

双隧道不同开挖顺序对临近群桩的影响研究^{*}

邵羽¹, 江杰^{1,2}, 韦朝华¹, 马少坤^{1,2}, 刘莹^{1,2}

(1.广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2.广西大学 工程防灾与结构安全重点实验室, 南宁 530004)

摘 要:双隧道不同开挖顺序对临近群桩承载性能的影响鲜有报道。针对此问题,采用基于地层损失比的位移控制有限单元法(DCM),对软土地基中不同埋深双隧道不同开挖顺序对处于工作荷载下群桩工作性能的影响进行研究,并与相关离心模型试验结果进行比较。得到以下结论:双隧道不同开挖顺序对群桩桩顶附加沉降和群桩承载能力损失影响差别显著,当先开挖上覆隧道时,群桩桩顶的附加沉降量为先开挖下置隧道时的1.25倍,且群桩承载能力的损失率约为后者的1.2倍;两工况中第二个隧道的开挖使得群桩中前桩附加弯矩和后桩附加弯矩均有明显的增大,此与分居群桩两侧但埋深相同的双隧道开挖对群桩弯矩的影响规律迥异;两工况下均产生较大的附加弯矩和附加轴力,且最大附加弯矩和最大附加轴力均位于上覆隧道轴线附近。

关键词:双隧道;群桩;DCM;离心模型试验;桩-土相互作用

中图分类号:TU47

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)01-0182-10

Effects of the Construction Sequence of Twin Tunnels on Adjacent Pile Group

Shao Yu¹, Jiang Jie^{1,2}, Wei Chaohua¹, Ma Shaokun^{1,2}, Liu Ying^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The effects of different tunnel excavation sequences of twin tunneling on exist pile foundation remain to be understood. In this study, a displacement controlled method (DCM) based on ground loss was applied to investigate the problem. Twin tunnels and pile group under working load were located in soft clay. Computation results were compared with the results of the relative centrifuge modeling tests. The following conclusion can be obtained. The effects of construction sequence on the induced settlement of pile group and the apparent loss of pile group capacity are significant. When the construction sequence is the upper tunnel first and then the lower tunnel, the induced settlement of pile group is 1.25 times of the situation which the construction sequence is in the reverse order. The apparent loss of pile group capacity induced by the former is 1.2 times of the latter. Simultaneously, both of induced bending moment of rear piles and front piles induced by the second tunneling are increased significantly in these two situations. It is contrary to the influence law of the induced bending moment of pile group induced by twin tunneling in the same buried depth located on both side of pile group. Large value of induced bending moment is induced by twin tunneling in the two situations. Both of the maximum values of induced bending moment and the induced axial load are located at the area nearby the axis of the upper tunnel.

Keywords: twin tunnels; pile group; DCM; centrifuge modeling; pile-soil interaction

^{*} 收稿日期:2017-08-09(修改稿)

作者简介:邵羽(1987-),男,湖北仙桃人,博士生,主要从事地下工程的研究工作。E-mail:shaoyu_1987@126.com
基金项目:国家自然科学基金资助(51068002;41362016);广西岩土力学与工程重点实验室资助课题(13-KF-02)

0 引言

随着地下空间开发利用的不断发展,地铁已成为缓解城市交通压力的重要手段。然而地铁隧道的施工将不可避免会扰动周围土体,使得临近桩基产生过大的附加沉降、附加弯矩和附加轴力^[1-3],从而对临近隧道桩基承载性能产生不利影响,甚至影响其正常使用,这也给岩土工作者提出了新的挑战。

Soomro 等^[4]采用考虑土体固结的三维弹塑性有限元模型对不同埋深单隧道开挖对临近群桩的影响进行了分析。结果显示,隧道与桩的相对位置对群桩的沉降、群桩承台倾斜、桩体应力分布有显著影响。王立新^[5]采用有限差分法计算砂卵石地基中盾构隧道开挖对临近群桩的影响,结果表明桩基群经过土体加固后,可有效地减小盾构掘进造成的地层损失。Lee and Chiang^[2]通过离心模型试验对处于不同地层损失率情况下,饱和砂土中不同埋深隧道开挖对处于不同工作荷载下的单桩的影响进行研究。试验结果显示,隧道与桩的相对位置对附加弯矩的影响较大,而工作荷载和地层损失率对附加轴力的影响较大,当地层损失率为 3%~5%时,单桩桩身的附加轴力和附加弯矩增加较快。Ng et al.^[6]在标准 Toyoura sand 中对位于群桩两侧相同位置处不同埋深的双隧道开挖对群桩的影响进行离心模型试验研究,试验分三种工况,即 C/D(隧道覆土厚度与隧道直径之比)为 1.5、2.7、3.7。试验结果显示,当 C/D=3.7 时所产生的群桩的沉降最大,且会使群桩的承载能力损失 40%,然而由双隧道的开挖所导致的附加轴力较小,约为工作荷载的 15%。马少坤等^[7]对位于膨胀土地基中不同埋深双隧道开挖对临近群桩的影响进行离心模型试验,试验结果显示,当隧道轴线与桩端齐平时,开挖引起的邻近桩基受力表现为悬臂梁模式,当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。

以上研究中均未涉及位于桩基两侧不同埋深隧道开挖顺序对临近桩基的影响。Ng and H.Lu^[8]对分别位于单桩两侧不同埋深处的直径为 6 m 的隧道不同开挖顺序对单桩的影响进行离心模型试

验,单桩两侧隧道一侧隧道轴线与桩底平齐(T),一侧隧道轴线位于 0.5 倍桩长处(S)。结果显示,当施工顺序为 ST 时的桩顶沉降比施工顺序为 TS 时的大 33%,且前者开挖顺序使桩的损失的承载能力约为后者的 1.4 倍。

以上研究表明,不同埋深隧道开挖对临近桩基承载性能的影响差别显著,但其研究中隧道及桩基均位于砂土及硬质粘土中,且有关不同埋深双隧道不同施工顺序对临近群桩的影响鲜有研究。基于此,本文在 Ng and H.Lu^[8]研究的基础上,采用基于地层损失比的位移控制有限单元法(DCM),对软土地基中不同埋深双隧道不同开挖顺序对临近群桩的影响进行模拟计算,并与相关的离心模型试验结果进行对比,着重对因双隧道不同开挖顺序所导致的群桩桩顶沉降、群桩承载能力的损失、群桩承台的倾斜、群桩荷载传递机理、桩体的附加轴力和附加弯矩进行研究。

1 三维有限元分析

为了与 Ng and H.Lu^[8]离心试验结果作比较,本文基于 Ng and H.Lu^[8]离心试验中模型所对应的原型尺寸建模,并设置相同的地层损失比(1%),利用 ABAQUS 有限元软件,采用基于地层损失比的位移控制有限元法(DCM),对位于软土地区中群桩两侧不同埋深双隧道不同开挖顺序对群桩的影响进行模拟,研究不同埋深双隧道不同开挖顺序对临近群桩的影响。

1.1 Ng and H.Lu 离心模型试验简介

此试验在香港科技大学土工离心实验中心完成^[9]。考虑隧道开挖所致桩基影响的范围、模型箱尺寸等因素,试验所采用的离心加速度为 40g(*g* 为重力加速度)。其离心试验共分 2 组,即考虑单桩两侧不同埋深隧道的不同的开挖顺序,第一组为先开挖如图 1 中的与桩底齐平的隧道 T,然后开挖位于桩身中部的隧道 S,即工序 TS;第二组为先开挖位于桩身中部的隧道 S,接着开挖与桩底齐平的隧道 T,即工序 ST。模型桩长 600 mm(相当于原型 24 m),桩径为 20 mm(相当于原型 0.8 m),隧道直径为 152 mm(相当于原型 6.08 m),隧道中心与桩轴线距离为 0.75*D*(*D* 为隧道直径)。

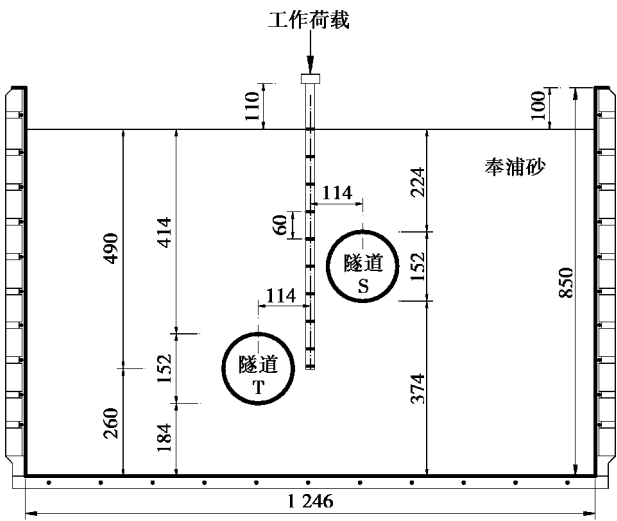


图 1 模型正立面图^[8] (单位:mm)

Fig.1 Elevation view of centrifuge tests^[8] (unit: mm)

每侧隧道分 5 步开挖, 每步开挖长度为 76 mm (相当于原型 3.04 m), 也即 $0.5D$ (D 为隧道直径)。每个隧道由 5 节充满水的水袋连接制成, 实际试验中并不模拟隧道开挖的施工细节, 而仅排出每节水袋总体积 1% 的水, 以此来模拟因隧道开挖所致的 1% 的地层损失率。

1.2 位移控制有限元法 (DCM)

本文数值模拟均采用基于地层损失比的位移控制有限元方法 (DCM)^[10-11] 进行模拟。该方法与隧道开挖离心模型试验一样, 忽略具体隧道施工过程的影响, 但可以准确地模拟任意给定的地层损失比。其具体的模拟过程如下:

(1) 由给定的地层损失率 ε_0 得到相应的间隙参数 $g^{[1]}$ 。

$$g = 2R(\sqrt{1 + \varepsilon_0} - 1) \tag{1}$$

式中: g 为间隙参数; ε_0 为地层损失率; R 为隧道外半径。

(2) 以直径 $(2R+g)$ 为隧道开挖尺寸建立有限元模型。本文所采用的隧道断面的位移模式如图 2^[11] 所示, 其沿着隧道边界的位移表达式为:

$$u_x = -\frac{g}{2}(1 + \sin \theta) \cdot \cos \theta \tag{2}$$

$$u_z = -\frac{g}{2}(1 + \sin \theta) \cdot \sin \theta \tag{3}$$

式中: μ_x 、 μ_y 分别为隧道边界水平位移和竖向位移。

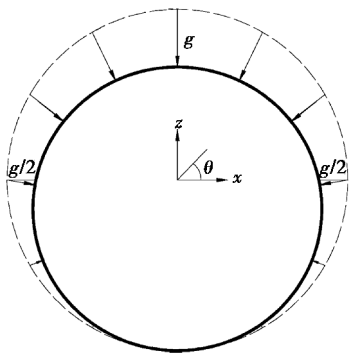


图 2 DCM 隧道变形示意图

Fig.2 Displacement boundary condition for tunneling

(3) 按照上式编写 ABAQUS 有限元子程序 DISP, 在隧道边界上施加上述位移以模拟隧道的施工过程。

1.3 有限元模型尺寸

如图 3 和图 4 所示为本文有限元模拟中隧道和群桩的基本尺寸和相对位置。图中分居 2×2 群桩两侧的隧道直径 D 为 6.08 m。两侧隧道与群桩相对位置分别为隧道轴线与桩底齐平 (T) 和隧道位于桩身中部 (S), 两侧隧道的覆土厚度 (C) 与隧道直径 (D) 之比分别为 2.7 和 1.5, 隧道与其临近桩基的净距均为 1.12 m。群桩每根桩长和桩径分别为 24 m 和 0.8 m, 桩间间距为 2.8 m, 群桩桩身入土深度为 19.6 m, 地表以上长度为 4.4 m, 群桩承台尺寸为 $4.8 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。在实际工程中, 为加强群桩承台的稳定性, 群桩承台大都与地表接触或者埋入土中, 但本文模拟的是桩体变形受外界影响较大的高承台群桩。

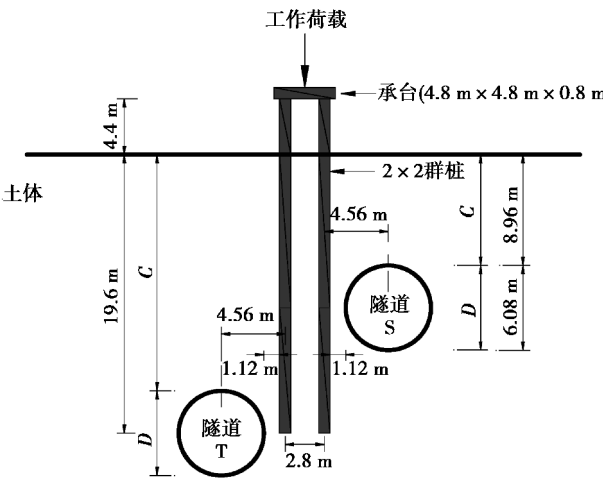


图 3 模型尺寸立面图

Fig.3 Elevation view of model size

(1)建立基本的有限元模型,设置边界条件并进行地应力平衡。

(2)在桩顶逐步施加工作荷载至 3.6 MN,每次施加大小为 0.6 MN。

(3)限制预开挖隧道边界位移使其固定于当前位置,杀死隧道土体单元。

(4)按照离心模型试验的开挖顺序,在第一分段隧道表面逐步施加预先设定的位移,以此来模拟目标地层损失率,施加位移的同时释放步骤(3)所施加的位移限制条件。

(5)重复第(3)、(4)步直至隧道各段按顺序开挖完毕。

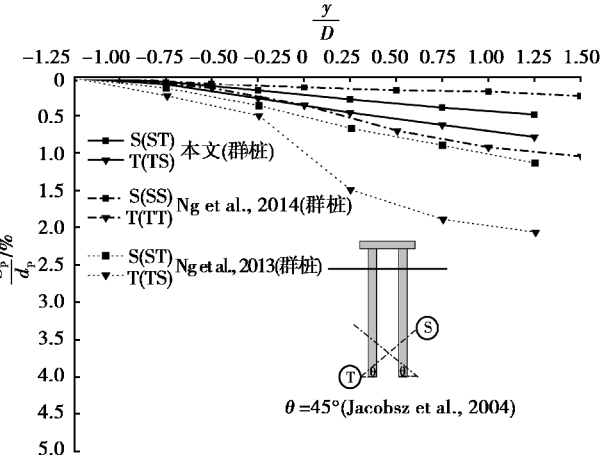
以上所述步骤为方案 TS 和 ST 中模拟步骤,对于方案 G_{TS} 和 G_{ST} ,其他步骤与 TS 和 ST 相同,而无需激活群桩单元且无桩顶荷载。对于方案 L 则仅有加载步,而无需隧道开挖,其中群桩桩顶加荷载至 30 MN,每次施加力大小为 3 MN。

2 结果分析

2.1 群桩轴向承载力确定

如图 5 为模拟所得的沉降值,经桩径 d_p 归一化后所得的荷载-沉降曲线。对群桩而言,目前还没有学者提出相关的极限承载力判别准则,本文采用《建筑基桩检测技术规范 JGJ 106—2014》^[13]中提出的单桩承载力判定标准和 Ng et al.^[14]提出的关于大直径($d_p \geq 0.8$ m)单桩的极限承载力判别准则来确定群桩的极限承载力,其表达式如下:

$$\delta_{ph,max} \cong 0.045d_p + \frac{1}{2} \frac{P_h L_p}{A_p E_p} \quad (4)$$



(a) 第一个隧道开挖过程中桩顶附加沉降

式中: $\delta_{ph,max}$ 为用于确定最终承载能力的桩顶最大沉降值; P_h 为桩顶荷载; L_p 为桩入土深度; A_p 、 E_p 分别为单桩截面面积和弹性模量。由如图 5 所示的荷载-沉降曲线并结合规范标准(5% d_p)及公式(4)可得,群桩的极限承载力分别为 15.5 MN、19 MN。工作荷载按沉降值为 1% d_p 所对应的荷载取值^[15],即在 ST 和 TS 工况中在群桩桩顶所施加的工作荷载为 3.6 MN。

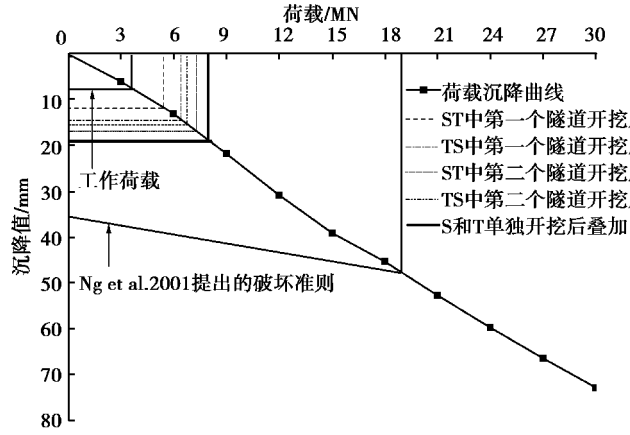
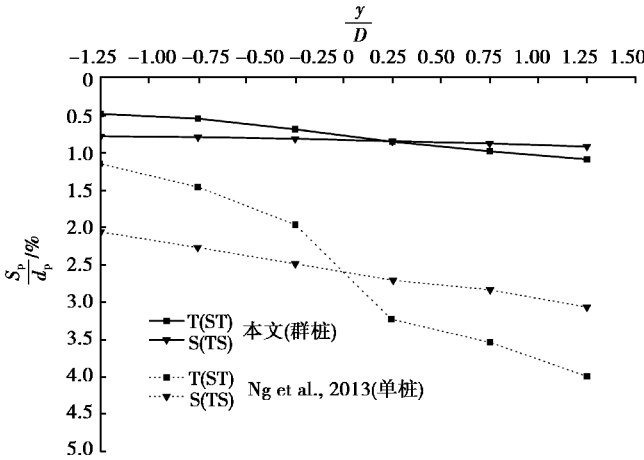


图 5 群桩位移荷载曲线

Fig.5 Load settlement curve obtained from the result of simulation

2.2 桩顶附加沉降

如图 6(a)、(b)所示为 ST、TS 两种工况下因第一、第二个隧道开挖所导致的群桩桩顶附加沉降。附加沉降值(S_p)取至承台中心,并已由桩径 d_p 归一化。 y 为隧道开挖面与图 4 中中心截面之间的距离,其值已由隧道直径 D 归一化。



(b) 第二个隧道开挖过程中桩顶附加沉降

图 6 桩顶附加沉降

Fig.6 Settlement of pile group due to twin tunneling

对比图 6(a) 中 ST 和 TS 两种工况下第一个隧道开挖所导致的群桩桩顶附加沉降,后者 ($0.78\% d_p$) 约为前者 ($0.51\% d_p$) 的 1.5 倍,其主要是因为当隧道与桩端齐平时 (T),群桩桩身约有 94% 部分位于 Jacobsz et al.^[16] 提出因隧道开挖所引起的主要影响区域,如图 6(a) 中插图所示,从而导致出现此工况下的群桩附加沉降明显大于隧道位于群桩桩身中部的情况 (S)。当工况 ST 和 TS 中第二个隧道开挖完成后,群桩桩顶附加沉降量前者 ($1.12\% d_p$) 约为后者 ($0.90\% d_p$) 的 1.25 倍,如图 6(b) 所示,此规律与 Ng et al.^[8] 所分析的不同埋深双隧道不同开挖顺序对单桩影响的离心试验结果相同。由此可知,不同埋深双隧道不同开挖顺序对群桩桩顶附加沉降影响较为明显,也即为减小因隧道开挖所导致的桩顶附加沉降量,施工中应先开挖埋深相对较浅隧道,后开挖埋深较深隧道。

图 6(a) 同时给出了 Ng et al.,^[6] 的离心试验结果,此试验目的是为研究不同埋深双隧道开挖对临近群桩的影响,试验所模拟的地层损失率同为 1%,但分居隧道两侧的隧道位于同一埋深处。对比分析图 6(a)、(b) 中不同埋深隧道开挖对单桩及群桩附加沉降的影响,由于群桩效应的影响,隧道开挖所致单桩附加沉降量远大于群桩附加沉降量,当隧道开挖面与群桩及单桩中心越近时 (y/D 位于 $-0.25 \sim 0.25$ 范围内),附加沉降变化量越大,随着隧道继续掘进,附加沉降变化率逐渐变缓。

2.3 群桩承载能力损失率

桩基承载能力一般用桩基沉降值来衡量,本文

对不同埋深双隧道不同开挖顺序所致的群桩承载能力的损失采用承载能力损失率 P_{Loss} 来衡量。其定义式如下:

$$P_{Loss} = \frac{N - N_w}{N_0} \cdot 100\%$$

(5)

式中: N 为位移为荷载曲线中各工况下双隧道开挖后群桩沉降量所对应的荷载; N_w 为工作荷载; N_0 为群桩极限承载力值。

如图 6(a) 所示,工况 ST 下,第一个隧道开挖引起的群桩沉降量为 $0.49\% d_p$ (3.9 mm),由图 5 中的位移荷载曲线可得 N 为 5.5 MN ,选用《建筑基桩检测技术规范 JGJ106—2014》^[13] 确定群桩极限承载能力,即 15.5 MN ,由式 (5) 可得工况 ST 下第一个隧道开挖引起的群桩承载能力损失率为 12.3% 。同理,TS 工况下第一隧道开挖引起的群桩承载能力损失率为 18.8% ,后者约为前者的 1.5 倍。工况 ST 下,双隧道开挖引起的群桩承载能力损失率为 20.0% ;TS 工况下,双隧道开挖引起的群桩承载能力损失率为 23.7% ,后者约为前者的 1.2 倍。

2.4 群桩承台倾斜量

如图 7(a)、(b) 所示为 ST 和 TS 工况下隧道各开挖阶段群桩承台倾斜量和 Ng et al.^[6] 通过离心试验给出的两种工况下 (SS、TT) 隧道各开挖阶段群桩承台倾斜量。倾斜量值为图 4 中 A、B 两点各开挖步沉降量之差与其距离之比,正值表示群桩承台倾向隧道 T 方向,反之亦然。

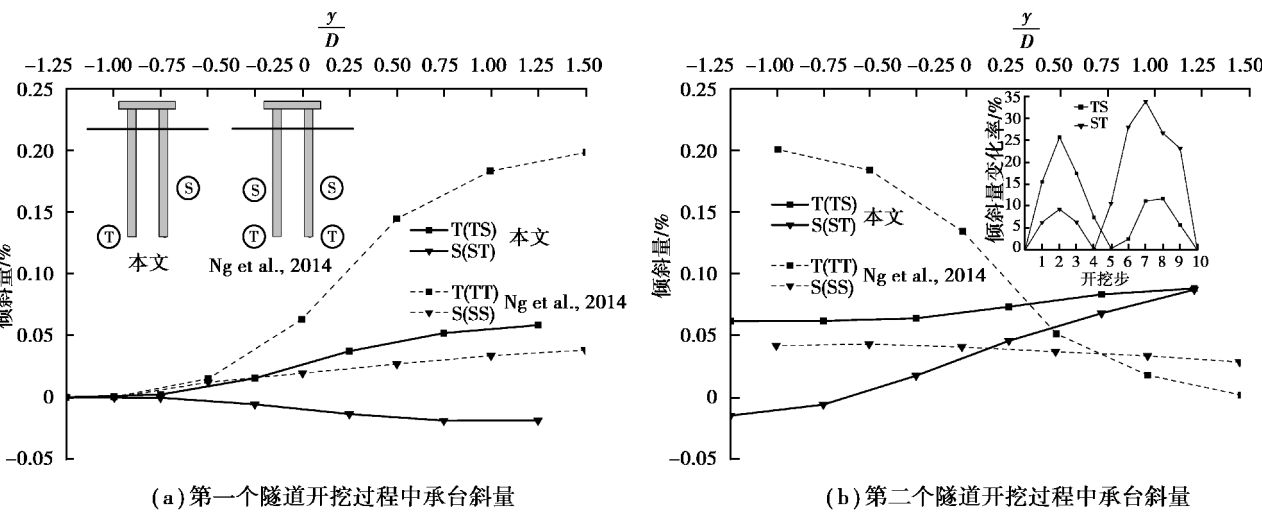


图 7 承台倾斜量
Fig.7 Transverse tilting due to twin tunneling

从图 7(a) 可知,当隧道轴线与桩端齐平时(T),隧道开挖引起的群桩承台倾斜量均大于隧道位于群桩桩身中部时(S)的情况。与群桩沉降变化规律不同,隧道开挖所导致的承台倾斜量呈非线性变化,即当隧道开挖面接近群桩中心时(y/D 位于 $-0.5\sim 0.5$ 范围),其倾斜量增量逐渐增大,随着隧道开挖面远离群桩中心,倾斜量增量逐渐趋于 0。

从图 7(b) 可知,工况 ST 和 TS 下因隧道开挖所导致的群桩承台倾斜量相等,即不同的开挖顺序对群桩承台倾斜量影响甚微,但如图 7(b) 中的插图所示,不同开挖顺序的倾斜量变化率(紧邻两开挖步所引起的承台倾斜量之差与最终倾斜量之比)差别明显,工况 ST 第二个隧道(T)开挖所引起的承台倾斜量变化率可达 35%,其对倾斜量变化较为敏感的建筑物如高耸结构的影响较大。

对比分析图 7(a)、(b),位于同一埋深双隧道开挖所导致的承台倾斜先偏向第一个隧道方向,随着第二个隧道的开挖,承台倾斜量逐渐减小并最终

减小趋于 0。而 ST 工况下,承台先倾向于隧道 S 一侧,随着第二个隧道(T)的开挖,承台逐渐偏向隧道 T 一侧,但 TS 工况下承台先偏向于隧道 T 一侧,随着第二个隧道(S)的开挖其倾斜并非如前所述逐渐恢复,而是偏向隧道 T 一侧的沉降量逐渐增大。

综上所述,即在进行不同埋深双隧道开挖施工时,为防止开挖所导致的临近群桩的承台的倾斜量过大,应对隧道埋深较深一侧桩身附近土体加固。ST 和 TS 两种工况下,双隧道开挖所导致的群桩倾斜量均为 0.08%,未超过《建筑桩基技术规范 JGJ94—2008》^[17] 规定的 0.2% 的最大倾斜量。

2.5 双隧道各开挖阶段群桩荷载传递机理

图 8(a)、(b) 为 ST 和 TS 两种工况下,群桩各桩桩顶和桩底在隧道开挖阶段荷载变化率变化图。荷载变化率为各开挖阶段各桩桩顶、底轴向应力与隧道开挖前各桩桩顶、桩底轴向应力之差与隧道开挖前各桩桩顶/桩底轴向应力之比。

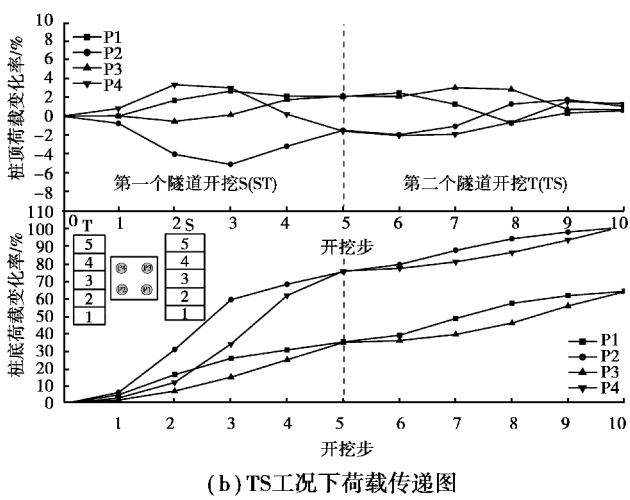
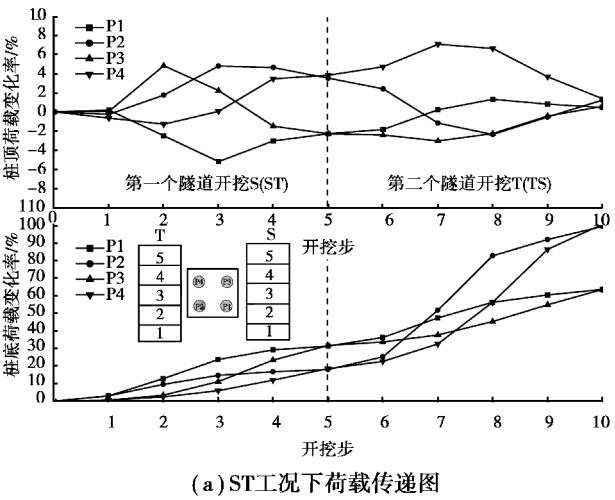


图 8 荷载传递图

Fig.8 Load transfer among piles (P1, P2, P3, P4)

如图 8(a) 所示的 ST 工况下隧道各开挖步桩顶荷载变化率变化图,在隧道 S 第一个开挖步(0~1),由于隧道开挖面离群桩较远,所以其对群桩各单桩的荷载影响较小,随着隧道开挖面逐渐接近群桩中的单桩 P1,即第二个开挖步(1~2),P1 桩桩顶荷载逐渐减小,而 P2、P3 桩顶荷载逐渐增加,即 P1 桩桩顶减小的荷载由其临近单桩 P2、P3 承担。在第三个开挖步(2~3),由于开挖面逐渐接近单桩 P3,从而导致 P1、P3 桩顶荷载逐渐减小,而其减小的荷载由 P2、P4 承担。随着隧道进一步的掘进并逐渐接近单桩 P3(3~4),单桩 P3 桩顶荷载进一步

减小,且其减小的荷载由其临近单桩 P4、P1 分担。随着开挖面远离单桩 P3(4~5),群桩各单桩桩顶荷载变化率逐渐较小。第一个隧道开挖完成后,单桩 P1、P3 桩顶荷载相同,单桩 P2 与单桩 P4 荷载相同,但 P1、P3 所承担的荷载比 P2、P4 承担的荷载小。隧道 T 各开挖步群桩中各单桩桩顶荷载传递机理基本与隧道 S 各开挖阶段相似,即当隧道开挖面接近 P2 和 P4 时,其减小的荷载由与其临近的单桩承担,即 P1、P4 和 P2、P3。双隧道开挖完成后,由于群桩所承担荷载逐渐的向下传递,4 根单桩所承担荷载几乎相同。如图 8(a) 所示的 ST

工况下隧道各开挖步桩底荷载变化率变化图,各桩桩底荷载均呈增长趋势,在第一个隧道开挖阶段(S),当隧道开挖面逐渐接近单桩 P1(1~2)和 P3(3~4)时,P1 和 P3 桩底荷载变化率的增长幅度均大于其他单桩,当第一个隧道开挖完成后,单桩 P1 和 P3 桩底荷载相同,且均大于单桩 P2 和 P4 桩底荷载,从而导致群桩承台倾斜并偏向隧道 S 一侧,此与前面分析 ST 工况下第一个隧道开挖完成后承台倾向隧道 S 一侧相符。与第一个隧道开挖阶段桩底荷载变化相似,在第二个隧道开挖阶段(T),当隧道开挖面逐渐接近单桩 P2(6~7)和 P4(8~9)时,P2 和 P4 桩底荷载变化率的增长幅度均大于其他单桩。当第二个隧道开挖完成后,单桩 P2 和 P4 桩底荷载相同,且均大于单桩 P1 和 P3 桩底荷载,从而导致群桩承台倾斜并偏向隧道 T 一侧。此与前面分析 ST 工况下第二个隧道开挖完成后承

台倾向隧道 T 一侧相符。

如图 8(b)所示为 TS 工况下隧道各开挖步桩顶/底荷载变化率变化图,其变化规律基本与工况 ST 下相似,只是在第一个隧道(T)开挖完成后,单桩 P2 和 P4 桩底荷载相同且均大于单桩 P1 和 P3 的桩底荷载,从而导致群桩承台偏向隧道 T 一侧,当第二个隧道(S)开挖成为后,单桩 P2 和 P4 桩底荷载相同且仍大于单桩 P1 和 P3 的桩底荷载,从而导致隧道开挖完成后群桩承台仍偏向隧道 T 一侧。

2.6 群桩附加弯矩

考虑到群桩的对称性,仅给出第一、二个隧道开挖完成后单桩 P1 和 P2 的附加弯矩,如图 9(a)、(b)所示。图中弯矩已由群桩中单桩在弹性破坏条件下弯矩承载能力($M_c=800\text{ kN}\cdot\text{m}$)归一化,当临近隧道 T 一侧群桩表面受拉时弯矩为正,反之亦然。

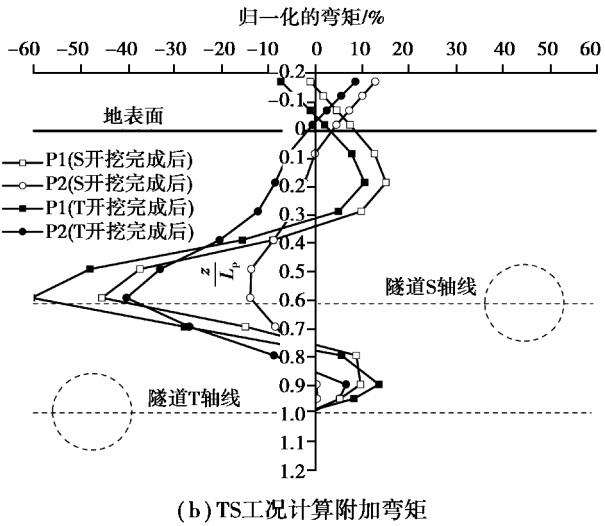
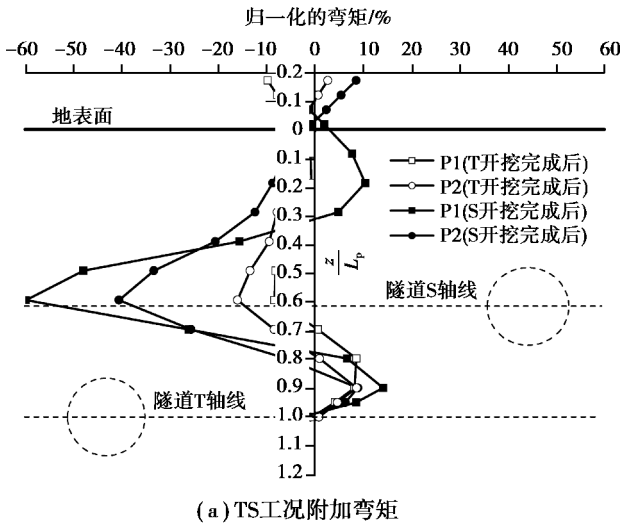


图 9 附加弯矩

Fig.9 Induced bending moment in piles after the first and the second tunneling

如图 9(a)所示,当隧道 T 开挖完成后,单桩 P1 和 P2 最大附加弯矩位于 $z/L_p=0.67$ 处,其值分别为 $-16.1\%M_c$ 、 $-8.5\%M_c$,前者约为后者的 2 倍,可见由于单桩 P2、P4 的存在而产生的遮拦效应对单桩 P1、P3 的附加弯矩影响较大。从弯矩的分布可以看出,单桩 P2 可视为以隧道冠顶处为自由端以 $z/L_p=0.67$ 处为固定端的悬臂梁。第二个隧道开挖完成后,单桩 P1、P2 最大附加弯矩分别为 $-40.1\%M_c$ 、 $-60\%M_c$,后者约为前者的 1.5 倍。

如图 9(b)所示,当隧道 S 开挖完成后,单桩 P1、P2 的附加弯矩分别为 $-13.8\%M_c$ 和 $-45.5\%M_c$,后者约为前者的 3.3 倍。对比之前分析的因隧

道 T 开挖导致单桩 P1、P2 的附加弯矩,群桩中遮拦效应随着 C/D 值的减小而越明显。从单桩 P1 的附加弯矩分布可以看出,单桩 P1 可视为以地表处和 $z/L_p=0.8$ 处为铰结的简支梁。

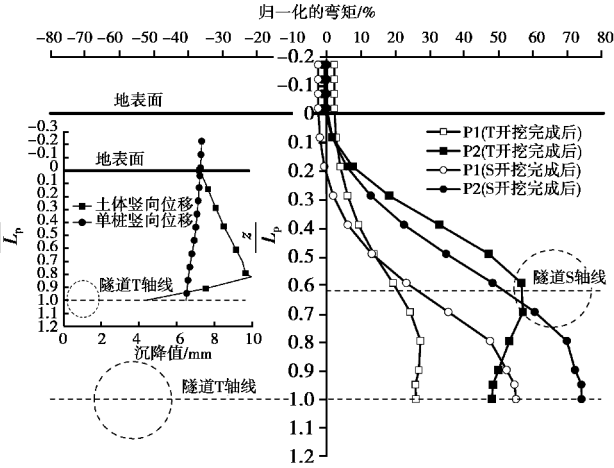
对比图 9(a)、(b)所示第二个隧道开挖完成后弯矩分布图,不同埋深双隧道不同开挖顺序对群桩附加弯矩的影响甚微,这与 Ng et al.^[8]研究不同埋深双隧道不同开挖顺序所导致的单桩附加轴力规律一致,且最大弯矩均位于埋深较浅隧道(S)轴线附近。但 TS 工况下,隧道 T 开挖所导致的单桩 P1、P2 的最大附加弯矩占双隧道开挖完成后最大附加弯矩的百分比分别为 40%、14.2%;在 ST 工况下,隧道 S 开挖所导致的单桩 P1、P2 的最大附加

弯矩占双隧道开挖完成后最大附加弯矩的百分比分别为 34.5%、75.8%。由此可知,隧道开挖所导致的桩身附加弯矩受隧道-桩相对位置影响较大。第二个隧道开挖完成后,与此隧道距离较远一侧单桩的附加弯矩明显增加,此规律与相同埋深双隧道开挖对临近群桩附加弯矩影响的规律相反,即第二个隧道开挖完成后,与此隧道距离较远一侧单桩附

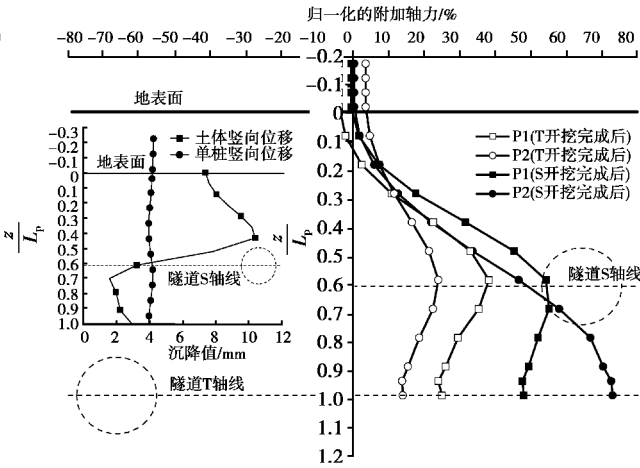
加弯矩有所减小^[5]。

2.7 群桩附加轴力

考虑到群桩的对称性,仅给出第一、二个隧道开挖完成后单桩 P1 和 P2 的附加轴力,如图 10 (a)、(b) 所示。图中轴力已由群桩中单桩承担的工作荷载,即 $N_w=900\text{ kN}$ 归一化,当单桩桩体轴力增加时附加轴力为正,反之亦然。



(a) TST 况附加轴力



(b) STT 况附加轴力

图 10 附加轴力

Fig.10 Induced axial force in piles after the first and the second tunneling

如图 10 (a) 所示,当隧道 T 开挖完成,单桩 P1、P2 最大附加轴力值分别为 $26\%N_w$ 、 $55.6\%N_w$,后者约为前者的 2.1 倍,且均位于隧道 T 轴线处。其主要原因是此工况下桩周土相对桩体有向下的相对位移。图 10(a) 中的插图为 G_{TS} 工况下,隧道 T 开挖完成后,群桩中单桩 P2 的竖向位移与其桩周土竖向位移对比图,隧道冠顶以上桩周土的竖向位移均大于桩体位移,从而使得隧道冠顶以上部分桩体产生负摩阻力,则此部分桩体的轴力增加,也即附加轴力增加。当隧道 S 开挖完成后,单桩 P1、P2 最大附加轴力值分别为 $48\%N_w$ 、 $74\%N_w$,后者约为前者的 1.6 倍,其中单桩 P1 的最大附加轴力位于隧道 S 轴线附近,单桩 P2 的最大附加轴力位于隧道 S 冠顶附近。

如图 10 (b) 所示,当隧道 S 开挖完成,单桩 P1、P2 最大附加轴力值分别为 $38.4\%N_w$ 、 $24.2\%N_w$,前者约为后者的 1.6 倍,且均位于隧道 S 轴线处。其主要原因大体与之前分析的类似。图 10 (b) 中插图为 G_{ST} 工况下,隧道 S 开挖完成后,群桩中单桩 P1 的竖向位移与其桩周土的竖向位移的对比图,隧道 S 轴线以上 ($z/L_p<0.61$) 桩周土的竖向位移均大于桩体位移,而轴线以下部分桩周土的

竖向位移均小于桩土位移,从而使得隧道轴线以上部分桩体产生负摩阻力,轴线以下桩体产生正摩阻力,则隧道轴线以上部分桩体产生轴力增大,附加轴力增大,而轴线以下部分桩体附加轴力有减小的趋势。

对比图 10(a)、(b) 所示第二个隧道开挖完成后的轴力分布图,不同埋深双隧道的不同开挖顺序对群桩附加轴力的影响甚微,且双隧道开挖所导致的附加轴力随 C/D 的增大而增大。

3 结论

(1) 不同埋深双隧道不同开挖顺序对群桩的沉降及群桩承载能力损失影响明显,当开挖顺序为 ST 时,群桩桩顶沉降量为 $1.12\%d_p$ (桩径),当开挖顺序为 TS 时,群桩桩顶沉降量为 $0.90\%d_p$,前者约为后者的 1.25 倍。当开挖顺序为 ST、TS 时,群桩承载能力损失率分别为 20.0%、23.7%,前者约为后者的 1.2 倍。

(2) 不同埋深双隧道的不同开挖顺序对临近群桩承台倾斜量变化率影响较大。当开挖顺序为 ST 时,承台倾斜量变化率较开挖顺序为 TS 的大,前者对倾斜量变化较为敏感的建筑物的 (如高耸结构) 的

影响较大。

(3)不同埋深双隧道不同开挖顺序均产生较大的附加弯矩,最大值可达 $60\%M_c$ (单桩弯矩承载能力),且其最大值均位于埋深较浅隧道轴线处,所以隧道施工时应考虑对该位置桩周土进行加固处理。隧道开挖所导致的附加弯矩随 C/D 值的增大而减小。

(4)不同埋深双隧道的不同开挖顺序均产生较大附加轴力,最大值可达 $74\%N_w$ (单桩工作荷载)。隧道开挖所导致的附加轴力随 C/D 值的增大而增大。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Lee C, Chiang K. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44 (10): 1224-1241.
- [3] Mroueh H, Shahrou I. Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26 (3): 217-230.
- [4] 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.
- [5] 王立新. 盾构超近距离穿越大型立交桩基群影响研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12 (3): 761-768. (Wang Lixin. Research on the influences of closely passing through the pile foundations of large interchange [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12 (3): 761-768. (in Chinese))
- [6] Ng C W W, Soomro M A, Hong Y. Three-dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43 (7): 350-361.
- [7] 马少坤, 陈欣, 吕虎, 等. 不同埋置位置隧道对群桩影响的离心模型试验研究 [J]. *中国公路学报*, 2015, 28 (8): 67-73. (Ma Shaokun, Chen Xin, Lü Hu, et al. Centrifuge modeling test of effects of tunnelling with different depths on pile group [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28 (8): 67-73. (in Chinese))
- [8] Ng C W W, Lü H. Effects of the construction sequence of twin tunnels at different depths on an existing pile [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51 (2): 173-183.
- [9] Ng C W W. The state-of-the-art centrifuge modelling of geotechnical problems at HKUST [J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2014, 15 (1): 1-21.
- [10] 杜佐龙, 黄茂松, 李早. 基于地层损失比的隧道开挖对临近群桩影响的 DCM 方法 [J]. *岩土力学*, 2009, 30 (10): 3043-3047. (Du Zuolong, Huang Maosong, Li Zao. DCM-based on ground loss for response of group piles induced by tunneling [J]. *Rock and soil mechanics*, 2009, 30 (10): 3043-3047. (in Chinese))
- [11] Park K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, 4 (4): 310-318.
- [12] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (Xu Zhonghua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in shanghai soft deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基检测技术规范 (JGJ 106—2014) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. (Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles (JGJ 106—2014) [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014. (in Chinese))
- [14] Ng C W W, Yau T L Y, Li J H M, et al. New failure load criterion for large diameter bored piles in weathered geomaterials [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127 (6): 488-498.
- [15] 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 Shaokun, 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. (in Chinese))
- [16] Jacobsz S W, Standing J R, Mair R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44 (1): 49-56.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范 (JGJ 94—2008) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, Technical Code for Building Pile Foundations (JGJ 94—2008) [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese)).