

文章编号: 1001-4179(2011)04-0029-04

# 地下水位波动带内滨海软土性状研究进展

孟庆山, 陈能远, 杨超

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北武汉 430071)

**摘要:** 针对沿海城市地下水位波动带内的软土在饱和与非饱和状态之间交替转化的特点, 通过分析国内外有关地下水位波动引发地面沉降以及地面沉降间接造成相对海平面上升等的研究现状, 提出: 探讨地下水位波动及工程施工荷载作用下非饱和软土的变形强度规律, 揭示软土中孔隙水在减饱和—增饱和和反复过程中的激变、转化和迁移机制, 以及建立反映地下水渗流与荷载变化的非饱和软土固结沉降理论计算方法, 是今后研究工作的的发展方向, 并提供了可行的技术研究思路与方法。

**关键词:** 非饱和软土; 地下水位波动; 地面沉降; 微观结构; 渗流

**中图分类号:** TV223 **文献标志码:** A

## 1 地下水位影响地面沉降研究现状

### 1.1 地面沉降与相对海平面上升的耦合性

截至目前, 长三角地区因地面沉降所造成的直接和间接损失已经达到 3 150 亿元, 上海地面每沉降 1 mm 就会造成 1 000 万元经济损失。全球有 60 多个国家和地区发生了地面沉降, 日本和美国较为突出, 1981 年日本有 59 个地区沉降明显, 美国 1995 年在全部 50 个州都发现有地面沉降。

我国东部沿海城市面临着地面沉降和海平面上升的双重压力, 两者耦合作用在我国沿海地区已引起一系列环境效应和灾害, 严重制约着我国沿海地区经济的繁荣和社会的可持续发展, 长三角、珠三角、黄三角和环渤海湾仍将是海平面上升影响的主要脆弱区<sup>[1]</sup>。专家认为, 地面沉降的原因主要是由于过度开采地下水所致。海平面上升是一个缓慢渐进的过程, 是一种“隐形”的灾害。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 2 次和第 4 次评估, 充分意识到了海平面上升给人类生存带来的巨大威胁<sup>[2]</sup>。刘昌明指出, 中国地下水严重超采对海平面上升的总贡献水平大约为

2.22 mm<sup>[3]</sup>。除压缩开采量外, 加快地下水人工回灌, 对减轻地面沉降具有显著效果。但在地面沉降控制中, 过度开采或严格禁止开采地下水的做法都不科学, 应根据可持续利用战略确定合理的控制开采量<sup>[4]</sup>。

### 1.2 水位波动下软土中水的性态

开采或回灌地下水、潮汐、河道水位涨落、降雨、干旱和洪涝灾害以及工程施工降水等作用会促成地下水位反复下降与回升, 形成地下水位的大幅波动。地下水位下降引起地面沉降危害严重<sup>[5-6]</sup>, 地下水位回升问题同样应引起人们足够的重视。武强、郑铄鑫等研究认为, 地下水人工回灌可使地面产生较大幅度回弹, 回弹量取决于粘土层的吸水量, 但吸水量只占同压力释水量的 30% 以下<sup>[7]</sup>。国内外许多学者就软土回弹问题进行了大量研究, 魏汝龙、刘国彬、侯学渊等研究了粘性土卸荷后的抗剪强度和变形特性以及软土的卸荷模量; 李广信、胡中雄等研究了卸荷状态下土的回弹、强度、体缩现象及其变形机理; 曹文炳、Juares 孟庆山等就淤泥的回弹变形、释水、吸水与越流发展过程以及加荷及卸荷土体响应特性方面进行了卓有成效的研究<sup>[8-9]</sup>; 另有研究者通过模拟抽水作用, 揭示了深层坚硬粘性土的渗透、释水特性。肖树芳、房后国通过蠕变

收稿日期: 2010-10-03

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (40902092); 国家自然科学基金重点项目 (50639010); 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程领域前沿项目 (Q071204Q01)

作者简介: 孟庆山, 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩土力学和软基加固处理研究。E-mail: mqs749720@yahoo.com.cn  
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试验,分析了软土的粘滞系数与结合水膜厚度的相关关系。

软土中水通常以强结合水、弱结合水以及自由水的方式存在,水的性态是决定软土物理力学特性的关键,这一点受到了研究者的关注,如王平全用离子交换法确定粘土表面结合水界限;王铁行、孙建乐、Zehe、Stewart等对等温条件下非饱和土中气态水迁移规律及气态水迁移与液态水迁移关系问题进行试验研究<sup>[10-11]</sup>;房莹光、Augustesen等通过试验分析表明,强结合水是土体产生流变的主要因素,而弱结合水则是相对次要因素<sup>[12]</sup>;王秀艳、刘长礼等通过分析衡水地区地裂缝空间发育特征与地下水位降深之间的关系,认为饱和超固结粘性土在附加应力作用下会产生释水变形并存在一定规律;水在土中渗透运动是不同的水力梯度条件下重力水、毛细水和结合水相互转化、综合作用的结果<sup>[13]</sup>。

### 1.3 地面沉降变形计算与预测

在软土地基沉降计算和模型预测方面,国内外仍存在一定差距。分析长期沉降的常用方法有双曲线、指数曲线和泊松曲线等数学模型。双曲线模型和泊松曲线模型并不能解释沉降的本质原因,指数曲线由于能够反映流变学中的 Merchant 模型方程,具有明显的物理意义。姜晨光、张伟等通过分析地下水位变化与城市地表沉降的关系,以一维固结理论为基础,利用计算机模拟方法,给出了滨海平原城市地表沉降的数学模型<sup>[14-15]</sup>。

地面沉降预测计算模型主要分为土水模型(释水压密理论,多由水位预测模型和土层压密模型构成)和生命轮回模型(Life Cycle Model 直接由沉降量和时间的关系构成)两大类。目前,美国已推出三维可视化模型 Mod-Flow 其具有泊松轮回模型、Verhulst 生物模型和灰色模型,但国内近年来研制的模型主要为三维地下水流耦合一维沉降数值模型;同时,开发了 DP 夹层排水软件包并对美国的 Mod-Flow 进行改进;以及考虑流变特性的流固耦合地面沉降计算模型<sup>[16]</sup>。唐益群、崔振东等分析了国内外地面沉降的现状、引起沉降的原因、地面沉降的机理和地面沉降灾害预测与监测,开展了高层建筑群对地面沉降影响的模型试验研究,并应用非等时距灰色理论模型对工程环境效应引起的上海地面沉降进行了预测<sup>[17]</sup>。

### 1.4 水位波动带内软土的非饱和特性

上述有关粘性土地基承载力、渗透性、沉降变形计算及预测等研究均是建立在饱水条件基础上的,真正考虑地下水位波动对软土回弹变形及强度特性影响的

研究尚不多见。城市建设工程中遇到的地下水位以上或含气的海相沉积土、地下工程施工中的强降水作业区、沿江近海地段因潮汐等引起的地下水位波动带内均大量存在非饱和土,因此,沿海软土地区开展非饱和土的研究同样具有现实意义。对于纯粹的非饱和土的研究,国内外学者取得了大量的研究成果,如 Bishop, Morgenstern, Croney, Coleman, Aitchison, Jennings 等提出了一些形式相近的非饱和土有效应力表达式, Degeer, Vanapalli, Fredlund 等分别从仪器设备、模型建立及利用土水特征曲线进行强度预测等方面,研究了非饱和土强度问题<sup>[18]</sup>。国内学者陈正汉、谢定义、殷宗泽、赵明华、黄润秋、栾茂田、缪林昌、赵成刚、陈云敏等分别探讨了非饱和土的有效应力变量、内部应力、总吸力和抗剪强度间的关系以及抗剪强度随含水率和基质吸力变化关系等内容<sup>[19]</sup>。

可见,纯粹的饱和土或是非饱和土的研究成果是相当丰硕的,但专门针对由于地下水位波动,造成软土在饱和与非饱和状态之间相互转化过程中的变形强度特性的研究还很少,特别是综合考虑水位波动及荷载变化耦合作用下软土变形强度的研究则更显不足,只有以叶为民、Leong、曹文炳、万力等为代表的学者进行了探索性的工作,获取了上海地区浅部特征土层减饱和过程的第 1 条土水特征曲线,用释水函数取代太沙基固结模型中的渗透系数,建立了淤泥类软土释水固结研究方法<sup>[20-22]</sup>。

就地下水位与地面变形的关系研究中,张云、郭拴宁、骆祖江等分析了上海地下水位 5 种变化模式下砂性土层的变形特征<sup>[23]</sup>,以及地下水位升降带中的地基土含水量的变化规律和特征<sup>[24]</sup>,初步建立了地下水疏降与地面沉降变形的三维数学模型<sup>[25]</sup>。薛禹群、张云、施小清、Lanson 等认为,查明各土层变形特征是建立区域地面沉降模型的关键<sup>[26-27]</sup>,对此,研究了上海含水砂层变形特征及其与地下水位变化的关系,对上海地铁车站进行了室内降水沉降模型试验分析,针对大面积非均质各向异性三维地下水流模型,采用多尺度有限单元法对上海浦西地区地下水进行模拟<sup>[28]</sup>,给出了一维地面沉降模型的求解方法。

## 2 研究中的关键技术问题

大幅波动的地下水位将会对地基沉降产生影响,有关地基沉降的计算方法也很多,但在考虑地下水位抬升对地基沉降的激化程度时,则需探讨在地下水位变化和荷载共同作用下地基变形及承载特性。在分析动水位产生的荷载对土层变形沉降特征的影响时,如何考虑水位波动带来的荷载循环变化,是沉降研究

中的一个难点。通常的做法是按水位变化的初、终水位直接求沉降值, 没有考虑水位在下降过程中的升降波动对沉降的影响<sup>[29]</sup>。这实际上将水位升降波动时带来的荷载循环加卸、土层反复压缩回弹问题简化成了求恒定渗透下固结力作用的问题。若假定水位波动时土强度指标不变, 仅考虑水的浮力的影响, 运用 Prandtl-Reynolds 的 Taylor 补充公式、Terzaghi 公式和地基规范公式对粘性土地基进行计算, 粘性土地基承载力随着地下水位的升高将下降 50% 左右。因此地基承载力的各种极限平衡理论公式中不考虑地下水的影 响, 会偏于不安全。

纵观国内外就地下水位波动与荷载双重作用对地面沉降及地基承载力影响方面的研究成果来看, 尽管研究范围很广, 但系统性、深入性不强, 尤其在以下 4 个方面值得深究。

(1) 非饱和土不同于饱和土的最本质的原因就是非饱和土中基质吸力的存在, 基质吸力在控制非饱和土的力学性质方面起着十分重要的作用, 弄清基质吸力在饱和土体减饱和—增饱和过程中所起的作用, 是非饱和土研究中亟待解决的问题。

(2) 要按水位升降变化影响土性参数来计算沉降量, 因此如何定量确定动态水位循环荷载作用下相关系数的变化值得研究。

(3) 在分析动水位产生的荷载对土层变形沉降特征的影响时, 如何考虑地基上部荷载的加卸载变化与水位波动耦合作用, 是沉降变形及承载特性研究中的难点与关键技术问题。

(4) 三维渗流和变形的耦合分析是地面沉降模型进一步研究的方向, 地面沉降的室内模型试验是检验模型合理性和适用性的有效手段。

### 3 研究热点和技术方法

基于以上关键技术问题, 对于水位波动带内滨海软土的变形性状研究, 可以从以下几个方面展开。

(1) 减饱和—增饱和过程中原状软土变形—渗透特性。在原状土的减饱和—增饱和相互转化过程中, 进行变形—渗透的联合测定试验, 得到不同土性、荷载状态下原状软土的变形和渗透特性的演化规律; 通过固结渗透试验和微观结构试验手段, 建立渗透系数与孔隙率之间的关系表达式, 揭示减饱和—增饱和过程及加卸荷作用下微观孔隙演化规律、土体变形与渗透特性之间的关联性。通过持水度试验和等温吸附法确定粘性土表面吸附结合水界限值, 寻求孔隙水类型及其激变、转化与迁移机制, 由此弄清地下水位波动带内软土结构性和水的性态问题。

(2) 孔隙水激变、转化、迁移机制。对减饱和—增饱和过程中取得的软土试样开展室内常规土工试验、压汞试验及扫描电镜试验, 并利用图像分析软件获得粘土颗粒内孔隙分布特征, 孔隙的大小及种类随荷载和水位的变化特征; 借助压汞测孔试验, 分析软土中孔隙特征和含水类型, 对软土固结及回弹不同阶段的微观结构特征进行定量描述。对地下水位及荷载变化下孔隙水激变、转化和迁移方式进行分析, 比较水位变化与荷载变化对非饱和软土孔隙性演化规律影响的异同, 建立压缩系数、孔隙分布与荷载及饱和度之间的对应关系, 进一步弄清它们对工程力学特性的影响程度。

(3) 水位波动状态下软土变形强度的模型试验。开展水位波动与加卸载耦合的软土变形强度模型试验。建立不同土性的减饱和—增饱和过程中重塑软土的变形强度与荷载、饱和度、固结度之间定量关系。通过对重塑软土的释水量和吸水量进行量测, 得到软土在水位波动与荷载变化独立与耦合作用下的蠕变变形规律, 建立荷载变化条件下动态水位波动带内非饱和软土变形沉降计算分析方法, 由此解决水位波动带内软土在荷载与水位变动下的变形与强度特征问题。

(4) 地下水位波动—固结沉降耦合模型及其数值模拟。通过测定不同压缩条件下非饱和软土的颗粒组成、孔隙度、渗透系数等参数, 最终得到孔隙度与渗透系数关系式, 实现土层的变形强度、孔隙度、渗透系数动态变化的定量表达, 建立变系数的三维地下水渗流模型。根据流固耦合力学的理论与方法, 将沿海城市地面沉降过程视为一个地下水波动、上覆荷载变化以及土体压缩—回弹的动态耦合作用过程, 建立渗流—应力—沉降耦合模型, 对渗流、荷载和沉降过程进行仿真模拟及预测, 为相关部门决策提供科学依据, 解决与地面沉降相关的问题。

(5) 利用理论分析、室内土工试验、模型试验和数值模拟方法等综合技术手段, 以土的微观结构定量描述为切入点, 充分重视非饱和软土的水敏性在固结及回弹变形过程中所起的关键作用, 研究微观结构演化过程中以孔隙性、渗透性、固结性和回弹性等为表征的软土宏观物理力学特性的变化规律。研究中应突出软土固结理论、非饱和土力学理论、微观结构学、流体力学等学科交叉、融合与渗透, 同时促成微观结构演化与宏观力学特性表征研究的统一。

### 4 结语

地面沉降和海平面上升业已成为科学界和政府决策部门共同关注的重要环境问题, 研究沿海地区非饱和软土沉降变形对相对海平面上升影响机理与响应程

度,对于探索城市地下水位波动对地面沉降和承载力变化的作用机理,提高科学决策水平及减轻环境地质灾害有着显著作用。通过调整和优化设计地下水开采和人工回灌,使地面沉降防治与地下水资源保护达到最佳状态,确保近海地区可持续发展。

参考文献:

[ 1 ] Hu R L, Yue Z Q, Wang L C. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China[ J]. *Engineering Geology* 2004 76: 65—77

[ 2 ] PCC Plenary XXV II. An assessment of the intergovernmental panel on climate change[R]. Valencia Spain [ S ] , 2007.

[ 3 ] 刘昌明. 建设节水型社会, 缓解地下水危机[ J]. *中国水利*, 2007 (15): 10—13

[ 4 ] 李国和, 荆志东, 许再良. 京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[ J]. *水文地质工程地质*, 2008 (6): 90—95

[ 5 ] 毛邦燕, 许模, 唐万春, 等. 地铁建设中地下水与环境岩土体相互作用研究[ J]. *人民长江*, 2009 40(16): 49—52

[ 6 ] 胡建勋, 甄计国. 石羊河流域地下水水位下降原因及对策研究[ J]. *人民长江*, 2009 40(1): 31—33.

[ 7 ] Wu Q, Zheng X X, Xu H. Relative sea-level rising and its control strategy in coastal regions of China in the 21st century[ J]. *Science in China Ser D* 2003 46(1): 74—83

[ 8 ] Juarez B E. Posturchase secondary compression equation for clays[ J]. *Canadian Geotechnical Journal* 1988 25: 594—599

[ 9 ] 孟庆山, 杨超, 许孝祖, 等. 动力排水固结前后软土微观结构分析[ J]. *岩土力学*, 2008 29(7): 1759—1763.

[ 10 ] Zehle E, Mauser T. Modeling water flow and mass transport in a loess catchment[ J]. *Physics and Chemistry of the Earth B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 2001 26(7/8): 487—507

[ 11 ] Stewart B W. Water transfer from soil to seed: the role of vapor transport[ J]. *Soil Science Society of America Journal* 2002 66(6): 1760—1763

[ 12 ] Augustesen A, Lingsaard M, Lade P V. Evaluation of time-dependent behavior of soils[ J]. *International Journal of Geomechanics* 2004 4(3): 137—156

[ 13 ] 王秀艳, 刘长礼, 张云. 超固结粘性土变形特征及可持续开采水位降的室内试验确定方法[ J]. *岩土力学*, 2006 27(6): 875—879

[ 14 ] 姜晨光, 于雪鹏, 蔡伟. 城市地面沉降与地下水位变化关系的数学模拟[ J]. *中国煤田地质*, 2004 16(1): 29—31.

[ 15 ] 张伟, 段保旭, 付耀军. 考虑地层结构和地下水位变化时地面沉降的模拟和预测[ J]. *工程勘察*, 2002 (5): 23—25.

[ 16 ] Ao C Y, Pao S Y. Application of fuzzy multi-objective function on reducing groundwater demand for aquaculture in land subsidence areas[ J]. *Water Resources Management* 2006 20: 377—390

[ 17 ] 唐益群, 严学新, 王建秀, 等. 高层建筑群对地面沉降影响的模型试验研究[ J]. *同济大学学报*, 2007 35(3): 320—325

[ 18 ] Fredlund D G, Rahardjo H. *Unsaturated Soil Mechanics*[ M]. Beijing: Chinese Construction Industry Publishing House, 1997

[ 19 ] 赵明华, 刘小平, 黄润秋. 水膜理论在非饱和土中吸力的应用研究[ J]. *岩土力学*, 2007 28(7): 1323—1327

[ 20 ] 叶为民, 陈宝, 卞祚麻. 上海软土的非饱和和三轴强度[ J]. *岩土工程学报*, 2006 28(3): 317—321

[ 21 ] Leong E C, He L, Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[ J]. *Geotechnical Testing* 2002 25(3): 322—333

[ 22 ] 曹文炳, 万力, 龚斌, 等. 水位变化条件下粘性土渗流特征试验研究[ J]. *水文地质工程地质*, 2006 (2): 118—122.

[ 23 ] 张云, 薛禹群, 叶淑君, 等. 地下水位变化模式下含水砂层变形特征及上海地面沉降特征分析[ J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006 17(3): 103—109

[ 24 ] 郭控宇, 翟晓林. 利用饱和度对地下水位升降带含水量变化的定量预测[ J]. *电力建设*, 2000 (3): 38—39

[ 25 ] 骆祖江, 刘金宝. 第四纪松散沉积层地下水疏降与地面沉降三维全耦合数值模拟[ J]. *岩土工程学报*, 2008 30(2): 193—198

[ 26 ] 薛禹群, 吴吉春, 张云, 等. 长江三角洲(南部)区域地面沉降模拟研究[ J]. *中国科学 D辑: 地球科学*, 2008 38(4): 477—492.

[ 27 ] Larson K J, Basagaoglu H, Marino M A. Prediction of optimal safe groundwater yield and land subsidence in the Los Banos Kettleman City area, California using a calibrated numerical simulation model[ J]. *Journal of Hydrology* 2001 242 ( 122 ): 79—102.

[ 28 ] Ye S J, Xue Y Q, Xie C H. Application of the multiscale finite element method to flow in heterogeneous porous media[ J]. *Water Resources Research* 2004 40 (9): W09202

[ 29 ] 龚士良, 杨世伦. 地面沉降对上海城市防汛安全的影响. *人民长江*, 2008 39(6): 1—3.

(编辑: 郑毅)

Research progress review of characters of marine soft clay in underground water fluctuating zone

MENG Qingshan, CHEN Nengyuan, YANG Chao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Soil and Rock Mechanics of Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of soft clay in underground water fluctuating zone of coastal cities which is usually in a transformation process between saturation and unsaturation states, through analyzing the research progress of ground subsidence induced by water fluctuation and the subsequent relative sea level rise caused by ground subsidence, we present several future research directions, including discussion on the laws of deformation and strength of soft clay under coupling loading of water fluctuation and construction, investigation on the mechanisms of deformation, transference and transformation of pore water in soft clay in a recurrent process of saturation—unsaturation, establishment of a computational method for consolidation settlement of unsaturated soft clay which can reflect the effects of underground seepage and load variation.

Key words: unsaturated soft clay; fluctuation of underground water level; ground subsidence; microstructure; seepage flow