

无黏性土的压缩特性及模型

马 露

Compression characteristics and models of cohesionless soil

MA Lu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108-108

无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123-130

基于应力修正的土体抗剪强度影响因素分析

An analysis of the factors affecting shear strength parameters of soils based on stress correction

龚琰, 朱建群, 陈浩锋 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 95-95

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

尹振华, 张建明, 张虎, 王宏磊 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 97-105

尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil

陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74-82

原状扬州黏性土压缩特性与孔径分布

#{suggestArticle.titleEn}

孙德安, 汪健, 何家浩, 徐永福 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 111-116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010014

无黏性土的压缩特性及模型

马 露^{1,2}

(1. 安徽科技学院建筑学院, 安徽 蚌埠 233100; 2. 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)

摘要: 我国南海神狐海域海底沉积物主要由钙质砂与无黏性土组成, 其力学性质对海洋工程的稳定性具有显著影响。无黏性土的压缩特性是研究其力学性能的重要内容之一, 为分析不同荷载作用下土样的压缩特性, 利用高压三轴仪试验系统, 开展了不同砂含量及不同初始孔隙比下无黏性土样的等向压缩试验。试验结果表明: 在试验采用的高有效应力下, 无黏性土具有显著的过渡土性质, 初始组构难以被改变; 随多孔易碎钙质砂含量的增加, 土样可压缩性和压缩曲线的收敛度均增加, 钙质砂的破碎显著改变了初始组构。提出可以描述含砂无黏性土压缩特性的数学模型, 所含参数物理意义明确且易于确定。与不同砂土压缩试验数据对比发现, 该模型对其他种类土同样具有较好的拟合度, 验证了本模型的广泛适用性。与已有压缩模型的对比, 验证了本模型的实用性, 为无黏性土应力-应变关系的理论研究提供基础。

关键词: 钙质砂; 无黏性土; 压缩模型; 孔隙比

中图分类号: P642.11⁺6; TU411.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0072-06

Compression characteristics and models of cohesionless soil

MA Lu^{1,2}

(1. College of Architecture, Anhui Science and Technology University, Bengbu, Anhui 233100, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The sediments in the Shenhu sea area of the South China Sea is composed of sand and cohesionless soil, and their mechanical properties have a significant impact on the stability of ocean engineering. The compression characteristics of the cohesionless soil with sand is one of the important contents of the studies of its mechanical properties. In order to analyze the compression characteristics of soil samples under different loads, the isotropic compression tests of cohesionless soil samples with different sand contents and different initial void ratios are carried out by using the high-pressure triaxial apparatus test system. The test results show that under the high effective stress, the cohesionless soil has significant transition soil properties, and the initial fabric is difficult to be changed. With the increase of the content of the porous fragile calcareous sand, the compressibility and the convergence of the compression curve of the soil sample increase, and the crushing of calcareous sand significantly changes the initial fabric. A mathematical model is proposed to describe the compression characteristics of the cohesionless soil with sand, and the physical meaning of fitting parameters is clear and easy to determine. Compared with the different soils compression tests data, it is found that the model results also are in a good agreement with those of other kinds of sands, which verifies the extensive applicability of the model. Compared with the existing compression models, the practicability of the model is verified. The results can

收稿日期: 2020-10-10; 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 安徽省教育厅重点研究项目(KJ2018A0539; KJ2020A0080); 安徽省质量工程项目(2018zhkt175)

第一作者: 马露(1988-), 男, 硕士研究生, 讲师, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: mal@ahstu.edu.cn

provide a basis for analyzing the stress-strain relationship of cohesionless soil.

Keywords: carbonate sand; cohesionless soil; compression model; void ratio

地基沉降的预测和控制是工程师和学者的重要工作之一,为此进行的试验、理论和数值研究为众多工程提供分析依据。针对传统地基沉降计算方法的不足,杨光华^[1]提出基于 $e-p$ 曲线软土地基非线性沉降计算方法,实用性和精度均较高,曹文贵等^[2-3]基于不同分析理论,提出地基沉降的计算模型,对工程具有较高的参考价值。

地基沉降和强度分析建立在土体压缩固结理论基础之上,因此,土体的压缩特性是研究其力学性能的重要内容之一,等向压缩模型为土体本构模型的建立提供基础。大量压缩试验表明^[4-6],土体压缩变形由两部分组成:低应力阶段的颗粒重排列和高应力阶段的颗粒破碎。无黏性土与黏性土的力学行为具有显著差别,因此,基于黏性土力学实验所提出的理论公式在无黏性土压缩沉降方面的应用效果欠佳,提出适用于无黏性土的压缩固结模型具有显著的意义。

有学者基于土体收敛的极限压缩曲线提出无黏性土的压缩模型^[7-9],但这类模型参数值确定困难,对试验要求较高,实用性较低,且有试验表明^[10],无黏性土的不同初始孔隙比对应不同的压缩曲线,即高应力区压缩曲线不收敛。因此,无黏性土的压缩性与初始孔隙比具有重要的相关性,寻求建立与初始状态相关的孔隙比与压缩应力之间的关系,对研究无黏性土的本构模型格外重要。

基于无黏性土的等向压缩试验,学者已提出了不同的压缩模型。Bauer^[11]通过总结试验数据,提出两参数压缩方程,形式简单,应用方便,但在高应力区对数据的拟合度较低,具有一定的局限性。沈珠江^[12]发现无黏性土压缩过程中,体积应变与固结压力在双对数坐标系中呈现线性关系,并提出应力-应变与固结应力的幂函数关系,但不能反映初始密度对压缩曲线的影响。赵颜辉等^[13]在其基础上,对压缩模型参数进一步分析,提出考虑初始状态变化的等向压缩条件下应力-应变三参数压缩模型,仅适用于低应力区压缩曲线的计算。王龙等^[14]通过计算无黏性土等向压缩状态下压缩指数的定量表达式,进而推演出以孔隙比与球应力表达的压缩模型,与不同砂土试验数据对比发现,该模型表现出较好的适用性与实用性,虽然在高应力区(>20 MPa)其拟合效果欠佳,但满足一般工程

的需要。

我国南海地区广泛分布着钙质砂,并用于当地的工程建设,对当地经济和海洋资源开采都具有重要的意义,因此有必要更全面地对南海地区砂土的压缩特性进行研究。根据广州海洋地质局 HY-2006-3 航次实地取样发现,在干燥沉积物中,粒径大于 0.15 mm 的砂粒与粒径小于 0.063 mm 的细粒土质量比约为 1:4。本文采用钙质砂与粉砂按一定质量比配制试验用砂,在高压(30 MPa)三轴仪上开展等向压缩试验,以探求含砂无黏性土的压缩特性,并提出一种与无黏性土初始状态相关的压缩模型。通过与不同种类砂土压缩试验数据以及压缩模型对比,对本文模型进行验证。

1 压缩试验

1.1 试验材料及方案

试验所用钙质砂取自我国南海某岛礁海域,碳酸钙含量较高,粉砂为硅质石英砂,物理参数见表 1。粉砂呈片状和块状,粒径 <0.075 mm,在应力作用下不会破碎,而块状的钙质砂含有较多内部孔隙,粒径在 0.5~1 mm 范围内,在高压应力下易破碎,已有诸多学者开展了颗粒破碎对钙质砂压缩特性的影响研究^[15-16],本文试验砂为钙质砂与粉砂的混合砂,且钙质砂含量较少,由于粉砂的包裹作用,钙质砂难以破碎,2种砂土的颗分曲线如图 1 所示。

表 1 钙质砂和粉砂的物理参数

| 土类 | 比重 G_s | 粒径/mm | 最大孔隙比 e_{max} | 最小孔隙比 e_{min} |
|-----|----------|----------|-----------------|-----------------|
| 粉砂 | 2.63 | <0.075 | 0.880 | 0.560 |
| 钙质砂 | 2.77 | 0.5~1 | 1.290 | 0.930 |

本次等向压缩试验在 GDS 高压三轴仪上进行,最大围压可达 32 MPa,试样直径 50 mm,高 100 mm。试验选用 4 种钙质砂(S)含量,质量占比为 0% S、20% S、40% S、100% S,分别开展不同初始孔隙比下的等向压缩试验。试验方案如表 2 所示。试验中为保证试样的饱和,反压采用 800 kPa, B 值均在 0.96 以上。

1.2 试验结果及分析

土体在应力作用下的压缩变形由颗粒重排列和颗粒破碎两部分组成。本试验所用的混合砂,粉砂含量均大于 60%,钙质砂基本不会破碎。因此,砂样压

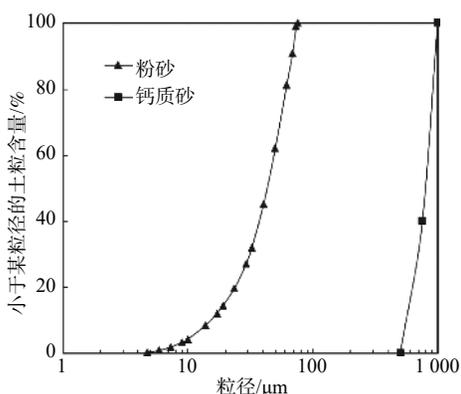


图 1 粉砂和钙质砂级配累计曲线

Fig. 1 Grain size distribution curves of silt and calcareous sand

表 2 试验方案
Table 2 Test scheme

| 编号ID | 砂含量S/% | 初始孔隙比 e_0 | 相对密度 D_r /% | 加载梯度/MPa |
|------|--------|-------------|---------------|---------------------|
| 1 | 0 | 0.633 | 90 | |
| 2 | 0 | 0.685 | 80 | |
| 3 | 0 | 0.795 | 60 | |
| 4 | 20 | 0.582 | 80 | |
| 5 | 20 | 0.683 | 60 | 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, |
| 6 | 20 | 0.795 | 40 | 1, 2, 4, 6, 8, 12, |
| 7 | 40 | 0.581 | 60 | 16, 20, 24, 28, 30 |
| 8 | 40 | 0.682 | 4% | |
| 9 | 40 | 0.795 | 20 | |
| 10 | 100 | 1.060 | 80 | |
| 11 | 100 | 1.120 | 60 | |

缩变形主要是由粉砂颗粒重排列引起。4种试验砂的压缩曲线如图2所示。随着有效应力的增加,砂样被压缩,孔隙比不断减小,在应力达到30 MPa时,曲线仍未收敛,符合典型的无黏性土压缩特性。

由图2可以看出:(1)前3种砂样在同一初始孔隙比下,随着钙质砂含量的增加,砂样残余孔隙比逐渐减小,如初始孔隙比 $e_0=0.795$ 时,3种混合砂样的残余孔隙比分别是0.543, 0.514, 0.478,究其原因,钙质砂内部含有较多孔隙,在压缩变形过程中,粒径远小于钙质砂的粉砂会发生错动和位移,进入钙质砂内部,填充内部孔隙,导致砂样在宏观上表现出较大的体变;(2)对同一种砂样来说,初始孔隙比越小,最终的体变也越小,这是由于高密实度的砂样在初始状态砂颗粒排列已经很紧密,部分粉砂颗粒进入到钙质砂内部。因此,当压缩应力较高时,粉砂的错动位移量有限,相比于高孔隙比的初始状态,体变显著减小;(3)分别取3种砂样初始孔隙比相同的2组数据,对比后发现在相同有效应力下,钙质砂含量较高2组试样试验数据的差值较小,即砂样压缩曲线的收敛度较高,如

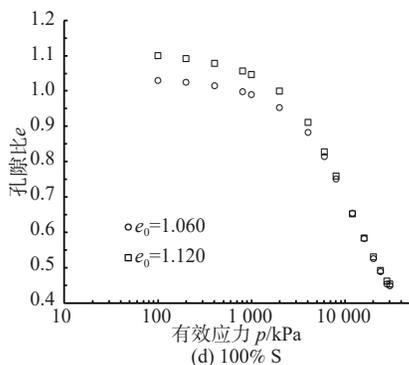
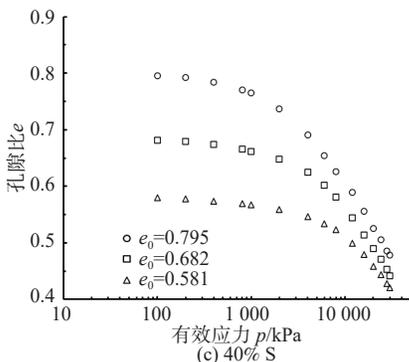
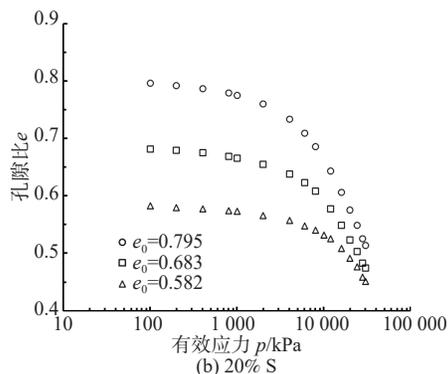
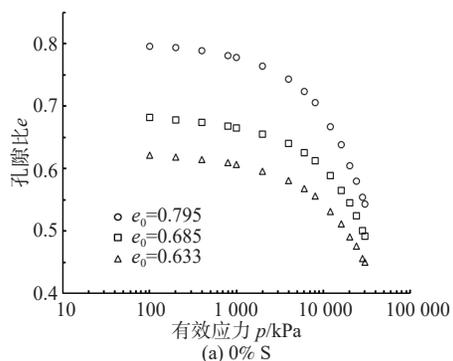


图 2 不同土样压缩曲线

Fig. 2 Compression curves of different samples

100% S 试样的 2 组数据在有效应力达到 6 MPa 时,压缩曲线趋于重合。分析原因可能是在试验应力范围内,钙质砂含量越高,细颗粒粉砂包裹作用就越小,初始结构强度就越低,压缩曲线收敛度就越高,即随着

有效应力增加, 会较早达到收敛点。

2 压缩模型及验证

2.1 压缩模型

无黏性土的等向压缩模型是其本构模型建立的基础, 因此, 针对本文含钙质砂无黏性土的压缩特性, 提出压缩模型。沈珠江^[12]提出, 对于无黏性土, 等向压缩试验中的体积应变与压缩应力之间存在如下关系:

$$\varepsilon_v = t(p/p_a)^\lambda \quad (1)$$

式中: ε_v ——体积应变;

p ——压缩应力/kPa;

p_a ——大气压力, 取 100 kPa;

t 、 λ ——拟合参数。

在 10 MPa 固结压力范围内, 在体积应变与固结应力的双对数坐标系下, 式(1)具有较好的适用性, 但其不能反映初始密度对压缩曲线的影响^[13]。本文在此基础上, 根据体积应变与孔隙比的关系, 经简单换算后, 并假设残余孔隙比与初始孔隙比和压缩应力存在如下关系:

$$e = e_0 - \alpha(p/p_a)^\beta \quad (2)$$

式中: e 、 e_0 ——残余和初始孔隙比;

α 、 β ——拟合参数。

利用本文含钙质砂无黏性土的压缩试验数据, 对本模型拟合参数进行探讨。取 0%S 试验数据, 对 3 种不同初始孔隙比下数据拟合, 结果见表 3。

由表 3 可以看出, 随着初始孔隙比的增大, β 值增大, 表示压缩应力对体积应变的影响效果在增强, 符合低密实度砂样易于压缩的规律。其次, 虽然 β 值有差异, 但差异很小, 取其平均值 0.749, 重新确定 α 值后, 发现 α 与 e_0 具有良好的线性关系, 为验证其适用性, 对 20%S 和 40%S 这 2 组数据采用相同处理方法, 得到 α 与 e_0 的关系(图 3)。由图 3 可以看出, α 与 e_0 具有较好的线性关系, 相关系数 R^2 均大于 0.996。因此, 提出如下 α 与 e_0 的线性关系式:

$$\alpha = k(e_0 - e_t) \quad (3)$$

式中: k ——拟合斜率;

e_t ——参考孔隙比, 与文献[13]保持一致。

这两个参数与土体的压缩特性有紧密关系, 对于同一种无黏性土而言, 均是常数。将式(3)代入式(2)得到残余孔隙比 e 与压缩应力 p 的关系式, 即含钙质砂无黏性土的压缩模型:

$$e = e_0 - k(e_0 - e_t)(p/p_a)^\beta \quad (4)$$

模型含有 3 个参数, 易通过试验方法获得, 用式(4)拟合本文试验数据, 以验证其有效性, 拟合参数如表 4 所示, 计算值与试验值对比如图 4 所示。

表 3 0% S 不同初始孔隙比下的拟合参数
Table 3 Fitting parameters of 0% S with different initial void ratios

| e_0 | α | β |
|-------|----------|---------|
| 0.633 | 0.002 87 | 0.719 |
| 0.685 | 0.002 56 | 0.754 |
| 0.795 | 0.003 11 | 0.773 |

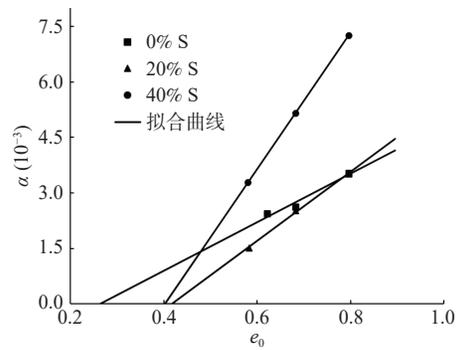


图 3 不同砂含量下 α 与 e_0 的关系

Fig. 3 Relationship between α and e_0 of sands with different sand contents

表 4 砂含量不同时无黏性土的拟合参数
Table 4 Fitting parameters of cohesionless soils with different sand contents

| 试样 | k | e_t | β |
|-------|---------|-------|---------|
| 0% S | 0.006 6 | 0.258 | 0.749 |
| 20% S | 0.009 3 | 0.419 | 0.776 |
| 40% S | 0.010 5 | 0.400 | 0.781 |

由图 4 可以看出, 本文提出的含钙质砂无黏性土压缩模型可以较好地拟合试验数据, 根据预测曲线的形态与走势, 钙质砂含量越高, 高应力下压缩曲线越趋于收敛, 与前文分析相吻合, 可以用于该类无黏性土不同初始孔隙比下的压缩曲线预测, 为本构模型的建立提供基础, 具有显著的实用价值。

2.2 压缩模型验证

为验证本文模型的适用性, 对 Sacramento River 砂和 Mason 砂的压缩试验数据^[17]进行拟合。Sacramento River 砂比重为 2.68, 最大、最小孔隙比分别为 1.030 和 0.610, 不均匀系数为 1.5, 利用本文模型进行拟合, 拟合参数为 $k=0.008 8$, $e_t=0.466$, $\beta=0.885$, 并与试验数据对比, 见图 5(a)。在试验压缩应力和初始孔隙比范

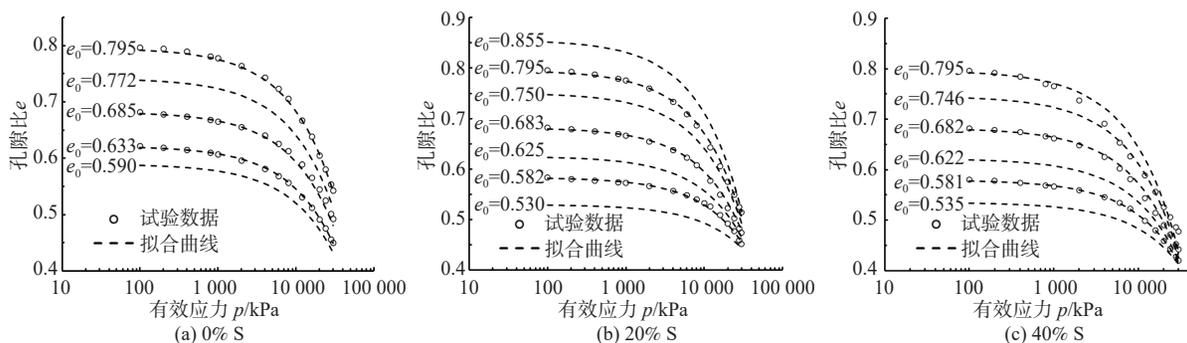


图 4 本文砂土预测值与试验值

Fig. 4 Tested and predicted values of sands in this paper

围内,模型计算值与试验实测值吻合度较高,具有较好的相关性。Mason 砂比重为 2.62,最大、最小孔隙比分别为 0.780、0.500,试验数据及拟合曲线如图 5(b)所示。同样,本文模型对试验数据的拟合度较高,拟合参数为 $k=0.0578$, $e_c=0.304$, $\beta=0.5$ 。

因此,对 Sacramento River 砂和 Mason 砂压缩试验数据良好的拟合效果,表明本模型不仅能够用于描述本文试验砂的压缩特性,也可推广用于其他种类的无黏性土,具有广泛的适用性。

王龙等^[14]根据无黏性土的等向压缩特性,提出其压缩指数的定量表达式,进而给出可以描述无黏性土

孔隙比-应力关系的模型,在拟合低应力区无黏性土的压缩特性时,具有较好的实用性。为验证本文模型的优越性,依据 Mason 砂的等向压缩试验数据,与王龙等提出的压缩模型进行拟合度对比,见图 5(b)。显然,当有效应力小于 5 MPa 时,本文模型与王龙模型均能较好地拟合试验数据,但当有效应力继续增大时,王龙模型的计算值与试验数据的偏差逐渐增大,而本文模型计算值始终保持与试验实测值的高度吻合,因此本文模型具有更好的实用性。

3 结论

(1)大颗粒的钙质砂对粉砂的压缩特性影响显著,随着钙质砂含量的增加,砂样的体积应变增大,且在高应力区,压缩曲线的收敛程度增加。

(2)根据砂土等向压缩试验数据,提出一个三参数的压缩模型,参数意义明确,通过试验易于获得,对试验数据具有较好的拟合效果。

(3)与不同砂土和压缩模型的对比表明,本文模型在低应力区可以较好地描述无黏性土的孔隙比-应力关系,在高应力区也具有较强的适用性和实用性。

参考文献 (References) :

[1] 杨光华,姚丽娜,姜燕,等.基于 $e-p$ 曲线的软土地基非线性沉降的实用计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(2): 242 - 249. [YANG Guanghua, YAO Lina, JIANG Yan, et al. Practical method for calculating nonlinear settlement of soft ground based on $e-p$ curve[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(2): 242 - 249. (in Chinese with English abstract)]

[2] 曹文贵,印鹏,贺敏,等.考虑实测数据新旧程度的工后沉降单项模型预测方法[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6): 65 - 70. [CAO Wengui, YIN Peng, HE Min, et al. A prediction method for post-construction

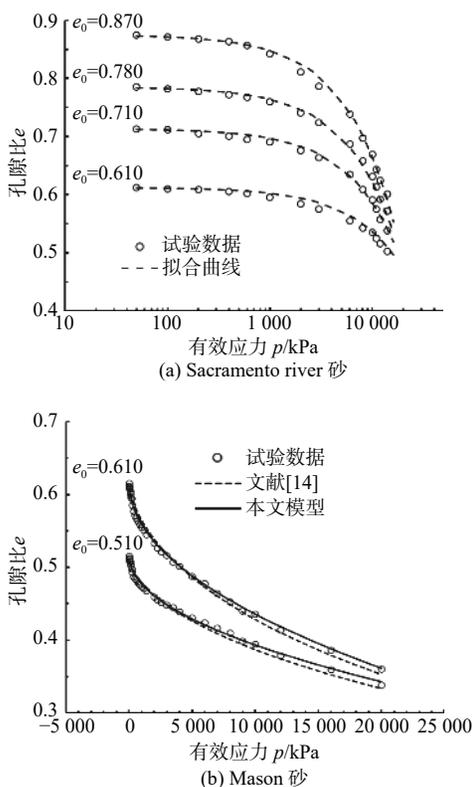


图 5 模型拟合值与实测值对比

Fig. 5 Fitting results compared with the measured data

- settlement of a single model with the consideration of the new or old degree of the measured data[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 65 – 70. (in Chinese with English abstract)
- [3] 曹文贵, 许烜, 李鹏, 等. 基于Eshelby等效夹杂原理的地基沉降分层总和分析方法探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 59 – 65. [CAO Wengui, XU Xuan, LI Peng, et al. A discussion of the layer-wise summation method for ground foundation settlement analysis based on the Eshelby equivalent inclusion[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 59 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [4] ELKAMHAWY E, ZHOU B, WANG H B. Transitional behavior in well-graded soils: an example of completely decomposed granite[J]. *Engineering Geology*, 2019, 253: 240 – 250.
- [5] 孙德安, 汪健, 何家浩, 等. 原状扬州黏性土压缩特性与孔径分布[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 111 – 116. [SUN De'an, WANG Jian, HE Jiahao, et al. Compression characteristics and pore-size distributions of the undisturbed Yangzhou clayey soils[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 111 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吕亚茹, 李治中, 李浪. 高应力状态下钙质砂的一维压缩特性及试验影响因素分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊1): 3142 – 3150. [LYU Yaru, LI Zhizhong, LI Lang. One-dimensional compression behavior of calcareous sand and its experimental technology under high stress conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup1): 3142 – 3150. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王新志, 翁贻令, 王星, 等. 钙质土颗粒咬合作用机制[J]. *岩土力学*, 2018, 39(9): 3113 – 3120. [WANG Xinzhi, WENG Yiling, WANG Xing, et al. Interlocking mechanism of calcareous soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(9): 3113 – 3120. (in Chinese with English abstract)]
- [8] MUN W, MCCARTNEY J S. Roles of particle breakage and drainage in the isotropic compression of sand to high pressures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(10): 04017071.
- [9] SHENG D C, YAO Y P, CARTER J P. A volume–stress model for sands under isotropic and critical stress states[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(11): 1639 – 1645.
- [10] MCDOWELL G R, HUMPHREYS A. Yielding of granular materials[J]. *Granular Matter*, 2002, 4(1): 1 – 8.
- [11] BAUER E. Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials[J]. *Soils and Foundations*, 1996, 36(1): 13 – 26.
- [12] 沈珠江. 土的重屈服面应力应变模式[J]. *固体力学学报*, 1984, 5(2): 163 – 174. [SHEN Zhujiang. A stress-strain model for soils with three yield surfaces[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1984, 5(2): 163 – 174. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 赵颜辉, 朱俊高, 张宗亮, 等. 无黏性土压缩曲线的一种数学模式[J]. *岩土力学*, 2011, 32(10): 3033 – 3037. [ZHAO Yanhui, ZHU Jungao, ZHANG Zongliang, et al. A compression model for cohesionless soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3033 – 3037. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王龙, 朱俊高, 郭万里, 等. 无黏性土压缩模型及其验证[J]. *岩土力学*, 2020, 41(1): 229 – 234. [WANG Long, ZHU Jungao, GUO Wanli, et al. Compression model for cohesionless soils and its verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(1): 229 – 234. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 沈扬, 沈雪, 俞演名, 等. 粒组含量对钙质砂压缩变形特性影响的宏微观研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3733 – 3740. [SHEN Yang, SHEN Xue, YU Yanming, et al. Macro-micro study of compressive deformation properties of calcareous sand with different particle fraction contents[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3733 – 3740. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 蔡正银, 侯贺营, 张晋勋, 等. 考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂临界状态与本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 989 – 995. [CAI Zhengyin, HOU Heying, ZHANG Jinxun, et al. Critical state and constitutive model for coral sand considering particle breakage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6): 989 – 995. (in Chinese with English abstract)]
- [17] LEE K L, FARHOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1967, 4(1): 68 – 86.