

DOI: 10.11779/CJGE201508007

含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究

王元战¹, 刘旭菲¹, 张智凯², 马殿光³, 崔衍强⁴

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 天津 300072; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 3. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456; 4. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 水工构筑物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 用室内三轴试验方法研究了原状和重塑草根加筋土的强度特性, 分析含根量对土体强度的影响, 并对二者强度的差异进行量化描述。试验结果表明: 对于原状草根加筋土, 含根量的增加对内摩擦角基本无影响, 但可提高土体黏聚力, 并且黏聚力先增加再基本保持不变; 对于重塑草根加筋土, 存在最优含根量使其强度最高, 并且该值与围压相关, 随围压的增大, 该值增加; 重塑草根加筋土的含根量是原状土的4~6倍时, 二者土体破坏时的主应力差值基本相等。

关键词: 原状土; 重塑土; 草根加筋土; 含根量; 三轴试验; 强度

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)08-1405-06

作者简介: 王元战(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 从事港口海岸与近海结构设计理论和方法、土与结构相互作用、结构振动分析理论和方法等方面的研究工作。E-mail: yzwang@tju.edu.cn。

Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil

WANG Yuan-zhan¹, LIU Xu-fei¹, ZHANG Zhi-kai², MA Dian-guang³, CUI Yan-qiang⁴

(1. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, National Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Simulation and Security, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. CCCC-FHD Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 3. Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 4. Key Laboratory of Harbor and Marine Structure Safety of Ministry of Communication, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Laboratory triaxial tests are carried out in order to understand the strength property of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil (UGRS and RGRS). The influence of root content on soil strength is investigated. Moreover, the strength difference between the two soils is quantitatively described by root content. The laboratory test results show that: (1) As to UGRS, the increase of root content has little effect on the internal friction angle, while it can improve the cohesion which increases first and then keeps unchanged; (2) There is an optimal root content in RGRS making soil strength the highest, which increases with the increasing confining pressure; (3) When the root content in RGRS is 4~6 times that in UGRS, the deviator stresses of RGRS and UGRS in the limit equilibrium state are almost equal.

Key words: undisturbed soil; remolded soil; grassroots-reinforced soil; root content; triaxial test; strength

0 引言

在国家大力发展内河航运事业的当下, 大量内河航道岸坡整治工程被投入建设。植被护坡作为一项兼顾岸坡加固及环境保护的工程技术, 在近几十年间被广泛应用于岸坡整治工程^[1-5]。

对于植被根系的固坡机理, 学者们普遍从加筋土的角度开展试验研究, 其中含根量就是一个重要的影响因素。杨亚川等^[6]开展原状草本植物根系土的直剪试验, 指出含根量的增加能有效提高土体黏聚力, 但

对内摩擦角影响不大; 张谢东等^[7]对重塑根系土开展直剪试验, 得出相同结论; 张锋等^[8]对含植被须根的重塑加筋土进行三轴固结不排水剪切试验, 得出相同结论; 陈昌富等^[9]通过进行重塑草根加筋土的三轴固结不排水剪切试验, 在得出相同结论的基础上, 进一

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279128); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51321065); 交通运输部交通建设科技项目(2013328224070)

收稿日期: 2014-09-24

步提出最优加筋量的概念；胡其志等^[10]对草本植物根土复合体进行直剪试验，也提出了最佳含根量；刘秀萍等^[11]对含刺槐须根的重塑土样进行三轴不固结不排水剪切试验，得出随根系直径的增大，抗剪强度增加。在以往的研究中，由于受制样难度的限制，通常采用直剪试验来研究含根量对原状根系加筋土强度的影响。为在可控的前提下对含根量的影响加以研究，学者们采用的是重塑土试验。并未有学者通过三轴剪切试验来研究含根量对原状土强度的影响。

本文首先开展原状草根加筋土的三轴固结排水剪切试验，分析含根量对土体强度的影响，在此基础上进一步开展不同含根量下重塑草根加筋土的三轴试验，并以含根量为指标对二者强度的差异进行量化描述。目的是明确两者间的强度对应关系，从而期以重塑草根加筋土的试验结果指导植被护坡工程的开展。

1 试验仪器、材料和方法

1.1 试验仪器和材料

试验采用南京土壤仪器厂生产的 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗流试验仪。试样的直径为 39.1 mm，高度为 80 mm。

原状草根加筋土试验土料取自广西壮族自治区右江上游那吉库区生态治理示范点，粉质黏土，天然密度为 1.664 g/cm^3 ，干密度为 1.389 g/cm^3 ，天然含水率为 19.78%，比重为 2.513。植被为地毯草，多年生草本植物。

1.2 试验方案

原状草根加筋土取土深度很浅，为有效测量土体强度指标，且又与土体在实际土层深度中所受围压值相差不大，此次试验围压取为 20, 27, 35 kPa。

由于原状草根加筋土试样中含根量无法提前控制，所以每个围压下试验土样定为 10 个。

重塑草根加筋土的含根量（质量百分比：根系质量与干土质量之比）定为 0%, 0.22%, 0.45%, 0.67%, 0.90%。

试验为三轴固结排水剪切试验，剪切速率为 0.1 mm/min。

1.3 试验方法

(1) 原状草根加筋土的试样制备

原状草根加筋土试样的制备按照 SL237—1999 土工试验规程^[12]进行。为保证所制试样中含根量具有较高的可统计性，尽量规避不可控因素的干扰，从标准取土盒（直径 100 mm，高 200 mm）的中心开样，一个取土盒内的土体只制备出一个直径 39.1 mm，高 80 mm 的试样。原状草根加筋土的取土盒内的土体和制

备试样如图 1 所示。

剪切完成后，对土样进行拆解。对于本研究中所用的植被，其根系特征为短细，直径为小于 1 mm 的极细根，根系长度集中在 2~5 cm，根系分散分布，故只对根系称重。所有试验完成后，挑选 3 种围压工况下具有相同含根量的试验结果作为分析对象，最终确定含根量为 0.11%, 0.15% 和 0.26% 的试样具有可分析性。



图 1 原状草根加筋土试样

Fig. 1 Sample of UGRS

(2) 重塑草根加筋土的试样制备

重塑草根加筋土试样的根系分布方式为分散分布。其制备土料为原状土挑出根系后的剩余土体。采用干密度控制原则，基本的制备方法按 SL237—1999 土工试验规程^[12]进行，具体步骤如下所述：

a) 将片状或碎块状的土样放入烘箱，在温度为 105°C ~ 110°C 的恒温下烘干 8 h，降至室温后取出土样，将其放到橡皮板上用木碾碾散，过 2 mm 筛。本研究用土属于粉质黏土，土颗粒粒径小于 0.075 mm，直接用过筛后颗粒均匀的土体制样，可以保证原状土和重塑土的颗粒组成相同。

b) 按原状土的干密度和天然含水率算出重塑土样所需干土重量和加水量，将需加的水喷洒到土料上拌匀静置，然后置于密闭容器内 20 h 以上，使土料各处含水率均匀。

c) 将均匀含水的土料和根平均分成 4 份，分别相互拌合，拌合过程中应尽量使根在土料中均匀分布。

d) 利用重塑仪、油压千斤顶及脱模器分 4 层压实制成高 80 mm、直径 39.1 mm 的试样。

2 试验结果

2.1 原状草根加筋土的强度特性分析

原状土和含根量 0.11%, 0.15% 和 0.26% 的原状草根加筋土试样的应力-应变关系如图 2~5 所示。

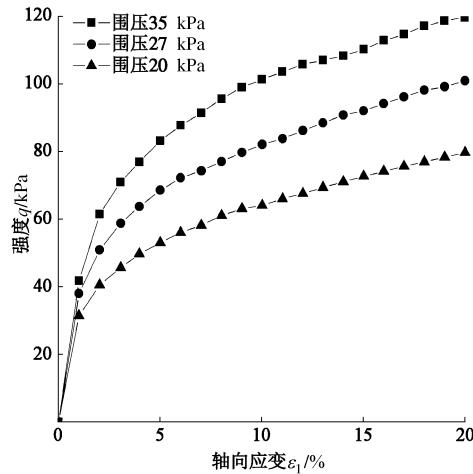


图 2 原状素土试样应力 - 应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of undisturbed soil without roots

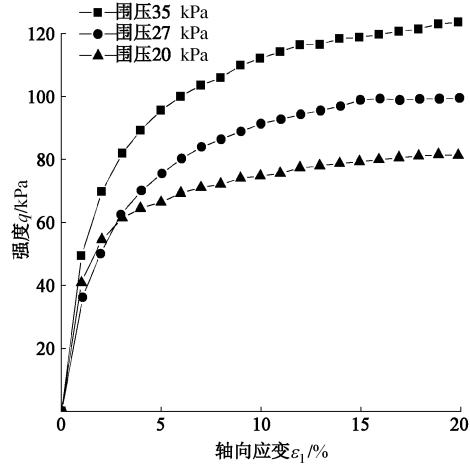


图 3 含根量为 0.11% 的原状草根加筋土试样应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of UGRS with root content of 0.11%

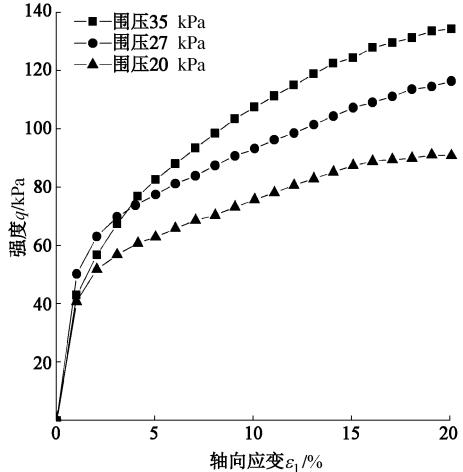


图 4 含根量为 0.15% 的原状草根加筋土试样应力 - 应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of UGRS with root content of 0.15%

从图 2~5 中看出, 原状素土和原状草根加筋土试样的主应力差值随轴向应变的增加呈上升趋势, 应力应变关系为应变硬化型, 故取轴向应变 15% 对应的主应力差值进行强度特性分析。依据 Mohr-Coulomb 强度准则分析其抗剪强度指标, 见表 1。

表 1 原状草根加筋土的抗剪强度指标

Table 1 Shear strength indexes of UGRS

含根量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
0	33.7	6.2
0.11	34.4	7.5
0.15	33.5	10.5
0.26	35.7	10.4

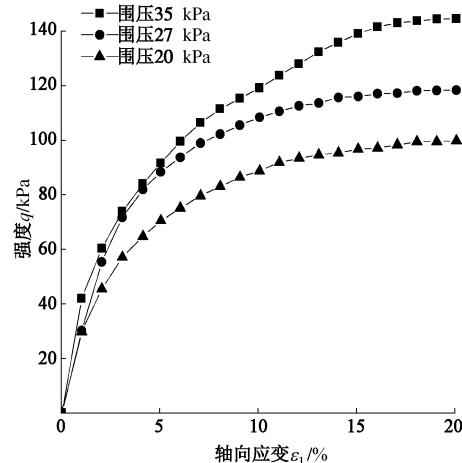


图 5 含根量为 0.26% 的原状草根加筋土试样应力 - 应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of UGRS with root content of 0.26%

从图 2~5 中看出, 原状草根加筋土的应力应变曲线为应变硬化型, 不是先有峰值后软化, 并且观察剪切完成后的试样, 没有明显的破裂面, 呈径向鼓状破坏, 拆解后发现根系基本完好, 沿根系有摩擦痕迹。该现象说明当受到外荷载作用时, 复合体中土体和根系共同受力、协调变形, 由于土体与根系在变形模量方面存在着差异, 因此土体和根系之间产生相互错动或有相互错动趋势, 这种错动被根系与土体之间存在的摩阻联结产生的摩阻力所抵抗, 使根系承受拉力, 土与根系间的摩阻作用既可将根系的拉力传递到土中, 又可阻止土层的侧向变形发展, 所以根土复合体改变了土的力学性能, 提高了土体的抗剪强度。

从表 1 中可看出, 含根量的增加对内摩擦角基本无影响, 但可提高土体黏聚力, 这与前人从重塑草根加筋土中得出的结论相同。原状草根加筋土的黏聚力随含根量的增加呈现出先增加, 然后再基本保持不变。

2.2 重塑草根加筋土的强度特性分析

围压为 20, 27, 35 kPa 时, 不同含根量的重塑草根加筋土试样的应力 - 应变关系如图 6~8 所示。

从图 6 中可以看出, 当轴向应变小于 15% 时, 含根量 0.22% 的重塑草根加筋土的主应力差值低于重塑素土; 从图 7, 8 中可以看出, 前者高于后者。上述现象说明 0.22% 根系的存在未能稳定体现根系对土体强度的提高效果, 主要原因为 0.22% 的根系与试样体积相比, 较少, 所以不能产生稳定明显的加筋效果。

当含根量为 0.45% 时, 从图 6~8 中可以看出, 其主应力差值在剪切初期略低于重塑素土, 当轴向应变

超过 5%以后，其主应力差值明显高于重塑素土，体现出了稳定的加筋效果。可能原因为固结时根系被压缩，剪切后在应变足够大时才会被重新拉伸，从而起到加筋作用。

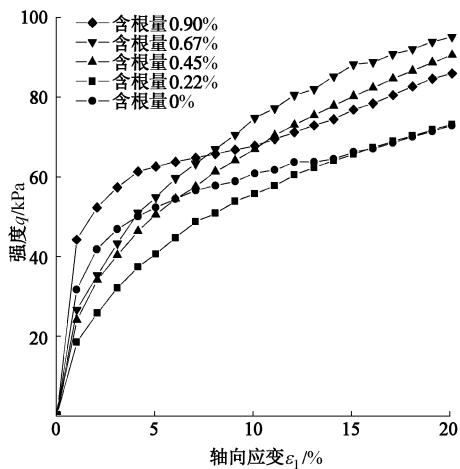


图 6 20 kPa 围压下重塑草根加筋土试样的应力 - 应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of RGRS with confining pressure of 20 kPa

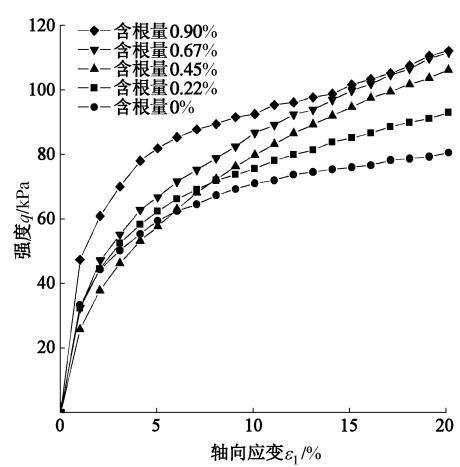


图 7 27 kPa 围压下重塑草根加筋土试样的应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of RGRS with confining pressure of

27 kPa

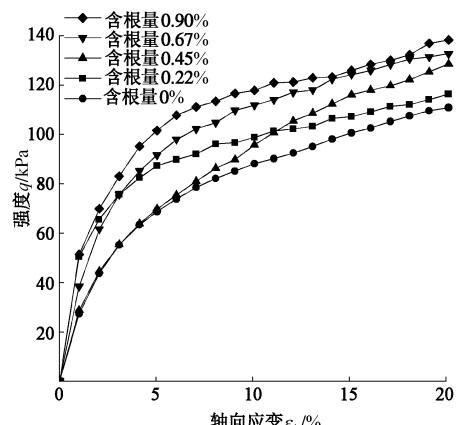


图 8 35 kPa 围压下重塑草根加筋土试样的应力 - 应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of RGRS with confining pressure of

35 kPa

当含根量为 0.67% 时，其主应力差值明显高于含根量 0.45% 的试样，体现出了根系的加筋效果随含根量的增加而增强。

当含根量为 0.90% 时，从图 6 中可以看出，当应变大于 7.5% 后，其主应力差值明显低于含根量为 0.67% 的试样；从图 7 中可以看出，当应变大于 15% 后，其主应力差值与含根量为 0.67% 的试样基本相等；从图 8 中可以看出，其主应力差值略高于含根量为 0.67% 的试样。原因是：根系一方面可以约束土体的变形，随根系质量的增加，根系与土颗粒间的接触面增大，提高了根系的加筋效应；然而另一方面，根系的增加会使土体中的潜在裂隙增加，若围压太小，则会使土体松散，强度降低。

取 15% 轴向应变对应的主应力差值进行分析，不同围压与含根量工况下试样的破坏强度如图 9 所示。分别对不同围压下的强度进行抛物线拟合，得出围压 20, 27, 35 kPa 下对应的最优含根量分别为 0.69%，0.90% 和 1.17%。

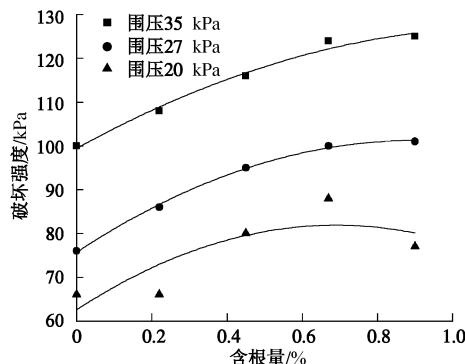


图 9 不同围压与含根量工况下重塑草根加筋土破坏强度值

Fig. 9 Failure strengths of RGRS with different confining pressures and root contents

通过以上分析可以看出，对于重塑草根加筋土，存在最优含根量使其强度最高，并且该值与围压相关，随围压的增大而增加。

2.3 重塑与原状草根加筋土的强度特性对比

目前学界普遍认为原状根系与土体间有着更牢固的接触关系，若能对两者间的差异进行量化描述，则可依据重塑草根加筋土的试验结果指导植被护坡工程的开展，从而节省人力、物力及时间成本。

由于原状草根加筋土的有效试验数据偏少，只有 3 个含根量的试样具有可分析性，故而前文从抗剪强度指标（内摩擦角和黏聚力）的角度去分析含根量对其强度的影响。而对于重塑草根加筋土，对土体破坏时的强度进行分析，得出其最优含根量与围压相关，因而不能从抗剪强度指标的角度去分析含根量对其强度的影响。综上，本文的思想是将重塑草根加筋土破

坏时的强度与原状草根加筋土进行比较, 以二者相近或相等时重塑草根加筋土与原状草根加筋土含根量的比值来描述两者间根系加筋效果的差异。

在 20, 27, 35 kPa 围压下, 本文所做的重塑草根加筋土的破坏强度值都低于含根量为 0.26% 的原状草根加筋土, 并且在 20 kPa 围压下, 当重塑草根加筋土含根量为 0.90% 时, 根系的存在已然使土体松散, 相比含根量为 0.67% 的土体, 强度降低, 故而不再继续增加含根量进行试验。

选择破坏强度相近的原状与重塑草根加筋土的应力应变曲线作对比, 如图 10~12 所示。

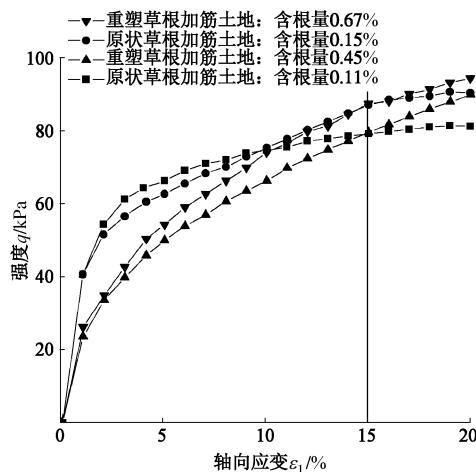


图 10 20 kPa 围压下重塑与原状草根加筋土的应力 - 应变对比

Fig. 10 Comparison of stress-strain curves between RGRS and UGRS with confining pressure of 20 kPa

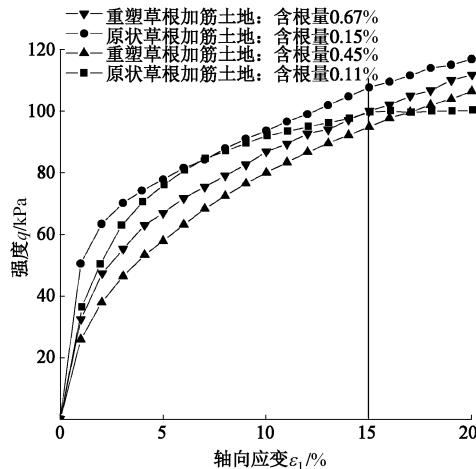


图 11 27 kPa 围压下重塑与原状草根加筋土的应力 - 应变对比

Fig. 11 Comparison of stress-strain curves between RGRS and UGRS with confining pressure of 27 kPa

在 20, 27, 35 kPa 围压下, 与含根量为 0.11% 的原状草根加筋土的破坏强度相比, 含根量为 0.45% 的重塑草根加筋土的强度与其大小关系分别为相等、低 4.78% 和低 2.82%; 含根量为 0.67% 的重塑草根加筋土

的强度与其大小关系分别为高 10.5%、相等和高 4%。综上可认为重塑草根加筋土含根量是原状草根加筋土的 4~6 倍时, 二者破坏强度相当。

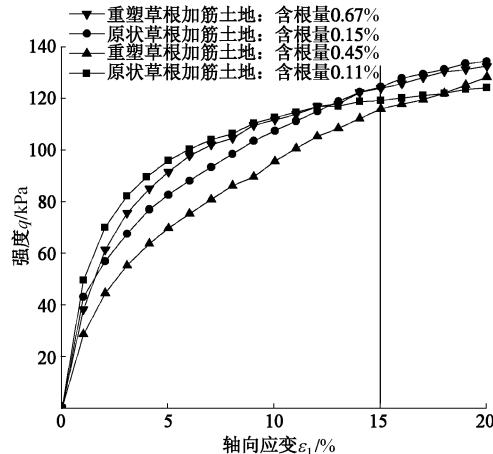


图 12 35 kPa 围压下重塑与原状草根加筋土的应力 - 应变对比

Fig. 12 Comparison of stress-strain curves between RGRS and UGRS with confining pressure of 35 kPa

此外, 对于含根量为 0.15% 的原状草根加筋土, 在 20, 27, 35 kPa 围压下, 含根量为 0.67% 的重塑草根加筋土的强度与其大小关系分别为相等、低 7% 和相等, 也印证了上面所说。

3 结 论

本文用室内三轴固结排水剪切试验方法研究了原状和重塑草根加筋土的强度特性, 分析含根量对土体强度的影响, 并对二者强度的差异进行量化描述。得出以下结论:

(1) 对于原状草根加筋土, 含根量的增加对内摩擦角基本无影响, 但可提高土体黏聚力, 这与前人从重塑草根加筋土中得出的结论相同。原状草根加筋土的黏聚力随含根量的增加呈现出先增加, 然后再基本保持不变。

(2) 对于重塑草根加筋土, 存在最优含根量使其强度最高, 并且该值与围压相关, 随围压的增大而增加。

(3) 当重塑草根加筋土的含根量是原状土的 4~6 倍时, 二者破坏强度基本相等。

参考文献:

- [1] 谢晓华. 三维土工网植草在加固河岸边坡工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(1): 71~72. (XIE Xiao-hua. Application of three-dimensional geonet sprig-grass for reinforcement of the side slope of bank[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(1): 71~72. (in Chinese))
- [2] ANDY G Coir rolls combat bank erosion on Monmouthshire

- & Brecon Canal[J]. British Waterways, 2005, 6: 1 - 4.
- [3] 史云霞, 陈一梅. 国内外内河航道护岸型式及发展趋势[J]. 水道港口, 2007, 28(4): 261 - 264. (SHI Yun-xia, CHEN Yi-mei. Revetment type of inland waterway and its development trends at home and abroad[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(4): 261 - 264. (in Chinese))
- [4] 王炜正. 新型生态护岸在连云港港疏港航道中的应用[J]. 水运工程, 2008(9): 135 - 139. (WANG Wei-zheng. Application of new ecological-type revetment in cargo-distributing channel of Lianyungang port[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(9): 135 - 139. (in Chinese))
- [5] 葛红群, 朱轶群. 芦苇生态护坡在京杭运河两淮段治理工程中的应用[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2009, 8(2): 62 - 64. (GE Hong-qun, ZHU Yi-qun. Application of reed ecological bank revetment in regulation project of Beijing-Hangzhou canal Huaian-Huaiyin ship lock section[J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2009, 8(2): 62 - 64. (in Chinese))
- [6] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31 - 38. (YANG Ya-chuan, MO Yong-jing, WANG Zhi-fang, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(2): 31 - 38. (in Chinese))
- [7] 张谢东, 石明强, 沈雪香, 等. 高速公路生态防护根系固坡的力学试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(1): 59 - 61. (ZHANG Xie-dong, SHI Ming-qiang, SHEN Xue-xiang, et al. Experimental research on plant-mechanical analysis for highway eco-protection slope[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(1): 59 - 61. (in Chinese))
- [8] 张锋, 凌贤长, 吴李泉, 等. 植被须根护坡力学效应的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3979 - 3985. (ZHANG Feng, LING Xian-zhang, WU Li-quan, et al. Triaxial experimental study of mechanical effect of slope protection with vegetation fibril[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3979 - 3985. (in Chinese))
- [9] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041 - 2045. (CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041 - 2045. (in Chinese))
- [10] 胡其志, 周政, 肖本林, 等. 生态护坡中土壤含根量与抗剪强度关系试验研究[J]. 土工基础, 2010, 24(5): 85 - 87. (HU Qi-zhi, ZHOU Zheng, XIAO Ben-lin, et al. Experimental research on relationship between root weight and shearing strength in soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(5): 85 - 87. (in Chinese))
- [11] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 67 - 72. (LIU Xiu-ping, CHEN Li-hua, SONG Wei-feng. Study on the shear strength of forest root-loess composite[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(5): 67 - 72. (in Chinese))
- [12] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))