

黄麻纤维加筋土的强度特性及增强机理研究

钱叶琳^{1,2},王洁¹,吕卫柯¹,郭盼盼²,单生彪²,汪亦显²

(1.安徽路桥工程集团有限责任公司,安徽合肥210029;2.合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽合肥230009)

摘要:采用黄麻纤维对合肥地铁工程沿线广泛分布地典型弱潜势膨胀土加筋改良处理,通过改变黄麻纤维掺量和长度对包含素膨胀土和纤维加筋土的土样进行了一系列室内直剪试验和无侧限抗压强度试验,探讨了纤维长度和纤维含量对加筋土强度特性的影响,并简要分析了纤维增强机理。研究表明:黄麻纤维加筋可显著提高土体抗剪强度和膨胀土的无侧限抗压强度,改善了膨胀土的剪切破坏形式,减小了破坏时裂隙的宽度和长度。

关键词:黄麻纤维;纤维加筋土;抗剪强度;增强机理;无侧限抗压强度试验

中图分类号:TU94+1

文献标识码:A

Research on strength characteristics and improving mechanism of Jute fiber – reinforced soil

QIAN Yelin^{1,2}, Wang Jie¹, Lv Weike¹, GUO Panpan², SHAN Shengbiao², WANG Yixian²

(1. Anhui Road & Bridge Group Co., Ltd, Anhui Hefei 210029, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Anhui Hefei 230009, China.)

Abstract: The classical weak expansive soil existed widely in Hefei was treated by mixing with randomly and uniformly distributed jute fiber. And a series of direct shear and unconfined compression tests were conducted on soil samples of ten groups including expansive soil and reinforced soil with jute fiber of varying fiber content and fiber length. Besides, the improving mechanism of fiber reinforcement and the effects of fiber length and fiber content on the strength characteristics of jute fiber – reinforced soil were analyzed briefly. Results of this investigation show that: Incorporating randomly distributed jute fiber into expansive soil could enhance observably the shear strength of soil, Jute fiber reinforcement improved the shear failure mode of expansive soil, at the same time, the length and the width of the fractures on the surface of soil specimens after failure reduced largely.

Key words: Jute fiber; fiber – reinforced soil; shear strength; improving mechanism; unconfined compression test

建造于软弱土或膨胀土地基上的建筑物或构筑物,常常因地基土体的弱抗剪强度和高压缩性导致的不均匀沉降产生开裂、倾覆等工程问题,给生命、财产安全带来巨大威胁。为此,以改善不良土的抗剪强度、承载能力和渗透特性等工程性质的土体改良或加固技术得到广泛研究和发
展^[1-5]。采用石灰、水泥或CTMAB等作为土体改良剂的化学加固法被证明在提高不良土工程性质方面效果显著^[6-7]。但这些化学添加物会导致土

体脆性增强,变形能力减弱,同时也有可能污染地下水。研究表明,土体中纤维的较高抗拉强度和较好延展性可有效提高土体强度、降低土体压缩性和脆性,且对环境无污染,和传统采用石灰或水泥的土体改良法相比具有较大优越性^[8-10]。近年来,国内外有关纤维加筋土的直剪、三轴、无侧限抗压和CBR等试验研究较多,取得了丰硕成果^[11-13]。李广信等指出纤维加筋能显著提高黏性土的抗剪强度,增加塑性和韧性^[15]。Mona

收稿日期:2016-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304057);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放研究基金项目资助(SKLG201406);合肥市重点工程建设局科技支撑项目(2013CGAZ0771);安徽省住房城乡建设厅科学技术计划项目(2013YF-27)。

作者简介:钱叶琳(1980-),男,安徽青阳人,硕士,高级工程师,从事岩土及路基工程方面的研究。

Malekzadeh 发现聚丙烯纤维可降低膨胀土的膨胀性,且在提高加筋土抗拉强度上比提高抗压强度更有效^[16]。纤维加筋土不仅具有较好的静力特性,也具有可观的抗震性能,适合作为土石坝裂缝敏感区的填料^[17]。据研究,纤维加筋可显著提高砂土的抗液化强度^[18],因此,在不排水条件下,使砂土液化所需的加载循环次数增多^[19-20]。姚波等^[21]提出加筋土中加入水泥可显著提高其抗剪强度和残余强度指标,并增强结构稳定性。Prabakar J 等^[22]经试验证明剑麻是一种优异的土体改良材料。本文基于直剪试验和无侧限抗压试验,探讨了纤维长度和纤维含量对黄麻纤维加筋土的强度特性的影响,并简要分析了纤维增强机理,研究结果可为理论研究与工程实践打下基础。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用土样取自合肥市轨道交通 1 号线某换乘站基坑工程,取样深度 4~6 m。土样取回后密封贮存,以备后续试验所用。基于密度、界限含水率和颗粒分析等一系列室内基本土力学试验,得到膨胀土的基本物理力学性质如表 1 所示。本研究所用加筋材料为黄麻纤维。黄麻纤维是经济价值高、用途广泛的天然纤维之一,大量种植于孟加拉国、中国、印度和泰国等地。黄麻纤维具有低断裂伸长率和较高抗拉强度,使得黄麻纤维加筋复合材料表现出较高韧性和较强抗剪强度。具有“黄金纤维”之称的黄麻纤维将会在岩土工程土体改良领域扮演越来越重要的角色。

1.2 试样制备

将取回的膨胀土风干碾碎,过 2 mm 筛,并测得膨胀土的风干含水率为 4.1%。将过筛后的膨胀土颗粒混合均匀,装入塑料袋中密封保存。本研究选取的黄麻纤维掺量分别为干土质量的 0.05%、0.15% 和 0.25%,选取的黄麻纤维长度为

6、12 和 18 mm。试验过程中,首先用剪刀将黄麻纤维剪成 6、12 和 18 mm 三种长度,然后称取一定质量预先准备好的过筛后风干膨胀土颗粒,根据其干土质量和黄麻纤维掺加率计算出所需黄麻纤维的质量,用精度为 0.01 g 的电子天平称取所需质量的黄麻纤维,接着,通过手工拌合,分多次、小增量地将黄麻纤维混入到风干膨胀土颗粒中,最终使所有黄麻纤维都能有效地与膨胀土样随机均匀混合。

黄麻纤维与风干膨胀土颗粒均匀混合后,根据膨胀土的风干土质量、风干土含水率和最优含水率计算出纤维土中所需加入的水量,将计算得到的制样所需加水量通过喷雾器均匀洒入纤维土中,将配制好的土样装入塑料袋,封闭焖料 24 h,以便水分在土体中充分扩散,直至均匀。依据公路土工试验规程(JTG E40-2007),按膨胀土的最优含水率和最大干密度制作直剪试验和无侧限抗压试验所用的黄麻纤维加筋土试样,共开展 10 组试验。直剪试验采用的仪器为应变控制式电动直剪仪,每组土样 4 个试样,在 4 种不同垂直压力下(100、200、300、400 kPa)进行剪切试验,选择的剪切速率为 0.8 mm/min。无侧限抗压强度试验采用的试验仪器为三轴压缩仪。

2 直剪试验结果与分析

2.1 直剪试验结果

10 组试样的直剪试验结束后,各组试样在每级垂直压应力 σ 下的抗剪强度 τ 按以下标准从剪应力-剪切变形曲线上获取:当剪应力-剪切变形曲线有峰值时,抗剪强度即为峰值剪应力;当剪应力-剪切变形曲线无峰值时,取剪切位移为 4 mm 时的剪应力为抗剪强度。对每组试样的抗剪强度 τ 与垂直压应力 σ 关系进行线性拟合,获取各组试样的抗剪强度指标(黏聚力 c 、内摩擦角 φ),试验结果如图 1~图 4 所示。

表 1 膨胀土的基本物理力学性质

Tab. 1 The basic physical and mechanical properties of expansive soil

天然含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比重 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	液性指数 I_L	最优含水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	自由膨胀率 $\delta_f/\%$
24.6	1.77	2.78	52.5	23.2	29.3	0.05	17.2	1.86	52

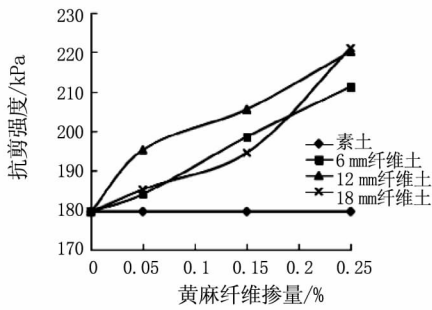


图1 土样抗剪强度与纤维掺量关系($\sigma=200$ kPa)
Fig.1 The relationship of fiber content vs. shear strength ($\sigma=200$ kPa)

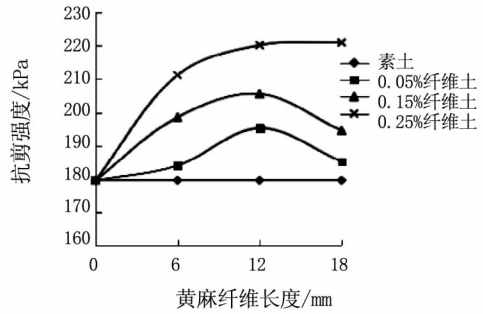


图2 土样抗剪强度与纤维长度关系($\sigma=200$ kPa)
Fig.2 The relationship of fiber length vs. shear strength ($\sigma=200$ kPa)

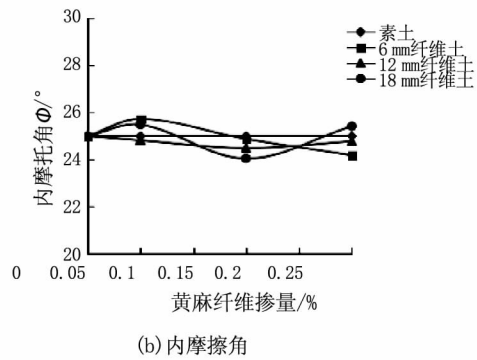
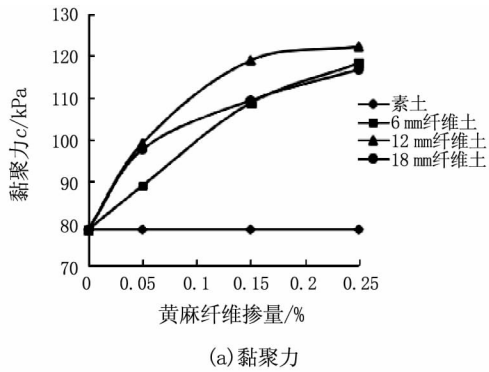


图3 黄麻纤维掺量对土样抗剪强度指标的影响

Fig.3 The influence of fiber content vs. shear strength for specimen

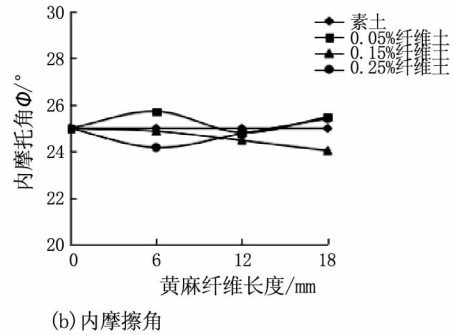
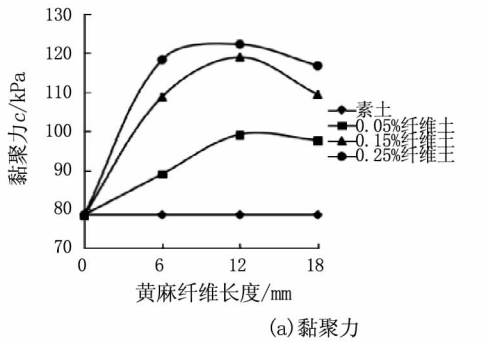


图4 黄麻纤维长度对土样抗剪强度的影响

Fig.4 The influence of fiber length vs. shear strength for specimen

2.2 直剪试验结果分析

图1为垂直压应力为200 kPa时的土样抗剪强度与纤维含量关系曲线,其它压应力下的曲线与此类似。结果表明,在每一级垂直压应力下,土样的抗剪强度都随黄麻纤维掺量的增加而不断提高,当黄麻纤维掺量从0增加到0.05%时,土样的抗剪强度提高幅度较明显,而当黄麻纤维掺量进一步增大时,土样抗剪强度提高幅度逐渐降低。由图2可见,黄麻纤维长度对土样抗剪强度有显著影响,总体上,不同垂直压应力下的不同纤维掺

量土样的抗剪强度随黄麻纤维长度的增加先增大后减小,当纤维长度为12 mm时,土样抗剪强度达到最大值。

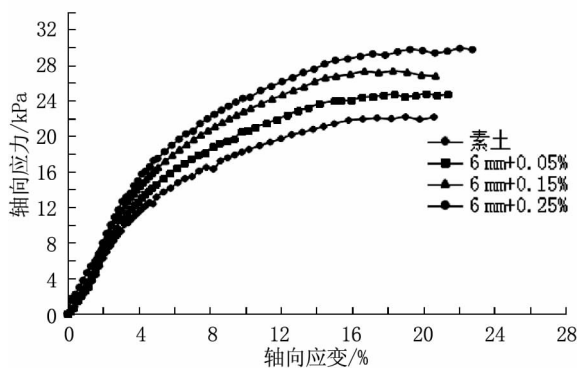
土体的抗剪强度指标包括黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,是建筑设计、基坑支护等工程建设的重要参数。土样的抗剪强度指标随黄麻纤维掺量和长度的变化情况如图3和图4所示。黄麻纤维掺量对土样抗剪强度指标的影响主要表现为:纤维加筋膨胀土的黏聚力随黄麻纤维掺量的增加呈不断增长趋势,但增长的幅度随纤维掺量的增加呈降低趋势,理论上,土体中纤维掺量越多,剪切面

上纤维密度越大,纤维对剪应力的分担能力就越高,但是纤维加筋对黏聚力的贡献存在临界掺量,超过临界值后,纤维加筋土的黏聚力会随纤维掺量的增加而降低;黄麻纤维掺量对纤维加筋膨胀土的内摩擦角影响较小,且无明显规律。黄麻纤维长度对土样黏聚力的影响与黄麻纤维长度对土样抗剪强度的影响类似,黄麻纤维加筋土中纤维掺量一定时,其黏聚力随黄麻纤维长度的增加先增大后减小,黄麻纤维长度在纤维增强效果上存在最优值。

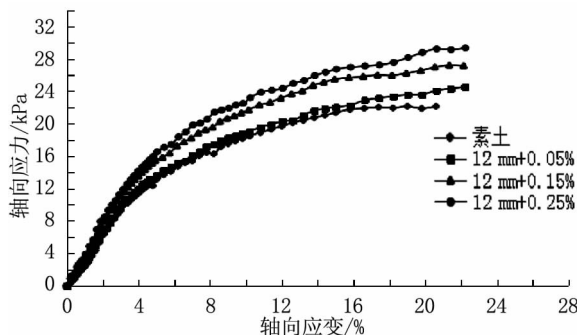
3 无侧限抗压强度试验结果与分析

3.1 无侧限抗压强度试验结果

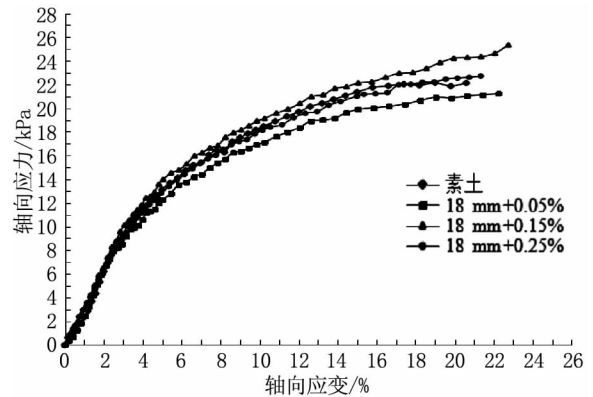
无侧限抗压强度试验结束后,根据手轮转数和百分表读数等计算出土样的轴向应变和轴向应力,然后,以轴向应力 σ 为纵坐标,以轴向应变 ε_1 为横坐标,绘制试样的应力-应变曲线。以应力-应变曲线的最大轴向应力作为土样的无侧限抗压强度,若最大轴向应力不明显,取轴向应变 15% 处的应力作为该试样的无侧限抗压强度 q_u ,10 组土样的轴向应力-轴向应变关系曲线见图 5。



(a) 黄麻纤维长6 mm



(b) 黄麻纤维长12 mm



(c) 黄麻纤维长18 mm

图5 土样的轴向应力-轴向应变关系曲线

Fig.5 The relationship of axial stress vs. axial strain for specimen

3.2 无侧限抗压强度试验结果分析

图 6 表明,对于不同黄麻纤维掺量的土样,其无侧限抗压强度-纤维长度曲线呈“拱形”,无侧限抗压强度值在纤维长度为 6 mm 时达到峰值。之后,随着黄麻纤维长度的进一步增大,土样的无侧限抗压强度值发生衰减,0.05% 掺量的纤维土的衰减稳定值甚至低于未加筋土。该现象表明,采用长度为 12 mm、掺量为 0.05% 的黄麻纤维与膨胀土混合,不但达不到提高其无侧限抗压强度的目的,反而抑制了土样本身无侧限抗压强度的发挥,经分析,这可能是由以下原因造成:黄麻纤维与土体拌合过程中,长度大于 6 mm 的纤维间更容易发生相互扭曲、缠绕,凝结成团,土体中均匀分散的纤维只是所掺纤维中的很小一部分,大部分的纤维凝结成团,且土体中“大块”的凝结成团纤维占有较大体积,使土颗粒间距增大,土颗粒间连接力减弱,土样受荷变形过程中,凝结成团纤维与土颗粒间的摩擦力小于土颗粒与土颗粒间的摩擦力和黏结力之和,导致土颗粒发生重排与移动的阻力降低(阻力降低值用 F_{dec} 表示),在黄麻纤维掺量较小时,土体中均匀离散分布的纤维对土体强度贡献值 $F_{inc} < F_{dec}$,从而造成长度为 12 mm、掺量为 0.05% 的黄麻纤维加筋土的无侧限抗压强度低于未加筋土的无侧限抗压强度。

图 7 表明,总体上,黄麻纤维对膨胀土无侧限抗压强度值的贡献与黄麻纤维掺量呈正相关关系,但 18 mm 纤维加筋土的无侧限抗压强度值随黄麻纤维掺量发生“波动”,无侧限抗压强度极大值发生在纤维掺量为 0.15% 处,该现象是由纤维长度和纤维掺量的耦合作用造成的。因此,工程

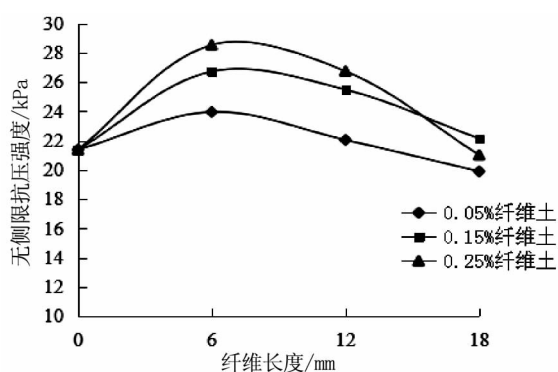


图6 无侧限抗压强度与纤维长度的关系

Fig. 6 Unconfined compressive strength versus fiber length

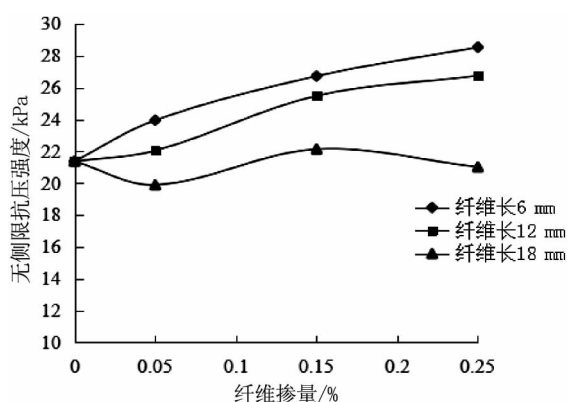


图7 无侧限抗压强度与纤维含量的关系

Fig. 7 Unconfined compressive strength versus fiber content

实践中采用黄麻纤维对土体进行改良时,应合理搭配纤维长度与纤维掺量,力求采用最优“配合比”,从而实现经济效益最大化。初步研究发现,6 mm纤维长度与0.25%纤维掺量对提高合肥膨胀土的无侧限抗压强度值效果较佳。

3.3 纤维增强土体无侧限抗压强度机理

纤维加筋土在无侧限抗压强度试验过程中,只在轴向施加荷载,侧向无荷载,土样在轴向荷载作用下发生轴向和侧向变形,土样的变形使得纤维与土体接触面相互作用,纤维体中产生拉应力,纤维对土颗粒的反作用力与土体变形或土颗粒移动方向相反,从而可抑制土颗粒的移动和土体变形。无侧限抗压强度试验过程中,纤维对土颗粒的等效附加应力(反作用力)可视为围压作用于土样周围,据此,土样抗压强度试验中的“无侧限”变为“有侧限”,即相当于三轴压缩试验。在“有侧限”情况下,土样的受荷变形受到限制,抗压强度的得到提高。

4 结论

1) 黄麻纤维长度对纤维加筋土抗剪强度有一定影响,表现为抗剪强度随黄麻纤维长度的增加先增大后减小,较长纤维间的相互缠绕、凝结降低了纤维增强土体抗剪强度效果。黄麻纤维加筋土的无侧限抗压强度较素土提高明显,黄麻纤维加筋、纤维长度和纤维掺量对膨胀土受压过程中的初始刚度无明显影响。

2) 纤维加筋土直剪试样中的纤维按照其是否对抗剪强度有所贡献分为“有效纤维”和“无效纤维”,“有效纤维”加筋改良膨胀土效果受筋/土界面摩擦力和黏聚力控制。

3) 无侧限抗压强度试验中,纤维对土颗粒的等效附加应力可视为围压作用于土样周围,据此,土样抗压强度试验中的“无侧限”变为“有侧限”,在“有侧限”情况下,土样的受荷变形受到限制,抗压强度得到提高。

参考文献:

- [1] HANIFI CANAKCIA, WALEED SIDIKA, IBRABIM HALIL KILICC. Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(5): 1211 - 1221.
- [2] ALY ABMED. Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite[J]. Applied Clay Science, 2015, 104: 27 - 35.
- [3] VIVI ANGGRAINIA, AFSHIN ASADIB, BUJANG B. K. HUATA, et al. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil [J]. Measurement, 2015, 59: 372 - 381.
- [4] 袁俊平, 韩春雷, 丁巍, 等. 膨胀土边坡土工膜防护方案试验研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(4): 6 - 10
- [5] 卢子威, 张文慧, 王晶晶. 重塑膨胀土膨胀力室内试验研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(3): 47 - 50
- [6] 汪亦显, 郭盼盼, 单生彪, 等. 合肥膨胀土阳离子改良试验及微观机制分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 104 - 109 & 135.
- [7] MOHAMED KHEMISSA, ABDELKRIM MAHAMED. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay[J]. Applied Clay Science, 2014, 95: 104 - 110.
- [8] CHAOSHENG TANG, BIN SHI, WEI GAO, et al. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 25(3): 194 - 202.
- [9] FATAHI B, KHABBAZ H. Mechanical characteristics of soft

- clay treated with fibre and cement[J]. *Geosynthetics International*, 2012, 19(3): 252 - 262.
- [10] FATAHI B, TM LE, KHABBAZ H. Shrinkage properties of soft clay treated with cement and geofibers[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2013, 31(5): 1421 - 1435.
- [11] TEMEL YETIMOGLU, ONER SALBAS. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21(2): 103 - 110.
- [12] SIVAKUMAR BABU G L, VASUDEVAN A K. Sumanta Hal-dar Numerical simulation of fiber - reinforced sand behavior [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(2): 181 - 188.
- [13] SUNG SIK PARK. Unconfined compressive strength and ductility of fiber - reinforced cemented sand[J]. *Composite Materials and Adhesive Bonding Technology*, 2011, 25(2): 1134 - 1138.
- [14] KUMAR D, NIGAM S, NANGIA A, et al. Improvement in CBR Values of Soil Reinforced with Jute Fibre[J]. *Internal Journal of Engineering and Technical Research*, 2015, 3(5): 290 - 293.
- [15] 李广信, 陈 轮, 郑继勤, 等. 纤维加筋粘性土的试验研究[J]. *水利学报*, 1995, 6: 31 - 36.
- [16] MALEKZADEH M, BILSEL H. Effect of polypropylene fiber on mechanical behavior of expansive soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 17/A: 55 - 63.
- [17] 张小江, 周克骥, 周景星. 纤维加筋土的动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(3): 45 - 49.
- [18] GHIASSIAN H, GHAZI F. Liquefaction analysis of fine sand reinforced with carpet waste fibers under triaxial tests[C]// 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.
- [19] MAHER M H, WOODS R D. Dynamic response of sand reinforced with randomly distributed fibers. ? *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1990, 116(7): 1116 - 1131.
- [20] NR KRISHNASWAMY, NT LSAAC. Liquefaction potential of reinforced sand [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 1994, ? 13(94): 23 - 41.
- [21] 姚 波, 刘振杰, 宋 佳, 等. 水泥增强法提高土工织物加筋土抗剪强度的试验研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(11): 1860 - 1862.
- [22] PRABAKAR J, SRIDHAR R S. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. *Construction and Building Materials*, 2002, 16(2): 123 - 131.

(责任编辑 李 军)

(上接第 18 页)

- [3] 闰宏生. 再生混凝土结构的氯离子侵蚀试验[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2013, 32(12): 1673 - 1676.
- [4] FUNG W K. Durability of Concrete Using Recycled Aggregates[C]// SCCT. SCCT Annual Concrete Seminar. Hone Kone; SCCT, 2005, 101 - 129.
- [5] OTSUKI N, MIYAZATO S, YODSUDJAI W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(5): 443 - 451.
- [6] 郭远臣, 王 雪, 何运祥. 再生骨料混凝土吸湿性能及对干燥收缩的影响[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(3): 386 - 390.
- [7] 安新正, 易 成, 姜新佩, 等. 海水环境下再生混凝土的腐蚀研究[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(1): 5 - 9.
- [8] DB11/T803 - 2011. 再生混凝土结构设计规程[S].
- [9] GB/T50476 - 2008. 混凝土结构耐久性设计规范[S].
- [10] 金伟良, 袁迎曙, 卫 军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] PAPANAKIS V G, VAYENAS C G, FARDIS M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation [J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(4): 363 - 373.
- [12] TUUTTI K. Corrosion of steel in concrete[R]. Stockholm; Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [13] VALENZA J J, SCHERER G W. Mechanism for salt scaling[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(4): 1161 - 1179.
- [14] ULM F J, COUSSY O, LI K F, et al. Thermo - chemo - mechanics of ASR expansion in concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(3): 233 - 242.
- [15] 金祖权, 赵铁军, 陈惠苏, 等. 海洋环境下裂缝混凝土氯盐腐蚀[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(7): 2821 - 2826.
- [16] KWON S J, NA U J, PARK S S, et al. Service life prediction of concrete wharves with early - aged crack; Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. *Structural Safety*, 2009, 31(1): 75 - 83.
- [17] 崔正龙, 路沙沙, 汪振双. 弯曲裂缝对再生混凝土构件碳化性能影响的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2011, 30(5): 1173 - 1176.
- [18] 刘 超, 白国良, 尹 磊, 等. 长期荷载作用下再生混凝土梁裂缝宽度试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(1): 82 - 87.
- [19] 肖建庄, 雷 斌. 再生混凝土耐久性研究[J]. *混凝土*, 2008(5): 83 - 89.

(责任编辑 王利君)