

## 邻近双洞隧道衬砌结构的爆破动力响应规律分析\*

王路<sup>1,2</sup>, 张庆彬<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2.湖南省高速公路建设开发总公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 为优化温州绕城高速公路西南线横山隧道施工方案、控制爆破开挖对邻近洞室衬砌结构的动力影响, 采用数值手段模拟了不同开挖工法时邻近洞室衬砌结构在爆破动力作用下的响应规律, 对比分析了爆破引起邻近隧道衬砌结构不同部位的应力和振动速度, 提出了衬砌结构的重要影响部位和相应的减振措施; 分析了单洞爆破开挖引起的衬砌结构振动速度, 根据不同振动速度控制标准优化了掌子面与衬砌结构的安全步距。

**关键词:** 隧道; 双洞隧道; 衬砌结构; 爆破; 动力响应

**中图分类号:** U458.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)01-0169-05

大跨小净距隧道施工中由于双洞间距过小、断面过大, 不可避免地存在双洞施工互相干扰, 甚至导致衬砌开裂、剥落等结构劣化。为降低施工干扰及爆破开挖对邻近衬砌结构的影响, 一般在按照 GB 6722—2014《爆破安全规程》对爆破振动速度和装药量进行控制的同时, 凭借施工经验扩大先行洞掌子面与后行洞衬砌结构的距离, 但这将增加施工成本, 拖延施工进度。目前国内外众多学者对该问题开展了研究, 但因每座隧道岩体性质的差异和双洞间距及断面大小、覆盖层厚度等不同, 研究结果不具有普遍适用性, 无法直接用于具体工程。该文针对温州绕城高速公路西南线上横山隧道, 采用数值手段对后行洞隧道爆破影响进行模拟, 分析其对先行洞衬砌结构的影响并优化施工安全步距, 保证爆破安全施工的同时为施工方案优化提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 隧道概况

横山隧道位于温州绕城高速公路西南线工程第 4 标段, 为双洞六车道分离式小间距直线隧道。左洞起止桩号 ZK14+752—ZK15+090, 全长 338 m; 右洞起止桩号 K14+775—K15+085, 全长 330 m; 左、右洞中夹岩柱最小距离 8 m。按照单洞施工资源配置, 单向双洞错开开挖施工, 由出口向进口掘进。

### 1.2 地质概况

横山隧道长度小, 处于丘陵区, 地形坡度平缓,

山顶浑圆。最高点位于路线左侧, 隧址区地面最高点 106 m 左右, 隧道设计洞顶高程 31~33 m。地貌为中间高、周边低的丘陵, 地形平缓, 地层序列正常, 上覆残坡积碎石土, 下部基岩为霏细斑岩和砂岩, 均属于硬质岩, 抗风化能力较强~强。洞身埋深最大 53 m 左右, 因该隧道总体埋深较小, 隧道段岩性完整性较差, 围岩以 IV~V 级为主; 隧道中部埋深较大, 围岩完整性相对较好, 属于 III 级。

## 2 模型建立

### 2.1 模型参数选取

实际工程中的 2 号岩石乳化炸药采用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和 JWLN 状态方程进行模拟, 参数取值见表 1。岩体为 IV 级围岩, 选取弹塑性材料中的塑性随动硬化模型进行模拟, 参数取值见表 2。衬砌材料为 C30 砼, 采用 JHC 材料模型进行模拟, 参数取值见表 3。

表 1 2 号岩石乳化炸药材料参数

项目	参数值
炸药密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3 300
系数 $A/\text{GPa}$	229
系数 $B/\text{GPa}$	0.55
系数 $R_1$	6.5
系数 $R_2$	1.0
系数 $\omega$	0.35
初始比内能 $E_0/\text{GPa}$	3.51

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51508038; 51274049); 湖南省教育厅项目(15C0051); 长沙理工大学土木工程重点学科项目(13ZDXK11)

表2 围岩材料参数

项目	参数值
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 700
弹性模量/MPa	400
切线模量/MPa	33
失效应变	1.25
泊松比	0.27

表3 C30 砼损伤本构模型参数

参数	参数值	参数	参数值
$\rho_0$	2.31	C	0.008
E/GPa	30.5	N	0.62
V	0.19	T/GPa	0.004
G/GPa	13.24	$K_1$	86.0
A	0.79	$K_2$	-173.0
B	1.60	$K_3$	204.0

## 2.2 整体模型建立

隧道实际最大开挖宽度 17.4 m, 开挖高度 11.7 m。模型建立时左右边界各取 45 m, 下边界取 40 m, 隧道埋深 30 m。后行洞采用上下台阶法开挖, 先行洞为已开挖隧道, 纵向均考虑 100 m, 后行洞掌子面已开挖 50 m, 左右两隧道的净距为 10 m。两隧道平面相对位置见图 1, 模型见图 2。

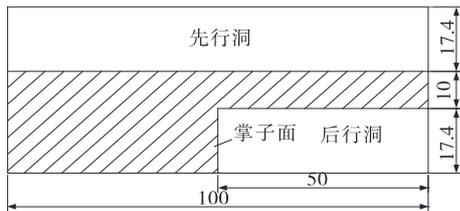


图1 先行洞和后行洞相对位置关系平面图(单位:m)

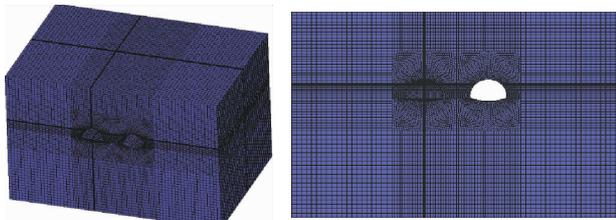


图2 实体模型整体及正面(单位:m)

## 2.3 边界条件设定

爆破模拟通常需引入无反射边界条件, 以此模拟实际岩体中爆破地震波传播到无反射边界时全部被吸收而不产生反射的情况。因此, 模型中除上边

界为自由表面外, 其余边界均设为无反射边界。

## 3 计算工况

为研究横山隧道后行洞爆破对先行洞隧道衬砌结构应力和振动速度的影响, 结合工程施工组织文件, 确定后行洞爆破模拟药量为 30(上下台阶法)和 50 kg(全断面法)。计算工况如下:

(1) 模拟计算后行洞最大药量 30 kg 时先行洞衬砌结构横断面各部位不同时刻的最大主应力分布及先行洞衬砌主应力沿隧道纵向的分布规律。

(2) 计算后行洞爆破最大药量 30 kg 时先行洞衬砌结构不同位置的振动速度分布及衰减规律。

(3) 模拟后行洞爆破药量为 50 kg 时爆破对后方衬砌结构应力和振动的影响, 提出衬砌结构施工安全步距。

## 4 计算结果及分析

### 4.1 上下台阶法开挖计算结果及分析

#### 4.1.1 后行洞爆破开挖对先行洞衬砌结构应力影响分析

选取模型中先行洞 5 个截面(见图 3)分析最大主应力达到最大值时先行洞不同截面位置的主应力分布规律。5 个截面的最大主应力分布见图 4, 先行隧道衬砌结构的最大主应力见图 5。

从图 4 可看出: 先行洞衬砌对应后行洞掌子面

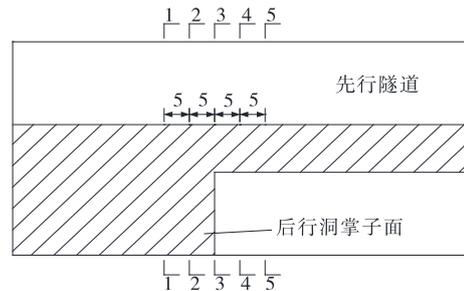


图3 先行洞分析截面位置示意图(单位:m)

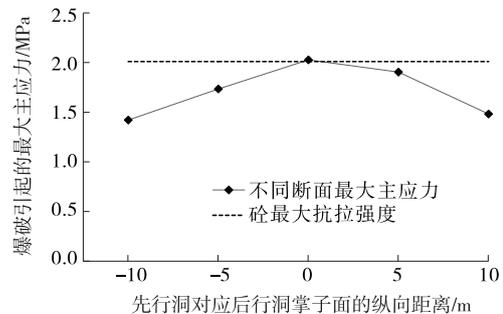


图4 不同断面最大主应力分布曲线

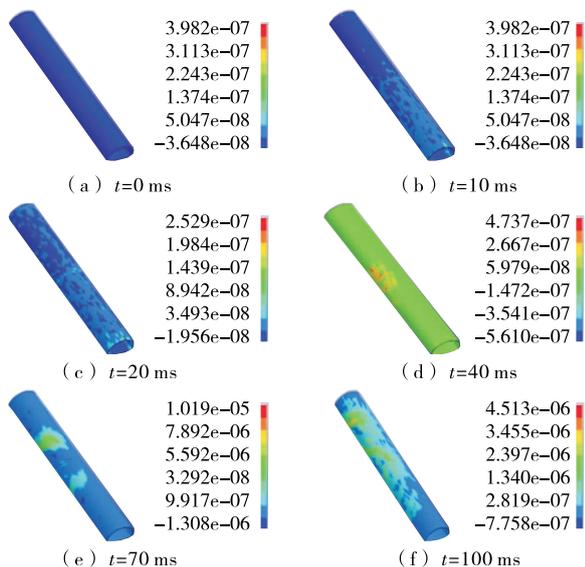


图5 先行洞不同时刻二次衬砌最大主应力云图(单位:10<sup>11</sup>MPa)

的纵向距离越近,最大主应力峰值越大,但仅垂直爆破掌子面的后行洞衬砌断面处的最大主应力超过砼的抗拉强度,该部位衬砌砼可能产生拉伸破坏而开裂。当衬砌砼未达到28d龄期时,潜在破坏范围将进一步增大,如C30砼5d龄期时的抗拉强度仅1.55MPa,衬砌发生拉伸破坏的潜在范围为对应爆破掌子面前后10m左右,施工中应引起足够重视。

从图5可看出:采用上下台阶法开挖时,在后行洞爆破应力波未传到之前,先行隧道衬砌结构的最大主应力为零;随着爆破应力波和爆生气体共同作用产生的爆破能量的传递,隧道衬砌结构最大应力峰值逐渐增大,应力波向爆破掌子面后方及四周传播;t=70ms时,应力波开始衰减,t=100ms时拉应力峰值只有0.45MPa。

4.1.2 后行洞爆破对先行洞衬砌结构振动速度影响分析

先行洞衬砌结构迎爆侧和背爆侧的拱顶、拱腰、边墙等控制点(见图6)在隧道横向(x方向)、竖向(y方向)和纵向(z方向)的振动速度见表4,先行洞衬砌不同测线振动速度衰减情况见图7,对应后行

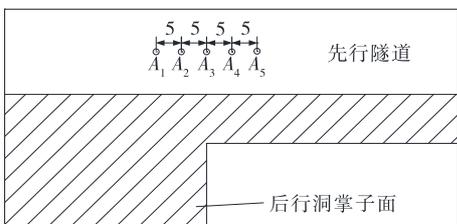


图6 各控制点分布示意图(单位:m)

洞掌子面前后开挖区和未开挖区断面振动速度衰减情况见图8。

表4 先行洞不同断面的合成振动速度

位置	离掌子面不同纵向距离(m)时的合成振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )				
	-10	-5	0	5	10
拱顶	2.480	2.931	2.935	2.198	1.549
迎爆侧拱腰	7.948	9.612	9.340	6.162	3.250
迎爆侧边墙	3.981	5.798	7.191	2.760	1.774
迎爆侧拱脚	5.144	8.179	9.834	4.095	2.989
背爆侧边墙	0.895	1.005	1.123	1.170	0.669
背爆侧拱脚	1.449	1.628	1.894	1.457	1.182
背爆侧拱腰	1.317	1.466	1.599	1.000	0.665

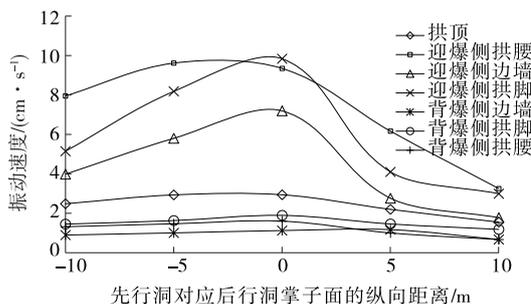


图7 先行洞衬砌不同测线振动速度衰减规律

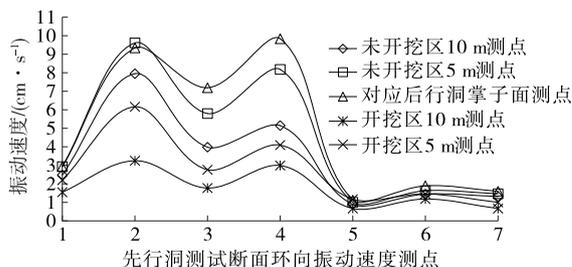


图8 对应后行洞掌子面前后开挖区和未开挖区断面振动速度衰减规律

从表4、图7、图8可看出:1) 先行洞迎爆侧衬砌质点振动速度普遍大于背爆侧衬砌振动速度;迎爆侧最大振动速度出现在拱腰或拱脚位置,这与后行洞掌子面掏槽眼位置有关;30kg药量时引起的迎爆侧拱腰或拱脚位置的振动速度已接近GB6722-2014《爆破安全规程》规定的下限值10cm/s;迎爆侧的振动速度衰减速度大于背爆侧振动速度衰减速度。2) 无论是迎爆侧还是背爆侧,先行洞衬砌对应后行洞掌子面已开挖部分的振动速度均小于衬砌对应后行洞未开挖部分的振动速度,且前者的振动

速度衰减幅度小于后者。

#### 4.2 全断面法开挖时后行洞爆破引起先行洞振动速度衰减规律分析

测点布置位置同上下台阶法,先行洞对应后行洞掌子面纵向间隔5 m均匀布置5个测点。先行洞迎爆侧衬砌不同断面上拱脚、边墙、拱腰、拱顶处的横向( $x$ 方向)振动速度最大值和合成振动速度分别见表5、表6。

表5 先行洞迎爆侧不同断面横向振动速度

位置	离掌子面不同纵向距离(m)时的 横向振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )				
	-10	-5	0	5	10
拱脚	3.551	3.914	4.437	2.539	2.265
边墙	8.946	14.078	15.683	13.75	8.262
拱腰	6.607	8.574	8.075	5.002	3.076
拱顶	1.547	2.345	2.548	1.547	0.956

表6 先行洞迎爆侧不同断面合成振动速度

位置	离掌子面不同纵向距离(m)时的 合成振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )				
	-10	-5	0	5	10
拱脚	6.158	9.867	10.999	4.788	2.961
边墙	9.845	15.313	17.202	14.025	8.454
拱腰	8.767	11.234	11.109	6.778	4.194
拱顶	2.787	3.489	3.491	2.458	1.665

从表5、表6可看出:采用全断面法开挖时,先行洞衬砌离后行洞掌子面的纵向距离越小,最大振动速度越大,且同一断面不同位置的最大振动速度有所差异,振动速度分布规律为边墙>拱腰>拱脚>拱顶;后行洞掏槽眼总药量为50 kg时,先行洞衬砌对应后行洞掌子面前后10 m范围内迎爆侧边墙处最大振动速度超过规定值。

#### 4.3 单洞掘进爆破对后方衬砌结构安全影响分析

采用全断面法开挖时,掌子面爆破不仅对邻近隧道衬砌结构产生较大影响,且后方衬砌结构与掌子面距离过近时会对后方衬砌结构产生不利影响,故有必要分析单洞掘进对后方衬砌结构的影响规律,进而提出衬砌施工安全步距。单洞掘进爆破模拟测点布置见图9。

##### 4.3.1 单洞掘进引起的振动速度纵向衰减规律

单洞爆破时不同断面上拱脚、边墙、拱肩、拱顶

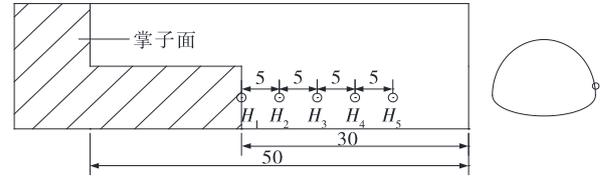


图9 单洞掘进爆破模拟测点布置示意图(单位:m)  
处的纵向( $z$ 方向)最大振动速度和合成振动速度分别见表7、表8。

表7 不同断面各位置纵向最大振动速度

位置	测点与掌子面不同距离(m)时的 纵向振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )				
	20	25	30	35	40
拱脚	0.552	0.591	0.642	0.256	0.358
边墙	1.721	1.197	1.175	0.594	0.352
拱腰	3.288	1.977	1.229	0.629	0.181
拱顶	11.331	8.786	7.747	3.869	1.052

表8 爆破掌子面后方衬砌结构合成振动速度

位置	测点与掌子面不同距离(m)时的 合成振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )				
	20	25	30	35	40
拱顶	11.487	8.936	7.849	4.114	1.189
拱腰	8.875	5.437	3.970	4.981	2.475
边墙	3.064	2.919	2.976	1.797	1.615
拱脚	1.793	1.806	2.170	2.272	1.543

从表7、表8可看出:1)断面各点的最大振动速度随断面与掌子面距离的增大而减小。2)同一断面不同位置的振动速度各不相同,自拱顶沿着环向至拱脚逐步减小,拱顶振动速度最大,拱腰次之,边墙和拱脚部位振动速度最小。实际施工中应将拱顶范围作为重点监测部位。3)随着测点与掌子面距离的增大,各测点在3个主要方向上的振动速度峰值及合成速度峰值均逐渐减小。对于新浇筑衬砌,为提高爆破控制安全性,当以10 cm/s作为爆破振动速度控制标准时,掌子面与二次衬砌之间的安全距离应为 $1.5D$ (约25 m);当以15 cm/s作为爆破振动速度控制标准时,二次衬砌浇筑里程应滞后掌子面至少 $1.0D$ 。随着距掌子面步距的增加,控制断面上各测点的峰值振动速度均在《爆破安全规程》规定的安全振动速度范围内,并逐次递减。

### 4.3.2 单洞掘进引起的后方衬砌动应力规律分析

单洞掘进时掌子面爆破引起后方衬砌结构的动应力见图10。

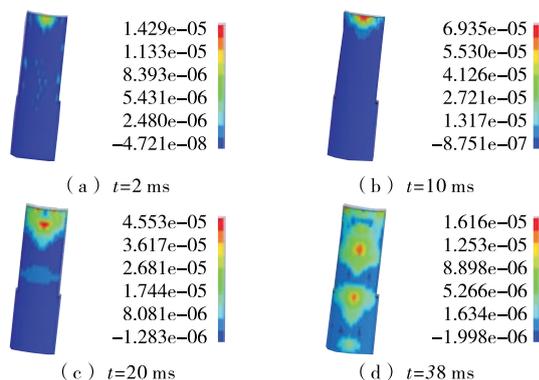


图10 掌子面爆破引起后方衬砌动应力分布云图(单位:  $10^{11}$  Pa)

从图10可看出:在冲击波应力未传到之前,先行隧道衬砌结构的最大主应力为零; $t=2$  ms时,掌子面附近最大主应力峰值瞬间达到1.429 MPa; $t=10$  ms时,最大应力峰值逐渐增大,且应力波向临空面一侧传播; $t=20$  ms时,距掌子面5 m左右里程衬砌最大主应力达到4.55 MPa; $t=38$  ms时,距掌子面纵向15 m范围内,最大主应力值均超过C30砼的抗拉强度2.01 MPa,可能引起支护结构受拉破坏。根据爆破振动速度控制标准,为降低爆破开挖对衬砌结构的影响,衬砌浇筑应滞后掘进掌子面20 m以上,从而保证衬砌结构安全。

## 5 结论

(1) 先行洞衬砌结构在迎爆侧受到的动应力影响远大于衬砌结构背爆侧,现场爆破测试应以先行洞衬砌结构迎爆侧为主,并根据后行洞掌子面开挖工况确定重点监测点是拱腰还是拱脚;先行洞衬砌结构对应后行洞掌子面已开挖部分和未开挖部分的振动响应不同,前者小于后者,现场实测时要对这两个区域区别对待。

(2) 上下台阶法开挖时,后行洞爆破引起先行洞衬砌结构的动应力随时间的增加而增加, $t=52$  ms时拱腰部位的主应力达到峰值2.027 MPa,超出砼静态抗拉强度,接近砼的动态抗拉强度,可能导致隧道衬砌结构受拉破坏而引起衬砌结构开裂,故应控制施工安全步距或控制最大段齐爆药量。当先行洞衬砌超前后行洞掌子面时,应对最大段齐爆药量进行控制,以小于30 kg为宜;当先行洞衬砌浇筑

里程落后于后行洞掌子面时,为降低爆破对衬砌结构的影响,先行洞二次衬砌里程应滞后后行洞掌子面10 m以上。

(3) 单洞爆破掘进时,离左洞掌子面5 m左右部位最大主应力达到4.55 MPa,距掌子面15 m范围内最大主应力达到砼静态抗拉强度2.01 MPa,可能引起衬砌结构受拉破坏。为降低爆破危害,后行洞衬砌浇筑里程与掌子面之间应设定足够的安全步距。对于新浇筑衬砌砼,以5.0 cm/s作为爆破振动速度控制标准时,衬砌距离掌子面的安全步距应大于 $3.0D$ ;以10 cm/s作为爆破振动速度控制标准时,衬砌距离掌子面的安全步距应大于 $1.5D$ ;以15 cm/s作为爆破振动速度控制标准时,衬砌距离掌子面的安全步距应大于 $1.0D$ 。

## 参考文献:

- [1] 李书才,李克先,雷刚,等.近距离下穿在建地铁隧道施工爆破变形及控制方法研究[J].岩土力学,2014,35(增刊2).
- [2] 王明年,潘晓马,张成满,等.近隧道爆破振动影响研究[J].岩土力学,2004,25(3).
- [3] GB 6722-2014,爆破安全规程[S].
- [4] 李云鹏,艾传志,韩常领,等.小净距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2007,27(1).
- [5] 汪波,何川,夏炜洋.爆破施工新建地铁隧道与既有运营地铁的相互动力响应研究[J].中国铁道科学,2011(9).
- [6] 姚勇,何川.并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究[J].岩土力学,2009,30(9).
- [7] 李云鹏,艾传志,韩常领,等.小间距隧道爆破开挖动力效应数值模拟研究[J].爆炸与冲击,2007(1).
- [8] 冯仲仁,文曦.新建隧道爆破震动对既有隧道影响的数值分析[J].爆破,2008,25(12).
- [9] 蔚立元,李术才,徐帮树.青岛小净距海底隧道爆破振动响应研究[J].土木工程学报,2010,43(8).
- [10] Monjezi M. Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2010, 30.
- [11] Javier Torano, Rafael Rodriguez, I Diego, et al. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(1).
- [12] 苏国韶,张小飞,符兴义,等.爆炸荷载作用下岩体振动特性的DE-FLAC<sup>3D</sup>数值模拟方法[J].北京理工大学学报,2009,29(6).

(下转第182页)

期产生过多,消耗的实际成本比预计的多,实际利润出现负值。同理可得其他4个月的整体绩效和承包商所能获得利润的变化情况。

3.3 成本偏差分析

(1) 第1个月时的计算结果为  $SV > 0, SPI > 1, USV > 0, UCPI > 1, TCV > 0, TCPI > 1$ , 偏差结果属于表1中第4种情况,进度偏快,效率高,单位成本高,投入超前,但计划利润降低。要想提高项目效益,应适当降低进度,减少人工费成本。

(2) 第2个月时的计算结果为  $SV < 0, SPI < 1, USV > 0, UCPI > 1, TCV > 0, TCPI > 1$ , 偏差结果属于第1种情况,进度偏慢,效率较低,单位成本很高,总成本偏高,项目计划利润降低。需加快进度,降低成本,增加计划利润。

(3) 第3个月时的计算结果为  $SV > 0, SPI > 1, USV > 0, UCPI > 1, TCV > 0, TCPI > 1$ , 偏差结果属于第5种情况,项目进度偏快,项目效率高,单位成本偏高,投入金额超前,项目计划利润降低。需适当降低进度,减少人工费成本。

(4) 第4个月时的计算结果为  $SV > 0, SPI > 1, USV > 0, UCPI > 1, TCV > 0, TCPI > 1$ , 偏差结果属于第5种情况,计划利润良好,进度太慢,效率很低,单位成本高,总成本偏低。要想提高项目效益,应提高效率。

(5) 第5个月时的计算结果为  $SV > 0, SPI > 1, USV < 0, UCPI < 1, TCV = 0, TCPI = 1$ , 偏差结果属于第8种情况,计划利润良好,项目进度偏快,效率高,单位成本低,总成本与计划相同。应保持原有状态。

4 结论

CBM—挣值法在传统挣值法参数的基础上引入承包商角度的计划预算成本参数对项目执行实际

利润状况进行控制,可及时对项目检查点的实际成本费用偏差、实际进度费用偏差、实际利润效益偏差进行原因分析并纠偏,实现对成本、进度、利润三者同步控制,使项目的成本、进度、利润均保持在计划范围或比计划范围更好。该方法可对建筑工程项目的全过程进行有效成本控制,使成本控制贯穿于全体员工、全过程、全方位,提高项目成本控制意识和控制水平,实现成本、进度、利润的有效集成管理,使企业竞争力得以提升。

参考文献:

[1] 弗雷德里克·泰勒.科学管理原理[M].马风才,译.北京:机械工业出版社,2013.

[2] 阿特金森.管理会计[M].王立彦,等译.北京:北京大学出版社,2004.

[3] Lukas J A. Earned value analysis-why it doesn't work [J].Aace International Transactions,2008,12(1).

[4] Fleeting Q W, J M Koppelman. Earned value project management[J].Cost Engineering,1997,39(2).

[5] 张帅,谈飞.基于改进挣值法的工程项目进度优化研究[J].土木工程与管理学报,2014,31(1).

[6] 郑生钦,牟强.改进挣值法在工程项目综合绩效评价中的应用[J].工程管理学报,2013,27(2).

[7] 卢天柱.基于改进挣值法的工程项目成本控制研究与应用[D].重庆:重庆大学,2010.

[8] 龚小燕.公路交通安全设施工程成本控制措施探讨[J].公路与汽运,2016(1).

[9] 苏建安,杨毅.高速公路施工标准化管理绩效评价[J].公路与汽运,2016(4).

[10] 高贺,苑少伟,慈玉生.高速公路投资绩效评价指标体系[J].中外公路.2014,34(6).

[11] 高勇.高速公路项目经营效益评价研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.

收稿日期:2017-09-08

(上接第173页)

[13] 朱正国,孙明路,朱永全,等.超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J].岩土力学,2012,33(12).

[14] 李利平,李术才,张庆松,等.浅埋大跨隧道施工爆破监测与减震技术[J].岩土力学,2008,29(8).

[15] 陈连进.小净距隧道爆破振动对邻近隧道影响测试研究[J].爆破,2010,27(2).

[16] Zhu Zheng-guo, Sun Ming-lu, Zhu Yong-quan, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic

response of ultra-small spacing tunnels[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(12).

[17] 吴超凡.特大断面小净距隧道爆破开挖震动控制标准的研究[J].现代隧道技术,2009,46(4).

[18] 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).

[19] 张恒.爆破开挖路堑对罗依溪隧道安全影响的数值分析[J].公路与汽运,2015(5).

收稿日期:2017-08-14