

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.01.014

# 预压时效对 Asaoka 法预测精度的影响

周仁<sup>1,2</sup>,倪小东<sup>1,2</sup>,王媛<sup>1,2</sup>,许修亮<sup>3</sup>

(1.河海大学 岩土力学与堤防工程教育部重点实验室,江苏南京 210098;

2.河海大学 土木与交通学院 隧道与城市轨道交通工程研究所,江苏南京 210098;

3.广东长大海外工程有限公司,广州广东 510620)

**摘要:** Asaoka 法是以土体固结系数保持不变为前提推导而来,而工程中压缩模量和渗透系数的改变会引起固结系数的变化。借助 ABAQUS 软件,研究预压时效和渗透系数变化对 Asaoka 法预测精度的影响,分析一般性粘土和软土在常规渗透系数和变渗透系数下预压时效对 Asaoka 法预测最终沉降的影响。结果表明:预压期越长,Asaoka 法推算的最终沉降量越大,相对误差越小;变渗透系数下相同预压时间的 Asaoka 法预测精度明显小于常规渗透系数下的预测精度,其中以软土的差别最大;Asaoka 法运用于渗透系数较小的软土中在较长的预压期内预测精度较高。

**关键词:** Asaoka 法;预压时效;软土地基;渗透系数变化

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)01-0067-05

## Influence of Preloading Time-effect on Prediction Accuracy of Asaoka's Method

ZHOU Ren<sup>1,2</sup>, NI Xiao-dong<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>1,2</sup>, XU Xiu-liang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Guangdong Changda Overseas Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510620, China)

**Abstract:** Asaoka's method is based on the theory that the consolidation coefficient of soil keeps constant, but in fact, the changes of compression modulus and the permeability coefficient can cause the change of consolidation coefficient. For studying the influence of preloading time-effect and variable permeability coefficient in the prediction of Asaoka's method by using ABAQUS software, the influence of preloading time-effect of clay and soft soil on the settlement magnitude by using Asaoka's method was analyzed in the case of constant permeability coefficient and variable permeability coefficient. The results show that the final settlement magnitude by using Asaoka's method is large and the relative error is small when the preloading time is long. The prediction accuracy is significantly small in the case of variable permeability coefficient, especially in the soft soil. It needs longer preloading time when using Asaoka's method in the soft soil with small permeability coefficient so as to achieve the higher prediction accuracy.

**Keywords:** Asaoka's method; preloading time effect; soft soil foundation; change of permeability coefficient

在软土地基上修筑高速公路,能否确保按期保质完成,关键之一在于能否正确估算地基最终沉降量。分层总和法由于不能考虑土体的侧向变形,计算结果与实测值有相当大的差异<sup>[1]</sup>;数值模拟法存在着计算量大、参数确定困难等方面的不足;沉降预测方法中的 Asaoka 法因计算公式简单且有一定的

理论基础而运用的较多,但也存在着实测沉降数据必须有相等的时间间隔等缺点<sup>[2]</sup>。为解决 Asaoka 法工程运用中的问题,王志亮等<sup>[3]</sup>基于抛物插值法和直线最小二乘法,编制了相应的沉降预测程序,并结合工程实例,详细分析了时间间隔对 Asaoka 法预测精度的影响;张成良等<sup>[4]</sup>利用三次样条曲线处理

非等时间间隔的沉降观测资料,取得了较满意的结果。彭满红等<sup>[5]</sup>则探讨了如何利用 Asaoka 法进行越级沉降的预测,给出了该法图解中每级荷载下沉降数据对应的直线在纵坐标轴上截距与路堤高度之间的近似关系,为运用 Asaoka 法进行越级沉降提供了新的思路。Asaoka 法是以土体固结系数保持不变为前提推导出来的<sup>[6]</sup>,而在工程中固结系数随着压缩模量和渗透系数变化而改变,显然简化引起的误差是值得商榷的,但目前这方面的文献偏少,本文就借助 ABAQUS 软件<sup>[7]</sup>分析了预压时间长短对 Asaoka 法推算最终沉降量的影响;通过对土体渗透系数的适当调整,分析对比了 Asaoka 法在常规渗透系数下和变渗透系数下的预测结果,结果表明 Asaoka 法在变渗透系数下的土体中的误差相对较大,尤其是在渗透系数较小的软土中,为现实问题中沉降方法的选取给出了一定的建议。

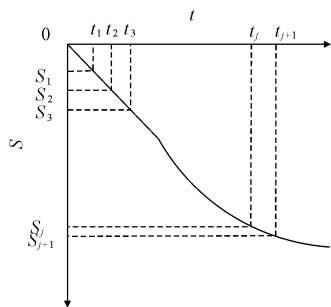
## 1 Asaoka 法的原理

土体在一维固结条件下的固结微分方程, Mikasa<sup>[8]</sup>采用体积应变的表达式:

$$\frac{\partial \varepsilon(t, z)}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \varepsilon(t, z)}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon(t, z)$  为土体竖向应变;  $t$  为固结时间;  $z$  为排水的距离;  $C_v$  为土体竖向固结系数(竖向固结系数保持不变)。

Asaoka 通过研究认为上述方程可用级数形式的微分方程近似表示,多数情况下取一阶就能满足精度要求,于是简化为:



$$S + a_1 \frac{d_s}{dt} = b \quad (2)$$

式中:  $S$  为总沉降(不包含次固结沉降);  $a_1$  和  $b$  为与土层边界条件和固结系数相关的参数;  $\frac{d_s}{dt}$  为沉降  $S$  对时间  $t$  的一阶导数。

对于一维固结条件下,沉降曲线可分离成:  $t_j = j\Delta t, j = 1, 2, 3, \dots, \Delta t$  是常数,  $S_j = S(t_j)$ , 上式可表示为递推形式:

$$S_j = \beta_0 + \beta_1 S_{j-1} \quad (3)$$

式中:  $S_j, S_{j-1}$  为  $t_j, t_{j-1}$  时刻的沉降量;  $\beta_0, \beta_1$  为需要确定的相关参数。

由式(3)导出的最终沉降量为:

$$S_\infty = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (4)$$

由于上述简化仅选取了沉降的一阶导数,因此式(4)中的最终沉降量不包含土体的次固结沉降<sup>[9]</sup>。

Asaoka 法又被称为图解法,它是基于式(3)的递推关系,具体求解步骤如下:

(1) 将沉降曲线划分成时间段相等的  $\Delta t$ , 从曲线上选取对应时刻的沉降量  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{j+1}$ ;

(2) 在以  $S_{j-1}, S_j$  为坐标轴的平面中,将沉降值以  $(S_{j-1}, S_j)$  的形式绘在该坐标系中,并作出  $S_{j-1} = S_j$  的  $45^\circ$  直线;

(3) 过  $(S_{j-1}, S_j)$  点绘制最佳拟合直线,与  $45^\circ$  直线交点处的沉降即为路基的最终沉降量  $S_\infty$  (见图 1)。

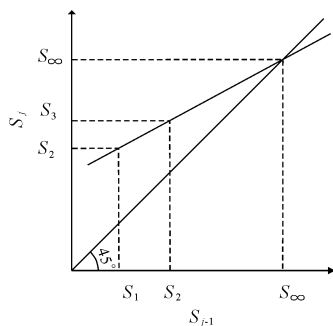


图 1 Asaoka 法求解示意图

## 2 预压时效对沉降推算精度的影响

Asaoka 法是工程中运用较多的沉降预测方法之一,但由于沉降拟合方程中所有待定参数的确定需要一定长的实测沉降时间,而工程上一般需满足尽早预报沉降的要求,因此,分析预压时效对 Asaoka 法

预测最终沉降的影响,为工程实践尽早预测沉降给出一定的建议和指导,就具有很强的工程实际意义。

### 2.1 常规渗透系数下预压时效对沉降推算精度的影响

设定一些常规土体的指标,利用 ABAQUS 进行有限元路堤沉降计算,得到荷载下的沉降数据,以此

数据为基础并利用 Asaoka 法对不同预压时间下的最终沉降作预测,并与 ABAQUS 计算的最终沉降量进行分析对比,比较分析预压期长短对推算结果的影响。一般粘性土(孔隙比在 0.5 ~ 1.0 之间,对应的泊松比在 0.25 ~ 0.35 之间)和软土(孔隙比大于 1.0,对应的泊松比在 0.35 以上)是软基路堤中常见

到的土体。本文选取 3 组有代表性的一般性粘土和软土的非线性模型参数(表 1)。建立如下模型:路堤高度为 4.3 m,坡比为 1:2,路基中沉降计算深度取为 10 m,计算宽度为路堤底宽的 2 倍。依据第一级荷载作用下的沉降计算结果进行 Asaoka 法的沉降预测,结果分别见(表 2 ~ 表 4)。

表 1 土体非线性模型参数

组别	模型	$C/(kPa)$	$\Phi/(^\circ)$	$\Psi/(^\circ)$	$E/(kPa)$	$\mu$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$k/(m \cdot d^{-1})$
①	MC	18.4	15	0	1446	0.35	17.1	0.000345
②	MC	40.0	19	0	2819	0.25	18.5	0.001627
③	MC	32.0	19	0	4613	0.25	18.7	0.004422

注:MC 为摩尔库伦模型。

表 2 第①组分析对比结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	Abaqus 计算沉降量 $S_B$ /mm	Abaqus 计算最终沉降量 $S_f$ /mm	相对误差 /% $\left  \frac{S_A - S_f}{S_f} \right $
291	267.836	205.965	335	20.049
491	311.042	259.268		7.152
591	322.487	278.329		3.735
691	329.616	293.725		1.607

表 3 第②组分析对比结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	Abaqus 计算沉降量 $S_B$ /mm	Abaqus 计算最终沉降量 $S_f$ /mm	相对误差 /% $\left  \frac{S_A - S_f}{S_f} \right $
191	232.336	211.834	235.475	1.333
291	234.469	229.816		0.427
391	235.042	234.200		0.184
441	235.237	234.927		0.101

表 4 第③组分析对比结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	Abaqus 计算沉降量 $S_B$ /mm	Abaqus 计算最终沉降量 $S_f$ /mm	相对误差 /% $\left  \frac{S_A - S_f}{S_f} \right $
141	146.224	145.173	146.342	0.081
191	146.294	146.267		0.033
216	146.329	146.323		0.009
241	146.304	146.337		0.026

由表 2 ~ 表 4 可以看出,Asaoka 法推算的最终沉降量与预压期有很大的关系,无论哪组土体,随着预压期变长,Asaoka 法推算的结果都逐渐收敛,预测的最终沉降值都趋于稳定。相对于第②组、第③组土体,第①组土体 Asaoka 法预测的误差明显偏大。分析认为该组土体渗透系数较小,固结时间较长,至预

压 291 d 时,剩余沉降量仍很大,沉降稳定时间相对滞后,至 491 d 时,预测相对误差已经较小。显然采用 Asaoka 法预测最终沉降时,为减小误差,控制预压时间是极为重要的。预压时间越长,Asaoka 法推算的最终沉降量越大,推算结果的相对误差越小,其推算的最终沉降量基本都小于 ABAQUS 计算的最终沉降量。

### 2.2 渗透系数变化时预压时效对沉降推算精度影响

渗透系数是描述土体渗流和固结的基本参数,大量研究实践表明渗透系数与土体的上覆有效应力和孔隙比有相关性,尤其是孔隙比,并提出了多种渗透系数与孔隙比间的经验关系模型,本文采用 Taylor<sup>[10]</sup>提出的  $k = k_0 \frac{e - e_0}{0.5e_0}$  公式来计算随孔隙比变化的渗透系数,其中  $e_0$  为初始孔隙比,所选土体渗透系数变化如图 2 ~ 图 4,其他参数见表 1,沉降推算结果见表 5 ~ 表 7。

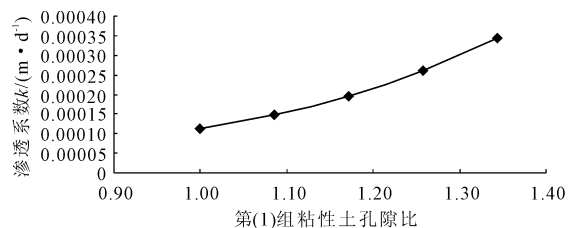


图 2 第(1)组粘性土渗透系数与孔隙比的关系曲线

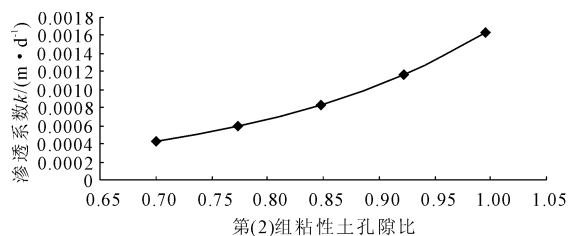


图 3 第(2)组粘性土渗透系数与孔隙比的关系

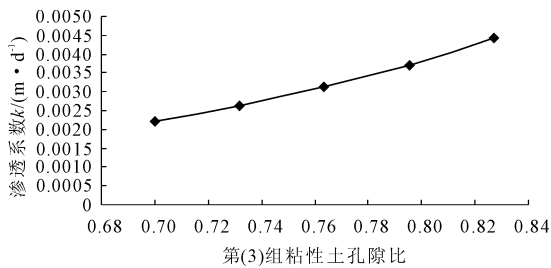


图 4 第(3)组粘性土渗透系数与孔隙比的关系

表 5 第①组土体分析对比结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	Abaqus 计算沉降量 $S_B$ /mm	Abaqus 计算最终沉降量 $S_f$ /mm	相对误差 /% $\left  \frac{S_A - S_f}{S_f} \right $
291	237.831	188.080		26.821
491	280.806	234.708	325	13.598
591	293.973	252.473		9.547
691	305.206	267.541		6.091

表 6 第②组土体分析对比结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	Abaqus 计算沉降量 $S_B$ /mm	Abaqus 计算最终沉降量 $S_f$ /mm	相对误差 /% $\left  \frac{S_A - S_f}{S_f} \right $
191	227.257	199.252		3.500
291	232.103	222.934	235.5	1.443
391	233.818	231.055		0.714
441	233.979	232.838		0.646

表 7 第③组土体分析对比结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	Abaqus 计算沉降量 $S_B$ /mm	Abaqus 计算最终沉降量 $S_f$ /mm	相对误差 /% $\left  \frac{S_A - S_f}{S_f} \right $
141	145.731	143.419		0.206
191	145.935	145.737	146.031	0.065
216	145.962	145.932		0.047
241	145.948	145.998		0.057

由表 5~表 7 可以看出:(1) 相对于土体渗透系数不变的情况,当渗透系数变化时,Asaoka 法推算的相同预压时间的最终沉降量变小,而 ABAQUS 计算的最终总沉降基本保持不变。(2) 渗透系数随压缩进行调整时,Asaoka 法预测最终沉降的相对误差要明显大于渗透系数不变下的相对误差。第①组粘性土在渗透系数变化时的数据推算结果与渗透系数不变下的数据推算结果相差接近 7%。分析认为,Asaoka 法是基于 Mikasa 方程推导而来,其中固结系数  $C_v$  是保持不变的,而在实际土体中,随着土体的

压缩,压缩模量和渗透系数的改变会引起固结系数的改变,所以渗透系数变化会影响 Asaoka 法预测最终沉降的精度。

在高速公路的路堤填筑过程中,有的路段需要多级加载,根据观测资料利用 Asaoka 法推算地基某一阶段堆载的固结度和最终沉降量,以此推断地基在某一荷载下的固结完成情况,判断是否可以进行下一阶段的堆载,为施工提供依据。本文对比分析了表 1 中 3 组土体不同预压时间下以 Asaoka 法推算的固结度  $U_1$  和 Abaqus 计算固结度  $U_2$  的差值,其中

$$U_1 = \frac{S_B}{S_A}, U_2 = \frac{S_B}{S_f}, \text{结果见图 5。}$$

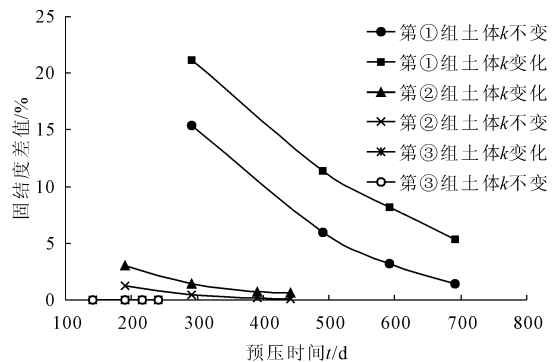


图 5 第①、②、③组土体固结度差值与预压时间的关系曲线

由图 5 可见:(1) 无论哪组土体,Asaoka 法推算的固结度  $U_1$  与 Abaqus 计算的固结度  $U_2$  的差值随着预压时间的增长而变小,说明预压等待时间越长,Asaoka 法预测的精度越高。

(2) 当考虑渗透系数随时间变化时,相同预压时间下依据 Asaoka 法预测得到的固结度与 Abaqus 计算得到的固结度的差值明显偏大,特别是第①组土体在常渗透系数下差值最大为 15%,而在变渗透系数下差值最大达到 22%。

(3) 对比①、②、③组土体,渗透系数较大的第②、③组土体的固结度差值明显小于渗透系数较小的第①组土体,而且与 Abaqus 计算固结度  $U_2$  的差值很小。说明 Asaoka 法应用于渗透系数  $k$  较大的土体,预测最终沉降误差是可以接受的。

### 3 实例计算与分析

本文采用越南河内—海防高速公路 EX-5 标段,起止桩号为 KM48+000—KM63+300,路基全长 15.3 km。EX-5 标段全线经过的区域,河塘密布,地势平坦,主要为农田耕作区域,有较高的地下水位。原地表以下地质组成主要是黏土粒、砂、及带有植物残留的黏土,软土分布范围很广。K50+500、

K50 + 800 断面路基中心地表实测沉降随填土高度  $H$  和时间  $t$  的变化曲线分别见图 6、图 7。

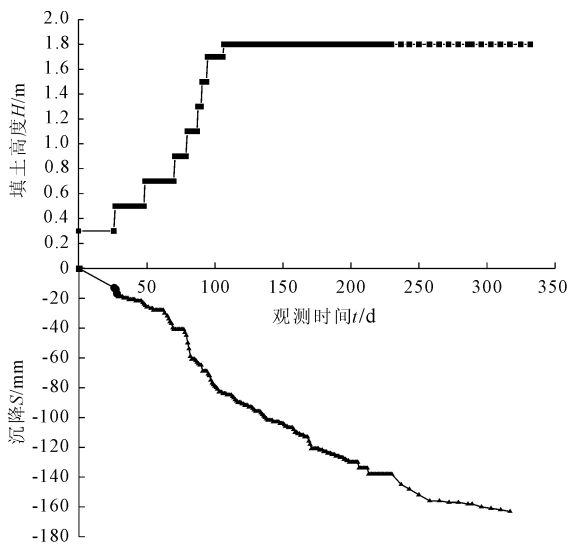


图 6 K50 + 500 沉降 - 时程图

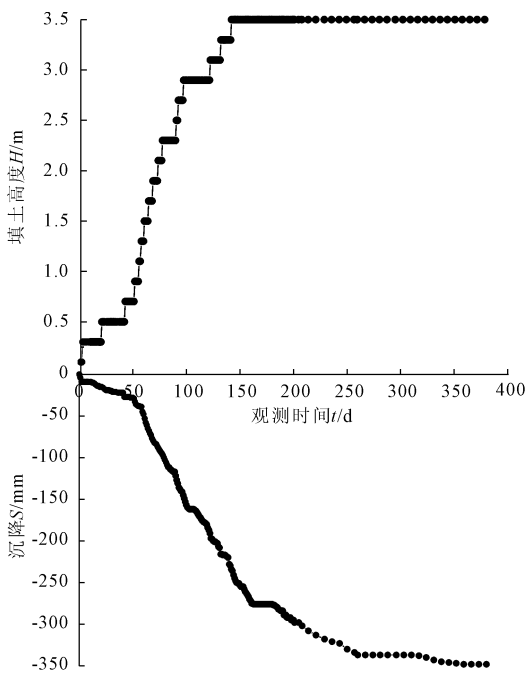


图 7 K50 + 800 沉降 - 时程图

用 K50 + 500 和 K50 + 800 断面的实测沉降数据进行 Asaoka 法的最终沉降预测,  $\Delta t$  取 7 d, 其结果分别见表 8、表 9。

由表 8、表 9 可以看出, K50 + 500 和 K50 + 800 两个断面, Asaoka 法预测的最终沉降量基本都小于实际最终沉降量, 预压期越长, Asaoka 法预测的最终沉降量越大, 预测的相对误差越小。K50 + 500 和 K50 + 800 断面采用 Asaoka 法预测, 预压期较短时, 预压沉降量与实际沉降量误差较大, 分析认为, 这两

个断面下地基土分层较多, 软土分布深厚, 土体渗透系数较小, 渗透系数随着压缩的变化较为复杂, 沉降稳定时间相对滞后, 采用 Asaoka 法预测需要相对长的预压时间。

表 8 K50 + 500 最终预测结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	实测沉降量 /mm	实测最终沉降量 /mm	相对误差 /% Asaoka
218	157.550	138		19.205
281	177.926	158	195	8.756
323	178.826	164		8.294
393	184.257	172		5.509

表 9 K50 + 800 最终预测结果

预压时间 /d	Asaoka 预测最终沉降量 $S_A$ /mm	实测沉降量 /mm	实测最终沉降量 /mm	相对误差 /% Asaoka
205	315.363	298		14.303
268	349.073	337	368	5.143
324	346.411	340		5.867
366	358.081	352		2.695

## 4 结 论

对于 Asaoka 法, 预压期越长, 预测得到的最终沉降量越大, 且推算误差相对越小。特别是对于渗透系数较小的软土, 采用 Asaoka 法进行预测时, 为了保证预测精度, 需要的预压期相对更长, 而在实际工程中, 由于施工工期的限制, 往往需要尽早进行沉降预测, 必然会存在一定的偏差, 因此, 当预压期较短时, 对预测的最终沉降进行一定的修正是必要的。

本文选用的渗透系数 Taylor 公式为众多经验公式的一种, 并不能完全反映和考虑渗透系数  $k$  随时间变化对固结的影响, 在  $k$  较大时, 误差可控; 对于  $k$  较小时, 渗透系数变化引起的预测误差必须给以足够的重视。

### 参考文献:

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [2] 罗存喜. Asaoka 法在高速铁路沉降分析中的应用[J]. 土工基础, 2013, 27(2): 79-82.
- [3] 王志亮, 黄景忠, 李永池. 沉降预测中的 Asaoka 法应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2025-2028, 2032.
- [4] 张成良, 刘小泉. 三次样条插值曲线在 Asaoka 法中的应用[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(1): 21-24.