

平成 2 7 年度 修士論文

地震で崩壊した堤体の密度測定と 非排水強度特性

首都大学東京大学院

都市環境科学研究科

都市基盤環境学域

1 4 8 8 5 4 3 5 倪 帥

指導教授 吉嶺 充俊 准教授

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	定常状態理論	3
第2章	藤沼砂の湿潤密度試験	5
2.1	実験試料	5
2.2	実験方法	7
2.3	実験装置と実験器具	8
2.4	実験手順	10
2.4.1	ノギス法	10
2.4.2	パラフィン法	11
2.5	実験結果と考察	13
第3章	非排水三軸圧縮試験	15
3.1	豊浦砂の非排水三軸圧縮試験	15
3.1.1	実験目的	15
3.1.2	実験試料	16
3.1.3	実験装置	17
3.1.4	試験器具	23
3.1.5	供試体の堆積方法	25
3.1.6	実験手順	27
3.1.7	供試体の体積補正	34
3.1.8	方法4の実験方法	37
3.1.9	実験結果と考察	40
3.2	藤沼砂の非排水三軸圧縮試験	45
3.2.1	試料の調製と準備	45
3.2.2	実験結果と考察	47
3.2.3	非排水三軸圧縮試験の難点分析	54
第4章	結論	55

参考文献

謝辭

第 1 章 序論

1.1 研究背景

藤沼ダム(堤高 18.5m、堤頂長 133m)は、日本の福島県須賀川市江花にある、江花川（阿武隈川水系）の支流・簗の子川に建設されたアースダム（土堰堤）形式の灌漑用ダムである。ダム湖の正式名称は藤沼貯水池である。農水省の資料に、「長年水不足に苦しんでいた旧長沼・梓衝・稲田の 1 町 2 村の人々が、主に人力で築き上げたもので、昭和 12 年に着手し、12 年の歳月を経て終戦直後の昭和 24 年に完成」という記述がある。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震で堤が決壊し、流域で被害が発生した。下流の長沼地区および滝地区では、死者 7 人、行方不明者 1 人、流失もしくは全壊した家屋 19 棟、床上床下浸水家屋 55 棟という被害を出し、田畑の土壌も多くが流失した。地震のほぼ直後に越流が生じたことや、堤体の右岸側半分では堤体が上流方向に大きく滑り出した痕跡があることなどから、地震振動中あるいは直後に堤頂を含む上流側斜面の大規模な滑り破壊が生じたものと思われる。

この事故に関しては福島県が報告書を作成した。この報告書によれば、被災後の堤体に関する調査を行った結果、盛り土は土質構成の違いにより三層に区分できる。上部は砂質で構成される、中部と下部はシルト質砂と粘土を構成されることがわかるが、上部砂質土層は大部分が流出したため、明瞭なまき出しの痕跡に乏しい。

藤沼ダムの写真から見ると、ダムから流下した泥流は、河川沿いの樹木も巻き込んだ。右岸と左岸の上部砂層はほとんど流失し、わずかに残っている。

1.2 研究目的

藤沼ダムの堤体は東日本大地震によって決壊した。地震のほぼ直後に越流が生じたことや、堤体の右岸側半分では堤体が上流方向に大きく滑り出した痕跡があることなどから、地震振動中あるいは直後に堤頂を含む上流側斜面の大規模な滑り破壊が生じたものと思われる。このダムの安定性を評価するためには、崩壊した堤体盛土の密度を正確に測定するとともに、その土の大変形後の定常状態での非排水強度と密度の相関を把握することが重要である。堤体盛土は上部砂層(層厚 6m～8m)と中部・下部盛土の粘性土層に大別できる。本研究では、特に上部砂層から採取した試料を用いて三軸圧縮試験を行い、この砂の定常状態における乾燥密度と有効拘束圧との相関を調べた。これに上部砂層から採取した不攪乱試料の密度試験結果を加味し、崩壊前の推定原位置状態に対応する定常状態での非排水強度特性を実験的に明らかにすることによって、崩壊した藤沼ダム上部砂層の安定性を評価することが本研究の目的である。



図1－1 崩壊したダム全景



図1－2 藤沼ダムの右岸



図1-3 藤沼ダムの左岸

1.3 定常状態理論

砂の大変形挙動を観察し、その強度特性から砂の液状化あるいは流動化を評価しようとする手法を定常状態理論という。この理論の特徴は定常状態と呼ばれるせん断変形の最終状態における砂の密度と拘束圧の間に初期状態に関わらず一対一の関係を仮定することである。本研究では定常状態を次のように定義した。

定義 土の定常状態 (Steady State, SS) とは、応力状態が変化せずに等体積で変形が生じている状態にある。すなわち、定常状態では応力増分はすべての成分についてゼロであるが、少なくとも一つのひずみ成分の増分がゼロではない。

(Casagrande, 1936) は、密な砂をせん断すると体積の膨張により密度が減少し、緩い砂をせん断すると体積の圧縮により密度が増加することを観測した。そして、せん断の最終段階では初期密度によらず同じ密度へ収束していくことを実証した。最終的に密度が収束する値とそのときの有効拘束圧の値を平面にプロットしたものを定常状態点をいう。またその点を繋いだものを定常状態線 (Steady State Line, SSL) という。一般的に砂の密度と拘束圧の関係は平均有効主応力-間隙比平面で表されることが多い。

定常状態線は図 1-4(c) のような有効主応力-間隙比平面において、右下がりの直線もしくは曲線である。初期状態が定常状態線より上 (右) にあれば間隙比一定の非排水せん断を受けた場合、間隙水圧の上昇にともない有効拘束圧が減少し、土の強度が低下する。

反対に図 1－4(c)のように初期状態が定常状態線より下（左）にあれば、間隙水圧の減少にとともに有効拘束圧が増大し、土の硬化が生じる。つまり、定常状態線からより右上に位置するほど、すなわち土の密度がより小さくまた有効拘束圧がより大きいほど、液状化流動の危険が大きいと判断される。このように、定常状態線の位置は、砂の流動を評価するための重要な基準となっている。

また、定常状態での有効主応力, p' 、間隙比, e 、せん断応力, τ 、軸ひずみ, ε_a には関係性があり、以下に非排水試験でのものとせん断応力一定での給排水をとまなう試験での関係図を示す図 1－4。また体積ひずみについては次式より算出することができる。

$$\varepsilon_{v,ss} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

$\varepsilon_{v,ss}$: 定常状態での体積ひずみ
 Δe : 間隙比変化量 e_0 : 初期間隙比

つまり、砂の定常状態線の位置（ e － p' 相関）がわかっているれば、ある密度（間隙比 e ）をもつ砂が流動大変形したときの定常状態強度 $\tau = Mp'$ を予測することができる。また反対にせん断荷重がわかっているときには、透水によってどの程度の吸水（体積ひずみ）が生じると流動大変形が生じるかを予測できることになる。従って定常状態は砂の流動特性を把握するうえで最も重要な事項であり、流動挙動の解明には不可欠だといえる。

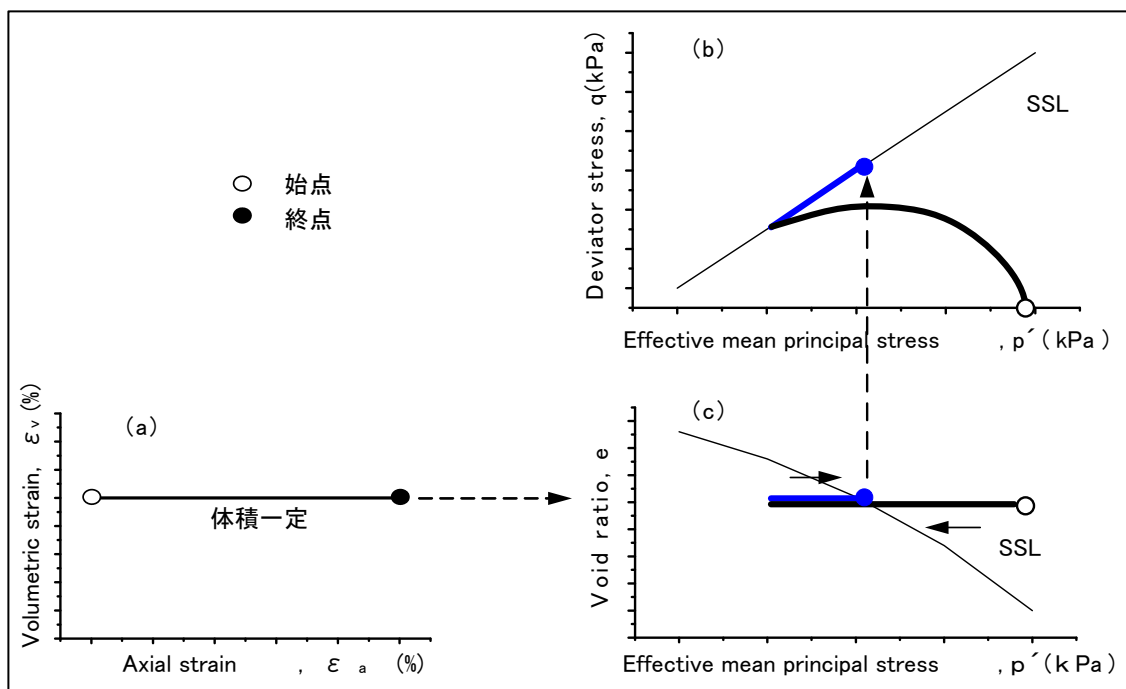


図1－4 非排水試験での砂の流動挙動

第2章 藤沼砂の湿潤密度試験

2.1 実験試料

地震発生から2年以上経過した2013年6月に不攪乱試料のブロックサンプリングを行った。上部層は砂質土で構成されており決壊時にほとんどが流失して左右両岸の堤体端部にわずかに残存しているに過ぎない。左右両岸における採取場所はいずれも崩壊前の下流側法肩のほぼ直下(数m下流寄り)であり、堤頂から3~4m低い地点である(写真2-1, 2-2)。左右両岸から約15cm角のブロックをそれぞれ採取した(写真2-3)。この試料の粒度試験結果を図2-1に示した。右岸・左岸の土質は同一であり、細粒分含有率 $F_c=25\%$ 、平均粒径 $D_{50}=0.5\text{mm}$ である。なお、福島県の報告書は上部層について $F_c=17.2\%$ 、平均粒径 $D_{50}=0.482\text{mm}$ と報告しており、細粒分はやや少ないものの、図2-1とほぼ同一の粒度である。

試料採取時の掘削・整形作業の感触として、左岸では盛り土として尋常な堅さであったのに比較して、右岸は極めて柔らかく、密度が低いことが予想された。また、中部・下部盛り土では造成の撒き出しや締め固めの工程で生じる成層構造が顕著なのに対して上部砂質土層は全体として非常に均一な堆積物であった。



写真2-1 右岸での試料採取



写真2-2 左岸での試料採取



写真2-3 左岸で採集したブロックサンプリング

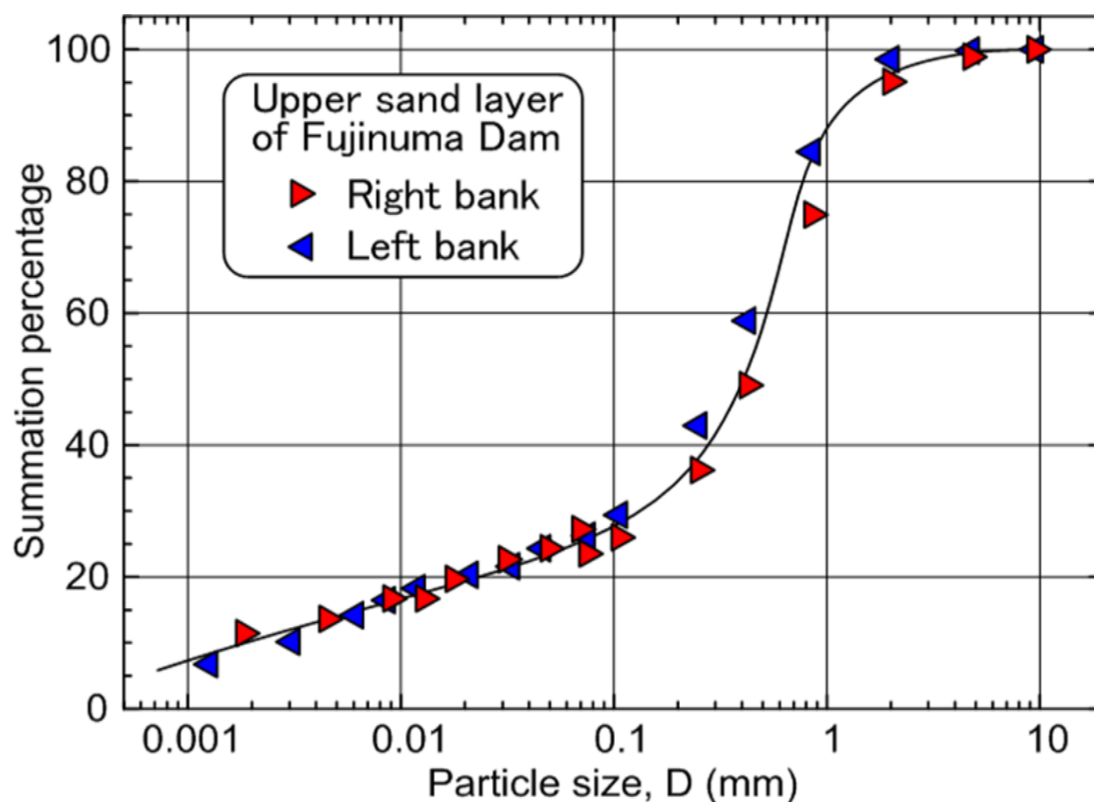


図2-1 粒度試験の結果

2.2 実験方法

供試体の湿潤密度を求めるために、体積を正しく測定する必要がある。「土質試験に方法と解説」より、体積を測る方法としてノギス法とパラフィン法を規定した。この二つの方法は、一般的に広く用いられている体積測定方法であり、試験装置及び試験器具が比較的簡単かつ安価で、操作方法も平易である。ノギス法は成形できる円柱供試体に適し、円柱供試体に成形できない場合はパラフィン法が適する。

今回の試験はまず採取したブロックから直径およそ 5cm、高さおよそ 10cm、体積がおよそ 200cm³ の円柱供試体を整形し、ノギス法により密度測定を試みた。不攪乱試料のブロックは非常に脆く、整形できた円柱供試体の数は極めて限られていた。そこで、測定の信頼性を向上させるために体積が 20cm³ 程度の不整形の不攪乱試料片を用いてパラフィン法による密度試験もあわせて実施した。

2.3 実験装置と実験器具

1. ノギス法の試験器具

- (1) 供試体作製器具 トリマー、マイターボックス、ワイヤーソー及び直ナイフ
- (2) はかり
- (3) 含水比測定器具 容器、恒温乾燥炉など
- (4) ノギス

2. パラフィン法の試験装置と試験器具

- (1) パラフィン
- (2) 水中の供試体質量測定用の器具 水を入れる容器及び供試体を載せる吊り皿をもつもの
- (3) はかり
- (4) 温度計
- (5) 含水比測定器具 容器、恒温乾燥炉など



写真2-4 ワイヤーソーとへら

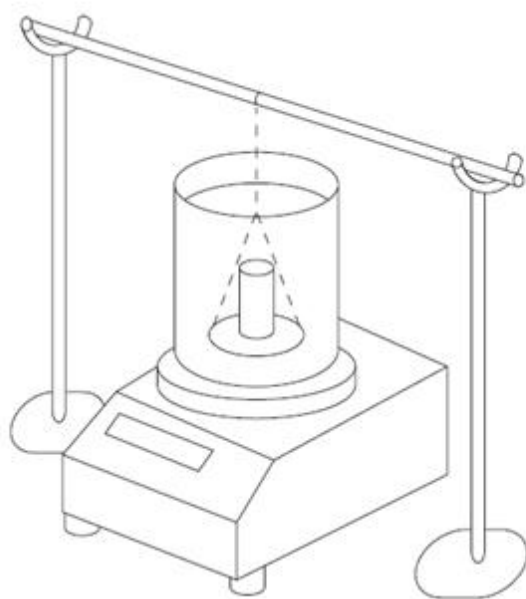


図2-2 はかりと水中の供試体質量測定用の器具

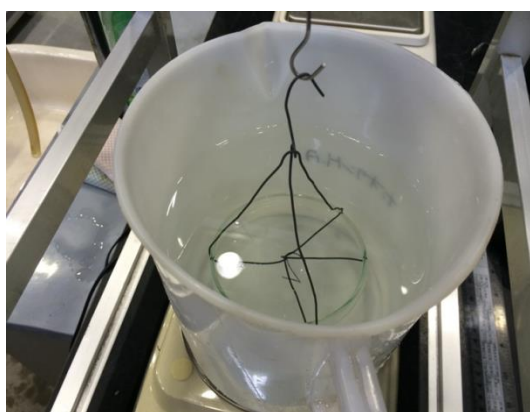
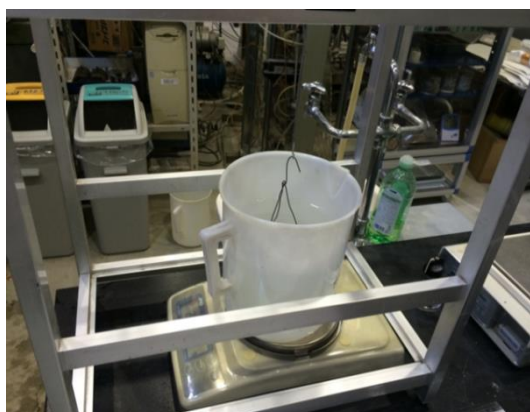


写真2-5
パラフィン法の実験装置



写真2-6
後日新たに購入した実験装置

2.4 実験手順

2.4.1 ノギス法

1. 供試体の作製

供試体は乱れた部分がワイヤーソーで取り除き、側面が所定の直径になるように、トリマーやワイヤーソーなどを用いて成形する。また、両端面をマイターボックス、ワイヤーソーなどを用いて成形する。

2. 供試体体積の測定

供試体の直径は供試体の上中下のそれぞれの位置で直交する二方向をはかり、高さは円周を等分した二か所のそれぞれの位置ではかる。供試体の平均直径 $D(\text{cm})$ 及び平均高さ $H(\text{cm})$ を求める。

3. 計算

供試体の体積は次の式によって算出する。

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H$$

V : 供試体の体積 (cm^3)

D : 供試体の平均直径 (cm)

H : 供試体の平均高さ (cm)

湿潤密度は次の式で計算できる。

$$\rho_t = \frac{m}{V}$$

ρ_t : 供試体の湿潤密度 (g/cm^3)

m : 供試体の質量 (g)

2.4.2 パラフィン法

1. 供試体の作製

任意形状の供試体を溶融したパラフィン液中に何度か繰り返し浸し、はけを用いて表面に被膜を作り、室温になるまで放置する。

2. 供試体体積の測定

パラフィン塗布後の供試体の質量 $m_1(\text{g})$ を測る。実験装置つまりはかりに取り付けた吊り皿の水中での見掛けの質量を測って、 $m_2(\text{g})$ とする。パラフィンを塗布した供試体を水中の吊り皿に載せて、水中での見掛けの質量 $m_3(\text{g})$ をはかる。その際、吊り皿及び供試体は完全に水中に入るようにし、両方とも容器に触れないようにする。最後水温 $T(^{\circ}\text{C})$ をはかる。

3. 計算

供試体の体積は次の式によって算出する。

$$V = \frac{m_3 - m_2}{\rho_2} - \frac{m_1 - m}{\rho_1}$$

V : 供試体の体積 (cm^3)

m : 供試体の質量 (g)

m_1 : パラフィン塗布後の供試体の質量(g)

m_2 : 供試体を水中に入れる前の実験装置の質量(g)

m_3 : 供試体を水中に入れる後の実験装置の質量(g)

ρ_1 : パラフィンの密度(g/cm^3)

ρ_2 : 温度 $T(^{\circ}\text{C})$ での水の密度(g/cm^3)

湿潤密度は次の式で計算できる。

$$\rho_t = \frac{m}{V}$$

ρ_t : 供試体の湿潤密度 (g/cm^3)

土の安定性を分析するため、次の式で乾燥密度を算出する。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\omega}{100}}$$

ρ_d : 供試体の乾燥密度 (g/cm^3)

ω : 供試体又は削りくずの含水比 (%)



写真2-7 供試体を溶融したパラフィン液中に浸す



写真2-8 供試体の被膜をつくる

2.5 実験結果と考察

左岸より右岸の土が極めて柔らかくて壊れやすい。乾燥密度は、土の体積変化を伴わずに間隙水が完全に排除された状態を想定したもので、土の締め具合を絶対値で示す指標として、土の締め固め度の判定などの品質管理に利用される。本研究では、藤沼ダム堤体の上部砂層の締め固め具合を明らかにするため、湿潤密度の結果から乾燥密度を求めた。

試験に用いた供試体は、右岸から採取したものが4個（R1～R4）、左岸から採取したものが5個（L1～L5）の合計9個である。このうち、R1、L1、L2がノギス法によって計測したものであり、残りのものがパラフィン法によって計測したものである。パラフィン法で計測したものについては、試験データの詳細を表2-2に掲載した。

予想通り右岸の試料の方が乾燥密度 ρ_d は小さい結果となり、右岸で $\rho_d = 1.22 \sim 1.35 \text{g/cm}^3$ と左岸で $\rho_d = 1.45 \sim 1.65 \text{g/cm}^3$ であった。ノギス法による計測結果とパラフィン法による計測結果を比較してみると、両者に有意の差はなく、計測精度には十分な信頼性があるといえる。

表2-1 上部砂層の乾燥密度

採取場所 供試体No.	右岸			
	R1	R2	R3	R4
体積, $V(\text{cm}^3)$	202.5	23.45	22.57	25.94
乾燥質量, $m_s(\text{g})$	274.36	31.489	30.137	31.674
乾燥密度, $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.355	1.343	1.335	1.221

採取場所 供試体No.	左岸				
	L1	L2	L3	L4	L5
体積, $V(\text{cm}^3)$	204.9	189.2	31.41	11.10	22.91
乾燥質量, $m_s(\text{g})$	316.66	311.75	51.536	16.143	35.773
乾燥密度, $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.546	1.648	1.641	1.454	1.561

表2-2 上部砂層左岸と右岸のパラフィン法試験結果

No	L1	L2	L3	R1	R2	R3
m(g)	57.75	18.05	40.04	36.93	36.51	37.62
m ₁ (g)	64.69	26.44	48.25	47.43	43.00	51.67
m ₂ (g)	2568.53	2248.08	2195.88	2567.21	2251.82	2195.61
m ₃ (g)	2607.52	2268.44	2227.80	2602.20	2281.53	2237.01
T(°C)	25.0	23.0	26.0	24.0	23.0	26.0
$\rho_2(\text{g/cm}^3)$	0.997	0.998	0.997	0.997	0.998	0.997
$\rho_1(\text{g/cm}^3)$	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902
V(cm ³)	31.41	11.10	22.91	23.45	22.57	25.95
m _a (g)	99.15	71.17	91.52	89.89	85.93	88.45
m _b (g)	94.56	69.62	87.75	84.81	80.73	83.40
m _c (g)	56.49	56.50	56.14	55.41	56.14	56.50
$\omega(\%)$	12.06	11.81	11.93	17.28	21.15	18.77
$\rho_t(\text{g/cm}^3)$	1.838	1.626	1.747	1.575	1.617	1.450
$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.641	1.454	1.561	1.343	1.335	1.221

第3章 非排水三軸圧縮試験

3.1 豊浦砂の非排水三軸圧縮試験

3.1.1 実験目的

藤沼砂を用いた実験を行う前に、豊浦砂を実験材料として非排水三軸圧縮試験を行う。土の乾燥密度を算出するために用いる三軸試験結果の整理方法については、4通りの方法が考えられる。これらの計算方法で計算されたそれぞれの乾燥密度の値にはどのような関係があるか、また、どの方法の信頼性が最も高いのかを検討する必要がある。豊浦砂と比較すると、藤沼砂は細粒分を多く含むために、いろいろな要因で計算値のばらつきが多く、密度計算方法の関係や信頼性を評価することが難しいと予想される。従って、三軸供試体の密度評価の精度を向上することを目的とする場合には、どの方法で結果の信頼性が高いかは、藤沼砂よりも豊浦砂の試験でより適切に判断できる。これが豊浦砂を使った実験を実施する第一の目的である。

また、採取してある藤沼砂の残量は少なくなっているが、ダム の 堤 体 は 既 に 修 復 さ れ て いるために、崩壊した盛り土の再採集は不可能である。そのため、新しい実験方法を試みる場合には、まず豊浦砂を用いて試験方法と試験手順を詳しく検討する必要がある。つまり、現場から採取した試料を節約することが豊浦砂を使った実験の第二の目的である。

砂の定常状態における非排水せん断特性を把握するためには、なるべく幅広い拘束圧とその砂の乾燥密度との相関を表現できるように試験を行う必要がある。現在、豊浦砂の定常状態を調べたデータは多数あるが、供試体が非常に緩い部分のデータは不足している。そこで、非常に緩い供試体の作成方法を検討するとともに、定常状態での拘束圧がより小さい条件で、それと密度の相関を求めることを第三の目的とする。

3.1.2 実験試料

豊浦砂(豊浦標準砂)は山口県下関市豊浦町大字黒井付近の2km四方程度のかかなり限定された場所で産出された天然のシリカサンドに対して、細粒分やごみを取り除くための水洗い、ボイラーによる乾燥、ふるい分けによる粒径0.3mm以上の成分の除去の加工を行って製造したものである。天然砂の特質として、粉碎された人工のものに比べて自然界に存在する形状が保たれており、粒子に丸みがある。この砂は豊浦硅石鉱業株式会社により一貫して採掘や製造が行われているため、長期間にわたり品質のばらつきが非常に小さい。また、粒径幅が非常に狭いので多量の砂を扱っても分級による不均一が生じないので取り扱いが大変に便利である。そのためコンクリート分野のみならず地盤工学の分野でも日本における事実上の標準砂として一般に土質力学試験に用いられている。豊浦砂の物理特性を表2.1に示した。

表 2.1 豊浦砂の物理特性

材料	細粒分含有率 $F_c(\%)$	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$
豊浦砂	0.0	2.650	0.21

3.1.3 実験装置

圧密非排水三軸圧縮試験(CU 試験)は地盤が載荷重によって圧密されて強度を増やした後、排水が生じないような条件の下で新たに急速な載荷を受けるときの圧縮強さを求めるために行われる。

A. 載荷装置

1. 軸力載荷装置(上部)

動的載荷を行うときの鉛直荷重は装置上部にあるベロフラムシリンダーの圧力をパソコン制御で変動させることによって行う。本研究では静的な単調載荷試験のみを行ったので、この装置は使用していない。



写真3-1 載荷ハンドル

2. 軸力載荷装置(下部)

静的載荷を行う際の鉛直荷重の載荷動力は装置下部にある電動モーターである。モーターの回転はいくつかの低速ギアで速度を調整した後、三軸圧力室台座の上下動に変換されて載荷を行う。

3. セル圧載荷装置

セル圧載荷装置の動力はコンプレッサーによって発生する空気圧である。コンプレッサーは空圧タンクの圧力が 1000kPa 以下になると運転を開始するように設定されており、一次圧調整用レギュレーターを通じて各載荷装置に供給されている。セル圧載荷用空圧レギュレーターで調整された空気圧はセル内上部に直接導入され、セル水を介して水圧として供試体に載荷される。



写真3-2 セル圧計

3. 背圧載荷装置

背圧载荷用レギュレーターで調整された空気圧は、供試体体積変化測定用二重管ビュレットに導入され、ビュレット内で水圧に変換される。ビュレット内の水圧は、供試体上下の配水管を通じて伝達され、ポラストーンを通して供試体に载荷される。



写真3-3 軸変位計

B. 測定装置

1. 計測・記録装置

供試体に作用する荷重と供試体の変形は、各測定装置により電圧に変換された後、ADコンバーターカードによってパソコンに呼び込まれ、表示・記録される。観測値ディスプレイ表示のサンプリング周波数は30Hz程度である。最大記録周波数は100Hzであるが、単調载荷中は1Hzに設定する。ADコンバーターの入力レンジは20V(±10V)、分解能力は16bit(0.350mV)である。測定・記録項目は鉛直軸荷重、セル圧、背圧(間隙水圧)及び軸変位の4チャンネルである。実験中には上記4項目に加え、鉛直応力、水平応力、K値(鉛直応力と水平応力の比)、および鉛直ひずみをリアルタイムでディスプレイ表示する。



写真3-4 ひずみ変換機

2. 鉛直軸荷重測定装置

鉛直軸荷重は三軸室内のロードセルおよび動ひずみ計によって電圧に変換して測定する。ロードセルの定格容量は5000Nである。観測レンジを定格容量としたときの分解能は理論上約0.03Nであるが、実際はノイズのために有効分解能は約0.1Nである。

3. セル圧・背圧測定装置

セル圧をひずみゲージ式圧力計と動ひずみ計によって電圧に変換して観測する。圧力計の定格容量はセル圧1000kPa、背圧500kPaであり、観測レンジを定格容量にしたときには分解能は約0.1kPaである。

4. 軸変位測定装置

セル外部に取り付けられた垂直変位アタッチメントの垂直変位をひずみゲージ式で測定する。変位計の定格容量は50mmであり、観測レンジを定格容量としたときの分解能は約0.01mmである。

5. 供試体体積変化量測定装置

実験では飽和した供試体のみを用いるので、供試体から排出される水の体積をビュレットにより測定し、これを供試体体積変化量とする。観測は、圧密時などはビュレットの水面を目測することにより行う。観測精度は、ビュレットの最小目盛りは0.1cm³であるが、目測によって約0.05cm³まで読み取ることができる。



写真3-5

供試体体積変化測定用二重管ビュレット

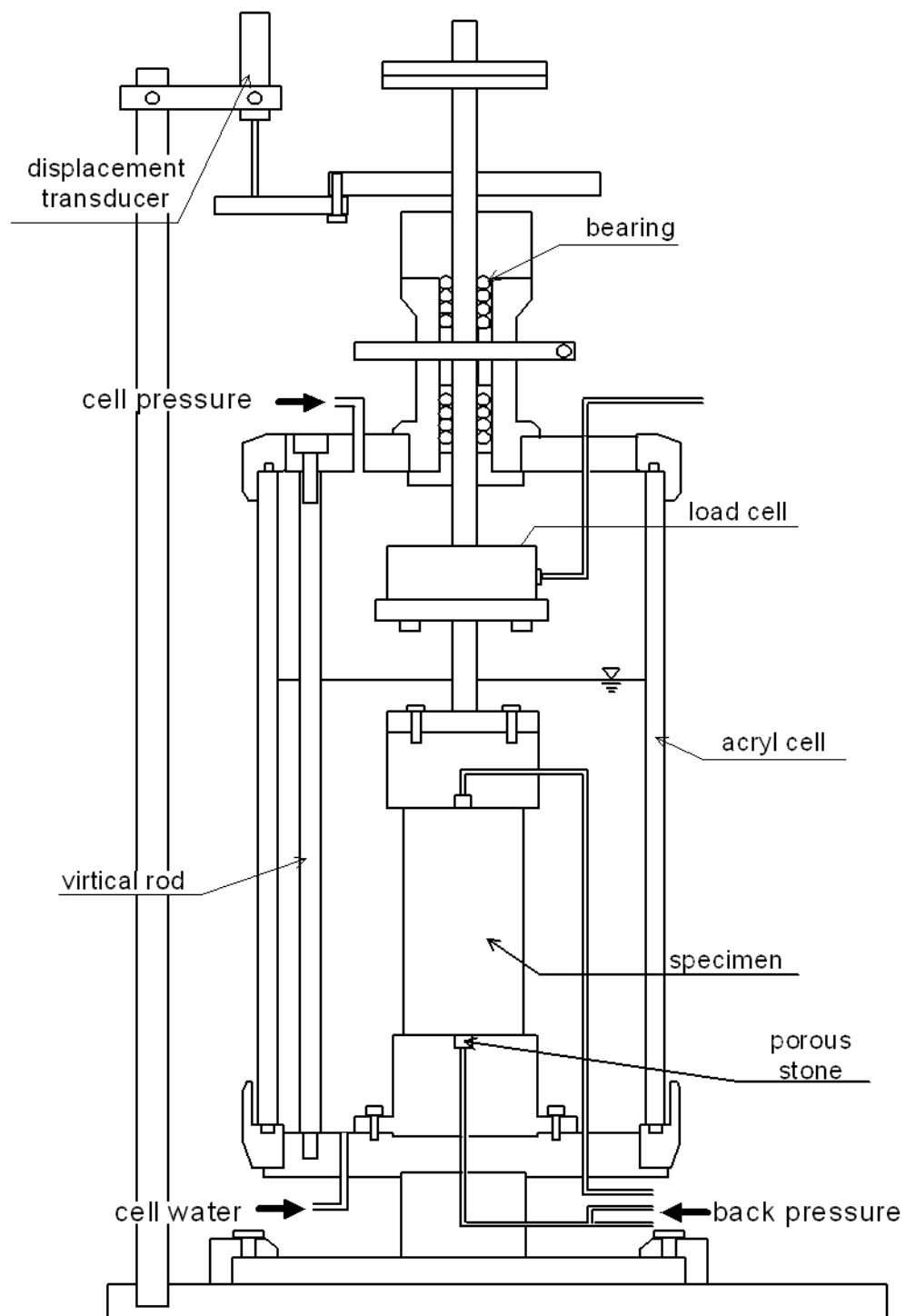


図3-1 三軸圧縮試験圧力室図

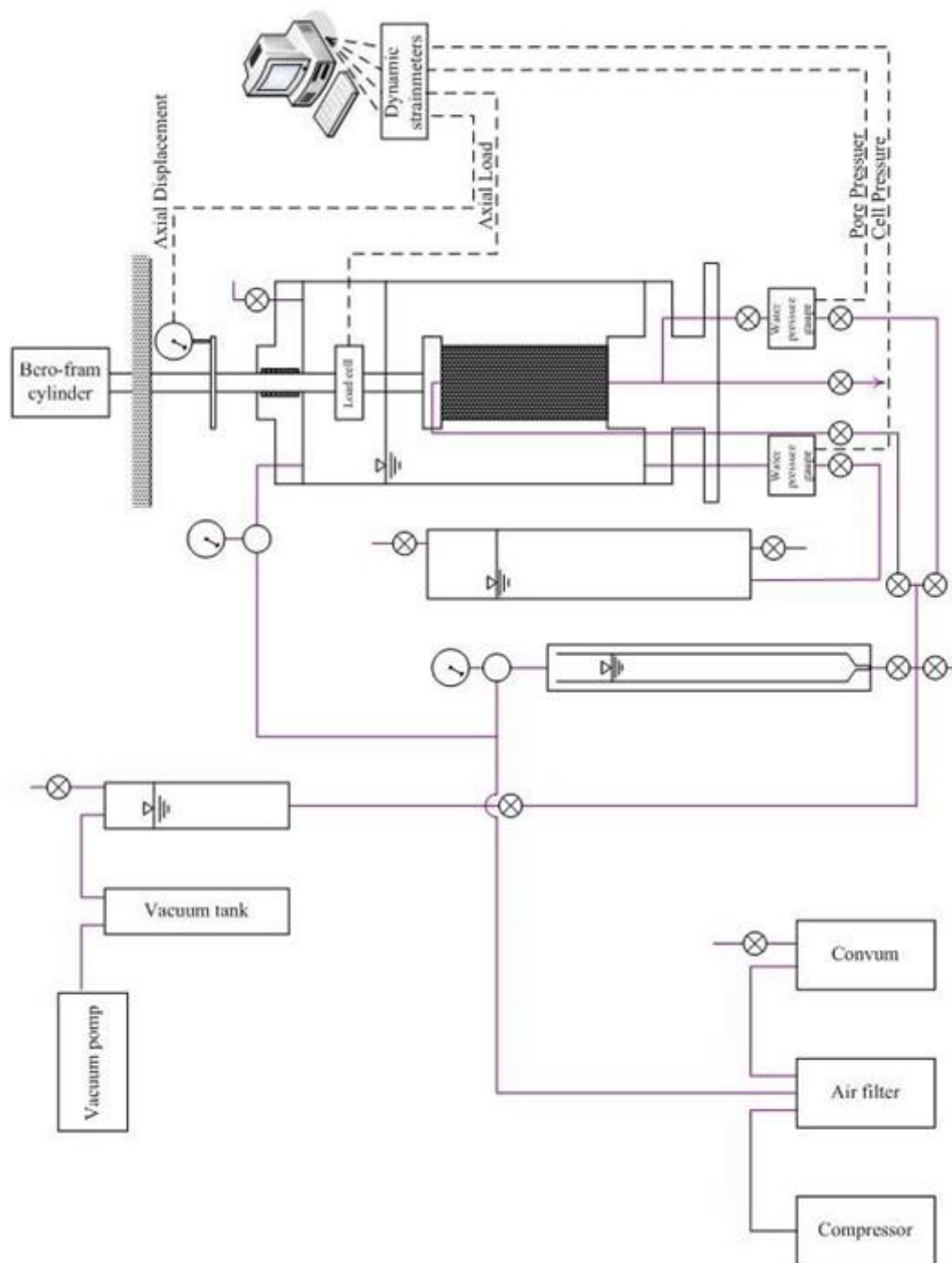


图3-2 三轴压缩试验配管图



写真3-6 三軸圧縮試験試験装置の全体

3.1.4 試験器具

供試体メンブレン

供試体外周に設置して、間隙圧とセル圧を分離させる目的で使用する。供試体を入れるメンブレンは直径 50mm、厚さ 0.2mm となる。ハサミ、直尺と赤ボールペンで作る。

ポーラスストーン

供試体に圧力をかける際に、試料が流出させないために、ペデスタルとキャップの穴にそれぞれ一個設置する

オーリング

メンブレンをキャップおよび台座に固定するためのゴム輪。メンブレンの上下端に 2 本ずつ使用する。

分度器

供試体を堆積したあと、キャップと供試体との密着性を高めるため、供試体の上端面に若干試料を加え、分度器で平らにする。

グリス

端面摩擦除去用メンブレン、キャップおよび台座に若干塗る。

金属へら

試験後供試体の一部分を金属へらで切り取り、湿潤質量を測る。

端面摩擦除去用メンブレン（ドーナツ状）

ペデスタル下端面およびキャップ部上端面との摩擦を除くために使用する。グリスを塗り、台座およびキャップに貼り付ける。供試体メンブレンと同じ厚さ 0.2mm のものを切り取って、外径 48mm、内径 48mm の円盤状（ドーナツ状）としたものを使用する。

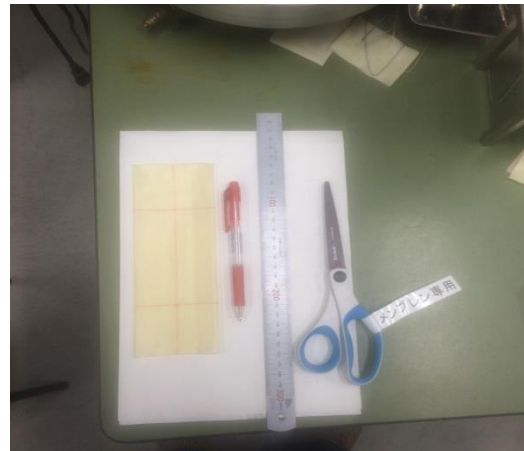


写真3-7（左から順に）
供試体メンブレン、赤ボールペン、直尺
とハサミ



写真3-8（左から順に）
ポーラスストーン、オーリング、
分度器、グリス、金属へら、
端面摩擦除去用メンブレン

円周尺（パイテープ）

供試体円周長さ測定時に使用する。

ノギス

供試体高さ測定時に使用する。

木槌

脱気水を作成時に、水槽壁を木槌で叩き、蒸留水の中の空気を排出する。

紙漏斗

砂の最小密度試験法で堆積するとき、試料を緩い状態でモールド内に堆積させるときに用いる。

金属バット

試料採取時および実験中の未使用砂の仮置き用、試験終了時の炉乾燥用（密度試験用とその他残り）の2枚使用する。

負圧発生装置

圧縮空気を用いて負圧を発生させる装置。

スパナ

試験装置を組み立てる時や、配管の連結時に使用する。

モールド

攪乱砂を堆積させるとき、供試体を正しく円柱状に固定するために使用する。



写真3-9（左から順に）
直径尺、ノギス、木槌、紙漏斗



写真3-10（左から順に）
金属バット、負圧発生装置、
スパナ、モールド

3.1.5 供試体の堆積方法

本研究では、供試体を堆積するとき、三つの方法を使った。締固めが行われないとき最小密度法を用いて、締固めるため、乾燥堆積法と湿潤堆積法を使用した。

A. 最小密度法

1. 紙漏斗の下端を台座の中心に合わせて、紙漏斗に適量の試料を入れる。
2. 試料の落下高さをゼロにするように、振動させないように丁寧に適度な速さで漏斗を持ち上げる。
3. 供試体の上端面に少し過剰堆積し、分度器で平らにする。

今回の試験では、豊浦砂の方はすべて最小密度法で試験を行った。藤沼砂の場合、試料を締固めない試験では最小密度法を用いた。



写真3－11 試料と紙漏斗

B. 乾燥堆積法

1. 適量の藤沼砂を平均に五つの部分に分け、小さなビーカーに入れる。
2. 一つのビーカー内の砂をモールドに入れた後、砂の表面をはかで平らにする。
3. モールドの表面に電動マッサージ機で振動させ、砂を締め固める。一層に四つの方向から適度の時間で振動させる（本研究では5秒または10秒にする）。
4. 手順2と3を四層で各層ごとに行う。
5. 最後の第五層では砂をモールドの上端面と水平するにするまで入れる。振動させる時、砂を外に飛ばさせないように丁寧に操作する。
6. 残る砂をモールドにもう少し入れ、過剰堆積する。分度器で平らにする。

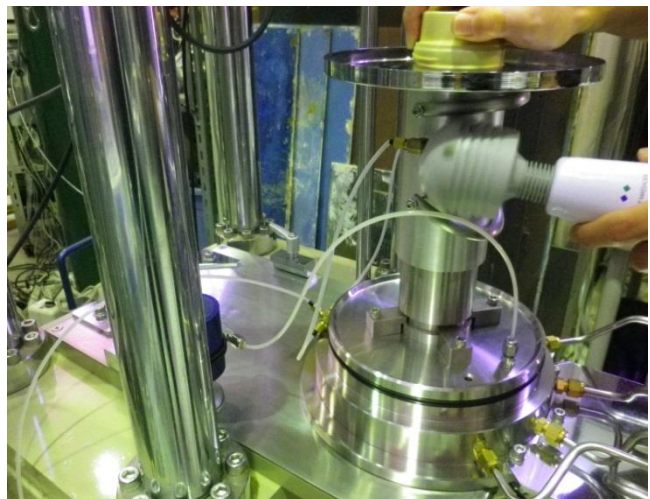


写真3－12 電動マッサージ機で締固め

C. 湿潤堆積法

1. 適量の藤沼砂を平均に五つの部分で分け、小さなビーカーに入れる。同じ質量の水（本研究で水の質量は砂の 5%または 10%である）を五つのビーカーにそれぞれ入れる。
2. 直ナイフで水と砂を十分に混合させる。
2. 一個のビーカー内の砂を型枠に入れた後、砂の表面をはかで平らにする。
3. 砂の表面に金属板を介して上から木槌で打って締め固める。
4. 手順 2 と 3 を五層で各層ごとに行う。最後の第五層では、砂を外に飛ばさせないように丁寧に操作する。
6. メンブレンを別の型枠の内部に固定する、型枠両端に折り返す。型枠内面とメンブレンを密着させる。密着を維持するため、空気穴を指でふさいでおく。
7. 供試体を取り出してこの型枠の中に移動する。一端は台座に載せ、メンブレンを型枠から外し、供試体下部と上部に折り返す。
8. 供試体下部の台座を取り出す。供試体を試験機のペダスタルに移し、下部の折り返していたメンブレンを試験機のペダスタルに被せ、オーリングで固定する。
9. ポーラスストーンを取り出し、試験機のキャップを供試体に密着させる。供試体上部の折り返していたメンブレンをキャップに被せ、オーリングで固定する。



写真3-13 メンブレンを型枠に被せる



写真3-14 メンブレンの設置

3.1.6 実験手順

1. 実験機の準備

- (1) 圧力コンプレッサーの電源を入れる。
- (2) 空気供給弁の元栓を開放する。

2. メンブレンの準備

- (1) 直径 50mm、厚さ 0.2mm のメンブレンを用意する。
- (2) 長さ 200mm に切り取り、各端から 50mm の位置に緯線、中軸部に経線をつける。
- (3) 実験直前にメンブレンを平らにして、幅の長さを測り、その値の 2 倍を円周とする。
- (4) 供試体摩擦除去用メンブレンは、外径 4.9 mm、内径 1.5mm のドーナツ状にしたものを用意しておく

3. 記録ソフトの準備

- (1) パソコンの電源を入れる。
- (2) 「trax win」を起動する。

4. 間隙水圧のキャリブレーション

- (1) 間隙水圧計のバルブを開放し、画面上の「Pore Pressure」を右クリックして間隙水圧計に作用している大気圧力とする base 値 0kPa を入力する。
- (2) ひずみ変換機の校正ボタンを+側にあげながら「off set」をクリックする。圧力計に 500kPa の圧力が作用したときのひずみ量がひずみ変換機の校正器のダイヤルに設定されているため、off set 値「500」と入力し、「OK」ボタンを押す。
- (3) 校正ボタンをもう一度押し、この時ちょうど 500kPa の圧力に相当する電圧が流れていることを確認する。
- (4) 確認が取れたら圧力開放バルブを閉める。

5. セル圧のキャリブレーション

- (1) セル圧計のバルブを開放し、画面上の「Pore Pressure」を右クリックしてセル圧計に作用している大気圧力とする base 値 0kPa を入力する。
- (2) ひずみ変換機の校正ボタンを+側にあげながら「off set」をクリックする。圧力計に 1000kPa の圧力が作用したときのひずみ量がひずみ変換機の校正器のダイヤルに設定されているため、off set 値「1000」と入力し、「OK」ボタンを押す。
- (3) 校正ボタンをもう一度押し、この時ちょうど 1000kPa の圧力に相当する電圧が流れていることを確認する。
- (4) 確認が取れたら圧力開放バルブを閉める。

6. モールドの取り付け

- (1) はかりを用いて砂の質量を測定する。水を加える場合、測定した後直ナイフを用いて水を土に均等に混合する。
- (2) ポーラスストーンをペデスタルとキャップの穴に設置する。
- (3) 端面摩擦除去用メンブレンにグリスを塗り、間に空気が入らないようにペデスタルとキャップに貼り付ける。
- (4) 供試体用メンブレンをペデスタルに設置し、オーリングで固定する。メンブレンの中軸経線を手前に向き、緯線をペデスタルに合わせる。
- (5) メンブレンを破らないようにモールドを取り付け、止め金具で固定する。メンブレン上端をモールド外側に折り返す。
- (6) モールドとメンブレンの間に負圧発生装置を用いて負圧で引き、密着させる。モールドの中に見てメンブレンにはねじり、たるみがないことを確認する。

7. 試料の堆積

- (1) 砂を最小密度法で注入する。
- (2) キャップと供試体との密着性を高めるため、供試体の上端面に若干試料を加え、分度器で平らにする。

8. キャップの固定

- (1) キャップと供試体の中心点を合わせてキャップを被せる。
- (2) モールドの上部に折り返したメンブレンをキャップに被せ、二重オーリングで固定する。ここで、供試体が崩れないようにやさしく操作する。
- (3) 供試体下部の間隙圧ラインに負圧を付け、 -10kPa まで引き、供試体を自立させてからモールドを外す。
- (4) 供試体が崩れないため、すぐに下部の間隙圧ラインを -20kPa まで引く。

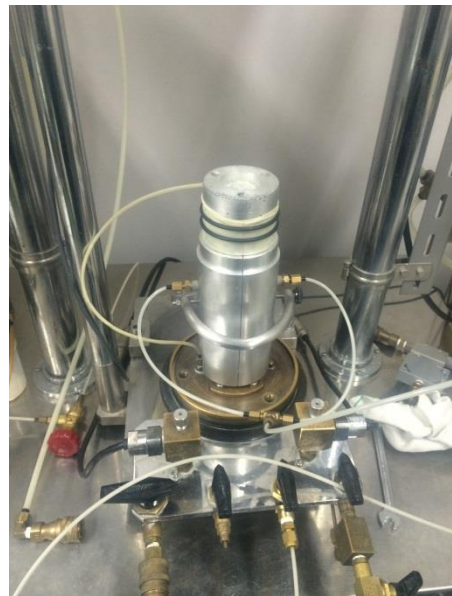


写真3-15

キャップを固定した後の供試体

9. 供試体の寸法

- (1) 供試体の高さはノギスで三か所以上ではかる。キャップとペデスタルを含めた高さ(105mm)を測り、それらを引くのは供試体の高さとする。平均高さを求める。

(2) 供試体の直径を直径尺測る。供試体上部、中部、下部の3回測り、平均直径を算出できる。さらにメンブレンの厚さの2倍(0.4mm)を引き、供試体の直径とする。

(3) 残る砂の質量を測り、全部の質量から引いては供試体の初期乾燥質量となる。

(4) 「trax win」の「specimen/initial」に直径(Diameter)、高さ(Height)、乾燥質量(Dry Weight)、メンブレンの円周(Circum-ference) (Modulus : 280kPa/mm)、土粒子密度(Specific gravity)、キャップ等の質量(Weight of rod and cap : 368g)を入力する。



写真3-15 自立した供試体

10. セル室の設置とロードセルのキャリブレーション

(1) 試験機で三本の金属棒をペDESTALに組み立てる、ロードセルを金属棒の上に取り付ける。

(2) ロードセルの信号コードとひずみ変換機を接続する、ロードセルのキャリブレーションを行う。ひずみ変換機の「ATT」ボタムを0から1/5まで回す、画面上の「Axial Load」を右クリックしてロードセルに作用している圧力とするbase値0Nを入力する。

(2) ひずみ変換機の校正ボタンを+側にあげながら「off set」をクリックする。圧力計に5000Nの圧力が作用したときのひずみ量がひずみ変換機の校正器のダイヤルに設定されているため、off set値「5000」と入力し、「OK」ボタンを押す。

(3) 校正ボタンをもう一度押し、この時ちょうど5000Nの圧力に相当する電圧が流れていることを確認する。

(4) ロードセルと供試体に組み合わせた後、信号コードを一旦取り外す。

(5) セル室をロードセルの上部から移動、ペDESTALまでに固定する。

(6) 信号コードを再び接続し直す。

11. セル室と試験機の接続と軸変位のキャリブレーション

(1) セル室を載荷台の中心に移動する、鉛直載荷装置の手動ハンドルを回して軸の上部を固定する。セルのペDESTALを載荷台と固定する。

(2) 軸変位のキャリブレーションを行う。「Axial Displacement」を右クリックして、baseを0mmに設定する。

(3) ひずみ変換機の校正ボタンを+側にあげながら「off set」をクリックし、50mmを入力

する。再びボタンを押し、50mm になることを確認する。

(4) 変位計の軸を押しながらロードセルの軸に付ける金属の片持梁を垂直的に載せる。

(5) もう一度「Axial Displacement」を右クリックして、「Zero Set」を押す。

12. セル室に水を注入すると圧力変換

(1) セル室の上方のバルブを開け、大気解放状態にする。

(2) セル室とセル水槽接続する供水バルブを開ける。水槽に空気圧を加え、水を供水ラインから押し込む。

(3) 供試体のキャップまで水の中に浸したら供水バルブとセル室上部の大気圧解放弁両方ともに閉じる。

(4) 負圧を解除しながらセル圧をあげる。供試体の有効等方圧を 20kPa を維持して、負圧を 0kPa、セル圧を 20kPa にする。



写真3-16 セル水の注入

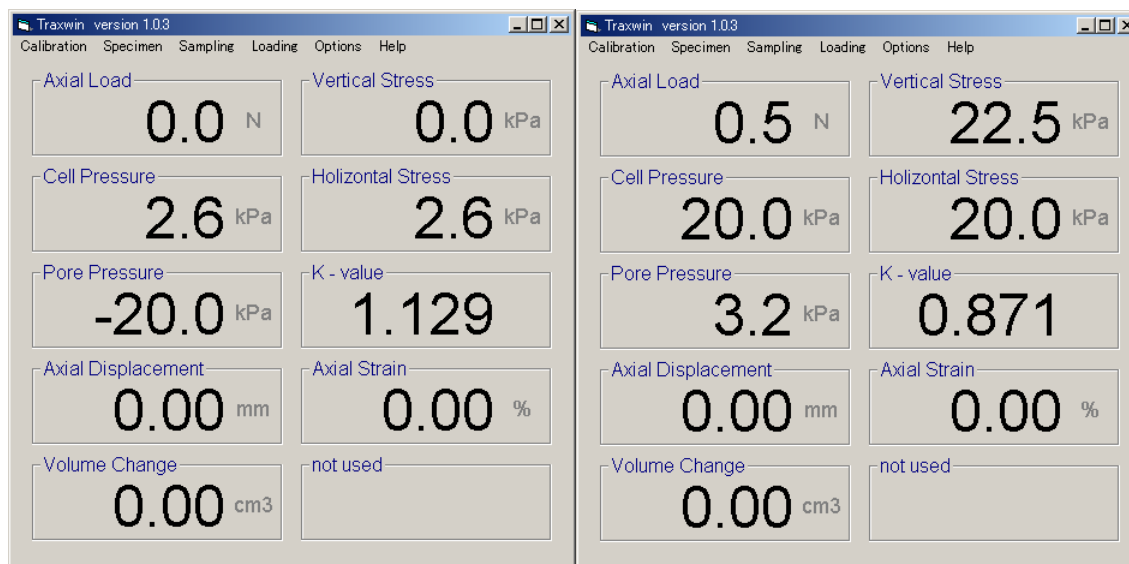


図3-3 圧力変換

13. 供試体の空気置換

- (1) 二酸化炭素の元栓を開け、供試体内部の空気を二酸化炭素に置換する。供給速度を 1 秒間に気泡 2-3 個程度とする。
- (2) 供試体上部ラインを開放し、管を接続して先端をバケツに浸す。下部ラインより二酸化炭素を供給する。供給時間は 30 分ぐらいとする。

14. 脱気水の作成と供給

- (1) 蒸留水を蒸留水タンク内に用意する。
- (2) 真空ポンプを起動し、蒸留水の中の空気を脱気する。脱気を充分させるように蒸留水タンクを木槌で叩き、30 分程度脱気する。終了後、タンクと真空ポンプを遮断し、電源を切る。
- (3) 蒸留水タンクを供試体下部ラインに接続する。供試体上部ラインから出る気泡が 1 秒間 1 個程度になるように下部ラインのバルブを少しずつ開けて調節する。



写真3-17 脱気水の供給

- (4) 上部ラインから蒸留水が出ると下部ラインのバルブを全開する。砂の種類より水を流して飽和させるまでの時間が違います。今回の豊浦砂の場合、30 分ほど十分に飽和させる。

15. ビュレットの調節

- (1) ビュレット内を脱気水で満たし、空気を排出する。給水弁を閉じながら、排水弁を開け、目盛を低い値まで水位を下げる。
- (2) ビュレット下部を供試体上部ラインに接続し、上部と空気圧ラインを接続させる。

16. 飽和度 B 値の測定

- (1) 供試体の上部下部ラインのバルブを閉じ、非排水状態にする。セル圧を 20kPa になるように調節する。この時点の間隙水压を記録する。
- (2) セル圧を 70kPa まで上げ、間隙水压を記録する。セル圧の 50kPa の増分に対し、間隙水压の増分に割れる結果は飽和度である。間隙水压も 50kPa 増分する場合飽和度 B 値は 1.000 となる。信頼性を高い試験データを算出するため、飽和度を 0.950 以上になる必要がある。
- (3) 供試体と間隙水压計を遮断し、有効等方圧を 20kPa にするためビュレット内の圧力を 50kPa に上げ、排水状態にする。
- (4) B 値が 0.95 以下の場合、10 分ほど放置し、セル圧を 50kPa 増加し、120kPa までに上げる、B 値を計算する。また 0.95 を下回った場合、同様の手順で測定する。

17. 圧密

- (1) 「trax win/before consolidation」の「Axial」にその時点の軸変位「Axial Displacement」のデータを記入する。
- (2) ビュレットの初期目盛を記録する。
- (3) 供試体を排水状態にする。本研究では初期有効拘束圧が 100kPa の条件を基づいて圧密を行う。つまり、セル圧と間隙水圧の差は 100kPa とする。セル圧、軸圧を同時に制御し、初期有効拘束圧となる所定の値までに圧力を増大させる。
- (4) 圧密時間は 30 分から 2 時間ほどとなる。圧密中軸圧を所定の値を維持するように、ハンドルで調整する。供試体を一旦非排水状態にした際間隙水圧が上昇しなかったら、圧密が終了する。
- (5) 圧密後、ビュレットの目盛を読み、供試体の体積変化量を算出する。このデータとその時点「Axial Displacement」のデータを「trax win/after consolidation」に記録する。

18. 載荷

- (1) 「trax win/sampling」をクリックし、保存先を設定する。
- (2) 供試体を非排水状態にしてコントローラーの電源を起動し、載荷を行う。載荷過程での間隙水圧、軸力、軸変位などのデータはパソコンに自動的に保存される。軸変位は 30～40mm までに載荷をする。
- (3) 載荷が完了すれば「Data sampling」の「stop」をクリックし、データを保存する。コントローラーの電源を切る。

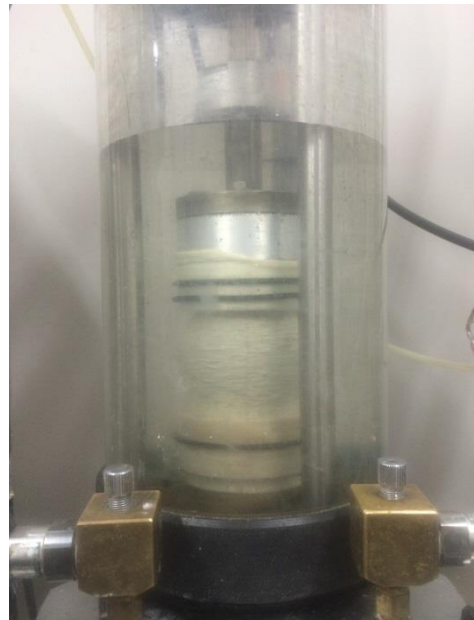


写真3－18 載荷中の供試体

19. 間隙水圧の排出と供試体の取り出し

- (1) ビュレットを大気解放し、初期目盛を読み取る。供試体を排水状態にする。
- (2) セル圧を 20～50kPa までに下げ、ロードセルの軸を繰り返して押し出し、供試体内部残る間隙水を排出する。再びセル圧を 200kPa 以上に高める、間隙水をなるべく多く排出する。

- (3) 間隙水を排出した後、供試体を非排水状態にしてビュレットの目盛を読み、体積変化量を計算する。
- (4) セル水を排出し、セル室とロードセルを解体させる。
- (5) 供試体のメンブレン表面の水を拭き、オーリングとキャップを外す。供試体を慎重にペデスタルから取り出す、金属バットに移動する。

20. 含水比の測定

- (1) 供試体の端面を直ナイフで切り取り、中心部分をもう一枚の金属バットに載せ、バットを含めた質量を測り、乾燥炉に入れる。
- (2) 供試体のメンブレン、キャップ、ペデスタルと端面摩擦除去用メンブレンについた砂をなるべく飛ばさないように回収し、乾燥炉に入れる。
- (3) 試料を 24 時間乾燥させ、全体の乾燥質量と含水比を算出する。
- (4) 測定したデータをパソコンで保存したファイルの中に書き直す。



写真3-19 載荷後の供試体

21. 試験機材の片付け

- (1) エアガン、タオルで実験装置をきれいに掃除する。
- (2) 空気供給弁の元栓を閉じ、圧力コンプレッサーの電源を切る。
- (3) メンブレンの表面には穴があるかどうかチェックする。片端を縛り、メンブレンに水を入れる。水が漏れる箇所を標記し、タオルで拭いた後接着剤で補修を行う。

3.1.7 供試体の体積計算方法

三軸圧縮試験中、供試体の密度を正しく把握するためには、供試体の寸法や変化量を正確に計測して供試体の体積を計算する必要があるが、特に供試体を水で飽和してから体積変化計（ビューレット）を設置する以前の段階ではその体積変化量を直接に測定できないため、供試体体積を完全に正しく計算することが難しく、密度誤差が生じやすい。図3-4に飽和するまでの供試体の寸法の変化を示している。最初に供試体を作成してキャップを設置してから供試体を自立させ、ロードセルを載せる前に、供試体（キャップとベDESTALを含む）の高さ H_0 と直径 D_0 をノギスおよびπテープで直接測定する。キャップとベDESTALの高さは試験中に変化しないので、試料の高さは H_0 からキャップとベDESTALの高さを引いたものとなる。ロードセルを載せて載荷軸を連結する時点で、供試体の上部にロードセルや載荷軸の重力に作用したりするために高さが ΔH_1 減少し、 $H_0 - \Delta H_1$ となる。しかし載荷軸を連結するまでは高さ変化計を設置できないため、 ΔH_1 は測定できない。軸方向に変形すると供試体水平方向にも変形が発生すると考えられ、直径が ΔD_1 変化し $D_0 - \Delta D_1$ となるが、 ΔD_1 も測定できない。（厳密に言うと、供試体は「樽型」のように変形するため、 ΔD_1 は高さによって異なると考えられる。）そのあと、セルを被せ、セル水を注入したうえで、供試体の下から上へ通水して供試体を飽和させる。この飽和前後の高さと直径の変化量をそれぞれ ΔH_2 、 ΔD_2 と表示すると、飽和後の供試体の高さが $H_0 - \Delta H_1 - \Delta H_2$ になり、直径が $D_0 - \Delta D_1 - \Delta D_2$ になる。すでに軸変位計を設置しているので ΔH_2 は計測できるが、 ΔD_2 は測定できない。飽和後には体積変化計（ビューレット）を供試体に接続して直接に体積変化量を測定できるので、その後の体積変化については問題は生じない。

要するに、 ΔH_1 、 ΔD_1 、 ΔD_2 が測定できないことが問題であるが、このことによって生じる誤差を減少させるために、従来は3つの方法（方法1～3）で供試体の体積変化を計算してきた。今回、より信頼性が高い方法を検討するために、新たな方法（方法4）を試みた。これらの方法1～4について以下に説明する。

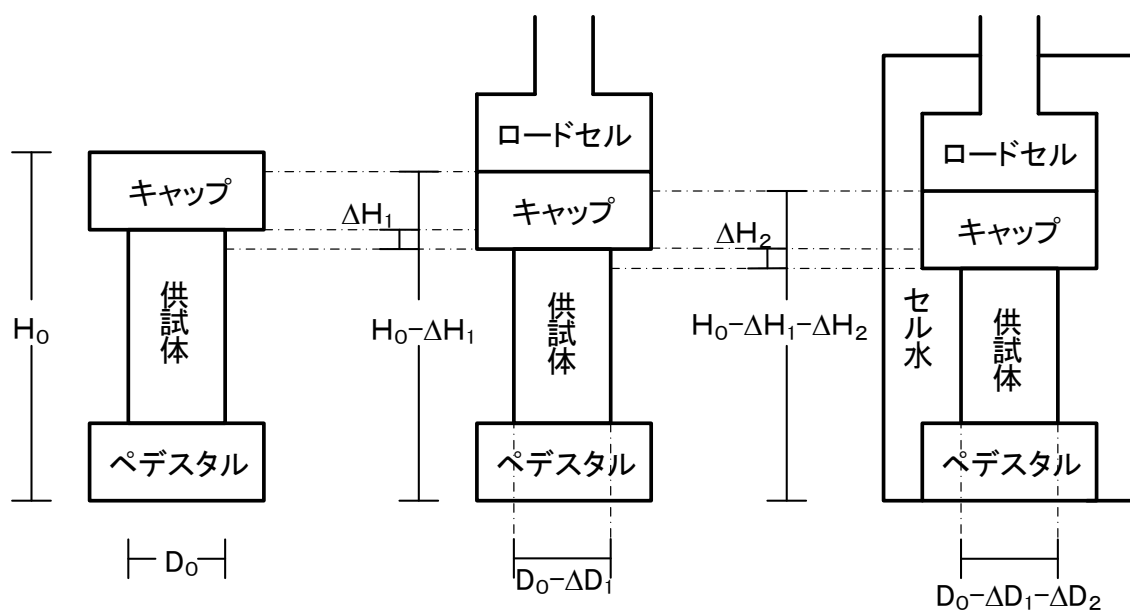


図3-4 飽和させる以前の供試体の変形状態

1. 前進一次元変形計算（方法1）

前進一次元計算は、変位計設置後の飽和過程での実測された軸圧縮 ΔH_2 のみを考慮した計算方法である。つまり、 ΔH_1 、 ΔD_1 、 ΔD_2 は0であると仮定する。飽和させた後の高さ H 、直径 D は

$$\begin{cases} H = H_0 - \Delta H_2 \\ D = D_0 \end{cases}$$

のように計算される。

2. 前進等方変形計算（方法2）

前進等方計算は、飽和過程での軸圧縮 ΔH_2 を考慮した上で、軸方向ひずみと同じ大きさの供試体水平方向ひずみを仮定する計算方法である。飽和させた後の高さを H 、直径を D とし、飽和過程以前での垂直ひずみを ε_v 、水平ひずみを ε_d とすると

$$\begin{cases} H = H_0 - \Delta H_1 - \Delta H_2 \\ D = D_0 - \Delta D_1 - \Delta D_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_v = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{H_0} \\ \varepsilon_d = \frac{\Delta D_1 + \Delta D_2}{D_0} \\ \varepsilon_v = \varepsilon_d \end{cases} \quad (2)$$

ここで ΔH_1 を 0 と仮定し、②式から $\Delta D_1 + \Delta D_2$ を求めて①式に代入すると、飽和させた後の高さ H と直径 D を算出できる。

$$\begin{cases} H = H_0 - \Delta H_2 \\ D = D_0 - \frac{D_0 \cdot \Delta H_2}{H_0} \end{cases}$$

3. 試験後の測定値から逆計算（方法 3）

逆計算は、せん断試験後に試料の乾燥質量 $m_s(g)$ と含水比 $\omega(\%)$ を測定し、別途測定した土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$ も用いてせん断時の飽和した供試体の体積を計算する方法である。緩い砂質土の含水比を正確に測定するために、供試体を装置から取り出す前に間隙水をできるだけ絞り出すが、そのとき絞り出した水の体積 $V_w(cm^3)$ もビュレットで測定する。土粒子の体積は m_s/ρ_s 、乾燥させる前の水の体積は $\omega \cdot m_s/100$ なので、せん断載荷後の供試体体積 V は次のように計算できる。

$$V = V_w + \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{\omega \cdot m_s}{100}$$

この方法で不確実な仮定を使わずに密度が求まる。しかしながら、試験後の供試体に水分が逆流したり、間隙水の排水が十分でないといった場合には、砂質土、特に細粒分を多く含む緩い砂の三軸供試体の含水比を確実に測定することは難しく、現実とはかけ離れた体積量が算出されてしまう。

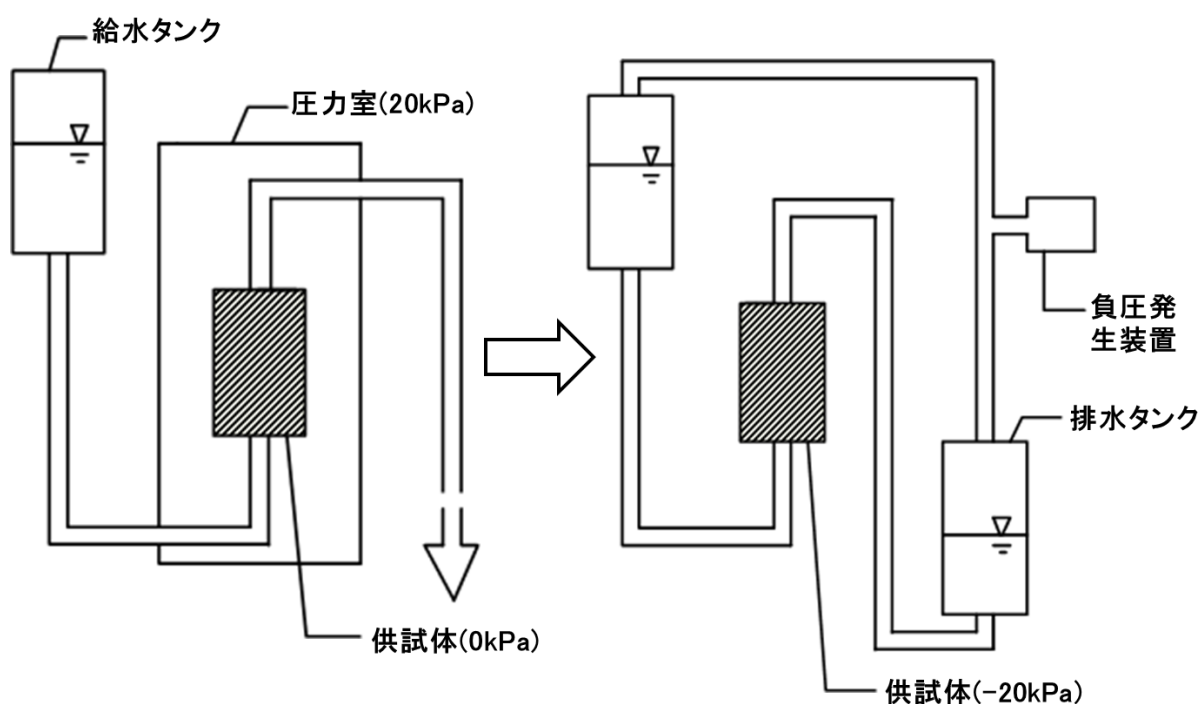
4. 二回体積を測定（方法 4）

藤沼砂のように細粒分が多く含む砂は試験中の飽和時の体積変化が大きいこともあって、以上 3 通りの方法で算定した供試体の密度は差が大きく、信頼性に問題がある。この問題

を解決するためには、供試体を飽和させた後で体積を正しく測定することが重要である。そのために、新しい方法（方法4）を用いて飽和させた後で直接に試料の直径 D と高さ H を測る。この方法の詳細を次に説明する。

3.1.8 方法4の実験方法

1. やり方1



実験装置を改良し、供試体上側に接続する排水用のタンクを設置することにより、脱気水に負圧を作用させながら供試体に通水ができるようにする。圧力室をつけないまま供試体を飽和させるので、飽和後に供試体の直径と高さをもう一回はかる際にセルを脱着させる必要がない。概略図は図3-5の右側に示す。

やり方1では飽和させる時空気が入りやすい(写真3-20)。また、細粒分が多い場合は、飽和する時間が長くなる可能性がある。飽和度を95%以上になることが難しく、データの信頼性が低くなる。そのため、この方法は断念し、次のやり方2を試みた。



写真3-20 やり方1で供試体内部に空気が入った状況

2. やり方2

- (1) 供試体を自立させた後、ロードセルの軸と供試体のキャップを連結しない状態でセルを被せる。
- (2) 空気置換と脱気水の供給は従来と同じように供試体を飽和させる。
- (3) 供試体をビュレットに接続し、飽和度B値を測定する。
- (4) セル圧を20kPaまでに下げる。
- (5) 供試体をもう一度自立させるため、供試体内部を-20kPaまでに下げる必要となる。負圧発生装置とビュレットに繋げ、供試体に負圧力を提供する。セル圧を0kPaに低下させるのと同時に、間隙水圧を-20kPaに変換する。
- (6) ロードセルと圧力室を取り除き、直径と高さを測定する。
- (7) ロードセルを取り付け、キャリブレーションを行う。
- (8) セルを被せ、供試体の飽和度をもう一回測定する。

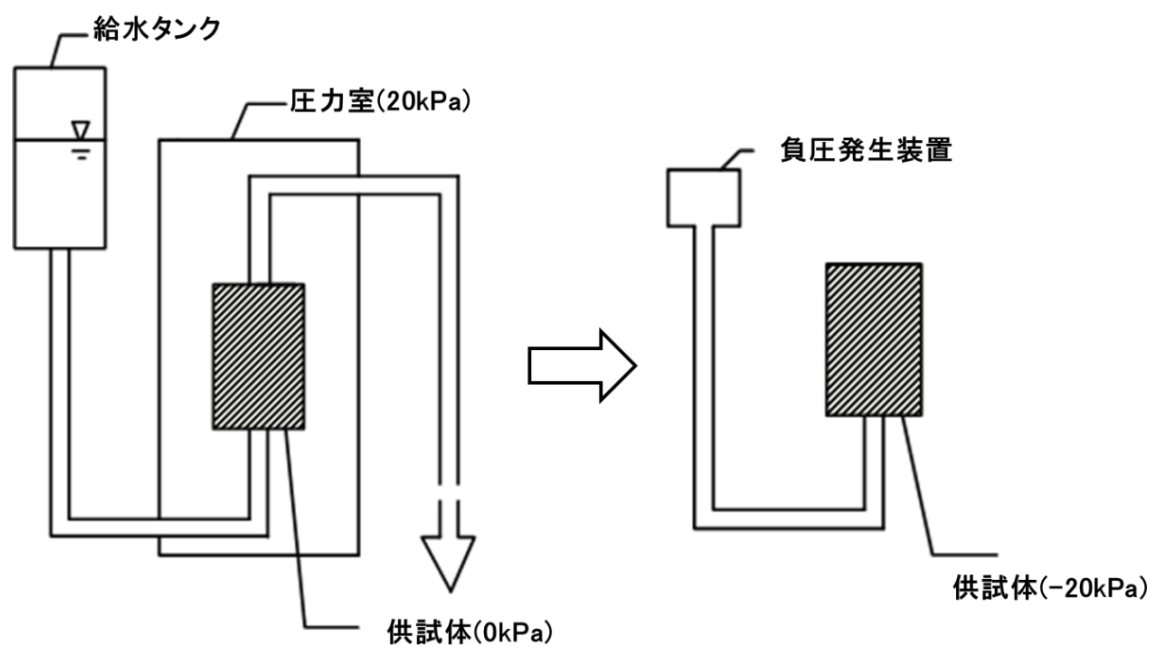


図3-6 方法4(やり方2)の実験過程の概略



写真3-21 方法4で飽和させた供試体

3.1.9 実験結果と考察

1. 既往研究の試験結果

既往研究の試験結果について、非常に緩い部分のデータが不足と考えられます。三つの方法で計算した結果、同じ定常状態強度の前提で方法 1 と方法 2 より、方法 3 の乾燥密度が大きい結果と見える。

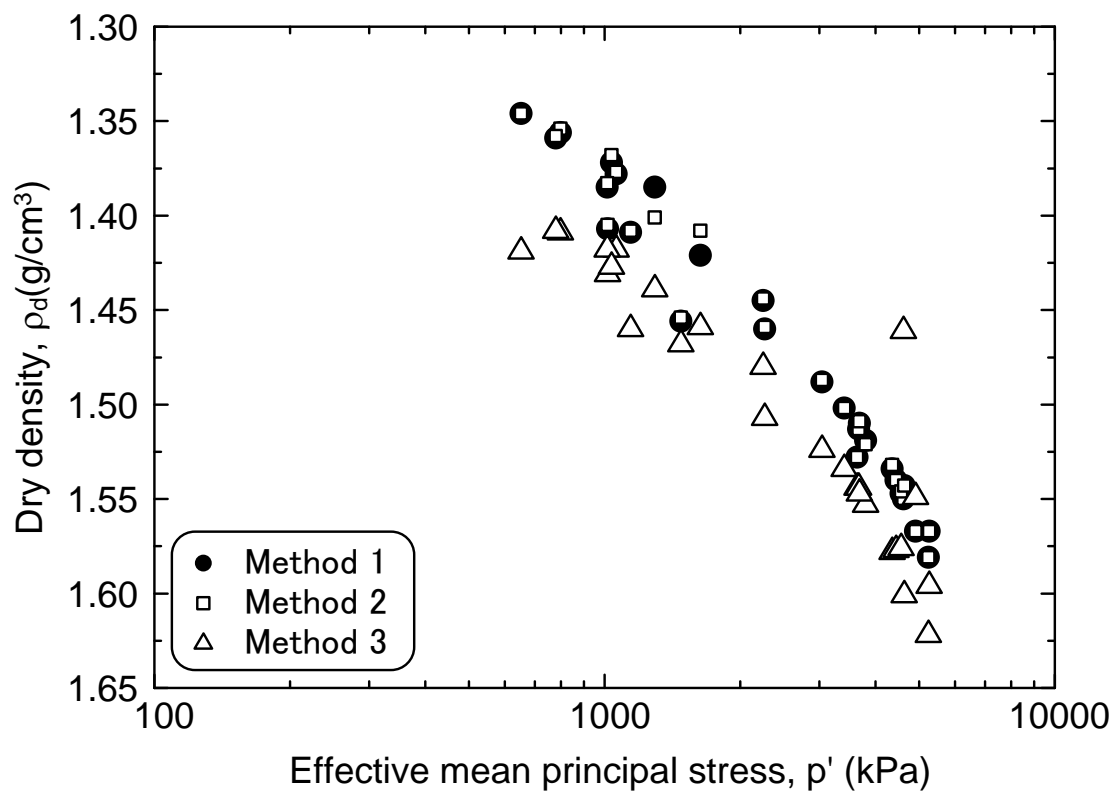


図3-7 既往研究で得られた豊浦砂の乾燥密度と定常状態強度の相関

2. 試験結果

本研究では、豊浦砂を用いて 10 回試験を行った。飽和度が低下である、あるいはメンブレンに穴が有するなど様々な原因で、test005~008 の試験結果の信頼性が低いと思われる。ほかの六回の試験条件と結果を表 3－1 に示している。図 3－8、図 3－9、図 3－10 に今回の試験結果と既往研究の関係を示す。既往研究と同じように、方法 1 と方法 2 より方法 3 の乾燥密度が大きいと見える。

方法 4 を用いて豊浦砂で試験を一回行った。試験結果は次の表に示している。方法 4 と方法 1，2 の乾燥密度結果はほぼ一致している、方法 3 が大きい結果となる。

表 3－1 豊浦砂の試験結果

Test No.	Dry density, ρ_d (g/cm ³)				Initial state, p'_{ini} (kPa)	Steady-state, p' (kPa)	B value	Void ratio, e
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4				
test 001	1.382	1.383	1.394		100	365.9	0.994	0.902
test 002	1.348	1.354	1.378		100	142.6	0.980	0.923
test 003	1.365	1.360	1.392		100	345.3	0.988	0.904
test 004	1.350	1.349	1.386		100	301.4	0.998	0.913
test 009	1.326	1.332	1.388		100	277.7	0.992	0.909
test 010	1.381	1.387	1.412	1.378	100	477.1	0.958	0.877

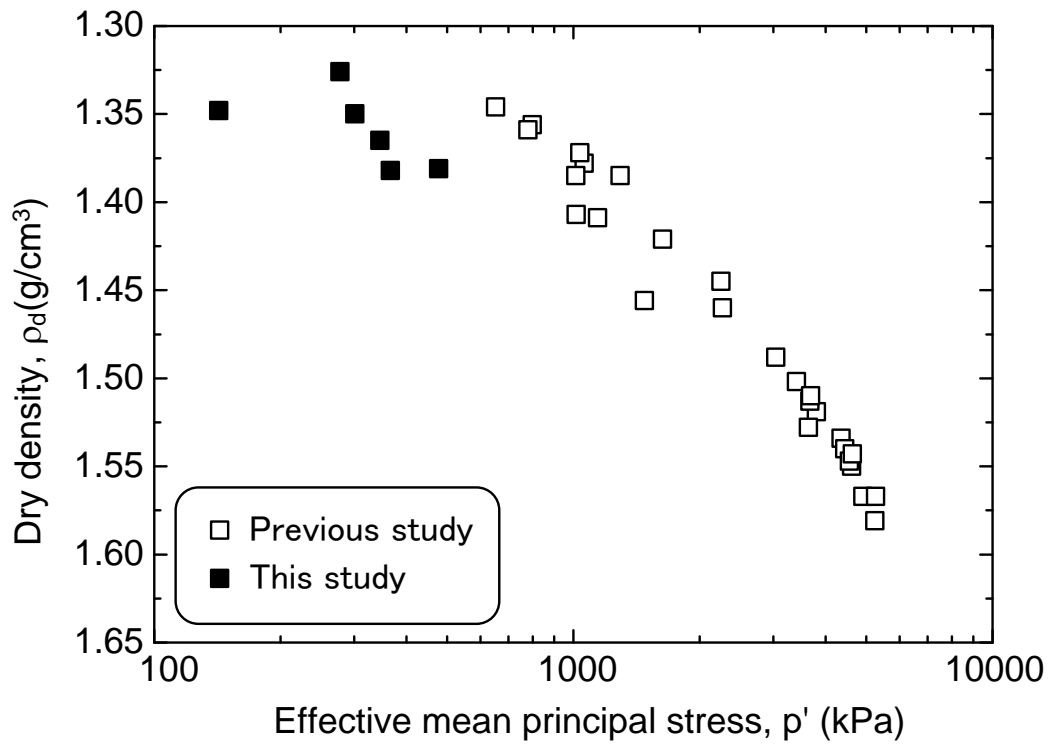


図3-8 方法1で乾燥密度と定常状態との相関

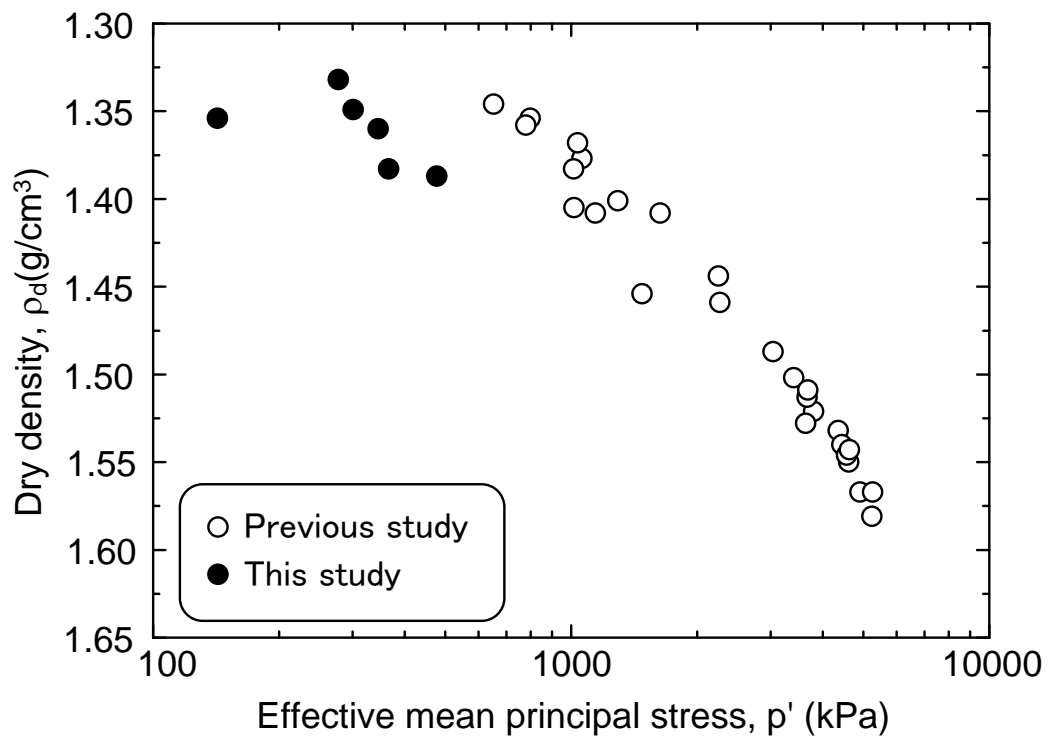


図3-9 方法2で乾燥密度と定常状態との相関

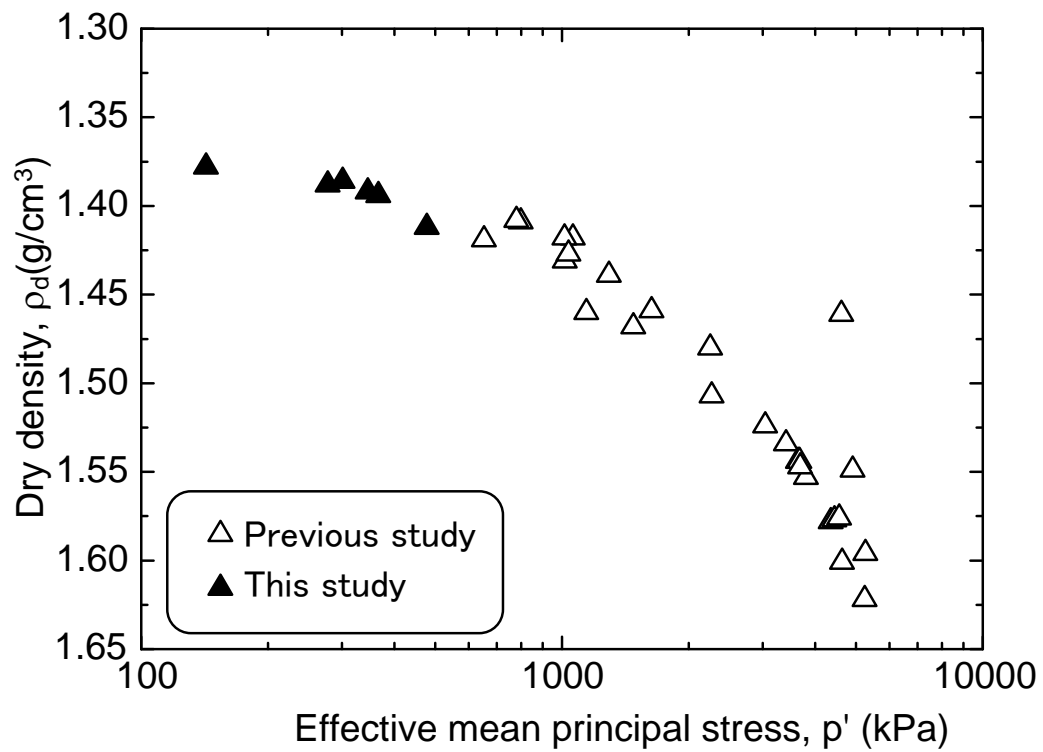


図3-10 方法3で乾燥密度と定常状態との相関

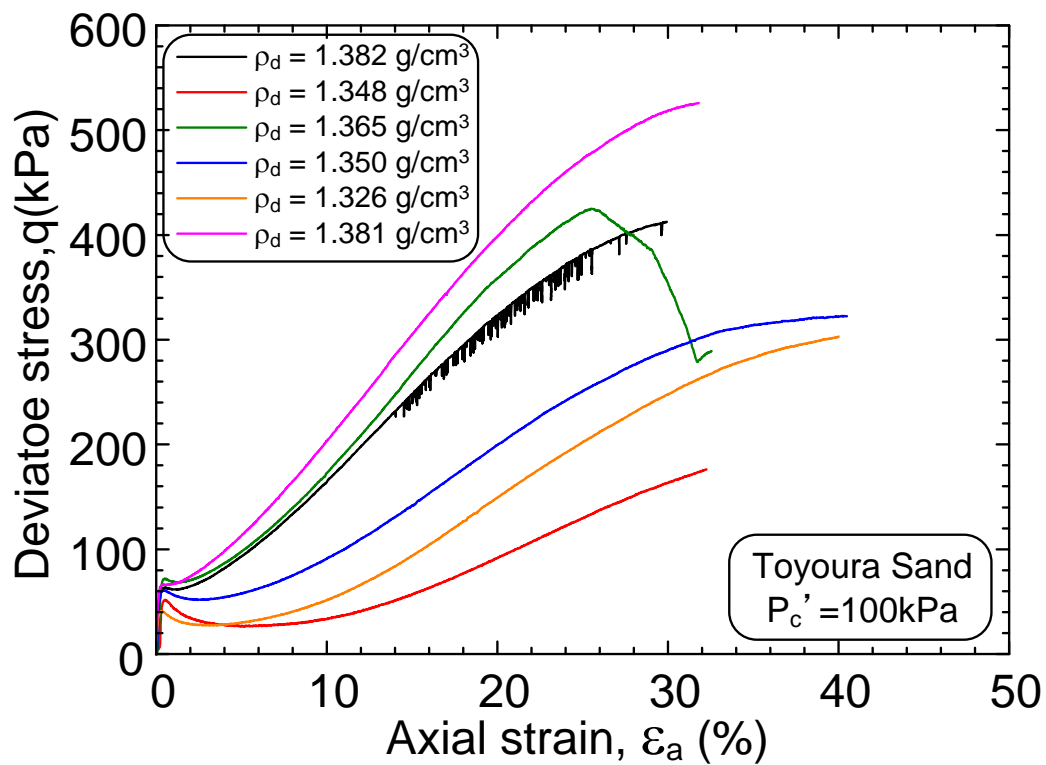


図3-11 豊浦砂のの非排水三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線

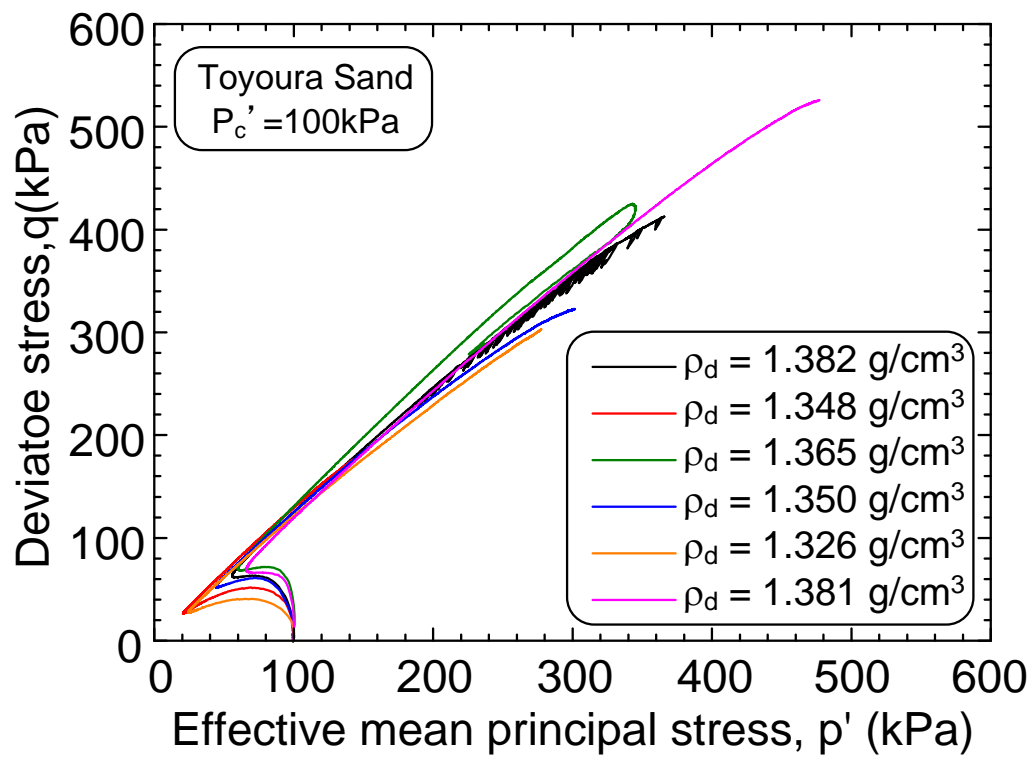


図3-12 豊浦砂の非排水三軸圧縮試験で得られた応力経路

3.2 藤沼砂の非排水三軸圧縮試験

3.2.1 試料の調製と準備

日本工業規格「土質試験のための乱した土の試料調製方法」より、試験に用いる乱した試料を必要量取り出すときは、粒径のかたよりや不均一性を防ぐために、原則として四分法を用いる。

1. 調製器具

- (1) はかり はかりは測定質量の約 0.1%まではかることができるもの
- (2) ふるい ふるいを用いて大きい（本研究で直径が 0.85mm 以上）砂粒子を除く
- (3) ときほぐし器具 乳鉢及び乳棒、または土粒子を破損せずに土の塊をときぼくすのに適したもの。
- (4) 恒温乾燥炉
- (6) ゴムへら、バット、はけなど



写真3-22（時計回りの順に）

ゴムへら、はけ、バット、ふるい、ときほぐし器具

2. 試料の分取方法

四分法の手順を図3-13に示す。

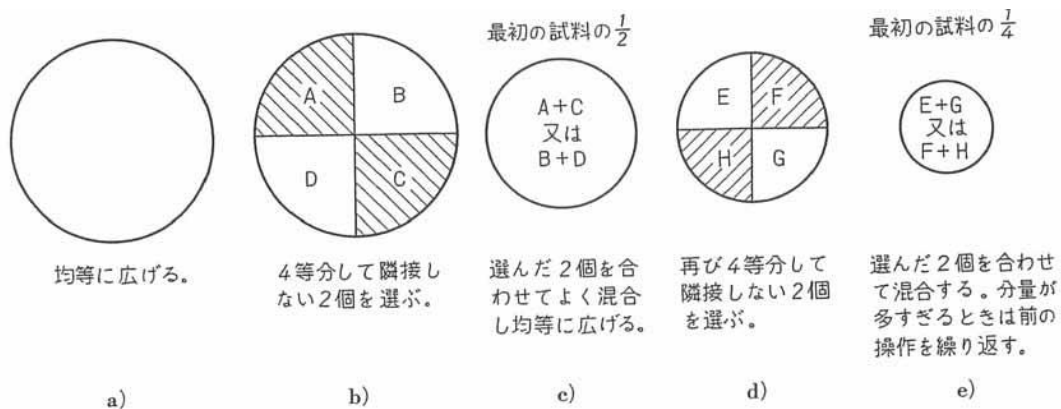


図3-13 四分法の手順(地盤工学会「地盤材料試験の方法と解説」より引用)

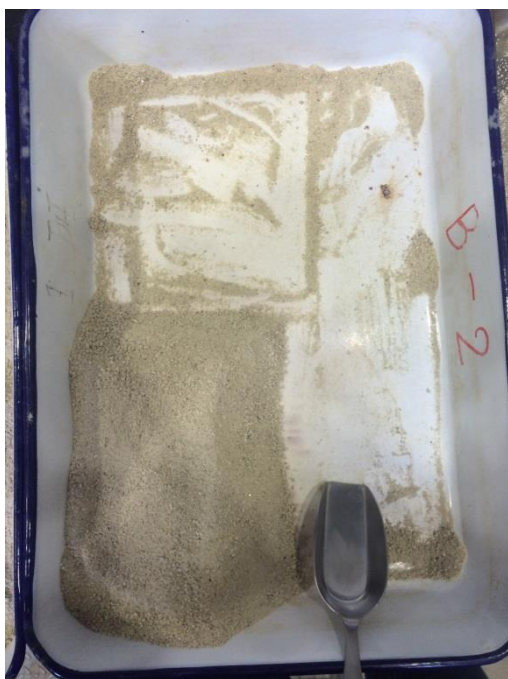


写真3-23 四分法の状況

3.2.2 実験結果と考察

1. 既往研究の実験結果

藤沼砂の既往研究の試験結果（経岩、2014）を図3－14に示している。これは、砂の乾燥密度と定常状態での有効主応力の関係をプロットしたものである。定常状態での有効主応力が 100kPa 以上である三つのグループのデータは不攪乱試料で実験を行った結果である。既往の研究では密度評価は方法1～3だけを用いており、ばらつきが大きい。また供試体の飽和度が十分に確保されていたかにも若干の疑問がある。

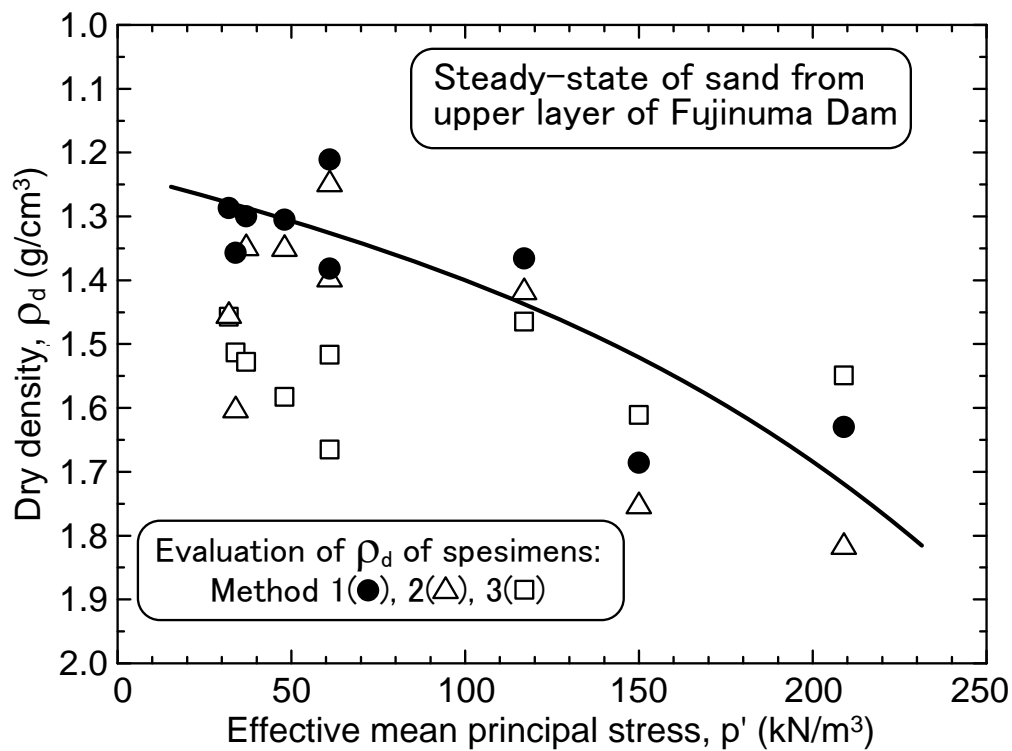


図3－14 既往研究で得られた藤沼砂の乾燥密度と定常状態強度の相関

2. 実験結果

定常状態における藤沼砂の幅広い乾燥密度と幅広い拘束圧との相関を表現するため、密度差が大きな供試体を作成する必要がある。そこで、土を締め固めて供試体を作るために、本研究では 3.1.5 での乾燥堆積法と湿潤堆積法を使用した。乾燥堆積法では振動締め固め時にメンブレンに穴をつけやすい。堆積方法の違いは定常状態に影響はほぼないと思われるので、密度が特に大きな供試体には湿潤堆積法を試みた。(Test020 の供試体は湿潤堆積法より作成した。)

飽和過程について、通常の方法では、供試体の下から上に通水することによって空気を排出し、供試体を飽和させる。ところが、砂が密になる(湿潤堆積法で締め固めた砂)と透水性が低下し、通水が困難になるため飽和度があがりにくい、数日がかかっても通水量はまだ足りない。そこで、新しい方法「二重負圧法」を試みた。二重負圧法は供試体内部を真空にすることで、空気を排出する方法である。この方法は粘土のように透水性が低い土に適する。

二重負圧法の実験手順

- (1) ビュレット中の水を排出し、供試体上下部ラインをビュレットに接続し、間隙水圧を -20kPa まで下げ、自立させる。
- (2) 圧力室を被せ、負圧を解除しながらセル圧をあげる。供試体の有効等方圧を 20kPa に維持して、負圧を 0kPa 、セル圧を 20kPa にする。
- (3) ビュレット上部のラインを水槽上部のバルブに接続し、真空ポンプを用いて供試体内部の間隙圧を負圧(理想の状況は -95kPa 以下に達する)に下げる。有効等方圧を 20kPa に維持し、負圧発生装置を用いて、セル圧も同時に負圧に下げる。
- (4) 負圧の状態で 供試体の中の空気を排出する。そのあと、供試体の負圧をだんだん解除しながら、セル圧も同時に上げる。最後、間隙水圧を 0kPa 、セル圧を 20kPa にする。
- (5) 真空ポンプの電源を切る。供試体とビュレットを遮断し、水槽タンクに接続して通水する。

藤沼砂の試験条件と結果は表 3-3 に示している。また、図 3-17 は非排水三軸圧縮試験で得られた応力経路、図 3-18 は応力ひずみ曲線である。その中で Test020 は湿潤堆積法で締め固めた砂を用いる試験である。乾燥密度については、豊浦砂と同様に、方法 1, 2, 4 がほぼ一致、方法 3 だけが大きい結果となる。ただし、Test020 では四つの方法はすべて重なっている。土が密になる場合、含水比の測定誤差が小さいので、方法 3 によって計算した乾燥密度と実際値との誤差が少なくなると推測した。

図 3-15 に藤沼砂の乾燥密度と定常状態強度の相関を示している。ここで、定常状態線 (SSL) は方法 4 による乾燥密度計算結果より作成した。

表3-3 藤沼砂の試験結果

Test No.	Dry density, r_d (g/cm ³)				Initial state, p'_{ini} (kPa)	Steady-state, p' (kPa)	B value	Void ratio, e
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4				
test011	1.286	1.281	1.418	1.288	100	45	1.000	0.914
test015	1.346	1.349	1.416	1.344	100	52	0.648	0.918
test016	1.343	1.347	1.488	1.341	100	62	0.738	0.824
test017	1.445	1.449	1.525	1.444	100	45	0.880	0.781
test018	1.364	1.367	1.448	1.362	100	49	0.948	0.875
test019	1.367	1.367	1.436	1.367	100	46	0.980	0.890
test020	1.500	1.496	1.492	1.501	100	66	0.960	0.819

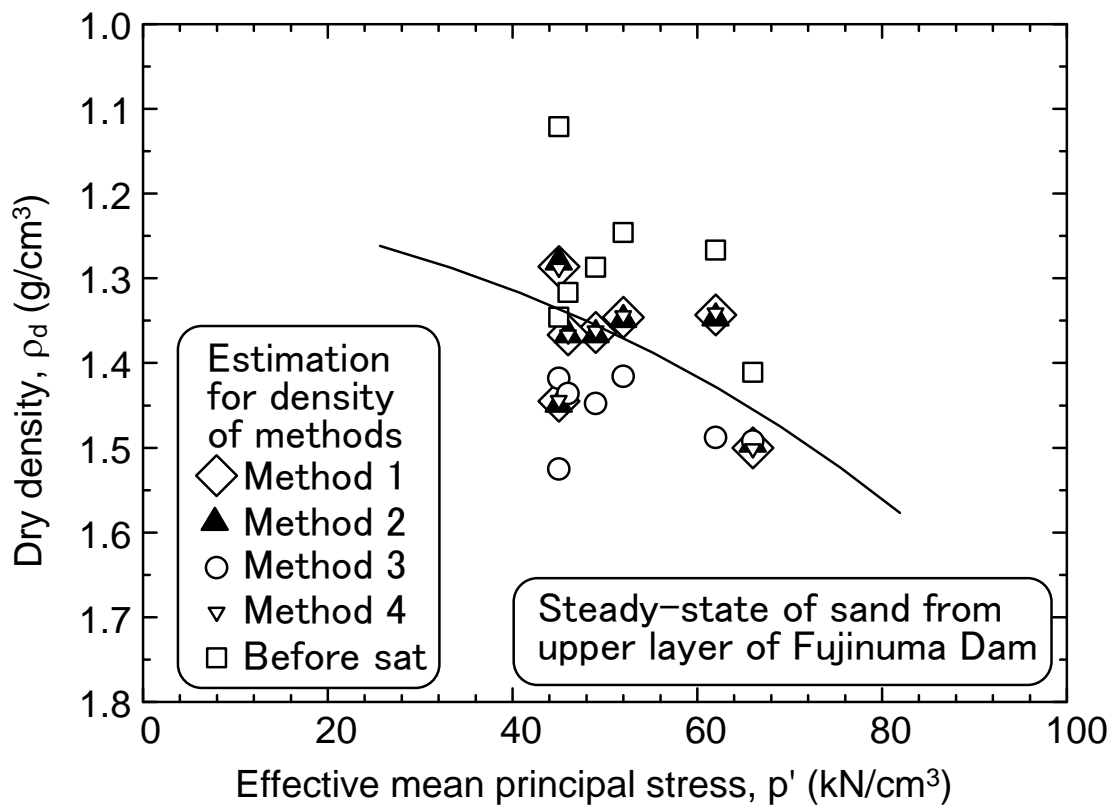


図3-15 藤沼砂の乾燥密度と定常状態強度の相関

表3－4 藤沼砂の非排水試験中の体積変化一覧

Method	Test No.	volume (cm ³)			
		before.sat	after.sat	before cons.	after cons.
Method1	test011	181.21	152.84	153.10	145.80
	test015	175.79	158.59	158.42	153.82
	test016	172.35	158.62	158.36	153.96
	test017	195.17	183.65	183.46	162.16
	test018	198.31	187.26	187.07	179.57
	test019	197.33	188.98	188.98	181.68
	test020	212.67	206.51	206.73	198.33
Method2	test011	181.21	152.84	153.61	146.31
	test015	175.79	158.59	158.08	153.48
	test016	172.35	158.62	157.85	153.45
	test017	195.17	183.65	183.08	161.78
	test018	198.31	187.26	186.69	179.19
	test019	197.33	188.98	188.98	181.68
	test020	212.67	206.51	207.17	198.77
Method3	test011	181.21	152.84	139.45	132.15
	test015	175.79	158.59	150.83	146.23
	test016	172.35	158.62	143.34	138.94
	test017	195.17	183.65	175.02	153.72
	test018	198.31	187.26	176.60	169.10
	test019	197.33	188.98	180.23	172.93
	test020	212.67	206.51	207.68	199.28
Method4	test011	181.21	152.84	152.84	145.54
	test015	175.79	158.59	158.59	153.99
	test016	172.35	158.62	158.62	154.22
	test017	195.17	183.65	183.65	162.35
	test018	198.31	187.26	187.26	179.76
	test019	197.33	188.98	188.98	181.68
	test020	212.67	206.51	206.51	198.11

3. 福島県の報告書による試験結果との比較

福島県の報告書では、上部盛り土の非排水三軸圧縮試験を行っている。供試体作成時の締固め度は $D=88\%$ （現状密度）、80%、100%の3種類であるが、飽和や圧密時の供試体の変形や体積変化については報告されていないため、実際のせん断時の密度は不明である。そこで、応力経路より定常状態強度を読み取り、供試体作成時の乾燥密度と定常状態強度の関係を図3-16に示している。この図には、本研究で得られた供試体作成時の乾燥密度と定常状態強度の関係も示してある。これを見ると、福島県のデータに基づく定常状態線は本研究のものより少し下側にあるように見えるが、縦軸の乾燥密度が定常状態時の密度ではないため、実際の状況は不明である。

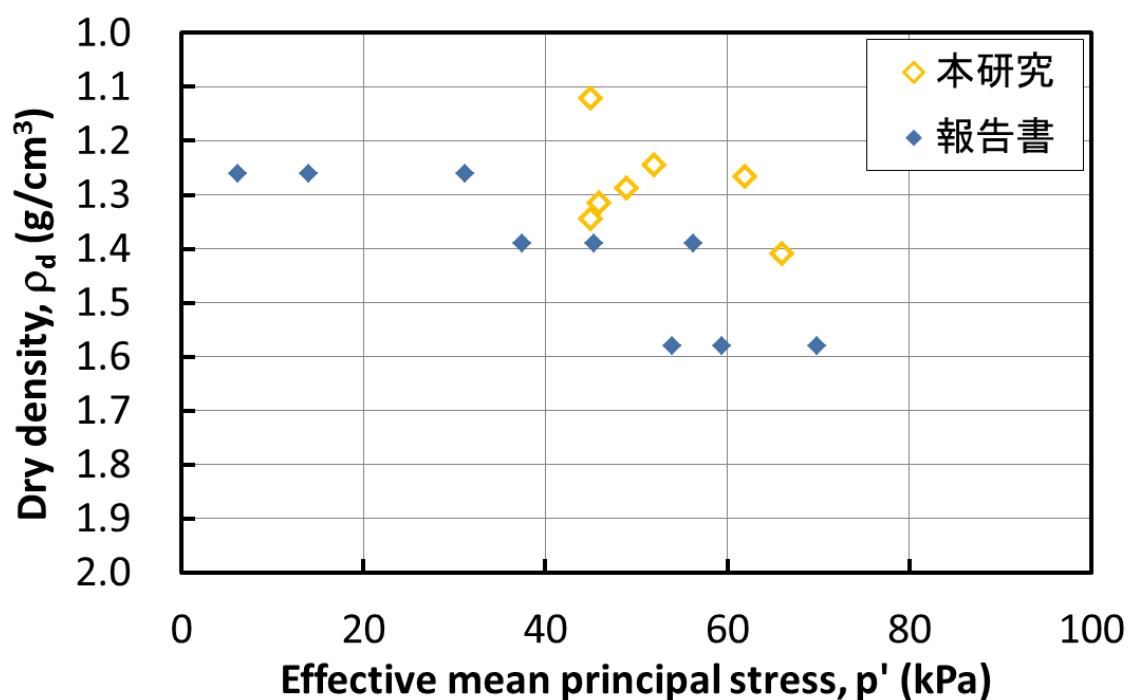


図3-16 福島県の報告書から求めた定常状態と本研究の比較

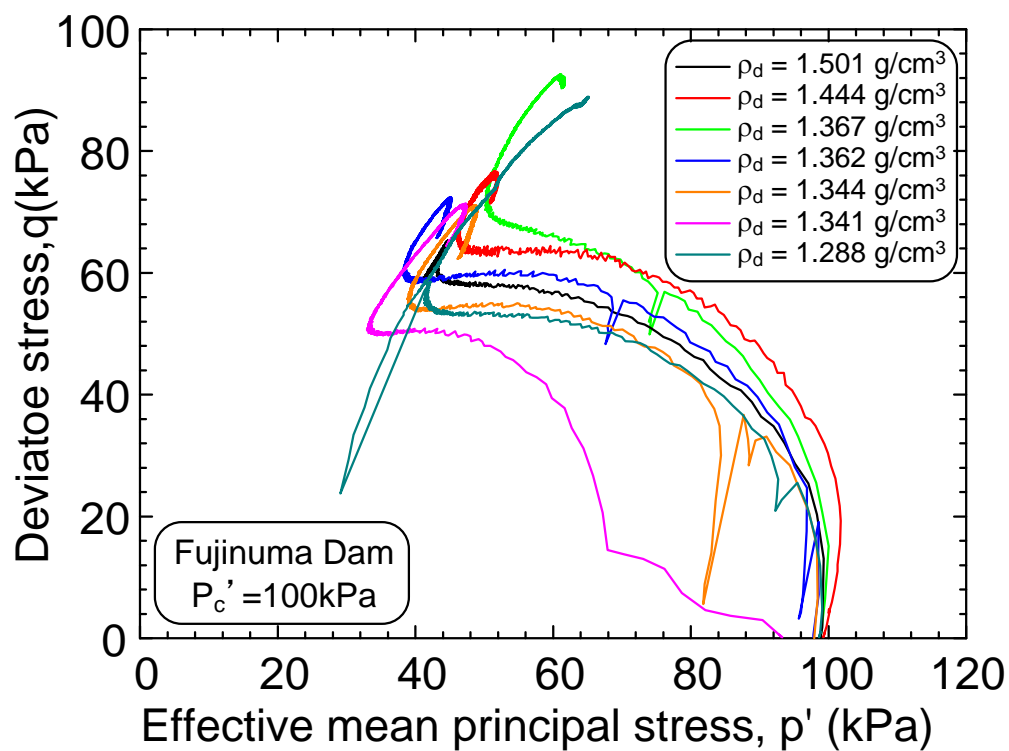


図3-17 藤沼砂の非排水三軸圧縮試験で得られた応力経路

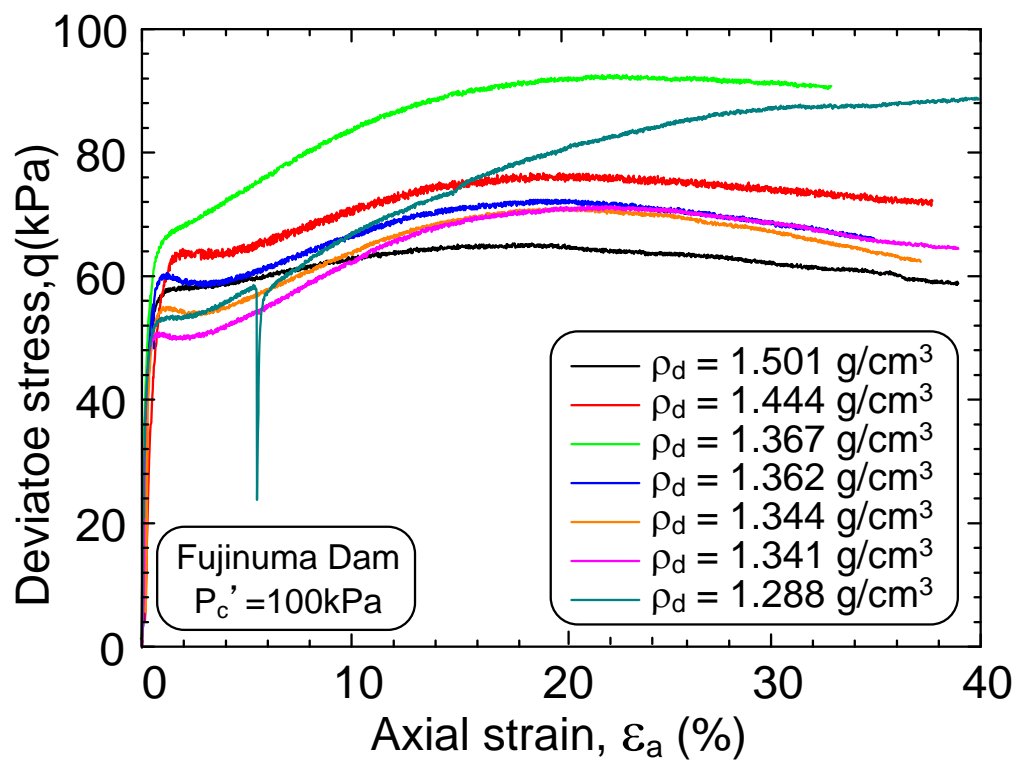


図3-18 藤沼砂の非排水三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線

4. ダム堤体崩壊要因の考察

上部盛り土の崩壊前の原位置での有効拘束圧の評価においては、堤体内の水理条件等を詳しく検討する必要があるが、層厚から考えて概ね 100kN/m^3 以下であったと考えられる。これに不攪乱試料の密度試験結果を加味して、崩壊前の原位置での密度と応力の状態を推定し、推定した原位置状態と三軸圧縮試験から推定した定常状態を同じグラフにプロットすると、両者はほぼ同一の状態にあることがわかる（図3-19）。このような状態では非常に微小な振動や静的せん断荷重であっても非排水条件となっただけで間隙水圧が大きく上昇して安定性が失われ、土は定常状態となって無限に大きな流動変形が生じると考えられる。

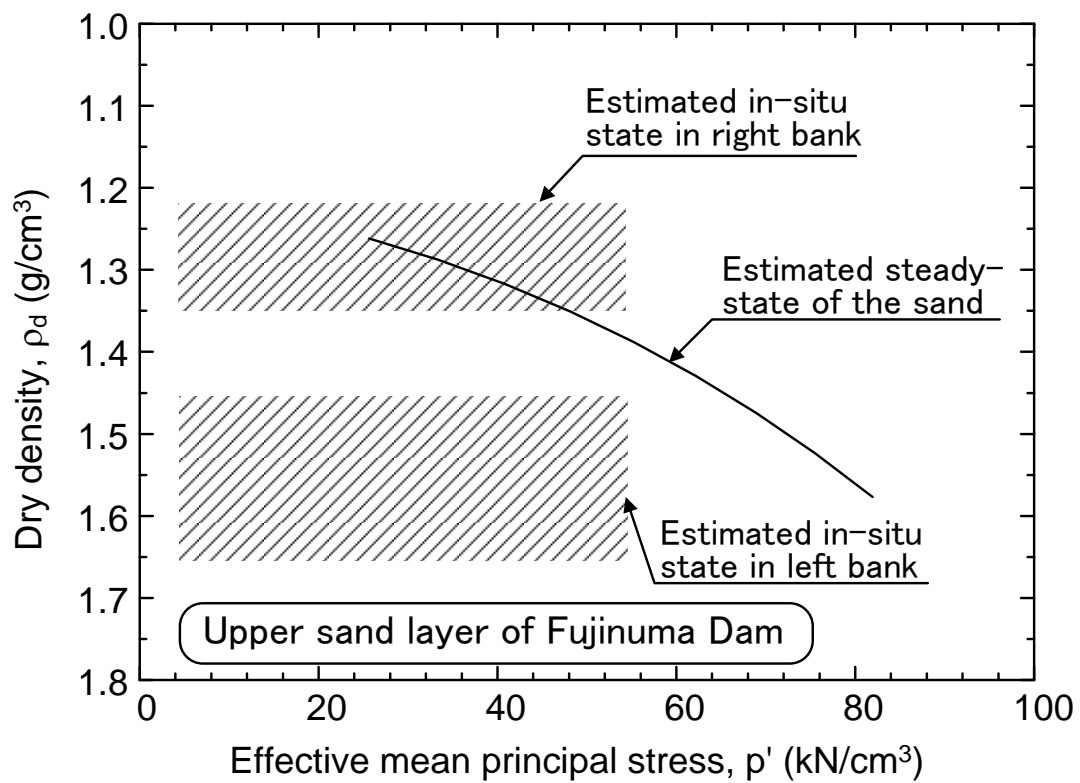


図3-19 藤沼砂の密度試験から推定した原位置状態と実験で得られた定常状態の比較

3.2.3 非排水三軸圧縮試験の難点分析

非排水三軸圧縮試験の手順が複雑で、試験中にさまざまな問題がある。小さいミスを犯しても、最後の結果は信頼性が低いと考えられるか、もしくは試験を中断させなければならない。今回の研究について、失敗した回数が多くて、かなりの部分の砂が無駄になってしまった。写真3-24～27は実験の失敗状況の事例である。

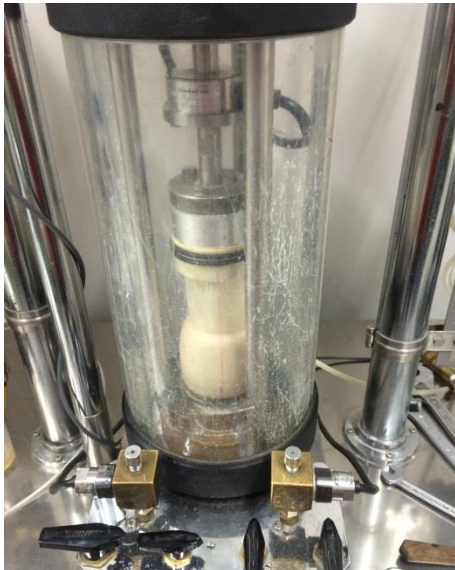


写真3-24 セル水を注入する前に供試体の負圧を減少させたため、供試体が破壊した



写真3-25 水平圧力を調整するときロードセルの軸が固定された



写真3-26 せん断が終わるときメンブレンに大きい穴が生じた



写真3-27 間隙水圧がセル圧より大きくなったため供試体が破壊した

第4章 結論

1. 藤沼ダム上部砂層から採取した不攪乱試料のブロッグサンプリングを用いて、パラフィン法とノギス法で湿潤密度試験を行った。試料採取時の掘削・整形作業の時の予想どおり右岸の試料の方が乾燥密度 ρ_d は小さい結果となり、右岸で $\rho_d = 1.22 \sim 1.35 \text{g/cm}^3$ 、左岸で $\rho_d = 1.45 \sim 1.65 \text{g/cm}^3$ であった。
2. 非排水三軸圧縮試験について、従来は3通りの方法により三軸供試体密度を算定していたが、これらの3通りの方法で算定した供試体の密度は差が大きく、信頼性に問題があった。そこで、試験中供試体を飽和させた後に圧力室を取り除いで供試体の体積をもう一測定する方法を試みた。
3. 不攪乱試料の密度試験結果により推定した原位置状態と、攪乱試料の三軸圧縮試験から明らかになったこの試料の定常状態を同じグラフにプロットすると、特に右岸の原位置状態は定常状態とほぼ同一になり、流動破壊を生じる危険性が大きかったと考えられる。
4. 堤体盛り土の上部の右岸側には密度がかなり低い部分があり、その密度に対応する非排水強度は、土が無限に大きく流動変形する限界である定常状態におけるせん断抵抗と同程度であったために、これが堤体崩壊の要因となった可能性があることを本研究は明らかにした。

参考文献

- (1) 経岩廣貴 地震で崩壊した砂質盛土の非排水強度特性，卒業論文，首都大学東京，2014
- (2) 小川祥生 バングラデシュで採取されたマイカ混じり砂の非排水せん断特性，修士論文，首都大学東京，2014
- (3) 朱穎 幅広い拘束圧レベルでの砂の流動変形挙動，修士論文，首都大学東京，2013
- (4) 吉嶺充俊 砂質土の力学的挙動に及ぼす拘束圧の影響，修士論文，東京大学，1991
- (5) 社団法人地盤工学会 土質試験の方法と解説，2000
- (6) 土木学会 土質試験のてびき[改訂版]，2003
- (7) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会 藤沼湖の決壊原因調査，2013

謝辞

本研究は、吉嶺充俊准教授の下、平成 25 年から平成 27 年の二年間における研究の成果をまとめたものであります。吉嶺先生には体調のすぐれない中、実験方法及び改良、実験装置の組立て及び整備、論文作成などに関してはすべてにわたりたくさんのご指導を頂いたことを心より深く感謝申し上げます。また、同じ地盤工学グループに属されている小田義也先生、井上素行先生、細野康代先生、修士論文審査会で副査を担当して頂いた上野敦先生にはご助言、ご指導を頂きましたことを非常に感謝いたしております。

最後に、地盤工学グループ学生の皆様には公私にわたってお世話になりましたことにお礼を申し上げます。