

用回归模型预测水泥和废玻璃掺合料稳定黑棉土的 CBR 值

Ibrahim Abdulkarim Ikara^{1,*}, Ali Musa Kundiri², Abbagana Mohammed¹

1 尼日利亚 包奇州 包奇巴勒瓦大学土木工程系

2 尼日利亚 博尔诺州 迈杜古里市迈杜古丽大学土木与水利工程系

摘要: 多年来, 在公路建设中, 为了改善土壤的工程财产, 路基和底基层土壤稳定一直被用作首要和主要的过程之一。这些层的强度由它们的加州承载比 (CBR) 值表示, 这是非常昂贵和耗时的。为了克服这种情况, 本研究提出了一种使用多元回归分析 (MRA) 预测水泥和废玻璃掺合料稳定的黑棉土的浸泡加州承载比 (CBR) 值的方法。实验测试结果, 如阿太堡极限 (液限 (LL)、塑性极限 (PL) 和塑性指数 (PI))、两种压实作用的压实特性, 即标准普氏压实剂 (SP) 和改良普氏压实法 (MP) (最大干密度 (MDD) 和最佳含水量 (OMC))、CBR、废玻璃 (WG) 含量和水泥含量 (Cm), 从尼日利亚包奇巴勒瓦大学的实验室获得的数据已被用于开发多元回归模型。以加州承载比为因变量, 以液限、塑限、最大干密度、最佳含水量、废玻璃含量和水泥含量为自变量。回归分析计算了每个可能模型的误差均方 (MS_E), 并且没有为最佳回归方程选择具有大 MSE 的模型。对于六变量模型 (C_m , WG, LL, PL, OMC_{sp} , MDD_{sp}) 和 (C_m , WG, PL, LL, OMC_{mp} , MDD_{mp}), 最佳模型具有出现的 MSE 的最小值, 其中对应的倍数确定系数 $R^2 = 0.98$ 和 0.94 的较高值。拟合回归模型的性能评估表明, 上述变量之间存在很强的相关性 ($R^2=0.89-0.98$), 根据本研究得出的模型方程对响应进行了很好的预测, 因为该方程可用于估算具有类似岩土财产的其他黑棉土的浸水 CBR。

关键词: 土壤稳定; 黑棉土; 废玻璃外加剂; 回归模型

Predicting CBR Values of Black Cotton Soil Stabilized with Cement and Waste Glass Admixture Using Regression Model

Ibrahim Abdulkarim Ikara^{1,*}, Ali Musa Kundiri², Abbagana Mohammed¹

1. Department of Civil Engineering, Abubakar Tafawa Balewa University, Bauchi, Bauchi State, Nigeria

2. Department of Civil and Water Resource Engineering, University of Maiduguri, Maiduguri, Borno State, Nigeria

Abstract: In highway constructions, sub-grade and sub-base soil stabilization has been used as one of the prime and major process for many years in order to improve the engineering properties of soil. The strength of these layers is indicated by their California bearing ratio (CBR) value which is quite expensive and time consuming. In order to overcome this situation, this study presents a methodology for predicting soaked California Bearing Ration (CBR) value of Black Cotton Soil Stabilized with Cement and Waste Glass Admixture using Multiple Regression Analysis (MRA). Experimental test results such Atterberg limit (Liquid limit (LL), Plastic limit (PL) and Plasticity index (PI)), Compaction characteristics of two compactive efforts namely standard proctor (SP) and modified proctor (MP) (maximum dry density (MDD) and optimum moisture content (OMC)), CBR, Waste glass (WG) content and Cement content (Cm), obtained from a laboratory at Abubakar Tafawa Balewa University Bauchi, Nigeria, have been employed in developing multiple regression models. California Bearing Ration was taken as the dependent variables while Liquid limit, Plastic limit, maximum dry density, optimum moisture content, waste glass content and Cement content were taken as independent variables. The regression analysis calculated the error mean square (MSE) for each possible model, and models with large MSE were not selected for the best regression equations. The best models have a minimum value of MSE occurring for the six-variable model (C_m , WG, LL, PL, OMC_{sp} , MDD_{sp}) and

(Cm, WG, PL, LL, OMC_{mp}, MDD_{mp}) with a corresponding higher value of coefficient of multiple determination $R^2 = 0.98$ and 0.94. The performance evaluation of the fitted regression models indicates a strong correlation ($R^2 = 0.89 - 0.98$) between the mentioned variables, and the model equations developed from this work provided a very good prediction of the response, as the equations can be employed for making estimates of soaked CBR of other black cotton soils having similar geotechnical properties.

Keywords: Soil stabilization; Black cotton soil; Waste glass admixture; Regression models

1. 引言

为了提高黑棉土的强度财产, 将几种类型的稳定材料用作公路路面的基层、底基层或处理过的路基^[1]。这些包括水泥稳定或处理过的骨料、土壤水泥、石灰水泥粉煤灰和石灰稳定材料。通常, 这些材料的 CBR 值用于路面设计目的。

公路路面是一种相对稳定的附加材料层, 建造在天然土壤上, 用于支撑和分配车轮荷载, 并为一个国家的交通和经济发展提供耐用的耐磨表面^[2]。柔性路面在尼日利亚等几乎所有发展中国家都最受欢迎。柔性路面的设计和性能主要取决于路基材料的强度, 路面表面的荷载最终转移到底基层和路基^[3]。加州承载比 (CBR) 试验是一种用于柔性路面设计的经验方法, 它决定了路面的厚度, 换句话说, 与 CBR 值较高的路基相比, CBR 值较低的路基将具有相对较厚的路面^[3]。因此, 在修建路面之前, 需要对路基材料的适用性和稳定性进行评估。

Satyanarayana 和 Pavani、Gregory 和 Cross、Vinod 和 Reena、Patel 和 Desai 以及 Yildirim 和 Gunaydin 等多位研究人员已经开发了基于低成本、较少时间消耗和易于进行此类测试的基础上估计 CBR 值的模型^[4-8]。其他一些研究人员, 如 Patel&Patel、Venkatasubramanian&Dhinakaran、Sabat、Alawi&Rajab 和 Talukdar, 也使用人工神经网络 (ANN) 和基因表达编程 (GEP) 等软计算系统开发了多元线性回归分析模型 (MLRA), 用于将 CBR 与土壤指数财产相关联^[9-13]。

^[14] 先前的研究表明, 使用水泥稳定的黑棉土和废玻璃 (WG) 混合物作为路基层的潜力。本研究旨在应用多元回归方法, 通过使用财产、塑性特性 (LL 和 PL)、压实特性 (MDD 和 OMC)、WG 和水泥含量 (Cm)、, 以便能够在回归中考虑稳定剂和混合物的作用。

2. 方法

然而, 为了进行 CBR 试验, 必须从选定的位置收集有代表性的土壤样本, 从中必须在预定的最佳含水量 (OMC) 和最大干密度 (MDD) 下制备重塑样本, 并根据具体情况使用标准或改良的普氏压实能进行试验。要获得土壤样本的浸泡 CBR 值, 至少需要 48 小时, 这使得 CBR 测试昂贵、耗时且费力^[2]。因此, 拟建道路每千米长度只能进行有限数量的 CBR 试验。同样, 在需要稳定的情况下, 这种有限数量的 CBR 测试结果通常不会揭示 CBR 值在需要稳定以实现合理、经济和安全施工的道路长度上的变化^[2]。只有在道路沿线采集大量土壤样本的情况下, 才能避免这种情况。但这样的程序会

增加项目成本和时间。为了克服这个问题, 需要一种简单且耗时较少的方法, 这可以通过将浸泡的 CBR 值与易于确定的土壤参数相关联来实现。

制备了二十 (20) 个扰动土壤样品, 用所需的普通硅酸盐水泥 (OPC) 和 WG 混合物在 OMC 下稳定。对制备的土壤 /OCP/WG 混合样品进行浸泡 CBR 值、OMC、MDD、LL、PL 和 PI 测试。这些试验是根据 BS 1377^[15] 对天然土壤和 BS 1924^[16] 对稳定土壤进行的, 使用标准普氏压实剂 (SP) 和改良普氏压实力。

MINITAB 16.1, 统计软件用于开发数据的回归模型。CBR 作为因变量, MDD、WG、Cm、LL 和 PL 作为自变量。

一般的多元线性回归模型由方程 1 给出, 拟合方程由方程 2 给出。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (1)$$

拟合方程:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad (2)$$

$\beta_k =$ 第 k 个群体回归系数, $e =$ 误差项, $b_k =$ 第 k 个人群回归系数的估计, $\hat{Y} =$ 拟合响应。

3. 结果和讨论

实验室制备的土壤 /OCP/WG 混合样品的结果如表 1 所示。基于岩土参数的结果用于使用多元线性回归分析 (MLRA) 开发回归模型。本次调查中研究的土壤 /OPC/WG 混合物财产范围为: WG=0-20%, Cm=2-8%, LL=47.1-59.8%, PL=31-36.3%, MDD=1.47-1.63 和 1.55-1.76 Mg/m³, OMC=19.8-25.4 和 17.6-23%, SP 和 MP 的浸水 CBR 值分别为 9.1-20.4 和 16-29.3%, 如表 1 所示。选择整个参数范围进行回归分析, 以预测浸泡 CBR 值。

对于可靠的预测模型, 该模型应具有高 R^2 值和低 MS_E ^[17] 值。回归分析计算了每个可能模型的误差均方 (MS_E), 并且没有为最佳回归方程选择具有大 MS_E 的模型, 以获得可靠的模型。 MS_E 是响应变量的单位的度量, 并且表示从拟合值下降的标准距离值。因此, MS_E 越低, 模型对响应的预测就越好, 并且多重确定系数 (R^2) 描述了预测器观测到的响应值的变化量。 R^2 的值越高, 模型就越适合数据。总的来说, 只对 MS_E 值较小的模型进行了详细检查。表 2 和表 3 列出了表 1 中列出的 20 个观测值的所有可能回归。

S/n	Replacement proportion by dry weight of soil (%)			Index properties (%)			MDD (Mg/m ³)		OMC (%)		Soaked CBR (%)	
	SOIL	OPC	WG	LL	PL	PI	SP	MP	SP	MP	SP	MP
1	98	2	0	59.9	11	28.8	1.47	1.55	25.4	23	9	16
2	96	4	0	57	32.3	24.7	1.53	1.57	24.1	22.2	12	20
3	94	6	0	53	33.6	19.4	1.59	1.64	23.7	21.1	13	21.7
4	92	8	0	49	35.1	14.8	1.61	1.66	21.9	20	16	25
5	93	2	5	55.5	31.4	24.1	1.53	1.66	24.7	20.6	9	16.7
6	88	2	10	53.3	32.3	21	1.57	1.68	23.1	19.5	9.6	18
7	83	2	15	52.3	32.8	19.5	1.59	1.68	21.8	19.5	10.8	19
8	78	2	20	51.4	33.1	18.3	1.62	1.69	20.2	18.9	12.5	20.1
9	91	4	5	54.3	33.2	23.1	1.57	1.69	23.7	20	12.4	9
10	86	4	10	52.7	34.1	18.6	1.58	1.69	22.9	19.2	12.8	21.4
11	81	4	15	52	34.9	17.7	1.59	1.71	21.7	19.3	14.3	1
12	76	4	20	51.6	35.7	15.9	1.62	1.72	20.1	18.7	14.7	23.7
13	89	6	5	50.3	33.8	16.5	1.60	1.71	22.8	19	14	22.8
14	84	6	10	48.9	34.8	14.1	1.61	1.71	22.1	18.9	15.1	23
15	79	6	15	49.3	35.1	14.2	1.60	1.72	21.1	18.1	15.1	23
16	74	6	20	48.7	35.9	12.8	1.62	1.73	19.8	18.1	15.5	23.1
17	87	8	5	49.2	34.6	14.6	1.61	1.73	21.4	18.5	17.1	26
18	82	8	10	48.2	35.2	13	1.62	1.73	20.6	18.3	7.9	26.8
19	77	8	15	48.3	35.9	12.4	1.61	1.75	20.9	17.9	18.7	27
20	72	8	20	47.1	36.3	10.8	1.63	1.76	19.8	17.6	4	29.3

表 1. 制备的土壤 /OPC/WG 混合样品的实验室测试结果。

S/n	No. of variables in model	Variables in model	SS _R (p)	SS _E (p)	MS _R (p)	R ²
1	3	Cm, WG, LL	110.879	72.869	4.554	0.63
2	3	Cm, WG, PL	140.426	43.303	2.706	0.76
3	3	Cm, WG, OMC _{sp}	163.274	20.455	1.131	0.89
4	3	Cm, WG, MDD _{sp}	110.552	71.177	4.374	0.60
5	4	Cm, WG, LL, PL	162.265	21.465	1.431	0.88
6	4	Cm, WG, LL, OMC _{sp}	160.852	22.878	1.525	0.86
7	4	Cm, WG, LL, MDD _{sp}	121.934	61.795	4.120	0.66
8	5	Cm, WG, LL, PL, OMC _{sp}	171.916	11.813	0.844	0.94
9	5	Cm, WG, LL, PL, MDD _{sp}	162.345	21.385	1.527	0.88
10	6	Cm, WG, LL, PL, OMC _{sp} , MDD _{sp}	180.149	3.580	0.275	0.98

表 2. 标准普氏紧致努力的回归变量。

S/n	No. of variables in model	Variables in model	SS _R (p)	SS _E (p)	MS _R (p)	R ²
1	3	Cm, WG, LL	154.374	32.968	5.186	0.65
2	3	Cm, WG, PL	183.028	54.314	3.395	0.77
3	3	Cm, WG, OMC _{sp}	156.166	81.176	5.073	0.66
4	3	Cm, WG, MDD _{sp}	139.891	106.541	6.659	0.55
5	4	Cm, WG, LL, PL	209.539	27.803	1.854	0.88
6	4	Cm, WG, LL, OMC _{sp}	166.331	71.011	4.734	0.70
7	4	Cm, WG, LL, MDD _{sp}	162.019	75.323	5.022	0.68
8	5	Cm, WG, LL, PL, OMC _{sp}	210.634	26.708	1.908	0.89
9	5	Cm, WG, LL, PL, MDD _{sp}	211.331	26.011	1.858	0.89
10	6	Cm, WG, LL, PL, OMC _{sp} , MDD _{sp}	223.982	13.760	1.058	0.94

表 3. 改良普氏紧致努力的回归变量。

式中: SS_R = 回归平方和; SS_E = 误差平方和; SS_T = 总平方和; MS_R = 回归均方; MS_E = 误差均方

在 R^2 改进方面, 从三变量模型到六变量模型有一个平均增益, 其中几个模型具有良好的 MS_E 值。对于六变量模型 (C_m 、WG、LL、PL、 OMC_{sp} 、 MDD_{sp}) 和 (C_m 、WG、PL、LL、 OMC_{mp} 、 MDD_{mp})。尽管其他模型的 MSE 值较小, 但那些 R^2 值较高的模型也被考虑进行验证。此类其他模型包括: (C_m 、WG、LL、PL、 OMC_{sp})、(C_m 、WG、LL、PL、 OMC_{mp})。根据 [18], R^2 值越接近 1, 标准偏差越小, 模型在预测响应变量方面就越好。此外, [19] 注意到, 大 R^2 (接近 1) 在模型开发中被认为是好的。从上述模型的回归中获得的方程如表 4 所示。

Equation No.	Variables in model	Model equation	MS _R (p)	R ²
1	Cm, WG, OMC _{sp}	$CBR_{sp} = 59.5 + 0.239 Cm - 0.187 WG - 2.03 OMC_{sp}$	1.131	0.89
2	Cm, WG, LL, PL, OMC _{sp}	$CBR_{sp} = 0.7 - 0.356 Cm - 0.189 WG - 0.088 LL + 1.37 PL - 1.13 OMC_{sp}$	0.844	0.94
3	Cm, WG, LL, PL, OMC _{sp} , MDD _{sp}	$CBR_{sp} = 108 - 0.464 Cm - 0.240 WG - 0.607 LL + 1.31 PL - 1.47 OMC_{sp} - 44.4 MDD_{sp}$	0.275	0.98
4	Cm, WG, LL, PL, OMC _{mp}	$CBR_{mp} = 15.1 - 0.836 Cm - 0.270 WG - 0.411 LL + 2.20 PL - 0.517 OMC_{mp}$	1.508	0.89
5	Cm, WG, LL, PL, MDD _{mp}	$CBR_{mp} = 19.5 - 0.836 Cm - 0.178 WG - 0.759 LL + 2.33 PL - 18.5 MDD_{mp}$	1.858	0.89
6	Cm, WG, LL, PL, OMC _{mp} , MDD _{mp}	$CBR_{mp} = 19.5 - 0.836 Cm - 0.178 WG + 2.32 PL - 0.935 LL - 1.66 OMC_{mp} - 71.6 MDD_{mp}$	1.058	0.94

表 4. 从回归模型中获得的最佳方程。

模型验证评估确定了模型在多大程度上是实验数据的准确表示。

在验证模型时, 使用最佳模型方程 (即方程) 计算预测值。1-6, 并根据样本数量绘制, 类似地, 实验数据也根据样本数量进行绘制, 并进行比较, 如图 1-6 所示。从图中可以观察到, 实验值接近预测值, 这从曲线图中可以明显看出, 该曲线图显示了与 R^2 趋势值相同的趋势。

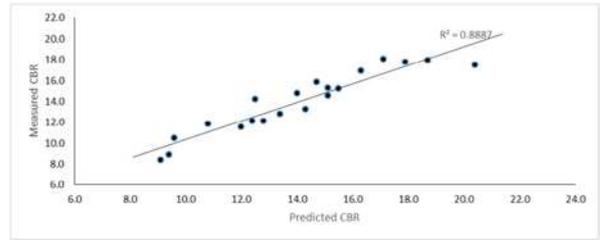


图 1. CBR_{sp} 的验证图 $=59.5+0.239 Cm-0.187 WG-2.03 OMC_{sp}$

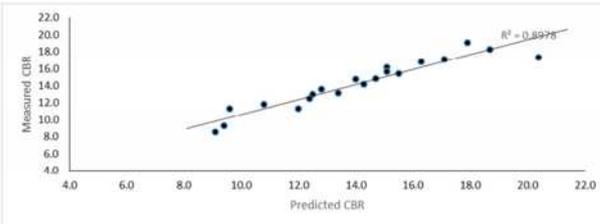


图 2. $CBR_{sp}=0.7-0.356 Cm-0.189 WG-0.088 LL+1.37 PL-1.13 OMC_{sp}$ 的验证图。

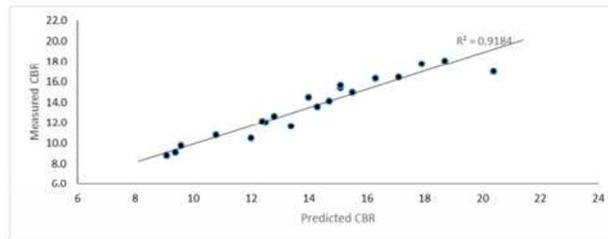


图 3. $CBR_{sp}=108-0.464 Cm-0.240 WG-0.607 LL+1.31 PL-1.47 OMC_{sp}-44.4 MDD_{sp}$ 的验证图。

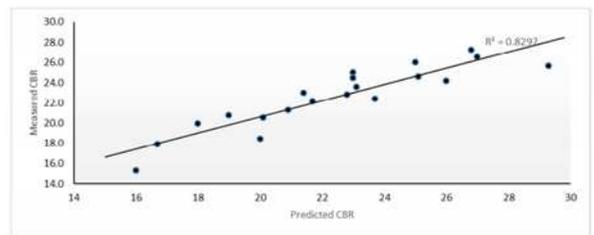


图 4. CBR_{mp} 的验证图 $=-15.1-0.663 Cm-0.270 WG-0.411 LL+2.20 PL-0.517 OMC_{mp}$

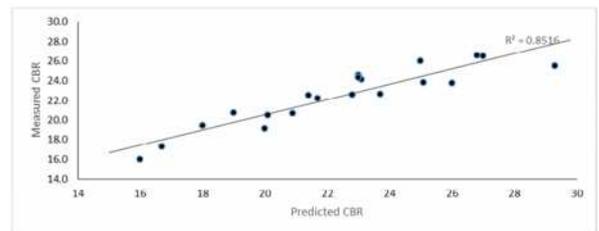


图 5. CBR_{mp} 的验证图 $=19.5-0.836 Cm-0.178 WG-0.759 LL+2.33 PL-18.5 MDD_{mp}$

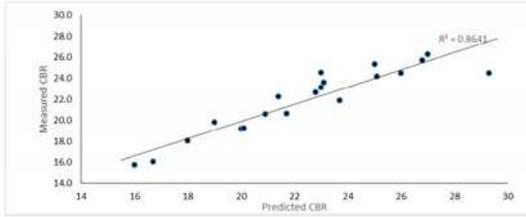


图 6. $CBR_{mp}=151-1.05 C_m-0.152 WG+2.32 PL-0.935 LL-1.66 OMC_{mp}-71.6 MDD_{mp}$ 的验证图。

4. 结论

对二十 (20) 个扰动土壤样品进行回归分析, 将浸泡 CBR 值与易于确定的土壤参数相关联, 扰动土壤样品在 OMC 下用 (2-8%) 普通硅酸盐水泥 (OPC) 和 (5-20%) WG 混合物稳定。CBR 被用作因变量, 而 MDD、WG、 C_m 、LL 和 PL 被用作自变量, 发现这些自变量对于压实力和浸泡 CBR 的预测模型都相当接近相应的实际结果。对这些变量的回归分析估计表明, SP 和 MP 分别具有很强的相关性 ($R^2=0.98$ 和 0.94)。结果表明, 回归分析得出的相关方程与试验结果一致, 并且根据本工作得出的模型方程对响应进行了很好的预测, 因为这些方程可用于估算具有类似岩土财产的其他黑棉土的浸水 CBR。方程式为:

$$CBR_{sp}=108-0.464 C_m-0.240 WG-0.607 LL+1.31 PL-1.47 OMC_{sp}-44.4 MDD_{sp} \quad (R^2=0.98)$$

$$CBR_{mp}=151-1.05 C_m-0.152 WG+2.32 PL-0.935 LL-1.66 OMC_{mp}-71.6 MDD_{mp} \quad (R^2=0.94)$$

参考文献

[1] Patel, M. A., and Patel, H. S. (2012). A review on effects of stabilizing agents for stabilization of weak soil. *Civil and Environmental Research*, 2 (6), 1-7.

[2] Ramasubbarao, G. V., & Sankar, G. S. (2013). Predicting soaked CBR value of fine-grained soils using index and compaction characteristics. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7 (3), 354-360.

[3] Shirur, N. B., & Hiremath, S. G. (2014). Establishing relationship between CBR value and physical properties of soil. *IOSR journal of mechanical and civil engineering*, 11 (5), 26-30.

[4] Satyanarayana Reddy, C. N. V., & Pavani, K. (2006). Mechanically stabilised soils—regression equation for CBR evaluation. In *Proceedings of the Indian geotechnical conference, Chennai, India* (pp. 731-734).

[5] Gregory, G. H., & Cross, S. A. (2007). Correlation of CBR with shear strength parameters. In *Proceedings of 9th International Conference on Low Volume Roads*, Austin, Texas

[6] Vinod, P., & Reena, C. (2008). Prediction of CBR value of lateritic soils using liquid limit and gradation characteristics data. *Highway Research Journal, IRC*, 1 (1),

89-98.

[7] Patel, R. S., & Desai, M. D. (2010). CBR predicted by index properties for alluvial soils of South Gujarat. In *Proceedings of the Indian Geotechnical conference, Mumbai* (pp. 79-82).

[8] Yildirim, B. and Gunaydin, O. (2011). Estimation of CBR by Soft Computing Systems, *Expert Systems with Applications, ELSEVIER*, 38 (5): 6381-6391.

[9] Patel, M. A., & Patel, H. S. (2012). Experimental Study to Correlate the Test Results of PBT, UCS, and CBR with DCP on Various soils in soaked condition. *International Journal of Engineering (IJE)*, 6(5), 244.

[10] Venkatasubramanian, C., & Dhinakaran, G. (2011). ANNmodel for predicting CBR from index properties of soils. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 2 (2), 614-620.

[11] Sabat, A. K. (2013). Prediction of California bearing ratio of a soil stabilized with lime and quarry dust using artificial neural network. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 3261-3272.

[12] Alawi, M., and Rajab, M. (2013). Prediction of California bearing ratio of sub-base layer using multiple linear regression models. *Road Materials and Pavement Design*, 14 (1), 211-219.

[13] Talukdar, D. K. (2014). A Study of Correlation between California Bearing Ratio (CBR) Values with Other Properties of Soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 (1), 559-562.

[14] Ikara, I. A., Kundiri, A. M., & Mohammed, A. (2015). Effects of Waste Glass (WG) on the Strength Characteristics of Cement Stabilized Expansive Soil. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 4, 33-41.

[15] BS 1377 (1990). *Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes*. British Standard Specification, London.

[16] BS 1924 (1990). *Methods of Tests for Stabilized Soils*. British Standard Specification. London.

[17] Ugbe, F. C. (2012). Predicting Compaction Characteristics of Lateritic Soil of Western Niger Delta, Nigeria. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 4 (5), 553-559.

[18] Alam MZ, Ameen ES, Muyibi SA, Kabbash NA (2009) the factors affecting the performance of activated carbon prepared from oil palm empty fruit bunches for adsorption of phenol. *Chemical Engineering Journal* doi: 10.106/J.cej.2009.07.033.

[19] Montgomery DC, Runger GC (2011) *Applied statistics and probability for engineers*. 5th edn. Wiley and Sons, Asia, Pte, Ltd.