

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.001



RC 梁、柱剪力增大系数取值的有效性

白绍良¹, 向上¹, 王敏¹, 朱爱萍²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘要: 抗震混凝土框架结构的梁、柱剪力增大系数是保证结构抗震安全性的关键指标之一。中国结构设计规范对各抗震等级的剪力增大系数取值作了规定, 但却未见有关实际控制效果的研究成果发表。按照现行设计规范设计了 3 个规则空间框架结构算例, 分别位于设防烈度 7 度(0.15g)区、8 度(0.20g)区和 9 度(0.40g)区。对每个算例进行罕遇地震作用下的非弹性动力反应分析, 以不少于 90% 的梁、柱满足“罕遇地震作用剪力”小于“平均强度抗震抗剪能力”为标准, 判断剪力增大系数取值的有效性。当不满足该标准时, 调整剪力增大系数取值, 直到满足上述标准。结果表明, 现行结构设计规范对框架梁取用的剪力增大系数有效, 可继续使用; 框架柱剪力增大系数取值, 在一级抗震等级时过大, 在二、三级抗震等级时不满足上述标准。建议了两套柱剪力增大系数的取值方案。

关键词: 框架结构; 抗震性能; 剪力增大系数; 抗剪需求-能力比

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2018)03-0001-07

Shear overstrength factors for RC frame members in Chinese code

Bai Shaoliang¹, Xiang Shang¹, Wang Min¹, Zhu Aiping²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 10013, P. R. China)

Abstract: Using shear overstrength factors is one of key earthquake resisting measures for reinforced concrete (RC) frame members, which aims to ensure the safety of structures under rare earthquakes. The shear overstrength factors for different seismic grades have been provided in Chinese code, while little research has been conducted up to date which focused on the actual effect of shear overstrength factors. Three regular RC frame structures were designed according to the current code, which respectively located in intensity region 7(0.15g), 8(0.20g) and 9(0.40g). Nonlinear dynamic analyses under rare earthquakes were finished. The ratio of the shear demand under rare earthquakes to the average shear capacity for beams and columns was calculated to identify the effectiveness of the shear overstrength factor. The rule is that the ratio of more than 90% components are less than 1.0. The adjustments were made in the case when the shear overstrength factor did not meet to the rule, which continued until that the factor is up to grade. The result proves that shear overstrength factors for RC frame beams can keep on; the shear overstrength factors for first seismic grade is oversized, while that for second and third seismic grades can not satisfy the shear demand. Two sets of schemes for column shear overstrength factors are proposed based on further analysis.

收稿日期: 2017-04-19

作者简介: 白绍良(1935-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程抗震分析及抗震性能研究, E-mail: shaoliangbai@126.com。

Received: 2017-04-19

Author brief: Bai Shaoliang (1935-), professor, doctoral supervisor, main research interests: seismic analysis and seismic behavior of structural engineering, E-mail: shaoliangbai@126.com.

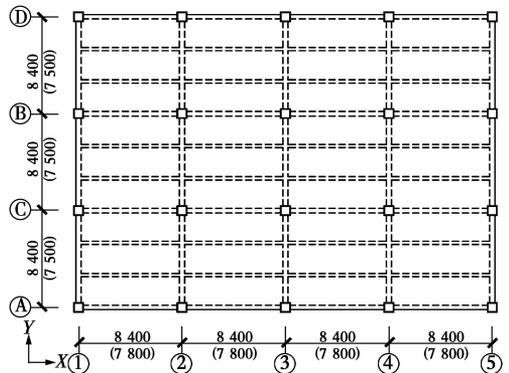
Keywords: frame structure; seismic behavior; shear overstrength factors; the ratio of shear demand to shear capacity

近年来,中、美等国相继明确提出以保证不低于 50 a 超越概率 2%、50 a 超越概率 2% 地震作用下的生命安全为结构抗震设防的首要目标^[1-2],即中国俗称的“大震不倒”。剪切破坏作为一种脆性破坏,是结构设计中应尽量避免出现的破坏形式。从“大震不倒”的抗震设防目标来看,即使在罕遇地震作用下,也希望结构构件在达到罕遇地震作用下的变形需求之前不发生剪切失效^[3-4]。因此,《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[5](简称抗规 2010)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[4](简称混规 2010)规定了框架结构梁、柱的剪力增大系数分别增大梁、柱的组合作用剪力,以防止在罕遇地震作用下发生剪切破坏。通常称这一抗震措施为“强剪弱弯”。但罕遇地震作用下,这些剪力增大系数的实际控制效果如何,尚未见相关的研究成果。而对应“强柱弱梁”措施的框架柱端弯矩增大系数取值有效性,却通过罕遇地震作用下的非弹性动力反应分析进行了一定验证^[6-8]。

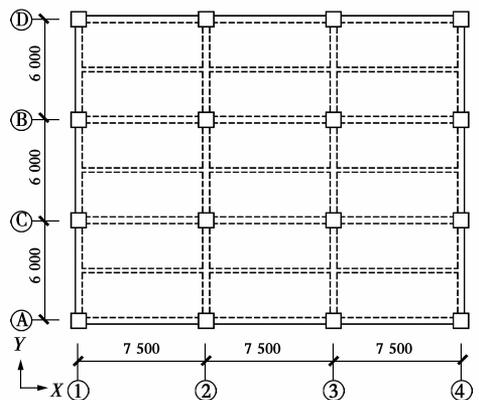
为了通过非弹性动力反应分析考察梁、柱剪力增大系数的有效性,严格按中国现行设计规范设计了 3 个分别处于 7 度(0.15g)、8 度(0.20g)和 9 度(0.40g)设防烈度分区的规则空间框架结构算例;然后建立非线性模型,其材料强度取用体现一般水准的平均强度^[9],并考虑材料非线性特征,进行罕遇地震作用下的非弹性动力反应分析。计算梁、柱构件的“抗剪需求-能力比”:对于柱构件,因其抗剪能力与轴力相关,依次提取每条地面运动输入下柱剪力和轴力时程,逐时间点计算柱作用剪力与按材料平均强度及抗剪箍筋算得的抗震抗剪能力(考虑轴力影响)的比值,将该时程中的最大比值定义为柱的“抗剪需求-能力比”;对于梁构件,直接用时程中最大剪力与抗震抗剪能力的比值作为梁的“抗剪需求-能力比”。分别统计各算例被考察梁、柱在每条地震波作用下的抗剪需求-能力比,以不少于 90% 被考察构件的抗剪需求-能力比小于 1.0 为评价标准,识别抗规 2010 对各个抗震等级取用的梁、柱剪力增大系数的有效性。对于不符合上述评价标准的情况,再逐步按一定增量调整剪力增大系数,重复步骤,直至所使用剪力增大系数取值满足上述评价标准为止。并以此为据给出对剪力增大系数取值调整的建议。

1 框架结构模型及地面运动记录

选用的空间框架算例平面布置如图 1 所示,均为 6 层。框架 KJ1、KJ2 和 KJ3 的抗震设防烈度和设计基本加速度值分别对应于 7 度(0.15g)、8 度(0.20g)和 9 度(0.40g)区,其他有关信息见表 1。各框架结构均假定为丙类建筑,所在地均按 II 类场地、第二设计分组考虑。在各算例的抗震设计中,利用 PKPM 程序确定构件截面尺寸及材料强度;再利用 SAP2000 程序完成各工况下的内力分析及柱端弯矩增大系数和梁、柱剪力增大系数的调整,并进行截面配筋设计。非弹性动力反应分析采用 PERFORM-3D 软件,建模时梁、柱单元采用基于材料的纤维模型,用 Mander 模型考虑箍筋对混凝土的约束作用,框架梁左、右各取 6 倍板厚范围内平行于梁轴线的板筋参与共同工作^[10]。



(a) KJ1和KJ2平面布置
(括号中数字适用于KJ2)



(b) KJ3平面布置

图 1 各抗震等级空间框架平面布置

Fig. 1 Plans of frame structures with different seismic resisting grades

表 1 框架结构算例的基本信息
Table 1 Details of the frame structures

框架结构编号	抗震等级	边、角柱截面尺寸	中柱截面尺寸	楼(屋)面板厚度/mm	线荷载/(kN·m ⁻¹)		框架梁截面尺寸	
					外墙	女儿墙	边框架	中框架
KJ1	三级	650 mm×650 mm (600 mm×600 mm)	600 mm×600 mm	100	12.7	3.9	350 mm×700 mm	300 mm×600 mm
KJ2	二级	700 mm×700 mm (650 mm×650 mm)	600 mm×600 mm	100	12.7	4.2	400 mm×800 mm	350 mm×700 mm
KJ3	一级	950 mm×950 mm (900 mm×900 mm)	600 mm×600 mm	100	16.2	7.6	450 mm×950 mm	350 mm×700 mm
层高/mm		混凝土强度		楼(屋)面荷载/(kN·m ⁻²)		小震下层间位移角		最大设计
底层	中间层	梁、板	柱	恒载	活荷载	X 方向	Y 方向	轴压比
4 200	3 900	C30	C40	4.0(4.5)	3.5(2.0)	1/570	1/603	0.72
4 200	3 900	C30	C40	4.0(4.5)	3.5(2.0)	1/579	1/556	0.71
4 800	3 900	C30	C40	4.0(5.5)	3.5(2.0)	1/563	1/587	0.31

注:边(角)柱尺寸一栏的括号内数字为框架柱在 5 层及以上变截面后的尺寸。

从美国太平洋地震研究中心(PEER)数据库中为各框架结构算例选取符合要求的各 7 组地面运动记录,所选用地面运动的基本信息见表 2。选波初始筛选条件包括:位于中国 II 类场地,对应美国场地条件的等效剪切波速是 260~540 m/s^[11],震源距为 10~30 km,地面运动持时大于 10T₁。以算例所在烈度区罕遇地震对应的反应谱为目标谱,

具体过程见文献[12-13]。抗规对关于结构承载力设计及变形验算的条文均以结构沿其平面主轴分别进行设计和分析为前提设置,再者,本结构无明显扭转效应,于是,在分析中采用在 *x* 方向单向输入地面运动的方式研究结构的地震响应。选取该方向位于中间的一榀平面框架作为主要考察对象。

表 2 各条地面运动的基本信息
Table 2 Basic information of earthquake ground motion records

框架编号	编号 RSN	地震事件名称	发震时间	记录台站名称	震级 <i>M</i>	距离 <i>R</i> _{rup}
KJ1	169-262	Imperial Valley-06	1979	Delta	6.53	22.03
	752-000	Loma Prieta	1989	Sturno (STN)	6.39	12.53
	767-090	Loma Prieta	1989	SMART1002	6.93	12.82
	960-000	Northridge-01	1994	Gilroy Array # 3	6.69	12.44
	1148-090	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.51	13.49
	1158-180	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	15.37
	1602-090	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.14	12.04
KJ2	68-090	San Fernando	1971	LA-Hollywood Stor FF	6.61	22.77
	725-360	Superstition Hills-02	1987	Poe Poad(temp)	6.54	13.7
	960-270	Loma Prieta	1994	Gilroy Array # 3	6.69	12.44
	1148-090	Kocaeli, Turkey	1994	Arcelik	7.51	13.49
	1158-180	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	15.37
	1485-045	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.62	26
	1762-090	Hector Mine	1999	Amboy	7.13	43.05
KJ3	721-090	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp. Co. Cent	6.54	18.2
	725-270	Superstition Hills-02	1987	Superstition Hills-02	6.54	11.16
	752-000	Loma Prieta	1989	Capitola	6.39	12.53
	1111-000	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	7.08
	1158-270	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	15.37
	1602-000	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.14	12.04
	1787-090	Hector Mine	1999	Hector	7.13	11.66

注:“地震波编号”一栏是指所选地面运动的 RSN 编号以及加速度文件的后缀。例如 RSN169-262 是 RSN169 波中加速度文件名 IMPVALL_H_H-DLT262.AT2 的缩写。

2 现行规范框架梁剪力增大系数的控制效果

为了获得现行设计规范对不同抗震等级框架梁所用的剪力增大系数 1.1、1.2 和 1.3 (见抗规 2010 第 6.2.4 条) 在相应设防烈度区罕遇地震作用下避免梁端发生剪切失效的控制效果, 对 3 个设防烈度区所选的框架结构算例逐一输入所选的标定到罕遇水准的 7 条地面运动记录, 在用每条记录完成动力反应分析后, 通过逐时点搜索找到该框架每梁在整个时程中出现的最大剪力, 并以此作为该梁的“罕遇地震作用剪力”。同时, 根据每根梁在考虑剪力增大系数的条件下按规范规定的抗震抗剪公式 (见混规 2010 第 11.3.4 条) 算得的箍筋需要量 (暂不考虑约束箍筋的构造需要量) 及其他截面特征值算出梁截面基于材料平均强度的抗震抗剪能力, 以此作为该根梁的“平均强度抗剪能力”, 计算该梁的抗剪需求-能力比。例如, 算例 KJ1 共有框架梁 18 根, 共输入地面运动 7 次, 故总计得出 126 个抗剪需求-能力比数据。将每个算例的这些数据进行统计, 所得抗剪需求-能力比的直方图如图 2 所示 (图中横坐标值表示各分布区间抗剪需求-能力比的平均值, 纵坐标表示该区间的构件数量与被考察构件总数的比值, 在图 2~图 5 中简称“需求比”)。

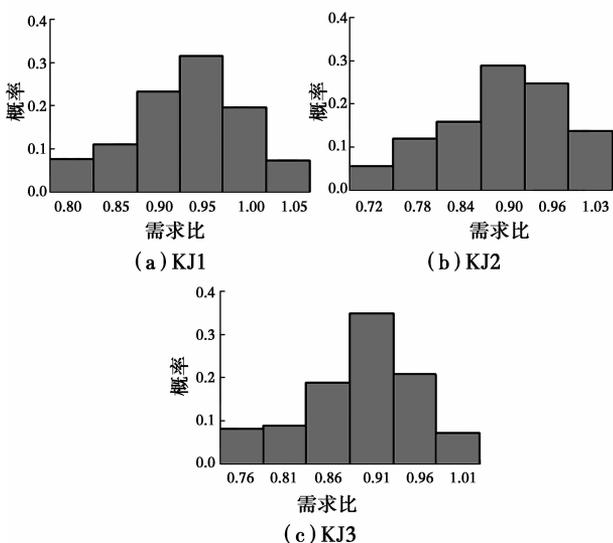


图 2 梁端剪力增大系数有效性识别结果
Fig. 2 Inspection of shear overstrength factors for ends of beams

从图 2 可以看出, 对于所考虑的 3 个算例, 抗剪需求-能力比不大于 1.0 的情况均已占到统计子样的 90% 以上 (KJ1、KJ2 和 KJ3 分别为 97%、93% 和

95%), 这表明抗规 2010 所给的针对这 3 个抗震等级的梁端剪力增大系数能够满足设定的抗剪安全性评价标准, 且尚不致过分安全。

对一级抗震等级的算例按抗规 2010^[4] 式 (6.2.4-2) 的要求, 即实配抗弯能力反算方案, 计算了梁端剪力, 发现各根梁算得的梁端剪力与用规范式 (6.2.4-1) (梁端剪力增大系数取 1.3) 计算出的剪力相比平均低 10% 左右, 主要体现了非弹性动力反应分析中取用的平均强度和规范式 (6.2.4-2) 中取用的 1.1 倍标准强度之间的差异, 以及非弹性动力反应分析中取用结构轴线尺寸与式 (6.2.4-2) 中取用梁净跨所带来的差异。需要指出的是, 按实配抗弯能力反算作用剪力符合单根梁两端发生正、负弯矩下受拉纵筋屈服时的平衡条件^[14], 因此, 取实配方法作为梁的强剪弱弯措施也可用。只不过该方法在现行结构设计用的各种商业软件中不便于操作, 必须由设计人手工完成计算, 故该方法的使用前景不如直接取用剪力增大系数的方法。

3 现行规范框架柱剪力增大系数的控制效果

现行设计规范对三级、二级和一级框架结构柱规定的剪力增大系数分别为 1.2、1.3 和 1.5 (见抗规 2010^[4] 第 6.2.5 条)。为了考察这些系数取值的有效性, 所用的分析思路与上面框架梁处类似。但与框架梁处不同的是, 框架柱的平均强度抗震抗剪能力计算中含有轴压力项, 而框架结构在非弹性动力反应时程中任何一根柱的轴力都随时点不断变化, 故当对每个算例输入一条标定到罕遇水准的地面运动记录并完成结构的非弹性动力反应分析后, 必须每一时间点根据实际作用剪力 (包含各时间点不同的轴力值) 算出其平均强度抗震抗剪能力, 以及该时点的罕遇地震作用剪力与这一平均强度抗震抗剪能力的比值, 即该时点的抗剪需求-能力比; 再通过沿时程的搜索找到该时程的最大抗剪需求-能力比。在对每个算例中的各根柱获得 7 条地面运动输入下的这一最大抗剪需求-能力比值后, 所作出统计直方图如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 如果仍用有 90% 的子样值不大于 1.0 作为评价规范规定的柱剪力增大系数实际控制效果的标准, 则三级抗震等级下的统计结果将无法满 足抗震抗剪安全性评价标准 (只有 80% 的子样不大于 1.0); 二级抗震等级下的统计结果虽略好于三级 (只有 85% 的子样不大于 1.0), 但仍未能满

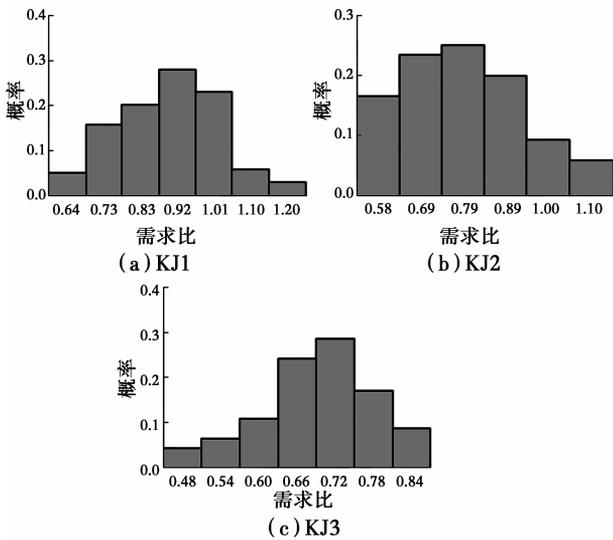


图 3 现行设计规范规定的柱端剪力增大系数有效性识别结果

Fig. 3 Inspection of shear overstrength factors for ends of columns in Chinese seismic design code

足所提出的安全性评价标准;而一级抗震等级下的统计结果则有过的安全余量(全部子样的抗剪需求-能力比小于或明显小于 1.0)。出现以上现象的主要原因在于,抗规 2010^[4]第 6.2.4 条规定,在抗震设计中确定柱端作用剪力时,需使用对应的已经考虑了柱端弯矩增大系数的相应柱上、下端截面的组合弯矩设计值。由于该规范规定一、二、三级抗震等级下框架柱端弯矩增大系数分别取 1.7、1.5 和 1.3 (见抗规 2010^[5]第 6.2.2 条),这就使得在一级框架结构柱抗震抗剪设计时所取用的设计剪力已被柱端弯矩增大系数 1.7 放大,因此,由该设计剪力求得的抗剪箍筋算出的平均强度抗剪能力也自然过于偏大,这是导致一级抗震等级框架柱上述抗剪能力-需求比统计结果过偏安全的主要原因。而二级抗震等级的柱设计剪力中虽含有柱端弯矩增大系数 1.5 的影响,但因所取柱剪力增大系数 1.3 尚不够大,故控制效果仍未能达到本文提出的标准。三级抗震等级因柱弯矩增大系数更小(只有 1.3),加之柱剪力增大系数取值也更小(只有 1.2),故明显达不到所提出的评价标准。

4 调整框架柱剪力增大系数的步骤及结果

从以上对 3 个算例中框架梁和框架柱能力-需求比的统计结果可以初步看出,抗规 2010^[5]规定的框架梁剪力增大系数取值基本合理。而框架柱的统

计分析结果却出现了上述异常情况,主要是因为制定框架柱剪力增大系数时缺乏相应的非弹性动力分析结果作为参考,而对抗震设计时确定作用剪力所用的柱端弯矩中包括了柱端弯矩增大系数的影响所导致的后果估计不足。故有必要对不同抗震等级框架结构的柱剪力增大系数取值作必要调整,以保证在不同抗震等级下框架结构各类构件的罕遇地震抗剪安全性得到相同水准的保证。

为此,分别对所选的 3 个算例确定了以下调整柱剪力增大系数的计算步骤:选取剪力增大系数的正、负增量为 0.05。对每个算例的每个剪力增大系数增量下,完成构件实际配箍及模型调整,重复完成对框架的抗剪设计和上述多条罕遇水准地面运动输入下的非弹性动力反应分析,依照以上相同思路完成对各算例框架柱抗剪需求-能力比的统计分析,直至柱剪力增大系数取值调整到使所得统计分析结果满足建议的抗剪安全性评价标准为止。

根据以上步骤,在不改变柱端弯矩增大系数的前提下完成对 3 个算例柱端剪力增大系数的逐次增量分析,所得的调整后的柱剪力增大系数建议值为,对三级、二级和一级分别取 1.45、1.35 和 1.20。这时对应的抗剪需求-能力比直方图如图 4 所示。从图中可以看出,当取用上述调整后的柱剪力增大系数后,在一、二、三级抗震等级下就都能满足在罕遇地震作用下的抗剪需求-能力比不大于 1.0 的子样占全部子样不少于 90% 的评价标准。从所建议的调整后的柱剪力增大系数数值可以看出,其取值随抗震等级变化的趋势与习惯见到的相反,即抗震等级越高取值越小。从前面讨论可知这主要是由于柱端弯矩增大系数随抗震等级提高而逐步增

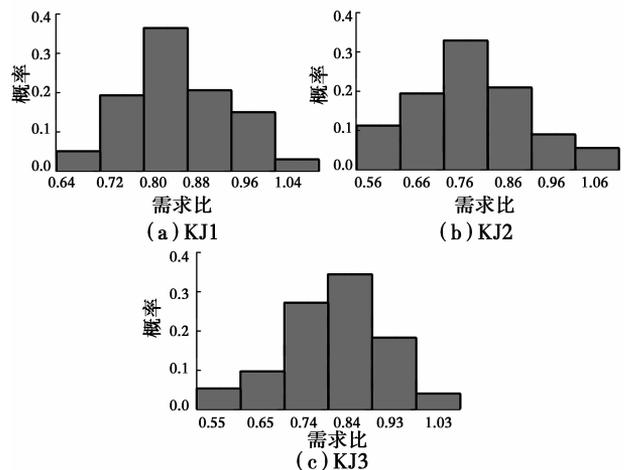


图 4 调整后柱端剪力增大系数有效性识别结果
Fig. 4 Inspection of adjusted shear overstrength factors for ends of columns

大造成的。

在以上分析的基础上,还对在柱端弯矩中不考虑柱端弯矩增大系数的情况下,对三级、二级和一级抗震等级框架柱所需剪力增大系数取值作了分析。结果表明,当满足上述统一评价标准时,三级、二级和一级抗震等级的柱剪力增大系数应分别取为 1.8、1.9 和 2.0。从以上两组建议取值的显著差异也可看出,考虑与不考虑柱端弯矩增大系数对柱剪力增大系数有重大影响。

5 构造约束箍筋与抗震抗剪箍筋的用量对比

从框架结构梁、柱剪力增大系数的本意角度讨论了其取值后,还应注意到根据规范要求,梁、柱端箍筋除需满足考虑了剪力增大系数后的抗震抗剪承载力需要之外,还需从构造角度满足对梁、柱端受压混凝土和受压纵筋发挥被动约束作用的要求,以保证梁、柱端延性能力和滞回耗能能力所需的箍筋数量(抗规 2010^[5]第 6.3.3 条和第 6.3.9 条)。而且,不同设计规范所用的设计思路都是最终箍筋用量按以上两项要求中的较大者确定。这意味着,所设置箍筋既可用于保证结构构件在罕遇地震作用下的抗剪安全性,又可用来发挥被动约束作用。

为了一般性地识别出中国现行规范规定中到底是哪一项要求对梁、柱端箍筋用量起控制作用,仍以所选 3 个框架结构算例为对象,逐一算出 3 个框架各梁、柱按以上两项要求所需的箍筋用量(抗震抗剪箍筋用量按本文建议调整后的剪力增大系数确定)。各层框架梁、柱构造约束箍筋需要量与抗震抗剪箍筋需要量比值的平均值随楼层变化规律如图 5 所示。其中,梁端箍筋用量按梁腹板水平截面内的配箍率计算,柱端箍筋用量按体积配箍率计算(其中假定柱截面两个方向箍筋用量相同)。从曲线走势可得出以下认识和判断:

1) 由于框架构件的约束箍筋需要量只随抗震等级变化,柱还需考虑轴压比影响;而抗震抗剪箍筋需要量则取决于各梁、柱构件弹性分析内力及剪力增大系数的大小,因构件的作用剪力是从上到下逐层减小的,故曲线随楼层序号成上升趋势。

2) 除一级抗震等级框架 KJ3 的底部楼层的箍筋数量由抗震抗剪控制外(图 5 中比值不大于 1.0),其余均由构造要求控制。

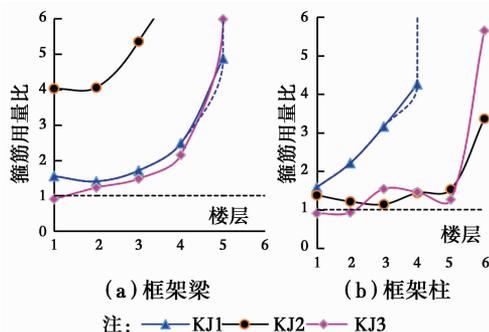


图 5 各层梁、柱构造箍筋与抗震抗剪箍筋的用量比值

Fig. 5 Average ratio of structural constraint stirrup and shear-resisting stirrup in each floor

6 结论和建议

1) 抗规 2010 对三级、二级和一级抗震等级框架结构中框架梁取用的剪力增大系数(1.1、1.2 和 1.3)大致可以以 90% 的保证率满足罕遇地震作用下的抗剪需求。

2) 抗规 2010 在框架结构柱剪力的计算中考虑了柱端弯矩增大系数的影响,且该系数随抗震等级的提高而增大,导致现行设计规范取用的柱剪力增大系数在一级抗震等级下明显偏大,而二、三级抗震等级取值不足。

3) 建议两套柱端剪力增大系数的取值方案:若继续保留抗规 2010 考虑柱端弯矩增大系数的做法,则柱剪力增大系数应调整为三级、二级和一级抗震等级分别取为 1.45、1.35 和 1.20;若在柱端弯矩增大系数中不再考虑柱端弯矩增大系数,则柱剪力增大系数应调整为三级、二级和一级抗震等级分别为 1.8、1.9 和 2.0。

参考文献:

- [1] 高孟潭.《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)宣贯教材[M].北京:中国质检出版社;中国标准出版社,2015.
- [2] Recommended seismic provisions for new buildings and other structures volume I: Part 1 provisions, Part 2 commentary: NEHRP 1050 [S]. FEMA P-1050-1/2015 ed. Washington, D. C.: Building Seismic Safety Council, 2015.
- [3] Guidelines for performance-based seismic design of tall buildings: PEER-2010/05 [R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2010.
- [4] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

- Code for design of concrete buildings: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [5] 建筑结构抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of building: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [6] FIB. Seismic design of reinforced concrete structures for controlled inelastic response (design concept) [R]. Comité Euro-Internat. du Béton (CEB), 2003.
- [7] 杨红, 韦锋, 白绍良, 等. 柱增强系数取值对钢筋混凝土抗震框架塑性铰机构的控制效果[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 155-161.
- YANG H, WEI F, BAI S L, et al. Effect of moment amplification factors of column on controlling plastic hinge mechanism of RC frame [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 155-161. (in Chinese)
- [8] 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 H, ZHU Z H, BAI S L. 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. (in Chinese)
- [9] PEER/ATC-72. Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings [R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2010.
- [10] 康绪聪. 用弹性及非弹性分析识别现浇板对钢筋混凝土梁的增强效应[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- KANG X C. Identify the slab enhancement effect to reinforce concrete beams by elastic and inelastic analysis [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [11] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
- LYU H S, ZHAO F X. Site coefficients suitable to China site category [J]. Earthquake Science, 2007, 29(1): 67-76 (in Chinese)
- [12] 罗熠. 考虑地震动谱形影响的钢筋混凝土框架结构非线性反应分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- LUO Y. Nonlinear seismic response analysis of RC frame structure accounting for the influence of ground motion special shape [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报, 2000, 33(6): 33-37.
- YANG P, LI Y M, LAI M. A new method for selecting inputting wave for time-history analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37. (in Chinese)
- [14] MOEHLEJ P, HOOPERJ D, LUBKEC D. Seismic design of reinforced concrete special moment frames [R]. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 1, 2008.

(编辑 胡英奎)