

多种应力路径条件下上海粉细砂的室内试验

彭芳乐^{1,2}, 白小宇^{1,3}, 雷 亮¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 深圳市地铁集团有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 通过多组排水条件下不同应力路径的平面应变压缩试验对上海粉细砂的变形强度特性进行了研究, 试验结果表明: 上海粉细砂的剪应变、体应变、塑性剪应变、塑性体应变、塑性功受应力路径的影响都比较明显, 不能作为合适的硬化参数. 根据多应力路径平面应变压缩试验结果提出了与应力路径不相关的修正塑性功参量及上海粉细砂本构模型的剪切硬化函数.

关键词: 上海粉细砂; 平面应变压缩试验; 应力路径; 硬化参数; 硬化函数

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Laboratory Experimental Study on Shanghai Fine Sand Along Different Stress Paths

PENG Fangle^{1,2}, BAI Xiaoyu^{1,3}, LEI Liang¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shenzhen Metro Co. Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: The deformation and strength behaviour of Shanghai fine sand is studied through a series of plane strain compression (PSC) tests with different stress paths. The result from the PSC tests shows that the shear strain, volumetric strain, plastic shear strain, plastic volumetric strain and plastic work are all influenced by stress path for Shanghai fine sand. Therefore, none of the above quantities can be used as appropriate hardening parameter for Shanghai fine sand. Based on the experimental results from the PSC tests for Shanghai fine sand, a modified plastic work parameter and the related function are proposed. The proposed parameter and function are independent of stress path, which can be used as the shear hardening state parameter and hardening function in

the constitutive modelling for Shanghai fine sand.

Key words: Shanghai fine sand; plane strain compression tests; stress-path; hardening parameter; hardening function

目前国外研究者对丰浦砂^[1-3]、Leighton - Buzzard 砂^[4-6], 国内研究者对承德砂^[7-8]、永定河砂^[8-9]以及福建标准砂^[10-11]均做了一定程度的研究. 对于上海粉细砂, 张问清与赵锡宏在 20 世纪 80 年代初期通过三轴排水试验对其进行了一定的研究^[12-13], 而且主要针对的是浅层粉细砂.

上海 7-2 层粉细砂为草黄色夹粉粒的粉砂土, 主要由粉砂和粉粒组成, 并夹杂少量粘粒, 含水量较高, 一般呈饱和状态. 该层粉砂是上海地区高层建筑的主要持力层, 并且随着该地区地下空间开发力度的加大, 工程中遇到粉砂层的几率越来越大, 因此有必要对该层砂土的变形强度特性进行研究. 本文以上海深层 7-2 粉细砂为研究对象, 利用一系列多应力路径平面应变压缩试验以及共振柱试验对该层粉细砂的应力应变特性以及塑性变形中的应力路径效应进行研究, 并在此基础上提出上海粉细砂应力路径不相关剪切硬化函数的形式.

1 上海粉细砂基本物理力学指标

本文所研究的砂土为上海 7-2 层粉细砂. 通过相关的岩土工程勘察报告可知, 该层砂土基本处于 30 m 以下的深层, 砂土的相对密度为 2.69. 通过对所取上海粉细砂的最大、最小孔隙比试验可得最大孔隙比 $e_{\max} = 1.185$, 最小孔隙比为 $e_{\min} = 0.533$. 图 1 为所取砂土试样的颗分曲线. 颗分试验的结果显示:

收稿日期: 2010-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(50679056, 40972176); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0378); 上海市曙光计划(05SG25); 上海市重点学科建设项目(B308)

第一作者: 彭芳乐(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土力学、基础工程及地下空间等.
E-mail: pengfangle@tongji.edu.cn

粒径大于 0.25 mm 的仅占 0.89%, 0.075 mm 以上的砂占总质量的 66.25%; 所取砂样的平均粒径为 D_{50} (下标 50 表示砂样中累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径, 下同) = 0.1 mm, D_{10} = 0.003 mm, D_{60} = 0.12 mm, D_{30} = 0.06 mm, 不均匀系数为 C_u = 40.0, 曲率系数为 C_c = 10.0. 由上述筛分试验结果可知, 相对于其他标准试验砂, 上海粉细砂颗粒未经筛分处理, 基本接近于天然状态, 其粒径较细, 以粉砂为主, 含相当数量的粉粒和少量粘粒.

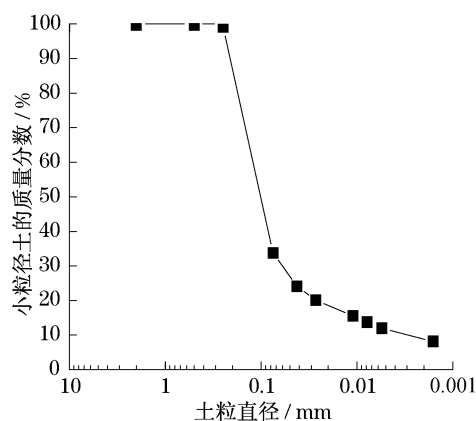


图 1 上海粉细砂的筛分曲线

Fig.1 Particle size distribution curve for Shanghai fine sand

2 上海粉细砂多应力路径平面应变压缩试验

2.1 试验仪器

本文上海粉细砂的一系列多应力路径平面应变压缩试验是在同济大学地下及岩土工程实验室自主研发的平面应变仪上进行的. 仪器与真三轴试验仪相兼容, 在真三轴试验系统的压力室内更换底座与试样帽, 增加了限制中主应力方向变形的有机玻璃刚性侧限板, 增设了小主应力方向局部侧向变形传感器(左右各两个), 并完善了计算机数据自动采集系统. 仪器主要由压力室、轴向荷载传动系统、加荷台架、气压控制装置、位移与荷载传感器、数据接收转换装置以及数据采集与处理装置等部分组成. 加载速率可以控制到 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 试验中, 竖向应力通过计算机控制的电机装置和机械传动由下往上通过压力室的传压活塞传递给试样, 竖向应力最大可加至 3 000 kPa. 小主应力则通过气压源由调压阀和精密压力表控制气体压力来完成, 最大可达 1 000 kPa. 竖向荷载的加载模式分别有应变控制式与应力控制式. 竖向和水平向应变均通过接触式位

移传感器测量, 可检测最大应变达 20%. 但是, 以上试验仪器也存在一些不足. 例如, 在等应力比试验过程中需手动控制, 且加载中因水平向应力是通过气压加载, 存在一定的滞后效应, 因而在一定程度上影响了试验数据的精度. 图 2 为同济大学真三轴兼容平面应变仪的主要试验系统以及气压装置.



图 2 同济大学平面应变仪

Fig.2 PSC apparatus of Tongji University

2.2 试样制作及试验步骤

试验中的砂土试样为 $70 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的长方体, 试样的控制孔隙比为 0.64, 即砂土试样的控制相对密度为 83.6%. 试样通过击样法在模具中分 6 层制作而成. 试样制作中对每层砂土的质量均进行了严格控制. 由于试样在压制过程中, 下层土的压缩程度往往大于上层土, 因此在试样制作过程中令每层土在模具中所占的体积由下到上逐步减少, 这样就更好地保证了试样的均匀性. 同时为了保证试样的整体性, 对两层土之间的接触面均进行了打毛处理.

试样安装、饱和之后, 在相应的围压下进行一个半小时的排水固结, 然后进行试验. 对上海粉细砂排水条件下的平面应变压缩试验包含围压为 100, 200, 300, 400 kPa 的常规应力路径, 以及两条等应力比 ($R = \sigma'_v / \sigma'_h$ 分别等于 2.0 和 3.0, 其中 σ'_v 为竖直方向的主应力, σ'_h 为水平方向的主应力) 的应力路径. 常规应力路径分别为试样在 100, 200, 300, 400 kPa 围压作用下固结, 然后保持围压 σ'_h 不变, 增加竖向应力 σ'_v 一直到试样进入残余状态. 在等应力比应力路径中, 试样先在 $\sigma'_h = 30 \text{ kPa}$ 的围压作用下固结, 在 σ'_h 不变的条件下增加 σ'_v 分别到 $\sigma'_v / \sigma'_h = 2.0$ 或 3.0, 然后保持这一应力比不变同时增加 σ'_h 与 σ'_v , 保持等应力比加载到 $\sigma'_h = 400 \text{ kPa}$ 时保持 σ'_h 不变, 增加竖向应力 σ'_v 剪切试样至破坏, 如图 3 所示.

常规应力路径试验的加载速率均为 $0.08 \text{ mm} \cdot$

min^{-1} . 等应力比应力路径试验中,为了保证试样不会由于加载速率过大而出现破坏,在 $\sigma'_h = 400 \text{ kPa}$ 之前,加载速率设为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $\sigma'_h = 400 \text{ kPa}$ 之后加载速率变为 $0.08 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

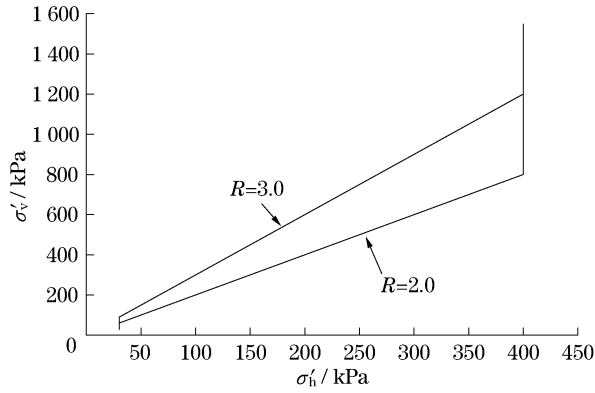


图 3 等应力比应力路径

Fig.3 Stress path in constant stress ratio (R)

在试验数据处理时采用以下应变计算方法:

$$\text{应变} = - \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \times 100\% = - \ln(l/l_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: l_0 为试样的初始长度; l 为试样的当前长度. 试样竖向与水平向的变形可分别通过与试验数据采集装置连接的计算机自动采集获得.

3 试验结果分析

图 4 与图 5 分别为上海粉细砂在围压为 100, 200, 300, 400 kPa 的常规应力路径下得到的剪应变 γ 与应力比关系以及体应变与应力比的关系. 由图 4 可知,随着围压的增加,上海粉细砂的峰值应力比相应下降,软化程度逐渐降低. 由图 5 可知,随着围压

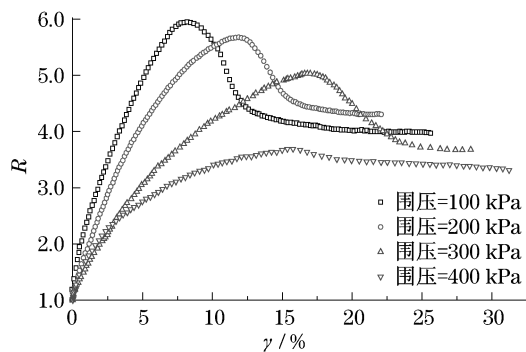


图 4 常规应力路径不同围压下的剪应变与应力比关系

Fig.4 Relation between shear strain and stress ratio with different confining pressures (conventional stress path)

的增加,上海粉细砂的峰值压缩体应变 ϵ_{vol} 逐渐增加,剪胀程度逐渐减弱. 图 6 与图 7 为等应力比应力路径 $R = \sigma'_v/\sigma'_h = 2.0$ 和 3.0 得到的试验结果.

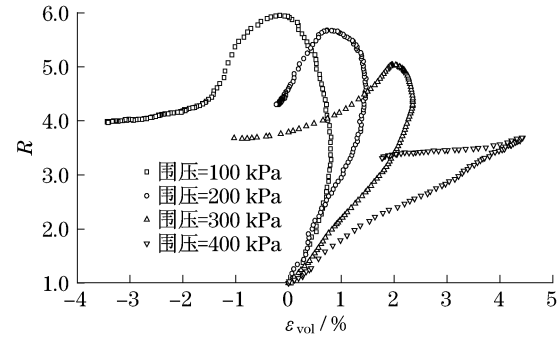


图 5 常规应力路径不同围压下的体应变与应力比关系

Fig.5 Relation between volumetric strain and stress ratio with different confining pressures (conventional stress path)

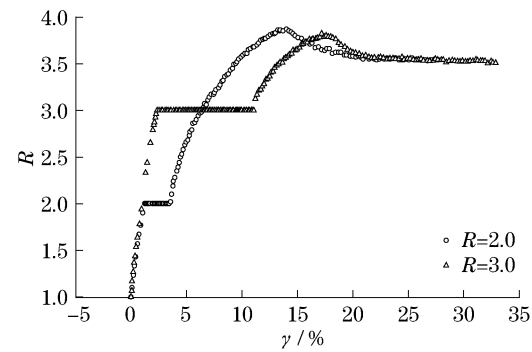


图 6 等应力比应力路径下的剪应变与应力比关系

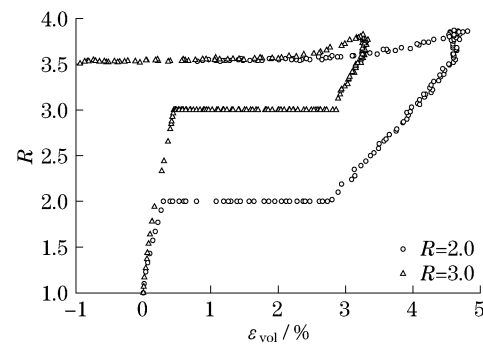
Fig.6 Relation between shear strain and stress ratio (stress path in constant stress ratio (R))

图 7 等应力比应力路径下的体应变与应力比关系

Fig.7 Relation between volumetric strain and stress ratio (stress path in constant stress ratio (R))

由图 4~7 可以看出,当围压等于 400 kPa 时,在相同的应力状态下,上海粉细砂的剪应变 γ 和体应变 ϵ_{vol} 都由于应力路径的不同而出现明显差异. 这说明剪应变 γ 和体应变 ϵ_{vol} 与应力路径存在比较大的

相关性.

接下来本文将对上海粉细砂塑性变量与应力路径的相关性进行分析. 以下塑性应变是通过“总应变-弹性应变”获得的. 本文所用弹性模型为各向同性的弹性模型, 模型假定泊松比 γ 等于 0.3, 并考虑了应力水平对弹性模量的影响. 弹性剪切模量 G^e 可通过以下关系式^[14]得出:

$$G^e = G_0 f_e(e) (p'/p'_a)^m p'_a \quad (2)$$

式中: G_0 和 m 是与材料性质有关的常数; $f_e(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e)$, e 为孔隙比; p' 为平均主应力, $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3$, $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 分别为第一, 第二, 第三有效主应力; p'_a 为大气压力, 等于 98.1 kPa.

本文上海粉细砂的弹性剪切模量是通过同济大学共振柱试验仪在 10^{-6} 的应变范围内获得的, 试验所用围压分别为 50, 100, 200, 400 kPa. 孔隙比为 0.64 的上海粉细砂共振柱试验结果及其拟合曲线见图 8, 通过试验可得 $m = 0.5$, $G_0 = 430$.

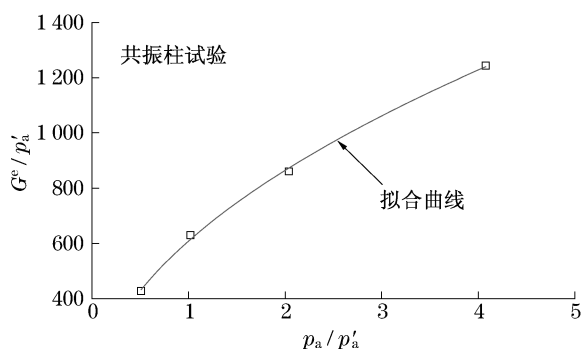


图 8 归一化的平均应力与弹性剪切模量关系

Fig.8 Relation between mean stress and elastic shear modulus (normalized)

Iwasaki 和 Tatsuoka 的共振柱试验研究^[14]与 Tatsuoka 和 Shibuya 以及 Park 和 Tatsuoka 的试验研究^[15-16]表明, 对于砂土, 动荷载试验确定的剪切模量与由循环荷载以及单调静载下所得结果是一致的.

图 9 和图 10 分别为常规应力路径作用下塑性剪应变 γ^p 、塑性体应变 ϵ_{vol}^p 与应力比 R 的关系. 图 11 和图 12 分别为等应力比应力路径作用下塑性剪应变 γ^p 、塑性体应变 ϵ_{vol}^p 与应力比 R 的关系.

由图 4~7 与图 9~12 的比较可知, 上海粉细砂的弹性变形对总体变形有一定的影响, 但这种影响相对较小. 与总应变一样, 塑性剪应变和塑性体积应变也受应力路径的影响. 对于上海粉细砂, 剪应变、塑性剪应变以及体应变、塑性体应变都不是与应力状态唯一对应的量, 直接将上述参量作为硬化参数

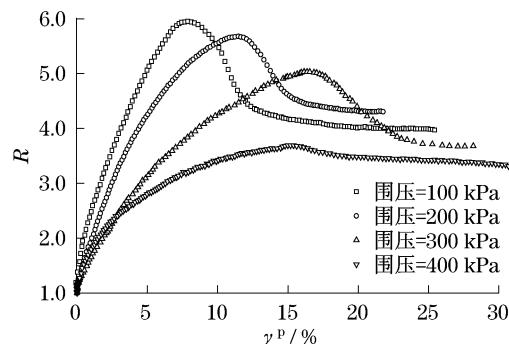


图 9 常规应力路径不同围压下的塑性剪应变与应力比关系

Fig.9 Relation between plastic shear strain and stress ratio with different confining pressures (conventional stress path)

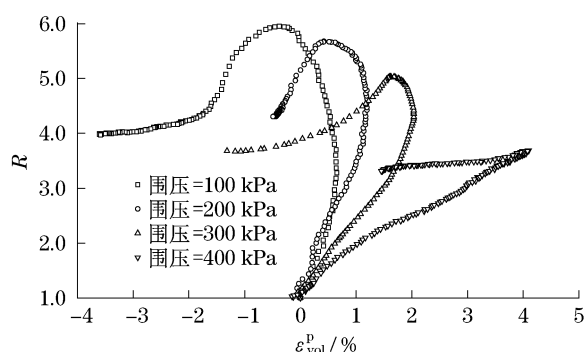


图 10 常规应力路径不同围压下的塑性体应变与应力比关系

Fig.10 Relation between plastic volumetric strain and stress ratio with different confining pressures (conventional stress path)

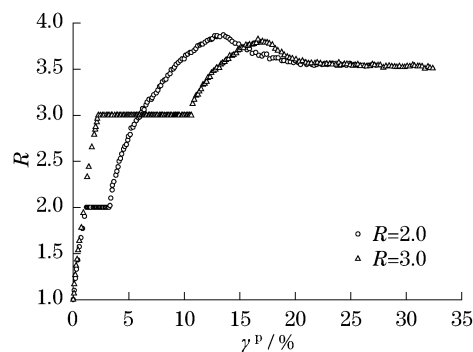


图 11 等应力比应力路径下的塑性剪应变与应力比关系

Fig.11 Relation between plastic shear strain and stress ratio (stress path in constant stress ratio (R))

是不合适的. 图 13 为不同应力路径下归一化的塑性功 W^p/p'_a 与 s/p'_a 的关系. 平面应变条件下的塑性功为

$$W^p = \int (t d\gamma^p + s d\epsilon_{vol}^p) \quad (3)$$

式中: $t = (\sigma'_v - \sigma'_h) / 2$; $s = (\sigma'_v + \sigma'_h) / 2$.

从图 13 可知,对上海粉细砂,不同应力路径下相同应力状态的塑性功也有明显的差异,塑性功也存在一定的应力路径效应,因此将塑性功作为硬化参数也不合理.

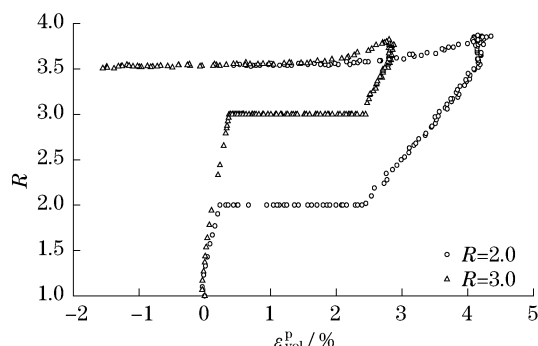


图 12 等应力比应力路径下的塑性体应变与应力比关系
Fig.12 Relation between plastic volumetric strain and stress ratio (stress path in constant stress ratio (R))

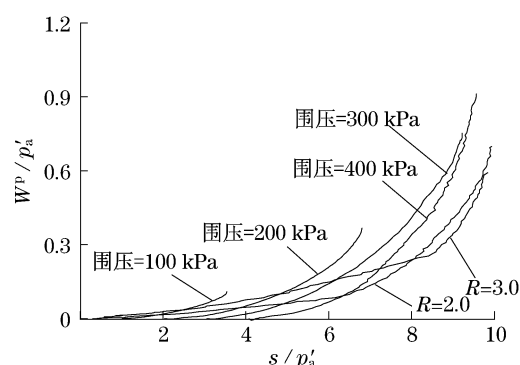


图 13 不同应力路径峰值前 s/p'_a 和 W^p/p'_a 的关系
Fig.13 Relationship between s/p'_a and W^p/p'_a of different stress-paths at pre-peak

4 上海粉细砂应力路径不相关的硬化函数

文献[17]在对丰浦砂塑性变形的分析中,提出了应力路径不相关修正塑性功的硬化函数的形式.本文将这一思路应用到对上海粉细砂的分析中,找出峰值前针对上海粉细砂的应力路径不相关硬化函数的形式,从而合理地将应力路径效应考虑到对上海粉细砂峰值前的变形强度分析中.

首先提出一个修正的塑性功 W^{p*} ,它具有以下的形式:

$$W^{p*} = \int [t d\gamma^p + s d\epsilon_{vol}^p] / (s/p'_a)^n \quad (4)$$

假定与它相对应的应力状态参数形式为

$$X = t/s + r \ln (s/p'_a) \quad (5)$$

式(4)与(5)中: n 和 r 为常数.调整 n 和 r 值令式(4)的修正塑性功参量 W^{p*} 以及式(5)的应力状态参数 X 在不同应力路径下满足唯一对应的条件,则此时的 W^{p*} 即为满足与应力状态 X 唯一对应的硬化参数,得到的 X 与 W^{p*} 关系式就是满足唯一性要求的硬化函数.利用上述上海粉细砂平面应变压缩试验结果,通过反复的试算可以发现,当 $n=0.4$, $r=0.6$ 时,不同应力路径下得出的 X 与 W^{p*}/p'_a 的关系基本趋向一致(图 14),即 X 与 W^{p*}/p'_a 的关系受应力路径的影响很小,基本上满足硬化参数唯一性的要求,二者此时的关系可作为应力路径无关的硬化函数.

通过对图 13 试验数据的拟合,可知上海粉细砂与应力路径无关剪切硬化函数的形式(图 15)为

$$X = a \ln \left(\frac{W^{p*}}{b p'_a} + h \right) \quad (6)$$

式中: $a=0.2774$; $b=2.5 \times 10^{-4}$; $h=-24.32$.式(6)即为上海粉细砂与应力路径不相关的硬化函数.

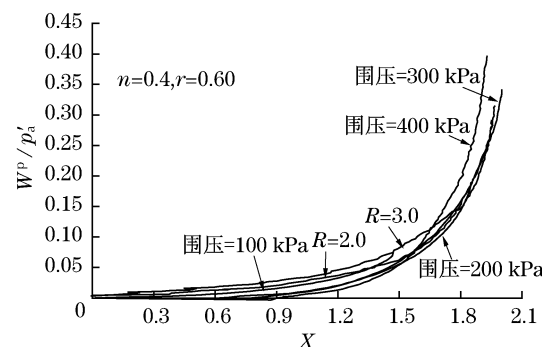


图 14 不同应力路径峰值 X 和 W^{p*}/p'_a 的关系
Fig.14 Relationship between X and W^{p*}/p'_a of different stress-paths at pre-peak

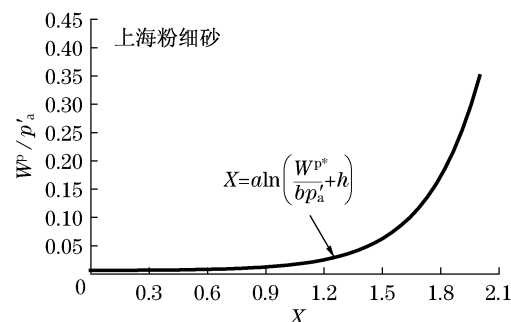


图 15 峰值前修正塑性功剪切硬化函数
Fig.15 Modified plastic work shear hardening function at pre-peak

5 结论

本文对 7-2 层上海粉细砂进行了一系列试验,研究了该层砂土的变形强度特性.通过排水条件下多应力路径平面应变压缩试验可知,上海粉细砂的剪切应变量、体积应变量、塑性剪应变、塑性体应变和塑性功都明显受到了应力路径的影响.因此将这些状态量作为上海粉细砂的硬化参量是不合理的.

基于上述平面应变压缩试验结果,提出一个修正塑性功参量 W^p 以及相应的应力状态参数 X .通过对 W^p 与 X 中参数 n 和 r 的调整,令 W^p 与 X 在不同应力路径下都能唯一对应,得出 X 与 W^p/p'_a 关系不受应力路径的影响,可以作为上海粉细砂应力路径不相关的硬化函数.

参考文献:

- [1] Tatsuoka F, Sakamoto M, Kawamura T, et al. Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures[J]. *Soils and Foundations*, 1986, 26(1): 65.
- [2] Tatsuoka F, Siddiquee M S A, Park C, et al. Modeling stress-strain relations of sand[J]. *Soils and Foundations*, 1993, 33(2): 60.
- [3] Yasin S J M, Tatsuoka F. Stress history-dependent deformation characteristics of dense sand in plane strain [J]. *Soils and Foundations*, 2000, 40(2): 77.
- [4] Stroud M A. The behaviour of sand at low stress levels in the simple shear apparatus [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1971.
- [5] Wood D M, Budhu M. The behaviour of Leighton Buzzard sand in cyclic simple shear tests[C]// *International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading*. Rotterdam: Balkema A A, 1980: 9-21.
- [6] Bolton M D, Wilson J M R. An experimental and theoretical comparison between static and dynamic torsional soil tests[J]. *Geotechnique*, 1989, 39(1): 585.
- [7] 黄文熙, 濮家骝, 陈愈炯. 土的硬化规律和屈服函数[J]. *岩土工程学报*, 1981, 3(3): 19.
HUANG Wenxi, PU Jialiu, CHEN Yujiong. Hardening rule and yield function for soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1981, 3(3): 19.
- [8] 郭瑞平, 李广信, 阪上最一. 土的应变软化模型及其在边值问题中的应用[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2000, 40(8): 106.
Guo Ruiping, Li Guangxin, Sakajo S. Constitutive model for soil with strain-softening behavior and its application in boundary value problems[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2000, 40(8): 106.
- [9] 郭瑞平, 李广信. 以塑性功函数为硬化参数的土的弹塑性模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2000, 40(5): 125.
GUO Ruiping, LI Guangxin. Elastoplastic model of soil with a function of plastic work as the hardening function[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2000, 40(5): 125.
- [10] 谢定义, 姚仰平, 陈存礼. 饱和砂土的应力-应变特性的试验研究[J]. *陕西水力发电*, 1994, 10(1): 1.
XIE Dingyi, YAO Yangping, CHEN Cunli. The research of relation of stress ratio-strain increment ratio for saturated sand [J]. *Journal of Shaanxi Water Power*, 1994, 10(1): 1.
- [11] 冷艺, 栾茂田, 许成顺, 等. 应力历史对饱和砂土力学性状影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(5): 1257.
LENG Yi, LUAN Maotian, XU Chengshun, et al. Experimental study of effect of stress history on mechanical properties of saturated sand under complex stress conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1257.
- [12] 张问清, 赵锡宏, 董建国. 上海粉砂土弹塑性应力-应变模型的探讨[J]. *岩土工程学报*, 1982, 4(4): 159.
ZHANG Wenqing, ZHAO Xihong, DONG Jianguo. A study of elastoplastic model for Shanghai silty-sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, 4(1): 159.
- [13] 张问清, 赵锡宏, 董建国. 上海粉砂土地基(弹塑性模型)与高层建筑箱型基础的共同作用[J]. *建筑结构学报*, 1982, 4: 50.
ZHANG Wenqing, ZHAO Xihong, DONG Jianguo. A study of interaction between silty-sand (elastoplastic model) and box foundation for tall buildings in Shanghai[J]. *Journal of Building Structures*, 1982, 4: 50.
- [14] Iwasaki T, Tatsuoka F. Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading [J]. *Soils and Foundations*, 1978, 18(1): 39.
- [15] Tatsuoka F, Shibuya S. Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests[C]// *Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Bangkok: Southeast Asian Geotechnical Society, 1991: 101-170.
- [16] Park C S, Tatsuoka F. Anisotropic strength and deformations of sands in plane strain compression[C]// *Proceeding of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New Delhi: A. A Balkema, 1994, 13(1): 1-4.
- [17] 彭芳乐, 白晓宇, 亚辛, 等. 砂土应力路径不相关的修正塑性功硬化参量与函数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1171.
Peng F L, Bai X Y, Yasin S J M, et al. A modified plastic-work hardening parameter and function independent of stress path for sandy soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1171.