

第五届 全国塑料排水工程技术 研讨会论文集

(中国 天津 2002.10.12~16)

PROCEEDINGS OF
THE 5TH SYMPOSIUM
ON PREFABRICATED
DRAINAGE
ENGINEERING

Oct 12 ~ 16 2002
Tianjin China



中国土木工程学会港口工程学会
塑料排水学术委员会

海洋出版社

第五届全国塑料排水工程技术 研讨会论文集

(中国 天津 2002.10.12~16)

Proceedings of the 5th Symposium on Prefabricated
Drainage Engineering

(Oct 12~16, 2002, Tianjin China)

中国土木水利工程学会港口工程学会

塑料排水技术委员会

江苏工业学院图书馆
藏书章



海洋出版社

2002年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

第五届全国塑料排水工程技术研讨会论文集/中国土木工程学会港口工程学会塑料排水学术委员会编. —北京: 海洋出版社, 2002. 9

ISBN 7-5027-4731-1

I. 第… II. 中… III. 软土地基—塑料排水工程—学术会议—文集 IV. TU472.6-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 062144 号

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京市燕山印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.5

字数: 312 千字 印数: 1~500 册

定价: 65.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

秋天是收获的季节。金秋时节，我们聚集在我国塑料排水板应用于软基加固工程的发源地——天津，召开全国第五届塑料排水工程技术研讨会。总结技术进步，规划未来发展，讨论加强质量监督和规范市场秩序的措施，是本次会议的主要任务。

我们中国土木工程学会港口工程学会塑料排水学术委员会前几届研讨会主要交流排水固结法加固软土地基方面的新经验与新成果。时代在发展，技术在进步，为了适应工程实践发展的需要，本次研讨会的交流内容扩展到边坡、挡墙、隧道、地下结构、环保等工程中的排水、反滤、排水兼顾加筋等方面的内容。因此，本届会议也改名为第五届全国塑料排水工程技术研讨会，既延续学会以往研讨的主题，也拓展学会在新时期工作的新的目标与方向。

本论文集共收录论文 28 篇，其中有总报告与综合报告 3 篇，理论分析 8 篇，标准规程的讨论 1 篇，设计与现场试验研究 12 篇，内容涉及塑料排水工程技术的各个方面。日本方面的论文 3 篇，涉及理论分析、现场试验研究以及排水板日本和国际标准方面的内容。为了便于中外读者了解各篇论文的主要内容，学术委员会组织有关人员将英、日文的论文译成中文，将中文的论文摘要译成英文，装订成册随论文集发行。

在本次论文集的征集与编写中，得到各有关单位与作者的大力支持，在此一并表示感谢。

刘家豪

2002 年 8 月

目 次

塑料排水技术在工程中的应用与发展	赵维炳 汪肇京 高长胜(1)
塑料排水板在天津港口建设中的研究和应用	张 敬(11)
塑料盲沟的应用与设计	刘家豪 高长胜(23)
关于塑料排水带打设深度的讨论	马时冬(35)
垂直排水通道对真空排水预压加固效果的影响	姜 炎 李宝强(39)
深圳河反滤土工布试验研究	胡利文 董志良(43)
塑料排水板加固软土地基的设计与实践	于志强 张丽丽(50)
控制变形排水固结加固深厚软基现场试验研究	冯 强 赵维炳 艾英林(54)
现行《塑料排水板质量检验标准》的讨论	杨明昌 汪肇京 钟祥海(60)
复杂工况条件下的真空预压施工质量的控制	陈允进 付海峰(65)
高速公路真空联合路基堆载预压加载控制指标探讨	郑新亮 董志良(71)
塑料排水板在工程中的应用及功效	高长胜 汪肇京 刘家豪(77)
塑料排水板在加固坝基工程中的应用	孟宪鹏(84)
塑料盲沟的材料、特性及性能指标	武良金 刘永强(88)
南京市纬八路西延工程软土地基排水固结沉降特性	杨守华 陈永战 郭 建 张 凌 朱群峰(94)
璩门海堤二期工程有限元反分析研究	林正熙 彭 勃(99)
真空联合堆载预压加固高速公路桥台软基的研究	曹永琅 丛 健 吴晓峰(107)
真空联合堆载预压法在某污水处理厂软基处理中的应用	阮亨琅 张学增 陈文华 赵云德 吴存富(116)
塑料排水板结合堆载预压法加固油罐地基的应用	黄康理 袁文明 戴济群 苏冬林(121)
深水插设塑料排水板施工技术在玉环漩门二期堵坝工程中的应用	陈富强 李运洲 陈 晖 孙张波 张茂军(127)
真空堆载联合预压在公路工程中加固软基应用	郭耿新 张敏方(132)
塑料板排水充水预压法处理大型油罐软土地基的试验研究与工程应用	贾庆山(137)
塑料排水板的发展趋势及质量改进建议	武良金(142)
深厚软基高速公路软基预压研究	王铁儒 丁 利 李玲玲(145)
煤场自预压法软基加固的变形与稳定分析	王立中 李玲玲(153)
Existence of an Optimum Shape of PVD to Minimize the Effect of Confining Pressure	M. Kamon, S. Suwa, M. Fukuda and T. Shimonodan(162)
処分場におけるバーチカルドレーンによる浚渫粘土の流容化技術	木山正明 日下部史明 原田健二 野村忠明(168)
Standard for Construction Procedure of Prefabricated Vertical Drain (PVD)	Masashi Kamon(176)
附录	(186)

塑料排水技术在工程中的应用与发展

赵维炳 汪肇京 高长胜

(南京水利科学研究院土工研究所 南京 210024)

摘 要 本文对塑料排水技术近年来在工程中的应用及相关设计理论进行概括与分析,特别对控制工后变形的地基新一代处理设计方法进行了详细介绍,并提出该技术的发展趋势。

关键词 塑料排水板;排水;软土地基。

1 概 述

自从 1999 年第四届塑料板排水法加固软土地基技术研讨会召开以来,我国在排水固结法加固软土地基领域又取得许多新的经验和成果。排水板作为土工合成材料,不但具有垂直排水加固软土地基的功效,而且经直接或间接改型后应用于工程还具有工程排水、反滤、加筋等功效。本文将对塑料排水土工合成材料在工程中的应用及其发展进行分析与讨论。

2 塑料排水板在工程中的应用现状

塑料排水板处理软土地基是在纸板基础上发展而来的。1925 年,美国工程师 D. J. Moran 首次将砂井作为处理软土地基的方法,并于第二年取得美国专利,几年后在加利福尼亚实施了第一个砂井工程。与此同时,瑞典的 Kjellman 采用纸板应用于工程实验,并获得专利。由于纸板易损坏,直到 1971 年, O. Wager 用塑料槽型芯板代替纸板,才使该方法在工程中迅速推广应用。我国于 1981 年开始实际应用,取得良好的加固效果。排水板用于加固饱和软粘土地基中,主要作为垂直排水通道,缩短渗径长度,加快土体排水固结,提高地基的承载力,加速地基的沉降变形,减少使用期残余沉降的发生。塑料排水板固结设计计算,主要采用砂井的排水固结理论来进行,由于排水板的间距远比土层的厚度小,在荷载作用下,土层的排水固结大大加快,根据固结理论可知软土地基的固结时间与排水板间距的平方成反比,因此可以根据工程要求的固结度和固结时间来确定排水板的间距和布置。排水板作为垂直排水通道加固软土地基在我国已取得许多工程经验和研究成果,并为此召开了四届塑料板排水法加固软土地基技术的专题会议。

到目前为止,塑料排水板在地基工程中的应用主要是作为垂直排水通道来加快软土地基的固结速率,提高地基强度。此外,排水板在地基工程中还具有抗震减灾、保护环境、加筋补强、水平排水以及护坡等功效。目前排水板在工程中的应用情况见表 1。

表 1 排水板在工程中的应用

功 效	工程使用	设 置 目 的	应用水平
垂直排水	排水板加固软基	加速固结,提高强度	较为成熟
抗震减灾	软粘土动力固结	减少橡皮土事故,保护周边环境	进一步研究
桩基防护	群桩施工	加速孔压消散,减震隔离,保护环境	进一步研究
水平排水及加筋	吹填土处理,路基冒浆	水平排水固结、加筋	进一步研究
其 他	土石坝反滤、护坡	反滤、排水、截水、排水垫层	进一步研究

3 排水固结设计计算基本方法

3.1 设计的基本资料及过程

当决定采用排水板处理软土地基时,设计前应首先准确确定土体的基本性质指标和相关的工程资料。设计的基本技术要求如表 2 所示。

获得基本资料后即可进行排水井地基的设计。设计过程如下:

输入:

- (1) 土的特性;
- (2) 边界和排水条件;
- (3) 要求达到的固结度;
- (4) 可利用的固结时间;
- (5) 排水井的布置形式(如正方形、梅花形等);
- (6) 塑料排水板的等效直径。

输出:

- (1) 排水井的井距;
- (2) 加荷的大小与方式。

表 2 排水固结设计所需的基本资料

名 称	内 容	影 响
基本资料	处理面积、排水井长度	工程费用
	土体宏观结构、排水路径和排水边界条件	固结速率
	土体应力历史和超固结比	沉降量
土工资料	垂直和水平方向的固结和渗透特性	固结速率
	应力应变关系和强度特性	稳定及加荷状况
	涂抹区范围及范围内的渗透系数	固结速率
其他资料	打设方法及打设排水井的影响	固结速率和沉降量
	排水板的通水量及其随侧向压力变化情况(井阻)	固结速率

3.2 固结理论及关键指标分析

垂直排水使地基中软土在原先垂直向排水的基础上增加了一个径向排水途径来加速软土的固结。由于地基的水平向固结系数往往比垂直向固结系数大,且径向渗径比垂直向排水距离

要小得多,因而径向排水固结在地基的固结过程中占支配地位,以至一般情况下垂直向的排水固结对地基的固结影响可忽略不计,因而径向固结理论是指导排水井地基设计的理论基础。1948年,Barron 在综合前人研究的基础上建立了非理想井(考虑井阻和涂抹作用)的地基固结理论,后人又进行了一定的改进和完善,这一理论至今仍指导着工程实践。本文仅做简单的介绍。

非理想井的径向固结表达式为

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F_J + \pi G}}$$

式中,

$$F_J = \left(\ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln s - \frac{3}{4} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} + \frac{s^2}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{k_h}{k_s} \right) \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \frac{1}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right);$$

$$T_h = \frac{C_h t}{d_e^2}; \quad G = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w} \right)^2;$$

井径比 $n = \frac{d_e}{d_w}$; 涂抹区影响范围比值 $s = \frac{d_s}{d_w}$ 。

其中, k_h ——地基水平渗透系数;

k_w ——井料渗透系数;

d_e ——排水井的影响直径;

d_w ——排水板的等效直径;

k_h ——水平渗透系数;

t ——地基固结时间;

k_s ——地基扰动区渗透系数;

d_s ——排水井周围涂抹区直径;

H ——软土层厚度,在有下卧排水砂层情况下厚度按 1/2 计算。

当以上指标确定后即可计算出地基的径向固结度,它相当于地基在插设排水板后地基的固结度大小。下面对设计中几个关键指标进行分析。

3.2.1 排水板等效直径 d_w

排水板等效直径,是指在理想井条件下某一规格排水板在地基中的固结效果相当于在相同条件下多大的砂井直径。排水板的等效直径仅取决于它的表面积和形状,而与通水量和材质等无关。相同形状和表面积的排水板,其等效直径应是惟一的。也就是说,排水板等效直径是排水板本身固有的特性,它仅与表面积大小和断面形状有关,对于相同形状和尺寸的排水板而言,其等效直径相同,即它不应随板本身和被加固土体性质不同而发生变化。排水板等效直径的换算表达式为

$$d_w = \alpha \frac{2(b + \delta)}{\pi}$$

式中, b 、 δ 分别为排水板的长度和厚度; α 为换算系数。

对换算系数 α ,国内外众多学者都进行了大量的研究,所得的换算系数也各不相同,但根据排水板等效直径的定义和水力学有关原理,目前一字形排水板的等效直径应比相同表面积条件下圆形的排水砂井小,也就是说换算系数 α 目前一般应取 0.75~1.0 较为合理。

3.2.2 涂抹因子 J

由 $F_J(n)$ 的表达式可以看出,当 n 较大时,表达式后两项的数值很小,可以忽略不计,

$n^2/(n^2-1)$ 也近似为1。故可将 F_J 进行简化,有

$$F_J(n) = \ln \frac{n}{s} - \frac{3}{4} + \frac{k_h}{k_s} \ln s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln s + \ln n - \frac{3}{4}$$

涂抹作用主要反映在 $\left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln s$ 上,我们把它定义为涂抹因子 J 。对于涂抹因子中的两个参数 s ,即 d_s/d_w 及 k_h/k_s ,精确地确定它们是很困难的。这里综述前人根据现场和室内扰动情况的研究成果以供工程设计参考使用:

(1) 参数 s ,即 d_s/d_w ,与施工机具的动力形式和导管的大小、形状有关。 s 约为 $1.5 \sim 4$,导管直径大、振动力大取大值,相反取小值。

(2) 参数 k_h/k_s 与涂抹区扰动土渗透系数及周围土的性质有关。对于塑性指数 I_p 大于 30 的均质粘土,

$$k_h/k_s = 1.5 \sim 3$$

I_p 小于 30 的非均质粘土,

$$k_h/k_s = 3 \sim 5$$

非均质并具明显的粉土或细砂微层理结构的可塑性粘土, $k_h/k_s = 5 \sim 8$;

(3) 对于非挤入式的砂井而言,这些比值通常可假设为 1;

(4) 对于低挤入式的砂井来说, s 为 1.5;

(5) 还有一种比较保守的观点是:假定涂抹区的直径 $d_s = 2.5 \sim 3d_w$,认为土体被严重扰动后,任何各向异性对渗透系数的影响已经完全丧失,涂抹区内土的渗透系数 k_s 可以用该区内完全重塑的土,通过室内渗透试验来确定。

在实际情况下,土体的扰动程度还与其灵敏度和结构性等有很大的关系,并且土体的扰动程度自排水面向外是逐渐减少的,只是为了设计的方便,才假定一均匀的涂抹区的范围 d_s 。由于这一假定在理论和实践上都缺乏可靠的论据,故 d_s 的选定仍然是不确定的。对于这一扰动和涂抹的问题,在理论上和实际工程中都应做进一步的研究。对于排水板地基来说,以下几点也应引起工程技术人员的注意:

(1) 打设塑料排水板对土体的扰动明显小于常规挤入式砂井的方法。因为与被处理土的体积相比,插入的排水板体积要小得多。因此,塑料排水板更适于灵敏度高、结构性强和渗透性明显各向异性的软粘土。

(2) 随着井径 d_w 的增大,涂抹作用的影响将增大。

(3) 在有涂抹作用存在的情况下,缩小排水井间距以减少固结时间,效果并不明显。因为随着井径比 n 值的减少, $F_J(n)$ 与 $F(n)$ 的差值反而增大,故固结时间减少得并不明显。所以,对于结构性强、灵敏度高的软粘土来说,由于涂抹作用影响变得突出,缩小井径比 n 并不能达到显著加快固结排水的目的,反而增加了费用。

3.2.3 井阻因子 G

由井阻因子表达式可以推出

$$G = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{Q_h}{Q_w} \frac{H}{d} = \frac{1}{4} \frac{Q_h}{q_w/F_s} \frac{H}{d_w}$$

式中, Q_h ——单位水力梯度作用下,单位时间内由井壁流入排水板的水量,称流入量;

Q_w ——单位水力梯度作用下,单位时间内从排水板内流出的水量,称通水量,又称原位

条件下排水板的实际通水量;

q_w ——排水板由试验测定的容许通水量(按有关规定由室内试验测定);

F_s ——由试验所测的容许通水量值到工程中实际通水量的安全系数,

$$F_s = F_{1s} \times F_{2s} \times F_{3s} \times F_{4s} \times F_{5s} \times F_6$$

其中,

F_{1s} ——滤膜弹性变形进入芯带的安全系数,取 1.5~2.5;

F_{2s} ——滤膜和芯带蠕变的安全系数,取 1~2.5;

F_{3s} ——化学性质的淤堵影响安全系数,取 1~1.2;

F_{4s} ——生物物理淤堵的安全系数,取 1~1.2;

F_{5s} ——弯曲变形的安全系数,取 1.1~4,加固深度大于 20 m 时,取大值;

F_6 ——富余安全系数,根据工程对固结效果的要求确定,取 1~2。

上述折减系数 F_s ,产品质量好的用低值,差的用高值。根据我国排水板有关质量的统计情况,建议对于加固深度小于 10 m 时,折减系数取 2~4;大于 10 m 而小于 20 m 时,取 4~7;大于 20 m 时,取 7~10。当然,这一结论还需要在工程中进一步验证。

4 控制工后变形的新一代地基处理设计方法

地基处理是岩土工程实践的重要内容,具有很悠久的历史,积累了丰富的经验。长期以来,地基处理以保证地基在上部结构施工和使用过程中的稳定性和安全为目的,据此形成了系统的地基处理技术,其设计、施工和质量检验等标准和方法较为成熟。

随着经济建设和工程技术的发展,对地基处理提出了新的更高的要求。主要表现在通过工程实践,人们认识到建筑工程仅仅保证稳定性和安全还不够,有些工程由于变形过大影响使用功能甚至导致工程失事,如基坑和隧道支护结构因水平位移过大(并未超出挡土结构稳定的位移极限值)而产生的周围建筑物开裂或管线拉裂等环境影响事故,以及地基不均匀沉降导致建筑物倾斜或结构内有害内力、道路不平整和桥头跳车等,故工程实践中对变形的要求不断提高。如高速公路开始路面施工前日地基沉降量的控制标准从 1990 年的 10 mm 提高到目前的 4~6 mm。实际上,按照稳定性要求进行工程设计时设计位移也远小于地基达到极限平衡状态对应的极限位移,有时地基的允许承载力直接根据允许位移来确定。因此,工程实践提出了按位移(多数情况下是工后位移)来控制设计的新的要求,它隐含了稳定性的要求,而且更加合理和严格。这是发展的必然,工程技术人员必须适应这种新要求。

应该指出,笔者经常参加高速公路地基处理等专家审查咨询会议而深深体会到,在我国公路设计规范中规定工后沉降、沉降速率及平整度均不得超过规定的标准,工程设计中也按此要求进行计算,据此对地基处理方法进行设计。但是这种计算分析目前还是相当粗糙的,计算结果的误差极大,经常出现误差超过 100% 甚至更大的情况。因此,设计人员在实际设计中仍重点考虑控制地基稳定性,在做地基处理方案设计时仍以经验类比为主,在控制工后沉降方面一般只做初步验算,因把握不足而盲目从严要求,缺乏对工后沉降深入准确的分析及对加固技术参数的优化设计,也经常出现因工后沉降估算不准而导致地基处理方法选择不当的问题。总而言之,在高速公路设计规范中虽提出了控制工后沉降的要求,但实际设计中因技术上的困难而执行不严和工作粗糙,亟待解决的问题很多。强调地基处理从控制工后沉降出发,有利于加强

对变形问题的认识,促进变形计算和地基处理技术的发展。

地基处理工程设计从控制稳定转向控制变形,将带来许多方面的重要变化,也将促进新一代地基处理技术的发展,值得广大岩土工程工作者密切关注。

4.1 工后沉降的概念及分类

为便于讨论,这里只讨论工后沉降。

工后沉降是指建筑物竣工以后至大修或报废为止一段时间(以下简称为工后)内发生的沉降。它直接关系到建筑物的使用效果和安全,而施工期及大修期以后的沉降并不对上部结构产生危害,因此工程设计以工后沉降作为控制目标是合理的。

工后沉降 S_h 根据其产生的原因可划分为加固体工后压缩量 S_{gh} ,下卧层工后压缩量 S_{xh} 、加固体和下卧层工后次固结压缩量 S_{ch} 三部分,即

$$S_h = S_{gh} + S_{xh} + S_{ch} \quad (1)$$

而每一部分工后压缩量又可写成对应的总压缩量 S^* 与变形比增量 $\Delta V^* = V_x^* - V_j^*$ 之乘积。其中 V 表示变形比,即某时刻压缩量与最终压缩量的比值,对弹性土体且一次性加载情况下等于固结度 U ,对于软土具有流变性和分级加载等情况变形比不等于固结度,为简化起见以下假设固结变形比等于固结度。 $*$ 表示以上三部分中的一种, x 表示大修或报废时, j 表示竣工时。因此公式(1)又可写成

$$S_h = S_g^* (V_{gx} - V_{gj}) + S_x^* (V_{xx} - V_{xj}) + S_c^* (V_{cx} - V_{cj}) \quad (2)$$

4.2 按控制工后沉降进行设计及带来的影响

按控制工后沉降设计,就是把工后沉降控制在规定的限制值内作为目标,据此进行设计。它概括了保证安全稳定和正常使用功能两方面的要求。从公式(2)可以看出,要控制工后沉降必须从解决加固体工后压缩量、下卧层工后压缩量、加固体和下卧层工后次固结压缩量三方面入手。由于土是以塑性为主的弹塑性材料,变形大部分不可恢复,企图使加固体在加固施工期的压缩量超过其设计荷载下的总压缩量来抵消下卧层工后压缩量及工后次固结压缩量的做法是不能实现的。换言之,必须通过加固将三部分工后压缩量都控制在比较小的范围内,才能保证工后沉降控制在规定的较小值。在目前的工程实践中,经常发生施工期安全和稳定得到了保证,但出现工后沉降过大的现象。其主要原因是对加固体的设计较重视,而对下卧层和次固结问题重视不够,致使下卧层工后压缩量及次固结压缩量过大导致工后沉降过大。

另一方面,从公式(2)可以看出,在工后沉降控制值和各部分总压缩量不变的条件下,保证工后沉降总量不超过控制值有多种选择,使得设计者在设计时可以有一定的回旋余地。如施工期加固体变形比较大(超载预压时可达或超过 100%)则下卧层变形比可较小,次固结性质不明显的土其(主)固结变形可以较大等。

按控制工后沉降来进行设计将带来许多重要的变化,主要包括:

(1) 设计方法的变化。现设计以稳定(承载力)计算和控制为主,变形计算处于次要位置。现应转化到以变形计算和控制为主,必要时验算稳定性(一般能满足)。工后变形控制标准的制定仍不成熟和缺乏经验,根据保证结构使用效能和安全稳定制定工后变形控制标准的工作亟待加强和深化。

(2) 变形和固结计算方法的进步。现有计算方法过于粗糙,精度低,很不成熟,这与过去研

研究工作重视不够有密切关系。随着按工后沉降控制设计的实现,以分层总和法为代表的总沉降计算方法、以太沙基和巴隆公式为基础的固结计算方法、次固结变形的经验公式计算方法亟待完善,以 Biot 固结理论为基础的变形与应力耦合数值分析方法将得到广泛的应用,其中应考虑土体的弹塑性、流变性及施工过程的影响。

(3) 计算范围扩大。现有设计方法中对加固体性质和影响的研究和计算较为重视,对下卧层和次固结变形的研究和计算不够重视,今后应该加强。

(4) 处理深度加大。现有设计方法从保证安全稳定和控制总沉降量出发,对地面以下 20 m(有些工程甚至只考虑 15 m)深度范围内主要压缩层的软土进行加固,遇到下卧土层仍为中高压缩性土时,往往因下卧层工后压缩量大而导致工后沉降过大。因此,必须加强对深部土层工后压缩量的计算论证工作,必要时加大处理深度。

(5) 加固新型施工机械和施工工艺的发展。控制工后沉降新一代地基处理技术,除了对上部土层加固以外,还要对深层土进行加固,对沿海、沿江流变性质显著的软土要采取措施,改变其结构,从而减少工后次固结压缩量。为适应这些新的要求,地基处理技术必然要改进,一些新的处理技术将得到发展和应用。

(6) 测试技术和工程质量检验技术的发展。由于加固深度的加大,工后沉降的历时长,工后沉降的量相对总沉降量而言较小,要求新一代地基处理技术中的测试技术的精度要提高,稳定性要好,测试深度要深。

4.3 排水固结加固按控制工后沉降设计

为了便于对问题有更清晰的认识,先讨论一个实例。

例 1 北京—珠海高速公路广珠东线软基堆载预压试验路段建设在厚度最大达 40 m 的深厚软弱土地基上,长 353.43 m,地基分层见表 3,设计路堤填筑高度为 3.85 m,实际填土高度 5.18 m(超载 1.33 m)。袋装砂井梅花形布置,间距 1.5 m,直径 7.0 cm,长度 15.0 m。砂垫层厚 70 cm,内铺两层土工布。

表 3 堆载预压试验路段地基分层情况

层号	土质名称	厚度 (m)	含水率 (%)	孔隙比	塑性指数 (%)	压缩系数 (MPa ⁻¹)	固结系数 (10 ⁻³ cm ² /s)
1	耕植土	0.7~1.2					
2	淤泥	8.4~16.0	68.3	1.80	20.4	1.86	0.87
3	淤泥夹细砂	3.4~6.4	30.8	0.76	8.7	0.44	4.23
4	淤泥质粘土	未穿透	53.2	1.37	16.6	1.072	4.65

计算得到最终主固结压缩量:上部加固深度范围内土层为 97.1 cm,下卧土层为 88.0 cm,最终次固结压缩量为 33.8 cm。地基最终总沉降约为 218.9 cm,其中加固深度内主固结沉降占 45%,下卧层主固结沉降占 40%,次固结占 15%。

施工期 18 个月(其中预压期 6 个月)结束时,地面以下 15 m 内设置排水用袋装砂井,固结度达 98%,压缩量 95.8 cm;下卧层固结度 73%,压缩量 64.3 cm;次固结变形比 72%,压缩量约 24.3 cm。地基施工期沉降 184.4 cm(现场实测值 186.7 cm,与计算相符),其中加固深度内占 52%,下卧层占 35%,次固结占 13%,人们由此认为加固取得了很好的效果,加固深度确定为 15 m 是正确的和合理的。

再分析工后沉降。在竣工后 15 a 时,加固深度内固结度为 100%,工后压缩量 1.3 cm;下卧层固结度 99%,工后压缩量 22.66 cm;次固结比 95%,工后压缩量 7.7 cm。工后沉降共 31.6 cm,其中加固深度内占 4%,下卧层占 72%,次固结占 24%。由此可见,下卧层和次固结的工后压缩量是造成工后沉降过大的主要原因。

由于地质条件等方面的原因,以上实例分析得到的一些数据不一定具有普遍意义,但我们仍可由此得出以下有价值的定性的结论:在地基中软土深厚的情况下,地面以下 15 m 软土层的压缩量在地基最终总沉降中是主要的,将加固深度定为 15 m 左右可保证地基的稳定性并有效地减少竣工后地基的总沉降;但从控制工后沉降的目标出发,按目前设计方法确定的加固深度不够,须进一步加大。

基于以上观点,笔者近几年来致力于在高速公路软基处理中推广应用真空联合堆载预压排水固结加固方法,除了保证地基稳定性和通过加快路堤填筑速度以缩短工期外,通过加大地基深层加固应力来提高路基设计荷载下下卧层的固结度,从而有效地减少下卧层的工后压缩量和地基的工后沉降,取得了很好的效果,这一做法已在广东省、浙江省和江苏省得到了推广。

例 2 北京—珠海高速公路广珠东线软基真空联合堆载预压试验路段长 255 m,地基分层见表 4,设计路堤填筑高度在 4.8 m。实际真空压力 80 kPa,填土 5.0 m。砂垫层厚 70 cm,袋装砂井梅花形布置,间距 1.5 m,直径 7.0 cm,长度 20.0 m。

表 4 真空联合堆载预压试验路段地基分层情况

层号	土质名称	厚度 (m)	含水率 (%)	孔隙比	塑性指数 (%)	压缩系数 (MPa ⁻¹)	固结系数 (10 ⁻³ cm ² /s)
1	耕植土	0.5~1.5					
2	淤泥	3.0~5.8	90.2	2.44	36	2.17	0.82
3	淤泥夹细砂	3.2~8.1	26.1	0.72	7	0.44	6.23
4	淤泥质粘土	未穿透	61.8	1.68	32	1.13	0.91

施工期 12 个月(其中准备期 78 d)结束时,地面以下 20 m 内设置排水用袋装砂井,固结度达 99%,压缩量 116.7 cm;下卧层固结度 91%,压缩量 96.7 cm;次固结变形比 80%,压缩量约 26.9 cm。地基施工期沉降 240.3 cm(现场实测值 248.1 cm),其中加固深度内占 49%,下卧层占 40%,次固结占 11%。

再分析工后沉降。在竣工后 15 a 时,加固深度内工后压缩量 0.8 cm,下卧层工后压缩量 9.3 cm,次固结工后压缩量 6.5 cm。工后沉降共 16.6 cm,其中加固深度内占 5%,下卧层占 56%,次固结占 39%。与堆载预压相比较,在施工期缩短 6 个月的情况下,下卧层固结度从 73%提高到 91%,下卧层工后压缩量在地基总工后沉降中的比例从 72%减小到 56%,次固结压缩比从 72%提高到 80%。由此可见,真空预压加固除可缩短工期外,还在减少下卧层工后主固结沉降和次固结沉降方面具有突出优势。

按控制工后沉降设计排水固结加固软土地基可按以下步骤进行:

- (1) 用分层总和法计算各土层的最终(主固结)压缩量并估算次固结压缩量;
- (2) 初定加固深度和间距等,分别用巴隆公式和太沙基公式等计算施工期和大修期加固深度内和下卧层的固结度,按次固结理论公式计算次固结变形比;
- (3) 按公式(2)计算地基工后沉降;
- (4) 校核工后沉降是否在规定的数值范围以内,超出时应加大加固深度重新进行设计;

(5) 验算地基的稳定性。

5 工程质量的控制

塑料板排水法处理软土地基的工程质量控制主要有两个方面：一是排水板本身的质量；另一方面是施工质量。排水板本身的质量可根据交通部 1996 年发布的《塑料排水板质量检验标准》，通过现场采取样品和室内试验来保证，其检测工作均已规范化，只要检测样本能代表实际使用的产品，就能确保排水板本身的质量。由于塑料排水板施工是一项隐蔽性工程，根据交通部 1996 年发布的《塑料排水板施工规程》，排水板的施工质量主要从打设垂直度、平面位置的偏差和打设深度这三个方面来控制，垂直度与平面位置的控制在今后的施工中能较好地监控。

打设深度是排水板施工质量最重要的控制指标，也是最难控制的指标。《塑料排水板施工规程》规定，打设排水板的每根回带长度不超过 500 mm，回带总数量不超过打设总数量的 5%。目前国内施工控制一般采用的方法是在插管外做一定标记，用目测进行记录与控制，但这也只能保证插管是否到位，对于提管回带及土中排水板的实际长度无法确定，因而很难保证施工质量，且人为的因素较多；另一方面，目前工程的竞标压价的现象较为普遍，有些建设单位过于追求报价，而不顾工程实施的可行性，且转包层次过多，致使直接施工者根本无利可得，无心改进施工质量，甚至依靠偷工减料来维持。因此，完善监理制度和采用科学有效的打设深度检测方法是确保施工质量的可靠保证。目前一些工程已采用的排水板长度自动记录仪，可有效减少人为因素的影响，准确记录打设在土中的排水板，发现排水板长度不足或回带过多时可及时采取补救措施。

排水板长度记录仪作为一种新型的施工监测设备，目前应大面积推广应用，并完善施工规范，明确排水板施工必须有相应的记录设备，这对保证排水板处理软土地基这种技术的健康生存和发展具有重要意义。

6 发展趋势

塑料板排水法加固软土地基在我国虽然得到了广泛的应用，取得了很大的发展，但许多问题仍需进一步研究，主要表现在以下几个方面。

6.1 排水板材料及制作工艺研究

目前我国排水板的品种和材料质量和国外相比均具有较大的差距，且品种单一，应加快排水板更新换代的步伐，改进制作工艺，研制出满足不同要求与用途的各种规格和性能的排水板系列产品；提高产品质量，研制经济型粘合式排水板，淘汰缝合式排水板。

6.2 规范的完善与改进及施工质量监测设备的推广

两个行业标准的制定与实施对促进我国塑料板排水法加固软基技术提供了条件，但应注意总结实践经验，调查研究其不完善和不合理的地方，并结合国外有关标准，对规程和标准进行修改和完善，使其更好地服务、指导于工程实践。

施工质量存在的问题严重威胁塑料板排水法处理软土技术的生存和发展，应尽快制定相

关规程,使排水板施工检测设备在工程中得到充分应用,确保排水板的插设在有效的监控下进行。

6.3 加固设计的理论与方法研究

对设计中几个关键的问题应进一步开展理论分析与现场试验对比研究,如地基强度参数的确定;井阻与涂抹计算参数的实用计算方法;强度、沉降与稳定的计算等。

以往的地基处理设计大部分是按稳定控制考虑,而按控制工后沉降进行地基处理设计是发展的必然。因此,要进一步完善按控制工后沉降进行地基处理设计的设计理论与方法,特别是对深厚软土地基,下卧层主固结和整个地基次固结工后压缩量在地基工后沉降中占很大比例。应加强对下卧层主固结和整个地基次固结的最终压缩量及变形比随时间变化的计算理论和方法的研究。

参 考 文 献

- 1 Barron R A. Consolidation of fine grained soils by drain wells. Trans ASCE, 1948, 113: 718~724
- 2 Hansbo S. Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. Grd Eng, 1979, 12 (5): 16~25
- 3 Richart F E. A review of the theories for sand drains. Trans ASCE, 1957, 124: 709~736
- 4 汪肇京译. 垂直塑料排水板: 设计与施工. 1992
- 5 Hansbo S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Proc 10th ICSMFE, V. 3. Stockholm 1981, 677~682
- 6 塑料排水学术委员会. 第一届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集 1992
- 7 塑料排水学术委员会. 第二届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集 1994
- 8 塑料排水学术委员会. 第三届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集 1996
- 9 塑料排水学术委员会. 第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会论文集 1999
- 10 南京水利科学研究院. 真空预压法固结机理研究. 1986
- 11 Hansbo S, Jamiolkowski, Kok I. Consolidation by vertical drains. Geotechnique, 1981, 31 (1): 45~67
- 12 Atkinson M S, P J L Eldred. Consolidation of soils using vertical drains. Geotechnique, 1981, 31 (1): 33~45
- 13 Davies J A, C Humpheson. A comparison between the performance of two type of vertical drains beneath a trial embankment in Belfast. Geotechnique, 1981, 31 (1): 19~33
- 14 Singh G, T N Hattab. A laboratory study of efficiency of sand drains in relation to methods of installation and spacing. Geotechnique, 1979, 29 (4): 395~422
- 15 崔伯华. 京珠高速公路广珠东线某试验段软基加固效果分析. 见: 第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 1998
- 16 赵维炳, 施健勇. 软土固结与流变. 南京: 河海大学出版社. 1996
- 17 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算. 北京: 水利电力出版社. 1994
- 18 赵维炳. 主次固结简化计算方法. 水利学报. 1994

塑料排水板在天津港口建设中的研究和应用

张 敬

(天津港湾工程研究所 天津 300222)

摘 要 本文主要论述的是塑料排水板在港口建设中的研究应用和发展情况,重点介绍了塑料排水板真空预压加固软基的几个技术参数的选取,简要地介绍了天津港工程建设中几个典型实例的加固方法和效果,并对塑料排水板在海上的应用也做了简要的介绍,同时指出了目前海上塑料排水板应用的难度。工程的应用促进了塑料排水固结技术的进步和理论的发展,反过来又指导工程的应用。所以本文对工程设计、施工和检测都具有实用意义。

关键词 塑料排水板;真空预压法;排水固结;加固效果;港口建设。

1 综 述

排水固结法加固软粘土地基,由于其设计理论成熟,施工简便,质量控制手段可靠,造价低廉,已被广泛地应用在实际工程上。

排水固结法是由预压、排水系统组成的工法。预压手段主要有堆载预压、真空预压和真空联合堆载预压等,排水系统主要是普通砂井、袋装砂井和塑料排水板。预压方法中真空预压与堆载预压效果相同。在堆载材料相对缺少的地方,采用真空预压更具有优势。

在我国的港口工程中,20世纪50~60年代主要是采用水冲法或套管法加固堆场及码头岸坡;70年代引进了袋装砂井;80年代初,在河海大学与南京塑料厂合作生产出我国第一代SOB-1型塑料排水板后,天津港湾工程研究所研制出我国第一台专用TJB-16型步履式插板机;经天津港湾工程研究所、河海大学、天津港务局在天津港四港池后方堆场进行的塑料排水板堆载预压对比试验获得成功的基础上,塑料排水板才开始应用在码头堆场软基加固工程中。

80年代初,天津港建设中软基处理还是一个突出的难题,这里不但有大面积已吹填几年的软粘土需要加固,而且有大量的刚刚吹填的“超软基”急需处理,仅当时的天津港四港池3个集装箱泊位后方堆场和“七五”期间进行建设的东突堤10个泊位的后方堆场,需要加固的软基、超软基的面积就达130万 m^2 。为此,天津港务局委托天津港湾工程研究所在天津港进行了袋装砂井真空预压加固法的现场试验研究。研究结果表明,加固软粘土效果显著,从而使该项课题纳入国家“六五”科技攻关项目,获得了开展现场大规模试验研究工作的机会。与此同时,天津大学等单位进行了相应的机理研究,取得了成功。1985年12月7日,国家经委安排由交通部主持,对袋装砂井真空预压加固软粘土地基的科研成果进行了鉴定。

在此基础上,天津港湾工程研究所又对塑料排水板和袋装砂井排水效果进行了对比试验。

试验结果表明,当加固深度为 15 m 时,100 mm×4 mm 塑料排水板与 $\varnothing 7$ cm 袋装砂井等效。其后,塑料排水板在实际工程中开始大面积应用,并获得成功。首次加固面积达到 20 万 m²,塑料排水板打设深度 12.5 m。同时通过实际工程的应用发展,完善了塑料排水板打设机械与施工工艺,初步确定了设计方法。80 年代塑料排水板的应用主要集中在天津、广州、深圳、连云港等地港口建设中的大面积软基处理中。进入 90 年代以后,塑料排水板推广应用到全国各地,应用范围扩大到机场跑道、电厂、公路、铁路、工业与民用建筑等行业的地基加固工程中。

真空预压法的研究成功使塑料排水板的推广应用如虎添翼,迅猛发展。仅天津港地区,近 8 年来塑料排水板真空预压加固软土地基约 162 万 m²,塑料排水板使用量为 3 681 万延米;据粗略统计,而今真空预压塑料排水板加固港口软土地基已累计完成了近千万平方米,仅此一项,即已耗用塑料排水板近 1.5 亿延米。

从第一根塑料排水板试验应用至今已经 20 年了。在这 20 年中,塑料排水板从设计理论到施工机械及工艺,乃至质量监测方法等方面都得到了长足的发展,已形成了设计、施工、材料、质量检验规程、施工技术规程在内的成套技术,为塑料排水板的发展打下了良好的基础。它的开发应用引起了地基处理施工工艺、原材料市场的巨大变化,促进了相关产业的发展,具有显著的经济意义和广泛的社会意义。

2 塑料排水板在天津港的应用

2.1 超软基表面处理技术

天津港是我国最大的人工港口,整个港口几乎完全由海域挖泥吹填造陆形成。天津港区的地质结构是海相和陆相交错形成的。一般来说,港口天然滩涂为 +1.0~ -1.0 m,标高在 -20.0 m 以上为淤泥和淤泥质土,个别深槽可达 -36.0 m。如东突堤,其土质松软、压缩性高、含水量大,尤以 -14.0 m 以上为最明显。而港口陆域又要建在 +6.0 m 标高,因此一般软基加固的深度达 20 m。这里,从 -1.0~ +6.0 m(包括加固后沉降往往要求吹填高度高于 +7.0 m)如果是刚吹填不久,土的含水量常高于 80%,人上去没膝,部分则可齐腰甚至没顶——我们称它为“超软基”,加固深度从 10 m 增加到 20 m。怎样进入超软基的施工现场?怎样在超软基上设置排水通道?怎样使超软基加固深度达到 20 m?这都是在天津港建设中急需解决的问题。

超软基表层处理技术的研究就是为在超软基上进行正常的施工创造条件而开发的施工技术。以天津港东突堤为例,它的表层有 4 m 多的细颗粒吹填土,其中最上层 2 m 是仅用一年多的时间吹填起来的,晾晒时间不足半年,无法行人,更无法行走施工机械。因此,在进行软基加固之前,首先必须采取表层处理,以满足机械行走、运转要求。

1985 年,天津港湾工程研究所在东突堤西部对 6 种不同表层处理方案进行了现场试验,选定了荆芭砂垫层法(图 1a);在天津港东突堤陆域大面积加固施工中又对此加以改进,形成了经济、有效的荆芭砂石垫层法(图 1b)。

荆芭砂石垫层法是一种复合表层处理法。它既能充分发挥砂石垫层的应力扩散作用,又可以充分利用荆芭的刚性、抗拉作用,把松散的砂石材料连接成为一个可承载上部荷重的整体,使原地基承载力大大地提高。此外,由于垫层的排水作用,处理后的地基表层超软土可迅速固结,整体承载力可不断增长。超软地基用荆芭砂石垫层法处理后可立即铺设轻轨,行走门架式