

超宽大纵坡 V 型刚构桥悬臂施工受力安全分析

崔建伟¹, 傅中秋¹, 李心诚¹, 刘 锋²

(1.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.中铁二十四局集团有限公司,上海 200071)

摘要:以某现浇混凝土超宽大纵坡 V 型墩刚构桥为背景,建立全桥及挂篮有限元模型。提取主梁悬臂端及 V 墩固结区域应力,并将纵坡两侧的应力进行对比,分析悬臂施工中的 V 型刚构桥受力特征以及大纵坡的影响。研究表明,距离挂篮前支点约 70 cm 处的主桁架下方顶板存在应力集中,建议同类型桥梁悬臂施工时重点关注主桁架前支点向跨中方向 1 m 范围内的应力。V 墩与主梁固结区域在位于主梁腹板下方的位置出现应力集中,建议 V 墩设计时提高该部位的局部配筋率。V 墩斜腿随悬臂伸长发生了应力重分布,最不利位置为斜腿上部外侧角点,施工中应严格监控。大纵坡提高了纵坡低侧的主梁悬臂端应力,对 V 墩的影响可忽略不计。

关键词:超宽桥面;大纵坡;V 型刚构桥;悬臂施工;受力分析

中图分类号: U445.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)03-0030-06

随着中国城市交通量的快速增长,桥梁在规划设计时为加大通行能力,越来越多的超宽桥梁开始出现^[1],且当桥梁位于地形起伏较大的山区丘陵时,常采用大纵坡桥梁^[2]。V 型墩刚构桥由于外观轻盈优美、结构受力合理等优点在中国桥梁建设中逐渐得到推广^[3],其主梁通常采用挂篮对称悬臂浇筑的施工工艺^[4]。V 型墩斜腿与梁体斜交,墩梁固结区域截面发生突变,传力方式复杂,容易出现局部应力集中^[5-6]。

目前针对 V 型墩刚构桥的研究成果主要集中在 V 型墩刚构桥的成桥阶段,对悬臂施工阶段受力性能的研究较少:朱荣^[7]通过有限元平面杆系模型研究了 V 形支撑连续刚构桥在悬臂施工中的主梁和 V 墩的截面应力变化,但杆系模型并不能得到主梁和 V 墩的空间应力分布;张飞等^[8]通过施加集中力和集中力矩来模拟悬浇段的挂篮荷载,得到了悬臂阶段的变形控制目标和成桥状态累计变形,但随着超宽桥面的出现,挂篮越来越多地采用多榀主桁架的结构形式^[9],上述的荷载施加方式难以获得挂篮荷载下的桥梁悬臂端真实受力。另一方面,桥梁有限元模型大多采用对称建模,并未考虑桥面纵向坡度对结构受力的影响。

同时考虑超宽桥面挂篮多榀主桁架实际荷载的施加和桥面大纵坡的模拟,建立不同悬臂施工阶段的全桥及挂篮有限元模型。通过提取主梁悬臂端横桥向及纵桥向应力,分析了挂篮荷载下的悬臂端局部应力特征。通过分析 V 墩固结区域及斜腿整体应力,明确了 V 墩应力分布规律,得到了施工过程的最不利位置。通过对比纵坡两侧的应力,探究了大纵坡对结构受力的影响。同时根据分析结果,提出施工过程应重点关注的部位,为同类型 V 型刚构桥悬臂施工提供参考。

1 有限元建模

1.1 工程背景

某现浇混凝土超宽大纵坡 V 型墩刚构桥,桥梁跨度为 132 m,桥面宽度达 34 m,具有一 3.97% 的较大纵向坡度,桥梁小里程侧为纵坡高侧,大里程侧为纵坡低侧。主梁断面为单箱四室断面,箱梁顶宽 34.0 m,底宽 19.94~23.64 m,梁端及跨中横断面见图 1。V 墩斜腿为钢筋混凝土板式结构,斜腿长分别为 11.52 m 和 10.78 m,上下固结,横向顶部与固结处箱梁底同宽为 19.94 m,底部与墩座固结处宽度为 12 m,V

收稿日期:2022-07-01 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20220199

作者简介:崔建伟(1999—),男,硕士研究生,研究方向为桥梁工程。E-mail:hhucjw@163.com

崔建伟,傅中秋,李心诚,等.超宽大纵坡 V 型刚构桥悬臂施工受力安全分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(3):30-35.

墩斜腿及墩座立面见图 2。

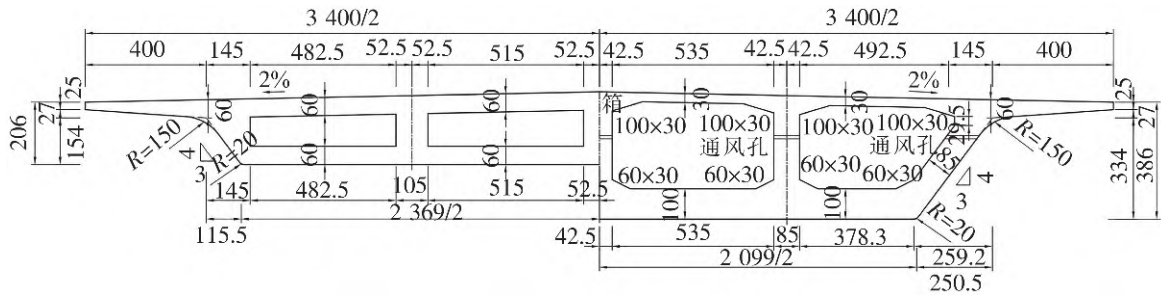


图 1 梁端及跨中横断面图(单位:cm)

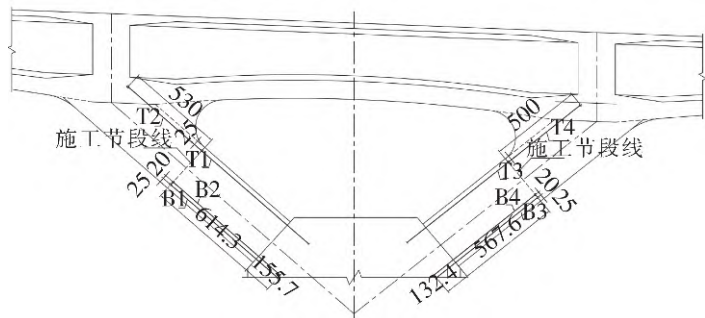


图 2 V 墩斜腿及墩座立面图(单位:cm)

超宽桥面主梁悬臂浇筑采用 5 榀菱形挂篮进行施工,根据主梁截面形式,5 榀菱形主桁架分别安装于主梁中腹板及斜腹板上方,每两榀主桁架中心间距均为 620 cm。挂篮主要通过主桁架前、后支点以及底篮吊杆将悬浇段荷载传递给已成型梁段,每榀桁架前、后支点间距均为 450 cm,主桁架前支点和底篮吊杆距离主梁悬臂端距离均为 50 cm。

1.2 模型建立

通过 Abaqus 有限元软件,建立全桥和挂篮有限元模型见图 3 和图 4。混凝土采用“三维实体”建模方式,即主梁、斜腿、墩座均采用三维实体单元进行模拟。挂篮各构件采用线单元进行建模并赋予截面属性与梁方向。考虑斜腿上下固结,斜腿与主梁和墩座均采用 Tie 接触进行绑定。模型边界条件设置为墩座底部固定约束。

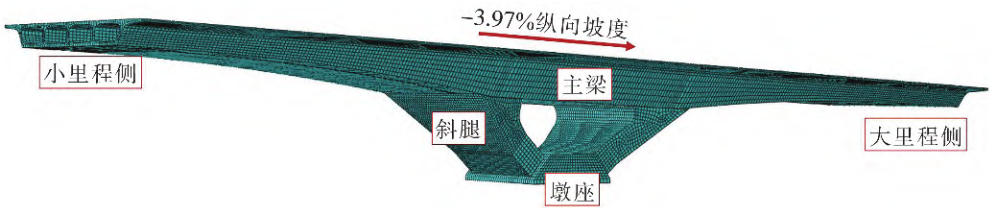


图 3 全桥有限元模型

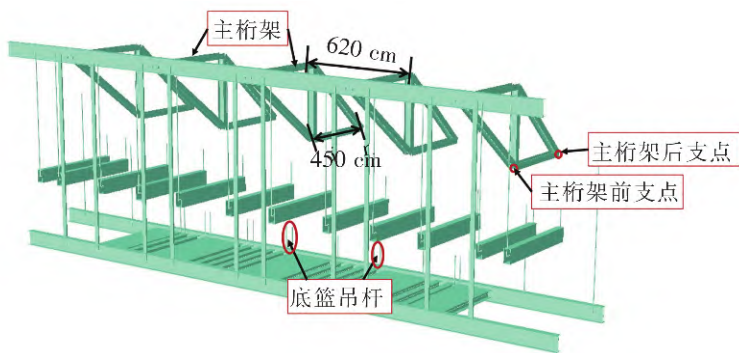


图 4 挂篮有限元模型

普通钢筋采用线单元进行模拟,混凝土与钢筋之间采用 Embedded Region 约束实现共同受力。由于仅分析挂篮锚固区的主梁悬臂端局部应力,而受张拉次序影响,通过悬臂端的预应力筋较少,因此为简化分析,可不考虑预应力钢筋。

混凝土材料标号采用 C55,普通钢筋采用 HRB400 钢筋,挂篮采用 Q235 和 Q345 钢材。混凝土弹性模量 $E=35\ 500\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.2$;钢材弹性模量 $E=206\ 000\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

1.3 计算工况

主梁悬臂施工共划分为 13 个节段,从 1 号块至 13 号块依次对称悬臂浇筑。1 号块为最重块段,其长度为 3.5 m,质量为 429.14 t;4 号块为最长块段,其长度为 4.0 m,质量为 370.51 t;13 号块长度最短、质量最轻,其长度和质量分别为 1.5 m 和 237.12 t。

为分析挂篮荷载对 V 型墩刚构桥悬臂施工过程结构受力的影响,设置以下 3 种工况进行计算分析。工况 1 为 1 号块浇筑时的工况,此工况梁段质量最重,为悬臂浇筑起始节段;工况 2 为 4 号块浇筑时的工况,此工况梁段长度最长,为悬臂浇筑中部节段;工况 3 为 13 号块浇筑时的工况,此工况梁段悬臂最大,为悬臂浇筑最终节段。

1.4 荷载施加

为准确获得悬臂施工过程中主梁上挂篮各锚固节点处的反力,通过建立挂篮有限元模型,按照不同工况分别将待浇筑梁段腹板、底板、顶板、翼板的荷载转化为线荷载并施加于挂篮对应构件,计算所得各节点的反力见表 1。表 1 中数值以主梁受拉为正,受压为负,并偏安全得取同一类节点处的反力为该节点反力的最大值。在全桥有限元模型中,将各节点反力按其实际作用位置施加于主梁上,从而实现对接挂篮荷载的精确模拟。

表 1 挂篮各锚固节点处的反力

工况	主桁架前支点反力/kN	主桁架后支点反力/kN	底篮吊杆反力/kN
1	-1 520.1	768.6	201.1
2	-1 619.6	820.4	231.6
3	-1 744.6	908.5	129.6

2 主梁应力分析

2.1 悬臂端横桥向

挂篮锚固于已成型梁段的悬臂端部,其荷载对梁端局部受力的影响有待探究。为分析挂篮荷载下的悬臂端局部应力沿横桥向的分布规律,以小里程侧主梁在主桁架前支点处的横截面为研究对象,提取其箱梁顶板 Mises 应力见图 5。由图 5 可知,各工况下横桥向的应力分布规律基本一致,均存在 5 个应力峰值且均出现在横坐标 -12.4、-6.2、0、6.2、12.4 m 处,即对应于主梁腹板上主桁架的安装位置。应力值从各峰值点向其两侧迅速衰减,以工况 2 为例,横坐标 0 m 处应力为 10.46 MPa,而 -0.4 m 处仅为 2.72 MPa。最小应力均出现在各箱室顶板中部和两侧翼缘处,其值仅为 1 MPa 左右。

针对钢筋应力,工况 1 与工况 2 时其最大应力均位于上述应力峰值点下方的竖筋处,分别为 137.9 MPa 和 268.7 MPa;工况 3 时,由于悬臂长度最长且待浇筑节段质量较小,此时同位置处应力为 171.4 MPa,而钢筋最大应力位于悬臂根部的纵筋处,其值为 196.9 MPa。

2.2 悬臂端纵桥向

为分析挂篮荷载下梁端应力沿纵桥向的分布规律,提取小里程侧主梁顶板纵轴线上距离悬臂端部 0~

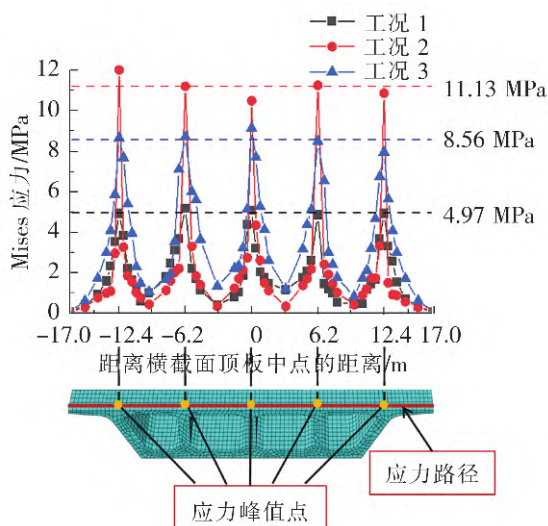


图 5 悬臂端横桥向应力

700 cm 范围内的 Mises 应力见图 6。由图 6 可知,各工况下纵桥向的应力分布规律基本一致,总体上均是先增大后减小最后趋于稳定。路径上的应力峰值并未出现在主桁架前支点反力加载位置即横坐标 50 cm 处,而是出现在横坐标 120 cm 附近。推测这是由于在主桁架前支点反力与已成型梁段自重荷载的综合作用下,应力集中位置从主桁架前支点向跨中方向发生 70 cm 的偏移。建议同类型桥梁在悬臂施工时,应重点关注主桁架前支点向跨中方向 1 m 范围内的应力。

2.3 大纵坡对主梁影响

本 V 型墩刚构桥桥面纵向坡度高达 -3.97% ,有必要研究大纵坡对主梁受力的影响。以工况 2 为例,分别提取大、小里程侧主梁顶板纵轴线上距离悬臂端 $0 \sim 700$ cm 范围内的 Mises 应力进行对比,见图 7,可见两侧应力分布规律一致。在距离悬臂端 $0 \sim 500$ cm 范围内,即从悬臂端到主桁架后支点的路径上,大里程侧的应力普遍高于小里程侧。两侧应力最大差值为 1.74 MPa,大里程侧较小里程侧增大 22.3%。在距离悬臂端 $500 \sim 700$ cm 范围内,即从主桁架后支点向跨中方向的路径上,两侧应力大小几乎相同。分析表明,大纵坡提高了大里程侧即纵坡低侧的悬臂端局部应力,建议实桥施工时应重点关注该侧悬臂端的结构安全。

3 V 墩应力分析

3.1 V 墩与主梁固结区域

墩梁固结区域作为 V 型墩刚构桥的关键受力部位,其在挂篮荷载作用下的受力特征尚不明确。为此以小里程侧 V 墩与主梁外侧交界线为研究对象,提取该路径上的 V 墩斜腿 Mises 应力见图 8,图 8 中横坐标零点为路径中点。由图 8 可知,工况 1 中 V 墩与主梁外侧交界处应力很小,其值均不超过 1 MPa。工况 2 与工况 3 的应力分布规律相似,均出现了应力集中且 5 个应力峰值位置相同,均位于主梁中腹板及斜腹板下方,推测应力集中的原因是主梁腹板处刚度较大,导致 V 墩上对应于腹板下方的位置应力较高,建议 V 墩设计时提高该部位的局部配筋率,以增加安全储备。最大应力均位于两侧端点即斜腿角点处,工况 2 中最大应力为 4.87 MPa,横坐标 0 m 与 2.5 m 处的应力差值为 1.08 MPa,而工况 3 中最大应力和应力差值分别为 21.59 MPa 和 13.88 MPa,表明该区域的应力大小和应力集中程度随着主梁悬臂的伸长而迅速增大。

3.2 V 墩与墩座固结区域

为分析挂篮荷载下 V 墩与墩座固结区域的应力特征,提取小里程侧 V 墩与墩座外侧交界线上的斜腿 Mises 应力见图 9,图 9 中横坐标零点为路径中点。由图 9 可

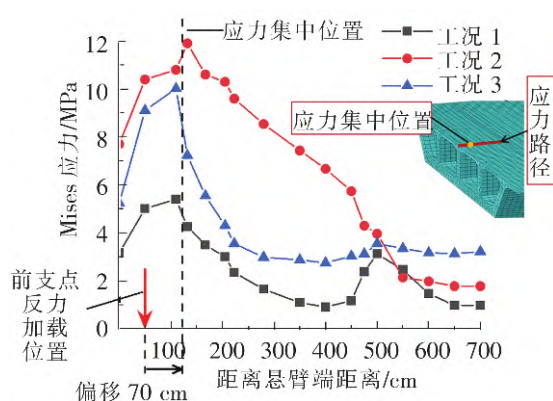


图6 悬臂端纵桥向应力

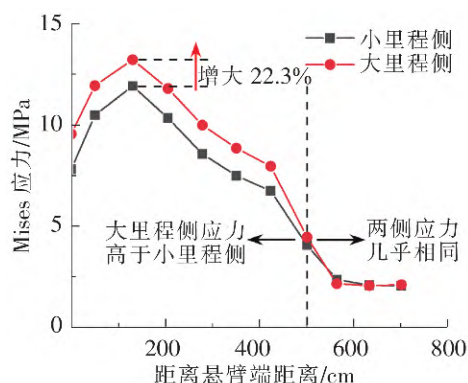


图7 主梁大小里程侧应力对比(工况2)

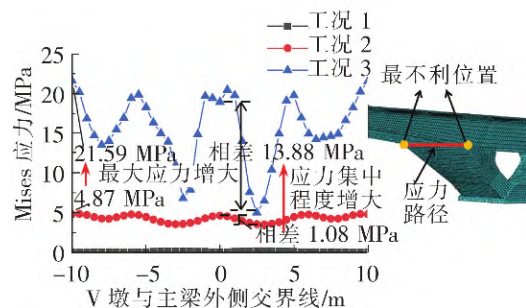


图8 V墩与主梁外侧交界线应力

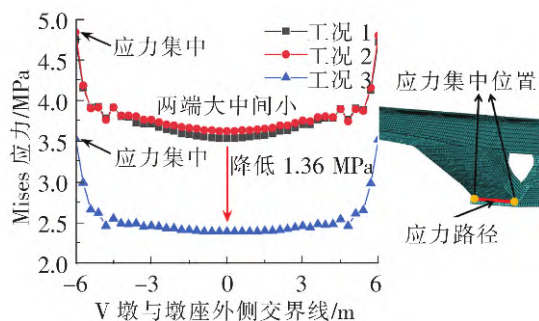


图9 V墩与墩座外侧交界线应力

知,3种工况下的应力分布规律一致,总体呈现两端大中间小的特征。两端斜腿角点处存在明显的应力集中,路径内部的应力分布较为均匀,最大应力均不超过5 MPa,因此V墩与墩座固结区域较为安全。工况1和工况2的应力大小非常接近,而悬臂长度最长的工况3,其应力相较于工况1和工况2反而有所降低,说明随着悬臂长度的伸长,V墩斜腿的整体应力发生了重分布。

3.3 V墩斜腿整体受力

为探究V墩应力重分布过程,现根据工况1~工况3的小里程侧V墩斜腿应力云图进行分析,见图10。

针对斜腿的整体受力特征,发现工况1时应力峰值位于点4,工况2时点1与点4的应力均较大,工况3时应力峰值位于点1,即斜腿应力峰值的位置经历了4→1(4)→1的变化,说明不同施工阶段的最危险位置不同。针对各点的受力大小,发现点1和点3的应力逐渐增大,点2和点4的应力则有所减小。由材料力学理论解释,这是由于0号块位于斜腿正上方,其自重使斜腿沿点2至点4的路径竖向受压;悬臂节段1~13号块位于斜腿外侧,其自重使斜腿沿点1至点3的路径斜向受压。因此随着悬臂长度的伸长,0号块影响变小,悬臂段影响增大,使得应力主要分布位置由点2和点4逐渐转变为点1和点3。最大悬臂状态下的斜腿上部外侧角点为悬臂施工中的最不利位置,其应力值21.59 MPa超过了C55混凝土标准抗压强度的60%,在实桥施工中应严格监控。

3.4 大纵坡对V墩影响

为探究桥面大纵坡对V墩受力特征的影响,以工况2中小里程侧与大里程侧的V墩与主梁外侧交界线为研究对象,分别提取其Mises应力进行对比,见图11。可以得出,两侧应力分布规律一致,大里程侧的应力略高于小里程侧。两侧应力最大差值仅为0.39 MPa,大里程侧较小里程侧增大8.1%。数据表明,大纵坡对V墩的影响程度较小,可以忽略不计。

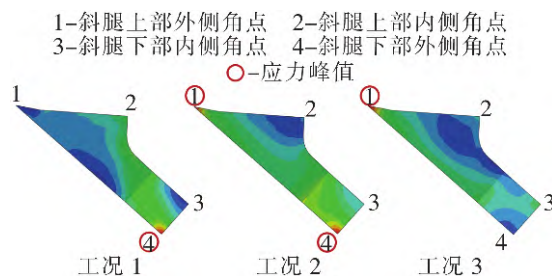


图10 V墩斜腿应力重分布过程

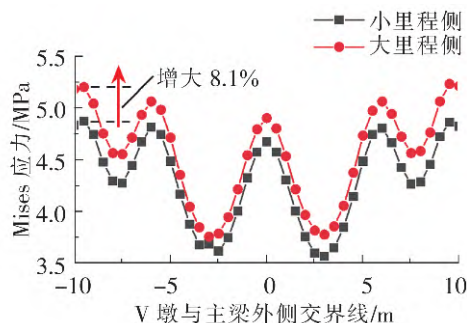


图11 V墩大小里程侧应力对比(工况2)

4 结论

(1)在前支点反力与自重的综合作用下,距离前支点约70 cm处的主桁架下方顶板出现应力集中,建议同类型桥梁悬臂施工时重点关注主桁架前支点向跨中方向1 m范围内的应力。

(2)由于主梁腹板处刚度较大,导致V墩与主梁固结区域的应力集中位置位于主梁中腹板及斜腹板下方,建议V墩设计时提高该部位的局部配筋率,以增加安全储备。随着悬臂伸长,V墩斜腿会发生应力重分布,应力峰值由斜腿下部转移至上部,最大悬臂状态下的斜腿上部角点为悬臂施工中的最不利位置,在实桥施工中应严格监控。

(3)对于具有大纵坡的V型刚构桥,纵坡两侧的V墩应力相差不大,但纵坡低侧的主梁悬臂端应力相较纵坡高侧有较大增长,应重点关注该侧主梁悬臂端挂篮锚固区的受力安全。

参 考 文 献

- [1]马琼峰,严小卫.超宽混合梁斜拉桥钢箱梁悬臂拼装施工关键技术[J].中外公路,2019,39(6):144-146.
- [2]叶鹏飞.较大纵坡梁桥向下滑机理及处置对策[D].南昌:华东交通大学,2021.
- [3]邵旭东.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [4]Hao X W, Yang Y X. Space analysis of long-span continuous rigid frame bridges[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671:1045-1050.
- [5]王春,邱建军,李伟平.南翔桥V形墩施工方案关键技术研究[J].中外公路,2014,34(6):171-173.

- [6] Zhang F, Wang Y. Static load test study on long-span continuous rigid frame bridge with V-shaped pier[J]. OP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 295(4):042062.
- [7] 朱荣. 预应力混凝土 V 型墩连续刚构桥分段施工的状态估计及工程控制[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010.
- [8] 张飞, 王燕, 姚良云. V 型墩连续刚构桥施工正装分析和阶段变形控制[J]. 三明学院学报, 2018, 35(6):81-87.
- [9] 靳会武, 周春华, 陈占明. 镇山大桥 44m 宽桥面挂篮施工技术[J]. 公路, 2019, 64(11):147-152.

Stress Safety Analysis of Cantilever Construction of V-Type Rigid Frame Bridge with Ultra-Wide and Large Longitudinal Slope

Cui Jianwei¹, Fu Zhongqiu¹, Li Xincheng¹, Liu Feng²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The 24th Bureau Group Co. Ltd. of China Railway, Shanghai 200071, China)

Abstract: Based on a cast-in-place concrete V-shaped pier rigid frame bridge with ultra-wide and large longitudinal slope, the finite element model of the whole bridge and the hanging basket was established. The stress of the cantilever end of the main beam and the consolidation area of the V pier were extracted, and the stress on both sides of the longitudinal slope was compared. The stress characteristics of the V-type rigid frame bridge in cantilever construction and the influence of large longitudinal slope were analyzed. The research shows that there is stress concentration in the roof below the main truss at about 70 cm from the front fulcrum of the hanging basket. It is suggested that the stress in the range of 1 m from the front fulcrum of the main truss to the middle of the span should be focused on in the cantilever construction of the same type of bridge. The stress concentration occurs in the consolidation area of the V pier and the main beam at the position below the main beam web. It is suggested that the local reinforcement ratio of this position should be increased in the design of the V pier. The stress redistribution of the inclined leg of V pier occurs with the cantilever extension, and the most unfavorable position is the upper lateral corner of the inclined leg so the construction should be strictly monitored. The large longitudinal slope increases the cantilever end stress of the main beam at the low side of the longitudinal slope, and the influence on the V pier is negligible.

Key words: ultra-wide deck; large longitudinal slope; V-type rigid frame bridge; cantilever construction; stress analysis