

文章编号: 1000-7598(2014)10-2941-09

盾构施工对大型立交桥超长桩工作性状的影响

郭一斌^{1,2}, 张立明³, 郑刚¹, 杨振丹³

(1. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 郑州航空工业管理学院 土木工程学院, 郑州 450015;
3. 天津市地下铁道集团有限公司, 天津 300000)

摘要: 盾构近距离穿越大型立交桥超长桩基础会对桩基础及上部桥梁结构产生不利影响。通过对盾构近距离侧穿超长桩基础过程进行数值模拟, 研究了不同深度处盾构掘进对超长桩承载性状、变形和内力的影响。研究表明: 盾构近距离侧穿超长桩会导致桩身出现较大变形及内力, 且隧道轴线与超长桩处于不同相对位置时会对桩的特性产生不同影响。其他条件不变时, 盾构从桩身上部的近距离穿越, 将引起桩身最大的横向水平位移; 盾构从桩身中部近距离穿越则将引起桩身产生沿盾构掘进方向的最大水平位移; 盾构从桩端附近穿越时将引起桩身产生最大的竖向位移; 盾构从桩身中下部穿越时将引起桩身产生最大的附加轴力。桩身侧阻在隧道轴线附近呈“S”型, 同时桩身轴力最大值也出现在隧道轴线附近。盾构导致桩身产生纵向和横向变形延伸至桥面高度的变形量相当可观。当盾构穿越高架桥梁基础时应该严格控制桩顶水平位移。

关键词: 盾构; 超长桩; 工作性状

中图分类号: U 455.43

文献标识码: A

Influence of shield tunneling on working performance of large interchange's super-long piles

GUO Yi-bin^{1,2}, ZHANG Li-ming³, ZHENG Gang¹, YANG Zhen-dan³

(1. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 3. Tianjin Metro Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Shield tunneling passing through adjacent large interchange's super-long piles has negative effect on super-long piles and bridge structures. Numerical analysis is conducted to simulate the process of the shield tunneling passing through the adjacent super-long piles. The bearing performance, deformations and forces of super-long piles caused by the shield tunneling with different depths are investigated. Some conclusions are drawn as follows. Large deformations and forces may occur in piles due to nearby tunneling. The various tunneling locations have different influences on the behaviors of piles. The most unfavorable position for lateral displacement is the upper part of pile; the most unfavorable position for longitudinal displacement is the middle part of pile; the most unfavorable position for vertical displacement is the tip of pile; the most unfavorable position for additional axial force is the lower part of pile, when other conditions are the same. The shaft resistances appear ‘S-shaped’ distribution near the tunnel axis; meanwhile, the maximum axial forces of the piles are also located at the tunnel axis. Lateral and longitudinal deformations of piles that extend to bridge decks are considerable. Horizontal deformations of piles top should be strictly controlled while tunneling passing through adjacent interchange's super-long piles.

Key words: shield tunneling; super-long piles; working performance

1 前言

地铁已经成为现代化城市的标志之一, 目前我国正在进行大规模的地铁建设, 开展地下空间。当地铁穿越城市中心区时不可避免地要近距离穿越桥梁及建筑物的基础, 特别是深度较大的桩基础。

国内外很多学者对盾构掘进对桩基础影响的问题进行过研究。Morton 等^[1]和 Loganathan 等^[2]分别进行了重力场和离心机模型试验, 发现盾构掘进对桩基影响很大, 尤其是在软土中。Mroueh 等^[3]和 Gordon 等^[4]采用有限元方法分析了隧道掘进施工对附近单桩和群桩产生的影响。

收稿日期: 2013-10-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(No. 2010CB732106)。

第一作者简介: 郭一斌, 女, 1974 年生, 博士研究生, 主要从事土力学及岩土工程科研工作。E-mail: 1259582620@qq.com

通讯作者: 张立明, 男, 1984 年生, 博士, 主要从事地下工程设计管理及科研工作。E-mail: tjuzlm@163.com

国内学者黄茂松等^[5]、王丽等^[6]、姜忻良等^[7]、张志强等^[8]、朱逢斌等^[9]依托实际工程采用有限元法对隧道施工对近邻桩基的承载性状进行了研究。

目前研究盾构掘进对桩基础的影响主要是针对常规桩基础进行研究。在天津等沿海软土地区的大型城市立交桥、高架桥,为减小桥墩桩基础的占地面积,桥墩往往支承在长度达 50~60 m 的超长桩上,以减少桩数。近几年多次出现盾构穿越大型立交桥超长桩基础的案例。由于大型立交桥高度大,盾构穿越引起的桩基础的水平位移可导致桥面标高处的水平位移显著放大;此外,地震荷载作用下桩基往往承担较大的地震作用。为此,必须对盾构穿越大型立交桥、高架桥超长桩基础的引起的桩水平变位以及相应的竖向和水平向承载性能进行分析。

本文基于天津地铁盾构穿越桩基工程实践,结合实测数据进行分析,采用有限元进行模拟,并将计算与实测结果进行拟合。基于实测验证的有限单元模型,对隧道近距离穿越超长桩基础进行模拟,研究了不同隧道埋深情况下盾构掘进对超长桩承载性状的影响,并对其机制进行分析。

2 工程实测及有限元验证

2.1 工程概况

天津地铁 3 号线某区间近距离穿越高架桥桩基础,该段地层主要为粉土、粉质黏土和粉砂,土层分布及物理力学参数如表 1 所示。

高架桥基础承台下共 8 根预制混凝土方桩,承台底位于地面,承台尺寸为 2.8 m×4.2 m,方桩尺寸为 0.35 m×0.35 m,桩长为 25 m,单桩荷载 500 kN。桩身及承台混凝土为 C30。

本工程所采用盾构机前盾直径为 6.41 m,隧道管片外径为 6.2 m,管片外注浆层厚度约为 10 cm。隧道管片厚度为 0.35 m,管片环宽为 1.2 m。盾构过程中同步注浆压力为 200 kPa,土仓压力为 120 kPa。

此段盾构埋深 8 m,盾构外边线距离桩边最小距离为 1.69 m。盾构与桥桩基础平面关系如图 1 所示。

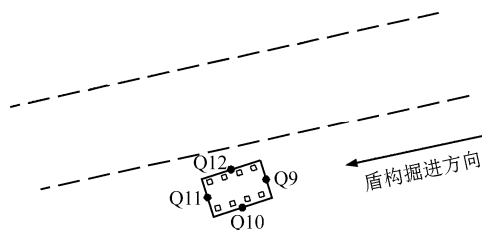


图 1 盾构与桩基础平面示意图

Fig.1 Schematic diagram of tunnel and the pile foundation

2.2 实测结果分析

此段盾构区间从 2011 年 1 月初始发,在 2011 年 2 月至 2011 年 3 月初经过桥桩基础。桥桩承台上布设 4 个监测点,分别为 Q9~Q12,监测过程中 Q11 点失效。

盾构穿过桥桩期间承台监测点沉降如图 2 所示。由图中可以发现,当盾构距离桥桩基础较远时就已经对桩基础产生了一定的影响,但整体沉降较小,在 2 月 8 日前桥桩沉降均不超过 0.5 mm;2 月 8 日以后,此时盾构机距离桥桩基础 25 m (4D) 左右,沉降开始迅速发展,期间 3 个监测点均存在回弹的现象;2 月底盾构基本通过桥桩基础,但沉降仍然有所发展,但逐渐趋于稳定,最终沉降将近 2 mm。

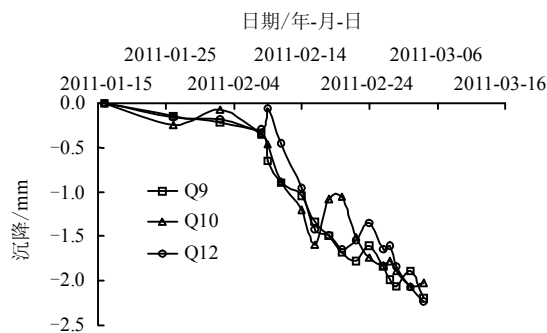


图 2 盾构穿越期间桩基承台沉降

Fig.2 Settlements of pile-cap during passing of shield

盾构穿越桥桩基础过程中,承台沉降整体呈下沉趋势,但在沉降过程中存在多次回弹现象,笔者分析其原因为盾构推进过程中进行同步注浆,注浆压力为 200 kPa 左右,注浆使桩基础产生了回弹的现象。

2.3 有限元模型及参数

采用有限元软件 ABAQUS 对盾构穿越桥桩基础工程进行模拟。

桩身混凝土为 C30,隧道管片混凝土为 C50。考虑到隧道衬砌接头对衬砌结构刚度的影响,将衬砌管片刚度折减 0.15。有限元计算中桩和隧道管片采用弹性材料进行模拟,桩身弹性模量 $E=30$ GPa,隧道管片弹性模量 $E=29.3$ GPa。

土体采用修正的剑桥模型,土层参数见表 1,为现场薄壁取土器取样、专门试验获得^[10]。

桩-土接触面采用库仑摩擦模型,摩擦系数取值 0.35,与文献[10]中一致。

有限元计算中先将群桩加载至工作条件下上部荷载值,然后进行盾构掘进。有限元模型网格划分如图 3 所示。

表 1 土层分布及物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers and soil distribution

编号	土层名称	层底深度/m	重度 γ /(kN/m ³)	孔隙比 e	压缩参数 λ	回弹参数 k	临界状态有效应力比 M
1	填土	6.8	19.1	0.87	0.065	0.007 7	0.71
2	粉质黏土	16.0	19.3	0.82	0.044	0.005 2	1.09
3	粉质黏土	21.8	20.0	0.69	0.048	0.005 7	1.03
4	粉土	25.0	20.6	0.59	0.022	0.002 6	1.41
5	粉质黏土	26.8	20.2	0.66	0.045	0.005 3	1.03
6	粉砂	28.6	21.6	0.49	0.011	0.001 2	1.71
7	粉质黏土	35.9	20.3	0.64	0.041	0.004 8	1.22
8	粉土	50.0	20.5	0.60	0.025	0.002 9	1.46

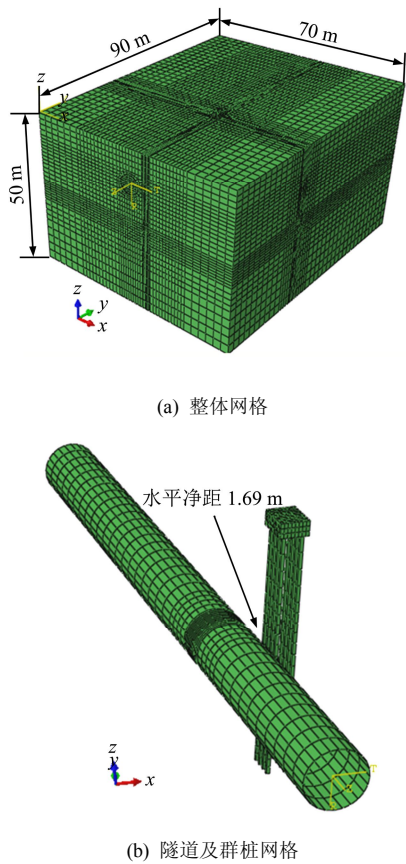


图 3 有限元网格模型
Fig.3 Meshed finite element model

2.4 盾构施工过程模拟

对盾构施工过程的模拟，采用刚度荷载迁移和施工等代层的方法反映施工过程和施工质量^[11]。

将盾构推进作为一个非连续的过程来研究，每次向前推进的长度为一个管片单元的宽度，去掉开挖部分土体，同时变换盾构和管片单元材料。

以施工等代层考虑隧道管片与周围土体间的注浆层，盾尾空隙、土体向盾构空隙的自然填充及注浆后的分布情况通过设置等代层的弹性模量来考虑。有限元模拟中等代层厚度为 10 mm，根据对实测

数据的反演计算，确定等代层弹性模量 $E=3.0\text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu=0.2$ 。

有限元模拟中考虑盾构掘进过程中进行同步注浆，以均布压力的形式进行模拟，注浆压力与现场施工情况相同，取 200 kPa。

采用对开挖面的土体施加均布压应力以模拟盾构推进产生的土仓压力，模型中土仓压力与现场施工情况相同，取 120 kPa。

2.5 有限元模型及参数

图 4 为点 Q12 有限元计算沉降与实测值对比，可以发现，有限元计算沉降发展趋势及数值与实测值拟合较好，说明有限元模型中所取的桩-土接触面参数、土体及桩身材料参数、盾构模拟方法及有限元网格划分合理，能够较好地模拟现场施工过程。

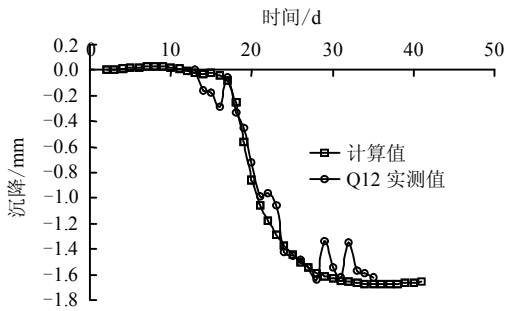


图 4 有限元计算与实测对比
Fig.4 Results of finite element analysis and measured data

3 盾构近距离穿越超长桩工程背景及有限元模型

3.1 工程背景

天津地铁 5、6 号线线路与市区内多座桥梁交叉，需要近距离穿越桥桩基础，最小净距大多为 1.5 m 左右，所涉及的桥梁桩基础大多为长度 50 m 以上的超长桩基础。盾构穿越桥梁桩基础处盾构埋深为 10~30 m 不等，变化幅度较大。

3.2 有限元模型

采用有限元软件 ABAQUS 对隧道近距离穿越超长桩进行模拟, 研究不同埋深的盾构掘进对超长桩造成的不利影响。

盾构隧道参数均与验证模型中相同。超长桩桩长为 55 m, 桩径 1.0 m, 单桩桩顶荷载为 5 500 kN。隧道与超长桩相对位置及尺寸如图 5 所示。

隧道与超长桩净距为 1.5 m, 研究隧道与超长桩处于不同相对位置时对超长桩产生的影响, 隧道中心线深度分别为 15、25、35 和 45 m。

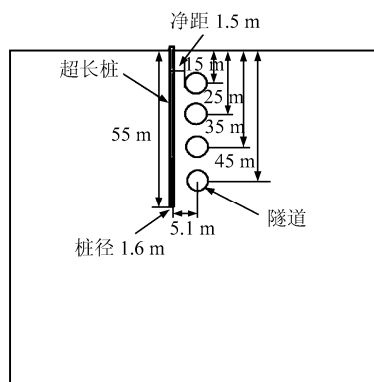


图 5 模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of model

为简化计算土层采用均质土层, 土体采用修正的剑桥模型, 土层参数采用表 1 中第 7 层粉质黏土参数。

桩身和隧道管片混凝土标号、材料力学参数、衬砌结构处理、接触面参数等均与验证模型中相同。

有限元计算中先将单桩加载至工作条件下桩顶荷载, 然后进行盾构掘进。有限元模型网格划分如图 6 所示。

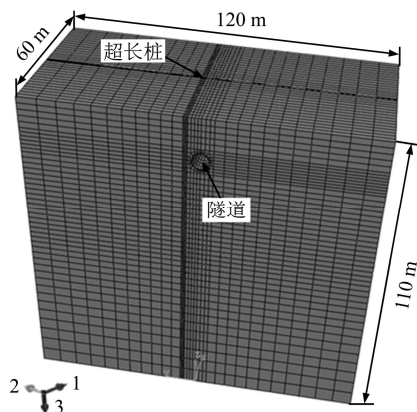


图 6 有限元网格模型

Fig.6 Meshed finite element model

3.3 盾构施工过程模拟

有限元模型中对盾构施工过程的模拟方法及参数均与验证模型中相同。

仍然采用对开挖面的土体施加均布压应力以模拟盾构推进产生的土仓压力, 4 个模型中, 对应隧道深度为 15、25、35 和 45 m, 土仓压力分别为 150、250、350 和 450 kPa。

4 盾构穿过后单桩承载性状

盾构穿越桩基础后继续对单桩进行加载, 盾构穿越前和不同埋深的盾构穿越后单桩 $Q-s$ 曲线如图 7 所示。

可以发现, 盾构穿越导致桩顶产生一定的沉降, 盾构埋深越大, 桩顶沉降也越大。继续在桩顶进行加载, $Q-s$ 曲线的斜率较原曲线有所减小, 说明单桩的刚度不仅没有减小, 反而有所增加。

笔者分析其原因为盾构穿越导致桩身产生一定沉降, 在此过程中桩身侧阻及桩端阻力发挥较充分, 后期再进行加载时端阻可以较快的发挥出来, 单桩刚度未出现减小的现象。

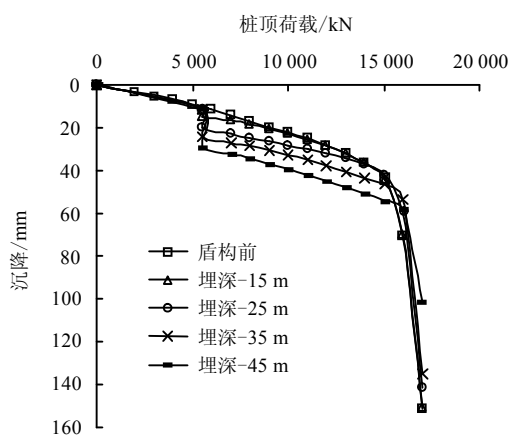


图 7 不同盾构单桩 $Q-s$ 曲线

Fig.7 Load and settlement curves of piles with different tunneling depths

5 盾构施工引起超长桩变形及内力分析

盾构掘进不可避免对周边环境造成影响, 当隧道近距离穿过超长桩, 会导致超长桩产生变形以及桩身内力的变化。

以隧道轴线方向为纵向, 桩身位移以盾构掘进方向为正; 以垂直隧道掘进的垂直方向为横向, 桩身位移以远离隧道方向为正; 以桩轴向为竖向, 桩身位移以沉降为正。

5.1 桩身沿隧道掘进方向的变位

以隧道轴线方向为纵向, 桩身位移以盾构掘进方向为正, 即图 6 中 1 方向。不同隧道埋深情况下桩身纵向变形如图 8 所示。

由图可以观察到, 桩身纵向位移随着盾构的掘进和隧道埋深的不同呈现出如下规律:

(1) 盾构中轴线附近 15~20 m 范围内纵向变形为正向, 正向位移的极值位于盾构中轴线深度处, 不同盾构埋深情况下, 极值范围为 1~2 mm。

(2) 盾构中轴线附近 15~20 m 范围之外纵向变形为负向, 靠近地面处位移值较大, 而桩身下部靠近桩端附近位移值非常小。最大位移绝对值位于桩顶处, 不同盾构埋深情况下, 纵向最大位移值范围为 2~5 mm。

(3) 盾构掘进过程中, 桩身纵向变形始终呈现出盾构中轴线附近 15~25 m 范围为正, 此范围之外为负的分布形式。当盾构开挖面还未通过超长桩中轴线位置, 随着盾构掘进的进行, 桩身纵向变形逐渐增大, 盾构开挖面与桩轴线位于同一平面时, 纵向位移整体达到最大值。当盾构开挖面通过桩轴线位置继续掘进, 桩身纵向变形整体逐渐减小。

(4) 隧道埋置深度对桩身纵向变形也有较大的影响, 当盾构轴线埋深为 25 m 时, 桩身正向和负向纵向位移均达到最大值。即对于桩身纵向位移, 最不利隧道埋深为位于桩长的中心位置附近。

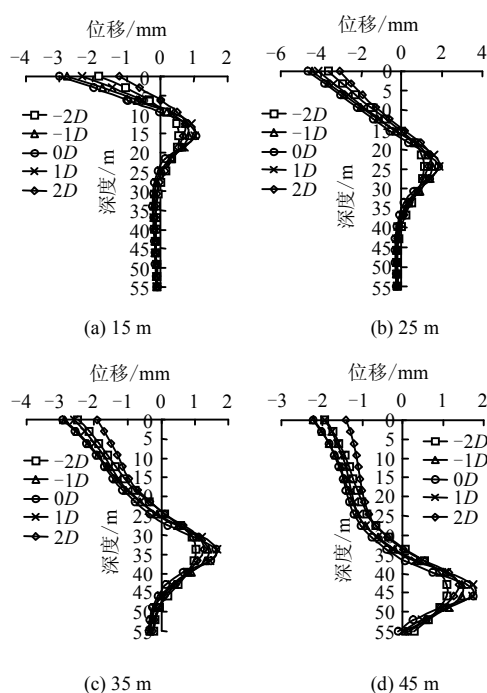


图 8 不同中心线埋深情况下桩身纵向变形
Fig.8 Longitudinal deformations of piles with various tunnel axial depths

盾构穿越会导致桩顶产生水平位移, 桩身上部发生倾斜, 桩顶倾斜延伸至桥面高度会产生很大的水平位移。不同桥面高度情况下, 不同工况桥面沿隧道掘进方向最大水平位移如图 9 所示。

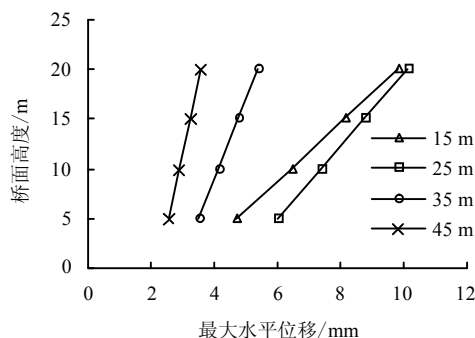


图 9 不同隧道埋深时不同桥面高度情况下最大纵向水平位移

Fig.9 Maximum longitudinal deformations of bridge decks with various heights and various tunnel axial depths

桥面高度越大, 由于桩顶倾斜导致的桥面水平位移越大, 桩顶位移延伸至桥面会产生可观的水平位移。盾构埋深为 25 m 对桩身纵向水平位移最不利, 当桥面高度为 20 m 时, 桥面水平位移可达到 10 mm 左右。

5.2 桩身垂直隧道掘进方向的变位

以垂直于隧道掘进方向的水平方向为横向, 桩身位移以远离隧道方向为正, 即图 6 中 2 方向。不同隧道埋深情况下桩身横向变形如图 10 所示。

由图可以观察到, 当盾构开挖面未达到桩轴线位置时, 靠近盾构轴线附近范围内的桩身横向位移为正值, 即位移为远离隧道方向, 该范围之外为负值。当盾构开挖面通过桩轴线位置继续向前掘进, 桩身横向位移为整体倾向隧道方向, 且随着盾构的掘进桩身横向位移整体逐渐增大。

桩身最大横向位移绝对值发生在桩顶, 随着隧道埋深的增加, 桩顶最大横向水平位移值逐渐减小, 但对桩身的影响范围逐渐增大。对于桩身横向水平位移, 最不利的盾构中心线埋深为 15 m, 位于桩身上部。

当隧道轴线埋深为 15 m 和 25 m 时, 桩身横向位移主要分布在桩身上部, 桩身下部位移很小, 桩端处几乎为 0。而当隧道轴线埋深为 35 m 和 45 m 时, 桩身全长均产生较大的横向位移。即随着隧道埋深的增加, 桩身整体横向位移由上部倾斜逐渐转变为整体侧移。

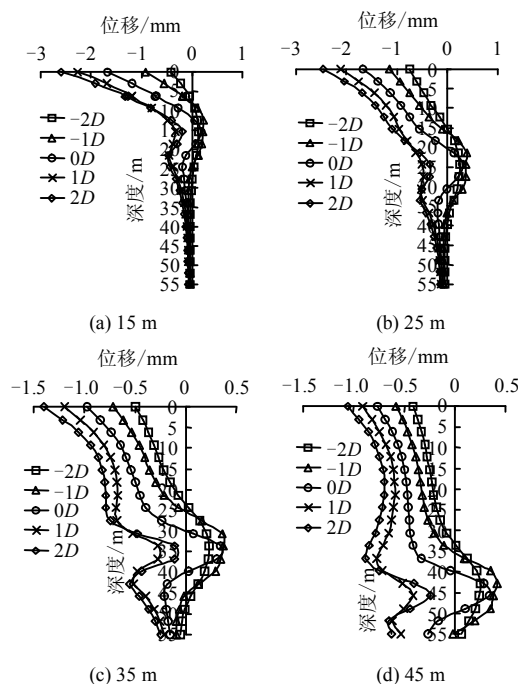


图 10 不同中心线埋深情况下桩身横向变形
Fig.10 Lateral deformations of piles with various tunnel axial depths

不同桥面高度情况下,不同工况桥面垂直隧道掘进方向最大水平位移如图 11 所示。

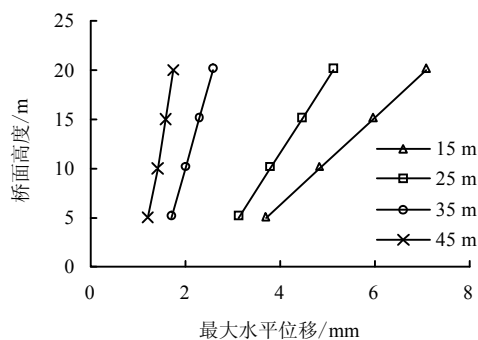


图 11 不同隧道埋深时不同桥面高度情况下最大横向水平位移
Fig.11 Maximum lateral deformations of bridge decks with various heights and various tunnel axial depths

盾构埋深为 15 m 时对桩身横向水平位移最不利,当桥面高度 20 m,桥面水平位移可达到 7 mm 左右。

5.3 桩身竖向位移

以桩轴向为竖向,桩身位移以沉降为正,即图 6 中 3 方向。不同隧道埋深情况下桩身竖向变形如图 12 所示。

由图可见,盾构掘进对超长桩竖向沉降的影响非常大。随着盾构开挖面距桩的距离逐渐减小,桩身竖向位移逐渐增加,当开挖面通过桩轴线位置继

续掘进,桩身竖向位移继续增加。

当盾构开挖面超过桩轴线纵向距离达到 2 倍隧道直径,盾构轴线埋深由 15 m 增加到 45 m 时,桩顶因盾构产生沉降由 4.5 mm 增加到 13.3 mm。且对于隧道埋深为 15 m 和 25 m 的情况下沉降趋势已经基本稳定,而隧道埋深为 35 m 和 45 m 时,沉降仍具有较大的增长趋势。

从竖向位移分布上看,隧道埋深为 15~35 m 时,盾构引起的竖向位移主要集中在桩身的中上部,桩端处竖向位移几乎为 0;而隧道埋深为 45 m,盾构超过桩轴线 2 倍隧道直径时,桩端产生了 7 mm 的沉降。

综上所述,隧道埋深越靠近桩端,盾构掘进对桩身竖向位移的影响越大。且隧道轴线埋深距桩顶 60% 桩长以内时,盾构掘进几乎不会对桩端产生竖向沉降。

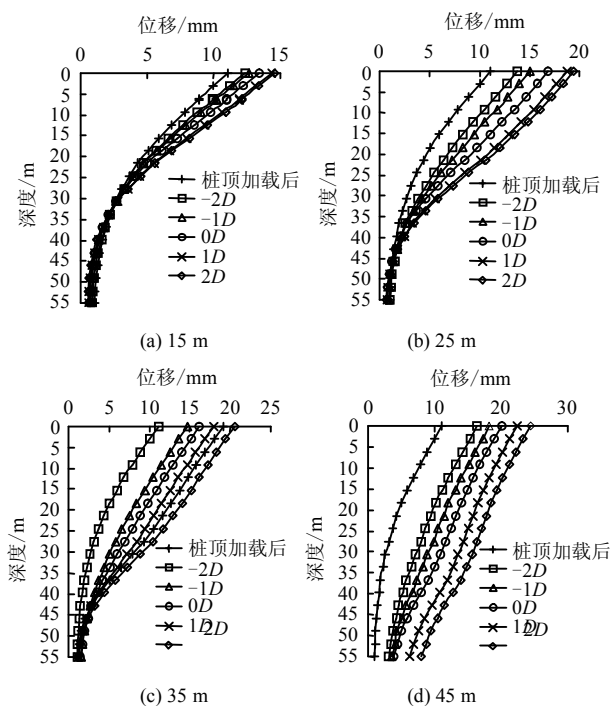


图 12 不同中心线埋深情况下桩身竖向变形
Fig.12 Vertical deformations of piles with various tunnel axial depths

5.4 桩身轴力

图 13 为不同隧道埋深情况下的桩身轴力分布,由图可以观察到,盾构掘进导致桩身轴力大幅增加,隧道轴线深度以上轴力随深度增加,该深度以下轴力随深度减小,桩身轴力在隧道轴线深度处出现最大值。

随着盾构开挖面距桩的距离逐渐减小,桩身轴力逐渐增大,当开挖面通过桩轴线位置继续掘进,

桩身轴力仍继续增大。

对比不同隧道埋深情况下桩身增加的轴力可以发现, 当隧道埋深为 15~35 m 时, 隧道埋深越大, 桩身轴力增加的幅度也越大, 且桩端轴力增加幅度很小。当隧道轴线埋深为 35 m 时, 桩身最大轴力为桩顶轴力的 1.5 倍。

当隧道埋深为 45 m 时, 桩身轴力增加幅度较 35 m 时减小, 而桩端轴力大幅增加, 为原桩端轴力的 3.7 倍。

说明当隧道位于桩身中下部时引起桩身产生的轴力最大, 当隧道位置靠近桩端会导致桩端阻力大幅增加。

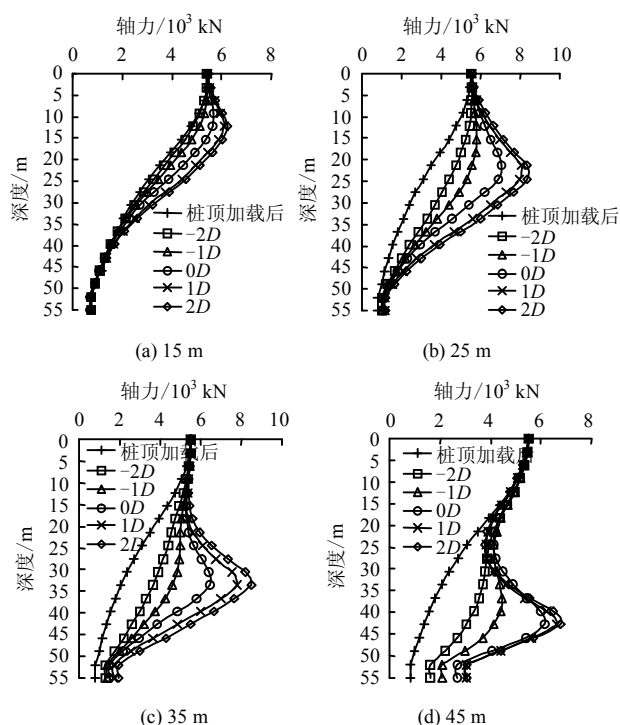


图 13 不同中心线埋深情况下桩身轴力

Fig.13 Axial forces of piles with various tunnel axial depths

5.5 桩身侧阻

图 14 为不同隧道埋深情况下的桩身侧阻分布, 由图可以观察到: 超长桩在承载力特征值下侧阻为一种单驼峰式的分布, 桩身中上部侧阻发挥较充分, 桩身下部发挥程度较小。

当盾构开挖面靠近超长桩时, 隧道轴线以上深度桩身侧阻逐渐减小, 隧道轴线以下深度桩身侧阻逐渐增大。当盾构通过桩轴线位置继续掘进时, 隧道轴线以上深度桩身甚至出现较大范围的负摩阻区, 且负摩阻力发挥程度较大; 隧道轴线以下深度桩身侧阻较承载力特征值情况下大幅增加。

盾构近距穿过超长桩后, 导致隧道轴线附近桩身侧阻呈“S”型分布。隧道埋深越大, 盾构掘进引起的超长桩侧阻变化程度也越大。

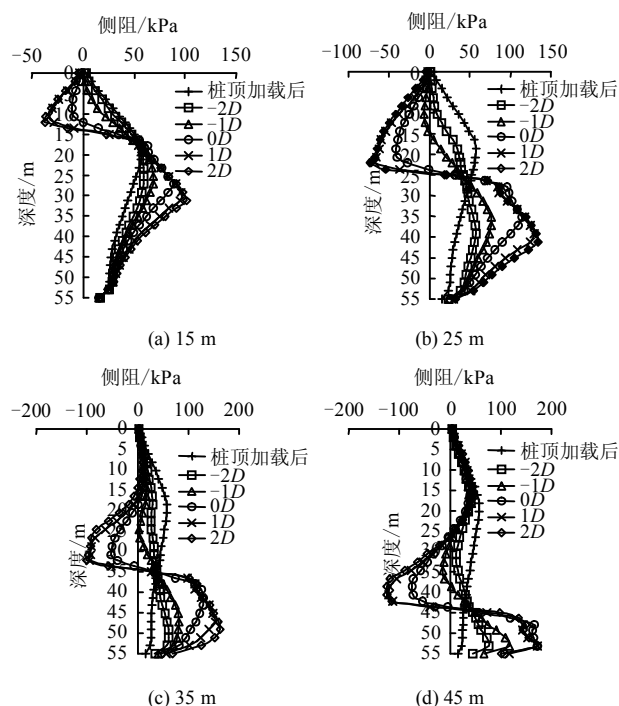


图 14 不同中心线埋深情况下桩身侧阻

Fig.14 Shaft resistance of piles with various tunnel axial depths

5.6 桩身沿隧道掘进方向弯矩

由于盾构掌子面存在土仓压力, 导致桩身发生沿隧道掘进方向的弯曲, 桩身会产生一定的弯矩。

图 15 为不同隧道埋深情况下的沿隧道掘进方向 (纵向) 桩身弯矩分布, 可以发现, 仅在桩身为 10 m 左右范围内弯矩较大, 弯矩最大值发生在盾构中轴线附近, 且弯矩分布存在反弯的现象。

盾构掘进过程中, 在盾构掌子面与桩身位置平齐时弯矩达到最大值, 盾构通过后桩身弯矩有所减小。所有工况条件下, 桩身沿隧道掘进方向最大弯矩值均不超过为 100 kN·m。对于直径为 1 m 的桩, 配筋率 0.4% 时, 钢筋均匀布置, 能承受最大弯矩为 463 kN·m, 附加弯矩对桩身的影响可以忽略不计。

5.7 桩身垂直隧道掘进方向弯矩

盾构同步注浆, 导致桩身发生垂直隧道掘进方向的弯曲, 桩身会产生一定的弯矩。

图 16 为不同隧道埋深情况下的垂直隧道掘进方向 (横向) 桩身弯矩分布, 可以发现, 桩身较大范围 (约为 30 m) 内均存在较大的弯矩, 且存在多个反弯点。所有工况条件下, 桩身垂直隧道掘进方向最大弯矩值均不超过 50 kN·m。对于直径为 1 m

的桩,配筋率 0.4% 时,钢筋均匀布置,能承受最大弯矩为 $463 \text{ kN} \cdot \text{m}$,附加弯矩对桩身的影响可以忽略不计。

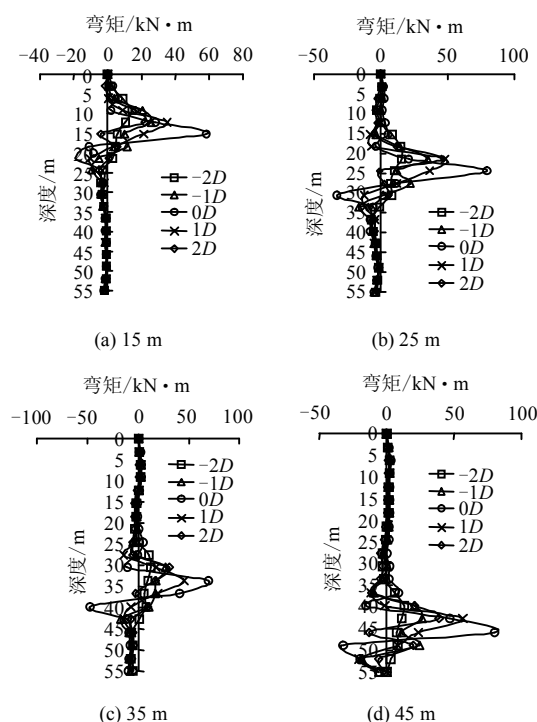


图 15 不同中心线埋深情况下桩身纵向弯矩
Fig.15 Longitudinal moment of piles with various tunnel axial depths

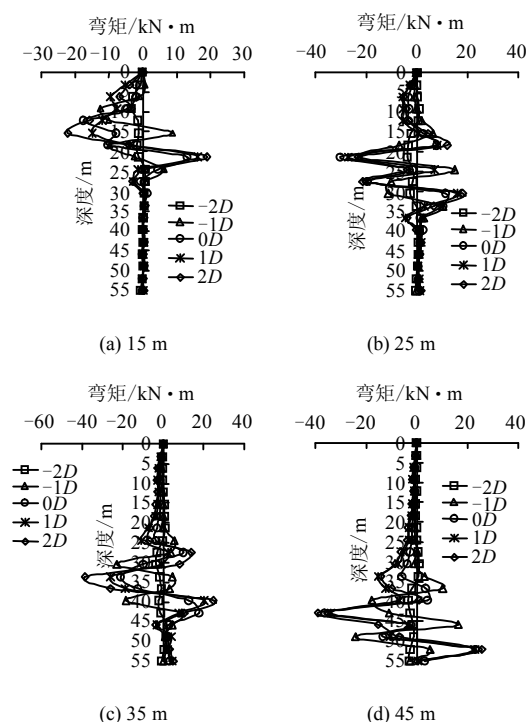


图 16 不同中心线埋深情况下桩身横向弯矩
Fig.16 Lateral moment of piles with various tunnel axial depths

6 结 论

(1) 盾构近距离穿越超长桩会导致盾构中轴线附近 $15 \sim 20 \text{ m}$ 范围内纵向变形方向为盾构掘进方向,此范围之外为相反方向。对于桩身纵向位移,最不利隧道中心线埋深为 25 m ,位于桩长的中心位置附近。

(2) 桩身横向位移整体是朝向隧道方向,最大横向位移绝对值发生在桩顶,随着隧道埋深的增加,桩顶最大横向水平位移值逐渐减小,桩身整体横向位移由上部倾斜逐渐转变为整体侧移。对于桩身横向位移,最不利隧道埋深为 15 m ,位于桩身上部位置。

(3) 桩身的纵向和横向水平位移延伸至桥面标高后均会产生非常可观的水平变形量,盾构穿越高架桥梁桩基础时更需严格控制桩顶水平位移。

(4) 盾构掘进会导致超长桩产生较大沉降,桩顶处竖向沉降最大并随深度增加逐渐减小。隧道埋深越靠近桩端,盾构对桩身竖向位移的影响越大。当隧道轴线埋深距桩顶 60% 桩长以内时,桩端几乎不会产生沉降;超过此范围就会导致超长桩桩端也产生较大的沉降。

(5) 盾构掘进导致桩身轴力大幅增加,隧道轴线深度以上轴力随深度增加,该深度以下轴力随深度减小,桩身轴力在隧道轴线深度处出现最大值。当隧道位于桩身中下部时,在桩身中引起的附加轴力最大。

(6) 盾构近距穿过超长桩后,隧道轴线以上深度桩身侧阻逐渐减小,以下深度桩身侧阻逐渐增大,导致隧道轴线附近桩身侧阻呈“S”型分布。且隧道埋深越大,盾构掘进引起的超长桩侧阻变化程度也越大。

(7) 盾构近距离穿过超长桩,对桩身产生的附加弯矩影响较小,工程中不必采取专门措施。

参 考 文 献

- [1] MORTON J D, KING K H. Effect of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations[C]// Proc. Tunneling 79. London: IMM, 1979: 57—68.
- [2] 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.