

DOI: 10.11779/CJGE2019S1061

# 考虑上覆水综合作用的水下真空预压沉降分析

林 澍<sup>1, 2</sup>, 闫澍旺<sup>1, 2</sup>, 付登锋<sup>1, 2</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 上覆水问题是水下真空预压与陆上真空预压的一大不同点。在水下真空预压中, 上覆水会对地基固结和沉降产生一定的影响。通过有限元模拟研究了上覆水对加固区土体的沉降所产生的两方面影响, 即荷载作用方面和边界渗透方面。基于有限元结果, 结合固结理论和渗流理论, 提出一种考虑上覆水综合作用效果的地基沉降计算方法, 并通过一则案例分析对该方法进行了验证, 同时与传统计算方法进行了对比分析。结果显示, 与传统方法相比所得结果与实测数据更加吻合, 说明了考虑上覆水对地基沉降的综合影响是可靠的。最后对工程实际中的应用提出了一定的建议。  
**关键词:** 水下真空预压; 上覆水; 荷载效应; 边界渗透; FEM

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0241-04

作者简介: 林 澍(1991—), 男, 博士, 主要从事岩土工程地基处理方面研究工作。E-mail: lin182838@126.com。

## Settlement analysis by considering combined effect of covering water in underwater vacuum preloading

LIN Shu<sup>1, 2</sup>, YAN Shu-wang<sup>1, 2</sup>, FU Deng-feng<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Covering water is one of the factors that make the underwater vacuum preloading different from the onshore one. It affects the behaviors of consolidation and settlement of the foundation to some degree. FEM analysis is adopted to investigate the loading and the boundary seepage effects of the covering water on the foundation settlement. An analysis method is proposed with the theories of consolidation and seepage to consider the combined effect of the covering water on the settlement on the basis of the FEM results, which is proved to be reasonable and valid with a case study. Comparison is also made between the conventional and the proposed methods. The research results show that the prediction by the proposed method is better in fitting with the measured data than the conventional one, suggesting the reasonability and validity of the proposed method in considering the effect of the covering water. Advices are also given to the application of the method in engineering practice.

**Key words:** underwater vacuum preloading; covering water; loading effect; boundary seepage; FEM

## 0 引 言

与陆上真空预压不同, 无论是在潮间带还是常水位水域, 水下真空预压中都会存在上覆水。一方面, 上覆水在水下真空预压过程中可能对地基的固结沉降起到部分荷载作用。目前已有的室内模型试验<sup>[1-4]</sup>和现场试验研究<sup>[5-9]</sup>结果表明, 上覆水的存在使得土体中的初始孔隙水压力增加, 增加上覆水深度将使得地基沉降增大, 且水下真空预压中孔压消散值会超过一个大气压力<sup>[6]</sup>, 因此水下土体能受到更大的有效应力作用。由此可知, 上覆水的存在增大了 $\Delta u$ 的理论上限值, 当 $\Delta u$ 大于100 kPa时, 可认为上覆水对有效应力的增加和地基的加固起到了积极的促进作用。另一方面, 上覆水水头与排水板中的真空压力间的水头差会使上覆水通过渗流作用进入加固区土体中<sup>[2, 10]</sup>, 从而使得

加固区土体在真空预压作用下减少的孔隙水又得到一定程度的补充, 减弱加固区土体的固结沉降。若上覆水的上述边界渗透效应所占比重较大时, 甚至会抵消掉真空预压的固结沉降效果, 使水下真空预压停止、失效<sup>[10]</sup>。然而, 目前对于上覆水边界渗透对地基加固影响的认识基本还停留在感性讨论层面, 深入的研究还鲜有报道。因此, 对于上覆水的作用, 应从上述两方面着手, 合理地进行综合考虑。

针对上述水下真空预压中的上覆水作用问题, 本文通过有限元模拟研究其在水下真空预压中对地基沉降的作用。基于有限元结果, 从渗流理论和固结理论入手, 通过理论推导提出一种考虑上覆水综合作用的

地基沉降分析方法，并运用该方法对一则案例进行了分析。最后，对工程中如何合理考虑上覆水作用提出了一定的建议。

## 1 有限元分析

### 1.1 模型描述

模型尺寸为 60 m×30 m，其中加固区为 10 m×10 m，排水板间距 1 m，深度 10 m。加固区表面为密封膜，默认为不透水边界，非加固区土体表面设置为透水边界。土体采用各向同性弹性模型进行模拟，土体参数根据参考文献[11]进行取值，如表 1 所示。

表 1 有限元模型参数<sup>[11]</sup>

Table 1 Model parameters in FEM	
指标	参数
杨氏模量 $E$	2.035 MPa
泊松比 $\nu$	0.3
渗透系数 $k$	$1.16 \times 10^{-10}$ m/s
土体天然重度 $\gamma$	16 kN/m <sup>3</sup>
水的重度 $\gamma_w$	10 kN/m <sup>3</sup>

约束土体底部和水平向变形，竖向允许自由变形。真空压力的施加采用超孔压分析方法，在排水板处施加真空压力  $-\gamma_w h_v$ ， $h_v$  为真空水头。上覆水厚度  $h$  的变化通过  $h_v$  的变化来体现，如表 2 所示。为方便表示，真空水头归一化为  $h_v/H$ ， $H$  为加固区深度。

表 2 有限元模拟工况

Table 2 Schemes of FEM simulation					
上覆水厚度	0 m	1 m	5 m	10 m	15 m
排水板水头 $h_v/H$	-0.85	-0.95	-1.35	-1.85	-2.35

土体单元类型为 CPE4P，加固区土体  $H$  范围内地基土单元尺寸  $\Delta l$  均为 0.1 m。

### 1.2 模拟结果分析

图 1 (a) 为有限元中渗流流网图，箭头表示流线，云图表示等势线（即超孔压）。为了便于说明，流网图取对称的一半。图中可明显看出上覆水由非加固区土体表面往加固区中渗流，其渗流路径可近似为圆弧。另外，加固区底部虽然也存在部分孔隙水流入，但其密集程度比加固区两侧明显弱了不少，主要是因为从非加固区土体表面到加固区底部的渗流路径过长，在短时间内上覆水难以通过加固区底部渗流进入。

图 2 为有限元沉降计算结果，其中“ $h=0$ ， $h_v/H=-0.85$ ”代表没有上覆水的工况，可视为陆上真空预压结果。由图 2 可知，随着上覆水厚度的增大，土体沉降明显增加，说明上覆水对土体固结沉降起到了明显的增益作用。由于上覆水厚度的增加提升了土中孔压消散的上限值，使得有效应力增量的上限值也增大了，从而增加了土体的固结沉降。

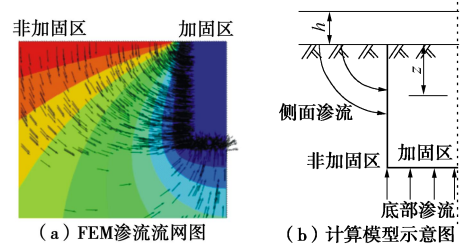


图 1 渗流流网图

Fig. 1 Seepage flow net

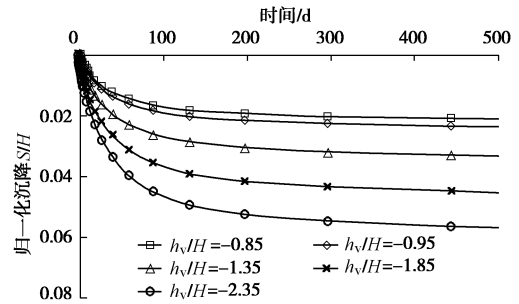


图 2 FEM 沉降曲线结果

Fig. 2 Settlement curves in FEM

## 2 上覆水综合作用分析

### 2.1 上覆水边界渗透作用分析

基于有限元结果，现通过理论推导探究上覆水的边界渗透对地基沉降固结的影响。为便于分析，对水下真空预压中的边界渗透问题研究进行如下假设：①土体饱和，土中渗流为稳定渗流且贯穿于整个水下真空预压过程中，水的渗流符合 Darcy 定律；②加固区与非加固区的分界面为渗透断面；③渗径为圆弧形，渗透断面上深度为  $z$  处对应的上覆水渗径大小为  $\pi z/2$ ，加固区底部为  $\pi H/2$ 。

根据上述假设，取图 1 (b) 所示断面进行分析。对于渗透断面上埋深为  $z$  处长度为  $dz$  的微元而言，形成稳定渗流时的水力梯度  $i(z)$  可表示为

$$i(z) = \frac{2h_v}{\pi z} \quad (1)$$

根据前文假设及 Darcy 定律，可得到  $dt$  时间段内该微元处的渗流流量  $q(z)$ ，并沿整个渗透断面积分后得到单位时间内上覆水边界渗透量，即渗流流速为

$$q = q_1 + q_b = 2kh_v \left[ \frac{2 \ln(H/H_0)}{\pi} + \frac{B}{\pi H} \right] \quad (2)$$

式中， $q_1$ ， $q_b$  分别为加固区两侧和底部的单位渗透量， $H_0$  为密封体入泥深度，可取压膜沟深度。由此，渗流稳定阶段中  $t$  时刻上覆水的累积边界渗透量为

$$Q(B) = q\beta_1(t) = 2kh_v\beta_1(t) \cdot \left[ \frac{2 \ln(H/H_0)}{\pi} + \frac{B}{\pi H} \right] \quad (3)$$

式中,  $\beta_1(t)$  为渗流时间因子, 用于将稳定渗流结果修正为与实际中非稳定渗流相对应的结果, 可通过线性关系表示:

$$\beta_1(t) = A_1 t + B_1 \quad (4)$$

其中,  $A_1$  和  $B_1$  为拟合参数, 根据本文有限元渗流计算结果的反演分析,  $A_1$  可取 0.9~1.1,  $B_1$  可取为  $3 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ . 图 3 为式 (3) 与有限元结果的对比. 由图可知, 式 (3) 所得结果与有限元结果较为接近, 说明式 (3) 用于估算上覆水边界渗透量是可靠的.

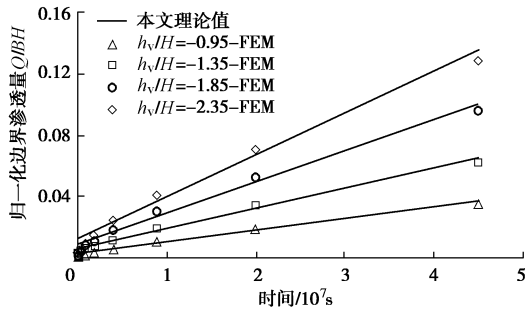


图 3 FEM 与理论方法的边界渗透量结果对比

Fig. 3 Comparison between results of boundary seepage discharge from FEM and theory

### 2.2 考虑上覆水综合作用的沉降计算方法

通过前文分析可知, 上覆水厚度的增加可使得土体沉降增大, 加固作用可通过增大排水板负压水头  $h_v$  来实现. 因此, 考虑上覆水增益效果的沉降表达式为

$$S_t = S_\infty \cdot U_t = \frac{\gamma_w h_v H}{\bar{E}_s} \cdot [1 - (1 - U_r)(1 - U_v)] \quad (5)$$

式中  $S_t$  为  $t$  时刻地基平均沉降;  $S_\infty$  为考虑上覆水增益作用时地基的最终沉降;  $U_t$  为地基平均固结度;  $\bar{E}_s$  为土层平均压缩模量, 可由加权平均求得.  $U_r$ 、 $U_v$  分别为径向固结度和竖向固结度, 可分别通过砂井固结理论和太沙基一维固结理论求得.

在水下真空预压中, 上覆水对地基沉降的综合作用效果可分为荷载作用和边界渗透作用两方面. 因此, 综合式 (3), (5) 可得

$$S_{tw} = S_t - \frac{Q(t)}{B} \quad (6)$$

式中,  $S_{tw}$  为考虑上覆水综合作用时的地基平均沉降. 由此, 可通过式 (6) 计算考虑上覆水综合作用的水下真空预压地基沉降.

### 3 案例分析

本案例为天津港某码头区实施的潮间带水下真空预压加固工程, 对码头的岸坡进行加固<sup>[8]</sup>. 该场地平均水深约为 1 m, 施工域面积为 30 m×154 m, 排水板长度 15 m, 间距为 0.8 m, 正方形布置. 加固深度

内土层大致可分为 3 层, 各层土参数如表 3 所示. 地基表层先铺设一层 1 m 厚的砂垫层, 然后进行铺膜密封. 从开始抽气、施加真空荷载开始, 到第三天真空压力基本稳定在 -80 kPa. 之后再满载加固约 105 d 后停泵卸载, 加固工程完成.

表 3 工程案例参数<sup>[8]</sup>

Table 3 Parameters of engineering case				
土层	厚度 /m	渗透系数 $k/(m \cdot s^{-1})$	固结系数 $c_v/(m^2 \cdot s^{-1})$	压缩模量 $E_s/MPa$
淤泥	9	$9.64 \times 10^{-11}$	$1.25 \times 10^{-8}$	1.30
淤泥质黏土	3	$5.46 \times 10^{-11}$	$9.51 \times 10^{-9}$	1.74
黏土	3	$6.50 \times 10^{-12}$	$1.33 \times 10^{-9}$	2.05

图 4 为理论沉降计算结果与实测值的对比. 结果显示, 不考虑上覆水作用时得到的沉降曲线明显偏小, 而考虑上覆水综合作用时得到的沉降曲线与实测值吻合得很好. 通过案例分析可知, 在水下真空预压工程中应合理地考虑上覆水对地基沉降的综合作用, 由此得到的预测值更贴近实际结果.

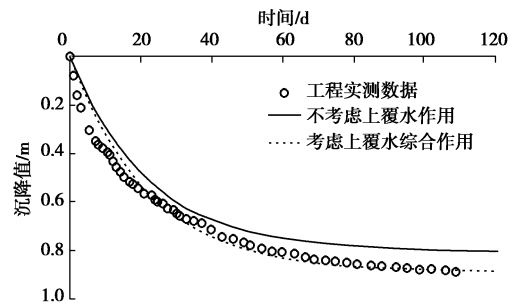


图 4 实测沉降值与不同理论方法所得沉降结果对比

Fig. 4 Comparison between measured data and settlement results from various theories

### 4 结论与建议

本文通过有限元方法对上覆水在水下真空预压中的作用进行了综合分析. 基于有限元结果, 从渗流理论和固结理论入手, 通过理论推导提出了一种考虑上覆水综合作用的水下真空预压地基平均沉降分析方法, 并利用该方法对一则工程实例进行了分析. 通过本文的研究, 得到如下结论:

(1) 上覆水在水下真空预压中的作用可分为两个方面: 荷载作用和边界渗透作用. 前者对水下真空预压的加固起到积极的作用, 而后者则起到消极作用. 上覆水在水下真空预压中的综合作用是一种变化的过程, 应通过上述两方面的强弱关系进行综合评价.

(2) 与传统的真空预压地基沉降计算理论相比, 本文方法考虑了上覆水综合作用的影响, 能得到与实测值更为吻合的结果. 若地基渗透性较强、上覆水较

深、加固时长足够长时,上覆水的边界渗透将对地基沉降产生明显的削弱作用。

(3)对于潮间带水下真空预压而言,其上覆水较浅、土体渗透性较差、加固时长较短,因此在工程应用时可不考虑上覆水作用,将上覆水的荷载作用视为安全储备。若想得到较为精确的地基沉降预测值,则建议通过本文提出的方法合理地考虑上覆水对地基沉降的影响。

#### 参考文献:

- [1] 张敬,刘爱民.水下真空预压的加固机理分析[J].岩土工程学报,2007,29(5):644-649.(ZHANG Jing, LIU Ai-min. Analysis of mechanism of consolidation of soil improved with underwater vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 644 - 649. (in Chinese))
- [2] 张敬.水下真空预压中真空产生机制、预压加固机理及其应用技术研究[D].天津:天津大学,2007.(ZHANG Jing. Research on the vacuumization method, treatment mechanism and application technology of underwater vacuum preloading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [3] HU L. Consolidation behavior of soft soil subjected to on-land and underwater vacuum preloading[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2010.
- [4] 闫澍旺,李亚奇,林澍,等.泥封法水下真空预压室内模型试验及数值模拟[J].中国港湾建设,2017,37(9):5-10.(YAN Shu-wang, LI Ya-qi, LIN Shu, et al. Indoor model experimental research and numerical simulation of underwater vacuum preloading with clay-sealing method[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(9): 5 - 10. (in Chinese))
- [5] 刘润,闫澍旺,苗中海,等.水下真空预压中真空产生机制的研究[J].中国港湾建设,2003(5):29-35.(LIU Run, YAN Shu-wang, MIAO Zhong-hai, et al. Study of mechanism of vacuumization in underwater vacuum preloading[J]. China Harbour Engineering, 2003(5): 29 - 35. (in Chinese))
- [6] KARLSRUD K, GREGERSEN O, NERLAND Ø, et al. Vacuum consolidation of seabed clay- A full scale experiment[C]// Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid, 2007: 1335 - 1340.
- [7] 韩雪峰,邝国麟,谭国焕,等.水下真空预压过程中孔隙水压力变化规律研究[J].岩土工程学报,2008,30(5):658-662.(HAN Xue-feng, KWONG A K L, THAM L G, et al. Variation law of pore water pressure in soil improved by underwater vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 658 - 662. (in Chinese))
- [8] 刘爱民.变动水压荷载对真空预压加固效果的影响[J].地震工程学报,2015,2:467-471.(LIU Ai-min. Influence of varied water pressure loading on strengthening effect of vacuum preloading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 2: 467 - 471. (in Chinese))
- [9] CHU J, GUO W. Land reclamation using clay slurry or in deep water: challenges and solutions[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 51(2): 1790 - 1793.
- [10] 王传成.水下真空预压的机理研究[D].天津:天津大学,2005.(WANG Chuan-cheng. Study of mechanism of underwater vacuum preloading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))
- [11] GOURVENEC S M, WHITE D J. Elastic solutions for consolidation around seabed pipelines[C]// Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. Houston, 2010.

(责编:胡海霞)