

先张折线预应力 T 形梁腹板厚度优化研究

张青¹, 魏明光², 张炜³

[1.江西昌铜高速公路有限责任公司,江西 南昌 330025; 2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092;

3.江西省交通投资集团有限公司 南昌西管理中心信息分中心,江西 南昌 330009]

摘要:先张法预应力 T 形梁因结构简洁、施工方便、经济性和耐久性好等突出优点逐渐开始在我国桥梁建设中大规模应用。腹板是 T 形梁的重要受力部位,是提供结构抗剪的重要部件。根据结构的受力特点,我国传统 T 梁一般采用变厚腹板的形式,支点腹板厚度一般达到 45 cm。然而,美国推出的先张法折线预应力 T 梁采用等厚腹板的形式,且在支点处的腹板厚度远小于我国 T 梁腹板。为了探明腹板厚度对桥梁力学性能及经济性的影响,以一座 30 m 跨的先张折线预应力等厚腹板 T 形梁为例,对 3 种腹板厚度进行了空间有限元分析,对抗弯、抗剪、抗裂的关键力学指标和预制梁的经济性进行了分析。研究表明:腹板厚度的变化对荷载效应、承载力、刚度及抗裂性的影响较小,对截面抗剪上限值的影响较大,往往会控制设计。不同设计规范对截面尺寸的限制存在较大差异,采用《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)以及规范《节段预制混凝土桥梁技术标准》(CJJ/T 111—2023)设计的预制 T 梁经济性更好。

关键词:先张法;折线预应力;腹板;力学性能;经济性

中图分类号:TU758.11;U445.47+1 **文献标志码:**A

文章编号:1009-7716(2024)12-0097-03

0 引言

预制装配式技术是我国桥梁建设领域重要的发展方向。装配式预应力施工可根据预应力张拉及混凝土浇筑顺序分为先张法和后张法^[1]。折线先张法预应力因克服了传统直线预应力混凝土构件无法实现大跨度以及传统后张法预应力端部锚头较大的缺点,而在国内外的装配式桥梁中得到了广泛应用。随着我国的桥梁工业化建造不断发展,折线先张法预应力 T 形梁因结构简洁、施工方便、经济性和耐久性好等突出优点逐渐开始在我国桥梁建设中大规模应用。一般而言,折线先张 T 梁主要应用于 30 m 跨及以上的桥梁中。在有些省市已开始形成地方标准图集。

腹板是 T 形梁的重要受力部位,是结构提供抗剪的重要部件。我国传统的 T 形梁一般采用变厚腹板的形式,如公路标准图中 30 m 跨后张 T 形梁的跨中腹板厚度为 20 cm,支点腹板厚度为 45 cm。然而

美国 AASHTO 和 PCI 推出的先张法折线预应力 I 形梁和 Bulb T^[2-4]则采用等厚腹板且腹板厚度为 6~7 in (15~18 cm)。采用等厚腹板可以提高预制的便利性,且较薄的腹板可以节省混凝土的材料用量。但较薄的腹板有可能会使结构受力不可靠,如腹板主拉应力超限导致的腹板开裂或腹板尺寸较小导致的腹板斜压破坏。我国的设计规范对腹板主拉应力及腹板最小尺寸均作了明确规定。

为了探明腹板厚度对桥梁力学性能及经济性的影响,本文以一座 30 m 跨的先张折线预应力等厚腹板 T 形梁为例,对三种腹板厚度进行了空间有限元分析,对关键力学指标和预制梁的经济性进行了分析。

1 结构设计及分析方法

1.1 先张 T 梁桥结构设计

本文以一座桥宽 16.55 m 的 30 m 跨先张折线预应力 T 为研究对象。预制梁长为 29.96 m,梁高 1.6 m,腹板间距 2.45 m,湿接缝宽度 400 mm。仅设端横梁,不设中横梁。主梁采用 C60 混凝土,预应力采用 $\Phi 15.2$ mm 低松弛钢绞线,共 44 根,其中 18 根采用折线布置,弯折点间距约 16 m。箍筋采用双肢 $\Phi 12@100$ 的 HRB400 钢筋,纵筋采用 6 根 $\Phi 20$ 的

收稿日期:2024-06-17

作者简介:张青(1977—),女,硕士,高级工程师,从事工程建设管理工作。

通信作者:魏明光(1988—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。电子信箱:weimingguang@smcdi.com

HRB400 钢筋,铺装采用 10 cm 混凝土 +10 cm 沥青,防撞墙采用混凝土防撞墙,主要结构参数如图 1 所示。

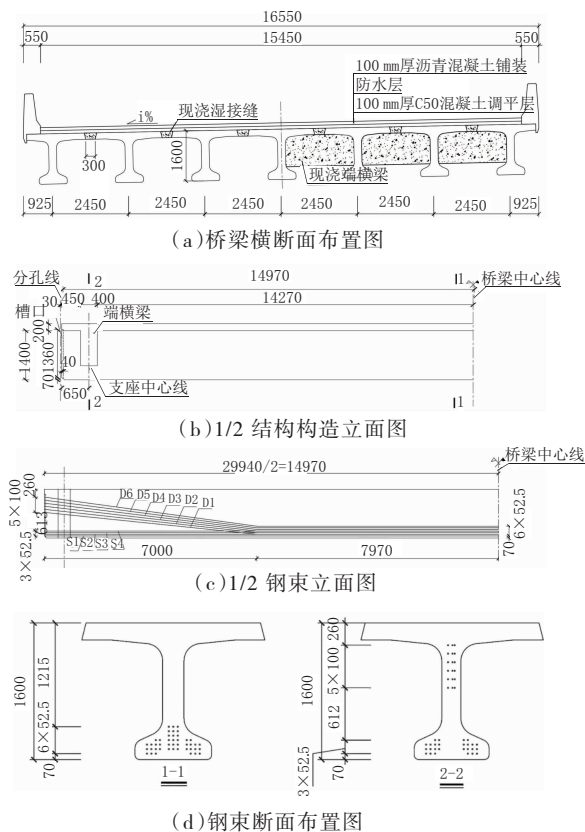


图 1 T 梁结构构造钢束钢筋图(单位:mm)

在以上结构尺寸的基础上,本文对图 1 中的先张折线预应力 T 梁,在保持其他构造尺寸和预应力配置方式不变的情况下,腹板厚度(b)分别取为 210、250、280 mm,研究 3 种不同断面形式的预制梁的受力性能。

1.2 分析方法

本文采用桥梁博士 5.0 建立空间梁格模型来研究桥梁的结构受力特性,梁格模型及模型如图 2 所示。结构自重及铺装重量按实际尺寸计取,防撞护栏重取 12 kN/m,汽车荷载取公路—I 级,其余作用根据桥梁设计规范相应计取值。

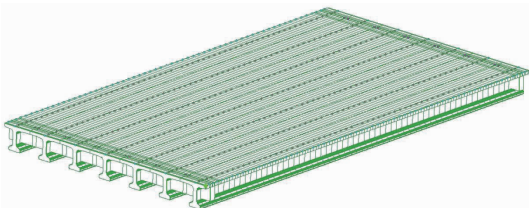


图 2 空间梁格模型

2 结果与讨论

2.1 抗弯性能

对 3 种不同的腹板宽度分别输出边梁最大弯

矩、抗弯承载力以及计算抗弯刚度,结果见表 1 所列。

表 1 抗弯性能评价(基本组合)

腹板厚度 / mm	最大设计弯矩 / (kN·m)	抗弯承载力 / (kN·m)	抗弯刚度 EI / (N·mm ²)	活载挠度 / mm
280	10 151.9	11 374.4	1.29×10^{16}	12.4
250	10 057.9	113 60.2	1.27×10^{16}	12.6
210	9 940.9	11 363.5	1.25×10^{16}	12.9

当腹板厚度从 250 mm 减小为 210 mm 时,腹板厚度减小 16%,截面积从 0.992 mm² 减少到 0.949 mm²,减少了 4.3%,跨中最大弯矩减小了 1.2%,抗弯承载力基本无变化,抗弯刚度减小 1.6%。

当腹板厚度从 250 mm 增大至 280 mm 时,腹板厚度增加了 12%,截面积从 0.992 mm² 增加到 1.024 mm²,增加了 3.3%,跨中最大弯矩增加了 0.9%,抗弯承载力增加了 0.1%,抗弯刚度增加了 1.6%。

对比最大弯矩与对应的抗弯承载力,3 种类型的最大弯矩均小于抗弯承载力,满足设计使用要求。

通过对 3 项力学指标的对比发现,梁体的截面刚度会随着腹板厚度的变化而变化,但刚度的变化率小于截面积的变化率。3 种腹板厚度的活载挠度远小于规范限制,故,刚度的变化对结构的性能影响很小。腹板变化对跨中弯矩和抗弯承载力的影响很小。故,腹板的变化对于抗弯性能的影响很小。

2.2 抗剪性能

对 3 种不同的腹板宽度分别输出边梁最大剪力、抗剪承载力以及抗剪刚度,结果如表 2 所列。

表 2 抗剪性能评价(基本组合)

腹板厚度 / mm	最大设计剪力 / kN	抗剪承载力 / kN	抗剪刚度 GA/kN
280	1 623.6	2 214.4	8.33×10^6
250	1 609.6	2 139.0	8.19×10^6
210	1 592.1	2 033.4	8.03×10^6

当腹板厚度从 250 mm 减小为 210 mm 时,腹板厚度减小 16%,截面积减少了 4.3%,最大剪力减小了 1.1%,抗剪承载力减小 4.9%,抗剪刚度减小 2.0%;

当腹板厚度从 250 mm 增大至 280 mm 时,腹板厚度增加了 12%,截面积增加了 3.3%,最大剪力增加了 0.9%,抗剪承载力增大 3.5%,抗剪刚度增加了 1.7%。

对比 3 种腹板厚度的 T 梁的 3 项力学指标可知,3 种类型的 T 梁的的最大剪力均小于抗剪承载

力,满足设计使用要求。随着腹板厚度的变化而变化,变化趋势相同,支点最大剪力和剪切刚度相应减小,变化率小于截面变化率。抗剪承载力的变化趋势和截面的变化趋势相同,变化率与截面变化率相当。

抗剪承载力的上限限制是薄腹板验算中最为重要的部分,主要是因为当截面尺寸过小时,较大的剪力会产生过大的主压应力,进而发生斜压破坏,斜压破坏属于脆性破坏^[5],一旦发生,后果会很严重。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[6](以下简称:“规范 JTG 3362—2018”)中的 5.2.11 条^[6],对抗剪截面的要求如式(1)所示:

$$\gamma_0 V_d \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} b h_0 \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; V_d 为用于抗剪配筋设计的最大剪力设计值; $f_{cu,k}$ 边长为 150 mm 的混凝土立方体抗压强度标准值; b 为用于抗剪配筋设计的最大剪力截面的梁腹宽度; h_0 用于抗剪配筋设计的最大剪力截面的有效高度。

而《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)^[7](以下简称:“规范 JTG/T 3365-05—2022”)以及《节段预制混凝土桥梁技术标准》(CJJ/T 111—2023)^[8](以下简称:“规范 CJJ/T 111—2023”)中对于抗剪截面的要求如式(2)所示:

$$\gamma_0 V_d \leq 0.23 a_s \phi_s f_{cd} h_e h_e + V_{pe} \quad (2)$$

式中: a_s 为截面形状影响系数; ϕ_s 为接缝对截面抗剪承载力上限值的折减系数; f_{cd} 为混凝土轴心抗压强度设计值; h_e 为截面受拉区纵向连续普通钢筋合力点至截面受压边缘的距离; V_{pe} 为弯起预应力钢筋的永存预加力在与构件轴线垂直方向的分力;根据规范 JTG 3362—2018 和规范 CJJ/T 111—2023 对三种不同腹板宽度的 T 形梁进行抗剪承载力上限的验算,计算结果如表 3 所列。

由公式(1)及表 3 可知,依据规范 JTG 3362—2018 得到的截面抗剪上限值和腹板宽度呈正比关系。当腹板厚度从 250 mm 减小为 210 mm 时,腹板厚度减小 16%,截面抗剪上限值减少了 16%;当腹板厚度从 250 mm 增大至 280 mm 时,腹板厚度增加了 12%,抗剪上限值增加 12%。

由公式(2)及表 3 可知,依据规范 JTG/T 3365-05—2022 以及规范 CJJ/T 111—2023 得到的截面抗剪上限成线性关系。当腹板厚度从 250 mm 减小为 210 mm 时,腹板厚度减小 16%,截面抗剪上限值减少了 18%;当腹板厚度从 250 mm 增大至 280 mm 时,腹板厚度增加了 12%,抗剪上限值增加 14%。

根据规范 JTG 3362—2018,当腹板厚度为 210 mm 和 250 mm 时,腹板的截面尺寸不满足规范要求,当腹板厚度增加至 280 mm 时,截面尺寸满足要求。而根据规范 JTG/T 3365-05—2022 以及规范 CJJ/T 111—2023,3 种腹板厚度的截面尺寸均满足要求。

由以上分析可见,腹板厚度对截面尺寸限制值的影响很大,不同规范对截面尺寸的限制存在较大差异,采用规范 JTG/T 3365-05—2022 以及规范 CJJ/T 111—2023 进行结构设计,可最大节省 7.3%的混凝土用量。

表 3 不同规范的截面抗剪上限值对比

腹板厚度 / mm	最大设计剪力 / kN	CJJ/T 111—2023、JTG/T 3365-05—2022/kN	JTG 3362—2018/kN
280	1 623.6	2 422.5	1 736.61
250	1 609.6	2 128.9	1 550.54
210	1 592.1	1 745.1	1 302.46

3 抗裂性能

腹板主拉应力是反映腹板抗裂性的重要指标,3 种不同腹板厚度的先张折线预应力 T 梁的最大主应力如表 4 所列。

表 4 腹板最大主拉应力

腹板厚度 / mm	主拉应力 / MPa	主拉应力容许值 / MPa
280	1.810	
250	1.825	1.995
210	1.865	

从表 4 可以看出,随着腹板厚度的增加,主拉应力呈现逐渐减小的趋势。当腹板厚度从 250 mm 减小为 210 mm 时,腹板厚度减小 16%,主拉应力增大 2.2%。当腹板厚度从 250 mm 增大至 280 mm 时,腹板厚度增加了 12%,主拉应力减小 0.8%。3 种不同腹板厚度的 T 梁的最大主拉应力值均低于容许值,且腹板厚度对主拉应力的影响较小。

4 结 论

本文以一座 30 m 跨的先张折线预应力等厚腹板 T 形梁为例,对 3 种腹板厚度进行了空间有限元分析,对其抗弯性能、抗剪性能、腹板抗裂性能进行了分析,可以得到如下结论。

(1)腹板厚度的变化对荷载效应,承载力、刚度及抗裂性的影响较小;

(2)腹板厚度对截面抗剪上限值的影响较大,往

(下转第 103 页)

合成刚度,同样从 0.8 m 增大至 1.0 m 时,增幅分别为 24.6% 和 40.4%,原因同前;

(2)中墩各类指标的安全系数变化幅度很小。边墩各类指标的安全系数变化则呈现出了先增大后减小的规律。这说明仅边墩壁厚变化时,对中墩的影响很小,而过小的壁厚会因为截面高度不足导致边墩各类指标的安全系数变小,过大的壁厚会因为次内力过大导致边墩各类指标的安全系数变小。

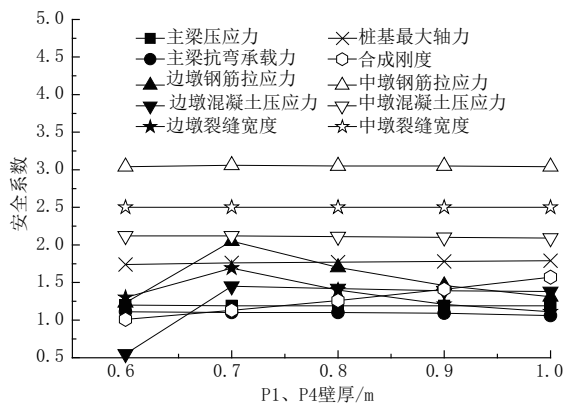


图 7 仅边墩壁厚变化对安全系数的影响

4 结 语

本文以某城市轨道交通工程中的双肢薄壁墩无支座连续刚构桥为例,通过建立有限元模型,研究了双肢薄壁墩墩高、壁厚在多种变化模式下对桥梁性能的影响,得出以下结论。

(1)主梁压应力、主梁抗弯承载力及桩基最大轴力对桥墩墩高及壁厚的变化不敏感。

(2)合成刚度对桥墩墩高及壁厚的变化很敏感,

中墩的影响大于边墩的影响。

(3)壁厚不变时,桥墩钢筋拉应力、混凝土压应力及裂缝宽度随墩高增大而减小。仅个别桥墩墩高变化时,未变化的桥墩会因为整体刚度中的占比变化而相应变化。

(4)墩高不变时,桥墩钢筋拉应力、混凝土压应力及裂缝宽度的变化趋势为先有利后不利,这表明其中存在一个最优的壁厚取值。

参考文献:

- [1] 朱六兵.无支座连续刚构体系在六号线中的应用[J].建筑监督检测与造价,2017,10(2):38-41.
- [2] 郭敏,何建梅,陈亮.广州地铁 14 号线全刚构桥梁设计关键技术[J].都市轨道交通,2020,33(4):84-89.
- [3] 何永平,陈清华.节段预制无支座连续刚构体系在广州地铁 21 号线中的应用[J].四川水泥,2019(5):140-141.
- [4] 文望青,王德志,武兵,等.高速铁路无支座整体式刚构设计[J].桥梁建设,2020,50(2):86-91.
- [5] 王维康.预制节段拼装 PC 连续刚构桥无支座体系设计要点研究[J].智能城市,2021,7(4):21-22.
- [6] 王德志,张红旭.福厦高铁桥梁技术创新与应用[J].世界桥梁,2020,48(增刊 1):1-6.
- [7] 文望青,林骋,武兵.预应力混凝土连续刚构在铁路桥梁中的创新应用[J].中国铁路,2021(9):40-45.
- [8] 程杰.无支座连续刚构轨道结构受力分析及温度跨度研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [9] 许泉.共用双肢墩连续刚构桥力学性能及优化设计研究[D].北京:北京交通大学,2022.
- [10] 伍祖涛.连续刚构桥桥墩单、双肢构造形式的对比选择[J].科技与企业,2014(2):197.

(上接第 99 页)

往会控制设计;

(3)不同设计规范对截面尺寸的限制存在较大差异,规范 JTG 3362—2018 比规范 JTG/T 3365—05—2022 以及规范 CJJ/T 111—2023 对截面最小尺寸的限制更严,所要求的腹板厚度更大。

参考文献:

- [1] 刘本立,张朋,郭冬梅.折线先张法 Bulb-T 梁抗弯性能有限元分析[J].特种结构,2023,40(5):20-24.
- [2] Roland Lavallee, Ken Cadman. New England Bulb Tee Girder Brings Strength, Elegance and Economy to Jetport Interchange Bridge[J].PCI

Journal, 2001, 46(6):68-75.

- [3] Bardow A K, Seraderian R L, Culmo M P. Design. Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder[J]. PCI Journal, 1997, 42(6):30-40.
- [4] Helm S. Cost Comparison of AASHTO Type IV and Modified Type IV Bridge Beams with 54 and 63 in. Bulb-Tees [J]. transportation research record, 1982:109-114.
- [5] 高玉婷.中美欧混凝土构件抗剪承载力和预应力损失计算方法对比分析[D].大连:大连理工大学,2016.
- [6] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [7] JTG/T 3365—05—2022,公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].
- [8] CJJ/T 111—2023,节段预制混凝土桥梁技术标准[S].