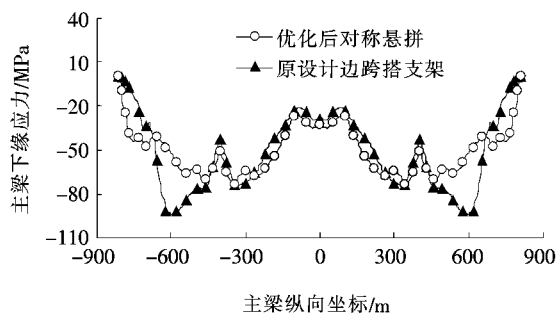


图 19 优化前后主梁下缘应力对比

由图 18、19 可知:成桥状态下主梁上缘最大拉应

力为 20 MPa ,最大压应力为 80 MPa ,应力分布更加均匀;主梁下缘最大压应力为 80 MPa ,位于塔根处断面,辅助墩墩顶断面的压应力已减小至 58 MPa 。

成桥状态下,主塔的位移及弯矩分布如图 20、21 所示。

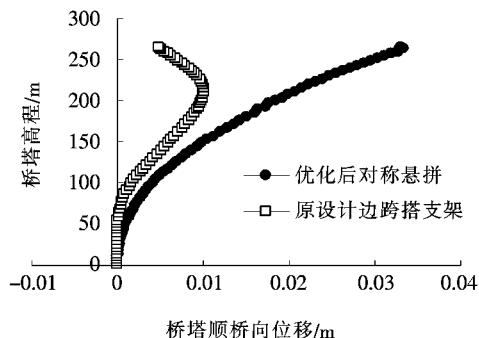


图 20 优化前后主塔顺桥向位移

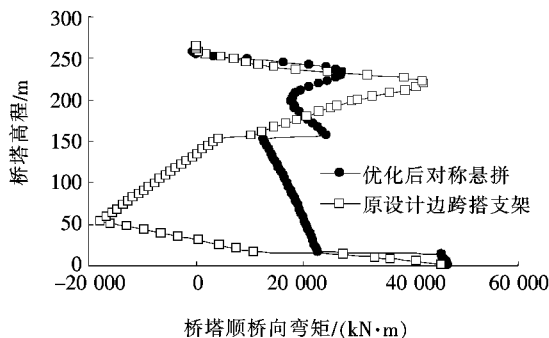


图 21 优化前后主塔弯矩对比

由图 20、21 可知:优化后的方案主塔在成桥状态下塔顶位移为 33 mm ,基本保持“正直”状态;塔身弯矩显著减小,且分布比较均匀。桥塔处于比较理想的受力状态。

运营阶段在荷载标准组合下,采用对称悬臂拼装施工并进行优化后与采用支架施工的设计方案相比,两种情况下主梁的应力包络基本接近,尤其在边跨辅助墩墩顶截面,最大压应力约为 120 MPa ,远小于优化前的 250 MPa ,主梁受力得到极大改善。既满足了施工方案调整的要求,又保证了桥梁结构的受力要求。

6 结语

针对芜湖长江公路二桥在施工方案调整而导致结构无法达到理想成桥状态的问题进行了比较全面深入的分析。研究表明:相同的结构在不同的施工方法下得到完全不同的成桥状态,从两种成桥状态的受力特点出发,推断出梁段重量是导致结构受力无法改善的根本原因。从该桥柔性桥塔以及分孔布跨的特点出

仅裂缝灌浆处置 PC 斜拉桥主梁模型试验研究

颜东煌, 张德培, 袁明

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了研究超重交通荷载作用下 PC 斜拉桥主梁受损状况及开裂主梁仅做裂缝灌浆处置后受力性能的变化情况,以一座跨径 220 m 的 PC 斜拉桥为研究背景,进行了 PC 斜拉桥节段缩尺模型试验,对加载至破坏的试验主梁裂缝灌浆封闭后再进行相同工况加载,建立了该模型试验混凝土塑性损伤(Concrete Damage Plastic,简称 CDP)Abaqus 有限元模型,并将试验与有限元计算结果进行对比分析。结果表明:超重交通荷载作用下的 PC 斜拉桥主梁开裂严重、主梁刚度急剧下降,裂缝灌浆处置虽然能显著提升破坏梁体刚度,但很难恢复到受损之前的刚度;低倍活载(1 倍)作用下灌浆主梁的位移与原主梁接近,说明仅做裂缝灌浆处置可以满足 PC 斜拉桥正常使用性能;灌浆主梁抗裂性较原主梁偏低,但仍满足规范要求,且有一定储备;加载过程中拉索始终未达到极限受拉状态,模型在加、卸载过程中荷载一位移曲线重复性好,呈线性状态,索力随荷载变化规律也与之相似;PC 斜拉桥考虑混凝土塑性损伤有限元模型计算结果与试验结果吻合较好,表明 CDP 模型能较好地模拟组合结构在往复荷载作用下的受力特性。

关键词: 桥梁工程;裂缝灌浆;模型试验;PC 斜拉桥;混凝土塑性损伤

1 前言

截至 2017 年 1 月,中国已建成的特大桥(>400

m)中斜拉桥数量已超过 50%,其主梁主要采用混凝土结构。长期重载交通作用下,服役期预应力混凝土(PC)斜拉桥主梁产生开裂、梁体腐蚀等病害,严重威胁桥梁结构的安全。为使 PC 斜拉桥开裂后仍满足耐

发,论述了采用对称悬臂拼装施工时必须保证边中跨梁段的重量相平衡这一原则,以此为关键问题并结合边跨压重布置提出了优化思路,按此优化思路执行后,对称悬臂拼装施工方案完全可以满足该桥受力要求并且能够达到更优的成桥受力状态。

由此可见,对于斜拉桥这种高次超静定结构,施工过程中对结构受力有着至关重要的影响。设计过程应结合桥址处的水文地质特点确定好最经济合理可行的施工方法,进而依照此方案进行施工。否则就有可能导致结构无法达到理想受力状态甚至可能产生难以挽回的损失。

参考文献:

[1] 项春领.大跨度斜拉桥施工风险分析与对策研究[D].同济大学博士学位论文,2006.

- [2] 陈常松,颜东煌,涂光亚,等.超大跨度不对称混合梁斜拉桥的施工全过程[C].第二届全国桥梁学术会议论文集,2012.
- [3] 丁望星,姜友生.荆岳长江公路大桥设计[J].桥梁建设,2011(4).
- [4] 邓永锋,周明星.黄冈公铁两用长江大桥钢桁梁架设技术研究[J].桥梁建设,2013(2).
- [5] 汪水清,刘爱林.安庆长江铁路大桥主桥上部结构施工关键技术[J].桥梁建设,2013(2).
- [6] 石雪飞,项海帆.斜拉桥施工控制方法的分类分析[J].同济大学学报,2001(1).
- [7] 颜东煌.斜拉桥合理成桥状态与施工控制[D].湖南大学博士学位论文,2001.
- [8] 肖汝诚.确定大跨径桥梁合理设计状态理论与方法研究[D].同济大学博士学位论文,1996.
- [9] 魏红一,胡世德,范立础.对斜拉桥总体参数的讨论[J].结构工程师,2003(3).

收稿日期:2019-04-13(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678068)

作者简介:颜东煌,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:yandonghuang@126.com