

单向与双向排水时饱和软黏土固结震陷的计算方法

刘金韬¹, 金晓媚²

1. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120
2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

摘要 软黏土在地震时产生固结震陷可导致建筑物下沉、不均匀沉降和倾倒塌毁等破坏, 因此研究软黏土固结震陷及其计算方法是防震减灾的重要课题。运用动力学等效应力原理, 将震动固结问题在加荷期与卸荷期简化为常规固结问题, 研究了单向与双向排水条件下, 软黏土层在加荷与卸荷期间超静孔隙水压力的变化, 提出一种相对简单的震陷量计算方法。利用天津市塘沽望海楼住宅区的有关资料进行了实例验算, 该地区在双向排水条件下的平均震陷量为 46.1cm, 在单向排水条件下的震陷量为 25.7cm, 计算结果与该地区地震后的实测资料基本吻合, 验证了该计算方法的可行性。

关键词 饱和软黏土; 固结震陷; 超静孔隙水压力; 单向排水; 双向排水

中图分类号 P642.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.17.001

Estimation Method of Consolidation Seismic Subsidence of Saturated Soft Clayey Soil with One-side And Two-side Drainages

LIU Jintao¹, JIN Xiaomei²

1. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China
2. China University of Geosciences, School of Water Resources and Environment, Beijing 100083, China

Abstract During earthquake disasters, the consolidation seismic subsidence of soft clayey soil in the coastal areas could cause the damages of building subsidence, collapse, and non-uniform settlement. Therefore the research on the consolidation seismic subsidence of soft clayey soil and the method for estimating seismic subsidence are the important subject. Based on the equivalent stress principle of soil dynamics, the problem of consolidation seismic subsidence on loading and unloading conditions is simplified to the general consolidation problem, and the variations of extra-static pore water pressure of soft clay in one-side and two-sides drainages are discussed. Furthermore, a relative simple method for seismic subsidence estimation is put forward and it is validated by the data collected from Wanghailou residential area of Tanggu, Tianjin. The result indicates that the seismic subsidence is 46.1cm with two-side drainage while 25.7cm with one-side drainage. Based on field data of the area, the seismic subsidence of silty loam area is 30-40cm with 15-20cm in silty clay region, and the largest subsidence is 60cm. Therefore, the modeling result is consistent with field data.

Keywords saturated soft clayey soil; consolidation seismic subsidence; extra-static pore water-pressure; one-side drainage; two-side drainage

0 引言

对软黏土在震动条件下变形的研究始于 20 世纪中叶, Braja^[1]曾用旧金山海湾淤泥在没有静应力作用的特殊情况下进行试验, 找出了脉动应力和使土样破坏的脉冲数之间的关系。Lee^[2]对循环荷载下三轴试验的残余变形做了比较系统的试验研究, 建立了动应力作用 N 次后, 试件产生残余变形的

经验公式, 并用于估算地震作用下软黏土的震陷量。中国科学院工程力学研究所^[3,4]对各类型软黏土做了大量的震陷试验, 并在 Lee 研究的基础上, 建立了残余应变的经验公式, 同时提出“软化模型”的概念, 其基本设想是认为地震作用会使土体变软、模量降低, 从而产生震陷。Matasovic^[5]通过对不同超固结比下高塑性海洋土的试验, 研究了超固结比对土体软化

收稿日期: 2013-02-18; 修回日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772158)

作者简介: 刘金韬, 博士, 高级工程师, 研究方向为水文地质工程地质, 电子信箱: jinxiaomei26@gmail.com

的影响,并引入软化指数和软化参数。要明伦、聂桂林^[6]对软化指数进行了修正,提出了计算饱和软黏土动变形的一种模式,并取渤海近海海底的饱和软黏土进行动三轴试验,用修正后的软化模型进行了验算^[4]。后来,孟上九、刘汉龙等^[7,8]改进了软化模型,假定地震中土体随动荷载作用而逐步软化,逐步软化模型在物理上可以理解为一列弹簧首尾相接串联在一起,只要有一个应力循环就有一个弹簧串联在体系之中,而且每串联一个弹簧,体系的模量就衰减一次,相应的土体变形量也进行计算,以此类推,一直到全部动应力的往复作用结束。还有许多学者^[9-27]在其它方面进行了诸多研究,这里不再赘述。以上研究在试验和理论方面都取得了许多成果,为今后的研究打下了基础。

笔者在学习以往的研究成果中,开拓思路,从另一个角度对震陷问题进行研究探讨。震陷即为软黏土在地震作用下排水固结的过程。将地震过程按震动周期分段,每个震动周期可以分为加荷期与无荷期,利用等效应力原理^[1](即在加荷期地震荷载取等效应力,不随时间变化),则可将震动固结问题近似转化为常规固结问题,同时,震动固结的速度是由孔隙水从土中逸出的速度支配的。相邻土层是排水条件还是隔水条件,对动荷载条件下的震动固结都是有影响的,本文通过对震动固结这种边界条件的讨论,研究单向与双向排水时软黏土震陷量的计算方法。

1 理论模型的建立

根据震动固结原理,地震时软黏土层中超静孔压随时间及深度变化的微分方程为^[26]

$$C_v \frac{\partial^2 u_t}{\partial z^2} = \frac{\partial u_t}{\partial t} - (\gamma_p H_p + \gamma_0 z) A_0 \omega \cos \omega t \quad (1)$$

式中, H_p 为上覆土层厚度, m; γ_p 为上覆土层容重, g/cm³; γ_0 为软黏土容重, g/cm³; A_0 为地震加速度峰值, m/s²; ω 为地震圆频率, s⁻¹; C_v 为固结系数, cm²/s; u_t 为 t 时刻的超静孔压, kPa; z 为软黏土层某一深度, m; t 为地震持续到某一时刻, s。

方程的通解为

$$u_t(z, t) = (C_1 \cos Bz + C_2 \sin Bz) e^{-B^2 C_v t} + (\gamma_p H_p + \gamma_0 z) A_0 \sin \omega t + C_3 \quad (2)$$

式中, u_t 为 t 时刻的超静孔压, kPa; C_1, C_2, C_3, B 为待定系数; 其他符号同前。

将地震时的往复荷载利用等效应力原理简化,可以假设每一个加荷周期为一个加荷期与一个无荷期之和,加荷期地震加速度取加速度峰值的 65%,即 $A = 0.65A_0$ 。这时在每个加荷周期的加荷时间段与无荷时间段可以看作常规固结,进行如下讨论。

1.1 双向排水条件

假定饱和软黏土均质各向同性,上、下层面自由排水且无覆盖层,水没有水平方向的运动,压缩系数为常数,压缩率等于膨胀率,如图 1 所示。往复荷载加荷方式如图 2 所示,即在 T_1 时间段内动荷载 $\sigma_t = \sigma$, 在 T_2 时间段内无荷载, $T_1 + T_2 = T$ 为一个加荷往复周期。

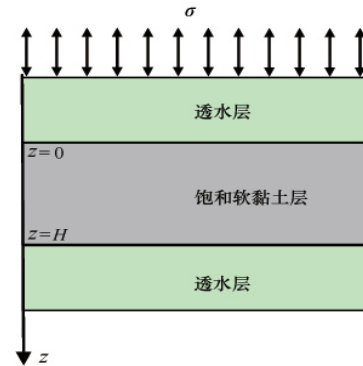


图 1 双向排水软黏土埋藏示意

Fig. 1 Scheme of buried soft clayey soil with two-side drainage

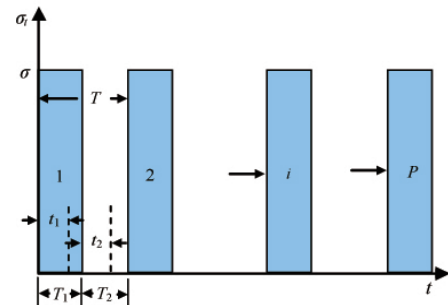


图 2 加荷方式示意

Fig. 2 Scheme of loading manner

1) 讨论第一个加荷期 T_1 内的情况 (时间段为加荷开始至加荷结束,见图 2)。由排水量等于压缩量原理可以得出动荷载 σ 引起的超静孔压 u 随时间及深度变化的微分方程,即常规固结方程

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式中 $C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$ $m_v = \frac{a_{1-2}}{1+e_0}$

其中, m_v 为土的压缩率; k 为渗透系数; γ_w 为水容重; a_{1-2} 为压缩系数; e_0 为初始孔隙比。

初始条件为: 当 $t=0$ 时, $u=\sigma$; 当自重条件下往复加荷时, $\sigma = \gamma_0 z A$ (z 为深度)。

边界条件为: 当 $z=0$ 时, $u=0$; 当 $z=H$ 时, $u=0$ 。

用分离变量法可解得式(1)的通解为

$$u = (C_1 \cos \lambda z + C_2 \sin \lambda z) e^{-\lambda^2 C_v t} \quad (4)$$

式中, λ 为待定系数。由边界条件及初始条件解得

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{2\gamma_0 H A}{(2m+1)\pi} \sin \frac{(2m+1)\pi}{H} z \right] \cdot \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v t \right] \quad (5)$$

式(5)即为在 T_1 时间段内,由附加动荷载 σ 引起的超静孔压随深度及时间变化的关系式。

由于在 T_1 时间段内,总动荷载 σ 不变,则有效附加应力的改变就是超静孔压的改变,由式(5)可得 t_1 时刻的超静孔压为



$$u_{t_1} = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2\gamma_0 HA}{(2m+1)\pi} \sin \frac{(2m+1)\pi}{H} z \right] \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v t_1 \right] \quad (6)$$

则从加荷开始至 t_1 时间段内,超静孔压的变化量为

$$\Delta u_{t_1} = \sigma - u_{t_1} = \gamma_0 z A - u_{t_1} \quad (7)$$

由土力学有关原理可知,该时间段内土层的压缩量为

$$S_{t_1} = \int_0^H \Delta \sigma'_{t_1} m_v dz \quad (8)$$

式中, $\Delta \sigma'_{t_1}$ 为从加荷开始至 t_1 时间段内有效附加应力的变化量,由式(7)可知

$$\Delta \sigma'_{t_1} = \gamma_0 z A - u_{t_1} \quad (9)$$

由式(5)还可得 T_1 加荷期结束时刻的超静孔压为

$$u_{T_1} = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2\gamma_0 HA}{(2m+1)\pi} \sin \frac{(2m+1)\pi}{H} z \right] \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v T_1 \right] \quad (10)$$

则 t_1 时刻至 T_1 加荷期结束时刻时间段内,超静孔压变化量为

$$\Delta u_{t_1-T_1} = u_{t_1} - u_{T_1} \quad (11)$$

该时间段内土层的压缩量为

$$S_{t_1-T_1} = \int_0^H \Delta \sigma'_{t_1-T_1} m_v dz \quad (12)$$

其中 $\Delta \sigma'_{t_1-T_1} = u_{t_1} - u_{T_1}$, 则整个 T_1 时间段内土层的压缩量为

$$S_{T_1} = S_{t_1} + S_{t_1-T_1} = \int_0^H (\Delta \sigma'_{t_1} + \Delta \sigma'_{t_1-T_1}) m_v dz = \int_0^H (\gamma_0 z A - u_{T_1}) m_v dz \quad (13)$$

将式(10)代入式(13)得

$$S_{T_1} = \int_0^H \left[e^{-(4m+1)^2 \beta T_1} - 2e^{-(4m+1)^2 \beta T_1} \right] m_v dz = m_v \gamma_0 A H^2 \left\{ \frac{1}{2} - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{4}{(2m+1)^2 \pi^2} \cdot \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v T_1 \right] \right\} \quad (14)$$

2) 讨论第一个无荷期 T_2 内的情况 (时间段为第一加荷期结束时刻至第二加荷期开始时刻,见图2)。此时间段内由于没有附加荷载,则土体会产生一定的回弹,这部分回弹是由于残余超静孔压逐渐转化为有效附加应力造成的,由吸水量等于膨胀量的原理可知, T_2 时间段内超静孔压随时间及深度的变化仍符合式(3),但此时相当于静荷载时的固结情况,其对应的初始条件为 $t=0$ 时 $u=u_{T_1}$ 。

边界条件不变,可解得

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2\gamma_0 HA}{(2m+1)\pi} \sin \frac{(2m+1)\pi}{H} z \right] \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v (T_1 + t) \right] \quad (15)$$

此时 t 是从 T_1 结束时刻算起的时间。由此第一个加荷往复周期 T 结束时刻土体中残余超静孔压为

$$u_T = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2\gamma_0 HA}{(2m+1)\pi} \sin \frac{(2m+1)\pi}{H} z \right] \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v (T_1 + T_2) \right] \quad (16)$$

因此, T_2 时间段内超静孔压的变化量为

$$\Delta u_{T_2} = u_{T_1} - u_T \quad (17)$$

那么, T_2 时间段内土体的回弹量为

$$E_{T_2} = \int_0^H \Delta \sigma'_{T_2} \cdot m_v dz = \int_0^H (u_{T_1} - u_T) m_v dz \quad (18)$$

将式(10)及式(16)代入式(18)并积分整理得

$$E_{T_2} = m_v \gamma_0 A H^2 \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{4}{(2m+1)^2 \pi^2} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v T_1 \right] - \exp \left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{H^2} C_v T \right] \right\} \quad (19)$$

则在第一个往复加荷周期 T 内,土体产生的总压缩量为

$$S_{1T} = S_{T_1} - E_{T_2} \quad (20)$$

将式(14)及式(19)代入式(20),并设 $\beta = \frac{\pi^2 C_v}{H^2}$, 整理后可得

$$S_{1T} = m_v \gamma_0 A H^2 \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{4}{(2m+1)^2 \pi^2} \left[e^{-(2m+1)^2 \beta T} - 2e^{-(2m+1)^2 \beta T} \right] \right\} \quad (21)$$

假设与土层厚度相比,动荷载使土层产生的压缩量非常小,则可认为经过第一个加荷周期后土层厚度仍为 H ,那么在第二个加荷周期中,土层仍会重复第一个周期中的压缩过程,产生相同的压缩量。若整个往复加荷持续 P 个周期,则土层产生的总压缩量为

$$S_{PT} = P S_{1T} \quad (22)$$

1.2 单向排水条件

假定饱和软黏土层上界面自由排水,下界面为不透水界面(如图3所示),其它假设条件同前。

1) 讨论第一个加荷期 T_1 内的情况(时间段为加荷开始至加荷结束,见图2)。此时土体内超静孔压 u 的变化仍符合式(1),只是边界条件发生了变化。

初始条件为:当 $t=0$ 时, $u = \sigma = \gamma_0 z A$ 。

边界条件为:当 $z=0$ 时, $u=0$; 当 $z=H$ 时, $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ 。

方程的通解仍可用式(4)表示,由初始及边界条件可解得

$$u = \sum_{n=0}^{n=\infty} \left[\frac{8\gamma_0 HA}{(4n+1)^2 \pi^2} \sin \frac{(4n+1)\pi}{2H} z \right] \exp \left[-\frac{(4n+1)^2 \pi^2}{4H^2} C_v t \right] \quad (23)$$

式(23)即为单向排水条件下在 T_1 时间段内,由于附加动荷载 σ 引起的超静孔压随深度及时间变化的关系式。

与前面的原理相同, T_1 时间段内有效附加应力变化量为

$$\Delta \sigma'_{T_1} = \gamma_0 z A - u_{T_1} \quad (24)$$

由此可得到该时间段内土层的压缩量为

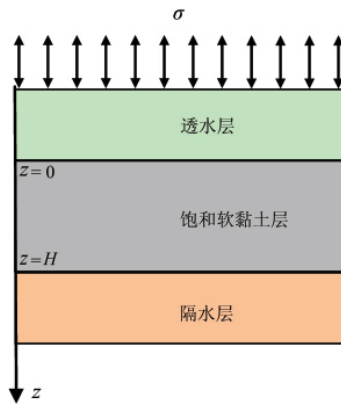


图3 单向排水软黏土埋藏示意

Fig. 3 Sketch of buried soft clayey soil with one-side drainage

$$S_{T_1} = \int_0^H \Delta \sigma'_{T_1} m_c dz = m_c \gamma_0 A H^2 \left\{ \frac{1}{2} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{16}{(4n+1)^3 \pi^3} \exp \left[-\frac{(4n+1)^2 \pi^2}{4H^2} C_v T_1 \right] \right\} \quad (25)$$

2) 讨论第一个无荷期 T_2 内的情况 (时间段为第一个加荷期结束时刻至第二个加荷期开始时刻, 见图2)。原理同前, 第一个加荷往复周期 T 结束时刻土体内残余超静孔压为

$$u_r = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{8\gamma_0 H A}{(4n+1)^2 \pi^2} \sin \frac{(4n+1)\pi}{2H} z \right] \exp \left[-\frac{(4n+1)^2 \pi^2}{4H^2} C_v T \right] \quad (26)$$

则 T_2 时间段内土体的回弹量为

$$E_{T_2} = \int_0^H \Delta \sigma'_{T_2} m_c dz = \int_0^H (u_r - u_T) m_c dz \quad (27)$$

将 u_T, u_r 表达式代入式(27)并积分得

$$E_{T_2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{16m_c \gamma_0 A H^2}{(4n+1)^3 \pi^3} \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(4n+1)^2 \pi^2}{4H^2} C_v T_1 \right] - \exp \left[-\frac{(4n+1)^2 \pi^2}{4H^2} C_v T \right] \right\} \quad (28)$$

则在第一个往复加荷周期 T 内, 土体产生的总压缩量为

$$S_{1T} = S_{T_1} - E_{T_2} \quad (29)$$

将式(25)及式(28)代入, 并设 $\beta = \frac{\pi^2 C_v}{H^2}$, 整理后得

$$S_{1T} = m_c \gamma_0 A H^2 \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{16}{(4n+1)^3 \pi^3} \left[e^{-(4n+1)^2 \beta T} - 2e^{-(4n+1)^2 \beta T_1} \right] \right\} \quad (30)$$

若土层的压缩量远小于土层厚度, 并设整个往复加荷过程持续 R 个周期, 根据上述原理, 土层的总压缩量为

$$S_{RT} = R S_{1T} \quad (31)$$

在式(21)和式(30)中, 由于

$$\left[e^{-(2m+1)^2 \beta T} - 2e^{-(2m+1)^2 \beta T} \right] < 1 \quad \left[e^{-(4n+1)^2 \beta T} - 2e^{-(4n+1)^2 \beta T_1} \right] < 1$$

而 $4(2m+1)^2 \pi^2$ 及 $16(4n+1)^3 \pi^3$ 随 n 与 m 取值的增大会逐渐收敛, 因此, 一般计算中取前 50 项 ($m, n=0, 1, 2, \dots, 49$), 结果趋于稳定。

2 实例计算

计算选用的实例为天津塘沽望海楼住宅区淤泥质土层。该地区地层条件, 最上部为杂填土, 厚度约 0.5m, 其下部为淤泥、淤泥质黏土、淤泥质亚黏土互层, 厚度约 15~17m^[27]。软黏土层 (包括淤泥、淤泥质黏土、淤泥质亚黏土) 之下为粉质壤土或粉质黏土, 其主要物理力学参数列于表 1 (平均值)。由表 1 可知, 粉质黏土的渗透系数约是软黏土的 10~20 倍, 而杂填土与粉质壤土的渗透系数是软黏土的 100 倍以上, 因此, 可以根据淤泥质软黏土的埋藏条件确定排水形式, 当下伏粉质壤

表 1 淤泥质土及相邻土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of muddy soil and adjacent layer

项目	容重 γ /(g/cm ³)	孔隙 比 e	饱和度 S_r /%	压缩系 数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	渗透系 数 k /(cm/s)
淤泥	1.17	1.53	92	1.51	1.79×10^{-6}
淤泥质黏土	1.23	1.20	83	1.38	7.55×10^{-6}
淤泥质亚黏土	1.25	1.18	85	1.29	5.66×10^{-6}
杂填土	1.46	0.90	—	0.33	7.67×10^{-4}
粉质壤土	1.55	0.87	—	0.21	8.61×10^{-4}
粉质黏土	1.57	0.79	—	0.28	3.51×10^{-5}

土时为双向排水, 当下伏粉质黏土时为单向排水。

1976 年唐山地震时, 塘沽地区烈度为 8, 产生的地震加速度峰值 A_0 为 $0.05g$ (g 为重力加速度), 地震持续时间为 15s, 震动周期为 0.2s, 计算中 A 取值为 $0.65A_0$ ^[26,27]。

由上述条件, 可计算出唐山地震时该地区淤泥质软黏土在双向排水时产生的平均固结震陷量为 46.1cm, 最大震陷量 48.1cm; 在单向排水时产生的平均固结震陷量为 25.7cm, 最大震陷量 29.6cm。该地区地震后实测资料显示, 该地区平均固结震陷量在下伏粉质壤土地区为 30~40cm, 在下伏粉质黏土地区为 15~20cm, 最大震陷量约 60cm, 由此可见, 计算结果与实测结果基本吻合。

3 结论

1) 利用土动力学等效应力原理, 可将震动固结问题近似转化为常规固结问题, 将每个地震往复荷载周期简化为一个加荷期与一个无荷期。加荷期地震荷载取等效应力, 即计算中地震加速度取 65% 的地震加速度峰值。无荷期没有地震荷载。

2) 在考虑单向排水与双向排水对软黏土震陷影响条件下, 提出了一种计算震陷量的方法, 并利用该方法进行了实例计算: 双向排水条件下, 软土层厚度 15m 时震陷量为 43.2cm, 软黏土层厚度 17m 时震陷量为 48.1cm, 平均震陷量为 46.1cm; 单向排水条件下, 软黏土层厚度 15m 时震陷量为 22.5cm, 软黏土层厚度 17m 时震陷量为 29.6cm, 平均震陷量

为 25.7cm。实测资料显示,下伏粉质壤土(相当于双向排水)的震陷量为 30~40cm;下伏粉质黏土(相当与单向排水)的震陷量为 15~20cm,最大震陷量约 60cm。计算结果与实测资料基本吻合,说明本文计算方法是可行的。

3) 分析计算和实测资料均反映,单向排水比双向排水条件下产生的震陷量小。

在上述成果的基础上,有些问题尚需进一步研究,如在第一加荷周期过后,土层厚度实际已受到压缩,即土层厚度随震动持续而变化(孔隙比亦改变);又如实际中软黏土层上下界面的排水条件并不是绝对排水或不排水,而是介于其间,相比之下,二者渗透系数相差大时可近似认为是排水条件,反之认为是不排水条件;还有 A 值等效问题,等等。

参考文献 (References)

- [1] Braja M D. Fundamentals of soil dynamics [M]. New York: Elsevier Science Publishing, 1983.
- [2] Lee K L, Focht J A. Strength of clay subjected to cyclic loading [J]. Marine Geotechnology, 1976, 1(3): 165-185.
- [3] 石兆吉,郁寿松,翁鹿年. 塘沽新港地区震陷计算分析[J]. 土木工程学报, 1988, 21(4): 24-33.
Shi Zhaoji, Yu Shousong, Weng Lunian. China Civil Engineering Journal, 1988, 21(4): 24-33.
- [4] 郁寿松,石兆吉. 土壤震陷试验研究[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 35-44.
Yu Shousong, Shi Zhaoji. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 35-44.
- [5] Matasovic N. Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits[D]. Los Angeles: University of California, 1993.
- [6] 要明伦,聂栓林. 饱和软黏土动变形计算的一种模式[J]. 水利学报, 1994(7): 51-55.
Yao Minglun, Nie Shuanlin. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(7): 51-55.
- [7] 孟上九,刘汉龙,袁晓铭,等. 塘沽新港地区建筑物不均匀震陷分析[J]. 河海大学学报, 2004, 32(2): 175-178.
Meng Shangjiu, Liu Hanlong, Yuan Xiaoming, et al. Journal of Hohai University, 2004, 32(2): 175-178.
- [8] 孟上九,刘汉龙,袁晓铭,等. 建筑物地基不均匀震陷有限元时程分析方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 33-36.
Meng Shangjiu, Liu Hanlong, Yuan Xiaoming, et al. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 33-36.
- [9] 张勇,孔令伟,李雄威. 循环荷载下饱和软黏土的动骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1699-1704.
Zhang Yong, Kong Lingwei, Li Xiongwei. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1699-1704.
- [10] 徐舜华,王兰民,孙军杰,等. 黄土震陷性深度特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3397-3403.
Xu Shunhua, Wang Lanmin, Sun Junjie, et al. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3397-3403.
- [11] 张先伟,王常明,李军霞. 软土固结蠕变特性及机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3584-3590.
Zhang Xianwei, Wang Changming, Li Junxia. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3584-3590.
- [12] 陈青生,高广运,何俊锋. 上海软土地场三维非线性地震反应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3461-3467.
Chen Qingsheng, Gao Guangyun, He Junfeng. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3461-3467.
- [13] 黄博,史海栋,凌道盛,等. 两种粉质黏土的动静强度特性对比研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 665-673.
Huang Bo, Shi Haidong, Ling Daosheng, et al. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 665-673.
- [14] 丁伯阳,张勇. 杭州第四系软土动力特性试验与土结构性影响的探讨[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 336-342.
Ding Boyang, Zhang Yong. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 336-342.
- [15] 李国维,胡坚,陆晓岑,等. 超固结软黏土一维蠕变次固结系数与侧压力系数[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2198-2205.
Li Guowei, Hu Jian, Lu Xiaocen, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2198-2205.
- [16] 郭林,蔡袁强,王军,等. 长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2249-2254.
Guo Lin, Cai Yuanqiang, Wang Jun, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2249-2254.
- [17] 王元战,黄东旭,肖忠. 天津滨海地区两种典型软黏土蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 379-380.
Wang Yuanzhan, Huang Dongxu, Xiao Zhong. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 379-380.
- [18] 郑刚,霍海峰,雷华阳,等. 循环荷载后原状与重塑饱和粉质黏土不排水强度性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 400-408.
Zheng Gang, Huo Haifeng, Lei Huayang, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 32(3): 400-408.
- [19] 李丽华,陈轮,高盛焱. 翠湖湿地软土触变性试验研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 765-768.
Li Lihua, Chen Lun, Gao Shengyan. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 765-768.
- [20] 师旭超,韩阳. 卸荷作用下软黏土回弹吸水试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 732-736.
Shi Xuchao, Han Yang. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 732-736.
- [21] Desai C S, Ma Y. Modelling of joints and interface using the disturbed state concept [J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16: 623-653.
- [22] Armaleh S H, Desai C S. Modelling and testing of cohesion less material using disturbed state concept [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 1994(2): 297-295.
- [23] Surajit P, Wathugais G W. Disturbed state model for sand geosynthetic interface and application to pull out tests [J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23: 1873-1892.
- [24] Fakharian K, Evgin E. Plastic modeling of stress path dependent behavior of interfaces [J]. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24: 183-199.
- [25] Lee C Y. Pile groups under negative skin friction [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(10): 1587-1600.
- [26] Lee C J. Development of down drag on piles and pile groups in consolidation soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 905-914.
- [27] 胡存,刘海笑,黄维. 考虑循环荷载下饱和黏土软化的损伤边界模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 459-466.
Hu Cun, Liu Haixiao, Huang Wei. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 459-466.
- [28] 刘金韬. 唐山沿海主要环境地质问题形成机制及其预测模型的研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 1998.
Liu Jintao. The research of forming mechanism and calculating model of the main environmental geological problem in tangshan coastal areas [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1998.
- [29] 杨书遂. 渤海湾西岸海滩地区工程地质条件初探 [J]. 水文地质工程地质, 1989, 16(2): 58-59.
Yang Shusui. Hydrogeology & Engineering Geology, 1989, 16(2): 58-59.

(责任编辑 韩星明,彭金平)