

大吨位钢结构模块整体提升及滑移安装 关键设计和施工技术

窦勇芝 向宝城 韦福堂 孙毅峰 刘文 邓海毅

(柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005)

摘要:该文介绍利用同步液压控制系统技术实现大吨位钢结构模块整体提升、滑移安装工艺,并重点阐述了该工艺的关键设计方法、施工要点,总结了该安装工艺存在需改进和注意的方面,为同类大吨位整体安装工程提供了可参鉴的实例。

关键词:大吨位钢结构 整体提升 滑移

1 工程概况

MRU模块为荔湾3-1项目组块上的一部分,项目位于青岛经济开发区海洋石油工程(青岛)有限公司场地内。MRU(乙二醇再生)模块就在CEP的顶层甲板上(高度是37.74m),MRU模块长21.6m×宽度19.9m×高23m,总重约850t。MRU模块整体预制加工,通过驳船将MRU输送到青岛施工现场码头。采用SPMT小车将其从驳船上卸载后运送到荔湾3-1项目组块提升施工现场。安装采用液压同步提升和滑移方式就位(如图1、2所示)。MRU模块在荔湾3-1项目组块上的位置(如图3所示)。

2 安装方案概述

本工程采用塔架与组块牛腿相配合起吊的方法提升MRU模块。塔架为2副平面尺寸2.4×2.4m塔架(每副能提升1500t),2副塔架之间使用4排圆管横联支撑,塔架外侧使用4根桁架支撑。2副塔架分别竖立在MRU模块的外侧,MRU模块侧的吊点选用EL+41m层甲板上组块平台上位于轴线2.2轴、3轴线西侧3m轴线上的2根立柱(3轴线西侧3m处增加立柱),分别在立柱端头位置焊接接长牛腿,牛腿上放置液压千斤顶。利用顶升工艺将MRU模块就位在托梁上,托梁内侧吊点与牛腿上的千斤顶联接,托梁外侧吊点与塔架上的千斤顶联接。同步驱动千斤顶,提升托梁至与EL+41m层平面H型钢齐平,使用联接板铰链联接牛腿与托梁后,拆除牛腿上的千斤顶,再使用千斤顶拖拉模块至安装位置顶落放下,完成MRU模块的安装。

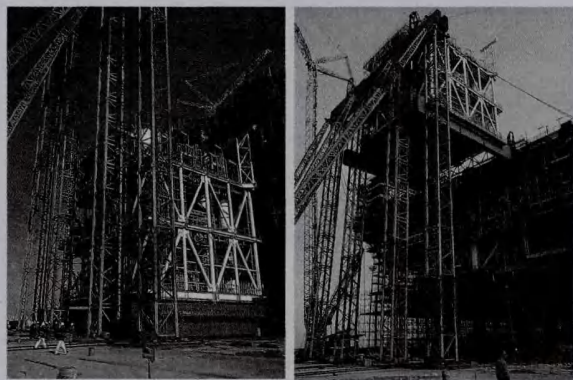


图1 MRU模块提升前
现场照片

图2 MRU模块提升就位
现场照片

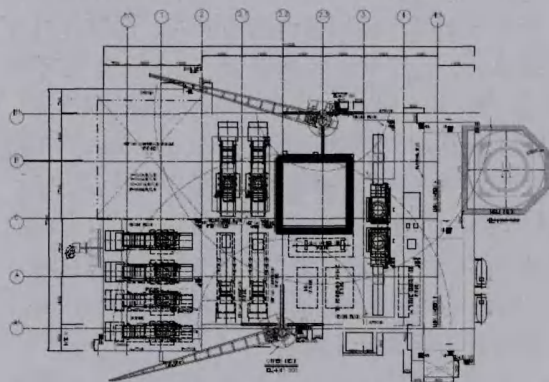


图3 MRU模块就位平面布置图
(注意:黑色粗框位置为MRU就位位置)

3 关键设计技术

3.1 组块侧牛腿与托梁联接设计

组块侧与托梁联接采用新增设牛腿,并设置联接板和承重销联接(如图4、5所示)。

新增设牛腿为箱形截面,高1.2m。上翼缘板宽0.9m,厚0.038m;腹板高1.128m,厚0.028m;

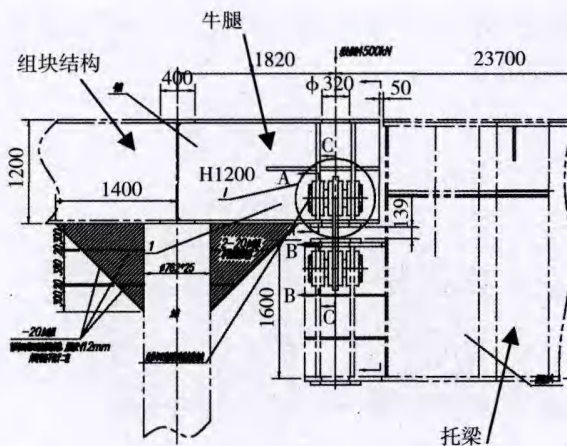
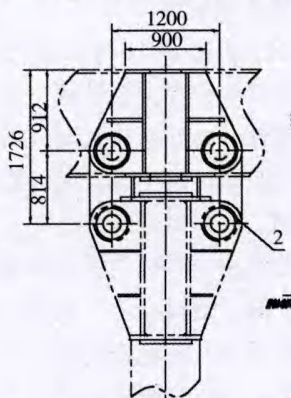


图4 组块牛腿与托梁联接立面图(单位: mm)

图5 组块牛腿与托梁联接侧面图
(单位: mm)

下翼缘板宽1.0m,厚0.038m。箱型截面腹板两侧各设置2道承重耳板,承重耳板厚0.045m,耳板孔两侧均设置0.045m厚环形加强板。单个牛腿悬臂长度为1.820m,按450t设计验算。计算如下:

钢材采用船用结构钢D36,屈服强度 $f_y = 355\text{MPa}$,设计强度 $f_d = 355\text{MPa}$ 。

考虑荷载分项系数1.2,动力荷载系数1.05,即单个牛腿承担的提升荷载设计值为 $4500 \times 1.2 \times 1.05 = 5670\text{kN}$ 。计算时,偏安全不考虑加劲板作用。

牛腿受力点与支撑工字钢中心线的距离为1.820m,牛腿根部在提升荷载作用下产生的最大弯矩设计值 $M_d = 5670 \times 1.82\text{m} = 10319.4\text{ kN} \cdot \text{m}$,牛腿根部的最大剪力 $V_d = 5670\text{ kN}$ 。根据上图,牛腿截面的最小惯性矩 $I = 30971352459.85\text{ mm}^4$,截面的最小抗弯模量 $W = 50250711.14\text{ mm}^3$ 。

该截面的最大弯曲应力

$$\sigma = \frac{W}{W} = \frac{10319.4 \times 10^6}{50250711.14} = 205.4\text{MPa}, \text{ 小于钢材}$$

的强度设计值 $f_d = 265\text{MPa}$,满足规范要求^[1]。

根据上图,牛腿截面的抗剪面积 $A = 1124 \times 28 \times 2 = 62944\text{ mm}^2$,截面的最大剪力 $V_d = 5670\text{ kN}$,最大剪应力

$$\tau = 1.5 \times \frac{V_d}{A} = 1.5 \times \frac{5670\text{ kN} \times 1000}{62944\text{ mm}^2} = 135.1\text{MPa},$$

小于钢材的抗剪强度 $f_v = 265\text{MPa} \div \sqrt{3} = 153\text{MPa}$,满足规范要求^[1]。

3.2 门式提升塔架设计

门式提升塔架的结构体系由2副门式支架和一批张拉于其顶上的缆风绳组成(如图6、7所示)。提升塔架总高50m,采用节段拼装,柱身为四边形格构式缀条柱,柱脚中心距 $2.4\text{m} \times 2.4\text{m}$,柱肢截面为 $300 \times 300 \times 12\text{mm}$ 方钢管,4个柱肢各自与地面铰接,通过设置“7”字形板对柱脚进行限位;塔架基础为路基箱承重,满足场地承载力要求;横梁为箱形截面,高2.4m,梁与柱联接方式为铰接;提升门架后方设置刚性斜支撑,斜支撑为四边形格构柱,柱脚中心距 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$,通过设置联接板和“7”字形板固定在压重钢板上,压重按50t设置;2副塔架之间使用4排圆管横联支撑,塔架前、后方及两侧各设置缆风,缆风基础采用约472t压重块。单幅塔架按提升1500t设计,由于塔架柱身高度较高,截面小,柔度大,且承受较大的轴向压力,具有明显的P- Δ 效应,同时缆风绳本身也具有很强的几何非线性效应,对柱身和缆风绳进行整体的非线性有限元分析(详细计算在此不作赘述)。

图6 门式提升塔架
立面现场照片图7 门式提升塔架
侧面现场照片

3.3 托梁设计

提升托梁采用节段拼装(如图8所示),设置法兰螺栓联接,划分为标准段、提升牛腿联接段,计算跨径为23.7m。标准段为箱形截面,高度为3m,上、下翼缘板宽1.2m,厚0.046m,腹板厚0.02m。牛腿端高度为1.6m,宽度为0.8m。计

算工况分别为提升和滑移过程中不利荷载布置位置(如图9、10所示)。计算验算截面分别为跨中、支座处、联接处关键截面。提升模块共6个供滑移用支撑腿,一侧3个,分别按8.5m间距作用在一道提升托梁上,支撑腿反力取最大值1713kN,考虑起升启动冲击系数1.1,支撑腿反力设计值P取为1885kN。



图8 提升托梁现场照片

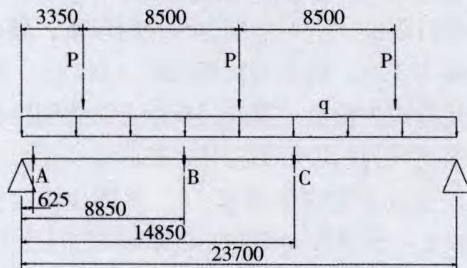


图9 提升工况计算简图(单位: mm)

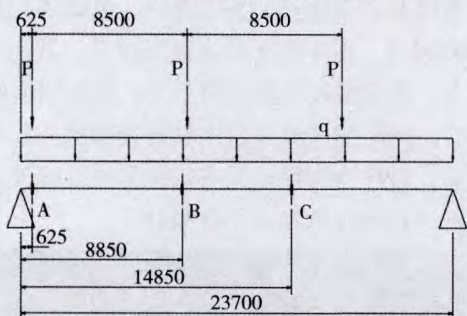


图10 滑移不利工况计算简图(单位: mm)

3.4 风缆设计

风缆设计主要包括提升塔架风缆和提升托梁风缆(如图11所示)。提升塔架后方除设置刚性斜撑,同时设置4根缆风绳;组块侧塔架正前方,设置2根缆风绳固定在组块上;提升门架各侧面约40m或50m处设置缆风基础,便于从侧面拉设缆风绳;另外在2副提升门架间拉设横向风撑。提升托梁风缆主要从侧面各拉设2根风缆,分别固定在组块和缆风基础上。由于提升施工周期较短,不超过5天,故计算的风荷载取值按照

相关国家规范^[2]吊装作业不得超过6级风的要求取值计算。

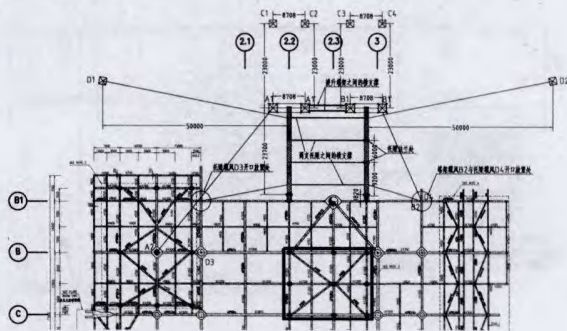


图11 风缆平面布置示意图(单位: mm)

3.5 组块滑道主梁加固设计

待提升工况完毕,MRU模块提升至设计高度,组块牛腿联接端完成力系转换,由承力钢绞线转换至承重销处。开始滑移工况,由计算简图12可知,组块牛腿联接端为悬臂端,根部为主要负弯矩集中区域,在MRU模块3处支撑腿移动荷载作用下,随着移动至牛腿与托梁联接端,负弯矩出现最大值,随后逐渐变小。故需验算组块与牛腿联接端抗弯强度,经验算该联接端存在3m区域负弯矩过渡区,均抗弯强度不满足,需通过对局部上、下翼缘板加宽改造,且将原H型钢截面改造成三腹板的箱型截面(如图13所示),增强滑道主梁该区段截面的整体抗弯强度和刚度。

3.6 滑道及滑块设计

导向滑道由40a槽钢、3mm厚不锈钢板构成(如图14、15所示),导向滑道两侧间距0.5m焊接限位钢挡块,不锈钢板通过间隔0.5m点焊方式固定在滑道上,并涂抹专用润滑油。滑块采用专用0.02m厚高分子MGE板,摩擦系数为0.03~0.06,分别在滑道上6个MRU支撑腿下方设置1个滑块。滑块选型计算(滑块宽取滑道内槽宽320mm),滑块受力按8MPa容许值控制计算:

滑块尺寸采用 $320 \times 600 \times 20$ mm,受压正应力为 $850 \times 10000 / 6 / 600 / 320 = 7.55$ MPa,满足要求。

3.7 拖拉反力架及拉锚器设计

拖拉千斤顶反力架设置在组块滑道梁与其余主梁相联接的重要节点处(如图16所示),拖拉反力架按600kN设计,以贴角焊接方式固定在滑道梁方向的重要节点处。MRU模块侧固定端拉锚器以坡

口熔透焊接方式与支撑腿联接, 均在各滑道方向第1个支撑腿处设置1个拉锚器(如图17所示)。

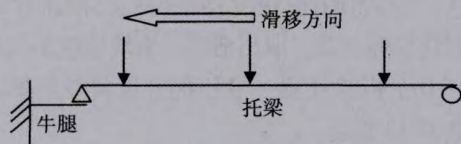


图12 滑移工况计算简图

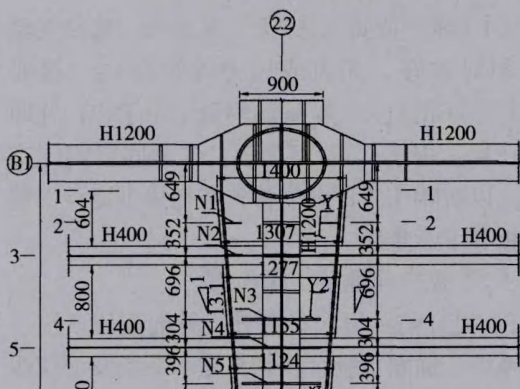


图13 组块2.2轴滑道主梁局部加固示意图

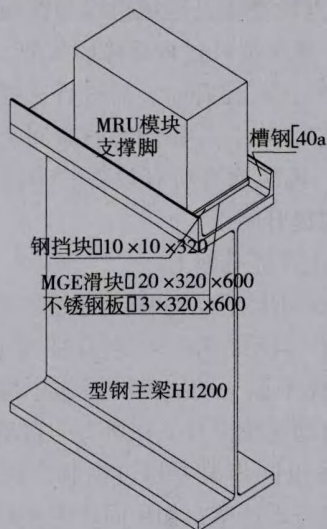


图14 导向滑道示意图



图15 导向滑道现场照片

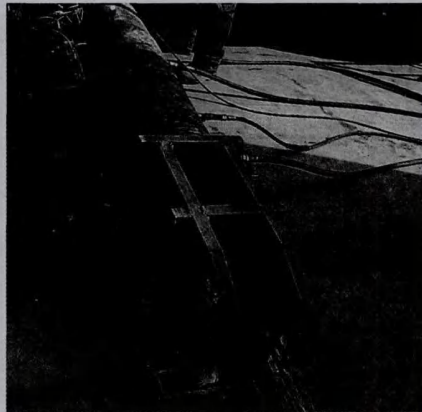


图16 千斤顶侧张拉端拖拉反力架



图17 MRU模块侧固定端拉锚器

3.8 提升、滑移、顶落各工况千斤顶及钢绞线配置

3.8.1 提升工况千斤顶及钢绞线配置

提升工况采用4台LSD5000千斤顶, 提升能力储备系数为 $4 \times 500/1050 = 1.91$ 。相配套LSDB105A液压泵站2台, LSDKC-16控制系统(含传感器)1套。提升千斤顶采用直径 $\phi^{\circ}17.8\text{mm}$ 的钢绞线, 每台配置22根钢绞线, 其安全系数为 $4 \times 22 \times 35/1050 = 2.93$ 。

3.8.2 顶推滑移工况千斤顶及钢绞线配置

顶推滑移工况采用2台100吨级连续顶推千斤顶, MRU模块重量为850t, 顶推力按10%计算85t, 顶推设备能力储备为 $200/85=2.35$ 。相配套ZLDB自动连续顶推泵站1台, ZLDC控制系统1套。牵引拉索采用直径 $\phi^{\circ}15.24\text{mm}$, 每台配置6根钢绞线, 其安全系数为 $2 \times 6 \times 26/85 = 3.6$ 。

3.8.3 顶落工况千斤顶配置

顶落工况采用16台100吨级千斤顶(如图18所示), 在MRU模块8个支撑腿各布置2台千斤顶, 起顶千斤顶储备能力为 $100 \times 16/850 = 1.88$ 。实行同步顶、落控制。

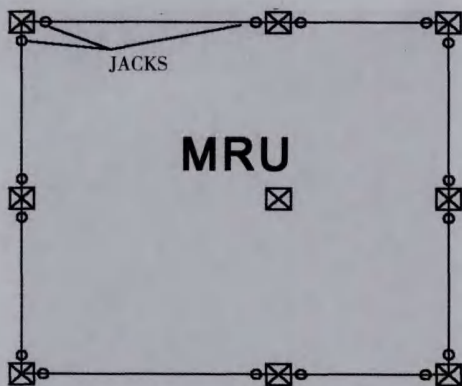


图18 顶落千斤顶平面布置示意图

4 关键施工技术

4.1 施工步骤

(1) 施工场地平整, 测量放样塔架基础、提升托梁、风缆基础等平面布置位置, 对塔架基础的地基进行现场承载力检验, 保证满足场地承载力要求, 就位塔架路基箱基础; 另外, 布置托梁下的钢垫梁, 用履带吊就位提升托梁, 在托梁上布置滑道及滑块, 同时对托梁侧面增设斜撑加固, 待MRU运输至施工现场。

(2) 用驳船将850t MRU模块运输至青岛现场码头。采用SPMT专用运输小车将模块从驳船上卸载后, 运送到荔湾3-1项目组块提升施工现场。

(3) SPMT专用运输小车将MRU模块放置在托梁上并与托梁进行临时固结。

(4) 安装提升塔架及缆风、钢绞线、液压提升设备调试。同时, 焊接就位拉锚器、顶推滑移反力架、导向滑道及组块牛腿(注意: 牛腿安装前需试拼装), 并对组块结构滑道梁进行局部补强。

(5) 对塔架基础、塔顶偏移量、组块结构牛腿布置观测点, 并测量记录。待MRU模块正式提升。

(6) MRU模块试提空并静置24小时, 组块结构及提升系统(锚固结构、塔架、揽风等)检查。

(7) 继续提升, 待MRU模块提升到位, 托梁与组块牛腿进行临时销接固定, 完成提升系统与承重销的力系转换, 并拉设托梁侧面缆风固定, 拆除组块上的提升设备, 清除滑移通道上的障碍。补强封闭提升用孔洞, 联接导向滑道。

(8) 滑移系统安装调试, 安装顶推用锚

板、钢绞线并与MRU模块支撑腿进行联接, 采用ZLD连续顶推系统进行滑移。

(9) 待MRU模块滑移就位后, 用千斤顶将MRU模块整体顶升, 取出滑道、滑块后就位固定。

(10) 拆除托梁、液压提升设备及塔架, 完成MRU模块安装。

4.2 提升施工要点

(1) 密切收集未来7天气预报, 选择气象条件相对较好, 无风或风力等级在1~2级时段, 并作好相关关键位置的测量记录工作; 并通过在托梁上焊接“7”字型板, 卡紧固定MRU支撑腿, 以防MRU支撑腿滑移; 在托梁牛腿预安装联接板和下承重销。

(2) 提升前准备工作检查

1) 提升前要再次对提升装置的液压系统、电路系统、锚固系统、控制与显示系统及钢绞线进行全面细致检查, 并记录登记。

2) 重点检查提升区域边缘与组块结构间的安全距离, 确保提升过程无障碍实施。

(3) 在正式提升前, 需进行试提升, 逐级加载试提空0.05m, 并用倒链收紧固定托梁, 静置24小时。再次检查所有设备、吊索具及地锚等, 待正式提升施工。

(4) 正式提升施工

1) 启动同步液压控制提升系统。主控台进入主菜单启动“自动提升”功能模块, 系统启动。

2) 整体平衡自动提升。操作主控台的自动按钮进行自动连续提升。在所有的自动提升中, 如果各顶吊点同步误差超过控制系统的设定误差, 系统将自动调整; 如果同步误差超过控制系统设定的最大误差, 系统将自动进入紧急停机, 等待调整; 调整完毕, 进入准提升状态, 再次启动自动提升。

3) 提升过程中, 观察提升过程中同步控制误差对构件的影响; 注意记录提升过程中的油压最大、最小值, 并时刻监测托梁状态偏移是否在规定范围内, 在误差出现时应及时进行修正。

4) 考虑控制系统就位下落工况风险较大, 提升位置应较就位位置稍低, 就位时再作进一步精确调整。

5) 提升过程应随时监控负荷、结构状态、

及提升通道是否畅通。

(5) 提升就位

1) 通过提升千斤顶微调提升位置, 保证预安装在提升牛腿上的联接板与组块牛腿耳板孔中心对中, 插入上承重销, 安装卡板限位固定。

2) 逐级将提升顶的荷载卸载至联接板和承重销上, 完成力系转换。

3) 拆除提升钢绞线及提升顶, 准备滑移施工。

4.3 滑移施工要点

(1) 滑移前准备工作

1) 收紧托梁两侧的4根缆风绳, 防止MRU模块滑移过程中托梁横向晃动。

2) 先在组块牛腿与提升牛腿间的间隙间铺设过渡垫板, 再铺设联接导向滑道;

3) 在组块牛腿上的穿钢绞线孔洞(孔径 ϕ 310mm)处, 补焊圆形钢板, 保证滑道平面的平整性。

4) 解除原固定MRU支撑腿的“7”字型卡板。

5) 安装锚板、穿钢绞线、顶推顶及调试同步液压顶推滑移系统。

6) 在每条导向滑道侧面, 标示刻度值, 便于在滑移过程中检查实施同步性。

7) 在滑道不锈钢板上涂抹硅脂油润滑, 待正式滑移施工。

(2) 正式滑移施工

1) 在主控台启动同步液压顶推滑移系统, 逐级加载至MRU模块开始滑动。

2) 利用同步控制系统误差调整原理, 保证两侧滑道上MRU支撑腿滑移的同步性, 并通过滑道侧面的标示刻度值复核检查。

3) 顶推滑移过程应随时监控负荷、结构状态、及滑移通道是否畅通。

(3) 待滑移就位, 卸载, 拆除钢绞线和顶推顶。待顶落施工。

4.4 顶落就位施工要点

(1) 截断MRU支撑腿周边的滑道。

(2) 布置顶升顶位置, 并在顶升顶布置位置上、下平面均布置钢垫板, 增大受载面积, 保证顶升顶一个行程内的回落高度大于MRU支撑腿

的落梁高度。

(3) 调试同步液压控制顶落系统, 待正式顶落施工。

(4) 待逐级同步控制16台顶升顶, 将MRU支撑腿整体顶升2~5mm时停止, 停放5~10min进行观察, 无任何异常后方可继续整体顶升, 控制顶升速度在1mm/min左右, 同时观测起顶高度和千斤顶的起顶力, 施行双控。同时派专人密切注意是否有异常情况, 一旦发现立即停止施工。在顶升过程中及时加垫千斤顶保护环作为临时支撑点, 确保顶升整体安全。当顶升就位后, 锁住千斤顶, 将截断滑道、滑块取出, 并清洁支撑腿支撑平面, 整体同步回落MRU模块至就位。

5 结论

本工程通过同步液压控制系统技术将大吨位模块(长21.6m×宽度19.9m×高23m, 总重850吨)整体提升约38m, 滑移35m至顶落就位, 共计5个施工日历天。其设计、施工技术较复杂, 值得同类工程参鉴。在实施过程中, 仍存在诸多不足和需注意的地方:

(1) 大吨位模块整体提升、滑移工程为特种工程, 组块结构设计单位在设计计算过程中, 未能全面仿真安装施工过程, 导致存在原主结构个别构件在最不利施工工况中承载力不足或应力过大情况, 需加强原主结构施工仿真整体和细部模型分析, 并采取相应的加固补强措施。

(2) 提升托梁导向滑道面在设计时需考虑比组块侧滑道面垫高些, 保证提升托梁与组块牛腿销接后, 能够补偿组块牛腿的下挠量, 保证提升牛腿与组块牛腿间隙两侧能平顺过渡, 防止出现间隙处突变高差带来顶推滑移的困难。

(3) 在滑移过程中, 要保证滑移轨道面的平整度, 若滑移轨道变形较大, 造成1侧3个MRU支撑腿中1个支撑腿下脱空, 滑块易滑脱出支撑腿受压范围, 需采取设置“7”字型卡板对滑板起防滑脱限位作用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准. GB50017-2003钢结构设计规范[S].
- [2] 中华人民共和国安全生产行业标准. AQ3021-2008, 吊装作业安全规范[S].