

文章编号: 1000-4750(2016)11-0075-09

# 建筑结构构件基于性能的抗爆设计方法

于润清, 方 秦, 陈 力, 颜海春

(中国人民解放军理工大学国防工程学院, 江苏, 南京 210007)

**摘 要:** 在我国, 基于性能的设计方法已运用于工程结构抗震设计, 但尚没有运用在结构抗爆设计。该文将基于性能的设计方法引入结构抗爆领域, 提出了基于性能的结构抗爆设计方法, 明确了基于性能的抗爆设计中的关键问题, 给出了设计思路与步骤。在此基础上, 以 RC 柱为研究对象, 以轴心受压承载力损失为性能水平参数, 划分了 3 个等级性能水平; 根据典型的爆炸场景, 确定爆炸的不同烈度等级, 计算出 RC 柱承受的荷载; 针对不同类别的建筑, 确定两个水准的抗爆性能目标; 结合现有 RC 柱承载力损失的研究成果, 分析不同爆炸烈度下的 RC 柱的承载力损失, 提出 RC 柱基于承载力损失的性能设计方法; 基于确定的性能目标和设计方法, 提出 RC 柱基于性能的抗爆设计步骤; 最后, 给出了 RC 柱基于性能的抗爆设计的算例。

**关键词:** 抗爆结构; 性能设计; 性能目标; 设计方法; 钢筋混凝土柱

**中图分类号:** TU318+.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.04.0280

## PERFORMANCE-BASED BLAST-RESISTANT DESIGN OF BUILDING STRUCTURE COMPONENTS

YU Run-qing, FANG Qin, CHEN Li, YAN Hai-chun

(College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** In China, performance-based design method has been used in the field of seismic design, but not in the field of blast-resistant design yet. This article introduces the performance-based design method into the field of blast-resistant structural design and proposes a performance-based blast-resistant design method. Some key issues during design were highlighted and a general design idea and procedure were proposed. Then, the RC column was chosen as an example, the loss of axial load bearing capacity was chosen as the performance level parameter and three performance levels were determined. By setting typical blast scenarios, the explosion intensity levels were determined. For different types of buildings, two performance objectives were determined. The loss of load carrying capacity of RC columns under different explosion intensity levels were analyzed using existing research results. Then, a design method based on the loss of load carrying capacity was proposed. Based on the determined performance objectives and the design method, the performance-based blast-resistant design of the RC columns was proposed. At the end of this paper, a design of RC columns was presented in order to describe the performance-based blast-resistant design method.

**Key words:** blast-resistant structures; performance-based design; performance objectives; design method; RC column

收稿日期: 2015-04-10; 修改日期: 2016-04-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51478467, 51378016); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51210012); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51321064)

通讯作者: 于润清(1991—), 男, 安徽人, 博士生, 主要从事结构抗爆设计研究(E-mail: yurunqing08@126.com).

作者简介: 方 秦(1962—), 男, 福建人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗爆和防灾减灾研究(E-mail: fangqinjs@139.com);

陈 力(1982—), 男, 江苏人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗爆和防灾减灾研究(E-mail: chenli1360@qq.com);

颜海春(1973—), 女, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事人防结构设计研究(E-mail: yanhaichun@163.com).

基于性能的设计方法的思想源自于 20 世纪 70 年代新西兰学者帕克提出的基于能力原理的抗震设计<sup>[1]</sup>,在工程结构抗震设计方面得到了较为成熟的运用<sup>[2-3]</sup>,是很多抗震设计规范的理论基础<sup>[4-7]</sup>。近年来,基于性能的抗冲击爆炸设计方法研究开始受到国内外学者和工程师的关注。**Hamburger** 等<sup>[8]</sup>认为,在概念上,性能目标应该避免出现大规模人员伤亡的情况下允许结构有较严重的损伤,基于性能的设计主要应防止结构出现连续性倒塌。**Whittaker** 等<sup>[9]</sup>对比了基于性能的抗震设计与抗爆设计在灾害强度指标(IM)、工程需求参数(EDP)、损伤指标(DM)和决策变量(DV)上的区别,认为基于性能的工程结构抗爆设计可以通过分析这 4 个参量来完成。在结构性能分析和抗爆设计方法上,**Lam** 等<sup>[10]</sup>采用单自由度方法分析结构的响应,得出爆炸荷载下结构的速度和加速度反应谱,在反应谱中定义体现性能的临界点,进而达到性能设计的要求。**Ali** 等<sup>[11-12]</sup>根据海洋平台的特点,划分了合理的性能水平和性能目标,提出了海洋平台基于性能的抗爆设计方法,并根据板壳理论和有限元方法,以平台甲板为例,说明了基于性能的海洋平台的设计步骤。但是,**Ali** 等的研究针对于海洋平台,并不完全适用于建筑结构。**Williamson** 等<sup>[13]</sup>设置了 10 种比例爆距,对不同钢筋布置形式的 RC 柱进行了抗爆性能的试验研究,根据破坏形态将柱分为 4 个性能水平,但试验没有考虑柱端弯矩和柱端压力等重要影响因素。**Oswald** 等<sup>[14]</sup>对 RC 柱、板、梁按照延性比、支撑处转角等参数划分了 3 个等级,运用 P-I 曲线讨论了构件性能与延性比和端部转角之间的关系。**Grumbach** 等<sup>[15]</sup>运用单自由度的方法,将预应力钢筋混凝土构件、普通钢筋混凝土构件按照延性比和端部转角划分了 4 个损伤等级,但是单自由度方法体现出的动力响应信息不够全面(如难以反映出剪切破坏模式)。在风险性分析上,**FEMA426**<sup>[16]</sup>通过财产评估、危险性分析和结构易损性等步骤,估算出了结构的财产损失,并运用 HAZUS-MH 软件,分析了汽车炸弹的影响范围,结合人员损伤标准绘出人员伤亡分布图。**Stewart** 等<sup>[17-19]</sup>考虑了爆炸物成功起爆概率、结构破损概率等,结合结构动力分析结果,从概率的角度分析了建筑物爆炸后的损失情况。**Moteff** 等<sup>[20]</sup>提出了爆炸损失评估流程,即评估财产、评估风险、评估脆弱性、确定风险。**Olmati** 等<sup>[21]</sup>运用单自由度的方法,对抗爆墙体进行了易损性分析。**Parisi**<sup>[22]</sup>基于师燕

超<sup>[23]</sup>拟合的 PI 曲线,提出了能够反映出结构易损性和性能的 PI 曲线。

国内虽然没有对基于性能的抗爆设计进行研究,但是一些文献体现了基于性能设计的思想。在建筑结构性能水平和性能目标的确定上,丁阳等<sup>[24]</sup>结合我国国情,提出了 5 个建筑结构的抗爆防护等级和 5 个爆炸风险等级。在爆炸后损失评估上,李天祺等<sup>[25]</sup>基于冲击波伤害-破坏准则,建立了爆炸引起的人员伤害区域和建筑物破坏区域的模型。闫秋实等<sup>[26]</sup>利用 LS-DYNA 对地铁站内爆炸进行了三维数值模拟,根据相关评价准则,评估了人员伤亡。

综上所述,基于性能的抗爆设计的研究才刚刚起步,远没有基于性能的抗震设计成熟<sup>[27]</sup>。在工程结构抗爆,特别是建筑结构抗爆方面,基于性能的设计方法缺乏系统的研究。目前,国内的抗爆设计方法仍停留在以概率理论为基础的极限状态设计方法上。

本文将基于性能的设计方法引入抗爆领域,对基于性能的抗爆设计方法进行初步的研究。文章分两大部分,第一部分提出了基于性能的建筑结构抗爆设计的思想和方法,概述了基于性能的抗爆设计的特点,并对设计中的关键问题进行了阐述;第二部分以 RC 柱的抗爆设计为例,提出了基于性能的 RC 柱抗爆设计方法,并给出了典型算例。

## 1 基于性能的建筑结构抗爆设计方法

基于性能的设计方法广泛运用于抗震领域,其基本思想大体上可以用表 1 的北欧建筑标准委员会等级体系诠释<sup>[28]</sup>。从表 1 可以看出,与传统的设计方法相比,基于性能的设计方法不仅强调性能

表 1 北欧建筑标准委员会规定的水准体系<sup>[28]</sup>

Table 1 NKB level system<sup>[28]</sup>

步骤	定义	强制性要求
步骤 1): 目的	从社会及其构成人员角度,对重要建筑物的描述	
步骤 2): 性能要求	为明确特殊目的、意图,将水准 1 规定的所有目标按功能项目原则分类	有强制性
步骤 3): 性能要求水准	为实现水准 2 的规定提出的每一性能的具体要求	
步骤 4): 验证	性能符合性的验证方法	无强制性
步骤 5): 具体解决方法	符合性能要求的具体设计方法	

目标的确定，而且还增加了性能目标的验证，这样就能最大限度的保证工程结构能够达到预期的性能。

本文借鉴基于性能的抗震设计和国外基于性能抗爆设计的相关研究，提出建筑结构基于性能抗爆设计大致流程，如图 1 所示。由图 1 可知，基于性能抗爆设计主要由 5 个要素组成：爆炸荷载的确定、性能水平的划分、性能目标的确定、结构性能分析、结构性能验证。在爆炸荷载确定上，由于建筑物遭受的爆炸荷载未知，可以通过风险评

估的办法确定典型爆炸场景，结合初步的设计方案确定爆炸荷载。在性能水平划分和性能目标确定上，需要结合业主需求、设计人员的经验、建筑功能、社会需求以及荷载大小等进行合理的设置。在建筑结构的性能分析上，需要能够将建筑结构的动力分析结构(如结构损伤、变形等)与结构的性能(使用功能、人员财产损失等)联系起来。在结构的性能验证方面，根据结构性能分析的结果，判断结构是否满足预定的性能目标，并采用必要的措施对结构进行加固或是设计方案上的修改。

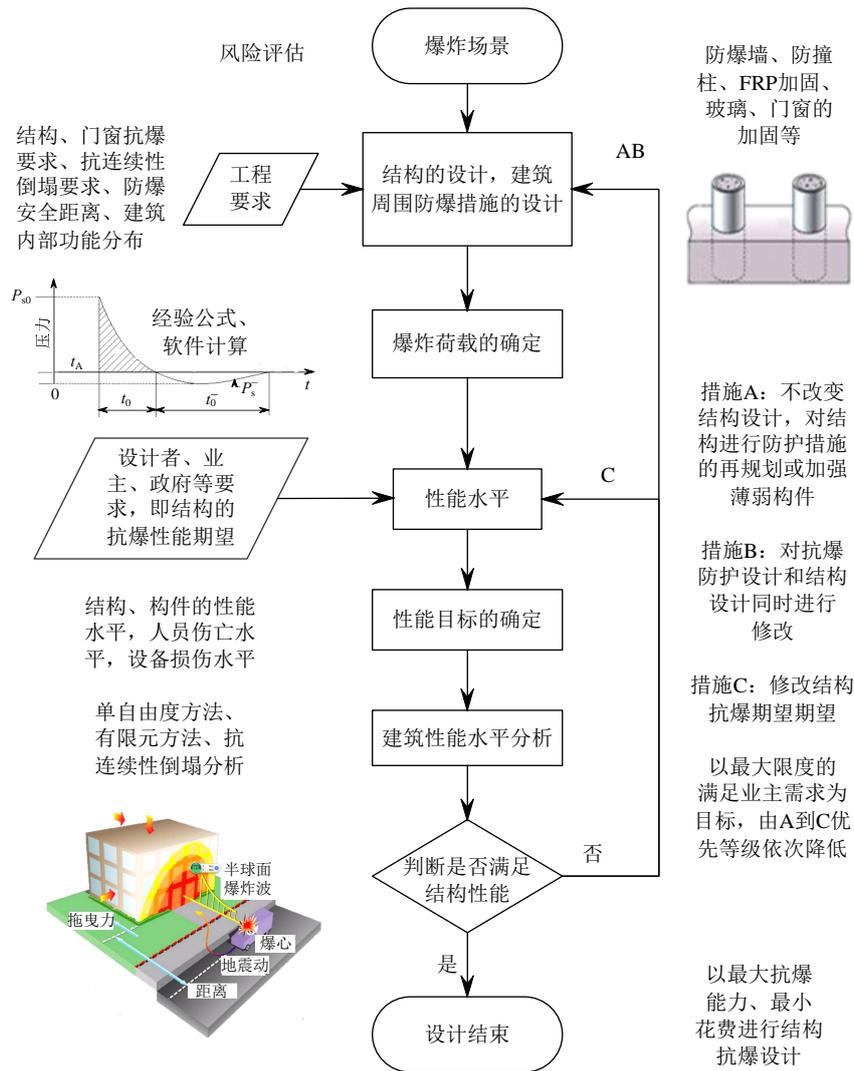


图 1 建筑结构基于性能抗爆设计流程

Fig.1 Flowchart of performance-based design for blast-resistant structures

归纳起来，基于性能抗爆设计主要分以下 3 个步骤：1) 根据业主或使用者的要求确定合适的性能目标；2) 根据性能目标进行结构设计；3) 对结构进行性能目标的验证。

由于结构的设计是在设计者和使用者之间相互

交流的过程中完成的，上述的第 1)步与第 2)步通常是交互进行的，并没有十分明确的次序关系。

连续性倒塌是建筑结构抗爆设计中必须考虑的一个重要方面，在基于性能抗爆设计中，必须充分考虑结构的抗连续性倒塌的能力。在结构的初步

设计中, 需要根据典型的爆炸场景、建筑结构的使用功能等判断结构是否需要抗连续性倒塌设计。对于需要进行抗连续性倒塌设计的结构, 必须通过合理的结构布局和相关的构造措施, 提高结构的鲁棒性<sup>[29]</sup>。在结构的性能水平分析时, 也要对结构的抗连续性倒塌能力进行检验。根据现有建筑结构抗连续性倒塌设计的方法, 可对结构的水平和竖向拉结力强度进行验证<sup>[30]</sup>。若水平拉结力不满足要求, 则采用图 1 中措施 B 对结构进行重新设计; 若水平拉结力满足要求, 而竖向拉结力不满足要求, 则采用去除构件的方法, 评估结构连续性倒塌的风险, 若风险较低, 则设计满足抗连续性倒塌设计要求, 否则, 采用图 1 中措施 A 对结构进行抗爆再设计或是对结构的薄弱构件进行加强<sup>[31]</sup>。

此外, 在很多情况下, 还需对建筑的全寿命花费进行评估, 作为决策的参考。结构的全寿命花费主要包括结构的初始费用、爆炸后结构的损失和结构的维修费用<sup>[32]</sup>。一般而言, 结构的初始费用越高, 结构的抗爆措施越全面, 爆炸后的损失就越低, 结构维修费用也越低, 但是若无限度的增加结构的初始费用也是不经济的, 因此需要权衡初始造价、损失和维修费用三者的关系, 对结构进行合理的设计或加固, 使得建筑的全寿命花费最小。

本节提出的建筑结构基于性能的抗爆设计思想不仅适用于建筑结构, 也可以用于其他工程结构。对其他的工程结构进行基于性能的抗爆设计时, 需要充分考虑该工程结构的特点进行有侧重的设计, 但是设计的思路仍如图 1 所示, 仅是设计中具体考虑的细节有所变化。

为更加清晰地说明图 1 的建筑结构基于性能的抗爆设计思想与流程, 本文以较简单的 RC 柱为例, 阐述基于性能的抗爆设计方法及步骤。主要研究内容有: 1) 根据已有的研究成果, 以 RC 柱承载力损失为性能参数, 划分性能水平; 2) 设定爆炸场景, 定义 4 个爆炸烈度; 3) 根据结构的实际需求, 确定了 2 个水准的性能目标; 4) 对 RC 柱进行抗爆设计。

## 2 RC 柱性能水平和性能目标的确定

### 2.1 性能水平

性能水平要根据实际需求, 选择恰当的参数, 进行合适的划分。延性比<sup>[14-15]</sup>、端部转角<sup>[14-15]</sup>、柱端剪力<sup>[33]</sup>、承载力损失<sup>[23-34]</sup>等都可以表征 RC 柱的性能水平, 但是每种参数所侧重的需求不同。例如,

柱端剪力侧重于 RC 柱的直剪破坏, 而承载力损失比例侧重于 RC 柱的竖向承载能力。考虑到 RC 柱为建筑的主要承重构件, 选取轴心受压承载力损失作为柱的性能水平参数。

爆炸后 RC 柱承载力损失( $D$ )可以表示为<sup>[23]</sup>:

$$D = 1 - \frac{P_{N,r}}{P_N} \quad (1)$$

式中:  $P_{N,r}$  表示 RC 柱爆炸损伤后的残余承载力;  $P_N$  表示 RC 柱未损伤前的承载力, 可以由下式计算:

$$P_N = 0.85f_c(A_G - A_s) + f_y A_s \quad (2)$$

式中:  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度;  $f_y$  为纵筋屈服强度;  $A_G$  为柱的截面面积;  $A_s$  为纵筋的总截面面积。

根据  $D$  值的不同, 可以将 RC 柱的性能水平化为 4 个等级, 分为 3 个性能水平, 如表 2, 此时的性能水平表示  $D$  的最大容许值。

表 2 RC 柱的性能水平  
Table 2 Performance level of RC column

损伤描述	性能水平( $D$ )	性能水平描述
轻度损伤	—	—
—	PL1( $D=0.2$ )	基本无损, 可以继续使用
中度损伤	—	—
—	PL2( $D=0.5$ )	修复后可以使用
重度损伤	—	—
—	PL3( $D=0.8$ )	不能修复
倒塌	—	—

需要指出的是, 表 2 仅是一种性能水平的划分方式, 一般对于性能水平要进行破坏形态、使用功能、人身财产安全等方面的描述。对于性能水平的详细描述, 需要结合工程实际情况做合理的讨论, 限于篇幅, 本文不做详细的叙述。

### 2.2 性能目标

文献[24]建议了 5 个等级的爆炸烈度: 30 kg、200 kg、500 kg、1000 kg、4000 kg。其中, 30 kg 为典型的箱包炸弹 TNT 当量; 200 kg、500 kg、1000 kg 为小型轿车炸弹或厢式货车炸弹的 TNT 当量, 在恐怖袭击中较为常见; 4000 kg 是大型汽车炸弹的 TNT 当量, 在恐怖袭击中较为罕见。现实情况中, 箱包炸弹一般放置在柱子的旁边, 主要是对柱子造成局部破坏, 对于此种爆炸形式, 采用增大配筋率或是加大柱子的横截面积等结构措施通常难以达到预期的效果, 此时需要采用其他的防爆措施, 如表面覆盖吸能材料、FRP 加固等。本文主要考虑 RC 柱结构上的设计(配筋率、截面尺

寸等),因此取4个等级的爆炸烈度:200 kg、500 kg、1000 kg、4000 kg。

在建筑结构防爆设计中,一般会运用设定防爆路障、出入口检查等方式保证一定的防爆距离。根据防爆距离和爆炸烈度,既可以确定爆炸荷载峰值和冲量。对于有出入口检查的人员聚集的建筑,车辆可距建筑最近10 m处停放<sup>[35]</sup>,于是本文取安全距离为10 m,根据TM5-1300<sup>[36]</sup>可以计算出作用在建筑上的爆炸荷载,如表3。

表3 爆炸烈度

Table 3 Explosive intensity

爆炸烈度	当量/kg	入射峰值/kPa	入射冲量/(kPa·ms)
B=1度	200	407.15	906.00
B=2度	500	819.13	1616.88
B=3度	1000	1356.94	2323.62
B=4度	4000	3319.94	2759.34

根据建筑功能和客户需求,必要的情况下可以进行费效比的计算,综合考虑后确定较为合适的建筑结构性能目标。本文取RC柱的性能目标如表4。RC柱的性能目标可以根据表4的样式进行灵活的确定,本文仅确定了水准1和水准2两个水准的性能目标。对于设防水准要求较高的建筑(如商业中心),承重柱可采用水准2的性能目标,可以保证RC柱在较小的爆炸烈度(1度)下不发生破坏,在较罕见的爆炸烈度下(4度)出现重度损伤(PL3);对于设防水准要求不高的建筑,承重柱可采用水准1的性能目标,能够保证RC柱在较小的爆炸烈度下(1度)出现轻度损伤(PL1),在较大的爆炸烈度下(3度)出现重度损伤(PL3)。

表4 RC柱的性能目标

Table 4 Performance objectives of RC columns

		性能水平		
		PL1	PL2	PL3
爆炸烈度	1度	浅灰色	深灰色	深灰色
	2度	浅灰色	深灰色	深灰色
	3度	浅灰色	深灰色	深灰色
	4度	浅灰色	深灰色	深灰色

注:浅灰色为水准1;深灰色为水准2。

### 3 基于承载力损失的RC柱基于性能抗爆设计方法

现有规范抗爆设计为基于概率的极限状态设计法,柱子的设计根据承载力极限状态进行设计的,因此并不能用在基于承载力损失的设计上。本文基

于承载力损失的研究成果<sup>[23]</sup>,提出一种新的基于性能的RC柱抗爆设计方法。

首先对RC柱截面进行初步的设计。根据初步设计,确定不同损伤程度下的P-I曲线,即:

$$P_D = f(I_D, \alpha_0) \quad (3)$$

其中: $\alpha_0$ 表示柱子的设计参数(如柱子截面尺寸、配筋率等); $P_D$ 表示不同D值时的超压峰值; $I_D$ 表示不同D值时的冲量。

对比P-I曲线和柱承受的爆炸荷载,确定RC柱对既定性能目标的满足情况。本文以下式为判断标准,即要求:

$$k = \frac{f(I_B, \alpha_0)}{P_B} \geq 1.0 \quad (4)$$

其中: $P_B$ 、 $I_B$ 表示RC柱不同爆炸烈度下RC柱承受的超压峰值和冲量。若满足式(4),则设计完成;若不满足,则首先需确定最不利爆炸情况,即最小的k所对应的爆炸场景。针对该爆炸场景,调整RC柱设计参数,使其满足要求,根据下式求得修正后的设计参数 $\alpha_1$ 。

$$k = \frac{f(I_B, \alpha_1)}{P_B} = 1.0 \quad (5)$$

根据式(5)可以求得多组满足条件的参数组合,此时需要考虑经济性的要求,可通过设置造价目标函数,根据不等式约束优化的方法,选择最优的参数组合<sup>[37]</sup>,限于篇幅,本文不做详细讨论。若固定截面尺寸,只调整RC柱的纵筋配筋率 $\rho$ 和箍筋配筋率 $\rho_s$ ,根据最少用钢量原则,即:

$$\rho + \rho_s = \min \quad (6)$$

验证调整后的RC柱设计参数 $\alpha_1$ 是否满足既定的性能目标。在验证时,可以采用有限元方法、经验公式法等现有的研究成果。

RC柱基于承载力损失的性能抗爆设计的计算流程如图2所示。以下依据图1和图2,提出RC柱基于性能抗爆设计的具体步骤:

#### 1) 确定爆炸荷载

通过对建筑整体爆炸危险性分析或是爆炸事件的历史统计数据<sup>[38]</sup>,确定建筑物最有可能遭受的几种爆炸场景。根据爆炸场景,结合建筑结构的布局,分析RC柱承受的荷载大小。对于简单的建筑布局,可以根据已有的研究成果<sup>[23-34]</sup>确定,对复杂的建筑布局,建议采用有限元方法计算确定。

#### 2) 确定RC柱的性能水平

RC柱的性能水平需要能描述爆炸后RC柱的

安全性、可修复性等性能，并且要与结构的动力分析结果联系起来。在确定性能水平时主要考虑以下3点：① 爆炸后 RC 柱的性能表现，可结合工程经验，运用等效单自由度或有限元方法确定；② RC 柱的设计性能目标水准需要能够保证结构具有一定的鲁棒性<sup>[24]</sup>；③ RC 柱遭受不同的损伤或变形后对结构的影响，可运用有限元方法或是其他快速分析方法确定。

### 3) 确定 RC 柱的性能目标

在确定 RC 柱可能承受的爆炸荷载后，根据客户的需求、建筑的使用功能、工程经验和 RC 柱的重要性，确定 RC 柱的性能目标。必要时，可以计算出不同性能目标建筑物的大致损失情况，为性能目标的确定提供参考。

4) 根据性能目标，对 RC 柱进行设计，并对设计参数进行验证。

RC 柱的设计要根据选取的性能水平参数和确定的性能目标进行。本文以 RC 柱的承载力损失比例作为性能水平参数，设计步骤如图 2 所述。若选用其他的参数(如延性比、端部转角等)表示性能水平，则需针对实际情况选用其他的设计方法。设计完成后，需要对设计参数进行有效的性能验证，以保证设计方案的可行性。

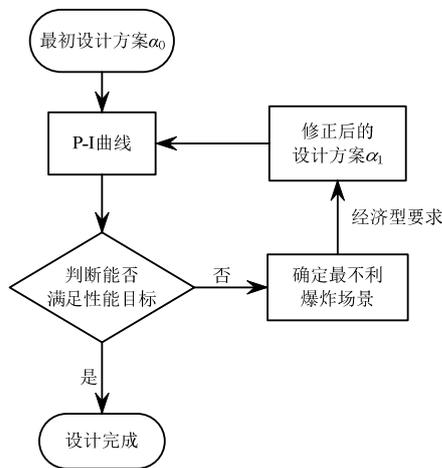


图 2 基于承载力损失的 RC 柱性能抗爆设计流程

Fig.2 Flowchart of blast-resistant design of RC columns based on loss of load carrying capacity

## 4 算例

在不考虑爆炸荷载的情况下，假设 RC 柱的设计参数  $\alpha_0$  如表 5。

### 1) 确定 RC 柱性能水平

选择 RC 柱承载力损失比例  $D$  为表示性能水平

的参数，性能水平划分如表 2。

表 5 RC 柱初步设计参数( $\alpha_0$ )

Table 5 Preliminary design parameters of RC columns ( $\alpha_0$ )

柱宽/ mm	柱深/mm	柱长/mm	混凝土轴心 抗压强度/MPa	纵筋配筋率 $\rho$	箍筋配筋率 $\rho_s$
600	600	4600	40	0.01	0.006

### 2) 确定 RC 柱性能目标

根据典型爆炸场景，确定不同爆炸烈度等级如表 3，假设建筑的性能目标为水准 1 的性能目标，如表 4。

将柱承受的爆炸荷载简化为均布倒三角形荷载，柱承受的荷载可以计算得出<sup>[23]</sup>：

$$P_B = \{1.936 + 0.402 \ln(b) + [4.833 + 1.980 \ln(b)] e^{-0.65Z}\} P_{\text{入射}}, \quad 0.5 \leq Z \leq 10 \quad (7a)$$

$$I_B = \{2.154 + 0.291 \ln(b) + [136.554 + 65.001 \ln(b)] e^{-6Z}\} I_{\text{入射}}, \quad 0.5 \leq Z \leq 1.0 \quad (7b)$$

$$I_B = \{1.452 + 0.287 \ln(b) + [3.221 + 1.577 \ln(b)] e^{-0.65Z}\} I_{\text{入射}}, \quad 1.0 \leq Z \leq 10 \quad (7c)$$

其中： $P_B/\text{kPa}$  和  $I_B/(\text{kPa} \cdot \text{ms})$  分别为柱子承受的爆炸荷载峰值和爆炸荷载冲量； $b/\text{m}$  为柱宽； $Z/(\text{m}/\text{kg}^{1/3})$  为比例距离； $I_{\text{入射}}/\text{kPa}$  和  $P_{\text{入射}}/(\text{kPa} \cdot \text{ms})$  为入射冲量和入射超压，如表 3 所示。

根据式(7)，计算得出 RC 柱承受的爆炸荷载大小，如表 6。

表 6 不同爆炸烈度下 RC 柱承受的爆炸荷载  
Table 6 Loads on RC column of different explosive intensities

爆炸烈度	$Z/(\text{m}/\text{kg}^{1/3})$	$P_B/\text{kPa}$	$I_B/(\text{kPa} \cdot \text{ms})$
B=1 度	1.71	1217.63	1904.49
B=2 度	1.26	2793.23	3832.00
B=3 度	1.00	5047.82	5948.47
B=4 度	0.63	14176.14	12034.53

3) RC 柱基于承载力损失的设计及设计参数的验证

首先，根据初始设计  $\alpha_0$ ，确定 P-I 曲线，验证  $\alpha_0$  能否满足性能目标。

根据文献[23]，得出不同性能水平下的 P-I 曲线。

$$(P - P_0)(I - I_0) = 12(P_0/2 + I_0/2)^{1.5} \quad (8)$$

其中： $P_0/\text{kPa}$  和  $I_0/(\text{kPa} \cdot \text{ms})$  分别为 P-I 曲线中的压力渐进线和冲量渐近线值，对应不同的  $D$  值(在式(9)中  $P_0$  和  $I_0$  的括号内)均有相应的经验公式<sup>[23]</sup>：

$$P_0(0.2) = 1000 \left[ 0.007 \exp\left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.069 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + \right.$$

$$0.034 \exp\left(\frac{f_c}{30}\right) - 0.835 \ln\left(\frac{H}{4.0}\right) + \left[\left(\frac{h}{0.6}\right)^{1.804} + 0.067 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) - 0.168\right],$$

$$I_0(0.2) = 1000 \left[ 0.053 \exp\left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.107 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 0.021 \exp\left(\frac{f_c}{30}\right) + \left(\frac{H}{4.0}\right)^{-0.207} + 1.203 \exp\left(\frac{h}{0.6}\right) - 0.943 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) - 2.686 \right] \quad (9a)$$

$$P_0(0.5) = 1000 \left[ 0.143 \ln\left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.320 \ln\left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 0.063 \exp\left(\frac{f_c}{30}\right) + \left(\frac{H}{4.0}\right)^{-1.390} + 2.639 \left(\frac{h}{0.6}\right) + 0.318 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) - 2.271 \right],$$

$$I_0(0.5) = 1000 \left[ 0.837 \left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.036 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 0.235 \exp\left(\frac{f_c}{30}\right) + \left(\frac{H}{4.0}\right)^{-0.274} + 2.271 \exp\left(\frac{h}{0.6}\right) - 0.998 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) - 5.286 \right] \quad (9b)$$

$$P_0(D=0.8) = 1000 \left[ 0.062 \ln\left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) + 0.238 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 0.291 \ln\left(\frac{f_c}{30}\right) - 1.676 \ln\left(\frac{H}{4.0}\right) + 2.439 \ln\left(\frac{h}{0.6}\right) + 0.210 \ln\left(\frac{b}{0.6}\right) + 1.563 \right],$$

$$I_0(D=0.8) = 1000 \left[ 3.448 \left(\frac{\rho_s}{0.01}\right) - 0.254 \left(\frac{\rho}{0.01}\right) + 1.200 \left(\frac{f_c}{30}\right) - 0.521 \left(\frac{H}{4.0}\right) + 6.993 \left(\frac{h}{0.6}\right) - 2.759 \left(\frac{b}{0.6}\right) - 2.035 \right] \quad (9c)$$

式中： $f_c/\text{MPa}$  为混凝土轴心抗压强度； $H$ 、 $b$ 、 $h$  分别为柱高、柱宽、柱深(单位均为 m)； $\rho$ 和 $\rho_s$  分别为纵筋配筋率和箍筋配筋率。

根据 P-I 曲线和爆炸荷载大小，可以判定柱的承载能力，如图 3。根据式(5)计算出不同爆炸烈度下对应的  $k$  值，如表 7，表中运用爆炸烈度和性能水平

的组合来表达某种具体的性能目标，如 1 度+PL1 表示 1 度爆炸烈度下结构达到 PL1 的性能水平，不同水准的性能目标见表 4。

表 7  $k$  值( $\alpha_0$ )

Table 7 Values of  $k$  ( $\alpha_0$ )

1 水准性能目标	1 度+PL1	2 度+PL2	3 度+PL3
设计方案 $\alpha_0$ 的 $k$ 值	$k_1=2.00$	$k_2=1.40$	$k_3=0.86$

由表 7 可以看出，对于初始设计方案  $\alpha_0$ ，有  $k_1 > k_2 > 1.0 > k_3$ ，说明  $k_3$  所对应的爆炸场景最危险，即结构不能保证在 3 度爆炸烈度下达到 PL3 的性能水平。于是，针对最不利的爆炸场景，对初始设计方案  $\alpha_0$  进行修正。

在修正柱子设计参数时，要根据经济性的原则合理的修改截面尺寸、钢筋种类、配筋率、混凝土标号等参数<sup>[37]</sup>，需要进行更为深入的研究。本文为更加简洁的说明 RC 柱抗爆设计的步骤，仅对纵筋配筋率或箍筋配筋率进行修正。

由式(8)知，P-I 曲线可表示为：

$$P = \frac{12(P_0/2 + I_0/2)^{1.5}}{I - I_0} + P_0 \quad (10)$$

根据式(5)，令：

$$k = \frac{f(I_{B=3}, \alpha_1)}{P_{B=3}} = 1.0 \quad (11)$$

联立式(9c)、式(10)、式(11)即可得到修正后的配筋率。根据计算，若仅改变纵向配筋率，可得改进后纵向配筋率为 0.131，若仅改变箍筋配筋率，得改进后的箍筋配筋率为 0.0067，取为 0.007。根据式(6)的最少用钢量的原则，选择第一种方案，即改变箍筋配筋率，改为 0.007。对修正后的设计方案进行验证。绘出修正后参数的 P-I 曲线(图 3)，计算  $k$  值(见表 8)，可以看出  $k_1 > k_2 > k_3 > 1.0$ ，满足设计要求。

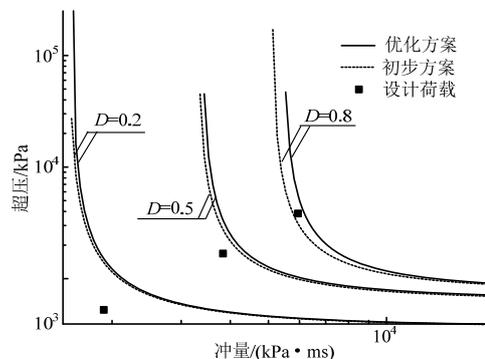


图 3 不同设计参数下的 P-I 曲线

Fig.3 P-I diagram of different design parameters

表 8  $k$  值( $\alpha_1$ )  
Table 8 Values of  $k$  ( $\alpha_1$ )

1 水准性能目标	1 度+PL1	2 度+PL2	3 度+PL3
设计方案 $\alpha_1$ 的 $k$ 值	$k_1=2.13$	$k_2=1.63$	$k_3=1.3$

## 5 结论

本文将基于性能的设计方法引入工程结构抗爆设计领域,给出了基于性能的工程结构构件抗爆设计的一般流程,并对基于性能抗爆设计中的关键环节及步骤进行了详细描述。本文提出的基于性能的抗爆设计方法主要分为 5 个步骤,即性能水平的确定、爆炸荷载的确定、性能目标的确定、结构的性能分析和结构性能验证;以 RC 柱为例,以承载力损失表示性能,划分 3 个性能水平,根据相关文献确定了爆炸烈度和承受的荷载大小,划分 2 个水准的性能目标,提出了 RC 柱基于性能的抗爆设计方法。

本文提出的基于性能的抗爆设计与传统的基于可靠度的抗爆设计有着本质的区别。基于可靠度设计表达的是结构达到某一极限状态的失效概率,结构设计时通过控制可靠度实现预期的结构性能,而本文提出的基于性能的抗爆设计表达的是结构达到不同的极限状态,设计时直接控制结构的性能目标,并没有借助可靠度来体现结构的性能。

本文仅对基于性能的工程结构抗爆设计进行了初步探讨,尚有一些不足之处,需要进一步研究。

首先,在对 RC 柱进行抗爆设计时以承载力损失表示 RC 柱的性能,但是承载力损失可能并不是最优的表达参数,还有待今后系统考察。此外,由于对于 RC 柱承载力损失的研究尚不够成熟,文中在计算 RC 柱承载力损失时所引用的公式可能不够准确,但并不影响文中设计思想的表达。

其次,文中对 RC 柱性能水平的划分具有一定的主观性。若要对 RC 柱的性能水平有更加清晰地认识,需要分析 RC 柱的性能水平与建筑结构性能水平的关系,通过结构整体的性能水平确定出 RC 柱的性能水平。

第三,结构的设计不仅要满足期望的性能目标,还须有经济性要求,即需要进行优化设计。本文在研究 RC 柱基于性能的设计时,仅考虑了最小用钢量,并没有考虑截面尺寸、钢筋种类等其他因素。在下一步的工作中,拟对结构基于性能的抗爆优化设计进行研究。

最后,本文提出的基于性能的抗爆设计方法没

有考虑爆炸荷载、结构尺寸、材料等不确定性。今后可以从概率的角度进行研究,即可通过分析灾害强度指标(IM)的超越函数、工程需求参数(EDP)和损伤指标(DM)的条件概率,进而得到决策变量(DV)的概率,进而完成结构基于性能的抗爆设计。

## 参考文献:

- [1] Park R, Paulay T. Ductile reinforced concrete frames-some comments on the special provisions for seismic design of ACI 318-71 and on capacity design [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1975, 8(1): 70-90.
- [2] 徐龙河, 吴耀伟, 李忠献, 等. 基于性能的钢框架结构失效模式识别及优化[J]. 工程力学, 2015: 32(10): 44-51.  
Xu Longhe, Wu Yaowei, Li Zhongxian, et al. Performance-based seismic failure mode identification and optimization for steel frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2015: 32(10): 44-51. (in Chinese)
- [3] 郝际平, 袁昌鲁, 樊春雷, 等. 钢板剪力墙结构基于性能的塑性设计方法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 118-127.  
Hao Jiping, Yuan Changlu, Fan Chunlei, et al. Performance-based plastic design method for the slender unstiffened steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 118-127. (in Chinese)
- [4] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [5] FEMA 273. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of building seismic safety council [S]. Washington DC, USA: Federal Emergency Management Agency, Department of Homeland Security, 1996.
- [6] Committee V S. Performance based seismic engineering of buildings [S]. Structural Engineers Avocation of California (SEAOC), California, 2000.
- [7] ATC 40. Seismic evaluation and retrofit of existing concrete buildings [S]. Applied Technology Council (ATC), California, 1996.
- [8] Hamburger R, Whittaker A. Design of steel structures for blast-related progressive collapse resistance [J]. Modern Steel Construction, 2004, 44(3): 45-51.
- [9] Whittaker A, Hamburger R O, Comartin C, et al. Performance-based engineering of buildings and infrastructure for extreme loadings [C]// Proceedings of the AISC-SINY Symposium on Resisting Blast and Progressive Collapse. American Institute of Steel Construction, New York, 2003: 1-11.
- [10] Lam N, Mendis P, Ngo T. Response spectrum solutions for blast loading [J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2004, 4(4): 28-44.
- [11] Mohamed Ali R M, Louca L A. Performance based design of blast resistant offshore topsides, Part I: Philosophy [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(9): 1030-1045.

- [12] Mohamed Ali R M, Louca L A. Performance-based design of blast resistant offshore topsides, Part II: Modelling and design [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(9): 1046—1058.
- [13] Williamson E B, Bayrak O, Davis C, et al. Performance of bridge columns subjected to blast loads. I: Experimental program [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(6): 693—702.
- [14] Oswald C J. Component explosive damage assessment workbook (CEDAW) [M]. Washington: US Army Corps of Engineers Protective Design Center, 2005: 36—48.
- [15] Naito C, Dinan R, Bewick B. Use of precast concrete walls for blast protection of steel stud construction [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 25(5): 454—463.
- [16] Federal Emergency Management Agency. Risk management series: Reference manual-to mitigate potential terrorist attacks against buildings [M]. Washington: Government Printing Office, 2003: 24—30.
- [17] Stewart M G. Risk-informed decision support for assessing the costs and benefits of counter-terrorism protective measures for infrastructure [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2010, 3(1): 29—40.
- [18] Stewart M G, Netherton M D, Rosowsky D V. Terrorism risks and blast damage to built infrastructure [J]. *Natural Hazards Review*, 2006, 7(3): 114—122.
- [19] Stewart M G, Netherton M D. Security risks and probabilistic risk assessment of glazing subject to explosive blast loading [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, 93(4): 627—638.
- [20] Moteff J. Risk management and critical infrastructure protection: Assessing, integrating, and managing threats, vulnerabilities and consequences [C]. Washington: Library of Congress Washington DC Congressional Research Service, 2005: 1—8.
- [21] Olmati P, Petrini F, Gkoumas K. Fragility analysis for the performance-based design of cladding wall panels subjected to blast load [J]. *Engineering Structures*, 2014, 78: 112—120.
- [22] Parisi F. Blast fragility and performance-based pressure-impulse diagrams of European reinforced concrete columns [J]. *Engineering Structures*, 2015, 103: 285—297.
- [23] 师燕超. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应行为与损伤破坏机理[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Shi Yanchao. Dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete structures under blast loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [24] 丁阳, 方磊, 李忠献, 等. 反恐建筑结构抗爆防护分类设防标准研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(4): 57—64.  
Ding Yang, Fang Lei, Li Zhongxian, et al. Research on categorized explosion protection criterion of anti-terrorism building structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(4): 57—64. (in Chinese)
- [25] 李天祺, 赵振东, 余世舟. 基于 GIS 的爆炸灾害数值模拟与应急损失评估[J]. *灾害学*, 2010, 25(3): 96—99.  
Li Tianqi, Zhao Zhendong, Yu Shizhou. GIS-based numerical simulation and emergency loss evaluation of explosion disasters [J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(3): 96—99. (in Chinese)
- [26] 闫秋实, 刘晶波, 伍俊. 典型地铁车站内爆炸致人员伤亡区域的预测研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(2): 81—88.  
Yan Qiushi, Liu Jingbo, Wujun. Estimation of casualty areas in subway station subjected to terrorist bomb [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(2): 81—88. (in Chinese)
- [27] Augusti G, Ciampoli M. Performance-based design in risk assessment and reduction [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2008, 23(4): 496—508.
- [28] NKB (Nordic Committee on Building Regulations). Structure for building regulations [R]. Stockholm, Sweden: NKB, 1978.
- [29] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
GB 50009-2012, Load code for design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [30] 傅学怡, 黄俊海. 结构抗连续倒塌设计分析方法探讨[J]. *建筑结构学报*, 2009(增刊 1): 195—199.  
Fu Xueyi, Huang Junhai. Structural design methods to prevent progressive collapse [J]. *Journal of Building Structures*, 2009(Suppl 1): 195—199. (in Chinese)
- [31] 张建兴, 施刚, 王元清, 等. 钢框架抗连续性倒塌研究综述[J]. *钢结构*, 2012(增刊 1): 51—69.  
Zhang Jianxing, Shi Gang, Wang Yuanqing, et al. Research on progressive collapse of steel frames [J]. *Steel Structures*, 2012(Suppl 1): 51—69. (in Chinese)
- [32] FEMA 427 Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks [S]. Washington DC, USA: Federal Emergency Management Agency, Department of Homeland Security, 2003.
- [33] Sharma H, Hurlbaeus S, Gardoni P. Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 43: 52—62.
- [34] Bao X, Li B. Residual strength of blast damaged reinforced concrete columns [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(3): 295—308.
- [35] UFC4-010-01 Unified facilities criteria (UFC): DOD minimum antiterrorism standards for buildings [S]. Washington DC, USA: US Army corps of Engineering, 2002.
- [36] Technical Manual (TM5-1300). To resist the effect of accidental explosions [M]. Department of the Army, Navy and the Air Force, Washington, DC, 1990: 1355—1360.
- [37] 彭立敏, 施成华, 刘小兵. 隧道钢筋混凝土结构的优化设计模型及应用[J]. *中国公路学报*, 2001, 14(2): 71—74.  
Peng Limin, Shi Chenghua, Liu Xiaobin. Optimization design model and application about the reinforced concrete structure of tunnel China [J]. *Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(2): 71—74. (in Chinese)
- [38] FEMA 452 Risk Assessment: A how-to guide to mitigate potential terrorist attacks [S]. Washington DC, USA: Federal Emergency Management Agency. Department of Homeland Security, 2005.