

装配式节段小箱梁关键技术分析

刘梦渝¹, 张艺伟², 史建朋¹, 刘 勋¹, 刘 瑞¹

(1. 重庆设计集团有限公司市政设计研究院, 重庆市 401120; 2. 重庆市住房和城乡建设委员会, 重庆市 400014)

摘 要: 重庆市地形复杂, 高架桥多且限载, 弯道多且半径小, 因此需采用装配式节段小箱梁来解决运输困难的问题。进行构件轻量化小型化设计, 确定装配式节段小箱梁的结构形式, 对比装配式节段小箱梁整体结构和接缝截面的计算理论, 采用 MIDAS Civil 建立一片装配式节段小箱梁的有限元模型, 分别对其整体结构、接缝截面及节段进行验算, 验算结果满足规范要求。装配式节段小箱梁解决了现有山地城市装配化构件运输困难的问题, 可实现构件的轻量化、小型化、标准化、工业化。

关键词: 装配式节段小箱梁; 轻量化; 小型化; 标准化; 工业化

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0196-07

Key Technical Analysis of Prefabricated Segmental Small Box Girder

LIU Mengyu¹, ZHANG Yiwei², SHI Jianpeng¹, LIU Xun¹, LIU Rui¹

(1. Chongqing Design Group Co., Ltd. Municipal Design and Research Institute, Chongqing 401120, China; 2. Chongqing Housing and Urban-Rural Construction Committee, Chongqing 400014, China)

Abstract: The terrain in Chongqing is complex, with numerous elevated bridges and load limits, as well as many curves with small radii, therefore, prefabricated segmented small box girders need to be adopted to solve the problem of difficult transportation. The lightweight and miniaturized design of components is carried out, the structural form of prefabricated segmented small box girders is determined and the calculation theory of the overall structure and joint section of the prefabricated segmented small box girder is compared. A finite element model of a prefabricated segmental small box girder has been established using MIDAS Civil, its overall structure, joint section and segments have been verified respectively, and the verification results have met the specification requirements. Therefore, the prefabricated segmented small box girder has solved the problem of difficult transportation of prefabricated components in existing mountainous cities, achieving lightweight, miniaturization, standardization and industrialization of components.

Keywords: prefabricated segmental small box girder; lightweight; miniaturization; standardization; industrialization

0 引 言

中共中央、国务院办公厅《关于大力发展装配式建筑的指导意见》(国办发[2016]71号)、住房城乡建设部等部门《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》(建标规[2020]8号)和重庆市人民政府办公厅《关于印发重庆市推进建筑产业现代化促进建筑业高质量发展若干政策措施的通知》(渝府办发[2020]107号)等文件指出市政工程工业化、装配化是推进新型建筑工业化的重要途径,应坚持推动轨道交通、桥梁、隧道、道路、人行天桥、综合管廊等市政工程项目采用装配化、工业化建造方式^[1-5]。

重庆市地形、路况复杂,为降低桥梁施工对交通、环境的影响,缩短施工周期,预制小箱梁必不可少且需求量大^[6]。整体预制小箱梁重量及尺寸大,平原地区运输尚且困难,重庆地形、路况复杂,高架桥较多,限载且坡陡,弯道多,弯道半径小,导致运输困难。

以重庆市为背景,以40 m标准跨径简支小箱梁为例,通过构件轻量化小型化设计,解决现有山地城市装配化构件运输困难的问题,实现构件的轻量化、小型化、标准化、工业化^[7]。

1 装配式节段小箱梁结构形式

1.1 构件轻量化小型化

构件轻量化小型化主要有3种方式:钢板组合梁、装配式波形钢腹板组合梁等组合结构^[8-9];超高

收稿日期: 2025-07-10

作者简介: 刘梦渝(1995—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

性能混凝土(UHPC)等新材料应用^[10-12];截面拆分和节段划分^[13-14]。截面拆分和节段划分后构件长度及重量均显著减小,运输及施工更便捷,因此在重庆市构件的轻量化、小型化更适宜采用截面拆分和节段划分的方式。

截面拆分和节段划分又可分为截面横向拆分、截面竖向拆分及纵向节段划分,如图1所示。截面横向和竖向拆分,减少了一定重量,但长度未减小,现场施工量大工艺复杂。纵向节段划分重量和长度均有效减小,故重庆地区构件的轻量化小型化最终采用纵向节段划分的方式。

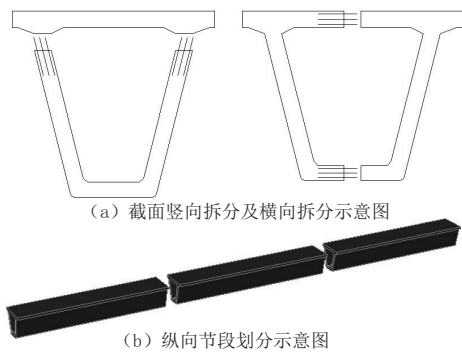


图1 截面竖向拆分及横向拆分、纵向节段划分示意图

1.2 纵向节段划分

简支小箱梁基本组合下弯矩图和剪力图、频遇组合下梁底压应力图分别如图2各图所示。

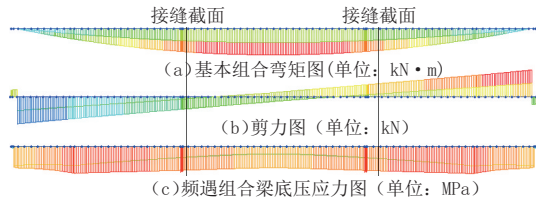


图2 基本组合弯矩图、剪力图及频遇组合梁底压应力图

简支小箱梁跨中弯矩最大,支点剪力最大,根据其受力特性,纵向节段划分选择桥跨约1/3处,此处通常不是受力控制截面,且拥有一定的压应力储备。故40 m跨径装配式节段小箱梁纵向节段划分为13 m+14 m+13 m。

1.3 施工流程

装配式节段小箱梁在工厂预制完成后,运输至施工现场;采用架桥机进行节段吊装并进行定位、校准及预拼;在接缝截面涂抹接缝胶,将节段进行匹配定位并张拉临时预应力挤紧固化;张拉预应力钢束,灌浆、封锚,浇筑梁间湿接缝、跨中横隔板及端横梁横向连接混凝土;重复以上步骤吊装架设其余跨;设置桥面连续,安装护栏,铺设桥面铺装层,安装附属设施成桥^[15-16]。

装配式节段小箱梁可在架桥机上拼装并张拉临时和永久预应力,避免在地面组拼占地,也可在施工现场台座上拼装并张拉临时和永久预应力。

2 横向分布系数及有限元模型

一片40 m标准跨径的简支装配式节段小箱梁,采用C50混凝土,梁高2.02 m,裸梁宽度有4种,分别为2.4 m中梁和2.4、2.85、3.15 m边梁,梁端一道端横隔板,跨中一道中横隔板。桥面铺装为:0.1 m厚C50混凝土+0.1 m厚沥青混凝土。桥宽为8~35 m,湿接缝宽度为0.3~0.9 m,通过不同宽度的中梁、边梁及湿接缝进行组合,桥梁横断面参数如表1所示。

表1 桥梁横断面参数表

设计桥宽 B/m	2.4 m 中边梁/片	2.85 m 边梁/片	3.15 m 边梁/片	湿接缝宽度/m
8.00≤B≤8.75	3	—	—	0.40~0.78
8.75<B≤9.50	1	2	—	0.33~0.70
9.50<B≤10.50	1	—	2	0.40~0.90
10.50<B≤12.00	4	—	—	0.30~0.80
11.75<B≤13.00	2	2	—	0.42~0.83
12.50<B≤13.50	2	—	2	0.47~0.80
13.50<B≤15.00	5	—	—	0.38~0.75
14.50<B≤16.00	3	2	—	0.40~0.78
16.00<B≤18.00	6	—	—	0.32~0.72
17.00<B≤19.25	4	2	—	0.34~0.79
19.25<B≤21.00	7	—	—	0.41~0.70
20.00<B≤22.50	5	2	—	0.38~0.80
22.50<B≤25.50	6	2	—	0.34~0.77
25.50<B≤28.50	7	2	—	0.38~0.75
28.50<B≤32.00	8	2	—	0.40~0.79
32.00<B≤35.00	9	2	—	0.47~0.77

采用MIDAS Civil中的横向分布系数程序,按刚接梁法,计算表1给出的所有桥梁横断面组合的横向分布系数,2.4 m中梁和2.4、2.85、3.15 m边梁的最大横向分布系数依次为0.892、0.847、0.963、1.066。

以40 m标准跨径、2.4 m中梁、0.9 m宽湿接缝为例进行计算分析,其中支点节段长度为12.96 m,跨中节段长度为14 m,梁高2.02 m。采用MIDAS Civil建立一片装配式节段小箱梁的有限元模型,共计95个节点86个单元,小箱梁采用梁单元,C50混凝土,N1~N3预应力钢束的规格为7φ_{15.2},N4~N5预应力钢束的规格为8φ_{15.2},张拉控制应力为1 302 MPa,除接缝处的单元以外均考虑普通钢筋的作用,支座底节点采用一般支承固结,支座采用弹性连接模拟,上座上节点与主梁采用刚性连接模拟。模型如图3

所示。

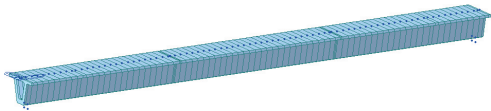


图3 一片小箱梁有限元模型

3 装配式节段小箱梁设计计算理论依据

根据参考文献[17](简称《桥规》),装配式节段小箱梁按A类预应力混凝土预制构件进行整体验算,跨中节段和支点节段按钢筋混凝土构件进行验算。根据参考文献[18](简称《装配式桥规》)第5.5.2条,当构件无纵向连续普通钢筋时,应按全预应力混凝土设计,故装配式节段小箱梁接缝截面按全预应力混凝土构件进行验算。验算公式对比如表2所示。

表2 整体预制验算与接缝截面验算公式对比表

验算内容	A类整体预制	全预应力接缝截面
正截面抗弯	$\gamma_0 M_d \leq M_{ud}$	$\gamma_0 M_d \leq 0.95 M_{ud}$
斜截面抗剪承载力上限	不需验算	需验算
斜截面抗剪	$\gamma_0 V_d \leq V_{cs} + V_{pb,d}$	$\gamma_0 V_d \leq V_{cs} + V_{pb,d}$
抗剪弯承载力	不需验算	需验算
正截面抗裂	$\sigma_{st} - \sigma_{pe} \leq 0.7 f_{tk}$ $\sigma_{lt} - \sigma_{pe} \leq 0$	$\sigma_{st} - 0.80 \sigma_{pe} \leq 0$
斜截面抗裂	$\sigma_{tp} \leq 0.7 f_{tk}$	$\sigma_{tp} \leq 0.4 f_{tk}$
正截面压应力	$\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5 f_{ck}$	$\sigma_{cc} \leq 0.5 f_{ck}$
斜截面压应力	$\sigma_{cp} \leq 0.6 f_{ck}$	$\sigma_{cp} \leq 0.6 f_{ck}$
预应力钢筋拉应力	$\sigma_{pe} + \sigma_p \leq 0.65 f_{pk}$	$\sigma_{pe} + \sigma_p \leq 0.65 f_{pk}$
短暂状况法向应力	$\sigma'_{cc} \leq 0.7 f'_{ck}$	$\sigma'_{cc} \leq 0.65 f'_{ck}$
短暂状况键齿应力	不需验算	需验算
键齿胶接缝直剪承载力	不需验算	需验算
节段吊装RC验算	不需验算	需验算

式中: γ_0 为结构重要性系数; M_d 为弯矩,kN·m; V_d 为剪力,kN; M_{ud} 为弯矩,kN·m; V_{ud} 为剪力承载力,kN; V_{cs} 为斜截面内混凝土和箍筋共同的抗剪承载力,kN; $V_{pb,d}$ 为弯起预应力钢筋抗剪承载力,kN; σ_{st} 、 σ_{lt} 为频遇组合或准永久组合下截面边缘混凝土的法向拉应力,MPa; σ_{pe} 为混凝土预压应力,MPa; σ_{cp} 、 σ_{tp} 为混凝土主压或主拉应力,MPa; f_{ck} 、 f_{tk} 为混凝土抗压或抗拉强度标准值,MPa; σ_{kc} 为标准组合下混凝土法向压应力,MPa; σ_{cc} 为使用阶段截面混凝土法向压应力,MPa; σ_{pt} 为由预加力产生的混凝土法向拉应力,MPa; σ_{pe} 为受拉区纵向预应力钢筋的有效预应力,MPa; σ_p 为预应力钢筋的应力增量,MPa; f_{pk} 为预应力钢筋抗拉强度标准值,MPa; σ'_{cc} 为截面边缘混凝土的法向应力,MPa; f'_{ck} 为短暂状况施工阶段的混凝土轴心抗压强度标准值,MPa。

4 装配式节段小箱梁整体结构验算

4.1 承载能力极限状态验算

(1)正截面抗弯验算

正截面抗弯验算包络图如图4所示。

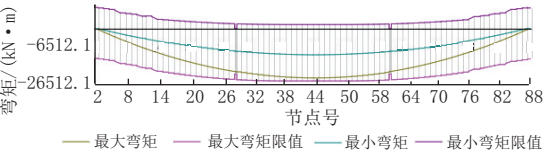


图4 正截面抗弯验算包络图

根据《桥规》第5.1.2条进行验算,最不利位置为接缝及跨中处,验算结果分别如式(1)和式(2)所示:

$$\gamma M_u = 1.1 \times 18\,465.0 = 20\,311.5 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq M_n = 21\,479.8 \text{ kN} \cdot \text{m} \tag{1}$$

$$\gamma M_u = 1.1 \times 21\,177.7 = 23\,295.5 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq M_n = 24\,750.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \tag{2}$$

满足规范要求。

(2)斜截面抗剪验算

斜截面抗剪验算包络图如图5所示。

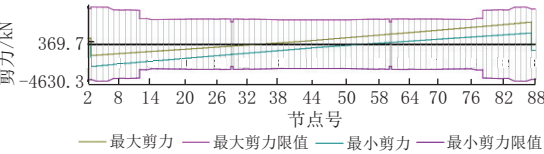


图5 斜截面抗剪验算包络图

根据《桥规》第5.1.2条进行验算,最不利位置为支点处,验算结果如式(3)所示:

$$\gamma V_d = 1.1 \times 2\,290.6 = 2\,519.7 \text{ kN} \leq V_n = 3\,983.6 \text{ kN} \tag{3}$$

满足规范要求。

4.2 正常使用极限状态验算

(1)正截面抗裂验算

正截面抗裂验算包络图如图6所示。

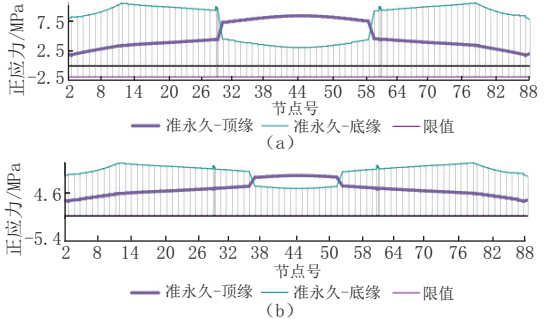


图6 正截面抗裂验算包络图

根据《桥规》式(6.3.1-3)和(6.3.1-4)进行验算:

$$\sigma_{st} - \sigma_{pe} = -1.3 + 3.0 = 1.7 \text{ MPa(压)} \leq 0.7 f_{tk} = 0.7 \times 2.65 = 1.855 \text{ MPa(拉)} \tag{4}$$

$$\sigma_{lt} - \sigma_{pe} = -0.1 + 3.0 = 2.9 \text{ MPa(压)} \leq 0 \text{ MPa(拉)} \tag{5}$$

满足规范要求。

(2)斜截面抗裂验算

斜截面抗裂验算包络图如图 7 所示。

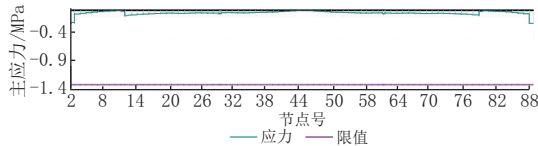


图 7 斜截面抗裂验算包络图

根据《桥规》式(6.3.1-7)进行验算:

$$\begin{aligned}\sigma_{tp} &= 0.1 \text{ MPa(拉)} \leq 0.7f_{tk} \\ &= 0.7 \times 2.65 = 1.855 \text{ MPa(拉)}\end{aligned}\quad (6)$$

满足规范要求。

(3)挠度验算及预拱度验算

根据《桥规》第 6.5.3 ~ 6.5.5 条进行验算。

C50 混凝土的挠度长期增长系数 $\eta_\theta = 1.425$, 汽车荷载(不计冲击力)的最大挠度为 16.3 mm, 长期挠度为 $1.425 \times 16.3 = 23.3 \text{ mm} < l/600 = 64.9 \text{ mm}$, 满足规范要求。

荷载频遇值挠度为 63.2 mm, 预应力反拱值为 53.3 mm, 考虑长期效应的荷载频遇组合挠度为 $1.425 \times 63.2 = 90.1 \text{ mm} < 2 \times 53.3 = 106.6 \text{ mm}$, 不需要设置预拱度。

4.3 应力验算

(1)正截面压应力验算

正截面压应力验算包络图如图 8 所示。

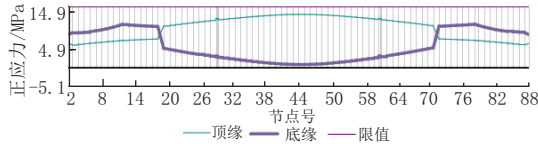


图 8 正截面顶边缘压应力验算包络图

根据《桥规》式(7.1.5-1)进行验算:

$$\begin{aligned}\sigma_{kc} + \sigma_{pc} &= 14.2 \text{ MPa} \leq 0.5f_{ck} \\ &= 0.5 \times 32.4 = 16.2 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (7)$$

满足规范要求。

(2)斜截面主压应力验算

斜截面主压应力验算包络图如图 9 所示。

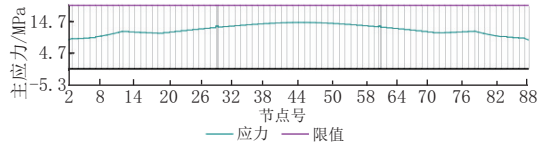


图 9 斜截面主压应力验算包络图

根据《桥规》式(7.1.6-1)进行验算:

$$\begin{aligned}\sigma_{cp} &= 14.2 \text{ MPa} \leq 0.6f_{ck} \\ &= 0.5 \times 32.4 = 19.44 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (8)$$

满足规范要求。

(3)预应力钢筋拉应力验算

根据《桥规》式(7.1.5-2)进行验算:

$$\begin{aligned}\sigma_{pe} + \sigma_p &= 1174.0 \text{ MPa} \leq 0.65f_{pk} \\ &= 0.65 \times 1860 = 1209 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (9)$$

满足规范要求。

(4)短暂状况法向应力验算

短暂状况法向应力验算包络图如图 10 所示。

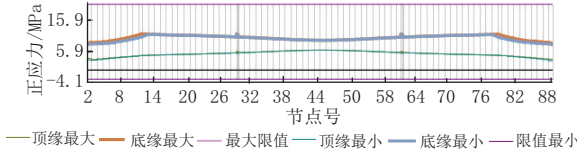


图 10 短暂状况法向应力验算包络图

混凝土强度及弹性模量达到设计值的 90%, 且龄期不小于 7 d, 方可张拉预应力钢束, 故 C50 混凝土的 f'_{ck} 等于 C45 混凝土的 f_{ck} 。根据《桥规》式(7.2.8)进行验算:

$$\begin{aligned}\sigma'_{cc} &= 16.5 \text{ MPa} \leq 0.7f'_{ck} = 0.7 \times 29.6 = 20.72 \text{ MPa} \quad (10) \\ &\text{满足规范要求。}\end{aligned}$$

5 装配式节段小箱梁接缝截面验算

5.1 承载能力极限状态验算

(1)正截面抗弯验算

根据《装配式桥规》式(5.4.3)进行验算:

$$\gamma_0 M_d = 1.1 \times 18465.0 = 20311.5 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}0.95M_{ud} &= 0.95 \times 21603.8 = \\ &= 20523.6 \text{ kN} \cdot \text{m} > \gamma_0 M_d\end{aligned}\quad (12)$$

满足规范要求。

(2)斜截面抗剪承载力上限值验算

根据《装配式桥规》第 5.4.7 条进行验算:

$$\gamma_0 V_d = 1.1 \times 1034.9 = 1138.4 \text{ kN} \quad (13)$$

$$V_{pe} = 0.95\sigma_{pe,i} A_{pb,i} \sin \theta_i = 242.0 \text{ kN} \quad (14)$$

$$\bar{V}_{ud} = 0.23\alpha_s \phi_s f_{cd} b_e h_e + V_{pe} = 2534.3 \text{ kN} > \gamma_0 V_d \quad (15)$$

式中: V_{pe} 为预应力钢筋拉力在构件垂直方向的分力, MPa; $\sigma_{pe,i}$ 为预应力钢筋应力, MPa; $A_{pb,i}$ 为预应力钢筋面积, mm^2 ; θ_i 为预应力钢筋与构件轴线的夹角, $^\circ$; $\bar{V}_{ud}$ 为截面抗剪承载力上限值, N; α_s 为截面形状系数; ϕ_s 为接缝对截面抗剪承载力上限值的折减系数; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值, MPa; b_e 为截面有效宽度, mm; h_e 为截面抗剪有效高度, mm。

满足规范要求。

(3)斜截面抗剪验算

根据《装配式桥规》第 5.4.8 条进行验算:

$$\gamma_0 V_d = 1.1 \times 1034.9 = 1138.4 \text{ kN} \quad (16)$$

$$V_{pb,d} = 0.95\sigma_{pd,i} A_{pd,i} \sin \theta_i = 220.3 \text{ kN} \quad (17)$$

$$0.35\alpha_1\lambda\phi(0.11+P)\frac{\sqrt{f_{cu,k}}}{m}b_lh_e+0.45\frac{C}{s_v}f_{sv,d}A_{sv} \quad (18)$$

$$+V_{pb,d}=3\,183.4\text{ kN}>\gamma_0V_d$$

式中: $V_{pb,d}$ 为预应力钢筋拉力设计值在构件垂直方向的分力, MPa; $\sigma_{pd,i}$ 为预应力钢筋极限应力设计值, MPa; $A_{pd,i}$ 为预应力钢筋面积, mm^2 ; α_1 为异号弯矩影响系数; λ 为预应力配筋形式的影响系数; ϕ 为受压翼板影响系数; P 为受拉区纵向连续钢筋和预应力钢筋的配筋率; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值, MPa; m 为剪跨比; b_l 为剪压区对应正截面处, 腹板宽度, mm; C 为斜截面水平投影长度, mm; s_v 为箍筋间距, mm; $f_{sv,d}$ 为箍筋的抗拉强度设计值, MPa; A_{sv} 为箍筋各肢截面面积之和, mm^2 。

满足规范要求。

(4) 抗剪弯承载力验算

受弯构件接缝截面剪压区高度在腹板处, 应按《装配式桥规》第 5.4.10 条进行验算:

$$\gamma_0V_d=1.1\times 1\,034.9=1\,138.4\text{ kN} \quad (19)$$

$$0.95\tau_c\left[bx+(b'_{f,s}-b)h_f\right]+V_{pd}=1\,878.9\text{ kN}>\gamma_0V_d \quad (20)$$

$$\gamma_0M_d=1.1\times 1\,1624.7=12\,787.2\text{ kN}\cdot\text{m} \quad (21)$$

$$\phi_f\left\{\sigma_c\left[bx\left(h_0-\frac{x}{2}\right)+(b'_f-b)h'_f\left(h_0-\frac{h'_f}{2}\right)\right]\right. \quad (22)$$

$$\left.-N_{spd,f}(h_0-h_{spd,f})\right\}=21\,104.8\text{ kN}\cdot\text{m}>\gamma_0M_d$$

式中: τ_c 为剪压区混凝土的剪应力设计值, MPa; b 为腹板厚度, mm; x 为受弯构件接缝截面剪压区的高度, mm; $b'_{f,s}$ 为受压翼板的抗剪有效宽度, mm; V_{pd} 为预应力钢筋拉力设计值在接缝截面切向的分力, N; ϕ_f 为接缝对抗弯承载力的折减系数; σ_c 为剪压区混凝土的压应力设计值, MPa; h_0 为受拉区纵向连续钢筋和预应力钢筋的合力点至受压边缘的距离, mm; b'_f 为截面受压翼板的有效宽度, mm; h' 为截面受压翼板有效宽度内的平均厚度, mm; $N_{spd,f}$ 为受拉区纵向连续钢筋和预应力钢筋的合力设计值在接缝截面法向的分力, N; $h_{spd,f}$ 为 $N_{spd,f}$ 的作用点至截面受压边缘的距离, mm。

满足规范要求。

5.2 正常使用极限状态验算

(1) 正截面抗裂验算

根据《装配式桥规》式(5.5.8-1)进行验算:

$$\sigma_{st}-0.8\sigma_{pc}=0.1\text{ MPa(压)}<0\text{ MPa(拉)}$$

满足规范要求。

(2) 斜截面抗裂验算

根据《装配式桥规》式(5.5.8-4)进行验算:

$$\sigma_{tp}=0.1\text{ MPa(拉)}\leq 0.4f_{tk}=1.06\text{ MPa(拉)}$$

满足规范要求。

5.3 应力验算

(1) 正截面压应力验算

根据《装配式桥规》式(5.6.3-1)进行验算:

$$\sigma_{cc}=13.2\text{ MPa(压)}\leq 0.5f_{tk}=16.2\text{ MPa(压)}$$

满足规范要求。

(2) 斜截面主压应力验算

根据《装配式桥规》式(5.6.3-2)进行验算:

$$\sigma_{cp}=13.2\text{ MPa(压)}\leq 0.6f_{ck}=19.44\text{ MPa(压)}$$

满足规范要求。

(3) 预应力钢筋拉应力验算

根据《装配式桥规》第 5.6.4 条, 预应力钢筋的最大拉应力应符合现行《桥规》的规定:

$$\sigma_{pe}+\sigma_p=1\,174.0\text{ MPa}\leq 0.65f_{pk}=1\,209\text{ MPa}$$

满足规范要求。

(4) 短暂状况法向应力验算

根据《装配式桥规》式(5.6.5-1)和(5.6.6)进行验算。施工阶段接缝截面边缘混凝土的最大压应力为:

$$\sigma'_{cc}=15.6\text{ MPa(压)}\leq 0.65f'_{ck}=19.24\text{ MPa(压)}$$

施工阶段接缝截面边缘混凝土未出现拉应力, 故不需验算拉应力是否满足要求。

综上, 满足规范要求。

(5) 短暂状况键齿剪应力验算

根据《装配式桥规》式(5.6.8)进行验算:

$$\tau'_{ck}=\frac{1.5V_k^i}{\sum A_{ck,i}}=1.6\text{ MPa} \quad (23)$$

$$0.7f'_{ck}\sqrt{0.009+0.095\frac{\sigma'_{pc,a}}{f'_{ck}}-0.104\left(\frac{\sigma'_{pc,a}}{f'_{ck}}\right)^2} \quad (24)$$

$$=3.4\text{ MPa}>\tau'_{ck}$$

式中: τ'_{ck} 为施工阶段剪力键根部截面混凝土的剪应力, MPa; V_k^i 为施工阶段计入动力系数作用标准值组合在接缝截面产生的剪力, kN; $A_{ck,i}$ 为第 i 格键块根部的截面面积, mm^2 ; $\sigma'_{pc,a}$ 为施工阶段接缝全截面的平均压应力, MPa。

满足规范要求。

5.4 键齿剪力键接缝的抗剪承载力应力验算

(1) 按规范验算

根据参考文献[19]第 6.3.2 条式(2)进行验算:

$$\gamma_0V_d=1.1\times 1\,049.8=1\,154.8\text{ kN} \quad (25)$$

$$\alpha(0.42 + 0.08\sigma_{pc,m})A_w(f_{cu,k})^{2/3} = 5800.0 \text{ kN} > \gamma_0 V_d (26)$$

式中: α 为胶接缝键齿抗剪承载力折减系数; $\sigma_{pc,m}$ 为构件截面形心混凝土预压应力,MPa; A_w 为腹板截面积, m^2 。

满足规范要求。

(2) ABAQUS 建模验算

为研究键齿数量对于胶接缝抗剪承载力的影响,采用 ABAQUS 建立一个单键齿模型和一个双键齿模型(接缝总面积相同),C50 混凝土采用 C3D8R 实体单元,普通钢筋采用 T3D2 桁架单元,结构两侧及上下面均设置与实际加载时相同尺寸的钢板,并与模型进行绑定,结构上部设置点 RP1 与加载板上部进行耦合约束,并约束 RP1 的 X 及 Z 方向的位移,结构下部设置点 RP2 与钢垫板下部进行耦合,并约束 RP2 的 X、Y、Z 方向的位移及转角,结构左右两侧设置点 RP3 及 RP4 与钢垫板进行耦合,并在 RP3 及 RP4 上施加水平集中力来模拟接缝正应力,钢筋与结构的连接采用嵌入,胶接缝采用绑定约束。模型如图 11 所示,单键齿和双键齿模型荷载位移曲线如图 12 所示。

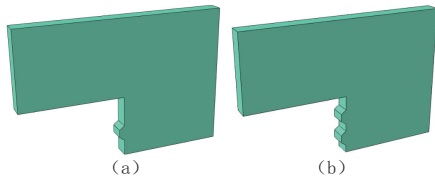


图 11 单键齿及双键齿模型示意图

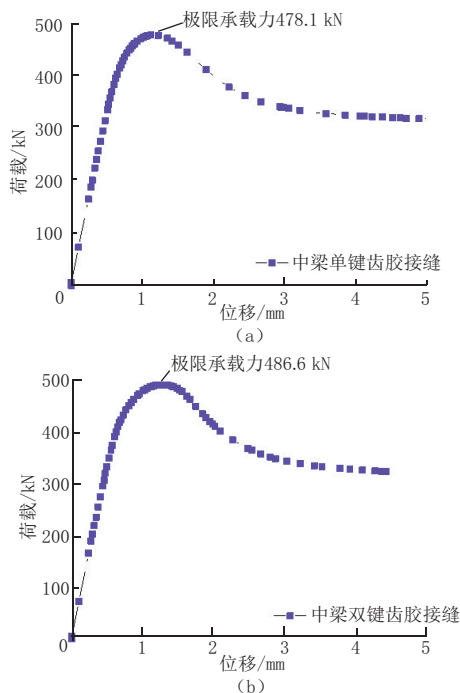


图 12 单键齿和双键齿模型荷载位移曲线图

由图 7 可知,单键齿与双键齿抗剪承载力分别为 478.1 kN 和 486.6 kN,仅相差 1.7%。且 5.4 节(1)中的抗剪承载力计算公式也只与混凝土强度、应力以及接缝总面积有关,因此有限元模型只建立单侧腹板 1/8 接缝面积,接缝承载力根据计算结果进行线性叠加即可得到。

单键齿抗剪承载力为 478.1 kN,换算为整个接缝截面键齿胶接缝抗剪承载力为 $478.1 \times 2 \times 8 \times 0.85 = 6502.2 \text{ kN} > \gamma_0 V_d$,满足规范要求。

6 装配式节段小箱梁跨中节段计算

对更不利的跨中节段按钢筋混凝土进行验算。

(1) 正截面抗弯验算

根据《桥规》第 5.1.2 条进行验算:

$$\gamma M_u = 1.1 \times 484.5 = 533.0 \text{ kN} \cdot \text{m} \leq M_n = 2435.6 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (27)$$

满足规范要求。

(2) 斜截面抗剪验算

根据《桥规》第 5.1.2 条进行验算:

$$\gamma V_d = 1.1 \times 225.4 = 247.9 \text{ kN} \leq V_n = 718.7 \text{ kN} \quad (28)$$

满足规范要求。

(3) 裂缝宽度验算

根据《桥规》第 6.4 条进行验算,最大裂缝宽度 $W_{cr} = 0.06 < \text{裂缝宽度允许值 } 0.20 \text{ mm}$,满足规范要求。

(4) 混凝土边缘压应力验算

根据《桥规》式(7.2.4-1)进行验算:

$$\sigma_{cc}^t = 0.86 \text{ MPa} < 0.8f'_{ck} = 23.68 \text{ MPa}$$

满足规范要求。

(5) 受拉钢筋应力验算

根据《桥规》式(7.2.4-2)进行验算:

$$\sigma_{si}^t = 45.98 \text{ MPa} < 0.75f_{sk} = 300 \text{ MPa}$$

式中: σ_{si}^t 为受拉钢筋的应力,MPa; f_{sk} 为普通钢筋抗拉强度标准值,MPa。

满足规范要求。

(6) 中性轴主拉应力验算

根据《桥规》式(7.2.5)进行验算:

$$\sigma_{tp}^t = 0.285 \text{ MPa (拉应力)} < f'_{tk} = 2.51 \text{ MPa}$$

式中: σ_{tp}^t 为钢筋混凝土受弯构件中性轴处的主拉应力,MPa; f'_{tk} 为施工阶段混凝土抗拉强度标准值,MPa。

满足规范要求。

7 结 语

本文对装配式节段小箱梁进行构件轻量化小型

化设计,对装配式节段小箱梁整体结构和接缝截面的设计计算理论进行了对比分析,以40 m标准跨径、2.4 m宽中梁、0.9 m宽湿接缝的简支装配式节段小箱梁为例进行计算分析,可以得出以下结论:

(1)装配式节段小箱梁构件轻量化小型化采用纵向节段划分的方式,总计3段,接缝截面均在弯矩、剪力相对较小且不控制设计的截面处。

(2)装配式节段小箱梁整体结构验算与接缝截面的验算公式大部分相似,仅系数不同,但接缝截面的验算比整体结构验算多了5项验算。

(3)分段后小箱梁整体重量和长度可减少约2/3,对于山地城市道路小半径弯道运输及过桥超重风险带来了极大的改善。

综上所述,装配式节段小箱梁沿纵向划分节段后,受力满足规范要求,使构件轻量化、小型化、标准化、工业化,符合重庆地区的实际需求。

参考文献:

- [1] 张亚栋.推进全过程工程咨询服务发展背景下建设工程监理发展的选择[J].建设监理,2022(8):50-53.
- [2] 郭云飞,侯照保,杨斌,等.市政工程装配化产业发展问题及展望[J].市政技术,2022,40(1):166-171;177.
- [3] 叶浩文,樊则森,苏衍江.工业化建筑标准化、数字化、一体化建造关键技术[J].建设科技,2022,(7):38-41.
- [4] 李晓明.推进工业化建筑的标准化设计[J].施工企业管理,2022,(12):67-68.
- [5] 姚鑫.城市推广装配式桥梁影响因素及技术难点分析[J].城市住宅,2021,28(1):242-243.
- [6] 张琥.装配式预应力混凝土连续小箱梁桥常见病害分析及对策[J].交通世界,2024(9):132-134.
- [7] 蒋文浩,周涛.隐盖梁预制小箱梁桥方案设计[J].城市道桥与防洪,2024(11):132-135.
- [8] 马翥,徐航,苏俭,等.预制装配式波形钢腹板组合小箱梁的研究及应用[J].城市道桥与防洪,2023(1):64-66.
- [9] 邵勇刚.波形钢腹板组合梁的应用与研究综述[J].山西交通科技,2022(6):66-70.
- [10] 李庆楼,孙超.超高性能混凝土在装配式模块化建筑中的应用[J].水泥,2025(7):84-87.
- [11] 李芳芳,武春明,贾鹏.UHPC在装配式建筑中的应用及施工技术优化[J].居舍,2025(16):37-39.
- [12] 杨亮.装配式建筑工程中超高性能混凝土应用研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):58-60.
- [13] 李剑鸾.全装配式UHPC-RC箱形组合梁原型设计及转向块受力性能分析[J].工程与建设,2023,37(5):1513-1517.
- [14] 李剑鸾,殷亮.全装配式UHPC-RC箱形组合梁快速化施工方案探讨[J].工程与建设,2024,38(1):125-128.
- [15] 雷仅富.预制装配式节段箱梁架设技术应用探讨[J].西部交通科技,2020(4):127-129.
- [16] 焦洋.桥梁工程中预制装配式节段箱梁架设施工技术探讨[J].黑龙江科学,2021,12(2):112-113.
- [17] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [18] JTG/T 3365—05—2022,公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].
- [19] DB 32/T 3564—2019,节段预制拼装混凝土桥梁设计与施工规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

