

# 基于周期的结构整体地震损伤评价方法

刘良林<sup>1,2</sup>, 王全凤<sup>1</sup>, 林煌斌<sup>3</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 南通市广播电视大学 建筑工程系, 江苏 南通 226006;  
3. 集美大学 工程技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于等效线性方法,分析地震作用下结构进入弹塑性阶段后的不同自振周期简化计算方法,并建立结构刚度与周期的关系.在 Ghobarah 整体损伤评价模型的基础上,推导新的结构整体损伤指数计算式,并采用 4 根破坏性试验柱和两榀框架的数据,对表达式进行验证分析.结果表明:该表达式是合理、正确的,可应用于地震作用下结构的整体损伤评价.

**关键词:** 周期; 结构位移; 延性系数; 地震; 损伤评价; 等效线性方法

**中图分类号:** TU 311.4

**文献标志码:** A

结构抗震性能的优劣,主要依赖于其对地震能量吸收能力与弹塑性变形的能力,而这些能力的实现是以结构的损伤为代价的.具备一定消耗地震能量能力的结构在地震作用下,必然使该结构处于某个相对应的损伤的状态<sup>[1]</sup>.因此,无论是在结构抗震评估、受损结构的加固方面,还是保证结构坏而不倒的设计极限方面,都应对结构进行损伤评价.由于结构整体涉及的构件数量较多,地震作用下的损伤评价分析难以全面进行.本文基于结构的整体参数如周期、延性系数等,结合典型的地震损伤评价模型,进行结构整体损伤评价方法的推导.

## 1 结构自振周期分析

### 1.1 弹性阶段下结构自振周期

在线弹性单自由度体系中,结构的自振周期( $T$ )<sup>[2]</sup>可以从如下的表达式中进行求解,即

$$T = 2\pi/\omega. \quad (1)$$

式(1)中: $\omega$ 为结构的自振圆频率.在文献[3]中, $\omega^2 = k/m$ ,将其代入式(1),经整理可得

$$k \propto 1/T^2. \quad (2)$$

式(2)中: $k$ 为体系刚度; $m$ 为体系质量.

由此可以看出:在线弹性状态下,体系的刚度与其周期的平方成反比.此外,在地震作用下,结构通过强度和刚度的变化来体现损伤对结构的影响.因此,应该考虑周期对结构损伤的影响.

### 1.2 弹塑性阶段下结构自振周期

在地震作用下,进入弹塑性阶段后,结构的自振周期随之增长.由于地震作用,结构消耗地震能量的过程中造成的刚度下降程度不好界定.所以,此时结构的自振周期的计算更加困难.基于此,文献[4]建议对规范中计算周期的经验公式乘以调整系数来计算结构的自振周期,并建议采用等效线性化方法对地震周期进行调整.

5 种被认为是精度较好的,或者是规范中已经得到应用的等效线性方法<sup>[5]</sup>,其计算等效周期的表达式如表 1 所示.表 1 中: $T_0$ 为结构弹性周期; $T_{eq}$ 为结构弹塑性等效周期; $\mu$ 为结构位移延性系数.

**收稿日期:** 2012-10-26

**通信作者:** 刘良林(1983-),男,讲师,主要从事防灾减灾及工程加固的研究. E-mail: tlliu@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50578066, E080507);福建省自然科学基金资助项目(2011J01320)

从表 1 中可以看出:每个方法关于周期的计算都与位移延性系数相关,这与文献[6]的结论是一致的. 即位移延性系数是决定等效参数取值的主要因素.

2 结构位移延性系数分析

通常情况下,用位移延性系数  $\mu$  表征构件延性的大小,而极限位移与屈服位移之比即为位移延性系数<sup>[7]</sup>. 屈服位移常用等能量法来确定,而极限位移常按构件上荷载下降到最大值的 85%时的位移取用<sup>[8]</sup>.

文献[9]基于 4 根 HRB400 级钢筋混凝土柱的低周反复加载破坏性试验的结果,以位移延性系数来评价钢筋混凝土柱的抗震性能,结果如表 2 所示. 文献[10]通过低周反复荷载试验,对两榀双层双跨的钢筋混凝土框架结构的抗震性能进行研究,结果如表 2 所示. 表 2 中:屈服位移为  $\Delta_y$ ;极限位移为  $\Delta_u$ ;位移延性系数为  $\mu$ .

表 2 结构的位移延性系数表  
Tab. 2 Coefficient of structural displacement ductility

参数	钢筋混凝土柱				钢筋混凝土框架结构			
	KZ-1	KZ-2	KZ-3	KZ-4	HPCF-1 (正向)	HPCF-1 (反向)	HPCF-2 (正向)	HPCF-2 (反向)
$\Delta_y/\text{mm}$	2.64	2.39	2.42	2.16	19.80	−16.80	20.20	−13.60
$\Delta_u/\text{mm}$	6.65	6.05	5.88	5.44	60.10	−67.10	47.90	−41.00
$\mu$	2.52	2.53	2.43	2.52	3.04	3.99	2.37	3.01

3 结构整体损伤指数的计算

目前,结构损伤评价方法主要包括加权组合法和整体法<sup>[1]</sup>. 典型的 Park 和 Ang 整体损伤模型属于加权组合法,而由 Ghobarah 提出的基于刚度退化的损伤模型则是整体法的代表<sup>[11]</sup>. Park 和 Ang 模型在计算软件 IDARC 中用于结构整体损伤程度的测定,但存在损伤指数大于 1 的情况,与损伤指数的性质相左. Ghobarah 模型因为其表达式简单,且符合损伤指数的性质,在应用上比较简便准确,但其地震前后的刚度不好直接确定,尤其是地震后的刚度. 基于此,本文利用式(2)和 Ghobarah 整体损伤评价模型<sup>[11]</sup>,推导出结构整体损伤指数的计算式,即

$$D = 1 - T_0^2/T_{eq}^2.$$

(3)

基于表 2 中钢筋混凝土柱的数据,利用表 1 中计算式和式(3)进行分析和计算,得到 4 根钢筋混凝土柱的整体损伤指数,如表 3 所示. 同时,基于表 2 中钢筋混凝土框架结构的数据,利用表 1 中计算式和式(3)进行分析和计算,得到两榀框架的整体损伤指数,如表 3 所示.

表 3 结构整体损伤指数  
Tab. 3 Index of global structural damage

计算方法	钢筋混凝土柱				钢筋混凝土框架结构			
	KZ-1	KZ-2	KZ-3	KZ-4	HPCF-1 (正向)	HPCF-1 (反向)	HPCF-2 (正向)	HPCF-2 (反向)
割线刚度法	0.60	0.60	0.59	0.60	0.67	0.75	0.58	0.67
Iwan 和 Gates 法	0.24	0.24	0.22	0.24	0.31	0.40	0.21	0.30
Iwan 法	0.28	0.28	0.27	0.28	0.19	0.25	0.14	0.19
Huang 法	0.52	0.52	0.50	0.52	0.53	0.66	0.37	0.53

从表 3 可知:割线刚度法与 Huang 法得到的结果比较集中,而 Iwan 法与 Iwan 和 Gates 法计算结果比较离散. 由于各个试验都是破坏性的,从这个层面上来说,割线刚度法与 Huang 法是比较可靠的.

根据 Ghobarah 整体损伤评价模型的评价准则,表 3 的数据表明割线刚度法与 Huang 法得到的评价结果与试验现象比较一致,说明这两种方法是比较准确的.从表 3 的计算结果以及损伤评价的结果来看,结构整体损伤评价式(3)比较准确,因此该表达式可以应用于地震作用下结构的整体损伤评价.

4 结束语

文中运用 4 根破坏性试验柱和两榀框架的数据,对结构整体损伤评价表达式进行了分析,认为该表达式是合理与正确的.然而,由于文中数据有限,且影响结构整体稳定的因素较多,因此需要进行更多、更深入的研究,以进一步验证地震作用下结构的整体损伤评价方法.

参考文献:

[1] 张国彬,龚云平,于海祥,等.基于两次 POA 的整体损伤模型[J].重庆建筑,2005(8):35-38.  
[2] 吴明军.高层钢筋混凝土框架结构自振周期估算的研究[J].工业建筑,2008,38(10):57-60.  
[3] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006:132-133.  
[4] 赵静,刘文峰.建筑结构的基本自振周期研究[J].特种结构,2011,28(2):30-32.  
[5] 李妍,吴斌,欧进萍.弹塑性结构等效线性化方法的对比研究[J].工程抗震与加固改造,2005,27(1):1-6.  
[6] 苏亮,王毅.等效线性化方法中系统参数求解的优化算法[J].工程力学,2011,28(9):23-29.  
[7] 李斌,高春彦.方钢管高强混凝土柱的受力性能分析[J].工程力学,2011,28(增刊 1):69-74.  
[8] 蒋东红,王连广,刘之洋.高强钢骨混凝土框架柱的抗震性能[J].东北大学学报:自然科学版,2002,23(1):67-70.  
[9] 刘良林,王全凤,沈章春.HRB400 级钢筋混凝土柱的滞回性能分析[J].华侨大学学报:自然科学版,2008,29(2):280-283.  
[10] 薛伟辰,程斌,李杰.双层双跨高性能混凝土框架抗震性能分析[J].土木工程学报,2004,37(3):58-65.  
[11] 刘良林.地震作用下结构损伤评价方法研究[D].泉州:华侨大学,2008:48-50.

Evaluation of Global Structure Seismic Damage Based on the Period

LIU Liang-lin<sup>1,2</sup>, WANG Quan-feng<sup>1</sup>, LIN Huang-bin<sup>3</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Department of Architectural Engineering, Nantong Radio and TV University, Nantong 226006, China;
3. College of Engineering Technology, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on the method of equivalent linearization, the simplified methods to calculate the natural period of structure in elastic-plastic state under earthquake were discussed. The relationship between the structure stiffness and period was also built. Combining the evaluation of the global damage model by Ghobarah, a new expression was derived to calculate the global damage index of the structure, and was validated by the data of destructive tests of four columns and two frames. The results show the new expression is reasonable and corrective, which could be applied in the evaluation of global structure seismic damage.

**Keywords:** period; structural displacement; ductility coefficient; earthquake; damage evaluation; equivalent linearization

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)