

中主应力对砾石料变形和强度的影响

施维成, 朱俊高, 刘汉龙

(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)

摘要: 对砾石料进行了 σ_3 不变, σ_1 和 σ_2 等比例同时加载的等 b 试验, 分别研究了中主应力对大、中、小主应变及强度的影响规律。将 Mohr-Coulomb 准则、Lade-Duncan 准则、Matsuoka-Nakai 准则和方开泽准则与砾石料的真三轴试验结果进行比较, 发现 Matsuoka-Nakai 准则和方开泽准则反映的内摩擦角与 b 的关系与试验得到的规律差别较大, Lade-Duncan 准则反映的规律与试验结果最接近, 但数值上高估了 b 对内摩擦角的影响。因此, 建议了一个破坏准则, 推导了该准则的内摩擦角与 b 的关系式, 并用几组真三轴试验结果进行验证, 表明本文建议的准则比 Lade-Duncan 准则、Matsuoka-Nakai 准则更准确地反映砾石料的内摩擦角与 b 的关系。

关键词: 中主应力; 砾石料; 变形; 强度; 真三轴试验; 内摩擦角

中图分类号: TU521 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)10-1449-05

作者简介: 施维成 (1982 -), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 主要从事土体本构模型研究。E-mail: shiweicheng2008@yahoo.com.cn。

Influence of intermediate principal stress on deformation and strength of gravel

SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, LIU Han-long

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: True triaxial tests on specimens of gravel were performed, in which σ_3 was invariable, and σ_1, σ_2 were loaded at the same time in a certain proportion $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. The influences of the intermediate principal stress on three principal strains and strength were studied separately. Mohr-Coulomb Criterion, Lade-Duncan Criterion, Matsuoka-Nakai Criterion and Fang Kai-ze Criterion were compared with the true triaxial test results of gravel. It was found that the relationships between friction angle and b reflected by Matsuoka-Nakai Criterion and Fang Kai-ze Criterion were different from those of the experimental results, and the laws reflected by Lade-Duncan Criterion were close to those of the experimental results, while it overrated the influence of b on the friction angle. Hence a criterion was proposed, and the relationship between the friction angle and b was deduced and verified using several true triaxial test results. It was indicated that the proposed criterion could reflect the relationship between the friction angle and b more accurately than Lade-Duncan Criterion and Matsuoka-Nakai Criterion.

Key words: intermediate principal stress; gravel; deformation; strength; true triaxial test; angle of internal friction

0 前言

近年来由于高土石坝的大量兴建, 对粗粒土的力学性质的了解提出了更高要求, 因而, 对其力学性质和本构模型的研究已成为土力学的一个重要热点^[1-3]。到目前为止, 对粗粒土的研究主要局限于常规三轴试验, 很多学者对粗粒土进行了大量的常规三轴试验^[4-7]。然而, 常规三轴试验只能模拟轴对称应力状态, 无法考虑中主应力的影响。实际工程中出现的应力状态一般都是三向不等的应力状态, 因此有必要对粗粒土进行真三轴试验研究。

国内外都有学者曾经对砂进行真三轴试验^[8-11],

并研究砂在三维应力状态下的力学性质^[12-16]。工程中使用的粗粒土粒径通常较大, 甚至是巨粒土, 比砂的粒径要大得多, 力学性质上也与砂存在较大差异。因此, 对粗粒土在三维应力状态下性质的研究不能仅仅照搬砂的真三轴试验成果, 有必要对粗粒土进行真三轴试验。

本文对某砾石料进行了真三轴试验。由于仪器的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50579014); 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合基金项目 (50639050)

收稿日期: 2007-11-25

限制,只进行了粒径为2~5 mm的砾石土试样的试验。通过试验研究了中主应力对其变形和强度的影响。

1 试验方法与试验路径

1.1 试验方法

试验使用河海大学、国家电力公司电力自动化研究院、江苏溧阳永昌工程试验仪器厂联合研制的ZSY-1型真三轴仪。 σ_3 方向采用气压加压, σ_1 , σ_2 方向在气压的基础上再采用液压加压, σ_2 方向使用铝片与橡皮管相间组成的、横向刚性传递力、竖向柔性随试样一起压缩的复合加压板,可有效避免 σ_1 , σ_2 方向加压板的相互干扰。

试验所用砾石料为花岗岩,粒径2~5 mm。试样为长方体,尺寸为35 mm×70 mm×70 mm,制样干密度1.43 g/cm³。因为复合加压板在对试样施加力的同时作用在橡皮膜上的力也很大,而试样表面很粗糙,就很容易将橡皮膜顶破,所以在试样的 σ_2 面上放一层很薄的土工布。

砾石料在击实模具中成形后,如果不采取任何措施就直接将模具拆除,则试样会立即坍塌不成形。因此,本文试验中在拆除击实模具前先用吸球在试样中形成一定真空度,靠试样内外的气压差立样,保证加围压之前试样稳定,直到压力室中气压达到20 kPa时再拿走吸球。

1.2 试验路径

b 是反映中主应力 σ_2 与大主应力 σ_1 、小主应力 σ_3 相对大小的一个参数,表达式为

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

由式(1)移项得

$$\sigma_2 - \sigma_3 = b(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

若 σ_3 不变,同时增加 σ_1 , σ_2 ,保持 b 值不变,则对式(2)两端求导可得

$$d\sigma_2 = b d\sigma_1 \quad (3)$$

本文试验中,首先加气压 σ_3 ,使试样处于三向相等的应力状态。然后保持 σ_3 不变, σ_1 , σ_2 按照式(3)进行等比例加载,则可保证试样在加载过程中任意一个时刻的 b 值都相等,这就是本文的等 b 加载试验应力路径,图1为加载示意图。

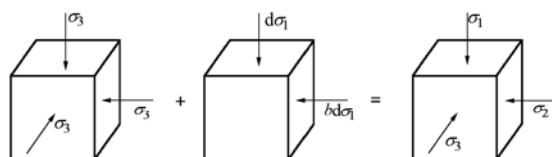


图1 试验加载示意图

Fig. 1 Sketch map of the loading

进行了不同围压(围压分别为75,100,125,150,200 kPa)下的等 b 加载试验, b 分别取0,0.25,0.5,0.75,1。不同围压等 b 试验的应力应变规律与 $\sigma_3=100$ kPa下测定的规律相似,因此,下面主要分析围压为100 kPa的试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 中主应力对应变的影响

图2是 $\sigma_3=100$ kPa, b 分别为0,0.25,0.5,0.75,1时的等 b 加载试验实测的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 的关系,图3,4分别为实测的 $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$, $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 关系。

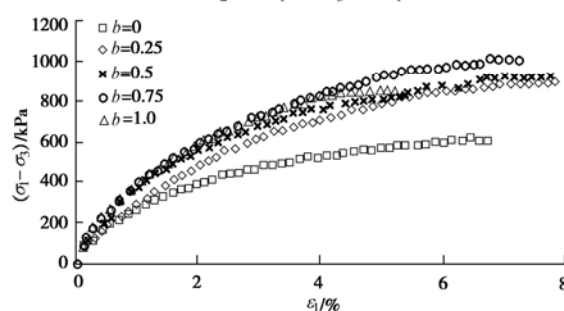


图2 试验实测的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ε_1 的关系曲线

Fig. 2 Relationship between $\sigma_1 - \sigma_3$ and ε_1 measured in tests

由图2可见, $\sigma_1 - \sigma_3$ 与 ε_1 的关系曲线在 b 较小时随 b 的增大而明显变陡,在 b 较大时随着 b 的变化则相对较小。

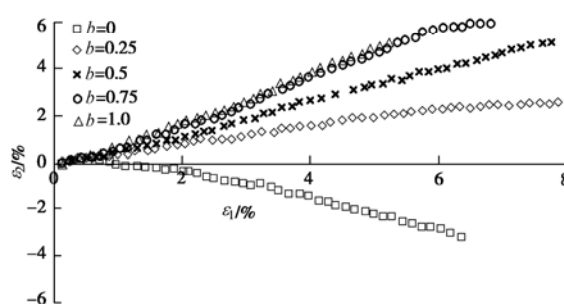


图3 试验实测的 $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 3 Relationship between ε_2 and ε_1 measured in tests

由图3可见,中主应变 ε_2 可正可负,且在同样的 ε_1 下,数值上随着 b 的增大而增大, $b=0$ 时 ε_2 为负,即膨胀, $b=0.25$ 时 ε_2 就已经为正,转为压缩。

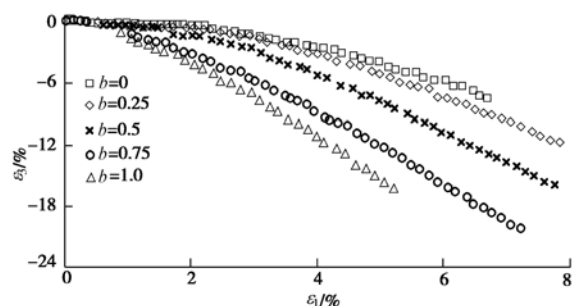


图4 试验实测的 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 4 Relationship between ε_3 and ε_1 measured in tests

由图 4 可见, 小主应变 ε_3 都是为负, 即在不同的 b 值下, 小主应力面都是发生膨胀。 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 关系曲线的斜率 (绝对值) 随着 b 的增大而增大, b 的大小对小主应力面的膨胀量影响较大, b 越大, 试样在小主应力方向越容易膨胀。

2.2 中主应力对内摩擦角的影响

砾石料是无黏性材料, 可以认为黏聚力 $c = 0$, Mohr-Coulomb 准则成为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi, \quad (4)$$

式中, φ 为内摩擦角。

Mohr-Coulomb 准则没有考虑中主应力 σ_2 的影响, 即认为在加载过程中, σ_2 的大小对最终破坏时的 σ_1 大小无关, 内摩擦角与 σ_2 无关。而本文所做的等 b 试验, 对同样的 σ_3 , 不同的 b 值下加载, 到试样破坏时的 σ_1 不同, 表明内摩擦角是随 b 值而变化的, 定义为

$$\sin \varphi_b = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}, \quad (5)$$

式中, φ_b 为不同 b 值时的等 b 试验内摩擦角。Mohr-Coulomb 准则不考虑中主应力对强度的影响, 对任意的 b , 都有 $\varphi_b = \varphi_0$ (φ_0 为 $b = 0$ 时的内摩擦角)。Lade-Duncan 准则、Matsuoka-Nakai 准则、方开泽准则^[17]都包含中主应力项, 内摩擦角与 b 有关。下文将把这 3 个准则反映的 $\varphi_b - b$ 关系与试验结果进行比较, 验证它们对砾石土的适用性。

图 5 是 $\sigma_3 = 100$ kPa 的等 b 加载试验得到的 $\varphi_b - b$ 关系 (其中 $\varphi_0 = 48.6^\circ$), 以及 Lade-Duncan 准则、Matsuoka-Nakai 准则、方开泽准则在 $\varphi_0 = 48.6^\circ$ 时的 $\varphi_b - b$ 关系曲线。

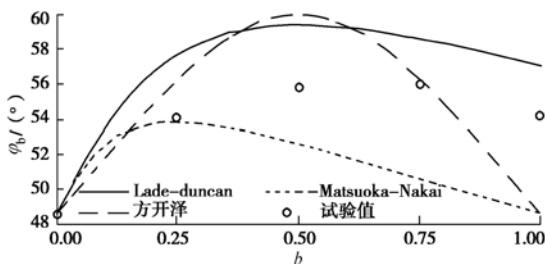


图 5 各准则的 $\varphi_b - b$ 关系与试验值的比较

Fig. 5 Comparison among the relationship of φ_b and b reflected by different criterion and the experimental values

试验结果显示, $b = 0.25 \sim 1$ 时的内摩擦角 φ_b 与 $b = 0$ 时相比有显著增大, $\varphi_{0.25}$ 就比 φ_0 要大 11%, 而 b 在 $0.25 \sim 1$ 之间变化时, φ_b 的变化幅度只有 3%。这说明在 b 值较小时内摩擦角随 b 的增大而显著增大, b 值较大时内摩擦角随 b 的变化相对较小。

Matsuoka-Nakai 准则和方开泽准则都有 $\varphi_0 = \varphi_1$ (φ_1 为 $b = 1$ 时的内摩擦角)。而从试验结果看, φ_1 明显比 φ_0 要大, 这与文献[16]得到的砂样试验结果相似。从这个角度看, Lade-Duncan 准则对 $\varphi_b - b$ 关系的反映比 Matsuoka-Nakai 准则、方开泽准则更加符合试验结果。

由图 5 可以看出, 试验值介于 Lade-Duncan 准则和 Matsuoka-Nakai 准则之间, Lade-Duncan 准则夸大了 b 对内摩擦角的影响, 而 Matsuoka-Nakai 准则不但低估了 b 对内摩擦角的影响, 而且所反映的 b 在 $0.25 \sim 1$ 之间变化时 $\varphi_b - b$ 关系在规律上与试验结果差别较大。

3 本文破坏准则

3.1 本文破坏准则的提出

上述分析表明, Matsuoka-Nakai 准则和方开泽准则不能很好地反映本文研究的砾石料的内摩擦角 φ_b 随 b 的变化规律, 而 Lade-Duncan 准则夸大了 b 对内摩擦角的影响。为能够更准确地反映 b 对 φ_b 的影响, 提出式 (6) 所示的破坏准则。

$$\frac{I_1^3 - 4I_1I_2}{I_3} = k_f, \quad (6)$$

式中, k_f 为材料参数, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 、 $I_2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)$ 、 $I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$ 分别为第一、第二、第三应力不变量。

由式 (1) 可得

$$\sigma_2 = b\sigma_1 + (1-b)\sigma_3. \quad (7)$$

由式 (7) 可得

$$I_1 = \frac{1}{2}[3(\sigma_1 + \sigma_3) + (2b-1)(\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (8)$$

$$I_2 = -\left(b - \frac{1}{2}\right)(\sigma_1 + \sigma_3)(\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{3}{4}(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_3)^2, \quad (9)$$

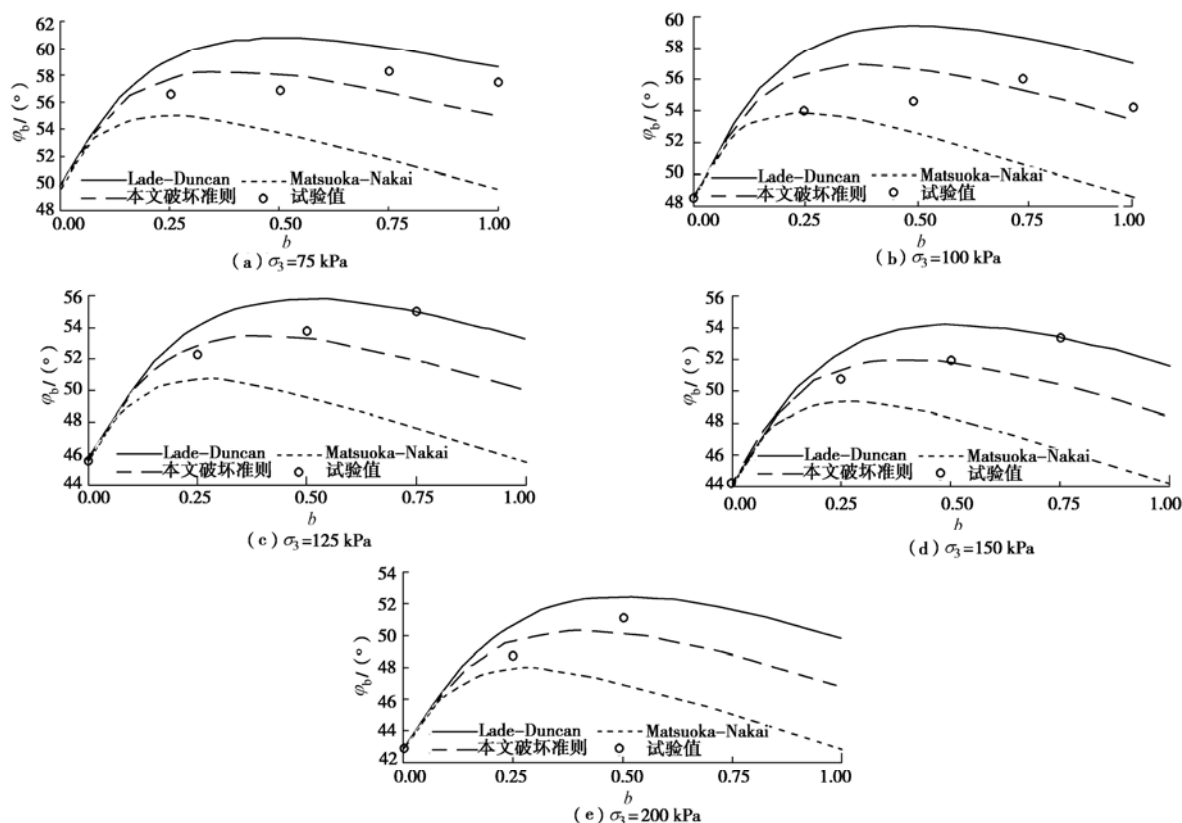
$$I_3 = \frac{1}{8}[(\sigma_1 + \sigma_3)^2 - (\sigma_1 - \sigma_3)^2][(\sigma_1 + \sigma_3) + (2b-1)(\sigma_1 - \sigma_3)]. \quad (10)$$

将式 (8) ~ (10) 代入式 (6), 并考虑到式 (5), 整理可得

$$63 - k_f + (63 - k_f)(2b-1)\sin \varphi_b + [17(2b-1)^2 - 12 + k_f]\sin^2 \varphi_b + (2b-1)[(2b-1)^2 - 4 + k_f]\sin^3 \varphi_b = 0. \quad (11)$$

式 (11) 即为本文建议准则的 $\varphi_b - b$ 关系式。

考虑常规三轴压缩试验: $b = 0$, $\varphi_b = \varphi_0$, 代入式 (11) 得

图6 本文破坏准则的 $\varphi_b - b$ 关系验证Fig. 6 Verification of the relationship between φ_b and b reflected by the proposed criterion

$$k_f = \frac{63 - 63 \sin \varphi_0 + 5 \sin^2 \varphi_0 + 3 \sin^3 \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0 - \sin^2 \varphi_0 + \sin^3 \varphi_0} \quad (12)$$

3.2 本文破坏准则的验证

为验证本文破坏准则, 将 Lade-Duncan 准则、Matsuoka-Nakai 准则和本文破坏准则的 $\varphi_b - b$ 关系与不同围压下的等 b 试验结果进行比较, 见图 6 (a) ~ (e)。

可以看出, 本文破坏准则所反映的 $\varphi_b - b$ 关系比 Lade-Duncan 准则和 Matsuoka-Nakai 准则更接近试验值。

4 结 论

本文对某砾石料进行了 σ_3 一定的控制 b 恒定的加载试验, 得出了以下结论和成果。

(1) 在 σ_3 一定 b 恒定的加载试验中, b 值大小对 3 个主应变的影响显著。 b 在较小值变化时对 ε_1 的影响较大, 在较大值变化时对 ε_1 的影响较小; ε_2 可能为正也可能为负, 且在同样的 ε_1 下, 数值上随着 b 的增大而增大; ε_3 总是为负, 即小主应力方向试样总是膨胀, 而 b 值大小对膨胀量影响较大, b 越大, 越容易膨胀。

(2) 在 σ_3 一定 b 恒定的加载试验中, 在 b 值较小时内摩擦角随 b 的增大而显著增大, b 值较大时内

摩擦角随 b 的变化相对较小。

(3) Mohr-Coulomb 准则不考虑中主应力对强度的影响, 内摩擦角与 b 无关, 这与试验结果不符。Lade-Duncan 准则比 Matsuoka-Nakai 准则、方开泽准则更好地反映内摩擦角 φ_b 随 b 的变化规律, 而 Lade-Duncan 准则夸大了 b 对内摩擦角的影响。

(4) 本文提出的破坏准则所反映的 $\varphi_b - b$ 关系比 Lade-Duncan 准则和 Matsuoka-Nakai 准则更接近试验值。由于试验成果有限, 此准则对于其它石料或更粗堆石料的适用性还有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 张 嘎, 张建明. 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 Ga, 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))
- [2] 张建明, 罗 刚. 考虑可逆与不可逆剪胀的粗粒土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 178 - 184. (ZHANG Jian-ming, LUO Gang. A new cyclic constitutive model for granular soil considering reversible and irreversible dilatancy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 178 - 184. (in Chinese))

- [3] 张 嘎, 吴 伟, 张建明. 粗粒土亚塑性损伤模型[J]. 清华大学学报, 2006, **46**(6): 793 - 796. (ZHANG Ga, WU Wei, ZHANG Jian-ming. Hypoplasticity damage model of coarse grained soils[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, **46**(6): 793 - 796. (in Chinese))
- [4] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 费 康. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学, 2002, **23**(2): 217 - 221. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long, FEI Kang. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(2): 217 - 221. (in Chinese))
- [5] 张丙印, 吕明治, 高莲士. 粗粒料大型三轴试验中橡皮膜嵌入量对体变的影响及校正[J]. 水利水电技术, 2003, **34**(2): 30 - 33. (ZHANG Bing-yin, LÜ Ming-zhi, GAO Lian-shi. Correction of membrane penetration in large-scale triaxial tests for granular materials[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, **34**(2): 30 - 33. (in Chinese))
- [6] 谢婉丽, 王家鼎, 张林洪. 土石粗粒料的强度和变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(3): 430 - 437. (XIE Wan-li, WANG Jia-ding, ZHANG Lin-hong. Testing study on characteristics of strength and deformation for coarse materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(3): 430 - 437. (in Chinese))
- [7] 程展林, 丁红顺, 吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(8): 1151 - 1158. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, WU Liang-ping. Experimental study on mechanical behaviour of granular material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1151 - 1158. (in Chinese))
- [8] 李广信. 土的三维本构关系的探讨与模型验证[D]. 北京: 清华大学, 1985. (LI Guang-xin. A study of three-dimensional constitutive relationship of soils and an examination of various models[D]. Beijing: Tsinghua University, 1985. (in Chinese))
- [9] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究[J]. 河海大学学报, 1995, **23**(6): 28 - 33. (ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true triaxial test[J]. Journal of Hohai University, 1995, **23**(6): 28 - 33. (in Chinese))
- [10] 徐志伟, 殷宗泽. 粉砂侧向变形特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(5): 626 - 629. (XU Zhi-wei, YIN Zong-ze. Study on deformation characteristic of silt by true triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(5): 626 - 629. (in Chinese))
- [11] LADE Poul V, DUNCAN James M. Cubical triaxial tests on cohesionless soil[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, **99**(10): 793 - 812.
- [12] LADE Poul V, WANG Qiong. Analysis of shear banding in true triaxial tests on sand[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, **127**(8): 762 - 767.
- [13] ABELEV Andrei V, LADE Poul V. Effects of cross anisotropy on three-dimensional behavior of sand, I : stress-strain behavior and shear banding[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, **129**(2): 160 - 166.
- [14] LADE Poul V, ABELEV Andrei V. Effects of cross anisotropy on three-dimensional behavior of sand, II : volume change behavior and failure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, **129**(2): 167 - 174.
- [15] ABELEV Andrei V, LADE Poul V. Characterization of failure in cross-anisotropic soils[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, **130**(5): 599 - 606.
- [16] 许成顺, 栾茂田, 何 杨, 郭 莹, 李木国. 中主应力对饱和松砂不排水单调剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(5): 689 - 693. (XU Cheng-shun, LUAN Mao-tian, HE Yang, GUO Ying, LI Mu-guo. Effect of intermediate principal stress on undrained behavior of saturated loose sands under monotonic shearing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5): 689 - 693. (in Chinese))
- [17] 殷宗泽, 朱俊高, 刘汉龙, 等. 土工原理 [M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao, LIU Han-long, et al. Geotechnical theory and computing[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))