

【土木学会論文集 第391号／VI-8 1988年3月】

感圧導電ゴムを利用した土圧計および間隙水圧計の開発と現場への適用

LOW-COST EARTH PRESSURE AND PORE PRESSURE GAUGES
USING PRESSURE RESPONSIBLE CONDUCTIVE RUBBER

庄子幹雄*・太田秀樹**・吉田英信***・佐藤眞***

By Mikio SHOJI, Hideki OHTA, Hidenobu YOSHIDA

and Makoto SATO

Low-cost earth pressure and pore pressure gauges using pressure responsible conductive rubber were newly developed to promote the observational procedure during construction. Their performances were tested by indoor and outdoor investigations. The features of the pressure gauge are as follows: ① Low-cost. The cost of the new pressure gauge is about 160 yen. ② The pressure-response curve of the pressure responsible conductive rubber tends to migrate with the increase in number of repeated pressure application. Since this migration of the pressure-response curve settles gradually when applied a great number of repeated pressure application, the preliminary application of cyclic repeated loading is needed. ③ Durability and water proofness are proved. ④ The pressure responsible conductive rubber has a property of viscosity (creep) and a relationship between pressure and electric resistance of the rubber shows a hysteresis loop, therefore, it is not appropriate to use for the measurement of dynamic behaviour. ⑤ Rubber size has an effect on a pressure range at which the rubber is able to respond properly.

Keywords : earth pressure gauge, pressure responsible, conductive rubber, information oriented construction

1. まえがき

盛土や切土を主体とする土構造物の建設は、土木工事の中でも一番古い歴史を有しており人類は土の挙動特性に関する知識や経験を豊富にもっている。そして土質力学の進歩、建設機械の高度化、社会資本投資の充実により、今日では非常に大規模な土工事が可能となった。

わが国の大手建設会社において建設工事原価に占める土工事の割合は約10%である。おおまかであるが、このことを敷衍して考えると昭和60年度の日本における建設投資は約55兆円であったので、土工事は約5兆5000億円にも達する。

これほど長い歴史と豊富な経験を有し、現在でも多くの土工事を行っているにもかかわらず、一般に施工前にその挙動を確実に予測するのは容易ではない。

このような予測と実際とのギャップを埋め合わせるのが情報化施工という工学的手法である。

情報化施工は現場技術者にもかなり定着しつつあると

いわれてはいるが、土工事が主体となる中小現場においては、計測システムの高価さおよび人手不足などが災いしていまだ十分普及しているとはいえないと思われる。

著者らの調査によると計測管理を実施している工事と総施工高との関連は図-1に示すとおりであり、比較的大規模の大きい工事で計測が実施されていることがわかる。

一方、計測に要するコストは、土木学会のアンケート結果¹⁾によると、総施工高に対して計測費用が占める割合の平均は、全体で約2.0%，盛土、土留め、シールドに限れば平均1.4%となっている。

以上のデータから現場計測を行っている現場は比較的大規模工事で、計測に要するコストは人件費を除いても

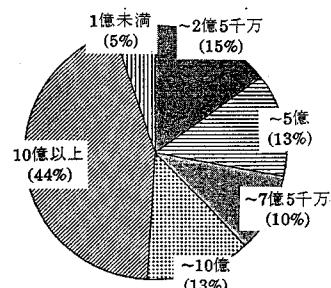


図-1 計測現場の総施工高別割合

* 正会員 鹿島建設株式会社 情報システム部長
(〒107 港区元赤坂1-2-7)

** 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科
(〒920 金沢市立野2-40-20)

*** 工修 鹿島建設株式会社 情報システム部
(〒107 港区元赤坂1-2-7)

最低 500 万円程度、平均 1,000 万～3,000 万円を要していることを示しており、中小現場では現場計測の必要性、利点は認識していても実施を手控えていることがうかがえる。

このような現状において、著者らは情報化施工を広く定着させるためには次の 4 項目が必要であると考えている。

- (i) 安価で取扱いが簡単な計測センサの開発
 - (ii) 自動計測が可能な安価な計測システムの開発
 - (iii) 得られたデータの施工安全管理へのフィードバックシステムの開発
 - (iv) リアルタイムに次工程の挙動予測を現場に伝えるためのコンピュータネットワークの構築
- 本論文では、このうち (i) に関するもので感圧導電ゴムを用いた土圧計および間隙水圧計を開発し、その特性について検討を行ったものである。

2. 土圧計および間隙水圧計の開発

(1) センサの選択

先に述べたように、情報化施工を現場に定着させるためには、安価で取扱いの簡単な計測センサを開発し、かつ人手によらない自動計測にすることが必要である。

このようなニーズに対応した計測センサの一例として土圧計および間隙水圧計の開発を行った。センサの候補として感圧導電ゴム、カールソン型、差動トランス、ひずみゲージ、について、センサの単価と精度および増幅器の必要性を比較したものを表-1 に示す。この表からもわかるように感圧導電ゴムが非常に安価であること、増幅器が不要なことからセンサとして採用した。さらに、感圧導電ゴムの剛性が地盤に近いため周辺地盤になじみやすく応力集中を起こしにくいや他のセンサのように圧力を機械的な加工を介して変形に変換する必要がないため機械加工料が安いことなど数多くの利点を有している。

(2) 感圧導電ゴムの特徴

感圧導電ゴムは、シリコンゴム膜中にカーボン粒子を埋め込んだものを用いており、厚さ（加圧されていない状態）は 0.5 mm である。加圧されていないときは、絶縁状態 ($10 M\Omega$ 以上) にあり、圧力を加えるとその

表-1 各センサの比較

センサ	価 格	精 度	アンプの必要性	総合評価
感圧導電ゴム	160 円 / $\phi 50$ mm 見当	◎ ○	無	◎
カールソン型	8.8 円 〔東横エルメス(株)CE型〕	○ ○	無	○
差動トランス	10.5 万円～35 万円 〔坂田電機(株)EEP-5300D〕	△ ○	有 / 無	△
ひずみゲージ タイプ	7 万円～10 万円 〔共和電業 BE 型〕	○ ○	有	△

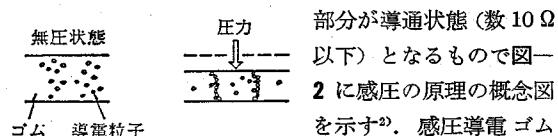


図-2 感圧導電ゴムの感圧の原理²⁾ 2 に感圧の原理の概念図を示す²⁾。感圧導電ゴムタイプの特徴はその安価さ (160 円 / $\phi 50$ mm) と、出力電圧が大きいため、ひずみゲージタイプのように増幅器を必要としない点にある。

(3) 感圧導電ゴムの感圧特性に関する基礎的実験

a) 実験の目的および実験項目

感圧導電ゴムは従来スイッチング素子(オン・オフ用)として利用されていたもので、計測器用センサとして使用できる可能性があると思われるが、現状では感圧導電ゴムの圧力～電気抵抗変化特性およびその精度が十分明瞭かになっているとはいえない。したがって、圧力～電気抵抗変化特性に影響を与えると考えられる次の諸項目について明らかにすることを目的に、室内実験を金沢大学工学部土木建設工学科において実施した。

- (i) 感圧導電ゴムの大きさによる影響（寸法効果）
- (ii) 荷重載荷後の放置時間と抵抗変化の関係（クリープ特性）
- (iii) 載荷時と除荷時の荷重～抵抗関係の違い（ヒステリシス特性）
- (iv) 温度変化による影響

b) 実験方法

前項で述べた (i)～(iv) の項目を明らかにするためゴムの載荷-除荷試験（圧縮荷重）を行った。以下に実験方法について記す。

圧縮荷重に対する感圧導電ゴムの荷重～電気抵抗変化特性を明らかにするため、ここでは圧密試験機を用いて載荷-除荷試験（項目 (iii) に対応）を行った。

実験のケース数は寸法効果の影響を調べる（項目 (i) に対応）ために感圧導電ゴムの大きさが異なる 4 ケース ($\phi 45$ mm, $\phi 35$ mm, $\phi 25$ mm, $\phi 15$ mm) について行った。

表-2 は、実験の諸条件を示したもので、荷重は 0～3.5 kgf/cm² の間で往復させ、各荷重段階における放置時間は 24 時間とした。これにより項目 (ii) のクリープ特性が調べられる。電極は黄銅を用いゴムとの接触面端部の応力集中を避けるためゴムよりも少し大きめの寸法にしている。

実験のシステム概要は、図-3 に示すとおりで、圧密試験器上に載せた上下電極と感圧導電ゴム、定電流回路と逆対数回路を組み込んだオペアンプ、A/D 変換器、PC-9801 VF を使用した。

本実験では、感圧導電ゴム中の発熱によ

表-2 実験条件（感圧導電ゴムの載荷・除荷試験
(圧縮荷重)

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
ゴムの大きさ(mm)	φ45	φ35	φ25	φ15
電極(真鍮板)の大きさ(mm)	φ50	φ40	φ30	φ20
荷重段階 (kgf/cm ²)	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 2.5, 3.5			
除荷時	3.5, 2.5, 1.6, 0.8, 0.4, 0.2, 0.1, 0.08, 0.06, 0.04			
各荷重段階における放電時間	24時間			
計測時間間隔	荷重変更後 0分～10分 : 1分間隔 10分～40分 : 5分間隔 40分～1時間 : 20分間隔 1時間～2時間 : 30分間隔 2時間～24時間 : 1時間間隔			

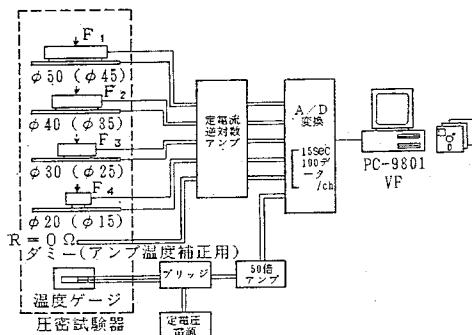


図-3 実験のシステム概要図

るゴムの特性変化を防ぐために、定電流回路を使用した。使用した定電流回路は $15\text{ k}\Omega$ 以下の抵抗値域に対して、 1 mA の一定電流量を保つことが可能であり、 $0\sim15\text{ V}$ の電圧が取り出せる仕様とした。

感圧導電ゴムの特徴として高荷重域で圧力変化に対する抵抗値の変化が小さくなるため、高荷重域での分解能が低荷重域に比べて悪くなる。全荷重域での分解能をほぼ平均化するために逆対数回路を使用した。使用した逆対数回路は、 $0\sim2\text{ V}$ の入力電圧を $0\sim10\text{ V}$ の逆対数変換した電圧として出力する。定電流回路の出力は逆対数回路の入力域に合うように、さらに逆対数回路の出力は A/D 変換器の入力域に合うように圧縮した。

本実験では、PC-9801 VF 内のタイマーを利用して自動計測を行っている。表-2 中の所定の計測時間に自動的に計測が始まり、12 ピットの A/D 変換器により 15 秒間連続して各チャンネル当たり 100 個のデータを取り込み平均値を計算し 5 インチフロッピーディスクに記録することとした。アンプのキャリブレーションは、上下電極間の感圧導電ゴムを取り除いてショートさせた状態で、出力電圧が 2000 mV ($\pm 10\text{ mV}$) になるように調整した。感圧導電ゴムの温度による影響の検討は過去の研究によってなされており、その結果を図-4 に示す³⁾。この温度による影響を取り除くために次の 2 項目についても同時に測定を行った。

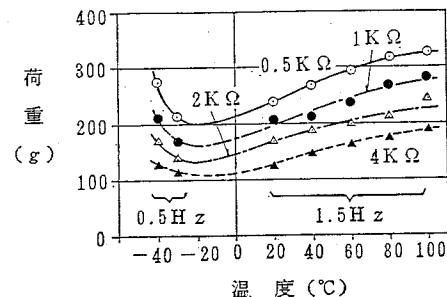


図-4 溫度による特性変化³⁾

① 実験室内の温度

② 抵抗値 0Ω に対する出力電圧の変化

①は温度ゲージ、プリッジボックス、定電圧電源および 50 倍アンプを図-3 のように配し、測定を行った。定電圧電源によるプリッジ印加電圧は 1000 mV とした。

②は、アンプの温度変化による出力電圧のドリフトを補正する目的で行ったもので、初期出力 2000 mV に対する変化量を計算し、測定結果を出力する際に補正を行った。

c) 実験結果および考察

図-5 は荷重 = 1.6 kgf/cm^2 (載荷過程) における放置時間～出力電圧の関係をケース 1～ケース 4 について示したものである。荷重を変化させた後、2～3 時間は出力電圧も急速に上昇するがその後はなだらかな上昇傾向の変動の中に小さな変動を含んだ曲線を描いている。

図-6 は圧力の変化に伴う出力電圧変化の関係を載荷過程および除荷過程について示したもので、荷重放置時間 3 時間ににおける関係をプロットしている。

図-7 (a), (b) は、ケース 1 ($\phi 45\text{ mm}$) およびケース 4 ($\phi 15\text{ mm}$) における圧力～出力電圧の関係を載荷時間のみについて示したもので、荷重放置時間 1 時間、3 時間、12 時間、および 24 時間のときの関係を同時にプロットしている。

図-8 は図-4 に示す荷重～温度関係を出力電圧～温

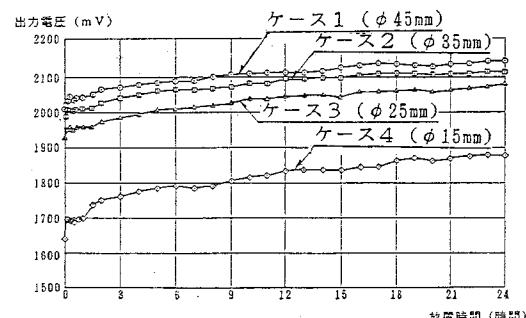


図-5 出力電圧～放置時間の関係

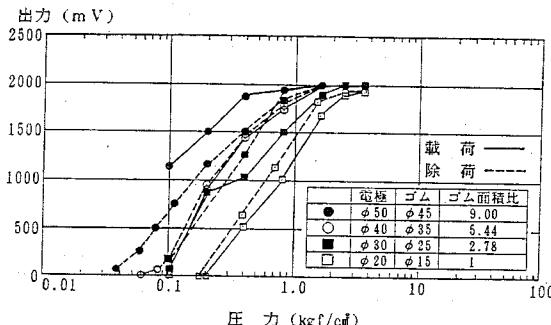


図-6 圧力～出力電圧関係

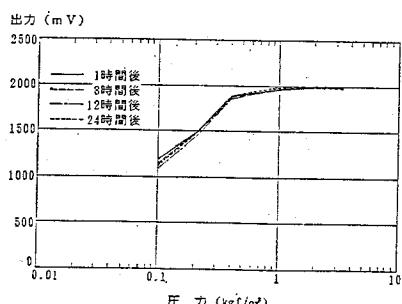
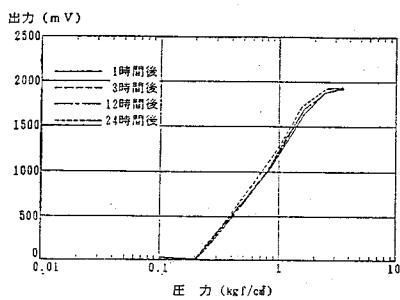
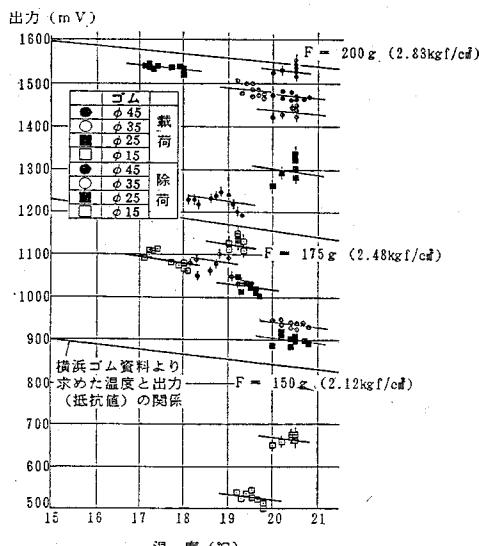
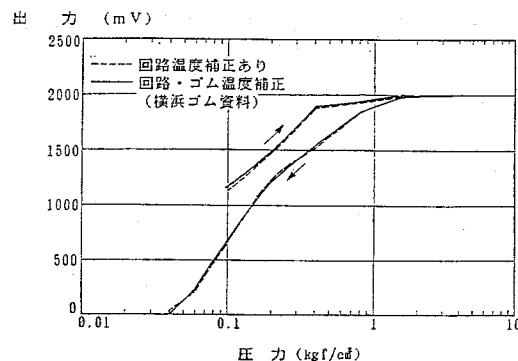
図-7(a) 圧力～出力電圧の関係 ($\phi 45 \text{ mm}$)図-7(b) 圧力～出力電圧の関係 ($\phi 15 \text{ mm}$)

図-8 測定出力 500~1600 mV の出力と温度の関係

図-9 圧力～出力電圧の関係 ($\phi 45 \text{ mm}$)

度関係に荷重をパラメーターとして読みかえたものを直線で示しており、同時に今回の実験で得られた出力電圧～温度の関係もプロットしている。図-4 で示されている結果の実験条件（ゴムの寸法、実験方法など）は今回の実験とは異なるが温度が上昇すると抵抗が増大し出力電圧が低下するという傾向は一致しており、この直線勾配を用いて温度補正を行った。その一例 ($\phi 45 \text{ mm}$) を図-9 に示すが、 4°C 程度の温度変化に対しては高々 2 % 程度（フルスケール 2000 mV に対する百分率）の影響しか認められず、また土圧計、間隙水圧計は温度変化の少ない地中に埋設されることを考慮すれば、温度変化の影響は無視できる。

以上のことから得られる知見をまとめると以下のとおりである。

- (i) 図-6において $\phi 45 \text{ mm}$ の感圧導電ゴムは $0.04 \text{ kgf/cm}^2 \sim 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の圧力域で反応するのに対し、 $\phi 15 \text{ mm}$ の感圧導電ゴムは $0.2 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の圧力域で反応している。したがって、感圧導電ゴムの寸法によって反応する圧力域が異なり、寸法の大きなゴムほど低圧力域で反応し、寸法の小さなゴムほど高圧力域で反応する傾向がある（寸法効果）。
 - (ii) 荷重放置時間として 3 時間をとればほぼゴムの圧力～出力電圧関係は安定する（クリープは終了する）。
 - (iii) 載荷時と除荷時では異なる曲線となり、圧力～出力電圧関係はヒステリシスループを描く（ヒステリシス特性）。
 - (iv) 4°C 程度の温度変化は感圧導電ゴムの特性に大きな影響を与えない（温度の影響）。
- (4) 感圧導電ゴムを用いた土圧計および間隙水圧計の開発

上で示した実験結果によって感圧導電ゴムが土木計測用の土圧計および間隙水圧計に利用できることがわかった。ここでは、感圧導電ゴムを用いてこれらの計測器を

実際に製作してみた。以下でその製作法、構造および製作費用について述べる。

a) 土圧計および間隙水圧計の構造

土木計測用の土圧計および間隙水圧計として感圧導電ゴムを用いるためには、感圧導電ゴムおよび電極の防水を考えする必要がある。ここでは、MS ラミペット L-230（通称パウチッコ）を用いて防水加工を行った。この MS ラミペットは通常定期券や診察券等のビニールカバー用として用いられる機械である。図-10 は土圧計の概略図を示している。電極は厚さ 0.08 mm の黄銅箔を用いており、外部に出した電極にリード線をはんだ付けし同様に防水加工を施している。電極を外部に出す部分は接着剤（アラルダイト・スタンダードタイプ）によって防水加工を行った。

間隙水圧計は土圧計を有孔覆いの中に設置し、センサ周辺の土圧が直接作用しないような構造が考えられる。なお、水中にて（たとえば水柱の高さを測るなど）使用する場合は 図-10 の土圧計をそのまま水中に沈めるだけでよい。

b) 土圧計および間隙水圧計の製作費用

ここで開発した土圧計および間隙水圧計はその製作費用が安価であることが大きな特徴であり、大規模（多チャンネル）の計測が可能となる。そこで、土圧計を例に

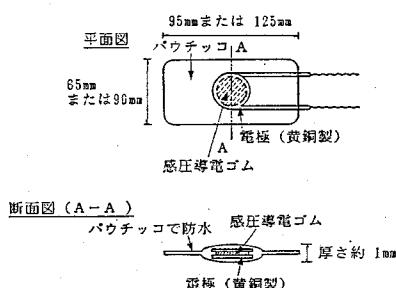


図-10 土圧計の概略図

表-3 土圧計製作費用概算

項目	単価	備考
感圧導電ゴム (横浜ゴム(株))	100円/1枚	2500円/A4枚 (A4枚で25個作成可能(Φ50mm))
MSラミペット用 フィルム (株)明光商会)	20円/1組	95mm×65mm または 125mm×90mm
黄銅箔電極	34円/2枚	170円 (200mm×100mm ×0.08mm)
接着剤	6円/1枚	アラルダイト・ スタンダードタイプ 450円/30cc
合計	160円/1個	

とって製作費用の概算を示したのが表-3 である。製作人件費を除けば160 円と、きわめて安価な土圧計が開発できた。製作に要する時間も 1 個当たり 10 分程度で、手作りとしても人件費が 1 個 100 円程度であり、機械化による大量生産を行えば、さらに安価になることが予想される。

(5) 感圧導電ゴムを用いた土圧計および間隙水圧計の室内実験

2.(4) で製作した土圧計および間隙水圧計を用いて室内実験を行った。2.(4) a) で述べたとおり間隙水圧計は、本質的に土圧計と同じであるのでここでは土圧計を用いて実験を行っている。

a) 実験の目的および実験項目

2.(4) a) で述べた土圧計は、感圧導電ゴムに MS ラミペット L-230（通称パウチッコ）を用いて防水加工をしたものである。このような加工を行っても 2.(3) で明らかになったゴムの特性をもっているか否かを確かめることを主目的にして室内実験を行った。実験によって確かめるべき項目は以下のとおりである。

- (i) 土圧計の大きさによる影響
- (ii) 荷重載荷後の放置時間と抵抗変化の関係
- (iii) 載荷時と除荷時の荷重～抵抗関係の違い
- (iv) 被覆加工の防水性の確認
- (v) 繰り返し載荷時の荷重～抵抗関係

b) 実験方法

前項で述べた (i)～(iii) を明らかにするため圧密試験機による土圧計の載荷一除荷試験、(iv) および (v) を明らかにするため三軸試験機を用いた繰り返し載荷試験を実施した。以下それぞれの実験方法について述べる。

① 土圧計の載荷一除荷試験（圧密試験機による）

土圧計の荷重～電気抵抗変化特性を明らかにするため 2.(3) と同じ圧密試験機を用いて載荷一除荷試験を行った。

実験は、感圧導電ゴムの寸法を $\phi 45\text{ mm}$, $\phi 35\text{ mm}$, $\phi 15\text{ mm}$ にした 3 ケースを実施した。

表-4 はケース 1～ケース 3 の実験条件を示したものである。実験装置は 2.(3) b) で述べたものと全く同様のものを用いた。

② 土圧計の繰り返し載荷試験（三軸圧縮試験機による）

本土圧計を用いて精度よく計測を行うためには、履歴による圧力～出力電圧曲線の移動がなくなるまであらかじめ実験室で繰り返し載荷を十分作用させ、その後で得られた圧力～出力電圧関係を用いる必要がある。これは、実験室で 1 サイクル目の載荷・除荷を行ったのち現場で 2 サイクル目の荷重が作用するときに 1 サイクル目

表-4 実験条件(土圧計の載荷-除荷試験)

	ケース1	ケース2	ケース3	
ゴムの大きさ(mm)	φ45	φ35	φ15	
電極の大きさ(mm)	φ45	φ35	φ15	
荷重段階(kgf/cm ²)	載荷時	0.100 0.199 0.400 0.802 1.203	0.100 0.200 0.400 0.799 1.199	0.100 0.200 0.520 0.848 1.184 1.984
	除荷時	1.203 0.802 0.400 0.199 0.100 0.000	0.799 0.400 0.200 0.100 0.000	1.184 0.548 0.520 0.200 0.100 0.000
	各荷重段階における放置時間	5時間		
	荷重変更後	0分～10分：1分間隔 10分～40分：5分間隔 40分～1時間：20分間隔 1時間～2時間：30分間隔 2時間～5時間：1時間間隔		
	計測時間間隔			

とは異なる圧力～出力電圧関係となることが予想されるためである。たとえば、過圧密砂は液状化しない限り繰り返し荷重を受けるとその応力～ひずみ関係が逐次変化し、ある一定のサイクルを過ぎるとその応力～ひずみ関係が変動しなくなる現象⁴⁾を示すが、感圧導電ゴムがシリコンゴムとカーボン粒子からなる一種の粒状体とみなせるため、感圧導電ゴムもこれと同様の特性を示すものと予想して、圧力～出力電圧関係が不变になるまで繰り返し載荷試験を行ったものである。

実験は φ15 mm, φ25 mm, φ35 mm, φ45 mm の 4 種類の寸法に対して、表-5 に示す条件の下で水圧を繰り返し作用させた。図-11 は実験のシステム概要を示したものである。本システムではモジュール内に定電流回路と A/D 変換器が内蔵されており、1 モジュール当たり 15 チャンネルの計測が可能である⁵⁾。

c) 実験結果および考察

① 土圧計の載荷-除荷試験(圧密試験機による)

表-5 土圧計の繰り返し載荷-除荷試験

ゴムの大きさ(mm)	φ15	φ25	φ35	φ45
電極の大きさ(mm)	φ15	φ25	φ35	φ45
荷重段階(kgf/cm ²)	載荷時	Case-1 0.0→1.0→3.0		
		Case-2 0.0→0.25→0.5→0.75→1.0→2.0→3.0		
除荷時		Case-1 3.0→1.0→0.0		
		Case-2 3.0→2.0→1.0→0.75→0.5→0.25→0.0		
各荷重段階における放置時間	15時間			

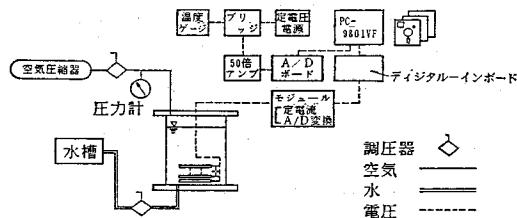


図-11 実験システム概要

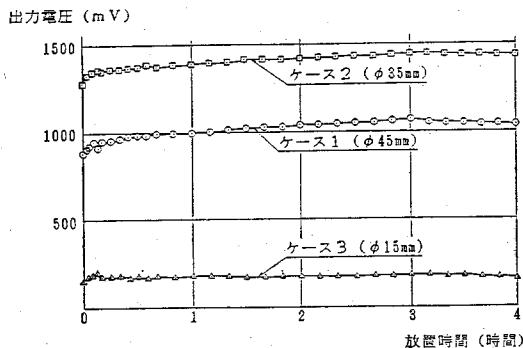


図-12 出力電圧～放置時間の関係

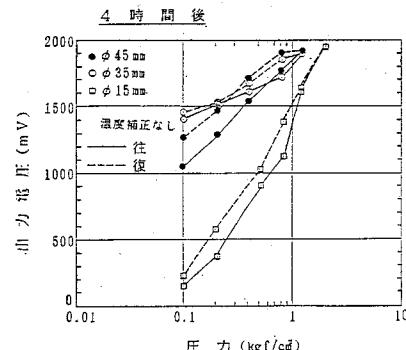


図-13 圧力と出力電圧の関係

図-12 は、荷重 0.1 kgf/cm² 時(載荷過程)の放置時間～出力電圧の関係をケース 1～ケース 3 について示したものである。2.(3) c) で述べた結果と同じく放置時間 2～3 時間で出力電圧が安定することがわかる。

図-13 は、圧力～出力電圧関係を載荷過程および除荷過程について示したもので出力電圧が落ちていたとみられる放置時間 4 時間ににおける関係をプロットしている。

これらの図から、得られる考察をまとめると以下のとおりである。

- (i) 圧力～出力電圧関係は 2.(3) c) で述べた感圧導電ゴム単体の結果と同じくヒステリシスループを描く。
- (ii) 低圧力域では寸法の大きなゴムが、高圧力域では寸法の小さなゴムが適していることもゴム単体の結果と同様である。

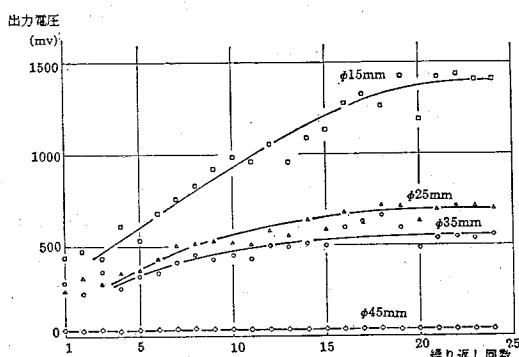


図-14 繰り返し回数と出力電圧の関係

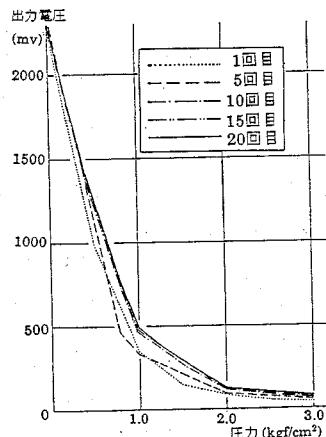


図-15 圧力～出力電圧関係(繰り返し載荷)

- (iii) 荷重放置時間として3~4時間とすれば、ゴムの出力電圧が安定する。
- (iv) 土圧計のもつ圧力～抵抗関係は基本的に感圧導電ゴム単体と類似であり、防水加工による悪影響はない。
- ② 土圧計の繰り返し載荷試験(三軸圧縮試験機による)
 - 図-14に圧力1.0kgf/cm²における出力電圧の繰り返し回数に対する変動を示している。この図からわかるように、圧力1.0kgf/cm²における電圧は繰り返し回数が15~20回を超えるとしだいに一定となり20回以降はほとんど変動していない。

図-15は圧力～出力電圧関係を繰り返し回数を変数として1枚の図に示したものの一例(φ35mm)で20回以降はほぼ一本の曲線に重なっている。

以上のことから30回程度の繰り返し載荷を与えてやれば安定した圧力～出力電圧曲線が得られ、精度の高い土圧が計測されることがわかる。

3. 土圧計および間隙水圧計の現場への適用

感圧導電ゴムを用いた土圧計の、現場への適用実験を

昭和62年8月21日から昭和62年9月1日の間、千葉県平川カントリークラブ造成工事現場で実施した。

ここで述べる現場実験に先立って金沢大学角間移転予定地での盛土工事現場に感圧導電ゴムの土圧計を埋設したが、その際の経験から、ここでは計測精度を上げるために、2.(5)b)②で述べたように、履歴による圧力～出力電圧の移動がなくなるまであらかじめ実験室で繰り返し載荷を十分加えた(30回程度の繰り返し載荷でほぼ安定した圧力～出力電圧曲線が得られることが2.(5)b)②で明らかになったが、ここでは十分な余裕をみて100回の繰り返し載荷を与えた)土圧計を用いて計測を行った。

本現場は千葉市東部に18ホールから成る平川カントリークラブの造成工事に隣接した盛土工事で、図-16において太枠で示す部分である。この盛土部分は完成後、近隣住民の畑地となる箇所である。

(1) 計測器の設置位置と設置方法

図-17は図-16の太枠部分のA-A'断面図である。矢印で示した地点(EL. 62.7m)まで掘り下げて14個の土圧計を並べて埋設した後、盛土を行い盛土完成における土圧計の最終被り深さは5mである。図中には盛立て高さおよび盛立て工程を同時に示している。写真-1は土圧計の設置状況を示している。

土圧計設置地点と計測室とは約250m離れており、その間を10芯ケーブル(ケーブル長300m)を用いて接続した。ケーブルを保護するために道路を横断する部

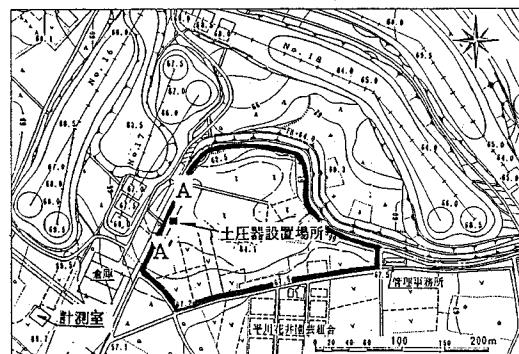


図-16 土圧計設置位置(平川カントリークラブ)

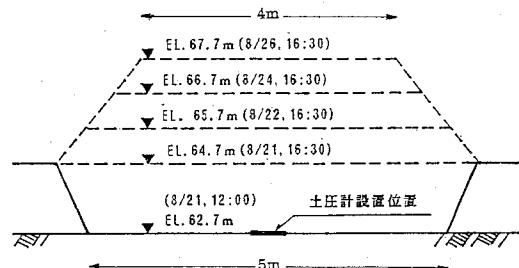


図-17 土圧計設置位置断面図

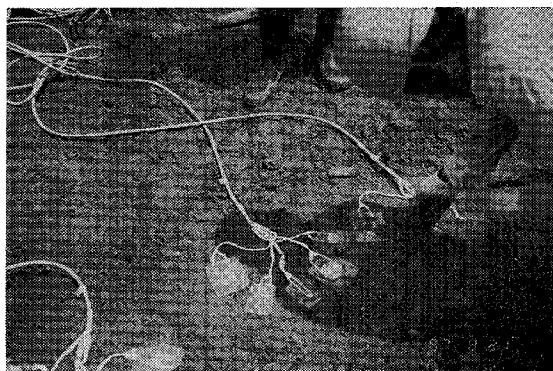


写真-1 土圧計設置状況

分では $0.5\text{ m} \sim 1.5\text{ m}$ の深さに埋設し、他の部分では樹木に結び付けて、重機による損傷を防いだ。

土圧計は前述したとおりあらかじめ実験室で繰り返し載荷を十分加えたものを用いており、感圧導電ゴムの種類の内訳は $\phi 55\text{ mm}$ を 5 個、 $\phi 45\text{ mm}$ を 5 個、 $\phi 25\text{ mm}$ を 2 個、 $\phi 35\text{ mm}$ および $\phi 15\text{ mm}$ を各 1 個の 5 種類 14 個である。寸法の大きい感圧導電ゴムを用いた土圧計を多く使用したのは、2.(3) および 2.(5) の結果、今回の実験で対象となるような比較的低い土圧レベルでは寸法の大きいゴムが適していると思われたからである。

なお、当盛土の湿潤密度は放射性同位元素 (RI) を利用した水分・密度計を用いて計測したもので $r_t = 1.2\text{ tf/m}^3$ である。この盛土は先にも述べたように畑地に利用されるもので盛土高も低いうえ、締固めを行っていないので生じる土圧も 5 m 盛り立て時に 6.0 tf/m^2 である。

(2) 計測方法

PC-9801 VM と計測器のインターフェースモジュールは、2.(5) b) ②で述べたものと同一である。PC 9801 VM のタイマーを利用して自動計測を行っており、データの取り込みは 2 m の初期盛立てを開始した昭和 62 年 8 月 21 日 11:30～12:00 の間は 5 分間隔、12:00～14:00 の間は 20 分間隔、それ以降は 1 時間間隔である。1 時間間隔の計測の場合は、3.6 日分の計測データ

タが 5 インチ両面倍密フロッピーディスクに記録保存できるので、8 月 22 日以降のフロッピーの交換は 3 日ごとに行つた。

(3) 計測結果および考察

自動的に出力電圧が記録されていくので、その出力電圧を図-18 に一例 ($\phi 55\text{ mm}$) として示す圧力～出力電圧関係を用いて圧力を変換した。この図は 0.0 kgf/cm^2 から 3.0 kgf/cm^2 の間の荷重を 100 回繰り返して載荷した後、表-6 に示す Case-2 の載荷パターンを 3 度繰り返して載荷したもので、3 本の線はほとんど重なっているため、3 度目の圧力～出力電圧関係を変換特性曲線として用いた。他の 13 個の土圧計についても同様である。

図-19 が、土圧の時刻歴を示したものである。ただし、この図は第 2 段盛土直前（8 月 22 日 16 時）で初期値の補正を行っている。すなわち、第 2 段盛土直前には推定土圧 0.24 kgf/cm^2 が生じているが、それに対して 14 個の土圧計のうち半分の 7 個は $\pm 10\%$ の精度で推定土圧値を示しているが、他の 4 個（3 個は欠損）は約 2 倍の値 ($0.45\text{ kgf/cm}^2 \sim 0.60\text{ kgf/cm}^2$) を示しており、全土圧計が第 2 段盛土直前に 0.24 kgf/cm^2 となる

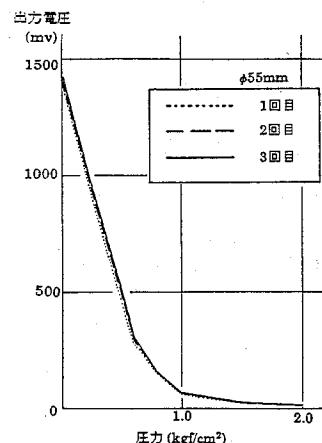


図-18 圧力～出力電圧関係

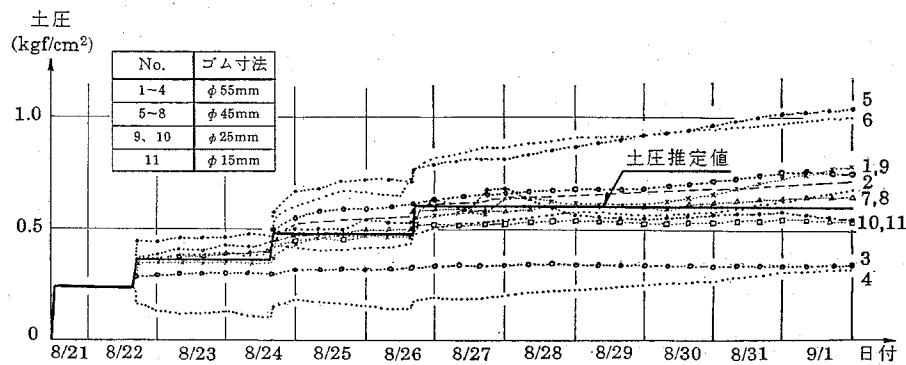


図-19 土圧の経時変化

よう圧力～出力電圧関係の変換特性曲線を平行移動して補正を行った。図-18 の変換特性曲線も補正後のものである。図-19 から指摘できる事項をまとめると以下のとおりである。

- (i) 盛り立てについて土圧計は比較的的確に反応し、初期値補正を行うことによって、指示土圧値も湿潤密度 1.2 tf/m^3 から求めた推定値とある程度一致する。
- (ii) あらかじめ 100 回の繰り返し載荷を与えることによって安定した圧力～出力電圧関係が得られる。
- (iii) 今回用いた被覆加工（パウチック）によると、(i) で述べたとおり初期値補正が必要であった。これは製造工程時に微小の空気粒が被覆加工された中に入り込むことによるものと考えられ、真空パックのように自動的に大気圧が作用して初期値補正がなされる被覆加工を今後は試みる必要がある。
- (iv) 14 個の土圧計のうち 3 個 ($\phi 55 \text{ mm}$, $\phi 45 \text{ mm}$ および $\phi 35 \text{ mm}$) が断線もしくは土圧計の破損が主たる理由と考えられるが作動しなかった。作動した 11 個のうち、4 個 ($\phi 55 \text{ mm}$, $\phi 45 \text{ mm}$ 各 2 個) は接続不良（図-19 中に示す土圧計 No. 3, No. 4) やキャリブレーションミス（図-19 中に示す土圧計 No. 5, No. 6) 等が原因として推定されるあまり良好な結果を示していない。残りの 7 個の示す土圧値はほぼ良好であり、湿潤密度 (1.2 tf/m^3) から求めた推定値との差が 25% 以内におさまっている。
- (v) 室内実験では大きい寸法の感圧導電ゴム ($\phi 55 \text{ mm}$ および $\phi 45 \text{ mm}$) を用いた方が小さい寸法の感圧導電ゴム ($\phi 15 \text{ mm}$ および $\phi 25 \text{ mm}$) を用いるよりも安定した土圧が得られたが、現場実験ではこの傾向はみられなかった。この原因は今後の検討課題である。
- (vi) 盛立て終了（8月 26 日）後 6 日放置しておいたが 9 月 1 日までの結果をみると、本土圧計は現場という劣悪な環境下においても作動することが確認され、また 3.(1) で述べた設置方法によればケーブルの損傷もほぼ防げることが明らかになった。
- (vii) 精度にばらつきがあり、さらに安定した性能をもつセンサを作成するためには今後研究を続行

する必要がある。

4. む す び

情報化施工を中小現場においても普及させるため、感圧導電ゴムを用いた安価で新しい土圧計を開発し、室内実験および現場実験によって実用性の検討を行った。この土圧計、間隙水圧計の特徴を整理すると以下のとおりである。

- (i) 非常に安価である。1 個の土圧計が約 160 円で製作できる。
- (ii) あらかじめ感圧導電ゴムに 100 回程度の繰り返し荷重を与えておくことにより安定した精度を確保することができる。
- (iii) 圧力～出力電圧関係はヒステリシスを有することおよびクリープ特性を有するので動的挙動の測定には向きである。
- (iv) 精度にばらつきがあり現時点では初期補正が必要となり、被覆加工を一定条件下で行う工夫をする（たとえば真空パックによる被覆）など今後の研究に待つべき問題が残る。

今回の検討で感圧導電ゴムを用いた土圧計の実用性のめどがついたが、今後、さらに精度および信頼性を向上するための努力を行う必要があると考えている。

最後に本計測システムの開発に際してご助言、ご指導、ご協力をいただいた金沢大学工学部土木建設工学科梶川教授、松本助手、横浜ゴム（株）工業資材生産本部産業資材第二技術部技術三課 金森担当副部長、鹿島建設（株）千葉土木営業所 大久保副所長、土氣作業所 荒木所長、機械部 平松主任、情報システム部 松本課長、鈴木副主任をはじめ関係の皆様に厚く感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：現場計測工 現場計測システムの現状と課題「現場計測システムに関するアンケート調査報告書」、建設マネジメント委員会 現場計測システム小委員会、1986。
- 2) 柳田博明・山崎弘郎：センサ 先端技術—センサ 材料とシステムの高度化、海文堂、1986。
- 3) 横浜ゴム（株）：感圧導電性シリコンゴムシート（CS 57-7 RSC）の性能特性、横浜ゴム（株）技術資料、1980。
- 4) 吉見吉昭：砂地盤の液状化、土質基礎シリーズ、技報堂出版、1980。
- 5) 林 幹郎・金井稚夫・平松雄二・酒井克己：現場計測標準システムの開発、鹿島建設（株）第 3 回コンピュータ利用技術研究発表会報文集、pp. 139~147, 1986.

(1987.10.7・受付)