

# 核岛侧常规岛主厂房山墙抗倒塌能力分析

戚永乐<sup>1,2</sup>, 万海涛<sup>3</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广州 510663; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640;  
3. 河南大学 土木建筑学院, 开封 475001)

**摘要:** 常规岛主厂房是一种特殊的工业建筑结构, 具有质量、刚度分布不均匀、多错层等特点, 其靠近核岛一侧山墙抗倒塌性能会影响核岛的安全性, 应进行细致的分析与设计。首先, 通过静力推覆法对主厂房结构在 SL-2 级地震作用下的整体抗震性能进行了研究, 然后, 通过移除核岛侧山墙的关键构件, 对核岛侧山墙抵御突发事件的能力进行了评估。结果表明: 经过合理的设计, 核岛侧山墙能够在地震作用和重要构件突然丧失承载力的作用下保持不倒塌, 结构具有较大冗余度, 能保证核岛安全。

**关键词:** 常规岛; 主厂房; 抗倒塌; 抗震性能

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2014)01-0070-05

## The Capacity of Resisting Collapse of the Main Power Building Gable Nearby Nuclear Island

QI Yongle<sup>1,2</sup>, WAN Haitao<sup>3</sup>

(1. Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;  
2. College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** The main building of nuclear power station is a special kind of industrial structure with irregular in mass and stiffness. The capacity of resisting collapse of its gable can affect the safety of nuclear island nearby. The analysis and design should be carried on very carefully. Firstly, the seismic performance under SL-2 level earthquake of the main building of power station is studied through the Pushover analysis. Secondly, by dismantling the key component of the gable, the capacity of resisting collapse of the gable is evaluated. Results show that through reasonable design the gable can have larger redundancy to avoid collapse under earthquake and sudden loss of bearing capacity of its key component, and can ensure the safety of the nuclear island.

**Key words:** conventional island; main building of power station; the capacity of resisting collapse; seismic performance

核岛在靠近常规岛一侧布置有属于 I 类物项 (即与核安全相关, 应严格控制损坏情况的物项) 的电气厂房。靠近核岛的山墙抗倒塌能力应进行严格控制, 避免由于主厂房的破坏而影响到核岛的安全。可能引起核岛侧山墙倒塌的作用主要有地震作用和突发事件引起的重要构件失效。

核电厂常规岛主厂房由于工艺管道及设备布置复杂, 结构形式一般都属于平面不规则结构, 有的

甚至是竖向不规则结构, 而且结构质量分布非常不均匀。对于这样特殊的结构, 现行民用建筑抗震规范并没有具体的设计建议, 因此规范中的调整系数还能否适用, 有待研究<sup>[1]</sup>。另外, 采用传统抗震设计的工业建筑结构抗震设防绝大多数情况只是保证了在小震下的设防目标, 多数结构在中、大震能否实现规范要求的“可修”、“不倒”尚有待实践检验, 至于在中、大震下保证了结构不倒是否就能实现避免或减少了财产损失的预定目标更是有待商榷。基于性能的抗震设计方法可以较准确预测地震作用下塑性铰的产生与发展, 能具体到构件层次评价结构的损伤程度<sup>[2]</sup>, 为地震作用下核岛侧山墙的抗倒塌能力评估提供了较为可靠的方法。

收稿日期: 2014-8-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378221)

作者简介: 戚永乐(1983), 男, 湖北仙桃人, 博士, 主要从事复杂建筑结构抗震性能研究(e-mail)q.yongle@mail.scut.edu.cn。

从 1968 年 Ronan Point 公寓燃气爆炸事故到 Oklahoma 汽车炸弹事件, 连续倒塌问题经历了从发现到引起广泛的重视<sup>[3]</sup>。结构连续倒塌是指结构因突发事件或严重超载而造成局部结构破坏失效, 继而引起与失效破坏构件相连的构件连续破坏, 最终导致相对于初始局部破坏更大范围的、不成比例的倒塌破坏。建筑结构抗连续倒塌近年来在欧美国家得到了广泛关注, 并颁布了相关的设计标准。我国迄今还没有制定有关结构抗连续倒塌的专门标准, 《建筑抗震设计规范》对抗倒塌设计给出了概念性设计原则, 但并无具体实施方法<sup>[4]</sup>。鉴于国际形势发展的需要和国内许多有关国计民生重大建筑有待建设, 结构抗连续倒塌设计更显迫切和重要。受工艺流程的制约, 电厂主厂房的结构质量、刚度分布不均匀, 其整体抗震性能较差, 主要构件若在突发荷载下丧失承载力, 是否会引起连锁破坏应采用抗连续倒塌的方法进行评估。

本文针对主厂房的特点, 设计预想在强震作用下, 靠近核岛处山墙以外的框架能发挥较好的耗能作用, 以减少山墙处构件的破坏倒塌, 保证核岛的安全。同时希望结构有较好的拉接作用, 结构整体具有较大的冗余度, 使得重要竖向构件突然丧失承载力时, 核岛侧山墙不至于倒塌影响核岛安全。

### 1 核电结构的抗震重要性分类

核电厂建筑物、构筑物和设备按抗震重要性进行分类, 进而采取不同的安全检验标准, 如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

《核电厂抗震设计规范》(GB 50267 - 97)<sup>[6]</sup>根据核电厂中安全壳、建(构)筑物、管道、设备等有关部件对核安全的重要性, 将其分为三类物项, I 类物项、II 类物项、III 类物项(常规物项)。国家核安全局给出的《核电厂的抗震设计与鉴定》(HAD 102/02)规定<sup>[7]</sup>: “当一物项根据分析、试验或经验预期会发生破坏、坠落、移位或任何其他的空间反应, 并可能危及高类物项的功能时, 应选择下列措施之一: 1) 这类物项必须归入被危及物项的同一类别; 2) 必须证明低类物项在基准地震动 SL-2 作用下不会倒塌或不会失去功能; 3) 被危及物项必须给以适当保护, 使之不受危及。对于因其可能危及高类物项而被重新分类的物项, 由于仅需保证其结构整体性, 可采用较不严格的抗震设计。”

表 1 各国核电结构抗震重要性分类

Table 1 Classification of Seismic Importance of Nuclear Power Countries

国家 或机构	重要性分类		抗震要求	
	类别	定义	设计地震	设防标准
IAEA, 中国, 俄罗斯	I	反应堆主要设施	$S_2, SL-2, MDE$ $S_1, SL-1, DE$	保障安全 正常运行
	II	反应堆其他设施	$S_1, SL-1, DE$	正常运行 现行通用 抗震标准
	III	一般设施		
日本	S 级	重要安全设施以及 与高放射性物质有关 设施	$S_{max}(S_d,$ $3.0C_i)$	保障安全 功能正常运行
	B 级	放射性物质有关设施	$1.5C_i$	正常运行 现行通用 抗震标准
	C 级	A、B 以外的设施	$1.0C_i$	
美国, 德国, 法国	I	反应堆有关设施	SSE, SEB, SMS, OBE, AEB, SMHV	保障安全 正常运行 现行通用 抗震标准
	不分类			
加拿大	A	反应堆有关设施	DBE	维持结构健全
	B	部分反应堆有关 设施(ECCS 等)	SDE	维持结构健全 并保持功能 现行通用 抗震标准
	其他	一般设施		

注:  $C_i$  为静态地震力系数, 设施一词包括建筑物, 构筑物与设备。

AP1000 与 CPR1000 核电厂的常规岛属于与核安全无关的物项, 属于我国《核电厂抗震设计规范》规定的 III 类物项。核电厂常规岛的特殊之处在于其与核岛布置紧密相邻, 其山墙结构在地震中若发生倒塌将可能危及核岛中的电气厂房(I 类物项), 因而汽轮发电机厂房抗震设计又存在特殊性。由此可见, 只要保证汽轮发电机厂房在 SL-2 和突发事件作用下核岛侧山墙不倒塌, 不危及 I 类物项的安全, 则汽轮发电机厂房完全可按 III 类物项进行抗震设计。

### 2 验算地震动

常规岛结构形式复杂, 国内暂还没有针对常规岛结构设计的专门规定, 考虑核电工程的重要性, 以及业主对常规岛提出的抗震性能要求, 采用 SL-1 级弹性设计, SL-1 级弹性设计与不屈服设计的区别如表 2 所示, SL-1 级弹性设计更为严格。

采用 SL-1 级地面运动(运行安全地震震动, 又常称为运行基准地震, 500 年一遇, 与民用建筑抗震的中震水平相当)计算地震作用, 其地面运动加速度值为 0.1 g(相当于常规地震烈度下的 7 度中震); 补充 SL-2 级地面运动(极限安全地震震动, 又常称

为安全停堆地震, 万年一遇) 作用下的结构弹塑性变形验算, 保证在 SL-2 作用下不倒塌, 在本 CPR 二代半堆型的核电常规岛主厂房设计中, 极限地震 SL-2 的校核按该厂址设计数据文件取为 0.2 g。

表 2 SL-1 弹性设计与不屈服设计对比

Table 2 The Comparison of Elastic Design and Un-yield Design

设计参数	SL-1 级弹性设计	SL-1 级不屈服设计
水平地震影响系数最大值	SL-1 级地面运动	SL-1 级地面运动
时程分析地震加速度时程曲线最大值	SL-1 级地面运动	SL-1 级地面运动
内力调整系数	1.0 (抗震等级四级)	1.0 (抗震等级四级)
荷载分项系数	按抗规 GB 50011 - 2010 要求	1.0
承载力抗震调整系数	按抗规 GB 50011 - 2010 要求	1.0
材料强度取值	设计强度	材料标准值 (提高了承载力)

### 3 主厂房弹塑性分析模型

采用 SAP2000 有限元软件进行空间整体模型分析计算, 此 CPR 二代半堆型常规岛主厂房模型如图 1 所示。在整体模型中包括常规岛内主要结构构件, 如混凝土主体框架、汽机房各层平台、辅助间、润滑油室、钢结构屋面以及防甩结构等。配筋计算中考虑恒载、工艺荷载、吊车荷载、风荷载、地震作用、主蒸汽管道与主给水管道的事故工况下甩击荷载、楼面活荷载、屋面活荷载等。完成配筋设计后, 按照施工图调整 SAP2000 配筋为实际配筋, 依据施工图的配筋生成实际的塑性铰模型参

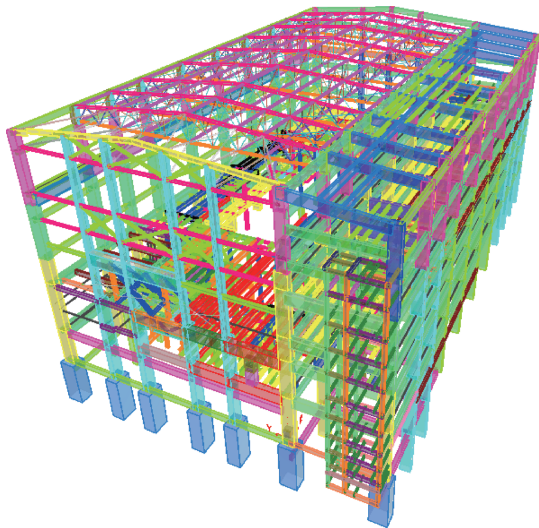
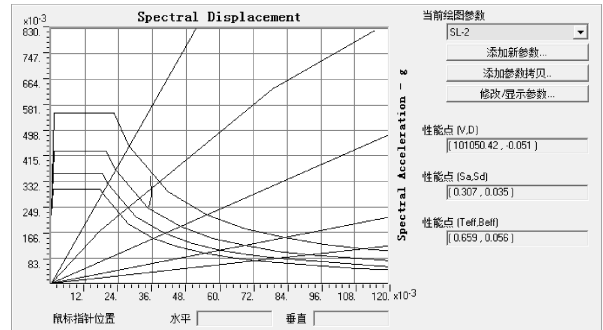


图 1 主厂房模型

Fig. 1 The Model of Main Power Building

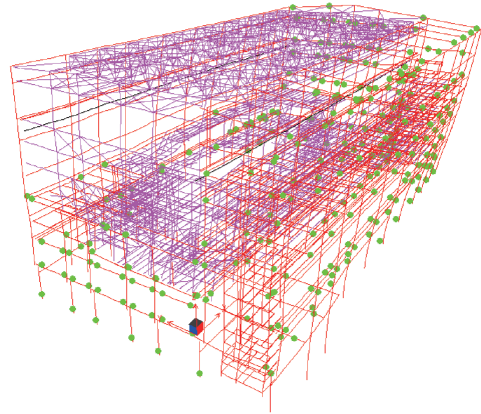
数, 在此基础上, 进行下一步的 Pushover 分析 (静力推覆分析)。

由图 2 可知能力谱与需求谱相交求得的性能点基本处于弹性段内, 图 3 可知结构在 SL-2 级地震作用下塑性铰分布, 在 SL-2 级地震作用下, 核岛侧主要构件基本处于完好状态, 不会由于核岛侧山墙的倒塌而影响核岛的安全。



(a) SL-2 级地震下纵向 Pushover 分析

(a) Pushover Analysis in the Longitudinal Direction Under SL-2 Level



(b) SL-2 级地震下横向 Pushover 分析

(b) Pushover Analysis in the Transverse Direction Under SL-2 Level

图 2 SL-2 级地震下能力谱与需求谱曲线

Fig. 2 The Capacity Spectra and the Demand Spectra of SL-2 Level

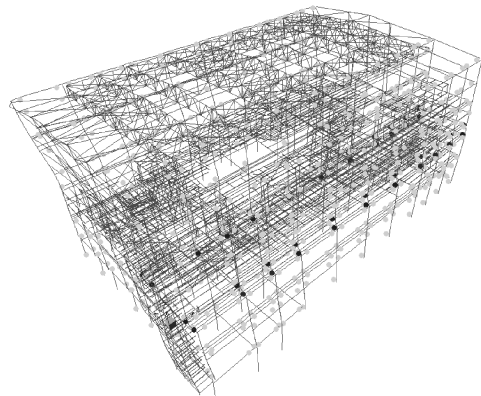


图 3 Pushover 分析下的铰分布图

Fig. 3 Plastic Hinges Distribution Under the Pushover Analysis

## 4 局部极限状态抗倒塌能力

针对本 CPR 二代半堆型的核电常规岛, 核岛侧山墙受到主厂房防甩结构的保护, 基本上免除了由于蒸汽管道断裂甩动而造成柱子破坏的情况, 本文防倒塌设计是为了考查极端条件下, 假定核岛侧山墙关键竖向构件由于爆炸、冲击而破坏时是否具有抗连续倒塌能力。

### 4.1 轴压比评估法

当仅采用柱轴压比进行评估时, 应首先检验竖向承重的柱子尚未失效前的柱轴压比, 以提高结构的安全性能。由大量的弹塑性分析结果可知, 校验永久荷载作用下柱的轴压比是一种有效地防止结构连续性倒塌的简单评估方法<sup>[8]</sup>。当竖向承重构件失效后, 竖向荷载将通过梁重分布至其他竖向承重构件。如果正常使用阶段柱的轴压比相对较小, 则其承担重分布后的竖向荷载的能力就相对较强。有学者通过大量的弹塑性统计分析发现, 应设定柱在恒荷载作用下的临界轴压比  $n_{\max} < n_{\text{limit}} = 0.25$ <sup>[8]</sup>。

在设计的外包荷载组合下, 核岛侧山墙的最大轴压比为 0.348 (图 4 矩形圈出, 轴力为 8 847 kN), 此柱在重力荷载代表值下的轴压比为 0.246。一般而言, 柱在恒载作用下的轴压比是抑制结构发生连续性破坏的一个关键因素。就当前的研究成果而言, 将恒荷载作用下的柱轴压比限制在约 0.25 以内, 是防止结构发生连续性倒塌的一个设计准则。按照常规结构统计的 0.25 的限值, 核岛侧山墙具有一定的冗余度, 有一定的抗连续倒塌能力储备。

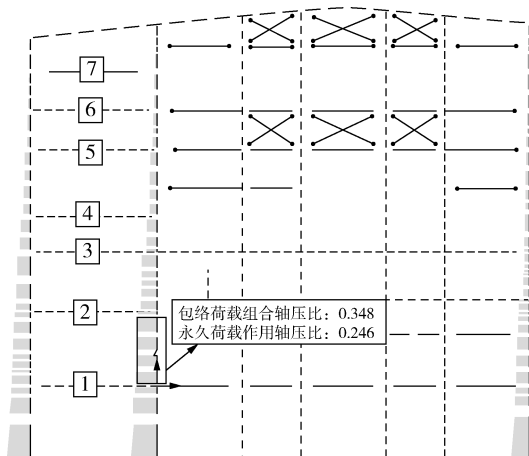


图 4 核岛侧山墙的轴压力与轴压比

Fig. 4 The Axial Compression and Axial Ratio of the Gable Nearby Nuclear Island

### 4.2 虚位移法

简单评估方法是当竖向承重构件失效时, 检验梁柱荷载重分布能力的一种方法。

当某些柱子丧失承载能力时, 可以认为这些柱子所承受的轴力将会重分布到其他性能完好的构件上。可以采用虚功原理进行推导出<sup>[8]</sup>:

$$\sum_{j=1}^n P_j \delta < \sum_{i=1}^N M_{\text{bpi}} \theta_i \quad (1)$$

式中:  $n$  为丧失承载力的柱子数量;  $P_j$  为丧失承载能力的柱子的轴力;  $N$  为梁端塑性铰的数目;  $M_{\text{bpi}}$  为梁的全截面塑性弯矩;  $\delta$  为柱子移除后, 移除处产生的竖向虚位移。

当各跨度  $L$  均相同时, 可以转化为:

$$\sum_{j=1}^n P_j < \sum_{i=1}^N \frac{M_{\text{bpi}}}{L} \quad (2)$$

公式左端项为柱子轴力的总和, 右端项是相邻梁的剪力总和。

如果结构能满足式(2), 则可认为荷载能够通过上部梁进行重分布。通过式(2)判断荷载不能进行重分布, 则需要提高结构的荷载重分布能力。

按照设计工况的包络值计算, 柱子的轴力为 8 847 kN, 相连梁的极限塑性弯矩分别为 2 901.82 kN·m、4 540.96 kN·m、1 467.24 kN·m, 按照跨度 10 m 计算, 显然不满足式(2), 并且梁端形成塑性铰之前, 梁端弯矩与转角一起增长, 采用  $M_{\text{bpi}}$  计算结构吸收能量显然高估了结构耗能能力。由此可见, 仅仅依靠与此柱相连接的梁是无法补偿轴力传递的不足, 此时需要加强顶部、四周其它梁的抗弯能力。

### 4.3 构件去除法

美国国防部 (DOD) 负责出版的连续性倒塌设计指南 (UFC 指南)<sup>[9,10]</sup>, 采用的直接评估与间接评估法分别是构件去除法 (Alternative Path Method) 和联系力法 (Tie Force Method)。

移除图 4 轴压比最大的那根柱子后, 原设计结构在重力荷载代表值作用下不稳定, 采用静力非线性分析, 结果不收敛, 结构的倒塌会扩散开。若不改变柱子的配筋, 仅改变若干梁的配筋, 使得跨层梁形成的“箱型截面效应”可以达到拉结作用, 而避免连续倒塌的发生。此时可采用如下简化设计: 采用等效静力分析, 考虑到构件破坏后的冲击荷载作用, 失效构件下部结构承受的荷载将等于该失效构

表4 柱子移除前后梁配筋对比

Table 4 The Comparison of Reinforcement Amount of Beam Before-and-after Column Removed

mm<sup>2</sup>

梁编号	配筋部位	柱移除前			柱移除后保存稳定的梁配筋			配筋量之比		
		左	中	右	左	中	右	左	中	右
1	上	4 240	3 335	7 178	5 639	3 335	5 823	1.33	1.00	0.81
	下	4 184	7 327	4 184	3 335	7 022	4 104	0.80	0.96	0.98
2	上	2 189	1 778	2 928	2 865	1 778	2 189	1.31	1.00	0.75
	下	2 189	1 778	2 189	1 778	1 778	2 189	0.81	1.00	1.00
3	上	2 988	1 778	4 150	3 710	1 778	2 189	1.24	1.00	0.53
	下	2 189	1 778	2 189	1 855	1 778	2 189	0.85	1.00	1.00
4	上	8 179	4 742	9 784	9 761	4 742	5 837	1.19	1.00	0.60
	下	5 837	4 742	5 837	4 880	4 742	5 837	0.84	1.00	1.00
5	上	8 349	4 742	8 614	10 898	4 742	5 837	1.31	1.00	0.68
	下	5 837	4 742	5 837	5 449	4 742	5 837	0.93	1.00	1.00
6	上	6 546	4 742	7 189	13 261	4 918	0	2.03	1.04	0.00
	下	5 837	4 742	4 742	6 630	7 295	9 870	1.14	1.54	2.08
7	上	5 837	4 742	5 837	6 968	5 121	0	1.19	1.08	0.00
	下	5 837	4 742	5 837	3 484	6 459	15 739	0.60	1.36	2.70

件原先承受荷载的2倍<sup>[11]</sup>，其它部分承受的荷载不变，重新进行梁的配筋设计，同时对设计的结果进行静力非线性分析校核。此时梁的配筋若按照表4采用，由于梁的拉结，结构的倒塌不会扩散开，表4中梁的编号见图4。

## 5 结语

(1) 核电厂汽轮发电机厂房可以定义为Ⅲ类物项，按现行《建筑抗震设计规范》进行抗震设计。但当汽轮发电机厂房的倒塌对核安全物项产生影响时，其相对一般常规非涉核构筑物，在抗震设计时应补充进行在极源地震SL-2地震动下的结构防倒塌验算。

(2) 经过Pushover分析，此核电厂汽轮发电机厂房在SL-2作用下，核岛一侧山墙基本保持完好，不会倒塌，更不会影响核岛的安全性。

(3) 若移除主要的柱构件，按照仅仅需要加强少数几根梁的配筋，同时采取一定的构造措施增强其延性、提高拉结锚固能力，而不必改变其原有柱子配筋设计即可达到较好的防连续倒塌的作用。

### 参考文献：

[1] 林生逸, 彭雪平, 韩小雷. 核电站常规岛主厂房基于性能的抗震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 5(31): 50-59. LIN Shengyi, PENG Xueping, HAN Xiaolei, ZHOU Yu. PBS Study on Seismic Behavior of Main Machine Hall in Conventional Island[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 5(31): 50-59.

[2] 戚永乐. 基于材料应变的RC梁、柱及剪力墙构件抗震性能指标限值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[3] 黄永东. 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌分析研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

[4] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2010. GB 50011-2010. Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

[5] 林皋. 核电工程结构抗震设计研究综述(I)[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 1-3. LIN Gao. Review on Seismic Structural Design of Nuclear Power Project (I)[J]. Yangtze River, 2011, 42(19): 1-3.

[6] GB 50267-97. 核电厂抗震设计规范[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 1997. GB50267-97. Code for Seismic Design of Nuclear Plants[S]. Beijing: China Building Industry Press, 1997.

[7] HAD102/02. 核电厂的抗震设计与鉴定[S]. 国家核安全局, 1996. HAD102/02. Seismic Assessment and Design of Nuclear Plants[S]. National Nuclear Security Administration, 1996.

[8] 陈以一, 赵宪忠. 高冗余度钢结构倒塌控制设计指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2007. CHENG Yiyi, ZHAO Zhongxian. Guideline for Collapse Control Design Construction of Steel Buildings with High Redundancy[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2007.

[9] 刘传卿. 框架结构的连续倒塌分析[D]. 天津: 天津大学, 2010.

[10] 何庆锋. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能试验应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[11] 黄俊海. 结构抗连续倒塌设计理论与方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

(责任编辑 林希平)