

文章编号: 1000-7598-(2007) 02-0409-06

盾构近接隧道施工力学行为分析

赵旭峰¹, 王春苗², 孙景林³, 孔祥利¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 210006; 3. 中铁工程设计咨询有限公司, 北京 100860)

摘 要: 在地下工程近接施工中, 新建结构物的施工会改变既有结构物的受力状态, 从而对既有结构物产生各种不利影响。由于新建结构物的受力模式不同于半无限体或无限体中修建单一洞室的一般状况, 其初始应力场往往经过多次扰动, 施工时将再次进行扰动, 表现出极大的变异性。通过三维仿真计算, 模拟了盾构机上作用 3 种不同推进力时对既有运营隧道变形和主应力的影响, 以对是否加固既有运营地铁隧道给出建议, 同时对最大推进力作用下随着盾构隧道的开挖对既有地铁隧道轨底倾斜度的影响进行了分析。分析计算得出的结论对于盾构隧道设计和施工有一定指导意义。

关 键 词: 盾构掘进; 交叉隧道; 非线性有限元分析; 力学行为分析

中图分类号: U 456.3

文献标识码: A

Analysis of mechanical action of shield driving for approaching excavation

ZHAO Xu-feng¹, WANG Chun-miao², SUN Jing-lin³, KONG Xiang-li¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210006, China; 3. China Railway Engineering Design and Consultant Group, Beijing 100860, China)

Abstract: In course of the approaching excavation of underground works, the construction of new structure will change the mechanics case of existing structure and brings some bad influence. At the same time, the mechanical mode of newly-built structure is not the same as that single cavern is excavated in the half-unbounded space. Its original stress field is disturbed by former time and time again, and once more by excavating of later. A project is taken into account in this paper. By the three-dimensional elastoplastic finite element analysis, results show whether we should reinforce the old tunnel or not, it gives the suggestion, as well as whether the shield driving influences the orbit pitch of the old tunnel. It also simulates three pressure on the shield machine and how to influence the distortion and the principal stress. Finally, it makes the conclusion that may instruct the design and the construction of the project.

Key words: shield driving; overlapped tunnel; nonlinear FEM; analysis of mechanical action

1 引 言

随着我国地铁建设的迅速发展, 地铁网络不断完善, 城市地下空间开发利用的规模也在不断扩大, 然而, 这也使得新建盾构隧道近距离穿越既有地铁隧道及其他各种地下建筑物的现象愈加普遍。如何控制盾构隧道近距离穿越地下建筑物所引起的地层位移, 以确保既有地下结构设施的正常使用和新建盾构的顺利掘进, 对于我国城市地铁建设和地下空间开发利用具有重要的指导作用。

在地下工程近接施工中, 新建结构物的施工会改变既有结构物的受力状态, 从而对既有结构物产

生不利影响。新建地下结构的受力模式也不同于半无限体或无限体中修建单一洞室的一般状况, 其初始应力场往往是经过多次扰动, 施工将引起再次扰动, 其受力往往是非对称的, 表现出极大的变异性。概括地讲, 新建结构物的施工会使围岩从原来的 3 次应力场演变到 5 次应力场。正是这种应力场的演变导致了既有结构和新建结构的受力变异, 造成既有结构的安全性和新建工程施工的复杂性问题, 这是不可回避和必须加以解决的问题, 因此研究其复杂的受力机理和相应对策已成为当务之急。国内外对盾构隧道以及其近接和交叠等施工力学行为的研究也方兴未艾, 进行了诸多研究^[1-7]。

本文基于地下工程开挖的力学行为原理和在有限元数值模拟的基础上,对隧道开挖采用“生死单元”进行模拟,并提出采用重叠单元的方法模拟盾构的推进过程。利用盾构施工引起的地层损失机理,针对北京地铁 10 号线新建盾构隧道垂直交叉穿过既有 1 号线运营地铁隧道的工程实例进行三维仿真分析。根据数值计算结果。研究了近接盾构隧道施工力学行为,对新建盾构隧道的施工控制以及既有结构的加固措施等提出了有益的建议,并研究了最大推进力作用下随着盾构隧道的开挖对既有地铁隧道轨底倾斜度的影响问题,通过模拟盾构机上作用三种不同的推进力,研究了推进力对既有运营隧道变形和主应力的影响,得出的结论对于盾构隧道的设计和施工有一定的指导意义。

2 三维有限元分析模型

2.1 有限元模型网格及计算采用的材料参数

新隧道与既有隧道垂直交叉,分析区间的两个既有隧道相距 10 m,且为运行地铁隧道,截面形状为三心圆截面,衬砌由素混凝土组成。新隧道从既有隧道下方垂直通过,最近仅相距 1.245 m,新隧道采用盾构法施工,管片宽度为 1.2 m。由于两既有隧道相距为 10 m,两新隧道相距为 80 m,故分析只取一条新隧道。计算采用大型有限元软件 ANSYS 进行三维开挖分析,三维有限元模型尺寸为长 49.2 m,宽 50 m,高 50 m,经过优化后的网格如图 1 所示,共有 33 450 个单元,89 780 个节点,计算所使用的是 ANSYS 所提供的 Solid95 三维 20 节点等参单元。计算模型约束条件为左右两侧、前后两侧施加水平方向的单向位移约束,下侧施加竖直方向的单向位移约束,上侧为自由端。施加荷载为重力荷载。模拟计算中,管片厚度取为 30 cm,盾壳厚度取为 6 cm。模型计算采用的地层材料参数见表 1^[8]。

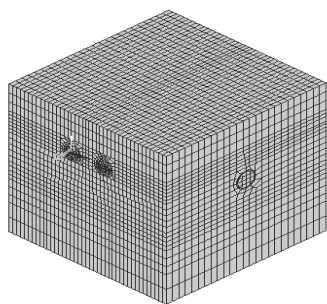


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

表 1 材料参数
Table 1 Parameters of materials

名称	模型计算所用的地层和材料参数						地层厚度 / m
	E / MPa	μ	γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	c / MPa	ϕ / ($^{\circ}$)	膨胀角 / ($^{\circ}$)	
人工填土	100	0.3	17.0	0.015	22	22	10
粉土	60	0.3	19.9	0.019	31	31	16
中粗砂	44	0.27	20.7	0.015	35	35	3
圆砾卵石	77	0.19	20.9	0.015	45	45	3
粉土	170	0.33	19.0	0.02	29	29	8
圆卵石	115.5	0.19	21.2	0.015	55	55	10
混凝土	31 400	0.17	23.0	3	60	60	
填充混凝土	3 000	0.13	18.0	1.1	43	43	
钢壳	210 000	0.3	78.0				

2.2 开挖过程模拟

既有隧道采用全断面一次性开挖模拟,并且一次性施做衬砌,即先计算初始静力场,然后全断面开挖,接着修筑衬砌。新隧道每次推进距离为管片衬砌的宽度为 1.2 m。由于管片是处于盾壳保护下拼装完毕的,所以模拟开始需先模拟盾壳支护作用,即改变材料为钢壳材料,同时在开挖面上施加压力 P 来模拟盾构的推进力,后进行开挖,开挖部分为管片和管片内部所在的土体。当盾构向前行进时盾壳抽出向前,此时盾尾处的管片会露出,需要对盾尾留出的空隙进行注浆填充,以防止上部隧道沉降,此步需要重新激活被杀死的管片单元,改变此部分单元的材料为混凝土材料,同时改变盾尾空隙的材料为填充材料。

在采用“生死单元”模拟盾构开挖过程中,一般是先将土体单元“杀死”,然后在后续荷载步里“激活”被“杀死”的单元,同时改变材料特性。然而,在模拟盾构开挖过程中,如果采用上述方法,则会使土体在盾壳未支护下已先变形,这与盾构法施工的实际情况差别很大。因为盾构施工过程中,盾壳的推进(支护)与盾壳所在位置土体的破坏是同时完成的,土体的开挖是在盾壳的保护下进行的,这样,土体的变形和应力状态与实际受力状况有很大差别。因此,为了更好的模拟盾壳的支护作用,本文提出在盾壳所在土体单元上生成一层与土体单元材料不同的重叠单元。模拟过程中,先杀死材料为钢材(盾壳)的重叠单元,然后在后续荷载步计算过程中再杀死盾壳所在层的土体单元,同时激活相应位置的盾壳单元,并改变材料特性为盾壳材料。这样在此荷载步中,在盾壳支护下进行的土体开挖计算更符合实际受力过程。

3 计算结果分析

以往的工程计算表明,对于垂直交叉隧道问题,新隧道影响既有隧道的范围一般从距离为8 m左右开始影响比较大,即新隧道工作平面距离既有隧道的轴线为8 m将既有隧道自身受影响分析取7个截面,每个截面相隔为4 m,所取截面1位于两隧道垂直交叉的正上方,沿左右方向每4 m,分别取3个截面,即主要分析既有隧道的受影响距离为24 m。

3.1 1号截面随盾构开挖产生的位移和应力分析

由于1号截面恰好位于新建盾构隧道轴线的正上方,即最危险的截面,整个开挖过程中的既有隧道衬砌的最大位移和主应力随开挖推进的变化见图2。以下仅给出盾构机工作平面上作用的最大推进力 $P=1$ MPa时的结果。图2、图3分别为既有隧道衬砌最大位移、最大水平位移与推进步数关系。

从图2可以看出,整个开挖过程既有隧道衬砌竖向发生了向上的隆起,这主要受盾构工作平面所施加的推进力有关,因此施工时需要严格控制盾构机的施工参数。另外,左右隧道衬砌的最大竖向位移相差1.5 mm左右,不是发生在同一开挖步内,左侧既有隧道衬砌的最大竖向位移要大于右侧既有隧道衬砌的位移,这是由于在同一推进力作用下左右两侧既有隧道的受力不是对称的。

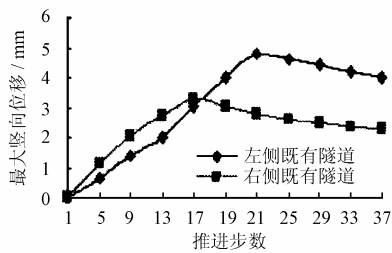


图2 既有隧道衬砌竖向最大位移与推进步数的关系图
Fig.2 Relation of vertical displacements of old tunnel lining and excavation steps

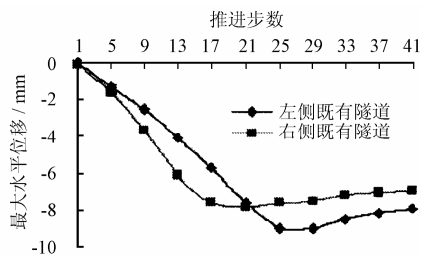


图3 既有隧道最大水平位移与推进步数的关系图
Fig.3 Relation of horizontal displacements of old tunnel lining and excavation steps

从图3可以看出,左右隧道衬砌的最大水平位移相差1.2 mm左右,且右侧最大水平位移发生在第21步,即盾构工作平面推进到两隧道中间的下方,而左侧最大发生在第25开挖步。两隧道水平位移最大数值并不是都发生在工作平面推进到既有隧道正下方,这是由于盾构的经过时盾构机中的千斤顶反力需要一定的累积才能使得对既有隧道水平位移的影响显现出来,因此左侧既有隧道衬砌的水平位移要大于右侧既有隧道衬砌的水平位移。

由图4可以看出,左右两既有隧道衬砌最大主拉应力的数值均超过了2 MPa,且右侧衬砌最大数值大于左侧既有隧道衬砌。从第9开挖步开始,最大主拉应力数值突变比较大,两既有隧道衬砌最大主拉应力在此步开挖时均超过1.5 MPa,这也与一些已经完成的工程所得结论一致,即盾构工作平面距离右侧既有隧道轴线距离10 m左右时,盾构机进入了对于既有隧道影响比较大的范围以内,施工过程中当盾构推进到此范围时应严格进行监测,并且实时调整盾构机的参数。从图4和图5中还可以看出,既有隧道衬砌最大主拉应力和主压应力数值与盾构工作平面距离既有隧道的距离有很大的关系。当盾构工作平面距离既有隧道9 m左右时影响凸现出来。

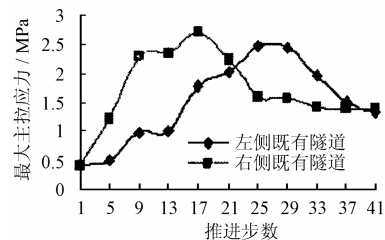


图4 最大主拉应力与推进步数的关系图
Fig.4 Relation of maximum principal tensile stress and excavation steps

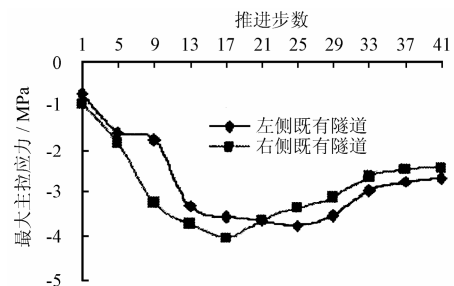


图5 最大主压应力与推进步数的关系图
Fig.5 Relation of maximum principal compressive stress and excavation steps

3.2 既有隧道受新盾构隧道开挖产生的影响范围

通过既有右侧隧道受新盾构开挖影响产生的竖向和水平向位移的范围可以分析既有隧道受新盾构隧道开挖产生的影响范围。从图 6 和图 7 (图中箭头方向表示盾构推进步数的增加) 可以看出, 随着新建盾构隧道的盾构机向既有隧道推进, 既有隧道的变形与盾构隧道推进方向一致。在推进力 $P = 1$ MPa 时, 右侧既有隧道衬砌水平位移在第 21 开挖步时水平位移达到最大为 -7.828 mm。另外, 在第 17 开挖步时竖向隆起达到最大, 数值为 3.294 mm, 当盾构通过时水平位移和竖向位移均相对于盾构推进方向回落。从水平和竖向位移两者来综合分析可以看出, 既有右侧隧道受开挖所影响的范围在 50 m 左右, 即在此范围内右侧既有隧道衬砌的水平位移和竖向位移均超过了 1 mm。计算分析还发现, 左侧既有隧道衬砌的竖向和水平位移变化规律与右侧既有隧道衬砌变化基本一致。不同的是, 左侧既有隧道衬砌的竖向和水平位移均比右侧大, 这主要由于受盾构开挖推进的不对称影响, 导致两隧道在开挖过程中受力不对称, 故最后变形幅度不同。

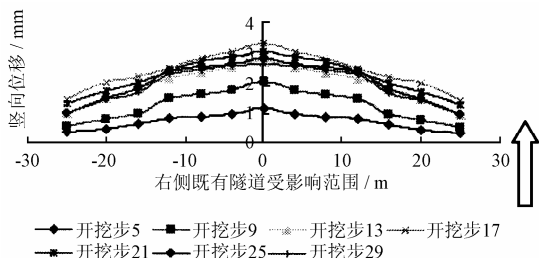


图 6 右侧既有隧道衬砌受开挖影响产生的竖向位移图
Fig.6 Vertical displacement of right old tunnel lining with excavation

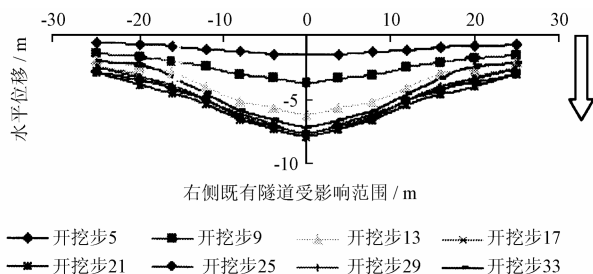


图 7 右侧既有隧道衬砌受开挖影响产生的水平位移图
Fig.7 Horizontal displacements of right old tunnel lining with excavation

3.3 刀盘不同推进力对既有隧道产生的影响

由于盾构在推进过程中地质和周边环境的变化, 盾构机参数的调整是一个实时的过程。模拟过

程中主要采用推进力 $P = 1, 0.5, 0.3$ MPa 三种工况。由图 8 可看出, 当推进力减小一半时右侧既有隧道衬砌的最大竖向及水平位移都有不同程度的减小, 具体为最大竖向位移从隆起 3.294 mm 减小到 1.665 mm, 减小幅度大约为 49.4% , 而最大水平位移从 -7.828 mm 减小到 -3.115 mm, 减小幅度大约为 60.2% ; 当推进力减小 70% 时竖向位移从隆起表现为沉降 -1.278 mm, 水平位移减小到 -1.563 mm, 减小幅度大约为 80% , 从位移减小幅度上可以看出推进力是直接影响既有隧道衬砌位移变化的主要因素。

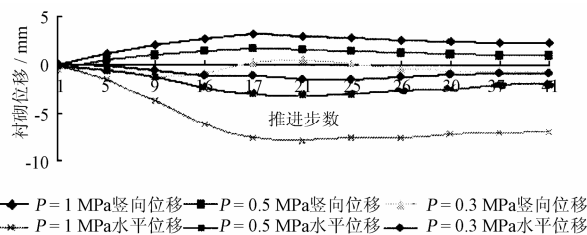


图 8 右侧既有隧道衬砌位移与盾构推进力的关系图
Fig.8 Relation of displacements of right old tunnel lining and shield drive

在最不利工况 $P = 1$ MPa 下, 既有隧道衬砌的最大主压应力为 -4.019 MPa。对于由素混凝土组成的既有隧道衬砌来讲, 主压应力在材料允许的范围以内, 因此研究主要针对不同推进力作用下, 对既有隧道所产生的最大主拉应力进行分析。由计算分析可知, 当推进力减小一半时, 既有隧道衬砌所受最大主拉应力明显减小, 减小幅度从 2.702 MPa 到 2.015 MPa。当推进力减小 70% 时, 既有隧道衬砌最大主拉应力减小到 1.559 MPa, 并可发现既有隧道衬砌所受主拉应力数值超过 1.5 MPa 的区域明显地减小, 具体为右侧隧道衬砌的拱腰部分的较大主拉应力消退比较明显, 可以得出防止既有隧道衬砌开裂的一个主要措施就是要严格控制施工时的盾构机推进力参数。

3.4 轨底倾斜度分析

既有隧道为运营地铁区间隧道, 在新建盾构隧道推进穿越既有隧道过程中应对既有地铁隧道轨底倾斜进行实时监测。分析时将左右两个隧道衬砌钢轨处各取两点作为结果分析的 2 个点, 这主要考虑穿越过程中既有隧道衬砌截面会产生挤压或者倾斜的变形, 取 2 个点来近似模拟钢轨与衬砌结合点的变形。从图 9 和图 10 中可以看出, 在新建盾构隧道整体开挖过程中, 2 个既有隧道轨底竖向位移差数值均在 1 mm 以内。通过模拟计算可以表明, 穿越

对于既有运营隧道轨底倾斜影响不是很大，但是需要注意在既有地铁隧道运营期间穿越，一定要慢，并且要连续通过。

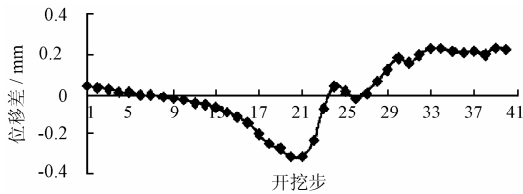


图 9 左侧轨底 1, 2 两点竖向位移差

Fig.9 Difference value of vertical displacement of 1 and 2 on left rail base

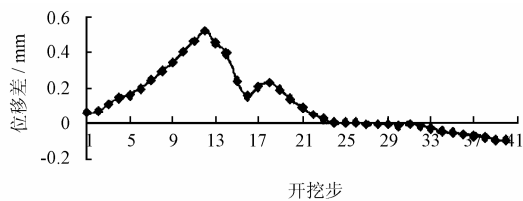


图 10 右侧轨底 3, 4 两点竖向位移差

Fig.10 Difference value of vertical displacement of 3 and 4 on right rail base

4 既有隧道加固分析

对交叉隧道的模拟仿真结果表明，不同推进力对于既有隧道的最大主拉应力有很大的影响。由于既有隧道衬砌由素混凝土组成，使得既有隧道衬砌在盾构大推进力作用下可能产生裂缝，有必要对于既有隧道衬砌进行预加固处理。

根据地下铁道设计规范^[9]，采用双线既有隧道加固范围为 2 m 左右，具体为两既有隧道中间土体全部加固，隧道上方及外侧土体 2 m 左右范围加固，隧道底部即与新建盾构隧道之间的交叉土体 1.245 m 范围需要加固。

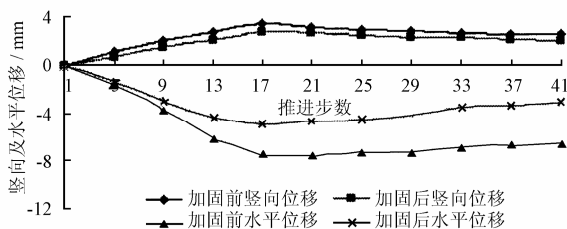


图 11 加固前后右侧既有隧道衬砌位移

Fig.11 Displacements of right old tunnel lining before and after reinforce

从图 11 中可看出，加固前后右侧既有隧道衬砌位移随开挖变化上的规律基本一致，但是变形幅度明显下降，加固后竖向位移降为 2.728 mm，相对

于加固前的下降幅度为 17 % 左右。加固后水平位移降为 -4.852 mm，下降幅度为 34 %。从下降幅度上可以看出，在同等推进力作用下加固对于水平位移的影响要远大于竖向位移，这对施工时的控制变形会有一些的借鉴作用。对于左线既有隧道，其加固前后衬砌位移的变化规律和右线基本一致。

通过计算分析，还可以得出加固后左、右侧既有隧道衬砌中部外侧最大主拉应力明显要小于加固前，而且整个隧道受盾构开挖影响的主拉应力范围相对于加固前有所减小，见表 2。

表 2 既有隧道衬砌加固前后的主拉应力
Table 2 Principal tensile stresses of old tunnel lining

参数	右侧既有隧道衬砌		左侧既有隧道衬砌	
	加固前	加固后	加固前	加固后
最大拉应力/MPa	2.702	1.929	2.522	2.065
加固时位移降幅/%	28.6		18.2	
发生位置	拱腰左右侧	拱腰左侧	拱腰外侧	左侧拱底
影响范围/m	30 左右	10 左右	25 左右	10 左右

5 结 论

通过三维仿真模拟可见，新建盾构隧道的施工对于既有运营地铁隧道有一定的影响，但只要严格进行盾构施工参数的控制，并加强对新建和既有隧道的现场监测，可将新建盾构隧道对既有隧道的影响程度降到最小。

(1) 当盾构向前推进时，既有隧道衬砌最大竖向位移发生在新建盾构隧道开挖到既有隧道的正下方。最大水平位移为沿盾构机前进方向，发生在盾构工作平面超过左侧既有隧道轴线 4.8 m 处。最大主拉应力和最大主压应力发生在盾构机处在既有隧道的正下方。

(2) 随着新建隧道盾构机向既有隧道的推进，既有右侧隧道受开挖所影响的范围在 50 m 左右。在盾构推进的同时应加强对既有隧道受影响范围的现场监测。

(3) 盾构推进力是影响既有隧道衬砌变形和受力状态的主要因素，应在施工过程中严格控制盾构机推进力参数，防止既有隧道衬砌开裂。

(4) 通过模拟计算表明，新建盾构隧道整体穿越过程中对运营隧道轨底倾斜影响不是很大。但是，在穿越既有地铁隧道运营期间，一定要慢，并且要连续通过。

(5) 通过对既有隧道的加固分析可知，加固

后既有隧道衬砌变形幅度显著下降,且中部衬砌外侧最大主拉应力明显要小于加固前,整个隧道受盾构开挖影响的主拉应力范围也相对减小,这对施工时的控制变形会有一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] 孙钧,刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J]. 同济大学学报, 2002, 30(4): 379—386.
SUN Jun, LIU Hong-zhou. 3D numerical simulation of ground surface settlement under overlapped shield tunneling[J]. **Journal of Tongji University**, 2002, 30(4): 379—386.
- [2] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [3] 张志强,何川. 深圳地铁隧道邻接桩基施工力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 204—207.
ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Study on the mechanical behaviour of a metro tunnel construction adjacent to existing pile foundations in Shenzhen[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 204—207.
- [4] 吴波,高波. 地铁区间隧道施工对近邻管线影响的三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 451—2 456.
WU Bo, GAO Bo. 3D numerical simulation on effect of tunnel construction on adjacent pipeline[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.2): 2 451—2 456.
- [5] 廖少明,余炎,彭芳乐. 裂缝性低渗透砂岩油田二次加密调整实践盾构近距离穿越相邻隧道施工的数值解析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 223—336.
LIAO Shao-ming, YU Yan, PENG Fang-le. Numerical analysis of shield tunneling construction through adjacent objects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 223—336.
- [6] 张志强,何川. 双线盾构隧道与联络通道复杂结构受力分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 89—92.
ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Research on mechanical behaviour of construction of link line and shield tunnel on No. 2 line of Guangzhou metro[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2002, 24(6): 89—92.
- [7] 朱合华,丁文其,李晓军. 盾构隧道施工力学性态模拟及工程应用[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 98—103.
ZHU He-hua, DING Wen-qi, LI Xiao-jun. Construction simulation for the mechanical behavior of shield tunnel and its application[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(3): 98—103.
- [8] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. 岩土物理力学性质综合统计表[R]. 北京: 北京城建勘测设计院, 2003.
- [9] GB50157—92, 地下铁道设计规范[S].

会议信息

会议名称	类型	会议时间	地点	承办单位	会议网址或 E 地址
第七届建筑承受撞击和震动国际会议	国际	2007-10-17	北京		http://www.cipremier.com
第九届钢结构、空间结构和复合材料结构国际会议	国际	2007-10-10	烟台	烟台大学 清华大学	http://www.cipremier.com/ciframeset.htm
第六届国际软土地下工程学术大会	国际	2008-4-10	上海	同济大学	http://www.cces.net.cn/notice/tz20061117.html
第二届岩土工程减灾与修复国际会议	国际	2008-5-30	南京	河海大学	http://www.GeoHohai.com/GEDMAR08
第三届全国防震减灾工程学术研讨会	国内	2007-3-1	南京	南京工业大学	http://celab.njut.edu.cn/fzjz
第十届国际滑坡与工程边坡会议	国际	2008-6-30	西安	清华大学 中国水利水电科学研究院	http://www.landslide.iwhr.com/
第四届居住建筑能源与环境国际研讨会	国际	2007-1-15	哈尔滨	哈尔滨工业大学	http://indoorair.hit.edu.cn
中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议	国内	2007-11-1	重庆	后勤工程学院	librte@163.com , librte@sohu.com
第九届全国渗流力学学术讨论会	国内	2007-5-1	西安	中国力学学会 中国石油学会等	
第四届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会	国际	2007-4-26	杭州	浙江大学	http://www.ccea.zju.edu.cn/ccsge/index.html
第九届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会暨中国力学学会第七届岩土力学专业委员会	国内	2007-10	武汉	中国科学院武汉岩土力学研究所	swbai@whrsm.ac.cn