

东海大桥Ⅶ标主桥斜拉桥的钢梁安装

张鹏飞, 贾桂营, 刘磊

(路桥华东工程有限公司 上海市 200135)

摘 要: 东海大桥Ⅶ标主桥——颗珠山大桥为海上段工程, 主桥斜拉桥钢梁 0 号块和尾梁段采用浮吊安装, 标准梁段采用自制悬臂吊机安装, 取得了较好的施工效果。

关键词: 颗珠山大桥; 梁段; 安装

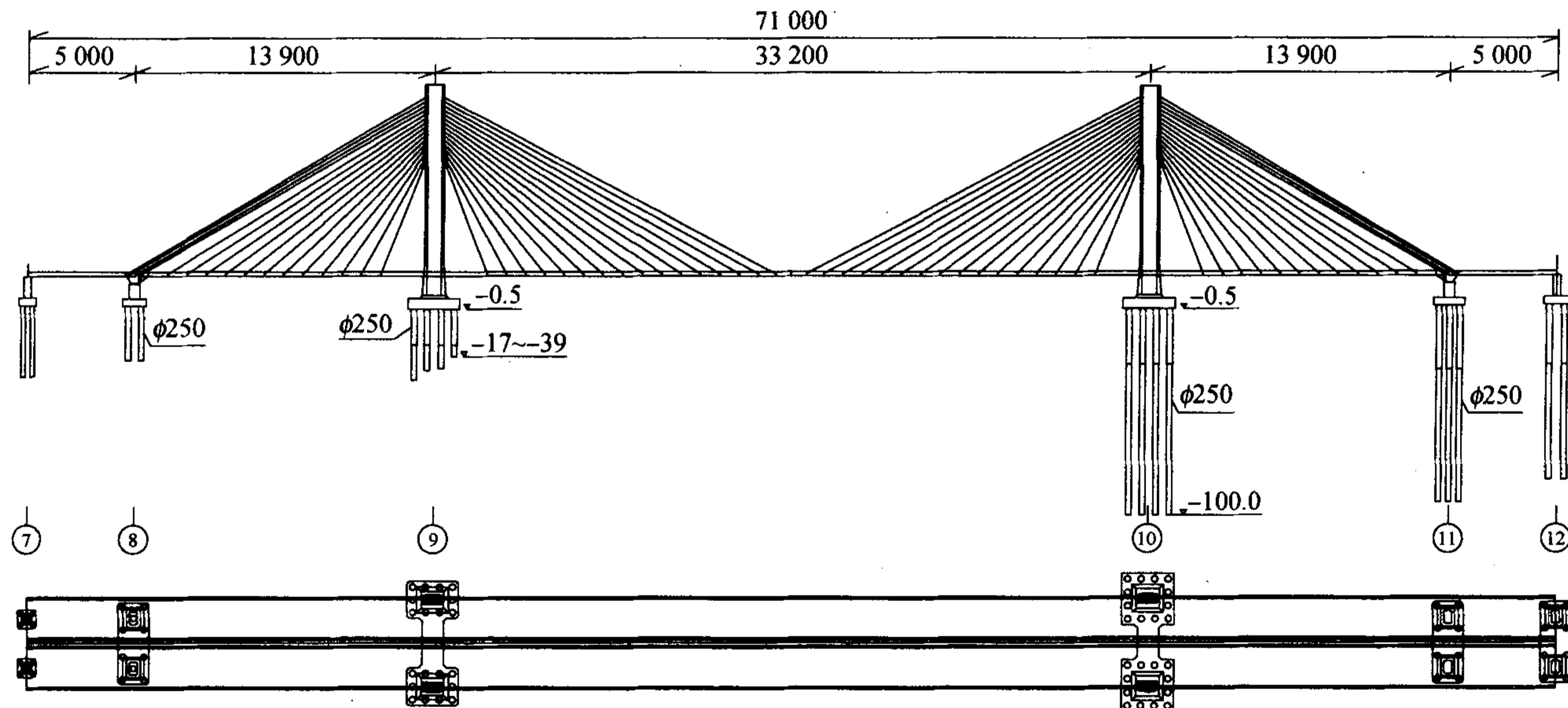
1 工程概况

东海大桥起始于上海浦东南汇区芦潮港镇, 跨越杭州湾北部海域, 直达浙江省嵊泗县崎岖列岛的小洋山岛, 工程全长 31 km, 自然条件十分恶劣, 无论是工程规模, 还是施工难度、技术含量在国内均是首屈一指。东海大桥Ⅶ标——颗珠山大桥西起颗珠山岛, 东连小城子山港区, 距上海市南汇区芦潮港镇约 30 km。

桥区不利的自然条件主要包括气象和水文两种因素。不利的气象因素主要有大风、雾、大雨、雷暴以

及高温和严寒的天气条件; 不利的水文因素主要为波浪。综合考虑各种不利因素, 一年中有效作业天数约为 200 d。

东海大桥Ⅶ标全长 1 660 m, 桥跨组合为 $7 \times 50 \text{ m} + (50 + 139 + 332 + 139 + 50) \text{ m} + 12 \times 50 \text{ m}$ 。其中主桥为斜拉桥, 全长 710 m, 采用双塔双索面叠合梁构造, 钢梁为框架式结构, 由钢主梁、钢横梁、小纵梁组成, 节段间采用高强螺栓连接。全桥钢箱梁共 65 块, 其中标准梁段 56 块, 0 号块梁段 6 块, 尾梁段 2 块, 合拢段 1 块。主桥桥型布置见图 1 所示。



单位: cm

图 1 主桥桥型布置

2 钢梁 0 号块安装

钢梁 0 号块位于主塔附近无索区, 采用浮吊在

支架上安装, 为抵抗钢梁悬拼过程中由不平衡荷载产生的倾覆力矩, 以及塔根部产生的水平推力, 0 号

块与支架、索塔之间采取临时固结措施。

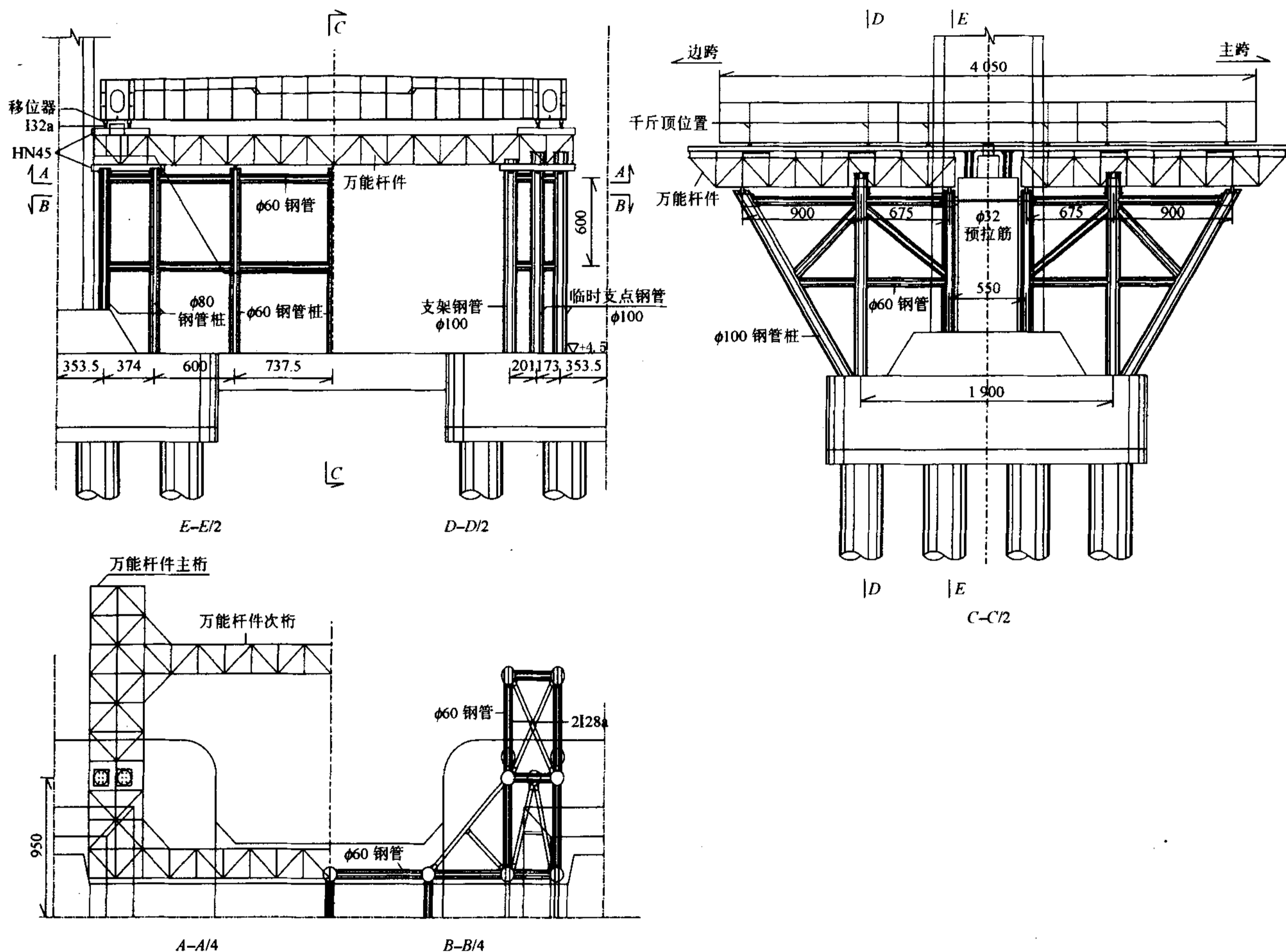
2.1 0 号块支架的结构形式

(1) 0 号块支架的总体布置形式。

0 号块支架采用梁柱式结构,基础为钢管桩,支承于承台顶面。钢管分承重钢管和辅助钢管两种形式。承重钢管位于两侧钢主梁底部,辅助钢管位于两侧主承重钢管之间,将左右幅主承重钢管连接成整体,以增加支架整体横向刚度。承重钢管桩底部通过

精轧螺纹钢筋与承台锚固,在主塔下横梁处通过精轧螺纹钢筋锚固在下横梁上。

0 号块支架上部结构承重梁采用甲型万能杆件,分为主桁和次桁,主桁设置在两侧钢主梁底部,杆件按 4 肢采用;次桁采用双肢杆件,将主桁连成整体框架式结构。主承重杆件顶部设 H45 型钢横梁,横梁顶部设双肢 I32a 工字钢作为纵移轨道。0 号块支架布置见图 2 所示。



单位: mm

图 2 0 号块施工支架

(2) 支架移位及顶升系统。

0 号块支架顶部钢箱梁移位系统采用移梁小车,移梁小车位于钢主梁腹板底部轨道梁上,每侧钢主梁两端各设 2 台移梁小车,1 段钢梁共设 8 台。移梁小车顶部从下到上依次设置四氟滑板、不锈钢板、钢垫板和橡胶垫,用于钢箱梁横移。移位系统顶标高高于设计梁底标高约 50 mm。

(3) 临时固结形式。

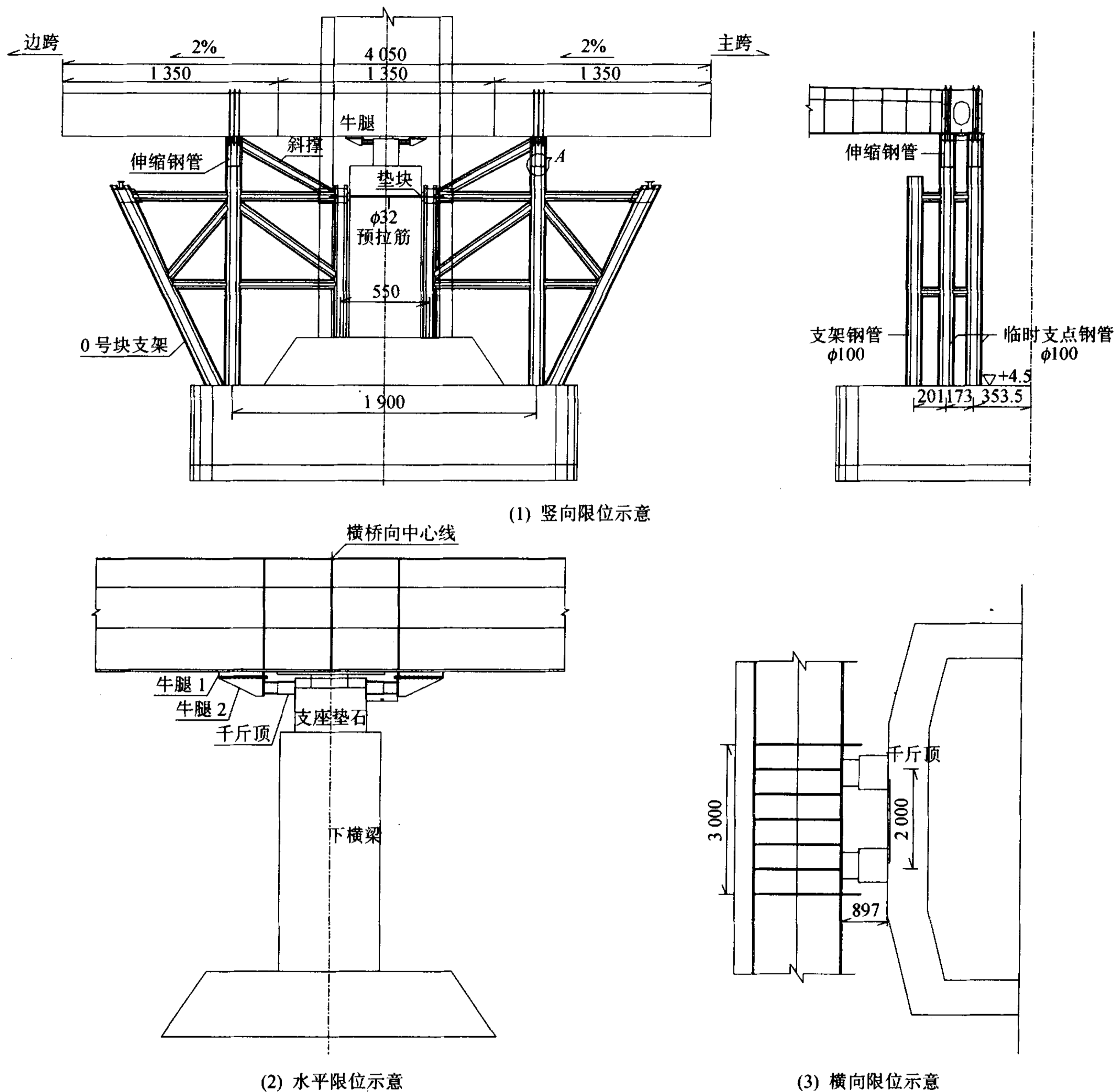
钢梁临时固结装置,主要是竖向将 LZ0、LB0 段钢箱梁通过钢管桩与主墩承台刚性固结,水平顺桥

向在支座垫石两侧钢箱梁底部设牛腿,牛腿与支座垫石间设刚性支撑,水平横桥向在 0 号块钢箱梁与塔柱间设置千斤顶,使大桥在悬臂拼装施工阶段竖向、横向均成为稳定结构,临时固结设施与 0 号块支架结合设计,竖向固结点利用 0 号块支架部分承重钢管。临时固结构造见图 3 所示。

2.2 0 号块钢梁安装

(1) 支架安装。

为减少现场的施工时间,0 号块支架钢管桩基础和万能杆件主桁、次桁均按分片组拼、整体安装的



单位: mm

图3 塔梁临时固结布置

方法施工,即先在后场或驳船上将钢管桩分片加工成整体,将万能杆件分主次桁分片组拼好,然后根据主墩不同的现场环境,采用履带吊或浮吊分片整体安装到位。

支架顶部横梁、轨道及移位顶升装置采用塔吊安装。

(2) 钢梁安装。

0号块钢梁自重约200 t,采用500 t浮吊横桥向安装,按LB0、L0、LZ0顺序,从一侧向另一侧进行。浮吊先将LB0钢箱梁放于支架顶移位系统上,由移

位系统纵移至待安装位置,调整钢箱梁横桥向位置并临时固定,依次安装L0、LZ0段钢箱梁就位,利用移位、顶升系统调整3段箱梁的纵向、横向位置及标高,待钢箱梁接口匹配后,施拧高强螺栓。3段钢箱梁连接成整体后,整体调整3段钢箱梁的纵向、横向位置,然后利用顶升系统将钢梁整体顶升,移走移位器,将钢箱梁同步缓慢放于永久支座上。

0号块作为全桥主梁安装的基准梁段,必须做到精确定位,严格控制轴线偏差在 ± 1 mm以内,高程误差控制在 ± 3 mm以内。

(3) 钢梁临时固接。

0 号段钢箱梁全部安装就位后, 拆除临时支点位置的移梁轨道; 拉伸临时支点钢管内的可调钢管至钢箱梁底部, 安装预应力筋(每根桩顶设 6 根 $\phi 32$ 精轧螺纹钢筋)并张拉, 使可调钢管锚固在钢主梁上; 焊接可调钢管与临时支点钢管, 使之连接为整体, 将 0 号块钢梁纵向通过临时支点钢管与承台固接; 然后安装梁底顺桥向限位牛腿及牛腿与支座垫石间的刚性支承, 将钢梁顺桥向与支座垫石固接; 横桥向在 0 号块钢箱梁与塔柱间设置千斤顶使钢梁与

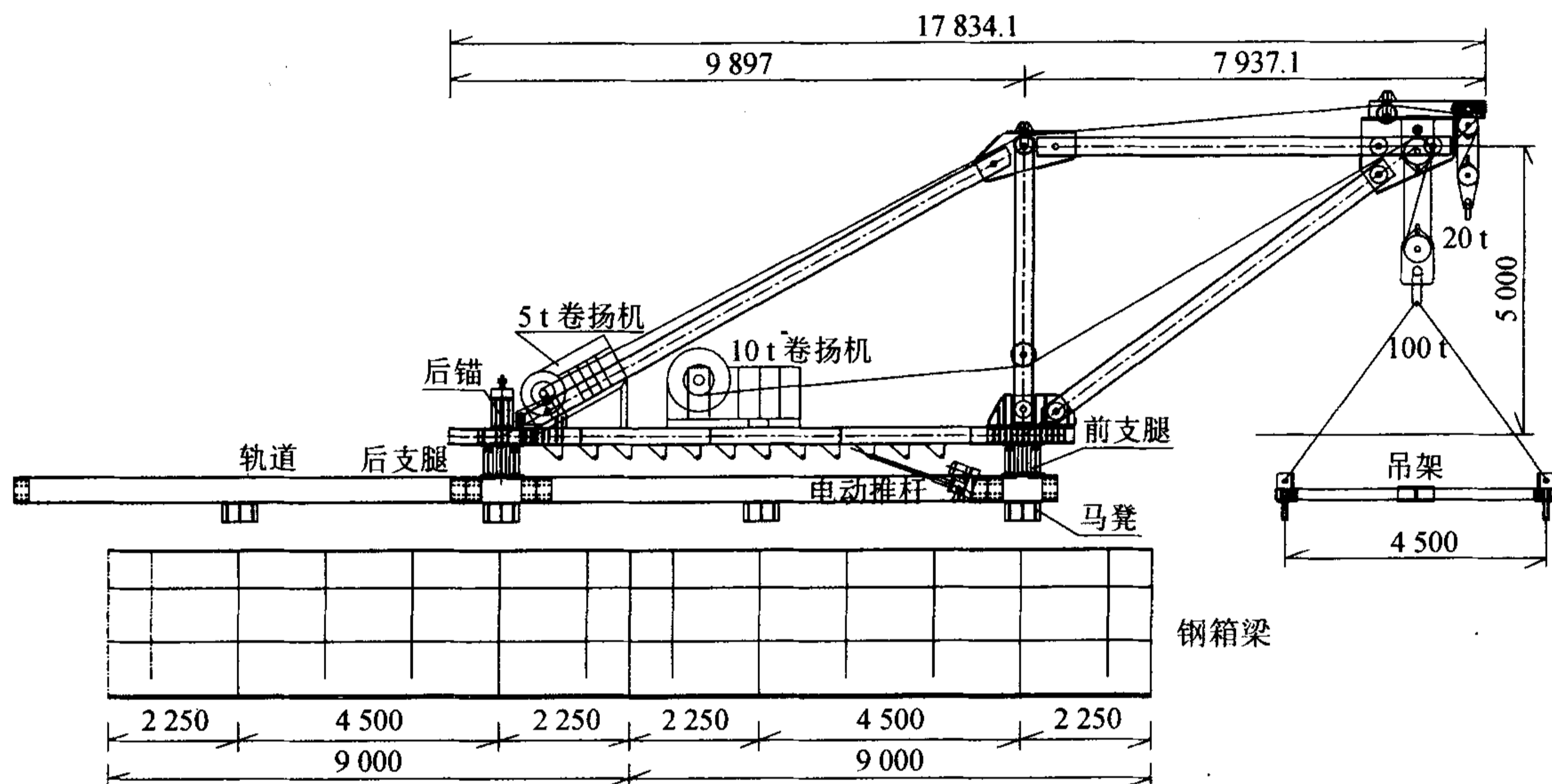
塔柱固接。

3 标准梁段的施工

标准梁段的安装采用自制的悬臂吊机进行, 每段钢梁采用 2 台吊机台吊的形式, 悬臂吊机布置在钢梁两侧。悬臂吊机在 0 号块钢梁顶部拼装。

3.1 悬臂吊机的设计

悬臂吊机由主桁片、锚固系统、行走系统、起吊系统组成。悬臂吊机见图 4 所示。



单位: mm

图 4 悬臂吊机立面示意

钢箱梁悬臂吊机由我单位自行设计, 设计过程中采用 sap2000 程序模拟钢箱梁安装、空载行走及风荷载等不同工况条件下, 验算悬臂吊机的结构强度和变形, 并采用 ROBOT 软件复核, 计算模型见图 5 所示。

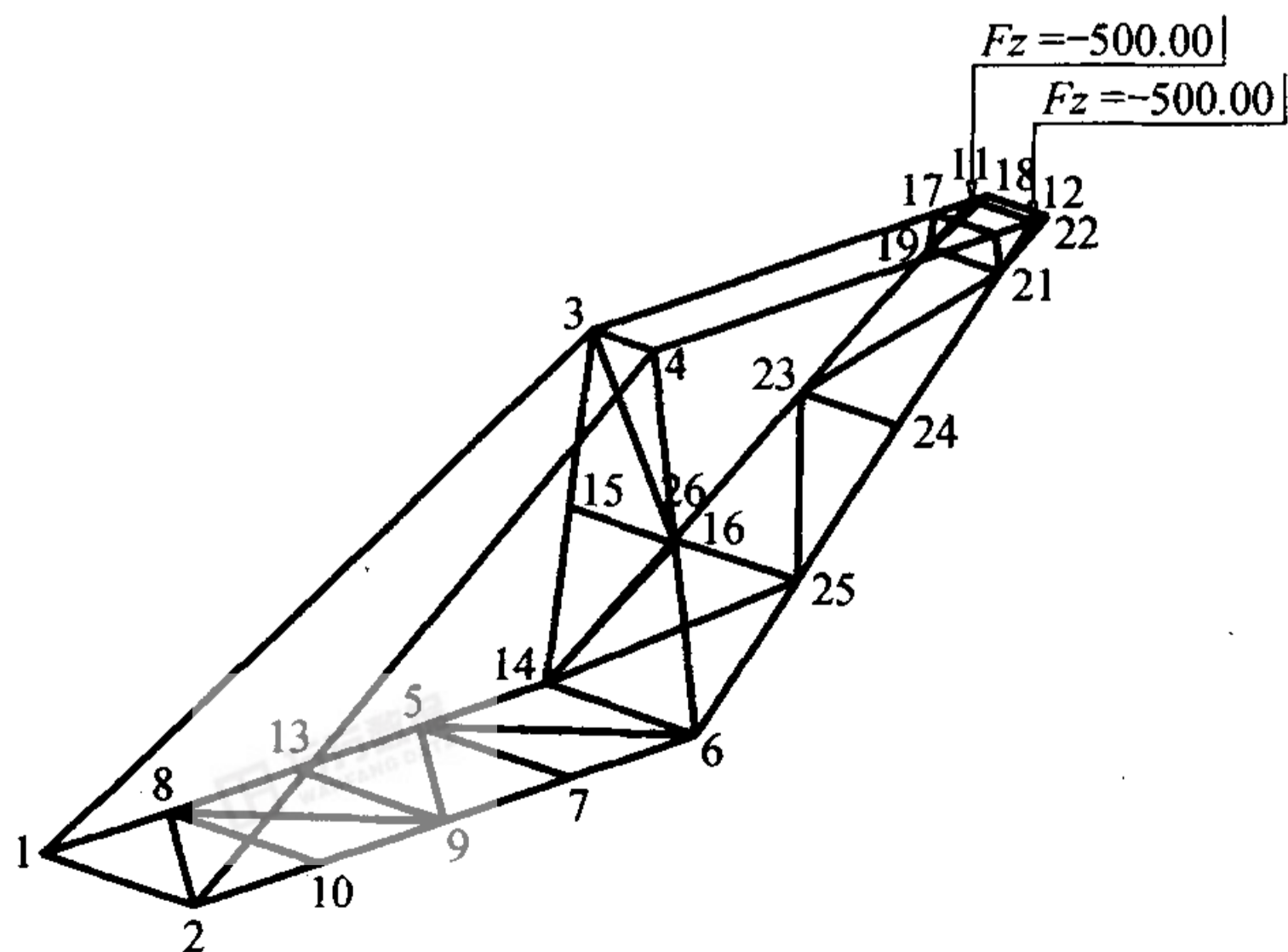


图 5 悬臂吊机计算模型

悬臂吊机主要计算结果为:

- 前支点竖向最大反力 878 kN;
- 后支点竖向最大反力 -378 kN;
- 最大变形 -2 cm;
- 杆件最大应力 -149 MPa;
- 抗倾覆系数 1.6。

3.2 悬臂吊机加载试验

悬臂吊机使用前, 采用“水箱加载法”进行加载试验, 以水箱和水的自重作为试验荷载, 采取逐级加载逐级测量的试验方法。加载总重量为标准梁段自重的 1.3 倍(160 t)。

3.3 标准梁段安装

(1) 运梁驳船抛锚就位。

将运梁驳船在主、边跨吊装位置抛锚定位好, 在悬臂吊机下放吊具后, 通过驳船锚缆的收放使钢箱梁吊点位置与吊架平面误差在 50 cm 以内, 保证钢箱梁停泊位置与安装位置基本一致。

(2) 悬臂吊机起吊钢箱梁。

将悬臂吊机起吊吊具下降,与待吊钢箱梁吊耳连接,调整吊点两侧吊绳长度使其一致,保证钢箱梁水平起吊。

钢箱梁吊离驳船 100 cm 左右后,暂停起吊,检查吊点、吊架、梢棒以及悬臂吊机后锚点等的受力与变形情况,如无异常,继续起吊。

起吊过程中,应尽量保证两侧钢箱梁对称同步起吊,水平提升。

(3) 钢箱梁定位。

钢箱梁起吊到拼装位置时,前移施工挂篮,作为钢梁接缝施工平台,然后用以下方法调整钢箱梁竖向、顺桥向、横桥向位置及扭角。

①利用吊机调整钢箱梁标高至两侧钢主梁均比设计标高高约 3 cm。

②在钢箱梁底板安装导向钢板。

③在钢主梁顶板及底板安装顺桥向对拉葫芦,利用对拉葫芦调整钢箱梁底板、顶板的顺桥向位置,同时挂副吊钩,调整副吊钩及主吊钩位置使钢箱梁拼接端底板放置在导向钢板上;继续调整底板。使钢箱梁顶板、底板拼接缝宽度约至 10 mm,使钢箱梁拼接缝位置顶板、底板竖向匹配,拼接缝间用直径为 10 mm 的圆钢限位。

④钢箱梁顺桥向就位后,在拼接缝位置两侧钢主梁底板及顶板安装斜向对拉拉杆,通过斜向对拉拉杆调整钢箱梁横桥向位置,使钢箱梁拼接缝位置腹板横桥向匹配,然后拉紧上下对拉拉杆。

⑤按施工控制小组提供的梁段精确匹配高程,复测钢箱梁悬臂端标高及平面位置,如需调整,通过精调顶板、底板上顺桥向及横桥向(斜向)对拉拉杆使梁段精确定位。前后梁段高程误差控制在 ± 5 mm 之间。

(4) 高强螺栓施工。

4 尾梁段钢梁安装

尾梁段钢梁采用浮吊在支架上安装。由于尾梁段两侧钢主梁间以混凝土横梁的形式连接,如边跨合拢后施工混凝土横梁,受边跨钢梁温差变形的影响,混凝土横梁的质量很难保证。为了不影响主桥钢梁的施工进度及保证混凝土横梁的施工质量,尾梁段先行施工。尾梁段安装时向边跨方向预偏 10 cm,以便边跨 12 号梁段顺利起吊就位。

4.1 尾梁段支架的结构形式

尾梁段钢桁梁托架采用钢托架形式,钢托架锚固在盖梁上,共有 8 片,左右对称各 4 片布置在钢桁梁的两侧钢主梁下。采用 H60 型钢与 2[36a 槽钢加工而成。在支架上设有尾梁段的移位调整系统,以对整体吊装的尾梁段空间位置进行调整。

尾梁段的移位调整系统包括钢箱梁底部滑道、纵横向扭角、竖向扭角移位纠偏装置,标高直接靠滑道标高控制,不再调整。滑道采用四氟滑板,纵向移位调整装置由限位牛腿、千斤顶及移位垫块组成,设置在桁片支架上尾梁段钢主梁两端;横向移位调整装置由反力架及千斤顶组成,设置在锚墩盖梁上;在桁片支架上钢主梁两侧安装可调节支撑螺杆,通过调节支撑螺杆进行纠正尾梁段钢箱梁的竖向扭角。此套移位调整系统在边跨合拢时也需使用。尾梁段支架布置见图 6 所示。

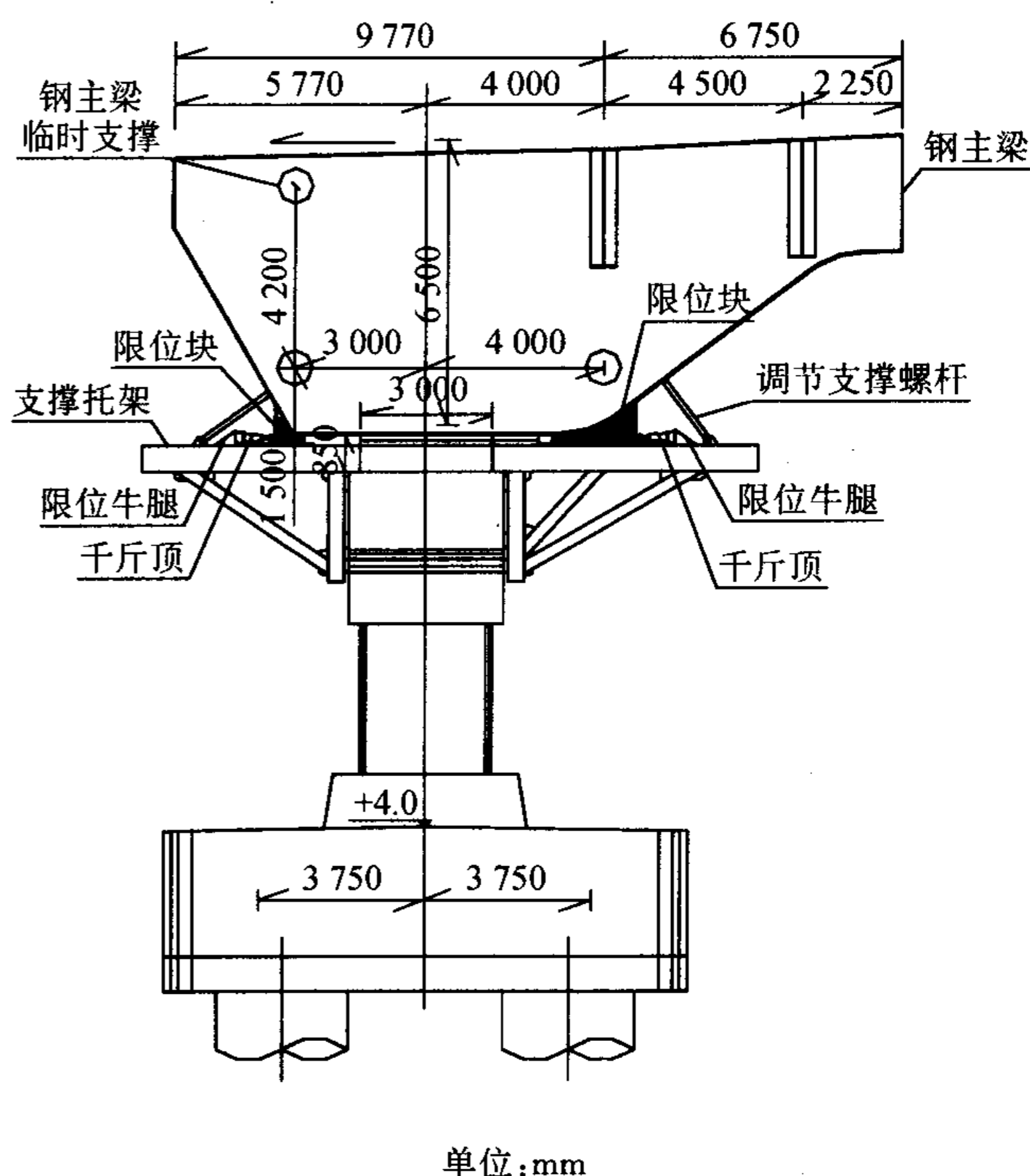


图 6 尾梁段支架布置示意

4.2 尾梁段加固

由于尾梁段在混凝土横梁未施工前仅靠前端的两根钢横梁连接,整体刚度较小,为防止钢主梁吊装时变形,在尾梁段后端钢主梁间设置 3 道临时钢管支撑,钢管支撑端部与钢主梁焊接。同时为保证尾梁段安装后重心位于盖梁顶部钢托架上,临时支撑钢管两端各 10 m 范围内封闭后加水作配重用,以调整尾梁段重心。

4.3 尾梁段安装

尾梁段采用 500 t 浮吊整体吊装,尾梁段平面位置及扭角通过支架及盖梁顶部钢主梁两侧横桥向、顺桥向的移位装置调整;竖向位置及扭角靠支架顶标高控制,支架顶标高按设计梁底标高设计,同时尾梁段钢主梁两侧可调节支承,当尾梁段顺桥向出现竖向扭角时,用支架两侧的可调支承调整两侧标高,纠正扭角(见图 6)。尾梁段位置调整后,移位调整系统暂不拆除,边跨合拢时使用。尾梁段位置调整后进行可靠的限位支护,固定牢靠。

尾梁段安装到位后,进行混凝土横梁及过渡孔现浇箱梁的施工。端横梁施工前应将盖梁上永久支座安装好,永久支座安装应考虑以后的预偏量复位措施,并在合拢前设置临时支座。

5 边跨合拢段施工

边跨合拢在过渡孔现浇箱梁施工结束后进行,采取强制合拢方案。

5.1 合拢前的准备工作

(1)合拢温度的确定:在施工过程中,对温度变形进行监测,特别是对将接近合拢段的边跨梁段和温度变形做重点测量,复核环境温度对温度变形的影响关系。并结合历年气温变化情况及预计气温的变化趋势,预计合拢时间,选择一个合理的合拢温度。合拢温度的范围一般在确定尾梁段预偏量时已考虑。

(2)合拢段梁长度的确定:由于采取了预偏措施,选取了合理的合拢温度,合拢段梁长度按设计长度采用,不再修正。

(3)在施工过程中,提前合拢段 2~3 个梁段观测已安装梁段端部与尾梁段间的距离,确定在预计合拢温度下,消除预偏。如误差较大,则应采取措施。

(4)观测合拢段两侧钢梁的高程、轴线、扭角,预先设定纠偏措施。

(5)尾梁段移位时,必须保证尾梁段及端横梁与墩顶盖梁脱离,过渡孔箱梁与支架脱离。因此在合拢前必须将所有影响尾梁段前移的支架拆除。

5.2 边跨合拢施工

(1)起吊过程中合拢段钢梁纵坡调整。

为保证合拢段能顺利起吊至安装位置,合拢段钢梁在吊离驳船前在边跨方向两侧的钢主梁顶各设一个加载水箱,通过水量控制梁段纵坡,保证合拢段吊离驳船后,纵坡与边跨设计纵坡一致。

(2)合拢段就位、调整。

为保证合拢段钢梁能顺利起吊至安装位置,合拢段就位选择在凌晨进行。尾梁段纵移前调整横桥向、竖向位置及扭角,使其与前后接口匹配。合拢段调整方法如下。

①标高调整:LB12 段钢箱梁端部标高通过调整斜拉索索力来进行。局部微调采用加配重和悬臂吊机进行。

②横桥向平面位置及扭角调整:在合拢段和 LB11 段左右幅钢主梁内侧挂斜向对拉葫芦,通过对拉葫芦调整两段钢箱梁间的平面位置及扭角。

(3)尾梁段纵桥向位置调整。

尾梁段及过渡孔箱梁纵移以纵向牵引为主,并以尾梁段底部及过渡孔梁端顶推为备用的辅助前移方案。

①主牵引方案。

纵移装置设置在尾梁段和合拢段钢主梁底板底面,左右幅各设置 2 套,每套牵引装置采用 12 根预应力钢绞线,牵引动力采用 250 t 液压千斤顶。通过牵引装置实现尾梁段纵移。布置形式见图 7 所示。

②辅助前移方案。

墩顶上尾梁段纵移:在尾梁段安装支架上设有尾梁纵移装置,一片尾梁共设有 4 处纵移装置,采用 4 台 150 t 千斤顶作为顶推动力。

边墩处过渡孔箱梁顶推:引桥箱梁端部为实心段混凝土,在每片箱梁端部腹板对应位置设置 2 台 150 t 千斤顶,顶推过渡孔箱梁,以实现过渡孔箱梁前移。

(4)合拢段与尾梁段连接。

①连接板与尾梁段的连接。

先将合拢接缝连接板在尾梁段一侧安装好,钉好冲钉,初拧高强螺栓。

②连接板与合拢段连接。

在尾梁段纵向移动到位后,调整合拢段螺栓孔与连接板孔眼匹配后以最快速度钉好冲钉,所有冲钉要求在 2 h 内施工完毕,作业队应根据强制性条件安排足够作业人员,然后进行高强螺栓施工。

6 中跨合拢段施工

中跨合拢段采取低温自然合拢方案,自然合拢的关键是确定合适的合拢温度和准确的合拢段长度,并在时机成熟时迅速实现合拢连接,在温度再次出现急剧变化前解除完临时固结装置。

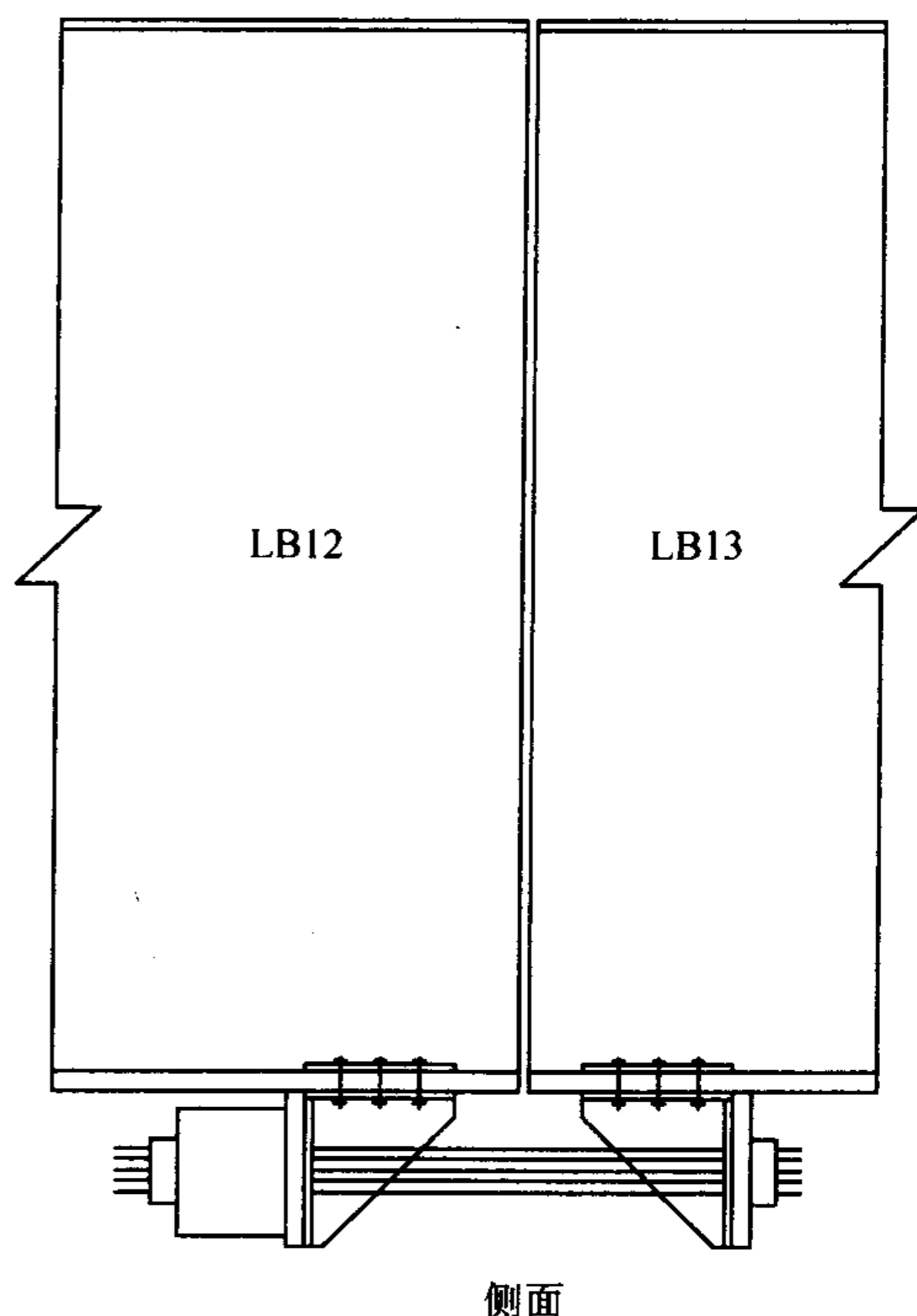
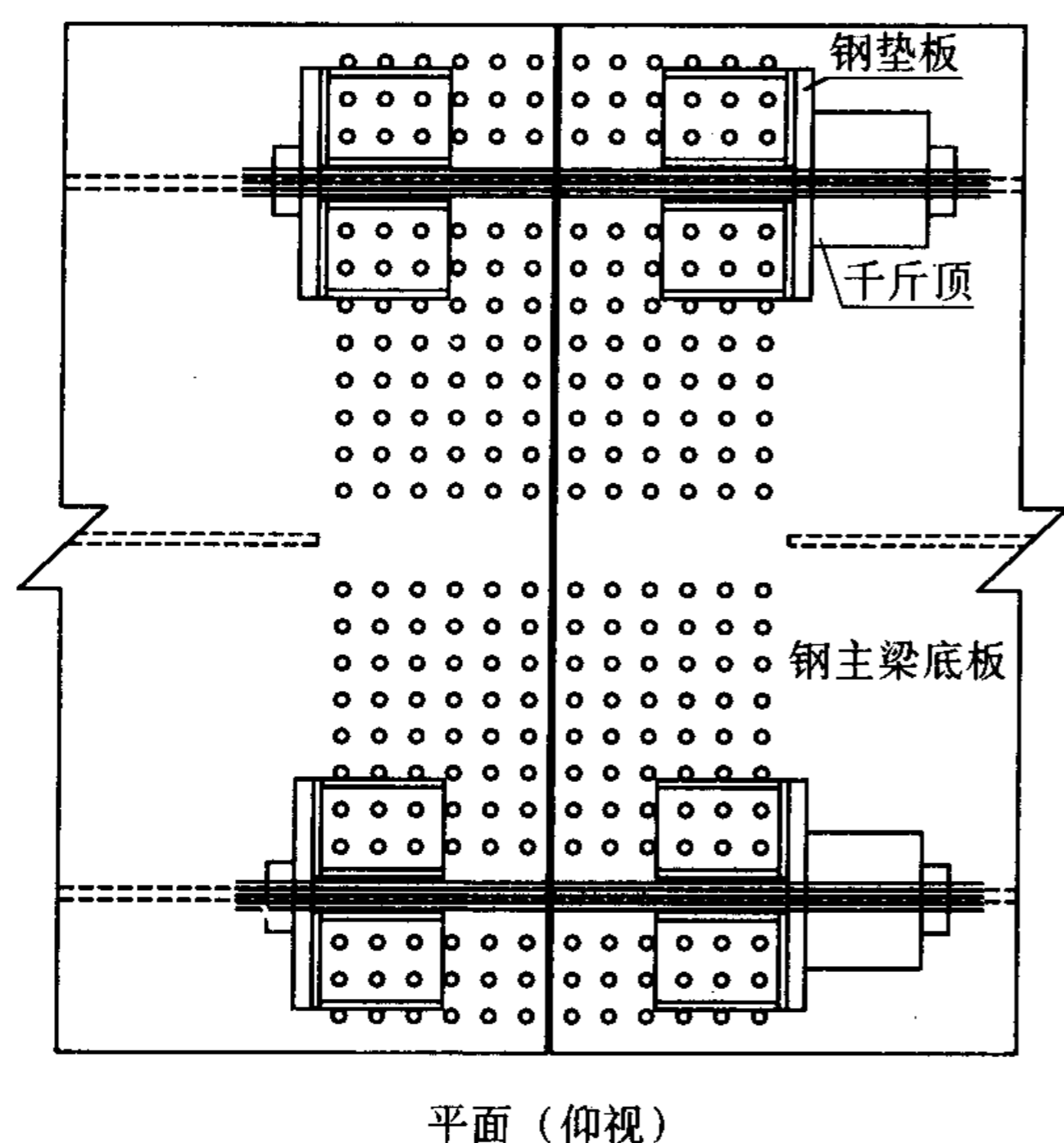


图7 纵移装置示意

(1) 合拢段温度确定。

在施工过程中,对温度变形进行监测,特别是对将接近合拢时的边跨梁段和温度变形要重点测量,复核环境温度对温度变形的影响关系,并结合历年气温变化情况及预计气温变化趋势,预计合拢时间,选择一个合理的合拢温度。如果两个时间一致时,则可按预期目标顺利合拢。如果所选温度高于或低于合拢期间温度时,则均须等候合适温度合拢。

(2) 合拢段长度的确定。

① 提前2个梁段即在LZ15钢梁安装好并且将其标高、轴线调整标高后,采用仪器及钢尺测量相结合的方法,精确测量2个LZ15钢梁间的距离。

② 合拢段最终长度与现场温度条件、梁长拼装误差、横桥向扭转及竖向标高等有关,在现场实测后计算确定。修正合拢段长度 $L_i = a_i - b_i - c_i$, a_i 为理论合拢段长度; b_i 为厂内实际加工长度,应在与合拢温度相同的条件下进行测量确定; c_i 为温度修正、压缩量及标高修正。

③ 厂内梁长修正。

厂内加工时,合拢段(LZ17)按照设计梁长预留+20 cm制作,待提供精确长度后再进行修正,修正后与两侧LZ16梁段预拼装。修正端及连接板螺栓孔的孔温度应与拟定的合拢温度大致相同。即在预定的合拢温度下(17℃)。

(4) 合拢段钢梁吊装就位。

① 由于中跨合拢段空间呈“工”字形布置,钢主梁间仅有一道钢横梁,整体刚度较小,为防止吊装过程中变形过大,中跨合拢段采用钢管加固,在钢主梁外侧加劲板位置与钢横梁平行布置。

② 合拢段的吊装就位可适时进行,采用4台悬臂吊机同步起吊安装。

③ 合拢段吊装就位后,先将颗珠山侧接缝先行匹配、安装。

(5) 梁段匹配调整。

颗珠山侧LZ16号梁段及合拢段LZ17号梁段安装后,对洋山侧合拢段接缝进行精确匹配调整。

① 竖向纠偏。

洋山侧LZ16号梁段和合拢段LZ17钢梁端部标高通过调整斜拉索索力来实现。局部微调采用水箱配重和通过悬臂吊机加载来实施。

② 横向纠偏。

LZ15梁段安装后,轴线相对偏差控制在10 mm以内,LZ16段安装后轴线相对偏差控制在5 mm以内,超出要求均应进行轴线纠偏。

粗调:采用在梁底LZ12~LZ14梁段或LZ13~LZ15梁段之间设置对拉装置进行轴线调整。

微调:采用在合拢段LZ17和LZ16号梁段顶面的钢横梁上设置对拉装置,或在两段梁左右幅钢主

梁上设置斜向对拉葫芦来调整LZ16和LZ17两段钢梁横桥向的匹配。

③调整扭转。

大扭转通过索力调整,小扭转采用增加配重(水箱)和4台悬臂吊机施加不平衡荷载的办法进行调整。

(6)合拢。

洋山侧LZ16与LZ17梁段精确匹配后,安装LZ16梁段腹板连接板。等候温度,待LZ17梁段钢主梁腹板螺栓孔眼与连接板螺栓孔眼匹配时,立即上腹板冲钉直至螺栓安装50%,然后再上顶板及底板冲钉直至安装剩余的50%螺栓。依次进行高强螺栓施工,实现全桥合拢。

如果顶板或底板局部不匹配,则采取梁顶或梁底强制合拢或纠偏进行微调直至满足螺栓孔眼匹配为止。

(7)解除临时固结。

中跨合拢段一旦冲钉安装好,立即解除0号块塔梁临时固结装置。竖向约束、纵桥向限位的解除两主墩同步同时进行,临时固结的拆除应该在2h之内完成。

7 高强螺栓施工

7.1 高强螺栓施工准备工作

(1)高强螺栓的出厂及进场均按规范进行检查。高强螺栓出厂扭矩系数应保证在0.12~0.14之间。

(2)对栓接面进行检查。

(3)随梁试板的摩擦面试验,摩擦系数满足大于0.45的设计要求。

(4)试验确定扭矩系数 K 和施工扭矩。

(5)标定电动扳手及检查扳手。

7.2 高强度螺栓施拧

(1)安装冲钉。

安装时先打定位冲钉,并按冲钉、螺栓各50%按梅花形排列,开始安装高强螺栓前应用5%或不少于4个精制螺栓将板缝夹紧。

(2)高强螺栓安装。

①高强螺栓严禁强行穿入,以防止损伤螺纹,影响预紧力;

②安装高强螺栓时,应注意垫圈及螺母的正反面;

③必须在高强螺栓初拧完毕后,方能对冲钉进行逐个替换;

④如高强螺栓穿不过,应对该螺栓孔进行扩孔,扩孔孔径不得大于设计孔径2mm。

(3)高强螺栓的初拧和终拧。

①初拧力矩定为终拧施工力矩的50%,初拧完毕2h后进行终拧;

②高强螺栓的拧紧顺序,应从钉群中心向板边缘进行;

③钢箱梁螺栓施拧顺序为先腹板,再底板、顶板;

④初拧和终拧应在同一工作日内完成,施拧时用卡死扳手卡住螺栓头,防止螺栓转动;

⑤高强螺栓初拧完毕后,用黄色油漆在螺栓、螺母、垫片及连接板上进行画线标识;

⑥初拧、终拧完毕后,用不同的标记在螺栓上标识,以利于检查处理;

⑦电动扳手班前、班后均应进行标定。

(4)质量检查。

①采用紧扣法对每个节点高强度螺栓连接副总数的5%进行终拧扭矩检查,测取的扭矩应在 $0.9T_c \sim 1.1T_c$ 范围内方为合格;

②每个节点检查的螺栓,其不合格者不得超过节点抽查总数的20%,如超过此值,则应继续抽查直至累计总数80%的合格率为止,然后对欠拧者补拧,超过者更换高强螺栓后重新按初拧、终拧工序施拧;

③高强螺栓的长度应符合螺栓终拧后出丝不少于一扣,不大于4扣的要求;

④高强度螺栓连接副的终拧扭矩检查应在终拧4h以后进行,24h之内完成;

⑤检查用的扭矩扳手使用前必须进行标定,其扭矩误差不得大于施工扭矩值的 $\pm 3\%$;

(6)高强螺栓连接副终拧检查合格后,按设计要求进行腻缝封闭和涂装。

8 结语

东海大桥受恶劣的自然条件影响,有效施工作业天数少,施工组织难度很大。颍珠山大桥钢梁安装通过施工方案的优化、现场的合理组织,取得了良好的施工效果。特别是自重达6000t的尾梁段纵移技术的采用,优化了施工工序,节约了施工工期;另外悬臂吊机的设计、中跨LZ17钢梁段的成功合拢、海上高强螺栓的施工等均为海上斜拉桥钢梁的安装提供了宝贵的施工经验。