第54卷第3期
2014年5月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 54, No. 3
May 2014

文章编号：1000-8608(2014)03-0323-06

秸秆纤维黏土混合料作为填埋场衬垫材料可行性研究

陆海军*，陈　威，董祎挈

（武汉轻工大学 多孔介质力学研究所，湖北 武汉 430023）

摘要： 为保证填埋场衬垫防渗系统的安全性，采用秸秆纤维对压实黏土衬垫系统进行改良，以提高衬垫系统的承载能力及抗开裂特性. 通过无侧限抗压强度试验、直剪试验、固结试验与抗开裂试验，探讨了秸秆纤维改良黏土的强度特性、变形特性和抗开裂特性，并以此对秸秆纤维黏土混合料作为填埋场衬垫材料的可行性进行评价. 试验结果表明，秸秆纤维改良黏土具有较高的承载能力与抗开裂能力，秸秆纤维黏土混合料可以作为填埋场衬垫材料. 秸秆纤维掺量对改良黏土的强度特性影响显著，随纤维掺量的增加，改良黏土的无侧限抗压强度先增大后减小，破裂形态由脆性破坏逐渐过渡为塑性破坏；黏聚力 c、内摩擦角 φ、压缩模量 E_s 先增大后减小；压缩系数 α_v、压缩指数 C_c 则出现先减小后增大的趋势. 最佳秸秆纤维掺量为 0.30%，此时改良黏土的最大抗压强度达到 459.15 kPa，满足填埋场衬垫的工程强度要求. 秸秆纤维掺量为 0.30% 的改良黏土，其开裂因子仅为 0.008 1.

关键词： 填埋场衬垫；秸秆纤维；改良黏土；承载能力；开裂因子

中图分类号： TV131.2　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201403010

0 引　言

为了保护填埋场生态环境的安全，减少垃圾渗滤液的外泄，现代垃圾卫生填埋场要求建设衬垫系统.《生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ 17—2004)要求采用压实黏土衬垫系统，且系统中压实黏土层的渗透系数不得大于 1×10^{-7} cm/s. 垃圾填埋体对衬垫系统产生的强大的压应力与剪应力，会引起衬垫系统的失稳破坏. 此外，在填埋场内部与外部环境作用下，压实黏土衬垫系统经常会出现干燥开裂现象. 衬垫系统一旦开裂，将为垃圾渗滤液的外泄提供便捷路径，污染填埋场周边的生态环境.

众多学者试图采用石灰、砂子、水泥等作为添加剂，以改善压实黏土衬垫系统承载能力与抗开裂能力. 然而，经添加剂改良的压实黏土在控制黏土开裂方面，其效果并不明显. 近年来，纤维材料由于具有较好的韧性和延展性被普遍应用于压实黏土中，用以提高压实黏土的抗开裂性能及抗剪强度. 聚丙烯纤维在黏土与混凝土加筋中被普遍采用. Maher 等[1]、Nataraj 等[2]、许勇宏等[3]、王伟等[4]、唐朝生等[5-6]、赵宁雨等[7]、张金利等[8]通过试验分析了纤维掺合比、长度、直径等因素对改良黏土抗剪性能及抗开裂特性的影响规律，确定了纤维的最佳掺量、长度、排列方式. 近几年，很多学者尝试采用其他纤维材料作为压实黏土的改良材料以提高其抗开裂及强度特性. Prabakar 等[9]对剑麻纤维不同长度和掺量对黏土强度的影响进行了研究；Khosrow 等[10]探讨了椰壳纤维的物理性质和加筋效果. 张艳美等[11]通过对土工合成纤维土补强机理的理论分析，认为纤维土黏聚力增量与纤维的韧度、细度及纤维土的配合比等参数有密切联系；Xue 等[12]采用秸秆废弃物提取路用秸秆纤维，并对秸秆纤维的表面微观结构、力学特性进行了检测.

农作物秸秆利用率较低，绝大多数秸秆就地焚烧，造成资源浪费，污染环境. 通过废弃农作物秸秆提取秸秆纤维材料，将其作为添加剂对传统压实黏土衬垫系统进行改良，可以有效避免秸秆焚烧造成的生态环境污染，并有效提高填埋场衬垫系统的承载能力与抗开裂特性.

收稿日期： 2013-12-05；　**修回日期：** 2014-03-11.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(11002102)；武汉市青年科技晨光计划资助项目(201271031419).
作者简介： 陆海军*(1979-)，男，博士，E-mail：luhaijun111@163.com.

本文为了提高压实黏土的抗开裂特性和强度特性，试图采用农作物秸秆纤维作为改良添加剂. 为了对秸秆纤维黏土混合料作为填埋场衬垫材料的可行性进行评价，通过无侧限抗压强度试验、直剪试验、固结试验，检测纤维黏土混合料的强度特性与渗透性能；通过多次干湿循环条件下秸秆纤维改性黏土开裂试验，检测纤维黏土混合料的抗开裂特性.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验中所用的黏土取自武汉市汉口常青花园某一施工现场，取土器取土深度 3 m. 黏土基本物理性质指标和化学成分分析如表 1、2 所示. 采用碱法蒸煮对秸秆纤维进行提取，先剔除秸秆中的叶、穗、节等杂质，再将秸秆截取至 3～5 cm，将其洗净，晾干并且置于干净的包装袋中备用. 用碱量(工业纯 NaOH)为 10%，高温蒸煮锅进行蒸煮. 最高蒸煮压力 380～530 kPa，蒸煮温度 150～160 ℃，蒸煮时间为 3～4 h. 待蒸煮完毕，将其进行过滤，并洗去碱液，置于常温条件下自然风干得到秸秆纤维. 秸秆纤维微观结构如图 1 所示，其化学成分与物理特性如表 3、4 所示.

表 1 黏土的基本物理性质指标

Tab. 1 The basic physical properties of clay

孔隙比 e	ρ_{dmax}/(g·cm^{-3})	W_{opt}/%	液限 W_l/%	塑限 W_p/%	塑限指数 I_p	渗透系数 K_s/(cm·s^{-1})
0.44	1.65	19	48.5	26.2	22.3	3.5×10^{-8}

表 2 黏土的化学成分

Tab. 2 The chemical composition of clay

化学成分	w/%	化学成分	w/%
SiO_2	58.42	MgO	0.12
Al_2O_3	25.23	K_2O	5.32
Fe_2O_3	0.24	Na_2O	2.67
CaO	0.51		

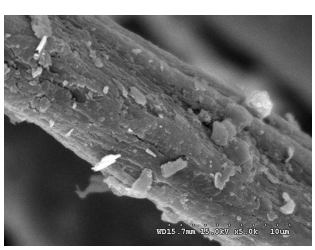


图 1 秸秆纤维微观结构

Fig. 1 The microstructure of straw fiber

表 3 秸秆纤维的化学成分

Tab. 3 The chemical composition of straw fiber

化学成分	w/%	化学成分	w/%
灰分	13.52	木质素	10.44
硝酸-乙醇纤维素	35.65	脂蜡质	5.21
半纤维素	26.83	其他	8.35

表 4 秸秆纤维的物理特性

Tab. 4 The physical properties of straw fiber

长度/mm	宽度/μm	pH(20℃)
1±0.1	20～50	7.73
含水率/%	断裂强力/(cN·tex^{-1})	断裂伸长率/%
3.6	12.6～24.5	5.3

1.2 试验方法

针对最大压实度(1.65 g/cm^3)、最优含水率(0.19)的黏土样本，采用秸秆纤维对其进行改良，秸秆纤维的掺量分别为 0.05%、0.10%、0.20%、0.30%、0.40%、0.50%. 根据土工试验规程 SL 237-020—1999、SL 237-021—1999、SL 237-015—1999，对秸秆纤维黏土混合料进行无侧限抗压强度、直剪试验及固结试验.

在恒温干燥箱内进行秸秆纤维改良压实黏土开裂试验，温度设定为 40 ℃. 利用电子天平来检测压实黏土中水分的变化. 采用数码显微摄像系统观测压实黏土试样的开裂情况，放大倍数为 10 倍，如图 2 所示. 在干湿循环过程中，压实黏土试样干燥 5 d 后，进行第一次干湿循环，其后每隔 5 d 进行一次，共进行 4 次干湿循环，历时 25 d.

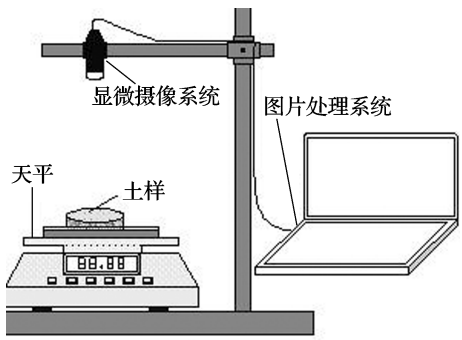


图 2 压实黏土开裂监测装置

Fig. 2 Cracking monitoring device of compacted clay

2 试验结果与分析

2.1 改良黏土的无侧限抗压强度

秸秆纤维改良黏土的无侧限抗压强度如图 3

所示，破坏应变如图 4 所示，破坏形态如图 5 所示. 由图 3 可知，抗压强度随应变的增大呈先增大后减小的规律，素土的最大抗压强度为 326.61 kPa. 随秸秆纤维掺量的增大，抗压强度先增大后减小，纤维掺量为 0.30%时抗压强度最大，其值为 459.15 kPa. Daniel 等[13]认为作为衬垫系统的土壤材料的无侧限抗压强度不能小于 200 kPa. 通过数据对比，发现秸秆纤维黏土混合料抗压强度明显高于 200 kPa，满足土壤材料的强度要求，可以作为填埋场衬垫材料. 在试验中，素土发生显著的软化现象，但随纤维掺量的增加，软化形态逐渐削弱，使得轴向应力达到峰值后会在峰值水平附近波动，其后当应变增大到一定程度后而急剧衰减. 由图 4 可知，随着纤维掺量 ρ_f 的增加，土样的破坏应变 ε_f 增大，但当纤维掺量增加至 0.30%，破坏应变达到最大值，为 6.5%，说明纤维的增加提高了土样的塑性变形能力.

由图 5 可以看出，当纤维掺量小于 0.30%，黏土的破坏形态由脆性破坏向塑性破坏转变. 素土试样破裂面清晰可见，为脆性破坏，达到抗压强度极限后发生断裂. 纤维具有良好的韧性和延性，在黏土颗粒之间纤维起到连结加固作用，能提高黏土的韧性和延性，从而有效避免黏土的开裂，黏土的破裂形态由脆性破坏向塑性破坏转变. 当纤维掺量大于 0.30%，纤维的定向分布和过多的纤维直接接触会造成纤维和土体的摩阻力减小，抗压强度减小，进而出现越来越明显的破裂面.

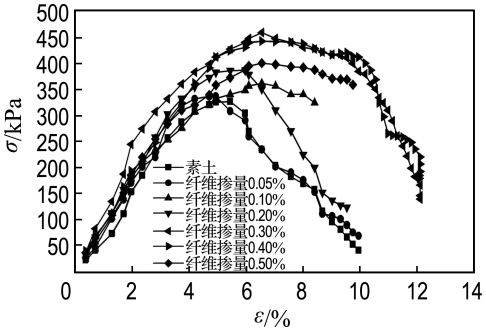


图 3　秸秆纤维改良黏土的无侧限抗压强度

Fig. 3　The unconfined compressive strength of clay containing straw fiber

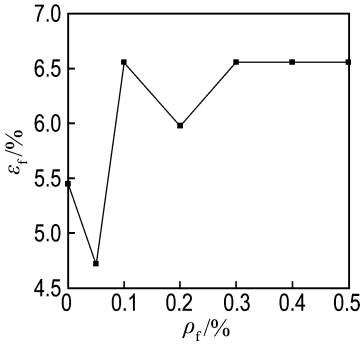
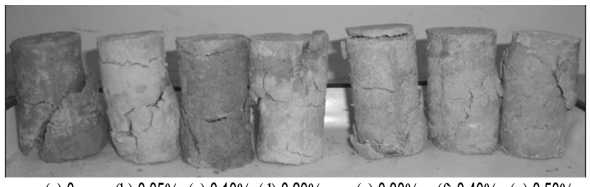


图 4　破坏应变与纤维掺量之间的关系

Fig. 4　The relationship of strain at failure with content of straw fiber



(a) 0　(b) 0.05%　(c) 0.10%　(d) 0.20%　(e) 0.30%　(f) 0.40%　(g) 0.50%

图 5　秸秆纤维改良黏土的破坏形态

Fig. 5　The failure pattern of clay containing straw fiber

2.2　改良黏土的抗剪强度

秸秆纤维改良黏土抗剪强度 τ 如图 6 所示，抗剪强度指标如表 5 所示. 由图 6 可知，在纤维掺量小于 0.30%时，改良黏土的抗剪强度随纤维掺量的增大而增大，纤维掺量为 0.30%时，其抗剪强度最大. 由表 5 可知，c、φ 均随纤维掺量的增加先变大后减小，并且在纤维掺量为 0.30%的条件下，达到最大值，所以，最佳的纤维掺量为0.30%.

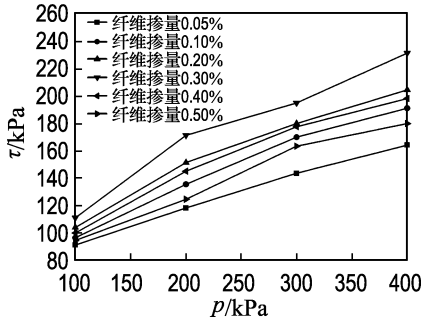


图 6　秸秆纤维改良黏土的抗剪强度

Fig. 6　The shear strength of clay containing straw fiber

表 5　秸秆纤维改良黏土的抗剪强度指标

Tab. 5　The shear strength index of clay containing straw fiber

纤维掺量/%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
0.05	68.10	13.71
0.10	68.49	17.75
0.20	77.31	18.26
0.30	80.90	21.06
0.40	73.36	18.13
0.50	66.61	16.44

纤维改良黏土的 c、φ 主要由纤维与黏土颗粒以及黏土颗粒之间的法向约束力与水平约束力相互作用而产生. 纤维对压实黏土的补强作用,不仅来自水平约束力,也来自于法向约束力. 改良黏土的黏聚力主要由土颗粒、结合水和毛细水的连结作用以及纤维与土颗粒之间的黏聚力构成,其中土颗粒、结合水与毛细水的连结特性保持不变. 纤维掺量小于 0.30%,纤维与土颗粒的黏聚力随纤维掺量的增加而增大,纤维网能增强黏土内部摩阻力,进而增大 φ;纤维掺量超过 0.30%时,纤维含量的剧增引起纤维的聚集,造成改良黏土的 c、φ 减小.

2.3 改良黏土的固结压缩特性

秸秆纤维改良黏土的固结压缩曲线如图 7 所示,压缩系数 α_v、压缩模量 E_s、压缩指数 C_c 如表 6 所示.

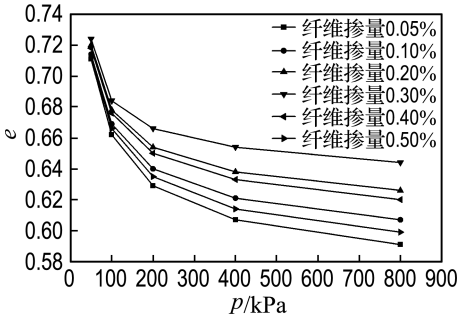


图 7 秸秆纤维改良黏土的压缩曲线

Fig. 7 The compression curve of clay containing straw fiber

表 6 秸秆纤维改良黏土的 α_v、E_s 与 C_c

Tab. 6 The α, E_s and C_c values of clay containing straw fiber

纤维掺量/%	α_v/MPa^{-1}	E_s/MPa	C_c/MPa^{-1}
0.05	0.33	5.036	0.110
0.10	0.29	5.755	0.096
0.20	0.24	6.992	0.080
0.30	0.18	9.356	0.060
0.40	0.26	6.446	0.086
0.50	0.31	5.374	0.103

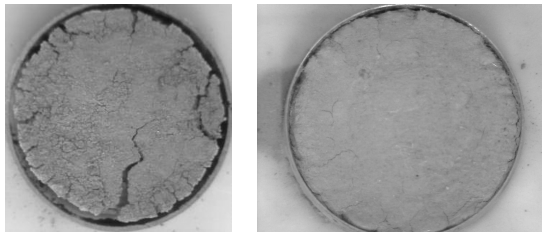
由图 7 及表 6 可知,纤维掺量小于 0.30%时,孔隙比 e 随纤维掺量的增大而增大;大于 0.30%时,孔隙比则随纤维掺量的增大而减小. α_v、C_c 随纤维掺量的增大呈先减小后增大的趋势,在纤维掺量为 0.30%时,α_v、C_c 达到最小值,E_s 表现出与 α_v、C_c 相反的规律. 改良黏土在固结压缩过程中存在法向约束力,法向约束力来源于纤维与土体的摩阻力、黏聚力,纤维网对土体的包裹作用以及土颗粒间的胶结作用. 纤维掺量小于 0.30%时,纤维与土体的摩阻力、黏聚力与纤维网对土体的包裹作用随纤维增加而增加;纤维掺量大于0.30%时,纤维在局部的聚集使得纤维与土体的摩阻力、黏聚力与纤维网对土体的包裹作用削弱.

2.4 改良黏土的抗开裂特性

干湿循环作用下试样开裂情况如图 8 所示. 试样开裂程度采用开裂因子 CIF 进行描述,开裂因子的计算公式如下:

$$CIF = A_c/A \tag{1}$$

式中:A_c 为试样表面开裂面积,A 为试样的总表面积.



(a) 压实黏土 (b) 秸秆纤维改良压实黏土

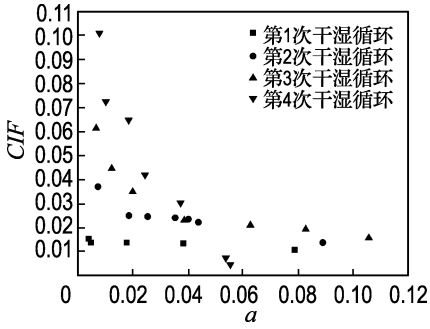
图 8 干湿循环作用下压实黏土和秸秆纤维改良压实黏土的开裂

Fig. 8 The cracking of compacted clay and compacted clay containing straw fiber in dry-wet cycles

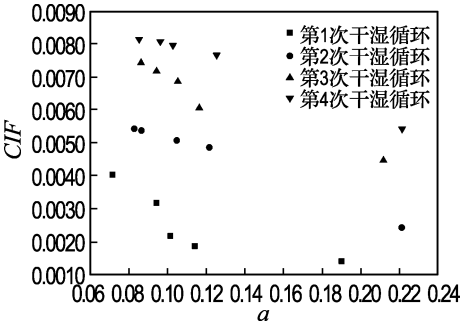
当土样处于非饱和状态时,土颗粒不仅承受总压力也承受孔隙水压力. 如果作用于土颗粒的水平向总应力为 0,即压缩性水平应力小于拉伸性的孔隙水压力,土体发生开裂[14]. 由图 8 可以看出,经过 4 次干湿循环作用,传统压实黏土表面出现了明显的裂缝,且裂缝较宽,部分裂缝已经完全贯穿 2 cm 厚的试样,周边破碎严重;经过 0.30%的秸秆纤维改良后的压实黏土试样,表面裂缝发育并不明显,只有少数几条微小裂缝,且裂缝向土层内部延伸较浅,说明秸秆纤维有效地抑制了压实黏土的开裂.

干湿循环作用下试样开裂因子变化如图 9 所示. 由图可以得出,试样的开裂因子随着含水率 a 的减小表现出逐渐增大的趋势,且随着干湿循环次数的增加,开裂明显加重,说明干湿循环作用是造成压实黏土开裂的最重要因素. 试样在干湿循环前,开裂较弱,其开裂因子较小,但经干湿循环

作用后，开裂因子显著增大. 在干湿循环过程中，试样初遇水后，在短期内表现出裂缝愈合的现象，随着后期干燥失水，裂缝重新出现，且开裂程度远高于遇水之前. 压实黏土的开裂因子在 4 次干湿循环作用后，其值为 0.101 0，而秸秆纤维改良的压实黏土开裂因子仅为 0.008 1，说明经 0.30% 秸秆纤维改良的黏土具有较强的抗开裂性.



(a) 压实黏土



(b) 秸秆纤维改良压实黏土

图 9　干湿循环作用下压实黏土和秸秆纤维改良压实黏土的开裂因子

Fig. 9　The cracking factor of compacted clay and compacted clay containing straw fiber in dry-wet cycles

3　结　论

(1)秸秆纤维能有效提高压实黏土的强度特性，纤维的最佳掺量为 0.30%，此时秸秆纤维改良黏土的力学强度明显提高.

(2)随秸秆纤维掺量的增加，改良黏土的无侧限抗压强度呈先增大后减小的趋势，破裂形态由脆性破坏逐渐过渡为塑性破坏，受力软化形态减弱；纤维掺量为 0.30% 时，无侧限抗压强度达到最大值，其值为 459.15 kPa，达到填埋场衬垫材料强度要求.

(3)秸秆纤维改良黏土的黏聚力 c、内摩擦角 φ、压缩模量 E_s 随纤维掺量的增加呈先增大后减小的规律；压缩系数 α_v、压缩指数 C_c 表现出了相反的趋势，且均在纤维掺量为 0.30% 时出现极值.

(4)干湿循环作用对压实黏土开裂影响较明显，表面裂缝开裂较严重，其开裂因子达到 0.101 0；经 0.30% 秸秆纤维改良的压实黏土具有较强的抗开裂性，其开裂因子仅为 0.008 1.

参考文献：

[1] Maher M H, Ho Y C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994(120):1381-1393.

[2] Nataraj M S, McManis K L. Strength and deformation properties of soil reinforced with fibrillated fibers [J]. **Geosynthetics International**, 1997, **4**(1):65-79.

[3] 许勇宏，潘洪科. 聚丙烯纤维影响加筋土的力学性能的研究[J]. 城市建设理论研究，2011(21):1-6.
XU Yong-hong, PAN Hong-ke. The research on impact of polypropylene fibre to mechanical property of reinforcement soil [J]. **Urban Construction Theory Research**, 2011(21):1-6. (in Chinese)

[4] 王　伟，王中华，曾　媛，等. 聚丙烯纤维复合土抗裂补强特性试验研究[J]. 岩土力学，2011，**32**(3):703-708.
WANG Wei, WANG Zhong-hua, ZENG Yuan, *et al*. Experimental study of anti-cracking and reinforcement behaviors of polypropylene fiber composite soil [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, **32**(3):703-708. (in Chinese)

[5] 唐朝生，施　斌，蔡　奕，等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学，2007，**28**(9):1793-1800.
TANG Chao-sheng, SHI Bin, CAI Yi, *et al*. Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, **28**(9):1793-1800. (in Chinese)

[6] 唐朝生，施　斌，顾　凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报，2011，**19**(4):610-614.
TANG Chao-sheng, SHI Bin, GU Kai. Microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil [J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, **19**(4):610-614. (in Chinese)

[7] 赵宁雨，荆林立. 纤维加筋红黏土强度特性影响因素的试验[J]. 重庆理工大学学报：自然科学，2010，**24**(9):47-51.

ZHAO Ning-yu, JING Lin-li. Experimental study on strength properties of texsol [J]. **Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science**, 2010, **24**(9): 47-51. (in Chinese)

[8] 张金利,蒋正国,杨 钢. 聚丙烯纤维红黏土力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 420-425.
ZHANG Jin-li, JIANG Zheng-guo, YANG Gang. Experimental study on mechanical behaviors of polypropylene fiber reinforced clay [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, **33**(Suppl. 1): 420-425. (in Chinese)

[9] 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.

[10] Khosrow G, Romildo D, Toledo F, *et al*. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres [J]. **Cement and Concrete Composites**, 1999, **21**(1): 39-48.

[11] 张艳美,张旭东,张鸿儒. 土工合成纤维土补强机理试验研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1323-1326.
ZHANG Yan-mei, ZHANG Xu-dong, ZHANG Hong-ru. Test research of geotechnique textile soil reinforcement mechanism and engineering application [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, **26**(8): 1323-1326. (in Chinese)

[12] XUE Qiang, WANG Jing, FENG Xia-ting, *et al*. Experimental study for performance influence of various pH values on pavement straw composite fibers [J]. **Advanced Materials Research**, 2009, **79-82**: 1783-1786.

[13] Daniel D E, Wu Y K. Compacted clay liners and covers for arid sites [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, **119**(2): 223-237.

[14] Döll P. Desiccation of mineral liners below landfills with heat generation [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1997, **123**(11): 1001-1009.

Feasibility study of clay containing straw fiber as landfill liner material

LU Hai-jun*, CHEN Wei, DONG Yi-qie

(Institute of Poromechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: For the purpose of operating impervious system of the landfill liner safely, improving bearing capacity and anti-cracking characteristics of the landfill liner, straw fiber was chosen as liner system of modified compacted clay. Through unconfined compressive test, direct shear test, consolidation test and anti-cracking test, strength, deformation and anti-cracking characteristics of modified clay with straw fiber were observed to evaluate the feasibility of straw fiber clay mixture as landfill liner material. Experimental results show that straw fiber clay mixture can be used as landfill liner material with higher bearing capacity and anti-cracking ability. Strength characteristics of modified clay are influenced significantly by the content of straw fiber. With the increase of fiber content, unconfined compression strength of modified clay increases firstly and then decreases; fracture morphology transforms gradually from brittle fracture to plastic failure; cohesion c, internal friction angle φ and compression modulus E_s increase firstly and then decrease; compression coefficient α_v, compressive index C_c firstly decrease and then increase. The best content of straw fiber is 0.30%. At this time the maximum compressive strength of modified clay reaches 459.15 kPa to meet the requirements of landfill liner about engineering strength. For the modified clay with 0.30% of straw fiber content, the cracking factor is only 0.008 1.

Key words: landfill liner; straw fiber; modified clay; bearing capacity; cracking intensity factor