

文章编号: 1009-3443(2008)01-0039-08

地下管道结构爆振效应和冲击破坏行为实验

马 维

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 通过小当量爆炸实验研究爆源近区地下结构动力响应和材料破坏行为。研究了地下管道结构的爆炸振动效应, 分析了混凝土材料在爆炸冲击波作用下的破坏行为。结果表明, 爆炸振动波使地下管道结构发生以瞬态径向压缩为主的变形, 以及沿轴向和环向两方向的刚体振动响应。在爆源近场随爆炸折算距离变化, 爆炸冲击波可以引起混凝土管道结构的3种破坏行为, 即结构破坏、结构和材料耦合破坏以及材料破坏行为。

关键词: 小当量爆炸; 爆源近区; 管道结构; 破坏行为; 折算距离

中图分类号: O 347. 3 **文献标识码:** A

Experimental Investigations on effects of blast vibration and behaviors of impacting failure of underground pipeline structures

MA Wei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The dynamic responses of underground pipeline structures was studied together with the failure behaviors of concrete materials in near-field blast conditions with the small normal weight of explosive charge. The blast vibration effects of the underground pipeline structures induced by blast vibration waves were researched; secondly, the failure behaviors of the concrete materials produced by blast shock waves were investigated. The results show that the blast vibration wave induces the transient radial compressive deformation as well as the axial and circumferential rigid vibrations of the underground pipeline structures. In the near-field blast tests, when the scale distance changes, shock waves bring about three types of distinct failure behaviors of concrete pipelines that is, the structure failure, both structure and material failure, and the material failure.

Key words: small normal weight of explosion; near-field of blast source; pipeline structure; failure behavior; scale distance

地下爆炸冲击波对地下结构造成的损伤和破坏, 以及爆炸振动效应对建筑物中仪器和设备正常工作产生的影响是工程领域广泛关注的课题。深层钻地弹对地下工事和建筑物的摧毁和防摧毁都涉及

到爆源近区爆炸冲击波或振动波作用下, 目标物的动力响应以及材料和结构的动态破坏性能。关于爆炸振动波作用下地下结构动力学响应研究已取得很多成果^[1-10]。但是, 相关研究较少涉及爆源近区材料和结构破坏特征和动力响应问题。事实上, 现有各种关于爆炸载荷作用下结构破坏准则和判据均是针对距爆源足够远的建筑物而言的。不能正确描述爆炸载荷对爆源近区建筑结构和材料产生的影响。因此, 开展爆炸载荷作用下爆源近区结构动力学响应和材

收稿日期: 2007-05-18

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10632100)

作者简介: 马 维(1960-), 男, 博士, 副研究员; 研究方向: 爆炸与冲击载荷作用下材料和结构破坏, 动态断裂力学, 热冲击条件下材料热-力学动态响应; Email: watwm@mech.ac.cn

料破坏行为研究具有现实意义。

本文对爆源近区地下管道结构在爆炸载荷作用下的动力学响应开展探索性实验研究。由于地下结构受到周围介质的约束,不论是结构动力学响应还是材料破坏行为,均表现出与地面结构完全不同的特征。研究表明^[1, 4, 11]: 地下结构爆炸振动特征,如振动波波长和频率等,与岩土介质地表特征基本相同;与地面结构的波长和频率相比,振动波持续时间明显缩短,振动频率显著提高。这与爆源近区地下结构动力学响应存在着明显区别^[12~15]。本文通过实验方法定量研究爆炸振动波对地下管道结构产生的振动效应;定性分析爆炸冲击波对地下管道产生的结构破坏效应对混凝土材料产生的动态破坏效应。实验主要关注小药量爆源近区地下管道结构破坏效应和混凝土材料动态破坏行为与药量和距离的关系。

1 实验过程

图1为小药量爆炸中爆源近区地下结构破坏行为实验研究示意图。这里选用普通钢筋混凝土管道模拟地下结构。实验前对管道性能进行了检验。观察到管内、外壁表面光洁平整,无蜂窝、塌落、露筋、空鼓和裂纹等缺陷。混凝土材料破坏强度为26 kN/m。管道尺寸 ϕ 为:800 mm × 2000 mm × 100 mm。为了便于随时观察管道在不同距离爆炸过程中的破坏情况,管道竖立地埋于地下。上顶面距地表面0.3 m,

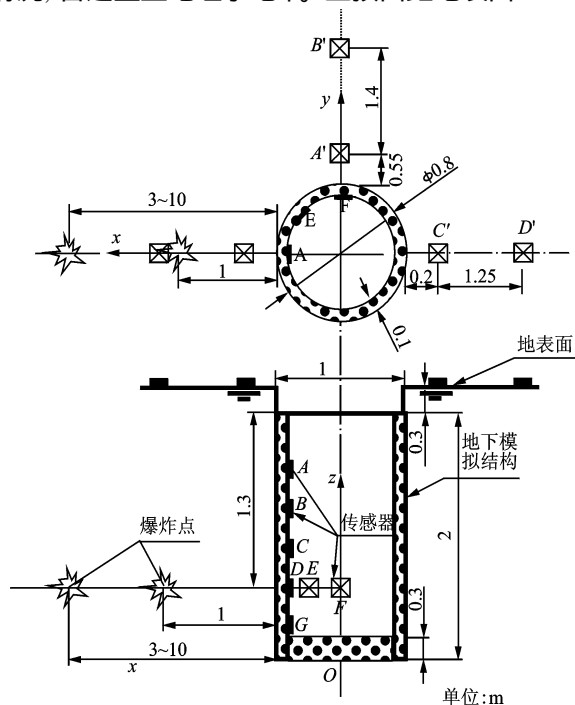


图1 地下管道结构近距离爆炸试验示意图

Fig 1 Sketch of near-field blast tests of underground pipeline structures

下底面位于地下2.3 m处。为了增加管道稳定性,管内填埋0.3 m原土。对管道内外填土分别进行夯实处理。沿管内壁一母线安置5个单点正交三向加速度传感器A、B、C、D和G。距管顶面的距离分别为:0.4、0.7、1、1.3和1.6 m。在距管顶面1.3 m圆周上,角度为45°和90°两处分别安置2个传感器E和F。爆炸距离指爆源与安置传感器母线处管外壁间与地面平行的水平距离,具体值为1、3、5、7和10 m。爆源所处平面为传感器D、E和F所在平面,即爆源距地面1.6 m。实验前在选定爆点处打直径为80 mm的垂直地孔形成送药通道,试验表明上述实验条件可以有效消除地面边界效应对爆炸振动波和地下结构动力学响应的影响,并认为爆炸过程是在含地下结构无限大土介质中发生。实验用炸药为黑索金,引爆采用普通商用雷管,并近似认为是球形装药,药量选为100 g TNT当量。爆炸振动波的测试采用TDR 5.0遥测记录仪系统和单点正交三向加速度传感器。

为研究小药量爆炸对混凝土材料产生的破坏现象,进行了药量为50、100 g TNT当量,爆炸距离为0.1、0.3 m的混凝土结构爆炸试验。由于距爆源1 m范围内,爆炸只产生冲击波,TDR 5.0遥测记录仪系统只能测定振动波,所以本文仅通过爆源近距离小药量爆炸实验定性研究爆炸冲击波对地下结构和材料产生的破坏效应。

2 结果和讨论

地下爆炸产生的体波通过岩土介质传播,其形式有压缩波和剪切波。体波随传播距离增加迅速衰减。在爆源近区对介质和结构产生较大影响,影响范围与爆炸当量有关。根据Hendron公式可以得到相应折算距离为: $D = (K/v_p)^{1/6}$,其中, $D = d/w^{1/3}$, d 和 w 分别为实测距离和药量; K 和 v_p 分别为约束因子和介质振动峰值速度。研究爆源近区地下结构动力学响应和破坏行为时应首先考虑体波作用,特别是压缩波对结构产生的影响。地下管道结构在爆炸载荷作用下有3种基本变形形式:轴向拉压;横向弯曲;环向压缩。当压缩波沿管道轴向作用时,管道变形以轴向拉压为主;当剪切体波沿管道轴向传播时可以引起管道弯曲变形;当压缩波和剪切波传播方向垂直于管道轴线时,管道中环向应力发生变化,环向变形发生。理论上不论是爆炸振动波还是冲击波均可能使地下管道发生上述3种变形。一般情形管道变形为这些基本变形的组合。

当爆炸现象引起岩土介质和地面振动时,振动效应可以直接造成地下结构的损伤破坏。对于距爆源几十米范围内的结构,这种损伤现象一般由爆炸

振动波引起。结构振动强度与土介质和结构间的相互作用有关,这种作用决定了地下结构对其周围土介质激励的响应。爆炸产生的瑞利表面波是引起地面建筑物振动的主要原因。研究表明^[16, 17]地面结构振动响应频率大致分为 2 个范围,即 2~ 30 Hz 和 30~ 450 Hz。振动频率为 2~ 30 Hz 时,大于 51 mm/s 的地面振动峰值速度和振动频率为 30~ 450 Hz 时地面振动峰值速度均可引起结构损伤。与其不同,地下结构振动效应由爆炸压缩波引起。对近距离爆炸压缩波与结构相互作用情形,已不是平面波与结构相互作用。因此结构变形和受力也不是均匀分布。这种高频高幅值短程作用的强振动载荷对地下结构

造成的破坏程度仍然是需要进一步研究的课题。在小药量近距离爆炸情形,爆炸距离为 5 m 时振动频率接近千赫兹。而在 2 m 时频率可达数千赫兹。在此爆炸距离范围,爆炸波传播速度远大于远离爆源介质中的传播速度。这是爆炸波作用下介质和结构以质点峰值速度持续振动时间较短的原因。所以高频和高速率载荷可明显降低地下结构的结构破坏效应,并且增加材料破坏的发生几率。即在结构局部区域导致材料损伤和破坏。

2.1 地下结构爆炸振动效应

图 2 为地下 1.6 m、爆炸距离为 1 m、药量为 100 g

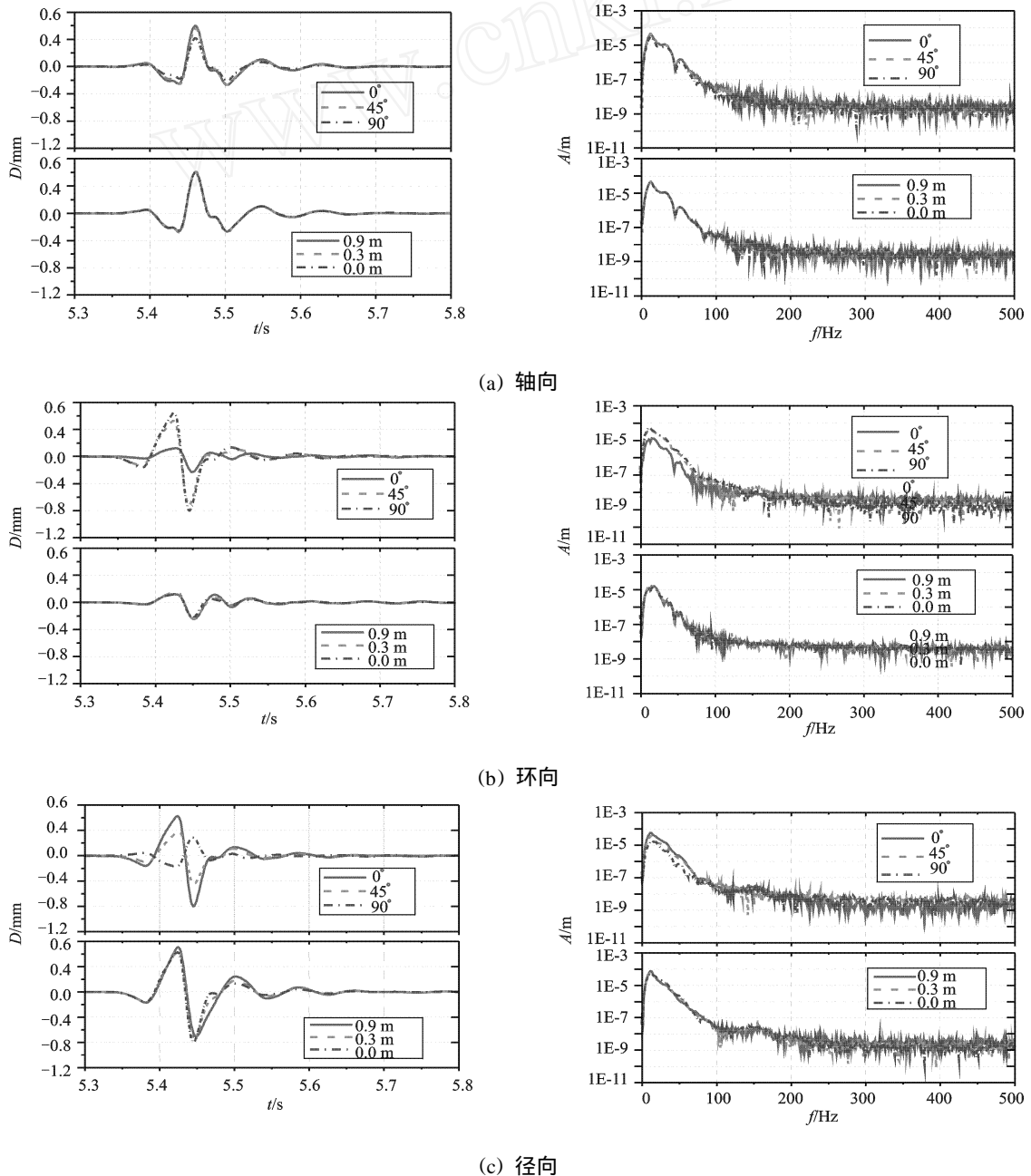


图 2 爆炸距离为 1 m 时地下管道结构位移—时间变化规律及其频域分析结果

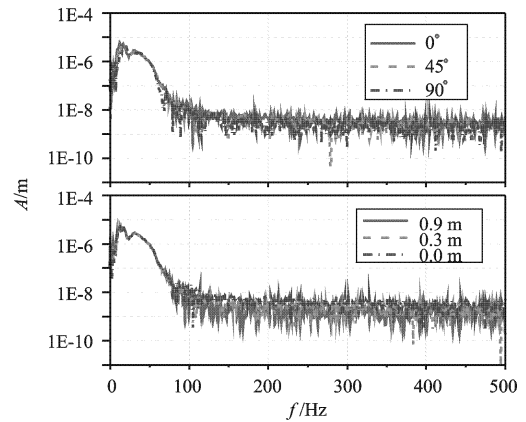
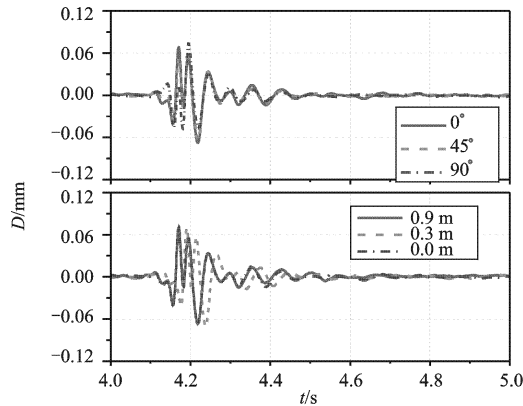
Fig 2 When blast distance is 1 m, the variation with time and corresponding frequency-domain analytic results of underground pipeline structures

TNT 当量时近距离爆炸过程中地下管道结构轴向、环向和径向位移随时间的变化规律及相应的频域分析结果。可见,爆炸产生的振动现象具有波长短和周期小的特点。说明爆炸波中仍有相当的冲击波成分对结构产生影响;3 方向位移幅值随轴向坐标 z 变化不敏感,随环向坐标 θ 变化敏感。说明管道结构的环向变形为主要形式,轴向拉压和横向弯曲变形是次要行为;管道结构轴向、环向和径向位移几乎不随轴向坐标变化,说明管道结构沿轴向主要发生刚体位移;环向位移和径向位移受环向坐标 θ 变化影响较明显。特别是在环向坐标为 0° 的D 点环向位移最小。表明在管道结构上距爆炸点最近的该点几乎没有环向位移。实际上该点相对于环向坐标是结构和爆炸载荷的对称点,其环向位移理应为零;与环向位移不同,径向位移随环向坐标增加,其幅值逐渐减小。特别是径向位移在环向坐标为 90° 时,其量值发生了正负号的变化。说明在爆炸载荷作用下,管道结构内壁在爆炸近点D 处发生拉伸变形,而在 90° 点F 处发生压缩变形。且径向位移的正负值转换点位于环向坐标的 $45^\circ \sim 90^\circ$ 。

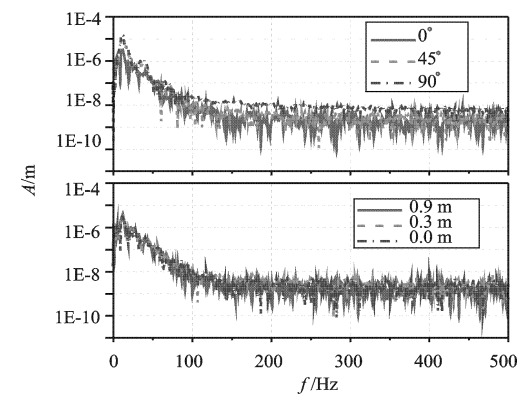
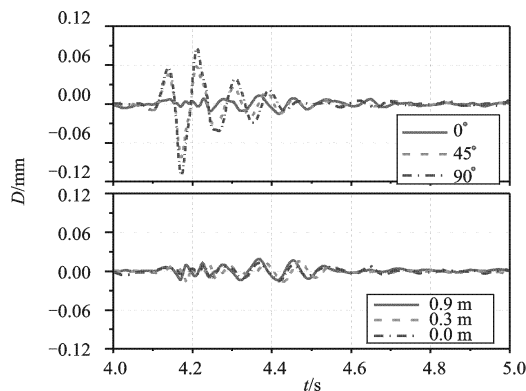
频域分析结果表明低频偏差主要出现在环向和径向位移分量中,主要由环向坐标变化引起。高频偏

差普遍存在,幅度较小,对结构响应几乎不产生影响。爆炸波产生的结构低频振动效应为主要振动现象。频率低于 100 Hz 时结构振动效应明显。频率大于 100 Hz 时振动效应较弱。说明爆炸距离为 1 m 时,爆炸冲击波对结构动力响应仍起着一定影响。频域分析结果同样表明在近距离爆炸过程中管道结构以环向压缩变形为主要动力学行为。

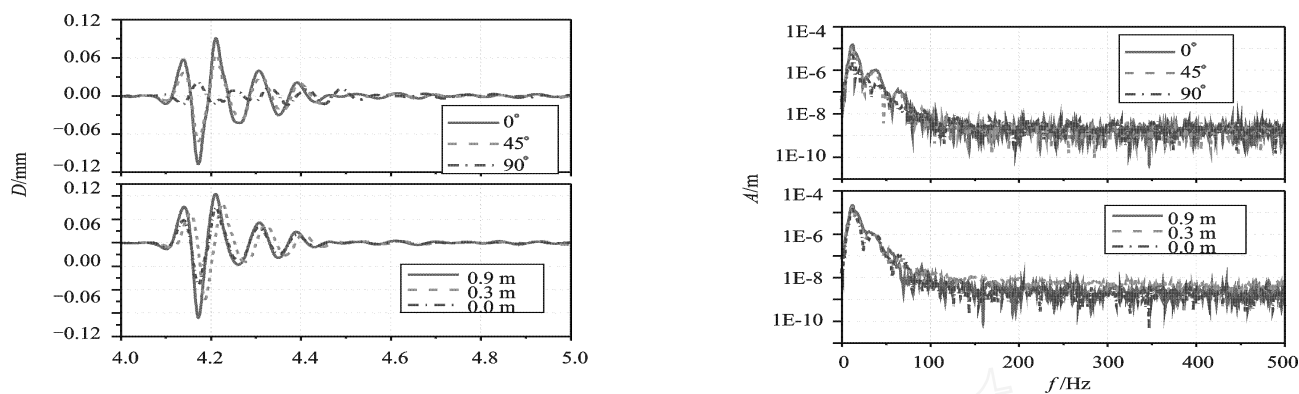
当爆炸距离为 7 m 时,管道结构仍然表现出前述爆炸距离为 1 m 时的主要动力响应特征。区别在于振动效应增加,冲击波效应减弱,即振动频率明显提高,振动波持续时间显著延长,振动幅值明显减小。这些特点可以从图3 地下管道结构3 个方向测得的位移随时间变化规律及相应频域分析结果中看到;当爆炸距离增大到 10 m 时(图4),上述管道结构近距离爆炸的动力学特征不再明显,取而代之的是典型的结构振动特征。所以爆炸距离足够大时爆炸振动效应成为引起结构破坏和损伤的主要原因。只在爆炸距离充分小时才存在爆炸波对地下结构的冲击破坏效应。这个“充分小距离”主要与爆炸当量和土介质特性相关。地下 1.6 m 药量为 100 g TNT 当量小药量爆炸实验中测得的位移和速度随时间变化的结果表明该距离一般小于 1.35 m 。



(a) 轴向



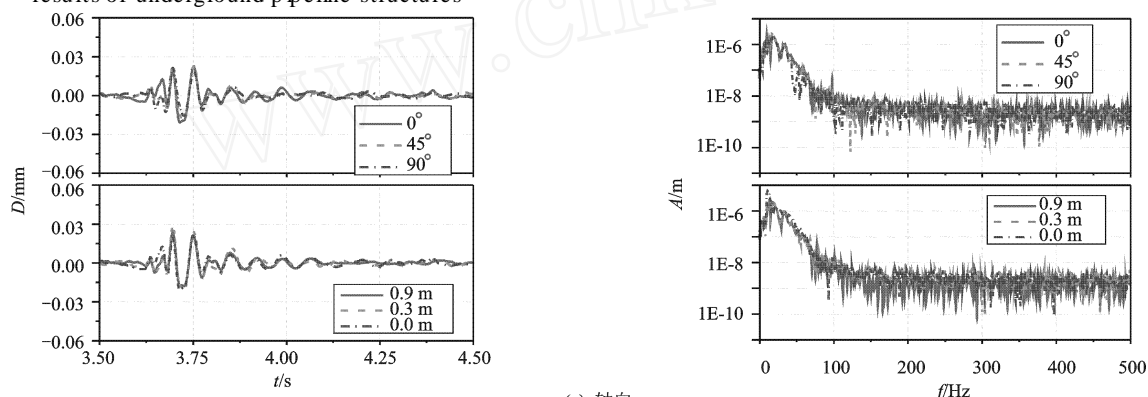
(b) 环向



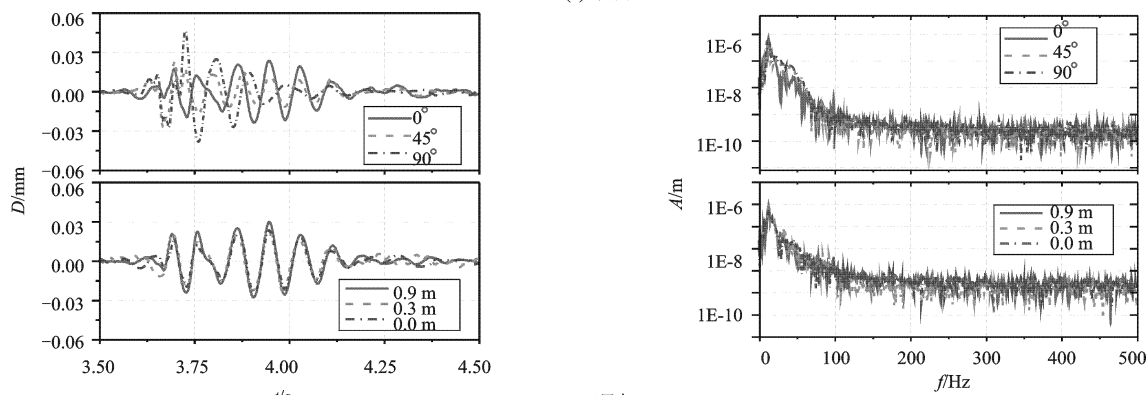
(c) 径向

图 3 爆炸距离为 7 m 时地下管道结构位移—时间变化规律及其频域分析结果

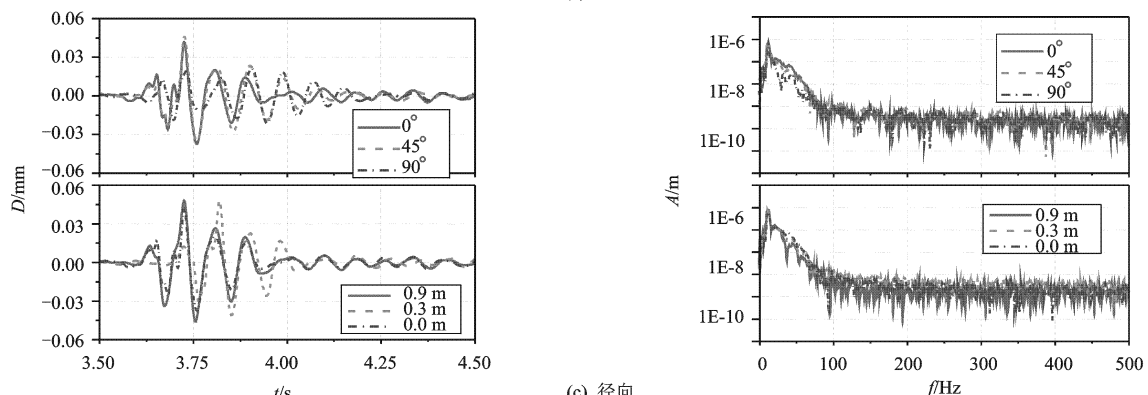
Fig 3 When blast distance is 7 m, the variation of displacements with time and corresponding frequency-domain analytic results of underground pipeline structures



(a) 轴向



(b) 环向



(c) 径向

图 4 爆炸距离为 10 m 时地下管道结构位移—时间变化规律及其频域分析结果

Fig 4 When blast distance is 10 m, the variation of displacements with time and corresponding frequency-domain analytic results of underground pipeline structures

2.2 地下结构近距离爆炸破坏效应

关于近距离爆炸载荷作用下地下结构动力响应和材料破坏效应课题研究的开展并不普遍,相关研究成果的报道也很有限。现有相关准则和判据主要针对远距离爆炸产生的爆炸振动现象,不能正确描述近距离爆炸载荷作用下结构动力响应和破坏特征。因为爆炸振动频率是设计爆炸方案和确定爆炸效果的主要依据。所以在近距离爆炸实验和工程实践中应该首先考虑爆炸振动波的频率响应,并考虑爆炸振动产生的介质和结构质点峰值速度和结构类型等因素的影响。由于近距离爆炸信息测试技术尚不成熟,只能定性地进行相关实验研究。这里为研究近距离爆炸环境地下结构的破坏效应,分别进行药量为50、100 g TNT 当量2个级别爆炸实验。爆炸距离分别取为0.1、0.3 m。

对于爆炸距离为0.3 m,炸药药量为50 g TNT 当量的爆炸试验,事后从爆腔垂直纵向抛面观察到爆腔水平最大直径为380 mm,垂直最大直径为400 mm。爆腔内没有混凝土管道裸露面积,也没有测得爆炸引起的管道振动的有效加速度信号。说明在此近距离爆炸过程中仅产生冲击波形式的动载荷,而爆炸振动波尚未形成。对混凝土管道的检查也未观察到管道有明显的结构破坏和材料损伤迹象。但是观察到爆炸冲击波载荷作用下管道发生了整体刚体位移。

在爆炸距离不变,药量为100 g TNT 当量的爆炸试验中形成的爆腔尺寸为:水平最大直径540 mm,垂直最大直径620 mm(图5);爆腔内混凝土管



图5 爆炸距离为0.1 m,药量为100 g TNT 当量的爆炸试验中形成的爆腔

Fig 5 Blasting cavity forming in the blast with blasting distance of 0.1 m and normal weight of 100 g TNT

道裸露面积尺寸为:垂直最大直径300 mm,水平最大直径160 mm。距爆腔顶部距离约为110 mm(图6);对管道的破坏情形检测结果表明这时混凝土管道内壁出现贯穿其母线的2条裂纹(图7)。2条裂纹分别位于管道横截面内由距爆炸最近点和最远点连成的直径两端。此外,也观察到管道在爆炸冲击波载荷作用下发生的整体刚体位移。但没有明显观察到混凝土管道材料损伤和动态破坏现象。探针和密度测试结果见图8。可见爆炸在土介质中产生的影响区限于爆孔周边0.4 m的范围。



图6 爆炸距离为0.1 m,药量为100 g TNT 当量爆炸试验中爆腔内混凝土管道的裸露面积

Fig 6 Naked area of concrete pipeline wall inside blasting cavity in the blast with blasting distance of 0.1 m and normal weight of 100 g TNT

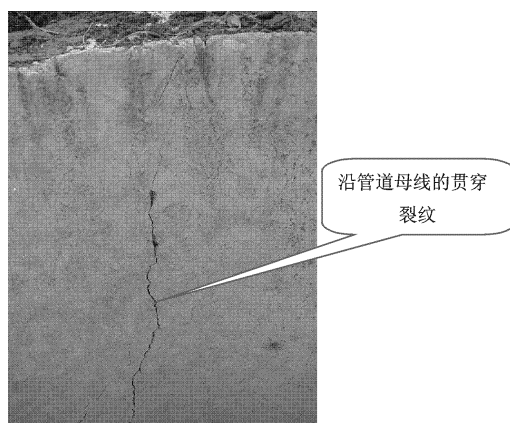


图7 爆炸距离为0.3 m,炸药药量为100 g TNT 当量的爆炸试验中混凝土管道的结构动力学响应特征

Fig 7 Structural dynamic characteristics of concrete pipeline in the blast with blasting distance of 0.3 m and normal weight of 100 g TNT

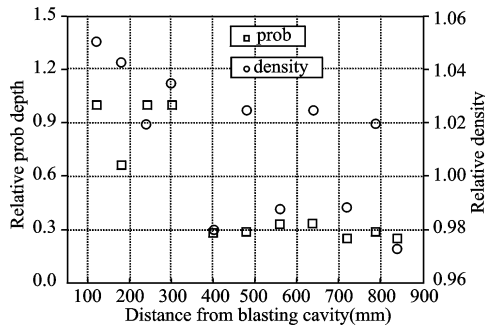


图 8 爆炸当量为 100 g TNT 爆炸试验中爆腔周围土介质性质变化

Fig 8 Changes of soil properties around blasting cavity in the blast with normal weight of 100 g TNT

在距爆源 0.1 m, 药量为 100 g TNT 当量爆炸中水泥管混凝土材料发生破坏。即在混凝土管道上形成直径约为 0.4 m 的爆炸孔。孔边沿管道轴向和与轴向近似成正负 30° 角的方向上形成不贯穿管道的裂纹。裂纹长度约为 30~ 45 cm (图 9)。爆炸冲击波载荷使混凝土材料发生粉碎性破坏, 形成粉末状物质, 且管道结构整体刚体位移不明显。

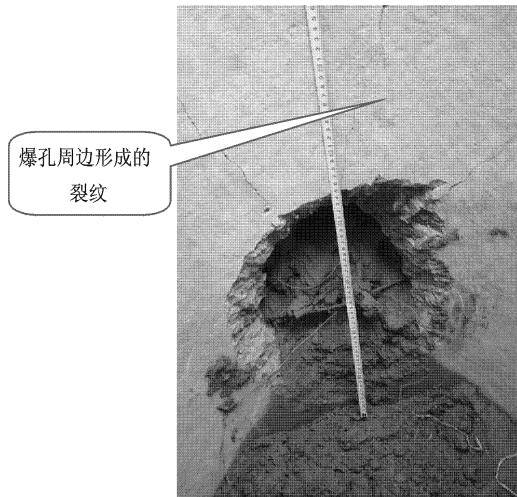


图 9 爆炸距离为 0.1 m, 药量为 100 g TNT 当量爆炸试验中混凝土材料破坏现象

Fig 9 Failure behavior of concrete material in the blast with blasting distance of 0.1 m and normal weight 100 g TNT

当距爆源仍为 0.1 m, 药量减少为 50 g TNT 当量时, 观察到爆炸冲击波载荷既造成混凝土材料破坏, 又引起管道结构破坏。材料破坏特征主要表现为管道内表面出现层裂现象, 外表面出现破碎现象 (图 10)。内表面层裂区域近似直径为 40 cm 的圆面积, 厚度约 10 mm。结构破坏特征表现为沿近爆源轴线形成贯穿母线的 2 条裂纹和多条未贯穿裂纹, 而且

还伴随着明显的整体刚体位移。

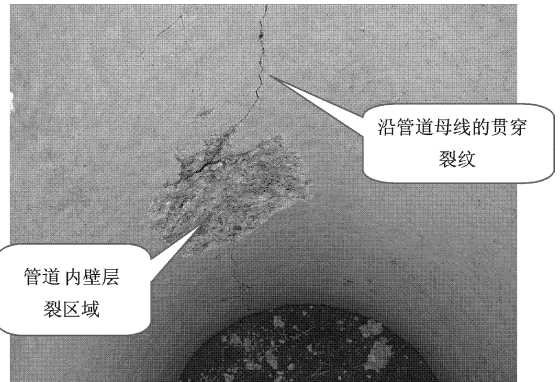


图 10 爆炸距离为 0.1 m, 药量为 50 g TNT 当量爆炸试验中混凝土材料破坏和结构动力学响应现象

Fig 10 Failure behavior of concrete material and structural dynamic responses of concrete pipeline in the blast with blasting distance of 0.1 m and normal weight 50 g TNT

3 结 语

从小药量地下结构爆炸实验结果可以得出结论: 随爆炸距离和当量的不同, 爆炸载荷对地下结构可以产生振动和冲击两种不同的动力学效应。以常用折算距离衡量, 折算距离大于 $0.22 \sim 0.25 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 时, 100 g TNT 当量的爆炸以产生振动效应为主。在折算距离小于 $0.22 \sim 0.25 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 时, 爆炸主要产生冲击效应。在折算距离小于 $1.5 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 时, 爆炸近区地下管道结构主要发生径向变形。而且, 管道上与爆源最近点为管道变形对称点。管道轴向和环向动力响应表现为相应方向上的刚体运动。在爆炸距离大于 $1.5 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$, 如等于 $2.15 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 的情况下, 管道结构动力学响应主要表现为整体振动。结构的变形特征基本消失; 地下爆炸冲击波对爆源近区混凝土结构可以产生 3 种破坏效应: 在折算距离等于 $0.065 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 时, 低强度冲击波仅引起结构破坏效应。折算距离等于 $0.027 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 时, 中强度冲击载荷既引起结构破坏, 也产生材料破坏。折算距离等于 $0.022 \text{ m} \sqrt{W}^{1/3}$ 时, 爆炸强冲击波产生的材料破坏形式表现为破碎。

参考文献:

[1] DOWD NG C H. Blast vibratio monitoring and control[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc, 1985
 [2] RICHART, F E, HALL, J R, WOODS, R D. Vibra-

- tions of soils and foundations[M]. Englewood Cliffs: New Jersey, Prentice-Hall, Inc, 1970
- [3] WISS, J F. Construction vibrations: state-of-the-Art [J]. American Society of Civil Engineers, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 107 (GT2): 167-181
- [4] YANG R L, ROCQUE P, KATSABANIS P, et al. Measurement and analysis of near-field blast vibration and damage [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1994, 12, 169
- [5] DOWDING C H. Construction vibrations[M]. Upper Saddle River Prentice Hall, 1996
- [6] BLAIR, D P. Some problems associated with standard charge weight vibration scaling laws [C]. Brisbane: Proceedings of the Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 1990
- [7] HOLMBERG R, PERSSON P A. Design of tunnel perimeter blast hole patterns to prevent rock damage [C]. London: MM Proc Tunnelling, 1979
- [8] SVENKNM R. Overcoming soil uncertainty in prediction of construction and industrial vibrations [J]. American Society of Civil Engineers, 1996, 2: 1178-1194
- [9] SVENKN, M R. Numerical methods with experimental soil response in predicting vibrations from dynamic sources [C]. Wuhan: Proceedings of the Ninth International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 1997
- [10] BARKAN D D. Dynamics of bases and foundations [M]. New York: McGraw Hill Co, 1962
- [11] MAYNE, P W. Ground vibrations during dynamic compaction [C]. Detroit: American Society of Civil Engineers, Proceedings of ASCE Symposium on Vibration Problems in Geotechnical Engineering, 1985
- [12] WOODS, D. Dynamic effects of pile installations on adjacent structures [R]. Washington: Synthesis Report, National Cooperative Highway Research Program NCHRP Synthesis 253, 1997
- [13] WOODW C, THEISSEN, J R. Variations in adjacent structures due to pile driving [C]. San Francisco: Proceedings of the GEOPLE Conference, 1982
- [14] TAYLOR L M, CHERTEP, KUSZMAUL J S. Microcrack induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 55: 301-320
- [15] YANG R L, BAWDEN W F, TALEBIS, et al. An integrated technique for vibration monitoring adjacent to a blast hole [J]. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1993, 86: 972
- [16] SISKINDE, STAGGM S, KOPPJ W. Structure response and damage produced by ground vibrations from surface blasting [R]. Washington: RI 8507, U S Bureau of Mines, 1980
- [17] SISKINDE. Vibrations from blasting [J]. International Society of Explosives Engineers, 2000

(责任编辑: 汤雪峰)