

# 塑料板排水法加固软基技术

贾宁 张永波

(太原理工大学, 太原 030024)

**【摘要】** 阐述了塑料板排水法加固地基的原理, 并对抗剪强度的增长计算和地基沉降的机理进行了分析, 对其今后发展方向作了展望。

**【关键词】** 塑料排水板; 排水固结; 抗剪强度; 地基沉降

**【中图分类号】** TU 753.8

## Prefabricated Drain Technology Used in Soft Soil Foundation Improvement

**【Abstract】** The principle of prefabricated drain technology used in soft soil foundation improvement, calculation of strength growth due to consolidation and mechanism of settlement are discussed. The future of the prefabricated drains is also presented.

**【Key words】** prefabricated drains; drained consolidation; strength; foundational settlement

### 1 塑料板排水法简介

塑料板排水法属于地基处理中的排水固结预压法。它是通过在饱和软土地基中打设可排水的塑料板, 使其与预先铺好的砂垫层共同组成排水系统, 然后在砂垫层上加载预压。软土中的孔隙水在水力梯度作用下, 通过塑料板向砂垫层排出, 超孔隙水压力逐渐消散。地基排水固结, 强度得到增长, 沉降逐渐发展, 从而提高了地基的承载力和稳定性, 同时减少或消除了建筑物修建后的沉降和不均匀沉降。

塑料板排水法源于美国丹尼尔·莫兰 (Daniel, E·Moran) 在 1925 年提出的砂井预压固结法。由于砂井施工质量难于控制, 容易出现缩径、断桩、错位等现象, 况且施工机械笨重, 不能在超软土地基上进行施工, 所以后来又逐渐发展了袋装砂井和塑料板排水法。

尽管塑料板排水法是一种较为成熟的地基处理方法, 但随着塑料板排水法的大量使用和应用场合的转移, 出现了许多新的问题, 如: 由于处理的软土层越来越厚, 原来的不考虑井

阻和涂抹作用的理想井固结理论就显得不够精确; 由于工期的紧迫, 为了充分地利用好每一天, 地基的抗剪强度增长的精确计算也是一个需要解决的问题; 在高等级公路路基的应用上, 由于公路对路基不均匀沉降有严格的要求, 所以如何计算及评价工后沉降和不均匀沉降也是一个迫在眉睫的事情。另外随着人们环保意识的提高, 使用多次回炉的废旧塑料或新旧混合的塑料制成的塑料板对地下水造成的污染也受到了人们的重视。

### 2 塑料板排水法加固软基的固结理论

固结理论是整个排水固结预压法设计与实践的理论基础。软土强度增长和沉降发展直接与固结度相关, 所以它是塑料板排水法设计中的一项重要内容。但是由于边界条件、受力状态、应力历史的复杂性和固结介质——土本身的复杂性, 使得固结度的计算十分困难。自砂井问世以来它一直受到人们的重视, 这也使得固结理论的发展成为排水固结法理论研究的核心和主线。

塑料板排水地基固结度的计算实际上应以群井理论计算,但为了计算和参数测定方便,地基的固结度计算一般都是以单井计算。

固结度若按实际情况计算会十分复杂,所以迄今为止所有解析法求固结度大小的理论都作了不同的假设,可归纳为:

①涂抹区及棱柱形土体均简化为圆柱形;

②塑料板等效为圆柱形砂井;

③砂垫层的透水性为无穷大(即柱体顶部为自由排水面);

④柱体底部为不透水面(当底部为透水的砂层时,由对称性,取  $1/2$  柱体为研究对象,则底部亦为不透水层);

⑤假定柱体变形为小变形;

⑥井阻、涂抹效应大小不随时间变化;

⑦土体上部各点荷载不随时间变化(自由应变)或土体内各点应变不随距中心点的远近而变化(垂直等应变)。

另外,不同学者根据工程的具体情况,在不同的假设条件下,如土的均匀性、渗透性随时间的变化、适用的渗透定律、排水体的影响(井阻,涂抹)、加荷速率和蠕变效应等,得出了土体固结的解析解。其中最为著名的为巴伦(Barron, 1948)的固结理论解,他分自由应变理想井(不考虑井阻和涂抹),自由应变有涂抹作用及垂直等应变情况下考虑井阻及涂抹作用等三种情况给出了固结度计算的解析解<sup>[1]</sup>。赵维炳(1988)研究指出:巴伦在推导垂直等应变情况下考虑井阻及涂抹作用下的解时,因不满足  $N \cdot \text{Carrillo}$  定理而只能是近似解而非精确解<sup>[2]</sup>。

尽管如此,巴伦的砂井固结理论被广泛应用于工程设计中,并取得了较好的效果。随着袋装砂井和塑料排水板的出现,由于这类排水体直径小,间距小,长度大,施工扰动也大,所以井阻和涂抹作用也大,若采用理想井理论计算地基的固结度,则往往存在较大的误差(Mitchell, 1982; Hansbo, 1981)。因此引起人

们对非理想井理论的研究。巴伦提出的非理想井理论,虽然能考虑井阻和涂抹作用,应用也方便,但是由于数学上处理过于粗略,属于近似解,计算的结果偏于保守;约希库米(Yoshikumi, 1974)提出的较严密的自由应变条件考虑井阻的砂井固结解析解,其结果为非显式表示,应用不太方便;汉斯堡(Hansbo, 1981)提出的等应变条件下考虑井阻的砂井地基固结理论,其解仅给出某一深度径向平均固结度,地基的平均固结度仍然是个近似式;钱家欢等人(1984)认为饱和粘土地基属于粘滞体,从而基于流变模型提出了自由应变和等应变条件下非理想井地基粘弹性体固结理论解,并在某些工程中应用而获得良好的效果,它对于分析预压工程后期变形及地基强度具有实用意义,这是对砂井地基固结理论有意义的发展;谢康和(1987)在总结前人研究的基础上,提出了等应变条件下非理想井固结理论精确解及其简化式,这一解与汉斯堡的解接近,与约希库米的精确解更接近,并且公式表达简明,物理概念清楚,参数易于测定,易于应用<sup>[3]</sup>。第三届塑料板排水法加固软基技术研讨会(1996)上,专家们建议在工程上采用谢康和的理论分析计算固结度。《塑料排水带地基设计规程》(CTAG02-97)用的也是谢康和固结度计算的简化式及分级连续等速加荷的计算式。

### 3 强度增长与排水固结的关系

在预压荷载作用下,一方面,随着排水固结的进行,地基的抗剪强度逐渐增长;另一方面,剪应力随着荷载的增加而加大,而且在施工扰动和剪切蠕变作用下,地基强度还有一定衰减。因此,在附加荷载作用下,地基中某一点、某一时间的抗剪强度  $\tau_t$  为:

$$\tau_t = \tau_0 + \Delta\tau_c - \tau_s \quad (1)$$

式中:  $\tau_0$ ——天然地基抗剪强度, kPa, 可用十字板或无侧限抗压强度试验来测定;

$\Delta\tau_c$ ——由于固结而增长的抗剪强度增量, kPa;

$\tau_s$ ——由于剪切而引起的抗剪强度衰减量, kPa。

目前, 计算  $\tau_s$  还有困难, 所以曾国熙建议用下式计算  $\tau_s$ :

$$\tau_s = \eta(\tau_0 + \Delta\tau_c) \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为剪切蠕变及其它因素对强度的折减系数, 大多数参考书中  $\eta$  的取值在 0.75 ~ 0.95 之间。当土的强度较低, 荷载较大时, 剪应力较大, 剪切蠕变效应较大, 则  $\eta$  应取较低值; 反之, 取高值。

事实上,  $\eta$  的取值更还应与时间有关。王盛源<sup>[4]</sup>在第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会(1999)上, 发表论文指出“排水体施工前后对土体扰动造成土体强度降低达 50%”。这时若堆载预压,  $\eta$  显然应取较小值; 在预压后期, 随着施工扰动的恢复,  $\eta$  应有所增加。

$\Delta\tau_c$  的计算方法很多, 如: 按单轴无侧限抗压强度或不排水抗剪强度计算, 有 Skempton 经验公式推算法、有效应力法、含水量法、天然地基十字板强度推算法等, 但以沈珠江等人(1963)提出的有效固结应力法较为合理, 其计算公式如下:

$$\Delta\tau_c = \Delta\sigma'_c \cdot \tan\varphi_c \quad (3)$$

$$\tan\varphi_c = \frac{1 + \sin\varphi_{cu}}{\cos\varphi_{cu}} \tan\varphi_{cu} \quad (4)$$

式中:  $\sigma'_c$ ——有效固结压, 即试验剪切前的有效围压, kPa;

$\varphi_c$ ——有效固结压力强度指标, ( $^\circ$ );

$\varphi_{cu}$ ——固结不排水剪内摩擦角, ( $^\circ$ )。

上式可进一步简化为下式:

$$\Delta\tau_c = \Delta\sigma'_c \cdot \tan\varphi_c \approx \Delta\sigma_z \cdot U \cdot \tan\varphi_{cu} \quad (5)$$

其中,  $\Delta\sigma_z$ ——竖向附加应力增量, kPa;

$U$ ——地基平均固结度。

上式即现行规范中建议的强度增长计算公式。

## 4 地基的沉降计算

预压能消除主固结变形, 这一点人们的认识较为一致。关于次固结变形发生的时间, 有人认为在主固结阶段也有次固结变形, 但根据试验研究, 对于正常固结土, 主固结阶段的次固结变形很小, 可以忽略不计, 次固结发生在主固结以后。

对于超载预压, 若选择一超载量  $P_s$ , 使其与相当于建筑物永久荷载量  $P_f$  的堆载的共同作用下的沉降大于  $P_f$  作用下主固结变形, 超载卸除以后, 土层变为超固结状态, 土层中水平有效应力和竖向有效应力之比较正常固结土大, 从而使该点剪应力降低, 次固结系数  $C_a$  降低。卸去的超载越大,  $C_a$  降低越显著。预压期越长,  $C_a$  降低越明显, 次固结发生的时间越迟。这就是超载预压能消除主固结、降低和推迟次固结的原因。

从以上讨论看出, 土中有效应力的变化, 是地基发生次固结变形的原因。据此, 赤石胜于 1981 年根据卸载前后土体中的应力变化提出一种计算工后次固结沉降的方法。

## 5 今后发展方向

### 5.1 理论发展

正如前面所说, 砂井的固结理论是砂井排水法的核心, 它一直是人们研究的重点。从巴伦总结前人研究成果提出砂井地基排水固结理论以来, 考虑各种因素的固结理论出现很多。这些方法可分为两类: 一类是以巴伦公式为基础的解析方法; 另一类是利用边界元或有限元联立求解位移和孔隙水压的数值法。由于计算方法和计算设备的迅速发展, 第二类方法发展很快。其计算结果可靠程度依赖于所选用的地基土体本构模型的合理性以及模型参数选用的正确性。

在排水固结作用下, 高压缩性土将产生很大的变形, 很多都超过 10%, 应属于大变形问题, 用大变形理论计算将更加合理。但由于该方法较为复杂, 现在大多应用于一维和二维平面应变情况。西安公路学院编制了大变形固

结有限元沉降分析程序。该程序应用了 Biot 固结理论和 Duncan—Chang 非线性弹性模型,它能反映打设塑料板后空间渗流和垂直土层不同刚度的特点,与实际较符。

随着固结模型的完善,软土参数指标选取受到重视。铁道部科学研究院的李国周和欧阳葆元提出了地基沉降的概率计算方法<sup>[5]</sup>,杨高升和刘家豪(1999)从分析塑料板排水加固地基的受力和固结特点入手,建立了地基失稳的概率模型<sup>[6]</sup>。这些都是对塑料板地基的进一步认识,并将更好地指导设计和计算。

1989年谢康和和曾国熙首次提出地基的优化计算理论和方法<sup>[7]</sup>,为以后塑料板排水法处理粘土地基的优化设计奠定了基础。但这方面的研究还不多。

## 5.2 实践创新

除了在理论方面的发展,塑料板这种土工合成材料的创新应用也出现很多。从应用的场合看,塑料板排水法不仅在陆上,而且在水下、深基和超软基等方面也有应用。从应用的工程类型上看,公路、铁路、水利、围垦、机场、电站和城建工程中都有应用。从应用的方法上看,不断革新,如:塑料板与碎石桩综合处理大型油罐软土地基。这种技术利用碎石桩消除土层地震液化的可能性,提高上部地基土层承载力;利用塑料排水板为深部淤泥质土层提供竖向排水通道,再通过油罐充水预压进一步提高地基强度,经综合处理,保证油罐地基的稳定和控制地基不均匀变形。该技术可适用于沿海大型油罐软土地基的处理。

上海罗泾港区用塑料板排水动力固结钢渣挤实法加固湿排粉煤灰软土地基<sup>[8]</sup>。该项技术先在湿排粉煤灰地基上铺设钢渣然后进行强夯,钢渣不仅起到排水垫层和工作垫层的作用,而且在强夯结束后,由于粉煤灰固有的化学活性,与钢渣中的游离氧化钙相结合,起火山灰反应而使强度逐渐增长,形成硬壳。该法利用了大量的粉煤灰和钢渣,取得了显著的

环境效益。

日本京都大学教授嘉门雅史用水平铺设的塑料板以发挥其排水和加筋作用,来处理疏浚工程产生的弃土<sup>[9]</sup>。使软粘土也能建成较陡的斜坡,节约了弃土处理的地方。

另外,在打桩区内,或打桩区周围布设塑料排水板可以消散打桩引起的超孔隙水压力。防止液化层液化、减小挤土效应,从而降低打桩对周围建筑的危害。尽管这种方法已经得到了较为广泛的应用,但对于需打设多少塑料板,塑料板怎样布置,以及打设塑料板后,能降低多大比例的超孔隙水压等问题至今仍没有很好的解决。在实际工程中一般都是根据经验布置一定数量的塑料排水板。

塑料板还可水平铺设于铁路路基下防止地基翻浆冒泥,铺于山坡、土堤坝的背水坡上以降低地下渗水的逸出点、防止边坡的坍滑,垂直铺于建筑物地下室外侧或挡土墙背面,以降低墙后的地下水压力。这些都说明塑料排水板是一种有潜力可挖的土工合成材料,值得我们进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 Barron R A. Consolidation of fine-grained soils by drain well. Trans Am Soc Civ Engrs, 1948(113): 718~754
- 2 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱和土体轴对称固结理论解. 河海大学学报, 1988, 16(5): 47~56
- 3 王铁儒等. 排水固结预压法工程应用与设计综述. 见:中国土木工程学会港口工程学会,塑料排水学术委员会编. 第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集. 南京:河海大学出版社, 1999. 8~32
- 4 王盛源等. 塑料排水板的软基加固功能. 见:中国土木工程学会港口工程学会,塑料排水学术委员会编. 第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集. 南京:河海大学出版社, 1999. 131~139
- 5 李国周, 欧阳葆元. 软土地基固结与沉降概率分析. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 25~34

## 参 考 文 献

- 1 夏林等. 挤密碎石桩与强夯法加固处理湿陷性黄土地基. 武汉工业大学学报, 1996, 18(2): 31~33
- 2 吴延杰等. 干振碎石桩设计计算的研究. 见: 第七  
届土力学及基础工程学习会议论文集. 北京: 中国  
建筑工业出版社, 1994. 560~561
- 3 刘景政等. 地基处理与工程实例分析. 北京: 中国  
建筑工业出版社, 1998. 380~385
- 4 收稿日期: 2000-11-20
- 5 杨高升, 刘家豪. 蒙特卡罗法在塑料板地基稳定性  
分析中应用. 见: 中国土木工程学会港口工程学  
会, 塑料排水学术委员会编, 第四届塑料板排水法  
加固软基技术研讨会论文集. 南京: 河海大学出版  
社, 1999. 251~256
- 6 谢康和, 曾国熙. 砂井地基的优化设计. 土木工程  
学报, 1989, 22(2): 3~12
- 7 洪国镇. 罗泾港区湿排粉煤灰软基加固工程. 见:  
中国土木工程学会港口工程学会, 塑料排水学术  
委员会编. 塑料板排水法加固软基工程实例集. 北  
京: 人民交通出版社, 1999. 51~59
- 8 嘉门雅史, 三村卫. 用土工聚合物水平排水材料加  
固粘性土填土变形的有限元分析. 见: 中国土木工  
程学会港口工程学会, 塑料排水学术委员会编. 第  
四届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集.  
南京: 河海大学出版社, 1999. 14~23
- 9 收稿日期: 2000-11-06

(上接第 95 页)

## 岩土工程技术加入“万方数据——数字化期刊群”

为了实现科技期刊编辑、出版、发行工作的电子化, 加速科技信息交流的网络化进程, 本刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”, 本刊发表的论文, 将一律由编辑部统一送入“万方数据——数字化期刊群”, 以进入因特网并提供信息服务。凡有不同意见者, 请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬。

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。在万方数据资源系统上开通的数字化期刊群, 期刊总数达到 2000 种, 90% 以上属进入中国科技论文统计源的核心期刊(网址: <http://www.periodicals.com.cn>)。本刊全文内容按照统一格式制作被编入“万方数据——数字化期刊群”, 读者可上因特网进入“万方数据——数字化期刊群”查询浏览本刊内容。欢迎各界朋友通过“万方数据——数字化期刊群”向我刊提出宝贵意见和建议, 或征订本刊。

《岩土工程技术》编辑部