



井阻和涂抹作用计算方法对比分析

陈 喆

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 井阻和涂抹作用是采用塑料排水板进行排水固结地基处理过程中普遍存在的现象, 对地基固结度影响较大。具体阐述了涂抹和井阻作用产生的机理和对地基固结的影响, 分析了涂抹影响因子和井阻影响因子的计算方法, 指出了各种计算方法的区别, 并分析其合理性, 从而为排水固结地基处理的分析和设计提供了参考。

关键词: 排水固结; 地基处理; 井阻; 涂抹

中图分类号: TU 46⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0144-04

Comparative analysis of calculation methods of well-obstruction and daub-effect to consolidation by draining

CHEN Zhe

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Well-obstruction and daub-effect are often met in the process of consolidation by prefabricated drains for ground improvement and their influences on the degree of consolidation are great. This paper expounds the principle of well-obstruction and daub-effect and the influence to foundation consolidation, analyzes the calculation methods of factors concerning well-obstruction and daub-effect, and points out the differences between these calculation methods and analyzes the rationality of the methods. It provides a reference for the analysis and design of drainage consolidation of foundation improvement.

Key words: consolidation by drain; ground improvement; well-obstruction; daub-effect

土体固结计算是排水固结地基处理设计中的一个重要内容。通过固结计算可以推算出地基强度的增长, 确定适应地基强度增长的加荷计划, 推算各个时间的沉降量。在土体固结计算中, 如何考虑井阻和涂抹作用是影响固结计算精确度的重要因素。

1 不考虑井阻和涂抹作用的塑料排水板或砂井地基固结度计算理论

塑料排水板或砂井地基固结度的计算是建立在太沙基固结理论和巴伦固结理论基础上的^[1]。假设荷载是一次瞬间加足的, 软黏土层是双面排水, 在一定压力作用下, 土层中的固结流沿径向

和竖向流动, 所以, 塑料排水板或砂井地基属于三维固结轴对称问题。若以圆柱坐标表示, 设任意点 (r, z) 处的空隙水压力为 u , 则固结微分方程为

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

该固结理论作了如下假设: 每个塑料排水板或砂井的有效影响范围为一圆柱体; 塑料排水板或砂井地基表面受连续均布荷载作用下, 地基中附加应力分布不随深度而变化, 地基土仅产生竖向的压密变形; 荷载是一次施加上去的, 加荷开始时, 外荷载全部由孔隙水压力负担; 在整个压密过程中, 地基土的渗透系数保持不变; 井壁土面受砂井施工所引起的涂抹作用 (可使渗透系数

收稿日期: 2012-10-10

作者简介: 陈喆 (1973—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计工作。

发生变化)和井阻的影响不计。

1) 竖向排水平均固结度。

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^2} e^{-\frac{m^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (2)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (3)$$

式中: m 为正奇数 1, 3, 5, ...; C_v 为竖向固结系数 (cm^2/s); t 为固结时间。当 $\bar{U} > 30\%$, 可采用下式近似计算:

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \quad (4)$$

2) 径向排水平均固结度。

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\frac{8}{F} T_h} \quad (5)$$

式中: $T_h = \frac{C_h t}{d_e}$; C_h 为水平向固结系数 (cm^2/s)。

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (6)$$

当 $n \geq 15$ 时 $F \approx \ln n - 0.75$ (7)

式中: $n = \frac{d_e}{d_w}$; d_e 为每一个塑料排水板或砂井有效影响范围; d_w 为竖向排水体等效换算直径 (cm)。

3) 总固结度。

$$(1 - \bar{U}_{rz}) = (1 - \bar{U}_r) (1 - \bar{U}_z) \quad (8)$$

当塑料排水板、砂井间距较密或软土层很厚或 $c_h > c_v$ 时, 竖向平均固结度 U_z 的影响很小, 常可忽略不计。

2 井阻和涂抹作用对土体固结的影响

2.1 涂抹作用影响

理想的排水通道实际上是不存在的, 打设排水井或排水板不可避免地会改变其周围土的性质, 其扰动的程度与打设机械、打设方法、土的特性 (灵敏度、宏观结构) 等因素有关。竖井采用挤土方式施工时, 由于井壁涂抹及对周围土的扰动而使土的渗透系数降低, 因而影响土层的固结速率, 这就是涂抹作用^[2]。

若考虑涂抹的影响, 在巴龙 (Barron, 1948) 和汉斯堡 (Hansbo, 1979, 1981) 的分析中, 都假定在排水井或排水板周围有一涂抹土环存在, 其直径为 d , 渗透系数 k_s , 且 $k_s < k_h$, 在这新的边界条件下, 土体的平均固结度仍可用式 (6) 表示, 仅因子 F_n 稍加改变为 F 。

$$F = \left(\ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln s - \frac{3}{4} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} - \frac{s^2}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{k_h}{k_s} \right) \cdot \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \frac{1}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \quad (9)$$

当 $n \geq 15$ 时

$$F = \ln(n/s) - 0.75 + (k_h/k_s) \ln s = F_n + F_s \quad (10)$$

其中: $F_s = (k_h/k_s - 1) \ln s$ (11)

式中: s 为考虑涂抹影响的因子, $s = d_s/d$ 。

2.2 井阻影响

细长的排水板的纵向通水能力以及它随时间变化会直接影响到土体的固结速率。影响排水板通水能力的因素有很多, 归纳起来有以下几类:

1) 排水板的结构和几何特性是保证提供足够过水条件的基本因素, 地基中的水从地基土壤流入塑料排水板, 从排水板的纵向沟槽中排走, 这种水力性状属于管流, 管路接近矩形断面。根据研究, 管路中水流的沿程水头损失 h_f 可由下式计算:

$$h_f = K v^n \quad (12)$$

当排水板中的水力坡度 $i < i_k$ (i_k 为临界坡降) 时为层流状态, $n=1$; 当 $i > i_k$ 为紊流状态, $n \neq 1$; K 值与水流的阻力系数 λ , 雷诺系数 Re , 水力坡降及水的运动黏滞系数 ν 有关, λ 和 Re 取决于排水板沟槽的断面性状及周边材质。

2) 地基上施加的预压荷载及加固土层对排水板造成的侧向压力是塑料排水板通水能力的一个函数, 它为固结排水提供必要的水头, 形成必要的超静水压力, 同时侧压力的作用使排水板的滤膜受压凹入沟槽内, 减少过水断面, 增加了井阻。

3) 在地基排水固结过程中, 排水板随地基沉降发生弯曲和折曲, 这些弯曲和折曲改变排水板过水通道的形状和大小, 阻塞水流, 增加水流阻力, 据研究在现场排水板的弯曲沉降率可能会超过 20%, 一般在 15%~35%, 根据有关单位研究表明, 当弯曲率为 25% 时, 在土中塑料排水板的纵向通水能力比没有弯曲时要小 40%~50% (图 1), 国外有试验资料表明, 排水板由于弯曲比率增加, 井阻将是非线性的迅速增加, 且试验中测出排水板在土中的井阻要比理论计算值大 2 倍^[3]。图 2 表明排水板弯曲率与流速、水头损失的关系^[2]。

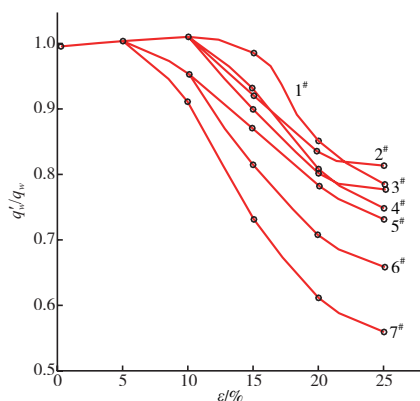


图1 排水板弯曲率与纵向通水能力的关系

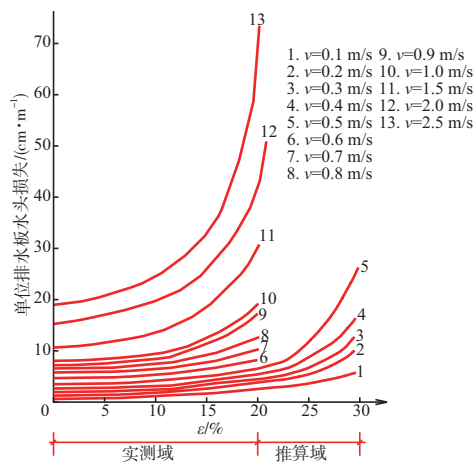


图2 排水板弯曲率与流速和水头损失的关系

在荷载的长期作用下，塑料排水板也会发生蠕变，随着时间的增加逐步改变排水板的形状，减少排水通道的面积，增加井阻，降低排水能力。

4) 塑料排水板内水流由排水板进入水平排水层（一般为砂垫层）时存在着局部水头损失，水平排水砂垫层含泥量越高，则局部水头损失越大^[4]。

5) 地基内一部分极细粒径的黏土颗粒被渗水带进滤膜或排水沟槽，堵塞滤膜和沟槽，从而降低通水能力。

6) 在地基内有一些生物、微生物菌集在排水板表面以及受酸碱等物质长期作用，这些均会危及塑料排水板的耐久性，影响排水板的通水能力。

对于排水板井阻的影响因素除了上述的以外还有一些，但最主要的起关键作用的是前4项^[5]。

井阻作用由井阻因子 F_r 所体现，有

$$F_r = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w} \right)^2 = \frac{k_h \pi H^2}{4k_w A_w} = \frac{\pi^2 k_h H^2}{4q_w r_s} \quad (13)$$

式中： k_h 为地基水平渗透系数； H 为塑料排水板打设

深度； q_w 为塑料排水板纵向通水量； A_w 为排水板当量截面积； k_w 为地基水平渗透系数； r_s 为安全系数。

土体的平均固结度仍可用式（6）表示，仅因子 F_n 稍加改变为 F

$$F = F_n + F_r = \frac{n^2}{n^2-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2} + \frac{\pi^2 k_h H^2}{4q_w r_s} \quad (14)$$

根据有关文献，大量的计算分析结果表明，按照式（5）和式（14）计算是保守的，在多数情况下偏差较大，对式（14）进行修正后得到式（16），与实际情况比较接近

$$F^* = F_n + 0.875F_r = \frac{n^2}{n^2-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2} + 0.875 \times \frac{\pi^2 k_h H^2}{4q_w r_s} \quad (16)$$

3 几种固结度计算方法比较

1) JTJ 250—1998《港口工程地基规范》^[6]推荐采用的固结度计算方法采用的是式（5），其中 F 取值采用式（6），在计算中不考虑涂抹和井阻作用。其固结度计算结果明显偏大。

2) JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[7]推荐的考虑涂抹作用和井阻影响地基固结估算方法采用的同样是式（5），其中 F 取值为

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (17)$$

$$F_n = \ln n - \frac{3}{4} \quad n \geq 15 \quad (18)$$

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln s \quad (19)$$

$$F_r = \frac{\pi^2 L^2 k_h}{4 q_w} \quad (20)$$

该计算方法考虑了涂抹和井阻作用影响。在计算井阻因子 F_r 时，直接采用塑料排水板纵向通水量，未考虑由试验室测定的允许通水量值与工程中实际通水量的不同。在计算涂抹影响因子时，涂抹区土的水平渗透系数 k_s 取值为（0.2~0.3） k_h ，涂抹区直径 d_s 与竖井直径 d_w 的比值 s 取2.0~3.0，对中等灵敏黏性土取低值，对高灵敏黏性土取高值。

3) JTS 147-1—2010《港口工程地基基础规范》^[8]和JTS 206-1—2009《水运工程塑料排水板应用技术规程》^[9]推荐的考虑涂抹作用和井阻影响地基固结估算方法采用的同样是式（5），其中 F 取值为

$$F = F_n + F_s + F_r \quad (17)$$

式中: F_n 取值采用式(6), F_s 取值采用式(11), F_r 取值采用式(16), 考虑由试验室测定的允许通水量值与工程中实际通水量的不同, 安全系数 r_s 根据排水板长度不同分别取值4~6。在计算涂抹影响因子时, 涂抹区土的水平渗透系数 k_h 取值(0.125~0.667) k_h , 涂抹区直径 d_s 与竖井直径 d_w 的比值 s 取1.5~4.0, 施工中对地基扰动小取低值, 扰动大取高值。

4) 对上述3种规范推荐的计算方法, 以及文献[10]推荐的对式(14)进行修正后的计算方法通过计算实例进行比较。

某个工程软土地基, 进行堆载预压地基处理, $C_v = 3.33 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $C_h = 6.68 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, $k_v = 4.51 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, $k_h = 4.51 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 排水板板长30 m, 间距1.5 m, 梅花形布置。不同计算方法计算的固结度关系曲线见图3。

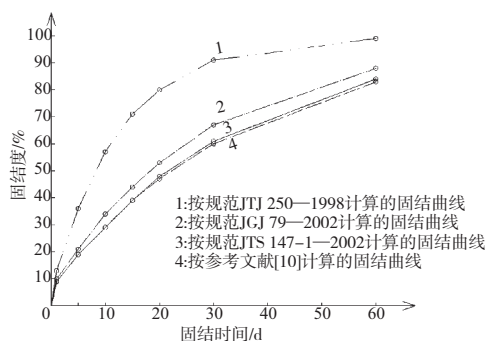


图3 不同计算方法所得的固结度关系

由图3可以看出: ①JTJ 250—1998《港口工程地基规范》^[6]推荐采用的固结度计算方法未考虑涂抹和井阻作用影响, 计算值明显偏大, 计算固结度比采用JTS 147-1—2010《港口工程地基基础规范》^[8]和JTS 206-1—2009《水运工程塑料排水板应用技术规程》^[9]推荐的考虑涂抹作用和井阻影响的地基固结估算值偏大大约20%~100%。②JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[7]推荐地基固结估算方法, 考虑了涂抹作用和井阻影响, 但未考虑由试验室测定的允许通水量值与工程中实际通水量的不同, 计算的固结度值比采用JTS 147-1—2010《港口工程地基基础规范》^[6]和JTS 206-1—2009《水运工程塑料排水板应用技术规程》^[9]推荐的计算方法计算的固结度值偏大约

6%~17%。③采用JTS 147-1—2010《港口工程地基基础规范》^[8]和JTS 206-1—2009《水运工程塑料排水板应用技术规程》^[9]推荐的计算方法计算的固结度值与参考文献推荐的计算值非常接近。

4 结语

1) 涂抹和井阻作用对排水固结地基处理过程中的固结度影响是十分显著的, 在实际工程中, 必须充分考虑涂抹和井阻作用的不利影响。

2) 涂抹作用与涂抹圈内土渗透系数和非扰动土渗透系数之比及涂抹圈直径和排水井直径之比有关, 当被扰动土的渗透系数降低程度和扰动影响直径越大, 涂抹作用越明显。

3) 引起井阻最直接原因就是排水板的实际通水能力, 而排水板的实际通水能力与排水板的板芯结构、弯曲变形程度、滤膜效果等众多因素有关, 因此, 采用在原位条件下性能可以保持良好的排水板是降低井阻影响的有效措施。

4) 现行的JTS 147-1—2010《港口工程地基基础规范》^[8]和JTS 206-1—2009《水运工程塑料排水板应用技术规程》^[9]推荐采用的固结度计算方法, 考虑了涂抹作用和井阻影响, 并且考虑由试验室测定的允许通水量值与工程中实际通水量的不同, 计算原理和方法与工程实际情况比较接近。

参考文献:

- [1] 叶书麟. 地基加固新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.
- [3] 河海大学. 第二界塑料排水法加固软基技术研讨会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1993.
- [4] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [5] 徐泽中. 交通土建软土地基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [6] JTJ 250—1998 港口工程地基规范[S].
- [7] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].
- [8] JTS 147-1—2010 港口工程地基基础规范[S].
- [9] JTS 206-1—2009 水运工程塑料排水板应用技术规程[S].
- [10] 高长胜, 汪肇京, 魏汝龙. 井阻和涂抹作用在排水板地基设计中的应用[J]. 水利水运工程学报, 1999(3): 3-11.

(本文编辑 武亚庆)