

DOI: 10.7672/sgjs2026100089

地铁上盖大跨度预制梁长期变形与承载性能研究^{*}

李元帅¹, 梅 源²

(1. 中铁七局集团南京工程有限公司, 江苏 南京 210039;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 为应对地铁上盖大跨度预制梁在长期荷载与空间约束作用下所面临的变形控制难题,以西安地铁 4 号线草滩停车场工程为背景,系统研究该类构件的变形性能与承载可靠性。建立同时考虑混凝土时变特性与截面开裂状态的变形计算模型,研究混凝土徐变与收缩耦合作用下的长期变形预测、开裂状态下截面刚度计算方法的改进、空间约束对梁体受力状态及承载力的影响机制,及统筹多因素时变效应的预拱度设置方法。研究结果表明:所提出的长期挠度计算方法可有效预测混凝土徐变与收缩的耦合效应;采用分布系数法与 Timoshenko 梁理论相结合,显著提高了开裂阶段梁体刚度的计算精度;空间约束效应使梁体由纯弯状态转变为压弯组合受力状态,实际承载力得到显著提升,忽略该效应将导致承载力低估并影响抗震设计原则的落实;提出的预拱度设置方法综合考量了时变因素的影响,为大跨度梁的施工控制与长期服役性能保障提供了实用途径。

[关键词] 地铁;预制梁;混凝土;大跨度;变形;承载力;有限元分析

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0089-08

Long-term Deformation and Bearing Capacity of Precast Beams for Subway Overhead Structures

LI Yuanshuai¹, MEI Yuan²

(1. China Railway Seventh Bureau Group Nanjing Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210039, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to deal with the deformation control problem of large-span precast beams under long-term load and spatial constraints, the deformation performance and bearing reliability of such components are systematically studied based on the Caotan parking lot project of Xi'an Metro Line 4. A deformation calculation model considering both the time-varying characteristics of concrete and the cracking state of the section is established. The long-term deformation prediction under the coupling effect of concrete creep and shrinkage, the improvement of the calculation method of section stiffness under the cracking state, the influence mechanism of spatial constraints on the stress state and bearing capacity of the beam, and the pre-camber setting method for coordinating the time-varying effects of multiple factors are studied. The results show that the proposed long-term deflection calculation method can effectively predict the coupling effect of creep and shrinkage of concrete. The calculation accuracy of beam stiffness in the cracking stage is significantly improved by combining the distribution coefficient method with Timoshenko beam theory. The spatial constraint effect makes the beam body change from pure bending state to compression-bending combined stress state, and the actual bearing capacity is significantly improved. Ignoring this effect will lead to underestimation of bearing capacity and affect the implementation of seismic design principles. The proposed pre-camber setting method comprehensively considers the influence of time-varying factors, and provides a practical way for the construction control and long-term service performance guarantee of long-span beams.

^{*} 国家自然科学基金(52178302)

[作者简介] 李元帅,工程师,E-mail:251667090@qq.com

[收稿日期] 2025-12-26

Keywords: subways; precast beams; concrete; large-span; deformation; bearing capacity; finite element analysis

0 引言

随着我国城市化进程的加速推进,城市轨道交通系统成为现代都市综合交通体系的重要组成部分。预制装配式结构凭借其施工效率高、质量控制严格、环境影响小等优势,在城市轨道交通工程中得到了广泛的推广与应用^[1]。西安地铁 4 号线草滩停车场物业综合开发加盖造地工程作为典型的地铁停车场改造项目,其主体结构采用大跨度预制梁板体系,具有构件尺寸大、荷载重、抗震性能要求高等特点,对构件的受力机理、变形行为及节点连接承载性能提出了更高要求。

目前,国内外关于大跨度预制梁在地铁工程中的系统研究仍较缺乏,尤其在复杂荷载耦合作用下的结构性能、施工工艺与抗震设计等方面尚未形成统一认识,亟需开展系统的理论分析、数值模拟与试验验证。在钢筋混凝土连梁抗震性能方面,周柯靖等^[2]系统综述了小跨高比连梁的抗震设计方法与受剪承载力模型,指出各国规范^[3-5]在计算普通箍筋和对角斜筋连梁时存在较大离散性,且对角斜筋设计偏保守,建议合理考虑混凝土与箍筋的抗剪贡献。林静聪等^[6]研究了空间约束下连续梁的受力性能,结果表明周边构件约束产生的被动轴力会显著提高梁的承载力,这一效应在大跨度梁设计中不可忽视。针对大跨度预制板构件的受弯性能,颜慧等^[7]通过静载试验与数值模拟,研究了地铁车站中预制带肋混凝土叠合板的裂缝发展规律、荷载-挠度关系及叠合面协同工作性能。研究结果表明,肋板上部钢筋可有效参与受拉工作,显著提升结构整体承载力;采用空心底板可在减轻自重的同时保持良好的受力性能。在预制混合梁变形性能方面,张锡治等^[8]基于奇异函数法建立了钢-混凝土预制混合梁的挠曲线理论计算公式,系统分析了抗弯刚度比、长跨比和高跨比对结构变形的影响规律。研究表明,剪切变形在深梁中影响显著,建议在高跨比大于 1/12 时予以合理考虑。

然而,目前针对地铁停车场大跨度预制梁体系的系统性研究仍相对薄弱,尤其是在构件吊装工艺、节点连接性能、施工阶段稳定性及长期服役性能等方面的研究尚不充分^[9-12]。西安地铁 4 号线草滩停车场工程中,预制梁最大跨度超过 25m,单重达 106.54t,施工过程中需跨越运营线路,吊装难度大、安全风险高,对结构设计、施工组织与过程控制提

出了更高要求。因此,本文结合工程实际,系统梳理大跨度预制梁的研究现状与工程难点,通过数值模拟深入分析其受力性能与变形特征,识别关键影响因素,旨在为该类型构件的结构优化、施工控制与标准化设计提供理论依据与实践指导。

1 大跨度梁变形设计方法

1.1 混凝土时变特性的长期变形计算

混凝土时变特性主要包括徐变和收缩,对大跨度梁长期变形有至关重要的影响。这两种效应会显著增加钢筋混凝土梁在长期使用过程中的变形,因此,准确的长期变形预测对大跨度梁的设计至关重要。

1.1.1 混凝土徐变引起的变形

徐变系数可依据欧洲规范 EN 1992-1-1 (Eurocode 2) 提供的模型确定,孙海林等^[13]基于国内试验数据,提出了适用于中国材料的钢筋混凝土梁长期变形计算方法,混凝土徐变引起的截面曲率增大系数可表示为:

$$\varphi_{cr} = \frac{M}{E_c I_c} \phi(t, t_0) \quad (1)$$

式中: $\phi(t, t_0)$ 为徐变系数,表示在时间 t 加载的徐变变形与初始弹性变形的比值; M 为截面弯矩; E_c 为混凝土弹性模量; I_c 为截面惯性矩。

徐变系数 $\phi(t, t_0)$ 依据欧洲规范 EN 1992-1-1 提供的模型确定:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (2)$$

式中: ϕ_0 为名义徐变系数; $\beta_c(t, t_0)$ 为描述徐变随时间发展的系数。

在长期变形分析中,徐变引起的挠度增量可通过初始瞬时挠度乘以徐变影响系数得到:

$$\delta_{cr} = \delta_i [1 + k_{cr} \phi(t, t_0)] \quad (3)$$

式中: δ_i 为初始瞬时挠度; k_{cr} 为徐变影响系数,其取值与截面配筋率、截面形状及混凝土材料特性密切相关。

1.1.2 混凝土收缩引起的变形

混凝土收缩会导致截面不均匀变形,进而引起曲率变化。对称配筋的矩形截面收缩曲率为:

$$\kappa_{sh} = \frac{\varepsilon_{sh} \alpha_e \rho}{h} \quad (4)$$

式中: ε_{sh} 为混凝土自由收缩应变; $\alpha_e = E_s/E_c$ 为钢筋与混凝土弹性模量比; ρ 为配筋率; h 为截面高度。

基于曲率分布,可进一步推导由收缩引起的挠度:

$$\delta_{sh} = \kappa_{sh} \frac{L^2}{k} \quad (5)$$

式中: L 为梁跨度; k 为与支承条件和荷载形式相关的系数。

1.1.3 徐变和收缩共同作用的长期变形计算

在实际工程中,徐变与收缩往往共同作用,导致构件长期变形显著增大。为综合考虑两者的耦合效应,可通过引入等效弯矩或变形增大系数的方法,建立总长期挠度计算公式:

$$\delta_{total} = \delta_i + \delta_{cr} + \delta_{sh} = \delta_i [1 + k_{cr} \phi(t, t_0)] + \kappa_{sh} \frac{L^2}{k} \quad (6)$$

为进一步提高预测精度,提出采用附加变形增大系数法:

$$\delta_{long-term} = \delta_i \eta_{add} \quad (7)$$

式中: η_{add} 为附加变形增大系数,可进一步分解为: $\eta_{add} = 1 + \beta_1 \beta_2 \phi(t, t_0)$, β_1 为考虑荷载类型的系数, β_2 为考虑配筋率的系数。

1.2 截面开裂状态下的刚度与变形计算

钢筋混凝土梁在使用阶段常处于带裂缝工作状态,截面刚度因混凝土受拉区开裂而显著降低,从而影响其变形性能。为合理预测构件变形,需根据截面受力状态选用适当的刚度模型。欧洲规范 EN 1992-1-1 及我国 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版)均建议采用分布系数法,肖良丽等^[14]对比了中、美、欧规范中混凝土梁的受弯性能,为本研究刚度计算模型的选取提供了跨规范的视角。

1.2.1 截面刚度的基本概念

钢筋混凝土的截面刚度与其开裂状态密切相关。在弯矩作用下,截面可能处于未开裂状态(状态 I)、开裂状态(状态 II)及过渡状态。未开裂状态下的截面刚度最大,采用全截面惯性矩;开裂状态下的截面刚度最小,仅考虑受压区混凝土和受拉钢筋的作用。

$$EI_I = E_c I_c \quad (8)$$

$$EI_{II} = E_c I_{cr} \quad (9)$$

式中: I_c 为混凝土全截面惯性矩; I_{cr} 为开裂截面惯性矩。

1.2.2 分布系数 ξ 的计算方法

分布系数 ξ 是描述截面从未开裂到开裂过渡状态的关键参数,在 0(未开裂)到 1(完全开裂)之间变化:

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{f_{ctm}}{\sigma_{max}} \right)^2 \quad (10)$$

式中: β 为考虑荷载持续时间或重复次数的参数(长期荷载取 0.5,短期荷载取 1.0); f_{ctm} 为混凝土平均抗拉强度; σ_{max} 为基于线弹性材料假设计算的混凝土最大拉应力。

当考虑受拉刚化效应时,有效刚度的计算公式为:

$$\frac{1}{EI_{eff}} = \frac{\xi}{EI_{II}} + \frac{1 - \xi}{EI_I} \quad (11)$$

或等效表示为:

$$EI_{eff} = \frac{E_c I_c}{1 - \xi \left(1 - \frac{I_c}{I_{cr}} \right)} \quad (12)$$

这一公式综合考虑了未开裂区和开裂区的共同作用,能更准确地反映钢筋混凝土构件的实际刚度。

1.2.3 开裂截面惯性矩计算

对于矩形截面,开裂惯性矩 I_{cr} 计算需首先确定中和轴高度 x :

$$\frac{1}{2} b x^2 + (\alpha_e - 1) A'_s (x - d') = \alpha_e A_s (d - x) \quad (13)$$

式中: b 为截面宽度; $\alpha_e = E_s / E_c$ 为模量比; A_s 和 A'_s 分别为受拉和受压钢筋面积; d 和 d' 分别为受拉和受压钢筋保护层厚度。

进而计算开裂惯性矩:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b x^3 + (\alpha_e - 1) A'_s (x - d')^2 + \alpha_e A_s (d - x)^2 \quad (14)$$

对于 T 形或 I 形截面,需考虑受压翼缘的贡献,计算方法类似但更复杂。

1.2.4 考虑开裂状态的变形计算

在获得有效刚度后,梁曲率计算如下:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI_{eff}} \quad (15)$$

挠度计算则需根据梁的支承条件和荷载形式,通过对曲率沿梁长的积分或直接使用结构力学方法求得。在大跨度梁设计中,还需考虑剪切变形的影响,特别是在梁高较大时。考虑剪切变形的梁单元刚度矩阵需进行相应修正:

$$\delta_{total} = \delta_b + \delta_s = \frac{k_b M L^2}{EI_{eff}} + \frac{k_s V L}{G A_{eff}} \quad (16)$$

式中: δ_b 为弯曲变形; δ_s 为剪切变形; k_b 和 k_s 分别为与荷载和支承条件相关的系数; G 为剪切模量;

A_{eff} 为有效剪切面积。

1.3 大跨度梁预拱度设计方法

为抵消长期荷载引起的变形,确保结构在使用期内保持设计线形,常在大跨度梁中设置预拱度。根据 DB14/T 1034—2025《大跨径预应力混凝土连续梁和连续刚构桥梁施工监控技术规程》,预拱度设计应系统考虑混凝土收缩、徐变、预应力损失及活荷载等时变效应的影响。大跨度梁的预拱度设置需基于时变分析,考虑施工过程和长期荷载影响逐步计算:

$$\delta_{\text{camber}} = \delta_{\text{self-weight}} + \delta_{\text{prestress}} + \delta_{\text{creep}} + \delta_{\text{shrinkage}} + \delta_{\text{relaxation}} + \delta_{\text{service}} \quad (17)$$

式中: $\delta_{\text{self-weight}}$ 为自重引起的挠度; $\delta_{\text{prestress}}$ 为预应力引起的反拱度; δ_{creep} 为徐变引起的附加挠度; $\delta_{\text{shrinkage}}$ 为收缩引起的挠度; $\delta_{\text{relaxation}}$ 为预应力松弛引起的挠度; δ_{service} 为活荷载引起的挠度。

对于混凝土收缩徐变引起的长期变形,可采用老化理论和改进的 Dischinger 方法进行计算:

$$\delta_{\text{creep+shrinkage}} = \delta_i \phi(t, t_0) k_{\text{creep}} + \varepsilon_{\text{sh}}(t, t_s) S(x) k_{\text{shrinkage}} \quad (18)$$

式中: $S(x)$ 为收缩曲率影响线积分; k_{creep} 和 $k_{\text{shrinkage}}$ 分别为徐变和收缩影响系数。

1.4 长期变形与承载力关联性分析

大跨度预制梁在长期荷载作用下的变形累积,不但影响结构正常使用性能,还可能通过材料时变行为、截面应力重分布及约束状态变化等途径,直接或间接地影响其极限承载力。建立长期变形与承载力之间的理论联系,为后续试验与数值分析提供逻辑衔接。

1.4.1 时变效应引起的应力重分布

混凝土徐变与收缩会导致截面内应力随时间变化而重新分布。在持续弯矩作用下,混凝土压应力逐步向钢筋转移,受压区高度减小,受拉钢筋应力增大。这种重分布可使截面更早进入塑性,影响其极限弯矩承载力。考虑徐变后的截面弯矩-曲率关系为:

$$M(\phi, t) = M_0(\phi) + \Delta M_{\text{creep}}(\phi, t) \quad (19)$$

式中: M_0 为瞬时弯矩承载力; ΔM_{creep} 为徐变引起的弯矩调整量。

1.4.2 长期变形对刚度退化的影响

长期变形加剧了截面开裂与刚度退化,从而会影响结构内力分布与破坏模式。在连续梁或多跨框架中,刚度变化会引起弯矩重分配,可能使某些截面提前达到极限状态。考虑时变刚度的内力分析模型为:

$$\mathbf{K}(t)\mathbf{u}(t) = \mathbf{F} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{K}(t)$ 为随时间退化的整体刚度矩阵; $\mathbf{u}(t)$ 为节点位移向量; $\mathbf{F}$ 为荷载向量。

1.4.3 对承载力计算模型的修正考虑

在承载力计算中,若忽略长期变形引起的轴力累积与弯矩重分布,将导致计算结果偏离实际受力状态。在承载力模型中引入长期效应修正系数 η_{LT} (一般取 1.05~1.15),对截面抗弯承载力进行修正:

$$M_{u, \text{LT}} = \eta_{\text{LT}} M_u \quad (21)$$

在实际结构中,长期变形受相邻构件的空间约束,这种约束效应会随时间进一步发展,增强梁体的轴压效应,使其由纯弯向压弯状态转变。

2 试验概况

在大型基础设施建设中,大跨度预制混凝土梁因其工厂化生产、装配化施工等优点被广泛应用。然而,此类构件在吊装及使用荷载作用下,其变形控制关乎结构安全性与适用性。特别是在地铁停车场出入线加盖等跨越既有运营线路的工程中,梁体的过度变形不仅影响自身结构性能,更可能对下部精密设备构成安全威胁,且现场进行足尺试验成本高昂、风险巨大,直接进行物理验证极其困难。

因此,本文以西安地铁 4 号线草滩停车场出入场线加盖工程中的大跨度预制梁为工程背景,收集 6 组不同参数预制梁的缩尺模型物理试验数据,采用 ABAQUS 软件系统性地研究其在荷载作用下的变形性能与破坏机理。

2.1 试件设计

设计 6 根 YL-1~YL-6 大跨度预制混凝土梁试件,其原型为工程中截面为 900mm×1 800mm、跨度达 25.067m 的 YL2-10 预制梁,如图 1 所示。试件设计在保持基本尺寸一致的基础上,针对关键变量进行差异化设计,以对比分析各参数的影响。

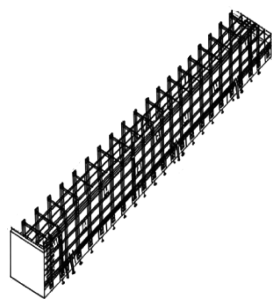


图 1 预制梁

Fig. 1 Precast beam

2.2 材料本构模型

混凝土采用《混凝土结构设计规范》(2015 年版)建议的混凝土应力-应变关系模型。对于 C40 混

凝土,其轴心抗压强度、弹性模量等参数均按规范取值。为准确模拟混凝土的开裂与压碎行为,模型中引入了损伤塑性模型,定义了混凝土受拉与受压的损伤因子。

普通钢筋和预应力钢绞线均采用双线性随动强化模型,该模型能准确描述钢筋弹性阶段、屈服阶段及强化阶段的力学行为。其屈服强度、极限强度及弹性模量均按材料标准设定。

根据上述建模要求,结合文献[15-16]对6个预制梁构件建立有限元模型进行静力分析。在大跨度预制梁的受力性能试验中,通过分析试件的荷载-跨中位移($P-\delta$)关系曲线可知,其整体受力过程呈现出与普通受弯简支梁不同的3阶段特征,具体表现如下。

1)线弹性工作阶段:在加载初期,荷载水平较低,试件未出现可见裂缝,钢筋与混凝土应变均较小,结构整体处于弹性状态。随着荷载增至 $0.12P_u \sim 0.30P_u$ (P_u 为峰值荷载),跨中及梁端区域开始出现初始裂缝,结构进入带裂缝工作阶段。当荷载进一步增大至 $0.39P_u \sim 0.64P_u$ 时,最大裂缝宽度达到正常使用极限状态所规定的限值。在此阶段内,各试件的 $P-\delta$ 曲线基本保持线性增长趋势。

2)塑性发展阶段:随着外荷载持续增大,跨中区域裂缝发展趋于稳定,梁内纵向受力钢筋逐渐进入屈服状态,梁端斜裂缝进一步扩展并贯通,构件整体刚度逐步下降。该阶段内,跨中位移的增长速率显著高于荷载的增长速率, $P-\delta$ 曲线呈现出明显的非线性特征。

3)承载能力衰退阶段:当荷载达到峰值 P_u 后,梁体受压区混凝土逐渐压溃;与此同时,剪跨区斜裂缝与水平裂缝持续发展并相互贯通,导致混凝土保护层剥落,构件承载能力迅速下降,荷载-位移曲线进入陡降段。

值得注意的是,大跨度预制梁在实际结构体系中通常受竖向构件所构成的空间框架体系的整体约束,从而在受力过程中产生随位移增大而逐步累积的被动轴压力。该轴力作用使梁体由纯弯构件转变为压弯构件,不仅提高了其受弯承载力,同时也改变了破坏形态,使其更倾向于发生剪切型破坏。因此,在达到极限荷载后,该类构件往往表现出承载能力的快速退化特征。

3 数值模拟

3.1 有限元模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件开展数值模拟,深入研究结构空间约束条件下大跨度连续梁的承载性能与损伤演化规律。基于实际工程中跨度 25.07m、

重达 106.54t 的预制梁结构几何尺寸,建立有限元模型。模型中,柱脚节点边界条件设定为不约束水平平动,以反映实际支撑情况。

混凝土采用 C3D8R 实体单元,钢筋采用 T3D2 桁架单元,并将钢筋笼通过“Embedded”方式嵌入混凝土中,以准确反映两者的协同工作性能。为提高计算收敛性,采用位移控制加载方式,并在多跨梁上同步施加外荷载。荷载通过加载参考点与加载垫块之间的“Couple”约束传递至垫块,垫块与梁体接触面采用“Tie”连接,确保荷载有效传递。

为提高计算效率并保证精度,采用局部精细化网格法。试验层厚度方向网格尺寸为 25mm,梁高度方向为 40mm,梁跨度方向、柱体网格尺寸均为 100mm,其余结构区域网格尺寸取 200mm。为准确模拟相邻柱对目标加载梁的空间约束效应,建立相应的有限元分析模型,如图 2 所示。

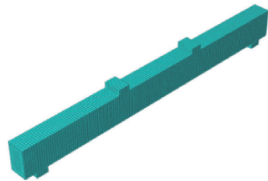


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

基于材性试验结果,对模型中的材料参数进行系统定义。钢筋材料的本构关系采用弹塑性双折线模型,以反映其屈服与硬化行为;混凝土则选用塑性损伤模型来模拟其在复杂应力状态下的非线性响应。混凝土密度、泊松比、弹性模量及单轴抗压应力-应变关系均严格依据《混凝土结构设计规范》(2015 年版)中的相关规定确定。在此基础上,采用能量等价原理法,分别计算混凝土在受拉与受压状态下的损伤因子,以合理描述材料刚度退化的力学行为。在 CDP 模型的塑性参数设定中,剪胀角取 32° ,黏性参数设定为 0.000 5,偏心率取 0.001;双轴与单轴抗压强度比值 f_{b0}/f_{c0} 为 1.16,屈服函数中的系数 K 取 0.666 667。

3.2 有限元模型模拟结果验证

以预制梁 YL-1 的模拟结果为例,混凝土受拉损伤与钢筋损伤云图如图 3,4 所示。由图 3,4 可知,跨中底部钢筋与梁端顶部钢筋依次进入屈服状态,对应荷载为 577.5kN,与预期钢筋屈服的荷载水平基本吻合。在该荷载阶段,模拟中混凝土受拉损伤较严重的区域与实际构件在钢筋屈服时所观察到的裂缝分布相符。此时,梁端区域箍筋应力处于 500~600MPa 范围内,尚未达到屈服。随着荷载逐

步增大至峰值,梁剪跨区混凝土损伤进一步扩展,模拟结果与预期损伤形态一致。在此过程中,与裂缝相交的箍筋承担了更大的剪力,应变显著增大,最终也进入屈服状态。

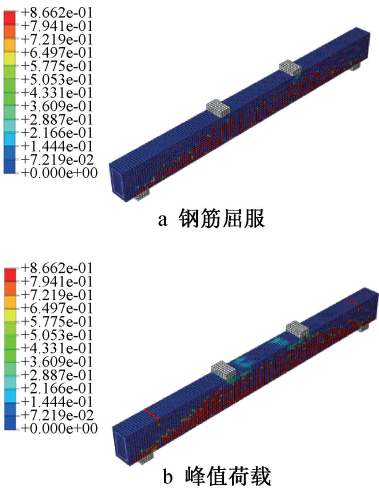


图 3 试件 YL-1 受拉损伤云图(单位:mm)

Fig. 3 Cloud map of specimen YL-1 tensile damage(unit: mm)

试验与有限元模拟所得荷载-跨中位移挠度关系曲线及轴向伸长行为的对比结果如图 5,6 所示。由图 5 可知,数值模拟获得的荷载-位移挠度曲线与试验曲线形态基本吻合,均表现出典型的先上升后下降的非线性变化特征。在承载能力方面,模拟值与试验结果之间的误差为-3.8%~9.4%,平均误差

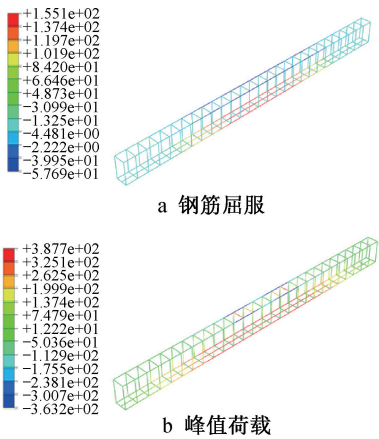


图 4 试件 YL-1 钢筋应力(单位:MPa)

Fig. 4 Reinforcing bar stress of specimen YL-1(unit: MPa)

为 1.7%,表明所建立的有限元模型能有效模拟试件的受力性能。

由图 6 可知,有限元分析结果显示试件的轴向伸长量在加载初期随跨中位移的增加而逐步增大,并在加载中后期趋于稳定或出现回缩,该变化趋势与试验观测现象基本一致。进一步分析表明,轴向伸长的模拟值随着结构约束作用的增强、纵向配筋率的提高及剪跨比的减小而减小,与试验中所呈现的规律相符。

模拟值与试验值的荷载-跨中挠度曲线发展趋势一致,二者在弹性阶段基本吻合,在弹塑性阶段模拟值虽略高但整体趋势相同,验证了本文所建立

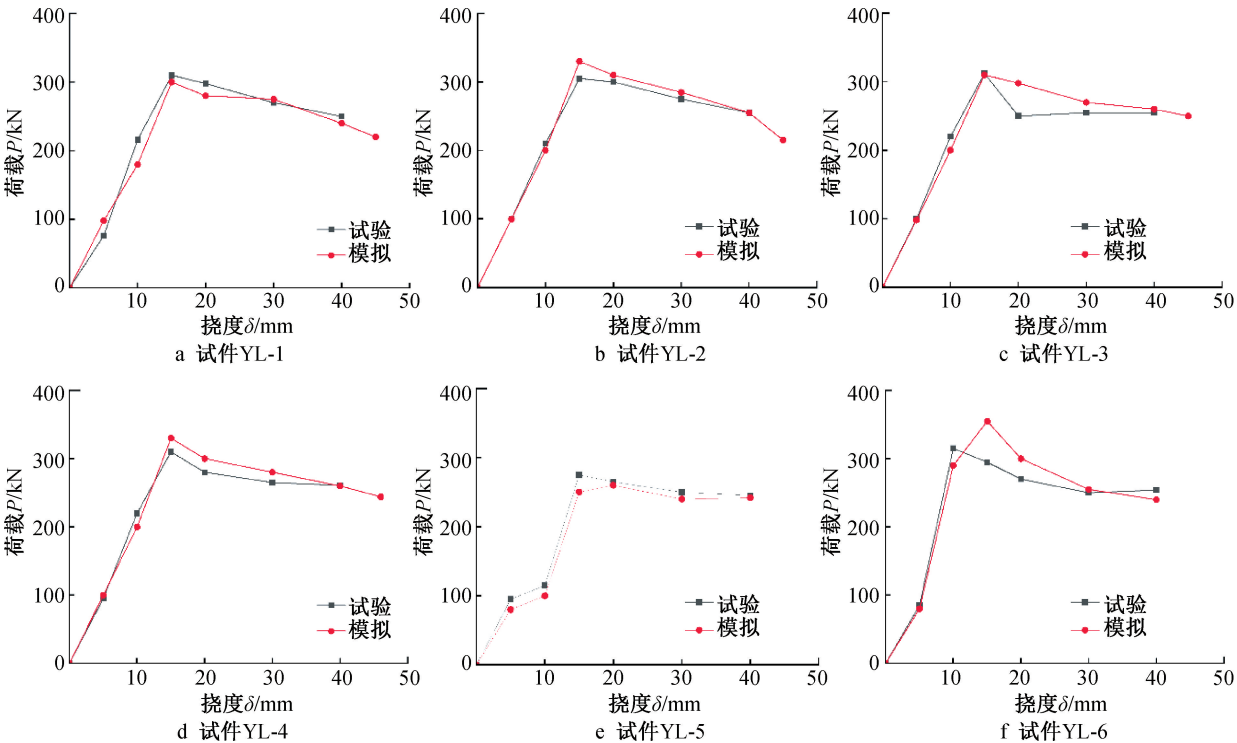


图 5 试验与模拟荷载-跨中位移挠度曲线

Fig. 5 Experimental and simulated load-mid-span displacement deflection curves

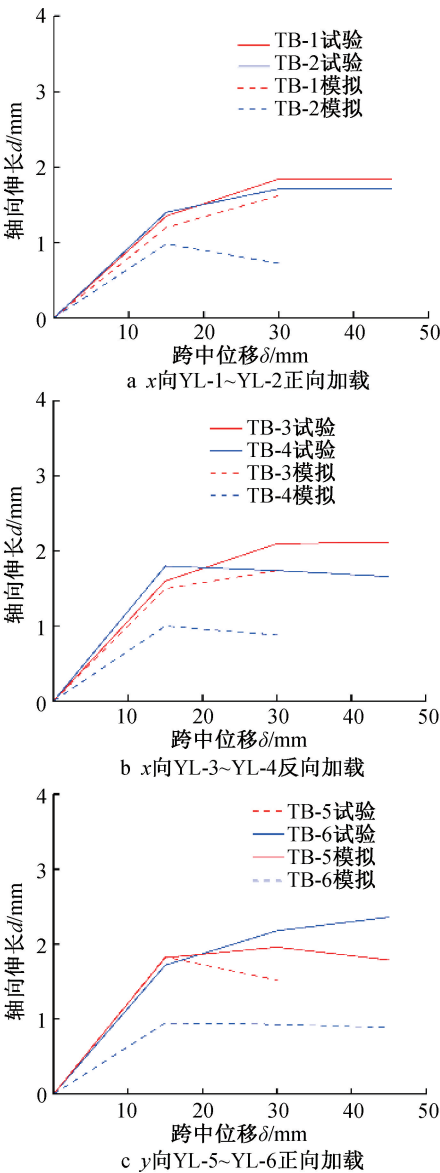


图6 试验与模拟轴向伸长-跨中位移曲线
Fig. 6 Experimental and simulated axial elongation-mid-span displacement curves

的数值模型能有效预测构件极限承载力、轴向变形及损伤发展过程,表明该有限元方法可靠,可用于后续参数分析。

3.3 承载力分析

在基于平截面假定的梁截面受弯承载力计算中,各国规范的计算结果差异较小。为保持研究一致性,本文采用《混凝土结构设计规范》(2015年版)进行承载力计算。将梁视为无轴力作用的受弯构件,采用材料强度试验平均值,按无轴力受弯构件理论计算梁截面的受弯承载力。基于塑性铰理论^[17],进一步计算试验梁构件的理论荷载值 P_0 ,并分析峰值荷载试验值 P_{test} 与理论荷载值的比值 P_{test}/P_0 ,具体结果如表1所示。

表1 试件承载力试验值与理论值对比

Table 1 Comparison between the test value and the theoretical value of the bearing capacity of the specimen			
试件编号	$P_{\text{test}}/\text{kN}$	P_0/kN	P_{test}/P_0
YL-1	426.5	141.7	3.00
YL-2	410.7	255.1	1.61
YL-3	367.2	141.7	2.59
YL-4	400.1	141.7	2.82
YL-5	398.4	255.1	1.56
YL-6	435.8	240.7	1.81

在计算理论荷载值 P_0 时,结合试验数据与数值模拟结果,假定支座截面与跨中截面同时受弯,且均可达到受弯承载力极限状态。对于正向加载条件下梁的支座截面及反向加载条件下梁的跨中截面,取6倍板厚范围内的板筋作为有效受拉翼缘;对于正向加载的跨中截面及反向加载的支座截面,其有效翼缘宽度依据《混凝土结构设计规范》(2015年版)第5.2.4条的相关规定确定。

由表1可知,试验测得的峰值荷载普遍高于按受弯构件理论计算的荷载值,显示出明显的承载力提升效应。具体而言,剪跨比为4.8的试件,其荷载比处于1.61~3.00;而剪跨比为3.5的试件,该比值为1.56~2.82,表明随着剪跨比减小,承载力增强效应有所减弱。此外,随着梁纵筋配筋率的提高,尽管试验峰值荷载 P_{test} 略有增加,但由于梁的弯剪比增大,空间约束对承载力提升的贡献相对减弱,导致 P_{test}/P_0 的平均值由2.4降至2.06。在相同纵筋配筋率条件下,中跨梁因受到比边跨梁更显著的空间约束作用,其承载力约提高5%,相应 P_{test}/P_0 比值也有所增大。特别值得注意的是,对于纵筋配筋率较高且剪跨比较小的试件,由于弯剪比较大,其破坏模式更趋近于受剪破坏,此时试验峰值荷载与理论受弯承载力已无显著差异。综上,若在计算中忽略结构的空间约束效应,将梁简化为受弯构件进行分析,会严重低估其实际承载力^[18-20],进而影响“强柱弱梁”抗震设计理念的有效落实。

4 结语

- 1)大跨度梁长期变形预测方法得到完善。通过系统考虑混凝土徐变与收缩耦合效应,提出了基于曲率增大系数和等效弯矩的长期挠度计算方法,结合欧洲规范与我国规范建议,建立了适用于大跨度预制梁的时变变形预测模型,为结构服役期内的变形控制提供了理论依据。
- 2)开裂状态下截面刚度计算精度显著提升。采用分布系数法有效描述了截面从弹性到开裂的刚度过渡过程,结合 Timoshenko 梁理论进一步考虑

了剪切变形的影响,显著提高了带裂缝工作阶段梁体变形的计算准确性。

3)空间约束效应显著提升梁的实际承载力,但对抗震设计提出新要求。研究表明,周边构件的约束使梁从纯弯状态转为压弯状态,轴压力可大幅提高其承载力。若设计时忽略该效应,仍按纯弯构件计算,会导致梁的实际承载力远高于设计值。此时,按原设计建造的柱构件可能相对薄弱,地震中易先于梁形成塑性铰,使破坏模式从预期的“梁铰机制”转为不利的“柱铰机制”,从而违背“强柱弱梁”原则,削弱结构整体延性与耗能能力。因此,在抗震设计中须定量评估空间约束带来的轴力,并在设计中对柱进行相应加强或对梁的受弯承载力进行折减,以确保塑性铰按预期顺序形成,保障结构抗震安全性。

4)预拱度设置方法及基于时变效应分析的总预拱度计算公式,系统纳入了自重、预应力、收缩徐变及活荷载等多因素影响,为大跨度梁桥施工阶段的线形控制与长期服役性能预测提供了统一、完整的理论分析框架与关键的计算基础。公式在理论上具备了工程适用性所需的要素。其在实际工程中的精确度与可靠性,有待在未来通过具体项目的长期监测数据进行对比验证与参数校准,从而完成从理论方法到成熟设计工具的转化。

参考文献:

- [1] 邵莹,胡双平,高志宏,等. 装配式混凝土地下车站结构应用与研究进展[J]. 铁道工程学报,2023,40(4):89-93,104.
SHAO Y, HU S P, GAO Z H, et al. Applications and investigations of precast concrete structures for underground metro station[J]. Journal of railway engineering society, 2023, 40(4): 89-93, 104.
- [2] 周柯靖,陈晖,易伟建. 小跨高比钢筋混凝土连梁抗震性能研究综述[J]. 建筑结构学报,2020,41(S2):213-226.
ZHOU K J, CHEN H, YI W J. Review of seismic performance of reinforced concrete coupling beams with small span-to-depth[J]. Journal of building structures, 2020, 41(S2): 213-226.
- [3] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318—19) and commentary [S]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- [4] NZS 3101: 2006 Concrete structures standard [S]. Wellington, 2006.
- [5] Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1—1: General rules and rules for buildings (foreign standard); DIN EN 1992—1—1:2005[S]. Deutsches Institut für Normung, 2005.
- [6] 林静聪,韩小雷,何子鸣,等. 考虑空间约束的钢筋混凝土连续梁受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(9): 219-231.
LIN J C, HAN X L, HE Z M, et al. Study on mechanical properties of reinforced concrete continuous beams incorporating spatial restraint[J]. Journal of building structures, 2025, 46(9):

219-231.

- [7] 颜慧,徐前卫,路林海,等. 地铁地下车站大跨度预制带肋混凝土叠合板受弯性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(4):172-176,190.
YAN H, XU Q W, LU L H, et al. Study on flexural behavior of large-span precast ribbed concrete composite slabs for underground subway stations[J]. Urban mass transit, 2025, 28(4):172-176,190.
- [8] 张锡治,李青正,章少华,等. 钢-混凝土预制混合梁变形性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6):193-201.
ZHANG X Z, LI Q Z, ZHANG S H, et al. Study on the deformation performance of precast hybrid steel-concrete beams[J]. Engineering mechanics, 2019, 36(6):193-201.
- [9] 杜修力,刘洪涛,许成顺,等. 装配整体式地铁车站纵断面方向梁板柱中节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9):51-60.
DU X L, LIU H T, XU C S, et al. Study on seismic performance of beam-column-slab interior joints in longitudinal section of assembled monolithic subway station[J]. Journal of building structures, 2019, 40(9):51-60.
- [10] 邢琼. 装配整体式地下车站钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁节点力学性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7):59-65,70.
XING Q. Joint mechanical properties of concrete-filled steel tube columns and steel-concrete composite beams in assembled monolithic underground station[J]. Urban mass transit, 2023, 26(7):59-65,70.
- [11] 杨勇. “预制+现浇”叠合拱壳工艺在地铁车站中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3):203-206.
YANG Y. Application of “prefabrication + cast-in-situ” superposition arch shell technology in metro station construction[J]. Urban mass transit, 2021, 24(3):203-206.
- [12] TAO L, DING P, SHI C, et al. Shaking table test on seismic response characteristics of prefabricated subway station structure[J]. Tunnelling and underground space technology, 2019, 91:102994.
- [13] 孙海林,叶列平,冯鹏. 钢筋混凝土梁长期变形的计算[J]. 工程力学, 2007, 24(11):88-92.
SUN H L, YE L P, FENG P. Long-term deflection prediction of reinforced concrete beams[J]. Engineering mechanics, 2007, 24(11):88-92.
- [14] 肖良丽,潘明杨. 中、美、欧混凝土梁的受弯性能对比研究[J]. 工程建设与设计, 2012(10):73-76,79.
XIAO L L, PAN M Y. Comparative study on the flexural behavior of concrete beams in the United States, European and China[J]. Construction & design for project, 2012(10):73-76,79.
- [15] 牛涛涛,陈新孝,王学民. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(10):36-38,45.
NIU D T, CHEN X X, WANG X M. Experimental study on seismic performance of corroded reinforced concrete members with flexure and compression[J]. Building structure, 2004, 34(10):36-38,45.

3)创新采用曲线钢桁梁长悬臂、小间距、大偏心、柔性支架、双幅、高墩同一墩顶同步转体施工工艺,成功研发钢桁梁墩顶转体方法及装置、梁体偏心配重稳定转体方法,彻底破解了长悬臂曲线钢桁梁墩顶大偏心同步转体稳定性控制的难题。

4)融合 BIM、北斗定位及 PLC 控制技术,构建全流程监测与协同控制体系,保障了复杂环境下转体施工的精准度与安全性。

参考文献:

[1] 李艳明,徐升桥,彭岚平,等.墩顶转体法施工的大跨度曲线钢桁梁桥总体设计及创新——以国道 109 新线高速公路安家庄特大桥主桥设计为例[J].铁道标准设计,2024,68(3):1-7,55.
LI Y M,XU S Q,PENG L P,et al. Overall design and innovation of large-span curved steel truss bridges constructed using pier top rotation method—taking the design of the main bridge of anjiazhuang super major bridge on National Highway 109 New Line Expressway as an example[J]. Railway standard design, 2024,68(3):1-7,55.

[2] 金令,李辉,高静青,等.京张高铁官厅水库特大桥总体设计及创新技术[J].铁道标准设计,2020,64(1):194-198,208.
JIN L,LI H,GAO J Q,et al. General design and innovation of extra-long bridge over Guanting Reservoir on jingzhang high-speed railway[J]. Railway standard design, 2020,64(1):194-198,208.

[3] 王春生,何文龙,寇婷苇.公轨两用双层连续钢桁梁桥体系可靠度分析[J].中国公路学报,2024,37(10):73-84.
WANG C S,HE W L,KOU T W. System reliability analysis of rail-road double-deck continuous steel truss bridge[J]. China journal of highway and transport,2024,37(10):73-84.

[4] 刘郭周,傅中秋,李荫晓,等.考虑双重非线性的大跨度钢桁梁拱桥稳定性能评估[J].施工技术(中英文),2024,53(12):52-57.
LIU G Z,FU Z Q,LI Y X,et al. Stability performance evaluation of long-span steel arch bridge with truss girder based on double nonlinearity[J]. Construction technology,2024,53(12):52-57.

[5] 甘国荣,李居泽,赖道辉,等.大跨度斜拉桥拉索安装扭转控制技术[J].施工技术(中英文),2024,53(4):98-102.
GAN G R,LI J Z,LAI D H,et al. Torsion control technology of stay cable installation of long-span cable-stayed bridge[J]. Construction technology,2024,53(4):98-102.

[6] 盛建军,卢靖宇,严春明,等.大跨度悬索桥桥塔横梁施工优化方法研究[J].施工技术(中英文),2023,52(23):74-79,108.
SHENG J J,LU J Y,YAN C M,et al. Construction optimization method of tower cross beam of long-span suspension bridge[J]. Construction technology,2023,52(23):74-79,108.

[7] 陈示光.大跨度钢桁梁桥分段吊装技术[J].施工技术(中英文),2022,51(24):60-64.
CHEN S G. Segmental hoisting technology of long span steel truss bridge[J]. Construction technology,2022,51(24):60-64.

(上接第 96 页)

[16] 王晓刚.碳纤维布加固锈蚀钢筋混凝土梁受弯性能研究[D].上海:同济大学,2008.
WANG X G. Study on bending performance of corroded reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber cloth[D]. Shanghai: Tongji University,2008.

[17] 苏幼坡,王兴国,宋晓胜,等.钢筋混凝土框架梁拱效应的试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(4):477-484.
SU Y P,WANG X G,SONG X S,et al. Experimental investigation on the arching action in reinforced concrete frame-beams[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition),2009,41(4):477-484.

[18] 林静聪,韩小雷,何子鸣,等.考虑空间约束的钢筋混凝土连续梁受力性能研究[J].建筑结构学报,2025,46(9):219-231.
LIN J C,HAN X L,HE Z M,et al. Study on mechanical

properties of reinforced concrete continuous beams incorporating spatial restraint[J]. Journal of building structures,2025,46(9):219-231.

[19] 韩小雷,郑振光,梁晓敏,等.考虑结构空间约束的现浇楼盖梁受剪性能试验研究[J].土木工程学报,2023,56(11):16-26.
HAN X L,ZHENG Z G,LIANG X M,et al. Experimental study on shear performance of cast-in-situ floor beams incorporating structural spatial restraint[J]. China civil engineering journal, 2023,56(11):16-26.

[20] 韩小雷,郑振光,杨坚,等.考虑结构空间约束的现浇楼盖梁跨中受弯性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(6):61-71.
HAN X L,ZHENG Z G,YANG J,et al. Experimental study on mid-span flexural performance of floor beams incorporating structural spatial restraints[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2024,56(6):61-71.