

文章编号: 1674-599X(2021)01-0001-06

## 炭质泥岩路堑边坡湿化变形模拟分析

刘新喜, 邓子君, 李盛南, 陈良, 王玮玮, 张卓

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为探究炭质泥岩路堑边坡湿化前、后的变形规律, 通过三轴压缩试验确定邓肯-张 EB 模型的参数, 并利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模拟了不同坡高、坡比的炭质泥岩路堑边坡的湿化变形。研究表明: 坡比为 1:1.5、坡高为 16 m 的二级炭质泥岩路堑边坡的干态、湿态的最大水平位移、竖向位移均发生在一级、二级边坡坡顶。湿化后的最大水平位移、竖向位移均增大; 在坡比相同时, 随着坡高增加, 边坡水平和垂直方向的湿化变形均增大, 垂直方向湿化变形约为水平方向湿化变形的 5~10 倍; 在坡高相同时, 对于坡比的增加, 边坡水平与垂直方向的湿化变形规律不明显。

**关键词:** 路堑边坡; 湿化变形; 邓肯-张 EB 模型; 数值分析

**中图分类号:** U213.1+3      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.001

### Simulation analysis of wetting deformation of carbonaceous mudstone cutting slope

LIU Xin-xi, DENG Zi-jun, LI Sheng-nan, CHEN Liang, WANG Wei-wei, ZHANG Zhuo

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To explore the wetting deformation laws of carbonaceous mudstone cutting slopes, the parameters of Duncan-Chang EB model were determined by carrying out triaxial compression tests. The wetting deformation of carbonaceous mudstone cutting slopes with different slope heights and slope ratios were simulated by FLAC<sup>3D</sup>. The simulation results indicate that the maximum horizontal displacement and vertical displacement of 16 m secondary carbonaceous mudstone cutting slope with a slope ratio of 1:1.5 per level in dry and wet occurred on the top of the firstly slope and the secondary slope, respectively. Both the maximum horizontal and vertical displacement after humidification increased. When the slope ratio remains constant, the horizontal and vertical wetting deformation of the slope increase with the increase of the slope height. The vertical wetting deformation is about 5~10 times of the horizontal wetting deformation. At the same slope height, the change of the horizontal and vertical slope wetting deformation is not obvious with the increase of the slope ratio.

**Key words:** cutting slope; wetting deformation; Duncan-Chang model; numerical analysis

炭质泥岩在中国境内西部的铁路、矿区和高速公路等工程建设中普遍存在<sup>[1-3]</sup>。由于炭质泥岩具有遇水软化、易崩解等水理特性<sup>[4-7]</sup>, 致使内部多为不稳定结构。炭质泥岩经湿化变形后, 引起的地

质灾害已经严重影响到中国西部地区公路的营运安全。

目前, 炭质泥岩湿化变形已成国内研究的热点之一, 众多学者对湿化变形作用下的岩土体特性进

收稿日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378082, 51674041); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200839)

作者简介: 刘新喜(1963-), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

行了研究。魏松<sup>[8]</sup>等人通过对粗粒土进行了三轴压缩的湿化变形试验,分析了粗粒土在不变的应力条件下,湿化变形前、后的变化趋势。杜秦文<sup>[9]</sup>等人利用双线法对不同密度的变质软岩进行大型三轴试验,对不同围压的风干、饱和状态下的应力-应变规律进行分析,得出软岩在密度、围压等因素影响下的湿化效应。刘新喜<sup>[10]</sup>等人以湿化变形试验并结合三轴压缩试验等对强风化软岩进行剖析,得出压实度对路堤处湿化变形有一定的影响。周雄雄<sup>[11]</sup>等人通过对粗粒料进行湿化试验,结合三轴湿化数值模拟,模拟了湿胀、湿缩等湿化现象,并且拟合度高。殷宗泽<sup>[12]</sup>等人针对土坝在水库初次蓄水时的应力变形问题进行了研究,提出了更能反映浸水变形特性的双屈服面弹塑性本构模型。张丙印<sup>[13]</sup>等人根据荷载作用下干热-湿冷循环耦合变化的风化试验结果,建立了可以反映堆石料劣化变形的参数模型。董建筑<sup>[14]</sup>等人通过对黑河水库大坝湿化变形进行研究,并运用邓肯 E-B 模型进行了本构分析,其结果相吻合。周成<sup>[15]</sup>等人针对高土石坝的坝料,在高压及湿化作用下,会发生显著的颗粒破碎现象,开发了颗粒破碎后的土石料本构模型,并对其动力有限元进行推演计算。尽管已有学者<sup>[16-19]</sup>对炭质泥岩本构开展了相关研究,但有关湿化后的炭质泥岩路堑边坡的研究鲜见,且提出的湿化变形本构模型很少用于路堑边坡稳定性分析。因此,作者拟采用邓肯-张 EB 模型,并利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件针对炭质泥岩路堑边坡湿化变形进行模拟研究,分析边坡在不同坡高和坡比的湿化前、后的变形规律,以期对炭质泥岩边坡的稳定性分析提供理论依据。

## 1 邓肯-张 EB 模型理论

邓肯-张 EB 模型在广义胡克定律中的弹性理论上能反映出土体非线性变形,并且在一定条件下还能反映土体的弹塑性变形。该模型所描述的应力-应变关系为:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}. \quad (1)$$

式中:  $[D]$  为非线性弹性体的刚度矩阵。

$$[D] = \frac{3B}{9B-E} \begin{bmatrix} 3B+E & 3B-E & 0 \\ 3B-E & 3B+E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中  $E$ 、 $B$  分别为切线模量、体积模量,且随应力的大小而变化。弹性参数的变化可用于反映模型中土体的应力-应变非线性关系。 $E$ 、 $B$  的计算公式:

$$E = Kp_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2. \quad (3)$$

$$B = K_b p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m. \quad (4)$$

式中:  $P_a$  为大气压强;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  为最大、最小主应力轴。

卸载及重复加载全过程中的弹性模量用  $E_{ur}$  表示,其计算式为:

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n. \quad (5)$$

由式(1)~(5)可看出,邓肯-张 EB 模型 8 个参数为:  $R_f$ 、 $c$ 、 $\varphi$ 、 $n$ 、 $K$ 、 $m$ 、 $K_b$ 、 $K_{ur}$ 。 $c$ 、 $\varphi$  是强度参数,用于计算土体的抗剪强度;  $R_f$  是土体的破坏比,土体抗剪强度与土体极限强度的比值,其值小于 1;  $n$ 、 $K$  为试验常数,  $m$ 、 $K_b$  为材料常数;  $E$ 、 $B$  的主要参数分别由  $K$ 、 $K_b$  确定,  $E$  和  $B$  随  $\sigma_3$  的变化程度分别由  $n$ 、 $m$  来反映;  $K_{ur}$  反映卸荷后再加荷载的模量,其值大于常数  $K$ ,反映土体经荷载作用后变形能否恢复。这些均可由三轴压缩试验结果确定各参数的取值大小。

## 2 邓肯-张 EB 模型在 FLAC<sup>3D</sup> 中的实现

FLAC<sup>3D</sup> 是以连续介质力学为基础的有限元分析软件,能够较好地对岩土体的三维受力特性进行模拟。FLAC<sup>3D</sup> 软件中所常用的开挖本构模型、弹性本构模型及弹塑性本构模型,对各类岩土实际工程的数值计算均能满足,但部分应用较为广泛的本构模型并未囊括其中,如:邓肯-张模型、椭圆抛物双曲面模型及清华弹塑性模型等<sup>[19-20]</sup>。因此,软件开辟了二次开发平台,能分析更多种类材料的本构,满足了实际工程的科研应用需求。

本研究利用此软件中的二次开发程序平台,运用 C++ 平台,通过结合 Initialize() 和 Run() 2 种函数,对邓肯-张 EB 模型进行编译,并编译为 DLL(动态链接库)文件。在 FLAC<sup>3D</sup> 上调用该 DLL 文件,并结合自主编辑的 Fish 语言,模拟三轴试验加载过

程。FLAC<sup>3D</sup> 模拟围压和轴向荷载施加的效果如图 1 所示。围压为 400 kPa 时, 干、湿态下将试验得到的应力-应变曲线与 FLAC<sup>3D</sup> 模拟得到的应力-应变曲线进行对比, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, FLAC<sup>3D</sup> 模拟曲线和三轴试验曲线契合较好, 且最大主应力差值小于 15%, 所以采用邓肯-张 EB 模型能较好地适用于炭质泥岩, 可更好的阐明炭质泥岩的本构关系。

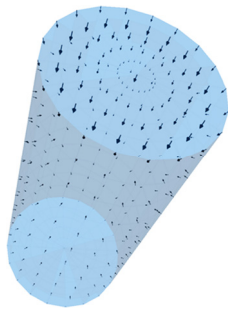


图 1 围压和轴向荷载施加效果

Fig. 1 Effect picture of confining pressure and axial load

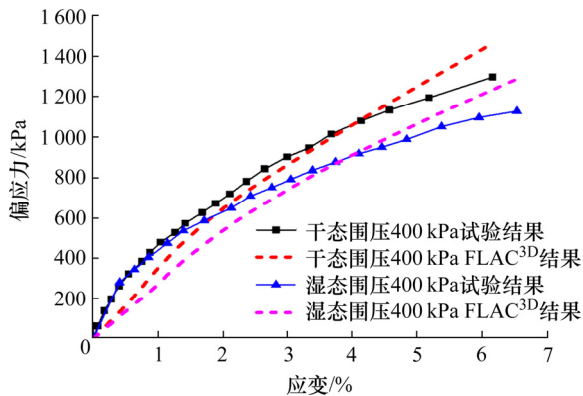


图 2 试验结果与 FLAC<sup>3D</sup> 模拟结果的对比

Fig. 2 Comparison of test results and FLAC<sup>3D</sup> simulation results

### 3 边坡湿化变形研究

干湿双线法中, 若围压相同的条件下, 饱和、风干状态下岩土体分别产生的应变之间的相互差值为湿化作用后产生的应变, 即湿化变形:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_w - \varepsilon_d \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_w$  为饱和状态下试样的应变;  $\varepsilon_d$  为风干状态下试样的应变。

边坡遇水浸湿后, 其矿物出现软化现象, 而水在矿物颗粒之间起润滑作用, 逐渐导致颗粒间产生滑移、分离, 从而引起自身应力重新分布, 结构发

生软化, 最终产生变形。所以本研究选用了双线法对炭质泥岩边坡的湿化规律进行分析。试样试验中, 将未浸水时所得参数作为干态边坡参数, 而浸水饱和后所得参数作为湿态边坡参数, 为简化计算, 将边坡模型理想为完全干、湿状态, 并以水平和垂直方向的最大位移变化值来反映边坡的湿化变形特性。

## 4 工程实例模拟分析

### 4.1 模型建立

选取广西某段炭质泥岩路堑边坡, 边坡分为两级, 中间台阶宽 1.5 m, 每级高 8 m, 共 16 m; 坡比均为 1 : 1.5, 坡顶宽 8 m, 取路面方向 12 m, 路面以下深度取 10 m 建立模型。荷载模拟只考虑自重荷载作用, 其中边坡模型的左、右两边界均仅设立水平约束, 底部边界设立水平与垂直 2 种约束, 而上部设自由边界。该计算模型经设置后, 总共有 8 010 个单元数, 而总节点数多达 9 559 个。

### 4.2 模型及参数确定

选用邓肯-张 EB 模型。根据室内三轴试验得出干、湿态下的  $E$ 、 $B$ 、 $c$ 、 $\varphi$ 、 $R_f$  值, 并将其代入式(3)~(5)中, 得到模型其他参数, 见表 1。

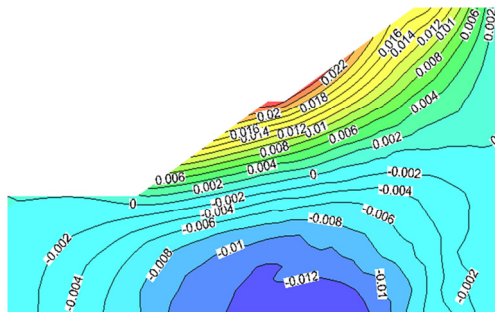
表 1 邓肯-张 EB 模型参数

Table 1 Duncan-Chang EB model parameters								
状态	$K$	$n$	$R_f$	$c/kPa$	$\varphi(^{\circ})$	$K_{ur}$	$K_b$	$m$
干态	764.86	0.058	0.76	76	38	1 070.804	84.49	0.58
湿态	625.43	0.082	0.72	42	33	875.602	67.58	0.54

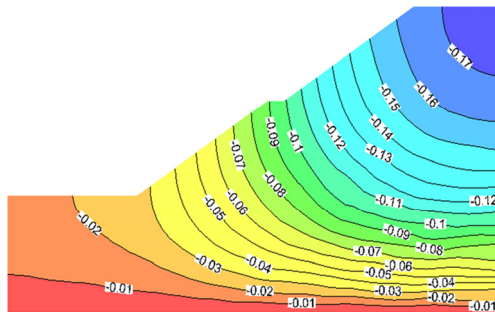
### 4.3 数值计算结果分析

根据干湿双线法, 在 FLAC<sup>3D</sup> 中将干、湿态邓肯-张 EB 参数分别导入同一个二阶边坡模型进行运算, 得到干、湿态下相应的水平方向等势线图、竖向方向等势线图。通过等势线, 可知边坡各处的位移变化具体情况, 并对一、二级边坡坡顶和坡脚处的位移变化情况进行了具体数值分析, 所得的计算等势线结果如图 3,4 所示。

从图 3,4 中可以看出, 干态、湿态下边坡最大水平位移均发生在一级边坡的坡顶处, 且水平位移变化值向四周依次递减。干、湿态下其最大竖向位移均发生在边坡二级边坡坡顶, 且竖向位移自坡顶从上往下依次层层递减。干、湿 2 种状态下边坡分别产生了 2.63 cm、4.71 cm 的最大水平方向位移,



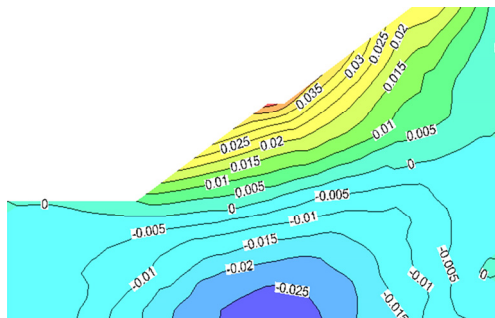
(a) 水平方向位移



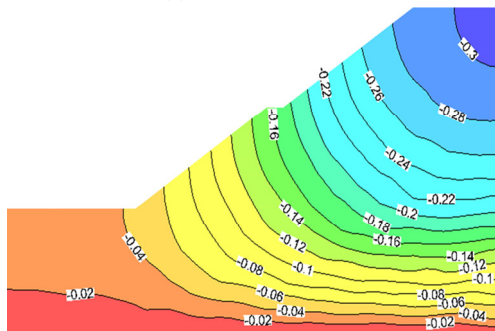
(b) 垂直方向位移(单位: m)

图3 干态下边坡位移等势线图

Fig. 3 Displacement contour map of slope in dry



(a) 水平方向位移



(b) 垂直方向位移

图4 湿态下边坡位移等势线(单位: m)

Fig. 4 Displacement contour map of slope in wet (unit: m)

而其湿化变形导致水平位移为 2.08 cm, 增加不明显; 干、湿 2 种状态下边坡分别产生了 17.52 cm、30.65 cm 的最大竖向位移, 而其湿化变形导致竖向

位移为 13.13 cm, 增加明显。

#### 4.4 坡高、坡比对湿化变形影响

在该路段中, 边坡是以 8 m 高为一阶, 分不同坡比(主要是 1:1.25、1:1.50、1:1.75)进行开挖的, 每阶间设置 1.5 m 宽台阶。考虑到不同坡高、坡比下边坡湿化变形大小将会有所差异, 所以分别对不同坡高、坡比工况进行模拟, 并分析不同工况下干、湿状况的最大水平位移、竖向位移及湿化变形的变化趋势, 见表 2。

表2 不同坡高、坡比工况下模拟结果

Table 2 Simulation results under different slope heights and slope ratios

工况	水平方向最大位移/cm		竖向方向最大位移/cm		湿化变形值/cm	
	干态	湿态	干态	湿态	水平方向	垂直方向
8 1:1.25	0.92	1.54	7.22	12.68	0.62	5.46
8 1:1.50	0.94	1.71	7.28	13.09	0.77	5.81
8 1:1.75	0.99	1.72	7.45	13.21	0.73	5.76
16 1:1.25	2.74	4.93	16.60	29.02	2.19	12.42
16 1:1.50	2.63	4.71	17.52	30.65	2.08	13.13
16 1:1.75	2.53	4.31	17.74	30.09	1.78	12.35
24 1:1.25	5.53	8.57	32.64	52.34	3.04	19.70
24 1:1.50	5.57	7.90	33.68	55.11	2.33	21.43
24 1:1.75	5.16	7.47	34.50	57.05	2.31	22.55

由表 2 可知, 不同坡比情况下, 当坡高为 8 m 时, 水平方向最大湿化变形差值达 0.15 cm, 竖向方向最大湿化变形差值达 0.35 cm; 当坡高为 16 m 时, 水平方向最大湿化变形差值达 0.41 cm, 竖向方向最大湿化变形差值达 0.78 cm; 当坡高为 24 m 时, 水平方向最大湿化变形差值达 0.73 cm, 竖向方向最大湿化变形差值达 2.85 cm。随坡高的增加, 水平、竖向方向湿化变形差值逐渐增加。表明: 相同坡高不同坡比时, 边坡的水平、竖向方向湿化变形值均相差较小, 即坡比对湿化变形影响较小。

由表 2 还可知, 坡高从 8 m 增至 24 m, 且坡比为 1:1.25 时, 竖向方向湿化变形约是水平方向湿化变形的 5.6~8.8 倍; 坡比为 1:1.50 时, 竖向方向湿化变形约是水平方向湿化变形的 6.3~9.2 倍; 坡比为 1:1.75 时, 竖向方向湿化变形约是水平方向湿化变形的 6.9~9.8 倍。表明: 在自重应力下, 其湿化变形值逐渐增大且明显, 特别是竖向方向的湿化变形值, 约是水平方向湿化变形的 5~10 倍。

## 5 结论

1) 在 FLAC<sup>3D</sup> 二次开发平台上, 采用邓肯-张 EB 模型, 模拟了常规三轴压缩下炭质泥岩湿化前、后变形过程, 其模拟结果与试验结果一致, 表明: 邓肯-张 EB 模型能较好地反映炭质泥岩湿化变形。

2) 对每级坡比为 1:1.5, 坡高为 16 m 的二级炭质泥岩路堑边坡进行的数值模拟分析。干、湿态下边坡最大水平位移、竖向位移均发生在一级、二级边坡坡顶, 湿化变形引起的最大水平、竖向位移分别增大 2.08 cm、13.13 cm。

3) 边坡模型中的坡高、坡比均会影响边坡的湿化变化, 坡高对湿化变形影响更加显著。坡比相同时, 随着坡高增加, 边坡水平和垂直方向的湿化变形均增大, 而垂直方向的湿化变形增加更大, 约为水平方向湿化变形的 5~10 倍。坡高不变时, 对于坡比的增加, 边坡水平与垂直方向的湿化变形规律不明显。

### 参考文献(References):

- [1] 刘新喜,张平,邓宗伟.炭质泥岩软岩基座路堑边坡开挖过程稳定性分析[J].中外公路,2016,36(6):14-16.(LIU Xin-xi,ZHANG Ping,DENG Zong-wei.Stability analysis of cutting slope excavation process on soft rock foundation with carbonaceous mudstone[J].Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(6): 14-16. (in Chinese))
- [2] 廖常川,刘新喜,周群.高速公路炭质(泥)岩路堑变形特性研究[J].西部交通科技,2011(5):37-41.(LIAO Chang-chuan,LIU Xin-xi,ZHOU Qun.The study on deformation property of carbon shale slope in highway[J].Western China Communications Science & Technology, 2011(5):37-41.(in Chinese))
- [3] 宋桂锋,茶增云,王庆龙,等.全强风化边坡破坏机理及加固措施研究[J].交通科学与工程,2020,36(2):7-15.(SONG Gui-feng,CHA Zeng-yun,WANG Qing-long,et al. Study on failure mechanism and reinforcement measure of completely weathered rock slope[J].Journal of Transport Science and Engineering,2020,36(2):7-15.(in Chinese))
- [4] 陈晓平,茜平一,梁志松,等.泥质软岩高边坡湿化稳定性研究[J].岩土工程学报,2003,25(5):543-547.(CHEN Xiao-ping,QIAN Ping-yi,LIANG Zhi-song,et al.Study on slaking stability of excavated high slope of argillaceous soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003,25(5):543-547.(in Chinese))
- [5] 付宏渊,邱祥,李光裕,等.降雨入渗条件下炭质泥岩路堑动态稳定性[J].长安大学学报:自然科学版,2017,37(1):33-42.(FU Hong-yuan,QIU Xiang,LI Guang-yu,et al. Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(1): 33-42.(in Chinese))
- [6] 曾铃,史振宁,付宏渊,等.预崩解炭质泥岩路用性能及其基于三轴 CT 试验的力学特性[J].中南大学学报:自然科学版,2016,47(6):2030-2036.(ZENG Ling,SHI Zhen-ning, FU Hong-yuan, et al. Road performance of preliminary disintegration of carbon mudstone and mechanical characteristics based on CT-Triaxial test[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2016, 47(6):2030-2036.(in Chinese))
- [7] 郭名春.不同降雨强度对土质高路堑边坡稳定性影响分析[J].公路与汽运,2018(3):91-94.(GUO Ming-chun. Analysis on the influence of different rainfall intensity on the stability of high cutting slope[J]. Highways & Automotive Applications,2018(3):91-94.(in Chinese))
- [8] 魏松,朱俊高.粗粒土料湿化变形三轴试验研究[J].岩土力学,2007,28(8):1609-1614.(WEI Song,ZHU Jun-gao. Study on wetting behavior of coarse grained soil in triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1609-1614. (in Chinese))
- [9] 杜秦文,刘永军,曹周阳.变质软岩路堑填料湿化变形规律研究[J].岩土力学,2015,36(1):41-46.(DU Qin-wen, LIU Yong-jun,CAO Zhou-yang.Large-scale triaxial tests on metamorphic soft rock embankment filler for wetting deformation characteristics[J].Rock and Soil Mechanics, 2015,36(1):41-46.(in Chinese))
- [10] 刘新喜,夏元友,刘祖德,等.复杂应力下强风化软岩湿化变形试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):925-930.(LIU Xin-xi,XIA Yuan-you,LIU Zu-de,et al. Experimental study on slaking deformation of intense weathering soft rock under complicated stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(5):925-930.(in Chinese))
- [11] 周雄雄,迟世春,贾宇峰.粗粒料湿化变形特性研究[J].岩土工程学报,2019,41(10):1943-1948.(ZHOU Xiong-xiong,Chi Shi-chun,Jia Yu-feng. Study on wetting behavior of coarse grained soil in triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 41(10): 1943-1948. (in Chinese))

- Xiong-xiong, CHI Shi-chun, JIA Yu-feng. Wetting deformation characteristics of coarse granular materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10):1943–1948.(in Chinese))
- [12] 殷宗泽,赵航.土坝浸水变形分析[J].岩土工程学报, 1990,12(2):1–8.(YIN Zong-ze,ZHAO Hang. Deformation analysis of earth dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1990,12(2):1–8.(in Chinese))
- [13] 张丙印,孙国亮,张宗亮.堆石料的劣化变形和本构模型[J].岩土工程学报,2010,32(1):98–103.(ZHANG Bing-yin, SUN Guo-liang, ZHANG Zong-liang. Degrading deformation of rockfill materials and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 98–103.(in Chinese))
- [14] 董建筑,王瑞骏.黑河水库初次蓄水大坝湿化变形有限元分析[J].水资源与水工程学报,2004,15(1):71–73,77.(DONG Jian-zhu, WANG Rui-jun. Finite element analysis of wetting deformation for Heihe earth dam during reservoir filling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2004, 15(1): 71–73, 77. (in Chinese))
- [15] 周成,陈生水,何建村,等.考虑土石料颗粒破碎和密度变化的次塑性本构模型建模方法[J].岩土力学,2013, 34(S2): 18–21. (ZHOU Cheng, CHEN Sheng-shui, HE Jian-cun, et al. Development of a hypo-plastic model for earth-rock dams considering rock crushing and density changing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 18–21.(in Chinese))
- [16] 刘新喜,李盛南,徐泽沛,等.冻融循环作用下炭质页岩蠕变模型研究[J].中国公路学报, 2019, 32(11): 137–145. (LIU Xin-xi, LI Sheng-nan, XU Ze-pei, et al. Research on creep model of carbonaceous shale under freeze-thaw cycle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 137–145.(in Chinese))
- [17] 解廷堃,李二利,刘如成.炭质页岩常规三轴试验和本构方程的研究[J].露天采矿技术,2008,23(6):7–10,12.XIE Ting-kun, LI Er-li, LIU Ru-cheng. Research on carbonaceous shale general tri-axial test and constitutive equation[J]. Opencast Mining Technology, 2008, 23(6): 7–10,12.(in Chinese))
- [18] 刘新喜,李盛南,徐泽佩,等.高应力泥质粉砂岩黏弹塑性蠕变模型[J].中南大学学报:自然科学版,2019,50(5): 1210–1220.(LIU Xin-xi,LI Sheng-nan,XU Ze-pei,et al. Viscoelastic-plastic creep model of high stress argillaceous siltstone[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(5): 1210–1220.(in Chinese))
- [19] 刘新喜,童庆闯,侯勇,等.高应力泥质粉砂岩非线性蠕变损伤模型研究[J].中国公路学报,2018,31(2):280–288. (LIU Xin-xi, TONG Qing-chuang, HOU Yong, et al. Research on nonlinear creep damage model of high stress argillaceous siltstone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 280–288. (in Chinese))