

# 某机场跑道真空联合堆载预压法 地基处理试验研究

穆永亮<sup>1</sup>, 沈云如<sup>2\*</sup>, 姜建伟<sup>3</sup>

(1. 德清同创建设发展有限公司, 浙江 湖州 313200; 2. 浙江德稻工程咨询有限公司, 浙江 湖州 313200;  
3. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310032)

**摘要:** 本文对某机场跑道试验段真空联合堆载预压法加固处理的现场试验和部分室内土工实验资料进行详尽分析。结果表明, 淤泥地基在经过真空联合堆载预压法加固后各项物理力学指标均发生了显著变化, 承载力大幅提高, 加固效果较好。

**关键词:** 真空联合堆载预压法; 软土地基; 物理力学指标

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0382-06

## Experimental study on foundation treatment by vacuum and surcharge preloading method for runway of an airport

MU Yong-liang<sup>1</sup>, SHEN Yun-ru<sup>2\*</sup>, JIANG Jian-wei<sup>3</sup>

(1. Deqing Tongchuang Construction Development Co., Ltd., Huzhou 313200, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Dedao Engineering Consulting Co., Ltd., Huzhou 313200, Zhejiang, China;

3. School of Architectural Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, Zhejiang, China)

**Abstract:** The vacuum and surcharge preloading method is used to improve the soft soil foundation of an airport runway. The measured data in the field and laboratory geotechnical tests are studied in detail. The results show that after the mud soil foundation is improved by vacuum and surcharge preloading method, various physical and mechanical indexes of the foundation changed significantly, the bearing capacity has been greatly improved, and the reinforcement effect is good.

**Key words:** vacuum combined surcharge preloading method; soft soil foundation; physical and mechanical index

## 0 引 言

随着我国经济进入快速发展的轨道, 国民经济持续高速增长, 航空业务量需求旺盛, 我国出现大规模机场改、扩建及新建民用机场的高潮。与一般地面相比, 机场跑道对工后沉降, 地基稳定有更高的要求, 特别是要严格控制工后沉降, 过大的工后沉降将增大不均匀沉降的可能性, 会使跑道上高速运行的飞机产生明显的颠簸, 使飞机结构受到损害, 甚至可能会带来安全隐患。在我国东南沿海一带, 大多属于软土地区, 土的类别多为淤泥、淤泥质黏土。这类土往往具有细粒含量高、高含水率、

土层压缩性大、强度极低等特点。因此, 要想在这类地基上进行机场建筑物及跑道建设, 需要对这种软土地基进行处理, 才能保证其在施工和使用期间的承载力及稳定性安全。

对于机场跑道地基处理而言, 排水加固法是一种较好的地基处理方法。该法包括真空预压法、堆载预压法及真空联合堆载预压法等。将二者结合形成的真空联合堆载预压法将真空预压法及堆载预压法的优势结合在一起, 尤其适用于工程应用当中。随着工程应用越来越广泛, 国内的学者对其加固效果, 设计与施工方法的研究也不断深入。吴跃东等<sup>[1]</sup>对真空联合堆载预压加固地基

收稿日期: 2021-05-11

作者简介: 穆永亮 (1973—), 男, 浙江湖州人, 工程师, 主要从事地基处理、基坑工程的研究工作。E-mail: 237181361@qq.com。

\*通信作者: 沈云如 (1973—), 男, 浙江湖州人, 工程师, 主要从事地基处理项目管理研究。E-mail: 347739356@qq.com。

过程中孔隙水压力的变化进行了研究。郭彪等<sup>[2]</sup>和林伟岸等<sup>[3]</sup>分别推导出了真空联合堆载预压下,竖井地基和砂土地基的固结度解析。付光奇等<sup>[4]</sup>对以往计算方法及一些工程案例总结的基础上,提出了真空联合堆载预压加固软土地基的实用设计方法。彭劼等<sup>[5]</sup>对真空联合堆载预压法加固地基过程中对周围环境的影响进行了研究。周雷靖<sup>[6]</sup>、翟勇坚<sup>[7]</sup>和齐添等<sup>[8]</sup>结合工程实例,对真空联合堆载预压方法加固软基的施工方案及处理效果进行了研究。

本文依托某通用航空机场飞行区跑道建设工程,采用真空联合堆载预压法对地基进行加固以达到提高软土地基强度,减少工后沉降的目的。根据现场试验监测结果对孔隙水压力、土层表层及分层沉降、真空度传递等变化规律进行分析,以供类似工程参考。

## 1 工程概况

本工程场地地形较平坦,场地北侧及西侧分布有大量水塘。本区地貌分区属浙北平原区,拟建场地地貌属堆积地貌冲积湖积平原。跑道场地已进行回填处理,表层为厚度不均匀的素填土,土质结构较为疏松,其下层为粉质黏土、淤泥质粉质黏土等,分布较为广泛,层厚变化较大。结合钻孔取样后的试验结果,试验跑道土层具体分层及各层的物理力学指标参数见表1。由于机场跑道对工后沉降要求较高,单一使用真空预压或堆载预压处理难以在较短的工期内达到良好的土体加固效果,而真空联合堆载预压技术能克服真空预压(等效预压荷载不足)和堆载预压(工期较长)的缺点,因此该技术十分符合机场跑道地基加固要求,本工程选用该技术对机场跑道进行地基处理施工。

表1 各土层的物理力学指标参数

Table 1 Physical and mechanical index parameters of soil layers

层号	岩土名称	层面高程/m	层厚/m	含水量 $\omega_0/\%$	土的重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙比 $e_0$	土的比重 $G_s$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$
①	素填土	0.59~3.43	0.3~1.8	—	—	—	—	—	—
②	粉质黏土	0.34~1.80	0.6~2.1	32.2	18.00	0.958	2.72	20.0	9.9
③ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	-0.98~1.32	20.9~32.1	44.6	16.80	1.302	2.73	9.5	7.1
③ <sub>2</sub>	粉质黏土	-25.34~-21.37	1.7~6.9	32.1	17.93	0.979	2.72	21.8	6.8
④ <sub>1</sub>	黏土	-28.05~-23.56	0.8~5.5	26.5	18.67	0.819	2.74	46.6	10.0
④ <sub>2</sub>	中砂	-29.44~-22.17	1.0~8.1	—	—	—	—	—	—
⑤	粉质黏土	-31.98~-27.33	1.3~5.5	28.1	18.62	0.838	2.72	21.5	6.9
⑥ <sub>1</sub>	粉砂	-35.58~-25.33	1.0~7.7	—	—	—	—	—	—
⑥ <sub>2</sub>	粉质黏土	-38.91~-29.78	0.3~10.8	27.8	18.54	0.842	2.72	29.5	8.9
⑥ <sub>3</sub>	粉质黏土	-41.36~-39.84	1.1~2.7	32.0	18.07	0.945	2.72	12.2	6.9
⑥ <sub>4</sub>	粉砂	-43.36~-31.37	1.6~6.9	—	—	—	—	—	—
⑥ <sub>5</sub>	粉质黏土	-48.98~-37.08	0.5~4.8	31.6	17.96	0.962	2.72	27.1	8.4

## 2 真空联合堆载预压实施方案

该工程跑道试验段真空预压处理面积约为5 000 m<sup>2</sup>。排水板间距为1.3 m,排水板之间呈正三角形布置,排水板入土深度为18 m。真空联合堆载预压设计剖面示意图如图1所示。

主要施工顺序为:(1)清理平整场地→(2)摊铺30 cm厚中粗砂作为工作面→(3)打设塑料排水板→(4)布置监测点→(5)铺设滤水管→(6)摊铺密封膜→(7)安装并调试真空泵设备→(8)抽真空→(9)监测→(10)抽真空40 d后分层堆

载3.2 m厚回填土→(11)检测。

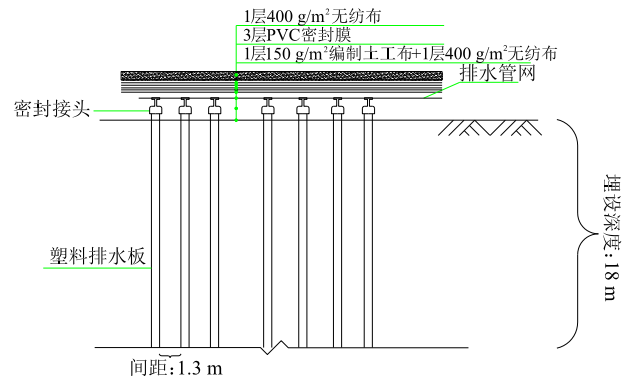


图1 真空联合堆载预压剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum and preloading section

该飞行区跑道试验段于2017年1月23日开始覆膜抽真空,真空度在24 h内达到75 kPa,随后2 d内稳定在84 kPa附近。自2017年3月3日开始以每天20 cm的速度进行堆载塘渣,堆载高度为3.2 m(含50 cm砂垫层),堆载压力53 kPa,堆载持续时间62 d。至2017年5月18日固结度达到停泵标准,共计处理时间为118 d。

地基处理过程中对孔隙水压力、地下水位、膜下真空度、土体表层沉降、深层分层沉降进行监测。测点平面布置图见图2。

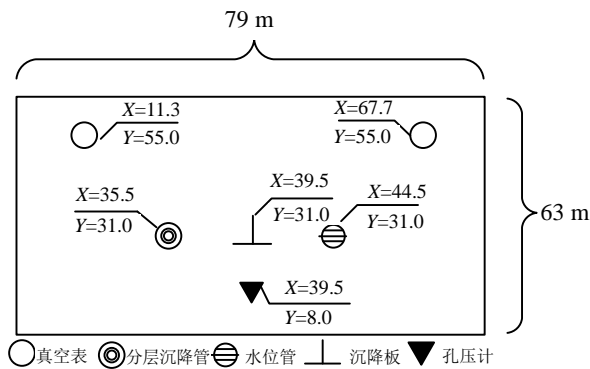


图2 试验段监测仪器平面布置示意图

Fig. 2 Layout plan of monitoring instruments in test section

### 3 真空联合堆载预压试验结果分析

#### 3.1 孔隙水压力

随着真空联合堆载预压工程的进行,孔隙水压力逐渐消散,土体含水率下降,土体达到固结压缩效果,进而使土体强度增强,因此孔隙水压力的变化能反映土体强度的增强效果。图3为淤泥孔隙水压力随日期的变化曲线。由图可知,随着抽真空的开始,不同深度处的孔隙水压力也相应地降低,说明这期间的排水通道十分顺畅。在抽真空40 d后,开始以每天填土20 cm的速度进行堆载,随着填土高度的不断增加,不同深度的孔隙水压力监测值均产生一定的波动,这可能是由填土时的施工干扰造成的。当填土高度达至施工方案设计值后,孔隙水压力监测值呈稳定下降的趋势。

#### 3.2 地下水位

真空联合堆载预压过程中地下水位累积下降值随时间的变化曲线如图4所示。在整个真空联合堆载预压期间地下水位累积下降值持续增大,由于加载期间天气及外界因素的影响,地下水位累积下降值在部分区域出现震荡现象,但总体来看,该试验段的地下水位累计下降值呈增长的趋势。

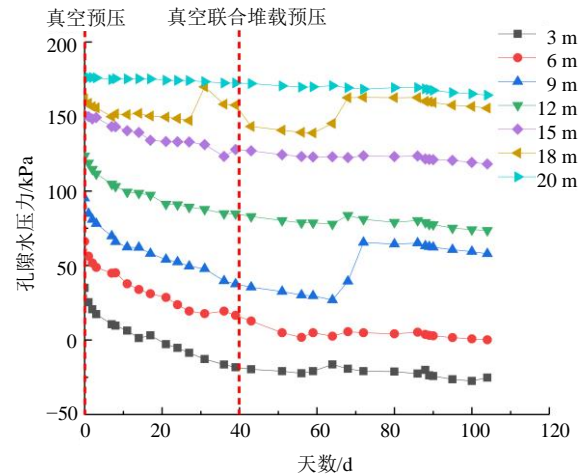


图3 孔隙水压力消散曲线

Fig. 3 Pore water pressure dissipation curves

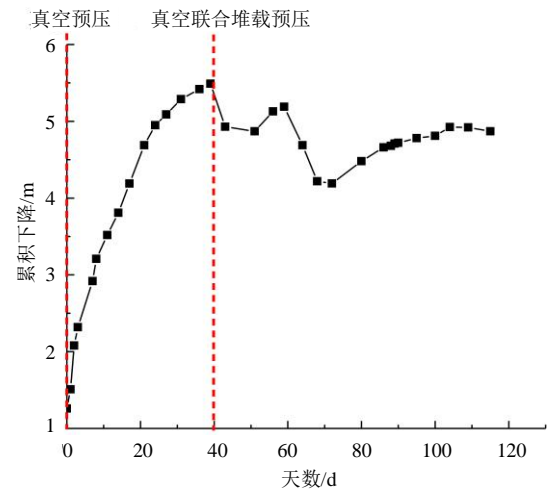


图4 地下水位累积下降值随时间的变化曲线

Fig. 4 Curve of cumulative decline of groundwater level with time

#### 3.3 膜下真空度

试验段膜下真空度随时间的变化曲线如图5所示。在抽真空初期,膜下真空度逐渐增大,这是由于该阶段膜下和土中孔隙的空气被抽走,从而导致真空度的上升。在真空泵工作5 d后达至85 kPa左右,达到设计规范<sup>[9]</sup>对真空预压膜下真空度的要求(膜下真空度达到86.7 kPa左右),随后一直稳定在该值附近。在真空联合堆载预压中期,由于邻近试验段工地施工不小心破坏了该试验段的真空系统,导致膜下真空度骤降,随即施工人员立即采取补救措施,将该试验段重新进行密封,相应的膜下真空度也就逐渐增加至85 kPa。在试验末期,由于工后沉降基本不发生变化,为节省资源,施工人员将工作的真空泵减少至1台,随即膜下真空度也相应减小。

### 3.4 土体表层沉降

试验段中心区域地表累积沉降量随时间的变化曲线如图6所示。随着真空联合堆载预压地基处理的进行,地表累积沉降量逐渐增大并趋于稳定,沉降速率随着抽真空的进行逐渐减小并趋于稳定。在卸载前15 d内实测的地表平均沉降速率小于2 mm/d,达到真空联合堆载预压设计卸载要求(竖向沉降速率不大于10 mm/d)<sup>[9]</sup>。最终卸载时刻总沉降量为73.9 cm。

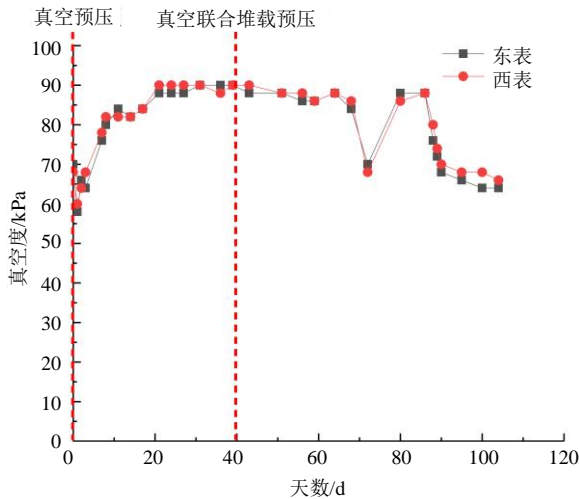


图5 膜下真空度随时间的变化曲线

Fig. 5 Curve of vacuum degree under film with time

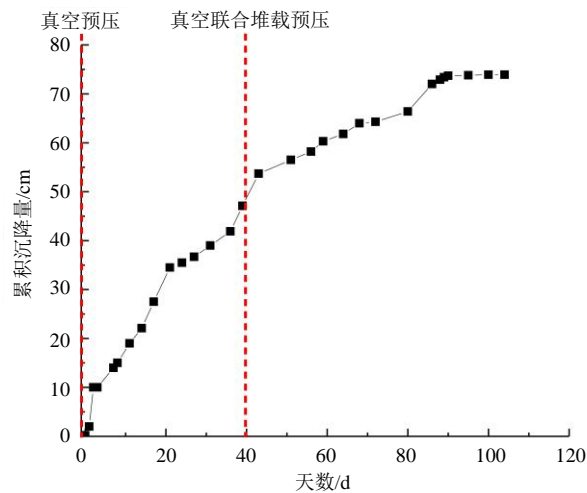


图6 地表累积沉降量随时间的变化曲线

Fig. 6 Curve of cumulative surface settlement with time

### 3.5 分层沉降

试验段中心区域不同深度的累积沉降随时间的变化曲线如图7所示。随着真空联合堆载预压地基处理的进行,不同深度处的测点累积沉降量随时间变化趋势基本相同。土层离地表位置越近,相应的累积沉降量也越大,同时沉降收敛速度越慢。

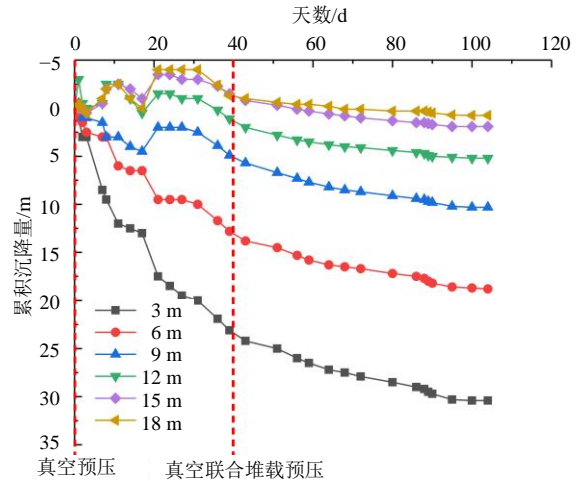


图7 中心区域不同深度的累积沉降随时间的变化曲线

Fig. 7 Curve of cumulative settlement with time at different depths in the central area

## 4 加固效果检验

为对真空联合堆载预压法处理的加固效果进行检验,分别进行了原位十字板剪切试验、钻孔取土室内试验和静力触探试验。

### 4.1 静力触探试验

表2给出了地基加固前后试验段淤泥质粉质黏土层③<sub>1</sub>的双桥静力触探的侧阻和端阻值,并将其处理前后的平均值(5个数据的平均值)与标准值进行比较。由表可知,地基处理后,试验段的淤泥质粉质黏土层的侧阻及端阻标准值都提高了20%。

表2 地基加固前后试验段区域双桥静力触探统计值对比表  
Table 2 Comparison of static cone penetration test statistical values of double bridges in the test section area before and after foundation reinforcement

③ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土	端阻 $q_c$ /MPa		侧阻 $f_s$ /MPa	
	平均值	标准值	平均值	标准值
处理后	0.615	0.603	0.009 5	0.009 4
处理前	0.510	0.503	0.008 0	0.007 8
提高程度	21%	20%	18%	20%

### 4.2 钻孔取土室内试验

地基处理后飞行区各区域③<sub>1</sub>淤泥质粉质黏土层的含水率、湿密度、比重和孔隙比等物性指标以及固结快剪黏聚力和摩擦角等强度指标统计值见表3。由表可知,地基处理后试验段淤泥质粉质黏土层含水率降低了9%,密度增加了3.0%,颗粒比重基本不变,孔隙比降低了16%,黏聚力增加了17.1%,内摩擦角增加了14.1%。

表3 飞行区跑道试验段③<sub>-1</sub>淤泥质粉质黏土层各项指标统计值

Table 3 Statistical values of indexes of ③<sub>-1</sub> muddy silt clay layer in runway test section of flight area

项目	加固前	加固后	变化率/%
含水率/%	44.600	40.50	-9.0
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.680	1.73	+3.0
比重	2.730	2.71	-0.7
孔隙比	1.302	1.09	-16.0
粘聚力/kPa	9.500	11.12	+17.1
内摩擦角/(°)	7.100	8.10	+14.1

#### 4.3 原位十字板剪切强度测试

地基处理后的淤泥质粉质黏土层的原状十字板剪切强度达至 31.95 kPa, 满足设计要求。

结合上述试验的各项指标对比可知, 土层性能有明显改善, 地基的承载力大幅提高, 说明真空联合堆载预压法加固效果明显, 达到了设计要求。

#### 4.4 土体固结度

根据《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147—2—2009)<sup>[10]</sup> 可计算得到本工程设计固结度为 60%, 而实际施工后, 固结度达到 68%, 满足设计要求。

## 5 结 论

本文通过对德清通用航空机场飞行区跑道试验段真空联合堆载预压法处理的现场试验资料分析研究, 可以得出以下结论:

(1) 监测结果表明, 随着真空联合堆载预压法加固处理的进行, 淤泥地基的孔隙水压力随着地下水的排出而相应消散, 消散趋势沿深度方向大致相同。

(2) 地下水位累计下降值随着真空联合堆载预压的进行呈增长趋势, 试验段在加固过程中真空度基本呈稳定状态。

(3) 自开始抽真空起, 地表累积沉降量逐渐增大, 且沉降曲线初期斜率较陡, 随着现场试验的进行, 沉降曲线逐渐缓和并趋于稳定。土体分层沉降沿深度方向基本呈相同趋势, 浅层土体较深层土体而言会产生更大的压缩量。

(4) 根据现场十字板剪切强度测试与室内静力触探试验及部分土工试验结果可知, 淤泥地基在经过真空联合堆载预压法处理后, 地基各物理力学指标均发生了显著变化, 承载力大幅提高, 加固效果较好。

## 参考文献

- [1] 吴跃东, 赵维炳. 真空-堆载联合预压加固高速公路软基的研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999(6): 77-81.  
WU Yue-dong, ZHAO Wei-bing. Study on strengthening expressway soft foundation by vacuum surcharge combined preloading[J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 1999(6): 77-81.
- [2] 郭彪, 龚晓南, 卢萌盟, 等. 真空联合堆载预压下竖井地基固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1045-1054.  
GUO Biao, GONG Xiao-nan, LU Meng-meng, et al. Analytical solution for consolidation of vertical drains by vacuum-surcharge preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1045-1054.
- [3] 林伟岸, 江文豪, 詹良通. 考虑真空加载过程及堆载随时间变化下砂井地基的普遍固结解析解[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1828-1838.  
LIN Wei-an, JIANG Wen-hao, ZHAN Liang-tong. General analytical solution for consolidation of sand-drained foundation considering the vacuum loading process and the time-dependent surcharge loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(7): 1828-1838.
- [4] 付光奇, 艾英钵, 李震. 真空-堆载联合预压加固高速公路软基的实用设计[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2002, 21(1): 41-45.  
FU Guang-qi, AI Ying-bo, LI Zhen. Practical design of vacuum surcharge preloading for strengthening expressway soft foundation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2002, 21(1): 41-45.
- [5] 彭劫, 刘汉龙, 陈永辉, 等. 真空-堆载联合预压法软基加固对周围环境的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 656-659.  
PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Yong-hui, et al. Effects of combined vacuum surcharge preloading to surrounding environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 656-659.
- [6] 周雷靖. 真空联合堆载预压法处理吹填淤泥地基的设计与施工[J]. 人民珠江, 2001(5): 32-34, 37.  
ZHOU Lei-jing. Design and construction of hydraulic fill silt foundation treated by vacuum combined surcharge preloading method[J]. Pearl River, 2001(5): 32-34, 37.
- [7] 翟勇坚. 广惠高速公路 A 段真空联合堆载预压施工[J].

- 公路与汽运, 2003(1): 34-36.
- ZHAI Yong-jian. Vacuum combined surcharge preloading construction of section a of Guanghui expressway[J]. Highway and Automotive Applications, 2003(1): 34-36.
- [8] 齐添, 李水江, 黄永基. 真空联合堆载预压处理深厚软土的效果分析[J]. 地基处理, 2020, 2(5): 392-396.
- QI Tian, LI Shui-jiang, HUANG Yong-ji. Effect of vacuum-surcharge preloading on thick soft soil[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(5): 392-396.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2013.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 真空预压加固软土地基技术规程: JTS 147—2—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

## 【简 讯】

### 《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版) 简介

《土力学及基础工程实用名词词典》(浙江大学出版社, 1993) 出版 20 多年来得到了广大读者的欢迎。20 多年来我国土木工程建设快速发展, 对外交流日益增多, 不少设计、施工技术人员承担域外工程。近年来, 不少读者希望词典能够再版。为了适应需要, 我们在第一版的基础上组织编写了第二版。第二版对第一版收编的词条进行了修订、补充、完善, 收编的汉语词条从 723 条扩展到 1 106 条。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版) 收录了土力学及基础工程领域的常用词条和相应的英文词条。词条释文力求正确、简明、全面, 并尽可能包括设计、施工所需资料。词条索引共有 3 种: (1) 词条分类检字索引; (2) 词条拼音检字索引; (3) 词条英文检字索引。查阅方便。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版) 内容分 30 个部分, 分别为: (1) 综合类; (2) 工程地质及勘查; (3) 岩土分类; (4) 室内试验; (5) 原位测试; (6) 土的物理性质; (7) 渗透性和渗流; (8) 应力; (9) 位移和变形; (10) 固结; (11) 抗剪强度; (12) 本构模型; (13)

岩土动力性质; (14) 地基承载力; (15) 地基处理; (16) 浅基础; (17) 复合地基; (18) 桩基础; (19) 特种基础; (20) 土坡稳定; (21) 挡土结构和喷锚结构; (22) 堤与坝; (23) 土压力; (24) 基坑工程与降水; (25) 地下工程; (26) 动力机器基础; (27) 地基基础抗震; (28) 土工合成材料; (29) 环境岩土工程; (30) 其他。

《土力学及基础工程实用名词词典》(第二版) 主编龚晓南, 副主编谢康和。罗勇博士、连峰博士、李瑛博士、王志达博士、沈扬博士、郭彪博士、吕文志博士、张杰博士、陈东霞博士、史海莹博士、张磊博士、张雪婵博士、黄大中博士等在浙江大学学习期间参与了本词典词条的遴选、编写和校对工作。本词典在编写过程中还得到了浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心同事们的大力支持, 陆水琴和王笑笑等同志为本词典的排版、校对等做了许多工作, 在此表示感谢。

由于编者水平有限, 本词典中难免有错误和不当之处, 敬请读者批评指正。