

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.026

淤泥-岩石地层爆破临近供水管道振动特征*

尹涛^{a,1b}, 吉凌^{1a}, 李洪伟^{1b}, 周传波², 何志伟^{1b}, 郑长青³

(1. 安徽理工大学 a. 土木建筑学院; b. 安徽省爆破器材与技术工程实验室, 淮南 232001;
2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074; 3. 珠海爆破新技术开发有限公司, 珠海 519099)

摘要: 盾构机通过淤泥-岩石地层时,可以在地面钻孔预先爆破破碎岩石,但是淤泥-岩石地层爆破产生的振动威胁爆区周围供水管道的安全。通过对爆破振动进行现场测试和数值模拟,首先验证爆破现场材料的物理和力学参数,然后研究了爆区附近供水管道的动态响应。得出如下结论:在管道轴向上,节点峰值速度(PPV)随着距爆炸源水平距离的增加而减小;在管道正上方地表沿管道轴向,节点峰值速度也随着距爆炸源水平距离的增加而减小;管道上节点峰值速度与管道上方地面的节点峰值速度之间存在函数关系。管道内壁最大PPV是最小PPV的3.97倍,管道内壁90°处的节点峰值速度最高,管道外壁最大PPV是最小PPV的1.03倍,管道外壁150°处的节点峰值速度最高,每个节点的PPV彼此不同,供水管道内壁PPV大于外壁,内壁PPV变化较大,但外壁PPV相对接近。单元的最大峰值有效应力是单元的最小峰值有效应力的4.06倍,在管道外壁240°~270°处单元的峰值有效应力最高。本研究的结论可以为确定爆区周围供水管道的安全性提供参考。

关键词: 振动特征; 供水管道; 岩石爆破; 淤泥-岩石地层; 数值模拟

中图分类号: TD236 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)03-0222-10

Vibration Characteristics of Water Supply Pipeline near Rock Blasting in Silt-rock Strata

YIN Tao^{1a,1b}, JI Ling^{1a}, LI Hong-wei^{1b}, ZHOU Chuan-bo², HE Zhi-wei^{1b}, ZHENG Chang-qing³

(1. a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Anhui Engineering Laboratory of Explosive Materials and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
3. Zhuhai Baopoxin Research & Development Co., Ltd., Zhuhai 519099, China)

Abstract: Although the rock stratum can be blasted into blocks in advance on the ground when the shield machine bores through silt-rock strata, the vibrations generated by blasting in silt-rock strata will threaten the safety of the water supply pipeline near the blast area. Based on the blasting vibrations of field tests and numerical simulations, the physical and mechanical parameters of the materials on sites were verified, and the dynamic response of the water supply pipeline near the blast area was studied. The research results show that the peak particle velocity (PPV) decreases with the increase of the horizontal distance from the explosion source on the pipeline along the axial direc-

收稿日期 (Date of reception): 2023-03-14

网络首发日期 (Published online): 2023-09-15

作者简介: 尹涛 (1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事爆破工程与岩土动力学研究工作, (E-mail) 1095685591@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (41972286); 安徽理工大学人才引进基金 (13190208, 13220458); 安徽理工大学青年基金 (QNYB2021-01); 安徽理工大学安徽省爆破器材与技术工程实验室 (AHBP2022B-05)

About the author: YIN Tao (1989-), male, Ph. D, lecturer, mainly engaged in blasting engineering and geotechnical dynamics research, (E-mail) 1095685591@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41972286), the Fund for Talent Introduction, Anhui University of Science and Technology (No. 13190208, No. 13220458), the Youth Fund, Anhui University of Science and Technology (No. QNYB2021-01), Anhui Engineering Laboratory of Explosive Materials and Technology, Anhui University of Science and Technology (No. AHBP2022B-05)

tion. The PPV also decreases with the increase of the horizontal distance from the explosion source on the ground surface above the pipeline along the axial direction, and there is a relationship between the PPVs of the pipeline and the PPVs of the ground surface above the pipeline. The maximum PPV of the pipeline's inner wall is 3.97 times the minimum PPV, and the PPV is the highest at 90° of the inner wall. Meanwhile, the maximum PPV of the pipeline's outer wall is 1.03 times the minimum PPV, and the PPV is the highest at 150° of the outer wall. Besides, the PPV of each node is different from that of the other, and the PPV on the pipeline's inner wall is more significant than that on the pipeline's outer wall. Although the PPV on the pipeline's inner wall changes significantly, the PPV on the pipeline's outer wall is relatively close. The maximum peak effective stress of the element is 4.06 times the minimum peak effective stress of the element, and the peak effective stress of the element is the highest at $240^\circ \sim 270^\circ$ of the pipeline's outer wall.

Key words: vibration characteristic; water supply pipeline; rock blasting; silt-rock strata; numerical simulation

盾构法是一种先进的地铁施工方法,具有开挖速度快、机械化程度高、施工安全性好等优点,但在地铁隧道断面内经常出现复合地层,如葡萄牙 Oporto 地铁 C 线和 S 线^[1]、新加坡 Kranji 隧道^[2]、伊朗 Tabriz 地铁 1 号线等^[3]。当盾构机通过淤泥-岩石地层时,隧道断面中的岩层不易破碎,而断面中淤泥层很容易进入土仓,当密封土仓内的土压力不平衡时,容易发生大规模沉降和坍塌事故。为了解决这个问题^[4,5],地面钻孔预先爆破破碎岩石,破碎后的石块最大直径需要小于 30 cm,然后碎石块可以通过 TBM 刀盘的开口顺利进入土仓,最后通过螺旋输送机排出。然而,爆破破碎岩石会产生振动,振动威胁临近供水管道的安全运行。

由于城市管道系统错综复杂,许多专家通过现场测试、理论分析和数值模拟等方法研究了管道系统在爆炸荷载下的动态响应。王栋等研究了钻爆法施工时周边埋地管道的动态响应特征^[6]。Won J H 等通过现场测试和数学分析研究了爆炸荷载下多层管道的动态响应特征^[7]。Jin H 等讨论了地铁隧道钻爆法施工过程时埋地管道的动态响应特征^[8]。朱斌等通过动态测试研究了爆破期间管道和管道上方表层土壤的振动特性^[9]。张震等研究了地铁站通道爆破开挖过程中相邻埋地管道的动态响应^[10]。Zhang J 等研究了土-岩石地层中爆破作用下埋地管道的破坏特征^[11]。Parviz M 等调查了不同地质条件和不同炸药下爆破造成的管道损坏特征^[12]。钟冬望等通过现场实验和理论分析讨论了埋地聚乙烯管道在爆炸荷载下的动态响应^[13]。Mokhtari M 等通过数值模拟研究了爆炸荷载下埋地 X65 钢管的动态响应^[14]。Song K 等通过实验和数值模拟研究了 X70 钢管在爆炸荷载下的动态响应^[15]。张黎明等调查了爆破施工期间临近地下管道的安全距离^[16]。Giannaros E 等使用 LS-DYNA 研究了爆源距

离和爆炸量对复合管动态响应的影响^[17]。Abedi A S 等将管道建模为梁^[18],并计算其在爆炸波等效动荷载下的位移。Zhong D 等研究了冲击波作用下聚乙烯管道的动态响应^[19]。Shi C 等研究了隧道爆炸荷载下既有埋地管道的安全性^[20]。Seyed-Kolbadi S M 等研究了地面爆炸时埋地天然气管道的动态响应^[21]。Guan X 等研究了临近隧道爆破开挖引起的输水管道的响应^[22]。综合目前国内外的研究,对淤泥-岩石地层中岩石爆破附近供水管道的振动特性研究很少。

以珠海地铁盾构区间岩石爆破工程为背景,通过现场测试和有限元数值模拟,研究了淤泥-岩石地层中岩石爆破临近供水管道的振动特征。研究结果为确定淤泥-岩石地层爆破周围供水管道的安全距离提供参考。

1 工程概况和振动测试

1.1 工程地质及爆破参数

横琴站和横琴北站之间的盾构区间位于珠海市。地铁隧道为双洞单线,左线需要爆破破碎隧道起讫里程为 $DK10+320 \sim DK10+414$ 、 $DK10+587 \sim DK10+703$,右线需要爆破破碎隧道起讫里程为 $YDK10+380 \sim YDK10+507$ 、 $DK10+668 \sim DK10+724$ 。两条隧道地质剖面图分别如图 1 所示。

从地面到区间隧道有人工填土、淤泥、弱风化花岗岩三个地层,人工填土层厚 0.30 ~ 15.10 m,淤泥层厚 0.50 ~ 32.30 m,隧道断面的岩层厚度 0.40 ~ 4.30 m。由于盾构隧道穿过淤泥-岩石地层,隧道横截面中的岩层需要爆破成碎石块。工程现场的装药如图 2 所示,爆破前和爆破后的岩心如图 3 所示。

从地表到盾构隧道有三个地层。第一个地层为人工填土,第二个地层为淤泥,第三个地层是弱风化花岗岩。炮眼直径为 14.6 cm,炮眼深度为

3400 cm,采用连续装药,装药长度为隧道断面范围内岩层厚度,隧道断面的岩层厚度为0.5 m。炮眼

布置示意图如图4所示。

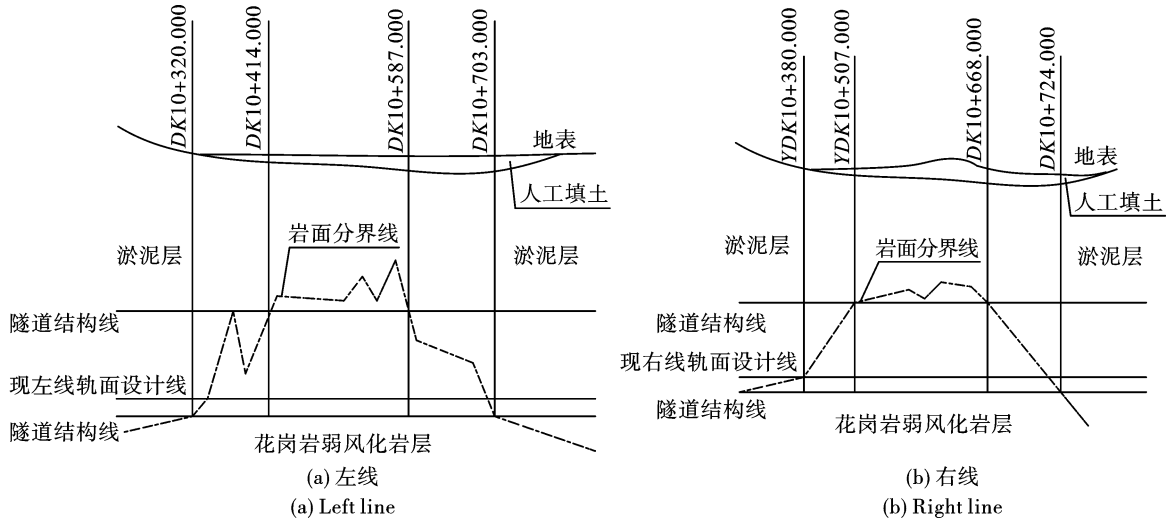


图1 两条隧道地质剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geological sections of two tunnels



图2 爆破现场装药图

Fig. 2 The charging at the engineering site

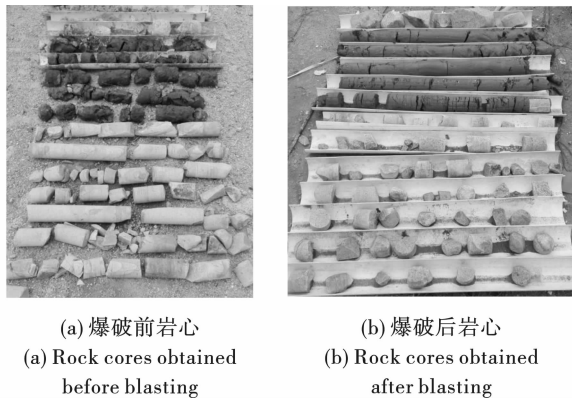


图3 爆破前后岩心图

Fig. 3 Rock cores obtained before blasting and after blasting

1.2 振动测试

采用中科(成都)仪器有限公司生产的 TC-

4850 振动记录仪测量爆破振动,爆破测振仪布置如图5所示。

2 模型参数和验证

通过现场测试和动态有限元软件模拟验证爆破工程所涉及材料的物理力学参数。

2.1 数值模型

爆破岩石的模型是对称的,建立了二分之一模型来模拟计算以减少计算时间。立方体模型的长度为4580 cm(X 方向),宽度为1200 cm(Y 方向),高度为4150 cm(Z 方向)。立方体模型如图6所示。

炮眼距左侧自由面500 cm。炮眼半径为7.3 cm。由于炮眼半径相对于模型尺寸太小,模拟计算时很容易产生畸形网格;因此,建立等效药包^[23],将炮眼半径放大为30 cm。模型中装药高度为50 cm,岩石高度为550 cm,淤泥高度为3050 cm,人工填土高度为300 cm,空气高度为300 cm。管道距离右侧自由面1000 cm,管道埋深为200 cm,管道直径为120 cm,管壁厚度为15 cm,管道是空的。模型的前表面是对称边界,上表面是自由边界,其他表面是非反射边界。采用 cm-g- μ s 单位制。

2.2 材料参数

使用 * MAT_HIGH_explosive_BURN 材料模拟乳化炸药^[24,25]。使用 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模拟岩石^[26,27]。使用 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模拟淤泥^[28]。管道由混凝土制成,使用 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 材料进

行模拟^[29], 材料模型的等效屈服强度是压力、应变率和损伤的函数, 而压力是体积应变的函数, 本构方程如下

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*n}](1 + c \ln \varepsilon^*) \quad (1)$$

式中: A, B, n 是材料常数; $\sigma^* = \sigma/f_c$ 是实际等效应力与静态屈服强度的比值; $p^* = p/f_c$ 为无量纲压力; $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$ 为无量纲应变率; D 是损伤系数 ($0 \leq D \leq 1$)。

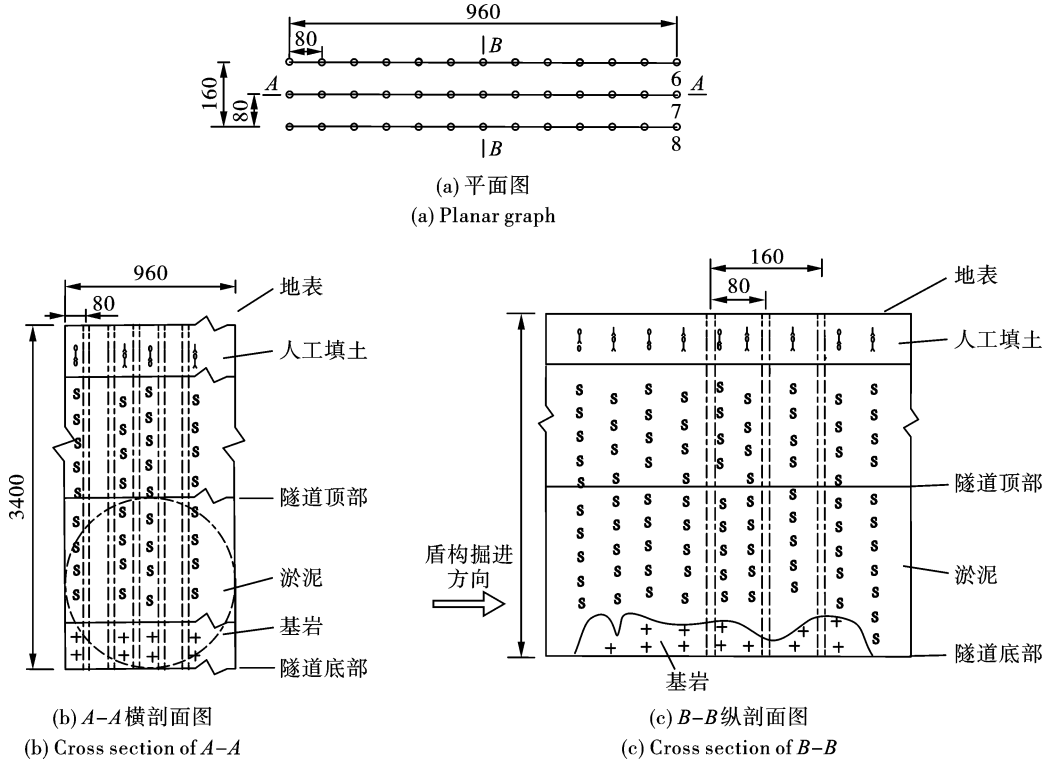


图4 炮眼布置示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of the blast holes(unit:cm)



图5 测振仪器布置图

Fig. 5 Arrangement of the vibration meters

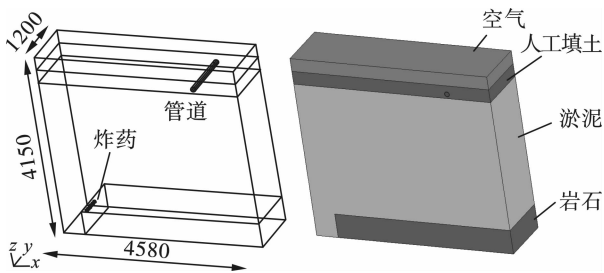


图6 岩石爆破数值模型(单位:cm)

Fig. 6 Numerical model of rock blasting(unit:cm)

* MAT_DRUCKER_PRAGER 用于模拟人工填土^[19]。* MAT_NULL 用于模拟空气^[30]。炸药、岩石、淤泥^[28]、管道、人工填土和空气的参数通过现场测试和实验室测试获得^[31](表1)。

炸药爆轰的状态方程可以用JWL方程来描述

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: P 是压力; A, B, R_1, R_2, ω 是与炸药相关的材料常数; V 是相对体积; E_0 是初始比内能。

根据赵根对乳化炸药在水中爆破时爆速 D 与水深 h_0 之间关系的研究^[32], 并结合爆压与水深之间的关系式(3)。然后, 可以获得爆轰压力 P_{CJ} 、炸药密度 ρ_2 和爆速 D 之间的关系。在数值模型中, 炸药高度为 0.5 m, 装药位于 34 m 的水深处, 炸药爆速为 2733 m/s, 因此, 炸药的爆轰压力为 1.98 GPa。

$$P_{CJ} = \frac{1}{k + 1} \rho_2 D^2 \quad (3)$$

式中: P_{CJ} 是炸药爆轰平均初始压力, GPa; ρ_2 是炸药的密度, kg/m^3 ; D 是炸药的爆轰速度, m/s ; k 是

炸药的等熵指数,普通工业炸药取 3。见表 2、表 3。

表 1 炸药的物理和力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the explosive

密度/(g · cm ⁻³)	爆速/(cm · μs ⁻¹)	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E ₀ /GPa
1.06	0.5	216.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

表 2 岩石和淤泥的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the rock and silt

类别	ρ/(g · cm ⁻³)	E/(10 ¹¹ Pa)	u	纵波速度/ (m · s ⁻¹)	SIGY/ (10 ¹¹ Pa)	ETAN/ (10 ¹¹ Pa)	BETA	C
岩石	2.5	0.74	0.25	5357	3.0e-5	0.042	1.0	0.06
淤泥	1.63	3.3e-5	0.45	1250	4.0e-9	0.0	—	—

表 3 管道的物理和力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the pipeline

参数		参数	
密度 ρ/(g · cm ⁻³)	2.4	应变硬化指数 N	0.61
剪切模量 G/GPa	12.3	准静态单轴抗压强度 f _c /MPa	24
应变率系数 C	0.007	最大拉伸静水压力 T/MPa	2.7
归一化粘结强度 A	0.79	相对应变率 ε ₀ /(s ⁻¹)	1 × 10 ⁻⁶
归一化粘结强度 B	1.6	断裂前的最小塑性应变 ε _{min}	0.01
归一化最大强度 s _{max}	7	损伤常数 D ₁	0.04
压碎压力 p _c /MPa	8	损伤常数 D ₂	1.0
压碎体积应变 μ _c	5.6 × 10 ⁻⁴	损伤常数 K ₁ /GPa	17.4
压实压力 p _t /GPa	1.05	损伤常数 K ₂ /GPa	38.8
压实体积应变 μ ₁	0.1	损伤常数 K ₃ /GPa	29.8

空气采用 NULL 材料模型,其满足 GRUNEISEN 状态方程

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) e_0 \quad (4)$$

式中:c 是剪切-压缩波速曲线的截距;P 是压力;e₀ 是初始比内能;μ = ρ/ρ₀ - 1;ρ 是材料的密度;S₁、S₂、S₃ 是剪切-压缩波速曲线的斜率因数;γ₀ 是 GRUNEISEN 常数;α 是初始体积修正因数;ρ₀ 是材料的初始密度。见表 4、表 5。

表 4 空气的物理和力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of the air

ρ/(g · cm ⁻³)	c/(m · s ⁻¹)	S ₁	S ₂	S ₃	γ ₀	α	e ₀ /GPa
空气	1.29E-03	344	0	0	0	1.40	0

表 5 人工填土的物理和力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of the artificial fill

密度 ρ/(g · cm ⁻³)	泊松比 u	内聚力/kPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/rad
1.98	0.35	100	150	0.31

2.3 数值模拟的可靠性分析

在现场测试了爆破引起的地表振动,监测点#1

位于爆源右侧 30 m 处。表 6 列出了现场监测和数值计算的振动。结果表明,两者数据接近,误差在

5.88%和17.37%之间。因此,使用数值计算模型和材料研究岩石爆破附近供水管道的振动特性是可行的^[33]。见表6。

表6 监测点#1 质点振动速度峰值对比

Table 6 Comparison of PPVs at monitoring point#1

监测点	#1	
	X	Y
现场监测/(cm·s ⁻¹)	2.13	0.68
数值计算/(cm·s ⁻¹)	1.76	0.64
误差率/%	17.37	5.88

3 计算结果分析

为了研究淤泥-岩石地层爆破时临近给水管道振动特征,对给水管道沿轴向 PPV 的变化特点、给水管道正上方地表沿给水管道轴向的 PPV 的变化特点、给水管道沿轴向 PPV 和给水管道正上方地表沿给水管道轴向的 PPV 的函数拟合关系、给水管道内壁不同方向的 PPV、给水管道外壁不同方向的

PPV、给水管道内壁和外壁 PPV 对比分析、给水管道外壁单元的峰值有效应力等进行了研究。

选择给水管道内壁和外壁上节点和单元的位置如图7所示。

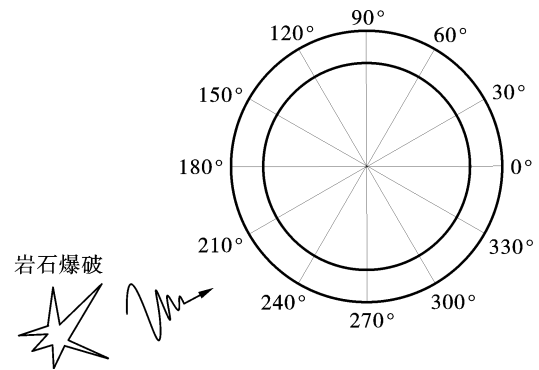


图7 供水管道节点和单元位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the nodes and the elements on the water supply pipeline

3.1 给水管道沿轴向的 PPV

给水管道沿轴向的 PPV 如表7和图8所示。

表7 给水管道沿轴向的 PPV

Table 7 The PPVs of the water supply pipeline along the axial direction

距对称面的距离/m	0	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00	3.60	4.20	4.80	5.40	6.00
管道上节点的 PPVs/(cm·s ⁻¹)	3.68	3.71	3.80	3.68	3.54	3.54	3.46	3.19	2.83	2.77	2.50

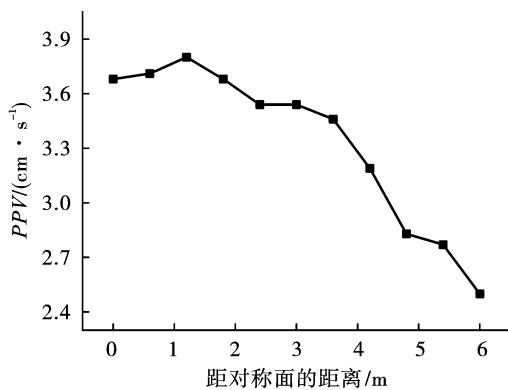


图8 给水管道沿轴向的 PPV

Fig. 8 The PPVs of the water supply pipeline along the axial direction

在沿轴向的给水管道上,PPV 随着距爆炸源水平距离的增加而减小,PPV 从 3.80 cm/s 减小到 2.50 cm/s,距爆炸源的水平距离越近,PPV 越大。

3.2 给水管道正上方地表沿给水管道轴向的 PPV

给水管道正上方地表沿轴向的 PPV 如表8和图9所示。

在给水管道正上方地表沿轴向上,PPV 随着距

爆炸源水平距离的增加而减小,PPV 从 3.61 cm/s 减小到 2.77 cm/s,距爆炸源的水平距离越近,PPV 越大,最大 PPV 位于炮孔中心连心线上。

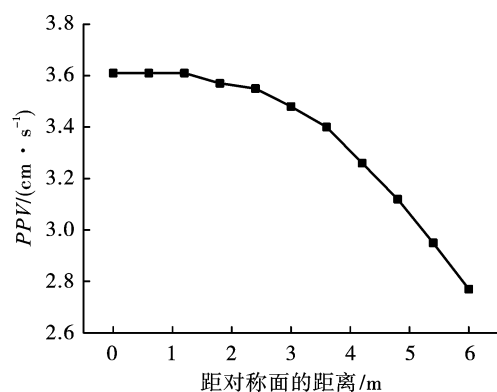


图9 给水管道正上方地表沿轴向的 PPV

Fig. 9 The PPVs of the surface along the axial direction

3.3 给水管道 PPV 与给水管道正上方地表 PPV 之间的关系

通过数值模拟结果对管道 PPV 与管道上方地表 PPV 之间的关系进行了函数拟合,管道 PPV 和管道上方地表的 PPV 之间关系如图10所示。为确保

淤泥-岩石地层中岩石爆破附近给水管道的安全,需要对管道的 PPV 进行测试,但挖掘土壤然后测试管

道上的 PPV 工程量大,可以在管道正上方的地表测试爆破引起的 PPV。

表 8 给水管管道正上方地表沿轴向的 PPV

Table 8 The PPVs of the surface above the water supply pipeline along the axial direction

距对称平面的距离/m	0	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00	3.60	4.20	4.80	5.40	6.00
管道正上方地表的 PPV/(cm·s ⁻¹)	3.61	3.61	3.61	3.57	3.55	3.48	3.40	3.26	3.12	2.95	2.77

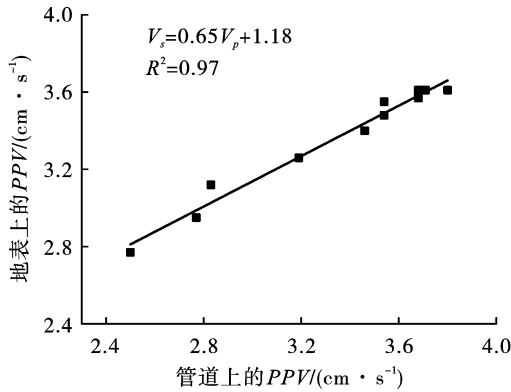


图 10 给水管管道 PPV 与给水管管道正上方地表 PPV 之间的关系

Fig. 10 Relationship between the PPVs of the water supply pipeline and the PPVs of the surface above the water supply pipeline

给水管管道 PPV 与给水管管道正上方地表 PPV 之间的关系如式(5)所示。

$$V_s = 0.65V_p + 1.18, R^2 = 0.97 \quad (5)$$

式中: V_p 是给水管管道的 PPV; V_s 是给水管管道上方地表的 PPV。

3.4 给水管管道内壁不同方向的 PPV

不同方向上给水管管道内壁的 PPV 如表 9 和图 11 所示。

最大的 PPV 位于给水管管道内壁 90° 处, 最大 PPV 为 15.92 cm/s; 最小的 PPV 位于给水管管道内壁 180° 处, 最小 PPV 为 4.01 cm/s; 最大 PPV 是最小 PPV 的 3.97 倍, 位于给水管管道内壁 90° 处的 PPV 最高。

在给水管管道内壁上, PPV 在 4.01 cm/s 和 15.92 cm/s 之间, 但每个节点的 PPV 彼此不同。

表 9 给水管管道内壁的 PPV

Table 9 The PPVs of the water supply pipeline inner wall

角度/°	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
管道内壁的 PPV/(cm·s ⁻¹)	5.56	8.89	14.68	15.92	11.19	6.24	4.01	4.19	4.88	6.17	5.39	4.74

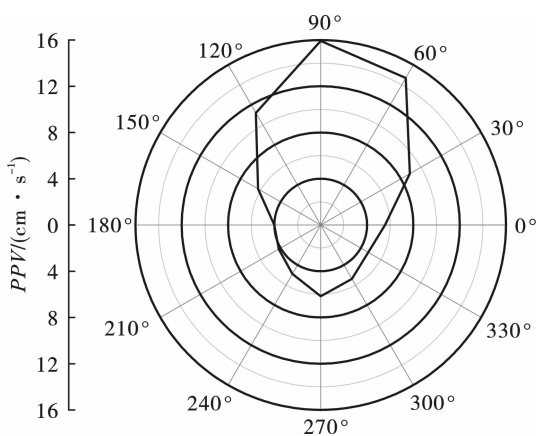


图 11 给水管管道内壁的 PPV

Fig. 11 The PPVs of the water supply pipeline inner wall

3.5 给水管管道外壁不同方向的 PPV

给水管管道外壁不同方向的 PPV 如表 10 和图 12 所示。

最大的 PPV 位于给水管管道外壁 150° 处, 最大 PPV 为 4.11 cm/s; 最小的 PPV 位于给水管管道外壁 330° 处, 最小 PPV 为 3.09 cm/s; 最大 PPV 是最小 PPV 的 1.03 倍, 给水管管道外壁 150° 处的 PPV 最高。

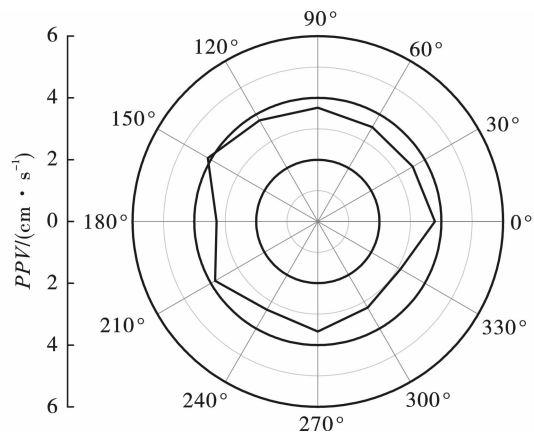


图 12 给水管管道外壁的 PPV

Fig. 12 The PPVs of the water supply pipeline outer wall

表 10 给水管道的 PPV

Table 10 The PPVs of the water supply pipeline outer wall

角度/°	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
管道外壁 PPV/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.79	3.55	3.53	3.68	3.78	4.11	3.28	3.84	3.30	3.56	3.22	3.09

在给水管道的管壁上, PPV 在 3.09 cm/s 和 4.11 cm/s 之间, 但每个节点的 PPV 彼此不同。爆炸产生的地震波在土壤-给水管道的界面透射和折射, 透射给水管道的波多次反射和折射, 导致每个节点

的 PPV 不同。

3.6 给水管道的内壁和外壁 PPV 对比分析

给水管道的内壁和外壁的 PPV 如表 11 所示。

表 11 给水管道的内壁和外壁的 PPV

Table 11 The PPVs of the water supply pipeline inner wall and outer wall

角度/°	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
管道内壁 PPV/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	5.56	8.89	14.68	15.92	11.19	6.24	4.01	4.19	4.88	6.17	5.39	4.74
管道外壁 PPV/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.79	3.55	3.53	3.68	3.78	4.11	3.28	3.84	3.30	3.56	3.22	3.09

由表 11 可以得出给水管道的内壁的 PPV 大于给水管道的管外壁的 PPV, 给水管道的内壁的 PPV 变化很大, 但给水管道的管外壁的 PPV 相对接近。

3.7 给水管道的单元的峰值有效应力

给水管道的不同方向上单元的峰值有效应力如表 12 所示。

表 12 给水管道的单元的峰值有效应力

Table 12 The peak effective stress of elements on the water supply pipeline

角度/°	0~30	30~60	60~90	90~120	120~150	150~180	180~210	210~240	240~270	270~300	300~330	330~360
单元峰值有效 应力/(10^5 Pa)	4.72	7.38	5.67	7.61	8.48	6.28	8.83	14.68	19.14	14.69	5.85	5.58

单元的最大峰值有效应力位于给水管道的 240°~270° 处, 单元的最大峰值有效应力为 $19.14 \times 10^5 \text{ Pa}$; 单元的最小峰值有效应力位于给水管道的 0°~30° 处, 单元的最小峰值有效应力为 $4.72 \times 10^5 \text{ Pa}$; 单元的最大峰值有效应力是单元最小峰值有效应力的 4.06 倍, 给水管道的 240°~270° 处单元的最大有效应力最高。

给水管道的管壁由 C35 混凝土制成, 混凝土抗压强度高但抗拉强度低, 混凝土管道易受拉破坏。根据混凝土结构设计规范^[34] C35 混凝土轴心抗拉强度设计值为 $f_{tk} = 1.57 \text{ MPa}$, 欧洲国际混凝土委员会建议考虑应变率强度的动态增长系数为 1.31^[35], 得到混凝土管道动抗拉强度为 $f_{tk} = 2.06 \text{ MPa}$ 。混凝土管道动抗拉强度大于单元的最大峰值有效应力, 混凝土管道在这种工况下是安全的。

4 结论

以珠海地铁盾构隧道岩石爆破施工为背景, 采用现场测试和有限元数值模拟相结合的方法, 研究

了淤泥-岩石地层岩石爆破附近给水管道的振动特性。得到如下结论。

(1) 在给水管道的管壁上, PPV 随着距爆炸源水平距离的增加而减小。在给水管道的上方沿轴向上的表面上, PPV 也随着距爆炸源水平距离的增加而减小。给水管道的 PPV 与给水管道的上方地面 PPV 之间的函数关系为: $V_s = 0.65V_p + 1.18$, 其中 V_p 为给水管道的 PPV, 是给水管道正上方地表 PPV。

(2) 在给水管道的管壁上, 最大 PPV 是最小 PPV 的 3.97 倍, 给水管道的内壁 90° 处的 PPV 最高。在给水管道的管外壁上, 最大 PPV 是最小 PPV 的 1.03 倍, 给水管道的管外壁 150° 处的 PPV 最高。每个节点的 PPV 彼此不同, 给水管道的内壁 PPV 大于外壁, 内壁 PPV 变化较大, 但外壁 PPV 相对接近。

(3) 在给水管道的管壁上, 单元的最大峰值有效应力是单元的最小峰值有效应力的 4.06 倍, 单元在给水管道的 240°~270° 处的峰值有效应力最高, 混凝土管道在这种工况下是安全的。

参考文献 (References)

- [1] BABENDERERDE S, HOEK E, MARINOS P, et al. Geological risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses-The case of "Metro do Porto" and the measures adopted[C] // Workshop in Aveiro, Portugal (in print), 2004:1-15.
- [2] ZHAO Jian, GONG Qiu-ming, EISENSTEN Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground; a case history in Singapore [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(4):388-400.
- [3] BARZEGARI G, UROMEIHY A, ZHAO Jian. EPB tunnelling challenges in bouldery ground; a new experience on the Tabriz metro line 1, Iran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73:429-440.
- [4] 李 冲. 盾构通过上软下硬地层深孔爆破预处理施工技术研究[J]. 技术与市场, 2015, 22(8):32-35.
- [4] LI Chong. Study on construction technology of deep hole blasting pretreatment for shield passing through upper soft and lower hard strata[J]. Technology and Market, 2015, 22(8):32-35. (in Chinese)
- [5] YIN Tao, ZHOU Chuan-bo, ZHENG Chang-qing, et al. The vibration characteristics of ground of rock blasting in silt-rock strata[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021:1-14.
- [6] 王 栋, 何历超, 王 凯. 钻爆法施工对邻近埋地管道影响的现场实测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2):134-140.
- [6] WANG Dong, HE Li-chao, WANG Kai. Field measurement and numerical simulation for influence of blasting excavation on adjacent buried pipelines [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2):134-140. (in Chinese)
- [7] WON Jong-Hwa, KIM Moon-Kyum, KIM Gun, et al. Blast-induced dynamic response on the interface of a multilayered pipeline [J]. structure and Infrastructure Engineering, 2014, 10(1):80-92.
- [8] 王海涛, 金 慧, 贾金青, 等. 地铁隧道钻爆法施工对邻近埋地管道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1):3332-3339.
- [8] WANG Hai-tao, JIN Hui, JIA Jin-qing, et al. Model test study on the influence of subway tunnel drilling and blasting method on adjacent buried pipeline [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1):3332-3339. (in Chinese)
- [9] 朱 斌, 蒋 楠, 贾永胜, 等. 下穿燃气管道爆破振动效应现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12):2582-2592.
- [9] ZHU Bin, JIANG Nan, JIA Yong-sheng, et al. Field experiment on blasting vibration effect of underpass gas pipelines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12):2582-2592. (in Chinese)
- [10] 张 震, 周传波, 路世伟, 等. 爆破振动作用下邻近埋地混凝土管道动力响应特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9):79-84.
- [10] ZHANG Zhen, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Dynamic response characteristic of adjacent buried concrete pipeline subjected to blasting vibration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9):79-84. (in Chinese)
- [11] ZHANG Jie, ZHANG Lan, ZHENG Liang. Buckling failure of a buried pipeline subjected to ground explosions [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 114:36-47.
- [12] PARVIZ M, AMINNEJAD B, FIOUZ A. Numerical simulation of dynamic response of water in buried pipeline under explosion[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21:2798-2806.
- [13] 钟冬望, 卢 哲, 黄 雄, 等. 爆破荷载下埋地 PE 管道动力响应的试验研究[J]. 爆破, 2018, 35(4):1-5.
- [13] ZHONG Dong-wang, LU Zhe, HUANG Xiong, et al. Experimental study on buried PE pipeline under blasting loads [J]. Blasting, 2018, 35(4):1-5. (in Chinese)
- [14] MOKHTARI M, ALAVI Nia A. A parametric study on the mechanical performance of buried X65 steel pipelines under subsurface detonation [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15(3):668-679.
- [15] SONG Ke-jian, LONG Yuan, JI Chong, et al. Experimental and numerical studies on the deformation and tearing of X70 pipelines subjected to localized blast loading [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 107:156-168.
- [16] 张黎明, 赵明生, 池恩安, 等. 爆破振动对地下管道影响试验及风险预测 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(16):241-247.
- [16] ZHANG Li-ming, ZHAO Ming-sheng, CHI En-an, et al. Experiments for effect of blasting vibration on underground pipeline and risk prediction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16):241-247, (in Chinese)
- [17] GIANNAROS E, KOTZAKOLIOS T, KOSTOPOULOS V. Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques [J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(25):3459-3476.
- [18] ABEDI A S, HATAF N, GHAHRAMANI A. Analytical solution of the dynamic response of buried pipelines under blast wave [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88:301-306.

- [19] ZHONG Dong-wang, GONG Xiang-chao, HAN Fang, et al. Monitoring the dynamic response of a buried polyethylene pipe to a blast wave: an experimental study[J]. Applied sciences, 2019, 9(8): 1663.
- [20] SHI Cheng-hua, ZHAO Qian-jin, LEI Ming-feng, et al. Vibration velocity control standard of buried pipeline under blast loading of adjacent tunnel[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(6): 2195-2205.
- [21] SEYED-KOLBADI S M, SAFI M, KESHMIRI A, et al. Explosive performance assessment of buried steel pipeline[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-24.
- [22] GUAN Xiao-ming, ZHANG Liang, WANG Yu-wen, et al. Velocity and stress response and damage mechanism of three types pipelines subjected to highway tunnel blasting vibration[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104840.
- [23] 蒋楠. 露天转地下开采边坡爆破动力特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [23] JIANG Nan. Study on blasting dynamic characteristics of open pit to underground mining slope[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)
- [24] LEE E, FINGER M, COLLINS W. JWL equation of state coefficients for high explosives[R]. Lawrence Livermore National Lab (LLNL), Livermore, CA (United States), 1973.
- [25] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User's manual[M]. Livermore, CA, 2003.
- [26] 周传波, 谷任国, 罗学东. 坚硬岩石一次爆破成井掏槽方式的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(13): 2298-2303.
- [26] ZHOU Chuan-bo, GU Ren-guo, LUO Xue-dong. Numerical simulation on cutting mode of shaft excavation by one-step deep-hole blasting in hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(13): 2298-2303. (in Chinese)
- [27] 马险峰, 隋涛, 尚金华, 等. 双圆盾构隧道在内部爆炸荷载下的响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 983-988.
- [27] MA Xian-feng, SUI Tao, SHANG Jin-hua, et al. Response analysis of dot shield tunnels under internal explosion[J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2011, 39(7): 983-988. (in Chinese)
- [28] 乔继延, 丁桦, 郑哲敏. 爆炸排淤填石法中淤泥的本构模型[J]. 工程爆破, 2003(3): 1-6.
- [28] QIAO Ji-yan, DING Hua, ZHENG Zhe-min. Seaooze constitutive model for toe-shooting method[J]. Engineering Blasting, 2003, 9(3): 1-6. (in Chinese)
- [29] 蔡清裕, 崔伟峰, 向东, 等. 模拟刚性动能弹丸侵彻混凝土的 FE-SPH 方法[J]. 国防科技大学学报, 2003(6): 87-90.
- [29] CAI Qing-yu, CUI Wei-feng, XIANG Dong, et al. Simulation of concrete penetrated by rigid projectile with coupled FE-SPH methods[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003(6): 87-90. (in Chinese)
- [30] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 1 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [30] SHI Dang-yong, LI Yu-chun, ZHANG Sheng-min. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1[M]. 1st edition. Beijing: Press of Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [31] 曹艳梅, 李东伟, 李喆. 地基土层剪切模量的随机分布及地面振动传递函数的区间估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 1022-1031.
- [31] CAO Yan-mei, LI Dong-wei, LI Zhe. Random distribution of shear modulus of soils and interval estimation of ground vibration transfer function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 1022-1031. (in Chinese)
- [32] 赵根. 深水条件下围堰拆除爆破技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [32] ZHAO Gen. Study on technology of the cofferdam demolition blasting in deep water conditions[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [33] YIN Tao, ZHOU Chuan-bo, ZHENG Chang-qing, et al. Propagation characteristics of vibrations due to rock blasting in silt-rock strata[J]. Mathematical Models in Engineering, 2022, 8(2): 42-57.
- [34] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范(2015 版)[S]. 2010.
- [35] Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP model code 1990: Design code[M]. Thomas Telford Publishing, 1993.