

第 2 章 試料および実験方法

2-1 用いた試料

本研究で使用した試料は、常陸那珂砂および豊浦砂である。以下に、地盤工学会土質試験法によって求めた物理試験の結果について述べる。

常陸那珂砂の物理的性質は、土粒子密度 $\rho_s = 2.677 \text{ g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max} = 1.143$ 、最小間隙比 $e_{\min} = 0.631$ 、最大乾燥密度 $\rho_{\max} = 1.641 \text{ g/cm}^3$ 、最小乾燥密度 $\rho_{\min} = 1.249 \text{ g/cm}^3$ となっている。この試料の粒径加積曲線を図 2-1 に示す。この図より、均等係数 $U_c = 5.13$ 、曲率係数 $U_c' = 1.69$ となっている。また、この試料は、重量百分率で約 18%の礫分を含んでいるが、実験では 2mm ふるいを通過した試料のみを用いた。

豊浦砂の物理的性質は、土粒子密度 $\rho_s = 2.637 \text{ g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max} = 0.977$ 、最小間隙比 $e_{\min} = 0.605$ 、最大乾燥密度 $\rho_{\max} = 1.646 \text{ g/cm}^3$ 、最小乾燥密度 $\rho_{\min} = 1.332 \text{ g/cm}^3$ となっている。

2-2 繰返し中空ねじり試験について

2-2-1 繰返しねじりせん断試験装置の位置づけ

新潟地震やアラスカ地震の直後、Seed らが繰返し三軸試験によって液状化試験を行って以来、室内試験による液状化の研究が急速に広まった。その成果は 1970 年代になると実際の液状化予測にも多く用いられるようになってきた。これらに伴って繰返し三軸圧縮試験装置以外の装置も考案され、同時に載荷部や記録部の改良も行われてきた。

現在用いられている装置を分類し、特徴をまとめると表 2-1 となる。これらのうち、繰返し三軸試験装置が最も広く用いられている。これは、装置や操作が比較的簡単であることや、Seed ら以来の研究の蓄積があるという理由からであろう。しかしこの装置は、圧密中、せん断中の主応力方向が固定されてしまい、複雑な応力状態を再現するのは不适当であるという欠点がある。

繰返し単純せん断試験装置は、NGI 型や Cambridge 型があり、前者は ①主応力方向を回転させることができる、②動的せん断にも適している、という長所をもち、後者は ①主応力方向を回転させることができる、②側方応力も測定することができる、という長所をもつが、装置が複雑になることやひずみ分布が均一になりにくいという欠点をもつため、実務的に用いられる頻度は少ない。これらの装置に対して、繰返しねじりせん断試験装置は複雑な応力状態のもとで試験を行うときに活用されることが多く、三軸試験装置に比べて、拘束条件をより原地盤に合わせて、異方圧密や初期せん断力が加わった状態を再現でき、また繰返しねじりせん断応力を水平方向に載荷できる。さらに、ランダム波での試験もより良く行うことができる特徴を持っている。

2-2-2 繰返しねじりせん断試験装置の概要

繰返しねじりせん断試験では中空円筒や中実円筒の供試体を用い、これにねじり力を加える

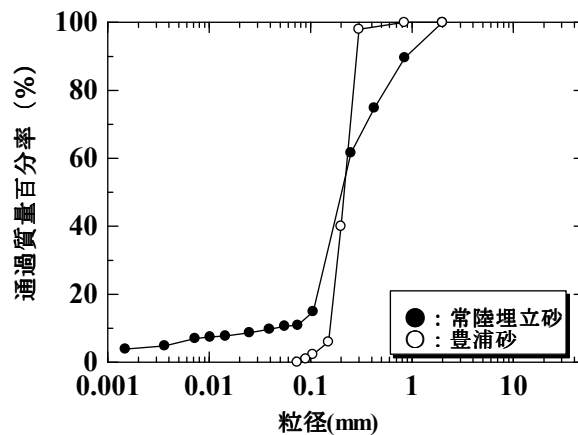


図 2-1 粒径加積曲線

表 2-1 室内液状化試験装置の種類と特徴

項目 種類	応力状態	モールド	応力経路 (全応力) 1→2→3→4	拘束状態	ひずみ状態	繰返し荷重
原地盤				異方応力状態 (K_0 圧密) (初期せん断応力が加わることもある)	平面ひずみ 単純せん断変形	多方向ランダム波
繰返し三軸 (別名 振動三軸) 動的三軸				等方応力状態	軸対称変形	一方向正弦波
繰返しねじりせん断 (別名 動的ねじりせん断) (リングねじりせん断も同種類)				等方または異方 応力状態 (K_0 圧密可) (初期せん断応力も加えられる)	平面ひずみ 単純せん断変形	一方向 正弦波またはランダム波
繰返し 単純 せん断	NGI 型 			異方応力状態 (準 K_0 圧密; K_0 未知) (初期せん断応力も可)	平面ひずみ 単純せん断変形	多方向 正弦波またはランダム波
	Cambridge 型 			異方応力状態 (K_0 圧密) (初期せん断応力も可)	平面ひずみ 単純せん断変形	一方向 正弦波またはランダム波

ことでせん断を行う。後述するが、円筒や円柱供試体を用いた場合、半径方向にせん断ひずみの分布が異なってくる。その影響をなるべく少なくするために、中空円筒の供試体の方がよく用いられている。供試体には図 2-2 に示すように初期の拘束圧や初期せん断力を加えておいた後、繰返しせん断力を加える。通常の液状化試験では、初期応力の加え方として等方応力で、しかも初期せん断力が 0 の状態とすることが多い。この状態では繰返し三軸試験と同等の応力状態しか再現できないが、この他に、地盤内での応力状態に合わせて異方応力状態にしたり、斜面内や構造物下の地盤の状態を再現するために初期せん断力を加えたり、さらに側圧でも外圧と内圧とを違えて三主応力が異なるようにすることもできる。

また、繰返し载荷時の供試体の側方変位は、図 2-2 に示すように、自由にすることも拘束することもできる。初期応力が等方の場合にはどちらでも結果は同じであるが、異方応力状態の場合には両方で試験結果が異なってくる。

異方応力状態の場合、水平地盤や斜面でものり面から奥深く入ったところでは側方変位拘束の条件が必要であり、逆にのり面付近では側方変位自由の条件となる。なお、側方変位を拘束する場合には、供試体とピストンロッドの断面積を等しくし、さらに剛性の高いセルと脱気したセル水を用いるか、またはピストンが上下に移動しないようにして試験を行う方法をとればよい。

一般的な繰返しねじり試験装置はアクチュエーターによる水平方向の動きをラックピニオンにより回転運動に変え、供試体上部からねじり力が加わるようになっている。ねじり力をトルク検出器で、回転角を回転角検出器で検出し、せん断力とせん断ひずみを求めるようになっている。また、軸方向の変位を垂直変位検出器で測定し、軸ひずみを求める。回転角検出器としてはポテンショメーターを用いることが多いが、動的変形特性を求める試験で微小なひずみまで測定したい場合には、ギャップセンサーも用いられている。

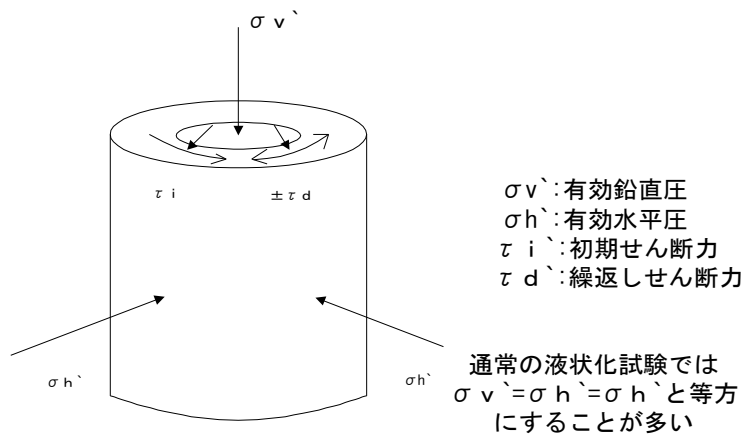
供試体としては、外径 10cm、内径 6cm、高さ 10～15cm 程度のものや、外径 7cm、内径 3cm、高さ 7cm 程度のものがよく用いられている。通常のサンプラーで採取した不攪乱試料では後者の寸法程度におさえる必要がある。

測定した回転角からせん断ひずみを検出するが、図 2-3 のように供試体高さ、内径、外径を H 、 a 、 b とし、供試体上部が θ だけねじれたとすると、せん断ひずみ γ は θ が小さい範囲で

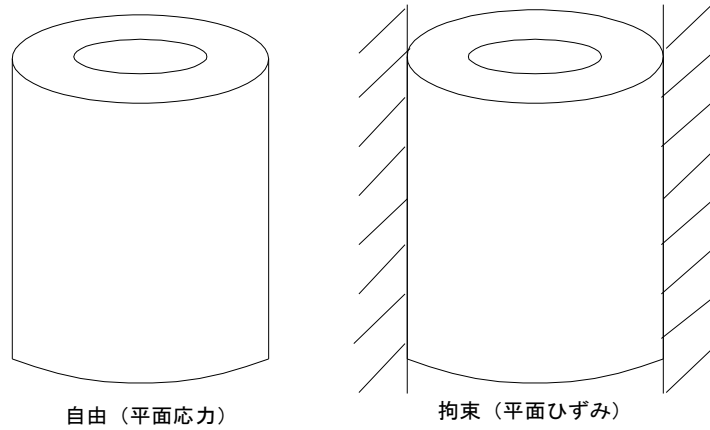
$$\left. \begin{array}{l} \text{供試体内部で } \gamma = \frac{a}{H} \theta \\ \text{供試体外部で } \gamma = \frac{b}{H} \theta \end{array} \right\} \cdots (2.1)$$

と表される。

このようにせん断ひずみは半径に比例し、中空円筒といえども供試体の内側と外側で異なるため、一般に両者の平均値をとって次のように算出することが多い。



(a) 応力状態



(b) 側方変位拘束条件

図 2-2 繰返しせん断試験における応力、側方変位拘束条件

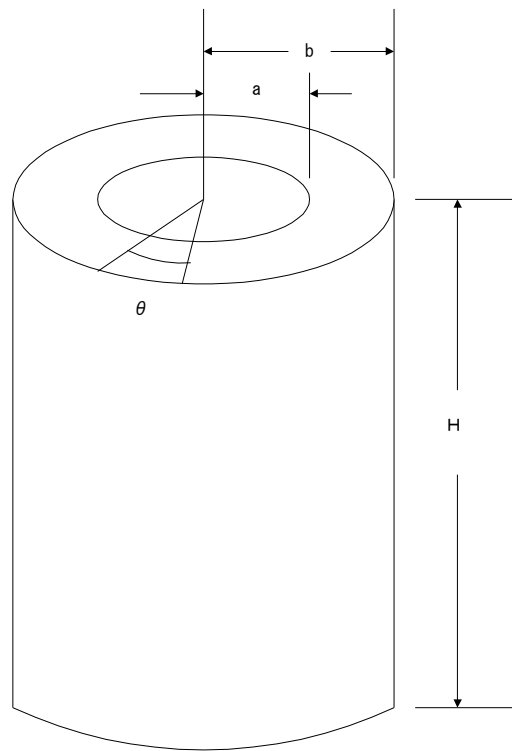


図 2-3 供試体の高さと内径、外径

$$\gamma = \frac{a+b}{2} \cdot \frac{\theta}{H} \quad \dots(2.2)$$

次に半径方向のせん断力分布については、供試体の物性に応じて図 2-4 のような分布が考えられる。(a)は弾性的な場合で応力が半径に比例するケース、(c)は剛塑性的な場合で一定の応力分布となるケースであるが、実際の分布はその間にあり(b)のような分布となっていると考えられる。ただし、液状化の進行に伴い(a)に近い分布から(c)に近い分布へと移ってゆくと考えられる。

さて、供試体にトルク T が加わったとき

$$\begin{aligned} T &= \int_a^b \tau \times 2\pi r dr \times r \\ &= 2\pi \int_a^b \tau r^2 dr \quad \dots(2.3) \end{aligned}$$

と表され(c)のように $\tau = \tau_p = \text{一定}$ の場合には τ_p は次のようになる。

$$\tau_p = \frac{3}{2\pi(b^3 - a^3)} \cdot T \quad \dots(2.4)$$

また、(a)の場合には

$$\tau_a = \frac{2aT}{\pi(b^4 - a^4)} \quad \dots(2.5)$$

と表される。

$a=3\text{cm}$ 、 $b=5\text{cm}$ として、式(2.4)、(2.5)で τ を計算すると、 $\tau_p = 0.00488 T$ 、 τ_a と τ_p の平均値は $0.00468 T$ となりあまり差はない。したがって、液状化した場合には(c)であることを考慮して、式(2.4)でせん断力を計算してよいといえる。

(1)使用した繰返し中空ねじりせん断試験装置の特徴

今回使用した繰返し中空ねじりせん断試験装置は、東京大学生産技術研究所で設計されたもので、以下の条件を満たす様に設計されている。

- ①できるだけ簡単明瞭であり、部品数や作業量ができるだけ少数であること。
- ②総合的にみて価格が安いこと。
- ③コンパクトでできるだけスペースをとらないこと。
- ④必要に応じて一部部品を交換すれば、改良・改善が行えるようにしておき、全体を変えなければ改良・改善ができないというような手間を省く。
- ⑤三軸室・水圧系・空気圧系・測定器系・記録系・載荷系等の試験機の各部が必要に応じて完全に分離でき、別個の組み合わせを行うことにより、多数の目的に応じた試験が行えるようにしておく。例えばこのねじりせん断試験装置で、繰返し三軸試験、静的圧縮・伸張試験、平面ひずみ試験、一軸試験、 K_0 圧密試験、標準圧密試験を行えるようにしておく。
- ⑥研究用であるから十分に精度の高い実験が行えるようにしておくこと。しかし、精度を上げ

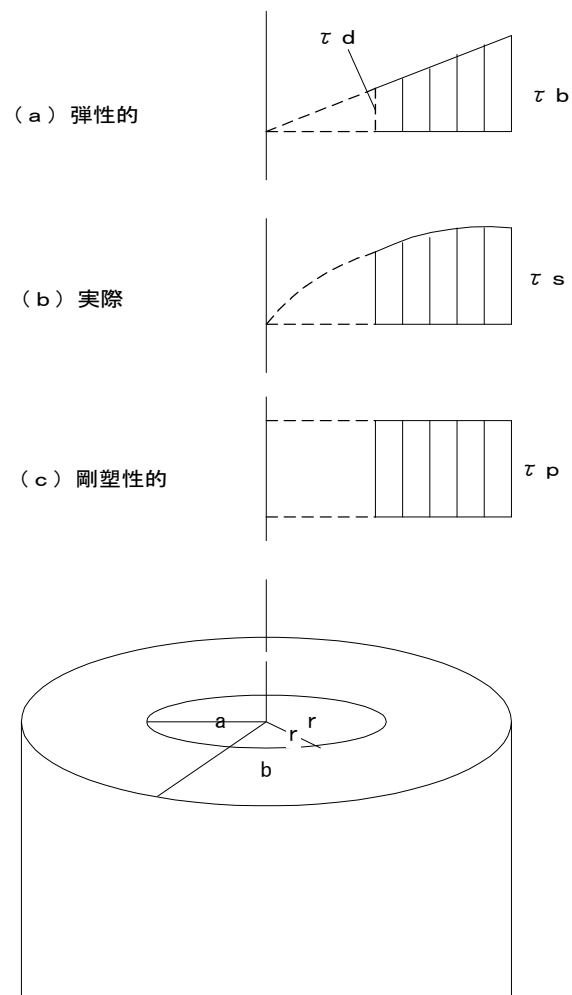


図 2-4 せん断力の分布

る目的で試験機の複雑化・肥大化は絶対に避けること。

⑦ 初心者でも使いやすいものであること。習熟期間が短くそれほどの技術を必要としない試験機であれば、データに個人差が出にくく複数の人のデータを同一レベルで比較できるようになる。

⑧ 長時間にわたるせん断試験において、自動計測に適したものである。

今回使用した、繰返し中空ねじりせん断試験装置の全景を写真 2-1 に示す。

(2)セル本体

図 2-5 にセル本体の全体図を示す。図からもわかるように耐圧円筒と上盤は分離しており、耐圧円筒が支柱の外側に位置しているため、キャップとロッドを結合したまま、供試体に影響も与えないで耐圧円筒をセットできる。なお、軸荷重・せん断荷重は上方から加える。供試体は、中空円筒形のもので、ペDESTALは、供試体の内外径にあわせてあり、端部の滑りを防ぐために、ポーラスストーンには高さ約 2mm の金属刃のブレードを 8 枚埋め込んでいる。写真 2-2 にこれらを収めたセル本体を示す。

2-3 K₀圧密条件下における繰返し中空ねじり試験の実験概要

本研究では、二重セル型中空ねじりせん断試験装置を用い、パーソナルコンピュータ制御のもとで K₀ 圧密状態を再現し、過圧密砂の液状化強度特性を調べる。ただし、このような試験条件を満足するために、予め装置の改良を行う。過圧密履歴の与え方として載荷盛土工法と地下水位低下工法を様々な割合や順序で組み合わせた工法を再現し、それぞれの圧密時における K₀ 値の挙動等の相違について検討する。

実験に使用した試料は常陸那珂砂である。空中落下法により所定の相対密度 $D_r=45\%$ になるように作製した。供試体は、外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の中空円筒形のものである。供試体作製の際に使用したメンブレンは厚さ 0.3mm のラテックスゴム製のものである。その供試体に対して CO₂ 置換を行い、脱気水を供試体体積の 2 倍程度通し飽和化を行う。また、過剰間隙圧係数 B 値が 0.95 以上になったものに対してのみ実験を行う。つまり B 値が小さいものは、飽和度の低下を意味し、液状化強度を過大評価する恐れがあるためである。

また、本研究における K₀ 圧密試験の精度は次のようである。パーソナルコンピュータ制御の下、圧密中の側方ひずみは $\pm 0.05\%$ 以内に収まるように側圧にて制御している。K₀ 圧密載荷では、毎分 1.96kPa の速度で軸圧縮応力を与えて側方ひずみ $\pm 0.05\%$ (基準水位ビューレットと内セルの水位差 $\pm 0.05\text{ml}$ 以内)以下に収まるようにした。本装置は、内セルの自由開放水面積をできるだけ小さくして、水位変化量の精度を向上させ、その変化量を差圧計で測定できるようにしている。K₀ 圧密試験方法は、地盤工学会において 1995 年に定められている「土の K₀ 圧密三軸圧縮試験方法」の学会基準案に準拠した。

過圧密履歴は、所定の初期鉛直有効応力($\sigma_{v0}'=49.5\text{ kPa}$)で 30 分 K₀ 圧密した後、初期鉛直有効応力の 2 倍、3 倍、または 5 倍の鉛直有効応力 σ_v' を鉛直方向に与えて 1 時間 K₀ 圧密し、その後鉛直有効応力 σ_v' を初期鉛直有効応力 σ_{v0}' まで除荷する方法で与えた。このとき水平有



写真 2-1 試験装置の全景

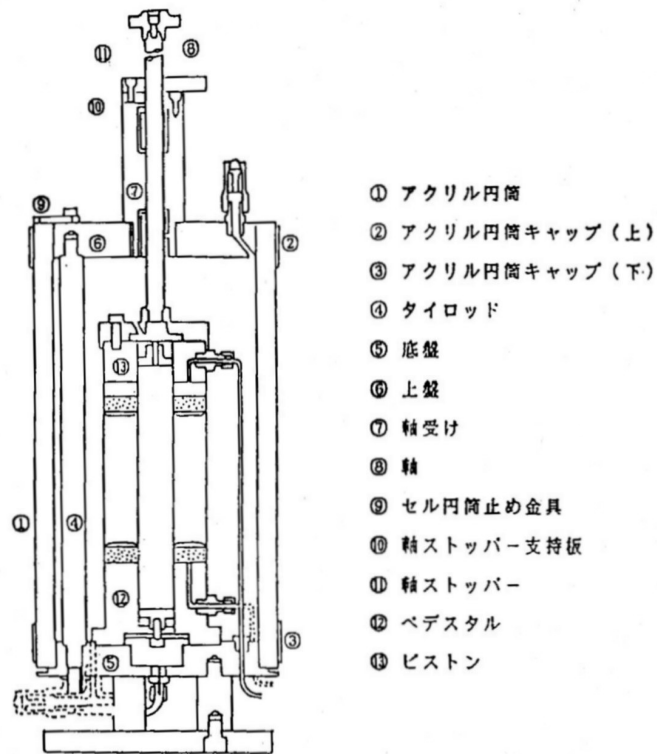


図 2-5 セル本体図



写真 2-2 セル本体

効応力 σ_h' は、通常、鉛直有効応力 σ_v' の増加・減少に伴い、 K_0 応力状態を保ちながら変化する。このときの過圧密比(OCR)_v は、最大鉛直有効応力 σ_v' と初期鉛直有効応力 σ_{vo}' の比で定義している。また、等方応力状態で過圧密履歴を与える場合、過圧密比(OCR)₀ は、最大鉛直有効応力 σ_v' と初期鉛直有効応力 σ_{vo}' の比、または最大水平有効応力 σ_h' と初期水平有効応力 σ_{ho}' の比で定義している。

2-3-1 K_0 圧密の手順

図 2-6 に K_0 圧密フローチャートを示す。 K_0 圧密は以下の手順で行っている。

(1) K_0 圧密（軸力制御）の場合

1. 供試体に二酸化炭素ガスを約 30 分間流入させる。
2. 供試体に、供試体体積と同程度の脱気水を下から上に流す。水頭差は 4.9(kPa) 以下とする。
3. 供試体および排水系統（チューブ類）が飽和したことを確認した後、ビューレットを接続する。この時、ビューレット水位をセル水位に合わせる。
4. ダイヤルゲージの読みをゼロとした後、供試体の飽和を完全にするために、背圧を 98(kPa) まで加える。この際、セル圧背圧との差を 19.6kPa に保つ。
背圧をかけた状態で 20～30 分間放置する。
5. 非排水状態にした後、 B 値の測定を行う。測定は、載荷と除荷で行い、平均値をとる。
6. 再び排水状態にしてロッドのクランプを締め、載荷軸にセットし、載荷軸にセット直前の重りと受け皿分の重さを軸力を使ってかけ、クランプを緩める。軸変位計もセットする。
7. アンプの配線をし、パーソナルコンピュータに供試体寸法（外径・内径・高さ）、初期軸力(kPa)、セル圧(kPa)、サンプリング周期(回/min)、背圧(kPa)、許容水位差の上限および下限(ml)、待ち時間(sec)、初期背圧(kPa)を入力する。図 2-7 にアンプとコンピューターの配線図、図 2-8 に K_0 圧密載荷時の繰返し中空ねじりせん断試験装置システムをそれぞれ示す。
8. 自動で毎分 1.96kPa の速度で軸圧縮応力を加え鉛直有効応力を増加させる。
9. 所定の鉛直有効応力まで上げてから 1 時間放置する。過圧密履歴の際も所定の鉛直応力まで上げた後 1 時間放置し、初期の鉛直有効応力まで除荷する。そして、30 分間放置する。

(2) K_0 圧密（背圧制御）の場合

1. (3)(a)の 1.~9.と同じ操作を行う。
2. 鉛直応力を初期鉛直有効応力($\sigma_{vo}'=49.0\text{kPa}$)まで増加させる。
3. 約 30 分間 K_0 圧密を行う。
4. 背圧を所定の鉛直有効応力 σ_v' になるまで毎分 9.8kPa の割合で除荷し、約 1 時間 K_0 圧密する。
5. 背圧を初期鉛直有効応力($\sigma_{vo}'=49.0\text{kPa}$)になるまで毎分 9.8kPa の割合で載荷し、約 30 分間 K_0 圧密する。

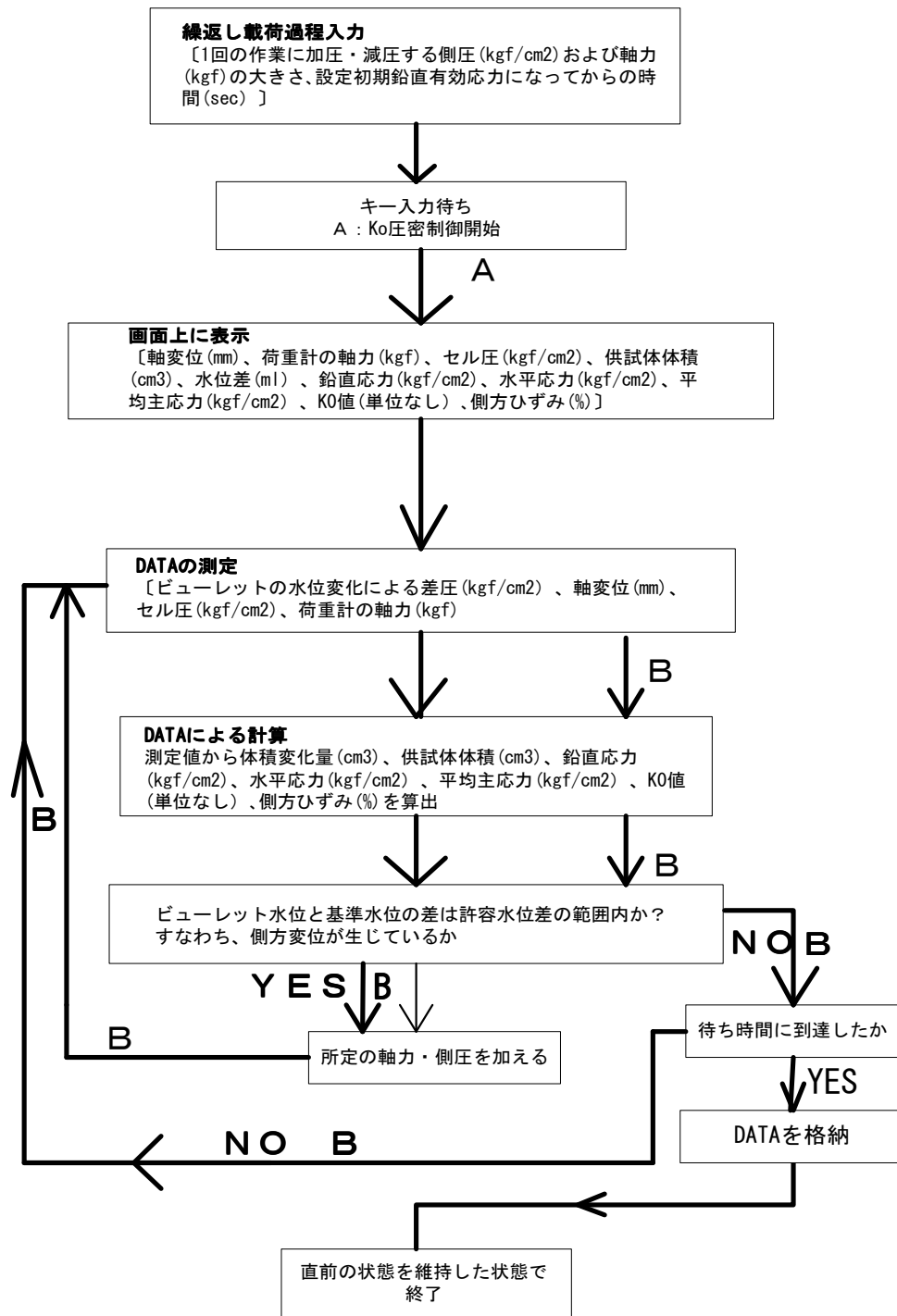


図 2-6 K₀ 圧密フローチャート

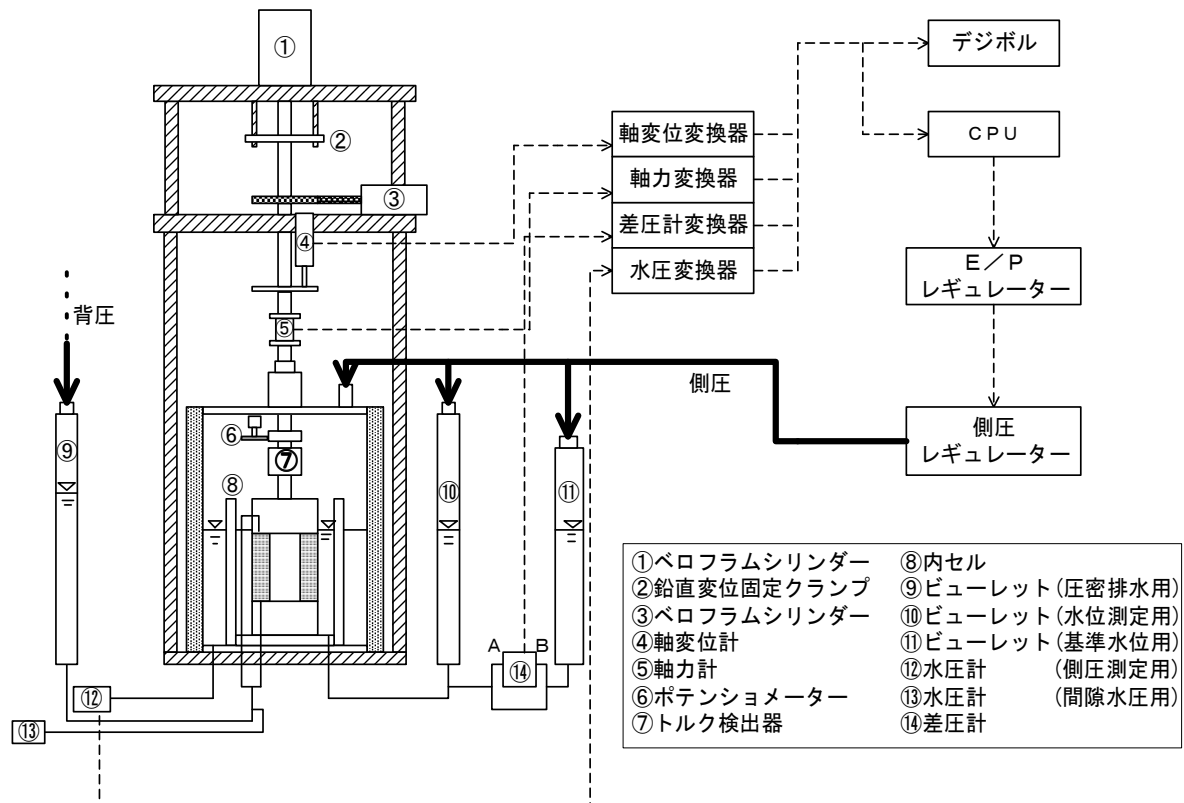
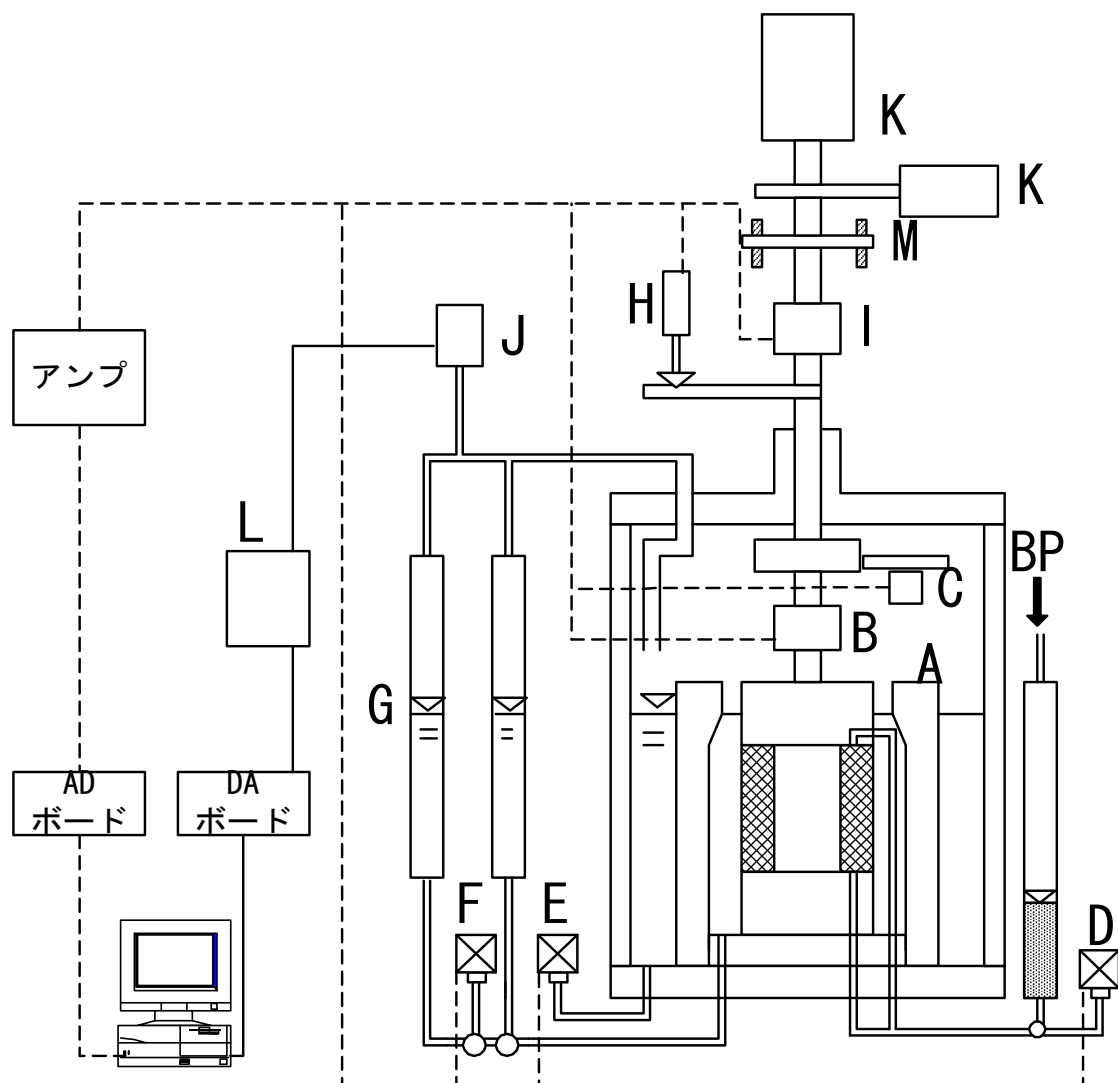


図 2-7 K_0 圧密载荷繰返し中空ねじりせん断試験装置配線図



- | | |
|----------|------------------|
| A: 内セル | G: 基準水位管 |
| B: 内トルク | H: 軸変位計 |
| C: 回転角 | I: ロードセル |
| D: 間隙水圧計 | J: 電空圧変換器 |
| E: 側圧計 | K: ベロフラムシリンダー |
| F: 差圧計 | L: サーボモータコントローラー |
| | M: 鉛直変位拘束クランプ |

図 2-8 K_0 圧密載荷時の繰返し中空ねじりせん断試験装置システム

(3) K₀ 圧密（軸力制御＋背圧制御）の場合

1. (3)(a)の 1.~9.と同じ操作を行う。
2. 鉛直応力を初期鉛直有効応力 ($\sigma_{vo}'=49.0\text{kPa}$)まで増加させる。
3. 約 30 分間 K₀ 圧密を行う。
4. 所定の鉛直有効応力 σ_v' と初期鉛直有効応力($\sigma_{vo}'=49.0\text{kPa}$)を二等分する鉛直有効応力まで軸力制御で上げる。
5. 背圧を所定の鉛直有効応力 σ_v' になるまで毎分 9.8kPa の割合で除荷し、約 1 時間 K₀ 圧密する。
6. 背圧を所定の鉛直有効応力 σ_v' と初期鉛直有効応力($\sigma_{vo}'=49.0\text{kPa}$)を二等分する鉛直有効応力まで毎分 9.8kPa の割合で載荷する。
7. 軸力を初期鉛直有効応力($\sigma_{vo}'=49.0\text{kPa}$)になるまで除荷し、約 30 分間 K₀ 圧密する。

2-3-2 実験結果の整理方法

(1) 供試体の初期状態

試験前の供試体体積 V_0 (cm³)を次式で算定する。

$$V_0 = \pi \cdot D_0^2 \cdot H_0 / 4$$

ここで、 D_0 : 試験前の供試体直径 (cm)

H_0 : 試験前の供試体高さ (cm)

(2) 圧密過程

- ① 圧密後の供試体体積 V_c (cm³)を次式で算定する。

$$V_c = V_0 - \Delta V_0$$

ここで、 ΔV_0 : 圧密による排水量 (cm³)

- ② 圧密後の供試体高さ H_c (cm)を次式で算定する。

$$H_c = H_0 - \Delta H_c$$

ここで、 ΔH_c : 圧密による軸変位量 (cm)

- ③ 圧密後の供試体断面積 A_c (cm²)を次式で算定する。

$$A_c = V_c / H_c$$

- ④ 圧密後の乾燥密度 ρ_{dc} (g/cm³)を次式で算定する。

$$\rho_{dc} = m_s / V_c$$

ここで、 m_s : 供試体の炉乾燥質量 (g)

- ⑤ K₀ 圧密時側方ひずみ ε_r

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2V_0} \{ (A_p \cdot \Delta H - A_w \cdot \Delta H_w) - A_0 \cdot \Delta H \} \cdot 100$$

ΔH_w : 内セルの水位変化量 (上昇を正)

A_w : 内セル水の自由水面の面積

A_p : 内セル水の自由水面位置での載荷ピストンの断面積

(3) 繰返し非排水せん断過程

- ① 所定の軸ひずみの両振幅 DA の時の繰返し載荷回数 N_c を求める。軸ひずみの両振幅 DA は次式で算定する。

$$DA = \Delta L / H_c \times 100$$

ここで、 ΔL : 供試体高さ変化 ΔH の両振幅 (cm)

- ② $DA=10\%$ までの付加力の両振幅 (mm) を積算し、その波数で除して平均を導く。

- ③ 繰返し軸差応力の片振幅 ρ_d (kgf/cm²) を次式で算定する。

$$\rho_d = (P_C + P_E) / (2 A_s)$$

ここで、 P_C 、 P_E : 各々圧縮及び伸張繰返し軸荷重片振幅 (kgf)

(4) 補足

所定の DA になった時の繰返し載荷回数 N_c を求める際、10 回未満の N に対しては次式で算定する。

$$N = \frac{DA - DA(N_i)}{DA(N_i + 0.5) - DA(N_i)} \times 0.5 + N_i$$

(5) 液状化強度比の定義

液状化発生時点の判断として、繰返し三軸試験で用いられる $DA=5\%$ に対応し、繰返しねじりせん断試験の場合、 $DA=7.5\%$ をとることとし、繰返し回数 $N_c=20$ で $DA=7.5\%$ に到達する繰返し応力比を液状化強度比と定義する。