

超长多跨预应力连续梁桥合龙方案优化设计

史彪之¹, 怀光辉¹, 查怀松¹, 宋健², 钱盛域³, 周小猷³

(1. 中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥 230041; 2. 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 无锡 214000;

3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 整体性好、行车舒适性高的超长多跨预应力连续梁桥越来越多地被工程采用, 但其施工过程中往往面临多次体系转化, 合龙方式、时间、顺序等则对施工与成桥阶段结构力学行为具有显著影响。针对超长多跨连续梁桥的合龙方案设计, 以某全长 864.98 m 的超长多跨预应力连续梁桥的施工顺序选择开展研究, 通过拟定 7 种不同方式的合龙顺序, 利用有限元仿真分析各个施工阶段荷载与约束的转换, 分析不同合龙方案下的成桥应力、挠度、支座位移等关键结构行为, 比较评估合龙方案的优劣。研究结果表明, 从“两侧向中间”的合龙顺序使得成桥的线型与应力变化较小, 是最为合理的合龙方案制定原则。

关键词: 超长多跨连续梁; 合龙方案; 成桥线型; 支座预偏量; 截面应力; 数值模拟

中图分类号: U442

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0103-04

0 引言

随着大位移橡胶支座和大变形量伸缩缝的开发与应用, 对设计、施工认识的加深, 如混凝土收缩徐变、结构体系转换、预拱值和施工变形控制等技术的发展, 以及计算机在桥梁结构计算中的应用, 连续梁桥正在向大跨度长联的方向发展。预应力混凝土连续梁的单联长度不断增长, 单联跨数超过 5 跨甚至 10 跨以上的屡见不鲜, 将 10 跨以上的连续梁称为超长多跨预应力连续梁桥^[1-3]。超长多跨预应力连续梁桥采用分节段施工再合龙往往由于存在邻近节段的约束, 合龙口处张拉预应力钢束时会产生预应力损失, 其钢束实际应力值往往小于设计应力值, 引起主梁截面产生纵向裂缝^[4-6]。混凝土收缩徐变效应和荷载作用可能会使主梁产生更大的应力损失, 使纵向裂缝进一步增大, 影响桥梁结构的耐久性。跨数的增多也进一步使得结构内力与变形复杂性增大, 施工工期增长, 导致桥梁经历各个施工过程及合龙时, 主梁结构在温度、混凝土收缩徐变等因素的影响下, 产生纵向变形, 导致支座的位移量、梁端伸缩量较大^[7-9]。为此, 根据施工条件、施工方式、施工环境等, 制定和优化合龙方案是保证施工质量和安

全的关键。

在国内的相关研究中, 孙全胜等^[10]从主梁的应力、线型变化出发, 就研究长联多跨连续梁桥最优合龙顺序, 发现“部分奇数跨合龙→T 构小合龙→半桥合龙→中跨最终合龙”的合龙方案具有较大优势。方淑君等^[11]研究长联多跨连续梁桥的合龙顺序优化问题, 发现累计最大位移在边跨至中跨依次合龙的工况下出现在次中跨, 而在其余工况时出现在中跨。孟阳君等^[12]提出由中跨向边跨依次合龙在成桥十年后线型最为平顺。殷任宏等^[13]以线型控制为主、应力控制为辅研究了多跨连续刚构桥的合理合龙顺序。李剑锋等^[14]研究发现合龙顺序对线型的影响大于对应力的影响, 采用边跨、中跨、次中跨、次边跨的合龙方案挠度最小。李传习等^[15]研究了某 14 跨连续梁桥不同方案合龙引起的预加力次弯矩, 发现先两两 T 构合龙成 II 构后、再 II 构间合龙的预加力次弯矩更小, 合龙方案更合理。以上研究表明, 合理的合龙顺序需综合线型、应力和支座位移等。

本研究采用 MIDAS Civil 模拟对 7 种可能的合龙方案进行评估, 分析不同合龙方案对单联长达 21 跨的连续梁桥力学性能的影响, 为超长多跨预应力混凝土连续梁桥的合理合龙方案提供建议与参考。

1 工程概况

某超长多跨混凝土连续梁跨径布置为 42.22 m+

收稿日期: 2023-11-18

作者简介: 史彪之(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 从事施工管理工作。

$3 \times 41.5 \text{ m} + 12 \times 39 \text{ m} + 40 \text{ m} + 65 \text{ m} + 40 \text{ m} + 43 \text{ m} + 42.98 \text{ m}$, 全长 864.98 m , 共计 21 跨, 标准段桥宽 33 m , 变宽段最大宽 51.87 m 。第 1 跨至第 15 跨标准桥宽为 33 m , 标准梁高 2.5 m , 采用单箱 5 室断面, 顶板厚 25 cm , 底板厚 22 cm , 腹板宽 50 cm (端部加宽到 75 cm), 悬臂 3.5 m , 其标准横断面如图 1 所示。采用两支座支承, 支座间距 11 m 。第 16 跨至第 21 跨位于半径 $3\,300 \text{ m}$ 的圆曲线上, 为顺接上下匝道, 桥宽由 33 m 变宽到 51.87 m , 变宽处横断如图 2 所示。为适应桥宽变化, 标准断面由单箱 5 室渐变为单箱 7 室, 箱室变化在第 17 跨内完成。其中, 第 17 跨至第 19 跨为 $40 \text{ m} + 65 \text{ m} + 40 \text{ m}$ 变高变宽变箱室段, 梁高由 2.5 m 按二次抛物线变化到 3.8 m , 顶底板均加厚到 28 cm , 腹板宽 50 cm ; 第 20 跨至第 21 跨顶板加厚到 28 cm , 底板加厚到 26 cm 。

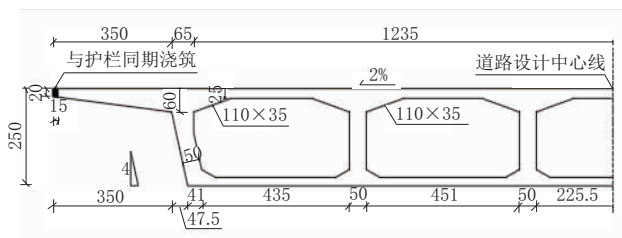


图 1 连续梁标准横断面 (单位: cm)

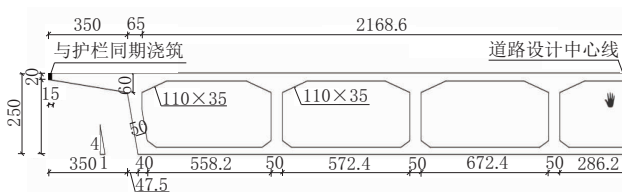


图 2 连续梁变宽处横断面 (单位: cm)

采用支架分段浇筑的方式进行超长多跨连续梁的施工, 将其分为 7 个节段, 在第 4、8、12、16、20 跨的 $1/5$ 处分段, 其间预留 2 m 合龙段, 共设有 6 组临时墩, 共设立 7 组施工阶段 (S1 ~ S7, 见图 3)。主梁与桥墩之间采用摩擦摆减隔震支座, 在 34# 墩设置固定支座, 其余支座均可纵向滑动, 各桥墩均为刚性墩, 发生地震时, 由支座的摆动进行耗能抗震。本桥未设置施工缝隙, 为一联 21 跨连续梁桥结构, 此桥附近设有芯片加工厂, 为降低运营过程中桥梁的振动对于附近高精度工厂的影响, 采用此种结构形式。

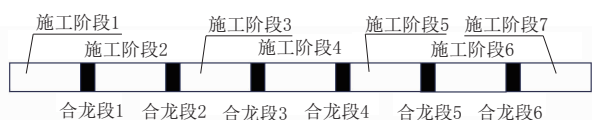


图 3 各个施工节段与合龙段设置情况

2 全桥有限元模型与合龙方案制定

2.1 全桥有限元模型构建

采用 MIDAS Civil 2020 建立有限元模型, 主梁采用梁单元模拟, 预应力钢束采用索单元。为便于施工过程分析, 建模时将全桥按照施工节段进行分段建立, 即每个节段划分单元, 再组合成全桥模型, 共设立 7 个节段 (S1 ~ S7), 主梁采用 C50 混凝土, 共有单元 894 个, 节点 1075 个, 超长多跨连续梁桥的全桥有限元模型建立如图 4 所示。



图 4 超长多跨连续梁桥的全桥有限元模型

约束通过在梁单元对应支座的节点处通过刚性连接延伸到对应的支座位置处, 并向下布设节点通过弹性连接的 x 、 y 、 z 方向的刚度模拟支座的约束情况, 在下方的节点约束 D_x 、 D_y 、 D_z 、 R_x 、 R_y 、 R_z 。依据图纸在模型中共设置 1 398 根预应力钢束, 均为内部后张低松弛类型, 因预应力筋均对称于梁截面对称轴设置, 模型中预应力筋均在对称轴上进行设置, 不考虑预应力筋所产生的横向弯矩效应。

2.2 合龙方案的制定

本工程采用满堂支架施工, S1 ~ S7 各个施工节段采用一次激活的方式建立, 每个施工节段持续时间假定为 23 d 。共拟定 7 种不同合龙方案。为了避免各个节段混凝土收缩徐变的影响, 将 7 种合龙方案的前七步施工方案以相同的方式设立, 前七步施工方案为“S1 至 S7 顺序依次激活”, 即只考虑合龙顺序不同对于结构内力变化与线型变化的影响。各合龙施工阶段假定为 20 d , 共三个工况: 通过在梁端加载竖向向下的集中力模拟合龙段浇筑时的荷载; 激活合龙段预应力钢束; 通过钝化临时支座的节点与单元模拟临时支座的拆除。将 6 个合龙段简称为 HL1 ~ HL6, 设立 7 组合龙方案。方案 I: HL1 → HL2 → HL3 → HL4 → HL5 → HL6。方案 II: HL1 → HL6 → HL2 → HL5 → HL3 → HL4。方案 III: HL1 → HL3 → HL5 → HL6 → HL4 → HL2。方案 IV: HL1 → HL6 → HL3 → HL5 → HL2 → HL4。方案 V: HL1 → HL6 → HL2 → HL3 → HL4 → HL5; 方案 VI: HL4 → HL3 → HL2 → HL5 → HL1 → HL6。方案 VII: HL2 → HL5 → HL1 → HL6 → HL3 → HL4。

3 合龙方案综合评价与优化设计

采用合龙完成后施工阶段的主梁竖向线型、主梁上下缘应力、支座偏移量作为评价合龙方案优劣的依据。

3.1 主梁竖向线型分析

主梁竖向线型按全桥合龙完成后主梁的支座、跨中、1/4 跨及 3/4 跨位置处提取,并汇总于图 5。对竖向线型变化数据处理,提取成桥状态的向上变形最大值、向下变形最小值、变形的均值与方差,列于表 1。分析竖向线型变化数据,方案Ⅲ的成桥状态变形的均值最小,最大向上变形值最小。这是由于方案Ⅲ相对于其他方案较快完成了 S6 节段的左右两侧合龙,S6 节段跨径较大,此方案有效地协调了 S6 节段的竖向变形。方案Ⅰ最大向上变形最大、均值最大,是所有合龙方案中线型控制最不好的合龙方案。这是由于合龙方案Ⅰ为一侧向另一侧顺序开展,不利于线型的控制,对于跨径较长的 S6 节段最后才完成左右两侧的合龙,缺乏其他节段协调控制 S6 节段。方案Ⅵ方差最小,由于该合龙方案为从中间向两侧对称合龙,联长增长使得内力分配更加均匀,结构变形小,竖向线型变化更趋平缓。

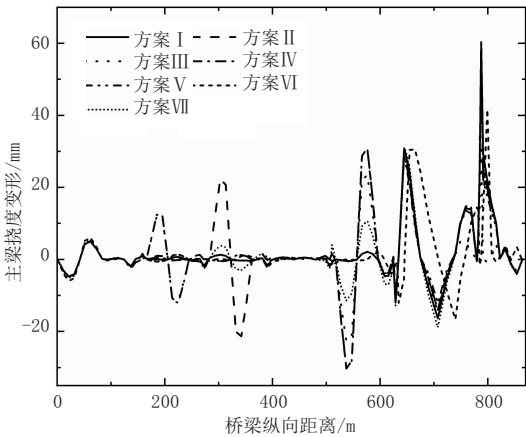


图 5 七种合龙方案线型数据对比

表 1 各合龙方案成桥状态竖向变形数据情况 单位:mm

项目	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ	方案Ⅳ	方案Ⅴ	方案Ⅵ	方案Ⅶ
向上变形最大值	60.36	59.35	30.55	59.48	56.58	41.62	57.80
向下变形最大值	-16.38	-30.33	-22.68	-30.33	-12.16	-16.72	-18.91
变形方差	0.09	0.14	0.07	0.12	0.07	0.05	0.09
变形均值	2.35	2.36	1.04	2.28	2.19	1.28	2.19

3.2 主梁上下缘应力对比分析

提取合龙后主梁的支座、跨中、1/4 跨及 3/4 跨位

置处上缘主梁应力,分析成桥状态的上缘应力最大值、上缘应力最小值、上缘应力的均值与方差。其中上缘主梁应力如图 6 所示,应力统计值详见表 2 所列。分析上缘应力数据,方案Ⅰ在合龙阶段上缘压应力最大值最小,方差最小;方案Ⅲ压应力最大值最大,方案Ⅵ最小应力值较大。

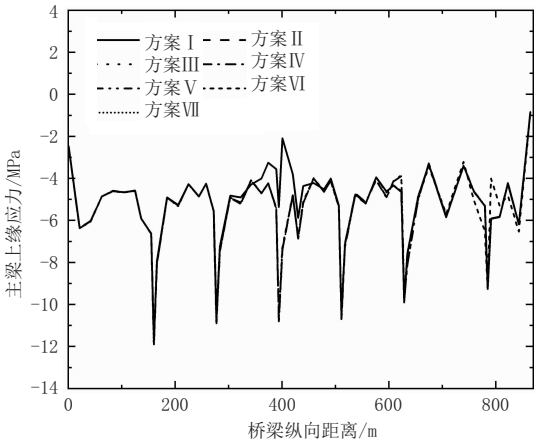


图 6 七种合龙方案上缘应力数据对比(单位:MPa)

表 2 各合龙方案合龙阶段上缘应力数据情况 单位:MPa

项目	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ	方案Ⅳ	方案Ⅴ	方案Ⅵ	方案Ⅶ
压应力最小值	0.87	0.86	0.87	0.86	0.86	0.89	0.86
压应力最大值	12.50	12.60	12.80	12.70	12.60	12.60	12.60
压应力方差	4.87	5.30	5.30	5.42	5.46	5.32	5.30
压应力均值	5.66	6.00	6.00	5.99	6.00	5.99	6.00

以同样方式获得主梁下缘的应力如图 7 所示,并对应力数据进行统计分析处理后列于表 3。分析下缘应力数据,方案Ⅰ在合龙阶段下缘应力最小值最小,方差最大;方案Ⅵ应力最大值最大;方案Ⅱ应力最小值最大;方案Ⅳ应力最大值最小,同时方差最小;方案Ⅴ均值为各方案中最小,方案Ⅰ最大。

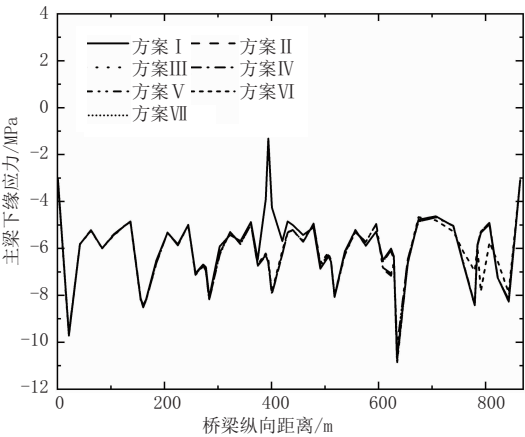


图 7 七种合龙方案下缘应力数据对比

表3 各合龙方案合龙阶段下缘应力数据情况 单位:MPa

项目	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ	方案Ⅳ	方案Ⅴ	方案Ⅵ	方案Ⅶ
压应力最小值	1.42	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
压应力最大值	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60	11.70	11.60
压应力方差	3.97	3.48	3.46	3.45	3.48	3.51	3.48
压应力均值	6.27	6.54	6.53	6.54	6.55	6.53	6.54

从上缘应力与下缘应力数据来看,合龙方案的变化对于应力变化的均值与方差影响较小。这主要是由于不同合龙方案并没有改变预应力的施加与材料属性,因此主梁的上下缘应力的数据特征不会有太大的差异。

3.3 支座纵向预偏量对比分析

支座偏移量数值按每个桥墩上设置的永久支座,按合龙完成阶段各方案的支座 x 方向位移数值提取,并对不同合龙方案的支座位移数据进行处理,详见表4。方案Ⅵ支座位移相对较小,最大正负向位移之差为74.17 mm,同时最大正向位移最小,位移方差最小。其他方案位移差值均大于80 mm。方案Ⅶ的负向支座位移最大,达到了46.84 mm;方案Ⅰ正向支座位移最大,方差与均值均为所有方案中最大。同时,方案Ⅴ负向位移最小,为38.01 mm。方案Ⅵ的支座位移控制较好,主要得益于此合龙方案为对称合龙方案。S4节段具有固定支座且位于整桥中间位置,此方案将其他节段较快地与S4固定支座节段进行合龙。这种对称的合龙方式可以有效地控制支座位移。

表4 各合龙方案位移数据特征 单位:mm

项目	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ	方案Ⅳ	方案Ⅴ	方案Ⅵ	方案Ⅶ
向上变形最大值	56.19	51.65	41.07	44.73	53.21	33.34	38.17
向下变形最大值	39.48	44.01	46.27	43.93	38.01	40.83	46.84
变形方差	478.22	533.30	453.17	481.35	479.08	391.80	433.80
变形均值	5.93	2.05	-0.51	0.33	4.20	0.32	-1.36
变形最大差值	95.67	95.66	87.34	88.66	91.21	74.17	85.01

4 结 语

本文以主梁线型、关键截面应力和支座纵向位移对超长多跨预应力混凝土连续梁桥的合龙方案的

合理选择展开研究,得出以下结论:

(1)合龙方案的改变对于主梁竖向线型与支座位移的改变影响较大,而各个节段的上下缘应力变化数值的均值与方差变化较小。可见,合龙方案的改变对于应力的影响较小,合龙方案的选择应以竖向线型和支座位移为主要指标。

(2)对比七种合龙方案,方案Ⅲ的主梁线型变化的均值最小、方差相对较小,表明在桥梁的跨径各不相同同时,以竖向线型控制为主时,应较先合龙跨径较大的节段。

(3)对于现浇施工的超长多跨连续梁,分阶段浇筑再对不同施工节段合龙,相当于悬臂施工先完成“小合龙”的施工方案。方案Ⅵ为从中间向两侧合龙的施工方案其竖向线型变化与支座位移相对较小,方便施工质量控制,是最优的施工方案,即从“中间向两侧”是最优的合龙方案设计理念。

参考文献:

[1] 刘亚非.多跨连续梁桥合龙顺序优化研究[D].西安:长安大学,2012.

[2] 潘博.多跨长联连续梁桥合龙关键问题研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[3] 董方晏.多跨预应力连续梁桥合龙方案优化分析[J].西部交通科技,2020(11):148-150,191.

[4] 王程昆,张运波.不同合龙顺序对多跨长联波形钢腹板连续梁桥施工方案的影响[J].施工技术(中英文),2023,52(18):23-26.

[5] 徐天良.预应力混凝土连续梁桥合龙施工关键技术[J].铁道建筑,2017(4):37-39,55.

[6] 管钟.超长联预应力混凝土连续梁桥合龙顺序对结构效应的影响[D].武汉:华中科技大学,2019.

[7] 李剑锋,季日臣,等.多跨预应力混凝土连续梁桥合龙顺序研究[J].铁道建筑,2018,58(2):42-44.

[8] 张凯丽.某预应力混凝土刚构—连续梁组合桥合龙关键技术研究[D].邯郸:河北工程大学,2020.

[9] 郭文骏.四跨连续梁桥施工监控及合龙顺序研究[D].南京:东南大学,2019.

[10] 孙全胜,李大杰.超长联大跨连续梁桥合龙顺序分析[J].世界桥梁,2012,40(5):45-48.

[11] 方淑君,肖啸,李杰.多跨连续梁合龙顺序的优化以及混凝土初始加载龄期的探讨[J].铁道科学与工程学报,2013,10(4):24-29.

[12] 孟阳君,陈强.偶数跨连续梁桥施工合拢优化分析[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2017,26(3):15-20.

[13] 殷任宏,安平和,冯伟琼.多跨连续刚构桥合龙顺序[J].沈阳大学学报(自然科学版),2017,29(1):58-61.

[14] 李剑锋,季日臣.多跨预应力混凝土连续梁桥合龙顺序研究[J].铁道建筑,2018,58(2):42-44.

[15] 李传习,柯璐,陈卓异,等.移动模架施工PC箱梁底板裂缝成因分析与对策研究[J].中外公路,2015,35(5):114-118.