

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 15 日現在

機関番号：54501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560552

研究課題名（和文） 古紙シュレッダーダストを混合した低強度領域対応型の土質改良

研究課題名（英文） Strength characteristics of improved soil mixing with shredded used paper for low-intensity area

研究代表者

友久 誠司（TOMOHISA SEISHI）

明石工業高等専門学校・都市システム工学科・教授

研究者番号：60099827

研究成果の概要（和文）：現在、わが国で発生する廃棄物のうち、泥状の土とペーパーシュレッダーダストの排出量は膨大であり、建設材料としての利用の可能性を検討した。結果として、泥土に紙片を混合すると 2% までは添加率に応じて混合土の強度は増加し、第二～四種の改良土としての利用が可能となる。改良土の強度増加の要因は紙片の吸水による泥土の含水比の低下、および紙片のせん断抵抗と引き抜き抵抗である。また、紙片の混合は改良土の水浸に対する安定性に貢献する。

研究成果の概要（英文）：The amount of muddy soils and shredded papers generated from various kinds of industries has been increasing. In this research, the reuse method that the muddy soils mixed with shredded papers and cements as constructional materials is examined. As the result, the unconfined compression strength of the improved soil mixed with shredded paper as less than 2% increases. The improved soil can be used on low-intensity area of construction sites. The cause of strength intensity of improved soil is decrease in water content due to the paper absorption and increasing of pullout and shearing resistance. The paper mixed to the muddy soils contributes to the prevention of collapse when the improved soil sinks in water.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2010 年度 | 2,700,000 | 810,000 | 3,510,000 |
| 2011 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木環境システム

キーワード：廃棄物、ペーパーシュレッダーダスト、セメント、泥土、一軸圧縮強度、改良土

1. 研究開始当初の背景

近年、わが国の産業廃棄物の排出量は高い水準に留まっており、平成 21 年度は約 3 億 9 千万トンとなっている。その内、汚泥は全体の約 4 割の膨大な量を占めている。一方、平成 17 年施行された個人情報保護法の厳格化

によりペーパーシュレッダーダストも膨大な量が発生している。この裁断紙片は繊維長が短く再生紙として利用することも困難である。毎年、膨大な量が発生しているこれらの廃棄物を建設材料として有効活用が可能となれば、自然環境の保全や廃棄物の処分に

かかる費用の削減、および最終処分場の残余容量の確保等に大いに貢献できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、そのままでは建設材料として使用が困難な泥土にペーパーシュレッダーダスト（紙片）を混合することで泥土の強度特性を改善し、第四種処理土（ $q_u=20 \text{ kN/m}^2$ ($q_c=200 \text{ kN/m}^2$)) の低強度領域の建設材料として有効利用を図ることである。混合する紙片の寸法・混合率・泥土の含水比が改良土の強度特性に与える影響について調べ、紙片が改良土に及ぼす強度発現メカニズム等を明らかにする。また改良土の水浸に対する安定性についても併せて検討する。

3. 研究の方法

用いた試料は、兵庫県のため池の底泥（泥土）である。液性限界が 51.1% と高く、日本統一土質分類により、粘土（高液性限界）CH に分類され、非常に軟弱な土である（表 1）。紙片を混合した改良土は直径 5cm、高さ 10cm の円柱形で「安定処理土の締固めをしない供試体作成方法（JGS 0821）」に準じて成形し、その評価は変位速度 1mm/分の一軸圧縮試験で行う。なお、紙片混合率は泥土の湿潤質量に対する割合で示している。

表 2 は泥土に混合する新聞紙と再生コピー紙の引張強度と吸水率である。引張強度は図 1 に示した試験片を 1cm/分の速度で引っ張り破断したときの荷重を最も狭い部分の寸法で割った値であり、吸水率は紙片の乾燥質量に対する表面乾燥飽水状態での吸水量の割合を示している。紙片は質量と同等以上の水を吸水すること、および湿潤すると強度は 1/10 以下の大変小さくなることがわかる。

(1) 改良土の強度発現メカニズム

改良土の強度発現メカニズムの検討はリングせん断試験機を用いて行った。供試体は外径 150mm、内径 100mm、高さ 25mm のリング状である（図 2）。泥土の含水比は 20%・30%・40% に調整し、空隙ができないように突き棒で締固めた。混合する新聞紙片は幅 23mm、長さ 25mm で、供試体リングの中心から放射状の 27 か所に紙片混合率 0.2% は紙片 1 枚/箇所、1.0% は紙片 5 枚/箇所の 2 段階で配置した。せん断試験は、垂直応力を当該泥土含水比の一軸強度 394 kN/m^2 (含水比 20%)・ 98.8 kN/m^2 (30%)・ 26.4 kN/m^2 (40%) の 0.25 倍・0.5 倍・0.75 倍の 3 段階とし、0.76 度/分のせん断変位速度で行った。

(2) 紙片の形状寸法と強度の関係

泥土に混合する紙片の形状を変化させて改良土の強度発現特性を追究するもので、泥

表 1 泥土の性質

| | |
|----------------------------|---------------|
| 自然含水比 (%) | 54.4 |
| 調整含水比 (%) | 40.5 |
| 液性限界 (%) | 51.1 |
| 塑性限界 (%) | 21.6 |
| 土粒子の密度 (g/cm^3) | 2.66 |
| 日本統一分類 | 粘土 (低液性限界) CL |

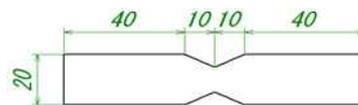


図 1 紙片の引張試験供試体

表 2 紙片の引張強度と吸水率

| 紙片 | 引張強度(N/mm) | | 吸水率(%) |
|--------|------------|------|--------|
| | 乾燥状態 | 湿潤状態 | |
| 新聞紙 | 1.56 | 0.13 | 121 |
| 再生コピー紙 | 3.17 | 0.17 | 113 |

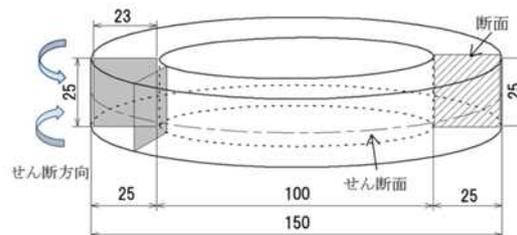


図 2 リングせん断試験供試体

表 3 供試体健全度ランク

| ランク | クラック状況 |
|-----|---------------------------|
| | 欠落状況 |
| A | 外見上、ほとんど変化なし |
| B | 微細クラック、局部クラック |
| | 表面剥離が局部的に発生 |
| C | 明瞭なクラックが一部のみに発生 |
| | 供試体の一部が僅かに欠落 |
| D | 明瞭なクラックが全体に発生 |
| | 供試体より大きく欠落 |
| E | 供試体の一部または全体が崩落 (~20% 程度) |
| F | 供試体が全体的に崩落、崩壊、供試体としての形は存在 |
| G | 供試体の全体が崩壊し、片々は塊状 |
| H | 供試体の全体が崩壊し、片々は細粒分 ~ 泥状化 |

土の含水比は 40.5% に調節した。改良土の配合は、混合する新聞紙片が、幅 $3.4 \cdot 5 \text{ mm}$ 、長さ $10 \cdot 20 \cdot 30 \text{ mm}$ として混合率は 0.5・1.0・2.0% の組み合わせの 27 種類である。また、再生コピー紙を混合したものは紙片の幅が 4mm で、新聞紙と同じ長さとして混合率の 9 種類である。供試体は養生せずに一軸圧縮試験を行う。

一方、紙片とセメント 3.0% を併用する改

良土は幅4mm、長さ20mmの新聞紙を0.5・1.0・2.0%の3段階で混合している。供試体は温度20℃、湿度95%の恒温室で密封養生をし、3、14日後に強度試験を行う。

(3) 水浸による安定性試験

改良土の水浸に対する安定性を調べる。供試体は、泥土のみと、幅4mm・長さ20mmの再生コピー紙を1%混合した改良土でセメント混合率が0・1.0・3.0%の合計4種類で、養生日数は14日である。

乾湿の繰り返し試験方法は、独立行政法人土木研究所の「建設汚泥の高度処理・利用技術の開発」建設汚泥改良土の耐久性試験に準拠している。すなわち、40℃炉乾燥2日・20℃水浸1日の合計3日を1サイクルとし、6サイクルまでの乾湿繰り返しサイクル数の増加に伴う供試体の観察および偶数サイクル終了後に一軸圧縮強度を調べた。供試体の観察は、表3に示す健全度ランクにより供試体の健全度を評価した。

4. 研究成果

(1) 改良土の強度発現メカニズム

図3はリングせん断試験を行った改良土の紙片混合率と最大せん断応力および粘着力の関係である。紙片混合率および垂直応力の増加に伴い、最大せん断応力や粘着力は増加していることが分かる。

図4は泥土の含水比と粘着力および内部摩擦角の関係である。これらによると、いずれの泥土や改良土も含水比が小さくなり紙片混合率が増えると粘着力が大きく増加する。一方、内部摩擦角は泥土の含水比および紙片混合率が異なっても大きな違いは見られない。そして、泥土の含水比が高い場合は、紙片を混合しても粘着力の増加量は小さい。

図5は各試験条件における最大せん断応力と残留応力の差を示している。ばらつきもみられるが、紙片混合率の多い方が最大せん断応力と残留応力の差は小さいことがわかる。

表-4 はリングせん断試験後の供試体中の紙片の状況である。紙片混合率が小さい0.2%は、全ての紙片が破断している。一方、紙片混合率の多い1.0%の場合は、ほとんど

表4 せん断試験後の紙片状況

| 泥土含水比 (%) | 紙片混合率 (%) | 垂直応力 | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| | | 0.25倍 | 0.50倍 | 0.75倍 |
| 40 | 0.2 | × | × | × |
| | 1.0 | ○ | ○ | ○ |
| 30 | 0.2 | × | × | × |
| | 1.0 | ○ | ○ | ○ |
| 20 | 0.2 | × | × | × |
| | 1.0 | ○ | △ | △ |

○:破断なし, ×:破断, △:一部破断

の紙片が破断せず、せん断変位の量だけ紙片が改良土中から引き抜かれたことがわかる。すなわち、紙片混合率の少ない場合、供試体中の紙片は最大せん断応力のときに破断し、せん断断面が鏡肌になり粘着力が減少するた

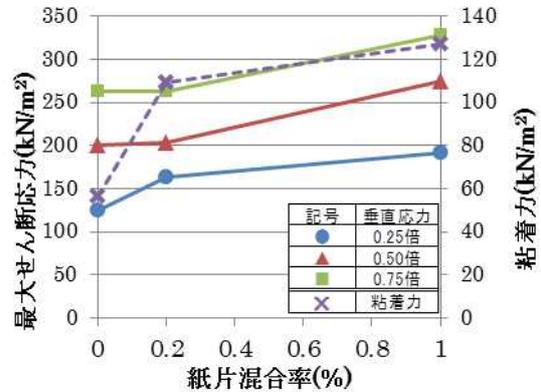


図3 紙片混合率と最大せん断力、粘着力 (泥土含水比20%)

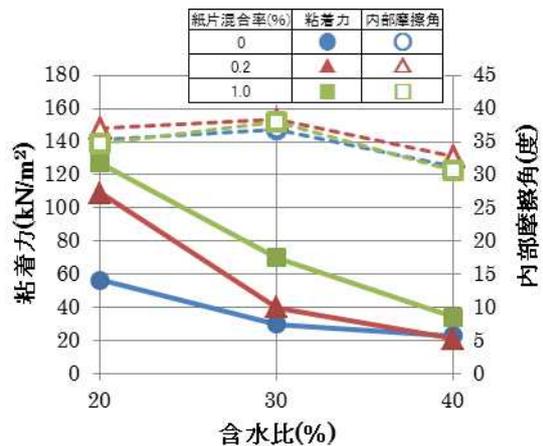


図4 含水比と粘着力、内部摩擦角

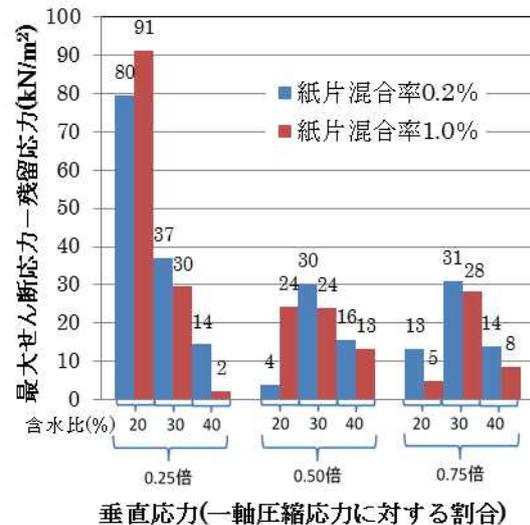


図5 最大せん断応力と残留応力の差

め、せん断抵抗が小さくなり最大せん断応力と残留応力の差が大きくなったと考えられる。一方、紙片混合率が多い場合はせん断中に紙片が破断せず、引抜き抵抗が働くため、最大せん断応力と残留応力の差が小さくなったものである。紙片の破断抵抗および引抜き抵抗により最大せん断応力および残留応力が増加し、靱性の増加することが紙片を混合した効果であると考えられる。

(2) 紙片の形状寸法と強度の関係

図6は幅5mmの紙片を混合した改良土の紙片混合率と強度の関係である。混合率0.5%と1.0%は土のみと同等で強度の大きな違いはみられないが、混合率を2.0%に増加すると、改良土の強度は大きく増加し、第四種処理土としての利用が可能となる。図7は紙片の長さとの関係である。同じ紙片混合率で比較すると、紙片の幅が5mmでは紙片長さの長いほど改良土は大きな強度を示しているのに対して、紙片の幅が3mmでは、値の変化はわずかであるが短い紙片が大きな強度となり、反対の傾向を示している。また、試験後の観察では、いずれの供試体もせん断面での紙片の破断は見られなかった。図8は強度試験後の紙片混合率と含水比の関係である。ここではできるだけ紙片を取り除いて、泥土だけの含水比を測定している。ばらつきは大きいですが、紙片混合率が増加するほど、また、紙片の長さが短いほど含水比の減少していることがわかる。これが改良土の強度増加の一因である。

図9は泥土に混合した紙片1枚当たりの面積と強度の関係である。当然ながら、面積の大きな紙片を用いると供試体中に存在する紙片枚数は少なくなる。また、図中には紙片混合率ごとの回帰式も示している。これらによると、紙片の混合率によって、長さや幅の大きさと改良土の強度の関係が分かる。すな

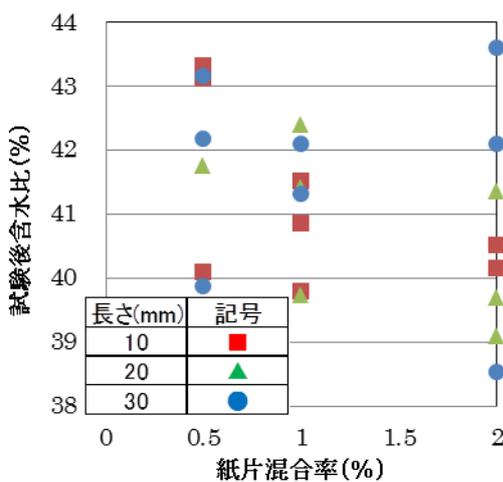


図-8 試験終了後の含水比

わち、混合率が多い場合(2.0%)は、小さな紙片を多く混合すると泥土の含水比低下により改良土は大きな強度が得られる。一方、

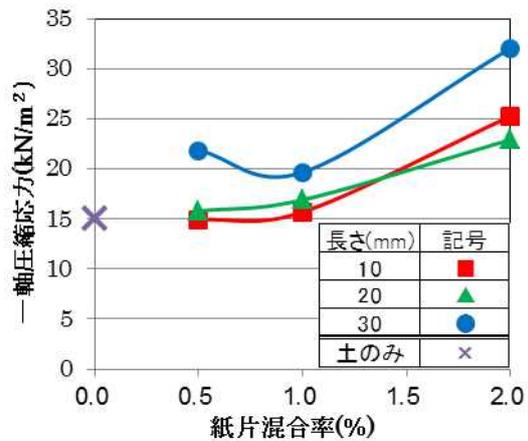


図6 紙片混合率と強度 (幅5mm)

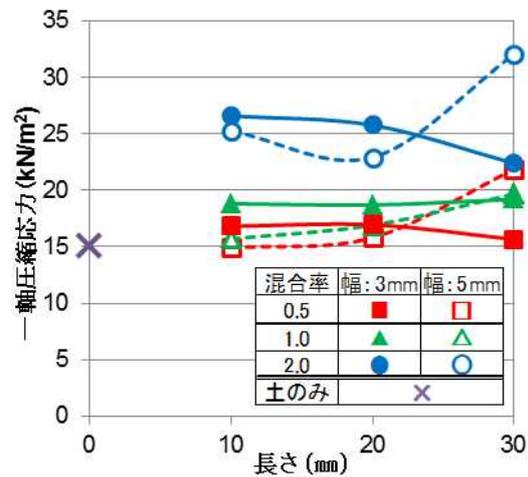


図7 紙片長さとの関係

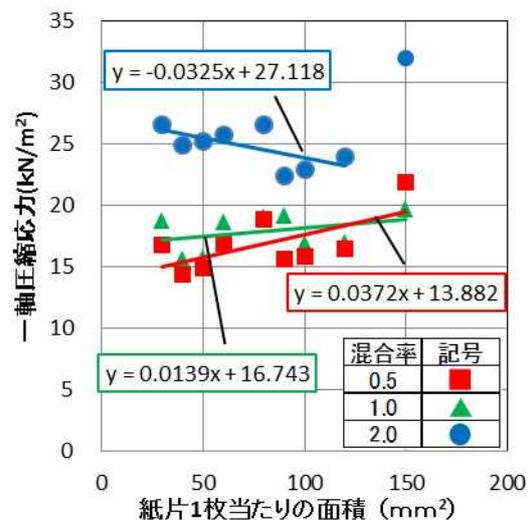


図9 紙片1枚あたりの面積と圧縮強度

混合率が少ない場合(0.5%)は、引張抵抗力の高い大きな紙片を混合することが、15~30kN/m²のような低強度領域の紙片混合による強度改善に有効であることが明らかになった。

(3) 水浸による安定性試験

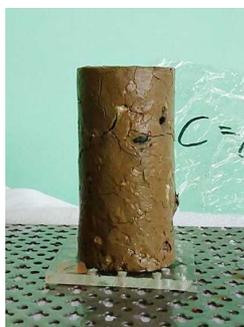
図 10 は乾湿繰り返し試験に伴うサイクル数と各供試体の健全度ランクとの関係である。セメントを 1.0、3.0%混合した供試体は表面に軽微な剥離が発生したものの6サイクル終了まで大きく劣化することはなかった(写真 1(a), (b))。紙片のみを混合した改良土と土のみの供試体はサイクルを重ねるごとに劣化が進行し、6 サイクル目には紙片改良土が一部崩壊(写真 1(c))、土のみの場合は一軸圧縮試験ができない状態に崩壊した(写真 1(d))。その結果、紙片のみを混合した改良土は泥土単体に比べて、劣化の進行を遅らせる効果のあることを示している。

図 11 は乾湿繰り返しサイクル数と強度の関係である。土単体のものは4サイクルを過ぎると崩壊し、強度試験はできなかった。

乾湿の繰り返しサイクル数と強度の関係は3種類に分けることができる。泥土単体は乾燥過程で含水比が減少し、サイクル数の増加とともに強度は増加するが4サイクル後にスレーキングが発生して崩壊する。紙片のみの混合とセメントを 1.0%併用した改良土は、2 サイクルで強度は増加するものの、その後の乾湿サイクルの経過により劣化が進行し、強度は6サイクルまで低下する。一方、セメントを 3%併用した改良土は強度発現が良好で、一般的にサイクル数の増加とともに強度は増加傾向にあり、劣化は見られない。よって、紙片とともにセメントを 3.0%程度併用すれば水浸に対する改良土の劣化を抑えることが可能となり、軟弱な泥土を堤防の盛土へ有効活用できると考えられる。

(5) まとめ

本研究において得られた主な結果は以下



(a) 紙片 1%とセメント 1%



(b) 紙片 1%とセメント 3%



(c) 紙片 1%



(d) 泥土単体

写真 1 乾湿繰り返し 6 サイクル後の供試体

のとおりである。

①泥土の含水比が高い場合、改良土の強度は紙片無混合と差は見られないが、含水比が低い場合、混合した紙片は強度増加に貢献する。

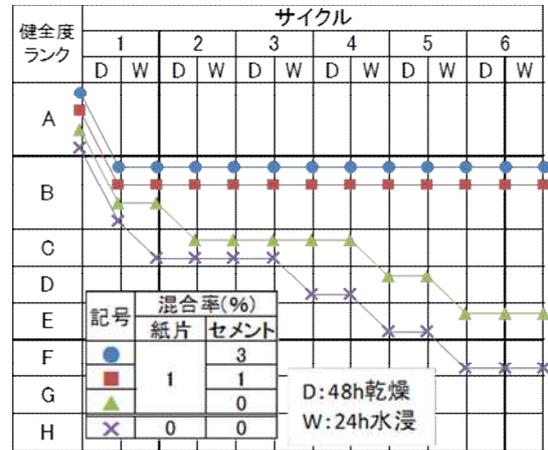


図 10 乾湿繰り返しに伴う供試体の観察結果

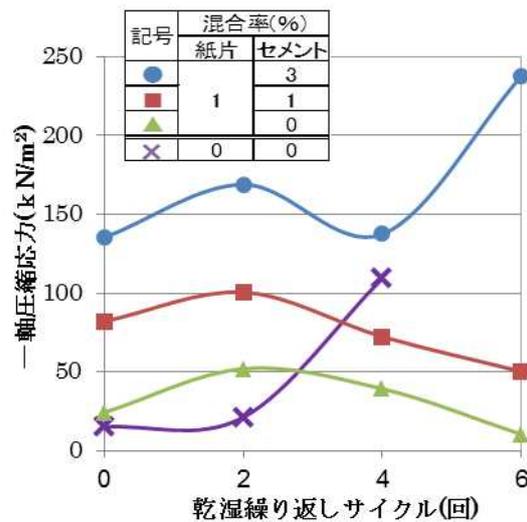


図 11 圧縮強度と乾湿繰り返しサイクル

紙片の形状は、幅より長さが改良土の強度に大きく影響する。

②リングせん断試験の結果、紙片の混合により、改良土は粘着力 c_r が大きくなり、最大せん断応力 τ_{max} は増加する。一方、残留応力 τ_r は、紙片混合率が多くなると内部摩擦角 ϕ_r の増加により大きくなる。

③紙片の混合により、改良土の強度はばらつきが大きくなるが、残留応力が増加し脆性的な性質を示す。

④再生コピー紙および新聞紙を混合した改良土は、紙片混合率が増加すると強度は増加する。紙片を2.0%混合すると第四種処理土として再利用が可能となる。

⑤紙片を混合した供試体の一軸圧縮試験後では、混合した紙片の破断は見られず、

・紙片混合率が多い(2.0%)場合：紙片の幅・長さの小さな紙片が多く存在することで改良土の含水比低下量が大きくなり、改良土は大きな強度が得られる。

・紙片混合率が少ない(0.5%)場合：紙片数は少なくとも紙片の幅・長さの大きな紙片の存在で紙片の引き抜き抵抗が大きくなるため大きな強度が得られる。

⑥紙片を混合した改良土は、土単体の供試体に比べて乾湿の繰り返しによる劣化が抑制される。また、セメント3%を併用すれば軟弱な泥土を堤防等の盛土へ有効活用が可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 鍋島康之、友久誠司、内藤永秀、三浦佑也、野口登史樹、紙片混合改良土の強度発現メカニズムについて、第10回地盤改良シンポジウム発表論文集、査読有、pp. 505~508、2012.
- ② 友久誠司、鍋島康之、内藤永秀、大西貴之、紙片を混合した改良土の強度特性、第9回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、査読有、pp. 237~242、2011.
- ③ 鍋島康之、友久誠司、上辻和樹、紙片混合処理土の一軸圧縮強さと紙片引張強度、第9回地盤改良シンポジウム発表論文集、査読有、pp. 135~138、2010.

〔学会発表〕(計5件)

- ① S. Tomohisa, Y. Nabeshima, Y. Miura, T. Noguchi、Strength Characteristics of Improved Soil Mixing with Shredded Paper, The 2nd International Symposium on Technology for Sustainability, No. 84, pp. 196~199, Bangkok, 2012. 11. 21、タイ.
- ② 三浦佑也、鍋島康之、友久誠司、紙片混合改良土の長期強度特性について、第67回土木学会年次学術講演会概要集、第III

部門、III-058, pp. 115~116, (CD-ROM)、2012. 9. 5、名古屋大学.

- ③ 友久誠司、鍋島康之、内藤永秀、北野智哉、森田 諒、紙片混合処理土の強度特性について(その2)、第47回地盤工学研究発表会平成24年度発表講演集、No. 300, pp. 597 ~ 598(CD-ROM)、2012. 7. 15、八戸工業大学.
- ④ 友久誠司、鍋島康之、内藤永秀、大西貴之、紙片混合処理土の強度特性について、第46回地盤工学研究発表会平成23年度発表講演集、No. 310(CD-ROM)、2011. 7. 6、神戸.
- ⑤ 大西貴之、友久誠司、鍋島康之、内藤永秀、紙片混合による泥土の強度特性に関する研究、平成23年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、III-24、2011. 6. 12、関西大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

友久誠司 (TOMOHIISA SEISHI)
明石工業高等専門学校・
都市システム工学科・教授
研究者番号：60099827

(2) 研究分担者

鍋島康之 (NABESIMA YASUYUKI)
明石工業高等専門学校・
都市システム工学科・教授
研究者番号：40263214