

## 土仓压力对隧道近接既有隧道盾构施工影响分析\*

刘五一<sup>1</sup>, 张健<sup>1</sup>, 周中<sup>2</sup>

(1.中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南长沙 410004; 2.中南大学, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 针对水底隧道平行近接既有隧道施工的情况, 以长沙地铁 4 号线下穿湘江近接南湖路隧道工程为依托进行三维数值模拟分析, 探索近接施工中盾构机土仓压力对新建隧道及既有隧道的影响。结果表明, 盾构土仓压力越大, 地表最终沉降越小, 推进过程中要选择适当的土仓压力, 不宜过大也不宜过小; 盾构开挖对周边土体扰动产生的附加应力场基本以隧道中心为对称轴对称分布, 随着离中心距离的增大沿两侧逐渐减少, 盾构土仓压力增大则引起的附加应力也增大; 随着盾构土仓压力的增大, 既有隧道管片变形增大, 不利于既有隧道结构的安全。

**关键词:** 隧道; 土仓压力; 水底隧道; 近接施工; 数值模拟

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0145-05

近接既有隧道施工不可避免地引起地层移动进而对已建隧道产生影响, 当地层变形或变形差异过大时, 既有隧道衬砌结构会在一定程度上产生附加应力, 对隧道结构的稳定性及使用功能产生损害和安全威胁。盾构隧道施工中盾构机土仓压力大小也会影响土体的位移和变形, 同样会对近接建筑物产生附加应力, 相对于近接施工造成的影响, 土仓压力造成的影响是可控进而规避的。因此, 有必要分析不同土仓压力作用下水底盾构隧道近接施工的影响。文献[1]首次提出隧道开挖引起的地表沉降槽类似于正态分布, 同时提出地层损失的概念, 认为地层的移动是由地层损失引起的; 文献[2]和文献[3]对隧道近接施工进行了理论计算; 文献[4]对两孔平行隧道近接施工的力学行为进行了分析; 文献[5]分析了多线叠交盾构隧道在各穿越阶段下因地层损失和开挖卸荷引起的地表沉降及既有隧道纵向变形规律; 文献[6]和文献[7]对近接施工的影响进行了数值模拟分析; 文献[9]对双孔盾构隧道近接施工进行分析, 得出新建隧道施工对既有隧道结构内力影响明显; 文献[8]、文献[10]和文献[11]分析了盾构近接隧道施工对既有隧道管片受力的影响, 发现新建隧道施工会使既有隧道侧向受压, 引起既有隧道拱腰部位产生较大压缩变形、拱顶及仰拱部位产生较大张拉变形; 文献[12]分析了在土体局部加固的情况下新建隧道掘进对已建隧道周围土体位移及衬砌内力与变形的影响, 并将地表变形计算结果与实测

数据进行了对比分析; 文献[13]借助 Pasternak 地基模型建立既有隧道受荷变形平衡微分方程, 得到了既有隧道因新建隧道盾构施工产生的附加位移; 文献[14]对隧道近接施工影响进行了风险评估。国内外学者对水下盾构隧道施工风险控制和普通隧道近接施工影响进行了卓有成效的研究, 取得了阶段性研究成果, 但关于水下盾构隧道下穿及长距离平行近接施工既有隧道影响的研究成果不多见。该文采用三维有限元软件模拟长沙地铁 4 号线下穿湘江长距离平行近接南湖路隧道工程, 分析盾构机土仓压力对近接施工的影响。

## 1 工程概况

长沙地铁 4 号线下穿湘江近接南湖路隧道工程采用  $\phi 6250$  土压平衡盾构机掘进, 其中左线近平行于邻近南湖路隧道主线, 两条隧道外轮廓最小间距为 14.700 m。江底地层主要为强风化砾岩, 局部为中风化砾岩。选择典型断面进行计算分析, 根据地质资料, 该处江水深 6 m, 盾构隧道埋深 10.906 m, 隧道全身处于强风化砾岩中。相关参数如下: 隧道半径为 3.14 m, 承受内水水头为零, 足够远处水头为 20 m, 围岩原岩应力为 0.4 MPa, 等效孔隙水压力系数为 1.0; 围岩弹性模量为 45 MPa, 泊松比为 0.3, 粘聚力为 50 kPa, 内摩擦角为  $37^\circ$ 。

## 2 模型建立

利用 MIDAS.NX 软件建立三维有限元模型,

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(50908234); 厅局级项目“复杂条件下水底隧道下穿近接既有隧道关键控制技术研究”

模型边界条件严格按照隧道力学分析要求设定。由于隧道属于细长结构,隧道横断面宽度相对于隧道纵向长度来说非常小,假定在围岩荷载作用下只有横向及竖向位移,没有纵向位移(掌子面位移除外)。为了消除模型边界对计算结果的影响,模型中横向边界到隧道边界的距离取为3~5倍洞径;垂直方向上,边界向上取至地表,向下到隧道底部边界的距离达3倍洞径。模型纵向长度为45 m,横向宽度为85 m,竖向宽度为40 m,隧道上部覆土为10 m(见图1~3)。

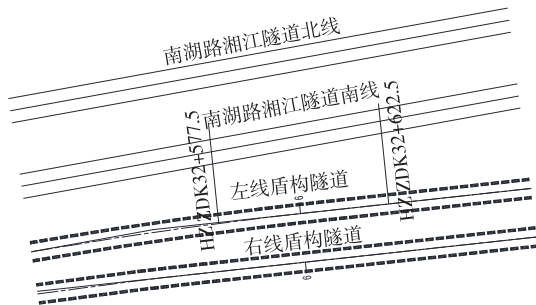


图1 模型选取段平面图

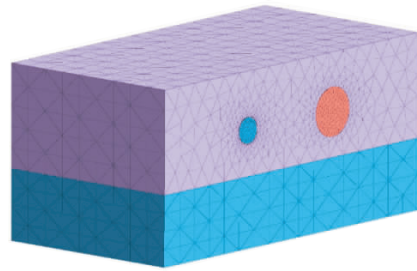


图2 三维计算网格模型

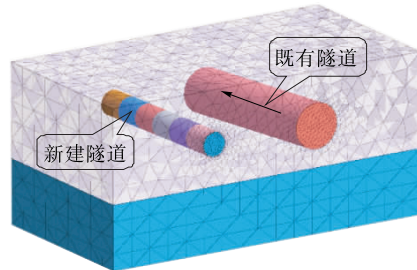


图3 隧道近接施工三维位置关系

根据地质勘探报告及相关设计资料,模型采用表1所示地层及结构材料参数。

表1 地层及结构材料参数

土层及结构	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	泊松比	压缩模量/MPa	单元类型
强风化砾岩	23.7	28	37	0.25	45	实体单元
中风化砾岩	24.7	200	45	0.17	70	实体单元
管片	25.0	—	—	0.25	34 500	板单元
等代注浆层	23.0	—	—	0.30	200	实体单元
盾壳	78.6	—	—	0.20	210 000	实体单元

根据盾构施工流程,采用MIDAS/GTS模拟盾构隧道施工过程,主要开挖步骤如下:1) 激活各土层及边界条件,在自重应力下达到平衡状态,将其位移清零。2) 钝化第一个掘进环内的土体模拟土体开挖,同时激活该段盾壳单元模拟盾构机钢壳支撑作用,并向掌子面施加面压力模拟土仓压力,防止掌子面失稳。为更真实地模拟围岩荷载释放过程,以一定比例释放周边围岩压力。3) 钝化该段盾壳部分单元模拟盾构机通过过程,激活相应位置管片模拟管片安装,将管片外围间隙土单元替换为等代注浆层单元模拟盾构同步注浆。释放剩余应力。4) 待第一个掘进环的开挖过程计算平衡后,重复上述步骤开挖下一个掘进环,直至隧道贯通,完成整个模型计算(见图4、图5)。

### 3 结果分析

以长沙轨道交通4号线阜埠河站—碧沙湖站区

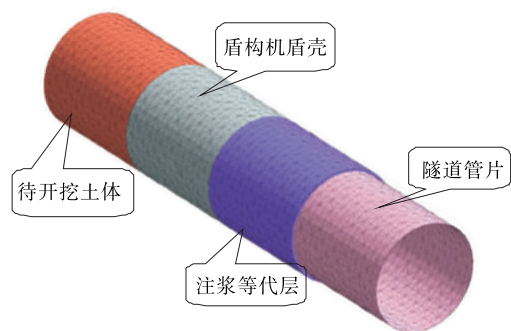


图4 新建隧道施工过程示意图

间工程为背景,模拟分析不同盾构土仓压力下土体位移、管片受力变形和土体应力,研究盾构土仓压力对水底隧道近接既有隧道施工的影响。

#### 3.1 土体位移分析

盾构土仓压力分别为100、150、200、250 kPa时隧道贯通后土体竖向位移见表2。

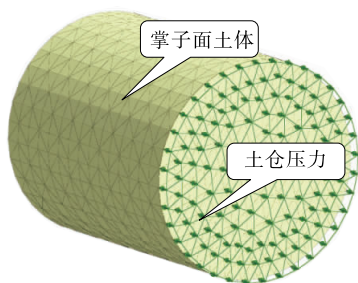


图5 盾构土仓压力示意图

表2 不同盾构土仓压力下隧道贯通后土体竖向位移

土仓压力/kPa	位移云图/m	位移最大值/mm
100		最大值20.69; 最小值-11.29
150		最大值20.69; 最小值-11.06
200		最大值20.71; 最小值-10.81
250		最大值20.73; 最小值-10.54

注:正值表示隆起,负值表示下沉。

由表2可知:1) 4种工况下,最大竖向位移均位于隧道底部,呈隆起状态;最小竖向位移均位于隧道顶部,呈下沉状态。盾构土仓压力为100 kPa时,土体最大竖向位移为20.69 mm,最小竖向位移为-11.29 mm;盾构土仓压力为150 kPa时,土体最大竖向位移为20.69 mm,最小竖向位移为-11.06 mm;盾构土仓压力为200 kPa时,土体最大竖向位移为20.71 mm,最小竖向位移为-10.81 mm;盾构土仓压力为250 kPa时,土体最大竖向位移为20.73 mm,最小竖向位移为-10.54 mm。2) 隧道开挖对周边围岩造成的最大扰动位于隧道周边,对深部土体的扰动较小;随着土仓压力的加大,土体竖向最大位移微小增大,而最大下沉量有所减少。

为了研究盾构推进对地表位移的影响,对盾构推进至模型中心即里程ZDK32+600处时的地表位移进行分析,结果见图6、图7。

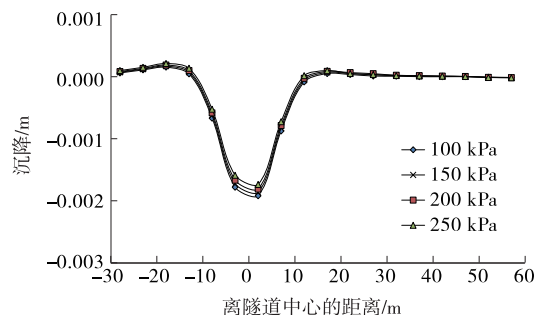


图6 盾构土仓压力对地表横向沉降的影响

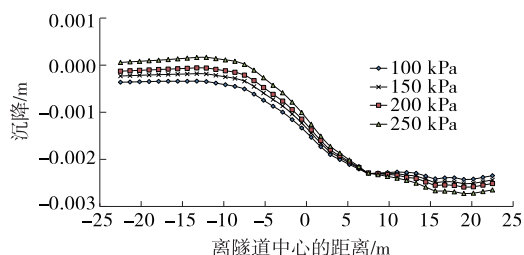


图7 盾构土仓压力对地表纵向沉降的影响

由图6可知:4种工况下,地表土体的横向沉降曲线都较符合Peck公式隧道沉降槽,隧道中心处地表沉降最大,距离隧道中心越远则沉降越小,直到很远处时扰动基本为零。盾构土仓压力为100 kPa时,地表沉降最大值为-1.92 mm;盾构土仓压力为150 kPa时,地表沉降最大值为-1.87 mm;盾构土仓压力为200 kPa时,地表沉降最大值为-1.81 mm;盾构土仓压力为250 kPa时,地表沉降最大值为-1.74 mm。说明随着盾构土仓压力的增大,地表沉降最大值和整个地表沉降量减小。

由图7可知:盾构土仓压力为100 kPa时,地表沉降最大值为-2.43 mm;盾构土仓压力为150 kPa时,地表沉降最大值为-2.51 mm;盾构土仓压力为200 kPa时,地表沉降最大值为-2.59 mm;盾构土仓压力为250 kPa时,地表沉降最大值为-2.72 mm。各工况下地表土体的纵向沉降曲线都较符合常规的隧道纵向沉降槽趋势,掌子面后方地表沉降基本完成,掌子面前方随着离掌子面距离的增大沉降减小。掌子面前方沉降随着土仓压力的增大逐渐减少,土仓压力为250 kPa时,掌子面前方地表有微小隆起。说明土仓压力过大会造成掌子面前方土体隆起,对地表建筑物不利。

综上,盾构土仓压力越大,地表竖向沉降越小。盾构土仓压力是盾构掘进的一个重要参数,对地表沉降控制有着很重要的作用,施工中应严格控制盾构土仓压力,不能过大或过小,防止地表产生隆起或塌陷,影响周边环境安全。根据数值模拟结果,该工程盾构土仓压力取 200 kPa 较合适。

### 3.2 土体应力分析

盾构掘进及土仓压力对周边岩体会造成一定扰动,隧道周围土体会产生附加应力场。将开挖后的应力状态减去原始应力状态可得到土体的附加应力场。考虑近接施工对土体应力的影响,选取 ZDK32+607.5 断面,以该断面隧道中心为原点,水平向两端延伸至边界和既有隧道(见图 8),分析土体的附加应力场。盾构掘进 15 环时,5 种土仓压力下土体产生的附加应力见图 9~11。

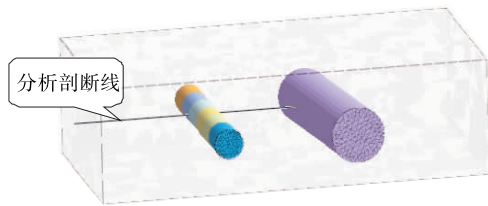


图 8 土体附加应力分析位置

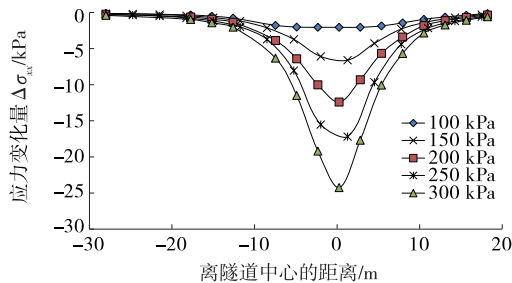


图 9 剖断线上附加应力  $\Delta\sigma_{xx}$  分布

由图 9~11 可知:1) 盾构开挖对周边土体扰动产生的附加应力场基本以隧道中心为对称轴对称分布,隧道中心的附加应力最大,离中心 10 m(1.5D)

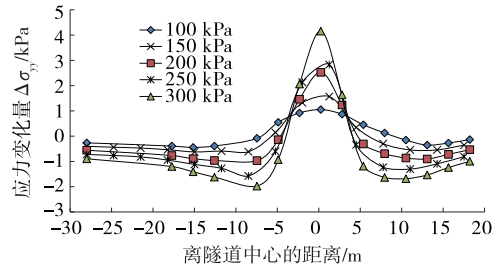


图 10 剖断线上附加应力  $\Delta\sigma_{yy}$  分布

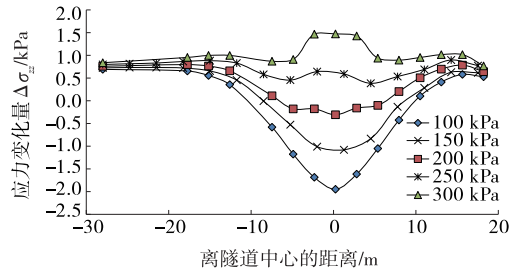


图 11 剖断线上附加应力  $\Delta\sigma_{zz}$  分布

左右范围扰动较大,随着离中心距离的增大沿两侧逐渐减少。2) 随着土仓压力的增加,  $\Delta\sigma_{xx}$  最大值由 -2 kPa 增长到 -24 kPa,  $\Delta\sigma_{yy}$  最大值由 1 kPa 增长到 4 kPa,  $\Delta\sigma_{zz}$  最大值由 -2 kPa 增长到 1.5 kPa, 说明盾构开挖对于目标面周围土体的扰动越来越大。2) 盾构开挖及土仓压力对周边土体在 X 方向(掘进方向)产生的是附加压应力,在 Y 方向(两隧道中心连线方向)产生的是附加拉应力,而在 Z 方向(两隧道中心连线方向)随着土仓压力的增大由附加压应力转变为附加拉应力。3) 随着开挖环数的增加,即掌子面与目标面距离越近,土体产生的附加应力越大,说明盾构开挖对于目标面的扰动越来越大。

在不同盾构土仓压力作用下,土体正应力形式基本不变,正应力大小在相同工况下随着推力的变化而变化;剪应力的形式也基本不变,剪应力大小变化情况见表 3。

表 3 不同土仓压力工况下围岩剪应力分析

土仓压力	kPa					
	XY 方向剪力		YZ 方向剪力		XZ 方向剪力	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
100	23.02	-16.59	176.50	-198.20	33.43	-48.17
150	24.95	-21.42	179.50	-199.20	25.10	-36.59
200	30.13	-26.49	184.50	-202.20	24.95	-34.04
250	34.69	-31.72	188.80	-206.00	30.18	-32.18
300	39.50	-37.57	193.50	-210.40	40.87	-41.21

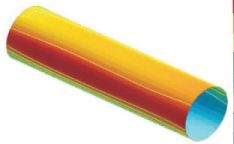
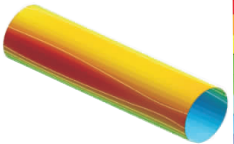
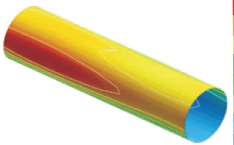
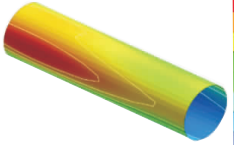
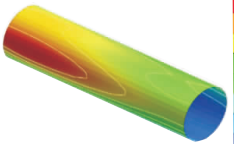


由表3可知:随着盾构土仓压力的增大,XY和YZ方向围岩剪应力增大,盾构土仓压力增大对围岩XY和YZ方向抗剪不利;从剪应力数值来看,YZ方向的剪应力比其他两个方向的大得多,说明土体中YZ方向是主要抗剪方向;在XZ方向,盾构土仓压力为100和300 kPa时的剪应力明显大于200 kPa时的剪应力,XZ方向土体剪应力随着土仓压力的增大逐渐减小,达到界限值后又逐渐增大,说明盾构土仓压力过大或过小对围岩XZ方向抗剪都不利。在实际工程中为保证安全施工,应将盾构土仓压力控制在合理范围。

### 3.3 管片位移分析

选取既有南湖路隧道管片进行管片位移分析,结果见表4。

表4 南湖路隧道管片Y向变形分析

土仓压力/kPa	位移云图/m	位移最值/mm
100		最大值 0.91; 最小值 0.14
150		最大值 0.95; 最小值 0.16
200		最大值 1.01; 最小值 0.18
250		最大值 1.07; 最小值 0.20
300		最大值 1.13; 最小值 0.22

注:正值表示位移方向为Y正向,负值表示位移方向为Y负向。

由表4可知:在盾构土仓压力分别为100、150、200、250、300 kPa的工况下,管片Y向变形规律基本一致。隧道管片位移都是正值,既有隧道整体呈背离

开挖隧道移动的趋势,靠近开挖隧道侧管片变形较大,另一侧管片变形较小。主要原因在于开挖隧道在土体压力作用下拱顶及底部向隧道内收敛,拱腰则向外扩张,挤压背部土体向外移动,引起既有隧道背离开挖隧道移动。随着盾构土仓压力的增大,既有隧道管片变形最大值由0.91 mm增至1.13 mm,管片变形最小值也增大。说明盾构土仓压力增大会使既有隧道变形增大,不利于既有隧道结构的安全。

## 4 结论

(1) 随着盾构土仓压力的增大,隧道周围土体位移增大,地表最终沉降减小,但在推进过程中掌子面前方土体会随土仓压力的增大由沉降减少转变至地表隆起。盾构土仓压力是盾构掘进的一个重要参数,对地表沉降控制有着很重要的作用,在施工中应严格控制盾构土仓压力,不能过大或过小,防止地表产生隆起或塌陷,影响周边环境安全。长沙轨道交通4号线阜埠河站—碧沙湖站区间工程中盾构土仓压力取200 kPa较合适。

(2) 盾构开挖对周边土体扰动产生的附加应力场基本以隧道中心为对称轴对称分布,随着离中心距离的增大沿两侧逐渐减少,离中心10 m(1.5D)左右范围扰动较大,同时盾构土仓压力增大则所引起的附加应力也增大。

(3) 随着新建隧道盾构土仓压力的增大,既有隧道管片变形增大,不利于既有隧道结构的安全。

### 参考文献:

- [1] Peck R B. Deep excavation and tunnelling in soft ground [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. 1969.
- [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] 廖少明, 余炎, 彭芳乐. 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(2).
- [4] 闻毓民. 两孔平行盾构隧道近接施工的力学行为分析 [D]. 成都:西南交通大学, 2005.
- [5] 张晓清, 张孟喜, 吴应明, 等. 多线叠交盾构隧道近接施工模型试验 [J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7).
- [6] Ng C W W, Lee K M, Tang D K W. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM) twin tunnel interactions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3).

(下转第171页)

由式(11)~(13)计算出2017年各项安全成本投入的优化投入额和计划投入额(见表4)。

表4 公路项目安全成本优化投入额和计划投入额 万元

安全成本投入评价指标	优化投入额	修正值	计划投入额
安全设备费 $x_1$	50.37	3.91	54.28
安全设施费 $x_2$	48.73	4.29	53.02
安全应急费 $x_3$	37.45	2.44	39.89
安全技术费 $x_4$	59.50	4.54	64.04
安全教育费 $x_5$	29.86	2.16	32.02
劳动保护费 $x_6$	37.93	3.60	41.53
文明施工费 $x_7$	21.60	2.40	24.00
安全管理费 $x_8$	46.36	4.86	51.21

该公路工程项目2017年各项安全成本投入的计划额为:安全设备费54.28万元、安全设施费53.02万元、安全应急费39.89万元、安全技术费64.04万元、安全教育费32.02万元、劳动保护费41.53万元、文明施工费24.00万元、安全管理费51.21万元。

#### 4 结语

该文根据法律法规对公路项目施工安全成本的相关规定探究安全成本的构成,对安全成本投入配比进行优化调整;通过计算确定各项安全成本投入的计划额,按照规定正确地投入和有计划地使用安全成本,满足施工安全成本投入的需要,保证公路项目施工安全水平目标,为公路工程项目的安全控制提供决策依据。

#### 参考文献:

- [1] Matthew Hallowell. Cost-effectiveness of construction safety programme elements[J]. Construction Management and Economics, 2010, 28(1).
- [2] Chan K H. Improving building safety in property maintenance[J]. Property Management, 2012, 30(5).
- [3] Reiman T, Pietikainen E. Leading indicators of system safety: monitoring and driving the organizational safety potential[J]. Safety Science, 2012, 50(10).
- [4] 冯斌, 张守健. 建筑工程安全事故机会损失的确定及计算[J]. 工程管理学报, 2011, 25(1).
- [5] 姜慧, 王建平, 梁化强. 建筑企业保证性安全成本的构成与灰色关联度[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2014, 17(1).
- [6] 王文伟, 章恒全. 水利水电工程项目安全投入非线性优化分配研究[J]. 项目管理技术, 2013, 11(5).
- [7] 于川. 施工项目安全成本的研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [8] 姜慧, 王建平, 董孟娟, 等. 基于聚类熵权的建筑安全投入评价指标[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29(6).
- [9] 陈玉梅. 建筑企业安全成本评价体系及控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [10] 李墨. 基于博弈论的非煤地下矿山安全投入构成分析与优化[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [11] 叶贵, 任宏, 汪红霞. 基于模糊因子分析法的建筑企业安全成本因素分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4).

收稿日期: 2018-03-19

\*\*\*\*\*

(上接第149页)

- [7] Chakeri Hamid, Hasanpour Rohola, Bahtiyar Ünever, et al. Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70.
- [8] 赵旭峰, 王春苗, 孙景林, 等. 盾构近接隧道施工力学行为分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2).
- [9] 凌昊, 仇文革, 孙兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9).
- [10] 马程昊, 白晨光. 盾构近接隧道施工对既有隧道管片受力影响分析[J]. 建筑科技, 2012, 28(增刊1).
- [11] 李雪峰, 杜守继, 张顶锋. 新建盾构隧道施工对近接平行隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5).
- [12] 路平, 蒋辉, 郑刚. 盾构隧道的近接施工对已建隧道产

生的影响[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(8).

- [13] 卢岱岳, 王士民, 何川, 等. 新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(10).
- [14] 李军, 吕婧, 刘瑞. 新建隧道施工对近距离既有隧道的影响及安全风险评估[J]. 公路与汽运, 2017(5).
- [15] 杨立华, 潘智锋, 王晨涛. 软弱围岩条件下新建隧道下穿浅埋隧道安全及稳定性研究[J]. 公路, 2015(7).
- [16] 凌同华, 谢伟华, 周凯, 等. 施工顺序对浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性影响的分析[J]. 公路与汽运, 2016(8).
- [17] 王路, 张庆彬. 邻近双洞隧道衬砌结构的爆破动力响应规律分析[J]. 公路与汽运, 2018(1).

收稿日期: 2017-12-26