

软土地区加筋土工格栅对高填土侧压力减小作用的理论分析与应用

梁永辉, 水伟厚, 詹金林, 何立军

(现代建筑设计集团上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

摘要: 软土地区由于填土的土性较差, 高填土堆筑往往会对邻近建筑结构或支挡结构产生巨大的侧压力, 给工程设计带来很大的挑战。近年来, 土工格栅作为一种新型的土工合成材料在岩土工程中(尤其是地基处理、边坡加固等工程)得到广泛应用, 从而为解决高填土的侧压力问题带来很好的契机。为此, 本文从土工格栅的加筋原理出发, 采用极限平衡理论对土工格栅加筋填土的土压力进行理论分析, 并探讨了墙后土体加筋的挡墙设计方法, 最后结合某工程实例分析表明采用土工格栅加筋对于减小高填土侧压力的作用以及优点, 从而可为软土地区的类似高填土工程的设计施工提供参考。

关键词: 软土工程; 高填土; 土工格栅; 侧压力; 极限平衡理论

作者简介: 梁永辉(1983—), 男, 山西闻喜人, 硕士, 从事地基处理设计和研究工作。

0 前言

软土地基上修筑高填土挡墙结构, 往往由于填料性质差、不易压实, 地基软弱, 承载力不够, 地基抗水平滑移不易满足, 导致采用传统的重力式挡墙或钢筋混凝土挡墙时, 截面尺寸过大或是截面配筋率过大, 造成挡墙结构造价增加, 同时安全度减小, 给工程设计人员带来困难。近年来, 土工格栅在岩土工程领域(如挡墙支护、地基加固等)的应用得到充分的发展, 一种采用土工格栅联合传统挡墙进行支护设计的方法正逐渐为工程界所采用, 然而如何考虑土工格栅对支护结构的作用, 对土工格栅联合传统挡墙的设计方法尚不成熟。为此, 本文拟从土工格栅的加筋原理出发, 采用极限平衡理论对土工格栅加筋填土的土压力进行理论分析, 并针对上海地区某世博配套重点工程中的高填土支挡结构设计实例进行分析, 表明采用土工格栅加筋具有减小土压力, 节省造价的优点, 可以作为软土地区高填土工程中处理高填土侧压力问题的很好方法。

1 土工格栅减少土压力的基本原理

众所周知, 加筋土中筋土相互作用的基本原

理通常可分为两类概念^[1~4], 第一种是准黏聚力原理, 第二种是摩擦加筋原理。

准黏聚力原理是将加筋土看作各向异性的复合材料, 拉筋的弹性模量远大于填土的弹性模量, 拉筋与填土共同工作, 包括填土的抗剪力、填土与拉筋的摩阻力和拉筋的抗拉力的共同作用, 使得加筋土的强度明显提高; 摩擦加筋原理是将土体作用在墙背上的土压力通过筋土间的摩擦力由锚固区内的筋土锚固力来抵消。该原理忽略了筋带在力作用下的变形, 也未考虑土是非连续介质、具有各向异性的特点, 对加筋材料本身模量较小、相对变形较大的合成材料, 其结果是近似的。

土工格栅能增强土体强度及整体性, 限制土体变形。分析认为, 土工格栅加固土的机理在于格栅与土的相互作用, 主要表现在两个方面: (1) 格栅表面与土之间的摩擦作用; (2) 格栅网眼对土的嵌锁作用(如图 1 所示)。

下面, 借助一个简单的示例来解释加筋理论。图 2(a)为未加筋土体应力和应变示意图。土体承受垂直应力 σ_v 和相邻土体侧向挤压造成的相应水平应力 σ_h 。在竖向应力和水平应力的作用下, 土体发生竖向的压缩变形 ϵ_v , 同时由于偏应力的作用, 土体水平方向还承受拉伸应变 ϵ_h , 这是局部破

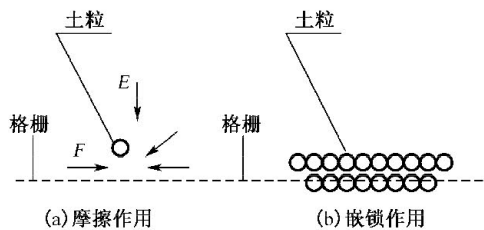


图1 格栅与土的相互作用

坏的主要原因之一。图2(b)为加筋土体应力和应变示意图。土体中间放置一层土工格栅,由于土工格栅与土之间存在上述所说的摩擦作用和嵌锁作用且土工格栅的刚度远大于土体刚度,当土体在偏应力作用下水平拉伸变形时,格栅对土体产生附加的侧向应力 σ_h^* ,从而限制土体的侧向变形,减小土体的土压力。

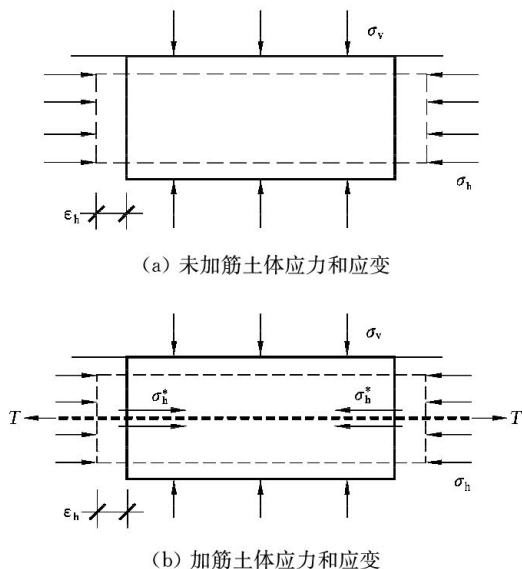


图2 未加筋和加筋土的应力和应变

2 土压力减小的理论分析

2.1 加筋土的两破坏模式

采用土工格栅加筋后土体的破坏模式主要有两种(图3)。一种是筋材与土体之间的剪切滑移破坏,即筋材被拔出;另一种破坏模式即加筋筋材被拉伸断裂。前者发生于多层加筋体的中上部;后者发生于多层加筋体的下部。

第*i*层土工格栅与土之间最大摩擦阻力,即抗拔力为

$$F_i = 2\gamma h_i f L_a \quad (1)$$

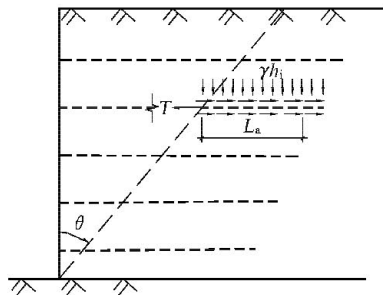


图3 格栅与土的相互作用

式中, L_a 为锚固长度; f 为筋土之间的似摩擦系数,宜由实验获得,初步设计时也可按下式计算。

$$f = \alpha_s \tan \varphi \quad (2)$$

式中, α_s 为经验系数,可取0.667~0.9,对于土工织物可取低值,土工格栅、土工网取高值; φ 为填料内摩擦角,对无黏性土可取土体快剪内摩擦角,对黏性土取综合内摩擦角,可依据现行规范查取。

设第*i*层土工格栅的极限抗拉强度为 T_i ,则当 $T_i \leq F_i$ 时,加筋土破坏模式为筋材断裂;当 $T_i > F_i$ 时,发生筋材剪切滑移破坏。

2.2 极限平衡理论分析

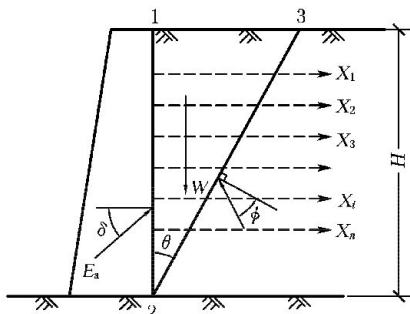
下面将基于极限平衡理论对格栅加筋后的填土主动土压力进行分析。蒋楚生^[5]假定破坏时加筋体全部达到断裂抗拉强度,根据极限平衡理论推导了路堤支挡结构的土压力计算公式,但是未考虑加筋体的破坏模式不同,加筋体实际发挥的抗拉力也不同。本文将结合上文中关于加筋土的破坏模式分析推导加筋土的主动土压力。如图4(a)所示,1-2为墙背,2-3为主动破裂面, X_i 为第*i*层土工格栅可以减小的水平力

$$X_i = \text{Max}(F_i, T_i) \quad (3)$$

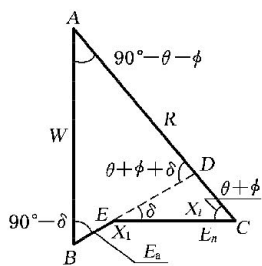
式中, F_i 、 T_i 分别为第*i*层土工格栅处单位宽度的抗拔力和极限抗拉力,见式(1)、式(2)。图4(b)为挡墙的受力多边形图, W 为滑裂体123的重力, $W = \gamma H^2 \tan \theta / 2$, R 为破裂面上的反力, E_a 为主动土压力,图中ED段即为土工格栅加筋减小的水平力作用。根据正弦定律可得

$$\begin{aligned} E &= \overline{BD} - \overline{ED} \\ &= \frac{W \sin(90^\circ - \theta - \varphi)}{\sin(\theta + \varphi + \delta)} - \frac{\sum X_i \sin(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \varphi + \delta)} \\ &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \varphi + \delta)} \tan \theta - \end{aligned}$$

$$\frac{\sin(\theta + \varphi)}{\sin(\theta + \varphi + \delta)} \sum X_i \quad (4)$$



(a) 受力示意图



(b) 力多边形

图4 土工格栅加筋重力式挡墙

由此可见, E 为破裂角 θ 的函数, E_a 为 E 的最小值, 由 $\frac{dE}{d\theta} = 0$ 可求得

$$\tan \theta = -\tan(\varphi + \delta) +$$

$$\sqrt{\tan(\varphi + \delta) \left[\tan(\varphi + \delta) + \frac{1}{\tan \varphi} \right] - \frac{2 \sum X_i}{\sin \varphi \cos(\varphi + \delta) \gamma H^2} \sin \delta} \quad (5)$$

将 φ 、 δ 值代入式(5), 即可求得破裂角, 再代入式(4)即求得主动土压力值。

为节省材料, 应尽量发挥土工材料的抗拉强度, 使筋材的破坏模式均为拉伸断裂破坏, 必须保障加筋体有足够的锚固长度。锚固长度可根据式(6)初步估算

$$L_{ai} = \frac{T_{ult} F_m}{2\gamma h_i f} \quad (6)$$

式中, γ 为填料容重; h_i 为第 i 层格栅的埋设深度; T_{ult} 为格栅极限抗拉强度; F_m 为锚固安全系数, 对无黏性土取 $F_m = 1.5$, 黏性土取 2.0 。 f 为土与土工格栅的界面摩擦系数。

3 加筋模式探讨

利用加筋减小墙后土压力的挡墙设计思路主

要有两种。

其一就是采用包裹式加筋, 加筋土与挡墙间预留一定的间距, 在加筋土铺设至一定高度后, 加筋体已充分受力, 再采用中粗砂等粗颗粒填料对孔隙进行回填。虽然包裹式加筋在理论上可以完全承担墙后的土压力, 但是由于加筋体材料的蠕变性较大, 加筋土的变形往往较大, 因此最终形成包裹式加筋土与挡墙共同受力的模式。

另一种思路是, 只考虑在填土中适当加设一些密度不是很大的土工格栅, 以适当减小土压力为主要目的, 这种模式中, 加筋体只起减小土压力的目的, 挡土的功能主要还是靠其外侧的挡土墙来实现。

根据上文中思路二, 挡墙的设计步骤如下:

- (1) 根据填土高度、土性指标, 计算墙背土压力, 并初选支挡结构的类型;
- (2) 考虑铺设适当密度的土工格栅, 根据式(4)、式(5)计算墙背主动土压力值;
- (3) 对初选挡墙类型进行初步设计, 并进行方案比选, 确定最终支挡类型及截面尺寸;
- (4) 挡墙结构设计并绘制施工图。

4 应用实例分析

上海某软土地基上的高填土工程, 邻近建筑区域进行填土支挡结构设计。经过分析计算, 此软基上的高填土对邻近建筑物的地基基础产生严重的不利影响: 引起桩基负摩阻力、水平力问题, 引起地基不均匀沉降, 结构倾斜、裂缝等; 同时, 软土地基不能满足高填土的承载力要求, 可能产生地基整体滑移破坏。因此, 设计中采用复合桩基进行高填土下地基加固, 挡墙采用桩基础形式。该部分内容因不是本文讨论的重点, 因此, 不作展开论述。

本工程中挡墙最大高度为 14 m, 根据结构两侧填土的对称性, 采用水平结构对撑体系解决了

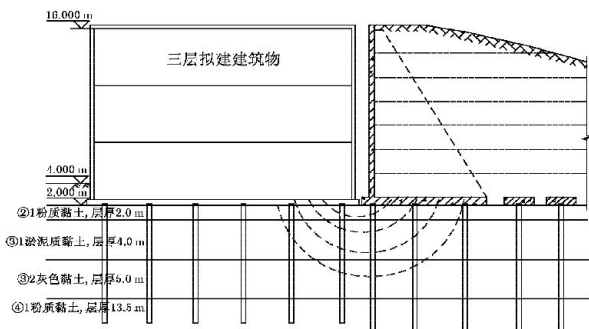


图5 邻近建筑的高填土支挡实例示意图

高度为 10~14 m 的填土的水平力问题。其余 8 m 高填土挡墙段,由于只有单侧填土,无法通过结构对撑来抵消水平力影响,在这种区域设计采用土工格栅加筋来减小填土的侧压力,使挡墙满足水平滑移的稳定性要求。

由于大面积填土,受土源限制,填料多为基坑开挖的黏土或粉质黏土,含水量较大,设计时填料的抗剪强度指标按 $c = 10 \text{ kPa}$, $\phi = 15^\circ$ 计算。地基土为黏性土,墙底滑移系数取 0.25。采用库仑理论计算主动土压力。填料内摩擦角按抗剪强度相等原则换算为综合内摩擦角, $\phi_D = \arctan(\tan \phi + c/(\gamma H)) = 18.5^\circ$, 墙背与墙后填土摩擦角 $\delta = 0.5\phi_D = 9.25^\circ$ 。代入式(5)得:破裂角 $\theta = 39.82^\circ$, $E_a = 288 \text{ kN/m}$ 。

经挡墙方案比选,拟采用扶壁式钢筋混凝土挡墙。初步计算结果表明,挡墙抗倾覆稳定性远远满足规范要求,挡墙截面尺寸主要受滑移稳定性控制,满足规范要求的截面尺寸如图 6 所示。墙踵长度为 10.20 m 时,抗滑移稳定系数达到 1.30,挡墙截面面积为 9.35 m^2 。

层,格栅极限抗拉强度为 30 kN/m 。格栅铺设长度为自墙背至破裂面后 3 m,满足抗拔稳定要求。

将 ϕ_D, δ 代入式(5), $\tan \theta = 0.780, \theta = 37.95^\circ$,再代入式(4),得 $E_a = 150.37 \text{ kN}$ 。墙踵长度为 5.5 m 时,抗滑移稳定系数即可达到 1.30,从而大大节省截面尺寸,每延米混凝土用量节省 2.35 m^3 ,挡墙截面用钢量节省 0.12 t。每延米造价总节省约 1 250 元。可见,采用土工格栅加筋减小墙后土压力后,挡墙造价可以大幅降低。

5 结 语

本文从土工格栅加筋的机理出发,分析了采用加筋减小填土土压力的基本原理,并应用楔体的极限平衡原理给出了墙后加筋填土的主动土压力近似计算公式。通过实例分析表明,采用土工格栅加筋来减小墙后填土土压力,不仅解决了高填土对结构的水平力影响问题,同时比传统的挡土墙更加节约造价。

本文讨论中假定考虑土工格栅的抗拉强度完全发挥,并未考虑加筋对填料的力学性质的改良作用,因而只能作为近似的计算方法。事实上,土工格栅加筋后,由于土工格栅的摩擦作用和嵌锁效应使层间土体的应力状态发生改变,抗剪强度有所提高,鉴于目前缺少必要的实测数据,因此,建议今后有条件时通过模型试验、现场测试等手段对墙后加筋的填土土压力进行试验研究和理论分析,进一步完善加筋填土挡土结构的计算理论和设计方法。

参 考 文 献

- [1] 《土工合成材料工程应用手册》编委会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 蒋楚生. 土工格栅减小路堤支挡结构土压力的理论分析[J]. 铁道工程学报, 2007(8): 30~34.
- [4] 叶建东, 王保田, 等. 利用土工格栅减小桥台桩土压力和桩体位移的研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 209~212.
- [5] 关秀光, 刘文白, 等. 土工格栅与土的摩擦特性试验[J]. 上海地质, 2004(2): 13~17.

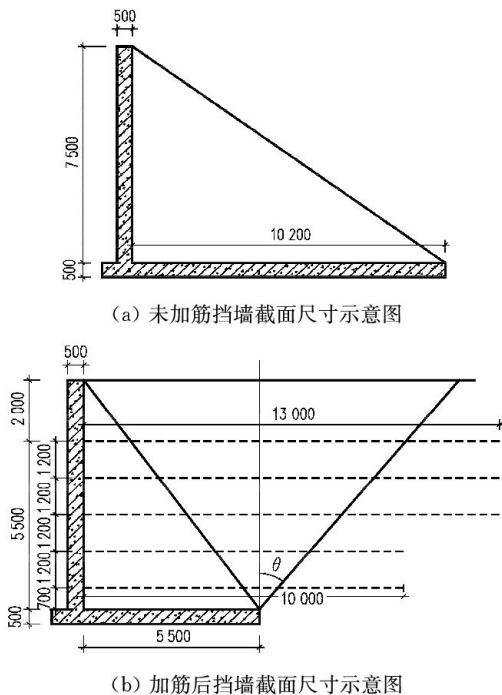


图 6 未加筋与加筋后挡墙截面尺寸示意图

采用土工格栅加筋来减小填土土压力时,为了充分利用土工格栅的抗拉强度,土工格栅应尽量往下布置,本例中,墙顶下 2.0 m 处铺设第一层单向土工格栅,以下每隔 120 cm 铺设一层,共 5