

最近の静的現場計測用機器の動向

木 村 謙 治*
菅 野 進**

1. はじめに

近年の電子技術の進歩には目を見張るものがある。最近の計測技術の進歩もこの電子技術の進歩に負うところが大きく、様々な計測機器が開発されてきている。特に計測機器へのコンピュータ技術の導入は、測定の省力化・データ処理の迅速化といった面だけではなく、いままで不可能であった測定をも可能にするなどしており、今後更に進歩していくものと思われる。

本文では、こうした現状を鑑み、最近開発されている静的現場計測用機器のうち、

- ① 測温機能を有する新しいタイプのひずみゲージ式土木計測用変換器（センサー）
- ② 現場計測における「市販の」コンピュータの適用
- ③ コンピュータ技術を導入した特殊な現場用測定機器

等について、簡単に解説したいと考える。

2. 測温機能を有する新しいひずみゲージ式変換器

コンクリート構造物の挙動計測に際し、挙動の重要なファクターとなる物理量に温度変化が挙げられる。例えば、コンクリートのひずみを測定する場合、温度も測定する必要からひずみ計と温度計を併設することが一般的に行われている。これは、温度変化がコンクリートひずみに大きく影響することによるものであり、温度応力によるクラック発生等の問題では不可欠な測定項目であ

る。

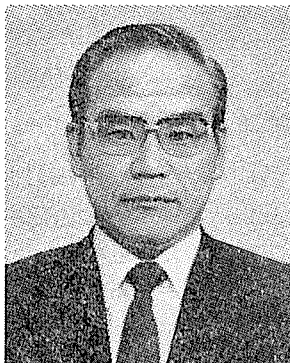
この温度計併設の必要がない変換器として、従来よく現場等に使用されていたものに「カールソン型」変換器がある。この変換器は同一変換器でひずみ・応力・変位といった力学量と同時に温度を測定することができ、現場計測用変換器としてかなり使用された時期があった。しかしながら精度・測定の容易さといった面で多くの問題点を有しており、我が国における最近のコンクリート構造物挙動の測定では、そのほとんどが「ひずみゲージ式変換器」¹⁾ にとって代わっているのが現状である。

このひずみゲージ式変換器は、カールソン型に比較して様々な点で改良されており、種々の長を有している^{2),3)}。しかしながら、カールソン型変換器に対するひずみゲージ式変換器の唯一の弱点は、温度も同一変換器で測定できなくなったことである。そのため温度も測定しようとする場合は温度計の併設が必要となり、コストアップの要因ともなっていた。

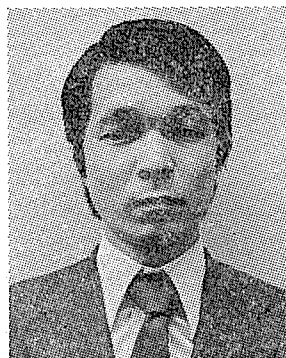
ひずみゲージ式変換器でも、同一変換器で同時に温度も測定できるという新しい変換器が開発されている⁴⁾。この変換器は「測温機能付ひずみゲージ式変換器」と言うべきものである。この新しい変換器は、今後我が国におけるコンクリート構造物挙動計測用変換器の主流になることが考えられるため、簡単にその原理等を解説したい。

2.1 測温機能付ひずみゲージ式変換器の概要

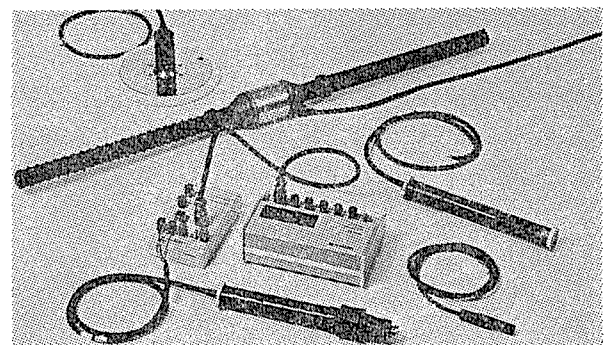
従来のひずみゲージ式変換器に、これもまた従来から温度測定用素子として知られている白金抵抗体 (Pt) を1個のみ追加することによって、測温機能を付加することに成功した。白金抵抗体は温度変化によってその抵抗



* Kenji KIMURA
(株)共和電業計測エンジニアリング部部长



** Susumu KANNO
(株)共和電業計測エンジニアリング部技術開発室



写真—1 測温機能付ひずみゲージ式変換器

表—1 測温機能付ひずみゲージ式変換器

| 種 類 | 測温機能付ひずみ計 | 測温機能付継目計 | 測温機能付鉄筋計 | 測温機能付応力計 |
|------------------|--|--|--|--|
| 型 式 名 | BS-25 AT BS-8 FT | BJ-5 AT BJ-10 AT BJ-20 AT BJ-50 AT | BF-10 CT BF-22 CT BF-13 CT BF-25 CT BF-16 CT BF-29 CT BF-19 CT BF-32 CT | BR-20 KBT BR-50 KBT BR-100 KBT |
| 温 度 測 定 範 囲 | -30~+70°C | | | |
| 温 度 測 定 誤 差 | ±0.5°C (-10~+50°C), ±1°C (-30~+70°C) | | | |
| 容 量 | BS-25 AT ±500×10 ⁻⁶ ひずみ BS-8 FT ±1000×10 ⁻⁶ ひずみ | BJ-5 AT 5 mm BJ-10 AT 10 mm BJ-20 AT 20 mm BJ-50 AT 50 mm | 3 000 kgf/cm ² | BR-20 KBT 20 kgf/cm ² BR-50 KBT 50 kgf/cm ² BR-100 KBT 100 kgf/cm ² |
| 計 器 長 | BS-25 AT 250 mm BS-8 FT 80 mm | 260 mm | 900 mm | 円板の厚さ 13 mm 円板の直径 φ190 mm |
| 出 力 電 圧 感 度 | ±1 mV/V 以上 | 1 mV/V 以上 | 1.85 mV/V 以上 | 1 mV/V 以上 |
| 非 直 線 性 | BS-25 AT 1.5% RO BS-8 FT 2% RO | 1.5% RO | 1% RO | 1% RO |
| 許 容 負 荷 | 120% | 120% | 120% | 150% |
| 推 奨 ブリッジ電圧 | 2~10 V DC または AC | | | |
| 入 力 抵 抗 | 350 Ω | | | |
| 出 力 抵 抗 (0°C にて) | 450 Ω | | | |
| 許 容 温 度 範 囲 | -30~+80°C | | | |
| 零 点 の 温 度 影 響 | 11×10 ⁻⁶ ひずみ/°C* | 0.05% RO/°C | 0.05% RO/°C | 0.05% RO/°C |
| 出 力 の 温 度 影 響 | 0.05%/°C | | | |

値が大きく変化するという原理を利用したもので、JISにも規定されているものである。

この種の変換器は、現場に埋設されて長い場合は10年以上も測定継続されることがあるため、どうしても使用実績が問題となる。その点、これらの変換器は充分実績を有する変換器と素子によって構成されており、長期測定にも使用可能である。

現在、表—1の種類の換器が製品化されている。原理的にはほとんどのひずみゲージ式変換器に適用が可能であるため、今後他の変換器にも適用されていくものと思われる。

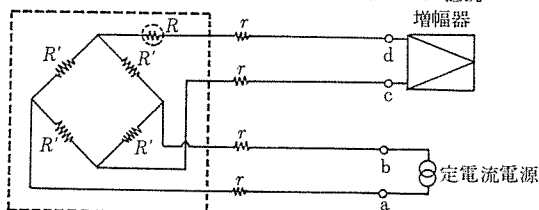
2.2 測定の原理

図—1は測定の回路を示したものである。

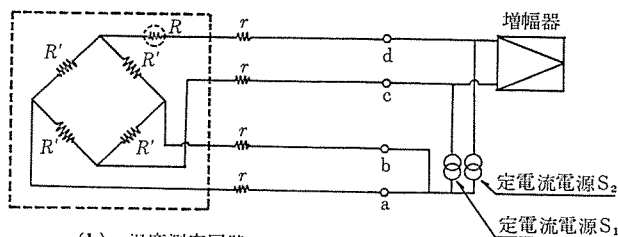
同図(a)はひずみ・応力といった力学量の測定回路であるが、この場合、白金抵抗体の存在はほとんど力学量測定値に影響を与えない。これは力学量測定時、測定器(増幅器)のインピーダンスがケーブル抵抗に比して充分大きいためケーブル c, d にはほとんど電流が流れず、白金抵抗体 R に電圧降下が生じないことによるのである。

図—1(b)は同一変換器で温度を測定する回路である。温度変化によって R(0°C で 100 Ω) が変化する。このときひずみゲージ抵抗 R' も力学量に応じて抵抗変化しているため、R' の変化が温度測定値に影響を与えるこ

R' : ひずみゲージ
R : 白金抵抗体Pt
r : ケーブル抵抗



(a) ひずみ(力学量)測定回路



(b) 温度測定回路

図—1 測定回路図

とになる。したがってこれによる測定誤差を最小限に押さえるために、「定電流電源」(変換器に供給する電流が一定である電源)を2個使用して R' の変化をキャンセルできるようにしている。すなわち、図—1(b)の等価回路を示すと図—2のように表わすことができる。

図—2の Z は4枚のひずみゲージ式抵抗 R' を等価的に表わしたものであるが、この回路にオームの法則を適用して

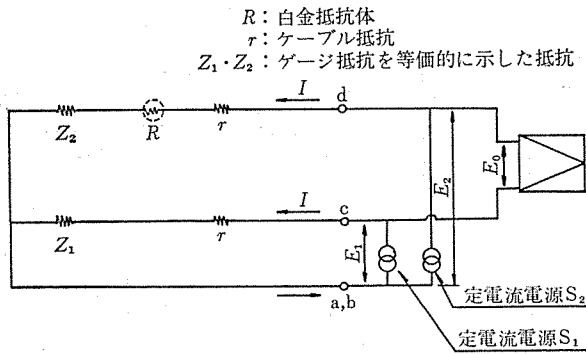


図-2 温度測定時の等価回路図

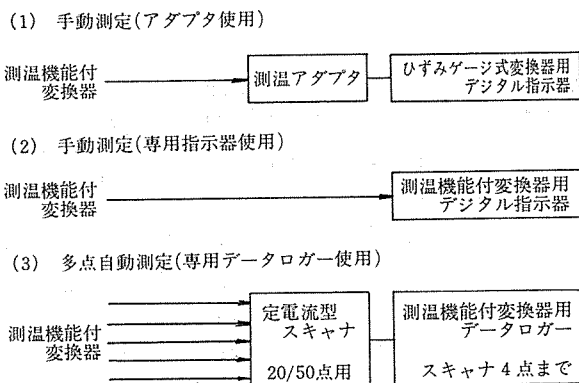


図-3 測定方法

$$E_1 = (Z_1 + r) \cdot I \dots\dots\dots (1)$$

$$E_2 = (Z_2 + R + r) \cdot I \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $I = \text{一定 (定電流)}$

を得る。(1) 式と (2) 式の差 E_0 が増幅器に印加される電圧、すなわち変換器の温度出力であり

$$E_0 = E_2 - E_1 = (Z_2 - Z_1 + R) \cdot I \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここでひずみゲージ式変換器の原理から $Z_1 \approx Z_2$ と考えることができる。したがって (3) 式は、

$$E_0 \approx R \cdot I \dots\dots\dots (4)$$

と近似できる。(4) 式は変換器の温度測定時の出力電圧 E_0 が、ひずみゲージの等価抵抗 Z (すなわちひずみゲージ抵抗 R') やケーブル抵抗 r に関係なく白金抵抗体 R の変化のみによることを示している。

2.3 測定方法

この変換器は、力学量のみを測定する場合は従来のひずみゲージ用測定器 (指示器) で測定可能であるが、温度も同時に測定する場合は、図-3 のようにアダプタなり専用指示器・専用データロガーを使用する必要がある。これらの専用測定器は定量流電源を採用しているので、ケーブル延長 5 km 程度までは感度低下がない。

2.4 特徴

改めてこの変換器の特徴を列举すると、

- ① ひずみゲージ式変換器でありながら、同一変換器

で力学量と温度の二量の測定が可能。

- ② 外觀・形状が従来のひずみゲージ式変換器と全く同じ。

- ③ 使用する延長ケーブルは従来と同じ $0.5 \text{ mm}^2 \times 4$ 芯。

等を挙げることができる。

この測温機能付ひずみゲージ式変換器は昭和 57 年末に開発・発表され、昭和 58 年夏頃より実際に現場に使用され始めたものであるが、その後約 1 年間で急速に普及してきている (現在特許出願中である)。

本文で紹介した測温の技術は、今後別な分野にも応用されてゆき、更に多くの変換器が製品化されるものと思われる。最近の計測技術の進歩の多くが、変換器側ではなく、電子技術の進歩を背景にした測定器側の進歩であることを考えると、こうした変換器側の確実な進歩を促すことが「計測技術の向上」という面からの基本であり重要である、と改めて痛感する次第である。

3. 「市販」のコンピュータの現場計測への適用

測定器・記録器は近年の電子技術の進歩の恩恵を十二分にうけており、新たに発表されてくる製品群には目を見張るものがある。特に目覚ましいのは、従来の測定器・記録器へのコンピュータ技術の導入である⁹⁾。これによって計測の省力化・迅速化が大幅に促進されており、従来に比べると正に様変わりという感がある。

過去 10 年、静的な測定器・記録器に限って見ると、この測定器・記録器へのコンピュータ技術の導入には、いくつかの段階があったように思われる。

- (1) 第一段階 (コンピュータ導入初期)

それまで主流を占めていたアナログ測定の時代から、急速にデジタル化が促進された時代。既に「計測用コンピュータ」は作られるようになっていたが、測定器やコンピュータの周辺機器個々にインタフェース (I/F) を必要とし、機能的にも制限が多かった。

価格も高価であり、計測現場へ持ち込んでデータをオンライン処理することはまれで、紙テープ等を介してオフライン処理することが多かった。

- (2) 第二段階 (測定器へのマイコンの組込み)

昭和 52, 3 年ごろから、測定器にマイクロコンピュータ (マイコン) を組み込み、測定器の制御・チェック等を行うとともに、それまで人力にたよっていた初期値・校正係数の乗算などデータの一次処理を測定器で自動的に処理できるようにしたものが現われた。GP-IB, RS-232C といった I/F が測定機器に採用され始め、測定器とコンピュータの接続が大幅に簡単になった。しかしな

がら安価なパーソナルコンピュータ（パソコン）の普及にはまだ間があり、「計測用パソコン」（多くは輸入品）が使用されることが多かった。

測定器に直接コンピュータの周辺機器（X-Yプロッタ・プリンタ・カセットテープドライブ等）が接続でき、簡単なデータ処理（作図・作表等）は測定器のみで実施できる「高級器」が発表されたのもこの時代である。

（3）第三段階（市販のコンピュータ活用の時代）

パソコンが安価になり、急速に一般に普及し始めている現在、現場計測といえども特別視されなくなっている。従来から使用していた「計測用パソコン」に代わり、一般に普及している安価な国産コンピュータ（本文ではこういったコンピュータを「市販の」と形容している）を現場計測にも積極的に導入し、計測のコストダウンを図っている。現場計測を構造物施工工程の中に明確に位置付けて、データを施工にフィードバックしていく「情報化施工」では、この種のパソコン導入が不可欠である。

この第三段階についてもう少し詳細に見てみたい。

3.1 パソコンを用いた現場計測の基本的システム

多数の測定点を静的に測定し、パソコンを用いてデータを現場処理する場合のもっとも基本的なシステムを図-4に示す。

多数の変換器をケーブルで測定室まで延長しスキャナ（自動多点切換器）に接続する。測定時、1点ずつ切り換えて測定データをデータロガーに転送する。データロガーはそのデータをデジタル変換し、I/Fを介してパソコンに転送する。データロガーはマイコンを内蔵しており、測定系の制御・チェック、データの一次処理を行う。第二段階の、測定器内のマイコンで作図・作表等を実施するというレベルでは中途半端になっており、そういった機能はすべてパソコンで実施するようになっている（測定器の「単機能」化がここでは要求されている）。

一般に図-4のシステムでは、1日何回かの測定データをフロッピディスクに記録しておき、まとめて処理するという形をとることが多い。パソコンによる処理内容の一例を示すと、

- ・測定日報の作成
- ・測定月報の作成
- ・経時・経日変化図の作成
- ・分布図の作成
- ・警報発生（あらかじめ警報値を設定しておき測定値が警報設定値を超えた場合に警報を発する）

等がよく実施されている。

3.2 データの長距離伝送

現場から遠く離れた事務所等で測定データの収集・処

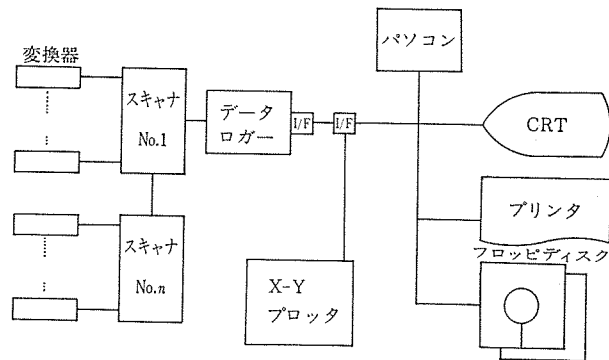


図-4 パソコンを使用した現場計測の基本的システム
(多点・静的測定)

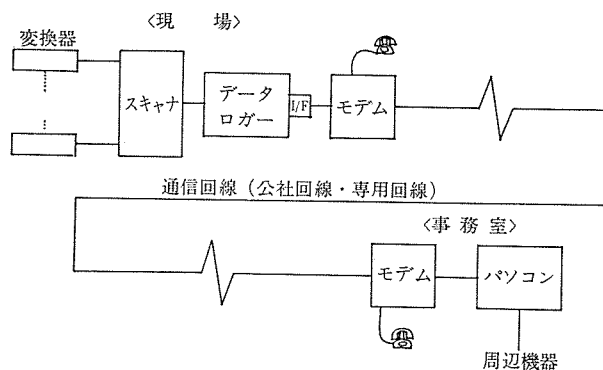


図-5 測定データの長距離伝送

理を行うことが可能になっている⁶⁾。これは、電話回線が比較的簡単に利用できるようになったことによるものであり、今後こういったシステムの導入が増加することが予想される。

図-5は通信回線（公社回線・専用回線等）を用いてデータを長距離伝送するシステム例である。定時に事務所のパソコンから現場のデータロガーに測定開始を指示すると、自動的に測定を実行しデータを伝送する。測定をしない時は一般の電話器として使用することが可能であり、事務所では特にそのために電話回線を増設する必要がない。

例えば1日数回測定するというような場合、データロガーで測定時間間隔を設定しておく、

- ・設定時刻に自動的に測定を実施し、その測定値を内蔵のRAMにメモリしておく
- ・1日1回、通信回線を利用してデータロガーにメモリされたデータを回収する

という使用方法も可能である。

3.3 データ収録と処理の分離

図-4のシステムでは、通常、パソコンでデータを処理している時に測定はできない。1日数回程度の測定ですむような現場計測では特に図-4のシステムで問題はないが、常時測定してデータをCRT表示（モニタ）す

る必要がある、またはそのデータをフロッピディスクに記録する必要がある現場計測では、データ処理中にも測定を継続しておかなければならないという問題が生じる。この場合、市販のパソコンでデータ収録と処理を同時に行うのは機能的に難しく、図-6のように分離しているのが現状である。

動的測定ほど高い周波数の現象ではないが、現象変動

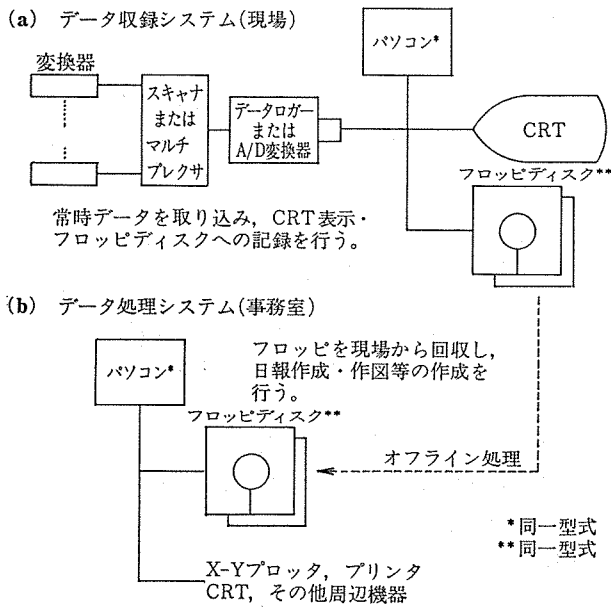


図-6 データ収録とデータ処理の分離

が比較的早い常時測定(モニター・記録)に有効であり、現在、ダム安全管理計測装置⁷⁾等の各種計測管理システムに適用されている。PC-9800(NEC製)・FM-11(富士通製)等がその機能・価格・オプションの有無等の理由によりよく使用されている。このシステムのデータ処理プログラムチャート例を図-7に示す。

圧力計・流量計・変位計等、常時計測管理によく用いられる変換器を10点、常時CRT表示(モニター)・フロッピディスクに記録し、1日1回程度このディスクを回収してデータ処理するシステムの例を示すと、

- ① データ収録システム
 - ・変換器10点をインターバル時間6sec(1点の切換時間0.4sec程度)で測定・サンプリングする。
 - ・1分間にサンプリングした測定値を常時CRT上に表示する(数値表示、波形として表示することも可能)。
 - ・フロッピディスクに測定値を記録
- ② データ処理システム
 - ・データ収録システムから回収したフロッピディスクを用いて、
 - i. 経時変化図作成
 - ii. 日報・月報作成
 - iii. 各種集計表の作成
 - iv. 統計解析
 - v. その他

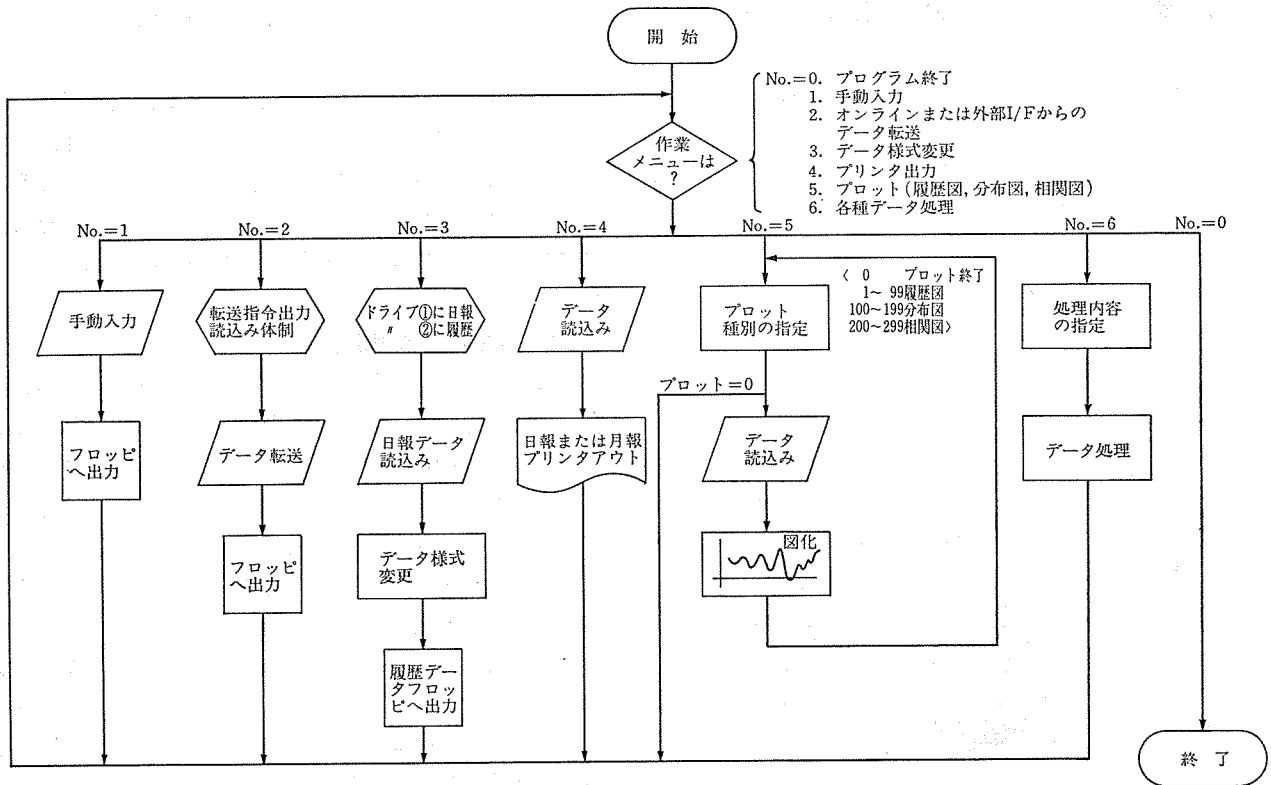


図-7 構造物安全管理データ処理システム フローチャート例⁷⁾

等を実施する。

従来、この種の計測システムでは、アナログレコーダに常時記録しておくとともに、その後何らかの形でデータ処理することが多かった。本システムでは常時測定値をパソコンに取り込むためアナログレコーダが不要になるほか、パソコンによるデータ処理がかなり容易になっている。これまで本社（本店）のミニコンクラスに頼っていた上記 iii, iv の処理を、現場独自で処理できるようになったというような例もあることを付記しておく。

以上、市販のコンピュータを用いた現場計測システム例を簡単に述べたが、パソコンの価格低減と機能アップは今後とも促進されるものと考えられ、より様々な使用方法が採用されていくと思われる。

4. コンピュータ技術を導入した特殊な現場用測定器

前章で述べた第三段階（市販コンピュータの現場計測への活用）は、測定器という側面からは「単機能化」が要求されていた。と同時に、測定器内にコンピュータ技術をより積極的に導入することにより、これまで不可能とされていた測定等が可能になるなど、様々な種別の測定器が開発されている。これらは「単機能化」とは全く異なる第三段階の三つ目の方向であると言える。これらの特殊な測定器について概略を見てみたい。

4.1 商用電源がない場合の長期計測用測定器

山間地・海上等、商用電源がない地点に変換器を設置し、長期測定（静的・自動測定）を実施するための測定器が開発されている^{9),10)}（デジタルストレインレコーダ）。図-8 に示すように測定器を現場に設置し単一乾電池で駆動できるものであり、下記のような機能を有している。

- ・ひずみゲージ式変換器での測定が可能

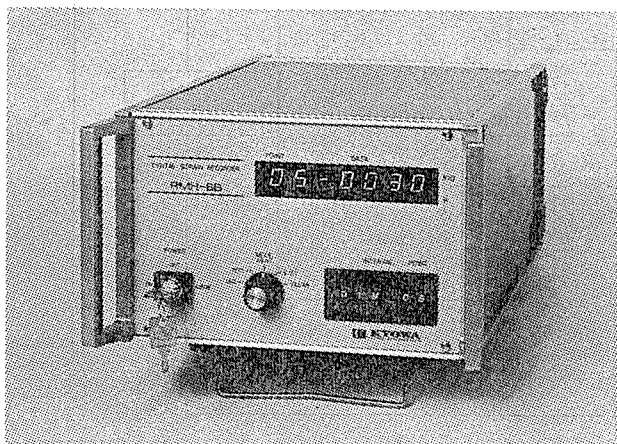


写真-2 デジタルストレインレコーダ

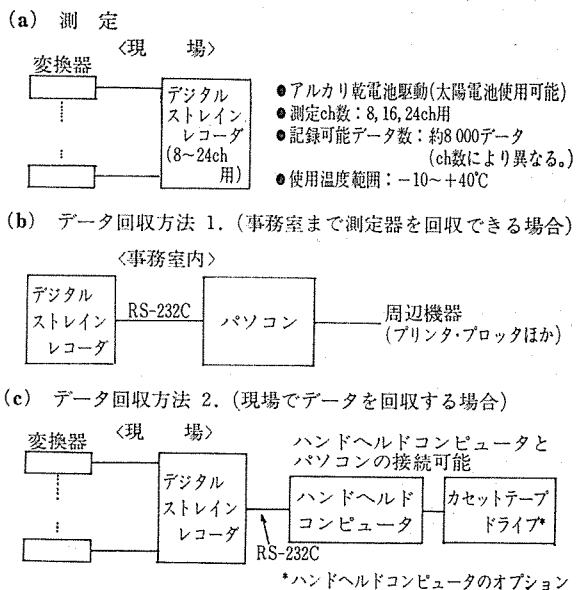


図-8 電池駆動の長期計測用測定器 (デジタルストレインレコーダ)

- ・単一乾電池（アルカリ乾電池）3本
- ・長期測定可能（2回/日・測定点数8点で約1年間の連続測定が可能）
- ・RS-232Cを実装

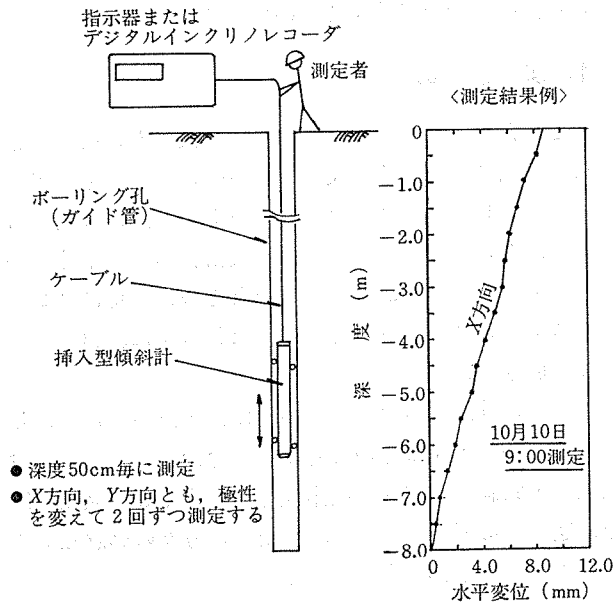
この測定器は、測定値をA/Dして内蔵RAMに記憶しておくものであり、データの回収は、測定器を事務所に持ち帰りパソコンに掃き出す方法と現場にハンディタイプコンピュータ（HC-20：エプソン製等）を持参して掃き出す方法の2通りがある。

この測定器は、省電力・低温特性に優れたCMOS-ICが開発されて初めて可能になったものであり、従来不可能とされていた積雪地での冬期間測定に採用された¹⁰⁾ほか、これまでの山間地・地すべり地・海上等での計測現場に採用されている。今後更に広範囲に適用されていくものと思われる。

4.2 メモ不要の測定器

現場において指示器を用いた手動測定を実施する場合、指示値を目で読みそれを野帳等に記入して事務所に持ち帰り、その後電卓・パソコン等でデータ処理をするというのが一般的に行われている方法である。測定点数が多くなると、測定手間が大変であるとともに、仮にパソコン等でデータ処理をする場合でも測定値のキーインに大きな労力を要しているのが現状である。

数多い変換器のなかで、どうしても手動測定によらなければならないのが「挿入型傾斜計」と言われるものである。これは図-9に示すように、地盤や地中構造物等の深度別傾斜角を測定してその水平変位を求めるもので¹¹⁾、測定用のガイド管内に測定の都度、傾斜計を挿入



図—9 挿入型傾斜計による構造物・地盤の水平変位測定

しなければならぬためどうしても人力に頼らざるを得ない。傾斜計の指示値を指示計で読み取り野帳等にメモするが、例えば50mの深さのボーリング孔1孔で、1回のデータが400データにも上り(X・Y2方向測定時)、その測定やデータ処理に要する労力は多大なものがある。

この挿入型傾斜計用の指示器として下記のような機能を有する測定器が開発されている(デジタルインクリノレコーダ)。

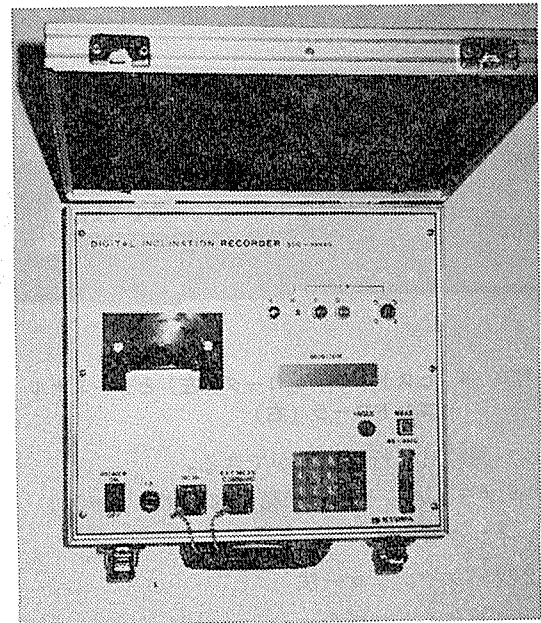
- ・測定値を内蔵RAMに自動的に記録する(メモ不要)。
- ・現場で水平変位の計算・作図が可能
- ・測定値を事務所に持ち帰りパソコンに接続してデータを掃き出すことができる(パソコンへのキーイン不要)……RS-232C実装

この種の測定器は、測定値をカセットテープに記録するタイプが従来から製品化されていたが、かなり大型でありまた高価であり、普及しているとは言い難い。内蔵RAMに記録するタイプの測定器は、カセットテープドライブ等のメカニカルな部分を使用せず、小型化・低価格化が実現されている。

4.3 現場における頻度の測定器

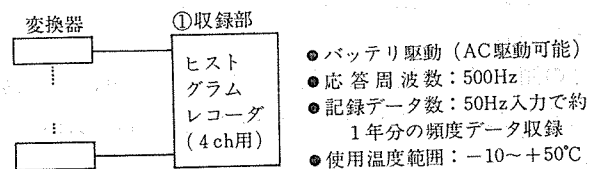
構造物に動的(500Hzまで)に作用する応力・ひずみの頻度、すなわちどれだけの大きさの応力・ひずみをどれだけの回数受けたか、を長期的に測定する現場用の測定器が開発されている(ヒストグラムレコーダ)。

従来、現象の頻度測定のためにはペンレコーダ・データレコーダ等によって波形を連続記録し、その最大値・最小値をカウントすることが多かったが、そうした方法

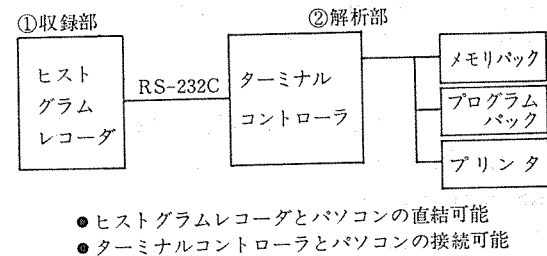


写真—3 デジタルインクリノレコーダ

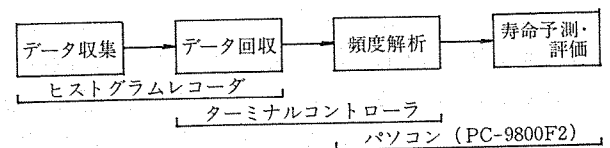
(a) 測定(現場)



(b) データ解析方法(ヒストグラムレコーダを事務室まで回収する)



(c) 測定からパソコンによるデータ解析までのフロー図例



図—10 頻度計測用測定器(ヒストグラムレコーダ)

では測定時間が限られてしまう。この測定値は測定した頻度を内蔵RAMにメモリするタイプであり、1年間程度の長期測定が可能となった。

図—10はこの測定器の構成を示したものであるが、現場に設置しておきデータを収録する①収録部(ヒストグラムレコーダ)と、収録部の初期設定・測定後のデータ読み出しを行う②解析部からなる。解析部では下記に示す解析プログラムで頻度解析を行うことができるほか、より高度な解析をする場合はRS-232Cによりパ

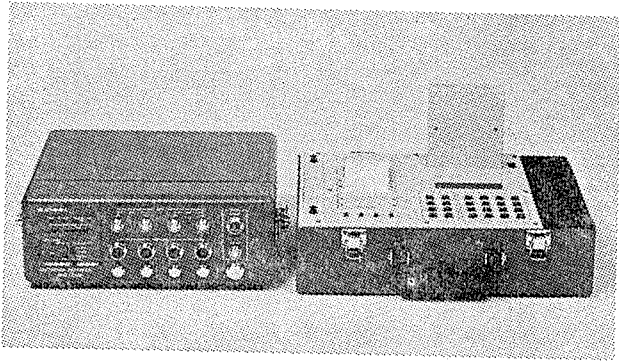


写真-4 ヒストグラムレコーダ（左）とターミナルコントローラ（右）

ソコンへ接続して行うことができる。

[プログラムパックの標準頻度解析プログラム]

- ・ レインフロー法
- ・ 2次元レインフロー法
- ・ 2次元タイムレベル
- ・ 極大値・極小値法
- ・ 最大値・最小値法
- ・ レインフロー法による疲労寿命の推定
- ・ その他

この測定器を計測現場に使用することにより、構造物の長期的挙動モニタ・強度評価・疲労解析等が可能になる。

以上紹介した特殊な測定器は、共通点として下記の項目を挙げることができる。すなわち、

- ① 測定データの記録に磁気テープやそれを動かすメカニカルな機構を使用せず、内蔵 RAM に記録する方法を採用している（すべて電氣的に処理する）。
 - ② RS-232C I/F を標準的に実装しており、パソコンとの直接接続が可能。
 - ③ 電源は乾電池またはバッテリー（省電力）。
 - ④ 耐寒性等、苛酷な現場条件等が考慮されている。
- これまでの無人・自動測定の間接感からすれば、測定データが記録紙上に残されていないことに不安を感じるむきもあるかもしれないが、これらの諸条件は現場型測定

器の今後の方向を示唆するものであると言える。

4. ま と め

最近の新しい変換器・コンピュータ技術を応用した様な測定器についてその概略を一般的に述べてきたが、必ずしもプレストレストコンクリートの計測に直結するものではないかもしれない。測定技術自体は測定分野が異なっても共通する部分が大いと思われ、特にプレストレストコンクリートの計測にこだわらずに記述した。お許し頂きたい。

これらの計測機器はまだその操作性・機能的に改良していく点が多々あるものとする。今後とも、より高付加価値・低価格・容易な操作性等を目標として製品の開発に邁進する所存であるが、使用者の方々の御意見を賜ることができれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 渡辺 理：ひずみゲージとその応用・改訂版，昭和52年4月，日刊工業新聞社
- 2) 矢部ほか：挙動計測用埋設計器，土木施工，Vol. 25, No. 6, 1984年3月，山海堂
- 3) 建設省河川局開発課監修：コンクリートダム細部技術，昭和58年2月，ダム技術センター
- 4) 小川ほか：測温機能付土木用変換器の概略，共和技報，No. 308, 昭和58年10月，共和電業
- 5) 安藤 久：計測機器とパーソナルコンピュータの利用技術，共和技報，No. 315, 昭和59年5月，共和電業
- 6) 小澤 靖：土木計測におけるパソコンの利用，基礎工，Vol. 12, No. 10, 1984年10月，総合土木研究所
- 7) 菅野 進：ダム施工中の計測データ処理用パソコンソフトの開発，土木とコンピュータ，月刊1号，昭和59年11月，山海堂
- 8) 益子貞夫：長期無人計測可能なデジタルストレインレコーダ，共和技報，No. 314, 昭和59年4月，共和電業
- 9) 菅野 進：商用電源が無い計測現場用デジタルレコーダ，土木学会論文集VI, No. 349/VI-1, 1984年9月，土木学会
- 10) 福本安正：地すべり地におけるコンピュータシステムによる自動記録測定，治山，Vol. 28, No. 7, 1983年10月
- 11) 矢部ほか：地盤および基礎の側方変位計測機器，基礎工，Vol. 12, No. 5, 1984年5月，総合土木研究所