

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1089

土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的实用预测方法研究

樊科伟¹, 邹维列², 王柳江³, 廖 洁⁴, 刘斯宏³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072;
3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 三江学院 土木工程学院, 江苏 南京 210012)

摘 要: 回填膨胀土吸水至饱和状态时, 土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的预测方法, 对减压膨胀土挡墙的设计至关重要。假定膨胀土变形由吸水膨胀变形和外力压缩变形组成, 以弹性理论为基础推导了膨胀土弹性模量和膨胀力的计算公式, 公式参数通过膨胀土有荷膨胀试验确定; 基于减压挡墙中回填膨胀土吸水至饱和时土工合成材料缓冲层与回填膨胀土间相互作用关系与变形协调条件, 建立了一种土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的实用预测方法。根据土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙和土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验结果, 对提出的预测方法进行了验证, 结果表明通过预测方法得到的计算结果与模型试验中实测结果具有良好的一致性。

关 键 词: 土工合成材料; 膨胀土; 挡土墙; 侧向压力; 实用预测方法

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 11-3182-09

A practical approach for predicting lateral pressures on expansive soil retaining walls with geosynthetic inclusions

FAN Ke-wei¹, ZOU Wei-lie², WANG Liu-jiang³, LIAO Jie⁴, LIU Si-hong³

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing, Jiangsu 210012, China)

Abstract: The development of a prediction method for the lateral pressure exerted on expansive soil retaining walls with geosynthetic inclusions has been identified as vital for the design of such structures when saturation of the backfilled expansive soil is achieved. It is assumed that the deformations of expansive soil are composed of swelling deformation due to water absorption by the soil and compression deformation induced by external loads. Within the tenets of elasticity, equations were devised to estimate the elastic modulus and swelling force of expansive soil, respectively. Parameters for these equations were determined through the swelling tests on the expansive soil with loadings. Based on the interaction relationship between the geosynthetic inclusions and the backfilled expansive soil, a practical prediction method for the lateral pressure exerted on expansive soil retaining walls with geosynthetic inclusions was developed when the expansive soil reached saturation, and its performance was fully validated by model tests of the expansive soil retaining wall with soilbag and expanded polystyrene geofoam (EPS) inclusions, respectively. It was observed that the lateral pressures calculated using the proposed method exhibited a well agreement with experimental measurements.

Keywords: geosynthetics; expansive soil; retaining wall; lateral pressure; practical prediction method

收稿日期: 2023-07-24

录用日期: 2023-08-31

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFE0105000); 国家自然科学基金项目 (No. 52308349); 江苏省自然科学基金项目 (No. BK20230967); 江苏省卓越博士后计划 (No. 2023ZB830); 江苏省高等学校自然科学基金项目 (No. 23KJB560022)。

This work was supported by the National Key Research and Development Project (2022YFE0105000), the National Natural Science Foundation of China (52308349), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20230967), Jiangsu Provincial Excellent Postdoctoral Program (2023ZB830) and the Natural Science Research Project of Jiangsu Provincial Colleges and Universities (23KJB560022).

第一作者简介: 樊科伟, 男, 1991 年生, 博士, 博士后, 主要从事土工合成材料应用原理等方面的科研工作。E-mail: fkwhhu@163.com

通讯作者: 王柳江, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事土石坝工程及土力学方面的科研和教学工作。E-mail: 15850514642@163.com

1 引言

挡土墙作为一种支挡填土或山坡土体、防止土体变形失稳的常见挡土构筑物, 被广泛应用于水利、土木工程当中。由于优越的排水和力学性能, 粒状土一直以来都是工程中挡土墙墙后回填的首选材料^[1-2]。然而, 在许多地区粒状土材料稀缺, 且购买、运输材料成本高昂。为节约工程成本, 这些地区可能会选择淤泥土甚至膨胀土等不良土体作为挡墙的回填材料^[3-4]。当膨胀土作为回填材料时, 挡墙不仅要承受膨胀土自重产生的土压力, 还要抵抗膨胀土吸水膨胀而产生的侧向膨胀压力。研究结果表明^[5-7], 膨胀土吸水膨胀后对静止挡墙产生的侧向压力, 可达膨胀土自重产生的土压力的 6~10 倍。

为减少回填膨胀土由于吸水膨胀对挡墙的侧向压力, 《膨胀土地区建筑技术规范》(GB50112—2013)^[8]和《铁路路基支挡结构设计规范》(TB10025—2006)^[9]要求在挡墙与回填膨胀土之间设置不小于 500 mm 的粒料层。然而研究表明, 即使墙后设置 1 m 厚的粒料层, 也只能降低作用在挡墙上约 30% 的侧向压力^[10]。因此, 通过增加粒料层厚度来减小膨胀土挡墙侧向压力的效果是有限的。近年来, 国内外学者提出了在墙背与回填膨胀土之间铺设土工合成材料缓冲层的方法用于减小膨胀土挡墙墙后的侧向压力。如 Wang 等^[11]提出将开挖的膨胀土直接装入编织袋形成的柔性土工袋堆筑在挡墙与回填膨胀土之间, 利用土工袋的柔性减小挡墙墙后侧向压力; 郑俊杰^[12]、邹维列^[13]等提出在墙背与回填膨胀土之间铺设可发性聚苯乙烯土工泡沫板(简称“土工泡沫板”), 利用土工泡沫板的高压缩特性减小挡墙墙后侧向压力。

以往提出的土工袋、土工泡沫板等土工合成材料缓冲层减压手段为膨胀土地区挡土结构工程中解决墙后侧向压力过大的问题提供了解决途径。然而, 还未形成土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的预测方法, 尤其是回填膨胀土吸水至饱和时(即最危险工况)的侧向压力, 导致目前土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙设计缺少必要的理论依据。由于土性和边界条件的不同, 现有土工合成材料缓冲层减压非膨胀性土挡墙以及没有减压措施的膨胀土挡墙侧向压力的预测方法^[5, 14-17], 并不适用于土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙。

为此, 本文假设膨胀土为连续均匀、各向同性的弹性材料, 以弹性理论为基础建立回填膨胀土浸水饱和条件下, 土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡

墙墙后侧向压力的实用预测方法, 以便于工程使用; 最后分别利用土工袋缓冲层和土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验结果对预测方法的准确性进行验证。

2 侧向压力计算方法

2.1 缓冲层-膨胀土-挡墙相互作用机制

邹维列等^[13]和万梁龙^[18]通过土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验和数值模拟, 揭示了挡墙中缓冲层与膨胀土、挡墙之间的相互作用机制:

(1) 缓冲层在膨胀土吸水膨胀时压缩, 为膨胀土侧向变形提供了变形空间, 不仅导致膨胀土侧向膨胀力得以释放, 而且其自身的抗剪强度也得以发挥, 进而使得作用在挡墙上的侧向压力减小;

(2) 回填膨胀土浸水至饱和过程中, 墙后回填膨胀土处于非极限主动状态, 缓冲层与膨胀土以及墙体之间的摩擦使得缓冲层受到力矩作用, 导致作用在挡墙上部侧向压力增加而下部侧向压力减小, 总侧向压力变化不大但倾覆力矩增加。

2.2 分析模型

对于普通挡墙, 在计算墙后侧向压力时, 通常是以影响挡墙侧向压力有限范围内的填土为研究对象进行分析^[19], 如库仑主动土压力计算方法是以墙后滑动面与挡墙之间的滑楔体为研究对象提出的。与普通挡墙不同的是, 通常情况下膨胀土挡墙是以影响范围内的回填膨胀土为研究对象。张颖钧^[20]通过对 4 个膨胀土堑坡进行了为期 2 a 的变形观测, 统计了坡面累计变形量随考虑填土宽度范围的变化规律, 如图 1 所示。可以看出, 考虑 92.5% 和 96.7% 坡面累计变形时, 分别需要考虑 2.0 m 和 3.0 m 宽度内的膨胀土; 随着土体深度增加, 所需要考虑的膨胀土宽度 D_y (以下简称“有效宽度”) 有所减少。

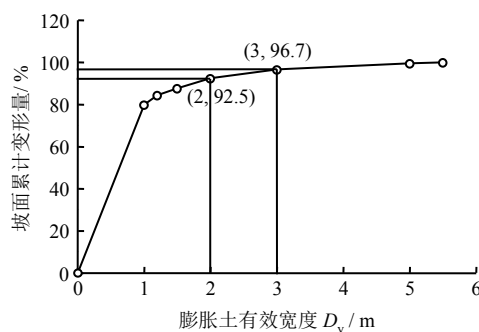


图 1 坡面累计变形量随回填膨胀土有效宽度的变化
Fig.1 Variation of slope surface cumulative deformation with effective width of backfilled expansive soil

基于膨胀土挡墙有效宽度概念, 建立了如图 2

所示的土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙分析模型。图中 B 为土工合成材料缓冲层厚度； H 为挡墙墙高； σ_{z-inc} 和 σ_{x-inc} 分别为深度 z 处缓冲层薄层单元竖向和侧向应力； σ_{z-e} 和 σ_{x-e} 分别为深度 z 处膨胀土薄层单元竖向和侧向应力。

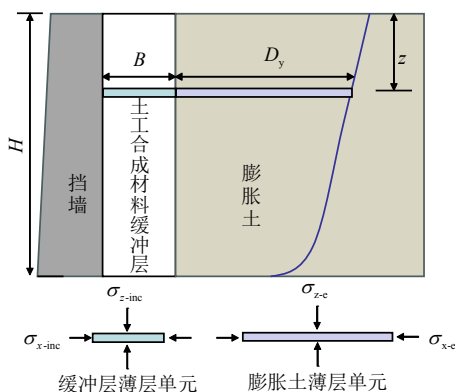


图2 分析模型
Fig.2 Analytic model

2.3 基本方程建立

邹维列等^[13]发现,膨胀土浸水过程中,挡墙中缓冲层和膨胀土时刻处于一种动态平衡状态,即不同深度处膨胀土与缓冲层变形和应力相等;膨胀土吸水饱和后,不同深度处膨胀土与缓冲层变形和应力相等且不再改变,挡墙最终达到其静态平衡状态。取图2所示深度 z 处缓冲层和膨胀土有效宽度内的薄层单元,忽略缓冲层与膨胀土以及墙体之间摩擦的影响,挡墙达到最终静态平衡状态时可以得到

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x-inc} B &= \varepsilon_{x-e} D_y \\ \sigma_{x-inc} &= \sigma_{x-e} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ε_{x-inc} 和 ε_{x-e} 分别为深度 z 处缓冲层和膨胀土薄层单元上的侧向应变。

为推导土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的简单表达形式,对膨胀土吸水至饱和过程中挡墙状态变化进行了如下假设和简化:膨胀土首先吸水膨胀,假设膨胀土吸水过程中不产生膨胀变形,吸水至饱和时膨胀土产生最大膨胀应力,之后再开始挤压土工合成材料缓冲层;挤压过程中,膨胀土侧向变形和缓冲层压缩变形增大,膨胀土产生的膨胀应力减小,而作用在缓冲层上的挤压应力增大;当不同深度处膨胀土膨胀变形和土工合成材料缓冲层压缩变形、膨胀土侧向应力与土工合成材料缓冲层挤压应力相等时,挡墙达到最终静态稳定状态。在所述简化和假设条件下,膨胀土吸水至饱和过程中膨胀土和缓冲层侧向应力和变形的变化过程如图3所示。当膨胀土和缓冲层侧向应力变形曲线

相交时挡墙达到最终静态稳定状态,交点处侧向变形 s_x 和侧向应力 σ_x 分别可表示为

$$\left. \begin{aligned} s_x &= \varepsilon_{x-inc} B = \varepsilon_{x-e} D_y \\ \sigma_x &= \sigma_{x-inc} = \sigma_{x-e} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

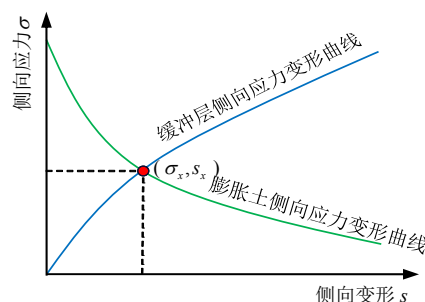


图3 膨胀土与缓冲层侧向应力变形关系
Fig.3 Stress-deformation relationships of expansive soil and geosynthetic inclusions

根据2.1节可知,土工合成材料缓冲层减小膨胀土挡墙侧向压力可分为两个方面:一是膨胀土侧向膨胀应力的减小,二是膨胀土自身抗剪强度的发挥。基于此,假设膨胀土变形由两部分组成:①外荷载下膨胀土的压缩变形;②吸水导致的膨胀变形,如图4所示(p_e 为膨胀土膨胀应力)。通常情况下膨胀土三向膨胀应力并不相等。张颖钧^[21]以及Erguler等^[22]采用三向膨胀特性仪测量了膨胀土的三向膨胀应力,发现水平两个方向膨胀应力差异较小,而竖向膨胀应力是水平膨胀应力的0.65~2倍。简化起见,认为膨胀土3个方向的膨胀应力相等。

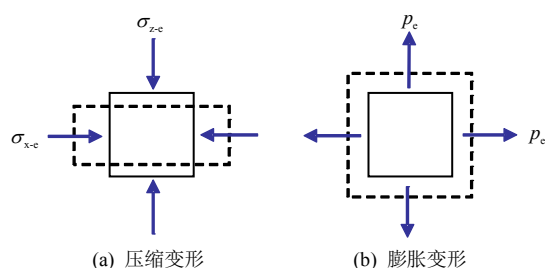


图4 膨胀土变形示意图
Fig.4 Deformation diagram of the expansive soil

假设膨胀土为均匀连续、各向同性的弹性材料,根据广义 Hook 定理可得:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{x-e} &= \frac{1}{E_e} [\sigma_{x-e} - p_e - \mu(\sigma_{y-e} + \sigma_{z-e} - 2p_e)] \\ \varepsilon_{y-e} &= \frac{1}{E_e} [\sigma_{y-e} - p_e - \mu(\sigma_{x-e} + \sigma_{z-e} - 2p_e)] \\ \varepsilon_{z-e} &= \frac{1}{E_e} [\sigma_{z-e} - p_e - \mu(\sigma_{x-e} + \sigma_{y-e} - 2p_e)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ε_{y-e} 和 ε_{z-e} 分别为膨胀土单元竖向和侧向应变; E_e 为膨胀土的弹性模量, 定义为膨胀土吸水产生的应力和应变的比值; μ 为膨胀土的泊松比。

挡墙受侧向压力属于平面应变问题, 则:

$$\sigma_{y-e} = p_e + \mu(\sigma_{x-e} + \sigma_{z-e} - 2p_e) \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 得到:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x-e} = & \frac{1}{E_e} \left[(1-\mu^2)\sigma_{x-e} - \mu(1+\mu)\sigma_{z-e} + (2\mu^2 + \mu - 1)p_e \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{z-e} = \gamma z$, γ 为膨胀土重度。

不同土工合成材料缓冲层的压缩应力-应变关系不尽相同, 可将其统一表示为

$$\sigma_{x-inc} = E_{inc} \varepsilon_{x-inc} \quad (6)$$

式中: E_{inc} 为土工合成材料缓冲层的弹性模量。

将式 (5)、(6) 代入式 (2), 可以得到减压膨胀土挡墙侧向应力 σ_x 的表达式:

$$\sigma_x = \frac{\left[\mu(1+\mu)\gamma z - (2\mu^2 + \mu - 1)p_e \right] \cdot D_y}{D_y(1-\mu^2) + B \cdot E_e / E_{inc}} \quad (7)$$

根据挡墙概况和常规土工试验, 可以较为容易地确定式 (7) 中 B 、 z 和 γ 。而 D_y 、 μ 、 E_e 以及 p_e 的准确测试和计算则较为困难。因此, 下面通过工程经验和理论推导对这 4 个未知参数进行了求解。

2.4 方程参数求解

2.4.1 膨胀土弹性模量 E_e

膨胀土弹性模量 E_e 与膨胀土含水率与埋深相关^[23]。为推导 E_e 的简单表达形式, 假设同一含水率和膨胀力情况下, E_e 随埋深线性增大, 即:

$$E_e = E_0 + m\sigma_{z-e} \quad (8)$$

式中: E_0 为竖向压力为 0 时膨胀土的弹性模量; m 为相关参数。

工程中通常所说的膨胀力, 一般是指竖向膨胀力, 可通过有荷膨胀试验测量, 目前该测量方法已较为成熟。而对于侧向膨胀力, 目前还没有统一和成熟的测量方法。为利于工程使用, 在假设膨胀土三向膨胀应力相等以及膨胀土为均匀连续、各向同性弹性材料的条件下, 通过对侧限条件下膨胀土膨胀特性进行分析, 推导 E_e 的具体表达式。侧限条件下膨胀土侧向变形 $\varepsilon_{x-e} = \varepsilon_{y-e} = 0$, 代入式 (3) 中第 1、2 式可得

$$\sigma_{x-e} = \sigma_{y-e} = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{z-e} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (3) 中第 3 式可以得到膨胀土竖向应变 ε_{z-e} 与竖向应力 σ_{z-e} 的关系:

$$\varepsilon_{z-e} = \frac{1}{E_e} \cdot \frac{2\mu^2 + \mu - 1}{1-\mu} (p_e - \sigma_{z-e}) \quad (10)$$

进一步地, 侧限条件下 ε_{z-e} 等于膨胀土的膨胀率 δ_e , 则式 (10) 移项后可以推导出 E_e 的表达式:

$$E_e = \frac{(\mu+1)(1-2\mu)(p_e - \sigma_{z-e})}{(1-\mu)\delta_e} \quad (11)$$

根据式 (11), 可以进一步得到竖向应力 σ_{z-e} 为 0 时 E_0 的表达式:

$$E_0 = \frac{(\mu+1)(1-2\mu)p_e}{(1-\mu)\delta_{e0}} \quad (12)$$

式中: δ_{e0} 为竖向荷载为 0 时对应的膨胀土膨胀率。

联立式 (8)、(11)、(12), 可得 δ_e 的表达式:

$$\delta_e = \frac{k(p_e - \sigma_{z-e})\delta_{e0}}{kp_e + m\sigma_{z-e}} \quad (13)$$

式中: $k = (\mu+1)(1-2\mu)/(1-\mu)$ 。

从式 (13) 可以看出, δ_e 与 σ_{z-e} 之间存在双曲线关系。为验证该公式的合理性, 对两种膨胀土 (A 和 B) 分别进行了不同竖向应力条件下的有荷膨胀试验, 试验结果如图 5 所示。所用膨胀土 A 和 B 基本物理参数如表 1 所示, 其中有荷膨胀试验中膨胀土 A 试样的初始含水率为 8%, 初始密度为 1.55 g/cm³; 膨胀土 B 试样的初始含水率为 9.3%, 初始密度为 1.56 g/cm³。

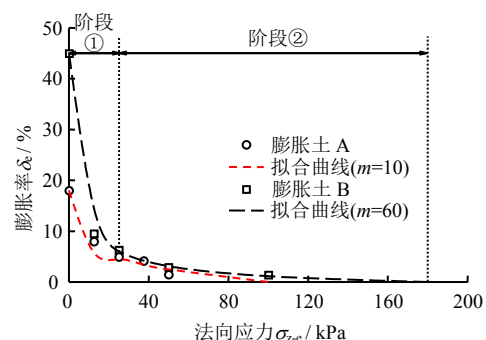


图 5 膨胀土有荷膨胀试验结果
Fig.5 Results of expansion ratio tests with loadings

表 1 膨胀土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of the expansive soils

类型	相对密度	液限 / %	塑限 / %	最优含水率 / %	最大干密度 / (kg · m ⁻³)	自由膨胀率 / %
A	2.45	50.1	26.8	20.4	1 760	82
B	2.69	64.8	37.2	24.0	1 600	103

从图 5 可以看出, 两种膨胀土试样 δ_e 与 σ_{z-e} 均大致成双曲线关系, 证明了式 (13) 的合理性, 同时也证明了上述假设的合理性。

将式 (11) 代入式 (8), 则 E_e 可表示为

$$E_e = \frac{(\mu+1)(1-2\mu)p_e}{(1-\mu)\delta_{e0}} + m\sigma_{z-e} \quad (14)$$

但若要通过式 (14) 确定 E_e , 还需要得知膨胀土膨胀力 p_e 和参数 m 。下面首先对 p_e 进行求解。

2.4.2 膨胀土膨胀力 p_e

膨胀土浸水膨胀时若完全受约束而不产生膨胀变形, 则产生最大膨胀应力 p_0 ; 如果完全不受约束, 则发生最大膨胀变形 δ_{e0} 。一般情况下, 大气影响范围内的膨胀土, 既能发生部分膨胀变形, 也能产生部分膨胀应力^[24-25]。王年香等^[5]假设大气影响范围内膨胀土膨胀力与膨胀变形呈线性关系, 建立了膨胀土可动挡墙侧向压力的计算方法, 并通过模型试验结果证明了所推导计算方法的合理性。从图 5 可以看出, 膨胀土膨胀力和膨胀变形并非线性关系。然而, 由于王年香等^[5]试验中挡墙位移较小, 膨胀土膨胀力较大, 因此其膨胀力变化范围位于图 5 所示的膨胀土膨胀变形和膨胀力关系曲线阶段②内。在此范围内, 王年香等^[5]假设膨胀土膨胀力和膨胀变形呈线性关系是合理的。

土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙与可动膨胀土挡墙类似, 由于缓冲层对膨胀土的变形限制, 膨胀土变形不能完全发挥, 其膨胀力变化范围也应大致位于图 5 阶段②内, 因此本文也同样假设了膨胀土膨胀力与膨胀变形呈线性关系。基于此假设, 侧向条件下膨胀力与膨胀变形可表示为

$$p_e = \frac{\delta_{e0} - \delta_e}{\delta_{e0}} p_0 \quad (15)$$

联立式 (13)、(15), 则可得到 p_e 的具体表达式:

$$p_e = \frac{p_0\sigma_{z-e}(m\delta_{e0} + k)}{kp_0 + m\sigma_{z-e}\delta_{e0}} \quad (16)$$

根据有荷膨胀试验结果可以直接得到 p_0 和 δ_{e0} , 然后根据式 (16)、(13) 拟合参数 m , 拟合效果如图 5 所示, 可以看出两种膨胀土的拟合结果与

试验结果均较为吻合。

2.4.3 有效宽度 D_y 和泊松比 μ

万梁龙^[18]发现, 大气对土体的急剧影响深度通常不超过 3 m, 3 m 深度以下膨胀土挡墙墙后侧向压力可按照静止土压力进行计算。张颖钧^[20]认为考虑水平方向上 3 m 范围内的膨胀土, 便可得到结构外表面 96.7% 的累计变形。简化和保守起见, 本文假设 3 m 深度以内, 不同墙深处膨胀土有效宽度 D_y 直接取 3 m, 即 $D_y = 3.0$ m; 当墙后回填膨胀土实际宽度 D 不大于 3 m 时, D_y 直接取膨胀土实际宽度值。

膨胀土泊松比 μ 通常由土工试验来确定。一般而言, μ 并非固定不变, 而与膨胀土的初始含水率呈现出一定的线性相关关系^[26]。当无试验数据时, μ 取 0.3 可满足一般工程要求^[27]。

2.5 计算流程

图 6 给出了本文所提出的土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力预测方法的具体计算流程, 以便于该方法在工程中的使用。

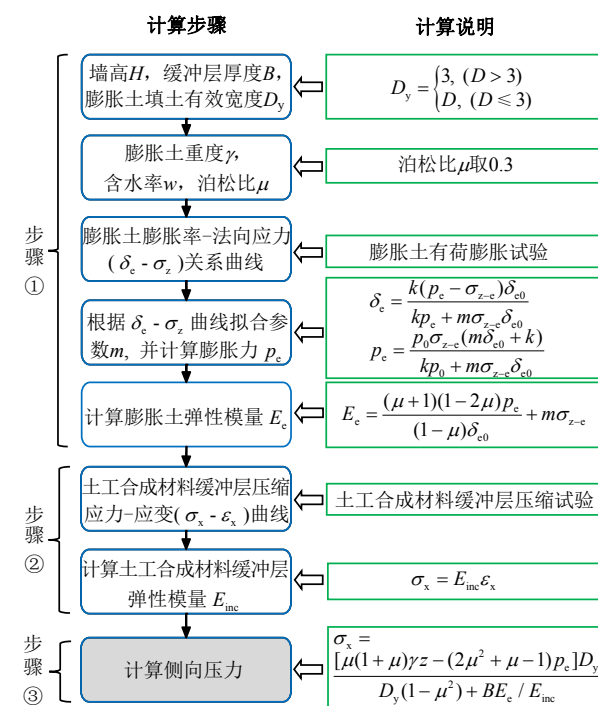


图 6 侧向压力计算流程图

Fig.6 Flowchart for predicting the lateral pressure

3 模型试验验证

3.1 土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验

Wang 等^[11]开展了如图 7 所示的土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验。模型试验箱尺寸为 2 m × 1 m × 1 m (长 × 宽 × 高), 试验所用膨胀土为表 1 中的

膨胀土 A, 膨胀土初始含水率为 8%, 压实后其初始密度为 1.55 g/cm^3 , 膨胀土填土宽度为 1.55 m 。试验所用土工袋尺寸为 $0.50 \text{ m} \times 0.45 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 袋内充填膨胀土初始含水率为 30%。填土表面通过花洒模拟降雨, 使得回填膨胀土吸水饱和和。

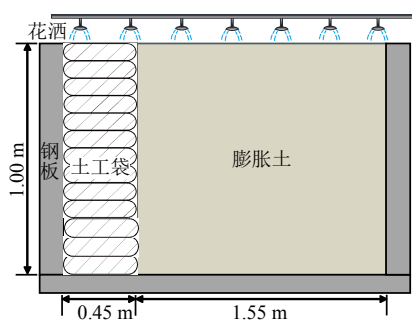


图 7 土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验示意图

Fig.7 Diagram of the model test on expansive soil retaining wall with soilbag inclusions

已知模型试验中 H 为 1.00 m , B 为 0.45 m , 膨胀土宽度为 1.55 m , 小于 3.00 m , 因此 D_y 取 1.55 m ; γ 为 16.4 kN/m^3 , μ 取 0.3 , 膨胀土 A 拟合参数 $m = 10$ 。在对土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙在回填膨胀土吸水饱和条件下的侧向应力进行求解前, 还需要根据式 (6) 求解土工袋缓冲层的弹性模量。为此, 开展了袋内充填不同含水率膨胀土土工袋在不同竖向应力作用下的侧向压缩试验, 试验结果如图 8 所示。可以看出, 袋内充填不同含水率膨胀土土工袋的侧向应力-应变大致呈线弹性关系。

图 9 给出了袋内充填不同含水率膨胀土土工袋侧向压缩模量 E_{inc} 与竖向应力 σ_{z-inc} 的关系。可以看出, 同一膨胀土含水率下, E_{inc} 随 σ_{z-inc} 的增大而增大, 两者呈现很好的指数函数关系。根据两者指数函数关系, 拟合出土工袋侧向应力-应变关系为

$$\sigma_x = a e^{b \sigma_{z-inc}} \varepsilon_{x-inc} \quad (17)$$

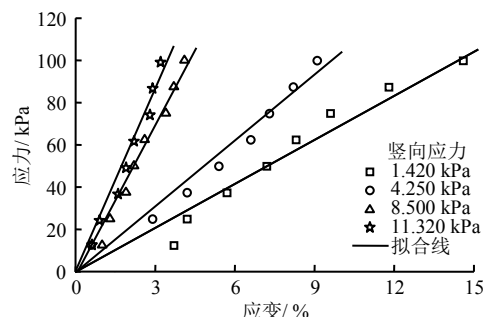
式中: a 和 b 分别为拟合参数。对于充填含水率为 30% 膨胀土的土工袋, $a = 307.9$, $b = 0.0507$ 。

将式 (17) 代入式 (7), 可得土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙侧向应力 σ_x 的具体表达式:

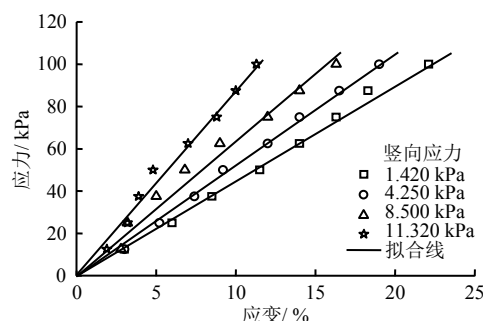
$$\sigma_x = \frac{[\mu(1+\mu)\gamma z - (2\mu^2 + \mu - 1)p_c] \cdot D_y}{D_y(1-\mu^2) + B/(a e^{-b \sigma_{z-inc}}) \cdot E_c} \quad (18)$$

图 10 给出了回填膨胀土浸水饱和时土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的实测值与预测值。可以看出, 由于没有考虑缓冲层与膨胀土以及墙体

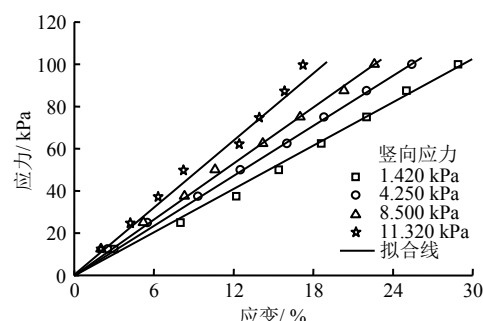
之间摩擦的影响, 预测得到的土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙上部侧向压力略小于模型试验结果。但总体来看, 预测结果与模型试验结果基本保持一致, 表明了本文提出预测方法的合理性。



(a) 含水率为 20%



(b) 含水率为 25%



(c) 含水率为 30%

图 8 充填不同含水率膨胀土土工袋侧向压缩应力-应变关系

Fig.8 Lateral stress-strain relationship of the soilbags filled with expansive soils of different moisture contents

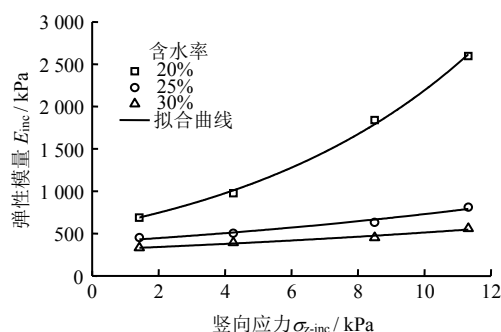


图 9 土工袋侧向弹性模量 E_{inc} 与竖向应力 σ_{z-inc} 关系

Fig.9 Relationship between E_{inc} and σ_{z-inc} of soilbags

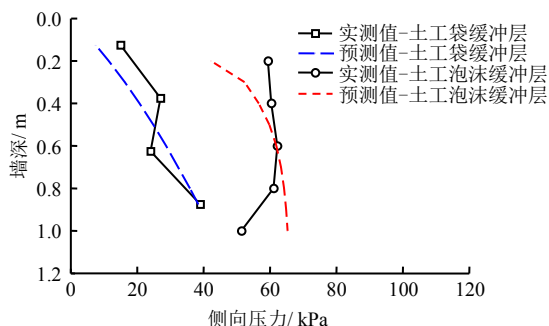


图 10 土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力分布
Fig.10 Distribution of the lateral pressure on the expansive soil retaining wall with geosynthetic inclusions

3.2 土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验

邹维列等^[13]开展了如图 11 所示的土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验。模型试验箱尺寸为 2.0 m×1.2 m×1.0 m (长×宽×高), 试验所用膨胀土为表 1 中的膨胀土 B, 膨胀土初始含水率为 9.3%, 压实后其初始密度为 1.56 g/cm³, 膨胀土填土宽度为 1.7 m。所用土工泡沫板密度为 12 kg/m³, 尺寸为 1.0 m×0.3 m×1.2 m (长×宽×高)。填土表面通过覆水, 使得膨胀土填土吸水饱和。

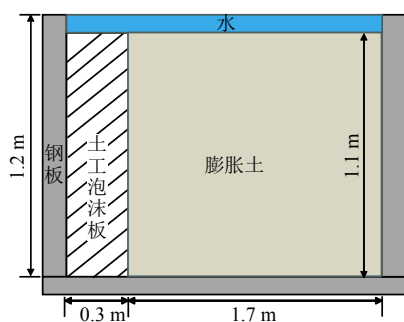


图 11 土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙模型试验示意图
Fig.11 Diagram of the model test on expansive soil retaining wall with EPS inclusions

已知模型试验中 H 为 1.1 m, B 为 0.3 m, 膨胀土宽度为 1.7 m, 小于 3.0 m, 因此 D_y 取 1.7 m; γ 为 16.7 kN/m³, μ 取 0.3, 膨胀土 B 拟合参数 $m=60$ 。在对土工泡沫缓冲层减压膨胀土挡墙在回填膨胀土吸水饱和条件下的侧向应力进行求解前, 还需要根据式 (6) 求解土工泡沫板缓冲层的弹性模量。为此, 取边长为 5 cm 的 3 种常见密度的土工泡沫 (12、15、25 kg/m³) 立方块进行无侧限压缩试验 (压缩应变速率为 10%/min), 得到其应力-应变曲线如图 12 所示。土工泡沫板采用无侧限压缩试验而并非不同竖向应力作用下的侧向压缩试验是因为, 土工泡沫板本身质量很轻, 其自重引起的上覆荷载通常

情况下可以忽略不计。

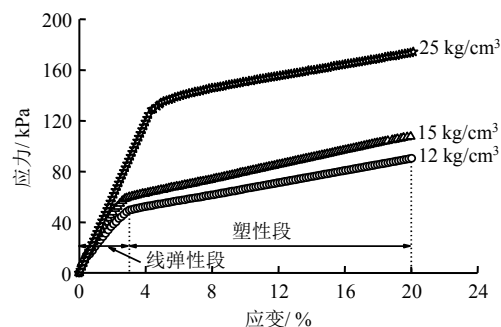


图 12 土工泡沫板无侧限压缩应力-应变曲线
Fig.12 Stress-strain relationship of the EPS block

从图 12 可以看出, 在 20% 的应变范围内, 3 种密度土工泡沫压缩应力-应变曲线均大致成双线性 (线弹性段和塑性段)。根据双线性规律, 拟合出土工泡沫压缩应力-应变关系式:

$$\sigma_x = \begin{cases} E_1 \varepsilon_x & \varepsilon_x \leq \varepsilon_0 \\ \sigma_0 + E_2 (\varepsilon_x - \varepsilon_0) & \varepsilon_x > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: E_1 , E_2 分别为线弹性段和塑性段的切线模量; σ_0 , ε_0 分别为线弹性段和塑性段交点处应力和应变。对于密度为 12 kg/m³ 的土工泡沫, 具体拟合出 $E_1 = 1537.5$ kPa, $E_2 = 244.6$ kPa, $\sigma_0 = 49.2$ kPa, $\varepsilon_0 = 3.2\%$ 。

将式 (19) 代入式 (7), 可得吸水饱和时土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙侧向应力 σ_x 的表达式, 其中当 $\varepsilon_x \leq \varepsilon_0$:

$$\sigma_x = \frac{[\mu(1+\mu)\gamma z - (2\mu^2 + \mu - 1)p_e] \cdot D_y}{D_y(1-\mu^2) + B \cdot E_e / E_1} \quad (20)$$

当 $\varepsilon_x > \varepsilon_0$:

$$\sigma_x = \frac{[\mu(1+\mu)\gamma z - (2\mu^2 + \mu - 1)p_e] D_y + B(E_1 - E_2)\varepsilon_0 E_e / E_2}{D_y(1-\mu^2) + B E_e / E_2} \quad (21)$$

回填膨胀土浸水饱和时土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的实测值与预测值如图 10 所示。可以看出, 由于没有考虑缓冲层与膨胀土以及墙体之间摩擦的影响, 预测得到的土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙上部侧向压力小于模型试验结果, 而下部侧向压力大于试验结果。根据图 10 所示土工泡沫板缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的实测值与预测值, 取 1 m 墙厚, 进一步计算出作用在墙深 0.2~1.0 m 范围内的总侧向压力。根据实测值和预

测值计算出总侧向压力分别为 47.82 kN 和 47.67 kN, 两者差值较小, 从总侧向压力上来看作者认为预测结果能够大致满足工程要求。

4 结 论

(1) 假设膨胀土为均匀连续、各向同性的弹性材料, 基于经典 Hook 理论, 推导了膨胀土弹性模量和膨胀力的计算公式, 公式包含一个参数, 可直接通过膨胀土有荷膨胀试验确定。

(2) 通过压缩试验发现土工袋侧向应力-应变呈线性关系, 其弹性模量与袋内膨胀土含水率和所受竖向应力相关; 土工泡沫压缩应力-应变曲线呈双线性关系, 其弹性模量主要与其密度相关。

(3) 基于回填膨胀土浸水至饱和时, 土工合成材料缓冲层和膨胀土侧向应力-应变关系, 推导出土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力统一预测方法, 该公式综合考虑了膨胀土作用范围、膨胀力与膨胀变形、膨胀率与上覆压力之间的关系。

(4) 土工袋缓冲层减压膨胀土挡墙以及土工泡沫板减压缓冲层膨胀土挡墙模型试验得到的侧向压力与预测结果具有良好的一致性, 证明了预测方法的合理性。

参 考 文 献

- [1] FAN K W, LIU S H, CHENG Y P, et al. Sliding stability analysis of a retaining wall constructed by soilbags[J]. **Géotechnique Letters**, 2019, 9(3): 211-217.
- [2] 刘华北. 考虑蠕变、地震效应的土工格栅砂性土加筋挡墙弹塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 175(6): 917-921.
LIU Hua-bei. Elasto-plastic finite element analysis of geogrid-reinforced sandy soil retaining walls considering effect of creep and earthquake[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 175(6): 917-921.
- [3] LIU S H, FAN K W, XU S Y. Field study of a retaining wall constructed with clay-filled soilbags[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2019, 47(1): 87-94.
- [4] 侯天顺, 杨凯旋. 挡土墙后 EPS 颗粒混合轻量土填料静止土压力特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3249-3259, 3270.
HOU Tian-shun, YANG Kai-xuan. Model test on earth pressure at rest of light weight soil mixed EPS particles behind a retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(12): 3249-3259, 3270.
- [5] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 膨胀土挡墙侧向膨胀压力研究[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 580-587.
WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Lateral swelling pressure of expansive soil acting on retaining wall due to inundation[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(5): 580-587.
- [6] 刘云龙, 李文庆, 张景伟, 等. 考虑环境荷载作用的膨胀土边坡挡墙侧向土压力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 150-159.
LIU Yun-long, LI Wen-qing, ZHANG Jing-wei, et al. Research on lateral earth pressure acting on retaining wall in expansive soil considering influences of environmental load[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2022, 53(1): 150-159.
- [7] 张颖钧. 挡墙后裂土膨胀压力分布与设计计算方法[J]. 铁道学报, 1995, 17(1): 93-102.
ZHANG Ying-jun. Distribution of lateral swelling pressure and the method of design and computation of retaining wall in expansive soil area[J]. **Journal of the China Railway Society**, 1995, 17(1): 93-102.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50112—2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [9] 铁道第二勘察设计院. TB 10025—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
The Second Survey and Design Institute of China Railway. TB 10025—2006 Code for design on retaining structures of railway subgrade[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [10] 张颖钧. 裂土挡土墙模型试验缓冲层设置的研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 38-45.
ZHANG Ying-jun. Study on the buffering cushion installed in retaining wall model test with expansive soil as backfill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(1): 38-45.
- [11] WANG L J, LIU S H, ZHOU B. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2015, 43(1): 89-96.
- [12] 郑俊杰, 吕思祺, 曹文昭, 等. 高填方膨胀土作用下刚柔复合桩基挡墙结构数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 395-402.

- ZHENG Jun-jie, LÜ Si-qi, CAO Wen-zhao, et al. Numerical simulation of composite rigid-flexible pile-supported retaining wall under the action of high-filled expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(1): 395-402.
- [13] 邹维列, 樊科伟, 张攀, 等. 土工泡沫减压膨胀土挡墙侧向压力及影响因素分析[J]. **岩土力学**, 2023, 44(9): 2537-2544.
- ZOU Wei-lie, FAN Ke-wei, ZHANG Pan, et al. Model test and influence factors analysis of lateral pressures on expansive soil retaining wall with expanded polystyrene geofoam inclusions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 2537-2544.
- [14] FAN K W, YAN J, ZOU W L, et al. Active earth pressure on non-yielding retaining walls with geofoam blocks and granular backfills[J]. **Transportation Geotechnics**, 2022, 33: 100712.
- [15] 王秉勇. 裂土地区挡土墙上承受的膨胀力分析[J]. **路基工程**, 1993, 47(4): 5-11.
- WANG Bing-yong. Analysis of swelling pressure of expansive soil on retaining wall[J]. **Subgrade Engineering**, 1993, 47(4): 5-11.
- [16] XIE M M, ZHENG J J, SHAO A D, et al. Study of lateral earth pressures on nonyielding retaining walls with deformable geofoam inclusions[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2020, 48(5): 684-690.
- [17] LIU Y L, VANAPALLI S K. Prediction of lateral swelling pressure behind retaining structure with expansive soil as backfill[J]. **Soils and Foundations**, 2019, 59(1): 176-195.
- [18] 万梁龙. 聚苯乙烯泡沫(EPS)减小膨胀土挡墙侧压力的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- WAN Liang-long. Reduction of lateral pressure on retaining walls backfilling with expansive soil using expanded polystyrene (EPS) geofoam[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [19] 邓波, 杨明辉, 王东星, 等. 刚性挡墙后非饱和土破坏模式及主动土压力计算[J]. **岩土力学**, 2022, 43(9): 2371-2382.
- DENG Bo, YANG Ming-hui, WANG Dong-xing, et al. Failure mode and active earth pressure calculation of unsaturated soil behind rigid retaining wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(9): 2371-2382.
- [20] 张颖钧. 裂土堑坡变形观测分析[C]//滑坡文集(第8集). 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- ZHANG Ying-jun. Analysis of displacement mechanism of slope in expansive soil[C]//Collected Works on Landslides (Episode 8). Beijing: China Railway Publishing House, 1991.
- [21] 张颖钧. 裂土三向胀缩性的室内研究[J]. **大坝观测与土工测试**, 1990(1): 13-22.
- ZHANG Ying-jun. Laboratory investigations of three-dimensional swell-shrinking characteristics of expansive soils[J]. **Dam Observation and Geotechnical Testing**, 1990(1): 13-22.
- [22] ERGULER Z A, ULUSAY R. A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) Clay[J]. **Engineering Geology**, 2003, 67(3): 331-352.
- [23] TANG L, CONG S Y, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2018, 145: 197-207.
- [24] MA T T, YAO C Q, DONG Y, et al. Physicochemical approach to evaluating the swelling pressure of expansive soils[J]. **Applied Clay Science**, 2019, 172: 85-95.
- [25] 高志傲, 孔令伟, 王双娇, 等. 平面应变条件下不同裂隙方向原状膨胀土变形破坏性状与剪切带演化特征[J]. **岩土力学**, 2023, 44(9): 2495-2508.
- GAO Zhi-ao, KONG Ling-wei, WANG Shuang-jiao, et al. Deformation behavior and shear zone evolution characteristics of undisturbed expansive soil with different fissure directions under plane strain condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(9): 2495-2508.
- [26] 林宇亮, 张震, 罗桂军, 等. 膨胀土边坡的水平膨胀力及桩板结构内力分析[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2022, 53(1): 140-149.
- LIN Yu-liang, ZHANG Zhen, LUO Gui-jun, et al. Analysis of lateral swelling pressure of expansive soil slope and internal force of pile-sheet structure[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2022, 53(1): 140-149.
- [27] AYTEKIN M. Numerical modeling of EPS geofoam used with swelling soil[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1997, 15(1-3): 133-146.