

楼板参与作用对 RC 框架结构抗倒塌能力影响

左 琼, 白雪霜, 王亚勇

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

[摘要] 通过 Pushover 方法, 评估了楼板参与作用对 RC 框架结构整体承载力和变形能力的影响。结果表明, 由于楼板增加了梁柱线刚度比及梁的受压区面积, 这一抗弯刚度贡献提高了结构的超强系数和延性系数。“超配”的板筋虽有利于提高结构的超强系数, 但降低了结构的变形能力。因此, 在进行框架梁设计时, 应恰当地考虑楼板的刚度贡献及减小有效翼缘宽度内板筋的作用, 以使结构获得更好的抗倒塌能力。

[关键词] 抗倒塌; 有效翼缘宽度; 梁柱线刚度比; RC 框架结构

中图分类号: TU312 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0037-04

Effects of floor slab on the collapse-resistance capacity of RC frame structures

Zuo Qiong, Bai Xueshuang, Wang Yayong

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Pushover analysis was performed to investigate the effects of floor slab on the integrity strength and deformation capacity of RC frame structures. The results show that, owing to the contribution of floor slab to the beam bending stiffness including the augment of line stiffness ratio of beam and column and the flexural pressure areas of beam, over strength factor and ductility ratio of the structure are improved. Despite the fact that additional reinforcement in slab appreciably advances over strength factor of the structure, ductility of the structure gets worse. Consequently, while designing frame beam, the amplification of beam bending stiffness due to slab should be appropriately taken into account and the additional contribution of the distributed reinforcement along the beam in the effective width of slab should be reduced, so that the structure can attain better collapse-resistance capacity.

Keywords: collapse-resistance; effective slab width; line stiffness ratio of beam and column; RC frame structure

0 引言

历次震害表明, 建筑物在地震作用下的倒塌是造成地震灾害的主要原因之一。因此, 如何避免结构在极端灾害下的倒塌是研究者和工程师必须面临的挑战。由于目前抗震规范均基于承载力设计, 使得结构遭遇罕遇地震时按弹性地震力设计的经济代价太高, 通常采用强度折减系数 R (或结构系数 C) 将弹性地震作用折减, 并利用构件的塑性变形来耗散地震能量以达到“大震不倒”的目标。对于设计合理的结构, 其实际抗侧承载力要高于小震弹性地震力, 即存在超强系数 Ω 。因而, 一个优秀的结构体系设计, 就是在 R 已规定的情况下, 使结构体系尽可能有效地获得更大的超强系数和变形耗能能力。

作为结构的重要组成部分, 现浇楼板一般与框架梁结合良好, 共同工作能力强, 可显著提高框架梁的抗弯刚度和承载力。即在正弯矩区, 楼板与框架梁形成 T 形梁或 Γ 形梁, 有效增加了框架梁的受压区宽度; 而在负弯矩区, 与梁平行的板内分布筋相当于增加了梁顶配筋, 提高了梁端负弯矩承载力。然而, 现浇楼板与梁的这种共同作用可能导致框架柱端出现“塑性铰”, 以致对结构的抗倒塌能力产生影响。已有多位学者在震后调研中发现^[1-4], 设计时未考

虑楼板对梁端截面抗弯承载力的提高作用是汶川地震中 RC 框架结构出现“强梁弱柱”型破坏的一个主要因素。鉴于此, 我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[5] (简称《抗规》) 提高了柱端弯矩增大系数。下面从结构整体承载力和变形能力两方面对楼板的参与作用进行评定, 采用 Pushover 方法识别结构的倒塌模式, 以确定其对结构抗侧向倒塌能力的影响。

1 楼板有效翼缘宽度

楼板有效翼缘宽度是指将楼板所提供的有效抗弯能力折算成一定范围内楼板完全参与受弯 (即考虑达到屈服) 的折算宽度。其实际参与程度主要取决于地震作用下结构非线性变形程度、直交梁的刚度和强度以及参与受力板筋的锚固程度和垂直于梁的横向钢筋的设置情况等^[6]。对于楼板有效翼缘宽度, 各国规范的相关规定如下:

美国规范 ACI 318—08^[7]: 1) 梁两边都有板时, 每侧有效翼缘宽不超过 8 倍板厚和梁间净距的一半, 且不超过梁跨度的 1/4; 2) 梁只在单侧有板时, 有效翼缘宽不超过 1/12 的梁跨度、6 倍板厚和梁间

作者简介: 左琼, 博士研究生, Email: qingzuo@gmail.com。

净距的一半。规范同时规定应该将计算所需的部分负弯矩受拉钢筋分布在有效翼缘宽度或 1/10 梁跨范围内。

新西兰规范 NZS 3101^[8]: 1) 梁两边都有板时, 有效翼缘宽度不超过 8 倍较小板厚和梁的高度, 且不超过梁间净距的 $h_{b1} / (h_{b1} + h_{b2})$ 倍; 2) 梁只在单侧有板时, 有效翼缘宽不超过 1/8 的梁跨度、8 倍板厚和梁高以及梁间净距的 $h_{b1} / (h_{b1} + h_{b2})$ 倍。这里 h_{b1} 为所考虑梁的高度 h_{b2} 为邻近梁的高度。当符合规范相应构造要求时, 每侧有效翼缘宽度内受力钢筋可分担不超过 15% 的梁端计算所需负弯矩。

加拿大规范 CSA^[9]: 1) 当梁两边都有板时, 如为简支梁, 每侧有效翼缘宽不超过相应梁跨的 1/5; 如为连续梁, 每侧有效翼缘宽不超过相应梁跨的 1/10; 且每侧有效翼缘宽不超过 12 倍板厚和梁间净距的一半; 2) 梁只在单侧有板时, 有效翼缘宽不超过 1/12 的梁跨度、6 倍板厚和梁间净距的一半。规范规定应将计算所需的部分负弯矩受拉钢筋分布在有效翼缘宽度或 1/20 梁跨范围内, 且这部分钢筋面积不应小于翼缘面积的 0.4%。

欧盟规范 Eurocode8^[10]: 1) 当梁与边柱相连时, 如无直交边梁, 取有效翼缘宽度为柱宽; 如有相近高度的直交梁, 取柱宽每侧加 2 倍板厚; 2) 当梁穿过中柱时, 在上述相应规定的梁每侧增加 2 倍板厚。这个宽度既是考虑参与梁端抗弯能力的板筋宽度, 也是允许一部分计算所需的梁负弯矩钢筋放在梁肋宽以外的现浇板内的宽度。

我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[11](简称《混规》) 5.2.4 条规定, 对现浇楼盖和装配整体式楼盖, 宜考虑楼板作为翼缘对梁刚度和承载力的影响, 梁受压区有效翼缘宽度为: 1) 梁两边都有板时, 每侧有效翼缘宽不超过 6 倍板厚和梁(肋)净距的一半, 且不超过梁计算跨度的 1/3。2) 梁只在单侧有板时, 有效翼缘宽不超过 1/6 的梁计算跨度、5 倍板厚和梁(肋)间净距的一半。

相比而言, 除我国《混规》外, 其他规范皆要求应将梁端计算出的部分负弯矩筋放在一定板宽范围内, 这意味着按实配确定梁端抗弯承载力时, 有效翼缘内既有原设计所需的受拉钢筋, 也有额外的板筋, 只有后者才属于“超配”部分, 客观上降低了板筋“超配”带来的影响; 但按我国《混规》确定梁端实配抗弯承载力时, 有效翼缘宽度内的板筋全部属于“超配”。

2 结构抗倒塌能力指标

在地震工程中, 结构整体超强系数定义为结构

实际的抗震能力与其设计地震力的比值^[12]:

$$\Omega = V_{\max} / V_d \quad (1)$$

式中: Ω 为超强系数; V_{\max} 是结构整体的峰值抗侧向承载力; V_d 是结构的设计地震力。

Ω 是工程上的“设计安全系数”, 可以从结构体系强度储备的角度反映结构的整体地震安全性。影响结构超强系数的因素有很多, 主要包括: 内力重分布的影响、材料实际强度与设计强度之间的差异、结构分析的保守简化、应变硬化、非结构构件的参与及混凝土的约束效应等。然而, 影响超强系数的因素并不都是有利的, 如框架梁的弯曲超强可能引起楼层的倒塌机制的变化和梁中的剪切破坏。

延性系数是衡量结构抗震性能的另一个重要指标, 具有良好的延性可以保证结构强度和刚度不会因为结构发生塑性变形而急剧下降。通常结构的整体延性系数可表示为:

$$\mu = \Delta_{\max} / \Delta_y \text{ 或 } \mu_T = \Delta_u / \Delta_y \quad (2)$$

式中: μ 、 μ_T 为结构整体延性系数; Δ_{\max} 为峰值抗侧向承载力对应的结构顶点位移; Δ_y 为结构的屈服位移; Δ_u 为结构基底剪力退化至 $0.8\Delta_{\max}$ 的顶点位移。这里采用等能量法计算结构的屈服位移, 各符号的具体意义参见图 1。

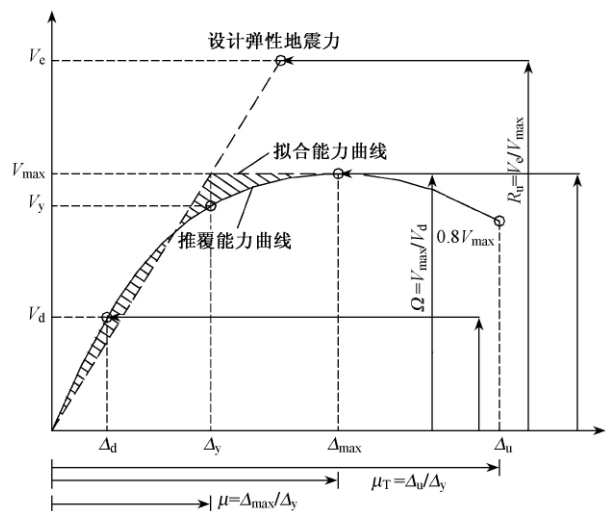


图 1 结构超强系数和延性系数示意图

由图 1 可知, 结构的延性 μ 使得结构具有耗散滞回能量的能力, 这也是通过“延性折减系数” R_μ 将设计弹性地震力 V_c 降低为屈服强度水平的原理^[12]。因此, 结构具有的位移延性水平越高, 结构所需的强度就越低, 反之同理。故一个好的延性抗震结构设计应在强度和延性之间取得适当的平衡。

3 数值模型

采用 PKPM 软件(2011 年 3 月版), 按照我国《抗规》设计了 4 幢钢筋混凝土框架结构(SF1 ~

SF4) 框架平面尺寸如图 2 所示, 底层层高为 3.9m, 其他层均为 3.3m, 楼板厚度为 120mm。各楼层恒、活荷载分别为 7.0kN/m²和 2.0kN/m², 梁、柱和楼板的混凝土强度等级均为 C30, 截面纵筋等级为 HRB335, 箍筋及楼板内钢筋均采用 HPB235 级钢筋。《抗震》设防烈度为 8 度, II 类场地, 地震分组为第一组。

由于结构平面规则, 在 MSC. MARC 平台上, 对图 2 所示的一榀平面框架进行设计、建模和分析, 楼层重量按(1.0 恒载 + 0.5 活载) 折算, 并参照 PKPM 程序荷载导出结果等效为梁上均布荷载和柱顶集中荷载。

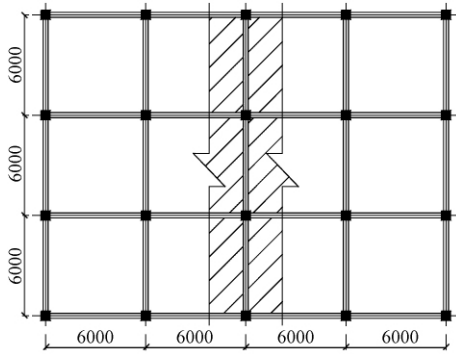


图 2 框架平面尺寸/mm

梁柱配筋面积如图 3 所示。框架梁三段配筋, 框架柱通长配筋; 图中标注的数字为梁或柱单侧配筋面积。楼板正弯矩配筋为中 8@200, 负弯矩配筋为中 10@150。表 1 为 4 个框架的梁、柱截面尺寸、底层柱轴压比及框架中间层的梁柱线刚度比

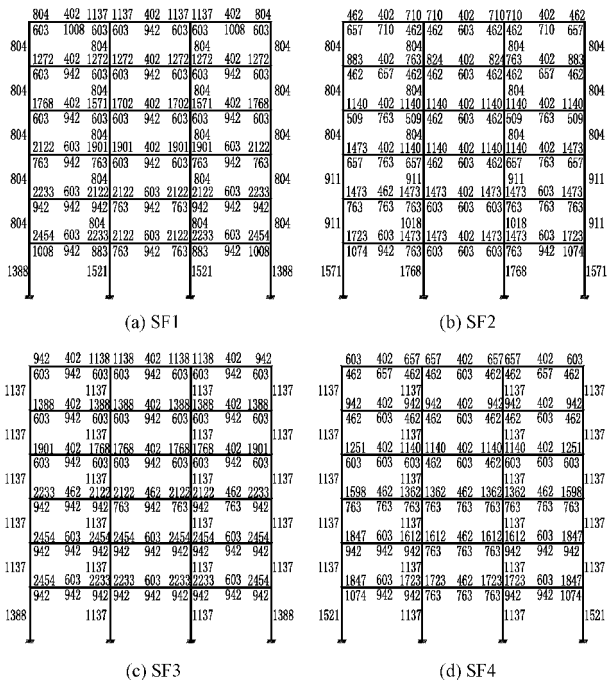


图 3 梁、柱截面配筋/mm²

(按 $\sum i_b / 2i_c$ 计算, 其中 i_b 为与柱相交梁的线刚度, i_c 为柱的线刚度)。

轴压比与梁柱线刚度比 表 1

结构编号	柱尺寸/mm	梁尺寸/mm	轴压比		梁柱线刚度比(含翼缘)	
			边柱	中柱	边柱	中柱
SF1	500 × 500	300 × 500	0.49	0.72	0.33(0.66)	0.66(1.32)
SF2		200 × 750	0.51	0.72	0.74(1.65)	1.49(3.21)
SF3	600 × 600	300 × 500	0.36	0.51	0.16(0.32)	0.32(0.63)
SF4		200 × 750	0.38	0.51	0.36(0.78)	0.72(1.55)

为便于对比, 所设计的 4 个框架分别考虑了梁、柱截面尺寸的不同, 且每一框架分成三种情况进行分析: 1) M1: 梁截面为矩形, 不考虑楼板的参与作用; 2) M2: 梁截面为 T 形, 仅考虑楼板对梁抗弯刚度的贡献; 3) M3: 梁截面为 T 形, 同时考虑楼板对梁抗弯刚度及有效翼缘宽度内与梁平行板筋的贡献。其中, 有效翼缘宽度根据《混规》的规定确定。

对于长细比较大的杆系结构, 基于杆系结构力学和一维材料本构的纤维模型, 是目前分析钢筋混凝土框架结构非线性行为较好的数值方法之一。本文采用基于纤维模型编制的 THUFIBER-T 程序, 结构模型中的混凝土和钢筋本构模型参见文[13]。材料强度按《混规》给定的标准值取用。至于箍筋对截面的约束作用, Mander 等^[14] 建议通过有效约束系数(Confinement Effectiveness Coefficient)考虑, Légeron 和 Paultre^[15] 根据这一理论定义了混凝土的有效约束指标(Confinement Index)及其与约束混凝土抗压强度和应变的关系, 这里按照后者的建议计算约束混凝土的材料参数。

在进行推覆分析时, 考虑了 P-Δ 效应, 侧向分布荷载为倒三角模式, 采用了文[13]建议的基于多点位移控制的推覆分析算法, 这一方法可以稳定地追踪结构的整个软化过程。

4 结果分析

从推覆分析的结果来看, 在基底剪力达到峰值时, 各模型底部 5 层梁端和柱底分别出现“塑性铰”, 表明在倒三角形荷载分布模式作用下, 按《抗规》设计的结构呈现“强柱弱梁”的破坏模式。各框架的推覆曲线如图 4 所示, 根据图 4 及式(1), (2) 计算的结构超强系数和延性系数如表 2 所示。

超强系数和延性系数 表 2

结构编号	Ω			μ/μ_T		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
SF1	1.39	1.47	1.59	2.33/6.35	2.70/7.63	2.16/4.42
SF2	1.55	1.65	1.80	2.88/6.21	2.96/9.71	2.61/6.97
SF3	1.39	1.48	1.59	2.30/7.30	2.67/7.42	2.23/5.05
SF4	1.88	1.99	2.14	2.41/7.83	2.90/10.78	2.50/7.85

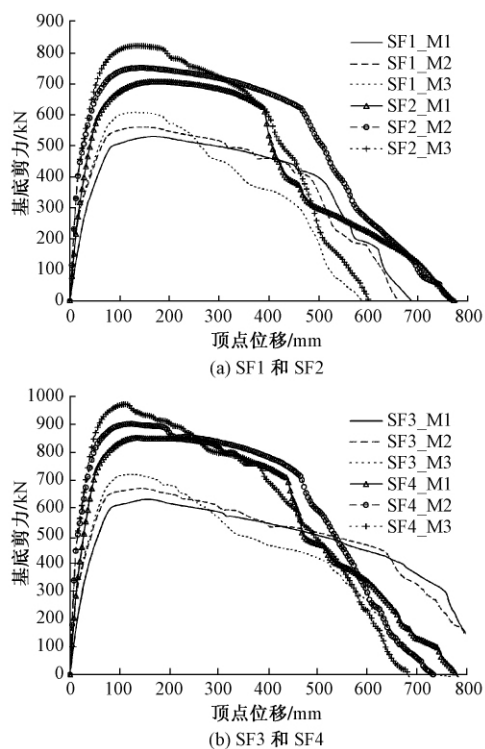


图4 框架推覆曲线

由表1可知,在SF1、SF2和SF3、SF4两组框架中,每组内结构具有相同的柱截面尺寸,且轴压比基本相等。从图4(a)或(b)中可以看到,在轴压比基本相等的情况下,梁柱线刚度比越大,结构初始刚度和基底剪力峰值越大。

由表1可知,对于所设计的4个框架,算例M2的梁柱线刚度比至少是M1的两倍。从表2中可以看到,算例M2具有更大的超强系数和延性系数,可见,由于楼板增加了梁柱线刚度比及梁的受压区面积,这一抗弯刚度贡献提高了结构的超强系数和延性系数;由算例M2和M3的对比可见,“超配”的板筋虽进一步提高了结构的超强系数,却降低了结构的延性系数,其中 μ_T 的降低程度更为显著。可见“超配”的板筋虽有利于提高结构的超强系数,但会导致结构的变形能力变差,尤其是结构的极限变形能力;反之,如果板筋是梁端计算所需抗弯钢筋的一部分,则可以消除这一影响。

5 结语

一个合理的结构设计是使结构在更大程度上获得理想的整体承载力和变形能力。文中按照《抗规》设计了4幢钢筋混凝土框架结构,采用Pushover方法,探讨了现浇楼板对框架结构抗倒塌能力的影响。结果表明,因楼板增加了梁的受压区面积,这种抗弯刚度贡献提高了结构的超强系数和延性系数,宜可作为结构的抗倒塌能力储备;“超配”的板筋虽

提高了结构的超强系数,但对结构的变形能力不利,从优化的角度来说,在进行框架梁设计时,宜按等强度法扣除有效翼缘宽度内与梁平行的板筋的贡献,以使结构获得更好的抗倒塌能力。

参考文献

- [1] 清华大学土木工程组,西南交通大学土木工程组,北京交通大学土木工程组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.
- [2] 清华大学,西南交通大学,重庆大学,等.汶川地震建筑震害分析及设计对策[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [3] 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.
- [4] 叶列平,曲哲,陆新征,等.提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J].建筑结构学报,2008,29(4):42-50.
- [5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] 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.
- [7] ACI 318—08 Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. American Concrete Institute, 2008.
- [8] NZS 3101 Concrete structures standard [S]. New Zealand Standard, 2006.
- [9] CSA A23.3—04 Design of concrete structures [S]. Canadian Standards Association 2004.
- [10] BS EN1998-1 Eurocode8: Design of structures for earthquake resistance [S]. European Committee for Standardization, 2004.
- [11] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] WHITTAKER A, HART G, ROJAHN C. Seismic response modification factors [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4): 438-444.
- [13] 陆新征,叶列平,缪志伟,等.建筑抗震弹塑性分析[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [14] MANDER J, PRIESTLEY J, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [15] LÉGERON F, PAULTRE P. Uniaxial confinement model for normal- and high-strength concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 241-252.

欢迎订阅《建筑结构》杂志