

## · 地基与基础 ·



# 水下真空预压的加固机理及其 密封铺膜施工工艺

陈 富<sup>1,2</sup>, 胡利文<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461;

3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 水下真空预压与真空联合膜上覆水预压在应力状态和加固机理方面有着本质区别。水下真空预压过程中总应力不变, 真空联合膜上覆水预压过程中土体总应力随膜上覆水厚度的增大而增大。水下真空预压的加固机理与陆上真空预压相同, 即总应力不变的情况下, 抽真空减小孔隙水压力, 从而增大有效应力。水下真空预压前后的有效应力增长幅值与水深无关, 其理论最大值为 100 kPa。水下真空预压的关键施工工艺主要包括铺膜及密封工艺、真空泵选型与布置。从加固效果好的角度, 应该采用类似挪威现场试验的密封膜密封和射流泵抽真空的组合, 但水下真空预压施工的现场影响因素复杂, 须根据现场实际情况选择性价比最优的方案。水下真空预压密封膜铺设装置专利技术集密封、滤管、出膜装置等功能于一体, 实现完全水下环境下的密封膜的铺设及密封, 减少水下作业, 尤其适用于海上风电领域吸力桶基础的小范围的海底软黏土加固。

**关键词:** 水下; 真空预压; 真空联合膜上覆水预压; 机理; 施工工艺

中图分类号: TU 472; U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0146-08

## Reinforcement mechanism and membrane laying and sealing construction process of underwater vacuum preloading

CHEN Fu<sup>1,2</sup>, HU Li-wen<sup>3</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co. Ltd., Tianjin 300461, China;

3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Essential differences in stress state and reinforcement mechanism exist between underwater vacuum preloading and preloading combining vacuum with overlying water on the membrane. Specifically, the total stress does not change during underwater vacuum preloading. In contrast, the total stress in soil increases with the thickness of the overlying water on the membrane in preloading combining vacuum with overlying water on the membrane. The reinforcement mechanism of underwater vacuum preloading is the same as that of onshore vacuum preloading, namely that on the premise of the same total stress, vacuum pumping reduces the pore water pressure and further increases the effective stress. The increasing amplitude between the effective stress before and after underwater vacuum preloading is independent of the water depth, with a theoretical maximum value of 100 kPa. The key construction process of underwater vacuum preloading mainly includes membrane laying and sealing and the selection and layout of the vacuum pump. A combination of sealing with an overlying sealing membrane and vacuum pumping with a jet pump similar to that adopted in the field test in Norway is advisable for the sake of a favorable reinforcement effect. However, factors influencing the construction site of underwater vacuum preloading are complex,

收稿日期: 2022-05-13

作者简介: 陈富(1986—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事地基处理和污泥处理等研究。

demanding the selection of the scheme with the optimal cost performance according to the actual situation on site. Integrating the functions of the sealing device, filter pipes, and membrane outlet device, the patented technology of the sealing membrane laying device for underwater vacuum preloading is available for the sealing membrane laying and sealing in a completely underwater environment, and it reduces underwater operation, It is especially suitable for small-scale seabed soft clay reinforcement for suction bucket foundations in the field of offshore wind power.

**Keywords:** underwater; vacuum preloading; preloading combining vacuum with overlying water on membrane; mechanism; construction process

自 1980 年中交一航局在天津新港成功进行真空预压现场试验以来，真空预压软基处理技术在大面积深厚软黏土地基处理工程中得到了广泛的应用。真空预压的加固机理是负压作用下的排水固结，总应力不变的情况下，通过抽真空降低孔隙水压力，从而增大有效应力，达到加固土体的目的<sup>[1]</sup>。

现阶段真空预压地基处理工程基本都是陆上施工，天津、连云港和福建等地的潮间带也应用了真空预压工艺<sup>[2-4]</sup>。潮间带在低潮位时场地可以露出水面，可以利用低潮位时间进行真空预压相关工序的施工，尤其是密封膜和压膜沟密封必须要退潮后陆上施工，因此潮间带真空预压本质上属于陆上真空预压施工。

目前水下铺设砂垫层和打设塑料排水板均有成熟的船舶设备和施工工艺，水下真空预压的主要难点是水下环境密封膜铺设与密封问题，该问题一直没有较好的解决方案，限制了水下真空预压的现场大规模应用。

近年来国内外学者针对水下密封问题提出了若干新的施工工艺，并进行了现场试验验证。2000—2002 年 Karlsrud<sup>[5]</sup>在挪威德拉门港进行了水下真空预压的现场试验，试验区面积 30 m×50 m、水深 10 m，采用放卷的方式水下铺密封膜，其四周用砂袋压住实现密封。试验过程中发现密封效果不好，潜水员应及时水下修补，现场试验断断续续进行了 3 个阶段。

2009 年 Yeung<sup>[6]</sup>在两个试验水坑内进行了水下真空预压试验，水坑尺寸 30 m×30 m、水深约

1.4 m。第 1 个采用黏土回填作为自密封层试验失败；第 2 个采用密封膜水上展开然后潜水员用砂袋压住密封膜四周，试验基本成功。

2007—2015 年日本东京新海洋处理场 C 区块采用了水下真空预压工艺，处理总面积 38 万 m<sup>2</sup>，水深约 2 m。利用表层一定厚度的软黏土层作为水下真空预压密封层，将塑料排水板通过接头与主管相连，然后通过主管抽真空对水下软土进行加固，平均沉降 5.13 m，取得了成功<sup>[7]</sup>。

除了日本东京新海洋处理场 C 区采用一定厚度黏土层作为密封层实现了大面积应用外，其他采用铺膜密封工艺的水下真空预压现场试验都遇到了较多的问题，难以实现大规模水下应用。

由于成本和施工工艺上的困难，未来水下真空预压的应用领域和规模与陆上真空预压有着明显差异。水下真空预压的应用不可能像陆上真空预压一次性加固几十万平方米，目前较为可行的应用方向是与海上风电吸力桶基础形式结合，在吸力桶安装之前对该点位的软土地基进行地基处理。通过对软黏土排水固结使土体发生压缩沉降，并提高土体的强度，通过排水固结改善土体循环弱化特性，提高吸力筒基础在不利荷载组合下的正常运行性能。目前吸力筒基础直径大多在 50 m 以内，因此水下真空预压的单次加固范围应稍大于该尺寸。

制约水下真空预压法现场应用的因素除了上述施工工艺问题，还有对加固机理方面认识不清，尤其是膜上水水深是否对水下真空预压有影响，因此本文从加固机理和现场施工工艺两个方面对水下真空预压法进行深入研究。

1 水下真空预压加固机理

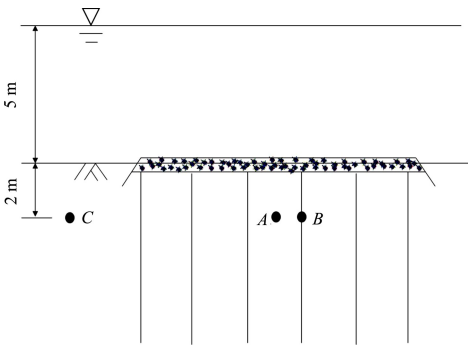
水下真空预压与真空联合膜上覆水预压都是在一定水深下进行真空预压，两者容易混淆，但它们在应力状态和加固机理方面有着本质区别。

文献[1]指出水下真空预压时膜上已存在水体，即在铺膜前水下土体已施加该水深对应的孔隙水压力，成为初始孔压的一部分；后者膜上压载水是在铺膜后施加的，压载水成为荷载的一部分，增大了膜下土体的总应力，从而使两者的加固机理产生了本质的区别。

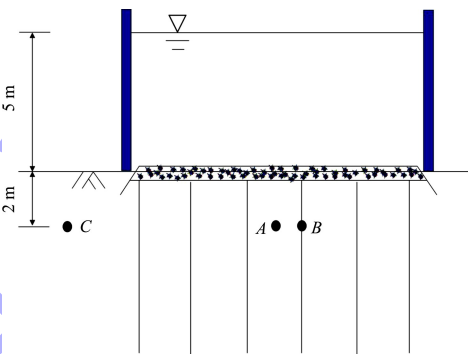
水下真空预压加固过程中总应力不变，抽真空后带来负的超静孔隙水压力，从而使土体产生负压作用下的固结，固结过程孔隙水压力无升高现象，有向加固区内变形的趋势。真空联合膜上覆水预压的压载水增大了膜下土体的总应力，并且总应力的增大值是膜上覆水水深对应的压力值，固结过程孔压先上升再逐渐消散，与真空联合堆载预压的孔压变化相似，其土体侧向位移是向外的。

结合算例进一步分析水下真空预压和真空联合膜上压载水之间的区别。图 1 中的 A、B、C 均位于土体表面以下 2 m 的软黏土中，其中 A 点位于两根塑料排水板之间，B 点位于塑料排水板位置，C 点位于真空预压的影响区(假定加固区内固结度 100%时,真空预压影响区内 C 点的固结度为

50%)。假定水的密度为 1.0 t/m<sup>3</sup>、软黏土的饱和密度为 1.8 t/m<sup>3</sup>、抽真空造成的膜下负压为-80 kPa。



a) 水下真空预压



b) 真空联合膜上覆水预压

图 1 算例剖面

对于水下真空预压，铺膜前水深 5 m；对于真空联合膜上覆水预压，铺膜前地下水位位于地表，铺膜后的膜上覆水的水深 5 m。应力状态变化见表 1。

表 1 应力状态变化

预压模式	阶段	位置	总应力/kPa	有效应力/kPa	静水压力/kPa	超静孔压/kPa	总孔压/kPa
水下真空预压	铺膜前	A	86	16	70	0	70
		B	86	16	70	0	70
		C	86	16	70	0	70
	铺膜密封后	A	86	16	70	0	70
		B	86	16	70	0	70
		C	86	16	70	0	70
	刚开始抽真空	A	86	16	70	0	70
		B	86	96	70	-80	-10
		C	86	16	70	0	70
	固结度 100%	A	86	96	70	-80	-10
		B	86	96	70	-80	-10
		C	86	56	70	-40	30
卸载后		A	86	16	70	0	70
		B	86	16	70	0	70
		C	86	16	70	0	70

续表1

预压模式	阶段	位置	总应力/kPa	有效应力/kPa	静水压力/kPa	超静孔压/kPa	总孔压/kPa
真空联合膜上覆水预压	铺膜前	A	36	16	20	0	20
		B	36	16	20	0	20
		C	36	16	20	0	20
	铺膜密封后	A	36	16	20	0	20
		B	36	16	20	0	20
		C	36	16	20	0	20
	刚开始抽真空	A	36	16	20	0	20
		B	36	96	20	-80	-60
		C	36	16	20	0	20
	随即膜上覆水 5 m	A	86	16	20	50	70
		B	86	146	20	-80	-60
		C	36	16	20	0	20
	固结度 100%	A	86	146	20	-80	-60
		B	86	146	20	-80	-60
		C	36	56	20	-40	-20
	卸载后(无膜上水)	A	36	16	20	0	20
		B	36	16	20	0	20
		C	36	16	20	0	20

注：对于铺膜后的膜下静水压力以铺膜前的自由液面为基准而确定。

通过表 1 可以看出，水下真空预压与真空联合膜上覆水预压的应力状态变化是完全不同的。以 A 点为例，水下真空预压时总应力不变，固结度 100%时最终有效应力值只与抽真空负压大小有关，与水深无关，其加固后的土体的超固结比 OCR=6.0；真空联合膜上覆水预压时总应力随膜上覆水水深增大而增大，固结度 100%时最终有效应力与抽真空负压和膜上覆水水深直接相关，其加固后的土体的超固结比 OCR=9.1。

根据修正剑桥模型，软黏土原位不排水抗剪强度与超固结比 OCR 和应力状态有关<sup>[8]</sup>：

$$S_u = OCR \cdot \sigma'_{vi} \cdot g(\theta) \cdot \cos\theta \cdot \frac{1+2 K_0^{NC}}{6} \cdot (1+B^2)^{\left[ \frac{2(1+K_0^{OC})}{(1+2 K_0^{NC}) \cdot OCR \cdot (1+B^2)} \right]^{\frac{\kappa}{\lambda}}}$$

(1)

其中

$$B = \frac{\sqrt{3}(1-K_0^{NC})}{g(-30^\circ)(1+2 K_0^{NC})}$$

(2)

$$K_0^{NC} = 1 - \sin\varphi'_{cs}$$

(3)

$$K_0^{OC} = K_0^{NC} \cdot OCR^{\varphi'_{cs}}$$

(4)

$$g(\theta) = \frac{\sin\varphi'_{cs}}{\cos\theta + \frac{\sin\theta\sin\varphi'_{cs}}{\sqrt{3}}}$$

(5)

式中：OCR 为超固结比； $K_0^{NC}$  为正常固结状态下的水平静止土压力系数； $K_0^{OC}$  为超固结状态下的水平静止土压力系数； $\varphi'_{cs}$  为内摩擦角； $\sigma'_{vi}$  为竖向有效应力； $\kappa$  为膨胀曲线  $e-\ln p'$  的斜率； $\lambda$  为压缩曲线  $e-\ln p'$  的斜率； $\theta$  为洛德 (Lode) 角，取  $-30^\circ$ 。

软黏土的不排水抗剪强度与有效应力和超固结比 OCR 成正比，因此水下真空预压的不排水抗剪强度增长幅值只与抽真空负压大小相关，与水深无关。而真空联合膜上覆水预压的不排水抗剪强度增长幅值与抽真空负压大小和膜上覆水水深均相关，即膜上覆水的水深越大，加固后土体的不排水抗剪强度越大。

由于水下真空预压与真空联合膜上覆水预压的应力状态和加固效果存在明显区别，在进行相关模型试验时由于装置或试验工艺的限制，容易将两者混淆，因此应首先明确区分到底进行的是何种试验，避免造成误导。

真空联合膜上覆水预压的试验步骤比较直观、

容易理解，即土层之上先覆盖密封膜进行密封，然后抽真空和膜上覆水加载同时进行。水下真空预压的模型试验的最理想操作步骤是先在土体之上灌指定深度的水，静置足够长的时间后，水下安装密封膜并在密封后开始抽真空。这种操作步骤最接近水下真空预压的现场应用工况，但由于模型试验中水深较大或者操作空间受限，可能在模型试验中实施较为困难。另一种比较接近于水下真空预压现场应用的模型试验的次优操作步骤是土层上覆盖密封膜之后覆水静置较长时间后再抽真空。覆水后静置较长时间是为了让膜下由于覆水荷载导致的超静孔隙水压力消散完毕，排除覆水后的压载效应。为了加快膜上与膜下的水压达到一致的进程，可以在密封膜上预留若干个开孔，膜上和膜上水能够连通，快速达到一致，最后将上述开孔封闭后再进行抽真空。

张敬等<sup>[9]</sup>的模型试验采用先抽真空再膜上覆水的方式，实际上是真空联合膜上覆水预压试验，并不是水下真空预压。因此实际上证明的是真空联合膜上覆水预压的加固效果与膜上覆水水深有关，相关结论不适用于水下真空预压。

胡利文等<sup>[10]</sup>的离心机模型试验采用先覆水再抽真空，水深荷载换算为 50 kPa，比较符合水下真空预压的原理。抽真空后砂井和黏土中的超静孔隙水压力不断消散，初始孔隙水压力和最终孔隙水压力之间的平均降低幅值为 91.8 kPa。另外，Hu 等<sup>[11]</sup>在水下真空预压模型试验中发现比较明显的向内侧向变形。

Karlsrud 进行的现场水下真空预压试验结果对于理解水下真空预压机理更为直观。在水深 10 m 的情况下，整个水下真空预压过程孔隙水压力最大的下降幅值为 103 kPa。

日本东京新海洋处理场 C 区的水下真空预压过程中负压减小幅值为 49.5~80.5 kPa，平均值为 66 kPa，小于胡利文和 Karlsrud 进行的有密封膜的水下真空预压过程中的孔压减小幅值，可能是因为表层黏土层的密封效果不如密封膜。

基于上述算例分析和试验结果可以得出水下真空预压的加固机理与陆上真空预压相同，即：总应

力不变的情况下，抽真空减小孔隙水压力，形成负的超静孔隙水压力，从而增大有效应力。水下真空预压前后的有效应力增长幅值(即孔压减小幅值)只与抽真空设备的真空负压相关，与水深无关。水下真空预压的孔压减小幅值的理论最大值与陆上真空预压一样，即 100 kPa，这与胡利文和 Karlsrud 分别观测到的 91.8 和 103 kPa 的结果基本符合。

上述总应力和孔隙水压力变化方面，水下真空预压与真空联合膜上覆水预压有差异，但两者在真空压力传递和孔隙水排出的机理是相同的，即真空度沿塑料排水板传递至整个插设塑料排水板的土层范围，并在 A 点与 B 点之间形成水平向压差，在此压差的作用下孔隙水不断排向 B 点，并经过塑料排水板向上排出，完成整个排水固结过程。此外陆上真空预压的地下水位是否改变、是否会形成非饱和区等认识问题，同样也存在于水下真空预压，这些问题的认识与真空预压的加固机理直接相关。笔者认为水下真空预压与陆上真空预压一样，预压过程中地下水位不发生变化、不会形成非饱和区，具体论证分析过程见参考文献[12-13]。

2 水下真空预压现场施工工艺

2.1 铺膜及密封工艺

陆上真空预压一般采用人工展开并铺设密封膜，然后四周挖压膜沟将密封膜边缘埋入并回填黏土进行密封，密封效果可靠，但水下真空预压无法在水下环境下完成上述操作。挪威德拉门港现场试验采用放卷工艺进行水下密封膜铺设，见图 2。对于密封膜的周边采用两项措施相结合确保密封性：一是每边往外多铺 5 m；二是沿密封膜四周边缘压砂袋(间隔 0.5 m)或者铁链。

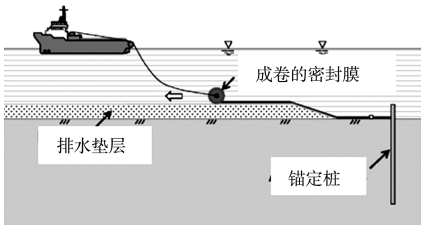


图 2 挪威德拉门港水下真空预压放卷铺膜

现场试验阶段 1 发现该密封工艺不可靠，导致试验中止，并提出了两项密封改进设想：一是



挖沟将密封膜四周边缘埋入, 然后再回填; 二是在密封膜的四周外扩若干米回填覆盖 1 m 厚的砂土或者黏土。这两项密封改进设想相当于将陆上真空预压的密封工艺直接搬到水下施工, 实施十分困难, 最终在阶段 3 也没有落实上述改进设想, 只是将射流泵的功率增大 4 倍来保持膜下真空度。

日本东京新海洋处理场 C 区的水下真空预压为了规避水下铺膜的困难, 采用上部一定厚度的黏土层当密封层从而可以不铺密封膜。塑料排水板通过上部的密封盖与排水软管(支管)相连, 再与集水管(主管)相连, 这样真空负压可以直接传递到塑料排水板内实现真空预压, 见图 3、4。

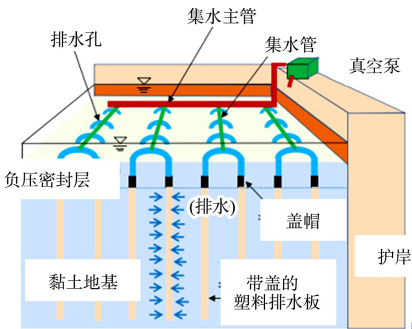


图 3 日本东京水下真空预压原理



图 4 集水管与排水软管连接

日本水下真空预压方案虽然规避了水下铺膜的难题, 但水下管路连接数量多且实施困难, 尤其是在较深水中更加难以实施, 也容易出现管路破碎或者脱开的风险, 影响管路内负压的传递; 同时相比传统密封膜, 表层一定厚度的黏土层的密封效果也很难达到传统密封膜的效果。上述因素造成了该水下真空预压工艺的最终孔压减小 66 kPa, 小于挪威水下真空预压试验有密封膜情况下的 103 kPa。

2.2 真空泵选型与布置

挪威水下真空预压现场试验采用射流泵抽真

空, 在射流泵泵叶轮高速旋转下, 液体从射流器喷嘴高速喷出, 高速流动的液体通过射流腔时, 会在射流腔形成真空, 见图 5。

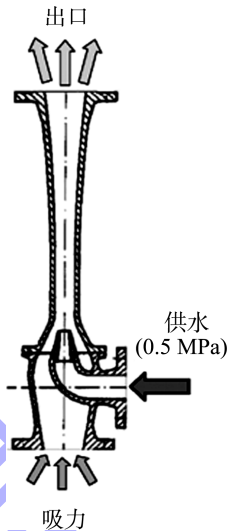


图 5 挪威水下真空预压现场试验的射流腔细部原理

挪威现场试验采用射流泵向射流腔内提供 0.5 MPa 的高速水流, 流量为 26 m<sup>3</sup>/h。射流泵与射流腔采用分离式布置, 射流泵布置在水面高程处, 射流腔布置在水底密封膜处。射流泵与射流腔的水深高差约 10 m, 两者连接管路距离约 200 m, 见图 6。

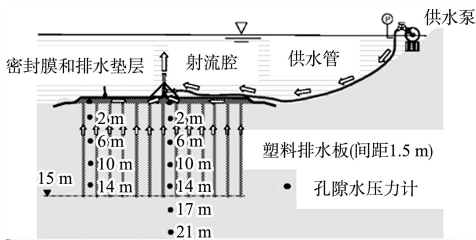


图 6 挪威水下真空预压现场试验的射流泵布置

现场试验该装置的抽真空能力基本能够保证 -80 kPa, 证明了该布置方案的可行性。但对于射流泵和射流腔的具体布置, 笔者认为将两者同时布置在水底或水面不影响其抽真空能力, 尚需要以后进行现场试验验证。

日本东京水下真空预压试验的抽真空装置由水底真空罐和船上真空泵组成。真空罐放置在海底(水深约 2.0 m), 通过管道与船上真空泵连接可以在真空罐内形成真空。真空预压排出的水先进入真空罐内, 再通过真空罐内的排水水泵将该部分水排

入船上的贮水箱，并最终排入海中，见图 7。

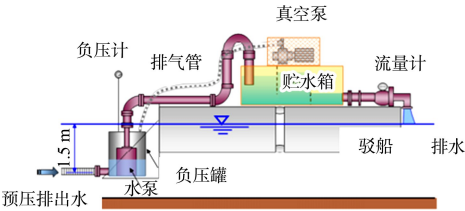


图 7 日本东京水下真空预压的真空泵布置

由于日本东京都水下真空预压的水深仅 2 m，采用海底真空罐进行水下真空预压问题不大，对于较深的水下真空预压，对真空罐的耐压和与安装连接等工艺要求较高，而且排水水泵的扬程增大也使排水水泵工作效率下降，从而使该抽真空装置不再适用。

综上，日本的水下真空预压方案是上部黏土作为密封层+集水管与塑料排水板板头直连+海底真空罐的组合，存在表层黏土层密封效果不好、水下大量主管支管连接困难、真空负压小等问题。从加固效果角度，水下真空预压应该采用挪威水下真空预压的方案，即密封膜密封+射流泵的方案。但水下真空预压施工的现场影响因素复杂，现有的挪威方案水下施工工序多、工艺复杂、无法使用大型设备、密封膜容易破漏，现阶段难以做到日本水下真空预压的加固面积和规模。当加固面积大、水深较浅、加固效果要求不高的情况下，日本水下真空预压方案在经济、成本方面具有优势，需要根据现场实际情况选择性价比最优的方案。

2.3 水下真空预压密封膜铺设装置新专利

挪威水下真空预压的方案采用有密封膜的工艺能够保证真空预压加固效果，但密封膜铺设及密封在现场试验中出现了大量问题，因此水下真空预压施工工艺改进的重点在水下铺膜及其密封工艺。

由于水下作业环境不利，现场使用的铺膜及其密封工艺必须减少甚至取消潜水员的水下操作，同时应当尽量陆上组装然后直接起吊沉入水中完成安装。笔者发明了水下真空预压密封膜铺设装置<sup>[14]</sup>，该装置集合了密封、滤管、出膜装置等功

能，采用陆上组装、水下直接吊装下沉就位的方式，具有密封效果可靠、减少水下作业等优点，见图 8。

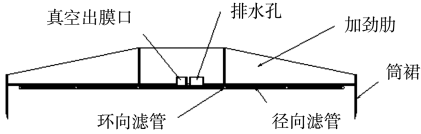


图 8 水下真空预压密封膜铺设装置结构组成

筒裙是中空的圆柱形结构，贯入软黏土一定深度后可以起到四周密封的作用。水平密封膜的边缘与筒裙内壁密封固定形成一个完整的密封系统。排水滤管固定在密封膜的下方，密封膜铺设完成后，排水滤管与砂垫层接触，软土地基中的水分经排水滤管排出。排水滤管由环向和径向组成排水网络，并最终通过出膜口与外界的真空中射流泵相连，形成连续的真空传递通道。

该专利的水下真空预压施工工艺的具体施工流程为：1)地基整平。对软土地基表面进行整平，并铺设土工布。2)在土工布上铺设砂垫层。3)铺设塑料排水板。使用水上打设船，向软土地基内打设塑料排水板，为后续水下真空预压提供排水通道。4)铺设密封膜并密封。通过起重船收放系统将该密封膜铺装置下沉到水下，通过水泵从排水口不断抽取装置内的水使之不断下沉，直至筒裙完全进入软土地基内，密封膜与砂垫层紧密接触完成铺设，然后关闭排水口。5)开始真空预压。将射流泵与该装置上的出膜口相连，真空负压沿滤管、砂垫层、塑料排水板传递至整个加固土体，并对水下真空预压过程中的沉降量和孔隙水压力变化进行监测，发现异常情况及时采取补救措施。水下真空预压密封膜铺设装置见图 9。

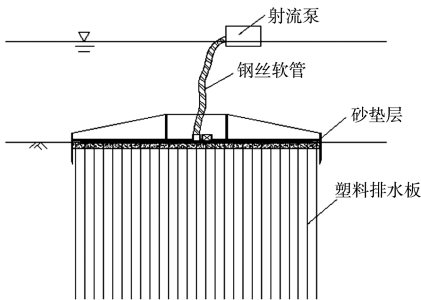


图 9 水下真空预压密封膜铺设装置

该水下真空预压专利的优点在于: 1) 真正实现完全水下环境下的密封膜的铺设及密封。密封膜铺设不易破损, 其边缘无需额外密封措施, 密封效果可靠。2) 该密封装置采用陆上组装、水下直接吊装下沉就位的方式, 降低了施工难度, 同时无需水下人工作业, 安全性高。

受限于密封装置组装及后续水上拖运安装等, 水下真空预压的规模远小于陆上真空预压, 比较有前景的应用领域为点状或块状的小范围土体加固。目前吸力桶基础形式在海上风电、漂浮式结构锚定系统等应用较有优势, 单个吸力桶的直径一般小于 50 m, 但在软弱黏土地基存在承载力较低的问题, 水下真空预压可以针对吸力桶所在的小范围软弱黏土进行加固, 扩大吸力桶基础的承载能力和应用范围。

3 结论

1) 水下真空预压与真空联合膜上覆水预压在应力状态和加固机理方面有着本质区别。水下真空预压过程中总应力不变, 真空联合膜上覆水预压过程中土体总应力随覆水水深的增大而增大。

2) 水下真空预压的加固机理与陆上真空预压相同, 即总应力不变的情况下, 抽真空减小孔隙水压力, 从而增大有效应力。水下真空预压前后的有效应力增长幅值, 与水深无关, 其理论最大值为 100 kPa。

3) 水下真空预压的关键施工工艺主要包括铺膜及密封工艺、真空泵选型与布置两个方面。从加固效果看, 水下真空预压应该采用挪威水下真空预压的方案, 即密封膜密封+射流泵的方案, 但水下真空预压施工的现场影响因素复杂, 需要根据现场实际情况选择性价比最优的方案。

4) 水下真空预压密封膜铺设装置的专利集合了密封、滤管、出膜装置等功能, 真正实现完全水下环境下的密封膜的铺设及密封, 减少水下作业, 尤其适用于海上风电吸力桶基础形式的小范围的地基处理。

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] 耿耀民, 叶永强, 梁江邕. 水下真空预压法在连云港围堰工程中的应用[J]. 水运工程, 2009(6): 126-129.

[3] 张丽丽, 张晓晗, 阚卫明. 水下真空预压在高桩码头岸坡工程中的应用及实践[J]. 中国港湾建设, 2011(3): 54-58.

[4] 杨勇, 桑登峰. 潮间带水下真空预压技术优化及应用[J]. 水运工程, 2018(2): 175-180.

[5] KARLSURD K, GREGERSEN O, Q N, SPARREVIK P, 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: ICSMGE, 2007: 1335-1340.

[6] Yeung A T, SO S T C, KWONG A K L, et al. Field-scale constructability evaluation of underwater vacuum preloading[J]. Geomechanics and geoengineering, 2009, 4(3): 245-252.

[7] 小野正揮, 新舍博, 中川大輔, 等. 東京都新海面処分場 Cブロックにおける粘土の減容化施工. 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 71, No. 4, 365-379, 2015.

[8] POTTS D M, ZDRAVKOVIC L. Finite element analysis in geotechnical engineering[M]. London: Thomas Telford, 1999.

[9] 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(5): 644-649.

[10] 胡利文, 吴宏伟. 软土地基水下真空预压固结离心模型试验[J]. 水运工程, 2011(11): 201-206.

[11] HU L W, WANG Y P, LIU Z J. Centrifuge modelling on soft soil subjected to underwater vacuum preloading[C]// Journal of ground improvement, 2019, 172(3): 167-178

[12] 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.

[13] 陈富, 张健. 真空预压刚性膜模型和非饱和带的探讨[C]//地基处理理论与实践新发展—第十四届全国地基处理学术讨论会论文集. 南昌: 江西科学技术出版社, 2016: 268-271.

[14] 陈富. 水下真空预压密封膜铺设装置: CN215252798[P]. 2021-11-22.