

滨海新区浅层软土卸荷变形性状试验研究

魏少伟, 郑刚, 刘畅
(天津大学, 天津 300072)

摘要: 天津市滨海新区的城市开发建设正步入高速发展阶段, 出现了大量的深基坑工程等地下工程, 工程建设的需要使得针对滨海软土各种性状尤其是卸荷性状的研究成为必然。通过对天津市滨海新区浅层淤泥质粘土原状饱和试样进行的一系列 k_0 固结不排水三轴卸荷试验, 研究土体卸荷路径下的变形特性。试验表明, 滨海新区浅层土体的变形性状与应力路径密切相关。在侧向及竖向卸荷条件下土样的应力-应变曲线均可用双曲线函数模拟, 且土体初始卸荷模量随固结围压的增加而增加; 侧向与轴向卸荷条件下, 滨海新区浅层软土均有着比较明显的归一化性状, 其应力-应变关系随着固结围压线性变化。

关键词: 试验研究; 卸荷路径; 变形特性; 双曲线模型; 归一化性状

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)05-0077-06

土体是一种摩擦型非连续介质, 其变形特性复杂, 受应力状态、应力路径及应力历史的影响。长期的研究和实践表明, 软土在加荷、卸荷路径下的变形性状有着显著的差别, 而现有的理论基本上都是以加荷试验为依据建立的, 对于卸荷工程, 尽管也能计算(几乎所有本构模型均能适用于加卸荷计算), 但计算结果往往偏离工程实际。因此加强土体在卸荷路径下变形性状的研究有着十分重要的意义。

基坑工程是典型的卸荷工程, 被动区土体竖向卸荷, 主动区土体侧向卸荷。近年来国内很多学者在这方面进行了研究。曾国熙等^[1]认为, 软粘土的应力应变关系受应力路径的影响明显; 正常固结饱和粘土的应力应变曲线可以按双曲线拟合, 且具有良好的归一化特性。刘国彬^[2]对上海地区有代表性的三种淤泥质软土在卸荷路径下的变形特性进行了研究, 试验表明上海软土卸荷路径下应力应变曲线可用双曲线模拟, 且相对围压有良好的归一化特性, 并在此基础上提出了切线卸荷模量的计算公式。潘林有等^[3]针对温州地区浅层原状粉质粘土进行大量的常规固结回弹试验, 通过对试验的深入分析, 提出了回弹区与强回弹区的范围, 并定义了卸荷比、回弹率、回弹模量的指标与试验方法, 推导了估算回弹量的简易公式。王保田等^[4]通过侧向卸荷应力路径试验, 分析了天然固结地

基土在基坑开挖侧向卸荷过程中墙后土体的变形规律, 根据双曲线假定, 并引用 Duncan-Chang 模型的计算参数推导了其模量公式。公式能够较真实地反映侧向卸荷应力路径下土体变形规律, 其计算参数可以通过常规三轴试验获得。师旭超等^[5]通过大量卸荷试验研究了淤泥质土在卸荷作用下的变形特性。试验结果表明, 淤泥的回弹变形存在临界卸荷比, 若淤泥的卸荷比小于临界卸荷比时, 淤泥不会发生回弹变形; 淤泥的回弹变形分为主回弹阶段、次回弹阶段、附加次固结变形阶段。

本课题组曾经对天津市第一海相层粉质粘土的卸荷变形性状进行了研究^[6], 推导的天津第一海相层粉质粘土初始切线卸荷模量计算公式可用于天津市基坑工程的设计计算。随着滨海新区开发建设步伐的加快, 有大量在建或者即将建设的深基坑工程等地下工程, 工程建设的需要使得针对滨海软土各种性状尤其是卸荷性状的研究成为必然。目前国内尚无关于滨海新区土体卸荷性状研究的报道。本课题组以滨海新区市民广场基坑工程附近浅层饱和原状淤泥质粘土为研究对象, 在一系列特殊三轴试验的基础上对土体的卸荷变形性状进行了研究, 揭示了土体在卸荷状态下的应力应变变化规律。

1 应力路径试验简介

1.1 试验仪器

本试验是在现有的 TSZ-1.0 应变控制式三轴仪主机基础上, 自主开发的可以实现应力-应变联合控制的三轴试验仪上进行的, 仪器改造的详细介绍见参

收稿日期: 2010-03-17; 修订日期: 2010-04-14

作者简介: 魏少伟(1984-), 男, 博士研究生, 从事土力学与岩土工程相关研究。

E-mail: weironi@yahoo.com.cn

考文献[7]。经过改造后的仪器,可以实现对土样轴向与侧向分别加卸荷,这也使得进行土样的特殊应力路径试验成为可能。土样采用薄壁取土器取土,用连续压入法均匀取样,制样过程严格按照土工试验规程进行,避免对土样造成大的扰动。试样直径为3.91cm,高8cm,采用真空抽气法饱和。本次试验的卸荷均在不排水条件下进行。

1.2 试验应力路径确定

基坑开挖过程中基坑周围各部分土体经历的应力路径明显不同。主动区土体由于支护结构发生侧移,水平应力减小,而竖向应力则基本不变,如图1所示的单元C。被动区土体在开挖过程竖向卸荷明显,水平向则可能卸荷,甚至可能加荷。对于图1中单元A,由于处于开挖中心,受挡土墙变形影响较小,侧向卸荷;对于单元B,由于挡土墙向坑内侧移,其侧向卸荷量明显小于单元A,甚至可能出现不变或加荷。

依据以上路径分析,本次试验先根据土样取土深度求得其有效重度进行 k_0 排水固结,固结结束后进行卸荷应力路径试验。 k_0 按 $k_0 = 1 - \sin\varphi'$ 取值,式中 φ' 为土的有效内摩擦角。土样的卸荷分级进行,在某一级荷载作用下孔压与轴向变形基本稳定后才可进行下一级卸荷。卸荷比分别为 $UU = 0, UU = 4, UU = \infty$ 。符号UU表示竖向卸荷应力值与水平向卸荷应力值的比值,其中 $UU = 0$ 和 $UU = \infty$ 分别代表了主动区和被动区两种极端情况下的应力路径。土样取自四个土层,取土深度分别为6.7m、10.7m、12.3m、15.0m。试验土样均为典型的淤泥质粘土。

在以上试验的基础上,进行土体在不同围压作用下的卸荷路径试验,卸荷比选取依据基坑开挖深度,土样取土深度小于基坑开挖深度,模拟主动区土体侧向卸荷,即 $UU = 0$;土样取土深度大于基坑开挖深度,模拟被动区土体轴向卸荷,即 $UU = \infty$ 。本次试验,取土深度为6.7m、10.7m的土样模拟主动区侧向卸荷;取土深度为15.0m的土样模拟被动区轴向卸荷。

2 应力路径试验结果

2.1 应力应变关系曲线

考虑到路径 $UU = \infty$ 或 $UU = 4$ 土样处于轴向拉伸状态,发生应力主轴旋转,采用 $\sigma_v - \sigma_h$ 代替 $\sigma_1 - \sigma_3$ 。其中 σ_v 表示竖向应力, σ_h 表示水平应力。图2~5为不同卸荷路径下各个取土深度(6.7m, 10.7m, 12.3m及15.0m)土样的应力增量-应变关系曲线。图中纵坐标表示应力增量, $\Delta(\sigma_v - \sigma_h) = (\sigma_v - \sigma_h) - (\sigma_{vc} - \sigma_{hc})$

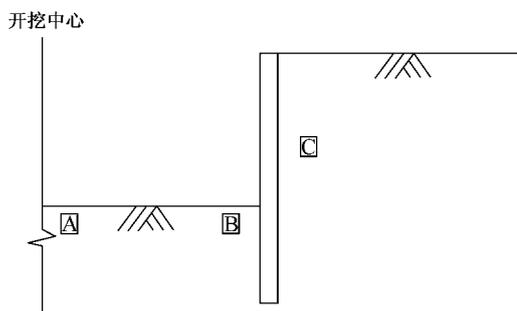


图1 基坑工程示意图

Fig.1 The profile of excavation

$-\sigma_{hc})$,横坐标 ε_v 表示轴向应变。式中 $(\sigma_{vc} - \sigma_{hc})$ 表示固结完成后竖向应力与水平应力差值。拉伸时 $\Delta(\sigma_v - \sigma_h)$ 为负值,压缩时为正值,为了方便对比,假定处于拉伸状态土样($UU = \infty, UU = 4$)的应力增量 $\Delta(\sigma_v - \sigma_h)$ 与轴向应变 ε_v 与压缩状态土样($UU = 0$)的正负一致,均设为正值。从图2~5中可以看出,拉伸状态土样($UU = \infty$)的初始卸荷模量明显大于压缩状态土样($UU = 0$)的初始卸荷模量;轴侧向卸荷比4:1($UU = 4$)的土样,其变形性状介于拉伸与压缩状态之间,更接近拉伸状态。无论土样处于何种路径,卸荷初期,土样变形较小,随着卸荷量增加,土样变形量迅速增大,直至土样破坏,而且不同深度土样表现出类似的卸荷变形性状。

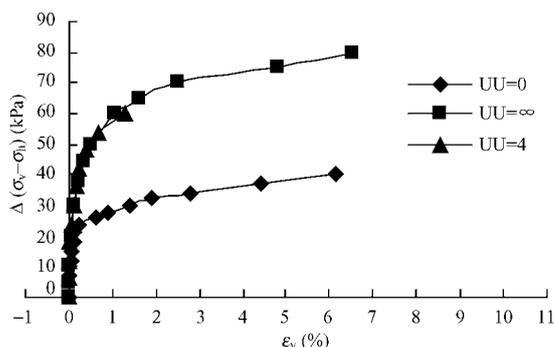


图2 深度6.7m处土样不同卸荷路径应力增量-应变曲线

Fig.2 Stress increment-strain curves for soil at depth of 6.7m under different unloading paths

图6~8为同一卸荷路径不同围压下土样的应力-应变曲线。图中纵坐标 $\sigma_v - \sigma_h$ 表示竖向与水平向应力差,横坐标 ε_v 表示轴向应变。其中深度为6.7m与10.7m土样取侧向卸荷应力路径($UU = 0$);深度为15.0m土样取轴向卸荷应力路径($UU = \infty$)。从图6~8中可知,相同卸荷路径不同围压下土样的应力-

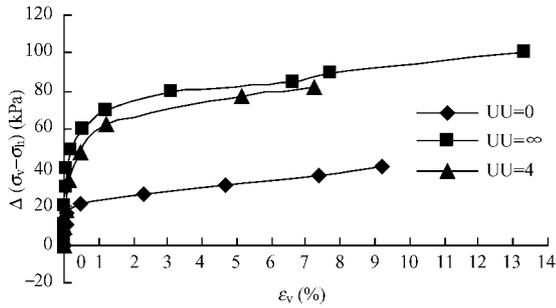


图 3 深度 10.7m 处土样不同卸荷路径
应力增量 - 应变曲线

Fig. 3 Stress increment-strain curves for soil at depth of 10.7m under different unloading paths

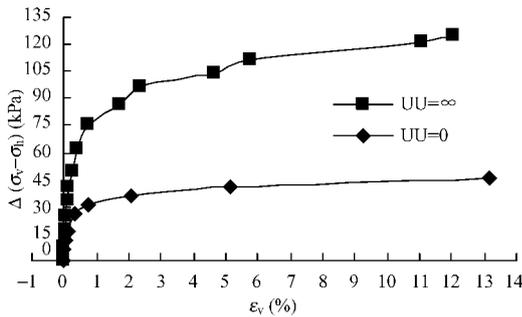


图 4 深度 12.3m 处土样不同卸荷路径
应力增量 - 应变曲线

Fig. 4 Stress increment-strain curves for soil at depth of 12.3m under different unloading paths

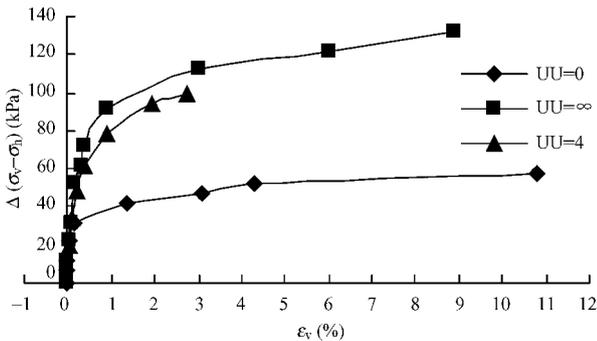


图 5 深度 15.0m 处土样不同卸荷路径
应力增量 - 应变曲线

Fig. 5 Stress increment-strain curves for soil at depth of 15.0m under different unloading paths

应变曲线相似。图 6 ~ 8 将在下面重点讨论。首先应用双曲线对这些应力 - 应变关系曲线进行拟合,并在此基础上得出土体初始切线卸荷模量。由于土体侧向与轴向卸荷变形性状的差别,将分别讨论侧向卸荷与轴向卸荷变形性状,以更清楚地揭示其规律。

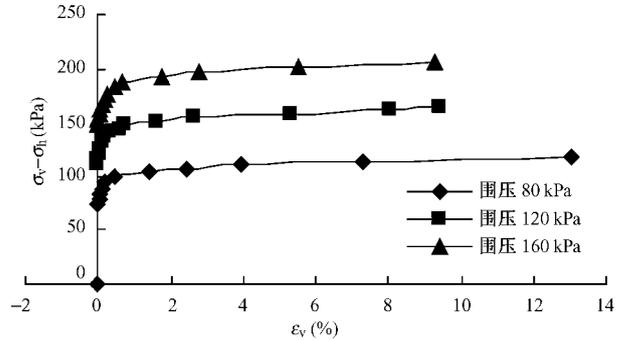


图 6 深度 6.7m 处土样不同围压
下侧向卸荷应力 - 应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves for soil at depth of 6.7m under lateral unloading path

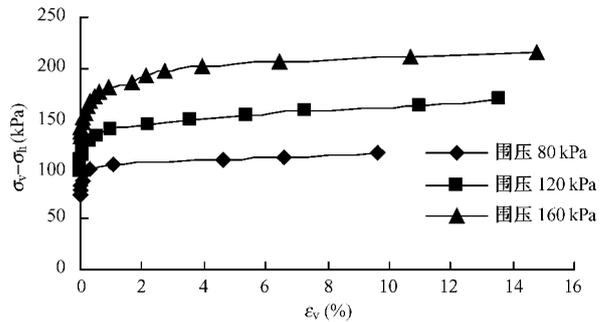


图 7 深度 10.7m 处土样不同围压下侧
向卸荷应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves for soil at depth of 10.7m under lateral unloading path

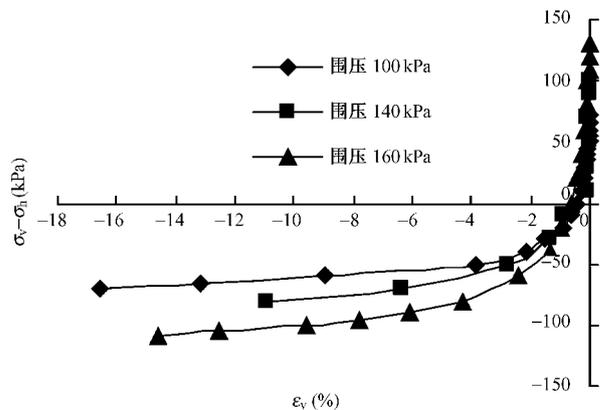


图 8 深度 15.0m 处土样不同围压下轴
向卸荷应力 - 应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves for soil at depth of 15.0m under axial unloading path

2.2 应力 - 应变双曲线拟合

Kondner^[8]早在 1963 年便提出可以用双曲线函数来表达粘性土固结不排水三轴压缩试验的应力 - 应变

关系,其函数表达式为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1)$$

UU = 0 路径下,土样处于压缩状态,公式(1)适用;UU = ∞ 路径下,土样处于拉伸状态,会发生应力主轴旋转。采用 $\sigma_v - \sigma_h$ 代替 $\sigma_1 - \sigma_3$, ε_a 代替 ε_1 , ε_a 为轴向应变,(1)式可以写成:

$$(\sigma_v - \sigma_h) = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (2)$$

由于是 k_0 固结,存在初始剪应力 $(\sigma_{vc} - \sigma_{hc})$,为消除其影响,将(2)式改为:

$$(\sigma_v - \sigma_h) - (\sigma_{vc} - \sigma_{hc}) = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (3)$$

或

$$\frac{\varepsilon_a}{(\sigma_v - \sigma_h) - (\sigma_{vc} - \sigma_{hc})} = a + b\varepsilon_a \quad (4)$$

公式(4)与 Y P Vaid^[9](1984)提出的模拟土体应力-应变关系的双曲线函数类似,适用于压缩与拉伸状态的土样。式中, σ_{vc} 、 σ_{hc} 为固结状态下的轴压和围压; a 、 b 分别为所拟合的直线的截距和斜率,土样的初始切线斜率为 $1/a$,定义为初始切线卸荷模量 $E_i = 1/a$;而土样的极限剪切强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$ 。

2.2.1 侧向卸荷应力-应变双曲线拟合

将图 6、7 的应力-应变关系(侧向卸荷)根据式(4)进行双曲线拟合得到图 9~10。图中纵坐标为 $\varepsilon_a \times 10^{-2} / ((\sigma_v - \sigma_h) - ((\sigma_{vc} - \sigma_{hc})))$,横坐标 ε_a 为轴向应变。从图上看,在侧向卸荷路径条件下,不同的固结压力时,几乎所有的应力-应变曲线都呈良好的线性关系,这证明式(4)能够很好地模拟试验结果。在侧向卸荷条件下,滨海新区浅层软土的应力-应变关系也能由双曲线函数表达。从图 9~10 可以得出侧向卸荷路径土样在不同围压下的初始切线卸荷模量,见表 1。土样的初始切线卸荷模量随固结围压的变化呈现出明显的规律性,即随着固结围压的增大,土样的初始切线卸荷模量也增大。而深度为 10.7m 的土样在相同固结围压下其初始切线卸荷模量明显大于深度为 6.7m 的土样,这也说明随着深度的增加,土样会变

表 1 UU = 0 的初始切线卸荷模量

Table 1 The initial tangent modulus for UU = 0 tests

深度 (m)	6.7			10.7		
围压 (kPa)	80	120	160	80	120	160
a (MPa ⁻¹)	0.102	0.05	0.049	0.067	0.056	0.049
E_i (MPa)	9.803	20.0	20.41	14.93	17.86	20.41

得更加密实(对粘性土即孔隙比越小),其变形形状也会越好。

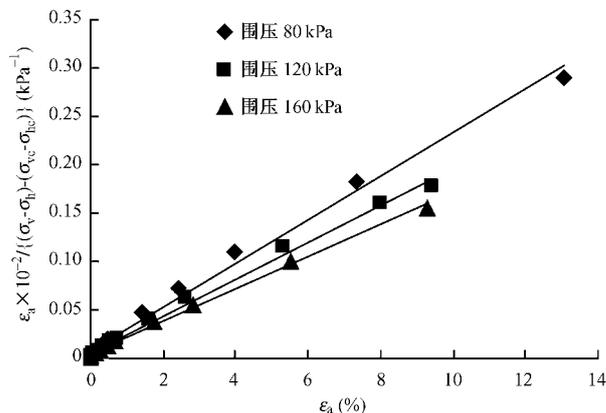


图 9 深度 6.7m 土样侧向卸荷应力-应变双曲线拟合
Fig. 9 Hyperbolic stress-strain curves for soil at depth of 6.7m under lateral unloading path

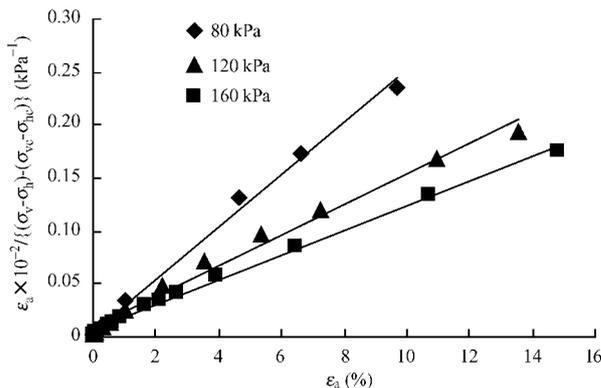


图 10 深度 10.7m 土样侧向卸荷应力-应变双曲线拟合
Fig. 10 Hyperbolic stress-strain curves for soil at depth of 10.7m under lateral unloading path

2.2.2 轴向卸荷应力-应变双曲线拟合

将图 8 的应力-应变关系(轴向卸荷)根据式(4)进行双曲线拟合得到图 11 所示,图中纵坐标为 $\varepsilon_a \times 10^{-2} / ((\sigma_v - \sigma_h) - ((\sigma_{vc} - \sigma_{hc})))$,横坐标 ε_a 为轴向应变。从图上看,在轴向卸荷路径条件下不同的固结压力时,几乎所有的应力-应变曲线都呈良好的线性关系,与侧向卸荷得出的结论一致。这也表明在侧向卸荷条件下,滨海新区浅层软土的应力-应变关系也能由双曲线函数表达。轴向卸荷路径土样在不同围压下的初始切线卸荷模量见表 2。从表 2 中可知,轴向卸荷条件下土样的初始卸荷模量随着固结围压的增大而增大,此规律与侧向卸荷一致。比较表 2 与表 1,明显看出轴向卸荷条件下土样的初始卸荷模量大于侧向卸荷条件。

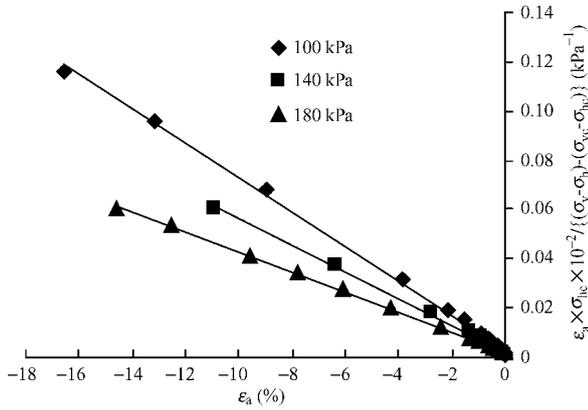


图 11 深度 15.0m 土样轴向卸荷应力 - 应变双曲线拟合
Fig. 11 Hyperbolic stress-strain curves for soil at depth of 15.0m under axial unloading path

表 2 UU = ∞ 的初始切线卸荷模量

Table 2 The initial tangent modulus for UU = ∞ tests

取土深度 (m)	15.0		
围压 (kPa)	100	140	180
a (MPa^{-1})	0.023	0.016	0.01
E_t (MPa)	43.478	62.5	100.0

2.3 应力 - 应变关系归一化性状

以上分析得出,侧向与轴向卸荷路径下土样的初始切线卸荷模量随固结围压的变化呈现出明显的规律性,所以,其应力 - 应变关系相对于固结围压可能存在归一化性质。将式(4)改写成:

$$\frac{\varepsilon_a \times \sigma_{hc}}{(\sigma_v - \sigma_h) - (\sigma_{vc} - \sigma_{hc})} = \bar{a} + \bar{b}\varepsilon_a \quad (5)$$

式中: \bar{a} 、 \bar{b} 为据式(5)拟合的直线的截距和斜率,且 $\bar{a} = a\sigma_{hc}$ 、 $\bar{b} = b\sigma_{hc}$ 。利用式(5)对图 6~8 的应力 - 应变曲线进行相对于围压的归一化处理(图 12~14)。图中纵坐标为 $\varepsilon_a \times \sigma_{hc} \times 10^{-2} / ((\sigma_v - \sigma_h) - (\sigma_{vc} - \sigma_{hc}))$,横坐标 ε_a 为轴向应变。

如图 12~14 所示,在同一类应力路径下,除少数点有离散外,大多数点都呈集中、线性排列,这表明在侧向与轴向卸荷条件下,滨海新区浅层软土有着比较明显的归一化性状,即其应力 - 应变关系随着固结围压线性变化。这一结论的得出,以及土的卸荷应力 - 应变关系可以很好地应用双曲线函数模拟,使得可以很方便地应用邓肯张模型去表述土的卸荷特性,并方便工程应用。

3 结论

(1) 土样的变形特性与应力路径密切相关。轴向

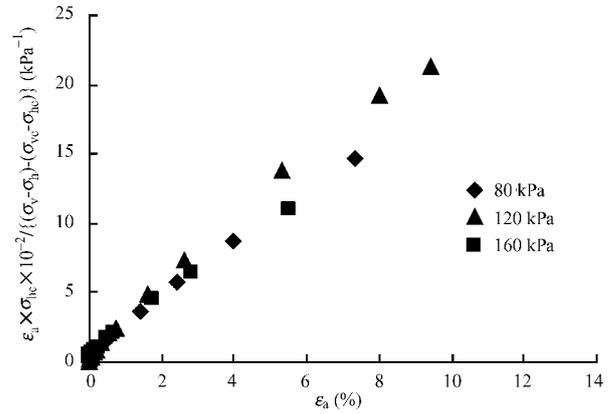


图 12 深度 6.7m 土样侧向卸荷应力 - 应变双曲线按固结围压归一化

Fig. 12 Normalized hyperbolic stress-strain curves at depth of 6.7m under lateral unloading path

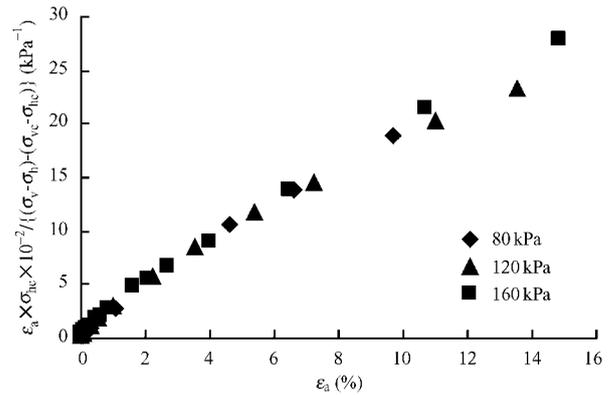


图 13 深度 10.7m 土样侧向卸荷应力 - 应变双曲线按固结围压归一化

Fig. 13 Normalized hyperbolic stress-strain curves at depth of 10.7m under lateral unloading path

卸荷 (UU = ∞) 与侧向卸荷 (UU = 0) 变形性状存在较大差异,轴侧向卸荷比 4:1 (UU = 4) 的土样其变形性状介于两者之间,更接近于轴向卸荷。在同样的固结压力下,卸荷模量是随着卸荷比 (UU) 的增大而增大的。

(2) 对不同深度处土样的侧向或轴向卸荷 (UU = 0 或 UU = ∞) 应力 - 应变关系曲线应用双曲线函数进行模拟,得出双曲线模型能较好的模拟试验结果,且试验曲线存在比较明显的归一化性状,可以用固结围压进行归一化处理。在侧向或轴向卸荷条件下,土的初始卸荷模量随着围压的增大而增大。这也使得应用邓肯张模型去表述土的卸荷特性成为可能,对改善工程计算有利。

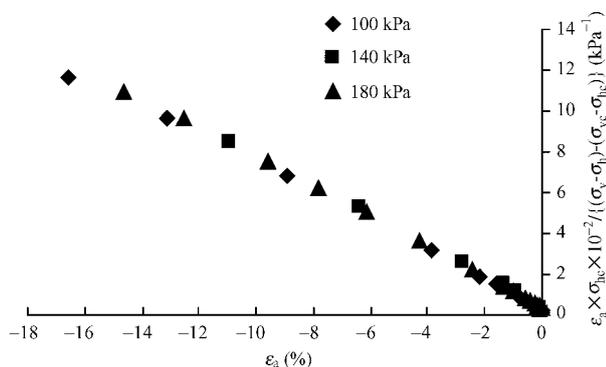


图 14 深度 15.0m 土样轴向卸荷应力 - 应变
双曲线按固结围压归一化

Fig. 14 Normalized hyperbolic stress-strain curves
at depth of 15.0m under axial unloading path

参考文献:

[1] 曾国熙,潘秋元,胡一峰. 软黏土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报,1988,10(3):13-22.

[2] 刘国彬. 软土卸荷变形特性的试验研究[D]. 上

海:同济大学,1993.

[3] 潘林有,胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(1):101-104.

[4] 李守德,王保田. 天然地基土在基坑开挖侧向卸荷过程中的模量计算[J]. 土木工程学报,2003,35(5):70-74.

[5] 师旭超,汪稔,韩阳. 卸荷作用下淤泥变形规律的试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(8):97-100.

[6] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等. 天津市区第一海相层粉质粘土卸荷变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(5):1237-1242.

[7] 颜志雄. 卸荷路径下软土力学性状的试验研究及基坑开挖对邻近桩基影响的分析[D]. 天津:天津大学,2007.

[8] Kondner R L. Hyperbolic stress - strain response: cohesive soils [J]. Journal of Soil Mechanics and foundation ,American Society of Civil Engineers ,1963,89(1):115-143.

[9] Y P Vaid. Effect of consolidation history and stress path on hyperbolic stress - strain relations [J]. Canadian Geotechnical Journal ,1985,22:172-176.

Experimental studies on unloading deformation properties of soft clay in Binhai New Area

WEI Shao-wei , ZHENG Gang , LIU Chang
(Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

Abstract: With high speed development of the city construction in Tianjin Binhai New Area , a great deal of underground engineering such as deep foundation excavations came forth. This made the research on the properties of soft clay in Binhai New Area become necessary , especially for the unloading properties. Using the improved triaxial equipment , a series of k_0 consolidation and undrained tests have been carried out to study the unloading deformation properties of the soil in Tianjin Binhai New Area. According to the experimental results , it can be conclude that the unloading deformation properties of the soft clay are relative to the stress path. The stress - strain curves of the soil under lateral or vertical unloading path can be simulated by hyperbola function and the initial tangent modulus is proportional to the confining pressure. Also the soft clay under lateral or vertical unloading path has obvious normalization character. The stress - strain relations vary linearly with the variation of confining pressure.

Key words: experimental studies; unloading path; deformation properties; hyperbolic model; normalization character

责任编辑:张明霞