

预应力等截面T梁锚固区开裂机理分析及优化

刘超, 季申增, 杨智

(四川公路桥梁建设集团有限公司勘察设计分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 随着我国逐步提出绿色低碳高质量发展的前进战略, 众多学者提出了等截面T梁的概念, 并着重于等截面T梁在抗剪承载能力方面的研究, 对由于腹板厚度降低而产生的预应力锚固区裂缝鲜有涉及。为探索等截面T梁在实际应用中, 梁端锚固区的应力分布规律, 进行了参数化的有限元分析, 并提出合理的等截面T梁预应力布置方法和思路。研究表明等截面T梁虽然在支点位置腹板并未加宽, 但仍然能够满足国内外对结构抗弯、抗剪承载能力的要求。同时等截面T梁梁端截面会由于预应力张拉产生局部腹板开裂现象, 这种现象与梁体截面大小关联性较小, 与预应力钢束布置位置有关。

关键词: 等截面T梁; 锚固区; 有限元; 参数化分析

中图分类号: U441⁺.5; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0197-06

Analysis and Optimization of Cracking Mechanism in Anchorage Zone of Prestressed Uniform-section T-beam

LIU Chao, JI Shenzeng, YANG Zhi

(Sichuan Highway and Bridge Construction Group Co., Ltd., Survey and Design Branch, Chengdu 610041, China)

Abstract: As China gradually advances its green, low-carbon and high-quality development strategy, numerous scholars have proposed the concept of uniform-section T-beams and focused on studying their shear bearing capacity. However, there is little research on cracks in the prestressed anchorage zone caused by reduced web thickness. To explore the stress distribution pattern in the beam end anchorage zone of uniform-section T-beams in practical applications, a parametric finite element analysis is conducted, and a reasonable prestressing arrangement method and approach for uniform-section T-beams are proposed. The research indicates that although the web plate is not widened at the fulcrum position of the uniform-section T-beam, it still meets the domestic and international requirements for structural bending and shear bearing capacity. At the same time, the beam end section of the uniform-section T-beam may experience local web plate cracking due to prestress tensioning. This phenomenon is less related to the size of the beam section and more related to the arrangement position of the prestressed steel tendons.

Keywords: uniform-section T-beam; anchorage zone; finite element; parametric analysis

0 引言

预应力混凝土T梁具备跨越能力大、结构简单、安装方便、建设技术成熟等优势, 被大量运用于我国中小跨径桥梁建设中^[1-2]。

然而, 传统T梁腹板较薄, 支点附近剪力较大, 同时结合《公路混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中规定的混凝土抗剪截面最小尺寸标准^[3], 设计人员于T梁靠近支点位置设计

了腹板加厚处理。这类处理在增加结构抗剪承载力的同时, 也加大了混凝土T梁的预制难度。随着我国提出绿色低碳高质量发展的前进战略^[4], 大量工程建设行业从业者以节约资源、高效建设为目标, 提出了多项方案^[5-6]。黄海新等^[7]结合现有规范, 通过模块化集成系统对传统T梁进行外观构造、内部配筋的优化布置, 建立了不同地域的最优T梁构造, 避免了设计人员“一刀切”式的设计方案, 大幅提升了工程经济性。龙彬^[8]从结构强度、最小截面尺寸等方向出发, 建立了钢筋混凝土T梁综合评价函数, 对于大规模装配式T梁而言, 可以降低8.4%的综合用钢量。申法钰等^[9]则着重于混凝土T梁的生产制造方向, 基于实体工程建立了智能化梁场, 提升装配式T梁的浇筑养护效率, 降低了生产费用约430.2万元。

收稿日期: 2025-09-30

作者简介: 刘超(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 季申增(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计与智能建造研究工作。电子信箱: 821513091@qq.com

等截面T梁在荷载作用组合下的最大内力效应值为22 172 kN·m,结构自身最大抗力值为23 570 kN·m,能够满足抗弯承载能力要求。

1.3 国内外抗剪承载力计算分析

1.3.1 国内抗剪承载能力

我国对抗剪承载能力的计算主要分为四个部分,分别是斜截面内混凝土与箍筋的共同承载能力 V_{cs} 、斜截面弯起钢筋抗剪承载能力 V_{sb} 、斜截面预应力弯起钢筋抗剪承载能力 V_{pb} 和 $V_{pb,ex}$,计算公式如式(2)所示。

$$\gamma_0 V_d \leq V_{cs} + V_{sb} + V_{pb} + V_{pb,ex} \tag{2}$$

根据计算,等截面T梁抗剪承载能力为2 954.6 kN,结构内力为1 896.5 kN,满足规范要求。

1.3.2 国外抗剪承载能力

与国内规范公式相比,欧洲关于有腹筋构件抗剪的计算公式是基于桁架模型推导^[15],充分考虑到了梁体斜截面混凝土截面压应力对抗剪承载能力的影响,最终梁体的抗剪承载力取式(3)与(4)中较小值。

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \tag{3}$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w v_1 f_{cd} z \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \tag{4}$$

式中: $V_{Rd,s}$ 与 $V_{Rd,max}$ 分别为钢筋屈服时的剪力和混凝土被压碎时的剪力; A_{sw} 为箍筋截面面积; z 为最大弯矩所对应的内力臂; f_{cd} 为混凝土屈服强度设计值; f_{ywd} 为箍筋屈服强度设计值; b_w 为拉杆和压杆的最小宽度。

经过计算,于距离梁端一倍梁高截面下钢筋屈服剪力为3 426.9 kN,混凝土被压碎时的剪力为3 560.9 kN。综合对比后,以欧洲规范计算的等截面T梁抗剪承载能力为3 426.9 kN,大于我国规范计算值13.8%。虽然结构抗力均能满足两者要求,但国内计算公式明显更为保守。

1.4 与传统T梁对比

目前等截面T梁在S81线会理至禄劝(四川境)高速公路的实际工程中进行了试点应用。结构通过等截面设计,模板建造便利,钢筋布置简单,横隔板结构样式统一,大幅提升了施工建造效率,节约了施工建设成本。

在工程量方面,以交通部40 m预制T梁通用图为例,对比传统T梁与本文提出的等截面T梁工程量如表1所示。对比传统T梁结构,等截面T梁结构自

重增加,在混凝土和预应力钢绞线上的用量分别增加了5.8%和44.4%,但由于结构截面不存在加宽构造,普通钢筋用量大幅降低,主体受力钢筋HRB400减少了12.2%,作为结构钢筋的HPB300减少幅度最大,达到49.1%。

表1 预制结构原材料标准占比

项目	梁型		变化幅度
	传统T梁	等截面T梁	
C50混凝土/m ³	235.6	249.3	5.8%
HRB400钢筋/kg	51 031.9	44 830.5	-12.2%
HPB300钢筋/kg	6 932.5	3 525.5	-49.1%
钢绞线/kg	7 562.9	10 920.8	44.4%

在预制和施工效率方面,等截面T梁的建设比传统T梁具有更为显著的优势。首先,在模板工程方面,传统T梁模板在梁端位置需要进行变截面转换,设置精度要求高,每次拆模、支模都需要调整模板形状。等截面T梁模板由两块直线形的侧模和底模构成,结构简单,安装便利。两者相比,后者一方面降低了模板的建造和养护费用,另一方面这使得模板的周转率大幅提升。其次是钢筋绑扎工程的大幅优化,等截面T梁使得梁体内部箍筋形状尺寸保持一致,更加便于钢筋骨架的批量生产和安装定位,更容易实现自动化绑扎焊接技术的介入,未来发展前景更大。最后是混凝土浇筑与振捣工序的质量提升,等截面的结构形式,腹部厚度均匀,混凝土流动性和密实度更容易控制,振捣工艺更统一,减少了因截面变化导致的质量风险,有利于降低桥梁全寿命周期的养护费用。

综合上述,等截面T梁在工程量方面与传统相同跨径T梁相差不大,但就预制建造和未来发展前景而言,等截面T梁比传统T梁优势更为显著,工程建设效率提升达到30%左右。

在受力性能方面,两者能够满足我国相关规范要求,等截面T梁由于跨中腹板更厚,抗弯承载力大于传统同等跨径T梁结构(以交通部40 m预制T梁通用图为例,约为16 500 kN·m)。同时,端部截面未进行加宽,对于抗剪承载力而言,等截面T梁比传统T梁(以交通部40 m预制T梁通用图为例,约为3 900 kN)略有降低。

2 等截面T梁锚固区应力分析

2.1 模型建立

虽然等截面T梁在承载能力上满足结构受力要求,且具备较大的安全系数。但由于在支点位置腹

板厚度较小,在预应力布置较为集中,端部可能有开裂风险。因此对等截面T梁锚固区进行局部应力分析。

模型如图4所示,通过建立T梁锚固区局部空间有限元分析模型,选取梁端长度5 m为分析对象,重点关注在预应力张拉工况下,锚固区局部应力分布情况。

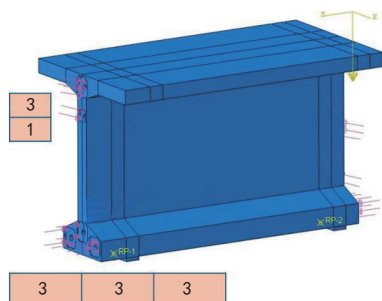


图4 预制结构原材料标准占比

其中,混凝土材料通过实体单元模拟,普通钢筋通过桁架单元模拟,两者之间不考虑黏结滑移,通过“内置区域”约束进行绑定。对于模型预应力,为模拟实际张拉工况,通过两端施加对应的压强荷载进行模拟,实现模型梁段自平衡状态,锚固区局部模型底部通过简支约束进行约束。

2.2 结果分析

根据计算,锚固区最大主拉应力水平如图5所示。最大应力出现在腹板底板与马蹄交界位置截面,向梁体内部延伸呈现半圆形分布。最大拉应力超过10 MPa,远超C50混凝土标准抗拉强度,在实际工程中,腹板底部会产生局部开裂现象,根据图中超限应力分布范围,裂缝延伸深度至少为20 cm。因此,需要对该结构进行优化设计,降低截面应力。

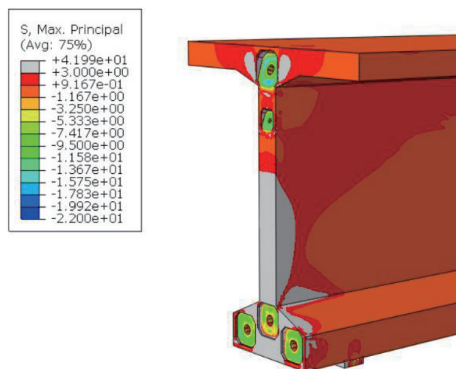


图5 锚固区主拉应力云图(单位:MPa)

3 等截面T梁参数化研究

3.1 对比传统T梁

首先,以同等跨径下的传统T梁为对比对象,通过对比两者在预应力张拉力作用下的梁端应力水平,为后续结构优化提供方向。与等截面T梁不同

的是,传统T梁在梁端预应力布置处理上,钢束均匀分布在梁体腹板上,分布间距相近,如图6所示。

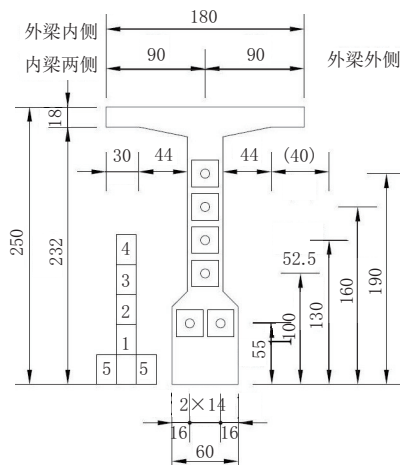


图6 传统40 m T梁梁端预应力布置(单位:cm)

经过计算,传统T梁在预应力张拉作用力下,锚固区最大主拉应力云图如图7所示。对于传统T梁,在预应力张拉力的作用下,梁端截面局部位置主拉应力会超过3 MPa,集中在锚固区周边。与等截面T梁不同的是,这些应力超限区域仅仅集中在混凝土表层,并未向内部延伸。可以认为这些表层混凝土的应力超限现象是由预应力锚具的局部应力集中导致的,可以通过在锚固区额外布置螺旋钢筋解决。

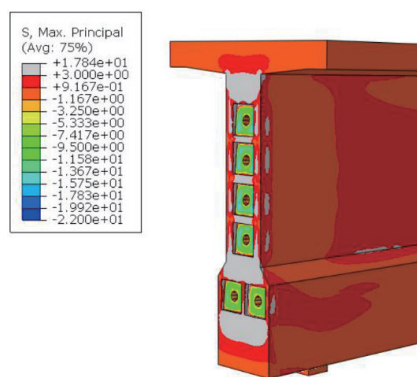


图7 传统T梁锚固区(单位:cm)

综上所述,传统T梁在预应力张拉力的作用下,梁端不会产生大面积开裂现象,对比等截面T梁,主要区别在于预应力布置位置和截面大小影响。

3.2 腹板厚度参数对比

通过改变等截面T梁的腹板厚度参数,观察梁端应力变化,如图8所示。对比图5,由于预应力张拉导致的腹板最大主拉应力降低幅度很小,且腹板位置的拉应力超限区域和深度基本没有任何的优化。

3.3 马蹄高度参数对比

通过改变等截面T梁底板马蹄高度参数,观察梁端应力变化,如图9和图8(c)所示。随着底板马

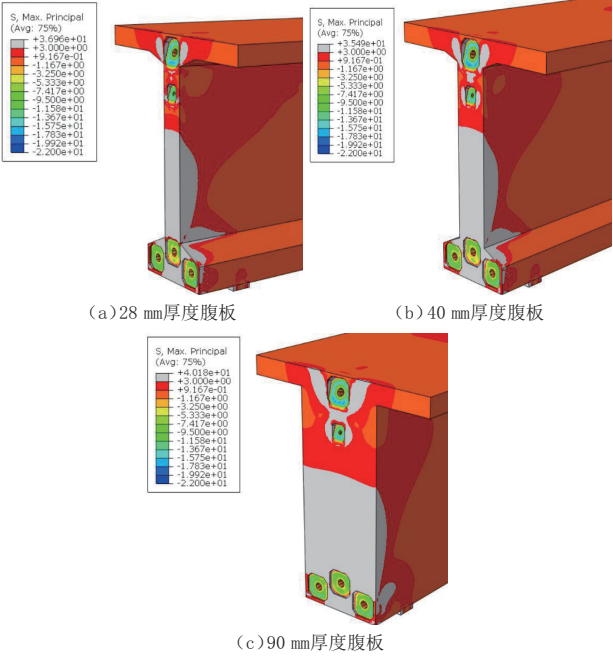


图 8 不同腹板厚度等截面T梁应力分布变化(单位:MPa)

蹄不断增加,对比图 5,梁端最大主拉应力水平和覆盖范围并未明显降低,最大主拉应力分布位置依然位于腹板与马蹄相交处。

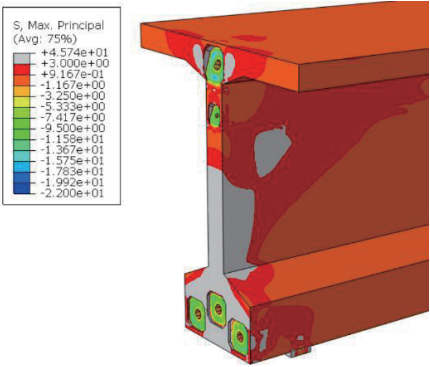


图 9 不同马蹄高度等截面T梁应力分布变化(单位:MPa)

3.4 预应力布置参数化对比

综合上述,对等截面T梁梁端尺寸构造的参数化分析,传统T梁与等截面T梁虽然在锚固区构造上存在区别,但这些区别并不是导致锚固区腹板拉应力超限的主要原因。根本原因在于等截面T梁由于腹板厚度降低,梁端预应力钢束锚固端集中布置在顶板和底板位置,使得顶板和底板马蹄位置压应力较大,与腹板中部产生了较大的应力差异,因此在腹板中部出现了明显的拉应力超限现象。且该拉应力方向为沿着腹板高度方向,开裂裂缝则为向梁体内部水平延伸。

下面以等截面T梁顶板钢束和底板马蹄位置钢束为参数,分析顶板钢束和底板钢束对腹板裂缝的影响程度,如图 10 所示。

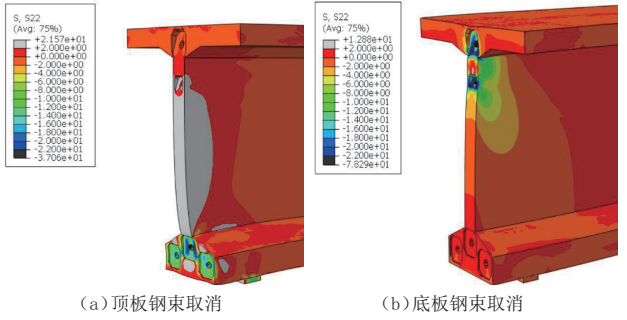


图 10 取消顶底板预应力钢束竖向应力分布变化(单位:MPa)

对比图 10 中顶板钢束和底板钢束分别取消后梁端应力变化,若取消底板马蹄位置钢束,锚固区竖向拉应力水平明显降低,且最大竖向拉应力小于 2 MPa。因此,对于等截面T梁的预应力布置优化应当以合理调整底板马蹄处钢束布置为主。

4 等截面T梁锚固区优化方案

4.1 钢绞线优化方案

由于等截面T梁底板马蹄位置的钢束张拉力过大,与未布置钢束的腹板位置产生了较为明显的变形差距,但若将底板马蹄位置钢束上移,均布于腹板内部,则T梁底板钢束不足,承载能力受到影响,因此考虑在腹板内部增加两道 $1\times\phi 28.6$ 布置的钢束,起到对腹板应力的限制作用,如图 11 所示。

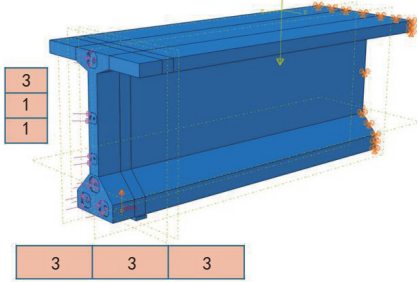


图 11 优化后等截面T梁梁端预应力钢束布置

在梁端预应力钢束布置优化后,在预应力张拉力的作用下,梁端主拉应力如图 12 所示。对比图 5,梁端主拉应力水平下降显著,尤其是腹板与底板马蹄相对位置,拉应力水平约为 0.2 MPa。梁端最大应力水平位于腹板预应力锚固区与顶板锚固区之间,最大拉应力水平约为 4.65 MPa,但基本限制在梁端表层,并未向腹板内部延伸,可以认为是由于预应力张拉锚具周边的应力集中的正常现象。

4.2 传统 15.2 mm 直径钢绞线方案

依托工程采用了较为新颖的大直径钢绞线技术,虽然在一定程度上提升了预应力钢束的建设效率,但同时由于 $\phi 28.6$ 规格的钢绞线直径较大,通过调整钢束数量来变动细部预应力分布较为困难。因

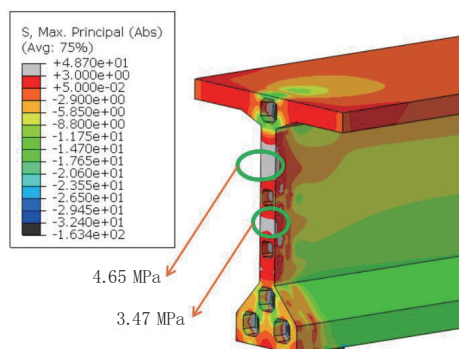


图12 优化后梁端主拉应力云图(单位:MPa)

此本文进一步提出 $\phi 15.2$ 规格钢绞线等截面T梁建设方案。

梁体基本构造尺寸不发生改变,钢束布置依然为顶板1根、腹板2根、底板3根的分布形式。其中,顶板钢束采用 $11 \times \phi 15.2$ 规格,腹板2根钢束均采用 $4 \times \phi 15.2$ 规格,底板三根钢束自上而下分别为 $12 \times \phi 15.2$ 、 $11 \times \phi 15.2$ 、 $11 \times \phi 15.2$ 布置,如图13所示。

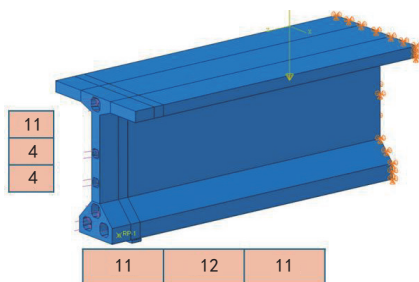


图13 15.2mm钢绞线等截面T梁梁端预应力钢束布置

对于直径15.2 mm钢绞线方案下的等截面T梁在梁端锚固区的最大主拉应力对比直径28.6 mm钢绞线方案(见图12)又进一步降低,其中最大主拉应力位置出现变化,位于腹板两块预应力锚固区之间位置,最大主拉应力为3.86 MPa,同样仅分布于混凝土表层。

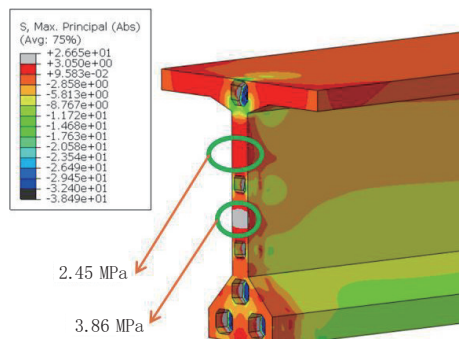


图14 15.2直径钢绞线方案锚固区主拉应力云图(单位:MPa)

5 结 语

本文通过对四川某工程提出的等截面T梁构造

进行了大量的有限元分析对比和构造优化,得出以下结论:

(1)等截面T梁虽然在支点位置腹板并未加宽,但仍然能够满足国内外对结构抗弯、抗剪承载能力的要求,但国内规范所定义的抗剪承载力计算方法偏向保守。

(2)等截面T梁梁端截面较小,在梁端截面会由于预应力张拉产生局部腹板开裂现象。这种现象与梁体截面大小关联性较小,主要是由腹板厚度较小,预应力钢束布置不合理导致的。

(3)针对等截面T梁梁端预应力张拉开裂问题,分别对大直径钢绞线和传统钢绞线等截面T梁均提出了预应力钢束布置优化方案,大幅降低了腹板混凝土应力超限数值和范围,该解决思路可以为后续相关工程做参考。

参考文献:

- [1] 朱玉,丁德豪,刘勇.广东省公路装配式预制T梁设计创新[J].公路,2020,65(10):127-132.
- [2] Kayabekir A E, Bekdaş G, Nigdeli S M. Optimum design of reinforced concrete T-beam considering environmental factors via flower pollination algorithm[J]. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2021, 13(4): 166-178.
- [3] JTG 3362—2018 公路混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [4] 工业化建造推动公路技术加速转型[J].中国公路,2024(11):90-93.
- [5] Ezebirika M C, Sule S. Cost Optimization of a T-beam Under Bending Constraints[J]. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 2024, 17(4): 67-74.
- [6] 张青,魏明光,张炜.先张折线预应力T形梁腹板厚度优化研究[J].城市道桥与防洪,2024,(12):97-99;103.
- [7] 黄海新,孙文豪,程寿山.钢筋混凝土T梁桥模块化集成设计优化与实践[J].混凝土,2020(6):152-159;162.
- [8] 龙彬.钢筋混凝土T形梁桥多目标优化设计研究[J].铁道建筑技术,2025(5):93-96;112.
- [9] 申法钰.智能工厂化预制T梁生产优化措施研究[J].交通世界,2024(33):163-165;172.
- [10] 尹平阳.基于改进鲸鱼算法的预应力简支T梁参数优化设计研究[J].西部交通科技,2021(12):102-106.
- [11] 李祥华.国内外规范对于钢筋混凝土梁抗剪承载力公式的比较[J].建材世界,2016,37(1):59-61;74.
- [12] 梁程亮.中美欧规范混凝土截面抗剪承载力计算方法对比[J].江西建材,2023(4):16-18.
- [13] 王倩,朱自萍,谢玉萌,等.预应力混凝土T梁锚固区受力分析与验算[J].工程与建设,2020,34(6):1109-1111;1124.
- [14] JTG D60—2015 公路桥梁设计通用规范[S].
- [15] EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1: General Rules and Rules for Buildings[S].