

2017年安徽省公路学会学术交流

全体外预应力节段拼装箱梁及工业化建造技术



石雪飞

同济大学桥梁工程系
施工与信息技术研究室

shixf@tongji.edu.cn 13701803862



- 桥梁建造的工业化趋势
- 节段预制安装桥梁发展简史
- 节段梁设计中的工业化元素
- 全体外预应力节段梁的力学性能保障
- 节段预制与架设的机械化加工和工厂化生产
- 节段梁的信息化管理



桥梁建造的工业化趋势



- 工业化？ 机械化？ 标准化？

机器体系的发展：

第一个阶段：“简单协作”，“同种并同时共同发生作用的工作机”在工厂中的“集结”，它们使用着单一的动力来源。

第二个阶段：“有组织的机器体系”，各局部机器之间不断地交接工作，产品便从一个生产阶段传送到另一个生产阶段。

建筑工业化

用现代工业的生产方式和管理手段，代替传统分散手工业生产方式建造房屋，也就是和其他工业那样用机械化手段生产定型产品。

1. **标准化**是建筑工业化的前提
2. **机械化**是建筑工业化的核心
3. **工厂化**是建筑工业化的手段
4. 组织管理科学化是保证



上海浦江镇保障房

图片来源：网络



新型工业化

工业化的过程中，不是只讲工业增加值，而是要坚持以信息化带动工业化，以工业化促进信息化，就是科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的工业化。



桥梁结构

结构个性：结构类型、施工方法

生产模式：订单式，不利用工厂化、部品化

工业化建造桥梁

标准化、机械化、工厂化为基本特征

信息化为支撑





节段预制拼装桥梁发展简史



节段预制安装桥梁发展简史

- 国外发展
 - 1974年巴西建成的Rio-Niterói Bridge首次采用了复合剪力键

节段预制安装桥梁发展简史

Rio-Niterói Bridge





节段预制安装桥梁发展简史

- 国外发展
 - 1974年巴西建成的Rio-Niterói Bridge首次采用了复合剪力键
 - 1978年建成的Long Key Bridge, Floride (USA) 是世界上第一座采用节段预制拼装的体外预应力桥梁

节段预制安装桥梁发展简史

Long Key Bridge 1978





节段预制安装桥梁发展简史

- 我国的发展
 - 1966年建成的成昆铁路旧庄河1号桥采用节段预制悬臂拼装连续梁桥，孙水河4号桥采用逐孔拼装连续梁。
 - 1988年建成广东南海九江预应力混凝土斜拉桥， $2 \times 160\text{m}$ 独塔，长线预制、体内预应力。

节段预制安装桥梁发展简史

南海九江大桥斜拉桥





节段预制安装桥梁发展简史

- 我国的发展
 - 1988年建成广东南海九江预应力混凝土斜拉桥， $2 \times 160\text{m}$ 独塔，长线预制、体内预应力。
 - 1990年建成的福州洪塘大桥滩孔 $31 \times 40\text{m}$ 的预应力混凝土连续箱梁桥，体外预应力，长线预制。

节段预制安装桥梁发展简史

洪塘大桥引桥





节段预制安装桥梁发展简史

- 我国的发展
 - 1996年建成的佛开高速公路九江大桥 $3 \times 160\text{m}$ 节段拼装变截面连续箱梁，体内预应力。

节段预制安装桥梁发展简史

佛开高速公路九江大桥





节段预制安装桥梁发展简史

- 我国的发展
 - 2001年建成的上海新浏河大桥，主桥 $3 \times 42\text{m}$ 预应力混凝土简支箱梁，是我国首次采用专用架桥机实现逐跨拼装施工的高速公路桥梁，体内+体外预应力，长线预制。



节段预制安装桥梁发展简史

- 我国的发展

- 苏通、南京四桥、崇启桥、泉州湾桥、上海长江桥、嘉绍大桥——短线预制、胶接拼装、逐跨拼装、悬臂拼装
- 目前正在建设的芜湖长江二桥引桥，我国首次采用全体外预应力短线节段预制连续箱梁，20034个节段，全国最大规模。



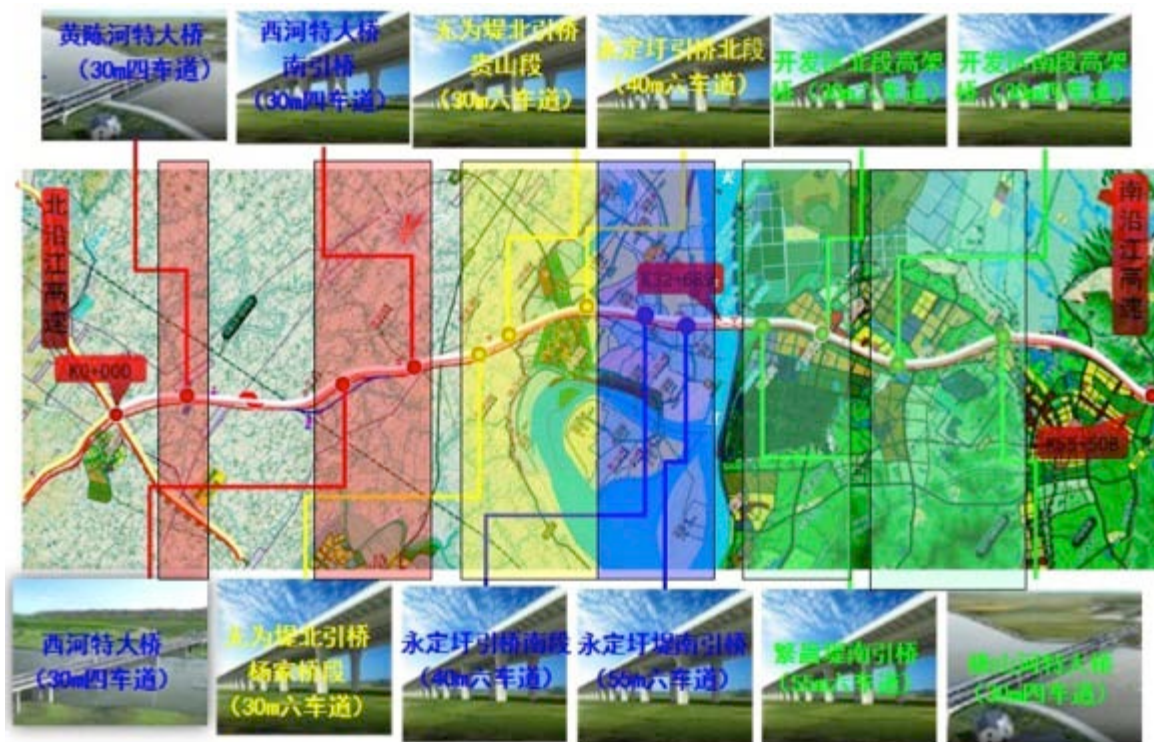
节段拼装轻型薄壁箱梁的设计构思

全体外预应力节段梁设计构思

背景工程

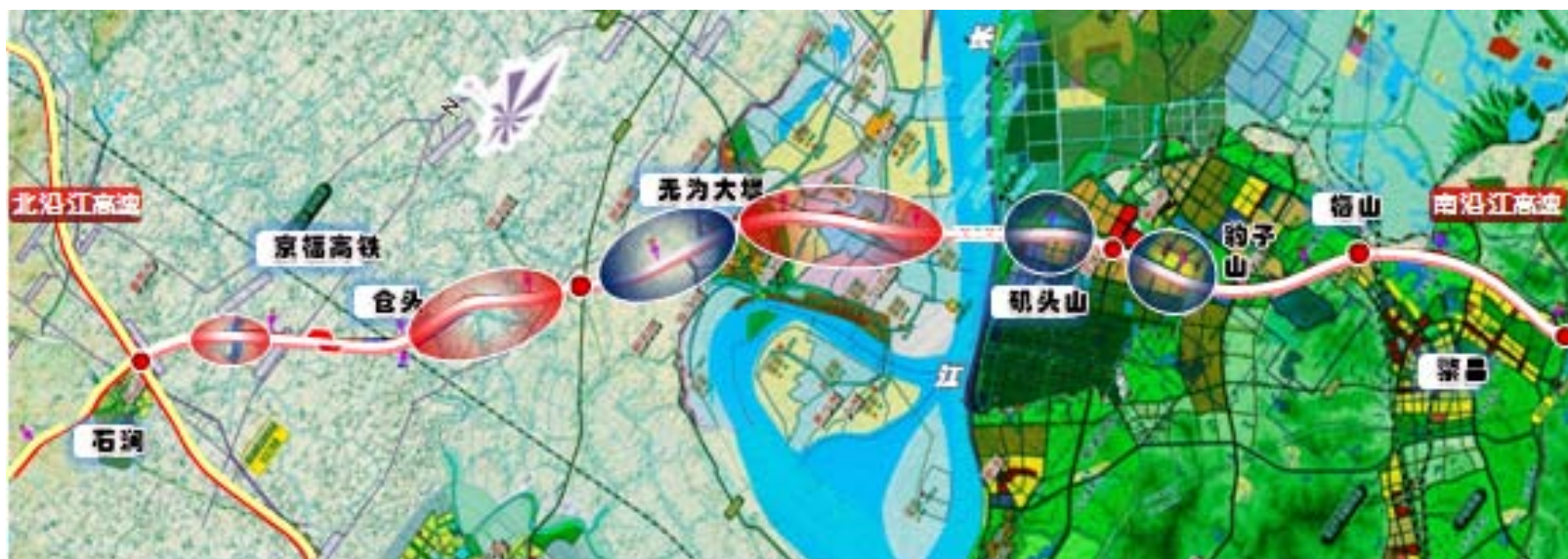
芜湖二桥引桥及接线工程

- 地处长江中下游地区，周边水系发达；
- 全线桥梁比例高；占到70%以上，28公里多
- 建设周期短，进度要求高

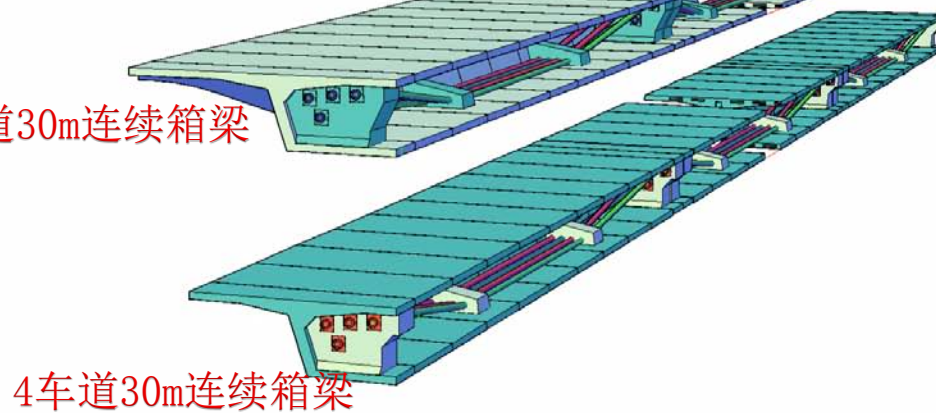
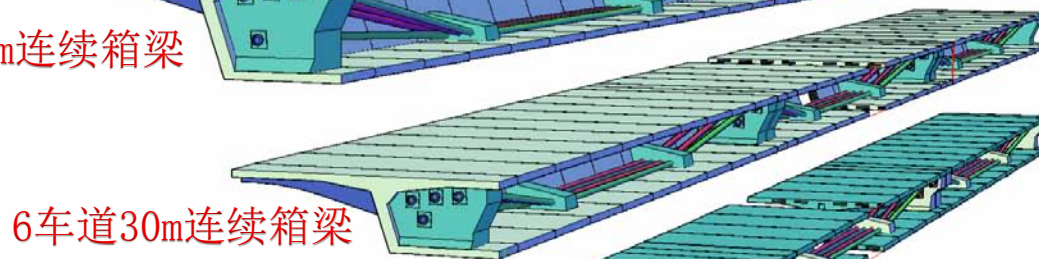
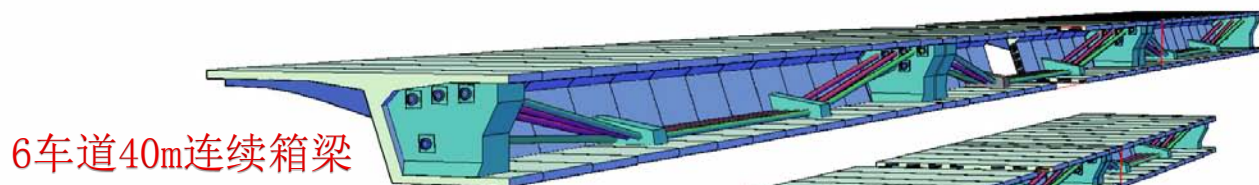
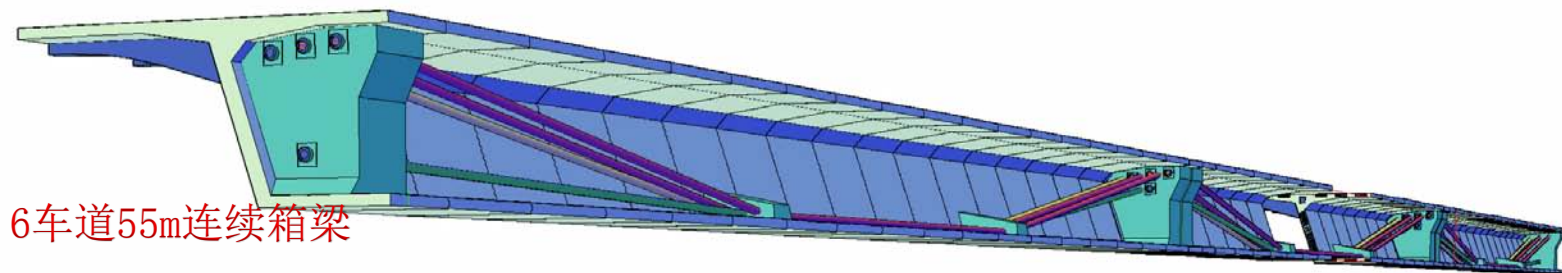


桥梁跨径布设的解决

- 全线28.6km，在地形测量的基础上进行了大量的分析和整理，归并为30m、40m、55m共三种跨径；
- 结合交通量的情况分为6车道和4车道两种断面，综合断面和跨径布置实现了28.6km只有四种结构形式。

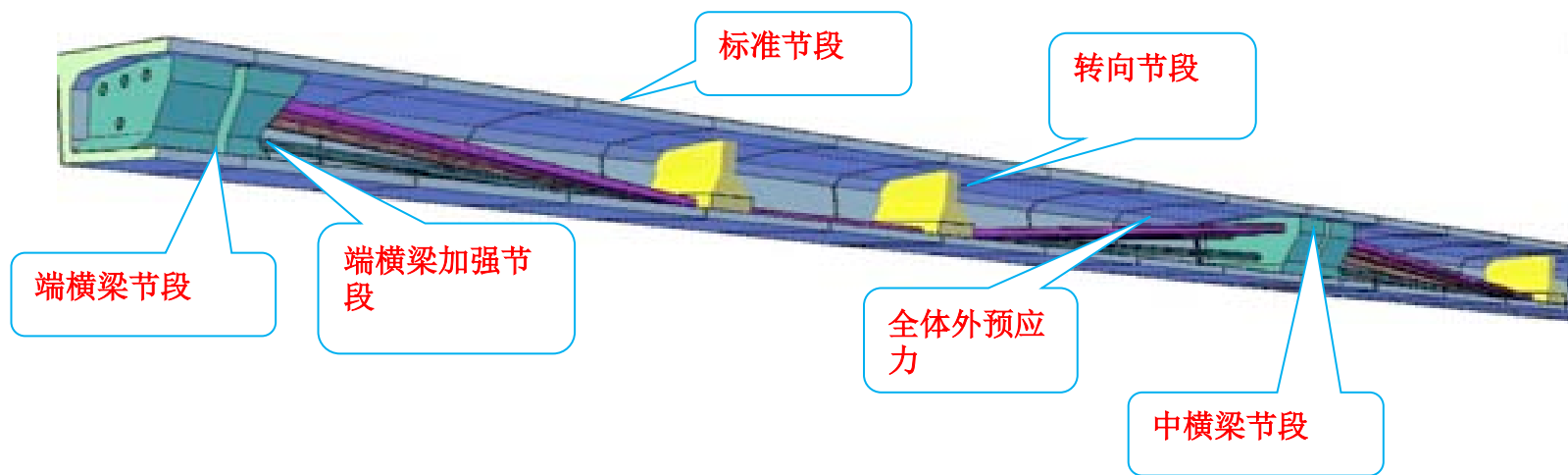


桥梁跨径布设的解决



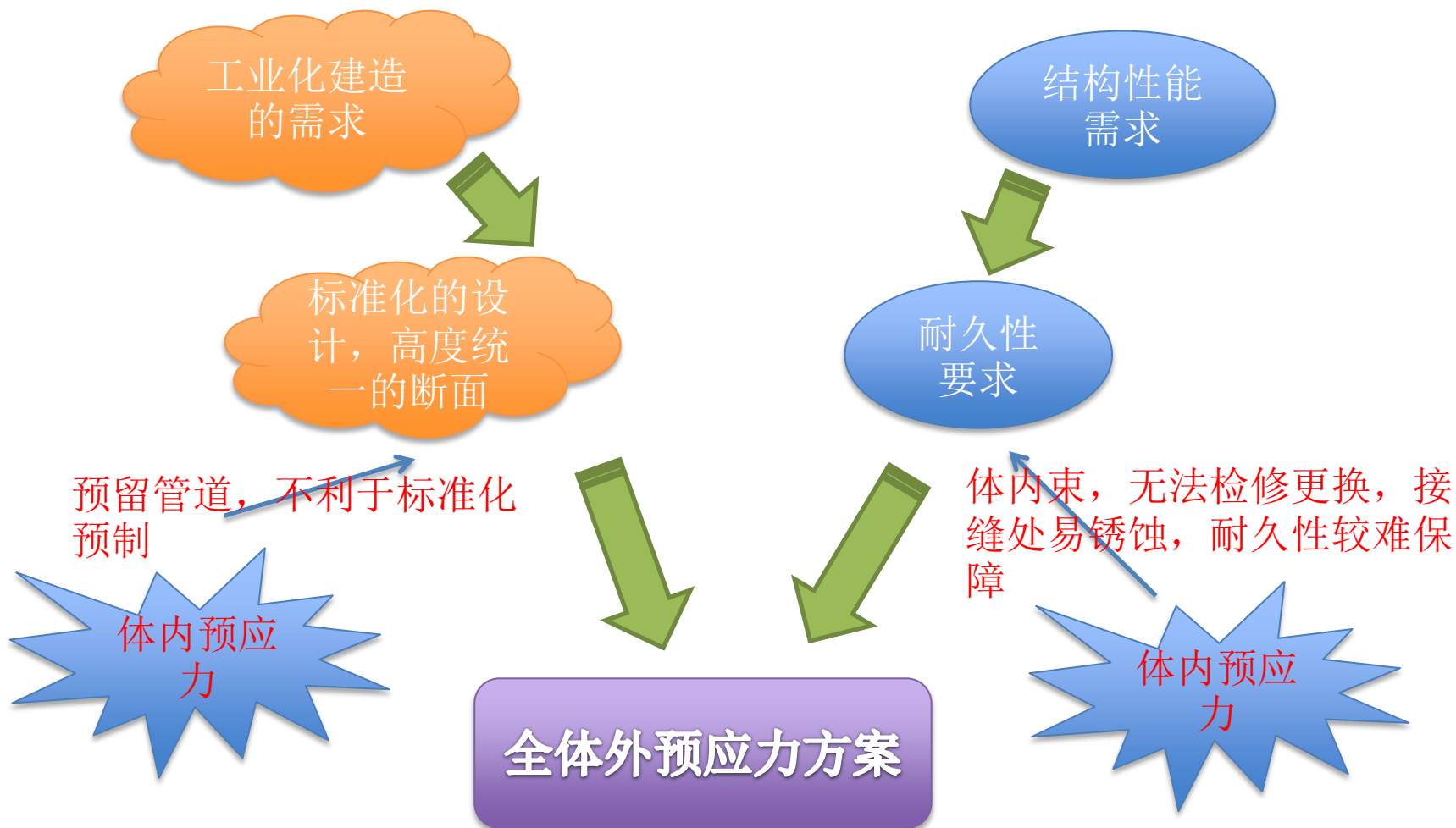
构造解决方案——总体构想

- 统一断面形式，全桥等截面
- 仅四种构造尺寸和配筋，标准节段、转向节段、墩顶节段、加强节段



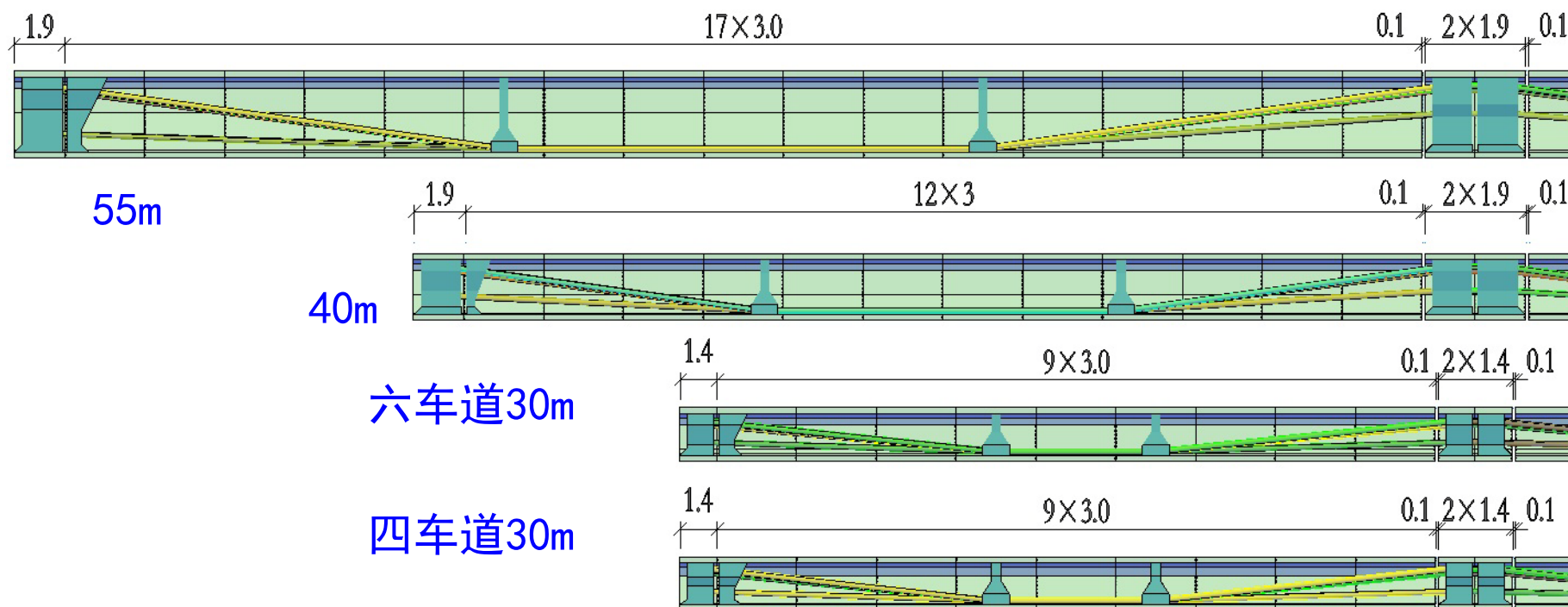


构造解决方案——全体外预应力的构想



构造设计——梁段

- 全线20034榀，共3中长度，4套型号外模
- 预制模板一致，最大限度规范预制施工



构造解决方案——断面

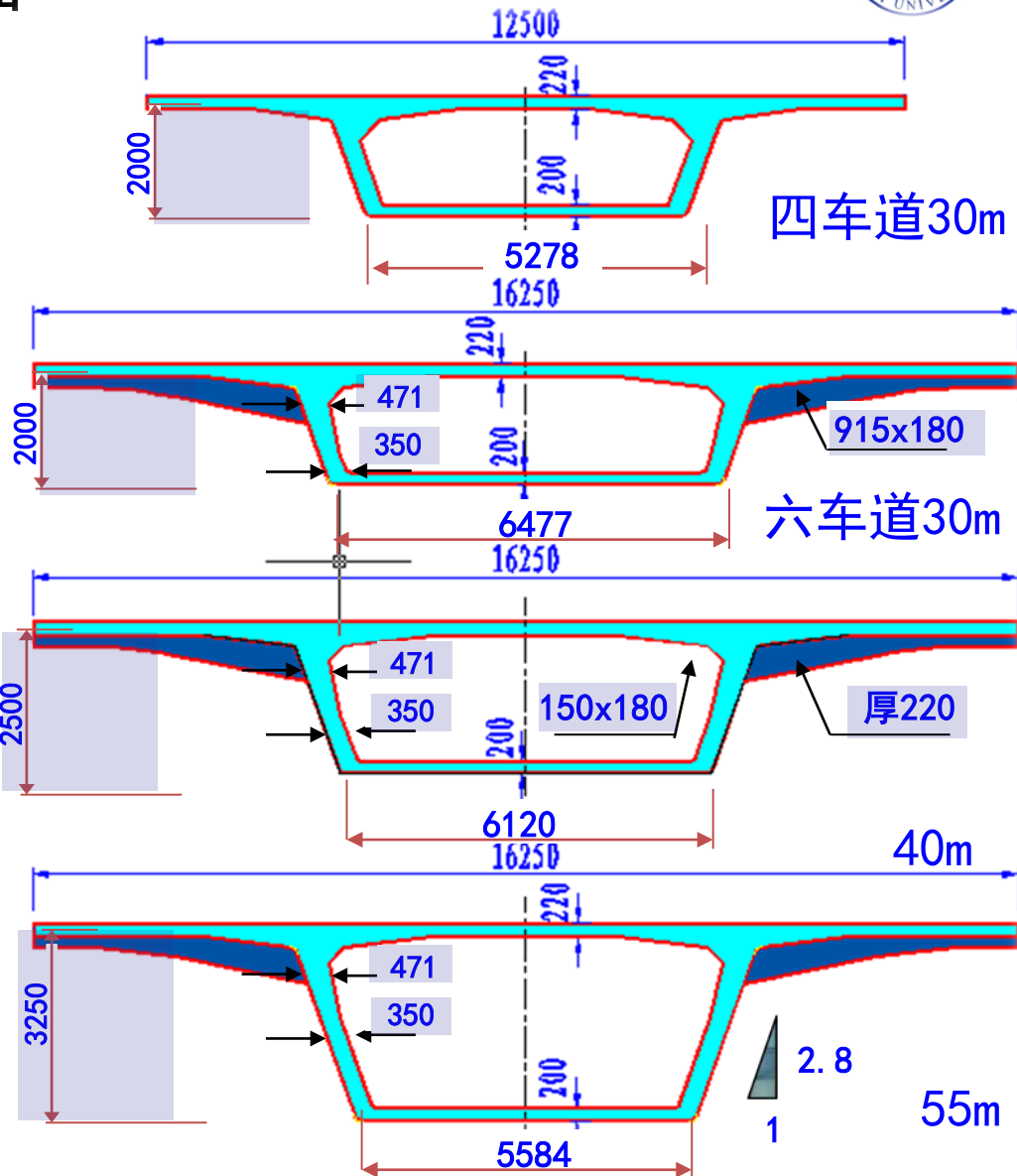
- 4种跨径共16种节段形式腹板、顶板及底板采用等截面布置
- 顶板厚220~400mm，底板厚200cm，



芜湖二桥



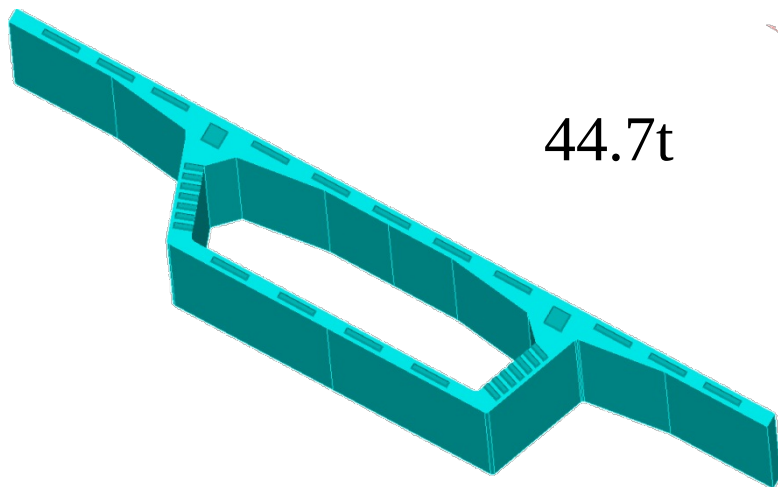
嘉绍





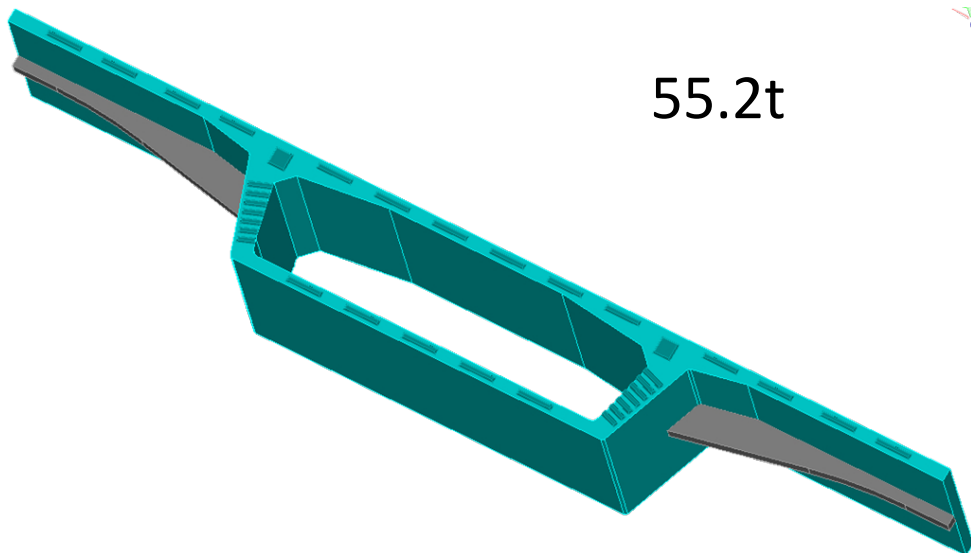
构造解决方案——断面

30m4车道标准段



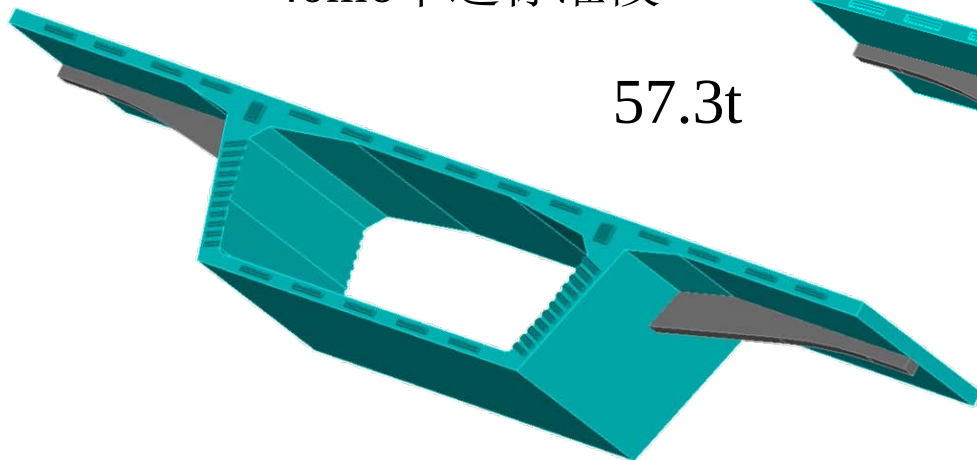
44.7t

30m6车道标准段



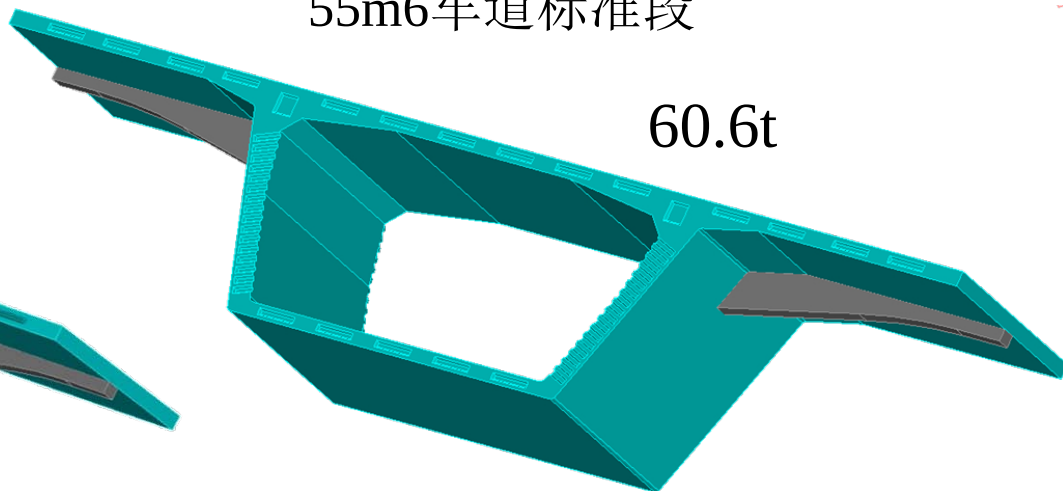
55.2t

40m6车道标准段



57.3t

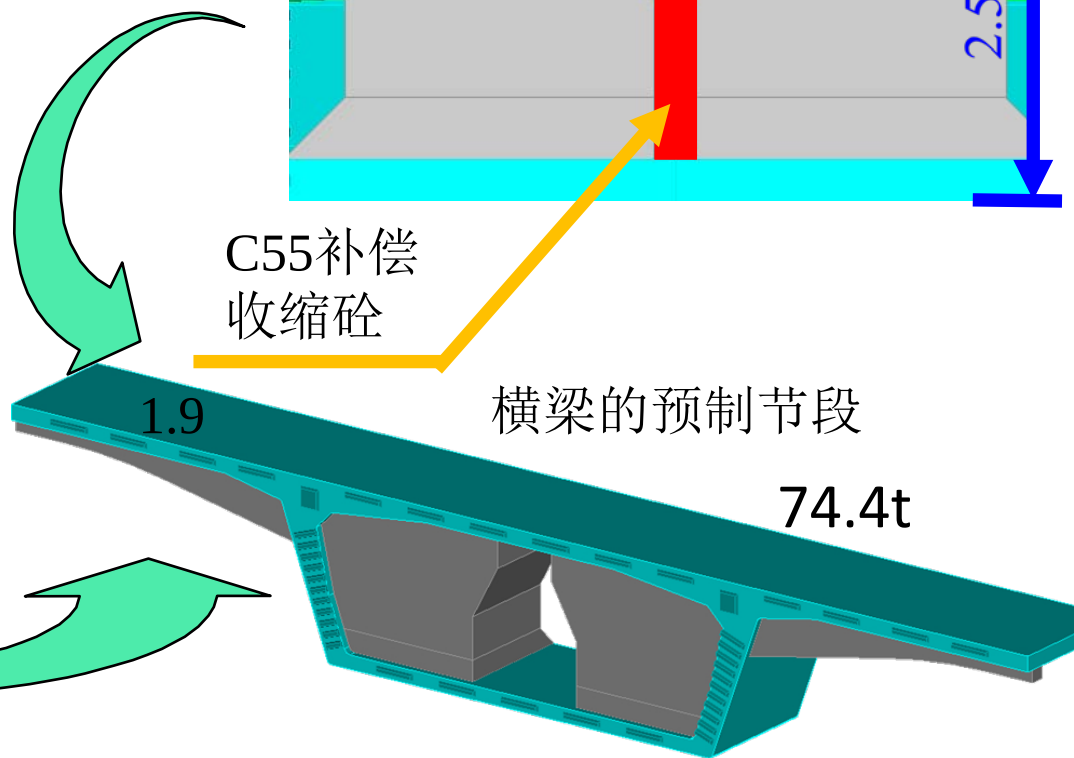
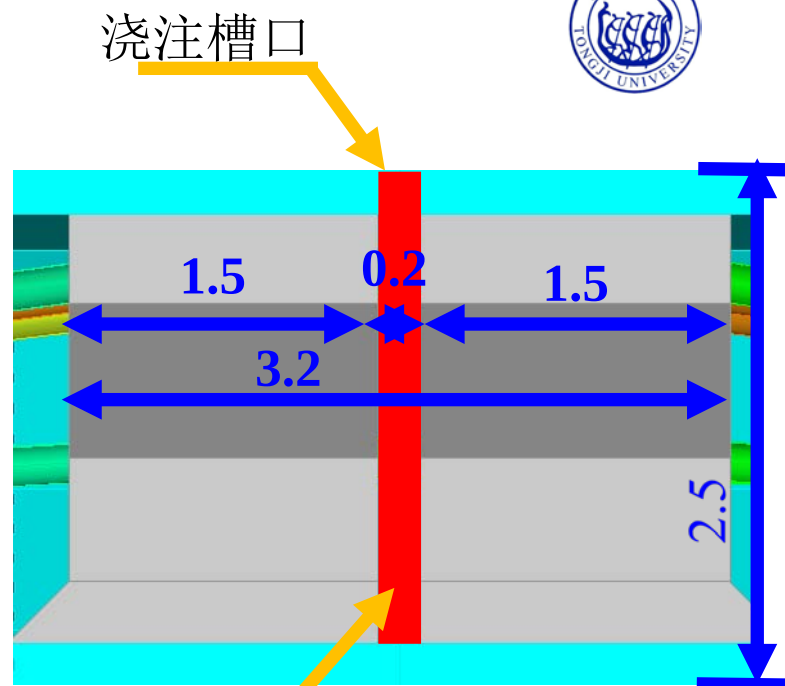
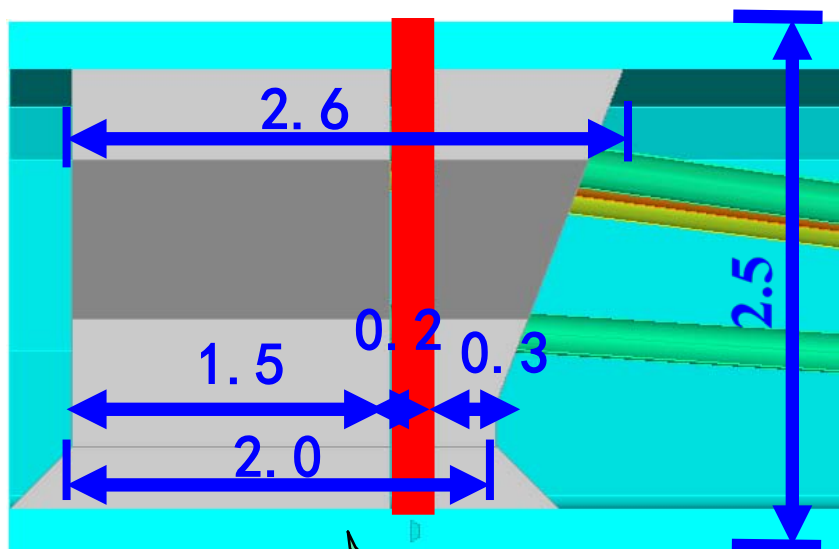
55m6车道标准段



60.6t

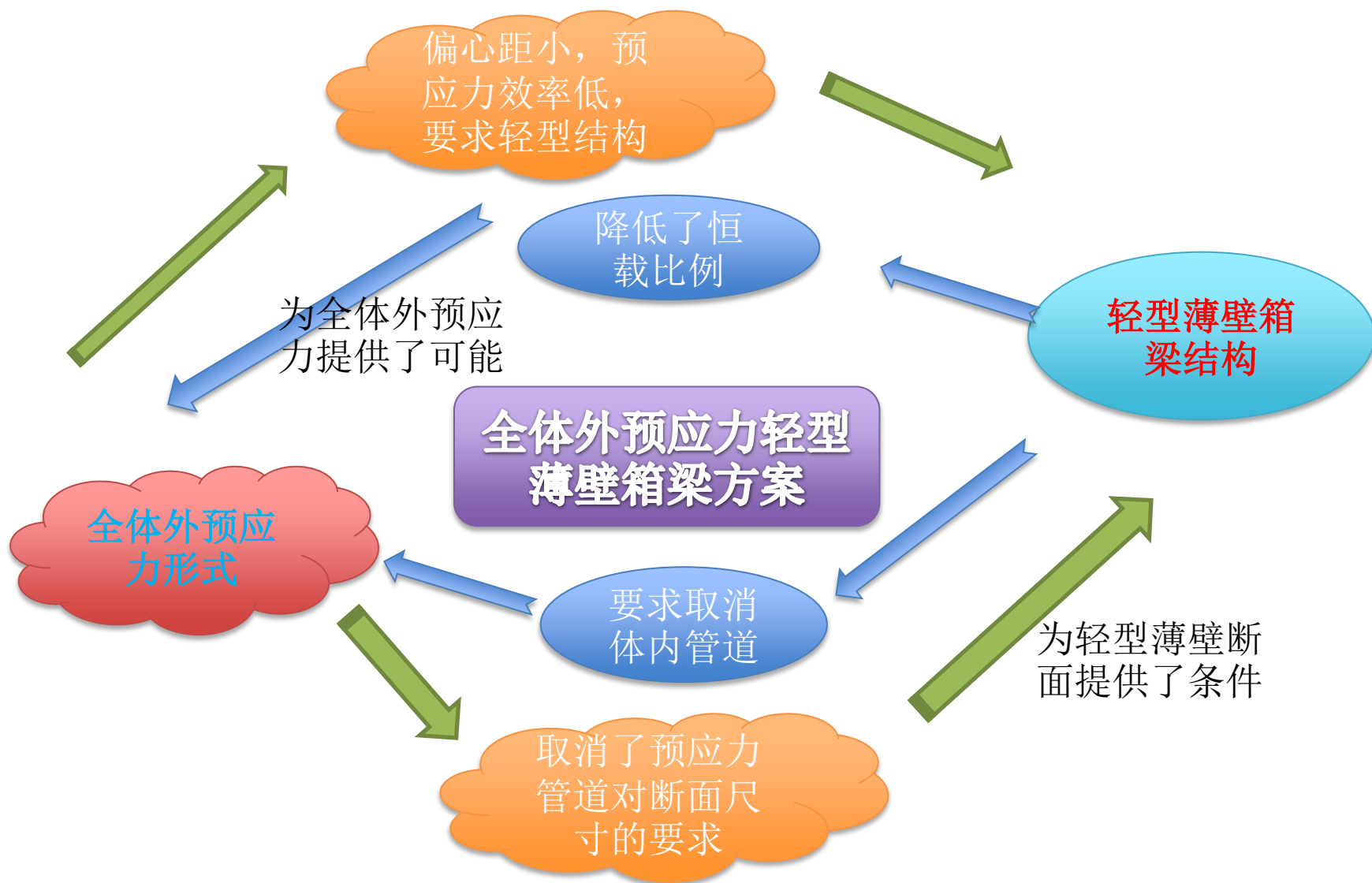
构造解决方案——墩顶块

- 采用两个完全相同的节段进行匹配预制，湿接，形式统一。
- 构造尺寸以参数优化选定



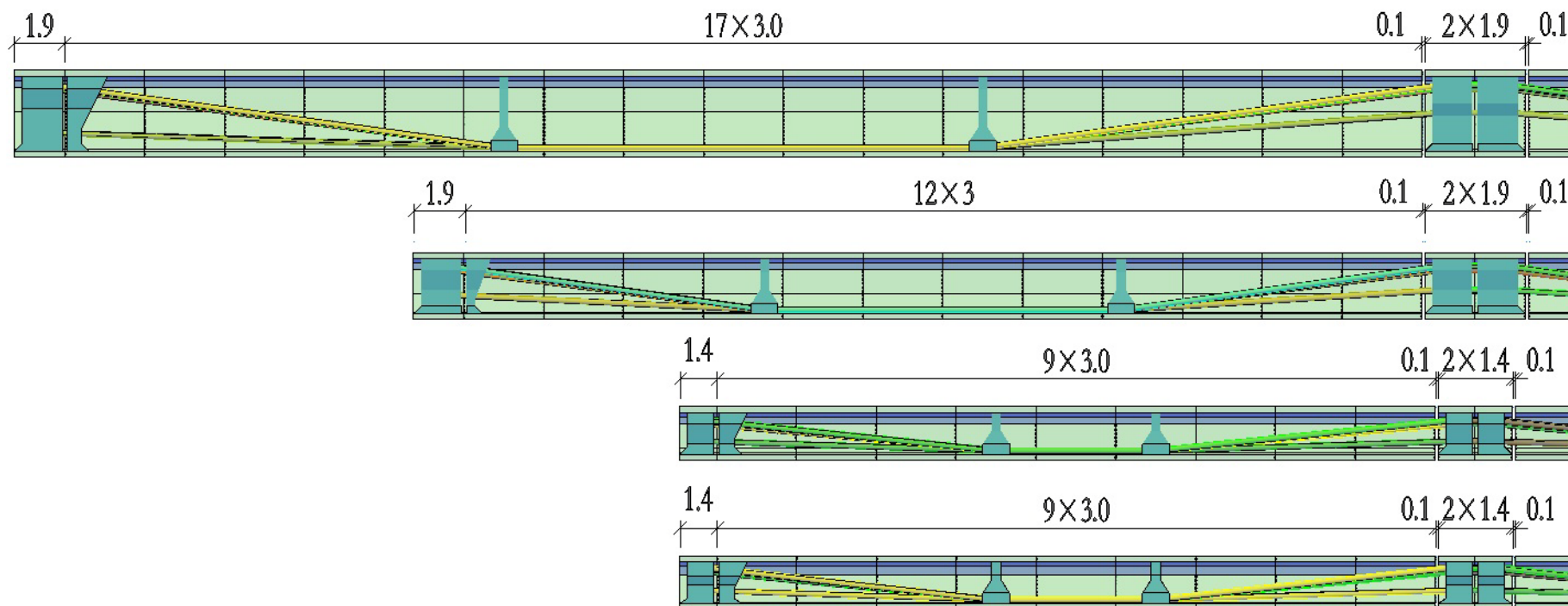


预应力解决方案——总体思路



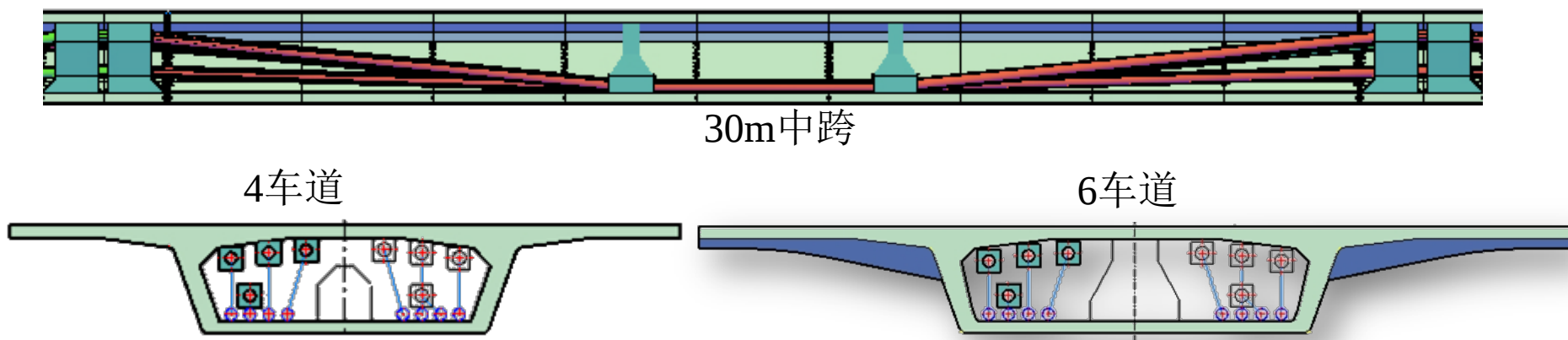
预应力解决方案——配束的整体思路

- 尽可能消除由预应力设置带来节段的多样性;
- 均采用单跨束配置, 统一标准化。
- 在墩顶位置采用交叉锚固, 解决墩顶块分离预制的整体性问题。



预应力解决方案——配束的整体思路

- 4车道30m边跨钢束 $6 \times 20 + 2 \times 25$ ，中跨钢束 $6 \times 21 + 2 \times 26$ ，配束指标 17.1kg/m^2
- 6车道30m边跨钢束 $6 \times 25 + 2 \times 25$ ，中跨钢束 $6 \times 26 + 2 \times 28$ ，配束指标 15.6kg/m^2
- 6车道40m边跨钢束 $6 \times 32 + 2 \times 32$ ，中跨钢束 $6 \times 31 + 2 \times 31$ ，配束指标 18.7kg/m^2

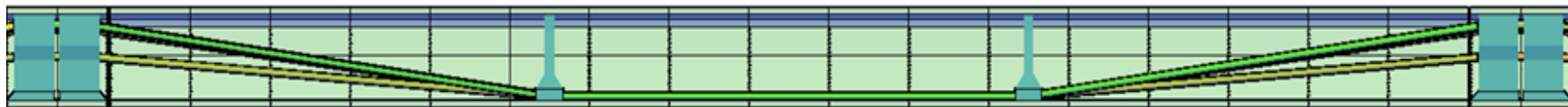


预应力解决方案——配束的整体思路

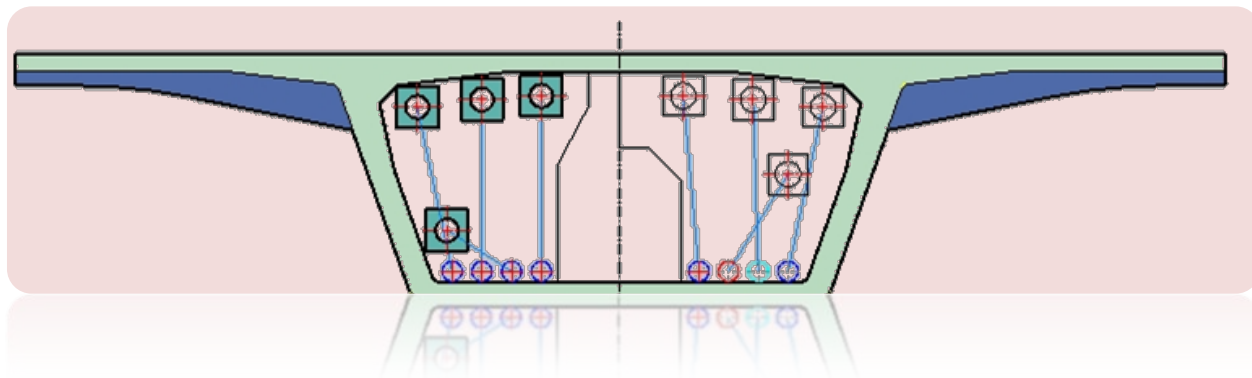
- **6车道55m边跨**钢束 $6 \times 41 + 2 \times 42$ ，中跨钢束 $6 \times 40 + 2 \times 40$ ，配束指标 23.5kg/m^2
- 苏通大桥50m跨径，顶宽15.8m，配束指标为 37.0kg/m^2
- 崇启大桥50m跨径，顶宽15.8m，配束指标为 37.7kg/m^2



55m边跨

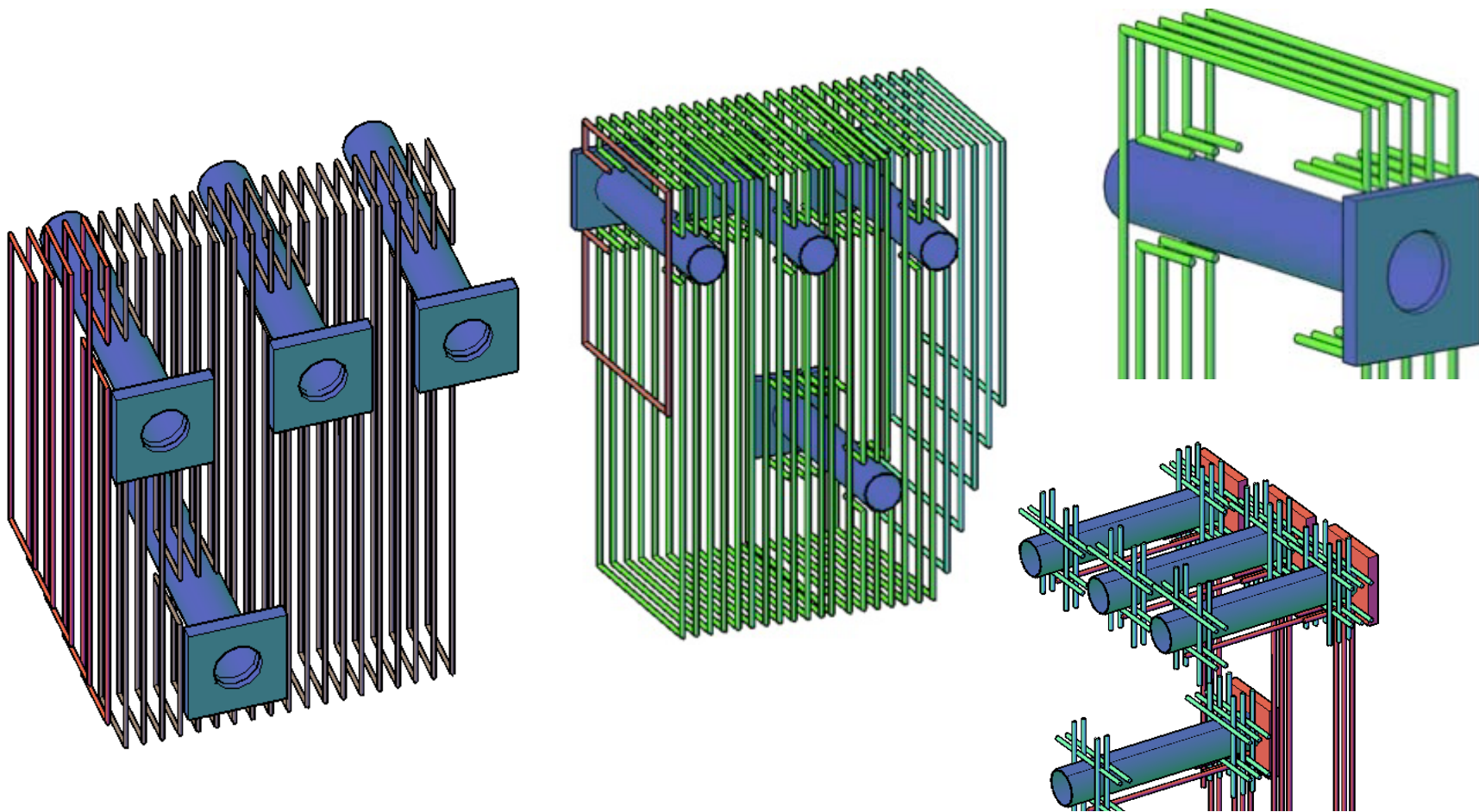


55m中跨



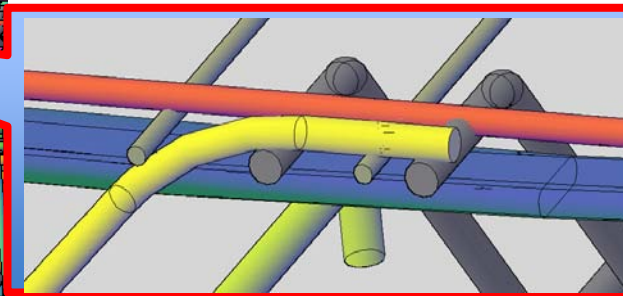
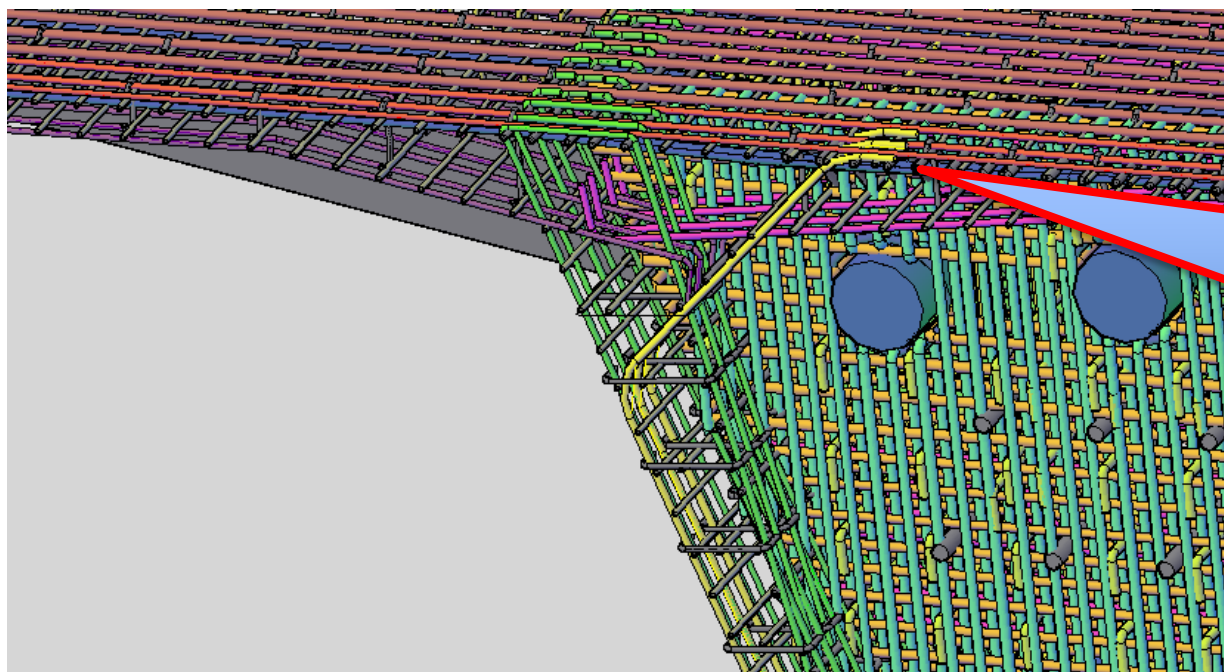
普通钢筋的解决方案

- 三维设计，模拟钢筋绑扎过程，设计充分考虑可施工性；



普通钢筋的解决方案

- 三维设计，模拟钢筋绑扎过程，设计充分考虑可施工性；
- 设计以绑扎施工为基本条件，实现钢筋的无焊接绑扎工艺

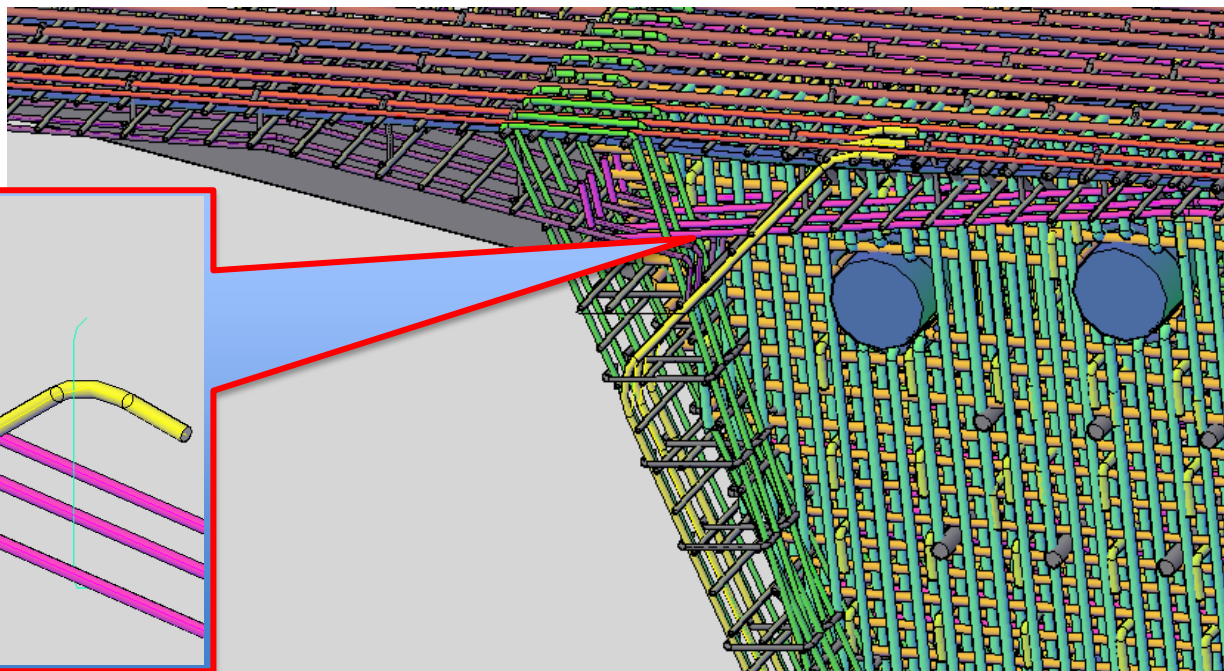
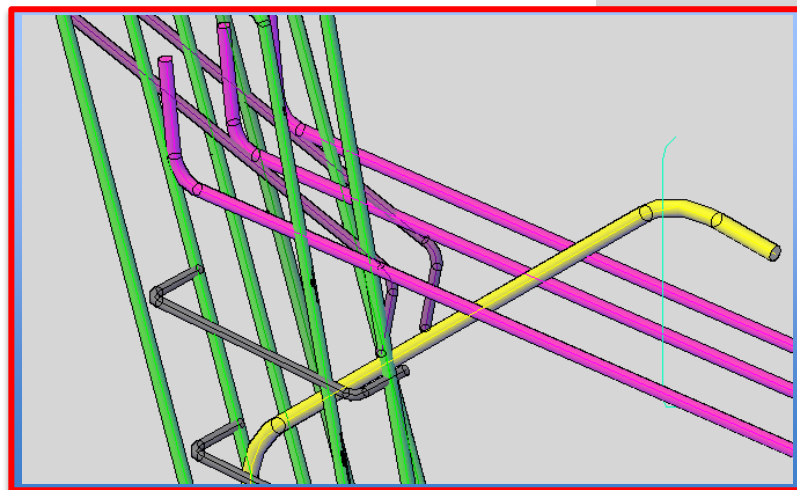


绑扎细节的考虑

普通钢筋的解决方案

- 三维设计，模拟钢筋绑扎过程，设计充分考虑可施工性；
- 设计以绑扎施工为基本条件，实现钢筋的无焊接绑扎工艺；
- 细化同类型不同长度的设计，做到零件加工图的层面；

绑扎细节的考虑



设计中的工业化元素

- 全线长度28.6km四种结构类型
- 共20034榀节段，3种节段长度；
- 4种跨径共16种节段形式

标段编号	节段梁长度 (km)	节段梁数量
预制场1	7.360	5400
预制场2	5.806	4186
预制场3	7.560	5284
预制场4	7.10084	5164





设计中的工业化元素

- 总体布置中跨径及宽度的优化组合
- 梁体构造形式的高度统一
- 所有结构均采用单跨简支配束，预应力配件型号统一；
- 预应力在每一跨内线性的简约化处理
- 精细化的钢筋设计；
- 机械化加工的思路；
- 全绑扎工艺的推行；



全体外应力节段梁力学性能保障



节段梁解决方案——力学性能保障

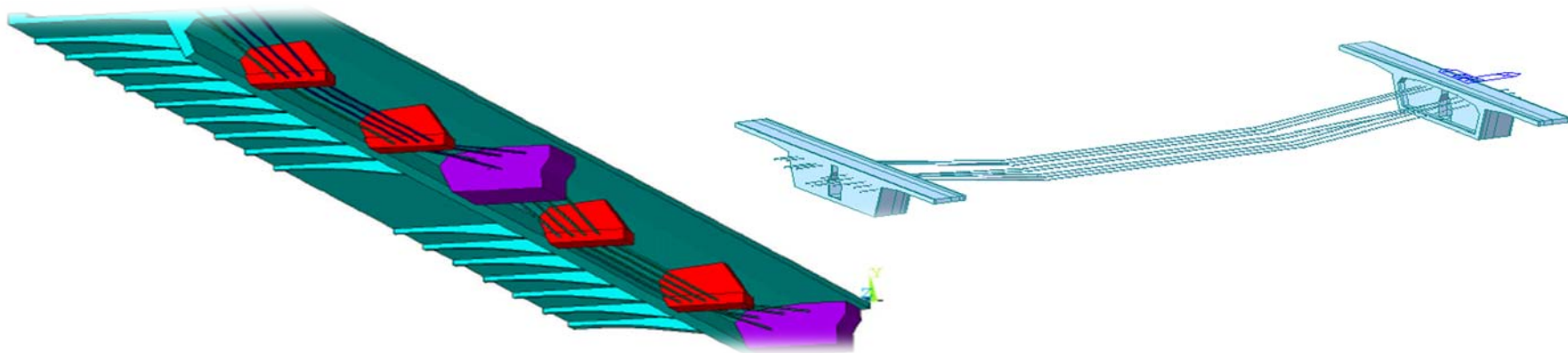
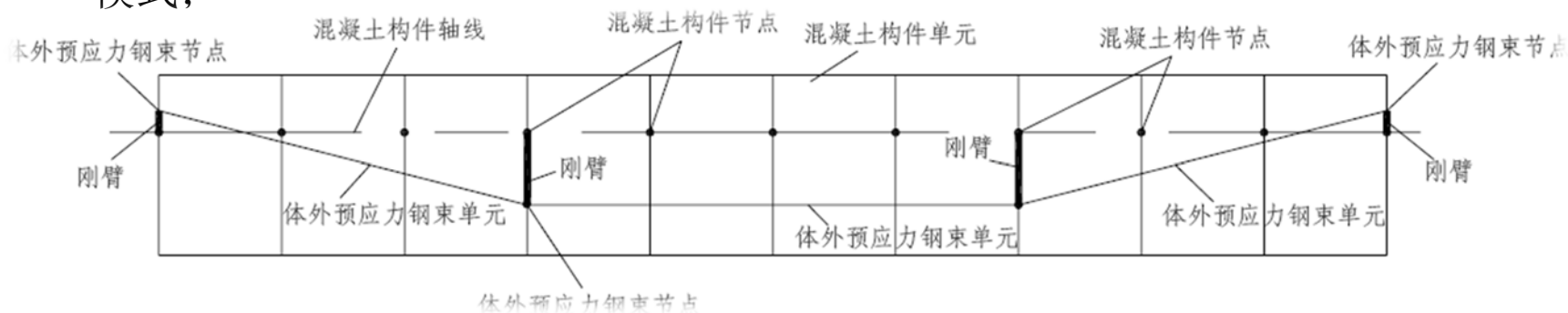
◆ 设计计算需要解决的关键问题：

- 计算模式的选定；
- 有效分布宽度的合理选择；
- 承载能力计算的模式选择；
- 通用构造与现有规范抗剪验算的矛盾；
- 体外束极限应力的合理选取；
- 墩顶块的合理构造与配筋。

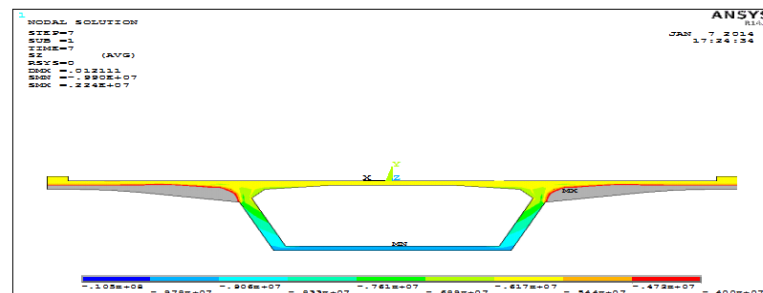
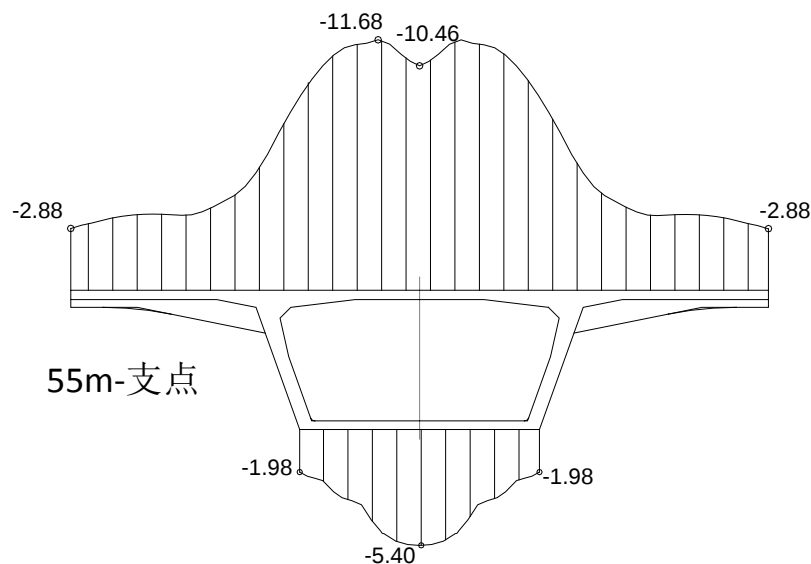
节段梁解决方案——力学性能保障

计算模式的讨论

- 以理论分析和数值模拟为依据，理论指导设计；
- 空间杆系计算模型的选定，开展了专题分析，利用实体验证，选定了合理的计算模式；



- 对截面的有效分布宽度进行了专题研究；
- 考虑体外预应力独特的剪力滞分布特性；
- 剪力滞特性分布与现行规范有很大区别；
- 跨中位置更为均匀，支点与预应力布置相关
- 不能简单按照规范选用。





节段梁解决方案——力学性能保障

抗弯承载能力
的讨论

- 对极限承载力验算模式尚无统一认识；
- 研究了“梁式”验算与“柱式”验算的不同模式与特点。
- 对现有规范和“指南”的推荐公式的机理进行了分析；
- 指南对极限状态体外束的应力选取偏保守；
- 对推荐公式提出了修正（包括钢束极限应变，钢束二次效应等）；
- 最终选定以修订后的“抗弯模式”验算，以考虑“P- Δ ”效应的偏压模式进行校核。

梁桥

or

倒矮
塔斜
拉桥





节段梁解决方案——力学性能保障

抗剪承载能力的讨论

- 轻型薄壁断面与《公预规》5.2.9条（最小腹板厚）的矛盾；
- 调研了AASHTO（1994）规范的相关规定；
- 参考了欧洲规范的验算方法；
- 现有规范规定来自钢筋混凝土梁的试验，计算模式不适用体外预应力桥梁。
- 充分分析比较的基础上提出了本桥的抗剪计算方法，解决等截面抗剪的可靠性。

$$\gamma_0 V_d \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} b h_0 (\text{kN})$$

应计入

预应力产生的剪力 V_P

一种荷载



节段梁解决方案——力学性能保障

钢束合理永存
应力的讨论

- 对永存预应力进行了专题研究；
- 针对体外预应力节段梁的特点进行分析；
- 基于体外预应力应力幅比体内预应力低的特点，
对允许永存应力提高5%
 - 体外预应力筋的允许应力
 - 体内预应力 $0.65f_{pk}$
 - 体外预应力筋的应力幅小于体内预应力
 - 国外 $0.70\sim 0.72f_{pu}$

不同预应力形式应力幅的差别

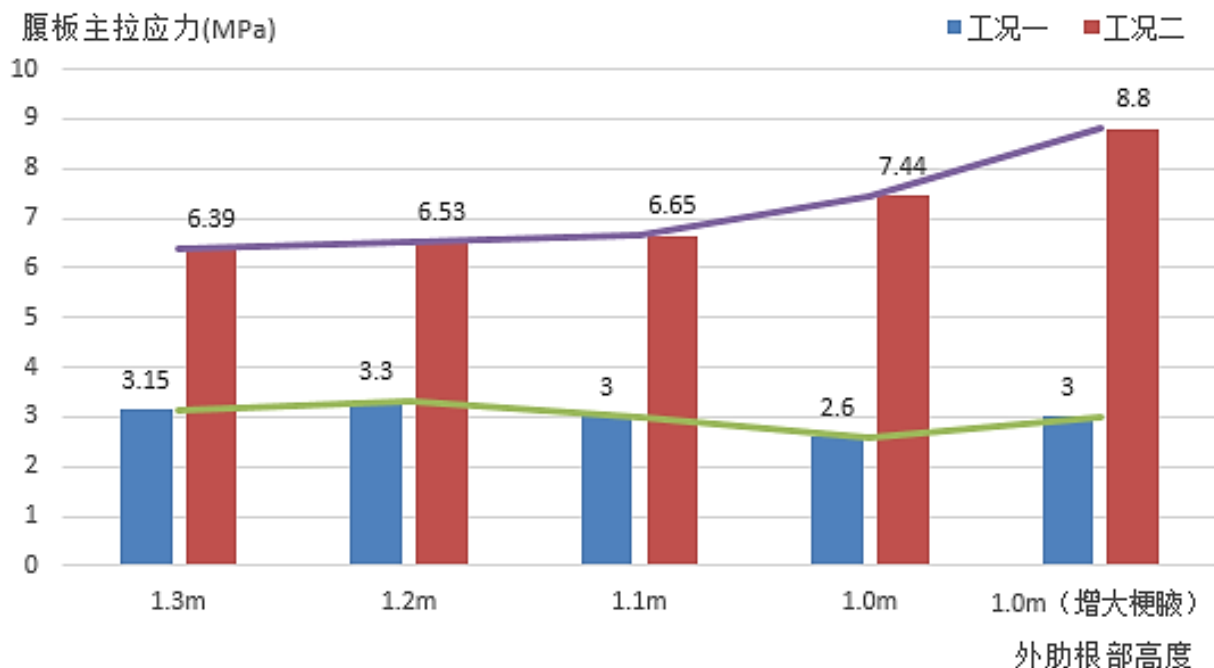
钢束形式	简支梁	连续梁
体外无粘结	15	15
体外有粘结	22	23
体内	30	28



节段梁解决方案——力学性能保障

构造的参数
优化

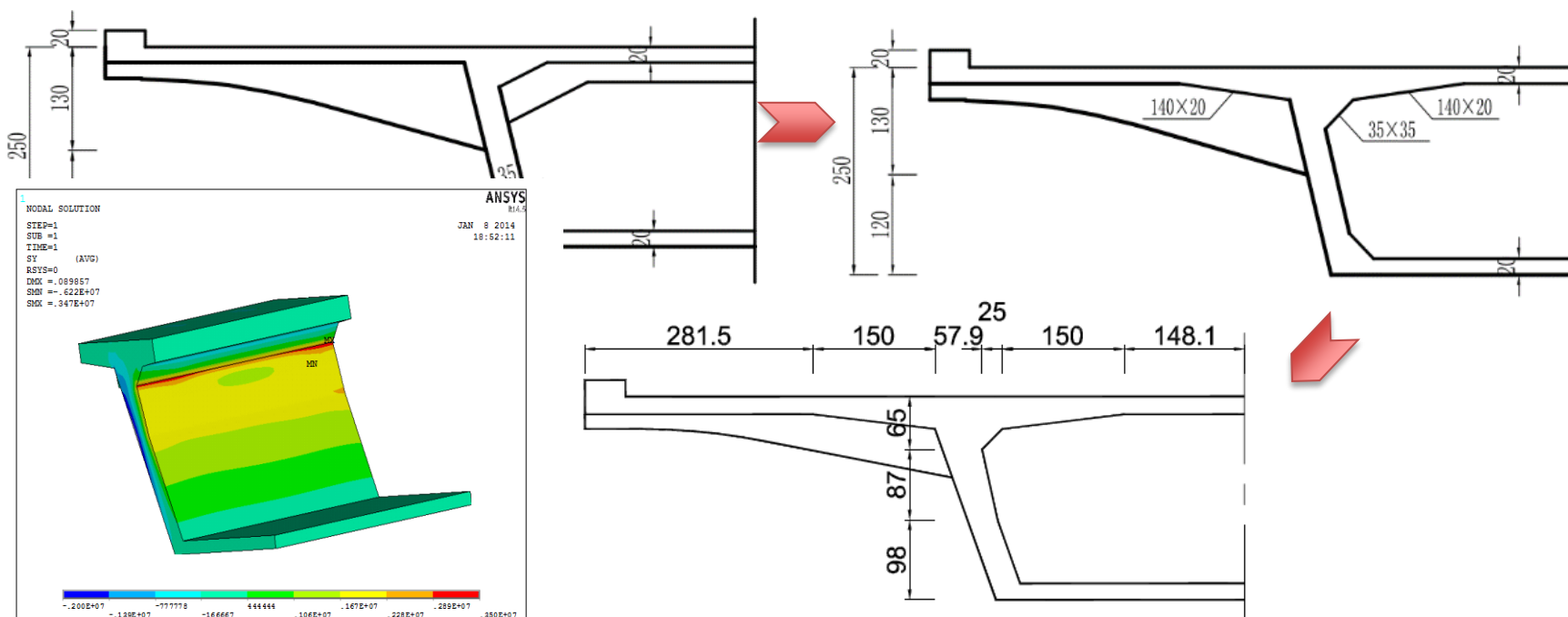
- 以结构优化确定构造尺寸；
 - 为了提高体外束的效率，要将材料应用在合理位置，严格控制自重
 - 对顶板尺寸、以参数化分析，选取最合理厚度
 - 对加劲肋的形式及尺寸，进行参数化分析，解决构造难题



节段梁解决方案——力学性能保障

构造的参数
优化

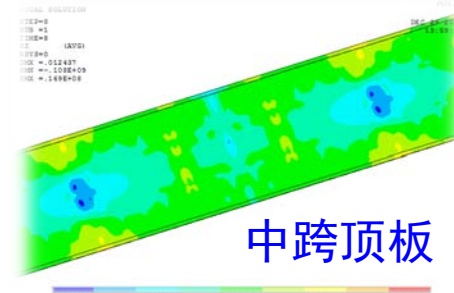
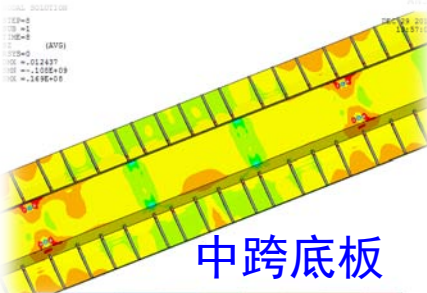
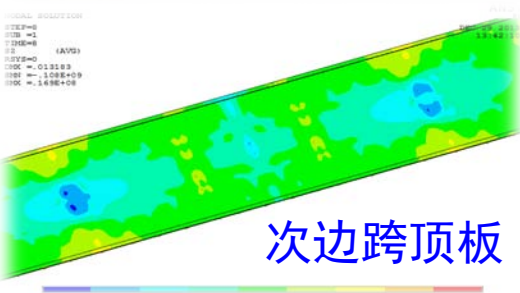
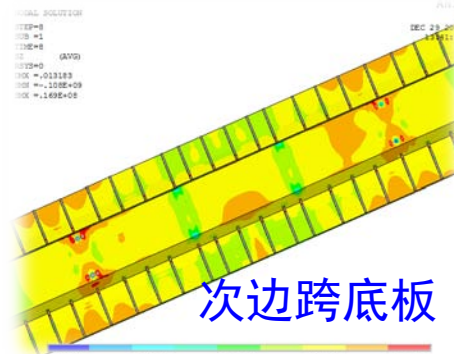
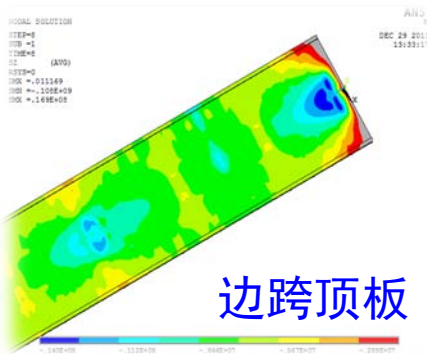
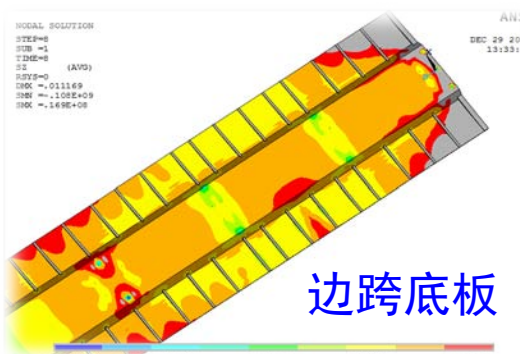
- 以结构优化确定构造尺寸；
 - 腹板尺寸、构造均采用参数优化的方法确定
 - 首次选用两折线腹板构造形式



节段梁解决方案——力学性能保障

全桥受力特性的校验

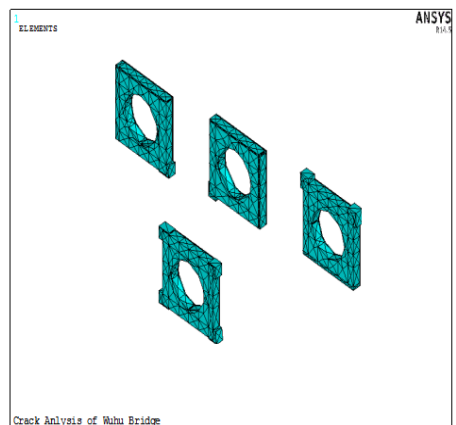
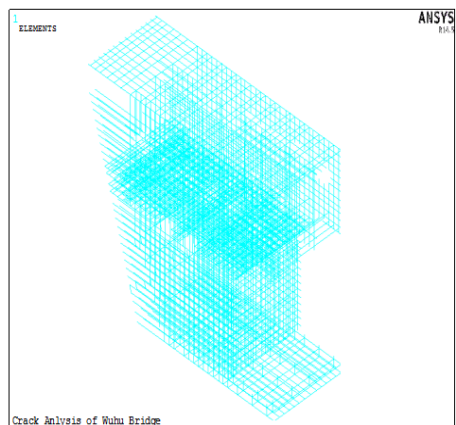
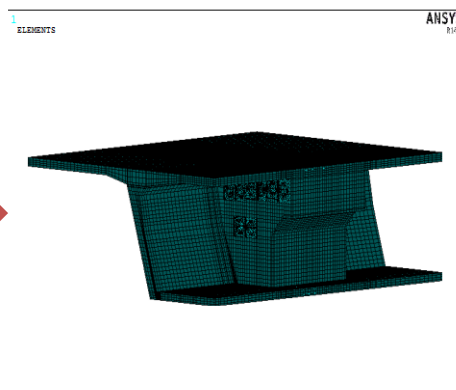
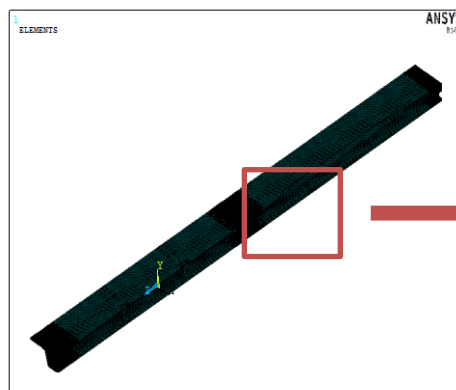
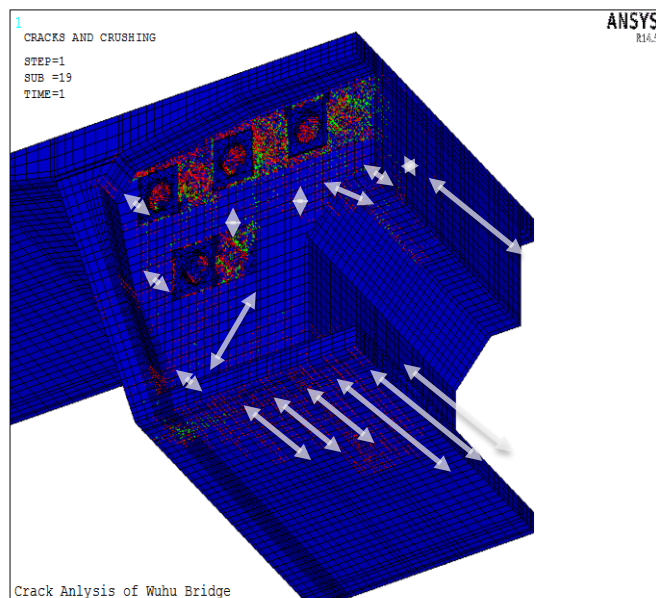
- 以结构优化确定构造尺寸；
 - 以全三维的设计计算分析结构的正式状态
 - 解决剪力滞后、车辆偏载等空间特性问题



节段梁解决方案——力学性能保障

墩顶块的专题研究

- 横隔板的构造进行专题研究；
 - 对隔板的形式选定进行分析，包括开口形式、倒角形式等；
 - 构造的形式直接决定了受力传递的模式，需要按照设计传力思路确定构造；



节段梁解决方案——力学性能保障

- 对预应力张拉过程中进行全面测试，全面把握结构在施工过程中的响应；
- 张拉过程中的索力监测，优化控制张拉应力的选取；
- 结构的整体应力分布，把握结构的应力储备情况，验证计算模式的选取可靠；
- 对专项块、墩顶块的响应进行测试，验证局部计算的准确性和优化的合理性。





节段梁解决方案——力学性能保障

- 开展横向特性研究，进行车辆加载试验；
- 验证带肋结构的横向计算模式；
- 解决带肋大挑臂结构的传力机理和计算方法；
- 验证横向的安全性可靠。



节段梁解决方案——力学性能保障

- 足尺模型试验对结构在使用过程中的性能进行测试，解决正常使用的抗裂性，结构使用过程中的合理性和可靠性。
- 正常使用状态跨中最大正弯矩试验；
- 正常使用状态支点最大负弯矩试验；
- 正常使用状态最大扭转试验；



节段梁解决方案——力学性能保障

- 对承载能力极限状态的机理性研究（包括钢束滑移、二次效应等）；
- 研究结构的破坏发展历程和破坏模式；
- 验证承载能力极限状态的安全性；
- 验证极限状态的计算模式和假定；
- 提出合理的承载能力极限状态验算模式。

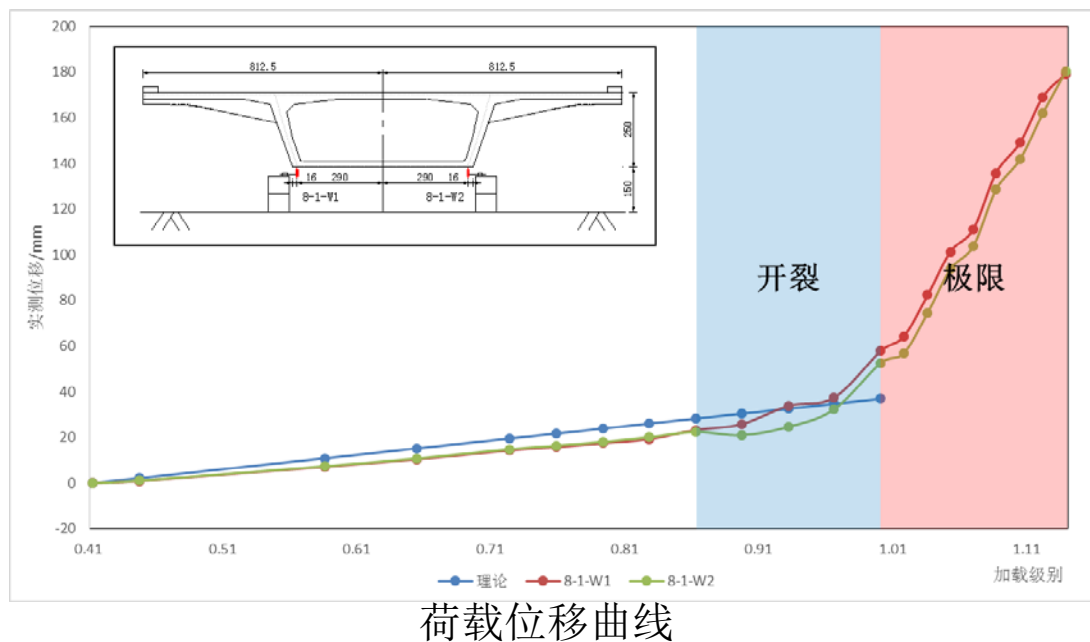


节段梁解决方案——力学性能保障

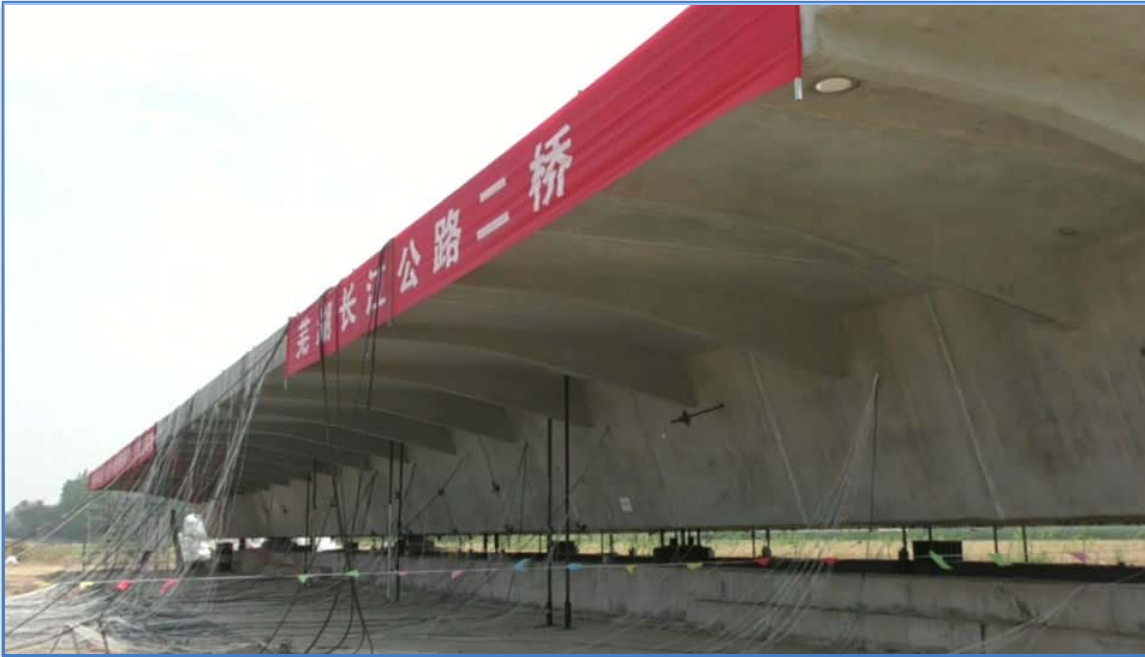


节段梁解决方案——力学性能保障

- 破坏阶段箱梁中间的裂缝最大宽度达到73mm;
- 以上缘混凝土被压溃为最后的破坏形态;
- 预应力钢绞线并未断裂;
- 卸载后梁体的裂缝均闭合.



Ultimate limit state



Ultimate limit state



Ultimate limit state



Ultimate limit state



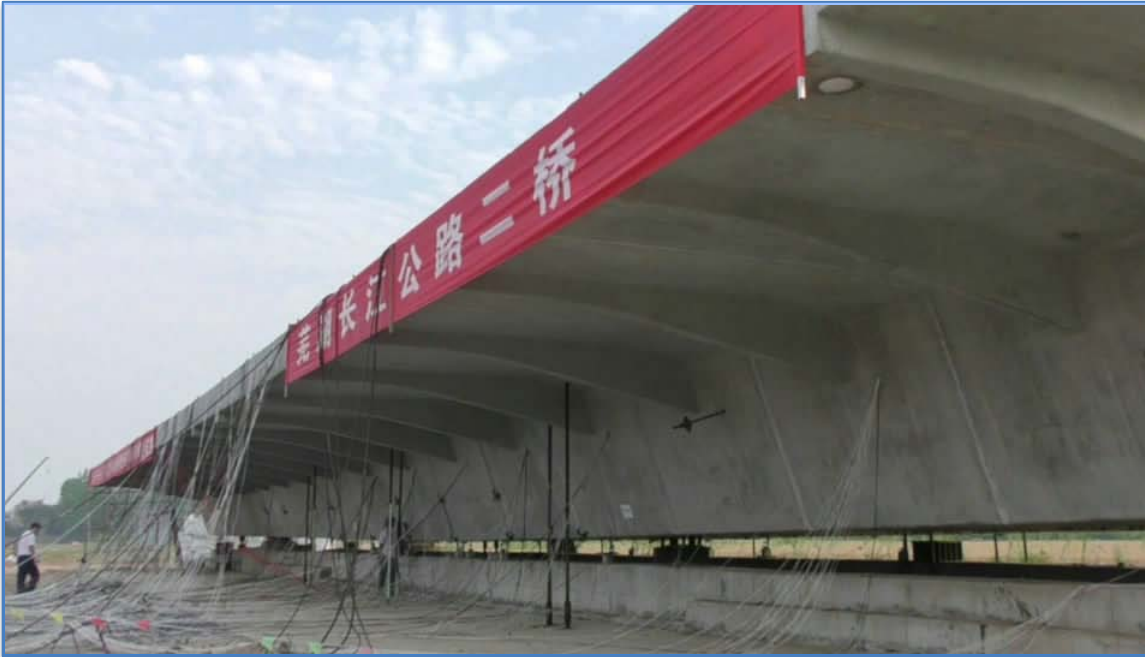
Ultimate limit state



Ultimate limit state



Ultimate limit state



Ultimate limit state



Ultimate limit state



节段梁解决方案——力学性能保障

- 试验证明跨中截面的极限承载能力大于设计内力的1.3倍，结构的极限承载能力满足要求（ $R > 1.32S$ ）。





节段梁解决方案——力学性能保障

- 结构的受力特性与理论分析结果较为吻合；
- 在正常使用过程中总体受力性能较好，在正常使用过程中主梁各断面均具有较好的压应力储备；
- 桥面板横向加载试验表明顶板上下缘都无拉应力出现，柔性大悬臂薄壁箱梁在车辆活载作用下的应力储备充足；
- 承载能力极限工况试验表明梁体的跨中和支点的承载能力满足要求；
- 梁体极限承载能力试验表明梁体经历了消压荷载（ $79.3\%Md$ ）、开裂荷载（ $89.6\%Md$ ）、破坏荷载（ $121\%Md$ ）三个关键阶段。
- 在荷载加载至截面设计承载能力的 121% （ $1.21rMd$ ）时梁体上缘混凝土出现了压溃现象，梁体的竖向位移开始发散，此时认为结构达到了承载能力。



节段的机械化加工和工厂化生产



面向工业化的方案：工厂化施工

- 钢筋工程：钢筋下料、加工、绑扎、入模均建立流水化作业；
- 模板工程：模板形式统一，类型简单，操作顺序完善；
- 混凝土工程：厂拌；浇筑、养护机械化、自动化，形成固定的工序；
- 检验：专门编制了相关的施工指南等规范化施工手册。

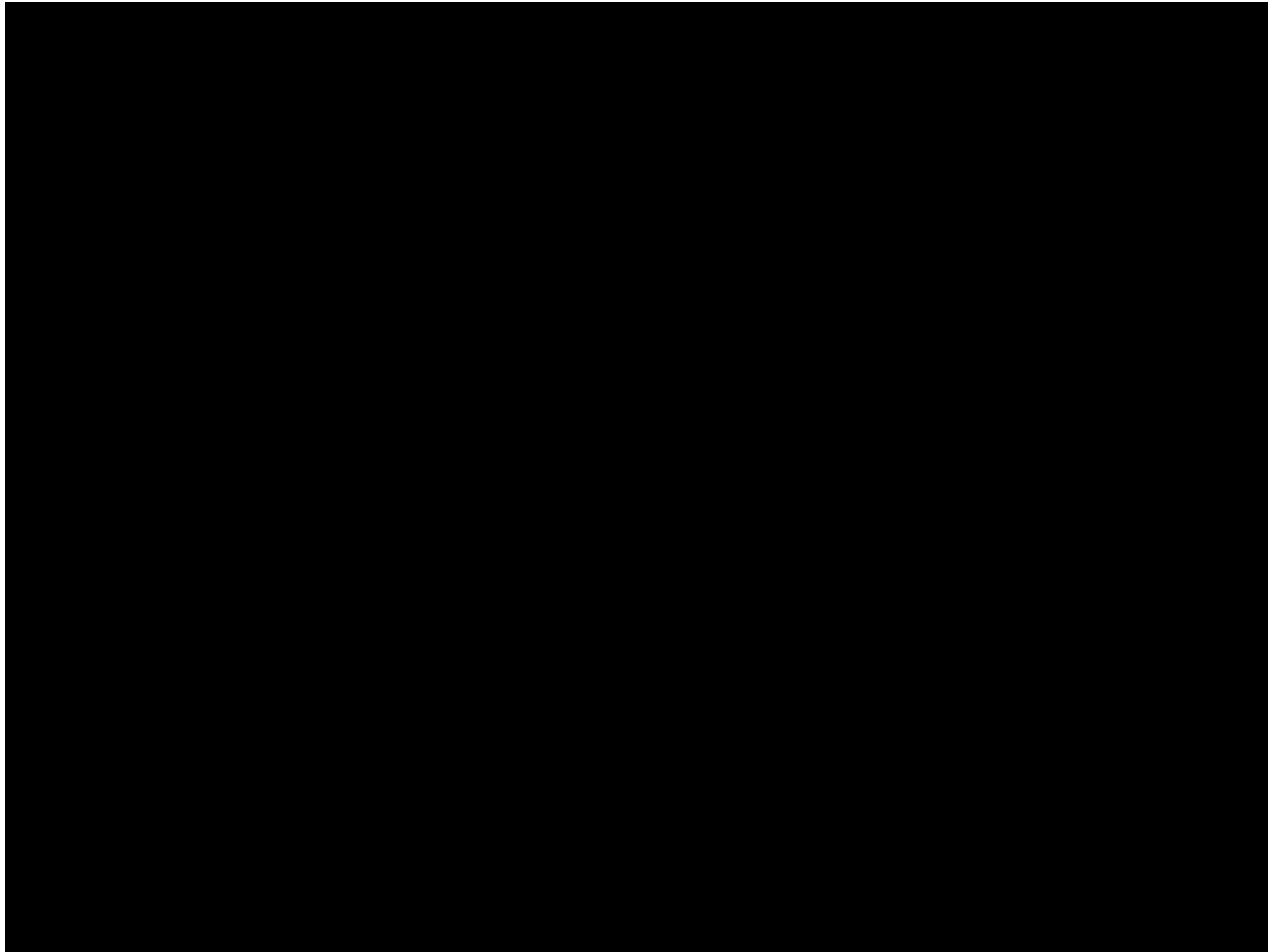
确保质量、提高效率！

Segmental precast: short-line match precast method





Short-line Match Precast





面向工业化的方案：工厂化



预制厂区

面向工业化的方案：工厂化



钢筋加工车间

面向工业化的方案：工厂化



钢筋绑扎台座

面向工业化的方案：工厂化



预制养生棚

面向工业化的方案：工厂化



场内存梁区

面向工业化的方案：机械化



面向工业化的方案：机械化



型号归类，货架式存放管理

面向工业化的方案：标准化绑扎



建立完善工作制度，合理的绑扎顺序，细致的绑扎流程，实现快速精确绑扎。

面向工业化的方案：机械化

- 首次在国内建设中采用下行架桥机架设施工；



提升站提梁



梁上运梁



前端拼梁

预制养生棚



搬梁机



存放区



阶段运输



上行式架桥机





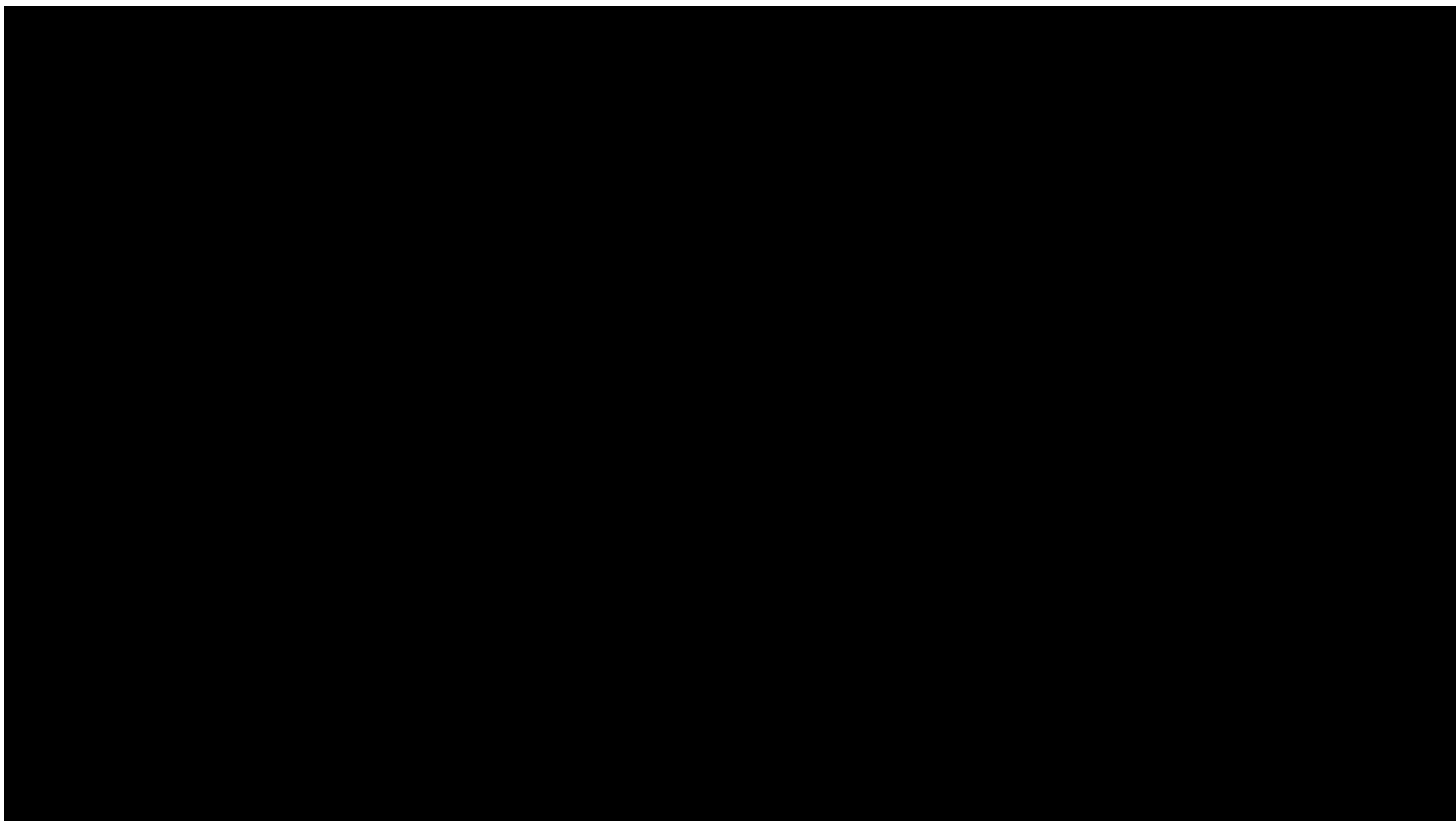
下行时架桥机





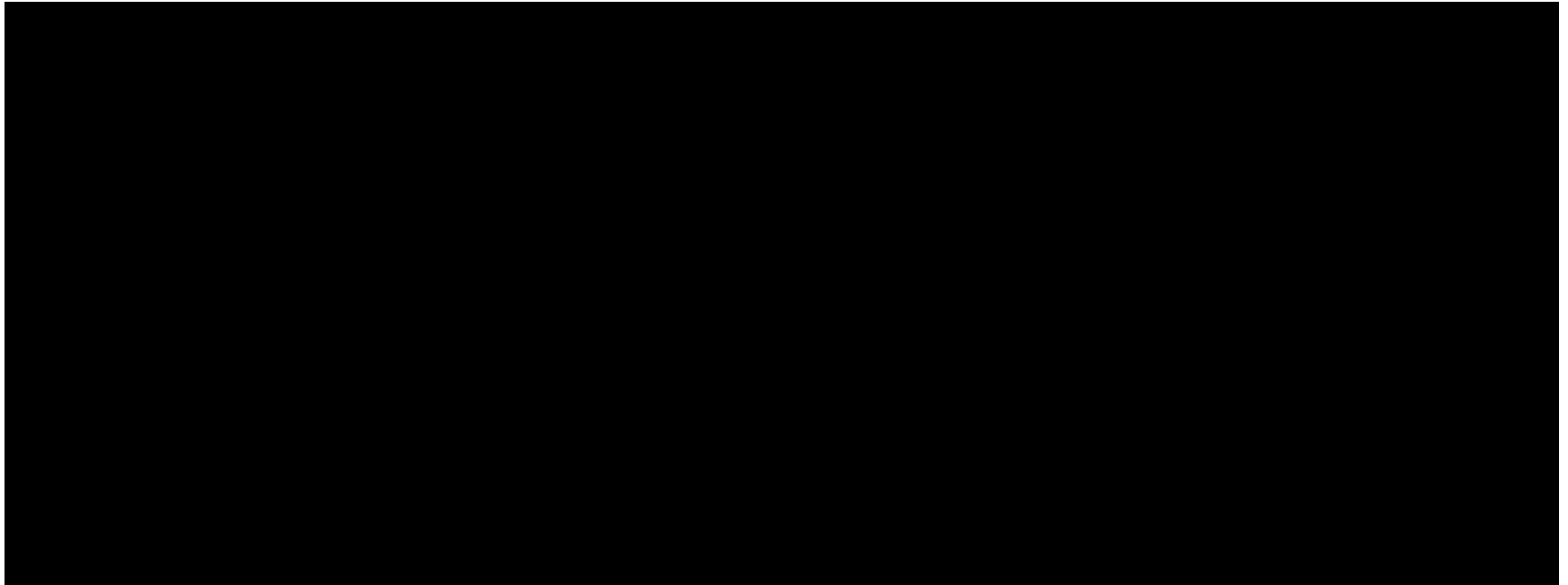


上行式架桥机





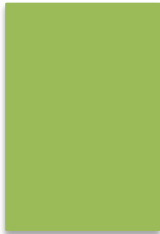
下行式架桥机





上、下行式架桥机比较

比较项目	上行式	下行式
工效（二桥）	4~5	6~7
适应结构形式	墩顶块现浇	全预制安装
难度	墩顶块安装	架桥机过孔
缺点	架设对墩顶块有扰动	桥机过孔需要辅助支撑
优点	可适应不同的墩高	托架对墩高有一定要求
安全性	安全风险略高	安全风险底



节段梁的信息化管理



项目面临的挑战——海量数据

- $20034 \text{ 榀节段} \times \text{每榀} 6 \text{ 个测量控制点} = 120,204 \text{ 个控制点}$;
- 每个控制点测量六次
 - 浇筑完、匹配指令、匹配完、架设指令、架设完、张拉完
 - 共72.1万组，216.3万个控制测量数据;
- $20034 \text{ 榀节段} \times \text{每榀截面尺寸控制数据} 10 \text{ 个} = 20 \text{ 万个}$
- $36.6 \text{ 万根体外束} \times \text{控制张拉力、引伸量} = 73.2 \text{ 万组数据}$;

控制与管理总信息量超过：309.5万个数组



项目面临的挑战——高效的交互

- 频繁的数据交互
 - 匹配指令、架设指令必须建立在已完成预制节段基础上；
- 数据质量的控制
 - 测控数据在施工、驻地监理、总监办、设计单位、监控单位、业主单位之间进行流转；
- 数据的关联性强
 - 环环相扣，如有一个环节出现迟滞，会导致工作无法顺利进展；



项目面临的挑战——多样化的需求

- 参建各方对系统的需求：
 - 业主——查看、评估、总体管控等；
 - 总监办——查看、管控、考核等；
 - 驻地监理——查看、审核、管理、监督等；
 - 设计单位——查看、知道、通告等；
 - 监控单位——数据核查、指令计算、控制分析、指令发布等；
 - 施工单位——数据上传、指令下载、内部管控等；



应对挑战的措施——基于网络模式的探索

- 传统控制方式
 - 现场服务，每个标段至少配备4人，4个标段16人；
 - 本地数据库处理，各标段独立运行
- 基于网络模式的探索
 - 云计算思路的运用
 - 集中数据库、服务器运算
 - 数据从终端上传
 - 从终端获得指令



系统的总体设计思路

- 采用基于网络平台的云计算监控与信息管理系统
- 基本信息共享、数据资料共享、信息交流
- 预制、架设数据动态跟踪、实时更新
- 数据分析能力：形象表现施工误差状态，有利于加强现场管理；
- 数据各参建单位同步可见，提高管理效率
- 与设计BIM模型对接，实现建管养一体化



节段梁信息系统——开发

网络平台:

登陆
窗口



Note:

通过定制角色与分工，适应工程需要，配合工程进展。





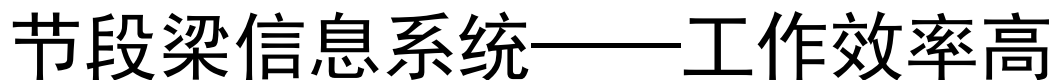
节段梁信息系统——数据流转速度快



无纸化的办公方式

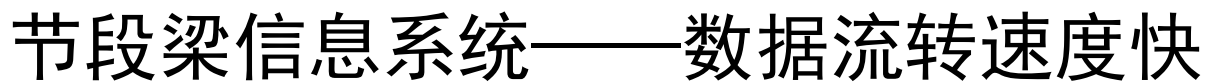
云端即时计算模式

即时形成指令
措施, 精准而
且高效



- 每天预制28榀，数据流转674组；
- 架设日均14榀，数据流转504组；
- 预应力张拉日均288根，数据流转576组；
- 每天质量管理数据198组；
- 所有指令均可即时自动计算下发，3人轮班在上海管理



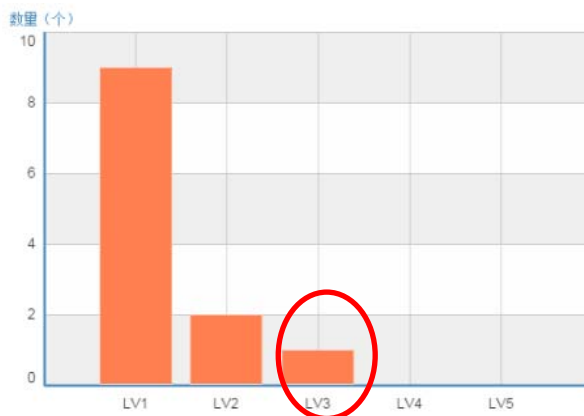
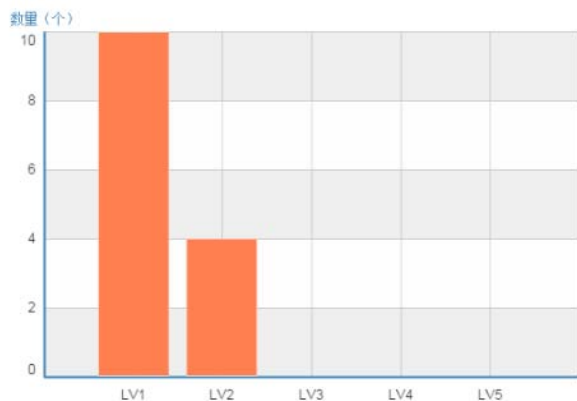


- 每日系统自动生成质量分析评价报告一份；
- 驻地监理、总监、业主均可下发管理监督指令；
- 管理指令系统可自动发送短信通知相关单位；



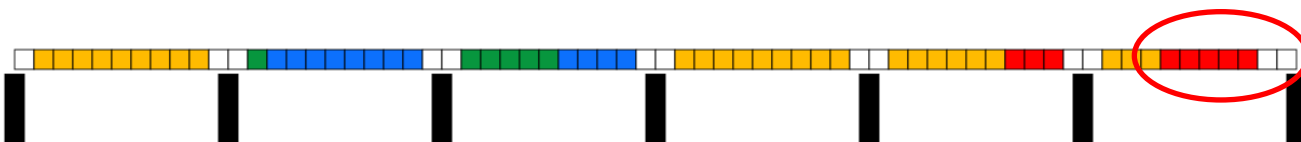


节段梁信息系统——及时发现现场存在问题

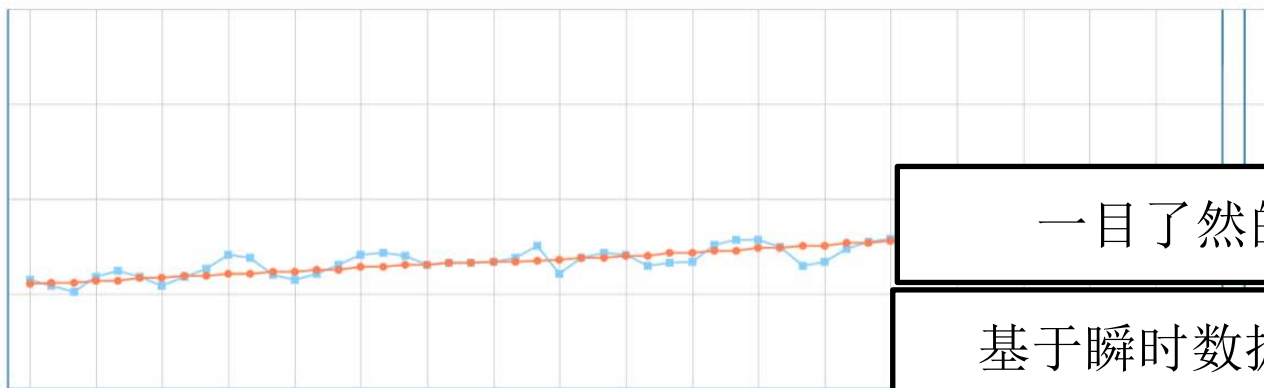


对于施工单位，优
化工序进展

对于业主单位，及
时加强管控



无为堤北引桥贵山段预制高程图

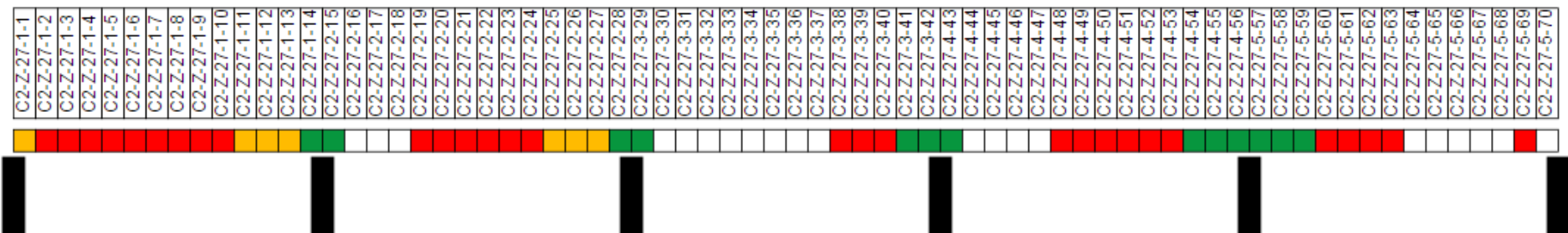


一目了然的质量呈现方式

基于瞬时数据的云端统计模式

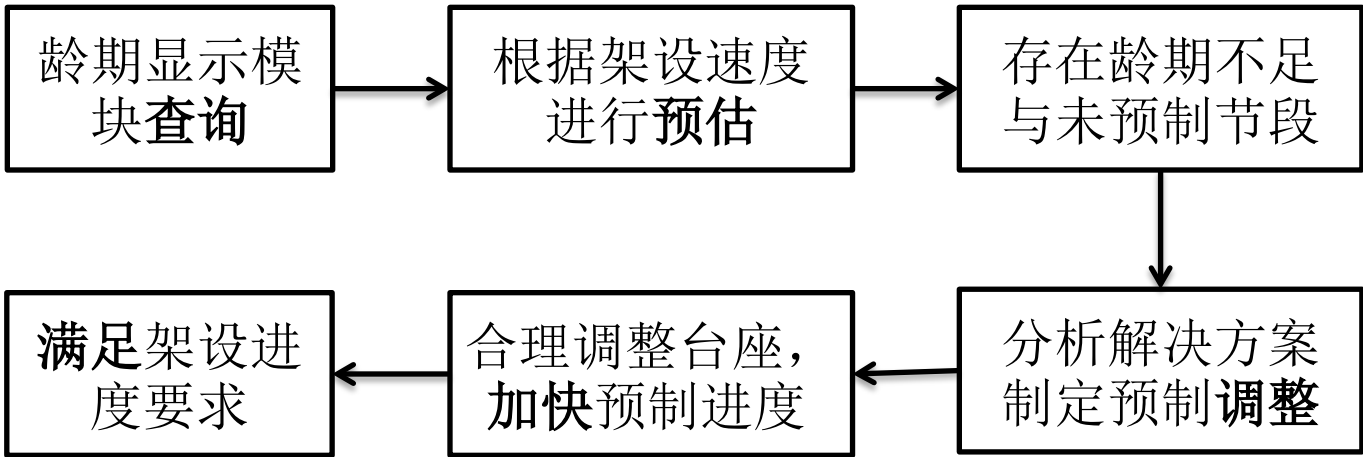


节段梁信息系统——优化工序进展



墩顶块: 0-10天 红色 大于10-20天 黄色 大于20-30天 蓝色 大于30-无限 绿色
标准块: 0-30天 红色 大于30-60天 黄色 大于60-90天 蓝色 大于90-无限 绿色

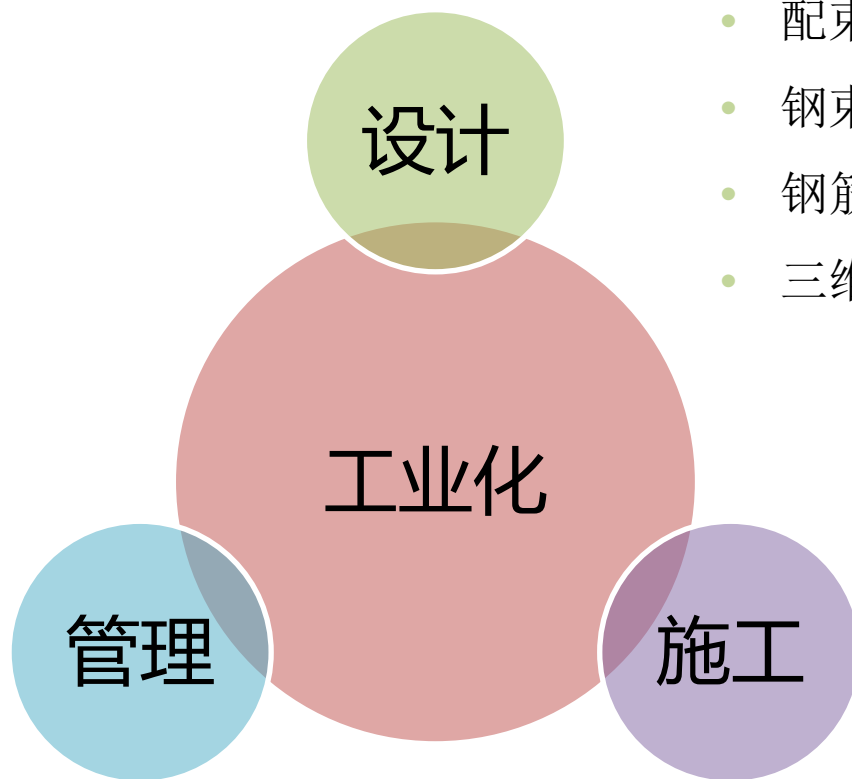
案例：解决了某标段可能出现龄期不足为。





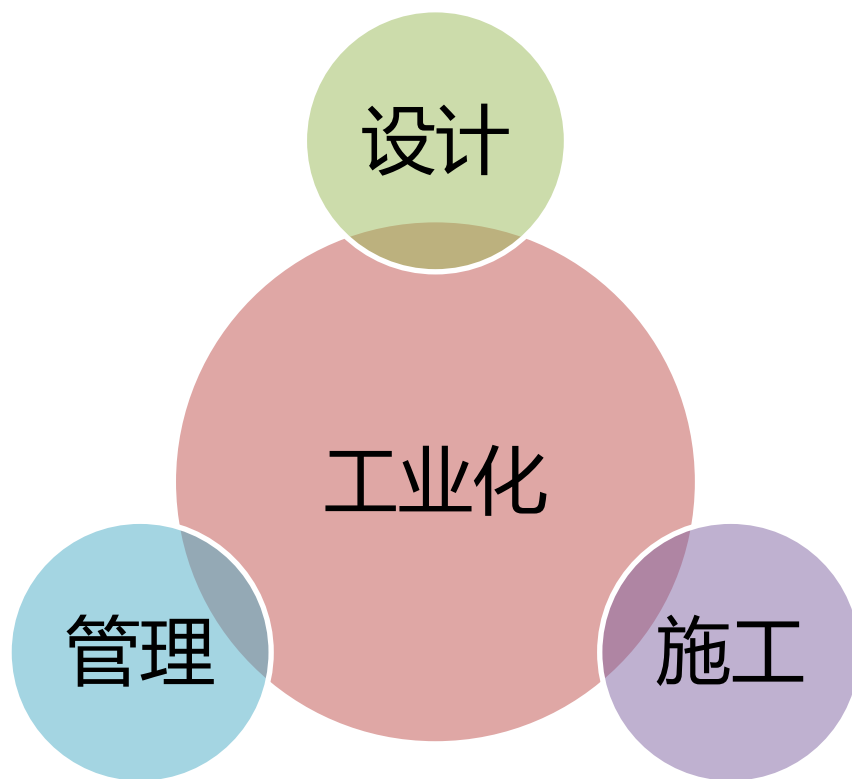
结 语

面向工业化的方案：技术的支持



- 构造设计：简化断面形式，减少节段种类
- 配束设计：采用全体外束，简化箱体
- 钢束线形：线形简单一次转向，标准化高
- 钢筋配置：形式统一，便于加工
- 三维设计：模拟施工过程，对施工指导性高

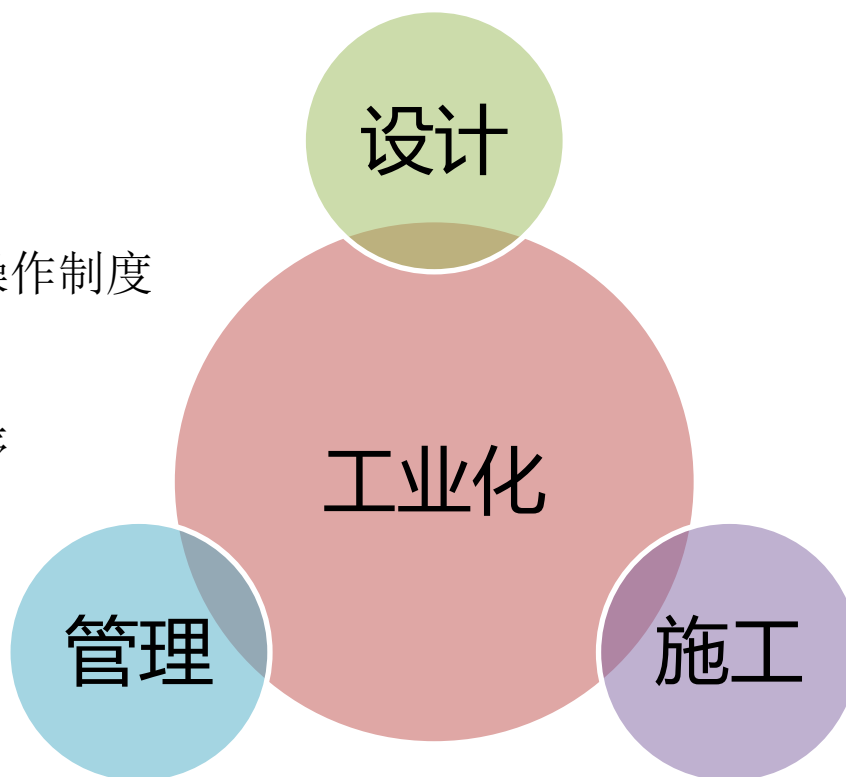
面向工业化的方案：技术的支持



- 按工厂化要求配置基本资源
- 钢筋加工数控化加工，加工精度高；
- 模板采用自动液压系统，操作简单规范；
- 自动喷淋养护，效率高；

面向工业化的方案：技术的支持

- 细化施工工序，建立完善的操作制度
- 固定班组专业化作业
- 每道工序建立周密的检验程序
- 建立专用的检验标准





结语：

- 标准化是工业化生产的关键基础（要求设计标准化）；
- 建设水平的提升，大范围施工机械化和构件预制化生产提高了工业化建造的条件（施工的机械化和工厂化）；
- 信息化可以为“新型工业化”提供实在的技术支持（信息化的管理）；
- 全体外预应力节段梁的建设方案的完美解决在一定程度推进了我国桥梁建设的工业化进程；

谢 谢！

