

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202006007



隧道下穿民房爆破振动效应监测

朱浩杰¹, 蔡奇鹏¹, 肖朝昀¹, 林立华², 涂兵雄¹, 黄山景¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: 依托右线隧道穿过民房正下方的福建省厦门市石堀山隧道工程, 在民房第一、二层墙角处各布置一台自动化爆破振动仪, 对爆破开挖引起的振动进行长期监测. 结果表明: 爆破振速整体上随着测点与掌子面距离的减小而增大; 在三向振速中, 垂向振速不一定总是最大, 但主频小于 30 Hz, 垂向振速占比最多; 分析时应综合振速与主频, 选择优势分向振速, 或根据建筑物固有频率, 选择接近的主频对应的分向振速; 当测点与掌子面距离为 10~50 m 时, 爆破振度显著放大, 而主频有一定的衰减, 径向和垂向主频衰减至与房屋固有频率接近; 当测点与掌子面距离为 50 m 内时, 随着掌子面远离测点, 振速影响系数 C_v 先增大后减小, 主频影响系数 C_f 先减小后增大; 空洞影响垂向最大, 径向次之, 切向最小; C_v 最大值为 3.4, C_f 最小值为 0.35.

关键词: 爆破振动; 下穿隧道; 民房; 空洞效应; 主频影响系数

中图分类号: U 455.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2021)02-0150-08

Monitoring on Blasting Vibration Effect of Tunnels Undercrossing Civil Buildings

ZHU Haojie¹, CAI Qipeng¹, XIAO Zhaoyun¹, LIN Lihua²,
TU Bingxiong¹, HUANG Shanjing¹

(1. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Luqiao Engineering Investment and Development Limited Company, Xiamen 361021, China)

Abstract: Relying on the right line of Shijueshan Tunnel Project Xiamen, Fujian undercrossing the civil buildings, an automatic blasting vibration meter was arranged in the corner of the first and second floor of the civil buildings, the long-term vibration monitoring caused by blasting excavation was conducted. The results show that: the blasting vibration velocity increases with the decrease of the distance between the measuring point and the tunnel face on the whole. The vertical velocity in the three-direction velocities is not always the maximum, but the dominant frequency is less than 30 Hz, and the vertical velocity proportion is the largest. The vibration velocity and dominant frequency should be analyzed together, selecting the dominant directional vibration velocity, or according to the natural frequency of the building, selecting the velocity of directional vibration corresponding to the close main frequency. When the distance between the measuring point and the tunnel face is 10-50 m, the blasting vibration velocity will be significantly amplified, while the main frequency has certain attenuation, the radial and vertical main frequency attenuation are close to the natural frequency of the house. When the distance between the measuring point and the tunnel face < 50 m, as the tunnel face moved away from the measurement point, vibration velocity influence coefficient C_v initially increases and then

收稿日期: 2020-06-03

通信作者: 肖朝昀(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事地下工程方面的研究. E-mail: zyxiao@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778249)

decreases, dominant frequency influence coefficient C_f initially decreases and then increases. The vertical direction of the cavity effect > radial direction > tangential direction. The maximum value of C_v is 3.4 and the minimum value of C_f is 0.35.

Keywords: blasting vibration; undercrossing tunnel; civil buildings; cavity effect; dominant frequency influence coefficient

暗挖隧道下穿建筑物时,会使爆源附近的建筑物受到一定程度的影响. 目前,已有众多学者对爆破振动波在岩土介质中的传播规律及减振技术进行研究,对比分析建筑物的振害特征及其对应的振动观测值,以不同频率段对应的最大振速作为爆破控制标准^[1]. 张声辉等^[2]采用小波变换和反应谱分析方法,发现爆破振动信号的能量主要分布在 0~64 Hz,随着高程的增加,能量分布趋于低频带. 毕卫国等^[3]通过对爆破地震波主频小波分析,发现振动主频与结构固有频率越接近,结构响应越大. 李洪涛等^[4]采用结构动力学理论对工程实例进行分析,发现建筑物对爆破振动不同频率能量成分的选择放大效应,以及结构固有频率一致的能量成分将被最大程度地放大.

工程中以预测振速控制装药量^[5-8],爆破最大振速可通过萨道夫斯基公式求出,但在振动传递的过程中,常因其他因素的影响导致实际振速与预测值相差较大. 针对下穿隧道,一些学者提出“空洞效应”的概念^[9-12],即已开挖的隧道形成空洞后,对地表振速产生放大效应. 杨海书等^[13]拟合现场实测振动数据,发现隧道空洞对其上部建(构)筑物的振速放大倍数约为 2. 王辉等^[14]分析轻轨隧道下穿建筑物时的爆破振动速度,发现下穿建筑物后的爆破振速放大倍数约为 1.32~1.69. 文献^[15-16]以掌子面前、后的振速比值和振速差值作为空洞效应衡量指标,探讨掌子面附近的振速变化规律,发现随着距离的增大,指标值先增大后减小. 基于此,本文对福建省厦门市石堀山隧道爆破开挖过程中洞顶民房进行长期持续监测,分析民房全过程爆破振动数据,研究“空洞效应”下振速和主频的变化规律.

1 工程概况

福建省厦门市石堀山隧道为双向 6 车道公路隧道,该隧道为分离式隧道,左、右线隧道中心线距离约为 35 m,施工时,左线先行,前后错开 30 m. 在隧道右线 AK0+400 桩号处有一栋两层砖混结构民房,民房高度为 7.2 m,第一、二层高度均为 3 m,民房的抗拉、抗剪、抗弯能力弱,抗震性能差,施工期间需重点监测爆破振动对其的影响.

在民房第一层(测点 1)及第二层(测点 2)墙角处,各布置 1 台自动化爆破振动仪,监测三方向(径向 X、切向 Y、垂向 Z)质点振速及对应的主频. 监测时间从 2017 年 1 月 1 日至 2017 年 4 月 16 日,连续监测 105 d,共获取 238 组数据,由此分析民房前、后 100 m 左线和右线的爆破振动数据.

隧道及民房平面图,如图 1 所示. 右线隧道地质纵断面图,如图 2 所示. 图 1、2 中:径向 X 为开挖方向;民房距隧道拱顶为 53 m;RQD 为岩石质量指标; K_v 为岩体完整性系数.

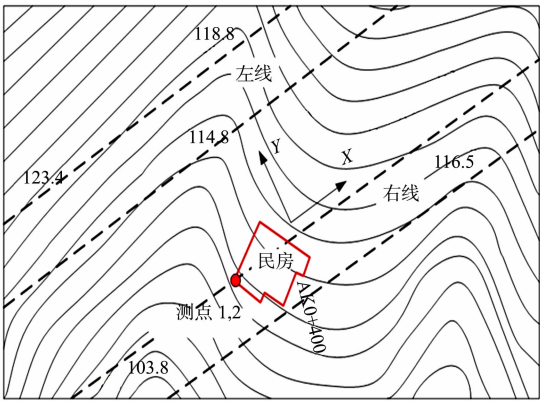


图 1 隧道及民房平面图(单位:m)

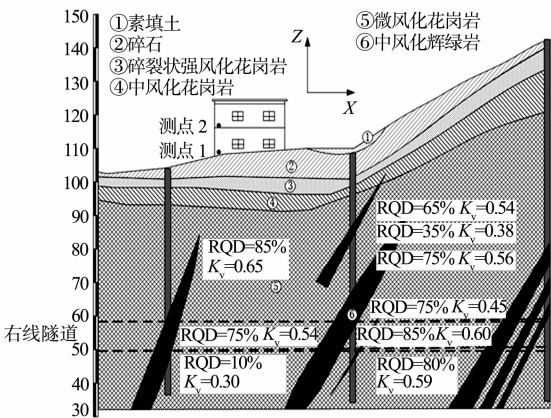


图 2 右线隧道地质纵断面图(单位:m)

Fig. 1 Plan of tunnel and civil buildings (unit: m)

Fig. 2 Geologic profile of right line tunnel (unit: m)

2 监测数据分析

以民房为中心,测点与掌子面上方地表处的水平距离记为 L ,左线和右线隧道爆破振速 v 与距离 L 的关系图,如图 3,4 所示.图 3,4 中: $v_x \sim v_z$ 分别表示径向、切向和垂向的爆破振速.由图 3,4 可知:爆破振速整体上随着测点与掌子面距离的减小而增大,基本符合萨道夫斯基振速衰减规律.

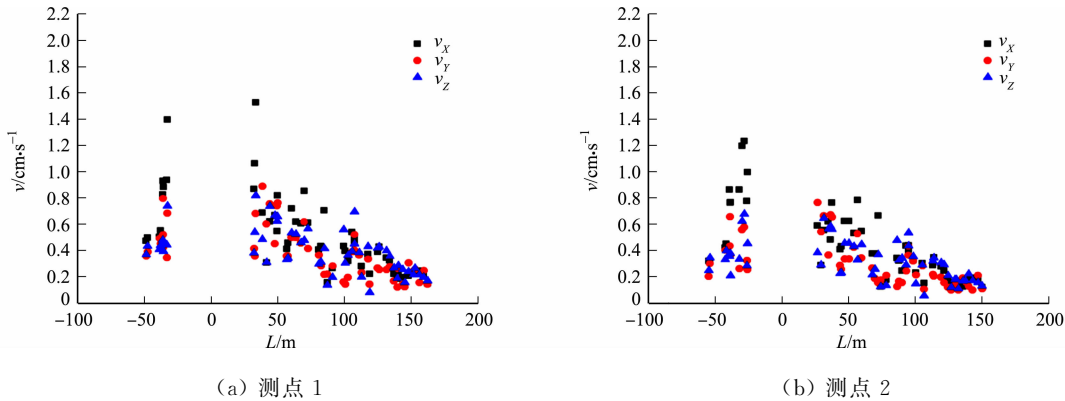


图 3 左线隧道爆破振速与距离的关系图

Fig. 3 Relationship between blasting speed and distance of left line tunnel

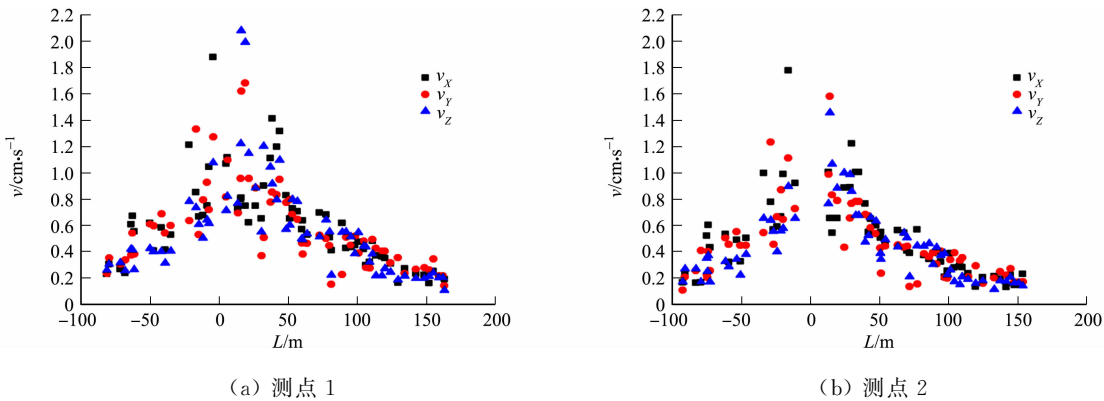


图 4 右线隧道爆破振速与距离的关系图

Fig. 4 Relationship between blasting speed and distance of right line tunnel

在爆破振动三向分量中,普遍认为垂向振速最大^[17],因此,进行相关分析时,通常以垂向振速为依据.然而,在文中隧道爆破振动数据中,垂向振速并不是最大,甚至在距离房屋较近的爆破振动中,径向振速明显大于垂向振速,水平向振速明显不可忽视.

在工程统计的 238 组数据中,有 105 组数据的径向振速最大,比例为 44%;有 64 组数据的切向振速最大,比例为 27%;有 69 组数据的垂向振速最大,比例为 29%.因此,单纯地以垂向振速作为分析依据并不科学.在以民房为中心的 50 m 范围内的 90 组数据中,径向振速最大的数据比例为 58%,切向振速最大的数据比例为 18%,垂向振速最大的数据比例为 24%.隧道开挖至测点前 4.5 m 时,测得径向振速为 $1.878 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,达到预警值.

结构固有频率与振动主频越接近时,结构响应越大^[3].参照文献[18-19]的方法,计算隧道上方砌体结构的固有频率.砌体房屋自振周期 T 与房屋高度 H_0 相关, $T=0.0168 \times (H_0+1.2)$.该砌体房屋的高度为 7.2 m,经计算可得砌体房屋自振周期为 0.141 12 s,固有频率 f_0 为 7.09 Hz($f_0=1/T$).

左线和右线隧道测点主频(f)与距离的关系图,如图 5,6 所示.图 5,6 中: $f_x \sim f_z$ 分别表示径向、切向和垂向主频.由图 5,6 可知:切向主频最大,大多为 35~70 Hz,径向主频次之,大多为 35~55 Hz,垂向主频最小,多为 15~45 Hz;在 238 组数据中,小于 30 Hz 的切向主频为 9.2%,径向主频为 15.1%,垂向主频为 36.6%;距离为 50 m 以内的 90 组数据中,小于 30 Hz 的切向主频为 4.5%,径向主频为 10.2%,垂向主频为 40.9%,切向平均主频为 48.83 Hz,径向平均主频为 43.58 Hz,垂向平均主频为 32.52 Hz,垂向主频处于更小的频带上.

由此可知,垂向主频更接近民房的固有频率,根据不同频率能量成分的选择放大效应^[4],垂向振速产生的能量对房屋的影响更大,径向能量次之,切向能量最小. 因此,在单一分向振速并不一直占据优势时,可以综合优势振速与主频选取分析对象,选择优势分向振速或根据建筑物固有频率选择较为接近主频的分向振速进行分析.

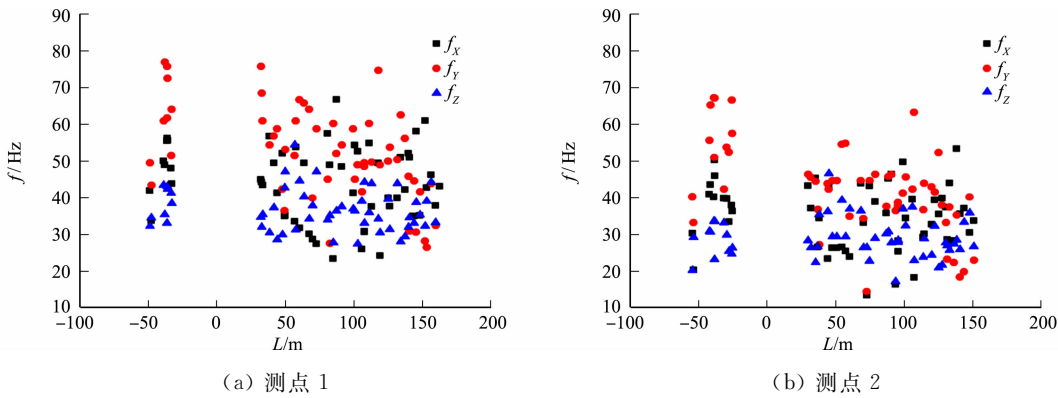


图 5 左线隧道测点主频与距离的关系图

Fig. 5 Relationship between main frequency and distance of left line tunnel measuring point

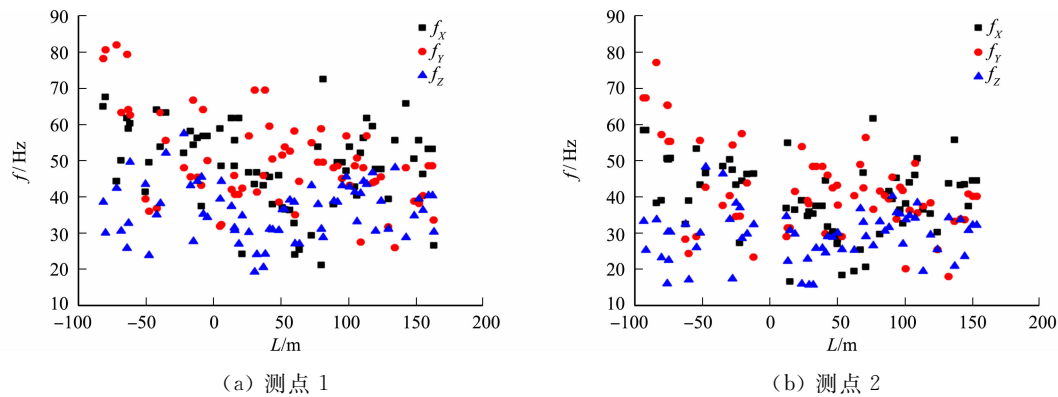


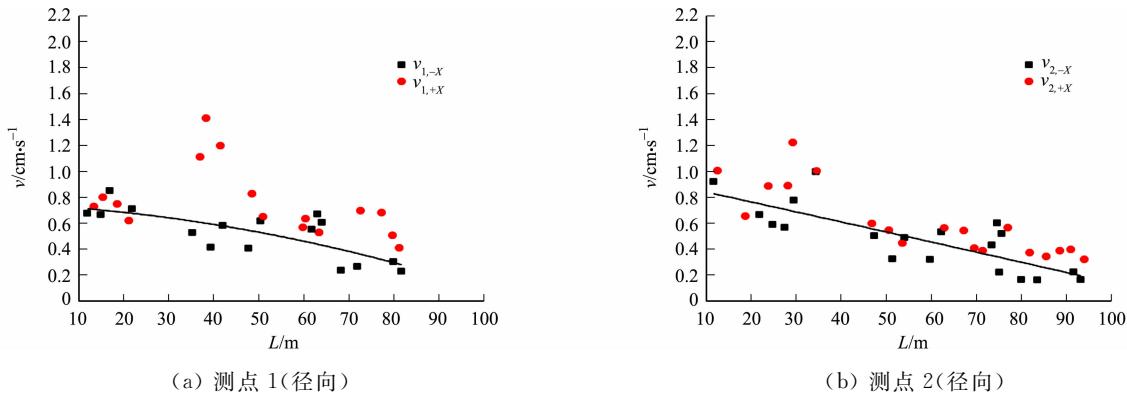
图 6 右线隧道测点主频与距离的关系图

Fig. 6 Relationship between main frequency and distance of right line tunnel measuring point

3 空洞效应分析

对于钻爆法隧道施工,众多学者以掌子面为对称面,对比未成洞前和成洞后的爆破振速,发现隧道已开挖成洞区地表的振速比对称位置未开挖区地表的振速更大,从而提出空洞效应的概念^[9-12]. 以房屋为对称点,在相同药量和距离的情况下,对比掌子面未通过房屋时与通过房屋后的数据,分析空洞产生的影响.

右线隧道下穿前、后测点的振速对比,如图 7 所示. 图 7 中: $v_{1,-x}$ 表示掌子面在测点后方的测点 1 的径向振速; $v_{1,+x}$ 表示掌子面在测点前方的测点 1 的径向振速;下文下标表示类似.



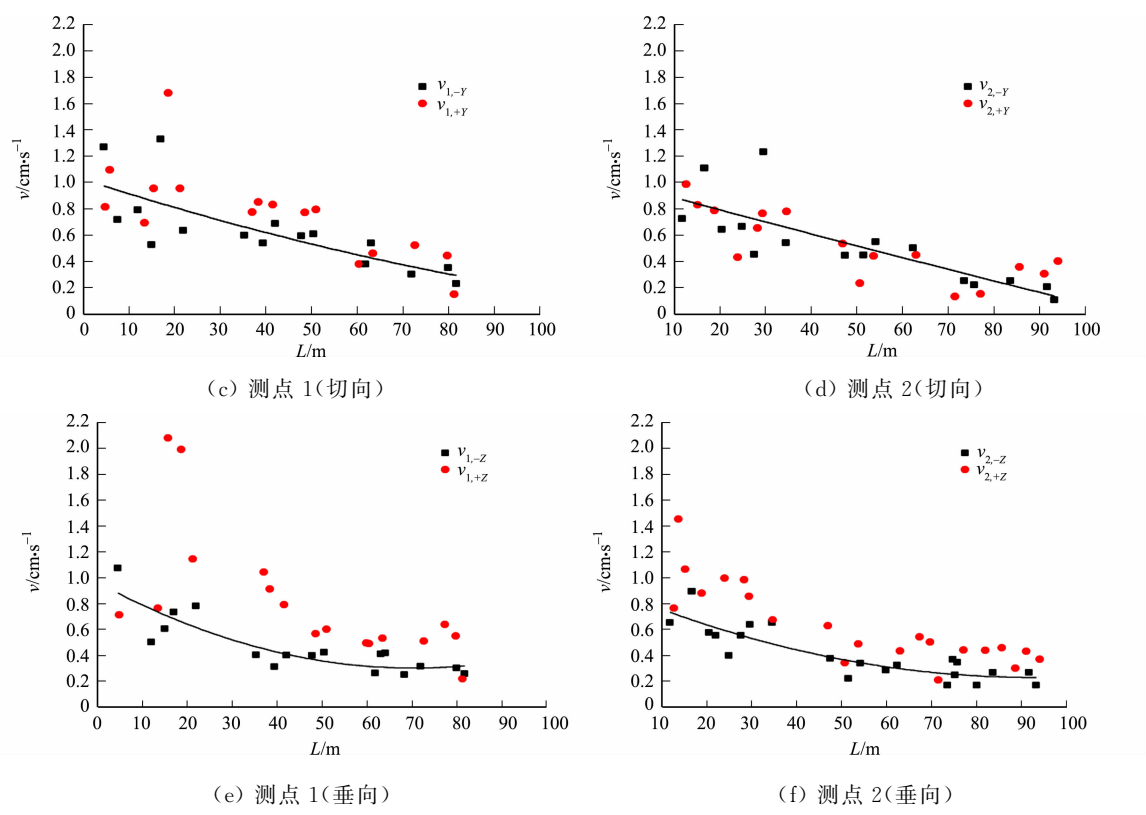


图 7 右线隧道下穿前、后测点的振速对比

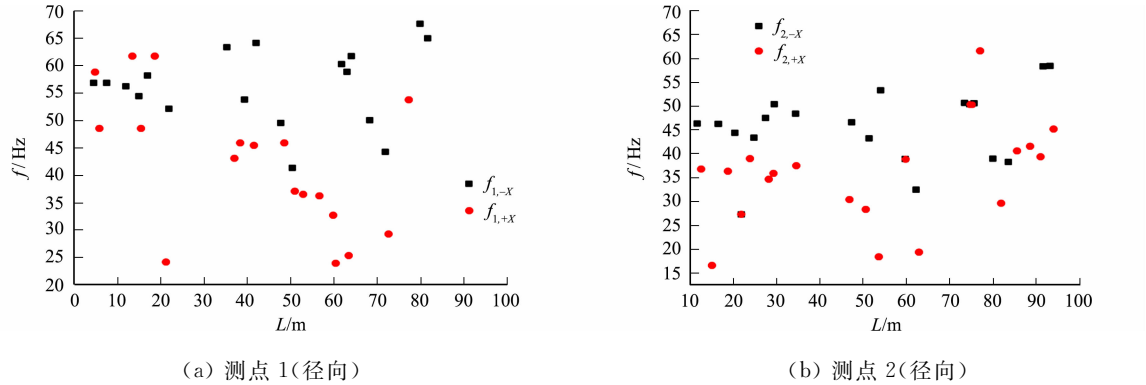
Fig. 7 Comparison of vibration velocity of measuring points before and after right line tunnel undercrossing

由图 7 可知:回归曲线拟合测点前方,即空洞形成前,三向振速均随距离的增加而降低;空洞形成后,测点 1 的径向、垂向振速明显增大,测点 2 的垂向振速略有增大,径向和切向振速变化不大;工程的放大效应随楼层的增加而减弱。

测点 1 的径向、垂向振速变化的最大幅值并不是出现在距离测点最近的位置,而是一个从小到大再变小的过程。对比未形成空洞时测点 1 的垂向振速,在空洞形成后 15.7 m 处,垂向振速显著增大,振速达 $2.08\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,超过 GB 6722—2014《爆破安全规程》的限值^[1]。

在一定的地质条件下,离测点相同距离时,不同爆破作业在测点处测得的主频基本相同^[20-21]。右线隧道下穿前、后测点的主频对比,如图 8 所示。由图 8 可知:空洞会使主频衰减;主频在距测点一定范围内有所衰减,测点 2 在 10~40 m 内的径向和垂向主频衰减至 15 Hz 左右。

曹孝君^[16]以掌子面为对称面,通过隧道中轴线上已开挖区(成洞区)与对称于爆源的未开挖区的地表质点振速之比(空洞效应的振速放大系数)衡量爆破振动的空洞效应。由于空洞效应不仅会对振速产生影响,而且还会显著影响主频,故重新定义空洞影响系数,即振速影响系数 C_v 和主频影响系数 C_f ,分别对应于以房屋为对称点,用开挖至测点后爆破在测点位置产生的振速(主频)与未开挖至测点时爆破在测点产生的振速(主频)之比。



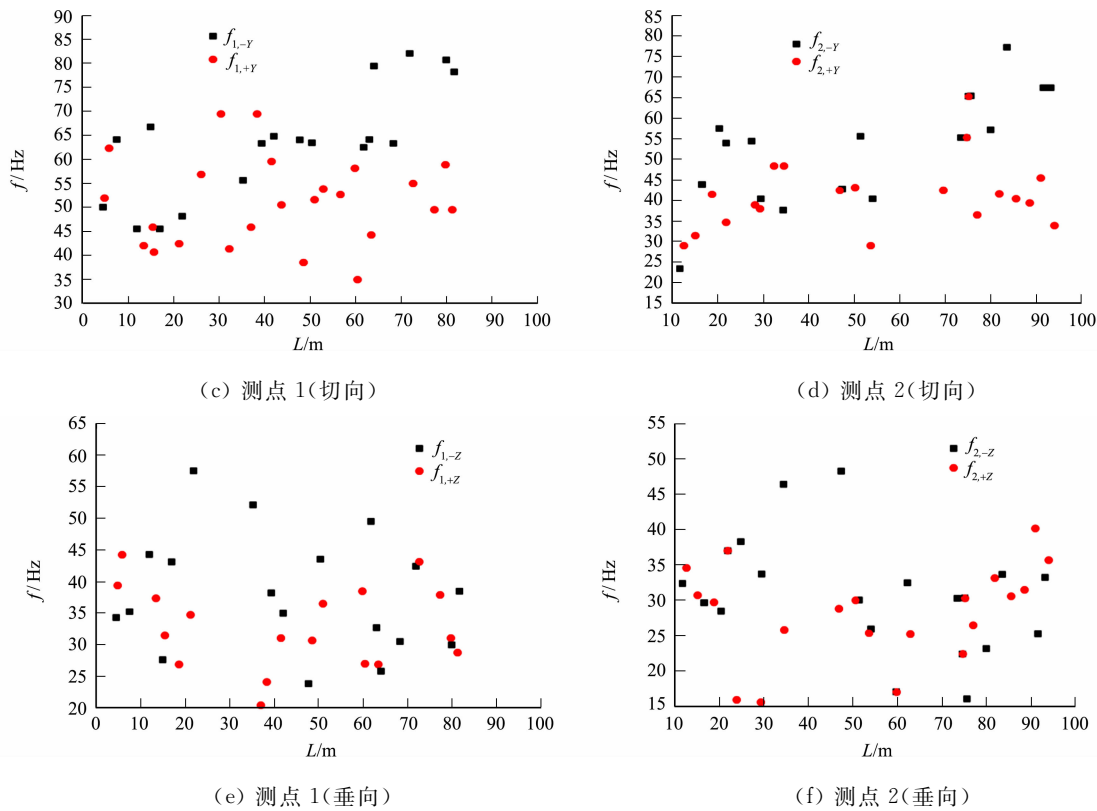


图 8 右线隧道下穿前、后测点的主频对比

Fig. 8 Comparison of main frequency of measuring points before and after right line tunnel undercrossing

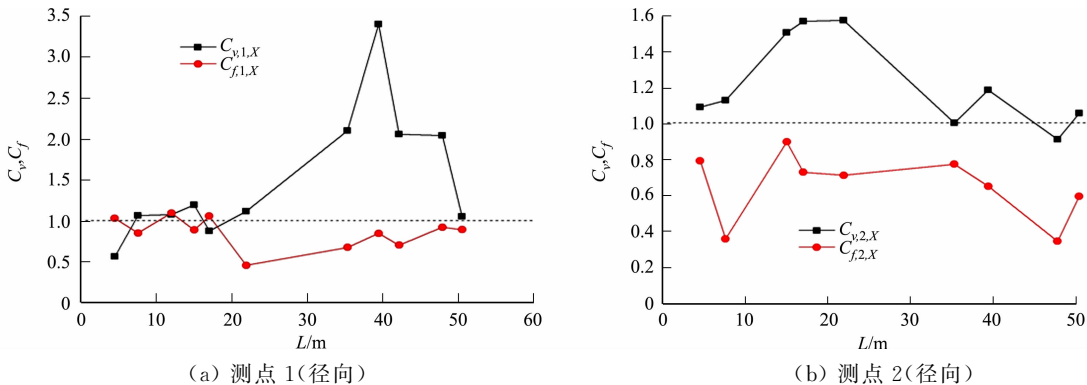
因此，振速影响系数 C_v 和主频影响系数 C_f 的计算式分别为

$$C_v = v_b / v_i, \quad C_f = f_b / f_i.$$

式中： v_i 为未形成空洞前测得的振速； v_b 为形成空洞后测得的振速； f_i 为未形成空洞前测得的主频； f_b 为形成空洞后测得的主频。

当距离小于 50 m 时，振速较大；当距离超过 50 m 时，振速已普遍降低至 $0.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下（图 7）。距离小于 50 m 时，振速影响系数与主频影响系数的变化图，如图 9 所示。图 9 中： $C_{v,1,X}$ 、 $C_{f,1,X}$ 分别表示测点 1 的径向 C_v 、 C_f 值；其他表示类似。由图 7、9 可得以下 2 个结论。

1) 振速影响系数大致呈现出“中间大，两头小”的特征，表明空洞形成后，放大作用随着掌子面距测点距离的增加而先增大后减小；当距离为 20~50 m 时，测点 1 放大系数较大，径向和垂向系数接近，普遍超过 2，径向系数最大超过 3，切向系数在 1.5 左右波动；当距离小于 25 m 时，垂向振速相对未形成空洞之前，增加了 $1.257 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，达 $2.182 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，超过控制值 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；当距离为 30~50 m 时，径向振速放大明显，增幅最大为 $0.997 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；当距离为 10~50 m 时，测点 2 垂向最大放大系数也超过 2.0。结合放大系数和增加幅值可知，垂向振速放大最大，径向振速次之，切向振速最小，第一层比第二层的振速放大效应更大。



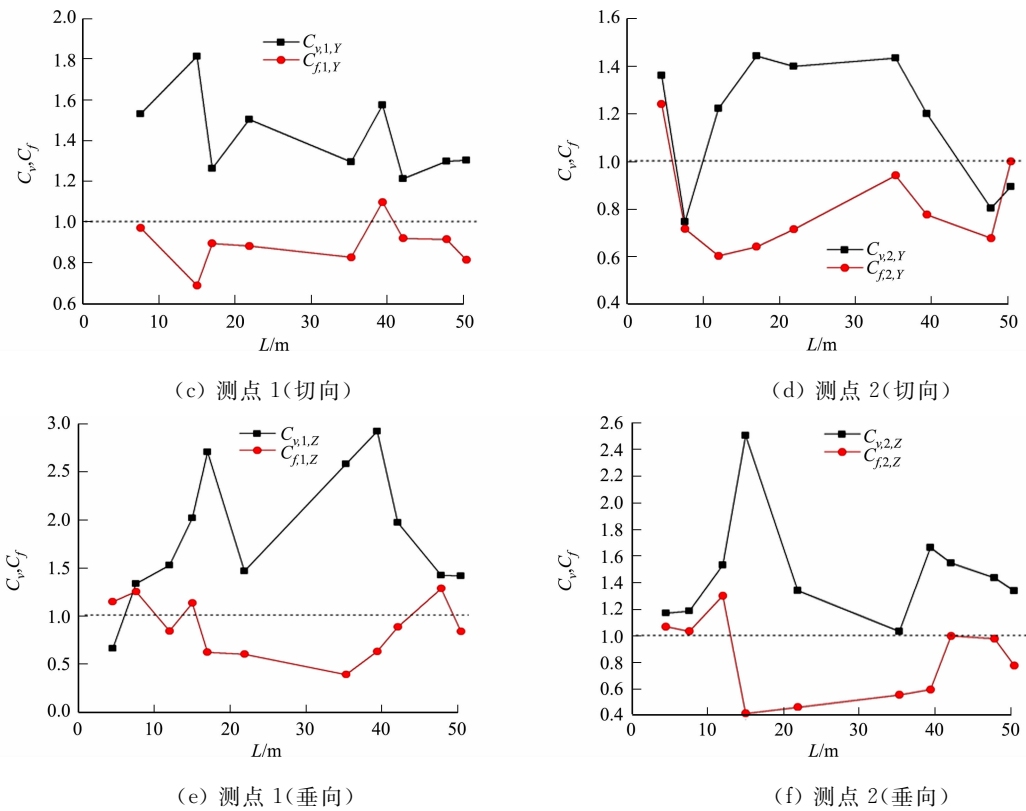


图 9 振速影响系数与主频影响系数的变化图

Fig. 9 Variation between influence coefficient of vibration velocity and main frequency

2) 空洞形成后,在 50 m 范围内,两个测点上的三向主频均有不同程度的降低,主频影响系数 C_f 大多数均小于 1,存在先减小后增大的过程;测点 1 的垂向 C_f 最小值为 0.39,测点 2 的垂向 C_f 最小值为 0.41;测点 1 的径向 C_f 最小值为 0.46,测点 2 的径向 C_f 最小值为 0.35;测点 1 切向 C_f 最小值为 0.68,测点 2 的切向 C_f 最小值为 0.60。总体而言,主频影响系数垂向最小,径向次之,切向最大。

当振速较大时,特别是振动主频越接近建筑物固有频率时,会对建筑物造成损害^[3-4]。空洞的存在会导致振速增加,主频减小。例如,由于空洞的存在,测点 1 的垂向振速增加幅值较大,而此时主频影响系数为 0.39,主频小于 20 Hz,接近房屋的固有频率 7.09 Hz,其他方向也普遍存在此类情况。工程右线隧道从民宅正下方穿过,施工单位应严格控制爆破装药量,控制爆破振速,除了个别点垂向振速超过 $2.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 外,3 个方向测得的振速均控制在 $1.6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。在隧道下穿房屋之前,仅民房窗台处出现个别细小裂缝,隧道下穿至工程结束后,民房窗台、墙壁开裂严重。因此,在爆破工程中,不能仅考虑隧道开挖至建筑物前的过程,就认为隧道通过后建筑物是安全的;而是应当充分认识空洞效应对振速放大、主频减小的影响,对空洞形成后的爆破控制,更要严格把控,尽可能减少对建筑物的损害。

4 结论

基于福建省厦门市石堀山隧道下穿民房段的大量自动化监测数据,详细分析振速及主频的变化规律,得出以下 4 个结论。

1) 爆破振速整体上随着测点与掌子面距离的减小而增大。在 238 组数据中,径向分量最大振速占比最多,达 44%;主频小于 30 Hz 的分量中,垂向分量占比最多,达 36.6%。三向振速中,垂向振速不一定总是最大,应综合振速与主频,选择优势分向振速或根据建筑物固有频率选择接近的主频对应的分向振速进行相关分析。

2) 隧道后方形成空洞后,在 10~50 m 范围内,将显著放大爆破振动速度,振速增幅最大达 $1.257\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,而主频有一定的衰减,径向和垂向主频衰减至与房屋固有频率接近。

3) 重新定义空洞影响系数,引入振速影响系数 C_v 和主频影响系数 C_f 描述空洞形成前后爆破振动

的变化规律.在50 m范围内,随着掌子面远离测点, C_v 先增加后减小,而 C_f 先减小后增大.对于空洞影响的综合效应,垂向最大,径向次之,切向最小. C_v 最大值达3.4, C_f 最小值为0.35.

4) 隧道下穿民宅时,不能仅仅考虑隧道开挖至建筑物前的过程,就认为隧道通过后建筑物是安全的,应充分认识到空洞效应对振速放大,主频减小的影响.对空洞形成后的爆破控制,更要严格把控,尽可能减少对建筑物损害.

参考文献:

- [1] 中国工程爆破协会,广东宏大爆破股份有限公司,浙江省高能爆破工程有限公司,等.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 张声辉,刘连生,钟清亮,等.露天边坡爆破地震波能量分布特征研究[J].振动与冲击,2019,38(7):224-232. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2004.03.029.
- [3] 毕卫国,石崇.爆破地震波引起结构响应的频率因素分析[J].爆破,2004,21(3):87-89. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2004.03.029.
- [4] 李洪涛,舒大强,卢文波,等.建筑物对爆破振动中不同频率能量成分的响应特征[J].振动与冲击,2010,29(2):154-158,227. DOI:10.3969/j.issn.1000-3835.2010.02.035.
- [5] 陈庆,王宏图,胡国忠,等.隧道开挖施工的爆破振动监测与控制技术[J].岩土力学,2005,26(6):964-967.
- [6] 陈晓斌,张家生,尹志政.城市隧道爆破振动测试分析研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(1):116-120,161. DOI:10.3969/j.issn.1673-0836.2008.01.023.
- [7] 平琦,马芹永,徐晓核.水库坝区竖井开挖爆破技术及振动测试分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):577-581. DOI:10.3969/j.issn.1673-0836.2009.03.033.
- [8] 高干,刘元雪,徐光伟,等.隧道扩建爆破震动控制研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(6):1285-1293. DOI:10.3969/j.issn.1673-0836.2010.06.032.
- [9] 张继春,曹孝君,郑爽英,等.浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(22):4158-4163. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2005.22.024.
- [10] 杨凌云.浅埋隧道爆破振动空洞效应研究[J].爆破,2012,29(3):127-130. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2012.03.031.
- [11] 石连松,高文学,王林台.地铁浅埋隧道爆破振动效应试验与数值模拟研究[J].北京理工大学学报,2018,38(12):1237-1243. DOI:10.15918/j.tbit.1001-0645.2018.12.005.
- [12] 高文学,颜鹏程,李志星,等.浅埋隧道爆破开挖及其振动效应研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊2):4153-4157.
- [13] 杨海书,林从谋,林丽群,等.复杂结构体系下隧道爆破震动对房屋影响的试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(2):65-69,79. DOI:10.3969/j.issn.1672-3767.2011.02.011.
- [14] 王辉,阳生权,常中民,等.轻轨隧道下穿建筑物爆破震动试验研究[J].湖南工业大学学报,2014,28(6):17-22. DOI:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.06.004.
- [15] 喻军,刘松玉,童立元.浅埋隧道爆破振动空洞效应[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(1):176-179. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2010.01.033.
- [16] 曹孝君.浅埋隧道爆破的地表震动效应研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [17] 李庆利.露天台阶爆破振动速度与频率预测研究[D].北京:首都经济贸易大学,2009.
- [18] 龚思礼.建筑抗振设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [19] 李永梅,孙国富.砌体房屋的爆破地震破坏机理和模型[J].北京工业大学学报,2001,27(1):61-63. DOI:10.3969/j.issn.0254-0037.2001.01.016.
- [20] 卢文波,张乐,周俊汝,等.爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析[J].爆破,2013,30(2):1-6,11. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2013.02.001.
- [21] 龙维祺,傅学生.爆破振速和振动频率的试验研究[J].有色金属(矿山部分),1986(6):34-36,39.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)