

DOI: 10.11779/CJGE2015S1035

平面应变加、卸荷条件下黄土的非线性变形特性的研究

张 玉^{1, 2}, 邵生俊¹

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安工业大学北方信息工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 针对黄土深基坑开挖坑壁土体侧向变形和填土路堤地基加载侧向挤出变形等平面应变问题, 利用西安理工大学真三轴仪改变加载机构, 模拟平面应变条件下路堤黄土地基竖向加载和黄土基坑侧向卸载, 进行了竖向加载和侧向卸载的黄土平面应变试验, 研究了平面应变条件下不同含水率原状 Q₃ 黄土的加、卸载应力应变关系。揭示了平面应变竖向加载应力路径下原状 Q₃ 黄土的大、小主应力差与轴向应变及轴向应变与侧向应变服从双曲线关系; 平面应变侧向卸载应力路径下原状 Q₃ 黄土的大、小主应力差与侧向应变及侧向应变与轴向应变也服从双曲线关系。依据平面应变条件下三向的切线弹性关系, 建立了切线弹性模量和泊松比随应力应变状态变化的关系, 以及非线性本构模型。经平面应变加、卸载应力路径下原状黄土应力应变关系的模型计算与试验结果比较, 验证了两种平面应变路径下非线性模型的正确性。

关键词: 黄土; 平面应变试验; 侧向卸载; 竖向加载; 应力 - 应变关系

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0185-06

作者简介: 张 玉(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事黄土力学研究方面的工作。E-mail: 153673438@qq.com。

Non-linear deformation behaviors of loess under plane strain state of vertical loading and lateral unloading

ZHANG Yu^{1,2}, SHAO Sheng-jun¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Technology University North Institute of Information Engineering, Xi'an 710032, China)

Abstract: For the plane strain problems of, such as lateral deformation of wall soil and lateral extrusion deformation of fill embankment foundation induced by excavation of foundation pits, with the help of the transformational loading system of the true triaxial apparatus in Xi'an University of Technology, the vertical loading of loess embankment under the plane strain and the lateral unloading of loess foundation pit are simulated. The experiments of vertical loading and lateral unloading are made to study the stress-strain relation of loading and unloading loess with different moistures under plane strain. It is revealed that the relationships between the major and minor principal stress difference and the axial strain of original Q₃ loess in the vertical loading stress path under plane strain, as well as the axial strain and the lateral strain are hyperbolic. Those between the major and minor principal stress difference and the lateral strain of original Q₃ loess in the lateral unloading stress path as well as the lateral strain and the axial strain are also hyperbolic. Based on the trifarious tangent elasticity relation under the plane strain, the relation between the tangent elasticity modulus and Poisson's ratio under change of stress-strain condition is derived, and a non-linear constitutive model is established. By comparing the calculated and test results of the stress path of loading and unloading of intact loess under plane strain, two kinds of non-linear models in the path of both plane strain are proved to be right.

Key words: loess; plane strain test; lateral unloading; vertical loading; stress-strain relation

0 引言

深基坑开挖时坑壁土体的变形及高填方时地基的变形常简化为平面应变问题来进行分析。随着黄土地区的城市基础设施和交通道路工程的发展, 黄土深基坑和填土路堤地基的变形即符合平面应变条件。填土路堤的地基在附加荷载作用下, 与填土体纵向正交的

侧向会发生挤出变形, 需要揭示竖向加载条件下土的平面应变特性; 深大基坑在开挖时, 坑壁土体会发生侧向变形, 需要揭示侧向卸荷条件下土的平面应变特

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320); 陕西省教育厅省级重点实验室项目(13JS074)

收稿日期: 2015-03-26

性。对卸荷条件下基坑土体的变形特性展开的研究大多针对砂土和软土，且以研究竖向应变为主^[1-4]，对坑侧土体卸荷时的侧向应变研究较少^[5-6]；针对平面应变条件下深大黄土基坑的试验研究也大多集中在加载和强度方面^[7]，对于卸载和变形方面的研究则更少^[8]。黄土深基坑工程和高填土路基工程越来越多，利用西安理工大学真三轴仪^[9]改变加载机构，模拟平面应变条件下路堤黄土地基竖向加载和黄土基坑侧向卸载，进行了竖向加载和侧向卸载的黄土平面应变试验，研究了平面应变条件下不同含水率原状Q₃黄土的加、卸载应力应变关系，可以为实际工程中的应用提供理论依据。

1 平面应变条件下黄土的加、卸载试验分析

试验的土样采取自西安市白鹿塬，取土深度为6~8 m。现场采取的原状黄土样呈长方体块状，密封保持天然水份，装箱运回试验室。土样呈黄褐色，局部含钙质核，有虫孔，属Q₃黄土。试样用原状样制样器直接切削而成。土样的干密度为1.46 g/cm³，天然含水率为15.8%，液限为32.82%，塑限为21.58%，塑性指数为11.25，饱和度为27.3%，土颗粒为2.7。不同含水率的试样由切削成的试样通过风干或滴定水分配制，配置好含水率的土样在保湿缸中放置24 h以上，让水分自由均匀扩散。

在西安理工大学自主研制的真三轴仪上，通过真三轴压力室内中主应力方向增设一对刚性板替换对应的液压囊，另一组液压囊施加伺服控制的主应力，可实现平面应变条件下土的强度和变形特性试验研究。试样侧向位移的量测主要由可径向自由伸缩导杆和位移传感器组成。设定试验结束条件为竖向应力方向应变达到12%，认为试样破坏。长方体试样的尺寸为7 cm×7 cm×14 cm。

1.1 竖向加载的应力应变曲线

不同含水率原状黄土试样的固结围压分别为50, 100, 200, 300 kPa。在排水条件下进行应变控制加载，随着竖向大主应力方向加载的剪切，得到大、小主应力差随竖向应变的变化曲线和侧向应变随竖向应变的变化曲线如图1所示。

1.2 侧向卸载应力应变关系曲线

对不同含水率原状黄土试样分别施加150, 200, 250, 300 kPa的固结围压。在排水条件下进行应变控制侧向应力逐渐卸荷，得到大、小主应力差随侧向应变的变化曲线和竖向应变随侧向应变的变化曲线如图2所示。

由图1, 2可见，不同固结围压条件下，黄土的平面应变加、卸载应力应变关系曲线均呈双曲线形态，剪切破坏时的主应力差随着固结围压的增大而增大，应力应变关系曲线的初始斜率也逐渐增大。但是，由于竖向主应力加载与侧向主应力卸载应力路径不同，加载条件下黄土剪切破坏的主应力差明显大于卸载条件下黄土剪切破坏的主应力差。由轴向应变和侧向应变的关系可知，原状黄土竖向加载的侧向挤出变形和侧向卸荷变形特性与其竖向裂隙发育的柱状结构有密切联系。由于原状黄土的原生结构性，当剪切应力小于黄土的初始结构强度，表现为应力水平发展较快；当应力逐渐增大到大于黄土的初始结构强度时，土的原生结构逐渐破坏，次生结构逐渐形成，表现为应变的迅速发展。

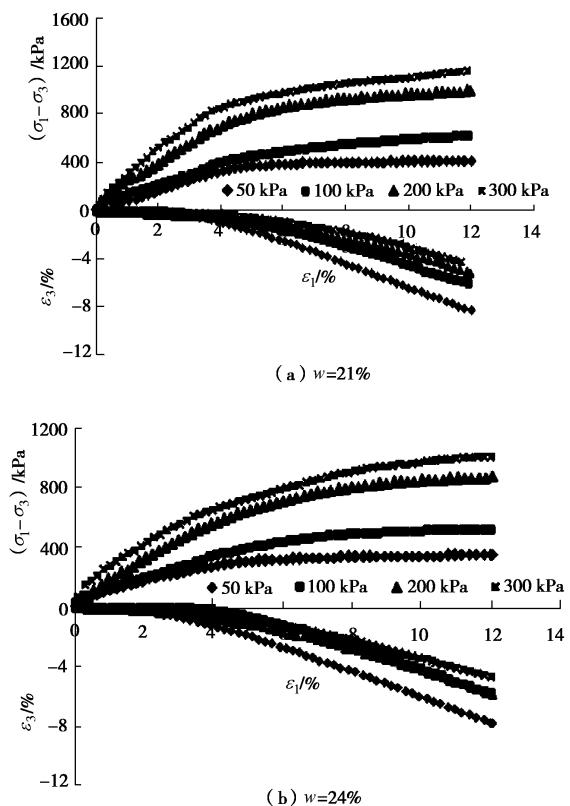
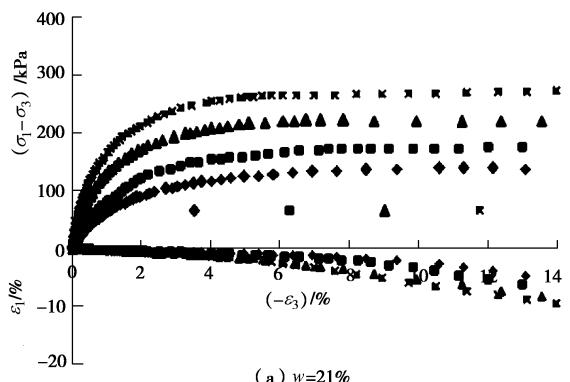


图1 平面应变竖向加载的应力应变曲线

Fig. 1 Curves of stress-strain with plane strain of vertical loading



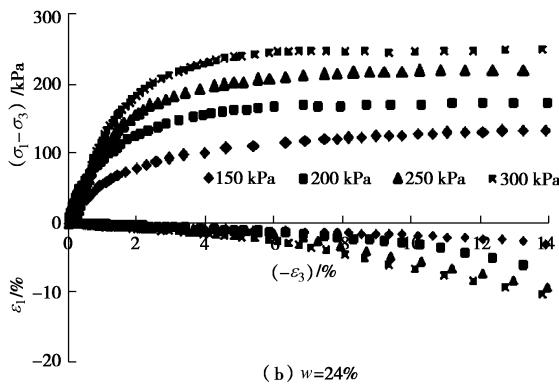


图 2 平面应变侧向卸载的应力应变曲线

Fig. 2 Curves of stress-strain with plane strain of lateral unloading

试验结果说明, 通过平面应变试验可以模拟土体的加、卸荷情况, 分析不同应力路径下土体的变形规律。在基坑开挖卸荷过程中, 坑壁土体的破坏往往是因为支护结构向基坑内产生变形时的土体达到主动土压力而发生失稳破坏, 因此, 对于侧向卸载情况来说直接研究应力侧向应变关系更直接、合适, 即图 2 中 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线可以更直接反映坑侧土体侧向卸载时应力的发展与侧向变形的关系。

2 平面应变竖向加载条件下黄土的应力应变关系描述

平面应变条件下, 不同含水率黄土竖向加载应力路径的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线呈双曲线关系, 即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \varepsilon_1 / (a + b\varepsilon_1) \quad , \quad (1)$$

式中, a, b 为与土的性质有关的试验参数。

依据测试的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 的应力应变关系, 得含水率分别为 21%, 24% 黄土的 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 近似呈直线关系, 如图 3 所示。其余含水率条件下的试验结果也有类似的规律。

由式(1), 可得参数 a 实际上是 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线的初始切线斜率的倒数, 即

$$a = 1/E_i \quad . \quad (2)$$

考虑 E_i 与初始固结围压 σ_{3c} 间的关系, 绘出 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_{3c}/p_a)$ 的关系曲线图, 二者近似呈直线关系, 如图 4 所示, 其中 p_a 为大气压 ($p_a = 101.4$ kPa), 量纲与 σ_{3c} 相同。

令直线的截距为 $\lg K$, 斜率为 n , 于是有

$$E_i = K p_a \left(\frac{\sigma_{3c}}{p_a} \right)^n \quad . \quad (3)$$

依据式(1), 当 $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$ 时, 则

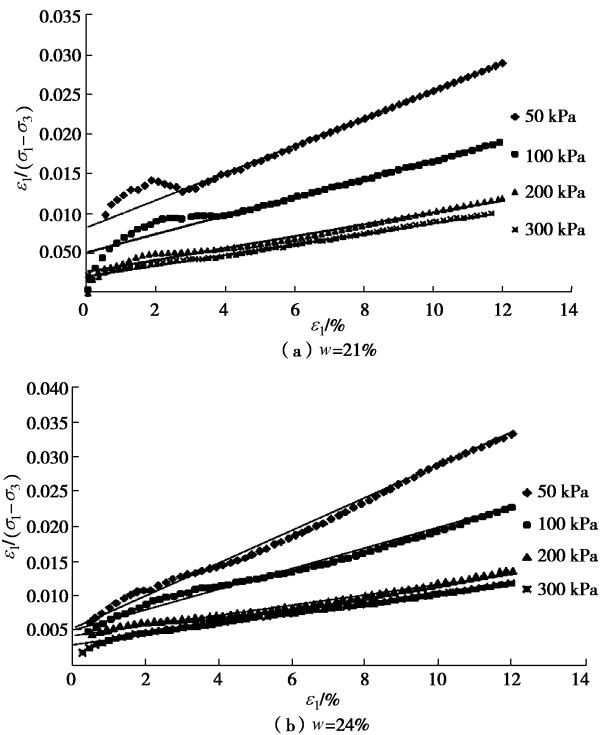
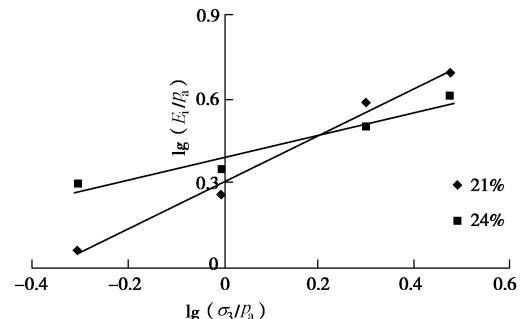
$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \quad . \quad (4)$$

令 $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$, 根据土的极限平衡条件, 得:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_{3c} \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad , \quad (5)$$

则

$$b = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} = \frac{R_f (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_{3c} \sin \varphi} \quad . \quad (6)$$

图 3 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线Fig. 3 Curves of $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 图 4 $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_{3c}/p_a)$ 关系曲线Fig. 4 Curves of $\lg(E_i/p_a) - \lg(\sigma_{3c}/p_a)$

依据广义虎克定律, 在平面应变加载条件下土的切线模量为

$$\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{E_t}{1 - \mu_t^2} = E_i (1 - S R_f)^2 \quad , \quad (7)$$

式中, $S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$ 。由式(7)可得

$$E_t = E_i (1 - S R_f)^2 (1 - \mu_t^2) \quad , \quad (8)$$

式中, μ_t 为泊松比。

由式(1)、(4)、(6)可得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{Kp_a \left(\frac{\sigma_{3c}}{p_a} \right)^n (2c \cos \varphi + 2\sigma_{3c} \sin \varphi) \varepsilon_1}{2c \cos \varphi + 2\sigma_{3c} \sin \varphi + R_f (1 - \sin \varphi) Kp_a \left(\frac{\sigma_{3c}}{p_a} \right)^n \varepsilon_1}。 \quad (9)$$

式(9)即为黄土竖向加载平面应变方向正交平面内主应力差与竖向应变的关系。

根据平面应变加载试验中轴向应变 ε_1 与侧向应变 $-\varepsilon_3$ 之间的关系可以得到 $-\varepsilon_3 / \varepsilon_1$ 与 $-\varepsilon_3$ 的关系近似为直线关系, 由此可得

$$-\varepsilon_3 / \varepsilon_1 = f + D(-\varepsilon_3) = f - D\varepsilon_3, \quad (10)$$

式中, $f = G - F \lg(\sigma_3 / p_a)$ 。

将式(10)微分, 可得

$$\frac{-d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} = \frac{(1 - D\varepsilon_1)f + D\varepsilon_1 f}{(1 - D\varepsilon_1)^2} = \frac{f}{(1 - D\varepsilon_1)^2}。 \quad (11)$$

依据广义胡克定律, 平面应变竖向加载条件下 $\sigma_3 = \text{constant}$, $d\sigma_3 = 0$, $\varepsilon_2 = 0$, $d\varepsilon_2 = 0$, 由式(11)可得

$$-\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1} = \frac{2\mu_t}{1 - \mu_t^2} \approx 2\mu_t。 \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得

$$\mu_t = \frac{f}{2(1 - D\varepsilon_1)^2}。 \quad (13)$$

整理后可得

$$\mu_t = \frac{f}{2(1 - A)^2}, \quad (14)$$

式中, $A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{(1 - R_f S)E_i}$ 。

平面应变竖向加载条件下, 不同含水率黄土的非线性模型参数 c , φ , K , n , R_f , D , G , F 如表1所示。

表1 土样竖向加载试验参数

Table 1 Test parameters of the soil in vertical loading

w/%	c/kPa	$\varphi/^\circ$	K	n	D	G	F	R_f
21	107	33.2	207	0.85	0.05	0.233	0.236	0.775
24	96	30.6	246	0.40	0.047	0.256	0.220	0.780

3 平面应变侧向卸载条件下黄土的应力应变关系描述

根据竖向加载应力-竖向应变非线性模型的建立思路, 同理可推导出侧向卸载条件下的应力-侧向变形关系。由图2可知, 侧向卸载应力路径上 $(\sigma_1 - \sigma_3) - -\varepsilon_3$ 关系曲线亦呈双曲线关系, 即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = -\varepsilon_3 / [a + b(-\varepsilon_3)]。 \quad (15)$$

依据测试的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - -\varepsilon_3$ 的应力应变关系, 得含水率分别为 21%、24% 黄土的 $(-\varepsilon_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) - (-\varepsilon_3)$ 近似呈线性关系, 如图5所示。其余含水率条件下的试验结果也有类似的规律。

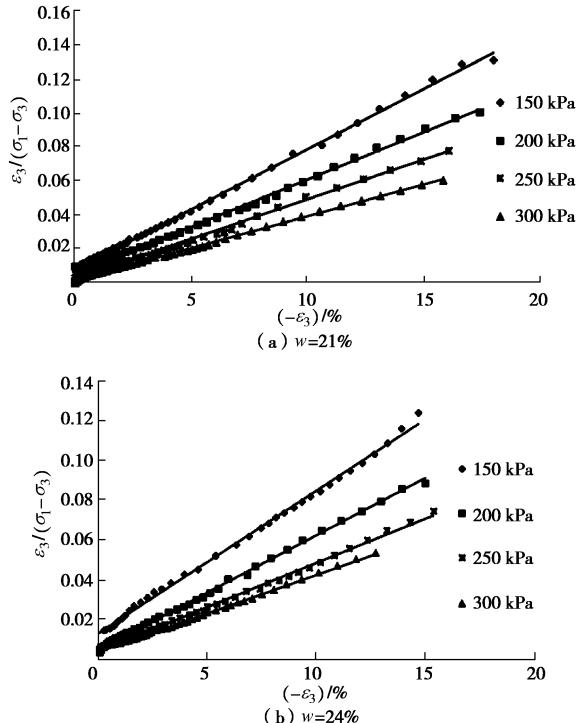


图5 $(-\varepsilon_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) - (-\varepsilon_3)$ 关系曲线

Fig. 5 Curves of $(-\varepsilon_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) - (-\varepsilon_3)$

由于在侧向卸载剪切试验中, 保持竖向应力 σ_1 不变, 侧向应力 σ_3 不断减小, 在卸载模型中考虑 E_i 与初始固结的竖向应力 σ_1 间的关系, 绘出 $\lg(E_i / p_a)$ 与 $\lg(\sigma_1 / p_a)$ 的关系曲线图, 二者近似呈直线关系, 如图6所示。

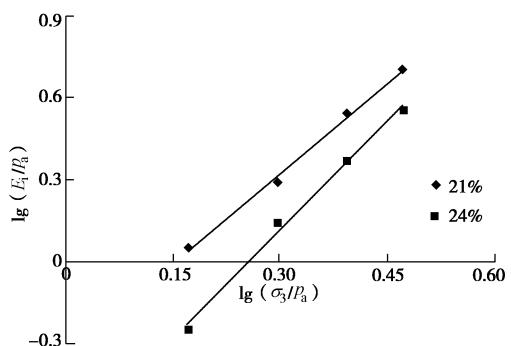


图6 $\lg(E_i / p_a) - \lg(\sigma_1 / p_a)$ 关系曲线

Fig. 6 Curves of $\lg(E_i / p_a) - \lg(\sigma_1 / p_a)$

E_i 为土体在侧向卸载条件下的初始切线模量:

$$E_i = Kp_a \left(\frac{\sigma_1}{p_a} \right)^n。 \quad (16)$$

根据土体侧向卸载时达到极限平衡条件时所满足

的关系可得

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_{3c} \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (17)$$

计算出平面应变卸载条件下土的切线模量为

$$E_t = E_i(1 - SR_f)^2(1 - \mu_t^2) \quad (18)$$

可推导出土体在侧向卸载应力路径下的应力与侧向应变的双曲线关系表达式:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{Kp_a \left(\frac{\sigma_1}{p_a} \right)^n (2c \cos \varphi + 2\sigma_1 \sin \varphi)(-\varepsilon_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_1 \sin \varphi + R_f(1 + \sin \varphi)Kp_a \left(\frac{\sigma_1}{p_a} \right)^n (-\varepsilon_3)} \quad (19)$$

根据平面应变侧向卸载试验中侧向应变 $-\varepsilon_3$ 与轴向应变 ε_1 之间的关系可以得到 $\varepsilon_1/(-\varepsilon_3)$ 与 ε_1 的关系近似为直线关系, 由此可得

$$\varepsilon_1/(-\varepsilon_3) = f + D\varepsilon_1 \quad (20)$$

式中, $f = G + F \lg(\sigma_1 / p_a)$ 。

将式 (20) 微分, 可得

$$\frac{d\varepsilon_1}{-d\varepsilon_3} = \frac{(1 + D\varepsilon_3)f - D\varepsilon_3f}{(1 + D\varepsilon_3)^2} = \frac{f}{(1 + D\varepsilon_3)^2} \quad (21)$$

平面应变侧向卸载条件下: $\sigma_1 = \text{constant}$, $d\sigma_1 = 0$, $\varepsilon_2 = 0$, $d\varepsilon_2 = 0$, 将其代入广义胡克定律可得

$$\frac{d\varepsilon_1}{-d\varepsilon_3} = \frac{\mu_t}{1 - \mu_t} \quad (22)$$

将式 (22) 代入式 (21) 可得

$$\mu_t = \frac{f}{f + (1 + D\varepsilon_3)^2} \quad (23)$$

整理后可得

$$\mu_t = \frac{f}{f + (1 + A)^2} \quad (24)$$

平面应变侧向卸载条件下, 不同含水率黄土的非线性模型参数 c , φ , K , n , R_f , D , G , F 如表 2 所示。

表 2 土样侧向卸载试验参数

Table 2 Test parameters of soils in lateral unloading

w/%	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	K	n	D	G	F	R_f
21	53	42.4	43.7	2.10	0.042	0.032	0.545	0.99
24	44	40.6	20.3	2.65	0.040	0.010	0.619	0.99

4 加、卸载模型预测曲线与实测结果对比分析

采用竖向加载模型计算出的曲线分别与上述竖向加载的试验数据进行比较, 结果如图 7 所示。

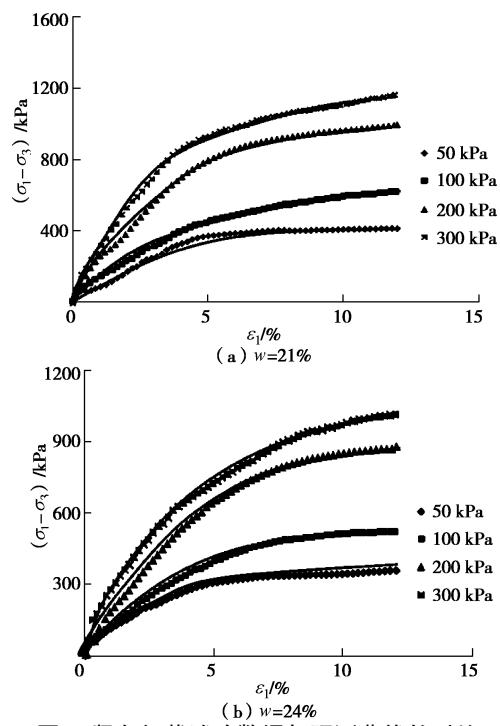


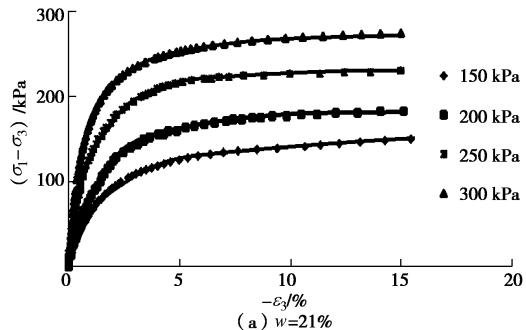
图 7 坚向加载试验数据与预测曲线的对比

Fig. 7 Comparison between predicated and test results under vertical loading

由图 7 可知, 在剪切的初始阶段, 模型预测的结果略微大于实测数据值, 分析其原因为: 在剪切过程中平面应变方向上的主应力逐步增长, 经历了由小主应力到中主应力的转换。因此, 平面应变条件下的应力应变曲线在剪切过程中的初始切线斜率要小于相应常规三轴条件下的斜率, 这也导致了将 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 双曲线型关系转换为 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 线性关系时在剪切初始阶段数据较为离散 (如图 3 所示), 影响了模型计算的精度; 随着剪切过程的发展, 模型预测结果与试验数据值基本吻合, 初步说明了本文中推导出的平面应变条件下非线性竖向加载模型能够较好的描述填土路堤地基竖向加载时的应力 - 应变特性。

采用侧向卸载模型计算出的曲线分别与上述侧向卸载的试验数据进行比较, 结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 侧向卸荷模型预测结果与试验数据值基本吻合, 说明了本文中推导出的平面应变条件下非线性侧向卸载模型能够较好的描述坑侧土体侧向卸载时的应力 - 侧向应变特性。



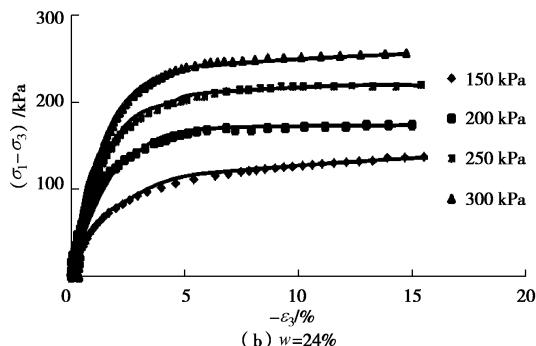


图 8 侧向卸载试验数据与预测曲线的对比

Fig. 8 Comparison between predicated and test results under lateral unloading

5 结 论

(1) 平面应变条件下的真三轴加、卸载试验所得应力 - 应变关系曲线的切线模量随着固结围压的增大而增大，固结围压对原状黄土的强度起增强作用。平面应变加、卸载试验条件下的应力 - 应变曲线均可用双曲线描述；由平面应变加、卸载试验的试验结果可见，应力路径对于原状 Q₃ 黄土的强度和变形特性影响较大。

(2) 平面应变条件下侧向卸载应力路径条件下的破坏应变要远小于竖向加载应力路径下的应变，在基坑开挖过程中，坑侧土体可以在相对较小的应变下发生破坏。

(3) 根据平面应变条件下的真三轴加、卸载试验所得到的应力 - 应变关系，推导了加、卸载原状黄土的非线性应力应变曲线的切线弹性模量和泊松比随应力状态的变化关系。通过模型预测结果与试验结果的比较表明，平面应变加、卸载非线性弹性模型能较好地描述路堤地基加载和基坑坑侧卸载土体的变形特性。

参 考 文 献:

- [1] 马险峰, 望月秋利, 温玉君. 基于改良型平面应变仪的砂土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1745 - 1753. (MA Xian-feng, MOCHIZUKI Akitoshi, WEN Yu-jun. Study of properties of sand based on improved plane strain test apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1745 - 1753. (in Chinese))
- [2] 何世秀, 朱志政, 杨雪强. 基坑土体侧向卸荷真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 869 - 872. (HE Shi-xiu, ZHU Zhi-zheng, YANG Xue-qiang. A study of true triaxial test on lateral unloading of soil mass of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 869 - 872. (in Chinese))
- [3] 陈善雄, 凌平平, 何世秀, 等. 粉质黏土卸荷变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2534 - 2538. (CHEN Shan-xiong, LING Ping-ping, HE Shi-xiu. Experimental study of deformation behavior of silty clay under unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2534 - 2538. (in Chinese))
- [4] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 天津市区第一海相层粉质黏土卸荷变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1237 - 1242. (ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang. Experimental studies of unloading deformation properties of silty clay of first marine layer in Tianjin urban area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1237 - 1242. (in Chinese))
- [5] 殷德顺, 王保田, 王云涛. 不同应力路径下的邓肯 - 张模型模量公式[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1380 - 1385. (YIN De-shun, WANG Bao-tian, WANG Yun-tao. Tangent elastic modulus of Duncan-Chang model for different stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1380 - 1385. (in Chinese))
- [6] 梅国雄, 陈浩, 卢廷浩, 等. 坑侧土体侧向卸荷的应力 - 应变关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3108 - 3112. (MEI Guo-xiong, CHEN Hao, LU Ting-hao. Reach on lateral stress-strain relation on side of foundation pit with lateral unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3108 - 3112. (in Chinese))
- [7] 李浩东, 骆亚生, 王瑞瑞, 等. 平面应变条件下非饱和黄土强度特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(11): 73 - 76. (LI Hao-dong, LUO Ya-sheng, WANG Rui-rui. An analysis of unsaturated loess under plane strain conditions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(11): 73 - 76. (in Chinese))
- [8] 李家贵, 陈正汉, 黄雪峰, 等. Q₃ 黄土侧向卸荷时的细观结构演化及强度特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1084 - 1091. (LI Jia-gui, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng. CT-triaxial shear tests on the meso-structure evolution and strength of unsaturated loess Q₃ during unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1084 - 1091. (in Chinese))
- [9] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172 - 1179. (SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172 - 1179. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)