

文章编号:1673-2049(2011)01-0118-09

隧道开挖对邻近桩基影响的研究综述

杨 敏^{1,2}, 孙 庆^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:介绍了隧道开挖对邻近桩基影响的现有研究成果;对部分试验结果和理论分析结果进行比较,讨论了隧道开挖对邻近桩基的沉降、轴力、侧向变形、弯矩以及群桩效应影响结果的异同;总结了目前已有研究的优缺点。分析结果表明:目前所有的研究方法都有其局限性,并不能获得统一的共识,而且研究中还经常出现相互矛盾的情况;模拟隧道开挖对邻近桩基三维影响的离心机试验和三维数值模拟相结合的研究方法是今后发展的方向。

关键词:隧道开挖;桩基;沉降;数值模拟;有限元方法

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Research Summary of Tunnel Excavation Effects on Adjacent Pile Foundation

YANG Min^{1,2}, SUN Qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji

University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji

University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The existing research results of tunnel excavation effects on adjacent pile foundation were introduced. The comparisons between some test results and theoretical analysis results were conducted, and then the differences of results of tunnelling-induced pile foundation settlement, axial force, lateral deflection, bending moment, as well as pile group effect were discussed. The merits and shortcomings of the existing research were summarized. The analysis results show that all existing research methods have limitations, a general agreement among all the investigations can not yet be obtained. Furthermore, contradictory observations are always found in the study. The research method of centrifuge tests of simulating 3-D tunnel advancement combined with 3-D numerical simulation is development direction in future.

Key words: tunnel excavation; pile foundation; settlement; numerical simulation; finite element method

0 引言

由于城市空间的限制和交通运输的发展,许多城市都在大力开发地下空间,尤其是地铁建设。由

于地铁隧道多建在建筑物已高度集中的大城市,地铁线路的布置不可避免地要靠近已有建筑,有的甚至从建筑物下面穿过,所以考虑隧道开挖对附近建筑物的影响越来越重要。隧道开挖对建筑物的影响

主要体现在对基础的影响,尤其是对桩基的影响,隧道开挖会对邻近桩基础的轴向(桩基沉降和轴力)和侧向(桩的侧向变形和弯矩)产生影响。

隧道开挖对邻近桩基影响的研究始于 20 世纪 70 年代 Morton 等^[1]所做的模型试验。从那之后,研究相对较少,直到 20 世纪 90 年代,从事这方面研究的学者骤然增加,主要是由于类似工程的增加,如英国的英吉利海峡隧道铁路线、新加坡的地铁环线以及荷兰阿姆斯特丹隧道的南北线建设,这些工程中隧道的开挖都对邻近的桩基础产生了影响。本文中笔者将综合介绍现有的研究成果,分析每种方法的优点和缺点,为以后的研究提供帮助。

1 工程实测资料

Mair 等^[2]和 Lee 等^[3]报道了英国伦敦天使地铁站隧道开挖工程,其中隧道与桩基间的净距为 1 m,隧道开挖前已经在土体和桩中安装了测量仪器。通过测量可知,当土体损失率为 2%时,离隧道最近的桩基最大水平位移达到 8 mm,由此得出结论:在伦敦粘土中隧道引起的桩基水平位移很小,可以建在离桩基较近的地方。

Selemetas 等^[4]提供了隧道开挖对桩基影响的足尺试验结果,研究对象是英吉利海峡隧道铁路线。该工程包括长 5.2 km、直径 8 m 的双线隧道,利用土压平衡盾构机施工,研究安装、加载过程并对沿双线隧道路线上 4 根装有仪器的桩进行监测。该文中对隧道开挖引起的桩基沉降和隧道周围的地表沉降进行了比较,定义了 3 个影响区域,并且对桩基沉降与地表沉降进行了对比(图 1):区域 A 中的桩基沉降比地表沉降大 2~4 mm;区域 B 中的桩基沉降与地表沉降基本相同;区域 C 中的桩基沉降小于地表沉降,其中, $R = S_p / S_g$, S_p 为桩基沉降, S_g 为地表沉降。

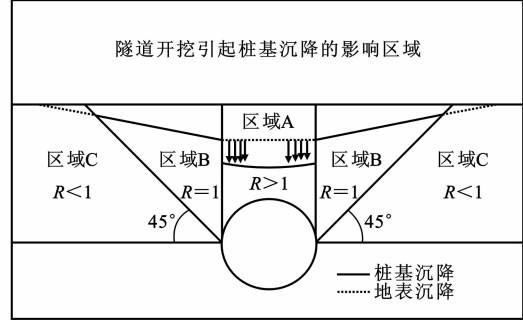


图 1 盾构隧道开挖的影响区域
Fig. 1 Influence Zone of Shield Tunnel Excavation

以上得出的桩基沉降和地表沉降的关系与 Jacobsz 等^[5]和 Kaalberg 等^[6]得出的结论十分相似。

Tham 等^[7]研究了新加坡地铁东北线其中一段隧道穿越一栋桩基直径为 0.45 m 的建筑,隧道与桩的净距大约为 1.85 m。通过对建筑物沉降的大量观测表明,建筑物并没有受到不利的影响。建筑物周边的最大沉降为 7 mm。施工的成功之处在于有效地控制了土体损失率,使之仅为 0.4%。

Pang^[8]提供了新加坡地铁东北线的部分数据,隧道开挖之前在长 62 m、直径 1.2 m 的桩上安装了 4 组应变片,量测得到了横向和纵向平均的轴向荷载和弯矩。隧道直径为 6.3 m,距离最近的桩基础为 1.6 m,土体损失率范围在 0.32%~1.45%之间。桩中应变片的结果显示桩受到下拉荷载导致轴力增加,距离隧道越近轴力越大,且当隧道开挖到与桩平行时轴力达到峰值。桩的轴力和弯矩都随土体损失率的增加而增加,从轴力和弯矩与土体损失率的关系也可以得出土体损失率增加到 1.5%对桩的影响也不是很显著。

Takahashi 等^[9]研究了日本东京临海线双线隧道的施工,此隧道在一栋建筑的桩基础下面穿过,距离桩基础最小距离为 3.4 m。为了避免建筑物产生过大的附加沉降以确保建筑物的安全,隧道开挖过程中采取注浆加固隧道周围土体以及严格的施工管理控制建筑物的沉降。由于措施得当,施工中的土体损失率不超过 0.5%,监测得到的桥墩沉降小于 4 mm。

Forth 等^[10]利用理论方法和有限元方法分析了中国香港铁路交通系统中的“Island”线工程。直径为 7.9 m 的双线隧道在一栋建筑的桩基础旁边穿过,桩与隧道的边缘相距大约 3 m。桩基的性状只能从地表上建筑物的位移来直接判断,在建筑物的边上观察到的沉降为 5 mm。

2 试验研究

在上述工程实测的桩中安设测量元件的较少,桩基的反应主要是通过检测建筑物得出的。因此,一些学者开始借助室内试验,在桩中安设测量元件以获得有价值的数。Morton 等在砂土中做了 4 组模型桩试验,隧道上方布置了 3 组深度不同的木桩。通过试验发现,隧道施工对桩基的影响很大,并得出结论:在地下工程的设计和施工中,隧道对已有邻近桩基或上部结构的影响是主要考虑的问题。试验中某些区域的桩基发生了瞬间破坏,这可能是由

于模型试验的尺寸效应导致砂土中的围压降低,从而引起了桩的突然破坏。

Ghahremannejad 等^[11]在密砂中利用 1g(g 为重力加速度)模型试验模拟了隧道开挖对邻近桩基的影响。通过一些列试验得出结论:当桩与隧道的间距为 1.5 倍隧道直径时引起的桩基弯矩最大,而且最大弯矩随着土体损失率的增大而增大。

随着离心机模型试验的发展,原型问题可以用小模型来模拟,克服了 1g 模型的限制。许多学者

做了关于隧道开挖对桩基影响的离心机试验,其中包括粘土试验(Bezuijen 等^[12];Hergarden 等^[13])、硬粘土试验(Loganathan 等^[14])、软粘土试验(Ran 等^[15];Ong 等^[16])、密实的干砂试验(Jacobsz 等^[17])、密实的饱和砂土试验(Lee 等^[18])。表 1 中总结了上面提到的离心机试验和细节。应该注意的是,所有的试验都是在平面应变条件下来模拟隧道开挖的。此外,大多数试验模拟的土体损失率为 1%~20%,在此区间研究隧道开挖对桩基的影响。

表 1 离心机试验结果
Tab. 1 Results of Centrifuge Tests

土体类型	量测内容	X_{pile}/m	H_{tun}/m	D_{tun}/m	D_{pile}/m	L_{p}/m	$V_{\text{L}}/\%$	$X_{\text{pile}} \cdot D_{\text{tun}}^{-1}$	$L_{\text{p}} \cdot H_{\text{tun}}^{-1}$	预加荷载	群桩试验	数据来源
粘土	桩基沉降,轴力	4.90, 6.50, 9.70, 12.90	18.00, 23.00, 14.50	7.0	0.40	18.00	10.0	0.70, 0.93, 1.39, 1.84	1.0, 0.8, 1.2	有	无	文献[12]、[13]
硬粘土	桩基沉降,轴力,弯矩	5.50	15.00, 18.00, 21.00	6.0	0.80	18.00	10.0	0.92	1.2, 1.0, 0.9	有	2×2 群桩	文献[14]
软粘土	桩基轴力,弯矩	6.00	15.00	6.0	1.26	23.50	28.2	1.00	1.6	无	无	文献[15]
软粘土	桩基沉降,侧向变形,轴力,弯矩	6.00	15.00	6.0	1.26	22.00	3.3, 6.6	1.00	1.5	无	无	文献[16]
密实干砂	桩基沉降,轴力	6.45, 10.20, 13.95, 17.70, 21.45	21.45	4.5	0.90	15.00, 18.75	20.0	1.43, 2.27, 3.10, 3.93, 4.77	0.7, 0.9	有	无	文献[17]
密实饱和砂土	桩基沉降,轴力,弯矩	4.98	9.00, 15.00, 21.00, 27.00	6.0	0.96	27.00	3.0	0.83	3.0, 1.8, 1.3, 1.0	有	无	文献[18]

注: X_{pile} 为隧道与桩基的中心距; H_{tun} 为隧道埋深; D_{tun} 为隧道直径; D_{pile} 为桩基直径; L_{p} 为桩长; V_{L} 为土体损失率。

Bezuijen 等及 Hergarden 等做了 3 组试验来模拟一个直径为 7 m 的隧道,分别在地表下 14.5、18、23 m 进行开挖。6 根直径 0.4 m、桩长 18 m 的端承桩与隧道的距离分别为 4.9、6.5、9.7、12.9 m。通过试验得出结论:离心机试验是研究隧道与桩相互作用的有力工具。当土体损失率达到或超过 1%且桩和隧道间距小于隧道直径 1 倍时,桩基的沉降是很明显的。当桩和隧道间距大于隧道直径 2 倍以上时,桩的沉降和承载力基本没有受到影响。

Loganathan 等在硬粘土中做了 3 组离心机试

验,土体损失率是通过隧道模型中油的体积来控制的。其中桩长 18 m,隧道埋深分别为 15、18、21 m,隧道与桩的间距 5.5 m。试验中土体损失率为 1%时,长桩即桩端在隧道起拱线以下时,单桩和群桩中的前排桩最大弯矩和轴力出现在隧道起拱线附近,而群桩中的后排桩最大弯矩出现在桩顶。短桩即桩端与隧道起拱线在同一平面或在其平面以上时,桩的最大弯矩发生在桩端以上,轴力则从桩顶到桩端不断增大,在桩端达到最大值,不论是单桩还是群桩,弯矩和轴力曲线的变化相似。通过 3 组试验的

对比可知:对于单桩来说,当桩端位于隧道起拱线平面时,弯矩是最大的;当桩端位于隧道起拱线以上时,轴力是最大的。而且通过比较得出,土体损失率在 5% 以下时 3 组试验所得的最大弯矩都是随着土体损失率的增大而增大的,几乎是呈线性变化的。因此当土体损失率小于 5% 时,用弹性分析基本可以准确地预测隧道开挖引起的桩基性状。另外,还得出结论:当隧道起拱线位于桩端平面或是靠近桩端平面时,桩的弯矩和侧向变形作用是主要的;当隧道起拱线位于桩底平面以下时,桩的轴力作用是主要的。此外,群桩中与隧道距离和单桩相同的基桩与单桩的弯矩和侧向变形是基本一致的。

Ran 等利用 Sharma 等^[19]建议的模拟隧道开挖的方法(利用有机溶液溶解模型隧道内的聚苯乙烯来模拟隧道开挖过程)在软粘土中做了隧道开挖对单桩影响的离心机试验,并与 Feng 等在砂土中所做的试验做了对比,得出结论:无论是在砂土还是在软粘土中,桩的最大弯矩和轴力都发生在隧道起拱线附近;桩的轴力从桩顶到隧道轴线逐渐增大,在隧道轴线附近达到最大,然后逐渐减小;对于在软粘土中桩顶和桩端自由的单桩,由于土体损失率达到 28.2%,所以桩基沉降十分显著;桩的侧向变形与土体的侧向变形相接近,说明桩基柔性较大并与土体一起变形。

Ran^[20]得出了一系列离心机试验的结果,其中包括桩与隧道之间距离、桩长、土体损失率的影响以及桩基轴向和侧向反应的长期效应。从研究中可知,粘土中桩的反应是具有时效性的,而且通过与 Feng 等在砂土中的试验对比可知,隧道开挖在粘土中引起的桩基反应要明显小于砂土中的反应。但是,这项研究中的缺陷是模拟隧道开挖的变形为椭圆向两侧突出变形,如图 2(a)所示,因此得出的弯矩方向与大多数实际情况相反。

为了克服 Ran 试验中的缺陷,Ong 等模拟隧道开挖的变形为椭圆内缩变形,如图 2(b)所示,这种隧道变形更接近工程实际。试验得出结论:桩基沉降和弯矩都是随着时间和土体损失率的增加而增大的,这就要求施工中的土体损失率不能过大,而且要注意时效性的影响;桩基的中性面和最大弯矩都位于隧道起拱线附近。

Jacobsz 等利用离心机试验研究密砂中隧道开挖对邻近打入桩的影响,通过控制隧道模型中水的体积来模拟从 0%~20% 的土体损失率,隧道产生均匀的径向变形。试验中布置多根与隧道距离不同

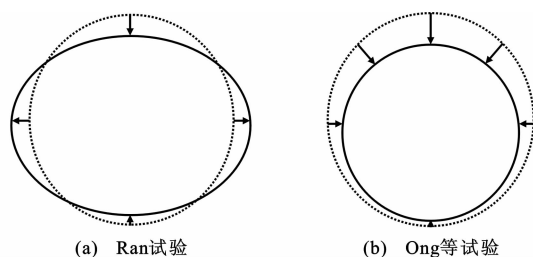


图 2 隧道断面变形

Fig. 2 Deformation of Tunnel Section

且桩长不同的测试桩,给出的隧道开挖影响区域与图 1 相似,当土体损失率大于 1.5% 时,影响区域以内的桩基发生较大沉降,基底负荷显著减小。当桩底在影响区域以外时,就算土体损失率达到 10% 时桩基也不会发生很大沉降。

Lee 等通过离心机试验主要研究在饱和砂土中隧道开挖引起的土体变形以及对邻近单桩的影响。试验中桩端与隧道的相对位置关系决定了沿桩长桩身轴力和弯矩的分布。当土体损失率达到 3%~3.5% 时,桩身轴力和弯矩迅速增大。对于浅埋隧道(桩端位于隧道仰拱以下),隧道开挖同时引起正弯矩和负弯矩,且正负弯矩值基本相等;而对于深埋隧道(桩端位于隧道仰拱之上),隧道开挖引起较大的负弯矩,正弯矩则非常小。对于浅埋隧道附近的桩基,在隧道深度 1 倍直径范围内的桩身单位摩阻力随着土体损失率的增大逐渐减小至 0 甚至出现负值,更多的荷载传递到桩端并引起了桩基沉降。对于深埋隧道附近的桩基,由于土体损失引起端承力丧失,导致桩基沉降迅速增大,桩基沉降大于周围土体沉降,由此引起的正摩阻力抵抗桩身荷载。综上所述,笔者建议施工过程中应采取措施防止桩基的弯曲破坏以及桩身的过大沉降。

3 有限元方法

Vermeer 等^[21]利用 PLAXIS 软件模拟了荷兰阿姆斯特丹隧道开挖引起的桩基沉降。首先采用有限元计算得到的地表沉降与采用经验方法得到的结果相似,验证了有限元对这类问题计算的有效性;然后再计算对桩基的影响,桩由板单元来模拟而桩土之间由接触单元来模拟,且考虑了桩顶荷载、土体蠕变以及负摩阻力的影响,得到的结论是桩的沉降主要取决于持力层的沉降。

Lee 等利用二维有限元程序 OASYS SAFE 分析了英国伦敦天使地铁站隧道开挖工程并与实测结果进行了对比。计算中使用线弹性土体模型并利用

不排水条件模拟了隧道开挖的短期效应,但没有直接模拟隧道开挖引起的桩基反应,而是假设桩作为柔性构件,把同位置土体变形视为桩基变形。通过对比发现,采用有限元方法得出的桩基侧向变形都比实测结果偏大,因此可以通过有限元分析预测桩基变形的上限值。

由于二维分析方法的局限性,有些学者开始采用三维有限元进行分析。Mroueh 等^[22]模拟了三维隧道开挖对邻近单桩和群桩的影响,利用简化的应力释放来代替盾构推进的全过程进行模拟超挖和盾尾注浆的影响。计算结果表明:隧道开挖引起的桩基变形和内力主要取决于桩底与隧道轴线的相对位置关系。在群桩分析中,后排桩的轴力明显小于同位置单桩的轴力,弯矩没有轴力减小的显著,但是也可以看出有利的群桩效应。另外,桩帽只对桩基的上部有影响,而隧道开挖主要是对桩基的下部影响较大,所以作者建议在分析中可以假设群桩桩头是自由的。

Lee 等^[23]采用三维有限元分析了敞开式隧道开挖对单桩的影响。此模型模拟了 Loganathan 所做的离心机试验,其中几何边界和隧道与桩的相对位置是一样的,但是土质并不一样,所以与离心机试验的结果没有可比性。分析中也得到了一些重要的结论:首先,桩的安全系数由 3.0 降到了隧道开挖之后的 1.5;其次,在隧道开挖面前后定义了 1 倍隧道直径的影响区域,在这个区域内桩的沉降要大于土体表面沉降,桩顶和桩端分别产生了明显的正孔压和负孔压;然后,开挖引起桩的横断面弯矩是纵断面弯矩的 3 倍;最后,隧道开挖对桩身轴力和弯矩的分布影响并不显著。

Cheng 等^[24-25]建立了三维有限元模型模拟隧道开挖对邻近单桩的影响,通过位移控制方法模拟平面应变条件下隧道开挖的影响。由参数分析得到结论:当 $X_{\text{pile}}/D_{\text{tun}} > 2.0$ 时,开挖引起的桩基弯矩可以忽略;当 $X_{\text{pile}}/D_{\text{tun}} < 1.0$ 时,即使在较小的土体损失率下桩基弯矩也很容易达到开裂弯矩;而桩身轴力则主要取决于桩端位置、土体刚度和土体损失率的大小。Cheng 对 Coutts 等的现场数据和 Loganathan 等的离心机试验进行了回归分析,有限元分析得到的弯矩和轴力与实测和试验数据基本一致。

杨超等^[26]采用三维整体数值分析方法模拟隧道施工对临近桩基的影响,计算表明:桩体的变形和受力不仅与隧道施工工况有关,而且也与桩基的位置、长度和数目多少有关。朱逢斌等^[27]应用

PLAXIS 3D Tunnel 有限元软件研究了盾构隧道开挖对邻近单桩的影响,结果与离心机试验结果相符,进一步模拟了隧道开挖对群桩的影响并与同位置处单桩的受力和变形进行了对比。

4 数值和解析方法

Broms 等^[28]最早开展了隧道开挖对桩基影响的数值研究,采用一个二维有限元模型研究了各种几何参数和材料参数对桩基位置处自由场土体水平位移的影响,然后把土体的水平位移等效成水平荷载施加于弹性地基梁上,求出桩基所受到的弯矩。通过上面的方法得出一系列的图表,以此估算隧道开挖引起的周围土体的水平位移以及邻近桩基的弯矩,研究认为,在隧道与桩基之间设置连续墙可以减小桩基的水平位移和弯矩。

Chen 等^[29]也采用了与 Broms 等类似的分析方法,利用两阶段法分析了单桩的水平 and 轴向反应:第 1 步,由解析方法计算自由场土体的竖向和水平位移;第 2 步,计算出来的土体位移施加到边界元程序(如 PIES 和 PALLAS)中计算桩的反应。研究时发现分别计算桩的水平 and 轴向反应会导致对弯矩的低估。对于隧道与桩基相对位置、土体损失率、土体刚度以及土体强度对桩的影响进行了一系列的参数分析,并提供了简单的设计图表,可用于估算实际工程中桩基的最大反应。

Loganathan 等^[30]把 Chen 等的研究延伸到了群桩,将隧道开挖引起的土体位移应用到计算程序 GEPAN 中计算 2×2 群桩的反应,并与单桩的性状进行了对比。结果表明:单桩的分析结果可以较好地预测群桩中基桩的弯矩、水平位移和沉降,由于桩顶条件的不同,在桩顶处的弯矩会稍有不同,而且单桩沉降要稍大于群桩中的基桩,但是单桩的轴向下拉荷载要大于群桩中的基桩。群桩中前排桩的反应要稍大于后排桩的反应,当桩底位于隧道轴线处时隧道开挖会引起显著的桩基沉降和水平变形。

Kitiyodom 等^[31]发展了被称作 PRAB 的数值程序,模拟隧道开挖对单桩、群桩和桩筏基础的影响,该程序所用方法与 Loganathan 等的两阶段法相似。在 PRAB 程序中,桩、土和筏板分别被模拟成弹性地基梁、弹簧和薄板。通过与 GEPAN 和 FLAC 程序计算结果的对比,验证了该程序的有效性;进行了参数分析并得出结论,隧道开挖对群桩中基桩的影响可以由单桩的分析结果代替(如弯矩、侧向变形和沉降),但是轴力有所偏差,该结论也只适

用于具有较大长细比的桩基。

Surjadinata 等^[32]利用三维有限元程序计算得到自由场土体位移,然后采用 Chen 等的边界元程序计算隧道开挖对桩基的影响,此种方法被称作 FAB 法。通过与整体有限元方法的对比可知,2 种方法计算得出的桩基侧向变形和弯矩基本一致,但是 FAB 法所用时间很短,而且前后处理相对简单。虽然研究只限于线弹性土体中的单桩分析,但是 FAB 法可较为容易地扩展到非线性土体中的群桩分析。

李永盛等^[33]、阮林旺等^[34]基于 Kelvin 解及弹性地基梁理论提出了盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法,并利用该方法分析了软土地质中盾构隧道施工对邻近桩基受力和变形的影响。李早等^[35-36]采用两阶段法分析了隧道开挖对邻近群桩竖向和水平向位移和内力的影响。

5 比较分析

从上述的研究中可以看出各种分析结果既有一致性也存在差异。下面将对部分试验结果和理论分析结果进行比较,讨论隧道开挖对桩基的沉降、轴力、侧向变形、弯矩以及群桩效应影响结果的异同。

5.1 桩基沉降

Loganathan^[37]的离心机试验指出:当 L_p/H_{tun} 等于 1.0 时,桩基的沉降最大;当 L_p/H_{tun} 大于 1.0 时,桩基的沉降较小;当 L_p/H_{tun} 小于 1.0 时,桩基的沉降要小于 L_p/H_{tun} 等于 1.0 时的情况[图 3(a)]。Bezuijen 等和 Hergarden 等的离心机试验得到了相似的趋势,但在 Hergarden 的试验中,当 X_{pile}/D_{tun} 增加时与 Loganathan 的试验结果相反,这应该是由于桩端相对影响区域位置的改变而引起的;除此之外,当 X_{pile}/D_{tun} 小于 1.0 且土体损失率大于等于 1% 时,桩基沉降较大。对于 L_p/H_{tun} 小于 1.0 的情况,Jacobsz 等、Kaalberg 等和 Selemetas 等分别定义了相似的影响区域(图 1)。Cheng 等通过三维有限元分析得出桩基沉降是随着 L_p/H_{tun} 增大而减小的[图 3(a)]。

5.2 桩基轴力

Loganathan 的离心机试验指出:当 L_p/H_{tun} 大于 1.0 时,桩基的最大轴力位于隧道起拱线附近;当 L_p/H_{tun} 小于等于 1.0 时,桩基的最大轴力在桩端,数值分析也得到了相似的趋势,且隧道开挖引起的下拉荷载使轴力沿深度的增加而增大;当 L_p/H_{tun} 大于 1.0 时,中性点位于隧道起拱线附近,中性点以

上桩段受到负摩阻力,中性点以下桩段受到正摩阻力。就大小而言, L_p/H_{tun} 小于 1.0 时的轴力最大[图 3(b)]。但是以上结论与其他研究相比,变化趋势是完全不同的,如 Mroueh 等指出:随着 L_p/H_{tun} 的改变,最大轴力并没有明确的变化趋势。而 Cheng 等指出:随着 L_p/H_{tun} 的增大,轴力是连续增大的[图 3(b)]。除此之外,可以看到离心机试验中的轴力要比有限元分析中的轴力小很多,尤其是在桩头附近桩可能承受拉力,这是桩帽的限制作用造成的。

5.3 桩基侧向变形

Loganathan 的离心机试验指出:不论 L_p/H_{tun} 大小如何,桩的最大侧向变形都发生在桩端。这与 Lee 等的现场观测结果相矛盾,现场结果显示,当 L_p/H_{tun} 大于 1.0 时,最大侧向变形位于隧道起拱线附近。就大小而言,当 L_p/H_{tun} 等于 1.0 时,桩基侧向变形最大[图 3(c)]。除此之外,桩基位置处的自由场土体位移与桩基的侧向变形相似,当土体损失率为 1% 时,桩基侧向变形为 7.5 mm。但 Lee 等观察到的结果是,当土体损失率为 2% 时,桩基侧向变形为 7 mm。这种差异是由许多不同因素造成的,如桩径、桩与隧道的距离、土体性质等。Cheng 等也得出了趋势相似的桩基侧向变形。

5.4 桩基弯矩

Loganathan 的离心机试验指出:对于各种不同情况下的 L_p/H_{tun} ,桩端附近的弯矩是最大的,而且 L_p/H_{tun} 等于 1.0 时的弯矩是最大的[图 3(d)];对于土体损失率为 1% 时,最大弯矩为 90 kN·m,只达到极限弯矩的 12%。Loganathan 也指出:当土体损失率为 10% 时,弯矩仅达到极限弯矩的 75%。Mroueh 等在有限元分析中指出:弯矩的变化趋势与 Loganathan 的离心机试验相似,其中最大弯矩出现在 L_p/H_{tun} 近似等于 1.0 时。Cheng 等指出:桩基弯矩随着 L_p/H_{tun} 的增加而增大[图 3(d)],并得出结论:当 X_{pile}/D_{tun} 大于 2.0 时,隧道开挖引起的弯矩可以忽略。在实际的隧道推进过程中,桩的横断面和纵断面都受弯矩的影响,以前的研究由于模拟平面应变条件下隧道开挖的影响,所以大多数集中于对横断面弯矩的研究。Mroueh 等利用有限元进行了三维隧道开挖的模拟,并指出横断面的弯矩近似为纵断面弯矩的 3 倍。

5.5 群桩效应

到目前为止,关于隧道开挖对群桩影响的研究相对较少^[38-39]。Loganathan 在离心机试验中模拟

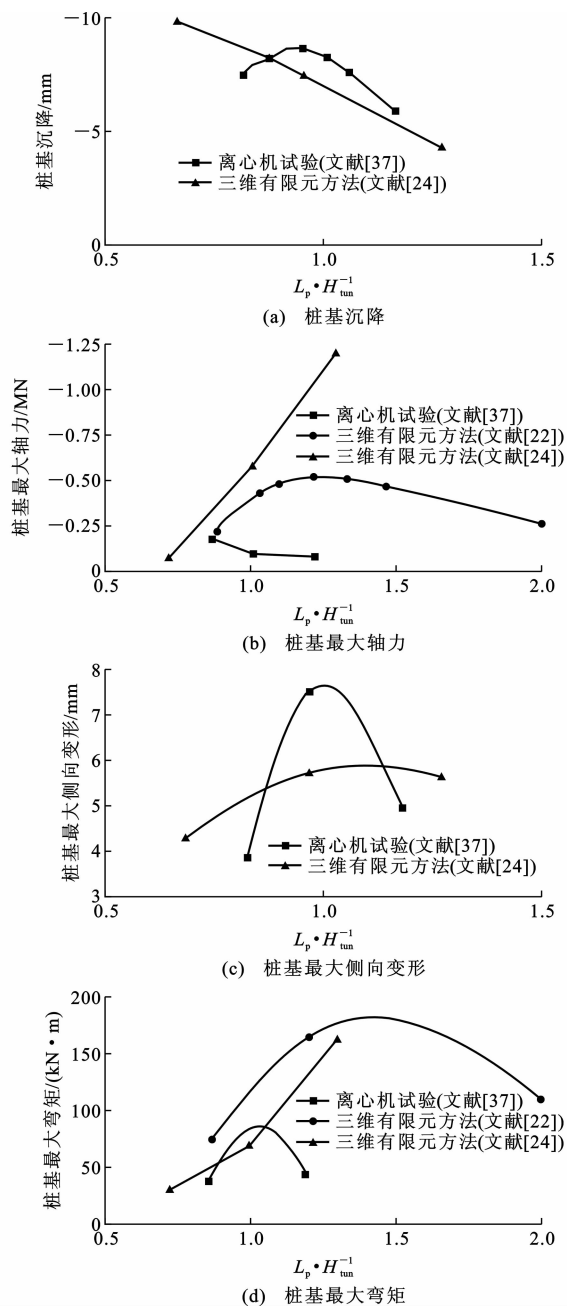


图3 桩基反应

Fig. 3 Pile Foundation Responses

了隧道开挖对 2×2 群桩的影响,并与相同位置的单桩进行对比,对于 L_p/H_{tun} 为 0.86、1.0 的情况,桩基弯矩分别减小了 16%、22%,但是,当 L_p/H_{tun} 等于 1.2 时,弯矩增大了 40%。这种不一致的情况在文献[30]的边界元分析中没有出现。群桩中的前排桩与同位置处的单桩相比,桩头沉降、轴力、侧向变形和弯矩分别减小了 12%、29%、6%、15%,而后排桩则分别减小了 10%、43%、0%、21%。值得注意的是,对于后排桩来说,侧向变形是没有减小的。

此外,Mroueh 等对 2×2 的群桩进行了三维有

限元分析,其中前排桩与同位置处的单桩相比,其最大轴力和弯矩分别减小了 20%、3%。后排桩减小更多,分别为 60%、45%。Kitiyodom 等的数值分析与上述得出的结论并不一致,当桩的长细比很大(等于 25)时,桩基轴力和弯矩的减小值几乎可以忽略不计,而当长细比减小到 5 时,群桩效应既有积极影响也有消极影响。

6 结 语

介绍了隧道开挖对邻近桩基影响的现有研究成果,讨论了一系列的现场实测、室内试验和数值分析结果。但是大多数的现场实测没有对桩安装测量仪器,因此也没有进一步研究桩基的反应。在所有的室内试验研究中,模拟的都是平面应变条件下的隧道开挖而没有研究三维隧道开挖的情况。在数值分析中,两阶段法可以节省计算时间,但是不能有效地模拟桩土相互作用,三维有限元分析在模拟隧道开挖的三维效应和桩土相互作用方面是优于两阶段法的,但是其计算时间较长。在二维有限元分析中,施加正确的桩基参数是主要问题。目前所有的研究方法都有其局限性,并不能获得统一的共识,而且研究中还经常出现相互矛盾的情况。离心机技术的发展使得模拟三维隧道开挖的影响成为可能,而计算机硬件的迅速发展也使三维数值模拟的时间问题能够得以克服,所以模拟隧道开挖对邻近桩基三维影响的离心机试验和三维数值模拟相结合的研究方法是今后的发展方向。

参考文献:

References:

- [1] MORTON J D, KING K H. Effects of Tunneling on the Bearing Capacity and Settlement of Piled Foundations[C]//IMM. Proceedings of Tunneling 79. London: IMM, 1979: 57-68.
- [2] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Sub-surface Settlement Profiles Above Tunnels in Clays [J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [3] LEE R G, TURNER A J, WHITWORTH L J. Deformations Caused by Tunneling Beneath a Piled Structure[C]//ICSMFE. Proceedings of the XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi: ICSMFE, 1994: 873-878.
- [4] SELEMETAS D, STANDING J R, MAIR R J. The Response of Full-scale Piles to Tunneling[C]//BAKER K J, BEZUIJEN A, BROERE W, et al. Proceed-

- ings of 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London; Taylor & Francis, 2005: 763-769.
- [5] JACOBZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. The Effects of Tunneling near Single Driven Piles in Dry Sand[C]//CUED. Proceedings of Asian Regional Conference on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Shanghai; CUED, 2001: 29-35.
- [6] KAALBERG F J, TEUNISSEN E A H, VAN TOL A F, et al. Dutch Research on the Impact of Shield Tunnelling on Pile Foundations[C]//BAKKER K J, BEZUIJEN W B, KWAST E A, et al. Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London; Taylor & Francis, 2005: 1615-1620.
- [7] THAM K S, DEUTSCHER M S. Tunnelling Under Woodleigh Workers' Quarters on Contract 705[C]//ZHAO J, SHIRLAW J N, KRISHNAN R. Tunnels and Underground Structures. Rotterdam; Balkema A A, 2000: 241-248.
- [8] PANG C H. The Effects of Tunnel Construction on Nearby Pile Foundation[D]. Singapore; National University of Singapore, 2006.
- [9] TAKAHASHI K, FUKAZAWA N, HAGIWARA T, et al. Observational Control of Slurry Shield Tunnels with Super Close Spacing Under the Nearby Bridge Abutments Loads[C]//ITA. Proceedings of World Tunnel Congress and 13th ITA Assembly. Singapore; ITA, 2004: 1-6.
- [10] FORTH R A, THORLEY C B B. Hong Kong Island Line-predictions and Performance[C]//MAIR R J, TAYLOR R N. Proceedings of 2nd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Rotterdam; Balkema A A, 1996: 677-682.
- [11] GHAREMANNEJAD B, SURJADINATA J, POON B, et al. Effects of Tunneling on Model Pile Foundations[C]//NG C W W, ZHANG L M, WANG Y H. Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. London; Taylor & Francis, 2006: 1157-1162.
- [12] BEZUIJEN A, VAN DER SCHRIER J. The Influence of a Bored Tunnel on Pile Foundations[C]//LEUNG C F, LEE F H, TAN T S. Centrifuge 94. Rotterdam; Balkema A A, 1994: 681-686.
- [13] HERGARDEN H J A M, POEL J T, SCHRIER J S. Ground Movements Due to Tunneling: Influence on Pile Foundations[C]//MAIR R J, TAYLOR R N. 2nd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Rotterdam; Balkema A A, 1996: 519-524.
- [14] 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.
- [15] RAN X, LEUNG C F, CHOW Y K. Centrifuge Modeling of Tunnel-pile Interaction in Clay[C]//TUCSS. Underground Singapore 2003. Singapore; TUCSS, 2003: 256-263.
- [16] ONG C W, LEUNG C F, CHOW Y K, et al. Experimental Study of Tunnel-soil-pile Interaction [C]//TUCSS. Underground Singapore 2007. Singapore; TUCSS, 2007: 55-66.
- [17] JACOBZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge Modeling of Tunneling near Driven Piles [J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 49-56.
- [18] LEE C J, CHIANG K H. Load Transfer on Single Pile near New Tunnelling in Sandy Ground [C]//MATSUI T, TANAKA Y, MIMURA M. Proceedings of the International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits. Osaka; JGS, 2004: 501-506.
- [19] SHARMA J S, BOLTON M D, BOYLE R E. A New Technique for Simulation of Tunnel Excavation in a Centrifuge[J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, 24(4): 343-349.
- [20] RAN X. Tunnel Pile Interaction in Clay[D]. Singapore; National University of Singapore, 2004.
- [21] VERMEER P A, BONNIER P G. Pile Settlements Due to Tunneling [C]//SEFE. Proceedings of 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam; Balkema A A, 1991: 869-872.
- [22] MROUEH H, SHAHROUR 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.
- [23] LEE G T K, NG C W W. Effects of Advancing Open Face Tunneling on an Existing Loaded Pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 193-201.
- [24] CHENG C Y, DASARI G R, LEUNG C F, et al. 3D Numerical Study of Tunnel-soil-pile Interaction[C]//AITES-ITA. Proceedings of 30th AITES-ITA World

- Tunnel Congress. Oxford:Elsevier,2004;1-8.
- [25] CHENG C Y,DASARI G R,CHOW Y K,et al. Finite Element Analysis of Tunnel-soil-pile Interaction Using Displacement Controlled Model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22 (4): 450-466.
- [26] 杨超,黄茂松,刘明蕴.隧道施工对临近桩基影响的三维数值分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增1):2601-2607.
- YANG Chao, HUANG Mao-song, LIU Ming-yun. Three-dimensional Numerical Analysis of Effect of Tunnel Construction on Adjacent Pile Foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1):2601-2607.
- [27] 朱逢斌,杨平,ONG C W.盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J].岩土工程学报,2008,30(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, 30(2):298-302.
- [28] BROMS B B, PANDEY P C. Influence of Ground Movements from Tunnelling on Adjacent Piles and Remedial Measures [C]//NTI. Proceedings of 5th International Geotechnical Seminar on Case Histories in Soft Clays. Singapore:NTI,1987;73-84.
- [29] CHEN L T,POULOS H G,LOGANATHAN N. Pile Responses Caused by Tunnelling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3):207-215.
- [30] LOGANATHAN N,POULOS H G,XU K J. Ground and Pile-group Response Due to Tunneling[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(1):57-67.
- [31] KITIYODOM P, MATSUMOTO T, KAWAGUCHI K. A Simplified Analysis Method for Piled Raft Foundations Subjected to Ground Movements Induced by Tunneling[J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29 (15): 1485-1507.
- [32] SURJADINATA J, HULL T S, CARTER J P, et al. Combined Finite- and Boundary- Element Analysis of the Effects of Tunneling on Single Piles [J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6 (5): 374-377.
- [33] 李永盛,黄海鹰.盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法[J].同济大学学报:自然科学版,1997,25(3):274-280.
- LI Yong-sheng, HUANG Hai-ying. Computation of Mechanical Effects on Adjacent Piles by Shield Excavation[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1997, 25(3):274-280.
- [34] 阮林旺,李永盛.软土盾构法施工引起相邻桩体变形和受力研究[J].隧道及地下工程,1997,18(3):18-23.
- RUAN Lin-wang, LI Yong-sheng. Study on Deformation and Force of Adjacent Pile by Shield Excavation in Soft Clay[J]. Tunnel and Underground Engineering, 1997, 18(3):18-23.
- [35] 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 Zao, HUANG Mao-song. Analysis of Settlement and Internal Forces of Group Pile Due to Tunneling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3):398-402.
- [36] 李早,黄茂松.隧道施工条件下临近群桩水平力学反应分析方法[J].工业建筑,2009,39(1):79-84.
- LI Zao, HUANG Mao-song. An Analytical Method for Lateral Behavior of Pile Groups Adjacent to Tunneling[J]. Industrial Construction, 2009, 39 (1): 79-84.
- [37] LOGANATHAN N. Effect of Tunneling Adjacent to Pile Foundations[D]. Sydney: University of Sydney, 1999.
- [38] 张红卫,任建喜,李振龙.隧道管棚注浆超前支护在特殊条件下的应用[J].西安科技大学学报,2009,29(2):165-169.
- ZHANG Hong-wei, REN Jian-xi, LI Zhen-long. Shed-pipe Grouting Technique Application in Shallow-buried and Lateral Pressure Tunneling [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29 (2):165-169.
- [39] 于远祥,谷拴成,韩荣刚,等.隧道开挖对临近墩基础承载力影响的数值模拟[J].西安科技大学学报,2009,29(4):427-432.
- YU Yuan-xiang, GU Shuan-cheng, HAN Rong-gang, et al. Numerical Simulation on Influence of Tunnel Excavation on Adjacent Pier Foundation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(4):427-432.