

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.10.019

结构整体效应对 RC 框架结构 屈服机制的影响(一):数值分析

王素裹

(福州大学 土木工程学院,福州 350108)

摘要:建立 3 个钢筋混凝土空间框架模型分别代表实际的带楼板空间框架结构、设计采用的纯杆计算模型和考虑部分板筋参与作用的设想计算模型,采用 ABAQUS 进行仿真模拟,通过考察各模型在侧向荷载下的屈服机制、塑性铰开展情况、梁柱钢筋应力对比和板筋应力情况,研究现浇楼板和结构整体效应对框架梁端抗弯能力产生的影响。研究表明,现浇楼板的存在使得实际带楼板框架结构与设计采用的纯杆空框架模型屈服机制不一致;梁端抗弯能力发生超强的原因不仅在于现浇楼板板筋的参与作用,还在于整浇后的结构整体作用;采用有效翼缘宽度考虑板筋作用时,取为 6 倍板厚不能全面概括实际框架的受力情况,应考虑结构整体效应、侧移等因素的影响。

关键词:钢筋混凝土框架结构;现浇楼板;整体效应;屈服机制;超强作用

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)10-126-07

Research on the influence of structure integral performance to the RC frame structure failure mode(I): Numerical analysis

WANG Suguo

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Three models of 3D cast-in-place RC frame structures are simulated in ABAQUS. In the three models, one represents the actual RC frame structure with monolithic slab, one represents the open frame structure used in structural design currently, which means truss structure at the stage of calculating internal forces of frame beams and columns, and the third one represents the open frame structure which takes into account some slab reinforcement in the rectangle section of frame beam to consider the slab participation in the flexural capacity of frame beam. By investigating the failure mode of these three models, the development of plastic hinges, the reinforcement stress of beam, column and slab in the models, the influence of monolithic slab to the bending resistance of beam end is studied. It shows that the existence of slab makes the failure mode of actual RC frame structure different from the design criteria of strong column weak beam. It also indicates that the slab participation in the bending resistance of beam end is not only expressed in the slab reinforcement but also in the structure integral performance. Besides, when using the effective flange width to consider the slab reinforcement participation, the structure integral performance, lateral displacement and other relevant factors should be taken into account.

Key words: reinforced concrete frame structure; monolithic slab; integral performance; failure mode; overstrength

收稿日期:2013-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208114);福州大学引进人才科研启动基金资助项目(XCR-1046);福州大学科技发展基金资助项目(2012-XQ-34)

作者简介:王素裹(1984-),女,博士,主要从事钢筋混凝土结构抗震性能研究,(E-mail)wangsuguo@foxmail.com。

目前我国城镇民用住房的结构形式中,钢筋混凝土(RC)框架结构形式仍占多数,然而,在 2008 年发生的汶川地震中,许多根据 GB50011—2001 版的抗震设计规范^[1]设计得到的框架结构呈现“强梁弱柱”的破坏形态^[2-3]。通过震害调查及数值分析表明^[4-8],实际框架结构中现浇楼板的存在使得负弯矩作用的梁端不易出现塑性铰,结构的实际破坏形态呈现“强梁弱柱”状态。

关于现浇楼板对框架梁端抗弯能力的提高作用,目前的研究主要集中在现浇楼板内与梁肋平行的板筋上^[9-16],而未对现浇楼板与框架梁柱整浇后的整体空间效应开展研究。对于板筋的参与作用,通过采用“有效翼缘宽度 b_f ”的形式进行考虑较为简便、更方便应用于设计,但目前 b_f 的取值方法仍处于研究阶段,尚未统一确定,在现有研究中,常见取 6 倍板厚范围内的板筋参与作用。文中除了考察与梁肋平行的板筋对框架梁端抗负弯矩能力产生的有利作用外,还考察现浇楼板的整体空间作用是否也对其产生有利影响;并考察有效翼缘宽度 b_f 为 6 倍板厚是否全面。通过非线性有限元软件 ABAQUS 建立 3 个三维 RC 空间框架模型,进行非线性有限元数值分析,对比分析 3 个模型的结构变形、屈服机制、塑性铰开展状况及构件应力情况,初步明确现浇楼板对梁端抗负弯矩能力的有利影响不仅包括与梁肋平行的板筋参与作用,还包括与梁柱构件整浇后结构整体作用,为之后开展试验研究提供参考。

1 带楼板与不带楼板 RC 空间框架有限元模拟

1.1 有限元模拟方法算例验证

为确定 ABAQUS 中的钢筋混凝土模拟方法的准确性,采用 McNeice 板^[17]进行算例验证。McNeice 板的几何尺寸及约束信息如图 1 所示,板内配筋为单层双向钢筋、布置在离板面 0.75 倍厚度处,每向楼板配筋率均为 0.85%。混凝土的弹性模量为 28.6 GPa,泊松比为 0.15,单轴受压应力情况如下:屈服应力为 20.68 MPa、破坏应力为 37.92 MPa,破坏时对应的塑性应变为 1.5×10^{-3} ;钢筋弹性模量为 200 GPa,屈服应力为 345 MPa。采用与文献^[5-6]相同的模拟方法进行 McNeice 板模拟,得到有限元与试验值的对比如图 2 所示,可知,采用文中的模拟方法得到的模拟结果与试验结果吻合良好,因此采用该模拟方法建立 RC 空间框架模型进行弹塑性分析能够较真实反映结构的实际

受力情况,分析结果可信。

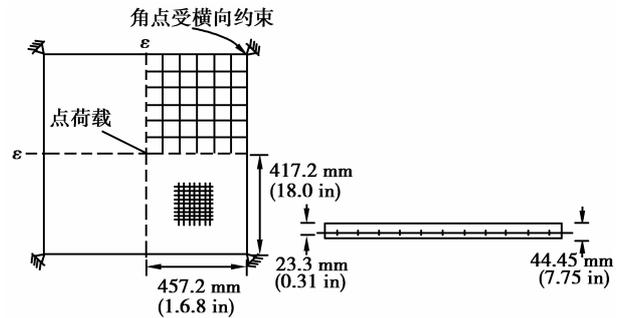


图 1 McNeice 板

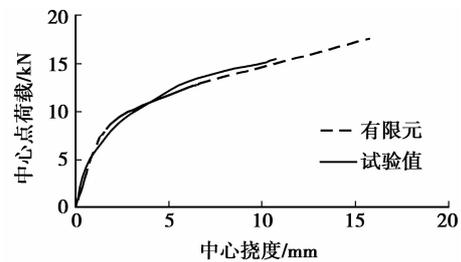


图 2 中心荷载-挠度曲线

1.2 RC 空间框架模型模拟

为考察现浇楼板对框架梁端抗弯能力的加强作用,设计 3 个 RC 空间框架结构模型:模型 1 为按现行结构设计方法计算构件配筋的实际带现浇楼板 RC 空间框架;模型 2 为同样设计条件下、按现行结构设计方法的纯杆模型计算配筋得到的不带楼板 RC 空框架结构,楼板仅在内力计算时作为单、双向板传递荷载作用;模型 3 的 RC 空框架结构也采用纯杆模型进行设计,但考虑了楼板中 6 倍板厚 ($6h_f$) 范围内、与梁肋平行的板筋参与作用,考虑方法为将该范围内的板筋等效到框架梁端矩形截面内。

3 个模型均为 2 层、3×3 跨,且符合实际设计要求,模型对应的轴网布置如图 3 所示,侧向荷载按倒三角形荷载施加, $F_1 : F_2 = 1 : 2$,施加方向图 4 所示。取框架梁跨长 4.0 m,层高 3.0 m,截面尺寸 200 mm×400 mm;板厚 100 mm;柱截面尺寸为 300 mm×300 mm。设计荷载按现行荷载规范^[18]选取,楼面均布永久荷载 3.5 kN/m² 和均布活荷载 2.0 kN/m²;墙载 3.6 kN/m;2 层柱顶施加 905 kN 的轴压力,使得模型底层中柱轴压比为 0.9。各模型配筋情况如下:模型 1 板底配筋为双向 8@150、板面配 8@200 钢筋。模型 1、2 的框架梁矩形截面内底部、顶部纵筋分别采用 2 Φ 14;模型 3 将楼板 $6h_f$ 范围内与梁肋平行的板筋等效到框架梁端的矩

形截面内,底部、顶部纵筋分别为 $4\Phi 14$ 和 $2\Phi 14$ 。3 个模型的柱内配筋均为 $4\Phi 16$,梁柱非加密区箍筋均为 $\Phi 8@200$,加密区箍筋为 $\Phi 8@100$ 。

在 ABAQUS 中,为清楚考察框架结构中混凝土和钢筋在受力过程中的应力应变变化情况,将混凝土和钢筋作为不同单元来处理,即采用分离式的有限元模型进行模拟,模拟过程中假定钢筋和混凝土之间粘结良好、不出现相对滑移,混凝土与钢筋之间通过 EMBEDDED 进行连接;混凝土采用 C40,通过八节点减缩积分实体单元 C3D8R 进行模拟,本构采用 ABAQUS 中的采用损伤塑性模型进行描述;受力筋采用 HRB335、箍筋采用 HPB300,均通过 ABAQUS 中的三维桁架线性单元 T3D2 进行模拟,本构采用双斜线模型。混凝土和钢筋的本构参数取值均根据现行《混凝土结构设计规范》^[19] 选取。根据模型的对称性,采用模型的 1/2 进行模拟,详细模拟方法见文献[5-6]。

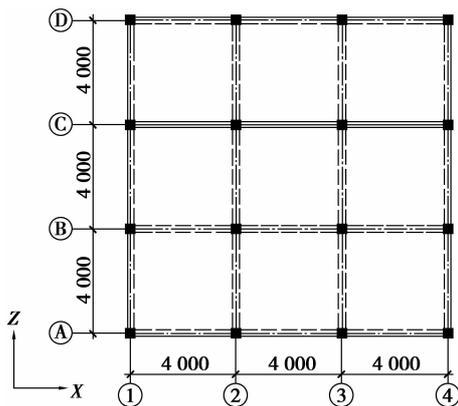


图 3 轴网布置图

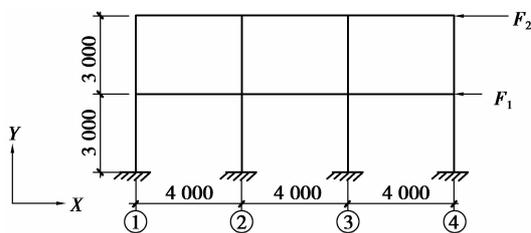


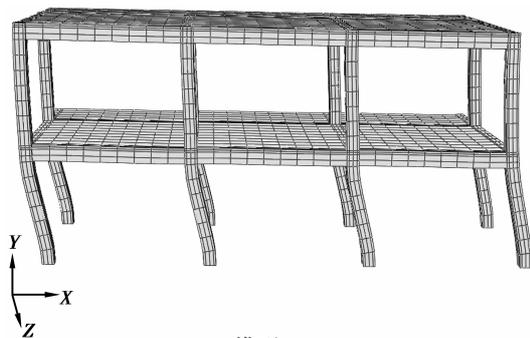
图 4 侧向荷载施加示意图

2 模拟结果分析

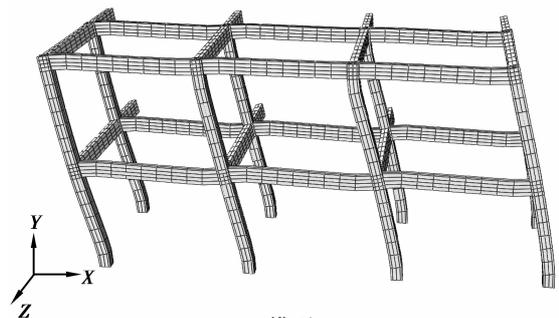
2.1 结构变形及屈服机制

给出 3 个模型达到 1/50 首层层间位移角时的模型变形情况(将变形放大 5 倍以便观察)如图 5 所示。由图 5 可直观看出,模型 1 的结构屈服形态与

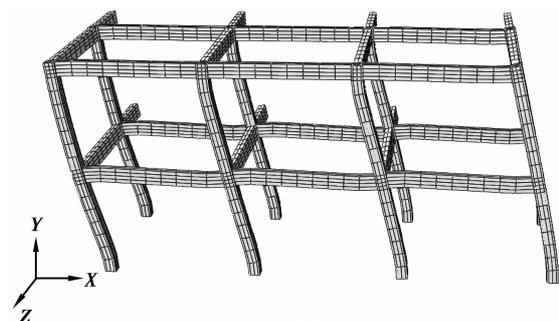
图 6(a)的柱铰机制一致,底层框架柱顶位置出现塑性铰、二层框架发生整体位移;而属于空框架的模型 2 和模型 3 表现出的结构屈服形态则与图 6(b)的梁铰机制一致,底层框架的梁端产生了塑性铰,二层框架没有发生整体位移现象,模型 2 与模型 3 的屈服形态基本类似。由此可见,在同等设计条件下,带现浇楼板的 RC 空间框架结构比空框架结构更难实现“强柱弱梁”;目前设计过程中采用纯杆模型计算结构内力,没有考虑楼板对框架梁端抗弯的有利影响,因而出现了震害中发现的“强梁弱柱”实际破坏形态与“强柱弱梁”设计准则之间的矛盾。因此,现浇楼板对结构的屈服机制影响不容忽视,当采用纯杆模型进行结构内力计算时应通过一定的方法考虑楼板作用,才能真实反映带楼板 RC 框架结构的受力情况。



(a) 模型1



(b) 模型2



(c) 模型3

图 5 结构变形图

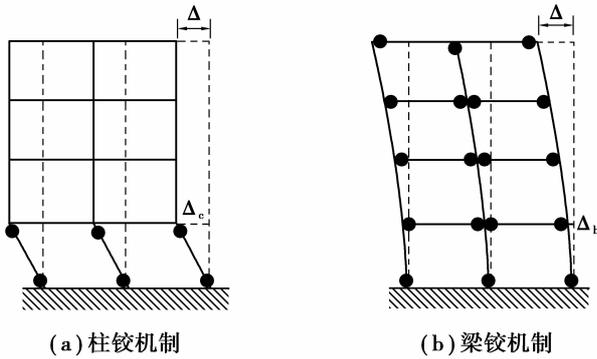


图 6 框架结构屈服机制示意图

2.2 塑性铰开展情况

当结构超过 $1/50$ 层间位移角(首层层间侧移为 60 mm)时,结构裂缝进一步开展。给出模型达到约为 $1/30$ 层间位移角(首层层间侧移为 102 mm)时的混凝土受拉损伤情况如图 7 所示,其中同为空框架的模型 3 与模型 2 的损伤情况类似,受拉损伤值越大说明结构受拉开裂越明显。从图 7(a)可以看出,与框架梁相连的楼板也有损伤,且越靠近框架梁梁端位置的楼板处损伤值越大,表明靠近框架梁端的楼板参与作用比远离框架梁端的楼板大。

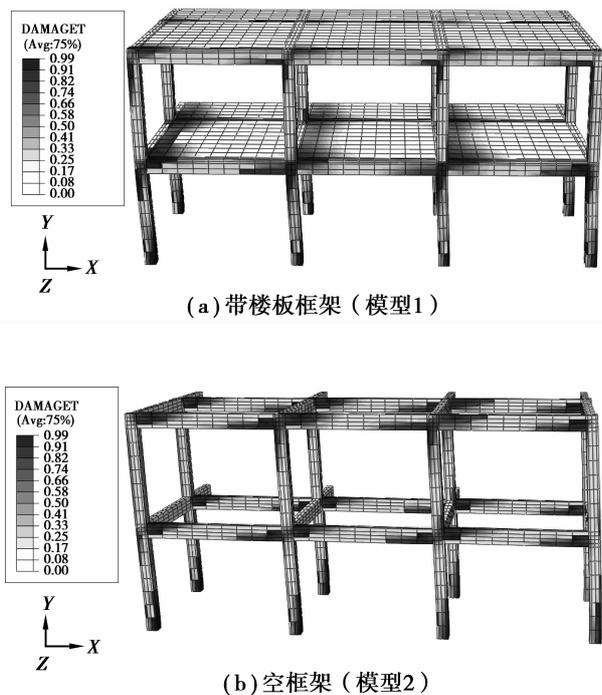


图 7 混凝土受拉损伤分布图

给出 3 个模型达到 $1/50$ 层间位移角时首层框架梁端负弯矩处受拉损伤值:模型 1 在图 1 中 A 榀平面框架①—②跨处为 0.975 、②—③跨和③—④跨为 0.888 ;模型 2 和模型 3 在三跨均为 0.990 。结合 3 个模型的受拉损伤情况,比较三者的受拉损伤值可知,现浇楼板的存在使得模型一的框架梁端受拉损伤值减小;而同为空框架的模型 2 和模型 3 的框架梁端受拉损伤值一样,由此可见,即使考虑了 6 倍板厚范围内的板筋参与作用,依然未能全面地考虑现浇楼板对框架梁端抗弯能力的加强作用,楼板与梁柱构件整浇后的结构整体效应亦对框架梁端的抗弯能力起了一定的加强作用。

给出 3 个模型在 A 榀框架和 B 榀框架①—②跨的负弯矩作用处的梁端和柱顶钢筋应力对比如图 8 和图 9 所示,图中侧移为 0 时显示不等于零的梁柱钢筋应力值由竖向荷载(包括构件自重和设计荷载)产生。由图可知,同一侧移下,带楼板的模型 1 中梁柱应力差距比空框架的模型 2、模型 3 小,当侧移超过 60 mm 时,模型 1 的梁钢筋应力减小,说明在超过 $1/50$ 层间位移角后结构的内力重分布明显,塑性铰先在柱顶产生;而模型 2、3 无此情况发生,且柱顶应力始终小于梁端应力,因此在模型 2、3 中塑性铰先在梁端产生。由于现浇楼板的存在,带楼板框架结构与空框架之间的屈服机制出现了很大的差别。

另外,从图 8、图 9 可知,在达到 60 mm 首层层间侧移之前模型 3 与模型 1 的梁端应力几乎完全相同;当侧移超过 60 mm 后,模型 1 的梁端钢筋应力减小,而由于没有楼板的存在,模型 2 的梁端应力未减小且缓慢增大。模型 2 与模型 3 的梁端应力相差不大,由于模型 3 梁内配筋考虑了 $6h_f$ 内的板筋参与作用,因此模型 2 的梁端应力比模型 3 稍早进入屈服阶段。相比于梁端钢筋应力类似的情况,模型 2 与模型 3 的柱顶应力情况相差较大,模型 2 中的柱顶应力始终小于模型 3,且在首层层间侧移为 102 mm 时差别更大,由此可见,模型 2 的柱端更不容易出现塑性铰。通过考察模型 2 与模型 3 之间应力情况可知,模型 2 比模型 1 和模型 3 更易出现“强柱弱梁”。

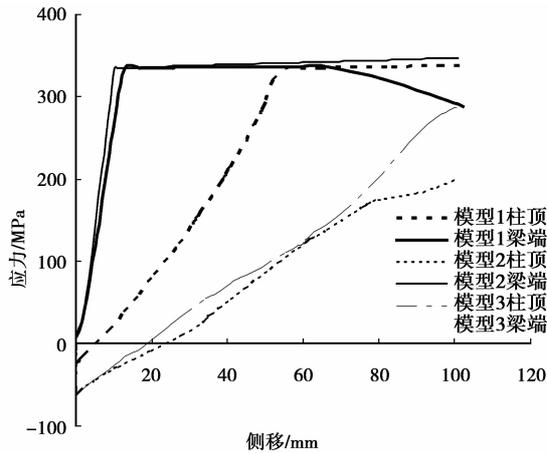


图 8 A 榀第一跨负弯矩处梁柱钢筋应力

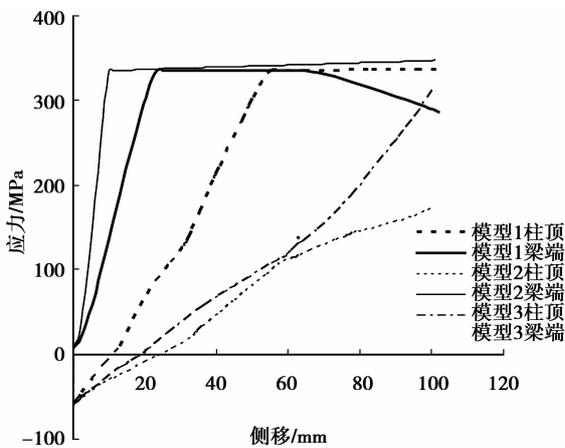


图 9 B 榀第一跨负弯矩处梁柱钢筋应力

2.3 板筋应力情况

给出模型 1 中现浇楼板内、与梁肋平行的板筋在不同首层层间侧移(5、20、40、60、102 mm)下沿着楼板宽度方向的应力分布情况如图 10~图 13 所示。从图可知,无论板面还是板底钢筋,其应力都随着侧移的增加而增大,并且从楼板宽度的分布上可看出板筋参与的数量随着侧移的增加也有所增加,因此有效翼缘宽度取值非某一固定值,而是会随着侧移值的增大而增大。当板面钢筋和板底钢筋在楼板宽度达到 1 000 mm 后应力随侧移增加而增加的幅度减小、曲线变平缓。由此可见,对于模型一的结构情况,在超过 60 mm 的侧移后,能参与梁端抗弯的有效翼缘宽度可取为 1 000 mm,大于 6 倍板厚 600 mm。因此,固定采用 $6h_f$ 进行估算现浇楼板的参与作用不完全精确。

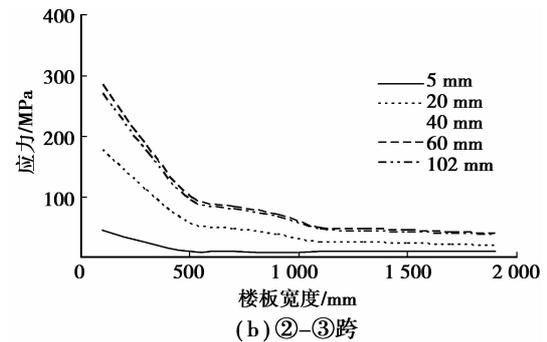
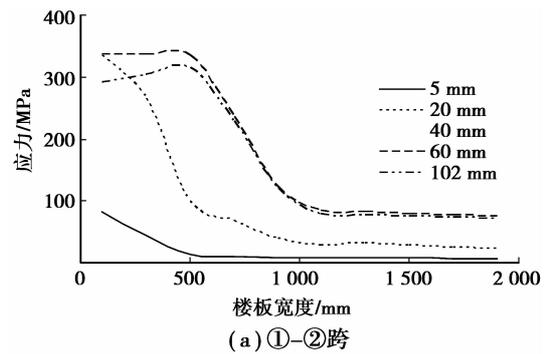


图 10 A 榀框架板面钢筋沿楼板宽度方向的应力分布

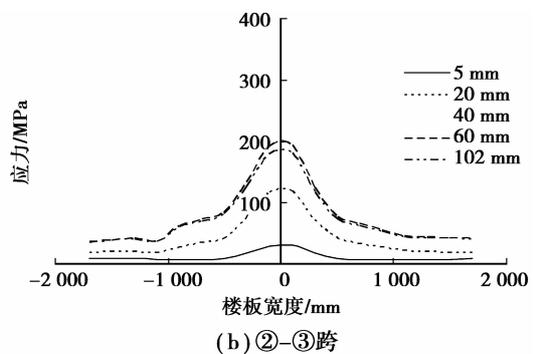
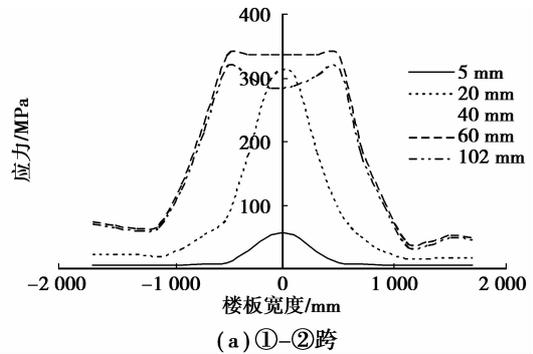


图 11 B 榀框架板面钢筋沿楼板宽度方向的应力分布

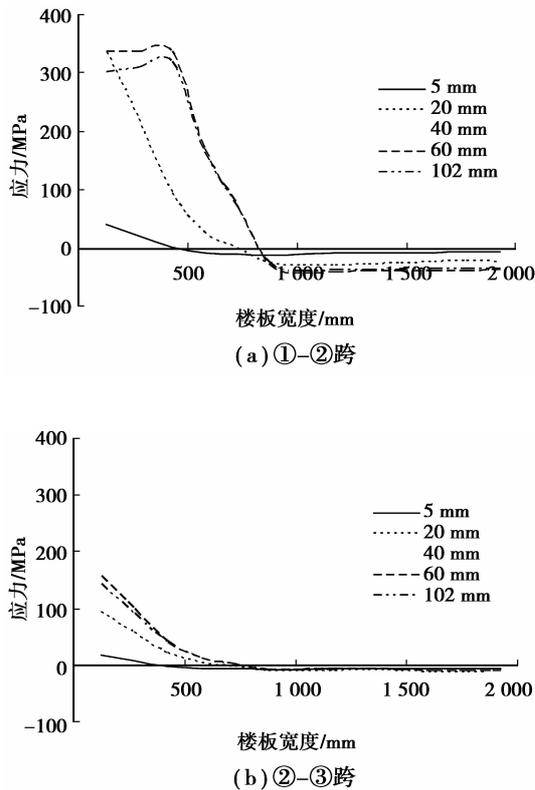


图 12 A 榀框架板底钢筋沿楼板宽度方向的应力分布

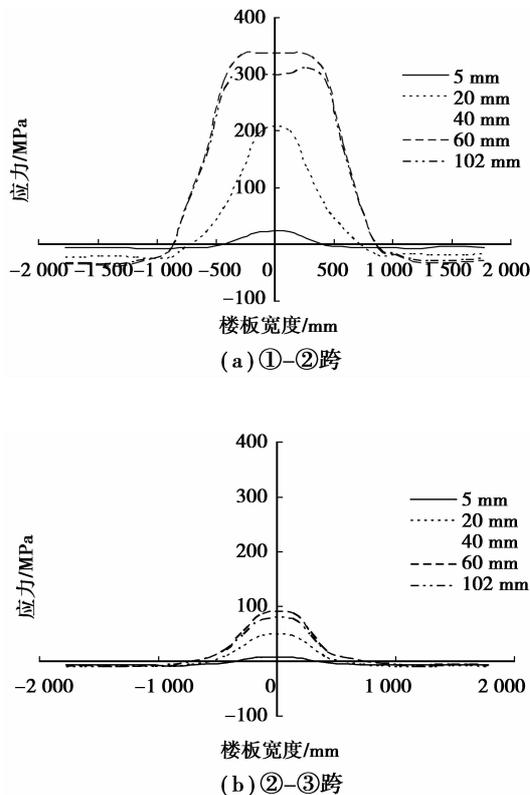


图 13 B 榀框架板底钢筋沿楼板宽度方向的应力分布

2.4 结果分析

通过对上述 3 个三维框架结构模型的仿真模拟结果在结构变形及屈服机制、塑性铰开展情况方面的比较和模型 1 在板筋应力情况上的分析表明,模型 1 代表的实际框架结构表现为“强梁弱柱”的屈服机制,较难出现梁端塑性铰,实现耗能目的;模型 2 代表的现有设计方法所采用的框架设计模型表现为“强柱弱梁”的屈服机制,较易出现梁端塑性铰,通过两者的比较可知,实际框架结构与现有设计方法采用的空框架力学模型在破坏形态上存在矛盾,在现实中表现为实际震害的“强梁弱柱”与“强柱弱梁”设计准则之间的矛盾。模型 3 代表的模型,通过 6 倍板厚的有效翼缘形式考虑部分板筋参与作用,通过与模型 1 的模拟结果比较表明,模型 3 并未能准确表达实际框架结构的受力情况,6 倍板厚亦尚未能完全概括板筋框架梁端抗弯能力的参与作用。

由此可见,楼板的存在和结构整体效应对 RC 框架结构的屈服机制存在很大的影响。因此,可结合该有限元数值仿真模拟情况开展试验研究,进一步明确现浇楼板与框架梁柱整浇后的结构整体空间效应对 RC 框架结构屈服机制影响规律。

3 结 论

通过建立 3 个具有代表性的 RC 空间框架模型,进行非线性有限元仿真模拟,考察了现浇楼板对结构屈服机制和塑性铰在梁柱构件中出现顺序的影响,根据模拟数据和理论分析情况可得以下结论:

1)带楼板 RC 空间框架结构的实际屈服机制与设计时采用纯杆模型计算得到的空框架模型不同,实际结构屈服机制呈现柱铰机制,而空框架呈现梁铰机制。

2)考虑了 6 倍板厚范围内的板筋参与作用得到的设计模型未能全面概括带楼板结构的实际破坏特征。整浇楼板对梁端抗弯的贡献不止在于与梁肋平行的板筋参与作用,还在于与梁柱构件整浇后结构整体空间效应。由此可见,有必要开展试验研究,进一步明确结构整体效应对 RC 框架结构屈服机制影响规律,从而指导实际框架结构设计,更好地实现“强柱弱梁”破坏形态。

3)由于随着侧移的增加,参与梁端抗弯的板筋随之增加,因此考虑楼板参与梁端抗弯作用的有效翼缘宽度会随侧移值的增大而增大,若将值取为 6 倍板厚等某一固定值不甚全面,建议结合结构整体效应、侧移等因素综合考虑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 20-25.
WANG Yayong. Lessons learnt from building damages in the Wenchuan earthquake——seismic concept design of buildings[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 20-25.
- [3] 苏幼坡, 张玉敏, 王绍杰, 等. 从汶川地震看提高建筑结构抗倒塌能力的必要性和可行性[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 25-32.
SU Youpo, ZHANG Yumin, WANG Shaojie, et al. The necessity and feasibility of enhancing seismic design of structures based on the Wenchuan earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 25-32.
- [4] 杨红, 朱振华, 白绍良. 双向地震作用下我国“强柱弱梁”措施的有效性评估[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 58-64.
YANG Hong, ZHU Zhenhua, BAI Shaoliang. An evaluation of the effectiveness of the Chinese strong column weak beam measure under bi-directional horizontal seismic excitations [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 58-64.
- [5] 王素裹, 韩小雷, 季静. 现浇楼板对 RC 框架结构破坏形式的影响分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(1): 66-71.
WANG Suguo, HAN Xiaolei, JI Jing. The effect of slabs on the failure mode of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(1): 66-71.
- [6] 王素裹, 韩小雷, 季静, 等. 轴压比对 RC 框架实现“强柱弱梁”的影响研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(3): 96-101.
WANG Suguo, HAN Xiaolei, JI Jing, et al. The influence of axial compression ratios on the strong-column and weak-beam actualization of RC frames[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 96-101.
- [7] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 102-113.
YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei. Study on weak beam -strong column design method of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 102-113.
- [8] 陈明政, 黄音, 陈曦, 等. 非强柱弱梁钢筋混凝土框架试验及有限元分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(6): 109-113.
CHEN Mingzhen, HUANG Yin, CHEN Xi, et al. Test and finite analysis to non-strong column and weak beam concrete frames [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(6): 109-113.
- [9] DURRANI A J, WIGHT J K. Earthquake resistance of reinforced concrete interior connections including a floor slab[J]. Structural Journal, 1987, 84(5): 400-406.
- [10] FRENCH C, BOROOJERDI A. Contribution of RC floor slabs in resisting lateral loads [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(1): 1-18.
- [11] SHAHROOZ B, MOEHLE J. Seismic response and design of setback buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(5): 1423-1439.
- [12] QI X, PANTAZOPOULOU S. Response of RC frames under lateral loads [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(4): 1167-1188.
- [13] 吴勇, 雷汲川, 杨红, 等. 板筋参与梁端负弯矩承载力问题的探讨[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(3): 33-37.
WU Yong, LEI Jichuan, YANG Hong, et al. Discussion on negative flexural strength of beams including slabs [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(3): 33-37.
- [14] PANTAZOPOULOU S J, FRENCH C W. Slab participation in practical earthquake design of reinforced concrete frame[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 479-489.
- [15] CANBOLAT B B, WIGHT J K. Experimental investigation on seismic behavior of eccentric reinforced concrete beam-column-slab connections[J]. Structural Journal, 2008, 105(2): 154-162.
- [16] 杨小卫, 王亚勇. 考虑板筋参与梁端承载力贡献的设计方法及抗震性能研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(7): 11-16.
YANG Xiaowei, WANG Yayong. Study on design method and seismic performance in consideration of the contribution of rebar in slabs to the bearing capacity of beams [J]. Building Science, 2011, 27(7): 11-16.
- [17] McNeice G M. Elastic-Plastic bending analysis of plates and slabs by the finite element method [D]. London: London University, 1967.
- [18] 中华人民共和国建设部. GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.