

真空预压出膜与覆水密封效果分析*

姜彦彬, 林志强, 林生法

(南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 管线出膜和覆水密封是影响真空预压密封膜密封效果的两个重要方面。介绍两种有效的管线出膜方式—裤筒式出膜和法兰盘式出膜。针对膜上覆水是否具有密封作用的争论, 分别采用空气动力学中的无粘性可压缩流体动力学模型和水力学中的薄壁大孔口出流模型, 近似描述膜上小孔单纯进气和单纯进水的两种情况。计算表明, 单位时间内膜上小孔进气驱替孔隙体积量比进水时大一个数量级, 膜上覆水可以减缓真空度的损失, 但仍然会浪费能量。为真空预压管线出膜施工及合理安排膜上覆水提供参考及依据。

关键词: 真空预压; 密封膜; 出膜方式; 膜上覆水

中图分类号: TU 472.3⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0170-05

Sealing effects of membrane being penetrated and submerged in vacuum preloading practice

JIANG Yan-bin, LIN Zhi-qiang, LIN Sheng-fa

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The way that pipelines penetrate through the membrane and submerged sealing are two important aspects to the sealing effect of the membrane in the vacuum preloading practice. Two effective methods for pipelines' penetrating through the membrane, i.e. trouser legs forming and flange forming, are expounded respectively. Whether water above the membrane has the sealing effect or not is disputed, non-viscous compressible fluid dynamic model in aerodynamics and the sharp-edged big orifice model in hydraulics are used to approximate the conditions of air leakage only and water leakage only because of the small holes on the membrane. Calculations show that the former condition has a larger magnitude displacement of pore volume than the latter in unit time. Water above the membrane can slow down the loss of the vacuum degree, but still waste energy. Reference can be provided for vacuum preloading projects to penetrate the membrane and overlie water above the membrane reasonably.

Keywords: vacuum preloading; sealing membrane; methods to penetrate through the membrane; overlying water above the membrane

真空预压法是加固软黏土地基的有效方法, 在我国沿海地区的软基处理工程中已得到广泛应用。地表密封膜的有效密封是获得持久、稳定真空度的必要条件, 主要涉及密封膜质量要求、铺膜施工及日常维护等方面, 业内学者及相关规范对此已有论述^[1-4]。其中, 有两个问题需进一步讨

论: 1) 如何采用恰当的管线出膜方法, 保证出膜处的密封; 2) 膜上覆水是否具有密封效果。

1 管线出膜与密封

真空预压区内监测仪器(孔压计、分层沉降管等)的管线和射流泵的主管都需要在铺膜后出

收稿日期: 2014-05-21

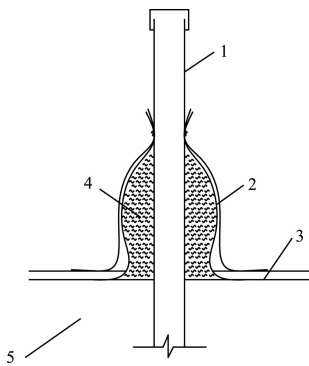
*基金项目: 国家自然科学基金(51379131, 41202177); 南京水利科学研究院研究生基金(LS31403)

作者简介: 姜彦彬(1989—), 男, 硕士研究生, 从事软土地基处理方面的学习、研究工作。

膜并密封。对于可以适应地表沉降、且不会因沉降影响密封效果的出膜管线(如射流泵的主管、孔压线),直接在膜上开小孔,出膜后用密封膜剪成的柔性条带将孔周膜紧贴管壁或数据线束扎紧,必要时用胶水密封其间孔隙。对于后期会与地表发生较大差异沉降、且会因此影响出膜处密封的管子(分层沉降管、水位管)出膜,须采取措施,既要保证有效密封,又要允许这种差异沉降的发生。下面介绍2种有效的管线出膜方式。

1.1 裤筒式出膜

所谓裤筒式出膜,就是在出膜后的管子底部与地表覆膜之间,用密封膜做成裤筒形状的密封筒进行密封的形式(图1)。



注: 1.出膜监测管; 2.裤筒膜(双层); 3.地表密封膜(双层); 4.密封泥浆; 5.砂垫层。

图1 裤筒式出膜结构

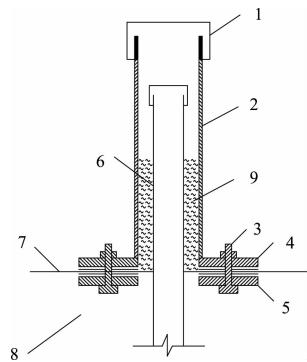
以场地铺2层密封膜为例: 1) 将矩形密封膜(1 m × 1 m)对折后用胶粘接两边,做2个高1 m、直径30 cm的“裤筒”(相应尺寸可根据情况调整); 2) 管子穿出地表膜时,膜上破孔宜等于管子外径,将上层密封膜的孔稍扩大,然后将裤筒套于管子外侧,下端夹于两层膜之间,裤筒下端的内、外侧分别与下、上层膜用胶密封; 3) 再套一个裤筒,其下端内侧与上层膜表面用胶密封,形成双层裤筒密封膜; 4) 在内层裤筒与管子之间灌入适量泥浆,形成高30 cm的泥浆柱密封段; 5) 2个裤筒的上端用膜剪成的柔性条带紧贴管壁扎牢密封。这样,密封了裤筒的上下端和监测管管口就做到了密封管子出膜的孔洞。

需要注意,膜上裤筒密封段之外的管段应是

完整的,如遇接管,要用胶密封。裤筒膜应保持松弛,并留有允许后期地表发生相对管子沉降的富余量。当相对沉降发生时,裤筒膜的下端随地表膜相对管子下沉,而上端由于紧扎在管壁上,相对管子不动,这样裤筒膜会因相对沉降富余量逐渐消失,从而被拉直绷紧。定期将裤筒膜上端松开,沿管壁下摺使裤筒膜松弛并有富余后,再次扎紧密封。如此,裤筒式出膜既解决了短时间的密封问题,又解决了后期由于地表相对管子沉降带来的长期密封问题。

1.2 法兰盘式出膜

所谓法兰盘式出膜,就是在出膜后的管子底部与地表覆膜之间用金属法兰盘和护筒进行密封的形式(图2)。



注: 1.螺纹密封顶盖; 2.金属外筒; 3.螺栓; 4.上法兰盘; 5.下法兰盘; 6.出膜监测管; 7.地表密封膜; 8.砂垫层; 9.密封泥浆。

图2 法兰盘式出膜结构

1) 加工1对四周均布若干螺栓孔的金属薄圆环作为上、下法兰盘,金属外筒一端与上法兰盘内环无缝焊接,外筒内径和高度都要大于出膜监测管; 2) 铺膜前将下法兰盘预装螺钉和橡皮垫圈后套在管周置于膜下; 3) 管子穿出膜后,将带上法兰盘的金属外筒套住管子,垫橡皮垫圈后与预置的下法兰盘通过螺栓对接,将地表密封膜夹在上、下法兰盘中间; 4) 为提高密封效果,法兰盘连接处和螺纹密封顶盖处涂抹硅脂,金属外筒与管子之间灌入密封泥浆。

如此,出膜的管段就处于金属外筒和法兰盘的密封与保护之下。相对沉降发生时,护筒随地表发生相对监测管的沉降,而护筒高于监测管,

因此，护筒式出膜可以在保证密封的前提下允许这种相对沉降的发生。

1.3 两种出膜方法对比

相同点：裤筒式出膜和法兰盘式出膜都可以解决管子出膜短时间内的密封问题，也可以解决因后期地表发生相对管子的沉降带来的长期密封问题。

不同点：1) 裤筒式出膜靠胶接密封，属于柔性连接，能适应管周地表的不均匀变形，且出现问题容易修补；开盖测量相对方便，成本低且可以随时加工。2) 法兰盘式出膜时，法兰盘与密封膜的连接属于“刚-柔”连接，靠法兰盘与膜的挤压咬合密封，对管周地表不均匀变形的适应性弱；外筒对监测管有保护作用，更适合真空联合堆载预压工况；测量开盖需注意密封；成本相对高。

2 膜上覆水问题

2.1 覆水密封的争论

真空预压抽真空期间，膜上出现小孔常常无法避免。不论膜上是否覆水，流体都会在压差作用下通过小孔被吸入膜下，再经膜下排水管路排出膜外。毫无疑问，这部分流体不仅耗费了能量，做了无用功，而且会在一定程度上降低膜下真空度。针对此类情况，关于膜上覆水能否起到密封作用的问题，存在争议：1) 很多人认为膜上覆水有密封效果^[2,4]。叶国良等^[5]指出，对于2万m²的加固区，如果没有覆水，真空度只能达到60kPa左右，覆水后可达80kPa以上；2) 娄炎^[3]认为膜上水不能承受剪应力，水在压差下容易由孔洞进入膜下，因而不能起到密封作用。金小荣等^[6]同意娄炎的观点，认为膜上短时间覆水无法达到密封效果。

针对覆水密封效果问题，可以通过简单的模型转化，比较单位时间内，在同样的膜内外压差作用下，通过同一个小孔的流体分别为空气和水时，膜下真空度受影响的程度。

2.2 模型近似与计算

密封膜上有一个圆形小孔，假定面积为1×

10⁻⁵ m² (即0.1 cm²)，膜下真空度为80 kPa，分2种情况讨论小孔对膜下真空度的影响程度：1) 膜上没有覆水，单纯进气；2) 膜上有覆水，单纯进水。

1) 单纯进气情况。

这种情况与打开阀门、让压力储气罐中的压缩空气向外排放类似。气体在压差作用下，由高压区向低压区流动，运用空气动力学中无黏性可压缩流体动力学方程得质量流量方程^[7]：

$$m' = \frac{AvP_0}{2RT_0} \tag{1}$$

式中： m' 为空气质量流量(kg/s)，小孔面积 $A = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ，假定孔口气体流速呈抛物线分布，且最大流速 $v = 50 \text{ m/s}$ (据现场简易试验结果合理取值)，大气压 $P_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，空气的气体常数 $R = 287.06 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ，20℃时的绝对温度 $T_0 = 293.15 \text{ K}$ 。

计算得小孔进气的质量流量 $m' = 3.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ ，换算为标准状态(20℃，101 kPa，空气密度为1.205 kg/m³)下的体积流量 $V = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

如图3所示，外部空气在压差作用下，通过膜上小孔进入B区域，由于压强变小，进气体积膨胀。认为短时间内膜下整体A真空度不因进气而变化，仍为80 kPa，相应大气压力 $P_2 = 21 \text{ kPa}$ 。简化为计算图4所示带有隔离活塞的容器(A部分压强恒为21 kPa)，进气口进入B部分的空气为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 时体积的等温变化($P_1 = 101 \text{ kPa}$ ， $P_2 = 21 \text{ kPa}$)：

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \tag{2}$$

将通过小孔进入膜下的流体体积看做是孔隙空间的驱替，用上式计算得每秒膜外空气通过小孔被吸入膜下，在不减小膜下整体真空度的前提下，被驱替的孔隙体积B为 $V_2 = 12.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。

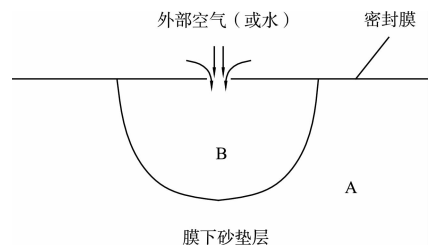


图3 膜上小孔进气(或水)示意

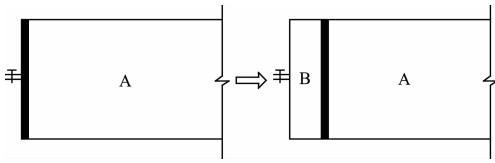


图4 小孔进气简化计算模型

2) 单纯进水情况。

将小孔单纯进水情况简化为常水头下薄壁大孔口出流模型^[8], 体积流量 Q 公式:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH_0} \quad (3)$$

取系数 $\mu = 0.6$, 小孔面积 $A = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 据膜内外 80 kPa 的压差换算的水头差 $H_0 = 8 \text{ m}$ 。计算得体积流量 $Q = 7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。将水看做不可压缩流体, 流到膜下孔隙中起驱替作用的水的体积流量亦为 $7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3) 结果分析。

由计算结果可知: 1) 单位时间内不计膜下真空度变化时, 由于膜上小孔进气所驱替的孔隙体积(图4中的B空间)要比进水时大一个数量级; 2) 流体驱替使膜下压力趋于升高、真空度趋于降低, 因此, 进气使膜下压力升高比进水时更明显, 膜上小孔进气比进水趋向于损失更多的真空度; 3) 膜上覆水可以减缓真空度的损失, 但依然会带来能量的浪费。

膜下砂垫层非饱和, 孔隙中是气液两相体。进气或进水都会对膜下真空度有所影响, 相应的计算参数 v 、 P_2 、 H_0 会随之变化, 又会反过来影响体积流量的计算结果。但实际上, 我们所讨论的情况是密封膜上存在小规模、有限数量的小孔时, 覆水是否具有避免或者减缓真空度损失的问题, 小孔的存在并不会使膜下整体真空度发生剧烈改变。所以, 上述模型近似仍是合理的, 计算结果能够说明问题。现场简易试验所得结论与模型计算相一致(用密闭塑料袋分别装气和装水, 被膜上小孔吸入膜下, 比较体积流量)。

如果膜上存在大范围、大尺寸的孔洞, 无论覆水与否, 真空度都会骤降, 应当立即采取修补措施, 而不应该以覆水代替修补。

2.3 合理安排覆水

除了可以减缓真空度损失外, 覆水对膜的保护功能是毋庸置疑的, 可以减轻密封膜因暴晒而老化, 减少恶劣天气、野生动物等对密封膜的破坏, 还可以直接利用排出的地下水作为有利于加固的上部堆载。但无论覆水与否, 膜上小孔都不利于密封, 且水下查找和修补漏洞相对困难, 所以建议合理安排覆水时间, 力求减少膜上小孔数量: 1) 恒载前不宜覆水, 对于真空射流泵的运作需要的循环水, 可以采用以下做法: ①不在加固区内布泵; ②为每台射流泵单独配置水箱作为循环水容器; ③覆膜前, 用砂垫层在射流泵周边做浅沙盘, 覆膜后作为循环水的蓄水池, 避免初期膜上大面积覆水而给查补漏洞带来不便。2) 恒载若干天, 拉网查补漏洞后再大面积覆水。3) 覆水后若出现大尺寸或大规模的孔洞, 附近射流泵抽出地下水量会明显增大, 且水中气泡增多, 俗称“白水”。此时需在破损处做小型临时围堰, 甚至全部排干膜上水后修补。此外, 对于膜上覆水的堆载作用, 由于覆水深度常因地面整平不够或后期产生较大差异沉降而不等, 因此, 在平均覆水深度不超过 0.5 m 且无法保证长期覆水时, 不宜将覆水荷载纳入沉降固结计算中。

3 结语

1) 裤筒式出膜和法兰盘式出膜是真空预压区内两种有效的管线出膜方式, 既可以解决短时间内的密封问题, 也可以解决后期地表相对管子发生沉降而带来的长期密封问题。

2) 模型近似计算表明, 单位时间内膜上小孔进气驱替孔隙体积量比进水大一个数量级; 膜上覆水可以减缓真空度的损失, 但无法完全密封。实际上, 小孔进、排气都要比进、排水快, 且近似计算中的模型适用条件及相关假定与实际情况尚存在一些出入, 建议设计相关室内试验进一步评价进水和进气工况对膜下真空度的影响程度。

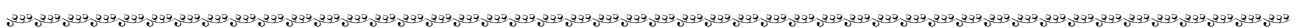
3) 密封膜的有效密封是真空预压加固效果的重要前提, 需要根据工况采用合理的管线出膜方式, 合理安排覆水时间, 减少因密封膜密封不良带来的能量浪费。

参考文献:

[1] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 89-95.
 [2] JTS 147-2—2009 真空预压加固软土地基技术规程[S].
 [3] 娄炎. “真空预压加固”中使用的密封膜[J]. 公路, 2003(9): 98-100.

[4] 李玉灿, 秦皎. 真空预压密封技术的分析与探讨[J]. 岩土工程界, 2009, 12(1): 73-75.
 [5] 叶国良, 张敬, 郭述军. 真空预压法加固软土地基的几点新认识[J]. 水运工程, 2004(10): 97-100.
 [6] 金小荣, 俞建霖, 龚晓南, 等. 真空预压部分工艺的改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2 711-2 714.
 [7] 潘锦珊, 单鹏主编. 气体动力学基础(2011年修订本)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 270-271.
 [8] 贾月梅主编. 流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 199-200.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 169 页)

4 结语

1) 在水运工程中, 抛石挤淤用于处理淤泥厚度小于 5 m 的围堤地基是比较常见的。但是如本工程这样大范围抛石挤淤处理深厚的软土地基, 并形成均匀的悬浮硬壳层地基的设计和施工在福建水运工程中尚属首例。大范围抛石挤淤施工应严格做好施工组织, 及时卸载挤出的淤泥, 充分发挥回填料自重对淤泥的破坏作用, 使其落底至设计深度。且施工中应控制好抛石的推进尺度, 严防回填料把拱起的淤泥包裹, 形成淤泥包, 造成回填层的不均匀。

2) 在四周边界均为封闭的区域, 大范围的高能强夯置换, 应在处理区域周边设置泄泥沟, 给置换出的淤泥寻找通道, 这样才能保证其置换效

果及地基处理的均匀性。否则将出现类似本工程这样淤泥拱起形成排泥口, 且排泥口位置不固定, 给施工带来一定的困难, 地基也易出现不均匀性而影响使用。

参考文献:

[1] 福建省交通规划设计院. 福建华电储运有限公司罗源湾港区可门作业区码头扩能工程(A 标段)施工图设计文件[R]. 福建: 福建省交通规划设计院, 2012.
 [2] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
 [3] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(本文编辑 郭雪珍)

