https://doi.org/10.1051/jnwpu/20224061366

土工格栅加筋土挡墙土压力分析及其计算方法改进

李丽华, 郑志刚, 严寒, 黄少平, 周鑫隆

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要:土压力分布规律与计算方法一直是加筋土挡墙研究中的难点问题。通过有限元方法探究了不同工况下加筋土挡墙主动土压力的大小和分布规律。结合内、外摩擦角的动态发挥提出针对非极限状态下的土压力计算方法,并与传统理论公式解、有限元数值解和实测结果进行对比,验证其合理性。结果表明:挡墙土压力数值大小受到土工格栅刚度和层数影响,呈现出随配筋层数和刚度增加,土压力逐渐减小的趋势。挡墙土压力大小与深度呈负相关,不同工况下加筋土挡墙土压力随深度变化趋势差异不大,加筋效果主要体现在挡墙上部。采用改进经验公式得到的非极限状态计算结果与实测结果整体一致,证明了改进公式的合理性。

关 键 词:土压力;数值模拟;土工格栅;加筋土挡墙;外摩擦角
中图分类号:TU43 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2022)06-1366-09

加筋土挡墙土压力大小与分布是影响其安全稳定的关键因素,而土压力的分布规律与计算方法一直是加筋土挡墙研究中的难点问题。Chowdhury[1]将数值计算的侧向土压力与模型试验测量值进行对比验证,基于已验证模型对挡土墙深度与土压力变化关系进行研究,确立了挡墙深度与主动土压力之间的归一化关系。Ahmadabadi 等[2]基于水平条分法,提出了一种新的针对黏性回填土的加筋土挡墙主动土压力计算方法。Vahedifard 等[3]构建了一种分析框架用来计算在非饱和干湿循环条件下挡墙主动土压力,打破了替代分析法中关于破坏机制和应力表示等相关限制。此外,有限元法因其完善的数学理论基础和高效的计算过程,成为了复杂挡土墙在设计中的一种强有力的重要工具[4-7]。大量研究表明,与未加筋土相比,加筋土在强度和刚度等力学性能方面表现更好,土工格栅作为一种柔性材料,是工程中常用的加筋材料,可以降低面板侧向土压力,同时显著改善土压力分布状况[8-9]。若采用传统的极限平衡法来计算加筋土挡墙土压力会使结果较为保守,因此,Allen 等[10-11]提出了 K 刚度法,对挡墙中的筋材负荷计算更为准确。

针对加筋土挡墙和非加筋土挡墙的土压力计算,国内外学者采用了众多研究方法,包括极限分析法、极限平衡法和均匀分析法等。Bathurst 等[12]开发出一种新的工作应力计算方法,用于计算加筋土挡墙中的筋材荷载。为研究挡墙水平方向主动土压力的分布情况,Silvestri[13]提出一种与朗肯土压力理论不同的土压力分析方法,并确定了破坏面的方向。Cheng[14]提出在地震荷载作用下确定挡墙侧向土压力滑移线方程解的轴线旋转方法,发现使用迭代分析方法能更易确定被动土压力。Liu 等[15]为确定主动土压力,提出一种广义的切向应力系数,结果表明,当切线半径远大于挡墙深度时,主动土压力收敛,但受到土体黏聚力作用,这一重合系数的临界值小于主动土压力系数。李丽华等[16-17]通过 Plaxis3D 有限元软件建立三维动态压实加筋土挡墙模型,研究了在不同压实宽度和不同加载方式下的加筋土挡墙三维动态响应。此外,通过模型试验对不同加筋

收稿日期:2022-03-10 **基金项目**:武汉市应用基础前沿专项(2020020601012278)、国家自然科学基金(52278347,52108315)、湖北省重点研发计划(2022BCA059)与湖北工业大学杰出人才基金(XJ2021000501)资助
作者简介:李丽华(1978—),湖北工业大学教授,主要从事加筋土及环境岩土研究。
通信作者:黄少平(1989—),湖北工业大学讲师、博士,主要从事斜坡岩土体稳定性分析评价与利用研究。
e-mail:792116933@qq.com

情况做了研究,发现在上部荷载作用下挡墙竖向土压力极大值点由加载处逐渐向挡墙面板处移动[17]。

外摩擦角的存在即挡墙面板侧摩响应,在计算挡墙土压力时会产生较大的影响。Fumio 等[18]通过模型试验方法对该滑动层进行进一步研究,结果表明,将中等黏性硅脂和 0.3 mm 薄乳胶膜制作而成的滑动层放置在试件与承台、底板和面板构件之间,整个试样能够接近理想平面应变条件,发生沿侧壁法向的均匀变形。Tatsuoka 和 Haibara[19]在大面积法向应力下,对砂在不同光滑程度表面之间进行了一系列直剪试验,发现砂与玻璃的摩擦角在 6°~9°之间,采用薄胶乳胶膜和硅油润滑层来降低砂的外摩擦角比光滑或抛光硬质板有效得多。Ruiken[20]基于直接剪切试验结果,发现正应力是影响外摩擦角的重要因素。综上所述,加筋土挡墙在使用过程中,填土与挡墙面板之间受到外摩擦角影响,但在以往的研究中未考虑其具体在加筋土挡墙中的影响作用。因此,在考虑到外摩擦角的情况下,对加筋挡墙土压力大小和分布规律的研究需要进一步开展。

本文利用有限元软件建立了加筋土挡墙数值模型,分析了不同工况下挡墙土压力作为挡墙侧向位移函数的变化特征和分布规律。同时,考虑到挡墙面板侧摩效应影响,计算出了土压力系数。最后,根据非极限状态下挡土墙内外摩擦角的发挥程度,对传统土压力计算公式进行了修正。

1　有限元数值模型

本文采用 Plaxis2D 软件建立加筋土挡墙有限元模型,对加筋土挡墙采用分步施工进行动态模拟,并用前人试验研究数据对该模型进行了参数修订,验证了模型的合理性与有效性。

1.1　模型与边界条件

在理想平面应变条件下,填土平行于侧壁方向发生变形产生抗剪应力,降低外摩擦角的有效方式是降低面板壁面粗糙度。挡土墙模型的高×宽为 1 m×1 m(见图 1),面板选用混凝土模块进行分步施工堆砌而成,方向垂直于地面。选取纵向长度 1 m的土工格栅作为挡墙加筋材料。

选用平面应变模型,全局疏密度参数设置为细,并对筋材与面板连接位置进行局部加密,共生成 25 786个 15 应力节点单元。

根据现有研究结论[18,21]可知正应力大小是影响砂和玻璃外摩擦角大小的重要因素。根据相关文献[20],设定外摩擦角为 6°进行分步施工模拟。设置固定锚杆水平支撑用来测定挡墙墙趾应力变化,轴向刚度为 4 000 kN/m。根据实际工程情况和相关模拟研究,将边界条件设置为:墙体底部固定约束,右侧水平约束,左侧挡墙面板和墙顶为自由端,如图 1 所示。

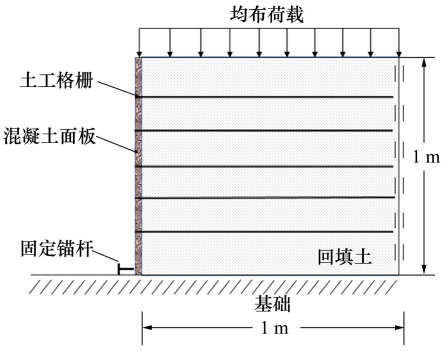


图 1　数值计算中模型试件示意图

1.2　材料参数

模型由三部分组成,包括土体单元、土工格栅单元和面板单元。假定结构单元、土体模型和界面之间能够相互兼容,通过设置界面单元来模拟三部分之间的相互作用。填土选用 Mohr-Coulomb 模型,模块选用线弹性模型,土工格栅选用弹塑性模型进行模拟。本研究采用的土体为干性中砂,相对密度 R_d 为 0.85,表 1 为具体的土壤参数。

表 1　数值模型填土参数

名称	数值	名称	数值
干密度 ρ_d/(g·cm^{-3})	1.725	最大孔隙比 e_{max}	0.842
最大干密度 $\rho_{d,max}$/(g·cm^{-3})	1.788	最小孔隙比 e_{min}	0.482
最小干密度 $\rho_{d,min}$/(g·cm^{-3})	1.439	孔隙比 e	0.539
孔隙率 n	0.349	内摩擦角 φ/(°)	60
最大孔隙率 n_{max}	0.457	相对密实度 D_r	0.85
最小孔隙率 n_{min}	0.325	相对孔隙率 e_r	0.82

为研究土工格栅抗拉刚度对加筋土挡墙土压力大小和分布规律的影响,本研究选用平均抗拉刚度为 700 kN/m 的 GL-700 和 1 155 kN/m 的 GL-1155 2 种型号土工格栅。

1.3 模型验证试验设计

针对土工格栅加筋层数对挡墙土压力的影响进行探究。设置 6 种不同工况进行有限元模拟，筋材均连接到面板承重处，加筋层数和间距如表 2 所示。

表 2 加筋方案设计

加筋层数	加筋间距/m
0	0
1	0
2	0.4
3	0.25
4	0.2
5	0.15

缓慢在模型右侧施加 $U_x/H \leqslant 0.01$ 的固定位移，挡墙模型顶部施加 50 kPa 均布荷载。U_x/H 表示墙体横向位移 U_x 与墙高 H 的比值，为归一化位移。此次数值试验结果可在一定程度上反映土压力发展规律和分布情况与挡墙变形之间的联系。

有限元试验模拟步骤为：首先在试验开始时，在挡墙顶部施加 50 kPa 外部压力，然后对挡墙模型缓慢施加右侧位移，在位移施加过程中土工格栅左端与挡墙面板无连接，设置不同的应力点位采集模拟过程中墙体土压力变化情况。

通过文献[21]的挡土墙模型试验验证本文数址模型的有效性，挡土墙模型尺寸为(长×高×宽) 1 m×1 m×0.45 m，本文采用的是二维平面应变模型，因此忽略挡墙宽度，挡墙长度和高度则与试验尺寸一致，均为 1 m。试验监测仪器主要采用测压元件、土压力盒和 LVTD 位移传感器，在试验的土压力监测中，挡墙面板上的土压力，由线性滑动轴承处的测压元件测量，挡墙内部土压力通过分层埋置土压力盒测量。

图 2 为在无筋条件下挡墙模型试验[21]与数值模拟分析结果比较。由图 2 可知，挡墙土压力模型试验监测数据与有限元数值模拟结果数值大小和随侧向位移变化规律一致，进而验证了该加筋土挡墙数值模型在边界条件设定、网格使用、模型类型和参数选用等方面的合理性和有效性。

数值模拟结果相对实测值土压力略微偏小，这是由于平面应变模型是一个理想模型，没有考虑纵向边界条件。此外，在数值模拟中忽略了土体存在的不均匀性和各向异性等材料特性。

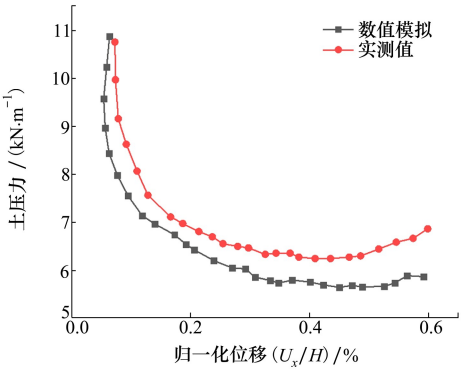


图 2 土压力测试值与数值模拟分析结果比较

2 结果分析

2.1 土压力

土工格栅未连接到挡墙面板时，不同工况下 GL-700 和 GL-1155 土工格栅加筋土挡墙土压力随墙体位移的变化如图 3 所示。

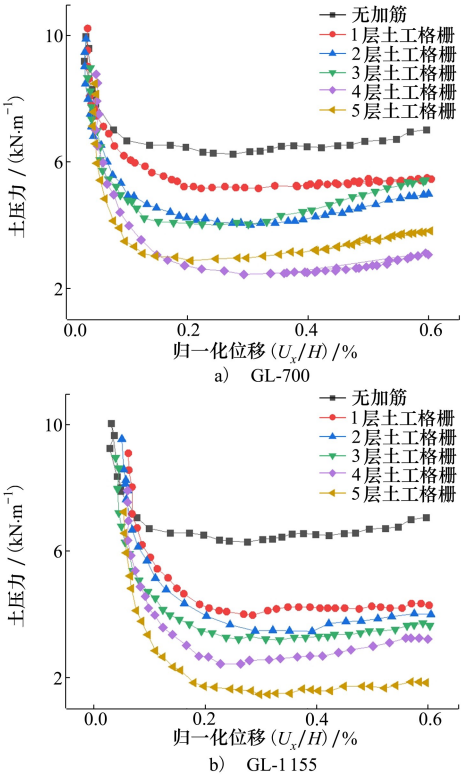


图 3 土工格栅加筋土挡墙土压力变化

由图 3 可知，随着配筋层数增加土压力呈现出逐渐减小的一般趋势，即筋材对土体的加固效应随配筋层数增加而增强，这是由于筋材与填土结合形

成了一种复合土体，增强了整体变形能力，将自重和外部荷载产生的应力通过筋材分散到各土层之间，进而减小面板上的土压力。

随着侧向位移增加，不同加筋层数下的挡墙土压力有接近的趋势。这是由于筋材选用的是弹塑性模型，随着试验的进行，土工格栅逐步发挥作用的同时也在发生着塑性变形，导致对土体的加固效果与试验初期存在差异。通过图 3a）和 3b）可知，后者加筋与未加筋的挡墙面板土压力效果存在显著差异，一层土工格栅加筋比未加筋试件土压力值可减少 35%～40%，当采用 3 层土工格栅对挡墙进行加筋时，土压力值降低 40%～60%。土工格栅刚度与挡墙土压力大小呈负相关，这是由于土工格栅不仅能传递应力，自身也可进行应力承担，其刚度越大，承担应力的能力就越强，对土体的加固作用也就越显著。

2.2　土压力分布

为研究土工格栅对挡墙土压力沿高度分布规律的影响，在侧向位移 $U_x/H=0.2\%$ 时，采集了不同工况下加筋土挡墙土压力在归一化高度上的分布，结果如图 4 所示。

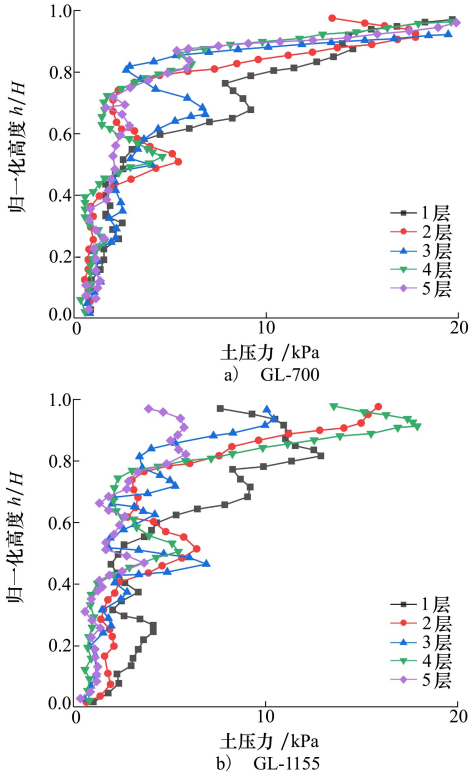


图 4　$U_x/H=0.2\%$ 处不同土工格栅层数土压力分布规律

归一化高度 h/H 为监测点的竖向高度 h 与墙高 H 的比值。从图中可以看出，土压力值与深度总体呈反比。同时，在靠近面板上部附近（$h/H=0.8\sim1.0$），多数工况下挡墙土压力随深度增加反而会增大。主要原因是伴随监测点深度的增加，面板侧壁摩擦逐渐增大，造成在挡墙底部土压力减小趋势明显大于挡墙上部，这也证明了面板的侧壁摩擦效应不可忽略。

加筋土挡墙与未加筋土挡墙相比，前者土压力较小，且加筋层数在挡墙上部对土压力降低影响幅度更为显著，而在挡墙下部，加筋层数差异效果不明显。而对比 2 种土工格栅（GL-700 和 GL-1155）发现，亦呈现上述规律，土工格栅刚度在挡墙上部对土压力数值大小影响较大，而在挡墙底部刚度差异带来的加筋效果差异不明显。造成这种效果的原因可能是每个模型试样的外摩擦角设置均为 6°，在挡墙底部，填土与面板侧摩效应明显对土压力的减小效果显著，分担了由加筋层数和加筋刚度不同所带来的差异。

图 5 展示了 2 种工况下土工格栅与挡墙面板采用不同连接方式时的挡墙土压力沿归一化高度 h/H 的分布情况。图 5a）为单层加筋，图 5b）为双层加筋。可以发现，土工格栅与面板连接与否对挡墙土压力的数值大小和分布规律影响不大，但相关文献表明[22]，筋材连接方式对土体的塑性变形会造成较大影响。这是由于受到竖向外部荷载作用，土体与筋材牢牢地嵌合在一起，这种嵌固作用远大于挡墙面板对筋材的限制，所以筋材与面板连接与否对挡墙土压力不会造成显著影响。

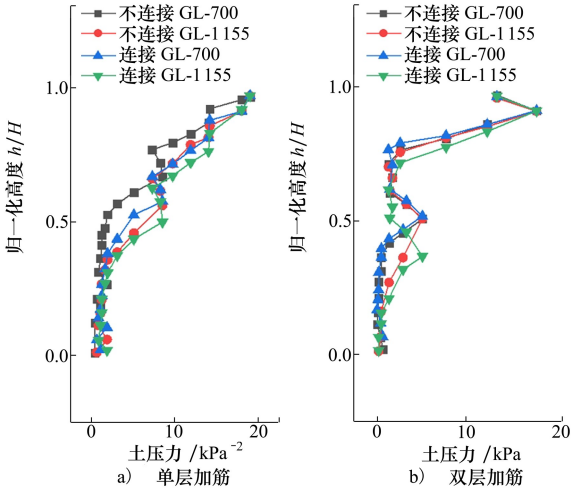


图 5　不同土工格栅与面板连接方式的加筋土挡墙土压力分布（$U_x/H=0.2\%$）

图 6 展示了在非加筋工况下土压力模拟结果与是否考虑外摩擦角理论计算结果对比。在图 6 中计算出土压力系数 K_a 后，理论土压力仅随深度 z 变化，在图中呈直线分布。挡墙顶部侧壁摩擦较小可忽略，因此 2 种理论土压力计算结果均在挡墙上端收敛。试验侧向位移施加过程中土压力系数测量值由 K_0 表示，K_0 = 0.47 时，侧向位移 U_x/H = 0.005% ~ 0.01%，表示处于静止土压力状态。q_0 = 50 kPa 的外部荷载作用下，土压力系数明显下降。结果表明，有限元模拟方法在试验中能较好反映侧壁摩擦，由于未对挡墙加筋，减小的土体应力认为与加筋状况无关而是由侧摩效应所导致的。

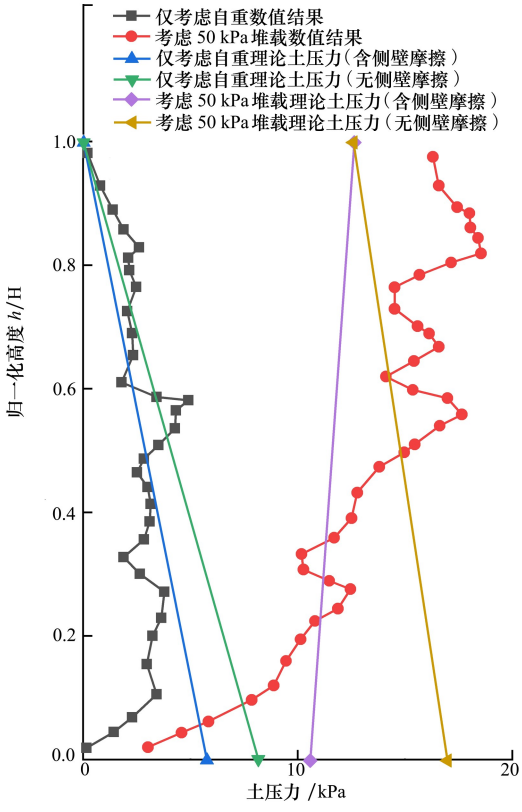


图 6 是否考虑边墙摩擦情况下静止状态下的实测土压力和理论土压力

2.3 考虑侧壁摩擦效应应力分析

Bathurst 和 Benjamin[23] 研究发现，竖向应力随自重逐渐减少

$$g'(z) = \gamma \times z(1 - 2 \times K_{sw} \times \tan\delta_{sw}) \quad (1)$$

式中：土体重度 γ = 17.1 kN/m^3；z 表示距挡墙顶部距离；δ_{sw} 表示竖向应力下砂土与面板之间的外摩擦角。

面板与填土之间的土压力系数为 $K_{sw} = K_2/2(1 + K_a)$，应力 σ_2 在平面应变中土压力系数 K_2 = 0.7[24]，在土压力系数基础上进行迭代，可选取主动土压力系数 K_a = 0.47。

侧摩效应可降低由外部荷载引起的垂直应力。在理想条件下，用 Bathurst 和 Benjamin[23] 的公式描述

$$q(z) = q_0 \times e^{-C_1 \times z} \quad (2)$$

式中，q_0 为外部竖向荷载。

$$C_1 = 2 \times K_{sw}/W \times \tan\delta_{sw} \quad (3)$$

式中：挡墙宽度 W = 0.45 m，同等应力水平下土体与侧壁之间的摩擦角 δ_{sw} = 15°。

根据侧摩效应所调整后的总有效应力为

$$\sigma'_v(z) = g'(z) + q(z) \quad (4)$$

2.4 土压力系数

通常根据土压力理论来设计加筋土挡墙面层，土压力系数须考虑到筋材对土体的加固作用。考虑面板侧摩效应时，土压力系数可由总土压力与竖向的平均有效应力比值计算

$$K = (E_{ah}/H)/\bar{\sigma}'_v \quad (5)$$

式中：E_{ah} 为水平土压力；H 为挡墙高度；σ_v 为根据面板侧摩效应获得的总有效应力。

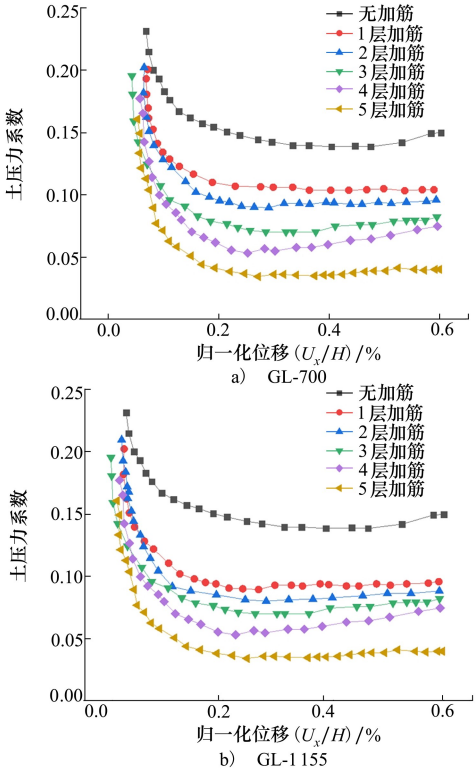


图 7 不同刚度土工格栅加筋土挡墙土压力系数随侧向位移变化关系

图 7 展示了不同工况下筋材与面板无连接时土压力系数随侧向位移的变化曲线。图 7a)~7b)分别展示了 2 种不同筋材(GL-700 和 GL-1155)的情况。

从图 7 中可以看出,在经历试验的初期阶段($U_x/H=0.02\%$),主动土压力系数数值较低。而若不考虑挡墙面板的侧摩效应,该值会更高[25]。另外,挡墙土压力降低主要在 $U_x/H=0.1\%$处发生。

3　土压力计算公式改进

由于在土压力产生过程中,侧摩效应会产生较大影响,而现在常用的朗肯土压力方法虽然较为简单,但假定忽略了侧壁摩擦效应,而在土体到达极限状态之前的土压力变化比较复杂,库伦土压力计算过程相对又过于繁琐,因此提出一种在非极限状态下能考虑侧壁摩擦效应的土压力计算方法是非常有必要的。

3.1　公式推导

当前,计算挡墙土压力方法一般采用假设土体处于极限状态下的经典土压力理论。现有研究[26]发现,挡墙工作时,墙后土体多数为非极限状态,尤其是挡墙处于主动状态下时,极限状态下土压力通常小于非极限状态下土压力。

在经典土压力理论中,土体内摩擦角为常数,而在工程实际中,土体内部摩擦和土-墙之间的侧壁摩擦通常是随着变形而逐步形成,大量现场检测和试验研究表明[27],土压力呈非线性分布。

随着土压力逐渐增大,墙后填土逐渐由静止状态向极限状态过渡,内摩擦角渐渐发挥作用。因此,将内摩擦角作为一个常数处理并不符合实际情况。土体内摩擦角发挥值 ϕ_m 通过(6)式计算

$$\tan\phi_m = \tan\phi_0 + K_d(\tan\phi - \tan\phi_0)$$

$$K_d = \frac{4\arctan(S/S_a)}{\pi} \tag{6}$$

式中:K_d 表示影响系数,反映了 ϕ_m 受到位移量 S 的影响程度;S_a 是土体塑性破坏时的水平位移量,可对应表 3 情形进行取值。ϕ_0 根据(7)式可求解

$$\frac{1}{K_0} = \left(\frac{1}{\cos\phi_0} + \sqrt{\tan^2\phi_0 + \tan\phi_0\tan\frac{\phi_0}{2}}\right)^2$$

$$K_0 = 1 - \sin\phi \tag{7}$$

表 3　土体塑性破坏时的位移量[28]

类别	位移形式	位移量
粉砂	平移	(0.6%~0.8%)H
矿渣	平移	(0.1%~1.3%)H
矿渣	绕底端偏移	(0.09%~0.1%)H
石灰	绕底端偏移	(0.09%~0.1%)H
粘土	平移	0.4%H
粘土	绕底端偏移	0.4%H
压实粘土	绕底端偏移	(0.9%~1.0%)H
粉质粘土	平移	0.4%H
砂土	平移	0.3%H
密实砂	平移	0.1%H
密实砂	绕底端偏移	0.1%H
中密砂	平移	(0.14%~0.16%)H
中密砂	绕底端偏移	(0.1%~0.27%)H

注:H 为墙高。

当墙体发生位移变形时,有可能导致填土发生相对墙体的偏移,水平应力会相应改变,直到与墙体产生塑性平衡,转变成主动极限状态。因而,水平方向的主动土压力 σ_{am} 可表示在特定位移下静止土压力 σ_0 与松弛土压力 σ_r 的关系

$$\sigma_{am} = \sigma_0 - \sigma_r \tag{8}$$

当挡墙发生转动,墙后填土进入主动极限状态时,水平土压力 σ_{am} 与库伦土压力 σ_a 的关系为

$$\sigma_{am} = \sigma_a\cos\delta \tag{9}$$

松弛应力 σ_r 到达最大值,引入位移函数 F_a,使 $\sigma_r = F_a\sigma_{rmax}$,即

$$\sigma_{am} = \sigma_0 - F_a(\sigma_0 - \sigma_a\cos\delta) \tag{10}$$

F_a 如(11)式所示

$$F_a = \frac{\exp[\tan^2(45° - \phi/2)]S}{\{\exp[\tan^2(45° - \phi/2)] - 1\}S_a + S} \tag{11}$$

将 $\sigma_0 = K_0\gamma h$,$\sigma_a = K_a\gamma h$ 和 K_a 代入(11)式,即可得出非极限状态下的土压力系数 K_{am}

$$K_{am} = K_0 - \frac{\exp[\tan^2(45° - \varphi_m/2)]S}{\{\exp[\tan^2(45° - \varphi_m/2)] - 1\}S_a + S} \times (K_0 - K_a\cos\delta) \tag{12}$$

3.2　模型验证

为验证该公式的合理性,图 8 展示了传统 Coulomb 理论、有限元模拟和 3.1 节改进公式对土压力

系数计算结果与实测结果[21]对比。

从图中可以看出,在 3 种不同的内摩擦角下,Coulomb 理论解对土压力计算偏保守,与实测值偏差较大,尤其在侧向位移刚施加阶段,Coulomb 理论计算出的土压力系数远远小于实测值。与其相比,改进公式土压力系数随着位移的施加在数值和变化趋势上都更接近实际情况。

当内摩擦角 φ 为 50°和 62°时,改进公式计算结果和实测值均出现极大值点,随着位移的施加,由之前的上升趋势转变为下降趋势。这可能是由于在较大内摩擦角作用下,随着试验的进行,内摩擦角发挥作用的空间较大,导致试验初期出现土压力系数上升的情况。而这种现象在另外 2 种计算结果中均未体现。这说明本文基于土体在非极限状态下所提出的土压力计算方法,由于考虑土体处于非极限状态和墙壁侧摩效应,对主动土压力大小和分布的计算较为准确、合理。

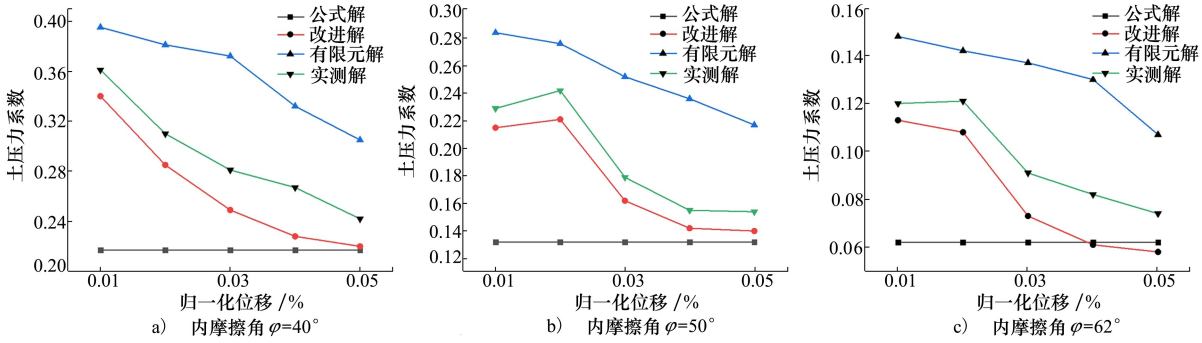


图 8 改进公式计算结果对比

4 结 论

本文利用有限元软件建立加筋土挡墙模型,研究了在不同工况下挡墙土压力大小和分布规律。基于此,根据非极限状态下挡土墙内外摩擦角的发挥程度,对传统土压力计算公式进行了修正。主要研究结论如下:

1) 挡墙土压力数值大小受到土工格栅刚度和层数影响,呈现出随着配筋层数和刚度增加,土压力逐渐减小的一般趋势。未进行预张拉的土工格栅在试验初期即可对土压力进行明显改善。

2) 挡墙土压力大小与深度呈负相关,不同工况下加筋土挡墙土压力随深度变化趋势差异不大。在挡墙上部,加筋层数和筋材刚度对土体作用相对挡墙底部效果明显。筋材与面板连接方式对土压力数值大小和分布规律影响较小。

3) 考虑到侧壁摩擦效应,对传统土压力计算公式进行改进,提出了非极限状态下土压力计算方法。与 Coulomb 土压力公式解和有限元数值解相比,该方法可较准确地反映主动土压力的大小和非线性分布,计算结果与实测值更为接近,证明该公式较为准确合理。

参考文献:

[1] CHOWDHURY S S. A study on lateral earth pressure against strutted retaining wall in cohesionless soil deposit[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 13(2): 122-138

[2] AHMADABADI M, GHANBARI A. New procedure for active earth pressure calculation in retaining walls with reinforced cohesive-frictional backfill[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2009, 27(6): 456-463

[3] VAHEDIFARD F, LESHCHINSKY B A, MORTEZAEI K, et al. Active earth pressures for unsaturated retaining structures[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 04015048

[4] YOO C, LEE D. Deep excavation-induced ground surface movement characteristic a numerical investigation[J]. Computers & Geotechnics, 2008, 35(2): 231-252

[5] HSIUNG B C B. A case study on the behaviour of a deep excavation in sand[J]. Computers & Geotechnics, 2009, 36(4): 665-675

[6] BILGIN O. Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions[J]. Computers & Geotechnics, 2010, 37(3): 399-407

[7] LI L. Behavior of tire-geogrid-reinforced retaining wall system under dynamic vehicle load[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020017

[8] 汪益敏, 闫岑, 于恒, 等. 静载作用下土工格栅加筋拓宽路堤土中应力特征试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(增刊 1): 311-317
WANG Yimin, YAN Cen, YU Heng, et al. Experimental study on stress characteristics of geogrid reinforced widening embankment soil under static load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(suppl 1): 311-317 (in Chinese)

[9] 王家全, 徐良杰, 黄世斌, 等. 动载下土工格栅加筋桥台挡墙承载性能分析[J]. 岩土力学,2019,40(11): 4220-4228
WANG Jiaquan, XU Liangjie, HUANG Shibin, et al. Analysis of bearing capacity of geogrid reinforced abutment retaining wall under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4220-4228 (in Chinese)

[10] SRBULOV M. Active earth pressure in cohesive soils with an inclined ground surface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 37: 171-177

[11] LEE I K, HERRINGTON J R. A theoretical study of the pressure acting on a rigid wall by sloping earth or rock fill[J]. Geotechnique, 1972, 22(1): 1-27

[12] BATHURST R, ALLEN T, WALTERS D. Reinforcement loads in geosynthetic walls and the case for a new working stress design method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(4): 287-322

[13] SILVESTRI V. Active earth pressure in cohesive soils with an inclined ground surface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 37(1): 171-177

[14] CHENG Y M. Seismic lateral earth pressure coefficients for c-φ soils by slip line method[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(8): 661-670

[15] LIU F Q, WANG J H, ZHANG L L. Axi-symmetric active earth pressure obtained by the slip line method with a general tangential stress coefficient[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2): 352-358

[16] 李丽华, 李行, 肖衡林, 等. 加筋土挡墙压实应力数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1), 3130-3138
LI Lihua, LI Hang, XIAO Henglin, et al. Numerical simulation analysis of compaction stress of reinforced earth retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(suppl 1): 3130-3138 (in Chinese)

[17] 李丽华, 石安宁, 肖衡林, 等. 加筋土挡墙静载模型试验及其力学性能研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4360-4368
LI Lihua, SHI Anning, XIAO Henglin, et al. Static load model test and mechanical properties of reinforced earth retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4360-4368 (in Chinese)

[18] FUMIO T, SHINYA N, CHINGCHUANG H. et al. Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(1): 35-54

[19] TATSUOKA F, HAIBARA O. Shear resistance between sand and smooth or lubricated surfaces[J]. Soils and Foundations, 2008, 25(1): 89-98

[20] RUIKEN A. Zum spannungs-dehnungsverhalten des verbundbaustoffs geogitterbewehrter boden[D]. Nordrhein-Westfalen: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2013

[21] JACOBS F, RUIKEN A, ZIEGLER M. Investigation of kinematic behavior and earth pressure development of geogrid reinforced soil walls[J]. Transportation Geotechnics, 2016, 8: 57-68

[22] 高水琴. 考虑时间效应的软土地基上加筋土挡墙性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011
GAO Shuiqin. Study on performance of reinforced earth retaining wall on soft soil foundation considering time effect[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011 (in Chinese)

[23] BATHURST R J, BENJAMIN D J. Preliminary assessment of sidewall friction on large-scale wall models in the RMC test facility //The application of polymeric reinforcement in soil retaining structures[M]. Dordrecht: Springer, 1988

[24] JARRETT P M, MCGOWN A. Reinforced soil wall analysis and behaviour[M]. Netherlands: Springer, 1988

[25] JAYASREE P K, RAJAGOPAL K, GNANENDRAN C T. Influence of sidewall friction on the results of small-scale laboratory

model tests: numerical assessment[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 12(2): 119-126

[26] 徐日庆, 龚慈, 魏纲, 等. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报工学版, 2005, 39(1): 119-122
XU Riqing, GONG Ci, WEI Gang, et al. Earth pressure theory of rigid retaining wall considering translational displacement effect[J]. Journal of Zhejiang University Engineering Edition, 2005, 39(1): 119-122 (in Chinese)

[27] 陈林. 不同变位模式下挡土墙主动土压力计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010
CHEN Lin. Study on calculation method of active earth pressure of retaining wall under different displacement modes[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010 (in Chinese)

[28] 卢坤林, 杨扬. 考虑位移影响的主动土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2009(2): 553-557
LU Kunlin, YANG Yang. Approximate calculation method of active earth pressure considering displacement effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(2): 553-557 (in Chinese)

Analysis of earth pressure on geogrid reinforced retaining wall and improvement of its calculation method

LI Lihua, ZHENG Zhigang, YAN Han, HUANG Shaoping, ZHOU Xinlong

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The distribution law and calculation method of earth pressure have always been a difficult problem in the research of reinforced retaining wall. In this paper, the magnitude and distribution law of active earth pressure of reinforced earth retaining wall under different working conditions are explored by using the numerical simulation finite element method. Combined with the dynamic play of the internal and external friction angles, a calculation method of earth pressure under non-limit state is proposed, and it is compared with the traditional theoretical formula solutions, finite element numerical solutions and measured results to verify its rationality. The results show that the numerical value of the earth pressure of the retaining wall is affected by the stiffness and the number of layers of the geogrid, showing a general trend that the earth pressure gradually decreases with the increasing of number of the reinforcement layers and the stiffness. The earth pressure of the retaining wall is negatively correlated with the depth. The earth pressure of the reinforced earth retaining wall varies slightly with the depth under different working conditions, and the reinforcement effect is mainly reflected in the upper part of the retaining wall. The non-limit state calculation results obtained by using the improved empirical formula are consistent with the measured results, which proves that the improved formula is reasonable.

Keywords: earth pressure; numerical simulation; geogrid; reinforced retaining wall; external friction angle

引用格式: *李丽华, 郑志刚, 严寒, 等. 土工格栅加筋土挡墙土压力分析及其计算方法改进[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(6): 1366-1374*

LI Lihua, ZHENG Zhigang, YAN Han, et al. Analysis of earth pressure on geogrid reinforced retaining wall and improvement of its calculation method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(6): 1366-1374 (in Chinese)

© 2022 Journal of Northwestern Polytechnical University.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.