

圆形构筑物周边土工膜沉降时的褶皱产生机理 及分析模型

高 登, 朱 斌*, 陈云敏

(软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 基于传统薄膜理论建立了下卧土体沉降作用下圆形构筑物周边土工膜受力变形的分析模型, 发现在下卧土体沉降作用下圆形构筑物周边土工膜中将产生褶皱, 并揭示了其产生机理。进一步通过引入“可变泊松比”概念并基于褶皱薄膜理论建立了褶皱区与张拉区土工膜受力变形的分析模型, 分析了下卧土体沉降大小、上覆土压力、土工膜界面强度、圆形构筑物半径及土工膜抗拉刚度对土工膜褶皱程度与受力变形大小的影响。结果表明下卧土体沉降越大、圆形构筑物半径越小, 则褶皱程度及土工膜最大应变越大。最后提出了工程上控制土工膜褶皱和最大应变与张力的几点工程措施。

关键词: 土工膜; 差异沉降; 圆形构筑物; 褶皱

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)08-1126-07

作者简介: 高 登(1984-), 男, 福建福州人, 博士研究生, 主要从事环境土工方面的研究。E-mail: golden9094@sina.com。

Mechanism and analytic model of wrinkled geomembranes around circular structures subjected to differential settlement

GAO Deng, ZHU Bin, CHEN Yun-min

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A simplified model to analyze the tension and strain of the geomembranes around circular structures subjected to differential settlement was presented based on the conventional membrane theory. It was found that wrinkles would be induced in the geomembranes around the circular structures and the mechanism was investigated. Further, the analytic model was given by introducing the concept of “variable Poisson’s ratio” and based on the wrinkled membrane theory so that the tension and strain of the geomembranes considering induced wrinkles could be analyzed. The effects of the differential settlement, the overburden pressure, the interface strength of the geomembranes, the radius of circular structures and the tensile stiffness of the geomembranes on the wrinkles, the tensions and strains of the geomembranes were also studied. It was shown that the behaved degree of wrinkles and the maximum strain of the geomembranes increased with the increase of differential settlement and the decrease of radius of the circular structures. In addition, some practical measures were suggested for controlling the behaved degree of wrinkles as well as the maximum tension and strain of the geomembranes.

Key words: geomembrane; differential settlement; circular structure; wrinkle

0 引 言

土工膜经常铺设于可压缩土层(如垃圾)之上, 并和刚性结构物(如导气井、维修井等)相连。可压缩土层在降解、自重或上覆压力作用下将发生沉降, 使得可压缩土层与刚性结构物之间存在差异沉降, 土工膜在差异沉降作用下将产生变形和内力, 一旦其应变或内力超过容许值, 土工膜可能被拉断从而导致其隔渗性能失效。

Giroud 等^[1-3]对差异沉降作用下土工膜的受力变

形作了较多研究, 其工作主要集中在基于经验并适合于工程应用的设计方法。文献[1]假定土工膜变形后的形状为抛物线或圆弧且应变处处相等, 利用相应的函数来确定土工膜的应变; 文献[2]提出了“共能量”的概念来评价各种土工膜抵抗差异沉降的能力, 结果表

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50538080); 国家自然科学基金国家杰出青年基金项目(50425825)

收稿日期: 2007-09-20

*通讯作者

明:柔性土工膜如聚氯乙烯(PVC)土工膜等延展性强,具有较好地抵抗差异沉降的能力。文献[3]考虑土工膜与无限长构筑物相连,基于平面应变理论,提出一套计算差异沉降作用下土工膜应变的方法。国内学者对这一问题也进行了相应的研究,邓学晶等^[4]采用FLAC程序对复杂荷载作用下城市垃圾填埋场HDPE土工膜的受力状况进行了分析,结果表明:土工膜的拉应力随着垃圾土的堆高、基础不均匀沉降、地震荷载的作用而积累。陈云敏等^[5]建立了填埋场下卧土体局部沉降条件下复合衬垫系统的受力变形分析模型。到目前为止,还未见文献对下卧土体沉降条件下圆形构筑物周边土工膜(图1)的变形和内力进行分析。当土工膜较柔或上覆土压力较大时,土工膜几乎紧贴圆形构筑物而下沉(图2(a)),此时土工膜上的A点沉降后变成B点,由于A点较B点所处同心圆周长较大(图2(b)),土工膜可能产生平面外大变形而发生褶皱,然而目前未见文献对这一现象从本质上加以认识,并建立其数学分析模型。



图1 圆形构筑物与土工膜连接图

Fig. 1 Connection between geomembranes and circular structures

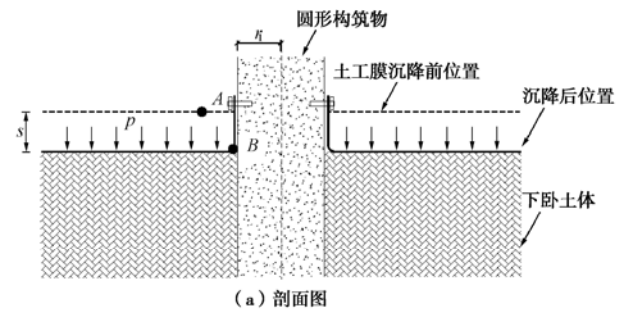
目前,国际上已开展了土工膜褶皱对衬垫系统防渗性能影响的研究^[6-9]。Giroud等^[6]认为施工现场中出现的土工膜大面积褶皱是由于温度应力引起。Soong等^[7]通过室内试验研究了上覆压力、初始褶皱高度、土工膜厚度和温度对褶皱区土工膜形态和应变的影响,结果表明:即使上覆正压力高达1000 kPa,持续时间高达1000 h,也不能完全消除褶皱现象。Dickinson等^[8]通过试验研究了土工膜褶皱对复合膨润土衬垫(GCL)变形的影响,认为褶皱将会改变GCL的受力状态并引起应力集中,且上覆压力作用下GCL中的膨润土将会迁移到褶皱区处使其厚度发生明显改变。由于土工膜承受平面内压应力的能力较差,在较大的平面内压应力作用下可能产生平面外大变形而发生褶皱,这也是除温度应力外,土工膜产生局部褶皱的一个重要原因。

本文首先在传统薄膜理论^[9]的基础上分析了下卧

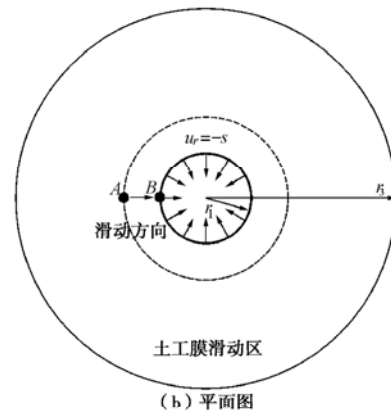
土体沉降条件下圆形构筑物周边土工膜的变形和内力,揭示了土工膜局部产生褶皱的机理。进一步基于褶皱薄膜理论^[10]提出了圆形构筑物周边土工膜受力变形的分析模型,并对影响土工膜褶皱和受力变形的因素进行了分析,提出了工程上控制土工膜褶皱和最大应变的几点措施,对于土工膜与圆形构筑物间的连接设计具有一定的指导意义。

1 分析模型

如图2(a)所示,土工膜上覆土压力为 p ,圆形构筑物半径为 r_1 ,下卧土层沉降量为 s 。假定土工膜均质、各向同性且应力-应变关系满足线弹性。考虑土工膜在沉降过程中始终与圆形构筑物保持紧密连接,即土工膜B点所在同心圆沿径向的总伸长量 u_r 与下卧土体沉降量 s 相等^[2](图2(b))。该问题可简化为如下轴对称问题:一片无限大且中空的薄膜位于上覆土体和下卧土体之间,空洞部分的半径为 r_1 ,且土工膜空洞处边界存在径向位移 u_r 。



(a) 剖面图



(b) 平面图

图2 圆形构筑物周边土工膜变形图

Fig. 2 Deformation of geomembranes around the circular structures

根据传统薄膜理论^[9],轴对称变形情况下土工膜的应变-张力关系满足以下基本方程:

$$T_r = \frac{E_t}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta) \quad (1)$$

$$T_\theta = \frac{E_t}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_r) \quad (2)$$

几何方程为

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}; \quad (4)$$

应变协调方程满足

$$\varepsilon_r = \frac{d}{dr}(r\varepsilon_\theta), \quad (5)$$

式中, T_r 为土工膜的径向张力, T_θ 为土工膜的环向张力, ε_r 为土工膜的径向应变, ε_θ 为土工膜的环向应变, ν 为土工膜的泊松比, E 为土工膜的抗拉模量, t 为土工膜的厚度, E_t 为土工膜的抗拉刚度。

在径向位移 u_r 作用下, 土工膜与上层材料以及下卧土体间将发生相对滑动, 土工膜受到上下界面摩擦力的作用。土工膜单元的受力情况如图 3 所示, 沿环向自然达到平衡状态, 考虑径向力的平衡, 得

$$\frac{d}{dr}(T_r r) + (\tau_1 + \tau_2)r - T_\theta = 0, \quad (6)$$

式中, $\tau_1 = p \tan \varphi_1$ 为土工膜与上覆材料之间的界面摩擦力, $\tau_2 = p \tan \varphi_2$ 为土工膜与下卧土体之间的界面摩擦力, φ_1 为土工膜与上覆材料的界面摩擦角, φ_2 为土工膜与下卧土体的界面摩擦角。

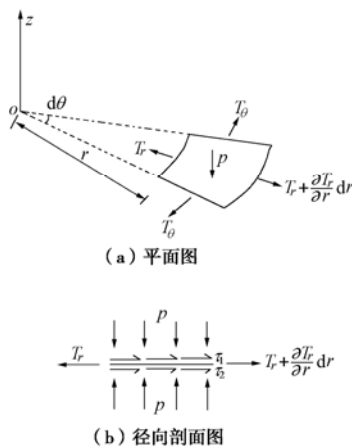


图 3 土工膜单元受力图

Fig. 3 Force analysis of geomembrane element

将式 (1) ~ (4) 代入式 (6), 得

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} r + \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r} + ar = 0, \quad (7)$$

$$\text{式中, } a = \frac{(\tau_1 + \tau_2)(1 - \nu^2)}{E_t} = \frac{p(\tan \varphi_1 + \tan \varphi_2)(1 - \nu^2)}{E_t}.$$

土工膜滑动区的边界条件为: ① $r = r_3$, $u_r = 0$, 表示滑动区域边缘处的径向位移为 0; ② $r = r_3$, $\varepsilon_r = 0$, 即 $du_r/dr = 0$, 表示滑动区域边缘处的径向应变为 0。其中 r_3 为土工膜滑动区域的外径, 如图 2 (b) 所示。

式 (7) 求解得到土工膜上任一点的径向位移为

$$u_r = -\frac{ar_3^3}{6r} + \frac{ar_3 r}{2} - \frac{ar^2}{3}. \quad (8)$$

根据假设条件, 土工膜在 $r = r_1$ 处的径向位移与下卧土体沉降 s 相等, 则有

$$-\frac{ar_3^3}{6r_1} + \frac{ar_3 r_1}{2} - \frac{ar_1^2}{3} = -s. \quad (9)$$

当圆形构筑物半径 r_1 和下卧土体沉降 s 已知时, 式 (9) 可直接求得

$$r_3 = \sqrt[3]{A + \sqrt{B}} + \sqrt[3]{A - \sqrt{B}}, \quad (10)$$

式中, $A = 3sr_1^3/a - r_1^3$, $B = 9s^2 r_1^2/a^2 - 6sr_1^4/a$ 。

联立式 (1) ~ (4) 和式 (8), 得到土工膜上任一点应变和张力的表达式:

$$\varepsilon_r = \frac{a}{6r^2}(r_3^3 + 3r^2 r_3 - 4r^3), \quad (11)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{a}{6r^2}(-r_3^3 + 3r^2 r_3 - 2r^3), \quad (12)$$

$$T_r = \frac{(\tau_1 + \tau_2)[(1 - \nu)r_3^3 + 3(1 + \nu)r^2 r_3 - 2(2 + \nu)r^3]}{6r^2}, \quad (13)$$

$$T_\theta = \frac{(\tau_1 + \tau_2)[(\nu - 1)r_3^3 + 3(1 + \nu)r^2 r_3 - 2(1 + 2\nu)r^3]}{6r^2}. \quad (14)$$

2 土工膜的褶皱产生机理及其受力变形分析

2.1 褶皱产生机理

根据上节土工膜应变和张力的解析表达式分析垃圾填埋场覆盖层系统中导气井周边土工膜在下卧土体沉降作用下的受力和变形。参考文献[11], 取土工膜基本参数如下: 双糙面超低密度聚乙烯土工膜 (LLDPE) 的抗拉模量 $E = 170 \text{ MPa}$, 厚度 $t = 1 \text{ mm}$, 其抗拉刚度 $E_t = 170 \text{ kN/m}$ 。假定土工膜上部为 0.6 m 厚的覆土, 等效为上覆土压力 $p = 10 \text{ kPa}$ 。实际填埋场中, 土工膜与覆土和下卧垃圾体的界面摩擦角会有所差异, 为方便起见, 本文取 $\varphi_1 = \varphi_2 = 30^\circ$ 。另取土工膜泊松比 $\nu = 0.45$ [12], 下卧土体沉降 $s = 0.05 \text{ m}$, 导气井半径 $r_1 = 0.5 \text{ m}$, 计算结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 土工膜的径向应变和径向张力为正值, 说明土工膜沿径向承受拉应力; 然而环向应变和环向张力为负值, 说明土工膜存在环向压应力区。通常认为土工膜不能承受平面内压应力[6], 特别是柔性的土工膜。在平面内压应力作用下, 土工膜环向将产生褶皱, 即形成褶皱区; 而在褶皱区外, 径向张力和环向张力均大于零, 土工膜处于双向张拉状态而形成张拉区, 如图 5 所示。因此, 有必要考虑褶皱对土工膜应变和张力的影响, 采用薄膜褶皱理论进行分析。

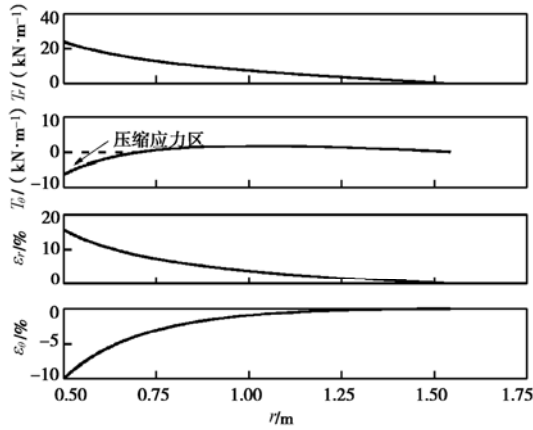


图4 导气井周边土工膜的应变和张力

Fig. 4 Strains and tensions of the geomembranes around the gas venting well

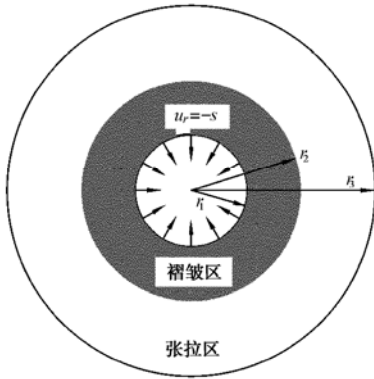


图5 土工膜褶皱区和张拉区分布

Fig. 5 Distribution of wrinkled region and tensioned region

2.2 考虑褶皱的土工膜受力变形分析

Stein 等^[10]首先对局部薄膜褶皱进行了研究,假定褶皱区中只有单向张拉力存在,则轴对称变形情况下褶皱区薄膜的环向应力为 0。通过引入“可变泊松比”来修正褶皱区薄膜的应力-应变关系,这样褶皱区中的可变泊松比值将超过材料的真实泊松比,从而导致土工膜垂直褶皱方向上产生“过度收缩”。

本文引入“可变泊松比”理论对圆形构筑物周边土工膜的受力和变形进行分析,土工膜的几何方程和应变协调方程与常规薄膜理论的基本方程相同,见式(3)~(5)。由于褶皱区土工膜的径向张力 T_r 不为 0,而环向张力 T_θ 为 0,则褶皱区土工膜的应变-张力关系可由式(1)、(2)得:

$$\varepsilon_r = \frac{T_r}{E_t}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_\theta = -\lambda \frac{T_r}{E_t}, \quad (16)$$

式中, λ 为可变泊松比,在褶皱区与张拉区交界处等于土工膜实际泊松比 ν 。将 $T_\theta = 0$ 代入式(6),得到褶皱区土工膜单元的平衡方程:

$$\frac{d}{dr}(T_r r) + (\tau_1 + \tau_2)r = 0. \quad (17)$$

由式(17)直接解得褶皱区的径向张力 T_r ,

$$T_r = \frac{C_1}{r} - \frac{(\tau_1 + \tau_2)r}{2}, \quad (18)$$

式中, C_1 为一常数。

根据连续条件,褶皱区与张拉区交界处的径向张力相等,联立式(13)、(18),得

$$C_1 = \frac{(\tau_1 + \tau_2)[(1-\nu)r_3^3 + 3(1+\nu)r_2^2 r_3 - (1+2\nu)r_2^3]}{6r_2}, \quad (19)$$

式中, r_2 和 r_3 分别为土工膜褶皱区和张拉区的外径,如图5所示。

将式(15)、(16)代入式(5),得

$$T_r = -T_r r \frac{d\lambda}{dr} - \lambda \frac{d(T_r r)}{dr}. \quad (20)$$

联立式(18)和(20)得

$$\lambda = \frac{-4C_1 \ln r + (\tau_1 + \tau_2)r^2 + 4C_2}{4C_1 - 2(\tau_1 + \tau_2)r^2}, \quad (21)$$

式中, C_2 为另一常数。

由于褶皱区与张拉区交界处泊松比相等,即当 $r = r_2$ 时, $\lambda = \nu$, 得

$$C_2 = (\nu + \ln r_2)C_1 - \frac{1}{4}(1+2\nu)(\tau_1 + \tau_2)r_2^2. \quad (22)$$

联立式(4)、(16)、(18)和(21)得到褶皱区径向位移 u_r 的表达式

$$u_r = -\frac{\lambda T_r r}{E_t} = \frac{[4C_1 \ln r - (\tau_1 + \tau_2)r^2 - 4C_2]}{4E_t}. \quad (23)$$

式(23)中土工膜褶皱区外径 r_2 和滑动区外径 r_3 可通过以下两个边界条件求解:① $r = r_1$, $u_r = -s$, 即土工膜空洞边缘处的径向位移与下卧土体沉降相等;② $r = r_2$, $T_\theta = 0$, 即褶皱区和张拉区交界处的环向张力为 0。得

$$C_1 \ln r_1 - \frac{1}{4}(\tau_1 + \tau_2)r_1^2 - C_2 = -E_t s, \quad (24)$$

$$(\nu - 1)r_3^3 + 3(1+\nu)r_2^2 r_3 - 2(1+2\nu)r_2^3 = 0, \quad (25)$$

式中, r_2 和 r_3 可通过迭代求解式(24)和(25)获得,则褶皱区和张拉区的土工膜张力和应变均可解得。

取 2.1 节中的算例重新进行分析,同样考虑下卧土体沉降 $s = 0.05$ m, 计算结果如表 1、图 6、7 所示。由表 1 可以看出:考虑褶皱时,滑动区的外径 r_3 和最大张力 $T_{\max}$ 同不考虑褶皱的计算值差别不大,而最大应变 $\varepsilon_{\max}$ 减小约 2%。因而,褶皱可一定程度上减小土工膜的最大应变。然而,褶皱将会影响衬垫系统的防渗性能,降低土工膜耐久性,影响渗滤液的流动,也容易引起应力集中使得土工膜下部 GCL 的厚度产生变化^[7-8]。因此,土工膜褶皱在工程上应尽量避免。

表 1 不同方法计算结果比较

计算模型	褶皱区外径 r_2/m	滑动区外径 r_3/m	最大应变 $\varepsilon_{\max}/\%$	最大张力 $T_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
有褶皱	0.72	1.56	13.79	23.44
无褶皱	无	1.54	15.65	23.77

若考虑土工膜与无限长构筑物相连,即平面应变的情况(无褶皱现象),按 Giroud 等^[3]的方法计算得到土工膜的最大应变 $\varepsilon_{\max}$ 仅为 8.24%,最大张力 $T_{\max}$ 仅为 14.01 kN/m,与表 1 结果相比较小。因此,下卧土体沉降条件下圆形构筑物周边土工膜的受力和变形更为不利。

由图 6 可以看出:褶皱区域土工膜的环向应力均为 0,而在张拉区域先增加后减小至 0,这与图 4 所示的计算结果有较大的差别。图 7 表示土工膜泊松比沿径向的变化,可以看出褶皱区域土工膜的可变泊松比 λ 大于土工膜实际泊松比 0.45,且越靠近圆形构筑物其值越大,说明土工膜的“过度收缩”越剧烈,即褶皱越明显。

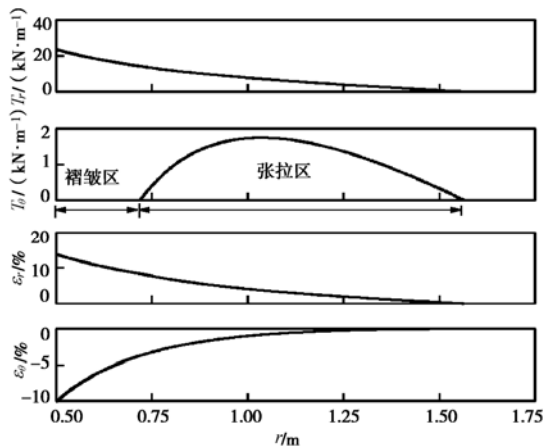


图 6 考虑褶皱时土工膜的应变和张力

Fig. 6 Strains and tensions of the geomembranes considering wrinkles

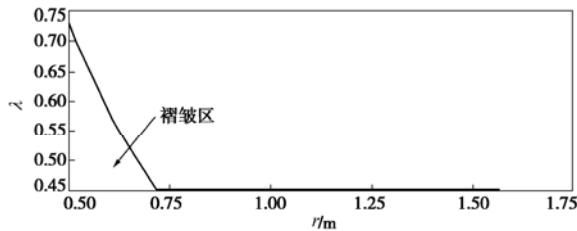


图 7 褶皱区可变泊松比的分布

Fig. 7 Distribution of variable Poisson's ratio in wrinkled region

3 影响土工膜褶皱的因素及控制措施

由 2.2 节可知,可用两个量 $(r_2 - r_1)$ 和 λ 来表征土工膜的褶皱程度,其中 $(r_2 - r_1)$ 表示环形褶皱区的宽度,而 λ 表示其褶皱的剧烈程度。为考察各种因素对

土工膜褶皱的影响程度,对一填埋场覆盖层系统进行分析。考虑上覆土厚度为 600~1200 mm,则上覆压力 p 等效为 10~20 kPa;土工膜上下界面摩擦角 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ 从 $15^\circ \sim 30^\circ$ 变化;下卧土体沉降 s 从 0.05~0.15 m 变化;导气井半径 r_1 从 0.5~1.0 m 变化。考虑 3 种不同刚度的土工膜:0.76 mm 聚氯乙烯(PVC)土工膜,1 mm LLDPE 土工膜和 0.75 mm 高密度聚乙烯(HDPE)土工膜,其抗拉刚度 E_t 分别为 76, 170, 540 kN/m。

分析结果如图 8~11 所示,环形褶皱宽度 $(r_2 - r_1)$ 和土工膜最大泊松比 $\lambda_{\max}$ 随上覆压力 p 、界面摩擦角 φ 和导气井半径 r_1 的增加而减小,但却随下卧土体沉降 s 的增加而增加。导气井半径 r_1 越大,则越趋于平面应变问题,则褶皱宽度将趋于 0, $\lambda_{\max}$ 也趋于实际泊松比。土工膜的抗拉刚度 E_t 对环形褶皱宽度和 $\lambda_{\max}$ 有较大的影响,土工膜抗拉刚度越小,则环形褶皱宽度和 $\lambda_{\max}$ 越小,说明在相同条件下,柔性土工膜与抗拉刚度较大的土工膜相比不容易产生褶皱,该结论与 Giroud 等^[6]得到的结论类似。

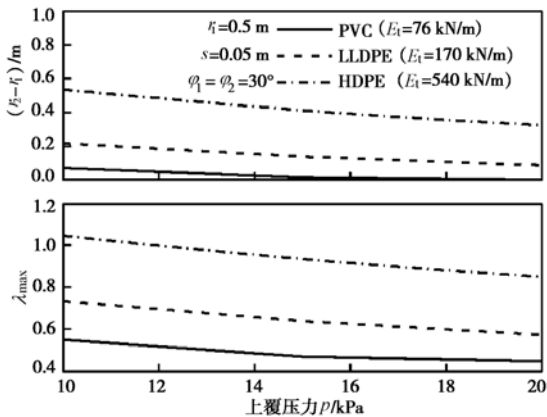


图 8 上覆压力对褶皱宽度和最大泊松比的影响

Fig. 8 Effect of overburden pressure on width of wrinkles and maximum Poisson's ratio

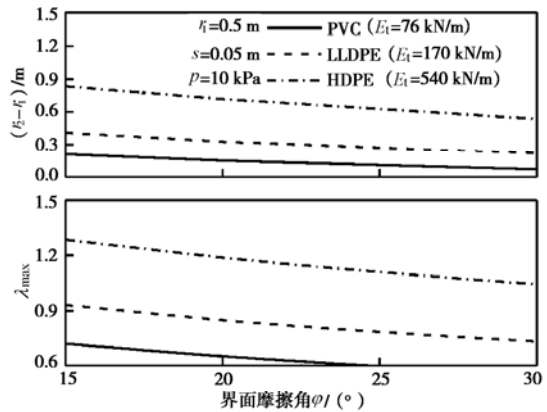


图 9 界面摩擦角对褶皱宽度和最大泊松比的影响

Fig. 9 Effect of interface friction angle on width of wrinkles and maximum Poisson's ratio

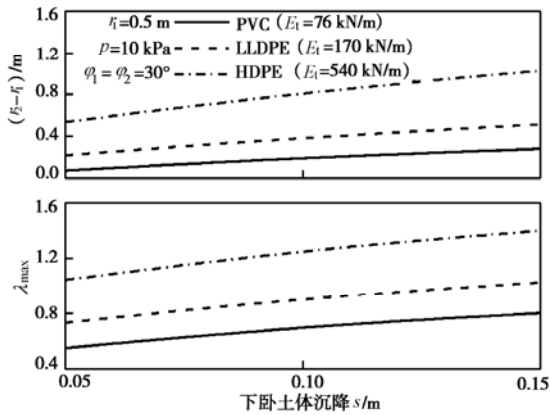


图 10 下卧土体沉降对褶皱宽度和最大泊松比的影响

Fig. 10 Effect of settlement of underlying soil on width of wrinkles and maximum Poisson's ratio

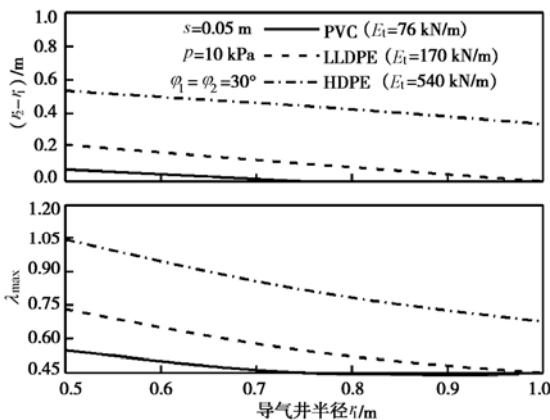


图 11 导气井半径对褶皱宽度和最大泊松比的影响

Fig. 11 Effect of radius of gas venting well on width of wrinkles and maximum Poisson's ratio

由此可见,控制下卧土体的沉降及采用柔性土工膜可在一定程度上降低土工膜褶皱的程度,而增大上覆土压力、界面内摩擦角和圆形构筑物半径也可一定程度上降低褶皱的程度。

4 影响土工膜受力变形的因素及控制措施

土工膜设计中很重要的一个问题是下卧土体沉降作用下圆形构筑物周边土工膜的最大应变 $\varepsilon_{\max}$ 和最大张力 $T_{\max}$ 是否超过其容许应变 $\varepsilon_{\text{allow}}$ 和容许张力 T_{allow} 。本节分析了各种因素对土工膜受力变形的影响,结果如图12~15所示。 $\varepsilon_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 随上覆压力 p 、界面摩擦角 φ 和下卧土体沉降 s 的增加而增加,下卧土体沉降 s 的影响尤为明显。然而, $\varepsilon_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 却随圆形构筑物半径 r_1 的增加而减小,若 r_1 趋向于无穷大,则 $\varepsilon_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 将达到最小值,从而趋于平面应变问题。另外,土工膜的抗拉刚度 E_t 对其受力变形同样有较大的影响,在相同条件下,土工膜抗拉刚度越小,其内力越小而应变越大,该结论同样可以从材料力学的基本方

程 $\sigma = E\varepsilon$ 或 $T = E_t\varepsilon$ 得到。

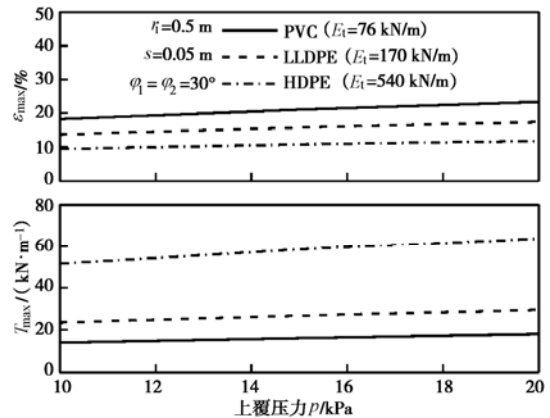


图 12 上覆压力对土工膜最大应变和张力的影响

Fig. 12 Effect of overburden pressure on maximum strain and tension of geomembranes

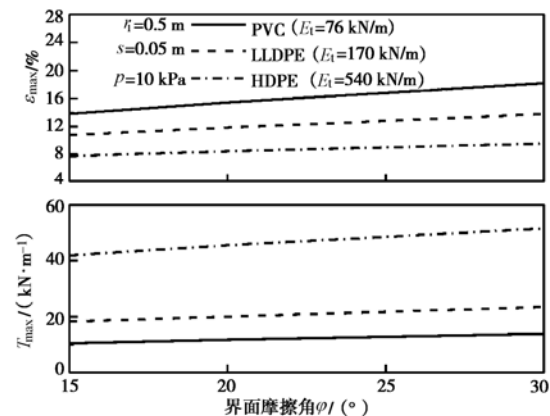


图 13 界面摩擦角对土工膜最大应变和张力的影响

Fig. 13 Effect of interface friction angle on maximum strain and tension of geomembranes

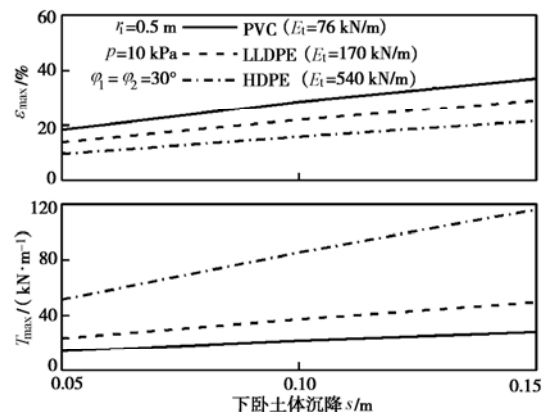


图 14 下卧土体沉降对土工膜最大应变和张力的影响

Fig. 14 Effect of settlement of underlying soil on maximum strain and tension of geomembranes

因而,减小下卧土体沉降可大幅降低土工膜的内力和变形,较小的上覆土压力、界面内摩擦角和较大的圆形构筑物半径也有利于控制土工膜的内力和变形。柔性土工膜具有较高的延伸率和容许应变,如窄条、宽幅和轴对称拉伸试验中 PVC 土工膜的极限应变

可达到 100%~480%，LLDPE 土工膜的极限应变可达到 75%~500%，而 HDPE 土工膜的屈服应变仅为 12%~17%^[11]。因而，柔性土工膜具有更好地适应差异沉降的能力。

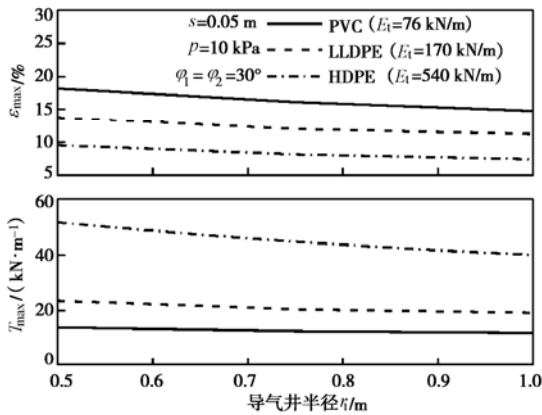


图 15 导气井半径对土工膜最大应变和张力的影响

Fig. 15 Effect of radius of gas venting well on maximum strain and tension of geomembranes

5 结 论

(1) 与平面应变问题相比，下卧土体沉降条件下圆形构筑物周边土工膜将产生更大的变形和张力。

(2) 下卧土体沉降的控制对降低土工膜褶皱程度和减小土工膜内力变形至关重要，在下卧土体施工时，应采用压实机械对圆形构筑物周边土体尽量压实。

(3) 减小的土工膜界面内摩擦角可降低土工膜的内力和变形，但却增大了褶皱的程度，因而工程上在构筑物周边局部区域设置光面土工膜“滑片”的作法，可一定程度上减小土工膜的内力和变形，但却不利于控制土工膜的褶皱。

(4) 柔性土工膜可大幅降低褶皱的程度，且具有更好的延展性。在满足其它设计要求的前提下，圆形构筑物周边应尽量采用柔性土工膜，如 PVC 土工膜或 LLDPE 土工膜。

本文假设土工膜在下卧土体沉降时始终保持和圆形构筑物紧密连接，但在实际情况中，如果上覆压力 p 较小，土工膜抗拉刚度 E_t 较大时，则土工膜较难保持与圆形构筑物紧密相连，因而本文计算方法偏于保守，然而对于工程设计是有利的。另外，本文考虑褶皱的圆形构筑物周边土工膜受力变形分析模型还有赖于试验的验证。

参考文献:

[1] GIROUD J P. Determination of geosynthetic strain due to deflection[J]. Geosynthetics International, 1995, 2(3): 635 -

641.

- [2] GIROUD J P, SODERMAN K L. Comparision of geomembranes subjected to differential settlement[J]. Geosynthetics International, 1995, 2(6): 953 - 968.
- [3] GIROUD J P, SODERMAN K L. Design of structure connected to geomembranes[J]. Geosynthetics International, 1995, 2(2): 379 - 428.
- [4] 邓学晶, 孔宪京, 邹德高. 复杂荷载作用下填埋场 HDPE 土工膜受拉计算[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 447 - 450. (DENG Xue-jing, KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Calculation of tension in HDPE geotechnical membrane under complicated loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 447 - 450. (in Chinese))
- [5] 陈云敏, 陈若曦, 朱 斌, 等. 下卧土体局部沉降条件下复合衬垫系统的受力变形性能及设计[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 21 - 27. (CHEN Yun-min, CHEN Ruo-xi, ZHU Bin, et al. Deformation characteristic and design of geosynthetic liner system subjected to local subsidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 21 - 27. (in Chinese))
- [6] GIROUD J P, MOREL N. Analysis of geomembrane wrinkles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, 11: 255 - 276.
- [7] SOONG T Y, KOERNER R M. Behavior of waves in high density polyethylene geomembranes: a laboratory study[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17: 81 - 104.
- [8] DICKINSON S, BRACHMAN R W I. Deformations of a geosynthetic clay liner beneath a geomembrane wrinkle and coarse gravel[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24: 285 - 298.
- [9] 黄克智. 板壳理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987: 125 - 127. (HUANG Ke-zhi. Plate theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987: 125 - 127. (in Chinese))
- [10] STEIN M, HEDGEPEITH J M. Analysis of partly wrinkle membranes[R]. Tech Rep NASA TN D-813, 1961: 1 - 32.
- [11] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 2001: 94 - 95.
- [12] FINLEY C A, HOLTZ R D. Investigation and modeling of two composite landfill covers[J]. Geosynthetics International, 2001, 8(2): 97 - 112.