

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.001

考虑刚度折减的弹性二阶分析法在双跨排架结构中的运用

刘毅^{a,b}, 刘年朋^b, 卓子^c, 蒙秀凡^b

(重庆大学 a.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; b.土木工程学院; c.建筑城规学院, 重庆 400045)

摘要:在框架结构设计中,构件的二阶效应采用一种实用且高效的考虑构件刚度折减的弹性有限元法来分析,该方法既能考虑结构的几何非线性又能考虑材料非线性,其准确性主要依赖于对构件刚度折减系数取值的合理性,但目前尚缺乏对排架结构的刚度折减系数的研究。以34个典型单层双跨等高排架结构为研究对象,进行最不利荷载条件下的弹性二阶分析和静力非线性分析,以排架结构整体二阶效应等效为基准,提出适用于双跨排架柱的统一刚度折减系数建议值;通过对多个双跨排架结构的非线性分析结果对比,验证了考虑刚度折减的弹性二阶分析法应用于排架结构的有效性,以及其刚度折减系数取值的合理性。

关键词:排架结构;静力非线性分析;弹性二阶分析;刚度折减系数

中图分类号:TU318

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)09-001-07

The application of elastic second-order method with considering stiffness reduction to two-span bent structure

LIU Yi^{a,b}, LIU Nianpeng^b, ZHUO Zi^c, MENG Xiufan^b

(a. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, b. College of Civil Engineer; c. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: Second-order effect of structural members is usually analyzed with a practical and effective elastic finite element method in the design of frame structure. The method considers the stiffness reduction of structural members, the structural geometric nonlinearity and the material nonlinearity, and its accuracy mainly depends on the rationality of stiffness reduction factor. Until now, there has no research on the stiffness reduction factor of the two-span bent structure. 34 typical single story equal-leg two-span bent columns were taken as the object to carry out the elastic second-order analysis and the nonlinear static analysis under the most unfavorable loads. Taking the equivalence of the entirety second-order effect as the target, a unified stiffness reduction ratio is suggested which is compliant to two-span bent columns. And the effectiveness of the elastic second-order method with considering stiffness reduction in two-span bent structure and the rationality of the stiffness reduction factor is proved through comparing the nonlinear analysis to multi two-span bent structures.

Keywords: bent structure; nonlinear static analysis; second-order elastic analysis; stiffness reduction factor

收稿日期:2017-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59678035)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(59678035).

作者简介:刘毅(1971—),男,重庆大学副教授,博士,主要从事钢筋混凝土结构研究,(E-mail)liuyicg@163.com。

几何非线性和材料非线性并存是钢筋混凝土构件在受荷过程中的基本特征^[1]。几何非线性主要指轴向压力对受压构件的侧移和挠曲产生附加弯矩和附加曲率,即二阶效应问题;材料非线性主要指构件材料自身所表现出来的非线性弯矩-轴力-曲率关系,由自身本构关系所决定,同时还受裂缝、钢筋滑移等因素的影响。为在结构设计中能同时考虑这两类非线性问题,中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[1]参考国外先进规范而引入了考虑构件刚度折减的弹性二阶分析法,该方法的关键在于对其折减系数取值的合理性。目前所查的国内外规范对柱的刚度折减系数取值仅针对框架结构^[2-5],尚缺乏对排架结构柱刚度折减系数的研究。且现行《混凝土结构设计规范》^[1]中对排架结构的二阶效应设计方法仍采用具有理论瑕疵且缺乏有效分析验证的 $\eta-l_0$ 法,该方法只考虑了几何非线性而没有考虑材料非线性^[6];另外,对比框架结构,排架结构的特殊性还在于承受荷载形式的复杂性和冗余度较小,因此有必要对排架结构的二阶效应进行深入研究,提出适用于整个排架结构的刚度折减系数,完善规范对排架结构在同时考虑材料非线性和几何非线性时存在的问题。

1 排架结构折减刚度的基本原理和分析程序

1.1 排架结构折减刚度的基本原理

考虑刚度折减系数的弹性二阶分析方法的设计思想主要来自美国认证协会(ACI)的规范^[3],《ACI 318》对考虑材料非线性后结构构件的刚度有 2 个重要的概念:被用于强度设计的刚度 EI ^[7]能够代表该构件将要破坏时的刚度; EI 值应符合构件整体的弯矩-端部转角关系,而不是构件最危险截面的弯矩-曲率关系。

结构刚度折减系数基本原理如图 1 所示^[6]。结构处于弹性状态的本构关系如直线 OC ,非线性状态的本构关系如曲线 OS 。在进行非线性分析时,可以通过引入一个刚度折减系数 α ,将弹性刚度 K_0 折减为 K_1 ,使结构在原有的荷载水平下,弹性分析与非线性分析产生近似相同的结构响应^[8]。运用此原理,同一非线性本构模型 S 在不同的结构输入水平下均可对应不同的折减系数,但鉴于工程实用性,只需找出一个具有普遍适用的折减系数,将其用于弹性二阶分析法,弹性二阶法计算出的层间位移角和层间位移与非线性有限元法计算出的结果等效,而不是仅拘泥于某个状态的刚度折减系数 α ^[8]。

如图 2(a)所示的门式框架,在承载能力极限状态下,梁柱沿长度方向每个截面的刚度退化程度不相同,表现为从中部沿两端退化不断增大,如图 2(b)所示;为能得到在工程设计中实用的方法,以柱顶位移和变形等效作为控制条件,通过一个统一的刚度折减系数模拟非线性状态下结构的内力和变形,而不是针对不同刚度退化截面均给出不同的折减系数;这种统一的折减系数被称之为综合刚度折减系数^[3],如图 2(c)所示。

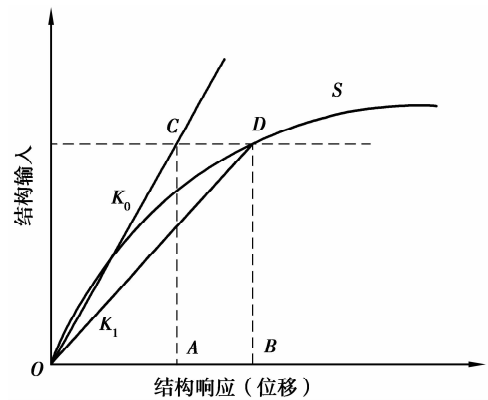
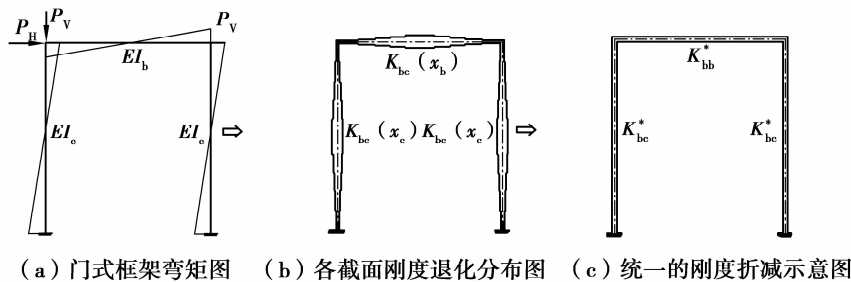


图 1 结构的非线性反应

Fig. 1 The non-linear response of structure



(a) 门式框架弯矩图 (b) 各截面刚度退化分布图 (c) 统一的刚度折减示意图

图 2 弹性刚度折减的等代思想

Fig. 2 The equivalent procedure of elastic stiffness reduction

根据单层工业厂房标准设计图集^[9],运用以上原理可设计出具有代表性的排架结构算例,以结构整体二阶效应等效为控制条件,对其进行非线性有限元分析和基于刚度折减的弹性二阶分析,对比计算结果,寻找出仅针对排架结构的综合刚度折减系数。

1.2 分析程序简介

采用较为成熟的商业软件 SAP2000 进行静力非线性分析。在 SAP2000 中,非线性二阶分析是考虑了构件曲率、层间位移和材料的非线性等共同因素的影响^[3];即构件曲率和层间位移主要是通过 $P-\Delta$ 效应和大位移效应考虑^[10-11],材料的非线性主要通过布置在杆件上离散的塑性点铰进行分析,结构的塑性变形均发生在此点铰内^[12],沿构件不同位置布置多个塑性铰来模拟构件的塑性特征。由于设计图集中采用的截面形式和配筋较为规则,塑性铰通常采用自动铰进行分析,本研究采用基于 FEMA-356 准则^[13]中形成的五阶段本构自动 P-M-M 铰,沿构件长度方向 0.05, 0.15, 0.25, ..., 0.95^[12]的相对位置处均匀布置,程序将根据实际的截面和配筋情况获得自动铰属性。

2 双跨排架结构刚度折减系数的分析过程

2.1 有关荷载的分析方案

排架柱设计是通过弹性二阶分析方法找出承载能力状态下的最不利工况^[14],确定最不利截面和截面配筋;其非线性分析是指在非线性状态下求出结构的内力及变形。当进行排架设计和非线性分析时,荷载取值均取用更加符合设计思想的荷载设计值,一方面,在进行结构非线性分析时,刚度对结构计算结果更加不利;另一方面,在承载能力极限状态下结构能得到稳定性较好的刚度折减系数。

2.2 分析过程关键点概述

2.2.1 分析模型

当采用忽略空间效应的单层双跨有侧移排架结构进行静力非线性分析时,排架结构下柱均分为 10 个单元,吊车梁牛腿部分分为 2 个单元,剩余部分均分为 4 个单元。

2.2.2 荷载分析

结构的荷载分析^[14]主要是确定在结构设计中用于最危险截面设计和非线性分析时所采用的荷载工况和最不利荷载组合,根据不同荷载工况作用下的荷载组合,利用 M_u-N_u 求出最危险截面及其对应的最不利荷载组合。对于单层双跨排架结构进行非线性分析时,主要对边柱下柱进行荷载分析,经计算其最不利荷载组合如下^[15]:

$$\begin{aligned} A: & 1.0 \times G_{\text{DEAD}} + 1.4 \times W_L + 1.4 \times (0.7 \times Q_{\text{CVC}} + 0.7 \times T_B), \\ B: & 1.0 \times G_{\text{DEAD}} - 1.4 \times T_A + 1.4 \times (0.6 \times W_R + 0.7 \times Q_{\text{DC}}), \\ C: & 1.0 \times G_{\text{DEAD}} + 1.4 \times W_R + 1.4 \times (0.7 \times Q_{\text{DC}} - 0.7 \times T_A), \end{aligned}$$

式中: G_{DEAD} 为恒载; W_L 为迎风面在左侧的风载; W_R 迎风面在右侧的风载; T_A 为小车在第一跨时的横向水平荷载; T_B 为小车在第二跨时的横向水平荷载; Q_{CVC} 为当仅有 2 台吊车作用于同一跨时,第二跨左侧产生最大轮压,另一侧产生最小轮压; Q_{DC} 为当每跨均有 2 台吊车同时作用时,第一跨右侧和第二跨左侧产生最大轮压,另一侧产生最小轮压;“+”表示荷载方向向右,“-”表示荷载方向向左。

2.2.3 加载方式

采用 SAP2000 有限元程序分析时,荷载的加载顺序直接影响到计算结果的正确性,于是为更好地模拟实际受力情况,通常首先加竖向荷载和弯矩,再施加水平荷载,加载方式均采取荷载控制的方式进行逐级加载,并控制水平位移直至设计控制的限值,同时确定刚度折减系数的最终非线性状态。

2.3 计算刚度折减系数的方法

参考框架结构中对刚度折减系数的研究方法,在进行弹性二阶分析时,以结构的整体位移作为宏观控制指标,使结构的整体位移和沿长度方向的层间位移与实际非线性二阶分析等效,从而引入一个能反应整体刚度退化的综合刚度折减系数^[16-18],其理论公式可表示为

$$EI = \alpha E_c I,$$

式中: α 为综合刚度折减系数; E_c 为混凝土刚度; E 为折减后刚度。

通过大量具有代表性的单层双跨排架算例,提出针对所有柱段均适用的单层双跨排架的统一刚度折减系数 α 。

3 双跨排架结构刚度折减系数的取值建议

根据单层工业厂房设计图集^[9],选取了综合考虑排架结构特征和受荷情况的 34 个单层双跨排架结构作为研究算例;在最不利荷载组合下,对排架结构进行弹性二阶分析和非线性二阶分析,当最不利截面达到承载能力极限状态时,以结构整体位移等效作为控制目标,对比分析此时的二阶内力和位移,综合确定刚度折减系数。

3.1 计算结果与分析

根据国家建筑标准设计图集^[9],可通过吊车吨位确定上下柱的截面尺寸,选取吊车吨位为 10 t, 20 t, 32/5 t, 50/10 t 4 种类型,对应的边柱上柱截面尺寸分别为 400 mm×400 mm, 400 mm×400 mm, 400 mm×500 mm, 400 mm×500 mm;中柱上柱截面尺寸均为 400 mm×600 mm;下柱截面尺寸分别均为 400 mm×800 mm, 400 mm×800 mm, 400 mm×1 000 mm, 400 mm×1 000 mm。根据排架结构承受的基本风压、跨度、吊车吨位和上下柱高比等因素设计算例,其编号汇总如表 1 所示,各算例采用的荷载组合类型汇总如表 2 所示,计算结果汇总如表 3 所示。

表 1 双跨排架结构算例编号
Table 1 The example number of double-span bent frames

吊车 吨位/ t	上柱 高度/ m	下柱 高度/ m	上下柱 高比	基本风压 0.3 kN/m ²			基本风压 0.5 kN/m ²			基本风压 0.8 kN/m ²		
				跨度	跨度	跨度	跨度	跨度	跨度	跨度	跨度	跨度
				18 m	24 m	30 m	18 m	24 m	30 m	18 m	24 m	30 m
10	3.6	9.5	0.379				4		20			
		7.1	0.507		1		5	16	21		32	
		6.0	0.600				6		22			
20	3.9	9.9	0.394				7		23			
		8.0	0.488		2		8	17	24		33	
		6.9	0.565				9		25			
32/5	4.2	9.4	0.447				10		26			
		8.3	0.506		3		11	18	27		34	
		7.7	0.545				12		28			
50/10	4.8	9.5	0.505				13	19	29			
		8.3	0.578				14		30			
		7.7	0.623				15		31			

表 2 算例采用的荷载组合类型
Table 2 The loading combination types of the example adopted

荷载组合类型	算例编号
A	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 32, 33
B	3, 14, 15, 30, 31
C	10, 11, 12, 13, 18, 19, 26, 27, 28, 29, 34

表3 排架结构位移比较及刚度折减系数

Table 3 The displacement comparison of bent frames and stiffness reduction factors

算例 编号	弹性 二阶 位移/ mm	非线性 二阶 位移/ mm	配筋 面积/ mm ²	刚度折 减系数	算例 编号	弹性 二阶 位移/ mm	非线性 二阶 位移/ mm	配筋 面积/ mm ²	刚度折 减系数
1	-17.12	-17.12	1 020	1.000	18	28.23	29.32	1664	0.964
2	-32.65	-35.56	1 344	0.924	19	56.23	59.05	3 034	0.956
3	25.19	25.31	1 374	0.996	20	-43.89	-50.37	1 956	0.870
4	-42.17	-49.66	2 142	0.860	21	-22.28	-24.30	1 024	0.923
5	-21.17	-24.22	1 278	0.878	22	-15.14	-15.14	1 020	1.000
6	-14.75	-15.69	1 020	0.942	23	-63.65	-69.41	2 696	0.927
7	-59.63	-71.94	2 820	0.841	24	-39.59	-43.25	1 850	0.923
8	-37.46	-44.97	2 044	0.842	25	-28.43	-30.55	1 340	0.936
9	-26.38	-30.56	1 574	0.867	26	38.67	41.87	1 886	0.929
10	37.20	39.97	2 264	0.933	27	28.84	30.29	1 474	0.955
11	27.87	30.00	1 858	0.931	28	24.75	25.01	1 274	0.990
12	23.92	25.17	1 660	0.951	29	57.09	59.38	2 886	0.965
13	54.43	56.98	3 142	0.958	30	43.15	45.65	2 386	0.949
14	40.37	43.13	2 662	0.938	31	37.39	39.28	2 144	0.955
15	35.06	37.20	2 430	0.944	32	-27.97	-30.58	1 886	0.932
16	-21.45	-24.10	1 132	0.915	33	-49.51	-51.64	2 938	0.962
17	-39.39	-43.66	1 982	0.910	34	34.47	36.60	2 370	0.944

注:①最小配筋面积为 1 021 mm²;

②表中刚度折减系数为 1 说明构件计算配筋面积由最小配筋率控制,当达到控制位移时,结构尚未进入非线性阶段。

3.2 刚度折减系数取值的建议

为更直观地观察和分析刚度折减系数的变化规律,将表 3 中计算出的结果绘制成二维坐标散点图,如图 3 所示。根据图 3 刚度折减系数散点图的分布情况,为使排架结构具备足够的安全储备和考虑最不利情况下最大的刚度退化程度,给出所有柱段统一的刚度折减系数取值建议: $\alpha = 0.85$ 。

3.3 验证其建议值的合理性

为了验证刚度折减系数 $\alpha = 0.85$ 的合理性,选取 4 个具有代表性的排架结构进行基于刚度折减的弹性二阶分析和非线性二阶分析,分别计算出各柱段的弯矩、剪力、位移,将其值汇总如表 4 所示。

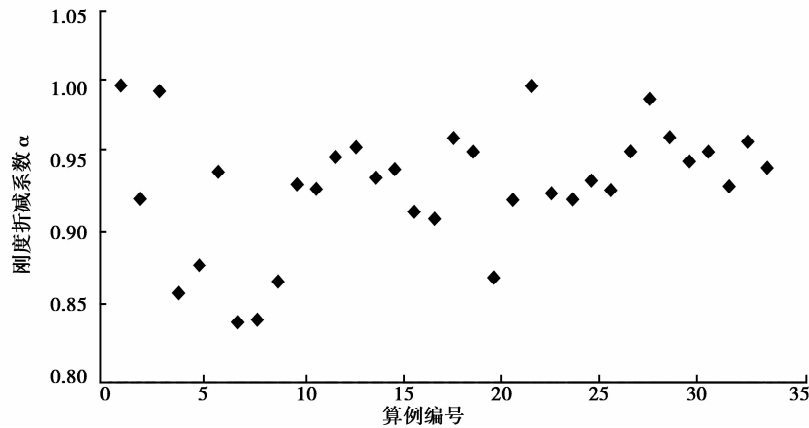


图 3 刚度折减系数散点图

Fig. 3 The scatter diagram of stiffness reduction factors

表 4 刚度折减系数建议值的验证

Table 4 Checking the suggested value of stiffness reduction factor

算例 编号	柱段	轴力/ kN	考虑刚度折减的弹性二阶			非线性二阶		
			弯矩/ (kN·m)	剪力/ kN	位移/ mm	弯矩/ (kN·m)	剪力/ kN	位移/ mm
7	右柱	420.68	446.8	-48.2		445.3	-48.0	
	中柱	952.02	331.5	-4.7	-71.21	408.0	-10.2	-71.94
	左柱	335.15	488.1	-62.6		415.4	-57.3	
9	右柱	407.37	297.4	-40.23		297.3	-40.5	
	中柱	938.71	248.6	-1.01	-31.94	286.1	-5.2	-30.56
	左柱	321.85	317.2	-51.2		267.1	-46.7	
10	右柱	781.04	-523.9	51.6		-544.8	53.7	
	中柱	1 161.47	-454.0	16.6	44.96	-477.5	19.3	39.97
	左柱	451.24	-571.4	61.2		-499.1	56.3	
12	右柱	770.80	-413.5	43.2		-429.8	44.7	
	中柱	1 151.23	-384.3	15.2	28.26	-402.6	16.8	25.17
	左柱	441.01	-459.5	56.8		-422.7	53.7	

通过表 4 可看出,考虑刚度折减后的截面内力有所增加,这是由于构件刚度的折减致使结构整体位移增加,增加的位移将放大截面弯矩从而表现为截面内力的增加,同时也间接证明了可通过引入刚度折减系数来考虑构件的材料非线性;但总体来说两种方法的计算结果较为接近,吻合程度较好,甚至采用刚度折减的弹性二阶方法更偏于安全,证明排架结构采用 $\alpha = 0.85$ 的刚度折减系数是合理的且可方便运用于工程设计中。

4 结 论

参考美国 ACI318 关于考虑刚度折减的弹性二阶分析方法的理念,选取 34 个具有代表性的单层双跨等高排架结构对其进行非线性反应分析和弹性二阶分析,对比两种分析方法的结果,以排架结构整体二阶效应等效为准,提出具有工程实用性的刚度折减系数为 0.85 的取值建议。通过多个典型算例的对比分析,表明只要选取了合适的排架柱刚度折减系数,将考虑刚度折减的弹性二阶分析法运用于荷载组合非常复杂的排架结构的内力分析中,直接得到既考虑几何非线性又考虑材料非线性的排架结构内力是高效且合理的。

参考文献:

- [1] Macgregor J G, Hage S E. Stability analysis and design of concrete frames[J]. Journal of the Structural Division, 1970, 103(10):1953-1970.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] American Concrete Institute. ACI 318-14. Building code requirements for structural concrete and commentary[S]. Farmington Hills, MI48331: American Concrete Institute, 2014.
- [4] New Zealand Concrete Design Committee. NZS3101-2006. Standard concrete structure standard[S]. New Zealand Concrete Design Committee, 2006.
- [5] Fafitis A, Kadam A N. Elasto-plastic Analysis and Design of Concrete Frames[C]// Computing in Civil Engineering and Symposium on Data Bases.[S.I.]: ASCE, 2010:402-411.
- [6] 刘毅,朱占友,魏巍,等.排架柱抗弯刚度折减系数探讨[J].重庆大学学报:自然科学版,2007,30(4):61-66.
LIU Yi, ZHU Zhanyou, WEI Wei, et al. Discussion of the stiffness factor of bent-columns[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(4):61-66.(in Chinese)
- [7] Tikka T K, Mirza S A. Nonlinear EI equation for slender reinforced concrete columns[J]. Aci Structural Journal, 2005, 102(6):839-848.
- [8] Feng X, Shen M, Sun C, et al. Research on flexural stiffness reduction factor of reinforced concrete column with equiaxial + shaped section[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 96(2):168-174.
- [9] 国家建筑标准设计图集.单层工业厂房钢筋混凝土柱:05G335 [S].北京:中国建筑标准设计研究院,2005.
National building standard design drawings. Reinforced concrete column of single storey industrial building: 05G335[S]. Beijing: China building standard design and Research Institute, 2005.(in Chinese)
- [10] Scholz H. P-delta effect in elastic analysis of sway frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(3):534-545.
- [11] Kijania M, Seruga T, Rewers I. Effect of some factors on second order effects in reinforced concrete columns[J]. 2013, 168(3-4):289-293.
- [12] 北京金土木软件技术有限公司.CSI分析参考手册[M].北京:中国建筑标准设计研究院,2009.
Beijing Civil King Software Technology Co.Ltd. CSI analysis reference manual[M]. Beijing: China Institute of Building Standard Design and Research, 2009.(in Chinese)
- [13] Emergency F, Agency M. FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[S]. Washington, D.C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [14] 中华人民共和国国家标准.建筑结构荷载规范:GB50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
People's Republic of China national standard. Load code for the design of building structures: GB50009-2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.(in Chinese)
- [15] 潘斯.钢筋混凝土两跨排架柱二阶效应规律及等效长度研究[D].重庆:重庆大学,2014.
PAN Si. Research on the second-order effect of two cress reinforced concrete bent-frames and the effective length of bentcolumns[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [16] 刘毅,魏巍,白绍良.考虑非弹性特征的钢筋混凝土框架杆件刚度折减系数[J].重庆建筑大学学报,2000,22(1):25-32.
LIU Yi, WEI Wei, BAI Shaoliang. RC frame component's stiffness reduction factor considering non-elastic characteristics[J]. Journal Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(1):25-32.(in Chinese)
- [17] Paulay T. Seismic displacement capacity of ductile reinforced concrete building systems[J]. Bulletin NZ Society for Earthquake Engineering, 2003, 36(1):47-65.
- [18] Li B, Xiang W. Effective stiffness of squat structural walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(12): 1470-1479.