短 文

考虑颗粒破碎的堆石体本构模型

米占宽，李国英，陈铁林
（南京水利科学研究院，南京 210029）

摘 要：对于高堆石坝而言，在高应力场作用下堆石颗粒将明显破碎，从而导致坝体变形率增加，因此，在高坝数值计算中必须考虑颗粒破碎的影响。传统的堆石体本构模型由于不能合理反映颗粒破碎的影响，导致计算变形与实测变形差别较大。在基于岩土破损力学二元介质模型概念的基础上，将堆石体视为结构体和破损带组成的二元介质，建立了颗粒破碎率和破损参数之间的关系，提出了可以考虑颗粒破碎的堆石体本构模型。并通过一个大型三轴剪切试验的算例，说明了该模型的合理性。

关键词：堆石体；二元介质；颗粒破碎；本构模型；破损参数
中图分类号：TU 443 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1865－05

作者简介：米占宽(1973－)，男，博士研究生。主要从事岩土工程试验和数值计算方面的研究。E-mail: zkmi@nhri.cn。

Constitutive model for rockfill material considering grain crushing

MI Zhan-kuan，LI Guo-ying，CHEN Tie-lin
(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: For high rockfill dams, the grain crushing in high stress field may raise the deformation rate of dam body and should be considered in numerical calculation. Because the traditional constitutive model for rockfill material can not reasonably reflect the effect of grain crushing, the calculated deformation of dam body is much different from the measured one. Based on the concept of binary medium model proposed by Professor Shen Zhujiang, a constitutive model of rockfill material considering grain crushing which was conceptualized as binary medium model consisting of structural system and breaking bond was presented, and the relationship between grain crushing rate and breaking parameter was established. An example of large scale triaxial test was taken to prove the rationality of the present model.

Key words: rockfill material; binary medium; grain crushing; constitutive model; breaking parameter

0 前 言

堆石体的颗粒破碎对堆石体的强度和变形特性有着重大的影响，对高堆石坝而言，其变形特性与堆石颗粒破碎明显相关。根据一些已建的高堆石坝变形观测成果，大坝的变形较大，主要原因在于堆石颗粒在高压下重新分布以及颗粒破碎引起的孔隙压缩。堆石颗粒破碎对堆石体变形的影响表现在两个方面：一方面，当压力增大时，如果颗粒间接触应力超过堆石颗粒强度，颗粒接触点即发生破碎，产生滑移和重新分布，导致堆石体孔隙缩小；另一方面，堆石体在压力持续作用下，堆石颗粒也会发生破碎，同样导致堆石体孔隙缩小，引起变形。已建堆石坝变形的数值计算结果与观测成果比较表明，计算沉降值往往比实测沉降值小，原因主要在于现有的堆石体本构模型中不能较好地考虑堆石颗粒破碎引起的堆石体体积变形。

颗粒破碎对堆石体物理力学特性的影响已经为国内外学者所重视，并开展了一系列的研究工作。但研究内容大都针对颗粒破碎现象、颗粒破碎的影响因素以及颗粒破碎对堆石体强度和剪胀特性的影响等[1-3]，迟世春等根据 Rowe 最小能比原理，推导得到破碎修正的屈服函数微分方程，与原始 Rowe 剪胀模型相比，该模型具有低剪胀性的优点[4]。但该模型只定性上反映了颗粒破碎的影响，至于在堆石体变形计算本构模型中考虑堆石颗粒破碎的研究还很少见。

目前，用于土石坝数值计算中主要有以 Duncan E-B(Duncan E-v)模型为代表的非线性模型和沈珠江院士提出的“南水”双屈服面模型[5]以及殷宗泽教授建议的“椭圆－抛物线”双屈服面模型[6]为代表的弹塑性模型。与 Duncan 非线性模型相比，双屈服面模型能较好的反映堆石体的压硬性、非线性、剪胀性和应力引起的各向异性四个方面的重要特性，计算结果

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50379028）；水利部“948”计划技术创新与转化项目（CT200520）
收稿日期：2007－01－15

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较为合理，但其计算所得的坝体变形与实测值仍有差异，对于高坝尤为明显。近年来沈珠江院士将岩土材料视为结构体和软弱带组成的二元介质，并提出了岩土介质的二元介质模型，在细观尺度上分别把结构体（胶结块）看成理想弹脆性材料和把结构面（软弱带）看成理想弹塑性材料（或线性强化弹塑性材料）[7-8]，近来又在更一般意义上推导了增量性的应力应变关系，以考虑应力路线转折的复杂加载情况[8]。上述模型已能在宏观上描述在受荷过程中岩土材料的破损过程[9-10]。

对筑坝材料采用的堆石体而言，在筑坝之前，经过爆破和二次粉碎后，通常会沿薄弱面碎裂，填筑坝体后，其破坏过程是由于外在荷载超过堆石体之间点点接触强度、点面接触强度而产生的。堆石体颗粒之间是无胶结力的，可视为摩擦性材料—破损带，而堆石体本身是强胶结的—可视为结构体。在外荷作用下将未破碎部分视为结构体，将破碎部分视为破损带，在颗粒破碎过程中，破损带补偿结构体所失去的承载能力，可能部分补偿也可能全部补偿，则堆石体在总体上亦会表现出应变软化或者应变硬化的特性，从而可借鉴二元介质模型的概念，建立堆石体的本构模型。

1 堆石体二元介质的力学特性

本文将堆石体看成结构体和破损带组成的二元介质，从而建立堆石体二元介质的本构模型。

对结构体而言，其变形过程具有脆性性质，因此可以假定结构体是理想脆弹性体，即在应力状态达到破坏强度之前其变形特性是线弹性的，达到破坏强度之后立即转化为破损带。图 1 给出了其变形特性，图中，σ_b 为结构体的应力，ε_b 为结构体的应变，σ_{bf} 为结构体破坏时的应力，ε_{bf} 为结构体破坏时的应变。

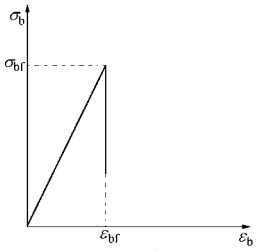


图 1 结构体变形特性

Fig. 1 Deformation character of structural system

对破损带而言，其变形过程具有弹塑性性质。众所周知，堆石体材料在宏观上表现为非线性、压硬性、剪胀性和应力引起的各向异性。堆石体材料破损后如果采用文献[7]所述的理想弹塑性模型，其屈服面通常为开口的筒形或锥形面，显然不能反映上述重要力学特性，本文对破损带改为采用“南水”双屈服面模型[5]，见图 2 所示，以全面反映堆石体的 4 个力学特性。

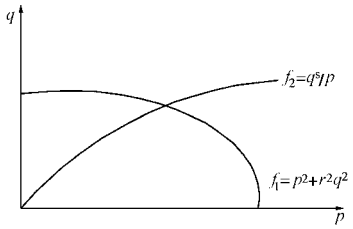


图 2 “南水”双屈服面模型

Fig. 2 NHRI double-yield-surface model

2 应力应变关系

在基于双参数均匀化理论和局部应力应变关系假设的基础上，沈珠江院士推导了二元介质模型的一般应力应变关系[9]。按双参数均匀化理论，其体积应变和偏应变的增量表达式为

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varepsilon_v &= (1-\Delta\lambda_v)\Delta\varepsilon_{v1} + \Delta\lambda_v\Delta\varepsilon_{v2} \ ,\\ \{\Delta e\} &= (1-\Delta\lambda_s)\{\Delta e\}_1 + \Delta\lambda_s\{\Delta e\}_2 \ ,\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中，$\Delta\varepsilon_{v1}$，$\Delta\varepsilon_{v2}$ 和 $\{\Delta e\}_1$，$\{\Delta e\}_2$ 分别为弹脆性元和弹塑性元的体积应变增量和偏应变增量，$\Delta\lambda_v$，$\Delta\lambda_s$ 分别为体积破损率增量和面积破损率增量。

$\Delta\varepsilon_{v1}$，$\{\Delta e\}_1$ 采用弹脆性元模拟，表达为

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{v1} &= \frac{\Delta\sigma_{m1}}{K_1} \ ,\\ \{\Delta e\}_1 &= \frac{\{\Delta s\}_1}{2G_1} \ .\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$\Delta\varepsilon_{v2}$，$\{\Delta e\}_2$ 采用弹塑性元模拟，其模型采用“南水”采用双屈服面模型，可表达为

$$\left.\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{v2} &= \frac{\Delta\sigma_{m2}}{K_2} + \sum_{i=1}^{2} A_i\{n_i\}\Delta f_i \ ,\\ \{\Delta e\}_2 &= \frac{\{\Delta s\}_2}{2G_2} + \sum_{i=1}^{2} A_i\{n_i\}\Delta f_i \ .\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式（2），（3）中，K_1，K_2和 G_1，G_2分别为结构体和破损带的体积模量和剪切模量。A_i（i=1,2）为塑性系数，$\Delta f_i = \left\{\frac{\partial f_i}{\partial\sigma}\right\}\Delta\sigma$（$i$=1,2）。$\{n_i\}$ 代表塑性应变增量的方向，表达为

$$\{n_i\} = \frac{\left\{\frac{\partial Q_i}{\partial\sigma}\right\}}{\sqrt{\left\{\frac{\partial Q_i}{\partial\sigma}\right\}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{\partial Q_i}{\partial\sigma}\right\}}} \ , \tag{4}$$

式中，Q_i 为塑性等势面，采用相关联的正交流动法则后。式（3）可表达为

$$\{\Delta e\}_2 = \frac{\{\Delta s\}_2}{2G_2} + \sum_{i=1}^{2} A_i\frac{\partial f_i}{\partial s_2}\left(\frac{\partial f_i}{\partial\sigma_{m2}}\Delta\sigma_{m2} + \left\{\frac{\partial f_i}{\partial\{s\}_2}\right\}^{\mathrm{T}}\Delta\{s\}_2\right) \ . \tag{5a}$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\Delta\varepsilon_{v2}=\frac{\Delta\sigma_{m2}}{K_2}+\sum_{i=1}^{2}A_i\frac{\partial f_i}{\partial\sigma_{m2}}\left(\frac{\partial f_i}{\partial\sigma_{m2}}\Delta\sigma_{m2}+\left\{\frac{\partial f_i}{\partial\{s\}_2}\right\}^{T}\Delta\{s\}_2\right)，(5b)$$

式中，A_i 相当于 $\dfrac{A_i}{\sqrt{\left\{\dfrac{\partial f_i}{\partial\sigma}\right\}^{T}\left\{\dfrac{\partial f_i}{\partial\sigma}\right\}}}$。

对于内部结构未知的结构性黏土或者砂性土而言，结构参数的确定唯一可行的办法是先假定不同的演化规律再通过实测应力应变曲线与试验应力应变曲线的比较而间接测定。而对于堆石体材料而言，其颗粒破碎率可通过试验前后的筛分试验测定，因此，与文献[7，9]不同的是，本文研究的重点是建立颗粒破碎率和破损参数之间的关系。

3　颗粒破碎率的计算模式

3.1　颗粒破碎率的影响因素

如前所述，堆石体一般在并不很高的围压下就会发生颗粒破碎。一旦产生颗粒破碎，堆石体原先所具备的承载结构就被破坏，从而引起颗粒间接触点荷重的重新分配。其结果是由于接触点处应力集中现象被缓解，使得接触点荷载平均化，从而形成了更为稳定的结构，阻碍了剪胀效应的发挥，压力越高，破碎率越高[1]。

影响堆石体的强度和压缩性的因素大致有以下几个方面[12]：

（1）不均匀系数

级配较好的堆石体由于粒间接触面较小，因而粒间接触应力较大，破碎率较高。

（2）相对密度

相对密度较大的堆石体颗粒间咬合较为紧密、接触面较大，因而粒间接触应力较小，破碎率也较小；而且由于减少了粒间重新排列，因而进一步减少了破碎率；加之颗粒间接触点数增加，减缓了颗粒间的破碎。

（3）粒径形状

棱角状颗粒较之圆粒接触面较小，因而容易破碎。

（4）粒径大小

粒径较大的堆石体较之粒径较小的堆石体接触应力更大、更易于破碎。

（5）矿物成分

堆石料矿物成分和其强度有很大的关系。Marsal[2]指出：堆石体的抗剪强度在很大程度上依赖于其母岩的矿物成分，母岩的矿物成分控制着堆石体的破碎指数。

3.2　颗粒破碎率的试验测定

Marsal[2]在研究堆石体粒间接触应力和破坏机制的基础上，建议用破碎率 B_M 来表征相应应力下颗粒破碎的程度，B_M 定义为试验前后颗粒在曲线上各粒组含量之差的正值之和，（如图 3 所示）即

$$B_M=\sum\Delta W_k \tag{6}$$

式中，$\Delta W_k=W_{ki}-W_{kf}$，W_{ki} 为原级配曲线上某级粒组的含量，W_{kf} 为试验后级配曲线上相同粒组的含量。

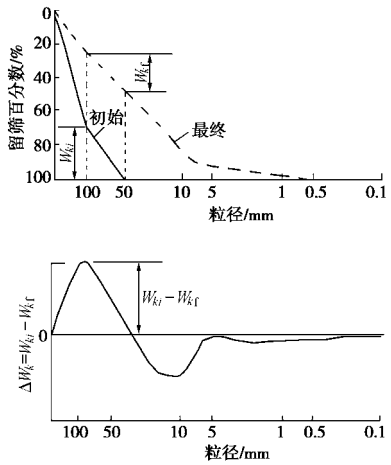


图 3　堆石体破碎率计算图

Fig. 3 Calculation of percentage of damage for rockfill

上式反映了颗粒破碎的绝对程度的大小，本文改用下式表示颗粒破碎的相对程度的大小：

$$B_M=\frac{\sum\dfrac{\Delta W_k}{W_{ki}}}{N} \tag{7}$$

式中，N 表示粒组数，可见 B_M 值在 0～1 之间变化，当 $B_M=0$ 时，表示没有颗粒破碎现象，当 $B_M=1$ 时，表示颗粒全部破碎。式（7）定义的颗粒破碎率称之为相对颗粒破碎率。

3.3　相对颗粒破碎率的经验公式

Hardin[13]曾建议了相对颗粒破碎率 B_r 的公式：

$$B_r=\frac{B_t}{B_{pi}}\quad， \tag{8}$$

式中，B_{pi} 为初始破碎势，B_t 为破碎量。刘汉龙等[3]在试验的基础上，建议了计算 B_r 的经验公式

$$B_r=\frac{\dfrac{\sigma_3}{Pa}}{a+b\left(\dfrac{\sigma_3}{Pa}\right)}\quad， \tag{9}$$

式中，a，b 为拟合参数。

本文第二作者在国家自然科学基金项目的资助下，开展了大量的堆石料颗粒破碎试验研究，结果表明，除围压外，剪应力也是影响颗粒破碎率的重要因素。考虑到颗粒破碎率的增量一般是前期较大后期逐渐减小并趋于稳定，因此，改为采用如下的指数型衰减函数来定义相对颗粒破碎率

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$B_{\mathrm{M}}=1-\exp\left\{-\left[a\left(\frac{\sigma_3}{Pa}\right)+b\left(\frac{q}{Pa}\right)\right]\right\} \quad , \qquad (10)$$

式中，a，b 为拟合参数，q 为广义剪应力，可以表示为 $q=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_1-\sigma_3)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2}$，在三轴压缩试验条件下，$q=\sigma_1-\sigma_3$。

上式定义的相对颗粒破碎率 B_{M} 也是在 0～1 之间变化，当堆石颗粒间接触应力小于其强度时，$B_{\mathrm{M}}=0$，当应力无穷大时，$B_{\mathrm{M}}=1$。

4 破损参数与颗粒破碎率之间的关系

仿照塑性理论中屈服面即为等硬化参数面的假设，采用“南水”双屈服面中 f_1 作为帽盖型破损面来描述围压作用下体积破损率的增长规律，f_2 作为 Mohr-Coulomb 型破损面来描述面积破损率的增长规律。本文同样只把破损面（屈服面）作为弹脆性元破损的边界，在受力过程中，如果堆石体所受的应力超过破损面，则弹脆性元逐渐破损，转化为弹塑性元，弹塑性元所占的破损率逐渐增大。根据非均质材料的均匀化理论，破损参数为破损带的应力分担率，其值在 0～1 之间变化。由此可见，破损参数与颗粒破碎率成正比关系：

$$\left.\begin{aligned}\lambda_{\mathrm{v}} &\propto B_{\mathrm{M}} f_1(\{\sigma\}_1)\ ,\\ \lambda_{\mathrm{s}} &\propto B_{\mathrm{M}} f_2(\{\sigma\}_1)\ ,\end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

式中 λ_{v}，λ_{s} 分别表示体积破损率和面积破损率。为使破损参数在 0～1 之间变化，仿照塑性应变增量可通过硬化规律、正交流动法则和屈服函数计算的方法，破损参数增量可表示为

$$\left.\begin{aligned}\Delta\lambda_{\mathrm{v}} &= \frac{\Delta B_{\mathrm{M}}\left\{\frac{\partial f_1}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{\partial f_1}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}}{\sqrt{\left\{\frac{\partial f_1}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{\partial f_1}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}}}\ ,\\ \Delta\lambda_{\mathrm{s}} &= \frac{\Delta B_{\mathrm{M}}\left\{\frac{\partial f_2}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{\partial f_2}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}}{\sqrt{\left\{\frac{\partial f_2}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{\partial f_2}{\partial\{\sigma\}_1}\right\}}}\ 。\end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

5 算 例

基于上述原理笔者修改了相应的平面有限元程序，并对某砂岩堆石料饱和样进行了不同围压下的大型三轴剪切试验，试验干密度为 2.19 g/cm^3，围压分别为 300，600，1000，1500 和 2500 kPa。试验尺寸为 300 mm×750 mm。计算采用的有限元网格见图 4 所示，结点数 2356 个，单元数 2250 个。

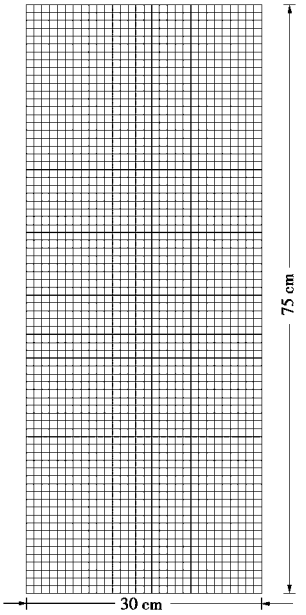


图 4 有限元网格

Fig. 4 Mesh of FEM

由试验结果整理出堆石体二元介质模型计算参数为：K_1 = 1050.9 MPa，G_1 = 899.7 MPa，a = 0.0091，b = 0.0062，c = 0.0 MPa，φ =50.4°，$\Delta\varphi$ =7.4°，k = 912，n = 0.32，k_{ur} = 1368，R_{f} = 0.66，c_{d} = 0.0047，n_{d} = 0.61，R_{d} = 0.62。

根据上述计算参数反算的考虑颗粒破碎和不考虑颗破碎两种情况下的应力应变曲线见图 5 所示，试验曲线一并绘于图上。可见，不考虑颗粒破碎的计算结果与低围压下的剪缩试验结果基本吻合，但与低围压下的剪胀试验结果及高围压下的剪缩试验结果都偏离

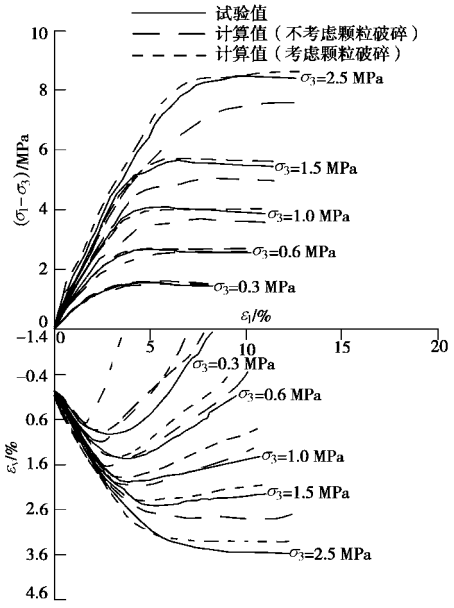


图 5 试验与计算应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of test and calculation under triaxial compression condition

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较多，而考虑颗粒破碎后计算的轴向应变和体应变曲线无论在低围压还是高围压下和试验曲线都基本吻合。上述计算结果表明，如果在数值计算中不考虑颗粒破碎现象，则不能反映低围压下由于颗粒破碎而引起的剪胀效应减小以及高围压下颗粒破碎量明显增大的现象。

6 结　论

（1）在基于岩土破损力学的基础上，堆石体材料同样可以抽象为由结构体和破损带构成的二元介质，前者可用弹脆性元模拟，后者可用弹塑性元模拟，在受力过程中当外荷超过堆石体的压应力或者拉应力后，弹脆性元逐渐破损并转化为弹塑性元。

（2）对弹塑性元采用“南水”双屈服面模型后可以全面反映堆石体的压硬性、非线性、剪胀性和应力引起的各向异性四个方面的重要特性。

（3）本文将双屈服面作为外力作用下颗粒破损的增长规律，仿照塑性力学中塑性应变增量的计算方法，建立了颗粒破碎率和破损参数之间的关系。

（4）本文建议的堆石体本构模型在通常的大型三轴试验基础上，仅需增加一次试验后的颗粒分析试验，以求得颗粒破碎率。通过一个大型三轴剪切试验的计算表明，考虑颗粒破碎计算的应力应变曲线与试验结果更加吻合，尤其是体变曲线，考虑颗粒破碎后，计算得到的低围压下的剪胀性明显降低，与试验曲线的吻合也更好，表明建议的模型具有较好的实用性。

参考文献：

[1] 郭熙灵，胡　辉，包承钢. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报，1997，**19**(3)：83－88. (GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(3): 83－88. (in Chinese))

[2] MARSAL R J, Mechanical properties of rockfill[M]// HIRSCHFELD R C, POULOS S J, Eds. Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume. New York: John Wiley & Sons, 1973: 109－200.

[3] 刘汉龙，秦红玉，高玉峰，周云东. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学，2005，**26**(4)：562－566. (LIU Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-feng, ZHOU Yun-dong. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 562－566. (in Chinese))

[4] 迟世春，贾宇峰. 土颗粒破碎对罗维剪胀模型模型的修正[J]. 岩土工程学报，2005，**27**(11)：1266－1269. (CHI Shi-chun, JIA Yu-feng. Rowe's stress-dilatancy model modified for energy dissipation of particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1266－1269. (in Chinese))

[5] 朱百里，沈珠江. 计算土力学[M]. 上海：上海科学技术出版社，1990：58－59. (ZHU Bai-li, SHEN Zhu-jiang. Computation soil mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1990: 58－59. (in Chinese))

[6] 钱家欢，殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京：中国水利水电出版社，1996：78－79. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Principles and calculation of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996: 78－79. (in Chinese))

[7] 沈珠江. 岩土破损力学：理想脆弹塑性模型[J]. 岩土工程学报，2003，**25**(3)：253－257. (SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics for geological materials: an ideal brittle-elasto-plastic model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(3): 253－257. (in Chinese))

[8] 沈珠江. 岩土破损力学与双重介质模型[J]. 水利水运工程学报，2002，(4)：1－6. (SHEN Zhu-jiang. Breakage mechanics and double-medium model for geological materials[J]. Hydro-Science and Engineering, 2002, (4): 1－6. (in Chinese))

[9] 沈珠江，刘恩龙，陈铁林. 岩土二元介质模型的一般应力应变关系[J]. 岩土工程学报，2005，**27**(5)：489－494. (SHEN Zhu-jiang, LIU En-long, CHEN Tie-lin. Generalized stress-strain relationship of binary medium model for geological materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 489－494. (in Chinese))

[10] 刘恩龙，沈珠江. 基于二元介质模型的岩土类材料破损过程数值模拟[J]. 水利学报，2006(6)：722－726. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Simulation of breakage process of geomaterials by binary medium model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006(6): 722－726. (in Chinese))

[11] 刘恩龙，沈珠江. 岩土材料破损过程的细观数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2006，**25**(9)：1790－1794. (LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Mesoscopical numerical simulation of breakage process of geomaterials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 25(9): 1790－1794. (in Chinese))

[12] SABOYA F Jr, BYRNE P M. Parameters for stress and deformation analysis of rockfill dams[J]. Can Geotech J, 1993, **30**(6): 90－701.

[13] BOBBY O, HARDIN F. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, **111**(10): 1117－1192.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net