

曾国熙教授科技论文选集

SELECTED WORKS ON SOIL MECHANICS OF
PROFESSOR ZENG GUO-XI

《 曾国熙教授科技论文选集 》 编委会

THE COMMITTEE OF THE SELECTED WORKS ON
SOIL MECHANICS OF PROFESSOR ZENG GUO-XI

中国建筑业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS



曾国熙教授科技论文选集

SELECTED WORKS ON SOIL MECHANICS
OF
PROFESSOR ZENG GUO-XI

《曾国熙教授科技论文选集》编委会
THE COMMITTEE OF THE SELECTED WORKS ON
SOIL MECHANICS OF PROFESSOR
ZENG GUO-XI



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

(京) 新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

曾国熙教授科技论文选集/《曾国熙教授科技论文选集》

编委会选编. —北京: 中国建筑工业出版社, 1997

ISBN 7-112-03303-9

I. 曾… II. 曾… III. 岩土工程-文集 IV. TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 10965 号

曾国熙教授在长达半个多世纪的高校教学和科研工作中, 坚持倡导以理论、室内外测试和工程实践相结合的指导思想, 为我国岩土工程的理论和实践做出了卓越的贡献, 造就和培养了一大批岩土工程专业骨干力量和高级人才, 是我国著名的岩土工程专家、学者、博士生导师。现从曾国熙教授发表的 118 篇学术论文中, 遴选出 20 篇, 结集出版, 供岩土工程专业的技术人员和师生阅读。

曾国熙教授科技论文选集

《曾国熙教授科技论文选集》编委会

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷 (北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$ 字数: 333 千字

1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月第一次印刷

印数: 1—1,000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-112-03303-9

TU·2545 (8448)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

谨以此书献给曾国熙教授
并祝贺他八十寿辰

编委会

《曾国熙教授科技论文选集》编委会

主任：龚晓南

委员：龚晓南 潘秋元 谢康和 朱向荣

前 言

曾国熙教授于1918年2月生于福建泉州。1943年毕业于厦门大学土木工程系，获工学学士学位。1950年于美国西北大学获硕士学位。1953年到浙江大学创建土工学教研室（后改为岩土工程研究所）。

曾国熙教授在长达半个多世纪的高校教学和科研工作中，坚持倡导以理论、室内外测试和工程实践相结合的指导思想，为我国岩土工程的理论和实践做出了卓越的贡献，造就和培养了一大批岩土工程专业骨干力量和高级人才，是我国著名的岩土工程专家、学者、博士生导师，在国际岩土工程界也有很高的声誉。

值此曾国熙教授八十寿辰之际，我们谨从他发表的118篇（截止1996年）学术论文中，遴选出20篇代表性的论文，汇编成《曾国熙教授科技论文选集》，并以此表达我们对曾国熙教授的衷心祝贺和敬意。

本论文集的出版得到中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会的资助，得到了中国建筑工业出版社及石振华编审和褚冬梅编辑的大力支持，浙江大学土木工程学系谢新宇博士、应宏伟、郭殊、李冰河、王欣等研究生为论文的收集和整理付出了辛勤劳动，在此一并表示感谢。

《曾国熙教授科技论文选集》编委会

1997年5月

曾国熙教授简历



曾国熙教授

曾国熙教授，1918年2月生，福建泉州人。1943年毕业于厦门大学土木工程系，获工学学士学位。早年留学美国专攻土力学，1950年获美国西北大学硕士学位。回国后任厦门大学副教授。1953年院系调整到浙江大学土木工程系任副教授、教授，曾任该系系主任。1981年经国务院批准为首批岩土工程专业博士生导师。曾兼任西安交通大学、华侨大学等六所大学和研究所的名誉教授或兼职教授、香港通达理中国建筑工程顾问公司等单位特级工程顾问或高级技术顾问。历任中国土木工程学会理事、中国建筑学会理事、中国土力学及基础工程学会副理事长，地基处理学术委员会主任委员等职，国际土力学及基础工程协会会员。

曾国熙教授从事高校教学科研五十余年，1990年获国家教委表彰。于1953年创立浙大土工学教研室（后改为岩土工程研究所），逐步形成为教学、科研和生产三者密切结合的基地。他一贯提倡对于土力学（或岩土工程）这一门应用学科在人才培养、科研和生产上都应以理论、室内外测试和工程实践三者密切结合作为指导思想。1996年岩土工程经国家教委批准为浙大重点学科之一。他指导已毕业的和在学的博士生分别有17名和16名（至1996年春）。

他长期从事软粘土力学和地基处理的科研工作。经常参加协助解决国内重要工程的地基问题，如为上海宝钢堆料场、金山石化总厂大型油罐、浙江杜湖水库和十字路水库土坝、宁波和温州机场跑道、深圳机场停机坪、蛇口第三突堤集装箱码头等的地基处理作出过贡献。在竖井排水地基的理论研究和工程实践方面历时三十余年，提出过固结度普遍表达式及其应用（含推荐沉降的指数三点法、固结系数反分析法、变速荷载下固结度计算法等）、新的固结理论、地基强度增长预计公式，以及他所指导的博士生发展的有关理论计算方法。在这方面有了较为完整的计算方法。此外他还提出过上埋式涵管土压力公式。这些计算方法已为有关手册和规范所采纳。

他和研究生在国内外重要刊物和学术会议论文集上发表了具有较高学术水平的论文100余篇。他曾多次出国参加国际会议和讲学。1979年首次赴意大利访问。1981年、1985年和1989年

分别赴瑞典斯德哥尔摩、美国旧金山、巴西里约热内卢连续参加第10、11和12届国际土力学及基础工程会议。有三篇论文被评选推荐参加会议,编入该三届会议论文集。1985年在日本名古屋和1988年在奥地利Innsbruck举行的第5届和第6届国际岩土力学中数值方法会议论文集上各发表了一篇论文。1987年出席在日本京都举行的第8届国际土力学及基础工程协会亚洲会议并发表了论文一篇和讨论一篇。美国土木工程师协会(ASCE)编辑出版的《中国岩土工程学报论文选编》(译为英文),收录论文共19篇,其中有他的论文两篇。

1988年他出席在美国奥兰多举行的第一届国际贯入试验研讨会,并在论文集中发表一篇论文(是中国学者唯一的一篇)。该文介绍他1950年在美国土工试验服务公司(STS)任工程师期间发明的袖珍贯入仪的历史。它是一种40余年来已为世界上许多国家普遍采用、使用简便的常规土工试验仪器。国内近年来已有若干厂家仿造,推广应用。美国STS及国内有的厂家对该仪器型号和单位符号均以曾氏命名。

近年来他也曾多次参加在我国举行的国际会议,为组织委员或技术委员会成员,多次担任分组主席,并宣读论文。中日岩土工程界于1989年4月在北京联合召开关于软弱地基的双边研讨会,他是发起人之一。双方各派出6名专家作报告,他是中方专家之一。

1982年曾国熙教授被指名代表浙江大学与以理查特教授为代表的美国密执安大学商谈建立关于土动力性质的合作研究。多年来两校一直保持经常的学术交流。1985年、1988年和1989年他三次访问密执安大学。并在该校和普渡大学、肯塔基大学、俄亥俄州立大学、伊利诺伊大学、西北大学、伊利诺伊理工学院等校讲学,并作为国际著名学者有一张照片陈列于普渡大学陈列室。1989年代表我国出席国际土力学及基础工程协会执委会。1987年应邀赴香港访问并在香港大学作专题报告。1990年应邀访问德国,并作学术报告。同年被特邀出席伊朗第一届国际土力学及基础工程国际研讨会,并宣读论文。1992年曾访问美国夏威夷大学土木工程系,同年再度访问意大利。

1978年他以软土地基设计计算理论和施工处理技术项目获全国科学大会奖。同年获水利电力部技术先进工作者奖。他以软粘土地基砂井排水固结及旋喷法技术项目于1985年获国家教委科技进步二等奖。1996年他参加的软土地基上大型机场跑道建造技术项目和软土地基竖井超载预压和非理想排水固结理论与应用项目分别获浙江省科技进步一等奖和国家教委科技进步二等奖。以他为主编之一的《地基处理手册》(中国建筑工业出版社,1988

年)是一本深受欢迎、十分畅销的科技书,1990年获全国优秀科技图书二等奖。他发表的论文多次获全国性、浙江省和杭州市优秀论文奖。1987年获美国西北大学“杰出校友”奖。1989年荣获国务院侨办、中华侨联优秀归侨知识分子奖。1997年以岩土工程博士生全面能力的高效培养模式获浙江省教委教学成果一等奖。

曾国熙教授的事迹已被十几种名人录所刊载,目前已正式出版的有

《浙江大学教授录》,浙江大学出版社,1990。

《中国当代名人录》,上海人民出版社,1991。

“The International Directory of Distinguished Leadership”, American Biographical Institute (世界名人录,美国传略研究所出版,1992)。

《中国当代教育名人传略》,香港未来中国出版社,1992。

《当代中国自然科学学者大辞典》,浙江大学出版社,1992。

《当代中国科技名人成就大典》,第三卷,福建科学技术出版社,1992。

《中国著名高等院校概况丛书》,《浙江大学》分册。

《中国当代高级专业技术人才大辞典》,中国华侨出版社,1994。

《浙江教育名人》,浙江教育出版社,1995。

《曾氏名人录》,1995。

《浙江大学教授录》,浙江大学出版社,1996。

编者

目 录

前 言

曾国熙教授简历

1. 砂井地基沉陷分析	1
2. 土坝下涵管竖向土压力的计算	34
3. 正常固结粘土不排水剪切的归一化性状	52
4. 软土地基固结有限元法分析	65
5. 具有各向异性和非匀质性的 $c-\phi$ 土上条形基础的极限承载力	78
6. 软粘土地基基坑开挖性状的研究	86
7. 多层各向异性地基的初参数解法	95
8. 水泥土桩复合地基固结分析	105
9. 考虑地基各向异性的沉降计算	111
10. 水泥搅拌桩的荷载传递规律	118
11. 竖井排水固结理论研究的若干进展	126
12. SOME ASPECTS OF SAND-DRAINED GROUND	140
13. GEOTECHNICAL ASPECTS OF SOFT CLAY UNDER TANKS	148
14. CONSOLIDATION ANALYSIS OF SAND-DRAINED GROUND BY F. E. M	155
15. THE USE OF STATIC PENETRATION AND POCKET PENETROMETER IN CHINA	162
16. ON THE SECONDARY DEFORMATION OF SOFT CLAY	167
17. DEFORMATION ANISOTROPY BEHAVIOUR OF SOFT CLAY	173
18. BACK ANALYSIS FOR DETERMINING NONLINEAR MECHANICAL PARAMETERS IN SOFT CLAY EXCAVATION	180
19. NEW DEVELOPMENT OF THE VERTICAL DRAIN THEORIES	188
20. ADVANCES IN DESIGN THEORIES FOR VERTICAL DRAINS	195
附录: 曾国熙教授科技论著总目录	205

砂井地基沉陷分析

浙江大学土木系 曾国熙 杨锡龄

提 要

本文主要利用五个方法来分析宁波铁路试验路堤和舟山渔业公司冷库两处砂井地基预压期间实测的沉陷-时间曲线。其目的在于检验推算方法并直接为工程服务。如舟山工程急于了解预压达到的固结度,以便确定卸载的日期。

上述五个方法中的第五个是根据固结度基本表达式 ($U=1-ae^{-\beta t}$) 而建立的。它不仅可以利用初期的沉陷-时间曲线推算最终沉陷 (s_{∞}), 还可以反分析由于地基侧向变形的沉陷部分 (s_d)、固结沉陷部分 (s_c) 以及固结系数 (c_v)。

前 言

砂井或砂桩一般常利用装有闭合的管尖的钢套, 先将其打入软弱地基中, 然后在套管中灌注砂料。如用活瓣管尖, 当套管上拔时, 活瓣张开, 砂料留于土中即成为砂桩。砂桩可分为挤实砂桩和排水砂桩 (即砂井) 两种类型。挤实砂桩主要是用以挤实砂性较大的软弱地基, 以提高其承载力。砂井主要是用以增加饱和软弱粘性土的排水途径, 使地基在荷载下加速固结, 并相应提高地基强度。挤实砂桩和砂井基本作用不同, 适用条件也不同, 施工方法大致相同。形式上的差异表现于间距, 挤实砂桩采用密间距, 为直径的 1.5~4 倍, 而砂井的间距常为直径的 7~10 倍。

铁道部为解决软土地区堆筑高路堤的稳定问题, 在宁波成立一基点试验组进行多种处理方法的试验研究, 其中砂井是一个主要项目, 试验结果证明砂井是一种处理饱和软粘土地基的有效方法。现已在多处推广应用。舟山冷库地基处理经多种方案比较后选定采用砂井和预压的方法, 现仍在预压期间, 从沉陷发展情况看来, 效果也是显著的。第一作者有机会参加这二项砂井工程设计施工中问题的研究讨论, 收获很大。

本文内容主要根据上述二项砂井工程的现场观测资料从理论上进行沉陷分析。一方面通过实例的计算分析, 来验证理论方法以及砂井的效果, 另一方面为生产单位提供计算分析结果。

本项研究工作在土木系党总支领导支持之下, 由曾国熙负责, 并经本教研组杨锡龄等同志参加讨论研究, 又得工民建五年级刘宣、孙去做、郑文德、河川四年级顾尧章等同学参加计算绘图工作, 我们谨以此集体劳动成果作为伟大建国十周年的献礼。

注: 本文刊于《浙江大学学报》, 1959 年第 3 期。

此次承铁道部宁波基点试验组、浙江省工业设计院及舟山渔业联合加工厂提供观测资料及试验和计算数据，藉此致谢。

因限于水平且时间匆促，不妥当或疏忽之处在所难免，尚祈各方面同志们指正。

一、砂井地基固结理论

砂井的平面布置有如图 1-1 (a)、(b) 所示的三角形和四方形两种排列，尤以前一种较为常用，因这种布置比较紧凑有效。在大面积的荷载下，每个砂井可设为独立排水作用。四方形排列的每个砂井的影响范围为一个四方形（图 1-1 (b)），三角形的排列即为一个六边形（图 1-1 (a)）。为方便起见，每个砂井的影响范围当为一个圆，其面积等于原来影响范围的面积，因此四方形排列中每个砂井的影响直径 d_e 应为：^[9]

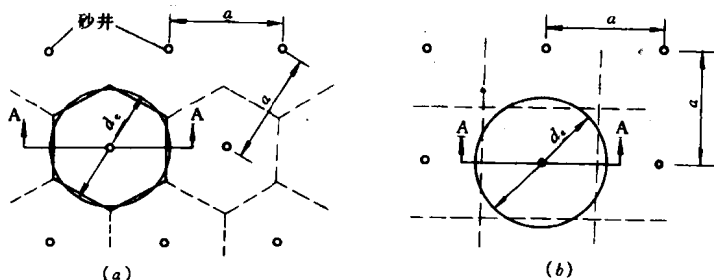


图 1-1 砂井平面布置图及影响范围土柱体剖面图

$$d_e = \sqrt{4/\pi} a = 1.128a$$

如为三角形排列，

$$d_e = \sqrt{2 \sqrt{3} / \pi} a = 1.050a$$

上二式中 a 为砂井间距。

当为上下两面排水的情况，每个砂井的影响范围内的饱和粘性土的固结排水途径如图

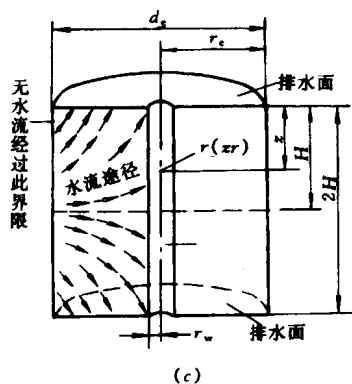


图 1-1 (c) A-A 剖面图

1-1 (c) 所示。砂井固结理论中有下列的一般假设条件：

- (1) 每砂井的影响范围在平面上为一个圆；
- (2) 在影响范围的面积上的荷载是均布的；
- (3) 土体仅有竖向压密变形；
- (4) 加荷开始时，所有竖向荷载全部由孔隙水超静压力所承受。

一维固结微分方程式如下式所示：^[1]

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

上式中表示饱和粘性土中任意深度为 z 的一点在固结过程中 t 时孔隙水超静压力 $u = f(z, t)$ ，其中竖向固结系数

$$c_v = k_v (1+e) / a_v \gamma_w$$

式中 k_v ——土的竖向渗透系数；

e ——孔隙比；

a_v ——竖向压缩系数；

γ_w ——水重度。

c_v 可由固结试验结果用半对数或时间平方根配合法决定之。

表为圆柱体坐标 z, r (图 1-1c) 的三维固结微分方程为：^{[6][1]}

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

当水平向的渗透系数 k_h 不等于竖向的渗透系数 k_v 时，则上式应改写为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right] + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1-3)$$

式中径向固结系数

$$c_h = k_h(1 + e)/a_v \gamma_w$$

式 (1-3) 可用变数分离法求解^[5]，即将它分为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right] \quad (1-4a)$$

和

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1-4b)$$

亦即分为径向固结和竖向固结。根据边界条件由以上两式分别解出径向固结的孔隙水压力 u_r 和竖向固结的孔隙水压力 u_z ，而 u_r 、 u_z 和总固结的孔隙水压力 u 应满足下式关系：^[5]

$$\frac{u}{u_0} = \frac{u_r}{u_0} \frac{u_z}{u_0} \quad (1-5)$$

式中 u_0 为开始孔隙水超静压力。

整个影响范围内土柱体的平均孔隙水超静压力亦应有同样关系：

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = \frac{\bar{u}_r}{\bar{u}_0} \frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_0} \quad (1-6)$$

或

$$1 - \bar{U}_{rz} = (1 - \bar{U}_r)(1 - \bar{U}_z) \quad (1-7)$$

式中 $\bar{U}_{rz}$ ——整个砂井影响范围内土柱体的平均总固结度；

$\bar{U}_r$ ——平均径向固结度；

$\bar{U}_z$ ——平均竖向固结度。

分别求得 $\bar{U}_r$ 和 $\bar{U}_z$ 然后代入式 (1-7)，即可求得总的平均固结度 $\bar{U}_{rz}$ 。一维的平均固结度的解见一般土力学书。^{[1][17]}

径向平均固结度 (即式 (1-4a) 的解) 仁杜立克 (Rendulic, 1935) 提出一种解法。^[2]后又经巴隆 (Barron, 1944-1948) 作了进一步发展。^{[3][4]}他们的解都系假设骤然一次加荷，但实际上都是逐渐加荷的，故必须修正。兹摘要介绍如下：

(一) 骤然加荷条件下径向固结理论公式

巴隆推导砂井径向固结理论公式时又分为自由应变和等应变两种条件。当砂井地基表面承受均布荷载时，如地基中各点的竖向变形是自由的，砂井附近土的固结必然要比远离砂井某点土的固结快，由于地基中各点固结速率不同，地基表面也应就会产生不均匀的沉降，并在地基土中引起剪切变形。自由应变的条件即系假设这些因素并不影响应力的分布及固结速率。但事实上这些因素会引起地基中应力一定程度的重新分布，其程度视压缩层

以上土层及加荷材料所发生起拱作用的大小而定。等应变条件即指起拱作用发展到使各点的竖向变形均相等无不均匀沉陷发生的程度。

巴隆分别解出上述两种条件的径向固结微分方程。自由应变条件的公式及计算比较繁难，且据理查特 (Richart, 1957) 的比较，^[8]两种条件固结时间 ($\bar{U}_r \sim T_h$) 曲线相差不大，特别是当井径比 $n (=d_e/d_w) > 10$ 时。 $n=5$ 的 $\bar{U}_r \sim T_h$ 曲线 (T_h -径向固结时间因子见下说明)，当 $\bar{U}_r \leq 50\%$ ，二者相差较大。但当 $\bar{U}_r > 50\%$ ，二条件的曲线渐趋吻合 (图 1-2)，因此本文只介绍等应变条件之下砂井径向固结微分方程 (式 1-4a) 的解：^[3]

离砂井轴线 r 处的孔隙水超静压力

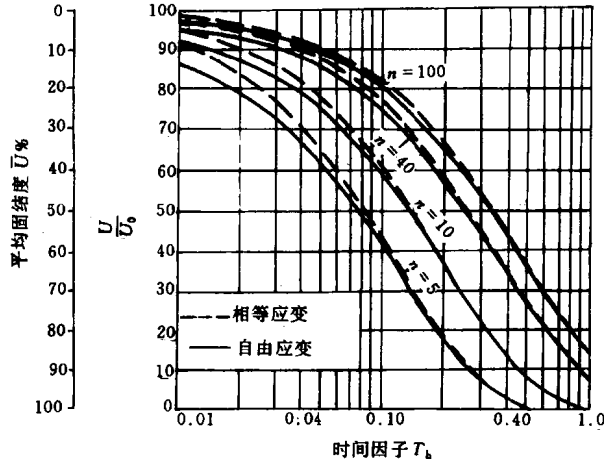


图 1-2 仅径向水流相等应变和自由应变的固结时间曲线

$$u_r = \frac{4\bar{u}_0}{d_e^2 F(n)} \left[r_e^2 \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right] \quad (1-8)$$

式中 d_e 、 r_e ——每一砂井影响范围的直径和半径 (图 1-1c)；

r_w ——砂井半径；

$$\bar{u}_r = \bar{u}_0 e^{-M} \quad (1-9)$$

式中 $\bar{u}_0$ ——开始孔隙水压力的平均值；

e ——自然对数底；

$$M = \frac{8}{F(n)} T_h \quad (1-10)$$

$$T_h = \frac{c_h}{d_e^2} t \quad (1-11)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (1-12)$$

式中 c_h ——径向固结系数；

t ——时间；

n ——井径比 $= \frac{d_e}{d_w}$ 。

由式 (1-9) 和 (1-10) 得

$$\ln\left(\frac{\bar{u}_r}{\bar{u}_0}\right) = -\frac{8}{F(n)}T_h$$

亦即

$$\ln(1 - \bar{U}_r) = -\frac{8}{F(n)}T_h \quad (1-13)$$

可知 $\frac{\bar{u}_r}{\bar{u}_0} \sim T_h$ 或 $\bar{U}_r \sim T_h$ 在半对数图上为一族直线, 如图 1-3 所示^[11], 利用这种图解在实际计算中就较方便, 图解 1-3 中同时表示竖向固结度 $U_z \sim T_v$ 关系,

$$T_v = \frac{c_v}{H^2}t \quad (1-14)$$

式中 H ——土层的排水距离(图 1-1c), 双面排水时 H 为土层厚度的一半, 单面排水时, 则为土层的厚度。

涂抹作用的影响

砂井施工时, 砂井周围的一圈土受了扰动或涂抹(Smear)作用, 其透水性减小, 也就影响了固结速率, 涂抹作用对于夹有粉砂薄层的粘土层的影响尤甚, 因这类土层 $k_h \gg k_v$, 受涂抹后砂井周围的一圈土的 k_h 大大减低, 也就影响了径向的固结。

巴隆还解出考虑到涂抹的影响自由应变和等应变二条件的径向固结微分方程(式 1-4a)的解^[4]。理查特曾根据巴隆解出的公式由数例来说明涂抹作用对固结度的影响有如减小砂井的直径。^[8]

涂抹作用对径向固结影响的程度视土的性质而定。据宁波基点试验组就当地土作重塑前后渗透系数试验比较, 二者几乎相等。对于这种土涂抹作用的影响可能不显著。

砂井阻力的影响

饱和粘性土层固结流向砂井的水流, 由于砂料的阻力, 将有一定水头损失。如水流甚大或砂井直径很小, 砂料的阻力就大。反之, 如水流小, 例如厚度不大的密致沉积层, 或砂井直径较大, 则砂料阻力小。为了减少砂井阻力, 砂料的透水性越大越好, 但同时又要要求砂料具有过滤作用, 以防止砂井周围的土颗粒被水冲洗带入砂井而淤塞, 砂井的过滤作用的要求对粉砂及夹有粉砂薄层的土层特别需要, 对于粘土此要求可以放宽。^[4]

巴隆还解出将砂井阻力考虑在内的径向固结微分方程^[4]。但据理查特的分析认为实际上井径比一般在 7 至 15, $\frac{d_e}{H} < 1.0$, 砂井阻力对固结的影响很小。

(二) 逐渐加荷条件下固结度的计算

根据骤然一次加荷的基本理论公式的计算结果再作修正, 修正方法有以下三种:

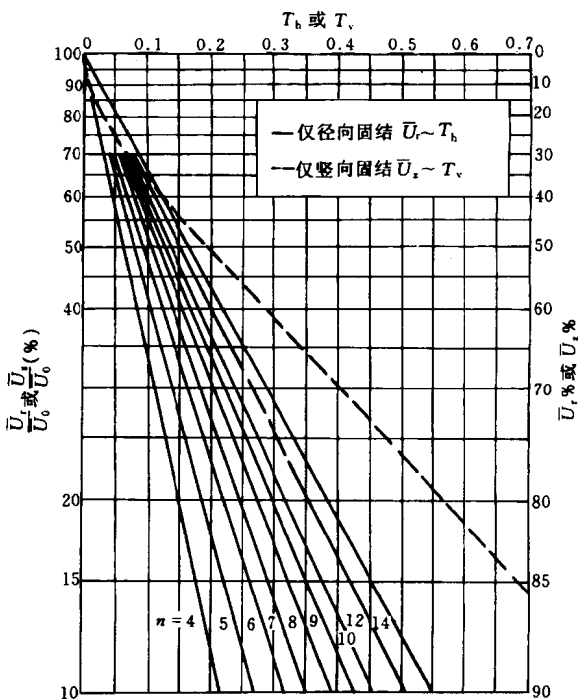


图 1-3 $\bar{U}_r \sim T_h$ 或 $\bar{U}_z \sim T_v$ 的关系

1. 太沙基-费兰利希修正法

太沙基和费兰利希对逐渐加荷条件下单向固结度提出三种荷载情况的修正方法^[1]，其中两种情况的修正方法对于砂井地基总固结度的修正还可适用，其方法如下：

(1) 等速加荷

根据固结理论公式先计算 $U \sim t$ 关系如图 1-4 (a) 中的 C' 曲线， t 时修正的固结度由下式计算：

$$U = U'_{\frac{t}{2}} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1-15)$$

式中 $U'_{\frac{t}{2}}$ ——未经修正 $U \sim t$ 关系当时间为 $\frac{t}{2}$ 时的固结度；

p_0 ——加荷完毕后的压力；

p ——相当于 t 时的压力。

同理按上式修正其他时间的固结度，修正后 $U \sim t$ 关系如图中曲线 C 。

(2) 多级加荷

如荷载成台阶形状 (图 1-4b)，可假设每级荷载 p_1 、 p_2 ……系骤然作用，并假设每级荷载单独作用所产生的固结如曲线 C_1 、 C_2 ……，将曲线 C_1 、 C_2 ……叠加则得修正的总固结曲线 C ，亦即

$$U = U_1 \frac{p_1}{p_0} + U_2 \frac{p_2}{p_0} + U_3 \frac{p_3}{p_0} + \dots \quad (1-16)$$

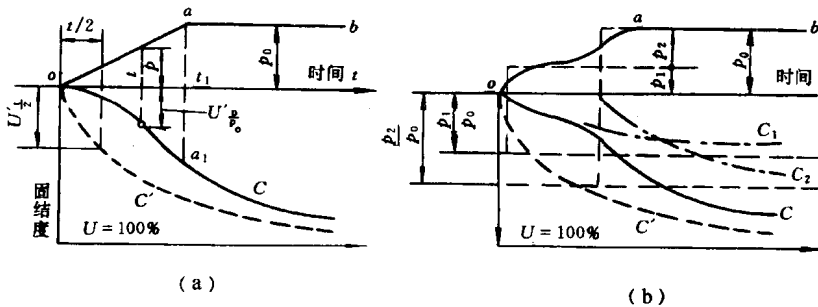


图 1-4 逐渐加荷固结时间曲线的绘制

2. 亨德生修正方法

亨德生 (Henderson, 1955) 对于砂井地基固结度修正提出和上法类似的方法如下：^[7]

竖向固结度：

$$U_z = U_{z1} \frac{p_1}{p_0} + U_{z2} \frac{p_2}{p_0} + U_{z3} \frac{p_3}{p_0} + \dots \quad (1-17a)$$

径向固结度：

$$U_r = U_{r1} \frac{p_1}{p_0} + U_{r2} \frac{p_2}{p_0} + U_{r3} \frac{p_3}{p_0} + \dots \quad (1-17b)$$

修正后的 U_z 、 U_r 代入式 (1-7) 即求得总固结度，上述方法系假设每级荷载在加荷期间的中点骤然一次施加的。

以后在实例分析中我们提出了一种类似的修正方法。

3. 竹治新助的修正方法

竹治新助根据巴隆的解，具体提出下列两种情况的修正方法：^[9]

(1) 等速加荷

如图 1-5 所示的等速加荷的条件之下，仅径向固结度由下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } 0 < t < T \quad \bar{U}_r &= \frac{t}{T} - \frac{1}{T}(D_0 - D_t) \\ \text{当 } t > T \quad \bar{U}_r &= 1 - \frac{1}{T}(D_{(t-T)} - D_t) \end{aligned} \right\} \quad (1-18a)$$

式中 T ——加荷经过时间，

$$D_t = D_{T_h} / (c_h / d_e^2) \quad (1-18b)$$

$$D_0 = D_{T_h=0} / (c_h / d_e^2) \quad (1-18c)$$

由 t 用式 (1-11) 计算 T_h ，再从图 1-6 查出 D_{T_h} ，然后由式 (1-18b) 计算 D_t ； $D_{T_h=0}$ 从图 1-6 中 $T_h=0$ 曲线在已知的 n 线交点查得。

(2) 变速连续加荷

如图 1-7 所示的变速连续加荷的情况下，径向固结度由下列各式计算：

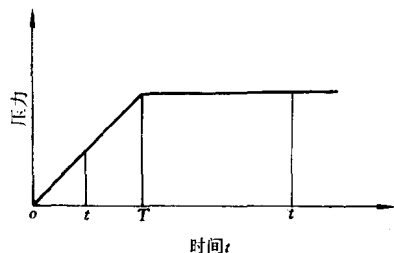


图 1-5 等速加荷

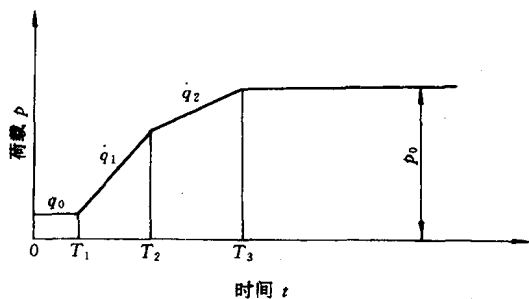


图 1-7 变速连续加荷

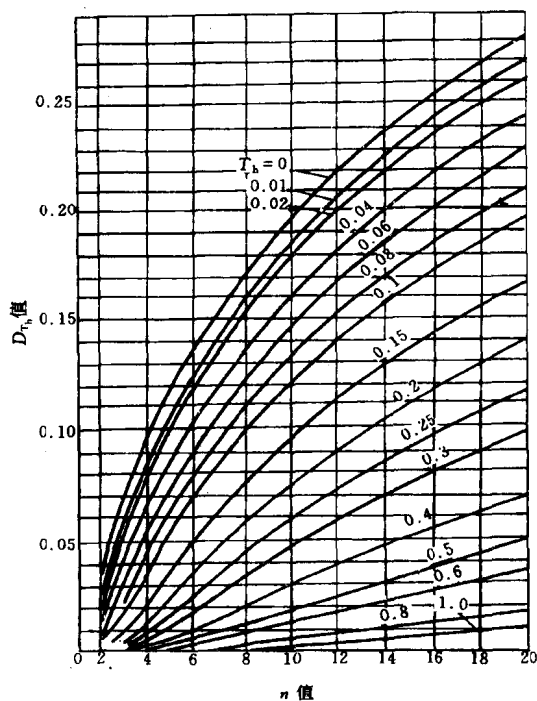


图 1-6 确定 D_{T_h} 值曲线

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } 0 < t < T_1 \quad \bar{U}_r &= \frac{q_0}{p_0} \bar{U}'_r \\ \text{当 } T_1 < t < T_2 \quad \bar{U}_r &= \frac{q_0}{p_0} \bar{U}'_r + \frac{q_1}{p_0} [t - T_1 - D_0 + D_{(t-T_1)}] \\ \text{当 } T_2 < t < T_3 \quad \bar{U}_r &= \frac{q_0}{p_0} \bar{U}'_r + \frac{q_1}{p_0} [T_2 - T_1 - D_{(t-T_2)} + D_{(t-T_1)}] \\ &\quad + \frac{q_2}{p_0} [t - T_2 - D_0 + D_{(t-T_2)}] \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$