

# 钢管桩施工对邻近既有隧道的动力响应分析

尹洪桦<sup>1</sup>, 尹洪冉<sup>2</sup>, 胡明华<sup>1</sup>, 祝佳宇<sup>3</sup>

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 德州市陵城区房产管理局, 山东 德州 253000;

3. 德州市陵城区住房和城乡建设局, 山东 德州 253000)

**摘要:**为了分析在打桩振动作用下既有隧道的动力响应,在验证某工程实际的基础上,采用有限元软件基于桩-土-隧道动力相互作用模型,对打桩施工引起邻近既有隧道的响应问题进行数值计算,分析在不同打桩距离情况下既有隧道的振动速度、最大总位移和弯矩响应及规律。建议打桩施工过程中加强既有隧道打桩侧 1/4 拱的振动监测,加强既有隧道拱顶的总位移监测,打桩施工前判断是否对既有隧道打桩侧起拱线附近进行加固处理,为类似实际工程问题提供参考。

**关键词:**打桩振动;既有隧道;动力响应;有限元;桩-土-隧道动力模型

**中图分类号:**TU921

**文献标志码:**A

## 引言

近年来,国内外专家学者围绕隧道下穿对既有建筑物或基础影响的研究开展了大量的工作,但关于上部结构施工对地下既有隧道影响的研究并不多见,尤其是桩基打桩施工对既有隧道影响的研究颇少,随着地上结构物桩基打桩施工的需要和城市地下空间的发展,这类问题日益突出。李怡闻<sup>[1]</sup>等利用 ANSYS 有限元分析软件,对打桩引起隧道的振动进行了研究,分析了打桩荷载下隧道的振动规律,为确定打桩间距、深度以及打桩动力等参数提供了参考。谢世波<sup>[2]</sup>等在打桩过程中对桩周围土体的孔隙水压力进行了跟踪测试,发现桩周一定范围内的土体产生裂缝,土体处于塑性状态,土体有效应力降低。尹雄<sup>[3]</sup>等采用有限元-无限元耦合模型对打桩引起近场波动的问题进行数值模拟。

冯龙飞<sup>[4]</sup>分析了钻孔灌注桩近距离施工对邻近隧道的影响,对桩周土体软化产生的应力传递效果进行了探讨。练健飞<sup>[5]</sup>指出桩基施工对隧道影响的两个方面:一是桩基振动施工对隧道的影响,二是桩基成孔后浇筑

混凝土前地基中成孔对隧道的影响。楼晓明<sup>[6]</sup>等讨论了振陷和地面沉降对隧道产生附加沉降的可能性,指出地面下沉使长桩基础的实测沉降偏小。朱红霞<sup>[7]</sup>分析桩基施工过程引起地铁结构的变形响应,其得知桩基施工顺序对隧道结构的变形和受力的影响较小。罗雪贵<sup>[8]</sup>分析桩基施工的不同水平距离对邻近隧道的影响差异,研究发现桩基施工对邻近隧道的竖向变形(与水平变形相比)影响较大。随水平位移增大,邻近隧道的水平、竖向位移都近似呈指数减小。徐云福<sup>[9]</sup>等在试桩过程中对隧道的水平位移和竖向沉降进行现场监测,监测结果表明,隧道管片位移最大值发生在与试桩相对应的剖面上;随着试桩的距离增大,管片竖向位移和水平位移均减小。且管片以发生水平位移为主,竖向位移约为水平位移的一半。

本文将采用 Midas/GTS 有限元分析软件建立基于非线性时程分析计算的桩-土-隧道动力相互作用模型。并且在某工程实测数据模拟验证的基础上,分析不同打桩距离引起近邻既有隧道的振动、位移、弯矩响应规律,提出针对类似工程打桩距离的建议值及施工控制方案,为类似实际工程问题提供一定参考。

收稿日期:2015-11-06

作者简介:尹洪桦(1992-),男,山东德州人,硕士生,主要从事岩土工程方面的研究,(E-mail) woshiyinhonghua@126.com

### 1-工程概况

某建筑物基础采用钢管桩形式,钢管桩桩长 24 m,钢管外径为 1 m,管壁厚度为 0.02 m,在距离桩 10 m 处有一地铁隧道,隧道埋深为 14 m,直径为 8 m。该地区土层分三层,第一层为黏土,厚度为 10 m,第二层为砂土层,厚度为 12 m,第三层为中风化层。桩-隧道平面位置如图 1 所示。

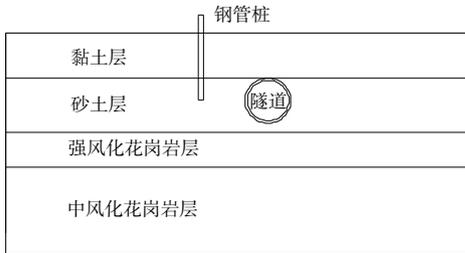


图 1 桩-隧道平面位置

### 2-模型的建立

#### (1)几何模型及参数

采用二维平面模型,模型尺寸为 50 m × 100 m,模型如图 2 所示。

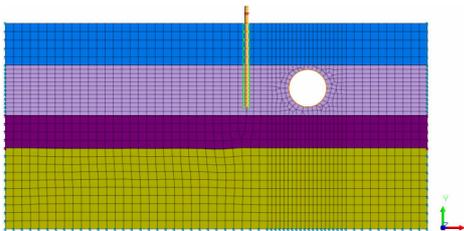


图 2 模型

岩土体按摩尔-库伦理想弹塑性材料考虑,钢管桩、隧道衬砌为弹性材料,桩和隧道衬砌均采用 1D 梁单元模拟。根据勘察报告和相关规范,计算模型中各材料取值见表 1。

表 1 各材料参数表

材 料	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力/(kN/m <sup>2</sup> )	内摩擦角 /°	重度/(kN/m <sup>3</sup> )
黏土	16.8	0.34	48	12	17
砂土	40.6	0.31	3	24	18.6
强风化花岗岩	400	0.29	100	30	21
中风化花岗岩	30280	0.24	900	43	24.8
钢管桩	200000	0.25	-	-	80
隧道衬砌	25800	0.26	-	-	24

#### (2) 边界条件<sup>[10]</sup>

##### ①特征值分析采用弹性边界条件

要进行桩基打桩动力时程分析,首先进行模态分析,求取有限元体系的特征周期,以计算其阻尼参数,在 MIDAS/GTS 有限元软件中,进行特征值分析时采用弹性边界条件,一般用曲面弹簧定义,曲面弹簧系数计算公式:

竖直地基反力系数:

$$k_v = k_{v0} \cdot \left(\frac{B_v}{30}\right)^{-3/4}$$

水平地基反力系数:

$$k_h = k_{h0} \cdot \left(\frac{B_h}{30}\right)^{-3/4}$$

式中,  $k_{v0} = \frac{1}{30} \cdot \alpha \cdot E_0 = k_{h0}$ ,  $B_v = \sqrt{A_v}$ ,  $B_h = \sqrt{A_h}$ ,  $A_v$  和  $A_h$  分别是计算模型的竖直方向和水平方向面的截面积,  $E_0$  为地基的弹性系数,  $\alpha$  一般取为 1.0,单位为 kgf/cm<sup>3</sup>。

##### ②时程分析采用黏弹性人工边界

桩基打桩时程分析时,若采用一般静力边界条件会由于波的反射作用而产生较大误差,故时程采用 Lysmer (1969 年)提出的黏性边界条件。为了定义粘性边界需要计算相应的岩土体在 X、Y 方向上的阻尼比。阻尼比计算公式:

P 波:

$$C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \gamma \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\gamma \cdot 9.81}} = c_p \cdot A$$

S 波:

$$C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \gamma \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\gamma \cdot 9.81}} = c_s \cdot A$$

式中,  $\lambda$  为体积弹性系数 (kN/m<sup>2</sup>),  $\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ ,  $G$  为剪切弹性系数 (kN/m<sup>2</sup>),  $G = \frac{\nu E}{2(1 + \nu)}$ ,  $E$  为弹性系数 (kN/m<sup>2</sup>),  $\nu$  为土体泊松比,  $A$

为截面积 (m<sup>2</sup>)。

##### (3) 选取打桩动力

目前常用的桩锤有自由落锤、柴油锤、蒸汽锤和液压锤等,但由于各桩锤作用方式不同,故打桩动力的实现形式也有较大差异,为近似模拟打桩过程,通过采取控制打桩动力峰值的方式简化不同打桩动力形式<sup>[11]</sup>。选取打桩动力峰值为 1500 kN,作用时间均为 12 s。打桩动力时程曲线如图 3 所示。

### 3 计算方案

为了研究打桩距离(隧道与桩基础的距离)对既有隧道的影响,分别取打桩距离 8 m ~ 48 m (相当于 1D ~ 6D, D 为隧道洞径),各模拟方案见表 2。

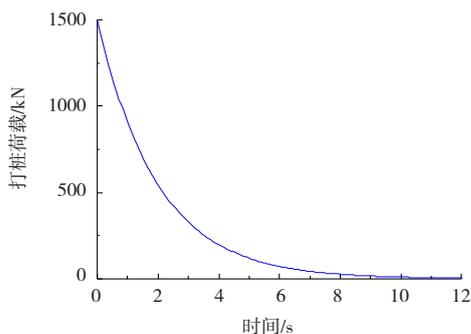


图3 打桩动力时程

表2 计算方案汇总

方案	打桩距离/m	打桩深度/m	打桩动力强度/kN
1-1	8(1D)	10	1500
1-2	16(2D)	10	1500
1-3	24(3D)	10	1500
1-4	32(4D)	10	1500
1-5	40(5D)	10	1500
1-6	48(6D)	10	1500

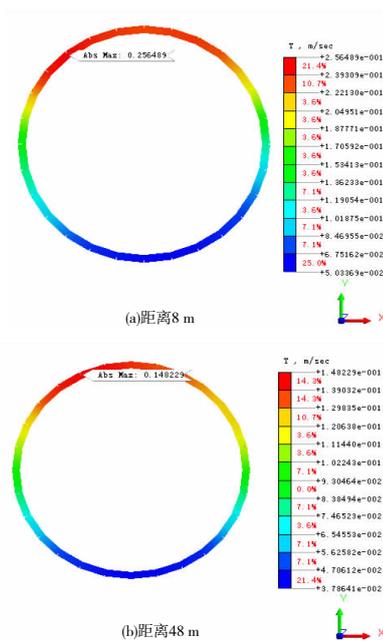


图4 隧道最大振动速度云图

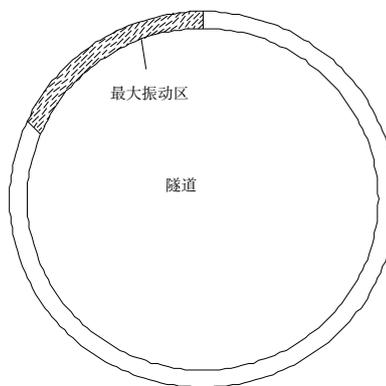


图5 隧道最大振动速度位置

### 4 实例验证

为了保证模型计算的可行性及准确性,对文献中的实例进行计算<sup>[12]</sup>,实例中土体模量 15 MPa,泊松比 0.4,重度 19 kN/m<sup>3</sup>,桩型 φ600,提取距离桩基础 10 m、20 m、30 m 和 40 m 处的地面振动速度时程响应,振动速度峰值的计算结果与实测结果进行对照,模型振动速度峰值计算值与实测值见表 3。

表3 计算值与实测值汇总

距离/m	振动速度峰值/(cm/s <sup>2</sup> )	
	计算值	实测值
10	1.13	1.3
20	0.69	0.63
30	0.38	0.47
40	0.21	0.27

由表 3 可以看出模型振动速度的计算值与实测值基本接近,说明该模型符合计算要求且能达到较好的精确度,本文采用的计算模型是可行的。

### 5 不同打桩距离对隧道的影响

#### (1) 既有隧道振动的影响分析

通过对方案 1-1~1-6 进行计算,得到在相同打桩深度和相同强度动力的情况下不同打桩距离引起既有隧道振动的响应,打桩距离 8 m 和 48 m 对应的隧道最大振动速度云图如图 4 所示,不同打桩距离的隧道最大振动速度区域汇总如图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知,在不同打桩距离情况下既有隧

道的最大振动位置都出现在隧道打桩侧的 1/4 拱附近。因此,在打桩过程中应着重对隧道打桩侧 1/4 拱区域的振动监测,以保证打桩引起的隧道振动安全。不同打桩距离的隧道最大振动速度时程及趋势如图 6 所示。

由图 6 可知,当打桩距离 1D~4D 时,随着打桩距离逐渐增大,隧道最大振动速度曲线较陡;当打桩距离 4D~6D 时,随着打桩距离逐渐增大,隧道最大振动速度曲线较缓,说明在 1D~4D 范围内既有隧道的最大振动速度减少较快且引起隧道振动速度较显著,这说明存在一定的打桩距离对既有隧道的最大振动速度影响较大。因此,在打桩施工之前应选取根据具体的场地条件、工程地质条件等选取合适的打桩距离,以避免打桩引起既有隧道的过大振动而产生安全隐患。

#### (2) 既有隧道位移的影响分析

通过对方案 1-1~1-6 进行计算,得到在相同打

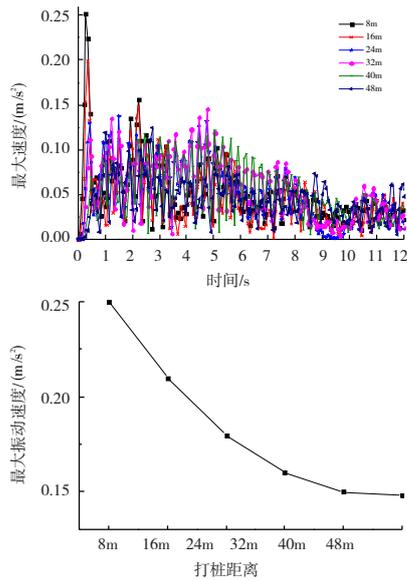


图 6 隧道最大振动速度

桩深度和相同强度动力的情况下不同打桩距离引起既有隧道位移的响应,打桩距离 8 m 和 48 m 对应的隧道最大总位移计算云图如图 7 所示。不同打桩距离的隧道最大总位移区域汇总如图 8 所示。

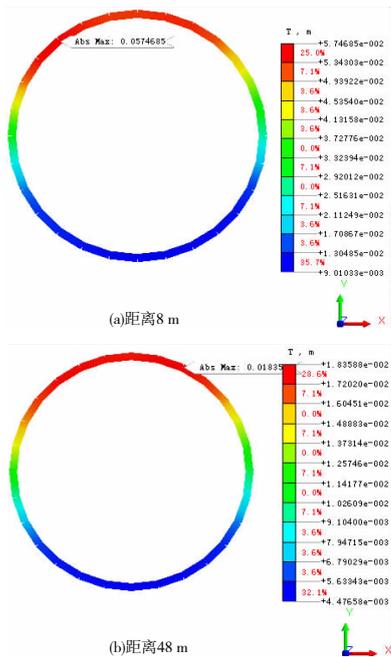


图 7 隧道最大总位移云图

由图 7 和图 8 可知,在不同打桩距离情况下既有隧道的最大总位移都出现在隧道的拱顶附近。当打桩距离 1D~3D 时,隧道最大总位移出现在隧道的上部偏左位置;当打桩距离 3D~6D 时,隧道最大总位移出现在隧道的上部偏右位置且在拱顶附近,这说明存在一定的打桩距离界限,使既有隧道的最大总位移位置分别出现在

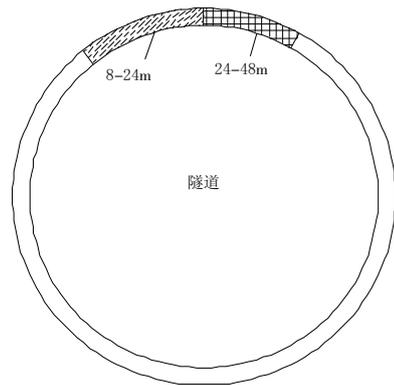


图 8 隧道最大总位移位置

拱顶附近的左、右位置。因此,在打桩施工过程中,应着重加强隧道拱顶附近的位移监测,及时预警以保证既有隧道运营安全。不同打桩距离的隧道最大总位移时程及趋势如图 9 所示。

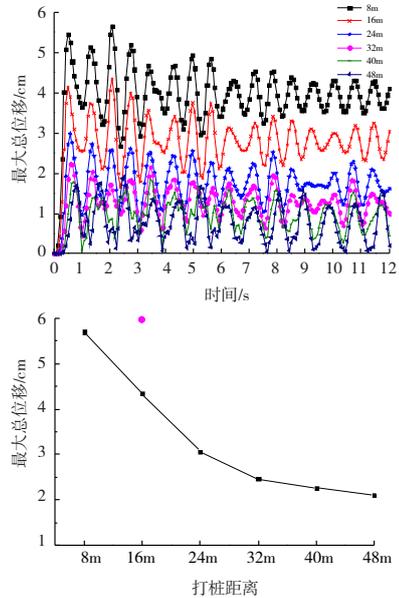


图 9 隧道最大总位移

由图 9 可知,当打桩距离 1D~4D 时,随着打桩距离逐渐增大,隧道最大总位移曲线较陡;当打桩距离 4D~6D 时,随着打桩距离逐渐增大,隧道最大总位移曲线较缓,说明在 1D~3D 范围内既有隧道的最大总位移减少较快且对隧道最大总位移的影响较显著,这说明存在一定的打桩距离对既有隧道的最大总位移影响较大。因此,在打桩施工之前,因根据具体的施工情况、场地条件等选取一定的打桩距离以避免引起既有隧道过大位移,进而影响既有隧道运营安全。

(3) 既有隧道弯矩的分析

通过对方案 1-1~1-6 进行计算,得到在相同打桩深度和相同强度动力的情况下不同打桩距离引起既

有隧道附加弯矩的响应,打桩距离 8 m 和 48 m 对应的隧道最大弯矩计算云图如图 10 所示。不同打桩距离的隧道最大弯矩区域如图 11 所示。

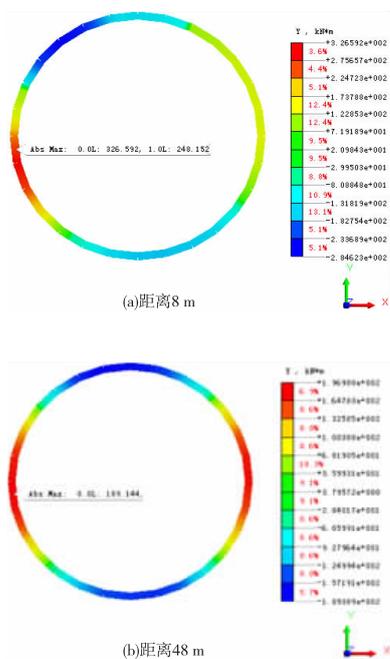


图 10 隧道最大弯矩云图

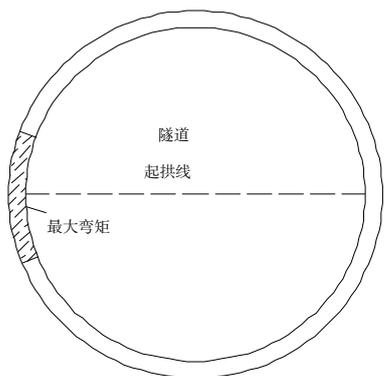


图 11 最大弯矩位置

由图 10 和图 11 可知,在相同打桩深度、相同强度动力和不同打桩距离的情况下,既有隧道的最大弯矩均出现在隧道的起拱线附近(打桩侧)。不同打桩距离的隧道最大弯矩时程及趋势如图 12 所示。因此,在打桩施工前,应根据实际情况判断是否对隧道进行加固处理,尤其是打桩侧的隧道起拱线附近,另外在隧道设计时也应考虑后期是否存在打桩施工的情况而进行加强设计。

由图 12 可知,当打桩距离 1D ~ 3D 时,随着打桩距离逐渐增大,隧道最大弯矩曲线较陡;当打桩距离 4D ~ 6D 时,随着打桩距离逐渐增大,隧道最大弯矩曲线较缓,说明在 1D ~ 3D 范围内随着距离增大既有隧道的最

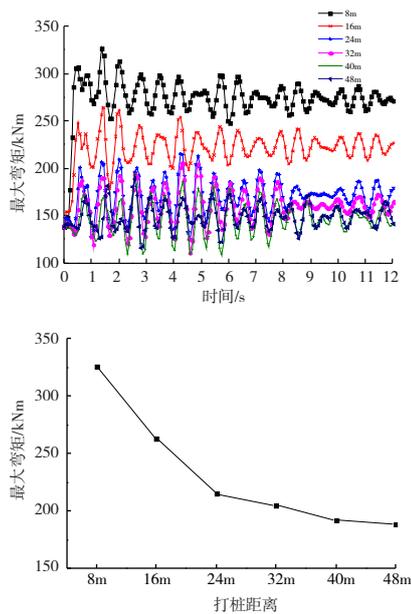


图 12 隧道最大弯矩

大弯矩减少较快且对隧道最大弯矩的影响较显著,这说明存在一定的打桩距离对既有隧道的最大弯矩影响较大。因此,打桩施工应控制一定的打桩距离以保证既有隧道的抗弯承载能力。

## 6 结论

(1) 在不同打桩距离情况下既有隧道的最大振动位置均出现在隧道打桩侧 1/4 拱附近,因此在打桩施工过程中加强既有隧道打桩侧 1/4 拱附近的振动监测;随着打桩距离的增大,打桩引起的既有隧道振动速度逐渐变小,且打桩距离大于 4D 后振动速度趋于稳定值。

(2) 在不同打桩距离情况下既有隧道的最大总位移位置均出现在拱顶附近,打桩距离在 1D ~ 3D 范围变化时,打桩距离对既有隧道最大总位移的影响较显著,且当打桩距离大于 4D 后既有隧道的最大位移变化不明显。因此,打桩施工过程中应加强既有隧道拱顶的位移监测。

(3) 在不同打桩距离情况下既有隧道的最大弯矩均出现在隧道打桩侧的起拱线附近,且打桩距离在 1D ~ 3D 变化时既有隧道的弯矩变化较明显。因此,在打桩施工前应判断是否加固既有隧道,尤其打桩侧隧道起拱线附近区域,打桩施工应控制一定的打桩距离以保证既有隧道的抗弯承载能力。

## 参考文献:

[1] 李怡闻,周健.土-结构动力相互作用分析打桩引起相邻隧道振动[J].岩土工程学报,2007(1):60-65.

- [2] 谢世波,陆林强.大口径开口钢管桩打桩过程对周围土体的影响分析[J].上海铁道大学学报,1997(2):67-72.
- [3] 尹雄,杨宝玉.打桩振动环境效应的有限元-无限元耦合分析[J].岩土力学,1999(3):51-55.
- [4] 冯龙飞,杨小平,刘庭金,等.跨线桥桩基施工对邻近隧道影响的有限元分析[J].铁道建筑,2014(1):37-39.
- [5] 练健飞.某地铁上盖建筑桩基础对地铁隧道影响分析[J].科技创新导报,2008(21):102-102,104.
- [6] 楼晓明,刘建航.高层建筑桩基础对邻近隧道影响的监测与分析[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(9):1014-1018.
- [7] 朱红霞,周文权,梁桥,等.匝道桩基施工对地铁结构变形的数值分析[J].湖南工程学院学报:自然科学版,2015,25(1):70-75.
- [8] 罗雪贵.桩基施工对邻近轨道交通的影响分析[J].路基工程,2014(5):140-143.
- [9] 徐云福,王立峰.近邻桩基施工对城市地铁隧道的影响分析[J].岩土力学,2015(S2):577-582.
- [10] 孙文,梁庆国,安亚芳,等.深埋公路隧道在双向地震动作用下的最大动力反应分析[J].西北地震学报,2012(4):369-374,382.
- [11] 李治.Midas/GTS 在岩土工程中的应用[M].北京:中国建筑出版社,2013.
- [12] 陈云敏,凌道盛,周承涛.打桩振动近场波动的数值分析和实测比较[J].振动工程学报,2002(2):58-64.

## Analysis of Dynamic Response of Steel Pipe Piles Construction on Adjacent Existing Tunnel

YIN Honghua<sup>1</sup>, YIN Hongran<sup>2</sup>, HU Minghua<sup>1</sup>, ZHU Jiayu<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064; 2. Dezhou Lingcheng District Housing Authority, Dezhou 253000, China; 3. Dezhou Lingcheng District Housing and Urban Construction Bureau, Dezhou 253000, China)

**Abstract:** In order to analyze the dynamic response of the existing tunnel under the action of pile driving vibration, on the basis of verifying the actual project, the finite element software is used to calculate the response of the adjacent existing tunnel caused by pile driving construction based on the pile soil interaction model. Response and regularity of the vibration speed of existing tunnel, the maximum total displacement and bending moment under different pile driving distance are analyzed. As a suggestion, the vibration monitoring of 1/4 side arch of the existing tunnel is strengthened in the process of piling construction, the monitoring of the total displacement of existing tunnel vault is strengthened, and whether need to reinforce the existing tunnel and the side of the arch bridge before piling construction is judged on. It provides reference for similar practical engineering problems.

**Key words:** pile driving vibration; the existing tunnel; the dynamic response; finite element; pile-soil-tunnel dynamic model