

深圳地铁隧道邻接桩基施工力学行为研究

Study on the mechanical behaviour of a metro tunnel construction adjacent to existing pile foundations in Shenzhen

张志强, 何 川

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对深圳地铁新建隧道邻接既有桩基的地铁工程, 进行了三维有限元数值模拟的施工力学行为研究。研究结果表明: 与无桩情况相比较, 邻接桩基施工将引起新建隧道自身结构, 特别是与既有桩基邻接一侧边墙不利的受力状况和变形特征; 并且, 邻接施工还将引起既有桩基产生偏向隧道水平方向的“拉伸”变形情况。因此, 需要采取加固措施, 以确保隧道自身结构以及邻接地下“建筑物”的安全。此外, 考察不同刚度折减系数时, 发现桩基水平侧向变形几乎没有变化, 这表明改变盾构管片的拼装方式, 在整体上对邻接地下“建筑物”几乎无影响。

关键词: 新建隧道; 邻接施工; 既有桩基

中图分类号: U 231; U 456

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)02-0204-04

作者简介: 张志强(1968-), 男, 四川人, 博士后, 副教授, 主要从事隧道与岩土工程方面的研究与教学工作。

ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan

(Dept. of Underground and Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In the paper, the mechanical behaviour of a metro tunnel construction adjacent to existing pile foundation in Shenzhen is studied with 3D FEM numerical simulation method. Comparing with the case of no pile foundation, the disadvantageous distribution of deformation and internal forces in the tunnel structure are demonstrated, particularly in its side wall adjacent to the existing pile foundation. In addition, the tunnel construction results in also the tensile deformation in the existing pile foundation. Therefore, it is necessary to take some reinforcing measures to guarantee safety of the tunnel itself and the adjacent existing pile foundation. Finally, based on analysis of deformation using different stiffness reduction coefficients, it is found that the tensile deformation values hardly change, because different assembling patterns of tunnel lining segments have little effects on the adjacent existing pile foundations.

Key words: new-made tunnel; close space construction; existing pile foundation

0 前 言^①

近年来, 由于土地价格上扬, 城市土地用地不足等, 城市急剧向郊区扩大, 土地高度利用化, 而邻接既有地下结构物进行邻接施工的工程, 大量涌现。因此在这种情况下, 最主要问题是施工中对既有结构物的影响问题以及自身近距离施工时的相互影响问题。概括的讲, 如何把对环境的影响减少到最低限度, 是地下建筑物在近距离条件下施工的核心问题, 不容忽视。这一新动向和新问题, 目前已经引起了地下工程界和岩土工程界甚至包括地铁承包商在内的广泛重视。在日本, 已将近距离条件下地下结构施工定义为“邻接施工影响问题”^[1], 并且给予了高度重视。而在我国, 随着近年来城市地铁交通事业的飞速发展, 已经先后在北京、上海以及广州地铁工程等建设中遇到了相类似的问题, 给设计和施工带来了极大难题。

近期的邻接工程与过去比较, 不仅工程规模大, 而且与既有地下结构物的间距更小。例如, 对于在建的深圳地铁一期工程7C标段天虹—岗厦区间隧道, 在左

线里程CK+716.924处, 与立交桥桩基邻接距离为1.1m, 可见, 邻接施工影响问题已变得非常严重^[2]。

为了确保邻接施工中, 新建盾构隧道自身结构安全稳定及施工期间对既有结构物影响减少到最低限度, 本文针对深圳地铁一期工程7C标段天虹—岗厦盾构区间隧道与立交桥桩基相互邻接的施工力学行为, 从整体上(包括新建盾构隧道、邻接桩基以及上至地表环境)进行数值模拟研究。

1 工程地质概况

根据《深圳地铁一期工程盾构工程设计图纸》工程地质描述, 7C标段天虹—岗厦区间地处台地、冲积平原, 地形平坦稍有起伏。勘测范围内自上而下围岩组成为第四系全新统人工堆积层 Q_4^m (由素填土、粉质黏土组成)、冲积层 Q_4^l (由淤泥质粉质黏土组成)、第四系残积层 Q_4^e 和下覆燕山期花岗岩 r_3^3 (由砂质黏性土及全风化花岗岩组成)侵入体构造角砾。

① 收稿日期: 2002-04-08

2 盾构隧道邻接既有地下桩结构的空
间计算

2.1 计算模型的建立

(1) 最不利工况确定

根据设计施工图资料, 可确定出盾构隧道邻接既有地下桩基施工时的最不利工况, 为左线里程 CK6+716.924 处, 与立交桥桩基邻接距离为 1.1m 工况, 如图 1 所示。因此, 新建盾构隧道邻接既有地下桩基的三维弹塑性数值分析将针对这种工况进行。

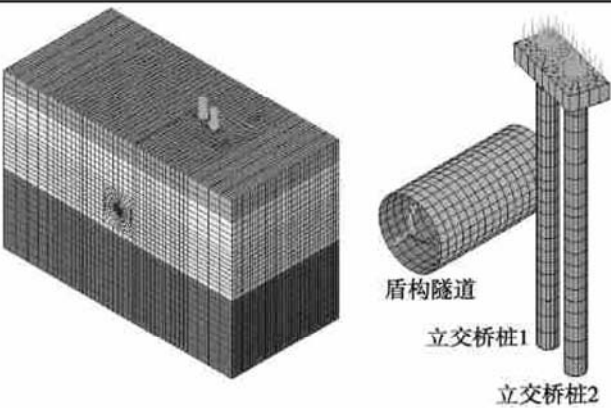


图 1 最不利工况模型

Fig. 1 Model of the worst case

(2) 模型设计

在建模中, 为保证计算准确性, 对混凝土管片结构选用等参 8 结点空间板壳单元, 而对于结构周边围岩体及立交桥桩基, 则选用等参 20 结点砖块单元进行模拟。在隧道和桩结构周边围岩体采用了细密单元, 见图 1。本次计算采用大型有限元软件 ANSYS 进行数值分析^[3]。

表 1 盾构隧道邻接既有地下桩邻接施工时计算参数

Table 1 Geotechnical parameters for 3D FEM numerical simulation

对应地层	E /MPa	ν	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	说明
地表浅层	2.13	0.44	18.0	35.6	16.0	地层号 I
地中中层	5.00	0.40	18.0	50.0	20.0	地层号 II
隧道周边	6.18	0.40	18.0	50.0	20.0	地层号 III
隧道底部土体	7.16	0.40	18.0	87.6	23.5	地层号 IV
盾构管片衬砌	34500	0.17	25.0	4241	62.7	
立交桥桩基	29000	0.20	25.0	2395	60.5	

(3) 计算参数

根据 7C 标段勘测围岩自上而下地质情况, 本文将其综合归并为 4 层材料性质岩土体, 具体为地表浅层 Q_4^{ml} 地中中层 Q_4^l 和 Q_4^{el} 隧道周边 Q^{le} 和 r_3^3 及隧道底部 r_3^3 。需要指出这 4 层材料参数确定, 是依据对其组分按厚度加权平均处理方法而获得, 结果如表 1 示。对于混凝土管片结构, 选取 C50 钢筋混凝土, 管片厚度

30 cm, 考虑到接头影响以及拟定采用的错缝拼装方式, 将管片的刚度折减系数分别确定为 0.75 和 0.85 两种情况。而对于立交桥地下桩基础, 根据现场实际确定为 C25 钢筋混凝土, 桩径 1500 mm, 所有力学参数一并列于表 1。

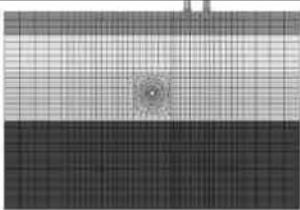
2.2 计算分析过程

为了说明地下结构桩基与盾构隧道相互邻接的影响, 需要完成以下 3 方面工作:

(1) 模拟施工过程。本文假定隧道开挖初期, 即形成“毛洞”状态时, 围岩载荷释放率为 25%, 管片施作支护后, 围岩载荷完成释放率 75%。

(2) 分别针对无桩和有桩两种条件下, 结构相互影响施工力学行为进行研究。

(3) 考虑可能采取错缝拼装方式, 选取管片刚度折减系数 $\eta=0.75$ 和 0.85 分别进行计算。模拟施工的整个计算过程如图 2 所示。



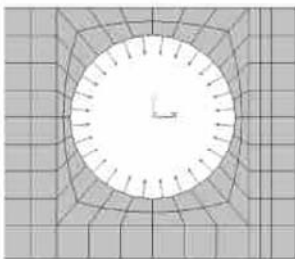
(a) 模拟形成初始自重地应力场



(b) 开挖隧道成“毛洞”, 释放25%载荷



(c) 完成管片拼装, 形成衬砌支护



(d) 释放75%载荷, 作用于管片衬砌

图 2 模拟盾构隧道施工的整个计算过程

Fig. 2 Numerical simulation process of shield tunnel construction

表 2 邻接福华路立交桥桩基($\eta=0.75, 0.85$)无桩和有桩条件下隧道最大横向内力和最大纵向内力比较

η 桩基		最大横向内力				最大纵向内力			
		垂直方向内力变化		水平方向内力变化		垂直方向内力变化		水平方向内力变化	
		最大横向弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	相应轴力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	最大横向弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	相应轴力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	最大纵向弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	相应轴力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	最大纵向弯矩 /($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	相应轴力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
0.75	无桩	- 68.925	399.39	68.815	510.81	- 14.114	78.078	14.087	103.920
	有桩	- 71.765	397.41	71.666	493.61	- 14.724	79.554	14.715	99.378
0.85	无桩	- 72.021	400.37	71.864	512.03	- 14.748	78.357	14.711	104.240
	有桩	- 74.983	398.25	74.844	494.61	- 15.375	79.785	15.361	99.626

垂直方向最大内力发生位置为底板,水平方向最大内力发生位置为邻接桩基边墙。

表 3 邻接福华路立交桥桩基(以 $\eta=0.75$ 为代表),衬砌支护前后洞周围岩及管片变形

条件		洞周围岩变形/cm				管片变形/cm			
		水平方向		垂直方向		水平方向		垂直方向	
		远离桩基	邻接桩基	拱顶	底板	远离桩基	邻接桩基	拱顶	底板
无桩	支护前	4.87	- 4.87	10.01	- 6.49	—	—	—	—
	支护后	4.57	- 4.57	10.53	- 7.10	- 0.30	0.30	- 0.42	0.61
有桩	支护前	4.78	- 4.96	10.28	- 6.72	—	—	—	—
	支护后	4.47	- 4.69	10.75	- 7.42	- 0.31	0.27	- 0.47	0.70

2.3 隧道接近福华路立交桥桩基计算结果

(1) 内力影响因素分析

从整体上看,对盾构隧道结构安全产生重大影响的是横向内力及其变化,而不是纵向内力及其变化。通过比较盾构隧道管片最大横、纵弯矩值及其相应轴力(如表 2 所列),可以更清楚看到这一点。

(2) 结构受力状况分析

分析表 2 所列结果,可以得出以下几点认识:

a) 从整体上看,有桩作用条件下,所获得最大弯矩均比无桩情况下相同位置的计算结果要高,而对应轴力则相差不多,这意味着在有桩作用条件下,结构安全性呈现出降低的趋势;

b) 从发生位置看,在有桩作用条件下,最大正负弯矩值,均出现在与桩基相互邻接一侧的管片边墙位置;

c) 提高刚度折减系数,结构内力呈现出一致性增大的趋势,不过相对来看,弯矩增加更明显一些,而轴力可近似视为不变。

因此,从加强结构重点看,应当更关注拼装管片衬砌底板及邻接桩基一侧边墙。

(3) 邻接桩基情况下的隧道变形

邻接福华路立交桥桩基条件下(以 $\eta=0.75$ 为例),衬砌支护前后洞周围岩及管片变形情况如表 3 所示,为清晰起见,与无桩条件下计算结果进行比较。

分析表 3 所列结果,可以得出以下几点认识:

a) 从整体上看,由于桩基作用,使得新建隧道沿水平方向的变形结果,左右方向不具备对称性,其中邻接桩基的一侧隧道边墙的水平变形要大于远离桩基一侧的结果;

b) 比较有桩和无桩条件结果可知,新建隧道邻接既有桩基的施工完成后,沿水平方向的变形均表现出高于无桩条件下变形情况的特征;

c) 考察支护前后洞周围岩变形情况,可以得到洞周围岩变形主要发生在管片衬砌支护之前,当完成管片衬砌支护后,洞周围岩变形沿拱顶、底板有所增加,而沿水平方向则有所减少;

d) 从管片变形情况看,整体变形较小,最大相对变形发生在垂直方向,为 1.17 cm。

表 4 邻接福华路立交桥桩基,管片衬砌支护前后桩基的最大水平侧向变形

Table 4 The maximum lateral deformation of pile foundation of the existing bridge				
η	支护前最大水平侧向变形 / cm		支护后最大水平侧向变形 / cm	
	立交桥桩 1	立交桥桩 2	立交桥桩 1	立交桥桩 2
0.75	- 2.23	- 1.49	- 2.21	1.48
0.85	- 2.23	- 1.49	- 2.21	1.48

(4) 邻接隧道施工引起的福华路立交桥桩基变形
邻接立交桥桩基最大水平侧向变形情况如表 4 所

示,从中可以得到以下认识:

a) 随开挖支护进程,福华路立交桥桩基的水平侧向变形主要发生在管片衬砌支护前,即仅释放 25% 载荷期间;

b) 在管片拼装支护完成后,尽管释放 75% 围岩载荷,但实际上桩基的水平侧向变形几乎未发生任何变化,这主要是由于管片衬砌具有远大于围岩的刚度,提供了强有利的支护;

c) 改变刚度折减系数从 0.75 到 0.85,发现桩基的水平侧向变形几乎没有任何变化,因此从隧道对邻接桩基的影响看,可以认为改变管片拼装方式,对邻接“建筑物”几乎无影响。

(5) 邻接隧道施工引起的地表沉降

显然,应选取刚度折减系数较小(选取 $\eta = 0.75$) 情况下引起的地表沉降进行分析说明。图 3 为刚度 $\eta = 0.75$ 时地表沉降大于 3 cm 结点位移矢量图。考察其覆盖范围,获得沉降槽最大宽度为 22.32 m,其中桩基一侧为 11.62 m,而另一侧为 10.70 m。以招标文件规定地表沉降小于等于 3 cm 为控制基准,则需要采取措施,控制地表沉降的宽度范围为 22.32 m。

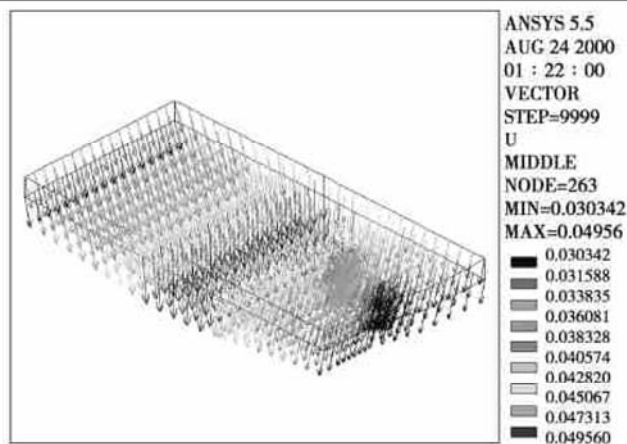


图 3 隧道邻接福华路立交桥桩基施工时,地表沉降超过 3 cm 范围及幅值

Fig. 3 Distribution of settlement over 3 cm in shield tunnel construction

3 结 论

(1) 与无桩情况相比较,邻接桩基施工将引起新建隧道自身结构,特别是与既有桩基邻接一侧边墙不利的受力状况。具体表现为有桩作用条件下,所获得最大弯矩均比无桩情况的相同位置的计算结果要高,而相应轴力则与无桩情况的相同位置计算结果相差不大,这意味着,在有桩作用条件下,结构安全性呈现出一致性降低的趋势。

(2) 从整体上看,由于桩基的作用,使得新建隧道沿水平方向左右边墙的变形结果不具备对称性。比较有桩和无桩条件的计算结果可知,邻接既有桩基的隧道施工完成后,邻接桩基一侧隧道边墙的水平变形均表现出高于无桩条件下情况的变形特征。

(3) 从隧道对桩基影响角度看,邻接施工将引起既有立交桥桩基产生偏向隧道水平方向“拉伸”变形情况。在邻接距离为 1.1 m 的桩基处,产生达到 2.2 cm 以上较大“拉伸”变形。因此,需要采取加固措施,以确保隧道自身结构以及邻接地下“建筑物”的安全。

(4) 考察不同刚度折减系数时,发现桩基水平侧向变形几乎没有变化,这表明改变盾构管片的拼装方式,在整体上对邻接地下“建筑物”几乎无影响。

(5) 以地表沉降允许值 3 cm 为控制基准,则新建隧道邻接福华路立交桥桩基施工时,需采取措施控制的宽度范围为 22.32 m。

参考文献:

- [1] 日本铁道综合技术研究所. 接近既有隧道施工对策指南 [M]. 1996.
- [2] 张志强, 等. 深圳地铁一期工程 7C 标段天虹—岗厦区间隧道施工力学研究报告 [R]. 2001.
- [3] 王国强. 实用工程数值技术及其在 ANSYS 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.