

国家自然科学基金资助项目 (40172092 40602034)

JIEGOUXING YUNITU GUJIE JILI JI MOXING YANJIU

结构性淤泥土 固结机理及模型研究

房后国 于立新 刘娉慧 编著

1.5



黄河水利出版社

TU411.5

1

国家自然科学基金资助项目(40172092 40602034)

结构性淤泥土固结机理及模型研究

房后国 于立新 刘娉慧 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书以淤泥土为研究对象,采用宏观力学行为和微观结构定量分析(SEM)相结合的方法,通过现场沉降、孔压观测,结合室内物理力学试验,旨在弄清结构性淤泥土固结机理,建立结构性淤泥土固结模型;详细分析了结构性淤泥土固结变形特性,基于海积淤泥土具有结构性这一本身固有属性,提出了考虑结构性及扰动影响的最终沉降计算方法及扰动程度的评价方法。

该书可作为研究生选修课程教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构性淤泥土固结机理及模型研究/房后国,于立新,
刘娉慧编著. —郑州:黄河水利出版社,2008. 1

ISBN 978 - 7 - 80734 - 391 - 2

I. 结… II. ①房… ②于… ③刘… III. 软土 - 固结
(土力学) - 研究 IV. TU411.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 007534 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940

传真:0371 - 66022620

E-mail: hhsclbbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:5

字数:150 千字

印数:1—1 000

版次:2008 年 1 月第 1 版

印次:2008 年 1 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

前 言

沿海地区淤泥土分布广泛,近几年来随着地区经济建设的发展,兴建在此类软基上的大型工程项目已越来越多,如高速公路、机场、堆载场、码头、铁路和水利工程等,对软基工程提出了更高更新的要求。软基工程问题主要是变形问题,也即沉降问题。淤泥土含水量高达 60% ~ 125%,远高于液限 39% ~ 55%,孔隙比大于 1.0,强度 $C_u = 10 \sim 30$ kPa,灵敏度为 $S_t = 4 \sim 8$,压缩系数 $a_v = 0.5 \sim 2.0 \text{ MPa}^{-1}$,固结系数为 $C_v = 10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。其固结变形量一般很大,有些甚至超过其压缩层厚度的 40%,工程中如何正确地评估淤泥土的固结变形量及固结时间,是合理选择地基处理方案的关键,也是评价软基处理效果的重要依据。

目前,中国沿海地区许多工程均采用了堆载预压排水固结法对软基进行处理,从软基处理的结果可以看出,淤泥土经砂井或塑料排水板堆载预压后沉降量很大,沉降稳定的时间也很长,无论是固结沉降量还是沉降过程预测,理论计算值与实际沉降值都有较大的差异,往往造成预压期延长,后续工程被迫延期等严重后果,因此迫切需要提高固结沉降计算的精度,而要准确计算其沉降就必须搞清楚固结变形机理,在此基础上建立合理的固结模型。

鉴于上述情况,本书是在国家自然科学基金资助项目“中国滨海软土结构性及结构性力学模型研究”(40172092)、“低频循环荷载作用下结构性软土本构关系及固结模型研究”

(40602034)、第一作者博士学位论文《深圳湾结构性淤泥土固结机理及模型研究》和广东省重大项目“深港西部通道填海及地基处理工程”等研究成果基础上深化完成的。以淤泥土为研究对象,采用宏观力学行为和微观结构定量分析相结合的方法,通过现场沉降、孔压观测,结合室内物理力学试验,深入分析了结构性淤泥土固结变形机理,建立了结构性淤泥土固结模型。

全书共分为7章。第1章总结了国内外学者对结构性软土的研究成果,包括结构性、结构性软土固结机理及其模型的研究现状和存在的主要问题,指出研究结构性软土固结机理及其模型对指导软基工程有着重要的理论意义和现实意义。第2章分析了淤泥土的结构性及其在固结过程中的变化、固结变形特性、淤泥土原状结构特征、结构连续特征、应力应变关系。提出了考虑结构性及扰动影响的最终沉降量计算公式及扰动程度的评价方法,指出 t_p 不是传统意义上的主次固结的分界点,实质反映的是固结过程中不同类型孔隙水的排出,淤泥土主次固结同时进行,在淤泥土固结的不同阶段占据不同的地位。第3章研究了结构性淤泥土固结过程中的孔压变化规律,结果表明由于结构性的影响,分级加载条件下,淤泥土固结过程中不同阶段相应孔隙水压力变化特征也不一样,与淤泥土骨架变形能力有密切关系。随着结构强度的逐渐丧失,土体逐渐压密,累积孔压与累积荷载曲线和孔压增量与荷载增量呈现阶段性变化。从固结过程中含水量变化特征可知淤泥土主固结前期主要排出孔隙中的自由水,后期有部分弱结合水排出,淤泥土颗粒间连结以结合水膜连结为主,次固结效应在主固结后期效应明显,固结后期实测沉降和传统固结理论计算值偏差增大。第4章采用压汞及扫描电镜对淤泥土

固结变形过程中微观结构变化特征进行定量研究,并得出了微结构参数和固结变形量之间的关系,发现在固结压缩变形过程中,淤泥土微观结构的变化随着结构强度的逐渐丧失和孔隙中含水类型的不同具有明显的阶段性。第5章考虑软基处理工程中荷载实际施加情况,建立了变荷载下淤泥土竖井地基结构性粘弹性固结模型,编制了相应的有限元程序。第6章分别采用弹性、粘弹性及所建立的结构性粘弹性模型对一软基处理工程进行了固结变形与时间关系计算,结果表明弹性固结理论沉降计算值和实测值的差异随着固结的发展逐渐增大;粘弹性固结理论沉降计算值和实测值在固结后期较接近,但固结前期沉降计算值小于实测值;作者所建立的结构性粘弹性固结理论沉降计算结果和实测值较一致;弹性固结理论孔压消散较快,其孔压计算结果低于实测值;粘弹性固结理论孔压计算值高于实测值,特别是结构破坏以后,孔压上升较快;所建立的结构性粘弹性固结理论孔压计算值虽然和实测值也有一定差异,但较弹性解和粘弹性解更为接近实测值。研究结果对于软基处理工程的施工设计、控制加荷速率及优化设计方案具有现实意义。第7章展望了今后结构性淤泥土的研究热点与进一步需要研究的工作。

书中许多观点与成果源于作者攻读博士学位期间受恩师肖树芳教授的启发与指导,也凝集了王俊臣博士、石丙飞博士、程祖峰博士等人的智慧结晶,在此作者表示最诚挚的感谢!

感谢同门师兄弟与河海大学水工基地强化05(2)班谢越韬同志在大量试验及成果整理分析过程中所付出的辛勤劳动!

感谢作者所在单位领导与同事的关心与支持!

在撰写过程中参考了大量国内外学者的相关研究成果,出版社相关同志在校审、图表绘制等方面给予了很大帮助,在此向他们表示感谢!

由于作者受实践经验与学术水平的限制,书中不免有疏漏与欠考虑之处,敬请读者不吝批评指教。

编著者
2007 年 11 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 结构性淤泥土固结机理及模型研究的意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.3 土的结构性研究	(12)
1.4 研究中的关键技术问题	(13)
第2章 淤泥土固结变形特性研究	(16)
2.1 引言	(16)
2.2 淤泥土基本物理力学性质	(16)
2.3 淤泥土的结构性	(21)
2.4 淤泥土室内压缩曲线的特性分析	(24)
2.5 淤泥土前期固结压力及结构屈服应力的确定	(30)
2.6 结构性淤泥土固结最终沉降量计算	(34)
2.7 固结—时间关系分析	(40)
2.8 固结度计算	(54)
第3章 淤泥土固结过程中孔隙水压力变化规律	(59)
3.1 概述	(59)
3.2 淤泥土中的孔隙水	(60)
3.3 现场实测孔压资料分析	(63)
第4章 淤泥土固结过程中微结构变化效应	(73)
4.1 引言	(73)
4.2 土微观结构定量化指标体系	(74)
4.3 微结构定量参数的确定及试验方法	(76)
4.4 淤泥土原状样微观结构特征	(78)
4.5 淤泥土固结过程中结构单元体变化特征	(80)
4.6 淤泥土固结过程中孔隙变化特征	(88)

4.7	固结变形与微观结构参数变化特性相关性分析	(91)
第5章	变荷载下竖井地基结构性粘弹性固结模型研究	(101)
5.1	引言	(101)
5.2	结构性粘弹性固结方程的建立	(102)
5.3	竖井地基粘弹性固结方程的解析解	(108)
5.4	结构性粘弹性模型 Biot 固结有限元方法	(115)
5.5	结构性粘弹性固结模型参数的确定	(118)
5.6	结构性粘弹性固结性状分析	(124)
第6章	深港西部通道软基处理工程固结变形计算与监测	
	结果分析	(132)
6.1	工程概况	(132)
6.2	有限元计算分析	(135)
6.3	计算结果与分析	(138)
第7章	进一步研究工作展望	(140)
7.1	几点认识	(140)
7.2	进一步研究工作的展望	(143)
参考文献		(145)

第1章 绪 论

1.1 结构性淤泥土固结机理及模型研究的意义

软土是指天然孔隙比大于1.0,且天然含水量大于液限的细粒土,主要包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等。本书研究对象淤泥土为滨海相沉积的淤泥和淤泥质土。

淤泥土分布广泛,近几年来随着地区经济建设的发展,兴建在此类软基上的大型工程项目已越来越多,如高速公路、机场、堆载场、码头、铁路和水利工程等,对软基工程提出了更高更新的要求。软基工程问题主要是变形问题,也即沉降问题。由于淤泥土具有强度低、渗透系数小、含水量高、孔隙比大、压缩性高等特点,其固结变形量一般很大,有些甚至超过其压缩层厚度的40%。在工程中如何正确地评估淤泥土的固结变形量及固结时间,尤其是淤泥土的不均匀变形和侧向变形,是合理选择地基处理方案的关键,也是评价软基处理效果的重要依据。

目前的状况是理论落后于实际应用,无论是太沙基(Terzaghi)固结理论还是比奥(Biot)固结理论,都是基于饱水弹性孔隙介质变形理论,建立在孔隙水压力消散的基础上,没有考虑土骨架蠕变效应。而土体的固结与时间有关,淤泥土体受荷载作用后,随着土中孔隙流体的流出,有效应力增加,骨架产生变形,此时土颗粒发生重新排列和骨架错动。而骨架错动与时间效应有关,土骨架具有粘滞性,少数考虑土骨架粘滞性也只是基于宏观力学试验,而没有从机制上阐述产生这种力学行为的本质因素。目前,深圳湾地区许多工程均采用了软基处理,如西部通道、深圳机场、皇岗口岸、福田保税区、南油前海,从进行软基处理的结果可以看出,淤泥土经砂井或塑料排水板堆载预压后沉降量很大,沉降稳定的时间也很长。无论是固结沉降量还是沉降过程预测,理论计算值与实际沉降值都有较大的差异,往往造成预压期延长,后续工程

被迫延期等严重后果。如某软基处理工程沉降理论计算值为 2.3 m, 设计预压时间为 210 d, 而实际沉降值为 3.2 m, 预压时间延长至 380 d, 因此迫切需要提高固结沉降计算的精度, 而要准确计算其沉降就必须搞清楚固结变形机理, 在此基础上选用合理的固结模型, 故拟题具有重要的理论意义和实用价值。

基于上述原因, 结合国家自然科学基金项目“中国滨海软土结构性及结构性力学模型研究”(40172092)、“低频循环荷载作用下结构性软土本构关系及固结模型研究”(40602034)和重大项目“深港西部通道填海及地基处理工程”, 以淤泥土为研究对象, 通过现场沉降、孔压观测, 结合室内物理力学试验, 分析淤泥土的固结变形特性, 固结过程中孔压变化规律, 总结室内和现场应力—应变关系; 采用先进的测试手段, 对淤泥土固结变形过程中微观结构变化特征进行定量研究, 建立微观结构参数和固结变形量之间的关系; 考虑软基处理工程中荷载实际施加情况, 建立变荷载下结构性淤泥土竖井地基粘弹性固结模型, 运用李氏比拟法和数值法求解, 对实际工程进行计算, 并与监测结果作对比分析。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 饱和土弹性固结理论研究

沉降计算以固结理论为基础, 固结理论是土力学中最根本的课题之一。1923 年, Terzaghi 发表了著名的论文《粘土中动水应力的消散计算》, 1925 年提出了有效应力原理, 并据此建立了一维固结理论, 是土力学发展史上一个重要里程碑, 极大地推动了土力学的发展, 强有力地指导了土工建筑物的设计和施工。所谓固结是指饱和或部分饱和土体, 当其应力状态改变时, 土体积逐渐压缩, 同时部分孔隙水从土体中排出, 外加压力相应地从孔隙水(与气)传递到骨架上, 直至变形达到稳定为止, 土体这一变形的全过程称为固结。但是 Terzaghi 一维固结理论存在诸多不足之处, 如魏汝龙(1993)指出软土地基现场观测资料表明, 实际沉降速率通常比 Terzaghi 一维固结理论计算的沉降速率快得多, 显然许多实际工程都是在二维或三维条件下发生固结和变形的,

而 Terzaghi 一维固结理论没有计入水平向的孔隙水压力消散,必然会使其沉降速率变小。后来, Rendulic(1936)将 Terzaghi 一维固结理论推广到二维、三维情况,其中考虑二维或三维渗流,但假定土体只在竖向变形,且在固结过程中总应力保持不变,没有考虑孔隙水运动与骨架变形相互影响,也无法解释 Mandel - Cryer 效应,但 Terzaghi - Rendulic 固结理论关于孔隙水压力变化与土骨架变形无关的假设使求解和计算大为简化,故在实际工程中仍得到广泛应用。在一般情况下,尤其是三维问题,固结过程中总应力保持不变的条件总是难以得到满足,而且总应力在固结过程中不变的假设使多维问题不能满足弹性力学相容方程,所以 Terzaghi - Rendulic 三维固结理论是不严格的。1941 年, Biot 从严格的固结理论出发,根据有效应力原理、连续条件和平衡方程,考虑孔隙水压力消散与土骨架变形相互关系,提出了 Biot 固结理论。1956 年, Biot 又把这一理论推广到动力问题,标志着理想弹性饱水介质固结变形理论基本框架的完成。

众所周知,对于二维、三维固结方程,其解析解求解十分复杂。如 Biot 固结理论,即使采用级数和积分变换等手段,也只能得到某些简单边界条件下的解析解(Biot, 1943; Mc Namee, 1960; Gibson, 1970; 宰金珉, 1990), 黄传志对 Biot 固结方程给出了一个普遍有效的一般解法,使得这一问题有一个较大的进展。正是由于在数学上解出固结微分方程组是困难的,限制了固结问题在工程中的应用。伴随着数值计算方法的发展,应用计算机模拟技术使许多工程问题可以通过数值计算得到解决(赵维炳、钱家欢, 1985; Sandhu, 1969; Christian, 1970; 沈珠江, 1977; 殷宗泽, 1978; 谢康和, 1987; 赵维炳、施建勇, 1996; Zhang Jingde、Ai Zhiyong、Zhao Huming, 1996; J. C. Small、J. R. Booker, 1979; 顾亮章, 1987; 张延军, 2003)。总之,近几年来,国内外根据 Biot 固结理论,应用数值分析方法求解土坝、路堤、建筑物地基、挡土结构、地下工程等问题,有力地推动了土力学理论的发展。

虽然二维、三维固结理论在许多实际情况中更为合理,但指标求取与测定困难,一维固结理论仍在工程实践中得到广泛应用。对于 Terzaghi 单向固结方程,最早由 Terzaghi 按照 Fourier 级分解的方法给

出了单层地基在恒定荷载下的解答;Schiffman(1958)随后作了进一步工作,分析了变荷载下的解答。关于成层地基的单向固结问题,Cray(1945)在恒定荷载瞬时施加等简单假设条件下,提出了双层地基单向固结问题;谢康和(1994)针对单面及双面排水双层地基,考虑荷载随时间变化,提出了更为一般情况下的解答。

随着工程建设的需要和对土的认识水平的提高,固结理论不断得以发展和完善。固结理论的假设正在被一个个地取消,主要围绕不同的材料模式,建立不同的物理方程:①土骨架——假设为线性或非线性弹性、塑性、粘弹塑性。②土中流体——不可压缩的、可压缩的、具有线性或非线性粘滞性。③研究对象的划分:一种是把土体作为整体考虑,孔隙流体作为其中的介质;一种采用混合物理论,把固体颗粒和孔隙流体分别作为考察对象,然后再合在一起作为土体。沈珠江(1995)认为两种理论的不同之处在于考虑问题的先后次序不同,工程关心的是土体整体的平衡和运动,这更符合工程技术人员的思维;而分别把土骨架和孔隙流体作为考察对象时,它们之间相互作用力变为外力,方程表述形式必然会更加复杂,所得结果不会有本质上的差别,因此混合物理论在土力学研究中不会有太大实用价值。④在土的固结分析中可以引入比较复杂的本构模型,如考虑土是粘弹或粘弹塑性材料,固结过程中渗透系数随有效应力不断变化,使固结方程能考虑应力应变非线性等因素。

小变形固结理论虽然经过许多工程实践证明了它的适用性,但是,对于软粘土和吹填土,当荷载较重、土体变形较大时,采用小变形固结理论计算固结变形量,致使计算值和实测值有较大差异。故有些学者放弃小变形的假设,采用大变形固结理论(Mikasa, Gibson, 1960, 1967; Mikasa, 1963; Gibson, Schiffman, 1981; 宴宜、蔡正银, 1992)。Gibson 等人的一维大变形固结方程往往采用有限差分法进行数值分析,与传统小变形固结理论相比,其计算分析结果更多体现的是材料的非线性;若要真正反映土体固结的几何非线性性状,则宜采用连续介质力学大变形理论。潘秋元、谢新宇、谢永利等在连续介质力学基本理论的基础上,引入了有限变形理论的一些概念,建立一维大变形固结理论,推导

了拉格朗日描述的以位移为控制变量的一维大变形固结普遍方程,给出了固结方程近似解析解,并进行非线性有限元分析。

许多学者在大、小变形固结理论计算得到地基最终沉降的差别的问题上存在分歧,Gibson 等人则对这一问题避而不谈。Cater 等人 and Prevost 各自采用相同的材料参数进行两种理论的分析,得出了考虑大变形效应的地基最终沉降小于小变形理论得到的最终沉降的结论;Cargill 和 Schiffman & Cargill 基于 Gibson 等人一维大变形固结理论,则都认为大变形分析得到的地基最终沉降更大,不过在他们的分析中,对于压缩指标,大、小变形理论分别取不同的模式,所以他们的结论更多的是考虑了土体的材料非线性因素。谢新宇从有限元分析和近似解析解计算结果对比分析指出,大变形固结理论得到的地表沉降较小,且两者的差值随着外加荷载的增加而增大。如果仅考虑几何非线性因素,在其他计算条件相同的情况下,大变形理论的地基最终沉降应该比小变形理论的小,且两者有显著差异。另外,近似解析解计算结果表明:土体自重也对地基最终沉降有影响,忽略土体自重得出的地基最终沉降量会明显偏小。大变形、小变形固结理论得到的应力分布情况差别较小,这与以往学者们的分析结果是一致的。在考虑材料非线性时,合理选用压缩性指标较容易,而选取合适的渗透系数随有效应力变化的表达式则较为困难。压缩性指标可以根据实际的荷载大小,由 $e \sim \sigma'$ 曲线取得;而固结过程中渗透系数的变化比较难确定,这也是以往材料非线性固结理论研究中所不够重视的,当采用 $e \sim \lg k$ 线性假定,研究表明:当荷载较大时,渗透系数的变化是影响土体固结性状的重要因素。根据地基最终沉降的解析解和有限元分析结果,谢新宇等人还提出了考虑大变形效应的一个分界条件:当荷载水平 q/E (外加荷载与地基弹性模量之比) < 0.1 时,可采用传统的小变形固结理论分析土体的固结过程;当 $q/E > 0.1$ 时,应该考虑几何非线性的影响。由于在通常的荷载和地基情况下, q/E 不会超过 0.1,所以只有对于深厚软土地基或超软土地基上的建筑物或构筑物,在较大的外加荷载作用下,才需要采用大变形固结理论来分析。

近三十年来,有不少学者借助离心机模拟试验对土的固结性状进

行研究, Miyake 等(1988)利用离心机模拟试验研究了疏浚后冲填之海相粘土泥浆层在自重作用下的沉积固结过程,并用一维大变形理论对离心试验所模拟的原型进行了对比分析。Croce 等(1988)则利用离心试验研究了竖向排水砂井对软土地基固结性状的影响,验证常用的砂井地基固结理论,研究指出,目前常用的砂井地基固结计算公式过高地估计了砂井地基的固结速率。Terashi(1988)针对超软土地基上通过设置加筋织物修筑路堤的工程实例,借助离心模型试验研究了路堤的变形和稳定性以及地基土固结变形性状。Kitazume(1993)则利用大型离心机对填海造陆的超软土地基采用袋装砂井处理的效果进行了研究。国内冯光愈等(1988)采用离心机研究了软土地基采用不同地基处理方案的可行性进行了对比分析,为工程设计提供了依据。易进栋等(1992)也通过离心机试验分析了几种不同地基处理方案的可行性。

1.2.2 考虑流变固结理论研究

土体流变是指土体的应力、应变和强度与时间有关的现象,如有效应力不变时土体的蠕变特性、应力松弛、土体固结和强度试验中土体对不同应变速率的反应等。研究土体应力、应变随时间变化特征是土体流变学的中心课题,在土的本构关系中,不仅要考虑应力—应变两者之间的关系,而且要把时间因素考虑在内,成为应力、应变和时间三者之间的关系。目前,从宏观和微观着重两个方面的研究:一方面研究剪应力作用下的剪切蠕变;一方面研究土骨架蠕变引起的体积变形,沈珠江(1998)认为合理的研究方向是把两者统一起来。

关于固结过程中考虑土的流变性有两种观点:一种观点认为次固结是在主固结完成后发生的,将主固结与次固结分开,用 Terzaghi 理论来计算主固结随时间变化的孔隙水压力和压缩量,用 C_c 计算主固结完成后的蠕变压缩量。这一观点表明在主固结阶段土的流变影响不起多大作用,主固结完成时应变值是确定的,而不依赖与主固结完成时间的长短。这一观点是在第十一届国际土力学及基础工程会议(ICSMFE)上讨论有关固结问题的时间效应时,由报告人 Jamilddowski 等(1985)在总结众多研究成果上提出的(Mesri, 1973, 1990; Mesri & Chio, 1979, 1985a, 1985b; Mesri & Godlewski, 1977; Mesri & Rokhsar,

1974; Leonards, 1977; Ladd et al., 1977)。说明主固结应变只与应力状态有关,而与达到这一应力状态的时间无关,主固结阶段流变的影响可以忽略(Adams, 1965),主固结结束时孔隙比与有效应力的关系有唯一性,而与试样厚度无关(Mesri & Chio, 1985a, 1985b)。而另一种观点认为主固结阶段流变是不能忽略的, Bjerrum(1967)还提出把土的应变分为瞬时应变和延时应变,以取代传统的主次固结划分方法。这一观点表明主固结完成时的应力—应变关系不是唯一的,而是依赖于主固结完成时间的长短,主固结阶段发生了流变变形(Wahls, 1962; Aboshi, 1973; Leroueil 等, 1985a, 1985b; Kabbaj, 1988)。Mesri(1985b)曾说过:“以下假设,即主固结完成时的孔隙比和有效应力之间的关系是唯一确定的,而不依赖于主固结完成的时间长短,并不是精确分析的结果。而是一个基于试验观察的试验观点。其目的是为了解决现实的工程问题。所以,持不同意这一试验观点的人必须提出一种替代的方法,并且这种替代的方法至少能够像上面的实验观点一样能较好地预测沉降。”Mesri的论点表明,在主固结阶段不考虑流变的影响只是一种近似的方法,而非精确的方法。对于厚度淤泥土,其固结时间是一个长期的过程,工程实践表明,在主固结阶段考虑流变的影响是完全必要的,关键在于要建立一个有效的流变模型,以正确地反映主次固结的耦合效应,并且能对地基的沉降和变形作出较精确的预测。

理论研究和大量岩土工程实践表明,土体呈现非线性、非均质,既不是弹性体,也不是塑性体,而是粘弹塑性。经典固结理论的建立以孔压消散为依据,没有考虑土骨架蠕变效应,而在固结过程中,伴随着孔隙水排出,土骨架必然要发生调整,形成新的结构形式来适应当前应力状态,反映了土体应力—应变关系的时效性。对于淤泥土,骨架蠕变所产生的次固结沉降量在总沉降量中占有相当大的比重。因此,众多学者将流变学的观点引入到土的本构关系中,运用粘弹塑性固结理论分析土体固结沉降特性。

陈宗基(1958)认为,次固结是由于偏应力产生的粘滞剪切流动和球应力产生的粘滞体积流动所引起的,体积变形的延滞作用是土骨架本身的粘弹性质及孔隙水挤出的延滞所致,流动同时产生硬化作用。

Merchant 认为,土体沉降中的次固结现象是由于土颗粒间的内部摩擦力延滞所致,并把这种现象称为次时间效应。Merchant 以 Terzaghi 理论为基础,在土骨架弹簧模型 H 体上串联一个 Kelvin 体,来表达土体的次固结现象。并假定孔隙比和有效应力 σ' 成线性关系,与时间无关。在荷载施加后,主次固结同时产生。

Floque(1961)认为,这些理论不能考虑非饱和土体固结性状,因为非饱和土的渗透系数明显地受所承受应力的影响,固结只可能是土骨架和结合水的蠕变变形。Floque 在陈宗基模型上串联了一个圣维南组件,用以说明非饱和土和击实土的流变特性。

村山朔朗将土体的主固结与次固结过程分开考虑,认为在主固结过程中主要是超静孔隙水压力逐渐消散的过程,作用在土骨架上的主应力很小,应变速率等于孔隙水压力的消散速率。而在次固结过程中,土体有效应力等于总应力,且不随时间变化。

20 世纪 80 年代,赵维炳对软粘土粘弹性固结理论及其计算方法进行了深入的系统研究。对于一维固结问题,在小变形、土颗粒和孔隙水不可压缩、渗透系数为常数条件下,采用广义 Voigt 流变模型建立了固结微分方程,指出可用下降法来确定饱和土体的粘弹性参数,通过 Laplace 变换对方程进行了求解。

Jianhua Yin & Graham(1989,1994)引入了“等效时间”的概念,建立了一维粘弹塑模型,模型中三个参数容易从常规试验中得到。D. F. T. Nash & S. J. Ryde 在此基础上,对砂井预压固结的软基进行了一维有限差分分析,探讨了超载消除蠕变的时间问题。

B. L. Kutter & N. Sathialingam(1992)在临界状态模型基础上建立了一个粘弹塑性本构模型,可以考虑主固结和次固结效应,超固结比对沉降的影响。

陈晓平对软土的蠕变—固结特性、计算模型、数值求解方法和工程应用进行了系统的研究。

粘弹性固结方程的求解,大体上有两种基本方法:一是选择合理的粘弹性本构模型,依据体积变化连续性原则建立固结微分方程,结合边界及初始条件进行求解,此法的优点是概念清晰、物理过程清楚,缺点