

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1530

高压下不同力学特性的砂土统一模型

陆 勇¹, 周国庆², 顾欢达¹

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为构建能够反映砂土高压下不同力学特性的统一模型, 分析了砂土在较大的压力范围内的力学试验结果并获取其强度、等向压缩以及临界状态特性参数。通过引入应力路径相关因子来修正塑性应变增量中与应力路径相关的部分, 从而使模型硬化参量能够反映密实砂土在常压下的剪胀特性。同时, 基于砂土的临界状态特性提出能够与砂土内部状态相对应的潜在状态面概念, 由屈服面与潜在状态面间的动态关系确定加载过程中的动态密实参数及潜在强度, 进而使得硬化参量也能够反映密实砂土在常压下的软化特性及高压下的剪缩、硬化特性。分析模型屈服面及潜在状态面间的演化规律并对不同压力等级下的砂土受荷力学行为进行模拟预测, 证实了该模型能够反映密实砂土常压下剪胀软化及高压下剪缩硬化的特性。

关 键 词: 砂土; 高压; 力学特性; 硬化参数; 本构模型

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)02-0614-07

Unified model of sand with different mechanical characteristics under high and low pressures

LU Yong¹, ZHOU Guo-qing², GU Huan-da¹

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: To reflect the different mechanical characteristics of sand under high and low pressures, the mechanical test results of sand, i.e., the strength, isotropic compression and critical state characteristic parameters, under a large range of confining pressure are analyzed to build a unified model. Correlation factor of stress path is used to adjust the plastic deformation related to stress path, and the hardening parameter can be used to describe the dilatancy behavior of relatively dense sand under low pressure. Based on the critical state behavior of sand, potential state surface is proposed to reflect the sand inherent state. With the dynamic relationship between the yield surface and potential state surface, the current compactness parameter and potential strength of sand are defined. The hardening parameter can reflect shear softening and shear contraction hardening properties of relatively dense sand under low and high pressures. Evolution law of yield surface and potential state surface is analyzed, and model prediction under different pressures is carried out. Results comparison validates the proposed model with the capability to reflect shear dilatancy softening and shear contraction hardening properties of sand under different pressures.

Keywords: sand; high pressure; mechanical properties; hardening parameter; constitutive model

1 引 言

砂土在常压下的力学行为依赖于其相对密实度及所处的压力, 为了能够反映两者的耦合影响, Li^[1]、Ling^[2]等在此方面做了较为深入的研究。随着大型工程的兴起, 高压条件下的砂土颗粒破碎行为作为岩土领域中的重要问题逐渐被众多学者所研

究。针对高压下的颗粒破碎对砂土强度、变形特性的重要影响, 国内外众多学者通过对已有土体模型进行修正扩展, 也已提出了多种能够考虑颗粒破碎的砂土弹塑性本构模型^[3-10]。此类针对砂土的研究成果多数将常压与高压下的砂土力学特性及模型参数进行独立分析, 所构建的模型也分别针对常压及高压, 尚未出现能够将砂土常压至高压下强度、变

收稿日期: 2016-07-27

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(No. 15KJB170017); 住房和城乡建设部科技计划项目(No. 2015-K4-034); 国家自然科学基金项目(No. 51378327)。This work was supported by the Natural Science Foundation for Colleges and Universities in Jiangsu Province (15KJB170017), the Science and Technology Project from Ministry of Housing and Urban Rural Construction in China (2015-K4-034) and the National Natural Science Foundation of China (51378327). 第一作者简介: 陆勇, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学特性及数值分析方面的研究。E-mail: cumtluyong@163.com

形特性进行综合考虑的适用于不同压力等级下的砂土模型。这使得现存模型大多忽视了加载过程中材料状态的改变,不能很好地描述砂土受荷过程中密实度和围压变化较大的情况。

论文在分析砂土不同压力条件下的峰值及残余强度特性、等向固结压缩特性以及临界状态特性的基础上,结合密实砂土的剪胀软化及剪缩硬化特性,通过引入应力路径相关因子^[11]来修正屈服面硬化参数并提出潜在状态面概念,从而构建一种能够将砂土常压至高压下的力学特性进行统一的砂土高、低压统一模型。

2 砂土不同压力等级下的力学特性

2.1 峰值、残余强度特性

相对密实砂土在三轴剪切过程中表现出常压下软化、高压下硬化的现象,并最终进入临界状态。在寻找砂土材料强度的过程中,吴越等^[12]针对软化情况选取峰值偏应力值作为剪切强度,在硬化情况下一般选取有限应变条件的偏应力值作为剪切强度,这不利于研究材料在全应变范围内的力学特性。

笔者前期对 ISO 标准砂经筛分得到的 3 种粒组砂土进行了 0~8 MPa 围压下的等向压缩及三轴剪切试验^[13]。采用渐近线判断方法,以偏应力的最终稳定值作为剪切残余强度,结合软化条件下的峰值强度将常压、高压下砂土力学特性进行综合描述,如此可以准确描述砂土的抗剪切力学特性。

图 1 为 3 种砂土在三轴剪切过程中所存在的峰值应力比、残余应力比与围压值的关系曲线。可以看出,3 种粒组砂土的峰值应力比受围压影响较为显著。在围压小于 3 MPa 条件下,3 种粒组砂土的峰值应力比随围压增大呈线性减小趋势。当围压大于 3 MPa 以后,由于应力比-轴向应变关系曲线由应变软化特征向应变硬化特征转变,所以不再具有明显的峰值应力比。采用渐进线方法得到 3 种粒组

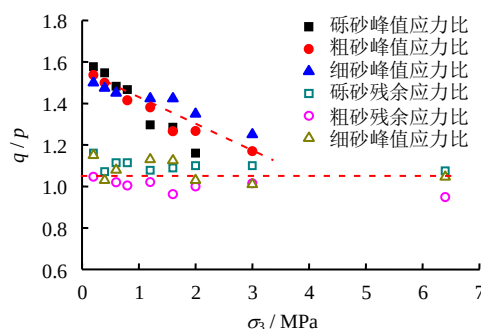


图 1 3 种砂土峰值/残余应力比-围压关系^[13]

Fig.1 Relationships between peak/ residual stress ratio and confining pressure of three different groups of sand^[13]

砂土在 $q-p$ 平面中达到临界状态时的 q 、 p 值,拟合得到相应的剪切强度临界状态线 (CSL) 斜率,也即为三轴压缩 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 条件下的临界破坏应力比 (残余应力比) M ,从图中可以看出残余应力比受围压值的影响则相对较小,试验中 3 种粒组砂土的残余应力比数值均在 1.05 左右。

在对砂土材料的临界状态分析以及高、低压统一模型研究中,残余应力比与峰值应力比应当予以一并考虑,两者均作为砂土材料的基本力学指标。

2.2 等向压缩与临界状态特性

对等向压缩以及三轴剪切过程中的球应力 p 与孔隙比改变量 Δe 进行统计,获得常压至高压范围内 3 种粒组砂土的等向压缩 $e-\ln p$ 曲线以及临界状态 $e-\ln p$ 曲线,如图 2 所示。

3 种粒组砂土的等向压缩曲线 (图中虚线) 与临界状态曲线 (图中实线) 形态相同,两者拟合函数均呈现指数衰减形式,分别为 $e = a - b \exp(c \ln p)$ 和 $e = l - m \exp(n \ln p)$,其中 a 、 b 、 c 、 l 、 m 、 n 为拟合参数,由砂土材料的自身特性决定。这一结果也正说明高压对于砂土变形特性的重要影响,在高压条件下砂土试样出现了一定量的颗粒破碎使得其压缩及抗剪机制发生改变,从而使得压缩曲线及临界状态曲线呈指数衰减型,衰减速度的大小依次为砾砂、粗砂、细砂,说明颗粒越大,破碎效应越强烈^[13]。

临界状态曲线为砂土试样在剪切过程中最终会达到的一个稳定状态。试验获得的常压至高压范围内的临界状态曲线与等向压缩曲线两者共同构成了砂土的状态区间,综合反映砂土在常压至高压范围内的剪胀与剪缩特性,为构建能够考虑砂土在受荷过程中密实度和围压变化较大情况的统一模型提供重要依据。

3 本构模型描述

以 Roscoe 及 Burland 等人在 1968 年提出的与 p 轴相正交的塑性势函数 (屈服函数) 即修正剑桥模型^[14]作为构建砂土常压至高压范围内屈服方程的基础。修正剑桥模型的屈服函数形式为

$$\ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) = \ln p_x - \ln p \quad (1)$$

式中: p_x 为屈服面与 p 轴的交点。

3.1 砂土屈服面及硬化参量

砂土在 $e-\ln p$ 平面中的等向固结压缩曲线呈现指数衰减形态,其拟合关系式为

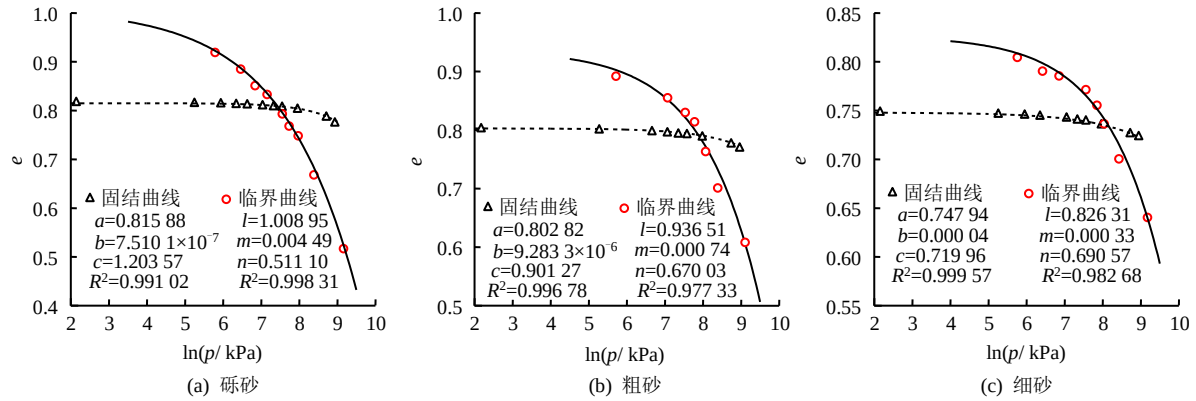


图2 $e-\ln p$ 平面中3种粒组砂的临界状态曲线与等向压缩曲线^[13]
Fig.2 Critical state line and isotropic compression line of three groups of sand in $e-\ln p$ plane^[13]

$$e = a - b \exp(c \ln p) \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为 $e - \ln p$ 中等向固结压缩曲线关系式的拟合参数。

对上式进行微分得

$$de = [-bc \exp(c \ln p)] d \ln p \quad (3)$$

其中弹性孔隙比变化量为

$$de^e = \kappa d \ln p \quad (4)$$

式中: κ 为 $e - \ln p$ 等向固结试验过程中卸荷曲线的斜率, 反映固结变形中的弹性部分。

综合式 (3)、(4), 得到塑性孔隙比变化量为

$$de^p = [-\kappa - bc \exp(c \ln p)] d \ln p \quad (5)$$

进一步得到塑性体应变 (压为正) 为

$$d\varepsilon_v^p = -\frac{de^p}{1+e} = -\frac{[-\kappa - bc \exp(c \ln p)]}{1+e} d \ln p \quad (6)$$

对上式进行变换并积分得

$$\int \frac{1+e}{\kappa + bc \exp(c \ln p)} d\varepsilon_v^p = \ln p_x - \ln p_0 \quad (7)$$

式中: e 为试样孔隙比; p_0 为与初始孔隙比 e_0 相对应的球应力, 其决定了初始屈服面与 p 轴的交点。

将式 (7) 代入式 (1) 得到屈服面函数为

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) - H = 0 \quad (8)$$

上式屈服面函数即为由砂土等向固结压缩路径获得, 其中屈服面的硬化参量 H 为

$$H = \int \frac{1+e}{bc \exp(c \ln p) + \kappa} d\varepsilon_v^p \quad (9)$$

鉴于相对密实砂土在常压条件下的剪切过程中具有显著的体胀特性^[15], 其塑性体应变与塑性剪应变均具有应力路径相关性, 由等向固结压缩这一

特殊应力路径的试验所得到的特定的硬化参量不能直接作为适用于砂土材料的硬化参量。在硬化参数中须包含有反映峰值强度 M_f 、残余强度 M 的参数, 且须包含能够体现塑性体变由剪缩阶段发展至剪胀阶段的特征状态参数。论文在构建模型硬化参量过程中参照姚仰平等^[16]提出的应力路径相关因子的修正方法, 确定相关因子为 $R(\eta) = M_f^4 (M^4 - \eta^4) / M^4 (M_f^4 - \eta^4)$, 使得 $d\varepsilon_v^p / R(\eta)$ 与应力路径无关从而纠正塑性应变增量中与应力路径相关的成分, 相关实例^[17-18]已能证明其可以满足上述相关要求。

结合上述修正因子得到修正后的屈服面硬化参量为

$$H = \int \frac{M_f^4 (M_f^4 - \eta^4)}{M_f^4 (M^4 - \eta^4)} \frac{1+e}{bc \exp(c \ln p) + \kappa} d\varepsilon_v^p \quad (10)$$

式中: η 为应力比。

3.2 潜在状态面及潜在强度 M_f

对屈服面 f 及其硬化参量 H 进行初步分析不难得知, 在应力比增大至 $\eta = M$ 后, 试样由剪缩转变为剪胀, 并呈硬化状态。此状态一直保持至应力比增大至 $\eta = M_f$, 而后进入临界状态。由此可知, 所构建模型能够体现剪切体缩发展至剪切体胀的特征状态, 但不能真实反映砂土软化特性以及高压下的剪缩、硬化特性, 究其原因在于 M_f 为定值。

大量研究已证实砂土材料的内部状态在受荷过程中不断变化, 由初始状态最终稳定至临界状态, 且不同相对密度的砂样在受荷过程中均有达到临界状态的趋势, 临界状态线是砂土本身的固有特性^[19-21]。临界状态可以理解为土体在当前状态下所对应的一个潜在状态, 当前状态逐步向潜在状态靠近。因此, 当前状态与潜在状态两者间的动态关系也即决定了加载过程中的潜在强度 M_f 。论文采用试验中获得的 $e - \ln p$ 平面中的临界状态线推导

得出一个可以描述潜在强度 M_f 的潜在状态面 $\bar{f}$ 。

考虑砂土的临界状态曲线与等向压缩曲线形态相同, 两者的拟合函数均为指数衰减型, 故不难推得由临界状态曲线决定的潜在状态函数为

$$\bar{f} = \ln \frac{\bar{p}}{\bar{p}_0} + \ln \left(1 + \frac{\bar{q}^2}{M^2 \bar{p}^2} \right) - \bar{H} = 0 \quad (11)$$

式中: $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ 为潜在状态函数中的球应力与偏应力; $\bar{p}_0$ 为与初始孔隙比 e_0 相对应的潜在状态面上的球应力, 其决定初始潜在状态面与 $\bar{p}$ 轴的交点。

临界状态为土体在当前状态下所对应的一个与应力路径无关的潜在状态, 因此, 其硬化参量无需进行应力路径修正, 可直接采用塑性体变表示为

$$\bar{H} = \int \frac{1+e}{\kappa + mn \exp(n \ln \bar{p})} d\epsilon_v^p \quad (12)$$

式中: e 为试样孔隙比。

针对砂土材料借鉴超固结土概念定义其动态密实参数 R 为潜在状态面上的球应力 $\bar{p}$ 与当前屈服面上的球应力 p 的比值 $R = \bar{p}/p$ 。由式 (11) 推导得到与 p 相对应的潜在状态面上的球应力 $\bar{p}$ 为

$$\bar{p} = \bar{p}_0 \left(\frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \right) \exp \left(\int \frac{1+e}{\kappa + mn \exp(n \ln \bar{p})} d\epsilon_v^p \right) \quad (13)$$

进而得到动态密实参数为

$$R = \frac{\bar{p}_0}{p} \left(\frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \right) \exp \left(\int \frac{1+e}{\kappa + mn \exp(n \ln \bar{p})} d\epsilon_v^p \right) \quad (14)$$

式 (14) 表明, 动态密实参数 R 与当前应力水平 (p, η) 及潜在状态面位置 (即硬化参量 $\bar{H}$) 相关, 这说明砂土动态密实参数 R 表征了与当前应力水平及砂土临界状态相关的砂土动态特征。

潜在强度 M_f 表征砂土在当前动态密实参数 R 条件下的潜在抵抗破坏的能力, 其与临界破坏应力比 (残余应力比) 间的大小关系则由动态密实参数 R 决定。如图 3 所示, 潜在强度与当前应力点 (p, q) 相对应, 由潜在应力点 $(\bar{p}, \bar{q})$ 与砂土材料伏斯列夫面斜率 M_h [17] 共同决定, M_h 由试验获得的不同围压下的峰值强度决定。潜在强度的描述关系式可表示为

$$M_f = \frac{q_f}{p} = \frac{M\bar{p} - M_h(\bar{p} - p)}{p} = M + (R-1)(M - M_h) \quad (15)$$

由式 (15) 看出, 在加荷过程中, 随着动态密实参数 R 的改变, 潜在强度 M_f 随之变化, 整个过程对应着屈服面的改变。潜在强度的引入使得模型

能够反映砂土的剪胀软化及剪缩硬化特性。

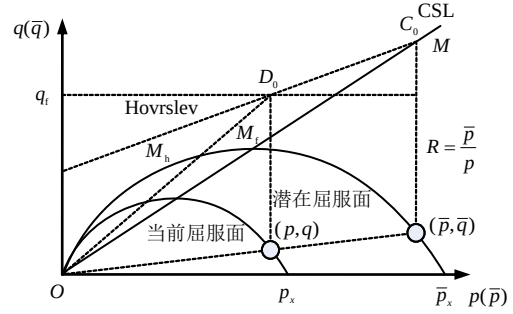


图3 潜在强度 M_f

Fig.3 Potential strength M_f

4 模型演化分析及预测

4.1 模型演化分析

屈服面、潜在状态面间的演化关系决定潜在强度 M_f 的变化, 而 M_f 又会影响着屈服面硬化参量的演变。因此, 针对相对密实砂土常压下的剪胀、软化及高压下的剪缩、硬化过程, 在 p - q 空间中对屈服面、潜在状态面以及潜在强度 M_f 的演化进行描述十分必要, 也是对模型适用性的一个验证。表 1、2 分别为密实砂土在常压以及高压下剪切过程中的状态演化描述。可以看出, 模型各状态参数在受荷过程中的演化规律能够反映常压下的剪胀软化过程以及在高压下的剪缩硬化过程。

4.2 模型预测

针对所构建的砂土模型, 对单元层面的弹塑性应力积分算法进行分析, 并基于 INTEL VISUAL FORTRAN 10 开发平台编写模型子程序, 将子程序接入自行编写的显式算法程序以能实现对软化问题的计算。限于篇幅, 程序部分不再展开。

因自行开发的程序尚只实现了对二维问题的模拟计算, 论文暂只进行砾砂的双轴压缩剪切模拟试验, 以对相对密实砂土在常压、中压及高压下所表现出的不同力学特性进行模拟预测。模拟过程中对尺寸为 $40 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的二维试样首先施加水平与轴向两个方向上的初始压力 σ_3 , 然后施加轴向位移 s , 记录试样顶部的新增轴向压力 $\Delta\sigma_1$ 随轴向位移 s 的变化。模拟计算中选取的砾砂相关物理力学参数如表 3 所示, 涉及弹性参数 κ 、 ν , 临界破坏强度参数 M , 屈服面硬化参数 a 、 b 、 c , 潜在状态面硬化参数 l 、 m 、 n , 初始孔隙比 e_0 (决定屈服面、潜在状态面与 p 轴的交点 p_0 、 $\bar{p}_0$)。

整理模拟计算结果, 获得初始压力 σ_3 分别为 600、1 200、3 200 kPa 条件下砾砂双轴试验的新增轴向应力 $\Delta\sigma_1$ -轴向应变 ϵ 以及剪切体变 ΔV -轴向

应变 ε 的关系曲线, 将其与文献[13]中的试验结果 进行定性比较, 如图 4 所示。

表 1 剪胀、软化过程描述

Table 1 Process of shear dilatancy and softening

状态阶段	应力比 η 、临界强度 M 及潜在强度 M_t 间关系	塑性体变增量 $d\varepsilon_v^p = d\lambda \frac{df}{d\sigma}$	硬化参量增量 dH 、 $d\bar{H}$	动态密实参数 $R = \bar{p}/p = \bar{q}/q$ 潜在强度 $M_t = M + (R-1)(M - M_h)$
(1)初始状态	$0 = \eta < M < M_t$	$d\varepsilon_v^p > 0$	$dH > d\bar{H} > 0$	$R > 1, M_t > M$
(2)剪缩硬化阶段	$0 < \eta < M < M_t$	$d\varepsilon_v^p > 0$	$dH > d\bar{H} > 0$	$R \downarrow, M_t \downarrow$
(3)特征状态	$0 < \eta = M < M_t$	$d\varepsilon_v^p = 0$	$dH = d\bar{H} = 0$	$R > 1, M_t > M$
(4)剪胀硬化阶段	$M_t > \eta > M$	$d\varepsilon_v^p < 0$	$dH > 0, d\bar{H} < 0$	$R \downarrow, M_t \downarrow$
(5)峰值应力状态	$M < \eta = M_t$	$d\varepsilon_v^p < 0$	$dH = 0, d\bar{H} < 0$	$R > 1, M_t > M$
(6)剪胀软化阶段 1	$\eta > M_t > M$	$d\varepsilon_v^p < 0$	$d\bar{H} < dH < 0$	$R \downarrow, M_t \downarrow$
(7)剪胀软化阶段 2	$\eta > M_t = M$	$d\varepsilon_v^p < 0$	$dH < 0, d\bar{H} < 0$	$R = 1, M_t = M$
(8)临界状态	$\eta = M_t = M$	$d\varepsilon_v^p = 0$	$dH = d\bar{H} = 0$	$R = 1, M_t = M$

表 2 剪缩、硬化过程描述

Table 2 Process of shear contraction and hardening

状态阶段	应力比 η 、临界强度 M 及潜在强度 M_t 间关系	塑性体变增量 $d\varepsilon_v^p = d\lambda \frac{df}{d\sigma}$	硬化参量增量 dH 、 $d\bar{H}$	动态密实参数 $R = \bar{p}/p = \bar{q}/q$ 潜在强度 $M_t = M + (R-1)(M - M_h)$
(1)压缩阶段	$0 = \eta < M < M_t$	$d\varepsilon_v^p > 0$	$dH > d\bar{H} > 0$	$R \downarrow, M_t \downarrow$
(2)高压状态	$0 = \eta < M_t < M$	$d\varepsilon_v^p > 0$	$dH > d\bar{H} > 0$	$R < 1, M_t < M$
(3)剪缩、硬化阶段	$\eta < M_t < M$	$d\varepsilon_v^p > 0$	$dH > 0, d\bar{H} > 0$	$R < 1, M_t < M$
(4)“似峰值”状态	$\eta = M_t < M$	$d\varepsilon_v^p > 0$	$dH = 0, d\bar{H} > 0$	$R < 1, M_t < M$
(5)临界状态	$\eta = M > M_t$	$d\varepsilon_v^p = 0$	$dH = d\bar{H} = 0$	$R < 1, M_t < M$

表 3 模型所用的砾砂相关参数

Table 3 Gravel sand parameters used in the model

κ	ν	M	e_0	a	b	c	l	m	n
-9×10^{-7}	0.26	1.05	0.814 4	0.814 9	7.51×10^{-7}	1.203 6	1.009	0.004 5	0.511 1

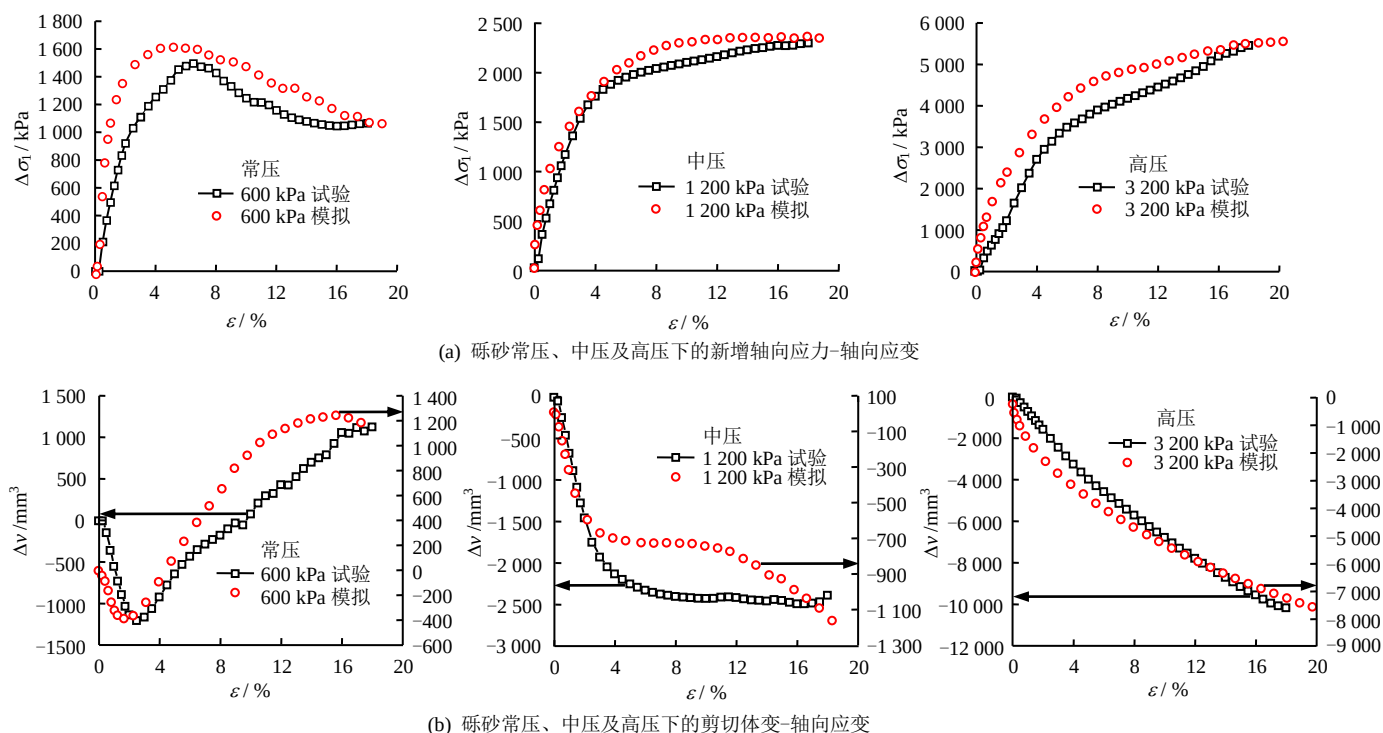


图 4 砾砂在不同压力等级下的试验结果与模型预测对比

Fig.4 Comparison between test result and model prediction under different pressures

图 4(a)中模拟预测结果显示, 常压下的新增轴向应力-轴向应变曲线存在明显的峰值点, 剪切过程呈应变软化特征, 并最终趋于平缓; 随着压力的增大, 剪切过程中的应变软化特征逐渐消失, 并在高压下的剪切过程中呈应变硬化特征。这一模拟预测结果与试验获得的结论吻合。同时, 根据剪切临界状态时的新增轴向应力与所施加的侧向力可推得试样的临界破坏强度参数 $M = q/p = 3\Delta\sigma_1/(\Delta\sigma_1 + 3\sigma_3)$ 约为 1.05, 这与模拟计算中的材料临界强度参数 M 一致, 表明预测结果可信。

图 4(b)为压缩剪切过程中的试样体积变化与轴向应变的关系曲线。可以看出, 砾砂在常压下的剪切过程中体积变化随轴向应变的发展先减小后逐渐增大, 并最终趋于稳定, 呈剪胀特征。体积增大趋势随着围压的增大逐渐减弱, 由常压下的剪胀特征逐步转变为高压下剪缩特征。

由于模型预测中砂样的受荷应力路径及试样体积与三轴试验的情况有所区别, 计算获得的新增轴向应力、剪切体变随轴向应变的变化曲线与试验情况不是完全重合, 但不同压力等级下的趋势基本一致。模型预测结果与前期物理试验获得的砂土相关力学特性结果一致, 说明论文所构建的砂土模型能够反映砂土常压至高压下的不同力学特性, 也进一步确定了采用论文所构建的砂土模型进行相关问题模拟研究的可行性。

5 结 论

通过对较大的压力范围内砂土力学试验结果的分析, 获得砂土强度、等向压缩及临界状态特性参数。采用应力路径相关因子的修正方法得到与应力路径无关的模型硬化参量。由砂土临界状态特性定义其潜在状态面, 并根据屈服面与潜在状态面间的关系确定砂土的动态密实参数及潜在强度, 进而使得硬化参数能够反映相对密实砂土在常压下的软化特性及高压下的剪缩、硬化特性。

通过分析模型屈服面、动态密实参数及潜在强度三者间的演化关系并对不同压力等级下的砂土受荷力学行为进行模拟预测, 证实了该模型能够将常压至高压下的砂土力学特性进行统一, 使得描述砂土受荷过程中密实度和围压变化较大的情况成为可能。模型共涉及弹性、临界破坏强度、屈服面及潜在状态面的参数共计 10 个, 各参数物理意义明确, 均可通过室内三轴试验获得。

论文有以下两点值得下一步研究与完善:

(1) 考虑砂土材料的力学特性具有较强的孔隙

相关性, 获取不同制样方法得到的不同初始孔隙比砂样的当前屈服面与潜在状态面硬化参数, 以使得所构建的模型得到进一步的完善。

(2) 完善显式算法无网格程序, 进行砂土三轴压缩剪切模拟试验, 以能够进行准确的定量分析比较, 为统一模型的最终推广应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] LI X S, DAFALIAS Y F. A constitutive framework for anisotropic sand including non-proportional loading[J]. *Geotechnique*, 2004, 54(1): 41—55.
- [2] LING H I, ASCE M, YUE D Y. Anisotropic elastoplastic bounding surface model for cohesive soils[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(7): 748—758.
- [3] UENG T S, CHEN T J. Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(1): 65—72.
- [4] DAOUADJI A, HICHER P Y, RAHMA A. An elastoplastic model for granular materials taking into account grain breakage[J]. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2001, 20(1): 113—137.
- [5] CECCONI M, DESIMONE A, TAMAGNINI C, et al. A constitutive model for granular materials with grain crushing and its application to a pyroclastic soil[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26(15): 1531—1560.
- [6] CHAVEZ C, ALONSO E E. A constitutive model for crushed granular aggregates which includes suction effects[J]. *Soils and Foundations*, 2003, 43(4): 215—227.
- [7] SALIM W, INDRARATNA B. A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(4): 657—671.
- [8] SUN D, HUANG W, SHENG D. An elastoplastic model for granular materials exhibiting particle crushing[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 340—341(6): 1273—1278.
- [9] YAO Y P, YAMAMOTO H, WANG N D. Constitutive model considering sand crushing[J]. *Soils and Foundations*, 2008, 48(4): 603—608.
- [10] HU W, YIN Z Y, DANO C, et al. A constitutive model for granular materials considering grain breakage[J]. *Science China- Technological Sciences*, 2011, 54(8): 2188—2196.

- [11] YAO Y P, SUN D A, LUO T. A critical state model for sands dependent on stress and density[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2004, 28(4): 323—337.
- [12] 吴越, 杨仲轩, 徐长节. 初始组构各向异性对砂土力学特性及临界状态的影响[J]. **岩土力学**, 2016, 37(9): 2569—2576.
- WU Yue, YANG Zhong-xuan, XU Chang-jie. Effects of initial fabric anisotropy on mechanical behavior and critical state of granular soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2569—2576.
- [13] 陆勇. 高、低压下砂土剪切带及砂土-结构界面力学行为演化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- LU Yong. Research on the mechanical behavior evolution of sand shear band and sand-structure interface layer under high and low pressure[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2014.
- [14] SCHOFIELD A, WROTH P. Critical state soil mechanics[M]. London: McGraw-Hill, 1968.
- [15] 陆勇, 周国庆, 赖泽金. 砂土剪切特性的荷载与粒径效应研究[J]. **中国矿业大学学报**, 2014, 43(2): 195—202.
- LU Yong, ZHOU Guo-qing, LAI Ze-jin. Effects of normal pressure and particle size on shear properties of sand material[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2014, 43(2): 195—202.
- [16] YAO Y P, SUN D A, MATSUOKA H. A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35(2): 210—222.
- [17] 罗汀, 姚仰平, 侯伟. 土的本构关系[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- LUO Ting, YAO Pang-ping, HOU wei. Constitutive law of soil[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [18] 姚仰平, 余亚妮. 基于统一硬化参数的砂土临界状态本构模型[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(12): 1827—1832.
- YAO Yang-ping, YU Ya-ni. Extended critical state constitutive model for sand based on unified hardening parameter[J]. **Chinese Journal of Geomechanical Engineering**, 2011, 33(12): 1827—1832.
- [19] VERDUGO R, ISHIHARA K. The steady state of sandy soils[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36(2): 81—91.
- [20] RIEMER M F, SEED R B. Factors affecting apparent position of steady-state line[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(3): 281—288.
- [21] LI X S, WANG Y. Linear representation of steady-state line for sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(12): 1215—1217.

中国建筑学会地基基础分会 2018 年学术会议 (1 号通知 征集论文 宁夏·银川)

主办单位: 中国建筑学会地基基础分会

承办单位: 宁夏大学

协办单位: 《岩土力学》杂志社 《建筑科学》杂志社

会议征文内容: 本次会议旨在展示和交流近年来全国在建筑地基基础领域理论与实践方面的最新研究成果、发展趋势及热点难点问题, 确定会议征文内容如下: ①地基基础设计理论; ②山区地基; ③软弱地基; ④桩基础; ⑤地基处理; ⑥基坑工程; ⑦地基基础抗震设计及工程实践; ⑧边坡及地质灾害治理; ⑨地下空间开发设计与施工新技术; ⑩地基基础规范编制修订研究。

论文格式要求: ①应征论文要求内容具体、明确、严谨、未公开发表过、文责自负且不涉及保密内容; ②论文格式请按《岩土力学》论文体例, 论文模板请登录《岩土力学》网站下载中心下载。网站地址: <http://ytlx.whrsm.ac.cn/>; ③请务必注明作者详细通讯地址、邮编、联系电话及 E-mail 地址; ④论文以邮件(word 电子文档)向会务组电子邮箱投稿, 文章篇幅一般不超过 8 000 字(含图、表), 原则上篇幅不超过 6 页, 最大篇幅不超过 8 页。要求图表清晰、数据翔实。

论文出版方式: 会议论文采取集中推荐期刊发表的方式。论文推荐发表方式为: 会议部分优秀论文将由《岩土力学》(EI 收录)正、增刊发表; 其他优秀论文将由《建筑科学》(核心期刊)增刊发表。所有论文由学会组织专家统一审阅, 决定是否录用、推荐具体发表刊物和形式, 并印发会议论文摘要集。每篇论文版面费以各刊出期刊收费标准而定。论文经审定确定刊出期刊后, 版面费直接交各刊出期刊编辑部。

重要日期: ①提交论文截止日期: 2018 年 3 月 31 日(岩土力学), 2018 年 4 月 30 日(建筑科学); ②全文录用截止日期: 2018 年 6 月 30 日; ③会议时间: 2018 年 8 月底。

论文投稿及联系方式: 郑文华: 010-64517820/18310056928; 地址: 北京市北三环东路 30 号中国建筑科学研究院地基所; 投稿邮箱: djhy2018@163.com。

中国建筑学会地基基础分会

二〇一七年十二月六日

(摘自《岩土力学》编辑部主页 <http://ytlx.whrsm.ac.cn/>)