

城市岩质边坡生态防护机理及试验

蒋德松, 蒋冲, 赵明华

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南长沙, 410082)

摘要: 针对边坡生态防护工程特点, 探讨城市岩质边坡的生态防护机理、植物与边坡的力学效应、植物根系加固边坡作用机理, 并由此建立相应的力学模型, 提出根系-土复合抗剪强度公式。研究植物对边坡降雨截留、径流延滞、土壤防渗、土层固结等效应, 并探讨生态防护对边坡的抗冲刷机理。在此基础上, 设计并完成城市岩质边坡生态防护室内模型试验, 研究不同草种、不同坡度、不同固土方式等情况下的工作特性。将本文方法应用于某城市岩质边坡生态防护工程, 获得百喜草、高羊茅和百慕达3种草在不同坡角(38°, 48°和58°)与固土结构(菱形铁丝网、土工格室、三维网垫)时的抗冲刷特性。研究结果表明: 土工格室的固土效果最优, 其次是三维网垫和菱形铁丝网; 单位面积的冲刷强度存在一个临界角度值, 为25°左右; 百慕达的固土效果优于百喜草和高羊茅的固土效果。

关键词: 岩质边坡; 生态防护; 抗冲刷

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)05-1087-07

Bio-engineering protection mechanism of city rock slope and its laboratory test

JIANG De-song, JIANG Chong, ZHAO Ming-hua

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the features of rock slope bio-engineering protection, the ecology protection mechanism of the urban rock slope was discussed with the mechanics effect of plants and rock slope, and the reinforcement action mechanism of rock slope by plant root system was analyzed as well. Then, the corresponding mechanical model was proposed, from which the formula to calculate the increased shearing strength of the root system-earth compound body was derived. And the side slope rainfall interception, the runoff lagging, the soil anti-seepage and soil layer consolidating effect were studied respectively. Furthermore, the indoor model experiment of urban crag rock slope ecology protection was designed and completed, in which various grasses to plant in slope with different angles, solid earth forms, and the different strengthening earth mechanisms were studied. Finally, the present method was applied in an engineering projects, from which the anti-washing behavior of three kind of grasses (i.e., the Bahiagrass, the tall fescue and the Bermudagrass) planted in the slope with an angle of 38°, 48° and 58° respectively and different strengthening structures (i.e., the diamond wire netting, the geocell and the three-dimensional network) were obtained. The application results also show that, the effect of geocell structure is the best one followed by the three-dimensional net and the diamond wire net. The anti-washing capability per unit area exists a critical slope angle of about 25°. The reinforcing effect of Bermudagrass is better than those of the Bahiagrass and tall fescue.

Key words: rock slope; bio-engineering protection; anti-washout

城市公路建设已成为城市基础设施建设重点之一,与此同时,城市公路建设在一定程度上也加剧了资源、环境和人口之间的矛盾,使生态环境问题日益突出。在城市道路建设中,受地形、地质等自然条件的限制,有时不可避免地形形成许多岩质边坡,大量裸露的岩石不但带来安全隐患,而且视觉效果差,与当前环保美观、以人为本的城市建设方针相背离^[1-2]。随着生活水平的提高和环境意识的增强,人们开始关注道路景观环境的美学欣赏价值及周围生态环境的保护问题。因此,在确保边坡稳定的前提下,进行城市道路的生态防护已成为亟待解决的新课题。传统边坡防护措施方法,仍大量采用浆砌片石护坡(护面墙)、拱型截水骨架等劳动密集型的边坡防护方式。近年来,一些新方法应运而生,如三维土工网格、土工格室以及菱形铁丝网 3 种固土技术^[2-3],但人们对其防护机理研究不多。为此,本文作者在总结城市岩质边坡研究现状基础上,对城市岩质边坡生态防护机理进行深入研究,并结合室内模型试验进行对比分析,最后结合工程实例进行验证,以期城市岩质边坡生态防护技术更加合理经济。

1 植物根系加固机理

1.1 力学效应分析

植物的竖向根系穿过坡体浅层的松散风化带,锚固到深处较稳定的岩土层上,起到预应力锚杆的作用;植物的侧向根系在土壤表层形成网状构造物,将其周围土壤缚紧,使土壤成一个加筋的整体,与竖向根系一起形成一种立体防护结构,在土壤的结构上起到网结和桩固作用,增加了土壤的抗拉强度和抗剪强度,从而提高边坡的安全系数^[3]。

1.1.1 力学模型

分析根土作用的常用模型有Waldron的受力平衡模型、Shewbridge基于变形特征的加筋复合土体模型、Wuetal 提出的考虑根的分布和分形的随机性统计模型^[3]。根纤维提高土体的抗剪强度主要是通过根土接触面的摩擦力把土中的剪应力转换成根的拉应力来实现,如图 1 所示。

令根的表面受到足够的摩擦力和约束力使根不至于被拉出,则当土中有剪应力发生时,根的错动位移使根伸长从而使根内产生拉力 T_R 。 T_R 沿剪切面切线方向的分力可直接抵抗剪切变形,它沿法线方向的分力可增加剪切面上的正应力,于是,根土复合体抗剪强度的增长为:

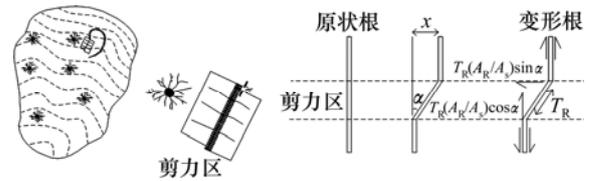


图 1 根变形示意图

Fig.1 Interaction of plants roots slope

$$\Delta s = t_R (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi) \quad (1)$$

式中: Δs 为抗剪强度增量; φ 为土的内摩擦角; θ 为剪切区的剪切变形的角度; t_R 为单位面积土中根产生的拉力,

$$t_R = T_R \cdot (A_R / S),$$

$$(A_R / A) = \sum n_i a_i / A \quad (2)$$

其中: n_i 是直径为第*i*级的根的数量; a_i 是直径为第*i*级的根的平均截面积。

考虑根的抗拉强度是随直径变化的,所以,根的平均抗拉强度可以由下式决定:

$$T_R = \frac{\sum T_i n_i a_i}{\sum n_i a_i} \quad (3)$$

式中: T_i 是直径为第*i*级的根的长度,于是,

$$\Delta s = T_R \cdot (A_R / A) (\sin \theta + \cos \theta \tan \varphi) \quad (4)$$

故土的抗剪强度的增量 Δs 完全依赖于根的平均抗拉强度 T_R 和根的面积比 (A_R/A) 。

1.1.2 基本原理

植物的根系在土中错综盘结,使边坡土体在其延伸范围内成为土与草根的复合材料,草根可视为带预应力的三维加筋材料。植被在地下广布的根系纵横交织,大大增加了土体的固着力和结持力。禾草、豆科植物和小灌木在地下 0.75~1.50 m 处有明显的土壤加固作用,而乔木根系的这种作用可影响到 3 m 的土层。植被的这种作用在近地表土层十分重要,表现为根密度最大而土壤最疏松,密集的根系可以加固疏松的土壤,保护深层的土壤,从而提高了坡体抗滑移的能力,提高了土体的稳定性。

根据摩尔-库仑准则,草根的加筋增加了土体的粘聚力 c ,使其破坏线向上平移 Δc ;此外,草根的张拉限制了土体的侧向变形,使 σ_3 增大到 $\sigma_3 + \Delta \sigma_3$,从而使摩尔圆向右平移 $\Delta \sigma_3$,如图 2 所示。 Δc 和 σ_3 与草根密度、强度及土体性质有关^[4]。

蔡强国^[5]对 4 种压应力作用下有根土和无根土样

进行三轴剪切试验, 结果如图3所示。由图3可见, 有根土的抗剪强度大于无根土的抗剪强度。

兴宁石马河流域水土流失综合治理研究认为^[6], 阻碍土体破坏的力由土壤黏结力 c 、内摩擦角 ϕ 及植物根系系统所产生的黏结力 Δc 决定, 通过采集草根及灌木根系进行分析。

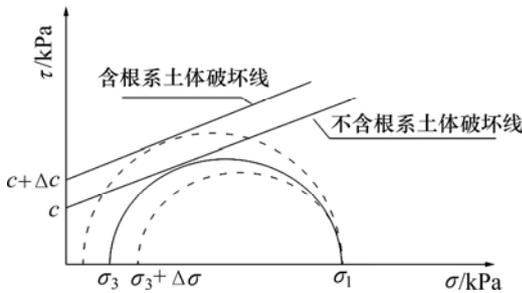
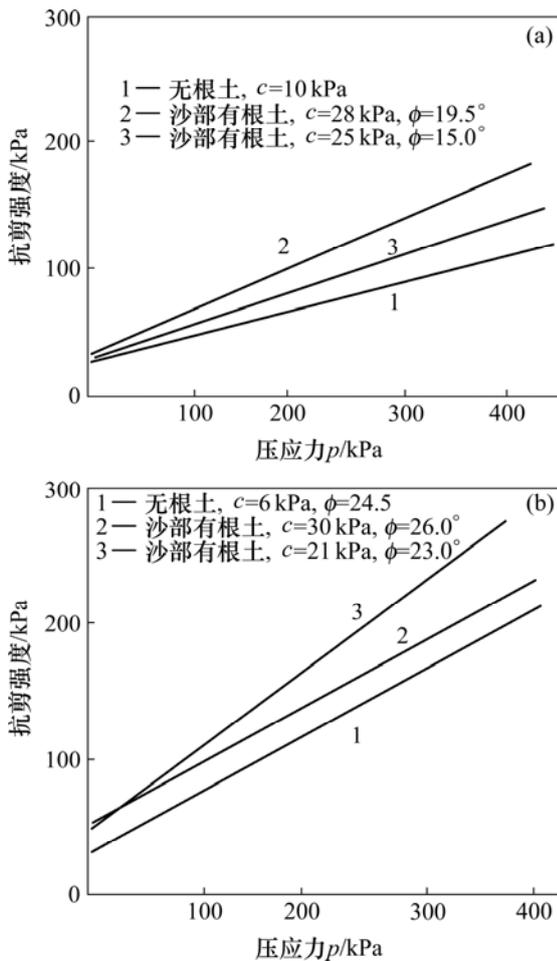


图2 根系对土体的加筋作用示意图

Fig.2 Diagram of consolidation of plants roots to soil



(a) 砂性土; (b) 黏性土

图3 有根和无根砂性土与黏性土抗剪强度比较

Fig.3 Comparison of soil shear strength between sandy soil with roots and sandy roots without roots

$$\Delta c = 0.076M_r + 0.95 \quad (5)$$

式中: Δc 为植物根系黏结力, kPa; M_r 为植物根系生物量, g。

1.2 水文效应分析

植被在坡面生态工程中的作用往往取决于地面径流的强度, 而径流强度却受地面状况、降雨分布和土壤上层的覆盖情况以及土层内部水物理化学性质所决定, 后者又常为荃岩母质的风化程度、土壤发育、团粒及植被生长所决定, 其中降雨超渗径流是形成土壤绞蚀的主要动力。而植被覆盖坡地的抗侵蚀性得到强化, 并且改善了坡面的小气候, 使坡面生态趋向稳定和良性循环。植被的地上部分可减少或防止降雨对地面的直接撞击溅蚀, 这对控制侵蚀和保护面有重要意义。植物尤其是草本植物具有控制土壤侵蚀的能力, 其通过降雨截留、径流延滞、土壤增渗、土层固结等作用, 改善坡面小气候, 减缓土表侵蚀^[7]。

1.2.1 降雨截留作用

一部分降雨在到达坡面之前就被植被截留, 以后重新蒸发到大气或下落到坡面。另一部分降雨则在到达坡面之前就被植被茎叶截留并暂时贮存在其中, 以后再重新蒸发到大气中或落到坡面。植被通过截留作用降低了到达坡面的有效雨量, 从而减弱了雨水对坡面土体的侵蚀。

假设植被截留降雨量 E 同降雨量 P 满足如下函数关系,

$$E(P) = \lambda(P) \times P \quad (6)$$

式中: $\lambda(P)$ 为截留系数, 为降雨量 P 的函数。对于确定的植被, 植被覆盖度 v_{eg} 及其叶面积指数 L_{AI} , 最大截留降雨量 E^* 是一个常数, 它由如下关系确定:

$$E^* = \alpha \cdot v_{eg} \cdot L_{AI} \quad (7)$$

式中: α 为叶面上平均最大持水深度, 变化范围为0.1~0.2 mm。

1.2.2 削弱溅蚀效应

雨滴在打击坡面时, 把动量传递给土体, 产生的力使土体颗粒分离飞溅, 在滴溅过程中, 雨滴动量越大, 撞击分裂力越大, 被溅出的土粒数量也越多, 植被能拦截高速下落的雨滴, 减少雨滴数量、滴溅能量及飞溅的土粒。雨滴的溅蚀是雨滴对地面的击溅作用, 它是水蚀的一种重要形式。降雨时雨滴从高空落下, 因雨滴具有一定的重力和速度, 落地时产生一定的打击力量, 裸露的表土在这种力量打击下, 土壤结构即

遭破坏,发生分离、破裂、位移并溅起,土粒能被溅至 0.6 m 高及 1.6 m 远^[4]。溅起的土粒落在坡面时,土粒总是向坡下方移动的多。植被能够拦截高速落下的雨滴,通过地上茎叶的缓冲作用,消耗掉雨滴大量的动能,并且能使大雨滴分散为小雨滴,从而雨滴的动能大大降低,当植被相当旺盛时,溅蚀可以明显削弱甚至消除。

1.2.3 抑制坡面径流作用

地表径流带走已被滴溅分离的土粒,可进一步引起片蚀、沟蚀。植被能够抑制地表径流并削弱雨滴溅蚀,从而控制土粒流失。在通常情况下,土体的流失量随植被覆盖率的增加呈指数关系降低。地表径流集中是坡面土体冲蚀的主要动力,土体冲蚀的强弱取决于径流流速、径流所具有的能量。草本植物分蘖多,呈丛状生长,能够有效地分散、减弱径流,而且阻截径流改变径流形态,径流在草间迂回流动,使径流由直流变为绕流。设径流流程为 L ,流速为 v ,则径流历时

$$T = L/V。 \quad (8)$$

由于径流在草间迂回流动,从而增大了流程(即 $L+L'$),流程增大,水力坡降减小,加上径流被分散和阻截,又减慢了流速(即 $v-v'$),因而,

$$T' = (L + L')/(v - v')。 \quad (9)$$

由此可见,依靠覆盖的草本植物延长了地表径流,增加了雨水入渗。径流减小,流速减缓,冲刷能量降低,从而使土体冲蚀减弱。

1.3 防冲刷作用

生物措施是水土保持中最有效和最根本的方法。土壤抗冲性的增强主要取决于根系的缠绕和固结作用,这种作用使土体有较高的水稳结构和抗蚀强度,从而不易被径流带走。植物根系提高土壤抗冲性的机制主要是根系提高土壤抗冲力,增加土壤渗透性及抗冲性土体结构的物理性质,即根系提高土壤抗冲性的直接作用是增强了土壤抗冲力,其间接作用是强化土壤渗透力,而根系改变抗冲性土体结构的物理性质是提高土壤抗冲性的物质基础。在大量调查研究基础上建立的根系提高了土壤抗冲机制数学模型,显示根系因子与土壤的抗冲性有很好的相关性。刘国彬^[8]在对草地植被恢复不同阶段土壤抗冲性变化的研究中提出,根系缠绕、固结土壤。强化抗冲性作用有 3 种方式:网络串连作用、根土粘结作用及根系生物化学

作用。

植物的根系在增强土壤的抗冲性能、减小土壤的冲刷方面起着非常重要的作用,土壤抗冲性的强弱与植物根系的分布和盘绕及固结状况密切相关。王库^[9]认为植物根群呈网状,将土体肢解包裹,从而使土体抵抗风蚀和流水冲刷的能力大增,抗冲性明显提高。他在野外调查的基础上,对根径小于 1 mm 的根系在土体中的分布密度与土壤的抗冲性进行了统计分析,结果表明,土壤的抗冲性与根系的分布密度呈指数关系。其表达式为:

$$S = 1.24 \exp(0.854x)。 \quad (10)$$

其中: S 为土壤抗冲性; x 为根径小于 1 mm 的根系分布密度。

但根系对不同土层抗冲性增强效应的差异则非常显著。李勇等^[10]在研究根系提高土壤抗冲性的有效土层深度时指出,根系对土壤抗冲性的增强速度随土层深度增大而减小,将不同根径的根量及根密度与土壤抗冲性联系起来分析,发现土壤抗冲性强化值与根径小于 1 mm 的须根密度关系最为密切。其原因如下:一是单位体积的根量主要由根径决定,根茎大者并非对提高土壤抗冲性有作用;二是须根径虽小,但密度很大,对改良土壤、建造抗冲性土体模型具有粗根不可比拟的作用。因此,将根径小于 1 mm 的须根密度定义为植物根系,以提高土壤抗冲性的有效根密度。它的物理基础是土壤剖面中 100 cm² 的截面上根径小于 1 mm 须根的个数,这为进一步确定植物根系、提高土壤抗冲性能的有效性奠定了实验及理论基础。不同植物根系提高土壤抗冲性能的作用随土层加深而急剧减少,其有效范围主要在上部 0~50 cm 土层内,这主要与植物根系在土中的分布特点有关。这种规律与有效根(根径小于 1 mm 的须根)的分布在上层密集(0~50 cm)土层占总根数的 90% 以上,下层稀疏(50 cm 以下土层不足总根数的 10%)的特征密切相关^[11-12]。本文作者对该土层范围内不同植物根系改善土壤水力学及物理性质效应的特征进行了研究,发现乔、灌木根系改善土壤水力学及物理性质的效应主要取决于有效根密度在剖面中的变化状况,草类的有效根密度与根量基本上的变化趋势相同。可见,草本植物的效应在不同土层间的明显差异是有效根密度和根量二者的同步变化所致。乔木类、草类由于其根系在剖面中的形态分布特征不同,对土壤水力学和物理性质的改善效应的平均水平有差异,对乔木的改善效应强,对草类

次之。草本植物根系对土壤冲刷量的降低作用与整个草本植物抑制土壤冲刷能力相差不大, 可见, 草本植物根系在提高土壤抗冲刷过程中起主导作用。无论是林地还是草地, 根系对土壤水力学及物理性质的影响程度具有一致的特点^[13-15]。

2 室内试验研究

室内实验的目的是在室外试验的基础上进一步研究各草种在不同边坡坡度、不同固土方式情况下的性能以及不同固土方式的固土机理。

2.1 试验方案

影响降雨-冲刷关系的主要因素有降雨特性(主要是降雨强度和降雨历时)、边坡坡度、固土结构、草种等。固土结构选取菱形铁丝网、土工格室、三维网垫 3 种。草种选取百喜草、高羊茅、百慕达 3 种。草种与固土结构可组合成 9 种形式的边坡(如表 1 所示), 坡角选取 38°, 48°和 58°。

表 1 室内试验方案表

Table 1 Scheme of laboratory test

编号	草种(固土方式)
1	百慕达(土工格室)
2	高羊茅(土工格室)
3	百喜草(土工格室)
4	高羊茅(三维网垫)
5	百喜草(三维网垫)
6	百慕达(三维网垫)
7	百慕达(铁丝网)
8	高羊茅(铁丝网)
9	百喜草(铁丝网)

2.2 试验装置

试验装置为 9 块长×宽为 1.20 m×1.00 m 的模板, 该模板可以改变倾斜角度, 如图 4 所示。

将模板面打毛、钉钉, 用细石混凝土打底拉毛, 以模拟岩质边坡面。将固土结构张开满铺在坡面上, 用钢钉固定, 充填种植基, 厚约 10 cm, 完全覆盖固土结构。将草籽与细土拌和均匀撒在坡面上, 每平方米约需草籽 15 g。覆盖土工织物或草垫, 每天早晚各洒水养护 1 次, 待草种生长到 35 d 进行测试。

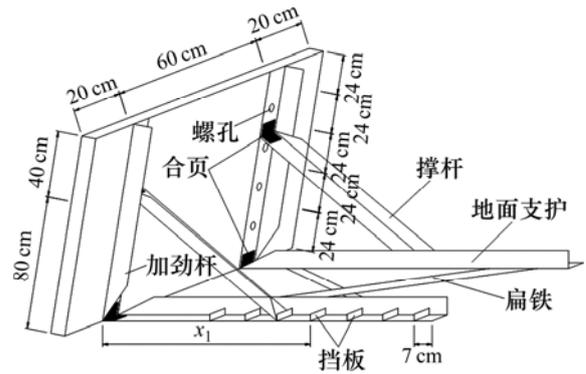


图 4 室内模型试验模板设计图

Fig.4 Blueprint of laboratory test template

2.3 室内测试

测试内容为: 试验区草种生长情况描述, 测评覆盖率; 各试验组合抗冲刷测试。

抗冲刷测试的方法为:

a. 试验前, 适当喷水, 将边坡湿透。

b. 试验时, 分 4 级雨量控制, 每次冲刷降雨强度分 4 级, 每级降雨强度一定, 历时 15 min; 收集每级冲刷水量。

c. 收集水量。每次取样 1.5 L, 取 1.0 L 烧干, 在室内可测得每次冲刷量 X 。

$$\text{单位面积冲刷量} = (X \times \text{总收集水量}) / \text{试验面积} \quad (11)$$

d. 改变模板坡度, 重复步骤 a~c。

e. 坡度冲刷试验完毕, 测量各种草的叶长和根长。

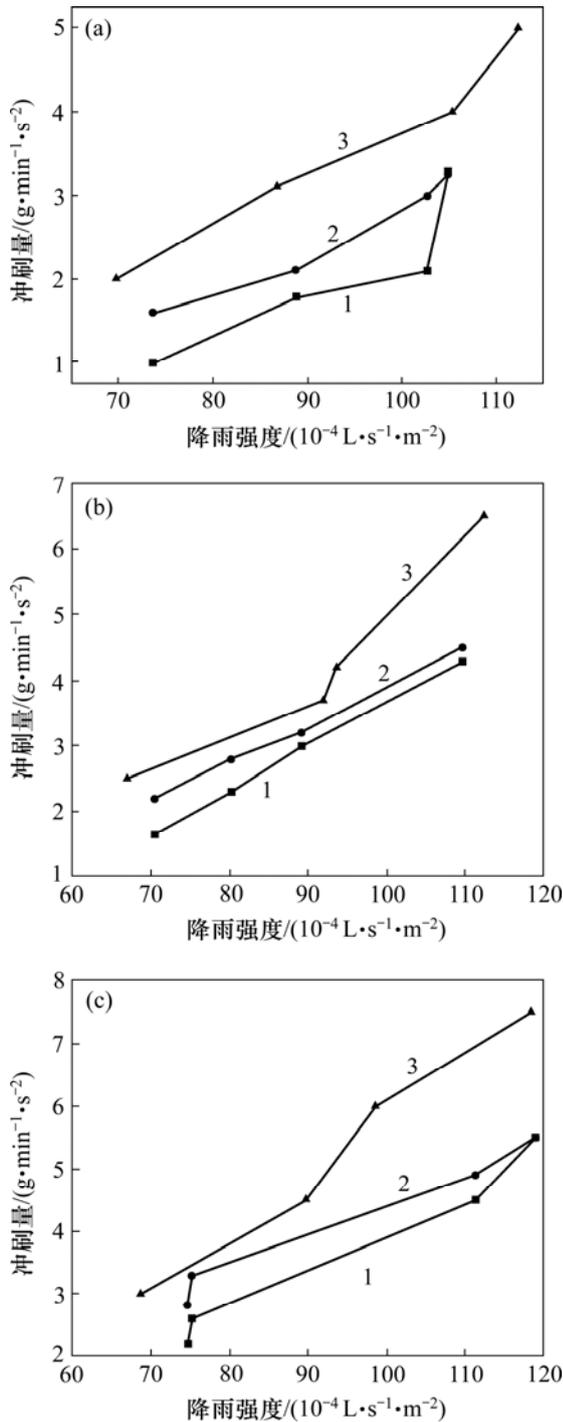
2.4 实验数据及分析

根据室内模拟试验测试结果, 各种固土方式下不同草种在不同降雨强度、不同坡角下边坡的冲刷情况见图 5(以百慕达为例)。

室内试验结果表明, 土工格室、三维网垫固土的抗冲刷能力比菱形铁丝网的强。这是因为固土材料土工格室、三维网垫为三维网状结构, 本身具有较强的抗拉强度, 在固土层起着加筋的作用, 能增强土的抗剪能力。草根发育后, 根系与网筋纠缠在一起, 能形成一个具有很高抗拉强度和抗剪强度的板块结构, 在坡面形成一保护层, 保证坡面免受冲刷, 增强稳定性。

从室内试验结果可见, 边坡达到某一临界坡角后, 单位长度边坡土体冲刷量随坡角的增大而减小, 即

$$G_{58} < G_{48} < G_{38} \quad (12)$$



1—土工格室；2—三维网垫；3—菱形铁丝网

图 5 降雨强度与冲刷量关系图

Fig.5 Relationship between rain intensity and washing out quantity

其中： G_{58} ， G_{48} 和 G_{38} 分别是边坡为 58° ， 48° 和 38° 时的冲刷量， $g/(s \cdot m^2)$ 。

公路边坡因降雨产生的坡面流，由于坡角的增大一方面使势能向动能的转化加快，另一方面，却使单

位坡长所接受的降雨减少，因此，坡面径流的流速应该存在 1 个临界坡角，即边坡达到某一临界坡角后，单位长度边坡土体冲刷量随坡角的增大而减小。周跃等^[3]通过研究指出，边坡坡面流速的临界坡角为 40° 左右，边坡土壤侵蚀量同样存在 1 个临界坡角，大约为 25° ^[3]。这与试验结果相吻合。

3 工程应用实例

3.1 工程概况及施工方案

长沙市环线道路的岩质边坡岩土体变化较大，边坡形态及其工程地质条件差异亦大。岩质边坡的形式有反倾向岩质边坡、顺倾向岩质边坡、顺倾向层状岩质边坡、反倾向岩质边坡(上覆土层)、顺倾向岩质边坡(上覆土层)及顺倾向层状岩质边坡(上覆土层)共六大类，岩层倾角为 27° ，边坡坡度范围为 $10^\circ \sim 75^\circ$ 不等，坡高为 $10 \sim 45$ m。岩性为红砂岩和强风化至中风化的泥岩。结合长沙地区的气候条件，主要选择狗牙根、百喜草、黑麦草、高羊茅草、弯叶画眉草等草种。土壤采用植物营养土，要预先配置好含有丰富有机质及氧、磷、钾等肥料的土壤，干容重约为 $0.8 \sim 0.9$ kN/m，固土方式采用土工格室和菱形铁网固土。

3.2 效果评价

该工程已竣工多年，从现场调查结果可知，环路岩质坡面绿化植草茂盛，长势良好，根系发达，草根扎入边坡土体和岩石缝隙，形成浅层致密的坡面复合保护层，具有较好的整体性和较强的抗冲蚀能力，对岩质坡面起到了良好的保护作用。

4 结 论

a. 从力学分析角度，研究竖向根系和侧向根系对边坡的加固效应，在此基础上，建立相应的力学模型，推导出抗剪强度的计算公式。

b. 草根对边坡的加固效果是草根与土体组成了复合层，增强了边坡土体的抗剪强度。

c. 生态防护降低了边坡土体的孔隙水压力，增强了边坡的稳定性。

d. 设计并完成城市岩质边坡生态防护的室内模

型试验研究,研究了百慕达、高羊茅、百喜草分别在边坡度为 38° 、 48° 和 58° 情况下,采用土工格室、三维网垫、菱形铁丝网3种固土方式下的工作特性与抗冲刷能力分析。

参考文献:

- [1] 王 玮, 冯治安, 高建立. 高等级公路边坡综合防护系统探讨[J]. 河南交通科技, 1999, 19(6): 29-33.
WANG Wei, FENG Zhi-an, GAO Jian-li. Study on side slope protection system of expressway[J]. Science and Technology of Henna Communication, 1999, 19(6): 29-33.
- [2] 广西公路局, 湖南大学. 破碎岩质边坡处理及生态防护技术研究报告[R]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2000.
Guangxi Highway Bureau, Hunan University. Research report of treatment and bio-engineering protection technology of rock slope[R]. Changsha: Institute of Civil Engineering, Hunan University, 2000.
- [3] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of American Proceedings, 1997, 41(2): 843-849.
- [4] 周 跃, 徐 强, 络华松, 等. 乔木侧根对土体的斜向牵引效应-原理和数学模型[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 4-9.
ZHOU Yue, XU Qiang, LUO Hua-song, et al. Traction effect of lateral roots of trees[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(1): 4-9.
- [5] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998, 42(1): 52-59.
CAI Qiang-guo. Research of rill initiation condition on loess hill slopes[J]. Journal of Sediment Research, 1998, 42(1): 52-59.
- [6] 长安大学. 高等级公路边坡综合防护技术研究技术报告[R]. 西安: 长安大学公路工程学院, 2002: 59-60.
Changan University. The report of sloping precaution for high level roads[R]. Xi'an: Highway Engineering Institute of Changan University, 2002: 59-60.
- [7] 蒲 智. 植物措施在公路工程护坡中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2003, 39(4): 33.
PU Zhi. Plant measure in highway engineering slope protection application[J]. Gansu Shuili Shuidian Jishu, 2003, 39(4): 33.
- [8] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
LIU Guo-bin. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on loess plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 93-96.
- [9] 王 库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 250-252.
WANG Ku. Effects of plant roots on soil anti erosion[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(3): 250-252.
- [10] 李 勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11-18.
LI Yong, XU Xiao-qin, ZHU Xian-rao, et al. Plant roots and soil anti-scourability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(3): 11-18.
- [11] Odemerbo F O. Variation in erosion-slope relationship on cut-slopes along a tropical high-way[J]. Tropical Geography Singapore, 1986, 7(2): 98-107.
- [12] Veloz R A, Logan T J. Erosion research on steep lands in the dominican republic[R]. Ankeny, Iowa: Soil and Water Conservation Society, 1988: 269-270.
- [13] 周 中, 巢万里, 刘宝琛, 等. 岩石边坡生态种植基强度的正交试验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(6): 1112-1117.
ZHOU Zhong, CHAO Wan-li, LIU Bao-chen, et al. Orthogonal test on strength of planting material for rock slope[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(6): 1112-1117.
- [14] 王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687-691.
WANG Ke-jun, LI Chou-fen. Brief mechanics analysis on bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687-691.
- [15] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical slope protection and erosion control[M]. New York: VNR Company Inc, 1982.