

文章编号: 1006 - 2106(2012) 10 - 0063 - 07

盾构隧道管片施工力学性能三维数值模拟研究^{*}

张 鹏^{**}

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 研究目的: 施工阶段的管片外部荷载系统和力学性能与正常使用阶段相比均表现出较大差异。大量工程经验表明, 管片在施工阶段破损的概率要远远高于正常使用阶段。本文通过建立考虑环、纵向接头不连续性的三维盾构隧道有限元模型, 针对注浆压力、千斤顶推力以及拼装方式三个施工要素进行研究, 拟为盾构施工提供合理的意见。

研究结论: 分析结果表明, 在施工阶段, 由于管片外部荷载沿隧道纵向有差异且接头存在非连续性, 管片的力学性能沿隧道纵向存在较大差异, 各环变形特征也不尽相同, 与传统均值连续模型相比亦存在较大差异, 注浆压力、千斤顶推力对施工阶段管片力学性能有较大影响, 管片在错缝、通缝拼装条件下表现的力学性能存在较大差异。综合来看, 错缝拼装结构相比通缝拼装具有更好的结构整体刚度。

关键词: 盾构隧道; 管片; 施工阶段; 数值模拟

中图分类号: U451 **文献标识码:** A

Research on Mechanical Property of Segment of Shield Tunnel During Construction with Three - dimensional Numerical Simulation

ZHANG Peng

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd , Wuhan , Hubei 430063 , China)

Abstract: Research purposes: The external load system and mechanical properties of segment during construction are big different from the normal use. A large number of engineering experiences have shown that the damaged probability of segment during construction is much higher than that during normal use. This paper researches the key elements of the grouting pressure , jacking force and assembling way during construction with the FEM three - dimensional model for the shield tunnel to provide the reference to the similar works.

Research conclusions: The analysis results show that the segment's mechanical properties along the vertical direction of the tunnel are big different , and the deformation features of each cirque are not the same and big different from that obtained by the conventional mean value continuous model due to the differences of the external load of the segment along the longitudinal direction of the tunnel and the non - continuity of the joint. The grouting pressure and jacking force have apparent effects on the mechanical properties of segment , and the mechanical properties of segment in staggered joint are quite different from the straight joint. Moreover , the staggered joint structure is better than straight joint in the overall stiffness.

Key words: shield tunnel; segment; construction stage; numerical simulation

管片是盾构隧道主要的受载体, 施工阶段的管片受到拼装形式、接头刚度、千斤顶推力、注浆压力以及

隧道纵向差异沉降等众多因素的综合影响, 因此阶段管片力学性能异常复杂, 对于如何合理评价盾构施

^{*} 收稿日期: 2012 - 03 - 31

^{**} 作者简介: 张鹏, 1987 年出生, 男, 助理工程师。

工阶段对管片性能的影响仍然是管片设计和施工中所要面临的难题之一,对于正常使用阶段的管片结构,其受力特性通常可以简化为平面应变问题进行分析;而对于施工阶段,盾构施工的时间空间性、隧道纵向荷载差异、边界约束条件的不均匀以及多向施工荷载的交叉影响,导致施工阶段管片受力成为一个完全的三维问题,大量施工经验表明,管片在施工阶段破坏的概率远远高于正常使用阶段,在盾构隧道施工过程中,管片的破坏形式主要有边角破裂、局部崩裂、螺栓孔局部压碎、管片环间错动等,出现上述破坏形式的主要原因有以下几个方面:

- (1) 管片制作及拼装过程中存在一定的误差;
- (2) 盾尾千斤顶作用力不均匀,隧道纵向出现一定的弯矩作用;
- (3) 盾构拼装完毕之后,盾壳脱离管片时,由于拼装质量、注浆不均匀等情况使得管片整体受力不均匀;
- (4) 由于施工过程中及盾构千斤顶的挤推作用,使得管片手孔处与螺栓的挤压作用加剧,管片局部易出现应力集中。

本文以北京地铁盾构隧道为工程背景,通过考虑管片环、纵向接头的非连续性,针对施工阶段的盾构管片进行精细的三维有限元模拟,重点讨论壁后注浆压力、千斤顶推力大小、管片拼装方式等施工要素对管片力学性能的影响,得出相关要素对施工阶段管片力学性能的影响规律,以期对盾构管片设计、施工有一定的指导意义。

1 理论基础

1.1 施工阶段荷载系统

由于施工阶段的管片与盾尾距离在不断发生着变化,故而管片上的外部荷载以及周围土体对隧道的约束作用也在随着施工的进程不断发生着变化,盾构隧道在施工阶段的外部荷载,主要有注浆压力、千斤顶推力以及外部水土荷载三个部分。

1.1.1 注浆压力

盾构隧道区别于其他隧道的一个重要特征就在于其施工过程中采用同步壁后注浆工艺对隧道开挖间隙进行壁后注浆,浆液在渗入土体过程中不断被地下水稀释,并同时伴随着注浆压力的释放,最终与外部水土压力形成一个相对平衡的状态,因此壁后注浆的影响具有明显的时间效应,注浆压力的大小沿着盾构隧道的纵向也存在一定的差异。

1.1.2 千斤顶推力

千斤顶推力是施工阶段隧道管片最大纵向作用外

力,直接作用在拼装好的管片上,管片在千斤顶推力作用下极易产生应力集中而出现边角剥落、局部破碎等破坏现象,很多情况下千斤顶推力是施工阶段管片破坏的直接或间接原因。当千斤顶的作用合力不与隧道的截面形心重合时,管片会产生较大的纵向弯矩,引起环间接头的张开及管片之间较大的错动,对于管片防水亦非常不利。

1.1.3 管片周围水土压力

当盾尾钢壳脱离管片并伴随着壁后注浆的进行及浆体的逐渐硬化,周围地层的水土荷载逐渐作用到管片上,此阶段水土荷载系统如图1所示,本文计算采用如表1所示的地层条件。其中 P_1 为拱顶处的竖向水土压力(含地面超载), P_2 为拱底处的竖向水土反力, P_3 为拱顶水平向的水土压力, P_4 为管片底部水平向由于埋深增加而产生的附加水土压力, P_g 为管片自重, P_5 为管片变形产生的侧向土体抗力, $P_5 = \Delta K$,其中 K 为管片周围土体的径向地基抗力系数, Δ 为管片沿径向的变形量。

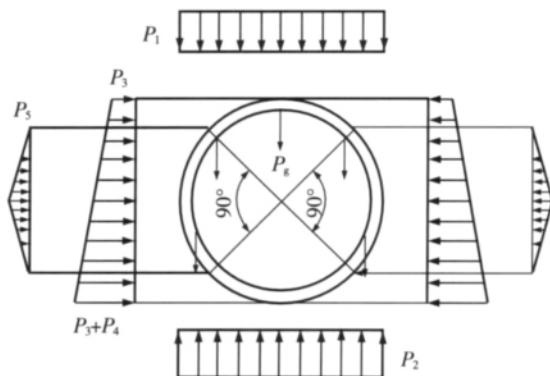


图1 盾构隧道管片外部荷载系统示意图

表1 计算断面地质力学参数表

土层代号 及名称	地层 厚度/m	重度 γ /(kN/m^3)	基床系数 K (MPa/m)		静止 侧压力 系数 K_0
			垂直	水平	
①素填土	2.3	19.3	10.0	—	—
③1黏土	3.0	19.9	20.0	28.0	0.48
③2粉质黏土	2.1	19.1	26.0	20.0	0.54
④1粉土	2.6	19.3	28.0	28.0	0.42
④2粉砂	10.5	19.4	30.0	30.0	0.50

1.2 施工阶段力学模型

根据上述盾构隧道施工阶段的受力特点,建立三维力学模型如下:

- (1) 远离盾尾处的管片结构,假设浆液凝固已经完成,注浆压力呈线性渐变至远离盾尾区的管片;
- (2) 盾尾区管片受到千斤顶推力的单向作用,计

算模型将千斤顶集中力等效为作用在管片端部的均布力;

(3) 通过法、纵向地基弹簧考虑隧道与土体之间的相互作用。该力学模型如图 2 所示。

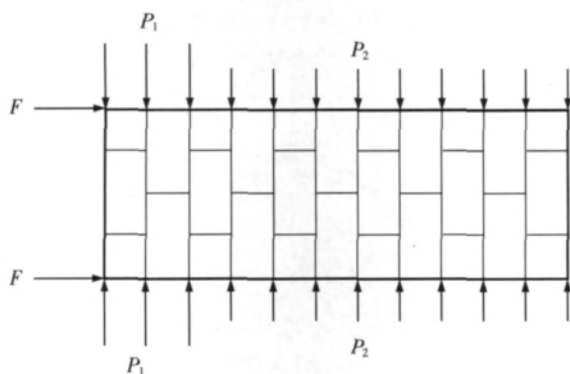


图 2 盾构隧道施工阶段力学示意图

2 盾构隧道有限元模型

2.1 模型假设

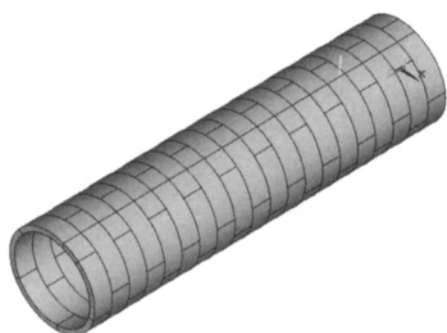
根据上述盾构隧道力学性能的理论分析,本文盾构隧道有限元模型做以下假设:

(1) 为了充分考虑盾构隧道施工过程的三维效应,正确地研究盾构施工阶段对管片力学性能的影响,选用 20 环管片(共 24 m)的纵向计算长度以满足模拟精度;

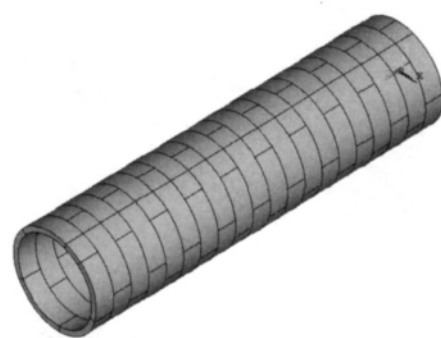
(2) 忽略管片环纵接缝处的构造处理,即管片接头端面处理为平面,并且不考虑螺栓与螺栓孔之间的摩擦作用,以直螺栓代替弯螺栓;

(3) 将千斤顶推力等效为均布的面荷载加载至盾尾管片端面。

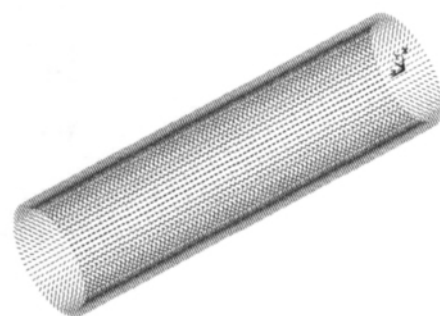
有限元模型采用 Solid65 单元模拟钢筋混凝土管片,采用 Link10 单元模拟环向螺栓与纵向螺栓,采用 Combination14 弹簧单元模拟地层与管片间的法向及切向地基弹簧,管片间选择 Target136 和 Contact173 单元实现管片环向、纵向面-面接触,有限元模型如图 3 所示。



(a) 通缝拼装整体模型



(b) 错缝拼装整体模型



(c) 法、切向地基弹簧

图 3 盾构隧道管片有限元模型

2.2 计算参数

盾构注浆施工阶段的螺栓初始预紧力通过对螺栓单元施加初始应变获得模型计算参数如表 2 所示。

表 2 盾构管片施工阶段计算参数

螺栓直径 D/mm	螺栓初始预 应变	壁后注浆 压力/MPa	盾构千斤顶 推力/kN
40	$0.2\text{E}-03$	0.2	15 000

3 施工要素的影响分析

3.1 注浆压力的影响

盾构隧道同步注浆是按规定的注浆压力和注浆量在盾尾管片支护完毕时同步充填至开挖空隙,对于城市地铁盾构隧道,围岩自身稳定性往往不高,壁后注浆质量的好坏就直接影响着围岩的稳定,在隧道开挖完成到壁后注浆开始这段间隙,隧道开挖形成的临空面处于无支护状态,而大量经验表明,许多开挖引起的地面安全事故发生在此阶段,如果壁后注浆不够及时,围岩变形发展无法得到有效的限制,隧道本身及地表环境的安全性将受到更大的影响。本节对注浆压力的影响规律进行讨论。

图 4 给出了注浆压力为 0.2 MPa 时管片的位移计算结果,其中管片的最大水平位移为 2.029 mm,出现在拱腰处,竖向最大位移为 5.442 mm,出现在拱顶处,

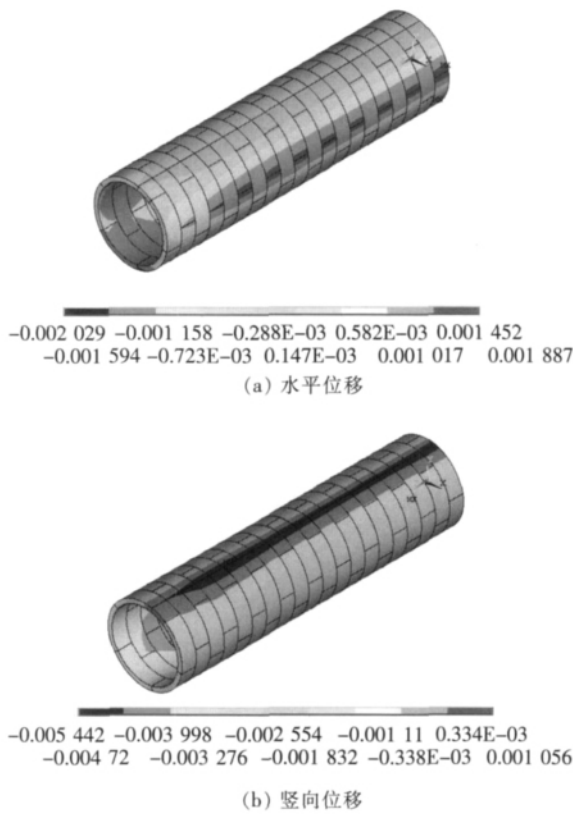


图 4 隧道位移云图(单位: m)

管片在纵向上也呈现了不同的变形特点。对于正常区管片(1~17环),由于荷载分布较为均匀,管片环以压缩受力为主,管片整体呈现椭圆状变形规律,管片的最大竖向位移与最大水平位移均发生在该区域,对于盾尾区管片(18~20环),其水平及竖向位移最大值要小于正常区域的管片变形量,造成上述现象的原因是由于盾尾的千斤顶作用使盾尾区管片混凝土处于三向受压的力学状态,其强度在一定程度上较正常区域的管片有所提高,故其横向变形量相对减小,从管片XY平面变形图(图5)中可以看出,相较连续介质模型,考虑了接头的模型,其变形受接头的影响较大,在变形过程中,接头处存在明显的挤压和张开,不连续现象较为明显,从整体上而言,隧道前15环管片的变形规律较为相似,而随着与盾尾的距离逐渐缩小,管片的变形特征逐渐发生改变,5组注浆工况下盾尾管片的计算结果如表3所示。

从计算结果分析可知,在错缝拼装及施工荷载共同作用下,管片呈现了较为复杂的力学性能,管片的力学性能对注浆压力表现出较高的敏感性,表3给出了盾尾区3环管片的最大内力值以及最大结构位移量,分析计算结果可知,结构的内力以及位移随着注浆压力的增大而出现了不同程度的增大,在注浆压力为0.2~0.3 MPa时,管片的内力及结构位移量的增大幅

度小于注浆压力大的增大幅度,当注浆压力超过0.3 MPa时,结构的内力及位移量均出现了较大幅度的增长,说明在注浆压力较小时,结构性能对其敏感程度较小,随着注浆压力的增大,结构性能对其响应增强,结构内力以及位移均表现了较大的增长趋势,结构内力的分布形式与传统的连续介质模型存在较大的分布差异。

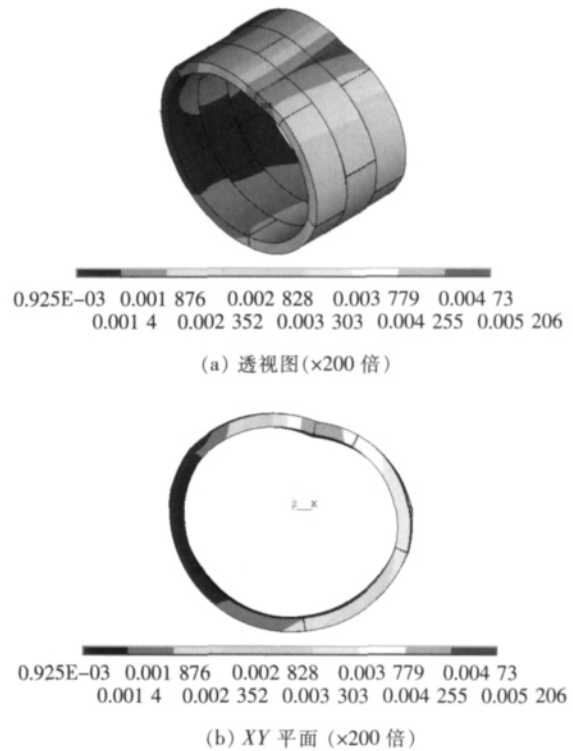


图 5 盾尾管片位移云图(单位: m)

表 3 不同注浆压力工况盾尾区管片(18~20环)计算结果

注浆压力 /MPa	计算工况: 千斤顶推力 15 000 kN, 法向及切向地基抗力系数: 30 MPa/m, 螺栓半径: 20 mm, 初始预紧力: 50 kN				
	管片最大正弯矩 / kN·m	管片最大负弯矩 / kN·m	管片最大轴力 / kN	管片最大水平位移 / mm	管片最大竖向位移 / mm
0.2	82.32	-75.46	1 293.6	1.823	5.184
0.25	92.61	-76.685	1 314.6	1.856	5.292
0.3	83.055	-84.525	1 449	1.872	5.344
0.35	94.815	-94.08	1 612.8	1.919	5.445
0.4	122.145	-116.465	1 739.4	1.924	5.397

3.2 千斤顶推力的影响

千斤顶推力的差异性会造成管片端部混凝土的不均匀压缩变形,形成较大的纵向不平衡力矩,不均匀顶力是管片纵向错动及管片局部崩裂的主要原因,本节假设千斤顶推力以面荷载形式均匀作用在盾尾管片端面上,若此时千斤顶总推力为 M ,按照对应圆心角分配

荷载, 封顶 K 块承担 $M/16$, 邻接块 B1、B2 以及标准块 A1 ~ A3 均承担 $3M/16$, 本节假设管片各部分千斤顶推力之间存在一定的推力差, 计算工况如表 4 所示。

表 4 管片千斤顶推力不均匀计算工况表

工况编号	封顶 K 块 推力/kN	邻接 B1、 B2 块推力 /kN	标准 A1、 A3 块推力 /kN	标准 A2 块 推力/kN
GK-1	1 000	3 000	3 000	8 000
GK-2	1 000	3 000	3 000	10 000
GK-3	1 000	3 000	8 000	3 000
GK-4	1 000	8 000	3 000	3 000

四组计算工况中, GK-1 和 GK-2 主要针对拱底标准 A2 块推力不均匀作用, 而 GK-3 和 GK-4 分别针对标准 A1、A3 块以及邻接 B1、B2 块推力不均匀作用, 千斤顶推力不均匀工况管片纵向位移计算结果如图 6 所示。

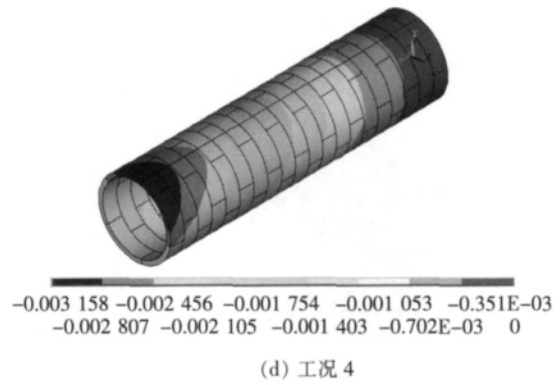


图 6 各工况管片纵向位移云图(单位: m)

从以上计算结果可以发现, 当千斤顶推力不均地作用在盾尾管片端面上时, 盾尾区管片之间会发生较明显的纵向错动, 总体来说, 错动现象在盾尾区管片较为明显, 计算工况条件下盾尾管片纵向错动量在 1 ~ 3 mm 之间, 管片的环间错动量随着管片距离盾尾注浆区的距离增大逐渐减小, 在距离盾尾 10 ~ 15 环时纵缝错动基本消失, 与正常施工条件相比, 盾尾千斤顶推力不均匀使得盾尾区管片纵向切应力明显增大, 管片在不均匀推力作用下发生不均匀变形极易使得其自身在施工过程中出现局部顶坏、压碎、破裂等现象, 故而在施工过程中, 应该尽量避免千斤顶推力不均匀现象的出现。

3.3 管片拼装方式的影响

在地铁盾构隧道工程中, 管片存在通缝和错缝两种拼装方式, 通缝拼装具有拼装简易、施工效率高的优势, 在国内早期软土地区地铁工程如上海地铁中较多地采用了这种管片拼装方式, 而随着盾构工法在国内大量推行, 错缝拼装方式的结构优越性逐渐被认可, 这使得近年来国内大多数盾构隧道工程均倾向于采用这种方式拼装管片。然而, 国内的地层条件较为复杂, 并不完全如日本的软塑地质也不完全如欧洲的硬岩地质, 国内工程界对管片拼装型式并没有取得一致的解决方案。本节主要以非连续性接头的三维数值模型为出发点, 结合地层条件因素, 对两种拼装方式下管片本身力学性能上的差异进行探讨, 图 7、图 8 是两种拼装类型管片的计算结果。

从上述计算结果可以看出, 在同样的径向及切向地基抗力系数条件下, 错缝拼装时隧道结构最大水平位移为 1.823 mm, 最大竖向位移为 5.184 mm, 通缝拼装时结构最大水平位移为 3.72 mm, 最大竖向位移为 10.189 mm, 通缝工况最大水平位移与竖向位移分别是通缝工况的 2.04 倍和 1.97 倍, 上述差异说明通缝和错缝拼装在同样的地质条件下管片的力学性能存在一定的差异, 计算表明错缝情况的结构刚度相对而言

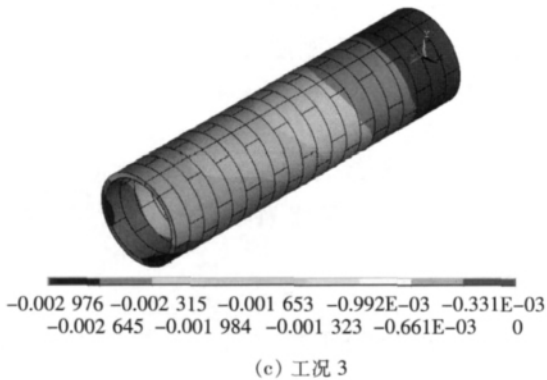
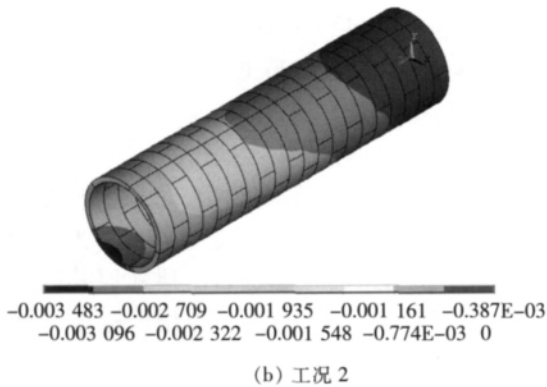
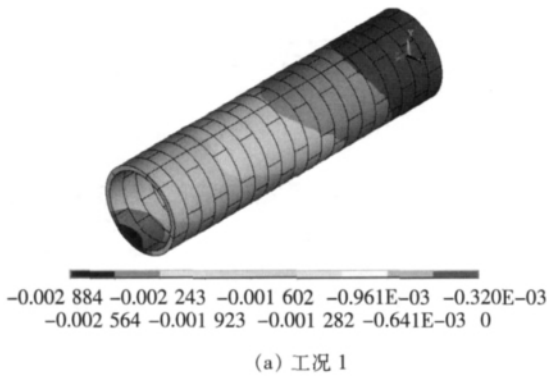




图 7 管片错缝拼装位移云图(单位: m)

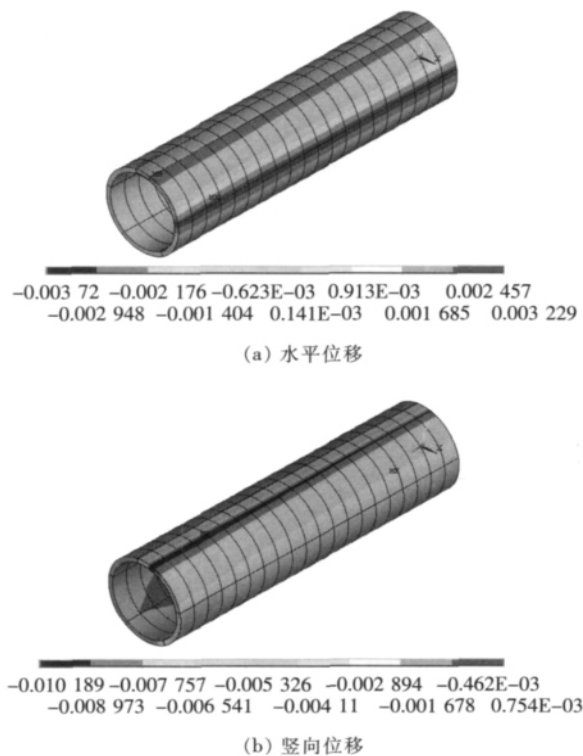


图 8 管片通缝拼装位移云图(单位: m)

要比通缝情况优越一些,在此种地层条件下错缝拼装方式在结构受力性能方面要明显优于通缝拼装方式,

然而以上的计算结果只是单纯量上的差异,并不能说明两者之间本质的差异,本节中隧道的基本计算模型中的法向及切向地基抗力系数采用计算区间的地质报告按照分层土的加权平均值进行取用,加权平均值为 30 MPa/m,地基抗力为隧道变形引起的周围地层对隧道的被动作用力,它与周围土层的地质状况息息相关,根据以往盾构隧道设计及施工经验,对于类似上海等地区的软土地区,地层能够提供的抗力较为有限,而对于类似广州地区的弱风化岩层地质条件,地层提供反力的能力较强,针对上述情况,以下将结合地层条件讨论拼装方式对管片的力学性能的影响,基于不同地层条件的通缝及错缝拼装方式计算结果如图 9 所示。

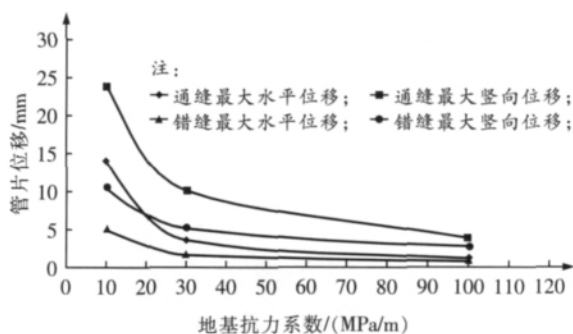


图 9 两种拼装形式管片最大位移随地层条件变化图

从以上计算结果分析可知,无论错缝还是通缝拼装,管片力学性能对地层条件的敏感程度随着地基抗力系数的增大而逐渐减小,在地基抗力系数较高的土层中,通缝拼装与错缝拼装管片的力学性能差异很小,而这种差异随着地基抗力系数的减小逐渐增大,当地基抗力系数为 10 MPa/m 和 30 MPa/m 时,通缝拼装的管片最大水平和竖向位移基本上都是错缝拼装工况的 2~2.5 倍,而当地基抗力系数增大至 100 MPa/m 时,错缝与通缝的最大位移基本接近,综合分析可知地基抗力系数与结构刚度本身相互影响造成了上述计算结果,对于地基抗力系数较小的软土质地层其周围土层对隧道的约束能力较小,隧道自身结构刚度对其受力性能的影响较大,而在地基抗力系数较大的地层中由于地层的束缚能力有所提升,使得管片之间错动的空间和能力降低,其自身刚度对力学性能的影响也相应降低,故而在地基抗力系数较高的情况下,两种拼装方式的计算结果差异程度有所下降,综合来看,错缝拼装结构相比通缝拼装具有更好的结构整体刚度,在结构变形性能上较通缝拼装更为优越。

4 结论

通过三维盾构隧道数值模拟研究,根据施工阶段管片力学性能分析,得到以下结论和建议。

(1) 在施工阶段, 由于管片外部荷载沿隧道纵向有差异且接头存在非连续性, 管片的力学性能沿隧道纵向存在较大差异, 各环变形特征也不尽相同, 与传统均值连续模型相比亦存在较大差异。

(2) 注浆压力、千斤顶推力对管片位移、内力均有较大影响, 千斤顶推力的不均匀作用易使得管片环间出现错台, 因此, 在施工中, 应根据不同的地层条件, 选择合理的注浆压力和注浆量, 使得盾构开挖形成的空隙及时填满, 在满足盾构推进的前提下, 尽量减小千斤顶推力的不均匀对隧道产生的附加荷载作用。

(3) 管片在错缝、通缝拼装条件下表现的力学性能存在较大差异, 综合来看, 错缝拼装结构相比通缝拼装具有更好的结构整体刚度, 在结构变形性能上较通缝拼装更为优越。

参考文献:

- [1] 朱伟, 陈仁俊. 盾构隧道技术问题和施工管理[J]. 岩土工程界, 2001(12): 14-16.
Zhu Wei, Chen Renjun. Shield Tunneling Technology and Construction Management [J]. Geotechnical Engineering, 2001(12): 14-16.
- [2] 朱伟, 译. 日本土木学会隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Zhu Wei, Translation. Japan Civil Society Tunnel Standards (shield article) and Commentary [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [3] 王树理. 地下建筑结构设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
Wang Shuli. The Underground Structure Design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [4] 胡如军, 朱伟, 谈小龙. 盾构隧道管片的设计计算方法[J]. 河海大学学报, 2001(12): 82-85.
Hu Rujun, Zhu Wei, Tan Xiaolong. The Design of Shield Tunnel Segment Lining Calculation Method [J]. Journal of Hehai University, 2001(12): 82-85.
- [5] GB 50157—2003, 地铁设计规范[S].
GB 50157—2003, Code for Design of Metro[S].
- [6] 郭玉海, 陈丹, 袁大军. 北京地铁盾构隧道管片设计合理性探讨[J]. 市政技术, 2006(4): 244-247.
Guo Yuhai, Chen Dan, Yun Dajun. Beijing Subway Shield Tunnel Segments Rationality Discusses Design [J]. Municipal Technology, 2006(4): 244-247.
- [7] 彭柳松. 关于城市地铁盾构管片结构设计的思考[J]. 隧道建设, 2005(1): 23-26.
Peng Liusong. Thinking About the Design of Urban Subway Shield Segment [J]. Tunnel Construction, 2005(1): 23-26.
- [8] Yukinori Koyama. Present Status and Technology of Shield Tunneling Method in Japan [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003(18): 145-149.
- [9] 陈俊生, 莫海鸿. 盾构隧道管片施工阶段力学行为的三维有限元分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2006(2): 3482-3488.
Chen Junsheng, Mo Haihong. Three - Dimensional Finite Element Analysis of Mechanical Behaviors of Shield Tunnel Segment During Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(2): 3482-3488.
- [10] 张志强, 何川, 余才高. 南京地铁盾构掘进施工的三维有限元仿真分析[J]. 铁道学报, 2005(1): 84-89.
Zhang Zhiqiang, He Chuan, She Caigao. Three Dimensional Finite Element Modeling of Excavation and Advancement Processes of Shield Tunnel Construction in Nanjing Metro [J]. Journal of the China Railway Society, 2005(1): 84-89.
- [11] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高, 等. 盾构法隧道衬砌施工阶段受力特性的三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2005(6): 990-994.
Zhang Haibo, Yin Zongze, Zhu Junguo, etc. Three Dimensional FEM simulation of Shield - driven Tunnel Lining During Construction Stage [J]. Rock and Mechanics, 2005(6): 990-994.
- [12] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析[J]. 岩土力学, 2008(3): 619-623.
Song Kezhi, Yuan Dajun, Wang Mengshu. Segmental Mechanical Analysis of Shield Tunnel During Construction Stage [J]. Rock and Mechanics, 2008(3): 619-623.
- [13] 石立成, 杜守继, 张强. 盾构通缝拼装隧道纵向错台的数值模拟分析[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2007(3): 37-40.
Shi Licheng, Du Shouji, Zhang Qiang. Numerical Simulation Analysis on Longitudinal Dislocation for Shield Tunnel with Straight Joint [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science), 2007(3): 37-40.
- [14] 孙文昊, 焦齐柱, 兰宇. 盾构管片接头抗弯刚度影响因素研究[J]. 铁道工程学报, 2008(3): 66-71.
Sun Wenhao, Jiao Qizhu, Lan Yu. Research on the Factors Influencing Flexural Rigidity of Duct Piece Joint of Shield Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(3): 66-71.

(编辑 梅志山)