

V形墩及0#块自平衡施工组合支护体系受力分析

侯攀¹, 段普凡², 戴志成², 叶鑫², 石浩天²

(1. 中交路桥建设有限公司, 北京市 100027; 2. 中交路桥华东工程有限公司, 上海市 201203)

摘要: V形墩以其结构轻巧、受力合理且造型优美, 在城市桥梁中得到广泛应用, 但因V形墩具有特殊墩身结构形式, 在墩身及0#块施工阶段易对支护体系产生较大水平分力, 线形控制难度大, 且易产生墩底内部裂缝, 施工期质量、安全成为品质工程的一大难题。以宁波舟山港六横公路大桥——梅山水道跨堤桥V形墩身及0#块施工为背景, 根据现场施工条件及安全、质量、成本控制需要, 对梅山水道跨堤桥V形墩身及0#块施工开展了系列研究, 提出了一种自平衡组合支护体系。分别以理论计算分析、数值模拟分析对自平衡组合支护体系在V形墩身及0#块施工全过程的受力情况进行研究分析, 二者取得较为一致的结果。计算结果及实际工程应用表明: 自平衡施工组合支护体系能较好地平衡V形墩及0#块施工过程中的水平分力, 有效地保障了墩身线形, 并降低了墩底出现裂缝的风险。自平衡组合支护体系具有受力-传力机制明确、结构体系安全性高、施工成本低等优点, 可为V形墩施工质量、安全提供有效保障。

关键词: V形墩刚构桥; 自平衡组合支护体系; 对拉杆; 受力

中图分类号: TU445.47; U445.46

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0235-05

Force Analysis of Self-balancing Composite Support System for V-shaped Pier and 0# Block

HOU Pan¹, DUAN Pufan², DAI Zhicheng², YE Xin², SHI Haotian²

(1. China Communications Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. China Communications Road and Bridge East China Engineering Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: The V-shaped pier is widely used in urban bridges due to its lightweight structure, reasonable force distribution and beautiful shape. However, due to the special form of pier body structure, the V-shaped pier is prone to generate the greater horizontal forces on the support system during the construction of pier body and 0# block. The linear control is difficult, and the internal cracks are prone to occur at the bottom of the pier. The quality and safety during construction have become a major challenge in the quality engineering. Therefore, taking the construction of the V-shaped pier body and 0# block of the Meishan Waterway Bridge crossing embankment — Liuheng Highway Bridge in Ningbo Zhoushan Port as the background, and based on the on-site construction conditions and safety, quality and cost control needs, a series of studies are conducted on the construction of the V-shaped pier body and 0# block of the Meishan Waterway Cross-embankment Bridge, and a self-balancing composite support system is proposed. The force situation of the self-balancing composite support system in the whole construction process of V-shaped pier body and 0# block are studied and analyzed by the theoretical calculation analysis and numerical simulation analysis. The relatively consistent results are achieved by the two. The calculation results and the practical engineering applications show that the self-balancing construction composite support system can balance the horizontal force during the construction process of V-shaped piers and 0 # piers better, effectively ensure the linearity of the pier body and reduce the occurrence of cracks at the pier bottom. The self-balancing composite support system has the advantages of clear force transmission mechanism, high structural system safety and low construction cost, which provides the effective guarantee for the construction quality and safety of V-shaped piers.

Keywords: V-shaped pier rigid frame bridge; self-balancing composite support system; pull rod; force

0 引言

桥梁中V形墩的独特结构形式相比常规T形钢

构及连续梁具有更加轻巧的特点, 能减小主梁的计算跨径, 缩小主梁梁高, 减少恒载弯矩20%~40%, 同时V形墩身结构形式, 使其具有抗震性能强、结构安全性高、稳定性好、造型新颖等特点^[1-2]。V形墩桥梁在具有上述优点的同时, 施工过程中存在较大困难, 即墩身及0#块混凝土在施工过程中, 在结构自

收稿日期: 2024-11-18

作者简介: 侯攀(1995—), 男, 本科, 助理工程师, 从事桥梁设计工作。

重作用下,使常规支护体系(钢管桩+型钢+盘口支架结构体系、钢管桩+型钢支架结构体系等)产生较大的水平分力,从而产生较大水平位移或变形,极易导致墩身受力超过安全许可范围,引起V腿根部内侧开裂。

针对V形墩设计、施工中存在的技术问题目前国内许多专家学者开展了较为广泛的研究。王聪^[3]通过建立实体有限元模型研究了V形墩梁固结区的合理构造形式和主要受力特征。Zhang^[4]利用三维有限元模型分析了V形墩墩梁固结区的空间应力分布,并通过缩尺比例模型开展了相应试验及对比研究。徐嘉煜^[5]依托某矮墩V腿刚构,针对墩高、墩壁厚度、V腿倾角和V腿厚度4个关键设计参数对V形墩刚构桥进行了设计优化探讨。而刘宝龙^[6]则针对大体积V形墩斜腿组合支护体系下施工技术开展了研究,提出了V形墩身施工采用桩基础和支墩作为竖向承力结构以及以精轧螺纹钢预应力索抵抗斜墩水平力的组合支护体系。刘宏宇^[7]对万吨V形墩-连续刚构支护体系进行了系统研究,提出了模板支架体系分段分部设计形式,同时依据设计参数探讨了支护体系的全过程工艺控制措施。张义和^[8]则通过理论和实践相结合的方法,对不等高V形墩施工关键技术进行了分析,探讨了V墩施工过程中的受力特征以及混凝土浇筑工艺和墩底混凝土防裂控制措施。文献^[9]则针对V型腿形成整体结构前对V型腿底部内侧开裂问题进行了研究。此外还有许多文献^[10-14]对V形的空间受力、设计优化以及施工支护体系开展广泛研究和工程实践。最终得出V墩具有良好的稳定性、结构安全性及良好的抗震性能,同时也产生了因结构自重导致V腿底部开裂及因水平应力导致的位移的问题。各文献形成了V墩施工过程中的受力特征及混凝土防裂控制措施等。本文通过理论计算分析和数值模拟分析,探究自平衡施工组合支护体系及其施工工序。

本文根据V形墩及0#块施工结构自重所产生的水平分力、竖向荷载对支架结构影响开展了系列研究,并研发出一种自平衡施工组合支护体系。

1 V形墩身及0#块自平衡施工组合支护体系及施工工序

梅山水道跨堤桥主墩采用V形实体墩,截面尺寸为8.75 m×2.0 m,墩身高为12.026~12.653 m,墩身两侧竖直夹角分别为31.902°和31.377°,单个墩身

混凝土方量约为 520.4 m³。主墩上部结构 0 号块长 26 m, 顶宽 16.05 m, 底宽 8.75 m, 最大梁高 6 m, 单个混凝土方量约为 782 m³, 0#块采用单箱单室结构, 与 V 形墩连接处各设置 1 道厚 3.5 m 横隔板, 横隔板间距为 15 m。

1.1 自平衡施工组合支护体系

V形墩身及0#块施工常规采用斜拉托架、平衡支架或者劲性骨架等施工工艺,其施工过程中的支护体系安全性以及墩底应力可控存在一定难度。根据施工现场条件及施工需求,梅山水道跨堤桥墩身及0#块混凝土施工拟采用自平衡施工钢管支架组合支撑体系(见图1)。该组合支护体系由两部分组成,分别为承担竖直荷载的钢管支架系统和承担水平分力的墩身内对拉螺纹杆系统,其中钢管支架系统由模板系统、钢管桩、型钢水平横联组成,主要承担V形墩身及0#块混凝土自重竖直方向作用,其传力路径是竖向荷载通过模板系统传给钢管支架系统及承台预埋件。墩身内对拉螺纹杆系统则由分布于墩身高度内的三层对拉螺杆组成,每层5根,对拉杆作用于模板背楞上,其受力原理是通过对张拉杆施加张拉力以抵抗墩身底模板部分对应混凝土和0#块横隔板混凝土重量在V形墩身外模板上所产生的水平分力,从而约束V形墩身整体水平位移,以达到控制V形墩身应力目的。

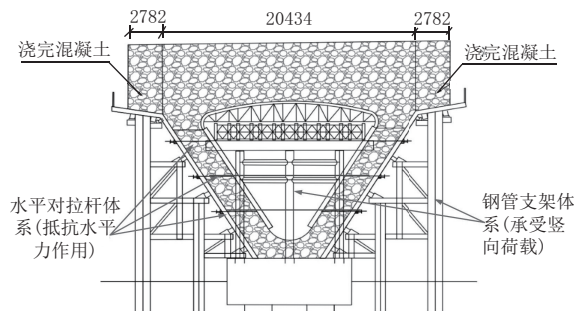


图1 自平衡施工组合支护体系(单位:mm)

1.2 墩身及 0#块混凝土施工及对拉杆张拉工序

V形墩身混凝土一次浇筑成型,当浇筑第一层拉杆以下混凝土时,将第一层对拉杆张拉至预定张拉力;浇筑第一层拉杆与第二层拉杆之间混凝土时,将第二层对拉杆张拉至预定张拉力;浇筑第二层拉杆与第三层拉杆之间混凝土时,第三层对拉杆张拉至预定张拉力。

0#块混凝土则分两次浇筑成型,第一次浇筑底板、腹板混凝土,第二次浇筑顶板混凝土。当浇筑0#块第一次混凝土时,将第一、二、三层拉杆张拉至

预定张拉力,而当全部混凝土浇筑完成时,所有拉杆张拉至终值。

2 自平衡施工组合支护体系对拉杆受力分析

组合支护体系中钢管支架体系主要承担竖向荷载作用,设计目标是不承担水平分力作用,仅承担竖向荷载作用,故在本文中不予讨论。而拉杆自平衡体系设计目标是承担全部水平分力,控制目标是拉杆作用处位移为零,对拉杆主动张拉力的大小将决定V形墩身的变形,若变形较大(无论是向内还是向外)都可能造成墩身底部开裂,从而对V形墩身结构安全造成影响,因此对其对拉杆张拉力进行分析十分重要。

2.1 V形墩身施工时对拉杆受力分析

墩身混凝土浇筑且混凝土强度未形成时,混凝土自重对模板系统的作用等同于荷载,此时对拉杆张拉力的控制目标是对拉杆作用点模板不发生水平位移,以确保V形墩底不开裂。研究时可将拉杆作用等效为水平支座,其分析模型可以简化如图2(a)所示。图中 l_1, l_2, l_3 分别为对拉杆作用位置, θ 为模板与墩身承台夹角, q_1 为模板以上V墩身混凝土重量(需扣除作用于承台部分混凝土重量),模板体系底部与承台之间考虑为铰链接。由于墩身的正对称性,取左半结构进行分析,并用多余未知力代替移动铰支座,形成如图2(b)所示的2次超静定连续梁结构。

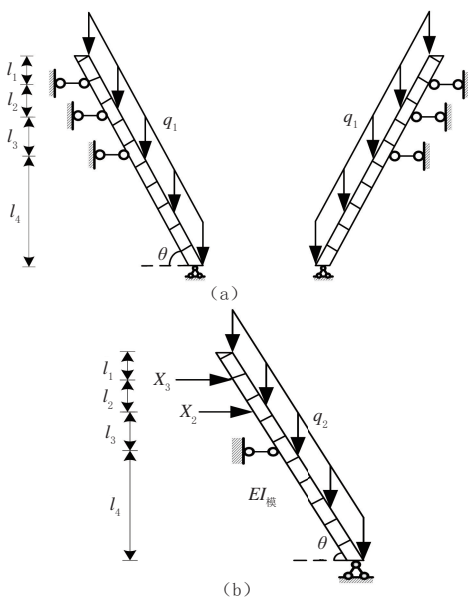


图2 墩身浇筑时对拉杆受力分析模型

对图2(b)可建立如下的分析方程:

$$\begin{cases} \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \Delta_{2p} = 0 \\ \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \Delta_{3p} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

利用结构力学知识可得:

$$\begin{aligned} \delta_{22} &= \frac{(l_1 + l_2)^2(l_3 + l_4)^2}{3EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta} + \frac{(l_3 + l_4)\cos^2\theta}{EA_{\text{模}}\sin\theta} \\ \delta_{33} &= \frac{l_1^2(l_2 + l_3 + l_4)^2}{3EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta} + \frac{(l_2 + l_3 + l_4)\cos^2\theta}{EA_{\text{模}}\sin\theta} \\ \delta_{23} = \delta_{32} &= \frac{l_1(l_3 + l_4)[(l_1 + l_2)^2(l_1 + l_2 + 3l_3 + 3l_4)]}{6EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} + \frac{l_1(l_3 + l_4)[2(l_3 + l_4)^2(l_1 + l_2)]}{6EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} - \frac{l_1(l_3 + l_4)[l_1^2(l_1 + 3l_2 + 3l_3 + 3l_4)]}{6EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} + \frac{(l_3 + l_4)\cos^2\theta}{EAA_{\text{模}}\sin\theta} \\ \Delta_{2p} &= -\frac{q_1(l_1 + l_2)\cos\theta[(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^4]}{48EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^4\theta} + \frac{q_1(l_1 + l_2)\cos\theta[(l_1 + l_2)^3(3l_1 + 3l_2 + 8l_3 + 8l_4)]}{48EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^4\theta} + \frac{q_1(l_3 + l_4)(2l_1 + 2l_2 + l_3 + l_4)\cos\theta}{2EA_{\text{模}}\sin\theta} \\ \Delta_{3p} &= -\frac{q_1l_1\cos\theta[(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^4]}{48EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^4\theta} + \frac{q_1l_1\cos\theta[l_1^3(3l_1 + 8l_2 + 8l_3 + 8l_4)]}{48EI_{\text{模}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^4\theta} + \frac{q_1(l_2 + l_3 + l_4)(2l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\cos\theta}{2EA_{\text{模}}\sin\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

将对拉杆位置以及墩身竖直角和混凝土自重等基本参数代入式(1)和式(2),可得解:

$$\begin{aligned} X_1 &= 234.545 \text{ kN} \\ X_2 &= 277.815 \text{ kN} \\ X_3 &= 290.855 \text{ kN} \end{aligned}$$

第一层各拉杆的力为 46.909 kN,第二层各拉杆的力为 55.563 kN,则第三层各拉杆的力为 58.171 kN。

2.2 0#块施工时对拉杆受力分析

0#块混凝土未形成强度时,V墩身顶部0#块横板混凝土重量作用于墩身上,并传递至水平拉杆,其他部分混凝土重量则作用于承担竖向荷载的钢管支

架上,但此时墩身已形成强度,可将墩身和模板体系(模板刚度远小于墩身刚度)与承台之间看作固结。拉杆张力控制目标仍是对拉杆作用点处不发生水平位移,同样可将拉杆作用等效为水平支座。利用结构正对称性,取左半结构进行分析,并用多余未知力代替移动铰支座,形成如图3(b)所示的3次超静定连续梁结构。图中荷载集度 q_2 为0#块隔板混凝土自重。

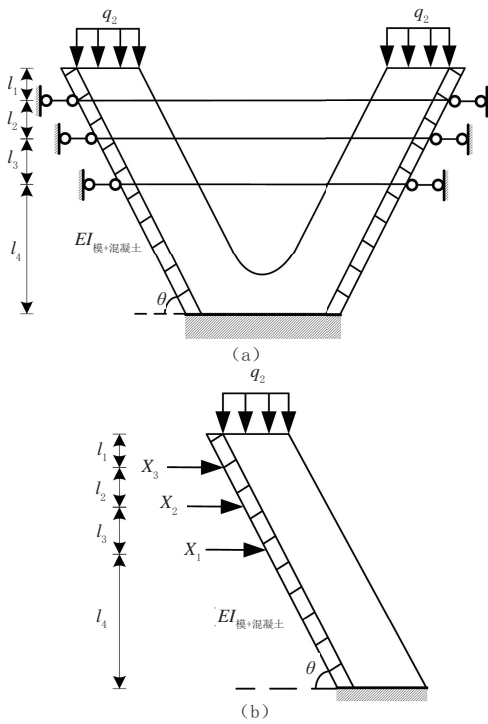


图3 0#块施工时墩身及对拉杆受力模型示意图

对图3(b)可建立如下的分析方程:

$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \Delta_{1p} &= 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \Delta_{2p} &= 0 \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \Delta_{3p} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

同样基于结构力学知识可得:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{l_4^2(l_1 + l_2 + l_3)^2}{3EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta} + \frac{l_4 \cos^2\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta} \\ \delta_{22} &= \frac{(l_1 + l_2)^2(l_3 + l_4)^2}{3EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta} + \frac{(l_3 + l_4)\cos^2\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta} \\ \delta_{33} &= \frac{l_1^2(l_2 + l_3 + l_4)^2}{3EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta} + \frac{(l_2 + l_3 + l_4)\cos^2\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta_{12} = \delta_{21} &= \frac{l_4(l_1 + l_2)\left[(l_1 + l_2 + l_3)^2(l_1 + l_2 + l_3 + 3l_4)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} + \frac{l_4(l_1 + l_2)\left[2l_4^2(l_1 + l_2 + l_3)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} - \frac{l_4(l_1 + l_2)\left[(l_1 + l_2)^2(l_1 + l_2 + 3l_3 + 3l_4)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} + \frac{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta}{l_4 \cos^2\theta} + \frac{EAA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta} \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= \frac{l_1l_4\left[(l_1 + l_2 + l_3)^2(l_1 + l_2 + l_3 + 3l_4)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} + \frac{l_1l_4\left[2l_4^2(l_1 + l_2 + l_3)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} - \frac{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta}{l_1l_4\left[l_1^2(l_1 + 3l_2 + 3l_3 + 3l_4)\right]} + \frac{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta}{l_4 \cos^2\theta} + \frac{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta} \\ \delta_{23} = \delta_{32} &= \frac{l_1(l_3 + l_4)\left[(l_1 + l_2)^2(l_1 + l_2 + 3l_3 + 3l_4)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} + \frac{l_1(l_3 + l_4)\left[2(l_3 + l_4)^2(l_1 + l_2)\right]}{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta} - \frac{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta}{l_1(l_3 + l_4)\left[l_1^2(l_1 + 3l_2 + 3l_3 + 3l_4)\right]} + \frac{6EI_{\text{模+混凝土}}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)^2\sin^3\theta}{(l_3 + l_4)\cos^2\theta} + \frac{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin\theta} \\ \Delta_{1p} &= -\frac{q_2l_4(l_1 + l_2 + l_3)\left[2(l_1 + l_2 + l_3)^2\right]}{3EI(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta \tan\theta} - \frac{q_2l_4(l_1 + l_2 + l_3)\left[l_4(3l_1 + 3l_2 + 3l_3 + l_4)\right]}{3EI(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta \tan\theta} + \frac{2q_2l_4 \cos\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin^2\theta} \\ \Delta_{2p} &= -\frac{q_2(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)\left[2(l_1 + l_2)^2\right]}{3EI(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta \tan\theta} + \frac{q_2(l_1 + l_2)(l_3 + l_4)\left[(l_3 + l_4)(3l_1 + 3l_2 + l_3 + l_4)\right]}{3EI(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta \tan\theta} + \frac{2q_2(l_3 + l_4)\cos\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin^2\theta} \\ \Delta_{3p} &= -\frac{q_2l_1(l_2 + l_3 + l_4)\left[2l_1^2\right]}{3EI(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta \tan\theta} - \frac{q_2l_1(l_2 + l_3 + l_4)\left[(l_2 + l_3 + l_4)(3l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\right]}{3EI(l_1 + l_2 + l_3 + l_4)\sin^3\theta \tan\theta} + \frac{2q_2(l_2 + l_3 + l_4)\cos\theta}{EA_{\text{模+混凝土}}\sin^2\theta} \end{aligned}$$

将各参数代入式(3)和式(4),可解得:

$$\begin{aligned} X_1 &= 948.27 \text{ kN} \\ X_2 &= 1\,097.55 \text{ kN} \\ X_3 &= 763.685 \text{ kN} \end{aligned}$$

进一步可得第一层各拉杆拉力为 189.65 kN,第二层各拉杆拉力为 219.51 kN,第三层各拉杆拉力为 152.737 kN。由于在此工况下仅考虑 0#号横隔板混凝土的影响,因此需要叠加上墩身混凝土影响,最终状态下第一层拉杆拉力为 236.563 kN,第二层拉杆力为 275.073 kN,则第三层拉杆力为 210.908 kN。

2.3 数值分析及对比

利用 MIDAS Civil 软件对梅山水道跨堤桥 V 墩及 0#块及其施工过程进行有限元建模,分析时对拉杆张拉力的控制目标为对拉杆作用点位移为零以及确保墩身应力处于安全范围。有限元分析(见图 4)时将每层 5 根拉杆采用 5 个单元共结点聚成,最终各对拉杆拉力结果如图 5 所示,其与理论值比较见表 1。

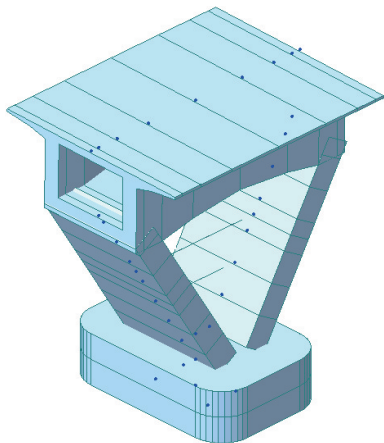


图 4 有限元分析模型

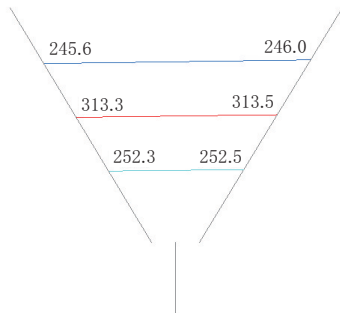


图 5 0#块浇筑完成时单根对拉杆拉力(单位:kN)

本文基于对拉杆作用处水平位移为零假设,亦是本次数值分析的边界条件,基于此对拉杆体系进行了理论、数值模拟分析。由表 1 可知,理论分析与数值分析结果基本一致,但仍存在可控范围的偏差。

表 1 对拉杆拉力理论与数值分析结果对比 单位:kN

施工工况	V 形墩混凝土浇筑		0#横隔板混凝土浇筑	
	理论分析	有限元分析	理论分析	有限元分析
第一层拉杆	46.909	45.5	236.563	252.5
第二层拉杆	55.563	60.1	275.073	313.5
第三层拉杆	59.171	67.9	210.908	246.0

导致偏差的原因为:理论和数值分析时对模板刚度、支架及钢筋重量分布影响不能完全一致。

3 结 语

本文以梅山水道跨堤桥为工程背景,提出了 V 形墩身及 0#块自平衡施工组合支护结构体系,该结构具有受力-传力体系明确、结构体系安全性高等优点。V 形墩身及 0#块施工时水平荷载全部由对拉杆承担,竖向荷载全部由钢管支架承担,确保 V 形墩及 0#施工过程中 V 形墩身内侧应力始终控制在安全允许范围内,有效保障了施工质量。同时本文通过理论计算及数值模拟分析对自平衡体系中对拉杆张拉力进行了理论分析,阐明了对拉杆张拉力的理论计算依据。数值与理论分析对比结果表明:自平衡施工组合支护体系能较好的平衡 V 形墩及 0#施工过程中的水平分力,有效地保障了墩身线形,并减少了墩底裂缝的出现。本文研究结果对类似工程具有一定指导、参考意义。

参考文献:

[1] 杨美良,杨柯,巩朝. 株洲红港大桥 V 形墩设计与分析[J]. 公路与汽运,2010(1):120-122.

[2] 刘天亮.V 型墩连续梁桥[J]. 国外公路,1983(5):49-53.

[3] 王聪.V 型墩刚构桥墩梁固结区构造及受力特性分析[J]. 交通科技,2021(1):43-47.

[4] Zhang Fei, Wang Yan. Spatial stress of the pier-grider region of a continuous rigid-frame bridge with V-shaped piers in two directions[J]. Journal of Highway and Transportation research and development, 2020, 14(1): 45-54.

[5] 徐嘉煜.V 型墩斜腿刚构桥设计优化的探讨[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(3): 120-125.

[6] 刘宝龙. 水中大体积 V 型墩斜腿组合式支撑体系下施工技术研究[J]. 铁道工程学报,2011(3):52-57.

[7] 刘宏宇. 超万吨级 V 型墩—连续刚构支撑体系设计与施工[J]. 铁道建筑技术,2020(8):76-80.

[8] 张义和. 横桥向不等高 V 型墩施工关键技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2013.

[9] 吴乾坤,唐剑,付景雷,等. 苏拉马都跨海大桥 V 型墩施工与控制[J]. 公路,2011(2):231-233.

[10] 赵顺波.V 型墩连续刚架桥的造型与结构方案设计研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2010(1):101-104.