

胶凝堆石料本构特性研究

蔡新^{1,2}, 武颖利², 李洪煊², 易剑刚²

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 在胶凝堆石料的抗压强度、抗折强度和大三轴试验基础上, 通过试验数据回归分析, 得出胶凝堆石料的强度与围压之间满足相关关系, 结合初始切线弹模的表达式和 E_t/E_1-S 曲线可导出该材料在压缩状态和拉伸状态下的本构关系模型; 根据所得出的本构关系模型对抗折强度试验和大三轴试验过程进行数值模拟, 计算结果与试验结果非常接近, 说明通过试验得出的胶凝堆石料应力应变本构关系模型是合理有效的, 可为胶凝堆石坝的计算分析设计提供参考依据。

关键词: 本构方程; 大三轴试验; 胶凝堆石料

中图分类号: TV321; TV649

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)09-1340-05

作者简介: 蔡新(1964-), 男, 江苏启东人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事力学教学和水工及土工结构方面的研究。E-mail: xcai@hhu.edu.cn。

Constitutive equation for CSG materials

CAI Xin^{1,2}, WU Ying-li², LI Hong-xuan², YI Jian-gang²

(1. College of Mechanics and Material, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the compression strength tests, bending tests and large scale triaxial tests on cemented sand and gravel (CSG) materials, the correlativity between the strength of CSG materials and the ambient pressure is deduced, and a constitutive equation for the materials during the phases of compression and tension is established combining with the expression of the original tangent modulus and the curve of E_t/E_1-S . According to this constitutive equation, the processes of the bending tests and large scale triaxial tests are simulated. Comparing the test results with those of FEM analysis, we find that they are very similar. It means that the proposed constitutive equation for the CSG material is accurate and reasonable, and it can provide reference for the design and analysis of dams with CSG materials.

Key words: constitutive equation; the large scale triaxial tests; CSG material

0 引言

胶凝面板堆石坝是由拉斐尔J M (Raphael J M) 于1970年在美国加州召开的“混凝土快速施工会议”上提出的^[1], 之后, Londe又提出其上、下游坝坡均设计为1:0.7, 上游面设防水面板防渗^[2], 放宽对碾压混凝土性能和技术的要求, 只求获得一种“硬填方”而不是有较高强度的混凝土, 总造价会降低且具有较高的安全度^[3]。众多学者都认为该坝型具有高安全性、高抗震性和对地基条件要求低的特点, 而且施工简便、快速, 造价低廉^[2]。该坝型因其具有断面小、施工速度快、节省用料、便于施工导流、抗震性能好、适应较软弱地基等特点, 有很好的安全可靠性和经济合理性, 备受国内外坝工界的青睐。

胶凝堆石料的变形模量大约是碾压堆石的10~100倍^[4]。使得该坝型的坝体变形大大减小, 有利于改善面板和周边缝的工作性态, 使得上游防渗体系能正

常工作。

在国内一些专家学者对该坝型进行了一定的研究, 但目前对胶凝堆石料的本构特性认识还不够深入, 多是将胶凝堆石料看作混凝土材料, 采用线弹性的本构关系来模拟, 也有将其按照堆石料进行处理, 采用邓肯-张本构关系或将其进行修正来使用。何蕴龙等人结合相关试验资料认为胶凝堆石料具备和混凝土材料相似的特性, 采用弹塑性模型可以描述该材料的特性, 并在此基础上对该坝型进行了系列研究^[5]; 何蕴龙, 彭云枫等结合日本关于 Hardfill 坝 (CSG) 材料的单轴压缩试验结果, 分析了 Hardfill 的本构关系、强度特性、渗透特性和热力学特性等, 认为把低强度的 Hardfill 材料与梯形 Hardfill 坝结合起来, 具有技术上和经济上的优越性, 应用前景良好^[6]; 杨首龙和

Batmaz S 分别从试验的角度,对胶凝材料的强度进行研究,结果表明,当胶凝材料用量为 70 kg/m^3 (水泥用量 35 kg/m^3) 时,胶凝堆石料 90 d 的强度可达 5 MPa 以上,即可满足一座坝高 100 m 坝的要求^[7-8];孙明权等人在对胶凝堆石料系列大三轴试验数据分析的基础上,认为胶凝堆石料的变形曲线经过适当的处理,其应力应变曲线与堆石料的三轴试验的应力应变曲线比较接近,故可在邓肯-张本构关系的基础上虚加弹簧来描述胶凝堆石料的特性,其优点是可以体现胶凝堆石料的软化过程^[9];贾金生,马锋玲等人结合福建街面水电站下游围堰工程,探讨了胶结砂砾石料渗透溶蚀性能,研究表明当采用当地天然砂砾石,掺入水泥和粉煤灰各 40 kg/m^3 ,其 180 d 龄期强度可达到 C7.5,并满足围堰的力学、稳定、防渗和抗溶蚀要求^[10-11]。

胶凝堆石料是一种非常复杂的新材料,其材料特性介于碾压堆石和混凝土之间,受胶凝含量、骨料级配、含砂率等诸多因素影响,采用线弹性或邓肯-张本构关系不能准确的描述该材料的应力应变特性,本文在试验的基础上,通过数据的回归分析和参数反演的方式对胶凝堆石料的本构特性进行初步探讨。

1 胶凝堆石料压缩阶段切线弹模

本文针对 40 kg/m^3 和 60 kg/m^3 两种胶凝含量的胶凝堆石料进行大三轴试验,分别对两种胶凝含量在 3 种围压下进行三轴试验,设计围压为 300, 500 和 800 kPa 。材料的大三轴试验,试件按照 $\Phi 30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 的标准试件进行制作。模型制作完毕后,采用湿布进行包裹以防止水分的蒸发,在养护期间要经常保持包裹布的湿润,经过 30 d 养护后的试件如图 1 所示。



图 1 胶凝材料大三轴试验试件图

Fig. 1 Specimens of CSG materials for large scale triaxial tests

由大三轴试验得到的 $(s_1 - s_3) - e_a$ 曲线特点,不满足邓肯-张本构关系中的双曲线假设,其非线性程度比邓肯-张本构关系的要高,特别是在接近材料破坏阶段,胶凝堆石料的切线斜率变化更为剧烈,图 2 为 60 kg/m^3 胶凝含量的胶凝堆石料在不同围压下的 $(s_1 - s_3) - e_a$ 曲线。

试验结果表明,胶凝材料表现比较明显的非线性特征,随着应力的增加应力应变曲线呈软化形态,其应力应变规律与文献^[9]一致。从大三轴试验数据可以

看出,随着围压的增加,试件的强度增加明显。当材料达到强度后,承载能力逐渐下降,此时材料已经完全破坏,无法满足工程实际的需要。

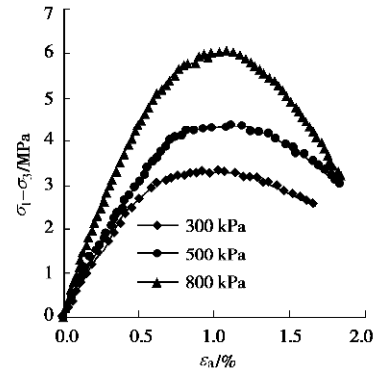


图 2 60 kg/m^3 含量试件大三轴试验数据

Fig. 2 Data of large scale triaxial tests on specimens with CSG content of 60 kg/m^3

通过对本次试验结果以及相关的研究成果进行整理分析,发现胶凝堆石料的应力水平 S 与切线弹模比初始弹模 E_t / E_i 之间的关系曲线比较一致,可以作为一条基本曲线,曲线采用三次多项式可以比较精确的反映两者之间的关系。通过控制基本曲线的初始斜率和曲线的峰值来调节曲线的形状,从而反映不同应力状态下该材料的应力-应变特性。本文选取 60 kg/m^3 含量的试验样本为基础,结合唐新军^[10]等关于“胶凝堆石料的基本特性研究”、贾金生^[11]等关于“胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用”以及孙明权等人做的三轴试验相关数据^[9, 12],对胶凝材料应力应变关系进行曲线拟合。

根据增量虎克定律,胶凝材料的切线斜率 E_t 满足

$$E_t = \frac{\Delta s_1}{\Delta e_1} = \frac{\Delta(s_1 - s_3)}{\Delta e_a} = \frac{\partial(s_1 - s_3)}{\partial e_a} \quad (1)$$

当 $e_a \rightarrow 0$ 时,得到 $(s_1 - s_3) - e_a$ 曲线的初始切线斜率,用 E_i 表示。对不同围压 s_3 得到的曲线的初始斜率,考虑到胶凝堆石料与土石料不同,围压可为零甚至为负,为了保证对数函数在围压为零时在数学上有意义,本文在邓肯-张本构关系的基础上进行适当的调整,做 $\lg(E_t / p_a) - \lg[(s_3 + p_a) / p_a]$ 曲线, p_a 为标准大气压力。如图 3 所示,图中 R^2 表示曲线的拟合相似度。

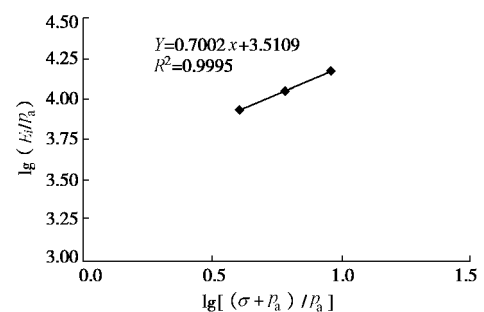


图 3 $\lg(E_t / p_a) - \lg[(s_3 + p_a) / p_a]$ 曲线

Fig. 3 Curve of $\lg(E_t / p_a) - \lg[(s_3 + p_a) / p_a]$

$\lg(E_i/p_a) - \lg[(s_3 + p_a)/p_a]$ 曲线可用直线方程拟合, 满足式 (2)

$$\lg\left(\frac{E_i}{p_a}\right) = n \lg\left(\frac{s_3 + p_a}{p_a}\right) + \lg k \quad (2)$$

则
$$E_i = k \cdot p_a \left(\frac{s_3 + p_a}{p_a}\right)^n \quad (3)$$

$\lg k$ 和 n 为 $\lg(E_i/p_a) - \lg[(s_3 + p_a)/p_a]$ 曲线与坐标轴的截距和直线的斜率。

当试样达到破坏时, 此时的偏应力为 $(s_1 - s_3)_f$, 称为破坏强度。结合孙明权教授对胶凝堆石料的大三轴试验结果, 对其试验数据进行回归分析, 作出不同胶凝含量的胶凝堆石料 $(s_1 - s_3)_f/p_a - (s_3/p_a)$ 曲线

(如图 4), 发现采用指数函数来描述围压和强度的关系是合理的。破坏强度和围压之间的关系满足式 (4)

$$(s_1 - s_3)_f = a \cdot p_a e^{\frac{b \cdot s_3}{p_a}} \quad (4)$$

式中, a, b 由试验结果可以得出。

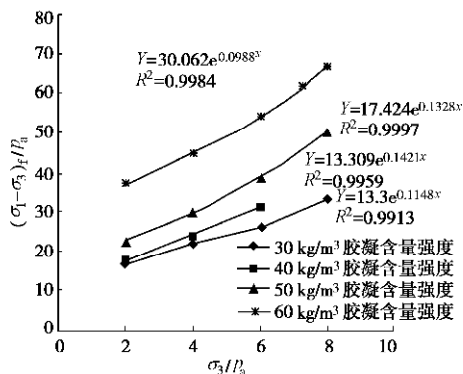


图 4 $(s_1 - s_3)_f/p_a - (s_3/p_a)$ 曲线

Fig. 4 Curves of $(s_1 - s_3)_f/p_a - (s_3/p_a)$

根据试验数据, 得 $e_a/(s_1 - s_3) - e_a$ 曲线 (见图 5)。

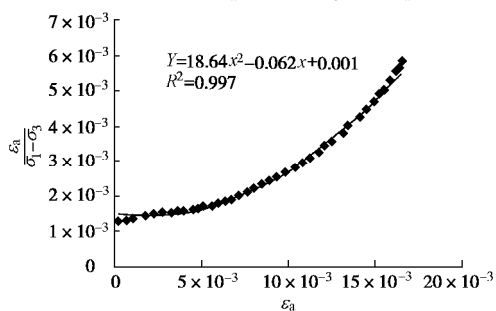


图 5 $e_a/(s_1 - s_3) - e_a$ 曲线

Fig. 5 Curve of $e_a/(s_1 - s_3) - e_a$

从图 5 可以看出, $e_a/(s_1 - s_3) - e_a$ 曲线不能象邓肯-张本构关系那样采用直线来表述, 采用二次曲线更能反映材料的变形特性, 这也更说明了胶凝材料的非线性程度较高, 在目前没有更好方式进行描述时, 采用对试验数据的回归分析得出的曲线更能真实有效的反映该材料的应力应变特性。

引入应力水平 S , 令 $S = \frac{s_1 - s_3}{(s_1 - s_3)_f}$, 得到 $S - E_t/E_i$

曲线, 如图 6 所示。采用 3 次曲线拟合出切线弹模的表达式, 满足下式

$$E_t = (cS^3 + dS^2 + fS + 1) \cdot E_i \quad (5)$$

将 $S = \frac{s_1 - s_3}{(s_1 - s_3)_f}$ 带入式 (5), 得

$$E_t = \left\{ c \left[\frac{s_1 - s_3}{(s_1 - s_3)_f} \right]^3 + d \left[\frac{s_1 - s_3}{(s_1 - s_3)_f} \right]^2 + f \left[\frac{s_1 - s_3}{(s_1 - s_3)_f} \right] + 1 \right\} \cdot E_i \quad (6)$$

将式 (3) 和式 (4) 带入式 (6), 可以得出切线弹模的表达式如下:

$$E_t = \left\{ c \left[\frac{s_1 - s_3}{a \cdot p_a e^{\frac{b \cdot s_3}{p_a}}} \right]^3 + d \left[\frac{s_1 - s_3}{a \cdot p_a e^{\frac{b \cdot s_3}{p_a}}} \right]^2 + f \left[\frac{s_1 - s_3}{a \cdot p_a e^{\frac{b \cdot s_3}{p_a}}} \right] + 1 \right\} \cdot k \cdot p_a \left(\frac{s_3 + p_a}{p_a} \right)^n \quad (7)$$

式中, c, d, f 为拟合参数, 式中 E_t 为该材料的切线弹性模量, s_1 和 s_3 为单元的最大和最小主应力, p_a 为标准大气压。

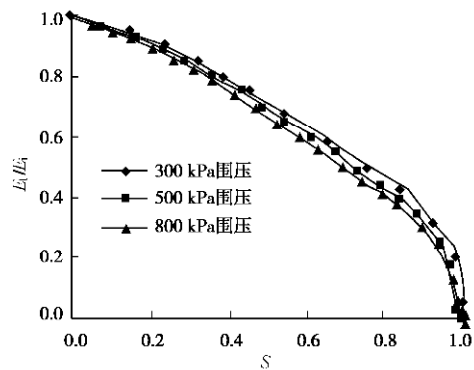


图 6 $S - E_t/E_i$ 曲线

Fig. 6 Curves of $S - E_t/E_i$

2 胶凝堆石料拉伸阶段切线弹模

胶凝堆石料由于具备一定的黏聚力, 其特性类似混凝土, 不像堆石那样不存在抗拉强度。本文结合对胶凝堆石料的抗折强度试验和强度试验, 得出胶凝堆石料的拉压强度比。

通过对比强度试验和抗折强度试验, 发现胶凝堆

石料的拉压强度比接近 1:8, 比较接近混凝土材料的拉压强度比。

根据上述材料试验结果, 在考虑胶凝材料拉伸状态下的弹性模量时, 将抗拉强度取强度的 1/8, 作为控制参数。在拉伸状态下, 以第一主应力 s_1 作为控制围压, 有

$$(s_1 - s_3)_b = -\frac{1}{8}a \cdot p_a e^{\frac{b-s_1}{p_a}}, \quad (8)$$

式中, $(s_1 - s_3)_b$ 为胶凝材料的抗拉强度, 假设其他参数与前文压缩状态得到的参数一致。

由于弹性模量的表达式函数是连续的, 故胶凝材料在拉伸和压缩状态下的初始弹模应相等, 假设在材料拉伸状态下围压对初始切线弹模的影响规律与压缩状态一致, 则拉伸状态下初始弹性模量可以表示为

$$E_{bi} = k \cdot p_a \left(\frac{-s_1 + p_a}{p_a} \right)^n, \quad (9)$$

式中, E_{bi} 为拉伸段胶凝初始切线弹性模量。

通过抗拉强度和拉伸状态初始切线弹模来描述拉伸状态下的切线弹模, 其表达式可表示为

$$E_{bt} = \left\{ c \left[\frac{8(s_1 - s_3)}{a \cdot p_a e^{\frac{b-s_3}{p_a}}} \right]^3 + d \left[\frac{8(s_1 - s_3)}{a \cdot p_a e^{\frac{b-s_3}{p_a}}} \right]^2 + f \left[\frac{8(s_1 - s_3)}{a \cdot p_a e^{\frac{b-s_3}{p_a}}} \right] + 1 \right\} \cdot k \cdot p_a \left(\frac{-s_1 + p_a}{p_a} \right)^3, \quad (10)$$

式中, E_{bt} 为在拉伸状态下的胶凝材料的切线弹性模量。

3 胶凝堆石料在复杂应力状态下的切线弹模

胶凝堆石料的压缩状态是以 $s_3 \geq 0$ 为判断依据的, 当满足上述条件时, 材料处于三向受压, 此时的切线弹模按照压缩状态切线弹模的表达式进行计算; 当 $s_1 \leq 0$ 时, 此时材料为三向受拉, 其切线弹模的表达式按照拉伸状态切线弹模的表达式进行计算; 当 $s_3 \leq 0$ 且 $s_1 \geq 0$ 时, 此时材料的 3 个主应力有正有负, 为复杂应力状态, 在此对该状态做如下讨论。

当 $-s_3 \leq s_1$ 时, 此时令 $s_3 = 0$, 将该情况下的复杂应力状态转化为无围压状态下的受压情况。

破坏强度的表达式如下:

$$(s_1 - s_3)_f = a \cdot p_a. \quad (11)$$

初始切线弹模的表达式如下:

$$E_i = k \cdot p_a. \quad (12)$$

此时材料的切线弹模可以表示如下:

$$E_i = \left\{ c \left(\frac{s_1}{a \cdot p_a} \right)^3 + d \left(\frac{s_1}{a \cdot p_a} \right)^2 + f \left(\frac{s_1}{a \cdot p_a} \right) + 1 \right\} \cdot k \cdot p_a. \quad (13)$$

当 $-s_3 \geq s_1$ 时, 此时令 $s_1 = 0$, 将该复杂应力状态转化为无围压作用下的拉伸状态, 则有

破坏强度的表达式如下:

$$(s_1 - s_3)_b = -\frac{1}{8}a \cdot p_a. \quad (14)$$

初始切线弹模的表达式:

$$E_{bi} = k \cdot p_a. \quad (15)$$

此时材料的切线弹模可以表示如下:

$$E_{bt} = \left\{ c \left[\frac{8(-s_3)}{a \cdot p_a} \right]^3 + d \left[\frac{8(-s_3)}{a \cdot p_a} \right]^2 + f \left[\frac{8(-s_3)}{a \cdot p_a} \right] + 1 \right\} \cdot k \cdot p_a. \quad (16)$$

4 胶凝堆石料本构关系合理性验证

采用大型商用软件 ANSYS 的二次开发功能, 将得到的胶凝堆石料本构关系模型开发到 ANSYS 程序中, 利用 ANSYS 对胶凝堆石料三点抗折试验进行计算分析, 并将得到的数值计算结果与试验采集的试验数据进行比对, 如图 7 所示。

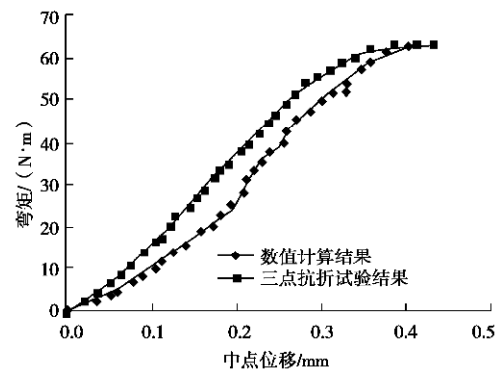


图7 数值计算结果与试验结果对比

Fig. 7 Comparison between FEM and test results

采用本文的本构关系模型, 对孙明权等提出的胶凝堆石料三轴试验过程进行数值模拟, 并将得到的计算结果与试验采集的数据进行对比, 结果如图 8 所示。

试验中胶凝堆石料在达到强度峰值后会出现软化现象, 此时胶凝堆石料的骨料之间已经发生了较明显滑移, 已经从固结体变成部分散粒体, 体现出了普通堆石的性质。对比试验数据和计算结果, 两者非常接近, 说明本文得到的本构模型可以很好的模拟胶凝堆石料的变形特征, 也进一步验证了本文得出的本构关系模型的合理有效性。

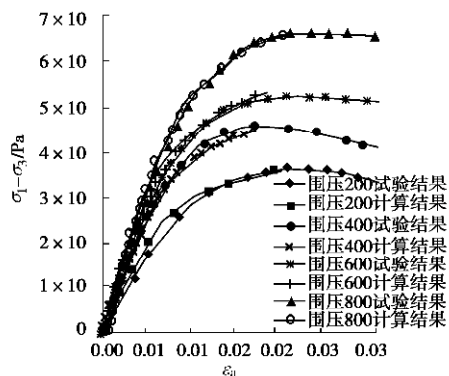


图8 数值模拟结果与三轴试验结果比较

Fig. 8 Comparison between numerical simulations and triaxial tests

5 结 论

(1) 试验结果表明,采用指数函数来描述胶凝堆石料的强度与围压之间的关系是合理有效的;胶凝堆石料的初始切线弹模的对数与围压的对数之间满足线性关系;对大量试验数据进行处理分析,可以得到一条 $S - E_t/E_i$ 曲线;采用该曲线描述其变形特征,结合初始切线弹模和破坏强度表达式得到胶凝堆石料压缩状态下的本构关系模型,并通过对大三轴试验的过程进行数值模拟,验证该本构关系模型的合理有效性。

(2) 在胶凝堆石料压缩状态本构关系模型的基础上,结合胶凝堆石料拉压强度比关系,得出胶凝堆石料拉伸状态的本构关系模型,采用此本构关系模型对抗折试验进行数值模拟,计算结果与试验结果非常接近,验证拉伸状态下的本构关系模型的合理有效性。

(3) 胶凝堆石料本构关系模型的获取,可为胶凝堆石坝工作性态的研究提供参考依据。

参考文献:

- [1] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam, rapid construction of concrete dams[M]. New York: ASCE, 1970.
- [2] LONDE P, LINO M. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC[J]. International Water Power&Dam Construction, 1992, **44**(2): 19 - 24.
- [3] LONDE P. The optimum gravity dam[C]// Proceedings Roller Compacted Concrete III, ASCE, San Diego, California, 1992: 5 - 19.
- [4] 陆述远,唐新军. 一种新坝型——面板胶凝堆石坝简介[J]. 长江科学院院报, 1998, **15**(2): 54 - 56. (LU Shu-yuan, TANG Xin-jun. Brief introduction to a new type of dam called face-plate-cementing rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, **15**(2): 54

- 56. (in Chinese))

- [5] 何蕴龙, 彭云枫, 熊 堃. Hardfill 坝结构特性分析[J]. 水力发电学报, 2008, **27**(6): 68 - 72. (HE Yun-long, PENG Yun-feng, XIONG Kun. Structural characteristic analysis on hardfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, **27**(6): 68 - 72. (in Chinese))
- [6] 何蕴龙, 彭云枫, 熊 堃. Hardfill 坝筑坝材料工程特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, **5**(4): 1 - 6. (HE Yun-long, PENG Yun-feng, XIONG Kun. Analysis on material property of hardfill dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, **5**(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [7] 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 Shou-long. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(2): 97 - 103. (in Chinese))
- [8] BATMAZ S. Clidere dam-107 m high roller compacted dam(RCHD) in Thrkey[C]// Proceedings 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Madrid, 2003: 121 - 126.
- [9] 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 Ming-quan, PENG Cheng-shan, LI Yong-le, et al. Triaxial test of over lean cemented mater[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, **27**(4): 46 - 49. (in Chinese))
- [10] 唐新军, 陆述远. 胶结堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, **30**(6): 15 - 18. (TANG Xin-jun, LU Shu-yuan. Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material[J]. Journal of Wuhan University of Hydr & Elic Engineering, 1997, **30**(6): 15 - 18. (in Chinese))
- [11] 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 Jin-sheng, MA Feng-ling, LI Xin-yu, 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))
- [12] 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 Ming-quan, YANG Shi-feng, ZHANG Jing-jian. Study on constitutive model for over lean cemented material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, **27**(3): 35 - 37. (in Chinese))