



真空预压与真空井点降水用于 软土处理的机理差异

陈富^{1,2,3}, 陈默⁴

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中交集团粤港澳大湾区创新研究院, 广东 深圳 518000;
3. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 4. 中交一航局第一工程有限公司, 天津 300461)

摘要: 真空预压与真空井点降水两种工艺均可用于软土地基处理, 表观上两者都是通过抽真空使土体内孔隙水排出并使软土沉降, 但目前对两者的工艺和机理等关键差异的认识不深入, 难以有效指导现场施工。真空预压和真空井点降水在抽真空设备、竖向排水通道和密封边界等设备与工艺方面有显著差异; 两者的排水机理也有着本质区别。真空预压的加固机理是负压作用下土体发生塑料排水板水平向排水固结, 同时塑料排水板内的水向上流动与重力无关; 真空井点降水的加固机理是群井抽水引起地下水位降低, 土体的浮重度变为湿重度导致荷载增大使土体沉降, 同时井点管内的水向上流动受重力影响。在工艺和机理的差异分析的基础上, 进一步明确了真空预压和真空井点降水在 10 个关键方面的差异, 包括加固机理、影响深度、不同深度的真空传播、土体水平变形、竖向排水与重力的关系、抽真空位置影响、与外界是否连通、影响区成因、地下水位变化、是否形成非饱和带。

关键词: 真空预压; 真空井点降水; 软基处理; 机理; 排水固结; 差异分析

中图分类号: U655; TU472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0183-06

Mechanism difference between vacuum preloading and vacuum well dewatering for soft soil treatment

CHEN Fu^{1,2,3}, CHEN Mo⁴

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. CCCC Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Innovation Research Institute, Shenzhen 518000, China;
3. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;
4. No. 1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Both vacuum preloading and vacuum well dewatering can be used for the improvement of soft soil foundation. Apparently, both of them drain out pore water through vacuum and make the soft soil consolidate. However, if the understanding of the key differences between the two technologies and mechanisms is not clear, it is difficult to effectively guide the on-site construction. There are significant differences between vacuum preloading and vacuum well dewatering in vacuum pumping equipment, vertical drainage channels and sealing boundaries. The drainage mechanism of the two is also fundamentally different. The mechanism of vacuum preloading is that the soil mass is consolidated horizontally towards prefabricated vertical drains(PVD) under negative pressure difference, and the upward flow of water in the PVD is independent of gravity. The mechanism of the vacuum well dewatering is that the groundwater level decreases due to the pumping of group wells, thus makes the soil unit weight to change from buoyant unit weight to the wet unit weight, resulting in additional loading and consolidation, and the water inside the well pipe is affected by gravity. On the basis of the difference analysis of process and mechanism, the differences

收稿日期: 2023-08-10

作者简介: 陈富 (1986—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事真空预压和污泥处理等方面研究。

between vacuum preloading and vacuum well dewatering in 10 key aspects are further clarified, including reinforcement mechanism, influence depth, vacuum propagation at different depths, soil horizontal deformation, relationship between upwards water flow and gravity, influence of vacuum pumping location, connectivity state with the outside environment, cause of influence area, changes in groundwater level, and formation of unsaturated zone.

Keywords: vacuum preloading; vacuum well dewatering; soft soil ground improvement; mechanism; consolidation; difference analysis

在港口、公路等基础设施建设中经常需要面对软黏土地基处理问题。软黏土含水量大、渗透系数小、压缩性大、抗剪强度低，目前大多采用排水固结方法将土体内的孔隙水排出而产生压缩固结沉降，其中真空预压工艺在处理软土时不存在地基加载失稳问题，得到了广泛应用^[1-2]。真空井点降水主要用于基坑工程，通过真空泵抽取地下水使地下水位降低从而为开挖形成干作业条件。近年来开始将真空井点降水与强夯相结合处理粉质黏土等渗透系数稍大的软土，取得了一定的处理效果，其中井点管通常采用常规无缝钢管^[3]，最近也有采用塑料排水板的新工艺^[4]。

真空预压和真空井点降水均采用抽真空方式将土体内孔隙水排出使软土沉降，但对于两者的机理和关键问题等方面的差异研究不够深入，容易出现错误认识，影响现场施工效率和质量。尤其是对于真空预压加固机理尚存在争议，除主流的负压排水固结机理解释之外，岑仰润^[5]、龚晓南等^[6]提出真空渗流场排水机制，明经平等^[7]提出溶解气膨胀驱水机制、孔隙水汽化成水蒸气和毛细水上升等排水机制。上述排水机制无法全面解释真空预压的争议问题，例如是否形成非饱和带、地下水位变化、塑料排水板内真空度衰减、四周密封边界、真空面作用位置的影响等关键认识问题^[8]。

本文对真空预压与真空井点降水的机理和工艺方面的差异进行全面分析，并对重要认识问题进行解释，旨在为软土地基处理的设计和施工提供参考。

1 工艺与设备

1.1 抽真空系统

1.1.1 真空预压

真空预压工艺抽真空系统主要由射流泵、文丘里管(射流器)、钢丝软管和出膜装置等组成。

射流泵和文丘里管是真空源，通过钢丝软管和出膜装置接入密封膜下的空间，从而在密封膜之下的砂垫层和塑料排水板中形成真空，见图1。根据《建筑地基处理技术规范》，每台射流泵的对应加固面积为1 000~1 500 m²，膜下真空度需要稳定保持在86.7 kPa以上^[9]。



图1 真空预压射流泵

1.1.2 真空井点降水

真空井点降水工艺的抽真空系统主要由真空泵、离心泵和集水箱组成，常用真空泵类型见图2^[10]。



a) 往复式



b) 外置式

图2 真空井点降水工艺抽真空设备

1.2 排水系统

1.2.1 真空预压

真空预压排水系统主要包括竖向塑料排水板、水平排水砂垫层及埋置在砂垫层中的滤管。塑料排水板在地基内形成竖向排水通道,地基内的孔隙水依次通过塑料排水板和水平砂垫层排出到密封膜外。插设塑料排水板一般采用正方形或者等边三角形布置,间距为0.7~2.0 m,见图3。



图3 塑料排水板插设及砂垫层

1.2.2 真空井点降水

真空井点降水工艺排水系统主要包括滤管、无缝钢管、水平汇水主管。打入土体内的无缝钢管间距一般为1.2~2.4 m。钢管直径约50 mm,底部连接1.0~1.5 m打孔滤管,滤管必须埋入含水层内,且比挖基坑底深0.9~1.2 m。钢管顶端与水平集水总管连接,利用水泵产生的真空作用将地下水从井点管内不断抽出。同时为了充分利用真空抽吸水头的能力,汇水主管的高程宜尽量接近地下水位线,见图4。



图4 真空井点降水管路

1.3 密封系统

1.3.1 真空预压

真空预压工艺密封系统主要包括水平密封膜、压膜沟和竖向密封墙。水平密封膜与竖向密封墙在压膜沟处紧密搭接,共同组成完整的密封边界。

水平密封膜一般采用2~3层黑色聚氯乙烯膜,隔绝大气与膜下土体的联系。同时竖向密封墙可以封闭地基内的粉土、粉砂等渗透性较大的夹层,隔绝深处土体与加固区之外的大气和地下水的连通,见图5。

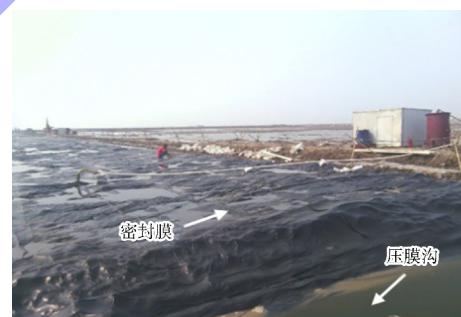


图5 密封膜及密封沟

1.3.2 真空井点降水

真空井点降水工艺无水平密封膜和竖向密封墙,只利用土体自身的隔离密封保持井点管内的真空度,如在地面以下0.5~1.0 m内用黏土分层封口捣实以防漏气,且井点管距基坑壁距离不小于1.0~1.5 m以防漏气,见图6。真空井点降水过程中抽真空仅能作用在井点管内及底部滤管附近,井点管一定距离之外土体内的地下水与外界大气保持连通。



图 6 真空井点降水的管口密封

2 加固机理分析

2.1 真空预压机理

真空预压加固机理是负压作用下土体发生塑料排水板的水平向排水固结。在地表铺设中粗砂排水垫层，并在地基内插入塑料排水板形成竖向排水通道，然后在砂垫层上铺设密封膜，通过射流泵在密封膜下抽真空，该负压沿砂垫层迅速传递至塑料排水板的所有深度范围，从而在土体内部和塑料排水板之间压差作用下孔隙水不断排出，土体沉降固结。

真空预压排水过程如图 7 所示，假定膜下真空度(负压)为 85 kPa，该真空度通过压强传递的方式传递至砂垫层和塑料排水板内，因此 C、B 点的总压强值降低 85 kPa，也就是超静孔隙水压力变为-85 kPa，而静水压力保持不变。此时 A 点的超静孔隙水压力仍为 0 kPa，此 A、B 点之间形成超静孔隙水压力差 85 kPa，在此水平向压差的作用下，A 点孔隙水不断向 B 点渗流，随着时间增加，A、B 点的孔隙水压力值逐渐相等，土体完成固结并产生相应的沉降变形。因此真空预压下土体的固结过程仅是抽真空引起的超静孔隙水压力的消散变化，而静水压力始终保持不变。

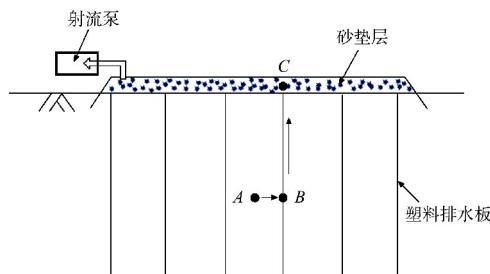


图 7 真空预压排水过程

岩土工程中地下水位一般定义为静水压力为 0 kPa 的(自由)液面^[11]。因此尽管真空预压过程中地下水位随地基沉降而同步下降，从而使得最终地下水位的绝对高程降低，但从地下水位与周围土体颗粒 A 的对应位置关系来看，整个真空预压期间地下水位相对位置不变，即土体沉降量 Δs_1 等于地下水位降深 Δs_2 ，见图 8。

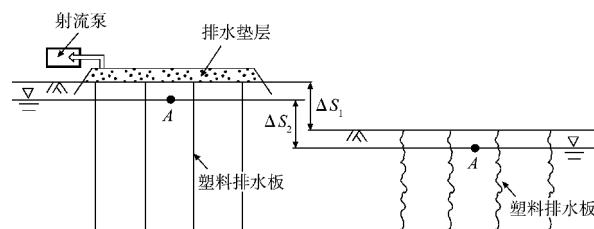


图 8 真空预压前后地下水位变化

塑料排水板内水的竖向流动动力来自于抽真空带来的负压在塑料排水板内传递而引起分子移动，即由于射流器抽真空造成原有流体分子带走，而塑料排水板内的流体分子向上移动填充，本质上是一种分子移动引起的压强传播，即真空负压以压强传递的方式在砂垫层和塑料排水板内传递，与重力作用无关。真空预压过程中塑料排水板内的水向上流动不是通常理解的在塑料排水板顶部抽真空而托起重力场下的“水柱”的概念。可以从以下 3 个方面进行论证。

1) 真空预压中塑料排水板液面及地基土体内液面与地基同步沉降，因此塑料排水板内不会存在高于周围土体水位之上的“水柱”。

2) 在固结理论和数值模拟中，塑料排水板作为完全排水边界，占鑫杰^[12]、胡铀等^[13]、闫澍旺等^[14]在真空预压实际工程中观测到塑料排水板内的真空度沿竖向无衰减，证明其上部与下部之间不存在重力水头差。

3) 从塑料排水板的构造角度看，塑料排水板由芯板和滤膜两部分组成，芯板材质为聚乙烯或聚丙烯或两者混合物，通过挤塑工艺形成具有若干纵向齿楞的形状。滤膜一般采用 PET 纺黏热轧无纺布，通过热熔的方式黏附在芯板的齿楞外侧。塑料排水板的断面尺寸为 4 mm×100 mm，芯板齿

楞和外侧滤膜共同组成两排共计 62 个微小齿间通道,单齿间通道的净空尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,由 3 面芯板和 1 面滤膜围成,见图 9。

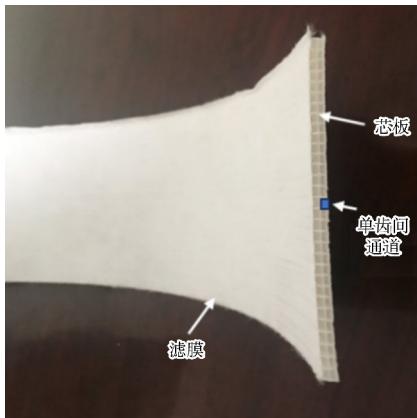


图 9 塑料排水板构造

2.2 真空井点降水机理

真空井点降水的机理是群井抽水引起地下水位降低,通过抽真空不断将井点管的水抽出,井内水位降低,周围地下水位不断往井内汇集,当抽出的水量与周围土体汇集来的水量相等时,即形成稳定的降水漏斗,从而降低地下水位,符合渗流流网理论,见图 10。

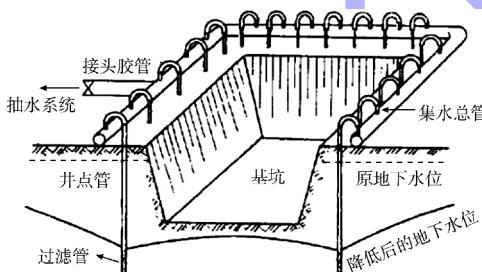


图 10 真空井点降水机理

井点管一般采用直径 50 mm 的无缝钢管,底部为打孔滤管,构造见图 11。



图 11 井点管构造

真空井点降水引起地下水位降低会导致地基沉降,主要原因是地下水位变动范围内的土体受到的有效应力由浮重度变为湿重度,对水位变动范围内及以下的土层形成附加荷载,从而引起土体压缩沉降。

抽真空使井点管内的压强小于周围大气压力从而在井点管内形成高出地下水位的“水柱”。由于井点管直径较大,毛细作用不明显,该水柱受重力作用影响,因此抽真空提水的最大理论高度是 10 m。综合考虑施工能耗和效益,实际降水工程中单级真空井点的降水深度约 6 m。

3 关键差异分析

从 10 个方面对真空预压和真空井点降水的差异进行进一步分析,见表 1。

表 1 真空预压和真空井点降水的差异

工艺	加固机理	影响深度	不同深度的真空传播	土体水平变形
真空预压	负压下土体发生塑料排水板的水平向排水固结变形	整个塑料排水板插设深度范围内均产生固结沉降	真空在整个插板深度均会水平传播	真空预压在土体各个方向施加球形有效应力引起收缩变形,因此深层水平位移方向指向加固区内
真空井点降水	真空井点群井抽水后降低地下水位使浮密度变为湿密度,增大上部荷载引起土体沉降	原地下水位以上的土层不会压缩变形,地下水位变动区及其以下土层发生压缩沉降(地下水位理论最大降深为 10 m)	上部不打孔钢管范围不扩散真空;底部打孔滤管范围发生真空传播	地下水位降低后上部土层重度变大,使得下部土层产生向井点管外的水平位移,同时浅层土体由于近处沉降后形成高度差,导致水平位移朝向井点管

续表1

工艺	竖向排水与重力的关系	抽真空位置影响	与外界是否连通	影响区成因	地下水位变化	是否形成非饱和带
真空预压	塑料排水板内竖向排水不受重力作用; 无高出地下水位的“重力水柱”概念	抽真空位置在塑料排水板的顶部或底部不影响加固效果	水平密封膜和竖向密封墙隔绝了与外界大气和地下水的连通	真空预压区周边的密封墙并非绝对不透水, 造成负压外扩引起加固区周边土层发生轻微固结变形	地下水位相对土体不下降	不形成新的非饱和带
真空井点降水	钢管内抽水需要克服重力作用; 井点管内的水形成高于地下水位的“重力水柱”, 最大高度为 10 m	水平汇水主管应尽量贴近原地下水位	除井点管地表局部密封处之外均与大气和地下水连通	滤管处地下水位降低, 引起周围土体的地下水汇集而形成降水漏斗, 导致周边土体沉降变形	形成降水漏斗, 地下水位下降	地下水位下降变动区会形成新的非饱和带

4 结论

- 1) 真空预压和真空井点降水工艺在抽真空设备、竖向排水通道和密封边界等方面有显著差异。
- 2) 真空预压和真空井点降水的排水机理有着本质的区别。真空预压的加固机理是负压作用下土体发生塑料排水板水平向排水固结, 真空度以压强传递的方式在塑料排水板内向下传递而不会衰减, 塑料排水板内的水向上流动与重力无关。真空井点降水的本质是群井抽水引起地下水位降低, 土体的浮重度变为湿重度导致荷载增大使土体沉降, 同时井点管内的水受重力影响。
- 3) 在工艺和机理分析的基础上, 进一步明确了真空预压和真空井点降水 10 个方面的差异, 包括加固机理、影响深度、不同深度的真空传播、土体水平变形、竖向排水与重力的关系、抽真空位置影响、与外界是否连通、影响区成因、地下水位变化、是否形成非饱和带等。

参考文献:

- [1] 高志义. 真空预压法的理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 陈环. 真空预压法机理研究十年 [J]. 港口工程, 1991 (4): 17-26.

- [3] 徐士龙. 快速“高真空击密法”软地基处理工法: CN 1330189[P]. 2002-01-09.
- [4] 上海建研地基基础工程有限公司. 井点塑排真空预压联合降水预压动力固结法: CN 105887902A[P]. 2016-08-24.
- [5] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [6] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固地基若干问题 [J]. 地基处理, 2002, 13(4): 7-11.
- [7] 明经平, 赵维炳. 真空预压法加固软基的排水机制研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1821-1825.
- [8] 张诚厚, 王伯衍, 曹永琅. 真空作用面位置及排水管间距对预压效果的影响 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 45-52.
- [9] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [10] 姚天强, 石振华. 基坑降水手册 [M]. 中国建筑工业出版社, 2006.
- [11] 陈富, 张健. 真空预压地下水位变化及测试方法 [J]. 中国港湾建设, 2016, 36(9): 37-41.
- [12] 占鑫杰. 市政污泥的化学调理和真空预压联合作用固结机理及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [13] 胡铀, 诸葛爱军, 陈智军. 塑料排水板内部真空压力的现场测试 [J]. 中国港湾建设, 2012(3): 45-48.
- [14] 闫澍旺, 侯晋芳, 程栋栋. 真空预压有效加固深度的探讨 [J]. 水利学报, 2007, 38(7): 774-778.

(本文编辑 王传瑜)