

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2020
課題番号：18K04341
研究課題名(和文) 地盤防災・コジェネレーション・廃材リサイクルのトータルソリューションシステム

研究課題名(英文) Total solution system for ground disaster prevention, cogeneration and construction waste material recycling

研究代表者
横浜 勝司 (Yokohama, Shoji)
北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：50299731
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：各種の自然災害に対して強く安全で、かつ持続可能な生活環境を整えるために、地盤補強と環境にやさしい発電方法の開発が必要となる。さらに、資源の有効活用は持続可能な生活環境の維持のために必須となる。本研究では地盤工学の観点から上記のことに貢献する知見を得るために、地盤補強-発電-資源のリユースのトータルシステム概念を提案し、その実現性を実験的研究により検討した。新たに製作した地盤補強と発電を実施するための部材を地盤内に挿入し、その表面をアスファルト廃材で被覆することで地盤支持力の向上および地表面温度を活用した発電が可能となることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、産業廃棄物の1つであるアスファルト舗装再生砕石の力学性質を利用した地盤補強効果の発揮の確認と、その集熱性を利用した発電の実行の両者を同時に実現させることを検討した。産業廃棄物および地表面温度エネルギーの両方のリユースと地盤力学特性向上を結びつけるシステムの構築と実用化を目指すことで、地盤工学分野の新知見を得るとともに、SDGsに基づいた持続可能な社会生活の仕組みを構築する新たな技術開発に向けた知見を獲得した。

研究成果の概要(英文)：In order to maintain the current standard of living without deteriorating the global environment, it is necessary to develop and spread the effective power generation methods using clean energy. Rational ground reinforcement is necessary to minimize the ground damage caused by frequent natural disasters such as earthquakes. In this study, one of the useful tools for constructing and maintaining a recycling-oriented society is considered. A series of the field monitoring for electric power generation and the laboratory test for the mechanical properties of protected ground are conducted for discussing the feasibility of the proposed total system. In the laboratory test, it is also confirmed that the bearing capacity can be improved by using recycled asphalt pavement material and PG unit. The both results of field monitoring and laboratory test imply that the proposed total system can be realized.

研究分野：地盤工学

キーワード：アスファルト再生砕石 地盤補強 発電 熱電素子 支持力

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

近年の自然災害では地盤崩壊に起因する各種構造物の直接的なダメージの発生と、日常生活を支えるエネルギーの供給遮断による影響の両方による被害拡大および長期化が見られている。このような状況に対応するために、地盤補強とエネルギー供給を両立する手法の提案および実用化を目指すことは工学的な意義が高い。加えて、2015年に採択されたSDGsを踏まえ持続可能な社会の仕組みを構築するために土木工学分野においても、建設材料や産業廃棄物を効果的にリユースすることがとても重要視されている。

(2) アスファルト舗装再生砕石による地盤保護の実践例

建設副産物のリユースの推進が重要視されている現状において、アスファルト舗装再生砕石(以降、アスファルト廃材またはRAPと称する)を地表面保護材としてリユースした施工例がある。本研究の開始前に北海道雨竜郡雨竜町で実施されたアスファルト廃材を用いた地表面の保護状況を観測する機会を得た。この保護工は降雨等により高含水状態になる地表面の泥濘化を防ぎ、車両および人員通行を容易にするために2009年6月に実施されたものである。施工完了から2020年11月までの期間、降雨および融雪水を受けても法面の顕著な侵食および地表面の泥濘化が見られていない。このような保護を実施した箇所での土壤硬度の推移を図1に示す。土壤硬度は山中式土壤硬度計により計測し、その平均値、最大値および最小値を得て図中に示した。図より毎年の春季での土壤硬度値が他の時期の値と比べて、その最大値と最小値の差が大きく、平均値が若干低いものの2016年から2020年の期間では土壤硬度値の平均値が30mm前後であることがわかる。この結果はアスファルト廃材を活用して長期的な地表面保護が可能であること示唆している。

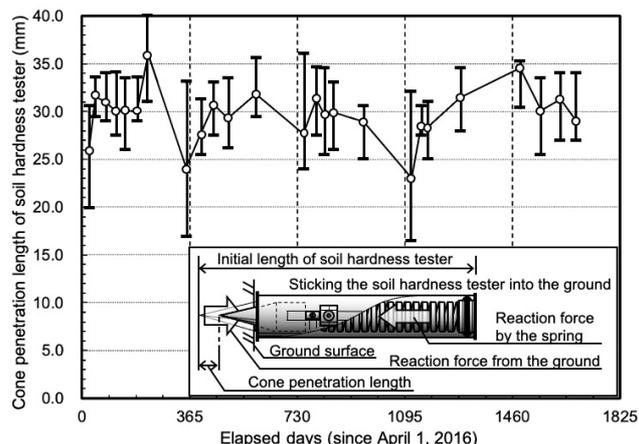


図1 アスファルト廃材で被覆した法面の土壤硬度

図1に示す。土壤硬度は山中式土壤硬度計により計測し、その平均値、最大値および最小値を得て図中に示した。図より毎年の春季での土壤硬度値が他の時期の値と比べて、その最大値と最小値の差が大きく、平均値が若干低いものの2016年から2020年の期間では土壤硬度値の平均値が30mm前後であることがわかる。この結果はアスファルト廃材を活用して長期的な地表面保護が可能であること示唆している。

2. 研究の目的

アスファルト廃材を用いた長期的な地表面保護の施工例の観測結果からアスファルト廃材を地盤の力学性能の維持または向上のために活用できる可能性があることが示された。加えて、アスファルト廃材粒子の多くは黒色であることから日光を受けてその温度が高くなることが考えられる。本研究ではこれらの特徴を工学的に活かし、地盤補強と発電を両立する仕組みの概念を提案している。

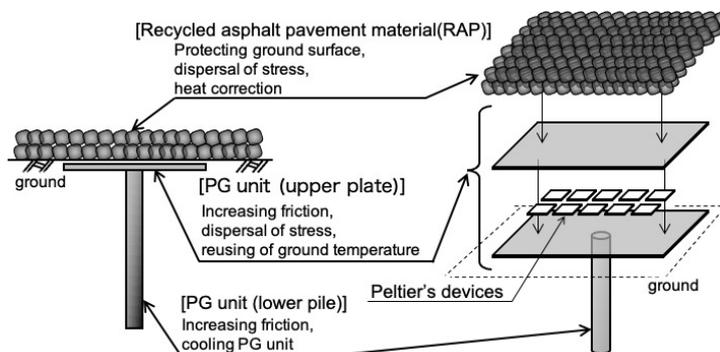


図2 地盤補強-発電-資源リユースのトータルシステム概念

図2はアスファルト廃材を用いた地盤補強と発電の両方を実現する方法の概念(地盤補強-発電-資源リユースのトータルシステム)を示す。図に示す提案する概念では、地表面にアスファルト廃材層を設け、その直下部にT字型の補強部材(PGユニットと称する)を挿入することで地盤の保護・補強を図ることを想定している。アスファルト廃材層において外力を分散したり地盤変形を抑制したりする。加えて、挿入したT字型の補強部材と周辺地盤との摩擦力発揮により地盤の支持力向上を図る。一方、アスファルト廃材とPGユニットに地盤温度を活用した発電の役割を持たせることを考え、PGユニットの上部板内部に熱電素子を内蔵する。ペルチェ素子は表裏面の温度差が与えられると発電する性質を有することから(引用文献①)、地表面のアスファルト廃材の温度と地中温度との差を活用した発電を試みる。本研究ではこのような一連の仕組みの実現性について地盤補強、発電の2つの観点から実験的に検討した。

3. 研究の方法

本研究では地盤補強-発電-資源リユースのトータルシステムの実現性を検証するために、地盤補強に関する室内試験と発電に関する屋外計測を実施した。

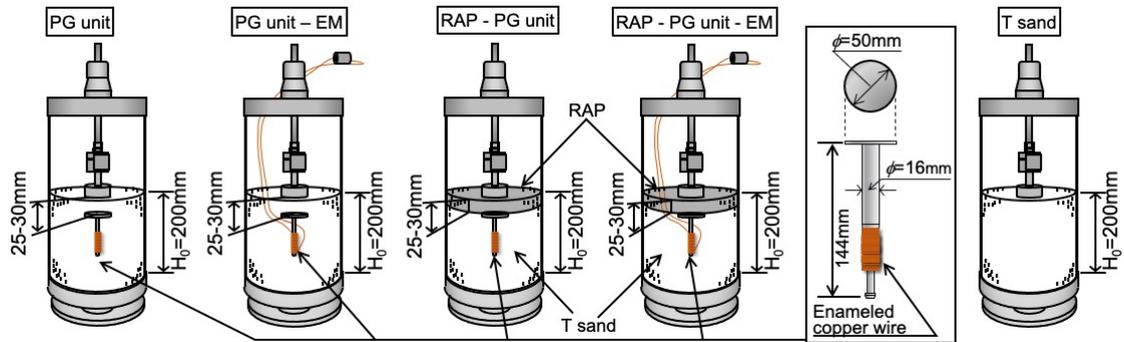


図3 地盤補強に関する実内試験条件

(1) 地盤補強に関する室内試験

T字型の補強部材 (PGユニットと称する) とアスファルト廃材による地盤補強効果を室内試験により調べた。アクリル製円筒セル、載荷板、載荷フレーム等で構成される試験装置を用いて試験用地盤の支持力を計測する試験を実施した。試験用地盤の材料には豊浦砂 (T sand) を採用した。試験用地盤の補強時に挿入する補強部材 (PGユニット) は鉄製としPGユニットの下部杭に長さ 30mm、直径 1.6mm のエナメル線をコイル状に巻きつけた。さらに、試験用地盤表面をアスファルト廃材で被覆したケースでの支持力も調べた。室内試験の条件の一覧を図3に示す。試験は地盤内にPGユニットを挿入した条件 (PG unit ケース)、挿入したPGユニットのエナメル線に電流を流した条件 (PG unit-EM)、PGユニットより上部の地盤をアスファルト廃材 (RAP) で置き換えた上でPGユニットを挿入した条件 (RAP-PG unit ケースおよびコイル部に電流を供給したRAP-PG unit-EM ケース)、無対策の条件 (T sand ケース) での試験を実施した。PGユニットのコイル部への電流は6500mAhのニッケル水素電池 (単一形) を6個直列に接続した電源から供給された。電流をPGユニットのコイル部に供給する目的は、PGユニットから磁力を発生させてT sand中の砂鉄をPGユニットに引きつけて地盤との摩擦向上を図ることである。

(2) 発電に関する屋外計測

アスファルト廃材で保護した地盤の地表面温度を活用した発電挙動を屋外計測により調べた。本研究では図4に示すような発電器具を新たに製作し、それを用いて発電挙動を計測した。発電用PGユニットは主としてペルチェ素子をアルミ板 (厚さ 0.3mm、幅 300mm、長さ 200mm) で挟んで作製した上部板、上部板裏面の冷却を図る部材群で構成されている。発電用PGユニット上部板の内部には30枚のペルチェ素子を直列に接続して並べて配置したものが搭載されている。

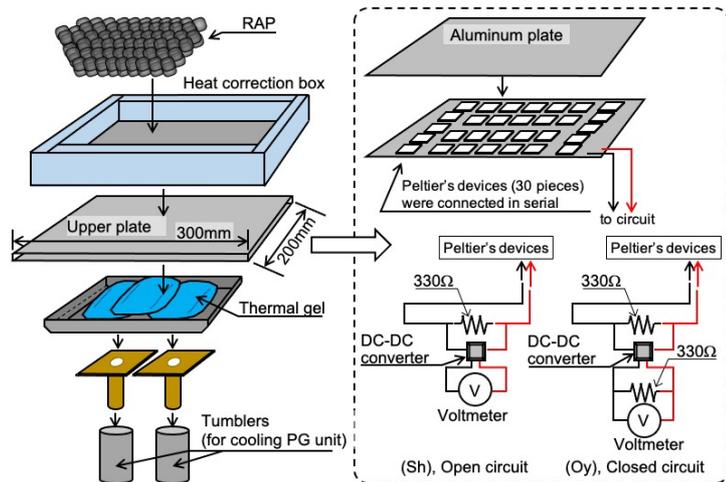


図4 地表面温度を活用した発電器具 (発電用PGユニット)

用いたペルチェ素子は1辺40mmの正方形、厚さ4mmの大きさで最大吸熱量が51W、外部からペルチェ素子へ入力可能な最大電圧は15.4Vのものである。PGユニットの上部板の表面および裏面には温度センサーを取り付けて温度を測定した。発電用PGユニット上部板の表面には厚さ20mmの断熱材とアルミ板で作成した集熱ボックスを取り付け、その集熱ボックス内にアスファルト廃材を敷き詰めて表面温度を高める工夫を施した。上部板の裏面には保冷剤 (高吸水性樹脂等を成分とする市販されている製品) を貼り付け、さらに発電用PGユニットの冷却を図るために真鍮製の固定ベースを2個取り付けた。屋外設置時には、水道水を入れたステンレス製タンブラーを2つ用意して計測箇所の地盤に埋め、そのタンブラー内にPGユニットに取り付けられた固定ベースの突起部が入るように設置した。本研究では出力用回路として2種類の回路を準備した。いずれの回路もペルチェ素子から出る配線に330Ωの抵抗と昇圧型DC-DCコンバータ (最大出力5V) を接続した。その内の1つは昇圧型DC-DCコンバータからの回路をオープン型 (オープン回路とする) として電圧計を接続し、発電用PGユニットからの出力で昇圧型DC-DCコンバータが作動するかどうかを調べた。他方は昇圧型DC-DCコンバータからの出力回路に330Ωの抵抗と電圧計を接続し、その発電挙動を調べた (クローズ回路とする)。

4. 研究成果

(1) 地盤補強に関する室内試験結果

RAPによる地表面保護を施さないPG unit、PG unit-EM、T sand ケースでの試験結果を図5に示す。図には地盤の相対密度 D_r が90%前後で得られた載荷応力 σ_v と載荷板の沈下量 ΔH を地盤の

初期厚さ H_0 で正規化した正規化沈下量 $\Delta H/H_0$ の関係を表す。図より T sand ケースの荷重応力の最大値と比べて PG unit および PG unit-EM ケースでの荷重応力の最大値が高いこと、PG unit-EM での荷重応力の最大値が全試験中で最大であることが確認できる。このことから PG unit の挿入による効果に加えて、PG unit の周辺に発生させた磁力が砂地盤内の支持力向上効果を発揮したことが推察される。次に、荷重応力の最大値の出現以降の残留状態に着目する。PG unit-EM での残留状態での荷重応力は T sand および PG unit ケースでの値の約 2 倍に達していることがわかる。つまり PG unit 周囲に発生した磁力が地盤内の砂鉄を引きつける等の効果により地盤内の応力分布状況に影響を及ぼしたことで、残留状態における強度が高まったと考えられる。

次に、RAP による地表面保護を施した場合の挙動に着目する。図 6 は RAP-PG unit、RAP-PG unit-EM ケースで得た荷重応力 σ_v と正規化沈下量 $\Delta H/H_0$ の関係を示す。いずれも T sand 部分の相対密度 D_r は 85 % 程度である。比較のために RAP 層を設けない PG unit および PG unit-EM の結果 (図 5 参照) を併記した。図より、RAP-PG unit と RAP-PG unit-EM では RAP 層を設けない試験条件に比べて正規化沈下量 $\Delta H/H_0$ が小さい段階での荷重応力の増加が鈍いこと、正規化沈下量 $\Delta H/H_0$ が 1.1% 以上になると RAP 層を設けない条件に比べて高い荷重応力値を発揮することがわかる。RAP-PG unit と RAP-PG unit-EM の試験では試験装置に搭載した荷重計の計測限界のため明確な荷重応力のピーク値を測定できなかったが、RAP 層を設けない場合と比べて地盤の支持力が高くなる傾向を見ることができた。

(2) 発電に関する屋外計測結果

屋外計測は北海道内で実施された。ここでは計測結果の一例として札幌市厚別区大谷地 ([Oy] と記す) と札幌市北区篠路 ([Sh] と記す) の 2 地点で計測された結果を示す。なお [Oy] および [Sh] ではそれぞれクローズ回路およびオープン回路の発電用 PG ユニートを設置した。図 7 (a)、(b) は [Oy] および [Sh] での電圧計による計測値および発電用 PG ユニート上部板の温度差 ΔT の時間変化を示す。ここで、温度差 ΔT は PG ユニート上部板の表面温度から裏面温度を引いた値とする。図 7 (a) に示す [Oy] では温度差 ΔT の変動に対応した電圧が出力しており、出力値が 5000 mV に達する場合も見られた。これより所定の温度差を確保できれば発電用 PG ユニートからの出力電力によって昇圧型 DC-DC コンバータを作動させることが可能であることが示されている。図 7 (b) で

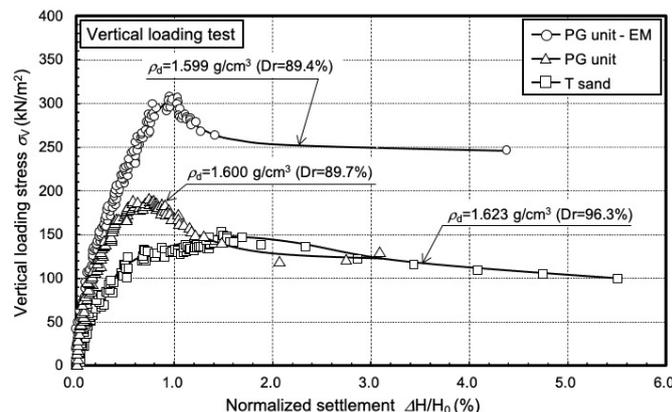


図 5 荷重応力-正規化沈下量関係 (RAP による保護なし)

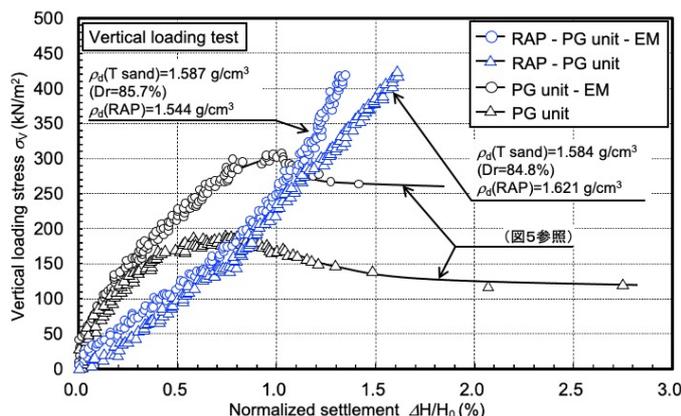


図 6 荷重応力-正規化沈下量関係 (RAP による保護あり)

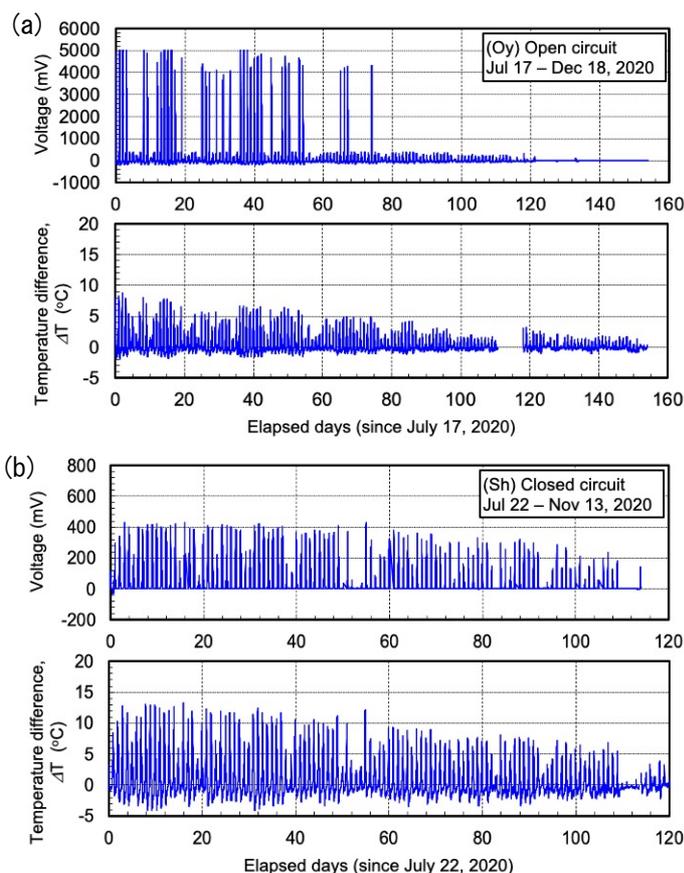


図 7 出力電圧と PG ユニート温度差: (a) [Oy]、(b) [Sh]

示した[Sh]の結果では温度差 ΔT は最大で13°Cまで達し、回路に接続した抵抗(330 Ω)での電圧が400 mVに達したことが見られた。季節や時間による傾向の違いはあるものの、本研究の手法によれば10°C程度の発電用PGユニットの温度差を確保可能であり、昇圧型DC-DCコンバータを作動させた上で電力を発生可能であることがわかった。

次に、出力した電圧値と温度差 ΔT の関係を図8(a)、(b)に示した。[0y]での結果(図8(a)図参照)では、温度差 ΔT が3°C以上になると昇圧型DC-DCコンバータが作動し5V程度の出力が見られるケースがあった。一方、温度差 ΔT が5°C以上でも出力が400~500mVであるケースも見られた。これより、温度差 ΔT が所定の値より大きくなると、昇圧型DC-DCコンバータの作動に必要な電力出力が可能であるものの、昇圧型DC-DCコンバータの安定的な作動には温度差 ΔT 以外にも留意する事項があることがわかる。図8(b)は[Sh]で得られた温度差 ΔT と電圧の関係を示す。図より、温度差 ΔT の上昇に伴う電圧の増加が見られたが、出力値は[0y]の約10分の1であった。これは、発電用PGユニットに接続した回路の抵抗値や接続方法などが影響したことによるものと考えられる。また電圧と温度差 ΔT の関係が一義的でないことから、本手法による発電挙動が温度差 ΔT 以外の影響を受けることが読み取れる。そこで、[Sh]での結果に着目して温度差 ΔT の他に電圧出力に影響を及ぼす因子について考察する。図-9は[Sh]で得た計測結果を発電用PGユニットの表面温度 T_s と電圧の関係として整理したものであり、 $T_s=8^\circ\text{C}$ での結果である。この図より電圧は表面温度 T_s と正の相関関係にあることが読み取れる。このことから出力電圧を高めるためには、発電用PGユニット表面温度と温度差の両者を高める工夫が必要となることが明らかとなった。今後はPGユニットに搭載する回路の再検討およびPGユニット効率的な冷却手法等を検討することで、地表面温度を活用しつつ安定的で高出力の発電を目指すことを考えている。

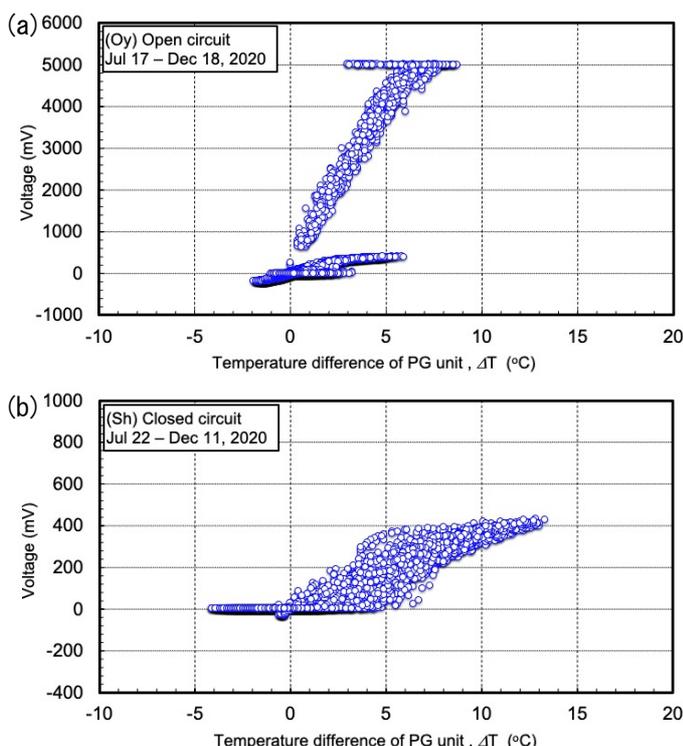


図8 出力電圧とPGユニット温度差の関係: (a) [0y]、(b) [Sh]

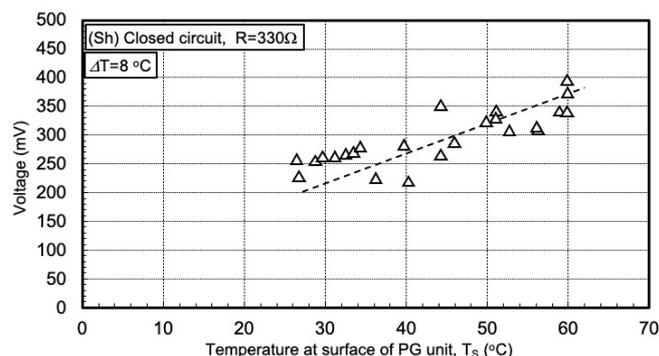


図9 出力電圧とPGユニット表面温度の関係、[Sh]

(3) アスファルト廃材を活用した地盤補強と発電を同時に実行するシステム

本研究で実施した室内試験およびから以下の主な結果を得た。

- ・アスファルト廃材を地盤表面に敷設し、その地盤内に補強部材を挿入した条件では、無対策条件に比べて地盤の支持力が向上することが示された。補強部材の周辺に磁力を発生させることで支持力が高まることも明らかとなった。

- ・熱電素子を搭載した発電器具を地表面付近に設置し、発電器具の表面をアスファルト廃材で覆うことにより、電力の出力を見ることができた。安定的な電力の出力のためには発電器具の表裏面の温度差を大きく保つこと等の工夫が必要であることも明らかとなった。

以上のことから熱電素子を搭載し所定の応力を受けても損傷しない補強部材を製作できれば、地表面温度を活用して発生した電力により補強部材周辺に磁力を発生させ、補強部材と地盤との摩擦を向上させることで地盤を補強することが可能であると考えられる。補強部材の諸元、必要になるアスファルト廃材の数量、発生させた電力の活用法等、種々の検討が必要であるものの、今後も地盤補強-発電-資源リユースのトータルシステムの実用化に向けた検討を進める予定である。

<引用文献>

- ① Rasit Ahiska・Hayati Mamur : A review, Thermoelectric generators in renewable energy, International journal of Renewable Energy Research, Vol. 4, No. 1, pp.128-136, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shoji Yokohama and Atsuko Sato	4. 巻 16
2. 論文標題 Cyclic mechanical properties of sandy soils by mixing recycled asphalt pavement material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 41-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2019.58.8128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 横浜勝司	4. 巻 13
2. 論文標題 アスファルト廃材被覆地盤での地盤補強および発電に関する実験的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 351-358
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横浜勝司	4. 巻 59
2. 論文標題 地盤補強-発電-廃材リユースのトータルシステム具現化に関する基礎的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地盤工学会北海道支部技術報告集	6. 最初と最後の頁 9-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 横浜勝司、佐藤厚子	4. 巻 13
2. 論文標題 アスファルト廃材の長期圧縮挙動と排水強度特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第13回地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 437-442
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 横浜勝司
2. 発表標題 地盤補強-発電-廃材リユースのトータルシステムに関する実験的研究
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横浜勝司
2. 発表標題 アスファルト廃材被覆とPGユニット挿入を施した地盤の繰返し力学挙動および発電挙動
3. 学会等名 第60回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shoji Yokohama, Atsuko Sato
2. 発表標題 Cyclic mechanical properties of sandy soils by mixing recycled asphalt pavement material
3. 学会等名 8th international conference on Geotechnique, Construction Material and Environment (GEOMATE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------