

三軸圧縮試験のリアルタイム処理システムについて

三輪晃一・難波直彦・宮崎逸男*・恒吉明彦**

(農地工学研究室・*農業水利学研究室)

昭和58年8月10日 受理

On the Real Time Processing System for Triaxial Compression Test of Soil

Koichi MIWA, Naohiko NANBA, Itsuo MIYAZAKI* and Akihiko TSUNEYOSHI**

(Laboratory of Farm Land Engineering, *Laboratory

of Irrigation and Drainage Engineering)

緒 言

土質材料の三軸圧縮試験にパーソナルコンピュータシステムを組み込んだ場合、応力、ひずみ、間隙水圧または体積変化の自動計測とそれらの相互関係がリアルタイム処理できる利点は大きい。このようにコンピュータを土質試験に導入する試みは、まずデータの収集と整理に始まり¹⁾、いわゆるラボラトリオートメーションをはかる傾向にある²⁾。われわれの実験室でも計測と処理のシステム化を検討してきたが、現在は三軸圧縮試験のリアルタイム処理が可能な段階である。本文ではその出力例を提示し、システム化の過程で検討した事項について述べる。

計測、処理システム

土の三軸圧縮試験は、破壊時の地盤の排水条件に合わせて圧縮強度を測定する方法である。その基本的手順は、(i) 一定液圧 p_c を供試体に作用させる (供試体の応力状態 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p_c$)、(ii) 供試体に軸荷重 P_d を徐々に加えて圧縮破壊させる ($\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_d$, $\sigma_2 = \sigma_3$

$= p_c$) の2段階である。この (i) と (ii) の手順中に供試体からの排水を許すか否かで、試験は非圧密非排水試験 (UU 試験)、圧密非排水試験 (CU 試験)、圧密排水試験 (CD 試験) に分けられる。これらの試験に共通な (i) (ii) の両段階で供試体に作用させる一定液圧 p_c は、空気圧制御弁でコンプレッサの一次圧を所定の二次圧 (p_c) に変換して与えた。また (ii) における圧縮方法にはひずみ制御法を採用した。計測量は軸荷重 (P_d)、軸変位 (dH)、間隙水圧 (dU) および体積変化 (dV) であるが、UU 試験では P_d と dH 、CU 試験では P_d , dH , dU 、CD 試験では P_d , dH , dV を同時計測することになる。その検出には Table 1 の各センサを用いた。自動計測、処理システムのための機器の構成は Fig. 1 に示した。使用した A-D コンバータは、A-D 変換時間 35 μ S、分解能 12 ビット、変換誤差 0.5% F.S. の性能を有するが、増幅器の出力電圧 ± 3 V に合わせてその入力電圧範囲は ± 5 V とした。コンピュータはこれまでデータ処理に使用してきた標準的なシステムに、フロッピディスク 1 台を増設し、また応力～ひずみ曲線などの作図のために専用の

Table 1. Calibration sheets of sensors

Sensor	Capacity	Sensitivity	Nonlinearity	Hysteresis
Load cell	200 kgf	$1497.5 \mu\text{V/V}$ (2995×10^{-6})	0.03%F.S.	0.03%F.S.
Dial gauge with strain gauge for displacement	30 mm	1.5 mV/V (3000×10^{-6})	0.2 %F.S.	
Pressure gauge for pore pressure	10 kgf/cm ²	$1989.5 \mu\text{V/V}$ (3979×10^{-6})	0.07%F.S.	0.05%F.S.
Pressure gauge for volume change	100 gf/cm ²	$1480 \mu\text{V/V}$ (2960×10^{-6})	0.14%F.S.	0.17%F.S.

** 鹿児島県技師 (Engineer of Kagoshima Prefecture)

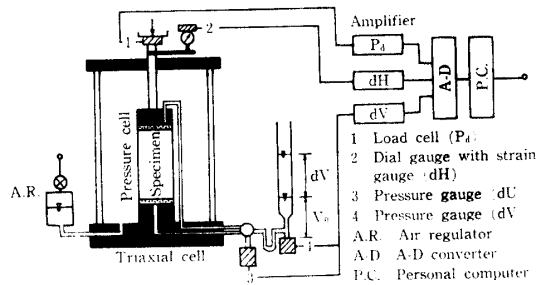


Fig. 1. Automatic measuring system for triaxial test.

X-Y プロッタを接続した。

Fig. 2 と Fig. 3 は自動計測とデータ処理のために用意したプログラムの流れ図である。このうち Fig. 2 は初期状態量の読み込み、試験方法の選択から応力～ひずみ曲線の作図までを含む。この中で試験手順 (i) ではデータの採取間隔を 2^n 秒とし、手順 (ii) では軸変位 0.25mm に要する時間をコンピュータで判断させる方法とした。また (i), (ii) 両段階の実験開始および終了はキーボードから指令する方法を用いた。Fig. 3 はディスクからのデータの読み込みからモールの応力円の作図および強度定数決定のための流れ図である。この中でモールの応力円は 0 から π ラジアンまでを 100 等分して描いた。またその包絡線の作図は最小自乗法で直線式 (勾配 m , 切片 f) を求め、これよ

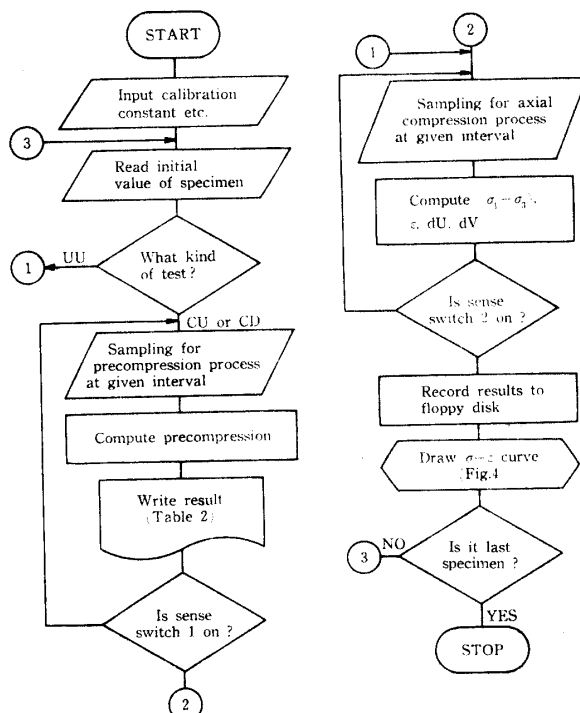


Fig. 2. Flow chart for automatic measurement.

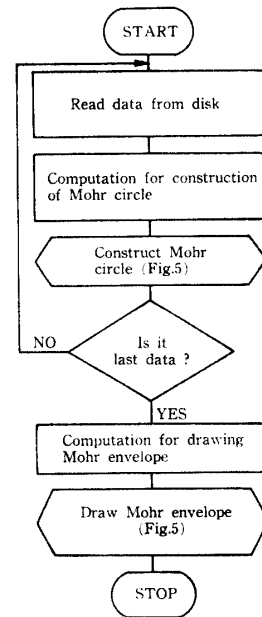


Fig. 3. Flow chart for construction of Mohr circle.

り直線上の 2 点を結ぶ方法とした。強度定数 (ϕ : 内部摩擦角, C : 粘着力) の決定には次式を用いた。

$$\sin \phi = m, \quad C = \frac{f}{\sqrt{1-m^2}}$$

出力例と考察

前述したように実験中の排水条件によって計測量が異なるが、ここでは手順 (i) (ii) を通して Table 1 の 4 センサを使用する CU 試験の場合の出力例を示す。供試体は高さ 12.5cm, 直径 5cm に突固めたクロボクである。飽和後の供試体の物理的性質は含水比 140.34%, 乾燥密度 0.533 g/cm^3 , 間隙比 3.50, 飽和度 96.2% である。

手順 (i) すなわち圧密過程の出力例は Table 2 に、手順 (ii) すなわち軸圧縮過程の出力は応力～ひずみ、間隙水圧～ひずみ曲線の作図結果を Fig. 4 に示した。また Fig. 3 による出力例を Fig. 5 に示した。これらの出力例は、当然システム全体の互換精度の範囲内で表示されている。この互換性はセンサや A-D コンバータの交換性能のほか増幅器を含む電気的雑音や三軸装置の機械的雑音の影響も受ける。そこで Fig. 1 の各機器で構成されているシステムの総合精度的な把握をするために、ここでは計測上きわめて基本的な事項にもとづいて出力例を検討する。

1. センサのトレーサビリティ

各センサの信号を所定の物理量に変換するために校正係数が必要であり、この校正係数の直線性は出力値

Table 2. Record of precompression process

Compression time (sec)	Compressed volume (cm ³)	Description of specimen after precompression
0	0.000	Compression time
2	1.092	T=60717 sec
4	1.247	Pore pressure parameter
8	1.355	B=0.95
16	1.568	Compressed volume
32	1.951	dV=57.63 cm ³
64	2.143	Compressed height
128	2.678	dH=0.86 cm
256	8.966	Height of specimen
512	12.369	H _c =11.89 cm
1024	15.624	Volume of specimen
2048	19.372	V _c =227.7 cm ³
4096	24.240	Cross-sectional area
8192	30.597	A _c =19.144 cm ²
16384	39.427	
32768	46.524	
60717	57.63	

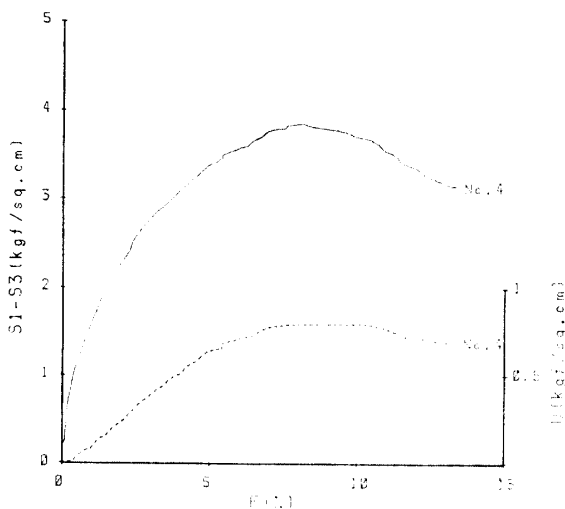


Fig. 4. Output of stress-strain curve of consolidated undrain test (CU test).

の精度に影響する。Fig.6 は次式で求めた各センサの校正係数の直線性である。

$$\left[\frac{n}{10} P \text{ の値} - \frac{(n-1)}{10} P \text{ の値} \right] - \left[\frac{1}{10} P \text{ の値} \right]$$

ここに、 n : 1~10 の整数, P : センサの能力

この検定に用いた標準器はブルービング・リング (200 kgf), ダイアルゲージ (変位用センサのダイアルゲージ使用, 30 mm, 1/100 mm), ブルドン 管式圧力計 (0.15% 級) およびスタンドパイプ (100 ml, 0.2 ml 目盛付) である。

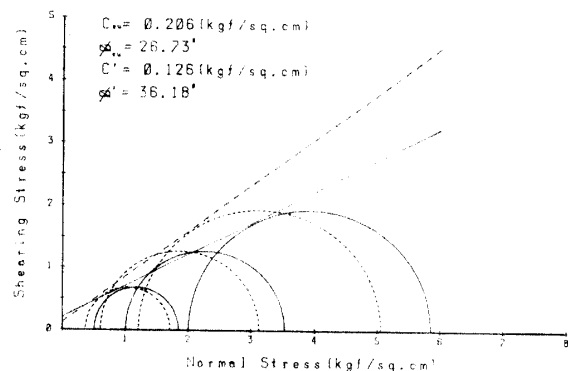


Fig. 5. Example of construction of Mohr circles and its envelope.

上式の各値が常に零であれば、センサの校正係数は直線関係にある。Fig.6 によれば、各センサとも折線で表わされ、校正係数は直線関係にない。しかし変位用センサを除けば、各センサとも標準器の1目盛 (Fig.6 の縦軸の1目盛の大きさに相当) の範囲内で変動しており、これらのセンサのトレーサビリティは良好である。また Fig.6 の実線は増加過程、点線は減少過程であるが、その両線の縦軸の差は往復の差すなわち各センサのヒステリシスを示している。この場合も軸変位のヒステリシスが最も大きく生じている。しかし往だけまたは復だけの差が比較的小さいことを利用すれば、軸変位は 0.05 mm 程度の誤差の範囲で表示できる。この誤差は軸ひずみで約 0.05% になり、

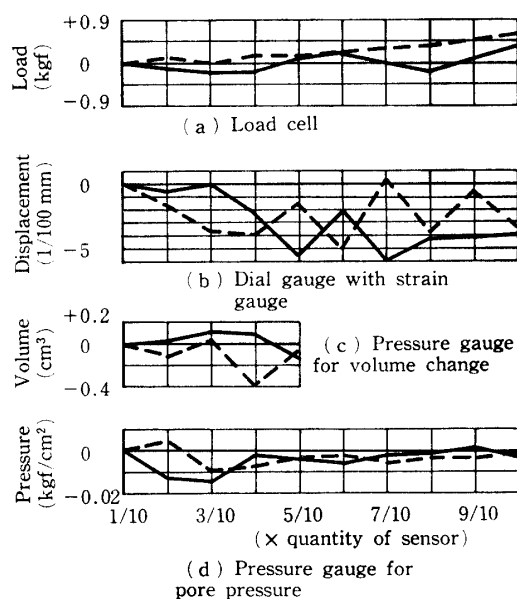


Fig. 6 Traceability of each sensor.

Fig. 4 の出力例ではほとんど問題にならない。

2. サンプルング個数

測定値は数個のデジタル信号の平均値に校正係数をかけて得られる。本システムではサンプルング間隔を 1 mS に設定した。Fig. 4 はこの時間内で軸荷重、軸変位、間隙水圧の順序でセンサからの信号を読み取り、それぞれサンプルング個数 100 個の平均値でその点の測定値を与えた結果である。したがって 1 測点の計測に要する時間は 0.1 秒である。このサンプルング個数が少ないほど計測における時間的遅れが小さくなる。しかし一般にセンサの内的雑音は完全に除去することが困難であるから³⁾、雑音を平均化する意味でもある程度のサンプルング個数は必要である。今回の計測ではサンプルングの最初に異常信号が発生したために、各センサとも最初の信号は除外した。この処理でサンプルング個数は少なくできるが、Table 2 および

Fig. 4 では試験が静的であることから 100 個の平均値を用いている。

3. データの信頼性

Table 3 は、Fig. 1 に各センサの検定に用いた標準器を併用して測定し、その指示値とシステムの入力値の差をシステムの互換誤差とした場合である。この誤差の最大値は、各センサの非直線性 (Table 1) と増幅器の非直線性 (ストレンアンプ 0.5% F.S. または直流増幅器 0.05% F.S.) の和に A-D コンバータの交換誤差 0.5% F.S. を加算した場合に比べて小さい。このことは計器間の誤差の累加作用がそれほど大きく働いていないとも考えられる。しかしその誤差はいずれもセンサの非直線性よりも大きい。またローパスフィルタ内蔵の直流増幅器 (バンド幅 10 Hz) を用いた場合はストレンアンプの場合に比べて互換誤差が小さく、その効果はロードセルで最大である。軸圧縮過程における軸ひずみの不安定な動きや軸荷重の異常な値は、ストレンアンプを用いる場合サンプルング個数を増しても消去できないが、フィルタを通すことでそれらの変動はかなり減少できる。

以上の検討結果から、計測には 0.1 秒の時間的遅れを生ずるが、システムの入力、例えば Fig. 4 の応力～ひずみ曲線に現われた変動は供試体の挙動を反映していると考えられる。

要 約

土の三軸圧縮試験にパーソナルコンピュータを導入して、この試験のリアルタイム処理が可能になった。しかし出力されるデータの信頼性はセンサ、増幅器、A-D コンバータなどを含む計測系の構成機器の 1 つ 1 つの精度に支配されていることが明らかになった。このために本システムでは (1) 三軸装置の機械的振動による雑音、(2) 計測機器に発生する電氣的雑音お

Table 3. Comparison of nonlinearity of instruments (sensor+amplifier+A-D converter) and detected error in test

Physical quantity	Case of using strain amp.		Case of using amplifier with low pass filter (10Hz)	
	Total non-linearity	Detected error	Total non-linearity	Detected error
Axial load	1.03%F.S.	0.78%F.S.	0.58%F.S.	0.10%F.S.
Axial displacement	1.2 %F.S.	0.29%F.S.	0.75%F.S.	0.12%F.S.
Pore pressure	1.07%F.S.	0.33%F.S.	0.62%F.S.	0.11%F.S.
Volume change	1.14%F.S.	0.41%F.S.	0.69%F.S.	0.17%F.S.

よび (3) センサの検定に用いる標準器の性能についてさらに検討する必要がある。

謝辞 プログラムの開発には、宮崎大学農学部教授国武昌人博士の御教示を得た。ここに感謝申し上げる。また各種の増幅器を貸与された、本学農業機械系研究室の方々に謝意を表する。

文 献

- 1) 大西有三, 岸本英明: マイクロコンピュータによる土質実験データの収集と整理, 土と基礎, **27 (6)**, 51-55 (1979)
- 2) 大矢 暁, 他 3 名: 一軸・三軸圧縮試験および圧密試験の自動化の現状と問題点, 土と基礎, **23 (11)**, 9-16 (1975)
- 3) 森村正直, 山崎弘郎編集: センサ工学, 朝倉書店, 78-80 (1982)

Summary

In this paper, the real time processing-system for the triaxial compression test of soil was put under examination, and the real time processing of this test was possible through the utilization of the personal computer. The precompression process recorded by this system was given in Table 2, adding to this, the results of real time processing for axial compression-process were in Fig. 4 and 5.

However, in carrying the test out, it was detected that in this system, the reliabilities of the data were depending upon the capacities of the instruments with quite poor accuracy such as sensor, amplifier and A-D converter. Accordingly, it was considered to be necessary to make more detailed examinations on the mechanical and electrical noises, and to make a reconsideration on the reliability of the calibration method of the sensor used in our laboratory.