

基于ANSYS的体外预应力钢梁的抗弯性能研究

宋文哲

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年7月15日; 录用日期: 2025年8月8日; 发布日期: 2025年8月18日

摘要

预应力钢梁作为一种新型的组合结构可以显著提升材料的经济效益和力学性能。通过体外主动植入钢绞线并施加偏心预拉力, 在结构中施加与外部荷载效应相反的初始应力, 同时由于钢绞线与钢梁的协同工作, 进一步的提升钢梁的力学性能。为研究体外预应力钢梁的受力性能, 本文基于Ansys有限元软件建立有限元模型, 阐述建模方法及实现流程并进行验证, 对不同预应力水平的钢梁进行参数化分析, 对体外预应力钢梁的仿真模拟有一定实际参考价值。

关键词

预应力钢梁, 挠曲变形, 参数化分析, 仿真模拟

Study on Flexural Behavior of Externally Prestressed Steel Beams Based on ANSYS

Wenzhe Song

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

Received: Jul. 15th, 2025; accepted: Aug. 8th, 2025; published: Aug. 18th, 2025

Abstract

Prestressed steel girders, as a novel type of composite structure, can significantly enhance material economic efficiency and mechanical performance. By actively embedding external steel strands and applying an eccentric prestressing force, an initial stress counteracting the effects of external loads is induced within the structure. Concurrently, the synergistic interaction between the strands and the steel girder further improves the girder's mechanical behavior. To investigate the mechanical performance of externally prestressed steel girders, this study establishes a finite element model based on Ansys software. The modeling methodology and implementation process are elaborated and validated. Parametric analyses are performed on girders with varying prestress levels. This work provides practical reference value for the simulation of externally prestressed steel girders.

Keywords

Prestressed Steel Beam, Flexural Deformation, Parametric Analysis, Numerical Simulation

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

钢结构因其高强度、轻质化和施工便捷性，在现代建筑与大跨桥梁中占据核心地位。然而，随着现代建筑和桥梁结构的快速发展，对构件的承载能力、几何尺寸、耐久性和经济性提出了更高的设计要求。钢梁作为常见的结构构件，其抗弯性能直接影响整体结构的安全性与适用性。体外预应力技术的引入为解决这一问题提供了一种有效的技术途径，通过施加预应力有效改善钢梁的受力性能，提高其抗弯承载力和刚度，同时减少用钢量，具有显著的经济和工程价值。

使用预应力筋、板改造现有混凝土结构由于其对混凝土抗弯、抗剪和约束加固均有显著提升已被广泛研究和应用于实践，并已成熟的理论体系[1]-[3]。而近年来，预应力在钢结构的加固方面也有诸多进展。吴涛[4]就预应力碳纤维布加固钢梁进行了正截面承载力的试验研究和理论分析，初步建立了预应力碳纤维布加固钢梁的理论计算体系，其结果表面外贴预应力碳纤维布对钢梁的正截面抗弯承载力和刚度都有明显的提高。李挚等[5]研发了预应力碳纤维布顶撑加固装置，通过试验发现加固后钢梁极限荷载提升 30.40%~50.40%，但过高的预应力会导致碳纤维布断裂，并且过厚的碳纤维布会引发锚固滑移，同步建立弹性理论公式及非线性有限元模型，验证后进行参数化分析并提出关键参数优化区间。Mahmoud 等[6]对六根相同截面简支工字钢梁进行了试验研究，采用两根七丝钢绞线进行加固，并设置不同偏心距(0 至 96 mm)，另一根作为对照梁，结果表明加固梁的极限承载力提升幅度和刚度提升幅度随偏心距增大而提高，其中极限承载力的提升最高达 61.74%。Elyas Ghafoori 等[7]进行对采用不同预应力水平的粘结和非粘结碳纤维增强聚合物(CFRP)层压板加固的钢 H 型梁的侧向扭转屈曲的实验和数值研究，发现预应力 CFRP 层压板对加固梁弹性刚度无影响，然而其对屈曲强度产生显著影响，同时较高预应力度不一定能增加加固梁屈曲强度。Ren Yangzhi [8]等对多束筋预应力深梁在集中力作用下后张法和先张法施工过程中受弯性能，基于 Timoshenko 梁理论得出位移和应力的解答，建立超静定体系并利用梁与筋的协调条件求解先张法加载期筋力增量，并且通过有限元分析验证了方法的准确性。

体外预应力加固法能够有效降低钢绞线与外部结构的摩擦损失以提升钢绞线内部预应力的加固效果，并且钢绞线通过梁支座附近的锚固端向试件梁传力，加固构件之间无粘结连接，试件梁受外荷载产生变形后，仅在钢绞线内部产生可控的应力增量，传力途径简单高效。由于国内外对于体外预应力钢梁的抗弯性能的有限元模拟分析较少，本文使用 Ansys 对体外预应力钢梁建立有限元模型，参考高志刚等[9]开展的加固钢吊车梁受弯性能试验中的 SJ-2 进行建模分析，以验证模型的可靠性，阐述建模过程，最后通过改变不同预应力水平进行参数化分析，以研究不同的预应力对钢梁力学性能的影响并分析原因。

2. 有限元建模

2.1. 单元选择

SOLID185 单元适用于三维实体结构建模。该单元为八节点单元，每个节点具有沿 X、Y 和 Z 方向

的三个平动自由度。其材料模型涵盖塑性、超弹性、应力刚化、蠕变、大变形及大应变行为。此外，此单元采用混合公式，能够有效模拟准不可压缩弹塑性材料及完全不可压缩超弹性材料的大变形过程。

为准确模拟钢材的屈服、强化及失效行为，本文采用 SOLID185 单元对进行建模，图 1 给出了 SOLID185 单元的几何描述。考虑预应力筋的轴向受力的特点，采用 LINK180 单元对预应力钢绞线，这种三维杆单元是杆轴方向的拉压单元，每个节点具有三个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动，像铰接结构一样，单元不承受弯矩。

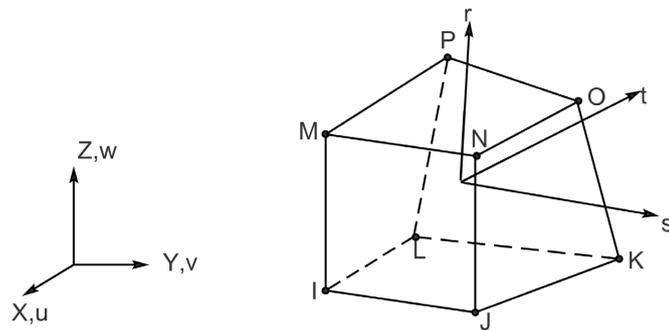


Figure 1. Geometric formulation of SOLID185 element Explanation
图 1. SOLID185 单元几何描述

2.2. 材料本构

本研究在有限元建模中采用双线性随动强化模型(BKIN)来描述钢材的本构关系，该模型在一个方向加载 - 卸载后，各个方向的强化效果不同，并同时考虑弹性阶段和塑性阶段的材料响应。采用 Von-Mises 屈服准则作为屈服判断依据[10]，Von-Mises 屈服准则主要适用于韧性材料，当 Von-Mises 应力达到称为屈服强度的值时，材料开始屈服，在屈服之前材料响应可以假设为非线性弹性、粘弹性或线性弹性行为，其等效应力表示为公式(1)。

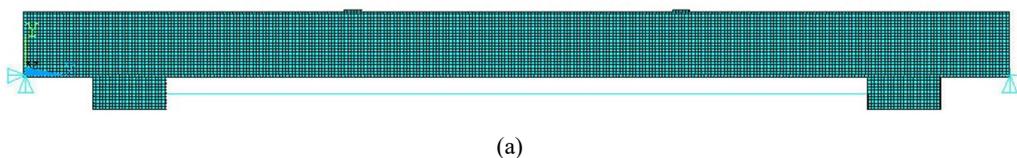
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1)$$

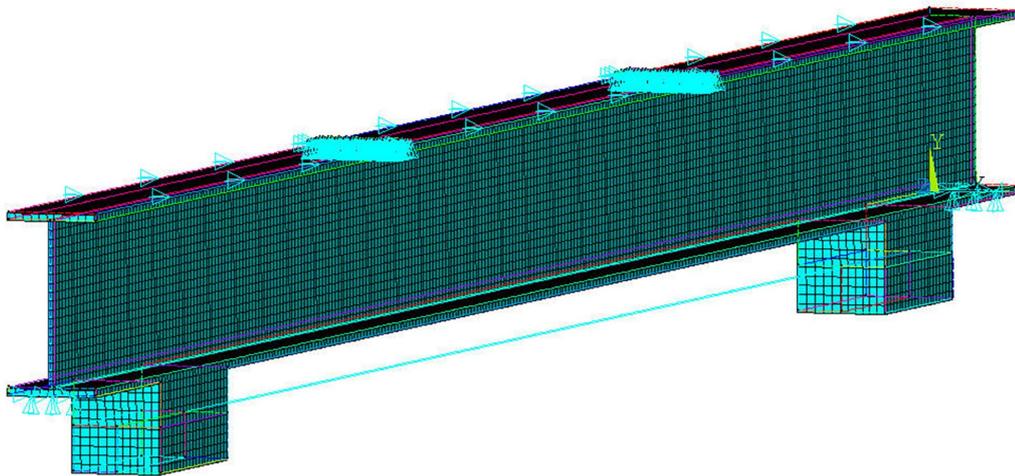
式中， σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力。

2.3. 加载过程

根据实际试验条件，本文在有限元模型中采用一端固定铰支座、一端滑动铰支座的约束方式，为防止钢梁屈曲，同时对翼缘处施加侧向约束。模型中以构件长度方向为 Z 轴，以高度方向为 Y 轴，宽度方向为 X 轴。在梁的两个三分点处各布置一宽为 50 mm 的垫块并对垫块的上表面施加 Y 轴负方向的位移，并提取支座反力以获得位移施加过程中的荷载值，以模拟实验四点弯曲的加载过程。钢梁的网格尺寸设置为 10 mm，钢绞线网格尺寸设置为 10 mm。

本文采用对杆单元施加初应变的方式施加相应的预应力。约束条件及几何模型如图 2 所示。





(b)

Figure 2. Finite element modeling
图 2. 有限元建模

3. 有限元结果

3.1. 有限元建模验证

为验证模型所选材料参数的合理性, 本文对文献[6]中的 SJ-2 体外预应力钢梁进行静力学分析, 验证的预应力钢梁几何尺寸为: 梁高 200 mm, 梁宽 100 mm, 翼缘厚度为 8 mm, 腹板厚度为 5.5 mm, 跨度为 3 m, 预应力筋的锚固间距为 2.2 m。钢梁采用 Q235 型钢, 实际材性试验结果为: 屈服强度为 261 MPa, 弹性模量为 198 GPa。钢绞线规格为 1×7 丝, 抗拉强度为 1860 MPa, 弹性模量为 194 GPa, 极限负荷为 260 kN, 屈服负荷为 234 kN, 对其施加 130 kN 的预应力。本文仅分析预应力筋的轴向应力状态, 不考虑预应力筋与钢梁下翼缘的接触。试验与有限元分析的验证结果如图 3 所示。

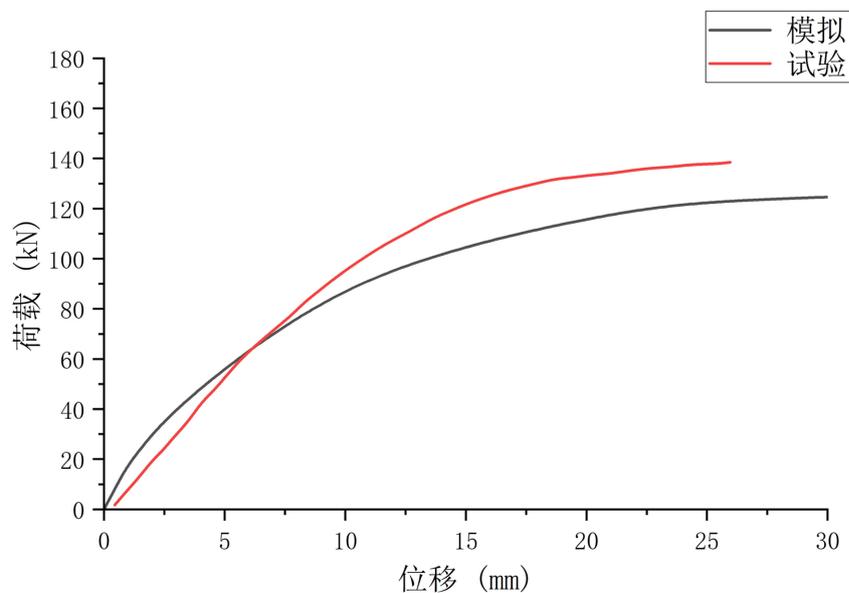


Figure 3. Finite element modeling validation
图 3. 有限元建模验证结果

如图 3 中所示, 根据实验给出的线弹性阶段的荷载 - 位移曲线与有限元模拟的荷载 - 位移曲线的对比, 可以看出, 两者存在较小的误差, 造成该误差的原因可能来自对模型连接条件和次要几何特征的简化。然而, 模拟曲线呈现更保守的结果, 并且两者具有相同的趋势, 证明本文的建模方式和材料性能数据较为合理, 整体趋势能够反应出该组合梁的挠曲变化规律。

3.2. 挠曲形态

为如图 4 所示为该预应力钢梁的有限元模型的挠曲形态, 其总体呈现出典型的四点加载弯曲构件的挠曲线形态, 即以弯曲变形为主, 沿长度方向连续均匀渐变, 在三分点之间的纯弯段位移变化逐渐减小。

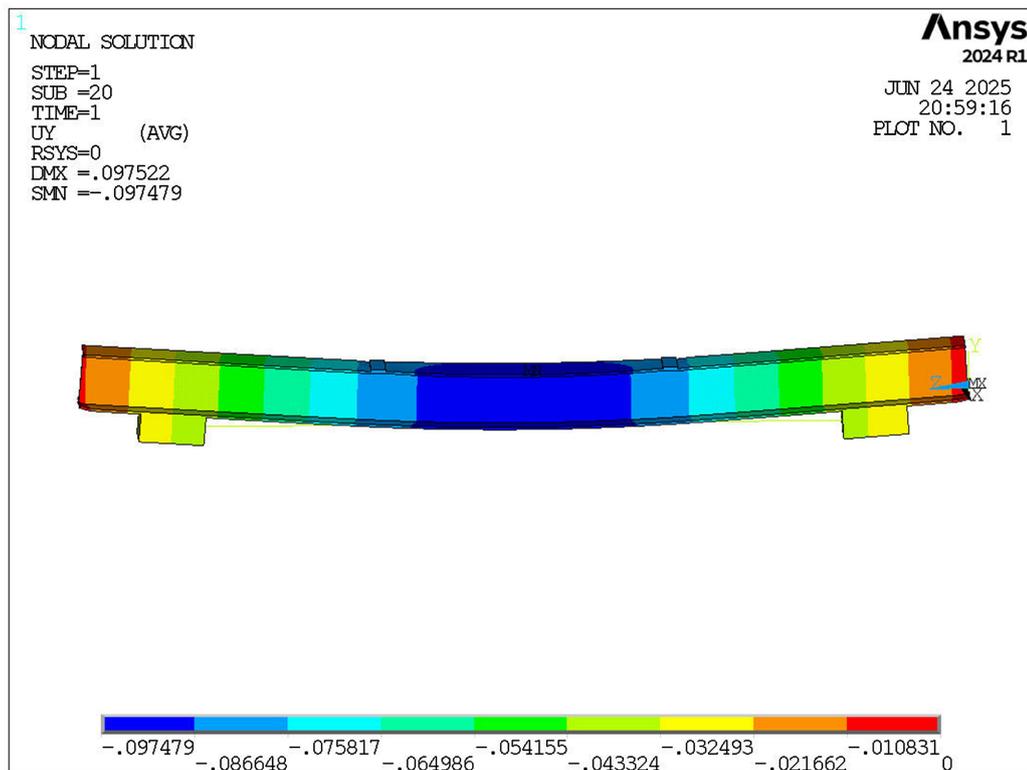


Figure 4. Flexural configuration

图 4. 挠曲形态

3.3. 不同预应力水平对钢梁力学性能的影响

预应力对钢梁的加强原理本质上是通过偏心施加的拉力对结构预施加一个与荷载方向相反的弯矩, 并且通过加载过程中预应力钢绞线与钢梁协同工作, 来提高钢梁的力学性能, 因此不同大小的预应力对钢梁的承载能力有直接影响。本文对相同几何尺寸的钢梁在不同水平的预应力下的力学性能进行参数化分析, 得到由有限元模型数据绘制荷载 - 位移关系曲线(图 5)。对应不同预应力的试件, 预应力值从小到大分别命名参考梁为 SJ-0, 0 kN 预应力的试件为 SJ-1, 40 kN 预应力的试件为 SJ-2, 90 kN 预应力的试件为 SJ-3, 130 kN 预应力的试件为 SJ-4。表 1 给出了各预应力水平构件的对比结果。

值得注意的是图 5 中参考梁为去除钢绞线的同尺寸钢梁, 0 kN 预应力的钢梁则是有钢绞线但没有张拉的钢梁。取构件跨度 $l/40 = 3000/40 = 75$ mm 为最大变形。在弹性阶段各预应力的钢梁的整体刚度基本

相同，这也说明了在弹性阶段预应力钢绞线对刚度的贡献较小。在塑性阶段，各个预应力水平的钢梁，呈现出相似的刚度水平，然而对比参考梁，通过钢绞线加固的预应力钢梁的屈服荷载和极限承载力都得到了明显的提升。

Table 1. Comparative results of mechanical behavior in steel beams under varying prestress levels

表 1. 不同预应力水平下的钢梁的力学性能对比结果

数量	预应力水平(kN)	屈服荷载(kN)	屈服变形(mm)	承载力(kN)
SJ-0	—	95.988	17.774	104.137
SJ-1	0	99.833	18.663	108.525
SJ-2	40	106.770	19.116	115.545
SJ-3	90	115.253	20.295	124.739
SJ-4	130	120.267	20.748	128.583

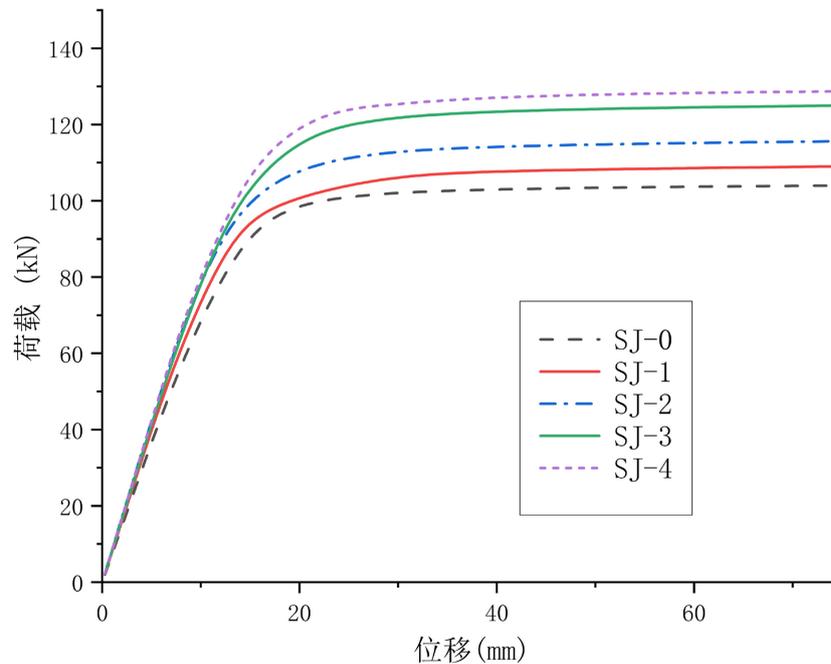


Figure 5. Comparative load-deflection relationships under varying prestress levels

图 5. 不同预应力水平下有限元模型的荷载 - 挠度关系对比

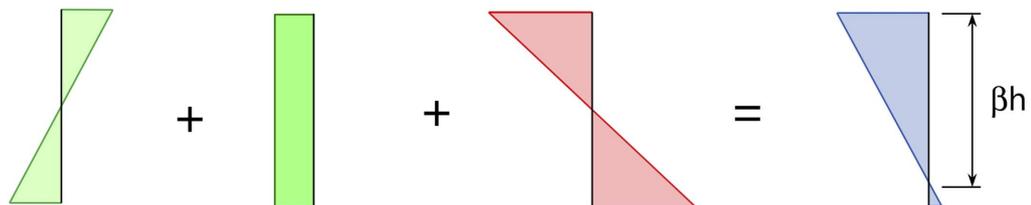


Figure 6. Normal stress distribution across the cross-section under high prestress levels

图 6. 高预应力水平下的截面正应力分布

SJ-1 相较于参考梁，对极限承载力的提升较小，提升了 4.04%，并且其对屈服荷载的提升同样幅度有限，为 4.63%，原因可能是没有预应力的钢绞线未能充分与钢梁协同工作导致的。而 SJ-2 和 SJ-3，则

分别提升了 9.87%和 16.52%，屈服荷载则分别提升了 11.2%和 19.26%。SJ-4 极限承载力的提升了 19.01%，屈服荷载提升了 26.2%，然而这相较于 SJ-2 与 SJ-3 提升幅度显著减小。

这是更大的预应力导致截面的受压区比例更高[7]，如图 6 所示，其中绿色图块表示由预应力引起的截面应力，红色则表示由外荷载引起的截面应力。对于此类预应力组合结构，应存在一个合理的预应力水平。

4. 结论

本文利用 ANSYS 有限元分析软件建立模型，并且与文献结果进行对照分析，验证了建模方法和材料性能参数的合理性，主要结论如下：

- 体外预应力钢梁的高度方向上的变形现出较为典型的弯曲构件的挠曲线形态，即以弯曲变形为主，沿长度方向连续均匀渐变，纯弯区内位移梯度逐渐减小。
- 预应力大小对钢梁的极限承载力有积极的影响，预应力越大，钢梁的极限承载力也会越大，同时屈服荷载也越大
- 预应力对承载力的贡献存在一个饱和区间，当预应力足够大时，对钢梁极限承载力的贡献显著减小。

参考文献

- [1] 邓宗才, 王作虎, 杜修力, 等. FRP 筋预应力混凝土梁抗弯性能研究进展[J]. 中国工程科学, 2006(8): 86-91.
- [2] 葛文杰, 张继文, 戴航, 等. FRP 筋和钢筋混合配筋增强混凝土梁受弯性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 114-119.
- [3] 王连广, 慕光波. 预应力空腹式钢骨混凝土梁受弯性能研究[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 113-118.
- [4] 吴涛. 预应力碳纤维布加固钢梁抗弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [5] 李挚. 预应力碳纤维布顶撑加固钢梁受弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [6] Mahmoud, K.S., Rasheed, M.M. and Mohaisen, S.K. (2020) Strengthening of I-Section Steel Beams by Prestressing Strands. *Key Engineering Materials*, **857**, 169-176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.857.169>
- [7] Ghafoori, E. and Motavalli, M. (2015) Lateral-Torsional Buckling of Steel I-Beams Retrofitted by Bonded and Unbonded CFRP Laminates with Different Pre-Stress Levels: Experimental and Numerical Study. *Construction and Building Materials*, **76**, 194-206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.070>
- [8] Ren, Y., Wang, Y., Wang, B., Ban, H., Song, J. and Su, G. (2018) Flexural Behavior of Steel Deep Beams Prestressed with Externally Unbonded Straight Multi-Tendons. *Thin-Walled Structures*, **131**, 519-530. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.022>
- [9] 高志刚, 苗哲, 何佳晨, 等. 体外预应力钢绞线加固钢吊车梁受弯性能试验[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(2): 351-361.
- [10] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.