

DOI: 10.7672/sgjs2026030161

低合金钢结构节点受力特性研究

肖坦树,高 权,蔺 杰,苗 鹤,张 鹏,淡 泊,于 鹏,李 繁

(中国人民解放军 63926 部队,北京 100192)

[摘要] 以 Q355 低合金钢结构节点为研究对象,通过构建考虑材料非线性、几何非线性的力学平衡模型,结合节点变形协调条件,系统分析板厚比、预紧力和螺栓间距等关键参数对节点承载力、刚度及应力分布的影响机理。研究表明,节点承载力随板厚比的增大呈线性增强趋势,建议板厚比取为 1.0~1.5,以兼顾安全性与经济性;预紧力损失随滑移量呈阶段性非线性变化,当滑移量超过临界值 0.645mm 后预紧力损失趋于稳定,建议将工作滑移量控制在 0.6mm 以内。螺栓间距比影响应力集中程度与刚度恢复,当螺栓间距比取为 3.0~3.5 时,节点刚度折减系数可回升至 0.97 以上,综合受力性能最优。

[关键词] 低合金钢;节点;螺栓;板厚比;预紧力;受力性能

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0161-06

Research on the Mechanical Characteristics of Low Alloy Steel Structure Nodes

XIAO Tanshu, GAO Quan, LIN Jie, MIAO He, ZHANG Peng, DAN Bo, YU Peng, LI Fan

(Troop No. 63926 of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100192, China)

Abstract: Taking Q355 low alloy steel structure nodes as the research object, a mechanical equilibrium model considering material nonlinearity and geometric nonlinearity was constructed. Combined with the node deformation compatibility conditions, the influence mechanisms of key parameters such as plate thickness ratio, pretightening force and bolt spacing on node bearing capacity, stiffness and stress distribution were systematically analyzed. The research results show that the node bearing capacity increases linearly with the increase of the plate thickness ratio. It is recommended that the plate thickness ratio be between 1.0 and 1.5 to balance safety and economy. The pretightening force loss changes nonlinearly in stages with the slip amount. When the slip amount exceeds the critical value of 0.645mm, the pretightening force loss tends to stabilize. It is suggested that the working slip amount be controlled within 0.6mm. The bolt spacing ratio significantly affects the degree of stress concentration and stiffness recovery. When bolt spacing ratio is between 3.0 and 3.5, the stiffness reduction coefficient can rise back to above 0.97, and the overall mechanical performance is optimal.

Keywords: low alloy steel; nodes; bolts; plate thickness ratio; pretightening force; mechanical characteristics

0 引言

钢结构因其强度高、施工速度快、抗震性能好等优点,在建筑与桥梁工程中得到广泛应用。节点作为钢结构传力的关键部位,其力学性能直接影响整体结构安全性、刚度和耐久性。近年来,随着工程结构向大跨度、高层化和重载化方向发展,对节

点性能提出了更高要求。低合金高强度钢因其优异的力学性能、良好的焊接性和经济性,逐渐成为钢结构主流材料之一。已有学者开展了相关研究,并得到一系列研究成果。然而,目前关于低合金钢节点在复杂受力状态下的力学行为研究仍不够系统,尤其是在多参数耦合作用下的节点性能响应机制尚不明确,且相关学者对钢结构节点的研究多集中于普通碳素钢或高强度钢材料,对低合金钢节点的系统研究相对较少。现有设计规范虽提供了节

点设计的基本方法,但在考虑板厚比、预紧力、螺栓间距等参数协同影响方面仍存在一定局限性。此外,节点在实际服役过程中常面临疲劳、冲击、腐蚀等多因素耦合作用,其长期性能与破坏机理仍需进一步深入研究。

本文以 Q355 低合金钢为研究对象,系统开展其节点受力特性研究。通过建立考虑材料非线性、接触非线性和几何非线性的力学平衡模型,研究板厚比、预紧力、螺栓间距等关键参数对节点承载力、刚度、应力分布及破坏模式的影响规律,旨在为低合金钢节点设计提供理论依据与优化建议,提升钢结构节点的安全性与经济性。

1 低合金钢特点

低合金钢是指在普通碳素钢基础上,添加低于总量 5% 的合金元素,并辅以适当的轧制或热处理工艺,使其力学性能显著提高的工程结构用钢。其中, Q355 低合金高强度钢在我国各类工程结构中应用最广泛,最具代表性,这得益于其相较于传统碳素钢具有更优异的综合性能,主要体现在力学性能、工艺性和经济性方面。

在力学性能方面, Q355 钢具有高强度、良好的塑性和优异的韧性。采用 Q355 钢的构件截面可更小,从而实现结构的轻量化,特别适用于大跨度、重荷载的结构体系,且其断后伸长率较高,材料具备足够的塑性变形能力,使结构在破坏前可产生明显征兆,提高了结构安全冗余。

在工艺性方面, Q355 钢具有良好的焊接性和成型性。焊接是钢结构最主要的连接方式,其焊接性优劣直接关乎工程质量和施工效率。Q355 钢碳当量较低,淬硬倾向小,对焊接冷裂纹的敏感性相对较低,适用于包括手工电弧焊、二氧化碳气体保护焊、埋弧焊等多种焊接方法。除焊接性, Q355 钢还具有较好的热轧、冷弯等成型加工性,易于加工成 H 型钢、箱型钢、钢管等不同截面形式构件,满足现代工程结构多样化需求。

在经济性方面, Q355 钢具有较高的性价比,其单价虽高于普通碳素钢,但由于其强度高,用于承重结构时可显著减少钢材用量,减轻结构自重,从而降低基础造价和运输、吊装成本。这种“以强度换用量”的策略,在大型乃至超大型工程中带来的经济效益尤为显著。

综上所述,高强度、高韧性、良好的焊接工艺性与优异经济性的结合,共同构成了 Q355 低合金高强度钢的核心优势,为其在诸多工程领域的广泛应用奠定了坚实基础。

2 节点理论模型

2.1 钢材力学模型

本文以 Q355 低合金钢作为研究对象,其应力-应变关系采用双线性本构模型描述,如图 1 所示。该模型通过分段函数表征钢材在不同阶段的力学行为,弹性阶段应力-应变关系为线性,塑性阶段考虑 $0.01E$ 的强化斜率,其中 E 为钢材弹性模量,取值为 206GPa。该本构模型满足 Von Mises 屈服准则,能够准确反映钢材在复杂应力状态下的弹塑性行为。

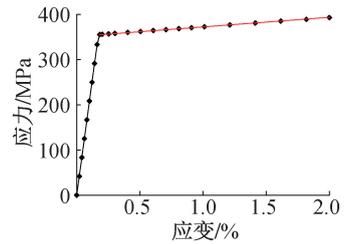


图 1 Q355 钢双线性本构模型

Fig. 1 Bilinear constitutive model of Q355 steel

弹性阶段(钢材应变 $\varepsilon \leq 0.00172$)应力-应变关系可表示为:

$$\sigma = E\varepsilon = 206\,000\varepsilon \quad (1)$$

塑性阶段(钢材应变 $\varepsilon > 0.00172$)应力-应变关系可表示为:

$$\sigma = f_y + E_p(\varepsilon - \varepsilon_y) = 355 + 2\,060(\varepsilon - 0.00172) \quad (2)$$

式中: σ 为钢材应力; f_y 为钢材屈服强度,取值为 355MPa; E 为弹性模量; E_p 为钢材塑性模量,取 $0.01E$; ε_y 为钢材屈服应变。

2.2 螺栓连接接触模型

螺栓连接部位的力学行为通过改进库仑模型模拟,该模型同时考虑法向接触非线性和切向摩擦效应。

法向接触行为表示如下:

$$p = k\delta^{3/2} \quad (3)$$

式中: p 为接触压力; k 为接触刚度系数,取值为 $3 \times 10^5 \text{ N/mm}^3$; δ 为接触穿透深度,当存在初始间隙 δ_0 时,接触条件修正为 $\delta_{\text{eff}} = \delta - \delta_0$, δ_{eff} 为有效接触挤压深度。

切向摩擦行为采用极限剪应力准则表示:

$$\tau_{\text{max}} = \mu p \quad (4)$$

式中: τ_{max} 为极限剪应力; μ 为摩擦系数,取值为 0.3。

当界面剪应力达到 τ_{max} 时,接触面进入滑移状态。

对边界条件进行处理时,根据欧洲规范建议,采用半刚性连接模型,转动刚度按下式计算:

$$S_j = \mu k_b k_s / (1/k_s + 1/k_b) \quad (5)$$

式中: S_j 为连接节点转动刚度; k_b 为螺栓抗拉刚度系数; k_s 为连接板局部刚度系数。

3 节点力学性能分析方法

3.1 平衡方程建立

基于节点域的静力平衡条件,建立考虑多螺栓协同受力的平衡方程组。对于包含 n 个螺栓的连接节点,其平衡条件表示为:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \rightarrow \sum F_i \cos \theta_i = P_x \\ \sum F_y = 0 \rightarrow \sum F_i \sin \theta_i = P_y \\ \sum M_0 = 0 \rightarrow \sum F_i [r_i \sin(\varphi_i - \theta_i)] = M_z \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_x, F_y 分别为 x, y 向合外力; M_0 为对旋转中心的合力矩; F_i 为第 i 个螺栓受力; θ_i 为第 i 个螺栓受力方向角; r_i 为第 i 个螺栓中心到旋转中心的距离; φ_i 为第 i 个螺栓位置角; P_x, P_y 分别为 x, y 向荷载分量; M_z 为绕 z 向的弯矩。

3.2 螺栓力分配

考虑实际工程中存在的孔位偏差 Δ_i , 推导得到修正螺栓力分配公式为:

$$F_i = P/n + M(r_i + \Delta_i) / \left[\sum_{j=1}^n (r_j + \Delta_j)^2 \right] \quad (7)$$

式中: P 为轴向荷载; M 为作用弯矩; Δ_i, Δ_j 分别为第 i, j 个螺栓孔位偏差; n 为螺栓总数; r_i, r_j 分别为第 i, j 个螺栓中心到旋转中心的距离。

当所有 $\Delta_i = 0$ 时,式(7)退化为标准弹性分配公式。对于承受纯剪力 V 的螺栓群 ($M = 0$), 各螺栓均匀分担剪力,即 $F_i = V/n$ 。

4 关键参数影响理论

4.1 板厚比效应

基于欧洲规范,建立板厚比对承载力的影响模型,承载力修正系数 η 计算公式如下:

$$\eta = [1 + 0.25(t_1/t_2 - 1)] \leq 1.5 \quad (8)$$

式中: t_1 为连接板中较薄板的厚度; t_2 为连接板中较厚板的厚度。

有效承压承载力计算公式如下:

$$F_b R d = \eta k_1 f_u d t \quad (9)$$

式中: F_b 为有效承压承载力; R 为荷载分配不均匀系数; k_1 为螺栓布置影响系数; f_u 为钢材抗拉强度极限; d 为螺栓直径; t 为连接板厚度。

4.2 预紧力作用机制

通过理论推导建立预紧力损失与滑移量的非线性关系如下:

$$\Delta F_p = \alpha h / (1 + \beta h^2) \quad (10)$$

式中: ΔF_p 为预紧力损失; α, β 为与连接面特性相关的试验常数; h 为连接板间的相对滑移量。

临界滑移量 h_{cr} 计算公式如下:

$$h_{cr} = 1/\sqrt{3\beta} \quad (11)$$

在该状态下预紧力损失率达到最大值。

4.3 节点域应力

节点域微元体应力状态分析方程如下:

$$\begin{cases} \partial \sigma_x / \partial x + \partial \tau_{xy} / y = 0 \\ \partial \tau_{xy} / \partial x + \partial \sigma_y / y = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_x, σ_y 分别为 x, y 向正应力; τ_{xy} 为平面剪应力。

通过莫尔圆理论,主应力计算公式如下:

$$\sigma_{1,2} = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (13)$$

采用第四强度理论进行强度评估:

$$\sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2} \leq f_y \quad (14)$$

式中: σ_1 为第一主应力; σ_2 为第二主应力; σ_3 为第三主应力。

对于平面应力状态,有 $\sigma_3 = 0$, 可得:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq f_y \quad (15)$$

5 参数化分析

5.1 参数设计

根据节点理论模型,设定螺栓直径 $d = 24 \text{ mm}$, 钢材屈服强度 $f_y = 355 \text{ MPa}$, 螺栓预紧力基准值 $F_{p0} = 170 \text{ kN}$, 即设定螺栓初始预紧力为 170 kN 。为系统研究板厚比、预紧力和螺栓间距对节点受力性能的影响,以工程常见参数取值范围为基准,设定板厚比 t_1/t_2 为 $0.50 \sim 2.00$ (步长 0.25), 预紧力系数 F_p/F_{p0} 为 $0.5 \sim 1.2$ (步长 0.1), 其中 F_p 为螺栓预紧力; 螺栓间距比 s/d 为 $2.0 \sim 4.0$ (步长 0.5), 其中 s 为螺栓间距。

5.2 结果分析

5.2.1 板厚比的影响

板厚比是影响节点承载力和应力分布的关键参数,不同板厚比下节点承载力计算结果如表 1 所示。板厚比对节点承载力的影响主要体现在连接板刚度匹配和应力分布特性方面。根据弹性力学理论可知,当 2 块连接板厚度比偏离 $1:1$ 时,较薄板的局部变形增大,会导致应力分布不均匀性增加。由表 1 可知,承载力修正系数与板厚比呈线性关系,这符合相关规范中关于非等厚连接

的设计规定。理论推导表明,当板厚比 <1 时,较薄板的承压面积减小,同时孔壁约束效应减弱,使螺栓群受力状态从理想的均匀受力模式转变为非均匀受力,这种受力模式的转变直接导致节点承载力下降,其下降幅度与板厚比的平方根近似成正比关系。当板厚比由 1.00 增至 2.00 时,节点刚度提升约 28.7%,材料用量增加约 66.7%,由此定义刚度利用系数为承载力增幅与材料用量增幅之比,当该系数 <0.5 时,视为“刚度过剩”状态。

表 1 不同板厚比下节点承载力计算结果

Table 1 Calculation results of node bearing capacity under different plate thickness ratios

板厚比	承载力修正系数	理论承载力/kN	承载力相对于板厚比为 1.0 时的变化率/%
0.50	0.875	297.5	-12.5
0.75	0.938	318.8	-6.2
1.00	1.000	340.0	0
1.25	1.062	361.2	6.2
1.50	1.125	382.5	12.5
1.75	1.188	403.8	18.8
2.00	1.250	425.0	25.0

从承载力变化趋势来看,当板厚比由 0.50 增至 2.00 时,节点理论承载力由 297.5kN 提升至 425.0kN,增幅达 42.9%。需要说明的是,节点承载力的提升并非无限制的,当板厚比 >1.5 时,节点承载力虽仍在增加,但增长速率明显降低。这是由于较厚板的刚度优势无法完全发挥,导致“刚度过剩”。同时,过大板厚比会导致应力在较薄板中过度集中,使板件发生局部屈曲或脆性破坏,对结构安全构成潜在威胁。

5.2.2 预紧力的影响

预紧力在螺栓连接节点中起着维持界面摩擦、控制滑移行为的重要作用,本文分析预紧力随界面滑移的损失规律。预紧力系数 F_p/F_{p0} 用于定义螺栓的初始安装状态,本节研究特定的初始预紧力下,节点随滑移量增加出现的预紧力衰减特征。

不同滑移量下预紧力损失计算结果如表 2 所示, α 取值为 1.2, β 取值为 0.8。预紧力在螺栓连接节点中的力学行为表现出显著的非线性特征。在滑移初期(滑移量 $<0.3\text{mm}$),预紧力损失虽最小,但损失曲线的斜率最大,即预紧力损失率最高。这是由于接触面微观凸体在初始阶段发生剧烈塑性屈服和压溃,导致表面氧化层破裂及局部应力重新分布。

表 2 预紧力损失计算结果

Table 2 Calculation results of pretightening force loss

滑移量/mm	预紧力损失/kN	剩余预紧力比例/%
0.2	23.5	86.2
0.4	41.4	75.6
0.6	53.8	68.3
0.8	61.4	63.9
1.0	65.2	61.6

当滑移量达 0.3~0.8mm 时,系统进入稳定滑移阶段,预紧力损失率趋于平稳,该阶段力学行为可用修正库仑摩擦模型描述。计算得到理论临界滑移量为 0.645mm,在该临界点附近,预紧力损失达到阶段性峰值。结合表 2 数据,当滑移量超过 0.645mm 后,预紧力损失增速明显放缓,剩余预紧力比例稳定在 61.6%~68.3%。这是由于接触面磨损产生的磨屑在界面间起到了一定的微观填充作用,同时接触面积因磨损增大减缓了压力的进一步集中。

当预紧力下降超过 30%时,界面由摩擦型连接逐步转变为承压型连接,微滑移累积加剧。基于上述分析,建议将工作滑移量控制在 0.6mm 范围内,以确保剩余预紧力比例保持在 70%以上。在此范围内,可有效维持节点摩擦型连接特性,刚度退化率可控制在 12%以内。最佳初始预紧力工作区间应设定为 $0.75\sim 0.85F_{p0}$,既能保证足够的夹紧力以抑制滑移,又能避免因预紧力过大导致螺栓产生过早的塑性伸长和应力松弛。

5.2.3 螺栓间距的影响

螺栓间距直接影响节点中应力分布的均匀性、刚度特性及承载效率,通过改变螺栓间距比系统研究其对边缘应力集中、荷载分配和破坏模式的影响,得到节点应力分布特性如表 3 所示。承载力利用率定义为实际承载力与理论最大承载力的比值,其变化规律揭示了螺栓间距优化的经济性边界。

表 3 不同螺栓间距比下节点应力分布特性

Table 3 Stress distribution characteristics of nodes under different bolt spacing ratios

螺栓间距比	边缘螺栓应力集中系数	应力不均匀系数	刚度折减系数	承载力利用率/%
2.0	1.38	0.62	0.85	72.5
2.5	1.25	0.73	0.91	83.2
3.0	1.12	0.84	0.97	94.8
3.5	1.06	0.89	0.99	97.5
4.0	1.05	0.93	1.00	95.3

螺栓间距对节点应力分布的影响机理主要源于荷载传递路径的重分布和相邻螺栓间的应力叠

加效应。根据弹性力学理论,当螺栓间距过小时(螺栓间距比 <2.5),各螺栓周围的应力影响区发生重叠,导致边缘螺栓承受不均匀荷载。这种应力重分布现象可通过圣维南原理和应力扩散角理论进行解释,单个螺栓应力影响范围约为 $2.5d$,当螺栓间距小于此值时,应力场相互干扰,产生显著的边缘效应。

边缘螺栓应力集中系数 K_1 随螺栓间距比变化规律可用指数衰减函数描述:

$$K_1 = 1 + Ae^{-B(s/d-2)} \quad (16)$$

式中: A, B 为拟合常数。

由表3可知,当螺栓间距比由2.0增至3.0时,边缘螺栓应力集中系数降低了约19%,这主要得益于应力影响区的有效分离和荷载传递路径优化。节点刚度变化规律呈明显的非线性特征,当螺栓间距比 <2.5 时,由于应力重叠导致的局部软化效应,整体刚度明显降低,刚度折减系数仅为0.85。这种刚度退化主要来源于两方面:一是连接板在密集螺栓群作用下的局部弯曲变形增大;二是螺栓杆与孔壁的接触状态恶化,接触压力分布不均匀性加剧。当螺栓间距比增至3.0~3.5时,刚度折减系数回升至0.97~0.99,表明节点刚度已恢复至97%以上,此时各螺栓基本独立工作,应力影响区重叠程度明显降低,荷载传递效率达最优。

通过计算得到,当螺栓间距比由3.5增至4.0时,连接板净截面面积 A_n 减少约6.8%,导致节点承载力下降约2.2%,使承载力利用率由97.5%降至95.3%。当螺栓间距比为4.0时,刚度折减系数达1.00,刚度完全恢复,但由于连接板有效承载面积减小,导致节点综合承载力利用率开始下降。

螺栓间距变化还会引起节点破坏模式的根本性转变。小间距时(螺栓间距比为2.0~2.5),破坏以边缘螺栓的剪切破坏为主,表现出明显的脆性特征;中等间距时(螺栓间距比为3.0~3.5),破坏模式转变为连接板的净截面破坏,延性显著改善;大间距时(螺栓间距比 ≥ 4.0),可能出现块状撕裂破坏,需特别注意板件边缘距离的设计。

6 结语

1)板厚比是影响节点承载力的重要几何参数,二者呈显著的正相关线性关系。当板厚比由0.5增至2.0时,节点承载力提升幅度约42.9%。为平衡节点承载效率与材料利用率,建议工程实际中板厚比取为1.0~1.5。此区间内节点受力平衡,可有效避免薄板过早发生局部屈曲破坏。

2)预紧力损失随界面滑移呈明显的阶段性非

线性特征。滑移初期(滑移量 $<0.3\text{mm}$)受接触面微观凸体压溃影响,预紧力损失率最高。随着滑移量超过临界值0.645mm,预紧力损失增速趋于平稳,剩余预紧力比例稳定在65%左右。设计时建议将工作滑移量控制在0.6mm以内,并设置 $0.75 \sim 0.85F_{p0}$ 的初始预紧力区间,以维持摩擦型连接的稳定性。

3)螺栓间距比决定了应力场重叠程度与刚度恢复水平。当螺栓间距比 <2.5 时,由于应力影响区严重叠加,边缘螺栓应力集中显著,导致刚度大幅度折减;当螺栓间距比提升至3.0~3.5时,应力分布趋于均匀,刚度折减系数回升至0.97以上。螺栓间距比进一步增大虽可使刚度完全恢复,但会导致连接板净截面面积减小,反而使承载力利用率下降。

参考文献:

- [1] 李阳,韩一博,赵炳震,等.大跨度公轨合建钢桁梁桥拱形加劲弦施工关键技术[J].施工技术(中英文),2025,54(14):52-56.
LI Y, HAN Y B, ZHAO B Z, et al. Key construction technology of arched stiffened chord for large-span combined rail and road steel truss girder bridge [J]. Construction technology, 2025, 54(14): 52-56.
- [2] 谢哈军,吴帅,张海涛,等.大跨度异形钢屋盖施工关键技术[J].施工技术(中英文),2025,54(14):29-34.
XIE Y J, WU S, ZHANG H T, et al. Key construction technology of large-span special-shaped steel roof [J]. Construction technology, 2025, 54(14): 29-34.
- [3] 朱振国.低合金钢TIG焊接热输入控制技术研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(2):120-122.
ZHU Z G. Research on heat input control technology for TIG welding of low alloy steel [J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2025, 61(2): 120-122.
- [4] 杜佳军,郭前鑫,杨涵,等.低合金钢回火焊道焊接温度场模拟计算分析及应用[J].电焊机,2025,55(7):57-63.
DU J J, GUO Q X, YANG H, et al. Simulation and analysis of tempering welding temperature field in low alloy steel and its application [J]. Electric welding machine, 2025, 55(7): 57-63.
- [5] 韩竞雄,李彦杰,冯俊鹏,等.低合金钢剪切板加工开裂原因分析及预防措施[J].宽厚板,2025,31(3):45-48.
HAN J X, LI Y J, FENG J P, et al. Causes analysis and preventive measures of fabrication cracking on the sheared low alloy steel plate [J]. Wide and heavy plate, 2025, 31(3): 45-48.
- [6] 郝佩远,赵东拂,刘育民.气孔缺陷对Q355B对接接头疲劳行为的影响[J].施工技术(中英文),2024,53(9):84-89,94.
HAO P Y, ZHAO D F, LIU Y M. Effect of porosity defects on fatigue behavior of Q355B butt joint [J]. Construction technology, 2024, 53(9): 84-89, 94.
- [7] 李静尧,聂诗东,曾佳,等.Q690钢-高强螺栓承压型抗剪连接试验[J].重庆大学学报,2022,45(7):24-36.
LI J Y, NIE S D, ZENG J, et al. Experimental study on Q690 steel-highstrength bolts bearing-type shear connection [J]. Journal

- of Chongqing University, 2022, 45(7): 24-36.
- [8] 蔡润泽,陈学森,赵华田,等. 大跨重载钢桁架销轴节点受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(S1): 332-342.
CAI R Z, CHEN X S, ZHAO H T, et al. Research on mechanical behavior of truss plate-reinforced pin joints in long-span steel structure under heavy load [J]. Journal of building structures, 2025, 46(S1): 332-342.
- [9] 黄志强,王渠,韩冬冬,等. 钢-混凝土组合弯梁桥受力性能研究[J]. 公路, 2025, 70(7): 201-210.
HUANG Z Q, WANG Q, HAN D D, et al. Study on mechanical performance of steel-concrete composite curved girder bridge [J]. Highway, 2025, 70(7): 201-210.
- [10] 闫亚杰,仲志强,陈冉,等. 单层铝合金球面壳顶升建造过程仿真分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22): 100-106.
YAN Y J, ZHONG Z Q, CHEN R, et al. Simulation analysis of single-layer aluminum alloy spherical shell jacking construction process [J]. Construction technology, 2024, 53(22): 100-106.
- [11] 闫亚杰,仲志强,武生文,等. 装配式铆钉在铝合金抗剪连接中的应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(21): 46-57.
YAN Y J, ZHONG Z Q, WU S W, et al. Applied research on assembled rivets for shear connection of aluminum alloy [J]. Construction technology, 2024, 53(21): 46-57.
- [12] 胡涛,易韵仪,尹玲媛,等. 超高性能混凝土桁架节点受力性能试验与有限元分析[J]. 铁道建筑, 2025, 65(5): 76-81.
HU T, YI Y Y, YIN L Y, et al. Experimental study and finite element analysis on stress performance of ultra-high performance concrete truss joint [J]. Railway engineering, 2025, 65(5): 76-81.
- [13] 邓宇,郭镇,张博,等. 嵌入式 H 型钢梁柱节点受力性能研究[J]. 广西科技大学学报, 2024, 35(2): 25-31.
DENG Y, GUO Z, ZHANG B, et al. Research on mechanical behavior of embedded H-beam column joints [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2024, 35(2): 25-31.
- [14] 孙爱民,张颢,吕振林. 大型低合金钢空心磨球开裂分析[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 609-613.
SUN A M, ZHANG H, LÜ Z L. Analysis of the cracking of low alloy steel hollow grinding balls [J]. Foundry technology, 2025, 46(6): 609-613.
- [15] 向剑,蒋立君,谭江峰,等. Q355T 型接头焊缝尺寸设计及承载能力研究[J]. 新技术新工艺, 2025(2): 48-53.
XIANG J, JIANG L J, TAN J F, et al. Research on weld size design and bearing capacity of Q355T-joints [J]. New technology & new process, 2025(2): 48-53.
- [16] 蔡哲罕,卓卫东,王志坚,等. 矩形钢管混凝土柱-软钢板组合高墩的抗侧刚度[J]. 中国公路学报, 2024, 37(8): 158-169.
CAI Z H, ZHUO W D, WANG Z J, et al. Lateral stiffness of rectangular concrete-filled steel tubular columns and low-yield-point steel plate composite tall pier [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(8): 158-169.
- [17] 谭鼎融,黄永辉,曾志伟,等. 摩擦型高强度螺栓长接头传力比的计算[J]. 工程力学, 2022, 39(S1): 109-114.
TAN D R, HUANG Y H, ZENG Z W, et al. Calculation of force transmission ratio of friction high strength bolts connections [J]. Engineering mechanics, 2022, 39(S1): 109-114.

(上接第 126 页)

- [2] 张立,范浩然,王婧. 非固化涂料与 SBS 卷材复合防水施工技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(13): 127-130.
ZHANG L, FAN H R, WANG J. Research on composite waterproof construction technology of non-curing coating and SBS membrane [J]. Construction technology, 2024, 53(13): 127-130.
- [3] 朱志远. “防水通用规范”与防水材料的新要求[J]. 中国建筑防水, 2023(2): 1-4, 8.
ZHU Z Y. “General code for waterproofing” and new requirements for waterproofing materials [J]. China building waterproofing, 2023(2): 1-4, 8.
- [4] 徐洪涛,肖绪文,王茜,等. 混凝土屋面工程防水研究(七): 工程防水耐久性评定方法与建议[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(23): 75-82.
XU H T, XIAO X W, WANG Q, et al. Research on waterproofing of concrete roofing engineering (7): Durability assessment method and suggestions for concrete roof waterproofing [J]. Construction technology, 2024, 53(23): 75-82.
- [5] 朱志远,朱晓华,王澜. 防水系统的耐久性能和可靠性[J]. 中国建筑防水, 2021(10): 1-7.
ZHU Z Y, ZHU X H, WANG L. Durability and reliability of waterproofing system [J]. China building waterproofing, 2021(10): 1-7.
- [6] 陈兴元,李国友,汪登,等. SBS 改性沥青防水卷材耐久性评价及静态使用寿命预测研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(4): 24-28.
CHEN X Y, LI G Y, WANG D, et al. Study of durability evaluation and static service life prediction of SBS modified asphalt waterproof membrane [J]. New building materials, 2023, 50(4): 24-28.
- [7] 徐洪涛,肖绪文,朱志远,等. 基于防水失效概率的混凝土屋面工程适应性技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(4): 29-35.
XU H T, XIAO X W, ZHU Z Y, et al. Adaptive technology of concrete roof engineering based on probability of waterproofing failure [J]. Construction technology, 2024, 53(4): 29-35.