

機関番号：92502

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560469

研究課題名 (和文) 高含水粘性土/中間土地盤への真空圧密の適用性についての研究

研究課題名 (英文) Study of application of vacuum consolidation pressure to high moisture content soil / intermediate soil

研究代表者

金田 一広 (KANEDA KAZUHIRO)

研究者番号：30314040

研究成果の概要 (和文)：

本研究は高含水比粘性土/中間土地盤への真空圧密工法の適用性について検討したものである。以下の結論が得られた。(1) 高含水比粘土や中間土地盤をSYSカムクレイモデルによる弾塑性構成式によって適切に表現し、力学挙動を明らかにした。(2) 中間土土槽による真空圧載荷実験を行い、中間土地盤においても真空圧載荷による地盤改良が有効であることを明らかにした。(3) 数値計算によって真空圧載荷による地盤改良のメカニズムについて解明し、盛土併用地盤改良の可能性について検討した。

研究成果の概要 (英文)：

This paper is discussed about the application of the vacuum consolidation to the high moisture content soil / intermediate soil. The followings are obtained. 1) Using the SYS Cam clay model, which is the elasto plastic constitutive equation, the shear behaviors of the high moisture content soil / intermediate soil are appropriately expressible and the mechanical behavior is clarified. 2) The vacuum pressure load tests were performed for the intermediate soil, and it was clarified that that soil improvement by vacuum pressure was effective for the intermediate soil. 3) The numerical simulations were performed, and the mechanism of soil improvement for vacuum pressure is clarified. In addition, the possibility of soil improvement with embankment together was examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤の挙動・地盤改良

1. 研究開始当初の背景

浚渫された土砂で埋立など港湾工事が行われるが、この土砂はきれいな砂でもなく粘土でもない、いわゆる砂混じり粘土や粘土混

じり砂といわれる中間土であることが多い。このような土の透水係数は粘土よりは大きく砂よりは小さく、また、力学挙動も粘土の

ような圧密材であったり、砂のような締固め材であったりと様々でまだ十分分からないことが多い。さらに、浚渫土砂は高含水比な粘性土であり、脱水圧密、減溶化が必要とされる。一般的に、プレロード工法のような地盤改良も考えられるが、浚渫粘土では地盤の破壊が生じる恐れがあり、たとえプレロードが作用したとしても、短期に地盤改良ができるかという問題もある。真空圧密工法と盛土などのプレロード工法とのコスト面についても検討する必要がある。さらに、沿岸域ではこのような中間土地盤の上に護岸構造物が建設される。地震による液状化抵抗の評価や上部構造物に対しての沈下対策を検討する必要もあり、設計指針を明らかにすることも急務となっている。

2. 研究の目的

本研究は上記の背景を受けて、中間土地盤や浚渫粘性土地盤の地盤改良について真空圧密工法を取り上げその適用性について検討することが主要な目的である。

ここでは次の2つの研究課題を挙げた。

- (1) まだ力学挙動が明らかになっていない中間土地盤について、実験と数値計算により明らかにすること。
- (2) 中間土地盤に真空圧密载荷による地盤改良の適用性について検討すること。

代表者らは5年前から自然堆積粘土地盤の地下水位が低下することによって引き起こされる地盤沈下について研究を行っている。このメカニズムは以下のようなものである。過剰な地下水揚水は地下水位の低下をまねき、地盤の深部から有効応力の増加が起こる。いわゆる先行圧密応力より大きな有効応力変化が起こると土骨格の崩壊が始まり、不可逆な長期にわたる地盤沈下を引き起こす。季節変動による地下水位変動によって不可逆な地盤

沈下挙動を示すが、構造の崩壊により説明できることを代表者らにより説明をしている。本研究で行う真空圧密工法は地盤内の有効応力を変化させて地盤の圧密を促進させるものであり、地下水位低下に起因する地盤沈下のメカニズムと力学的には同じであることから研究推進に関して支障はない。

実験のみならず水～土連成計算による理論的アプローチを加えることで総合的に真空圧密による地盤改良のメカニズムの解明に臨む。

3. 研究の方法

本研究は3年で完成を目指す。研究計画・方法は大きく分けて次の2つである。

- (1) 中間土地盤の力学的挙動の把握と弾塑性力学による記述
- (2) 中間土および粘性土地盤の真空圧密工法適用についての実験および数値解析

中間土の力学試験（圧密試験および三軸圧縮試験）は人工的に作った粘土と砂の混合土を取り扱う。また、液状化特性の把握も行い、中間土地盤に建設される護岸構造物などの耐震性にも役立つ。

水～土連成計算は1. 中間土地盤の力学挙動と構成モデルの比較を行い、2. 実際の地盤における真空圧密工法とプレロード工法の地盤改良メカニズムについて検討する。

4. 研究成果

本報告では次の3つの項目について示すことにする。

- (1) 中間土の力学挙動について

① 試料の作成

川崎粘土と相馬珪砂6号を用いて、粘土のみの場合および、細粒分含有率（以下Fcと略す）Fc30, 50, 70%になるように混合して作製した。表1に試料の物理試験のデータを示す。

なお、Fc30の場合は、砂分が多くなり、液性限界・塑性限界試験ができなかった。図1に実験で用いた粒径加積曲線を示す。

表1 試料の物性

	川崎粘土	Fc70	Fc50	Fc30
密度 ρ (g/cm^3)	2.72	2.73	2.70	2.69
液性限界 (%)	54.7	45.7	33.1	—
塑性限界 (%)	25.0	22.5	18.0	—
I_p	29.7	23.2	15.1	—

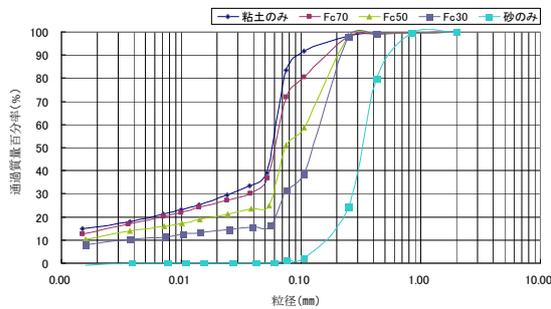


図1 粒径分布

② 力学試験とSYSカムクレイモデルとの比較

粘土、Fc70, 50, 30の各試料の段階圧密载荷試験および拘束圧196kPa, 側圧一定の非排水三軸圧縮試験を行った。ここでは図2にFc50の実験結果とモデルの応答を示す。各試料でグラフは4つあり、左下のグラフが圧密試験で残りは三軸試験である。圧密試験は $e-\log \sigma_v$ 関係、三軸試験は軸差応力 $q \sim$ 軸ひずみ ε_a 関係、平均有効応力 $p' \sim$ 軸差応力 q 関係、 $e-\log p'$ 関係である。実験結果は黒丸、計算結果は灰色の太線で示している。圧密試験・せん断試験とも実験結果と計算結果のよい整合性が得られ、実験とモデルの適合性が示された。

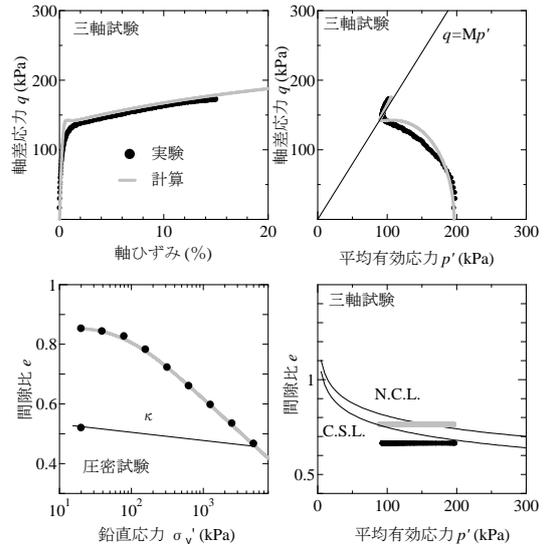


図2 実験結果と計算結果

(2) 真空圧密のメカニズムについて

① 浚渫粘性土のモデル化

図3に粘土の1次元圧縮の $e-\log p'$ 概念図を示す。繰り返した正規圧密線(赤)は骨格構造のある粘土を十分に繰り返して得られたもので、この粘土を低位な粘土と呼び $e-\log p'$ 関係では直線になる。また、自然に堆積した粘土は明確ないわゆる「先行圧密応力」 p_c が存在し、正規圧密線の上側に存在することが多い。繰り返された粘土より大きな間隙を有し、このかさ張りを構造と呼び、高位な構造を有する粘土と呼ぶ。また、浚渫粘土のような高含水比を有する粘土は、拘束圧の小さいところでは大きな間隙を有し、比較的小さな応力で著しい圧縮を示し、正規圧密線に漸近する。このような粘土も正規圧密線の上側に存在することから、同様に高位な構造を有する粘土として取り扱う。

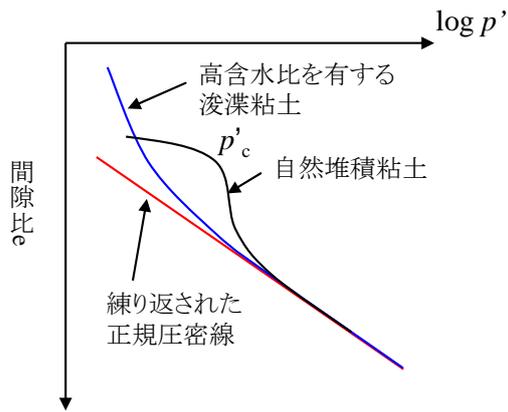


図3 構造概念

② 計算条件

計算は2次元平面ひずみ条件で左右対称地盤を想定した。図4に有限要素メッシュならびに境界条件を示す。図中の赤線で示した部分の間隙水圧を一様に低下させて行った。負圧はドレーン全域で1日に-60kPaまで水圧を低下させて、その後沈下が完全に収束するまで一定に放置した。図5に初期地盤を示す。

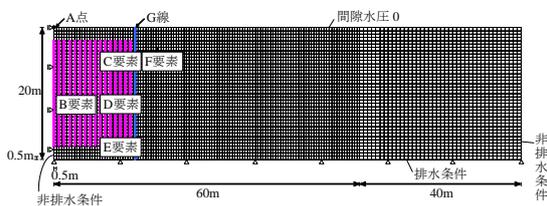


図4 境界条件

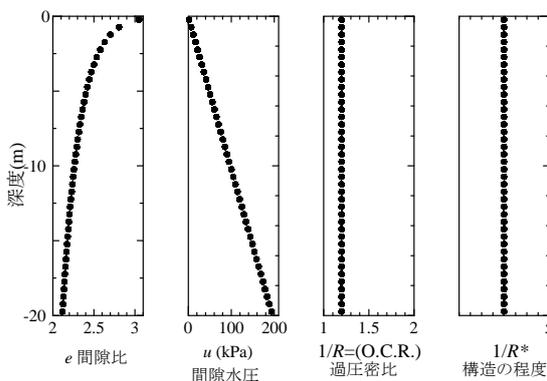


図5 初期地盤

③ 計算結果

図6に図4のA点(地表面)における沈下・時間関係を示す。1000日で約1.36mの沈下が見られ、50日後に圧密度73%、500日で圧密度93%の沈下量となっている。計算は沈下が完全に収束する1500日間行っているが、約1年強で圧密がほぼ終了している。図7に10日後、1000日後のせん断ひずみ分布を示す。改良域とともに、地盤深部から改良域の外側にかけてせん断ひずみが卓越している部分が層状に2~3箇所見られる。

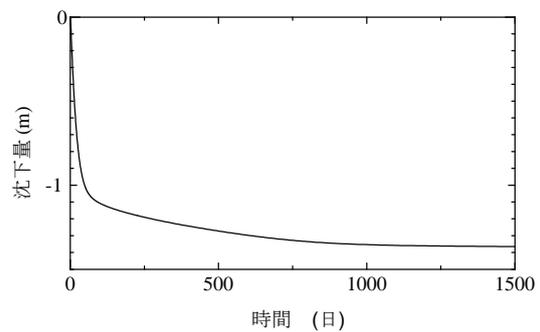


図6 沈下時間関係

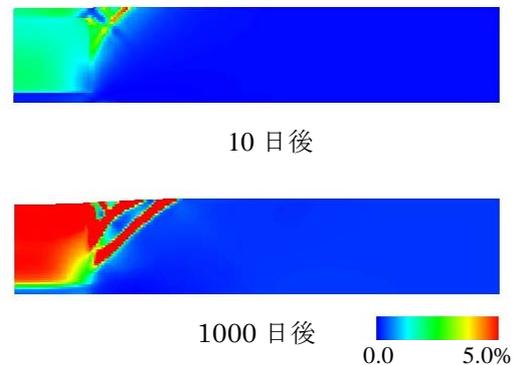


図7 せん断ひずみの分布図

④ 真空圧密のメカニズム

浚渫粘土のような高含水比を有する粘土の1次元圧縮線や等方圧縮線は低拘束圧下で下に凸な曲線を示す。真空圧を載荷することは有効応力の増加をもたらす。真空圧密工法はドレーンを介して地盤に真空圧を載荷し、有効応力の増加を期待する工法であり、地盤深部まで負圧を載荷することが可能である。このような有効応力の増加によって低拘束

圧下では大きな圧縮を引き起こし、さらに地盤深部までに真空圧が伝達されるため改良域全体で圧縮が促進される。この現象が真空圧密のメカニズムといえる。

(3) 模型実験による中間土の真空圧密の効果

① 模型実験の概要

図 8 に示すような内径 20cm、高さ 60cm の予備圧密用のアクリル土槽を用いた。試料は、本牧粘土と相馬珪砂 6 号を用いて、Fc50% になるように混合して作製した。混合試料は液性限界 51.1%、塑性限界 31.1%、土粒子密度は 2.64g/cm^3 である。実験の試料は、液性限界の 1.6 倍になるように脱気水を加えミキサーで十分に攪拌した後に、空気が入らないようにゆっくりと下から 34cm まで土槽に投入した。図 9 に側面図を示す。試料を投入後、19cm の不織布を土槽の中心に底面から 5cm まで挿入し、上部にチューブを介して真空ポンプに接続する。その後、不織布の中心位置に間隙水圧計を図 9 のように設置する。試料の上にキャップを装着し、その上から空気圧で 50kPa の上載圧を作用させた。上載圧を作用させているときはドレーンのみ排水境界とし、1 日圧密させた。その間の沈下量は 0.35mm で、圧密は終了したと判断した。その後ドレーンに -70kPa の真空圧を作用させた。これは、現場での真空圧がおおよそこの値であるためである。沈下量はキャップの変位を測定した。

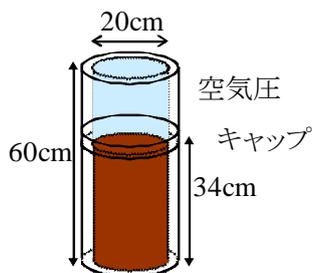


図 8 土槽の概要

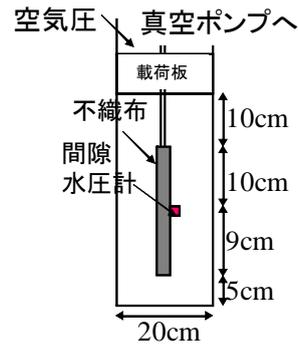


図 9 側面図

② 実験結果

図 10 に沈下量・間隙水圧～時間関係を示す。沈下量は圧密終了時から、間隙水圧は上載圧を載荷する前から計測している。実験は 7 日間続けて終了した。間隙水圧はすぐには上昇せずに徐々に上昇している。それに伴って沈下もだらだらと発生し、7 日時点で 7cm を超え、まだ増加する傾向にあった。間隙水圧は上載圧の載荷過程ではほとんど上昇せず、また真空圧載荷後に 7 日間では与えた -70kPa には達しなかった。原因を調べているが、間隙水圧計の設置に不備があったのではないかと考えている。図 11 に試料の液性限界、初期含水比（真空圧載荷時）、圧密終了後供試体を解体し不織布近傍の含水比を測定した結果を示す。試料を土槽に投入したときは均質な含水比を有していた。真空圧載荷によってドレーン近傍は含水比で 35% ほど低下した。深度方向にはそれほどばらつきはなく、ドレーン近傍は均質に含水比の低下が生じていた。またドレーンから離れていくと含水比の低下は少なくなるが初期含水比よりは大きく低下していることが分かり、真空ドレーンが 10cm ほど離れていても効果があったと思われる。初期は高い含水比であったが自立する程度の含水比に低下し、Fc50% の中間土であっても一定の地盤改良効果が見られた。

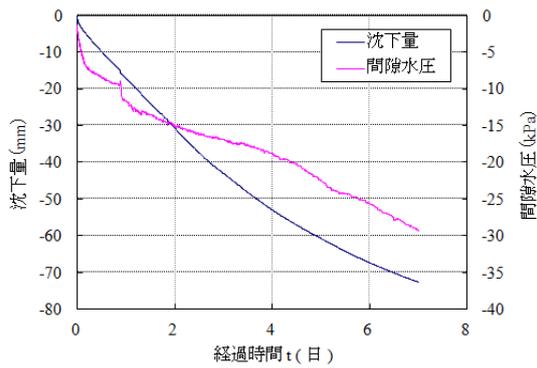


図 10 沈下量・間隙水圧～時間関係

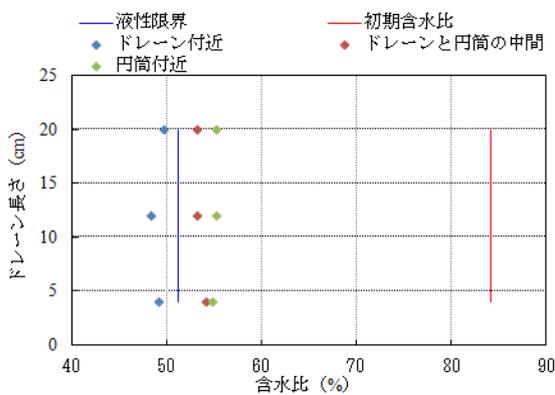


図 11 含水比分布

(4) まとめ

本報告には示していないが、真空圧密による地盤改良の施工事例として徳山下松港で行われた地盤改良について実測と数値計算のシミュレーションを行っている。これについても実測と計算結果は良好な対応を示していることを論文で報告している。

本研究を通して、以下の知見が得られた。

- ① 浚渫粘性土を骨格構造が高位な状態と仮定し真空圧密による脱水圧密の数値計算を実施した結果、真空圧密は地盤深部に荷重を伝達する工法であることを明らかにした。これはプレロードなど地表面に荷重を載荷して行う地盤改良に比べて破壊による危険性が少ないが、しかし、改

良域外に大きなせん断破壊を起こす恐れがあることも示した。

- ② 中間土の土質試験を実施し、SYS カムクレイモデルによる同定を行った。このモデルは中間土の力学挙動も適切に表現できることを示した。
- ③ 中間土を用いた土槽実験を行い、中間土地盤でも真空圧載荷による地盤改良効果が得られることを示した。

今後の課題として以下が挙げられる。

- ① 中間土地盤は拘束圧が上がるほど真空圧による沈下量が大きくなる傾向にあった。また、中間土の非排水クリープ試験を実施した結果、一定放置する荷重レベルが大きくなるほどクリープの変形量が多くなる傾向にある。これらのことを鑑みると、中間土地盤は上載圧などのせん断応力が増えるとクリープ変形や圧密が促進される傾向にあると考えられる。中間土は粘土と砂の特徴を併せ持ち、せん断力が増加すると異方性の影響が大きくなると考えられる。今後はさらに模型実験を行い、真空圧密の上載圧依存性などについて追加実験をするとともに、要素試験も実施し、誘導異方性などに着目して中間土の変形特性について調べていく予定である。さらに、異方性を考慮した中間土の構成式を用いた数値計算も行いたいと考えている。
- ② 現場実験を再現する数値計算例を他にも実施し、計算の信頼性の向上を図ってきたい。
- ③ ドレーン本数など経済的な検討は本報告では示していないが、別途数値計算で検討しているが、さらに地盤のばらつきを考慮して信頼性設計へ展開する必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Watabe, Y., Udaka, K. and Morikawa, Y.(2008): Strain rate effect on long-term consolidation of Osaka bay clay, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.4, pp.495-509.(査読有)
- ② 金田一広, 山崎浩之, 高稲敏浩 (2008) : 波浪作用下における防波堤基礎地盤挙動に関する水～土連成計算, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.297-302. (査読有)
- ③ 金田一広, 渡部要一, 山崎浩之, 新舎 博, 椎名貴彦(2009): 水～土連成計算による真空圧密工法の改良メカニズムの検討とその適用例, 地盤工学ジャーナル Vol. 4, No. 3, pp.245-258, 2009. doi:10.3208/jgs.4.245.(査読有)
- ④ Kazuhiro KANEDA, Hiroyuki YAMAZAKI(2009):Soil - water coupled analysis of low land widespread subsidence due to dewatering, *Lowland Technology International*, Vol.11, No.2, pp.47-52. (査読有)
- ⑤ 金田一広, 渡部要一, 山崎浩之(2009) : 中間土地盤の真空圧載荷による変形解析, 応用力学論文集, Vol. 12, pp.363-370. (査読有)
- ⑥ Watabe, Y., Tanaka, M. and Kikuchi, Y.(2009) Practical determination method for soil parameters adopted in the new performance based design code for port facilities in Japan, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.6, pp.827-839.(査読有)
- ⑦ 金田一広, 倉橋智, 水谷崇亮, 江村剛 (2010):関西国際空港 2 期工事における他深度間隙水圧測定と骨格構造の働きを考慮した水～土連成計算, 地盤工学ジャーナル Vol.5, No. 2, pp.263-280. (査読有)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 金田一広, 渡部要一, 山崎浩之(2009) : 真空圧密ドレーンによる中間土地盤の圧密特性, 地盤工学会全国大会.(発表 2009 年 8 月 20 日)
- ② 金田一広, 倉橋智, 水谷崇亮, 江村剛 (2009) : 関西国際空港 2 期工事における多深度間隙水圧測定と水～土連成計算, 第 54 回地盤工学シンポジウム, pp431-438.(発表 2009 年 11 月)
- ③ Kazuhiro KANEDA, Youichi WATABE and Hiroyuki YAMAZAKI (2010):Analysis of deformation of dredged clay and intermediate soils under vacuum pressure, Proc. of the

fourth Japan-China Geotechnical Symposium, Okinawa, Japan, pp.319-324. (発表 2010 年 4 月)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金田一広 (KANEDA KAZUHIRO)
株式会社 竹中工務店 技術研究所
建設技術研究部 構造部門 研究員
研究者番号 : 30314040

(2) 研究分担者

渡部要一 (WATABE YOUICHI)
独立行政法人 港湾空港技術研究所・
地盤・構造部・土質研究チーム リー
ムリーダー
研究者番号 : 00371758

山崎浩之 (YAMAZAKI HIROYUKI)

独立行政法人 港湾空港技術研究所・
地盤・構造部・動土質研究チーム リー
ダー
研究者番号 : 10371759

(3) 連携研究者

なし