

爆炸荷载作用下 RPC 柱破坏概率分析

姚仲泳

(平潭综合实验区城乡建设与交通运输服务中心, 福建 平潭 350400)

摘要: 活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)依托其优异的强度性能、抗冲击韧性以及较高的强重比等特性,在工程结构领域展现出巨大应用潜力。然而,当前对其在爆炸荷载作用下的动态响应机制及破坏模式研究仍存在空白。为提升关键建筑结构的抗爆性能,通过系统分析不同参数下 RPC 柱的 P-I 曲线特征,揭示其破坏概率演变规律,为优化结构设计提供理论支撑。研究结果显示,影响 RPC 柱破坏概率的关键因素依次为:截面尺寸>长细比>材料抗压强度,为工程实践中针对性设计优化提供了科学依据。

关键词: RPC 柱;爆炸作用;单自由度等效法;超压-冲量渐近线;破坏概率

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0312-05

Analysis of RPC Column Failure Probability under Explosive Load

YAO Zhongyong

(Pingtan Comprehensive Experimental Zone Urban and Rural Construction and Transportation Service Center, Pingtan 350400, China)

Abstract: Relying on its excellent strength properties, impact toughness and high strength-to-weight ratio, the reactive powder concrete (RPC) shows the great application potential in the field of engineering structures. However, there is still a gap in the research on the dynamic response mechanism and failure mode of RPC under the explosive load. In order to improve the explosion resistance of key building structures, the P-I curve characteristics of RPC columns under different parameters are systematically analyzed, and the evolution law of its failure probability is revealed, which provides the theoretical support for optimizing the structural design. The research results show that the key factors affecting the failure probability of RPC columns are the cross-sectional size > slenderness ratio > compressive strength of the material, which provides a scientific basis for the targeted design optimization in engineering practice.

Keywords: RPC columns; explosive effect; single-degree-of-freedom equivalence; overpressure - impulse asymptotic line; failure probability

0 引言

活性粉末混凝土(reactive powder concrete, RPC)作为具有优异动态力学性能的新型工程材料,其强度、阻裂耗能及抗冲击性能显著优于传统混凝土^[1]。该材料在结构工程、海洋工程及核工业等高要求领域展现出广泛应用潜力^[2-3],因其综合力学特性而具备重要工程实用价值^[4]。

活性粉末混凝土由水泥、矿渣、硅灰、石英砂等原材料配制而成,其力学性能可通过配合比优化与养护工艺调控。国内外学者通过系统研究配合比及养护条件对 RPC 强度的影响, Richard^[5]发现标准养护与高温蒸压养护可显著提升其力学性能。Mostofinejad^[6]进一步证实,经 20 °C 标准养护 28 d 的

RPC 抗压强度可达 85 MPa,而采用 125 °C 蒸压养护 +220 °C 热养护的组合工艺可制备出强度高达 233 MPa 的超高强材料。养护温度对早期强度发展的影响亦被 Hiremath P N 等^[8]证实,热养护可显著促进早期强度增长。

自应用于加拿大 Sherbrooke 人行桥以来, RPC 在工程领域的应用日益广泛。针对其抗爆性能,现有研究已初步揭示超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)结构在爆炸荷载下的响应规律^[9]。Li 等^[10]通过数值模拟发现 UHPC 柱可保留爆炸后承载能力,轴力作用可进一步增强抗爆性能; Astarlioglu 等^[11]对比普通混凝土与超高强度纤维增强混凝土(UHPFRC)柱的爆荷载响应差异,指出纤维增强材料可抑制爆炸冲击损伤; Xu 等^[12]则证实 UHPFRC 柱对超压与振动波的抵抗能力优于高强混凝土柱。然而,现有研究仍存在不足:爆炸荷载作用下的 RPC 柱动态响应与其内在的破坏模式尚缺乏系

收稿日期: 2025-07-24

作者简介: 姚仲泳(1981—),男,硕士,高级工程师,从事城乡建设与管理相关工作。

统的研究,P-I 曲线对柱体损伤评估方法有待进一步补充,缺乏对破坏概率的量化分析。

为此,本文基于等效单自由度(ESDOF)理论构建弯曲-剪切松耦合 RPC 柱计算模型,通过典型构件的 P-I 曲线分析,结合长细比、截面尺寸、材料强度等关键参数,系统研究爆炸荷载作用下 RPC 柱的破坏概率演变规律。研究揭示了各参数对破坏概率的影响权重(截面尺寸>长细比>抗压强度),为优化 RPC 柱抗爆设计提供理论依据,填补了当前研究空白。

1 基于等效单自由度法 RPC 柱动态响应

基于 ESDOF 法构建爆炸荷载下考虑弯曲-剪切松耦合效应的 RPC 柱等效简化模型^[13-15]。基于弯曲等价单自由度(ESDOF)系统,首先计算结构在外部激励下的动态剪切力时程响应,将其作为外部荷载施加于剪切型 ESDOF 系统。通过数值积分方法求解该系统的剪切响应,并基于响应结果评估结构的剪切损伤演化过程,从而建立从动力响应到损伤机制的完整分析框架。

RPC 柱的抗力函数由等效弯曲抗力与等效剪切抗力两部分构成,具体取值参考文献^[16]。材料动态强度增长因子 DIF 依据文献^[16]中公式计算,采用 Newmark-β 法对运动方程进行数值求解。针对弯曲响应,基于 ESDOF 法的运动方程表述如下:

$$K_{LM}M\ddot{x}(t) + C\ddot{x}(t) + R(x) = F_c(t) \tag{1}$$

根据动力学原理,钢筋混凝土(RPC)柱在外部荷载作用下的剪切损伤评估可通过以下步骤实现:首先,定义基本参数——柱体整体质量 M 、弯曲等效黏滞阻尼系数 C (由结构阻尼比 ζ 与临界阻尼系数 C_{cr} 计算,后者取决于构件弹性刚度 k)、抗力函数 $R(x)$ 描述柱体抵抗变形的能力,以及随时间变化的外荷载 $F_c(t)$ 。随后,引入等效系数 K_L 、 K_M 和载荷-质量耦合系数 K_{LM} (即 K_M/K_L)对系统进行参数化。

对于剪切响应,运动方程见式(2):

$$M_s\ddot{y}(t) + C_s\dot{y}(t) + R_s(y) = V(t) \tag{2}$$

式中: M_s 为剪切质量,系统参与剪切变形的有效质量,kg; C_s 为剪切阻尼系数,由材料剪切黏性率(%)决定,表征能量耗散能力; k_s 为剪切刚度,反映系统弹性剪切抗力特性; R_s 为非线性剪切抗力函数,描述材料屈服后刚度退化及塑性变形机制; F_s 为动态剪切力,外部输入荷载,kN,源自整体结构动力分析结果。

$$V(t) = aR(t) + bF(t) \tag{3}$$

式中: n 为荷载分布系数,表征压力分布特征, $n = p_1/p_2$ ($0 < n \leq 1$)(p_1 为构件中部压力, p_2 为两端边缘压力); a 和 b 为动态响应参数,与 n 值关联,调控弯曲荷载分配模式; $R(t)$ 为抗力函数,描述材料或构件在弯曲作用下的非线性抗力演变; $F(t)$ 为外荷载,是随时间变化的弯曲激励,kN。

2 RPC 柱损伤标准与 P-I 曲线

对柱端转角最大值 θ_{max} 和及支座平均剪切应变 γ 进行研究,分别建立弯曲-剪切耦合评估标准,典型 RPC 柱 P-I 曲线均可参考文献^[14]中关于 ESDOF 的相关标准,弯曲-剪切损伤评得出估参数及其标准见表 1。

表 1 弯曲-剪切损伤的评估参数及其标准

失效类别	评估参数	轻伤	中伤	重伤
弯曲破坏	柱端转角峰值 $[\theta_{max}]/(^{\circ})$	1.4	3.4	7.1
剪切破坏	剪切应变均值 $[\gamma]/\%$	1	2	3

根据文献^[10]并结合国家现行设计标准,对截面尺寸为 400 mm×400 mm、高度为 2 500 mm 的 RPC 柱(抗压强度 100 MPa)进行破坏与损伤分析。图 1(a)展示了 RPC 弯曲-剪切损伤失效模型的 6 种破坏等级 P-I 曲线,图 1(b)为损伤分区示意图。基于损伤判断原则^[17],可判定 RPC 柱在冲量荷载区易发剪切破坏,超压荷载区易发弯曲破坏,动力荷载区则易发弯剪耦合破坏。区域 C 为弯曲轻度损伤区,区域 F 为弯曲重度损伤区;区域 B 为剪切轻度损伤区,区域 D 为剪切重度损伤区,区域 A 为安全区。区域 E 的损伤类型需依据支座状态细分:(1)若弯曲损伤前已发生剪切失效,则仅出现剪切破坏;(2)若弯曲损伤前未达剪切失效,则表现为弯剪复合损伤。

3 关键参数对超压-冲量渐近线的影响分析

依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[18]和《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2018)^[19]中框架柱的相关限定,并结合文献^[10]中 RPC 柱参数设定,本研究聚焦长细比 λ 、截面尺寸($L \times B$)及材料强度(f_c)三个关键参数,分析其对 RPC 方柱弯曲-剪切响应 P-I 曲线超压-冲量渐近线的影响规律,具体参数设置详见表 2。

3.1 长细比的影响

根据试验数据,随长细比增加,弯曲与剪切损伤

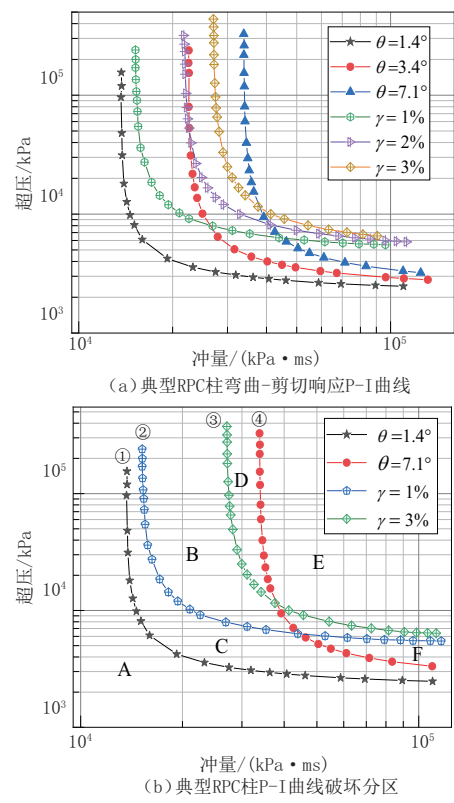


图1 典型RPC柱P-I曲线与损伤分区

表2 RPC柱分析参数

序号	长细比 λ	RPC柱截面尺寸 $L \times B$ / (mm×mm)	RPC材料强度 f_c / MPa
1	8.66	200×200	90
2	10.83	300×300	100
3	12.99	400×400	140
4	15.16	500×500	180
5	17.32	600×600	210

的P-I曲线渐近线均呈下降趋势。当长细比从8.66增至17.32时,弯曲损伤渐近线分别下降55%和9.3%,剪切损伤渐近线则降低40.1%和24.5%,表明长细比增大显著削弱了RPC柱的抗爆性能。

3.2 截面尺寸的影响

根据试验数据,随截面尺寸扩大,弯曲与剪切损伤的超压-冲量渐近线均呈显著提升趋势。当截面边长由200 mm增至600 mm(增幅2倍)时,弯曲损伤渐近线分别提升至原值的5.08倍和3.89倍,剪切损伤渐近线则分别增长1.55倍和3.62倍,表明截面尺寸的增加能显著提高RPC柱的抗爆性能。

3.3 RPC强度的影响

进一步分析RPC抗压强度(90、100、140、180 MPa及210 MPa)对P-I曲线的影响,随着强度提升(210 MPa较90 MPa增幅1.33倍),弯曲与剪切损伤的渐近线均呈线性增长。其中,弯曲损伤渐近线平均增长2.37倍(低强度区间)和1.31倍(高强度区

间),剪切损伤渐近线则分别增长1.34倍和1.11倍。尽管强度提升可增强抗爆能力,但其影响幅度较截面尺寸优化效果(2~5倍增幅)相对有限,验证了结构参数中尺寸优化的主导作用。

4 爆炸荷载下RPC柱破坏概率分析

4.1 爆炸荷载种类

爆炸荷载环境依据建筑影响与否可分为外部爆炸(无约束荷载)与内部爆炸(有约束荷载),本文研究聚焦无约束爆炸场景。具体涵盖恐怖袭击类(汽车炸弹、邮包炸弹、人体炸弹)、常规事故类(天然气爆炸、燃油爆炸)及实际案例(天津港8·12爆炸事件相当于500 t TNT当量、浙江温岭6·13事件8 305 kg、四川宜宾7·12事件230 kg)。后续分析将通过等效TNT转换方法(直接转换法与公式转换法)对不同荷载类型进行量化研究。

4.2 等效TNT计算方法

目前国际通用的爆炸分析标准方法是各类爆炸荷载换算为等效TNT炸药当量,以便通过统一标准开展研究。为简化计算分析流程,本文针对不同类型的爆炸荷载采用两种转换方法:直接转换法和公式转换法。

4.2.1 直接转换法

采用直接转换法的爆炸荷载涵盖汽车炸弹及天津港8·12、浙江温岭6·13、四川宜宾7·12三起真实案例。鉴于汽车炸弹在恐怖袭击中频次最高,相关领域学者已对其TNT当量完成精准量化(见表3)。真实事件方面,天津港事故相当于500 t TNT,浙江温岭事故为8 305 kg TNT,四川宜宾事故则为230 kg TNT(文献数据)。

表3 汽车炸弹等效TNT炸药量

序号	1	2	3	4	5
类别	常规车	交互车	多功能车	小客车	大型厢式货车
等效TNT量/kg	200	250	300	500	1 000
满载质量/kg	1 500	2 000	2 300	3 000	4 000
常见车型	常见车	面包车	旅行车	载人客车	厢式货车

4.2.2 公式转换法

采用公式转换法的爆炸荷载涵盖箱包炸弹、人体炸弹及燃气爆炸、燃油爆炸等随机性高且易发于公共场所的类型。针对箱包炸弹与人体炸弹,引入公式(1)和(2)计算TNT当量:

$$Q = m\eta \quad (1)$$

$$m = \rho V \quad (2)$$

式中: Q 为 TNT 当量,kg; m 为装药量,kg; ρ 为炸药密度,kg/m³; η 为 TNT 当量系数; V 为爆炸装置体积,m³。结合市面常见箱包尺寸与公式(1)、(2),可计算箱包炸弹(不含起爆器空间)的等效 TNT 量(见表 4);人体炸弹则按成年男性最大携药量 $Q=9.03$ kg 计。

燃气与燃油爆炸因缺乏直接 TNT 等效数据及文献参考,需借助热值转换公式(3)计算。

$$W_{TNT} = \alpha W Q_V / Q_{TNT} \tag{3}$$

式中: α 为爆炸效率因子(通常取 3%~4%); W 为燃料质量,kg; Q_V 为燃料热值,kJ/kg, Q_{TNT} 为 TNT 热值,4 520 kJ/kg。经核算,1 m³天然气($Q_1=38\ 500$ kJ/m³)燃烧相当于 0.34 kg TNT,1 kg 燃油($Q_2=41\ 816$ kJ/kg)燃烧相当于 0.37 kg TNT。鉴于实际事故规模远大于此,本文在设计中:燃气爆炸直接基于工况参数建模;燃油爆炸则依据加油站分级(见表 5)计算储油量。

表 4 加油站储油能力		单位:m ³
加油站	储油方量	
一级	120~180	
二级	90~120	
三级	30~90	

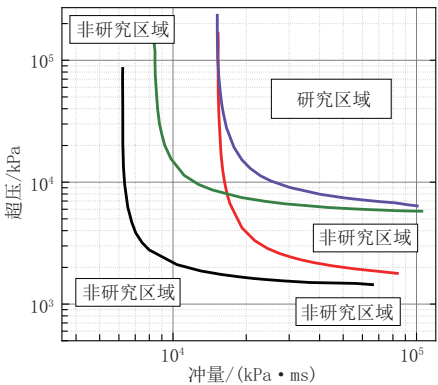
以三级加油站典型容量(30、60、90 m³)为例,燃油密度取 0.71 g/cm³。经核算,90、60、30 m³储罐分别可储存 63.9、42.6、21.3 t 燃油。基于公式(3)转换,其爆炸荷载等效 TNT 炸药量依次为 23.646、15.764、7.882 t。

4.3 RPC 柱破坏概率分析

取三种关键参数的最大与最小值构建 P-I 曲线,结合计算所得爆炸工况点开展破坏概率分析,共计 174 个荷载点。针对柱端最大转角 1.4°与 7.1°、平均剪切应变 1%与 3%对应的四条曲线进行重点分析。若荷载点落入 P-I 曲线的弯曲-剪切失效破坏区,则判定 RPC 柱发生破坏,破坏概率以研究区域内荷载点数量与总荷载点数量的比值表示。本文 P-I 曲线研究区域如图 2 所示

对 RPC 柱长细比(λ)为 8.66 与 17.32 的 P-I 曲线特征展开对比(见图 3(a)、3(b)),分析表明:在 P-I 曲线所涵盖的 174 个荷载工况点中, $\lambda=8.66$ 时破坏区域荷载点数为 53 个(占比 30.5%),而 $\lambda=17.32$ 时增至 99 个(占比 56.9%)。随长细比从 8.66 提升至 17.32,RPC 柱破坏概率显著攀升 26.4 个百分点。

进一步考察截面尺寸影响,选取 $L \times B=200$ mm $\times$ 200 mm 与 600 mm $\times$ 600 mm 的 P-I 曲线(见图 3(c)、



本节研究 P-I 曲线区域
图 2 RPC 柱 P-I 曲线破坏区域说明

3(d)),结果显示:前者破坏区域荷载点达 105 个(占比 60.3%),后者仅为 32 个(占比 18.4%)。截面尺寸扩大至 600 mm $\times$ 600 mm 时,破坏概率较 200 mm $\times$ 200 mm 基准下降 41.9%。

最后聚焦材料强度效应,对比 90 MPa 与 210 MPa 条件下的 P-I 曲线(见图 3(e)、3(f)),数据显示:90 MPa 强度等级下破坏荷载点数为 62 个(占比 35.6%),210 MPa 时减少至 37 个(占比 21.3%),材料强度提升使破坏概率降低 14.3%。上述参数调控对 RPC 柱抗爆性能的量化影响规律得以明晰呈现。

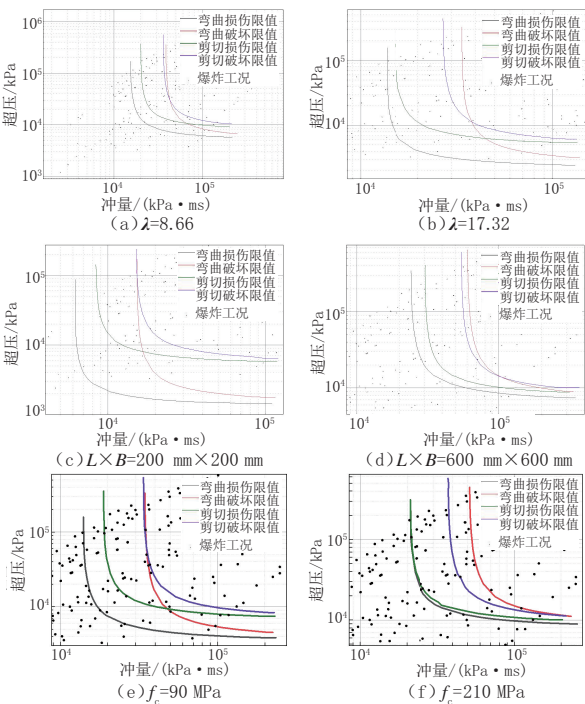


图 3 不同参数 RPC 柱爆炸荷载点分布

5 结 论

对 RPC 柱破坏概率影响程度从大到小的关键参数依次为:截面尺寸>长细比>RPC 抗压强度。

参考文献:

- [1] Kodur V K R, Bhatt P P, Soroushian P, *et al.* Temperature and stress development in ultra-high performance concrete during curing[J]. Construction & Building Materials, 2016(122): 63-71.
- [2] Hou X M, Cao S J, Rong Q, *et al.* Effects of steel fiber and strain rate on the dynamic compressive stress-strain relationship in reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018(170): 570-581.
- [3] Su Y, Li J, Wu C Q, *et al.* Effects of steel fibers on dynamic strength of UHPC[J]. Construction & Building Materials, 2016(114): 708-718.
- [4] 张仁巍, 曾武华, 邓永新. RPC-CFST 组合柱轴压性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 20-28.
- [5] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement and concrete research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [6] N P Lee, D H Chrisholm. Study Report: Reactive Powder Concrete[R]. Branz 2006.
- [7] Mostofinejad D, Nikoo M R, Hosseini S A. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)[J]. Construction and Building Materials, 2016(123): 754-767.
- [8] Hiremath P N, Yaragal S C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017(154): 72-87.
- [9] 邹慧辉, 郭志昆, 姜猛. 火灾后钢管 RPC 柱抗爆性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 1-7.
- [10] Li J, Wu C Q, Hao H. Residual loading capacity of ultra-high performance concrete columns after blast loads[J]. International Journal of Protective Structures, 2015, 6(4): 649-669.
- [11] Astarlioglu S, Krauthammer T. Response of normal-strength and ultra-high-performance fiber-reinforced concrete columns to idealized blast loads[J]. Engineering structures, 2014(61): 1-12.
- [12] Xu J C, Wu C Q, Xiang H B, *et al.* Behaviour of ultra high performance fiber reinforced concrete columns subjected to blast loading[J]. Engineering Structures, 2016(118): 97-107.
- [13] Ma G W, Shi H J, Shu D W. P-I diagram method for combined failure modes of rigid-plastic beams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 34(6): 1081-1094.
- [14] 柳锦春, 方秦, 龚自明, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形态分析[J]. 爆炸与冲击, 2003(1): 25-30.
- [15] 方秦, 吴平安. 爆炸荷载作用下影响 RC 梁破坏形态的主要因素分析[J]. 计算力学学报, 2003(1): 39-42; 48.
- [16] 赵仲晖. 爆炸荷载作用下活性粉末混凝土柱破坏模式与损伤评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [17] Hou X M, Cao S J, Rong Q, *et al.* A P-I diagram approach for predicting failure modes of RPC one-way slabs subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018(120): 171-184.
- [18] GB/T 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [19] GB/T 50011—2018, 建筑抗震设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

