

含剪力墙钢筋混凝土结构抗震能力的评估方法及应用

郝效强¹, 杨仕升^{2,3}, 秦 荣³(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 广西壮族自治区地震局, 广西南宁 530022;
3. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要:根据我国现行抗震设计规范、混凝土结构设计规范以及目前既有建筑结构抗震能力研究成果, 借鉴强度与延性评估理论, 探讨了一种适合我国工程实际的既有含剪力墙钢筋混凝土结构的抗震能力评估方法。应用自行编制的评估程序 EAC-RCSW 应用于工程实例, 表明该方法可定量评估含剪力墙钢筋混凝土结构的抗震能力。

关键词: 剪力墙; 钢筋混凝土结构; 抗震能力评估; 强度和延性

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2007)04-0347-04

Evaluation Method of Anti-seismic Capability for Reinforced Concrete Structure Including the Shear Wall and Its Application

HAO Xiao-qiang¹, YANG Shi-sheng^{2,3}, QIN Rong³

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Earthquake Administration of Guangxi Autonomous Region, Nanning 530022, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the code for seismic design of buildings, the code for reinforced concrete structure design and the research result about the existed buildings, by consulting the idea of strength and toughness evaluation theory of reinforced concrete, a new evaluation system for anti-seismic capability of reinforced concrete structure including the shear wall, which is suitable for Chinese engineering practice is presented in this paper. An existed building example is evaluated by the program EAC-RCSW, which is created according to the theory proposed by this paper. It is proved that this evaluation method could quantitatively evaluate the anti-seismic capability of the existing reinforced concrete structure including the shear wall.

Key words: Shear wall; RC construction; Anti-seismic capability evaluation; Strength and ductility

0 引言

相比较新建建筑结构的抗震设计, 既有建筑结构的抗震能力评估有自己的特点。首先, 既有建筑结构在服役期间由于环境因素、结构自身因素和人为因素的影响, 结构可能出现不同程度的损伤, 如混凝土出现裂缝、老化, 钢筋锈蚀, 结构渗水、变形, 基础的不均匀沉降等, 使得结构抗震能力的计算更加复杂。此外, 出于经济、效率的考虑对既有建筑结构的评估通常采用简化的方法, 而建筑抗震设计则需

要对结构进行详细的分析, 对于重要的结构甚至要求采用多种分析方法。因此建立合理、简单、有效的既有建筑结构抗震能力评估体系是一项很重要的课题。

本文在文献[1]中框架结构抗震能力评估的基础上, 借鉴强度与延性评估理论, 结合我国现行抗震设计规范和混凝土结构抗震设计规范, 探讨了适合我国工程实际的既有钢筋混凝土含剪力墙结构抗震

收稿日期: 2007-01-17

基金项目: 广西科学研究与技术开发项目资助(桂科攻 0322022-2)

作者简介: 郝效强(1980-), 男(汉族), 安徽临泉人, 博士研究生, 主要从事工程抗震、结构性能设计与控制、结构评估等方面的研究。

力评估方法^[2-3],并编写了相应的评估程序 Evaluation of Anti-seismic Capability for Reinforced Concrete structure including the Shear Wall,简称 EAC-RCSW)。

1 剪力墙的抗震能力

一般认为钢筋混凝土剪力墙墙肢为偏心受压或偏心受拉构件。为简化计算,减少不确定因素对评估结果的影响,计算剪力墙抗震能力时作如下假定:

(1) 各片剪力墙在其自身平面内的刚度很大;而在平面外的刚度相对很小,可忽略不计^[4]。也就是说在水平荷载作用下可不考虑各片剪力墙受到的与自身平面相垂直的力。这样评估建筑物某方向(纵向或横向)的抗震能力时,可只考虑沿该评估方向布置的剪力墙抗震能力,不考虑垂直于该评估方向布置的剪力墙的影响。

(2) 不开门窗洞口或虽开有洞口、但洞口很小(洞口面积不大于剪力墙总面积的15%)的剪力墙,评估时按一片整体的剪力墙计算其抗震能力。如果门窗洞口的尺寸较大,则应考虑门窗洞口的影响,按双肢或多肢剪力墙评估其抗震能力^[4]。对于开洞的总面积虽超过了剪力墙总面积的15%,但总的说来开洞仍不算大的剪力墙,视其具体情况按一片剪力墙或双肢、多肢剪力墙计算其抗震能力。

剪力墙的抗震能力可根据混凝土规范^[5]计算。试验结果表明,剪力墙在反复荷载作用下的受剪承载力比单调荷载作用下降低15%~20%。因此须将按上述计算的剪力墙斜截面受剪承载力乘以降低系数0.8^[6]。

2 含剪力墙钢筋混凝土结构抗震能力评估方法及步骤

2.1 结构弹性地震分析

一般建筑结构在0.05g地面运动加速度作用下应该处于弹性状态。按文献^[1]所述,结构的弹性地震作用应根据我国抗震规范^[7]对地震作用计算的规定,结合结构的特点采用底部剪力法或振型分解反应谱法进行计算。

本文采用ETABS软件对既有结构建模并进行弹性地震作用分析。ETABS是专业的建筑结构分析软件,建模效率高,功能强大,而且ETABS中已有中国最新的抗震规范^[7]。本文编写了能读取ETABS软件输出数据的接口程序,结合本文编写的评估程序,使对既有含剪力墙钢筋混凝土结构的

评估分析完全通过计算机实现。

2.2 各半层的屈服地面运动加速度放大系数

柱、剪力墙的破坏一般发生在单元的端部,因此各楼层的抗震能力也根据单元端部的承载力计算。以楼板为中心,楼层上部为上半层,楼层下部为下半层。对含剪力墙的钢筋混凝土结构,上、下半层的屈服地面运动加速度放大系数 $\alpha_{y_i}^{(a)}$ 与 $\alpha_{y_i}^{(b)}$ 有

$$\alpha_{y_i}^{(a)} = \frac{\sum (V_{fi}^{(a)} - V_{DLi}^{(a)}) + \sum (V_{sfi}^{(a)} - V_{SDLi}^{(a)})}{\sum V_{CEi}^{(a)} + \sum V_{SEi}^{(a)}} \quad (1)$$

$$\alpha_{y_i}^{(b)} = \frac{\sum (V_{fi}^{(b)} - V_{DLi}^{(b)}) + \sum (V_{sfi}^{(b)} - V_{SDLi}^{(b)})}{\sum V_{CEi}^{(b)} + \sum V_{SEi}^{(b)}} \quad (2)$$

式中 $V_{CEi}^{(a)}, V_{CEi}^{(b)}$ 为0.05g地震作用下,楼层上、下柱的剪力; $V_{SEi}^{(a)}, V_{SEi}^{(b)}$ 为0.05g地震作用下,楼层上、下剪力墙的剪力; $V_{fi}^{(a)}, V_{fi}^{(b)}$ 为楼层上、下柱破坏时承担的剪力; $V_{sfi}^{(a)}, V_{sfi}^{(b)}$ 为楼层上、下剪力墙破坏时承担的剪力; $V_{DLi}^{(a)}, V_{DLi}^{(b)}$ 为重力荷载代表值作用下,楼层上、下柱的剪力; $V_{SDLi}^{(a)}, V_{SDLi}^{(b)}$ 为重力荷载代表值作用下,楼层上、下剪力墙的剪力。

2.3 地震作用折减系数

结构或单元的延性容量是结构或单元延性比能达到的最大值。各上、下半层的延性容量是根据柱、剪力墙单元破坏时对应的延性容量,以单元抗剪能力为权重加权平均而得。各上、下半层的延性容量 $R_i^{(a)}$ 与 $R_i^{(b)}$ 有

$$R_i^{(a)} = \frac{\sum R_{fi}^{(a)} (V_{fi}^{(a)} - V_{DLi}^{(a)}) + \sum R_{sfi}^{(a)} (V_{sfi}^{(a)} - V_{SDLi}^{(a)})}{\sum (V_{fi}^{(a)} - V_{DLi}^{(a)}) + \sum (V_{sfi}^{(a)} - V_{SDLi}^{(a)})} \quad (3)$$

$$R_i^{(b)} = \frac{\sum R_{fi}^{(b)} (V_{fi}^{(b)} - V_{DLi}^{(b)}) + \sum R_{sfi}^{(b)} (V_{sfi}^{(b)} - V_{SDLi}^{(b)})}{\sum (V_{fi}^{(b)} - V_{DLi}^{(b)}) + \sum (V_{sfi}^{(b)} - V_{SDLi}^{(b)})} \quad (4)$$

式中 $R_{fi}^{(a)}, R_{fi}^{(b)}$ 为上、下半层柱单元破坏时的延性容量; $R_{sfi}^{(a)}, R_{sfi}^{(b)}$ 为上、下半层剪力墙单元破坏时的延性容量。

结构地震作用折减系数 F_u 为因结构屈服地震加速度可以提高的倍数,此时结构的延性比达到容许延性容量 R_a 。 F_u 与建筑结构的周期、场地种类及 R_a 有关。容许延性容量 R_a 与延性容量 R 的关系为: $R_a = 1 + 0.5(R - 1)$ 。结合我国建筑抗震设计规范,可计算 F_u 如下^[1]:

$$F_u = \begin{cases} R_a \text{ 丢} & T \geq T_g \\ \sqrt{2R_a - 1} + (R_a - \sqrt{2R_a - 1}) \left(\frac{T - \frac{T_g - 0.1}{2} - 0.1}{\frac{T_g - 0.1}{2}} \right) \text{ 丢} & 0.1 + \frac{(T_g - 0.1)}{2} \leq T \leq T_g \\ \sqrt{2R_a - 1} \text{ 丢} & 0.1 \leq T \leq 0.1 + \frac{(T_g - 0.1)}{2} \\ \sqrt{2R_a - 1} + (\sqrt{2R_a - 1} - 1) \left(\frac{T - 0.1}{0.08} \right) \text{ 丢} & 0.02 \leq T \leq 0.1 \\ 1.0 \text{ 丢} & T \leq 0.02 \end{cases} \quad (5)$$

式中 T_g 为场地土特征周期(单位 s); T 为建筑物的自振周期(单位 s); R_a 为容许延性容量。

2.4 各半层的抗震能力

结构各半层的抗震能力 A_a^a 或 A_a^b 计算如下^[1]:

$$A_a^{(a)} = 0.05g \times a_{yi}^{(a)} \times F_w^{(a)} \quad (6)$$

$$A_a^{(b)} = 0.05g \times a_{yi}^{(b)} \times F_w^{(b)} \quad (7)$$

每半层的抗震能力可能均不相同,为安全考虑取所有 A_a^a 和 A_a^b 中的最小者作为整个建筑的抗震能力。

2.5 考虑结构缺陷的影响及用途系数

既有钢筋混凝土建筑结构一般会有不同程度的缺陷及损伤。如在设计阶段,我国过去的建筑结构抗震标准较低,结构的设计可能不满足现在的抗震要求;在施工阶段由于施工不当出现质量问题;在使用阶段出现的结构大变形、混凝土明显裂缝、钢筋锈蚀、基础不均匀沉降等。此外还有偶然荷载如地震作用、爆炸等使结构出现的不同程度损伤。

对于结构的缺陷,可以通过缺陷系数 D 来从整体上考虑,将其乘以结构各半层的抗震能力 A_a 。根据缺陷的严重程度可依次取 D 值为: 1.0, 0.95, 0.90。对于结构局部缺陷或破损较严重的部位,如结构构造明显不满足要求,混凝土明显开裂,或者由于偶然荷载使结构局部严重损伤甚至出现暴筋现象等,除了要考虑上述结构整体缺陷的影响,还应对出现损伤的具体单元折减其强度及延性容量。

根据建筑抗震设计规范,建筑结构按其使用功能的重要性可分为甲、乙、丙、丁共4个抗震设防类别,对甲、乙类建筑,其用途系数分别取1.5和1.25,丙、丁类建筑取1.0^[1]。

2.6 抗震能力不足的标准

判断建筑结构能否满足抗震要求,是根据其能抵抗的最大地震加速度是否大于目标地震加速度

(满足一定超越概率的地震加速度乘以结构的用途系数)。对于新建的建筑物,目标地震加速度是抗震设计规范中^[7]的设计基本地震加速度值 A_{10} (设计基准期内地震动峰值超越概率为10%)乘以重要性系数。

有学者认为,既有结构的后续使用期小于设计基准期,进行抗震安全性评估时仍采用抗震设计规范中规定的地震作用是不合理的^[8],也有文献通过结构的使用寿命来表示其重要性^[9]。文献^[8]还根据等超越概率的原理论述了求取既有结构地震动参数(设防烈度、设防地震加速度等)的方法,根据该方法求出的设防地震加速度会小于结构设计时采用的值。实际上,地震是随机的,发生在结构的使用初期或后期很难预测,甚至是等可能的。而地震一旦发生,也不会因为是在建筑结构的后期地震作用就小些。因此,从这个角度考虑,对既有结构的抗震要求在整个结构使用期间应该是一样的。

3 工程应用实例

3.1 工程概况

本工程实例为广西某广播电视技术大楼的主楼。该建筑采用钢筋混凝土框架—剪力墙结构,地下1层,地上22层,2至3层间有一夹层,顶部还有两层附属层,结构总高度94 m。结构中部是一个刚度较大的钢筋混凝土筒体,从地下室直至屋顶;四周为7.05 m × 7.5 m的柱网形成框架结构。该建筑的部分标准平面图和三维立体图分别如图1和2所示。I、II级钢筋的设计强度分别为210 N/mm²和340 N/mm²;1~7层(含地下层)剪力墙、柱的混凝土强度等级为C40;8~14层为C35;15~26层为C25;梁、楼板的混凝土强度等级为C20。

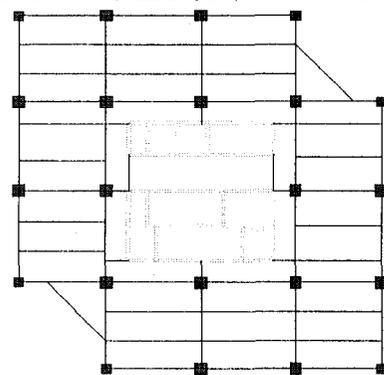


图1 实例建筑第4~18层平面图

Fig. 1 Plan drawing from No. 4 to No. 18 story in the structure.

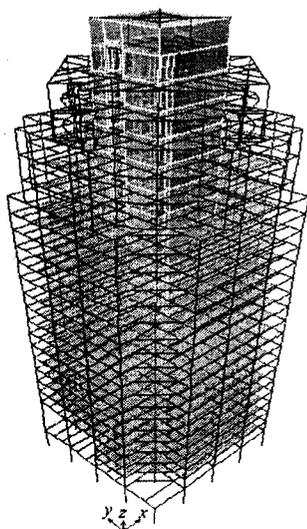


图 2 实例建筑的结构三维立体图

Fig. 2 Spatial drawing of the structure

该建筑 1996 年竣工,因使用功能的改变需对部分楼层进行改造,具体如下:由于对演播室等的改扩建需要,16、17 层的楼面活荷载由 5.8 kN/m^2 增加到 8.0 kN/m^2 ,同时打掉部分墙体;由于仓库容量增加,15 层的仓库活荷载由 5.8 kN/m^2 增加到 8.5 kN/m^2 ;由于装修的需要,21 层恒荷载增加 1.5 kN/m^2 。本文通过这个工程实例研究既有含剪力墙钢筋混凝土结构的抗震性能。

3.2 评估参数

该建筑物按 7 度设防,框架和剪力墙的抗震等级为二级,抗震设防类别为乙类,根据建筑使用方要求,重要性系数取 1.5,场地土类别为 II 类(2 组)。该建筑物使用时间不是很久(10 年),且没经过大的地震(大于 6 度),没出现明显的损伤,其缺陷系数可取为 1.0。由于该建筑物属于高层建筑,采用反应谱分析方法计算弹性地震作用。

3.3 评估结果及其分析

从楼层各半层的抗震能力评估结果(表 1)可以看出,由于荷载的增加,除了部分楼层外(带 * 号),改造后大部分楼层的抗震能力均有不同程度的降低。改造前后, X 方向抗震能力最弱楼层的抗震能力分别为: 0.402 g (第 3 层上半层)、 0.400 g (第 3 层上半层); Y 方向的相应值分别为: 0.220 g (顶)、 0.219 g (顶层)。根据等超越概率原则求出大震下目标地震加速度为 0.165 g ;结构设计基准期对应的目标地震加速度为 0.193 g 。所以改造后结构的抗震能力仍满足抗震要。

从评估结果还可以看出, X 方向结构抗震能力最小的楼层并不是出现在结构的底部,而是在第 3 层的上半层。若采用底部剪力法对结构进行地震作用分析,则地震作用沿结构高度从上到下逐渐增加;而采用反应谱法,由于高振型的影响,结构的受力、变形更加复杂,最大地震作用就不一定出现在结构底部,结构不一定是在底部最先破坏。Y 方向抗震能力最弱的楼层出现在建筑物顶部,也不是在建筑物最底部,是由于该楼层 Y 方向的剪力墙面积急剧减小造成的(见图 2)。改造后部分楼层的抗震能力不降低反而增加,是由于改造后结构的质量分布、模态等均发生变化,地震作用在楼层、单元之间重新分布引起的。

表 1 部分楼层改造前后的抗震能力

楼层上(下)半层	$A_{0,x}$	$A_{1,x}$	$A_{0,y}$	$A_{1,y}$
26 下半层	3.977 92	3.976 68	0.220 409	0.219 423
25 上半层	3.977 92	3.976 68	0.402 374	0.400 654
25 下半层	1.975 12	1.972 48	1.131 31	1.124 13
24 上半层	2.326 03	2.324 36	1.30 161	1.298 34
24 下半层	1.744 65	1.745 31 *	1.526 01	1.516 78
23 上半层	1.836 07	1.837 91 *	0.940 421	0.937 81
23 下半层	1.337 25	1.338 65 *	1.187 06	1.188 17 *
22 上半层	1.397 57	1.399 21 *	0.877 044	0.873 398
22 下半层	0.978 131	0.977 797	0.839 99	0.840 615 *
21 上半层	1.036 51	1.035 61	0.730 724	0.727 619
21 下半层	0.859 217	0.851 931	0.741 395	0.735 187
20 上半层	0.894 793	0.887 436	0.651 61	0.645 873
20 下半层	0.774 851	0.768 573	0.624 612	0.620 45
19 上半层	0.821 161	0.814 501	0.623 866	0.619 343
19 下半层	0.782 763	0.776 678	0.569 083	0.563 007
18 上半层	0.745 017	0.738 695	0.652 242	0.648 668
18 下半层	0.680 778	0.675 666	0.631 582	0.627 086
15 上半层	0.630 233	0.623 598 *	0.538 04	0.531 196
15 下半层	0.586 206	0.579 809	0.534 281	0.530 689
9 上半层	0.479 28	0.474 417	0.487 617	0.484 262
9 下半层	0.442 728	0.438 575	0.416 797	0.413 062
8 上半层	0.455 641	0.451 437	0.480 474	0.477 764
8 下半层	0.423 185	0.419 452	0.388 24	0.384 898
3 上半层	0.402 97	0.400 167	0.390 169	0.387 984
3 下半层	0.441 757	0.438 184	0.350 332	0.366 462 *
2 上半层	0.403 37	0.400 684	0.395 975	0.393 821
2 下半层	0.457 098	0.453 459	0.393 827	0.391 619
1 上半层	0.557 402	0.552 533	0.448 302	0.446 327
1 下半层	0.499 902	0.495 46	0.354 762	0.352 325
0 上半层	0.445 777	0.441 769	0.322 215	0.319 959

说明: $A_{0,x}$, $A_{1,x}$ 为改造前后 X 方向楼层的抗震能力, $A_{0,y}$, $A_{1,y}$ 为改造前后 y 方向楼层的抗震能力。

4 结论

(1) 建立了适合我国工程实际的既有含剪力墙钢筋混凝土结构抗震能力评估方法,并编写了相应程序,评估过程完全由计算机实现。

(2) 讨论了影响既有建筑结构抗震能力的因素,并应用到抗震评估体系中去。

(3) 通过具体的工程实例,表明该评估方法可定量评估既有含剪力墙钢筋混凝土结构的抗震能力,了解各楼层的抗震性能。

[参考文献]

- [1] 杨仕升,郝效强,秦荣. 钢筋混凝土框架结构抗震能力评估研究[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(5):80-84.
- [2] 杨仕升. 钢筋混凝土结构抗震能力评估研究[D]. 南宁:广西大学,2006.
- [3] 郝效强. 钢筋混凝土框架-剪力墙结构抗震能力评估[D]. 南宁:广西大学,2006.
- [4] 范家骥,高莲娣,喻永言,编著. 钢筋混凝土结构(下册)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1991:218-243.
- [5] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范(GB50010—2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:42-44.
- [6] 蓝宗建,梁书亭,孟少平,编著. 混凝土结构设计原理[M]. 南京:东南大学出版社,2002:431.
- [7] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [8] 孙彬,牛荻涛,董振平. 在役结构抗震评估地震作用取值研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2003,35(4):312-316.
- [9] 中国地震局工程力学研究所,中国建筑科学研究院工程抗震研究所,哈尔滨工业大学. 建筑工程抗震性态设计通则(试用)(中国工程建设标准化协会标准—CECS160:2004). 北京:中国计划出版社,2004:132-214.

(上接 346 页)

[参考文献]

- [1] 朱俊杰,曹继秀,钟巍,等. 兰州地区黄河最高级阶地与最老黄土沉积的发现及其古地磁年代学的研究[A]//青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究[G]. 北京:科学出版社,1994:77-90.
- [2] 陈发虎,李吉均,张维信. 兰州黄土地层研究[A]//中国西部第四纪冰川与环境[G]. 北京,科学出版社,1991:120-129.
- [3] 刘小凤,袁道阳,刘百麓. 兰州及邻近地区河流阶地变形特征[J]. 西北地震学报,2003,25(2):119-125.
- [4] 潘保田,苏怀,刘小丰,等. 兰州东盆地最近 1.2Ma 的黄河阶地序列与形成原因[J]. 第四纪研究,2007,27(2):172-180.
- [5] 陈发虎,张宇田. 兰州九洲台黄土沉积年代综合研究[J]. 沉积学报,1989,7(3):105-111.
- [6] 李吉均,方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. 科学通报,1998,43(15):1569-1574.
- [7] 袁道阳,刘小凤,郑文俊,等. 兰州马衔山—兴隆山活动断裂系的新构造变形特征和机制[J]. 中国地震,2003,19(2):125-131.
- [8] 袁道阳,刘百麓,才树华,等. 兰州马衔山北缘断裂带的新活动特征研究[J]. 地震地质,2002,24(3):315-323.