

应用沉降速率推算剩余沉降及卸载时间

张长生<sup>1,2</sup>, 张伯友<sup>1</sup>, 刘国楠<sup>3</sup>, 魏勇作<sup>1</sup>  
(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院  
北京 100039; 3. 铁道部科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034)

[摘要] 在地基处理工程中工后沉降和沉降速率是卸载的重要标准, 次固结沉降可以估算在一定范围内, 工后沉降满足要求与否则主要由剩余主固结沉降控制。基于砂进固结理论和 A saoka 方法可以推算出在堆载预压任意时间的沉降速率, 运用沉降速率和剩余主固结沉降的关系, 就可以推算出任意时间的主固结剩余沉降及卸载时间。在深圳—香港西部通道填海及地基处理工程中, 此方法应用效果较好。  
[关键词] 沉降速率; 软粘土; 地基处理; 剩余沉降; 工后沉降; 卸载时间  
[中图分类号] TU433 [文献标识码] A [文章编号] 1672 6561(2005)04 0028 05  
[作者简介] 张长生(1970—), 男, 黑龙江尚志人, 博士研究生, 从事软基处理监测工作和研究。

0 引言

在采用堆载预压排水固结法加固的地基处理工程中, 工后沉降(包括剩余主固结沉降和次固结沉降)和沉降速率是卸载的重要标准, 由于重要工程有严格限定的工期, 人们最关心的是经过软基处理并消除了大部分主固结沉降后, 何时工后沉降和沉降速率能满足卸载的要求? 使后续工程有确切合理地时间安排。因而就要求在理论上建立一套可行的预测方法, 并结合现场埋设的观测仪器测读的地基沉降值来准确预测满足设计要求时的卸载时间。在 A saoka 方法中可以推算出的沉降速率, 运用沉降速率和剩余主固结沉降的关系, 就可以推算出任意时间的主固结剩余沉降和卸载时间。沉降速率的对数和堆载预压时间又成线形关系, 由图解法也可以确定卸载时间。以深圳—香港西部通道填海及地基处理工程中的现场测试数据为基础, 对此方法进行介绍。

1 剩余主固结沉降和沉降速率的关系

按照砂井固结理论, 地基在加固历时  $t$  的平均

固结度按式(1)计算

$$U_t = 1 - \alpha e^{-\beta t} \tag{1}$$

式中:  $\alpha, \beta$  为排水固结参数, 其值见表 1。

表 1 不同条件下的  $\alpha, \beta$  值

Table 1 Values of  $\alpha, \beta$  Under Different Conditions

参数	径向排水	竖向排水	径向和竖向排水
$\beta$	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2}$	$\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$
$\alpha$	1	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{8}{\pi^2}$

注:  $C_v, C_h$  分别为竖向和径向固结系数;  $n$  为井径比;  $d_e$  为等效圆直径;  $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ ;  $H$  为竖向排水距离

设  $t$  时在均质地基已经施加  $n$  级荷载, 则  $t$  时的沉降量

$$S_t = \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) (1 - \alpha e^{-\beta t i}) \tag{2}$$

式中:  $S_{\infty i}, S_{Di}$  分别为最终沉降和瞬时沉降。则  $t$  时的沉降速率

$$\dot{S} = \frac{dS_t}{dt} = \beta \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) e^{-\beta t i} \tag{3}$$

而  $t$  时的剩余主固结沉降

$$S_{rc} = (S_{\infty i} - S_{Di}) (1 - U_t) = \alpha \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) e^{-\beta t i} \tag{4}$$

由式(3) 式(4) 可得多级荷载下  $t$  时的沉降速率与剩余主固结沉降之间的关系

$$\dot{S} = S_{\pi}\beta \tag{5}$$

因此, 由  $t$  时的沉降速率可推得对应的剩余主固结沉降, 反之由剩余主固结沉降也可推得对应的沉降速率, 其中  $\beta$  值可用以下 3 种方法进行确定:

1.1 根据固结系数计算  $\beta$

据试验确定的  $C_v, C_h$ , 按表 1 进行计算。

1.2 根据沉降资料反算  $\beta$

$$\beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2}$$

其中:  $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$ , 在多级荷载下  $t_1, t_2$  和  $t_3$  之间不得有加荷。

1.3 根据孔压资料反算  $\beta$

$$\beta = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

其中:  $\Delta t = t_2 - t_1$ , 在多级荷载下,  $t_1, t_2$  之间不得有加荷。

据实测资料反算的时间间隔  $\Delta t$  取值较大时, 计算值  $\beta$  的准确性增大。

2 由 Asaoka 法推导沉降速率

Asaoka 方法是建立在一维垂直固结方程基础上, 根据实测数据预测未来沉降的一种方法。由 Mikasa1963 年导出垂直(体积)应变表示的下列固结微分方程

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \quad (\text{或 } \epsilon = C_v \epsilon_{zz}) \tag{6}$$

设  $t$  时刻的沉降为  $S(t)$ , 则有

$$S(t) = \int_0^H \epsilon dz \tag{7}$$

$$\text{所以 } \dot{S}(t) = \int_0^H \dot{\epsilon} dz = C_v \int_0^H \epsilon_{zz} dz =$$

$$C_v \{ \epsilon(t, z = H) - \epsilon(t, z = 0) \} \tag{8}$$

在荷载一定的条件下, 式(6)式(9)是等价的。

$$S + a_1 \dot{S} + a_2 \ddot{S} + \dots + a_n S^{(n)} + \dots = C \tag{9}$$

由于高阶微分迅速变小, 实用式(9)采用一阶微分项精度已经可以满足要求, 即

$$S + C_1 \dot{S} = C \tag{10}$$

将时间  $t$  离散为  $t = \Delta t \cdot j (j = 1, 2, 3 \dots)$ , 令  $t_j$  时的沉降量为  $S_{t_j}$ , 由式(10)可得

$$S_{t_j} = \beta_0 + \beta_1 S_{t_{j-1}} \tag{11}$$

式中:  $S_{t_j}$  是离散化了的下沉量, 如图 1。

式(11)表示  $S_{t_j}$  和  $S_{t_{j-1}}$  成直线关系, 由实测离

散化了的下沉量作( $S_{t_j}, S_{t_{j-1}}$ )关系图(图 2), 连接图中数据点直线, 求得系数  $\beta_0$  及  $\beta_1$ 。

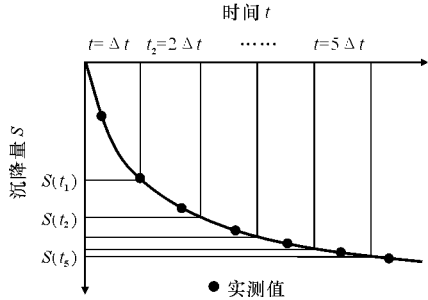


图 1 Asaoka 中  $t_j - S_{t_j}$  关系模式

Fig. 1 Relation Between  $t_j$  and  $S_{t_j}$  in Asaoka

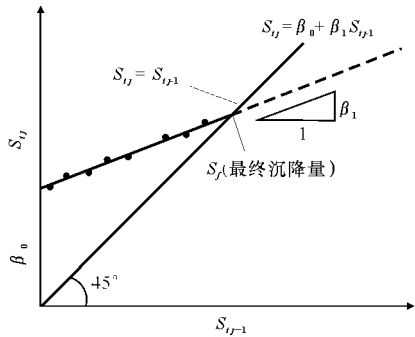


图 2  $S_{t_j} - S_{t_{j-1}}$  关系图

Fig. 2 Relation Between  $S_{t_j}$  and  $S_{t_{j-1}}$

均质地基施加一级瞬时荷载时的沉降速率

$$\dot{S} = \frac{dS_t}{dt} = \alpha\beta(S_{\infty} - S_D)e^{-\beta t} \tag{12}$$

$$\text{所以 } S_t = \int_0^t \dot{S} dt = \int_0^t \alpha\beta(S_{\infty} - S_D)e^{-\beta t} dt =$$

$$\alpha\beta(S_{\infty} - S_D) \int_0^t e^{-\beta t} dt = \nabla \int_0^t e^{-\beta t} dt \tag{13}$$

$$\text{式中: } \nabla = \alpha\beta(S_{\infty} - S_D) = \dot{S} e^{\beta t}$$

因而差分表达式(11)变为

$$\nabla \int_0^t e^{-\beta t} dt = \beta_0 + \beta_1 \nabla \int_0^{t-\Delta t} e^{-\beta t} dt \tag{14}$$

对式(14)两边积分得

$$\nabla e^{-\beta t} - \nabla = -\beta\beta_0 + \nabla\beta_1 e^{-\beta(t-\Delta t)} - \nabla\beta_1 \tag{15}$$

$$\dot{S} - \nabla = -\beta\beta_0 + \beta_1 \nabla e^{\beta\Delta t} - \nabla\beta_1 \tag{16}$$

$$\begin{aligned} \beta\beta_0 &= \dot{S}(\beta_1 e^{\beta\Delta t} - 1) - \nabla(\beta_1 - 1) = \\ &= \dot{S}(\beta_1 e^{\beta\Delta t} - 1) - S e^{\beta t}(\beta_1 - 1) = \\ &= \dot{S}[\beta_1 e^{\beta\Delta t} - 1 - e^{\beta t}(\beta_1 - 1)] \end{aligned} \tag{17}$$

因此, 在堆载预压任意时间的沉降速率

$$\dot{S} = \frac{\beta\beta_0}{\beta_1 e^{\beta\Delta t} - 1 - e^{\beta t}(\beta_1 - 1)} \tag{18}$$

式中:  $\beta_0$  及  $\beta_1$  的值由图 2 确定, 堆载预压时间  $t$  应从

修正后的起点算起。

根据实测资料反算  $\beta$  时的时间间隔  $\Delta t$  的取值要和将时间  $t$  离散为  $t = \Delta t \cdot j (j = 1, 2, 3, \dots)$  时的时间间隔相一致。

由  $S = S_{rc}\beta$  得到剩余主固结沉降量

$$S_{rc} = \frac{\beta_0}{\beta_1 e^{\beta \Delta t} - 1 - e^{\beta t} (\beta_1 - 1)} \tag{19}$$

由此推出对应的卸载时间

$$t = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\beta_1 e^{\beta \Delta t} - 1 - \frac{\beta_0}{S_c}}{\beta_1 - 1} \tag{20}$$

3 沉降速率与时间的关系

由前述可知, 在均质地基已经施加  $n$  级荷载下,  $t$  时的沉降速率

$$\dot{S} = \frac{dS_i}{dt} = \alpha \beta \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) e^{-\beta t_i} \tag{21}$$

对式 (21) 两边取以  $e$  为底的对数得到

$$\ln \dot{S} = -\beta \sum_{i=1}^n t_i + \ln \alpha \beta \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) = -\beta t + C \tag{22}$$

式中:  $C = \ln \alpha \beta \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di})$  为常数。

由此可见, 沉降速率  $\dot{S}$  以  $e$  为底的对数与堆载预压时间  $t$  成线性关系, 其斜率为  $-\beta$ 。做沉降速率  $\dot{S}-t$  的半对数关系曲线(图 3)。从图 3 中可以直接得到满足卸载要求时的沉降速率所对应的卸载时间。

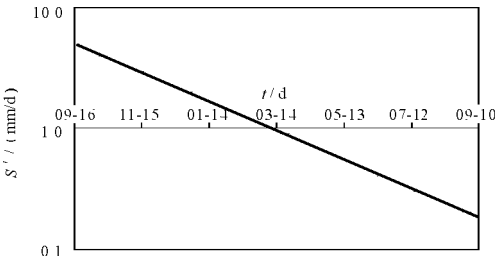


图 3 沉降速率  $\dot{S}-t$  关系曲线

Fig. 3 Settlement Velocity  $\dot{S}-t$  Time Curve

4 在深港西部通道填海工程中的应用

4.1 工程概况

深圳—香港西部通道工程是为了更好地连接和繁荣深港两地而修建的, 由跨海大桥和一线口岸组成(图 4)。公路大桥北起蛇口东角头, 南到香港

元朗鳌勘石。一线口岸位于深圳蛇口东角头港东侧, 其主要功能是对出入香港和内地的客货车及旅客进行边防和海关检查。此外, 尚有口岸管理区、生活区以及绿化地带和发展用地。根据国土规划, 口岸区填海及软基处理面积(包括场坪及海堤、隔堤)为  $150 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。



图 4 深圳—香港西部通道位置

Fig. 4 Place of Shenzhen-Hongkong West Passage

拟建的口岸区地处后海湾东角头以东 1 km, 为浅海域或蚝田, 海水多年平均深度为 0.44 ~ 4.73 m, 原始地面标高都低于平均海面水位, 而且场地遍布 7.0 ~ 19.0 m 厚的淤泥和淤泥质土。淤泥的物理力学性质很差, 具有含水量高(平均值达 91%)、孔隙比大(平均为 2.46)、压缩性高、强度低和欠固结的特点, 因此, 采用塑料插板堆载预压排水固结法进行处理。根据工程需要软基处理分两期进行, 一期工程开始于 2003 年 1 月份, 到 10 月完成, 二期开始于 2003 年 5 月份, 到 12 月完成。现以第一期的 I ~ III 标为例进行介绍。

4.2 由监测资料进行分析推测

深港西部通道工程中的沉降板按  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  间隔布置, 利用沉降板监测成果可以确定卸载时的沉降速率标准, 推算工后沉降量及卸载时间。

4.2.1 由剩余主固结沉降推算卸载沉降速率标准

第一期 I ~ III 标实测沉降速率与时间关系曲线如图 5。施工期的沉降速率为 5 ~ 15 mm/d。在满载预压的初期沉降速率也较大, 预压 5 个月后沉降速率仍为 1.0 ~ 1.5 mm/d, 减小缓慢。那么沉降速率降到多大才能满足工后沉降量小于等于 200 mm? 其需要的时间是否满足后续建设工期的要求? 首先要确定卸载沉降速率标准。

软基处理的工后沉降量  $S_r$  由剩余主固结沉降量  $S_{rc}$  与次固结沉降量  $S_a$  组成, 即

$$S_r = S_{rc} + S_a \tag{23}$$

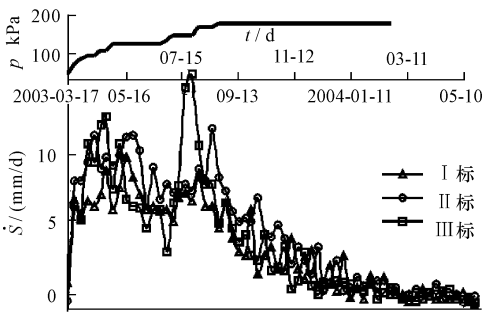


图 5 实测沉降速率与时间关系曲线

Fig. 5 Field Settlement Velocity time Curve

超载预压后软基的次固结变形计算为

$$Sa = Ca \frac{H_0}{1 + e_0} \lg \frac{t}{t_1} \tag{24}$$

式中:  $Ca$  为预压后的次固结系数;  $H_0$  为软土层厚;  $e_0$  为初始孔隙比;  $t_1$  为次固结变形开始出现的时间;  $t$  为所求次固结沉降的时间。按构筑物使用时间 50 年计算,  $Sa$  基本为 30 ~ 100 mm, 工程要求  $S_r \leq 200$  mm, 则卸载时应满足  $S_{rc} \leq 100$  mm。

根据一期工程 I ~ II 标每个沉降板的实测沉降资料反算

$$\beta_i = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2}$$

然后将计算出的  $\beta_i$  进行平均, 得到表 2。

表 2  $\beta$  的平均值

Table 2 Average of  $\beta$

标段	I	II	III
$\beta(1/d)$	0.009 99	0.012 0	0.014 9

由关系式  $S = S_{rc}\beta$  计算出的各种剩余主固结沉降情况下的沉降速率值见表 3。

表 3 沉降速率  $S$  推算值

Table 3 Estimated Values of Settlement Velocity

标段	200	150	100	50
I	2.0	1.5	1.0	0.5
II	2.4	1.8	1.2	0.6
III	3.0	2.2	1.5	0.7

注:  $\dot{S}$  单位为 mm/d;  $S_{rc}$  单位为 mm

推算表 3 可知, 当  $S_{rc} = 100$  mm 时, I ~ II 标段沉降速率分别达到 (1.0, 1.2, 1.5) mm/d, 沉降速率还较大。而当  $S_{rc} = 50$  mm 时, 沉降速率分别为 (0.5, 0.6, 0.7) mm/d, 完全满足  $S_r \leq 200$  mm, 因此卸载时的沉降速率标准定为 0.5 mm/d。

4.2.2 由沉降速率推算卸载时间

当由实测沉降资料确定卸载时沉降速率标准定为 0.5 mm/d 后, 可采用 2 种方法推算卸载时间:

(1) 计算法

$$t = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\beta_1 e^{\beta \Delta t} - 1 - \frac{\beta_0}{S_{rc}}}{\beta_1 - 1}$$

式中: 系数  $\beta$ ,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  由前述方法求出, 而  $S_{rc} = 50$  mm, 从而求出卸载时间  $t$ 。

(2) 图解法: 根据每个沉降板的实测沉降资料

做  $\dot{S}$  与  $t$  的半对数关系曲线(见图 3), 从图 3 中可以直接得到满足卸载要求  $\dot{S} = 0.5$  mm/d 时所对应的卸载时间。

由计算法和图解法推算卸载时间见表 4。

表 4 推算卸载时间对比

Table 4 Contrast of Estimated Unloading Time

推算方法	I			II			III		
	max	ave	min	max	ave	min	max	ave	min
	$S_{I-15}$	$S_{I-4}$	$S_{I-11}$	$S_{I-24}$	$S_{I-26}$	$S_{I-19}$	$S_{I-33}$	$S_{I-41}$	$S_{I-46}$
计算法	3/7	4/5	14/6	15/6	9/5	19/4	20/5	15/5	25/2
图解法	10/7	29/4	16/6	24/6	12/5	28/4	25/5	22/5	10/2

注: 各标只列举了沉降最大最小和接近平均值的板号; 从恒载到恒载后 2 个月间的数据进行推算

由表 4 推算的数据可以看出, 2 种方法推测结果十分一致, 达到沉降速率 0.5 mm/d 卸载标准的时间, 大部分沉降板在 6 月中旬可以满足要求。个别点  $S_{I-15}$  虽然要晚一些, 但在 6 月中旬也可以满足  $S_r \leq 200$  mm 的要求, 因而确定卸载时间为 6 月中旬。图 5 是 I ~ II 标段实测沉降速率与时间关系曲线, 由曲线可知, 实测沉降速率受加荷和观测的影响波动性较大, 但总体呈减小趋势。至 5 月底 6 月初, 其监测沉降速率已降到卸载标准的 0.5 mm/d 左右, 与推测的卸载时间吻合。

4.2.3 工后沉降量推算

首先用从恒载到恒载后 2 个月间的数据, 由剩余主固结沉降量

$$S_{rc} = \frac{\beta_0}{\beta_1 e^{\beta \Delta t} - 1 - e^{\beta t} (\beta_1 - 1)}$$

计算出 6 月中旬卸载时的  $S_{rc}$  和  $S_r$ (表 5)。

其次由实测到 6 月份的数据用常用的 A saoka 法和三点法进行推算  $S_r$ (表 5)。

由表 5 可见, 用几种方法推算的工后沉降量十分接近, 说明用公式 (19) 计算剩余主固结沉降量,

然后求工后沉降量是可行的和准确的。

深圳—香港西部通道填海及地基处理工程到 2004 年 6 月中旬, I ~ II 标段满载预压近 9 个月, 地基处理后双桥静力触探试验的锥尖端阻力  $qc$  (MPa) 和侧壁摩阻力  $fs$  (kPa), 淤泥原状土抗剪强度  $C_u$  和重塑土抗剪强度  $C_u'$ , 淤泥的物理力学性质指标都有较大提高, 软基处理效果明显。各点沉降速率为 0.2 ~ 0.5 mm/d, 工后沉降都小于 20 cm, 工后沉降差小于  $1.0 \times 10^{-3}$ , 满足设计要求。因此在 6 月中旬开始卸载, 既满足了设计要求, 也达到了后续建设工程的工期要求。

表 5 推算的工后沉降量对比

Table 5 Contrast of Estimated Post Construction Settlement										
推算 方法	I			II			III			
	max	ave	min	max	ave	min	max	ave	min	
	$S_{I-15}$	$S_{I-4}$	$S_{I-11}$	$S_{I-24}$	$S_{I-26}$	$S_{I-19}$	$S_{I-33}$	$S_{I-41}$	$S_{I-46}$	
计算	$S_{rc}$	69	30	50	45	32	25	40	45	20
算	$S_r$	140	77	109	135	115	78	132	89	79
A saok a 法	94	84	89	128	107	96	116	81	67	
三点法	98	78	94	104	95	80	120	88	71	

5 结论

(1) 由沉降速率  $\dot{S} = S_{rc}\beta$  的关系及 Asaoka 方

法中推导的计算卸载时间和求剩余主固结沉降量的公式在实际应用中是可行和准确的。

(2) 对于深圳湾深厚淤泥软基处理的沉降速率卸载标准定为 0.5 mm/d, 能满足工后沉降要求。

(3) 对于软基处理的卸载时间和工后沉降的推算可按如下程序进行: ① 首先由  $S_r = S_{rc} + S_a \geq S_{rc} = S_r - S_a$ ; ② 据恒载到恒载后 2 个月间的数据由  $S = S_{rc}\beta$  推算卸载时的沉降速率标准; ③ 由推算得到的卸载时沉降速率, 利用计算法和图解法预测卸载时间  $t$ ; ④ 由推算得到的卸载时间  $t$ , 利用公式 (19) 直接计算  $S_{rc}$ , 然后求工后沉降。

(4) 深圳—香港西部通道填海及地基处理工程到 6 月中旬, 各项指标都达到了设计要求, 已开始卸载, 这和预测的卸载时间是吻合的, 因而此种预测方法是准确和符合实际的。

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[ K ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

[ 2 ] 刘吉福, 陈新华. 应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降[ J ]. 岩土工程学报, 2003, 25( 2 ): 32 ~ 36.

[ 3 ] 李福民, 赵有明. 深圳软土地基处理中 Asaoka 法的应用[ J ]. 中国铁道科学, 2002, 23( 4 ): 38 ~ 42.

[ 4 ] 毛新虎. 大同一运城高速公路某软基复合地基检测结果分析[ J ]. 地球科学与环境学报, 2004, 26( 1 ): 33 ~ 37.

Application of Settlement Velocity to Calculate Residual Settlement and Unloading Time

ZHANG Chang sheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo you<sup>1</sup>, LIU Guo nan<sup>3</sup>, WEI Yong zuo<sup>1</sup>  
(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640 China;  
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Shenzhen Branch, China Academy of Railway Sciences, Shenzhen 518034, Guangdong, China)

**Abstract** The settlement velocity and post construction settlement including residual settlement and secondary consolidation settlement are very important unloading standard in foundation soil treatment project. The secondary consolidation settlement can be estimated within range, and the post construction settlement is mainly controlled by residual settlement. In Asaoka method, the settlement velocity can be calculated in preloading anytime. By applying the relationship between settlement velocity and residual settlement, the residual settlement and unloading time can also be computed. The relationship between settlement velocity's logarithm and preloading time is linearity, thus the unloading time can be confirmed by the graph. The method is very effective in Shenzhen Hongkong West Passage fill seafront and foundation soil treatment project, and may have preferable application value.

**Key words:** Settlement velocity; soft clay; foundation soil treatment; residual settlement; post construction settlement; unloading time

[ 英文审定: 苏生瑞 ]