

文章编号: 1000-4750(2017)02-0102-09

RC 框架结构抗地震倒塌性能评估的简化方法

梁 丹, 梁兴文

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘 要: 框架结构抗地震倒塌性能的定量评估近年来受到广泛关注, 迫切需要建立一套抗倒塌性能评估指标, 而且需同时具备实用性和可行性。该文从我国抗震规范的延性设计要求出发, 分别考虑柱、梁抗弯承载力比和柱弯曲屈服对应的剪力与柱受剪承载力比等参数对结构抗倒塌性能的影响, 并分析了二者对结构抗倒塌性能影响的相关性。结果表明: 柱、梁抗弯承载力比对结构抗倒塌性能影响显著, 柱弯曲屈服对应的剪力与柱受剪承载力比对结构抗倒塌性能也有一定的影响, 且二者对结构抗倒塌性能的影响存在相关性。通过对这两个结构参数进行不同的调整组合, 考察结构的抗倒塌性能, 进一步建立了简化的抗倒塌性能评估指标, 为框架结构抗倒塌性能的定量评估提供参考。

关键词: 框架结构; 抗倒塌性能评估; 增量动力分析; 强柱弱梁; 强剪弱弯

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.06.0492

A SIMPLIFIED METHOD FOR COLLAPSE-RESISTANT PERFORMANCE EVALUATION OF RC FRAME STRUCTURES

LIANG Dan, LIANG Xing-wen

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Quantitative evaluation of collapse-resistant performance of structures has attracted widespread attention in the past few years, urging a set of evaluation indexes with practicality and feasibility to be proposed. In this study, based on the requirement for ductility design in national codes for seismic design of buildings in China, the influence of the ratio of column-to-beam moment strength on the collapse-resistant performance of structure was considered. The effect of the ratio of column plastic shear demand-to-shear capacity was also taken into account. In addition, the correlation of the impact caused by the above two structural parameters on the collapse-resistant performance of structures was analyzed. The results indicate that the ratio of column-to-beam moment strength has a significant impact on the collapse-resistant performance of the structure, and so does the ratio of column plastic shear demand-to-shear capacity. The above two structural parameters also exhibit a strong correlation with collapse performance evaluation. At the same time, by adjusting and combining the above two structural parameters, the collapse-resistant performance of structures was investigated, and a simplified evaluation index of the collapse-resistant performance was established, offering a reference to the quantitative evaluation of collapse-resistant performance of structures.

Key words: frame structure; collapse-resistant performance evaluation; incremental dynamic analysis; strong column-weak beam; strong shear-weak bending

收稿日期: 2015-06-08; 修改日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278402, 51078305)

通讯作者: 梁兴文(1952—), 男, 陕西华县人, 教授, 硕士, 从事建筑结构和抗震研究(E-mail: liangxingwen2000@163.com).

作者简介: 梁 丹(1989—), 女, 陕西渭南人, 助理工程师, 硕士, 从事混凝土结构抗震性能评估研究(E-mail: liangdanxian@163.com).

钢筋混凝土(RC)框架结构在我国目前的结构形式中占了相当大的比例,其抗地震倒塌能力是保障人民生命财产安全的重要指标。我国现存的大量RC框架结构原设计的依据标准过低,加上耐久性、损伤积累等因素使得结构的承载力有所降低。如何合理评估建筑结构的抗地震倒塌能力成为重要的前沿课题,迫切需要建立一套指标来定量评估建筑结构的抗地震倒塌能力,使得抗震能力不足的建筑结构能及早加固或拆除,在最大程度上保证结构“大震不倒”。

近年来,基于增量动力分析方法(IDA, Incremental Dynamic Analysis)的易损性分析使得定量评估建筑结构的抗地震倒塌能力得以实现,在工程界得到广泛应用。但考虑到用按此方法进行结构抗倒塌评估需要进行多次动力弹塑性分析,耗时较长且建模过程繁琐,这对大量的既有建筑是不切实际的。加州大学 Galanis 和 Moehle^[1]研究探讨了 20 世纪 70 年代以前建造的老式非延性 RC 框架结构的抗地震倒塌安全性。通过增量动力分析方法来评估框架结构的抗震性能,并修改配箍率和柱、梁抗弯承载力比来考察其对结构抗倒塌性能的影响,发现二者均对结构的倒塌性能有一定影响,从而可参考两者的计算结果来识别倒塌风险较高的建筑。考虑到抗震设计中的延性设计对结构在大震下的耗能能力及抗倒塌能力有重要影响,本文从我国抗震规范延性设计要求出发,重点考察“强柱弱梁”和“强剪弱弯”对结构抗倒塌性能的影响,以增量动力分析方法为途径,对大量不同 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 和 V_p / V_u 比值下的结构进行倒塌性能评估,从而建立以 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 和 V_p / V_u 为参数的评估指标,通过简单计算这两个结构参数,即可参考已有研究成果对建筑结构进行抗倒塌性能的定量评估。

1 结构抗地震倒塌性能定量评估的基本原理

1.1 IDA 方法的基本原理

IDA 方法是目前建筑结构基于性能抗震评估中最常用的评估方法之一。它是将输入的地震动记录,通过乘以不同的比例系数调幅成为具有多重强度水平的一系列地震动记录,计算结构在这组调整后地震动作用下的非线性动力时程反应,从而建立地震动强度指标(Intensity Measure, IM)和工程需求参数(Engineering Demand Parameters, EDP)之间的

关系曲线^[2]。由于该方法能够准确观察结构从弹性到倒塌过程中结构性态变化的发展规律,被美国 FEMA 350^[3]与 FEMA 351^[4]采用并予以推荐。

由于目前国内还没有比较公认的地震动记录数据库,本文采用 FEMA P-695^[5]报告推荐的 22 对远场地震动(共 44 条)进行分析,综合考虑了震级、震源、场地土剪切波速、峰值加速度等因素,具有一定的代表性,具体地震动信息如表 1 所示。考虑到我国抗震规范是按照结构基本周期对应的 5% 阻尼比加速度反应谱 $S_a(T_1)$ 进行设计,且已有研究^[6]表明 $S_a(T_1)$ 对结构响应的离散性影响较小,故本文以 $S_a(T_1, 5\%)$ 作为地震动强度指标。工程需求参数本文选取最大层间位移角 θ_{\max} ,可以反映结构的层间位移延性和整体位移延性,从而全面了解结构的抗震性能。倒塌点的判断,本文采用 FEMA 350^[3]建议的基于结构 IDA 曲线的倒塌判别方法,即当结构切线刚度退化为初始弹性刚度的 20% 或者结构的最大层间位移角超过 10% 时,认为结构倒塌。

1.2 基于 IDA 方法的倒塌易损性分析

IDA 方法通过大量的弹塑性时程分析得到结构在不同地震动强度下的响应,倒塌易损性分析则需计算结构在不同强度水平地震作用下超过倒塌极限状态的概率,计算依据即为 IDA 分析所提供的分析成果。结构的易损性曲线表示在不同的强度地震作用下结构响应超过破坏阶段所定义的结构能力参数的条件概率,故结构的地震易损性分析包括概率地震需求分析和概率抗震能力分析两部分^[7]。

1.2.1 概率地震需求分析

文献[8]指出结构工程需求参数 EDP 与地震动强度指标 IM 之间的关系满足下式:

$$EDP = \alpha(IM)^\beta \quad (1)$$

对应于本文所选取的工程需求参数和地震动强度指标,式(1)可表达为:

$$\theta_{\max} = \alpha[S_a(T_1, 5\%)]^\beta \quad (2)$$

对式(2)两边同时取对数,可以得到:

$$\ln \theta_{\max} = \ln \alpha + \beta \ln S_a(T_1, 5\%) \quad (3)$$

IDA 的分析结果提供了 θ_{\max} 和 $S_a(T_1, 5\%)$ 之间的关系,若要求得式(3)中的系数 α 和 β ,则需要对不同地震动下 IDA 曲线簇上的数据点取对数,将取过对数的数据散点利用 Origin 软件进行线性拟合,所得的截距和斜率分别为 $\ln \alpha$ 和 β ,从而求出系数 α 和 β 。

表 1 远场(震中距大于 10 km)地震动记录

Table 1 Database information and parameters of recorded ground motions for the far-field record

编号	震级	发生年份	地震名称	记录台站名称	分量	PGA/g	PGV/(cm/s)
1	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	NORTHR/MUL279	0.52	63
2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	NORTHR/LOS270	0.48	45
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	DUZCE/BOL090	0.82	62
4	7.1	1999	Hector Mine	Hector	HECTOR/HEC090	0.34	42
5	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	IMPVALL/H-DLT352	0.35	33
6	6.5	1979	Imperial Valley	EI Centro Array #11	IMPVALL/H-E11230	0.38	42
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	KOBE/NIS090	0.51	37
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	KOBE/SHI090	0.24	38
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	KOCAELI/DZC270	0.36	59
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	KOCAELI/ARC090	0.22	40
11	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	LANDERS/YER360	0.24	52
12	7.3	1992	Landers	Coolwater	LANDERS/CLW-TR	0.42	42
13	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola	LOMAP/CAP090	0.53	35
14	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3	LOMAP/GO30090	0.56	45
15	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	MANJIL/ABBAR-T	0.51	54
16	6.5	1987	Superstition Hills	EI Centro Imp.Co.	SUPERST/B-ICC090	0.36	46
17	6.5	1987	Superstition Hills	Poe Road (temp)	SUPERST/B-POE360	0.45	36
18	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	CAPEMEND/RIO360	0.55	44
19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	CHICHI/CHY101-N	0.44	115
20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	CHICHI/TCU045-N	0.51	39
21	6.6	1971	San Fernando	LA-Hollywood Stor	SRERNPEL180	0.21	19
22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	FRIULI/A-TMZ270	0.35	21

1.2.2 概率抗震能力分析

概率抗震能力分析即确定结构的能力参数,以结构的顶点屈服位移角 θ_y 来表征结构的能力。一般以结构基本振型下的倒三角形侧向荷载分布作为水平加载模式,对结构进行 Pushover 分析,得到结构顶点位移与基底剪力的 Pushover 曲线,利用等面积原则得到理想的双线性荷载-位移关系曲线,从而确定各模型的顶点屈服位移角。各性能水平所对应的量化指标限值^[9-10]如表 2 所示。

表 2 结构各性能水平对应量化指标限值

Table 2 Quantitative index limits corresponding to different performance levels of the structure

结构性能水平	NO	IO	LF	CP
量化指标限值	θ_y	$2\theta_y$	$4\theta_y$	$10\theta_y$

注:其中 NO、IO、LF、CP 分别表示正常使用、暂时使用、生命安全、防止倒塌各性能水平。

结构在给定地震动强度下的倒塌概率即基于结构防止倒塌所对应的能力限值小于结构的响应而定义的,二者均可用对数正态分布函数来表示,经推导得出结构在防止倒塌性能水平下的超越概率 P_f 如下式^[11]所示:

$$P_f = \Phi \left[\frac{\ln \{ \alpha [S_a(T_1, 5\%)]^\beta / (10\theta_y) \}}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}} \right] \quad (4)$$

其中: $\Phi(x)$ 为正态分布函数; β_d 和 β_c 分别为结构响应参数与结构能力参数的对数标准差, $\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}$ 按 HAZUS99^[12]规定取 0.5。

2 RC 框架结构设计信息及有限元建模

2.1 结构设计信息

某办公楼采用五层现浇钢筋混凝土框架结构^[13],其结构平面如图 1 所示。层高均为 3.6 m,抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.20 g,场地类别为 II 类,设计地震分组为第 1 组,结构抗震等级二级,场地特征周期 $T_g=0.35$ s。混凝土强度等级为 C35,梁、柱混凝土保护层厚度均取 25 mm,梁、柱的纵筋采用 HRB400 钢筋。楼面恒荷载标准值取 3.5 kN/m²,活荷载标准值为 2.0 kN/m²,屋面恒荷载标准值为 5.0 kN/m²,活荷载标准值为 0.5 kN/m²。由于结构平面布置规则,故仅取一榀横向框架(3 轴线)进行分析,其结构参数见表 3。

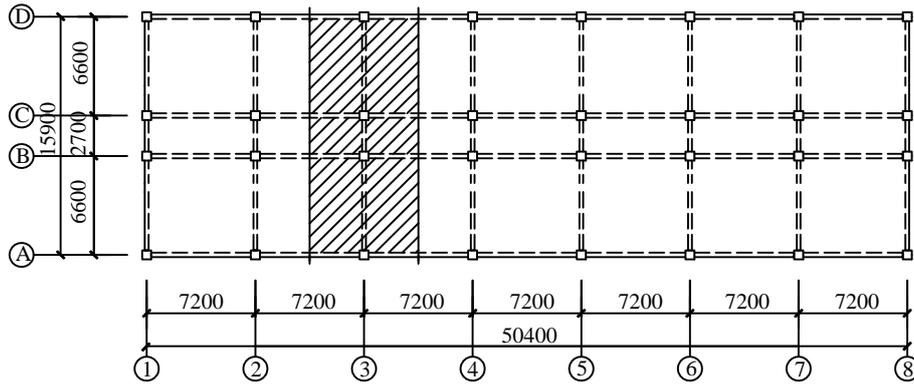


图1 框架结构平面布置图

Fig.1 The plan of the RC frame

表3 框架结构梁柱截面尺寸及配筋

Table 3 Dimensions and reinforcement details of beam and column sections

楼层 编号	柱截面/mm		梁截面/mm				梁配筋/mm ²				柱配筋/mm ²	
	<i>b_c</i>	<i>h_c</i>	边梁		中梁		边梁		中梁		边柱	中柱
			<i>b_b</i>	<i>h_b</i>	<i>b_b</i>	<i>h_b</i>	底部	顶部	底部	顶部		
1	600	600	300	600	300	400	1570	2281	1140	1520	1520	2463
2	600	600	300	600	300	400	1570	1900	1140	1520	1018	1520
3	500	500	300	600	300	400	1256	1702	1256	1388	804	1520
4	500	500	300	600	300	400	942	1140	942	1140	804	1018
5	500	500	300	600	300	400	763	763	509	763	804	804

2.2 有限元分析模型

采用三维非线性分析软件 PERFORM-3D 对框架结构建立纤维模型^[13], 不考虑梁的轴向变形, 底层柱下端与基础顶面固接, 柱构件考虑 *P-Δ*效应, 然后进行静力与动力弹塑性分析。

纤维模型是基于平截面假定将材料的应力-应变关系变成构件的力-变形关系, 此时程序可通过材料的本构关系自动确定截面的塑性特性。梁柱单元均由两端的塑性区和中间的弹性杆组成。塑性区长度采用 PERFORM-3D 的推荐值, 分别取 0.5 倍的梁截面高度和 0.5 倍的柱截面宽度。塑性区由纤维截面组成, 纤维划分的精细程度对计算结果的准确性和运算量有很大影响。本文将梁塑性区沿梁截面高度划分为 12 个纤维, 柱截面划分为 37 个纤维(包括非约束混凝土纤维、约束混凝土纤维和钢筋纤维)。钢材的本构模型采用双线性弹塑性模型, 而混凝土材料的本构模型采用 Kent-Park 约束混凝土本构模型。

3 “强柱弱梁”对结构抗倒塌性能的影响

提高框架结构柱端受弯承载力, 是能力设计中引导钢筋混凝土框架结构形成“强柱弱梁”型耗能

机制的关键措施^[14]。目前我国抗震规范主要采用柱端弯矩增大系数来实现“强柱弱梁”, 然而汶川地震震害表明, 即使按此思想设计的钢筋混凝土框架结构在地震时仍然存在不同程度的倒塌^[15-16], 因此柱、梁抗弯承载力比对 RC 框架结构抗倒塌性能的影响值得深入研究。

3.1 梁、柱抗弯承载力计算

计算梁、柱抗弯承载力时, 我国抗震规范建议采用构件实际的正截面承载力。即根据构件的实际配筋面积 A_s^a 、材料强度标准值 f_k 和相应于重力荷载代表值的轴向力 N_G (分项系数 γ_G 取 1.0), 按照下式进行计算^[10]:

梁:

$$M_{byk}^a = f_{yk} A_{sb}^a (h_0 - a_s') \quad (5)$$

柱:

$$M_{cyk}^a = f_{yk} A_{sc}^a (h_0 - a_s') + 0.5 N_G h_c (1 - N_G / f_{ck} b_c h_c) \quad (6)$$

式中: f_{yk} 为钢筋抗拉强度标准值; A_{sb}^a 、 A_{sc}^a 分别为梁、柱纵向受拉钢筋的实配截面面积; h_0 、 a_s' 分别为构件截面有效高度和纵向受压钢筋合力点至截面近边距离; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值; N_G 为相应于重力荷载代表值的轴向力。

式(5)、式(6)中各符号的上角 a 表示“实际的”，且柱的承载力计算仅适用于 $N_G / (f_{ck} b_c h_c) \leq 0.5$ 。

3.2 不同柱、梁抗弯承载力比值下的倒塌性能比较

本文以柱、梁抗弯承载力比 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 的变化来考察“强柱弱梁”对框架结构抗倒塌性能的影响。以按照我国现行抗震规范设计的某抗震设防烈度8度区RC框架结构为“基准建筑”，通过调整柱截面的配筋，使其柱、梁抗弯承载力比值分别为0.8、1.0、1.2、1.4、1.5、2.0，从而全面考察当柱端承载力低于梁端、与梁端相等、不同程度地高于梁端时对框架结构抗倒塌能力的影响，且包括了2001规范^[17]和现行2010规范^[10]中对柱端弯矩增大系数的要求。

对上述模型进行模态分析确定结构所对应的基本周期 T_1 ，从而根据 hunt & fill^[18]调幅准则进行地震动的调幅，通过大量的动力时程分析得到各模型的 IDA 曲线，如图 2 所示。

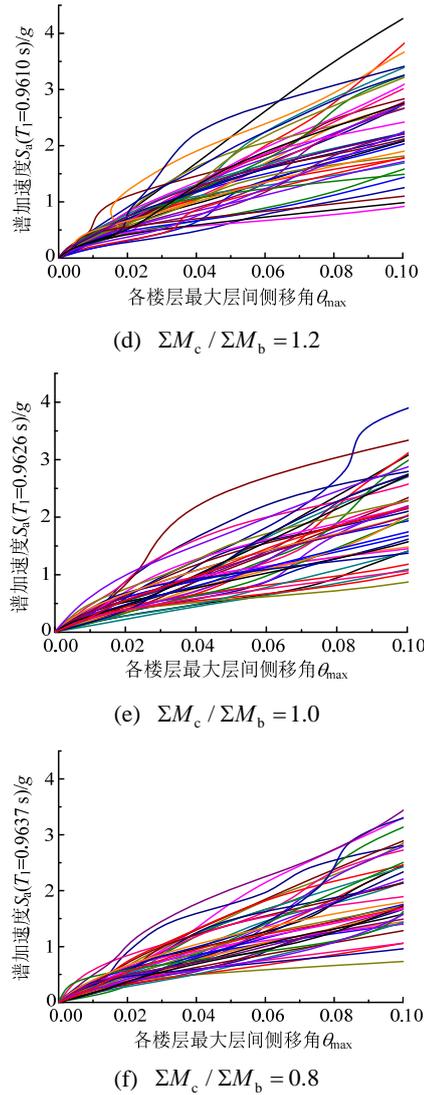
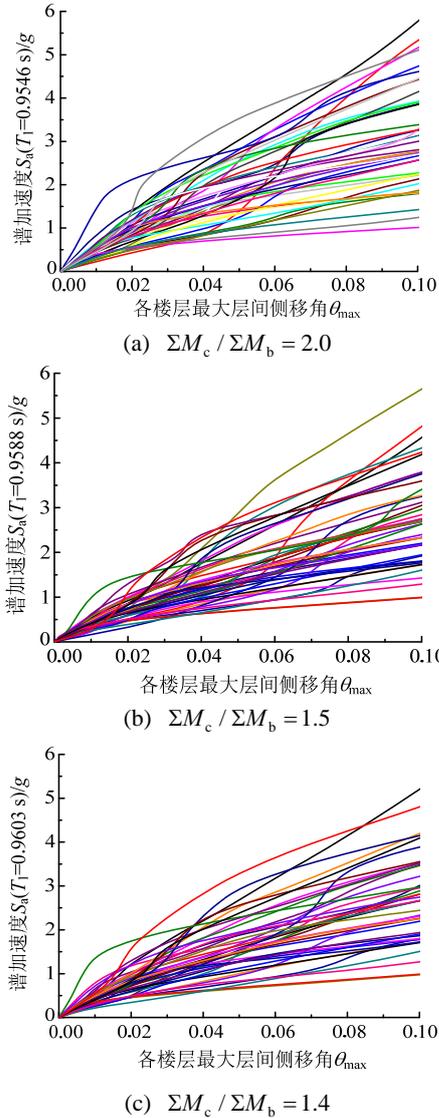


图 2 不同 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 比值下各模型的 IDA 曲线
Fig.2 The IDA curves of each model for different $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ ratios

由图2不难看出，在不同 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 比值下，不同模型的IDA曲线走势仍是相同的，且在初始弹性阶段，各模型的IDA曲线斜率变化不大，说明在地震动强度较小时，结构响应与地震动强度之间仍可近似认为是线性关系。当地震动强度增大时，每个模型的IDA曲线簇逐渐变得离散，此时结构响应与地震动强度之间非线性关系显著。对比六个模型，不难看出 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 比值越大，IDA曲线表现出来的离散性越显著。

图 2 的 IDA 分析结果是进行结构倒塌易损性分析的基础，根据地震倒塌易损性分析即可以得到结构在不同强度水平地震作用下结构达到或超过倒塌极限状态的条件概率，从而实现对结构抗地震倒塌性能的定量评估。对不同 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 比值下各模

型的倒塌性能进行计算比较,各模型对应于防止倒塌性能水准的易损性曲线如图3所示。从图3中可直观得出各个结构在对应不同强度地震作用下的倒塌概率。

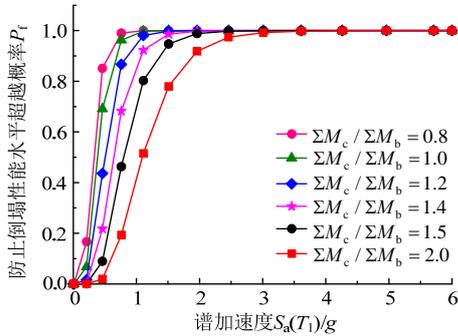


图3 各模型的倒塌性能对比

Fig.3 The comparison of collapse performance of each model
结构在与设防烈度8度相应的罕遇地震作用水平下 $S_a(5\%, 50a) = 0.40g$, 相应于 $\Sigma M_c / \Sigma M_b = 2.0, 1.5, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8$, 其发生倒塌的概率分别为 0.82%、4.54%、12.90%、30.29%、55.73%、75.27%。可以看出随着柱、梁抗弯承载力比值的减小,结构的倒塌概率急剧上升,说明柱、梁抗弯承载力比对结构的抗倒塌性能影响显著。ATC-63 报告^[5]建议:“在设防大震下倒塌概率小于 10%时即认为结构达到大震性能的要求”。可以看出当 $\Sigma M_c / \Sigma M_b \leq 1.4$ 时,结构的抗倒塌能力均不满足上述要求,即认为该结构在预估的大震下是很难满足“大震不倒”的要求;且当 $\Sigma M_c / \Sigma M_b \leq 1.2$ 时,相较于 $\Sigma M_c / \Sigma M_b = 1.4$ 结构的倒塌概率大大增加;在 $\Sigma M_c / \Sigma M_b = 1.5$ 时,结构的倒塌概率在 ATC-63 报告建议的达到大震性能要求的规定限值内,即该倒塌概率在人们可以接受的范围内,且继续提高柱、梁抗弯承载力比使得造价成本提高但对结构的抗倒塌能力提升不大,故对按照 8 度设防进行抗震设计的结构,可认为 $\Sigma M_c / \Sigma M_b = 1.5$ 是较优比值。

4 “强剪弱弯”对结构抗倒塌性能的影响

在结构设计时应遵循“强剪弱弯”的设计原则,对于梁柱构件应保证其斜截面受剪承载力大于构件弯曲屈服时实际达到的剪力值,防止构件发生脆性的剪切破坏。本文采用 V_p 表示构件弯曲屈服时实际达到的剪力,定义为屈服剪力;采用 V_u 表示构件的斜截面受剪承载力。以参数 V_p/V_u 的变化来考虑“强剪弱弯”对框架结构抗倒塌性能的影响。

4.1 受剪承载力和屈服剪力的计算

参数 V_u 为构件的斜截面受剪承载力。根据抗震规范^[10], 偏心受压柱的斜截面受剪承载力可按下式进行计算:

$$V_u = \frac{1}{\gamma_{RE}} \left(\frac{1.05}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.056N \right) \quad (7)$$

式中: N 为考虑地震作用效应组合的柱轴向压力设计值,当 $N > 0.3f_c A$ 时,取 $0.3f_c A$ 。 λ 为框架柱的计算剪跨比,其值取上、下端弯矩较大值 M 与对应的剪力 V 和柱截面有效高度 h_0 的比值,即 $M/(Vh_0)$;当框架柱的反弯点在柱层高范围时,也可取 $H_n/(2h_0)$,其中 H_n 为柱净高;当 $\lambda < 1$ 时取 1,当 $\lambda > 3$ 时取 3。

将参数 V_p 定义为屈服剪力,即构件弯曲屈服时实际达到的剪力值。由于地震作用是随机的,使框架的破坏具有不确定的形式,精确地计算柱承受的剪力值是很困难的,因此通常假定框架在一定破坏机制条件下估计其承受的剪力值。

4.1.1 强梁弱柱型框架

当框架为强梁弱柱型时,在水平地震作用下,柱两端将出现塑性铰,柱端由于柱的弯曲破坏而实际达到的剪力 V_p 可按下式计算:

$$V_p = (M_p^u + M_p^l) / h_n \quad (8)$$

式中: M_p^u 、 M_p^l 分别为柱上、下端的实际受弯承载力; h_n 为柱的净高。

4.1.2 非强梁弱柱型框架

对于弱梁型节点,梁端首先屈服,相应之柱端可能处于弹性状态,也可能新出现塑性铰,需进一步判别。一般采用柱底塑性铰法计算框架柱承受的剪力值。该方法的基本原理如下:在地震作用下,如塑性铰首先在梁端出现,则在地震作用继续增大时,节点的上、下柱端弯矩不是同号增长,而是大小相等、方向相反地同时出现一正一负的弯矩增量。这样,在梁端先出现屈服处,一般是将柱底截面弯矩增大而达到屈服,即弱梁型框架柱总是在柱的下端出现塑性铰。

对于弱梁型框架柱的上端,即弱梁型节点下柱端,柱端的实际正截面承载力满足 $\Sigma M_{by} < \Sigma M_{cy}$, 则柱上端未出现塑性铰,柱端弯矩可取 $\Sigma M_{by} [k_i / (k_i + k_{i+1})]$; 当不满足下式时,则柱的上端出现塑性铰,此时柱上端弯矩为柱的实际受弯承载力为:

$$\sum M_{by} \frac{k_i}{k_i + k_{i+1}} < M_{cy}^u \quad (9)$$

式中, k_i 、 k_{i+1} 分别表示 i 层及 $i+1$ 层柱的线刚度。

对柱下端出现塑性铰, 而柱上端未屈服的情况, 柱承受的剪力值 V_p 按下式计算:

$$V_p = \{M_{cy}^1 + \sum M_{by} [k_i / (k_i + k_{i+1})]\} / h_i \quad (10)$$

4.2 不同 V_p/V_u 比值下的倒塌性能比较

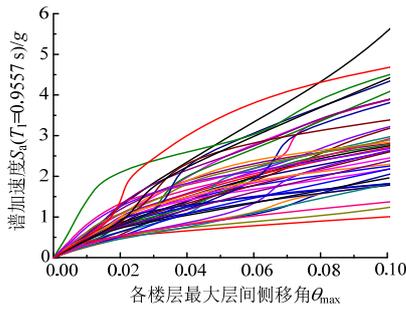
为了考察参数 V_p/V_u 的变化对结构抗倒塌性能的影响, 需对“基准建筑”的相关设计进行调整。在调整过程中, 只调整受剪承载力, 对屈服剪力不予调整, 即只对柱的箍筋配置进行调整, 这样才能保证柱的抗弯承载力不变, 不至于由于配筋量过少发生弯曲破坏。

考虑到一些早期兴建的建筑, 大多承载力较低、且不满足抗震构造措施, 结构的延性很差, 对居住者构成了很大的威胁。为了确定这些老式钢筋混凝土结构的抗倒塌性能, 在进行 V_p/V_u 比值调整时, 暂不考虑我国现行规范对框架结构的抗震构造要求。在“基准建筑”的基础上建立四个不同比值下的模型, 具体参数如表 4 所示。对表 4 经过箍筋配置调整的不同结构模型, 通过大量的动力时程分析得到各模型的 IDA 曲线, 如图 4 所示。

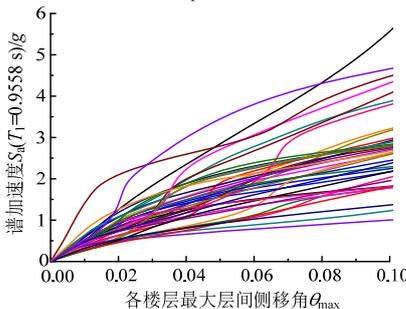
表 4 不同 V_p/V_u 比值下的模型参数

Table 4 The model parameters under different V_p/V_u ratios

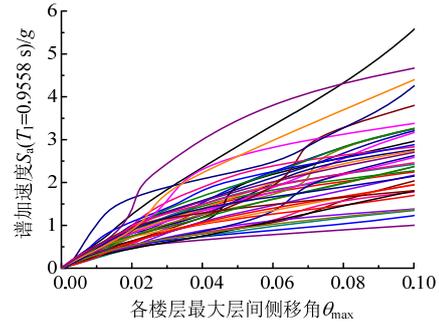
箍筋配置	$\phi 8@100$ (4 肢)	$\phi 8@200$ (4 肢)	$\phi 8@400$ (4 肢)	$\phi 8@350$ (双肢)
V_p/V_u	0.5	0.7	0.9	1.0



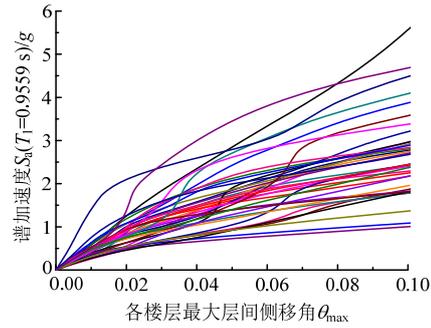
(a) $V_p/V_u=0.5$



(b) $V_p/V_u=0.7$



(c) $V_p/V_u=0.9$



(d) $V_p/V_u=1.0$

图 4 不同 V_p/V_u 比值下各模型的 IDA 曲线

Fig.4 The IDA curves of each model for different V_p/V_u ratios

由以上各模型的 IDA 曲线可以看出, 在不同 V_p/V_u 比值下, 各个模型的 IDA 曲线走势是十分相似的。从直观上看, 不同 V_p/V_u 比值对结构抗倒塌性能的影响不如柱、梁抗弯承载力比影响显著, 要考察 V_p/V_u 对结构抗倒塌性能的影响程度还需作进一步定量分析。采用上述 IDA 分析结果, 根据地震易损性分析得到结构在不同强度水平地震作用下达到或超过倒塌极限状态的条件概率, 倒塌易损性曲线如图 5 所示。

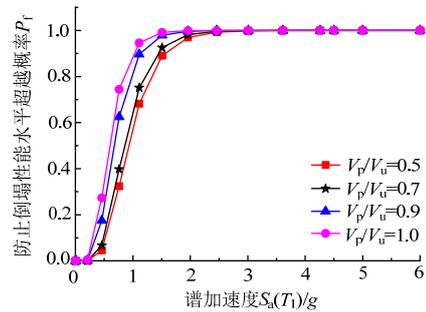


图 5 各模型的倒塌性能对比

Fig.5 The comparison of collapse performance of each model

由图 5 可以看出, V_p/V_u 比值越大, 结构的倒塌概率越大。相较不同柱、梁抗弯承载力比值时的倒塌易损性曲线, 不同 V_p/V_u 比值时的倒塌易损性曲线表现得更为集中, 说明在同一地震动强度下 V_p/V_u 比值对结构的抗倒塌性能影响梯度差异较小, 不如

柱、梁抗弯承载力比值的影响显著。在相应的罕遇地震水平下随着 V_p/V_u 比值的增大, 结构的倒塌概率分别为 2.10%、3.25%、9.96%、16.56%。由上述定量分析可知, 通过调整箍筋配置来改变参数 V_p/V_u , 对结构的倒塌概率也有一定的影响。若按照“在设防大震下倒塌概率小于 10%即认为结构达到大震性能的要求”进行判断, 仅当 $V_p/V_u=1.0$ 时不符合要求, 说明在保证柱不发生弯曲屈服的前提下, 仅从结构是否会发生倒塌考虑, 我国规范对箍筋间距的有关构造要求所留安全储备较充裕。

5 简化评估指标的建立

由上述分析可知, 参数 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 和 V_p/V_u 均对结构的抗倒塌性能有一定的影响, 且两个参数的计算简便可行, 单独用每个参数都可以对结构的抗倒塌性能进行定量评估。但考虑到采用单一参数进行评估时, 在某些情况下可能会造成误判, 为了给出一个综合可靠的抗倒塌评估指标, 可综合上述两个参数, 分析二者之间对结构抗倒塌性能影响的相关性, 建立简化的两参数抗倒塌评估指标。图 6 表明了对两个结构参数进行不同组合调整所得到的结构在罕遇地震下的倒塌概率。

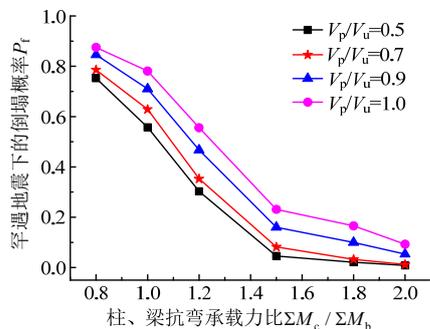


图 6 罕遇地震下不同 V_p/V_u 和 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 对应的倒塌率
Fig.6 Probability of collapse at the rare earthquake level for different V_p/V_u and $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ ratios

从图 6 可见, V_p/V_u 和 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 在倒塌概率上有一定的相关性。对于 $V_p/V_u=0.5$, 在 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 从 1.5~1.8 变化范围之内时, 曲线斜率发生明显的变化, 由陡峭变得平缓。这表明, $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 比值为 1.5 时可大大降低结构的倒塌概率, 继续增大柱、梁抗弯承载力比对结构的抗倒塌性能影响不大, 反而会因为柱截面配筋的增大提高工程造价, 故对按照 8 度设防进行抗震设计的结构, $\Sigma M_c / \Sigma M_b = 1.5$ 可认为是对应于 $V_p/V_u=0.5$ 的较优比值。随着 V_p/V_u 比值的增大, 曲线接近平缓时所对应的 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$

比值也逐渐增大, 说明随着柱截面受剪承载力的降低, 达到较小倒塌概率和较低造价所对应的 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 的最优比值也逐渐变大。对其他 8 度区的结构通过这两个结构参数的计算, 参考已有研究成果进行抗倒塌性能的定量评估, 从而判断是否满足大震下的性能要求, 并对抗倒塌性能设计提供参考。

6 结论

本文采用增量动力分析方法, 对不同结构参数的 RC 框架结构进行了抗倒塌性能评估, 得到以下结论:

(1) 柱、梁抗弯承载力比 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 对结构的抗倒塌能力有很大的影响。对按照设防烈度 8 度进行抗震设计的框架结构, 当二者之比小于等于 1.4 时, 结构在预估的大震下很难满足“大震不倒”的要求; 当二者之比小于 1.2 时, 结构的倒塌概率大大增加; 当比值为 1.5 时, 可以达到经济投入与灾害损失风险之间较为理想的平衡, 可认为 1.5 是较优比值。

(2) V_p/V_u 对结构的抗倒塌性能有一定的影响, 但不如柱、梁抗弯承载力比对结构抗倒塌性能的影响显著。即通过增大 V_u 达到“强剪”, 可以提高结构的抗倒塌性能, 但总体上增幅有限。比较不同 V_p/V_u 比值下结构在罕遇地震下的倒塌概率, 得到我国规范对箍筋的构造要求是留了较为充裕的安全储备的。

(3) 两个结构参数 V_p/V_u 和 $\Sigma M_c / \Sigma M_b$ 在倒塌概率上有一定的相关性。可结合两个参数的简单计算, 参考已有的研究成果对结构的抗倒塌性能实现定量的简化评估。

参考文献:

- [1] Galanis P H, Moehle J P. Development of collapse indicators for older-type reinforced concrete buildings [C]. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 2012, No.1704.
- [2] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491—514.
- [3] Federal Emergency Management Agency. Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, Report No. FEMA 350 [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [4] Federal Emergency Management Agency. Recommended

- seismic evaluation and upgrade criteria for welded steel moment frame buildings, Report No. FEMA 351 [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [5] Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors, Report No. FEMA P-695 [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [6] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 9—21.
Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 9—21. (in Chinese)
- [7] 李磊, 郑山锁, 李谦. 基于 IDA 的型钢混凝土框架的地震易损性分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 535—541.
Li Lei, Zheng Shansuo, Li Qian. Seismic fragility analysis of SRC structures based on IDA method [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2011, 36(4): 535—541. (in Chinese)
- [8] Shome N, Cornell C A. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [R]. Report No. RMS-35. Stanford, California: Stanford University, RMS Program, 2004: 16—50.
- [9] 李刚, 程耿东. 基于性能的结构抗震设计: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 2—131.
Li Gang, Cheng Gengdong. The performance-based seismic design of structure: Theory and method application [M]. Beijing: Science Press, 2004: 2—131. (in Chinese)
- [10] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 张耀庭, 马超, 郭宗明. 不同弯矩增大系数钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 29—37.
Zhang Yaoting, Ma Chao, Guo Zongming. Seismic fragility analysis for RC frame structures with various moment magnifying coefficients [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 29—37. (in Chinese)
- [12] National Institute of Building Science. HAZUS99 user's manual [R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1999: 199—208.
- [13] 梁丹, 梁兴文. 按现行规范设计的Ⅷ度区 RC 框架结构的倒塌性能评估[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 1060—1065.
Liang Dan, Liang Xingwen. Collapse performance evaluation of reinforced concrete frame structures in seismic-intensity-8 zone designed using current codes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 1060—1065. (in Chinese)
- [14] 蔡健, 周靖, 方小丹. 柱端弯矩增大系数取值对 RC 框架结构抗震性能的影响的评估[J]. 土木工程学报, 2007, 40(1): 6—14.
Cai Jian, Zhou Jing, Fang Xiaodan. Evaluation of influences of various moment magnifying coefficients at column ends of RC frames on seismic performance [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1): 6—14. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 岳茂光, 王东升, 孙治国, 苏志彬. 汶川地震下框架结构的抗倒塌能力分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 250—256.
Yue Maoguang, Wang Dongsheng, Sun Zhiguo, Su Zhibin. Analysis on collapse resistant capability of reinforced concrete frame structure under Wenchuan earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 250—256. (in Chinese)
- [17] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
GB 50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [18] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering Structural and Dynamics, 2002, 31(3): 491—514.