

高速铁路 40m 简支箱梁预制施工工法

中铁二局集团有限公司

陈孟强 王强 潘传伟 林国辉 陈建军

1. 前言

我国高速铁路桥梁预制架设的后张法预应力混凝土简支箱梁以 32m、24m 为主。随着高速铁路建设标准不断提高、规模不断扩大趋势下，建造所面临的地形、地质、环境等条件逐渐复杂，32m 跨度的简支箱梁已经不能满足发展的需要。当简支梁桥的跨度大于 32m 时，通常只能采用原位浇筑的简支梁或者连续梁、连续钢构桥等，经济性指标下降，且质量控制难度大，不能推广应用。

郑济铁路首次采用 40m 箱梁预制架设施工技术，中铁二局积极引进全国 32m 箱梁预制的先进经验，并针对 40m 简支箱梁的结构特点，对现有的施工技术进行总结提升，从标准化梁场建设、箱梁预制工艺及关键设备、静载试验方法和信息化管理等方面进行了创新，形成了高速铁路 40m 简支箱梁预制施工工法，该工法扩大了高速铁路预应力混凝土简支梁桥的适用范围，在一定条件下可提高桥梁的经济性。同时更有助于完善我国具有独立知识产权的高速铁路桥梁建造技术体系，对于我国高速铁路长期发展和实现“走出去”战略具有积极推动作用。

2. 工法特点

2.1 40m 箱梁预制场以 BIM 技术进行预制梁场规划布置，实现梁场内的虚拟漫游，模拟箱梁预制施工工艺；采用“四节一环保”的施工措施，减少对环境的影响，最终形成了标准化梁场绿色施工建设体系。

2.2 引进集成了自动张拉、压浆、静载、喷淋养护和钢筋数控加工等五套自动化设备；首次使用 40m/1000t 级大吨位搬运机和预应力钢拱架静载试验台关键设备，研制了自驱式内模、自动升降钢筋预扎内架和大管道链式卡瓦结构自动穿束、拔管机等四种工装，将以往箱梁预制的单一工序进行系统升级，形成了高速铁路 40m 简支箱梁预制施工体系。

2.3 梁场以铁路梁场综合管理平台 2.0 版的开发应用为引领，实现了自动张拉、压

浆、静载数据、试验室、拌和站、同条件试件养护自动采集、自控喷淋养护等数据上传，促进箱梁预制向智能化迈进，形成了信息化管理体系。

3. 适用范围

适用于高速铁路后张法 40m 混凝土简支箱梁预制。

4. 工艺原理

40m 简支箱梁钢筋采用定尺钢筋和盘螺为主，数控设备加工成型，利用装配式预扎外架绑扎底腹板钢筋，自动升降预扎内架绑扎顶板及翼缘板钢筋，采用钢筋吊架吊装入模。钢筋加工精度可靠，整体绑扎钢筋质量安全可控，效率高。

模型采用装配式模板，分为底模，侧模、内模和端模四部分，采用端模包侧模的方式。内模采用自驱式内模，通过齿轮转动进出钢筋笼和梁体内箱，安全高效，淘汰了龙门吊吊装和卷扬机拖拉的施工方式。

混凝土采用混凝土输送泵运输，布料机入模方式，浇筑按照“水平分层，斜向分段”的方式进行，顶板和腹板采用自动喷淋养护，内箱采用喷雾养护。

预应力采用成品束钢绞线，通过预应力孔道橡胶抽拔台车进行拔管施工，采用成品束钢绞线穿束台车实现钢绞线的穿束，张拉采用自动张拉设备，压浆采用自动压浆设备，实现一键操作，数据上传。

静载试验采用自平衡预应力拱式静载试验架和自动静载加载系统，自重轻，操作方便，能实现一键操作，数据自动采集上传。

5. 施工工艺流程及操作要点

5.1 施工工艺流程

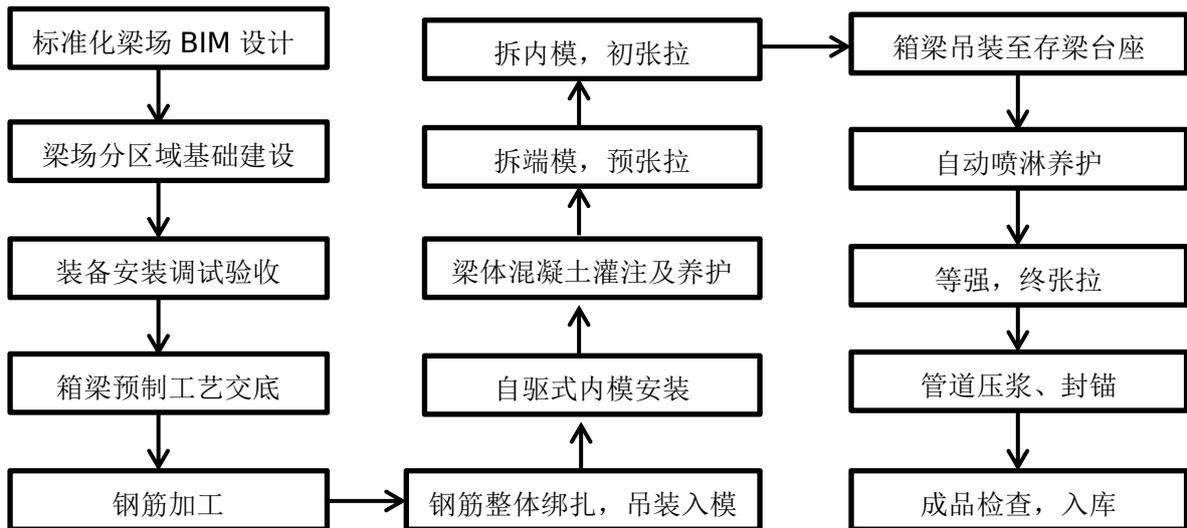


图 5.1 施工工艺流程图

5.2 操作要点

5.2.1 40m 箱梁预制场总体规划

通过前期的施工调查，综合考虑梁场位置、与设计位置关系、架梁顺序、控制性工程、迁改工程、附作物、风险隐患、主要控制措施等因素，对梁场预选址进行比选，确定梁场位置；并根据建设项目的总工期、施工组织设计、制梁能力、存梁能力等因素进行了场地平面布置规划，并进行了功能区域划分，各功能区分界清晰、功能明显、节约用地，体现工厂化作业。主要由办公生活区、制梁区、存梁区、保障区和提梁区组成。

原阳制梁场位于正线里程 DK383+300 北岸引桥 227#-235#墩线路左侧，梁场设置制梁台座 8 个，双层存梁台座 40 个，配置钢筋整体预扎架 4 个，底侧模 8 套，自驱式内模 4 套；配置 2 台 HZS120 型拌和站，2 台 95t/43m 龙门吊，钢筋数控加工设备 4 台，自动张拉设备 1 套，自动压浆设备 1 套，自动喷淋养护设备 1 套，自动静载设备 1 套，1000t 级搬运机 1 台。

梁场规划以 BIM 应用为基础，建立梁场可视化 BIM 模型，进行施工过程模拟分析、场地虚拟漫游、工程量精确计算，优化施工组织设计，指导现场施工。梁场平面布置规划采用 BIM 技术，将创建好的 BIM 模型导入到模拟软件中可视化三维漫游展示，管理者直观的了解场地修建好的布置情况，所见即所得真实直观，辅助场地布置方案的论证及调整。通过场地模拟并合理的规划场地，减少临时用地，符合绿色施工。

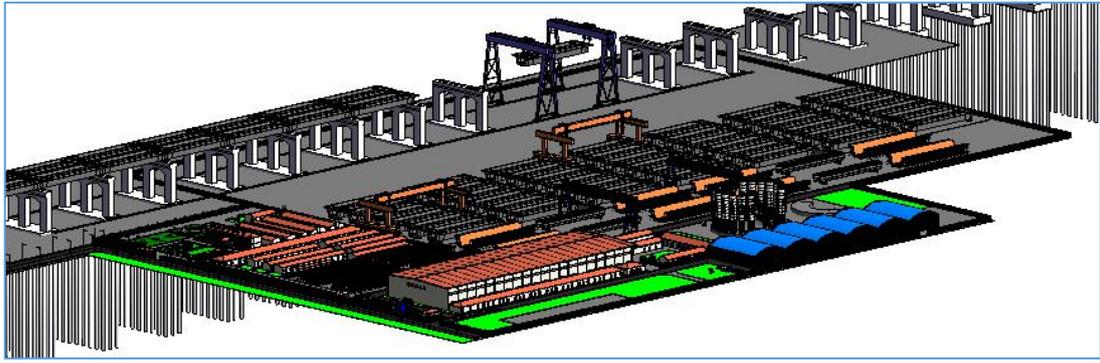


图 5.2.1-1 梁场 BIM 模型



图 5.2.1-2 梁场平面布置图

5.2.2 钢筋工程

钢筋加工采用数控弯曲设备进行钢筋下料，弯曲。经检验合格后，利用叉车作为物流转运平台进行钢筋转运。采用人工分布钢筋的方式，按照钢筋预扎架定位槽进行底板、腹板钢筋的位置按照设计数量逐一进行底、腹板钢筋的摆放，安装就位后对钢筋骨架严格根据相关规范要求要求进行钢筋绑扎，底板钢筋绑扎完成后，拉入钢筋内模支承架，再绑扎顶板及翼板钢筋，最后对绑扎成型后的钢筋骨架进行质量检查，合格后利用专用吊架龙门吊吊装至制梁台位进行钢筋骨架安装就位入模。

1、钢筋加工

钢筋数控加工采用数控设备进行钢筋调直、剪切、弯曲加工。依托智能数控系统，通过触摸屏操作面板设定钢筋加工参数，设备按预先设定好的程序控制伺服驱动系统进

行加工，通过编码器、位移传感器等检测手段实现加工精度及加工状态精确控制，充分保证了钢筋的定尺、调直、切断、弯曲加工精度。

钢筋加工作业前，操作人员可以直接调用图库数据，简单设置生产参数后即可开始自动生产。根据生产工序不同，作业人员将钢筋放置完毕后，通过踩踏脚踏板或按下控制面板启动按钮，设备自动完成钢筋的调直、定尺剪切、对齐传输、托起移送、自动弯曲等工序。加工完成后，作业人员只需要取出加工完成的钢筋加工半成品即完成作业。



图 5.2.2-1 数控弯曲机进行钢筋加工

2、钢筋整体绑扎

1) 钢筋骨架的制作流程

在钢筋绑扎胎模具上绑扎底腹板钢筋→布设预应力筋预留管道→拖入自动升降整体钢筋预扎内架→桥面钢筋绑扎→拖出自动升降整体钢筋预扎内架→将钢筋骨架整体吊装至制梁台座并安装就位。

2) 在钢筋与模板间设置保护层垫块, 模板安装和浇筑混凝土前, 仔细检查保护层垫块的位置、数量及紧固程度, 并指定专人作重复性检查以提高保护层厚度尺寸的质量保证率。垫块散布均匀, 侧面和底面的垫块不少于 4 个/ m^2 , 绑扎垫块和钢筋的铁线头不得伸入保护层内。

3) 橡胶抽拔管定位采用 $\phi 10$ 光圆钢筋定位网, 钢筋定位网在定位网钢筋胎卡具上进行焊接成型, 并按顺序摆放于底、腹筋上并绑扎牢固后采用卷扬机穿橡胶抽拔管, 要求管道坐标准确, 顺直、不得有死弯及钢筋断头卡住。



图 5.2.2-2 钢筋整体绑扎

3、钢筋吊装

箱梁钢筋面积大、重量大，钢筋吊装采用特制吊具，要求吊具具有足够的刚度，起吊时吊具及钢筋不得发生过大变形。压杆根据所在部位的受力情况分别选用型钢制作，起吊时钢筋笼内穿入短钢管以分散集中力，并将各吊点钢丝绳调平，使其均匀受力。

钢筋吊装采用两台 95t 龙门吊施工，并指定专人指挥。



图 5.2.2-3 钢筋整体吊装

5.2.3 模型工程

模型按照固定底侧模，活动式内模设计，由底模，侧模，内模，端模等构件组成，底模固定在钢制梁台座上，侧模调整到位后与底模焊接成一个整体，内模自驱式走行液压设计，通过内模的周转提高模板的使用率，降低施工成本。



图 5.2.3-1 箱梁底侧模及内模

1、自驱式内模设计

内模总体设计采用贝雷式龙骨结构和简明的液压系统，以减少变形，降低故障率、方便维护。液压收放采用变径断面直收、自动移位、液压系统无线遥控操作，内模行走采用电驱模式，配置 1 套固定托架、1 套驱动托架和 1 套从动车架，实现箱梁内模快速安全安拆。采用变径断面直收、自动移位、液压系统遥控操作功能，减量化设计 90 条螺旋支撑杆，管路清晰的简明液压系统，减少故障、方便维护。



图 5.2.3-2 箱梁自驱式液压内模

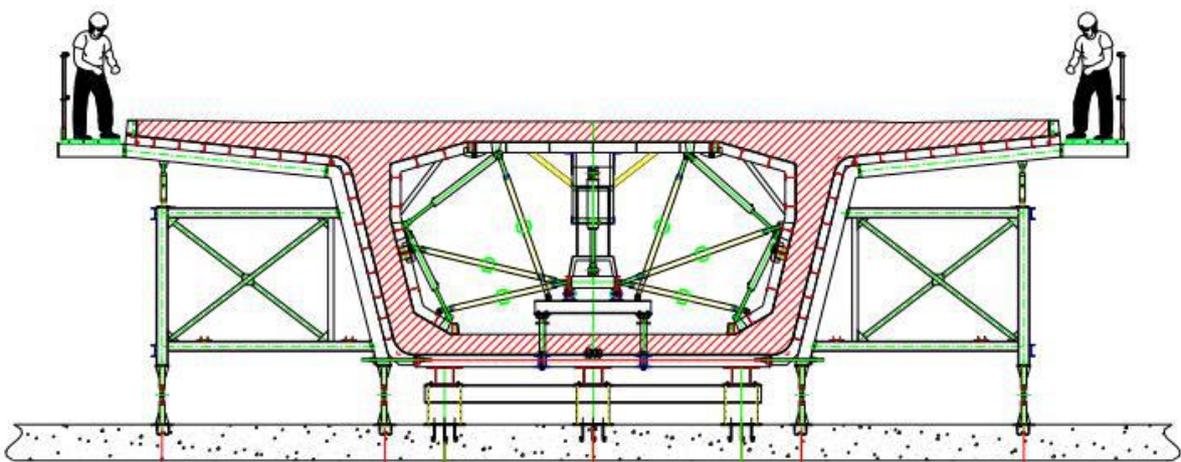


图 5.2.3-3 内模截面结构图

2、内模整体入模前检查

首先进行液压内模调试检查，调试液压内模两边收缩是否同步，检查液压内模油管、油缸是否存漏油，检查液压撑杆是否扭曲变形。然后检查自驱式液压内模电源是否接好，把内模液压撑杆收拢到位，使其达到收缩状态；紧接着安装移动架，内箱固定架；检查箱梁钢筋绑扎质量，确保内模准确安装到位。



图 5. 2. 3-4 安装移动架及调整



图 5. 2. 3-5 内模固定架安装及调整



图 5. 2. 3-6 入模状态

3、内模整体入模及调整

内模检查完毕后，启动电源，驱动齿轮带动链条，使内模匀速自行进入箱梁钢筋笼内。液压内模进入到位后，进行模板尺寸调整，具体步骤如下：

1) 顶升内模顶板到设计标高，打开液压撑杆，使内模侧板支撑到位。

2) 安装手动螺旋撑杆，然后从中间往两端开始微调内模底板厚度及内模高度，以内模底板平面为基准点，用直角尺卡住，再用卷尺测量，利用横向斜撑手动螺旋撑杆实现底板厚度的调整。

3) 内模底板厚度调好后，再调整内模高度，内模高度以底模面为准，用钢卷尺通过顶板下料孔从下往上测量，测量内模顶面位置，利用竖向斜撑手动螺旋撑杆调整内模高度。

4) 内模标准段调好后，再调整变截面与端头内模高度，标准段模板与变截面模板间采用螺栓进行连接，先用手动螺旋撑杆进行人工微调，把标准段与变截面连接处调平，在拧紧螺栓。

5) 端头与端模间，把端头部位撑到位，用横向斜撑手动螺旋撑杆微调，调到与端模密贴，再用螺栓拧紧。内模安装完成。



图 5.2.3-7 内模尺寸调整



图 5.2.3-8 底板厚度调整及检查



图 5.2.3-9 内模高度调整检查



图 5.2.3-10 内模安装完成

4、内模拆除

箱梁混凝土浇筑完成且强度达到设计要求后，拆除内模。首先把移动架固定到位，接上电源，再松开顶托拆除横向以及竖向撑杆，拆除模板间螺栓，之后打开内模液压系统，收起液压撑杆，把内模收拢到位，最后将内模高度降低到位，打开电源，驱动齿轮带动链条反转，使内模匀速自行出模。



图 5.2.3-11 内模出模

5.2.4 混凝土工程

1、混凝土拌和

混凝土拌和应有三台拌和站，两台正常拌和，一台备用，采用电子系统确保原材料计量满足规范要求。

混凝土的下料顺序由拌和站操作司机控制，在操作输入数据时必须严格按配料单施工配合比输入数据，依次先下骨料、水泥及矿物掺合料，拌和均匀后，再加入外加剂和水，拌和时间不宜少于2min，当遇操作系统出现问题或须手动操作时，拌和站司机须加强与现场的联系，确保混凝土必须拌和均匀，颜色一致

混凝土拌制速度和灌注速度要密切配合，拌制服从灌注，调度人员现场根据混凝土灌注速度，现场统一协调，拌和站须时刻保持与施工现场的联系沟通，在施工过程中，如因故障灌注中断，启动应急预案，保证常温下混凝土滞留在拌和机内的时限，一般不应超过45min。否则，须及时请示试验室主任或梁场总工处理。

2、混凝土泵送

泵送时输送管路全部采用钢管，尽量减少弯管。输送管路用支架、吊具牢固固定，且不得与模板或钢筋直接接触。泵送过程中，混凝土拌和物始终连续输送。高温或低温

环境下输送管路分别采用湿帘或保温材料覆盖。其它作业遵循 JGJ/T 10-2011《混凝土泵送施工技术规程》的规定。

输送泵及管道每次在泵送混凝土时先泵送清水湿润管壁，并检查是否有漏水，有渗漏时应及时处理。无渗漏再泵送与混凝土同强度等级的水泥砂浆润湿管壁，水泥砂浆不得泵送浇筑到梁体，最后泵送拌制的混凝土。

混凝土放入泵机后，应安置网筛并设专人监视，以防止粒径过大骨料或异物进入泵内造成堵塞。

混凝土泵送初始时，应慢速泵送，待泵送顺利后，在用正常速度泵送。混凝土泵送要均匀连续，必要时可降低混凝土的泵送速度，长时间停泵（超过45min）时将混凝土从泵和输送管中清除。

3、混凝土灌注及养护

混凝土灌注前应按要求做好开盘检查，并作好检查记录，确认无问题时才可开盘。由于梁体混凝土数量较大，且为高性能混凝土，为缩短灌注时间，混凝土拌和站及泵送设备均采用两套独立系统，连续灌注、一次成型。混凝土灌注应满足 TB/T 3275-2018《铁路混凝土》的有关规定和要求。混凝土模板温度应在 5℃~35℃（每孔梁灌注开盘前检测），最高不超过 40℃；混凝土入模温度应为 5℃~30℃；每 50m³测一次混凝土入模含气量、混凝土坍落度及扩展度。

混凝土浇筑前应用高压风对钢模板进行清理，清除杂物、灰尘及存于底模的积水。

采用三套拌和、灌注系统（其中备用一套），分别负责箱梁两端混凝土灌注。浇注顺序要求由两端向中间循序渐进的施工方法进行灌注，一次成型，每层灌注厚度不得大于 30cm。混凝土灌注采用斜向分段、水平分层的方式连续灌注，布料先从距箱梁端头 5m 处腹板下料，反向往支座板位置灌注，两边同步对称均匀进行，先灌注腹板与底板结合处及底板混凝土，再改用从内模顶面预留的混凝土灌注孔下料补浇底板混凝土，并及时摊平、补足、振捣，控制好标高，达到设计要求，再灌注腹板。当腹板混凝土灌注到与顶板面结合部位时，最后灌注顶板。灌注腹板混凝土时，应采用同步对称灌注腹板混凝土，防止混凝土面高低悬殊，造成内模偏移或其它后果。当腹板槽灌平后，开始灌注桥面板混凝土。桥面混凝土也从两端向中间连续分段灌注，每段 4m，以利表面收浆摸面。

混凝土灌注入模时下料要均匀，注意与振捣相配合，混凝土的振捣与下料交错进行，待混凝土将支座预埋板处的预埋钢筋全部覆盖后，采用插入式振动棒引捣至混凝土不再下沉且无气泡冒出时开动底板附着式振动器，侧模附着式振动器采用间断开启，一般开

启时间 $\leq 30s$ ，每次振动间隔时间 $\leq 30s$ ；待每段腹板及底板结合处混凝土浇筑完成后，开启侧模附着式振动器，每次振捣按混凝土所浇筑的部位开启相应区段上的附着振动器。

梁体混凝土浇筑采用插入式振动棒振捣成型，并辅以侧振和底振，以确保混凝土密实。浇筑过程中注意加强箱梁端头、倒角以及钢筋密集部位的振捣，特别是内箱作业面小、条件差，重点加强转角、腹板与底板的交界面处的振捣及底板标高控制。

插入式振动棒时应快插慢拔，垂直点振，不得平拉，不得漏振，谨防过振；振动棒移动距离应不超过振动棒作用半径的 1.5 倍，且不大于 400mm，每点振动时间约 20s~30s，振动时振动棒上下略有抽动，振动棒插入深度以进入前次浇筑的混凝土面层下 50mm。浇筑过程中注意加强倒角、交界面以及钢筋密集部位的振捣。为达到混凝土质量要求，在侧模、底模和端模上安装有高频振动器，在混凝土浇筑过程中根据下料情况开启使用，以保证梁体混凝土浇筑密实。

为防止混凝土浇筑过程中出现内箱大量涌料，应在浇筑腹板及端头混凝土时，可采用宽度为 50cm 的木板作为临时压板来阻止涌料。

在浇筑梁体内箱时设置专人对内箱进行捣鼓，确保混凝土密实。由于 40m 箱梁内箱较长，工人在施工过程中通风较差，采用布置通风管的方式确保内箱作业人员空气流动，呼吸顺畅。

在浇筑梁面混凝土时为了确保机械连接套筒不被混凝土覆盖，在绑扎钢筋时对连接套筒进行标高设计与要求，并顺着预先拉的直线逐个焊接，焊接完成后使用胶带包裹并超出套筒，防止混凝土堵住套筒，最后为了防止混凝土浇筑时，胶带脱落或者人为踩踏，在胶带外安装软管，混凝土灌注过后把软管去掉，利用软管的弹性确保预埋位置清晰可见。

顶板混凝土浇筑到设计标高后及时赶压、抹平，在混凝土初凝之前必须对桥面进行第二次收浆抹平以防裂纹，使桥面达到平整，排水通畅，同时在混凝土灌注前要对内模顶面的反拱进行复核。

在浇筑完成后混凝土初凝前安排专人对梁面进行土工布覆盖，确保养护到位。制梁台座梁体养护采用土工布覆盖洒水养护，存梁区采用自动喷淋养护系统。箱梁侧面、底板和顶板采用自动喷淋养护，箱梁内箱采用封闭雾化养护。



图 5.2.4-1 混凝土灌注

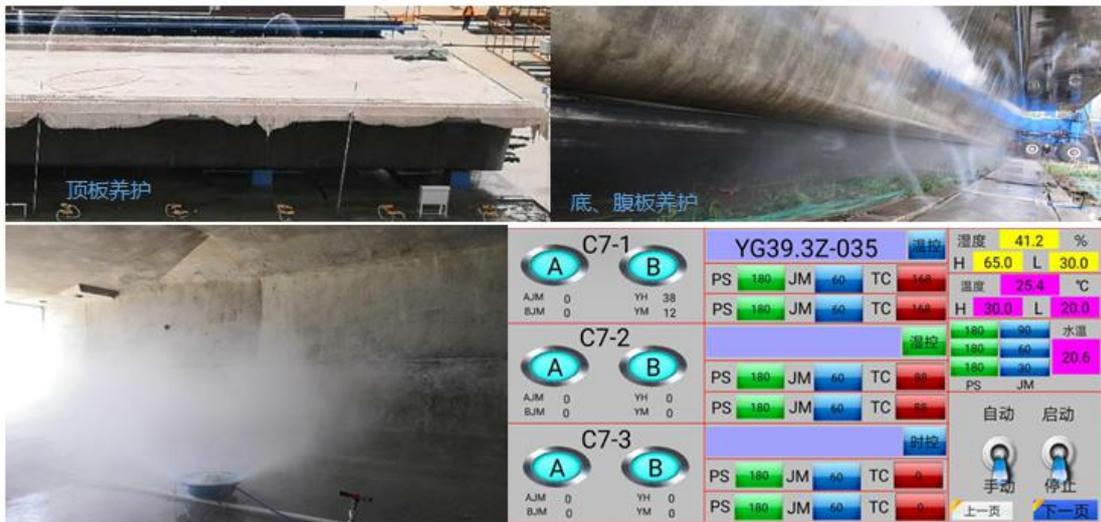


图 5.2.4-2 箱梁混凝土养护

5.2.5 预应力工程

40m 简支箱梁预应力工程包括抽拔橡胶抽拔管，成品钢绞线穿束，自动张拉，自动压浆，封锚和涂刷梁端防水涂料等工序，主要施工方案为采用橡胶抽拔管成孔，混凝土灌注完成后，在 6~8 小时观察混凝土灌注开始端，进行橡胶抽拔管试拔，拔管采用拔管台车，合格后全部拔出橡胶管；然后穿入成品束钢绞线，穿束采用穿束台车；当混凝土强度达到设计强度的 60%时进行预张拉，当混凝土强度达到设计强度的 80%时进行初张拉；初张拉完成后，采用 1000t 级的搬运机将箱梁吊装至存梁台座存放；当混凝土强度和弹模达到设计要求且龄期不少于 10 天后进行终张拉；张拉采用自动张拉设备；终

张拉后 48h 内进行管道压浆，压浆采用自动压浆设备；压浆完成后进行封锚和涂刷梁端防水涂料。

1、成品束钢绞线穿束

成品束穿束采用链式拔管穿束台车，其由行走台车、升降装置、拔管机、地脚支撑、反力支撑组成。工作时，行走台车可根据现场实际需要移动拔管-穿束台车；拔管机通过升降装置上下移动对准所需抽拔胶管；反力支撑抵在制梁台端面模板上，抵消抽拔胶管的反力；四角的液压地脚缸支撑在地面上，保证整机工作的稳定性。



图 5.2.5-1 拔管穿束台车构造图

钢绞线进场后堆放至钢筋加工房，经检验合格后方可进行穿束。将放线车开入加工房，操作梁式起重机将钢绞线预应力成品束吊入放线车内，随后将放线车开至工作地点就位。钢绞线应按照穿束相反的顺序吊入放线车，以方便穿束时钢绞线的定位。



图 5.2.5-2 放线台车及摆放位置

在放线车内将钢绞线捆绑钢带剪断，通过人力脱出钢绞线端头，使其进入放线车传动装置，将钢绞线端头放入穿束台车卡瓦链条，同时运行放线车与穿束台车，将钢绞线端头卡入链条适当长度，通过遥控装置调整链条踏面的横向位置与垂直高度，使钢绞线端头对准相应预应力孔道。同时运行放线车与穿束台车链条，并控制两者运行速率使

其同步进行。将钢绞线整体穿入孔道后，测量梁体两端头钢绞线露出长度，保证其相等并且达到规范的要求。钢绞线预留长度与工作锚具厚度、夹片外露长度、限位板厚度、千斤顶长度、工具锚厚度相关。完成一孔道的穿束后，重复以上步骤进行下一孔道的穿束工作。



图 5.2.5-3 成品束钢绞线穿束

2、预应力束自动张拉施工

预应力张拉采用自动张拉系统，该系统包括机械动力系统、传感器测量系统、智能张拉控制系统、数据管理系统及辅助系统等五部分，可实现桥梁预应力施工的张拉、静停、锚固全过程自动化；对预应力施工过程进行全过程监测控制，精准控制张拉力和预应力筋的伸长值；对施工结果进行信息化管理，数据自动储存且不可更改，确保施工数据真实有效，保证预施应力准确和结构安全，提高施工管理水平和劳动效率。



图 5.2.5-4 自动张拉控制系统

预应力张拉时压力传感器应经过试验室标定合格，并取得混凝土强度通知单及张拉通知单，张拉分为三次张拉，各次的张拉程序如下：

1) 预张拉： $0 \rightarrow$ 初应力 $0.2\sigma_k$ （作伸长值标记，油缸测距 A/C，夹片外露 E/G） \rightarrow 张拉至预张拉设计要求的控制应力（持荷 2min、油缸测距 B/D，夹片外露 F/H） \rightarrow 回油、

锚固(测量总回缩量)。

预张拉伸长值： $\Delta L_1 = (B-A) - (E-F) + (D-C) - (G-H)$

2) 初张拉：初张拉：0→初应力 $0.2\sigma_k$ (作伸长值标记，油缸测距 A/C，夹片外露 E/G)→张拉至初张拉设计要求的控制应力(持荷 2min、油缸测距 B/D，夹片外露 F/H)→回油、锚固(测量总回缩量)。

初张拉伸长值： $\Delta L_2 = (B-A) - (E-F) + (D-C) - (G-H)$

3) 终张拉：终张拉：0→初应力 $0.2\sigma_k$ (作伸长值标记，油缸测距 A/C，夹片外露 E/G)→ $1.0\sigma_k$ (持荷 5min、油缸测距 B/D，夹片外露 F/H)→回油、锚固(测量总回缩量、测工作夹片外露量)。

终张拉伸长值： $\Delta L_3 = (B-A) - (E-F) + (D-C) - (G-H)$

张拉时按照张拉应力、应变、时间、同步率“四控”：即张拉时以张拉力为主，以钢绞线的伸长值作校核，在 σ_k 作用下持荷 5min，两端伸长量不同步率 $\leq 5\%$ 。

自动张拉具体步骤如下：

1) 张拉设备安装及调试：将千斤顶与泵站连接好，同时将设备电路连接好，通电调试，保证设备没有问题，同时保证智能张拉控制电脑网络畅通，以便对整个张拉过程远程数据监控。

2) 千斤顶安装调整：a. 首先穿上限位板，装好过渡套。检查工作锚需“进槽”(锚垫板端面上的槽)。b. 安装千斤顶，使钢绞线从千斤顶穿过，然后安装工具锚，并塞紧夹片，打紧工具锚夹片，为退锚方便可涂抹地板蜡。c. 安装时，工作锚与工具锚间的钢绞线间严禁出现拧绞现象。d. 在缓慢供油情况下，调整千斤顶、限位板、过渡套、工具锚的位置，使各件与管道位于同一轴线上。f. 对中后检查各件之间严禁有“咬边”现象，包括工作锚与锚垫板槽之间。g. 施加初始应力时，保证上述的对中情况不会发生改变。

3) 调整对中后，智能张拉设备启动，控制系统将自动加载至钢绞线的初始应力，自动测量油缸长度及工具夹片外露长度。

4) 智能张拉计算机控制四台张拉设备同时启动，实时采集四台泵站的千斤顶张拉力和位移，采用基于神经网络的 PID 同步张拉控制技术，合理调节 PID 参数，通过 PLC 内部的 PID 模块闭环控制实现张拉精确同步。两端同时达到各级张拉力。

5) 智能张拉计算机严格控制两端张拉的同步性，采用分级控制的供油方式。

6) 张拉到控制应力后，持荷 5min (终张拉)，自动测量油缸长度及工具夹片外露长

度，并计算实际伸长值，相对理论值未超过 $\pm 6\%$ 时，回油自锚。相对理论值超过 $\pm 6\%$ 时，会发出报警，需查明原因重新进行张拉。

终张拉完成后，在锚圈口处的钢束做上记号，24h后检查确认无滑丝、断丝现象方可割束，切断处距夹片尾30mm~40mm。钢束切割应采用砂轮角磨机作业，严禁使用氧焰切割。



图 5.2.5-5 自动张拉作业

3、预应力孔道自动压浆施工

预应力孔道压浆采用自动压浆系统，该系统实现了压浆施工上料制浆、真空压浆两大关键工序自动化协同控制，具有自动化程度高、配料和压浆量计量精准、现场移动便捷、操作方便、工作效率高、可靠耐用、维护量少、绿色环保等特点，满足管道压浆施工对过程控制和成品质量的技术要求，适合铁路桥梁、公路桥梁以及其他工程领域管道压浆施工，该系统主要由控制柜、高速制浆桶、上料机、料仓、水泵、压浆泵、低速储料桶及称重传感器组成。

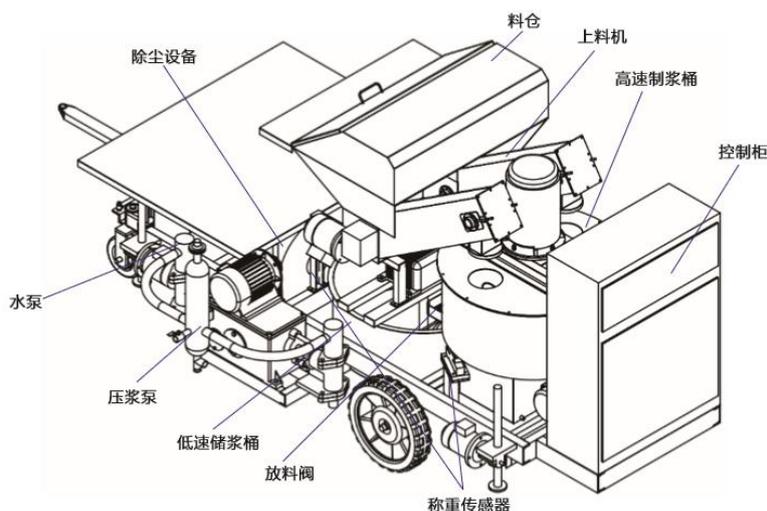


图 5.2.5-6 自动压浆系统结构图

压浆作业主要工作内容包包括压浆前准备工作，制浆，抽真空，压浆，压浆放气放浆，

压浆保压，管路清洗，设备清洗等。

压浆前将水管接入水箱，手动上水至高速制浆桶观察称量显示是否准确，然后打开卸料阀卸入低速储浆桶，再观察称量显示是否与高速桶相同，若示值相同或相差不大则准确，若示值相差大于 2kg 则需通过校称来确保称量精度，然后将低速储浆桶内水通过手动方式压出，此时观察压力表示值是否准确、压浆泵工作是否稳定、水的流速是否均匀等。

开机后首先在计算机桌面上打开图标，然后点击桥梁设置，完善桥梁信息中的工程信息及材料信息等，若是第一次使用设备，则需要将做好的梁型模板拷贝到 D 盘 BridgeType 文件夹中再打开桥梁设置，导入梁型，输入梁号后保存。

然后点击制浆工艺，在配比方案中手动输入单盘制浆总量、水泥配比、压浆剂配比、水配比等数据，系统自动计算出水胶比，然后在搅拌方案中输入粗加水比例、粗加压浆剂比例、粗加水泥比例、及精粗加搅拌的时间，设置好后点击保存，选择需要的方案，系统会默认制浆顺序，设置界面及搅拌流程见下图：



图 5.2.5-7 制浆工艺操作界面

设置好之后点击智能压浆，选择对应的梁型，确认后保存。设置完成后，在准备工作就绪的前提下点击制浆，输入连续制浆盘数，制浆开始。

抽真空时首先在普通参数中设置真空阈值（-0.1~-0.07MPa）和真空判定延时，然

后将真空泵注满水，打开抽真空阀门和主管道阀门，关闭进浆阀门，在压浆工艺中选择好对应的梁型后点击自动压浆按钮开始抽真空，当孔道中达到预先设置的真空值并且保持真空判定延时时间后真空泵停止工作，抽真空结束，进入压浆状态。

抽真空结束后，迅速打开进浆端主管道阀门和进浆阀门，关闭出浆端阀门，关闭真空阀门和放气阀门，进入压浆状态。（注：压第一根孔道前应将压浆管内废水全部压出，直至管道出浓浆后方可对梁体孔道进行压浆作业）。

在高级参数中设定好放气时间，当管道压力达到保压压力时系统自动报警提示放气，此时孔道两端工人将四通管上废料阀门手动打开、关闭两至三次直至进出浆端有均匀浓浆压出，完成压浆放气、放浆。

当压浆放气结束后，孔道中压力达到预先设定下限和判定延时时，进入保压阶段，直到保压结束，完成孔道压浆。保压结束后，完成孔道压浆。此时手动将真空泵阀门反向，将真空泵控制旋钮打到手动，真空泵抽水将管道中的浆体清洗出去，完成管道清洗，进行下一根孔道压浆。

完成所有孔道压浆后，将压浆管取下放至水桶或水沟处，将剩余的浆体压出，同时上水清洗高速筒，打开高压水枪冲洗筒壁及称重传感器，循环上述操作直至筒壁无浆体附着且压浆管压出清水即可。



图 5.2.5-8 自动压浆操作界面



图 5.2.5-8 自动压浆施工

5.2.6 箱梁吊装

梁场采用 1 台 1000t 级轮胎式搬运机进行预制箱梁场内转存和场内运输作业。设备跨度 48m，净跨 43.5m，起升高度 13m；自重 675t，爬坡能力 2%，可原地 90 度转向，适用于铁路 40m、32m、24m 双线整孔箱梁的起吊、运输、转移和装车等工作，支腿采用门式支腿，采用四点起吊三点均衡的吊梁方式；搬梁机配置 80 个轮胎，可以原地 90 度转向，合理设置轮压比，降低地基处理难度。



图 5.2.6-1 可变宽窄 1000 吨级箱梁搬运机

箱梁搬运机对位前，确保设备行走道路平整无油污，路面没有存在会对轮胎造成破坏的铁钉、钢筋头、螺丝等东西。搬梁机对位行走必须在其行走区域地面设置标志引导线并按引导线要求行走，避免对位造成偏差。

搬梁机吊梁走形前首先检查停车制动是否已解除，走形前方道路上有无障碍物。走行时先点动确认无异常后再连续前移。在移动搬梁机之前检查轮组方向是否一致，支撑油缸是否缩回。搬梁机吊梁整机行走时禁止吊钩的升降和纵移动作。搬梁机在行走时开

启警示灯提醒现场作业人员注意安全。搬运梁体过程中出现异常，应立刻停车检查并进行纠偏。

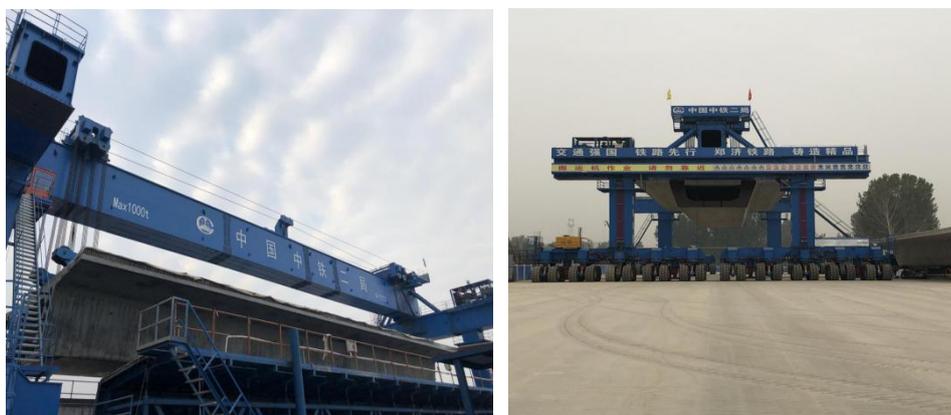


图 5.2.6-2 搬运机吊装箱梁

5.2.7 静载试验

40m 箱梁静载试验采用铁路桥梁静载试验自控系统和预应力钢结构自平衡式静载试验台进行。静载试验前将四个钢支墩（含杠杆梁）摆放在静载试验台座支座中心点位置，再将箱梁吊装移运至静载台座，安装桥梁支座并将箱梁精确安放在钢支墩上；在桥面按加载点精确布置千斤顶后安装反力架，连接静载设备电力和通信线路并对设备进行调试；在主控电脑录入静载试验梁的试验参数计算各级加载力值，复核无误后启动静载试验加载流程，主控根据各级加载力值均衡控制各千斤顶平衡加载，千斤顶加载作用于反力梁和梁面，利用闭合力系自平衡原理实现反力梁与地面反力的平衡；静载试验完成后系统自动保存数据，输出静载试验报告。

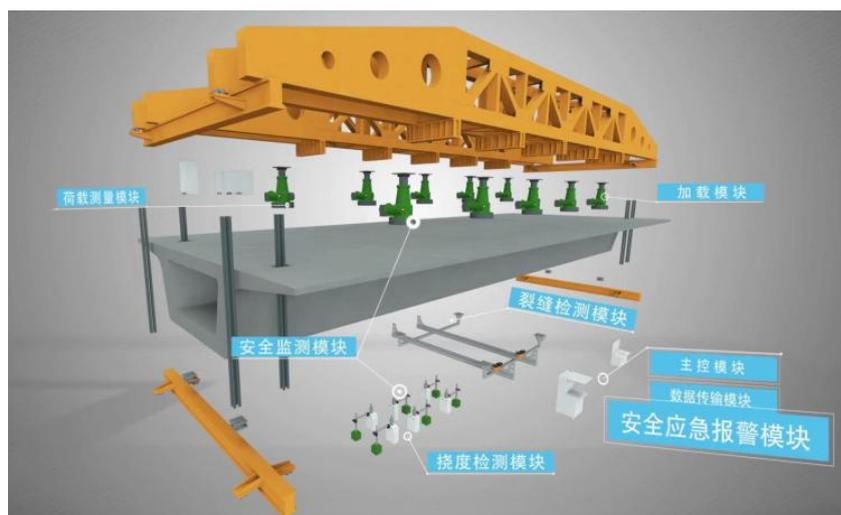


图 5.2.7-1 铁路桥梁静载试验自控系统模块结构示意图

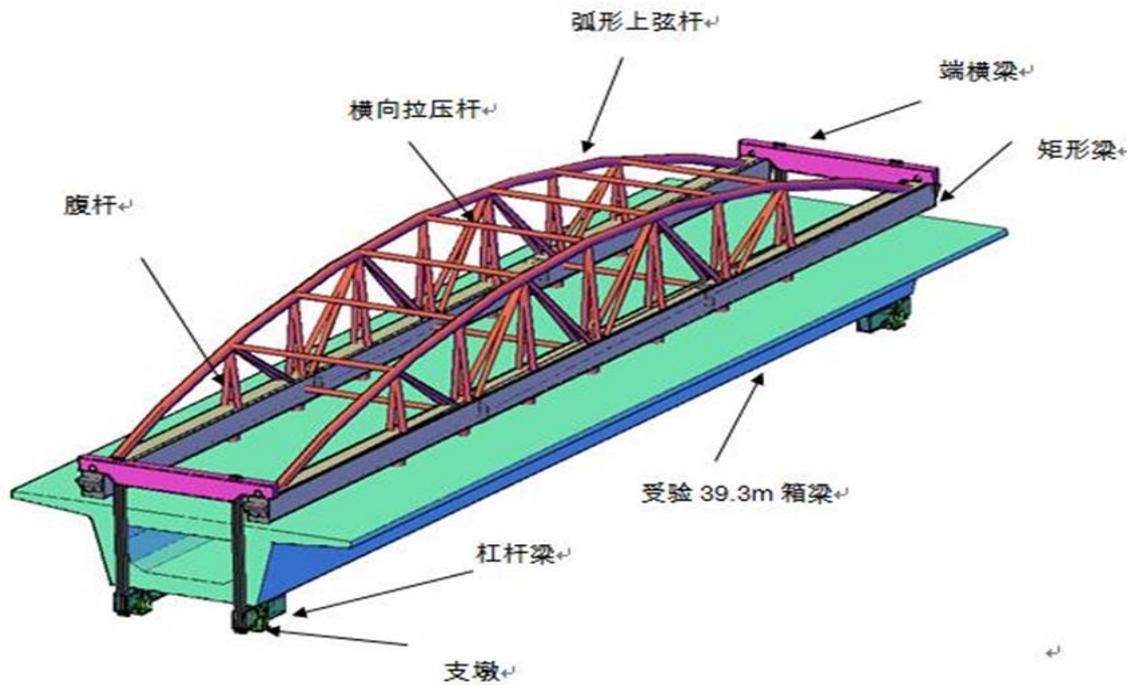


图 5.2.7-2 预应力钢结构自平衡式静载试验台结构示意图

当设备系统调试完成后，点击操作界面主控软件右下角“设备自检”按钮，在“铁路桥梁静载试验自控装置自检流程”窗口点击“下一步”对设备各检测单元进行检测，确认“荷载检测仪数据、校核仪数据、光栅采集数据”已清零。自检流程完毕后，点击主控软件右下角“开始”按钮，开始静载试验。

开始加载后，操作人员密切注意各千斤顶加载是否正常，测力传感器荷载上升是否正常，关注各挠度检测数据是否正常，振弦应变仪数据采集是否正常。若有问题，点击“暂停”按钮，检查和处理问题；处理完毕，点击“继续”，继续试验。遇紧急情况可一键按下急停按钮断电，停止所有加载操作，保证试验安全。

加载过程中，各千斤顶加载速度不超过 3kN/s ，同速、同步达到同一荷载值。每一级加载和持荷均有语音播报。现场试验人员根据语音得知加载进度及加载的具体情况，协调一致配合工作。

第一加载循环完毕后休息 10 分钟进行第二加载循环试验。在此期间，检查各千斤顶、光栅位移计是否回位，精轧螺纹钢是否松动，各种设备是否正常。

试验完成后系统自动保存试验数据，生成“静载试验计算单”和输出“静载试验报告”。



图 5.2.7-2 主控软件自动加载界面

5.2.8 信息化管理

采用先进的管理系统进行梁场管理，采用“一卡通”信息系统进行人员的吃、住、行管理；建立信息控制中心对箱梁制架施工全过程进行监控管理；通过高速铁路 40m 简支梁施工管理平台系统实现梁场管理及施工质量管理水平的提高。

原阳梁场按照桥梁认证细则的要素管理和过程管控，与铁科院联合开发并试运行铁路梁场综合管理平台 V2.0。平台主要围绕首页基本概况、质量管理、进度管理、运架管理、综合管理和系统管理六大模块。其中以质量管理为主线，将物资管理、试验管理、拌和站、工序管理、出库管理、统计分析紧密结合，打造全方位标准化梁场管理。



图 5.2.8-1 铁路梁场综合管理平台 V2.0

1、进度管理模块

进度管理模块由生产台账、BIM模型、计划管理、制架存关系、施工日志、预制梁检测等组成，可以全面展示梁场箱梁生产状态、生产工序、出库等信息，并可进行预制梁信息追溯、原材料追溯、工序技术档案追溯等。

生产台账	二维码	梁号	架梁桥名	架梁开始架号	架梁结束架号	当前台座号	当前状态	底侧模整修	钢筋整体绑扎	钢筋安装	内模调模安装
1		YG39.3Q-103	郑州黄河特大桥	301	302	6#	进行中	2018-12-03	2018-12-03	2018-12-03	2018-12-04
2		YS39.3Z-216	郑州黄河特大桥	242	243	5#	进行中	2018-12-02	2018-12-02	2018-12-02	2018-12-03
3		YG39.3Q-102	郑州黄河特大桥	300	301	7-1	进行中	2018-12-01	2018-12-01	2018-12-01	2018-12-01
4		YG39.3Q-101	郑州黄河特大桥	299	300	7-1	进行中	2018-11-29	2018-11-29	2018-11-30	2018-11-30
5		YS39.3Z-215	郑州黄河特大桥	241	242	6-1	进行中	2018-11-28	2018-11-28	2018-11-29	2018-11-29
6		YG39.3Q-100	郑州黄河特大桥	298	299	1-4	进行中	2018-11-27	2018-11-27	2018-11-27	2018-11-28
7		YG39.3Q-099	郑州黄河特大桥	297	298	5-6	进行中	2018-11-26	2018-11-26	2018-11-26	2018-11-26
8		YS39.3Z-214	郑州黄河特大桥	240	241	5-4	进行中	2018-11-25	2018-11-25	2018-11-25	2018-11-25
9		YG39.3Q-098	郑州黄河特大桥	296	297	4-4	进行中	2018-11-24	2018-11-24	2018-11-24	2018-11-25
10		YG39.3Q-097	郑州黄河特大桥	295	296	7-5	进行中	2018-11-24	2018-11-24	2018-11-24	2018-11-24
11		YS39.3Z-213	郑州黄河特大桥	239	240	6-3	进行中	2018-11-22	2018-11-22	2018-11-23	2018-11-23

图 5. 2. 8-2 进度管理模块

2、质量管理模块

质量管理模块包括物资管理、试验管理、拌和站、工序管理、出库管理、自动静载、统计分析、审批管理等，对原材料进场质量管控到预制梁成品的出库进行全过程控制，实现各种检测数据的流通共享，达到全员、全过程质量管理的目的，使预制梁的施工质量得到可靠保证。

后张法预应力混凝土简支箱梁 生产工艺流程卡															
梁号：		YS39.3Z-215		制架台座：		7#		二期恒载：		124KN/m kN/m		编号：		080	
序号	工艺	自检			互检			专检							
		评定	签名	日期	评定	签名	日期	评定	签名	日期					
1	底侧模整修	合格	青维进	2018-11-28	合格	文亚江	2018-11-28	合格	王刚	2018-11-28					
2	钢筋整体绑扎	合格	文亚江	2018-11-28	合格	青维进	2018-11-28	合格	南康政	2018-11-28					
3	钢筋安装	合格	文亚江	2018-11-29	合格	青维进	2018-11-29	合格	南康政	2018-11-29					
4	内模调模安装	合格	青维进	2018-11-29	合格	蒋春勇	2018-11-29	合格	王刚	2018-11-29					
5	预埋件安装	合格	青维进	2018-11-29	合格	蒋春勇	2018-11-29	合格	南康政	2018-11-29					
6	混凝土灌注	合格	蒋春勇	2018-11-29 16:16:27	合格	王刚	2018-11-29	合格	张大彬	2018-11-29					
7	拔管穿束	合格	曹健	2018-12-02	合格	青维进	2018-12-02	合格	何茂林	2018-12-02					
8	张拉	合格	曹健	2018-12-02	合格	青维进	2018-12-02	合格	何茂林	2018-12-02					

图 5. 2. 8-2 质量管理模块

3、运架管理模块

运架管理模块主要由工程管理、设备管理、在线监控、设备维保、人员管理、统计分析等组成，通过对运架大型设备的远程监控，确保在运架梁过程中的设备安全得到保证。



图 5. 2. 8-2 运架管理模块

5.3 劳动力组织

表 5.3 劳动力组织情况表

序号	单项工程	所需人数	备注
1	管理人员	12	
2	技术人员	28	
3	模板安装及拆除	22	
4	钢筋加工及绑扎	86	
5	混凝土灌注及养护	47	
6	预应力工程	25	
7	移梁	15	
	合计	235	

6. 材料与设备

6.1 材料

表 6.1 材料表

序号	材料名称	材料型号	生产厂家	用途
1	砂	中粗砂	唐河县鑫淼砂石有限公司	混凝土
2	石子	5~20mm	郑州鼎安建材有限公司	混凝土

序号	材料名称	材料型号	生产厂家	用途
3	水泥	低碱普通硅酸盐水泥	卫辉市春江水泥有限公司	混凝土
4	减水剂	缓凝型 (TK-PCA2)	四川铁科新型建材有限公司	混凝土
5	粉煤灰	F 类 I 级	大唐三门峡发电有限责任公司	混凝土
6	锚具	各种规格	襄阳中铁宏吉工程技术有限公司	预应力
7	成品束钢绞线	1*7-15.2-1860	河北景鹏预应力钢绞线有限公司	预应力
8	钢筋	各种规格	山西晋钢	钢筋

6.2 设备

表 6.2 机械设备表

序号	设备名称	规格型号	单位	数量	用途
1	轮式装载机	LG855B	台	3	拌合站上料
2	柴油发电机组	500GF-DF	台	2	备用电源
3	数控钢筋加工设别	/	台	8	钢筋加工
4	门式起重机	MGH95t/20-43 A3	台	2	钢筋吊装
5	混凝土搅拌站	HZS120F8	套	2	拌制混凝土
6	混凝土搅拌站	HZS90F8	套	1	备用
7	混凝土输送泵	HBT8022C-5	台	3	输送混凝土
8	混凝土布料机	HGY18/2A	台	2	混凝土灌注
9	混凝土布料机	HGY19/2A	台	2	混凝土灌注
10	混凝土提浆整平机	HCTZ-194	台	2	桥面坡度
11	铁路桥梁预应力自动压浆系统	TGZY/400-I/TK	套	2	自动压浆系统
12	铁路桥梁预应力自动张拉系统	TYZ/60-VII/YT	套	2	350t 和 600t 各 1 套
13	静载试验自动控制装置	JSZK-I	套	1	自动静载
14	预应力钢结构自平衡式静载试验台	39.3m	台	1	静载试验
15	洗石机	XS-1845	台	1	石子清洗
16	轮胎式搬运机	DLT1000	台	1	梁体转运

7. 质量控制

7.1 工程质量控制标准

7.1.1 《铁路混凝土工程施工质量验收标准》(TB10424-2018)

7.1.2 《高速铁路预制后张法预应力混凝土简支梁》(TB/T3432-2016)

7.1.3 《简支梁试验方法预应力混凝土梁静载弯曲试验》(TB/T 2092-2018)

7.2 质量保证措施

7.2.1 制梁所需的钢材、混凝土、预应力等材料进场后，由试验室核对原材料的认证证书、材料检验报告、使用说明书等质保手续，并按照频率进行检测，对于检测合格后，由质检室下达使用通知单，准予使用。

7.2.2 确定品质性能符合《铁路混凝土》(TB/T3275-2018)要求的水泥、粉煤灰、矿渣粉、砂、石、外加剂和水用于混凝土的试配，配置的混凝土拌合物性应满足施工、设计强度、耐久性等质量要求。

7.2.3 拆模时梁体混凝土芯部与表层、表层与环境温差均不得大于 15℃，气温急剧变化、大风天气不得进行拆模。

7.2.4 拔管顺序:先拔芯棒，后拔胶管；先拔下层胶管，后拔上层胶管；先拔灌梁的起始端，后拔灌梁结束端。

7.2.5 夏季混凝土灌注应避开高温时间段，以保证混凝土入模温度控制在 5℃~30℃。混凝土自然养护时要洒水漏洒，自动喷淋养护时应全梁养护，不要遗漏。

7.2.6 张拉时钢绞线计算伸长值与实测伸长值偏差不得超过±6%。

7.2.7 孔道压浆顺序为先下后上，依次进行。输浆管不应过长，长度大于 20m 时，压力应提高 0.1MPa。

7.2.8 各种施工控制仪器仪表应按期标定，设备系统应经常检查调试。

8. 安全措施

8.1 建立施工的安全保证体系。成立安全组织机构，设置专职安全工程师、工班安全检查员负责施工过程的安全监督。

8.2 在开工或施工前由安全专职干部向有关人员进行安全交底，未进行安全交底的人员不得进行作业。

8.3 作业班组进入工点施工作业前由班组长和安全员进行班前讲话，交待有关安全注意事项。制梁场及其作业班组每周一开展不少于一小时的安全活动，学习安全生产规章制度，总结和布置安全生产各项工作。

8.4 定期和不定期安全检查，堵塞事故漏洞，预防安全事故。安环室每周开展一次安全检查，检查的主要内容有：查思想、查制度、查纪律、查领导、查隐患、查落实；重点检查临时用电、防高空坠落、防物体打击、防交通事故等措施的落实。

8.5 检查张拉前的安全防护措施是否到位。如张拉挡板是否安放到位，警示标志是否设置在醒目合理的位置等。

8.6 进行压浆作业时操作者应配备防护眼镜，胶皮手套及口罩，装和拆除真空罩时，操作者不得正对锚具，压浆过程中，桥梁两端禁止人员通行，两端作业人员应统一联系方式。

8.7 进行钢筋吊装、移梁时设置专人进行安全巡查，吊装物下严禁通行；龙门吊走行形线上严禁堆放物体。

9. 环保节能措施

9.1 严格执行有关环境保护的国家法律、法规和施工技术细则规定的强制性条款；严格执行当地政府对环境影响和水土保持方案的有关要求；认真贯彻业主制定的环境保护措施。成立环境保护机构。

9.2 建立严格的检查制度，定期检查，发现问题及时处理，对违反有关环境保护法律、法规的及时移交相关部门处理，并无条件的接受环境监理单位的指导和监督。

9.3 防止水污染措施：施工营地生活废水就近排入不外流的地表水体，严禁将生活污水直接排放至地面，对于含沙量大且浑浊的施工生产废水，采用沉砂池处理后再排放，含油废水经隔油池处理后排放，防止油污染地表和水体。

9.4 严禁将生活污水直接排放至江河中，含油废水经隔油池处理后排放，防止油污染地表和水体。生活污水经化粪池处理后排放。

9.5 施工营地设置集中垃圾收集地，设专人管理，经无害化处理后排放，定期填埋，严禁就地焚烧。对营地生活垃圾（包括施工废弃物）集中装运至指定垃圾处理场处理。对不能处理的垃圾拉到设有处理设施的厂处理。

9.6 油和废油的管理：施工机械维修、油料存放地面应硬化，减少油品的跑、冒、滴、漏，所有油罐要有明显的标志，在不使用时要密封；严禁随意倾倒含油废水，应集中处理。

9.7 对机械设备产生的超分贝噪音利用消音设备减噪。

10. 效益分析

目前我国高速铁路桥梁长度占线路总长的 50%以上，主要为 32m、24m 跨度预应力混凝土简支梁桥为主。当简支梁桥的跨度大于 32m 时，目前只能采用原位浇筑的简支梁或者连续梁、连续钢构桥，经济性指标下降，且质量控制难度大。高速铁路 40m 箱梁的成功预制，规模化生产，扩大了高速铁路预应力混凝土简支梁桥的适用范围，在一定条件下可提高桥梁的经济性。同时更有助于完善我国具有独立知识产权的高速铁路桥梁建造

技术体系，对于我国高速铁路长期发展和实现“走出去”战略具有积极推动作用，具有广泛的社会效益。

11. 应用实例

11.1 本工法已成功应用于新建铁路郑济铁路郑州至濮阳段黄河特大桥北岸引桥的40m箱梁预制工程，本工程位于河南省新乡市原阳县内，梁场选择在北岸引桥227#墩~235#墩线路左侧，占地面积约195亩，其中生活、办公区占地30亩，生产区占地165亩，承担郑济铁路郑州至濮阳段DK381+304~DK389+107范围内共计344孔40m铁路箱梁的预制。于2017年10月进场，2018年4月底完成制梁场基础工程，2018年5月18日成功预制首孔40m简支箱梁，2018年9月12日通过质检中心的桥梁取证工作。该工法成功应用于原阳制梁场40m箱梁预制，受到了铁路总公司、工管中心、设计院、建设单位的好评，迎接了中铁建24局、25局、大桥局、11局、12局、22局、16局、中交二航局等兄弟单位的交流学习和观摩。

11.2 本工法已成功推广应用于鲁南高速铁路菏泽至曲阜段QHTJ-3标段箱梁预制工程。中铁二局嘉祥制梁场、郓城制梁场承担鲁南高速铁路菏泽至曲阜段QHTJ-3标段内1150孔简支箱梁的预制、架设和桥面系施工任务。在本次施工实践中，通过推广应用40m简支箱梁预制施工先进技术，通过吊装移梁设备、自动张拉、自动压浆、自动静载等关键技术应用，提高了施工工效，确保了箱梁预制的安全质量。中铁二局嘉祥制梁场于2019年4月22日成功实现首制，7月20日顺利通过了桥梁认证，郓城制梁场于2019年5月3日成功实现首制，7月10日一次性通过国家生产许可证审查；并于8月7日成功架设首孔箱梁。截止2020年4月20日，中铁二局共计预制简支箱梁820孔，施工质量满足设计及规范要求。