

结构性吹填软土蠕变模型研究

杨爱武^{1,2}, 闫澍旺³, 杜东菊^{1,2}

(1. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300381; 2. 天津城市建设学院 天津市软土工程特性与工程环境重点实验室, 天津 300381;
3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300381)

摘 要: 以天津滨海新区吹填场地经过真空预压处理的吹填软土为试验材料, 对原状土及其重塑土基本性质与蠕变特性进行了试验研究。试验结果表明: 经过真空预压处理后的吹填软土同时具有结构性和蠕变性, 结构性的存在, 对土体蠕变具有重要的影响。在修正的剑桥模型的基础上, 对其进行改进, 使其考虑结构性的影响, 并以此作为蠕变屈服函数, 建立了考虑结构性影响的吹填软土半经验半理论蠕变模型。计算结果表明, 该模型符合结构性吹填软土实际, 可在工程实践中应用。

关 键 词: 吹填软土; 结构性; 结构屈服应力; 蠕变模型

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Study of creep model of structural soft dredger fill

YANG Ai-wu^{1,2}, YAN Shu-wang³, DU Dong-ju^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300381, China;
2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300381, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300381, China)

Abstract: The basic characteristics and creep properties of undisturbed and remolded soft dredger fills treated by vacuum preloading from reclamation site in Binhai New Area of Tianjin, are studied. The results show that the soft dredger fill treated by vacuum preloading not only has structural characteristics but also has creep properties; the structural characteristics play a very important role in creep properties of the soil. Through updating the modified Cambridge model, it can consider the impact of structural characteristics; then making it as yield function of creep model, a semi-empirical and semi-theoretical creep model considering the impact of structural characteristics is established. The calculated results show that this model fits the fact of structural soft dredger fill, so it can be put into engineering practice.

Key words: soft dredger fill; structure; structure yield stress; creep model

1 引 言

天津滨海新区属于典型的淤泥质海岸, 蜿蜒的海岸、巨厚的淤泥质河口沉积, 决定了进行人工造陆时其吹填物质主要以细粒土为主, 黏土矿物所占比例高达 50%以上, 并以伊利石、伊蒙混层为主, 这是在我国东部沿海地区吹填造陆中比较特殊的吹填物源, 这种物质组成使其有别于我国其他地区吹填土, 经过真空预压地基处理后, 其结构性强, 蠕变变形不可低估。由于结构性和蠕变特性的存在, 使得吹填场地工后沉降计算及控制显得更为复杂。现有的各种本构模型实际上都是针对饱和扰动土和砂土而发展起来的, 考虑结构影响的较少, 且主要是弹性非线性以及弹塑性模型^[1-5], 对于蠕变模型

的研究则相对较少^[6-10]。现实的土体都具有结构性^[11-12], 这一内在因素对土体力学性能, 当然也包括土体的本构关系具有重要的影响, 其结果必然是计算数值与实际情况有一定的差距。本文在前人研究的基础上, 以半理论半经验蠕变模型为基础, 将结构性影响引入到模型中, 尝试建立考虑结构性的黏弹塑性本构模型, 对于减少和防治吹填场地工后沉降具有巨大的经济效益。

2 三轴蠕变试验

2.1 土的基本性质

本文研究的样品取自天津滨海新区临港工业区经过真空预压处理的吹填场地, 其物理力学性质如表 1 所示。无侧限抗压强度曲线见图 1, 一维压缩

曲线见图 2。

表 1 吹填软土的物理力学表
Table 1 Basic physico-mechanical parameters
of soft dredger fill

含水率 /%	天然密度 /(g/cm ³)	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa
55.5	1.72	1.495	42.4	21.4	21.0	1.067	2.305

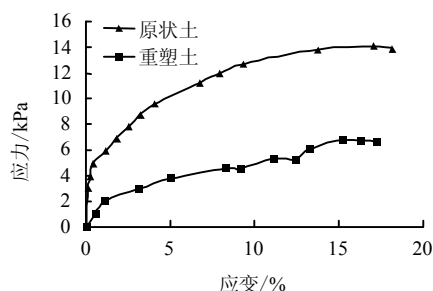


图 1 无侧限抗压强度
Fig.1 Unconfined compressive strength

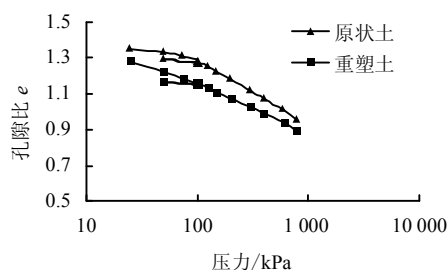


图 2 一维压缩曲线
Fig.2 One-dimensional compression curves

从表 1 可以看出，经过真空预压处理后的吹填软土亦为高含水率软土。由图 1 可知，原状样与重塑样（按与原状样相同的含水率及重量进行制样）无侧限抗压强度曲线都表现为应变硬化型。原状样无侧限抗压强度要比相同应变下重塑土的无侧限抗压强度高，其差值为结构性作用的结果。再由图 2 可知，重塑土压缩曲线为直线，原状土压缩曲线不为直线，可用两条折线拟合，两直线的交点即为结构屈服应力。总之，吹填软土经过真空预压处理后具有明显的结构性，在实际工程应用中要考虑到其结构性的影响。

2.2 蠕变试验

对于有结构性的吹填软土，原状土与重塑土性质差别很大，蠕变也不例外。目前天津滨海新区吹填场地最大深度在 10 m 左右，为了使研究的成果更符合现场工程实际，所采用的最大围压为 100 kPa。由于吹填软土为高塑性指数的黏土，且现场实际中不会有好的排水条件，因此，本文仅开展了不同围压下的不固结不排水蠕变试验，试验样品为原状样及其相应的重塑样。试验仪器采用 TSS10 土体三轴蠕变试验仪，不同偏应力 S 作用下变形随时间变化如图 3 所示。

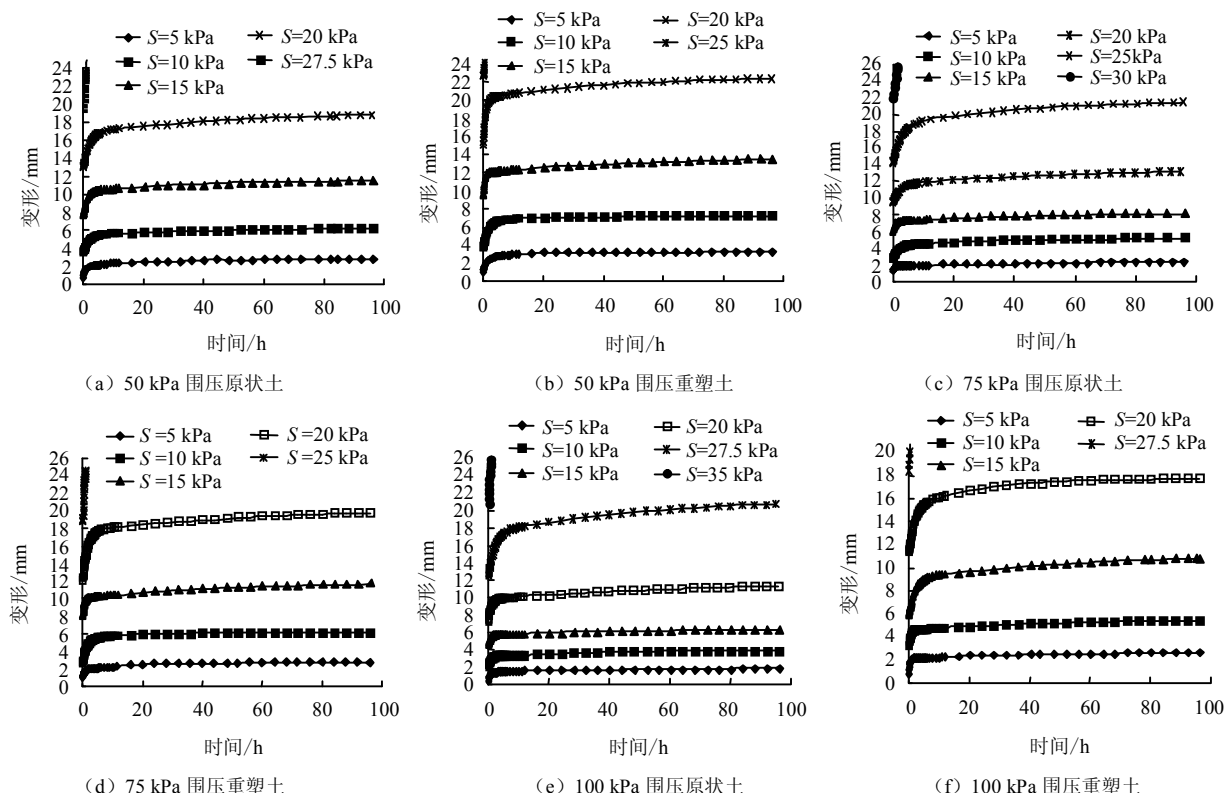


图 3 不同围压下的不固结不排水蠕变变形历时曲线
Fig.3 Creep diachronic curves of unconsolidated undrained test under different confining pressures

图 3 表明, 结构性的存在, 原状土与重塑土的蠕变有明显区别。首先是应力水平相同时, 原状土的蠕变量小于重塑土, 再次是最终的蠕变破坏应力水平也是原状土大于重塑土。

3 考虑结构性蠕变模型的建立

由文献[13]对吹填软土应力-应变等时曲线分析知: 在任意一级荷载下任意时刻的应变都可分解成线性黏弹性应变、线性黏塑性应变以及非线性黏塑性应变。因此, 本文采用这种方法来建立滨海吹填软土的非线性蠕变本构模型。即将吹填软土的总变形分为线性蠕变部分和非线性蠕变部分, 线性蠕变部分用模型理论来研究, 而非线性蠕变部分则用一经验模型来描述。当应力小于原状土结构屈服应力或重塑土屈服应力时, 吹填软土表现为线性黏弹性特征; 当应力大于原状土结构屈服应力或重塑土屈服应力时, 则表现为非线性黏塑性特性, 其中黏塑性变形又可分为线性黏塑性变形和非线性黏塑性变形的叠加。因此, 吹填软土的蠕变模型可以用线性黏弹性模型 (包括瞬时弹性变形)、线性黏塑性模型与非线性黏塑性模型三者串联而成, 具体模型如图 4 所示。

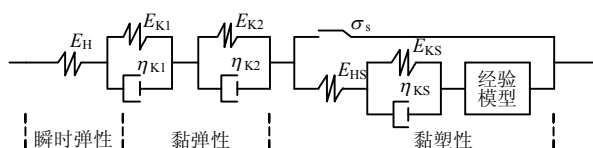


图 4 吹填软土蠕变模型

Fig.4 Creep model of soft dredger fill

图 4 中: E_H 为虎克体弹簧模量; E_{K_i} 、 η_{K_i} 为 Kelvin 体弹性模量和黏滞系数; E_{HS} 为虎克体弹簧模量; E_{KS} 、 η_{KS} 为 Kelvin 体弹性模量和黏滞系数; σ_s 为开关即屈服函数。屈服函数的选用是模型建立的关键。屈服函数决定了土体何时进入屈服状态即蠕变状态, 对蠕变变形量大小的计算起着重要的作用。传统的屈服函数如 Drackev-Prager (简称 D-P) 模型、修正的剑桥模型等都未考虑结构性的影响, 作为屈服状态的开关时, 忽略结构性的存在, 使计算结果与实际有出入。本文将以修正的剑桥模型为基础, 对其进行改进, 使其考虑结构性的影响, 再以此作为屈服函数, 结合蠕变特性试验成果, 建立一个适合吹填场地实际的蠕变本构模型。

3.1 对土的强度包线的处理

剑桥模型假定正常固结土的强度包线在 p' - q

平面上是通过坐标原点的 (见图 5)。实际上土具有凝聚力, 邓肯建议采用强度包线不通过原点, 而在 p' 轴上相交于离原点距离为 p'_r (见图 6), 也就是说所有公式中有关 p' 的量都应加上 p'_r 的值。本文认为还不够, 由于结构的存在, 强度包线不应为直线, 而应为折线, 折线交点处为剪切屈服应力, 具体见图 7。

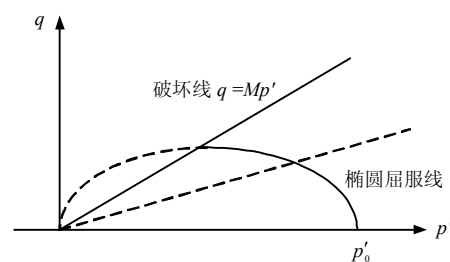


图 5 修正剑桥模型示意图

Fig.5 Sketch of modified Cambridge model

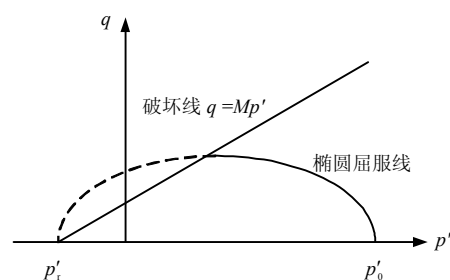


图 6 邓肯对剑桥模型的修正

Fig.6 Modified Cambridge model of Duncan

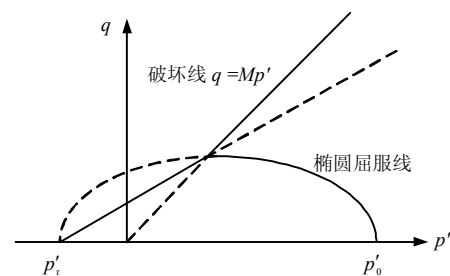


图 7 本文对剑桥模型的修正

Fig.7 Modified Cambridge model by the authors

3.2 对等向压缩曲线的处理

剑桥模型假定等向压缩曲线的斜率 λ 为常数 (见图 8)。邓肯认为, 等向压缩曲线的斜率 λ 不是常数, 可随 p' 改变而改变。因此, 输入 λ 的是一系列数值, 在计算时通过内插来决定处于某一应力状态的 λ 值。本文对其进行简化, 认为压缩斜率 λ 分为两段, 分界点处为同向固结结构屈服应力, 如图 9 所示。

根据等向固结试验得到以塑性体积应变为硬化

参量的剑桥模型屈服函数为^[14]

$$F = \frac{\lambda - k}{1 + e_0} \ln \frac{p}{p_0} + \frac{\lambda - k}{1 + e_0} \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

式中各符号含义详见文献[14]。

本文按以上对土的强度包线的处理以及对等向压缩曲线的处理对修正剑桥模型进行改进。在计算时,将式(1)中 λ 、 M 在结构屈服应力前后分别用 λ_1 、 λ_2 以及 M_1 、 M_2 代替。

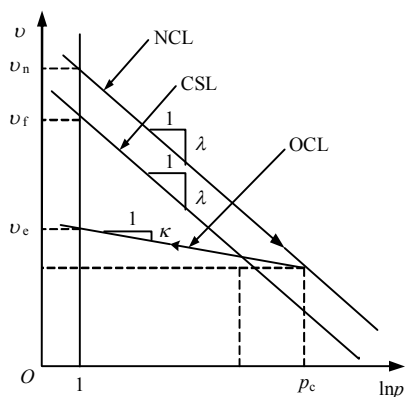


图8 剑桥模型等向压缩曲线

Fig.8 Isotropic compression curves of Cambridge model

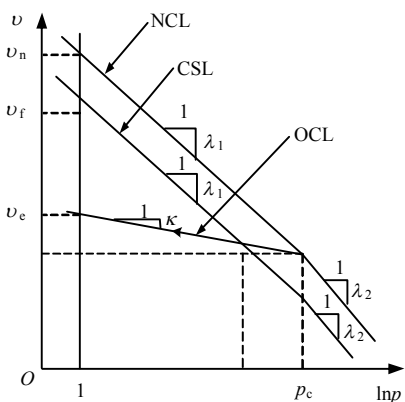


图9 本文改进的剑桥模型等向压缩曲线

Fig.9 Improved isotropic compression curves of Cambridge model by the authors

4 蠕变模型参数的确定

4.1 线性黏弹性模型参数的确定

本文将线黏弹性部分采用可以描述衰减稳定蠕变的最简单模型 Merchant 模型与 Kelvin 体串联, Merchant 体是由一个 Kelvin 体和一个弹簧串联而成。线性黏弹性蠕变方程为

$$\varepsilon_{le}(t) = J_{le}(t)\sigma \quad (2)$$

$$J_{le}(t) = 1/E_H + \sum_{i=1}^2 1/E_{K_i} \left[1 - \exp\left(-\left(E_{K_i}/\eta_{K_i}\right)t\right) \right] \quad (3)$$

5 个待定参数 E_H 、 E_1 、 η_1 、 E_2 、 η_2 , 采用 Origin 软件^[15], 通过相应的函数对曲线进行拟合来确定。线性黏弹性参数见表 2。

表2 线性黏弹性蠕变变形参数
Table 2 Deformation parameters of linear viscoelastic creep

围压 /kPa	土样	E_H /MPa	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(Pa·h)	η_2 /(Pa·h)
50	原状土	0.334	0.455	0.425	0.538	0.622
	重塑土	0.278	0.407	0.383	0.451	0.575
75	原状土	0.340	0.674	0.591	0.609	0.850
	重塑土	0.300	0.590	0.580	0.516	0.750
100	原状土	0.401	0.729	0.758	0.820	0.982
	重塑土	0.350	0.644	0.668	0.710	0.813

4.2 线性黏塑性模型参数的确定

线性黏塑性同样也用模型理论来研究,将应力-应变等时曲线上的线性黏弹性应变分离后,得到的黏塑性应力-应变等时曲线,其端点处切线即为线性黏塑性蠕变柔量 $J_{lp}(t)$ 。

本文将线性黏塑性部分用一摩阻滑块与 Merchant 体并联的模型,摩阻滑块表示蠕变门槛值,大于此值时将产生塑性应变,否则,塑性应变为 0。线性黏塑性蠕变方程为

$$\varepsilon_{lp}(t) = J_{lp}(t)(\sigma - \sigma_s) \quad (4)$$

$$J_{lp}(t) = 1/E_{HS} + 1/E_{KS} \left[1 - \exp\left(-\left(E_{KS}/\eta_{KS}\right)t\right) \right] \quad (5)$$

模型中 3 个待定参数 E_{HS} 、 E_{KS} 、 η_{KS} , 采用与黏弹性同样的方法采用相应的函数进行拟合,拟合参数见表 3。

表3 线性黏塑性蠕变变形参数
Table 3 Deformation parameters of linear viscoplastic creep

围压/kPa	土样	E_{HS} /MPa	E_{KS} /MPa	η_{KS} /(Pa·h)
50	原状土	0.157	0.379	2.485
	重塑土	0.139	0.346	2.163
75	原状土	0.161	0.439	3.324
	重塑土	0.148	0.364	2.967
100	原状土	0.176	0.493	3.526
	重塑土	0.170	0.484	3.054

4.3 非线性黏塑性模型参数的确定

非线性黏塑性变形可用经验公式来描述,一般可以用幂函数来描述,即非线性应变 ε_{np} 与应力的关系为

$$\varepsilon_{np} = (\sigma/A_t)^m t^\beta \quad (6)$$

式中: ε_{np} 为未除去瞬时非线性变形以后的非线性变形,它与时间有关,不考虑 $t=0$ 时的非线性变形; A_t 为非线性变形系数; m 为硬化系数。

对于模型中的 3 个待定参数 A_t 、 m 、 β ，可用 Origin 软件中设定的相关函数进行拟合，拟合后的结果如表 4。

表 4 非线性黏塑性蠕变变形参数
Table 4 Deformation parameters of nonlinear viscoplastic creep

围压/kPa	土样	A_t /MPa	m	β
50	原状土	0.638	2.37	0.398
	重塑土	0.621	2.54	0.504
75	原状土	0.682	2.33	0.629
	重塑土	0.658	2.72	0.664
100	原状土	0.736	2.25	0.581
	重塑土	0.614	2.60	0.586

表 4 数据表明，原状土与重塑土参数基本上无太大差别，说明非线性塑性阶段土体的结构性基本上可以忽略，即其已基本上不起作用。

综上所述，图 4 中天津滨海新区吹填软土非线性蠕变本构模型可表示为 3 部分的叠加，即

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} = \varepsilon_{lve} + (\varepsilon_{lvp} + \varepsilon_{nvp}) = \\ &\left\{ 1/E_H + 1/E_{k1} [1 - \exp(-E_{k1}t/\eta_{k1})] + \right. \\ &\left. 1/E_{k2} [1 - \exp(-E_{k2}t/\eta_{k2})] \right\} \sigma + \\ &\left\{ (1/E_{HS} + 1/E_{ks} [1 - \exp(-E_{ks}/\eta_M)]) \right\} (\sigma - \sigma_s) + \\ &\left(\frac{\sigma - \sigma_s}{A_t} \right)^m t^\beta \end{aligned} \quad (7)$$

式中： σ_s 为重塑土为屈服应力，对结构性原状土为结构屈服应力。

式(7)即为天津滨海吹填软土的蠕变本构模型，它包括线性黏弹性变形 ε_{lve} 、线性黏塑性变形 ε_{lvp} 和非线性黏塑性变形 ε_{nvp} 。

5 一维到三维转换

在多维情况下，蠕变模型很难用形象化的物理元件表达。假定软黏土为各向同性材料，则蠕变本构方程可以利用一维模型采用类比的方法直接导出，称为“泛化”。

根据 Perzyna^[16]原理并参考文献[17]，将式(7)的一维非线性蠕变本构方程推广到三维情况，即

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}\} &= \frac{\{\dot{\sigma}\}}{2G} + \left(\frac{1}{2G_M} + \frac{1}{2H_M} \right) \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} + \\ &\left[\frac{1}{A_t} \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} \right]^m t^\beta \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T$ ； $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y,$

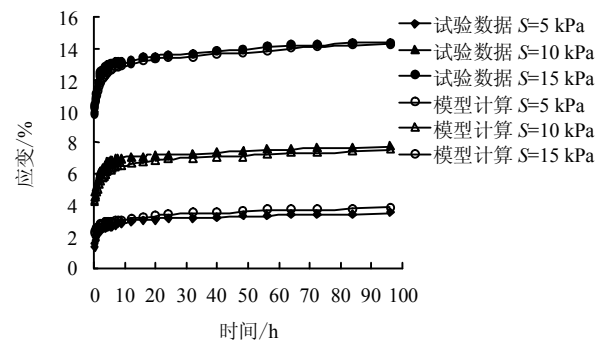
$\sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$ ； $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ， $G_M = \frac{E_M}{2(1+\mu)}$ ， G

和 G_M 为三维剪切模量； $H_M = (1/2)\eta_M$ ，为三维黏滞系数； $\langle \phi(F) \rangle$ 为开关函数； Q 为塑性势。

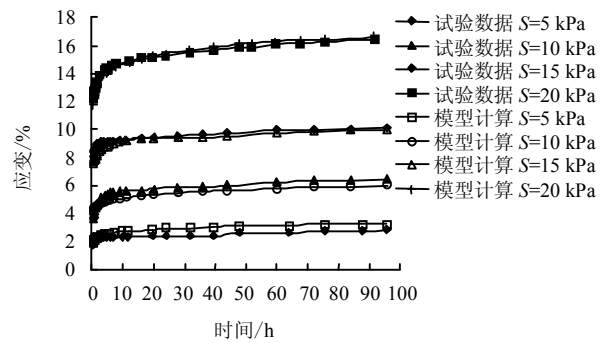
屈服函数 F 是 3 个应力不变量的函数，即 $F = F(\sigma_m, J_2, J_3)$ ，本文选用上述改进的剑桥模型作为屈服函数，选用相关联流动法则，即 $Q = F$ 。

6 模型应用

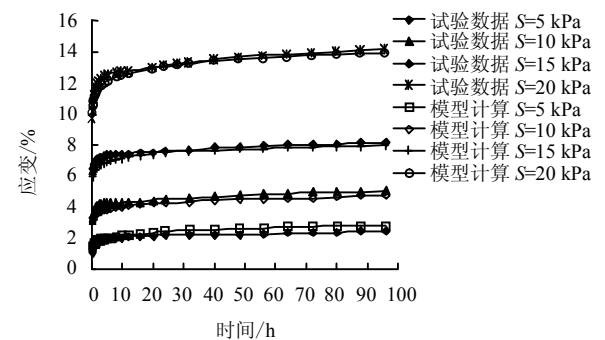
应用本文建立的本构模型，计算了 3 个围压（50、75、100 kPa）不同应力下的吹填软土蠕变发展趋势。将对应的时间和应变数据代入本构模型，拟合出应力-应变关系曲线，并与蠕变试验曲线数据进行对比，如图 10、11 所示。



(a) 围压为 50 kPa



(b) 围压为 75 kPa



(c) 围压为 100 kPa

图 10 原状土应力-应变实测值与计算值对比
Fig.10 Measured and calculated stress-strain values of undisturbed soil

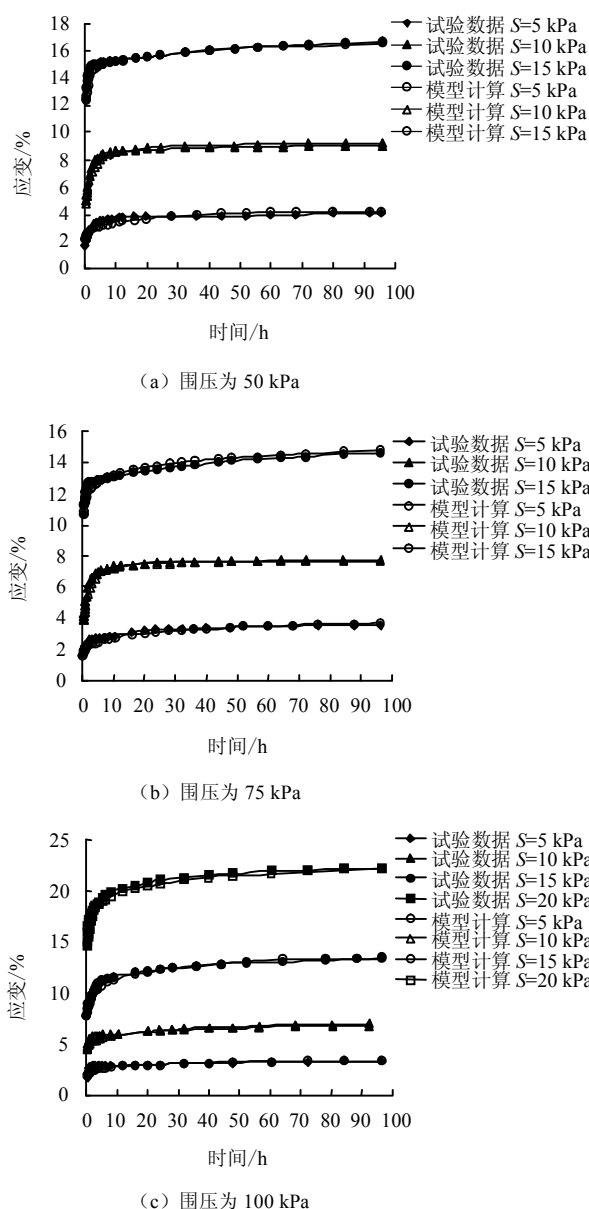


图 11 重塑土应力-应变实测值与计算值对比

Fig.11 Measured and calculated stress-strain values of remolded soil

图 10、11 表明, 实测值与计算值吻合得较好, 说明本文建立的模型可以反映吹填软土蠕变特性。但比较原状土与重塑土的拟合结果发现, 重塑土更精确, 原状土在初始阶段拟合效果略差, 原因是一维模型中原状土只用结构屈服应力代替了屈服应力, 结构性影响不能很好地反映出来, 三维模型计算优势会明显。另外, 原状土在蠕变过程中会有结构破损, 表现为开始黏弹性阶段模型参数会逐渐劣化变小, 而计算时用一固定值, 因此, 计算结果与实测值有偏差。因此, 在建模时考虑到结构损伤的影响, 会使模型更加完美地反映结构性土的蠕变特性。

7 结 论

(1) 天津滨海新区吹填软土经过真空预压处理后形成了一定的结构性, 结构性的存在使原状吹填软土蠕变特性明显区别于重塑土。

(2) 通过对修正的剑桥模型进行改进, 使其考虑结构性的影响, 并以其作为蠕变屈服函数, 建立了考虑结构性影响吹填软土蠕变模型。

(3) 本文的模型未考虑结构性损伤的影响, 深入开展此方面研究, 建立更完善的蠕变模型显得十分必要。

参 考 文 献

- [1] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21—28.
SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(3): 21—28.
- [2] 沈珠江. 结构性黏土的堆砌体模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 1—4.
SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(1): 1—4.
- [3] 饶为国, 赵成刚, 王哲, 等. 一个可考虑结构性影响的土体本构模型[J]. 固体力学学报, 2002, 23(11): 34—39.
RAO Wei-guo, ZHAO Cheng-gang, WANG Zhe, et al. A constitutive model considering the influence of soil structure[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 23(11): 34—39.
- [4] 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟, 等. 基于扰动状态概念的结构性黏土本构模型研究[J]. 固体力学学报, 2004, 25(2): 191—197.
WANG Guo-xin, XIAO Shu-fang, HUANG Hong-wei, et al. Study of constitutive model of structural clay based on the disturbed state concept[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 25(2): 191—197.
- [5] 王立忠, 沈恺伦. K_0 固结结构性软黏土的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 496—504.
WANG Li-zhong, SHEN Kai-lun. A constitutive model of K_0 consolidated structured soft clays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(4): 496—504.
- [6] 廖红建, 俞茂宏. 黏性土的弹黏塑性本构方程及应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 41—44.
LIAO Hong-jian, YU Mao-hong. Elasto visco-plastic constitutive equation of cohesive soils and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(2): 41—44.