

考虑面板刚度和 加筋材料沉降的

| 加筋土挡墙离心模型试验

郑召典 郑昱明 崔淑梅◎著

非外借

中国建筑工业出版社

考虑面板刚度和加筋材料沉降的 加筋土挡墙离心模型试验

郑召典 郑昱明 崔淑梅

著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

考虑面板刚度和加筋材料沉降的加筋土挡墙离心模型试验 / 郑召典, 郑昱明, 崔淑梅著. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.11

ISBN 978-7-112-24316-7

I. ①考… II. ①郑…②郑…③崔… III. ①加筋土挡土墙 — 离心模型 — 土工试验 — 研究 IV. ①U417.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 216668 号

责任编辑: 易 娜

责任校对: 王 瑞

考虑面板刚度和加筋材料沉降的加筋土挡墙离心模型试验

郑召典 郑昱明 崔淑梅 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京点击世代文化传媒有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 8 $\frac{3}{4}$ 字数: 198千字

2019年10月第一版 2019年10月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-24316-7

(34818)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

符号

a, b ——常数，其值可以通过常规三轴压缩试验确定。 $1/a$ 为初始切线模量 E_t ， $1/b$ 为最终的主应力差	R_T ——加筋材料的最大允许拉伸应力
a_c ——Coriolis 加速度	R_l ——离心机中心至模型顶部的半径
a_r ——加筋条的横截面积	r_d ——干重度
$[B]$ ——应变位移矩阵	r_{dmax} ——最大干重度
b ——加强条的宽度	r_o ——模型底部 h_m 处发生的最大超越应力与原型相应深度处的应力比值
b_1, b_2 ——常数，分别等于 $\frac{1}{k_1}$ 和 $\frac{1}{\tau_{ult}}$ 。 k_1 为单位剪切面积的初始切线剪切刚度， τ_{ult} 为剪切应力的最终值	r_u ——模型 $\frac{1}{2} h_i$ 深度处发生的最大欠缺应力与原型深度处应力的比值
C_c ——曲率系数	S_v ——土的主动区水平厚度
C_u ——均匀系数	r_w ——水的重度
c ——黏聚力	T_{al} ——单位宽度加筋的允许拉力
c_a ——界面附着力	$T_{a(n)}$ ——加筋的设计强度
c_{comp0} ——附加黏聚力	$T_{cl(n)}$ ——加筋的标准强度
c_{comp1} ——复合材料的附加黏聚力	T_{max} ——加筋材料的最大张力
$[c]_i$ ——本构矩阵	$T_{ultcocc(n)}$ ——通过 NCMA 测试确定的加筋材料的极限连接强度
c_n ——界面黏聚力	T_v ——固结度
c_v ——固结系数	t ——加筋条的厚度；时间
c_{vm} ——模型中的固结系数	U_e ——弹性应变能
c_{vp} ——原型中的固结系数	$\{d\}$ ——单元位移矢量或单元自由矢量
d ——总位移矩阵	E ——杨氏弹性模量
R_c ——模型的有效离心半径	E_r ——加筋材料的弹性模量
R_f ——失效率 ($R_f = b (\sigma_1 - \sigma_3)_{fail}$)	e ——初始孔隙比
R_{fl} ——与极限剪切应力—界面上的破坏应力相关的失效率	F —— $\Sigma \{F^e\}$ 总荷载向量
	F_{cs} ——增强材料的连接强度安全系数（通常取 1.5）

$\{F^e\}$ ——单元力矢量	η ——自然坐标系, $-1 \leq \eta \leq 1$
$\{T\}$ ——作用于表面的分布力矢量	η ——应力比, $\eta = \frac{q}{p'}$
F_f ——体荷载矢量	λ ——加载期间, $e \sim \ln p'$ 曲线的斜率
F_h ——边界牵引载荷矢量; 非零位移载荷矢量	ν ——动态黏度
F_p ——允许抗拉阻力	ξ ——自然坐标系, $-1 \leq \xi \leq 1$
F_{SR} ——加筋材料的抗拉强度安全系数	Π_e ——总势能
$\{f\}$ ——体积力矢量	K —— $\Sigma[K^e]$ 全刚度矩阵
G ——剪切模量	K_a ——主动土压力系数
G_s ——比重	K_B ——体积系数
H ——排水路径	$[K^e]$ ——单元刚度矩阵
H_f ——模型墙的破坏面高度	K_o ——静止土压力系数
h_m ——缩尺模型的高度	K_w ——卸载—再加载模数
h_p ——相应原型的高度	k ——渗透系数
i ——水力梯度	k_m ——模型中的渗透系数
i_m ——模型中的水力梯度	k_n ——界面刚度
i_p ——原型中的水力梯度	k_p ——原型的渗透系数
$[J]$ ——Jacobian 矩阵	k_s ——界面剪切刚度
$\{u(x)\}$ ——元素内任意点的位移	k_t ——剪切刚度数
V ——离心机运行时模型的速度	L ——加筋长度
v ——液体的渗流速度	L_e ——施加力的电位能量
W ——加强条的宽度	$LL(\%)$ ——液限
X ——作用于单元、平行于 X 轴的力	L_o ——加筋总长度
x_o ——土的主动区的宽度	l_e ——单元平均尺寸
Y ——作用于单元、平行于 Y 轴的力	M —— $p'-q$ 平面中摩尔破坏包线的斜率
Z ——墙顶以下的深度	N ——离心试验中使用的重力加速度倍数
α ——螺旋线切线与垂直方向夹角	$[N]$ ——有限单元形函数
$\{\delta\}$ ——位移矢量	$\frac{1}{N}$ ——模型的缩放因子
$\delta\mu_r$ ——给定应力条件下界面处的相对位移	n ——模量指数
ε_b ——侧向应变	n_1 ——剪切刚度指数
ε_r ——加筋材料的应变	ρ ——土体密度
ε_s ——土体的侧向应变	ϕ ——土的内摩擦角
ε_v ——轴向压缩应变	$\phi_{comp1}, \phi_{comp2}$ ——复合材料的摩擦角, 对于 B 线, 加筋土复合材料具有与原土体相同的摩擦角; 对于 C 线, 加筋土复合材料的摩擦角
ε_l ——轴向应变	
$\{d\varepsilon\}$ ——应变增量的矢量	
$\{\varepsilon\}$ ——有限单元中任意点的应变	

大于原土体的摩擦角

φ ——界面摩擦角

σ_{ff} ——发生破坏时，破坏面上的法向应力

σ_{H} ——侧向应力

σ_{Hi} ——任意加筋单元内的拉应力

σ_{n} ——作用于界面的法向应力

σ_{v} ——竖向应力

σ_{vm} ——缩尺模型中的竖向应力

σ_{vp} ——原型中的竖向应力

$\sigma_{\text{v}}(x)$ ——作用于筋—土界面点 (x) 处的竖向有效应力

$\sigma(\alpha)$ ——作用在破坏面上的法向应力

σ_1, σ_3 ——分别为最大主应力和最小主应力

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{fail}}$ ——破坏时，土体的主应力差

$\{\text{d}\sigma\}$ ——应力增量矢量

τ_{ff} ——破坏时，破坏面上的剪切强度

τ_{n} ——界面处的剪切应力

$\tau(x)$ ——筋—土界面点 (x) 处的动员剪切应力

P_{a} ——大气压力

$PI(\%)$ ——塑性指数

p' ——有效应力

p'_{o} ——预固结围压

μ_{r} ——界面的相对剪切位移

ν_{r} ——界面的相对法向位移

ω ——角速度

ψ ——剪胀角

目 录

符号

1	绪论	1
1.1	研究目的和必要性	1
1.2	研究概况	2
1.3	研究方法和范围	4
2	加筋土及其结构的基本理论	6
2.1	加筋土	6
2.2	加筋土挡墙	12
2.3	加筋土的性能	15
2.4	加筋土挡墙稳定性评价与设计方法	17
2.5	实践中使用的设计方法	20
2.6	加筋土挡墙结构的优点	26
2.7	加筋土结构的未来发展	27
3	加筋土挡墙离心模型试验	28
3.1	试验综述	28
3.2	加筋土挡墙模型中的材料特性	29
3.3	离心模型试验原理	33
3.4	试验装置	43
3.5	离心模型试验	50

4	试验结果与讨论	53
4.1	面板抗弯刚度对挡土结构特性的影响	53
4.2	加筋连接方式对加筋土挡土结构特性的影响	65
4.3	变形分布	71
4.4	破坏面位置及形态	78
4.5	加筋所受的拉力	82
4.6	对破坏加速度大小的影响	86
5	模型的有限元分析及结果比较	89
5.1	有限元分析综述	89
5.2	加筋土挡墙模型	90
5.3	输入参数	95
5.4	界面单元	96
5.5	分析过程	100
5.6	数值模拟结果分析、与试验结果比较	103
6	总结与展望	123
6.1	总结	123
6.2	展望	124
	参考文献	126

1 绪论

1.1 研究目的和必要性

众所周知,土体具有一定的抗剪强度,同时在土体内掺入纤维或铺设加筋材料,可以不同程度地改善土体的强度和变形特性,形成加筋土,是半刚性复合材料。对加筋土的感性认识早为古代劳动人民所掌握,并应用于实践。早在古巴比伦和中国就开始使用加筋土。通过添加稻草来提高土坯砖的质量。1963年,法国工程师 Henry Vidal 根据三轴压缩试验结果提出了加筋土的概念及加筋土的设计理论,成为加筋土发展历史上的一个重要里程碑,标志着现代加筋土技术的兴起 (Vidal, 1969)。条形加筋通常由镀锌钢制成的金属带埋入由砂和砾石组成的高品质填料中,通常要使用较高质量且价格昂贵的干净砂和砾石填料,以便在二者之间产生所需的摩擦力,常用于墙体较高或重载挡土墙。

加筋土挡墙系统通常是由面板、按规范选定的填料、嵌入填料的加筋单元组成的稳定结构系统。非黏性颗粒土与高黏性钢筋条的相互作用构成了一个综合体,其中的加筋承受拉伸力。这样形成的综合土体被设计视为一个黏性整体,既能支撑自身重量又能承受外部荷载。原则上讲,加筋土与钢筋混凝土类似,合理的假设是,加筋土的性能取决于用加筋间距表示的“土的配筋率”。

加筋土挡墙是一种具有一定柔性和变形适应能力的支挡结构,它与传统的重力式挡土墙以自重等因素抵抗墙后填土压力和保持自身稳定不同,加筋土挡墙是通过筋带和填土之间的摩擦作用,改善土体的变形条件和提高土体的工程性能,从而达到加固、稳定土体的目的。同时,加筋土挡墙还因具有以下优点而广泛应用于交通运输和其他土木工程领域:

(1) 适应性好:加筋土属柔性结构,在一定范围内可承受比较大的地基变形;其稳定性高,比其他类型的挡土墙抗震性能好。

(2) 可靠性:材料的耐久性可靠,结构的安全性较高。

(3) 成本效益:加筋土面板薄,基础尺寸小,与钢筋混凝土挡土墙相比,可减少造价一半左右,与石砌重力式挡土墙相比较,可以节省 20% 以上,且墙越高其经济效益越佳。

(4) 适应性:该技术适用于各种复杂情况,如通行受限区域的处理、不稳定自然边坡的处理、基础边界的处理及沉降较大地基的处理,事实证明是最佳的处理方案;可以因地制宜,

就地取材。

(5) 造型美观:挡土墙的总体布设和墙面板的形式图案可根据周围环境特点和需要实现路、景、物美化协调,人与工程环境和谐共存。

(6) 施工简便:墙面板和其他构件均可以预制,现场可用机械(或人工)分层拼装和填筑。除需要配置压实机械外,施工时一般不需要配备其他机械,易于掌握,节省劳力,缩短工期。

(7) 节约占地:由于墙面板可以垂直砌筑,可大量减少占地。

目前,国内外对加筋土挡墙结构的研究几乎都集中在加筋土挡墙结构的内、外稳定性方面,如加筋体系的位移、加筋的强度和徐变特性、加筋的使用期限以及加筋土挡墙结构的稳定性、加筋与填料之间的摩擦性状等,但有关于连接方式和面板弯曲刚度对该系统性能的影响的研究报告却很少见;而且,对于加筋,由于使用销和接头作为面板和钢筋之间的连接,应力集中会发生在连接区域周围的面板和面板附近的加筋中,因此,在面板或靠近面板的加筋上必然会出现由拉力引起的断裂。在施工现场发生的加筋墙的破坏实例表明,其破坏总是发生在连接部位,因此可以说,该部位是加筋层中最薄弱的部位。

根据上述讨论的基础,确定本研究的目的主要是研究面板抗弯刚度、加筋一面板的连接形式对加筋土挡墙系统的面板、填料、加筋的位移行为和拉力的影响,试验研究采用离心模型试验,数值解析采用二维有限元商用程序。在保持加筋的横向、竖向间距和刚度,填料强度、地基刚度等参数不变的情况下,通过系列的室内试验和有限元分析,确定连接类型如何影响加筋土挡墙的加筋带内拉力分布,面板刚度如何影响加筋土挡墙的变形行为等。

为了测定加筋土挡墙系统的各种变化,在试验模型制备期间及之后,在设计的模型上安装了测量仪器。随着离心加速度的增加,并用计算机同步记录位移计和应变片的测量结果。按照加筋土挡墙的实际结构,建立有限元计算分析模型,分析所确定的参数变化对墙体变形及力学性能的影响,在此基础上,对试验结果进行了比对、验证。

1.2 研究概况

现代加筋土自 1963 年由法国工程师 H.Vidal 提出并命名为“加筋土”以来,其发展主要有以下几个标志性事件:

现代加筋土技术 1963 年由法国工程师 H.Vidal 提出,他通过观察鸟类用草和泥筑巢的过程启发了加筋土体的念头,首次引入了“加筋土”(reinforced earth)技术,初步分析了加筋的机理,并为土体加筋设计与计算提供了一套分析方法,从而为加筋土技术开辟了更加广阔的应用前景。自此以后,1965 年,在法国 Pragnères 修建了第一道挡土墙。1968 ~ 1969 年在法国南部的 Roquebrune-Menton 公路上建造使用了第一组复合结构。在不稳定斜坡上修建 10 道挡土墙,挡土墙总面积 5520m²。1972 年在美国 1 号高速公路桥墩上第一次使用加筋土(高 14.0 m)。1972 年在美国洛杉矶东北加利福尼亚州 39 号高速公路上修建第一座加筋土墙,与传统的路基换填方式相比,使用加筋土在山坡基础条件上修建公路路基,显著降低了成本。

经过四年的项目试验,1974年年底美国联邦公路管理局将加筋土所属种类由“试验类”批准为经济和安全类以替代其他支护技术。

加筋土挡墙技术发展突破表现为材料上的两大进步:第一,1971年开始采用混凝土面板(大多数加筋土结构现在仍沿用这种面板结构);第二,1975年开发的带肋钢筋条带(这些条带由普通低碳钢制成,与传统光滑的条带相比,能够大幅度提高土体和钢筋之间的摩擦传递能力)。

目前,加筋土结构广泛应用于挡土墙、海洋结构、水库堤坝、桥台、基础持力层、扶壁墙地基、其他维持和支撑荷载结构。

截止到现在,大量的、持续的研究和试验,为加筋土结构的快速发展作出了突出贡献。研究主要集中于:

- (1) 土体加固的基本机理;
- (2) 加筋土结构的破坏机理;
- (3) 正常工作条件下结构的力学和变形行为;
- (4) 设计理论和计算方法的完善;
- (5) 埋设在土中的金属加筋材料的腐蚀和耐久性问题;
- (6) 加筋土结构的动态变形特性和抗震能力;
- (7) 外观造型和美学改进;
- (8) 新应用领域的扩展。

在对前人关于加筋摩擦特性研究工作评价的基础上,Jewell(1980)研究了筋—土剪切面和筋材坡度对加筋拉伸性能的影响;Juran等(1988)将筋—土荷载传递模型理论扩展到填料为黏性土的情形,并测试了该理论对黏土的正确性。Giroud等(1993)研究了随着接触应力的变化,筋—土之间的剪切特性;Bacot等(1978),Schlosser、Elias(1978),Ingold(1982,1984),Sridharan、Singh(1984,1986,1988),Kate等(1988),Rao、Panday(1988)等诸多学者进行了多种尺寸的拉拔试验,以验证筋——土之间剪切作用特性模型。Costalonga(1988)和Fannin、Raju(1991)等声称,在拉拔试验中,加筋材料在失效表面出现了渐进式破坏现象;Palmeira E.M.和Milligan(1989)以及Srinivasa Murthy(1993)等对试验仪器尺寸和剪切面粗糙度对试验结果的影响进行了测试,但到目前为止,仍没有提出拉拔设备的标准尺寸。

Bolton(1978)最早利用离心模型试验研究加筋土挡墙,目前离心模型试验已经比较广泛地用于研究加筋土挡墙的性质。Wong等(1994)对配置聚合物加筋层的加筋挡土模型进行了离心缩尺模型试验。其后,Sawicki(1987)和Porbaha(2000)等进行了离心模型试验,在导致模型破坏的过程中,在加筋体表面施加附加荷载。章为民等(2000)通过24组离心模型试验,对加筋土挡墙的主要工作机理作了探讨,包括破坏形式、破坏面、不同的加筋设计参数(间距、强度、长度、地基)对加筋土挡墙的影响,试验表明:加筋土挡墙的破坏面接近对数螺旋线;采用0.3H型破坏面较Rankine破坏面更为合理;加筋强度、加筋间距、填土强度与加筋土挡墙强度的关系基本符合准黏聚力理论,呈正相关;有一定的加筋锚固长度是必要的,此长度取决于筋土界面的摩擦特性及上覆土重;一定范围内基础对加筋土挡墙安全影响不大。

郑仁中等 1979 年首次将加筋土工法引入韩国。1980 年在京畿道永宁郡修建的第三条国家高速公路上,首次使用加筋土修建试验性挡土墙。

即使在韩国,与发达国家相比,加筋土的研究工作仍然不足。虽然已经能够生产加筋材料,但韩国使用的材料仍然主要依赖于从其他国家进口。由于设计和施工标准与其他国家的不同,在设计和施工过程中以及之后出现了许多问题。

Jo 等 (1995) 对加筋土合理的分析和设计方法进行了研究; Karpurapu 等 (1995) 开展了加筋土挡墙数值模拟研究; Kim 等 (1996) 开展了加筋土挡墙性能研究; Kim 等 (1998) 开发了用于加固挡土结构分析 / 设计的计算机程序。基于试验性挡土墙的观察结果, Kim 等 (2004) 提出了加筋的拉伸应变和分离式刚性块式面板上的侧向压力分布。Kim 等 (2005) 给出了加筋系统的连接强度,并提出了影响面板抗剪键、土工格栅节点强度和加筋强度的因素;采用满足模型相似律的物理模型试验方法——离心模型法,建立了缩尺模型,并进行了系列离心模型试验,探讨了模型的破坏机理,验证了目前所使用的设计方法的适当性。

近年来,由于社会发展的需要,各种各样的加筋土挡墙得到了迅速的发展,相应的分析程序也随着时间的推移而不断变化,可以说,加筋土结构的研究将成为一个新的研究领域,并将会有所突破。

1.3 研究方法和范围

本研究采用两种方法对上文所述内容进行研究,第一是对制备的加筋土挡墙模型实施离心试验,第二是建立与离心模型加速度对应尺寸的现场加筋土挡墙的有限元模型,进行有限元分析。

离心模型试验包括:①模型断面设计;②填料的选取;③面板及配筋的准备;④模型制备;⑤测量仪器安装及模型就位;⑥离心试验;⑦试验结果讨论。

本研究以广泛分布于韩国土地上的风化花岗岩土为加筋土回填材料,进行了六种工况下的离心模型试验。试验模型制备步骤为分层压实、加筋铺设、铺设压实下一层填料,如此反复直至设计高度,完工模型高度为 24cm。为了使加筋土沉降量相对较小,且又便于观测和测量,本研究选取模型填料的压实度为 80%。

模型选取的加筋条为铝箔,宽度为 10mm、长度为 18mm、厚度为 0.020mm,按设计间距铺设在模型中,其中,加筋条垂直间距为 40mm,水平间距为 45mm,故模型中加筋条的数量为水平方向 3 行、垂直方向 5 行。

按照预先设计,模型墙挡土面板使用铝板,其厚度分别为 2、4、6mm,用以模拟不同抗弯刚度的面板,并构建相应的模型,以通过离心模型试验探明面板抗弯刚度的变化对加筋土挡墙系统各项性能的影响。

本研究利用缩尺模型试验,探明加筋和挡板的连接形式对加筋土挡墙系统各项性能的影响,本试验分为固定型连接和移动型连接两种形式,每种连接形式包括 3 个面板厚度 (2、4、

6mm) 的子试验。每个模型完成后,在模型墙上安置测量器具,用于测量挡土系统的各种变形、应变等。位移由安装于面板或基础表面上的位移计测量;加筋条的局部应变由粘贴于预先设定的加筋层的应变片测量。

有限元分析使用荷兰 BV 公司开发的 PLAXIS 程序,模拟逐层填筑填料直至该墙体在自重作用下,达到预定高度或达到破坏的过程,并由此分析整体式刚性面板加筋土挡墙的各项性能。建成的模型为二维,填土破坏遵循 Mohr-Coulomb 准则,面板和补强单元遵循弹性准则。选择有限元模型计算输出的相应数据,与对应离心机模型试验中记录的数据如位移、加筋拉力等进行比较,以验证试验结果的科学性、合理性、准确性,并验证有限元分析时材料本构关系、建模思路的正确性。

2 加筋土及其结构的基本理论

2.1 加筋土

2.1.1 加筋土的定义

土是地球上最丰富和最便宜的建筑材料。在长期受压状态下，许多土体在适当的密实度和含水量情况下，可以变得足够坚固，具有一定的承载能力。和普通硅酸盐水泥混凝土一样，土体的抗拉能力很弱，这就限制了纯土体结构在某些领域的应用（如当斜坡的坡度比土的内摩擦角更大（ 30° 以上）时）。在素混凝土内配置受拉性能较好的钢筋，两种材料性能取长补短，则成为一种新的复合材料——钢筋混凝土。而在具有一定抗剪强度的土体内掺入纤维或铺设加筋材料，可以不同程度地改善土体的强度和变形特性，形成加筋土。从材料特性或几何形状，或两者综合来看，两种材料的相容性是土体加筋复合材料成功最重要的特征，使得应力从一种材料传递到另一种材料，类似于钢筋混凝土中混凝土与钢筋之间的良好的粘结。

土体内配置受拉加筋材料对干砂坡面稳定性的影响，和加筋土的概念如图 2-1、图 2-2 所示。图 2-1 所示为干态砂能保持的最陡坡度；图 2-2 显示在相同的干砂情况下，把纸带作为加筋材料对坡面稳定性的影响。需要注意的是，为了防止砂粒从加筋区域漏出，纸带应向上折叠作为挡土面板以保持左右端垂直，但不能作为重要的结构或承载构件。水平纸带作为必要的加筋材料，能够向复合材料提供较大的“黏聚力”，表现为破坏复合角度的增大。



图 2-1 干砂最陡坡度

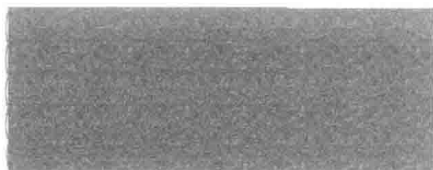


图 2-2 加入纸带的干砂影响图

同样，在现有的地面和堤坝也可以通过在土内设置加筋或采用加筋包裹的方法进行加固，以增加边坡的自然稳定性，维护堤坝的边坡安全，使得垂直开挖成为可能，或垂直坑壁免内支撑等。

2.1.2 加筋土的历史

鸟和动物出于本能都会在土中加入草屑、树枝等筑巢；人类早期对土体加固原理的应用，可能是建立在理论研究的基础上，但更有可能用经验方法建造，如 Agar Quf 神塔的建造。19 世纪 Pasley 的关于加筋土的经验性建议是建立在大量试验结果基础上的，其应用在较小范围相对有效。但是，仍需行之有效的理论来描述基本加筋土系统的基本特性。

1924 年，Coyne (1927、1945) 提出了“Coyne 梯墙”，在梯墙中配置了一系列加筋单元，该加筋单元一端与面板连接，另一端具有锚座，形成了加筋土结构 (图 2-3)。

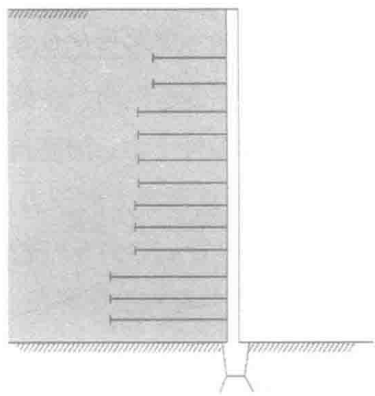


图 2-3 Coyne 梯墙

Coyne 用 Howe 梁来比拟解释他的“Coyne 梯墙”加筋土结构的机理 (图 2-4)。Howe 梁与常用的桁架不同。对于 Howe 梁，铅直构件与底部构件受拉，对角构件与顶部构件则受压。如果将 Howe 梁逆时针旋转 90°，就成了一个“梯子”，如图 2-5 所示。Coyne 认为，此时的水平加筋件相对于 Howe 梁中的竖杆，承受拉应力；而填土本身则可起到 Howe 梁斜杆的作用，承受压应力；梯墙的面板 AC 承受压应力；而相当于 Howe 梁底杆的 BD，虽然受拉，但因受填土自重的作用，实际上无需另设受拉构件。这样，整个“梯墙”ABCD 就好像组成了一个内部稳定的完整体系。

早在 1972 年，哈里森 (Harrison) 和格拉德 (Geward) 就提出把正交各向异性材料的弹性理论用于加筋土。假定加筋土是由无限薄、刚度无限大的紧密布设平行材料加筋的软土层，该理论是建立在 Westergaard (1938) 提出的加筋媒体的等效特性和塞拉蒙 (Salamon) 发展的有关等效均匀材料的弹性特性的计算方法基础之上的，采用半空间正交各向异性材料在点荷载、带状荷载和循环荷载作用下的已知解就可求得加筋体系中的应力和位移。这种方法假定土和筋都是线弹性体，弹性模量和泊松比都是一个常数，但实际上土是一种弹塑性体，即使在小变形时，也应考虑其非线性性质。对加筋材料而言，一般都是具有一定厚度，刚度也非无限大的，所以这种方法仅仅可作为粗略估算加筋土体的应力变形特性的一种简化方法，它的计算结果与实际情况相比会有较大的误差。

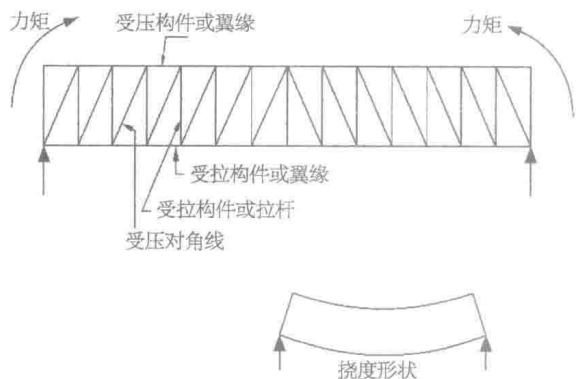


图 2-4 Howe 梁

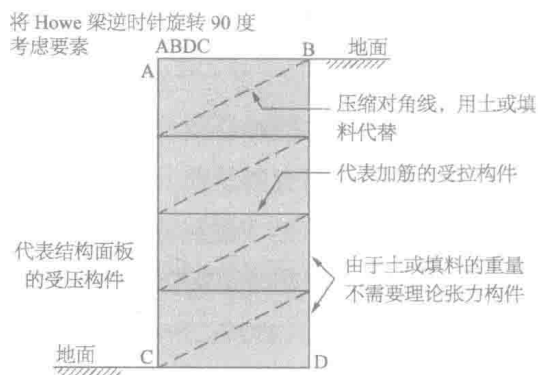


图 2-5 Coyne 梯墙的 Howe 梁分析

加筋土与钢筋混凝土的原理类似。在加筋土中配置的加筋条与土体粘结，而在钢筋混凝土中钢筋与混凝土之间存在握裹力；但二者又不完全相同，在钢筋混凝土结构中，设置钢筋的目的是承受拉力，而对于加筋土，特别是在非黏性土中，加筋条极有可能处于承受完全压应力区域。因此，土体中加筋的承载模式不是承受逐渐增大的拉力，而是非等向地降低或抑制土体的一个正常应变速率。Vidal (1963, 1966, 1969 a, 1969 b) 描述了这种抑制机理，并以图解（图 2-6）的方式进行了说明，图中显示了单个土体颗粒被捆绑在一起，产生了准黏聚力形态。

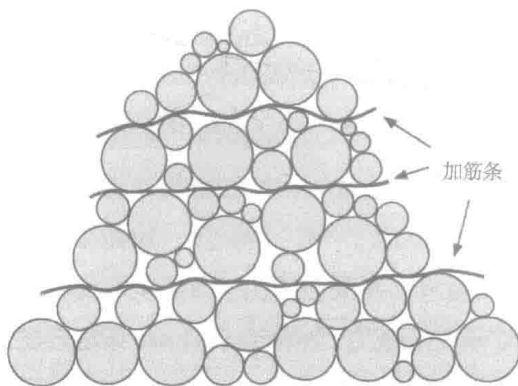


图 2-6 加筋土图示

考虑处于半无限空间非黏性土地基深度 H 处，某计算点由自重应力引起的垂直方向土的应力为：

$$\sigma_v = rH \quad (2-1)$$

此时，该计算点的静止土压应力为：

$$\sigma_H = K_0 rH = K_0 \sigma_v \quad (2-2)$$

式中 K_0 ——静止土压力系数, $K_0 \approx 1 - \sin \phi$;
 ϕ ——土的内摩擦角。

当紧邻计算点外侧土体水平向外平移时, 则侧向应力 ($\sigma_H = K_0 \sigma_V$) 逐渐减小, 直至其极限值 (图 2-7), 如式 (2-3) 所示。

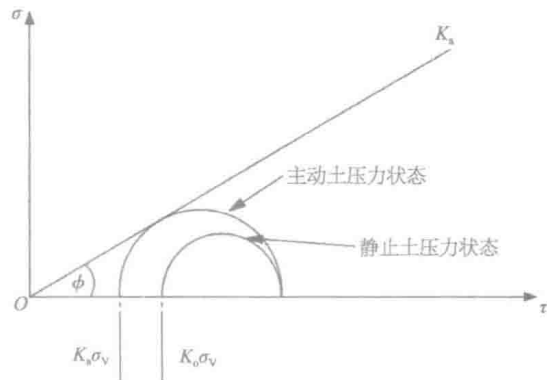


图 2-7 土体应力状态

$$\sigma_H = K_a \sigma_V \tag{2-3}$$

式中 K_a ——主动土压力系数。

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \tag{2-4}$$

考虑无黏性土的任意一个计算单元, 用以说明加筋土中加筋的作用及加筋和周围材料的相互关系 (图 2-8)。如果在土体上施加如图 2-8 (a) 所示的垂直载荷, 该单元将出现轴向压缩 ε_v 、横向膨胀拉伸 ε_h 的变形。如果将弹性模量远大于土体的加筋材料分层平铺到土体单元中 (图 2-8b), 土体和加筋条之间由于存在摩擦或其他结合方式, 二者之间必然产生粘结或相互作用。土体变形受到较大加筋条的约束和限制, 加筋条所受的张力大小与静止土压力 ($\sigma_H = K_0 \sigma_V$) 相等, 方向与之相反。即加筋的作用是限制计算单元某一方向的正常应变 (ε_0); 前述讨论是对一般条件, 对任何大小的垂直应力值 σ_V 都有效, 可以看出, 随着 σ_V 增加侧向应力也增加。由图 2-7 可以看出, 在土体加筋条件下, 应力圆始终位于抗剪强度包络线下方, 当加筋断裂或加筋与土体之间的粘结破坏 (即拔出破坏) 时, 加筋后的土体单元才会发生破坏。

基于以上讨论可知, 从土体单元传递到加筋中的力等于土的侧向应力, 即 $\sigma_H = K_a \sigma_V$, 因此, 任何加筋单元的拉应力

$$\sigma_{Hi} = \frac{K_a \sigma_V}{a_i} \tag{2-5}$$