

# 胶结砂石料应变预测模型参数灵敏度分析

杨海军, 季 厅

(南通市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 南通 226000)

**摘要:**为了探究胶结砂石料应变预测模型参数的灵敏度,首先利用胶凝掺量为 $80\text{kg/m}^3$ 的胶结砂石料三轴试验数据确定胶结砂石料应变预测模型的参数 $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$ ,分析了这些参数单独变化对该模型得出的应力变形计算结果的影响。研究表明,参数 $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$ 对胶结砂石料初始模量以及应力-应变曲线的非线性特征等变形特性有一定影响,参数 $k$ 、 $m$ 也对强度有较大影响;参数 $\varepsilon_d$ 影响着胶结砂石料体积应变曲线中的剪缩剪胀转折点位置,而 $\lambda$ 、 $d$ 影响着胶结砂石料的剪缩剪胀程度。综合比较了应变预测模型的各项参数对体变、模量及强度的灵敏度,表明不同参数的灵敏度差异很大;工程实际应用时,灵敏度较大的参数 $k$ 、 $m$ 、 $\lambda$ 取值应慎重。

**关键词:**胶结砂石料;应变预测模型;参数灵敏度

中图分类号:TV321;TV649

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2019)04-0033-04

## Analysis on the parameter sensitivity of the deformation predicting model for CSG material

YANG Haijun, JI Ting

(Nantong Surveying and Design Institute of Water Resource Co., Ltd., Nantong 226000, Jiangsu)

**Abstract:** In order to explore the parameter sensitivity of the deformation predicting model for cement-sand-gravel (CSG) material, firstly, the parameters  $E_i$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_d$ ,  $\lambda$ ,  $d$  of the deformation predicting model for CSG material were determined by using the triaxial test data with the cement proportion of  $80\text{kg/m}^3$ , and the influence of the individual changes of these parameters on the calculation results of stress and deformation obtained from the model was analyzed. The result showed that the parameters  $E_i$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $m$ ,  $\varepsilon_m$  had certain effects on the initial modulus and the nonlinear characteristics of the stress-strain curve, and the parameters  $k$ ,  $m$  also had a great influence on the shear strength. The parameter  $\varepsilon_d$  affected the position of the shear dilating turning point in the volumetric strain curve of CSG material, while  $\lambda$  and  $d$  affected the degree of shear dilatation and shear dilatancy. The sensitivities of each parameter of strain prediction model to volumetric strain, modulus and strength were comprehensively compared, which indicated that the sensitivities of different parameters were very different. When engineering was applied, the parameters  $k$ ,  $m$  and  $\lambda$  with higher sensitivity should be cautious.

**Key words:** CSG material; prediction model of deformation; parameters sensitivity

胶结砂石料是一种将工程附近河床或山区的天然砂砾石料、废弃料、破碎石料等材料添加少量胶凝剂、水拌和而成的工程材料,目前已应用在一些大坝、围堰、堤防、边坡以及地基加固工程中<sup>[1-2]</sup>。

蔡新等<sup>[3]</sup>在胶凝掺量 $60\text{kg/m}^3$ 的胶结砂石料三轴剪切试验基础上,提出了一种胶结砂石料应变预测模型。该模型的参数大多是依靠胶结砂石料现场或室内试验获取的。受材料物理性质、应力历史等

收稿日期:2019-01-16

作者简介:杨海军(1981—),男,本科,工程师,主要从事水利规划设计工作。

因素的影响以及现有试验方法与设备的限制,其中一些参数的取值可能不符合实际情况。模型参数能否合理且准确地获取,已成为该材料应用工程计算与安全评价中的关键问题,因此,深入了解模型各参数的变化对模型预测应力-应变结果的影响是必要的。

胶凝掺量  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料是目前胶结砂石料工程应用中常用的胶结砂石料<sup>[1]</sup>。为了探究胶结砂石料应变预测模型的参数对其计算结果的敏感性,本文以胶凝掺量  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料<sup>[4]</sup>对应的模型参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$  等结果作为基准参数,其中任一参数分别乘以 0.8、1.0、1.2 的放大系数,分析各参数对围压 300 kPa、1200 kPa 的三轴剪切试验应力-应变曲线或体积应变-轴向应变曲线的敏感性,并综合分析了各参数对应力水平 50% 对应的体变值、破坏时的体变值、模量及峰值强度的灵敏度。

## 1 胶结砂石料应变预测模型

胶结砂石料应变预测模型由胶结砂石料应力-应变方程与体变预测方程组成,其中应力-应变方程可采用式(1)表示:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{c\varepsilon_a^2 + b\varepsilon_a + a} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_1 - \sigma_3$  为主应力差;  $\varepsilon_a$  为轴向应变;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为拟合参数,可分别由下式表示:

$$a = \frac{1}{E_i \left( \frac{\sigma_3 + Pa}{Pa} \right)^n} \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{k\sigma_3 + m} - \frac{2}{\varepsilon_m E_i \left( \frac{\sigma_3 + Pa}{Pa} \right)^n} \quad (3)$$

$$c = \frac{1}{E_i \left( \frac{\sigma_3 + Pa}{Pa} \right)^n \varepsilon_m^2} \quad (4)$$

式中,  $E_i$  为无围压时,胶结砂石料的弹性剪切模量;  $n$  为模量指数,反映弹性模量随围压增加而增加的急剧程度;参数  $\varepsilon_m$  为峰值强度对应的轴向应变的平均值;  $k$  为峰值强度与围压的直线关系式的斜率;  $m$  为其纵轴截距;  $Pa$  为标准大气压,取 100 kPa。

胶结砂石料体积应变与轴向应变关系可用式(5)表示:

$$\varepsilon_v = -\frac{\lambda\sigma_3 + d}{\varepsilon_d^2} (\varepsilon_a - \varepsilon_d)^2 + \lambda\sigma_3 + d \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon_d$  为体变峰值对应的轴向应变的平均值;  $\lambda$  为体积应变峰值与围压的直线关系式的斜

率,  $d$  为其纵轴截距。

以  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料大型三轴剪切试验结果对胶结砂石料应变预测模型进行验证,试验结果相应的模型参数值见表 1。

表 1 修正应力变形模型的参数值

胶凝掺量 ( $\text{kg/m}^3$ )	$E_i$	$n$	$k$	$m$ (kPa)	$\varepsilon_m$ (%)	$\varepsilon_d$ (%)	$\lambda_2$ ( $10^{-3}$ )	$d_2$ (%)
80	3150	0.35	3.59	4638.2	1.42	1.21	0.25	0.4

图 1 为胶凝掺量  $20 \text{ kg/m}^3$  与  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料应变预测模型的计算值(以围压 300 kPa 与 1200 kPa 大型三轴剪切试验结果为例)。从图 1 可看出:胶凝掺量  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料应力变形计算结果与试验数据基本吻合,表明该模型能用于预测胶凝掺量  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料应力变形。

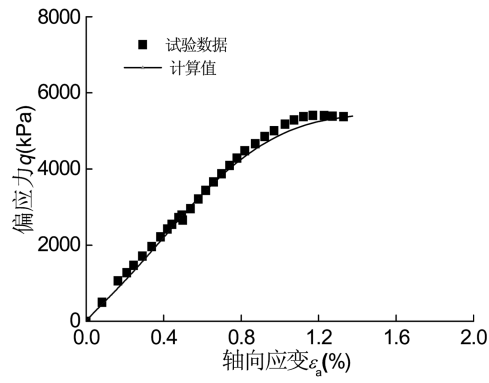
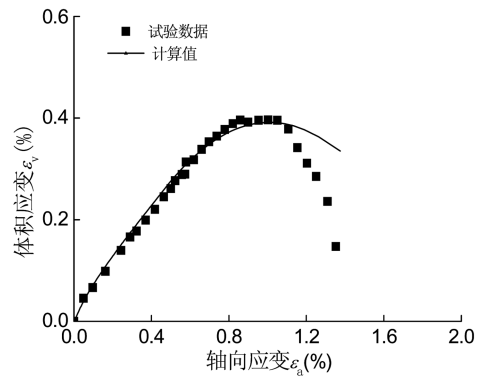
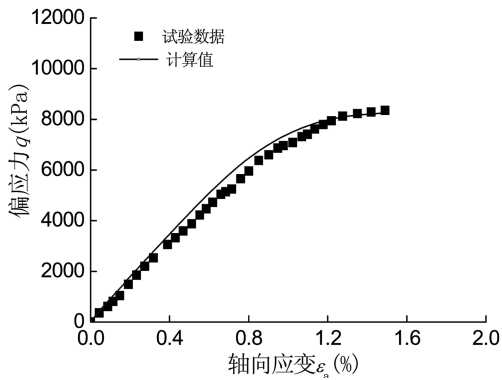
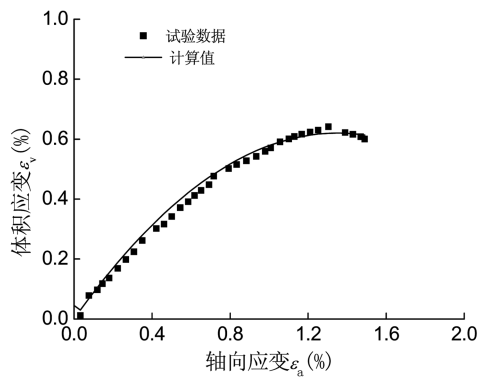
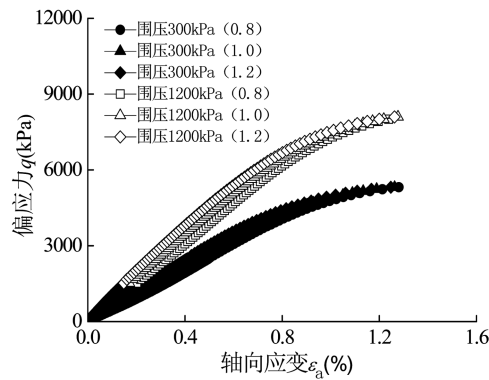
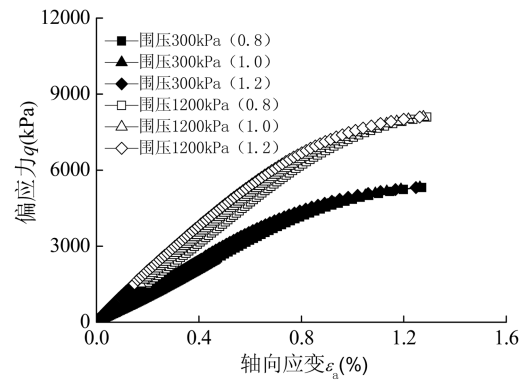
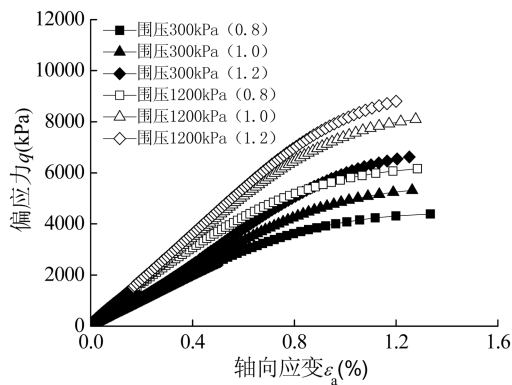
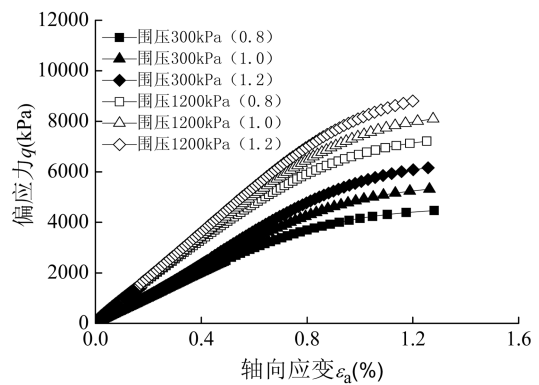
## 2 模型参数对应力变形结果的影响

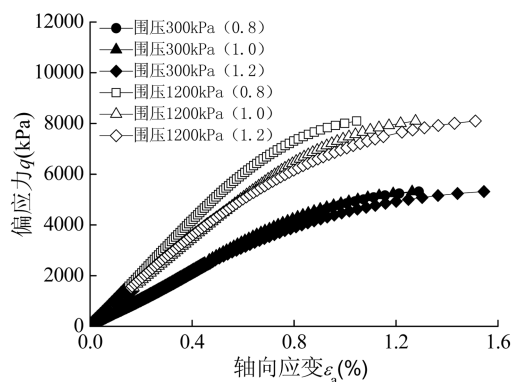
为研究模型参数变化对模型所反映的普通三轴应力条件下应力-应变关系的影响,以适当规律变化模型参数,本文进行了胶凝掺量  $80 \text{ kg/m}^3$  胶结砂石料的应变预测模型参数敏感性分析,其具体方法<sup>[5-7]</sup>为:首先通过改变  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$  任意一参数大小分别乘以 0.8、1.0、1.2 的折减或放大系数,保持其他参数不变,研究该参数变化对三轴试验结果的影响;之后,从三轴试验的应力变形计算值中获取其应力水平 50% 对应的体变、破坏时的体变、模量及峰值强度,综合分析各参数对这些量的灵敏度。

胶结砂石料预测模型的应力-应变方程包含参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$  等参数,而其体积应变-轴向应变方程包含参数  $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$ 。因此,下文主要分析参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$  对胶结砂石料三轴应力应变曲线的影响,参数  $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$  对体积应变-轴向应变曲线的影响。

### 2.1 参数 $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$

图 2~图 6 分别为考虑参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$  影响的胶结砂石料应力-应变关系。从图 2~图 6 可看出:随着参数  $E_i$  的增加,胶结砂石料初始阶段至应力水平约为 0.8 处特定的轴向应变对应的偏应力均明显增大,但破坏点附近的应力值大体相同;在胶结砂石料试件破坏点之前,相同轴向应变对应的偏应力随参数  $n$  的增加而增大,但破坏点附近的应力值大体相同;对于不同参数  $m$  而言,胶结砂石料在应力-应变关系初始阶段几乎不变;对于不同的参数  $k$ ,胶结砂石料在应力-应变关系初始阶段几乎不变;随着参数  $k$  的增加,破坏点附近的应力同样增

(a) 围压 300kPa 的偏应力  $q$  - 轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线(b) 围压 300kPa 的体积应变  $\varepsilon_v$  - 轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线(c) 围压 1200kPa 的偏应力  $q$  - 轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线(d) 围压 1200kPa 的体积应变  $\varepsilon_v$  - 轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线图1 胶凝掺量  $80\text{kg}/\text{m}^3$  的胶结砂石料大型三轴剪切试验验证图2 考虑参数  $E_i$  影响的应力 - 应变曲线图3 考虑参数  $n$  影响的应力 - 应变曲线图4 考虑参数  $k$  影响的应力 - 应变曲线图5 考虑参数  $m$  影响的应力 - 应变曲线

图6 考虑参数  $\varepsilon_m$  影响的应力-应变曲线

大,增幅略大于参数  $m$ ;随着参数  $\varepsilon_m$  的增加,同一轴向应变对应的偏应力减小。

造成上述试验曲线差异的主要原因是:参数  $E_i$  与  $n$  是初始模量  $E_0$  的重要参数,影响着该模量的量值,而式(1)包含着初始模量  $E_i$ ,对胶结砂石料应力-应变曲线非线性特征具有一定的影响;峰值强度  $q_m$  表达式未包含参数  $E_i$  与  $n$ ,因此参数  $E_i$  与  $n$  不影响胶结砂石料的峰值强度值且对破坏点附近的应力值影响非常小;参数  $m$  与  $k$  是峰值强度  $q_m$  的重要参数,影响着峰值强度的大小,而式(1)包含着峰值强度  $q_m$ ,对胶结砂石料应力-应变曲线非线性特征有一定的影响;初始模量  $E_i$  表达式中未包含参数  $m$  与  $k$ ,因此参数  $k$  与  $m$  不影响胶结砂石料剪切初始阶段的偏应力值。

## 2.2 参数 $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$

图7~图9分别为考虑参数  $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$  影响的胶结砂石料应力-应变关系与体积应变-轴向应变关系曲线。从图7~图9可看出:随着参数  $\varepsilon_d$  的增加,体积应变-轴向应变关系的初始斜率减小,峰值点附近的体积应变增大;随着参数  $\lambda$  的增加,相同轴向应变对应的体积应变增大;随着参数  $d$  的增加,体积应变-轴向应变关系曲线初始阶段的体积应变减小,峰值体积应变增大。

## 2.3 参数对体变、模量及强度的综合比较

由上述分析可知,体变、模量及强度对不同参数的敏感程度不同,即参数的灵敏度不同,分别定义  $S_{v_{0.5}} = P_{v_{0.5}}/P_p$ 、 $S_v = P_v/P_p$ 、 $S_{E_{0.5}} = P_{E_{0.5}}/P_p$  及  $S_{q_m} = P_{q_m}/P_p$  为应力水平 50% 对应的体变、破坏时的体变、模量及峰值强度的灵敏度,表示参数对模型所反映体变、模量及强度的影响程度,其中,  $P_{v_{0.5}}$  为应力水平 50% 对应的体变百分数,  $P_v$  为破坏时的体变百分数,  $P_p$  为模型参数变化百分数,  $P_{E_{0.5}}$  为应变 0.5% 对应的模量变化百分数,  $P_{q_m}$  为峰值强度  $q_m$

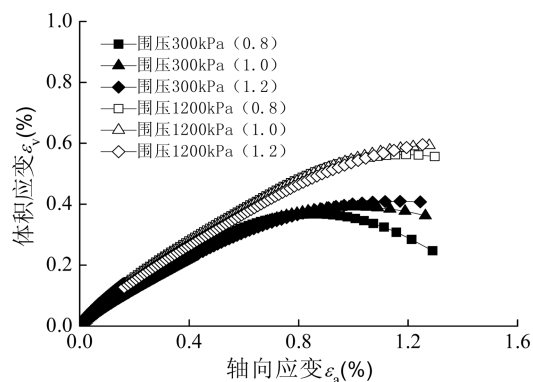
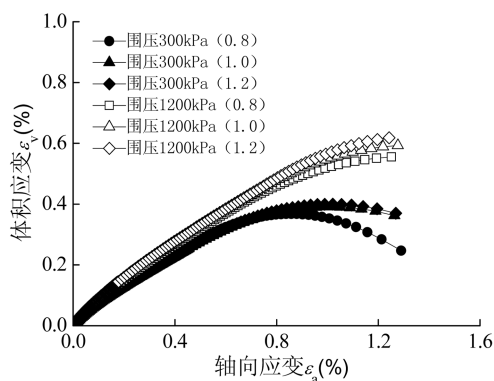
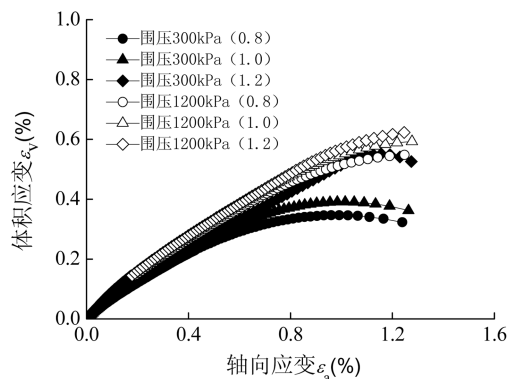
图7 考虑参数  $\varepsilon_d$  影响的体积应变-轴向应变曲线图8 考虑参数  $\lambda$  影响的体积应变-轴向应变曲线图9 考虑参数  $d$  影响的体积应变-轴向应变变化百分数。

表2列出了胶结砂石料应变预测模型的材料参数-20%~20%内变化引起的改变值,用于表示这些材料参数的灵敏度。从表2可看出:参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $\varepsilon_m$  对胶结砂石料初始模量的灵敏度一般在 0.2~0.6 范围内,但对峰值强度  $q_m$  的影响很小;参数  $k$ 、 $m$  对峰值强度与初始模量的灵敏度在 0.3~1.1 范围内,与参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $\varepsilon_m$  相比,  $k$ 、 $m$  的影响较大;参数  $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$  对胶结砂石料体积应变的灵敏度一般在 0.1~1.7 范围内,其中参数  $\lambda$  的影响较大;当胶结砂石料应变预测模型用于工程结构计算时,需特别考虑参数  $k$ 、 $m$ 、 $\lambda$  的准确性。

(下转第 41 页)

(上接第 36 页)

表 2 各参数的体变、模量及峰值强度灵敏度

参数	围压 (kPa)	$S_{v_{0.5}}$	$S_v$	$S_{E_{0.5}}$	$S_{q_m}$
$E_0$	300	—	—	0.52	0.02
	1200	—	—	0.50	0.03
$n$	300	—	—	0.33	0.02
	1200	—	—	0.48	0.03
$k$	300	—	—	0.56	1.05
	1200	—	—	0.64	1.05
$m$	300	—	—	0.43	0.8
	1200	—	—	0.38	0.5
$\varepsilon_m$	300	—	—	0.20	0.08
	1200	—	—	0.40	0.07
$\varepsilon_d$	300	0.28	0.26	—	—
	1200	0.23	0.22	—	—
$\lambda$	300	0.47	0.80	—	—
	1200	0.41	1.62	—	—
$d$	300	0.23	0.40	—	—
	1200	0.23	0.29	—	—

### 3 结论

本文通过改变胶凝掺量  $80 \text{ kg/m}^3$  的胶结砂石料模型参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、 $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_d$ 、 $\lambda$ 、 $d$  中的任一参数,分析了上述参数对模型所反映三轴试验曲线关系的影响程度,主要结论如下:

(1)在模型所有参数中,参数  $k$ 、 $m$  对胶结砂石的强度与模量均有一定的影响;参数  $E_i$ 、 $n$ 、 $k$ 、 $m$ 、

$\varepsilon_m$  对应力-应变曲线的初始模量以及应力-应变曲线的非线性特征等变形特性影响较大;参数  $\varepsilon_d$  影响着胶结砂石料的剪缩剪胀转折点位置; $\lambda$ 、 $d$  对剪胀程度存在一定的影响。

(2)胶结砂石料应变预测模型进行结构计算时,需特别注意参数  $k$ 、 $m$ 、 $\lambda$  的准确性。

### 参考文献:

- [1] 杨会臣. 胶凝砂砾石坝结构设计研究与工程应用 [D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.
- [2] 申美红. 胶凝砂砾石材料三轴抗剪试验研究 [D]. 郑州:华北水利水电大学, 2014.
- [3] 蔡新, 杨杰, 郭兴文. 一种新的胶凝砂砾石坝坝料应变预测模型 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6):1594-1599.
- [4] 杨杰, 蔡新, 宋小波. 基于大三轴试验的胶凝砂砾石坝坝料特性研究 [J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(4):24-28.
- [5] 史江伟, 朱俊高, 张丹, 等. 椭圆-抛物线双屈服面模型参数灵敏度分析 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1):70-76.
- [6] 付韶华, 刘军, 冯旭松. 赤泥堆场稳定性影响因素及其敏感性分析 [J]. 江苏水利, 2012, 7:20-22.
- [7] 闫昊晨, 王春美. 新型植被海堤波浪溢流破坏的堤形敏感性研究 [J]. 江苏水利, 2017, 1:51-55.