

近场爆炸荷载作用下CFDST墩柱损伤评估研究

赵瑞斌

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 本文提出了基于局部变形最大位移量的近场爆炸荷载作用下CFDST墩柱损伤程度的定性划分, 可为中空夹层钢管混凝土墩柱的近场爆炸损伤评估提供参考。建立CFDST墩柱的局部凹陷变形量与爆炸荷载参数与CFDST墩柱自身物理参数之间的关系, 进而实现对CFDST墩柱近场爆炸损伤的预测。利用多元非线性回归分析方法, 建立了预测CFDST墩柱近场爆炸荷载作用下的局部凹陷变形量的实用公式。

关键词: 近场爆炸荷载; CFDST墩柱; 多元非线性回归分析; 损伤评估
中图分类号: U447 **文献标识码:** A

墩柱作为桥梁结构中最重要承载构件之一, 在抗爆设计过程中评估其在近场爆炸荷载作用下的损伤程度至关重要。目前研究人员对爆炸后墩柱的损伤评估主要基于结构构件最大位移、支座转角、剩余承载力等, 且以剩余承载力为损伤评估准则居多, 但对于近场爆炸荷载作用下的CFDST墩柱损伤评估指标的选择标准、适用范围及评估精度的研究还不够明确。目前应用最广泛的是基于剩余承载力的损伤评估准则和基于构件*P-I*曲线的损伤评估准则^[1-2]。但是上述两种评估准则都具有一定的局限性, 在实际工程应用中往往不尽如人意。

1 近场爆炸荷载作用下CFDST墩柱数值模拟

采用非线性显示动力分析软件LS-DYNA建立近场爆炸作用下的CFDST墩柱的三维精细化模型, 模型包括TNT炸药、空气区域、CFDST墩柱、刚性地面四部分, 如图1-1所示。均采用8节点单点积分六面体对炸药、空气域和CFDST墩柱进行网格划分。内外钢管环向划分80个单元、纵向划分400个单元、径向划分3个单元, 网格尺寸约为5 mm; 核心混凝土部分环向和纵向单元与内外钢管网格保持一致, 径向划分10个单元, 网格尺寸同样约为5mm。

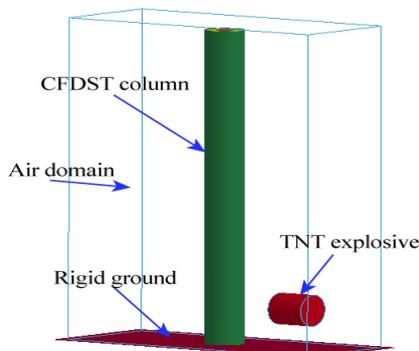


图1-1 三维数值模型

2 不同参数对CFDST墩柱损伤破坏的影响

为研究不同参数对CFDST墩柱近场爆炸荷载作用下动态响应的影响, 运用参数化建模方法研究不同参数对CFDST柱动态响应的影响, 主要分析参数是基于爆炸荷载和制作CFDST墩柱成本的各个因素上的, 分别为TNT炸药质量、爆炸距离、外钢管强度、内钢管强度、核心混凝土强度、外钢管壁厚、内钢管壁厚等^[3-5]。

当TNT炸药量为2.56kg、5.76kg、11.52kg、17.28kg、23.04kg时, 模拟结果为1.963cm、6.095cm、12.96cm、16.57cm、18.7cm; 爆炸距离为25cm、35cm、50cm、60cm、70cm时, 模拟结果为8.729cm、5.939cm、2.781cm、1.035cm、0.642cm; 外/内钢管强度为200MPa、300MPa、400MPa、500MPa、600MPa时, 模拟结果为6.395cm、5.939cm、5.557cm、5.163cm、4.8cm、6.239cm、5.939cm、5.667cm、5.432cm、5.201cm; 核心混凝土强度为30MPa、40MPa、50MPa、60MPa、70MPa时, 模拟结果为6.354cm、5.939cm、4.92cm、4.587cm、4.28cm; 外/内钢管壁厚2mm、4mm、6mm、8mm、10mm时, 模拟结果为7.28cm、6.616cm、5.939cm、5.136cm、4.55cm、6.827cm、6.244cm、5.939cm、5.305cm、4.77cm。

3 近场爆炸荷载作用下CFDST墩柱损伤估计的实用公式

3.1 不同参数对CFDST墩柱局部最大凹陷量的敏感度分析

CFDST墩柱的局部凹陷最大位移量可视为上述七个影响因素共同作用下的函数, 此时局部凹陷最大位移量可表示为

$$\varphi = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \quad (3-1)$$

式中: φ 表示CFDST墩柱的局部凹陷最大位移

量； x_n 为第 n 个影响因素。

将式(3-1)展开，得

$$\Delta\varphi = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta x_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3}\Delta x_3 + \frac{\partial f}{\partial x_4}\Delta x_4 + \frac{\partial f}{\partial x_5}\Delta x_5 + \frac{\partial f}{\partial x_6}\Delta x_6 + \frac{\partial f}{\partial x_7}\Delta x_7 \quad (3-2)$$

当只有其中一个影响因素改变，其他均不变时，式(3-2)可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1 \quad (3-3)$$

显然， $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3 + \Delta\varphi_4 + \Delta\varphi_5 + \Delta\varphi_6 + \Delta\varphi_7$ ，通常定义 φ 的变化率与 x_n 影响因素的变化率之比 s_i 为 x_n 对的敏感度，计算公式如下：

$$s_i = \left| \frac{(\varphi - \varphi')/\varphi'}{(x_i - x'_i)/x'_i} \right| \quad (3-4)$$

对式(3-4)所得敏感度取平均值后得到

$$s_{\text{平均}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{(\varphi - \varphi')/\varphi'}{(x_i - x'_i)/x'_i} \right| \quad (3-5)$$

利用式(3-5)计算结果见表3-1。

表3-1 各影响参数的敏感度

影响参数	敏感度
TNT炸药质量	0.98
爆炸距离	1.86
外钢管强度	0.24
内钢管强度	0.15
核心混凝土强度	0.36
外钢管壁厚	0.29
内钢管壁厚	0.23

从上表可知，TNT炸药质量和爆炸距离对CFDST墩柱局部凹陷最大位移量的影响较大，除此之外，剩余影响参数对CFDST墩柱局部凹陷最大变形量的敏感度从大到小依次为：核心混凝土强度>外钢管壁厚>外钢管强度>内钢管壁厚>内钢管强度。

3.2 CFDST墩柱损伤评估的实用公式

本文基于数值模拟的分析结果，利用多元非线性回归分析方法，建立了预测CFDST墩柱近场爆炸荷载作用下的局部凹陷变形量的实用公式，计算公式如下：

$$\delta = \frac{(-42.33 - 0.2388\alpha + 25.5045\beta - 3.1248\beta^2 + 0.1107\beta^3)}{(1 + 6.5897\alpha - 0.2325\alpha^2 + 26.3504\beta - 4.6525\beta^2 + 0.1812\beta^3)}$$

$$\alpha = \frac{t_{out} + t_{inn}}{1 - \omega}; \beta = \frac{f_{out} + f_c + f_{inn}}{3 \times Z^2}; Z = \frac{l_0}{\sqrt[3]{W}}$$

式中， δ 为CFDST墩柱的近场爆炸损伤指标； t_{out} 为外钢管管壁厚度； t_{inn} 为内钢管管壁厚度； ω 为CFDST墩柱的空心率； f_{out} 为外钢管屈服强度； f_{inn} 为内钢管屈服强度； f_c 为核心混凝土抗压强度； l_0 为TNT炸药中心点距CFDST墩柱外表面的距离； W 为TNT炸药的质量。因该公式尚

未考虑CFDST墩柱轴压比的影响，对桥梁墩柱而言轴压比较小，同时轴压比的存在对CFDST墩柱近场抗爆性能而言是有利的，因此采用上式计算所得的局部最大凹陷量为趋于更安全的结果^[6]。

4 结论

(1) 基于近场爆炸试验及数值模拟中CFDST墩柱的破坏特征，综合考虑其后期工作性能及加固修复工作的复杂性，提出了基于局部变形最大位移量的近场爆炸荷载作用下CFDST墩柱损伤程度的定性划分，可为中空夹层钢管混凝土墩柱的近场爆炸损伤评估提供参考^[7-8]。

(2) 基于数值模拟的分析结果，利用多元非线性回归分析方法，建立了预测CFDST墩柱近场爆炸荷载作用下的局部凹陷变形量与爆炸荷载参数、CFDST墩子自身物理参数的实用公式。此实用公式可以对近场爆炸荷载作用下的CFDST墩柱的损伤程度以及安全性进行快速评估。

参考文献

- [1] 王宏伟, 吴成清, 杨立燥, 等. 足尺钢管混凝土柱爆炸作用后残余承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(05): 155-160.
- [2] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸荷载作用下的毁伤效应及评估方法研究[D]. 长沙. 国防科学技术大学, 2012.
- [3] LI Q M, MENG H. Pressure-Impulse Diagram for Blast Loads Based on Dimensional Analysis and Single-Degree-of-Freedom Model[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(1): 87-92.
- [4] LI Q M, MENG H. Pulse loading shape effects on pressure-impulse diagram of anelastic-plastic, single-degree-of-freedom structural model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(9): 1985-1998.
- [5] 宗周红, 唐彪, 高超, 等. 钢筋混凝土墩柱抗爆性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(09): 51-60.
- [6] 曹雪叶, 赵均海, 李艳. 爆炸荷载作用下钢管混凝土柱非线性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(01): 58-63.
- [7] 李国强, 瞿海雁, 杨涛春, 等. 钢管混凝土柱抗爆性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 69-76.
- [8] 杨涛春, 李国强, 陆勇, 等. 爆炸作用下钢框架柱简化双自由度计算模型研究[J]. 钢结构, 2015, 30(07): 1-5, 51.