



探讨接触炸药对混凝土柱的影响

高速成像如何使研究人员更好地了解混凝土柱在接触炸药爆炸时的破坏反应, 该研究对发现更安全的建筑内爆做法具有启示意义。

由于世界上一半以上的人口生活在城市地区, 许多政府机构正在投资研究项目, 以改善城市居民的安全。自然灾害发生后出现的一个问题是建筑内爆, 这种做法涉及策略性地使用炸药, 使结构坍塌在尽可能小的区域上, 以最大限度地减少对周围环境的物理破坏。

要想开发出更安全的建筑内爆做法, 就需要更深入地了解混凝土结构是如何对爆炸冲击波作出动态反应的。为此, 厄瓜多尔武装部队 ESPE 大学的教授 David Mejia 分析了钢筋混凝土 (RC) 柱的破坏反应。“2016 年厄瓜多尔发生地震后, 军队不得不对几座建筑进行内爆,” 他解释说。“我们研究的目标之一是更深入地了解这一过程, 以提高这样的受控爆炸在密集的城市地区的安全性。例如, 我们至少需要多少炸药才能成功地内爆一座建筑物?”

进行爆破试验

虽然研究人员已经研究了许多爆炸类型对 RC 柱的影响,但关于 RC 柱是如何在接触炸药的作用下爆破的数据还不够全面,这些接触炸药可以将非常强烈的压力载荷传递到柱子的局部区域。这就是 Meija 的研究的意义所在,他试图重现接触炸药和轴向载荷的综合影响所造成的破坏。该研究还考虑了混凝土的抗压强度等变量,以及柱子内横向钢筋的各种排列方式。

Meija 和他的团队测试了 33 根 RC 柱,它们都是根据建筑规范对混凝土结构的要求 (ACI 318S-11) 制造的,Meija 说,“它们有不同的机械性能和横截面。”他们还建造了一个大型的结构框架,以在爆炸过程中支撑每根柱子。在他们将柱子放入框架后,他们就用液压千斤顶对其施加轴向载荷。爆炸后,研究人员使用液压千斤顶压力表检查剩余压力。“剩余压力是帮助我们确定柱子是否坍塌的参数之一,”Meija 解释说。“例如,如果压力表的数值为 0 兆帕,那么柱子 100% 失去了承载能力,那么就可以认为它们已经坍塌了。”

对于接触炸药,Meija 和他的团队使用了由 50% 的季戊四醇 (PETN) 和 50% 的三硝基甲苯 (TNT) 组成的 50/50 彭托利特炸药,并将每个锥形炸药连接到柱子的中间。爆炸后,他们对柱子的剩余部分进行了三维扫描,并在计算机图形软件中处理了数据,测量了纵向钢筋的暴露长度、中央纵向钢筋的变形程度和混凝土碎片的百分比。

“如果压力表的数值与 0 兆帕斯卡不同,我们就无法推断出柱子的损坏程度,”Meija 说。“因此,我们必须了解爆炸对柱子的混凝土芯和纵向钢筋的影响。这些信息加在一起,使我们能够确定损坏的程度。”



结构框架,以及里面有一个混凝土柱的框架。



将锥形炸药装到柱子上。

添加高速元素

作为实验的一部分,Meija 使用了高速成像设备,即 Phantom v2512 摄像机,该团队将其安装在距离爆炸点 30 米远的沟渠中。摄像机正面有防弹玻璃,顶部有炸药定向处理 (EOD) 弹道防护罩,以保护它不受任何由冲击波造成的混凝土碎片的影响。



Phantom v2512 高速摄像机,离爆炸试验点 30 米远。

Mejia 调整了摄像机的视场、分辨率和焦距，以最大限度地提高图像质量。具体来说，团队将拍摄速度设置为每秒 75,000 帧 (fps)，以 512 x 512 的分辨率拍摄爆炸，并将曝光时间设置为 13.33 微秒 (μs)。

PHANTOM: 爆炸试验的卓越选择

Phantom v2512 是一款功能强大的 100 万像素的高速数码相机，在 1280 x 800 的最高分辨率下每秒能够拍摄超过 25,000 帧，若配有出口受控的 FAST 选项，在降低的分辨率下每秒能够拍摄 100 万帧。除了能够平衡快速帧率和分辨率外，摄像机还结合了一些先进的功能，这使其成为对爆炸等棘手现象进行成像的卓越选择。这些功能包括：

- 一个专有的 CMOS 传感器，其像素大小为 28 微米，深度为 12 比特。
- 25 千兆像素 (Gpx) 的吞吐量。
- 能够减少爆炸试验中固有的强光。例如，该摄像机的最短曝光时间为 1 微秒，使用 FAST 选项时为 265 纳秒，而且它还有极端动态范围。
- 高图像质量，可以捕捉到冲击波和破碎细节。
- 高达 288 GB 的内存，可以捕捉到爆炸的余波。
- 坚固的全金属机身，可承受野外的恶劣环境。

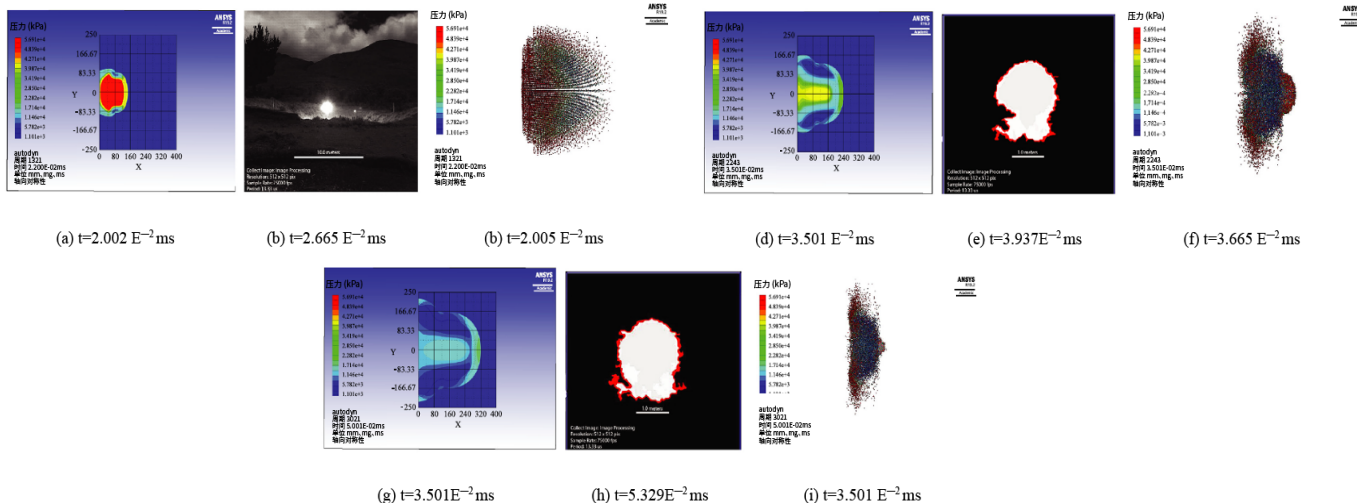
探索极端动态范围

拍摄极其明亮的事件 (如焊接、爆炸、燃烧和弹道冲击) 的高质量视频，不是一件容易的事。为了克服这些挑战，高速摄像机用户通常会选择较短的曝光时间或缩小光圈，以防止图像中明亮区域的过度饱和。然而，这些调整往往会影响事件中不明亮区域的特征，使镜头中的背景细节变得更暗，更不可见。

在某些情况下，在现场引入额外的光线可以对明亮事件进行有效的成像。然而，这是很难实现的，因为由照明提供的散射光子的数量应该与从事件中发出的光子的数量相当，因此很难实现高质量的图像，特别是对于具有大视场的事件。

解决这些问题的方法之一是使用极端动态范围 (EDR)，这是某些 Phantom 摄像机所具备的一种传感器功能，它提供了对每个像素进行动态曝光的方法。概括地说，如果在帧图像曝光 (或图像捕捉) 过程中，一个像素值在一定时间后超过了一个给定的阈值 (例如 600 个计数)，EDR 将把摄像机剩余的曝光时间重置为一个较短的时间。因此，与较亮的像素相比，较暗的像素将有一个相对较长的曝光时间，对于较亮的像素，EDR 功能将把摄像机重置到一个由用户定义的较低的曝光值。最后，这个过程通过在图像的较暗区域保持相对较长的曝光时间，在较亮区域保持相对较短的曝光时间，扩展了图像的动态范围。

Meija 最初想使用高速纹影成像来直接观察柱子的损坏顺序。“然而，烟雾和严重的尘埃云产生了太多的噪声，阻挡了我们的这一想法，”研究人员说。“摄像机捕捉到了火球、气体的膨胀和压缩以及混凝土碎裂过程，使我们能够观察到冲击波的传播。通过数值计算，我们可以证明，冲击波是非均匀地传播到周围的空气中的。”



150 克锥形彭托利特炸药的数值和实验结果表明，冲击波是非均匀地传播到周围的空气中的。首先，冲击波在 $2 \times 10 \text{ E}^2$ 毫秒 (ms) 之前采用垂直椭圆轮廓，之后采用对称的水母圆顶型轮廓。

评估破坏

根据他们的实验和数值研究，武装部队大学 ESPE 的研究人员发现，当接触炸药爆炸时 RC 柱是被超音速冲击波和火球同时损坏的，它们导致混凝土按下列顺序碎裂：

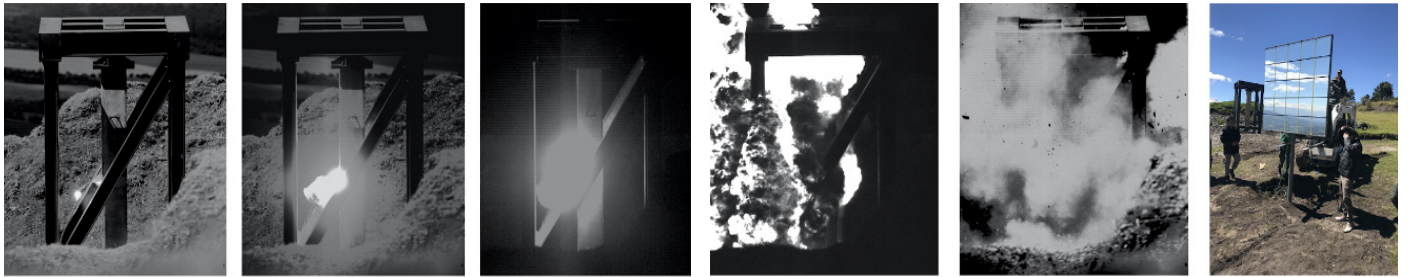
1. 混凝土保护层破碎。
2. 横向钢筋受到剪切。
3. 纵向钢筋弯曲。
4. 部分或全部混凝土碎裂。

研究小组还发现，柱子的后续坍塌涉及许多变量，包括炸药的质量（即以克为单位的彭托利特炸药的量）以及柱子的轴向载荷和抗压强度。

“当彭托利特炸药超过 500 克时，柱子内横向钢筋的排列方式对最终的破坏有很大影响，”Meija 解释说。“在这种情况下，轴向载荷也增加了柱子的爆破强度，并改善了对混凝土芯的约束力。”



分别受到中度和极度破坏的混凝土柱。



(a) 启动

(b) 爆炸

(c) 引爆

(d) 火球

(e) 混凝土碎片

(f) 镜子



(g) 纹影视频

使用 Phantom v2512 在 512 x 512 分辨率下以 75,000 fps 的速度拍摄的高速视频结果。曝光时间: 13.33 微秒。焦距: 32.41 毫米。

简单地说, 轴向载荷是在对建筑物进行内爆时必须考虑的一个重要参数。”

Meija 和他的团队目前正在进行另一项研究, 以研究圆柱形和圆锥形炸药的引爆情况。但这一次是大规模的: “在我们的下一个项目中,” 他说, “我们将对实际的建筑物进行内爆, 而不仅仅是对混凝土实验坯体进行内爆。”

要了解更多信息, 请访问: www.phantomhighspeed.com。



某些 Phantom 摄像机需要出口许可证。有关更多信息, 请访问 www.phantomhighspeed.com/export。