

植物根系固土护坡机理的研究进展及展望

周云艳, 陈建平, 王晓梅

中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: 在综合国内外相关研究成果的基础上, 详细介绍了近几年来植物根系固土护坡机理的研究进展。文章分别从水文效应和力学效应 2 个方面对根系固土护坡机理进行了介绍, 并着重从根增强的理论模型、根-土相互作用等方面论述了植物根系固土护坡的力学效应。首先介绍了根增强理论的先驱模型 Wu 和 Waldron 模型, 文章从多方面论证了 Wu 和 Waldron 模型假定穿过剪切面的所有根在受力时同时破坏高估了根的增强作用, 详细介绍了国外学者对 Wu 和 Waldron 模型改进后, 最新提出的 2 种考虑根系逐渐破坏的力学模型——纤维束增强模型 FBM 和根束增强模型 RBM。FBM 模型用动态纤维束来模拟根系的渐进破坏, 假设荷载被分配给束中的每个根, 当荷载增加到其值超过了某单根的抗拉强度时, 该根被拉断, 而被该根分担的荷载被重新分配到剩下的完好的根中, 直到所有的根都拉断。该模型使用应力控制的加载过程, 不能得到完整的力-位移关系曲线; 且该模型中没有考虑根的直径分布、几何性质、力学性质等的影响。为了克服上述缺陷 Schwarz 在 FBM 模型的基础上, 又提出了 RBM 模型。RBM 模型是一个以位移控制加载过程的纤维束模型, 该模型考虑整个根束的拔出力是位移的函数, 并被表示成单根的拔出力之和。文章最后详细论述了根系的拔出机理, 探讨了植物根系固土护坡研究的发展方向。

关键词: 根系固土; 力学效应; 纤维束增强模型; 根束增强模型; 根-土相互作用

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 06-1171-07

边坡地质灾害包括各种滑坡、崩塌及普遍存在的水土流失等。我国是世界上滑坡较多的国家之一, 同时也是世界上水土流失最为严重的国家之一。随着国民经济的蓬勃发展, 资源开发和大规模的基础设施建设中产生了大量的人工边坡, 造成严重的水土流失和土地沙化, 加剧了生态系统的退化, 随着建设规模的增大, 已不再是某一地区或一定范围内的局域性问题, 而是影响到我国生态环境建设总体目标实现的全局性问题^[1]。如何实现经济建设与环境保护兼顾的可持续发展战略目标是一个急需研究和解决的课题。过去, 为了防止边坡发生失稳破坏, 常采用土木工程措施进行护坡, 但却使得边坡原有的自然植被永远不能恢复, 对生态造成永久性破坏^[2]。植被具有改善生态环境、减少水土流失、涵养水源、固土固坡等其他工程措施所不具有的作用, 植被是一种既经济又环保的防治方法与措施, 具有不可替代的重要作用^[3]。2008 年 7 月在北京举行了地面生物和生态工程的第二次国际会议 (ICGBE2), 议题就是——应用植物来提高边坡的稳定性, 标志着采用植物方法来加固边坡已经成为一种新的必然的发展趋势, 是未来边坡防护发展的方向。而充分了解和认识植物根系的固土性能, 科学合理运用生物软措施代替或部分代替工程措施在我国繁重的生态环境保护和恢复的基本建

设工作中具有更加重要的应用价值和意义。近些年来, 植被护坡机理的研究在国内外也都取得了丰硕的成果。本文在综合国内外相关研究成果的基础上, 论述了近些年来植物根系固土护坡机理研究方面取得的进展及今后的发展方向。

1 植物根系护坡的作用

植物根系在增加边坡稳定、减少水土流失等方面有着很大的作用。通过根系吸水、植物的蒸腾作用, 能有效降低坡体孔隙水压力; 对坡体表面, 纵横交错的根网将土颗粒紧紧束缚住, 能有效抑制坡体表面土壤侵蚀; 对坡体内部, 根系和土体相互作用, 形成根土复合体, 增加土体的迁移阻力, 提高土层对滑移的抵抗力, 有效增加了含根土层的抗剪强度, 粗根对土体中张拉裂缝的桥连作用, 阻止了裂缝的繁衍, 有效增加了边坡的稳定性。

此外, 根系与土壤接触发生有机物质的胶结作用, 具有生理活性的吸收性根分解产生的糖类物质与土壤接触面的黏粒矿物发生生物化学作用, 能提高根土界面的摩擦作用, 提高土体的黏聚力^[4]。植物根系还具有“生物反馈”作用, 能通过增加土壤有机胶结物质及团粒结构等, 强化土壤通透入渗性能, 提高土壤结构及孔隙的稳定性^[5], 为生物的生存和繁衍提供了有利的场所, 还能改善土壤的污染。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41102228); 湖北省交通厅项目 (2004056056; 2004056061)

作者简介: 周云艳 (1977 年生), 女, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程与边坡防护方面的研究。E-mail: zhouyunyan369@sohu.com

收稿日期: 2012-04-16

2 根系固土护坡的机理

2.1 水文效应

2.1.1 根系提高土壤抗冲性的作用

根系在其生长发育过程中,分泌大量高分子粘胶物质和多糖类物质,这些物质存在巨大的粘结作用,能将土颗粒缠绕连接起来;同时,数量众多发达的须根系统形成纵横交错的根网,将土颗粒紧紧束缚包裹住,犹如施加了层层套箍作用,能有效保护土粒免于被冲蚀。国内外学者对植物根系增强土壤抗冲性方面的作用进行了较为深入的理论研究,指出根系强化土壤抗侵蚀能力主要通过根径 $<1\text{ mm}$ 的须根发挥作用,土壤的抗冲性与根系(根径 $\leq 1\text{ mm}$)的分布密度呈指数关系^[6-7]。

2.1.2 根系的水分运移作用

植物根系具有吸收土壤中的水分、降低土壤含水量、减小土壤孔隙水压力的作用。土壤有效水的消耗主要通过根系吸水,再由植物的蒸腾作用使水分消失掉,能有效降低土壤的含水量。根据 Reynolds 的报道,在亚马逊流域热带雨林区的 2 个典型盆地中,植被蒸腾量分别占到当地 2 000 mm 降水量的 62%~48%,高人等对辽东山区 5 种主要森林植被的研究表明,生长季植物的蒸腾耗水量为 240~369 mm,占同期降雨量的 32%~45%^[8]。植物根系能深入地表以下的深度从几厘米到几米,甚至十几米,能穿过具有不同含水状态的土层,这样,通过根系吸水及植物的蒸腾作用,渗进土体内的雨水甚至很深土层中的有效渗水都能被消耗掉,从而降低土体的含水量,减小孔隙水压力,致使土体粘聚力增加,土体的抗剪强度提高,边坡的稳定安全系数提高。

2.2 力学效应

2.2.1 根增强理论

由于根系相对土体具有较大的抗拉强度,在对土体加载的过程中,土体中的剪应力通过根土间的相互作用,逐渐转移到根系中,而使根系受拉,从而增加了土体的抗剪强度,已得到广泛认可。然而,根系对土增强效果的量化却存在一定的困难,尚处于前期研究阶段,有待发展。分布在土中的根系构成复杂混杂的生物网络,它们的几何特征、力学特征都随着时间和空间不断的发展进化着,要在野外对根系特征进行测量是有困难的,根对土增强作用的模拟也增加了挑战性。虽然已有众多学者对此进行了广泛研究,但最初的 Wu^[9]和 Waldron^[10]根增强模型几十年以来一直受到广泛应用,其原因也就在于此。

2.2.1.1 Wu 和 Waldron 根增强模型

早在上世纪 70 年代,1976 年 Wu^[9]和 1977 年 Waldron^[10]先后建立了根增强土的先驱模型,形成

了根系固土的理论基础——加筋土理论。该模型以摩尔-库伦强度理论为基础来说明根的增强效果,假定所有根系垂直穿过剪切面,当受剪切时,根土之间发生相对错动,根系发生变形产生拉应力,通过根土之间的相互作用,土中的剪应力逐渐向根系转移,增加了土体的抗剪强度。该模型将根系对土的贡献模拟成增加土的视凝聚力 c_r ,即土的抗剪强度为 $\tau = c + \sigma \tan \phi + c_r$ 。并指出抗剪强度的增量主要取决于根的平均抗拉强度 T_r 和根的面积比 (A_r/A)。

Wu 和 Waldron 模型假定当土受剪切时,穿过剪切面的所有根在同一时刻全部达到抗拉强度,即同时被拉断。然而,2004 年 Pollen 等^[11]在对河岸含根土的室内和野外的强度测试中发现河岸可能在所有的根在理论上达到抗拉强度之前就已破坏。1994 年 Reinstenberg^[12]、2005 年 Norris^[13]在根的拉拔试验,2008 年 Docker 等^[14]在根的拉拔测试和含根土的直接剪切测试中也证实了根系的逐渐破坏现象。由此, Wu 和 Waldron 模型假设所有的根同时破坏,使视凝聚力计算值 c_r 偏高。

2005 年 Fannin 等^[15]对无粘性土进行了一系列的原位剪切测试,以探索在浅层平面滑动的过程中土体抵抗强度的调动情况,其中得到的一个含根土的原位剪切测试结果如图 1 所示。

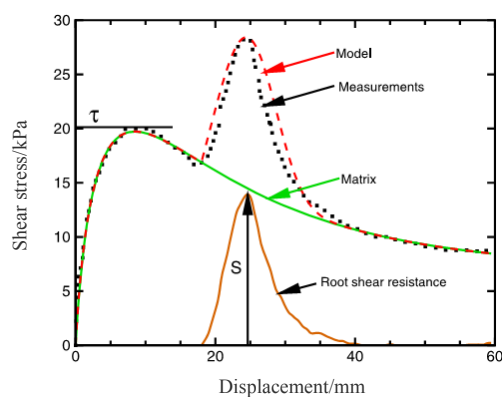


图 1 原位剪切测试的剪切应力与位移关系^[15]

Fig.1 The stress-strain behavior of soil of an in situ shear test by Fannin et al^[15]

图 1 显示了根对土应力-应变关系的影响,图中黑色方点代表被测量的含根土的应力-应变关系,如果将土体和根强度单独分开,则绿色曲线代表不含根土的应力-应变,而棕色曲线表示根的影响。从图中可以看出含根土有 2 个明显分离的剪切应力峰值,出现的第一个峰值是由土体本身的抗剪强度提供的,第二个峰值是由根的抗拉阻力提供的,且这 2 个峰值发生在不同的位移处,故如果仅简单地把根的抗拉阻力 S 加到土体的剪切强度上,则将高估

土体的抗剪强度,将高估在滑坡中所调动的抗力。由此,Wu 和 Waldron 模型将由根引起的视凝聚力 c_R 直接加到土的抗剪强度 τ 上,便高估了根的增强效果。

美国农业部农业研究服务署(USDA-ARS)国家沉降实验室的 Pollen 等^[16](2005)用纤维模拟根,测试了一纤维束所承受的最大荷载值,结果得到的值比所有单根强度相加之和(按照 Wu 和 Waldron 模型所有根同时断的假定)要小得多。于是 Pollen 和 Simon 对 Wu 和 Waldron 增强模型进行了改进,建立了一种动态纤维束模型(the Fiber Bundle Model)来考虑剪切过程中根系逐渐断裂的行为。并且 2010 年 Schwarz 等^[17]在对根束原位测试中发现,将实测的结果同 Wu 和 Waldron 模型计算的结果相比,Wu 和 Waldron 模型高估根系的抗力达到 60%~100%。

2.2.1.2 纤维束根增强模型(FBM)

纤维束模型假定不同直径的根具有不同的抗拉强度,每个根将在不同的位移处产生断裂。FBM 模拟以一个应力加载步骤对一束含 N 根平行纤维的纤维束施加载荷,荷载被分配给束中的每根纤维,当荷载增加到其值超过了某单根的抗拉强度时,该根被拉断,而被该根分担的荷载被重新分配到剩下的 $(N-1)$ 个完好的根中,接着,剩下的根中被分配到更多的荷载,更有可能被拉断,如果这次的荷载重新分配导致更多的根拉断,再一次的荷载重新分配将发生,直到没有更多的根拉断。如果重新分配后的荷载值不能引起更多的根拉断,最初施加的荷载必须增加,这个过程被重复,直到所有的根都拉断^[16]。FBM 模型在将整个荷载分配给纤维束中的每个平行纤维后,监测每根纤维所承受的荷载是否超过其抗拉强度,因此纤维束模型的控制方程能够写成:

第 n 根纤维的拉断力=总的加载值×分配函数
因此,确定总的荷载在根束中的分配函数是关键。2010 年 E. Comino 等^[18]提出了根束中荷载相等均分的分配标准,也即根束中每个完好的单根将承受相等的荷载。也有学者提出考虑根直径的大小,按应力相等来分配总的荷载给根束中的每个单根。但是根据 1996 年 Gray 等^[19]、2005 年 Genet 等^[20]提出的根的抗拉强度和根直径之间存在反幂函数关系,如果按应力相等分配总的荷载给根束中的每个单根,则最大的根将最先断,而最小的根将最后断。而且,2005 年 Pollen 等^[16]在野外和室内的剪切测试中发现最小的根趋于在土剪切开始时先断,2010 年 Thomas 等^[21]在剪切模拟中也发现当荷载被平均分配给穿过破坏面的每 1 个根时,最小的根最先断,

而最大的根最后断。因此,在根束中考虑荷载相等均分的分配标准能更加恰当地模拟含根土体的受力破坏特征。

然而受力过程中,根渐进破坏的特征主要依靠土变形及根的直径分布、几何性质、力学性质之间的相互作用和综合影响,而这些方面在 FBM 模型中没有被考虑。另外,FBM 模拟中使用应力控制的加载过程,则根束的力-位移关系曲线在超过最大的荷载峰值后是不能得到的,这样将不能得到完整的力-位移关系曲线,同时也将妨碍对残余强度的评价。为了克服上述缺陷和进一步深入研究根的增强效应,2010 年 Schwarz 等^[22-24]在 FBM 模型的基础上,提出了根束模型(the Root Bundle Model)来评价根的增强效应。

2.2.1.3 根束增强模型(RBM)

RBM 模型是一个以位移控制加载过程的纤维束模型。在 RBM 模型中,根的长度、直径、长度、弯曲、分支、土的含水量、根土间的摩擦作用都被明确地考虑。通过以位移控制的加载代替以应力控制的加载过程,RBM 模拟避免了同荷载重分配原则之间存在任何联系,产生了包括达到荷载峰值后根残余拉力在内的完整的力-位移关系曲线^[22-24]。RBM 模型考虑整个根束的拔出力是位移的函数,并被表示成单根的拔出力之和,如下所示^[17]:

$$F_{\text{根束}}(\Delta x) = \sum_{j=1}^N F_j(\Delta x) n_j$$

$F_{\text{根束}}(\Delta x)$ 为整个根束的拔出力; $F_j(\Delta x)$ 为属于根径 j 类的单根的拔出力; n_j 为根束中属于根径 j 类的单根数量; N 为根直径的分类数量。

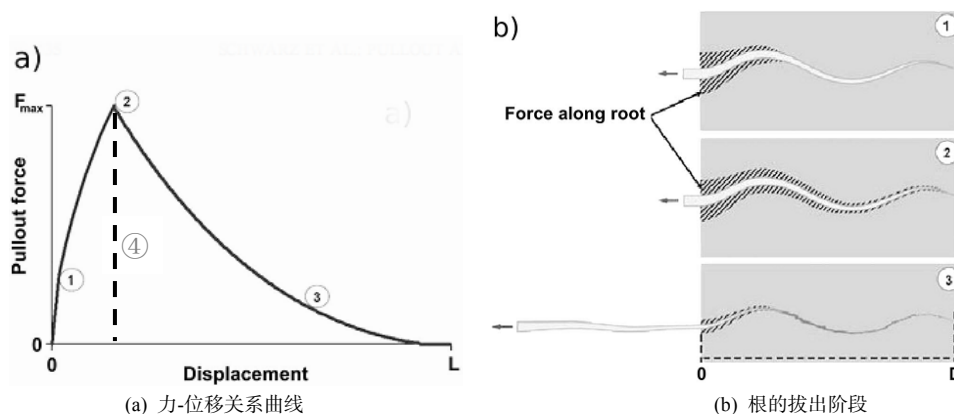
故 RBM 模型的关键在于探索拔出过程中根束中的每个单根沿根长的根强度的渐进积累过程,探索单根拔出力与位移间关系。

2.2.2 根-土相互作用

2.2.2.1 根系拔出机理

根-土间的相互作用机理是决定根对土增强的关键。这里以根的拔出过程来分析根-土间的相互作用。1981 年 Waldron 等^[25]提出根要么被拔出,要么被拉断,2005 年 Norris^[26]在对嵌入土中的单根的拔出测试的试验中也发现,根在经过一非线性弹性拉伸阶段后,要么被拔出,要么被拉断,其取决于根的几何和力学特征。根拔出时力与位移间的非线性关系也被 1990 年 Ennos^[27]、2007 年 Hamza 等^[28]在野外和室内试验中观察到。根系拔出的过程如图 2 所示。

图 2(a)显示了单根拔出时的力-位移关系,①代表根拔出的力-位移曲线的第一个阶段—根的拉伸阶段,为非线弹性,因为根土界面上的摩擦力沿着

图2 根拔出时的力-位移关系^[23]Fig.2 Force-displacement behavior of root during pull out^[23]

根的长度方向逐渐被激活, 被调动的根长逐渐增加, 见图 2(b)中①所示, 表示仅部分界面摩擦被激活, 仅部分根长被调动。图 2(a)中②点代表拔出力的峰值, ②~③段代表所有根长被激活, 达到最大的拔出力 (对应图 2(b)中②), 而沿根长的根截面的最大抗拉强度却始终没有达到, 根逐渐被拔出, 见图 2(b)中③所示; ②~④虚线段代表在某一临界位移处, 根长中某一截面上产生的拉力超过了其抗拉强度, 根被拉断。根一旦被拉断, 其上的荷载要么为零, 要么因根土界面间的滑动摩擦而保持一个残余的载荷, 其大小与仍然正在被拔出的根长成正比。

根的几何特征对根系拔出力具有重要的影响作用。2011 年 Schwarz 等^[17]在根系拔出的原位和室内试验中发现, 根长、根弯曲、根分支点是影响根系拔出力的关键参数, 有分支点的根比无分支点的根拔出拉力要大得多, 因为沿根分支锚固长度上的根的抗拉强度也被调动起来。分支点被定义成其侧根的直径>0.5 mm, 如图 3 所示, 红色标记点即为分支点。弯曲根同直根相比, 最大的拔出力及其相应位移值都要更大。而在根束的原位拔出测试中发现, 多种情况下, 在拔出力开始逐渐减小之前可能存在多个峰值点。

2.2.2.2 根土界面摩擦

根土间的摩擦作用随土类型、含水量而改变,

并影响根拔出力-位移关系曲线。自然土中, 根毛、根分泌物、根生长产生的压力和根对土的毛孔结构的适应性等都将增加根土间剪切强度。界面摩擦作用由根拉拔时拉伸阶段的静摩擦逐渐向根滑出阶段的动摩擦而变化。2010 年 Schwarz 等^[23]把根土间摩擦作用分成 2 部分: 根土界面间的摩擦、分支点的摩擦。因为在分支点处, 沿根分支锚固长度上的根土界面上的摩擦作用也被激活。Schwarz 等^[23]通过 n 个分支点将根长化分为 $n+1$ 段, 从根尾开始分别为 0 段、1 段... n 段, 得到根系的总拔出力为:

根土界面静摩擦力:

$$\tau_d = c + \sigma \tan \phi$$

根段 i 的总摩擦力: f_i = 根段 i 界面上的摩擦 + 分支点 i 的摩擦

$$\text{总拔出力: } F_{\text{总}} = \pi d_0 b \tau_d + \sum_{i=1}^n f_i, \quad d_0 \text{ 为根尾 } 0 \text{ 段的直径。}$$

2.2.3 根系的地下分布状况

植物根系的形态决定了根对边坡加固作用的发挥。Green-way、Operstein 等^[29]先后总结指出根系密度、直径、长度及根的地下分布形态是影响根增强土的主要因素, 地下生物量越大, 根系分布越深, 保持水土能力越强, 植物的抗逆性也越强。2011 年 Schwarz 等^[17]在对根束拔出的原位测试和室内模

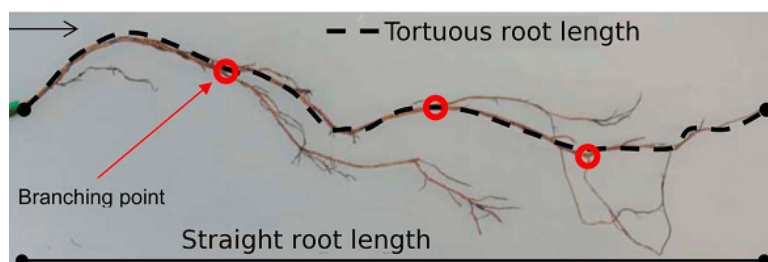


图3 根的几何特征

Fig.3 Characterization of geometrical parameters of a root

拟试验中发现根束中根直径的分布形态、根长等将极大地影响根束的最大拔出力。Kozlowski 对根的水平延伸规律作了探索,发现树根最少能延伸树冠半径的 1.5 倍。2010 年 Hubble 等^[30]对河岸植物的根系分布进行研究发现许多树种已进化了根,为了寻求夏季的低水位以便在干旱季节里能幸存更长久,根深度常大于 5 m,甚至超过 20 m,对土体失败的缓解更有效。早期,Nilaweera、Rutherford 就发现根系数量在土壤表层 0~50 cm 分布最多,在该深度范围以下根系密度随着垂直深度和水平距离增加而减少的规律^[31-32]。近年来,许多学者也对根的形态分布及模型构建进行了一定的探索,如 2004 年 Preston 等^[33]、2003 年 Vercambre 等^[34]、2004 年 Pages 等^[35]。2010 年 Scanlan 等^[36]、2011 年 Cohen 等^[37]还对根直径的密度分布规律进行了研究,发现利用 Web 分布和正态分布函数来分析根直径的分布形态,同实际测量的数据相比较,具有很好的适合性。

2.2.4 边坡稳定分析

根系对边坡的稳定增强通常通过以下 2 种途径进行:(1)将根系看成类似于土钉的杆件直接加入土体中进行分析;(2)将含根土层看成复合土体,用一个相当的增强层(具有根增强量 Δs 、根分布相同厚度)来代替含根土层而进行分析。在边坡的稳定分析中,数值模拟方法得到了广泛的应用。Robbin 建立了所谓的无限边坡模型用于边坡稳定分析。Ekanayake 等^[38]研究了植被护坡与斜坡稳定极限问题。2005 年 Greenwood^[39]以 Wu 和 Waldron 模型为基础建立了计算机程序—SLIP4EX,来综合考虑植物的力学效应和水文学效应对边坡稳定性的影响。2010 年 Der 等^[40]通过 3D 有限元程序,采用 $c-\phi$ 逐步递减方法,分析了不同根系分布深度分别对不同坡角的边坡安全稳定性的影响,发现边坡坡度在 25°~40°之间,根系增强效果最好,能调动边坡最大的安全储备。国内学者陈丽华、姜志强、宋维峰等也采用有限元数值模拟的方法就根系增加边坡安全稳定性进行了分析,指出随着根系的加密,边坡的稳定安全系数在增加,并指出根系密度对边坡整体稳定性的贡献存在一上限值^[3, 41]。

3 研究展望

植物根系固土护坡是涉及岩土工程、力学、生物学、植物学、土壤学等多学科于一体的综合的交叉学科,因此对植物根系固土护坡理论的研究应注重多学科交叉渗透,以便更全面更透彻地揭示根系的固土护坡机理。目前,根系固土护坡的研究在近十年来得到了最迅速的发展,根系固土理论的深度和广度都得到了极大深化。但由于根系埋于土体

中,生长受到各种环境因素的影响,随时间和空间不断发展,观察和测试都较困难,受到一定的制约作用。而单根的几何特征、力学特征上的不同也使真实的土体受力过程中,整个根系统的力学反映和失败机理更为复杂和多变。因此,根系固土理论研究还有待于进一步深入,今后的发展方向为:

(1)根系形态对植被护坡起着直接的作用,其形态受植物品种的限制,同时还受到气候条件、土壤条件及边坡形态的影响,是一个复杂动态的系统。因此应对根系形态进行深入研究,探索合理可行的量化根分布、根几何特征(如根长、根弯曲性、分支特征等)的方法,研究反映根形态分布的模型的构建,同时对地下根系形态的观察方法也有待于创新。

(2)继续加强根对土增强机理的研究,进一步完善根系增强土的力学模型,对根的增强作用进行量化研究。采用宏细观相结合的方式,深入研究根系从渐进激活到突然破坏整个增强的演化过程,探索根束的失败机理及其与浅层滑坡触发机制间的相互联系,揭示根系对浅层滑坡的阻碍机理。

(3)单根、根束拔出的力学行为直接关系到根对土增强的量化评价,要加强对根系拔出行为的量化研究,系统量化根的几何外形、土类型、土含水量等因素对根系拔出力学行为的影响。

(4)深入研究根-土界面的摩擦作用,分析土粒与根系之间黏聚力、摩擦力的形成机理及表达形式,研究根几何特征(如根弯曲、分支)、土类型、土含水量等因素对根土界面摩擦作用的影响,进一步加强对根土间摩擦作用量化的研究。

(5)在深入研究根固土机理的基础上,构建根土复合“土体”的本构模型,应用数值模拟的方法研究含根边坡的稳定性,探索根的增强效应与树间距等参数间的相互关联性,优化种植、合理确定造林密度等问题,具有重要的实际应用意义。

参考文献:

- [1] 姚裕春. 边坡开挖工程活动对环境影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
YAO Yuchun. Slope excavation activities on the environmental impact study[D]. CHEN DU: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [2] 周跃. 植被与侵蚀控制: 坡面生态工程基本原理探索[J]. 应用生态学报, 1999, 11(2): 298-301.
ZHOU Yue. Vegetation and erosion control: the basic principles exploration of the slope ecological engineering[J]. Journal of Applied Ecology, 1999, 11(2): 298-301.
- [3] 陈丽华, 余新晓, 宋维峰, 等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
CHEN Lihua, YU Xinxiao, SHONG Weifeng, et al. soil reinforcement by tree root[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力

- 学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- CHEN Hong, YAN Chuansheng, LI Jianqing, et al. The mechanism of the solid earth model and mechanical test of the herb plant root system[J]. Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 62-65.
- [5] 吴彦, 刘世全, 王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(2): 119-124.
- WU Yan, LIU Shiquan, WANG Jinxi. The impact of plant roots on soil anti-erosion ability[J]. Applied and Environmental Biology, 1997, 3(2): 119-124.
- [6] NIMAH M N, Hanks R J. Model for estimating soil water, plant and atmosphere interrelations: Field test of model[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1973, 37: 522-527.
- [7] HERKELRATH W N, Miller E E, Gardner W R. Water Uptake by Plant: I. Divided root experiment[J]. Soil Sci Soc Am J, 1977, 41: 1033-1038.
- [8] 高人, 周广柱. 辽东东部山区几种主要森林植被类型的蒸腾作用[J]. 辽宁农业科学, 2001(6):5-8.
- GAO Ren, ZHOU Guangzhu. Liaodong eastern mountains of several major types of forest vegetation transpiration[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2001(6):5-8.
- [9] WU T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Geotechnical Engr. Report No 5, dept. of Civil Engr[M]. Columbus: Ohio State University, 1976: 94.
- [10] WALDRON L J. Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Sci Soc Am, 1977, 41: 843-849.
- [11] POLLEN N, SIMON A, COLLISON A J C. Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability[M]//Bennett S, Simon A. Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphol. Water Sci Appl Ser, Vol. 8. AGU, Washington, DC, 2004: 125-139.
- [12] REINSTENBERG M M. Anchoring of thin collovium by roots of sugar maple and with ash on hillslopes in Cincinnati[J]. US Geol Surv Bull, 1994, 2059-E.
- [13] NORRIS J E. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut slope in Southern England[J]. Plant Soil, 2005, 278:43-53.
- [14] DOCKER B B, HUBBLE T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. Geomorphology, 2008, 100: 401-418.
- [15] FANNIN R J, A Eliadorani and J M T. Wilkinson. Shear strength of cohesionless soils at low stress[J]. Geotechnique, 2005, 55:467-478.
- [16] POLLEN N, A Simon. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. Water Resour, 2005, 41: W07025.
- [17] SCHWARZ M, Cohen D, D Or. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: F02007.
- [18] COMINO E, DRUETTA A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. Soil Tillage Res, 2009, 11:006.
- [19] GRAY D H, SOTIR R B. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control[J]. Wiley Chichester, 1996.
- [20] GENET M, STOKES A, SALIN F. The influence of cellulose content on tensile strength in tree root[J]. Plant Soil, 2005, 278: 1-9.
- [21] THOMAS R E, POLLEN B N. Modeling root-reinforcement with a fiber bundle model and Monte Carlo simulation[J]. Ecol Eng, 2010, 36: 47-61.
- [22] SCHWARZ M, Lehmann P, D Or. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—From a bundle of roots to tree stands[J]. Earth Surf Processes Landform, 2010b, 35:354-367.
- [23] SCHWARZ M, Cohen D, D Or. Soil-root mechanical interactions during pullout and failure of root bundles[J]. Geophys Res, 2010a, 115:F04035.
- [24] SCHWARZ M, Preti F, Giadrossich F, et al. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy) [J]. Ecol Eng, 2010c, 36:285-291.
- [25] WALDRON L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Sci, 1981, 132: 427-435.
- [26] NORRIS J N. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut slope in southern England[J]. Plant Soil, 2005, 278:43-53.
- [27] ENNOS A R. The anchorage of leek seedlings: The effect of root length and soil strength[J]. Ann Bot, 1990, 65:409-416.
- [28] HAMZA O, Bengough A G, Bransby M F, et al. Mechanics of root pullout from soil: A novel image and stress analysis procedure, in Eco and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability, edited by A. Stokes et al, 2007, 213-221, Springer, Dordrecht, Netherlands.
- [29] OPERSTEIN V, FRYDMAN S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Ground Improvement, 2000, 4: 81-89.
- [30] HUBBLE T C T, Dockera B B, Rutherford I D. The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: A review of Australian experience and practice[J]. Ecological Engineering, 2010, 36:292-304.
- [31] NILAWEERA N S, NUTALAYA P. Role of the roots in slope stabilization[J]. Bull Eng Geol Env, 1999, 57: 337-342.
- [32] ABEMETHY B, RUTHERFURD I D. The distribution and strength of riparian roots in relation to riverbank reinforcement[J]. Hydrol Process, 2001, 15: 63-79.
- [33] PRESTON G M, MCBRIDE R A, BRYAN J, et al. Estimating root mass in young hybrid poplar trees using the electrical capacitance method[J]. Agroforestry Systems, 2004, 60:305-309.
- [34] VERCAMBRE G, PAGES L, DOUSSAN C, et al. Architectural analysis and synthesis of the plum tree root system in an orchard using a quantitative modeling approach[J]. Plant and Soil, 2003, 251:1-11.
- [35] PAGES L, VERACMBRE G, DROUET J L, et al. Root type: a generic model to depict and analysis the root system architecture[J]. Plant and Soil, 2004, 258: 103-119.
- [36] SCANLAN C A, Hinz C. Using radius frequency distribution functions as a metric for quantifying root systems[J]. Plant Soil, 2010, 332:475-493.
- [37] COHEN D, Schwarz M, D Or. An analytical fiber bundle model for pullout mechanics of root bundles[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: F03010.
- [38] EKANAYAKE J C, PHILLIPS C J. A method for stability analysis of vegetated hillslopes: an energy approach[J]. Can Geotech, 1999, 36: 1172-1184.
- [39] GREENWOOD J R. Slip4ex—a program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation reinforcement and hydrological changes[J]. Geotech Geoleng, 2006, 24:449-465.
- [40] DER G L, BOR S H, SHIN H L. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability[J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 992-1006.
- [41] 姜志强, 孙树林, 程龙飞. 根系固土作用及植物护坡稳定性分析[J]. 勘察科学技术, 2005(4): 12-14.
- JIANG Zhiqiang, SUN Shulin, CHEN Longfei. Role of roots solid earth and slope stability analysis[J]. Investigation Science and Technology, 2005(4): 12-14.

Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation

ZHOU Yunyan, CHEN Jianping, WANG Xiaomei

China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Based on relevant research results both at home and abroad, the paper described in detail the progress of study on the mechanism in recent years in plant roots reinforcement soil. Soil reinforcement mechanisms by plant root were introduced respectively, from two aspects of the hydrological effects and mechanical effects, and the mechanical effects were especially described from the root enhancement theoretical model, the root-soil interaction and other aspects.

First introduced the root enhanced theory pioneer model of Wu and Waldron model, the paper in many ways demonstrates the Wu and Waldron model overestimating the enhanced role of the root which assumes all roots through the shear plane under an increasing load break simultaneously, and described in detail the two latest considering roots progressive failure mechanical models which proposed by foreign scholars on the basis of the Wu and Waldron model—the Fiber Bundle Model(FBM) and Root Bundle Model(RBM). The FBM model simulated roots in soils as a bundle of fibers that rupture progressively under an increasing load, assumed load assigned to each root in the bundle, when the load increased its value more than the tensile strength of a single root which pulled off, and the sharing load of the root was re-assigned to the remaining intact roots until all the roots pulled off. However, FBM model did not take into account the combined effects of root diameter distribution, geometry and mechanics, and because in the model bundle deformation controlled by load instead of displacement, the root bundle force-displacement curve not available past the maximum force. To remedy some of these issues Schwarz proposed the Root Bundle Model on the basis of FBM model. RBM was a displacement-controlled fiber bundle model, to estimate the pullout force of root bundles as a function of displacement and the sum of the single pullout force. Finally, discussed in detail the root pull-out mechanism, and explored the direction of development of study on soil reinforcement mechanisms by root.

Key words: soil reinforcement by plant roots; mechanical effect; the Fiber Bundle Model; the Root Bundle Model; root-soil interaction