

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.015



# 考虑孔隙比和渗透系数随土体当前应力变化的 深基坑降水开挖变形分析

邵羽<sup>1</sup>, 江杰<sup>1,2</sup>, 马少坤<sup>1,3</sup>, 吕海波<sup>1,3</sup>, 何建兴<sup>1</sup>, 陈俊羽<sup>1</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 工程防灾与结构安全重点实验室, 南宁 530004;

2. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; 3. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:**基于修正剑桥模型理论, 推导了孔隙比  $e$  随土体当前应力变化的方程, 同时比选了 4 组经典的描述渗透系数  $k$  随孔隙比变化的方程, 选择了其中一组最佳的估算公式, 编写 ABAQUS 用户子程序 VOIDRI 和 USDFLD, 以实现孔隙比和渗透系数随土体当前应力的变化。在此基础上, 研究深基坑降水开挖所致的坑内外土体的变形、围护结构的变形及弯矩, 得到以下结论: 当考虑孔隙比随土体当前应力变化时, 坑外地表沉降量、墙体的水平位移、地下连续墙的弯矩、坑底隆起量均大于孔隙比为定值时的情况; 当考虑渗透系数随土体当前应力变化时, 坑外地表沉降量、墙体的水平位移、地下连续墙的弯矩均小于渗透系数为定值时的情况, 但同时考虑渗透系数和孔隙比变化情况时, 其对坑底的隆起量的影响可以忽略不计。

**关键词:** 孔隙比; 渗透系数; 用户子程序; 深基坑

**中图分类号:** O319.56    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0092-09

## Deformation of deep foundation pits due to excavation and dewatering considering the change of void ratio and permeability coefficient with current stress of soil

Shao Yu<sup>1</sup>, Jiang Jie<sup>1,2</sup>, Ma Shaokun<sup>1,3</sup>, Lyu Hai-bo<sup>1,3</sup>, He Jianxing<sup>1</sup>, Chen Junyu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. China Ship building NDRI Engineering Co., Ltd, Shanghai 200063, P. R. China; 3. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China)

**Abstract:** The function of void ratio  $e$  changing with current stress was derived using the theory of Modified Cam-Clay Model. Simultaneously, four groups of classic estimate formula about permeability coefficient

**收稿日期:** 2014-07-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51068002、41362016); 广西岩土力学与工程重点实验室资助课题(13-KF-02); 上海市青年科技启明星计划项目(13QB1404300)

**作者简介:** 邵羽(1987-), 男, 博士生, 主要从事基坑工程研究, (E-mail)shaoyu\_1987@126.com。

马少坤(通信作者), 男, 教授, (E-mail)mashaokun@sina.com。

**Received:** 2014-07-02

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(No. 51068002, No. 41362016); Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering (13-KF-02); Shanghai Rising-Star Program (No. 13QB1404300)

**Author brief:** Shao Yu(1987-), PhD candidate, main research interest: excavation engineering, (E-mail)shaoyu\_1987@126.com.

Ma Shaokun(corresponding author), professor, (E-mail)mashaokun@sina.com.

changing with void ratio were compared to identify the accurate one. User subroutines VOIDRI and USDFLD in ABAQUS were compiled to realize the variation of void ratio and permeability coefficient along with the change of current stress of soil. Then the soil displacement, the deformation and the bending moment of retaining structure caused by excavation and dewatering with or without considering the change of void ratio and permeability coefficient with current stress of soil were compared. The results showed that with changing void ratio, values of ground settlement, horizontal displacement of diaphragm wall, bending moment of diaphragm wall and rebound at bottom were larger than those with constant void ratio. When permeability coefficient changed with current stress of soil, values of ground settlement, horizontal displacement and bending moment of diaphragm wall were smaller than those with constant permeability coefficient however, the change of void ratio and the permeability coefficient with the current stress has no significant impact on soil rebound at bottom.

**Key words:** void ratio; permeability coefficient; user subroutines; deep foundation pit

孔隙比和渗透系数的取值对土体的强度和变形产生影响较大。早期的岩土工作者在试验的基础上,考虑影响渗透系数的相关因素,提出了一系列针对不同土体  $e-k$  之间的关系表达式<sup>[1]</sup>。对于实际工程,若能掌握孔隙比和渗透系数随土体当前应力变化的规律,将使工程师能准确的计算如卸载、加载等不同工况条件下土体当前的孔隙比和渗透系数,为准确的预测土体的强度和变形奠定坚实的基础。为此,岩土工作者们在此方面做了不少有意义的研究。曾玲玲等<sup>[2]</sup>通过分析 23 组重塑黏土的固结渗透试验数据,提出土体压缩过程中当土体的应变大于 20% 时,渗透系数的对数与孔隙比的关系并非线性关系,而是呈非线性的指数关系。孙立强等<sup>[3]</sup>通过室内试验得出了吹填土孔隙比随固结应力变化的关系式及渗透系数与孔隙比的关系式,在此基础上建立了渗透系数与土体固结应力的变化关系。刘维正等<sup>[4]</sup>对太湖湖沼相粉质黏土原状样与不同工况下重塑样的渗透系数进行了测定,试验表明:对于同一土体,渗透系数主要受孔隙比的影响,而受土的结构性和应力历史的影响较小,并在此基础上建立了  $\lg(1+e) - \lg k_v$  的渗透模型。邱长林等<sup>[5]</sup>通过理论分析和室内模型试验,对吹填土的真空预压固结的影响因素进行了研究,结果表明:相对传统计算方法而言,对于吹填土地基进行固结设计时,应当考虑孔隙比和渗透系数这两种重要因素的变化影响,否则得到偏小的总体固结时间。柯瀚等<sup>[6]</sup>以自制垃圾为研究对象,采用室内三轴渗透试验和常水头渗透试验,分析了孔隙比、降解龄期、有效固结应力等因素对自制垃圾的渗透系数的影响。

孔隙比和渗透系数是影响土体强度和土体固结快慢的重要参数,其取值对于基坑降水开挖这种复杂工况的工程有着重要的影响,继而影响基坑降水开挖所致的坑内外土体的变形及围护结构的变形。本文在前人研究的基础上,首先基于修正剑桥模型,推导出土体处于  $K_0$  状态下孔隙比随土体当前应力变化的关系式,同时,比选了几组经典的渗透系数  $k$  随孔隙比变化的估算公式,选择其中一组最佳的估算公式,并据此编写了 ABAQUS 用户子程序 VOIDRI 和 USDFLD,以实现孔隙比和渗透系数随土体当前应力的变化。在此基础上,分析了孔隙比和渗透系数随土体当前应力的变化而变化这种更符合实际的情况下,深基坑降水开挖对坑内外土体变形、围护结构的变形和内力的影响。

## 1 基于 MCC 的孔隙比和渗透系数随土体当前应力变化的关系

为了实现孔隙比随土体深度变化而变化,也即随土体当前应力的变化而变化,根据下图 1 中  $e - \ln p'$  平面中的 NCL 线(各向等压固结线)、CSL 线(临界状态线)与  $K_0$  状态固结线之间的关系,并结合修正剑桥模型的原理推导出正常固结黏土  $K_0$  状态下孔隙比  $e$  与有效平均主应力的关系式,其具体推导过程可参见文献[7]。

$$e_k = e_1 + (\kappa - \lambda) \ln \left[ \left( \frac{q}{p' M} \right)^2 + 1 \right] - \lambda \ln p' \quad (1)$$

式(1)即为土体处于  $K_0$  正常固结状态下孔隙比随土体当前应力状态变化的关系式,可用于子程序 VOIDRI 的编写。

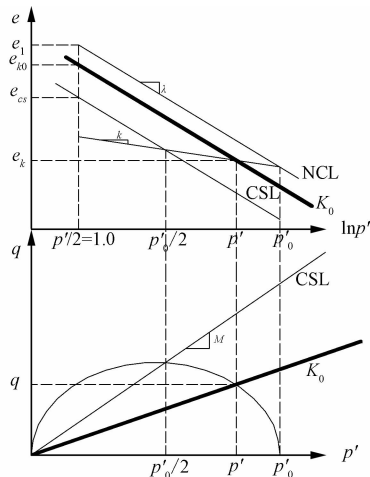


图 1  $K_0$  状态下土体初始孔隙比确定

Fig. 1 Calculation of the initial void ratio for clays under  $K_0$  state

关于渗透系数与孔隙比之间的关系,不少研究者通过室内外试验提出了不同的经验关系式,其中运用较为普遍的主要为表 1 中 4 种关系式。

表 1 渗透系数与孔隙比的关系式汇总  
Table 1 Tabulate the relationship between void ratio and permeability coefficient

提出者	关系式	适用土体
Kozeny <sup>[8]</sup> & Carman <sup>[9-10]</sup>	$k = \frac{n^3}{5(1-n)^2} (\frac{D_{eff}}{6})^2$ (2) $D_{eff}$ 为土体的平均有效粒径	砂土
Samarasinghe <sup>[11]</sup>	$k = C \frac{e_k^m}{1+e_k}$ (3) 对于软土 $m$ 一般取 5 <sup>[12]</sup>	砂土、粘土
Mesri 等 <sup>[13]</sup>	$k = 6.45 \times 10^{-11} (\frac{e_k/CF}{A_c+1})^4$ (4) $CF$ 为土体的粘粒含量, $A_c$ 为土体的活性指数	软土
Taylor <sup>[14]</sup>	$lgk = lgk_0 - \frac{e_0 - e_k}{C_k}$ (5) $C_k$ 为与土体渗透系数相关的指标, $C_k = 0.5e_0$	软土

对于式(5),可以写为  $C_k \Delta lgk = \Delta e$ ,可以看出  $C_k$  为  $\Delta lgk - \Delta e$  坐标中的斜率,且  $C_k(T) = 0.5e_0$ 。现将其他 3 式也通过类似的方法,将其在  $\Delta lgk - \Delta e$  坐标中进行转换,得到其斜率  $C_k$ ,并比较四者的斜率  $C_k$  与  $e_0$  的关系。

对于 KC 方程(2),  $k = \frac{n^3}{5(1-n)^2} (\frac{D_{eff}}{6})^2$ ,因对于同一种土  $D_{eff}$  为常数,所以其具体  $\Delta lgk - \Delta e$  转换过程如下:

$$\ln \frac{k}{k_0} = 3 \ln \frac{n}{n_0} - 2 \ln \frac{1-n}{1-n_0} = 3 \ln \frac{1+e_0}{1+e_k} -$$

$$2 \ln \frac{1 - \frac{e_k}{1+e_0}}{1 - \frac{e_0}{1+e_0}} = 3 \ln \frac{e_k}{e_0} - 2 \ln(1 + e_0 - e_k) = 3 \ln(1 -$$

$$\frac{\Delta e}{e_0}) - 2 \ln(1 + e_0 \frac{\Delta e}{e_0}) \approx -3 \frac{\Delta e}{e_0} - 2e_0 \frac{\Delta e}{e_0} = (\frac{3}{e_0} + 2)(e_k - e_0)$$

则有:  $\Delta \ln k = (\frac{3}{e_0} + 2)\Delta e \Rightarrow \frac{2.3e_0}{3+2e_0} \Delta lgk = \Delta e$ , 所以

$$C_k(K) = \frac{2.3e_0}{3+2e_0}$$

同理,式(3)可以转换为

$$\Delta \ln k = (\frac{m}{e_0} - \frac{1}{1+e_0})\Delta e \Rightarrow \frac{2.3}{\frac{m}{e_0} - \frac{1}{1+e_0}} \Delta lgk =$$

$$\Delta e, \text{ 所以 } C_k(S) = \frac{2.3}{\frac{m}{e_0} - \frac{1}{1+e_0}}$$

式(4)可以写为  $\Delta \ln \frac{k}{k_0} = 4 \ln(1 + \frac{\Delta e}{e_0})$ , 则有  $\Delta \ln k =$

$$\frac{4}{e_0} \Delta e \Rightarrow \frac{e_0}{4} \Delta \ln k = \Delta e, \text{ 所以 } C_k(M) = \frac{2.3e_0}{4}$$

将上述所得的斜率  $C_k$  与  $e_0$  的关系描绘在文献 [15-16]中所统计的 Champlain Clay、加拿大国内及一些国外粘土的  $C_k$  与  $e_0$  的关系数据库中,如图 2 所示。从图 2 可以看出,  $C_k(M)$  和  $C_k(S)$  在数据较为集中的上方,  $C_k(K)$  处于数据集中的下方,其与数据库数据的相关性较差,而  $C_k(T)$  与其他 3 式相比,其与数据库的相关性较好,所以本文拟采用 Talay 提出的渗透系数与孔隙比的关系式<sup>[14]</sup>,并结合前面推导的孔隙比随土体当前应力变化的关系式,可以得到下式:

$$lgk = lgk_0 - \frac{e_0 - (e_1 + (\kappa - \lambda) \ln[(\frac{q}{p'}M)^2 + 1] - \lambda \ln p')}{C_k} \quad (6)$$

式中  $e_0$  为  $K_0$  状态下的初始孔隙比,  $e_1$  为各向等压固结下的初始孔隙比。

按式(6)编写子程序 USDFLD,以实现渗透系数随土体当前应力的变化而变化。

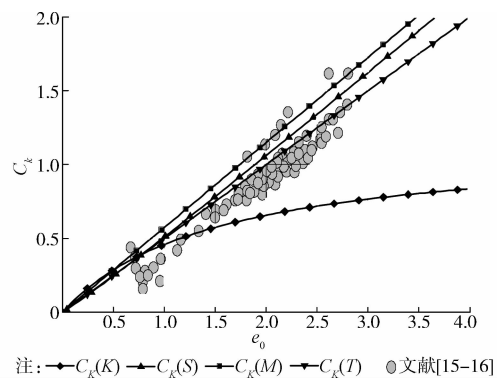


图 2 4 种  $C_k$  随初始孔隙比的变化与数据库的对比

Fig. 2 Comparison between the four types of  $C_k$  changed with  $e_0$  and the database

## 2 实例演示

计算模型为某公共建筑的基坑工程,基坑总宽度为 60 m,标准段开挖深度为 16 m,基坑开挖施工步骤分为 4 步,其具体的施作顺序见图 3,围护结构采用深度为 32 m 地下连续墙加 3 道支撑,地下水位高度设置为与地表平齐。由于施工支撑的需要,在模拟过程中每步开挖结束后,设置一定的间歇期。

根据 Peck<sup>[17]</sup>、Lin<sup>[18]</sup>、Roboski 等<sup>[19]</sup>研究的成果,对于软土地区的深基坑开挖,基坑的边缘至边界的距离为开挖深度的 5 倍时,边界条件对基坑的影响可以忽略。为尽量减少模型的边界条件对变形的影响,本文模拟区域为基坑两侧向外延伸 90 m,深度方向取为 70 m。

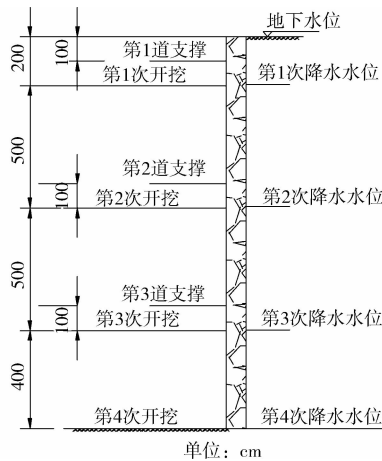


图 3 基坑降水开挖步骤概况

Fig. 3 Procedure of dewatering and excavation of deep foundation pit

模型中连续墙的模拟采用实体单元,按照 Hashash<sup>[20]</sup>等人的观点,认为连续墙的厚度方向至少要划分两排实体单元才能模拟连续墙的弯矩,此模型采用沿厚度方向 2 个单元模拟。建模过程中,地下连续墙与土体之间的接触采用摩擦模型,即切向符合各向同性的 Coulomb 定律,摩擦系数  $\mu = 0.3$ ,法向采用“硬”接触,即假设接触面间能传递无限大的压力而不能传递任何拉力。主动侧土体与墙体整体接触,被动侧土体与墙体按每步的开挖深度分段设置接触,这样在每次开挖土体时也相应移除了被动侧设置的接触对,如图 4 所示<sup>[21]</sup>。

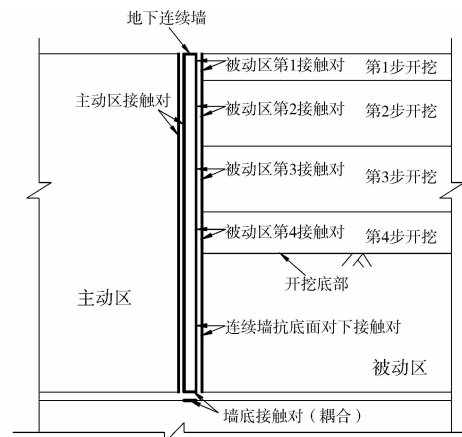


图 4 墙土接触关系示意图

Fig. 4 Schematic of the contact relationship between soil and diaphragm wall

导入编写的子程序以实现孔隙比和渗透系数随土体当前应力的变化。

土体参数采用上海地区第 4 层淤泥质黏土的修正剑桥模型参数,其具体取值见表 2<sup>[21]</sup>。

模型各部件所采用的单元见表 3。

表 2 土层的修正剑桥模型参数  
Table 2 Modified Cam-Clay parameters for the soil

重度 $\gamma/(\text{KN} \cdot \text{m}^{-3})$	初始孔隙比 $e_0$	静止侧压力系数 $K_0$	泊松比 $\nu$
17.15	1	0.5	0.35
$e-\ln p$ 平面正常固结线斜率 $\lambda$	$e-\ln p$ 平面回弹曲线斜率 $\kappa$	临界状态线斜率 $M$	渗透系数 $k/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
0.14	0.01	1.4	$8e^{-6}$

表 3 模型中各部件所选单元  
Table 3 Selected unit for all components in the two models

工况	土体	地下连续墙	水平支撑
不考虑降水	CPE8R	CPE8R	T2D2
考虑降水	CPE8RP	CPE8R	T2D2

相应的模型主要开挖区网格图如图 5 所示。

为了对比分析孔隙比和渗透系数的变化对基坑坑内外土体的变形和围护结构内力的影响,在保证其他参数不变的情况下,分别建立了如下 3 种情况下的计算模型:不考虑孔隙比和渗透系数的变化、只考虑孔隙比的变化不考虑渗透系数的变化、同时考虑孔隙比和渗透系数的变化。图 6、7 所示为孔隙比和渗透系数随深度变化关系图。



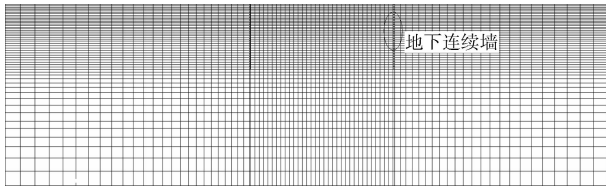


图 5 模型主要开挖区有限元网格

Fig. 5 Finite element meshes for the model

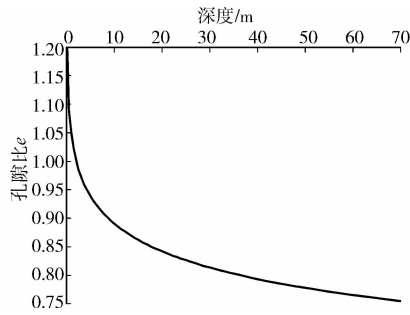


图 6 孔隙比随深度变化图

Fig. 6 Variation of void ratio with depth

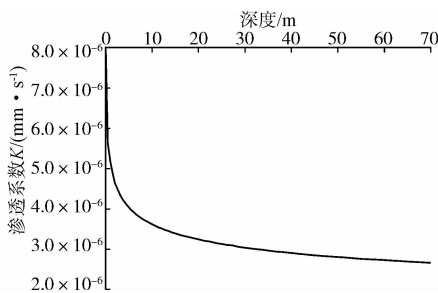


图 7 渗透系数随深度变化图

Fig. 7 Variation of permeability coefficient with depth

### 3 计算结果分析

#### 3.1 地表沉降

图 8(a)、(b)、(c)、(d) 分别为不考虑孔隙比和渗透系数的变化、仅考虑孔隙比变化、同时考虑孔隙比和渗透系数变化 3 种情况下基坑降水开挖各施工步的坑外地表沉降图。从以上 3 个图中可以看出距基坑边缘 80 m 处时,坑外地表沉降逐渐趋近于零,表明本次基坑降水开挖模拟所设置的边界条件对坑内外土体的变形的影响可以忽略。3 种情况下的最大地表沉降均发生在距基坑边缘约 1/3 倍基坑开挖深度附近,且其沉降变形模式由三角形逐渐向凹槽型过渡,这与 Ou 等<sup>[22]</sup>提出的关于软土地区基坑开挖所致地表沉降经验曲线吻合。

图 9 所示为如上所述的 3 种情况下,各降水开挖步引起的距基坑边缘 4.8 m 处(地表最终沉降量最大处)的地表沉降( $\Delta H$ )图。从图中可以看出除第一施工

步以外,每一施工步中由降水所引起地表沉降量约为开挖所引起的 0.5 倍。这也表明对深大基坑降水开挖进行相关的数值模拟时,必须考虑降水的影响,在进行基坑降水开挖现场监控时,应加强降水期间的监测频率,这对保障基坑施工安全有着重要意义。

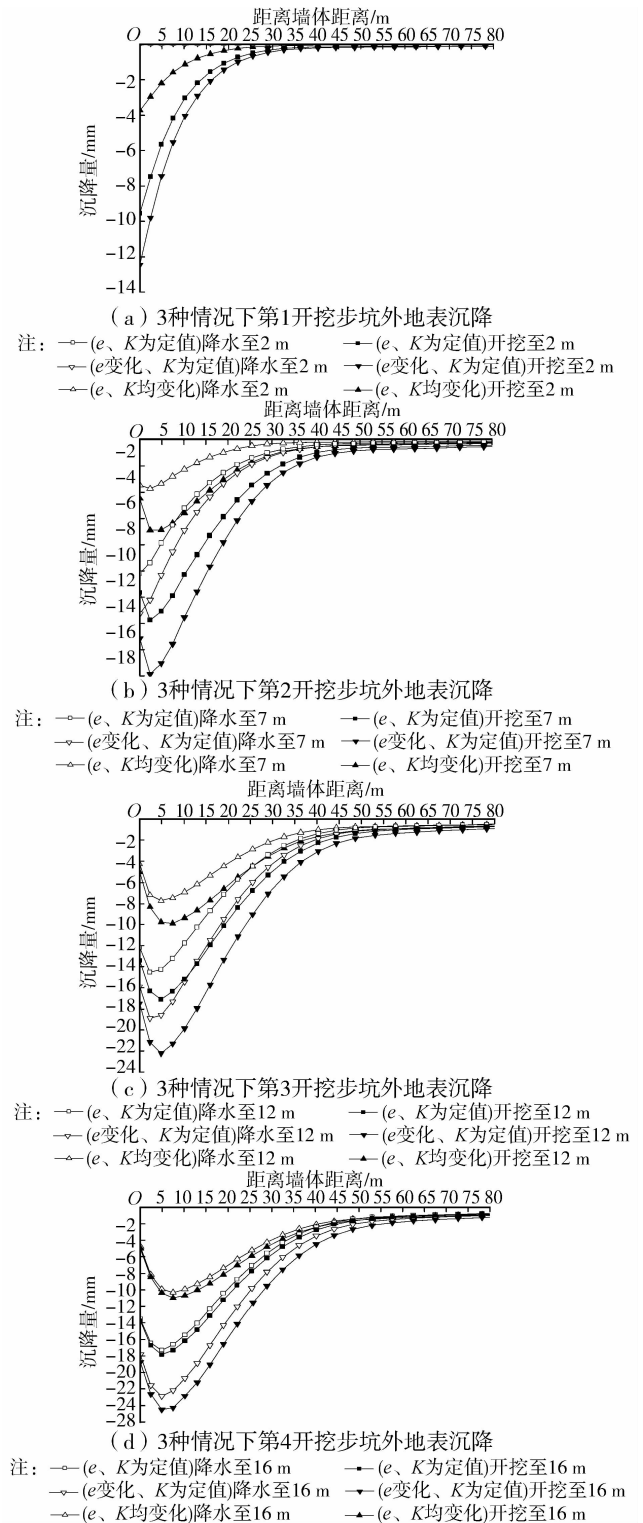


图 8 不同情况下地表沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves of ground surface with different situation

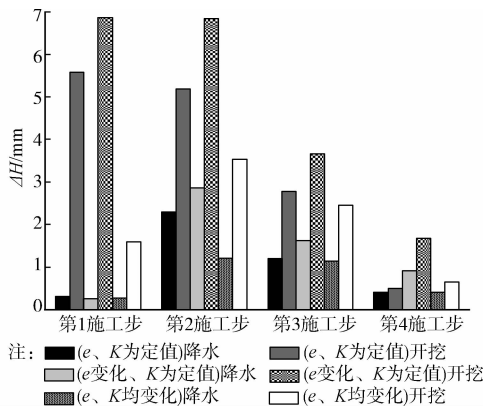


图 9 降水开挖对地表沉降的影响对比

Fig. 9 Comparison between the influence of dewatering and excavation to the surface subsidence

对比分析 8(a)、(b)、(c)、(d)可知,孔隙比随土体当前应力变化时各开挖步的坑外地表最大沉降量均大于孔隙比不变时的坑外地表最大沉降量,且由图 8(d)可知,孔隙比随土体当前应力变化时的坑外地表的最终沉降量约为孔隙比不变时的 1.4 倍,分析其原因如下。

修正剑桥模型中弹性应变增量可以表示为

$$de_v^e = \frac{dv}{v} = \frac{\kappa}{v} \frac{dp'}{p'} \quad (7)$$

由上式可以导出体积弹性模量为

$$K = \frac{vp'}{\kappa} = \frac{(1+e)p'}{\kappa} \quad (8)$$

从上式可以看出,当其他条件相同时,体积弹性模量  $K$  与  $e$  成正比,即  $K$  随着  $e$  的增大而增大,当孔隙比较大时,相同的土体卸荷条件产生的地表沉降将会较小<sup>[21]</sup>。图 6 所示为孔隙比随深度的变化图,其值随深度的增大呈非线性减小趋势,所以图 8(d)中仅考虑孔隙比变化时的坑外最大地表沉降量大于孔隙比为定值时的坑外最大沉降量。

同时由 8(d)可知,考虑渗透系数随深度变化时的坑外地表沉降的最大值和基坑边缘处的沉降值均小于渗透系数为定值时的情况,后者约为前者的 2.1 倍,可见渗透系数的选取对抗外地表沉降的影响显著,需慎重对待。董志良等<sup>[4]</sup>将渗透系数随固结应力的变化关系应用于真空预压下单井的三维有限元计算,其地表沉降计算结果也有类似的规律。所以在进行基坑降水开挖相关有限元分析时,必须同时考虑孔隙比和渗透系数的变化,否则会得到偏大的地表沉降,这将造成较大的工程浪费。

### 3.2 墙体水平位移

图 10(a)、(b)、(c)、(d)分别为不考虑孔隙比和渗透系数变化、仅考虑孔隙比变化、同时考虑孔隙比

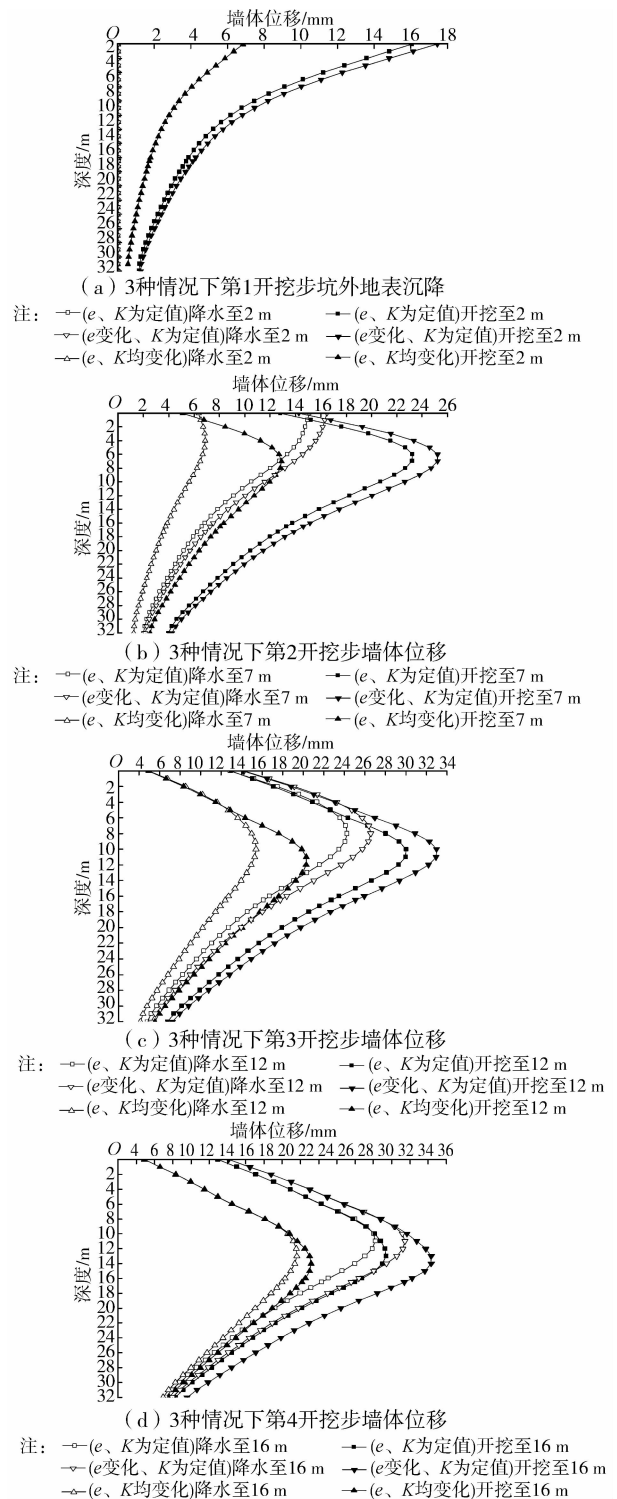


图 10 不同情况下的墙体水平位移

Fig. 10 Horizontal displacements of diaphragm wall with different situations

和渗透系数变化 3 种情况下各开挖步的墙体水平位移。从图中可以看出地下连续墙的每个开挖降水步的最大水平位移位置随基坑开挖深度的增加而不断下移,在未设置支撑时,基坑降水开挖所导致的墙体的水平位移变形模式呈悬臂状态,支撑设置之后,墙

体的最大水平位移逐渐下移,且其变形模式逐渐由悬臂模式逐渐向凹槽型转变,且各开挖步最大墙体水平位移均出现在基坑开挖面附近,这与大量的实测数据和理论分析所得连续墙体的变形规律相符。

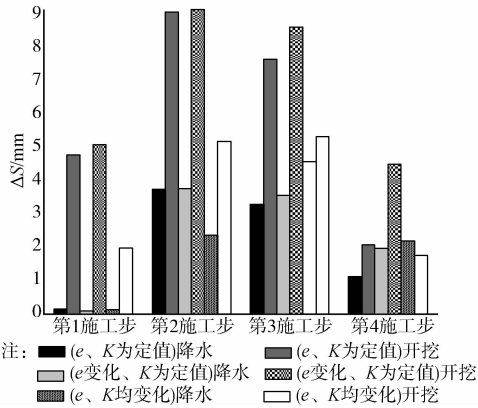


图 11 降水开挖各步对墙体水平位移的影响对比

Fig. 11 Comparison between the influence of dewatering and excavation to the horizontal displacement of wall

图 11 所示为 3 种情况下,各降水开挖步引起的距地表 14.8 m 处(地下连续墙最大水平位移处)墙体的水平位移( $\Delta S$ )图。从图中可以看出,除第一施工步以外,由降水所引起的墙体的水平位移为开挖所引起的 0.5~1.1 倍。这也表明降水对墙体的水平位移有较大的影响,在进行基坑降水开挖现场监控时,应加强降水期间的墙体位移的监测频率,这对保障基坑施工安全有着重要意义。

对比分析 10(a)、(b)、(c)、(d)可知,孔隙比随土体当前应力变化时,基坑降水开挖引起的墙体的最大水平位移均大于孔隙比不变时的墙体的最大水平位移,且由图 10(d)可知,孔隙比随土体当前应力变化时的墙体的最终的水平位移约为孔隙比不变时的 1.2 倍。由图 10(a)、(b)、(c)、(d)可知,同时考虑孔隙比和渗透系数的变化时较仅考虑孔隙比的变化时,基坑降水开挖所产生的各开挖步的墙体的最大位移均小于渗透系数为定值的情况,且其最终的墙体水平位移,后者约为前者的 1.6 倍。

### 3.3 坑底隆起

基坑工程施工过程中,由于坑内土体的开挖卸荷,从而使得坑底产生土体隆起。在实际基坑工程施工中,基坑坑底隆起的监测比较困难,而且有关影响坑底隆起的因素较多,诸如坑底有无工程桩、基坑开挖的施工方法和施工步骤、基坑围护结构的插入深度、坑内土体的卸荷比、地下水的渗流、坑外地表超载、温度的变化等。有关此方面的研究国内外的学者虽得到一定的研究成果,仍需更进一步的研究。

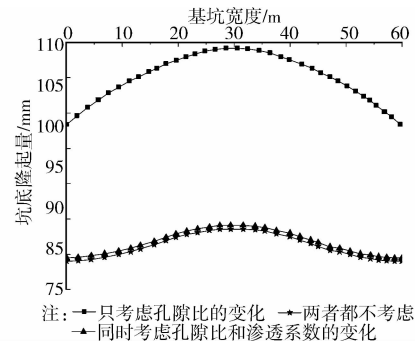


图 12 不同情况下的坑底最终隆起曲线

Fig. 12 Final values of rebound at bottom with different situations

图 12 所示为不考虑孔隙比和渗透系数的变化、仅考虑孔隙比的变化、同时考虑孔隙比和渗透系数的变化时 3 种情况下的坑底最终隆起曲线。从图中可知,仅考虑孔隙比的变化时,坑内隆起量较另外两者情况下均偏大,产生此结果的原因与前述分析孔隙比对坑外地表沉降变形的影响类似,不再赘述。同时孔隙比和渗透系数随土体当前应力变化时的情况较仅考虑孔隙比的变化时坑内隆起小,这种变化趋势与前述的坑外地表沉降和墙体位移一致。当孔隙比和渗透系数均为定值和孔隙比和渗透系数均变化时,其坑底隆起量几乎相同,其可以理解为孔隙比的变化和渗透系数的变化对坑底隆起影响效果的叠加所致。

### 3.4 地下连续墙弯矩

在进行地下连续墙的配筋及截面设计时通常需要了解墙体的弯矩分布情况,如图 13 所示为不考虑孔隙比和渗透系数的变化、仅考虑孔隙比的变化、同时考虑孔隙比和渗透系数的变化时 3 种情况下的地下连续墙的弯矩分布曲线。从图 13 可知,仅考虑孔隙比的变化和同时考虑孔隙比和渗透系数的变化两种情况下墙体的弯矩分布情况较一致,其最大的弯矩位于基坑最终开挖面附近,且其分布形式与 Zdravkovic 等<sup>[23]</sup>分析的软土地区基坑开挖多支撑地下连续墙的弯矩分布形式一致,墙体的最大弯矩值位置与墙体水平位移最大值位置基本一致,而两者都不考虑的情况下,计算所得的墙体弯矩分布与前述分布相差较大。对比分析 3 种情况下的墙体的最大弯矩可知,同时考虑孔隙比和渗透系数的变化时墙体的最大弯矩较仅考虑孔隙比的变化时小,后者约为前者的 2 倍,所以需慎重对待孔隙比和渗透系数的变化,如简单的将其设置为定值,则将会得到偏大的墙体弯矩值,从而造成严重的工程浪费。

笔者也曾尝试在其他参数完全相同的情况下,

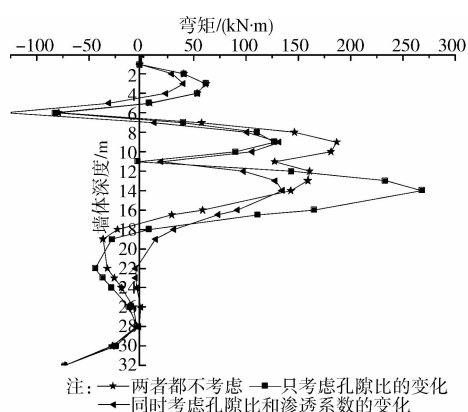


图13 不同情况下的地下连续墙弯矩

Fig. 13 Bending moment of diaphragm wall with different situations

将土体的渗透系数设置为某一定值,如  $5e^{-5}$ 、 $4e^{-5}$ 、 $3e^{-5}$ 、 $2e^{-5}$ 、 $1e^{-5}$ 、 $9e^{-6}$ 、 $8e^{-6}$ 、 $7e^{-6}$ 、 $6e^{-6}$ 、 $5e^{-6}$ 、 $4e^{-6}$ 、 $3e^{-6}$ 、 $2e^{-6}$ 、 $1e^{-6}$  (mm/s), 由此所得的地表沉降量、墙体的水平位移量、坑底的隆起量、墙体最大弯矩值均逐渐减小,即随着渗透系数的减小,上述各量均逐渐减小。但是,笔者发现上述各量的变化并非线性的,较其他范围而言,当渗透系数变化范围处于  $[7e^{-6}, 7e^{-5}]$  (mm/s) 时,土体位移及围护结构的位移和内力变化更为敏感,限于篇幅的原因不一对比。对于淤泥质黏土渗透系数的取值对基坑降水开挖所导致的坑内土体及围护结构变形及内力的影响还需更进一步的研究。

## 4 结语

1) 当孔隙比随土体当前应力变化时坑外地表沉降量、墙体的水平位移、坑底土体的隆起量、地下连续墙的弯矩均大于孔隙比为定值时的情况。当渗透系数随土体当前应力变化时坑外地表沉降量、墙体的水平位移、坑底隆起量、地下连续墙的弯矩均小于渗透系数为定值的情况,且这种差异在进行基坑降水开挖分析时不能被忽略,否则会影响基坑开挖施工及基坑周围建(构)筑物的安全和正常使用。

2) 由降水步所产生的最大地表沉降量和地下连续墙的最大水平位移约为开挖步所产生的一半以上,所以在进行基坑降水开挖现场监控时,应加强降水期间的监测频率,这对保障基坑施工安全有着重要意义。

3) 对于淤泥质黏土而言,在对基坑降水开挖进行有限元分析时,渗透系数的影响因素不容忽略,且当渗透系数在  $[7e^{-6}, 7e^{-5}]$  (mm/s) 范围内变化时,渗透系数这一参数的取值对坑内外土体的变形及围

护结构的内力的影响较其他范围更显著,所以其取值应慎重对待,且有关此方面的问题还需深入研究。

## 参考文献:

- [1] Nagaraj T S, Pandian N S, Narasimha Raju P S R. Stress-state-permeability relationships for fine-grained soils [J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 333-336.
- [2] 曾玲玲, 洪振舜, 陈福全. 压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1286-1292. Zeng L L, Hong Z S, Chen F Q. A law of change in permeability coefficient during compression of remodeled clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1286-1292. (in Chinese)
- [3] 孙立强, 杨爱武, 刘润, 等. 新近吹填土固结系数为变量的固结方程研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 476-480. Sun L Q, Yang A W, Liu R, et al. Improved consolidation theory for dredgerfilled soil with time dependent permeability coefficient [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(3): 476-480. (in Chinese)
- [4] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 天然沉积饱和黏土渗透系数试验研究与预测模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2501-2507. Liu W Z, Shi M L, Miao L C. Experimental study of permeability coefficient of natural saturated clay and its prediction model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2501-2507. (in Chinese)
- [5] 邱长林, 闫澍旺, 孙立强, 等. 孔隙变化对吹填土地基真空预压固结的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 631-638. Qiu C L, Yan S W, Sun L Q, et al. Effect of varying void on consolidation of dredger fill under vacuum preloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 631-638. (in Chinese)
- [6] 柯瀚, 王文芳, 魏长春, 等. 填埋体饱和渗透系数影响因素室内研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2013, 47(7): 1164-1170. Ke H, Wang W F, Wei C C, et al. Experimental study on saturated hydraulic conductivity of MSW under different conditions [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2013, 47(7): 1164-1170. (in Chinese)
- [7] 马少坤, 邵羽, 黄艳珍. 基于孔隙比和渗透系数与深度相关的深基坑开挖变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 940-944. Ma S K, Shao Y, Huang Y Z. Deformation of deep foundation pits due to excavation considering change of void ratio and permeability coefficient with depth [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 940-944. (in Chinese)

- [8] Kozeny J. Über kapillare leitung des wassers im boden [J]. Akad Wiss Wien, 1927, 136: 271-306.
- [9] Carman P C. The determination of the specific surface of powders; I. Transactions [J]. Journal of the Society of Chemical Industries, 1938, 57: 225-234.
- [10] Carman P C. Flow of gases through porous media [J]. Butterworths Scientific Publications, 1956: 182.
- [11] Samarasinghe A M, Huang Y H, Dranevich, V P. Permeability and consolidation of normally consolidated soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering ASCE, 1982, 108(6): 835-850.
- [12] Shridharan A, Nagaraj H B. Hydraulic conductivity of remolded fine-grained soils versus index properties [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2005, 23, 43-60.
- [13] Mesri G, Kwan L D O, Feng W T. Settlement of embankment on soft clays [C] // Proceedings of settlement 94, Geotechnical Special Publication ASCE, 1994, 40: 8-56.
- [14] Talor D W. Fundamentals of soil mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1948.
- [15] Leroueil S, Bouclin G, Tavenas F, et al. Permeability anisotropy of natural clays as a function of strain [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 568-579.
- [16] Tavenas F, Jean P, Leblond J, et al. The permeability of natural soft clays, Part II: permeability characteristics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20, 645-660.
- [17] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C] // Proceedings of the 7th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art-Volume, Mexico City, 1969, 225-290.
- [18] Lin D G, Chung T C, Phien-wej N. Quantitative evaluation of corner effect on deformation behavior of multi-strutted deep excavation in Bangkok subsoil [J]. Geotechnical Engineering, 2003, 34(1): 41-57.
- [19] Roboski J F. Three-dimensional performance and analyses of deep excavations [D]. Evanston: Northwestern University, 2004.
- [20] Hashash Y M A. Analysis of deep excavation in clay [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1992.
- [21] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006: 65-71.
- [22] Ou C Y, Hsieh P G. A simplified method for predicting ground settlement profiles included by excavation in soft clay [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38, 987-997.
- [23] Zdravkovic L, Potts D M, St John H D. Modelling of a 3D excavation in finite element analysis [J]. Géotechnique, 2005, 55: 497-513.

(编辑 吕建斌)

## 更正启事

《土木建筑与环境工程》2015 年第 1 期第 23 页,《建筑能耗模拟典型年中气象参数权重的确定》一文国家自然科学基金编号“51108366”应为“51325803”,特此更正。

《土木建筑与环境工程》编辑部