

植物护坡原理与 数值模拟研究

ZHIWU HUPU YUANLI YU SHUZHI MONI YANJIU

田 佳◎著



黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

植物护坡原理与 数值模拟研究

ZHIWU HUPO YUANLI YU SHUZHI MONI YANJIU

田 佳◎著



黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

植物护坡原理与 数值模拟研究

ZHIWU HUPO YUANLI YU SHUZHI MONI YANJIU

田 佳◎著



黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

植物护坡原理与数值模拟研究 / 田佳著. -- 银川:
宁夏人民出版社, 2021.5

ISBN 978-7-227-07467-0

I. ①植… II. ①田… III. ①植物-护坡-研究
IV. ①U417.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 101767 号

植物护坡原理与数值模拟研究

田 佳 著

责任编辑 杨敏媛

责任校对 陈 晶

封面设计 沈家菡

责任印制 马 丽



黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

出版发行

出 版 人 薛文斌

地 址 宁夏银川市北京东路 139 号出版大厦 (750001)

网 址 <http://www.yrpubm.com>

网上书店 <http://www.hh-book.com>

电子信箱 nxrmcbs@126.com

邮购电话 0951-5052104 5052106

经 销 全国新华书店

印刷装订 宁夏银报智能印刷科技有限公司

印刷委托书号 (宁) 0020841

开本 787 mm × 1092 mm 1/16

印张 8.5

字数 130 千字

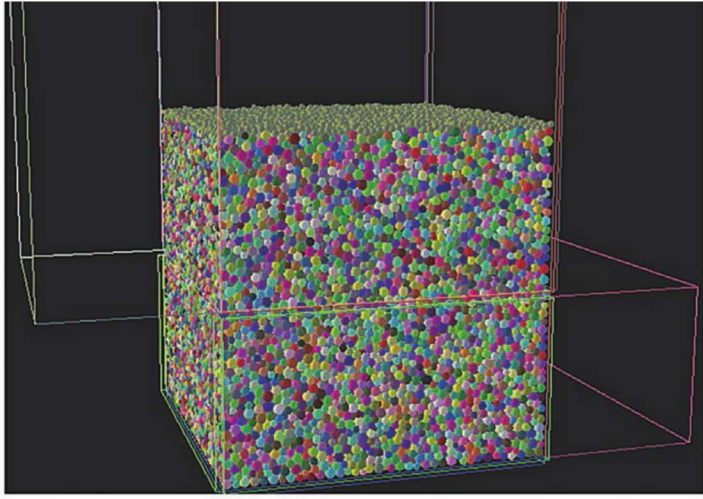
版次 2021 年 6 月第 1 版

印次 2021 年 6 月第 1 次印刷

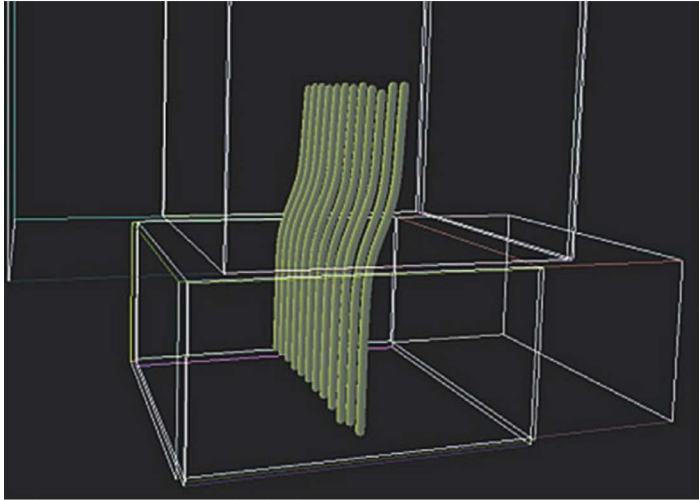
书号 ISBN 978-7-227-07467-0

定价 38.00 元

版权所有 侵权必究



(a) 土壤被离散为刚性局部可变形的球体集合

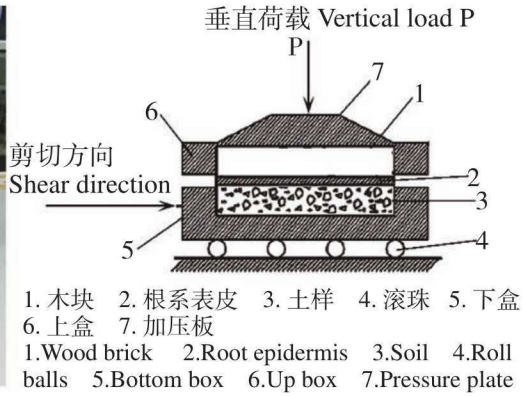


(b) 根系被离散为可变形的圆柱体集合

图 1-8 根系固土的离散元模型 (Bourrier *et al.*, 2013)



a. 试样制作
a. Sample preparation



b. 直剪摩擦试验示意图
b. Drawing of direct shear friction tests

图 3-1 根 - 土界面直剪摩擦试验试样制作及装置示意图

应力, Mises 应力
S, Mises (平均: 75%)

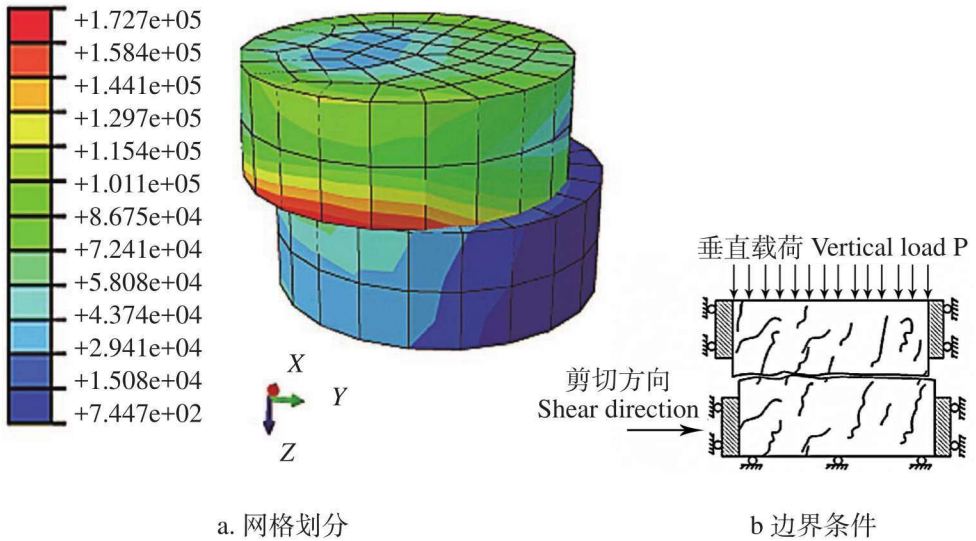


图 3-2 根 - 土界面直剪摩擦试验有限元网格划分与边界条件

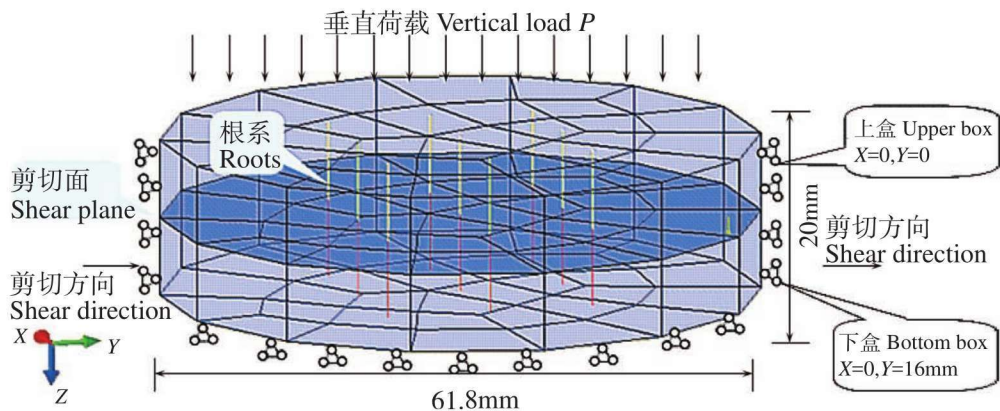


图 4-3 花棒根 - 土复合体直剪试验有限元数值模型

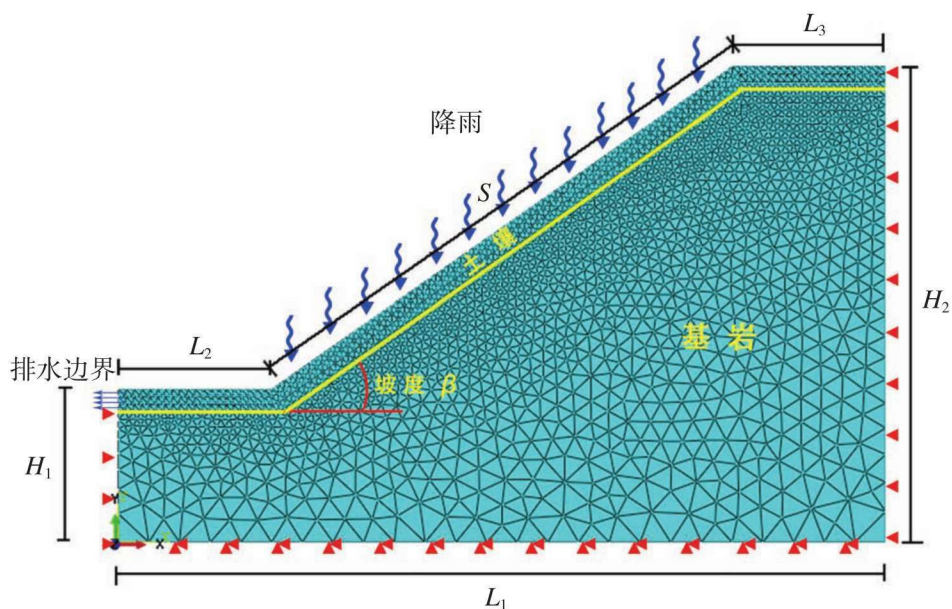


图 5-2 贺兰山水土保持林边坡稳定性计算有限元模型

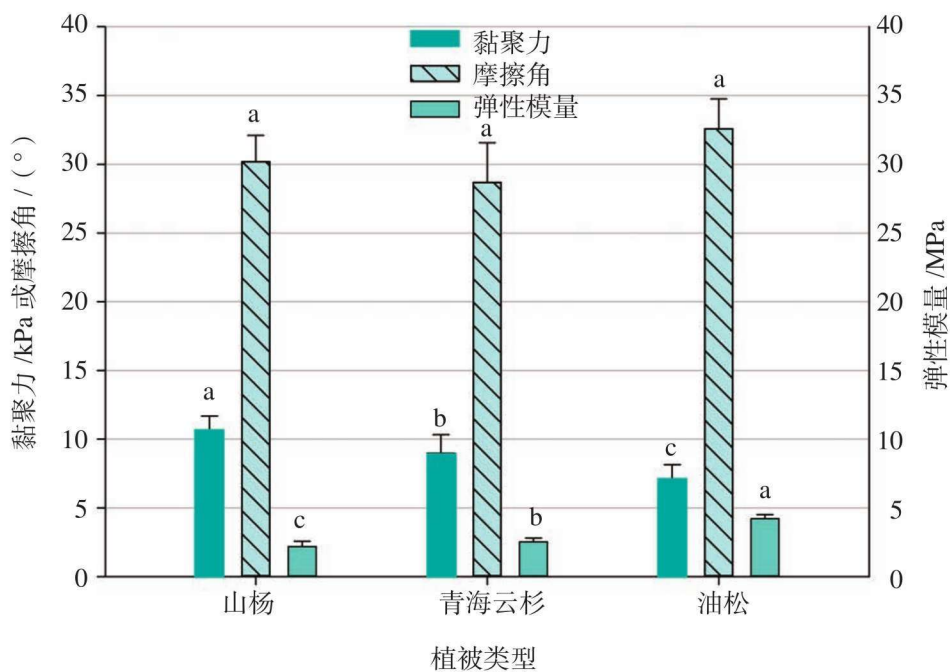


图 5-6 根 - 土复合体的强度指标比较

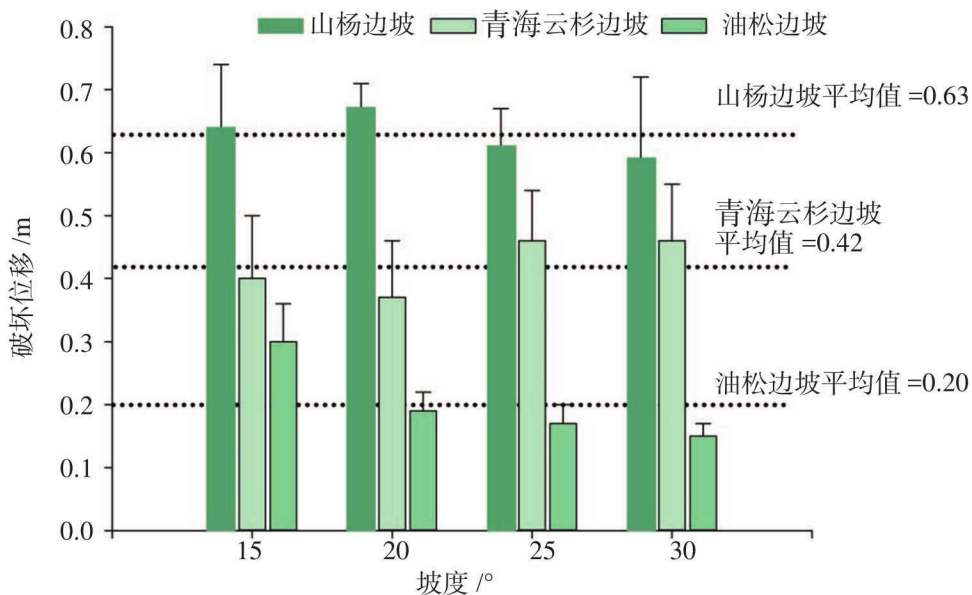


图 5-9 降雨条件下贺兰山 3 种乔木林边坡的平均破坏位移

前 言

国内外很多学者研究表明，植物根系及其形成的根-土复合体具有防治浅层滑坡和减少土壤侵蚀的作用，植物护坡作为工程护坡措施的辅助手段目前已经广泛应用于各类边坡防护工程当中。因具有防治成本低、景观美化效果和环境效益突出等优点，在越来越注重生态环境保护、人与自然和谐发展的今天，植物护坡正逐步成为国内外普遍采用的浅层滑坡和水土流失治理技术。与传统的通过野外和室内试验进行根系固土研究相比，数值模拟方法在时间、费用、复杂程度和可重复性上具有较大的优势，特别是基于有限元理论的数值模拟方法由于其模拟精度较高，应用也越来越广泛。本书试图介绍如何将有限元方法及软件应用在传统根系固土研究中，并为该领域研究寻找新的突破口提供参考。

本书写作过程中得到了国内根系固土领域多位专家、学者的大力支持和协助，特别感谢北京林业大学的赵廷宁教授、陈丽华教授、及金楠副教授、黄建坤副教授给予的学术支持，也感谢硕士研究生杨泽康为本书的校对付出的劳动。本书的出版得到了国家自然科学基金地区项目“降雨入渗下的宁南山区黄土梯田稳定性及优化设计研究”（31960330）和“贺兰山水土保持功能乔木根系锚固土壤作用与数值模拟研究”（31560232）的资助，这里对国家基金委表示由衷的感谢。

目 录

1 植物根系固土作用原理与模型研究

1.1 理论模型	002
1.1.1 Wu 模型和倾斜根系模型	002
1.1.2 位移模型	004
1.1.3 纤维束模型	007
1.1.4 根束增强模型	009
1.1.5 能量模型	010
1.1.6 渐近均匀化模型	012
1.2 数值模型	018
1.2.1 有限元数值模型	018
1.2.2 离散元数值模型	022
1.3 展 望	025

2 根系生物力学特性研究

——以花棒和沙柳生物力学特性研究为例

2.1 材料与方法	030
2.1.1 研究区域概况	030
2.1.2 单根拉伸试验	031

2.2 结果与分析	034
2.2.1 单根根系生物力学特性.....	034
2.2.2 整株根系垂直拉拔试验结果.....	038
2.3 讨论.....	040
2.3.1 单根的力学性质与直径的关系.....	040
2.3.2 拉伸试样预处理对试验结果的影响.....	041
2.3.3 影响整株根系最大垂直拉拔力的因素.....	042
2.4 结论.....	043

3 根 - 土界面摩擦特性研究

——以花棒和沙柳根 - 土界面摩擦特性研究为例

3.1 材料与方法	047
3.1.1 研究区域概况.....	047
3.1.2 试验材料采集与特性.....	047
3.1.3 试验土壤制备.....	047
3.1.4 试验仪器与试验方法.....	048
3.1.5 直剪摩擦试验的有限元数值模拟.....	049
3.2 结果与分析	052
3.2.1 摩擦界面类型对摩擦特性的影响.....	052
3.2.2 土壤含水率对摩擦特性的影响.....	052
3.2.3 根 - 土界面抗剪强度和垂直荷载的关系	054
3.2.4 根 - 土界面剪应力与剪切位移的关系及其数值模拟 ..	056
3.3 讨论.....	057
3.3.1 摩擦界面类型与土壤含水率对摩擦特性的影响.....	057

3.3.2	不同界面摩擦特性的数值模拟·····	062
3.4	结 论·····	064
4	根 - 土复合体力学特性研究	
	——以花棒根 - 土复合体力学特性研究为例	
4.1	材料与方法 ·····	066
4.1.1	花棒根 - 土复合体直剪试验有限元数值模型 ·····	066
4.1.2	根系表观黏聚力的计算·····	071
4.1.3	花棒根 - 土复合体直剪验证试验 ·····	072
4.2	结果与分析 ·····	072
4.2.1	根系表观黏聚力与根截面积比·····	072
4.2.2	花棒根 - 土复合体抗剪强度相对于素土抗剪强度的 增长率 ·····	073
4.2.3	花棒根 - 土复合体剪应力与剪切位移 ·····	075
4.2.4	数值模型的试验验证·····	075
4.3	讨 论·····	077
4.3.1	根系提高土壤抗剪强度的影响因素·····	077
4.3.2	根 - 土复合体的直剪试验与数值模拟 ·····	078
4.4	结 论·····	079
5	根系固土在边坡稳定中的应用	
	——以宁夏贺兰山 3 种水土保持乔木树种为例	
5.1	材料与方法 ·····	083
5.1.1	研究地点·····	083

5.1.2 土壤和单根的获取·····	083
5.1.3 根 - 土复合体的三轴压缩试验与土水特征曲线的获得···	084
5.1.4 边坡稳定性有限元计算模型的建立·····	087
5.2 结果与分析·····	092
5.2.1 单根力学特性·····	092
5.2.2 根 - 土复合体的力学特性·····	095
5.2.3 不同坡度和降雨强度条件下的边坡破坏时间·····	097
5.2.4 降雨条件下的边坡破坏位移·····	102
5.3 讨论·····	104
5.3.1 影响植物单根力学特性的因素·····	104
5.3.2 植物根系对根 - 土复合体力学特性的影响·····	105
5.3.3 土水特征曲线的获取方法·····	106
5.3.4 边坡降雨入渗过程与边界条件·····	107
5.3.5 植物根系对土壤的固持作用·····	108
5.3.6 植被对边坡破坏位移的影响·····	109
5.4 结论·····	109
参考文献·····	111

1 植物根系固土作用原理与模型研究

中国是一个多山的国家，存在着大量的自然边坡，滑坡等重力侵蚀相当严重。中国的滑坡以浅表层滑坡最为常见，约占全部类型的 2/3 (宋维峰等, 2011)。国内外很多学者研究表明，植物根系具有稳定边坡和减少土壤表面侵蚀的固土作用 (周德培等, 2003; Wu *et al.*, 1979; Waldron and Dakessian, 1981; Operstein and Frydman, 2000; Lin *et al.*, 2010)，并且已经应用到实际工程当中。植物的根系被用来加固土壤最早可以追溯到中国明朝时期，欧洲最早使用植物来固坡是在 19 世纪，在现代工程中的实际应用则是从 1936 年开始的 (刘秀萍, 2008)。因具有防治成本低、景观美化效果和环境效益突出等优点 (胡夏嵩等, 2009)，在越来越注重生态环境保护、人与自然和谐发展的今天，植物护坡正逐步成为国内外普遍采用的浅层滑坡和水土流失治理技术 (Mao *et al.*, 2012)。为了量化和评估根系加固土壤和边坡的效果，经过近 40 年的研究，多种根系固土作用的力学模型应运而生。从简单的极限平衡模型到复杂的有限元模型 (Finite Element Model) 和离散元模型 (Discrete Element Model)，根系固土作用的模型目前已发展到 10 余种 (Gray and Leise, 1982; Shewbridg, 1990; Abe, 1991; Fan, 2008; Pollen,

2005; Fan, 2012; 黄建坤等, 2020)。总结这些根系固土作用模型对揭示根系固土的力学机制和计算分析林地边坡的稳定性具有重要的意义, 同时对根系固土作用模型发展的未来方向也具有积极的指导意义。

本书对根系固土作用模型分两方面介绍: 第一, 主要介绍根系固土作用的理论模型, 包括 Wu 模型以及在 Wu 模型基础上的倾斜根系模型、位移模型; 纤维束模型、根束增强模型、能量模型、渐进均匀化模型; 第二, 主要介绍根系固土作用的数值模型, 包括有限元数值模型和离散元数值模型。

1.1 理论模型

1.1.1 Wu 模型和倾斜根系模型

第一个根系固土的力学模型, 最早由 Wu 等在 1979 年提出 (即 Wu 模型)。Wu 模型是一种简单的基于力学平衡的评价垂直根系固土作用的模型 (图 1-1-a), 1982 年 Gray and Leiser 在 Wu 模型的基础上提出了倾斜根系的固土模型 (图 1-1-b), 这种模型虽然比较简单, 但是对认识根系与土壤的相互作用有着很好的帮助。在 2 种模型中将根系加固土壤的原理用 Mohr-Coulomb 准则的变形来表述, 即方程 (1-1):

$$\tau_{rs} = \Delta S_R + c_s + \sigma \tan \phi \quad (1-1)$$

式中: τ_{rs} ——含根 - 土的抗剪强度, Pa;

ΔS_R ——由根系提供的抗剪强度, Pa;

$c_s + \sigma \tan \phi$ ——Mohr-Coulomb 准则的基础项, Pa。

根系固土作用的原理实际上就是根系增加了土壤的抗剪强度。图 1-1-b 反映了当土壤受到剪切时, 倾斜根系在土壤中的应力和位移的变

化, 这个过程可以由方程 (1-2) ~ (1-4) 来表达:

$$\Delta S_R = t_R [\sin(90^\circ - \psi) + \cos(90^\circ - \psi) \tan \phi] \quad (1-2)$$

$$t_R = T_R \frac{A_R}{A} \quad (1-3)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{1}{(m + (\tan i)^{-1})} \right] \quad (1-4)$$

式中: t_R ——由于根系作用单位土壤面积上的拉力, N;

ψ ——剪切变形角, $^\circ$;

ϕ ——土壤的内摩擦角, $^\circ$;

T_R ——土壤受到剪切时根的拉应力, Pa;

A_R ——穿过土壤剪切面的所有根系的截面积之和, m^2 ;

A ——土壤剪切面的面积, m^2 ;

A_R/A ——根面积比 (root area ratio);

i ——根系在剪切面上的初始倾斜角, $^\circ$;

m ——剪切变形比 ($m=x/z$);

x ——剪切位移, m;

z ——剪切区域的宽度, m。

这种力学平衡的模型假设在剪切过程当中, 剪切宽度是不变的 (也就是不考虑剪胀作用)。通常情况下, $48^\circ < \psi < 72^\circ$, $\sin(90^\circ - \psi) + \cos(90^\circ - \psi) \tan \phi$ 的值约等于 1.2, 从而方程 (1-2) 可以被简化为方程 (1-5):

$$\Delta S_R = 1.2 t_R \quad (1-5)$$

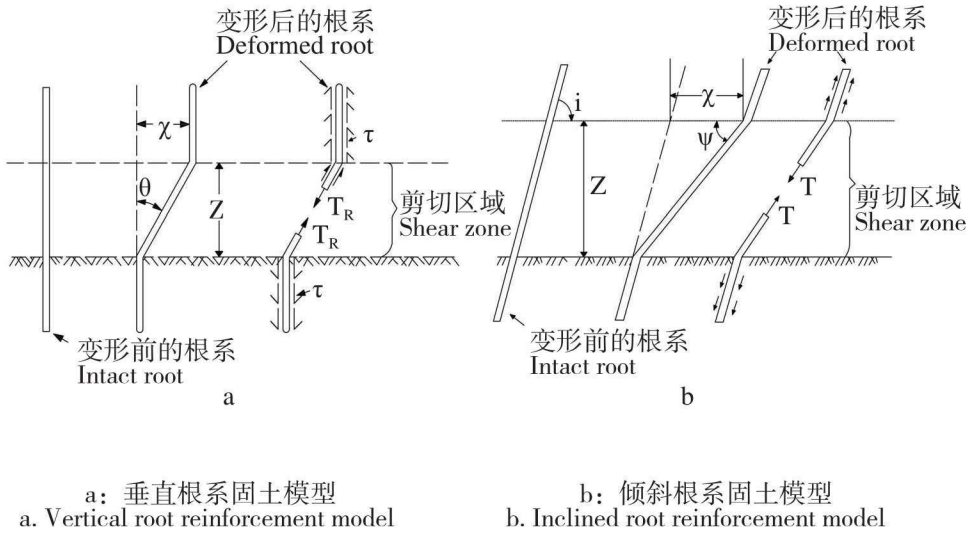


图 1-1 垂直和倾斜根系的固土模型 (Gray and Leiser, 1982)

Fig.1-1 Root reinforcement models for vertical and inclined roots

Wu 模型和倾斜根系模型原理清晰易懂，计算简单，在实践中得到了广泛的应用。但是模型假设所有根系在受拉时同时瞬间断裂，根系的固土作用被高估了。因此，Wu 模型和倾斜根系逐渐被考虑到根系渐进断裂的纤维束模型所取代。

1.1.2 位移模型

2008 年 Fan 和 Su 在前人研究的基础上总结出了基于剪切位移的根系固土作用模型，该模型认为不同长度的根系在土壤受到剪切时，将会出现不同的变形模式，如拉伸 (stretching)、滑动 (slippage) 和断裂 (breakage)，而且这些模式也可能同时发生。模型认为根系中的根对土壤抗剪强度的贡献是不同的，土壤抗剪强度的增加应该是根系中各种变形模式的根的固土能力之和，可以用方程 (1-6) 进行表达：