

DOI: 10.11779/CJGE201911006

基于界面物态演变规律的衬垫界面动力模型

冯世进^{1,2}, 沈阳^{1,2}, 郑奇腾^{1,2}, 常纪昀^{1,2}, 史嘉梁^{1,2}

(1. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 衬垫界面的动力剪切特性对填埋场动力稳定性有着重要影响, 然而, 已有界面/接触面动力本构理论无法完整揭示其动力剪切过程中的物态演变机理。将土工膜/GCL界面的动力剪切过程分为土质材料变形和界面滑动摩擦两个物态阶段, 提出了触发界面物态演变的界面临界状态和临界应力, 结合界面动力剪切基本规律, 分别采用弹塑性模型与摩擦系数模型描述两个物态阶段, 建立了衬垫界面动力模型, 并与多次循环条件下的土工膜/GCL界面动力剪切试验进行对比, 验证了该动力模型的准确性。研究表明, 该模型能有效地模拟衬垫界面动力剪切变形的力学特性与物态演变规律, 为填埋场动力稳定性分析提供了理论支持。

关键词: 填埋场衬垫; 土工膜/GCL界面; 界面动力模型; 物态演变

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)11-2018-09

作者简介: 冯世进(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土工程、土动力学的教学与科研工作。

E-mail: fsjgly@tongji.edu.cn.

Dynamic interface model based on physical state evolution of liner interface

FENG Shi-jin^{1,2}, SHEN Yang^{1,2}, ZHENG Qi-teng^{1,2}, CHANG Ji-yun^{1,2}, SHI Jia-liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 2. Department of

Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The dynamic shear characteristics of the liner interface have significant impacts on the seismic stability of landfills. However, the existing interface dynamic constitutive theory cannot fully reveal the evolution mechanism of the physical state during the dynamic shear process of a liner interface. The dynamic shear process of geomembrane/GCL interface is divided into two stages: deformation of soil materials and sliding friction of interface. The concepts of critical state and critical stress of interface, triggering interfacial physical state evolution, are proposed. Considering the basic laws of interfacial dynamic shearing, the elastic-visco model and friction coefficient model are utilized to describe the two stages. The accuracy of the interfacial dynamic model is verified by geomembrane/GCL interface dynamic shear tests under multiple cycling conditions. The research exhibits that the proposed model can effectively simulate the mechanical properties and physical state evolution of the dynamic shear deformation of a liner interface, providing a theoretical support for a seismic stability analysis of landfills.

Key words: landfill liner; geomembrane/GCL interface; dynamic interface model; physical state evolution

0 引言

衬垫系统是现代卫生填埋场的重要组成部分, 我国填埋场衬垫系统一般采用以土工膜/GCL为主要防渗层的复合衬垫结构^[1-2]。土工膜与GCL接触界面的剪切强度较低, 地震作用下填埋场极易沿该界面发生失稳破坏, 其界面的动力剪切特性是问题的关键。

在传统的土与结构相互作用、土与结构界面静动力本构的研究中, 已经建立了包括弹性界面模型、弹塑性界面模型、损伤界面模型等多种界面动力本构模型^[3-6], 这些模型主要应用于桩-土动力接触分析和土石坝地震稳定性分析等领域。目前, 已有大量的衬垫界面静动力剪切试验和剪切规律研究^[7-11], 而衬垫界

面的动力模型较为缺乏。因此, 非常必要根据试验结果提出填埋场衬垫界面的动力模型。

已有土工膜/GCL界面动力剪切试验^[11-12]表明, 土质材料剪切变形和界面润滑摩擦两种物理现象循环交替发生, 导致界面特性也相应改变。然而, 已有界面或接触面动力本构模型多将界面假设为连续介质^[3-6], 或者将界面动力剪切视为纯摩擦^[12], 虽可准确描述其应力应变曲线变化特征且易于工程抗震分析, 却无法揭示现象背后的界面剪切机理。本文首先分析衬垫

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目(41725012); 国家自然科学基金面上项目(41572265)

收稿日期: 2019-01-13

界面动力剪切过程中的界面物态演化规律, 总结界面剪切规律, 采用不同方法分别描述土质材料变形阶段与界面滑动摩擦阶段, 建立衬垫界面动力模型。利用土工膜/GCL 界面动力剪切试验结果, 对界面动力模型进行了验证。

1 衬垫界面动力剪切基本规律

复合衬垫结构的土工膜/GCL 界面中, 土工膜厚度不低于 $1.5 \text{ mm}^{[2]}$, 具有较大刚度, 按表面粗糙度可分为光面土工膜和糙面土工膜; GCL 是一种土质材料, 厚度为 $8 \sim 15 \text{ mm}$, 由上层土工织物和下层土工布通过针刺纤维共同夹持中间膨润土层构成三明治式结构, 膨润土吸水水化后可形成一定厚度的致密隔水层。

衬垫界面动力剪切过程可以分解为若干次连续的单向剪切, 每次单向剪切随界面剪切位移 u 的增加, 先后发生土质材料剪切变形和界面滑动摩擦阶段, 分别对应界面上发生的两种物理现象 (图 1)。

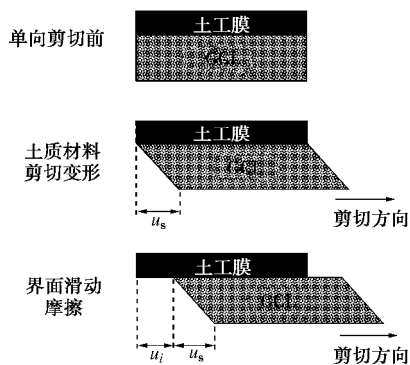


图 1 衬垫界面单向剪切的物态演变示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical state evolution during unidirectional shearing process of liner interface

由界面物态演化的基本思路出发, 分析土工膜/GCL 界面的静动力剪切机制, 可得到以下认识。

1.1 界面物态演化规律

(1) 剪切位置变化: 在界面动力剪切过程中, 界面剪应力及各材料所受水平剪应力相等, 而剪切位移总发生在抗剪能力最弱的部位, 导致剪切位移发生位置持续发生变化, 对应界面材料物理状态的演化。

(2) 剪切位移组成: 针对土工膜/GCL 界面动力剪切, 可以认为厚度较小且刚度较大的土工膜不具备承担剪切变形能力, 变形是由厚度较大且刚度较小的 GCL 承担, 主要是其中间膨润土层, 因此, 可认为 GCL 是一种土质材料, 界面动力剪切位移可分为①土质材料剪切变形和②界面滑动摩擦位移。

(3) 界面临界状态: 土质材料的抗剪能力和界面的抗剪能力有显著差异。土质材料剪应力随着剪切位移的增大首先持续增大到峰值, 随后发生一定程度

的软化 (图 2 中虚线)。土工膜/GCL 界面的剪切过程由土质材料和界面共同参与, 存在一个低于土质材料峰值剪应力的界面临界剪应力 τ_c , 当剪应力随着剪切位移的增大达到 τ_c 时, 就会触发界面滑动摩擦, 土质材料变形阶段结束, 开始界面滑动摩擦阶段, 此界面物态演变触发称为界面临界状态 (图 2)。

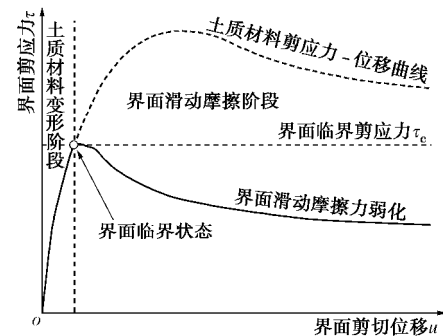


图 2 衬垫界面剪切过程的界面临界状态

Fig. 2 Liner critical states during shearing process of liner interface

(4) 土质材料变形阶段: 阶段内界面剪应力随着剪切位移的增加呈增大趋势, 剪应力值低于界面临界剪应力 τ_c , 且界面本身不发生相对滑动, 剪切变形完全由界面土质材料变形承担。

(5) 界面滑动摩擦阶段: 界面剪应力随着剪切位移的增大发展至界面临界剪应力 τ_c , 触发该阶段。阶段内界面剪切位移表现为界面相对位移, 界面剪应力可理解为界面摩擦力, 随着摩擦位移的持续增大, 界面剪应力 (摩擦力) 发生弱化 (如图 2 中实线)。

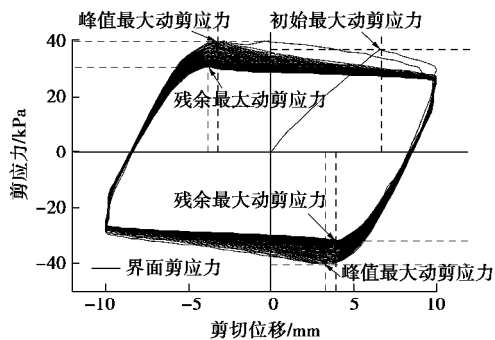
界面动力剪切过程中还伴随有多种材料物理状态的不可逆变化, 包括: ①土质材料内的孔隙水向界面方向移动, 产生界面泌水现象; ②界面泌水导致界面上产生水土混合物, 弱化土工膜表面粗糙度, 降低界面临界剪应力 τ_c ; ③在界面滑动摩擦阶段, 水土混合物充当界面摩擦介质, 起到润滑作用并进一步降低界面抗剪能力; ④界面动剪会导致材料发生损伤, 如土工膜表面磨损以及土质材料挤压、搓动等, 进而弱化界面抗剪能力。上述物理现象在界面动力剪切过程中不断发生、相互影响。

1.2 界面剪切规律

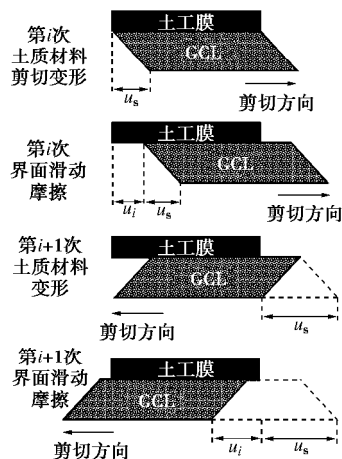
界面动力剪切包括多次正、反向的加、卸载循环过程。每一次循环都存在最大界面动剪应力, 对应界面单向剪切的界面临界剪应力, 第一次循环的最大动剪应力为初始最大动剪应力, 所有循环的最大值为峰值最大动剪应力, 多次循环后的稳定值为残余最大动剪应力 (图 3 (a))。界面初始、峰值、残余最大动剪应力均与界面正应力水平线性正相关, 影响最大动剪应力的主要因素包括: 界面材料表面粗糙度、界面泌

水程度、界面上水土混合物的赋存情况等。

在界面循环剪切过程中,界面剪应力达到最大界面动剪应力时,土质材料变形不再发展,转而发生界面滑动摩擦;剪切方向改变时,界面滑动摩擦不再发生,土质材料变形首先恢复(卸载)继而反向发展(反向加载),直至再次达到下一次最大动剪应力,触发下一次界面滑动摩擦,界面动力剪切的物态循环演变过程如图3(b)所示。



(a) 界面动力剪切滞回曲线中的最大动剪应力



(b) 界面动力剪切的特变循环演变示意图

图3 界面动力剪切滞回曲线及物态演变过程

Fig. 3 Hysteresis curve of dynamic shear of interface and process of interfacial physical state evolution

在循环剪切过程中,界面最大动剪应力随着循环剪切次数的增加而呈衰减趋势,最终趋近于残余最大动剪应力,影响界面最大动剪应力衰减速率的因素主要包括:动力剪切的加载能级、材料累积损伤情况、界面泌水及水土混合物增多程度等。

在土质材料变形阶段,土质材料发生轻微弹塑性变形;在界面滑动摩擦阶段,土质材料弹塑性变形不再继续发展。因此,土质材料在动力剪切中能保持较好的结构性,服从统一的应力-应变规律。

在界面滑动摩擦阶段,界面剪应力可以理解为摩擦力,摩擦力与法向力的关系可用摩擦系数解释。界面摩擦力随着滑动位移的增大而降低,泌水现象引发

的润滑作用、材料表面粗糙度降低等现象共同造成了界面摩擦力系数的降低。

2 模型假设

2.1 界面物态演化假设

假设1: 界面动力剪切分为两阶段。在界面动力剪切过程中,土质材料变形和界面滑动摩擦阶段在时间上首尾相连、彼此替代,前者土质材料的动力变形遵循弹塑性力学基本框架,后者界面的摩擦位移遵循界面力学基本原理和摩擦学基本定律。

假设2: 两阶段不耦合。界面动力剪切的两个阶段互不影响,不考虑其耦合关系。

从物态演化层面: 土质材料变形阶段只发生土质材料变形,不发生界面滑动摩擦;界面滑动摩擦阶段只发生界面材料间的滑动摩擦,不发生土质材料变形。

从力学层面: 土质材料的应力-应变特性与界面材料的接触特性互不影响,土质材料弹塑性模量的改变与界面摩擦系数的变化互不影响。

严格地从物理层面看,衬垫界面动力剪切过程中两阶段的切换不是瞬时发生的,存在界面物态转变的嬗变期,然而目前尚无科学方法以确定界面物态转变的时长与微观机理,因此提出假设2。

界面动力剪切位移 u 包括土质材料剪切变形 u_s 和界面滑动摩擦位移 u_i 两部分,两者的增量不同时产生,表达式如下:

$$u = u_s + u_i, \quad (1)$$

$$du = \begin{cases} du_s & \text{土质材料变形阶段} \\ du_i & \text{界面滑动摩擦阶段} \end{cases}. \quad (2)$$

2.2 界面应力状态假设

在界面动力剪切的任一时刻,假设界面上任意位置的剪应力均相同。认为界面剪应力为0时为界面平衡状态,在外力作用下远离界面平衡状态为加载过程,趋于恢复平衡状态为卸载过程。

2.3 弹塑性力学假设

土质材料变形阶段 GCL 动应力应变关系遵循弹塑性动力本构框架,采用边界面模型。由于土质材料的法向应变对界面应力水平的影响非常微弱,假设土质材料的厚度在空间和时间上保持恒定。此外,假设土质材料所有位置的剪应变在同一时刻均相等,由此可得到剪应变 g 与剪切变形量 u 之间的关系:

$$u = g \cdot t, \quad (3)$$

式中, t 为 GCL 厚度。

考虑 GCL 中加筋项的影响,认为加筋项参与 GCL 受力之前的阶段为弹性变形阶段,之后为塑性变形阶段。加筋纤维的平均长度、松弛程度、疏密程度等都

会影响 GCL 动力特性, 加筋纤维的不可逆松弛会导致 GCL 抗变形能力发生衰减。认为加筋项对 GCL 动力特性的影响存在最初状态和最终状态, 在界面动力剪切的任意时刻, 加筋项的影响为最初状态和最终状态的加权值, 加权因子为加筋项影响因子。

2.4 界面力学假设

界面滑动摩擦阶段的界面滑动位移与正应力关系采用摩擦系数模型框架^[12], 遵循经典库仑摩擦定律。本文认为在界面滑动摩擦阶段, 界面材料之间的相对剪切速率不影响摩擦系数。

定义临界摩擦系数 μ_c 为触发界面发生滑动摩擦的临界界面剪应力 τ_c 对应的摩擦系数。临界摩擦系数 μ_c 随着动力循环次数的增加而逐渐衰减, 仅考虑 3 个衰减影响因素: 界面润滑程度、界面粗糙度和累积摩擦距离。滑动摩擦系数 μ_s 为滑动摩擦阶段界面剪应力与正应力的比值, 滑动摩擦系数 μ_s 随着摩擦位移的累积呈指数型衰减, 并随摩擦距离的持续增加而存在渐近值, 这个渐近值称为残余动摩擦系数, 文中仅考虑 3 个衰减影响因素: 界面润滑程度、界面粗糙度和单次摩擦距离。

采用界面润滑系数 L 来描述界面上水土混合物的润滑作用及对界面摩擦力的降低, 界面润滑系数影响因素众多, 仅考虑两个因素: 界面正应力和累积摩擦距离。界面粗糙度系数 D_R 可描述界面动力剪切造成的材料损伤, 直接造成了界面材料表面粗糙度的降低, 主要考虑动力剪切能级的影响, 即振幅 A 和频率 f 。

3 衬垫界面动力模型

基于模型基本假设, 分别建立土质材料弹塑性变形部分和界面滑动摩擦部分的计算公式, 在此基础上建立衬垫界面动力模型。

3.1 土质材料弹塑性变形

土质材料变形阶段主要发生 GCL 弹塑性变形, 其剪应变 - 剪应力关系需考虑反复加卸载条件下的材料硬化规律、屈服面形状、模量变化等问题。本文基于边界面原理建模, 认为在动力卸载过程中屈服面随着应力点发生移动, 采用运动硬化的概念, 在 $s - \tau$ 应力空间内建立映射关系, 从而取消了屈服面的概念, 不需要大量的嵌套面来描述土质材料的塑性关系。

定义 R 为 GCL 加筋影响因子, 定义 H 为评价 GCL 在某一时刻受加筋项影响的物理力学性质状态量, H_0 为动力剪切前 GCL 受加筋项影响状态量, H_u 为最终稳定时状态量。 H 是 H_0 和 H_u 的加权平均值, 加权因子是 R , 表述如式 (4), (5):

$$H = (1 - R) \cdot H_0 + R \cdot H_u \quad (4)$$

$$R = \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(a_R \cdot \dot{\gamma}_{\max} \cdot t) \quad (5)$$

式中, a_R 为加筋作用参数, $\dot{\gamma}_{\max}$ 为剪切过程中发生的最大相对加速度, 如采用正弦式加载模式, $\dot{\gamma}_{\max} = A \cdot f^2$, A 为振幅, f 为频率, t 为土质材料累积变形时间。

土质材料剪切变形的切应变增量 dg 包括弹性切应变增量 dg^e 和塑性切应变增量 dg^p , 体应变 de_v 增量为 0, 表达式如下:

$$\begin{cases} dg = dg^e + dg^p, \\ de_v = 0. \end{cases} \quad (6)$$

在弹性变形阶段, 采用广义 Hooke 定律描述弹性剪应变增量 dg^e 和剪应力增量 dt 关系:

$$dg^e = \frac{dt}{G_e} \quad (7)$$

式中, 弹性模量 G_e 取值由土工膜/GCL 界面静力剪切试验的初始最大剪应力^[10]确定。

在塑性变形阶段, 建立边界面模型来模拟应力路线转折, 并计算塑性剪应变增量。边界面理论认为所有屈服面中最大屈服面不变, 内部用一个可动内屈服面表示, 塑性模量随着应力点与边界面距离的变化而变化, 应力点、内屈服面和边界面之间的关系用映射规则来规定。

图 4 (a), (b) 为模型映射规则的示意图, p 为当前状态的应力点, 应力点 p 不能越过边界面, p_0 为一次单向加载的起始应力点, 称为映射点。对于第一次离开平衡位置的初次剪切, p_0 在 S 轴上 (图 4 (a)); 对于除此以外的其他循环剪切, p_0 在加载面上, 即上一次剪切加载结束对应的最大应力面 (图 4 (b))。 \bar{p} 为映射点 p_0 和应力点 p 连线与边界面的交点, 称为共轭点。

可得映射点 p_0 与应力点 p 之间距离 r_0 、映射点 p_0 与共轭点 \bar{p} 之间距离 ρ 的计算式:

$$\begin{cases} r_0 = |p_0 p|, \\ \rho = |p_0 \bar{p}|. \end{cases} \quad (8)$$

显然, 两者存在大小关系: $r_0 \geq \rho$ 。

采用 r_0 和 ρ 的比值作为内变量, 反映界面的受力状态: 当 $r_0/\rho = 0$ 时, 界面处于某一次单向剪切的初始状态, 应力点在加载面上; 当 $r_0/\rho = 1$ 时, 应力点在边界面上。

采用应力面与应力增量的方向关系来判断土质材料塑性阶段的加卸载情况: 应力增量 ($d\sigma$, $d\tau$) 指向当前应力面以外为加载、以内为卸载, 判断公式如下:

$$df = s \cdot dt - |t| \cdot ds = \begin{cases} > 0 \text{ (加载)} \\ \leq 0 \text{ (卸载)} \end{cases} \quad (9)$$

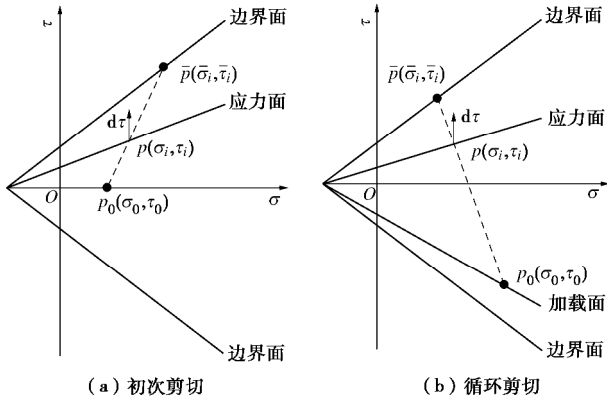


图4 映射准则示意图

Fig. 4 Schematic graph of mapping rules

映射点 p_0 根据应力增量方向的不同加以选取: ① 剪切加载切换为卸载时, 直接取卸载点为映射点; ② 卸载切换为剪切加载时, 仅当应力增量与前一步应力增量的夹角大于 90° 时发生应力路线转折, 此时取加卸载转变点为映射点。

塑性应变增量 dg^p 与剪应力增量 $d\tau$ 、正应力增量 ds 的关系如下:

$$dg^p = \frac{1}{H_r} dt - \frac{1}{H_{rd}} \cdot \frac{|t|}{s} ds, \quad (10)$$

式中, H_r 和 H_{rd} 可按下式计算:

$$H_r = \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^2 \cdot H_{rd}, \quad (11)$$

$$H_{rd} = (1 - R) \cdot G_0 \cdot p_a \cdot \left(\frac{s}{p_a}\right)^{n_0} + R \cdot G_u \cdot s. \quad (12)$$

则式 (10) 可进一步简化为

$$dg^p = \frac{1}{\left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^2} \cdot \frac{1}{(1 - R) \cdot G_0 \cdot p_a \cdot \left(\frac{s}{p_a}\right)^{n_0} + R \cdot G_u \cdot s} \cdot dt, \quad (13)$$

式中, G_0 为初始剪切模量数, G_u 为最终剪切模量数, n_0 为初始剪切模量指数, p_a 为标准大气压。

由于界面动力模型的待求量为 dt , 式 (13) 可进一步改写为

$$dt = \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^2 \cdot \left[(1 - R) \cdot G_0 \cdot p_a \cdot \left(\frac{s}{p_a}\right)^{n_0} + R \cdot G_u \cdot s \right] \cdot dg^p. \quad (14)$$

式 (14) 中 r 与 r_0 比值可表示为

$$\frac{r}{r_0} = \begin{cases} \frac{t_{i-1}}{t} & (\text{初次正向剪切}) \\ \frac{t_{i-1} - t_0}{t - t_0} & (\text{循环正/反向剪切}) \end{cases}, \quad (15)$$

式中, i 为计算迭代步, 第 0 步为初始条件。

因此, 式 (14) 可进一步改写为

$$dt = \begin{cases} \left(1 - \frac{t_{i-1}}{t}\right)^2 \cdot H_{rd} \cdot dg^p & (\text{初次正向剪切}) \\ \left(1 - \frac{t_{i-1} - t_0}{t - t_0}\right)^2 \cdot H_{rd} \cdot dg^p & (\text{循环正/负向剪切}) \end{cases}. \quad (16)$$

基于物态条件和屈服条件的判定, 以上推导出土质材料弹塑性变形阶段的剪应变计算方法, 是本文界面动力模型的重要组成部分。

3.2 界面滑动摩擦

界面滑动摩擦过程中材料表面粗糙程度的衰减体现在界面粗糙度系数 D_R 的降低上, D_0 表示界面材料的最大粗糙度, 光面土工膜的 D_0 取值低于糙面土工膜的。由于界面粗糙度会随着摩擦位移的增加而产生不可逆衰减, 结合界面正应力水平与动力加载能级的影响, 界面粗糙度 D_R 的计算式如下:

$$D_R = D_0 \left[1 - k_D \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(S \cdot A \cdot f^2 \cdot u_{af}) \right], \quad (17)$$

式中, D_0 为界面初始粗糙度系数 (设为 1), k_D 为粗糙度参数 (无量纲), u_{af} 为累积摩擦位移。

界面上水土混合物是一种黏性流体, 作为摩擦介质不仅不承担界面剪应力, 还能弱化接触材料之间的机械咬合。采用界面润滑系数 L 来描述该润滑作用, 考虑正应力水平和累积摩擦距离的影响, 可表示为

$$L = L_0 \cdot \frac{2}{\pi} \arctan(k_L \cdot S \cdot u_{af}), \quad (18)$$

式中, L_0 为初始润滑系数 (设为 1), k_L 为润滑参数 (无量纲)。

采用指数型函数描述临界摩擦系数 μ_c , 存在初始临界摩擦系数 μ_0 , 随着动力循环次数无穷增加, μ_c 渐趋于最终临界摩擦系数 μ_u , 其衰减速率与界面润滑和粗糙度相关, 表达如下:

$$m_c = (m_0 - m_u) \cdot \exp\left[-b_c \cdot \frac{L}{D_R} \cdot (u_{af} - u_f)\right] + m_u, \quad (19)$$

式中, b_c 为临界摩擦系数衰减参数 (无量纲), u_f 为此次单向剪切中的摩擦位移。

滑动摩擦系数 μ_s 采用类似指数型函数如下:

$$m_s = (m_c - m_u) \cdot \exp\left[-\frac{b_s}{D_R} \cdot u_f\right] + m_u, \quad (20)$$

式中, b_s 为滑动摩擦系数衰减参数 (无量纲)。

利用式 (19) 得到滑动摩擦系数 μ_s 后, 即可获得界面剪应力:

$$t = m_s \cdot s. \quad (21)$$

上述考虑界面粗糙度衰减和界面润滑作用等影响, 建立了指数型摩擦系数模型, 得到界面滑动摩擦阶段的界面剪应力计算方法。

3.3 模型基本架构

模型计算首先需要确定初始条件, 包括界面类型、正应力水平、动力荷载条件、时间步长等; 随后确定模型参数, 由界面动力剪切试验得到。

模型计算还需要状态变量, 以全面反映界面动力剪切中物理力学状态的瞬态变化, 每个状态变量由多个参量组成, 随时间步进行迭代更新。模型迭代计算中状态变量的部分参量保持不变, 其余参量随迭代发生变化。表 1 为状态变量的参量表, 分为已知参量和未知参量, 已知参量包括: 迭代参量、物理参量、参与计算过程的变形计算参量和摩擦计算参量, 在每一计算步的迭代中基于已知参量计算得到当前步的未知参量, 包括: 剪应力增量和剪应力。

表 1 界面动力模型状态变量参量表

Table 1 Parameters of state variables of interfacial dynamic model

编号	参量名称	符号	参量类型及说明
1	当前计算步	n	迭代参量
2	时间	t	物理参量
3	剪切位移	u	物理参量
4	正应力	σ	物理参量
5	剪应力	τ	物理参量, 待求
6	剪应力增量	$d\tau$	物理参量, 待求
7	剪切方向	D	状态参量, 取值: 1/-1
8	物理状态	S	状态参量, 取值: 0/1
9	屈服状态	Y	状态参量, 取值: 0/1/-1
10	剪应变	γ	变形计算参量
11	剪应变增量	$d\gamma$	变形计算参量
12	加载点应力值	τ_0	变形计算参量
13	边界面应力值	τ_b	变形计算参量
14	单次摩擦距离	u_f	摩擦计算参量
15	累积摩擦距离	u_{af}	摩擦计算参量
16	临界摩擦系数	μ_c	摩擦计算参量
17	滑动摩擦系数	μ_s	摩擦计算参量

在模型迭代计算中, 第 0 步的状态变量由初始条件和模型参数直接确定。从第 1 步开始, 迭代计算首先需要判断界面状态, 分为三步:

(1) 剪切方向判断 判断条件如下:

$$D_i = \begin{cases} 1 & (dg_i \cdot dg_{i-1} \geq 0) \\ -1 & (dg_i \cdot dg_{i-1} < 0) \end{cases}, \quad (22)$$

式中, D_i 为第 i 步的剪切方向标记, 若 $D_i = 1$ 表明第 i 步的剪切方向不变, 若 $D_i = -1$ 表明第 i 步的剪切方向发生改变。

(2) 界面物态判断 分为土质材料变形阶段和界面滑动摩擦阶段两种情况, 判断条件如下:

$$S_i = \begin{cases} 0 & (S_{i-1} = 0 \text{ 且 } t_{i-1} < m_c \cdot s_{i-1} \text{ 且 } t_i^* < m_c \cdot s_i) \\ 1 & (S_{i-1} = 0 \text{ 且 } t_{i-1} < m_c \cdot s_{i-1} \text{ 且 } t_i^* \geq m_c \cdot s_i) \\ 1 & (S_{i-1} = 1 \text{ 且 } t_{i-1} < m_c \cdot s_{i-1} \text{ 且 } t_i^* < m_c \cdot s_i) \end{cases}, \quad (23)$$

式中, S_i 为第 i 步的物态标记, S_{i-1} 为第 $i-1$ 步的物态标记, t_i^* 为假设第 i 步与第 $i-1$ 步物态相同时试算的剪应力, 若 $S_i = 0$ 表明第 i 步处于土质材料变形阶段,

若 $S_i = 1$ 表明第 i 步处于界面滑动摩擦阶段。

(3) 屈服判断 若由式 (23) 判断第 i 步处于土质材料变形阶段, 则需要判断屈服, 分为弹性阶段和塑性阶段两种情况, 判断条件如下:

$$Y_i = \begin{cases} 1 & (g_i < g_y) \\ 1 & (g_i \geq g_y \text{ 且 } df \leq 0) \\ -1 & (g_i \geq g_y \text{ 且 } df > 0) \end{cases}, \quad (24)$$

式中, Y_i 为第 i 步的物态标记, g_i 为第 i 步的剪应变, g_y 为屈服应变, df 的取值由式 (9) 计算得到, 若 $Y_i = 1$ 表明第 i 步处于弹性变形阶段, 若 $Y_i = -1$ 表明第 i 步处于塑性变形阶段。

依据判断结果分别进行: 土质材料弹性、塑性变形计算, 或界面滑动摩擦计算, 进而更新状态变量的全部参量。模型的迭代计算基本框架如图 5 所示。

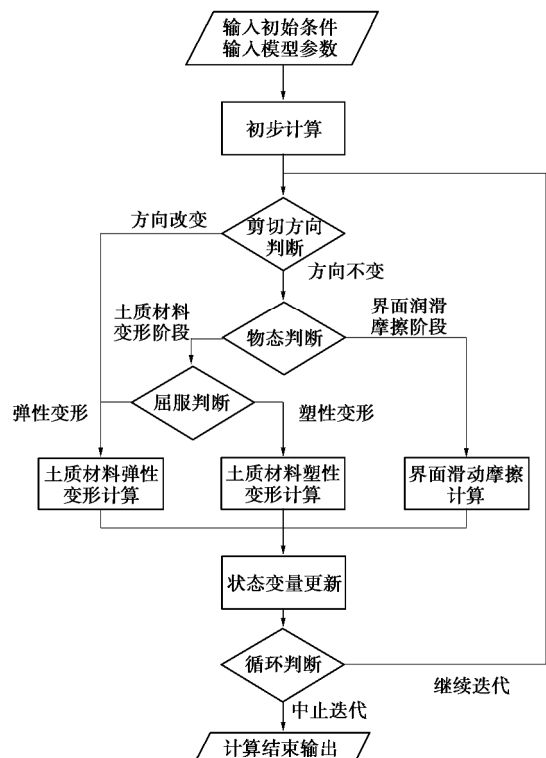


图 5 界面动力模型计算基本框架

Fig. 5 Calculation framework of interfacial dynamic model

3.4 模型参数

界面动力模型考虑光面、糙面两种土工膜, 不考虑土工膜厚度影响。界面动力模型需要设定 GCL 厚度 θ_k , 而土工膜/GCL 界面剪切试验^[10]发现 θ_k 与界面类型、剪切条件无关, 仅与正应力 (单位: kPa) 线性相关, 即

$$q_k = 11.06 - 0.0083 \cdot s \text{ (mm)}. \quad (25)$$

试验结果^[11]也发现 GCL 屈服界限 y_0 与试验条件无关, 仅取决于 GCL 固有特性, 界面动力模型中屈服界限 y_0 取所有试验结果的平均值: 0.554 mm。基于式 (25), 可得到临界剪应变 $g_y = y_0/\theta_k$, 采用 $G_e = \tau_0/g_y$,

得到 GCL 弹性剪切模量 $G_e = 438.11 \text{ kPa}$ 。

GCL 进入塑性变形阶段后的边界强度摩擦角 φ_b 和黏聚力 c_b ，可以根据水化 GCL 内部剪切试验^[13]选取，其线性关系表示如下：

$$\begin{cases} t_f = c_b + s \cdot \tan j_b, \\ c_b = 167.62 \text{ kPa}, \\ j_b = 13.0^\circ. \end{cases} \quad (26)$$

对于光面土工膜/GCL 界面和糙面土工膜/GCL 界面两种类型，初始剪切模量数 G_0 设为 0.1 和 0.25，最终剪切模量数 G_u 设为初始值 G_0 的 2 倍，初始剪切模量指数 $n_0 = 0.3$ 。通过分析大量土工膜/GCL 界面动力剪切试验结果发现，动力循环次数达 30 次时，GCL 加筋影响因子 R 接近于 1，即纤维损伤导致加筋作用丧失，经多次试算，将加筋衰减参数 α_R 设为 10。

经多次试算，取粗糙度参数 $k_D=0.2$ ，润滑参数 $k_L = 0.1$ ，光面（糙面）土工膜临界摩擦系数衰减参数 $b_c = 0.002$ （0.005），滑动摩擦系数衰减参数 $b_s = 0.01$ （0.05）。

通过分析大量的界面动力剪切试验结果，光面（糙面）土工膜/GCL 界面初始（最终）临界摩擦系数 μ_0 （ μ_u ）的计算式整理列于表 2 中。模型参数的取值列于表 3 中。

表 2 界面临界摩擦系数计算式汇总表

Table 2 Summary of formulas for critical friction coefficient of interface

界面类型	初始临界摩擦系数 μ_0	最终临界摩擦系数 μ_u
光面土工膜/GCL 界面	$\begin{cases} m_0 = c_{is}/s + \tan j_{is} \\ c_{is} = 13.27 \text{ kPa} \\ j_{is} = 5.43^\circ \end{cases}$	$\begin{cases} m_u = c_{rs}/s + \tan j_{rs} \\ c_{rs} = 7.75 \text{ kPa} \\ j_{rs} = 2.63^\circ \end{cases}$
糙面土工膜/GCL 界面	$\begin{cases} m_0 = c_{ix}/s + \tan j_{ix} \\ c_{ix} = 27.47 \text{ kPa} \\ j_{ix} = 8.48^\circ \end{cases}$	$\begin{cases} m_u = c_{rx}/s + \tan j_{rx} \\ c_{rx} = 12.85 \text{ kPa} \\ j_{rx} = 3.49^\circ \end{cases}$

表 3 界面动力模型参数选取

Table 3 Model parameters of interfacial dynamic model

编号	模型参数	参数取值	
		光面土工膜	糙面土工膜
1	G_e/kPa	438.11	438.11
2	y_0/mm	0.554	0.554
3	$\tan \varphi_b/1$	0.231	0.231
4	c_b/kPa	167.62	167.62
5	$\alpha_R/1$	10	10
6	$n_0/1$	0.2	0.2
7	G_0/kPa	0.1	0.25
8	G_u/kPa	$2 G_0$	$2 G_0$
9	$D_0/1$	1	1
10	$k_D/1$	0.2	0.2
11	$L_0/1$	1	1
12	$k_L/1$	0.1	0.1
13	$\beta_c/1$	0.002	0.005
14	$\beta_s/1$	0.01	0.05

4 试验验证

采用上述衬垫界面动力模型分别模拟了光面土工膜/GCL 界面（图 6）、糙面土工膜/GCL 界面（图 7）动力剪切试验。以图 6 为例（60 次循环），图 6（a）对比了界面剪应力 - 剪切位移滞回曲线，图 6（b）对比了界面剪应力随时间变化曲线。可以发现，模型计算结果与试验数据吻合良好，仅对界面初始最大动剪应力的预测有一些偏低，这主要是由于前期 3~5 次循环剪切中，试验仪提供了较大的冲量，导致测取的界面剪应力偏大。图 7 规律与图 6 的基本相似。

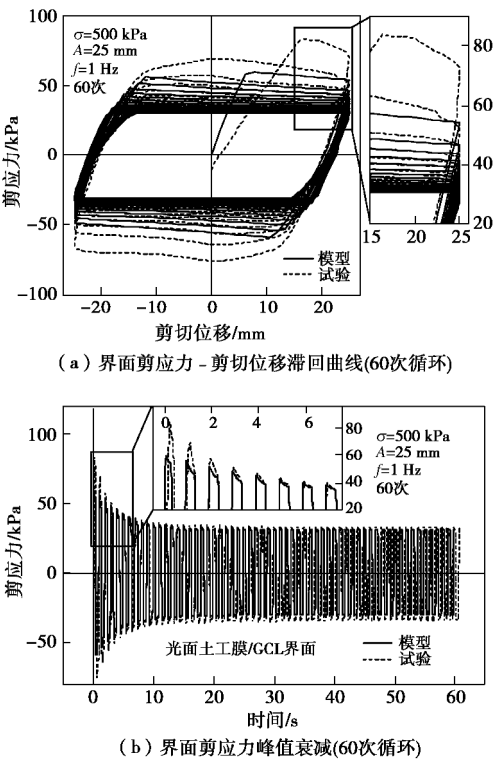
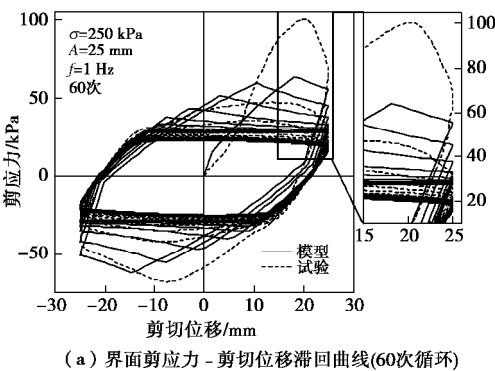


图 6 光面土工膜/GCL 界面动力剪切试验及模型模拟
Fig. 6 Dynamic shear test and model results of smooth geomenbrane/GCL interface

因此，本文提出的界面动力模型能够较好地模拟循环次数较多的界面动力剪切过程，描述界面剪应力与剪切位移的关系，具有较高的稳定性，为填埋场动力稳定性计算提供了理论支撑。



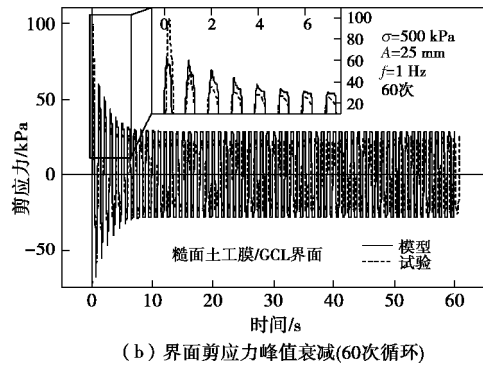


图 7 糙面土工膜/GCL 界面动力剪切试验及模型模拟

Fig. 7 Dynamic shear test and model results of textured geomembrane/GCL interface

5 结 语

通过分析动力剪切过程中衬垫界面的物态演化规律, 将其划分为土质材料变形和界面滑动摩擦两个阶段, 提出了触发界面物态演变的界面临界状态概念。采用界面临界应力作为界面物态判定准则, 分别采用弹塑性理论与界面力学理论描述上述两个物态阶段, 建立了衬垫界面动力模型。利用多次循环条件下的土工膜/GCL 界面动力剪切试验, 验证了界面动力模型的实用性与准确性。

该模型的基本理论与算法框架后续可嵌构于有限元计算软件, 用以分析地震作用下填埋场动力响应与变形。

参考文献:

- [1] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 1 - 46. (CHEN Yun-min. Basic theory and engineering application of environmental geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 1 - 46. (in Chinese))
- [2] CJJ 176—2012 生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (CJJ 176—2012 Technical codes for geotechnical engineering of municipal waste sanitary landfill site[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))
- [3] DESAI C S, PRADHAN S K, COHEN D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept [J]. International Journal of Geomechanics, 2005, **5**(4): 286 - 294.
- [4] 殷宗泽, 朱 泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(3): 14 - 22. (YIN Zong-xe, ZHU Hong, XU Guo-hua. Deformation of the interface between soil and structural materials and its mathematical simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(3): 14 - 22. (in Chinese))
- [5] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1175 - 1179. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Unified modeling of soil-structure and its test confirmation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1175 - 1179. (in Chinese))
- [6] 冯大阔. 粗粒土与结构接触面三维本构规律、机理与模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2012. (FENG Da-kuo. Three-dimensional constitutive law, mechanism and model of the interface between coarse-grained soil and structure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese))
- [7] 施建勇, 李 砚. 糙面土工膜与无纺土工织物界面剪切强度及表面粗糙度变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, **44**(3): 214 - 218. (SHI Jian-yong, LI Yan. Interfacial shear strength and surface roughness variation of textured geomembrane and non-woven geotextile[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2016, **44**(3): 214 - 218. (in Chinese))
- [8] ZIMMIE T F. Estimation of dynamic interfacial properties of geosynthetics [J]. Geosynthetics International, 1998, **5**(1/2): 17 - 39.
- [9] KIM J, RIEMER M, BRAY J D. Dynamic properties of geosynthetic interfaces[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(3): 288 - 296.
- [10] FOX P J, ROSS J D. Relationship between NP GCL internal and HDPE GMX/NP GCL interface shear strengths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(8): 743 - 753.
- [11] SHEN Yang, FENG Shi-jin, CHANG Ji-yun, et al. Dynamic direct shear tests of geosynthetic liner interface in landfills[C]// Proceedings of 2nd Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics (CPEG2). Leeds, UK, 2017.
- [12] MÉNDEZ B C, BOTERO E, ROMO M P. A new friction law for sliding rigid blocks under cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, **29**(5): 874 - 882.
- [13] SURA J M. Monotonic and cyclic shear response of a needle-punched geosynthetic clay liner at high normal stresses[D]. Columbus: The Ohio State University, 2009.