

# 混凝土结构在侵彻爆炸作用下的研究现状

罗泽  
陆军工程大学

**摘要:** 混凝土作为一种常用的建筑材料,被广泛运用于建筑领域。在防护工程中,混凝土结构除静荷载外,还会受到侵彻爆炸等强动荷载作用。本文从试验研究、数值模拟研究和理论研究三个方面对混凝土结构在侵彻、爆炸作用下的研究工作进行梳理,指出了现有研究不足以及往后的研究趋势。

**关键词:** 混凝土结构; 侵彻爆炸

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.10.033

## 引言

在恐怖袭击及战争中,民用建筑以及军用防护结构、机场等重要设施会受常规武器的打击。常规武器对目标介质的破坏是由战斗部产生的,穿甲型战斗部对目标介质的毁伤主要为侵彻毁伤效应,爆破型战斗部对目标介质主要造成爆炸毁伤<sup>[1]</sup>。

大部分建筑结构使用的材料为混凝土,因此,开展混凝土结构在侵彻爆炸作用下的研究,对防护结构设计、毁伤效应评估等具有重要的指导意义。目前关于混凝土在侵彻爆炸作用下的研究主要通过试验研究、理论研究及数值模拟研究等手段开展。

## 一、混凝土结构在侵彻作用下的研究

### (一) 试验研究

国内外学者开展了大量混凝土侵彻试验研究,围绕弹体侵彻速度<sup>[2]</sup>、弹头几何形状<sup>[3]</sup>、混凝土抗压强度<sup>[4]</sup>、钢筋分布<sup>[5]</sup>和靶体尺寸<sup>[6]</sup>等各种影响因素开展,主要关注弹体最终侵彻深度、剩余速度和靶体的损伤破坏模式。靶体阻力直接影响弹体侵彻深度与剩余速度,弹体加速度能直接地反映混凝土靶引起的阻力,Forrestal等<sup>[7]</sup>在试验中获得了一系列弹体侵彻加速度时程曲线,具有较强的代表性,为后续理论分析和数值模拟结果提供了验证依据。

### (二) 理论研究

目前,侵彻及穿甲理论模型大多都是基于球形空腔膨胀理论模型而建立的,许多研究者基于该理论模型开展了大量的研究。在工程结构中,钢筋的加入对混凝土基体形成约束。因此,将钢筋的约束作用应用到现有的理论模型中,对现有侵彻模型改进是众多学者研究的重要领域。Dancygier<sup>[8]</sup>讨论了配筋率对侵彻阻力的影响,并提出了一种定量评估方法;基于该方法,Chen等<sup>[9]</sup>提出侵彻穿甲的三阶段模型,考虑钢筋对后弹坑的影响提出了钢筋的无量纲数。随后,DENG等<sup>[10]</sup>考虑钢筋的约束作用,得到了钢筋混凝土中空腔径向应力的理论解,建立了弹丸侵彻钢筋混凝土的工程模型。

### (三) 数值模拟研究

随着计算机技术的发展,有限元数值仿真成了混凝土动态响应研究的主流方法之一,AUTODNY、LS-DYNA等大型有限元分析平台被广泛运用于分析结构侵彻冲击的问题中。徐世焯等<sup>[11]</sup>修正了RPC混凝土K&C本构模型相关参数,分析了侵彻深度与弹速、限贯穿速度与峰值加速度之间的关系。Lee等<sup>[12]</sup>对连续面帽(CSC)模型参数进行标定。Wu等<sup>[13]</sup>基于应变平滑的非残差惩罚项提出光滑粒子伽辽金法(SPG),解决侵彻过程中的大变形问题。

## 二、混凝土结构在爆炸作用下的研究

### (一) 试验研究

现有的研究多为小型结构或缩比模型试验,主要针对钢筋混凝土框架结构开展。杨亚东等<sup>[14]</sup>开展了钢筋混凝土结构缩比模型内爆试验。相同比例当量的炸药爆炸时,各个模型中同样位置处冲击波峰值服从相似规律,结构的破坏部位及破坏形态接近。刘彤等<sup>[15]</sup>开展了不同位置及不同装药量的钢筋混凝土结构内部爆炸试验。表明了爆炸位置对结构破坏影响较大,结构中各构件交界

处更先于构件本身发生破坏。

## （二）理论研究

陈力等<sup>[16]</sup>基于静载的梁板结构面力效应，提出了适用于动载条件的梁板结构面力效应分析模型。宋春明等<sup>[17]</sup>推导了用于判定爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构受力梁和支撑梁变形状态的计算方法。TU等<sup>[18]</sup>提出迎爆面爆坑和背爆面震塌坑尺寸理论预测模型。Wang等<sup>[19]</sup>基于三组不同缩比尺寸的钢筋混凝土板近爆试验数据提出了归一化峰值挠度（ $\delta/h$ ）和归一化层裂半径（ $r/h$ ）与不同缩放距离 $Z$ 和缩放因子 $S$ 的关系。

## （三）数值模拟研究

数值模拟技术在爆炸领域的运用已较为成熟。龚顺风等<sup>[20]</sup>建立了钢筋混凝土板受封闭空间内部爆炸作用的数值模型，研究了不同当量下钢筋混凝土板的破坏过程和碎块形态及喷射速度，结果表明：钢筋混凝土板的破裂和碎块大小受爆炸冲击波的影响。R. Castedo等<sup>[21]</sup>通过数值模拟研究了爆炸作用下钢筋混凝土板的响应。采用有限元（FEM）与SPH法耦合数值模型，三种炸药形状爆炸板的响应。王丹等<sup>[22]</sup>对钢筋混凝土框架结构受爆炸荷载进行了数值模拟研究，对结构在不同炸药当量和不同爆距的破坏进行等级划分。朱升波<sup>[23]</sup>使用AUTODYN对外部爆炸荷载作用下的多层钢筋混凝土框架结构进行了数值模拟研究，揭示了框架结构在外部爆炸作用下的破坏过程。王芳华等<sup>[24]</sup>分析了不同冲击波峰值作用下结构的破坏模式。结果表明：结构破坏模式为较近的构件发生局部破坏，随着爆炸当量增加，结构发生整体剪切破坏。

## 三、结论

通过对混凝土结构在侵彻爆炸作用下的毁伤研究进行综述，发现目前在该方面的研究取得了较大的进展，但仍存在些许不足，主要体现在：

（1）研究主要围绕新型高性能混凝土靶体、构件和缩比模型开展。对于原型的高强混凝土结构，尤其是整体式结构的爆炸试验研究较少。

（2）目前国内外学者开展了大量的新型高强混凝土材料如UHPC（超高性能水泥基复合材料）、RPC（活性粉末混凝土）和SFRC（钢纤维混凝土）等的抗爆炸性能研究，但在众多爆炸试验研究中对于装药形状的关注较少。

（3）对于结构在侵彻或爆炸作用下的研究主要针对结构的毁伤破坏，有关结构中的应力波和空气中冲击波的传播规律研究相对欠缺。

## 参考文献

- [1] 卢芳云. 武器毁伤与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [2] Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(6): 489-497.
- [3] Song ML, Wang XM, Li W B, Liu ZL. Influence of projectiles nose shape on high-speed penetration effect[J]. Dandao Xuebao/J Ballist, 2014, 26(3): 66-71.
- [4] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J. Penetration experiments with limestone targets and ogive-nose steel projectiles[J]. Journal of Applied Mechanics, 2000, 67(4).
- [5] 欧阳春, 赵国志, 杜中华, 等. 弹丸垂直侵彻钢筋混凝土介质的工程解析模型[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 5.
- [6] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1584-1594.
- [7] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International

Journal of Impact Engineering, 2003, 28 (5): 479-497.

[8] Dancygier A N. Effect of reinforcement ratio on the resistance of reinforced concrete to hard projectile impact[J]. Nuclear Engineering & Design, 1997, 172 (1-2): 233-245.

[9] Chen X W, Li X L, Huang F L, et al. Normal Perforation of reinforced concrete target by rigid projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35 (10): 1119-1129.

[10] Deng Y J, Chen X W, Song W J. Dynamic cavity-expansion penetration model of elastic-cracked-crushed response for reinforced-concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021.

[11] 徐世焯, 吴平, 周飞, 等. 活性粉末混凝土抗多次侵彻实验研究及数值预测[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41 (6): 16.

[12] Lee M J, Park G K, Kim S W, et al. Damage characteristics of high-performance fiber-reinforced cement composites panels subjected to projectile impact[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 214: 106919.

[13] Wei Fan, Zhong Z W, Xu Huang, et al. Multi-platform simulation of reinforced concrete structures under impact loading[J]. Engineering Structures, 2022, 266, 114523.

[14] Wu C T, Wu Y, Crawford J E, et al. Three-dimensional Concrete Impact and Penetration Simulations Using the Smoothed Particle Galerkin Method[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 106: 1-17.

[15] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣, 等. 钢筋混凝土结

构内爆炸相似模型试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2016 (2): 7.

[16] 刘彤, 朱晓伟, 贾彬, 等. 钢筋混凝土框架结构内部爆炸毁伤效应试验研究[C]//第六届全国强动载效应及防护学术会议暨2014年复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会.

[17] 陈力, 方秦, 还毅, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁板结构的面力效应[J]. 工程力学, 2010, 27 (8): 156-163.

[18] 宋春明, 王明洋, 冯淑芳. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁系结构的动力分析[C]//中国岩石力学与工程学会安全与防护分会成立大会暨第一届全国工程安全与防护学术会议.

[19] Tu H, Fung T C, Tan K H, et al. An analytical model to predict spalling and breaching of concrete plates under contact detonation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 160: 10475.

[20] 龚顺风, 金伟良. 内部爆炸荷载作用下钢筋混凝土板碎片抛射速度的预测[J]. 工程力学, 2009, 26 (9): 225-230.

[21] Castedo R, Santos A P, A Ala ó n, et al. Numerical study and experimental tests on full-scale RC slabs under close-in explosions[J]. Engineering Structures, 2021, 231: 111774.

[22] 王丹, 张亮. 爆炸作用下钢筋混凝土多层框架结构反应分析[J]. 建筑节能, 2006, 34 (2): 20-21.

[23] 朱升波. 近爆作用下钢筋混凝土结构的抗爆性能研究[D]. 浙江, 2010.

[24] 王芳华, 盛宏玉. 钢筋混凝土框架结构在爆炸荷载下的动力响应及破坏分析[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2010, 18 (1): 4.