



土体固结参数的反分析与工程应用

王绪锋^{1,2}, 解廷伟³, 陈炯钊², 李海丽²

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020;
3. 深圳市地铁集团有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 固结系数是排水固结法加固软土地基的一个重要参数。由于室内试验条件和现场相差较大, 根据实测资料反分析得固结参数更符合实际情况。利用某软基处理工程的沉降观测资料, 从荷载总量、满载前后荷载比、满载预压时间比及测点附近边界条件变化等角度, 分析各因素对固结参数的影响, 拟合固结参数变化关系式, 提出瞬时沉降的简易算法, 推算主固结时间零点并与曾国熙法算得的修正零时点进行对比分析。

关键词: 实测资料; 反分析; 固结参数; 工程应用

中图分类号: TU 472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0154-04

Back analysis and engineering application of consolidation parameters

WANG Xu-feng^{1,2}, XIE Ting-wei³, CHEN Jiong-zhao², LI Hai-li²

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China;
2. Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310020, China;
3. Shenzhen Metro Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: The coefficient of consolidation is one of most important parameters for reinforcement of soft ground with drainage method. The parameter obtained from back analysis with in-situ data would be more consistent with the actual situation, because the test conditions of the laboratory and field are quite different. Based on the in-situ settlement data of some soft ground treatment projects, this paper analyzes various kinds of effects on consolidation parameters from the aspect of total load, load ratio before and after full-load, pre-load time ratio and changes in boundary conditions beside the in-situ points, and fits relationship formula according to changes with the parameter. Furthermore, it proposes a simple algorithm with the immediate settlement, and calculates the primary consolidation zero point of time, which is compared with the revised zero point obtained from Zeng Guo-xi method. The results may serve as reference for the engineering and research concerning soft ground treatment project.

Key words: in-situ data; back analysis; consolidation parameter; engineering application

软土具有大孔隙比、高天然含水量、高压缩性和低强度等特点, 主要包括淤泥、淤泥质土等^[1]。我国沿海软土地基主要分布在天津塘沽、江苏连云港、浙江温州、宁波、福建厦门、广东广州、南沙、深圳等地。随着我国经济发展和城市建设范围的扩大, 很多工程需建造在软土地基上, 为确保上部建筑物正常使用, 通常对地基进行加固处理, 排水固结法是加固软土地基的有效

方法之一^[2]。在软基处理设计中, 根据固结理论计算地基固结完成时间与实测固结完成时间往往存在较大差异, 导致这种现象出现的主要原因之一是室内试验获得的固结系数与地基土体实际固结系数存在较大的差异^[3]。根据实测资料反分析固结系数已有比较多的研究, 且计算结果多能令人信服^[4-5]。

工程位于珠江口东侧, 以海域和鱼塘为主,

收稿日期: 2013-07-18

作者简介: 王绪锋 (1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事岩土工程勘察、软基处理监测、高边坡监测、基坑监测及相关管理工作。

场地普遍覆盖 8 ~ 12 m 厚的海相沉积淤泥。基于本工程长期沉降观测资料,本文利用指数曲线配合法(三点法),分析各因素对固结参数的影响,拟合固结参数随时间变化关系式,提出瞬时固结沉降量简易算法和主固结时间零点概念,并将其与曾国熙所提分级加荷修正零时点进行对比,分析了两者差异。

1 研究方法概述

基于实测资料反分析土体固结系数是从事软基处理工程的技术人员比较关注的问题。曾国熙 1959 年根据各种排水条件下土层平均固结度提出指数曲线配合法,1975 年又提出用孔隙水压力观测资料反算固结系数的方法,具有较强的实际意义。匡乐红提出等比级数法,该方法是一种改进后的指数曲线配合法^[6]。根据双曲线配合法推算最终沉降量,也可以推求固结系数法^[7-8]。1978 年,Asaoka 提出由沉降曲线图解法计算土体固结系数^[9]。

上述方法总体可以分为基于孔隙水压力资料的算法和沉降资料的算法,且以后者居多。利用指数曲线配合法计算固结参数对满载后曲线的平滑度要求较高,且计算结果存在较大的离散性。等比级数法是基于全体时间点拟合固结系数,计算结果唯一,但不能反映固结过程中固结参数的变化。双曲线配合法推算最终沉降量是偏大的,导致反算固结度和固结参数较实际值要小。Asaoka 法计算结果能反映固结系数变化,但存在一定的离散性。

2 成果分析

2.1 计算成果综述

假定沉降曲线在稳定荷载作用下符合指数函数规律,利用本工程沉降观测资料,在满载后沉降曲线上取任意 3 个时间点 t_1, t_2, t_3 , 且满足 $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$, s_1, s_2, s_3 为 3 个时间点对应的沉降量。根据平均固结度计算式 $U = 1 - \alpha e^{-\beta t}$, 可计算固结参数 β 和瞬时沉降量 s_d , 见式 (1) 和 (2)。

$$\beta = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_2} \right) \quad (1)$$

$$s_d = \frac{s_t - s_\infty (1 - \alpha e^{-\beta t})}{\alpha e^{-\beta t}} \quad (2)$$

对于砂井或排水板处理地基,土体主要是水平固结,若忽略竖向固结,则固结系数简化计算式为

$$C_h = \beta F(n) d_v^2 / 8 \quad (3)$$

为分析时间区段和时间间距选择对参数计算的影响,本文在推算过程中使用两种方法:1) 方法 1。令时间起点 t_1 不变(选满载时刻为计算起点),通过增加 Δt 计算固结参数 β_1 。2) 方法 2。令曲线末端点 t_3 不变,通过减小 Δt 计算固结参数 β_2 , 计算成果见表 1 和图 4 中曲线 1。对方法 1 算得的参数值 β_1 进行曲线拟合,相关性系数 $R^2 = 0.9994$, 可得关系式:

$$\beta_1 = 2 \times 10^{-9} \Delta t^3 - 1 \times 10^{-6} \Delta t^2 + 1 \times 10^{-4} \Delta t + 0.01 \quad (4)$$

表 1 不同方法计算固结参数成果对比

$\Delta t/d$	β_1	β_2
230	0.011 188	0.011 188
210	0.011 901	0.011 774
190	0.012 775	0.012 332
170	0.013 545	0.012 469
150	0.014 469	0.012 969
130	0.015 254	0.012 535
110	0.015 639	0.012 103
90	0.015 840	0.013 030

从表 1 和式 (4) 中可以看出,固结参数 β_1 在满载预压初期变化不大,在预压中期受大面积堆载影响加速递减,但在预压后期参数变化又趋于稳定,参数减幅超过 30%。对于选定末端点不变算得的参数 β_2 , 在预压后期受场区降水和开挖边界条件变化影响,参数值出现一定波动,但总体变幅不大,仅为 14%。说明固结参数并不是常数,而是随预压时间、荷载情况及边界条件变化而变化的,对于大面积堆载软基处理工程,固结参数呈“减小-加速减小-稳定”的变化规律,时间区间和时间间距选择对固结参数计算结果影响并不大。

2.2 影响因素分析

从固结参数 β 的物理意义可知，它不仅包括固结系数，而且包括排水距离和影响范围，可直接反映地基固结的快慢程度，还可以简便地用来估算地基平均固结度，是一个具有实际意义的综合经验指标。然而在实际工程中，往往选用单一固结参数进行设计计算，导致实际情况与理论计算结果存在较大差异。因此，有必要对固结参数变化规律及其多种影响因素进行分析和探讨。本文根据2.1节固结参数计算成果，从预压总荷载、满载前后荷载比、满载前后预压时间比及边界条件变化等角度，对计算成果进行归类统计并绘制其关系图。

在各沉降曲线上选取最大时间间距计算固结参数，绘制预压总荷载与固结参数关系（图1）。由图1可见，固结参数总体变化趋势是随预压总荷载的增加而增加，在50~100 kPa压力段内增速较慢，100~130 kPa压力段内增速加快，130~165 kPa压力段内增速又变缓。计算各观测点满载前一级荷载与预压总荷载的比值，绘制荷载比与固结参数关系（图2）。由图2可见，满载前的荷载比对固结参数影响不明显，而固结参数受预压总荷载影响较大。

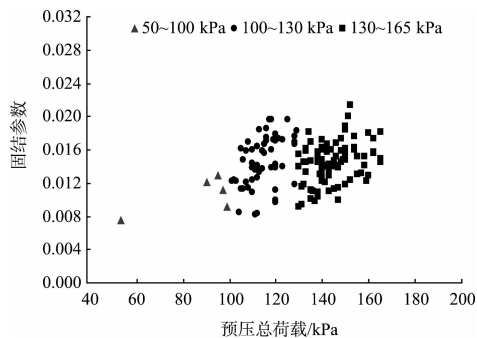


图1 预压总荷载与固结参数关系

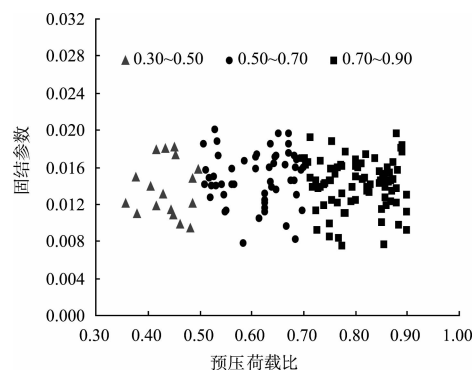


图2 荷载比与固结参数关系

计算各测点满载预压时间与加载总时间的比值，绘制预压时间比与固结参数关系曲线（图3）。由图3可见，在预压初期固结参数变化较快，随着时间增长固结参数逐渐减小。场区局部开挖会引起荷载条件和边界约束条件变化，选取地基坑附近观测点进行单独统计，采用上述两种方法分别计算固结参数，绘制时间间距与固结参数关系曲线（图4），曲线1,2和曲线3,4分别为边界条件无变化和边界条件发生变化所对应固结参数曲线。曲线3比曲线1在预压末期具有较慢的固结速度，而曲线4与曲线2规律性基本一致，但平均固结水平低于后者。

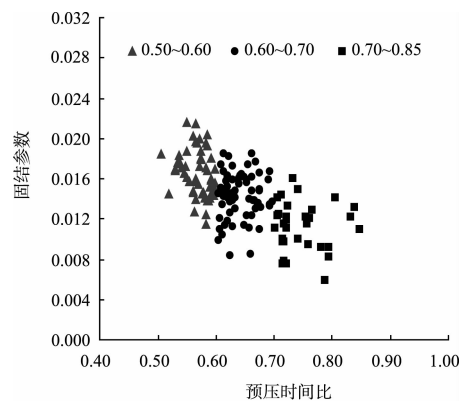


图3 预压时间比与固结参数关系

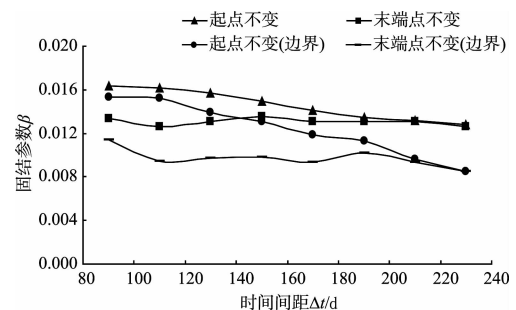


图4 边界条件与固结参数关系

3 工程应用

3.1 瞬时沉降简易算法

通过上述分析可知，取实测沉降曲线满载时刻为计算起点，预压结束时间为末端点，算得固结参数为满载预压期间参数平均值，该数值一般小于预压前期参数值，而大于预压后期参数值。根据简化式

$$s_t = s_\infty (1 - \alpha e^{-\beta t}) \tag{5}$$

计算最终沉降 s_{∞} 和固结参数 β , 令一次瞬时加载后沉降规律与分级加载满载后沉降规律一致, 且 s_t 等于满载时刻实测沉降量, 可以反算一次瞬时加载主固结时间零点及沉降量 s_t 所对应的的时间 t , 典型测点反算过程曲线见图 5。

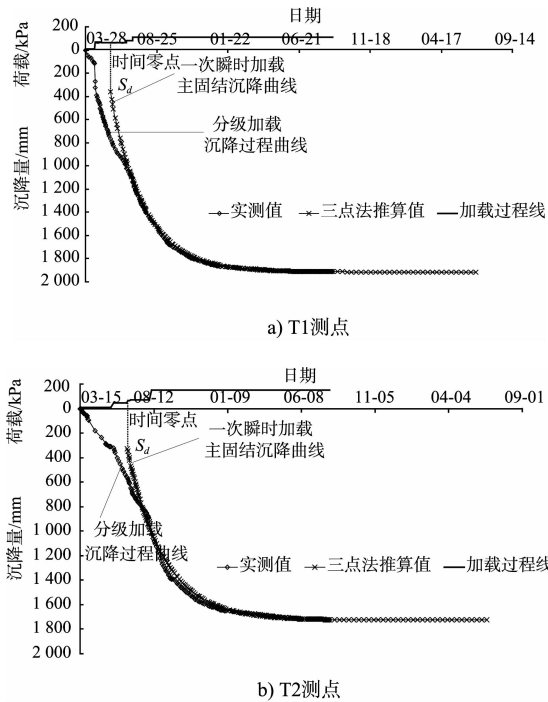


图 5 典型测点反算过程曲线

沉降是荷载施加后立即发生的那部分沉降, 主要由剪切变形引起, 而主固结沉降是由孔隙水排出土体固结所引起的沉降^[10], 令主固结时间零点所对应的沉降量为瞬时沉降量 s_d , 则

$$s_d = s_{\infty} (1 - \alpha) \quad (6)$$

可见瞬时沉降仅与地基最终沉降有关。与日本《高等级公路设计规范》瞬时沉降计算公式 $s_d = \alpha p H / 100$ 以及《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》瞬时沉降计算公式 $s_d = FPB/E$ 相比^[11], 用本方法计算瞬时沉降更为简便易行。

3.2 修正零点算法讨论

对于软基处理工程, 沉降观测往往是从砂垫层和插板施工完成后开始, 而施工前期有一定瞬时沉降和主固结沉降发生, 且这部分沉降很难通过现场实测获得^[12]。文献[13]提出根据实测沉降资料, 利用分级加荷法计算前期沉降的方法。利

用曾国熙所提两级等速加荷修正零时点计算公式

$$\overline{OO'} = [\Delta p_1 (T_1 / 2) + \Delta p_2 (T_2 + T_3) / 2] / (\Delta p_1 + \Delta p_2) \quad (7)$$

可计算实测沉降曲线修正零时点, 定为主固结修正零点。根据 3.1 节简化计算式可得

$$\beta = \ln[\alpha s_{\infty} / (s_{\infty} - s_t)] / t \quad (8)$$

其中时间 t 是从修正零点算起, 令 s_t 等于满载时刻实测沉降量, 可反算修正零点至满载时刻的平均固结参数 β , 进而可计算该时间段内任意时刻的沉降量, 并绘制沉降过程曲线。

将本节修正零点与 3.1 节主固结时间零点进行对比 (图 6), 可见两种方法计算零点存在一定差异, 主要受满载前一级荷载与预压总荷载比值影响, 且通过修正零时点法反算满载前固结参数与满载后参数不一致, 令满载前后固结参数分别为 β_A 和 β_B 。根据 2.1 节计算式 (2), 瞬时沉降是与时间、固结参数相关的变量, 用单一参数公式计算瞬时沉降是不合理的。建议在修正零点至满载时刻前选用参数 β_A , 在满载时刻后采用参数 β_B , 分阶段进行瞬时沉降计算。

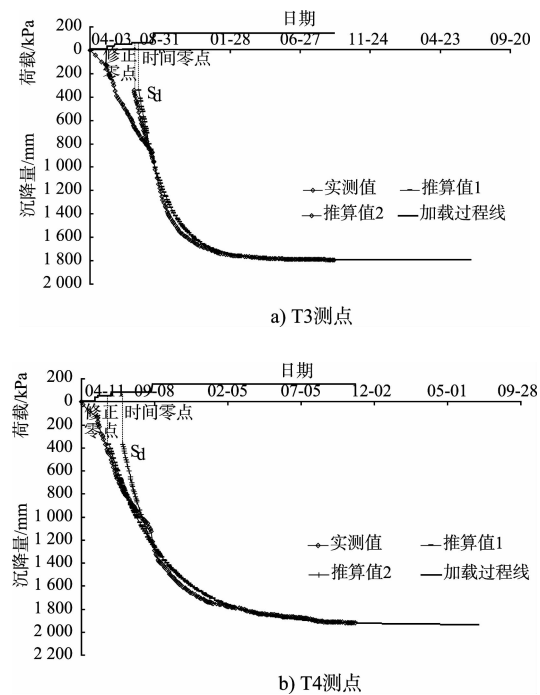


图 6 时间零点与修正零点对比