

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.152

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



长期反复荷载作用下软黏土地基的变形特性

师旭超, 孙运德, 士贺飞

(河南工业大学 土木建筑学院, 郑州 450001)

摘要:软黏土地基在长期反复荷载作用下容易产生变形大、沉降时间长且难于预测等问题。针对该问题,通过太沙基一维固结理论,求解了矩形及梯形反复荷载作用下软黏土地基的一维固结解析解;利用 ABAQUS 有限元软件,提出了一种反复荷载作用下软黏土地基长期固结变形的数值分析预测方法。利用该方法结合工程实例详细分析了反复荷载下软黏土地基沉降、孔隙压力和有效应力及孔隙比等随时间的长期发展变化规律,发现沉降量与反复荷载的水平加载段时间成正比;孔隙水压力的最终发展趋势是围绕 0 值上下波动;有效应力随着加载次数逐渐增加;孔隙比的变化与土层深度、加载大小与加载次数有关,并将不同荷载类型下的模拟值、理论值和实测数据进行了分析对比,发现等效的反复荷载下的沉降曲线与实测值吻合较好。

关键词:地基;固结方程;反复荷载;固结变形;数值模拟

中图分类号:TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)02-0023-07

Deformation characteristics of soft soil foundation under long-term repeated loading

Shi Xuchao, Sun Yunde, Shi Hefei

(College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: Soft soil foundations are prone to large deformation, long settling time and difficult to predict under long-term repeated loading. Aiming at this problem, the one-dimensional consolidation analytical solution of soft soil foundation under rectangular and trapezoidal repeated loads is solved by the one-dimensional consolidation theory of K. Terzaghi. The soft soil under repeated loading is proposed by ABAQUS finite element software. Numerical analysis and prediction method for long-term consolidation deformation of foundation. This method is combined with engineering examples to analyze the long-term development and change of soft soil foundation settlement, pore pressure, effective stress and void ratio under repeated loading with time. It is found that the settlement is proportional to the horizontal loading time of repeated load; pore water the final development trend of pressure is to fluctuate around 0; the effective stress increases with the total number of loading times; the change of void ratio is related to soil depth, loading size and loading times, the simulated values, theoretical values and measured data under different load types are compared and analyzed, and the settlement curve under the equivalent repeated load was found to be in good agreement with the actual measurement.

Keywords: foundation; consolidation equation; repeated load; consolidation deformation; numerical simulation

收稿日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金(U1304526)

作者简介:师旭超(1973-),男,教授,博士,主要从事岩石力学研究,E-mail:haut2013@163.com。

Received:2019-05-28

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. U1304526)

Author brief:Shi Xuchao (1973-), professor, PhD, main research interest: rock mechanics, E-mail: haut2013@163.com.

随着经济的不断发展,在软黏土地基上的工程建设越来越多,如油罐、筒仓、港口集装箱堆场等。地基在运营期间承受长期反复荷载作用,由于荷载情况复杂多变,荷载波动较大,地基经常会出现变形大、沉降时间长且难于预测等问题。许多学者根据其实际变化规律进行统计分析,将实际荷载进行数学化,等效为有规律的加载类型,Rahal等^[1]通过将筒仓荷载等效为正弦波载,对意大利的Ca'Mello筒仓进行了固结分析;Fattah等^[2]通过试验发现,在松散砂土中,循环荷载作用下的沉降随着荷载速率的增加而增加,而在致密砂土中,循环荷载作用下的沉降随荷载速率的增加而减小;Yazdani等^[3]推导了软黏土在循环荷载作用下的非线性固结解;Razouki等^[4]求解了半正矢循环荷载作用下的一维固结解;Fujiwara等^[5]通过现场观测研究了筒仓在满仓和空仓下地基的变形规律;Abbaspour^[6]通过数值和试验分析了三角形循环荷载下的固结过程;徐至钧等^[7]通过长期观测实例油罐分析反复荷载下地基的沉降规律;有些学者通过试验对反复荷载下软土的变形规律进行了分析^[8-12];杨峻等^[13]运用荷载及微分方程的Laplace变换求解了双层地基反复荷载下的固结解;洪辉煌^[14]用ABAQUS的修正剑桥模型模拟软土的固结变形,发现模拟值与试验值很接近;费康等^[15]介绍了ABAQUS在岩土工程中的具体应用。

目前,对反复荷载下软黏土地基的长期沉降预测的研究较少。笔者基于太沙基一维固结理论,通

$$\sigma'(z,t) = \frac{4p}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin\left(M \frac{z}{H}\right) \left[-\frac{e^{\alpha_m(T_1-t_1)} - e^{\alpha_m(T-t_1)}}{1 - e^{\alpha_m T}} + \frac{e^{\alpha_m(t-T_1)} - e^{-\alpha_m(t-T)}}{1 - e^{\alpha_m T}} + 1 - e^{-\alpha_m t} \right] \quad (3)$$

式中: t_1 为加载时间段时间参数, $0 \leq t_1 \leq T_1$; T 为累计时间参数, $t = NT + t_1$ 。

$$\sigma'(z,t) = \frac{4p}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \left[\frac{e^{\alpha_m(T_1-T_1-t_2)} - e^{\alpha_m(T-t_2)}}{1 - e^{\alpha_m T}} + \frac{e^{-\alpha_m(t-T_1)} - e^{-\alpha_m(t-T)}}{1 - e^{\alpha_m T}} - e^{-\alpha_m t} \right] \quad (4)$$

式中: t 为累计时间参数, $t = NT + T_1 + t_2$; t_2 为卸载时间段时间参数, $0 \leq t_2 \leq T - T_1$; $M = \frac{(2m+1)\pi}{2}$,

$$\alpha_m = c_v \frac{M^2}{H^2}。$$

$$q(t) = \begin{cases} \frac{q_u}{\alpha t_0} [t - (N-1)\beta t_0] & (N-1)\beta t_0 \leq t \leq [(N-1)\beta + \alpha] t_0 \\ q_u & [(N-1)\beta + \alpha] t_0 \leq t \leq [(N-1)\beta + (1-\alpha)] t_0 \\ -\frac{q_u}{\alpha t_0} [t - (N-1)\beta t_0 - t_0] & [(N-1)\beta + (1-\alpha)] t_0 \leq t \leq [(N-1)\beta + 1] t_0 \\ 0 & [(N-1)\beta + 1] t_0 \leq t \leq N\beta t_0 \end{cases} \quad (5)$$

过工程实例,利用ABAQUS有限元软件提出了一种反复荷载作用下软黏土地基长期沉降预测方法,并将实际监测与数值模拟进行对比,验证了该方法的合理性。

1 反复荷载作用下软黏土地基一维固结解

1.1 矩形反复荷载下一维固结解析解

矩形反复荷载为间断性施加的荷载,其数学公式可表示为

$$p(t) = \begin{cases} p & NT < t < NT + T_1 \\ 0 & NT + T_1 + T_1 < t < (N+1)T \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为加载周期; T_1 为加载时间段; N 为加载周期数。

矩形荷载下的固结理论假设与太沙基固结理论相同。取任意深度一微元体为研究对象,假设渗流符合达西定律,则用有效应力表示的矩形反复荷载下的一维固结微分方程为

$$C_{ve} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)的初始边界条件:当 $t=0, 0 \leq z \leq H$ 时, $p=0$;当 $t \geq 0, z=H$ 时, $\frac{\partial \sigma'}{\partial z} = 0$;当 $t \geq 0, z=0$ 时, $\sigma' = p(t)$ 。通过积分变换,可以求解式(2)的解析解。

当 $NT < t < NT + T_1$ 时

当 $NT + T_1 < t < (N+1)T$ 时

1.2 梯形反复荷载下一维固结解析解

梯形荷载的数学表达式为(5)。

式中: q_u 为反复荷载; βt_0 为一个周期; α 、 β 为加载系数; N 为加载周期数; t_0 为在一个周期内到卸载结束时所用时间。

梯形反复荷载下的一维偏微分方程为

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{dq(t)}{dt} \quad (6)$$

式(6)的求解条件:当 $t=0, 0 \leq z \leq H$ 时, $u|_{t=0} = 0$; 当 $0 < t < \infty$ 时, $u|_{z=0} = 0$; 当 $0 < t < \infty$ 时, $\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0$ 。

通过拉氏变换、逆变换及其时移性质,可以求解式(6)的解析解为

当 $(N-1)\beta t_0 \leq t \leq [(N-1)\beta + \alpha]t_0$ 时

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2q_u}{\alpha M^3 t T_0} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) (1 - B_N e^{-M^2 T'}) \quad (7)$$

当 $[(N-1)\beta + \alpha]t_0 \leq t \leq [(n-1)\beta + (1-\alpha)]t_0$ 时

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2q_u}{\alpha M^3 t T_0} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \left[\begin{array}{c} e^{\alpha M^2 T_0} \\ - \\ B_N \end{array} \right] e^{-M^2 T'} \quad (8)$$

当 $[(N-1)\beta + (1-\alpha)]t_0 \leq t \leq [(N-1)\beta + 1]t_0$ 时

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2q_u}{\alpha M^3 t T_0} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \left[1 - \begin{array}{c} e^{\alpha M^2 T_0} + \\ e^{(1-\alpha) M^2 T_0} \\ - B_N \end{array} \right] e^{-M^2 T'} \quad (9)$$

当 $[(N-1)\beta + 1]t_0 \leq t \leq N\beta t_0$ 时,

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2q_u}{\alpha M^3 t T_0} \sin\left(\frac{Mz}{H}\right) \left[\begin{array}{c} e^{\alpha M^2 T_0} - \\ e^{M^2 T_0} + \\ e^{(1-\alpha) M^2 T_0} \\ - B_N \end{array} \right] e^{-M^2 T'} \quad (10)$$

式中: $t = (N-1)\beta t_0 + t', 0 \leq t' \leq \beta t_0$; $B_N = 1 + \frac{(e^{\alpha M^2 T_0} - 1)(e^{\alpha M^2 T_0} - e^{M^2 T_0})(1 - e^{-(N-1)\beta M^2 T_0})}{e^{\alpha M^2 T_0}(1 - e^{M^2 T_0})}$; $T_0 = \frac{C_v t_0}{H^2}$; $T' = \frac{C_v t'}{H^2}$; $M = \frac{\pi}{2}(2m-1)$; $m=1, 2, 3, \dots, n$ 。

2 工程实例及模型

2.1 工程实例

文献[7]中一储油罐工程有数十年的沉降观测记录,该油罐位于河道附近,地势低洼,场地下方土层为高压缩性软土,地下水位埋藏深度为 0.8 m,自上而下有 6 层土类组成,每层土体的参数见表 1。表层土为河道吹填土,含水率及承载力很差,第 3 层土为压缩性非常高的软弱下卧层。该油罐直径为 40.63 m,高度为 16 m,油罐下边缘设 1.7 m 的透水性砂垫层,为了减少油罐的底部在反复荷载下的下陷程度,将地板预留为 3.5% 的拱度,中心最高处为 2.4 m,用钢筋混凝土环墙约束砂垫层。采用两次充水预压,两次预压时间共计 2 a,从第 2 次充水预压结束的第 10 天开始投产进油,投产观测时间为 8.8 a,投产后的前两年半平均荷载峰值 181.5 kPa,投产前两年半由于地基沉降的不稳定性,油面短时间内变化较大。

表 1 土体的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indicators of soil

土层	累积层深 h/m	含水量 $\omega/\%$	天然重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	初始孔隙比 e	液限				塑限		渗透系数 k / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比 ν	应力比 M
					固结快剪		有效应力法		压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩指数 C_c			
					φ	C/kPa	φ'	c'/kPa					
吹填土	4	38.4	17.5	1.32	21.5	19.6	32	0	0.47	0.209	2.53×10^{-8}	0.35	0.901
淤泥质亚粘土	14.2	37.4	17.7	1.27	22.6	16.3	32	0	0.41	0.207	2.35×10^{-7}	0.35	0.901
淤泥质粘土	26.2	48.8	16.8	1.23	18.2	9.8	28	0	0.87	0.478	1.02×10^{-9}	0.40	0.812
灰绿色亚粘土	29.3	24.5	19.4	1.04	21.6	12.7	32	0	0.19	0.103	5.37×10^{-7}	0.35	0.901
褐黄色亚粘土	31.8	33.5	18.1	0.96	24.2	32.7	34	0	0.19	0.118	4.98×10^{-7}	0.35	0.945
淤泥质亚粘土	>31.8	39.2	17.3	0.87	18.7	10.9	29	0	0.51	0.301	6.39×10^{-7}	0.3	0.835

2.2 模型建立及模拟方法

利用 ABAQUS 有限元软件进行建模^[15],由于圆形油罐的对称性,可以取油罐的一半进行建模分

析,采用二维。为减小边界条件的影响,取模型宽 100 m、深 80 m,考虑渗流与固结的耦合,选择 CPE8RP 单元类型。排水条件为顶部排水,本构模

型选用修正剑桥模型。经过分析,前两年半内的荷载变化周期为两个月。后续储油周期大约达到了一年一个周期,荷载峰值基本保持在 173.5 kPa。在观测的整个运营周期,考虑到油罐的自重及油面恒大于 0,设置了大小为 60.9 kPa 的恒载。利用 ABAQUS 提供的 DLOAD 荷载自定义子程序,编制了自定义反复荷载。

该模型共设 6 个分析步,第 1 步为地应力平衡及预加先期固结压力;第 2 步为第 1 次充水预压,时间 1.58 a;第 3 步为第 2 次充水,时间 0.5 a;第 4 步为一持续时间为 10 d 空罐时间;第 5 步为投产后 2.867 a,荷载周期为 3 个月的分析步;第 6 步为达到稳定运营之后 6 a 多的分析步,荷载周期为 1 a。根据运营期的荷载峰值及变化频率,将荷载做了如图 1 中梯形荷载的近似,并作矩形荷载与恒载用于对比分析,图 2 为模型的数值模拟图。

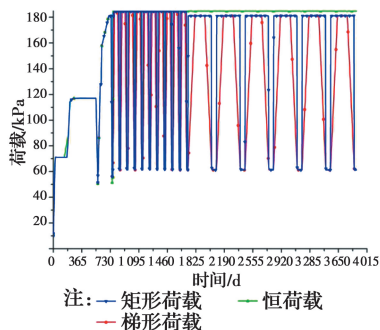


图 1 软件输出的荷载
Fig. 1 Output load of software

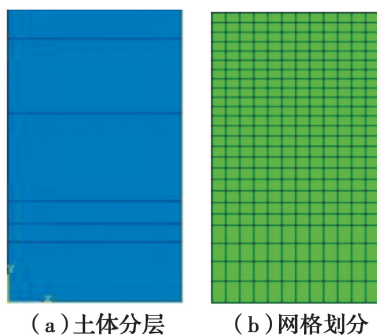


图 2 数值模型图

Fig. 2 Numerical model diagram

基础沉降云图如图 3 所示,从图 3 可以看出:储油罐基础沉降云图大致为半个蝴蝶形状,地基中部沉降大、周边沉降小;基底压力沿深度逐渐向外扩散,导致下部土体发生径向位移,在基础边缘 8.357 m 以外土体向上隆起,最终隆起量为 8.146 cm。隆起原因一是下部土体的径向位移侧向挤压土体,二是由于孔隙水压力的作用。

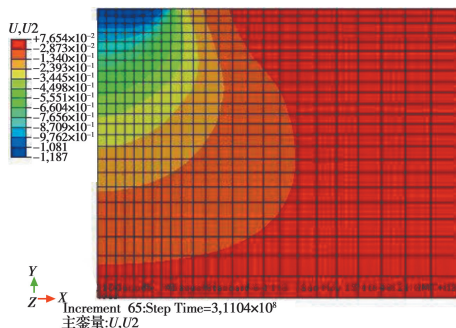


图 3 竖向位移等值云图

Fig. 3 Vertical displacement equivalent cloud map

3 软土地基变形分析

3.1 地基沉降变化规律

从图 4 可以看出,反复荷载下的沉降曲线与实测曲线有较好的吻合性;矩形荷载沉降大于梯形荷载,这是因为矩形荷载的水平加载时间段长于梯形荷载。由此可知,水平段的长短对结果的影响非常明显,随着周期数的增加,差距愈加明显,从图 5 也可以看出这一现象,因此,在进行实际荷载拟合时要充分考虑这一点。

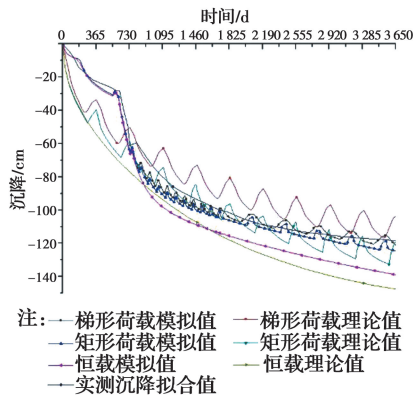


图 4 地基 10 a 沉降模拟、理论及实测值对比

Fig. 4 Comparison of foundation settlement simulation, theory and measured values for 10 years

表 2 显示图 4 的具体数值对比,由表 2 可以看出,实测的平均值为 1.184 m,梯形反复荷载模拟的平均值为 1.208 m,误差仅为 2.07%,而恒载模拟的结果与实测相差较大,达到 21.37%。但两者模拟结果都大于实测,这是由于实际荷载变化的随机性,等效后的荷载并不能与实际荷载完全吻合。通过对比可以发现,将荷载等效为梯形反复荷载较恒荷载有较高的真实性。从理论值、模拟值与实测值对比可以看出:模拟值误差比理论值普遍要小,这是由于理论公式的参数往往取平均值,不能像模拟那样分层准确取值;理论计算虽然不能像模拟那样能准确

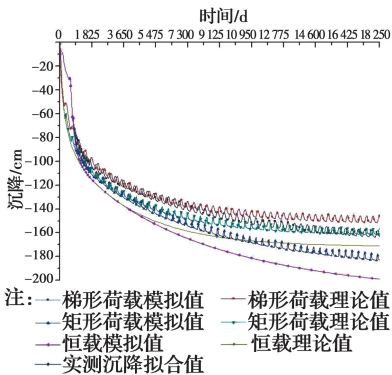


图 5 地基 50 a 沉降模拟值与理论值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and theoretical values of 50-year settlement of foundation

预测每一时刻具体变化(如图 4 中前期理论值误差很大),但是理论值与模拟值有相同的变化规律,也可以进行有效预测,并且理论计算比模拟更加方便快捷。

表 2 投产 10 a 后各荷载沉降与实测对比

Table 2 Comparison of load settlement and actual measurement after 10 years of production

荷载类型	计算类型	最大值/m	最小值/m	平均值/m	与实测偏差/%
恒荷载	模拟值	1.437	1.437	1.437	21.37
	理论值	1.473	1.473	1.473	24.41
矩形荷载	模拟值	1.268	1.221	1.245	5.15
	理论值	1.328	1.210	1.269	7.18
梯形荷载	模拟值	1.230	1.187	1.208	2.07
	理论值	1.169	1.034	1.102	6.93
实测		1.196	1.172	1.184	

从图 5 运营 50 a 的分析可以看出:地基在运营期间一直发生着沉降,土体的次固结将持续很长时间,但沉降速率很小而且均匀,不会对储罐设施造成破坏。从模拟值与理论值的对比可以看出,长期情况下理论值趋于稳定不变状态,模拟值处于缓慢沉降状态。这是由于土体的性质造成的,也说明理论解的局限性,通过实际情况可知,剑桥模型的模拟结果要比理论解更符合实际,而且更加可靠。

由图 6 可知,反复荷载值的大小对沉降的影响很大。实际反复荷载值作用的沉降为 1.230 m,而当反复荷载值为 100 kPa 时的沉降为 0.984 m,荷载相差 20 kPa,沉降差值为 0.246 m。因此,在将实际荷载进行拟合时,反复荷载值的大小是一个影响沉降的重要因素,应精确选择。

由图 7 可以看出,反复荷载模拟沿深度的沉降

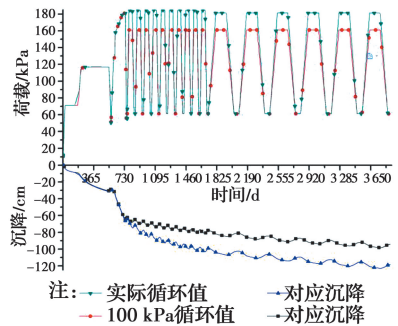


图 6 不同荷载峰值下的地基沉降

Fig. 6 Foundation settlement under different load peaks

值与实测值较贴近,第 1 层与第 2 层土体的沉降曲线比较吻合,第 3 层土体为软弱土层,沿深度有较大的沉降差。土层的沉降在 40 m 深处已经很小,实测值的影响深度在 36 m 处只有 3.9 cm,然而,数值模拟中,沉降影响深度比实测值要深很多,在土层 60 m 深处也有 4 cm 的沉降量。所以,在建立模型时应设置足够的深度及宽度,以减小边界条件对模拟结果的影响。

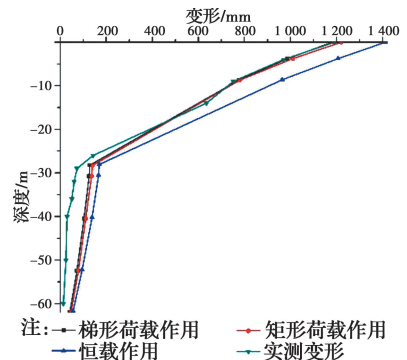


图 7 地基深层土体变形模拟及实测值分布图

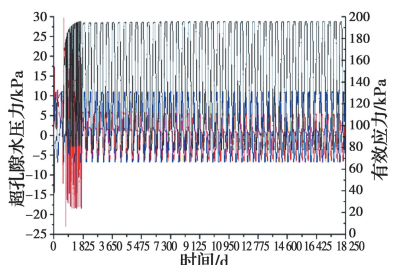
Fig. 7 Simulation of deep soil deformation and distribution of measured values

3.2 孔隙水压力与有效应力变化规律

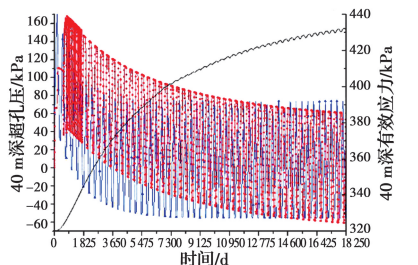
从图 8 可以看出,在长期反复荷载下,孔隙水压力最终会围绕 0 值上下波动,并逐渐趋于某一个上下限数值,这个数值与荷载有关,孔隙水压力波动范围的稳定性与有效应力有关,即当有效应力稳定时,孔压波动范围也就稳定下来;有效应力随时间逐渐增加,渐渐趋于反复荷载值,其增加速率与土层深度和加载次数有关,随着深度的增加,有效应力受反复荷载的影响越小,在 40 m 深处的有效应力受反复荷载的影响已经很小,但 50 a 内仍在增加,而 2 m 深处的有效应力在投产两年后就基本达到了最大值,随着加载次数的增加,有效应力逐渐趋于稳定并随荷载变化,土体逐渐显现出来弹性的特性。

从图 8 中梯形荷载下理论孔压值与模拟孔压值

对比可知,理论孔压值变化的幅度大于模拟值,这也解释了图4和图5理论沉降再加卸载时的变化幅度大于模拟沉降的原因,但两者有相似变化规律,从而论证了推导的固结解的正确性。



注:—2 m深超孔压理论值 —2 m深超孔压模拟值
—2 m深有效应力
(a) 2 m处超孔压与有效应力变化



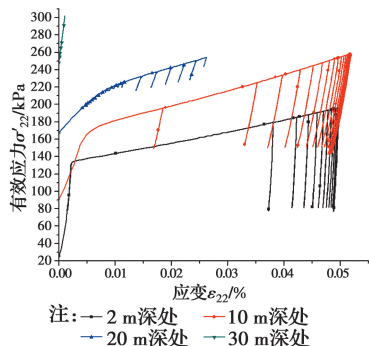
注:—40 m深超孔压理论值 —40 m深超孔压模拟值
—40 m深有效应力
(b) 40 m处超孔压与有效应力变化

图8 运营50 a后不同深度有效应力及孔压随时间变化曲线

Fig. 8 Curve of effective stress and pore pressure with time at different depths after 50 years of operation

3.3 有效应力-应变关系变化规律

从图9可以看出,有效应力随着时间逐渐增大,在运营期间,随着反复次数的增加,塑性应变逐渐减小;在2.5 a以后,每个加载周期塑性应变的增加量已经很小,可以说地基沉降已经进入了稳定增长期;随着深度的增加,反复荷载对有效应力-应变曲线影响越小,在30 m深处曲线基本变为线性增加。

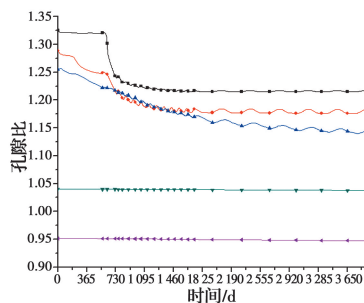


注:—2 m深处 —10 m深处
—20 m深处 —30 m深处
图9 运营10 a后土层深处有效应力-应变曲线
Fig. 9 Effective stress-strain curve in the depth of soil after 10 years of operation

3.4 孔隙比变化规律

由图10可知,土层越浅孔隙比前期变化速率越

快,达到稳定孔隙比的时间越短;在预压结束后,孔隙比均已经减小到了稳定值;土层越深孔隙比变化速率越均匀,达到稳定孔隙比所需时间就越长,如20 m深处的孔隙比变化;随着土层深度的增加,孔隙比受反复荷载的影响越来越小,如30 m深处的孔隙比受反复荷载的影响效果比较浅处土层要小很多,其在运营周期内的变化非常微小。



注:—2 m深处孔隙比变化曲线 —10 m深处孔隙比变化曲线
—20 m深处孔隙比变化曲线 —30 m深处孔隙比变化曲线
—40 m深处孔隙比变化曲线

图10 梯形荷载下不同深度孔隙比变化曲线

Fig. 10 Curve of variation of void ratio at different depths under trapezoidal load

4 结论

1) 基于太沙基一维固结理论,推导出了矩形及梯形反复荷载作用下软土地基的一维固结解析解。

2) 通过利用ABAQUS有限元软件及相关自定义子程序,对实例油罐荷载按照等效反复荷载作用和恒载作用分别进行了沉降数值模拟,发现对于储罐类受反复荷载作用的软土地基,利用反复荷载进行数值模拟的结果比恒荷载要精确很多,且与实测值相比误差很小。

3) 通过对存储类型、储量及储存周期的预先分析,可以近似确定等效反复荷载类型及大小,进而进行准确的数值模拟,其模拟结果不仅可以对存储类地基长期沉降进行预测,也可以得到实测中一些无法得到的数据,如土体形变、孔隙水压力及孔隙比对荷载的响应等,还可以辅助实地观测进行地基的承载力及差异沉降分析。

4) 反复荷载的水平加载段时间与荷载值对地基的长期沉降影响明显,水平加载段越长、反复荷载值越大,沉降量越大;反复荷载下有效应力随着加载次数其总体趋势逐渐增加;随着土层深度的增加孔隙比的变化受反复荷载的影响越来越小。

参考文献:

- [1] RAHAL M A, VUEZ A R. Analysis of settlement and pore pressure induced by cyclic loading of silo [J]. Journal of

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(12): 1208-1210.
- [2] FATTAH M Y, KARIM H H, AL-QAZAZ H H. Cyclic behavior of footings on dry sand under different rates of loading [J]. International Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 6(6): 240-253.
- [3] YAZDANI H, TOUFIGH M M. Nonlinear consolidation of soft clays subjected to cyclic loading-Part I: theory [J]. Geomechanics and Engineering, 2012, 4(4): 229-241.
- [4] RAZOUKI S S, BONNIER P, DATCHEVA M, et al. Analytical solution for 1D consolidation under haversine cyclic loading [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(14): 2367-2372.
- [5] FUJIWARA H, UE S. Effect of preloading on post-construction consolidation settlement of soft clay subjected to repeated loading [J]. Soils and Foundations, 1990, 30(1): 76-86.
- [6] ABBASPOUR M. An investigation of consolidation process under triangular cyclic loading by numerical and experimental analysis [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 1403-1417.
- [7] 徐至钧,魏汝龙,王竹三. 圆形油罐地基变形特性的研究[C]//中国土木工程学会第三届土力学及基础工程学术会议,北京:中国建筑工业出版社,1981.
XU Z J, WEI R L, WANG Z S. Study on deformation characteristics of circular oil tank foundation [C] // The 3rd Academic Conference of Soil Mechanics and Basic Engineering of China Civil Engineering Society, Beijing: China Architecture & Building Press, 1981. (in Chinese)
- [8] 莫小霞. 循环荷载作用下海积软土动力特性及微观结构试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
MO X X. Experimental study on dynamic characteristics and mesostructure of marine soft soil under cyclic loading [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [9] 杨爱武,仲涛,张国军,等. 反复荷载作用下结构性软黏土动力特性试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(1): 44-50.
YANG A W, ZHONG T, ZHANG G J, et al. Experimental study on dynamic characteristics of structural soft clay under cyclic loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(1): 44-50. (in Chinese)
- [10] 陈志波,孔秋平,朱俊高,等. 反复循环荷载下考虑上覆土体压力软土次固结变形试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3507-3514
CHEN Z B, KONG Q P, ZHU J G, et al. Experimental study on secondary consolidation deformation of soft soil under overburden cyclic stress [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(10): 3507-3514 (in Chinese)
- [11] 董焱赫. 长期反复荷载下饱和软粘土蠕变特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
DONG Y H. Study on creep characteristics of saturated soft clay under long-term cyclic loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [12] 瞿帅,刘维正,聂志红. 长期循环荷载下人工结构性软土累积变形规律及预测模型[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 975-984.
ZHAI S, LIU W Z, NIE Z H. Accumulation deformation law and prediction model of artificial structural soft soil under long-term cyclic loading [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 975-984. (in Chinese)
- [13] 杨峻,蔡袁强,吴世明. 循环荷载作用下双层地基的一维固结[J]. 浙江大学学报(工学版), 1996, 30(3): 319-326.
YANG J, CAI Y Q, WU S M. One-dimensional consolidation of two-layer foundation under cyclic loading [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1996, 30(3): 319-326. (in Chinese)
- [14] 洪辉煌. 福州地区软土的修正剑桥模型试验及其数值模拟验证[J]. 福建建筑, 2011, 162(12): 69-71.
HONG H H. Modified Cambridge Model test and numerical simulation of soft soil in Fuzhou [J]. Fujian Architecture, 2011, 162(12): 69-71. (in Chinese)
- [15] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
FEI K, ZHANG J W. Application of ABAQUS in Geotechnical Engineering [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2009. (in Chinese)