DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250528

宽幅下承式钢桁架桥公铁规范承载力对比分析

包起航[1,2],王　强[2],郑宇宙[2*]
(1.华设设计集团股份有限公司,江苏 南京 210014;2.南京工业大学 土木工程学院,江苏 南京 211816)

摘　要: 为了研究宽幅钢桁架的受力特点以及杆件应力分布特征,以某国道上跨锡澄运河的一座宽幅下承式钢桁架桥梁为例,利用有限元和理论分析相结合的方法,讨论了《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)和《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)在承载力计算方面的区别,并进一步对比分析了两种规范在承载力验算时的异同及原因。公铁规范承载力计算结果表明:公铁规范上下弦杆强度验算结果基本一致,但腹杆验算结果存在较为一致性差异。稳定性验算时差异规律与强度验算总体一致。此外,铁路规范公式相对简单易用,采用铁路规范进行设计更为经济。

关键词: 交通运输;钢桁架桥;承载力;公铁规范;铁路规范
中图分类号: U442.5　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0220-05

Comparative Analysis on Bearing Capacity of Wide Through Steel Truss Bridges under Highway and Railway Specifications

BAO Qihang[1,2], WANG Qiang[2], ZHENG Yuzhou[2*]
(1. Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: To study the stress characteristics of wide steel trusses and the stress distribution characteristics of members, taking a wide through steel truss bridge spanning the Xicheng Canal in a national highway as an example, the method of combining the finite element and theoretical analysis is used to discuss the differences between the *Code for the Design of Highway Steel Structure Bridges* (JTG D64—2015) and the *Code for the Design of Steel Structure of Railway Bridges* (TB 10091—2017) in the calculation of bearing capacity. And the similarities and differences between the two codes in the verification of bearing capacity and the reasons are further compared and analyzed. The calculation result of the bearing capacity in the highway and railway specifications shows that the results of the strength verification of the upper and lower chords in the highway and railway specifications are basically the same, but there are relatively consistent differences in the verification results of the web members. The difference law in the stability verification is generally consistent with the strength verification. In addition, the railway code formula is relatively simple and easy to use, and it is more economical to design with the railway code.

Keywords: transportation; steel truss bridge; bearing capacity; highway and railway specifications; railway codes

0　引　言

钢桁架桥因其高效的材料利用、良好的稳定性、灵活的跨度适应性、施工便捷性和维护成本低等显著的特点,在桥梁工程中得到了广泛的应用。这种结构通过将荷载分散到多个杆件上,使得每个杆件主要承受轴向力,从而充分利用钢材的强度,减少材料的使用量。同时,由于其由多个三角形单元组成的空间结构,具有很高的稳定性,能够有效抵抗侧向力和扭矩,保证桥梁的整体稳定性。

钢桁架桥在铁路桥梁中的应用历史悠久,是最为常见的铁路桥梁结构之一。随着技术的发展,现代铁路钢桁架桥不仅继承了传统结构的优点,还在材料选择、制造工艺等方面不断创新,以满足更高的安全和性能要求。传统钢桁架桥多采用双主桁结构,适用于中、小跨度桥梁,而宽幅钢桁架桥则采用三主桁或多主桁结构,适用于大跨度、多车道桥梁。宽幅钢桁架桥由于桥面宽度的增加,主桁下弦杆承受的轴向压力和面内弯矩显著增加,导致杆件尺寸

收稿日期:2025-05-21
基金项目:国家自然科学基金青年项目(52208298)
作者简介:包启航(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁结构设计及受力性能研究工作。
通信作者:郑宇宙(1987—),男,博士,副教授,从事桥梁结构受力性能研究工作。电子信箱:zyz2024@njtech.edu.cn

较大，传力路径复杂，对焊接工艺和节点连接提出了更高的要求。改革开放以来，随着我国基础设施建设的快速发展，公路钢桁架桥也取得了显著的进步，特别是在高速公路和城市快速路的建设中被广泛应用。《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》（JTJ 025—86）[1]中采用与铁路钢桥一致的容许应力法进行设计；随后在参考、借鉴了国内外相关标准规范后，《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64—2015）采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法[2]。而现行《铁路桥梁钢结构设计规范》（TB 10091—2017）结合我国实际情况，仍采用容许应力法[3]。周津斌等[4]以现在运行的铁路桥梁进行了对比分析，均认为极限状态法设计水准与容许应力法基本相当；谢馨等[5]通过对公铁两用简支钢桁梁进行有限元模拟计算，认为极限状态法计算工程量大，需对极限状态法规范相关参数调整；许宏伟等[6]通过研究得出极限状态设计方法和容许应立法均满足设计理念，但极限状态法设计铁路桥梁时有较大的安全储备；邓江涛、闫岩等[7-8]针对连续梁桥进行了两种设计方法的对比研究，认为容许应力法更为保守；牟兆祥等[9]对系梁和拱肋分别采用极限状态法和容许应力法进行设计对比分析，认为极限状态法在部分情况下安全储备或安全度小于容许应力法；尹银艳等[10]通过使用 ANSYS 分析梁轨相互作用的有限元分析模型，得出极限状态法与容许应力法在无缝线路设计计算结果上不完全一致，特殊工况下使用极限状态法设计时用容许应力法校核。荣钊等[11]对大跨度钢桁架桥进行受力特点分析，得出宽幅桥随宽度的增加，总位移和总应力增加，空间作用更明显。刘海彪等[12]对宽幅大跨度桥进行静力学性能及温度效应研究，宽幅桥在偏载作用下需考虑横向效应，整体升降温对梁桥偏位移影响最大。陈雨薇等[13]通过分析宽幅钢-混结合段在最不利荷载工况下的应力分布与传力规律，得出钢结构部分纵横向应力在锚固横隔板和承压板附近突变。

容许应力法以弹性设计理论为基础，以结构危险截面最不利点的计算应力小于等于材料的容许应力为准则，计算简便但安全系数多凭经验确定，不能充分考虑各种参数变化影响[14]；极限状态法全面考虑结构安全各种影响因素的变化和差异，基于概率理论和可靠度理论，欧洲地区广泛使用极限状态法，我国在发展过程中曾因忽视极限状态法使桥规修订受阻[15-16]。例如在铁路桥梁设计中，极限状态法在计算承载能力、应力和挠度时采用不同的荷载组合方式和系数，而容许应力法荷载组合时无分项系数。

李娜、毛德均等[17-18]认为需要对宽幅桥梁进行承载能力的评估，通过建立相关有限元模型进行分析，得出宽幅板桥横向受力不均匀，温度梯度和不均匀沉降致支座负反力大，在静动荷载试验中，桥梁承载能力和动力工作性能满足要求；杭京、杨利斌等[19]认为在钢桁架桥的养护工作中，防腐涂装的检查与维护、高强螺栓的检查与维护、杆件弯曲及损伤情况的检查与维护，以及焊缝的检查与处理尤为重要，需要予以重点关注。

考虑到公路和铁路钢桥设计规范强度验算计算理论类似，而压弯构件设计理论有较大差异。本文以某国道上跨锡澄运河的一座宽幅下承式钢桁架桥梁为典型工程案例，分别按照公路和铁路规范要求中的极限状态设计法和容许应力法对其承载力进行对比分析，研究不同规范对桁架桥压弯构件稳定承载力计算结果的影响，深入探讨两种设计方法的异同。

1　工程概况

本项目位于无锡市惠山区，上跨的锡澄运河为规划Ⅲ级航道，主线为连续高架桥。结合总体方案设计，为方便该区域东西向沟通，本项目采用主幅共面方案过河，设计荷载为公路－Ⅰ级，设计速度 80 km/h，钢桁架主跨均为 125 m 跨径。

横向分为三幅桥，主线桥主桁中心距为 29.1 m；两幅辅道桥主桁中心距为 19.8 m。从景观角度考虑，主线桥采用了两片桁的设计方案。主桁采用变高三角桁桁式，节间长度 12.34 m，共 10 个节间，结构全长 125 m。主桁高度 9~15.915 m。主线桥两片主桁中心距 29.1 m，宽跨比为 1/4.3，桥面宽度 27.5 m。主线桥上下弦杆均采用箱形截面；支座斜腹杆采用箱型截面；其余斜腹杆均采用箱型或者工字型截面。主桁节点采用焊接整体节点，节点外拼接，节段间弦杆顶板、腹板与底板四面均采用焊接，腹杆均采用基于翼缘对拼、腹板对拼的焊缝连接。桥面系采用密横梁正交异性桥面板，每隔 2.468 m 设置一道横梁。图 1 为桥梁方案效果图。

2　公路和铁路规范计算方法对比

《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64—2015），以下简称“公规”，采用极限状态法，基本表达式为：

图 1　桥梁方案效果图

$\gamma_0 S_d \leqslant R_d$，$S_d$ 为作用组合的效应设计值，以基本组合为例：

$$S_d = S\left(\sum_{i=1}^{m}\gamma_{Gi}G_{ik},\gamma_{Qi}\gamma_L Q_{1k},\psi_c\sum_{j=2}^{n}\gamma_{Lj}\gamma_{Qi}Q_{jk}\right)$$

γ_i 为各荷载作用分项系数。需要特别注意的是：公规（极限状态法）中荷载分项系数 γ_i 是对不同类型荷载（如恒载、汽车荷载）的变异性进行量化，例如恒载 γ_i=1.2~1.35，活载 γ_i=1.4~1.8，体现荷载超过设计值的概率分布。而铁规（容许应力法）中不直接区分荷载分项系数，而是通过总安全系数 K 统一考虑荷载与材料的不确定性，K 的取值更依赖经验，例如铁路桥梁中 K=1.7~2.0，隐含对荷载波动的保守估计。公规中材料强度采用标准值（如钢材屈服强度 f_{yk}），并通过材料分项系数 γ_s（如 γ_s=1.1~1.3）折减为设计值（$f_{yd}=f_{yk}/\gamma_s$），明确分离材料本身的离散性风险。铁规中材料强度采用极限值（如钢材的抗拉强度 f_u）直接除以总安全系数 K 得到容许应力（$[\sigma]=f_u/K$），K 同时包含荷载与材料的安全储备，例如 K=1.7 时，$[\sigma]=f_u/1.7$，未明确分离荷载与材料的影响。

《铁路桥梁钢结构设计规范》（TB 10091—2017）以下简称“铁规”，采用容许应力法，基本表达式为：$\sigma \leqslant [\sigma]$，$\sigma$ 为结构在标准荷载组合下的应力，$[\sigma]$ 为材料的容许应力，两种规范的对比情况见表 1。

表 1　公铁钢桥设计规范对比

验算内容	《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64—2015）	《铁路桥梁钢结构设计规范》（TB 10091—2017）
强度验算	$\gamma_0\left(\frac{N_d}{N_{Rd}}+\frac{M_y+N_d e_z}{M_{Rd,y}}+\frac{M_z+N_d e_y}{M_{Rd,z}}\right)\leqslant 1$	$\frac{N}{A}\pm\frac{M}{W}\leqslant[\sigma]$ $\frac{N}{A}\pm\left(\frac{M_y}{W_y}+\frac{M_z}{M_z}\right)\frac{1}{C}\leqslant[\sigma]$
稳定验算	$\gamma_0\left(\frac{N_d}{\chi_y N_{Rd}}+\beta_{m,y}\frac{M_y+N_d e_z}{M_{Rd,y}\left(1-\frac{N_d}{N_{cr,y}}\right)}+\beta_{m,z}\frac{M_z+N_d e_y}{\chi_{LT,z}M_{Rd,z}\left(1-\frac{N_d}{N_{cr,z}}\right)}\right)\leqslant 1$ $\gamma_0\left(\frac{N_d}{\chi_z N_{Rd}}+\beta_{m,y}\frac{M_y+N_d e_z}{\chi_{LT,y}M_{Rd,y}\left(1-\frac{N_d}{N_{cr,y}}\right)}+\beta_{m,z}\frac{M_z+N_d e_y}{M_{Rd,z}\left(1-\frac{N_d}{N_{cr,z}}\right)}\right)\leqslant 1$	$\frac{N}{A_m}+\frac{\varphi_1}{\mu_1\varphi_2}\cdot\frac{M}{W_m}\leqslant\varphi_1[\sigma]$

注：①为便于对比，将公铁规范强度验算的符号进行统一。式中：M_y 为对强轴弯矩，M_z 为对弱轴弯矩。

从表 1 可知两种规范中构件强度验算考虑的因素基本相同，均考虑了双向弯矩作用，但具体参数的计算方法略有不同；而稳定验算表现形式差异较大，公规钢桥设计考虑了双向弯矩共同作用，而铁规钢桥设计并未考虑。为了探究双向弯矩作用对构件承载力计算结果的影响，本文利用理论和 MIDAS Civil 软件详细分析了构件在承载力和稳定性验算方面的异同点，以期为宽幅式钢桁架桥承载力计算提供借鉴和参考。

3　计算结果及分析

3.1　设计荷载

设计荷载包括恒载、汽车活载、人群活载、风荷载、温度等工况，分别按公路和铁路规范进行最不利荷载组合承载力计算。

3.2　计算模型

利用 MIDAS Civil 软件建立主桥空间杆系计算模型，共计 1 137 节点、1 198 个单元（见图 2）。本桥设计为全焊节点，应考虑节点刚性的影响，因此，各杆件之间均为刚性连接，全桥模型采用简支约束。

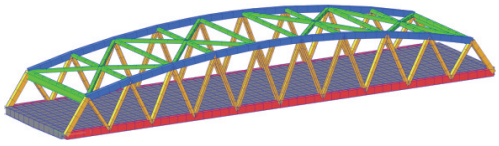

图 2　全桥模型

3.3　计算结果分析

获得计算模型在各种荷载作用下主桁各杆件的内力后，分别按公路和铁路规范进行荷载内力组合计算，其计算结果见表 2。文章中工况 A1–A5、B1–B5 和 C1–C10 分别对应上弦杆杆件号、下弦杆杆件号和腹杆杆件号，见图 3。

其中图 4 ~ 图 6 中对比值代表着，上弦杆、下弦杆和腹杆分别位于桥梁不同位置工况下，轴力和弯矩分别对应的最大值和最小值，由此来判断杆件的最不利工况。由图 4 ~ 图 6 可知，公路和铁路规范的

表 2　构件强度验算

构件		公路规范		铁路规范	
工况		最大/小轴力	最大/小弯矩	最大/小轴力	最大/小弯矩
上弦杆	A1	45.34%	44.91%	49.21%	48.31%
	A2	60.50%	61.73%	63.22%	63.20%
	A3	67.20%	67.86%	70.32%	69.91%
	A4	69.41%	69.82%	73.19%	73.42%
	A5	71.17%	73.24%	76.28%	76.47%
下弦杆	B1	32.30%	45.84%	34.90%	47.09%
	B2	62.15%	74.85%	67.38%	77.64%
	B3	72.19%	80.76%	77.71%	84.82%
	B4	75.72%	80.39%	81.01%	84.70%
	B5	84.30%	82.49%	89.30%	87.16%
腹杆	C1	61.34%	74.17%	46.56%	54.22%
	C2	73.77%	79.30%	55.70%	60.50%
	C3	50.03%	59.88%	42.77%	47.19%
	C4	41.65%	61.79%	41.04%	48.91%
	C5	29.71%	49.01%	28.53%	39.05%
	C6	45.30%	52.55%	36.00%	41.37%
	C7	23.14%	31.81%	19.03%	25.19%
	C8	27.60%	46.19%	28.05%	35.51%
	C9	27.89%	33.88%	21.73%	25.13%
	C10	32.96%	39.41%	25.87%	29.93%

注:①表中数据为各规范荷载组合效应设计值与规范限制值百分比。②表中铁路规范验算值为面内强度验算及斜弯曲强度验算的包络。

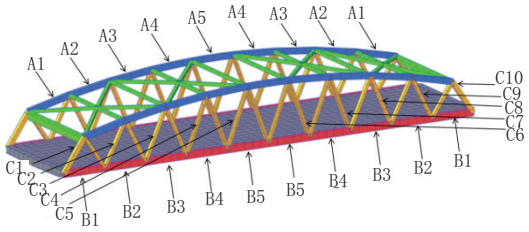

图 3　各构件在桥梁中的位置图

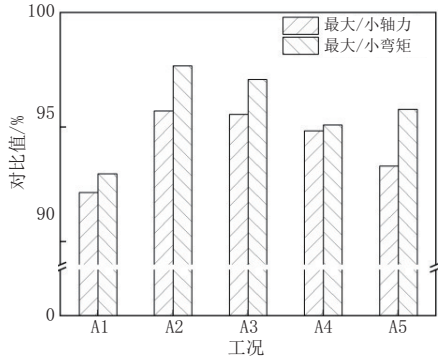

图 4　上弦杆不同工况作用下强度对比值

上下弦杆强度验算结果基本一致;但腹杆验算结果存在明显差异,公规计算结果显著大于铁规,偏差最大可达 37%。造成该差异的主要原因是公路和铁路规范对于次应力处理方式不一,《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)9.2.1-2 条中处理方式为:

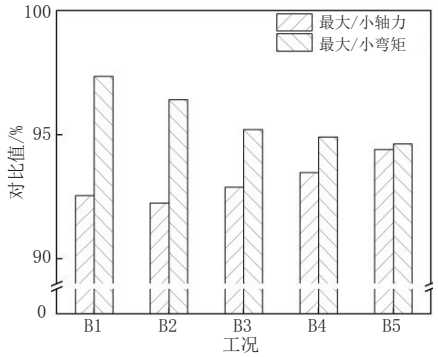

图 5　下弦杆强度对比值

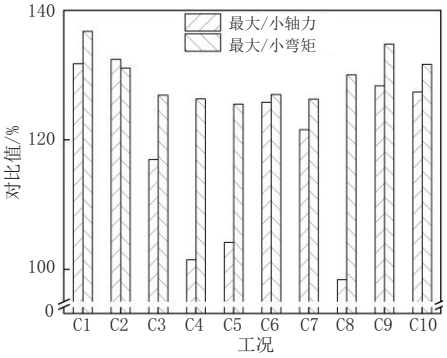

图 6　腹杆强度对比值

节点刚性引起的次力矩应乘以 0.8,而《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)3.2.8 条中处理方式是根据不同次应力组合工况对容许应力乘以相应提高系数。构件稳定验算见表 3。

表 3　构件稳定验算

构件		公路规范		铁路规范	
工况		最大/小轴力	最大/小弯矩	最大/小轴力	最大/小弯矩
上弦杆	A1	49.15%	48.48%	51.15%	50.86%
	A2	65.86%	66.95%	67.64%	67.60%
	A3	73.18%	73.75%	75.60%	75.53%
	A4	74.98%	75.30%	80.03%	79.99%
	A5	77.05%	79.20%	82.70%	82.65%
下弦杆	B1-B5	—			
腹杆	C1	64.22%	77.08%	44.83%	54.32%
	C3	58.52%	66.77%	42.25%	51.20%
	C5	32.68%	53.73%	32.53%	40.65%
	C7	49.12%	53.95%	39.40%	44.23%
	C9	23.92%	15.84%	26.60%	19.95%
	C2/C4/C6/C8/C10	—			

注:①表中数据为各规范荷载组合效应设计值与规范限制之百分比。

由图 7、图 8 可知,公路和铁路规范上弦杆稳定验算结果基本一致,腹杆验算结果有显著差异,但变化趋势与强度验算结果规律相近。需要注意的是腹杆 9 的稳定性验算结果与其余杆件规律差异较大,

原因是该杆件主要由长细比控制设计。虽公路和铁路规范稳定公式表现差异较大，但差异规律与强度验算结果总体一致。

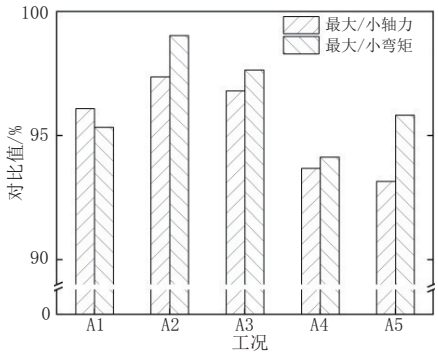

图 7　上弦杆稳定性对比值

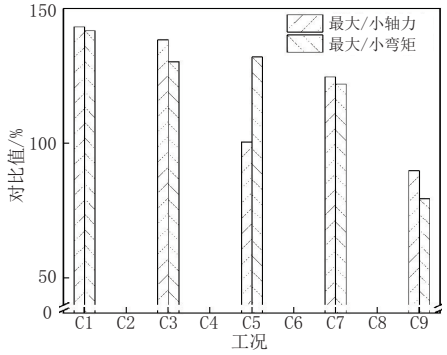

图 8　腹杆稳定性对比值

由图 9 可知，对于全焊整体节点板体系宽幅钢桁架桥，因节点为刚性连接，桥面系对腹杆下缘产生的横向弯矩效应较大。传统铁路钢桁架桥宽度较小，腹杆主要承受轴力，面外弯矩产生次应力相对较小。本文中弯矩最大/最小工况更为控制设计。

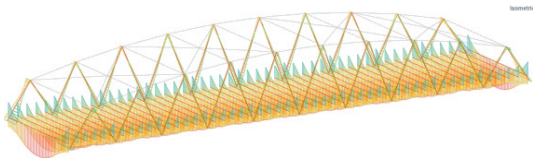

图 9　腹杆及横梁弯矩图

文章中构件稳定性验算中没有零杆。从结构受力看，下弦杆在某些工况受拉为主，稳定问题不突出；腹杆部分杆件因长细比、内力较小等因素影响，稳定性问题可忽略。再从规范方面来看，不同规范对构件验算规定有别，铁路规范对部分杆件稳定要求和计算方法不同，部分杆件不用计算。对于宽幅钢桁架腹杆是否适宜采用较大的容许应力提升系数值得商榷。赵廷衡等[20]提出对于箱形杆件承受次应力，且次应力又占很大比例（例如 30% 以上）时，容许应力就要少提高，甚至不提高。郝俊芳[21]认为采用容许应力法宽幅钢桁架在整个施工过程中，拱肋控制截面应力、变形，主梁拼装线形、控制截面应力，成桥桥面线形及索力均能得到良好的控制。

当主应力与次应力组合时，随着次应力的增加，截面屈服后杆件进入弹塑性工作阶段，丧失了对节点的嵌固作用；杆件自身的强度极限承载能力并未下降，但其稳定极限承载能力降低。如果局部杆件屈服后的整体稳定分析能满足要求，在局部杆件达到屈服后，铁路规范采用容许应力法允许杆件进入塑性状态，而公路规范采用极限状态法不允许杆件进入塑性状态，公路规范则需要补充使用更多的材料和杆件。在相同的荷载作用下，铁路规范的材料利用率更高，采用铁路规范进行设计更为经济。

4　结　语

本文以 125 m 宽幅下承式钢桁架桥梁为背景，分别采用公路和铁路规范进行承载力计算，对比分析了两种规范在承载力验算时的异同及原因，主要结论如下。

（1）公路和铁路规范中上下弦杆强度验算结果基本一致；但腹杆验算结果存在明显差异，公规计算结果显著大于铁规，偏差最大可达 37%，主要原因是公路和铁路规范中对于次应力的处理方式不同。

（2）本文进行稳定性验算时，虽公路规范考虑了双向弯矩作用而铁路规范未考虑，但差异规律与强度验算总体一致。

（3）全焊整体节点板体系宽幅钢桁架桥，因节点刚性连接，桥面系对腹杆下缘产生的横向弯矩效应较大，因此，控制设计应采用弯矩为主工况全焊整体节点板体系的宽幅钢桁架桥，节点刚性连接，桥面系致使腹杆下缘横向弯矩效应大，设计控制应以弯矩为主工况。

（4）铁路规范计算简便，局部杆件屈服后整体稳定分析达标，设计更经济。

参考文献：

[1] JTJ 025—1986，公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].

[2] JTG D64—2015，公路钢结构桥梁设计规范[S].

[3] TB 10091—2017，铁路桥梁钢结构设计规范[S].

[4] 周津斌. 容许应力法与极限状态法铁路桥墩设计对比分析[J]. 铁道标准设计，2016，60(9)：74-78.

[5] 谢馨，杜萍. 简支钢桁梁桥的极限状态法与容许应力法对比[J]. 交通科技，2021(4)：53-57.

[6] 许宏伟，于子杰，刘永前，等. 极限状态法和容许应力法用于重载铁路钢筋混凝土梁受力性能评价的对比[J]. 铁道建筑，2022，62(11)：

（下转第 233 页）