

海相软土一维固结流变特性及模型

杨超^{1,2*}, 王凯³, 舒伟富⁴

(1.湖南科技大学 页岩气资源利用湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201;

2.湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201;

3.广东省建筑科学研究院集团股份有限公司,广东广州 510500;

4.中国有色金属长沙勘察设计研究院有限公司,湖南长沙 410011)

摘要:通过分别加载和分级加载2种方式进行了一维固结流变试验,研究了上海海相软土一维固结流变特性和计算模型.试验结果表明:分别加载试验影响因素较多,试验结果易出现偏差,而分级加载试验结果容易得到保证;上海软土具有非线性流变特性,垂直压力较低时(分别加载垂直压力低于100 kPa;分级加载垂直压力低于200 kPa), ε - $\ln t$ 曲线近似为平行直线,可直接采用对数函数描述土的流变行为;垂直压力较高时(分别加载垂直压力超过100 kPa;分级加载垂直压力超过200 kPa), ε - $\ln t$ 曲线近似为平行折线,分别加载试验和分级加载试验斜率变化分别在49 min和16 min,此时可采用分段对数函数描述土的流变行为.建议应力-应变关系采用幂函数,应变-时间关系采用双曲线函数建立流变方程,该模型能较好的描述垂直压力在400 kPa范围内上海海相软土一维固结流变分级加载全过程.

关键词:海相软土;一维固结;非线性;流变模型

中图分类号:TU 471.91

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2018)01-0028-07

Study on Creep Characteristics and Model for One-dimensional Consolidation of Marine Soft Soil

Yang Chao^{1,2}, Wang Kai³, Shu Weifu³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China;

4. Chinese Nonferrous Metal Survey and Design Institute of Changsha Co., Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: Creep properties and model for one-dimensional consolidation of Shanghai marine soft soil was studied by each loading and gradation loading for the one-dimensional consolidation creep test. There were more influencing factors in each loading one-dimensional consolidation creep test, so that the results were more prone to errors than that in gradation loading test. Shanghai soft soil was of nonlinear creep characteristics. When the vertical pressure was less than 100 kPa in each loading test or 200 kPa in gradation loading test, ε - $\ln t$ curve was approximately parallel line. The logarithmic function was used directly to describe the rheological behavior of the soil. When the vertical pressure was more than 100 kPa in each loading test or 200 kPa in gradation loading test, ε - $\ln t$ curve was approximately parallel broken line. The slope of ε - $\ln t$ curve changed at 49 min and 16 min in each loading test and gradation loading test. Creep models of Shanghai soft soil were proposed, in which power function was adopted for stress-strain relationship and hyperbolic function was adopted for strain-time

收稿日期:2016-01-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(41702323);页岩气资源利用湖南省重点实验室资助项目(E21719);广西岩土力学与工程重点实验室资助项目(15-KF-04);湖南省教育厅科研资助项目(17C0648)

*通信作者, E-mail: yangc_3201@foxmail.com

relationship. The model which loading was below 400 kPa, was better to describe the creep behavior for one-dimensional consolidation of Shanghai marine soft soil in gradation loading.

Keywords: marine soft soil; one-dimensional consolidation; nonlinear; creep model

海相沉积软土广泛分布于我国沿海地区,其中上海是典型的海相软土地区之一.其总体特征为孔隙比大、压缩性高,含水量高,强度低等特点.此外,还具有灵敏度高、渗透系数小、透水性差、流变明显等特性.上海软土存在着显著的流变特性使得上海建筑物的沉降具有时间效应,且后期沉降量不可忽略.许多实测数据表明,上海地区多层建筑竣工时完成的沉降量大部分不足建筑物最终沉降量的 50%,沉降稳定一般需要 5~6 a,有些甚至长达 10 a 以上^[1].

针对软土的次固结特性,国内外学者做了大量研究^[2-8].结果表明:海相软土所表现出来的应力-应变关系,不仅与时间相关,还与所受的应力水平相关,呈非线性特征^[8].通常描述土体流变特性的方法大致可分模型理论和经验理论.模型理论概念明确,有助于从概念上认识土体流变的粘弹塑性,且模型理论能够直接采用数学表达式描述土的流变和应力松弛过程,能够解释土的各种流变性质;但理论模型无法描述土的非线性流变,且模型中复杂的参数确定和模型识别会给模型的建立带来较多的困难.经验模型虽然缺乏严密的理论依据,不同的土、不同的试验条件可能会有不同的经验公式^[8-12].经验模型仅能反映特定条件下土的流变特性,对特定的工程具有较好的拟合效果,在工程实践中具有一定的应用价值.

本文将依据上海软土的一维固结流变试验资料,运用数理统计的方法,探寻一种合理描述上海地区软土一维固结条件下应力-应变-时间关系的经验模型.

1 试验概况

一维固结流变试验是研究试样在侧向变形受到刚性限制、仅发生竖向变形时,不同垂直压力下应力、应变随时间的变化关系.本次一维固结流变试验采用了分别加载和分级加载的两种方式进行对比.

1.1 土的物理力学性质

上海地区软土分布具有成层性,土层厚度相对均匀,软土层埋藏深度变化不大,大部分地区软土埋深 4 m 左右.通常对工程影响比较大的软土为第③层淤泥质粉质粘土和第④层淤泥质粘土,厚度一般在 10~20 m,本次试验选取第④层淤泥质粘土.土的物理力学性质见表 1.

表 1 土的物理力学性质参数

含水量 W /%	密度 ρ / (g/cm^3)	比重 G	饱和度 S_r	孔隙比 e	液限 W_L /%	塑限 W_p /%	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ /($^\circ$)	压缩模量 E /MPa	压缩系数 a /MPa $^{-1}$
40.76	1.80	2.75	97	1.143	41.9	22.3	15	18.98	3.68	0.554

1.2 试验方法

一维固结流变试验是研究试样在侧向变形受到刚性限制、仅发生竖向变形时,不同垂直压力下应力、应变随时间的变化关系.本次一维固结流变试验采用了分别加载和分级加载的 2 种方式进行对比.分别加载采用南京土壤仪器厂生产的 WG-1 型三联固结仪,加载等级采用 50, 100, 200, 300, 400 kPa 共 5 个压力等级进行加载.在试验的各加载等级中,若试样在 1 d 内的变形量不超过 0.01 mm,则认为试样变形已经达到稳定,即可结束试验.分级加载试验在南京电力自动化设备厂生产的 YS-1 型高压固结仪上进行,加载等级分别为 12.5, 25.0, 50.0, ..., 1 600.0 kPa 共 8 个压力等级进行加载.在试验的每个加载等级中,若试样在 1 d 内的变形量不超过 0.01 mm,则可以认为试样变形已经达到稳定,进行下一级试验.

2 试验结果分析

2.1 分别加载试验成果

图 1 为分别加载 ε - $\ln t$ 曲线.由图 1 可以看出,垂直压力不大于 100 kPa 时 ε - $\ln t$ 曲线近似呈平行直

线,垂直压力大于 100 kPa 时 ε - $\ln t$ 曲线近似呈平行折线,约在 49 min 时曲线斜率变小,曲线趋于平缓,因此,垂直压力不大于 100 kPa 时可直接采用对数函数描述土的流变行为;垂直压力大于 100 kPa 时可采用分段对数函数描述土的流变行为。

图 2 为分别加载等时曲线.结果表明,试验过程中,应力-应变关系呈非线性;随着时间的推移,土体中孔隙水不断被挤压排出,孔隙变形越来越小,使得应力-应变关系逐渐接近线性.值得注意的是:试验初期(约 2.25 min 前)垂直荷载为 200 kPa 时试样的变形较 100 kPa 时小,应力-时间对数曲线(图 1)中,100 kPa 曲线与 200 kPa 曲线出现交叉;这种现象与传统认识不相符,试验结果表现出分别加载的不足.这种结果可能是上海地区软土成层分布导致土的不均匀性、力学性质存在差异造成的.在分析上海软土流变规律时应充分考虑试样性质差异对试验结果的影响。

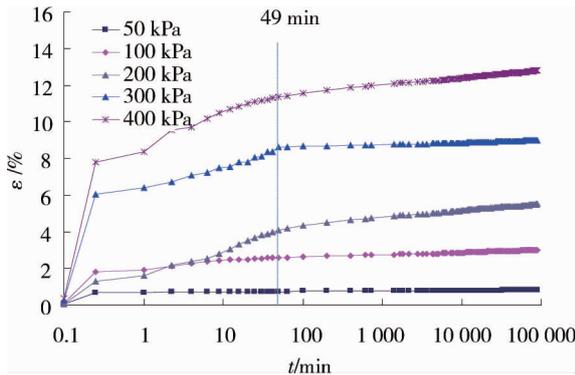


图 1 分别加载 ε - $\ln t$ 曲线

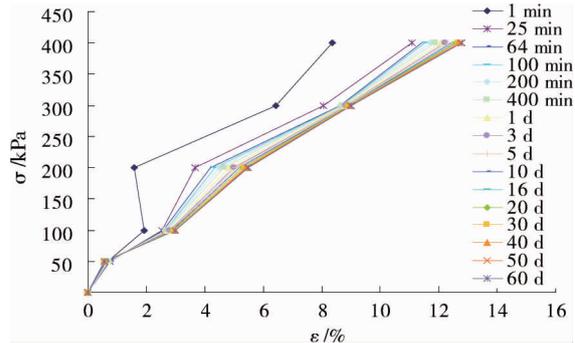


图 2 分别加载等时曲线

2.2 分级加载试验成果

图 3 为分级加载 ε - $\ln t$ 曲线.由图 3 可以看出,与分别加载类似,垂直压力不大于 200 kPa 时 ε - $\ln t$ 曲线近似呈平行折线,垂直,压力大于 200 kPa 时 ε - $\ln t$ 曲线近似呈平行折线,约在 16 min 时曲线斜率变小,曲线趋于平缓.因此垂直压力大于 200 kPa 时可采用分段对数描述土的流变行为,与分别加载试验结果相一致.由于各级荷载作用下,变形稳定时间存在一定差异,垂直压力较低时,变形稳定较快(如图 3)。

本次分析 2 d 内应力-应变之间的关系,应力-应变关系曲线如图 4 所示.图 4 表明,应力-应变关系呈非线性,随着时间的推移,应力-应变非线性关系存在减弱的趋势,与分级加载试验结果基本一致;随着荷载的继续增加,试样的变形增大,但并未出现加速蠕变迹象.这种现象,主要是由于试样侧向刚性约束限制了试样的侧向变形,试样的变形仍然为孔隙压缩。

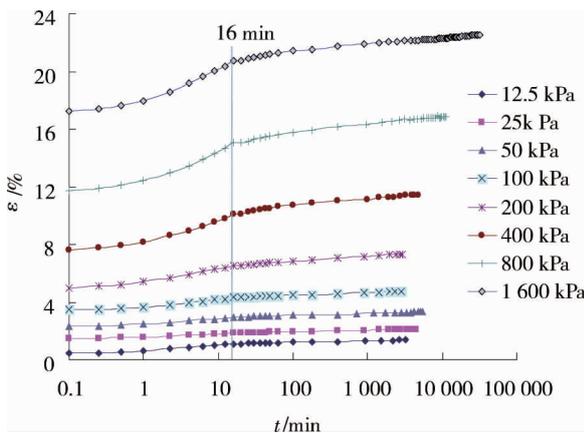


图 3 分级加载 ε - $\ln t$ 曲线

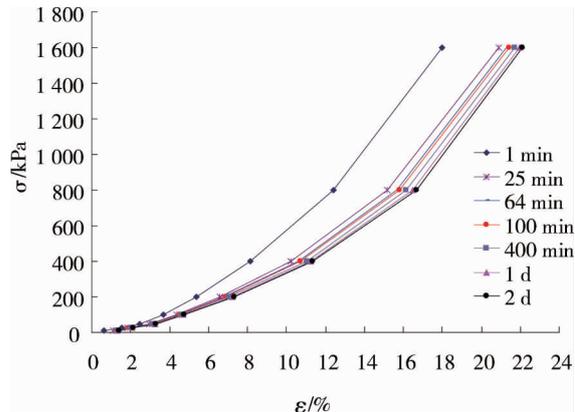


图 4 分级加载等时曲线

3 海相软土流变模型及参数分析

土工试验的经验模型中用来描述土体的流变模型通常有对数型、双曲线型和指数型等.对一维固结流变试验结果进行归一化处理时发现:对数函数形式描述上海软土加载一定时间后的流变行为时可以获得

满意的结果,但用来描述上海软土全过程流变行为时效果稍差.试验开始后不同时间段的对数型拟合结果见表 2、表 3:

表 2 分别加载试验开始不同时间段的 ε - $\ln t$ 拟合结果

垂直压力/kPa	全过程		10 min 后		49 min 后	
	拟合曲线	R^2	拟合曲线	R^2	拟合曲线	R^2
50	$\varepsilon = 0.170\ln(x) + 0.624$	0.479	$\varepsilon = 0.011\ln(x) + 0.682$	0.809	$\varepsilon = 0.016\ln(x) + 0.640$	0.852
100	$\varepsilon = 0.090\ln(x) + 2.025$	0.706	$\varepsilon = 0.058\ln(x) + 2.334$	0.989	$\varepsilon = 0.060\ln(x) + 2.311$	0.981
200	$\varepsilon = 0.291\ln(x) + 2.369$	0.909	$\varepsilon = 0.210\ln(x) + 3.169$	0.949	$\varepsilon = 0.163\ln(x) + 3.634$	0.992
300	$\varepsilon = 0.266\ln(x) + 6.670$	0.554	$\varepsilon = 0.096\ln(x) + 7.934$	0.783	$\varepsilon = 0.053\ln(x) + 8.368$	0.969
400	$\varepsilon = 0.363\ln(x) + 8.949$	0.656	$\varepsilon = 0.203\ln(x) + 10.507$	0.984	$\varepsilon = 0.180\ln(x) + 10.735$	0.996

表 3 分级加载试验开始不同时间段的 ε - $\ln t$ 拟合结果

垂直压力/kPa	全过程		10 min 后		16 min 后	
	拟合曲线	R^2	拟合曲线	R^2	拟合曲线	R^2
12.5	$\varepsilon = 0.094\ln(x) + 0.730$	0.904	$\varepsilon = 0.054\ln(x) + 0.946$	0.941	$\varepsilon = 0.050\ln(x) + 0.974$	0.954
25	$\varepsilon = 0.064\ln(x) + 1.625$	0.972	$\varepsilon = 0.052\ln(x) + 4.697$	0.981	$\varepsilon = 0.049\ln(x) + 1.717$	0.993
50	$\varepsilon = 0.093\ln(x) + 2.585$	0.943	$\varepsilon = 0.067\ln(x) + 2.755$	0.977	$\varepsilon = 0.063\ln(x) + 2.784$	0.991
100	$\varepsilon = 0.132\ln(x) + 3.818$	0.938	$\varepsilon = 0.088\ln(x) + 4.061$	0.974	$\varepsilon = 0.081\ln(x) + 4.102$	0.994
200	$\varepsilon = 0.235\ln(x) + 5.642$	0.944	$\varepsilon = 0.163\ln(x) + 6.051$	0.973	$\varepsilon = 0.151\ln(x) + 6.129$	0.993
400	$\varepsilon = 0.370\ln(x) + 8.66$	0.926	$\varepsilon = 0.250\ln(x) + 9.411$	0.943	$\varepsilon = 0.225\ln(x) + 9.590$	0.977
800	$\varepsilon = 0.422\ln(x) + 13.238$	0.920	$\varepsilon = 0.289\ln(x) + 14.254$	0.960	$\varepsilon = 0.265\ln(x) + 14.52$	0.984
1 600	$\varepsilon = 0.371\ln(x) + 18.979$	0.895	$\varepsilon = 0.241\ln(x) + 20.098$	0.961	$\varepsilon = 0.190\ln(x) + 20.599$	0.965

为建立一种能描述一维固结流变试验全过程模型,将等时曲线进行归一化处理,发现 ε/t 随 t 呈线性变化规律(图 5 和图 6),即可采用双曲线函数来描述应变-时间关系.

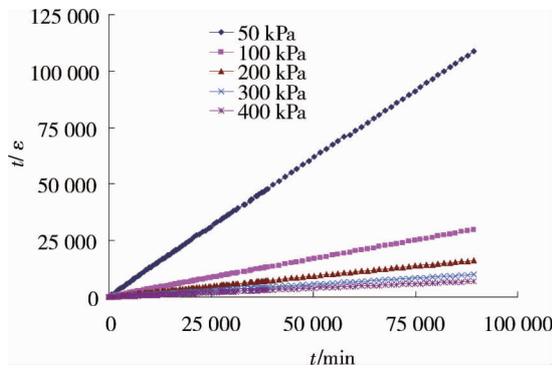


图 5 分别加载 t/ε - t 关系曲线

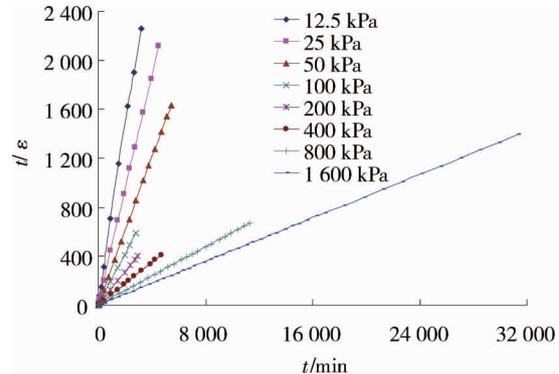


图 6 分级加载 t/ε - t 关系曲线

3.1 海相软土流变模型建立

应力-应变关系采用幂函数表示,应变-时间关系采用双曲线,则方程可表示为

$$\varepsilon(t) = \sigma^n \frac{t}{at + b} + c. \tag{1}$$

式中: a, b, c 为模型参数; σ 为垂直压力,可根据试验资料确定.

当 $t=0$ 时,初始时刻应变 $\varepsilon(0) = c$.在试验初始时刻,试样处于初始状态,无应力和变形产生,因此 $c=0$,确定 a, b, n 这 3 个参数即可得到一维固结流变的流变方程.

经简单变换,则上式可表示为

$$\frac{t}{\varepsilon(t)} = \frac{at + b}{\sigma^n}. \tag{2}$$

若令 $A = \frac{a}{\sigma^n}, B = \frac{b}{\sigma^n}$, 则式(2)可简化成:

$$\frac{t}{\varepsilon(t)} = At + B. \tag{3}$$

式中: A, B 可以由 $t/\varepsilon-t$ 关系曲线确定.其中 A 为曲线斜率,是加载到 ∞ 时应变的倒数; B 为截距,是加载瞬间应变速率的倒数.

3.2 流变模型参数分析

根据 $t/\varepsilon-t$ 关系曲线,确定分别加载和分级加载试验的双曲线模型参数,其结果见表4和表5.

从模型参数结果可以看出,随着加载等级的提高,参数 A 逐渐减小,土体稳定时的蠕变变形逐渐增大,但试验中试样并未随着加载等级的提高而发生破坏迹象,即 $A \neq 0$.而模型参数 B 则先减小然后增大,分别加载垂直荷载大于等于400 kPa、分级加载垂直荷载大于等于800 kPa时,试样的初始变形速率开始减小.因此,可利用幂函数拟合曲线确定400 kPa范围内的 A, B 值,进而确定模型参数 a, b 和 n ,如表6和图7.

表4 分别加载双曲线模型参数

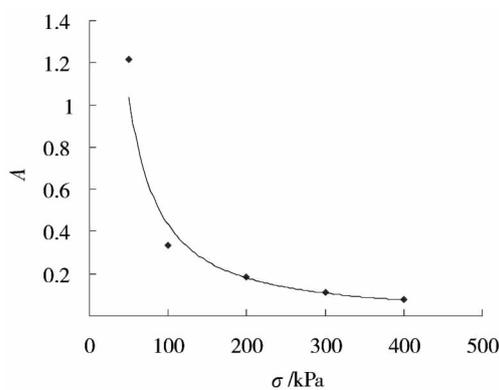
垂直压力/kPa	A	B
50	1.216 7	564.37
100	0.333 6	135.46
200	0.182 6	100.22
300	0.111 3	15.624
400	0.078 3	20.925

表5 分级加载双曲线模型参数

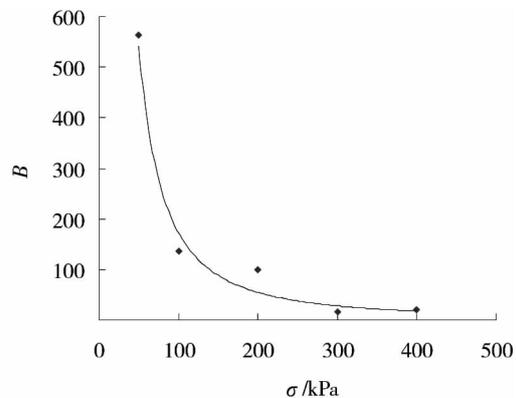
垂直压力/kPa	A	B
12.5	0.723 9	8.466 0
25.0	0.472 4	3.386 6
50.0	0.301 3	2.539 8
100.0	0.211 4	0.667 6
200.0	0.136 8	0.562 7
400.0	0.087 7	0.471 8
800.0	0.059 4	0.631 2
1 600.0	0.044 5	1.694 4

表6 双曲线型模型拟合结果

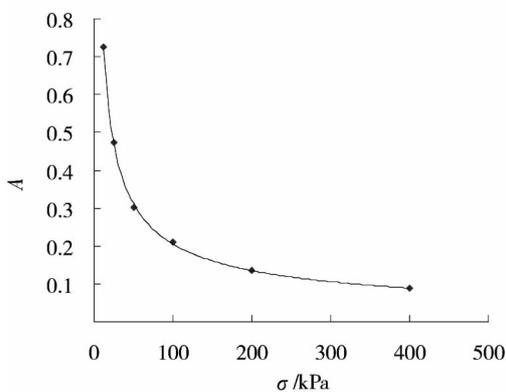
加载方式	A	B
分别加载	$A = 145.29\sigma^{-1.2637}$	$B = 34818\sigma^{-1.6527}$
分级加载	$A = 3.2952\sigma^{-0.6029}$	$B = 62.812\sigma^{-0.8721}$



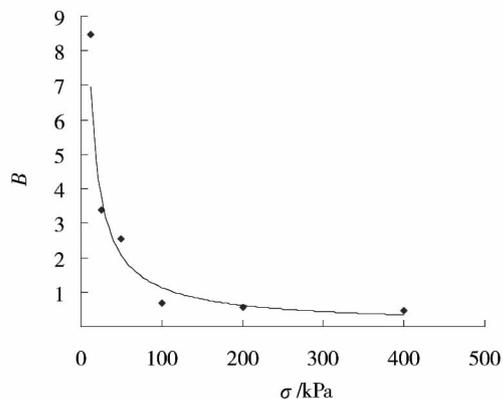
(a) 分别加载参数 A



(b) 分别加载参数 B



(c) 分级加载参数 A



(d) 分级加载参数 B

图7 一维固结流变模型参数幂函数拟合结果

根据拟合结果,将模型参数 A, B 重新表示为 $A = a\sigma^{-m}, B = b\sigma^{-n}$, 可方便的得到垂直压力在 400 kPa 范围内的一维固结流变双曲线方程.

$$\varepsilon(t) = \frac{t}{a\sigma^{-m}t + b\sigma^{-n}}. \quad (4)$$

因此,垂直压力在 400 kPa 范围内的一维固结流变双曲线方程如下.

分别加载:

$$\varepsilon(t) = \sigma^{1.458} \frac{t}{145.29t + 34\,818}. \quad (5)$$

分级加载:

$$\varepsilon(t) = \sigma^{0.738} \frac{t}{3.29t + 64.812}. \quad (6)$$

3.3 不同加载方式的试验结果对比

不同加载方式的流变模型参数差异较大.一方面,从取出到进行试验的过程,土样经历了一个卸载再加载的过程,分别加载试验使用 5 组土样,土样性质差异易导致试验结果出现不稳定(见图 1 和图 2);另一方面,分别加载试验使用了 5 台固结装置也导致了试验设备和试验操作的不确定性;此外,在分级加载过程中,土样经过逐级加载而不断固结,土的强度和压缩模量都将随之增大.从试验结果来看,2 种试验方式的结果有一定的差异,但 2 种加载方式试验结果表现出了相同的流变特性,不妨碍对软土固结流变规律的总体认识.

3.4 模型验证

对于一般工程建设来讲,建设周期较长,地基上部荷载加载速度较慢,因此,采用分级加载试验结果描述工程建设过程更加合理.为此,将分级加载模型计算值与试验值进行比较,如图 8 所示.对比结果表明:垂直压力不超过 50 kPa 时,模型计算值与试验值基本一致;垂直压力大于 50 kPa 时,模型计算值较试验值大,尤其是初始阶段,随后,模型计算值较试验值仍有偏大,但偏差较小,二者基本一致.因此,该模型可较好的描述垂直压力在 400 kPa 范围内上海海相软土一维固结流变行为.

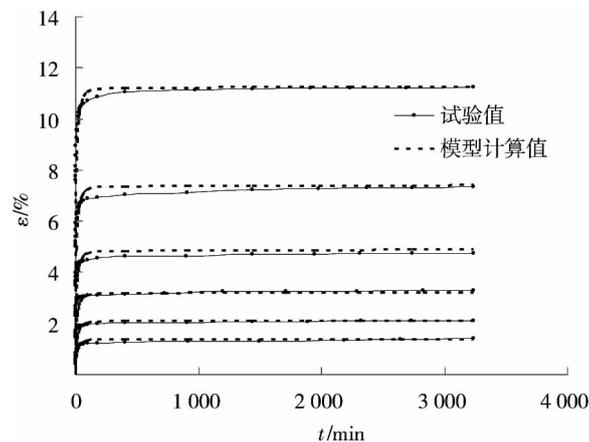


图 8 蠕变模型计算值与试验曲线

4 结论

1) 分别加载试验影响因素较多,试验结果可能出现偏差,而分级加载试验结果容易得到保证,但 2 种试验还是表现出了相同的固结流变性质.对于一般工程建设来讲,建设周期较长,加载速度较慢,采用分级加载描述工程建设过程更加合理.

2) 垂直压力较低时(分别加载垂直压力低于 100 kPa;分级加载垂直压力低于 200 kPa), $\varepsilon-\ln t$ 曲线近

似为平行直线,可直接采用对数函数描述土的流变行为;垂直压力较高时(分别加载垂直压力超过 100 kPa;分级加载垂直压力超过 200 kPa), $\varepsilon-\ln t$ 曲线近似为平行折线,分别加载试验和分级加载试验斜率变化分别在 49 min 和 16 min,此时可采用分段对数函数描述土的流变行为。

3)文中建立的流变模型,建议应力-应变关系采用幂函数表示,应变-时间关系采用双曲线表示.该模型可较好的描述垂直压力在 400 kPa 范围内上海海相软土一维固结流变分级加载全过程。

参考文献:

- [1] 《上海测绘志》编纂委员会.上海测绘志[M].上海:上海社会科学院出版社,1999.
- [2] Bjerrum L. Embankments on soft ground [C]//Proc. Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, 1972: 1-54.
- [3] 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): 913-916.
- [4] 余湘娟,殷宗泽,高磊. 软土的一维次固结双曲线流变模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 320-324.
- [5] 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): 521-526.
- [6] 王常明,王清,张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 227-230.
- [7] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(1): 21-46.
- [8] Mesri G, Febrescordero E, Shields D R, et al. Shear stress-strain-time behaviour of clays[J]. Geotechnique, 1981, 31(4): 37-52.
- [9] 李军世,林咏梅. 上海淤泥质粉质黏土的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 363-366.
- [10] 周秋娟,陈晓平. 典型基坑开挖卸荷路径下软土三轴流变特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1299-1305.