

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.002

桩基础影响下既有地铁隧道截面内力计算研究*

靳军伟^{1,2}, 李咏梅¹, 孟 潮¹, 李明宇^{1,2}, 陈 文³

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 地下工程安全与质量控制河南省工程实验室, 河南 郑州 450001; 3. 中铁十八局集团第一工程有限公司, 河北 涿州, 072756)

摘要:城市已建地铁隧道的保护是目前市政建设中需要考虑的重要问题之一, 针对非挤土桩和挤土桩两种桩型新建桩基础影响下既有地铁隧道的截面内力计算展开研究。采用“二阶段”法研究思想, 首先基于桩基础荷载传递法、Mindlin 位移解及柱孔扩张理论, 分别计算得到非挤土桩和挤土桩在隧道截面位置处产生的土体位移。之后, 将隧道衬砌简化为环形弹性地基梁模型, 同时考虑土体抗力的影响, 并将土体位移施加到环形地基梁模型, 从而得到2种桩型引起的隧道衬砌截面的内力分布。研究过程中将理论结果与既有土工离心机试验进行了对比分析。研究结果表明: ①计算方法得到的衬砌内力与既有文献土工离心式试验值差别不大且趋势一致, 验证了计算方法的合理性; ②挤土桩施工引起的隧道弯矩最大值增量远大于非挤土桩在极限荷载时的增量; ③隧道截面弯矩最大值位置与桩端-隧道圆心相对位置有直接关系, 大约位于桩端-隧道圆心连线相交处。

关键词: 桩基础; 地铁隧道; 桩-土-隧道相互作用; 内力计算

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0152-08

Subway Tunnel Section Inner Force Induced by Pile Foundation

JIN Junwei^{1,2}, LI Yongmei¹, MENG Chao¹, LI Mingyu^{1,2}, CHEN Wen³

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Laboratory of Underground Engineering Safety and Quality Control of Henan Province, Zhengzhou 450001, China;

3. First Engineering Limited Company of China Railway 18 Bureau Group, Zhuozhou 072756, China)

Abstract: Existing tunnel protection is a key problem during urban construction. This paper focus on the inner force in tunnel sections induced by newly built pile foundation including non-displacement pile and displacement pile. ‘Two-step’ method was used in this paper. Firstly, based on the pile foundation theory, Mindlin solution and Column hole expansion theory, the soil displacement induced by non-displacement pile and displacement pile in the tunnel lining was obtained. Then, considering the soil reaction, tunnel section inner force induced by the two types of pile foundations was calculated by simplifying the lining as a circular elastic foundation beam. Finally, the calculated results were compared with that of the geo-centrifuge test. Results show that the theoretical solution results of lining moment are consistent with the test results. This proves the rationality of the presented calculation method. Meanwhile, the tunnel internal force caused by the displacement pile is much larger than that by the non-displacement pile under ultimate load. The maximum internal force position on the tunnel section is directly related to the relative position of the pile end and the tunnel center, and the position is near the cross line of the pile bottom and tunnel center.

Keywords: pile foundation; subway tunnel; pile-soil-tunnel interaction; inner force calculation

* 收稿日期:2018-04-10;修回日期:2019-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51508520);河南省住房和城乡建设科技计划项目(K1816);河南省高等学校重点科研项目(18A560024)资助

作者简介:靳军伟(1986-),男,讲师,博士,硕导。主要从事隧道-结构相互作用方面研究。Email:jinjunwei@zzu.edu.cn

引言

近年来我国沿海及中西部经济较发达地区城市地铁发展迅猛,特别是2000年之后,运营线路总里程呈现指数倍增长,从沿海到中西部共34个城市目前已经或正在进行地铁建设,截止2017年底中国内地地铁交通总运营里程已经超过5 000 km^[1-3]。地铁隧道周边新建建筑多采用桩基础以减小对既有地铁隧道的影响,为了最大限度地利用建筑空间,新建建筑与地铁隧道之间的间距需要尽可能小,部分工程甚至小于1倍隧道直径^[4-6]。同时,为了控制桩基础对地铁隧道的影响,对桩基础与隧道之间的最小净距离都做了限制。如伦敦要求钻孔桩和挤土桩距离隧道分别为3和15 m^[7];新加坡将隧道周边分为3个区域,对6 m范围以内的桩进行严格控制^[8];我国《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[9]将地铁隧道周围划分为3个影响分区,在不同区域采用不同的控制标准。地铁隧道沿线有限建筑空间与地铁隧道保护限制之间的矛盾,成为城市建设中迫切需要解决的一个问题。

高层建筑通常采用桩基础,在上部荷载作用下桩基础对邻近隧道的影响是需要重点关注的问题。近年来学者们采用有限元、理论计算以及试验等手段,对该问题进行研究。F. C. Schroeder^[7]通过现场实测和三维有限元分析对荷载作用下桩基础对邻近隧道的影响进行研究。新加坡国立大学的J. Zou^[10]通过使用量纲分析法,得到了桩-土-隧道相互作用的关系。闫静雅^[11]以桩基础剪切位移法为基础,研究了带承台群桩基础邻近隧道所在位置土体的沉降情况,并通过三维有限元分析,认为桩基础荷载对邻近的隧道变形有显著影响,使隧道产生了对地铁隧道运行非常不利的扭曲变形。K. H. Chung^[12]认为可以采用球孔扩张理论研究挤土桩对隧道的影响,发现径向应力自球心到3倍桩径向外迅速衰减。S. Arunkumar等^[13]使用有限元方法,发现桩端位置对隧道的影响有显著作用。

综上所述,目前的研究包括理论分析及数值模拟两个方面,数值模拟能较好的模拟复杂问题,但缺少对理论本质的抽象理解。同时,现有的理论分析中将隧道沿纵向轴线简化为一维梁单元,不能很好的反应隧道的截面变形及内力特性。本文针对上述缺陷,重点研究桩基影响下既有地铁隧道的横

截面内力计算问题。

1 计算模型

采用“二阶段”方法进行分析,该方法首先计算得到非挤土桩/挤土桩基础作用下隧道横截面衬砌所在位置处的土体位移,之后将土体位移作为荷载施加到隧道横截面计算模型上,同时考虑隧道模型与土体之间的相互作用,从而得到非挤土/挤土桩基础影响下的隧道横截面内力。

1.1 非挤土桩土体位移

图1为桩身单元受力情况,根据桩体微单元的平衡条件:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -U_p \tau(z) \quad (1)$$

式中, U_p 为桩界面周长; $P(z)$ 为深度 z 处桩的轴力; $\tau(z)$ 为深度 z 处桩周摩阻力。

微元体的竖向应变为:

$$\epsilon = -\frac{P(z)}{E_p A_p} = \frac{dw(z)}{dz} \quad (2)$$

由式(1)、(2)得到桩身的位移方程:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - \frac{U_p}{E_p A_p} \tau(z) = 0 \quad (3)$$

式中, $w(z)$ 为桩身位移; E_p 和 A_p 分别为桩身弹性模量和横截面积。

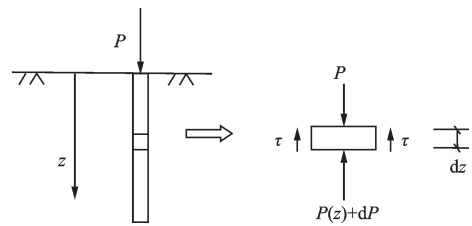


图1 桩身单元受力

Fig.1 Loading diagram of a pile element

桩-土界面的相互作用,参照美国石油规范^[14],计算所采用的桩侧土体与桩相互作用的弹簧刚度参数取值如图2所示。桩侧最大侧摩阻力 τ_{\max} 可通过实测或理论计算得到。桩端土体的荷载位移曲线如图3所示。桩端极限承载力 Q_p 可通过经验算法或实测得到。

求解式(3)可以得到桩身位移,进而计算得到桩身的轴力 P 及侧摩阻力分布,土体位移场通过Mindlin解得到。

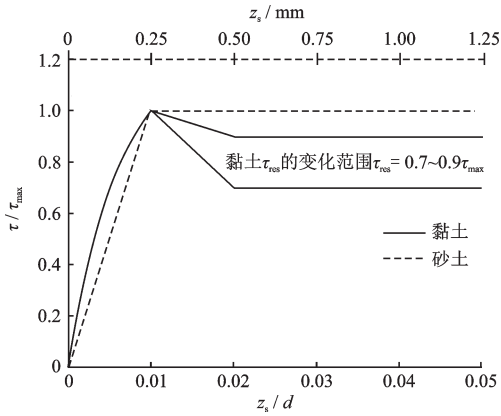


图2 桩-土的摩阻力-相对位移 τ - z 曲线^[14]

Fig.2 τ - z curve of frictional resistance versus relative displacement of pile-soil interaction^[14]

注: τ 为桩侧摩阻力刚度发挥值, τ_{\max} 为桩侧最大侧摩阻力, z_s 为桩土相对位移, d 为桩身直径, τ_{res} 为桩侧摩阻力退化值

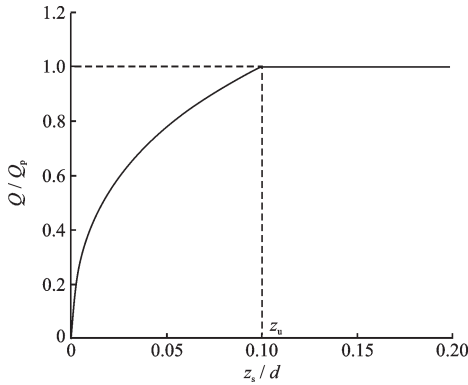


图3 桩端荷载-沉降 Q - z 曲线^[14]

Fig.3 Load-displacement Q - z curve at pile bottom^[14]

注: Q 为桩端承载力发挥值, Q_p 为桩端承载力极限值, z 为桩端位移, z_u 为桩端位移极限值, 通常取 0.1 倍桩径

1.2 挤土桩土体位移

根据“源-汇”理论, 挤土桩施工过程中产生的土体位移主要参考 C. Sagaseta 等^[15] 以及 Y. K. Chow 等^[16] 的研究成果。

假定土体为均匀的各向同性半无限空间体, 成桩过程中认为桩身按照一系列的球形扩张理论进行计算。对于单桩的计算, 采用中心对称解法。将桩身分段, 作为一系列球体, 按照球孔扩张理论以及源汇理论进行计算, 如图 4 所示。采用两种方法计算得到, 其主要区别在于镜像位置处采用“源”或“汇”, 在地表面产生不同的边界应力。当采用“源-源”方法时, 地表面产生边界为垂直正应力, 可采用 Buossinesq 解。当采用“源-汇”方法时, 地表面产生的边界应力为水平剪应力, 可采用 Cerutti

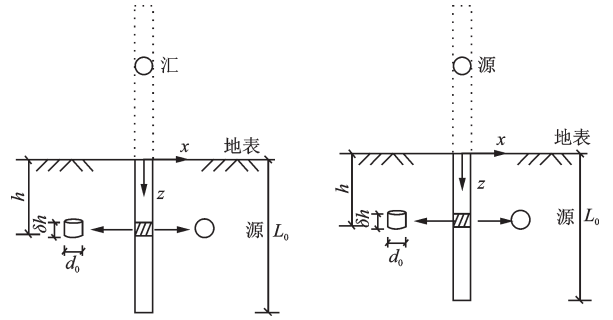


图4 挤土桩竖向和水平位移计算简图

Fig.4 Vertical and horizontal displacement calculation diagram for displacement and non-displacement piles

解。李月健^[17] 认为, 若求解的对象是水平位移或水平应力, 用“源-源”方法较好, 若求解的对象是垂直位移或垂直应力, 则用“源-汇”法更好。Y. K. Chow 等^[16] 根据“源-汇”计算方法得到的土体竖向位移为:

$$s_{ze} = -\frac{e^3}{3} \left[\frac{z-h}{\{x^2+(z-h)^2\}^{3/2}} - \frac{z+h}{\{x^2+(z+h)^2\}^{3/2}} \right] \quad (4)$$

式中, h 为源所在位置; z 为土体深度; e 为球体半径, 球体的半径根据体积相等的原则, 按照桩体的分段进行计算得到:

$$e = \left(\frac{3}{16} d_0 \delta h \right)^{1/3} \quad (5)$$

式中, d_0 为挤土桩桩身直径; δh 为桩身单元高度。

将式(5)代入式(4), 同时沿桩长方向进行积分得到土体竖向位移为:

$$s_{zs}(x, z) = -\frac{d_0^2}{16} \left[\frac{1}{\{x^2+(z-L_0)^2\}^{1/2}} + \frac{1}{\{x^2+(z+L_0)^2\}^{1/2}} - \frac{2}{(x^2+z^2)^{1/2}} \right] \quad (6)$$

式中, L 为桩长。

与挤土桩施工引起的土体竖向位移相似, 水平位移的计算可以通过“源-汇”理论计算得到, 如图 4 所示。李月健^[17] 认为, 竖向位移采用“源-汇”计算方法得到的结果较好, 而水平向位移采用“源-源”方法计算得到的结果较好。采用“源-源”方法计算时, 首先计算得到水平位移:

$$S_{rs} = \frac{1}{16} \frac{d_0^2 L_0}{x \sqrt{L_0^2 - 2zL_0 + x^2 + z^2}} - \frac{1}{16} \frac{d_0^2 z}{x \sqrt{L_0^2 - 2zL_0 + x^2 + z^2}} + \frac{1}{16} \frac{d_0^2 L_0}{x \sqrt{L_0^2 + 2zL_0 + x^2 + z^2}} + \frac{1}{16} \frac{d_0^2 z}{x \sqrt{L_0^2 + 2zL_0 + x^2 + z^2}} \quad (7)$$

“源—源”共同作用下,产生了一个附加的正应力,为了消除正应力的影响,在地表施加相反的正应力,该问题可归结为 Buossinesq 问题。根据李月健^[17]提供的算例,发现黏土中挤土桩施工过程中产生的水平位移,5倍桩径以下是否考虑地表处的应力对结果影响不大。对于竖向位移,除在地表位置,其他部分基本没有影响,这与 C. Sagaseta 等^[15]得出的结论基本一致。同时罗战友^[18]认为,在桩径 1 倍范围以外,大应变与小应变计算方法得到的结果近似一致,可以用小应变假定下的沉桩位移场来代替大应变的情况。C. Sagaseta 等^[15]认为,施工过程中桩身侧阻和端阻可以认为是瞬时荷载,在桩基施工结束后,桩顶压入荷载会消除,而且认为侧阻和端阻对结果影响很小,可以不进行考虑。李月健^[17]同样发现桩侧摩阻力对土体位移场的影响很小。考虑前述结论可以显著的简化计算,后续计算将不再考虑应力分布和大应变情况对位移场计算结果的影响。

1.3 土体位移作用下隧道截面变形计算

桩基础对既有隧道横截面影响方面,隧道截面单元的受力情况如图 5 所示。参考荣耀等^[19]的做法,将隧道简化为环形弹性地基梁,与其不同的是,需要考虑弹性地基梁的被动作用,即土体位移荷载作用下的环形弹性地基梁。通过这种简化,可以同时考虑土体位移和土体抗力的作用。

假定衬砌厚度 $t=R_2-R_1$,衬砌横截面面积为 A ,截面惯性矩为 I ,中心半径 $R_0=(R_2+R_1)/2$ 。图 5 取微单元 $d\theta$, k 为土体的法向抗力系数, τ 为衬砌侧面的切向摩擦力,弯矩为 $M(\theta)$,剪力为 $Q(\theta)$,轴力为 $N(\theta)$ 。

法向平衡:

$$dQ(\theta) + N(\theta) d\theta + k[\omega(\theta) - \omega_s(\theta)] R_2 d\theta = 0 \quad (8)$$

切向平衡:

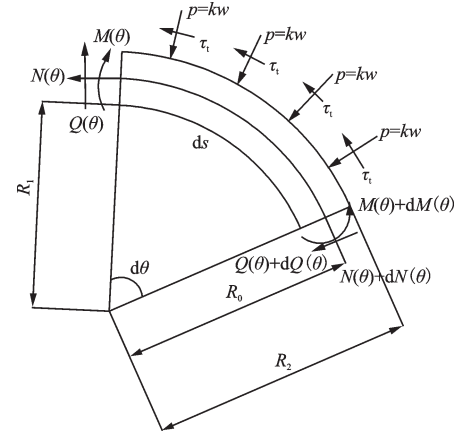


图 5 隧道衬砌截面单元计算简图

Fig.5 Calculation model of segment element

$$dN(\theta) - Q(\theta) d\theta - \tau R_2 d\theta = 0 \quad (9)$$

弯矩平衡:

$$dM(\theta) + \tau R_2^2 d\theta - R_0 dN(\theta) = 0 \quad (10)$$

由式(9),(10)可知:

$$\frac{dM(\theta)}{d\theta} = R_0 Q(\theta) + \tau R_2 (R_0 - R_2) \quad (11)$$

有

$$Q(\theta) = \frac{dM(\theta)}{R_0 d\theta} - \frac{\tau R_2 (R_0 - R_2)}{R_0} \quad (12)$$

将上式代入式(8),(9),得到:

$$\frac{d^2 M(\theta)}{R_0 d\theta^2} + N(\theta) + k[\omega(\theta) - \omega_s(\theta)] R_2 = 0 \quad (13)$$

式中, ω 为衬砌位移, ω_s 为土体位移。

$$\frac{dN(\theta)}{d\theta} = \frac{dM(\theta)}{R_0 d\theta} - \frac{\tau R_2 (R_0 - R_2)}{R_0} + \tau R_2 =$$

$$\frac{dM(\theta)}{R_0 d\theta} + \frac{\tau R_2^2}{R_0} \quad (14)$$

根据材料力学相关知识,可知:

$$\frac{d^2 \omega(\theta)}{d\theta^2} + \omega(\theta) = \frac{M(\theta) R_0^2}{E_1 I} + \frac{N(\theta) R_0}{E_1 A} \quad (15)$$

将式(14)沿衬砌轴向积分,得到:

$$\int_0^\theta \frac{dN(\theta)}{d\theta} d\theta = \int_0^\theta \frac{dM(\theta)}{R_0 d\theta} d\theta + \int_0^\theta \frac{\tau R_2^2}{R_0} d\theta \quad (16)$$

故有:

$$N(\theta) - N(0) = \frac{1}{R_0} [M(\theta) - M(0)] + \frac{\tau R_2^2}{R_0} \theta \quad (17)$$

即:

$$N(\theta) = \frac{M(\theta)}{R_0} - \left[\frac{M(0)}{R_0} - N(0) \right] + \frac{\tau R_2^2}{R_0} \theta \quad (18)$$

对式(15)二阶微分:

故衬砌位移可以写为以下形式:

$$\{\omega\} = [K_1]^{-1} [K_s] \{\omega_s\} \quad (35)$$

根据土体位移可以得到转角、弯矩以及剪力。根据弹性理论,得到土体的抗力系数为^[20]:

$$k = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)} \frac{1}{D_t} \quad (36)$$

式中, E_s 为土体弹性模量; D_t 为隧道直径。

需要注意的是,若计算过程中土体位移出现负值,说明土体会拉动衬砌,与实际情况不符。故不考虑土体受拉情况,将该处土体位移消除。

2 试验验证

2.1 土工离心机试验-非挤土桩

K. H. Chung^[12]进行了挤土桩和非挤土桩两种桩型对既有隧道影响的土工离心机试验,采用E型

号硅砂,最小孔隙比和最大孔隙比分别为 $e_{\min} = 0.613$, $e_{\max} = 1.014$,相对密度 $G_s = 2.65$,临界内摩擦角 $\varphi_{\text{crit}} = 32^\circ$ 。

非挤土桩-隧道土工离心试验设计如图7所示。理论计算及试验所采用的参数见表1、表2。

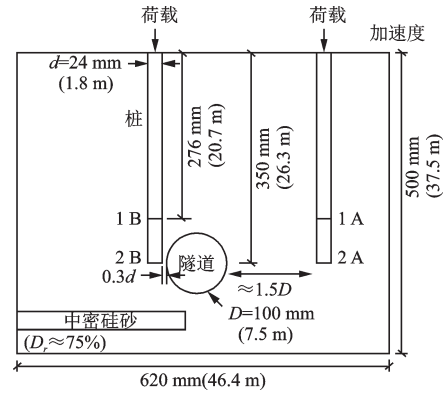


图7 非挤土桩-隧道土工离心试验简图^[12]

Fig.7 Schematic diagram of geo-centrifuge test on non-displacement pile-tunnel interaction^[12]

表1 理论计算参数取值^[12]

Table 1 Calculation parameters^[12]

参数	土体弹性模量/ MPa	土体 泊松比	桩径/ m	隧道直径/ m	衬砌厚度/ mm	衬砌弹性模量/ MPa	衬砌 泊松比
取值	50	0.3	1.8	7.0	150	70 000	0.3

表2 工况参数^[12]

Table 2 Test parameters^[12]

试验工况	桩长/m	桩-隧道 间距/m	桩顶荷载/kN
1B_WL	20.7	0.54	2.55 × 75 × 75
1B_FL	20.7	0.54	5.10 × 75 × 75
2B_WL	26.3	0.54	3.15 × 75 × 75
2B_FL	26.3	0.54	6.30 × 75 × 75
2B_1.2FL	26.3	0.54	6.30 × 75 × 75 × 1.2

注:WL表示单桩的工作荷载,FL表示极限荷载

致,其结果偏差的原因为到达极限荷载值时,隧道受力较为复杂,且极限荷载之后采用弹性理论计算单桩位移场可能不准确。整体来看,本文的计算结果与试验结果差别不大且趋势接近,说明本文所述的计算方法是合理的。

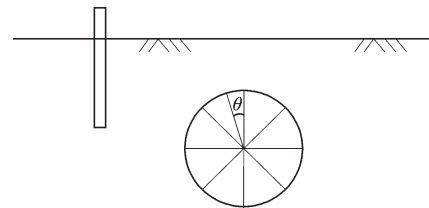


图8 桩基础影响下隧道截面变形简图

Fig.8 Schematic diagram of lining deformation induced by pile foundation

采用本文1.1节方法首先计算得到桩基础作用下的土体位移场,之后采用1.3节方法计算得到隧道截面的内力。计算过程中,桩-隧道计算模型如图8所示, θ 按照逆时针方向自隧道顶部靠近桩基础一侧开始。非挤土桩的隧道弯矩如图9所示,可以发现靠近桩基础一侧隧道衬砌所受到的影响明显大于远离桩基础一侧。将计算结果与试验测得的桩基加载前隧道最大弯矩(172 kN·m)进行无量纲化,可见试验1B_WL和试验1B_FL理论计算值稍微偏小,但差别不大,且整体趋势较为一致;试验2B_WL和2B_FL的理论计算值偏大,但整体趋势较为一

致。从图9计算结果来看,衬砌最大内力位置与隧道圆心和桩端的相对位置有直接的关系,当桩长增加时,隧道衬砌弯矩最大位置发生向下的平移,整体来看衬砌受影响最大位置在靠近桩端一侧区域的45°附近,与桩端-隧道中心连线位置较为接近。同时,非挤土桩在荷载增加至极限荷载时,隧道衬砌最大弯矩增加40%,说明非挤土桩邻近隧道施工对隧道的影响是需要引起注意的。

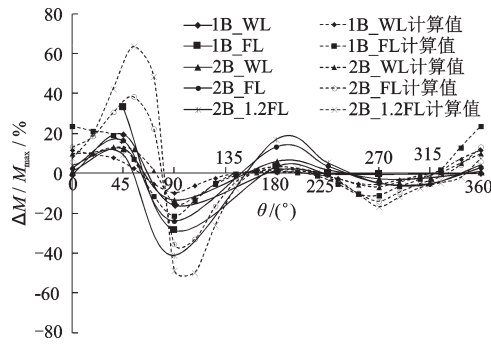


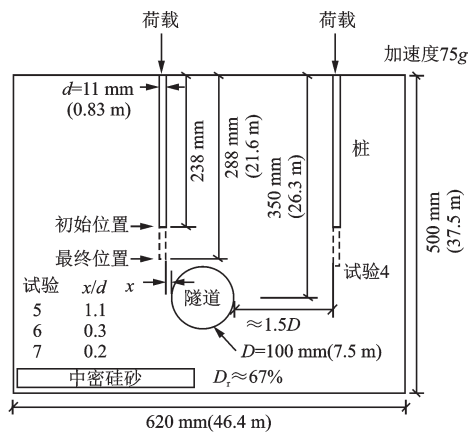
图9 非挤土桩简化计算结果与试验结果对比

Fig.9 Comparison of theory results and test results of non-displacement pile

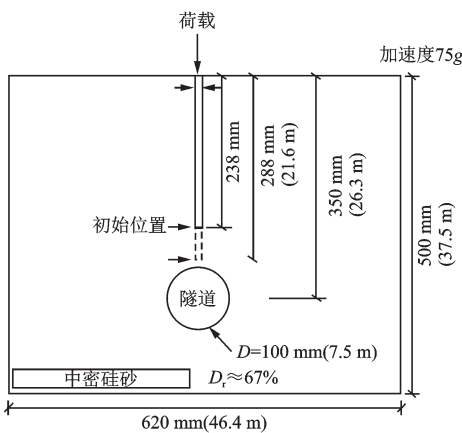
2.2 土工离心机试验-挤土桩

K. H. Chung^[12]进行的挤土桩对既有隧道的影响,试验简图如图10所示。

首先采用本文1.2节方法计算得到桩基础作用下的土体位移场,之后采用1.3节方法计算得到隧道截面的内力。挤土桩施工自桩身埋深17.85 m增



(a) 桩位于隧道一侧^[12]



(b) 桩位于隧道顶部^[12]

图10 挤土桩-隧道土工离心试验简图^[12]

Fig.10 Schematic diagram of geo-centrifuge test on displacement pile-tunnel interaction^[12]

加到21.6 m。挤土桩的隧道弯矩如图11所示,将计算结果与试验测得的桩基加载前隧道弯矩值进行无量纲化,可见靠近桩基础一侧隧道衬砌所受到的影响明显大于远离桩基础一侧,同时从试验5-6和试验8的实验值及计算值来看,隧道截面变形最大值与桩端和隧道的相对位置有直接关系。经过无量纲化后,理论计算与实测结果的趋势十分接近,验证了本文计算的合理性。

从图11中可以发现,与非挤土桩结果类似,衬砌最大内力位置与隧道圆心和桩端的相对位置有直接的关系。当桩基础位于隧道左侧时,衬砌受影响最大位置在靠近桩端一侧区域的45°附近。当桩基础位于隧道顶部时,衬砌受影响最大位置在桩端-隧道圆心连线的衬砌顶部位置。同时,挤土桩在施工过程中,隧道衬砌最大弯矩增加100%(隧道位于桩侧),甚至超过400%(隧道位于桩顶),说明挤土桩邻近隧道施工对隧道的影响远大于非挤土桩,工程中应在精确计算后综合考虑。

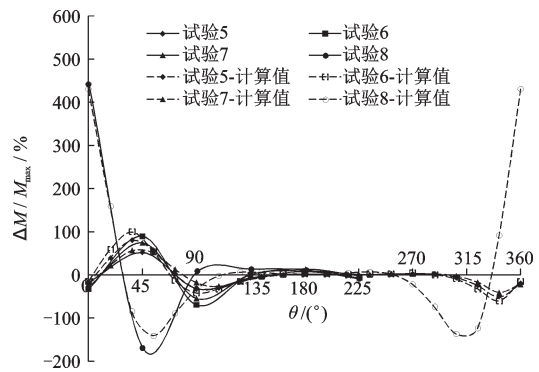


图11 挤土桩简化计算结果与试验结果对比

Fig.11 Comparison of theory results and test results of displacement pile

3 结论

(1)与土工离心机试验的对比分析表明,采用本文所推荐的方法计算非挤土桩以及挤土桩引起的隧道衬砌截面变形及内力是可行的。

(2)本文计算中,挤土桩施工过程中对隧道横截面产生的弯矩影响远大于非挤土桩在极限荷载时的影响。

(3)桩基础影响下既有隧道截面内力最大值与桩端-隧道圆心的相对位置有直接的关系,隧道衬砌弯矩最大值约在桩端-隧道圆心连线的相交位置。

参考文献:

- [1] 顾岷.我国城市轨道交通发展现状与展望[J].中国铁路,2011(10):53-56.
Gu M. The development status and prospect of urban rail transit in China [J]. Chinese Railways, 2011(10): 53-56. (in Chinese)
- [2] 智研咨询集团.2016-2022中国城市轨道交通市场运行态势及投资战略研究报告[R].北京:智研咨询集团,2016.
Zhiyan Caronsulting Group. Research report on the operation situation and investment strategy of China's urban rail transit market in 2016-2022 [R]. Beijing: Zhiyan Consulting Group, 2016. (in Chinese)
- [3] 中国城市轨道交通协会.2017年中国内地城轨交通线路概况[R].北京:中国城市轨道交通协会,2018.
China Urban Traffic Rail Association. 2017 China urban rail transit line overview [R]. Beijing: China Urban traffic Rail Association Information, 2018. (in Chinese)
- [4] 李镜培,王昆.超深群桩对邻近已有隧道的影响研究[J].岩土工程学报,2011,33(增2):128-134.
Li J P, Wang K. Influence of extra-deep pile groups on existing neighboring tunnels [J]. Chinese Journal of geotechnical engineering. 2011, 33 (Sup2): 128-134. (in Chinese)
- [5] 路平,郑刚.立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J].岩土工程学报,2013,(增2):923-927.
Lu P, Zheng G. Influence of construction and operation of pile foundation of overpass on existing tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup2):923-927. (in Chinese)
- [6] 翁效林,孙腾,冯莹.桩基础承载过程对近距离地铁隧道影响机制分析[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):138-142.
Weng X L, Sun T, Feng Y. Influence of loading pile foundation on existing neighboring subway tunnel [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (3):138-142. (in Chinese)
- [7] Schroeder F C. The influence of bored piles on existing tunnels [D]. London: Imperial College, 2002.
- [8] Land Transport Authority. Code of practice for railway protection: RP-2004 [S]. Singapore: Land Transport Authority,2004.
- [9] 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,2014.
Technical specifications for the safety and protection of urban rail transit structures: CJJ/T202—2013 [S]. Beijing: China Construction Industry Edition, 2014. (in Chinese)
- [10] Zou J. Analysis of pile-soil-tunnel interaction [D]. Singapore: National university of Singapore, 2003.
- [11] 闫静雅.桩基全寿命期对邻近已有隧道的影 响研究 [D].上海:同济大学,2007.
Yan J Y. The influence of pile foundation in lifecycle on adjacent existing tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [12] Chung K H. Effects of piles on tunnels [D]. London: University of Cambridge, 2007.
- [13] Arunkumar S, Ayothiraman R. Effect of Vertically Loaded Pile on Existing Urban Tunnel in Clay [C]// Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Canada; IGC, 2010;751-754.
- [14] Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design: RP 2A-WSD—2007 [S]. Washington D. C.: API Publishing Services, 2007.
- [15] Sagasetta C, Whittle A J. Prediction of ground movements due to pile driving in clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (1): 55-66.
- [16] Chow Y K, Teh C I. A theoretical study of pile heave [J]. Géotechnique, 1990, 40(1): 1-14.
- [17] 李月健.土体内球形空穴扩张及挤土桩沉桩机理研究 [D].杭州:浙江大学,2001.
Li Y J. A Study on spheric cavity expansion and static piling in soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [18] 罗战友.静压桩挤土效应及施工措施研究 [D].杭州:浙江大学,2004.
Luo Zh Y. Study on compacting effects and construction measures of jacked pile [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [19] 荣耀,许锡宾,蔡晓鸿.基于弹性地基梁法的隧道衬砌裂缝间距和宽度的计算 [J].重庆建筑大学学报,2006,28(5):23-26.
Rong Y, Xu X B, Cai X H. Calculation of crack space and crack width of tunnel lining based on elastic foundation curved beam model [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006,28(5):23-26. (in Chinese)
- [20] 王芝银,袁鸿鹄,汪德云,等.基于量测位移的隧洞围岩弹性抗力系数反演方法 [J].工程地质学报,2013,21(1):143-147.
Wang Zh Y, Yuan H H, Wang D Y, et al. Back analysis of elastic resistance coefficient of tunnel surrounding rocks with measured displacement [J]. Journal of Engineering Geology, 2013,21(1):143-147. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)