

剪压粘结破坏模式下钢筋混凝土框架梁受力性能分析

Performance Analysis of Reinforced Concrete Frame Beams under Shear Compression Bonding Failure Mode

张 鹏¹, 周宏峰², 刘 丁¹, 曾祥凯¹, 马 骏¹

(1. 河北省建筑工程质量检测中心有限公司, 石家庄 050227;

2. 承德中天建设工程检测试验有限公司, 承德 067000)

摘 要: 为弥补现有研究中对钢筋混凝土框架梁抗剪性能空间约束效应考虑的不足, 研究通过三维有限元模型, 模拟不同空间约束下框架梁的受力情况, 分析空间效应对框架梁受剪承载力、变形模式及破坏形态的影响。研究表明, 边跨梁因边界条件与构造特点的不同, 其应力和轴力普遍高于中跨梁; 楼板厚度对框架梁的约束作用显著, 增大板厚可有效提高梁的承载能力与刚度, 并抑制其挠度发展; 而配筋率在一定范围内对梁的初始受力性能影响相对有限。研究结果揭示了空间效应在框架梁剪压粘结破坏行为中的重要作用, 为钢筋混凝土框架梁的抗震性能设计与结构优化提供了理论依据和工程参考。

关键词: 剪压粘结破坏; 钢筋混凝土框架梁; 受力性能; 空间效应

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0156-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.027

ZHANG Peng¹, ZHOU Hongfeng², LIU Ding¹, ZENG Xiangkai¹, MA Jun¹

(1. Hebei Province Center for Building Quality Inspection Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;

2. Chengde Zhongtian Construction Engineering Testing Co., Ltd., Chengde 067000, China)

Abstract: To compensate for the insufficient consideration of spatial constraint effects on the shear performance of reinforced concrete frame beams in existing research, a three-dimensional finite element model was used to simulate the stress situation of frame beams under different spatial constraints, and analyze the influence of spatial effects on the shear bearing capacity, deformation mode, and failure mode of frame beams. Research indicates that edge beams generally exhibit higher stresses and axial forces than center beams due to differing boundary conditions and structural characteristics. Floor slab thickness significantly constrains frame beams; increasing slab thickness effectively enhances beam load-carrying capacity and stiffness while suppressing deflection development. Within a certain range, the reinforcement ratio has relatively limited influence on the beam's initial load-bearing performance. The findings reveal the crucial role of spatial effects in the shear-compression bond failure behavior of frame beams, providing theoretical foundations and engineering references for seismic performance design and structural optimization of reinforced concrete frame beams.

Key words: shear-compression bond damage; reinforced concrete frame beam; force performance; spatial effect

作者简介: 张 鹏 (1990—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑结构。

通信作者: 周宏峰 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程。

收稿日期: 2025-02-21

0 引言

钢筋混凝土框架结构因其良好的承载能力、空间布置灵活性和相对成熟的施工技术,在工业与民用建筑中占据主导地位,其抗震性能直接关系到整体结构在大震作用下的安全性与韧性^[1-2]。然而,强震作用下框架梁常因承受复杂的剪压复合应力而发生破坏,其中剪压黏结破坏模式因其隐蔽性和脆性特征尤为值得关注。准确评估并提升框架梁在此破坏模式下的性能,对保障结构抗震安全至关重要。

近年来,钢筋混凝土框架梁的受力性能研究取得了显著进展。曾敏茹等^[3]提出了梁端弹簧型自复位框架结构,通过梁柱节点铰接弱化抗侧刚度并在梁端设置钢板弹簧提供确定转动刚度,提高钢筋混凝土框架梁的抗震性能和变形性能;Shan 等^[4]通过改造传统钢筋混凝土框架并探讨其倒塌机制;郭隆基等^[5]提出了一种结合实地震害、破坏形式与数值模型的研究方法,通过 Midas Gen 有限元计算,对框架抗震性能的优化;丁发兴等^[6]通过考虑钢管与混凝土的约束作用及塑性耗能累积效应,实现了对框架结构应力-应变滞回曲线及塑性耗能分布进行分析;赖凤晨^[7]通过对钢筋混凝土框架结构强度、延性和整体性等关键特性的分析,提出了增加加强梁或加强柱的预应力混凝土框架;丁雪等^[8]研究了钢筋桁架梁承板在钢筋混凝土框架结构体系中的应用并提出了相应的施工措施;吴小婷^[9]通过综合研究配筋率、温差及楼板变形等因素,发现裂缝主要由楼板自身变形导致,且多集中于楼面板四角及外墙转角处;刘胜利等^[10]采用能量均衡的期望性理论进行了屈服支撑钢筋混凝土框架抗震性能试验研究,证明了具有抗屈曲能力的钢管混凝土结构的抗震优势;黄钰^[11]分析了不同轴力对钢筋混凝土框架柱力学特性的影响,证明了轴力每增加 1 kN,屈服荷载和极限荷载分别降低 2.27 kN 和 2.33 kN;白玉丽^[12]提出了筒仓顶部采用型钢混凝土框架梁与带压型钢板的现浇混凝土板结构形式;刀勇^[13]围绕地基处理与基础施工、钢筋的预埋和绑扎、梁、柱、板的施工工艺进行分析,提出了建筑工程钢筋混凝土框架结构施工质量保障措施;谢军等^[14]提出了基于改进

天牛须算法的钢筋混凝土框架结构优化算法,解决了钢筋混凝土框架离散变量结构优化问题。

综上,现有研究多基于平面假设分析梁构件抗剪性能,未充分考虑结构空间约束效应的影响。基于此,研究通过建立三维有限元模型,模拟不同空间约束条件下的框架梁受力情况,分析空间效应对框架梁受剪承载力、变形模式及破坏形态的影响。研究旨在揭示空间效应在框架梁受力性能中的重要性,为钢筋混凝土框架结构的抗震设计和优化提供新的视角和理论依据。

1 工程概况与模型建立

通过分析剪压黏结破坏模式下空间效应对钢筋混凝土框架梁受力的影响。构建钢筋混凝土框架梁的三维有限元模型,利用模型模拟框架梁在不同工况下的受力状态,包括应力分布、变形情况等。框架梁主要承受楼层荷载及水平风荷载、地震荷载等作用,是结构中的重要受力构件。鉴于框架梁在地震作用下更易发生剪压失效,采用单向集中荷载模拟地震作用下的等效荷载形式,重点考察在不同空间约束条件下梁构件的剪压响应与变形特征。

1.1 工程概况

选取某典型钢筋混凝土框架结构的中间层做研究对象,框架梁采用 C30 混凝土,纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋。梁截面尺寸为 300 mm × 600 mm,跨度为 8 m,两端简支。

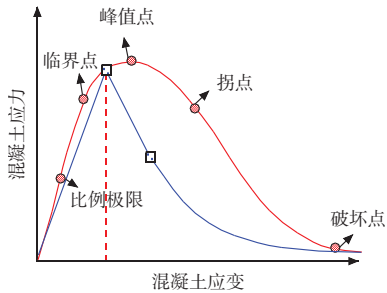
1.2 模型建立

采用 YJK-EPDA 软件根据实际工程参数及相关规范,建立钢筋混凝土框架梁的三维有限元模型。在建模过程中,首先根据工程概况确定框架梁的几何尺寸和材料参数。然后,采用壳单元模拟混凝土梁,采用梁单元模拟钢筋,通过节点连接实现混凝土与钢筋的共同作用。楼板则采用分层壳单元,充分考虑其面内刚度对整体结构刚度的贡献。在接触设置方面,考虑混凝土与钢筋之间的黏结滑移关系,采用适当的黏结滑移本构关系进行模拟。最后,根据结构实际情况施加荷载和边界条件,模拟实际工程中的受力约束情况。在材料本构模型方面,混凝土损伤因子按照 GB 50010《混凝土结构设计规范》取值,钢筋本构采用双折线强化模型以模拟钢筋的弹塑性行

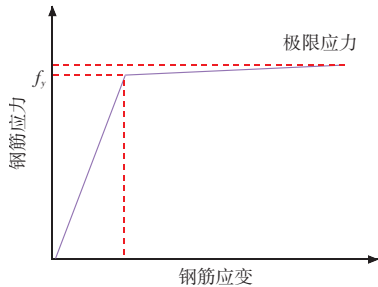
建筑结构

为，黏结滑移本构采用 CEB – FIP 模型来描述钢筋与混凝土之间的相互作用^[15–16]。其中，钢筋、混凝土的应力 – 应变曲线如图 1 所示。

混凝土本构模型考虑了混凝土在受拉和受压状态下的损伤演化过程，能够较好地反映混凝土材料的力学行为，适用于结构分析和有限元模拟。而钢筋双折线强化模型具有简单性和高效性，能够较好



(a) 混凝土应力 – 应变曲线



(b) 钢筋双折线模型

图 1 钢筋、混凝土的应力 – 应变曲线

Fig. 1 Stress – strain curves of steel and concrete

地捕捉钢筋的屈服和硬化行为^[17]。混凝土损伤本构模型的有效应力表达式为：

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c \varepsilon_c \tag{1}$$

式中： σ_c 为混凝土的有效应力； d_c 为受压损伤因子； E_c 为混凝土弹性模量； ε_c 为混凝土压应变。

钢筋本构模型的应力表达式为：

$$\sigma_r = \begin{cases} E_s \varepsilon_r & \varepsilon_r \leq \varepsilon_y \\ f_y + 0.01 E_t (\varepsilon_r - \varepsilon_y) & \varepsilon_r > \varepsilon_y \end{cases} \tag{2}$$

式中： σ_r 为钢筋应力； E_s 为钢筋的弹性模量； ε_r 为钢筋应变； ε_y 为钢筋的屈服应变； f_y 为钢筋的屈服强度； E_t 为钢筋的塑性强化模量。在弹性阶段，钢筋的应力和应变之间的关系是线性的，当应力达到屈服强度 f_y 时，钢筋进入屈服阶段。屈服后进入强化阶段，应力 – 应变关系曲线变为平缓的斜直线。黏结滑移本构模型的应力计算公式为：

$$\tau_b = \begin{cases} \tau_{\max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha & s \leq s_1 \\ \tau_{\max} - k(s - s_1) & s_1 < s \leq s_u \end{cases} \tag{3}$$

式中： τ_b 为黏结应力； $\tau_{\max}$ 为峰值黏结应力； s 为滑移量； s_1 为峰值滑移； k 为软化段斜率； s_u 为极限滑移； α 为曲线指数。

2 结果与分析

2.1 钢筋混凝土框架梁受力机制

根据钢筋混凝土框架梁的三维有限元模型，进行剪压黏结破坏模式的仿真模拟与分析。实验过程中，在模型两端施加竖向集中荷载模拟实际受力情况。按照分级加载方式，逐步增加荷载直至梁达到剪压粘结破坏状态。同时，在模型中设置监测点，记录不同位置的应力、应变以及位移数据。为量化空间效应，对比分析不同楼板厚度、配筋率等工况下梁的受力性能变化及影响程度。试验工况的参数设置见表 1。

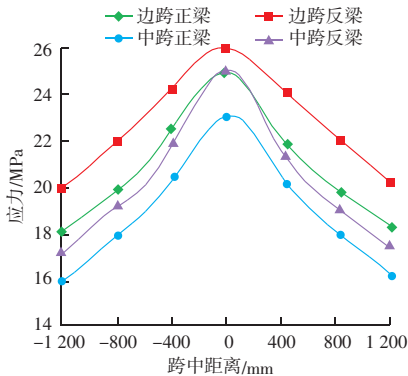
表 1 试验工况参数设置

Table 1 Parameter settings for experimental conditions

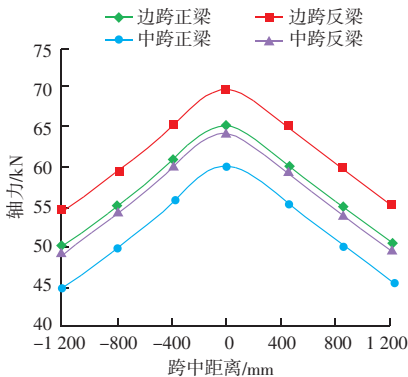
工况编号	混凝土强度 /MPa	纵筋配筋率 /%	楼板厚度 /mm	箍筋间距 /mm	荷载步长 /kN
M1	C30	1.2	120	150	20
M2	C30	1.2	150	150	20
M3	C30	1.2	180	150	20
M4	C30	1.2	120	100	20
M5	C30	1.6	120	100	20
M6	C30	2.0	120	100	20

图 2 为竖向荷载下，梁的空间位置和楼板约束对钢筋混凝土框架梁的应力和轴力分布。在相同跨中距离下，边跨反梁的应力、轴力普遍高于其他三种梁。中跨正梁的应力、轴力相对较低，说明中跨位置在结构体系中受力相对均匀，稳定性较好。当跨中距离为 0 时，边跨反梁的应力和轴力分别为 25.89 MPa 和 70.56 kN，比其他三种梁结构分别提高了 8.28% 和 10.51%。原因可能是边跨梁一端与边柱相连，边界条件不同，受力比中跨梁复杂；反梁构造和受力方向与正梁不同，在承担荷载时会受到额外的扭转和反力作用，所以边跨反梁应力和轴力较大。而中跨正梁在均匀的结构布置和受力状态下，

受力相对简单且均匀，表现出较低的应力和轴力。



(a) 梁的应力分布



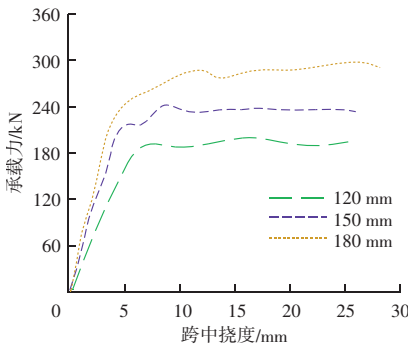
(b) 梁的轴力分布

图2 钢筋混凝土框架梁的应力和轴力分布
Fig. 2 Stress and axial force distribution in reinforced concrete frame beams

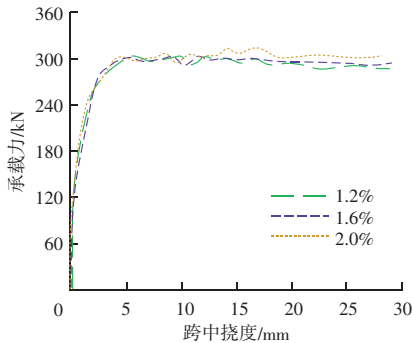
2.2 钢筋混凝土框架梁受力参数敏感性

图3为不同楼板厚度和配筋率对钢筋混凝土框架梁受力性能的影响。

随着楼板厚度的增加，梁的承载力显著提高，同时跨中挠度减小。具体而言，当跨中挠度为10 mm时，120 mm厚楼板对应的承载力约为120 kN，而180 mm厚楼板对应的承载力约为300 kN。说明楼板厚度的增加对空间效应有显著影响，能够提高框架



(a) 楼板厚度对框架梁受力性能的影响



(b) 配筋率对框架梁受力性能的影响

图3 不同楼板厚度和配筋率对框架梁受力性能的影响
Fig. 3 Effect of different floor thicknesses and reinforcement rates on the force performance of frame beams

梁的刚度，从而提高梁的承载能力和减少挠度。随着配筋率的变化，框架梁的荷载－跨中挠度曲线变化幅度很小，几乎保持一致。这可能是因为较低的配筋率下，梁已经达到了其潜在的承载能力，进一步增加配筋率并没有充分利用钢筋的强度，或者梁的破坏模式不是由配筋率控制的。此外，配筋率的增加可能会提高梁的延性，但这在荷载－挠度曲线上可能不会立即显现，而是在梁的破坏阶段更为明显。总的来说，楼板厚度对框架梁的承载力和挠度有显著影响，而配筋率在一定范围内对梁的受力性能影响较小，表明增加楼板厚度是一种有效提高框架梁承载能力和减少变形的方

2.3 变形性能分析

表2展示了在不同楼板厚度、配筋率和箍筋间距条件下，钢筋混凝土框架梁的变形情况。

表2 不同工况下钢筋混凝土框架梁变形性能对比							
Table 2 Comparison of deformation performance of reinforced concrete frame beams under different working conditions							
工况编号	楼板厚度/mm	配筋率/%	箍筋间距/mm	最大挠度/mm	屈服位移/mm	极限位移/mm	屈服后延性比
M1	120	1.2	150	14.6	9.2	23.8	2.59
M2	150	1.2	150	11.3	8.6	21.5	2.50
M3	180	1.2	150	8.9	7.5	19.7	2.63
M4	120	1.2	100	13.8	8.7	22.9	2.63
M5	120	1.6	100	13.6	8.5	23.2	2.73
M6	120	2.0	100	13.5	8.3	23.6	2.84

随着楼板厚度的增加，梁的最大挠度明显减小，由14.6 mm降低至8.9 mm，屈服位移与极限位移同步降低，表明楼板厚度增强了梁的整体约束，提高了刚度，减小了挠度与塑性变形空间。同时，残余位移亦明显下降，说明更厚的楼板有利于抑制残余

建筑结构

变形,提升结构恢复能力。配筋率的增加对最大挠度影响不明显,但屈服后延性比有所提升,由 2.63 上升至 2.84,说明高配筋率可在一定程度上增强延性性能,但对初始刚度影响有限。因此,控制楼板厚度是提高框架梁刚度和变形控制性能的有效途径,而提高配筋率可改善延性与抗震韧性。

3 结论

为了提高钢筋混凝土框架结构的整体安全性,以某典型钢筋混凝土框架结构为研究对象,借助 YJK-EPDA 软件构建三维有限元模型,对剪压粘结破坏模式下钢筋混凝土框架梁受力性能的空间效应进行了分析,得到以下主要结论:

框架梁的空间结构和楼板厚度对其受力性能影响显著。边跨反梁由于约束差异,受力较大;而增加楼板厚度能显著提高梁的承载力和刚度,减小挠度。相比之下,配筋率对受力性能影响较小。因此,设计时应重点考虑楼板厚度和空间约束条件,以提升梁的抗剪能力和整体稳定性。

参 考 文 献

- [1] 申彦利,邢晨鹏. 基于非弹性位移响应谱值的框架结构易损性分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2016, 33 (2): 1-4.
- [2] 江小兵. 非均匀锈蚀对建筑钢混组合梁承载力退化的影响分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (3): 164-168.
- [3] 曾敏茹,鲁亮,夏婉秋,等. 梁端弹簧型自复位钢筋混凝土框架基于性能的抗震设计方法 [J]. 工程力学, 2024, 41 (1): 266-274.
- [4] SHAN S, LI S. Progressive collapse mechanisms of post-tensioned reinforced concrete frames considering effect of infill walls [J].

Engineering Structures, 2022, 250 (1): 1-16.

- [5] 郭隆基,何满潮,瞿定军,等. 基于 MIDAS Gen 的多层钢筋混凝土框架结构倒塌数值模拟分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (14): 139-148.
- [6] 丁发兴,朱江,罗靓,等. 钢-混凝土组合空间框架拟动力有限元分析 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39 (5): 18-26.
- [7] 赖凤晨. 钢筋混凝土框架结构设计探讨 [J]. 建材与装饰, 2024, 20 (31): 46-48.
- [8] 丁雪,董斌,方婷,等. 钢筋桁架楼承板在钢筋混凝土框架结构中的应用 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (8): 1007-1010.
- [9] 吴小婷. 高层钢筋混凝土框架结构楼板裂缝成因研究 [J]. 广东建材, 2024, 40 (5): 49-51.
- [10] 刘胜利,刘丹彤,丁立. 屈服支撑钢筋混凝土框架抗震性能试验研究 [J]. 砖瓦, 2024 (9): 67-69.
- [11] 黄钰. 不同轴力下钢筋混凝土框架柱的力学性能分析 [J]. 江西建材, 2024 (3): 40-42.
- [12] 白玉丽. 清水钢筋混凝土框架筒仓结构施工技术研究 [J]. 建筑机械, 2024 (12): 137-142.
- [13] 刀勇. 建筑工程钢筋混凝土框架结构施工技术研究 [J]. 建材发展导向, 2024, 22 (11): 71-74.
- [14] 谢军,梁金晓,赵国帆,等. 基于天牛须算法的钢筋混凝土框架结构优化 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2024, 42 (1): 22-27.
- [15] HUANG J, YU D, CAO Y, et al. Flexural performance of reinforced concrete beams subjected to accelerated non-uniform corrosion [J]. Materials and Structures, 2024, 57 (1): 1-19.
- [16] 马福栋,邓明科,杨勇. 超高性能混凝土装配整体式框架梁柱节点抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2021, 38 (10): 90-102.
- [17] QIAN K, GENG S Y, LIANG S L, et al. Effects of loading regimes on the structural behavior of RC beam-column sub-assemblages against disproportionate collapse [J]. Engineering Structures, 2022, 251 (1): 1-18.