

基于精细化建模的叠层盾构施工扰动数值分析

程子聪¹, 沈蓉¹, 王新新¹, 孙廉威^{1,2}

(1. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 结合上海软土地区某越江叠层盾构隧道施工项目, 通过精细化建模和数值分析方法针对既有公路越江盾构隧道管片及螺栓在下叠地铁区间盾构隧道掘进下的物理力学响应机制展开了深入的研究。研究结果表明: 在下叠穿越中, 既有盾构隧道管片整体呈现为顶部和底部外侧受拉, 两侧腰部内侧受拉, 且最大拉应力出现隧道底部外侧, 对应于管片最大拉应力出现的位置, 螺栓最大拉应力也出现在既有盾构隧道结构的底部; 随着下叠盾构穿越施工中土体损失率的不断增加, 既有盾构隧道管片最大拉应力和螺栓最大拉应力也逐渐增大, 为保证施工安全, 宜将土体损失率控制在 0.5% 之内。

关键词: 精细化模拟, 叠层盾构, 施工扰动

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)02-0082-06

作者简介: 程子聪(1984-), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道工程、基坑工程的研究工作。E-mail: chengzicong@scgtc.com.cn。

Numerical analysis on construction disturbance of overlaying shield based on refined modeling

CHENG Zi-cong¹, SHEN Rong¹, WANG Xin-xin¹, SUN Lian-wei^{1,2}

(1. Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Combining a construction project of river-crossing laminated shield tunnel in soft soil area of Shanghai, the physical and mechanical response mechanism of segments and bolts of the existing river-crossing shield tunnel under the excavation of shield tunnel was analyzed by means of refined modeling and numerical analysis. The results show that segments of existing shield tunnel were tensioned at the top and bottom as well as the waist on both sides in the process of undercrossing, and the maximum tensile stress occurred at the outside of the tunnel bottom. Corresponding to the location where the maximum tensile stress occurred, the maximum bolt tensile stress also occurred at the bottom of the existing shield tunnel. With the increasing of soil loss rate during the construction of undercrossing shield tunnel, the maximum tensile stress of the segments and bolts of existing shield tunnel also increase gradually. In order to ensure the safety of construction, the soil loss rate should be controlled within 0.5%.

Key words: fine simulation; overlaying shield; construction disturbance

0 引言

随着城市地下空间的发展,“网络化、立体化、集约化、深层化、综合化”已成为城市地下空间开发的必然趋势。然而,随着城市地铁网络、地下快速路网等设施的建设和完善,中心城区浅层地下空间开发已基本趋于饱和,导致城市空间向地下延伸拓展不可避免面临着紧邻既有地下设施近接施工扰动控制问题。以往对于相邻盾构间“节点型”穿/跨越式的交叉掘进积累了大量的工程经验,而对于隧道叠层布置阶次推进鲜有涉及。尤其对于上海等土地资源匮乏的大都市,城市地下空间建设必将持

续拓展,地下设施长距离叠层布置势必将难以避免。

盾构穿越施工对既有盾构隧道结构的影响是传统的研究课题,陈亮^[1]、朱蕾^[2]、张治国^[3]、何川^[4]、Ng^[5]、徐前卫^[6]、Liao^[7]等学者在此领域展开了大量的研究,但是大多数研究主要集中在盾构下穿、上穿或是平行这三种工况。由于近年来许多大型市政公路隧道也逐步采用大直径盾构进行施工,

基金项目: 上海建工集团股份有限公司重点科研项目(16YJKF-07)

收稿日期: 2019-09-26

*通讯作者: 孙廉威(sunlw@scgtc.com.cn)

因此叠层盾构施工的工况也越来越多的出现在工程实际当中。目前, 国内外有关软土地层多层叠加隧道施工领域的研究成果较少, 多层叠加隧道施工扰动机理、既有盾构隧道在叠层盾构隧道施工下的响应机制尚待揭示。为此, 本文结合实际工程, 通过精细化数值模拟方法, 针对叠层盾构穿越施工对既有盾构隧道结构的影响展开研究和分析, 以期为软土地区逐渐增多的叠层隧道建设提供有益的借鉴和指导。

1 工程概况

1.1 位置关系

地铁区间隧道采用两台盾构机分别从南端头井依次始发, 沿上、下行线推进, 区间隧道单线长 1258 m。公路越江隧道江中段采用两台盾构机分别从江东工作井始发始发, 向江西工作井推进, 区间隧道单线长约 781 m, 如图 1 所示。

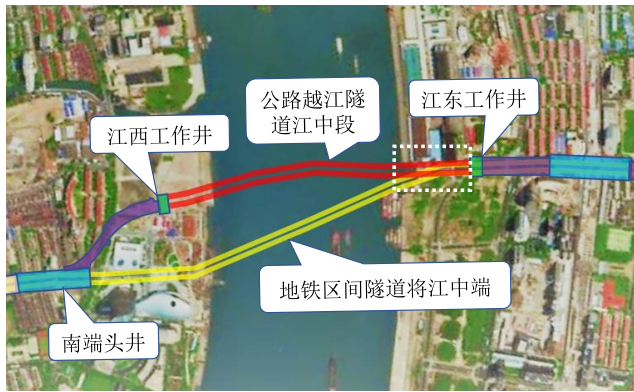


图 1 位置关系平面图

Figure 1 Position relationship plan

其中在江东工作井附近, 公路越江隧道将上穿地铁区间隧道, 最长叠交长度约为 124.8 m。图 2 给出叠交段结构典型断面。

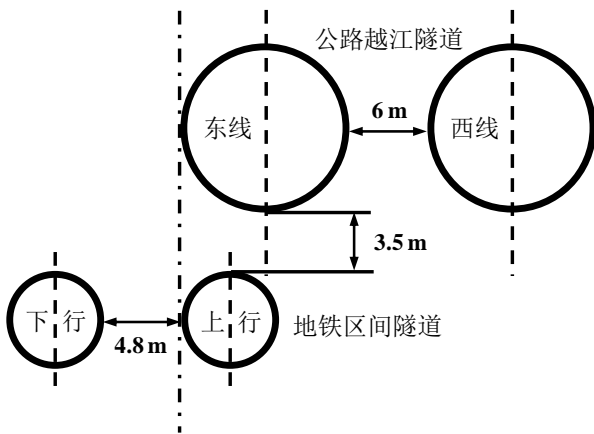


图 2 结构典型断面图

Figure 2 Typical section of structure

1.2 隧道结构概况

地铁区间隧道内径为 5.9 m, 外径为 6.6 m, 管片厚为 0.35 m, 环宽 1.2 m。每环由一块关键块, 两块邻近块和三块标准块组成, 均采用 C50 高强高精度钢筋混凝土预制管片。

过江公路隧道管片内径为 10.4 m, 外径为 11.36 m, 管片厚度为 0.48 m, 环宽 1.5 m。每环由 1 块封顶块 (F), 2 块邻近块 (L) 和 5 块标准块 (B) 块组成, 均采用大小一致的 C50 高强高精度钢筋混凝土预制管片。

1.3 工程地质条件

根据工程地质勘查报告, 拟建公路越江隧道除江中段北侧局部有古河道分布外, 其余大部分地段位于正常地层沉积区。主要由饱和粘性土、粉性土及砂土组成。地铁区间隧道穿越公路越江隧道江中段主要涉及土层分别为: 地铁区间隧道: ⑦₁₋₁ 草黄色粘质粉土夹粉质黏土、⑦₁₋₂ 草黄色砂质粉土; 公路越江隧道: ④ 灰色淤泥质黏土、⑤₁₋₁ 灰色黏土、⑤₁₋₂ 灰色粉质黏土、⑥ 暗绿~草黄色黏土。

2 精细化模型

2.1 模型的建立

为了能够精细的反映出公路越江隧道管片以及螺栓在地铁区间隧道开挖下的物理力学响应, 模型采用三维方式进行建模, 如图 3 所示。模型在长度 (x) 上取为 100 m, 在高度 (z) 上取为 50 m, 在沿隧道纵向方向 (y 方向) 上取为 4 环公路越江隧道管片宽度 (每环管片宽 1.5 m), 即 6 m。其中公路越江隧道采用精细化建模, 地铁区间隧道开挖采用施加位移边界条件进行模拟, 模型共划分 18120 个网格, 全部采用实体单元进行模拟。

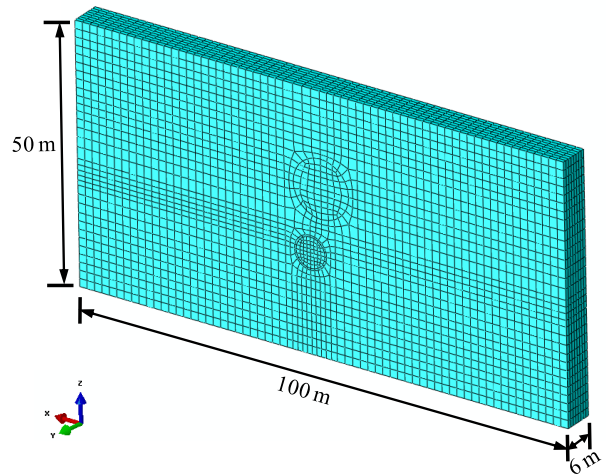


图 3 有限元模型

Figure 3 Finite element model

公路越江隧道精细化建模中，每环考虑管片、环向螺栓以及拼接，其中管片与管片之间采用3根6.8级M36环向螺栓进行连接，每环共24根，螺栓在管片间的连接作用通过将螺栓嵌入到两个相邻的管片来进行模拟，如图4(a)所示。管片与管片间设置接触面，如图4(b)所示，接触面间的相互作用关系为面与面之间能够传递压力和剪力，但不能传递拉力，当面与面之间压力为0时，两个面分开，即接触面在法向设置为硬接触，在切向设置为库伦-摩擦接触，摩擦系数根据郭瑞等^[10]研究成果取为0.5。管片、螺栓均采用实体单元进行模拟。

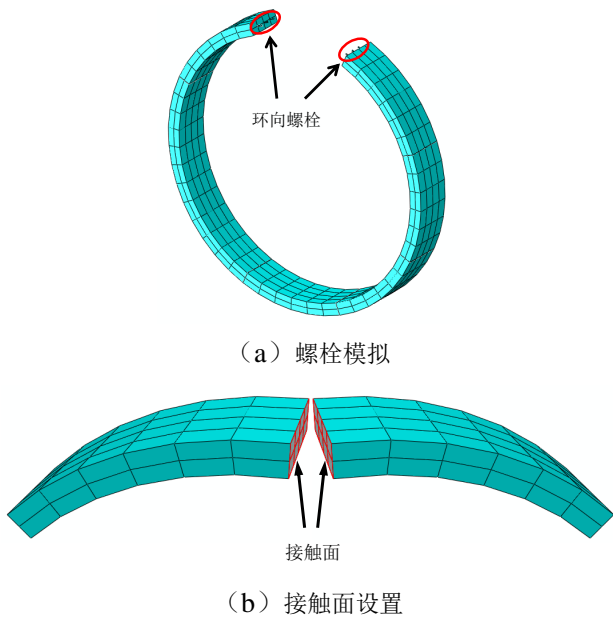


图4 精细化模拟

Figure 4 Refined simulation

2.2 材料参数的选取

在本次模型计算中，土体本构采用修正剑桥模型，修正剑桥模型从理论上和试验上都能较好地阐明了土体的弹塑性变形特性，是应用最为广泛的软土本构模型之一。修正剑桥模型需要4个模型参数，分别为正常固结线的斜率 λ ，回弹线的斜率 κ 、 $p'-q'$ 面上线的斜率 M 和泊松比 ν ，其参数取值详见表1。

表1 土体参数取值

Table 1 Soil parameters

土层	密度 (kg/m ³)	摩擦角 /°	λ	κ
④	1720	14.2	0.137	0.009
⑤ ₁₋₁	1820	11	0.115	0.005
⑤ ₁₋₂	1820	19.7	0.101	0.005
⑦ ₁₋₁	1910	31.2	0.068	0.003

螺栓、管片均采用弹性本构，其物理力学参数详见表2。

表2 螺栓、管片参数取值

Table 2 Bolt and segment parameters

计算参数	参数取值
管片密度	2450 kg/m ³
管片弹性模量	34.5 GPa
管片泊松比	0.167
螺栓密度	7850 kg/m ³
螺栓弹性模量	206 GPa
螺栓泊松比	0.3
螺栓抗拉强度	600 MPa
螺栓抗剪强度	420 MPa

2.3 边界条件设置

整体模型在底部边界施加 z 方向约束，在左右边界施加 x 方向约束，在前后边界施加 y 方向约束。对于隧道开挖，先开挖部分按照土体生死单元来进行隧道开挖模拟，后开挖部分则采用位移边界条件作为位移荷载施加在盾构隧道上来模拟隧道开挖。

Park^[8]在2004年简化出了隧道周边四种径向位移边界条件，如图5所示。四种位移边界条件分别为（其中 u_r 为隧道周边径向位移， u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 的含义如图5所示， r 和 θ' 的含义如图6所示）：

- (a) BC-1: $u_r(r=r_0) = -u_1$
- (b) BC-2: $u_r(r=r_0) = -u_2(1 + \sin\theta')$
- (c) BC-3: $u_r(r=r_0) = -u_3(1 + \sin\theta' - \cos^2\theta' / 2)$
- (d) BC-4: $u_r(r=r_0) = -u_4(5 + 3\sin\theta' - 3\cos^2\theta') / 4$

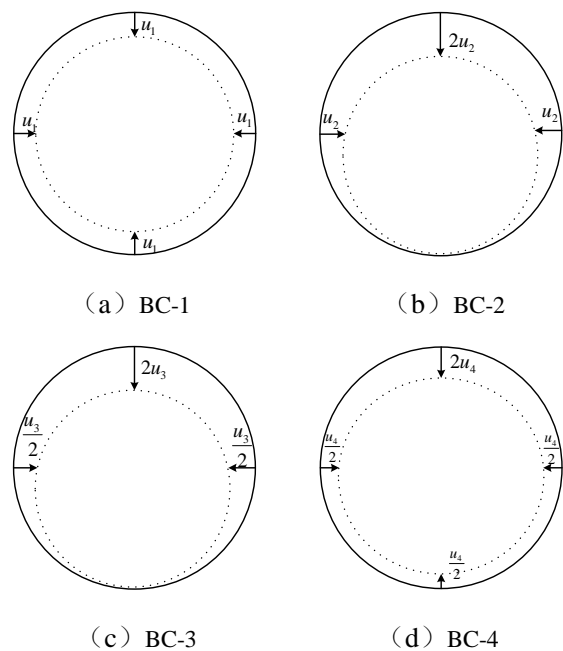


图5 径向位移边界条件

Figure 5 Radial displacement boundary conditions

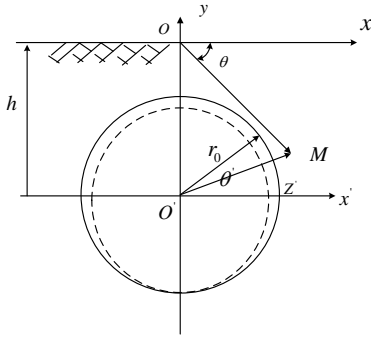


图6 坐标系统图

Figure 6 Coordinate system

王立忠等^[9]曾采用复变函数方法分析了四种不同位移边界条件下隧道施工引起的地基变形, 通过与现场实测数据的对比, 认为 BC-3 最为接近工程实际。因此本文计算将采用 BC-3 位移边界条件作为位移荷载施加在盾构隧道上来模拟开挖。

2.4 计算工况

为了模拟在 BC-3 位移边界条件下, 盾构开挖不同土体损失率对既有叠层盾构隧道的影响, 设置了如下计算工况, 详见表 3。

表3 工况设置表

Table 3 Working condition setting

工况	边界条件	土体损失率
1	BC-3	0.1%
2		0.5%
3		1.0%
4		2.0%

在本计算中分为先公路越江隧道开挖、后地铁区间隧道开挖, 其中后开挖部分通过采用施加 BC-3 位移边界条件来模拟隧道的开挖, 地铁区间隧道开挖位移边界条件见表 4。

表4 不同工况下的径向位移边界条件

Table 4 Radial displacement boundary conditions under different working conditions

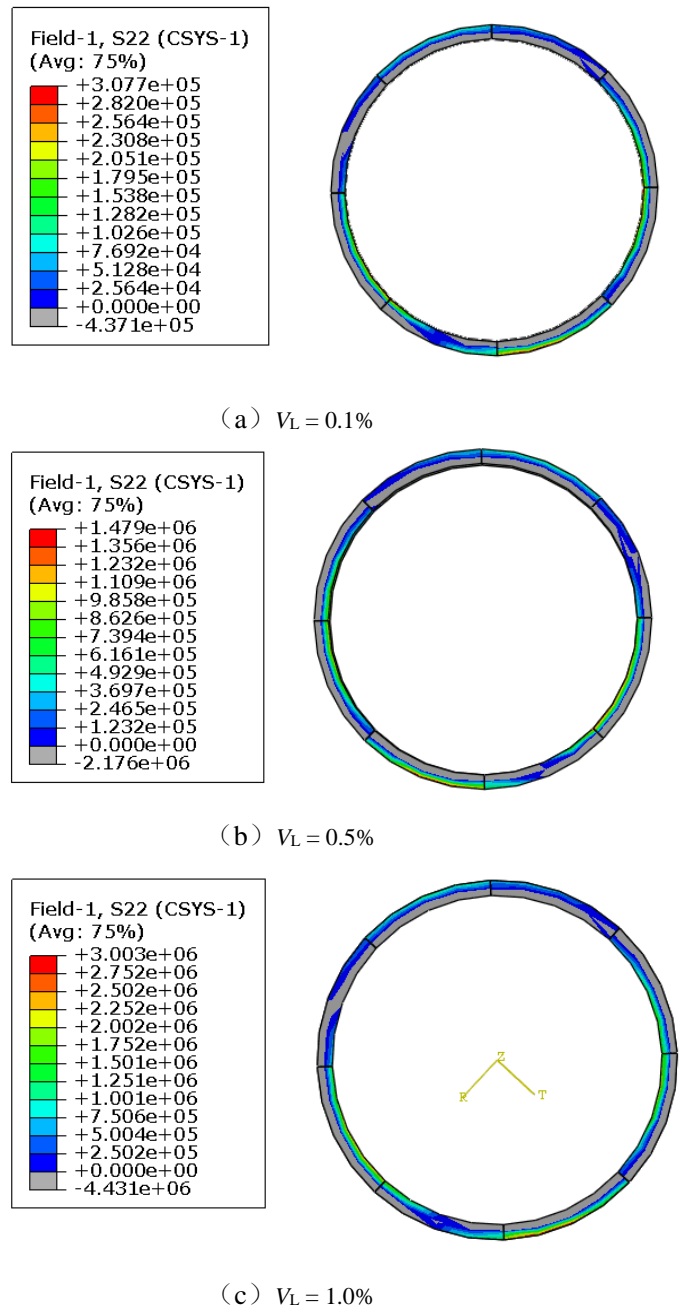
工况	边界条件	表达式/m
1	BC-3	$u_r(r=3.3)=-0.0022(1+\sin\theta'-\cos^2\theta'/2)$
2		$u_r(r=3.3)=-0.011(1+\sin\theta'-\cos^2\theta'/2)$
3		$u_r(r=3.3)=-0.022(1+\sin\theta'-\cos^2\theta'/2)$
4		$u_r(r=3.3)=-0.044(1+\sin\theta'-\cos^2\theta'/2)$

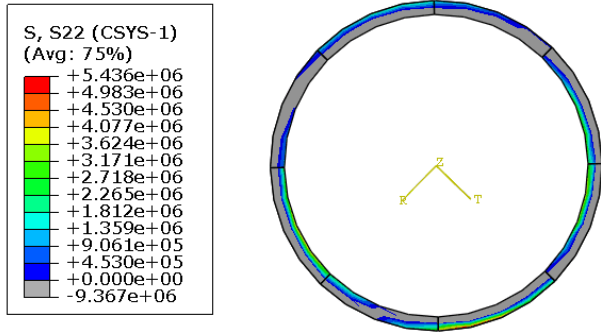
3 计算结果分析

3.1 管片受力分析

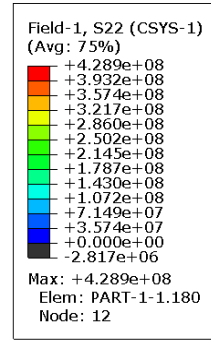
图7给出了地铁区间隧道开挖中不同土体损失率下, 公路越江隧道管片拉应力云图。从图中可以看出管片整体为顶部和底部外侧受拉, 两侧腰部内

侧受拉, 最大拉应力出现隧道底部外侧。随着土体损失率的不断增加, 管片所承受的拉应力也在逐渐增加, 当土体损失率达到 0.5% 时, 管片最大拉应力为 1.479 MPa, 已经接近 C50 混凝土的抗拉强度设计值 1.89 MPa, 当土体损失率达到 1.0% 时, 管片最大拉应力为 3.0 MPa, 已经超过了 C50 混凝土的抗拉强度标准值 2.64 MPa, 此种情况下, 管片极易产生裂缝, 当土体损失率达到 2.0% 时, 管片最大拉应力为 5.4 MPa, 已经远远超出 C50 混凝土的抗拉强度标准值, 虽然在建模分析中并没有考虑到管片中钢筋的存在, 但是在如此大的拉应力下, 管片发生破坏的可能性仍然很大。

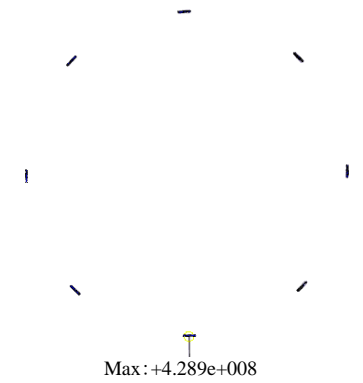




(d) $V_L = 2.0\%$



(c) $V_L = 1.0\%$



(d) $V_L = 2.0\%$

图 7 不同土体损失下公路越江隧道环向拉应力云图
Figure 7 Circumferential tensile stress contour of river-crossing roadway tunnel under different soil loss

3.2 螺栓受力分析

图 8 给出了公路越江隧道环向螺栓的拉应力云图。从图 8 中可以看出在不同土体损失率下，螺栓最大拉应力出现在隧道底部，随着土体损失率的不断增加，螺栓最大拉应力不断增大，当土体损失率达到 2.0% 时，螺栓最大拉应力达到了约 890 MPa，已经远远超出了螺栓的极限抗拉强度，此时螺栓已经发生了拉伸破坏。

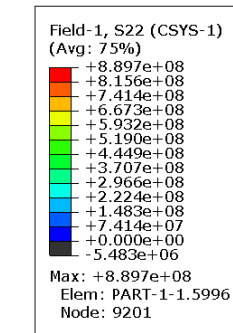
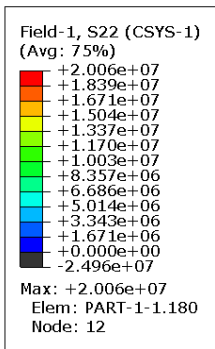
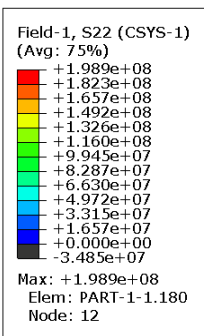


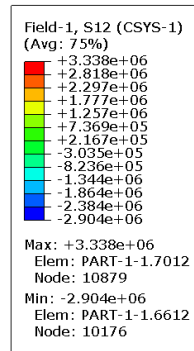
图 8 不同土体损失下公路越江隧道环向螺栓拉应力云图
Figure 8 Tensile stress of circumferential bolts of river-crossing roadway tunnel under different soil loss



(a) $V_L = 0.1\%$



(b) $V_L = 0.5\%$



(a) $V_L = 0.1\%$

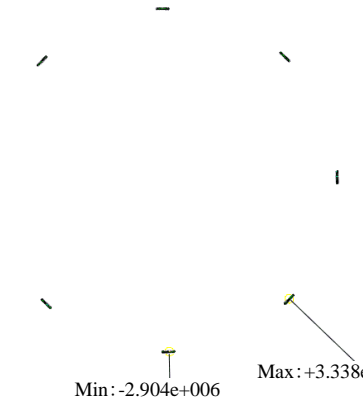
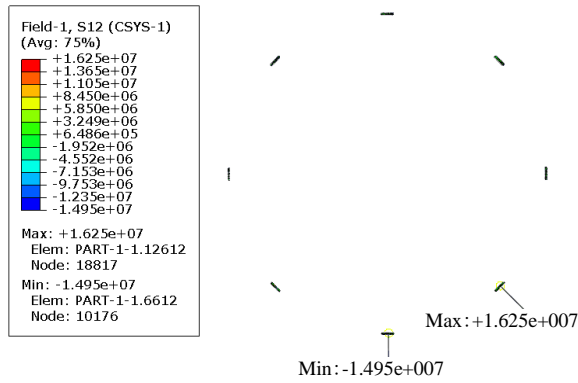
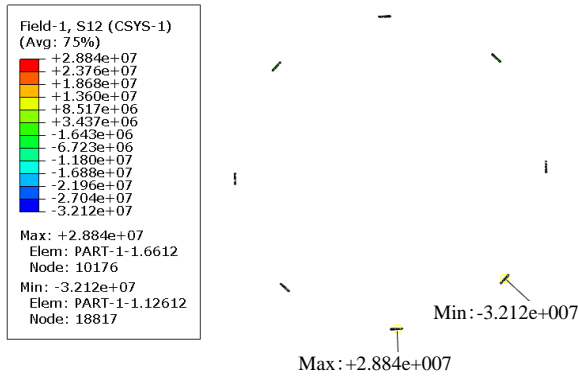


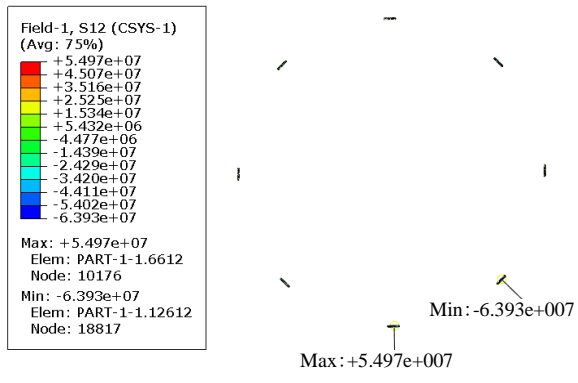
图 9 给出了公路越江隧道环向螺栓的剪应力云图。从图 9 中可以看出，相较于螺栓拉应力，螺栓剪应力则小了许多，最大剪应力为 63 MPa，仅为容许抗剪强度的 1/7。



(b) $V_L = 0.5\%$



(c) $V_L = 1.0\%$



(d) $V_L = 2.0\%$

图9 不同土体损失下公路越江隧道环向螺栓剪应力云图
Figure 9 Shear stress of circumferential bolts of river-crossing roadway tunnel under different soil loss

综合管片和螺栓受力分析, 可以看出地铁区间隧道开挖对公路越江隧道的影响主要集中在隧道的底部, 管片抗拉强度和螺栓抗拉强度为公路越江隧道结构是否安全的重要指标。

4 结 论

本文通过对叠层盾构隧道施工扰动展开精细化数值模拟和分析, 得到了以下几条主要结论:

(1) 在地铁区间盾构下叠穿越中, 公路越江

盾构隧道管片整体呈现为顶部和底部外侧受拉, 两侧腰部内侧受拉, 且最大拉应力出现隧道底部外侧。同时随着下叠盾构施工中土体损失率的不断增加, 越江盾构管片所承受的拉应力也会逐渐增加, 当土体损失率超过 0.5% 后, 管片极易出现裂缝甚至发生破坏。

(2) 对应于管片最大拉应力出现的位置, 螺栓最大拉应力同样出现在隧道底部, 且随着土体损失率的不断增加, 螺栓最大拉应力不断增大, 当土体损失率超过 1.0% 后, 螺栓最大拉应力将会达到甚至超过极限抗拉强度, 从而造成螺栓发生拉伸破坏。

(3) 对于公路越江盾构隧道, 管片拉应力和螺栓抗拉强度为结构是否安全的重要指标, 在本工程中, 为保证越江盾构隧道结构安全, 宜将地铁区间隧道施工的土体损失率控制在 0.5% 以内。

参考文献:

- [1] 陈亮, 黄宏伟, 王如路. 近距离上部穿越对原有隧道沉降的影响分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 83-87.
- [2] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 10: 1962-1966.
- [3] 张治国, 张孟喜. 软土城区土压平衡盾构上下交叠穿越地铁隧道的变形预测及施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, S2: 3428-3439.
- [4] 何川, 苏宗贤, 曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 91-98.
- [5] Ng C W W, Boonyarak T, Mašin D, et al. Three dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(9): 935-946.
- [6] 徐前卫, 尤春安, 李大勇. 盾构近距离穿越已建隧道的施工影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Z1): 95-98.
- [7] Liao S M, Liu J H, Wang R L, Li Z M. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 454-465.
- [8] Park K. H. Elastical solution for tunneling-induced ground movement in clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 310-318.
- [9] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 319-327.