

考虑初始各向异性的砂土弹塑性本构模型及试验验证

许成顺^{1, 2}, 栾茂田², 郭莹², 张振东²

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100022; 2. 大连理工大学土木水利学院岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于复杂应力条件下的试验结果, 就针对不同主应力方向对应力-应变关系的影响进行了试验研究, 并在此基础上结合状态概念提出了基于应力-剪胀关系和应力-应变拟双曲线关系的弹塑性本构模型。利用应力-应变拟双曲线关系描述了主应力方向对有效应力路径、应力-应变发展模式的影响, 并通过常规三轴试验测定了试验参数, 同时与试验结果进行对比, 说明基于状态概念, 引入状态参数, 利用主应力方向对塑性模量的影响, 能够同时描述初始物理状态及初始各向异性对砂土应力-应变关系的影响。

关键词: 弹塑性本构模型; 各向异性; 剪胀剪缩; 临界状态; 孔隙比

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)04-0546-06

作者简介: 许成顺(1977-), 女, 黑龙江海林人, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学基本理论与数值分析、海洋土力学理论与实验技术等方面的教学与科学研究工作。E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn。

Elasto-plastic constitutive model of sand considering initial anisotropy and its verification through experiments

XU Cheng-shun^{1, 2}, LUAN Mao-tian², GUO Ying^{1, 2}, ZHANG Zhen-dong²

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100022,

China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian

116024, China)

Abstract: Based on the results of test under complex stress, the relationship of stress-strain under the principal stress with different directions is studied through experiments, and according to this, combined with the concept of state, an elasto-plastic constitutive model based on relationship of stress-dilatancy and simulated hyperbolic relationship of stress-strain is put forward. The effect of direction of the principal stress on the effective stress path and the evolution mode of stress-strain is described by use of simulated hyperbolic relationship of stress-strain. The experimental parameters are determined by conventional triaxial tests. It is shown by comparison between the calculated and measured results that introducing the state parameters based on the concept of state and using the effect of the direction of principal stress on the plastic modulus, the effect of the initial physical state and initial anisotropy on the stress-strain relationship of sand can be described.

Key words: elasto-plastic constitutive model; anisotropy; dilatancy; critical state; void ratio

0 引言

众所周知, 砂土的应力-应变特性与相对密度和有效围压密切相关。根据其初始条件不同, 表现出剪胀或剪缩。已有的试验资料表明, 相同围压下的剪切过程中, 相对密度较低的砂易剪缩, 相对密度较高的砂易剪胀; 相同相对密度的砂, 在低围压下可能剪胀, 在高围压下则可能剪缩^[1-5]。在加载过程中, 材料的相对密度或有效围压会发生变化, 从而导致材料物理状态(简称物态)的改变。而砂土的循环流动性与剪胀剪缩特性直接相关, 且沿着循环流动或应变软化将会引起很大的变形。Vaid 和 Thomas 指出^[6], 这种状态下的应力-应变关系, 在评估土工结构液化的空

间发展及地震中或地震后的位移时是十分关键的因素。以往的一些砂土本构模型, 均采用相对密度作为指标, 将不同初始密度的同一种砂视为不同的材料。模型参数因初始密度不同而取不同值, 忽视了加载过程中材料物态的改变, 不能很好地描述砂土受力过程中密度和围压变化较大的情况。近年来一些学者将状态参数引入到砂土的本构模型。Been^[7]和 Jefferies^[8]在临界状态理论的基础上, 最早提出了状态参数的概念。状态参数用来反映材料的松密状态, 由相对密度

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50639010); 国家自然科学基金项目(50579006)

收稿日期: 2008-03-10

和有效围压两个因素共同确定。状态参数的引入, 使建立的本构模型能够考虑加载过程中与材料状态变化相关的力学行为。利用状态概念, 在临界状态土力学框架的基础上, Wood^[1], Li^[10-11], Cubrinovski M, Ishihara K^[12], 罗刚^[3]等人分别发展了本构模型。而 Yoshimine M^[13], 栾茂田等^[14]对福建标准松砂进行复杂应力条件下的试验结果表明, 初始固结主应力方向对砂土的剪胀剪缩特性的影响也十分显著。相同围压, 相同密度条件下, 大主应力方向偏离竖向越大, 其剪缩特性越显著。

本文为了同时考虑密度和有效应力对于砂土状态的影响及主应力方向、初始固结应力比对剪胀剪缩、应变硬化软化特性的影响, 预想结合状态概念, 将依赖于主应力方向的两个参数为基本参数的应力比-应变关系作为基本物理关系, 得到考虑密度、侧限应力、主应力方向及初始固结应力比的弹塑性本构模型, 并对试验进行模拟。

1 本构模型研究

试验结果表明^[13-14], 砂土的应力-应变特性不仅与相对密度和有效围压密切相关, 且对主应力方向的依赖性十分显著。又如文献[2]指出砂土的流动势受剪切模式的影响十分显著, 对于相同密度的砂, 三轴压缩中流动势最低, 三轴拉伸中最高, 单剪条件下介于其中。种种试验结果, 大主应力方向对砂土剪切特性的影响十分显著。本文在引入状态参数的基础上, 就针对主应力方向的影响, 对应力-应变本构模型进行了改进。

1.1 状态参数

首先引入描述物理密度的状态参数 ψ 。在临界状态土力学中, 临界状态是指土保持常应力和常体积同时剪切变形不断发展的状态。达到临界状态必须满足两个条件: 一是应力比达到临界应力比, 二是孔隙比也同时达到临界孔隙比, 两者缺一不可。其中临界孔隙比与压力相关, 可表示为

$$e_c = e_T - \lambda_c \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi$$

砂土在有效应力作用下的松密程度可通过相对于临界孔隙比的状态参数来表示, 如下

$$\psi = e - e_c = e - \left[e_T - \lambda_c \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi \right] \quad (1)$$

1.2 应力-应变-剪胀方程

砂土的塑性状态由应力-应变双曲线关系和依赖于状态参数的应力-剪胀关系来确定, 即

$$d = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_q^p},$$

式中, $d\epsilon_v^p$ 和 $d\epsilon_q^p$ 分别为塑性体应变增量和塑性剪应

变增量。通常认为剪胀比只与应力比有关, 因此在剪胀方程中往往仅包含塑性应变增量比与应力比之间的关系, 这对于黏土是适用的。而近期研究表明: 对于砂土剪胀比不仅与应力比有关, 而且还依赖于材料的物理状态。根据密实度的不同, 砂土会出现不同物态转换这一特性。但剑桥模型无法模拟这种依赖于物态的剪胀剪缩特性。在前人的研究基础上, 李相崧等^[10-11]提出了下列剪胀方程

$$d = \frac{d_0}{M_c} [M_c \exp(m\psi) - \eta] \quad (2)$$

式中, M_c 为临界应力比。当砂土达到临界应力状态时, $\psi = e - e_c = 0$, $\eta = M_c$, 此时剪胀比也为 0, 显然此应力-剪胀方程符合了稳态物理意义。可以看出原始剑桥模型剪胀特性 $d = M - \eta$ 是方程 (2) 的特殊形式 ($d_0 = M_c, m = 0$)。

另一方面, 试验结果表明, 应力比和广义剪应变之间近似地服从拟双曲线关系, 并且这种关系似乎与主应力方向及应变硬化或软化特性无关。于是当忽略弹性剪切变形时, 应力-应变关系为

$$\frac{\eta - \eta_0}{M_p - \eta_0} = \frac{G_N \gamma_g}{M_p + G_N \gamma_g} \approx \frac{G_N \epsilon_q^p}{M_p + G_N \epsilon_q^p} \quad (3)$$

式中 M_p 为应力比-应变曲线的峰值应力比。 G_N 为塑性模量, 参考 Cubrinovski Misiko 模型^[12], 可通过下式确定

$$G_N = (G_{N,\max} - G_{N,\min}) \exp \left(-f \frac{\epsilon_q^p}{\epsilon_q^0} \right) + G_{N,\min} \quad (4)$$

即 G_N 依赖于塑性变形, 随塑性应变的增长逐渐减小。式中参数 $G_{N,\max}$ 、 $G_{N,\min}$ 依赖于大主应力方向, 分别表示在小应变和大应变情况下的最优标准初始塑性模量。 η_0 表示初始固结偏应力比, 可描述非均等固结情况。相应地, ϵ_q^0 是当 G_N 接近于 $G_{N,\min}$, 且 f 接近常数时的塑性剪应变。这里 f 控制塑性模量 G_N 从 $G_{N,\max}$ 到 $G_{N,\min}$ 时相应的塑性剪应变的范围, f 一般取值不小于 3。当假定塑性剪应变固定在 0.01 时, f 值也是恒定的。

对于应力-应变曲线的峰值应力比 M_p 本文做两种解释。因为本文不排水剪切过程由于传感器量程的原因, 剪切过程没有进行到发生很大变形, 但应力比-应变关系中可看到, 其趋势基本稳定, 且 M_p 依赖于大主应力方向。而按照临界状态土力学概念, 当砂土趋于稳定状态时, 变形发展很大, 其初始结构基本破坏, 最终稳定应力比应是唯一的。即若继续剪切可能会出现应力跌落现象。或在三轴排水条件下应力比-应变曲线也有可能出现应力比降低现象。针对这种情况可以采用 wood 等^[9]提出的方法, 即

$$M_p = M_c - k\psi$$

此时式中参数 k 依赖于大主应力方向。

本文暂时以试验结果为标准, 取 $M_p = M_c$, 即应力比依赖于大主应力方向。

1.3 一般本构方程

对于弹塑性模型, 根据 $d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p$, 通常假定总的应变增量由弹性部分和塑性部分组成, 当进一步假设弹性变形线性且各向同性, 则砂土变形响应中的各向异性部分由塑性变形决定。假定加载函数为

$$f = q - \eta p' = 0, \quad (5)$$

则根据相关联流动法则, 得到塑性应变增量为

$$d\epsilon_{ij}^p = \langle L \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \left\langle \frac{1}{H_p} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\epsilon_{ij} \right\rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}},$$

进一步地, 得到

$$d\epsilon_q^p = L, \quad (6)$$

根据一致性相容条件得到

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \epsilon_q^p} d\epsilon_q^p = 0,$$

$$LH_p + \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \epsilon_q^p} d\epsilon_q^p = 0,$$

即可得到塑性变形模量为

$$H_p = - \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \epsilon_q^p}, \quad (6)$$

进一步地

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_N}{\partial \epsilon_q^p} &= (G_{N,\max} - G_{N,\min}) \exp \left(-f \frac{\epsilon_q^p}{\epsilon_q^0} \right) \cdot \left(-\frac{f}{\epsilon_q^0} \right) \\ &= \left(-\frac{f}{\epsilon_q^0} \right) (G_N - G_{N,\min}), \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial \epsilon_q^p} &= (M_p - \eta_0) M_p \frac{\frac{\partial G_N}{\partial \epsilon_q^p} \epsilon_q^p + G_N}{(M_p + G_N \epsilon_q^p)^2} \\ &= \frac{M_p}{(M_p - \eta_0)} \left[G_N - f \frac{\epsilon_q^p}{\epsilon_q^0} (G_N - G_{N,\min}) \right] \left(1 - \frac{\eta}{M_p} \right)^2. \end{aligned} \quad (7b)$$

由此得到依赖于变形的塑性硬化模量为

$$H_p = p' \frac{M_p}{(M_p - \eta_0)} \left[G_N - f \frac{\epsilon_q^p}{\epsilon_q^0} (G_N - G_{N,\min}) \right] \left(1 - \frac{\eta}{M_p} \right)^2.$$

因此,

$$d\epsilon_q^p = L = \frac{1}{H_p} \left(\frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial q} dq \right) = \frac{1}{H_p} (dq - \eta dp), \quad (8a)$$

$$d\epsilon_v^p = Ld = \frac{d}{H_p} (dq - \eta dp), \quad (8b)$$

进一步地,

$$\begin{aligned} d\epsilon_q &= d\epsilon_q^e + d\epsilon_q^p = \frac{dq}{3G} + \frac{1}{H_p} (dq - \eta dp) \\ &= \left(\frac{1}{3G} + \frac{1}{H_p} \right) dq - \frac{\eta}{H_p} dp, \end{aligned}$$

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p = \frac{dp}{K} + \frac{d}{H_p} (dq - \eta dp)$$

$$= \frac{d}{H_p} dq + \left(\frac{1}{K} - \frac{\eta d}{H_p} \right) dp.$$

式中, 弹性剪切模量和弹性体积模量可通过下式确定

$$G = G_0 p_a \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \sqrt{\frac{p'}{p_a}}, \quad (9)$$

$$K = G \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}, \quad (10)$$

进一步地,

$$\left. \begin{aligned} dq &= \frac{D}{A+B} d\epsilon_q + \frac{C}{A+B} d\epsilon_v, \\ dp &= \frac{-BD}{A+B} d\epsilon_q + \frac{AC}{A+B} d\epsilon_v, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中

$$A = \frac{H_p + 3G}{3G\eta}, \quad B = \frac{Kd}{H_p - K\eta d}, \quad C = \frac{KH_p}{H_p - K\eta d},$$

$$D = \frac{H_p}{\eta}.$$

1.4 材料参数的确定

本文提出的模型共有 10 个参数。其中临界状态参数包括 M_c , e_Γ , λ_c 和 ξ , 这些参数可通过常规三轴不排水剪切试验或三轴排水剪切试验确定。但如图 1(a) 所示, 对于福建标准砂, 在临界孔隙比和平均有效应力空间, 稳态线并不唯一。

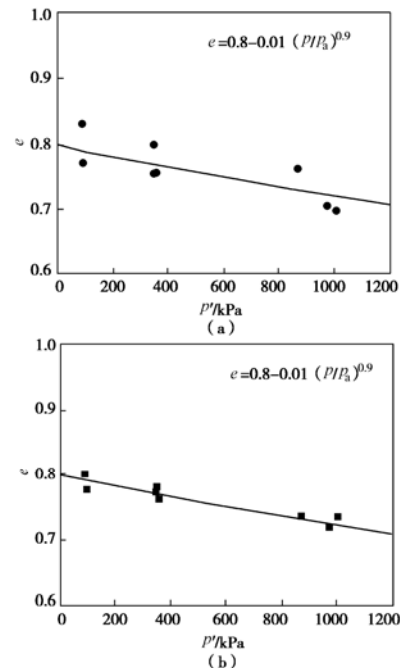


图 1 在 $e-p'$ 空间中的稳态状态线

Fig. 1 Ultimate steady state line in $e-p'$ space

对于此, 参考栾茂田等^[15]的修正方法进行修正,

$$e = \tilde{e} \frac{R_c}{R_{cr}}.$$

其中 e 和 $\tilde{e}$ 分别为归一化前后的稳态状态孔隙比; R_c 和 R_{c_r} 分别为原始相对压实度 (即土的干密度和最大干密度之比) 和参考相对压实度, 本文取参考相对压实度为 90%。归一化后的稳态线可认为是唯一的, 并不依赖于物理状态, 如图 1 (b) 所示。在 $q_{ss} - p'_{ss}$ 空间可认为稳态线唯一, 如图 2 所示。

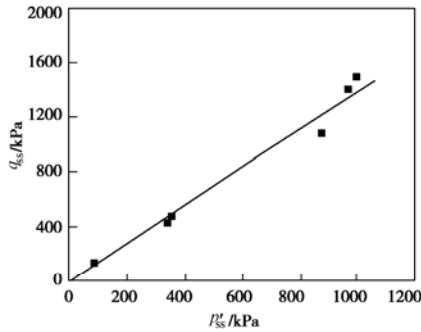


图 2 在 $q_{ss} - p'_{ss}$ 空间中的稳态线

Fig. 2 Ultimate steady state line in $q_{ss} - p'_{ss}$ space

关于剪胀特性的参数包括 m 和 d_0 , 参数 m 可通过式 (2) 中 d 等于零时即在物态转换状态的关系式确定, 即 $m = 1/\psi^d \ln(M^d / M_c)$, 可通过不排水扭剪试验的物态转换状态确定 m 值。参数 d_0 可通过排水剪切试验中当忽略弹性变形时的 $\varepsilon_v - \varepsilon_q$ 关系中确定。

弹性参数包括泊松比 ν 和最大剪切模量常数 G_0 , 这里泊松比取 0.2, G_0 可通过常规三轴排水剪切试验确定。图 3 (a) 表示在三轴排水剪切条件下, 针对不同围压及不同相对密度下所测得的剪切模量, 再通过式 (9) 得到的常数 G_0 如图 3 (b) 所示, 可见大约在 60~65 左右。

关于假定的应力 - 应变关系的参数包括 M_p 和 $G_{N, \max}$, $G_{N, \min}$; $G_{N, \max}$, $G_{N, \min}$ 可通过剪切模量获得, 分别对应的变形为 0.01% 和 1%。如图 4 (a) 所示, 为了较好地模拟微小变形阶段和较大变形阶段的应力 - 应变关系, 特别选取此两个参数。这里 $G_{N, \max}$ 是应力比 - 应变关系的初始斜率, 此时变形非常小, 有效应力也与初始固结应力相同, 因此 $G_{N, \max}$ 可通过剪切模量与初始固结应力的比值计算得到。文献[16]指出主应力方向对初始最大剪切模量没有显著的影响, 但对应于 0.01% 变形的剪切模量可能还是稍有影响, 可适当调整, 这种影响并不显著。而当变形增大时, 剪切模量明显依赖于初始各向异性, 即这里 $G_{N, \min}$ 依赖于大主应力方向, 通过试验实测得到的参数如图 4 (b) 所示, 可见与主应力方向近似地服从线性依赖关系, 可用式 (13) 表示。参数 f 来确定塑性应变的范围, 一般不小于 3。试验结果表明 M_p 依赖于大主应力方向, 随着大主应力方向的偏转, M_p 值具有减小的趋势。通过复杂应力条件下的不排水剪切试验所实测得到的值如图 5 所示, 可见与主应力方向近似地服从线性依赖

关系, 且当大主应力在竖向时, 与三轴排水试验得到的结果基本接近 (图 2), 可用式 (14) 表示。这里特别指出, 本文采用 $M_p = M_c$, 且对于任何密实度、任何初始固结压力, 临界状态线是唯一的, 但是对于初始各向异性, 临界状态线可能并不唯一。

$$G_{N, \min} = B1 - B2 \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

$$M_p = C1 - C2 \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

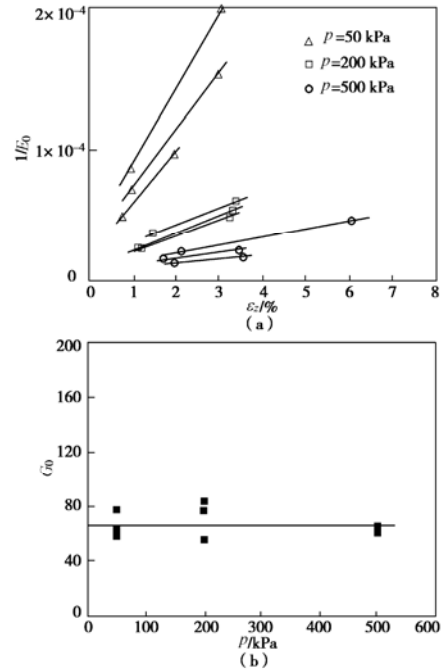


图 3 弹性参数的确定

Fig. 3 Determination of elastic parameters

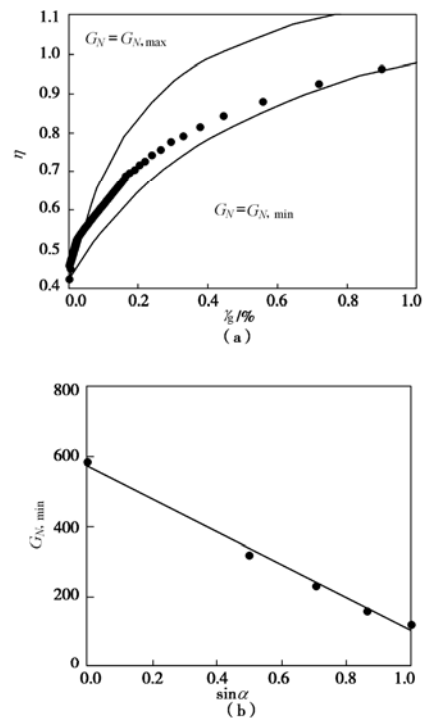


图 4 参数 $G_{N, \min}$ 的确定

Fig. 4 Determination of parameter $G_{N, \min}$

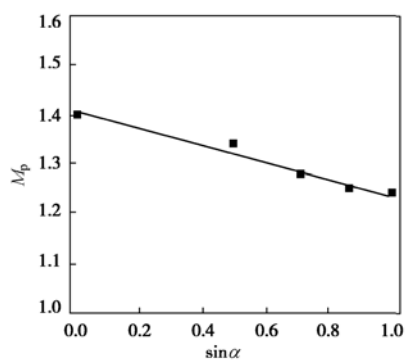


图 5 参数 M_p 的确定

Fig. 5 Determination of parameter M_p

通过上述确定方法得到的实测参数值列于表 1。

表 1 本构模型的实测参数值

Table 1 Measured parameters of constitutive model

	参数	参数取值	相应方程
弹性参数	G_0	65.00	公式(9)
	ν	0.20	公式(10)
	ξ	0.88	
状态参数	e_r	0.80	公式(1)
	λ_c	0.01	
	d_0	1.07	公式(2)
剪胀参数	d_0, m	2.80	公式(2)
	f	4.00	公式(7)
应力 - 应变关系参数	$B1, B2$	630, 490	公式(13)
	$C1, C2$	1.4, 0.18	公式(14)

2 模型的试验验证

2.1 非均等固结情况

当用上述方法确定参数所模拟得到的有效应力路径及应力 - 应变关系如图 6 所示。试验实测的砂土实际应力 - 应变关系如图 7 所示。可见本文提出的弹塑性本构模型能够较准确地描述非均等固结条件下，大主应力方向对砂土的剪胀剪缩、应变硬化 - 软化特性及应力 - 应变关系的影响，即较好地反映了初始各向异性对砂土不排水剪切特性的影响。

2.2 均等固结情况

对于均等固结情况，本文进行了单调扭剪试验，此时大主应力方向与竖向之间的夹角为 45° 。文献[16]指出初始固结偏应力比对剪切模量的影响较大，随着初始固结偏应力比的增大，其最大剪切模量具有减小

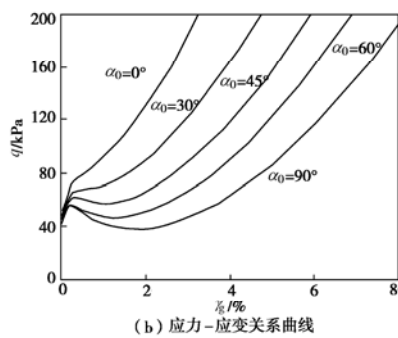


图 6 不排水及不同主应力方向条件下的剪切特性拟合曲线
Fig. 6 Fitting curves of shear properties under undrained condition with different directions of principal stress

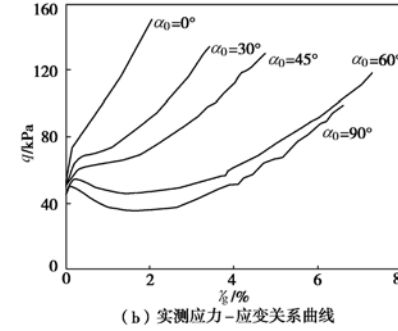
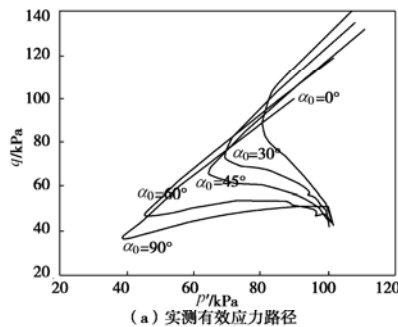
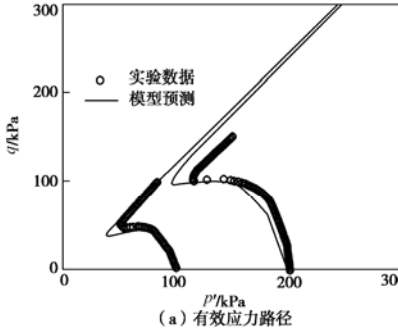
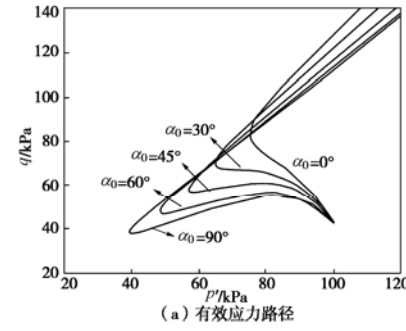


图 7 不排水条件下的实测剪切特性

Fig. 7 Measured shear properties under undrained conditions 的趋势。因此这里参数 $G_{N,max}$, $G_{N,min}$ 也应作适当的调整（但是调整幅度不大）。其余参数不需改变。有效应力路径及应力 - 应变关系的实测值与用本文模型模拟得到的情况如图 8 所示。这里对于 $p_m=200$ kPa 的情况，由于参数 M_c 与实测偏应力比峰值 M_p 有所差异，因此有效应力路径有所偏离。但总体趋势上，本文提出的模型能够较好地反映均等固结情况下不同固结围压时的砂土不排水剪切特性。



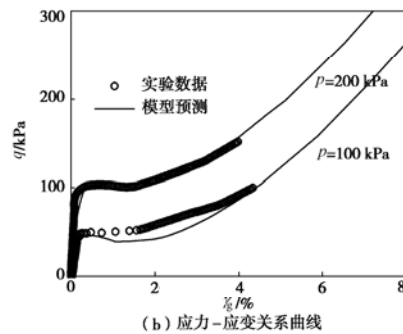


图8 均等固结条件下针对不同围压的试验验证

Fig. 8 Experimental verification of different cell pressures under isotropic consolidation

3 结 语

本文在不排水剪切条件下, 就针对不同主应力方向对应力-应变关系的影响进行了试验研究, 并在此基础上结合状态概念提出了基于应力-剪胀关系和应力-应变拟双曲线关系的弹塑性本构模型。应力-应变拟双曲线关系的两个参数依赖于塑性剪应变的发展并且随大主应力方向偏离轴向的夹角不同而不同。利用应力-应变拟双曲线关系的两个参数描述了主应力方向对有效应力路径、应力-应变发展模式的影响及非均等固结条件下的应力-应变特性, 并通过常规三轴试验测定了试验参数, 同时与试验结果进行对比, 说明基于状态概念, 引入状态参数, 利用主应力方向对塑性模量的影响, 能够同时描述初始物理状态及初始各向异性对砂土应力-应变关系的影响。

参考文献:

- [1] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. Geotechnique, 1993, **43**(3): 351 - 415.
- [2] YOSHIMINE M, ISHIHARA K. Flow potential of sand during liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(3): 189 - 198.
- [3] 罗 刚, 张建民. 考虑物理状态变化的砂土本构模型[J]. 水利学报, 2004(4): 26 - 31. (LUO Gang, ZHANG Jian-min. Constitutive model for sand considering the variation of its physical state[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(4): 26 - 31. (in Chinese))
- [4] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(3): 90 - 96. (ZHAO Cheng-gang, YOU Chang-long. Liquefaction and steady state strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(3): 90 - 96. (in Chinese))
- [5] 余湘娟, 姜 朴, 魏 松. 砂土的稳态强度试验研究[J]. 河海大学学报, 2001, **29**(1): 50 - 54. (YU Xiang-juan, JIANG Pu, WEI Song. Experimental research on the steady strength of sandy soils[J]. Journal of Hohai University, 2001, **29**(1): 50 - 54. (in Chinese))
- [6] VAID Y P, THOMAS J. Liquefaction and post liquefaction behavior of sand[J]. J Geotech Engrg, ASCE, **121**(2): 163 - 173.
- [7] BEEN K, JEFFERIES M G. A state parameter for sands[J]. Geotechnique, 1985, **35**(2): 99 - 112.
- [8] JEFFERIES M G. Norsand: a simple critical state model of sand[J]. Geotechnique, 1993, **43**(1): 91 - 103.
- [9] WOOD M D, BELKHEIR K, LIU D F. Strain softening and state parameter for sand modeling[J]. Geotechnique, 1994, **44**(2): 335 - 339.
- [10] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. Geotechnique, 2000, **50**(4): 449 - 460.
- [11] LI X S. Modeling of dilative shear failure[J]. Soil Dynamics and Engineering, 2000, **19**: 363 - 369.
- [12] CUBRINOVSKI M, ISHIHARA K. State concept and modified elastoplasticity for sand modeling[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(4): 213 - 225.
- [13] YOSHIMINE M, ISHIHARA K, VARGAS W. Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(3): 179 - 188.
- [14] 栾茂田, 许成顺, 何 杨, 等. 主应力方向对饱和松砂不排水单调剪切特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1085 - 1089. (LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, HE Yang, et al. Experimental study on the effect of orientation of principal stress on undrained behavior of saturated loose sand under monotonic shearing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1085 - 1089. (in Chinese))
- [15] 栾茂田, 罗锦添, 李焯芬, 等. 不排水条件下全风化花岗岩残积土工程特性与本构模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, **40**(增 1): 83 - 89. (LUAN Mao-tian, LUO Jin-tian, LI Zhuo-fen, et al. Fundamental behavior and constitutive modeling of a CDG residual soil under undrained shear[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, **40**(S1): 83 - 89. (in Chinese))
- [16] 郭 莹. 复杂应力条件下饱和松砂的不排水动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003. (GUO Ying. Experimental studies on undrained cyclic behavior of loose sands under complex stress conditions considering static and cyclic coupling effect[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese))