

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.005

一种胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构新模型

蔡新^{1,2,3}, 杨杰^{1,3}, 郭兴文², 宋小波²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于胶凝砂砾石坝坝料大三轴试验改进非线性解耦 K-G 模型, 提出一种可反映胶凝砂砾石坝坝料应变软化特性和剪胀特性的非线性 K-G-D 本构模型; 结合试验结果及回归分析方法确定模型的体积模量、剪切模量、剪胀模量及其包含的重要参数; 最后对非线性 K-G-D 本构模型进行了验证, 得出数值模拟结果与试验采集的数据基本吻合, 表明该模型可为胶凝砂砾石坝的计算分析及设计提供参考。

关键词: 胶凝砂砾石坝坝料; 大三轴试验; 剪胀特性; 本构关系
中图分类号: TV321; TV649 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)06-0491-06

A new type of nonlinear K-G-D constitutive model for CSG material

CAI Xin^{1, 2, 3}, YANG Jie^{1, 3}, GUO Xingwen², SONG Xiaobo²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through a large-scale triaxial test, a new type of nonlinear K-G-D constitutive model, which can describe the strain softening and dilatancy of cemented sand and gravel (CSG) material, was developed based on the K-G constitutive model. The bulk modulus, shear modulus, dilatancy modulus, and other important parameters of the model were determined according to the test results and regression analysis. The nonlinear K-G-D constitutive model was verified. The results show that the calculated values agreed with experimental data, indicating that the model can provide references for the design and analysis of dams with CSG materials.

Key words: CSG material; large-scale triaxial test; shear dilatation; constitutive relationship

胶凝砂砾石坝作为兼有混凝土面板堆石坝和混凝土重力坝两者优点的新坝型, 因断面小、施工速度快、省料、抗震性能好、适应较软弱地基等特点, 具有很强的竞争力和应用前景, 引起越来越多国内外学者的关注^[1]。目前胶凝砂砾石坝坝料工程特性研究不多^[2-7], 使得胶凝砂砾石坝坝料本构关系多借用堆石本构关系或混凝土材料本构关系^[8-12], 应用于工程的应力应变分析结果偏差较大。普通堆石料非线性弹性模型优点在于数学表述与理论框架较简单, 方便用于实际工程。本文基于胶凝砂砾石坝坝料的大三轴试验, 提出一种可反映胶凝砂砾石坝坝料应变软化特性和剪胀特性的非线性 K-G-D 本构模型。

1 试验简介

将胶凝砂砾石坝坝料(水泥、砂、石子、水等材料组成)制成直径 300 mm、高 700 mm 的圆柱形试件。试件胶凝掺量分为 20 kg/m³、40 kg/m³、60 kg/m³、80 kg/m³, 粗细骨料干密度为 2 130 kg/m³, 砂占 20%, 粗骨料占

80% (粒径 5 mm 以下占 3% , 5 ~ 10 mm 占 20% , 10 ~ 20 mm 占 35% , 20 ~ 40 mm 占 42%) , 水灰比(质量比) 为 1. 0。试验在南京水利科学研究院大型三轴剪切试验仪上进行。将养护(28 d) 好的试件参照规程^[13-14] 分别以 300 kPa、600 kPa、900 kPa、1 200 kPa (σ_3) 等压固结, 然后进行慢速排水剪切。

2 试验结果及分析

图 1 为各种胶凝掺量下胶凝砂砾石坝坝料应力应变关系。由图 1 可知: 胶凝砂砾石体存在应力峰值和应变软化现象。峰值强度之前偏应力随轴向应变 ε_s 的增加而不断增大, 梯度变陡, 呈非线性; 达到峰值后, ε_s 增大, 而偏应力逐渐减小, 表现出应变软化, 最终偏应力趋于一个称为残余强度的定值; 胶凝砂砾石坝坝料峰值强度和残余强度随胶凝掺量和围压增大而增大。随着胶凝掺量的增加, 应变软化现象更明显, 与低胶凝掺量的胶凝砂砾石坝坝料相比, 强度和初始变形模量有大幅度提高。

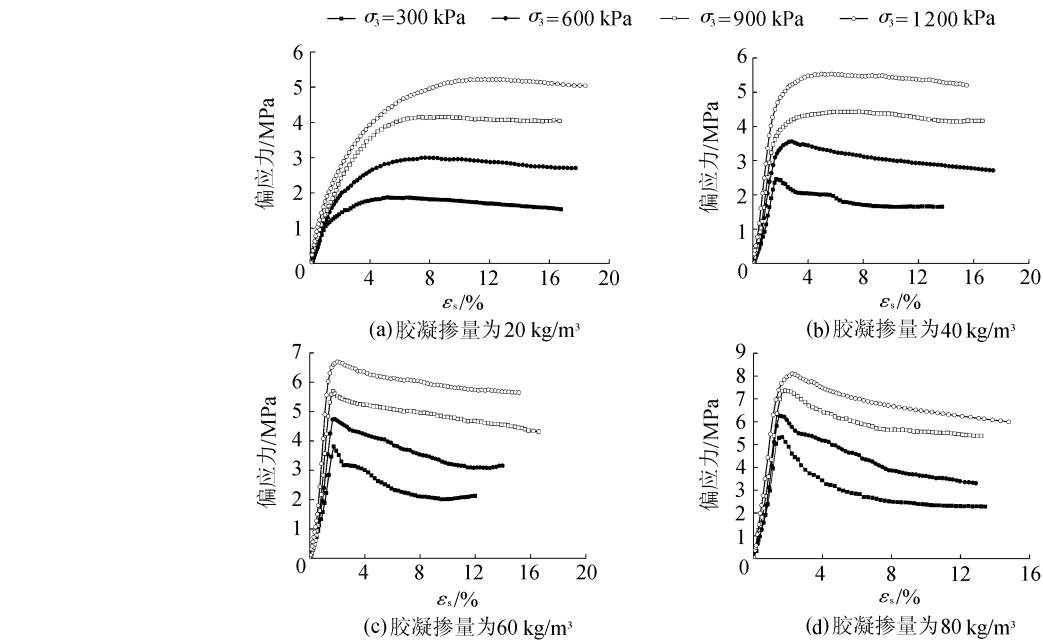


图 1 各种胶凝掺量下的胶凝砂砾石坝坝料应力应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationship for CSG material with different cement contents

图 2 为各胶凝掺量下胶凝砂砾石坝坝料体积应变 ε_v 与 ε_s 的关系。从图 2 可以看出: 同种胶凝掺量的胶凝砂砾石坝坝料的 ε_v 随着 ε_s 的增加而不断增大, 呈先剪缩, 后剪胀的特点。由峰值点对应的 ε_s 值可知, 低围压下的试件, 与高围压相比, 会较早出现剪胀现象。在同一轴向应变时, 可以发现剪胀区其围压越高, ε_v 越小。

3 胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构模型

3.1 强度准则的选取

基于胶凝砂砾石坝坝料大三轴试验数据以及孙明权等^[3,12] 的研究, 本文将摩尔库伦强度准则作为胶凝砂砾石坝坝料的强度准则。

3.2 加载时的应力应变关系

经改进的 K-G 增量应力应变关系由下式表示:

$$d\varepsilon_v = \frac{dp}{K_t} + \frac{dq}{D_t} \tag{1}$$

$$d\varepsilon_s = \frac{dq}{3G_t} \tag{2}$$

式中: G_t ——胶凝砂砾石坝坝料的剪切模量; K_t ——胶凝砂砾石坝坝料的体积模量; D_t ——剪胀模量; p ——平均应力; q ——剪切应力。

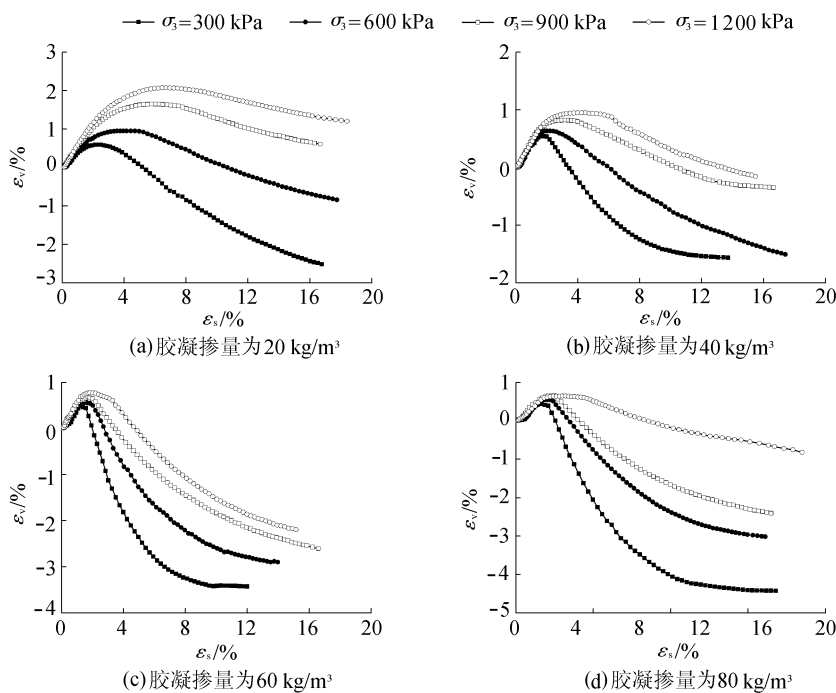


图 2 各胶凝掺量下的胶凝砂砾石坝坝料体积应变与轴向应变关系

Fig. 2 Volumetric strain-axial strain relationship for CSG material with different cement contents

a. G_t 。胶凝砂砾石坝坝料应力比(η)与 ε_s 的关系,可用式(3)表示:

$$\eta = \frac{\varepsilon_s(a + c\varepsilon_s)}{(a + b\varepsilon_s)^2}$$
 (3)

式中: a 、 b 、 c ——试验参数,分别与初始切线斜率、峰值应力比 η_f 和残余应力比 η_c 有关。

由文献[15]可知

$$\frac{1}{G_t} = 3\left(\frac{1}{G_p} \frac{dp}{dq} + \frac{1}{G_q}\right)$$
 (4)

式中: G_p ——压硬性模量; G_q ——偏剪切模量,具体可表示为

$$\begin{cases} \frac{1}{G_p} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial p} = -\frac{q(a + b\varepsilon_s)^3}{p^2(a^2 + 2ac\varepsilon_s - ab^2\varepsilon_s)} \\ \frac{1}{G_q} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial q} = \frac{(a + b\varepsilon_s)^3}{p(a^2 + 2ac\varepsilon_s - bc\varepsilon_s)} \end{cases}$$
 (5)

b. K_t 。图 3 为各胶凝掺量下 ε_v 与平均应力的对数关系。可表示为

$$\varepsilon_{vp} = \varepsilon_{vp0} + k \ln p$$
 (6)

则有

$$K_t = \frac{dp}{d\varepsilon_{vp}} = \frac{p}{k}$$

式中: ε_{vp} —— p 引起的体积应变; ε_{vp0} 、 k ——拟合常数。

c. D_t 。定义 D_t ,则有

$$D_t = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon_v}$$

将用于拟合总体积应变与轴向应变关系(如图 2 所示)的四次无常数项多项式,与由 p 引起的体积应变的表达式相减可得:

$$\varepsilon_{vpq} = d\varepsilon_s^4 + e\varepsilon_s^3 + f\varepsilon_s^2 + g\varepsilon_s - \varepsilon_{vp0} - k \ln p$$
 (7)

式中: d 、 e 、 f 、 g ——拟合参数,与围压有关。

应力-应变增量方程为

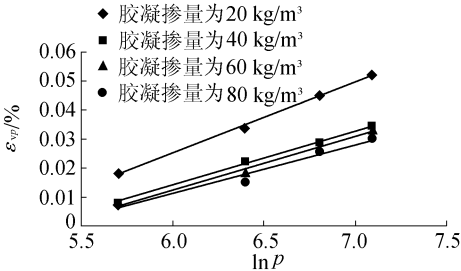


图 3 各胶凝掺量下的体积应变与平均应力的对数关系
Fig. 3 Logarithmic relationship between volumetric strain and average stress for CSG material with different cement contents

$$d\varepsilon_{vpq} = \frac{1}{D_p}dp + \frac{1}{D_q}dq$$

(8)

其中: D_p ——压胀模量; D_q ——纯剪胀模量。

对式(7)隐函数微分,可得

$$\frac{1}{D_p} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial p} \left(4d\varepsilon_s^3 + 3e\varepsilon_s^2 + 2f\varepsilon_s + g - \frac{k}{p} \right) dp$$

(9)

$$\frac{1}{D_q} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial q} (4d\varepsilon_s^3 + 3e\varepsilon_s^2 + 2f\varepsilon_s + g) dq$$

(10)

$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial p}$ 、 $\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial q}$ 可用式(5)表示,代入式(8)并将其两端同时除以 dq 可得

$$\frac{1}{D_t} = \frac{1}{D_p} \frac{dp}{dq} + \frac{1}{D_q}$$

(11)

3.3 参数确定

图4表明胶凝砂砾石坝坝料的剪切强度与围压趋于线性,则可表示为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = n_1\sigma_3 + n_2$$

(12)

因试验为常规三轴试验,应力比 $\eta = \frac{q}{p}$ 中 $q = \sigma_1 - \sigma_3$, $p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}$, 则峰值应力比 η_f 为

$$\eta_f = \frac{3(n_1\sigma_3 + n_2)}{(n_1 + 2\sigma_3) + n_2}$$

(13)

图5显示该材料残余强度与围压趋于线性,其残余应力比 η_c 表达式可类比式(13):

$$\eta_c = \frac{3(n_3\sigma_3 + n_4)}{(n_3 + 2\sigma_3) + n_4}$$

(14)

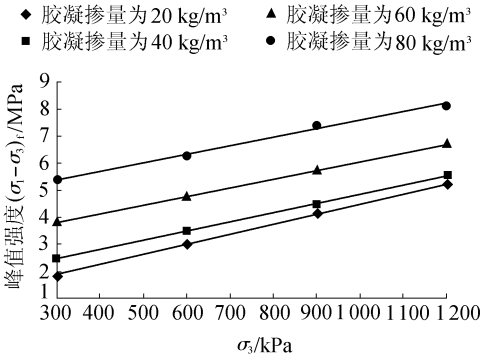


图4 峰值强度与围压的关系

Fig. 4 Relationship between peak strength and confining pressure

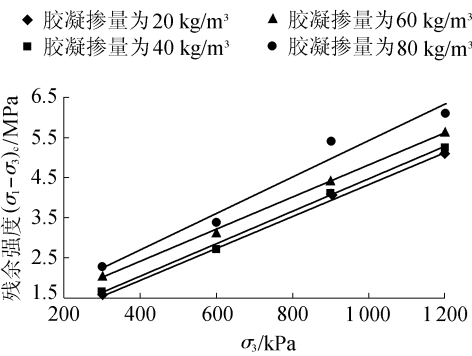


图5 残余强度与围压的关系

Fig. 5 Relationship between residual strength and confining pressure

从图6可知,胶凝砂砾石坝坝料的破坏应变 ε_{sf} 与围压的关系可表示为

$$\varepsilon_{sf} = n_5\sigma_3^2 + n_6\sigma_3 + n_7$$

(15)

根据式(13)(14)(15)以及文献[13]可得式(3)中的 a 、 b 、 c 。参数 d 、 e 、 f 、 g 与围压均为二次函数关系,这里仅列出参数 d 与围压关系(见图7),可表示为

$$d = n_8\sigma_3^2 + n_9\sigma_3 + n_{10}$$

(16)

式中: n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 、 n_6 、 n_7 、 n_8 、 n_9 、 n_{10} ——拟合参数。

同理 e 、 f 、 g 与围压关系通过试验曲线的回归可拟合出参数 $n_{11} \sim n_{19}$ 。

4 胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构模型的验证

结合试验数据,修正部分参数后,对大三轴试验进行数值模拟,限于篇幅,选取 40 kg/m^3 胶凝掺量下试验轴向应力比与轴向应变关系,并与试验结果进行对比,如图8所示。

由图8可看出数值模拟结果与试验采集的数据在峰值强度之前大致趋势相同,但在峰值强度之后有相

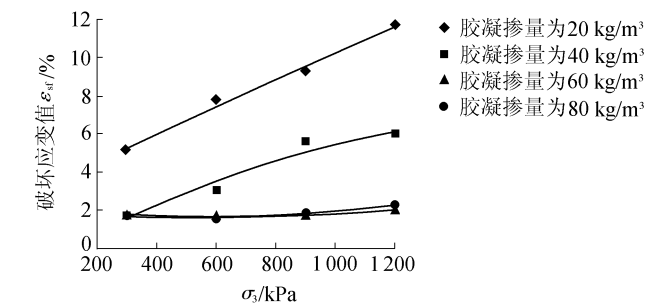


图6 破坏应变与围压的关系

Fig. 6 Relationship between failure strain and confining pressure

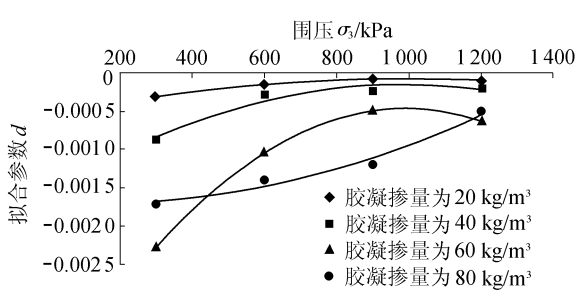


图7 拟合参数d与围压σ₃的关系

Fig. 7 Relationship between parameter d and confining pressure σ_3

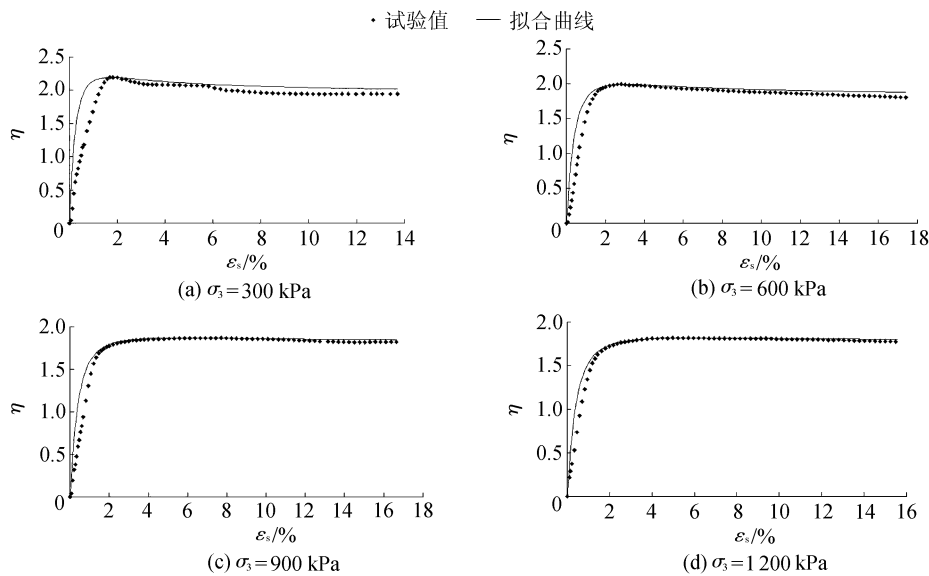


图8 胶凝掺量40 kg/m³的轴向应力比与轴向应变关系

Fig. 8 Axial stress ratio-axial strain relationship for CSG material with cement content of 40 kg/m³

当高的吻合度,说明胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构模型可以很好地反映该胶凝砂砾石坝坝料在 40 kg/m³胶凝掺量下的软化特性。

图9 为大三轴试验得到 ε_v 和 ε_s 的关系曲线。由图9 可以看出数值模拟结果与试验采集的数据基本吻合,说明胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构模型可以很好地反映胶凝砂砾石坝坝料剪胀特性。

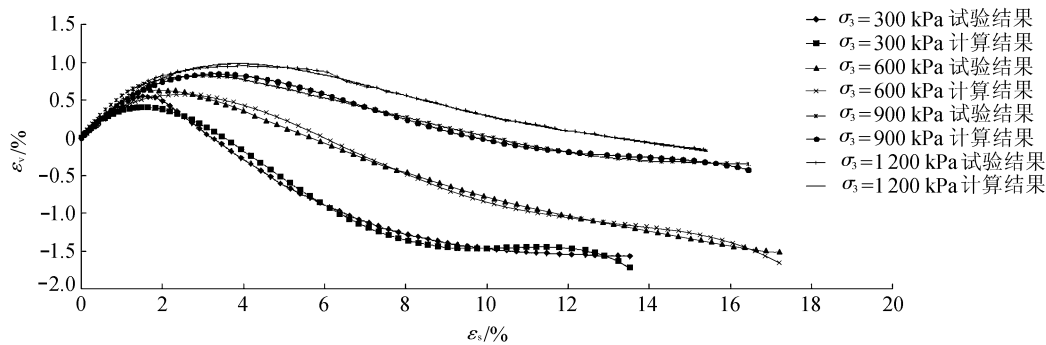


图9 胶凝掺量40 kg/m³胶凝砂砾石坝坝料体积应变与轴向应变关系

Fig. 9 Volumetric strain-axial strain relationship for CSG material with cement content of 40 kg/m³

胶凝砂砾石坝坝料非线性 K-G-D 本构模型考虑了软化和剪胀特性,适用于胶凝砂砾石坝坝料。虽然该模型含有 21 个参数,但所需试验仅有大三轴排水剪切试验,试验工程量较小,参数的获取较为简单。

5 结 论

- a. 试验结果表明,胶凝砂砾石坝坝料的峰值强度、残余强度与围压之间满足线性关系。
- b. 根据胶凝砂砾石坝坝料应力比与应变关系推导出能反映不同路径的剪切模量;根据体积应变与对数平均应力得出材料的体积模量;结合体积应变与轴向应变关系及体积应变与平均应力的关系,推导出能反映剪应力与平均应力相互作用的剪胀模量,确定各模型参数。
- c. 理论预测曲线与试验曲线基本吻合,说明模型能大致反映胶凝砂砾石坝坝料的应力应变关系并较准确地反映材料在不同胶凝掺量下的应变软化及剪胀特性。

参考文献:

[1] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam,rapid construction of concrete dams[M]. New York:ASCE,1970.

[2] 贾金生,马锋玲,李新宇,等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报,2006,37(5):578-582. (JIA Jinsheng, MA Fengling,LI Xinyu,et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(5):578-582. (in Chinese))

[3] 孙明权,彭成山,李永乐,等. 超贫胶结材料三轴试验[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):46-49. (SUN Mingquan,PENG Chengshan,LI Yongle,et al. Triaxial test of over lean cemented material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2007,27(4):46-49. (in Chinese))

[4] 李永乐,侯进凯,孙明权,等. 超贫胶结混凝土的力学特性试验研究[J]. 人民黄河,2007,29(3):59-60. (LI Yongle,HOU Jinkai,SUN Mingquan,et al. Test and study of mechanical property of super-short cement concrete[J]. Yellow River, 2007,29(3):59-60. (in Chinese))

[5] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究[J]. 土木工程学报,2007,40(2):97-103. (YANG Shoulong. Charateristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials[J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(2):97-103. (in Chinese))

[6] 柴启辉. 胶凝砂砾石坝材料力学性能试验及施工工艺初步探讨[D]. 郑州:华北水利水电学院,2012.

[7] 刘录录,何建新,刘亮,等. 胶凝砂砾石材料抗压强度影响因素及规律研究[J]. 混凝土,2013(3):77-80. (LIU Lulu,HE Jianxin,LIU Liang,et al. Study on influencing factors of compressive strength of gel sandy gravel materials and law[J]. Concrete,2013(3):77-80. (in Chinese))

[8] 孙明权,杨世锋,张镜剑. 超贫胶结材料本构模型[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):35-37. (SUN Mingquan,YANG Shifeng,ZHANG Jingjian. Study of constitutive model for over lean cemented material[J]. Advanced in Science and Technology of Water Resources,2007,27(3):35-37. (in Chinese))

[9] 刘俊林,何蕴龙,熊堃,等. Hardfill 材料非线性弹性本构模型研究[J]. 水利学报,2013,44(4):451-461. (LIU Junlin,HE Yunlong,XIONG Kun,et al. Study on nonlinear elasticity constitutive model of Hardfill material[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(4):451-461. (in Chinese))

[10] 蔡新,武颖利. 胶凝堆石料本构特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1340-1344. (CAI Xin,WU Yingli. Constitutive equation for CSG materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(9):1340-1344. (in Chinese))

[11] 武颖利. 胶凝砂砾石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究[D]. 南京:河海大学,2010.

[12] WU Mengxi,DU Bin,YAO Yuancheng,et al. An experimengtal study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material[J]. Science China:Physics,Mechanics & Astronomy, 2011,54(11):2015-2024.

[13] DL/T 5355—2006 水利水电工程土工试验规程[S].

[14] 南京水利科学研究所土工所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

[15] 周葆春,汪墨,李全华,等. 黏性土非线性弹性 K-G 模型的一种改进方法[J]. 岩土力学,2008,29(10):2725-2730. (ZHOU Baochun,WANG Mo,LI Quanhua,et al. A modified method of nonlinear elastic K-G model for clay soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(10):2725-2730. (in Chinese))