

DOI: 10.11779/CJGE2017S1004

基于非线性剪胀模型的面板堆石坝应力变形分析

潘家军¹, 王观琪², 程展林¹, 余挺², 江泊洧¹

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限责任公司, 四川 成都 610072)

摘要: 介绍了一种力学概念明确、简单实用的非线性剪胀模型, 给出了本构关系的刚度系数矩阵, 应用该模型对某堆石坝工程的堆石料真三轴试验进行了计算模拟, 并与试验成果进行比较, 验证了模型的合理性。在此基础上, 分别采用非线性剪胀模型和邓肯 E-B 模型完整模拟了坝体分层填筑、面板分期以及分期蓄水全过程, 对坝体应力与变形、面板应力与变形计算成果进行对比分析, 验证了非线性剪胀模型在面板堆石坝静力有限元分析中的适用性。

关键词: 堆石料; 应力应变关系; 本构模型; 剪胀性; 面板坝

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0017-05

作者简介: 潘家军(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事土的工程特性与土石坝工程研究。E-mail: pj62739663@126.com。

Deformation prediction of concrete face rockfill dams based on nonlinear dilatancy model

PAN Jia-jun¹, WANG Guan-qi², CHENG Zhan-lin¹, YU Ting², JIANG Ji-wei¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Minster of Water Resources, Changjiang River Scientific Research

Institute, Wuhan 430010, China; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

Abstract: A simple and robust nonlinear dilatation constitutive model with clear mechanics concept is introduced, and the stiffness coefficient matrix of constitutive relationship is presented. A kind of coarsened-grained soil is collected from a rockfill dam, and true triaxial consolidated drained shear tests with different values of b are conducted. The comparison between the calculated and test results is employed to validate the nonlinear dilatation model. On this basis, the nonlinear dilatation model and Duan-Chang E-B model are taken into account respectively to simulate the whole process of layered filling of dam, staged construction of face slab and staged impoundment. Based on the calculated results, the stress-strain relationships of dam body and concrete face slab are compared. Finally, the nonlinear dilatation constitutive model is verified to be available in the static finite element analysis of concrete face rockfill dams.

Key words: rockfill material; stress-strain relationship; constitutive model; dilatancy; concrete face rockfill dam

0 引言

混凝土面板堆石坝(CFRD: concrete faced rockfill dam)是以堆石体为支承结构、并在其上游表面设置混凝土面板作为防渗结构的一种堆石坝坝型。混凝土面板堆石坝因安全、经济、施工速度快等优点, 近几十年来得到了快速的发展。以中国为例, 根据中国大坝委员会的统计, 到目前为止, 中国已建成或在建的30 m以上的面板堆石坝超过了碾压混凝土大坝的发展, 成为当前大坝设计的首选坝型之一。对于面板堆石坝, 堆石体变形对面板的应力、变形影响较大。如果堆石体变形过大, 就会导致面板产生了裂缝或挤压破坏, 从而影响其防渗性能, 甚至会影响大坝的安全运行^[1]。因此, 在高堆石坝设计时需要正确合理的预

测大坝的变形, 减少坝体的变形量, 特别是蓄水期的变形量, 是保证大坝安全的关键问题^[2]。

早期面板堆石坝的设计和施工主要是依靠已有的工程经验和工程师的判断来实施的, 而对堆石料工程特性研究和面板堆石坝在不同应力路径下的应力变形等理论方面研究很少。在堆石体的本构关系理论研究方面, 国内外学者提出了众多的本构模型, 但真正用于工程实际, 为工程界所接受的却很少。国内在面板堆石坝计算分析中, 常用的有邓肯模型、K-G模型及弹塑性模型等^[3-6]。但工程实践表明, 现有堆石料的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379021, 51309024); 长江科学院创新团队项目(CKSF2015051/YT); 中央级科研院所基本科研业务费项目(CKSF2014055/YT)

收稿日期: 2016-11-28

本构模型计算出的坝体变形与实测资料相差甚远^[7]。本文介绍了堆石料的一种非线性剪胀模型，基于该本构模型对堆石料真三轴试验进行了计算模拟，并采用该模型和邓肯E-B模型对国内某水电站工程的面板堆石坝进行了仿真计算分析，验证了非线性剪胀模型用于堆石坝应力变形分析的适用性，将对高堆石坝变形预测技术的发展起到有益的促进作用。

1 非线性剪胀模型的应力应变关系

1.1 应力应变关系

非线性剪胀模型的应力应变关系增量形式为^[8]

$$d\varepsilon_v = \frac{dp}{K_p} + \frac{dq}{K_q} , \quad (1)$$

$$d\varepsilon_s = \frac{dq}{G} , \quad (2)$$

式中， K_p 为体变模量， K_q 为剪胀模量， G 为剪切模量。 p 为平均应力， q 为广义剪应力， ε_v 和 ε_s 分别为体应变和广义剪应变。

假设弹性应变与应力间服从广义虎克定律，剪胀应变服从Rowe剪胀方程：

$$K_f = -\frac{\sigma_1}{2\sigma_3} \frac{d\varepsilon_1^q}{d\varepsilon_3^q} , \quad (3)$$

式中， $d\varepsilon_3^q$ ， $d\varepsilon_1^q$ 为不可恢复的塑性应变， K_f 为最小能比系数，为试验确定的模型参数。

(1) 体变模量 K_p

$$K_p = \frac{E_{ur}}{3(1-2\nu)} , \quad (4)$$

式中， ν 为弹性泊松比，并假定其为常数， E_{ur} 为土的弹性模量，可由邓肯-张模型按下式计算：

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

式中， K_{ur} ， n 为退荷再加荷试验确定的模型参数。

(2) 剪胀模量 K_q

$$K_q = \frac{dq}{d\varepsilon_v^q} = \frac{K_f \sigma_3}{K_f \sigma_3 - \sigma_1} \frac{E_{ur} E_t}{E_{ur} - E_t} . \quad (6)$$

(3) 剪切模量 G

$$G = \frac{E_{ur} E_t}{2 \left[\left(1 + \frac{\sigma_1}{2K_f \sigma_3} \right) (E_{ur} - E_t) + (1 + \mu) E_t \right]} . \quad (7)$$

(4) 切线模量 E_t

$$E_t = K_p a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (1 - R_f S)^2 , \quad (8)$$

式中 S 为应力水平，表达式如下：

$$S = \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} . \quad (9)$$

对于粗粒土，建议上式作如下修正：

$$E_t = K_p a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (1 - R_f S^\alpha)^\beta . \quad (10)$$

式中包含 7 个参数 c ， φ ， K ， n ， R_f ， α ， β 为试验确定的模型参数。当 $\alpha=1$ ， $\beta=2$ 时，邓肯-张模型中 E_t 作为其特例。不同的堆石料， α 和 β 不同。

剪胀性模型共有 10 个参数，分别为 c ， φ ， K ， n ， R_f ， α ， β ， K_{ur} ， K_f ， μ 。这些参数可以通过常规三轴试验进行率定，本文旨在介绍模型对于粗粒土的强度和变形特性的适应能力，故对参数的物理意义及确定方法不做详细介绍，具体可参见相关文献[9, 10]。

1.2 模型的真三轴试验验证

对于一个本构模型，最关心的问题是该模型对复杂应力条件的适用性，即所谓的模型合理性验证。本文先采用 $b=0$ 的真三轴试验成果（相当于常规三轴试验）确定粗粒土的模型参数，再基于本构模型关系式计算真三轴复杂应力条件下的应力应变曲线，并与真三轴试验结果进行比较。

试验用料为某个堆石坝工程的堆石料，堆石料试样最大粒径为 60 mm，试验控制密度为 2.07 g/cm³。真三轴试验的试样为方样，尺寸为 300 mm×300 mm×600 mm，试验的小主应力最大值为 0.8 MPa，进行了应力比系数 $b=0, 0.25, 0.5$ ($b=(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3) = \Delta\sigma_2 / \Delta\sigma_1$) 的真三轴试验，非线性剪胀性模型参数见表 1 所示。

表 1 剪胀模型参数

Table 1 Parameters of dilatancy model

| 材料 | 模型参数 | | | | | | | | |
|-----|---------|--------------------|-----|------|----------|---------|-------|-------|-------|
| | c/kPa | $\varphi/(^\circ)$ | K | n | α | β | R_f | K_f | μ |
| 堆石料 | 100 | 38.6 | 750 | 0.12 | 1.25 | 1.8 | 0.85 | 5.7 | 0.25 |

从图 1~3 可以看出，非线性剪胀性模型能够很好地模拟堆石料在不同 b 值和不同围压下的应力-应变-体变关系，说明了该模型能够很好的反映堆石料的非线性、剪胀性等特点。从计算结果与试验结果比较来看，计算结果与试验结果吻合较好，初步验证了本文介绍非线性剪胀模型的合理性。

2 面板堆石坝应力变形分析

进行面板堆石坝应力变形计算时，堆石料的本构模型以非线性剪胀模型为主，同时采用邓肯张 E-B 模型作为比较模型计算了大坝的应力变形。

2.1 有限元模型

考虑坝体材料分区及堆石坝填筑施工过程、面板分期浇筑方案，建立了某水电工程的面板堆石坝三维有限单元模型，该模型共由有 20824 个单元、19111

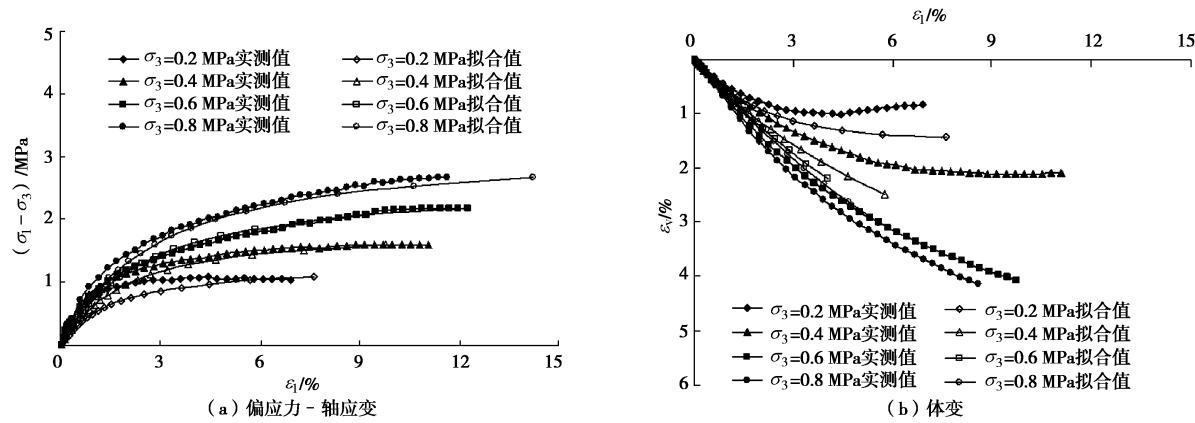
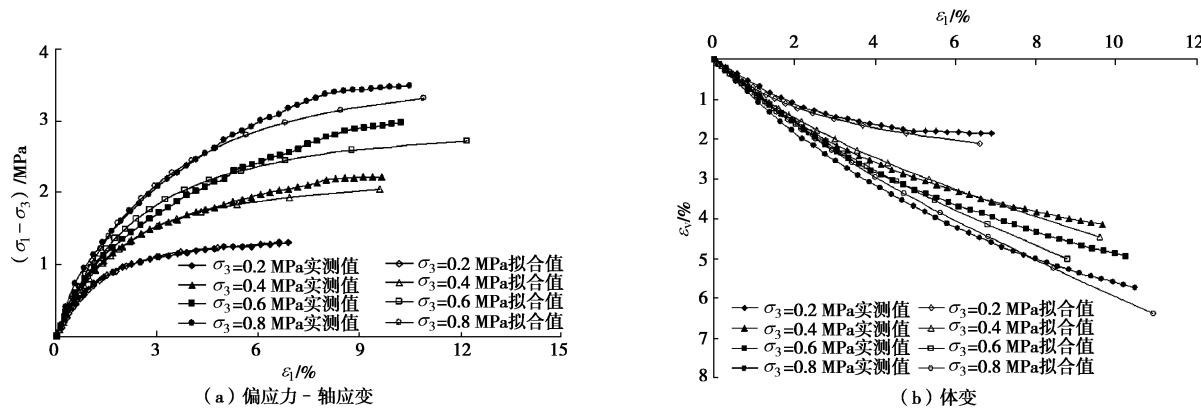
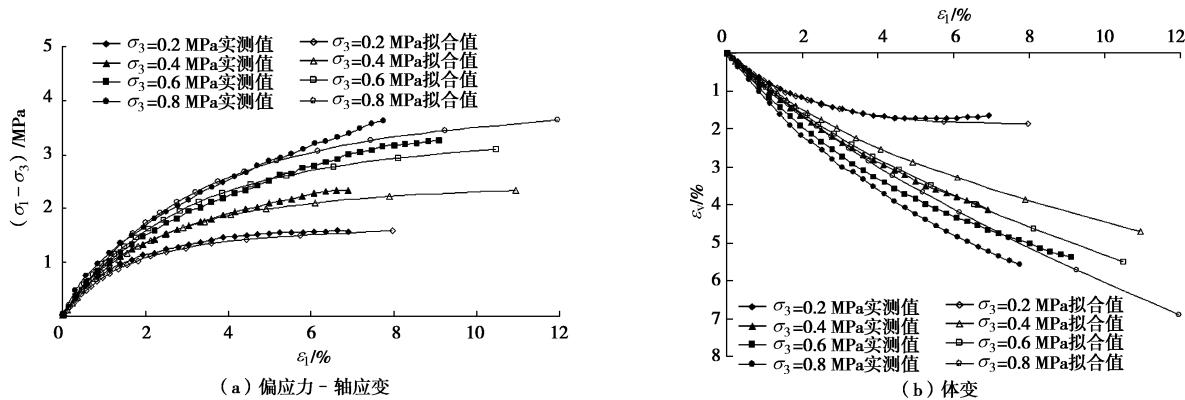
图 1 剪胀模型矩阵计算值与试验数据的对比 ($b=0$)Fig. 1 Comparison between calculated results and observed data of rockfill ($b=0$)图 2 剪胀模型矩阵计算值与试验数据的对比 ($b=0.25$)Fig. 2 Comparison between calculated results and observed data of rockfill ($b=0.25$)图 3 堆石料堆石料真三轴试验数据 ($b=0.5$)Fig. 3 Comparison between calculated results and observed data of rockfill ($b=0.5$)

表 2 面板坝堆石料“非线性剪胀”模型参数

Table 2 Parameters of dilatancy model of CFRD

| 名称 | ρ (g cm^{-3}) | Φ_0 ($^{\circ}$) | $\Delta\Phi$ ($^{\circ}$) | K | K_{ur} | n | R_f | E-B 模型 | | 非线性剪胀模型 | | |
|-----|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----|----------|------|-------|--------|------|---------|----------|---------|
| | | | | | | | | K_b | m | K_f | α | β |
| 堆石料 | 2200 | 50 | 10 | 900 | 1800 | 0.20 | 0.80 | 400 | 0.25 | 5.5 | 1.0 | 2.2 |

个节点组成，并在模型底部施加固定位移约束，三维空间网格如图 4 所示。在面板与垫层料之间设置了 8 结点空间 Goodman 接触面单元。

2.2 材料参数

堆石料非线性剪胀模型和邓肯 E-B 模型参数由试验结果并参考类似工程确定，见表 2 所示。混凝土

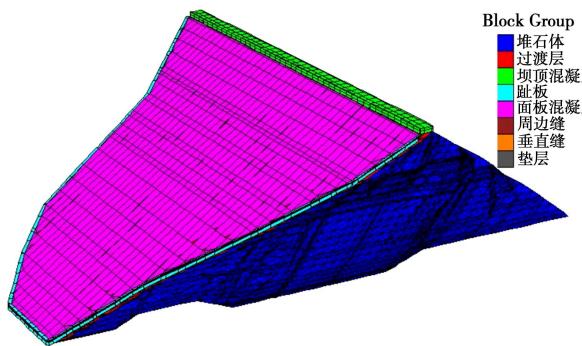


图 4 大坝三维有限元网格图

Fig. 4 Three-dimensional FE mesh of CFRD

面板采用线弹性模型模拟, 密度 $\rho=2.40 \text{ g/cm}^3$, 弹性模量 $E=25500 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.167$ 。

2.3 计算成果及分析

(1) 坝体变形

图 5 分别为采用非线性剪胀模型和邓肯 $E-B$ 模型计算得到的完建期坝体最大横断面水平顺河向以及沉降分布等值线图。从图 5 可以看出, 完建期非线性剪胀模型最大沉降值为 158 cm (约为坝高的 0.96%), 位于坝高约 3/5 处, 邓肯 $E-B$ 模型最大沉降值为 121 cm (约为坝高的 0.75%), 位于坝高约 3/5 处。对比来看, 非线性剪胀模型堆石体产生最大沉降要比邓肯 $E-B$ 模型堆石体产生最大沉降增大约 0.24%, 但两种模型的沉降规律基本一致。剪胀模型沉降明显大于邓肯 $E-B$ 模型的原因主要就在于模型中增加了剪胀模量这一项, 顺河向往上下游坝坡临空面的剪胀作用降低了水平侧限, 促进了坝体中部的沉降, 而邓肯 $E-B$ 模型由于未考虑剪胀作用, 导致采用相同参数进行计算得到的变形量明显偏小。蓄水后, 坝体最大剖面的沉降比竣工期增大。非线性剪胀模型最大沉降值达到 165 cm (约为坝高的 1.03%), 邓肯 $E-B$ 模型最大沉降值为 127 cm (约为坝高的 0.80 %)。

(2) 面板应力

图 6, 7 分别为采用非线性剪胀模型和邓肯 $E-B$ 模型计算得到的蓄水期面板应力分布规律等值线云图。

从坝轴向应力分布来看, 面板基本处于受压状态。其中非线性剪胀模型最大压应力为 15.22 MPa, 出现在面板中部, 最大拉应力为 0.97 MPa, 出现在两岸靠近坝顶部较小区域里。邓肯 $E-B$ 模型最大压应力为 12.84 MPa, 也出现在面板中部, 最大拉应力为 0.70 MPa, 也出现在两岸靠近坝顶部。面板产生拉压应力的原因主要是由于面板在水压力作用下, 由平面变为曲面, 使得面板有拉长的趋势, 使其受拉。另外, 在自重和水压作用下堆石体沉降时由两岸向河床方向变

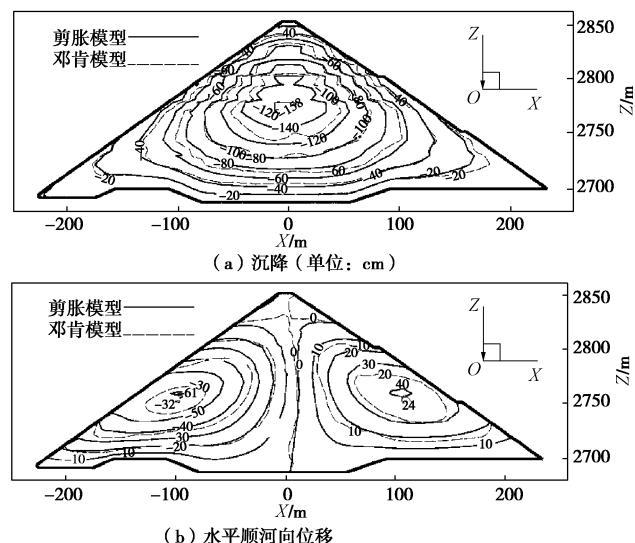


图 5 蓄水期坝体最大断面 (0+212) 位移等值线图

Fig. 5 Displacement contours of cross section 0+212 at full storage stage

形, 堆石体的位移趋势受到面板摩擦阻力作用, 堆石体对面板施加反向沿河床方向的摩擦力, 从而使面板中部形成较高的坝轴向压应力, 在两岸则出现拉应力, 但由于靠近两岸的面板张开缝受拉后张开, 因此面板坝轴向拉应力并不大, 河床中部的面板垂直缝受压, 致使坝轴向面板压应力较大。

从顺坡向应力分布来看, 剪胀模型在面板顺坡向基本上受压, 最大压应力为 10.06 MPa, 位于面板中部, 面板底部基本没有出现拉应力, 受力状态与面板的变形规律一致。邓肯 $E-B$ 模型面板顺坡向最大压应力为 8.82 MPa, 也位于面板中部, 在面板底部出现局部拉应力区, 拉应力最大值为 1.75 MPa。对比两种模型的计算结果可以看出, 顺坡向应力分布规律相差较大, 这主要是由于剪胀模型坝体沉降较邓肯 $E-B$ 模型大, 堆石体对面板产生沿顺坡向的摩擦力大些, 使得面板整体表现为压缩变形。

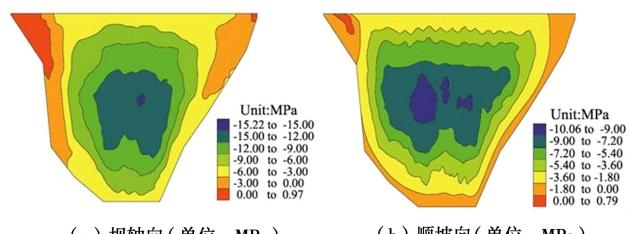


图 6 蓄水期面板应力等值线云图 (非线性剪胀模型, 压为负, 拉为正)

Fig. 6 Contour lines of slab stress at full storage stage
(compression means positive and tension means negative)

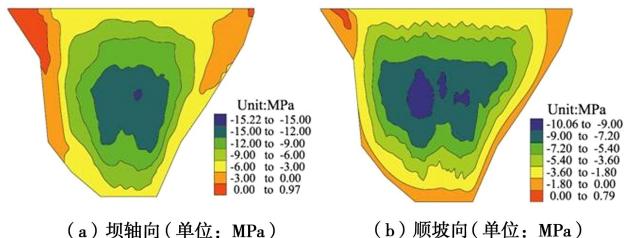


图 7 蓄水期面板应力等值线云图(邓肯 E-B 模型, 压为负, 拉为正)

Fig. 7 Contour lines of slab stress at full storage stage
(compression means positive and tension means negative)

3 结 论

(1) 介绍了一个三模量增量非线性剪胀模型, 给出了模型的 D 矩阵。采用该模型对真三轴试验进行了数值计算, 并与试验值进行了对比。计算值与试验数据符合较好, 表明该模型能够较好的反映堆石料在复杂应力条件下的变形特性。

(2) 基于堆石料的非线性剪胀模型和邓肯 E-B 模型, 对水布堰面板堆石坝的施工与蓄水过程进行了数值模拟。两模型的计算成果对比分析表明, 采用非线性剪胀模型计算出的坝体和面板的应力分布规律符合一般工程规律, 验证了非线性剪胀模型在面板堆石坝的应力变形分析中的适用性和优越性。

参考文献:

- [1] 付志安, 风家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. (FU Zhi-an, FENG Jia-ji. Concrete face rockfill dam[M]. Wuham: Huazhong University of Science and Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [2] 曹克明, 汪易森, 张宗亮. 高混凝土面板堆石坝的设计与施工[J]. 水力发电, 2001(10): 49 - 52. (CAO Ke-ming, WANG Yi-sen, ZHANG Zong-liang. Design and construction of high concrete face rockfill dam[J]. Water Power, 2001(10): 49 - 52. (in Chinese))
- [3] DUNCAN J M, BYRNE P M, WONG K S, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element

analysis of stress and movement in soil masses[R]. Berkeley: University of California, 1980.

- [4] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型[C]// 第五届土力学及基础工程学术研讨会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社. 1990: 142 - 147. (SHEN Zhu-jiang. A new model of stress and strain analysis for soils[C]// The 5th Proceedings of Symposium on Soil Mechanics and Foundation. Beijing: China Architecture and Building Press, 1990: 142 - 147. (in Chinese))
- [5] 殷宗泽, 卢海华, 朱俊高. 土体的椭圆-抛物双屈服面模型及其柔度矩阵[J]. 水力学报, 1996, 22(12): 23 - 28. (YIN Zong-ze, LU Hai-hua, ZHU Jun-gao. Elliptic-parabolic double yield surface model for soil and its flexibility matrix[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 22(12): 23 - 28. (in Chinese))
- [6] 高莲士, 赵红庆, 张丙印. 堆石料复杂应力路径试验及非线性 K-G 模型研究[C]// 国际高土石坝学术研讨会论文集. 北京, 1993: 110 - 117. (GAO Lian-shi, ZHAO Hong-qing, ZHANG Bing-yin. Complex stress path test on rockfill materials and study on K-G nonlinear Model[C]// Proceedings of the International Conference on High Earth-Rock Dam. Beijing, 1993: 110 - 117. (in Chinese))
- [7] 程展林, 潘家军. 水布堰面板堆石实测应力变形分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 1132 - 1138. (CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun. Analysis of monitoring data of stress and deformation for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 1132 - 1138. (in Chinese))
- [8] 程展林, 姜景山, 丁红顺, 等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 331 - 337. (CHENG Zhan-lin, QIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Nonlinear dilatant model for coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 331 - 337. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)