

# 基于强度折减法的高速公路煤系地层路堑高边坡FLAC<sup>3D</sup>数值模拟分析

席飞雁<sup>1,3</sup>,朱自强<sup>1</sup>,鲁光银<sup>1</sup>,韩博<sup>2\*</sup>,郭友军<sup>1</sup>

(1.中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083;2.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170;

3.中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,长沙 410083)

**摘要:**高速公路路堑边坡的稳定性对施工安全及施工进度存在重要的影响,而由于煤系地层特殊的物理及化学性质,其风化速度快且遇水极易软化,故煤系地层边坡相较于普通边坡具有较差的工程性质。本文基于强度折减法,利用FLAC<sup>3D</sup>软件对武深高速公路广东段煤系地层路堑高边坡的开挖过程 and 支护过程进行了数值模拟,分析了三级坡面开挖及锚杆、框架梁支护前后边坡位移场以及剪切应变增量的变化,并分别计算了开挖前后及支护前后边坡的稳定性系数,为后续边坡的设计与施工提供了技术参考。

**关键词:**FLAC<sup>3D</sup>;煤系地层;路堑高边坡;强度折减法;数值模拟

**中图分类号:** U416

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-4135(2021)04-0061-07

FLAC<sup>3D</sup> (Three Dimensional Fast Lagrangian Analysis of Continua)即三维快速拉格朗日分析软件,利用拉格朗日差分公式计算处理材料的屈服和流变等有限变形问题,能够相对准确地模拟边坡中岩土体和工程材料于三维尺度的结构和受力状态,从而有效地分析边坡岩土体在屈服极限强度前后的弹塑性情况<sup>[1-3]</sup>。FLAC<sup>3D</sup>软件提供包含弹性模型、弹塑性模型和null空模型在内的12个岩土体本构模型,对于具有区域特征性、构造复杂性和成分多相性等性质的岩土体的开挖、支护等过程均能进行较好的数值模拟。

武深高速公路广东段广泛分布着以石炭系下统测水组(C<sub>1dc</sub>)煤系地层以及石蹬子组(C<sub>1ds</sub>)灰岩为代表的煤系地层,煤系地层中炭质泥页岩、页岩岩质软弱,主要由叶蜡石、高岭石及伊利石等亲水性矿物组成,具有较强的遇水软化与失水崩解特性,并且含碳成分高使之具有较强的吸热能力<sup>[4]</sup>。煤系地层极易发生不可逆的干燥-浸水活化作用,且节理发育,岩层破碎,加之较大的孔隙比和较低的强度,使得煤系地层岩土体的工程性质较差<sup>[5]</sup>。而人为切坡卸载会造成煤系地层出露于地表,形成临空面,受水浸润而产生软化效应,强度较差的煤层趋向于坡面方向挤出,导致煤层

侧面的砂岩存在拉张作用;同时受外营力作用,煤层以较快的速度风化成低强度的煤系土,胶结能力弱的煤系土进一步导致煤层风化、裂隙发育,松散的结构进一步使得风化深度加大,从而造成边坡的稳定性弱化<sup>[6-9]</sup>。由于煤系地层较差的工程性质以及相对破碎的赋存状态,对该边坡进行开挖容易弱化其稳定性,造成边坡失稳,后续边坡支护工作的设计也难以得到高效有序的开展,因此对该路堑边坡的开挖施工以及支护处理进行模拟以分析其开挖对边坡稳定性的影响和支护效果的评估便至关重要<sup>[10]</sup>。

为了深入了解武深高速公路广东段煤系地层路堑高边坡开挖条件下的稳定性机理,本文以K431+230~K431+730段右侧高边坡为研究对象,基于强度折减法,利用FLAC<sup>3D</sup>建立边坡模型,对三级开挖过程以及锚杆、框架梁支护过程进行数值模拟,对比分析各个阶段边坡的应力场、位移场以及安全系数变化,掌握边坡在开挖前后以及支护前后的稳定性情况,为后续的设计与施工提供技术参考。

## 1 强度折减法

### 1.1 基本原理

强度折减法相较于极限平衡法等方法,滑动面

收稿日期:2020-06-30

资助项目:国家自然科学基金项目“基于盲源分析的重力梯度张量多异常源分离理论及算法研究(41374120)”;长沙市科技计划项目“边坡自动化监测预警与安全评价综合管理平台研发(kq1706068)”

作者简介:席飞雁(1994-),男,硕士,从事岩土工程勘察方向,E-mail:969395296@qq.com;\*通讯作者:韩博(1984-),男,工程师,博士,主要从事水文地质、工程地质、环境地质方面的调查与研究工作,Email:hanbo1984@126.com。

的位置与形状无需假定,较大程度上规避了人为假定的缺陷,同时对于静力许可、应变相容和土体的非线性应力-应变关系能够满足,因此强度折减法在边坡稳定性的分析方面得到了较为广泛的应用<sup>[11]</sup>。其原理是对边坡强度指标参数进行折减,就采用Mohr-Coulomb准则的边坡而言,所考虑的折减的强度指标参数为粘结力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ ,为达到逐步折减的目的,将初始强度指标参数 $c^0$ 、 $\varphi^0$ 值同时除以折减系数 $K$ ,得到一组新的强度参数 $c'$ 和 $\varphi'$ 之后继续进行有限差分分析<sup>[12]</sup>。通过不断增大折减系数 $K$ 的值,反复计算分析直到边坡达到临界破坏状态,若此时粘结力内摩擦角为 $c^r$ 和 $\varphi^r$ ,则定义边坡安全系数 $F$ 为达到临界破坏状态时对应的折减参数 $K'$ ,即:

$$F = K' = \frac{c^0}{c^r} = \frac{\tan \varphi^0}{\tan \varphi^r}$$

FLAC<sup>3D</sup>软件中自动查找安全系数命令“solve fos”,可以对内聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 进行折减,直至边坡处于临界破坏状态来确定安全系数,其实质就是强度折减法<sup>[13]</sup>。利用FLAC<sup>3D</sup>内嵌强度折减法指令计算所得边坡安全系数是评估边坡稳定性的有效依据,根据《公路路基设计规范》(JTG D30-2004),正常工况下,当高速公路路堑边坡稳定安全系数控制在1.20以上,则表明边坡处于相对稳定状态。

## 1.2 临界破坏判断依据

对于边坡是否达到临界破坏状态的判断是强度折减法的关键问题。本文参考的判断依据主要包括以下两点:(1)塑性变形区域相互贯通情况,边坡的失稳过程可以看作由塑性区逐步扩大至贯通,进而无法承载荷载进入塑流状态的过程,因此在数值模拟中,塑性变形区域相互贯通可以作为判断达到临界破坏的依据<sup>[14-15]</sup>,即当塑性区贯穿坡底至坡顶时,一定程度上可以表征边坡达到临界破坏状态;(2)数值计算的收敛性,由于边坡失稳,滑动面上的岩土体变为运动状态,进而产生位移和塑性应变的突变值,在数值分析层面上,则体现为位移和塑性应变增长较大,程序无法从数值方程组中找到一个既能满足静力平衡又能满足应力-应变关系和强度准则的解,其数值计算将无法收敛,因此,静力平衡方程组是否有解及数值计算是否收敛可以作为判断边坡达到临界失稳的又一依据<sup>[1]</sup>。除此之外,研究特征点的位移情况以及从动力学角度研究滑动岩土体的加速度情况,均可作为边坡体临界破坏的判断条件。

## 2 数值模拟

### 2.1 工程概况

本文以武深高速公路广东段K420+533~K420+844段右侧高边坡为研究对象,该边坡原始坡高45 m,坡宽157 m,坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$ ,如图1。



图1 边坡实际现场图

Fig.1 Actual site map of slope

该边坡所在区域属构造剥蚀丘陵地貌,冲沟斜坡地形,地形起伏、右高左低。高速公路位于较陡斜坡处,地下水补给和排泄均较为迅速,雨季坡面形成的地表径流快速地向坡角沟谷处排泄,加之坡面植被发育,因此,地表径流对坡体的冲刷影响不大。根据前期勘察结果,该边坡地表分布有厚度小于10 m的全风化残坡积土和强风化碎石,第四系覆盖层主要为全新统残坡积(Q<sub>4</sub><sup>st+d</sup>)粉质粘土,上部为强风化页岩夹砂岩,下伏岩性为石炭系下统大塘阶测水段(C<sub>1dc</sub>)全-强风化砂岩,且坡体中夹杂的由灰黑色炭质灰岩、炭质页岩和夹劣质煤等构成的煤系地层,与全-强风化砂岩及强风化页岩夹砂岩互层。

### 2.2 建立模型

根据实际工区条件以及施工需求,对该边坡的开挖自上而下分三段进行,第一级边坡高度15 m,坡率1/0.75,第二级边坡高度15 m,坡率1/1.0,第三级边坡高度15 m,坡率为1/1.5,一级平台宽2 m,二级平台宽14 m,三级平台宽8 m,设计如图2所示。顺次对各级坡面进行锚杆和框架梁支护。利用FLAC<sup>3D</sup>中Extrusion建立的原始边坡模型如图3所示,鉴于建立

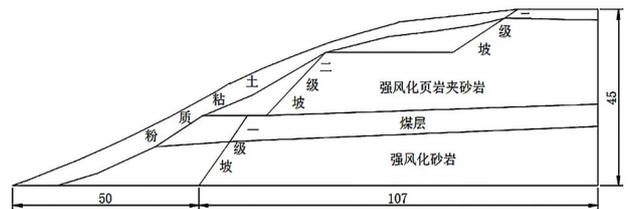


图2 边坡设计图

Fig.2 Design drawing of slope

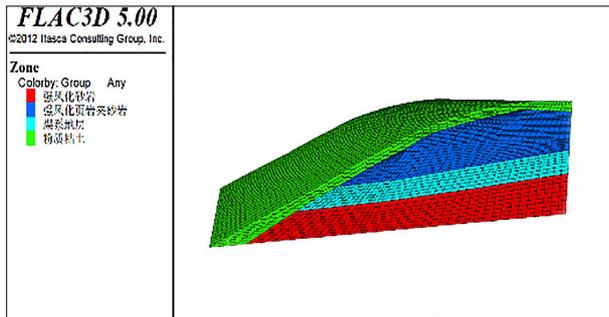


图3 原始边坡三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of Primitive Slope

三维网格模型的建立相对复杂,因此在建模时简化了某些因素,过程中所考虑的界线主要包括岩层面、严重卸荷带后缘以及开挖面,对于断层的影响则未纳入考虑。

该边坡主要由粉质粘土、全-强风化页岩夹砂岩和强风化砂岩及夹杂的煤系地层构成,复杂的岩土体弹性及塑性变形特性使得其应力应变规律的掌握较为困难,因此,将岩土体简化成为理想条件下的弹塑性材料,选用摩尔-库伦本构模型<sup>[16-18]</sup>对其进行数值模拟计算。根据土工试验,并结合实际经验,获得的岩土体物理力学参数如表1所示。

表1 煤系地层岩土体物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of Geotechnical body of coal measures strata

岩土层名称	体积模量/ Pa	内聚力/ Pa	密度/ kg/m <sup>3</sup>	膨胀 角/°	内摩擦 角/°	剪切模量/ Pa
粉质粘土	8.35×10 <sup>7</sup>	1.2×10 <sup>5</sup>	1 870	0	16	9.02×10 <sup>6</sup>
强风化页岩夹砂岩	6.18×10 <sup>8</sup>	4.2×10 <sup>5</sup>	2 510	20	24	2.54×10 <sup>7</sup>
煤系地层	4.76×10 <sup>8</sup>	4.2×10 <sup>5</sup>	2 262	14	20	2.47×10 <sup>7</sup>
强风化砂岩	8.72×10 <sup>8</sup>	1.1×10 <sup>6</sup>	2 750	27	29	4.52×10 <sup>7</sup>

开挖的进行会导致边坡内部应力场的改变,从而加强边坡内部结构的劣化,造成边坡表面位移而产生失稳。一般情况下,开挖后要进行锚索及框架梁等支护处理,锚索结构能够借助于水泥浆沿其长度方向提供的抗剪能力而产生局部阻力来抵抗岩块裂缝的位移,从而将潜在滑动岩土体与稳定岩体紧密连接为一体,以增加岩土体各层面的抗滑力形成深层加固<sup>[19-20]</sup>。而框架梁能够框箍坡面岩土,并且有效地连接各个锚索从而与之共同作用来控制边坡的松弛程度,由此构建了一套深层加固与浅层护坡的综合防护体系。合理的支护措施可以改善边坡的稳定性<sup>[21-24]</sup>。

因此,本文拟利用FLAC<sup>3D</sup>中的锚杆单元cable和梁单元beam对边坡开挖后的支护措施(锚索和框架

梁)进行模拟,根据边坡地质特征以及实际工况,锚杆及框架梁的物理力学参数选取如表2和表3所示。

表2 锚杆物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of slope bolts

弹性模量/Pa	抗拉强度/Pa	横截面积/m <sup>2</sup>	单位长度粘结力/N/m	单位长度水泥浆刚度/Pa/m	外圈周长/m
8.0×10 <sup>11</sup>	7.5×10 <sup>9</sup>	7.88×10 <sup>-3</sup>	1.0×10 <sup>6</sup>	2.0×10 <sup>9</sup>	0.314

表3 框架梁物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of frame beams of slope

弹性模量/Pa	泊松比	横截面积/m <sup>2</sup>	Y轴惯性矩/m <sup>4</sup>	Z轴惯性矩/m <sup>4</sup>	极惯性矩/m <sup>4</sup>
4.0×10 <sup>10</sup>	0.3	0.1	4×10 <sup>-4</sup>	4×10 <sup>-4</sup>	0

本次数值模拟对该边坡模型的左右侧向两面进行竖向滑动水平约束,其余面则呈自由界面不加以约束,以其自身重力作为初始应力,先取较大内聚力c及抗拉强度σ计算至初始应力平衡后再赋予表2对应的参数值。每步开挖后都进行计算以求得对应的动力响应特征值,同时利用强度折减法计算对应的安全系数,综合分析各步开挖施工对目标边坡稳定性的影响。同时对开挖后的边坡展开锚杆和框架梁的支护模拟,对比支护前后的动力响应特征值以及安全系数,从而达到为实际后续支护施工的设计及效果提供参考与评估的目的。

### 3 数值模拟结果分析

对该边坡执行开挖操作而造成的边坡稳定性的影响,本文将通过FLAC<sup>3D</sup>数值模拟自上而下执行3次开挖施工后的位移及应力等特性的变化特征,来对其进行分析。同时模拟开挖后对边坡的支护措施,进一步分析支护前后的边坡位移及应力变化。由于最大剪切应变增量的大小是边坡内部应力状态以及潜在滑动面位置的重要表征<sup>[19]</sup>,因此本文研究最大剪切应变增量云图以掌握边坡应力情况以及潜在滑动面位置。具体的数值模拟结果如下。

#### 3.1 初始状态下边坡的位移场和应力场

只将开挖前的边坡体自重纳入考虑范围,对所建模型施加重力,并且在未执行开挖卸荷作用的前提下,计算至目标边坡的最大不平衡力趋于水平(图4),即达平衡状态。运用强度折减法求解处原始状态下边坡的位移与应力以及对应的安全系数,由图5图6可以看出,在自然原始条件下,主要位移集中于边坡表面的粉质粘土,最大剪切应变增量的峰值区

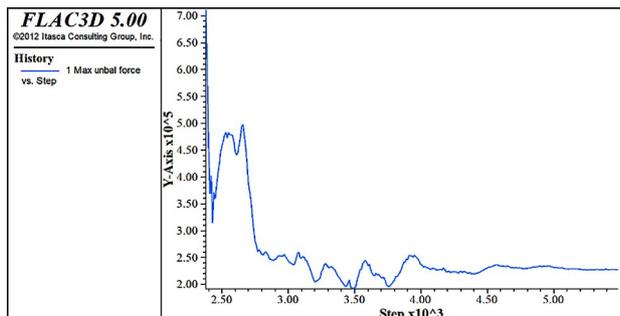


图4 最大不平衡力

Fig.4 Maximum unbalanced force

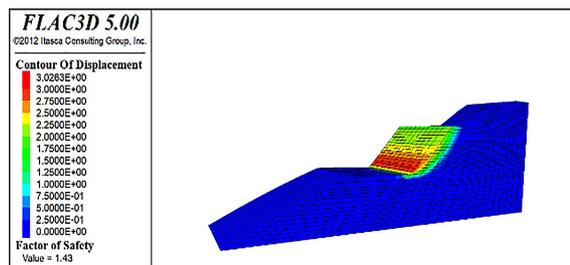


图8 第二次开挖后的位移云图

Fig.8 Displacement cloud map after the second excavation

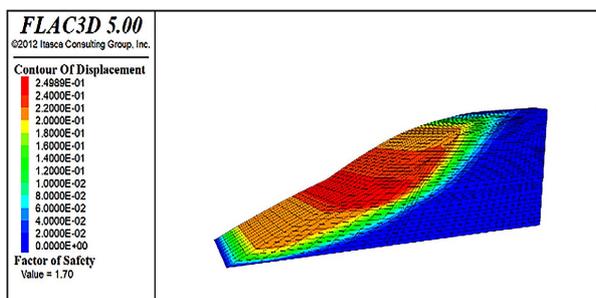


图5 原始状态下的位移云图

Fig.5 Displacement cloud map in primitive state

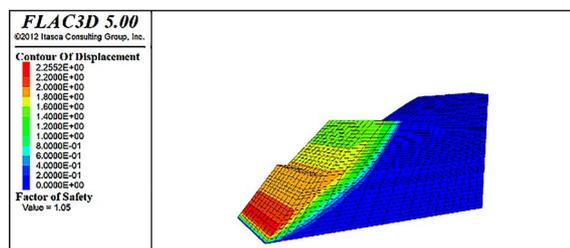


图9 第三次开挖后的位移云图

Fig.9 Displacement cloud map after the third excavation

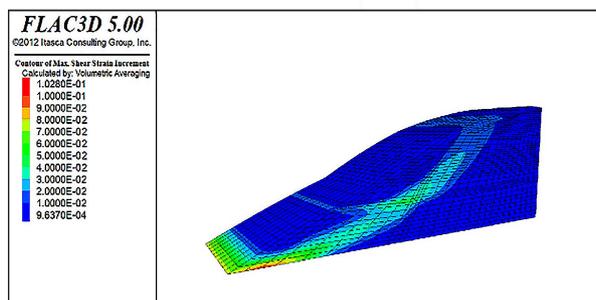


图6 原始状态下最大剪切应变增量云图

Fig.6 Maximum shear strain increment cloud map in primitive state

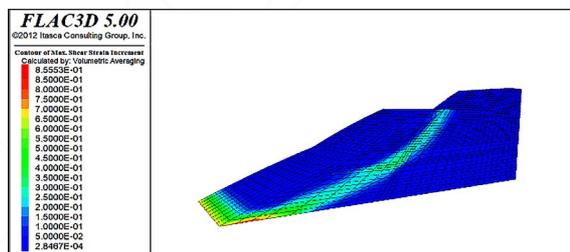


图10 第一次开挖最大剪切应变增量云图

Fig.10 Maximum shear strain increment cloud map after the first excavation

域集中于坡脚和煤层处,但边坡安全系数达到1.70,可见边坡在原始条件下处于较为稳定的状态。

### 3.2 开挖后边坡的位移场变化

对边坡进行三次开挖后的位移场变化(图7~12),从图中可知,开挖3次之后边坡安全系数呈

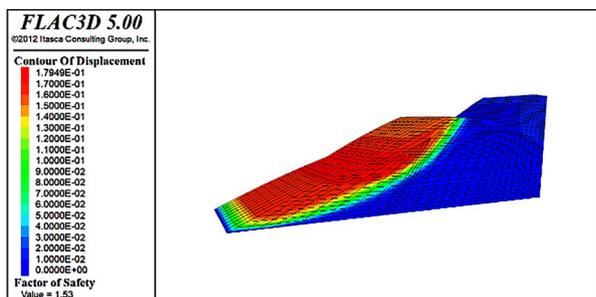


图7 第一次开挖后的位移云图

Fig.7 Displacement cloud map after the first excavation

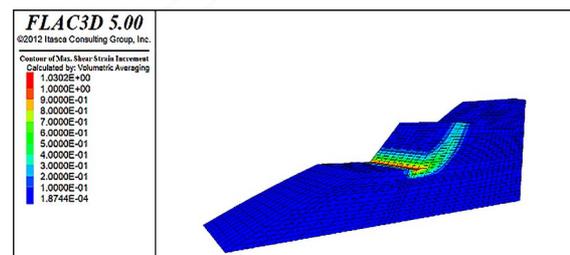


图11 第二次开挖最大剪切应变增量云图

Fig.11 Maximum shear strain increment cloud map after the second excavation

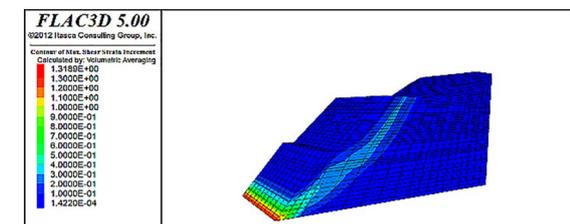


图12 第三次开挖最大剪切应变增量云图

Fig.12 Maximum shear strain increment cloud map after the third excavation

1.53~1.43~1.05的变化趋势,即3次开挖逐步削弱了边坡稳定性,并在第3次开挖后边坡呈欠稳定状态。边坡位移值自坡面向坡内部逐渐递减,临空面位移值相对较大,且边坡位移以水平位移为主,位移方向沿临空面向下。从图7可以看出,第1次开挖之后,卸荷作用致使边坡内部原有的应力平衡被破坏,导致边坡结构的劣化,因此边坡稳定性降低,由原始状态下的1.70减小至1.53。但由于对上覆岩土层的卸荷,一定程度减小了边坡自重,因此坡面位移较原始状态下的位移数值有所减小。从图8可以看出,第2次开挖后二级边坡坡脚的位移形变最大,可知卸荷作用对二级边坡影响最大,使得其坡脚的应力释放最为显著,且二级边坡坡脚处靠近煤系地层的出露处,因此,施工过程中应该重点监测防护,施工后应及时进行支护处理。从图9可知,第3次开挖完成后边坡安全系数为1.05呈欠稳定状态,且一、二级边坡临空面向内形成位移相对较大的弧形区域,边坡位移增量集中在坡脚处,因此,如不加以支护防范,容易产生滑塌现象,造成边坡失稳。

开挖后边坡的剪切应变增量(图10~12),由图可得知,开挖较大程度改变了边坡坡体内部应力状态,造成的应力转移现象使得开挖处形成了较为明显的应力集中区,边坡体的失稳破坏大多沿剪应变最大的部分而产生,而边坡内部的应力应变状态改变导致坡体中潜在滑动面的产生。最大剪切应变增量的极值出现在坡脚,同时剪切应变增量集中带从底部向顶部延伸贯穿了整个坡体,故对坡脚处应当及时进行支护处理,随着逐次开挖的进行其值也逐步增大,表明开挖操作一定程度上使得边坡稳定性变差,同时煤系地层处最大剪切应变增量的数值和范围相对较大,故在开挖过程中应对其重点防护。

### 3.3 支护后边坡应力场和位移场变化

对边坡的开挖引起的卸荷作用,使得坡体产生一定程度的形变,安全系数由原始的1.70减为1.05,边坡由稳定变为欠稳定,需要对边坡进行支护处理。初步支护方案采用锚索支护和框架梁支护,具体参数如表2和表3所示。其中框架梁横纵向间距取3 m,锚杆与水平面的交角取15°,第2级坡面坡脚处为煤系地层,鉴于其特殊的物理及工程性质,在出露处锚杆设置长度加大以达到重点支护的目的。

锚杆和框架梁支护后边坡的位移云图和最大剪切应变增量云图(图13、图14)。由图13可以看出,

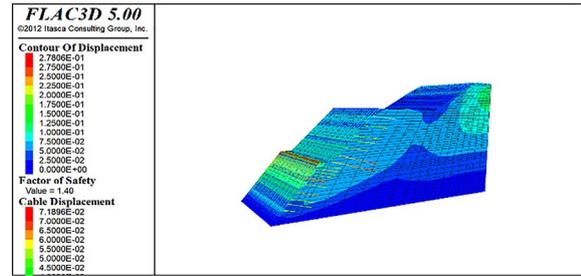


图13 支护后位移云图

Fig.13 Displacement cloud map after support measures

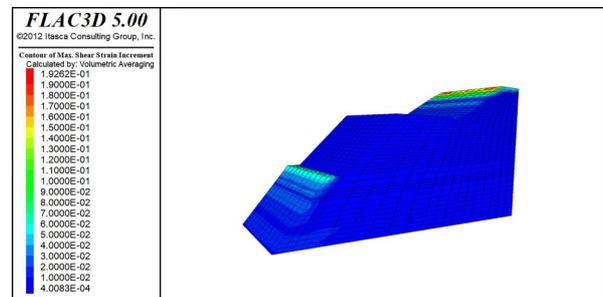


图14 支护后最大剪切应变增量

Fig.14 Maximum shear strain increment cloud map after support measures

三级边坡的坡脚位移得到了有效的控制,边坡安全系数增加到了1.40呈稳定状态。从图14可以看出,最大剪切应变增量云图表明通过一系列的支护措施之后,目标边坡的应力集中区域从应力值较大的坡脚转向应力值较小的坡顶,且潜在滑动面也得到了较大程度的控制,可见进行锚杆和框架梁支护后可将临空面区域和下部坡体连接成一个共同受力的整体,从而起到了传递压力的作用,因此,较大程度地改善了边坡的稳定性。

### 3.4 实际情况对比

现场施工前后对目标边坡开展地表位移和深部位移的监测,在K420+650里程处的监测结果较好地佐证了数值模拟结果的准确性。其水平位移和沉降(图15~16),监测结果显示在6月19日现场对边坡开挖后,边坡水平位移和沉降量变化速率较大,之后最大水平位移达到50.3 mm,最大沉降量达到118.0 mm,进行相应的支护工作之后其地表水平位移和沉降量均恢复基本稳定状态。其深部位移情况(图17~18)所示,A方向4 m以上深度累计最大位移为115.8 mm,B方向为33.9 mm,执行开挖之后,边坡稳定性受到影响,其深部位移增量过大,测斜孔发生破坏,深部位移监测中止。

综上所述,通过与实际情况的对比,利用FLAC<sup>3D</sup>

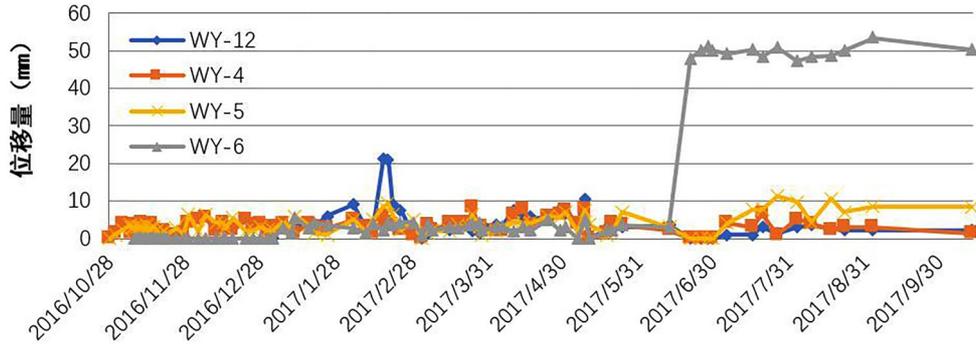


图 15 K420+650地表位移曲线图

Fig.15 Horizontal displacement Diagram of K420+650

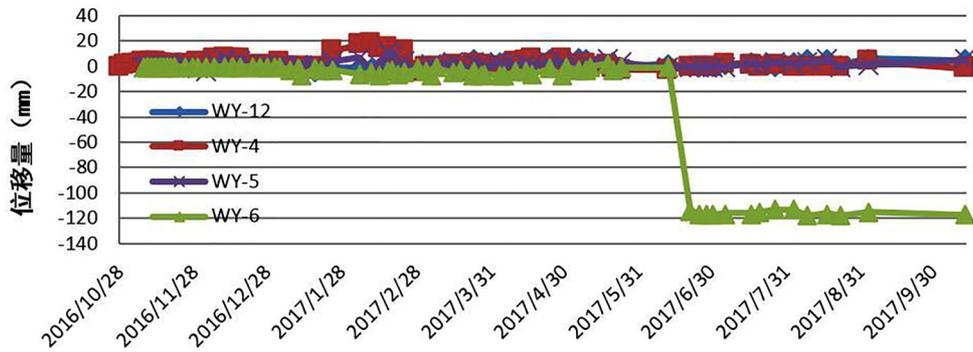


图 16 K420+650沉降曲线图

Fig.16 Settlement Diagram of K420+650

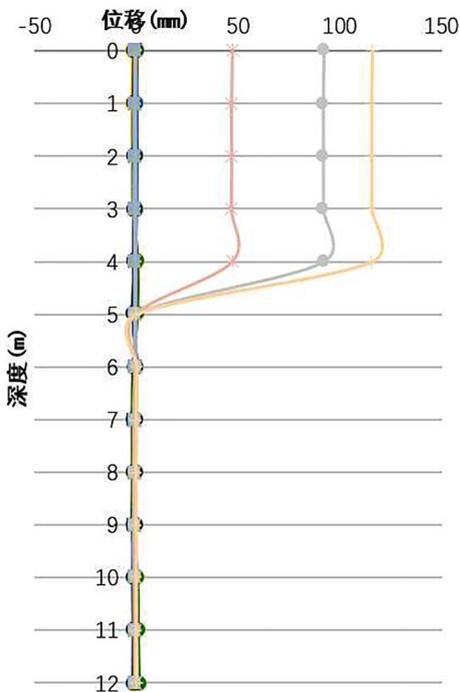


图 17 K420+650 A轴方向深部位移曲线图  
Fig.17 Deep displacement Diagram in Axis A direction

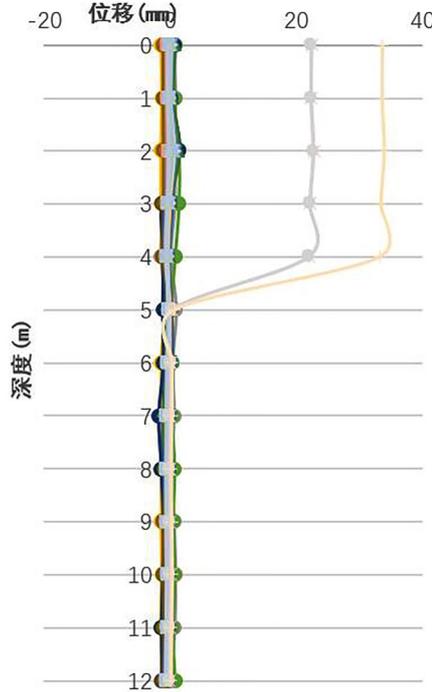


图 18 K420+650B轴方向深部位移曲线图  
Fig.18 Deep displacement Diagram in Axis B direction of K420+650

### 4 结论

(1)利用FLAC<sup>3D</sup>软件对煤系地层路堑高边坡进行了开挖条件下的数值模拟,分析了对应的位移和最大剪切应变增量特点以及利用强度折减法计算所得的安全系数变化,其结果与实际情况大致吻合,FLAC<sup>3D</sup>对于边坡施工具有较为准确的模拟效果。

(2)煤系地层具有特殊的物理及工程特性,当执行开挖操作后,煤系地层处的位移响应呈现较大的数值,最大剪切应变增量区也呈现较大的范围,因此,煤系地层对该边坡的稳定性起着举足轻重的作用,施工过程中应

基于强度折减法来数值模拟边坡的开挖和支护,其结果与实际现场施工的结果吻合程度良好。

重点对其部署监测工作,并且及时进行支护处理。

(3)对煤系边坡进行锚杆及坡面框架梁支护措

施,且对煤系地层处重点采取较大参数较大长度的锚杆支护后,边坡位移以及最大剪切应变等指标得到了有效的控制,安全系数也由1.05增加至1.4,支护措施明显的提高了边坡的稳定性,FLAC<sup>3D</sup>软件对边坡支护设计与施工提供了有效的技术指导与参考。

#### 参考文献:

- [1] 孙书伟,林杭,任连伟.FLAC<sup>3D</sup>在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC<sup>3D</sup>基础与工程实例.第2版[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [3] 彭文斌.FLAC<sup>3D</sup>实用教程[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [4] 姜静,江晓霞.广清高速公路煤系土路堑边坡设计[J].中外公路,2005,25(5):27-29.
- [5] 符滨.边坡开挖条件下煤系地层岩土体工程性质变化规律研究及加固措施[D].中南大学,2014.
- [6] 祝磊,洪宝宁.煤系土浅层滑坡的影响因素敏感性分析[J].长江科学院院报,2011,28(7):67-71.
- [7] 郑一晨,张可能.湘南煤系地层边坡稳定性分析及案例研究[J].土工基础,2016,(2):131-135.
- [8] 李敏,秦小林.煤系地层路堑高边坡病害防治措施设计[J].路基工程,2005(1):72-74.
- [9] 李乃旺,王辉,廖俊海,等.煤系地层路堑边坡滑坡机理分析与治理[J].公路,2014,(8):161-166.
- [10] 李国鹏.基于FLAC<sup>3D</sup>的深路堑开挖及防护分析[J].铁道建筑技术,2016,(1):9-12.
- [11] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [12] 迟世春,关立军.基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性[J].岩土工程学报,2004,(1):42-46.
- [13] 欧湘萍,白楷,朱云升,等.基于FLAC<sup>3D</sup>的强度折减法边坡稳定性分析[J].武汉理工大学学报,2009(9):03
- [14] 刘立鹏,陈奇,张彬.基于FLAC强度折减理论的边坡稳定性研究[J].岩土工程技术,2008,22(1):6-10.
- [15] 马建勋,赖志生,蔡庆娥,等.基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2690-2690.
- [16] 郭波,路娟.FLAC<sup>3D</sup>在路基边坡稳定性分析中的应用[J].路基工程,2009,(1):158-160.
- [17] 张艳阳,任光明.某滑坡稳定性的FLAC<sup>3D</sup>数值模拟研究[J].四川理工学院学报(自科版),2015,28(6):83-86.
- [18] 尹紫红,周志林,姚令侃.用FLAC<sup>3D</sup>软件分析高速公路边坡的稳定性[J].路基工程,2006,(1):45-47.
- [19] 王立文.基于FLAC<sup>3D</sup>的公路边坡分级柔性支护数值模拟研究[D].兰州理工大学,2012.
- [20] 肖若愚.基于FLAC<sup>3D</sup>的阳沟新村南侧边坡稳定性分析及治理措施研究[D].昆明理工大学,2016.
- [21] 阳建新,李发菊,陈田华.浅析四川汶川索桥滑坡稳定性及治理措施[J].地质调查与研究,2012,(3):210-213.
- [22] 许宇明.基于FLAC<sup>3D</sup>的山区高速公路高边坡支护方案优化设计[J].公路工程,2015,40(6):145-148.
- [23] 陈尤,韦秉旭,唐辉湘.基于FLAC<sup>3D</sup>的岩质边坡锚杆优化设计[J].中外公路,2011,31(6):85-89.
- [24] 许鹏,宋双双,刘宝生,等.南京下蜀土滑坡灾变成因现场调查及加固处理措施[J].地质调查与研究,2018,41(2):145-152.

## Analysis of numerical simulation of cutting high slope in coal measures stratum of highway based on the strength reduction method in FLAC<sup>3D</sup>

Xi Fei-yan<sup>1,3</sup>, ZHU Zi-qiang<sup>1</sup>, LU Guang-yin<sup>1</sup>, HAN Bo<sup>2</sup>, GUO You-jun<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha, 410083, China; 2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The stability of highway cutting slope has an important influence on construction safety and construction progress. Because of the special physical and chemical properties of coal measures stratum, its weathering speed is fast and it is easy to soften when it meets water, so the slope of coal measures stratum has worse engineering properties than that of common slope. In this paper, based on strength reduction method, the excavation and support process of cutting high slope in coal measure stratum of Guangdong section of Wushen Highway are simulated by FLAC<sup>3D</sup> software. The changes of stress and displacement fields of slope before and after excavation of three-stage slope surface and bolt and frame beam support are analyzed, The corresponding stability coefficients of slope are calculated too, which provides technical reference for the design and construction of subsequent slope.

**Key words:** FLAC<sup>3D</sup>; coal measures stratum; high cutting slope; strength reduction method; numerical simulation