

加筋挡墙加筋机理及其力学行为的分析

李小青, 虞海珍

(华中科技大学土木工程与力学学院 武汉市 430074)

摘 要: 随着加筋挡土结构在我国公路建设中被广泛研究和应用, 加筋挡墙加筋机理及其力学响应分析越来越引起重视。在研究加筋挡墙加筋机理及复合土体强度特性的基础上, 运用 ANSYS 分析软件对加筋挡墙受力的机制及力学行为特点进行模拟计算分析, 得出了一些有益的结论, 对加筋挡土工程具有指导和借鉴作用。

关键词: 加筋挡墙; 加筋机理; 力学行为; 数值分析

土是一种力学性能较差的材料, 其抗剪、抗拉强度较小, 在工程应用上受到很大限制。法国工程师 Henri Vidal 在三轴试验中发现, 掺有大量纤维材料的土体, 抗剪强度可提高好几倍, 从而提出了加筋土^[1](Reinforced Earth)的概念。

加筋土结构是一种在土中加入加筋材料而形成的复合土体结构, 加筋材料可以提高土体的强度, 增加土体的稳定性。在我国, 加筋结构的应用有着悠久的历史, 如在水工建筑物中, 当地基软弱, 不能保证堤身稳定时, 常在地基上铺设树木枝条以加固地基; 在河滩险峻的地段, 常在堤身逐层压入枝条以加固之。在道路工程中也常用加筋结构, 如在黄土地区修筑的土桥, 实际上是一种在填筑过程中铺入姜石、草绳、筋条等的加筋路堤, 这种土桥可历时数百年而不坍, 据实测, 土桥的高度有的达 61.5 m。

在国外, 加筋结构的应用也有类似的记载, 然而作为近代建筑技术加以研究和推广, 则是近几十年来的事。20 世纪 60 年代, 法国人 Henri Vidal 提出了加筋土的概念, 1965 年按照 Henri Vidal 的设计理论在法国成功修建了第一座加筋土公路挡土墙。于是, 这一具有许多独特优点的加筋结构立即引起了世界各国的重视, 加筋结构的研究和工程试验普遍而迅速地发展起来^[2,3]。

加筋结构技术研究在我国是 20 世纪 70 年代中期才开始的, 第一批试验工程是于 1978 年~1979 年在云南省宣威田坝和富源后所煤矿区建成的 3 座试验性加筋结构挡土墙。1980 年在富源后所矿区又建

成了一座长 57 m、高 8.3 m 的加筋土挡墙, 同年在山西省晋城~陵川公路上也建成了一座长 81.75 m、最高达 12 m 的路肩式加筋土挡土墙。此后, 加筋结构在我国得到越来越广泛的研究和应用, 尤其是在高速公路建设中的应用更加广泛^[4]。

1 加筋机理

1.1 筋条与土体的共同作用

在加筋土结构中, 筋条铺设一般成水平状, 相间、成层地放置。图 1 表示在不稳定土体中, 加筋上作用着上部荷载 N , 设其压强为 σ_v , 则筋条对土体每单位面积上的反作用力 $\sigma_v = -\sigma_v$ 。当土体对筋条作相对位移时, 筋条对上部土体将产生阻止其位移的摩擦阻力 F_m , 如图 1 a 所示。同时, 作用在筋条上的压力通过筋条传递给下部土体。如果忽略筋条本身的重量, 并且筋条与其上部和下部土体的摩擦系数均为 f , 则筋条对下部土体的摩擦阻力也为 F_m , 如图 1 b 所示。当然, 它也起着阻止土体位移的作用。由此可知, 在不稳定土体中埋设筋条, 可以约束土体的侧向位移。如果土体密实, 筋条竖向间距较小, 因筋条对土体的法向反力及摩擦阻力在土颗粒中传递, 上下筋条间的土体将形成与侧压力 σ_H 相平衡的承压拱, 如图 1 c 所示。这时, 在上下筋条之间的土体, 除拱端处的土不稳定外, 将与筋条形成一个稳定的整体。同样, 左右筋条间的土体也能在侧向力的作用下, 通过土拱作用, 传递给上下筋条间已形成的土拱, 最后也由筋条对土体的摩擦阻力承受侧压力。于

是,除拱端处的土体外,左右筋条间的土体也将获得 稳定。

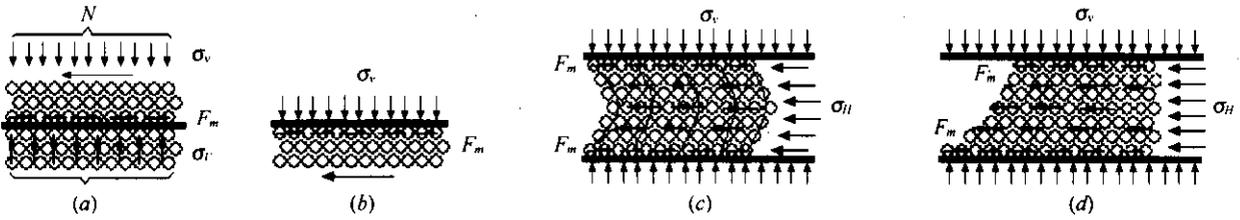


图1 筋条与土体共同作用机理

加筋土的成拱条件十分复杂,特别是在筋条间距较大而填土颗粒细小,以及土体密实度不足的情况下,筋条间土体较难形成稳定的土拱,筋条间的土体将失去约束而出现坍塌和侧向位移,如图1d所示。所以,用作支挡建筑或堤基时,加筋土结构应在筋条末端加设面板,用以支挡不稳定的土体,承受筋条与土体间的摩擦阻力未能克服的剩余侧压力,并通过连接件传递给筋条。

1.2 加筋土的强度特性

Henri Vidal 最先在三轴试验中得出^[1],加有带状加筋的砂土,其强度可以比不加筋的砂土强度高到原强度的4倍左右。虽然强度提高多少与拉筋布置的密度有关,但显著改善了土体的力学性质是无疑的^[5,6]。

一般填土在单轴压力下受到压密,由于侧压力而发生侧向应变。但在土中布置拉筋后,由于拉筋材料的弹性模量远远大于填土的弹性模量,在荷载作用下,拉筋与填土协调变形、相互共同作用,形成的作用力主要有相互错动趋势而产生的摩擦阻力和加筋网对土体的咬合力,其摩擦阻力和咬合力限制了土的侧向变形,于是土体侧向变形消失或减少。这就相当

于在土中增加了一个侧压力的反力,使土体强度提高了。加筋土体就是利用加筋材料与土体应变的协调一致来限制土体侧向变形,产生一定的约束力,减小土体的应变,提高土体承受最大主应力的能力,从而提高复合土体的抗剪能力。

关于加筋土强度提高的机理可利用 Mohr-Coulomb 破坏理论来分析,如图2所示。

图2a表示存在侧向变形的砂性土体中应力变化的情况:摩尔圆a为土体未破坏时的应力状态;圆b则是未加筋的土体极限破坏状态;圆c是土体中设置拉筋后,拉筋对土体提供了一个约束阻力 σ_R (即水平应力增量 $\Delta\sigma_3 = \sigma_R$),使得加筋土在达到破坏状态之前,侧向压力进一步减少,亦即在相同的轴向变形条件下,加筋土能承受较大的主应力差。换句话说,与无筋土相比,在 σ_3 相同的条件下,无筋土必然先破坏。这可从图2b的应力变化来说明:圆d为无筋土的极限摩尔圆;圆f为加筋土的摩尔圆;圆f的 σ_3 值与圆d相等,而能承受的应力则增加了 $\Delta\sigma_1$;圆e为加筋土中填土的极限摩尔圆,其最大主应力与圆f相等,而最小主应力却减小了 $\Delta\sigma_3$ 。

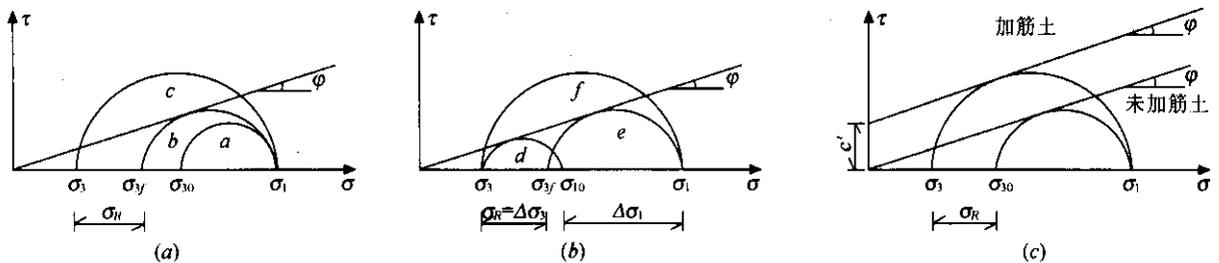


图2 加筋土 Mohr-Coulomb 强度增长示意

上述分析说明,加筋土体的强度有了增加,必须有一条新的抗剪强度线来反映这些关系,如图2c。为进一步讨论加筋土的强度特性,取加筋土三轴试样产生破裂时的一隔离体进行极限平衡状态分析,

如图3所示。作用在隔离体中的力有轴向应力、水平应力、拉筋的拉力 T 及填土的反作用力 R 。当填土的抗剪强度充分发挥时,反作用力 R 与破裂面的夹角为 φ (φ 为填土的内摩擦角)。如破裂面与水平轴

向的夹角为 α ，根据静力平衡原理，有：

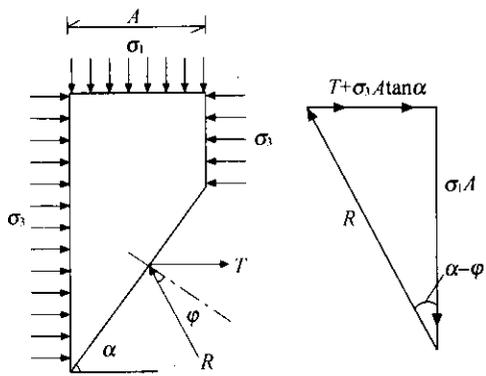


图 3 加筋土力系平衡关系

$$T + \sigma_3 A \tan \alpha = \sigma_1 A \tan (\alpha - \varphi) \quad (1)$$

即：

$$\sigma_1 = \frac{T}{A \tan (\alpha - \varphi)} + \frac{\sigma_3 \tan \alpha}{\tan (\alpha - \varphi)} \quad (2)$$

对于被破裂面所切割的各个加筋层来说，合力 T 是水平力：

$$T = \frac{A \sigma_t \tan \alpha}{\Delta H} \quad (3)$$

式中： A 为试件的截面积； ΔH 为拉筋竖向间距，对加筋墙的总高度来说是很小的； σ_t 为拉筋的抗拉强度。

于是可得：

$$\sigma_1 = (\sigma_3 + \sigma_t / \Delta H) \tan \alpha \cdot \cot (\alpha - \varphi) \quad (4)$$

当 σ_1 为最大主应力时， $\alpha = 45^\circ + \varphi / 2$ ，则：

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2 (45^\circ + \varphi / 2) + \frac{\sigma_t}{\Delta H} \cdot \tan^2 (45^\circ + \varphi / 2) \quad (5)$$

即：

$$\sigma_1 = (\sigma_3 + \sigma_t / \Delta H) K_p \quad (5)$$

式中： K_p 为被动土压力系数。

由式(5)可见，加筋土结构在极限平衡条件时，其大小主应力间仍保持线性关系。

在极限状态时加筋土试件与非加筋土的主应力 σ_1 、 σ_3 曲线相互平行， φ 值不变，但在同一 σ_3 条件下，加筋土破坏时的 σ_1 比无筋土提高了一个定值 σ_c ：

$$\begin{aligned} \sigma_c &= f(\sigma_t, \Delta H, \varphi) = \frac{\sigma_t}{\Delta H} \cdot \tan^2 (45^\circ + \varphi / 2) \\ &= \sigma_t K_p / \Delta H \end{aligned} \quad (6)$$

在破坏面上切向应力 τ 及法向应力 σ 之间的关系可用式(7)表示：

$$\tau = \sigma_3 \cdot \tan \varphi + \frac{\sigma_t}{2 \Delta H} \cdot \tan (45^\circ + \varphi / 2) \quad (7)$$

式(7)与无筋试件的抗剪强度比较，正如图 2 a 所示，加筋试件的抗剪强度产生了一个等于 $\frac{\sigma_t}{2 \Delta H} \cdot \tan (45^\circ + \varphi / 2)$ 的增量，这就是加筋层所产生的似粘聚力，即加筋层的抗剪强度，也就是图 2 c 表示的加筋土的强度增量 c' 。

$$c' = \frac{\sigma_t}{2 \Delta H} \cdot \tan (45^\circ + \varphi / 2) \quad (8)$$

2 加筋挡土墙的数值模拟分析

采用 ANSYS 分析软件对加筋挡墙进行三维数值模拟分析，以探讨加筋挡土墙有加筋效果。数值分析模型如图 4 所示，墙面垂直，墙高 8 m，共设 9 层加筋条。筋条长 3.5 m，层间距 0.8 m。周边土体计算范围沿水平和竖直方向为 3 倍的墙高，即取 24 m 计算。模拟计算时，材料参数取值如表 1 所示。

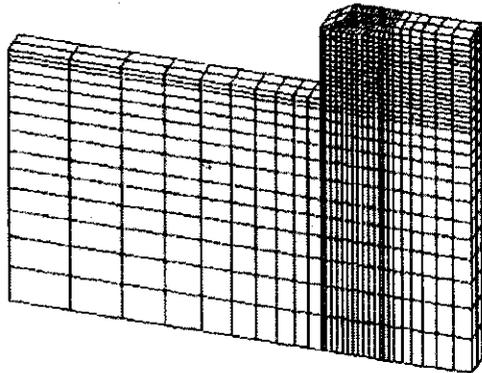


图 4 有限元模型的网络

表 1 数值分析的材料参数

材料名称	弹性模量 MPa	泊松比	容重 kN/m ³	粘聚力 kPa	内摩擦角 (°)
填土(砂土)	10	0.30	19.5	5.0	35
墙底基础	350	0.23	26.5	160	40
筋材	2.0 × 10 ⁵	0.25	—	—	—

2.1 加筋墙的力学响应分析

对加筋挡土墙与未加筋墙分别进行模拟计算，从塑性应变和侧向水平位移方面的差异来分析对比两者受力响应。图 5 为墙体等效塑性应变分布图。结果显示，未加筋墙的塑性区条带从墙趾点开始向上延伸，而加筋墙的塑性区集中在墙趾附近。这就说明加筋有效地抑制了塑性区的发展，增加了边坡的整体抗剪性能。

图 6 为加筋挡土墙与未加筋墙的侧向水平位移分布图。从图 6 中可以发现，未加筋墙的最大水平

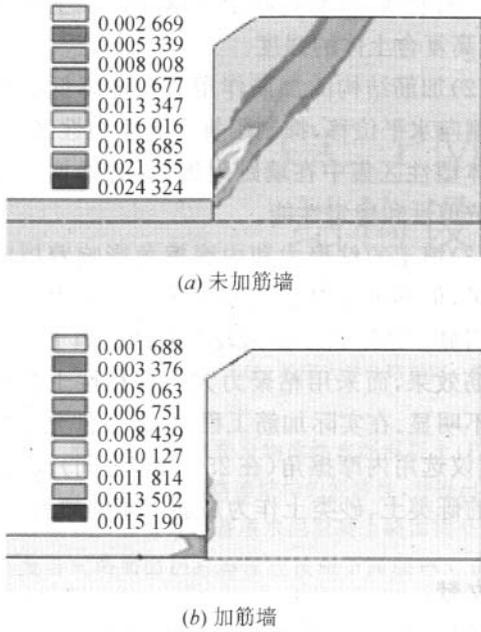


图5 墙体的等效塑性应变

位移为 22.06 mm,而加筋墙则为 5.94 mm。加筋有效地减少了墙体的侧向水平位移,并改变了墙体的水平位移分布。同时,加筋墙水平位移分布更加均匀,变化幅度显著降低,这也从侧面反映土体的主应力差明显减小,保障了加筋挡墙的稳定。两者的最大水平位移均出现在墙趾上部,这是由于模型中与底部相连的基础,其刚度较大而引起的现象。

2.2 加筋墙体的稳定性分析

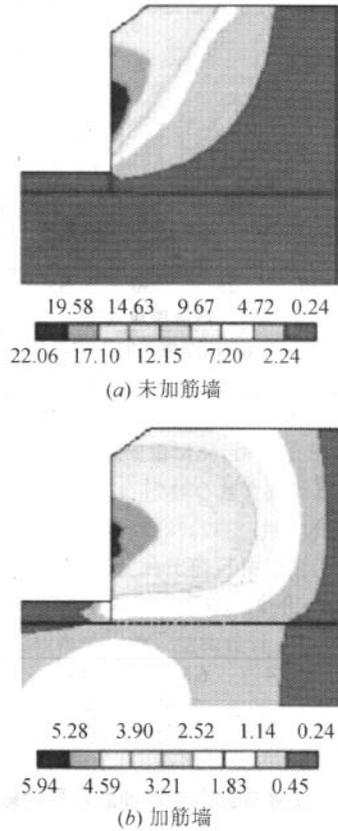
考虑到道路实际荷载情况,在加筋墙模型中加入 30 kPa 的附加荷载,采用强度折减法分析边坡的稳定安全系数。未加筋边坡的安全系数为 0.88,自重作用下加筋墙边坡安全系数为 1.73,而加入 30 kPa 附加荷载时加筋墙边坡安全系数为 1.52。

30 kPa 附加荷载下折减后土体塑性区分布如图 7 所示,可见加筋区土体的塑性区集中在墙趾附近,而加筋区背面则出现大范围塑性区。超过临界状态时,加筋墙最有可能沿塑性区出现的条带范围滑动失稳。

2.3 土体抗剪指标对加筋效果的影响

土体的抗剪强度指标主要指内摩擦角和粘聚力,研究其对加筋效果的影响,可直接指导实际工程的填料选取。图 8 为土体内摩擦角和粘聚力对加筋效果的影响程度模拟计算结果。

(1)内摩擦角的影响。土体内摩擦角对加筋效果有明显的影 响,随着土体内摩擦角的增加,加筋墙体的最大位移逐渐减小,但超过一定范围后,最大位移趋于稳定(图 8a)。在内摩擦角为 25°以前位移值



单位:mm
图6 加筋挡墙水平位移分布

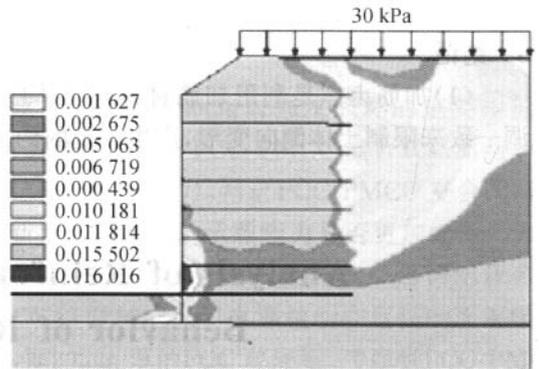


图7 临界等效塑性应变

变化较大,而 30°以后变化已不显著,其变化的幅度很小。这说明选用内摩擦角较大的砂性填土是有益于改善加筋效果的。因此,在条件允许的情况下,建议选用内摩擦角在 25°~30°之间的填料以增强加筋效果。

(2)粘聚力的影响。土体粘聚力的增大亦能增强加筋效果,但变化的幅度较小,对加筋效果的影响不如土体内摩擦角明显(图 8b)。如粘聚力由 4 kPa 增加至 15 kPa 时,最大位移仅由 6.38 mm 减小至

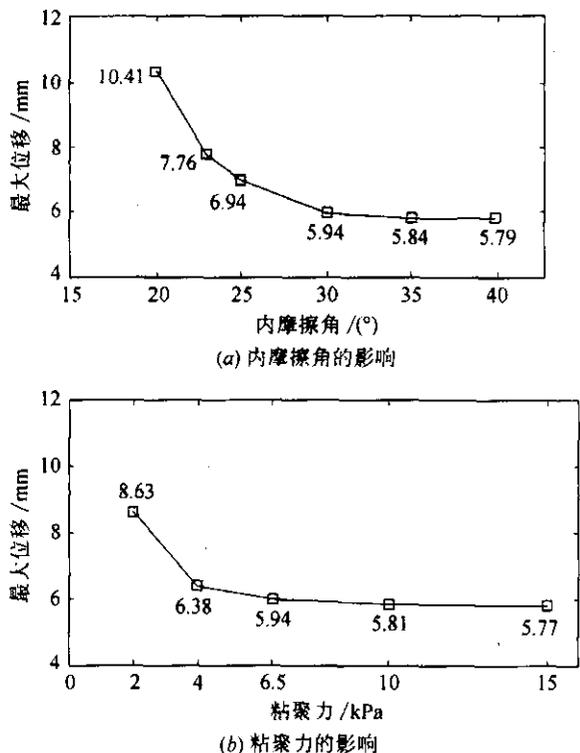


图 8 土体抗剪指标对加筋效果的影响

5.77 mm。因此,在实际工程应用中,适当增加填土的粘聚力有利于改善加筋的效果,但仅仅依靠增大粘聚力来改善加筋效果则是不可取的。

3 结语

(1)加筋土体是利用加筋材料与土体应变的协调一致来限制土体侧向变形,产生一定的约束力,减

小土体的应变,从而提高土体承受最大主应力的能力,提高复合土体的强度。

(2)加筋结构的加筋作用有效地降低了复合土体的侧向水平位移,抑制了复合土体塑性区的发展,使土体塑性区集中在墙趾附近,显著增加了墙体的整体抗剪性和稳定性能。

(3)填土的粘聚力和内摩擦角影响着挡墙的加筋效果,但粘聚力对加筋效果影响不如内摩擦角的影响明显。选用内摩擦角较大的砂性填土有利于改善加筋效果,而采用粘聚力大的高粘性土改善加固效果不明显。在实际加筋工程中,在条件允许的情况下,建议选用内摩擦角(在 25°~30°之间)较大、级配较好的砾类土、砂类土作为加筋挡墙的填料。

参考文献:

[1] Vidal H. The Principle of Reinforced Earth [Z]. Highway Research Record 282,1969.

[2] Garston Kerts. Reinforced earth research and practice [Z]. Ground engineering,1980.

[3] W P Brown. Reinforced earth application for bridge abutments in Australia [Z]. International conference on soil reinforcement. Paris,1979.

[4] JTJ 015-91,公路加筋土工程设计规范[S].

[5] M R Hausman,I K Lee. 加筋土强度特性 [Z]. University of New Wales,Kensington Univiv Report.

[6] Segrestin. 滑裂楔体法计算加筋土构造法 [Z]. Coll Int, reinforcement on des Sols Paris, 1979.

Analysis of Reinforced Mechanism and Mechanics Behavior of Reinforced Retaining Wall

LI Xiao-qing, YU Hai-zhen

(School of Civil Engineering & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the application and study on the reinforced retaining wall in highway construction, the study of the reinforced mechanism and the mechanics response of the reinforced retaining wall are paid more attention. On the basis of the study on the reinforced mechanism of the reinforced retaining wall and strength characteristics of the composite soil, the reinforced mechanism and the mechanics behavior of the reinforced retaining wall are simulated and calculated by ANSYS analysis software in this paper. Some available conclusions are obtained, and it makes reference to the reinforced retaining wall engineering.

Key words: reinforced retaining wall; reinforced mechanism; mechanics behavior; numerical analysis