

文章编号:1001-7372(2015)08-0067-07

不同埋置位置隧道对群桩影响的离心模型试验

马少坤^{1,2}, 陈欣¹, 吕虎³, 吴宏伟³, 江杰^{1,2}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 香港科技大学 土木及环境工程学系, 香港)

摘要:为了给广西地区隧道的设计与施工提供参考,针对隧道开挖对临近建筑物桩基产生不利影响的实际情况,开展了不同埋置位置隧道对群桩影响的离心模型试验。试验中选取的离心加速度为 $40g$,目标地层损失比为 2% ,通过排水法控制地层损失,并分析隧道开挖引起的地表沉降、桩顶附加沉降、附加弯矩和附加轴力的变化规律。试验结果表明:隧道开挖完成后,较浅埋深双隧道共同引起的地表沉降大于深埋隧道;隧道开挖过程中,位于桩端处的隧道开挖引起的桩顶附加沉降大于桩端以上处,对桩基的变形较为不利;不同埋深隧道分段开挖所引起桩的附加弯矩和附加轴力分布及发展规律差异显著。

关键词:隧道工程;桩基础;离心模型试验;承载特性;双隧道

中图分类号:U451.5

文献标志码:A

Centrifuge Modelling Test of Effects of Tunnelling with Different Depths on Pile Group

MA Shao-kun^{1,2}, CHEN Xin¹, LU Hu³, WU Hong-wei³, JIANG Jie^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: To provide reference for tunnel design and construction in Guangxi, aimed at the situation that tunnelling inevitably induced negative effects on pile foundations of adjacent buildings, centrifuge modelling test was carried out to investigate the effects of tunnelling with different depths on existing pile group. In this test, centrifugal acceleration being $40g$, the water drainage method was adopted to control ground loss with target ground loss ratio of 2% . Meanwhile, variation laws of ground surface settlement, pile top additional settlement, additional bending moment and additional axial force induced by tunnelling were analyzed. The results show that after the tunnelling, ground surface settlement induced by twin tunnelling with shallow depth is greater than that induced by twin tunnelling with deep depth. In the process of tunnelling, additional settlement of pile top caused by tunnelling located at pile tip is greater than that caused by tunnelling located above pile tip, which is bad for the deformation of pile

收稿日期:2014-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51068002,41362016);广西岩土力学与工程重点实验室项目(13-KF-02);
南宁轨道交通有限责任公司科研项目

作者简介:马少坤(1972-),男,湖南湘潭人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:mashaokun@sina.com。

foundation. There is a significant difference of the distribution and development law of additional moment and additional axial force of pile induced by segment tunnelling located at different depths.

Key words: tunnel engineering; pile foundation; centrifuge modelling test; bearing capacity characteristic; twin tunnel

0 引言

随着城市隧道建设的高速发展,许多隧道将建在原有建筑物的附近。Mair 等^[1-2]监测了隧道施工对附近建筑物桩基的影响,结果表明隧道开挖会引起桩基的附加位移和内力,对桩基的受力非常不利。因此深入研究隧道施工对附近桩基的影响具有重要意义。

离心模型试验的实质是利用离心力模拟重力效应,使模型应力状态与原型应力状态相同。因此,离心模型试验被广泛应用于隧道施工对桩基的影响分析研究。Chiang 等^[3]研究了砂土地基中隧道开挖对单桩的影响,运用了离心模型试验方法,得出邻近端承型单桩的承载能力发生明显降低的结论;Jacobsz 等^[4]发现地层损失引起的桩失效(桩的沉降显著增加)与隧道和桩端之间的距离密切相关;Loganathan 等^[5]通过离心模型试验研究表明,桩趾位于隧道中心轴线附近时,桩的附加弯矩和侧向变形非常明显;朱逢斌等^[6]通过数值模拟与离心试验的对比分析,探讨了软土中隧道施工对附近群桩的影响规律,指出群桩中前排桩变形及内力均大于后排桩。

虽然隧道施工对桩基影响的离心模型试验研究已经很广泛,但这些研究大多基于砂土或软土,关于广西地区的地基中的研究甚少。笔者^[7-8]通过三维离心模型试验对广西地区地基中的单隧道和双隧道开挖对群桩的影响做了研究。Ng 等^[9]通过离心试验研究,指出干砂中双隧道开挖引起桩的沉降与桩和隧道的相对位置密切相关。因此本文将在文献[7]、[8]的基础上,进一步通过离心模型试验,研究广西地区地基中隧道的不同埋置深度对桩基的影响规律,以期对广西地区的隧道设计及施工提供有益参考。

1 离心模型试验方案

离心模型试验原理见文献[7]。由于实际工程中建筑物桩基较长,隧道埋深一般位于桩端的上方,所以本次对比试验分为 2 组,试验 1 中桩端与隧道轴线平齐^[9],试验 2 中桩端与隧道底部平齐。对比试验中,除隧道埋置位置不同外,其他试验条件均相

同。本次试验主要研究不同埋置位置时隧道施工对群桩的地表沉降槽、桩顶附加沉降、附加弯矩和附加轴力的影响规律。

试验选用香港科技大学土工离心机,离心机容量为 $400g \cdot t$, (g 为重力加速度)旋转半径为 4.2 m,最大加速度为 $150g$;试验模型箱的尺寸为 1.265 m(长) \times 1.245 m(宽) \times 0.85 m(高),模型断面示意图 1。试验土样选取广西南宁地区土体,其塑性指数 $I_p = 28.0$,最优含水率 $W_o = 12.9\%$,干密度 $\rho_d = 1\,600\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,含水率 $W = 18\%$ 。试验中的砂土采用的是 Toyoura 砂,其土粒相对密度 $G_s = 2.65$,最大孔隙比 $e_{\max} = 0.977$,最小孔隙比 $e_{\min} = 0.597$,临界状态有效内摩擦角 $\varphi_c = 31^\circ$,本次试验选用的离心加速度为 $40g$ 。

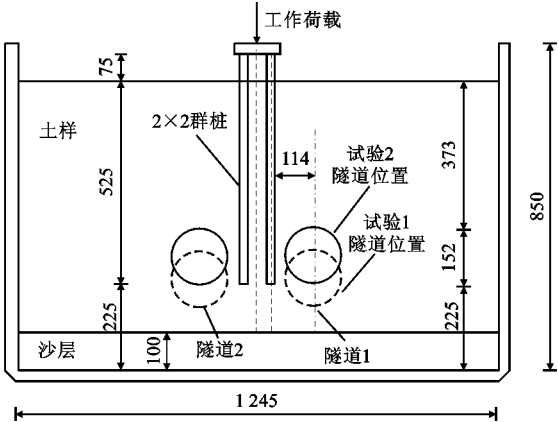


图 1 离心模型试验正立面图(单位:mm)
Fig. 1 Front Elevation View of Centrifuge Modelling Test (Unit:mm)

2 离心试验模型及制作

试验模型的群桩由 4 根单桩及承台组成,4 根单桩由厚为 25 mm、宽为 120 mm 的承台连接为群桩,模型桩由铝管制成,承台由铝板制成。模型隧道由 5 节水袋组成,在离心机转动过程中逐步排出 5 节水袋中的水来分别模拟隧道 5 步的开挖,为固定水袋位置,用金属框架将 5 节水袋组装在一起。当采用 $40g$ 的离心加速度时,即模型率(模型尺寸与原型尺寸之比)为 40 时,桩和隧道几何参数见表 1。

隧道施工造成的地层损失通过排水法来模拟,

Tab. 1 Model Size and Prototype Size mm

参数	模型	原型
隧道埋深	449(试验 1), 373(试验 2)	17.96×10^3 (试验 1), 14.92×10^3 (试验 2)
隧道洞径	152	6.08×10^3
掘进进尺	76	3.04×10^3
隧道总长	380	15.2×10^3
桩径	20	0.8×10^3
地表以下桩长	525	21×10^3
桩-桩间距	70	2.8×10^3
隧道与前桩间距	38	1.52×10^3

Figure 1 is a schematic diagram of the drainage system control room layout. The diagram shows a rectangular room with a total width of 1245 and a total height of 930. The layout includes a central control area with two 3x3 grids of points labeled LP1 through LP9. Surrounding these are various control points labeled L1 through L10. Dimensions are provided for the overall room, the central control area, and the spacing between components. The top section is labeled '排水系统控制室' (Drainage System Control Room).

Fig. 3 Plan View of Arrangement of Displacement Sensor for Ground Surface Settlement Control Point (Unit:mm)

应变片布置图(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of Strain Gauges (Unit:mm)

原型时间不能按照常规渗流固结问题对应,即不能简单将原型与模型渗流固结时间之比视为 $N^2 : 1$ (N 为原型与模型相似比),但目前离心试验中非饱和土的渗流固结问题在国内外还是个未解难题。同时,国外研究成果^[10-11]表明,离心试验中试验用土为非饱和土时其原型与模型渗流固结时间同样可以近似为 $N^2 : 1$,其渗流固结特性可近似按饱和土考虑。基于以上实际情况及国外研究成果,结合试验的主要目的,本文试验土样的渗流固结近似按饱和土考虑。

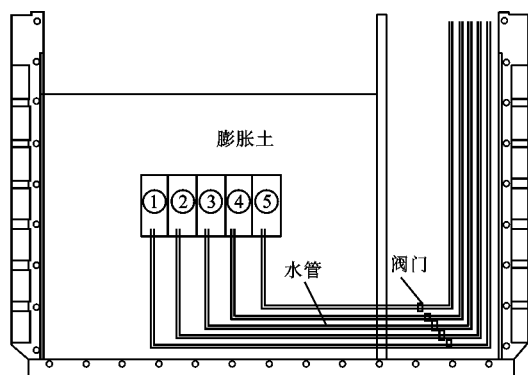


图 2 地层损失的模拟系统工作原理示意(侧立面图)

Fig. 2 Working Principle Diagram of Simulation System for Ground Loss (Side Elevation View)

3 测量仪器的布置与试验流程

3.1 测量仪器布置

测量地表沉降时,试验 1 布置了 L1~L6 号位移传感器,试验 2 中又增加了 4 个位移传感器, L7~L10 号位移传感器,如图 3 所示。位移传感器 L1 位于隧道 1 的中心轴线处,传感器 L1~L5 的间距均为 1 倍隧道半径,传感器 L6~L10 与 L1~L5 关于承台模型中心对称。测量桩顶时,布置了 LP2, LP3, LP4 和 LPC 共 4 个传感器,其中:LP4 测量前桩桩顶沉降;LP2 和 LP3 测量后桩的桩顶沉降;LPC 测量桩顶中心沉降。应变片布置如图 4 所示。

3.2 试验流程

将风干土样碾碎过孔径 2 mm 筛,取筛后土样配制成含水量为 18% 的湿样并放置 24 h 以上。于

表 2 试验流程
Tab. 2 Test Process

事件	模型时间/min	原型时间/d
从 1g 至 40g	10	
地表固结沉降的稳定	240	267.0
桩顶施加载荷 (约 1 500 N)	10	
依次开挖 2 个隧道	20	22.2
开挖完成后孔隙水压 的消散及长期沉降	1 200	1 333.3
从 40g 回到 1g	30	

O'Neill 等^[12]曾提出把桩沉降为桩径的 5% 所对应的荷载作为极限荷载,根据经验可把沉降为桩径的 2% 所对应的荷载作为工作荷载。基于以上理论及前期离心试验场中力-位移曲线测试结果,工作荷载确定为 1 500 N,也即相当于原型中的 2.4 MN。工作荷载的施加采用逐步施加,每步荷载增量为 100 N(相当于原型 160 kN),加荷过程中尽可能保证超孔隙水压力得以充分消散,此步大约持续 10 min,群桩在工作荷载作用下沉降也基本稳定。

4 试验结果与分析

4.1 地表土体竖向位移

图 5 为地表土体竖向位移。从图 5 可以看出:地表土体竖向位移均随隧道掘进的进行而逐渐增大。试验 1 和试验 2 中:第 1 个隧道开挖完成后,最大沉降均发生在隧道 1 轴线处,分别为 18.9、20.3 mm,隧道 2 轴线处的地表沉降为分别 11.2、11.6 mm;第 2 个隧道开挖完成后,隧道 1 轴线处地表沉降增加了 14.2、13.5 mm,隧道 2 轴线处地表沉降分别增加了 18.0、22.4 mm。由此可以看出,试验 2 中地表沉降槽要大于试验 1,且沉降槽的分布较试验 1 更为对称,这说明较浅埋深双隧道共同引起地表沉降要大于深埋隧道,这与 Peck^[13]的地表沉降公式表述的规律一致。而且较浅埋深双隧道共同引起地表沉降槽更为接近 2 个隧道单独依次开挖引起的沉降槽的叠加。Addenbrooke^[14]也得出只有在隧道埋深 C 与隧道外径 D 之比大于 3.0 的时候(试验 1 约为 2.9,试验 2 约为 2.5),才会得出隧道 2 开挖引起的地表沉降比隧道 1 开挖引起的地表沉降大得多的结论。

4.2 桩顶附加竖向位移

隧道开挖阶段桩顶沉降值如图 6 所示,前桩为与隧道 1 较近一侧的桩基,后桩为与隧道 1 较远一侧桩基。从图 6 可以看出:两试验的桩顶附加竖向

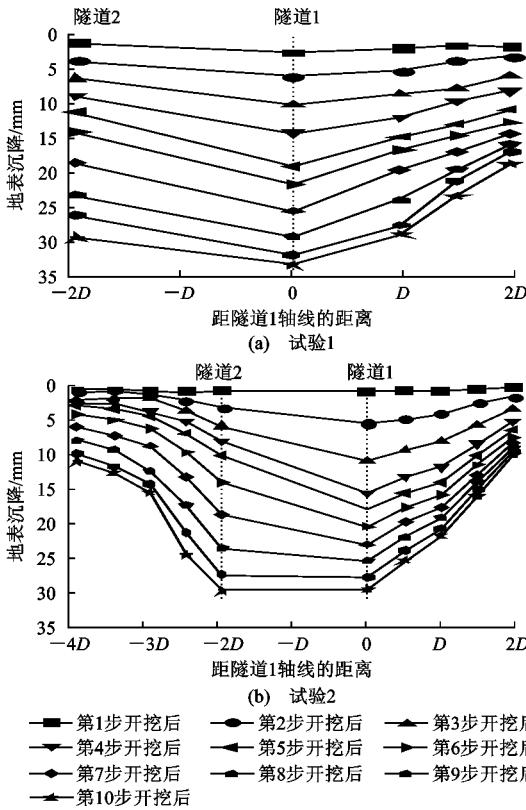


图 5 地表土体竖向位移

Fig. 5 Vertical Displacement of Ground Surface

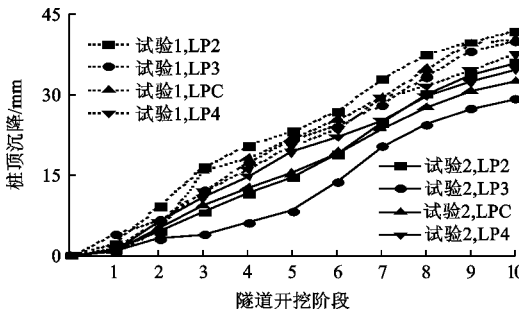


图 6 桩顶附加竖向位移

Fig. 6 Additional Vertical Displacement of Pile Top

位移均随隧道掘进的进行而近似线性增加;隧道开挖过程中,试验 1 的桩顶沉降均大于试验 2 中相对应的桩顶沉降,这主要是因为试验 1 中隧道位于桩端处,开挖对桩端阻力的影响更明显。说明位于桩端处的隧道开挖引起桩顶附加沉降比其他埋深的隧道要大。隧道开挖完成后,2 组试验中均在群桩后桩桩顶 LP2 处测得的沉降值最大。由此看来,隧道的分段开挖会引起承台的倾斜,相应桩基的内力将发生重分布。

4.3 附加弯矩

本文中以桩与隧道 1 临近一侧受拉的弯矩为正。图 7 为隧道 1 开挖引起的桩身附加弯矩,其中

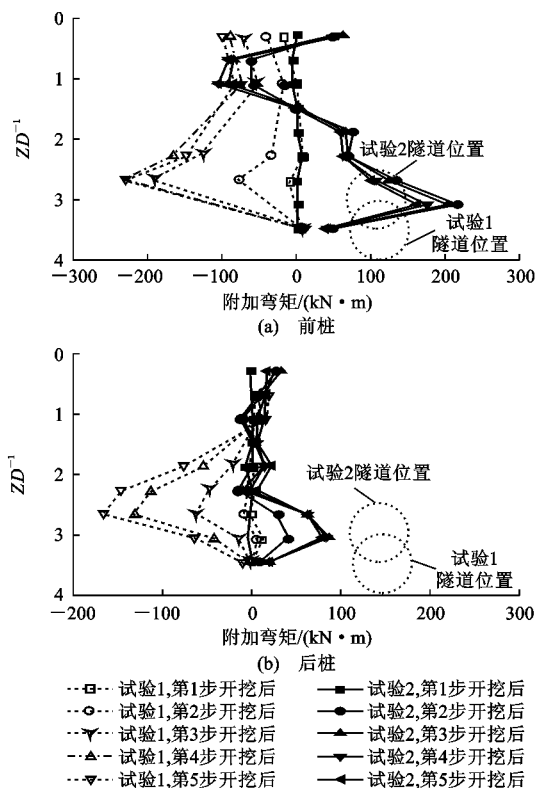


图 7 隧道 1 开挖引起的桩身附加弯矩

Fig. 7 Additional Bending Moment of Pile Caused by First Tunnelling

Z 为应变片埋深。从图 7(a)可以看出:试验 1 中第 1 个隧道开挖后,前排桩体没有出现反弯点,桩身附加弯矩均为负值,最大负弯矩位于 $Z/D=2.5$ 附近(为 $-232.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$),主要是因为隧道开挖引起桩趾附近右侧土体应力松弛,桩身从桩趾至隧道拱顶部分可看成一个悬臂结构,在桩趾处为自由端,隧道拱顶附近的弯矩达最大值。试验 2 中出现 2 个反弯点,弯矩最大绝对值位于隧道轴线 $Z/D=3.0$ 附近(为 $215.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$),主要是因为隧道掘进引起其周边土体松弛,进而对桩身产生水平挤压作用,桩趾至拱冠可近似看作两端嵌固的连系梁,在隧道轴线附近弯矩有最大值。

从图 7(b)可以看出:隧道开挖过程中,两试验桩身上半部均没有明显的弯矩出现,桩身下半部,试验 1 中弯矩主要表现为负弯矩,最大值位于 $Z/D=2.5$ 附近(为 $-167.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$),试验 2 中弯矩主要表现为正弯矩,位于 $Z/D=3.0$ 处(为 $86.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$)。随着第 1 个隧道开挖的进行,试验 1 和试验 2 最大弯矩均增大。以上规律与前桩类似,但数值明显比前桩小,这是因为前桩存在明显的遮挡效应。从图 7(a)、(b)可以看出,隧道位于桩端处时,开挖引起的邻近桩基受力表现为悬臂梁模式,隧道

位于桩端上方时,开挖引起的邻近桩基受力则表现为两端固支的连系梁模式。桩端离隧道越近,受开挖的影响越明显,且前桩存在明显的遮挡效应。隧道 1 开挖完成后,试验 1 中前桩最大弯矩出现在 $Z/D=2.7$ 处,最大值为 $-232 \text{ kN} \cdot \text{m}$;后桩最大弯矩出现在相同位置,最大值为 $-167 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。试验 2 中隧道 1 开挖完成后前桩最大弯矩出现在 $Z/D=3.1$ 处,其最大值为 $162.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$;后桩最大弯矩出现在相同位置,其最大弯矩为 $86 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

图 8 为隧道 2 开挖完成后桩身附加弯矩。从图 8(a)可以看出:随着第 2 个隧道开挖的进行而引起群桩左侧土体的应力松弛,桩身下部附加弯矩逐渐减少;隧道开挖过程中,试验 1 中最大附加弯矩仍位于 $Z/D=2.5$ 附近(为 $-239.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$),试验 2 中位于 $Z/D=1.0$ 附近处(为 $-114.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$)。

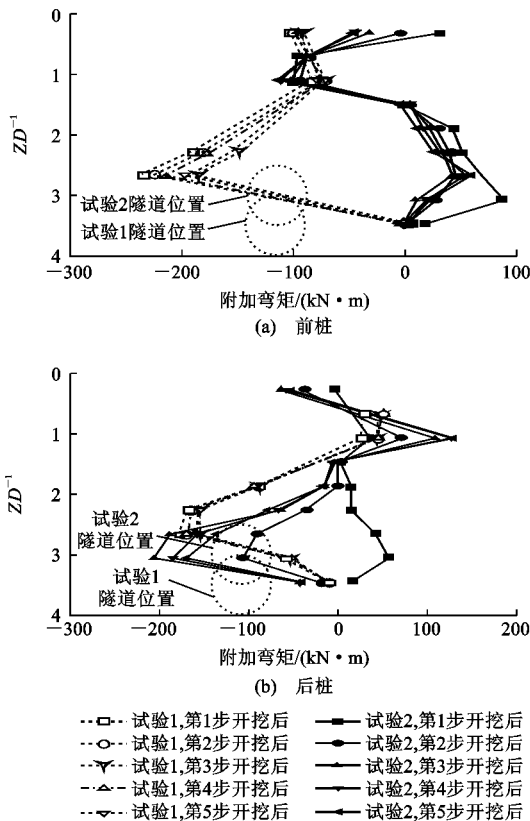


图 8 隧道 2 开挖完成后桩身附加弯矩

Fig. 8 Additional Bending Moment of Pile After Second Tunnelling

从图 8(b)可以看出:随着第 2 个隧道的开挖,试验 1 中桩体出现了 1 个反弯点,试验 2 中桩体出现了 2 个反弯点,出现了明显的负弯矩;隧道开挖过程中,试验 1 中最大弯矩位于 $Z/D=2.5$ 附近(为 $-167.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$),试验 2 中桩的最大弯矩位于 $Z/D=3.0$ 处(为 $-204.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$)。对比图 7 可知,在试

验2中,仅由第2个隧道开挖对后桩的弯矩分布影响更明显,不仅弯矩方向发生变化,最大值也明显增大(由 $86.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ 变为 $204.2\text{ kN}\cdot\text{m}$),这是因为第2个隧道与后桩的距离更近。

从图8(a)、(b)可见:双隧道开挖完成后,对比前桩和后桩的最终附加弯矩,隧道位于桩端较隧道位于桩端上方时,群桩受隧道开挖的影响更为明显。

4.4 附加轴力

图9为隧道1开挖引起的桩身附加轴力,本文中以桩身受压为正。

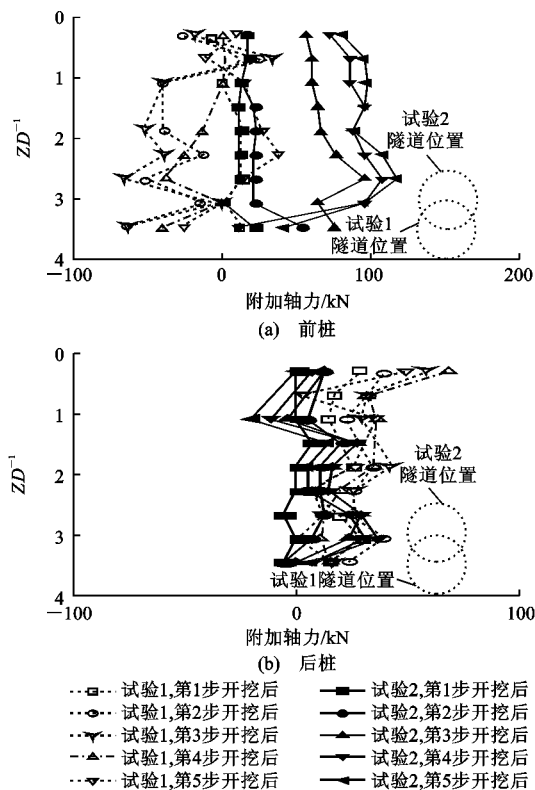


图9 隧道1开挖引起的桩身附加轴力

Fig. 9 Additional Axial Force of Pile Caused by First Tunneling

从图9(a)可以看出:试验1中,隧道开挖而引起桩端阻力降低,桩身相对桩侧土体的沉降更大,从而激发桩侧摩阻力,桩侧摩阻力表现为正摩阻力,引起的桩基附加轴力为拉力;在试验2中,隧道的开挖对桩端阻力影响较小,故桩身沉降小于桩周土的沉降,侧摩阻力表现为负摩阻力,引起的桩基附加轴力为压力;隧道开挖过程中,两试验均在 $Z/D=2.5$ 附近取得附加轴力最大值(试验1为 -66.52 kN ,试验2为 116.9 kN),试验2中附加轴力约增加 19.5% (群桩中每根单桩的工作荷载约为 600 kN)。

从图9(b)可以看出:两试验中,后桩的附加轴

力均为压力,这说明隧道开挖过程中,桩侧土相对于后桩的沉降更大,后桩侧摩阻力均为负摩阻力;两试验的后桩附加轴力均随着隧道的开挖而增加,但数值比前桩的小,这主要是因为前桩存在明显遮拦效应;试验1在接近桩顶处取得附加轴力最大值(68.7 kN),试验2在 $Z/D=3.0$ 附近取得附加轴力最大值(35.9 kN),试验1中的附加轴力约增加 11.5% (单桩工作荷载约为 600 kN)。

图10为隧道2开挖完成后桩身附加轴力。从图10(a)可以看出:在第2个隧道开挖过程中,试验1和试验2中前桩都承受的附加压力均在 $Z/D=2.5$ 附近达到最大值,但试验1引起的最大桩身附加轴力(53.2 kN)远小于试验2最大桩身附加轴力(191.6 kN),试验2中附加轴力最大值约增加 31.9% (单桩工作荷载约为 600 kN)。

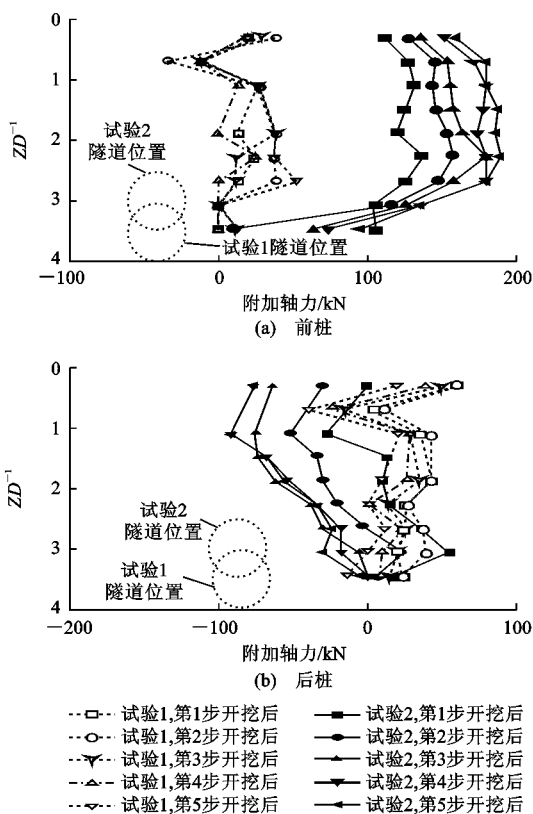


图10 隧道2开挖完成后桩身附加轴力

Fig. 10 Additional Axial Force of Pile After Second Tunneling

从图10(b)可以看出:第2个隧道开挖时,后桩的受力模式与第1个隧道开挖引起前桩附加轴力的受力模式相同。隧道开挖过程中,试验1在接近桩顶处取得附加轴力最大值(58.9 kN),试验2在 $Z/D=3.0$ 附近取得附加轴力最大值(53.8 kN),其中试验1的最大附加轴力约增加 10% (单桩工作荷载

约为 600 kN)。

5 结 语

(1)较浅埋深双隧道共同开挖引起的地表沉降要大于深埋隧道,且浅埋双隧道共同开挖引起的地表沉降与其分别开挖引起的地表沉降叠加更为相近。在对广西地区双隧道开挖所致地表沉降进行预测时,可采用 Peck 提出的经验公式分别计算 2 个隧道单独开挖所致地表沉降,再将两者叠加即为双隧道开挖所导致的地表沉降,且这种预测方法更适用于对浅埋双隧道开挖所引起地表沉降的预测。

(2)隧道开挖过程中,位于桩端处隧道开挖引起的桩顶附加沉降比其他埋深的隧道大,在隧道施工时应加强此种工况下桩基承载性能的监测。隧道分段开挖会引起承台的倾斜,相应桩基的内力将发生重分布。

(3)隧道位于桩端处时,开挖引起的邻近桩基受力表现为悬臂梁模式;隧道位于桩端上方时,开挖引起的邻近桩基受力则表现为两端固支的连系梁模式。因此,分析不同位置隧道开挖对临近群桩的影响及加固设计时需要采用不同的力学模型。

(4)双隧道施工时,处于桩端上方的隧道开挖对群桩产生较大的附加轴力,对桩基受力较为不利。

(5)本文试验土样虽为膨胀土,但根据膨胀土的膨胀收缩机理,其膨胀特性难以在离心模型试验中得到相似反映,故本文离心模型试验没有明显反映膨胀土的直接影响,这也是将来在该特殊土样中开展相关离心试验需要改进之处。

参考文献:

References:

- [1] MAIR R J. Unwin Memorial Lecture 1992. Developments in Geotechnical Engineering Research: Application to Tunnels and Deep Excavations[J]. Proceedings of the ICE: Civil Engineering, 1993, 97(1): 27-41.
- [2] JACOBZ S W. The Effects of Tunneling on Piled Foundations [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2003.
- [3] CHIANG K H, LEE C J. Responses of Single Piles to Tunneling-induced Soil Movements in Sandy Ground [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1224-1241.
- [4] JACOBZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge Modeling of Tunnelling near Driven Piles [J]. Soil and Foundations, 2004, 44(1): 49-56.

- [5] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge Model Testing of Tunneling-induced Ground and Pile Deformations [J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 283-294.
- [6] 朱逢斌, 杨平, ONG C W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 32(2): 298-302.
ZHU Feng-bin, YANG Ping, ONG C W. Numerical Analysis on Influence of Shield Tunnel Excavation to Neighboring Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 32(2): 298-302.
- [7] 马少坤, WONG K S, 吕虎, 等. 膨胀土地基中隧道施工对群桩影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3055-3060.
MA Shao-kun, WONG K S, LU Hu, et al. Study of Effects of Tunnel Construction on Pile Group in Expansive Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3055-3060.
- [8] 马少坤, 吕虎, WONG K S, 等. 双隧道对群桩影响的三维离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1337-1342.
MA Shao-kun, LU Hu, WONG K S, et al. Three-dimensional Centrifuge Modeling of the Effects of Twin Tunnelling on Existing Pile Group in Expansive Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1337-1342.
- [9] NG C W W, LU H, PENG S Y. Three-dimensional Centrifuge Modeling of the Effects of Twin Tunnelling on an Existing Pile [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35(3): 189-199.
- [10] DEPOUNTIS N, DAVIES M C R, HARRIS C, et al. Centrifuge Modeling of Capillary Rise [J]. Engineering Geology, 2001, 60(1/2/3/4): 95-106.
- [11] REZZOUG A, KÖNIG D, TRIANTAFYLIDIS T. Scaling Laws for Centrifuge Modeling of Capillary Rise in Sandy Soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 615-620.
- [12] O'NEILL M W, REESE L C. Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1999.
- [13] PECK R B. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground [C]//SMFE. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: SMFE, 1969: 225-290.
- [14] ADDENBROOKE T I. Numerical Analysis of Tunneling in Stiff Clay [D]. London: Imperial College London, 1996.