糖蜜，酢酸および酸化カルシウムを用いたカオリン粘土の締固め[†]

堤 隆* 谷口 亮太** 内田 修司*** 日高 純三****

Compaction for Kaolin Clay using Molasses, Acetic Acid and Calcium Oxide

by

Takashi TSUTSUMI*, Ryota TANIGUCHI**, Shuji UCHIDA*** and Junzo HIDAKA****

Ground improvement using lime or cement is popular because of the speed, adaptability, and profitability of this method. However, pollution due to alkaline water from lime or hexavalent chromium from cement may occur as a result. To avoid these issues, some studies have been carried out in India and a few African countries on the use of molasses for the improvement of clays. The increase in mechanical strength was demonstrated using the unconfined compressive strength or California Bearing Ratio (CBR) value. However, a sufficient value for ground improvement has not been achieved yet. In the present study, acetic acid and calcium oxide were added into molasses solution to increase the mechanical properties of clay specimens. Throughout the curing period, air temperature was set at 25 °C and the specimens were placed in a drying furnace. 1, 3, 7 and 28 days were chosen as the curing periods. The Brazilian test was used to obtain the tensile strength value for evaluation of the mechanical properties of the specimens. The tensile strength obtained through this procedure was twice that than from specimens with distilled water and 1.5 times that from specimens treated with a 10% molasses solution. Furthermore, the dry density achieved through this procedure was larger than that of specimens with distilled water because of the surface activity of molasses. At the same time, it was shown that the pH value of Kaolin clay treated with the solution proposed in this study is in the range of weak acidity. Therefore, the solution proposed in this study is expected not only improvement in mechanical properties of Kaolin clay but also little load to vegetation in ground improvement.

Key words:

Molasses, Kaolin clay, Acetic acid, Calcium oxide, Soil improvement, Tensile strength, Dry density, pH value

1 緒 言

我が国においては社会経済活動の基盤となる平野部の多くが軟弱な粘性土で構成されている。したがって、このような場所での建設工事の多くは軟弱な粘性土を取り扱うことになる。加えて、近年では処分費用の高騰から建設工事現場から搬出される建設発生土の積極的かつ有効活用が着目されている。建設発生土の活用においては、経済性、施工性のみならず環境面においても社会的要請を満たさなければならない¹⁾。

地盤の安定処理方法には機械的方法と安定剤の混合による方法に大別され、これらのうち後者では地盤に不足する粒度を補う方法と固結化に分類される²⁾。粘土に対する固結化には石灰、セメント系固化材が用いられてきた。しかしながら、これらの固化材では改良土のpH値がアルカリ性を示すため改良土からの表流水や浸透水による植生などの周辺の環境に影響を及ぼす可能性が指摘されている³⁾。さらに、セメントおよびセメント系固化材では、

改良土からの六価クロムの溶出も報告されている⁴⁾。このことから、十分な力学的強度を発生させるだけでなく、周辺環境への負荷の小さい地盤安定剤の開発が望まれる。

アフリカやインドにおいて、弱酸性であるさとうきびの糖蜜を使った路床の改良の試みがなされてきた。M' Ndegwa⁵⁾やTayeら⁶⁾は膨潤性粘土への、Raviら⁷⁾は圧縮性粘土への、そしてKiranら⁸⁾は黒綿土への安定処理を試みた。そこでは一軸圧縮強さやCBR値などの力学的特性に改善が見られセメントを用いた改良土に比べpH値が低いことが報告されているが、実用にあたっては糖蜜のみでは十分な強度増加を得るには至っていない。廣内らは、蟻塚由来のラテライトに酸化カルシウムを混入させて粒子間の結合力を向上させたラテライトブロックの作成を試みた⁹⁾。また、Meleseは膨潤性粘土に対し糖蜜に石灰、バガス灰およびセメントを混ぜて地盤改良を試みた¹⁰⁾。著者らは糖蜜、酸化カルシウムの他に弱い凝集効果が期待される微量の酢酸¹¹⁾を加えた水溶液でカオリン粘土を

[†] 原稿受理 令和3年6月6日 Received June 6, 2021 ©2022 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 鹿児島工業高等専門学校 都市環境デザイン工学科 〒899-5193 霧島市隼人町真孝
Dept. Urban Environmental Design and Eng., N. I. T. Kagoshima Col., Hayatochoshinko, Kirishima 899-5193.

** 長岡技術科学大学 工学部 環境社会基盤工学課程 〒940-2188 長岡市上富岡町
Dept. Civil and Environmental Eng., Nagaoka Univ. of Tech., Kamitomiokamachi, Nagaoka 940-2188.

*** 福島工業高等専門学校 化学・バイオ工学科 〒970-8034 いわき市平上荒川
Dept. Applied Chemistry and Biochemistry, N. I. T. Fukushima Col., Tairakamiarakawa, Iwaki 970-8034.

**** 合同会社HICD 〒112-0002 文京区小石川
HIC Distributing LLC, Koishikawa, Bunkyo-ku 112-0002.

締固めた。湿潤および気乾を組み合わせた 4 種類の条件で 7 日間養生を行った後に圧裂試験を行い、締固めに最適な仕事量および初期含水比を見出した。ここでは、糖蜜のみの水溶液で締固めた粘土に対し約 1.2 倍の引張強さを得た¹²⁾。

本論文では、糖蜜、酸化カルシウムおよび酢酸を用いた水溶液で締固めたカオリン粘土の時系列での強度の発現を観察した。まず、この水溶液を用いてカオリン粘土の塑性限界、液性限界および塑性指数を求めた。次に、この水溶液を用いてカオリン粘土を締固め、路床の改良など短い工期が求められる場合を想定して、すべての養生期間を気乾とした。養生 1 日、3 日、7 日および 28 日の引張強さを圧裂試験により求めた。さらにこれらの養生日数における初期含水量に対する含水量の比を求め、圧裂試験に用いた供試体の乾燥密度を求めた。同時に環境への負荷の指標として含水比が異なる試料ごとに pH 値を測定した。得られたこれらの結果を蒸留水あるいは糖蜜のみの水溶液で締固めた供試体から得られた結果と比較し、本研究で用いた水溶液の有用性について示した。

2 実験方法

2.1 粘土試料と水溶液

(1) 用いた粘土試料

本研究では昭和 KDE 社関白 AN クレーを用いた。関白 AN クレーの密度は 2.65g/cm^3 、自然状態の含水比は 0.48%、成分は SiO_2 63.3%、 Al_2O_3 18.9%、 Fe_2O_3 0.19%、 K_2O 2.9%で、粒度分布を Fig. 1 の粒径加積曲線に示す¹²⁾。関白 AN クレーの液性限界、塑性限界はそれぞれ 25.61%、17.88%である。

Fig. 1 Grain size accumulation curve of clay used in present study¹²⁾.

Fig. 2 Consistency of clays used in present and former studies.

Fig. 2 に関白 AN クレーの液性限界と塑性指数を既往の研究で用いられた粘土試料のものとともに塑性図上に表す。

(2) 締固めに用いた水溶液

用いた糖蜜は日本ガーリック社製の糖蜜液である。質量比 10%の濃度の水溶液の pH 値は 5.12、水分は 26.80%、ミネラルの含有割合および含有量は Table 1 に示すとおりである¹²⁾。酢酸は(株)エヌ・エヌ・シー社製濃度 90%のものを、酸化カルシウムは林純薬工業(株)製の試薬を用いた。

これらの糖蜜、試薬を使って Table 2 に示すような 3 種類の組み合わせの水溶液で締固めた。D, M はそれぞれ蒸留水および質量比 10%の糖蜜水溶液を表す。MCAD においては糖蜜の濃度は著者らの先行研究¹²⁾と同じ質量比 10%とし、酸化カルシウムの溶解度は 1.19g/l ¹³⁾であることから水溶液の酸化カルシウム濃度を 1g/l 程度となるよう質量比で 0.1%とした。酢酸の濃度は著者らの研究において最も大きな引張強さが得られた 0.9%とした¹²⁾。

Table 1 Mineral in molasses used in present study¹²⁾.

Mineral in molasses (%)				
Ca	P	Mg	K	Na
1.19	0.11	0.47	3.17	0.37
Mineral in molasses (mg/kg)				
Fe	Cu	Zn	Mn	Mo
300.00	79.40	43.00	56.00	0.10

Table 2 Variation of solution in present study.

Solution	Molasses	Calcium oxide	Acetic acid	pH value
D	0	0	0	6.27
M	10%	0	0	5.12
MCAD	10%	0.1%	0.9%	4.33

2.2 力学試験

著者らの実験によれば、MCAD を用いて湿潤養生を 4 日行った養生日数 7 日で最も大きな引張強さが得られる初期含水比は、締固め時に塑性変形が発生しない最も大きな含水比である 11%から 12%付近である¹²⁾。本研究では初期含水比が同程度になるように、自然乾燥状態の粘土試料 370g に対して Table 2 に示す液体を霧吹きで与え試料を作成した。直径 5cm 高さ 10cm のモールドに厚さ l が 2.5cm 程度となるように 90g の試料を入れて突き固め、供試体を作成した。Proctor によって定義された供試体への締固め仕事量 E_c を式(1)に示す¹⁴⁾。

$$E_c = \frac{W_R H N_B N_L}{V} \quad (1)$$

ここに、 W_R は締固めに用いたランマーの重量、 H はランマーの落下高さ、 N_B は層当たりの突き固め回数、 N_L は層の数、 V は供試体の体積を表す。本研究で用いたランマーは W_R が 14.7N (1.5kgf)、 H が 20cm であり、 N_L は 1 とした。著者らの研究によればカオリン粘土に対し最も効果

が期待できる締固め仕事量は $E_c=600\text{N/cm}^2$ 程度であること¹²⁾から、 N_B を99とした。

梶井らが行ったカオリン粘土に対する引張試験¹⁵⁾では、飽和状態から自然乾燥させたにもかかわらず引張試験時の含水比が近い値でありながら引張強さが大きく異なる供試体が見受けられた。本研究では養生時の環境の変化をできるだけ小さくするため25℃に設定した篠原製作所60型循環乾燥機中での空気乾燥とし、期間は1, 3, 7および28日とした。養生中は毎日午前8時に乾燥機内の湿度を測定し、それらの平均値は42.1%、標準偏差は8.0%、最小値は25%、最大値は60%であった。

室内あるいは現場で締固めや化学的処理によって人工的な改良を加えた土は一軸圧縮強さによって改良の効果が判定され、改良地盤の安定性が評価される¹⁶⁾。粘土の一軸圧縮強さに対する引張強さの比は有明粘土で0.12~0.13、兵庫粘土で0.18~0.21となるなど、粘土の一軸圧縮強さと引張強さには相関があることが示されている¹⁷⁾。そこで、本研究では水溶液の種類による改良の効果を引張強さで確認した。用いた試験方法はFig. 3に示すような圧裂試験である。圧裂試験は普及した一軸圧縮試験機を用いて容易に行うことができる利点を有する。さらに供試体の成型も容易で、使用する土試料も少なくすむ長所もある。引張強さ σ_t は以下の式で与えられる¹⁸⁾。

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi al} \quad (2)$$

ここに P は圧縮荷重、 a は供試体の半径である。供試体の厚さ l はノギスを用いて中心から対面の2か所を測定し平均した値を用いた。さらに、破壊後の供試体の含水比を測定し、供試体の乾燥密度を求めた。

Fig.3 Brazilian test and specimen in present study¹²⁾.

3 結果 および 考 察

3.1 コンシステンシーの変化

M および MCAD の液性限界と塑性限界はそれぞれ24.68%と16.17%、25.45%と16.83%であった。Dで得られた値を含めてこれらを塑性図上に表すと Fig. 4 のようになる。

Taye らによれば、エチオピアの膨潤性粘土に対しては糖蜜を質量比で8%混合したときに最も液性限界が小さくなる⁶⁾。また、Kiran らも黒綿土に対して糖蜜を質量比8%で混合したときに塑性限界、液性限界とも最小になっている⁸⁾。著者らの実験では質量比で10%の糖蜜を含む水溶液を含水比7%から12%程度を加えて供試体を作成したので、粘土に対する糖蜜の質量比は1%程度となる。Mでは塑性限界、液性限界ともDの場合に比べ減少しており、Kiran らと同様の結果になった。MCADでは塑性限界は減少したものの液性限界はDとほぼ同じ値となった。石灰処理土は石灰添加量が増加するにしたがって液性限界、塑性限界とも減少することが知られており、特に液性限界は石灰添加量が0%から5%までの範囲での減少が著しい¹⁹⁾。このことから、MCADで液性限界の値がほぼDに等しかったのは酢酸の効果と考えられる。同一の液性限界値を持った粘土では塑性指数が大きいほど乾燥状態での結合力が大きい²⁰⁾ことから、酢酸の添加による乾燥時の引張強さ増加への寄与が期待できる。

Fig. 4 Coordinates of consistency limits on plasticity chart.

3.2 引張強さ

MCAD, M および D の初期含水比と引張強さの関係を Fig. 5 に示す。以下、養生日数ごとに考察する。

(1) 養生日数 1 日

D では初期含水比が7.45%から11.59%に増加する間では引張強さの変化はほとんど見られず、すべて7.5N/cm²程度となった。Mでは初期含水比が7.46%および10.11%を除けば初期含水比が大きくなるにしたがって引張強さも大きくなった。初期含水比が7.46%および10.11%で作成した供試体の養生初日の乾燥機内の湿度が29%および31%と著しく低かったことから養生日数1日における引張強さが他の供試体に比べて大きな値となったものと考えられる。初期含水比が12.58%で作成した供試体も養生初日の乾燥機内の湿度が31%と著しく低かったが、他の供試体に比べ初期含水比が高くこの間に蒸発した水分量の初期含水量に対する比が小さいことから、養生日数1日での引張強さへの影響は小さかったものと考えられる。MCADでも初期含水比が7.50%から11.63%となる間に引張強さは11.8 N/cm²から17.7 N/cm²へと一様に増加した。

Fig. 5 Relation between tensile strength and initial water content.

Fig. 6 Water content in specimens during curing period.

(2) 養生日数 3 日

D ではやはり初期含水比の増加による引張強さの増加は小さく、すべて 10 N/cm^2 程度の値となった。M では初期含水比が 10.11% を除けば 10.92% までは初期含水比の値が増加するにしたがって引張強さも増加し、最大値は 33.1 N/cm^2 を示した。それを超えると引張強さは減少し、初期含水比が 12.58% のときに 27.1 N/cm^2 となった。MCAD では初期含水比が 7.82% , 9.19% および 10.78% では初期含水比が増加するにしたがって引張強さも増加した。初期含水比 7.50% の供試体の養生開始後 3 日間の乾燥機内の湿度は 28% , 32% , 38% となり養生初日と 2 日目の湿度が低いことから養生日数 3 日での引張強さが大きくなったものと考えられる。初期含水比 9.86% の供試体の養生開始後 3 日間の乾燥機内の湿度は 34% , 26% , 37% で、特に

養生 2 日目の湿度が小さかったことによって養生日数 3 日での引張強さが大きくなったものと考えられる。初期含水比 11.63% の供試体の養生開始後 3 日間の乾燥機内の湿度は 42% , 34% , 26% で、特に養生 3 日目の湿度が小さかったことによって養生日数 3 日での引張強さが大きくなったものと考えられる。

(3) 養生日数 7 日

D ではいずれの初期含水比においても養生日数 3 日とほぼ同じ引張強さとなった。M では初期含水比が 8.38% 以上で 20 N/cm^2 から 25 N/cm^2 程度の引張強さを示した。MCAD では初期含水比が 9.19% と 10.78% で養生 3 日の引張強さより大きくなり、 7.52% , 9.86% , 11.67% で小さくなった。これについては、養生中の湿度だけでは説明できず原因の特定には至っていない。

(4) 養生日数 28 日

D では初期含水比が大きくなるにしたがって引張強さもわずかながら増加し、初期含水比が 11.59%のときに最大値は 14.4 N/cm^2 となった。M では初期含水比 9.48%以上で 20 N/cm^2 程度の値を示した。MCAD では初期含水比 9.86%以上であれば養生日数 1, 3 および 7 日における引張強さ発生履歴にかかわらず、 30 N/cm^2 程度のほぼ一定値となった。

3.3 含水比の変化

Fig. 6 は MCAD, M および D のそれぞれの初期含水比で作成した供試体での養生日数 1, 3, 7 および 28 日における初期含水量に対する含水量の比を表す。

糖蜜を含む MCAD および M は養生日数 1 日での初期含水量に対する含水量の比が D の 2 倍程度となった。さらに、それ以降も MCAD および M は D よりも 0.01 程度大きな値となった。MCAD は酸化カルシウムを含んでおり、化学反応によって硬化を促進させるために適度な含水量を含むことは地盤改良に有利に働くことが期待される。

3.4 供試体の乾燥密度

Fig. 7 は MCAD, M および D それぞれの供試体での初期含水比と養生日数 1, 3, 7 および 28 日での乾燥密度の関係を表す。いずれの水溶液も締固めにおける最適含水比には至っていないため、初期含水比が大きくなるにしたがって乾燥密度も大きくなった。D では初期含水比 11.5% 付近での養生日数 28 日での乾燥密度が 1.75 g/cm^3 であるのに対し、M, MCAD ではそれぞれ 1.81 g/cm^3 , 1.78 g/cm^3 である。糖蜜には弱い界面活性効果があることから、界面活性効果が締固め時の乾燥密度を高くした²¹⁾ことが理由と考えられる。また、MCAD では初期含水比が 10.78% 以上の 2 つの供試体で養生日数 28 日の乾燥密度が養生期間中で最も小さくなった。本研究で使用したカオリン粘土の塑性指数は 7.73 であり、仮に膨潤が発生したとしても 0.5 時間から 1.5 時間で終了する²²⁾ことから膨潤が原因とは考えられない。酸化カルシウムによる土壌の安定化は水和反応、イオン交換反応、エトリンサイト生成反応、ポゾラン効果反応、炭酸化反応の 5 つの段階で進行すると考えられている。この中でエトリンサイトの結晶はごく微細な空隙を作りながら成長する³⁾。しかしながら、エトリンサイトは pH 値が 10.7 以上で析出され、それ以下の場合には二水セッコウが析出される²³⁾。

Fig. 8 に MCAD, M および D を添加したカオリン粘土の初期含水比と pH 値の関係を表す。ここでは、それぞれの粘土試料について供試体作成時に残った試料を 24 時間空気乾燥を行った後、20g を採取して 50cc の蒸留水を加えて静置したときの上澄み液の pH 値を採用した。平均値は D と M でそれぞれ 4.47 と 4.50 であるのに対し MCAD では 4.88 となった。特に、MCAD では含水比 11% 前後で 5 程度の値となった。これらの値は M および D より大きいものの、弱酸性の範囲にあることからエトリンサイトの析出は考えにくい。

(a) MCAD (Present study)

(b) M (10% molasses solution)

(c) D (Distilled water)

Fig. 7 Relation between dry density and initial water content.

Fig. 8 Relation between pH value and water content.

Fig. 9 XRD profile of clay material in present study.

Fig. 9 に本研究で供試体作成に用いた関白 AN クレーの X 線回折の結果を示す。カオリナイト特有のパターンを示しており、この図からは不純物として黄鉄鉱などの硫化鉱物の存在は確認できない²⁴⁾。Table 1 において糖蜜中の硫黄の存在に関する記載がないが、これは製造元が硫黄の成分分析を行っていないことによるもので、硫黄が存在しないことを意味するものではない。水/糖蜜比 0.5 の成分組成には 0.6%の SO_4^{2-} が含まれるとの報告もある²⁵⁾。

これらのことから、酸化カルシウムと酢酸を含む MCAD の密度が糖蜜のみの水溶液である M より小さいのは糖蜜内の SO_4^{2-} と酸化カルシウムとの反応によって二水セッコウが析出された際に生じた膨張の可能性が推察される。MCAD において大きな引張強さが得られた初期含水比 11%前後の試料で pH 値が 5 前後と D や M に比べて中性側の値を示したのも二水セッコウ析出が理由と考えられる²⁶⁾。

4 結 言

本研究では質量比で 0.1%となる酸化カルシウムを含む 10%の濃度の糖蜜の水溶液に 0.9%となるように酢酸を加えて水溶液を作成し、この水溶液を用いてカオリン粘土のコンシステンシー限界を求めた。次に、この水溶液を用いてカオリン粘土を締固め、締固め直後より 25°Cに設定した循環型乾燥機内で養生を行い、1, 3, 7 および 28 日後に圧裂試験によって引張強さを求めた。さらに、試験後の供試体の含水比を求め、供試体の乾燥密度およびそれぞれの初期含水比の試料について pH 値を求めた。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 本研究で提案した水溶液をカオリン粘土に用いた場合、蒸留水を用いた場合に比べ液性限界はほぼ等しい値となったが、塑性限界が低くなり塑性指数が増加した。糖蜜 10%水溶液を用いた場合と比べると、塑性限界、液性限界ともに増加し、塑性指数はほぼ等しくなった。
- (2) 養生 1 日での引張強さは初期含水比の影響が小さく、蒸留水を用いた場合に比べ 2 倍程度の値となった。養生 3 日における引張強さの値は養生時の湿度の影響が見られ、養生 7 日においても初期含水比の値に対し引張強さは不規則に発現した。しかしながら、養生日数 28 日では初期

含水比 10%付近を超えると 30N/cm²程度の一定値を示した。これは糖蜜 10%水溶液で作成した供試体のほぼ 1.5 倍の値である。

- (3) 同じ養生日数で比較した場合、本研究で用いた水溶液で作成した供試体は蒸留水で作成したものに比べ初期含水量に対する含水量の比が高い。これは糖蜜 10%水溶液で作成した供試体と同じ特徴を示す。

- (4) 塑性変形を生じさせない最も大きな含水比 12%程度より低い範囲では、初期含水比が大きくなるにしたがって供試体の乾燥密度は大きくなった。また、本研究で用いた水溶液で作成した供試体の乾燥密度は蒸留水で作成したものに比べて高くなった。さらに糖蜜 10%水溶液で作成した供試体と比較すると、初期含水比が 7.5%付近ではほとんど同じであるが、初期含水比が大きくなるにしたがって糖蜜 10%水溶液で作成した供試体の方が大きくなり、初期含水比 12%付近では 0.3g/cm³程度の差が生じた。

- (5) 本研究で提案した水溶液で締固めた供試体は初期含水比 10%を超えると養生日数 28 日の引張強さが養生日数 3 日あるいは 7 日より小さくなった。さらに、養生 28 日の乾燥密度も養生期間中の最小となった。

- (6) 本研究で提案した水溶液を用いた粘土試料は蒸留水および糖蜜のみの水溶液を用いたものと同様に弱酸性であり、pH 値は 0.4 程度大きな値を示した。

以上より、質量比 10%の糖蜜のみの水溶液に 0.9%の酢酸と 0.1%の酸化カルシウムを加えて締固めを行ったカオリン粘土は先行研究で扱われた糖蜜のみの水溶液で締固めを行った場合に比べて力学的強度が増し、環境に対してもほぼ同様に負荷が小さいことが本研究で示された。

この研究を遂行するにあたり、2020 年度鹿児島工業高等専門学校都市環境デザイン工学科卒業研究においてカオリン粘土の乾燥に関し多くの示唆に富む知見を導いた富田凱貴(東洋建設(株))、本村謙信((株)大阪防水建設社)両氏に感謝します。また、X 線回折に関しご協力いただいた鹿児島県工業技術センター吉村幸雄氏に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T. Kojima, "Soil stabilization with lime", Journal of the Society of Inorganic Materials, No. 14, pp. 355-260 (2007)
- 2) Y. Asakawa, "Stabilization of soil using lime in soil engineerings", Gypsum & Lime, No. 138, pp. 32-39 (1975).
- 3) N. Ozeki, S. Kiriyama and K. Kido, "Soil stabilization with limes and Complexed limes", Journal of the Society of Inorganic Materials, No. 12, pp. 512-515 (2005).
- 4) T. Hosoya, "Leaching of hexavalent chromium from cementitious soil improvement", Journal of the Society of Material Science, Japan, Vol. 51, No. 8, pp. 933-942 (2002).

- 5) J. K. M'Ndegwa, "The effect of cane molasses on strength of expansive clay soil", *Journal of Engineering Trends in Engineering and Applied Science*, Vol. 2, No. 6, pp. 1034-1041 (2011).
- 6) B. Taye, and A. A. Araya, "Stabilization of expansive clay soil with sugar cane molasses and cement", *Proceedings of 2nd International Conference on Transportation of Africa*, pp. 1-12 (2015).
- 7) E. Ravi, E., A. T. Manikandan, G. Karthick and A. A. Jameel, "Study on effect of molasses on strength of soil", *International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 57-61 (2015).
- 8) Kiran, S. Harsha, K. V. S. B. Raju and N. M. Kumar, "Experimental study on stabilization of black cotton soil with molasses and arecanut fibers", *International Journal of Applied Engineering and Research*, Vol. 13, No. 7, pp. 219-223 (2018).
- 9) S. Hirouchi, H. Horino, H. Dan, C. Hirose, S. Agodzo and P. S. Kwawukume, "Possibility to adapt laterite brick for earth canal protection - A case study in Republic of Ghana -", *IDRE Journal*, No. 303 (84-3), pp. II_51-II_59 (2016).
- 10) B. Melese, "Review on soil stabilization using bagasse ash with lime and molasses with cement", Master's thesis of Addis Ababa Science and Technology University, (2018).
- 11) T. Kida, "Polymers connecting with clay particles", *High polymers*, Japan, Vol. 13, No. 145, pp. 306-311 (1964).
- 12) T. Tsutsumi, J. Hidaka and S. Uchida, "Mechanical Behavior of clay compacted with molasses containing acetic acid and calcium oxide", *Proceedings of 14th Symposium on Ground Improvement*, Japan, pp. 233-238 (2020).
- 13) H. Takahashi and H. Kimura, "Fundamental research of traditional glazes using raw materials from Ishikawa Prefecture", *Research Report of Industrial Research Institute of Ishikawa Prefecture*, No. 65, pp.43-46 (2016).
- 14) Japan Geoengineering Society, "Methods and explanation for soil testing", p. 256 (2000).
- 15) T. Masui, S. Yao, A. Ito, M. Goto and Y. Sasaya, "The relationship between bonding forces and the state of water in Kaolin clay – Part 1 Experiments for measurement of tensile strength of Kaolin clay-", *The proceedings of 37th Japan Geoengineering Society Annual Conference*, pp. 935-936 (2002).
- 16) Japan Geoengineering Society, "Methods and explanation for soil testing", p. 430 (2000).
- 17) A. Takakura, Y. Koga, A. Hamatake and H. Koga, "Strength properties of stabilized soil slab in road on soft ground", *Report of the Faculty of Science and Engineering, Saga University*, Vol. 32, No. 2, pp. 17-20 (2002).
- 18) S. Moriguchi, "Two dimensional elasticity", *Iwanami Pub.*, p. 41 (1956).
- 19) M. Aoki and A. Tsuji, "Property of compaction for lime-treated soil", *Journal of the Agricultural Engineering Society, Japan*, Vol. 48 No. 4, pp.251-254 (1980).
- 20) H. Shirozu, "Clay mineralogy", *Asakura Pub.*, p. 52 (1988).
- 21) T. Niuro, Y. Masada, J. Jiang and E. Kuribayashi, "Effect of Gas-liquid interfacial forces on compaction behaviors of unsaturated soil", *Transaction of Japan Society of Civil Engineering*, No. 582/III-41, pp. 265-274 (1997).
- 22) Y. Shiraki, "Imbibitional swelling properties of clay-water system. Studies on clay-water system, III-6.", *Journal of Ceramics Association, Japan*, Vol. 72, No. 9, pp. 155-163 (1964).
- 23) A. Gabrisova and J. Havlica, "Stability of calcium sulphoaluminate hydrates in water solution with various pH values", *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 1023-1027 (1991).
- 24) M. Ichikuni, S. Aizawa, K. Yoshikawa, N. Kato and D. Otani, "Production of Yunohana sinter with the use of Kaolinite clay in the Myoban area, Beppu hot springs", *Journal of Hot Spring Science*, Vol. 62, pp. 3-12 (2012).
- 25) H. Ando, T. Otani, I. Furukawa, J. Kamizono and I. Mukoyoshi, "Separation technology of potassium from molasses", *Research Report of Industrial Research Institute of Kagoshima Prefecture*, No. 29, pp. 19-23 (2015).
- 26) Y. Umetsu, "Gypsum from Neutralization of sulfuric acid solution with limestone", *Gypsum & Lime*, No. 234, pp. 299-305 (1991).