

文章编号:1007-2985(2011)05-0069-06

# 炭质页岩高填方路堤稳定性分析\*

敖亦兵<sup>1</sup>, 刘新喜<sup>2</sup>, 杨子汉<sup>2</sup>, 王意明<sup>2</sup>

(1. 荆州市顺达高速公路建设有限公司, 湖北 荆州 434100; 2. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:**以广西某高速公路为工程背景,对炭质页岩物理力学性能进行了试验研究.炭质页岩强度随压实度的增加而增大,在水浸条件下炭质页岩的强度大大降低.运用有限元强度折减法,采用大型有限元计算软件分析了压实度及降雨对炭质页岩路堤稳定性的影响.结果表明:随着压实度的提高,路堤安全系数随之增加;降雨使路堤安全系数大幅减低,但只要路堤压实度达到 93% 以上,炭质页岩高填方路堤边坡不会失稳.

**关键词:**炭质页岩;高填方路堤稳定性;有限元强度折减法

中图分类号:U416.1+2

文献标志码:A

广西地处云贵高原至东南沿海丘陵过渡地带,分布着大量炭质页岩,六寨至河池高速公路沿线山势险峻,高差悬殊,地形条件异常复杂,在这种地形条件下修筑高速公路,考虑到投资和工期,不可避免地出现大量的炭质页岩挖方路堑边坡及高填路堤,高填路堤的稳定是高速公路正常运行的基本保证.目前,国内外对高路堤的稳定性研究已取得相当的研究成果<sup>[1-6]</sup>,然而,针对炭质页岩这种软岩高路堤的研究并不多见,笔者在已有的研究成果,以广西六寨至河池高速公路为背景工程,首先研究了炭质页岩的物理力学性质,然后采用有限元强度折减法,最后研究了路堤填料的压实度及极端雨情况下对其稳定性的影响.

## 1 炭质页岩的物理力学性质

### 1.1 炭质泥岩的化学组成

页岩属于沉积岩,在中国古生代和中生代有广泛分布,这些沉积岩中由于含碳而成黑色,习惯统称为炭质页岩(泥)岩.填料的物理力学性质由其化学组成及结构构成决定,通过外部环境因素(水、风、温度等)表现出来.笔者对广西六寨至河池高速公路沿线 K18+500、K20+400 和 K24+400 这 3 处炭质页岩进行 X 衍射分析如图 1,2,3,并对其化学组成全分析如图 4,从图可以看出,3 处页岩的化学成分基本相同,含量最高的是 SiO<sub>2</sub>,其次是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,K<sub>2</sub>O 的含量较少,烧失量超过 10%,由化学成分可以大致推断其矿物组成:含量最高的是石英,粘土矿物主要是高岭石和蒙脱石,伊利石含量较少.

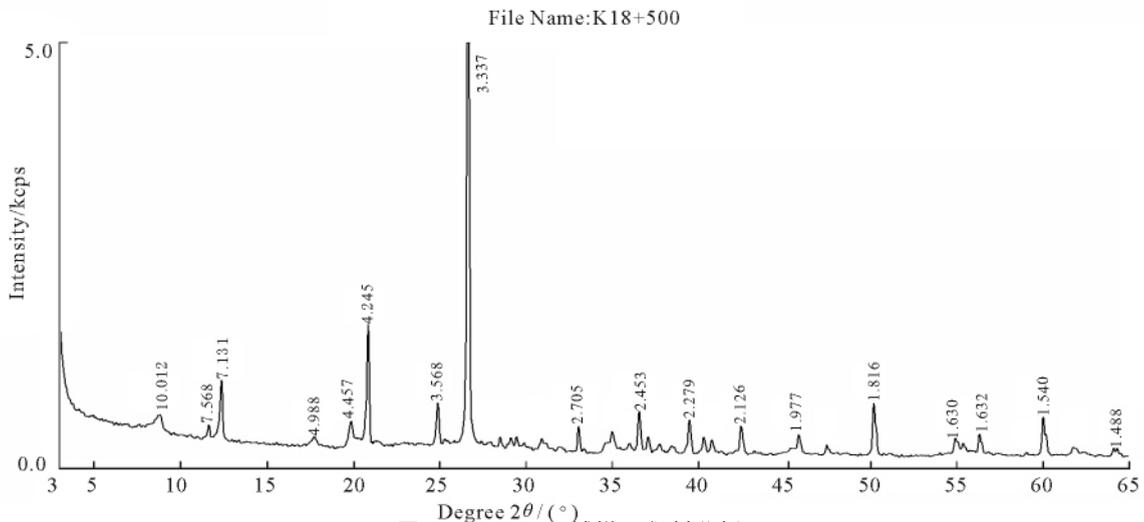


图 1 K18+500 试样 X 衍射分析

\* 收稿日期:2011-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50974024)

作者简介:敖亦兵(1965-),男,湖北荆州人,荆州市顺达高速公路建设有限公司高级工程师,主要从事道路工程研究.

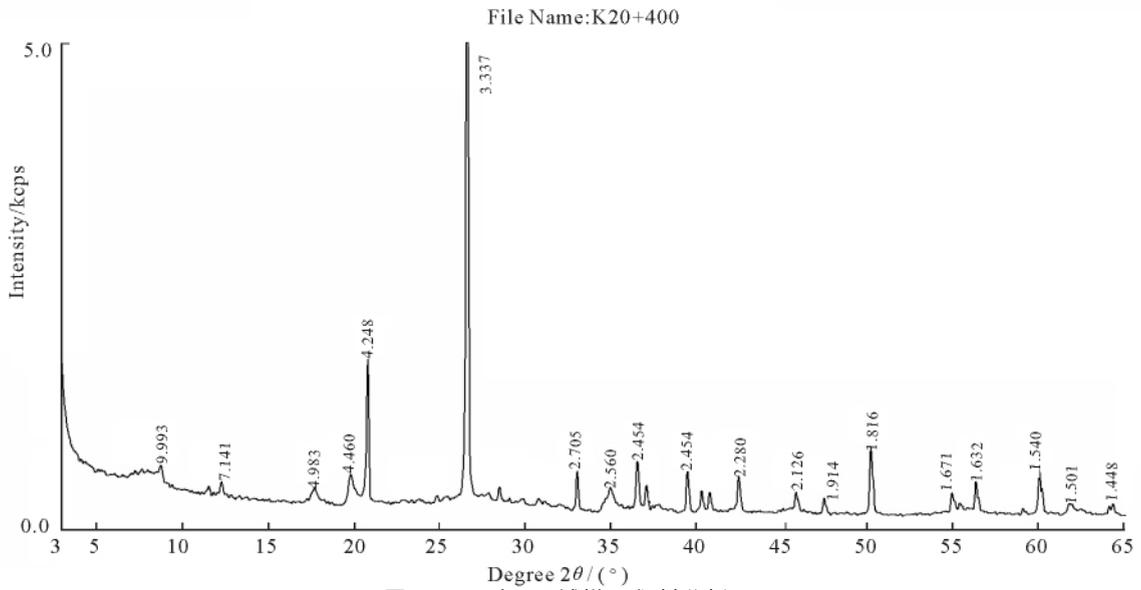


图 2 K20+400 试样 X 衍射分析

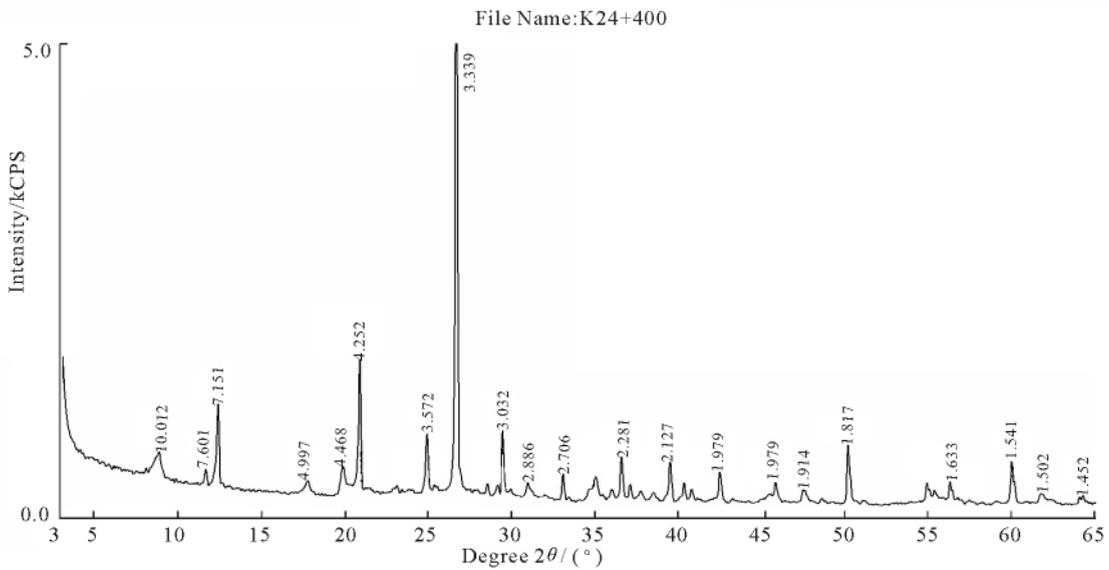


图 3 K24+400 试样 X 衍射分析

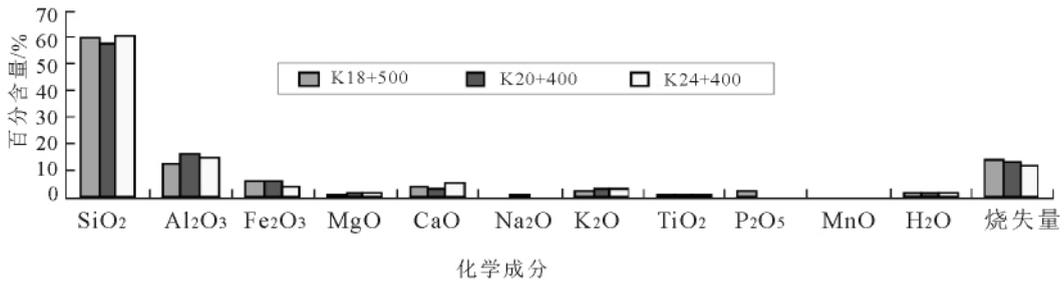


图 4 化学成分组成分布

1.2 炭质页岩的物理力学性质

1.2.1 基本物理性质 通过对 3 处炭质页岩进行室内相关土工试验得出物理参数如表 1。在击实试验中发现,当含水率较低时,随着含水率的增加,其干密度也逐渐增加;当含水率达到一定值时,随着含水率的增加,其干密度反而逐渐减少,说明炭质页岩的压实特性与土的压实特性基本相似,即存在最佳含水率和最大干密度,在最佳含水率左右压实可得到较大干密度,

当压实度大于 93% 时孔隙比降至 0.37 以下,说明该填料具有较好的压实性.同时,通过室内试验研究发现:未崩解的炭质页岩在遇水时易崩解、软化而使承载力下降,因此,炭质页岩填料只能用于路堤填料,不能用于路床填筑,在施工过程中应尽量让其崩解风化,填筑过程中及时做好排水设施,以免雨水渗入路堤内部而使路堤产生较大变形,最终发生破坏.

对炭质页岩进行筛分试验,得到 3 个工点试样的颗粒级配曲线如图 5 所示.计算得到的炭质页岩不均匀系数  $C_u$  分别为 48.08,23.29 及 28.96,曲率系数分别为 2.19,2.35 及 2.11.

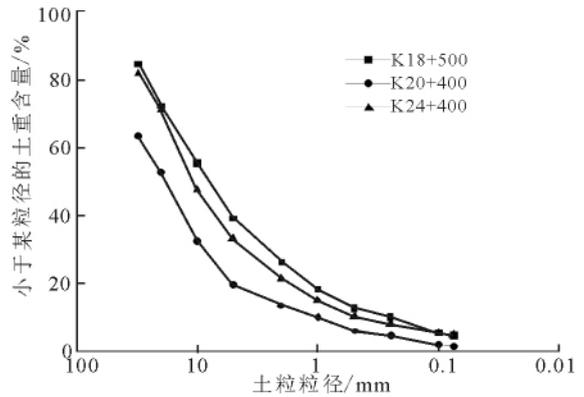


图 5 炭质泥岩风化土颗粒级配曲线

表 1 基本物理参数

土粒比重	抗压强度/MPa	最佳含水率/%	最大干密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	压实度/%	平均孔隙比
				93	0.37
2.66~2.72	10~20	5.65~7.28	2.08~2.22	94	0.35
				96	0.32

1.2.2 加州承载比(CBR) 路堤填料经过压实后必须满足一定的强度和变形要求,CBR 值是反映路堤强度和变形的一项重要指标.笔者根据击实试验所得的最佳含水率及最大干密度,分别制备压实度为 93%,94%,96% 的 3 组试样进行 CBR 试验,整理试验结果如表 2.从表 2 明显可以看出,K18+500 处炭质页岩 CBR 值较大,大于 5.0,并随着压实度的提高而增大,膨胀率较低,满足《公路路基设计规范》<sup>[7]</sup>(JTG D30-2004)对填料的要求,可用于路堤的填筑;其余两处炭质页岩 CBR 值都较小,膨胀率较大,不能直接用作路堤填料.因此,笔者只对 K18+500 处炭质页岩进行力学指标试验研究,考虑到降雨对路堤稳定性的影响,根据河池极端雨的情况,设计了 2 种试验:(1)填土上路基后,一直不受水的浸泡作用;(2)填土先受不同压力后浸泡.整理试验结果,得出力学指标如表 3.

表 2 不同压实度 CBR 值及膨胀率

压实度/%	K18+500		K20+400		K24+400	
	承载比(CBR)	膨胀率/%	承载比(CBR)	膨胀率/%	承载比(CBR)	膨胀率/%
93	7.5	1.63	1.2	3.01	1.8	2.53
94	8.5	2.29	2.1	2.96	2.8	3.72
96	9.2	1.87	2.2	3.59	1.8	4.67

表 3 基本力学指标

参数	90		93		94	
	干	湿	干	湿	干	湿
干密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	1.88	1.88	1.94	1.94	1.96	1.96
粘聚力 $c$ /kPa	82	26.4	88	32.3	92	35.9
内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	31	22	35	26	38	28
弹性模量 $E$ /kPa	22 500	18	24 000	19 500	25 000	20 000
泊松比 $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

1.2.3 浸水条件对炭质页岩特性的影响 为考虑浸水条件对炭质页岩填料的影响,采用直剪仪进行研究,设计 3 种不同试验方案,即(1)干试样直接剪切;(2)干试样先浸水再剪切至破坏;(3)干试样在不同竖向压力下先固结再浸水,最后将其剪切直至破坏.根据试验成果分析各种试验条件下试件的抗剪强度指标,其结果整理如表 4 所示.

表 4 不同试验条件下炭质页岩抗剪强度指标

强度指标	未浸水试件	先浸水后固结试件	先固结后浸水试件
$c_{cu}$ /kPa	102.8	78.6	36.5
$\varphi_{cu}$ /( $^{\circ}$ )	45.8	25.7	33.3

由表 4 可知,干试件固结不排水抗剪强度较大,但浸水后其值有较大幅度的降低.其中,先浸水后固结试件的凝聚力下降了 24%,先固结后浸水试件的凝聚力下降达到 65%,说明炭质页岩填料强度受水影响较大,因此路堤施工过程中应注意

加强排水,同时应防止路面开裂造成地表水入渗.需要指出的是,由于水的作用导致炭质页岩填料力学性质变化的机理极为复杂,且直剪试验过于简单,难以完全揭示浸水条件的影响,其规律有待进一步深入研究.

## 2 基于强度折减有限元法边坡稳定性分析

### 2.1 基本原理

有限元强度折减分析法,最早由 Griffiths 等提出<sup>[8-9]</sup>.在我国,郑颖人等将其称为“强度折减法”,这种方法分析边坡稳定性问题的基本思想与传统的极限平衡方法是一致的,均可称之为强度储备安全系数法,但是采用这种方法分析边坡稳定性时,边坡土体的任何区域都是满足平衡条件的,而在极限平衡法中,仅考虑了滑动土体的整体稳定性.

基于强度折减理论的有限元法分析边坡稳定性的基本原理,是将边坡土体的实际强度参数  $c, \phi$  值同时除以一个折减系数  $F$  (大于 1 的系数),得到一组折减后的新的强度参数  $c', \phi'$  值,其表达式为:

$$c' = \frac{c}{F}, \quad (1)$$

$$\phi' = \arctan\left(\frac{1}{F} \tan \phi\right). \quad (2)$$

其中  $F$  即为试算安全系数.通常,初始的  $F$  值需设置得足够小,这样可以保证边坡的稳定性,然后按上式对强度进行折减,将折减后的强度参数  $c', \phi'$  值作为新的材料参数代入有限元进行试算,在试算过程中,增加  $F$ ,使  $F_n = F_{n-1} + F_{mc}$ ,当边坡破坏后,减少安全系数增量  $F_{mc}$  到  $0.2F_{mc}$ ,此时,  $F_n = F_{n-1} + 0.2F_{mc}$ ,重复该试算过程,直到安全系数增量小于预先设定的极小数  $\epsilon$ .此时,边坡达到极限平衡状态,对应的  $F_n$  即为安全系数  $K$ ,同时可得到临界滑动面.

### 2.2 边坡破坏状态的确定

采用有限元强度折减法分析边坡稳定性分析时,边坡的稳定性通常采用解的不收敛性作为破坏准则.在最大迭代次数内,如果计算不能收敛,就意味着没有发现同时既能满足破坏准则又能满足整体平衡的应力分布,也就说明土体已经破坏.因此,破坏状态就定义为计算不收敛的状态,认为边坡的破坏和数值计算上的不收敛是同时发生的.同时,边坡整体失稳将发生于强度软弱带或应力集中区,该部位土体单元将产生不同程度的不可恢复的塑性变形,若塑性变形的软弱带或应力集中区相互贯通,则表明边坡土体内将在相互贯通的剪切破坏面发生整体失稳.

### 2.3 计算模型

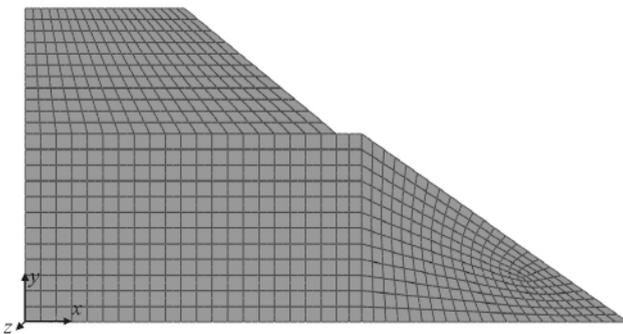


图 6 网格划分

广西宜州至六寨高速公路是其中阿荣旗至北海公路的组成部分,是国家高速公路“7918”网中兰州至海口和汕头至昆明高速公路的重要路段,该线路段有多处炭质页岩高填方路堤,笔者选取其中一个具有代表性的高填路堤(K19+133)进行边坡稳定性分析.该断面路堤总高度为 19.9 m,分两级施工,底层高为 12.0 m,按 1:1.75 放坡,上路堤高 7.9 m,按 1:1.5 放坡;并在 12 m 处设 2 m 平台,炭质页岩填筑高度为 19.1 m,路面宽 24.5 m.路堤边坡变形属于平面应变问题,由于路堤的对称性的特点,只需对路堤的一半进行模拟分析即可,材料模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型,材料计算参数如表 3,利用大型非线性有限元计算软件 ABAQUS 中的八节点二次平面应变减缩积分单元(CPE8R)进行稳定性分析,计算其安全系数,网格划分如图 6.笔者只考虑路堤本身稳定性,所以认为路堤地基是稳定的不变的,其计算边界条件设置为路堤底边 X、Y(1 和 2)方向自由度约束,路堤对称轴线上只允许有竖向位移( $U_2$ ),其它面为自由面.

广西宜州至六寨高速公路是其中阿荣旗至北海公路的组成部分,是国家高速公路“7918”网中兰州至海口和汕头至昆明高速公路的重要路段,该线路段有多处炭质页岩高填方路堤,笔者选取其中一个具有代表性的高填路堤(K19+133)进行边坡稳定性分析.该断面路堤总高度为 19.9 m,分两级施工,底层高为 12.0 m,按 1:1.75 放坡,上路堤高 7.9 m,按 1:1.5 放坡;并在 12 m 处设 2 m 平台,炭质页岩填筑高度为 19.1 m,路面宽 24.5 m.路堤边坡变形属于平面应变问题,由于路堤的对称性的特点,只需对路堤的一半进行模拟分析即可,材料模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型,材料计算参数如表 3,利用大型非线性有限元计算软件 ABAQUS 中的八节点二次平面应变减缩积分单元(CPE8R)进行稳定性分析,计算其安全系数,网格划分如图 6.笔者只考虑路堤本身稳定性,所以认为路堤地基是稳定的不变的,其计算边界条件设置为路堤底边 X、Y(1 和 2)方向自由度约束,路堤对称轴线上只允许有竖向位移( $U_2$ ),其它面为自由面.

### 2.4 计算结果分析

对于炭质页岩高填方路堤主要问题是炭质页岩崩解不充分,在地下水和大气降雨作用而产生路基沉降和边坡失稳.为了研究压实度及极端雨对路堤边坡稳定性的影响,运用有限元强度折减法,分别对不同压实度路堤边坡在无雨情况下和极端雨情况下的稳定性进行分析,得出安全系数如表 4,由于篇幅所限,只列出部分计算云图,如图 7,8.从表 4 可以看出,炭质页岩路堤在本身在自重作用下,无论是无雨还是极端雨情况下都具有较好地稳定性;图 7 为压实度为 93% 无雨情况下,试算安全系数  $F=3.55$  时的等效塑性应变图,从图 7 可以看出塑性应变已延伸到坡脚,逐渐向上路堤发展,坡脚处塑性应变值最大,且滑动面近似圆弧,据此可以推断此边坡安全系数  $K=3.55$ ;图 8 为压实度 90% 极端雨情况下,试算安全系数  $F=1.50$  时的等效塑性应变图,从图 8 可以看出,塑性区由路堤中部逐渐向外扩张,路堤中部塑性区基本连成一片,且塑性区也通过了坡脚,据此可知,路堤安全系数在 1.50 左右.

表 5 安全系数计算结果

工况	压实度/%		
	90	93	94
无雨	3.05	3.55	3.72
极端雨	1.53	1.81	1.96

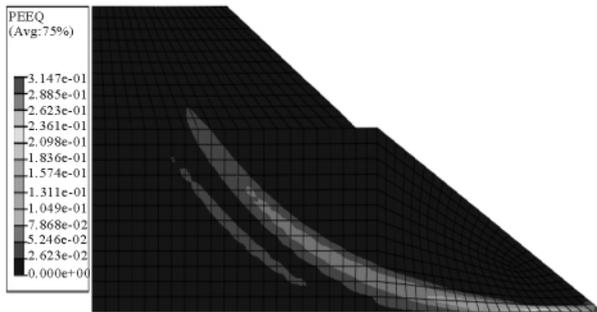


图 7 压实度 93% 无雨 ( $F=3.55$ ) 等效塑性应变图

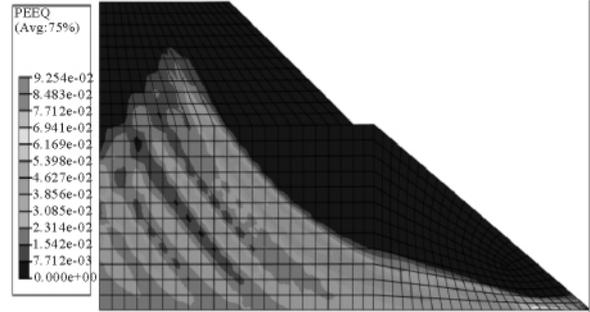


图 8 压实度 93% 无雨 ( $F=1.5$ ) 等效塑性应变图

从图 9 可以明显看出,无论是无雨还是极端雨情况下,随着压实度的提高,安全系数不断增加,同时,极端雨情况下安全系数大幅减低,降幅高达近 50%,但安全系数仍大于 1.5,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)的稳定性要求.但是由于路堤的整体稳定性还与动力荷载、地基的承载力及稳定性、地下水等其它客观条件有关,而在计算中这些因素并未考虑,因此,计算所得的安全系数偏高,在路堤填筑过程中应及时做好排水措施.

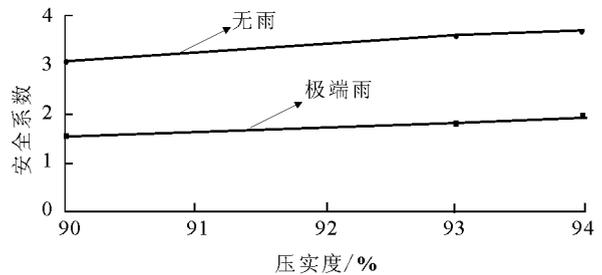


图 9 压实度与安全系数的关系

### 3 结论

(1) 通过对炭质页岩工程特性的研究,炭质页岩形成年代、形态和化学成分基本相同,但其物理力学性质却存在一定差别,总体而言,随着压实度的增大,炭质页岩的强度也随之增大;但水浸条件下水对炭质页岩强度的影响较大.因此,在将其用于筑路堤前一定要让其充分崩解,同时充分碾压并消灭大孔隙,且压实度不应低于 93%,其次应防止路面开裂导致地表水入渗,并应加强排水.

(2) 炭质页岩高填方路堤稳定性随着压实度的提高,路堤边坡的安全系数随之增大,稳定性增强.

(3) 降雨对炭质页岩路堤边坡稳定性的影响较大,炭质页岩路堤边坡在无雨情况下,安全系数较高,在暴雨情况下,安全系数大幅降低.因此,对于炭质页岩高路堤一定要做好排水措施,同时防止路面开裂地表水入渗.

#### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3387.  
 [3] 蒋鑫,邱延峻,魏永幸.基于强度折减法的斜坡软弱地基填方工程特性分析[J].岩土工程学报,2007,29(4):622-627.  
 [4] 张丽冰.基于弹塑性有限元法的陡坡高路堤稳定性分析及优化设计[D].成都:西南交通大学,2009.  
 [5] 刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等.降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J].岩土力学,2007,28(8):1705-1709.  
 [6] 丁王飞.滇西红层软岩地区填方路基边坡抗震稳定性研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.  
 [7] 交通部公路科学研究院.JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2007.  
 [8] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.  
 [9] 廖公云,黄晓明.ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M].南京:东南大学出版社,2008.

## Analysis of Stability for Carbon Shale High-Filled Embankment

AO Yi-bing<sup>1</sup>, LIU Xin-xi<sup>2</sup>, YANG Zi-han<sup>2</sup>, WANG Yi-ming<sup>2</sup>

(1. Shunda Limited Corporation of Highway Construction, Jingzhou 434100, Hubei China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Taking the highway in Guangxi province as the example, the physical and mechanical performance of carbon shale is tested. The strength of carbon shale increases with the degree of compaction augmentation, while the strength greatly decreases under the condition of water immersion carbon shale. Using the strength reduction finite element method, the influence on compaction and rainfall for carbon shale embankment stability is analyzed by large finite element calculation software. The results show that the safety coefficient of embankment will increase, when the compaction degree increases; while it will significantly decline with rainfall. When the compaction degree is up to more than 93%, the carbon shale high-filled embankment slope will be steady-going.

**Key words:** carbon shale; stability of high-filled embankment; finite element strength reduction method

(责任编辑 陈炳权)

(上接第 64 页)

- [7] ROUPASSOV D V, ZAVYALOV I N, STARIKOVSKII A Y. Boundary Layer Separation Control by Nanosecond Plasma Actuators [R]. Miami: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [8] BOUEF J P, LAGMICH Y, CALLIGARI T, et al. Electrohydrodynamic Force and Flow Acceleration in Surface Discharges [R]. San Francisco: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

## Diagnosis of Air Density Harassment

ZHOU Zhang-wen, LIU Zhan, SUN Dong

(Engineering College, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** By the laser beam deflection effect in air density gradient field, the laser deflection diagnosis system was designed, and the air density change caused by the aeronautical plasma actuators was diagnosed. The results showed that the air density decreased by  $-1.7\%$  in the vicinity of the upper electrode's edge between two electrodes, and increased by  $0.27\%$  in the vicinity of the lower electrode's edge between two electrodes. The measurement results were consistent with the results of other means. But the diagnosis of the laser deflection system is faster and more effective.

**Key words:** laser deflection system; air density; harassment; index of refraction

(责任编辑 陈炳权)