

1. はじめに

わが国は土地面積が小さく、土地を拡大するために様々な建設工事が行われてきた。建設工事の中でも軟弱粘土地盤の埋立工事の際に生じる粘土層の最終圧密沈下量の予測は地盤改良工費に多大な影響を及ぼすため高精度の予測が必要とされている。この粘土地盤の圧密問題は既往の研究で工学的に満足できる精度で予測がほぼ可能となっている。しかし、比較的大きな荷重を受ける洪積粘土地盤の圧密沈下や、交通荷重などの繰返し荷重による長期沈下において事前予測を大きく上回る事例が報告されている。これは、長年の堆積期間で形成された粘土の骨格構造が新たな荷重によって劣化することで大きな沈下が生じるが、この骨格構造の劣化現象を現在の圧密沈下予測法では考慮できていないと考えられる。

そこで本研究では、自然堆積粘土の骨格構造の変化を評価するために不攪乱試料を用いて定荷重と繰返し荷重の圧密試験を行い、荷重形態の違いが骨格構造がどのような違いをもたらし、それに伴い有効応力、ひずみ、せん断剛性がどのような変化をするかを検討した。

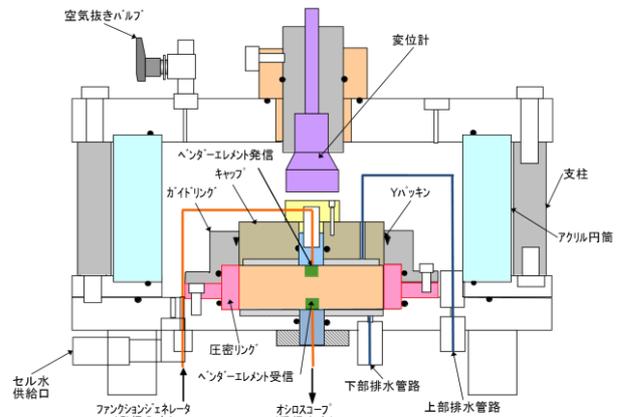
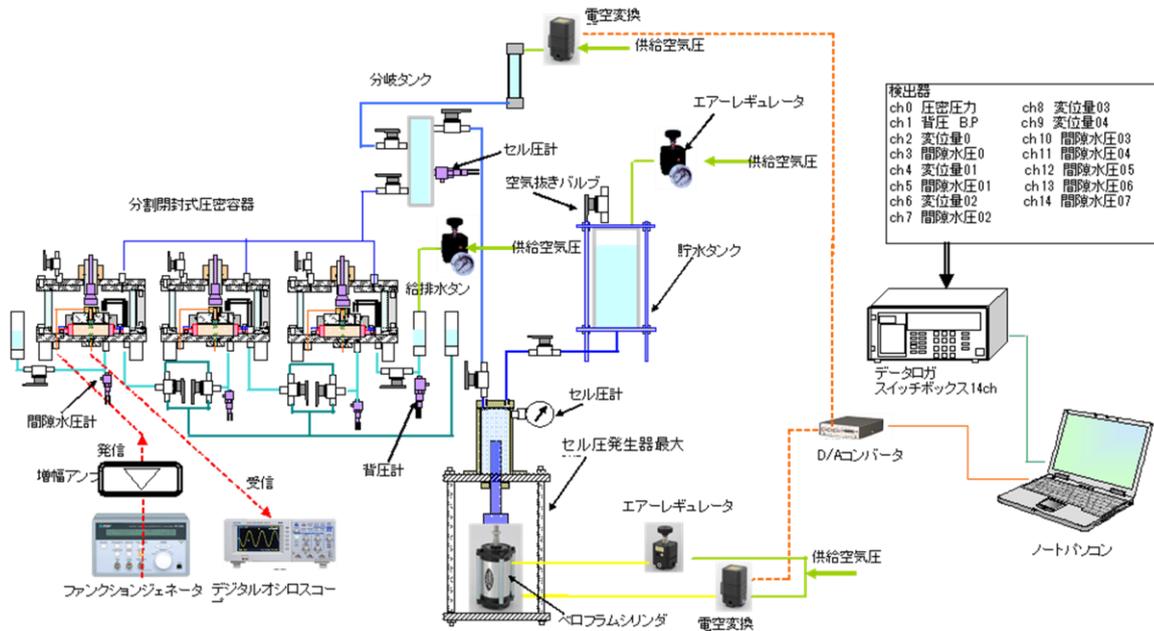


図1 閉封式圧密セル

2. 試料と測定方法

本研究では広島湾深江藻場の G.L. -13.00 ~ -13.80m、G.L. -15.00 ~ -15.80m、G.L. -22.00 ~ -22.80m の深さから粘性土をシンウォールサンプラーによって採取し、自然堆積粘土の骨格構造を評価するために不攪乱試料として使用した。各深度の物理特性を表1に示す。



分割閉封式圧密試験装

図2 試験機の概要

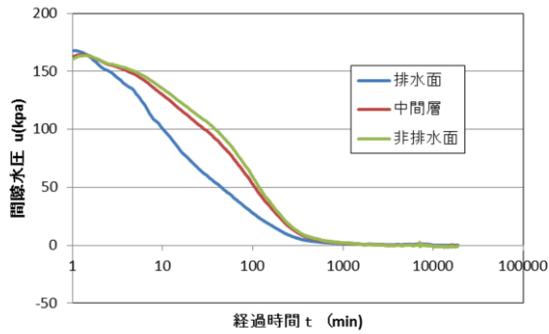


図3 間隙水圧と経過時間（定荷重）

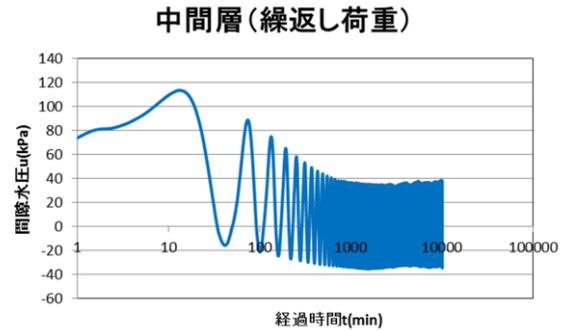


図5 間隙水圧と経過時間（中間層）

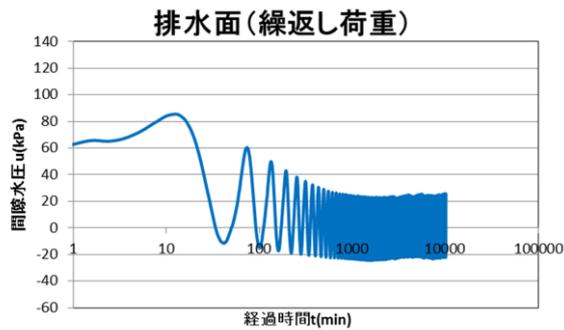


図4 間隙水圧と経過時間（排水面側）

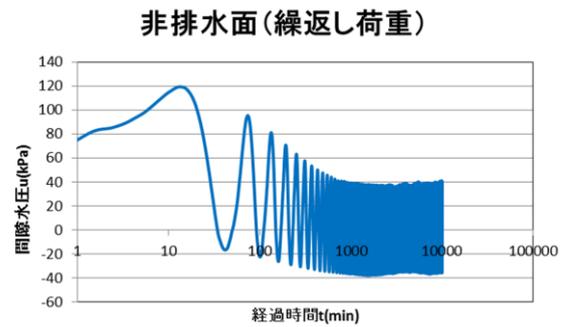


図6 間隙水圧と経過時間（非排水面側）

実験では試料中を伝播するせん断波速度 V_s を測定できるベンダーエレメント付きの分割型圧密試験機を用いて実施した。図1に閉封式セルの概要図、図2に試験全体の概要図を示す。上部ベンダーエレメントに電圧 $4V_{p-p}$ 、振動数 8 kHz のサイン波形を与え、素子を振動させる。この上部ベンダーエレメントで起振されたせん断波を下部ベンダーエレメントが受信して電圧波形に変換し、上部ベンダーエレメントに与えた電圧波形と下部ベンダーエレメントで受信した電圧波形の位相差から供試体を伝わるせん断波の到達時間を測定する。

この試験では、圧密過程中的骨格構造の変化によって有効応力、ひずみ、せん断剛性の地中分布がどのような変化をするかを検討するために試料を3層に分けて、圧密降伏応力付近である 80kPa と完全に正規圧密領域に入っている 320kPa を最終荷重段階とし、最終荷重段階以外の荷重段階では、両面排水にするために3つの試験機の排水経路を並列につなぎ、各荷重段階における24時間後の間隙比、せん断波速度、せん断弾性係数を測定した。また、最終荷重段階である 80kPa の定荷重と、320kPa の定荷重を載荷する試験、60kPa を中心として 40~80kPa の繰返し荷重と、240kPa を中心として 160~320kPa の間の繰返し荷重を載荷する試験では、供試体内部でのそれぞれの状態にお

ける間隙比、間隙水圧、せん断波速度、せん断弾性係数の時間的変化を明らかにするため、試験機の排水経路を排水面側から試験機1、試験機2、試験機3の順に直列につなぎ、排水面側と非排水面側での違いを検証した。実験によって得られたデータを用い、式(1)から間隙比、式(2)より湿潤密度 ρ_t (g/cm^3) を算出し、その結果と式(3)からせん断弾性係数 G (MPa) を算出する^{1)~3)}。

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho_t = \frac{\rho_s \rho_w + e}{1+e} \times \rho_w \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$G = \rho_t V_s^2 \times 10^{-3} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

H: 供試体の高さ (cm)

H_s : 供試体の実質高さ (cm)

ρ_s : 土粒子密度 (g/cm^3)

ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)

V_s : 供試体を伝わるせん断波速度 (m/s)

表1 試料の物理特性

	密度 (g/cm^3)	液性限界	塑性限界	塑性指数
G.L-13.0~-13.8m	2.560	116.6	41.7	74.9
G.L-15.0~-15.8m	2.575	118.2	45.0	73.2
G.L-22.0~-22.8m	2.598	103.8	35.0	68.8

3. 試験結果

(1) 荷重法の違いが間隙水圧の消散に及ぼす影響

図3は320kPaの定荷重を載荷した場合の間隙水圧の時間的変化を示したものである。320kPaの定荷重を載荷した場合の増加荷重は160kPaであり、間隙水圧は載荷直後にこの増加荷重と等しい160kPaがすべて供試体で発生し、その後排水面側から消散し、すべての供試体で約500分を過ぎたところでほぼゼロになっていることが分かる。

図4～6は320kPaの繰返し荷重を載荷した場合の間隙水圧の時間的変化を示したものである。320kPaの繰返し荷重を載荷する場合は、まず240kPaまで荷重を増加した後、この240kPaを中心に320～160kPaの間を振幅160kPa、周期60分で荷重変動する。ここで、繰返し荷重の周期は特定の現象を対象としたものではなく、載荷や計測の便宜上60分とした。図4～6において、非排水面側と中間層の間隙水圧は載荷直後に80kPaだけ発生し、その後は荷重変動に連動して変化している。排水面側で載荷直後に80kPaの間隙水圧が発生していないことや、15分経過後にすべての供試体で間隙水圧が160kPaまで発生していないのは、載荷の間に時間が経過し間隙水圧が消散したためである。また、図4～6において間隙水圧の変動領域が排水面側は-30kPaから30kPaの間で収束しているのに対し、非排水面側は-40kPaから40kPaの間で収束していることが分かる。これらから、排水面側では間隙水を排水することで間隙水圧が減少して全応力に対する有効応力の変化割合が大きいものに対して、非排水面側では排水面側のように間隙水圧が減少しないため有効応力の変化割合が小さいことが分かる。さらに、図3～6を比較すると定荷重を載荷した場合における間隙水圧がほぼ0kPaになる時間と、繰返し荷重を載荷した場合における間隙水圧の変動の中心値がほぼ0kPaに収束する時間はともに500分程度であり、両者に差がないことが分かる。このことから、最大荷重が320kPaになる平均240kPaの繰返し荷重を載荷させる場合と最大荷重の等しい320kPaの定荷重を載荷させる場合とでは平均的な有効応力の変化する時間が同程度であるといえる。

(2) 荷重法の違いによるせん断剛性への影響

図7は80kPaまで載荷した場合の間隙比と圧密応力の関係を示したものであり、80kPaの定荷重を載荷した時の排水面側と非排水面側の挙動と、60kPaを中心に最大80kPaになるような繰返し荷重を載荷した時の排水面側と非排水面側の挙動の違いを示している。この図において、定荷重の場合はG.L. -13.00mの試料に、繰返し荷重の場合はG.L. -15.00mの試料にそれぞれ載荷しているため、

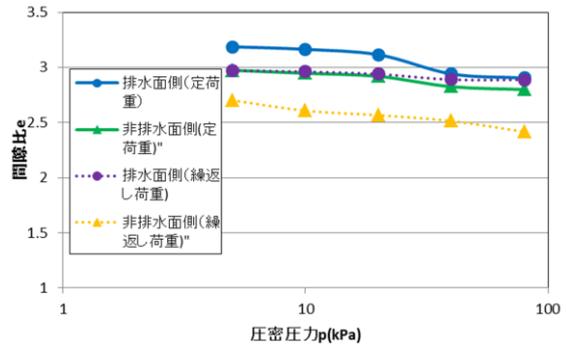


図7 間隙比と圧密応力 (80kPa)

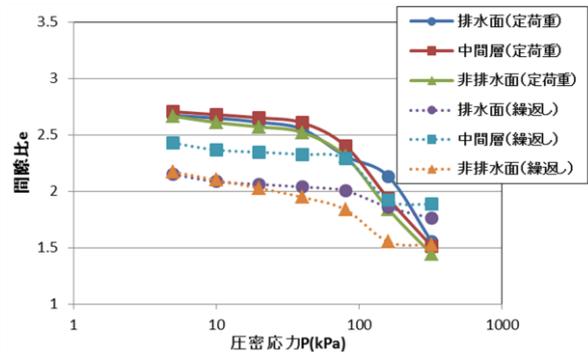


図8 間隙比と圧密応力 (320kPa)

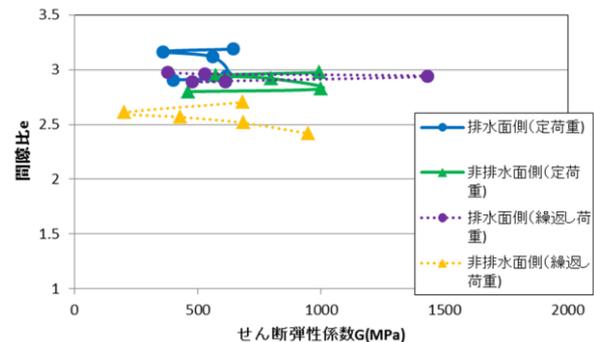


図9 間隙比とせん断弾性係数 (80kPa)

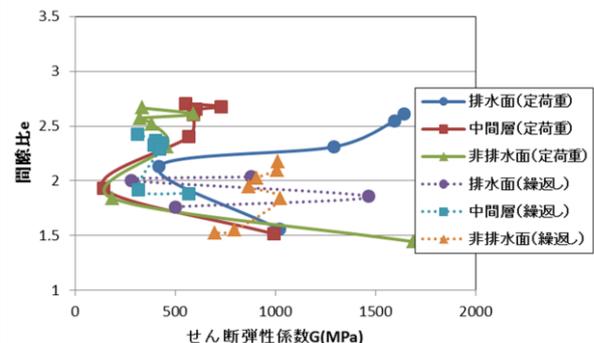


図10 間隙比とせん断弾性係数 (320kPa)

初期間隙比に違いはあるものの、排水面側、非排水面側ともに圧密応力の増加に伴う空隙比の変化の違いは小さいといえる。これは両試料とも80kPaが圧密降伏応力に達する直前の荷重であり、正規圧密領域に至っていないためであると考えられる。また、80kPaの繰返し荷重を載荷した場合は、時間的な平均荷重は60kPaであるが、空隙比は80kPaの定荷重が作用した場合と同程度となっており、繰返し荷重が載荷する場合は最大荷重に対応する沈下が生じると考えることが必要である。

図8は320kPaを載荷した場合の空隙比と圧密応力の関係を示したものであり、320kPaの定荷重を載荷した時の排水面側と非排水面側の挙動と、240kPaを中心に最大320kPaになるような繰返し荷重を載荷した時の排水面側と非排水面側の挙動の違いを示している。なお、不攪乱試料の量の問題から、定荷重の試験はG.L.-13.00～G.L.-13.80mの試料で、繰返し荷重の試験はG.L.-22.00～G.L.-22.80mの試料で行った。土被り圧の違いから初期間隙比に違いはあるものの、圧密応力が160kPaではともに正規圧密領域に入っていることが分かる。さらに、定荷重載荷時は圧密降伏応力に達した直後から空隙比が大きく減少し始めるのに対して、繰返し荷重載荷時は繰返し荷重を載荷させる直前の荷重160kPaから空隙比があまり減少していないことが分かる。これは、繰返し荷重を載荷させる直前の荷重160kPaがすでに正規圧密領域に達しており、堆積時に形成された骨格構造が破壊されて新たな骨格構造が再構築されているため、平均圧密応力が小さな繰返し荷重では骨格構造の変化が少なかったためと考えられる。

図9に示す80kPaまで載荷した時の空隙比とせん断弾性係数の関係において、繰返し荷重の排水面側の20kPaの値がやや大きいものの、排水面、非排水面ともに繰返し荷重を受けている供試体のほうが空隙比の変化に伴うせん断弾性係数の変化が大きいためといえる。これは、繰返し荷重の方が有効応力の変化が継続して作用するため骨格構造が変化しやすいからだと考えられる。

図10は320kPaを載荷した場合の空隙比とせん断弾性係数の関係を示したものであり、320kPaの定荷重を載荷した時の排水面側の挙動と非排水面側の挙動の違いを示している。この図において、定荷重の場合は160kPaを載荷した後空隙比の減少に伴いせん断弾性係数が大きく増加しているのに対し、繰返し荷重を載荷した場合は160kPa載荷しても空隙比の減少に伴いせん断弾性係数が増加していないことが分かる。これは、定荷重を載荷時は320kPaの荷重によって密度が増加して骨格

構造が再構築されることからせん断弾性係数が増加しているといえる。それに対し、繰返し荷重載荷時は平均圧密応力が定荷重より小さいために骨格構造が定荷重ほど再構築されずせん断弾性係数が増加しなかったと考えられる。

4. まとめ

(1) 最大荷重が320kPaで平均値が240kPaの繰返し荷重載荷時の空隙水圧の振動が定常状態になる時間と、最大荷重が等しい320kPaの定荷重載荷時の空隙水圧がほぼ0kPaに消散する時間は同程度であり、それに伴い平均的な有効応力が変化する時間も同程度である。

(2) 80kPa以下の過圧密領域においては骨格構造の破壊は見られないが、繰返し荷重を作用させることによってせん断剛性が大きくなる傾向が見られる。

(3) 320kPaの正規圧密領域においては堆積時に形成された骨格構造が破壊されて新たな骨格構造が再構築されているため、繰返し荷重を載荷すると最大荷重の等しい定荷重を載荷した時ほど空隙比の減少に伴うせん断弾性係数が増加しなかった。

以上のことを踏まえて、今後はほかの試料においても同様の結果が得られるかを試料の種類を増やして実験することで明らかにし、周期を変化させた時の骨格構造の変化も検討していきたい。

参考文献

- 1) 川口貴之, 三田地利之ほか2名: 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数Gの評価, 土木学会論文集 No. 694, 195-207, 2001. 12.
- 2) 山口順子, 渡邊徹, 真島正人: S波速度測定式圧密試験機による粘性土の圧密特性に関する研究その1試験装置の概要, 第35回地盤工学研究発表会(岐阜), 2000. 6.
- 3) 大島昭彦, 加藤正司, 笹尾憲一ほか9名: 土質試験基本と手引き, 社団法人地盤工学会, 2001.