

文章编号: 1000 - 1301 (2009) 06 - 0108 - 07

# 基于概率和位移的框支剪力墙结构抗震性能评估方法

季 静<sup>1,2</sup>, 陈学伟<sup>1,2</sup>, 何慧贤<sup>1</sup>, 韩小雷<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院高层建筑结构研究所, 广东 广州 510640;  
2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 本文严格按照中国规范设计出典型的带转换层部分框支剪力墙钢筋混凝土结构, 通过弹塑性分析程序 DARC2D 对该结构进行多个地震动作用下的大震弹塑性时程分析, 得到结构及各个构件的反应量的统计特征, 再参照美国基于性能抗震设计规范 ASCE - 41 - 06 的结构与构件变形限值作为性能指标, 计算出结构和各个构件的可靠度和可靠指标, 作为评价结构抗震性能的标准, 总结归纳出基于概率和位移的抗震设计方法的思路。最后运用该方法, 对 7、8 度烈度区的框支剪力墙结构进行可靠性分析, 通过对比分析, 研究考虑内力增强措施、层间位移角控制条件、竖向构件轴压比限制条件、层刚比控制准则和竖向构件最小配筋率等因素对不同抗震烈度区的框支剪力墙结构的可靠性的影响, 从而评价中国规范抗震措施和构造措施的有效性。

**关键词:** 基于位移; 统计特征; 框支剪力墙; 可靠度; 弹塑性分析

中图分类号: P315. 957

文献标志码: A

## Evaluation method of seismic performance of frame-supported shear wall structure based on probability and displacement

Ji Jing<sup>1,2</sup>, Chen Xuewei<sup>1,2</sup>, He Huixian<sup>1</sup>, Han Xiaolei<sup>1,2</sup>

(1. Tall Building Structure Research Institute, College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A typical partially frame-supported shear wall structure with transfer story is strictly designed in accordance with Chinese code. Inelastic time-history analysis under rare earthquake with several seismic ground motions is carried out by the program DARC2D, from which the statistical characteristics of structural and component's responses can be obtained. By taking the deformation limits of ASCE - 41 - 06 (American performance based seismic design code) as a reference, the reliability indexes of the structure and its components can be worked out. The results can be used for evaluating the structural seismic performance, and then the evaluation method of seismic performance based on probability and displacement is summarized. Furthermore, the reliability analysis for these frame-supported shear wall structures in seismic regions with intensity 7 or 8 is carried out. The influence of some factors, such as enhancement of internal forces, control conditions of story drift, axial compression ratio, control criterion of story stiffness ratio and minimum reinforcement ratio of vertical members etc, can be taken into account for the reliability of these frame-supported shear wall structures in different seismic regions, and the evaluation for the effectiveness of aseismic measures and construction measures is presented.

**Key words:** displacement based; statistical characteristic; frame-supported shear wall structure; reliability; inelastic analysis

收稿日期: 2009 - 03 - 24; 修订日期: 2009 - 09 - 17

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (06105416)

作者简介: 季 静 (1963 - ), 女, 教授, 主要从事高层建筑结构和钢 - 混凝土组合结构抗震研究. E-mail: cvjingji@scut.edu.cn

# 引言

基于位移的抗震设计方法是目前较先进的抗震思想之一,美国、日本、欧洲的抗震设计规范正在由传统的基于力的方法向基于该方法过渡<sup>[1-3]</sup>,我国也有一定的研究<sup>[4]</sup>和应用。基于位移的抗震设计方法多强调控制结构的整体变形,并作为结构抗震设计的基本指标。如何保证结构在各水准地震作用下的构件变形同样满足相应的性能指标,目前尚处于初步研究阶段。本文通过一系列统计可靠性分析,从控制构件变形的方面进一步完善基于位移的抗震设计方法。在对结构进行多个地震动弹塑性时程分析时,发现结构在某些地震动作用下的抗震性能良好,但在另一些地震动作用下抗震性能则达不到性能指标,这种情况下比较难以评估结构的安全性。本文针对这一情况提出的基于概率和位移的抗震设计方法对结构进行安全性的评估,为可靠度理论在结构抗震安全性评估中的方便应用提供借鉴。

## 1 框支剪力墙结构地震反应量的计算

### 1.1 计算模型

本文主要研究对象是带转换层的部分框支剪力墙钢筋混凝土结构。计算模型是位于结构抗震设防烈度为 7 度 - 0.10g(8 度 - 0.20g)地区,场地类别为 Ⅱ类,总层数为 20,转换层设置在第 5 层。竖向构件混凝土等级均为 C40,转换层下部由落地剪力墙和框架组成,层高为 6 m,梁板混凝土等级为 C40,剪力墙厚度为 1 200 mm(2 100 mm)。转换层上部为剪力墙结构,层高 3 m,梁板混凝土等级为 C30(C40),剪力墙厚度为 200 mm(250 mm)。计算地震作用方向为横向。结构平面以及构件尺寸如图 1 所示。(说明:括号内为 8 度 - 0.20g 地区结构的信息)。

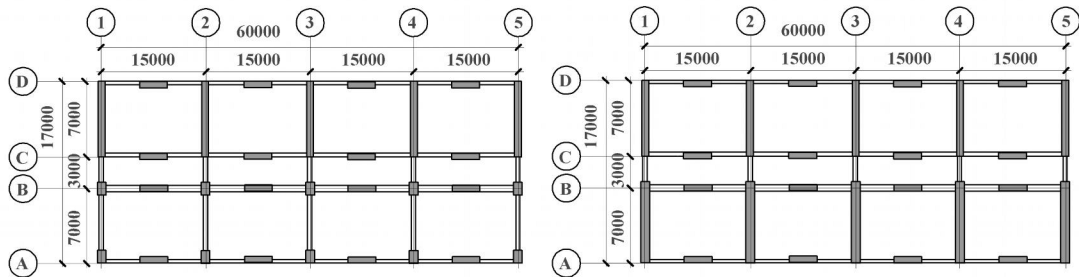


图 1 转换层上、下层结构平面布置图

Fig 1 Plan of structure

### 1.2 地震作用与地震动的选取

抗震设防等级直接关系到建筑物的抗震安全性和遭受地震破坏的危险性程度,因此在基于性能抗震设计理论中抗震设防水准的选择占有非常重要的地位。参考《建筑工程抗震性态设计通则(CECS160:2004)》<sup>[5]</sup>第 4.2.2 条,地震动参数如表 1 所示。目前,研究者普遍达成了定性的共识<sup>[6]</sup>:输入地震动的反应谱须拟合设计反应谱。尽管选择地震动的基本原则要求输入地震动的反应谱与场地设计反应谱一致,但并不是也不可能要求所选地震动的反应谱与规范标准反应谱在所有频段均有非常好的拟合。本文采用按地震加速度记录反应谱特征周期  $T_g$  和结构第一周期  $T_1$  双指标选择地震动,从 8 000 多个地震动的数据库中选取了 30 个符合要求的地震动进行计算分析。

表 1 时程分析所用的地震加速度时程最大值

Table 1 Earthquake level in current Chinese code

	6 度 (0.05 g)	7 度 (0.10 g)	7 度 (0.15 g)	8 度 (0.20 g)	8 度 (0.30 g)
小震	18	35	55	70	110
中震	50	100	150	200	300
大震	110	220	310	400	510

根据图 2 可把结构及构件的性能水准分为以下 4 个阶段:充分运行阶段(operational,简称 OP)、基本运行(immediate occupancy,简称 D)、生命安全(life safety,简称 LS)、接近倒塌(collapse prevention,简称 CP)。

### 1.3 性能目标

根据图 2 可把结构及构件的性能水准分为以下 4 个阶段:充分运行阶段(operational,简称 OP)、基本运行(immediate occupancy,简称 D)、生命安全(life safety,简称 LS)、接近倒塌(collapse prevention,简称 CP)。

由于本文主要研究的是评估结构安全性的问题,也就是接近倒塌阶段,所以结构及构件的性能指标均定为 CP 阶段。由于我国规范没有给出构件的截面变形的限值,故本文的构件性能指标采用美国规范 ASCE41-06<sup>[11]</sup>所规定的 CP 限值,如下表 2 所示:

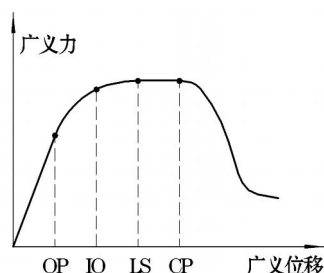


图 2 延性结构性能水平的阶段

Fig 2 The aseismic phases of the ductile structure

表 2 构件变形性能目标量化

Table 2 Performce object quantification of the components deformation

构件类型		框支柱	框架梁	剪力墙	连梁
CP 限 值	转角 / rad	0.010	0.020	0.009	0.025
	剪切变形	- - - -	- - - -	0.008	0.020

#### 1.4 弹塑性分析方法

本文弹塑性时程分析采用美国布法罗大学开发的二维平面杆系分析程序 DARC 2D 6.0<sup>[7]</sup>,该程序提供现行较为成熟的结构非线性分析功能,包括非线性 pushover 分析、非线性动力时程分析等。大量参数如时程输入、构件恢复力模型、结构阻尼等可由设计者自行调整,可详尽地输出结构刚度、振型变化、层间作用力、构件、楼层及整体结构的变形、耗能和损伤状态等分析结果。该软件已得到相关试验的检验,具有相当的工程参考意义。

DARC 的结构模型采用由一系列平行的平面框架和横向连梁构成的杆件层模型。梁单元模拟为连续的等效剪切-弯曲弹簧,不考虑轴向变形。柱单元是在梁单元的基础上,在单元的一端加上线性轴向弹簧。剪力墙单元理想化为在顶面和底面水平具有无限刚性的三竖线单元,两边竖向单元为非弹性轴向弹簧,中央竖向单元为等效剪切弹簧。剪力墙、梁和柱单元的截面性质 ( $M$ -关系曲线) 根据混凝土和钢筋的应力-应变性质由纤维模型分析计算。滞回曲线采用 Park 三参数模型,本工程分别取刚度退化系数  $\alpha = 2$ 、 $\beta = 0$  模拟一般的弯曲滞回模型和剪切滞回模型;取基于能量的强度退化系数  $\gamma = 0.1$  和基于能量的延性退化系数  $\delta = 0$  模拟构件因耗能和延性引起的强度衰减;取间隙闭合滑移指数  $\epsilon = 0.5$  模拟裂缝张开和闭合的典型效应。

杆件弯曲特性的改变采用传递塑性模型,即通过分布柔度来反映塑性的发展状况。分布柔度是通过屈服渗透系数修正杆件的截面抗弯刚度来实现的,而屈服渗透系数的取值取决于杆件端部弯矩的数值。结构损伤分析采用目前被广泛接受的双参数累积损伤模型<sup>[8]</sup>,该模型同时考虑到变形和耗能两种反映钢筋混凝土结构损伤的主要控制因素。

## 2 框支剪力墙结构地震反应量的统计特征

首先假设各个反应量服从正态、对数正态、极值 I 型、极值 II 型分布,然后采用非参数假设检验法 (K-S 法) 对以上假设进行判断。

通过对整体反应量:最大顶点位移、最大基底剪力、各层最大层间位移角和局部反应量:各楼层梁端截面的转角,各楼层柱端截面的转角,以及各楼层剪力墙端截面的转角的计算分析,对于 7、8 度区框支剪力墙结构均得到相同的检验结果如下:

(1) 对于最大顶点位移和各层层间位移角,对数正态分布的拟合度最好;对最大基底剪力,正态分布的拟合度最好。

(2) 框架梁端截面、连梁截面、框架柱截面的转角均符合对数正态、极值 I 型、极值 II 型分布。但是,对数正态分布拟合得最好。剪力墙截面的转角的检验结果对数正态分布最好,接受通过率超过 90%。所以,本文分析时所有构件的转角均取对数正态分布。

## 3 框支剪力墙结构地震反应的可靠性分析

在本文中,对于确定性的结构,可以认为地震输入的随机性对结构抗震可靠度的影响远大于结构随机参

数的影响,故不考虑结构随机参数的因素。而且,结构各反应量只考虑在具有特定发生概率的地震作用下抗震结构的条件破坏概率。

### 3.1 破坏准则

整体破坏准则:当结构的任一楼层层间位移角达到 1%,该楼层失效,结构失效。该准则与我国相关的规范及试验是比较一致的,与我国建筑抗震设计规范(GB50011-2001)<sup>[9]</sup>规定的弹塑性层间位移角限值([ $\mu_p$ ]=1/100)完全一致。

局部破坏准则:构件的任一截面位移达到表 2 相应的性能目标位移,则认为该构件失效。

### 3.2 构件的可靠度与可靠指标的计算

由于构件的截面转角符合对数正态分布,根据上述的局部破坏准则,参照式(1),可以算出每个构件的可靠指标<sup>[10]</sup>。

$$\ln \frac{\mu_R \sqrt{1 + \frac{2}{s^2}}}{\mu_S \sqrt{1 + \frac{2}{r^2}}} = \frac{\ln \frac{\mu_R \sqrt{1 + \frac{2}{s^2}}}{\mu_S \sqrt{1 + \frac{2}{r^2}}}{\sqrt{\ln[(1 + \frac{2}{r^2})(1 + \frac{2}{s^2})]}} \quad (1)$$

### 3.3 所有构件的可靠度和可靠指标的统计

分别将 30 条地震动作用所有的框架梁端、连梁梁端、柱端、剪力墙端截面转角可靠指标合并起来进行统计。经非参数假设检验(K-S法)发现,合并后的转角可靠指标均不符合前面给出的 4 种概率分布形式。但为了大致反映结构构件截面的破坏程度,按对数正态分布求出各类构件截面转角可靠指标的均值、标准差和超越概率(当目标可靠指标为 2 时,对应的可靠度为 99.3%,即构件基本不会发生破坏。超越概率是指构件可靠指标小于 2 的概率),如表 3 所示:

表 3 各类构件合并后的转角可靠指标的统计参数

Table 3 Statistical characteristics of members' reliability index

	7 度区的框支剪力墙结构				8 度区的框支剪力墙结构			
	框架梁	连梁	框支柱	剪力墙	框架梁	连梁	框支柱	剪力墙
平均值	20.33	3.65	16.87	17.49	20.42	3.01	17.63	13.39
标准值	3.28	3.78	8.77	11.49	2.62	2.71	5.96	8.96
超越概率	0.00%	42.24%	0.00%	0.00%	0.00%	51.74%	0.00%	0.00%

### 3.4 整体的可靠度和可靠指标的计算

根据上文所提出的整体破坏准则,本文认为结构的任一楼层层间位移角达到 1%的状态为结构破坏的状态。由计算可知:7 度区带转换层结构竖向构件中最低的可靠度和可靠指标分别为:99.40%和 2.487。8 度区的为:99.85%和 2.159。由此可知,该两个结构均安全。

### 3.5 基于概率和位移的抗震设计方法的提出

本文提出的基于概率和位移的抗震设计方法进行结构安全性评估的步骤如下:

- (1)按照“双频段控制”方法选定 30 条以上的地震动,并将其按照结构所在烈度区大震的水平进行调幅。
- (2)进行大震弹塑性时程分析,得出各反应量的概率分布形式和相应的数学特征值。
- (3)根据美国规范 ASCE41-06 规定的构件截面变形 CP 限值,计算出各构件的可靠度和可靠指标。
- (4)得出各类构件的可靠指标的分布,以便预见构件在大震下的破坏状态。
- (5)根据上面的整体破坏准则,得出结构体系的可靠度和可靠指标。

## 4 框支剪力墙结构的抗震措施有效性的评价

首先严格按我国抗震规范设计出处于 7、8 度区的 1、3、5 层转换的典型框支剪力墙结构(结构平面布置与图 1 相同)。然后,采用基于概率和位移的抗震设计方法对严格按照我国规范设计的 7、8 度区框支剪力墙结构进行可靠性分析比较,探讨规范规定的抗震措施和构造措施对不同烈度区的框支剪力墙结构的可靠性的影响。

#### 4.1 规范规定的抗震措施和构造措施

我国规范按传统习惯,主要根据地震烈度分区(同时也考虑了结构的总高度)将结构划分成从高到低(一级至四级)的 4 个抗震等级,并从一级抗震等级到三级抗震等级采用了从严到松的内力增强措施和抗震构造措施,用于钢筋混凝土框支剪力墙结构的主要抗震措施如表 4 所示:

表 4 中国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)<sup>[9]</sup>规定的框支剪力墙结构抗震措施

Table 4 Seismic fortification measures for structure with transfer storey in code for seismic design of buildings (GB50011-2001) in China

抗震等级	一级抗震等级		二级抗震等级
	用于 8 度 80m 抗震墙和框支层 框架及 7 度 >80m 框支层框架		用于 7 度的抗震墙和框支层 框架及 7 度 80m 抗震墙
底层柱下端截面和框支柱顶层上端截面的抗弯能力增强系数	1.5		1.25
抗震墙的抗弯能力增强措施	底部加强部位及以上一层应按墙肢底部截面组合弯矩设计值采用;其它部位应乘以增大系数 1.2。		
构件和节点的剪力增强措施	严格		中等
抗震构造措施	严格		中等

另外几个间接影响结构反应性态的抗震控制措施和构造措施包括:多遇地震标准值作用下的层间位移角控制条件、竖向构件轴压比限制条件、层刚比控制条件、竖向构件最小配筋率限制条件。

#### 4.2 分析结果的比较

表 5 反应量统计特征

Table 5 Statistical characteristics of the structural seismic responses

转换层 所在位置	结构所 在烈度区	整体反应量统计特征			各构件端截面可靠指标的统计特征值				
		统计特征值	顶点位移 /mm	基底剪力 /kN	可靠度最低 楼层的层间 转角 /rad	框架梁	连梁	框支柱	剪力墙
首层	7 度区	平均值	171.095	5010.639	0.447	- - -	2.918	11.198	19.892
		标准差	52.640	864.660	0.116	- - -	2.247	0.430	12.074
		95%分位点	275.081	6432.879	0.688	- - -	29.52%	0.00%	0.00%
	8 度区	平均值	160.555	9119.175	0.421	- - -	2.692	22.031	16.060
		标准差	51.317	1405.119	0.112	- - -	2.533	2.586	9.333
		95%分位点	263.249	11430.391	0.650	- - -	48.19%	0.00%	0.00%
3 层	7 度区	平均值	183.159	5154.366	0.490	11.361	3.201	10.529	17.368
		标准差	77.078	1070.026	0.153	2.920	3.080	3.498	9.752
		95%分位点	327.033	6914.402	0.791	0.00%	38.84%	0.00%	0.00%
	8 度区	平均值	165.884	10207.384	0.464	19.187	3.159	22.102	16.727
		标准差	51.464	1703.350	0.118	3.022	2.590	7.139	8.896
		95%分位点	268.885	13009.146	0.690	0.00%	40.09%	0.00%	0.00%
5 层	7 度区	平均值	182.309	6264.470	0.523	20.326	3.648	16.867	17.490
		标准差	57.588	1377.420	0.142	3.282	3.183	8.765	11.492
		95%分位点	285.309	8530.123	0.793	0.00%	42.24%	0.00%	0.00%
	8 度区	平均值	176.573	12824.871	0.566	20.425	3.010	17.635	13.392
		标准差	50.984	2344.334	0.161	4.617	2.711	5.959	8.964
		95%分位点	275.711	16680.957	0.865	0.00%	51.74%	0.00%	0.00%

表 6 结构体系可靠度和可靠指标

Table 6 Structure's reliability and reliability indexes

转换层所在位置	结构所在烈度区	数学特征值	按整体破坏准则
首层	7度区	可靠度	0.998
		可靠指标	2.964
	8度区	可靠度	0.999
		可靠指标	3.148
3层	7度区	可靠度	0.991
		可靠指标	2.377
	8度区	可靠度	0.999
		可靠指标	3.074
5层	7度区	可靠度	0.994
		可靠指标	2.487
	8度区	可靠度	0.985
		可靠指标	2.159

由表 5 和表 6 可知通过对以上计算结果的分析,转换层设置在首层、3层和 5层的结构均可以得到以下结论:

(1) 7度区框支剪力墙结构的顶点位移和可靠度最低楼层的层间转角平均值与 8度区的相差不大,8度区的略小。

(2) 框架梁的可靠指标:8度区结构比 7度区的大;框支柱的可靠指标:8度区结构比 7度区的大;连梁的可靠指标:8度区结构比 7度区的小;剪力墙的可靠指标:8度区结构与 7度区差别不大,7度区的略大;

(3) 在首层和 3层转换时:8度区的结构体系可靠指标比 7度区略大。在 5层转换时:8度区的结构体系可靠指标比 7度区略小,如表 6 所示。

#### 4.3 分析结果的讨论

(1) 框支层部分的构件可靠指标:8度区结构比 7度区大。这是由于不同的抗震等级对应的抗弯能力增强措施和抗震构造措施不同,8度区是一级抗震而 7度区是二级抗震。

(2) 转换层以下落地剪力墙可靠指标:8度区结构比 7度区略大,这除了抗震等级不同以外,还与层刚比控制准则有关:落地剪力墙在转换层以下的墙厚加大很多,远远超过受力所需的截面尺寸,而 8度区更是如此。

(3) 转换层以上的双肢剪力墙和连梁可靠指标:8度区的比 7度区的可靠指标略小,这是由于:(1) 7度区地震作用较小,多遇地震下的弹性层间位移角限制条件不再对连梁、剪力墙截面的选择起控制作用;而轴压比成为对剪力墙截面选择起控制作用的因素,而且 7度区框支剪力墙的配筋量是由最小配筋率条件确定的,这些因素相当于对 7度区剪力墙抗弯能力增强措施起了补偿作用。(2) 8度区虽然有剪力墙和连梁的抗弯能力增强措施,但是设计过程表明,连梁和剪力墙截面尺寸是由多遇地震下的层间位移角限制条件控制,大多数的构件截面配筋量全由计算控制,富余度没有 7度区时的大。

## 5 结论

本文利用统计和概率分析手段对带转换层部分框支剪力墙钢筋混凝土结构进行抗震分析得出了以下结论:

(1) 得出了弯曲型转换层结构的各反应量符合的具体概率分布形式:最大基底剪力,正态分布的拟合度最好;最大顶点位移和各层层间位移角,对数正态分布的拟合度最好;各构件的截面转角,对数正态分布的拟合度最好。

(2) 根据美国规范 ASCE41-06 的有关结构层间位移角和结构构件变形的有关规定作为性能目标,计算结构体系和构件的可靠度和可靠指标,并归纳出采用基于概率和位移的抗震设计方法进行评估结构安全性的思路。

(3) 应用基于概率和位移的抗震设计方法对 7度区和 8度区的框支剪力墙结构的可靠性进行分析比较,得出:对于转换层以下框支层部分,8度区结构的构件的可靠度比 7度区结构的高;对于转换层以上楼层部分,8度区结构的构件的可靠度比 7度区结构的略低。结构的整体反应和体系的可靠度则差别不大。

## 参考文献:

- [1] Seismic rehabilitation of existing buildings[S]. ASCE/SEI41 - 06
- [2] Seismic design of reinforced concrete structures for controlled inelastic response (Design Concepts) [S]. Comité Euro - International du Béton - CEB. 2003.
- [3] Guidelines for seismic performance evaluation of reinforced concrete buildings[S]. Architectural Institute of Japan, 2004.
- [4] 季 静,黄 超,韩小雷,等. 基于性能的设计方法在超限高层建筑结构设计中的应用研究 [J]. 世界地震工程, 2007, 23 (1): 98 - 103.
- [5] CECS160: 2004 建筑工程抗震性能化设计通则 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [6] 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.
- [7] Valles R E, Reinhorn A M. DARC 2D Version 4. 0: A program for the inelastic analysis of buildings[R]. Technical Report of NCEER, 1996.
- [8] Park Y J. Damage - limiting: A seismic design of buildings[J]. Earthquake Spectra, 1986, 3 (1): 1 - 26.
- [9] GB50011—2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [10] 何慧贤. 基于概率和位移的抗震设计方法在带转换层结构的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
- [11] Comell C A. A Probability based structural systems[J]. Journal of American Concrete Institute, 1969, 66 (12): 974 - 985.