

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0049-04

钢管直径对 T 形截面钢管混凝土芯柱的 抗爆性能影响研究

王 傲, 徐亚丰

(沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168)

摘 要: 研究钢管直径这一参数的变化对 T 形截面钢管混凝土芯柱抗爆性能的影响。通过非线性有限元分析软件 ABAQUS 对钢管直径不同的 T 形截面钢管混凝土芯柱在爆炸荷载作用下的动力响应进行了数值模拟。比较了普通 T 形钢筋混凝土异形柱和 T 形钢管混凝土芯柱抗爆性能的差异。通过变化钢管直径, 得到钢管直径的变化对 T 形钢管混凝土芯柱抗爆性能的影响。研究表明: T 形钢管混凝土芯柱的抗爆性能优于普通 T 形钢筋混凝土异形柱; T 形钢管混凝土芯柱的抗爆性能随钢管直径的增大而加强。

关键词: T 形钢管混凝土芯柱; 钢管直径; 爆炸荷载; 应变率; 动力增大系数

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S024

STUDY ON EFFECTS OF TUBE DIAMETER ON ANTIKNOCK PROPERTY OF T-SHAPED CONCRETE-FILLED STEEL TUBE CORE COLUMNS

WANG Ao, XU Ya-feng

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Study on the effects of tube-diameters on T-shaped concrete-filled steel tube core column antiknock properties. The dynamic responses on the T-shaped concrete-filled steel tube core columns with different tube diameters under a blast load were simulated by the finite element analysis software ABAQUS. The differences of antiknock properties were compared between those of ordinary T-shaped reinforced concrete columns and those of T-shaped concrete-filled steel tube core columns. By changing the diameter of a steel tube, we attained the influence of different tube diameters on the antiknock property of T-shaped concrete-filled steel tube core columns. Finally, we draw a conclusion: the antiknock property of T-shaped concrete-filled steel tube core columns is better than that of common T shaped reinforced concrete columns. The antiknock property of T-shaped concrete-filled steel tube core column is strengthened with the increasing of a steel tube diameter.

Key words: T-shaped concrete-filled steel tube core column; diameter of the steel pipe; blast load; strain-rate; dynamic magnification factor

近年来国际上多次发生大型建筑物在爆炸荷载作用下倒塌破坏的惨剧, 给生命财产造成巨大的损失, 在各种突发性强烈爆炸冲击作用下如何有效防护各类结构物及构件免遭严重破坏, 以至大幅降低生命和财产损失, 已经成为摆在我们面前的一项重要而现实的课题^[1]。本课题组结合混凝土异形柱、

钢管混凝土柱、钢管混凝土核心柱的特点, 吸取长处, 避免不足, 提出了异形钢管混凝土芯柱的概念。异形钢管混凝土芯柱的截面形式与异形钢筋混凝土的截面形式相同, 主要有 3 种形式, 即十字形、T 形和 L 形。由于钢管混凝土的加入, 异形钢管混凝土芯柱的承载力比钢筋混凝土异形柱大有提高,

收稿日期: 2012-04-30; 修改日期: 2013-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(19672016)

通讯作者: 王 傲(1988—), 男, 辽宁人, 硕士生, 从事结构工程研究(E-mail: wangao19880107@126.com).

作者简介: 徐亚丰(1963—), 男(蒙族), 内蒙古人, 教授, 博士后, 国家一级结构注册工程师, 主要从事组合结构研究(E-mail: ceyfxu@163.com).

拓宽了异形柱的应用范围^[2]。异形钢管混凝土芯柱在实际工程中的运用日益广泛,尤其是在高层、超高层等高耸大跨结构体系中。所以对其在爆炸荷载作用下的动力响应进行研究,合理地提高其抗爆性能,有利于减小人们生命和财产的损失。

本文利用非线性有限元软件 ABAQUS 分别对异形钢管混凝土芯柱和异形钢筋混凝土柱中的 T 形构件在表面爆炸荷载作用下的动态响应进行了数值模拟,得到了有、无钢管以及钢管直径不同时, T 形钢管混凝土芯柱在承受爆炸荷载作用后,柱身变形的差异。在数值模拟结果的基础上,得出了 T 形钢管混凝土芯柱较普通 T 形钢筋混凝土柱抗爆性能的差异,同时分析得到了钢管直径的变化对 T 形钢管混凝土芯柱抗爆性能的影响,为异形钢管混凝土芯柱在防爆、抗爆方面的应用提供了一定的理论规律和参数数据。

1 爆炸作用的简化

在实际工程应用中,为了简化计算,常将指数型的空气冲击波压力衰减曲线简化为线性下降三角形冲击波压力衰减曲线^[3],如图 1 所示。

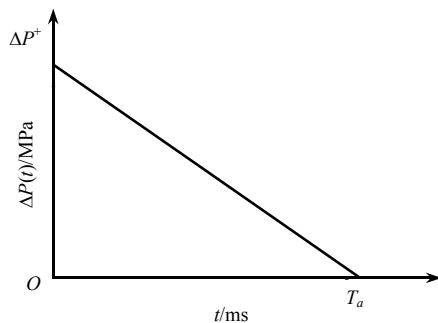


图 1 三角形冲击波压力衰减曲线

Fig.1 Triangular shock wave pressure attenuation curve

等效冲击波公式可以表示为:

$$\Delta P(t) = \Delta P^+ (1 - t / T_a) \quad (1)$$

其中: ΔP^+ 为等效冲击波侧向超压幅值; T_a 为等效冲击波作用时间。

本文选取的爆炸荷载为: $\Delta P^+ = 14.4 \text{MPa}$, $T_a = 1.67 \text{ms}$, 简化为随时间变化的均布荷载,作用在 T 形钢管混凝土芯柱的一侧。

2 应变率效应

钢材与混凝土两种材料在高应变率情况下将产生明显的应力提高现象,在爆炸荷载作用下钢筋混凝土的应变率可以达到 $100 \text{s}^{-1} \sim 1000 \text{s}^{-1}$ 。

Krauthammer 建议采用应变率为 100s^{-1} 的情况以便于计算分析^[4], 试验证明这种简化可以获得准确的结果。

对于金属类材料,采用 Cowper-Symonds 方程表示材料拉、压屈服强度与应变速率之间的关系^[5]:

$$\frac{\sigma_{dy}}{\sigma_{sy}} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{B_1} \right)^{\frac{1}{B_2}} \quad (2)$$

其中: σ_{dy} 为金属材料动拉、压屈服强度; σ_{sy} 为金属材料静拉、压屈服强度; B_1 、 B_2 为材料系数; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; 对于低碳钢,可以取 $B_1 = 40 \text{s}^{-1}$, $B_2 = 5$ 。

对于混凝土, Bischoff 总结自己和他人的试验结果,得出结论^[6-7]: 混凝土的临界应变和极限应变随应变率的变化虽然有所变化,但是变化规律不明显,并且变化幅度不大。所以本文分析时认为混凝土的临界应变和极限应变不随应变率的变化而变化。对于混凝土的应变率效应,本文是通过动力强度增大系数(DIF)来考虑,采用的是欧洲规范(CEB)提出的混凝土动力强度增大系数与应变率关系模型^[8]。

3 有限元模型的建立

本文通过有限元分析程序 ABAQUS 根据需要建立 5 根钢管直径不同的 T 形钢管混凝土芯柱和 1 根普通钢筋混凝土 T 形柱模型,对 T 形钢管混凝土芯柱的抗爆性能进行对比分析。采用适用于等高度非线性的动态时间 ABAQUS/Explicit 模块进行分析。

3.1 模型的尺寸设计

构件的受力及几何尺寸如图 2 所示。分别模拟钢管直径 $D = 69 \text{mm}$ 、 79mm 、 89mm 、 99mm 、 109mm 和无钢管 6 个构件。构件高度为 3m,假定两端为固定端,混凝土强度等级为 C40,纵向钢筋与水平箍筋均采用 HPB235 级钢筋,其中纵向钢筋直径 10mm,水平箍筋直径 8mm。

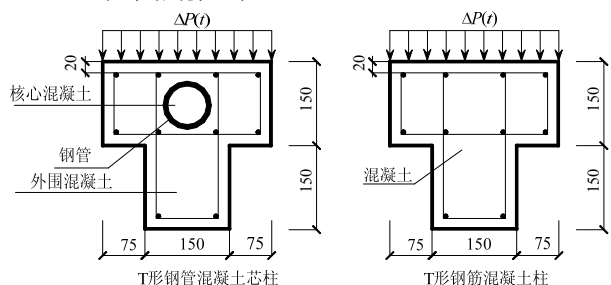


图 2 构件的尺寸及受力情况

Fig.2 Size and force conditions of the members

3.2 混凝土的力学性能及本构模型建立

混凝土的模拟, 采用 ABAQUS 中的 concrete damaged plasticity 模型。核心混凝土应力-应变关系的计算参照钢管混凝土本构关系的计算^[9]。外围混凝土的应力-应变关系采用美国 E. Hognestad 提出的应力-应变关系模型, 模型的上升段为二次抛物线, 下降段为斜直线。同时考虑应变率效应对核心及外围混凝土的影响, 通过动力增大系数(DIF)的计算, 得到动载下的应力-应变关系曲线^[10]。表 1 给出了混凝土的各项基本力学参数。

表 1 混凝土的力学性能

Table 1 The mechanical properties of the concrete

| 混凝土轴心抗压 强度标准值/MPa | 混凝土圆柱体轴心 抗压强度/MPa | 混凝土轴心抗拉 强度标准值/MPa | 混凝土密度/ 密度/(kg/m ³) |
|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 26.8 | 33 | 2.4 | 2400 |

3.3 钢材的力学性能及本构模型建立

钢材的模拟采用 ABAQUS 中提供的经典金属塑性模型(classic metal plasticity)。钢管、纵筋和箍筋所用钢材的各项力学性能以及应力-应变关系参照文献[11], 同时也考虑应变率的影响。表 2 给出了钢材的各项基本力学参数。

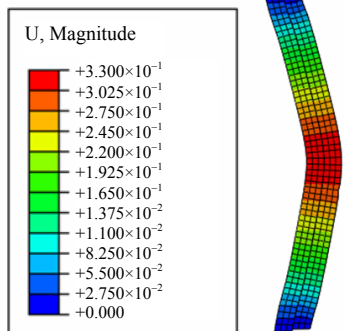
表 2 钢材的力学性能

Table 2 The mechanical properties of the steel

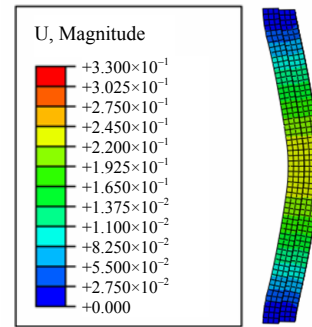
| 钢管 屈服强度/MPa | 纵筋 屈服强度/MPa | 箍筋 屈服强度/MPa | 钢材 密度/(kg/m ³) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| 252.8 | 245.9 | 244.5 | 7900 |

4 模拟结果及其分析

笔者先比较了有、无钢管时, T 形柱在承受爆炸荷载后的变形情况。如图 3、图 4 所示, 当钢管直径 $D=89\text{mm}$ 时, T 形钢管混凝土芯柱的中点侧向位移要小于普通 T 形截面柱, 其位移差值在 0.1m 左右, 说明钢管混凝土芯柱的抗爆性能优于普通异形截面柱。这是由于钢管有效的约束了核心混凝土



(a) 无钢管



(b) $D=89\text{mm}$

图 3 有、无钢管时柱的变形云图

Fig.3 Deformation nephograms of columns with and without steel pipe

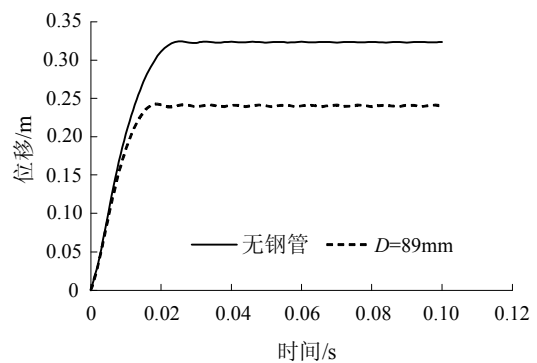


图 4 柱中点位移-时程曲线

Fig.4 Displacement curves of the column midpoints

的横向变形, 由钢管和核心混凝土组成的芯柱与钢筋骨架协同工作, 抑制了整个柱子的侧向位移。所以 T 形钢管混凝土芯柱这种结构形式有良好的抗爆性能。

图 5 给出了钢管直径不同时, 柱子在爆炸荷载作用后的中点的位移时间-曲线。表 3 给出了钢管直径不同时, 柱子中点的最大位移值。从图 4 和表 3 可得, T 形钢管混凝土芯柱在爆炸荷载作用后的侧向位移随钢管直径的增大而减小。

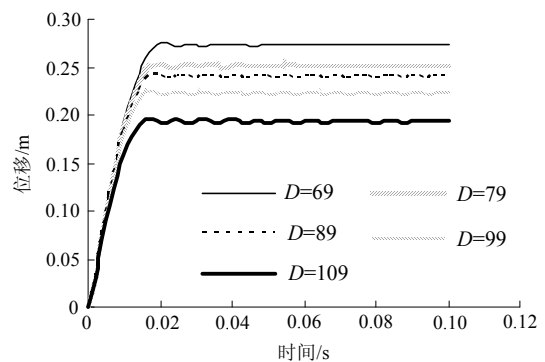


图 5 D 值不同时柱中点位移-时程曲线

Fig.5 Displacement curves of the column midpoints when D takes different values

表 3 D 值不同时柱中点位移最大值Table 3 The maximum displacements of the column midpoints when D takes different values

| 钢管直径/mm | 69 | 79 | 89 | 99 | 109 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 柱中点最大位移/mm | 274.69 | 253.09 | 242.21 | 226.24 | 195.66 |

5 结论

T 形钢管混凝土芯柱在承受爆炸荷载作用后的侧向位移要小于普通 T 形钢筋混凝土柱, 故 T 形钢管混凝土芯柱较普通 T 形钢筋混凝土柱而言有良好的抗爆性能。随钢管直径的增大, 其在承受爆炸荷载作用后的侧向位移减小, 抗爆性能越好。

参考文献:

- [1] 都浩, 李忠献, 郝洪. 建筑物外部爆炸超压荷载的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(5): 414—418.
Du Hao, Li Zhongxian, Hao Hong. Numerical simulation on blast overpressure loading out side buildings [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(5): 414—418. (in Chinese)
- [2] 王鑫. 异形钢管混凝土组合柱力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2010.
Wang Xin. Mechanical properties study on special-shaped concrete-filled steel tube compound column [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2010. (in Chinese)
- [3] 孙文彬. 爆炸荷载及爆炸对 RC 结构影响的研究[J]. 基建优化, 2007, 28(5): 148—151.
Sun Wenbin. The studies on blast loading and blast effects on RC structures [J]. Optimization of Capital Construction, 2007, 28(5): 148—151. (in Chinese)
- [4] Krauthammer T. Workshop on structural concrete slabs under impulsive loads [M]. Madrid: Proceedings of the Third International Conference on Structures under Shock and Impact, 1994: 99—106.
- [5] 杨桂通. 塑性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 79—99.
Yang Guitong. Plastic dynamic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 79—99. (in Chinese)
- [6] Bischoff P H, Perry S H. Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression [J]. ASCE: Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(6): 685—693.
- [7] Weathersbly J H. Investigation of bond slip between concrete and steel Reinforcement under dynamic loading conditions [D]. USA: The Louisiana State University, 2003.
- [8] CEB. Concrete structures under impact and impulsive loading [R]. Lausanne, Switzerland: Comite' Euro-International du Béton, 1988.
- [9] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 118—143.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structure —— Theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2004: 118—143. (in Chinese)
- [10] 王傲, 徐亚丰, 于力友. 钢管壁厚对 T 形钢管混凝土芯柱抗爆性能的影响研究[C]. 沈阳: 第九届沈阳科学学术年会, 2012: 111—115.
Wang Ao, Xu Yafeng, Yu Liyou. Study on effects of tube-thickness on antiknock property of T-shaped concrete-filled steel tube core columns [C]. Shenyang: The Symposium of the Ninth Shenyang Science Conference, 2012: 111—115. (in Chinese)
- [11] 徐亚丰, 崔来奇. 轴压 T 形钢管混凝土芯柱试验与有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2010, 26(1): 80—85.
Xu Yafeng, Cui Laiqi. Test and finite element analysis of axial compression on T-shaped concrete filled steel tubular column [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2010, 26(1): 80—85. (in Chinese)