

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.02.007

一个粗粒土的非线性弹性模型

史江伟^{1,2}, 朱俊高^{1,2}, 王 平³, 张 丹³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院坝工处, 四川 成都 610072)

摘要:对大量的粗粒土三轴固结排水剪试验结果进行了分析,发现粗粒土的 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$, $-\epsilon_r/\epsilon_a \sim -\epsilon_r$ 之间线性关系不是很好,尤其是 $-\epsilon_r/\epsilon_a \sim -\epsilon_r$ 的关系.进一步分析这些粗粒土试验资料后发现,分别采用双曲对数函数及抛物线函数可以很好地描述 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ 及 $-\epsilon_r \sim \epsilon_a$ 之间的关系,并在此基础上建立了 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型.采用宜兴坝堆石料、长河坝覆盖层料、双江口砾石料等的三轴固结排水剪试验结果对 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型进行了验证.结果表明,ELP 非线性 $E-\nu$ 模型能较好地反映粗粒土的应力应变关系.

关键词:粗粒土;三轴固结排水剪试验;应力应变关系;HLP 非线性 $E-\nu$ 模型

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)02-0154-07

堆石料等粗粒土具有压实性好、抗剪强度高、变形小等优点,被用来作为土石坝的主要填筑材料.近年来,我国土石坝坝高已达 200 m 甚至 300 m 级,且一般土石坝址地形和地质条件较复杂.在设计和施工中,准确控制坝体变形,尤其是防渗体的变形十分关键.在设计中,采用合理的本构模型是准确预测堆石体变形的重要环节.然而,迄今为止,专门针对粗粒土的本构模型较少,因此,迫切需要建立适用于粗粒土力学特性的本构模型.

邓肯-张模型^[1]结构简单,且能反映土体如非线性等主要变形特征,在工程中应用很广.但是,该模型主要是针对黏土建立,不能反映土体的剪胀性等特征,因此,不适用于砂土.至于粗粒土,其适用性更有待验证.

刘萌成等^[2-4]分析了大量大型三轴试验结果,用指数函数拟合了其应力应变关系,建立了堆石料本构模型.张嘎等^[5]用二次曲线描述粗粒土的体变,改进了邓肯-张模型.罗刚等^[6]结合邓肯-张模型和沈珠江模型^[7],提出能够统一模拟从低压到高压下土体剪胀性的数学表达式.王晓妮等^[8]基于邓肯非线性模型,建立了土体达到抗剪强度之前分段切线模量的非线性模型.针对邓肯-张 $E-\nu$ 模型的不足,沈广军^[9]提出了一种可以较好描述三轴剪切试验体积变形和轴向变形之间关系的经验公式,并用来确定泊松比.然而,这些模型对于粗粒土的普适性还未得到验证.

本文在分析大量粗粒土三轴固结排水剪试验结果的基础上,对长河坝覆盖层、双江口砾石料进行了三轴固结排水剪试验,分析粗粒土的应力应变关系.用双曲对数函数描述 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ 之间关系(其中 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为轴向附加应力, ϵ_a 为轴向应变),用抛物线函数表示 $-\epsilon_r \sim \epsilon_a$ 之间的关系(其中 ϵ_r 为径向应变),在此基础上建立 HLP 非线性的 $E-\nu$ 模型,并对模型进行初步验证.

1 粗粒土特性分析

1.1 应力应变特性

依据邓肯-张模型,在常规三轴试验中,土体的应力应变($q \sim \epsilon_a$, $q = \sigma_1 - \sigma_3$)关系符合双曲线关系,即 $\epsilon_a/q \sim \epsilon_a$ 为线性关系.然而,邓肯-张模型是由黏土的普通三轴试验总结得到,对粗粒土适用性并未得到验证.

收稿日期: 2010-07-08

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(200801133)、国家自然科学基金(50809023)

作者简介: 史江伟(1984—)男,江苏句容人,硕士研究生,主要从事土体基本特性及本构关系研究. E-mail: s_shijiangwei@126.com

笔者收集分析了大量的粗粒土三轴试验资料^[2-5, 10-13], 发现在不少情况下 $\varepsilon_a/q \sim \varepsilon_a$ 的线性关系并不是很好. 限于篇幅, 本文仅给出如图 1(a) 所示的 1 种土料的结果, 其试验材料为江苏宜兴抽水蓄能电站筑坝堆石料.

对 2 种粗粒料(长河坝覆盖层料、双江口砾石料)进行了三轴固结排水剪试验, $\varepsilon_a/q \sim \varepsilon_a$ 关系曲线如图 1(b)(c)所示.

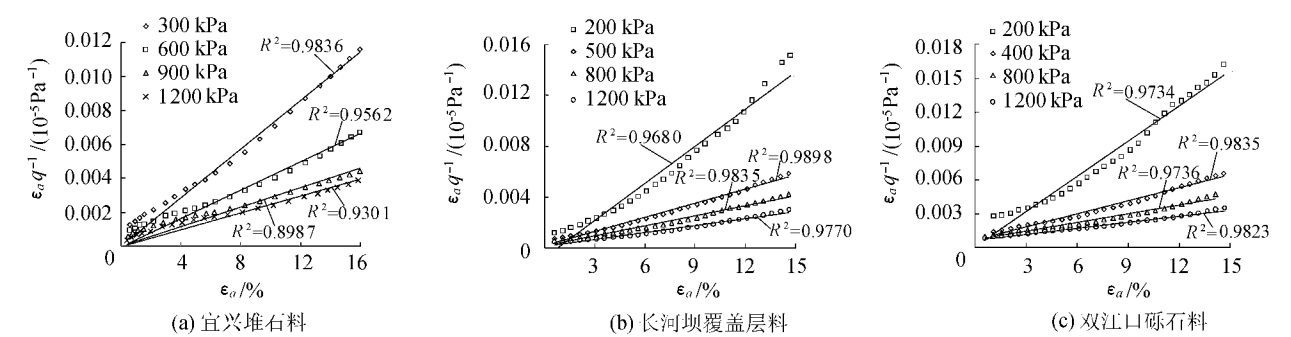


图 1 3 种料的 $\varepsilon_a/q \sim \varepsilon_a$ 关系曲线

Fig. 1 Relationships between ε_a/q and ε_a for three kinds of coarse-grained soils

从图 1 可以看出, 总体上, 围压较高时, $\varepsilon_a/q \sim \varepsilon_a$ 线性关系较好, 而对低围压情况, 线性关系相对较差. 因此, 本文将寻找一种合适的函数来描述 $q \sim \varepsilon_a$ 的关系.

图 2 点绘出 3 种粗料(宜兴堆石料、双江口砾石料、长河坝覆盖层料)的 $\varepsilon_a/\ln(q/p_a + 1) \sim \varepsilon_a$ 关系. 用直线拟合这些试验点, 相关系数达 0.997 以上, 有些曲线甚至达到 1.0, 说明 $\varepsilon_a/\ln(q/p_a + 1)$ 与 ε_a 的线性关系较好. 因此, 在此线性关系基础上建立的偏应力和轴向应变的关系, 应能更好地反映土体的变形模量.

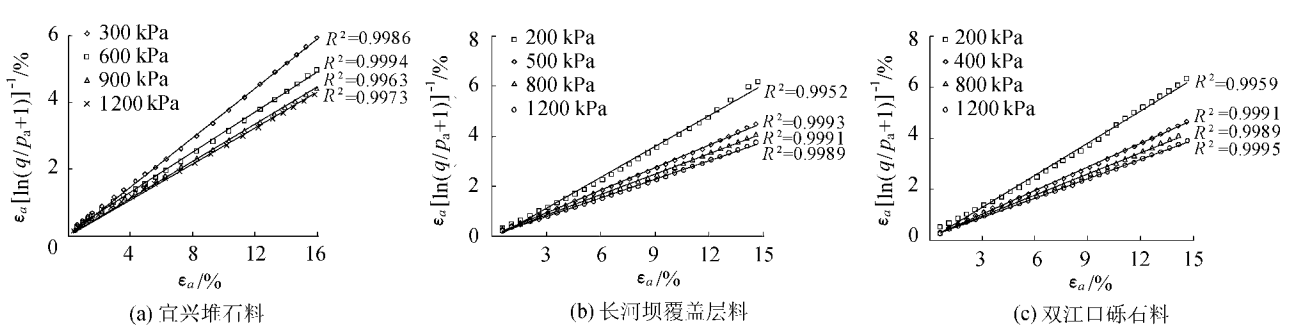


图 2 3 种料的 $\varepsilon_a/\ln(q/p_a + 1) \sim \varepsilon_a$ 关系曲线

Fig. 2 Relationships between $\varepsilon_a/\ln(q/p_a + 1)$ and ε_a for three kinds of coarse-grained soils

因此, 建议偏应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 与轴向应变 ε_a 关系用下式表示:

$$\ln\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p_a} + 1\right) = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a}$$

(1)

式中: p_a ——大气压力; a, b ——参数, 其确定方法与邓肯-张模型方法相似.

根据三轴固结排水剪试验中土体受剪变形特点, $\varepsilon_a = 0$ 时, 偏应力应为零, 因此, 式(1)左边取为 $\ln[(\sigma_1 - \sigma_3)/p_a + 1]$. 另外, 土体应变无限发展 $\varepsilon_a \rightarrow \infty$ 时, 即认为土体发生破坏, 试验中偏应力达到一定值. 式(1)右边的渐进值为 $1/b$, 能够反映这一点.

由以上分析可以看出, 无论是从数学的角度还是从土体性质的角度, 式(1)都是合理的, 可以用来反映土的三轴固结排水剪试验中的应力应变关系.

1.2 体变特性

笔者研究了若干粗粒土三轴固结排水剪试验的径向应变与轴向应变($-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$)关系, 发现一般情况下粗粒土 $-\varepsilon_r/\varepsilon_a \sim -\varepsilon_r$ 关系的线性较差, 说明粗粒土的 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 关系不宜用双曲线表示. 因而, 邓肯-张模型采用 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 关系的双曲线形式确定切线泊松比必然误差较大.

图 3 给出了文献[10]的江苏宜兴抽水蓄能电站筑坝堆石料及笔者进行的双江口砾石料、长河坝覆盖层

料的三轴固结排水剪试验得到的 $-\varepsilon_r/\varepsilon_a \sim -\varepsilon_r$ 关系. 可以看出, 大多数围压下, $-\varepsilon_r/\varepsilon_a \sim -\varepsilon_r$ 线性的关系较差.

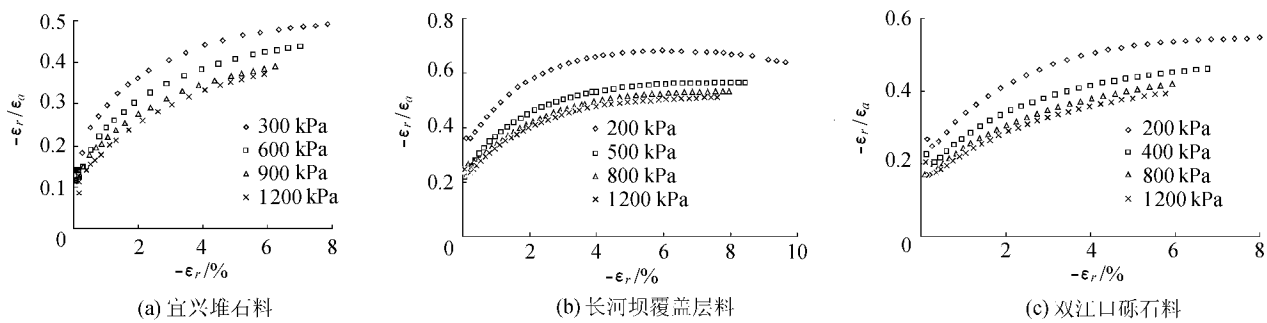


图 3 3 种料的 $-\varepsilon_r/\varepsilon_a \sim -\varepsilon_r$ 关系曲线

Fig. 3 Relationships between $-\varepsilon_r/\varepsilon_a$ and ε_a for three kinds of coarse-grained soils

进一步研究 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 关系, 发现采用常数项为零的二次多项式(抛物线函数)进行拟合效果不错, 表达式为

$$-(\varepsilon_r) = h\varepsilon_a^2 + d\varepsilon_a \tag{2}$$

式中 h, d 为拟合参数. 因此, 将图 3 中的 3 种粗粒土的 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 关系用式(2)所示的抛物线函数拟合, 如图 4 所示, 试验点与拟合曲线吻合很好, 其相关系数 R^2 能达到比较大的值, 具体数值如图 4 所示. 张嘎等^[5]也采用此种函数形式拟合了 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 关系.

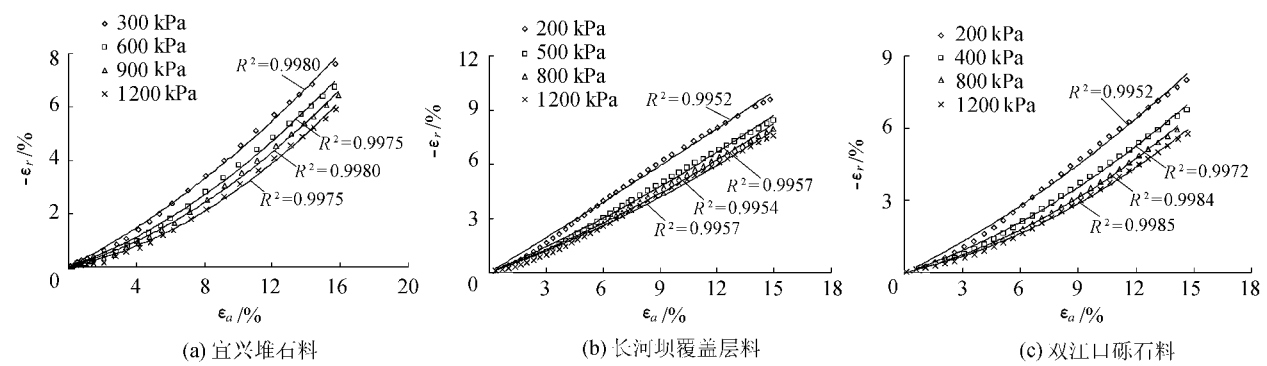


图 4 3 种料的 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves between $-\varepsilon_r$ and ε_a for three kinds of coarse-grained soils

2 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型的建立

参照邓肯-张模型的建立方法, 利用式(1)的双曲对数函数及式(2)的抛物线函数, 建立 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型.

2.1 切线弹性模量

由式(1)得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = p_a \exp\left(\frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a}\right) - p_a \tag{3}$$

常规三轴试验中, 大主应力的增量等于 $\Delta\sigma_1$ 与 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ 相等, 因此, 依据弹性模量的定义, 由式(3)可得切线弹性模量

$$E_t = (\sigma_1 - \sigma_3 + p_a) \frac{a}{(a + b\varepsilon_a)^2} \tag{4}$$

令 $A = \ln[(\sigma_1 - \sigma_3)/p_a + 1]$, 由式(1)解出 ε_a ,

$$\varepsilon_a = \frac{Aa}{1 - Ab} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)得

$$E_t = \frac{1}{a}(\sigma_1 - \sigma_3 + p_a)(1 - Ab) \quad (6)$$

现研究 a, b 的意义及它们随应力的变化. 由式(4)可见, 当 $\varepsilon_a \rightarrow 0$ 时, 得到的弹性模量为 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \varepsilon_a$ 关系曲线的初始斜率, 即初始切线模量, 用 E_i 来表示,

$$E_i = p_a/a \quad (7)$$

分析若干试验资料, 发现初始切线模量 E_i 随着围压 σ_3 的变化而变化. 用双对数坐标点绘出 $\lg(E_i/p_a)$ 和 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的关系, 线性较好. 令直线的截距 $\lg K$, 斜率为 n , 则得

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (8)$$

当 $\varepsilon_a \rightarrow \infty$ 时, 由式(1)得

$$\frac{1}{b} = \ln \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}{p_a} + 1 \right] \quad (9)$$

式中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 表示 $\varepsilon_a \rightarrow \infty$ 时 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的渐近值. 实际上 ε_a 不可能趋向无穷大, 达到一定值后试样发生破坏, 这时偏应力为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, 总小于 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$, 令

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_0} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得

$$\frac{1}{b} = \ln \left[\frac{1}{R_f} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{p_a} + 1 \right] \quad (11)$$

根据摩尔库伦破坏准则, 有

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

从而, 式(11)可以表示为

$$\frac{1}{b} = \ln \left[\frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{(1 - \sin \varphi)p_a R_f} + 1 \right] \quad (13)$$

通过上述的方法可求出 a, b , 这里的 a, b 与邓肯-张模型中稍有差别, 它们均是量纲为1的数. 把式(7)(13)代入式(6)得

$$E_t = \frac{E_i}{p_a} (\sigma_1 - \sigma_3 + p_a) \left\{ 1 - A / \ln \left[\frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{(1 - \sin \varphi)p_a R_f} + 1 \right] \right\}^2 \quad (14)$$

其中: $E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$; $A = \ln \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{p_a} + 1 \right)$.

2.2 切线泊松比

式(2)两边对 ε_a 求偏导数, 得切线泊松比,

$$\nu_t = \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial \varepsilon_a} = 2h\varepsilon_a + d \quad (15)$$

由式(15)和 $\varepsilon_a \rightarrow 0$ 时, d 为初始切线泊松比, $\nu_i = d$, 即为二次曲线一次项的系数. 若干试验资料分析后发现, ν_i 随 σ_3 变化, 在半对数坐标上点绘出 ν_i 和 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的关系, 线性较好. 令直线截距为 H , 斜率为 $-F$, 于是有初始切线泊松比

$$\nu_i = H - F \lg(\sigma_3/p_a) \quad (16)$$

整理试验资料后发现, 不同围压下参数 h 的大小变化不大, 而且式(15)中 h 与 ε_a 相乘后, h 变化对泊松比的影响更小, 因此, 可认为 h 为常数, 其大小可由不同围压下的 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 试验点直接用抛物线拟合并取平均值得到.

将式(5)(16)代入式(15), 便得到切线泊松比

$$\nu_t = \frac{2hAp_a}{E_i \left\{ 1 - A / \ln \left[\frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{(1 - \sin \varphi)p_a R_f} + 1 \right] \right\}} + H - F \lg \frac{\sigma_3}{p_a} \quad (17)$$

依据式(14)和式(17),可以确定土体的切线弹性模量和切线泊松比,此模型即为本文建议的 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型.模型参数为 $c, \varphi, R_f, K, n, H, F, h$.这些参数可根据三轴 CD 试验结果确定.

3 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型验证

首先利用常规三轴试验的应力应变曲线确定模型参数,再利用所确定的模型参数计算得到三轴试验条件下的应力应变关系,与试验结果比较,初步验证模型的可行性.

根据三轴固结排水剪试验结果,确定宜兴堆石料、长河坝覆盖层料、双江口砾石料的 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型的模型参数,如表 1 所示.采用非线性强度指标,故黏聚力 c 为零.

表 1 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型的模型参数

Table 1 Constitutive parameters for HLP nonlinear $E-\nu$ model

土料	φ_0	$\Delta\varphi$	R_f	K	n	H	F	h
宜兴堆石料	50.4	9.6	0.89	824	0.00	0.39	0.28	0.44
长河坝覆盖层料	55.5	9.7	0.79	999	0.15	0.60	0.13	0.48
双江口砾石料	51.3	9.6	0.81	404	0.16	0.35	0.22	0.49

图 5 为 3 种粗粒土的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 的试验曲线和 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型计算得到的曲线.从图 5 可以看出,HLP 非线性 $E-\nu$ 模型得到的偏应力与试验结果吻合很好,能较好地反映偏应力和轴向应变关系.

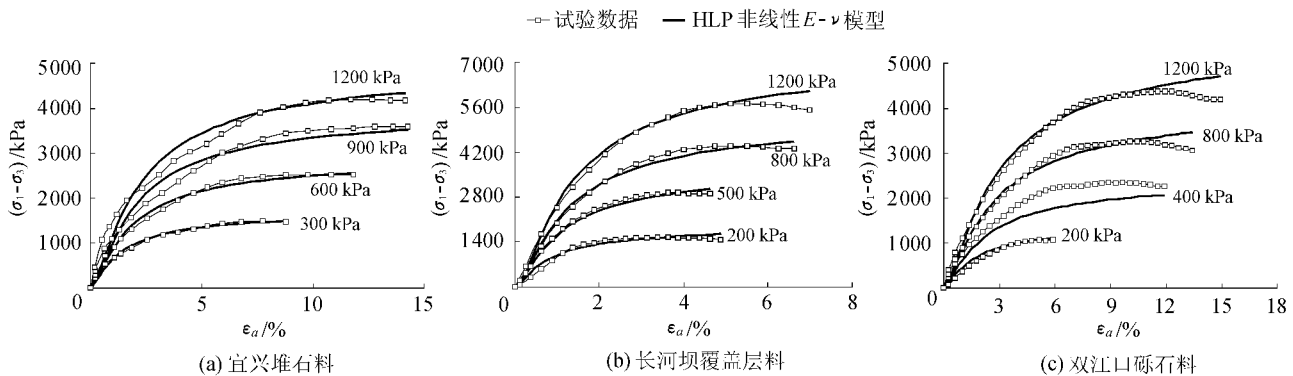


图 5 3 种料的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 试验与模型模拟曲线

Fig. 5 Comparison between simulated curves and test results of $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ for three kinds of coarse-grained soils

模型的切线模量通过对一个趋向于极限值函数求偏导得到,曲线是单调不减的,因此,模型亦不能反映土体的软化特性.因此,对软化型土,软化段一般拟合较差.进入软化阶段,土体的应力水平很高,实际应用时,土工结构的应力水平大部分较低,因此,如果一个模型能够保证低应力水平的拟合精度,那该模型就有一定的实用性.

实际应用 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型时,需依据应力状态确定土体的切线弹性模量和切线泊松比,然后,利用广义虎克定律求得弹性矩阵.这时,必须对泊松比进行限制,即 $\nu < 0.5$,这就使得模型不能反映土体的剪胀性.长河坝覆盖层料和双江口砾石料的剪胀性明显,HLP 非线性 $E-\nu$ 模型不能很好地预测,因此没有给出.本文只列出江苏宜兴抽水蓄能电站筑坝堆石料的体变预测结果.图 6 为宜兴堆石料的 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 试验结果和模型预测曲线.可以看出,HLP 非线性 $E-\nu$ 模型能很好地预测出试验围压下试样表现出剪缩特性的体变变化规律.

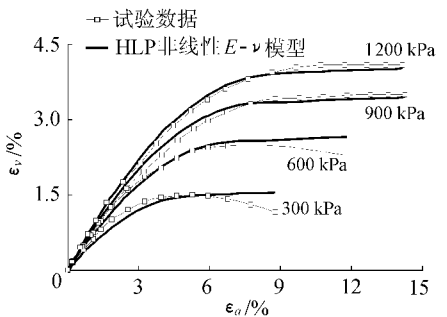


图 6 宜兴堆石料 $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ 试验与模型模拟曲线

Fig. 6 Comparison between simulated curves and test results of $\varepsilon_v \sim \varepsilon_a$ for Yixing rock-fill materials

由图 5 和图 6 可以看出,HLP 非线性 $E-\nu$ 模型能较好地反映弱剪胀性条件下粗粒土的应力应变特性.

4 结 语

通过对大量粗粒土试验数据的分析,发现 $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$, $-\varepsilon_r/\varepsilon_a \sim -\varepsilon_r$ 之间线性关系不是很好,尤其 $-\varepsilon_r/\varepsilon_a \sim -\varepsilon_r$ 的线性关系一般较差,于是采用双曲对数函数描述 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_a$ 之间关系,用抛物线函数表示 $-\varepsilon_r \sim \varepsilon_a$ 之间关系,并在此基础上建立了 HLP 非线性 $E-\nu$ 模型. HLP 非线性 $E-\nu$ 模型概念清晰,参数确定方法简单,可直接由常规三轴试验得到. 初步验证表明, HLP 非线性 $E-\nu$ 模型能较好地反映偏应力和轴向应变之间的关系,对于剪胀性弱的土体, HLP 模型也较理想地反映出体变变化的规律.

参考文献:

- [1] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineering, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [2] 刘萌成, 黄晓明, 高玉峰. 堆石料强度变形特性与非线性弹性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 798-802. (LIU Meng-cheng, HUANG Xiao-ming, GAO Yu-feng. Research on strength-deformation characteristics and nonlinear elastic model of rockfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 798-802. (in Chinese))
- [3] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 205-211. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 205-211. (in Chinese))
- [4] 刘萌成. 应力路径条件下堆石料工程及本构模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [5] 张嘎, 张建民. 粗颗粒土的应力应变特性及其数学描述研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1587-1591. (ZHANG Gai, ZHANG Jian-ming. Study on behavior of coarse grained soil and its modeling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1587-1591. (in Chinese))
- [6] 罗刚, 张建民, 邓肯-张模型和沈珠江双屈服面模型的改进[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 887-890. (LUO Gang, ZHANG Jian-ming. Revision of Duncan-Chang nonlinear model and Shen Zhu-jiang's elastoplastic model for granular soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 887-890. (in Chinese))
- [7] 沈珠江. 土体应力-应变分析中的一种新模型[C]//第五届土力学基础工程学术讨论会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 101-105.
- [8] 王晓妮, 卢廷浩, 王伟. 土体非线性模型的分段切线模量研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 204-207. (WANG Xiao-ni, LU Ting-hao, WANG Wei. Segmented tangent modulus of nonlinear soil model[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2006, 34(2): 204-207. (in Chinese))
- [9] 沈广军, 邓肯-张 $E-\nu$ 模型的改进[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 109-114. (SHEN Guang-jun. Improvement of Duncan-Chang $E-\nu$ model[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2010, 38(1): 109-114. (in Chinese))
- [10] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1575-1580. (QIN Hong-yu, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1575-1580. (in Chinese))
- [11] 张丙印, 袁会娜, 孙逊. 糯扎渡高心墙堆石坝心墙砾石土料变形参数反演分析[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 18-23; 104. (ZHANG Bing-yin, YUAN Hui-na, SUN Xun. The back-analysis of deformation parameters of core gravelly soil of the Nuozhadu high rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 18-23; 104. (in Chinese))
- [12] 张兵, 高玉峰, 毛金生, 等. 堆石料强度和变形性质的大型三轴试验及模型对比研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(1): 122-126. (ZHANG Bin, GAO Yu-feng, MAO Jin-sheng, et al. Strength and deformation properties of rockfill triaxial tests and model large-scale comparative study[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(1): 122-126. (in Chinese))
- [13] 张启岳, 司洪洋. 粗粒土大型三轴压缩试验的强度与应力-应变特性[J]. 水利学报, 1982(9): 22-31. (ZHANG Qi-yue, SI Hong-yang. Shear strength and stress-strain properties of coarse grain soil determined by large scale triaxial compression tests[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982(9): 22-31. (in Chinese))

Nonlinear elastic model for coarse-grained soils

SHI Jiang-wei^{1 2}, ZHU Jun-gao^{1 2}, WANG Ping³, ZHANG Dan³

- (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-mechanics and Embankment Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 3. HydroChina Chengdu Engineering Corporation , Chengdu 610072 , China)

Abstract : By analyzing the results of various triaxial consolidated-drained shear tests on coarse-grained soils , it was found that the linear relationships of $\epsilon_a/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_a$ and $-\epsilon_r/\epsilon_a \sim -\epsilon_r$ were not satisfactory , especially the relationship of $-\epsilon_r/\epsilon_a \sim -\epsilon_r$. However , the relationships of $(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_a$ and $-\epsilon_r \sim \epsilon_a$ could be reasonably described by the hyperbolic-logarithmic function and the parabolic function , respectively. On such a basis , a HLP nonlinear $E-\nu$ model was proposed. It was preliminarily validated by means of the results of triaxial consolidated-drained shear tests on Yixing rock-fill materials , Changheba overburden layers and Shuangjiangkou soils. The results show that the proposed model can satisfactorily depict the stress-strain relationship of coarse grained soils.

Key words : coarse-grained soils ; triaxial consolidated-drained shear test ; stress-strain ; HLP nonlinear $E-\nu$ model

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63 ,CN32-1117/TV ,ISSN1000-1980 ,双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考.

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年 ,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响.刊载的文章中 ,绝大部分为国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号.

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,每期定价 12.00 元 ,全年 6 期共 72.00 元.欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系.

编辑部地址 :南京市西康路 1 号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部
邮政编码 210098
电话/传真 025-83786343
E-mail xxb@hhu.edu.cn
网址 kkb.hhu.edu.cn/web/index_xb.asp ?l_id=53