

## 室内与现场反演固结系数差异特征与原因分析

赵俊明<sup>1</sup>, 陈琦<sup>2</sup>, 刘垚<sup>2</sup>, 邓永锋<sup>2</sup>

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210017; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**以连云港临海高等级公路工程现场地勘和沉降数据为基础,对基于沉降数据的反演分析法、孔压静力触探和室内试验所得固结系数进行对比,结果表明孔压静力触探和沉降曲线反演法所得固结系数处于同一数量级,而室内固结试验所得固结系数比反演法小 1~2 个数量级。从土样扰动、各向异性 and 固结模式方面分析,反演法和室内固结试验所得固结系数差异的产生原因为天然沉积软黏土具有结构性,室内试验所得固结系数与应力水平和取样扰动程度密切相关;天然沉积软黏土具有各向异性的特征,水平与竖向固结系数存在较大差异;根据沉降数据将二维固结简化为一维固结进行反演分析,会产生反演的固结系数放大效应。

**关键词:**公路;软土地基;固结系数;室内固结试验;反演分析法;沉降

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)02-0091-04

连云港地区紧靠黄海,土层多为淤泥、淤泥质黏土、淤泥质亚黏土及淤泥混砂层,属于饱和的正常压密软黏土,具有压缩性高、沉降量大、排水固结慢、地基稳定性较差的特点。根据对已建道桥的调查,大部分道桥因地基沉降不均而产生严重的路面开裂和桥头跳车,这是由施工期间对工后沉降预估不足所致。在软土地基上建设公路面临复杂的软土固结沉降问题,固结系数是体现固结过程快慢的指标,是软基变形设计计算的关键参数。

目前常用的获取固结系数的方法主要有室内固结试验法、孔压静力触探法和现场反演分析计算法。对这 3 种方法之间的差异,不少学者开展了相应研究。如陈新彦等以珠江三角洲大量软土地区试验结果为依据,比较了地基沉降反演、室内固结试验和孔压静力触探试验所得固结系数的相互关系;胡荣华等基于深圳地区软土工程实例,对比了室内试验法、现场试验法、反演分析法、间接推算法结果的异同;顾绍付等以具体工程土样的固结试验和渗透试验数据为依据,用多种方法计算土样的固结系数,分析了两种参数之间的联系;孟高头等开展孔压静力触探和室内固结试验,对比了两种固结系数间的异同;邓永锋等根据 Hong & Onitsuka 的扰动度定义,给出了土样扰动对室内固结试验结果的影响。已有研究表明现场沉降反演法与孔压静力触探法的固结系数较接近,而室内试验所得固结系数比现场沉降反演法小 1~2 个数量级。但对于这种差异产生原因的研究较少,导致选取合理的固结系数作为施工依据

比较困难。该文基于连云港临海高等级公路建设期沉降观测数据,从土样扰动、渗透系数各向异性及固结模式三方面分析差异产生原因。

## 1 固结系数获取方法

### 1.1 室内试验法

室内试验一般采用基于 Terzaghi 一维固结理论的解析法求竖向固结系数,固结方程为:

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

式中: $C_v$ 为固结系数, $C_v = k / (m_v \gamma_w)$ ;  $k$ 为渗透系数; $m_v$ 为体积压缩系数; $\gamma_w$ 为水的重度。

为便于求解, Terzaghi 假定  $k$  和  $m_v$  在土体压密固结过程中保持不变,即  $k$ 、 $m_v$  和  $C_v$  在固结过程中均为常数。

### 1.2 孔压静力触探法

探头贯入土层时,其周围土层中的应力、应变及孔隙水压力均产生重分布,探头贯入土层所产生的超静孔隙水压力的消散接近于水平径向扩散,故孔压静探在土层中所估算的为水平向固结系数  $C_h$ 。按 Terzaghi 固结理论,孔压消散的轴对称方程为:

$$C_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $u$ 为孔隙水压力; $r$ 为任一点距探头中心的水平距离; $t$ 为消散时间。

将式(2)代入满足超孔压的初始条件和边界条件,可求解某一深度土层的水平向固结系数:

$$C_h = \frac{Tr_0^2}{t}$$

式中： $T$  为时间因数； $r_0$  为探头半径。

目前国内外倾向于取固结度  $U$  为 50% 时的  $T_{50}$  计算固结系数。

### 1.3 Asaoka 沉降反演法

Asaoka 法数学形式相对简单，参数易确定，仅需少量数据即可进行图解法求解固结系数。Asaoka 基于 Mikasa 提出的一维大变形的连续性方程  $\partial \epsilon / \partial t = C_v (\partial^2 \epsilon / \partial z^2)$ ，构建了  $\epsilon$  的级数解：

$$\epsilon(z, t) = T + \frac{1}{2!} \left( \frac{z^2}{C_v} T' \right) + \frac{1}{4!} \left( \frac{z^4}{C_v^2} T'' \right) + \dots + zF + \frac{1}{3!} \left( \frac{z^3}{C_v} F' \right) + \frac{1}{5!} \left( \frac{z^5}{C_v^2} F'' \right) \quad (3)$$

式中： $T$ 、 $F$  为时间  $t$  的函数； $T'$ 、 $T''$ 、 $F'$ 、 $F''$  分别为  $T$ 、 $F$  对时间  $t$  的一阶和二阶导数。

根据边界条件，可得到 Asaoka 解析解：

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 S_{i-1} \quad (4)$$

式中： $S_i$  为在同一荷载作用下第  $i$  个时间段的沉降； $\beta_0$  和  $\beta_1$  为参数，双面排水时  $\ln \beta_1 = -6C_v / H^2 \Delta t$ ，单面排水时  $\ln \beta_1 = -2C_v / H^2 \Delta t$ 。

## 2 结果对比分析

### 2.1 室内固结系数与反演法结果对比

根据汾灌（汾水—灌云）、沪苏浙（上海—江苏—浙江）高速公路的勘察和沉降资料，采用 Asaoka 法

反演地基综合固结系数，并与现场原状土室内试验所得固结系数进行对比，结果见图 1。

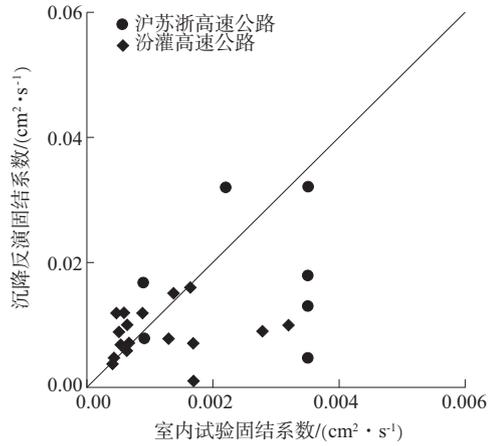


图 1 Asaoka 反演与室内平均固结系数对比

由图 1 可知：现场反演的平均固结系数比室内所得固结系数大 10 倍左右。

### 2.2 孔压静力触探法与沉降反演法结果对比

孟高头等基于珠江三角洲部分典型断面的现场沉降观测资料反算得出该地区软土土层的固结系数，并与孔压静力触探试验所得结果进行比较，结果见表 1。

由表 1 可知：孔压静力触探反演结果与实测沉降资料的反算值很接近，处于同一数量级。该结果与蔡国军等对连盐高速公路沿线 4 个典型监测断面的反演结果一致。

表 1 孔压静力触探消散试验值和现场沉降实测反算值对比

测定方法	广珠段沉降/cm								台山段沉降/cm	
	K23+670	K23+850	K28+765	K28+940	K28+995	K29+40	K35+305	K41+105	K22+190	K22+240
孔压静力触探	5.24	11.6	8.81	16.4	10.1	15.8	18.4	10.2	8.4	12.5
沉降反演	5.24	5.1	12.4	11.7	10.3	11.0	7.5	8.3	5.6	8.0
二者比值	1.0	2.3	0.7	1.4	0.98	1.4	2.5	1.2	1.5	1.6

## 3 差异原因分析

从勘察取样扰动、固结系数各向异性及固结模式 3 个角度对几种方法所得固结系数差异的产生原因进行分析。

### 3.1 取样扰动对固结系数的影响

邓永锋等对连云港海相软土进行薄壁取样，讨论了土样扰动程度、应力水平与固结系数的关系，得到固结系数随扰动度  $SD$  和应力的变化（见图 2）。

从图 2 可以看出：在扰动程度较低的情况下，屈

服前的固结系数比屈服后的大 1~2 个数量级，且扰动度低的屈服前固结系数比扰动度高的屈服前固结系数大 1~2 个数量级。由于室内试验在取样运输过程中存在应力、扰动度变化的情况，土样应力状态会从屈服前变为屈服后，扰动程度增加，进而导致室内试验结果比现场试验求得的固结系数小 1~2 个数量级。

### 3.2 固结系数各向异性

根据已有研究成果，反演法所得固结系数与孔压静力触探法所得水平向固结系数  $C_h$  处于同一个

数量级,差异很小。孟高头等以珠江三角洲大量钻探试验结果为依据,对孔压静力触探所得水平向固结系数  $C_h$  和室内固结试验所得  $C_v$  进行一元线性回归分析,结果见图 3。

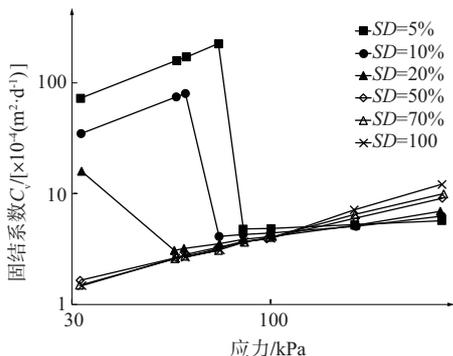


图 2 固结系数随扰动度 SD 的变化

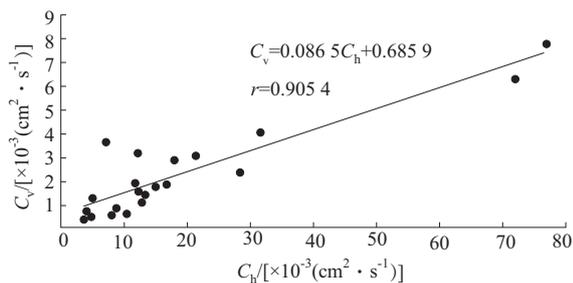


图 3  $C_h-C_v$  线性相关关系散点图及回归曲线

由图 3 可知: $C_h、C_v$  间的关系为  $C_v = 0.0865 C_h + 0.6859$ , 相关系数  $r$  为 0.9054, 回归方程的拟合程度很好,  $C_h$  和  $C_v$  具有明显的线性关系;  $C_h$  比  $C_v$  大 1~2 个数量级。

3.3 固结模式

Asaoka 法是基于太沙基一维固结理论提出的反演法,求得的是包含水平、竖向固结的现场整体固结系数,而室内试验由于侧限仅能获得竖向固结系数。为进一步分析固结模式对固结系数反演结果的影响,以临海高等级公路连云港段某断面为例建立

有限元数值模型,利用 Asaoka 法反演固结系数  $C_{v1}$ ,同时根据压力不同设置等效室内试验固结系数按深度的加权平均值  $C_{v2}$ ,通过渗透系数和固结系数的正相关关系建立水平、竖向渗透系数的比值  $k_h/k_v$  与固结系数的关系,分析  $k_h/k_v$  的改变对固结系数的影响。模型中,路基高度为 3 m,硬壳层厚度为 2 m,软土层深度为 15 m,下卧层深度为 10 m,地下水位在硬壳层下边界,水平影响区域为 50 m(见图 4)。土层基本参数见表 2,堆载过程见图 5。现场  $k_h/k_v$  一般为 2~5,在这个范围内,设定竖向渗透系数  $k_v$  不变,根据不同  $k_h/k_v$  及软土层厚度(15、20 和 25 m)下的沉降历时曲线进行反演分析。反演固结系数与竖向加权固结系数对比见表 3。

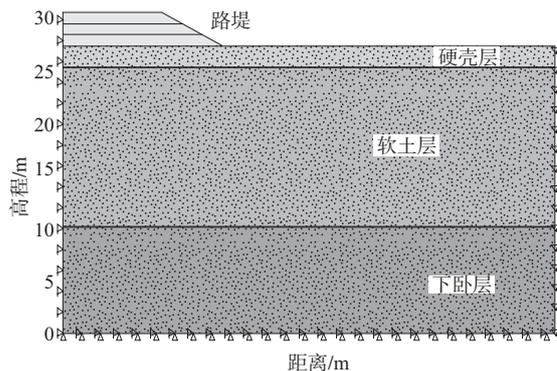


图 4 计算模型

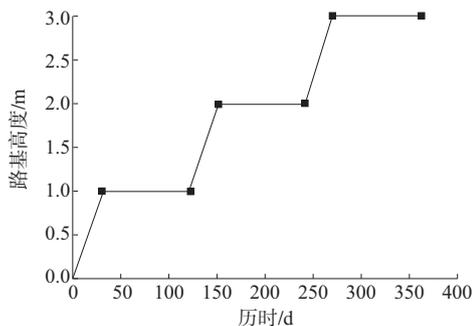


图 5 路基填土历时曲线

表 2 土层计算参数

土层	厚度 /m	本构模型	弹性模量/MPa	泊松比	容重/( $kN \cdot m^{-3}$ )	摩擦角/( $^{\circ}$ )	粘聚力/kPa	渗透系数/( $m \cdot d^{-1}$ )
路堤	3	线弹性	18.0	0.30	20.0	11.6	43	—
硬壳层	2	线弹性	5.0	0.34	18.4	—	—	—
软土层	15	弹塑性	1.5	0.34	16.5	29.0	16	$5.18 \times 10^{-4}$
下卧层	10	线弹性	5.0	0.34	20.0	27.5	11	$8.64 \times 10^{-6}$

从表 3 可看出:1)  $C_{v1}/C_{v2}$  随着  $k_h/k_v$  的升高而

升高。  $k_h/k_v = 1$  时,Asaoka 法平均反演固结系数

为室内固结试验的5倍左右; $k_h/k_v=5$ 时,Asaoka法平均反演固结系数为室内固结试验的10倍左右。2)  $C_{v1}/C_{v2}$ 随软土层厚度的增加而减小。即使水平向渗透系数与竖向渗透系数相等,反演固结系数 $C_{v1}$ 也为竖向固结系数 $C_{v2}$ 的5倍,说明在现场水平

和竖向二维固结模式中,水平向固结始终占主导地位,且随着 $k_h/k_v$ 的增大而增大。3) 在 $k_h/k_v$ 的一定比值,反演固结系数 $C_{v1}$ 比竖向固结系数 $C_{v2}$ 大1~2个数量级,即反演法所得固结系数比室内试验所得固结系数大1~2个数量级。

表3 反演固结系数 $C_{v1}$ 与竖向加权固结系数 $C_{v2}$ 对比

$k_h/k_v$	不同软土层厚度(m)下 $C_{v1}/$ [ $\times 10^{-3}(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ]			不同软土层厚度(m)下 $C_{v2}/$ [ $\times 10^{-3}(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ]			不同软土层厚度(m)下 $C_{v1}/C_{v2}$		
	15	20	25	15	20	25	15	20	25
1	5.66	6.44	7.09	0.78	1.27	1.44	7.3	5.1	4.9
2	6.76	7.91	9.10	0.78	1.27	1.44	8.7	6.2	6.3
3	7.42	9.10	9.56	0.78	1.27	1.44	9.5	7.2	6.6
5	9.72	10.00	12.00	0.78	1.27	1.44	12.5	7.9	8.3

#### 4 结论

(1) 天然沉积软黏土具有一定的结构性和应力状态,取样过程难免会对试样产生影响。固结系数与应力水平和扰动程度紧密相关,室内试验在取样和运输过程中引起应力和扰动度的改变,使应力状态从屈服前变为屈服后,扰动度增加,从而导致室内固结系数比现场反演固结系数小1~2个数量级。

(2) 在同样压力的情况下,采用孔压静力触探、室内试验分别获得水平向和竖向固结系数,所得水平向固结系数与反演法固结系数相近,处于同一数量级,且比室内试验固结系数大1~2个数量级。

(3) 室内试验的固结模式为竖向一维固结,现场固结模式为二维固结,其水平向固结始终占主导地位且随着 $k_h/k_v$ 的增加而增加。软土地基的 $k_h/k_v$ 一般为2~5,在这个范围内,在 $k_h/k_v$ 的一定比值下,反演法所得固结系数比室内试验所得固结系数大1~2个数量级。

#### 参考文献:

- [1] 刘小敏,刘松玉,杜延军.我国高速公路建设的主要岩土工程问题及其对策[A].全国岩土工程青年专家学术会议论文集[C].1998.
- [2] 王建军,刘鑫,王晨涛,等.孔压静力触探(CPTU)计算软土固结系数及其在港珠澳大桥工程中的应用[J].公路,2013(9).
- [3] 陈新彦,马传明.3种估算土层固结系数方法的对比研究[J].中南公路工程,2001,26(3).
- [4] 胡荣华,余海忠,张明,等.确定软土固结系数方法的研

究[J].铁道建筑,2010(2).

- [5] 顾绍付,徐林荣.对室内试验固结系数和渗透系数的相关性探讨[J].山西建筑,2004,30(23).
- [6] 邓永锋,刘松玉,季署月.取样扰动对固结系数的影响研究[J].岩土力学,2007,28(12).
- [7] 李元明,蔡国军,刘松玉.运用Asaoka法进行固结参数的反演计算[J].现代交通技术,2005(2).
- [8] 孟高头,王四海,张德波,等.用孔压静力触探求固结系数的研究[J].地球科学:中国地质大学学报,2001,26(1).
- [9] 孟高头,张德波,刘春宇,等.用孔压静力触探和室内固结试验求取土的固结系数的对比研究[J].水文地质工程地质,2001,28(1).
- [10] 林政.软土的固结和渗透特性原位测试理论研究及应用[D].杭州:浙江大学,2005.
- [11] 周健.某深水港土层固结系数反演及工后长期沉降预测[J].岩土力学,2008,29(5).
- [12] 王婧.珠海软土固结性质的宏微观试验及机理分析[D].广州:华南理工大学,2013.
- [13] 汪小平,杨永波,熊锋.软土路基固结系数的反演分析[J].中国水运:学术版,2007(11).
- [14] 王建兰,李仁民.软土地基固结系数确定方法探讨[J].山西建筑,2007,33(15).
- [15] 章为民,顾行文,王芳.Terzaghi固结系数的试验反演分析[J].岩土工程学报,2016,38(增刊1).
- [16] 李选正.黄河下游济南段堤防冲填土固结特性室内试验和数值模拟研究[D].济南:山东大学,2018.
- [17] 曾巧玲,张惠明,陈尊伟,等.软黏土固结系数确定方法探讨[J].岩土力学,2010,31(7).

收稿日期:2019-06-28