

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.033

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



隔离桩对盾构掘进引起邻近高铁桩基水平位移的影响分析

冯国辉¹, 周逊泉², 何庆亮³, 徐长节^{1,4}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 2. 浙江杭海城际铁路有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 3. 杭州市钱江新城建设开发有限公司, 杭州 310020; 4. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室; 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013)

摘要:在城市建设过程中, 盾构隧道开挖对邻近既有高铁桩基产生较大威胁, 在隧道和高铁桩基之间打入隔离桩可以有效减小盾构掘进对高铁桩基的影响。在研究桩土相互作用领域中, Winkler 地基模型和 Pasternak 地基模型得到了广泛的运用。基于这两种地基模型, 采用差分法, 利用 Maple 数学运算软件对某实际工程案例进行分析, 将计算结果与已有工程监测数据进行对比验证, 并深入分析隔离桩各项参数对高铁桩水平位移的影响。结果表明, 当隔离桩弹性模量较小时, Pasternak 地基模型计算结果比 Winkler 地基模型更加精准; 随着隔离桩桩径的增大, 高铁桩基水平位移显著减小; 在隔离桩桩体参数不变的条件下, 缩短隔离桩与隧道中心线的水平距离能减小高铁桩基的水平位移。

关键词:地基模型; 盾构隧道; 桩土相互作用; 邻近开挖; 隔离桩; 位移

中图分类号: TU433; U213.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)04-0028-08

Analysis on the influence of isolation pile on horizontal displacement of adjacent pile under high-speed railway caused by shield driving

Feng Guohui¹, Zhou Xunquan², He Qingliang³, Xu Changjie^{1,4}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 2. Zhejiang Hanghai Intercity Railway Co., Ltd., Jiaxing 314000, Zhejiang, P. R. China; 3. Hangzhou CBD Construction Development Co., Ltd., Hangzhou 310020, P. R. China; 4. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering; Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

收稿日期: 2019-12-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB057801); 国家杰出青年基金(51725802); 国家自然科学基金(51878276); 浙江省自然科学基金委员会-华东院联合基金(LHZ19E080001)

作者简介: 冯国辉(1996-), 男, 主要从事土与结构相互作用研究, E-mail: 21812133@zju.edu.cn.

徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

Received: 2019-12-18

Foundation items: Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (No. 2015CB057801); The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); National Natural Science Foundation of China (No. 51878276); Joint Fund of the Natural Science Foundation of Zhejiang Province and Huadong Engineering Corporation Limited (No. LHZ19E080001)

Author brief: Feng Guohui (1996-), main research interests: soil and structure interaction, E-mail: 21812133@zju.edu.cn.

Xu Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

Abstract: In the process of urban construction, shield tunnel excavation will pose a great threat to the adjacent existing pile under high-speed railway. Driving isolation pile between the tunnel and high-speed railway foundation pile can effectively reduce the influence of the shield driving to adjacent pile foundation. In the field of pile-soil interaction, Winkler foundation model and Pasternak foundation model have been widely used. Based on these two foundation models, this paper uses the finite difference method by Maple mathematical software to analyse a practical engineering case. The calculated results are in accordance with existing engineering monitoring data. Then the influences of isolation pile of various parameters on the horizontal displacement of the pile under high-speed railway are further analyzed. The results show that Pasternak foundation model is more accurate than Winkler foundation model when the elastic modulus of isolation pile is smaller. With the increase of isolated pile diameter, the horizontal displacement of pile foundation will decrease significantly. The horizontal displacement of high-speed railway pile foundation can be reduced by reducing the horizontal distance between the isolated pile and the tunnel center line on the condition that the parameters of isolated pile remain unchanged.

Keywords: foundation model; shield tunnel; pile-soil interaction; adjacent excavation; isolation pile; displacement

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,城市隧道工程的建设也越来越多,其中不乏盾构隧道近距离穿越既有建筑或桥梁桩基的情况。盾构掘进对周围土体产生扰动,造成土体变形,并进一步对邻近桩基的应力-应变场产生较大影响。评价盾构隧道开挖对邻近桩基的影响已成为地下工程领域的研究热点。

目前,已有较多学者就盾构隧道开挖对邻近桩基影响进行了深入的研究。Morton 等^[1]和 Loganathan 等^[2]分别进行了常规重力场和离心机模型试验,研究发现,在桩土作用过程中,尤其是在软土工程中,盾构隧道开挖对桩基的影响不可忽视。目前,盾构隧道开挖对邻近桩基影响的研究主要分为数值模拟分析法和二阶段分析法。数值模拟方面, Lee 等^[3]利用基于弹塑性力学开发的三维商业软件分析了隧道-桩-土的相互作用机制以及盾构隧道开挖对邻近桩基的影响;杨平等^[4]利用 Plaxis 3D 研究了盾构隧道开挖对邻近单桩的影响;沈建文等^[5]运用有限元软件建立了城市地下盾构隧道开挖穿越桥桩的数值模型,并将数值模拟结果与现场实测数据进行对比;Liu 等^[6]对某工程利用 ABAQUS 商业软件模拟研究盾构隧道开挖对邻近群桩的影响,并进一步分析群桩中桩基和单桩桩基工作性能的差异;Soomro 等^[7]利用有限元软件分析盾构隧道开挖对邻近桩基的影响。此类整体有限元方法能够考虑桩土相互作用以及边界条件,但是,商业软件运算起来工作量大而且繁琐,其程序中本构模型及参数选取不恰当还会导致计算结果与实际情况产生偏

差。二阶段分析法,即把隧道对邻近建构筑物的影响分析分成两部分,第一阶段分析盾构隧道开挖对桩周土体的变形的影响,第二阶段分析桩周土体变形所产生的附加应力对桩体变形的影响。李早等^[8]在群桩计算中,先考虑由于盾构隧道开挖引起土体自由位移场,随后,基于 Winkler 地基模型考虑相邻桩基之间位移场传递即遮蔽效应;Zhang 等^[9]分析比较 Winkler 地基模型和 Pasternak 地基模型下群桩的遮蔽效应,发现桩土相互作用过程中,土体剪切作用对桩内力位移的影响不容忽视;张治国等^[10]运用修正的 Kerr 地基模型,在充分考虑土体剪切作用的前提下,将土体自由场位移施加于桩基,得到了在被动位移扰动下桩基变形的简化解,并将计算结果与现场实测数据进行对比;王鑫等^[11]采用基于 Winkler 地基模型的简化二阶分析法,提出了桩基与隧道临界距离的概念,并基于工程案例,对盾构隧道开挖导致邻近桩基横截面不均匀收缩情况进行了预测。

已有研究表明,盾构隧道开挖对邻近桩基的影响不容忽视,为减小盾构掘进对邻近桩基的影响,工程实践中,可以人为在隧道和既有桩基之间加入隔离桩。陈涛等^[12]利用有限元软件仿真模拟某工程中盾构近距离侧穿高速公路过程中对桥梁桩基的影响,结果表明,在隧道和桥梁桩基之间打入旋喷隔离桩能够大幅降低盾构对桥梁桩基的影响;范东方^[13]利用商业有限元软件分析了无隔离桩和有隔离桩时,盾构开挖对邻近高铁桩基的影响,结果表明,隔离保护措施能较大程度地减少盾构掘进对高铁桥梁

的不利影响;李雪等^[14]研究分析了在饱和砂土地区盾构隧道对邻近高铁桥墩摩擦桩的影响;王长宁等^[15]以某高铁桥梁为背景,利用有限元软件分析研究深埋盾构隧道全断面穿越岩层时,隔离桩对高铁桩基的保护作用及其适用性,结果表明,深埋盾构掘进过程中,隔离桩的效果并不明显,而且隔离桩的应用反而对高铁桩基造成不利影响。

在分析桩土相互作用时,大多研究从有限元和理论二阶段法出发,在研究盾构开挖对邻近桩基的影响中,隔离桩对高铁桩基的保护作用大部分停留在有限元模拟方面,缺乏理论分析。为此,利用 Pasternak 地基模型和 Winkler 地基模型分析隔离桩对高铁桩基的保护作用,并进一步分析隔离桩桩径和隔离桩与隧道间距对高铁桩基水平位移的影响。

1 分析方法

1.1 盾构隧道开挖引起桩周土体自由位移场

为计算盾构隧道开挖引起的桩周土体自由位移场,采用 Loganathan 等^[16]修正后的解析公式

$$U_{x1}(z) = \varepsilon_0 R^2 x_0 \left[\frac{1}{x_0^2 + (H-z)^2} + \frac{3-4\nu}{x_0^2 + (H+z)^2} - \frac{4z(z+H)}{(x_0^2 + (H+z)^2)^2} \right] \cdot \exp\left(-\frac{1.38x_0^2}{(H+R)^2} - \frac{0.69z^2}{H^2}\right) \quad (1)$$

式中: $U_{x1}(z)$ 为自由场地时盾构隧道开挖引起的地表以下土体沉降; R 为隧道半径; Z 为地表以下深度; H 为隧道轴线深度; ν 为土体泊松比; ε_0 为平均地层损失比; x_0 为距隧道中心线的水平距离。

1.2 Winkler 地基模型和 Pasternak 地基模型下盾构隧道开挖对邻近桩基的影响

1.2.1 Winkler 地基模型差分方程 在桩土相互作用过程中,根据 Winkler 地基模型假定,桩与土体之间保持弹性接触,其控制方程见式(2)。

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kd w = p d \quad (2)$$

式中: w 为桩身水平位移; p 为作用在桩基上的附加荷载; d 和 EI 分别为桩基直径与截面抗弯刚度; k 为地基反力模量。采用 Vesic 等^[17]提出的地基模量计算方法, k 取值见式(3)。

$$k = \frac{0.65}{d} \left(\frac{E_s d^4}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \quad (3)$$

式中: E_s 为土体弹性模量。将式(2)写成差分形式为式(4)。

$$A w_{i-2} + B w_{i-1} + C w_i + B w_{i+1} + A w_{i+2} = p_i \quad (4)$$

式中: $i=0,1,2,3,\dots,n$; A 、 B 和 C 见式(5); P_i 为盾构隧道施工引起桩基处附加应力。

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -4 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{EI}{dh^4} \\ 0 \\ k \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中: h 为每段长度,即 $h=L/n$,其中, L 为桩长。

$$p_i(z) = k U_x(z) \quad (6)$$

式中: z 为地表以下深度, $U_x(z)$ 为式(1)中土体自由位移场。

1.2.2 Pasternak 地基模型差分方程 在桩土相互作用过程中,根据 Pasternak 地基模型假定,桩与土体之间即保持弹性接触,也有剪切变形,其控制方程为

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - G d \frac{d^2 w}{dx^2} + kd w = p d \quad (7)$$

式中: w 为桩身水平位移; p 为作用在桩基上的附加荷载; d 和 EI 分别为桩基直径与截面抗弯刚度; k 为地基反力模量; G 为剪切层刚度。根据文献[9], k 、 G 取值分别为

$$k = \frac{0.65}{d} \left(\frac{E_s d^4}{EI} \right)^{\frac{1}{12}} \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \quad (8)$$

$$G = \frac{E_s t}{6(1+\nu_s)} \quad (9)$$

式中: E_s 为土体弹性模量; t 为剪切层厚度。将式(7)写成差分形式为

$$A_1 w_{i-2} + B_1 w_{i-1} + C_1 w_i + B_1 w_{i+1} + A_1 w_{i+2} = p_i \quad (10)$$

式中: $i=0,1,2,3,\dots,n$; A_1 、 B_1 和 C_1 取值见式(11); p_i 为盾构隧道施工引起桩基处附加应力。

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -4 & -1 & 0 \\ 6 & 2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{EI}{dh^4} \\ \frac{G}{h^2} \\ k \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式中: h 为每段长度,即 $h=L/n$,其中, L 为桩长。

$$p_i(z) = k U_x(z) - G U''_x(z) \quad (12)$$

式中: z 为地表以下深度, $U_x(z)$ 为式(1)中土体自由位移场。

1.2.3 盾构隧道开挖引起邻近单桩的水平位移分析 当桩顶和桩端无约束时,边界条件为

$$\begin{aligned} w_{-1} - 2w_0 + w_1 &= 0 \\ w_{-2} - 2w_{-1} + 2w_1 - w_2 &= 0 \\ w_{n-3} - 2w_{n-2} + 2w_n - w_{n+1} &= 0 \\ w_{n-1} - 2w_n + w_{n+1} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

中,为研究高铁桩基的变形影响,取4个邻近高铁桩基中最靠近隧道中心线的桩基,隧道半径 $R=3.1$ m,隧道中心点离地面距离 $H=7.8$ m,隧道中心点到桩1(隔离桩)水平距离 $x_1=4.9$ m,隧道中心点到桩2(高铁桩)水平距离 $x_2=9.3$ m,地层损失 $\epsilon_0=1\%$,泊松比 $\nu=0.3$,根据地质勘查资料,地层由上而下层状分布,依次为人工填土、粉质黏土、淤泥质黏土、粉质黏土、粉质黏土夹粉土,对于不同土层土体模量,基于地基勘察报告,各层土水平基床系数采用加权平均法进行计算,得到水平基床系数为 $k=12$ MPa/m,根据式(8)可知,软土模量 $E_s=24$ MPa;隔离桩为钻孔灌注桩穿过软土层插入持力层,桩间间距为 0.2 m,模量 $E_{p1}=30$ GPa,桩长 15 m,桩截面为圆形,直径 0.8 m;高铁基桩模量 $E_{p2}=30$ GPa,桩长 35 m,计算高铁桩基单桩情况下全长水平位移后,取其上部 15 m 桩长,高铁桩截面为圆形,桩径为 1 m。

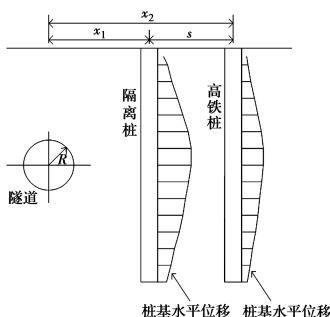


图3 隧道与群桩简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of tunnel and pile group

如图4所示,隔离柱间距为 0.2 m,隔离柱桩径为 0.8 m,将隔离桩等效成地下连续墙,等效公式通过式(24)^[16]计算。

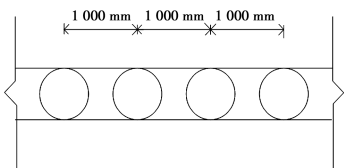


图4 Layout diagram of isolation pile

$$\frac{1}{12}(D+t)H^3 = \frac{1}{64}\pi D^4 \quad (24)$$

式中: D 为桩的直径; t 为两桩的净距; H 为等效厚度。经计算知,隔离桩等效厚度为 0.62 m。将隔离柱等效成板桩连续墙,忽略了桩间土体的绕流,使得盾构作用下土体水平位移产生的水平作用力均施加在桩身上,结果可能使土体水平位移比实际位移略小,而桩身水平位移比实际略大,根据文献[18]知,

当桩中心距小于 $3D$ 时,堆卸载导致的土体侧向位移在被动桩附近产生的侧压力有 90% 以上的份额由被动桩承担,即可以将隔离柱等效成板桩连续墙,从而证实了上述等效的有效性。

2.2 实际参数分析

高铁桩和隔离桩均视为 Euler-Bernoulli 梁,采用不同地基模型模拟桩基变形,分别讨论有隔离桩和无隔离桩对高铁桩基水平位移的影响。

情况1:用 Winkler 地基模型模拟高铁桩变形,用 Winkler 地基模型模拟隔离桩变形,参数 $k=12$ MPa/m,通过计算机编程,计算得到高铁桩水平位移,如图5所示。

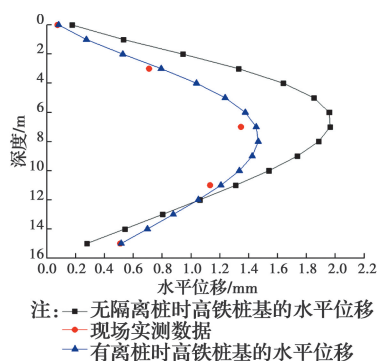


图5 WW模型下高铁桩水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in WW model

情况2:用 Pasternak 地基模型模拟高铁桩变形,用 Pasternak 地基模型模拟隔离桩变形,取 $k=12$ MPa/m,参考文献[19],取剪切层厚度 $t=11D$, D 为桩的直径。通过计算机编程计算,得到高铁桩水平位移,如图6所示。

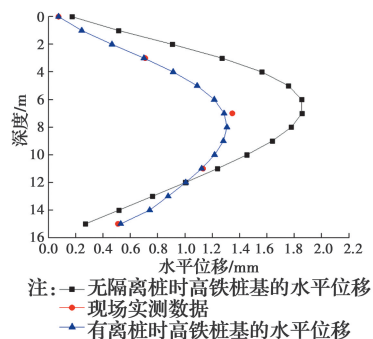


图6 PP模型下高铁桩水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in PP model

情况3:用 Winkler 地基模型模拟高铁桩变形,用 Pasternak 地基模型模拟隔离桩变形,剪切层厚度 $t=11D$, D 为桩的直径,通过计算机编程计算,得到高铁桩水平位移,如图7所示。

上述3种情况表明,隔离桩能够有效减小高铁桩基水平位移,尤其能够显著减小高铁桩基最大水平位移,说明非常有必要在隧道和高铁桩基之间设置隔离桩,而且图4、图5和图6对应的高铁桩基在隔离桩保护作用下,最大水平位移基本一致,且与现场实测数据相近,这是由于高铁桩基和隔离桩的弹性模量远大于土体模量($E_p/E_s > 10^3$),桩土之间弹性作用远大于剪切作用,Pasternak地基模型将退化成Winkler地基模型,此时,Pasternak地基模型计算结果与Winkler地基模型相近。

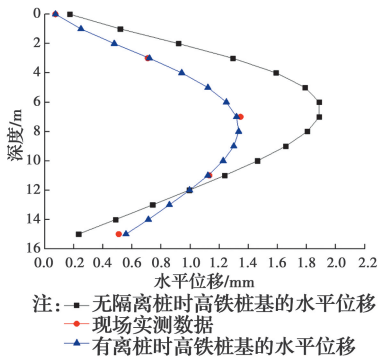


图7 PW模型下高铁桩水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in PW model

2.3 分析隔离桩不同弹性模量对高铁桩水平位移的影响

为研究隔离桩材料性质对高铁桩基水平位移的影响,现将隔离桩模量 E_{p1} 分别改变成0.2、1、10、20 GPa,其他参数不变,分析不同弹性模量隔离桩对高铁桩基水平位移的影响。

桩土模量相差较大的情况下,Pasternak地基模型将退化成Winkler地基模型,而高铁桩基模量远大于土体压缩模量,故在模拟高铁桩基的水平位移时,可采用Winkler地基模型。分别分析用Pasternak地基模型和Winkler地基模型来模拟隔离桩变形,并对比无隔离桩时高铁桩基水平位移的影响。

情况1:用Winkler地基模型模拟高铁桩变形,Winkler地基模型模拟隔离桩变形,参数 $k = 12$ MPa/m,通过计算机编程计算得到高铁桩水平位移,如图8所示。

情况2:用Winkler地基模型模拟高铁桩变形,Pasternak地基模型模拟隔离桩变形,取 $k = 12$ MPa/m,剪切层厚度 $t = 11D$, D 为桩的直径,通过计算机编程计算得高铁桩水平位移,如图9所示。

对比图7和图8可知,当隔离桩模量低于5 GPa

时,用Winkler地基模型模拟桩基的结果与用Pasternak地基模型的结果相差较大,这是在桩土模量相差不大(桩土模量 $E_p/E_s < 200$)时,桩土之间的剪切作用相比于桩土之间的弹性作用不可忽略,Pasternak地基模型更能准确地模拟土与结构的相互作用,而当隔离桩模量越来越大(桩土模量 $E_p/E_s > 200$)时,两种地基模型模拟隔离桩对高铁桩基水平位移影响几乎一致,这是由于桩土之间的剪切作用相比于桩土之间的弹性作用太小,可忽略,Pasternak地基模型将退化成Winkler地基模型。

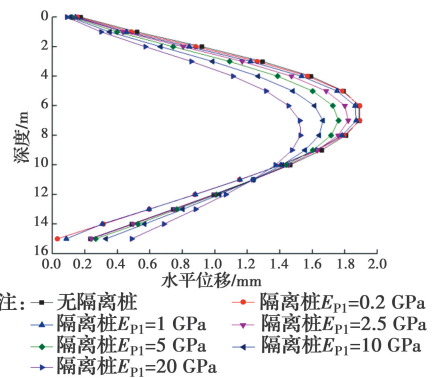


图8 WW模型下高铁桩水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in WW model

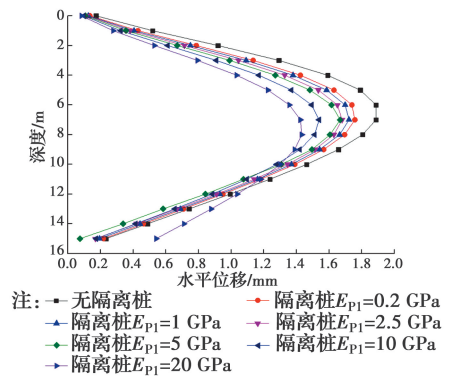


图9 PW模型下高铁桩水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in WW model

2.4 不同隔离桩桩径对高铁桩基水平位移的影响

当考虑隔离桩桩径影响时,分别取隔离桩桩径为0.6、0.7、0.9、1.0 m,其他参数不变,分析不同桩径的隔离桩对高铁桩水平位移的影响。

已知高铁桩基和隔离桩模量均远大于土体模量,故模拟桩基变形时,选择Pasternak地基模型和Winkler地基模型无区别,拟采用Pasternak地基模型计算隔离桩,Winkler地基模型计算高铁桩。

取 $k = 12$ MPa/m,剪切层厚度 $t = 11D$, D 为桩

的直径,通过计算机编程计算得到高铁桩水平位移,如图10所示。

从上述不同的位移曲线可知,在高铁桩和盾构之间打入钻孔灌注桩能够明显减小高铁桩基的水平位移,随着隔离桩桩径的增大,隔离桩对高铁桩基的保护效果越好,尤其是对减小桩基最大水平位移的效果较明显,因桩径越大,桩基抗弯刚度 EI 越大,其抗变形的能力越强。

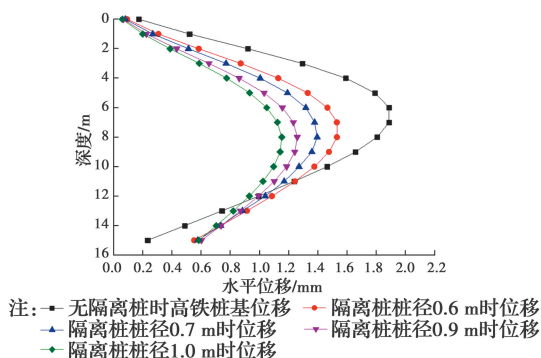


图10 PW模型下高铁桩水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in WW model

2.5 分析隔离桩与盾构轴线水平距离对高铁桩水平位移的影响

当考虑隔离桩至盾构轴线的水平距离对高铁桩基水平位移的影响时,分别取桩隧水平距离为 $0.5R$ 、 $0.75R$ 、 $1.0R$ 、 $1.25R$ 、 $1.5R$ 、 $1.75R$ (R 为隧道半径),其他参数不变,分析改变隔离桩与盾构轴线的水平距离对高铁桩水平位移的影响。

采用Winkler地基模型模拟高铁桩变形,Pasternak地基模型模拟隔离桩变形,取 $k=12\text{ MPa/m}$,剪切层厚度 $t=11D$, D 为桩的直径,通过计算机编程计算得到高铁桩水平位移,如图11所示。

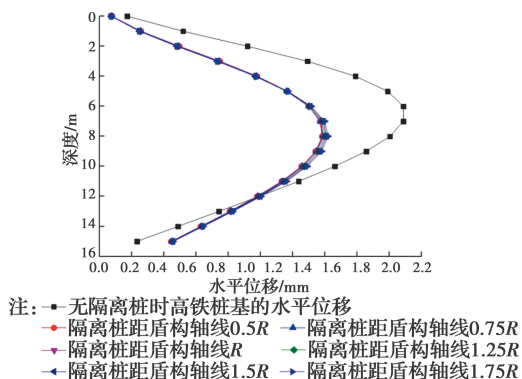


图11 PW模型下高铁桩水平位移

Fig. 11 Horizontal displacement of pile under high-speed railway in WW model

模拟均是在实际情况的基础上,仅改变隔离桩与盾构轴线的水平距离,从图10的几条位移曲线可知,随着隔离桩越来越远离高铁桩基,距离盾构轴线越来越远时,隔离桩对高铁桩基的保护效果越佳,可知,不同的隔离桩位置对高铁桩基水平位移的影响可达5.1%,故隔离桩在盾构开挖的安全范围内,隔离桩距离盾构隧道越近,盾构开挖对既有桩基的影响越小。

3 结论

1)在计算隔离桩对高铁桩的水平位移影响时,当隔离桩与土体模量相差较大时(桩土模量比 $E_p/E_s > 200$),Pasternak地基模型将退化成Winkler地基模型,当隔离桩与土体模量相差不大时(桩土模量 $E_p/E_s < 200$),Pasternak地基模型能更准确地模拟土与结构的相互作用,Pasternak地基模型的计算精度将明显优于Winkler地基模型。

2)当隔离桩桩径增大时,在相同土体自由位移场施加附加应力下,桩基自身水平位移会随之减小,由于遮蔽效应会使其后群桩的水平位移随之减小。

3)在保持隧道和高铁桩基位置不变的情况下,在隔离桩位于隧道安全范围内,隔离桩距离隧道越近,盾构开挖对既有桩基变形的影响越小。

参考文献:

- [1] MORTON J D, KING K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of pile foundations [C]//Proceedings Tunneling79, London: IMM, 1979: 57-68.
- [2] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations [J]. Géotechnique, 2000, 50 (3): 283-294.
- [3] LEE C J, JACOBSZ S W. The influence of tunnelling on adjacent piled foundations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 430.
- [4] 杨平, 朱逢斌. 城市隧道施工对邻近桩基工作性状影响研究[C]//中国土木工程学会第十二届年会暨隧道及地下工程分会第十四届年会论文集, 上海, 2006: 242-247.
- [5] 沈建文, 刘力. 盾构隧道施工对临近桩基影响数值及现场监测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36 (Sup2): 709-714.

SHEN J W, LIU L. Numerical analysis and field monitoring for studying effects of shield tunnelling on nearby piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36

- (Sup2): 709-714. (in Chinese)
- [6] LIU C, ZHANG Z X, REGUEIRO R A. Pile and pile group response to tunnelling using a large diameter slurry shield-Case study in Shanghai [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 59: 21-43.
- [7] SOOMRO M A, HONG Y, NG C W W, et al. Load transfer mechanism in pile group due to single tunnel advancement in stiff clay [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 45: 63-72.
- [8] 李早, 黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(3): 398-402.
LI Z, HUANG M S. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(3): 398-402. (in Chinese)
- [9] ZHANG Z G, HUANG M S, XU C, et al. Simplified solution for tunnel-soil-pile interaction in pasternak's foundation model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 146-158.
- [10] 张治国, 鲁明浩, 徐晨, 等. 基于 Kerr 地基模型的隧道开挖诱发桩基变形简化方法[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(6): 55-66.
ZHANG Z G, LU M H, XU C, et al. Simplified solution for tunnelling-induced pile foundation deformation based on the kerr foundation model [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(6): 55-66. (in Chinese)
- [11] 王鑫, 刘小兵. 地铁隧道开挖对临近桥桩影响的二阶段法分析[J]. *铁道建筑*, 2008(11): 27-31.
WANG X, LIU X B. Analysis about influence of metro's tunnel driving on nearby bridge's pile foundation with two-stage method [J]. *Railway Engineering*, 2008(11): 27-31. (in Chinese)
- [12] 陈涛, 吕勇刚. 盾构法隧道近距离侧穿对桥梁桩基的影响[J]. *中国港湾建设*, 2016, 36(8): 20-24.
CHEN T, LV Y G. Influence of construction of side-crossing shield tunnel on adjacent bridge pile foundation [J]. *China Harbour Engineering*, 2016, 36(8): 20-24. (in Chinese)
- [13] 范东方. 盾构隧道近距离侧穿高铁桥桩时隔离保护措施的效果分析[J]. *铁道勘测与设计*, 2016(4): 40-42, 76.
FAN D F. Effect analysis of isolation protection measures when shield tunneling through high-speed railway bridge piles at short distance [J]. *Railway Survey and Design*, 2016(4): 40-42, 76. (in Chinese)
- [14] 李雪, 周顺华, 王培鑫, 等. 隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J]. *岩土力学*, 2015, 36(Sup1): 235-240.
LI X, ZHOU S H, WANG P X, et al. Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup1): 235-240. (in Chinese)
- [15] 王长宁, 韩高孝. 深埋盾构隧道在岩层中穿越桥梁时隔离桩适用性研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2015, 28(2): 45-49, 67.
WANG C N, HAN G X. Research on applicability of isolating piles when deep-buried shield tunnel crossing bridge [J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition)*, 2015, 28(2): 45-49, 67. (in Chinese)
- [16] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(9): 846-856.
- [17] VESIC A S. Bending of beams resting on isotropic elastic solid [J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 1961, 87(2): 35-53.
- [18] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(2): 174-178, 184.
ZHANG J X, CHEN F Q, JIAN H Y. Numerical analysis of soil arching effects in passive piles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(2): 174-178, 184. (in Chinese)
- [19] 张治国, 姜蕴娟, 徐晨, 等. 对“考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析”讨论的答复[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1360-1362.
ZHANG Z G, JIANG Y J, XU C, et al. Response to the discussion on "analysis of influence of tunnel excavation on adjacent pile foundation considering three-dimensional soil mass effect and shear deformation of foundation" [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7): 1360-1362. (in Chinese)