

基于Midas刚接空心板简支梁桥分析

周崇伟

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年3月25日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

空心板桥是小跨径钢筋混凝土桥梁中常见的桥型, 具有高度小、外形美观、施工便捷等优点, 但在设计时需考虑其受力特点和材料特性。本文结合预应力钢筋混凝土体系, 利用Midas Civil软件对空心板桥进行有限元建模, 首先分析钢绞线在传力锚固前后的预应力损失, 然后分析其在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的受力表现。研究结果表明, 有限元计算结果与理论计算结果相差不大, 空心板桥的弯矩分布合理, 顶、底缘拉应力均满足规范要求, 梁在安装阶段及长期使用中的变形均符合设计标准。

关键词

预应力混凝土, 空心板桥, 先张法, 预应力损失

Analysis of Midas-Based Simply Supported Girder Bridge with Rigid Jointed Hollow Plate

Chongwei Zhou

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 25th, 2025; accepted: Apr. 18th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

The hollow slab bridge is a common type of small-span reinforced concrete bridge, characterized by its low height, aesthetic appearance, and convenient construction. However, its design must consider its mechanical characteristics and material properties. This paper integrates the prestressed reinforced concrete system and utilizes Midas Civil software to create a finite element model of the hollow slab bridge. The analysis first examines the prestress loss in steel strands before and after force-transfer anchoring, followed by an evaluation of its mechanical performance under the serviceability limit state and the ultimate limit state. The research results indicate that the finite

element calculations align closely with theoretical computations. The bending moment distribution of the hollow slab bridge is reasonable, with the tensile stresses at the top and bottom edges meeting code requirements. Additionally, the deformations of the beam during both the installation phase and long-term use comply with design standards.

Keywords

Prestressed Concrete, Hollow Plate, Pre-Tensioning, Prestress Loss

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

空心板桥是小跨径钢筋混凝土桥中最常用的桥型之一，其优点是桥梁高度小，外形美观节约，制作方便，施工便利，但缺点是跨径不建议设计太大，也不宜采用连续梁桥的设计[1][2]。Guo 等人[3]发现铰链连接梁模型的局限性在于，当板截面的旋转中心发生变化时，刚度系数的值也会发生变化，对横向荷载分析系数的计算影响较大。Kong 等人[4]基于刚接梁法提出一个经验公式用于多箱型桥梁的横向荷载分布系数的计算，改进公式在 80% 以上桥梁的误差小于 10%，可靠性和精确度较高。赵等人[5]通过 Midas civil 软件考虑荷载、混凝土收缩徐变等因素研究钢绞线预应力损失，张拉顺序对预应力损失具有较大影响。李等人[6]研究了不同因素影响下的预应力损失，通过理论和建模计算分析发现锚具变形和夹具回缩对预应力损失起到控制作用，但并没有考虑传力锚固后混凝土养护阶段由于混凝土收缩徐变导致的预应力损失。因此，本次研究使用软件计算刚接空心板梁的横向荷载分布系数，并充分考虑锚具变形、温度效应等等因素对钢绞线预应力损失的影响，然后使用有限元软件进行对比分析和验证，最后对空心板梁进行承载力分析，验证结构设计的可行性。

2. 工程概况

某工程为新建工程，采用桩基础，为减小建筑高度，增大跨径并提高行车舒适性，决定采用 3×22 m 装配式刚接空心板简支梁桥结构设计，计算跨径为 $l = 21.36$ m，采用左右双幅桥双车道布置，为了减少铺装材料的浪费并降低恒载影响，将铺装层在整个桥宽上做等厚度的形式，在墩台支座上方直接设置了横向坡度，同时也将桥梁上部构造做成了双向斜坡的形状以便于桥面排水。其中桥梁横断面尺寸如图 1 所示。空心板梁采用变截面设计，距离梁端 1500 mm 为支点截面，1500 mm 到 3000 mm 为支点截面与跨中截面过渡区，3000 mm 往后为跨中截面。

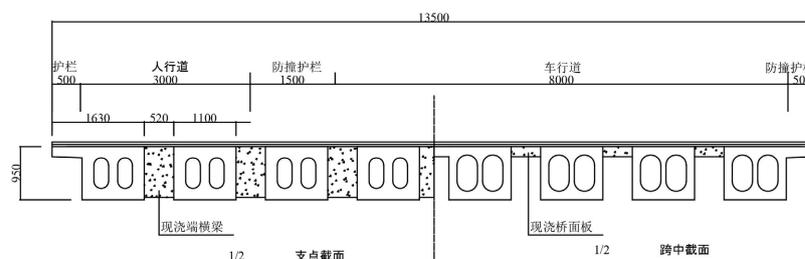


Figure 1. Bridge cross-section dimensions (mm)

图 1. 桥梁横断面尺寸(mm)

预应力钢筋为 1×7 股钢绞线，钢筋直径取 17.8 mm，采用先张法张拉预应力筋施工。非预应力钢筋采用 HRB400，直径为 12 mm 和 25 mm，预应力钢筋布置如图 2 所示。空心板混凝土强度为 C50，桥面铺装采用 C40 现浇混凝土和沥青混凝土，栏杆为 C30 混凝土，人行栏作用力按 1.52 kN/m 计算。荷载等级：公路-I 级，人群荷载按 3.5 kN/m² 计，设计车速为 60 km/h。

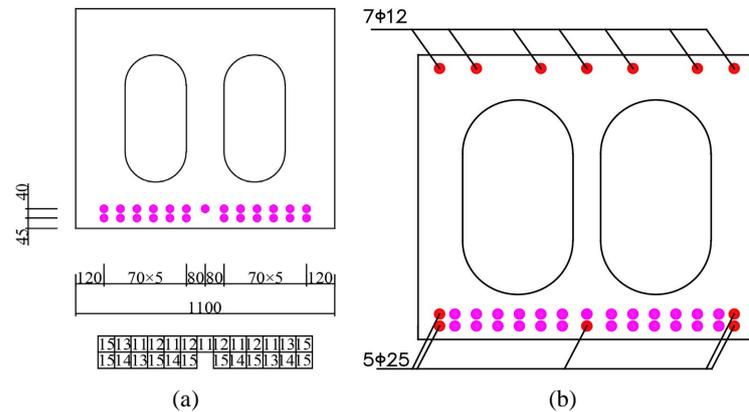


Figure 2. Prestressing steel and steel bar layout (mm)
图 2. 预应力筋和普通钢筋布置(mm)

3. 有限元模型

3.1. 横向荷载分布系数

横向荷载分布系数是指在桥梁或横向受力结构中，用于描述荷载在横向各构件(如梁、板等)之间分配比例的参数。一般支点处按杠杆原理法计算荷载横向分布系数，空心板跨中到 $l/4$ 截面处可以按偏心压力法、铰接板梁法、刚接梁法等计算，支点到 $l/4$ 截面处横向荷载分布系数按线性插值计算。由于本次工程实例按双车道设计，故不需要考虑车道折减系数，按横向最不利情况布置车道荷载。利用桥梁博士软件输入相应参数，如图 3 所示，即可输出横向荷载分布系数。

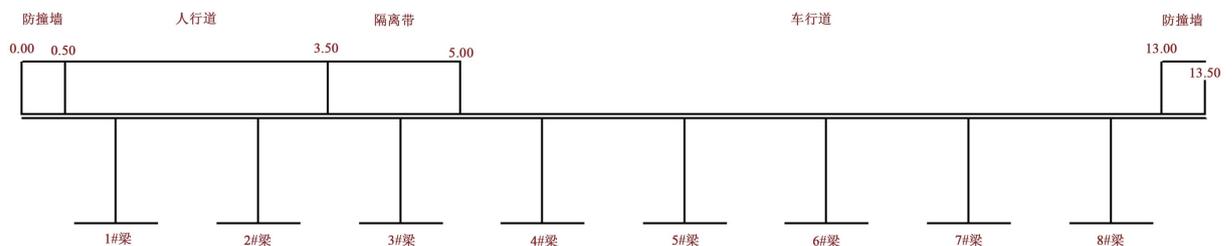


Figure 3. Illustration of lateral load distribution calculation (m)
图 3. 横向荷载分布计算(m)

Table 1. Lateral load distribution factors of mid-span
表 1. 跨中横向荷载分布系数

梁号	1	2	3	4	5	6	7	8
汽车	0.092	0.189	0.308	0.397	0.417	0.432	0.402	0.323
人群	1.628	0.86	0.374	0.126	0.031	0.005	0	0

Table 2. Lateral load distribution factors of support point
表 2. 支点横向荷载分布系数

梁号	1	2	3	4	5	6	7	8
汽车	0	0	0.163	0.6	0.6	0.6	0.6	0.63
人群	1.494	1.412	0.198	0	0	0	0	0

计算结果如表 1 和表 2 所示, 考虑到人群荷载效应与汽车荷载效应相组合并互相影响, 以及使用阶段车辆和人群荷载对桥梁结构的作用效应, 在空心板跨中和 1/4 截面处的荷载横向分布系数都偏安全地取以下表 3 数据:

Table 3. Hollow slab beam load transverse distribution factor
表 3. 空心板梁荷载横向分布系数

荷载作用	作用位置	
	跨中至 1/4 处	支点
汽车荷载	0.432	0.63
人群荷载	0.374	1.412

3.2. 作用效应

3.2.1. 永久作用效应

永久作用效应计算包括空心板梁自重、桥面系自重、现浇段自重。由桥梁结构产生的自重效应在空心板刚接形成整体以后作用在桥面板上。但实际中桥梁并不是刚度无穷大的理想构件, 会产生一定程度上的弯曲变形, 所以实际工程情况中自重效应对每块空心板的影响不尽相同。为后续计算的结果更为简洁方便, 在这里我们可以近似认为梁式桥结构所产生的自重效应是平均分配到了各个空心板上。

3.2.2. 可变作用效应计算

公路-I级荷载是本次工程设计使用的车辆荷载类型, 由车道荷载和车辆荷载共同构成。《公路桥涵通用设计规范》[7] (简称《桥规》) 要求梁式桥构造宜按照车道荷载进行计算。《桥规》规定汽车荷载的冲击标准值按汽车荷载标准值乘以冲击系数 μ 确定。

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (1)$$

式中: l 为计算跨径(m); E 为混凝土弹性模量; I_c 为截面惯性矩; m_c 为空心板梁的单位质量(kg/m), $m_c = G/g$; G 为单位长度质量(N/m); g 为重力加速度。当 $f < 1.5$ Hz 时, $\mu = 0.05$; 当 $f > 14$ Hz 时, $\mu = 0.45$; 当 $1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 14 \text{ Hz}$ 时, $\mu = 0.11767 \ln f - 0.157$ 。经过上式计算, 冲击系数按 $\mu = 0.0423$ 计算。人群荷载也属于均布荷载, 按 3.5 kN/m^2 进行计算。

3.2.3. 温度效应

空心板的设计需要考虑温度效应的影响。温度变化引起的混凝土热胀冷缩会导致结构位移和形变, 若设计或约束不当, 可能引发次内力和温度次应力。日照温差沿竖向非线性分布, 显著影响结构稳定性和疲劳寿命。根据本次铺装层厚度, 依据《桥规》4.3.12 条规定, 取温度梯度如图 4 所示。

其中竖向日照反温差应力按正温差应力乘以 -0.5 计算。将图 4 所示温度梯度以梁截面温度形式输入 Midas 软件, 仅考虑腹板温度效应, 忽略现浇桥面板局部加肋的温度影响。

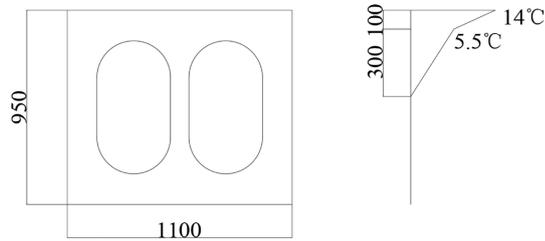


Figure 4. Hollow slab vertical temperature gradient (mm)

图 4. 空心板竖向温度梯度(mm)

3.2.4. 作用效应组合

按《桥规》的相关规定，公路桥涵结构宜按最不利承载能力的极限状况与正常使用极限状况进行效应结合，并分别进行不同的计算项目。其中按极限状态的承载能力计量时的基本组合公式如下：

$$S_{ud} = \gamma_0 (1.2S_{GK} + 1.4S_{Q1k} + 0.75 \times 1.4S_{Q2k}) \quad (2)$$

式中： S_{ud} 为最不利承载能力极限状态下作用基本组合的效应设计值； γ_0 为结构重要性系数，本次设计取1.1； S_{GK} 为永久作用效应标准值； S_{Q1k} 为含汽车冲击汽车荷载效应的标准值； S_{Q2k} 为人群荷载效应的标准值。

3.3. 预应力损失计算

本次工程采用先张法施工方案，根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》[8] (简称《公预规》)按照以下五种预应力损失计算。

3.3.1. 锚具变形损失

锚具及其垫板在预应力张拉后因巨大压力发生变形，同时锚具后方混凝土内部空隙被挤压，产生压缩变形。锚具夹片在锚固后产生一定回缩，故导致预应力钢筋回缩。按下式计算：

$$\sigma_{l2} = \frac{a}{l_m} E_s \quad (3)$$

式中： σ_{l2} 为锚具变形预应力损失； a 为锚具形变和预应力钢绞线的内缩值(mm)，有定压时取5 mm； l_m 为张拉预应力端至锚固锚具端间的距离(mm)； E_s 为预应力筋的弹性模量，取 1.95×10^5 MPa。

3.3.2. 温差损失

为缩短先张法构件生产时间，采用蒸汽养护加速混凝土硬化。但蒸汽升温导致预应力钢筋热胀，引发预应力损失。为减小温差损失，可通过二次升温养护降低损失，按下式计算：

$$\sigma_{l3} = 2\Delta t \quad (4)$$

式中： σ_{l3} 为温差预应力损失； Δt 为预应力筋与张拉设备之间的温度差值。

3.3.3. 混凝土弹性压缩损失

预应力筋张拉并锚固后，混凝土受到压缩而产生弹性变形，从而导致预应力筋的应力减小，属于混凝土弹性压缩损失，计算公式为：

$$\sigma_{l4} = \alpha_{Ep} \sigma_{pe} \quad (5)$$

式中： σ_{l4} 为混凝土弹性压缩损失； α_{Ep} 为预应力钢筋与混凝土弹性模量之比； σ_{pe} 为在计算截面钢筋中心处，全部钢筋预加力产生的混凝土法向应力(MPa)。

3.3.4. 钢筋松弛损失

预应力钢筋由于材料特性在高应力下会发生蠕变，导致钢筋在应力恒定时产生变形或钢筋长度固定时应力减小，属于钢束松弛损失 σ_{15} 。混凝土使用中的收缩徐变会缩短构件整体长度，从而造成预应力损失，属于收缩徐变损失 σ_{16} 。由于混凝土收缩徐变持续时间长且受自重影响，采用永久作用效应进行分析，并假设传力锚固龄期为 7d，且混凝土强度达到 C50。由于钢筋自重产生的拉应力以及全部纵向钢筋的中心处的总压应力随着空心板梁位置的不同而改变，导致空心板各个位置截面的预应力损失有所不同，后续计算选取跨中、1/4 截面和支点截面处作为特征截面进行验算，由于具体计算见《公预规》。

3.3.5. 计算分析

为直观展示各因素在预应力损失中的占比，选取一片空心板梁进行理论计算分析。采用先张法张拉，钢束编号如图 2 所示，张拉控制力取 1395 MPa，即 $\sigma_{con} = 0.75f_{pk}$ 。空心板各位置预应力损失如表 4 所示：

Table 4. Prestress loss statistics (MPa)

表 4. 预应力损失统计(MPa)

位置/损失	σ_{12}	σ_{13}	σ_{14}	σ_{15}	σ_{16}
跨中	19.6	30	53.79	51.4	147.38
1/4	19.6	30	53.79	51.4	172.56
支点	19.6	30	53.79	51.4	259.50

传力锚固时第一批预应力损失总和：

$$\sigma_1 = \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14} + 0.5 \times \sigma_{15} \quad (6)$$

传力锚固后的第二批预应力损失总和：

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} + \sigma_{13} + \sigma_{14} + \sigma_{15} + \sigma_{16} \quad (7)$$

Table 5. Prestress loss during force transfer anchoring (MPa)

表 5. 传力锚固时预应力损失(MPa)

位置	第一批	第二批
跨中		302.17
1/4	129.09	327.35
支点		414.29

由表 4 可知，由锚具变形所导致的预应力损失 σ_{12} 占第一批总预应力损失比例最少，为 15.18%。由混凝土弹性压缩导致的预应力筋的预应力损失占第一批总预应力损失为 41.67%，说明混凝土材料本身的特性很大程度上影响着预应力筋的损失。由表 5 可知，传力锚固后，靠近锚固端的支点截面处预应力损失最大，而跨中截面的预应力损失最少。而在各个截面中，由混凝土收缩徐变导致的预应力损失 σ_{16} 在跨中、1/4、支点截面中的占比分别为：48.77%，52.71%，62.64%，表明在传力锚固后，混凝土自身长时间的收缩徐变对预应力的损失影响较大，施工的时候应该注意混凝土的养护措施和环境，尽量减少混凝土收缩徐变的影响。

3.4. 建模方法

采用 Midas Civil 对该空心板桥进行建模分析，软件可以计算横向荷载分布系数，3.1 节已经给出计

算结果，其次由于空心板梁的高度较低，空心板截面的受拉区混凝土强度得不到有效发挥，混凝土本身的抗拉强度不高，故不宜在采用空心板梁桥时设计截面负弯矩，即本次工程采用三跨简支梁桥，而不是连续梁桥的原因。上述分析已经给出横向荷载分数的计算过程，所以无需将全桥宽所有空心板梁进行建模，只需选取其中一跨的一片空心板梁进行建模分析。将空心板划分为 24 个单元，25 个特征节点，其中设置 17 个普通节点，8 个特征节点。后续统计分析时只需采取跨中、支点、1/4 截面，1/8 截面作为特征节点计算结果。其中空心板截面尺寸如图 5 所示，有限元模型如图 6 所示。

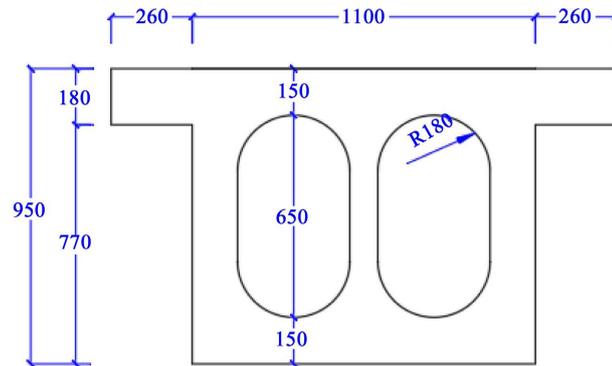


Figure 5. Hollow plate section (mm)
图 5. 空心板截面(mm)

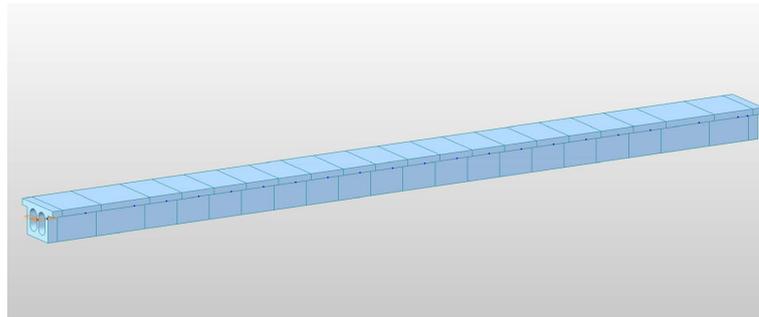


Figure 6. Finite element model
图 6. 有限元模型

4. 结果分析

4.1. 预应力分析

借助有限元软件 Midas Civil 可以分析空心板梁桥上各个截面的钢筋预应力损失，在建模时考虑混凝土的弹性应变、收缩徐变等等因素，手算理论值和有限元结果如表 6 所示：

Table 6. Hollow slab beam effective prestress (MPa)

表 6. 空心板梁有效预应力(MPa)

	跨中	1/4	支点
理论	1092.83	1067.65	980.71
有限元	1100.52	1061.42	982.23
相对误差%	-0.70	0.58	-0.15

由表 6 可知,有限元模拟结果与理论结果基本一致。由于计算机模拟的预应力线型与手算线型难以完全一致,预应力在空心梁板桥各截面位置的有效预应力存在微小差异。

4.2. 承载力分析

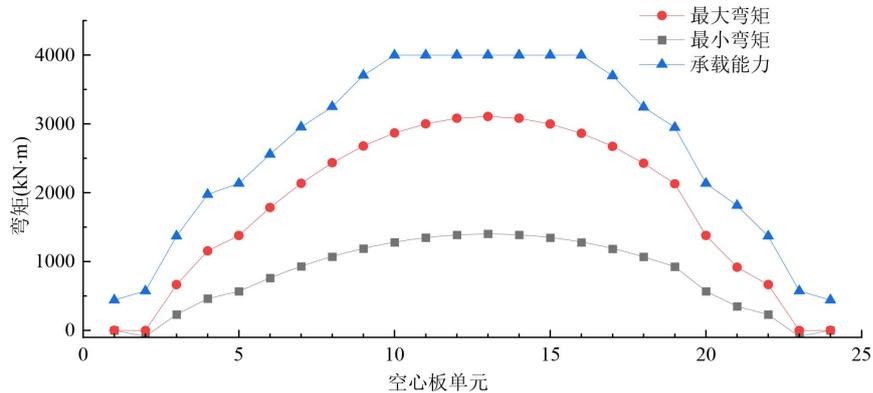


Figure 7. Maximum bending moment of hollow plate

图 7. 空心板最大弯矩

如图 7 所示,各个截面最大弯矩值在两端支座处最小,然后沿着桥纵向逐渐增大,到跨中处弯矩达到最大值 3107.6 MPa,随后再次降低,直到支座处弯矩值降为 0。按照《公预规》5.1.2 条得到允许最大承载力,弯矩值分布以跨中截面为对称轴对称分布,各截面最大、小弯矩值均在承载力包络图内。由于空心板上翼缘处配筋率较低且混凝土抗拉强度不高,不能承担较大负弯矩,承载力包络图说明了此次设计的合理性。

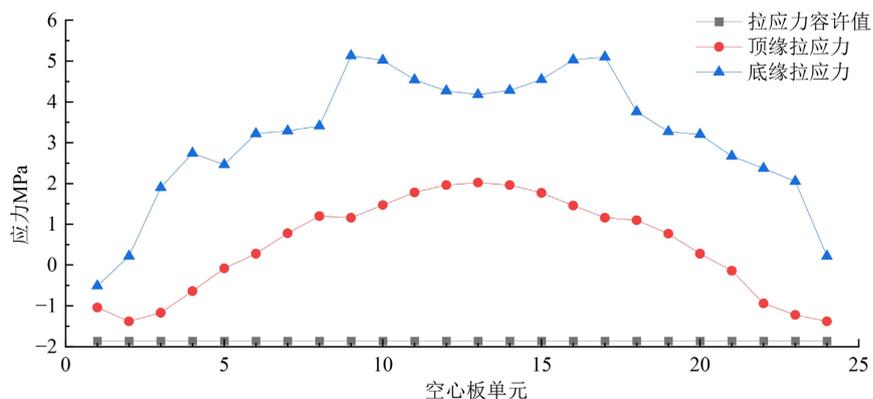


Figure 8. Tensile stress diagrams for top and bottom edges of hollow plate sections

图 8. 空心板截面顶缘、底缘拉应力图

如图 8 所示,空心板顶底缘的应力图大致为抛物线的形式。空心板顶缘应力上支点处应力应该为最小值 -1.38 MPa,跨中截面应力达到最大值 5.13 MPa。底缘应力值从支座处逐渐增大,跨中处应力反而不是最大值。空心板截面顶、底缘均满足规范对于持久状况下正常使用极限应力的要求。

预应力混凝土受弯构件在按短暂状态计算时,应计算构件在生产、运送及装配等施工过程中由预加力、结构自重及其他施工荷载引起的截面应力,并符合《公预规》的有关规定。本次设计目的是计算在梁安装阶段放松预应力钢筋时预制空心板梁上下缘的最大拉压应力。

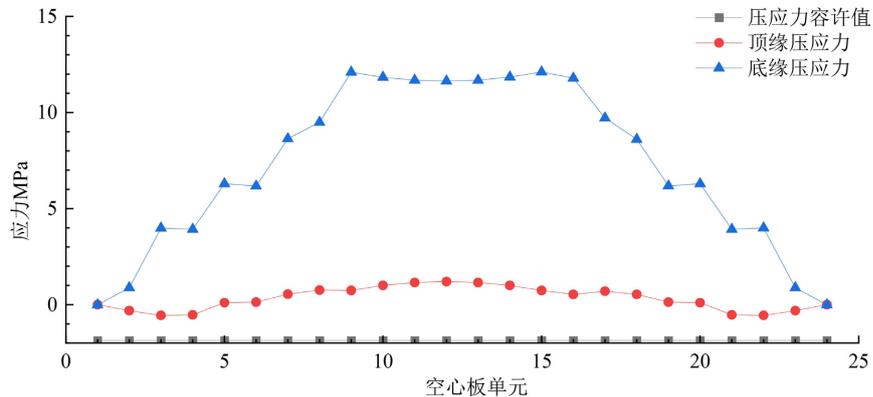


Figure 9. Maximum stress in hollow plate section at beam installation stage (MPa)
图 9. 梁安装阶段空心板截面最大应力(MPa)

由图 9 可知：梁安装、阶段的空心板上下缘的拉压应力均满足规范要求，其最大顶缘应力 1.2 MPa，底缘应力 12.1 MPa 均在容许值范围内。但在部分最大拉应力表格中出现正值，根据拉负压正的原则，此时截面不存在拉应力，而只有压应力，则此截面一定满足最大拉应力的要求，无需再继续验算。

受弯构件在实际使用阶段的变形挠度，应当充分考虑荷载长期效应的影响。消除结构自重产生的长期挠度后，主梁的最大挠度不应超过计算跨径的 $1/600$ 。图 10 所列为消除结构自重产生的挠度后主梁挠度最大值，各空心板单元竖向最大位移均小于计算跨径的 $1/600$ ，即 35.6 mm，从而符合规范条件。

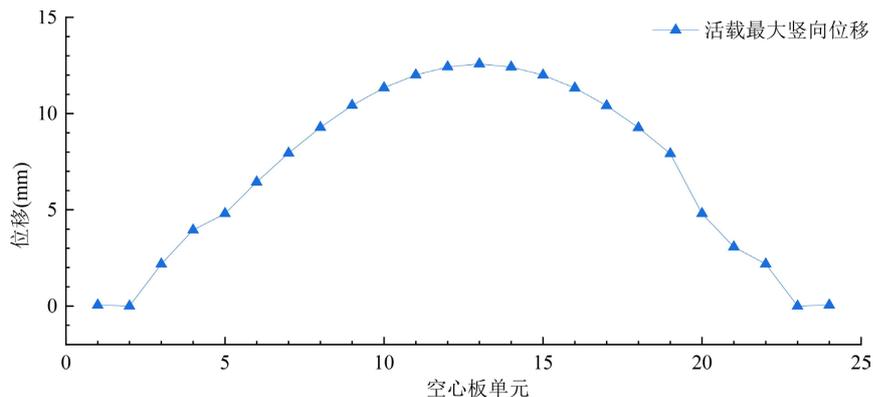


Figure 10. Vertical displacement of hollow plate beam (mm)
图 10. 空心板梁竖向位移(mm)

5. 结论

1) 锚具变形损失，温差损失，钢筋松弛损失，混凝土弹性压缩损失和混凝土收缩徐变损失对有效预应力起主要控制作用。在传力锚固时，混凝土弹性压缩损失占比 41.67%；传力锚固后第二批损失中混凝土收缩徐变损失最大占比 62.64%。因此混凝土自身的材料特性的控制以及后期的混凝土精细养护是保证预应力施工质量的重要环节。

2) 有限元建模充分考虑混凝土的弹性压缩、收缩徐变、钢筋松弛等因素所导致的预应力损失，有限元建模计算与理论数据对比分析显示，钢绞线的预应力损失结果两者吻合较好，表明理论数据计算准确，分析结论具有一定适用性。

3) 在设计过程中，充分考虑各种荷载和参数进行分析计算，包括空心板及桥面铺装自重、车辆荷载、

车道荷载、人群荷载、温度效应、冲击系数等等。有限元分析结果显示，空心板桥在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的弯矩分布合理，最大弯矩出现在跨中，且正截面抗弯承载力满足规范要求，确保了桥梁的结构安全性。梁的最大位移小于计算跨径的 1/600，符合规范限定值，保证了桥梁的行车舒适性和耐久性。

参考文献

- [1] Wang, J., Huang, P., Yuan, Y., Zhou, G. and Han, W. (2022) Multifractal Analytical Method and Experimental Study on Crack Evolution of Dismantled RC Hollow-Slab Beam. *Structures*, **40**, 524-535. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.048>
- [2] 马亚丽, 王东威, 赵卓. 既有预应力混凝土空心板桥承载力的检测与评定[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 76-81.
- [3] Guo, A., Zhu, H. and Jiang, A. (2024) A Modified Lateral Load Distribution Model for Hollow Slab Bridges Considering the Connecting Effect of Hinge Joints. *Structures*, **60**, Article 105889. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105889>
- [4] Kong, S., Zhuang, L., Tao, M. and Fan, J. (2020) Load Distribution Factor for Moment of Composite Bridges with Multi-Box Girders. *Engineering Structures*, **215**, Article 110716. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110716>
- [5] 赵晓庆. 桥梁现浇箱梁超长单端张拉法预应力损失分析[J]. 交通世界, 2024(33): 173-175.
- [6] 李海波, 陈浩. 桥梁锚下预应力损失影响因素分析[J]. 广州建筑, 2025, 53(1): 39-44.
- [7] 交通运输部. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 交通运输部. JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.