

DOI: 10.11779/CJGE201609003

# 胶凝砂砾石料弹塑性本构模型研究

蔡 新<sup>1, 2, 3</sup>, 杨 杰<sup>1</sup>, 郭兴文<sup>2</sup>, 武颖利<sup>3, 4</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 为了建立合理的胶凝砂砾石料弹塑性本构模型, 对胶凝掺量  $60 \text{ kg/m}^3$  的胶凝砂砾石料进行了三轴剪切排水与加卸载试验研究, 结果可描述不同围压下的胶凝砂砾石料的应力-应变特性。基于试验数据及一些专家的研究, 确定模型的弹性部分, 提出了胶凝砂砾石料的剪切屈服与体积屈服方程, 引入广义塑性理论, 建立了适用于胶凝砂砾石料的弹塑性本构模型。模型共有 9 个参数, 参数较少且确定简单。利用三轴剪切排水试验数据验证该模型计算结果, 表明其能够较准确地反映胶凝砂砾石料应力应变关系。

**关键词:** 加卸载试验; 屈服面; 弹塑性本构; 胶凝砂砾石料

中图分类号: TU411; TV321; TV649 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1569-09

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

## Elastoplastic constitutive model for cement-sand-gravel material

CAI Xin<sup>1, 2, 3</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, GUO Xing-wen<sup>2</sup>, WU Ying-li<sup>3, 4</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In order to establish an elastoplastic constitutive model for cement-sand-gravel (CSG) material, firstly some samples with cement content of  $60 \text{ kg/m}^3$  are prepared for the consolidated drained triaxial tests under constant confining pressure, isotropic loading-unloading-reloading tests and loading-unloading-reloading triaxial tests (under consolidated drained condition). The test results depict the stress-strain curves under various confining pressures. Based on the test results and some related researches on CSG material by some experts, the elastic part of the model is put forward, the shear and volume yield surface model is proposed, and by introducing the generalized plasticity theory, an appropriate elastoplastic constitutive model for CSG material is established. The calculated results by the model including 9 parameters are compared with the experimental data of the consolidated drained triaxial tests. It is shown that the proposed model accurately depicts the relationship between stress and strain for CSG material.

**Key words:** loading-unloading-reloading triaxial test; yield surface; elastoplastic constitutive model; cement-sand-gravel material

## 0 引言

胶凝砂砾石坝是兼有传统面板堆石坝与碾压混凝土坝优点的一种新坝型, 具有水泥用料省、温控简单、施工速度快、适应软弱地基及抗震性能好等特点<sup>[1]</sup>。而坝料的本构模型作为大坝结构分析的基础, 关系到能否准确预测大坝的实际工作性态, 因而一直是工程设计人员所面临的关键问题。许多学者已进行了一些胶凝砂砾石料本构模型的探索。目前对于胶凝砂砾石料本构模型的研究方法包括混凝土法和土工法两种。

混凝土法将胶凝砂砾石料视为一种强度较低的贫胶混凝土, 采用线弹性材料假定: 日本学者 Fujisawa 等<sup>[2]</sup>假定胶凝砂砾石料为线弹性材料、以弹性极限强度作

基金项目: 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目 (YK913001); 国家自然科学基金项目 (51179061); 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAD10B02); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (青年) 基金项目 (Y313003); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2014B36814)

收稿日期: 2015-06-10

为设计强度的设计理念；国内学者李永新等<sup>[3]</sup>针对胶凝砂砾石坝填筑分层的结构特征，提出了宏观各向同性的等效线弹性模型；何蕴龙等<sup>[4]</sup>在总结前人得出的应力应变试验曲线基础上，借用 Ottosen 模型的函数表达式，表示胶凝砂砾石料的应力应变关系。而土工法则视胶凝砂砾石料为一种改良性的堆石体，着重模拟材料应力-变形的非线性特征；蔡新等<sup>[5]</sup>在进行胶凝砂砾石料的基本材料试验和三轴试验基础上，提出了一个可反映胶凝砂砾石应力-应变特性，模型参数计算简便的本构模型；吴梦喜等<sup>[6]</sup>在不同龄期的胶凝砂砾石料大型三轴试验基础上，提出了基于应变一致假定的二元并联概念模型；2013 年何蕴龙等<sup>[7]</sup>利用广义双曲线的应力应变关系对胶凝砂砾石料非线性本构模型进行研究；蔡新等<sup>[8]</sup>考虑剪胀与软化特性，利用改进 K-G 模型模拟胶凝砂砾石料非线性关系。上述本构模型各有优缺点，但均未能反映胶凝砂砾石料及类似材料在一些试验研究中表现出的塑性变形特性。本文通过进行不同围压下胶凝掺量 60 kg/m<sup>3</sup> 的胶凝砂砾石料大三轴系列试验（含加卸载试验）研究，确定弹塑性模型的弹性部分，并结合已有岩土材料经典弹塑性本构的屈服面确定方法，提出胶凝砂砾石料的剪切与体积屈服方程，引入广义塑性理论，建立适用于胶凝砂砾石料的 9 参数弹塑性本构模型，并通过三轴剪切试验的数值模拟检验其有效性和可靠性。

## 1 试验概述

将胶凝砂砾石坝料（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。胶凝砂砾石料一般胶凝掺量为 60~100 kg/m<sup>3</sup>，文中胶凝掺量取为 60 g/m<sup>3</sup>，水灰比最佳取值范围为 0.8~1.2，文中取 1.0。由于胶凝砂砾石坝工程一般剔除较大颗粒且无筛分的天然砂砾石料进行筑坝，对材料的级配要求较低时，文中参考孙明权等<sup>[9]</sup>、武颖利<sup>[10]</sup>进行试验的骨料级配略为修正，砂为细度模数 2.7 的中砂，占 20%；砂砾料占 80%（其中粒径 5 mm 以下占 3%，5~10 mm 占 20%，10~20 mm 占 35%，20~40 mm 占 42%）。胶凝砂砾石料的总干密度为 2250 kg/m<sup>3</sup>（粗细骨料总掺量为 2130 kg/m<sup>3</sup>，胶凝掺量 60 kg/m<sup>3</sup>，拌合用水掺量 60 kg/m<sup>3</sup>），试件养护龄期为 28 d。上述均满足导则<sup>[11]</sup>要求。

在南京水利科学研究院岩土实验室大型三轴仪上进行胶凝掺量为 60 kg/m<sup>3</sup> 的典型胶凝砂砾石料的 3 组（每组含 4 种围压：300, 600, 900, 1200 kPa）大三轴系列试验研究，包括：常规三轴剪切排水试验，三轴加卸载试验（应力不等幅），等向加卸载试验。

## 2 试验结果分析

### 2.1 常规三轴剪切排水试验

图 1 为胶凝掺量 60 kg/m<sup>3</sup> 的胶凝砂砾石料主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  - 轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线，可看出：①在高围压（900, 1200 kPa）下峰值强度之前的应力应变曲线斜率比低围压下曲线斜率大。②在较低围压下，曲线有明显的峰值，且随轴向应变增加，主应力差值减小较明显；而高围压下，随轴向应变继续增加，主应力差减小但幅度较小。图 2 为胶凝掺量 60 kg/m<sup>3</sup> 的胶凝砂砾石料体积应变  $\varepsilon_v$  - 轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线，可看出：①与高围压相比，低围压条件下的试件剪胀峰值较早出现。②轴向应变相同时，围压越高试件的体积应变越大。图 1, 2 试验曲线特征与孙明权等<sup>[9]</sup>、傅华等<sup>[12]</sup>进行的试验结果相似，也体现了试验的准确性与合理性。

### 2.2 加卸载试验

#### （1）等向加卸载试验

图 3 为胶凝砂砾石料等向循环加卸载曲线，横轴为固结应力  $p_0$ ，纵轴为体积应变  $\varepsilon_v$  可以看出：①当荷载等向加载至某一平均应力（固结应力）后再卸荷，胶凝砂砾石料部分应变恢复，说明固结过程中胶凝砂砾石料产生不可恢复的塑性体积应变。②卸载再加载过程中，体积应变与固结应力关系曲线产生滞回圈，加卸载产生的滞回圈面积变大且滞回圈形状拉长，表明弹性体积模量与固结应力有关，且随固结应力增大而增大。

#### （2）三轴加卸载试验（应力不等幅）

图 4 为围压 300, 600, 900, 1200 kPa 的胶凝砂砾石料轴向加卸载试验下的剪应力  $q$  - 剪应变  $\gamma$  - 体积应变  $\varepsilon_v$  曲线。由图 4 可以看出：①当剪应力加载至某一应力值并卸荷至 0 时，剪应变仅部分恢复，说明胶凝砂砾石料加载过程中存在塑性剪切变形。②试件卸载再加载试验曲线形成滞回圈，峰值剪切强度点之前的滞回圈形状相似且不断增大，说明胶凝砂砾石料在剪切加载过程的塑性阶段，弹性剪应变也不断增大。

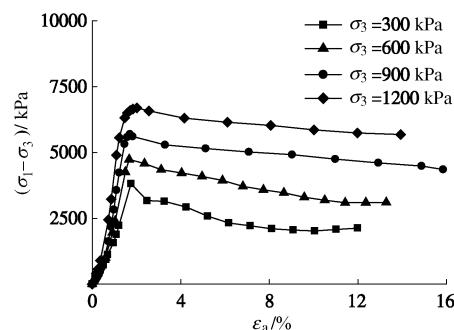


图 1 主应力差 - 轴向应变曲线

Fig. 1 Stress-axial strain curves

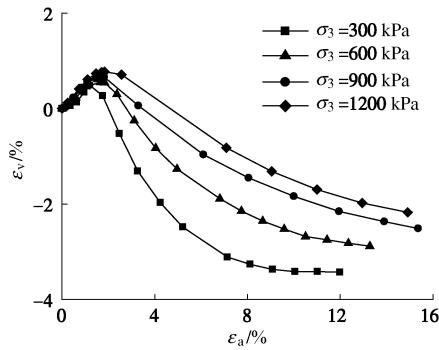


图2 体积应变-轴向应变关系

Fig. 2 Volumetric strain-axial strain curves

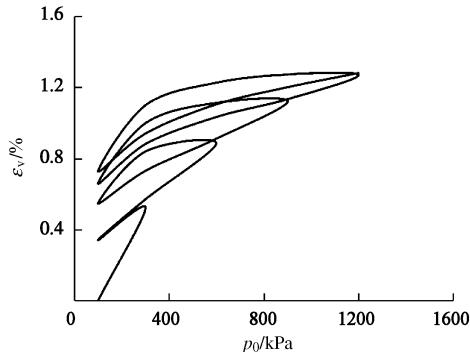


图3 胶凝砂砾石料等向加卸载曲线

Fig. 3 Isotropic loading-unloading curves

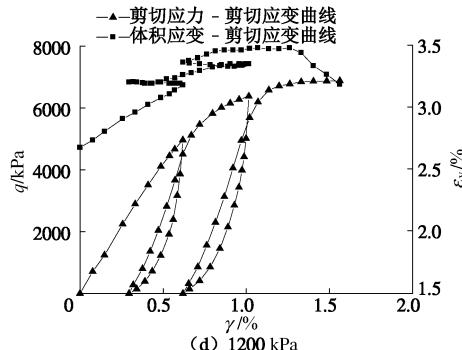
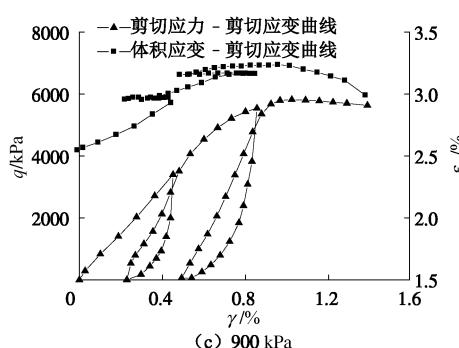
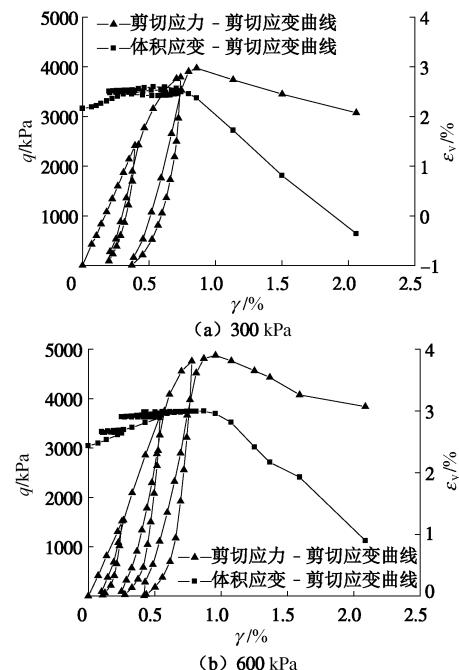


图4 轴向加卸载试验下的应力应变曲线

Fig. 4 Axial loading-unloading curves

### 3 胶凝砂砾石料弹塑性本构模型

#### 3.1 弹塑性本构模型的概述

根据不同的屈服准则、硬化定律及流动法则,建立了大量弹塑性本构模型,目前应用较多的有剑桥模型<sup>[13]</sup>、南水模型<sup>[14]</sup>、殷宗泽模型<sup>[15]</sup>、后勤工程学院模型<sup>[16]</sup>。剑桥模型<sup>[13]</sup>的建立仅需常规三轴试验与等向加卸载试验,而胶凝砂砾石料已完成常规三轴试验与等向加卸载试验,以剑桥模型为胶凝砂砾石料弹塑性本构模型存在可行性,但需进一步验证。沈珠江提出的南水模型<sup>[14]</sup>,考虑到塑性体积应变与塑性剪应变的双屈服面模型较剑桥模型更全面,参数获得方式较为简单,也可利用胶凝砂砾石料试验数据进行进一步分析。殷宗泽等<sup>[15]</sup>提出的双曲面模型能反映材料的剪胀剪缩特性,可用胶凝砂砾石料试验数据进行进一步验证。郑颖人等提出的后勤工程学院模型<sup>[16]</sup>是基于广义塑性理论,采用分量塑性势面与分量屈服面,既可用于压缩型土体,也可用于压缩剪胀型土体,屈服条件根据室内土工试验结果拟合得到,但参数缺乏物理意义。

#### 3.2 广义塑性理论

广义塑性理论<sup>[16]</sup>的主要内容包括:

应变增量为

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad . \quad (1)$$

流动法则为

$$d\epsilon_{ij}^p = \sum_{k=1}^3 d\lambda_k \frac{\partial Q_k}{\partial \sigma_{ij}} \quad . \quad (2)$$

式中,  $Q_k$  为塑性势函数,  $d\lambda_k$  为相应势面的塑性因子。

$p$ ,  $q$ ,  $\theta$  空间的屈服函数为

$$f_v(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = f_v(p, q, \theta_\sigma, h_v) = 0 \quad , \quad (3)$$

$$f_q(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = f_q(p, q, \theta_\sigma, h_q) = 0 \quad , \quad (4)$$

$$f_\theta(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = f_\theta(p, q, \theta_\sigma, h_\theta) = 0 \quad . \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)与式(2)结合可得

$$d\lambda_v = \frac{1}{A_v} \frac{\partial f_v}{\partial p} dp + \frac{1}{A_v} \frac{\partial f_v}{\partial q} dq + \frac{1}{A_v} \frac{\partial f_v}{\partial \theta_\sigma} d\theta_\sigma \quad , \quad (6)$$

$$d\lambda_q = \frac{1}{A_q} \frac{\partial f_q}{\partial p} dp + \frac{1}{A_q} \frac{\partial f_q}{\partial p} dq + \frac{1}{A_q} \frac{\partial f_q}{\partial \theta_\sigma} d\theta_\sigma, \quad (7)$$

$$d\lambda_\theta = \frac{1}{A_\theta} \frac{\partial f_\theta}{\partial p} dp + \frac{1}{A_\theta} \frac{\partial f_\theta}{\partial p} dq + \frac{1}{A_\theta} \frac{\partial f_\theta}{\partial \theta_\sigma} d\theta_\sigma, \quad (8)$$

其中,  $A_v$ ,  $A_q$ ,  $A_\theta$  为塑性系数, 用下式表示:

$$\begin{cases} A_v = -\frac{\partial f_v}{\partial h_v} \left\{ \frac{\partial h_v}{\partial \varepsilon^p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial g_v}{\partial \sigma} \right\} \\ A_q = -\frac{\partial f_q}{\partial h_q} \left\{ \frac{\partial h_q}{\partial \varepsilon^p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial g_q}{\partial \sigma} \right\} \\ A_\theta = -\frac{\partial f_\theta}{\partial h_\theta} \left\{ \frac{\partial h_\theta}{\partial \varepsilon^\theta} \right\}^T \left\{ \frac{\partial g_\theta}{\partial \sigma} \right\} \end{cases}, \quad (9)$$

假定  $\varepsilon_v^e = \frac{p_0}{K}$  的影响较小, 可用下式表示:

$$d\lambda_v = \frac{1}{A_v} \frac{\partial f_v}{\partial p} dp + \frac{1}{A_v} \frac{\partial f_v}{\partial p} dq, \quad (10)$$

$$d\lambda_q = \frac{1}{A_q} \frac{\partial f_q}{\partial p} dp + \frac{1}{A_q} \frac{\partial f_q}{\partial p} dq. \quad (11)$$

### 3.3 模型假定

(1) 塑性体应变与塑性剪应变在应力空间上等值面分别为体积屈服面与剪切屈服面, 对应塑性势面为  $p$  面与  $q$  面。

(2) 不考虑剪胀特性及软化的影响。

### 3.4 弹性参数

弹性矩阵可通过弹性体积模量  $K$  与剪切模量  $G$  两个参数确定。

(1) 弹性体积模量  $K$

根据等向加卸载试验结果, 绘出如图 5 的弹性体积应变与围压关系曲线, 可看出

$$k = \frac{d\varepsilon_v^e}{d(\ln(1+p_0/p_a))}, \quad (12)$$

$$K = \frac{dp}{d\varepsilon_v^e} = \frac{p_0 + p_a}{k}, \quad (13)$$

式中,  $k$  为虚线斜率,  $p_0$  为固结应力,  $p_a$  为大气压强。

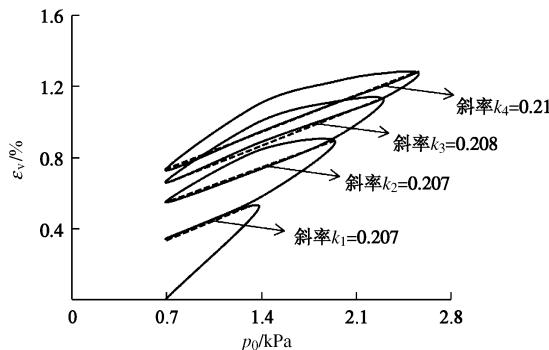


图 5 体积应变与围压关系曲线

Fig. 5 Volumetric strain-confining pressure curves

### (2) 弹性剪切模量 $G$

图 6 为围压 300, 600, 900 及 1200 kPa 下的胶凝砂砾石剪应力  $q$  - 剪应变  $\gamma$  的加卸载曲线。从中可看出斜率值在同一围压下基本不变, 但随着围压的增大而增大, 而斜率  $T$  为 3 倍的弹性剪切模量  $G$ 。因此, 弹性剪切模量  $G$  与围压的变化有关, 见图 7, 其关系可由下式表示:

$$G = G_i \left( \frac{\sigma_3 + p_a}{p_a} \right)^n. \quad (14)$$

式中  $G_i$  为无围压时, 胶凝砂砾石料的弹性剪切模量;  $n$  为模量指数, 反映剪切模量随围压增加而增加的急剧程度。

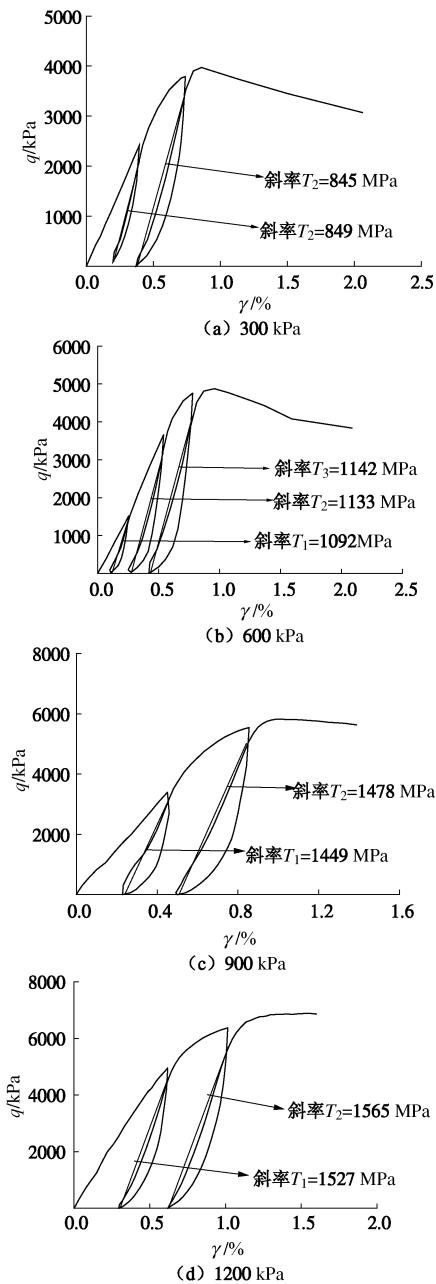


图 6 轴向加卸载曲线

Fig. 6 Axial loading-unloading curves

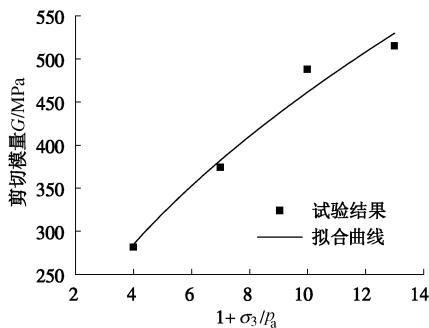


图 7 弹性剪切模量 - 围压曲线

Fig. 7 Elastic shearing module-confining pressure curves

### 3.5 胶凝砂砾石料屈服面

本文所提出的模型采用两个屈服面, 其一与塑性剪应变有关, 即剪切屈服面, 另一屈服面与塑性体积应变相关, 即体积屈服面。

#### (1) 剪切屈服面

已有文献中提出了一些描述胶凝砂砾石料总应力 - 应变表达式, 主要包括: 双曲线型<sup>[17]</sup>, 广义双曲线型<sup>[8]</sup>, 混凝土 Ottosen 模型<sup>[4]</sup>的函数曲线型等, 可分别用下式表示:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad , \quad (15)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a(a + c\varepsilon_a)}{(a + b\varepsilon_a)^2} \quad , \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_m} = \frac{A \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_m} + (D-1) \left( \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_m} \right)^2}{1 + (A-2) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_m} + D \left( \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_m} \right)^2} \quad . \quad (17)$$

式(15)仅适用于胶凝掺量较低的胶凝砂砾石料应力应变关系的描述, 式(16)虽然能描述胶凝砂砾石料的软化特性, 但与试验结果相比误差较大, 混凝土 Ottosen 函数曲线式(17)可应用于胶凝砂砾石料, 但误差也大。由于上述应力应变关系式均无法准确描述胶凝砂砾石坝的应力变形特征, 因此, 需研究一个更能准确反映胶凝砂砾石料应力变形特征的关系式。

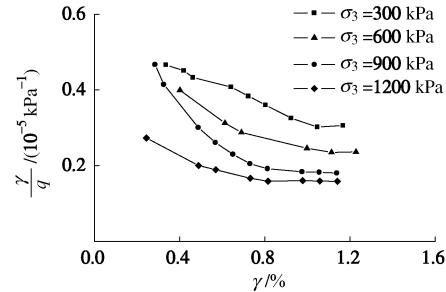
而在胶凝砂砾石料大型三轴剪切试验中, 广义剪应力为  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ , 广义剪应变  $\gamma = \varepsilon_a - \frac{\varepsilon_v}{3}$ , 将大型三

轴剪切试验数据点绘  $\frac{\gamma}{q}$  -  $\gamma$  关系曲线, 如图 8 所示。

从中可看出,  $\frac{\gamma}{q}$  -  $\gamma$  曲线可用下式表示:

$$\frac{\gamma}{q} = c\gamma^2 + b\gamma + a \quad , \quad (18)$$

式中,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  为拟合参数。

图 8  $\frac{\gamma}{q}$  -  $\gamma$  曲线Fig. 8  $\frac{\gamma}{q}$  -  $\gamma$  curves

则模拟胶凝砂砾石料的剪应力 - 剪应变关系可用下式表示:

$$q = \frac{\gamma}{c\gamma^2 + b\gamma + a} \quad . \quad (19)$$

式(19)与 Saenz 公式类似,  $c=0$  时, 式(19)可退化为双曲线关系式(15), 因此式(19)也可适用于堆石料等岩土硬化材料。

对式(19)求导, 当  $\gamma \rightarrow 0$ ,  $G_t = G_0$ , 则

$$3G_0 = \frac{1}{a} \quad , \quad (20)$$

当  $\gamma$  不为 0 时, 根据  $\frac{dq}{d\gamma} = 0$ , 解得

$$c = \frac{a}{\gamma_m^2} \quad , \quad (21)$$

当  $\gamma = \gamma_m$  时, 得

$$b = \frac{1}{q_m} - \frac{2}{3\gamma_m G_0} \quad , \quad (22)$$

式中,  $q_m$  为破坏剪应力,  $\gamma_m$  为破坏应变,  $G_0$  为初始剪切模量。

由式(19)可得剪应变:

$$\gamma = \frac{3}{2} G_0 \gamma_m^2 \left[ \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right) + \frac{2}{3G_0 \gamma_m} \right] - \sqrt{\left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right)^2 + \frac{4 \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right)}{3G_0 \gamma_m}} \quad , \quad (23)$$

而弹性剪应变如下式所示:

$$\gamma^e = \frac{q}{3G} \quad . \quad (24)$$

取塑性剪应变  $\gamma^p$  为硬化参数, 则剪切屈服面方程为

$$f_1(p, q) = \gamma - \gamma^e = \frac{3}{2} G_0 \gamma_m^2 \left[ \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right) + \frac{2}{3G_0 \gamma_m} \right] - \sqrt{\left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right)^2 + \frac{4 \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right)}{3G_0 \gamma_m}} - \frac{q}{3G} = \gamma^p \quad . \quad (25)$$

## (2) 体积屈服面

由图 4 可知胶凝砂砾石料的体积应变与剪切应变满足二次近似函数, 则可令

$$\varepsilon_v - \varepsilon_{v1} = d(\gamma - \gamma_d)^2 + \varepsilon_{v0} \quad , \quad (26)$$

式中,  $d$  为试验参数,  $\gamma_d$  为体应变 - 剪应变曲线峰值处的剪应变,  $\varepsilon_{v1}$  为等向加载体变, 与固结应力有关,  $\varepsilon_{v0}$  为剪切阶段产生的峰值体变, 与围压有关。

当  $\gamma=0$ ,  $\varepsilon_v = \varepsilon_{v1}$ 。则

$$d = -\frac{\varepsilon_{v0}}{\gamma_d^2} \quad . \quad (27)$$

因塑性体应变为

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v - \varepsilon_v^e \quad , \quad (28)$$

其中弹性体应变可用下式表示:

$$\varepsilon_v^e = \frac{P_0}{K} \quad . \quad (29)$$

从图 4 可知, 胶凝砂砾石料的弹性体积应变增加很少, 可假定剪切过程的体积应变变为塑性体积应变, 则弹性体积应变均在固结阶段产生。将式 (25) 代入可得体积屈服面为

$$f_2(p, q) = -\frac{\varepsilon_{v0}}{\gamma_d^2} \left\{ \frac{3}{2} G_0 \gamma_m^2 \left[ \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right) + \frac{2}{3G_0 \gamma_m} \right] - \sqrt{\left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right)^2 + \frac{4 \left( \frac{1}{q} - \frac{1}{q_m} \right)}{3G_0 \gamma_m} - \frac{q}{3G_0}} - \gamma_d \right\}^2 + \varepsilon_{v0} + \varepsilon_{v1} - \frac{P_0}{K} \quad . \quad (30)$$

## 3.6 弹塑性矩阵的确定

采用两个势面和两个屈服面求出应变增量  $d\varepsilon_v^p$  和  $d\gamma^p$ , 即有

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v^p \\ d\gamma^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\partial f_2} \frac{\partial f_2}{\partial p} & \frac{1}{\partial f_2} \frac{\partial f_2}{\partial q} \\ \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial \varepsilon_v} & \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial \gamma} \\ \frac{1}{\partial f_1} \frac{\partial f_1}{\partial p} & \frac{1}{\partial f_1} \frac{\partial f_1}{\partial q} \\ \frac{\partial \gamma^p}{\partial \gamma} & \frac{\partial \gamma^p}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} = [A_p] \begin{bmatrix} dp \\ dq \end{bmatrix} \quad . \quad (31)$$

遵循矩阵相乘原则, 通过转换得到主应力空间的塑性柔度矩阵  $[C_p]$ 。

又因  $[C_{ep}] = [C_e] + [C_p]$ , 将  $[C_{ep}]$  求逆, 即可得到弹性刚度矩阵  $[D_{ep}]$ , 从而获得胶凝砂砾石料的应力应变关系。

## 3.7 模型参数的确定

上述胶凝砂砾石料弹塑性本构模型共有 9 个参数, 由三轴剪切试验及加卸载试验获得。

### (1) 参数 $k$ , $G_i$ , $n$ 的确定

这一组是弹性模量  $K$  与  $G$  中包含的参数, 可由式

(13)、(14) 拟合得出。图 9 为初始剪切模量与围压关系, 可由下式:

$$G_0 = \frac{G_i}{7.7} \left( \frac{\sigma_3 + p_a}{p_a} \right)^n \quad , \quad (32)$$

式中,  $G_i$ ,  $n$  意义与式 (14) 相同。

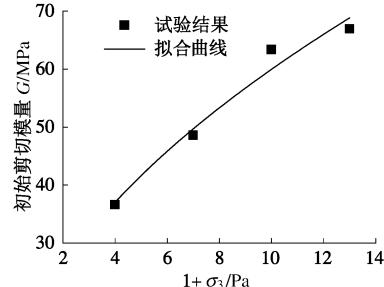


图 9 初始剪切模量与围压的关系

Fig. 9 Initial elastic shearing module-confining pressure curves

### (2) $M$ 和 $h$ 的确定

已有文献[8]指出胶凝砂砾石料破坏准则可由摩尔库仑准则表示。由三轴排水剪切试验所得抗剪强度点绘出破坏剪应力  $q_m$  与平均应力  $p$  关系曲线, 见图 10, 为一条直线, 可由下式表示

$$q_m = Mp + h \quad , \quad (33)$$

式中,  $h$  为纵轴上的截距,  $M$  为直线斜率。

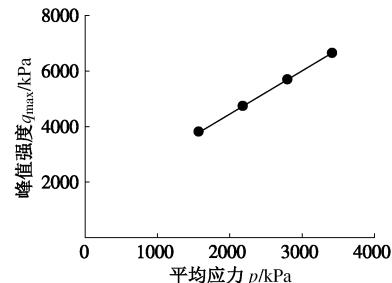


图 10 峰值强度与平均应力曲线

Fig. 10 Peak strength-mean pressure curves

### (3) 参数 $\gamma_m$ , $\gamma_d$ 的确定

参数  $\gamma_m$ ,  $\gamma_d$  分别为破坏剪应变与体变转折点剪应变。点绘出两者与围压的关系曲线, 如图 11 所示, 可看出  $\gamma_m$ ,  $\gamma_d$  随围压  $\sigma_3$  变化的影响小, 可取平均值, 同时忽略剪胀特性, 则  $\gamma_d = \gamma_m$ 。

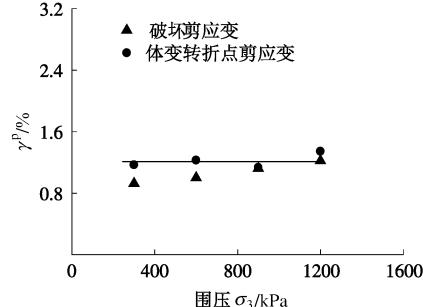


图 11 破坏剪应变与体变转折点应变对比

Fig. 11 Comparison between plastic failure shearing strain and shearing strain at dilatancy points

表 1 模型参数  
Table 1 Parameters of model

参数	$k$	$G_i/\text{MPa}$	$n$	$M$	$h/\text{kPa}$	$\gamma_m, \gamma_d /%$	$\lambda_1 /%$	$\lambda_2 /%$	$m /%$
取值	0.208	134	0.54	1.54	907	1.15	0.68	0.00032	0.38

(4)  $\lambda_1, \lambda_2, m$  的确定

根据等向加载的试验数据, 点绘等向加载的体积应变, 见图 12,  $\lambda_1$  可由下式表示:

$$\varepsilon_{vd} - \varepsilon_{v0} = \lambda_1 \ln(1 + p_0 / p_a) \quad , \quad (34)$$

式中,  $\lambda_1$  为拟合参数, 体积应变  $\varepsilon_{vd}$  与  $\ln(1 + p_0 / p_a)$  直线关系的斜率。

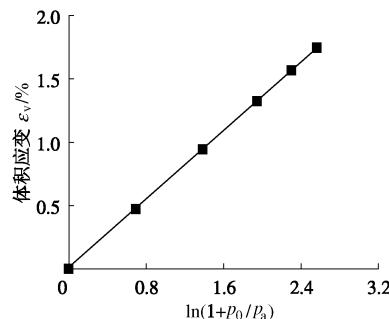


图 12 等向加载的体变与固结应力关系

Fig. 12 Relationship between volumetric strain under isotropic loading and confining pressure

点绘出剪切阶段产生的峰值体变  $\varepsilon_{v0}$  与围压  $\sigma_3$  关系曲线, 见图 13, 可用下式表示:

$$\varepsilon_{v0} = \lambda_2 \sigma_3 + m \quad , \quad (35)$$

式中,  $\lambda_2$  为直线斜率,  $m$  为纵轴截距。

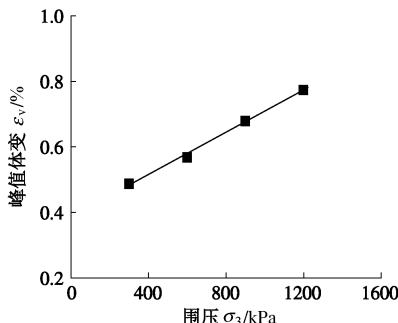


图 13 峰值体变与围压关系

Fig. 13 Peak volumetric strain -confining pressure curves

### 3.8 模型验证

对胶凝砂砾石料三轴剪切排水试验进行了模拟, 表 1 中给出了根据试验结果确定的参数。因本文中的模型不考虑应变软化的影响, 则图 14, 15 分别为不同围压下的峰值点之前的应力应变与体变轴向应变试验数据及预测结果。图 14 中 0.8% 处的应力应变的变陡是胶凝砂砾石料有别于普通堆石料的重要特征<sup>[5, 9, 12]</sup>, 一些堆石本构模型并不适用于胶凝砂砾石料, 而本文的胶凝砂砾石料本构模型可很好地模拟这一特征, 应力应变关系与试验值基本吻合, 体现了该模型模拟胶凝砂砾石料特性的适应性与优越性。此外, 从图 15

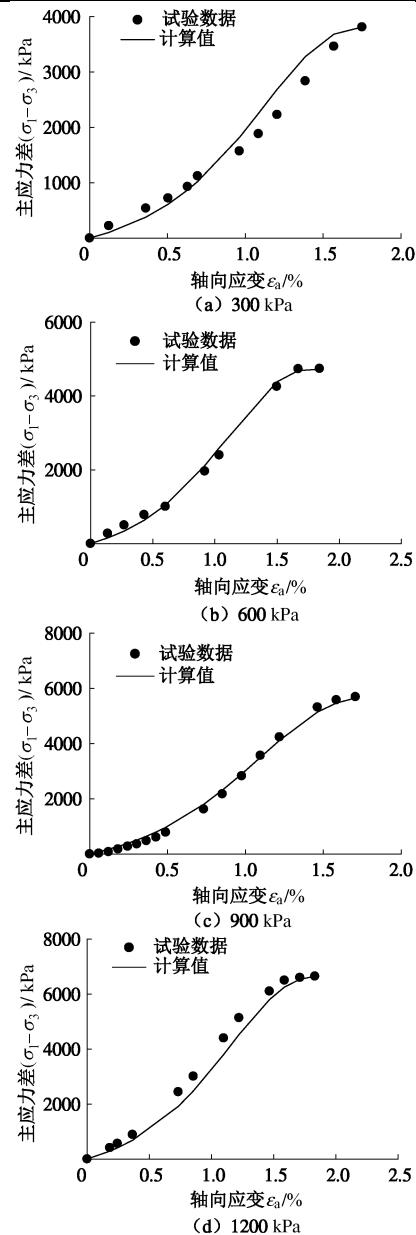
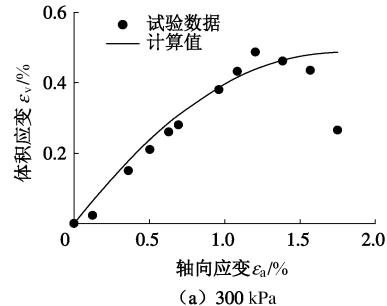


图 14 模型预测的应力 - 应变关系

Fig. 14 Predicted stress-strain curves by model

中可看出, 由于胶凝砂砾石料试验结果体现的剪胀特性较小 (300 kPa 围压条件的剪胀影响稍大, 但位于应力水平 0.8 左右), 可忽略剪胀特性影响。



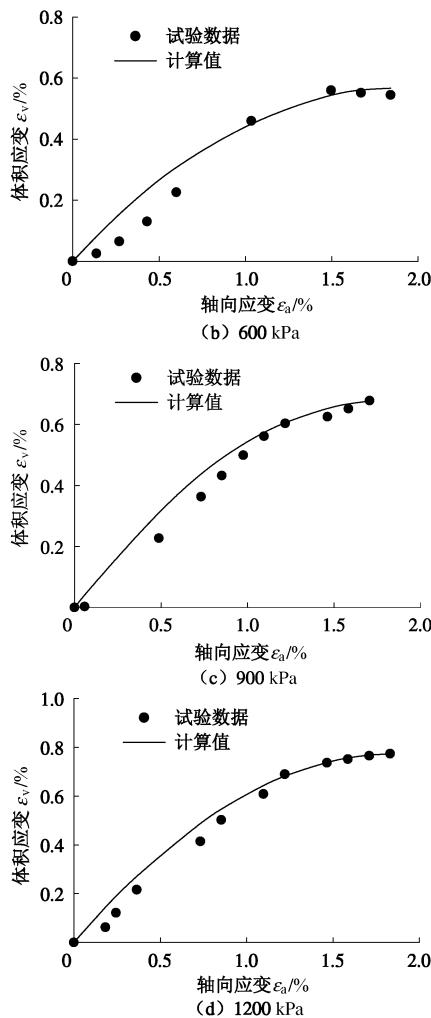


图 15 模型预测的体变 - 轴向应变关系

Fig. 15 Predicted volumetric strain-axial strain curves by model

## 4 结语

通过进行的胶凝砂砾石料常规三轴剪切排水、加卸载等试验研究表明：应力应变曲线初始斜率、剪胀特性及卸载再加载的试验曲线形成滞回圈均受围压的影响。同时针对目前本构模型无法反映塑性变形问题，通过整理试验数据，确定胶凝砂砾石料的弹性体积模量  $K$  与弹性剪切模量  $G$ ；选用一种改进双曲线关系式描述材料的应力应变关系，并在此基础上提出剪切屈服面；同时利用二次函数描述胶凝砂砾石料体变剪应变关系，并提出胶凝砂砾石料的体积屈服面；结合广义塑性理论，建立 9 参数胶凝砂砾石料的弹塑性本构模型；最后用试验数据对新本构模型进行了初步验证，表明该模型能很好地模拟堆石料的一些本构模型无法表现的 0.8% 处应力应变曲线变陡的特征，且整个应力应变关系与试验值基本吻合，同时表明该模型忽略的剪胀特性影响对材料的受力变形影响较小，从而体现了胶凝砂砾石料弹塑性本构模型的适应性与优越性。但胶凝砂砾石料弹塑性本构模型将卸载滞回圈假定为

直线，无法不考虑卸载再加载特性，需进一步进行研究。

## 参考文献：

- [1] LONDE P, LINO M. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC[J]. International Water Power& Dam Construction, 1992(2): 19 - 24.
- [2] FUJISAWA T, NAKAMURA A, KAWASAKI H, et al. Material properties of CSG for the seismic design of trapezoid-shaped CSG dam[C]// Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver B C, 2004.
- [3] 李永新, 何蕴龙, 乐治济. 胶结砂砾石坝应力与稳定有限元分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 35 - 38. (LI Yong-xin, HE Yun-long, LE Zhi-ji. Analysis of the stress and finite element stability for the cemented sand & gravel dam[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(7): 35 - 38. (in Chinese))
- [4] 何蕴龙, 刘俊林, 李建成. Hardfill 筑坝材料应力 - 应变特性与本构模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(6): 40 - 47. (HE Yun-long, LIU Jun-lin, LI Jian-cheng. Study on the stress-strain property and constitutive model of hardfill material[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(6): 40 - 47. (in Chinese))
- [5] 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 Ying-li. Constitutive equation for CSG materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1340 - 1344. (in Chinese))
- [6] WU Meng-xi, DU Bin, YAO Yuan-cheng, et al. An experimental study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2011, 54(11): 2015 - 2024.
- [7] 刘俊林, 何蕴龙, 熊堃, 等. Hardfill 材料非线性弹性本构模型研究[J]. 水力学报, 2013, 44(4): 451 - 461. (LIU Jun-lin, HE Yun-long, 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))
- [8] 蔡新, 杨杰, 郭兴文, 等. 一种胶凝砂砾石坝料非线性 K-G-D 本构新模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 491 - 496. (CAI Xin, YANG Jie, GUO Xing-wen, et al. A new type of nonlinear K-G-D constitutive

- model for CSG material[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, **42**(6): 491 - 496. (in Chinese))
- [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 material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, **27**(4): 46 - 49. (in Chinese))
- [10] 武颖利. 胶凝堆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. (WU Ying-li. Study on the mechanical properties and the working behavior of CSG dams[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))
- [11] SL 678—2014 胶结颗粒料筑坝技术导则[S]. (SL 678—2014 Technical guidelines for cemented material dams[S]. (in Chinese))
- [12] 傅华, 陈生水, 韩华强, 等. 胶凝砂砾石料静、动力三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(2): 357 - 362. (FU Hua, CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, et al. Experimental study on static and dynamic properties of cemented sand and gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(2): 357 - 362. (in Chinese))
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical principles and computations[M]. Beijing: Chinese Water Sources and Hydroelectric Power Press, 1996. (in Chinese))
- [14] 沈广军. 基于沈珠江双屈服面模型理论的土体弹塑性模型[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, **37**(1): 40 - 44. (SHEN Guang-jun. Elasto plasticity constitutive model of soils based on Shen Zhu-jiang's double-yield surface theory[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, **37**(1): 40 - 44. (in Chinese))
- [15] 殷宗泽, 邓肯 J M. 剪胀土与非剪胀土的应力应变关系[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(4): 24 - 37. (YIN Zong-ze, Duncan J M. A stress-strain relationship for dilative and nondilative soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, **6**(4): 24 - 40. (in Chinese))
- [16] 白川. 广义塑性力学模型在 ABAQUS 中的二次开发和工程应用[D]. 银川: 宁夏大学, 2010. (BAI Chuan. The secondary development by ABAQUS and the engineering application of the generalized plastic mechanics[M]. Yinchuan: Ningxia University, 2010. (in Chinese))
- [17] 蔡新, 宋小波, 明宇, 等. 胶凝堆石料大三轴试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, **41**(5): 424 - 427. (CAI Xin, SONG Xiao-bo, MING Yu, et al. Large-scale triaxial tests for CSG materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, **41**(5): 424 - 427. (in Chinese))