

地盤工学実験 実験報告書
圧密およびLL,PL試験

ゆり* (@81suke_)

実験日 2020/1/10(金)

Contents

1	圧密試験	2
1.1	実験目的	2
1.2	実験理論	2
1.3	実験	2
1.3.1	実験器具	2
1.3.2	実験方法	3
1.4	実験結果	3
1.5	考察	7
2	LL,PL 試験	9
2.1	実験目的	9
2.2	実験	9
2.2.1	実験器具	9
2.2.2	実験方法	9
2.3	実験結果	10
2.4	考察	11
3	感想	13
	References	13

1 圧密試験

1.1 実験目的

土に荷重が加わることで土粒子がつくる土骨格が縮む現象を圧縮という。その中でも、静的荷重によって間隙水を排出して圧縮することを圧密という。

今回の圧密試験は、カオリン粘土と川崎粘土について実地盤の沈下量や沈下時間の推定に必要な圧縮性と圧密速度などの圧密定数および圧密降伏応力を求め、沈下量と沈下時間の推定を行う。

また、圧密降伏応力 p_c と地盤内の有効土被り圧との比較から、過圧密土、正規圧密土の判定も行う。

1.2 実験理論

両側排水条件下で一次元圧密を行った際の沈下量 S および沈下時間 t は以下の式により表される。

$$S = m_v H \Delta p \quad (1)$$

$$t = \frac{(\frac{H}{2})^2}{c_v} = \frac{\gamma_w m_v}{k} (\frac{H}{2})^2 \quad (2)$$

したがって、工学上は m_v, c_v を求めることが肝要である。そのため、JIS に従った圧密試験を行い諸数を求める。

1.3 実験

1.3.1 実験器具

- 圧密容器

- － 圧密リング
内径 6cm, 高さ 2cm のもので供試体をセットする部分。内側にはグリセリンを塗る。
- － ガイドリング
圧密リングの上にかぶせて加圧板の上下変位を補助する。内側にはグリセリンを塗る。
- － 加圧板
中心に載荷点がある円盤で多孔質である。
- － 底板
圧密リングを固定し多孔質な板である。
- － 多孔板
透水係数が 10^{-6}m/s 以上で土粒子が通過しないもの。供試体の上面と底面の両方に設置する。

- 載荷装置
圧密容器を水平に支持し、所定の荷重を衝撃や偏心無しに短時間に加える。
- 変位計
100 分の 1 mm までの変位を読み取る。今回はダイヤルゲージを用いた。

1.3.2 実験方法

1. 圧密リングに合わせて供試体をワイヤソーでカットした。このとき含水比を測定するため、試料の一部を採取して重さを量ったのち乾燥炉に入れる。
2. 圧密容器を組み立て、供試体を水で満たした。
3. 圧密容器を載荷装置に設置し加圧版を載荷点に合わせた。
4. 載荷装置のレバーが水平になるように調整ハンドルを回して調整した。
5. 載荷直前の変位計の読みを 100 にあわせた。
6. 載荷後の経過時間 t に対する変位計の読みを測定した。
($t=6s, 9s, 12s, 18s, 30s, 42s, 1min, 1.5min, 2min, 3min, 5min, 7min, 10min, 15min, 20min$)
7. 変位計の読みから \sqrt{t} 法に基づき圧密曲線を作製した。
8. 圧密曲線から圧密度が 100% の点が求まった時点で次の載荷段階に移った。
9. 載荷段階を 5kN, 10kN, 20kN, 40kN, 80kN, 160kN, 320kN, 640kN, 1280kN の順に変えていった。
10. 1280kN までの載荷が終わったら、320kN, 80kN, 20kN の順番で除荷した。
11. 最終段階での測定が終了した後に載荷荷重を全て除荷し圧密容器を解体した。
12. 圧密リングの寸法、質量を計測した。
13. 後日乾燥炉から試料を取り出して重さを量り、含水比を求めた。

1.4 実験結果

初期状態の含水比 w_0 、間隙比 e_0 、飽和度 S_{r0} を以下のように算出する。

$$w_0 = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

$$e_0 = \frac{H_0}{H_s} - 1 \quad (4)$$

$$H_s = \frac{m_s}{\rho_s A} = \frac{m_s}{\rho_s \pi D^2 / 4} \quad (5)$$

$$S_{r0} = \frac{w_0 \rho_s}{e_0 \rho_w} \quad (6)$$

ここで、

w_0 :初期含水比 (%)
 e_0 :初期間隙比
 S_{r0} :初期飽和度 (%)
 m_T :圧密前の供試体及び圧密リングの質量 (g)
 m_R :圧密リングの質量 (g)
 m_s :供試体の炉乾燥質量 (g)
 H_0 :供試体の初期高さ (cm)
 H_s :供試体の実質高さ (cm)
 A :供試体の断面積 (cm²)
 D :供試体の直径 (cm)
 ρ_s :土粒子の密度 (g/cm³)
 ρ_w :水の密度 (g/cm³)

以上を用いて諸数を計算すると下表の通りとなった。

Table 1: 試料の初期情報

	カオリン粘土	川崎粘土
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.69
初期含水比 w_0 (%)	60.3	46.7
初期間隙比 e_0	1.67	1.18
飽和度 S_{r0} (%)	95.9	107

次に、各載荷段階における圧密量 ΔH (cm) を求める。載荷時最終の変位計の読み d_f (mm)、載荷直前の変位計の読み d_i (mm) を用いて

$$\Delta H = \frac{d_i - d_f}{10} \quad (7)$$

により求める。

各載荷段階の載荷終了時の供試体高さ H (cm) と平均供試体高さ \bar{H} (cm) を以下のように求める。ただし H' は一つ前の段階の供試体高さ (cm) であるとする。

$$H = H' - \Delta H \quad (8)$$

$$\bar{H} = \frac{H + H'}{2} \quad (9)$$

これにより間隙比 e を以下のように求める。

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (10)$$

さらに圧縮ひずみ $\Delta\varepsilon$ (%) 及び体積圧縮係数 m_v (m²/kN) を以下のように求める。

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta H}{\bar{H}} \times 100 \quad (11)$$

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon/100}{\Delta p} \quad (12)$$

以上より整理すると下表の通りとなった。

Table 2: カオリン粘土圧密結果

	圧密圧力 p (kN/m ²)	間隙比 e	圧縮ひずみ $\Delta\varepsilon$ (%)	体積圧縮係数 m_v $\times 10^{-4}(\text{m}^2/\text{kN})$
載荷	5	1.64	0.035	0.70
	10	1.61	0.14	2.8
	20	1.58	0.11	1.1
	40	1.54	0.15	0.75
	80	1.47	0.25	0.63
	160	1.35	0.49	0.61
	320	1.20	0.63	0.39
	640	1.05	0.70	0.22
	1280	0.89	0.76	0.12
除荷	320	0.93	-0.20	0.021
	80	0.98	-0.27	0.11
	20	1.03	-0.26	0.43

Table 3: 川崎粘土圧密結果

	圧密圧力 p (kN/m ²)	間隙比 e	圧縮ひずみ $\Delta\varepsilon$ (%)	体積圧縮係数 m_v $\times 10^{-4}(\text{m}^2/\text{kN})$
載荷	5	1.64	0.11	2.2
	10	1.61	0.41	8.2
	20	1.58	0.76	7.6
	40	1.54	1.5	7.6
	80	1.47	2.3	5.7
	160	1.35	4.5	5.6
	320	1.20	5.3	3.3
	640	1.05	6.1	1.9
	1280	0.89	6.2	0.96
除荷	320	0.93	-0.92	0.096
	80	0.98	-1.4	0.6
	20	1.03	-1.0	1.7

さらに各段階の圧密係数 c_v および透水係数 k を考える。
今回の圧密試験は両面排水条件であるから、

$$c_v(\text{cm}^2/\text{day}) = 0.848 \left(\frac{\bar{H}}{2} \right)^2 \frac{1440}{t_{90}} \quad (13)$$

$$k(\text{m/s}) = c_v m_v \gamma_w / (8.64 \times 10^8) \quad (14)$$

$t_{90}(\text{min})$:理論圧密度 90%に要した時間

γ_w :水の単位体積重量 (9.81kN/m³)

により求められる。

以上より下表の通りとなった。

Table 4: カオリン粘土の圧密量

	圧密圧力 p (kN/m ²)	平均高さ \bar{H} (cm)	90%圧密時間 t_{90} (min)	圧密係数 c_v $\times 10^2(\text{cm}^2/\text{day})$	透水係数 k $\times 10^{-10}(\text{m/s})$
載荷	5	2.00	2	6.1	4.9
	10	1.99	1.5	8.1	26
	20	1.96	5.5	2.1	2.7
	40	1.94	4	2.9	2.5
	80	1.91	5	2.2	1.6
	160	1.86	6.5	1.6	1.1
	320	1.77	3.6	2.6	1.2
	640	1.65	2.2	3.8	0.94
	1280	1.54	2.2	3.3	0.44
除荷	320	1.43	2	3.1	0.074
	80	1.46	2.3	2.8	0.36
	20	1.50	2	3.4	1.7

Table 5: 川崎粘土の圧密量

	圧密圧力 p (kN/m ²)	平均高さ \bar{H} (cm)	90%圧密時間 t_{90} (min)	圧密係数 c_v $\times 10^2(\text{cm}^2/\text{day})$	透水係数 k $\times 10^{-10}(\text{m/s})$
載荷	5	2.00	5	2.4	6.1
	10	1.98	1.5	8.0	75
	20	1.97	1.8	6.6	57
	40	1.95	3.9	3.0	26
	80	1.91	8	1.4	9.0
	160	1.85	14	0.75	4.8
	320	1.77	8.8	1.1	4.1
	640	1.66	5.8	1.5	3.1
	1280	1.57	5	1.5	1.6
除荷	320	1.52	0.5	14	1.5
	80	1.54	2.5	2.9	2.0
	20	1.56	12	0.62	1.2

1.5 考察

圧密状態について考える。

圧力 p を対数とした e - $\log p$ 曲線を描くと、圧密応力が小さいうちは曲線を描くが、ある圧力から先は勾配一定となり直線的になる。このとき土は、弾性的挙動を示す過圧密領域から、塑性的挙動を示す正規圧密領域に遷移したことを表す。¹このときの圧力を圧密降伏応力 p_c という。

各載荷段階での e, p から $e - \log p$ 曲線を描くと下図の通りとなる。

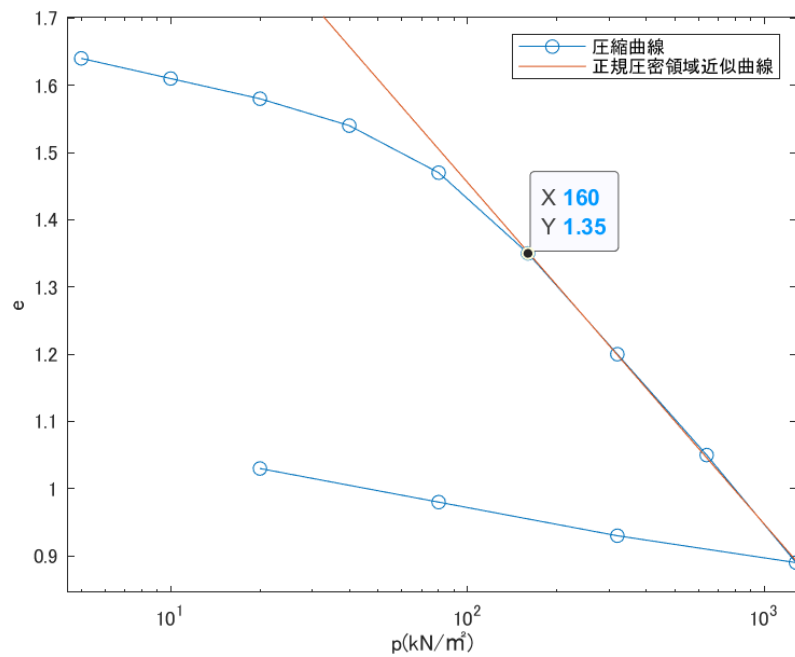


Figure 1: カオリン粘土 $e - \log p$ 曲線

¹土質試験-基本と手引き-[1]p.114 参照

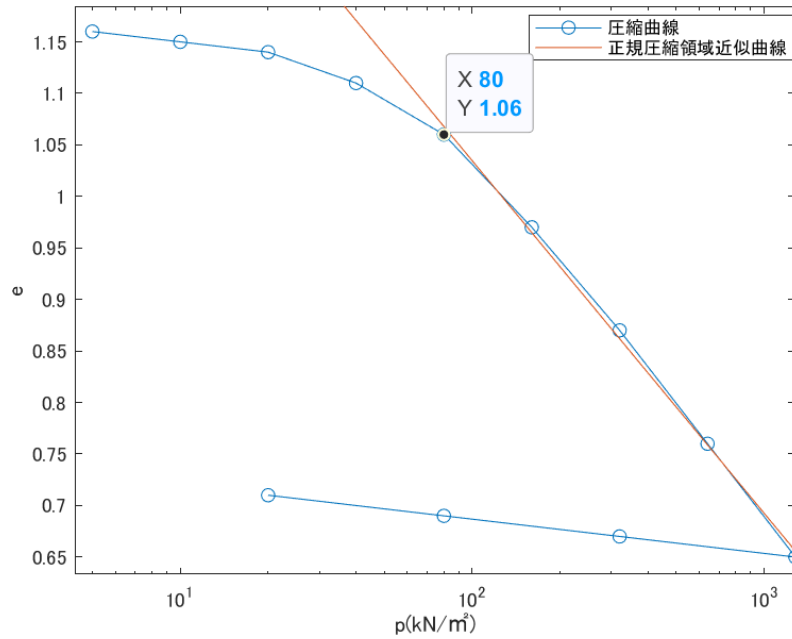


Figure 2: 川崎粘土 $e - \log p$ 曲線

圧縮指数 C_c は正規圧密領域の $(p_a, e_a), (p_b, e_b)$ について

$$C_c = \frac{e_a - e_b}{\log(p_b/p_a)} \quad (15)$$

により求められる。

カオリン粘土については 160kPa、川崎粘土については 80kPa 程度から正規圧密領域に遷移していると考えられるから、その部分の近似曲線より、カオリン粘土については $C_c = 0.22$ 、川崎粘土については $C_c = 0.15$ となる。

また、圧密降伏応力 p_c は Casagrande 法によりカオリン粘土については $p_c = 100\text{kPa}$ 、川崎粘土については $p_c = 70\text{kPa}$ 程度と推測される。それより p_c が大きくなると正規圧密領域となる。このため、先行圧密応力を p_c の分だけ実験前から受けていたと考えられる。実験前に受けていた圧力は、採取までに地中で受けていた圧力と同じと考えられるから、有効土被り圧 p_o は p_c 程度であると推測される。

2 LL,PL 試験

2.1 実験目的

細粒土では、含水比によってドロドロした液体状、ネバネバした塑性体状、ボロボロした半固体状、カチカチの固体状になる。このような土の含水比による状態の変化や変形に対する抵抗の大きさをコンシステンシーという。液性限界 (LL)、塑性限界 (PL) はコンシステンシー限界の一種である。

LL 試験では、土が塑性状から液状に移るときの境界含水比を求める。

PL 試験では、土が塑性状から半固体状に移るときの境界含水比を求める。

2.2 実験

基本的には JIS A 1205[2] に従った。

2.2.1 実験器具

LL 試験

- 液性限界測定器
ハンドルを回すと黄銅皿の落下が繰り返される機構。
- 溝切りゲージ
- へら

PL 試験

- 滑らかなガラス板
試料を転がす。

2.2.2 実験方法

LL 試験

1. 約 200g の試料をガラス板の上に均等に広げ、パテ状になるように、含水比を調節しながら十分にへらで練り合わせた。
2. 黄銅皿とゴム台の間にゲージを差し込み、黄銅皿の落下高さが 1cm になるようにねじと調節板を調節した。
3. 準備した試料をへらを用いて黄銅皿に入れ、最大厚さが約 1cm になるように形を整えた。
4. 溝切りを黄銅皿の底に直角に保ちながら皿の中を通るように試料を 2 分した。
5. 落下装置のハンドルを回し、1 秒間に 2 回の割合で黄銅皿を持ち上げては落とした。
6. 2 分された溝の底部の試料が長さ約 1.5cm 合流した時の落下回数を記録し、合流した付近の試料をへらでシャーレにとって含水比を測定した。

7. 黄銅皿の試料を戻し、黄銅皿を乾いた布で拭き取った。
8. 試料に蒸留水を加え含水量を増やし、以上の作業を繰り返した。その際、少なくとも落下回数 25～35 のものが 2 個、10～25 回のものが 2 個得られるようにした。

PL 試験

1. 約 30g の試料をすりガラス板の上で均等に広げ、団子状になる程度に含水比を調節しながら十分に手で練り合わせた。
2. 団子状の試料から、約 8g 取って、手のひらで丸め、楕円形のボール状にし、これを手のひらとすりガラス板との間できがしながらかひも状にし、ひもの太さが 3mm になるように細くしていった。
3. ひもの太さが 3mm になる前に切れぎれになった場合は、蒸留水を加え、十分練り合わせたのち 2. の操作を繰り返した。
4. ひもの太さが 3mm になっても切れぎれにならない場合は、ひもを数箇所で切り、再び指で練り合わせて 2. の操作をした。
5. この土のひもがちょうど直径約 3mm で切れぎれになった時、その切れぎれの土を集めて含水比を測定した。
6. 以上の測定を 4,5 回行った。

2.3 実験結果

LL 試験結果を落下回数を対数とした片対数グラフにすると以下の通りとなった。

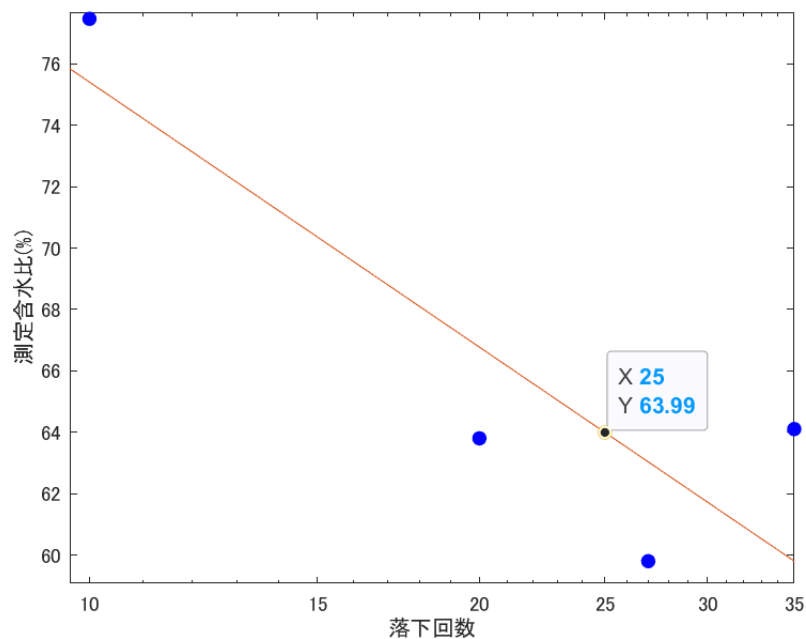


Figure 3: カオリン粘土 LL 試験結果

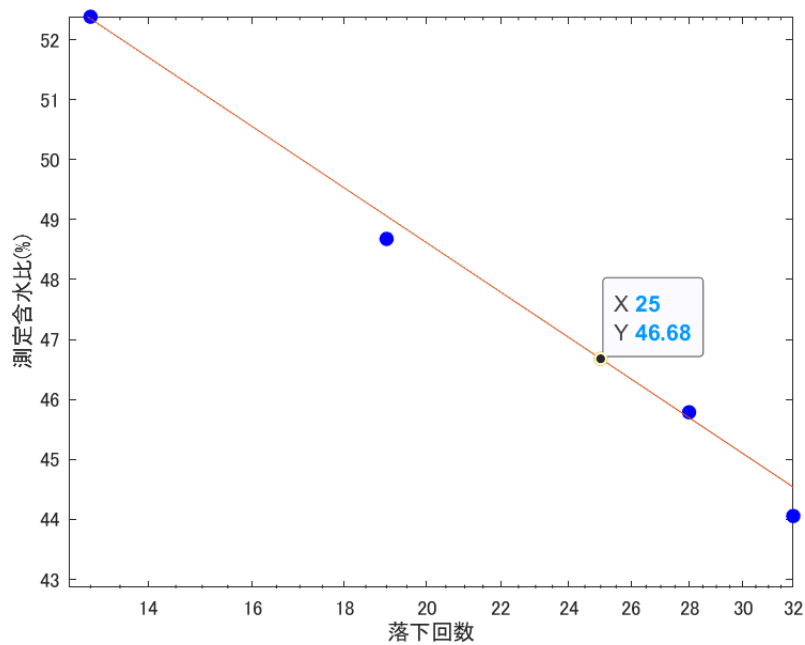


Figure 4: 川崎粘土 LL 試験結果

試験結果をプロットし、片対数グラフ上で近似直線を描き、落下回数 25 回となる含水比を推定し、液性限界 w_L とする。
 グラフより、 w_L はカオリン粘土については $w_L = 64.0\%$ 、川崎粘土については $w_L = 46.7\%$ となった。

また、塑性限界 w_P については各回測定値の平均をとることにより、カオリン粘土については $w_P = 34.8\%$ 、川崎粘土については $w_P = 25.6\%$ となった。

2.4 考察

今回の試験により求められた w_L, w_P から、各試料の状態を推測する。
 塑性指数 I_P は以下の式により求められる。

$$I_P = w_L - w_P \quad (16)$$

上式を用いるとカオリン粘土については $I_P = 29.2\%$ 、川崎粘土については $I_P = 21.1\%$ となった。

以上の情報を塑性図に入力する。

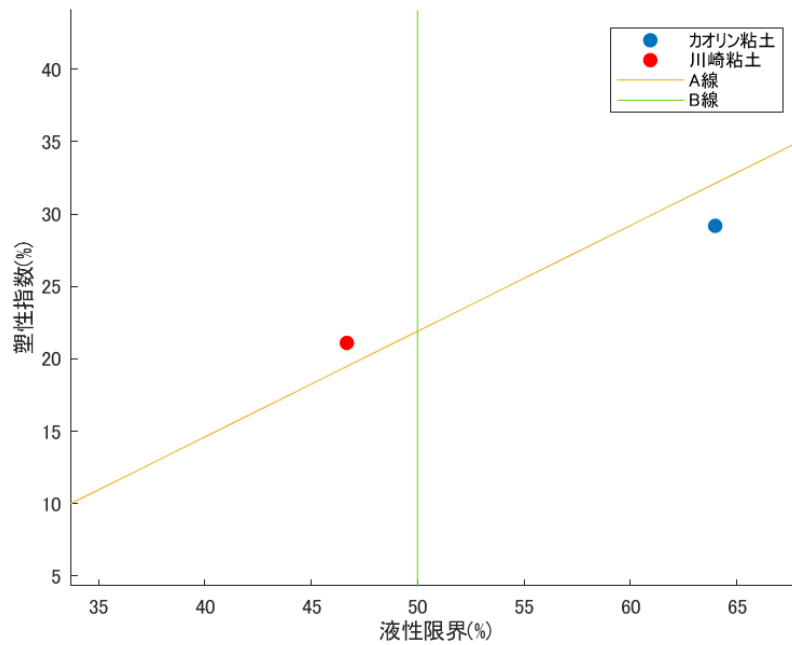


Figure 5: 塑性図での各試料位置

上図から、カオリン粘土については右下方に位置するため、圧縮性が大きく塑性が小さい土であることが確認できる。
また、同様に川崎粘土については左上方に位置するため、圧縮性が小さく塑性が大きい土であることが確認できる。

また、Terzaghi は、圧縮指数 C_c と液性限界 w_L について以下の経験式が得られるとしている。

$$C_c = 0.009(w_L - 10) \dots \text{不攪乱粘土} \quad (17)$$

$$C_c = 0.007(w_L - 10) \dots \text{攪乱粘土} \quad (18)$$

今回得られた C_c, w_L および Terzaghi の式をグラフに描く。

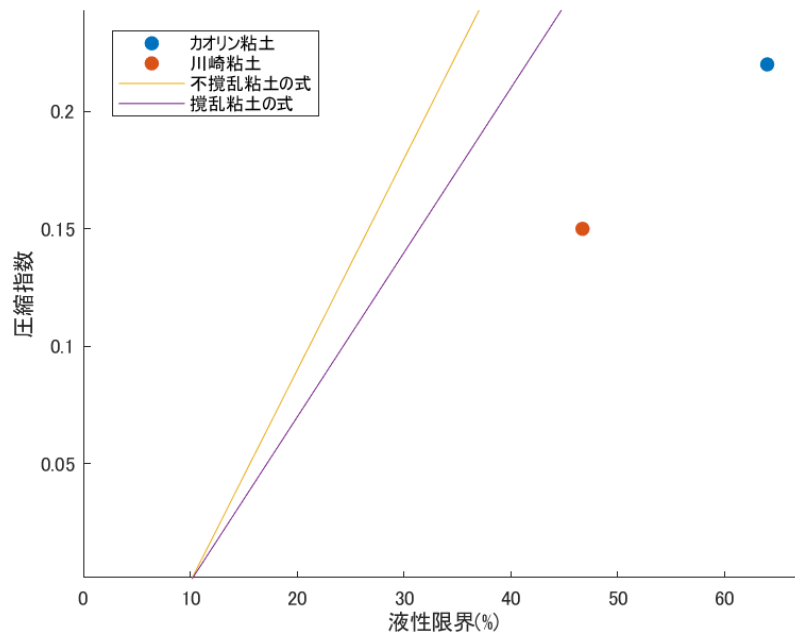


Figure 6: w_L と C_c の関係の考察

しかし、上図のみからでは Terzaghi の式の整合性は確認出来なかった。だが、仮に Terzaghi の式が正しいと仮定した場合、攪乱粘土の方が式は近いため、試料はかなりの攪乱を受けていたと考えられる。

3 感想

今回の実験では実際に圧密現象を観察することにより圧密現象について理解を深めることができた。ただ、今回の手法は JIS により定められている規格と異なる方法であり、その点については惜しい。

また、自分の手で LL, PL 試験を行うことで、含水比による土の性質をより実感することができた。

References

- [1] 公益社団法人 地盤工学会 土質試験-基本と手引き- 丸善出版 2010
- [2] JIS A 1205 土の液性限界・塑性限界試験方法
- [3] JIS A 1217 土の段階载荷による圧密試験方法