

土 - 结构动力相互作用分析打桩引起相邻隧道振动

李怡闻, 周 健

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 某集装箱码头打桩施工紧邻拟建的大直径越江隧道, 桩身长度达到 50 m, 隧道直径约 18 m。为了分析打桩对该隧道可能产生的振动影响, 采用有限元模拟打桩引起的隧道振动。该问题的本质是桩 - 土 - 隧道三者组成的体系在冲击荷载下的整体动力响应。桩与土、土与隧道之间的力学关系是这类问题的重点和难点。这种力学关系实质上是动荷载作用下的动力接触关系。利用 ANSYS 的瞬态分析和接触单元, 通过对动力参数和接触参数进行合理设置, 在验证了某工程实例的基础上, 对该问题进行了有效的数值模拟, 从而分析出隧道在打桩冲击荷载下的振动规律, 为确定打桩间距、打桩深度以及打桩能量等重要参数提供参考。

关键词: 桩 - 土 - 隧道动力相互作用; 动力接触; 有限元分析

中图分类号: TU354

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2007)01 - 0060 - 06

作者简介: 李怡闻(1981 -), 男, 上海人, 硕士, 主要从事桩、隧道等各类岩土工程的研究和数值模拟。E-mail: yiwen_lee@126.com。

Analysis of tunnel vibration due to pile driving under soil-structure dynamic interaction

LI Yi-wen, ZHOU Jian

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The pile driving of a container terminal is close to the large-diameter tunnel to be built, with the length of pile being up to 55 m and the diameter of tunnel being about 18 m. To analyze the potential vibration of the tunnel affected by pile driving, the vibration was simulated with FEM. The problem was the dynamic reaction of the whole system consisting of piles, soil and tunnel under the impact load of pile driving. The mechanical relationship among piles, soil and tunnel was the key and difficulty for such kind of problem. In fact, it was the relationship of dynamic contact under dynamic load. According to the transient analysis and contact elements of ANSYS, and based on the verification of a practical project, the problem was successfully simulated by setting up dynamic and contact parameters reasonably, then the vibration of tunnel under the impact load of pile driving was analyzed. Important parameters including safe distance, pile length and energy of pile driving were provided for reference.

Key words: pile-soil-tunnel dynamic interaction; dynamic contact; FEA

0 引 言

宰金珉等^[1]指出:“无论从静力学还是动力学的角度来分析结构的受力状态, 土与结构的相互作用都是不可忽略的, 只有把结构与基础和地基作为相互作用又相互制约的整体分析, 才能得到比较符合实际的计算结果”。

关于土 - 结构动力相互作用的研究, 较多的是地震对地表建筑的破坏^[2]。阪神地震后, 许多学者开始研究地震对大型地下构筑物的破坏^[3]。

另一类碰到较多的土 - 结构动力作用问题就是打桩振动问题, 但考虑较多的是打桩对周边土体和地面建筑的影响^[4-5]。而对打桩引起周边地下构筑物的振动

研究较少。随着城市地下空间的发展, 这类问题日益突出。本文的工程背景就是在某大直径隧道附近打入预制混凝土长桩。

土和结构的非线性接触是土 - 结构相互作用问题的难点之一^[1]。较为简化的处理是土 - 结构共用节点^[4-5]。但是准确来讲, 土与结构间的关系应该是摩擦接触^[6], 而对动力问题来说就是动力接触^[7]。

本文将采用 ANSYS^[8]建立基于动力接触^[9]的桩 - 土 - 隧道动力相互作用模型。在对某工程实测数据做出验证后, 分析不同打桩距离, 打桩深度和打桩能量

对隧道振动的影响规律, 给出针对本工程的各打桩施工参数的建议值. 并为日后这类问题的计算提供借鉴.

1 工程概况

某集装箱码头位于长江入海口, 由于该地区土质属于软土, 持力层较深, 因此该码头部分建筑物采用预制混凝土桩. 可以选择的持力层为第五层或第七层, 对应桩长分别为 35 m 或 50 m. 紧邻该码头处拟建一条直径 18 m 的大直径盾构隧道, 隧道中心埋深约为 20 m. 图 1 是桩、土、隧道三者关系的示意图.

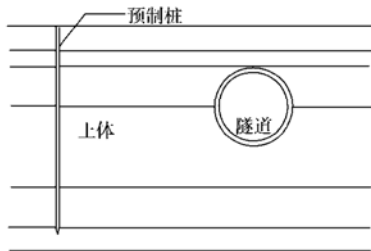


图 1 桩、土、隧道三者关系

Fig. 1 Relationship among piles, soil and tunnel

表 1 是计算所需的土层参数. 表 2 是桩、隧道的几何尺寸以及材料属性.

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层 编号	厚度 /m	密度 /(kg·m ⁻³)	E _s /MPa	泊松比	c /kPa	φ /(°)
1	6	1700	3.43	0.35	7	1.1
2	4	1860	8.84	0.25	9	7.9
3	8	1880	2.43	0.4	12	18.8
4	14	1730	0.7474	0.3	17	1.6
5	3	1810	1.687	0.3	22	8.1
6	9	1800	3.557	0.25	22	5
7	6	1920	11.034	0.3	15	18.3
8	14	2020	10.56	0.2	19	5.0
9	60	1960	40.572	0.2	5	29.7

表 2 桩、隧道参数

Table 2 Parameters of piles and tunnel

类型	几何尺寸 /m	密度 /(kg·m ⁻³)	E _s /MPa	泊松比
桩	B=0.8	2400	30000	0.18
隧道	R=9, t=0.6	2400	34500	0.18

2 计算模型

2.1 桩 - 土 - 隧道共同作用模型

过去在分析土与结构问题时, 常把土体用弹簧模拟, 施加在结构周围. 这种做法对单一结构是可行的, 因为在这些问题中, 土体只是作为这些结构的支承条件. 比如桩和桩周土、隧道与围岩以及我们熟知的弹性地基梁和基坑挡墙和坑内外土体.

但是在本问题中桩、隧道两个结构同时和土作用. 打桩的冲击荷载作用在桩上引起桩的振动, 桩身将振动传递给周围土体, 土体再带动隧道一起振动. 所以,

土体已经不仅仅起到简单的支承作用, 更重要的是起到传递振动的介质作用. 因此, 用弹簧模拟土体不适合这类问题.

较合理的模型是建立三者共同作用的模型, 也就是在模型中同时建立桩、土和隧道单元. 考虑到计算速度, 本文采用二维平面模型, 模型中的桩、土、隧道管片均用 4 节点平面单元模拟, 三者有限元模型如图 2 所示.

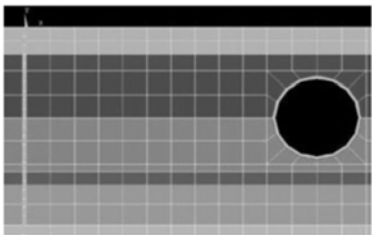


图 2 桩、土、隧道有限元模型

Fig. 2 FEM model of piles, soil and tunnel

由于隧道在纵向相当于无限长, 因此, 可以直接采用平面单元. 但是桩的转化则需要考虑等效关系. 考虑到桩和打桩荷载沿隧道纵向相当于点和集中力, 而采用平面单元后则相当于线和均布线载, 本文将采用位移一致的原则将空间问题中的桩和桩顶集中荷载等效为平面问题中的“桩体”和桩顶线载.

2.2 土 - 结构的动力接触关系

土 - 结构共同作用模型中的关键问题是土和结构之间的作用方式. 一种简化的处理是结构单元和土单元共用节点. 这种连接方式的最大特点是结构和土体在连接处位移是一致的. 对于土 - 结构之间的法向受力变形, 这种处理方法是接受的, 比如基坑的侧向变形. 但是对于两者之间切向的受力变形, 是不能接受的, 比如桩和桩侧土的相对滑动.

能够比较准确地反映土和结构之间力学关系的是接触关系. ANSYS 提供了丰富的接触类型. 针对本问题, 从接触双方的地位考虑, 采用刚性体 (rigid body) 和变形体 (deformable body) 之间的接触模式, 其中把桩和隧道作为刚性体, 土作为变形体; 从接触区域的类型考虑, 采用线和线之间的接触, 即桩、隧道的外廓线和其周围的土层边线接触; 从接触的摩擦类型考虑, 桩侧以及隧道的接触采用标准 (standard) 摩擦, 即允许相对滑动, 而在桩底处考虑到桩尖的作用, 桩底不会出现相对滑移, 因此桩底处的接触采用粗糙 (rough) 摩擦.

桩土摩擦系数 μ 是影响桩与桩侧土之间受力变形的一个重要参数, 它与桩土材料性质有关^[10]. 桩土界面上切向应力 τ 和法向应力 σ_x 存在如下关系:

$$\tau = \mu \sigma_x = \mu K_0 \sigma_y = \beta \sigma_y, \tag{1}$$

式中, σ_y 是土的竖向有效应力, K_0 是静止土压力系数, β 是根据经验得出桩土间的摩阻力参数。由式 (1) 可得

$$\mu = \beta / K_0 \quad , \quad (2)$$

K_0 由各土层的 c , φ 值计算得到, β 可按表 3 取值。

表 3 摩阻力参数 β 取值

Table 3 Values of friction parameter β	
土类	β 取值
饱和软土	0.15~0.25
黏性土、粉土	0.25~0.40
砂土	0.35~0.5

另一方面, 打桩的冲击荷载是一个动荷载。所以该问题的本质是桩-土-隧道三者组成的结构体系在冲击荷载下的整体动力响应, 桩与土、土与隧道之间的接触关系实质上是动荷载作用下的动力接触关系。

本模型采用 ANSYS 提供的瞬态分析功能计算模型的动力响应。其求解的基本运动方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad , \quad (3)$$

式中, $[M]$, $[C]$ 和 $[K]$ 分别是质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

ANSYS 提供 3 种瞬态求解方法: 完全法 (Full)、缩减法 (Reduced)、和模态叠加法 (Modal), 本模型采用完全法求解。

时间积分方法则采用 Newmark 方法^[9], 该方法有两个主要积分参数: α 和 β , 这两个值的选取将影响求解的收敛性。这两个参数的默认值是 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.252$, 这两个值为恒定平均加速度方案。

动力求解的另两个重要参数是质量阻尼 Alpha 和刚度阻尼 Beta, 岩土工程中对这两个参数的常用取法是 0.25 和 0.5。

2.3 冲击荷载形式和边界条件

根据相关资料, 打桩时, 桩锤与桩顶接触的时间约 10 s^[5]。假定冲击荷载施加方式为线性加载^[11], 影响时间取 10 s, 则冲击荷载分布形式如图 3 所示。 F_2 为打桩冲击荷载峰值, 由锤重、落距和冲击时间决定, F_1 为桩的自重。由于本文采用的是二维平面模型, 因此不能直接取实际的桩顶集中荷载, 而是根据位移一致关系转化为沿隧道纵向分布的桩顶均布线载。

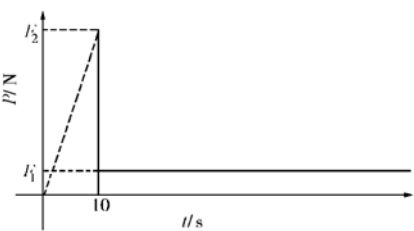


图 3 冲击荷载形式

Fig. 3 Types of impact load

考虑到打桩引起的振动随着离桩的距离的增大而减小, 因此模型的宽度取桩左右各 300 m 作为影响范围, 深度方向取桩长的 3 倍。另外, 本文不考虑打桩引起的超孔隙水压力对振动的影响。

3 实例验证

为验证本模型的准确性, 首先对文献[5]中的实例加以验证。实例中土层平均模量 15 MPa, 泊松比 0.4, 密度 1900 kg·m⁻³, 桩型 ϕ 600, 锤重 4 t, 落距 2 m, 冲击时间取 8 s。该实例给出了打桩深度 12~24 m 时, 距离桩心 5、10、20、30、40 m 处的地面振动速度峰值。表 4 列出了这些实测值与本模型的计算值。

表 4 实测值与计算值对比

Table 4 Comparison between measured and caculated values		
距桩心距离 /m	地表振动速度峰值/(mm·s ⁻¹)	
	资料实测值	本模型计算值
5	19	18.7
10	13	15.9
20	6.3	8.5
30	4.7	4.5
40	2.7	2.7

从与实测数据的比较中可以看出, 本模型的计算值与实测值基本吻合, 特别是当离桩心稍微有一段距离之后。文献[5]的计算结果也有类似的现象, 并指出在距离打桩很近的范围内, 由于土的塑性, 弹性模型计算值要高于实测值。但是对于一定距离外的场地, 弹性模型的计算值与实测值非常接近。

考虑到隧道不可能非常接近打桩点, 以至于进入土的塑性振动区, 因此, 本模型对于分析距离打桩有一定间距的隧道是可行的。

4 各打桩参数对隧道振动的影响

为比较不同打桩参数对隧道的振动影响, 对表 5 中的 6 种不同方案进行计算分析。

表 5 不同打桩方案

Table 5 Different cases of piling				
方案编号	桩与隧道间距离 /m	打桩深度 /m	锤重 /t	落距 /m
1	50	50	8	3
2	100	35	8	3
3	100	50	8	3
4	100	50	4	6
5	100	50	4	3
6	200	50	8	3

其中 1、3、6 号方案用于分析打桩距离对隧道的影响。2、3 方案用于分析打桩深度对隧道的影响。3、4、5 方案用于分析打桩能量对隧道的影响。

4.1 隧道截面最不利振动位置分析

在比较不同打桩参数之前, 我们先分析一下隧道

截面上最不利的振动位置。表 6 是根据 6 种方案的计算结果, 整理出的隧道截面上出现最大振动速度的位置。

表 6 隧道截面振速最大部位

Table 6 Position of the maximum vibration velocity						
方案编号	1	2	3	4	5	6
最大振速位置	离桩较近侧	顶部	顶部	顶部	顶部	顶部

从表 5 中可以发现, 除了 1 号方案出现在离打桩较近的一侧, 其余方案的最大振速都出现在隧道顶部。

分析其原因, 6 种方案中, 只有一号方案打桩距离隧道是 50 m, 而其余方案打桩距离隧道是 100 m 或 200 m。也就是说, 在打桩深度和打桩能量确定的条件下, 桩周围存在一个临界距离, 当隧道与桩的间距小于这个临界距离后, 隧道振动的最不利位置主要由距离振动源的远近控制, 即出现在离振动源较近的隧道近侧, 而当两者的距离大于这个临界距离后, 隧道的最不利振动截面, 主要受到上覆土厚度的控制, 既出现在覆土最浅的隧道顶部。

由此可得出结论, 隧道受打桩振动影响最大的部位由打桩间隔距离和隧道上覆土厚度共同决定。离打桩点越近, 上覆土越浅, 振动越大。因此隧道受打桩影响最不利的振动位置一般出现在如图 4 所示的隧道顶部与隧道离桩较近侧之间的 1/4 圆弧上。这为将来隧道振动监测点的布置提供了依据。

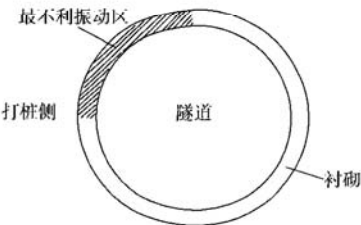


图 4 隧道最不利振动区

Fig. 4 Area of most severe vibration

4.2 不同打桩间隔距离的分析

下面比较 1、3、6 号方案, 这 3 个方案的打桩深度、锤重和落距均相同, 不同的是三者距离隧道分别是 50、100 和 200 m。表 7 列出了 3 种方案下隧道的最大振动速度。

表 7 不同间隔距离下隧道最大振动速度

Table 7 The maximum vibration velocity of tunnel at different distances		
方案编号	间隔距离/m	最大振动速度/(mm·s ⁻¹)
1	50	3.59
3	100	1.16
6	200	0.32

显而易见, 隧道的振动速度随着打桩间隔距离的增大而减小。这和目前其他方法的研究结果是一致的。但是对于大型地下构筑物, 比如说本文的大直径

隧道来说, 不能单凭振动的峰值来衡量振动对它的影响, 还要考虑隧道的振动形式。图 5 (a)、(b) 分别是打桩间隔 100 m 和 200 m 时, 隧道顶部、底部和两侧的振动速度响应曲线。

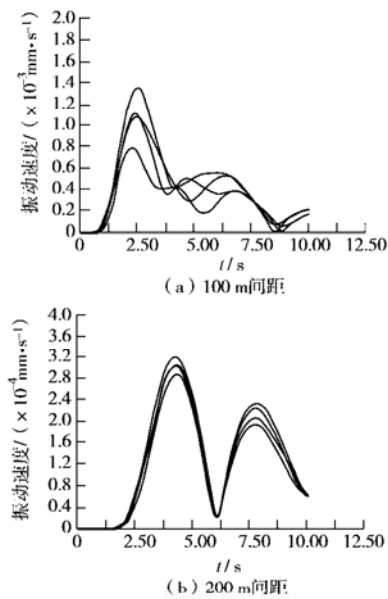


图 5 截面各处速度响应

Fig. 5 Velocity reaction in section of tunnel

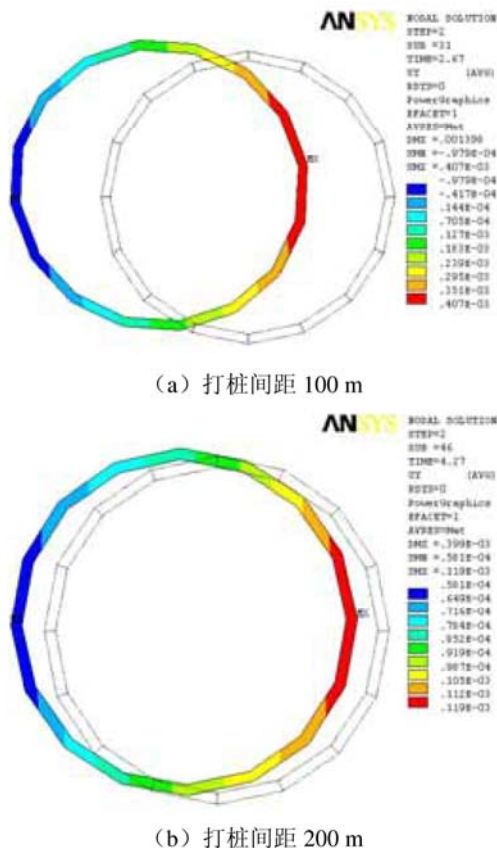


图 6 隧道截面竖向变形云图

Fig. 6 Contour of vertical displacement on tunnel section

可以看出, 间隔距离 100 m 时, 隧道截面上各部

分的振动速度峰值差异较大,而且振动响应时间差别也很大,这就说明,隧道截面上各个部位振动不均匀,隧道截面在振动过程中有较大的截面变形。

为了更直观地表达上述观点,笔者截取了以上两个不同距离下,隧道振动速度达到峰值时截面竖向位移云图,如图 6 (a) 和 (b) 所示。

从图 6 (a) 中可以看到,整个隧道截面上的竖向位移从右到左,由正变负,即竖向位移方向由上变下,其中截面右侧达到向上最大值,而截面左侧为向下最大值,整个截面有被剪切变形的趋势。图中虚线为隧道原来位置。而图 6 (b) 中,整个隧道截面上的竖向位移均为正值,即整个隧道截面整体向上抬起。

这个规律可以用图 7 进行解释。随着与打桩振动源距离的增大,土体中的振动能量逐渐衰减,这种衰减不仅体现为振幅的减小,即位移,速度,加速度峰值减小,同时由于阻尼的作用,波长 L 也逐渐变长。因此,对于离桩较近的隧道,隧道直径 D 接近或大于波长 L ,隧道各部分处于不同的振动周期内,因此表现为隧道各部分振动响应规律不同,隧道截面有较大的变形。而离桩较远的隧道,隧道直径 D 小于波长 L ,隧道各部分处于同一波长区间内,因此,各部分振动响应一致,隧道表现为截面整体的平动。

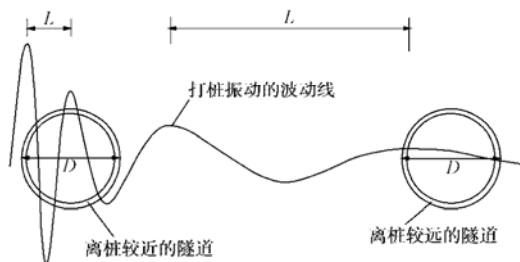


图 7 隧道直径与波长关系

Fig. 7 Relationship between diameter of tunnel and wave length

在前一种以截面变形为主的振动形式下,确定隧道振动允许值的主要依据是隧道的环向受力性能,对于盾构隧道来说就是管片的环向配筋,环向螺栓和管片厚度。而在后一种以截面整体平动为主的振动方式下,确定隧道振动允许值的依据是隧道的纵向连接性能,即管片之间纵向连接螺栓的抗剪性能。

所以在确定打桩间隔距离的时候不能仅仅考虑振动速度峰值的大小,还必须要考虑隧道结构的振动受力方式。因为不同距离下,隧道直径与波长的关系不同,隧道结构受振动影响的受力机理也不同。

4.3 不同打桩深度下的振动比较

除了打桩间隔距离,打桩深度也是控制打桩振动影响的重要参数。方案 2 的打桩深度 35 m,方案 3 的打桩深度 50 m,其它打桩参数均相同。表 8 列出了两

者的最大振动速度比较。

可以看出,打桩深度 50 m 时,隧道截面各个位置的振动速度均要大于打桩深度 35 m 时的对应数值。即打桩深度越深,振动影响越大。

这和地震引起的振动规律不同。地震的震源是点震源,因此相同能量下,震源越深,传播距离越长,能量消耗越多,振动的影响就越小。但是,打桩振动除了桩底是点振动源外,还有桩对桩侧土的振动。它是沿着桩所穿越土层分布的线振动源,桩长越长,打桩引起的桩侧土振动的范围就越大,振动传播范围就越广。

表 8 不同打桩深度下隧道振动速度

Table 8 Vibration velocity of at different depths of tunnel

截面位置	振动速度/(mm·s ⁻¹)	
	打桩深度 35 m	打桩深度 50 m
顶部	1.16	1.35
底部	0.62	0.78
离桩较近侧	0.86	1.08
离桩较远侧	0.98	1.11

4.4 不同打桩能量下的振动比较

方案 3、4、5 的锤重,落距分别是 8 t×3 m, 4 t×6 m, 4 t×3 m。其中 3、4 方案能量相同,但锤重,落距不同,5 号方案能量是 4 号方案的 1/2。3 种方案下的隧道最大振动速度如表 9 所示。

表 9 不同能量下隧道最大振动速度

Table 9 The maximum vibration velocity of tunnel under different energies

方案编号	锤重/t	落距/m	最大振动速度/(mm·s ⁻¹)
3	8	3	1.35
4	4	6	1.28
5	4	3	1.22

通过比较可以看到 3、4 方案能量相同,但 4 号方案的最大振速比 3 号方案小了 5.69%,而 5 号方案虽然能量比 4 号方案减少了 1/2,但是最大振速减少的幅度只有 4.15%。

这是因为虽然打桩能量相同,但是由于锤重和落距不同,两者的冲击动荷载峰值是不同的。根据冲量定理和动能定理,在相同作用时间下,冲击动荷载峰值与锤重呈线性关系,而与落距呈平方根关系。换句话说,相同能量下,锤重越重,冲击动荷载峰值越高,土体和隧道受振动影响也就越大。

因此,在相同能量和确保能够沉桩的前提下,为减小打桩的振动影响,应该尽量采用轻锤高击,避免重锤低击。

值得注意的是,在承载力允许的情况下,通过增加桩的数量,减小桩长,是一种非常有效的减少振动影响的综合手段。因为一方面它缩小了振动影响范围,

另一方面又降低了打桩所需的能量。

5 结 语

(1) 覆土越浅,离桩越近,隧道受振动影响越大,因此隧道振动最大的部位出现在隧道顶部和离桩较近一侧之间的1/4弧段上。

(2) 隧道振动幅度受该处振动能量大小的影响,离桩越远,隧道振动幅度越小。

(3) 隧道振动形式取决于隧道直径和波长的关系,离桩越远,波长越长,隧道直径相对于波长越小,隧道振动形式越趋向于整体一致的平动。

(4) 桩长越长,振动范围越广,振动程度越大。

(5) 打桩冲击荷载峰值越高,隧道振动越明显。

对于本文计算的预制桩工程,建议:①在承载力允许的条件下,选择35 m的桩长;②针对本文是大直径隧道,在场地允许的条件下,打桩距离隧道200 m为宜,以避免隧道不均匀振动造成隧道截面变形;③相同打桩能量下,尽量采用轻锤高击。

参考文献:

- [1] 宰金珉,庄海洋.对土-结构动力相互作用研究若干问题的思考[J].徐州工程学院学报,2005,20(1): 1-6. (ZAI Jin-min,ZHUANG Hai-yang. Analysis on the several problems about the dynamic soil-structure interaction[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology, 2005,20(1): 1-6.(in Chinese))
- [2] 黄雨,八嶋厚,张锋.液化场地桩-土-结构动力相互作用的有限元分析[J].岩土工程学报,2005,27(6): 646-651. (HUANG Yu, YASHIMA Atsushi, ZHANG Feng. Finite element analysis of pile-soil-structure dynamic interaction in liquefiable site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(6): 646-651.(in Chinese))
- [3] 白冰,周健.软土地层隧道抗震稳定分析[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2001(1): 39-44. (BAI Bing, ZHOU Jian. Analysis for aseismatic stability of tunnel in soft soil[J]. Journal of Foshan University (Natural science edition), 2001(1): 39-44.(in Chinese))
- [4] 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,1999,20(3): 51-55. (YI Xiong, YANG Bao-yu. Analysis with finite-infinite elements coupling for environmental effect of pile driving vibration [J]. Rock and Soil Mechanics, 1999,20(3): 51-55.(in Chinese))
- [5] 陈云敏,凌道盛,等.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,2002,15(2): 178-184. (CHEN Yun-min, LING Dao-sheng, et al. Numerical analysis and test of pile driving vibration[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002,15(2): 178-184.(in Chinese))
- [6] ZAVARISE G, WRIGGERS P, SCHREFLER B A. On augmented lagrangian algorithms for thermomechanical contact problems with friction[J]. Int J Number Methods Eng, 1995,38: 2929-2949.
- [7] ROBERT L Taylor, PANAYIOTIS Papadopoulos. On finite element method for dynamic contact/Impact problems[J]. Int J Number Methods Eng, 1993,36: 2123-2140.
- [8] 张胜民.基于有限元软件ANSYS7.0的结构分析[M].北京:清华大学出版社,2003. (ZHANG Sheng-min. Structural analysis with FEM software ANSYS7.0[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.(in Chinese))
- [9] 彼得·艾伯哈特,胡斌.现代接触动力学[M].南京:东南大学出版社,2003. (ALBERT Peter, HU Bin. Modern dynamic contact[M]. Nanjing: Dongnan University Press, 2003.)
- [10] 袁灯平,黄宏伟,马金荣.软土地基桩侧表面负摩阻力解析模型[J].上海交通大学学报,2005,39(5): 731-735,741. (YUAN Deng-ping, HUANG Hong-wei, MA Jin-rong. An analytical model of negative skin friction of piles in soft soil[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005,39(5): 731-735.(in Chinese))
- [11] 谭凡教,陈洪泳.受冲击荷载作用土体变形的有限元研究[J].岩土力学,2004,25(12): 2013-2016. (TAN Fan-jiao, CHEN Hong-yong. FEM study for soil deformation under impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(12): 2013-2016.(in Chinese))