

DOI:10.11918/201904113

考虑非线性流变的一维修正 UH 模型

刘忠玉, 张家超, 夏洋洋, 崔鹏陆

(郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001)

摘要: 考虑到饱和黏性土流变的非线性特点, 假定次固结系数是时间对数的双曲线函数, 提出一种修正的次固结计算式, 并基于这种思想修正统一硬化(UH)本构模型. 为验证修正 UH 本构模型的有效性, 以河南某地重塑黏性土为例, 进行一维单面排水流变固结试验. 结果表明, 在按 Cassagrande 方法确定的主固结完成时, 土样中仍有一定的孔隙水压力有待消散. 应用修正 UH 本构模型对不同荷载等级下试验结果进行的模拟表明, 该模型能够较好地拟合试验结果. 最后, 为进一步验证修正 UH 模型的适用性, 又对文献中的一些固结试验结果进行模拟.

关键词: 非线性流变; 次固结系数; 时间效应; 本构模型; 固结试验

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)11-0107-06

One-dimensional modified UH constitutive model considering nonlinear rheological behavior

LIU Zhongyu, ZHANG Jiachao, XIA Yangyang, CUI Penglu

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the nonlinear rheological characteristics of saturated clayey soil, the secondary consolidation coefficient was assumed as a hyperbolic function of the logarithm of time, and a modified secondary consolidation equation was proposed. Based on this idea, the unified hardening (UH) constitutive model was modified. To verify the effectiveness of the modified UH constitutive model, by taking a kind of reconstituted clayey soil in Henan province as an example, a series of one-dimensional rheological oedometer tests with one-way drainage were carried out. Test results illustrate that there was still some pore water pressure to be dissipated in the soil sample, when the primary consolidation determined by the Cassagrande method was completed. Then, the modified UH constitutive model was applied to simulate the measured data obtained at different loading stages, and results show that the model could fit the data well. Finally, in order to further verify the applicability of the model, some oedometer test results reported in the literature were simulated.

Keywords: nonlinear rheology; secondary consolidation coefficient; time effect; constitutive model; oedometer test

在软黏土地区, 因工后沉降问题而导致的工程事故频频发生, 给国家造成了巨大的损失. 为此, 大量学者^[1-4]投入到软黏土变形机理的研究中, 并发现经典太沙基理论并不总能较好地模拟软黏土变形过程的所有现象. 有关固结试验和现场观测^[5-6]表明, 软黏土的流变特性是影响软黏土变形过程的重要因素之一. 因此, 不少学者通过试验探讨了影响流变过程的因素, 如荷载强度^[7]、超固结比^[8]等. 在理论研究方面, 一些学者^[9-10]已考虑流变特性, 建立了两类形式的黏弹性或弹黏塑性本构关系: 一种是基于元件理论而提出的, 另一种是基于弹黏塑理论而提出的. 对此, 袁静等^[11]曾进行过比较, 认为基于弹黏塑性理论而提出的本构关系更有利于描述软

黏土的变形特性. 这类本构模型最早的工作是由 Bjerrum^[12]进行的, 他认为土的变形过程可划分为可恢复的瞬时压缩以及不可恢复的延时压缩两部分, 并提出了一维等时间线模型. 而 Yin 等^[13-14]认为土体的黏性变形与塑性变形应该统一起来, 并提出了“等效时间”的概念, 建立了一个与时间相关的弹黏塑性 (EVP) 本构模型. 后来, 姚仰平等^[15]在 Bjerrum 瞬时压缩线的基础上, 提出了相对瞬时压缩线的概念, 结合超固结统一硬化 (UH) 本构模型, 提出了可以考虑时间效应的 UH 模型. 除考虑时间效应^[15]外, 学者们在 UH 模型建模思想^[16-18]的基础上, 也开发了可以考虑其他因素的模型, 如温度效应^[19]、各向异性^[20]、土的结构性^[21]、胶结作用^[22]以及负蠕变效应^[23]等. 这些也说明 UH 模型具有较高的应用价值.

在上述考虑土体黏滞性的本构模型中, 有些已被应用于饱和黏土的一维固结分析中, 并成功模拟

收稿日期: 2019-04-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51578511)

作者简介: 刘忠玉 (1968—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘忠玉, zhylieu@zzu.edu.cn

了加载初期由黏土黏滞性引起的孔压增高现象^[24-25]。然而,上述本构模型均假定流变过程为线性的,常采用 Buisman 公式来表示流变引起的孔隙比减小值 Δe 与时间 t 的关系,即

$$\Delta e = C_\alpha \lg(t/t_1). \quad (1)$$

式中: t_1 为主固结完成时间; C_α 为次固结系数。但式(1)无法反映 $t=0$ 的情况,所以,有学者将其改为^[15,26]

$$\Delta e = \beta \lg[(t+t_0)/t_0]. \quad (2)$$

式中: t_0 表示参考时间或单位时间;系数 β 与 C_α 基本相同,并可用后者代替。

值得注意的是,当时间 t 趋向于无穷大时,式(1)或(2)表示的孔隙比减小值都趋向于无穷大,也就意味着土中的孔隙可以无限被压缩,这与事实是不相符的。不少试验和理论分析^[27-33]证明,次固结系数并不是常数,而是一个与时间相关的量。其中,Yin^[29]建议引用双曲线方程^[30]来表示由流变引起的变形^[31-32],而胡亚元^[33]则进一步将次固结系数表示为时间和超固结比的函数。

为进一步探究黏性土流变固结机理,参考 Yin^[29]的思想,考虑了次固结系数的时间效应,修正了统一硬化 UH 本构模型,并通过一维固结试验验证了修正 UH 模型的有效性。随后也应用文献资料对上述修正 UH 模型进行了验证,从而进一步确定了该修正模型的适用性。

1 UH 模型修正及非线性流变参数求解

1.1 UH 模型的修正

统一硬化 UH 本构模型^[15]是在修正剑桥模型的基础上进一步发展起来的,其一维应变增量及塑性应变增量可分别表示为

$$d\varepsilon_v = \begin{cases} d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^{sp} + d\varepsilon_v^{ip}, & d\sigma' \geq 0, \\ d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^{ip}, & d\sigma' < 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$d\varepsilon_v^p = \begin{cases} d\varepsilon_v^{sp} + d\varepsilon_v^{ip}, & d\sigma' \geq 0, \\ d\varepsilon_v^{ip}, & d\sigma' < 0. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d\varepsilon_v^e$ 和 $d\varepsilon_v^{sp}$ 分别为由竖向有效应力增量 $d\sigma'$ 产生的弹性应变增量和塑性应变增量; $d\varepsilon_v^{ip}$ 为延时应变增量,即由时间作用产生的塑性应变增量。

$$d\varepsilon_v^e = \frac{C_s}{\ln 10(1+e_0)} \frac{d\sigma'}{\sigma'}, \quad (5)$$

$$d\varepsilon_v^{sp} = \frac{C_c - C_s}{\ln 10(1+e_0)} \frac{M^4}{M_t^4} \frac{d\sigma'}{\sigma'}, \quad (6)$$

$$d\varepsilon_v^{ip} = \frac{C_\alpha}{\ln 10(1+e_0)t_a + t_0} dt. \quad (7)$$

式中: C_s 、 C_c 和 C_α 分别为回弹指数、压缩指数和次

固结系数; e_0 为初始孔隙比; t 和 t_a 分别为加载时间和老化时间,虽然二者在数值上并不相等,但其增量是相等的,即 $dt = dt_a^{[15]}$; t_0 为参考时间,可取相应的单位时间; M 为临界状态应力比; M_t 为潜在破坏应力比,即

$$M = 6 \sin \varphi / (3 - \sin \varphi), \quad (8)$$

$$M_t = 6 \left[\sqrt{\chi/R(1+\chi/R)} - \chi/R \right], \quad (9)$$

$$\chi = M^2 / [12(3-M)], \quad (10)$$

$$R = \sigma' / \sigma'_0 \exp \left[-\ln 10 \varepsilon_v^p (1+e_0) / (C_c - C_s) \right]. \quad (11)$$

式中: φ 为土的有效内摩擦角; ε_v^p 为塑性应变; σ'_0 为与初始孔隙比 e_0 相适应的初始有效应力; R 为反映超固结程度的参数,在不考虑时间效应时,其初始值 R_0 是超固结比 OCR 的倒数。另外,超固结参数 R 与老化时间 t_a 之间的关系为

$$(t_a + t_0) / t_0 = R^{-\alpha}. \quad (12)$$

式中 $\alpha = (C_c - C_s) / C_\alpha$ 。

式(7)所示的延时应变增量,实际是由土的流变引起的,其与式(2)是等效的。因此,如果 C_α 与时间无关,也会遇到前述式(2)所遇到的土体被无限压缩的问题。为避免该问题,考虑次固结系数的时间效应,即参考 Yin^[29]的方法,认为次固结系数与时间相关,并表示为

$$C_\alpha(t) = \frac{C_{\alpha 0}}{1 + C_{\alpha 0} / A \lg(t + t_0)}. \quad (13)$$

式中: $C_{\alpha 0}$ 为初始次固结系数, A 为非线性流变参数。可以看出,当 t 趋于无穷大时,次固结系数趋于零。将式(13)替代式(2)中的 β ,即

$$\Delta e = \frac{C_{\alpha 0} \lg(t_a + t_0)}{1 + (C_{\alpha 0} / A) \lg(t + t_0)}. \quad (14)$$

令 $t \rightarrow \infty$, 则 $\Delta e \rightarrow A$, 即 A 就是由流变引起的孔隙比减小值的极限,为可通过试验确定的有限值。这样就不会出现因流变因素而导致的土体被无限压缩的问题。

将式(14)等号两边同时微分可得到类似式(7)的增量形式,即

$$d\varepsilon_v^{ip} = -L \frac{dt}{t + t_0} + N \frac{dt_a}{t_a + t_0}. \quad (15)$$

式中: $L = \frac{C_{\alpha 0} \lg(t_a + t_0)}{\ln 10(1+e_0)A [1 + (C_{\alpha 0} / A) \lg(t + t_0)]^2}$,

$$N = \frac{1}{\ln 10(1+e_0)} \frac{C_{\alpha 0}}{[1 + (C_{\alpha 0} / A) \lg(t + t_0)]}.$$

通常, $C_{\alpha 0}$ 为远小于 1 的数,则其平方会远小于其本身,即 L 会远小于 N 。因此,延时应变增量可仅用式(15)中的第二项近似表示,即

$$d\varepsilon_v^{\text{lp}} = \frac{1}{\ln 10(1+e_0)} \frac{C_{\alpha 0}}{[1+(C_{\alpha 0}/A)\lg(t+t_0)]} \frac{dt_a}{t_a+t_0} \quad (16)$$

同时,式(12)中的参数 α 应调整为 $(C_c - C_s)/\{C_{\alpha 0}/[1+(C_{\alpha 0}/A)\lg(t+t_0)]\}$ 。

1.2 非线性流变参数求解

尽管老化时间 t_a 与加载时间 t 并不相等,但 $dt = dt_a^{[15]}$ 。因此,对于超固结土,设再加载开始时($t=0$)的初始老化时间为 t_{a0} ,则老化时间 $t_a = t + t_{a0}$ 。很明显,当加载时间很长时, $t_a + t_0$ 的对数与 $t + t_0$ 的对数近似相等。此时,式(14)可变为

$$\frac{\lg(t+t_0)}{\Delta e} = \frac{1}{A}\lg(t+t_0) + \frac{1}{C_{\alpha 0}} \quad (17)$$

式(17)表明,当 t 很大时, $\lg(t+t_0)/\Delta e$ 与 $\lg(t+t_0)$ 为线性关系。所以,将固结完成后(即主次固结分界点以后)孔隙比 e 随时间 t 变化的数据,按 $y = \lg(t+t_0)/\Delta e$ 与 $x = \lg(t+t_0)$ 进行变换,在 xy 坐标系中, x 较大的数据点将呈直线分布,则该直线斜率的倒数即为参数 A ,在 y 轴截距的倒数为参数 $C_{\alpha 0}$ 。

2 试 验

利用改装后可测不排水面孔隙水压力的固结仪,对河南某地的黏性土进行了一系列向上单面排水的流变固结试验。土样取土深度为 2.5 m,相对体积质量 $d_s = 2.71$,液限 $w_L = 39.4\%$,塑限 $w_p = 22.3\%$,塑限指数 $I_p = 17.1$ 。为保证土样均匀性,去除杂质后将其用蒸馏水进行充分浸泡,然后搅拌均匀后制成泥浆,最后采用泥浆静压法制备土样。待土样成型后,参照 GB/T50123—1999《土工试验方法标准》中的规定,利用高度为 2 cm、内径为 6.18 mm 的环刀切取了一组饱和重塑土样。经测定,试样密度为 1.738 g/cm^3 ,含水率为 47.77% ,初始孔隙比 e_0 为 1.30。固结试验中,取加荷比为 1,最小和最大压力分别为 25 和 1 600 kPa。

试验得到的不同荷载等级下试样的孔隙比 e 和不排水面(底部)处的孔压 u 随时间的变化情况分别示于图 1、2。从图 1 可以看出,不同荷载等级下孔隙比随时间变化曲线在出现“拐点”(即主次固结分界点)后,变形仍然持续发展。这说明该类黏土具有较为显著的流变特点。

图 2 表明,不同荷载等级下的孔压并不是从加载时刻就达到外加荷载增量的,而是需经历一段时间才能达到峰值,随后进入消散过程。该现象被称为“孔压滞后”现象^[34-36],其可能与试样饱和度、仪器内壁摩擦力、加载动力效应等因素有关。同时,不同荷载等级下孔压峰值所对应的时刻并不相同。图 2 表明,随着荷载增量的增大,孔压达到峰值所用

的时间也相应延长。另外,从图 2 还可以看出,当加载时刻达到图 1 中的“拐点”时,图 2 中相应时刻下的孔压还有相当一部分没有消散,这也说明该类黏性土具有明显的主次固结耦合特征。因此,基于 $e-\lg t$ 曲线并按 Casagrande 法确定主次固结分界点的做法并不能保证过了该时刻后的变形全部是由流变引起的。为剔除主固结部分的影响,建议以孔压消散到一定程度(比如 95%)对应的时刻作为主次固结分界点。

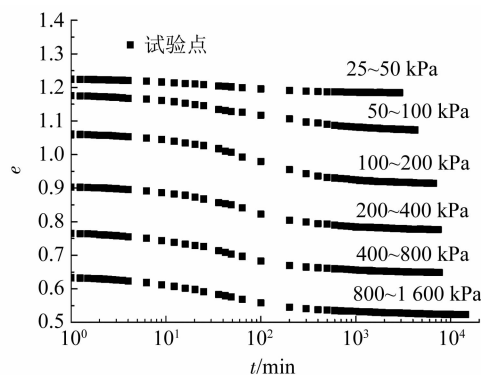


图 1 孔隙比与时间的变化曲线

Fig. 1 Relation between void ratio and time

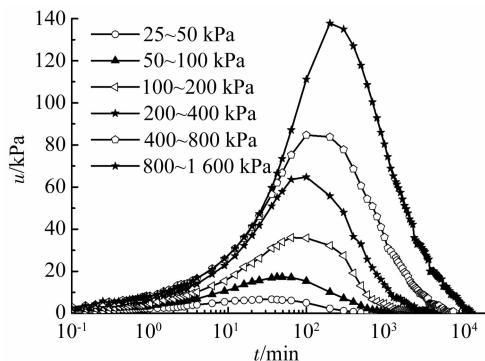


图 2 试样孔压随时间变化关系

Fig. 2 Relation between pore pressure and time

3 修正 UH 模型的验证

3.1 河南某地黏土

在上文中,对河南某地的黏性土在不同荷载等级下的流变固结特性进行了分析。为验证修正 UH 模型的有效性,利用修正 UH 模型对上述试验结果进行了模拟。模拟时,压缩指数 $C_c = 0.42$ 和回弹指数 $C_s = 0.035$ 是根据上述试验结果及其定义得到的;每级荷载等级对应的试样初始高度 H_0 和初始孔隙比 e_0 均根据上级荷载等级试验结束时的实测试样变形确定;黏土的有效内摩擦角按经验取为 20° ;非线性流变参数 $C_{\alpha 0}$ 和 A 按照 1.2 节的方法作图拟合而得;初始超固结参数 R_0 和渗透系数 k 根据试算选用。具体参数值示于表 1,模拟结果示于图 3。可以看出,修正 UH 模型能够较好地模拟本试验不同荷载等级下的变形过程。

表 1 河南某地黏土分析所用参数
Tab.1 Parameters used in analysis of Henan clay

荷载等级/kPa	H_0/mm	e_0	$k/(10^{-9}\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	R_0	$C_{\alpha 0}$	A
25~50	19.37	1.228	19.20	0.350	0.023	0.057
50~100	18.99	1.184	18.00	0.400	0.037	0.171
100~200	18.01	1.070	6.60	0.400	0.074	0.205
200~400	16.63	0.913	2.52	0.405	0.122	0.156
400~800	15.44	0.776	1.80	0.415	0.139	0.142
800~1 600	14.29	0.644	1.08	0.412	0.093	0.140

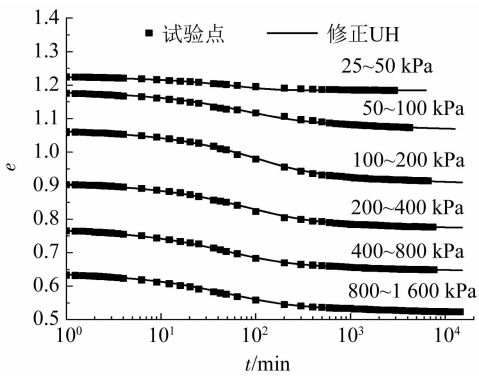


图 3 孔隙比与时间的变化曲线

Fig.3 Relation between void ratio and time

3.2 香港黏土

Yin^[29]曾对香港地区的黏土进行过固结试验,部分实验数据见图 4. 据此, Yin 给出了一个非线性流变的计算公式及相应 EVP 模型参数的确定方法. Le 等^[37]认为 Yin^[29]的方法在确定模型参数时有一定的局限性,因此,建议了 TRRLS 方法,其模拟结果见图 4. 本文按上述修正 UH 本构模型也对 Yin^[29]的试验数据进行模拟,所用参数见表 2. 其中,不同荷载等级下的试样高度 H_0 、压缩指数 $C_c=0.525$ 、回弹指数 $C_s=0.036$ 1、初始孔隙比 e_0 均参考 Le 等^[37]模拟所用参数取值,非线性流变参数 $C_{\alpha 0}$ 和 A 根据 Yin^[29]试验数据按照 1.2 节计算方法获得,初始超固结参数 R_0 和渗透系数 k 则根据试算选用,黏土的有效内摩擦角取为 15° . 模拟结果也示于图 4. 不难发现,本文修正 UH 本构模型也能够较好地描述香港黏土的流变固结特性.

表 2 香港黏土分析所用参数
Tab.2 Parameters used in analysis of Hong Kong clay

荷载/kPa	H_0/mm	e_0	$C_{\alpha 0}$	A	$k/(10^{-8}\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	R_0
50~100	18.30	1.315	0.110	0.163	8.0	0.45
100~200	17.25	1.182	0.163	0.157	5.0	0.43
200~400	16.63	0.913	0.144	0.148	4.0	0.41
400~800	14.95	0.891	0.148	0.150	1.5	0.43

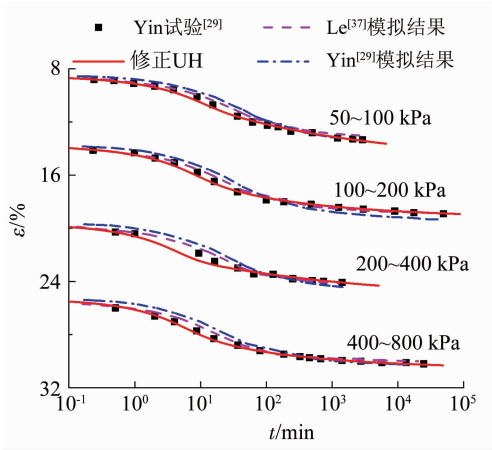


图 4 竖向应变与时间的变化关系

Fig.4 Relation between vertical strain and time

3.3 萧山黏土

为进一步验证修正 UH 模型的适用性,本节对李西斌^[38]的部分固结试验结果进行了模拟. 李西斌^[38]的试验对象为萧山黏土,其中 4 组试样在荷载等级 800~1 600 kPa 下的的竖向变形 S 随时间 t 的变化曲线示于图 5. 使用修正 UH 模型对其进行模拟时,4 组试样的土性参数见表 3.

表 3 萧山黏土分析所用参数
Tab.3 Parameters used in analysis of Xiaoshan clay

试样	H_0/mm	e_0	C_c	C_s	$C_{\alpha 0}$	A	$k/(10^{-11}\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	R_0
3-1	14.9	0.75	0.473	0.083	0.014 4	0.428 5	3.2	0.430
3-2	15.7	0.92	0.479	0.061	0.014 1	0.234 0	3.0	0.445
3-3	14.6	0.62	0.406	0.111	0.013 3	0.255 1	2.8	0.380
3-4	14.8	0.82	0.356	0.073	0.011 7	0.321 1	1.8	0.420

其中,黏土的有效内摩擦角参考文献^[25]取为 25°,其他参数的选取方法同 3.2 节. 模拟结果示于图 5. 很明显,修正 UH 模型能够较好地描述萧山黏土的流变固结特性.

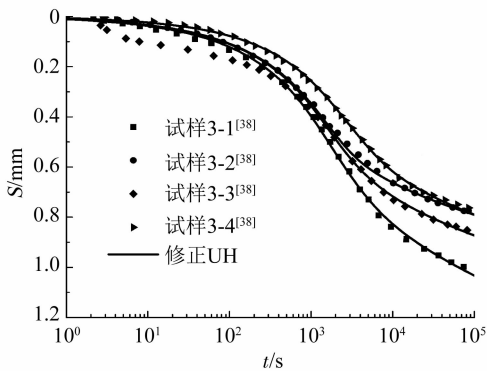


图 5 竖向变形与时间的关系

Fig. 5 Relation between vertical deformation and time

4 结 论

- 1) 次固结系数的时间效应是影响流变非线性过程的重要因素,考虑次固结系数的时间效应,对完善非线性流变本构关系具有重要意义.
- 2) 次固结系数与时间对数的双曲线表达式(13)可以较好地描述黏性土的非线性流变特性.
- 3) 基于次固结系数时间效应修正的 UH 本构模型可以较好地描述多地黏性土的一维流变固结过程,因而具有较广的适用性.

参考文献

[1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983
HUANG Wenxi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983

[2] HANSBO S. Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow[J]. Géotechnique, 1997, 47(5): 983. DOI: 10.1680/geot.1997.47.5.983

[3] 齐添, 谢康和, 胡安峰, 等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(6): 1023
QI Tian, XIE Kanghe, HU Anfeng, et al. Laboratorial study on non-Darcy seepage in Xiaoshan clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(6): 1023

[4] DENG Yinger, XIE Heping, HUANG Runqiu, et al. Law of nonlinear flow in saturated clays and radial consolidation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(11): 1427. DOI: 10.1007/s10483-007-1102-7

[5] 廖红建, 苏立军, 白子博明, 等. 次固结沉降对压缩时间曲线的影响研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 536
LIAO Hongjian, SU Lijun, SHIRAKO Hiroaki, et al. Research on influence of secondary consolidation on compression time curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 536. DOI: 10.16285/j.rsm.2002.05.002

[6] 张芳枝, 陈晓平, 黄国怡. 珠江三角洲饱和软黏土的固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊2): 192

ZHANG Fangzhi, CHEN Xiaoping, HUANG Guoyi. Experimental investigation of consolidation behavior of the pearl delta saturated soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 192

[7] 余湘娟, 殷宗泽, 董卫军. 荷载对软土次固结影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 913
YU Xiangjuan, YIN Zongze, DONG Weijun. Influence of load on secondary consolidation deformation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 913

[8] 李西斌, 谢康和, 陈福全. 考虑软土流变特性和应力历史的一维固结与渗透试验[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 18
LI Xibin, XIE Kanghe, CHEN Fuquan. One-dimensional consolidation and penetration tests considering rheological properties and stress history of soft soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 18. DOI:10.13243/j.cnki.slx.2013.01.001

[9] 高彦斌. 饱和软黏土一维非线性流变-固结耦合分析[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 116
GAO Yanbin. One-dimensional nonlinear creep-consolidation analysis of saturated clay[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 116

[10] 胡亚元. 软土的等效时间线剪切流变模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 84
HU Yajuan. An equivalent-timeline shear rheological model for soft clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 84. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201705048

[11] 袁静, 龚晓南, 益德清. 岩土流变模型的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 772
YUAN Jing, GONG Xiaonan, YI Deqing. Comparison study on rheological constitutive models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 772

[12] BJERRUM L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings[J]. Géotechnique, 1967, 17(2): 83. DOI: 10.1680/geot.1967.17.2.83

[13] YIN J H, GRAHAM J. Viscous-elastic-plastic modelling of one-dimensional time-dependent behaviour of clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(2): 199. DOI: 10.1139/t89-029

[14] YIN Jianhua, GRAHAM J. Equivalent times and one-dimensional elastic viscoplastic modelling of time-dependent stress-strain behaviour of clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(1): 42. DOI: 10.1139/t94-005

[15] YAO Yangping, KONG Lingming, HU Jing. An elastic-viscous-plastic model for overconsolidated clays[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(2): 441. DOI: 10.1007/s11431-012-5108-y

[16] YAO Yangping, LU Dechun, ZHOU Annan, et al. Generalized non-linear strength theory and transformed stress space[J]. Science in China Series E—Engineering and Materials Science, 2004, 47(6): 691. DOI: 10.1360/04ye0199

[17] 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. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.04.003

[18] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. Géotechnique, 2009, 59(5): 451. DOI: 10.1680/geot.2007.00029

[19] 姚仰平, 杨一帆, 牛雷. 考虑温度影响的 UH 模型[J]. 中国科学(E 辑), 2011, 41(2): 158

- YAO Yangping, YANG Yifan, NIU Lei. UH model considering temperature effect[J]. Science in China (Series E), 2011, 41(2): 158. DOI: 10.1007/s11431-010-4209-8
- [20] 孔令明, 姚仰平. 考虑时间效应的 K_0 各向异性 UH 模型[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 812
- KONG Lingming, YAO Yangping. K_0 -anisotropic UH model considering time effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 812. DOI: 10.11779/CJGE201505006
- [21] 祝恩阳, 姚仰平. 结构性土 UH 模型[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3101
- ZHU Enyang, YAO Yangping. A UH constitutive model for structured soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3101. DOI:10.16285/j. rsm. 2015. 11. 009
- [22] 祝恩阳, 李晓强, 朱建明. 三维胶结结构性土 UH 模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2200
- ZHU Enyang, LI Xiaoqiang, ZHU Jianming. A 3-D UH model considering bonding in structured soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2200. DOI:10.11779/CJGE201812006
- [23] 姚仰平, 方雨菲. 土的负蠕变特性及其本构模型[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1759
- YAO Yangping, FANG Yufei. Negative creep properties of soil and its constitutive model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1759. DOI: 10.11779/CJGE201810001
- [24] 殷建华, JACK I C. 土体与时间相关的一维应力-应变性状、弹黏塑性模型和固结分析(续)[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 65
- YIN Jianhua, JACK I C. One-dimensional time dependent stress-strain behaviour of soils, elastic visco-plastic modelling, and consolidation analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(4): 65. DOI: 10.16285/j. rsm. 1994. 04. 009
- [25] 胡晶, 姚仰平. 基于考虑时间效应的 UH 模型的一维固结分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(8): 1492
- HU Jing, YAO Yangping. One-dimensional consolidation analysis of UH model considering time effect [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(8): 1492. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2014. 0583
- [26] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521
- YIN Zongze, ZHANG Haibo, ZHU Jungao, et al. Secondary consolidation of soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521
- [27] BERRE T, IVERSEN K. Oedometer tests with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression [J]. Géotechnique, 1972, 22(1): 53. DOI: 10.1680/geot. 1972. 22. 1. 53
- [28] LEROUEIL S, KABBAJ M, TAVENAS F, et al. Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays [J]. Géotechnique, 1985, 35(2): 159. DOI: 10.1680/geot. 1985. 35. 2. 159
- [29] YIN J H. Non-linear creep of soils in oedometer tests [J]. Géotechnique, 1999, 45(5): 699. DOI: 10.1680/geot. 1999. 49. 5. 699
- [30] KONDNER R L. Hyperbolic stress - strain response; Cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115
- [31] YIN Jianhua, ZHU Jungao, GRAHAM J. A new elastic viscoplastic model for time-dependent behaviour of normally and overconsolidated clays; Theory and verification[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39: 157. DOI: 10.1139/t01-074
- [32] FENG Weiqiang, LALIT B, YIN Zhenyu, et al. Long-term non-linear creep and swelling behavior of Hong Kong marine deposits in oedometer condition[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 84: 1. DOI: 10.1016/j. compgeo. 2016. 11. 009
- [33] 胡亚元, 杨平, 余启致. 超固结土次固结系数的时间效应[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 29
- HU Yayuan, YANG Ping, YU Qizhi. Time effect of secondary consolidation coefficient of over-consolidated soil [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 29. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372. 2016. 09. 003
- [34] 赵慈义, 孙雯, 陈守义, 等. 孔隙水压力量测的延迟效应分析[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 66
- ZHAO Ciyi, SUN Wen, CHEN Shouyi, et al. An analysis on the delay effect in pore water pressure measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 66. DOI: 10.16285/j. rsm. 1995. 04. 009
- [35] 问延煦, 施建勇. 孔压滞后现象及其对固结系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 357
- WEN Yanxu, SHI Jianyong. Delay of pore pressure in oedometer and its effect on determination of coefficient of consolidation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 357
- [36] 刘忠玉, 李东阳. 基于加载动力效应对孔压滞后现象的一个解释[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1470
- LIU Zhongyu, LI Dongyang. An explanation of delay of pore water pressure based on dynamic effect due to loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1470. DOI: 10.16285/j. rsm. 2014. 05. 017
- [37] LE T M, FATAHI B, DISFANI M, et al. Analyzing consolidation data to obtain elastic viscoplastic parameters of clay [J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 8(4): 559. DOI: 10.12989/gae. 2015. 8. 4. 559
- [38] 李西斌. 软土流变固结理论与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- LI Xibin. Theoretical and experimental studies on rheological consolidation of soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005

(编辑 刘 彤)