

焼却灰固化材料を上載荷重とした港湾浚渫土の沈下特性に関する実験的検討

Experimental Study of Settlement Characteristics of Dredging Soil by Vertical Load of Cement-treated Ash

中村公一	Koichi NAKAMURA	(鳥取大学大学院工学研究科)
岩城徹也	Tetsuya IWAKI	(鳥取大学工学部土木工学科)
松本明	Akira MATSUMOTO	((株)大協組)
猪原隆志	Takashi INOHARA	((株)大協組環境建設事業部)

本研究では多孔質かつ軽量という特徴を持つ焼却灰固化材料を、表層処理工法での利用について検討している。表層処理工法の1つである被覆工法に本研究で用いる焼却灰固化材料を用いた場合、本材料は軽量であるため投入前にシートなどを敷設する必要がなくなることから、工期の短縮などの利点があるものと考えている。本論文では、超軟弱なスラリー状の港湾浚渫土に対し敷設したときの沈下特性について実験的検討を行った。その結果、上載荷重が小さいため浚渫土上の雨水の排水に留意すること、圧密沈下として浚渫土の沈下量を算定する場合用いる圧密係数は、正規圧密領域の値とほぼ同じかそれより小さい値となった。

キーワード：リサイクル材料，浚渫土，圧密

(IGC : K00, E02)

1. はじめに

近年、クリンカ、フライアッシュ、スラグなどリサイクル材料の利用が進んでいる¹⁾。本研究で使用している焼却灰固化材料と呼ぶリサイクル材料は、他のリサイクル材料と異なり、多孔質で軽量という特徴を持つ。特に土粒子のかさ密度は $1.0\sim 1.3\text{g/cm}^3$ であり、他のリサイクル材料に比べて軽量であると言える²⁾。この特徴を生かし、これまで河川改修・ため池などの工事において必要となる重機進入等のための仮設道に、本材料を敷設する方法が用いられている。なお、本材料は環境省告示第46号に基づく土壤溶出試験を行い、基準以下であることを確認している。

本研究では、浚渫土などスラリー状である超軟弱地盤へ焼却灰固化材料を敷設することで、重機進入などを可能とすることを目指している。超軟弱地盤へ重機が進入するための一般的な方法は、まずシートを敷設し、その後不均一な盛土厚さや局部的沈下による不同沈下ができるだけないように、順次土砂をまき出していくものである³⁾。これに対し焼却灰固化材料を用いる利点は、軽量であるためシート敷設の必要がない、軽量であるため局部的沈下を抑制できる点があげられ、工期短縮が可能であると考えている。

上記の目的から本論文では、焼却灰固化材料を港湾浚渫土へ敷設する模型実験を行い、沈下特性を検討することとした。具体的な目的は、室内で実施することは困難な実施工時と同じ粒度分布の試料を用いて実験を行うこと、軟弱な浚渫土へ多孔質かつ上載荷重が小さい焼却灰固化材料を敷設した場合の沈下特性について実験的検討を行った。

2. 試料

2.1 焼却灰固化材料

焼却灰固化材料は、木質チップ、RPF (Refuse Plastic & Paper Fuel, 古紙・廃プラスチック固形物)、タイヤチップを燃料とする製紙工場の発電ボイラーで発生する焼却灰を固めて作られたリサイクル材料である。図-1に試料、図-2に粒径加積曲線を示す。固化時は最大粒径約300mmであり、必要に応じて砕くことで最大粒径・粒度分布を調整している。本研究では、最大粒径37.5mmを用いており、図-1は粒度調整後の試料である。図-3は電子顕微鏡写真であり、試料表面が毛羽立っているように見える。さらに拡大すると針状結晶も確認され、これは固化過程の化学反応により生成されたものである。

図-4は、突固めによる締固め試験を最大粒径9.5mmと最大粒径37.5mmに行った結果を示した。図-4より含水比によらず乾燥密度は 1.1g/cm^3 程度となることがわかる。 $w=50\%$ 付近でばらつくのは、ほぼ飽和状態となり突固めによる締固めが困難になることが影響している。このように焼却灰固化材料は、締固めても軽量であるということがわかる。軽量である理由として、針状結晶で構成されているため結晶間の空隙が多いことがあげられる。本研究の模型実験では締固めないため、締固めない場合の乾燥密度についても検討を行った。実施工時は、投入後に敷きならす際にバックホーなどの重機で踏みため、全く締固めずに用いるわけではない。検討方法はバケツ内容積を求めた後、最大粒径9.5mmと最大粒径37.5mmの試料をそれぞれ投入し質量を測定することを複数回行った。その結果、最大粒径9.5mmでは $\rho_d=0.93\text{g/cm}^3$ 、最大粒径37.5mmでは $\rho_d=0.72\text{g/cm}^3$ となった。最大粒径37.5mmの方が小さくな



図-1 焼却灰固化材料

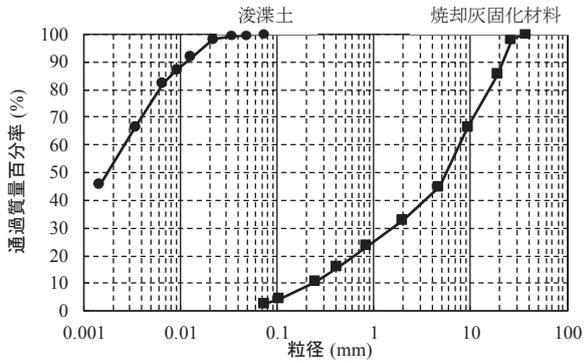


図-2 粒径加積曲線

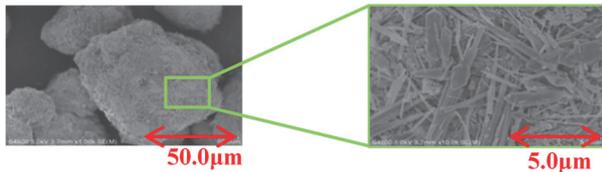


図-3 電子顕微鏡写真

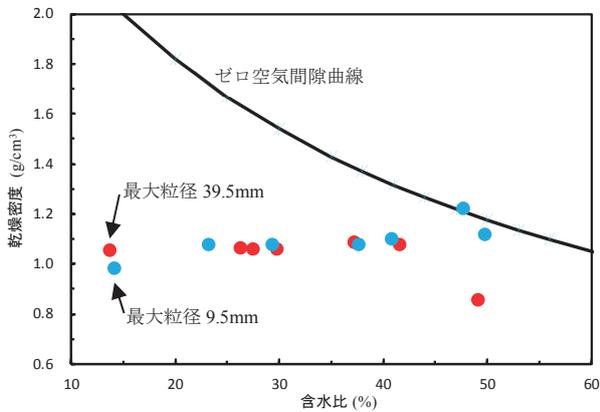


図-4 突固めによる締め試験結果

ったのは、粒子径が大きいため粒子間にできる空隙が大きくなることが影響しているものと考えられる。

焼却灰固化材料は、セメントを数%添加し反応させることで固化させている。添加セメント量が少ないため単粒子強度は小さく、0.2MPa~1MPa程度である。この値は、例えば豊浦砂の最大破砕強度が約100MPa⁴⁾である事に対して小さい値であり、破砕しやすい試料であるといえる。

以上のように、本研究で用いている焼却灰固化材料は、他のリサイクル材料と比べ軽量であり、破砕しやすいと言える。

2.2 浚渫土

本研究で用いた浚渫土は、舞鶴港で浚渫されたものであ



写真-1 浚渫土の状況



写真-2 浚渫土表面の状態

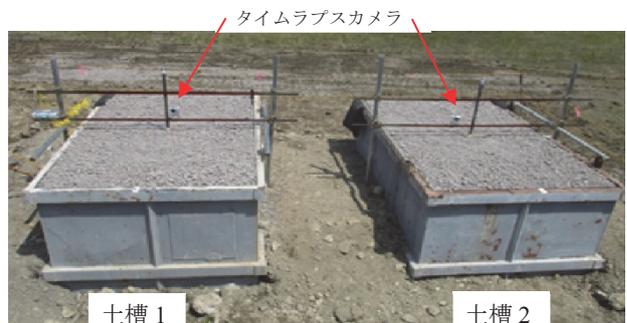


写真-3 土槽設置状況



写真-4 タイムラプスカメラによる測定例

り、舞鶴港湾内の浚渫土陸揚げ場所に約2年間放置されていたものである。写真-1に浚渫場所の状況、写真-2に浚渫土表面の状況を示す。写真-1に示すように、陸揚げから

約2年経過しており、地表面は乾燥しひび割れが発生している。しかし乾燥しているのは地表面だけであり、写真-2に示すように約10cm以深は軟弱な状態である。現位置の含水比を測定した結果、地表面から約10cmが乾燥し $w=50\sim60\%$ 程度、それ以深は約90%以上であった。模型実験と室内土質試験に使用した試料は、乾燥した地表面部分を取り除いて採取したものをを用いた。この浚渫土の物理特性は、 $\rho_s=2.70\text{g/cm}^3$ 、 $w_L=91.7\%$ 、 $w_P=36.4\%$ であり、図-2に粒径加積曲線を示す。粒径加積曲線に示す通り、細粒分含有率が100%の試料である。

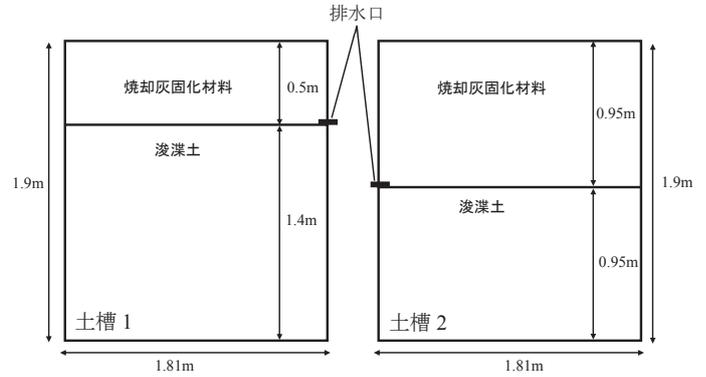


図-5 土槽断面図

3. 大型模型実験

3.1 概要

実験場所と期間は、京都府舞鶴市宇大波下（平地区）において、平成28年6月30日～平成28年10月6日の約3ヶ月間実施した。浚渫直後を模擬するのであれば、含水比を浚渫直後の140%程度とすべきであるが、多量の浚渫土を一様に含水比調整することは困難であることから、乾燥した表面より以深からバックホーで採取して土槽へ投入し、土槽内含水比が均一となるようバックホーで攪拌している。なお、浚渫土天端に立つことはできないほど軟弱である。

3.2 機材配置図

鋼鉄製の土槽を使用し、側面と底面に開口部はなく、内寸法は $1.81 \times 2.83 \times 1.9\text{m}$ 、写真-3に土槽設置状況、断面図を図-5に示す。図-5の排水口は、浚渫土上面に雨水が溜まり、焼却灰固化材料がどちらの土槽も約30cm水没する状況となったため、平成28年7月29日正午ごろ設置した（実験開始から28日後）。設置位置は、浚渫土の位置とならないよう、焼却灰固化材料の下端とした。

土槽1は、焼却灰固化材料の層厚を0.5mとした。なお、実験時に0.2～0.3m程度の厚さで歩行可能となることを確認している。層厚の違いによる影響も検討するため、土槽2はほぼ2倍の層厚となる条件とした。

地表面沈下量は、土槽中央部にタイムラプスカメラとスケールを設置し、10分ごとに撮影した結果を整理して算出した。写真-3で土槽中央部に設置しているのが確認できる。また、写真-4がタイムラプスカメラにより撮影される写真であり、沈下量読取箇所も示した。

3.3 沈下量測定結果

図-6に地表面沈下量と降水量の関係、図-7に浚渫土のひずみと日照時間の関係、図-8に実験開始時と終了時の含水比分布を示した。図-7のひずみは、地表面沈下量を全て浚渫土の圧縮量と考え、地表面沈下量を各土槽実験開始時の浚渫土層厚で除して算出している。図-8に示した含水比は、タイムラプスカメラを設置した土槽中央部直下の

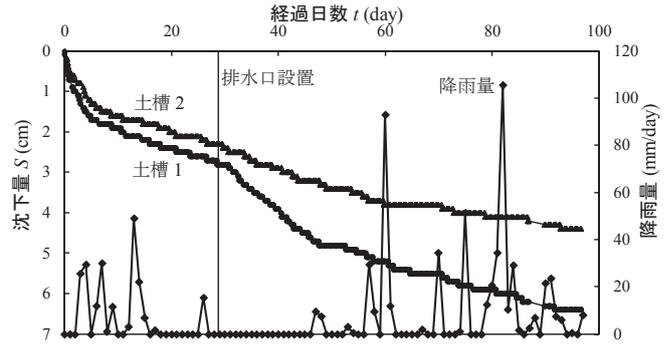


図-6 地表面沈下量・降雨量-経過時間関係

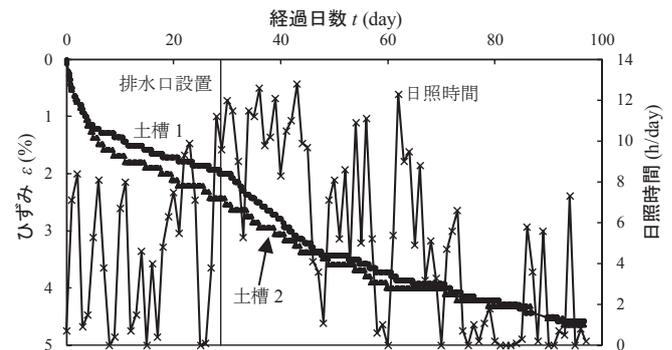


図-7 浚渫土ひずみ変化量・日照時間-経過時間関係

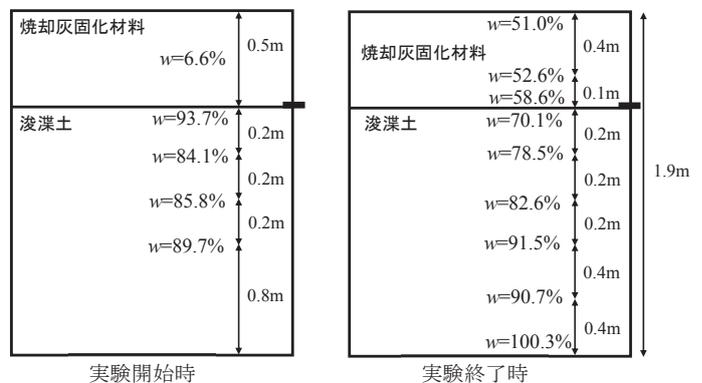


図-8 土槽1の実験開始時・終了時の含水比分布

各深度で5つ含水比を測定し、これを平均して求めている。なお、図-6と図-7の図中に排水口設置時点も示している。降雨量と日照量のデータは、舞鶴気象台の観測データを用いた。

図-6より、排水口設置まで土槽1と土槽2どちらも沈下が進行しているが、排水口設置後は土槽1の1日当たりの沈下量が土槽2よりも大きくなる。それが20日程度継続し、その後1日あたりの沈下量は小さくなる傾向を示した。これを図-7に示すひずみで考えると、排水口設置により土槽1の1日あたりのひずみ変化量は変化するが、土槽2は変化しないことがわかる。これより、土槽1は排水口設置により有効応力が増加した影響が顕著に表れているが、土槽2は影響が小さかったと言える。図-6より降雨量は実験開始50日経過後から多くなり、降雨があるとひずみ変化量が小さくなる傾向がみられる。これは上記のように浚渫土上面の排水が十分ではないことが影響しているものと考えられる。

図-8より、実験終了時の焼却灰固化材料の含水比は、6.6%から平均含水比54.2%へ変化している。焼却灰固化材料は、多孔質という特徴をもつため、水没などで一度内部まで吸水した場合、表面は直射日光などにより乾燥しても粒子内部は湿潤状態となる。降雨により排水口設置前は、どちらの土槽も浚渫土上端より30cm程度水没状態であった。そのため、排水口設置以降の含水比は、実験終了時の含水比であったと考えられる。以上より、焼却灰固化材料による上載荷重は、土槽1は3.8kPaから5.4kPa、土槽2は7.2kPaから10.3kPaへと変化したと言える。なお実験開始後の降雨により、実験開始後数日で湿潤状態の上載荷重となり、排水口設置までは降雨とともに有効応力が低下する状況であったと考えられる。

浚渫土の含水比は、実験開始時はほぼ90%前後、終了時は浚渫土上端から40cmまでは変化がみられるが、60cm以深は変化がみられない。図-7よりひずみ変化量が徐々に小さくなるようにみられるが、60日経過以降は降雨が多いため、浚渫土上に溜まる雨水の排水に時間がかかり、有効応力が低下した影響も考えられる。

4. 圧密現象としての検討

4.1 双曲線法の適用

浚渫土の圧縮を圧密現象として検討する。ここでは地表面沈下量を浚渫土の圧縮量として双曲線法⁹⁾を適用し、圧密に関するパラメータを求めた。任意の経過日数 t における沈下量を求める式を式(1)、最終沈下量 S_f を求める式を式(2)、双曲線法におけるパラメータを求める式を式(3)に示す。双曲線法では、漸増載荷の影響がなくなった経過日数を t_0 とするが、本論文では排水口を設置し有効応力が一定となった時点をも t_0 とした。

$$S = S_0 + \frac{t-t_0}{\alpha+\beta(t-t_0)} \quad (1)$$

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

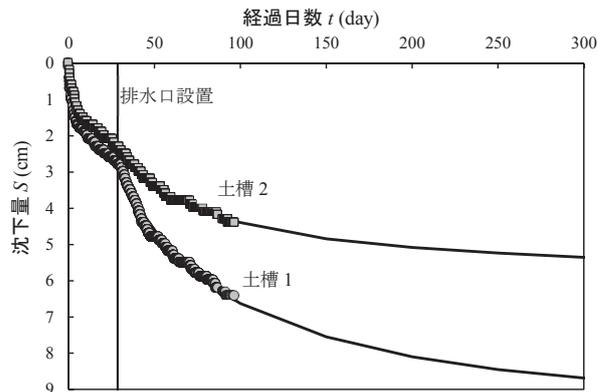


図-9 双曲線法適用結果

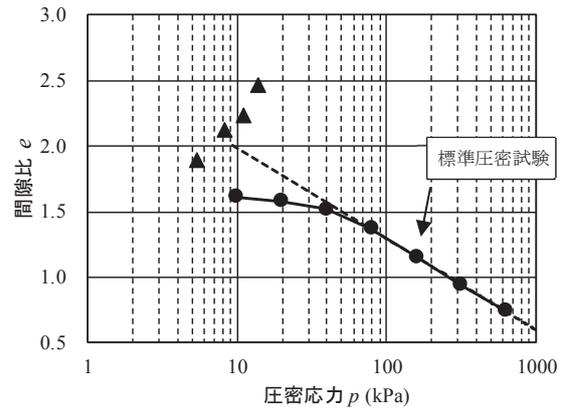


図-10 $e - \log p$ 関係

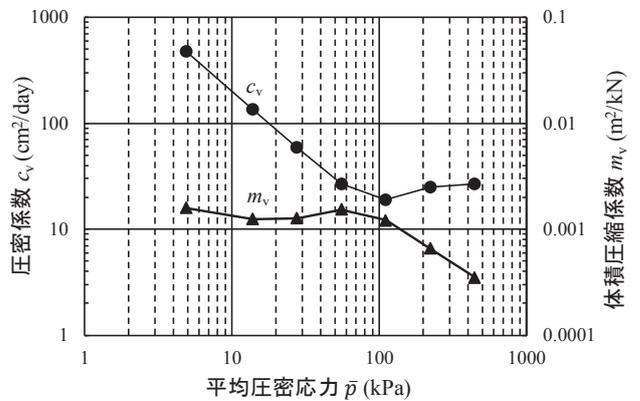


図-11 $c_v \cdot m_v - \log p$ 関係

$$\frac{t-t_0}{s-s_0} = \alpha + \beta(t-t_0) \quad (3)$$

t_0 : 漸増載荷の影響がなくなった経過日数 (day)

t : t_0 以降の任意の経過日数 (day)

S_0 : t_0 における沈下量 (cm)

α, β : 双曲線法におけるパラメータ

S : t における沈下量 (cm)

S_f : 最終沈下量 (cm)

図-9に沈下量への双曲線法適用結果を示し、よく一致していることがわかる。なお、図中の赤線が排水口設置点である。双曲線法により求めたパラメータを表-1に示

す。\$S_r\$は実験終了時の沈下量であり、圧密度は\$S_r\$と\$S_f\$より求めた。圧密係数は、浚渫土上面のみ排水される片面排水条件であるため、排水距離は浚渫土層厚として求めている。

表-1 双曲線法により求めたパラメータ

	\$S_f\$ (cm)	\$S_r\$ (cm)	\$U\$ (%)	\$c_v\$ (cm\$^2\$/day)
土槽 1	6.4	10.1	63.3	64.5
土槽 2	4.4	5.9	74.0	43.0

4.2 圧密試験結果との比較

4.1 で求めたパラメータと、標準圧密試験結果を比較する。図-10 に \$e - \log p\$ 関係、図-9 に \$c_v \cdot m_v - \log p\$ 関係を示す。標準圧密試験は、採取した試料に蒸留水を加え真空脱気した後、約 50kPa で予圧密した土塊から作成した供試体に対して実施した。

3.3 で述べたように、焼却灰固化材料は軽量であるため上載荷重は小さく、また浚渫土は人が立てないほどの軟弱な状態であることから、単に比較することは難しい。そこで、小林らによるスラリー状試料の自重圧密実験結果を参考に検討する⁶⁾。参考文献では、間隙比が 6 以上と非常に軟弱な状態であり、本論文の模型実験よりもさらに軟弱な状態であると考えられ、また自重圧密実験結果であるため、上載荷重がないという違いがある。図-10 には圧密試験による \$e - \log p\$ 関係と、土槽 1 実験終了時それぞれの浚渫土上端、上端より 0.2m, 0.4m, 0.6m の含水比より求めた間隙比と、各深度の地盤内応力の関係を示した。なお、正規圧密曲線も示している。地盤内応力は、平均含水比 90%として求めた単位体積重量による各深度の地盤内応力と、土槽中央部各深度の地盤内増加応力を長方形荷重として求め、足したものである。なお、実験開始時の含水比は約 90%であるため間隙比は約 2.4 となる。圧密度は 63%と圧密が進行している状態であるが、浚渫土上端の間隙比は正規圧密曲線より下方に位置した。焼却灰固化材料は多孔質であるため、浚渫土に対し上載荷重としての機能の他に、焼却灰固化材料が乾湿を繰り返すことで浚渫土から吸水する機能があると考えている。しかし定量的な評価は難しく、今後検討が必要である。

図-11 には圧密試験による \$c_v - \log p\$ 関係を示した。既往の研究によると、軟弱かつ低応力下で求められる圧密係数は、標準圧密試験結果と比較すると正規圧密領域の値より小さい値を示すと報告されている⁶⁾。模型実験結果は表 1 に示す通りであり、図-11 と比較して土槽 1・土槽 2 ともに正規圧密領域の値とほぼ同じ結果となった。参考文献は自重圧密、本実験は上載荷重有りとは条件は異なるが、軟弱土の圧密係数は正規圧密領域の値と同等か小さい値を示すものと考えられる。

5. 結論

本論文では、港湾浚渫土に対し軽量の焼却灰固化材料を上載圧としたときの沈下量に関して実験的検討を行なった。その結果、焼却灰固化材料は軽量であるが軟弱土へ敷設した場合は沈下を考慮する必要がある、軽量であるため水没による有効応力の低下は沈下特性に大きく影響すると言える。写真-1 に示すように、陸揚げ場所は土手で囲まれ降雨の排水について考慮されていないことが多いため、その影響について留意する必要がある。浚渫土の沈下に関して検討する場合、用いる圧密係数は軟弱土の状態にもよるが正規圧密領域の値と同等か小さい値となるものと考えられる。

本論文では、軟弱土上へ敷設後の地盤耐力について述べていない。現在、重機が進入に必要な層厚の算定方法などについて検討を進めているところである。

謝辞

実験場所・浚渫土試料に関しては国土交通省近畿地方整備局舞鶴港湾事務所、模型実験実施に関しては錦城護謨(株)のみなさまに大変お世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本フライアッシュ協会：フライアッシュ・クリンカアッシュの用途，<http://www.japan-flyash.com/fcuse.html>，閲覧日 2017.6.
- 2) 地盤工学会：岩石の密度試験，地盤材料試験の方法と解説，pp.186 - 194，2009.
- 3) 地盤工学会：地盤改良の調査・設計と施工，pp.52 - 56，2013.
- 4) 咸太圭，中田幸男，兵動正幸，村田秀一，吉本憲正：土の締固め特性と粒子破砕に関する実験的考察，山口大学工学部研究報告，pp.23 - 31，2002.
- 5) 諏訪靖二，大竹勉：講座 実務のための圧密沈下予測とその対策技術(3) 実測沈下に基づく沈下予測手法，地盤工学会誌「土と基礎」，pp.88 - 89，2006.
- 6) 小林正樹，山川匠，小川富美子：沈降過程を考慮した超軟弱粘土の自重圧密解析，港湾空港技術研究所資料 0680，pp.10 - 11，1990.

(2017年6月19日 受付)

