

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.007



# 不同设防烈度下 RC 框架结构的 抗侧向倒塌能力

林拥军<sup>a</sup>, 赵崇锦<sup>a</sup>, 潘毅<sup>a,b</sup>, 王源<sup>a</sup>

(西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031)

**摘要:**地震作用下建筑结构的抗侧向倒塌能力是抗震性能评价的基础。选取 4 个结构整体性能参数作为结构抗侧向倒塌能力评价指标, 分别为结构强屈比、超强系数、延性系数和延展系数。按中国现行规范设计了 12 个 RC 框架结构, 考虑侧向力分布形式和设防烈度的影响, 采用 Pushover 方法对结构进行计算, 并根据能力曲线和结构整体性能参数对结构抗侧向倒塌能力进行评价。结果表明: 结构整体性能参数能从强度储备和变形能力两个方面对结构抗侧向倒塌能力进行分析; 随着设防烈度和结构高度的提高, 侧向力分布形式对结构抗侧向倒塌能力的影响增大; 设防烈度对结构强屈比和结构延展系数的影响较小, 对结构超强系数和结构延性系数的影响较大; 随着设防烈度的提高, 结构超强系数减小, 而结构延性系数增大。

**关键词:**设防烈度; 框架结构; Pushover 分析; 抗侧向倒塌能力; 能力曲线

**中图分类号:** TU375.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2018)03-0044-09

## Lateral collapse-resistant capacity of reinforced concrete frame structures with different seismic fortification intensity

Lin Yongjun<sup>a</sup>, Zhao Chongjin<sup>a</sup>, Pan Yi<sup>a,b</sup>, Wang Yuan<sup>a</sup>

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** The lateral collapse-resistant capacity of the structure is the foundation of structure seismic performance assessment. Four seismic performance factors, namely, the yield ratio, the system overstrength factor, the ductility factor and the malleability factor, are used to evaluate lateral collapse-resistant capacity of 12 codified designed RC structures. The influences of the distribution of lateral loadings and seismic fortification intensity are considered in the Pushover analysis. Lateral collapse-resistant capacity of the structure is evaluated with capacity curve and seismic performance factors. The results show that lateral collapse-resistant capacity of the structure can be analyzed by seismic performance factors from two aspects, strength storage and deformability. The influence on lateral collapse-resistant capacity of the

**收稿日期:** 2017-05-05

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0802205); 国家自然科学基金(51608073, 51708461)

**作者简介:** 林拥军(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震鉴定与加固研究, E-mail: scsmith@126.com。

潘毅(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn。

**Received:** 2017-05-05

**Foundation item:** National Key Research and Development Program(No. 2016YFC0802205); National Natural Science Foundation of China (No. 51608073, 51708461)

**Author brief:** Lin Yongjun (1974-), associate professor, PhD, main research interests: structural seismic identification and reinforcement, E-mail: scsmith@126.com.

Pan Yi (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

structure of lateral loadings increases with the rise of seismic fortification intensity and the height of structures. Seismic fortification intensity has little influence on the yield ratio and the malleability factor, but has major influence on the system overstrength factor and the ductility factor. With the increase of fortification intensity, the overstrength coefficient decreases and the ductility coefficient increases.

**Keywords:** seismic fortification intensity; RC frame structures; Pushover analysis; lateral collapse-resistant capacity of the structure; capacity curve

抗倒塌能力是结构抗震设计的主要目标,中国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(简称《抗规》)及现有研究主要采用抗震概念设计和构造措施来保证结构的抗倒塌能力,缺乏相应的计算方法和定量评定指标<sup>[1-5]</sup>。汶川、芦山等地震经验表明,严格按照规范设计、施工的 RC 框架结构虽然具有较好的抗震性能,但大震导致结构倒塌造成的损失依然较大,结构抗大震的倒塌能力有待进一步提高,亟需加强对按现行《抗规》设计的结构进行抗地震倒塌能力分析,了解其地震安全水平,为结构抗震设计提供科学依据<sup>[6-8]</sup>。现有对 RC 框架结构抗地震侧向倒塌能力的研究中,结构多是按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)进行设计,而按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)设计的较少<sup>[7]</sup>。

当前,各类结构设计规范均以构件不超过最大承载力来保证结构的安全性和抗侧向倒塌能力,而对结构整体抗侧向倒塌能力考虑较少。结构抗震设计应保证结构具有足够的承载力(强度储备)和延性(变形能力),现行《抗规》并未对结构整体延性提出具体规定,仅从抗震概念设计的角度针对构件延性提出了相应要求,但构件的延性要求很难保证整个结构具有可靠的变形能力<sup>[8]</sup>。因此,结构抗侧向倒塌能力应包含结构整体强度储备和变形能力两个方面。通常情况下,结构都存在超强,即结构的实际承载力大于设计承载力,以保证结构在大震下具有较好的抗震性能,结构整体超强系数反映了结构极限承载力相对于设计水平力的相对裕度<sup>[9-10]</sup>,使结构具有一定的变形能力可保证承载力和刚度不会因为结构发生塑性变形而急剧下降<sup>[11-13]</sup>。在水平地震作用下,结构整体受力可分为屈服前、屈服至最大承载力和最大承载力至倒塌 3 个阶段。结构整体延性系数仅反映了结构从屈服至最大承载力、承载力未显著下降期间的变形能力<sup>[8]</sup>。为反映结构整体强度储备和变形能力,选取结构强屈比和延展系数分别代表结构极限承载力相对屈服水平力的相对裕度及结构达到最大承载力至倒塌期间的变形能力。

Pushover Analysis(简称 POA)方法简单易行、能充分反映结构局部塑性变形和整体变形机

制<sup>[14-15]</sup>,笔者采用 Pushover 方法得到结构的整体能力曲线,定义了 4 个结构抗侧向倒塌能力整体性能参数,分别为结构强屈比、超强系数、延性系数和延展系数。按现行《抗规》设计了 12 个具有不同设防烈度和结构层数的 RC 框架结构模型,在不同侧向力分布形式下,采用 Pushover 方法对各模型进行侧向增量倒塌分析,得到结构整体性能参数,从强度储备和变形能力两个方面分析结构的抗侧向倒塌能力。

## 1 基于 POA 的结构受力特征值及整体倒塌失效模式

### 1.1 基于 POA 的结构受力特征值

POA 假定结构的地震反应仅由第一振型控制,位移形状向量在水平地震作用过程中不变,通过在结构上施加某一分布模式并逐级增加的水平力,使构件依次进入塑性状态,直至整个结构达到目标位移或倒塌<sup>[16]</sup>,从而得到结构的基底剪力和顶部控制点侧移  $V-u$  曲线(能力曲线),如图 1 所示。

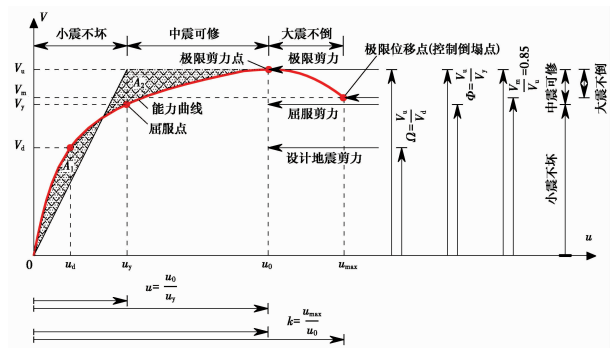


图 1 结构能力曲线

Fig. 1 Structural capacity curve

结构屈服剪力  $V_y$  和位移  $u_y$ 、极限剪力  $V_u$  和位移  $u_u$ 、极限位移  $u_{max}$  和剪力  $V_m$  均是结构重要的受力特征值,可通过能力曲线上的结构屈服点、极限剪力点和极限位移点(即倒塌控制点)来确定,如图 1 所示。结构的屈服点可采用能量法确定<sup>[7]</sup>,具体过程是:先找出能力曲线的最大剪力点,并沿最大剪力点作水平线;再通过原点作斜线与该水平线相交,并使斜线和能力曲线所包围面积  $A_1$  与斜线、水平线和能力曲线三者所包围面积  $A_2$  相等;然后,通过水平线

与斜线的交点作竖线,竖线与能力曲线的交点便为结构屈服点。极限位移点根据结构的破坏状态来确定,定义为极限剪力下降为 85% 时所对应的点<sup>[8]</sup>,并将其作为结构的倒塌控制点。

### 1.2 结构整体倒塌失效模式

结构整体倒塌失效模式有竖向连续倒塌和侧向增量倒塌两种<sup>[8]</sup>。竖向连续倒塌是指因结构局部构件失效导致其相邻构件失效,并且这种失效会发生连锁反应,导致结构产生大面积的局部坍塌甚至整体倒塌。侧向增量倒塌指水平地震作用过大导致结构局部构件失效,继而结构发生整体失稳丧失竖向承载力,引起结构整体倒塌。

RC 框架结构抗震设计的主要目标是实现大震作用下结构不发生侧向增量倒塌,因此,笔者研究的倒塌为结构侧向增量倒塌。

## 2 结构整体抗侧向倒塌能力性能参数

### 2.1 结构强屈比

强屈比指钢材的抗拉强度与屈服强度实测值之比,反映了钢材的抗震性能和强度储备。为保证钢筋混凝土结构或构件出现塑性铰后的耗能能力和转动能力,《抗规》要求钢筋的强屈比大于或等于 1.25。结构强屈比  $\Phi$  可以反映结构整体的强度储备和抗震性能,可按式(1)计算。

$$\Phi = \frac{V_u}{V_y} \quad (1)$$

式中: $V_u$  为结构的极限剪力; $V_y$  为结构的屈服剪力。

### 2.2 结构超强系数

结构在地震作用下,由于内力重分布,结构实际基底水平极限剪力一般都会比设计水平地震作用大,超出设计的剪力便为结构的超强承载力,其幅度可采用超强系数  $\Omega$  来表示<sup>[9]</sup>。 $\Omega$  可按式(2)计算。

$$\Omega = \frac{V_u}{V_d} \quad (2)$$

式中: $V_u$  为结构的极限剪力; $V_d$  为结构的设计水平地震作用。

### 2.3 结构延性系数

结构延性表示结构从屈服至最大承载力,且承载力未显著下降期间的变形能力,反映了结构发生塑性变形以及耗散滞回能量的能力<sup>[8]</sup>。结构延性大小用延性系数  $\mu$  表示,可按式(3)计算。

$$\mu = \frac{\mu_0}{\mu_y} \quad (3)$$

式中: $\mu_0$  为结构达到极限剪力时的顶部位移; $\mu_y$  为结构的屈服位移。

### 2.4 结构延展系数

结构延展性表示结构达到极限荷载后直至倒塌

期间的塑性变形能力,反映的是结构从极限荷载至倒塌之前的非弹性变形能力和耗能能力,其大小用结构延展系数  $\kappa$  表示,可按式(4)计算。

$$\kappa = \frac{\mu_{\max}}{\mu_0} \quad (4)$$

式中: $\mu_{\max}$  为结构的极限位移; $\mu_0$  为结构达到极限剪力时的位移。

## 3 结构模型

### 3.1 模型建立

以医院和学校建筑中典型的内廊式结构为例,其平面布置较为规则,设计了不同设防烈度下不同层数的 12 个 RC 框架结构。场地类别为 II 类,抗震设防类别为丙类,抗震设防烈度分别为 6 度(0.05g)、7 度(0.10g)、7.5 度(0.15g)、8 度(0.20g)、8.5 度(0.30g)、9 度(0.40g),设计地震分组为第二组,层数分别为 5 层(高 17.2 m)和 8 层(高 27.1 m)。结构平面布置如图 2 所示。恒载:楼面取 5.0 kN/m<sup>2</sup>,屋面取 7.0 kN/m<sup>2</sup>,隔墙与围护墙荷载取 10.0 kN/m;活载:房间取 2.5 kN/m<sup>2</sup>,走廊取 3.5 kN/m<sup>2</sup>,屋面取 0.5 kN/m<sup>2</sup>。严格按现行

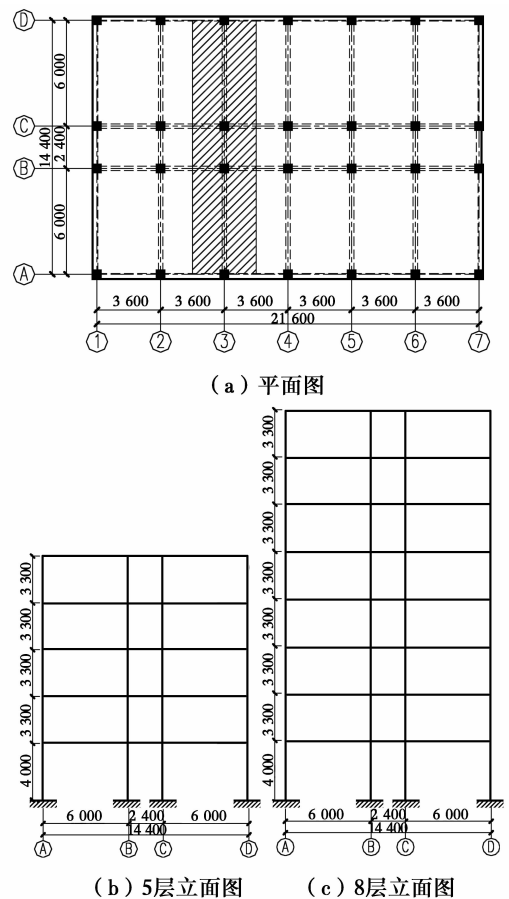


图 2 结构平、立面布置

Fig. 2 Plan and elevation arrangement of structure

《抗规》进行设计,模型编号、设防烈度、抗震等级等结构基本参数见表 1。表中,RFa-b 中 RF 表示钢筋

混凝土框架结构,  $a$  表示结构层数,  $b$  表示抗震设防烈度。

表 1 结构基本参数

Table 1 Basic structural parameters

模型 编号	基本地震 加速度/ $g$	抗震 等级	混凝土强 度等级	梁截面尺寸	梁截面配筋		柱截面尺寸	柱截面配筋	
					支座	梁底		边柱	中柱
RF5-6	0.05	四	C35	250 mm×500 mm	2B18	2B16	400 mm×400 mm	8 $\Phi$ 14	6 $\Phi$ 14
RF5-7	0.1	三	C35	250 mm×500 mm	2B22	2B16	400 mm×400 mm	6 $\Phi$ 18	4 $\Phi$ 20
RF5-7.5	0.15	三	C35	250 mm×500 mm	3B22	3B16	400 mm×400 mm	6 $\Phi$ 20	6 $\Phi$ 25
RF5-8	0.2	二	C35	250 mm×500 mm	3B25	2B22	500 mm×500 mm	8 $\Phi$ 25	6 $\Phi$ 32
RF5-8.5	0.3	二	C35	300 mm×600 mm	3B32	2B32	650 mm×650 mm	16 $\Phi$ 25	16 $\Phi$ 32
RF5-9	0.4	一	C40	300 mm×700 mm	4B32	3B32	800 mm×800 mm	18 $\Phi$ 36	18 $\Phi$ 36
RF8-6	0.05	三	C35	250 mm×500 mm	2B18	2B16	400 mm×400 mm	6 $\Phi$ 18	4 $\Phi$ 20
RF8-7	0.1	二	C35	250 mm×500 mm	2B22	2B16	400 mm×400 mm	6 $\Phi$ 18	6 $\Phi$ 18
RF8-7.5	0.15	二	C35	250 mm×500 mm	3B22	3B16	400 mm×400 mm	4 $\Phi$ 25	4 $\Phi$ 32
RF8-8	0.2	一	C35	250 mm×500 mm	3B25	2B22	500 mm×500 mm	14 $\Phi$ 22	14 $\Phi$ 25
RF8-8.5	0.3	一	C40	300 mm×600 mm	3C32	2C32	650 mm×650 mm	12 $\Phi$ 25	12 $\Phi$ 28
RF8-9	0.4	特一	C45	300 mm×700 mm	4C32	3C32	850 mm×850 mm	18 $\Phi$ 36	16 $\Phi$ 36

### 3.2 数值模型

混凝土和钢筋的本构关系参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)确定。几何模型为平面框架结构,有限元模型单元有梁单元和柱单元两种,均为杆单元,单元节点具有 3 个自由度,平动自由度 2 个,转动自由度 1 个。

采用 SAP2000 建立数值模型并进行 Pushover 分析,采用离散塑性铰考虑框架柱端、梁端屈服和屈服后的非线性行为,在框架梁端定义弯矩( $M$ )铰,柱端定义轴力弯矩( $P$ - $M$ - $M$ )铰,塑性铰本构关系如图 3 所示。图中,  $AB$  为弹性段、 $BC$  为强化段、 $CD$  为卸载段、 $DE$  为塑性段,  $B$  点代表铰开始出现,  $C$  点为倒塌点。点  $B$  和点  $C$  间的斜率取钢筋总应变强化的 10%,点  $C$ 、 $D$  和  $E$  按 FEMA-356<sup>[17]</sup> 确定,  $F_y$  和  $M_y$  根据实际配筋计算得到。

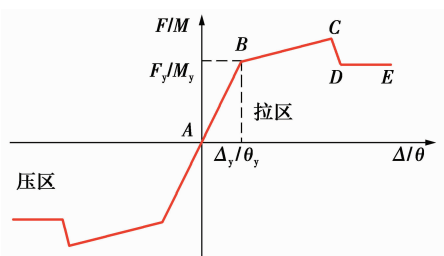


图 3 塑性铰的本构关系

Fig. 3 Constitutive relationship of plastic hinge

学者们对多层 RC 框架结构,分别就均匀模式、倒三角模式和第 1 模态模式对分析结果的影响进行了研究。研究表明,侧向力模式对 RC 框架结构 Pushover 分析结果有一定的影响<sup>[18-21]</sup>。因此,在 Pushover 分析时采用均匀模式、倒三角模式及第 1 模态模式 3 种模式分别进行加载。

## 4 结构抗侧向倒塌能力分析

首先,分析不同侧向力模式对结构抗侧向倒塌能力的影响;然后,从不同侧向力模式下的能力曲线中提取结构屈服剪力和位移、极限剪力和位移、极限位移和剪力等受力特征值,计算出结构强屈比、超强系数、延性系数和延展系数等结构整体性能参数;最后,分析不同抗震设防烈度对各个整体性能参数的影响。

### 4.1 不同侧向力模式对结构抗侧向倒塌能力的影响

分别采用倒三角模式、均匀模式和第 1 模态等 3 种侧向力分布,对结构进行 Pushover 分析。当底部剪力下降为极限剪力的 85% 时,定义为结构倒塌的极限状态。模型在不同侧向力模式下的能力曲线如图 4 所示。由图 4 可知,对于 5 层结构,倒三角模式和第 1 模态的计算结果差异较小;而对于 8 层结构,均匀模式与第 1 模态的计算结果差异较小。这

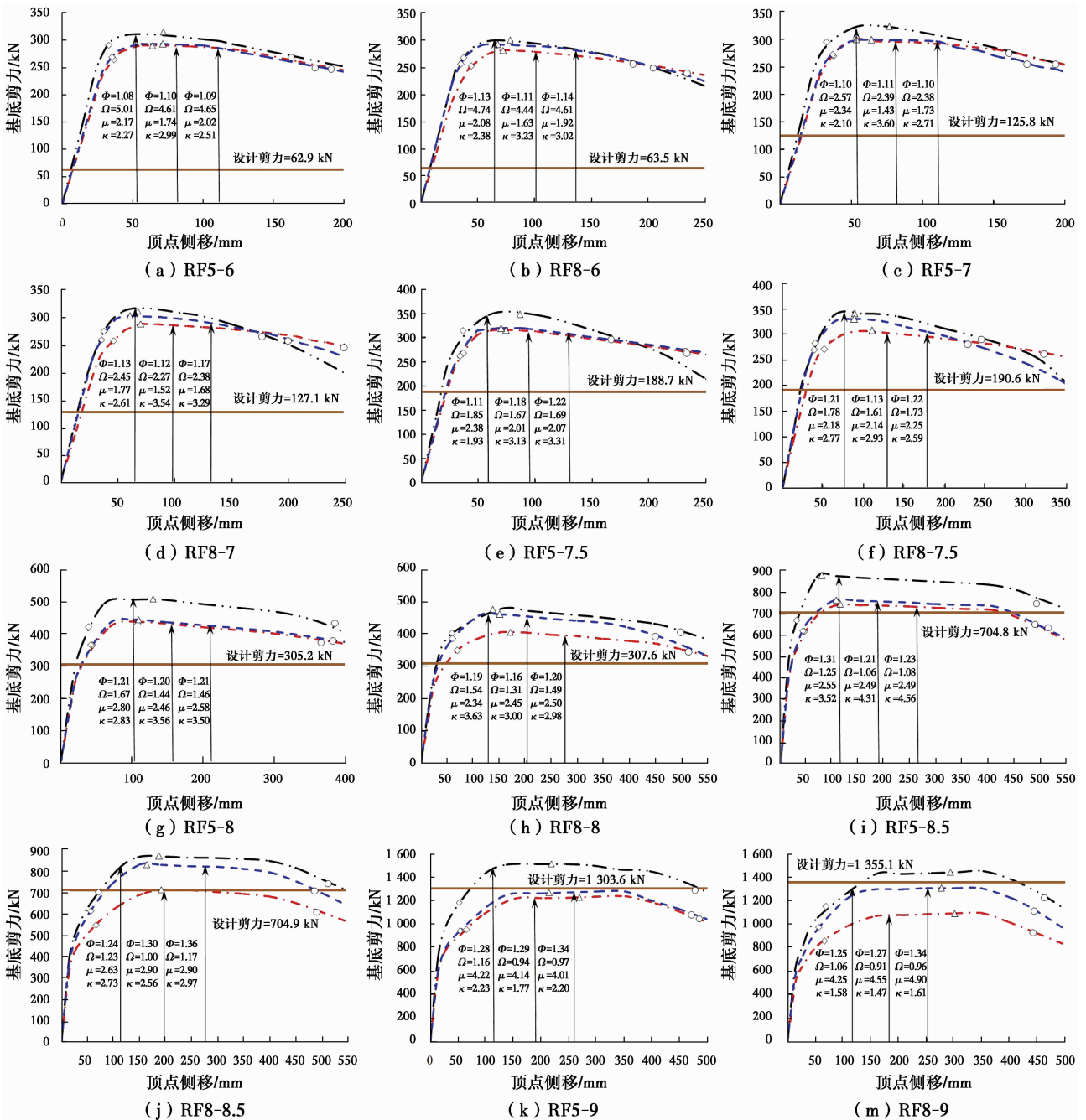


是由于结构高度较小时,第 1 模态的形状接近于倒三角模式,而结构高度增加后,第 1 模态的形状接近于均匀模式。

以 5 层结构为例,相较于均匀模式,在倒三角模式和第 1 模态下,结构在抗震设防烈度为 6 度 (0.05g)、7 度 (0.10g) 和 7.5 度 (0.15g) 时,强屈比和延展系数均有所提高,而超强系数和延性系数均有所降低;在抗震设防烈度为 8 度 (0.20g) 和 8.5 度

(0.30g) 时,强屈比、超强系数和延性系数均有所降低,而延展系数有所提高;在抗震设防烈度为 9 度 (0.40g) 时,强屈比有所提高,而超强系数、延性系数和延展系数均有所降低。

以上分析表明,侧向力分布模式对结构整体性能参数有影响,即对结构的抗倒塌能力有影响。影响程度与设防烈度和结构高度有关,设防烈度和结构高度越高,侧向力模式影响就越大。



注: ◇为屈服点; △为极限剪力点; ○为极限位移点。  
—·— 均匀模式    - - - 倒三角模式    - · - 第1模态    — 设计地震剪力

图 4 不同侧向力模式下的能力曲线

Fig. 4 Capacity curve under different modes of lateral force

#### 4.2 不同设防烈度对结构强屈比的影响

图5为不同设防烈度下结构强屈比 $\Phi$ 及变化情况。按设防烈度6度(0.05g)、7度(0.10g)、7.5度(0.15g)、8度(0.20g)、8.5度(0.30g)以及9度(0.40g)设计时,5层结构的结构强屈比 $\Phi$ 平均值分别为1.09、1.10、1.17、1.21、1.25和1.30,8层结构分别为1.13、1.14、1.19、1.18、1.30和1.29,8层结构的强屈比 $\Phi$ 略大于5层结构,但均在1.1~1.3之间,与《抗规》规定的钢筋强屈比限值最小值1.25十分接近,这表明钢筋对RC框架结构抗震性能和抗倒塌能力的影响比混凝土大。因此,结构强屈比 $\Phi$ 还可以综合反映材料对结构受力的影响。

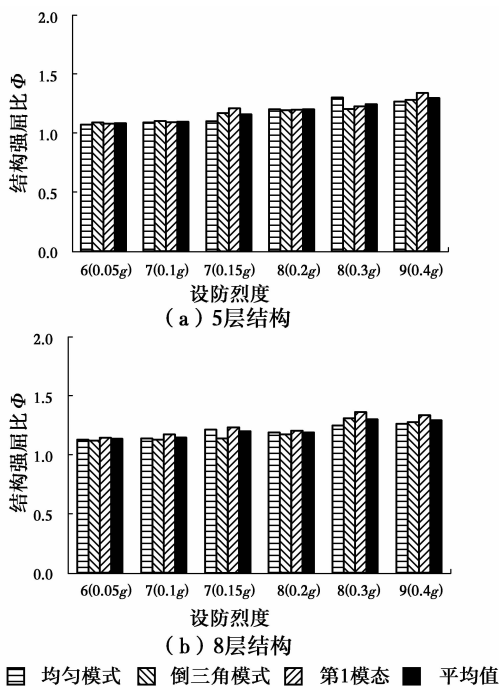


图5 结构强屈比  
Fig. 5 Structural strength yield ratio

结构强屈比 $\Phi$ 随设防烈度和层高的提高而增大,即结构抗侧向倒塌能力随设防烈度和层高的提高而减小。以8层结构为例,6度(0.05g)设防时结构强屈比 $\Phi$ 为1.13,而9度(0.40g)设防时为1.30,提高了15%。

#### 4.3 不同设防烈度对结构超强系数的影响

图6为不同设防烈度下结构超强系数 $\Omega$ 及变化情况。从图6可以看出,无论是5层还是8层结构,按倒三角模式计算的结构超强系数 $\Omega$ 都较小,而均匀模式较大,第1模态模式介于二者之间。对于5层结构,第1模态模式和倒三角模式较接近;对于8层结构,第1模态模式和均匀模式较接近。结构超强系数 $\Omega$ 随设防烈度的提高而减小,与结构层数基

本无关。

需要说明的是,抗震设防烈度为9度(0.4g)时,按倒三角模式和第1模态模式计算出的超强系数 $\Omega$ 出现了小于1.0的情况,其原因在于计算没有考虑现浇楼板和填充墙对结构超强能力的有利影响。根据文献[12],考虑填充墙和现浇楼板对结构超强能力的影响系数最小分别为1.05、1.1。因此,在考虑填充墙和现浇楼板的影响后,9度(0.4g)设防结构的超强系数 $\Omega$ 仍然大于1.0,在6度(0.05g)、7度(0.10g)、7.5度(0.15g)、8度(0.20g)、8.5度(0.30g)和9度(0.40g)抗震设防时,5层结构超强系数 $\Omega$ 平均值分别为5.5、2.8、2.0、1.8、1.3和1.2,8层结构分别为5.3、2.7、2.0、1.7、1.3和1.1,8层结构的超强系数 $\Omega$ 略低于5层结构。

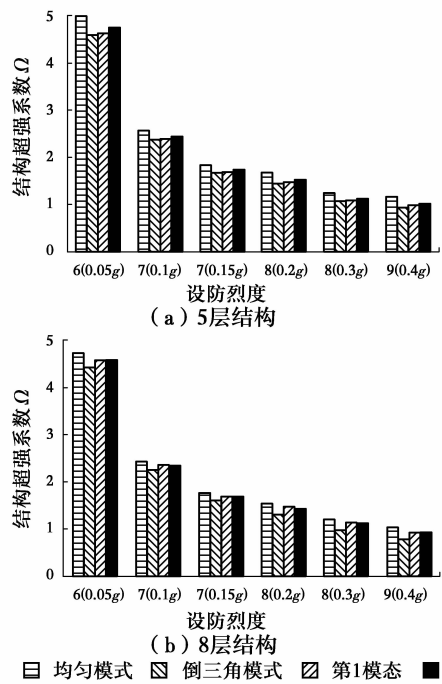


图6 结构超强系数  
Fig. 6 Structural overstrength factor

设防烈度对结构超强系数 $\Omega$ 的影响较大,即结构抗侧向倒塌能力随设防烈度和层高的提高而减小。以8层结构为例,6度(0.05g)设防时超强系数 $\Omega$ 为5.3,而9度(0.40g)设防时为1.1,降低了79%。

#### 4.4 不同设防烈度对结构延性系数的影响

图7为不同设防烈度下结构延性系数 $\mu$ 及变化情况。按设防烈度6度(0.05g)、7度(0.10g)、7.5度(0.15g)、8度(0.20g)、8.5度(0.30g)和9度(0.40g)设计时,5层结构延性系数 $\mu$ 平均值分别为1.97、1.83、2.15、2.79、2.51和4.12,8层结构分别

为 1.88、1.66、2.19、2.43、2.81 和 4.57。设防烈度较低时,8 层结构的延性系数  $\mu$  略低于 5 层结构,设防烈度较高时,8 层结构的延性系数  $\mu$  高于 5 层结构。设防烈度对结构延性系数  $\mu$  的影响较大。以 8 层结构为例,9 度(0.40g)设防时延性系数  $\mu$  为 4.57,而 7 度(0.10g)设防时为 1.66,降低了 64%。

除 7 度(0.1g)设防的结构延性系数  $\mu$  平均值(1.7)较小之外,其余结构的延性系数  $\mu$  随设防烈度的提高而增大。由于 6 度(0.05g)设防结构的配筋主要由竖向重力荷载或构造确定,其实际抗侧向承载力比设计地震作用大,故其延性系数  $\mu$  大于 7 度(0.1g)设防结构。在大震作用下,7 度(0.10g)设防结构的变形能力比其余设防烈度的结构弱。

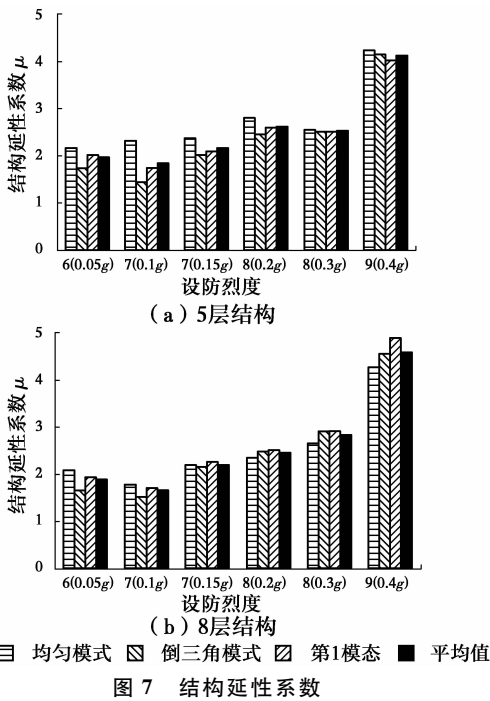


Fig. 7 Structural ductility factor

事实上,在按抗规设计钢筋混凝土框架结构时,随着设防烈度的增大,结构的抗震等级也会相应提高,其构造要求(如柱轴压比、梁端箍筋加密区长度、柱端箍筋加密区的配置要求等)也会相应提高,进而使得梁、柱构件的延性增大。而构件的延性是结构整体延性的决定性因素,因此,总体来讲,随着设防烈度的提高,结构的整体延性系数应是增大的,计算结果与此一致。

需要说明的是,在采用 SAP2000 建立数值模型并进行 Pushover 分析时,采用离散塑性铰考虑框架柱端、梁端屈服和屈服后的非线性行为,并通过合理定义塑性铰本构关系来反映前述构造要求对构件非线性行为的影响。

#### 4.5 不同设防烈度对结构延展系数的影响

图 8 为不同设防烈度下结构延展系数  $\kappa$  及变化情况。按设防烈度 6 度(0.05g)、7 度(0.10g)、7.5 度(0.15g)、8 度(0.20g)、8.5 度(0.30g)和 9 度(0.40g)抗震设防时,5 层结构延展系数  $\kappa$  平均值分别为 2.59、2.80、2.79、3.30、5.12 和 2.07,8 层结构分别为 2.88、3.15、2.76、3.20、2.76 和 1.55。当结构设防烈度小于 8 度(0.2g)时,结构层数(高度)对结构延展性的影响较小,8 度(0.3g)及 9 度(0.4g)设防时,5 层结构的延展性好于 8 层结构。

9 度(0.4g)设防结构的延展系数  $\kappa$  最低,仅为 1.8,结构变形能力较弱;8 度(0.3g)设防结构的延展系数  $\kappa$  最高,为 3.9,结构变形能力较强,其余设防烈度的结构的延展系数  $\kappa$  随设防烈度的提高变化不大,均在 3.0 左右。

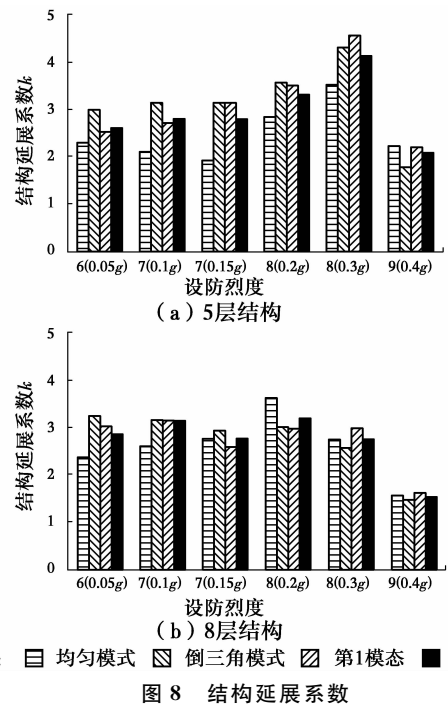


Fig. 8 Structural malleability factor

## 5 结论

按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)设计了 12 个钢筋混凝土框架结构,在不同侧向力分布形式下,采用 Pushover 方法对各结构进行侧向增量倒塌分析。选取结构强屈比、超强系数、延性系数和延展系数等 4 个结构整体性能参数,对结构的抗侧向倒塌能力进行了分析。

1)随着设防烈度和结构高度的提高,侧向力分布形式对结构抗侧向倒塌能力的影响增大。

2)强屈比和超强系数从强度储备方面反映了结

构的抗侧向倒塌能力,而延性系数和延展系数从变形能力方面反映了结构的抗侧向倒塌能力。

3)设防烈度对强屈比和结构延展系数的影响较小,对超强系数和延性系数的影响较大;随着设防烈度的提高,结构的超强系数减小,而延性系数增大。

#### 参考文献:

- [1] 程玲, 贡金鑫, 李颖. 基于 Pushover 方法分析的受腐蚀 RC 柱抗震性能评定[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 19-23.  
CHENG L, GONG J X, LI Y. Seismic evaluation of corroded reinforced concrete columns based on pushover analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(10): 19-23. (in Chinese)
- [2] 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.  
YE L P, QU Z, LU X Z, et al. Collapse prevention of building structures: A lesson from the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42-50. (in Chinese)
- [3] 潘毅, 刘宜丰, 秦楠, 等. 成都市规划展览馆辅楼抗连续倒塌评估(I)——基于概念设计的线性静力分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(Sup1): 177-181.  
PAN Y, LIU Y F, QIN N, et al. Progressive collapse resistance analysis on annex building of Chengdu Urban Planning Exhibition Hall, Part I: Linear static analysis based on conceptual design [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup1): 177-181. (in Chinese)
- [4] 潘毅, 王初翀, 卢立恒, 等. 建筑结构防连续倒塌分析与设计方法研究进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(1): 52-56.  
PAN Y, WANG C C, LU L H, et al. Advance research on analysis and design methods to resist progressive collapse for building structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(1): 52-56. (in Chinese)
- [5] 王初翀, 魏智辉, 陈侠辉, 等. 机械铰的量化准则及其在倒塌分析中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(Sup2): 1-5.  
WANG C C, WEI Z H, CHEN X H, et al. A quantitative criterion for mechanical hinge and its application on collapse analysis of reinforced concrete structures [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(Sup2): 1-5. (in Chinese)
- [6] 闫培雷, 孙柏涛, 张昊宇. 芦山 7.0 级强烈地震 RC 框架结构教学楼震害[J]. 土木工程学报, 2014, 47(Sup1): 24-28.  
YAN P L, SUN B T, ZHANG H Y. Seismic damage to RC frame teaching buildings in Lushan MS7. 0 earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup1): 24-28. (in Chinese)
- [7] 施炜, 叶列平, 陆新征, 等. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 41-48.  
SHI W, YE L P, LU X Z, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 41-48. (in Chinese)
- [8] 吕大刚, 崔双双, 陈志恒. 基于 Pushover 分析的 RC 框架结构抗侧向倒塌能力评定[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 180-189.  
LYU D G, CUI S S, CHEN Z H. Assessment of sidesway collapse resistant capacity of reinforced concrete frame structures based on pushover analysis [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 180-189. (in Chinese)
- [9] 崔双双, 吕大刚, 宋鹏彦. 填充墙和现浇板对钢筋混凝土框架结构整体超强的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 41-48.  
CUI S S, LYU D G, SONG P Y. Effects of infill walls and cast-in-place slabs on global overstrength of RC frames [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 41-48. (in Chinese)
- [10] 卓卫东. 桥梁结构延性抗震设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2000: 1-48.  
ZHUO W D. Study on ductility seismic design of bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2000: 1-48. (in Chinese)
- [11] LEE H J, KUCHMA D A. Seismic overstrength of shear walls in parking structures with flexible diaphragms [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(1): 86-109.
- [12] KURBAN C O, TOPKAYA C. A numerical study on response modification, overstrength, and displacement amplification factors for steel plate shear wall systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 38(4): 497-516.
- [13] ASGARIAN B, SHOKRGOZAR H R. BRBF response modification factor [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 290-298.
- [14] 韩小雷, 周新显, 季静, 等. 基于构件性能的 RC 结构抗震评估方法研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4):

- 177-184.  
HAN X L, ZHOU X X, JI J, et al. Research on component-performance based seismic assessment of RC structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4): 177-184. (in Chinese)
- [15] 赵桂峰, 李晓芬, 张猛. 基于 pushover 方法的 RC 框架结构抗震性能评估研究[J]. *世界地震工程*, 2012, 31(10): 19-23.  
ZHAO G F, LI X F, ZHANG M. Seismic assessment of an reinforced concrete frame building structure using pushover analysis [J]. *World Earthquake Engineering*, 2012, 31(10): 19-23. (in Chinese)
- [16] KRAWINKLER H, SENEVIRATNA G D P K. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(4/5/6): 452-464.
- [17] FEMA356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings [M]. Washington D. C., 2000.
- [18] CHEN P, COLLINS K R. Some observations on performance-based and reliability-based seismic design of asymmetric building structures [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(8): 1005-1010.
- [19] MWAFY A M, ELNASHAI A S. Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(5): 407-424.
- [20] 李刚, 刘永. 不同加载模式下不对称结构静力弹塑性分析[J]. *大连理工大学学报*, 2004, 44(3): 350-355.  
LI G, LIU Y. Static nonlinear analysis of asymmetric structures under different load patterns [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2004, 44(3): 350-355. (in Chinese)
- [21] 门进杰, 史庆轩, 周琦. 建筑结构考虑刚度变化的 Pushover 水平侧向力分布[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41(10): 184-187.  
MEN J J, SHI Q X, ZHOU Q. Lateral load distribution for Pushover analysis considering story stiffness for building structures [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41(10): 184-187. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)