

DIJI CHULI LILUN YU SHIJIAN XINJINZHAN

# 地基处理理论 与实践新进展

——第八届全国地基处理学术讨论会论文集

2004·长沙



龚晓南 俞建霖 主编

合肥工业大学出版社

# 地基处理理论与实践新进展 ——第八届全国学术讨论会论文集

2004·长沙

主编 龚晓南 俞建霖



合肥工业大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

地基处理理论与实践新进展:第八届全国地基处理学术讨论会论文集/龚晓南,俞建霖主编.

—合肥:合肥工业大学出版社,2004.10

ISBN 7-81093-148-2

I. 地... II. ①龚...②俞... III. 地基处理—学术会议—文集 IV. TU472-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 103777 号

### 地基处理理论与实践新进展

主编 龚晓南 俞建霖 责任编辑 孟宪余 权 怡

---

|        |                                   |
|--------|-----------------------------------|
| 出 版    | 合肥工业大学出版社                         |
| 地 址    | 合肥市屯溪路 193 号                      |
| 电 话    | 总编室:0551-2903038 发行部:0551-2903198 |
| 版 次    | 2004 年 10 月第 1 版                  |
| 印 次    | 2004 年 10 月第 1 次印刷                |
| 开 本    | 787×1092 1/16                     |
| 印 张    | 33.25 字 数 885 千字                  |
| 发 行    | 全国新华书店                            |
| 印 刷    | 合肥现代印务有限公司                        |
| 邮 编    | 230009                            |
| 网 址    | www.hfutpress.com.cn              |
| E-mail | press@hfutpress.com.cn            |

---

ISBN 7-81093-148-2/TU·8

定价:98.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

# 第八届全国地基处理学术讨论会

2004. 10. 22~2004. 10. 27 · 长沙

主办单位:中国土木工程学会土力学及岩土工程分会地基处理学术委员会

承办单位:湖南大学土木工程学院

协办单位:湖南省交通规划勘察设计研究院

长沙理工大学岩土工程研究所

株洲工学院土木工程系

赞助单位:北京燕化石油化工股份有限公司塑料分公司

会议组委会(按拼音排序):

陈昌富 龚晓南 韩树强 侯伟生 邝健政 刘 波 刘 杰

潘秋元 彭大用 彭建国 史存林 滕延京 王桂尧 王吉望

杨晓东 叶柏荣 叶观宝 俞建霖 张永钧 张在明 赵明华

周国然

# 前 言

第八届全国地基处理学术讨论会于2004年10月22日至27日在湖南省长沙市枫林宾馆召开。会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会地基处理学术委员会主办,湖南大学土木工程学院承办,湖南省交通规划勘察设计院、长沙理工大学岩土工程研究所和株洲工学院土木工程系共同协办。本次会议还得到了北京燕化石油化工有限公司塑料分公司的赞助。

本届会议是继第一届(上海宝钢,1986)、第二届(山东烟台,1989)、第三届(河北秦皇岛,1992)、第四届(广东肇庆,1995)、第五届(福建武夷山,1997)、第六届(浙江温州,2000)、第七届(甘肃兰州,2002)全国地基处理学术讨论会之后的又一次盛会。来自全国各行业的地基处理专家、学者、工程技术人员和有关厂家的代表会聚一堂,交流地基处理工程勘察、设计计算、施工技术、施工机械和现场测试等方面的理论和经验,介绍新材料、新产品和新工艺的开发和应用,讨论如何进一步发展和提高我国地基处理水平,更好地为国家经济建设服务。

本届讨论会应征论文的审查工作于2004年3月在杭州举行。铁道部第四勘测设计院软土地基研究所郑尔康、浙江大学龚晓南和俞建霖参加了论文审查工作。浙江大学岩土工程研究所博士生金小荣、王哲、丁洲祥、孙林娜,硕士生刘红岩、江璞等同志为论文的征集做了许多工作,在此表示感谢。

会议共收到论文114篇,经审查后录用100篇,内容包括基础理论,排水固结,振密、挤密(强夯、强夯置换、碎石桩、灰土桩),灌入固化物(深层搅拌法、高压喷射注浆法、灌浆法),加筋(土工合成材料),刚性桩复合地基和长短桩复合地基,桩基工程,基坑工程,托换与纠倾及其他共9个专题。论文集的内容反映了当前我国地基处理领域的主要成就和发展水平,可供同行们参考。限于我们的能力和水平,缺点和错误在所难免,希望作者和读者批评指正。

编 者

2004年6月

# 目 录

## 基础理论

01. 粘弹性未打穿竖井地基近似固结分析 ..... 赵维炳 黄家青 刘加才 (3)
02. 深厚软土双层地基超载预压固结理论及工程应用 ..... 郝玉龙 方兴华 帅志杰 李吉林 (8)
03. 确定路基岩溶顶板安全厚度的强度折减流形元方法分析 ..... 曹文贵 赵明华 程 晔 (16)
04. 垫层对复合地基桩土应力比的影响 ..... 张 宏 石名磊 赵俊明 (21)
05. 深层搅拌桩施工引起的周围土体的孔隙水压力 ..... 沈水龙 蔡丰锡 许焯霜 三浦哲彦 (26)
06. 强夯地基加固深度相似研究 ..... 赵抚民 李晓路 (31)
07. 山区填土地基处理技术与检测方法探讨 ..... 陆 新 丁振洲 郑颖人 (37)
08. 路堤下复合地基沉降影响因素有限元分析 ..... 李海芳 龚晓南 黄 晓 (44)
09. 明特林应力公式法计算桩基沉降经验系数之探讨 ..... 林 柏 施 展 丁文湘 朱向荣 (50)
10. 单桩水平动力阻抗的简化分析方法 ..... 陈 斌 刘 忠 姜 坚 (55)
11. 膨胀土单向浸水膨胀规律的试验研究 ..... 肖宏彬 范臻辉 王永和 刘 杰 (59)

## 排水固结

12. 真空联合堆载预压加固软土地基的影响区分析 ..... 朱建才 温晓贵 龚晓南 李文兵 (67)
13. 预压法在工程中的应用 ..... 施建勇 赵维炳 雷国辉 艾英钵 吴跃东 (72)
14. 动力排水固结法在处理软粘土地基中的应用 ..... 雷学文 王吉利 孟庆山 (76)
15. 真空预压排水固结法加固条形软基效果 ..... 杨国强 宋庆华 杨建洪 (80)
16. 未打穿砂井底部效应与大型地基模拟装置 ..... 唐晓武 张来芳 许 峰 林松金 (86)

## 振密、挤密(强夯、强夯置换、碎石桩、灰土桩)

17. 大面积深厚杂填土地基处理技术 ..... 刘焕存 王艳军 张建青 (93)
18. 某住宅区地基处理设计方案 ..... 李书伟 (100)
19. 强夯处理新近回填饱和软粘土地基的工程应用 ..... 张 英 (104)
20. 浅谈强夯法加固吹填砂江滩地中的试验研究 ..... 赵文社 郭元科 (111)
21. 某库区工程采用强夯进行地基处理的效果分析 ..... 黄生根 龚维明 唐治军 (119)
22. 非自重湿陷性场地的复合地基方案 ..... 张厚先 吕 广 (122)
23. 干振碎石桩在新近填土地基加固中的应用 ..... 张 英 (126)
24. 碎石桩复合地基的应力测试 ..... 沈锦儒 (131)
25. 扬州第二发电厂桩基设计及抗液化地基处理 ..... 王 勇 郭元科 (136)
26. 灰土挤密桩加固处理湿陷性黄土地基的工程应用 ..... 张 英 (143)

## 灌入固化物(深层搅拌法、高压喷射注浆法、灌浆法)

27. 水泥土搅拌桩处置连云港地区滨海相软土地基的工艺研究  
..... 叶观宝 徐 超 邹允祥 胡银宝 朱向阳 马冬梅 蔺宁君 (149)
28. 水泥搅拌桩加固高速公路高含水量深厚软基现场试验研究  
..... 高明生 唐彤芝 赵维炳 袁宏义 (157)
29. 深层搅拌桩施工引起周围土体的劈裂 ..... 沈水龙 许焯霜 蔡丰锡 三浦哲彦 (164)
30. 回填土作用下水泥搅拌桩的破坏机理 ..... 安春秀 (170)
31. 粉体喷搅法复合地基试验研究 ..... 刘兴录 钟景文 杨继程 李罗刚 (174)

## 32. 粉喷桩强度的时效性试验研究

..... 黄富华 盛文兰 黄洪兵 周泊锐 黄卫东 赵宪国 洪志强 (178)

## 33. 粉喷桩及复合桩在复杂软基的应用和试验 .....

..... 邓亚光 张文彬 顾名杰 (183)

## 34. 深层水泥搅拌桩复合地基工程质量若干问题的反思

..... 杨典智 方 诚 夏才安 张 豪 邱良佐 (189)

## 35. 浅基础及水泥土搅拌桩基础在同一建筑物中的变形控制 .....

..... 吴敏捷 喻丽华 (193)

## 36. 水泥搅拌桩复合地基设计中的若干误区 .....

..... 黄祥鏊 (197)

## 37. 连云港地区滨海相软土室内水泥土配比试验研究

..... 徐 超 叶观宝 邹允祥 胡银宝 朱向阳 马冬梅 蔺宁君 (204)

## 38. 软土地基可控性压密注浆(CCG工法)的研究与应用 .....

..... 黄均龙 张冠军 谢 彬 (208)

## 39. 打入花管拔管灌浆法在处理红粘土地基局部软土中的应用 .....

..... 王振华 (211)

## 40. 高压喷射注浆在桥梁深水低桩承台施工中的应用 .....

..... 赵文艺 郑俊杰 赵桂林 (219)

## 41. 润扬长江大桥深基坑高压旋喷防渗墙 .....

..... 张志山 张义东 李和山 查振衡 (224)

## 42. 新二管法高压旋喷加固某船坞软土 .....

..... 李和山 张 震 王圣忠 查振衡 (229)

**加筋(土工合成材料)**

## 43. 土工格室+碎石桩复合地基加固机理及受力特性研究

..... 陈昌富 赵明华 杨宇 杨明辉 陈艳平 (237)

## 44. 土工格室垫层+碎石桩复合地基承载机理及设计方法研究

..... 杨明辉 赵明华 吴亚中 陈艳平 (242)

## 45. 土工格栅在城市道路软基处理中的应用 .....

..... 吴 颖 (248)

**刚性桩复合地基和长短桩复合地基**

## 46. 桩方法处理桥头跳车问题试验研究 .....

..... 刘晓明 赵明华 陈昌富 (253)

## 47. 桩承土工加筋复合地基设计探讨 .....

..... 鲁长亮 黄生文 朱树彬 (258)

## 48. 预应力管桩在沪宁高速公路HN-E1、HN-E2标段路基拓宽工程中的应用

..... 陈国臻 杜长军 (264)

## 49. 高速公路软土路堤的稳定性控制 .....

..... 胡汉兵 (270)

## 50. 刚性桩复合地基承载力修正问题探讨 .....

..... 赵占山 梁耀哲 (274)

## 51. 基于既有桩基的复合地基设计实践 .....

..... 夏力农 王星华 贺春发 (276)

## 52. 淤泥填石区“强夯+CFG桩”地基处理设计与施工实践 .....

..... 雷 斌 王勇强 (280)

## 53. 花岗岩残积土复合地基设计与检测结果分析 .....

..... 左人宇 周洪涛 (286)

## 54. CM桩复合地基承载力计算方法与载荷试验研究 .....

..... 邹新军 赵明华 (291)

## 55. 多层复合地基试验研究 .....

..... 王维玉 王冬波 (296)

## 56. 长短桩复合地基优化设计方法探讨 .....

..... 陈昌富 肖淑君 (300)

## 57. 刚-柔性长短桩复合地基在椒江地区的应用 .....

..... 谢新宇 程 功 刘海涛 刘一林 (305)

**桩基工程**

## 58. 超长直径桩桩端注浆机理探讨 .....

..... 龚维明 李昌取 黄生根 (313)

## 59. 岩溶区桩基设计施工处理方法研究 .....

..... 程 晔 赵明华 曹文贵 (319)

## 60. 广州溶洞区桩基施工措施探讨 .....

..... 安关峰 廖雄华 (324)

## 61. 合肥地区软岩大直径嵌岩桩桩端阻检测方法及特性 .....

..... 曹光暄 李 彪 马金龙 (327)

## 62. 振动沉管人工扩底灌注桩的施工 .....

..... 赵福民 (330)

## 63. 粉土、粉砂土层中提高钻孔灌注桩单桩承载力途径的探索

..... 吕 猛 夏才安 韩万红 丁建江 邱良佐 (333)

## 64. PHC桩竖向抗拔静载试验 .....

..... 苏振明 陈拥军 (337)

## 65. 工程沉桩对周围环境影响的监测 .....

..... 朱 奎 王品海 (342)

66. 高层建筑打桩工程对邻近建筑物的影响与对策 ..... 盛忆寒 陈元元 姚戈平 (346)
67. 桩基施工对环境影响的分析处理 ..... 刘子超 (349)
68. 某工程预应力混凝土管桩倾斜断裂的处理 ..... 倪宏演 付 强 (353)
69. 某桩基础工程质量事故分析与处理 ..... 黄舜涛 (356)
70. 某仓灌注桩失稳原因分析 ..... 刘彦斌 张素红 黄奇勤 (361)
71. 浅谈钻孔灌注桩桩底注浆技术的应用 ..... 庞英杰 朱来星 (365)

## 基坑工程

72. 锚管桩复合土钉支护机理分析 ..... 张旭辉 董福涛 龚晓南 施晓春 (371)
73. 西湖文化广场超大超深基坑支护监控分析  
..... 顾仲文 廉 俊 王彬 柴如飞 黄啸蔚 潘 力 (375)
74. 负孔压消散对围护结构侧压力的影响 ..... 李玉岐 谢康和 应宏伟 (379)
75. 基坑降水对周围环境影响的有限元分析 ..... 陈湧彪 祝哨晨 金小荣 俞建霖 龚晓南 (383)
76. 地下连续墙围护形式下的深基坑水下封底技术 ..... 谢 非 (389)
77. 复杂地质条件中圆形超深基坑的支护工程实例 ..... 华锦耀 吴才德 (395)
78. 土钉喷锚体系在深基坑围护中的应用实例分析 ..... 戴志中 (401)
79. 深基坑土钉墙围护结构的变形及稳定控制 ..... 周朝怀 王文豪 周美芳 (406)
80. 扇形深基坑支护施工实例 ..... 陈时金 (411)
81. 深圳宝安新中心区软土地基处理和基坑围护设计中的若干问题 ..... 张 俊 杨志银 (415)
82. 齐鲁商会深基坑支护方案的优化与选择 ..... 王明森 安凯军 王洪恩 (419)
83. 万昌大厦工程基坑围护施工实例分析 ..... 王秀文 俞建霖 (426)
84. 拉锚式沉管桩作基坑支护的施工实例 ..... 朱永明 (429)
85. 吴山商城 D 地块基坑围护设计与施工 ..... 李冰和 刘兴旺 施祖元 益德清 (433)
86. 深厚软土地地区基坑工程设计实践的思考 ..... 姚炳祥 叶向前 岑仰润 (437)

## 托换与纠倾及其他

87. 经地基处理后的油罐基础的纠偏加固 ..... 何国富 张连中 (443)
88. 西南地区泥炭土地基加固技术 ..... 黄 俊 (450)
89. 润扬长江公路大桥北接线工程地质条件综述及软土地基处理  
..... 徐春明 高建新 陈国臻 卢天竺 (459)
90. 高纬度多年冻土区既有铁路病害浅析 ..... 李 程 宋国荣 (465)
91. 岩土工程中的安全问题探讨 ..... 杜 先 王直民 刘志祥 张土乔 (471)
92. 软岩边坡滑坡治理工程中综合手段的应用 ..... 徐国民 杨金和 李树琼 (476)
93. 某别墅区滑坡的综合治理及效果分析 ..... 俞建霖 岑仰润 金小荣 龚晓南 陆振华 (481)
94. 高边坡工程支护施工技术 ..... 马书识 金志宝 黄 晓 (485)
95. 大体积及超长混凝土结构裂缝控制措施 ..... 杨洪福 伊晓霞 (490)
96. 四车道大跨公路隧道穿过既有公路浅埋暗挖方案的确定和施工  
..... 阮建中 史文杰 曾建雄 段 晴 (493)
97. 浅述高频液压振动锤的特点及国内外概况 ..... 李 劲 王进怀 (499)
98. 位于地下室中的塔吊基础设计及施工 ..... 郑定芳 励慧杰 (505)
99. 平流沉淀池沉降裂缝事故的分析处理 ..... 姚 渊 (511)
100. 堤围加固软土地基处理实例 ..... 张芳枝 吴煌峰 (514)



# 基础理论



# 粘弹性未打穿竖井地基近似固结分析

赵维炳<sup>1</sup>, 黄家青<sup>2</sup>, 刘加才<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院土工研究所, 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程研究所, 南京 210098)

**摘 要** 根据竖井地基加固机理, 将未打穿竖井地基划分为竖井打设区和下卧层。竖井打设区按轴对称固结理论计算, 下卧层按一维固结理论计算。利用渗透面上平均孔压连续条件, 提出了基于麦钦特流变模型的未打穿竖井地基固结度近似计算方法。用该方法对一工程算例进行了分析, 结果表明下卧层固结速度明显慢于竖井打设区, 土体的粘滞性对下卧层平均固结度影响较大, 在实际竖井地基设计中应引起重视。

**关键词** 竖井; 地基; 固结; 粘弹性; 流变模型

## 一、前言

排水固结方法在堆场、码头以及高速公路的软基处理中应用较为广泛。软土一般具有流变特性, 对其应力变化、变形、强度和固结等均有影响。随着人们对土体流变特性的认识, 一些学者将流变模型引入到固结理论中, 如陈宗基<sup>[1]</sup>、Lo<sup>[2]</sup>、钱家欢<sup>[3]</sup>、赵维炳<sup>[4]</sup>、蔡袁强<sup>[5]</sup>等利用流变模型对一维固结问题进行了研究; 郭志平、赵维炳<sup>[6-7]</sup>、刘兴旺<sup>[8]</sup>、王瑞春<sup>[9]</sup>等则对均质打穿竖井地基的粘弹性问题进行了研究。实际工程中, 由于软土较为深厚或者其他原因, 有时会出现竖井未打穿软土层的情况。由于竖井未打穿情况较为复杂, 关于这方面的研究一般是借助数值计算方法进行的。Tang, et al<sup>[10]</sup>将土体视为线弹性体, 提出了考虑竖井打设区和下卧层相互影响的固结解析解。但关于竖井未打穿情况下的粘弹性固结问题的研究, 较少有文献提及。由于该问题较难直接获得其解析解, 即便通过对求解问题进行简化获得其解答, 表达式也较为复杂, 不便于工程应用。本文采用Merchant流变模型, 对竖井未打穿地基的固结问题进行了简化, 提出了考虑粘弹性时的近似固结分析方法。该方法可以满足工程精度, 并且为显式表达式, 应用较为方便。最后对利用该方法对一工程算例进行了分析。

## 二、竖井未打穿软土地基近似固结分析

### (一) 计算简图

图1为未打穿竖井地基, 竖井打设深度为 $H_1$ , 下卧层厚度为 $H_2$ , 软土总厚度为 $H = H_1 + H_2$ 。 $k_h$ 为土体水平向渗透系数;  $k_v$ 为土体竖直向渗透系数;  $k_s$ 为竖井打设区内涂抹区的渗透系数;  $k_w$ 为竖井的渗透系数。 $r_e$ 为等效排水半径;  $r_s$ 为涂抹半径;  $r_w$ 为砂井半径。土体竖直向固结系数为 $C_v$ ; 水平向固结系数为 $C_h$ 。竖井井顶部为排水面, 下卧层底部为不排水面, 或排水面。

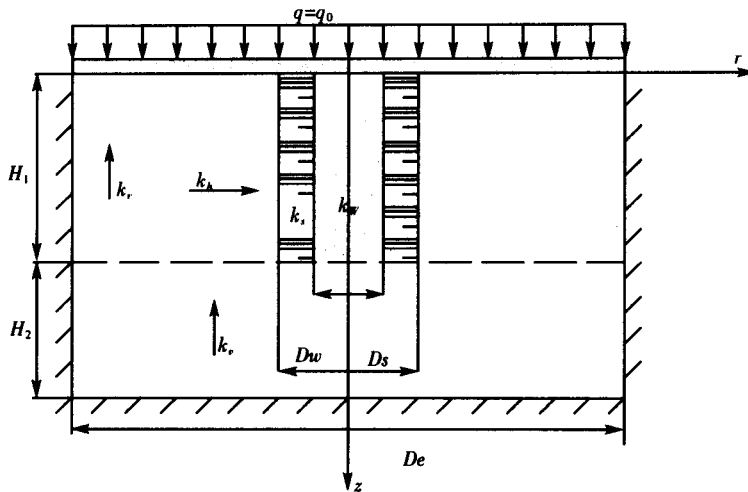


图1 未打穿砂井地基计算简图

图2为 Merchant 流变模型示意图,在应力不变条件下,应变随时间的关系为  $\epsilon = \sigma \delta(t)$ ,柔度函数  $\delta(t)$  为:

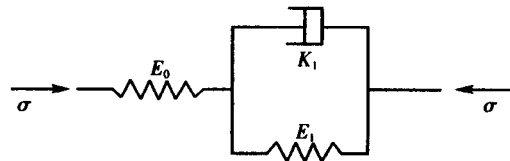


图2 Merchant 流变模型

$$\delta(t) = a_0 [1 + a_1 (1 - \exp(-\eta_1 t))] \quad (1)$$

式中  $a_0 = 1/E_0$ ,  $a_1 = E_0/E_1$ ,  $\eta_1 = E_1/K_1$ 。

## (二) 控制方程及求解条件

对于竖井打设区,采用 Merchant 流变模型,等应变条件下满足如下方程:

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial z^2} = 3(1-2v) \left[ \delta(0) \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial t^2} + \int_0^t \frac{\partial^2 \bar{u}_1}{\partial \tau^2} \frac{d\delta(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau \right] \quad 0 \leq z \leq H_1$$

下卧层基本上仅发生竖向排水,用一维固结理论研究下卧层的孔压消散产生的误差较小,设深度  $z$  处的孔压为  $u_2$ ,按一维太沙基固结理论进行,下卧层满足如下控制方程。

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} = \frac{1-v}{1-v-2v^2} \left[ \delta(0) \frac{\partial u_2}{\partial t} + \int_0^t \frac{\partial u_2}{\partial \tau} \frac{d\delta(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau \right] \quad H_1 < z \leq H$$

由于下卧层对竖井打设区的固结影响较小,竖井打设区仍可按打穿砂井地基求解,设深度  $z$  处的平均孔压为  $\bar{u}_1$ 。砂井打设区与下卧层在渗透面上满足孔压连续条件,即在  $z = H_1$  处满足  $\bar{u}_1 = u_2$ 。赵维炳推导出了考虑井阻、涂抹以及径竖向组合作用下打穿竖井地基任一深度处的粘弹性平均孔压解为<sup>[7]</sup>:

$$\bar{u} = u_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} \left( \frac{K_m + x_2}{x_2 - x_1} \exp(x_1 t) - \frac{K_m + x_1}{x_2 - x_1} \exp(x_2 t) \right) \quad (2)$$

$$x_{1,2} = -\frac{1}{2} \left[ (K_m + \eta_1 + a_1 \eta_1) \pm \sqrt{(K_m + \eta_1 + a_1 \eta_1)^2 - 4K_m \eta_1} \right] \quad (3)$$

$$k_m = \frac{1}{3(1-2v)a_0\gamma_w} \left[ \frac{M^2 k_v}{H^2} + \frac{M^2 n^2 \mu}{M^2 n^2 \mu + (n^2 - s^2)G} \frac{2k_h}{r_s^2 \mu} \right] \quad (4)$$

式中,  $M = \frac{2m+1}{2}\pi, m = 0, 1, 2, \dots, \mu = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s$ 。

此时, 竖井打设长度为  $H_1$ , 竖井底部平均孔压为:

$$f(t) = u_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin(M) \left( \frac{K_m + x_2}{x_2 - x_1} \exp(x_1 t) - \frac{K_m + x_1}{x_2 - x_1} \exp(x_2 t) \right) \quad (5)$$

单独将下卧层拿出来研究, 此处研究底部不排水情况, 属于 PTIB 类型。底部排水情况可仿照底部不排水情况求解。下卧层的边界条件为:

$$\bar{u} \Big|_{z=H_1} = u_2 \Big|_{z=H_1} \quad \frac{\partial u_2}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \quad (6)$$

初始条件为:

$$u_2 \Big|_{t=0} = u_0 = q_0 \quad (7)$$

该问题即为求如下定解问题:

$$\begin{cases} \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} = \frac{1-\mu}{1-\mu-2\mu^2} \left[ \delta(0) \frac{\partial u_2}{\partial t} + \int_0^t \frac{\partial u_2}{\partial \tau} \frac{d\delta(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau \right] & H_1 < z \leq H \\ u \Big|_{z=H_1} = u_1 \Big|_{z=H_1} = f(t) & \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \\ u \Big|_{t=0} = u_0 \end{cases} \quad (8)$$

### (三) 问题求解

令  $u_2 = w^* + w$ ,

$$w^* = u_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{m} \sin(m) \frac{\cos[D_m(z-H)]}{\cos[D_m H_2]} \left( \frac{K_m + x_2}{x_2 - x_1} \exp(x_1 t) - \frac{K_m + x_1}{x_2 - x_1} \exp(x_2 t) \right)。$$

式中,  $D_m = \sqrt{a_0 \gamma_w K_m (1-v) / [(1-v-2v^2)k_v]}$ 。则原定解问题变为:

$$\begin{cases} \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{1-v}{1-v-2v^2} \left[ \delta(0) \frac{\partial w}{\partial t} + \int_0^t \frac{\partial w}{\partial \tau} \frac{d\delta(t-\tau)}{d(t-\tau)} d\tau \right] & H_1 < z \leq H \\ w \Big|_{z=H_1} = 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \\ w \Big|_{t=0} = u_0 - u_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{m} \sin(m) \frac{\cos[D_m(z-H)]}{\cos[D_m H_2]} = g(z) \end{cases} \quad (9)$$

该问题的解为:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{N(z-H_1)}{H_2}\right) \left( \frac{K'_n + x'_2}{x'_2 - x'_1} \exp(x'_1 t) - \frac{K'_n + x'_1}{x'_2 - x'_1} \exp(x'_2 t) \right) \quad (10)$$

式中,  $x'_{1,2} = -\frac{1}{2} \left[ (K'_n + \eta_1 + a_1 \eta_1) \pm \sqrt{(K'_n + \eta_1 + a_1 \eta_1)^2 - 4K'_n \eta_1} \right], K'_n = \frac{N^2 k_v}{\gamma_w H_2^2 a_0} \frac{1-v-2v^2}{1-v},$

$n = (2n+1)\pi/2, n = 0, 1, 2, \dots, A_n$  可按级数展开求得, 整理后可得:

$$A_n = \frac{2u_0}{N} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\sin(M_0)}{M} \frac{-D_m^2 H_2^2}{N^2 - D_m^2 H_2^2} \quad (11)$$

最后可求得定解问题(8)的解为:

$$\begin{aligned} u_2 = & u_0 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \sin(M) \frac{\cos[D_m(z-H)]}{\cos[D_m H_2]} \left( \frac{K_m + x_2}{x_2 - x_1} \exp(x_1 t) - \frac{K_m + x_1}{x_2 - x_1} \exp(x_2 t) \right) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(\frac{N(z-H_1)}{H_2}\right) \left( \frac{K'_n + x'_2}{x'_2 - x'_1} \exp(x'_1 t) - \frac{K'_n + x'_1}{x'_2 - x'_1} \exp(x'_2 t) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

孔压求出后,平均固结度随之可以求出:

$$\bar{U} = 1 - \frac{\int_{H_1}^H u_z dz}{H_2 u_0} = 1 - \frac{1}{u_0} \sum_{n=0} \frac{A_n}{N} \left( \frac{K'_n + x'_2}{x'_2 - x'_1} \exp(x'_1 t) - \frac{K'_n + x'_1}{x'_2 - x'_1} \exp(x'_2 t) \right) - \frac{1}{H_2} \sum_{m=0} \frac{2 \sin(M)}{M} \frac{\lg(D_m H_2)}{D_m} \left( \frac{K_m + x_2}{x_2 - x_1} \exp(x_1 t) - \frac{K_m + x_1}{x_2 - x_1} \exp(x_2 t) \right) \quad (13)$$

### 三、工程算例

某高速公路试验段,软土厚 30m,软土层以下为硬粘土层,渗透系数为  $10^{-8}$  cm/s,可视为不透水层。采用排水固结预压法,堆载一次性施加。竖井采用三角形布置,打设长度为 20m,间距为 1.2m,竖井直径为 7cm。井阻和涂抹参数为:  $k_h/k_w = 10^{-1}$ ,  $s = 2.0$ ,  $k_h/k_s = 2.0$ ,  $k_h = 2k_v = 2.0 \times 10^{-8}$  m/s,  $v = 0.3$ 。Merchant 流变模型具体参数为:  $a_0 = 0.2 \text{ MPa}^{-1}$ ,  $a_1 = 0.3$ ;  $\eta_1 = 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。由于本文解为显式,极易通过编程实现。为讨论问题的方便,取  $T = \frac{C_v t}{H_2^2}$  为下卧层的等效时间因数,以  $T$  为横坐标,平均固结度为纵坐标,竖井打设区和下卧层的近似平均固结度如图 3 所示。图中 section 1 代表竖井打设区,section 2 代表下卧层。从图中可以看出,当下卧层平均固结度达 30% 时,竖井打设区平均固结度已超过 90%;考虑粘弹性影响时,竖井打设区和下卧层平均固结度均有所降低,而下卧层下降幅度则更大。

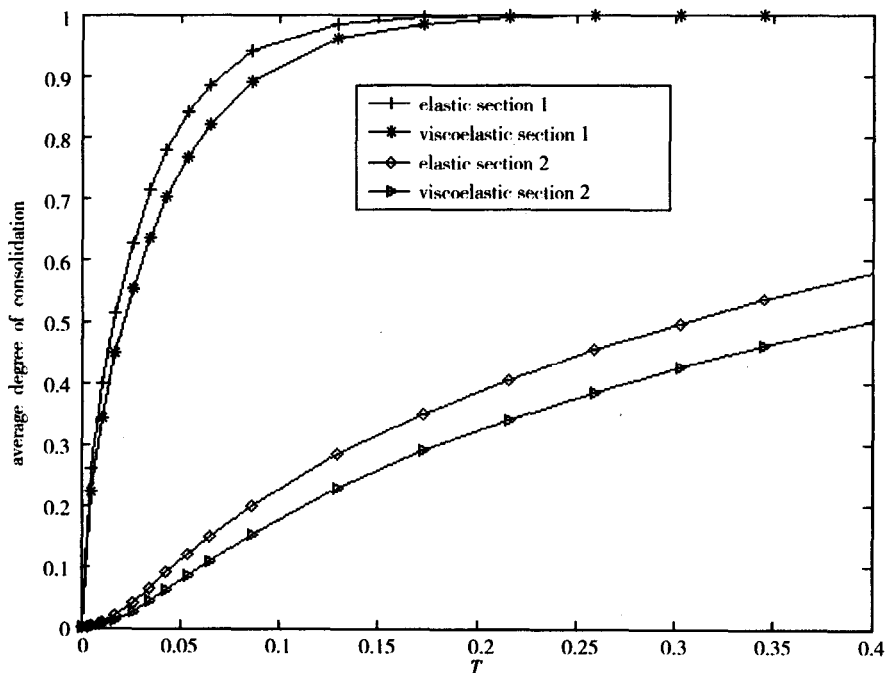


图 3 竖井打设区和下卧层平均固结度

### 四、结论

本文基于麦钦特流变模型,提出了考虑土体粘弹性的未打穿竖井地基固结度近似计算方法。该方法计算方便,满足工程精度要求。利用该方法对一未打穿竖井地基进行了固结分析。分析表明,竖

井打设区固结速度明显快于下卧层;考虑土体粘滞性影响时,下卧层平均固结度均比线弹性情况下有所降低,下卧层下降幅度则更大。可见,下卧层尚未完成的主固结沉降和整个土体的次固结沉降是引起工后沉降的主要原因,设计时应引起足够重视。

### 参考文献

- [1] 陈宗基. 固结及时间效应的单维固结问题[J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1 ~ 10
- [2] Lo K Y. Secondary compression of clays[J]. Proc ASCE, JSMFD. 1961, 87(SM4): 61 ~ 86
- [3] Qian J H, Wang S Y, Guo Z P. Rheology and soft clay engineering[J]. Marine Geotechnology and Nearshore / offshore Structures, ASTM, 1986, 923: 112 ~ 121
- [4] 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱水土体一维固结理论及应用[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(5): 78 ~ 85
- [5] 蔡袁强, 徐长节, 袁海明. 任意荷载下成层粘弹性地基的一维固结[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(3): 307 ~ 313
- [6] 赵维炳, 施建勇. 软土固结与流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996
- [7] 赵维炳. 广义 Voigt 模型模拟的饱和土体轴对称固结理论解[J]. 河海大学学报, 1988, 16(5): 47 ~ 56
- [8] 刘兴旺, 谢康和, 潘秋元, 曾国熙. 竖向排水井地基粘弹性固结解析理论[J]. 土木工程学报, 1998, 31(1): 10 ~ 19
- [9] 王瑞春, 谢康和. 考虑半透水边界的竖向排水井地基粘弹性固结解析分析[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(6): 33 ~ 36
- [10] Tang, X. - W., Onitsuka, K. Consolidation of ground with partially penetrated vertical drains[J]. Geotechnical Engineering Journal. 1998, 29(2): 209 ~ 231

# 深厚软土双层地基超载预压固结理论及工程应用

郝玉龙<sup>1</sup>, 方兴华<sup>1</sup>, 帅志杰<sup>2</sup>, 李吉林<sup>3</sup>

(1. 广州市建设委员会, 广州 510032; 2. 广州市建设投资发展有限公司, 广州 510100;

3. 广州市高速公路总公司, 广州 510030)

**摘要** 本文针对未打穿竖井地基传统固结计算方法的不足, 将深厚软土未打穿竖井地基合理转化为双层地基; 分析了双层地基超载预压的固结、沉降机理, 给出了多级等速加、卸载条件下双层地基一维固结孔压解析解。考虑时间因素的影响, 提出了反映土结构性的固结沉降计算方法。最后, 结合工程实例计算, 发现采用超载预压法处理结构性较强的软土地基, 对于控制工后沉降是不利的; 工后沉降主要是下卧层的压缩变形造成的, 约占工后总沉降的 74% 左右。

**关键词** 未打穿竖井地基; 双层地基; 超载预压; 结构性; 固结沉降

## 一、引言

近年来, 竖井超载预压法作为一种行之有效的软土地基加固方法, 已广泛应用于机场跑道, 高速公路、堤坝、大型油罐等各类大型工程。随着工程应用的深入, 以往被人们视为理论上和技术上均比较成熟的超载预压法, 也难免遇到许多新的问题。其中, 未打穿竖井超载预压地基的固结分析及沉降计算问题在我国南方深厚结构性软土地区就比较突出。传统的固结分析方法, 竖井区按打穿竖井固结理论计算, 而竖井区之下的软弱下卧层则按顶面(竖井区底面)排水的一维固结理论计算<sup>[1]</sup>, 这种固结计算方法固然具有简便易行的优点。但问题在于对下卧层作一维固结计算时, 取下卧层顶面(即竖井底面)作为透水面, 使得该水平面上孔隙水压力恒值为零, 这就和竖井区在该处的孔压不连续, 有明显的间断性, 这一问题的出现说明用传统的方法进行孔压计算时, 会存在相当大的误差<sup>[2]</sup>; 而孔压计算的误差将会掩盖地基土体中有效应力以及地基沉降的客观发展规律, 从而给地基沉降的预测和控制带来相当大的困难。另外, 传统的分层总和法计算沉降, 往往只选用单一的压缩指标  $E_{s1\sim 2}$ , 笔者认为这种做法过于简单, 不能完整地反映土的压缩特性, 因为  $E_{s1\sim 2}$  只能大致反映土在特定应力区域(100~200kPa)的压缩性状。针对上述未打穿竖井超载预压地基固结、沉降计算中存在的问题, 本文首先将竖井区三维固结实行等效的一维固结换算, 并对其合理性进行分析, 而后将竖井区和下卧层连在一起作为双层地基, 在分析双层地基超载预压固结沉降机理的基础上, 按双层地基一维固结理论进行固结计算, 以保证交界面上孔压的连续性, 克服传统固结计算方法存在的不足; 最后, 提出结构性软土的固结沉降计算方法, 并结合实际工程分析了未打穿竖井地基的固结沉降以及工后沉降的发展规律, 以期对深厚软土地基的处理加固工程设计有所指导与帮助。

## 二、未打穿竖井地基竖井区三维固结一维等效方法及其合理性分析

### (一) 竖井区三维固结一维等效方法

对于深厚软土未打穿竖井地基, 竖井区地基的三维固结可以实行等效的一维固结换算, 计算简图如图 1。



考虑井阻、涂抹作用以及超载预压引起土体结构损伤破坏对固结的影响,根据固结度相等的假设条件,竖井区三维固结一维等效竖向固结系数换算公式为<sup>[3]</sup>:

$$\bar{c}_v = c'_v + \frac{32h_1^2 c'_h}{\pi^2 F d_e^2} \quad (1)$$

式中,  $c'_v$ 、 $c'_h$  分别为土体结构损伤破坏后的竖向及水平向固结系数;  $h_1$  为竖井深度;  $F$  为一综合参数,反映井径比、井阻、涂抹作用对固结的影响;  $d_e$  为竖井影响范围直径。

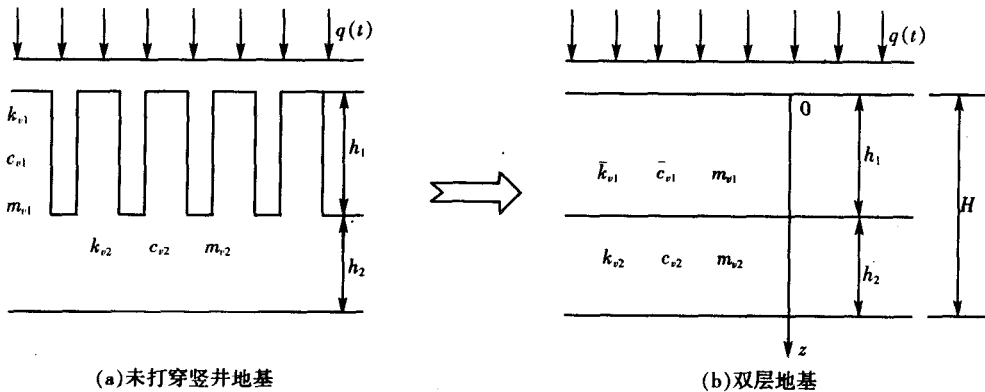


图1 未打穿竖井地基一维等效换算简图

## (二) 竖井区三维固结和一维等效的透水性比较

对于深厚软土未打穿竖井地基,将竖井区三维固结进行一维等效后,按双层地基一维固结问题计算是否合理,关键是分析竖井区等效之后,其自身的排水固结特性以及对下卧层的排水条件能否等价。在图1(a)中,假设竖井区底面是不透水的,则在瞬时加载、等应变以及考虑径向组合渗流条件下单井固结的孔压解析解为<sup>[4]</sup>:

$$u_s = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{F_a + D} \left[ \frac{k_h}{k_s} \left( \ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2r_e^2} \right) + D \right] \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{h_1} \exp(-\beta_m t) \quad (2)$$

$$u_n = u_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{F_a + D} \left[ \left( \ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_e^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \left( \ln s - \frac{s^2 - 1}{2n^2} \right) + D \right] \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{h_1} \exp(-\beta_m t) \quad (3)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{\pi(r_e^2 - r_w^2)} \left[ \int_{r_w}^{r_s} 2\pi r \cdot u_s dr + \int_{r_s}^{r_e} 2\pi r \cdot u_n dr \right] = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{h_1} \exp(-\beta_m t) \quad (4)$$

式(2)~式(4)中,  $u_s$  和  $u_n$  分别为涂抹区内、外土中任一点超静孔压;  $\bar{u}$  为地基中任一深度的平均孔压;  $k_h$ 、 $k_v$  为地基土水平向及竖向渗透系数;  $c_h$ 、 $c_v$  为地基土水平向及竖向固结系数(考虑土体结构损伤时用  $c'_h$ 、 $c'_v$ );  $k_s$ 、 $k_w$  为涂抹区内土体的渗透系数和竖井材料的渗透系数;  $r_w$ 、 $r_s$ 、 $r_e$  分别为竖井、涂抹区及竖井影响区半径;  $n = r_s/r_w$ , 井径比;  $s = r_e/r_w$ ;  $u_0$  为瞬时加荷引起的初始孔压。

竖井三维固结竖向排水量和径向排水量分别为:

$$Q_v = \pi(r_e^2 - r_w^2) \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 2\pi(r_e^2 - r_w^2) \frac{k_v}{\gamma_w h_1} u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \exp(-\beta_m t) \quad (5)$$

$$Q_r = \int_0^H 2\pi r_w dz \frac{k_s}{\gamma_w} \frac{\partial u_s}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = \frac{4\pi k_h u_0 h_1}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{F_a + D} \cdot \frac{1}{M^2} \exp(-\beta_m t) \quad (6)$$

计算表明,在实用范围内,式(5)和式(6)在相对误差小于10%的情况下可以近似写成:

$$Q_v = 2\pi r_e^2 \frac{k_v}{\gamma_w h_1} u_0 \exp \left[ - \left( \frac{\pi^2 c_v}{4h_1^2} + \frac{8c_h}{F d_e^2} \right) t \right] \quad (7)$$