

绕城高速现浇箱梁拓宽设计方案研究

程建曙

(上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200030)

摘要: 针对城市绕城高速既有现浇箱梁桥通行能力与结构安全性的提升需求,系统研究了横向拓宽设计的关键技术问题。对比分析单侧拓宽、悬挑式拓宽及叠合梁拓宽等方案的适用性,结合刚性连接、铰接及半刚性连接等拼接方式的力学特性与适用场景,并对材料性能试验进行分析,优选低收缩纤维混凝土作为湿接缝材料。基于梁格理论和横向框架分析法,利用有限元数值模拟,揭示了新旧结构协同受力机制,验证了铰接点位置调整对悬臂受力优化的有效性。以上海某绕城高速匝道桥为例,采用铰接方案并结合抗倾覆施工措施,解决了拓宽过程中旧桥受力状态改变与交通保通难题。研究表明:铰接点合理设置可降低旧桥悬臂底缘拉应力 20%~30%;低收缩混凝土湿接缝可有效控制裂缝宽度至 0.2 mm 以下。研究成果为城市高架拓宽工程提供了兼顾结构安全与施工可行性的设计方法。

关键词: 桥梁拓宽;箱梁拼接方式;拼接缝材料;横向分析;梁格理论;施工设计

中图分类号: U442.5; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0143-06

Research on Widening Design Scheme of Cast-in-place Box Girder Bridge for Ring Expressway

CHENG Jianshu

(Shanghai Municipal Planning and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: To enhance the traffic capacity and structural safety of existing cast-in-place box girder bridges on urban ring expressways, the key technologies for transverse widening design are systematically studied. The applicability of schemes such as single-side widening, cantilevered widening and composite beam widening is compared and analyzed. Combined with the mechanical characteristics and applicable scenes of rigid connection, hinge connection, semi-rigid connection and other splicing methods, the material performance tests are analyzed, and the low-shrinkage fiber-reinforced concrete is optimized as the wet joint material. Based on the grillage theory and transverse frame analysis method, the finite element numerical simulation is utilized to reveal the collaborative force mechanism of the old and the new structures, and to verify the effectiveness of adjusting the hinge point position in optimizing the force on the cantilever. Taking a ring expressway ramp bridge in Shanghai as an example, the hinge connection scheme combined with the anti-overturning construction measures is adopted to solve the problems of changing the force state of the old bridge and ensuring the traffic flow during the widening process. The research result shows that the reasonable layout of hinge connection points can reduce the tensile stress at the cantilever bottoms of the old bridge by 20%~30%. The low-shrinkage concrete wet joint can effectively control the crack width below 0.2 mm. The research results provide a design method that takes into account both structural safety and construction feasibility for urban elevated road widening projects.

Keywords: bridge widening; box girder splicing method; joint materials; lateral analysis; grillage theory; construction design

0 引言

随着我国城市经济快速发展,交通量迅速增长,城市出现交通拥挤、交通组织困难、行车速度缓慢等问题,交通需求与交通量增长的矛盾愈发明显,对既

有交通结构进行拓宽改造刻不容缓。

绕城高速桥梁拓宽有别于普通道路桥梁拓宽,绕城高速桥梁不仅承担着繁重的交通流量,还涉及交通节点枢纽问题,因此在拓宽项目进行时,在满足项目技术标准及总体方案条件的同时,还需要兼顾施工保通及保通期间拓宽桥梁的运营安全。故在拓宽项目进行时,需要对老桥健康状态及拓宽沿线地质状况进行分析调查,选择合适的拓宽方式、拼接方

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 程建曙(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

式、拓宽湿接缝材料及施工方案。本文针对现浇箱梁就上述问题进行研究论述。

1 现浇箱梁拓宽分析

1.1 拓宽方式

绕城高速桥梁中,现浇箱梁主要分布在小半径圆曲线匝道、大跨径跨路口及大变宽分合鼻端,拓宽的方式包括单侧、两侧加宽,悬挑式拓宽及叠合梁拓宽(见表1)。

表1 拓宽方式参数表

拓宽方式	适用范围	主要问题
悬挑式拓宽	老桥拓宽后悬挑长度为0.5~2.5 m	植筋+湿接缝、预应力锚固
单/双侧拓宽	梁高不受限且拓宽宽度>2 m	连接方式、桥面连续化、植筋+湿接缝、伸缩缝
叠合梁拓宽	分幅桥梁中间拓宽且梁高受限	桥面连续化、植筋+湿接缝

若老桥悬臂顶缘横向配筋较强且拓宽宽度小于

2 m,可采用悬挑式拓宽,即在老桥悬臂拓宽侧拓宽悬臂至需要的宽度,并在拓宽侧腹板上做支架支撑悬臂。这种拓宽方式可使桥梁在后期运营阶段桥面整体性较好,但局限于加宽宽度不宜过大,且若拓宽桥梁位于圆曲线上,宜用于圆曲线内侧拓宽,外侧拓宽需要进行抗倾覆复核。

若拓宽宽度大于2 m,宜在老桥单/双侧新建同类型、同跨度结构,但新老结构横向连接存在多种方式,不同拼接方式有着不同的优缺点,本文后续将详细介绍。

若老桥为分幅桥梁,现在需要在两幅桥间拼宽,由于桥面标高及老桥下部结构限制,或拓宽位置桥下净空不足,可采用叠合梁式拓宽,控制梁高。

1.2 拼接方式

拼接方式的选择主要针对单/双侧拓宽及叠合梁拓宽,主要问题集中于拼接方案上,其优缺点见表2。

表2 拼接方式对比表

拼接方式	优点	缺点	适用场景
铰接	1. 允许新旧结构间自由转动,减少温度、收缩应力; 2. 对原结构扰动小; 3. 适应基础差异沉降	1. 整体性差,横向荷载分配不均; 2. 接缝处易产生疲劳损伤	基础差异沉降较大、温度变形显著的桥梁拓宽
刚性连接	1. 新旧结构协同受力,整体性强; 2. 荷载分配均匀,抗弯抗剪性能好; 3. 桥面连续,行车舒适性高	1. 对施工精度要求高(如植筋定位、界面处理); 2. 易产生温度应力及收缩裂缝; 3. 原结构受力状态发生改变	交通荷载大、对整体性要求高的桥梁拓宽
半刚性连接	1. 兼具刚性与铰接特性,平衡应力与变形; 2. 通过预应力或柔性材料调节连接刚度; 3. 适应一定的不均匀沉降	1. 设计复杂,须精确控制连接刚度; 2. 施工难度大; 3. 长期性能受材料老化影响	中等荷载需求、基础条件复杂或须兼顾变形与受力的桥梁拓宽
不连接	1. 新旧结构完全独立,施工快速; 2. 无界面处理要求,成本低; 3. 避免新旧结构相互作用的风险	1. 横向刚度低,易产生错台或裂缝; 2. 荷载传递差,桥面铺装易损坏; 3. 后期维护成本高	临时拓宽、荷载需求低或错位拼宽

从表2可知,当地基土状态优良且拓宽后桥梁交通荷载对桥面总体性能要求较高时,宜采用刚性连接,但刚接后老桥悬臂受力状态发生改变,需要重新验算分析。

当地基土状态一般且老桥年代久远不宜扰动时,宜采用铰接,新老结构可通过铰接点减少温度、收缩应力,但铰接点上方铺装易出现疲劳裂缝,会增加后期维修养护费用。

若新老桥梁在纵向分孔线上存在错位,宜采用新老桥不连接的拓宽方式,其受力明确、施工快,新老桥梁分别受力,避免了因错位造成的活载疲劳应力,但新老桥梁之间需要设置纵向伸缩缝,造价成本高。

1.3 拼接缝材料

在桥梁拓宽工程中,湿接缝是连接新旧结构的

关键部位,需要承受动态荷载、温度变化及收缩应力,因此材料的选择需要兼顾抗裂性、耐久性和施工可行性。常用湿接缝材料详见表3。

基于吴昊等人^[1]对行车扰动下桥梁拼宽湿接缝混凝土性能的试验研究:当拼宽桥梁对变形要求低、荷载较小时,桥梁拓宽可采用普通混凝土;当新老桥连接后,若要减少收缩徐变引起的裂缝,可采用微膨胀/低收缩混凝土;当拼宽桥梁位于化工厂周边环境严重污染的区域时,宜采用环氧树脂混凝土,提高耐腐蚀性;当拼宽桥梁跨度大、强度要求高,且施工预算充足时,可采用超高性能混凝土(UHPC)。

1.4 施工控制

在桥梁拓宽施工过程中,需要系统性解决拓宽桥梁施工中的结构协同、交通干扰、质量控制等难

表 3 接缝材料对比表

材料类型	性能特点	优点	缺点
普通混凝土	1.强度等级 C25~C80; 2.黏结依赖界面处理; 3.收缩率较高	1.成本低 2.施工工艺成熟	1.易收缩开裂; 2.新旧混凝土界面黏结弱; 3.耐久性差
微膨胀/低收缩混凝土	1.添加膨胀剂(UEA); 2.补偿收缩,减少裂缝; 3.强度等级 C35~C50	1.抗裂性优于普通混凝土; 2.界面黏结增强; 3.耐久性较好	1.膨胀剂掺量需要精确控制,难度大; 2.成本略高; 3.需要严格养护
钢纤维混凝土	1.掺入钢纤维; 2.抗拉强度高,抗裂性好; 3.韧性提升	1.抗裂性、抗冲击性强; 2.延长使用寿命	1.施工时需要均匀分散纤维; 2.成本较高; 3.对搅拌设备要求高
环氧树脂混凝土	1.环氧树脂+骨料; 2.高黏结强度,低收缩; 3.耐腐蚀	1.黏结强度高(>3 MPa); 2.快硬早强; 3.防水抗渗性好	1.成本高; 2.脆性大、韧性差; 3.施工环境要求高
聚合物改性水泥基材料	1.水泥基+聚合物乳液(SBR); 2.柔韧性好,黏结力强	1.黏结强度高(1.5~2.5 MPa); 2.抗渗性好; 3.施工方便	1.抗压强度较低; 2.耐久性未知; 3.成本高于普通混凝土
超高性能混凝土(UHPC)	1.超高强度(>120 MPa); 2.高韧性,低渗透性; 3.自密实性好	1.耐久性好; 2.几乎无收缩; 3.使用寿命长	1.成本极高; 2.需专用设备; 3.施工技术要求高

点,实现安全、高效、可持续的工程建设目标控制。可按图 1 中的步骤控制。

2 现浇箱梁拓宽理论分析

2.1 截面设计

现浇箱梁拓宽截面设计时,在满足结构纵向所需顶板及腹板厚度后,宜控制新旧结构刚度比在 0.8~1.2 之间,避免应力集中的同时尽可能降低新旧桥梁活载位移差。

拓宽箱梁挑臂设计时:若新旧结构不连接,挑臂按悬臂结构设计控制即可;若新旧结构采用刚性连接或铰接或半刚性连接,在采用上述连接前旧结构挑臂为悬臂结构,顶缘受拉,底缘受压,连接后新旧结构两道腹板间悬臂将形成框架结构,旧结构挑臂底缘受拉,与原受力方式不同;若新旧结构采用铰接,可通过调整铰接点位置去控制底缘拉应力大小;若新旧结构采用刚性连接、半刚性连接,宜在考虑钢筋锚固长度后,切除老桥原悬臂不满足规范的部分,然后进行植筋,并与新拼桥连接。

2.2 结构设计理论

现浇箱梁刚性连接、铰接、半刚性连接后为多主梁协同受力,根据 E.C.Hambly 梁格体系理论^[2],可直接模拟新旧桥梁结构为纵横交叉的空间梁格体系,使结构内力和变形符合结构实际作用力的体系力学模型。

横向体系,本文主要基于横向框架分析法^[3],可在保证框架的变形与整个梁体协调一致的基础上,在梁体纵向上取单位长度形成薄片框架,按照弹性

支撑形式得到结构横向受力情况。

3 工程实例分析

以上海某绕城高速为例,项目整体规划对全线进行整体拓宽,本文选取立交区某条匝道上的钢筋混凝土箱梁作为研究实例。既有桥梁竣工于 2006 年,跨径组合为 18 m+23 m+23 m+18 m,桥宽 8 m,悬臂长 2 m,梁高 1.5 m,拟单侧拓宽 2 m。

3.1 拓宽方式选择

针对该项目老桥悬臂长 2 m,拟拓宽 2 m,故可选拓宽方式有悬臂拓宽、单侧拓宽及叠合梁拓宽。从经济性方面分析,该联无下穿道路、匝道等,梁高不受限,故可采用单侧拓宽或悬臂拓宽。从结构受力方面分析:若采用悬臂拓宽,单侧悬臂长度将达到 4 m,老桥横向顶缘配筋为 HRB335-D22@150,老桥悬臂根部高度 400 mm,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[4](以下简称《钢预规》)计算承载能力抗力值为 218 kN·m,老桥悬臂根部顶缘承载内力组合内力值为 1 488 kN·m,不满足规范要求;若采用单侧拓宽,需要在腹板上设置斜撑支撑悬臂端,施工复杂繁琐,增加造价。综上所述,最优方案为单侧拓宽,特殊上跨可采用叠合梁拓宽,不建议使用悬臂拓宽。

3.2 拼接方式选择

单侧拓宽拼接方式有不连接、铰接、刚性连接等。基于吴文清等人^[5]对横向混凝土箱梁桥拼接拓宽后横向内力的简化计算方法研究,采用有限元软件 MIDAS Civil 建立桥面板模型,对该项目进行受力

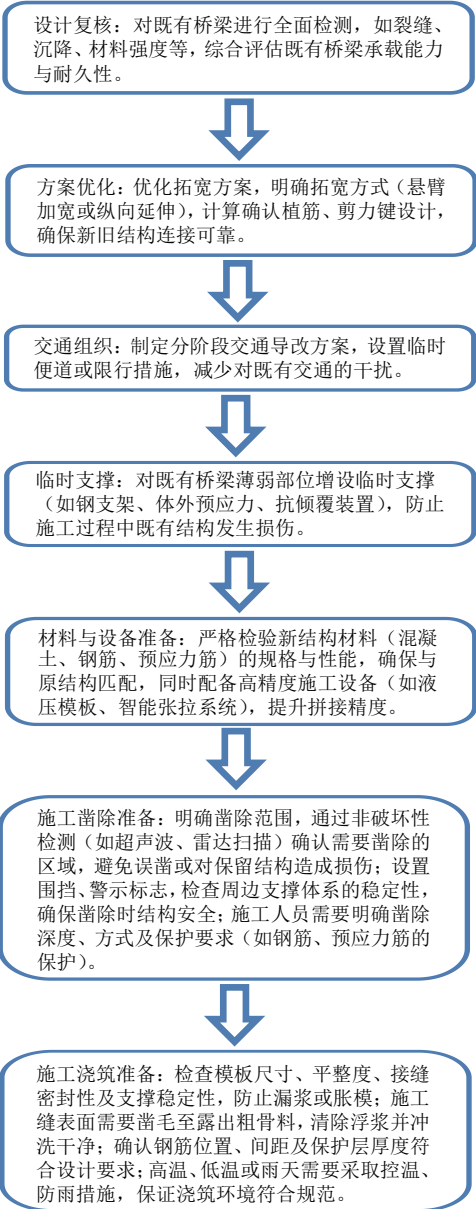


图1 拓宽桥梁施工控制步骤图

分析。同时,若新老桥连接,基于钱江^[6]对不同拓宽连接方式对旧桥受力状态的影响分析,分析本项目可知:新老结构连接前,老桥为悬臂结构;新老桥梁连接后,新老桥腹板间形成框架,恒载、活载、整体升降温及温度梯度均将会在悬臂底缘产生正弯矩,不均匀沉降、收缩徐变将会增加悬臂根部负弯矩。

(1)刚性连接

查阅旧桥竣工图,旧桥悬臂底缘钢筋采用的是HRB335-D12@150布置,顶缘钢筋标准段采用的是HRB335-D22@150布置,建立横向模型后计算得到新老结构间悬臂验算表(见表4、表5)。图2为悬臂刚接示意图。

基于表4、表5以及《钢预规》的要求,在老桥悬臂高度为350 mm处,悬臂底缘不满足要求,375 mm

表4 刚性连接新老结构间悬臂验算表(顶缘)

截面高度/mm	承载能力组合/(kN·m)	承载能力验算/富余量	正常使用组合/(kN·m)	裂缝宽度/mm
400	-210	-240/4%	-144	0.200
350	-95	-204/96%	-76	0.122
300	-45	-169/241%	-35	0.067
250	-29	-133/318%	-18	0.043

表5 刚性连接新老结构间悬臂验算表(底缘)

截面高度/mm	承载能力组合/(kN·m)	承载能力验算/富余量	正常使用组合/(kN·m)	裂缝宽度/mm
400	13	75/427%	-36	—
375	45	70/42%	18	0.078
350	95	65/-38%	45	0.210
300	115	54/-57%	56	0.312
250	122	44/-67%	65	0.447

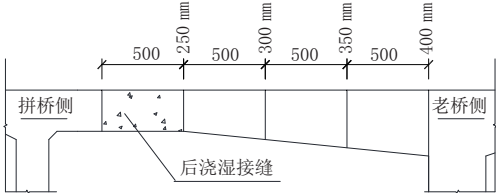


图2 悬臂刚接示意图(单位:mm)

处顶底缘均满足要求,故需要将老桥悬臂切除至高度为375 mm处,同时因《钢预规》对钢筋锚固长度的要求,老桥悬臂切除植筋时,切除长度应多切除一个钢筋直径对应的锚固长度

(2)铰接

基于前文所述可知,新老桥连接后,腹板间悬臂底缘将产生正弯矩,原悬臂底缘配筋较弱。铰接可释放内力,但铰接点位置决定了内力释放点位置,设计时可通过调整铰接点位置,实现对老桥扰动最小。

本文选取如下两个工况进行分析:工况一,悬臂切除350 mm(防撞墙宽),铰接点设置在距拼桥腹板425 mm处(见图3),验算表见表6、表7;工况二,悬臂切除750 mm,铰接点设置在距拼桥腹板725 mm处(见图4),验算表见表8、表9。

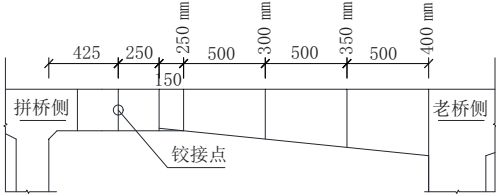


图3 工况一铰接示意图(单位:mm)

由表6至表9可知:新老结构铰接后,若按工况一设置铰接点,则老桥悬臂底缘在高300 mm处不满足《钢预规》对承载力的要求;继续移动铰接点到工况二位置,结构承载力验算和正常使用阶段验算,均

表 6 铰接工况一新老结构间悬臂验算表(顶缘)

截面高度/mm	承载能力组合/(kN·m)	承载能力验算/富余量	正常使用组合/(kN·m)	裂缝宽度/mm
400	-142	-240/54%	-118	0.164
350	-73	-205/155%	-72	0.116
300	-37	-169/315%	-40	0.077
250	-13	-134/834%	-15	0.036

表 7 铰接工况一新老结构间悬臂验算表(底缘)

截面高度/mm	承载能力组合/(kN·m)	承载能力验算/富余量	正常使用组合/(kN·m)	裂缝宽度/mm
400	4	75/1614%	-42	—
350	38	65/55%	-13	—
300	53	54/-7%	5	0.028
275	52	49/-14%	10	0.061
250	42	44/-5%	11	0.076

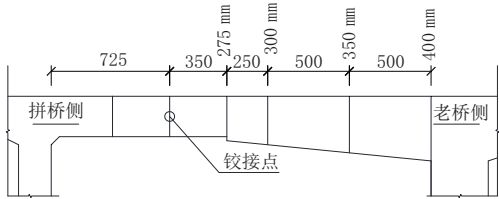


图 4 工况二铰接示意图(单位: mm)

表 8 铰接工况二新老结构间悬臂验算表(顶缘)

截面高度/mm	承载能力组合/(kN·m)	承载能力验算/富余量	正常使用组合/(kN·m)	裂缝宽度/mm
400	-145	-240/51%	-120	0.166
350	-90	-205/107%	-75	0.121
300	-42	-169/266%	-35	0.067
275	-20	-151/587%	-26	0.055

表 9 铰接工况二新老结构间悬臂验算表(底缘)

截面高度/mm	承载能力组合/(kN·m)	承载能力验算/富余量	正常使用组合/(kN·m)	裂缝宽度/mm
400	-23	75/—	-62	—
350	9	65/555%	-29	—
300	24	54/106%	-6	—
275	17	49/162%	0	—

能满足规范要求。

(3)不连接

若新老结构不连接,老桥悬臂受力状态未发生改变,无须验算,本文不再赘述。

上海地区地基土多为黏土,桩基采用摩擦桩,为减少行车稳定性、温度及沉降差对桥梁的影响,宜采用铰接。从施工角度分析:刚性连接需要将老桥悬臂完全切除并植筋,施工繁琐;铰接和不连接需要部分切除悬臂,裸露主筋即可,施工简易。从交通保通安全性角度分析:刚性连接需要切除全部悬臂,而铰接和不连接只需要部分切除悬臂,施工阶段的交通保通安全性更好。从抗倾覆角度分析:新老桥不连

接,老桥由于单侧防撞墙切除,存在倾覆风险;铰接只传递剪力不传递弯矩,桥梁拓宽拼接后,新老桥支座较多,老桥内侧支座存在脱空问题;刚性连接后,新老桥结构受力均匀,不存在倾覆及支座脱空问题。从造价的角度分析:刚性连接需要还原老悬臂并植筋;铰接和不连接,为解决倾覆及支座脱空问题,需要将防撞墙反向现浇于悬臂底缘。

综合分析后,本文选择新老桥铰接,铰接点设置在距拼桥腹板 725 mm 处,并将防撞墙重量按湿接缝形式现浇于铰接段悬臂底缘,纵向设置切缝。图 5 为铰接缝纵向横向示意图,图 6 为现浇梁拓宽标准断面图。

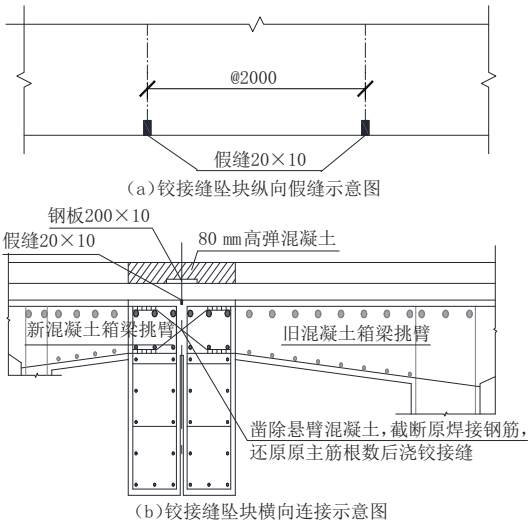


图 5 铰接缝纵向横向示意图(单位: mm)

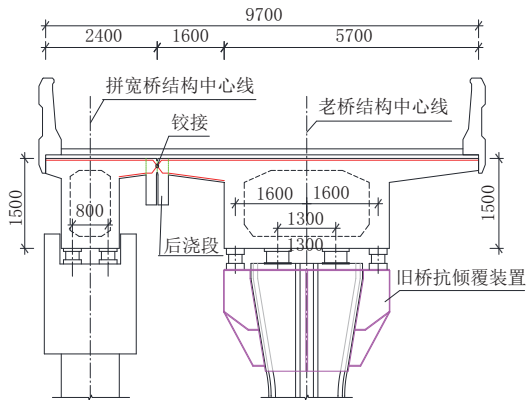


图 6 现浇梁拓宽标准断面图(单位: mm)

针对现浇湿接缝坠块建立 Midas Fea 实体模型,对铰接缝进行分析,得到恒载与活载作用下坠块间相对位移(见图 7)。

基于图 7,计算得坠块间水平位移最大值为 3.08 mm,小于 20 mm,坠块间间距能满足其相互间不出现碰撞的要求。

拼接材料方面,老桥收缩徐变已基本完成,新拼

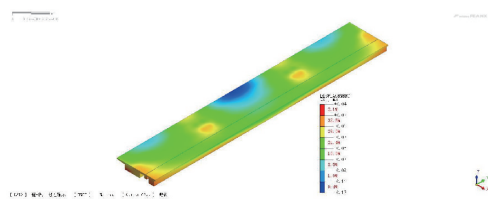


图7 横向位移-Dx(单位:mm)

桥梁收缩徐变尚未发生,故新老结构拼接前,新拼桥可先行浇筑并放置一段时间,既可预沉降,也可减少收缩徐变的影响,最后用低收缩混凝土浇筑新老结构间铰接缝,可有效降低由收缩徐变带来的问题。

3.3 施工阶段设计

该项目拼宽箱梁位于立交匝道繁忙区,日交通量较大,施工过程中需要兼顾保通。为保证施工过程安全可行,施工方案及思路如下:

(1)新老桥梁悬臂铰接,老桥悬臂部分切除前,为避免施工过程中发生桥梁倾覆事故,可先行安装抗倾覆加固措施,切除的悬臂重量可置于悬臂上。桥面设置临时车道,安装临时防撞护栏(见图8、图9);

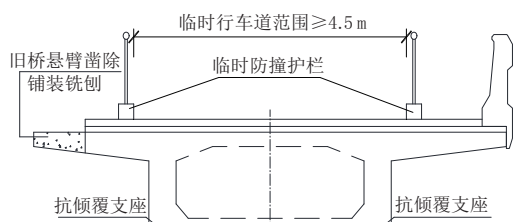


图8 抗倾覆装置安装图

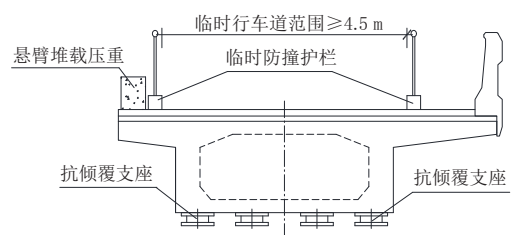


图9 临时防撞设施布置图

(2)新拼侧预制拼装下部结构安装,同时搭设支架,现浇拼桥上部结构,预留悬臂湿接缝钢筋,完成后,拼桥放置2个月,使其预沉降;

(3)现浇铰接缝施工前,施工单位复测新老结构铰接高程值,宜将老桥悬臂高程复位至未切除悬臂前,以减少对老桥下部结构的影响,再采用低收缩混凝土浇筑新老桥梁间湿接缝,以形成铰缝,待混凝土强度达标后,移除悬臂压重(见图10);

(4)喷洒防水层,进行桥面铺装施工,完成桥面系施工。

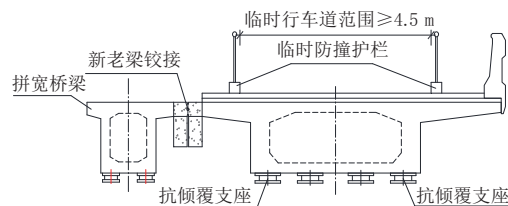


图10 现浇铰接缝图

4 结 语

本文从拓宽方式、拼接方式、拼接缝材料选择及施工控制等方面对现浇箱梁拓宽设计进行了阐述,并结合工程实例及有限元软件数值模拟得到如下结论:

(1)新老桥悬臂若连接,则新老桥腹板间原老桥部分的悬臂受力状态将会发生改变,需要重新验算老桥悬臂部分是否满足现行规范要求。

(2)新老桥悬臂若采用铰接,可通过调整铰接点位置去调整新老桥腹板间原老桥部分的悬臂受力,以满足现行规范要求。

(3)新老桥悬臂若不连接,宜将原老桥悬臂端部防撞墙切除,并将防撞墙等重的混凝土结构现浇于悬臂端底缘,能有效控制老桥抗倾覆问题。

(4)基于工程实例,本文提供了一个兼顾施工保通方案的施工过程说明,为类似桥梁拼宽设计提供参考。

参考文献:

- [1] 吴昊. 行车扰动下桥梁拼宽湿接缝混凝土性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [2] 依·西·汉勃利(E.C.Hambly). 桥梁上部构造性能[M]. 郭文辉, 译. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- [3] 龙驭球, 包世华, 袁驷. 结构力学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [4] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [5] 吴文清, 张慧, 唐章翔. 混凝土箱梁桥拼接拓宽后横向内力简化计算方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(1): 60-67.
- [6] 钱江, 艾军, 张丽芳. 不同扩宽连接方式对旧桥受力状态的影响分析[J]. 交通与计算机, 2008, 3(26): 123-126.
- [7] 马春生, 宋神友. 广佛高速公路胡洲大桥主桥新旧结构连接设计[J]. 公路, 2003(8): 63-66.
- [8] 叶见曙, 鞠金炎, 吴文清. 预应力混凝土桥梁拓宽的若干问题探讨[C]//全国既有桥梁加固、改造与评价学术会议论文集. 南京: 交通部公路科学研究院, 东南大学, 2008.
- [9] 吴永锦, 韩涛, 张建刚, 等. 日照温差对混凝土桥梁的裂缝影响的分析[J]. 铁道建筑, 2006(7): 24-25.
- [10] JTG B01—2014, 公路工程技术标准[S].