

大跨径钢混组合梁施工关键技术及控制要点研究

蒋 恺¹, 陈泽鹏², 孙宗申³

(1.浙江交科交通科技有限公司, 浙江 杭州 310000; 2.杭州交投建管项目管理有限公司, 浙江 杭州 310000;
3.中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212000)

摘 要: 大跨径梁式钢混组合梁, 受力结构复杂, 施工工序多且工艺复杂, 施工实例少。详细分析了杭州绕城高速公路大桥大跨度梁式钢混组合梁施工过程中, 钢混组合梁分段安装、顶升、多次叠合等关键施工技术, 总结提出了钢梁精细化加工、精准安装落位和同步顶升, 以及沉降、位移及变形控制等的施工关键控制要点。经实测验证, 按相关技术控制的钢混组合梁整体高精度完成, 相关指标符合设计文件及规范要求。

关键词: 钢混组合梁; 大跨径; 顶升; 叠合; 施工技术; 控制要点

中图分类号: U448.21+6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)06-0167-05

0 引 言

钢混组合梁是在钢结构和混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构型式^[1-2]。它主要通过将钢梁和混凝土翼缘板之间设置剪力连接件(栓钉、槽钢、弯筋等), 抵抗两者在交界面处的掀起及相对滑移, 使之成为一个整体而共同工作^[3]。同钢筋混凝土梁相比, 可以减轻结构自重, 减小地震作用, 减小截面尺寸, 增加有效使用空间, 节省支模工序和模板, 缩短施工周期, 增加梁的延性等; 同钢梁相比, 可以减小用钢量, 增大刚度, 增加稳定性和整体性, 增强结构抗火性和耐久性等^[4-5]。近年来, 钢混组合梁在我国桥梁结构中得到了越来越广泛的应用, 是未来结构体系的主要发展方向之一^[6-7]。

根据现有研究及施工实例, 目前大部分梁式桥的钢混组合梁以50 m以下中小跨径为主, 多采用整体或大节段预制安装工艺, 工艺成熟且相对简单^[8-10]。而大跨径梁式钢混组合梁, 由于受力结构复杂, 加上运输原因, 不具备整体或大节段预制安装条件, 往往需要分小段预制安装^[11], 工序多工艺复杂, 施工实例少, 目前对这方面的详细研究报道很少。本文结合杭州绕城高速公路大桥59(56)m+95 m+59 m大跨径梁式钢混组合梁施工实例, 详细介绍了分段安装、顶升、多次叠合等关键施工技术, 总结了四方面关键控制要点, 为以后类似大跨径钢混组合梁桥

的设计、施工和监管提供参考。

1 钢混组合梁概况

杭州绕城高速公路大桥上跨京杭运河二通道三级航道, 下穿东湖高架路, 上部结构采用预应力混凝土T梁、预应力混凝土连续箱梁和钢混组合梁三种形式。其中, 钢混组合梁跨径组合为59(56)m+95 m+59 m, 位于曲线段, 单幅宽度16.25 m, 采用连续结构。钢梁为变高梁, 直腹板, 通过腹板高度差形成横坡。箱梁高度基准为顶板顶面至底板底面, 宽度基准为腹板中心线, 梁高3.0~5.0 m, 挑臂长3.75 m。

钢梁顶板厚度为30~60 mm, 标准宽度1 200 mm, 在中墩顶局部加宽1 600 mm。底板厚度为30~40 mm, 宽度为8 850 mm, 采用280 mm×30 mm的板式加劲肋, 标准间距为600 mm。腹板厚度为20~28 mm, 设置230 mm×20 mm板式加劲肋。支座横向间距为6 000 mm。中墩每个支座位置设置3对竖向加劲板, 板厚50 mm, 宽600 mm。边墩每个支座位置设置2对竖向加劲板, 板厚26 mm, 宽300 mm。为改善结构受力性能及保证结构正常运营情况下的抗倾覆稳定性, 在梁端和中墩处均采用C55混凝土进行压重。桥面板采用C55混凝土现浇(部分节段为减小徐变采用C55微膨胀混凝土), 采用分次张拉钢束和叠合的设计, 墩顶段采用先张拉预应力再和钢梁叠合。为增强混凝土和钢结构的连接, 在需要浇筑混凝土部分均设置剪力钉。钢梁部分横断面如图1和图2所示。

收稿日期: 2022-06-15

作者简介: 蒋恺(1991—), 男, 学士, 工程师, 从事交通建设工程第三方施工安全技术咨询及安全风险评估工作。

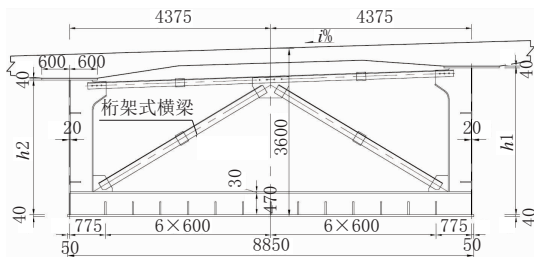


图1 钢梁横断面(一)(单位:mm)

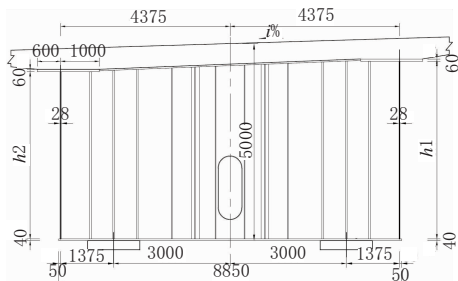


图2 钢梁横断面(二)(单位:mm)

2 钢梁分段安装

钢梁底宽达到 8.85 m,为方便陆运至现场(不具备水运条件),在宽度方向拆分成两段“L”形梁体(见图3),现场吊装后再进行焊接连接。左右幅钢梁共计 48 个节段,长度 8.152~31.836 m,宽度 3.97~5.1 m,高度 2.64~4.9 m,单个节段最大重量 99.85 t。



图3 “L”形梁体示意图

2.1 临时支撑施工

钢梁临时支撑由基础、预埋钢板、 $\phi 609 \times 10$ 钢管基础、 $\phi 180 \times 8$ 钢管平联及斜撑及 HM450 $\times$ 300 型钢主梁组成,并预备一定数量的钢板调节标高。临时支撑分为 1500 型和 2000 型两种(见图4),主要设置在临近永久墩体一侧及节段交界处。

临时支撑的基础需硬化且保证表面平整度,同时应防止出现不均匀沉降和下方土体非弹性变形,进而影响后续施工标高控制。

临时支撑搭设时,根据梁体的分段信息,提前计算出钢梁的底部标高,在搭设期间优先通过钢管的长度控制钢梁底部标高,原则上宜低不宜高。钢管搭

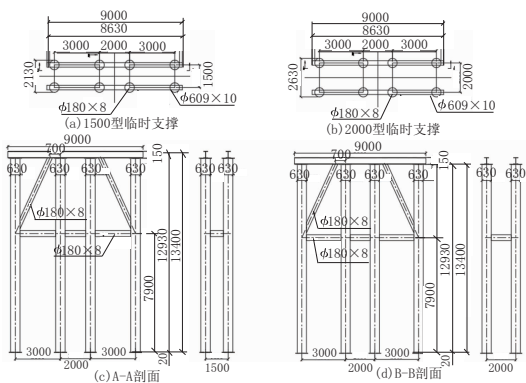


图4 临时支撑断面图

设完成后,再次测量支架钢管位置,并根据位置坐标复核梁底标高,然后通过封顶钢板进行微调,确保钢梁底标高准确。

在临时支撑顶部工字钢横梁上对应的钢梁边线位置焊接限位挡块作为安装过程中辅助定位用。

2.2 钢梁吊装

钢梁采用一台徐工 XGC 型 320 t 履带起重机吊装,配备专用吊耳、卸扣及起吊绳索。

(1) 吊点设置

根据梁段重量设置 4 个吊耳,吊耳与钢梁采用 T 形连接,熔透焊接。单个吊耳的最大允许负荷取 50 t 力。每段钢梁设计 4 个吊点,主吊点设置在顶板,辅助吊耳设置在底板(见图5)。主吊板与顶板焊接,焊角高度不小于 12 mm,并在顶板及腹板处设置加劲肋。

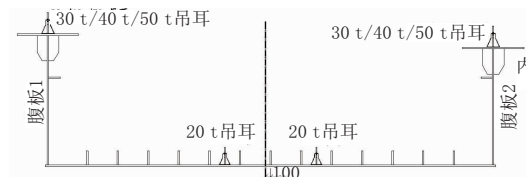


图5 典型钢梁分段吊点设置横断面示意图

(2) 钢梁吊装

履带吊起吊钢梁至要求高度后,通过调整大臂俯仰角度、收放履带吊缆绳将钢梁移到墩顶及支撑体系上方,同时利用钢梁底限位板及临时支撑顶限位挡块辅助调节平面位置,满足要求后将梁段缓慢地下放,完成梁段吊装与定位。

当同一节段两片“L”形梁体就位准确后,先使用“马板”固定(见图6),最后进行钢梁底板及腹板、钢梁间横梁焊接。

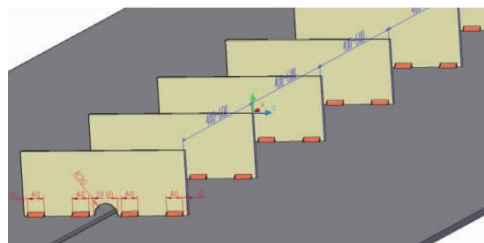


图6 “马板”示意图

2.3 钢梁现场焊接

现场焊接主要内容有钢梁顶、底、腹板的对接焊缝及板肋的肋嵌补段对接焊等,焊接母材主要为 Q355D。选择焊条电弧焊装配定位、CO₂ 气体保护药芯半自动焊焊接主焊缝。钢梁焊接基本情况见表 1。

表 1 钢梁焊接基本情况

序号	焊接部位	焊接方法	焊缝要求	焊接位置
1	面板对接	CO ₂ 气体保护焊	全熔透	平位
2	底板对接	CO ₂ 气体保护焊(陶质衬垫)	全熔透	平位
3	腹板对接	CO ₂ 气体保护焊	全熔透	立位
4	加劲肋嵌补对接	CO ₂ 气体保护焊	全熔透	全方位

3 支架及临时墩搭设

桥面板及翼板采用搭设满堂支架法现浇施工,采用承插型盘扣式钢管支架。

在边跨跨中和中跨跨中设置临时墩,支撑力需达到边跨跨中 3 981 kN,中跨跨中 6 889 kN。设置临时墩的主要目的是配合后续主墩位置钢梁顶升作业。临时墩采用桩柱式结构,由于临时墩在钢梁架设完成后浇筑极其不便,故在完成临时支撑后、吊装该区域钢梁节段前施做。其高度低于梁体,不会对钢梁安装造成影响。

4 混凝土浇筑及叠合

4.1 底板混凝土浇筑

钢梁架设完毕形成整体后,填充边墩、主墩顶钢梁横梁内混凝土,浇筑墩顶段长 25 m 范围底板混凝土(见图 7),并养护 7 d。

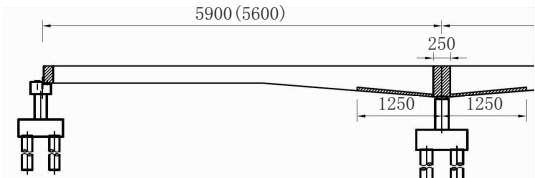


图 7 底板混凝土浇筑完成示意图(单位:cm)

4.2 钢梁顶升

底板混凝土养护 7 d 后对主墩位置的钢梁顶升 30 cm。根据设计文件提供的主墩位置钢梁顶升阶段最大反力,在最后一批钢束张拉时最大反力达到 25 626 kN,再结合千斤顶的安全使用考虑,选取 4 个同型号的 800 t 千斤顶布置在主墩墩顶支座内侧(见图 8)。

每个主墩处顶升力为 11 056 kN,墩顶与钢箱梁底部的净空为 56 cm 及 46 cm(左幅两处的净空均为 56 cm;右幅一处的净空为 56 cm,一处为 46 cm)。由

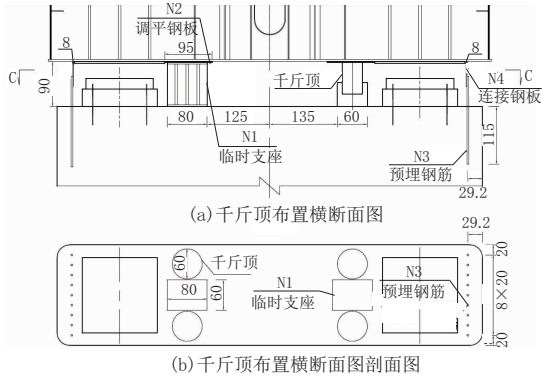


图 8 千斤顶布置横断面及剖视图

于千斤顶只适用于临时顶升,不能作长久支撑使用,在千斤顶之间布置临时支座,顶升后作为临时支撑。

4.3 桥面板浇筑叠合

(1)钢梁顶升后进行第一次桥面板浇筑。第一次浇筑除主墩墩顶 2.5 m 段及四个合龙段外的所有桥面板,养护 14 d。此时边跨 39.84 m 和中跨 57 m 桥面板与钢梁叠合,其余部分暂不叠合(见图 9)。

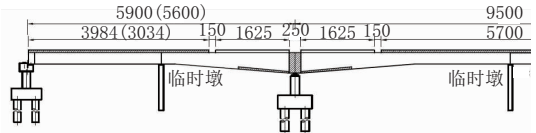


图 9 第一次桥面板浇筑完成示意图(单位:cm)

(2)待第一次桥面板浇筑完成后,拆除边跨跨中和中跨跨中临时墩,张拉横向预应力钢束 N1(具体见预应力布置)。

(3)横向预应力钢束张拉完成后,进行第二次桥面板浇筑,浇筑范围为主墩墩顶 2.5 m 段桥面板混凝土,养护 7 d。此时该段桥面板与钢梁叠合。

(4)第三次浇筑前先对墩顶长 35 m 段桥面板上压重 10 kN/m,并张拉纵向第一批预应力钢束 N1(具体见预应力布置)。压重的材料采用沙袋,1 个 1 m³ 的标准吨袋装沙后重量约为 1.4 t,桥面板压重时采用装填 2/3 的吨袋,满布一层,并用塑料布覆盖防水。浇筑墩顶长 35 m 段桥面板剪力钉群预留孔(采用微膨胀混凝土),使桥面板和钢梁叠合(见图 10)。同步浇筑合拢段混凝土(采用微膨胀混凝土),养护 7 d。

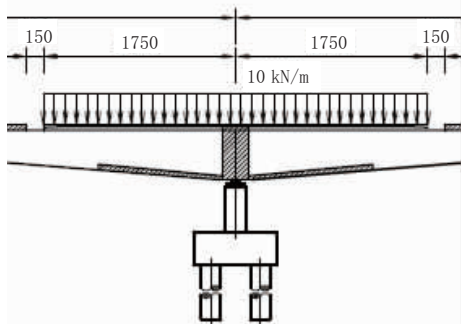


图 10 第三次桥面板浇筑及压重示意图(单位:cm)

4.4 钢梁回落

主墩位置钢梁回落在第三次桥面板浇筑完成之后进行。先移除压重,待纵向其余预应力钢束分批张拉完成之后(具体见预应力布置),对两处主墩顶部的临时支座进行拆除,拆除时需用千斤顶进行配合。此时每个墩顶的顶升力为 25 626 kN。

5 预应力布置

桥面板布置纵横双向预应力钢束,采用 $\phi^{s15.2}$ 高强度低松弛钢绞线,锚下张拉控制应力 1 395 MPa。

纵向预应力钢束根据长度由短至长分为 N1、N2、N2a、N3、N3a、N4、N4a 七种。N1 钢束在墩顶桥面板叠合后压重条件下张拉;除 N1 外其他钢束在移除墩顶压重后分批张拉,先张拉长束后张拉短束。纵向预应力钢束采用两端张拉。

横向预应力钢束只有 N1 一种,在拆除临时墩后、浇筑墩顶桥面板前张拉。横向预应力钢束采用单端交错张拉。

6 数据模型纠偏

施工之前,根据设计文件提供的参数,建立了各施工阶段各坐标点理论标高数据模型(见图 11),通过将各施工阶段的实测标高数据与理论标高数据模型进行对比,分析偏差,根据误差情况在相应阶段进行动态调整。例如:在钢梁架设阶段设置预拱度,用以抵消钢梁挠度形变;在二期混凝土浇筑前通过微调底模板及钢筋骨架,保证混凝土顶面标高及横坡与设计文件相符;在钢梁回落过程中采用数控千斤顶,避免回落过程中因不均匀下降造成的混凝土拉裂。通过动态调整各施工阶段的控制标高,以达到最终整个桥跨与设计文件尽量一致的目的。

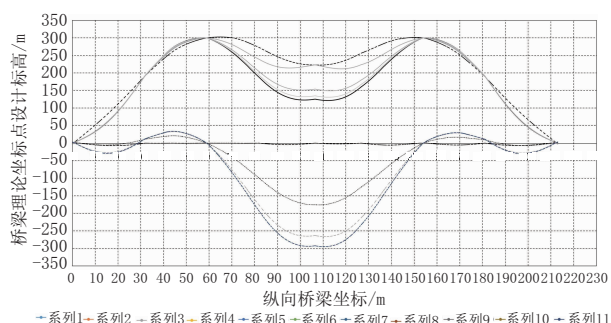


图 11 各施工阶段各坐标点理论标高数据模型

7 关键控制要点

大跨径梁式钢混组合梁施工,最重要的是控制钢梁分段安装叠合完成之后的桥面标高精度、桥梁

整体线形和混凝土裂缝,以确保桥梁成桥后符合设计及规范要求 and 整体结构安全。关键控制要点具体可总结为以下四方面。

7.1 钢梁精细化加工

(1)严控原材料质量,如外观质量及各种规格和几何尺寸,尤其是钢板厚度;严格审核有关质量证明材料(钢材的合格证、有关标志及检验报告、无损检测报告等)。

(2)严控各个零部件、单元件的下料、加工精度,充分利用自动化、智能化生产工艺进行精密切割;严控连接螺栓钻孔质量,如孔位置、孔径偏差、孔距偏差、孔轴线垂直度、孔壁表面粗糙度等。

(3)严控钢结构焊接制造环节,采用自动化工艺,主控项目包括焊接人员、焊接设备、焊接材料、焊接工艺、焊接环境、焊接过程、焊接完成后的检查等。所有类型的焊缝在施焊前应做焊接工艺评定,根据评定的结果编制焊接工艺。

(4)由于曲线超高渐变的影响,且部分梁段为扭转过渡,加工之前需对设计图所给参照特征点坐标进行核查,确保无问题后方可加工,以使扭转过渡值平均至梁段长度范围,以免过渡值累积至梁段两端部,使梁段节段拼接出现严重偏位,导致梁段板件拼接错位而拼装不上。

(5)钢梁制造时采取全桥匹配胎架制造,胎架所形成的工作面应与钢梁底板的外形相贴合,以保证钢梁的线性。胎架的基础及支承构架必须坚固,胎架基础应做专项设计,胎架结构刚度应进行验算。底座胎架应考虑竖曲线半径产生的拱度影响,并充分考虑项目超高及超高渐变的影响,按实际桥梁线性空间坐标进行试拼装。

(6)钢构件组焊场地或钢梁的胎架处均应设置工地连接件及纵肋的定位装置,以保证钢构件之间工地连接的准确度;钢梁节段出厂前先进行预拼,以拟合钢箱梁实际加工线形是否满足设计要求,预拼合格后方可出厂。

7.2 钢梁精准安装落位

左右幅共 48 个钢梁节段,运用一台 320 t 的履带起重机吊装组拼。在安装前和安装过程中,通过现代测量手段的反复微调,是确保钢梁精准安装落位的关键。

7.2.1 控制点复测

(1)平面控制:结合现场实际安装情况,对支撑体系进行现场定位。先用全站仪把桥墩中心线投影

线引测在地面上,并用红油漆进行标示,直线段每12~16 m一个点,曲线段每5 m测设一个点。测设误差必须达到图纸要求,中心线投射完毕后在沿纵向方向按着支撑体系布置图把支撑体系的定位关系在地面上标识。

(2)支撑体系上部控制:支撑体系各构件安装整体稳定后,根据控制点坐标,用全站仪将之前布设的桥墩中心线、钢梁边界线引线等标记在支撑上标示出来。

(3)支撑体系高程控制:测量前通过计算机放样,计算出钢梁每个支点处的设计高程。在临时支撑施工期间通过钢支撑顶部封顶钢板调整高程,确保安装后的梁底高程准确。

7.2.2 钢梁安装测量控制

(1)正式开工前,安装单位对钢梁平、纵设计参数表、支座设计参数等基本数据进行一次全面的校核,弄清平面及立面曲线要素,立面制造线形还应在总体立面线形的基础上叠加各跨的预拱度。安装钢梁之前,把每一段钢梁轴线尺寸(制作单位提交的预装记录定位线)和图纸设计的线形投影在支撑体系上。

(2)为消除基础不均匀沉降和变形,在基础施工完成后对基础进行预压,预压期间必须做好沉降观测记录。

(3)钢梁吊装就位脱钩前,需再次对钢梁点位坐标进行测量,保证就位准确后方可脱钩。

7.3 钢梁同步顶升

钢梁顶升时需特别注意千斤顶的同步率,缓慢同步顶升。采用PLC同步顶升系统进行顶升(见图12),同步顶升原理是根据位移传感器或压力传感器收集数据到PLC控制设备,通过人机操作界面设定PLC电脑,从而PLC计算机自动操控电动液压泵站和千斤顶,实现同步顶升^[12-13]。由于千斤顶单次行程达不到30 cm,可通过不同高度的临时支撑和钢板进行交替顶升,最终达到高度。

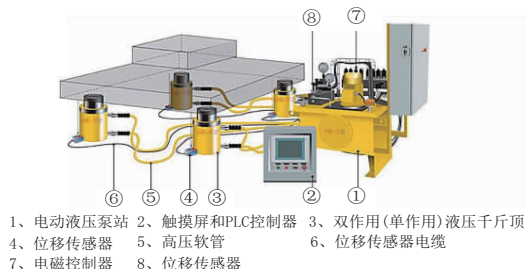


图12 PLC同步顶升系统

7.4 沉降、位移及变形控制

(1)钢梁制造及验收和工地用计量器具必须经计

量单位检定合格后方可使用,并应按有关规定进行操作;工地用尺在使用前必须与工厂用尺相互校对;

(2)临时支撑搭设施工前须通过荷载计算,并考虑基础沉降、支撑变形、设计预留拱度;

(3)施工时,支座处梁底楔形垫块的准确施工对钢梁线形影响较大,故施工时,应采取有效措施确保楔形垫块的加工精度,并确保支座范围内梁底的平整度和楔形块的施工变形,以确保楔形块的准确定位、连接和密贴;

(4)在施工过程中密切监测梁体的位移和应力的变化情况,如发现异常,及时停止施工,待问题解决后继续施工;

(5)钢梁两端压重施工时,应均匀浇注,以免形成偏载,对梁体受力不利。压重施工过程中,应检测梁体的位移和应力的变化情况,如发现异常,需及时停止施工,待问题解决后方可继续施工;

(6)桥面板加载龄期引起的徐变差异直接影响钢梁的受力性能,因此需严格确保桥面板混凝土的养护时间。

8 结 语

杭州绕城高速大桥59(56)m+95 m+59 m大跨径梁式钢混组合梁施工技术复杂,包含了钢梁节段加工制造运输、临时支撑体系搭设、大吨位起重吊装、大量钢结构现场焊接连接、钢梁整幅顶升及回落、桥面板分次浇筑叠合等多道工序,控制钢梁加工精度,钢梁精准安装落位,钢梁同步顶升,控制沉降、位移及变形等,是确保成桥后桥面标高精度、桥梁整体线形和减少混凝土裂缝的关键。

通过施工完成之后的桥梁实测数据分析,钢混组合梁整体高精度完成,相关指标符合设计文件及《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017)要求。本文介绍的大跨径梁式钢混组合梁分段安装叠合施工技术可行,有效保证了钢混组合梁的施工质量和结构安全性,可为同类工程提供参考。

参考文献:

- [1] 潘军.港珠澳大桥非通航孔85 m连续组合梁桥施工关键技术[J].世界桥梁,2016,44(1):20-24.
- [2] 段银龙,余海辉,徐东进.大跨径连续钢混组合梁的设计及关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2021(8):119-123.
- [3] 朱众,赵阳.变截面钢板组合梁施工方案结构性能对比分析[J].交通科技,2018(6):55-59.
- [4] 许延祺.小半径钢-混组合梁施工方法及顺序比选研究[J].特种结

(下转第216页)

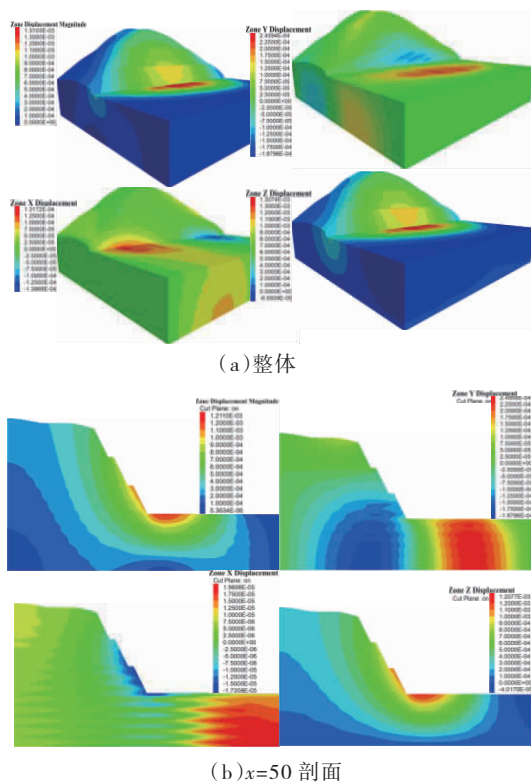


图8 边坡位移云图

应力和YY方向应力出现了沿岩层切向的锯齿形状,应力分布受岩层切向与互层岩性差异的影响较大,而ZZ方向的应力分布则较为规律,ZZ方向应力与均质岩坡分布几乎一致。

(2)切向岩层受侧向约束的影响,边坡变形出现了层次性,且X方向较为显著,Y方向次之,Z方向最弱;整体变形趋势与均质岩坡类似,呈现圆弧滑动趋势。

(3)边坡按1:0.5开挖后临界状态的折减系数为3.511,即安全系数为3.511,边坡处于稳定状态。

(4)对于砂泥岩切向互层边坡,采用框架锚杆支护,仅起到构造护坡作用,边坡的变形和应力状态并未发生实质性的影响。实际工程中,为避免岩体力学性质因风化作用劣化,防止边坡开挖面剥落、局部垮塌,确保边坡长久稳定,采取构造支护是有必要的。

参考文献:

- [1] 程强,周永江,黄绍槟.近水平红层开挖边坡变形破坏特征[J].岩土力学,2004,25(8):1311-1314.
- [2] 程强.红层软岩开挖边坡致灾机理及防治技术研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [3] 苗朝,石胜伟,谢忠胜,等.红层缓倾岩质斜坡地下水作用机制及稳定性分析[J].人民长江,2016,47(18):50-55.
- [4] 黄润秋,赵松江,宋肖冰,等.四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J].水文地质工程地质,2005(1):13-15.
- [5] 史文兵,李洪建,曾臻,等.平缓反倾红层边坡变形破坏机制研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):881-888.
- [6] 张涛,谢忠胜,石胜伟,等.川东红层缓倾岩质滑坡的演化过程及其识别标志探讨[J].工程地质学报,2017,25(2):496-503.
- [7] 蒋金阳.软硬互层边坡倾倒变形破坏特征及支护效果的大型离心机试验研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [8] 黄达,马昊,孟秋杰,等.软硬互层岩质反倾边坡弯曲倾倒离心模型试验与数值模拟研究[J].岩土工程学报,2020,42(7):1286-1295.
- [9] 陈权川.缓倾顺层岩质边坡抗滑键支护承载性能研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [10] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004(19):3381-3388.

(上接第171页)

- [5] 李航.大跨径钢混组合梁桥施工关键技术研究[J].交通世界(上旬刊),2021(8):46-47.
- [6] 王德怀,王琦,张玉奇.超宽大跨变截面连续钢混组合梁施工方案比选[J].中外公路,2021,41(2):193-197.
- [7] 安景峰,刘礼威,郭赵元,等.钢混组合钢板梁桥混凝土开裂影响因素及裂缝控制措施[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(3):389-398.
- [8] 苏庆田,胡一鸣,徐晨,等.整体预制钢-混凝土组合梁桥合理结构研究[J].建筑钢结构进展,2020,22(2):93-100.

- [9] 张晓杰,张金安,史艳.公路钢混组合梁装配化施工技术[J].价值工程,2021,40(8):146-148.
- [10] 文辉.高速公路桥梁工程中的钢混组合梁施工技术[J].交通世界(上旬刊),2021,(7):92-93.
- [11] 李义成.大跨径钢混组合箱梁工厂化制造关键技术[J].钢结构(中英文),2020,35(9):44-51.
- [12] 邹海军.市政高架桥钢混组合梁PLC同步顶升施工技术研究[J].价值工程,2021,40(5):192-194.
- [13] 蒯震宇,徐树堂.某市机场路高架桥钢混叠合梁预顶升施工技术研究[J].江苏建筑,2020(4):68-71.