

黑棉土治理：使用压实石灰作为水力屏障材料的入渗能力研究

A. N. Alkali* I. M. Shettima B. B. Kurna and N. Y. Okunade

迈杜古里大学土木与水资源工程系 尼日利亚 迈杜古里 600211

【摘要】：许多研究表明了水力屏障在减少沥滤液流动方面的作用，但沥滤液有可能污染地下水。实验室用干重高达 5% 的石灰处理过的黑棉土壤上进行试验，以评估其在废物收集设施中的适用性，并且对测试样品进行粒度分布分析、稠度极限测试、压实和水力传导率测试。压缩标准采用英国标准光（BSL）。研究表明，随着石灰含量的增加，液限从 65.20% 下降到 56.30%，塑性指数从 41.50% 下降到 28.58%，而塑限从 23.70% 上升到 27.72%。最大干密度（MDD）随着石灰的增加而增加，从 1.78 到 1.88 克/厘米³。而最佳含水量（OMC）从 19.79% 下降到 15.39%。用占土重 0%、1%、3% 和 5% 的石灰分别处理黑棉田土壤，研究其水力传导度。天然土壤的渗透系数为 1.65E-08，当石灰含量为 5% 时，渗透系数降至 3.71 E-09 m/s。因此，很明显，渗透系数随着石灰含量百分比的增加而降低。建议进行体积收缩、自由膨胀和无侧限抗压强度试验。

【关键词】：石灰；入渗能力；屏障材料；黑棉土

Infiltration Capacity of Compacted Lime Treated Black Cotton Soil as Hydraulic Barrier Material

A. N. Alkali* I. M. Shettima B. B. Kurna and N. Y. Okunade

Department of Civil and Water Resources Engineering University of Maiduguri Nigeria Maiduguri 600211

Abstract: Studies have shown the effect of hydraulic barriers in the reduction in movement of leachates, that have the potential of contaminating groundwater. Laboratory tests were conducted on black cotton soil treated with up to 5% lime by dry weight to assess its suitability in waste containment facilities. The test samples were subjected to particle size distribution analysis, consistency limit tests, compaction and hydraulic conductivity. The compaction energy of British Standard Light (BSL) was employed. The study showed decrease in liquid limit from 65.20% to 56.30% and plasticity index from 41.50% to 28.58% while plastic limit increased from 23.70% to 27.72% with the increase lime content. Maximum Dry Density (MDD) increases with increased in lime from 1.78 to 1.88 g/cm³ whereas the Optimum Moisture Content (OMC) decreased from 19.79% to 15.39%. Hydraulic conductivity of black cotton soil treated with percentage of lime content 0%, 1%, 3% and 5% of the soil weight examined for a period of 28 days. The hydraulic conductivity value of natural soil was 1.65E-08 and decreased to 3.71 E-09 m/s at 5% lime content. Therefore, it is clear that hydraulic conductivity decreases with percentage increase in lime content. It is recommended that volumetric shrinkage, free swell and unconfined compressive strength should be carried out.

Keywords: Lime; Infiltration capacity; Hydraulic barrier material; Black cotton soil

1 引言

地下水约占地球水资源总量的 0.6%，约占地球淡水资源总量的 21.4%（Mustafa and Yusuf, 2012）。水被认为是地球上最稀缺的没有病原体的自然资源之一。但浅层地下水源特别容易受到多种来源的污染，其中值得注意的是卫生填埋场。影响这些来源的污染的最大因素主要是由于垃圾填埋场下面的土壤很容易使这些污染物进入急需的地下水。废物控制设施通常被称为卫生填埋场，是固体废物处理设施，通过压缩废物，同时展开土壤并分层压实来运行。这些污染物或来自高水力传导性土壤的沥滤液垂直移动，污染了下面的地下水。水力传导度是多孔介质传导液体的量度（Chen and Chynoweth, 1995）。对于大多数土壤衬里材料而言，实现水力传导率的最低建议要求小于或等于 1.0x 10⁻⁹m/s。各种沥出物带有对人类健康有害的物理、化学或细菌污染物。因此，一些研究试图通过降低废物收集设施下层土壤的水力传导性来防止下层土壤被沥滤液污

染。通常被称为衬里的安全壳设施系统层已经用其它原材料开发，例如稻壳灰、花生壳灰、粉煤灰、油棕灰、石灰等。各种各样的土壤类型。已经使用的其他材料包括土工合成材料、加工粘土、水泥窑粉尘、塑料、玻璃和废弃轮胎（Moses 和 Afolayan, 2011）。黑棉土是一种膨胀土，其特征是灰色或黑色，大多局限于半干旱地区。这种土壤主要在年降水量超过蒸发量的地方存在，并且因其适合种植棉花而得名（Oriola 和 Moses, 2011）。粘土的粘性使其成为衬砌系统的合适组成部分（Osinubi 和 Moses, 2011）。

石灰被广泛用作这些粘土的改良剂或粘合剂。当用石灰处理高塑性粘土（如黑棉土）时，塑性指数降低，对水的亲和力降低（Modak 等, 2012）。石灰也被用来稳定（即阻止）粉煤灰的水力传导率。除了降低粘土的渗透性，石灰还能抵抗有机溶液的化学侵蚀，这也是废物处理设施的重要要求之一（Moses 和 Afolayan, 2011）。这些材料大多含有富含钙、硅和铝的氧

化物成分，并与水力传导性相对较低的土壤混合，如黑棉田和红土，在本研究涵盖的研究区域中含量相对丰富。

2 材料和方法

2.1 材料

黑棉土和石灰。从尼日利亚贡贝州 Akko 地方政府区 Kumo 沿 Yola 路的取土坑中获得黑色棉田土壤。这是使用位于北纬 $100^{\circ} 2'43''$ 和东经 $110^{\circ} 12'47''$ 的扰动取样方法实现的。土壤样品用土壤干重的 0、1、3 和 5% 石灰处理所用石灰购自博尔诺州迈杜古里的周一市场。

2.2 方法

(1) 指标。进行实验室试验以确定天然和石灰处理土壤的指标性质。根据英国标准 (BS) 1377 (1990) 对天然土壤进行测试，根据 BS1924 对石灰处理土壤进行测试。

(2) 压实。使用的压缩力是 BSL。使用通过孔径为 4.76 毫米的 BS 筛的空气干燥的土壤样品，其中混合有干土壤重量的 0%、1%、3% 和 5% 的石灰。根据 BS1377 (1990) 第 4 部分对天然土壤和稳定土壤进行测试。英国标准重量是 2.5 公斤重的夯锤下落 30 厘米，落在三层上，每层接受 27 次均匀分布的打击。

(3) 水力传导率。将样品放入刚性壁渗透仪中进行水力传导率测试。根据 Head (1992 年) 描述的程序，所有试验均采用落差法进行。将一个相对较短的样品连接到竖管上，竖管提供流经样品的水头。不同石灰含量 (0、1、3 和 5%) 和相应 OMC 的黑棉土-石灰样品采用 BSL 压实法进行压实。将样品浸泡在水槽中最少 24 小时，以允许完全饱和，并抑制样品在饱和期间垂直膨胀。然而，在渗透过程中，允许样品垂直膨胀，即不施加垂直应力。然后将完全饱和的试样连接到渗透液体 (自来水) 上。水力梯度范围从 5 到 15。只有当水力传导率读数稳定时，测试才停止。

(4) 石灰的氧化物成分。在 Ahmadu Bello 的化学系使用 X 射线荧光 (XRF) 机 (Philips PW1606) 测定石灰的氧化物组成卡杜纳州扎里亚大学。XRF 分析是基于这样的原理，当单个原子被外部能量源激发时，会发射出特征波长的 x 射线光子。通过计算从样品发射的每种能量的光子数，可以识别和量化存在的元素。该系统依赖于半导体型检测器，该检测器接收来自样品全部发射光谱，并将其解码成计数数量对光子能量的直方图 (Ehi- Eromosele 等人, 2012)。该仪器具有非常灵敏和精确的能力来测定地质和生物样品中的痕量和主要元素及其氧化物。将 1 克充分均化的石灰放入机器中进行自动分析，并给出结果。

3 结果和讨论

3.1 石灰的化学氧化物成分

使用 Phillips-PW-1606 X 射线荧光 (XRF) 光谱仪分析的石灰的氧化物组成如表 1 所示。石灰的主要氧化物由 CaO、SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 组成，其含量分别为 76.42%、7.33%、1.99% 和 1.07%。CaO 具有最高的氧化物组成，这也是在稳定化过程中负责反应的主要成分。这些反应包括阳离子交换、絮凝-凝聚、碳酸化和火山灰反应 (Khan 等, 2004)。

表 1 石灰的氧化物成分

氧化物	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
成分 (%)	7.33	1.07	1.99	76.42	2.12	0.00

3.2 土壤的物理性质

所用黑棉田的物理性质见表 2，而粒度分布曲线见图 1。对天然黑棉土壤进行的初步调查结果表明，土壤是细粒的，天然含水量为 6.26%。该土壤属于统一土壤分类系统 (USCS) (ASTM, 1992) 中的 CL 类或美国州运输官员协会 (AASHTO) 土壤分类系统中的 A-7-6 (10) 类 (AASHTO, 1986 年)。

表 2 土壤的物理性质

性质	0%	1%	3%	5%
自然含水量 (%)	6.28			
液限	65.20	58.90	57.20	56.30
塑性极限	23.70	25.93	26.71	27.72
塑性值	41.50	32.97	30.49	28.58
比重	2.66	2.62	2.58	2.56
通过 BS 200 号筛作为土壤分类系统	53.9	64.50	69.05	69.20
AASHTO 土壤分类	A-7-6 (10)			
	CL	CL	CL	CL

液限和塑性指数值随着石灰含量的增加而降低，而塑性极限则增加，这可能是由于交换反应将土壤颗粒絮凝在一起，减少了粘土粒级，从而减少了土壤表面积 (Osula, 1991)。这一趋势与 Osinubi 和 Katte (1997 年) 报告的黑棉田的发现相似。

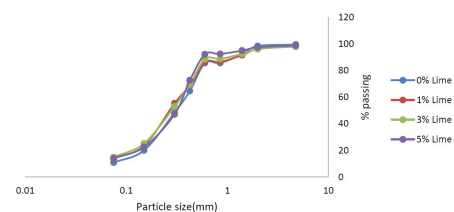


图 1 石灰处理黑棉田土壤的粒度分布曲线

黑棉土——石灰混合物的比重变化如图 2 所示。天然土壤的比重从 2.66 下降到 0% 至 5% 石灰的最小值 2.56。这种下降是由于石灰的低比重值 (2.1) 逐渐取代了土壤材料。这种下降也表明 MHA 没有发生矿物学变化 (Kumar, 2012; Amadi,

2010)。

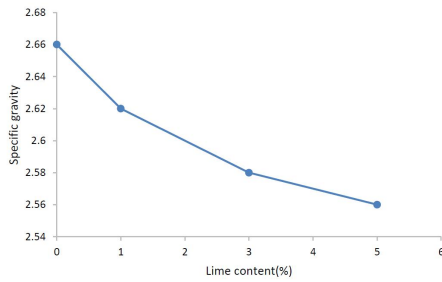


图2 黑棉石灰改良土的比重变化

3.3 压实

(1) 最大干密度。处理过的土壤的最大干密度 (MDD) 的变化如图3所示。该值最初从 1.78 克/厘米³ 下降到 1.71g/cm³, 后来又上升。从天然土壤的 1.78 到石灰处理土壤的 1.88g/cm³ 不等。这是由于石灰占据了土壤基质中的空隙, 此外, 由于离子交换, 粘土颗粒发生絮凝和凝聚 (Oriola 和 Moses, 2010 年; Moses, 2008)。

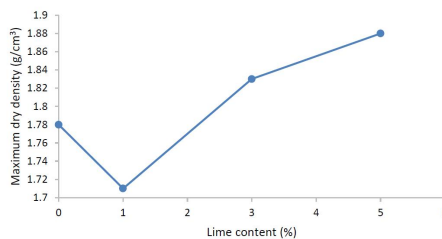


图3 石灰处理黑棉田土壤最大干密度的变化

(2) 最佳含水量。用石灰处理的黑棉田的 OMC 表明, 随着石灰添加量从 0% 到 5%, OMC 值从 19.79% 降低到 15.39%。这一趋势如图所示, OMC 的降低可能是由于自干燥, 其中所有的水被利用, 导致低水合作用。在没有水流入或流出石灰膏的情况下, 水在水合反应中被耗尽, 直到少量水浸透固体表面, 这往往会降低膏内的相对湿度。这可能影响了石灰处理黑棉田的反应机制 (Moses, 2008; Osinubi 和 Stephen, 2007)。

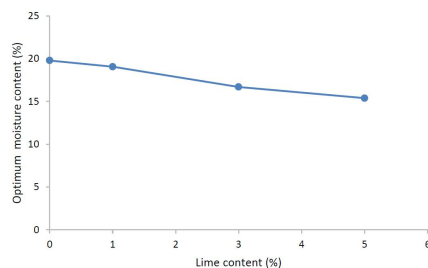


图4 石灰处理黑棉田土壤最佳含水量的变化

3.4 水力传导性

图5显示了用不同剂量的石灰处理的黑棉田土壤的水力传导率的变化。

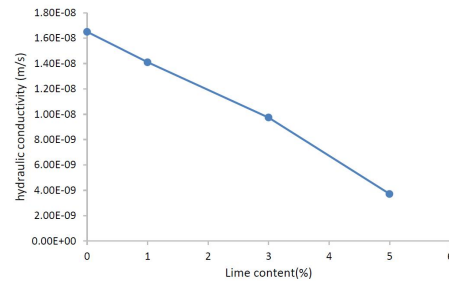


图5 石灰处理后黑棉田土壤导水率的变化

天然土壤的水力传导率呈下降趋势, 数值为 1.65×10^{-8} 米/秒对于 1%、3% 和 5% 的石灰处理, 这些值分别进一步降低到 1.4×10^{-8} 米/秒、 9.74×10^{-9} 米/秒和 3.71×10^{-9} 米/秒。水力传导率通常随着成型水含量的增加而降低。然而, 在这项研究中, 在制备样品时仅使用了各自的最佳含水量, 因此水力传导率不会快速下降。水力传导率的降低是由于单个颗粒的排列受到成型水含量的影响。这也可能是由于土壤的软湿土块容易重塑, 导致土块间空隙变小, 从而降低了水力传导率 (Osinubi 和 Eberemu, 2009)。

4 小结

石灰处理的黑棉土适合用作废物容纳设施中的压实水力屏障, 其渗透能力随着石灰含量的增加而降低。用占土壤重量 0%、1%、3% 和 5% 的石灰含量处理黑棉田土壤。石灰含量的增加降低了黑棉土的液限、缩限和塑性指数, 而塑限增加。MDD 普遍从 1.78 上升到随着石灰含量的增加, OMC 从 19.79 下降到 15.39%。有趣的是, 石灰含量的增加降低了土壤的导水率。5% 石灰处理的最小导水率为 3.71×10^{-9} 米/秒。该研究表明, 只要压实程序 (含水量和压实技术) 选择得当, 石灰处理的黑棉田土壤获得低于 1×10^{-9} m/s 的渗透系数是可能的。建议使用土壤最佳含水量的 -2%、+2%、+3% 和 +4% 来测定土壤的水力传导度自然土壤。还应进行无侧限抗压强度 (UCS) 和体积收缩应变 (VSS) 等测试, 以确定既定标准的可接受范围。

参考文献:

[1] AASHTO.1986. Standard Specification for Transportation, Material and Methods of Sampling and Testing. 14th ed. Washington, D.C.

Amsterdam Association of State Highway and Transportation Official.

- [2] Amadi, AA. 2010. Pozzolanic Influence of fly ash in mobilizing the compressive strength of lateritic soil. AUJT., 14(2): 139-146.
- [3] ASTM.1992. Annual Book of Standards. Philadelphia. American Society for Testing and Materials. 04(8).
- [4] British Standard Institute BS 1924.1990. Method of test for stabilized soils. British Standard Institute, London, U.K.
- [5] British Standard Institute. BS 1377. 1990. Methods of testing soils for Civil Engineering 2 purposes, London.
- [6] Chen, T. and Chynoweth, DP. 1995. Hydraulic Conductivity of Compacted Municipal Solid Waste. Bio-resource Technology, Elsevier Science Limited, Amsterdam.
- [7] Head, KH. 1992. Manual of Soil Laboratory Testing. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Pentech Press, London.
- [8] Ehi-Eromosele, CO., Adaramodu, AA., Anake, WU., Ajanaku, CO. and Edobor-Osoh, A. 2012. Comparison of three methods of digestion for trace metal analysis in surface dust collected from an e-waste recycling site. Nature and Science, 10(10): 42-47.
- [9] Khan, FI., Tahir, H. and Ramzi, H. 2004. An Overview and analysis of site remediation technologies. Journal of Environmental Management, 71: 95- 122.
- [10] Kumar, SMP. 2012. Silica and calcium effect on Geo-Technical properties of expansive soil extracted from rice husk ash and lime. International Conference on Environment Science and Engineering, IPCBEE, 3(2): 119-123.
- [11] Modak, PR., Nangare, PB., Nagrale, SD., Nalawade, RD. and Chavhan, VS. 2012. Stabilization of black cotton soil using admixtures. International Journal of Engineering and Innovative Technology, 1(5): 1-3.
- [12] Moses, G. 2008. Stabilization of black cotton soil with ordinary portland cement using bagasse ash as admixture. IRJI Journal of Research in Engineering, 5(3): 107-115.
- [13] Moses, G. and Afolayan, JO. 2011. Compacted foundry sand treated with cement kiln dust as hydraulic barrier material. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 16: 337-335.
- [14] Mustafa, S. and Yusuf, MI. 2012. A textbook of Hydrology and Water Resources. Topsmerit Page Publishers, Abuja.
- [15] Osinubi, KJ. and Katte, VY. 1997. Effect of Elapsed Time after Mixing on Grain Size and Plasticity Characteristics; Soil Lime Mixes. Nigeria Society of Engineers Technical Transactions, 32(4): 65-76.
- [16] Osinubi, KJ. and Stephen, TA. 2007. Influence of Compactive efforts on Bagasse ash treated black cotton soil. Nigerian Journal of Soil and Environmental Research, 7(1):92-101.
- [17] Osinubi, K J. and Eberemu, AO. 2009. Compatibility and Attenuative properties of Laterite blast furnace slag mixtures. Journal of Waste Technology and Management, 35(1): 7 – 16.
- [18] Osinubi, KJ., and Moses, G. 2011. Compacted Foundry Sand treated with Bagasse Ash as Hydraulic Barrier Material. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Geo Frontiers Congress, March, 13-16, 2011, Dallas, Texas, pp. 915-925. .
- [19] Osula, DOA. 1991. Lime modification of problem laterite. Engineering Geology, 30: 141-149.
- [20] Oriola, F. and Moses, G. 2010. Groundnut shell ash stabilization of black cotton soil. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15: 415-428.
- [21] Oriola, F and Moses, G. 2011. Compacted black cotton soil treated with cement kiln dust as hydraulic barrier material. American Journal of Scientific and Industrial Research, 2(4): 521-530