

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.017

滨海软土中爆炸冲击对盾构隧道的影 响研究*

陆文斌¹, 巴振宁², 刘冰松³, 王智恺²

(1. 天津滨海新区轨道交通投资发展有限公司, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院土木系, 天津 300072;
3. 天津大学国际工程师学院, 天津 300072)

摘要: 随着地下工程与城市管网的布设日益发展, 在规划设计阶段往往需要考虑潜在发生的安全事故影响, 确定安全距离。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 结合天津滨海新区饱和软土特点, 分析了可能发生的燃气管线爆炸所产生的冲击荷载对土中埋置盾构隧道的结构安全影响。运用有限元数值模拟, 得到了隧道与管线的间距—隧道结构振速峰值的曲线关系; 通过对标相关规范的振速限制, 得到不同燃气压力下隧道—管线的安全避让距离关系。结果表明: 随着燃气管道压强的增大, 隧道—管线的安全避让距离呈现先增大后平稳的趋势。结论对于爆破与防护工程设计均具有重要的参考价值。

关键词: 爆炸力学; 盾构隧道; 数值模拟; 饱和软土; 安全距离

中图分类号: TU471.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0125-07

Study on the Influence of Explosion Impact on Shield Tunnel in Saturated Soft Soil

LU Wenbin¹, BA Zhenning², LIU Bingsong³, WANG Zhikai²

(1. Tianjin Binhai New Area Rail Transit Investment Development Corporation, Tianjin 300072, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Tianjin International Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the increasing deployment of underground engineering and urban pipe networks, it is often necessary to consider potential safety accidents during the planning and design phase to determine the safe distance. Based on the ANSYS/LS-DYNA finite element software and the characteristics of saturated soft soil in Tianjin Binhai New Area, this paper analyzed the structural influence of the impact load generated by gas pipeline explosion on the buried shield tunnel in the soil. Through the finite element simulation, the curve relationship between the tunnel-pipeline distance and the peak velocity of the tunnel structure was obtained. By the vibration speed limit of the standard specification, the safe avoidance distance relationship of the tunnel-pipeline under different gas pressures was obtained. The analysis shows that with the increase of gas pipeline pressure, the safe avoidance distance of tunnel-pipeline increases first and then stabilizes. The conclusion has important reference value for blasting and protection engineering design.

Keywords: explosion mechanics; shield tunnel; numerical simulation; saturated soft soil; safe distance

* 收稿日期: 2019-02-15; 修回日期: 2020-01-02

作者简介: 巴振宁(1980-), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构动力响应研究。Email: bazhenning_001@163.com

引言

随着城市建设的发展,地下工程尤其是盾构隧道与城市管网的交叉更加频繁,而在城市中存在着大量的市政管道、暗渠等有限空间,燃气管道泄漏后极易形成爆炸环境空间。2013年1月23日,广西北海市某段地下管道发生爆炸,导致约80 m路面被损毁;2013年11月22日,青岛市黄岛区中石化东黄输油管道泄漏原油进入市政排水暗渠发生爆炸,造成62人死亡、136人受伤。因此,研究可能发生的燃气管线爆炸所产生的冲击荷载对土中埋置盾构隧道的结构安全影响具有很大的必要性。

J. Henrych^[1]在1987年编写的《爆炸动力学及其应用》一书中就专门论述了土中爆炸理论及其应用。H. I. Nagano^[2]通过对隧道施工现场的爆破施工进行测试实验,建立了一套评价隧道施工爆破振动等级的标准。李小雷等^[3]利用LS-DYNA有限元动力分析软件对土-混凝土介质中的爆炸进行了数值模拟,完成了不同装药位置、不同缩比模型的混凝土模型中爆炸威力的数值模拟。罗忆等^[4]讨论了国内外爆破振动安全判据的发展历程,并研究了爆炸应力波作用下新混凝土衬砌的破坏模式及安全振动速度。刘干斌等^[5]利用Ls-dyna软件模拟了土中爆炸冲击对地下隧道的影响,分析了隧道结构各部位所受爆炸冲击波荷载的特点及受载薄弱部位。程选生等^[6]通过Ls-dyna软件模拟了土体隧道衬砌结构在爆炸作用下不同部位的作用效果,分析了爆炸作用下土体隧道衬砌结构的动力响应。《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[7]对地铁隧道结构在外界荷载作用下的振动速度限值有所规定。各地方出于安全考虑,也对于燃气管道与地铁安全间距有具体的限制。

现有的研究在冲击荷载上以隧道施工爆破荷载与隧道内部爆炸荷载为主,对于埋地天然气管线爆炸对土中隧道的影响分析较少。对于天然气管线同地下隧道的安全避让距离,其与隧道衬砌结构及土质有很大关系,目前仍缺少明确的规定值。

为了解可能发生的燃气管线爆炸所产生的冲击荷载对土中埋置盾构隧道的结构安全影响,本文运用ANSYS/LS-DYNA有限元软件,验算隧道结

构在爆炸冲击下的动力响应,并研究天然气管线同地下隧道的安全避让距离。以此优化减爆措施设计并指导隧道管片设计,能够有效降低油气管道爆炸可能造成的隧道结构损伤。

1 模型与计算方法

1.1 计算模型

已有研究表明^[8],当天然气管线爆炸长度超过30 m时,对于爆炸产生的压缩波的压强峰值,其变化趋于稳定。所以,结合有限元建模需求和运算实际情况,选取管道长度为30 m进行运算分析。同时隧道管道外径为6.6 m,隧道距离模型边界的距离大于隧道直径的3倍时,可以很好的消除模型尺寸大小带来的边界效应。为研究不同工况情况,管道直径分别取为0.25、0.5、1、1.5 m,燃气管线位于单侧盾构隧道的正上方位置。

根据管片构造设计图,盾构隧道管片采用solid单元建模,隧道内径为5.9 m,外径为6.6 m,单一管片纵向长度为1.5 m,建模效果如图1所示。

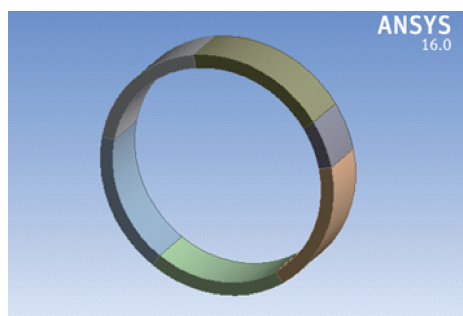


图1 隧道单一管片模型构造示意

Fig.1 Sketch of the single tunnel segment model

考虑到爆炸荷载冲击的影响范围,在隧道中间段建立了9段管片,共计12 m长,其余两端简化为圆筒近似表示;作为两向并行的盾构隧道结构,两个隧道之间的净距为6.6 m,隧道在土体中的埋深为16 m,建模效果如图2所示。

依据隧道管片设计,管片接缝通过M30螺栓连接。在有限元建模中采用Beam单元建模,包括环向螺栓和纵向螺栓两种分布,螺栓形状为一段圆弧,环向接缝螺栓和纵向接缝螺栓如图3所示。

最终土层模型建立尺寸为60 m(垂向深度) \times 30 m(轴向长度) \times 50 m(水平宽度),模型效果如图4(a)所示。在ANSYS中对于土体采取solid单元建

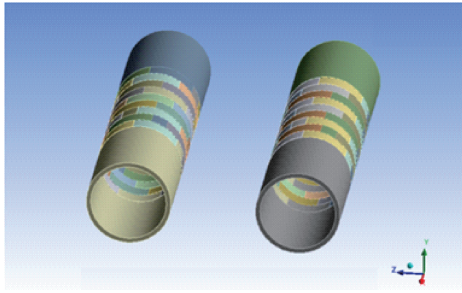
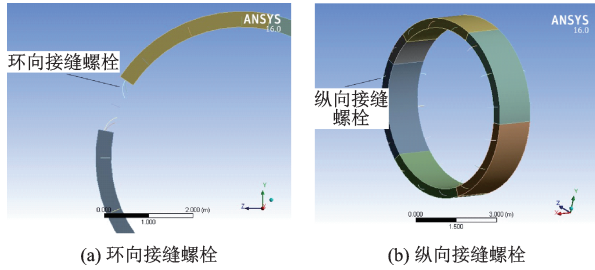


图2 双侧隧道管片模型构造示意

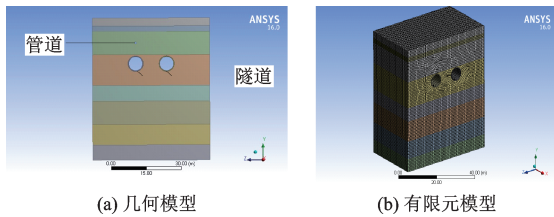
Fig.2 Sketch of double-sided tunnel segment model



(a) 环向接缝螺栓 (b) 纵向接缝螺栓

图3 接缝螺栓连接示意

Fig.3 Sketch of seam bolt connection



(a) 几何模型 (b) 有限元模型

图4 隧道-土层-管道模型示意

Fig.4 Tunnel-soil-pipe model diagram

模。在进行动力分析时,为避免模型边界反射波对求解结果的影响,在模型的底面及侧面添加了无反射边界条件,从而更好的模拟了地层的半无限性。所有模型均按照六面体单元划分,最终划分有238 226个单元,271 500个节点,隧道-土层-管道的有限元模型如图4(b)所示。

1.2 材料参数及本构模型

爆炸荷载施加的合理性直接影响到结果的可靠性,本研究采用LS-DYNA软件中的CONWEP爆炸荷载模型^[9]。该模型通过定义TNT装药量(假定为极小的球形装药)、模型迎爆面、引爆位置、起爆时间和起爆方式等来计算出施加作用在结构表面上的爆炸荷载,可以避免采用ALE算法求解流固耦合问题时的低效率问题,同时在计算精度上较直接将爆炸荷载简化成线性节点力的方法有较大的

提高,是研究结构在爆炸荷载作用下的动力响应问题的一种较理想的方法。*LOAD_BLAST关键字中的爆炸荷载计算如下:

$$P(t) = P_{ref} \cos^2 \theta + P_{in} (1 + \cos^2 \theta - 2 \cos \theta) \quad (1)$$

$$P_{ref} = P_{r0} (1 - t/t_0) e^{-at/t_0} \quad (2)$$

$$P_{in} = P_{s0} (1 - t/t_0) e^{-bt/t_0} \quad (3)$$

式中, θ 为爆炸入射角; P_{ref} 为反射压力; P_{in} 为入射压力; P_{s0} 为入射超压峰值; P_{r0} 为反射超压峰值; a 为反射压力衰减系数; b 为入射压力衰减系数; t_0 为正压作用时间。

盾构隧道衬砌管片的混凝土本构采用HJC(Holmquist-Johnson-Cook)模型,该本构模型能较好描述混凝土类材料大应变、高应变率和高压强条件下的力学行为,综合考虑了应变率、损伤演化效用、围压效应和压碎、压实效应的影响。其等效屈服强度是压力、应变率及损伤的函数,而压力是体积应变(包括永久压垮状态)的函数,损伤积累是塑性体积应变、等效塑性应变及压力的函数。混凝土材料的基本力学参数见表1。

表1 C50混凝土基本参数

Table 1 Parameters of C50 concrete

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
2 500	34.5	0.2

选取PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY本构模型用作螺栓的材料模型,此模型常被选用以描述钢筋材料的弹塑性特点,具体参数见表2。

表2 螺栓材料基本参数

Table 2 Parameters of bolt material

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa
7 800	210	0.3	640

土体模型采用LS-DYNA软件材料库中的SOIL-AND-FOAM-FAILURE本构模型,地质土层参数参考天津滨海新区轨道交通Z2线滨海机场至北塘段的岩土工程勘察成果。该土体模型的主要材料参数取值见表3,土体与模型一致为8个土层。

1.3 计算方法与工况

《城镇燃气设计规范》^[10]中对燃气管道进行了分级设置,根据燃气压力分别划分为低压燃气管

表3 土体主要力学参数

Table 3 List of mechanical parameters of soil

土层	层厚/ m	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	动弹性模量/ MPa
1	3.4	1 930	0.427	68
2	2.3	1 910	0.435	35
3	9.9	1 900	0.407	100
4	12.9	1 970	0.415	190
5	6.6	1 990	0.410	280
6	9.9	2 010	0.414	690
7	8.6	2 020	0.419	810
8	6.4	2 050	0.400	1 072

道、中压燃气管道B、中压燃气管道A、次高压燃气管道B、次高压燃气管道A、高压燃气管道B、高压燃气管道A七个级别。因此,在运算分析中,选取燃气管道压强4.0、2.5、1.6、0.8、0.4、0.2、0.01 MPa为7组工况进行后续分析。由于所选取的7个管道压强正好是城镇燃气设计压力分级的各节点,所以可以完整的覆盖低压一次高压一高压各类别,具有很好的代表性与参照性。

根据研究^[8],在工程设计时,往往把爆炸简化成一个点的起爆更加实用高效。为了计算统一与便捷,通常把爆炸冲击荷载等效成一定当量的TNT炸药,通过二者释放能量的一致性来进行计算。理论上可燃气体与助燃气体以化学计量比浓度混合时,爆炸强度大,故假定氢氧按化学计量比浓度配合。首先通过热力学计算得到可燃气体释放的热量,然后采用总能量相同等效方法,将这些热量等效成释放同样能量的一定质量TNT^[11]。在具体计算过程中,会按照之前的基础和工况条件进行燃气量的计算,管线长度为30 m,管径及管道压强均随工况变化而变化。

首先根据维里气体状态方程得到燃气管线中的天然气气体物质量:

$$n = \frac{PV}{ZRT} \quad (4)$$

标准状况下,根据燃气管道发生化学爆炸的化学反应方程式,可得到每摩尔烟气释放的能量为890.31 kJ,而1摩尔甲烷完全燃烧产生10.52摩尔的烟气。据此可得到燃气爆炸释放能量:

$$E = \frac{n}{n_0} E_0 \quad (5)$$

最后,单位摩尔的TNT爆炸后能量为4 250 kJ,可通过能量守恒等效转化得到对应TNT当量:

$$W_{TNT} = \frac{E}{E_{TNT}} \quad (6)$$

据此,根据不同的燃气管道直径与管道压强,可得到一系列相应的等效TNT当量值。由于燃气管道直径一般在200 mm~2 m,选取管道直径分别为0.25、0.5、1、1.5 m共4种;同时由于选取管道压强为7种,组合之下,总计有28种起爆量(表4)。

将这些当量值作为起爆荷载的参数进行工况设置,可以得带对应的28种基本工况,并以此进行爆炸模拟分析。

表4 不同燃气管道条件下的起爆量计算

Table 4 Calculation of the amount of initiation under different gas pipeline conditions 单位:kg

管道压强/ MPa	管道直径/m			
	0.25	0.5	1	1.5
4	43.04	172.16	688.63	1 549.43
2.5	26.90	107.60	430.40	968.39
1.6	17.22	68.86	275.45	619.77
0.8	8.61	34.43	137.73	309.89
0.4	4.30	17.22	68.86	154.94
0.2	2.15	8.61	34.43	77.47
0.01	0.11	0.43	1.72	3.87

2 数值模拟的结果与分析

2.1 计算结果分析

在抗爆模拟分析中,通过改变隧道—燃气管线的间距来获得不同工况下的运算结果,来进行隧道动力响应的评判。考虑到隧道埋深为16 m,对隧道与管线间距以1 m为间隔进行相应起爆量下的爆炸模拟。在爆炸荷载作用下隧道结构的位移响应与振速响应分别如图5与图6所示。由于燃气管线位于单侧隧道的正上方,因此动力响应最大处为隧道拱顶,其动力响应会明显呈现先快速上升后缓慢下降的趋势。

针对最危险的隧道拱顶中间处的单元进行分

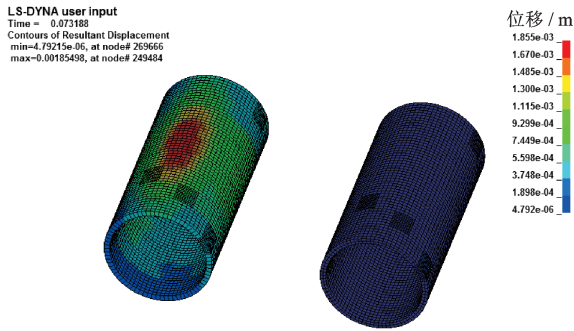


图5 隧道结构位移响应云图

Fig.5 Contour of tunnel displacement response

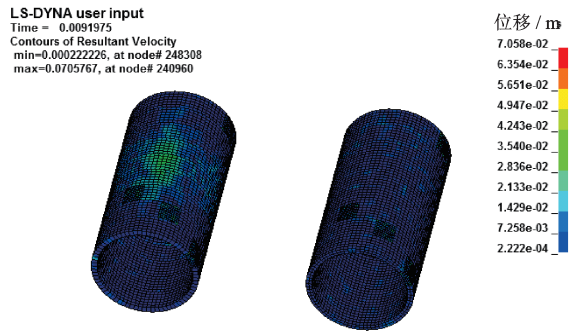


图6 隧道结构振速响应云图

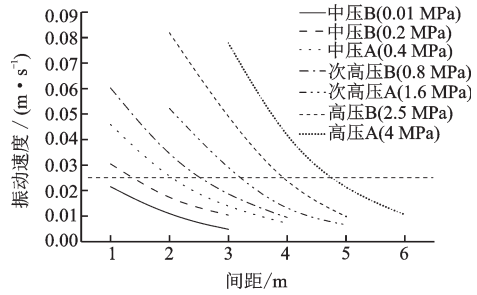
Fig.6 Contour of tunnel vibration velocity response

析,根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[7]规定,隧道结构的振速控制标准为2.5 cm/s。由于距离控制标准较远处的工况参考性不大,为了计算高效,选取在控制标准附近的3~4种间距进行统计,最终得到不同工况的模拟运算结果,提取其隧道结构处的振速峰值。将上述结果采用B样条曲线进行拟合,即可得到一定起爆量下,隧道与管线距离—振速峰值的曲线关系。

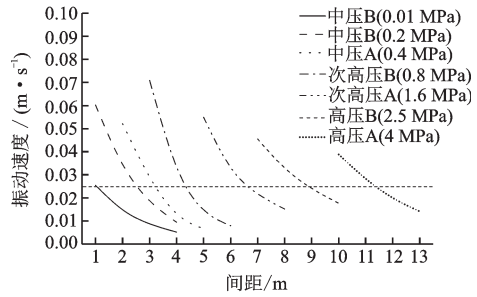
图7为管道直径0.25、0.5、1、1.5 m时各工况下的隧道管线间距—隧道结构振速峰值曲线。由于土层性质的不连续性,振动速度随间距的变化也会出现不稳定的情况。整体来看,各曲线的走势基本一致,振动速度随着间距的增大呈现下降越来越缓的趋势。在管道直径较小时,不同管道气压下,振动速度与间距的曲线关系比较接近,彼此间区分度不高。在相同管道直径下,管道气压越高的工况,其振动速度对间距的变化越敏感;管道气压越低的工况,其振动速度随间距的变化越快趋于平缓。

2.2 安全避让距离确定

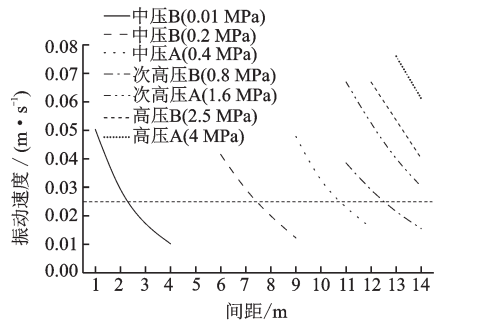
在最终的安全避让距离上,考虑到工程实际的



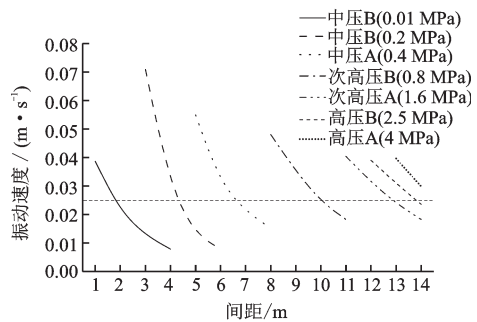
(a) 管道直径为0.25 m



(b) 管道直径为0.5 m



(c) 管道直径为1.0 m



(d) 管道直径为1.5 m

图7 不同工况条件下间距—隧道结构振速峰值曲线

Fig.7 Curves of distance and tunnel peak velocity of each tunnel under different working conditions

复杂性,在16 m埋深隧道的拟合结果上向上精确到0.5 m。因此,通过对照2.5 cm/s的控制标准,即可得到相应压强下隧道—管线的避让安全距离。最终,不同燃气压力下隧道—管线的避让安全距离可整理成表格,并进一步绘制得到不同燃气压力下隧道—管线的避让安全距离关系曲线。管径分别为0.25、0.5、1、1.5 m时,7种压强分别对应的避让

距离结果见表5。

图8给出了管径为0.25、0.5、1、1.5 m时不同燃气压力下隧道—管线的安全避让距离结果。可以看出:在某一固定管径下,随着管道压强的增大,安全避让距离呈现先增加后平稳的趋势;而且随着管径的增大,安全避让距离随着压强的增加,更早呈现出平稳的趋势。

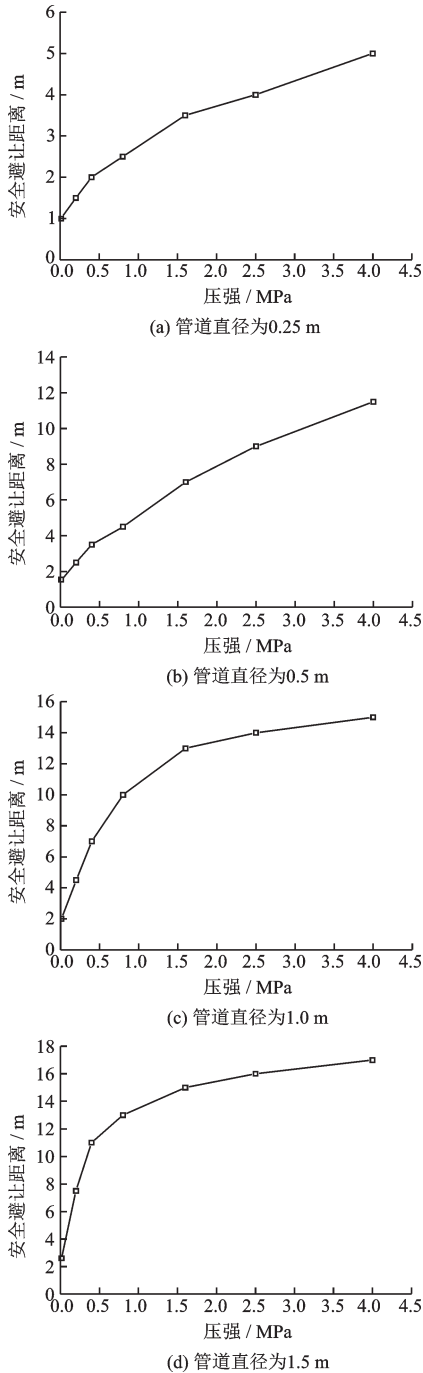


图8 不同工况条件下隧道—管线的安全避让距离

Fig.8 Safety avoidance distance of tunnel-pipeline under different working conditions

表5 不同燃气管道条件下的安全避让距离

Table 5 Safe avoidance distance under different gas pipeline conditions 单位:m

管道压强/ MPa	管道直径/m			
	0.25	0.5	1	1.5
4	5.0	11.5	15.0	17.0
2.5	4.0	9.0	14.0	16.0
1.6	3.5	7.0	13.0	15.0
0.8	2.5	4.5	10.0	13.0
0.4	2.0	3.5	7.0	11.0
0.2	1.5	2.5	4.5	7.5
0.01	1.0	1.5	2.0	2.5

3 结 论

利用动力有限元软件LS-DYNA,模拟了可能发生的燃气管线爆炸产生的爆炸冲击对饱和软土中盾构隧道的安全影响。根据计算,分析了各种燃气管道直径与压强下,不同的隧道—管线间距对应的隧道结构振速响应规律。分析表明:相同条件下,振速会随间距的增大呈现快速下降到趋于平缓的变化;而管道压强越大,振速对间距的变化越敏感;管道直径越小,振速随间距的变化趋势越规律。

依据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》中对于隧道结构振速2.5 cm/s的控制标准,求出了各个工况相应的隧道—燃气管线间距限值,最终得到了各种燃气管道直径下,不同燃气压强对应的隧道管线间的安全避让距离关系。研究中以天津滨海新区土层为依据,结论可作为深入研究隧道—管线安全避让距离的依据,也对类似的工程情况具有很大的借鉴意义,可以应用于爆破与防护工程设计。

参考文献:

- [1] Henrych J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987.
Henrych J. The dynamics of explosion and its use [M]. Xiong J G. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [2] Nagano H I. Blast vibration control in residential area [R]. Electric Power Research Institute EPRIEL, 1979: 263-268.

- [3] 李小雷, 聂建新, 覃剑锋, 等. 含铝炸药在混凝土中爆炸效应的数值模拟研究 [J]. 爆破, 2012, 29(3): 109-114.
Li X L, Nie J X, Qin J F, et al. Numerical simulation of explosion effects in concrete by aluminized explosives [J]. Blasting, 2012, 29(3): 109-114. (in Chinese)
- [4] 罗 忆, 卢文波, 陈 明, 等. 爆破振动安全判据研究综述 [J]. 爆破, 2010, 27(1): 14-22.
Luo Y, Lu W B, Chen M, et al. View of research on safety criterion of blasting vibration [J]. Blasting, 2010, 27 (1): 14-22. (in Chinese)
- [5] 刘干斌, 郑荣跃, 周 晔. 爆炸荷载作用下软土隧道动力响应数值模拟 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2009, 22(2): 263-267.
Liu G B, Zheng R Y, Zhou Y. Numerical model for dynamic response of tunnel in clay under explosive loading [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2009, 22 (2) : 263-267. (in Chinese)
- [6] 程选生, 苏佳轩. 爆炸作用下土体隧道衬砌结构的动力响应 [J]. 应用力学学报, 2012, 29(1): 104-108, 122.
Chen X Sh, Su J X. Dynamic response of soil tunnel lining structure under explosion [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29 (1) : 104-108, 122. (in Chinese)
- [7] 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T202—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJ/T202—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [8] Zhou Z, Zhou J, Fan H, et al. Shock wave pressure analysis of underground structure associated with buried natural-gas pipeline explosion [C] // International Conference on Architectural Engineering and Civil Engineering, Paris: Atlantis Press, 2016: 311-314.
- [9] 倪晋峰. 单层球面网壳基于 CONWEP 外爆响应分析及试验设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Ni J F. Response analysis of single-layer reticulated domes subjected to external blast loading using CONWEP and experimental design [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 城镇燃气设计规范: GB50028—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Code for design of city gas engineering: GB50028—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 牟 杰, 张金锋, 黄 武, 等. 城市燃气管道爆炸模拟及后果分析方法研究 [C] // 2016 安全科学与工程技术研讨会论文集. 浙江工业大学: 浙江省安全工程学会, 2016: 7.
Mou J, Zhang J F, Huang W, et al. Research on explosion simulation and consequence analysis method of urban gas pipeline [C] // Proceedings of Seminar on Safety Science and Technology 2016. Zhejiang University of Technology: Zhejiang Society of Safety Engineering, 2016: 7. (in Chinese)
- [12] 林 枫. 软土地铁区间隧道结构抗爆承载能力的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
Lin F. Study on bearing capacity of subway tunnel in soft soil under shock wave [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [13] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 地下箱形结构在爆炸冲击荷载作用下的动力反应分析 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2007(5): 520-524.
Liu J B, Du Y X, Yan Q Sh. Dynamic response of underground box structures subjected to blast load [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007 (5): 520-524. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)