

土圧計の検定に関する基礎的研究

奥村 哲夫・成田 国朝・大根 義男

A Basic Study on Calibrating Earth Pressure Cells

Tetsuo OKUMURA, Kunitomo NARITA and Yoshio OHNE

Earth pressure cells which are buried in earth and rock-fill dams are usually calibrated in a tank filled with water. It has been pointed out, however, that observed values of earth pressure in the field are sometimes not in good agreement with those presumed by theoretical and empirical evaluations and that this is partly because calibration curves determined by use of water are not reflect stress-strain characteristics of fill materials.

In the present investigations, some characteristics of earth pressure cells are examined experimentally in a soil bin by burying them in different positions, and theoretical considerations are given on them by use of the finite element methods. The effects of stress concentration, arching on the cell and side frictions on calibration curves of earth pressure cells are made clear by both experimental and analytical studies, and the best position of instrument in a soil bin is proposed to get the most appropriate calibration curve for field observations.

1. はじめに

近年、土質力学の発展とともに大規模なフィルダムが多く建設されている。

フィルダムに観測計器を設置する目的は、施工中の堤体の管理、施工後の維持管理および施工上の不確定要素を解明し今後の設計、施工に対し有用なデータを得ることにある。

観測計器の1つである土圧計は、堤体内および基礎地盤内の主応力の大きさと方向を知り滑動に対する堤体の安定性を検討すること、あるいは有限要素解折等による結果と現場で得られた実測値を比較検討しより合理的な設計法を確立すること等の目的を持っており、ダムの維持、管理上重要な計器である。

しかしながら、実際に得られた土圧の観測値を検討してみると妥当な結果が得られていない場合が少なくない。この主な原因として、(1) 計測時に測定者が十分な注意を払わざ基本的な操作ミスをしている、(2) 計器の特性が目的に対し十分満足し得るものでない、(3) 埋設方法に問題がある、(4) 計器の較正値がその周辺の材料に対し適当でない(例えは、周辺の材料が土であるのに対し液体で検定した較正値を用いている)、などがあげられる。

上記(1)(2)および(3)に対しては測定時に十分な注意を払う、適切な検出器の選定、検出器の改良、改善および埋設方法の検討等により解決する必要がある。(4)に対しては、検定土槽を用いて現場と同じ計器作動の状態で較正

値の決定を行う必要がある。

さらにまた、フィルダムなど盛土構造物においては、圧密の進行に伴なって盛土材料の応力～変形特性が変化する。従って土圧計周辺材料の応力～変形特性も必然的に当初とは異なるものとなり、用いる土圧計の較正値は各々の圧密度に応じた条件のもとで得られた値であることが望ましい。

これらのことから、筆者らは土圧計の検定に関する基礎的な実験を行ない実際の計測に用いるべき検定線を求めた。さらに土槽内の応力を有限要素解折により求め実験結果との比較を行った。

2 実験

2.1 検定土槽

実験に用いた検定土槽の概略を図1に示す。この土槽は内径75cm、深さ56cmの内筒形であり15Kg/cm²の圧力まで耐え得るように設計されている。

土圧計への載荷および除荷は試料の表面に張った厚さ2mmのゴムシートの表面に空気圧を加えることにより行ない、このゴムシートを介して土圧計の表面に鉛直土圧を発生させ得るようになっている。

2.2 試料

使用した試料の粒径加積曲線を図2に示した。試料の比重は $G_s=2.749$ 、液性限界 $LL=185\%$ 、塑性限界 $PL=106\%$ 、塑性指数 $IP=79$ 、および自然含水比 $w_f=140\%$ である。

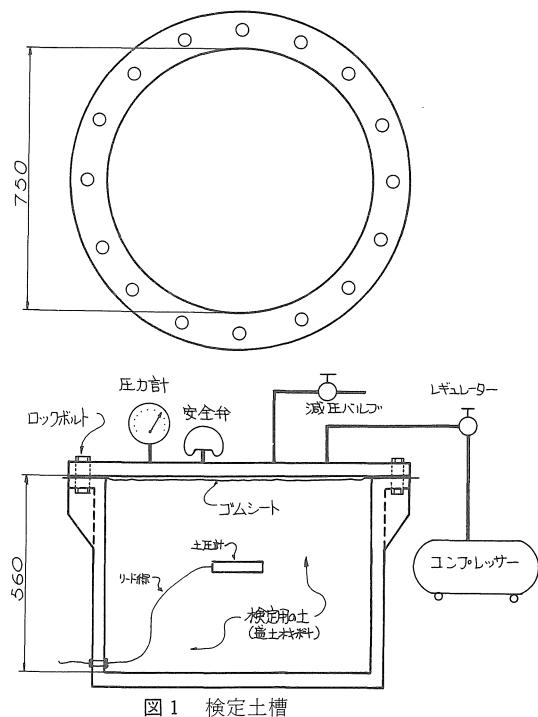


図 1 検定土槽

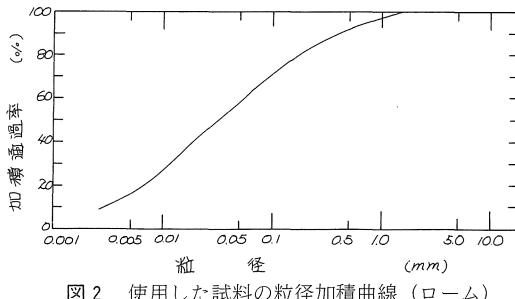


図 2 使用した試料の粒径加積曲線 (ローム)

この試料は火山灰の堆積物であり、三角座標分類では粘土ロームに属する。

2.3 実験方法

検定土槽を用いた土圧計の検定は現場と同じ応力状態で行なわなければならない。このためには土圧計への応力集中が最大となる深度、受圧板上で十分なアーチングが発生し得る深度、および側壁摩擦の影響を受けない位置で検定を行なう必要がある。以下にこの最適埋設位置を求めるために行なった実験の結果を示す。

表 1 土圧計の諸元

最大測定圧力	外径 (D)	有効径 (B)	厚さ (H)	受圧板たわみ量 (δ)	受圧板形状
6.0 Kg/cm ²	200 mm	160 mm	25 mm	0.003 mm	ダイヤフラム型

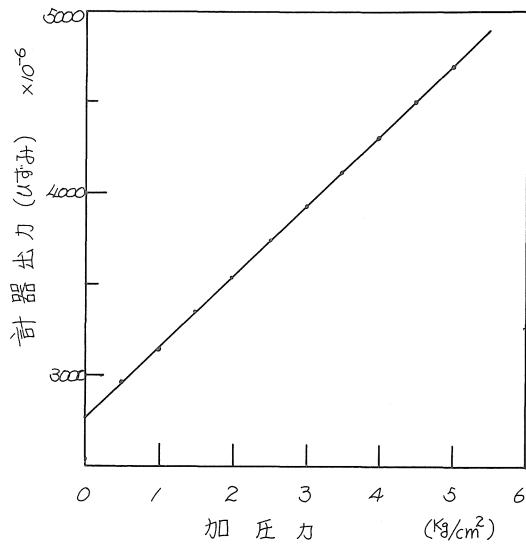


図 3 使用した土圧計の水圧検定結果

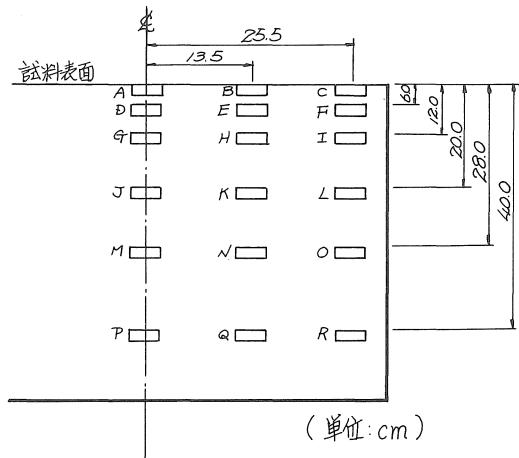


図 4 土圧計の据え付け位置

全実験を通じて用いた土圧計は同一のものであり、一般に市販されているビズミゲージタイプである。この土圧計の水圧検定結果は図 3 に示すようであり、直線性は十分に満足し得るものである。土圧計の諸元を表 1 に示した。

検定土槽内への土圧計の埋設方法は以下の通りである。まず試料をある一定の状態 (乾燥密度 $\gamma_d = 0.66 \text{ g/cm}^3$ 、含水比 $w = 100\%$ 、飽和度 $S_r = 88\%$) となるように所定の位置まで締固めて詰めたのち、土圧計をこの表面

に水平に据え付ける(受圧面は上向き)。この後上記と同様な方法で土槽の表面まで試料を詰める。なお、土圧計の零点は埋設前に測定した。

土圧計の据え付け位置は図4に示すとおりであり合計18個所である。

2.4 実験結果および考察

各据え付け位置における土圧計の計測値と加圧力の関係(検定線)の代表例を図5に示した。なお、土圧計の計測値は指示計の読みの値に水圧検定から求めた較正値を乗じた値である。

図5-1から図5-5は土槽の中心軸上で計器の据え付け位置が変化したときの結果である。これらの図より、加圧力と、計測値の関係は据え付け位置によって異なっ

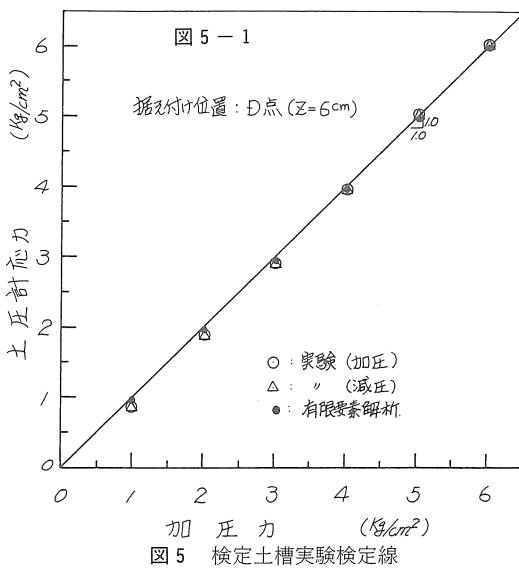
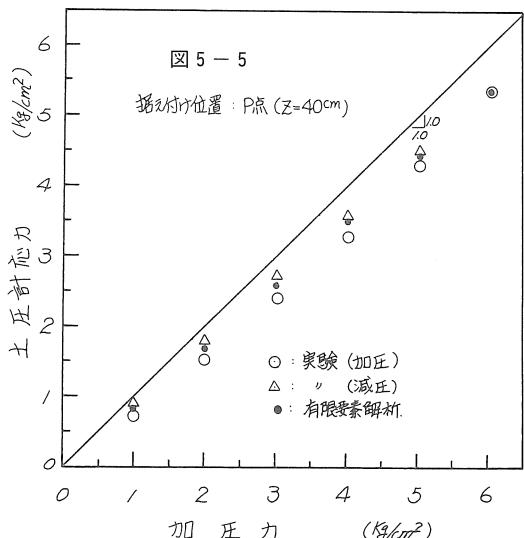
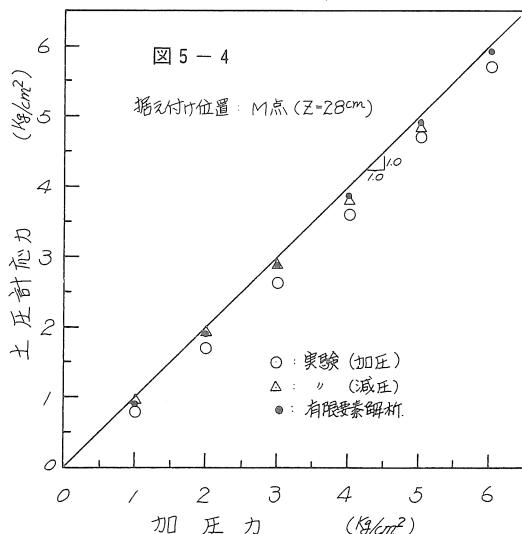
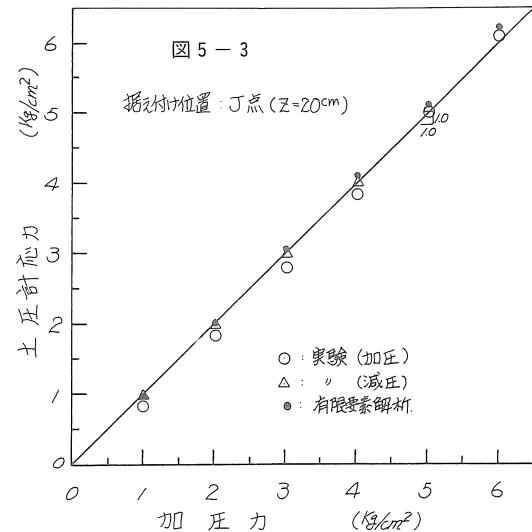
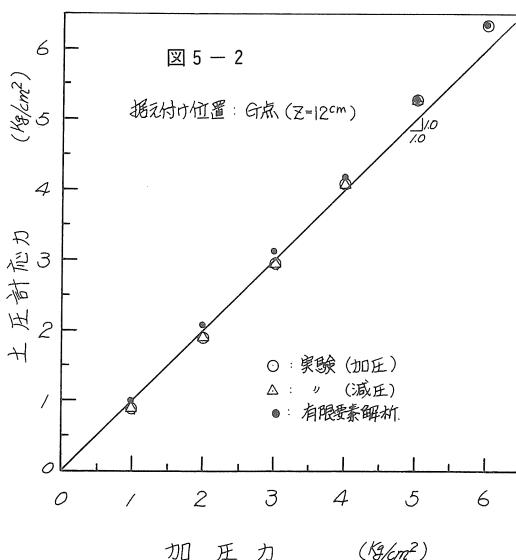
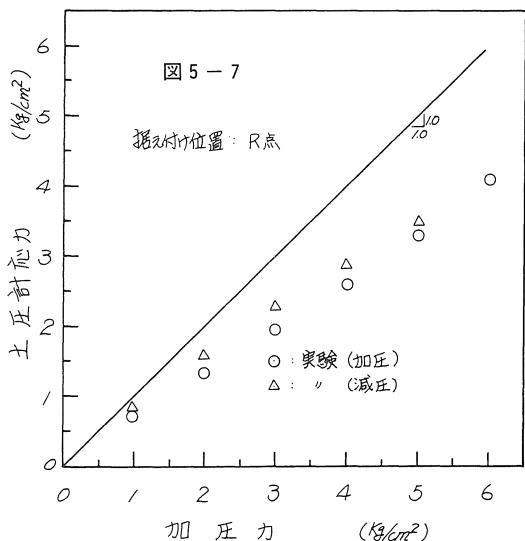
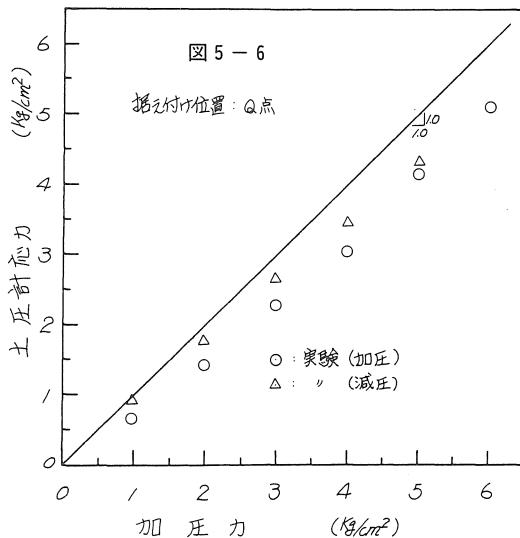


図5 検定土槽実験検定線





た傾向を示すことがわかる。最大加圧力 6 Kg/cm^2 における結果と埋設深さ Z の関係をみると、 $Z = 6 \text{ cm}$ および $Z = 28 \text{ cm}$ (図 5-1 および図 5-3) の結果は図中 45 度の直線にほど等しくなっており水圧検定結果に近い値を示している。また、 $Z = 12 \text{ cm}$ (図 5-2) では計測値が水圧検定結果より大きくなっている。しかし、 $Z = 40 \text{ cm}$ (図 5-5) ではこれとは逆の結果となっている。さらに、加圧過程と減圧過程の検定線を比較すると土圧計の埋設位置が比較的浅いところ (図 5-1 および図 5-2) ではほとんど差が認められないが、 $Z = 20 \text{ cm}$ より深い場所 (図 5-4, 図 5-5) では減圧過程の検定線が加圧過程のそれより上になっていることがわかる。

また、土圧計の据え付け位置を同一深さとし ($Z = 40 \text{ cm}$)、中心からの距離を変えた場合の結果を図 5-5 か

ら図 5-7 に示した。図から、側壁に近くなるほど水圧検定線との差が大きくなっていることがわかる。なお、表面中心付近の沈下量は全実験を通じて $10.5 \sim 13.0 \text{ cm}$ の範囲にあった。

以上のように、土圧計の据え付け位置によって計測値が異なったり、検定線がループを描く原因是市原らが指摘しているように以下の要因によるものと考えられる。

- (1) 受圧板の可とう性に問題があり、これによって土圧計の受圧面上にアーチングが発生する。
- (2) 土圧計とその周辺の土の応力～変形特性が異なるために受圧面上で応力集中が発生し水圧検定値より大きな値を示す。
- (3) 試料と土槽側壁との接触部で摩擦 (側壁摩擦) が発生し加えた応力が土圧計受圧面に十分伝達されない。

上記(1)の影響については、ダイヤフラム型土圧計では受圧板中心のたわみ量 (δ) と土圧計の直径 (D) との比、 δ/D が $1/10000$ 以下であればアーチングの影響はほとんど問題にないとされている¹⁾。今回用いた土圧計の δ/D は $1/66000$ でありアーチングの影響は無視してさしつかえないと考えられる。従って、検定線が据え付け位置によって異なる原因は上記(2)および(3)の影響によるものと考えられる。

応力集中および側壁摩擦と据え付け位置の関係を市原らの研究結果に基づいて整理し、この結果を図 6 から図 9 に示した。

図 6 は土圧計の埋設深さ Z と P_m/P_0 の関係を整理した結果である。こゝに、 P_m は最大加圧力 6 Kg/cm^2 のときの土圧計の計測値であり水圧検定から求めた較正係数と指示計の読みの値の積として得られる。また、 P_0 は加圧力 Pa (ここでは 6 Kg/cm^2) と受圧面上の土の重量 $\gamma \cdot Z$ の和として得られる。図より、埋設深さ $Z = 12 \text{ cm}$ で P_m/P_0 は最大値を示し、 $P_m/P_0 \approx 1.05$ である。また、 $Z > 12 \text{ cm}$ において P_m/P_0 の値は減少し、この傾向は側壁に近い場所ほど著しくなっている。

図 7 は側壁からの距離 (r) と P_m/P_0 の関係を埋設深さ別に示した結果である。図を見ると P_m/P_0 の最大値は $Z = 12 \text{ cm}$ の位置にあり、 $Z > 20 \text{ cm}$ では側壁に近い位置ほど P_m/P_0 の値は減少している。

図 8 は埋設深さ Z とループ量の関係を示したものである。なお、ループ量は次式から求めた。

$$\text{ループ量} = (P_u - P_l)/P_{0\max} \quad \text{---(1)}$$

ここに、 P_u は最大加圧力 $P_{0\max}$ の $1/2$ の圧力における減圧時の圧力、 P_l は $P_{0\max}/2$ の圧力における加圧時の圧力である。図より、埋設深さが約 12 cm まではループ量はほどゼロである。しかし、これより深い位置ではループ

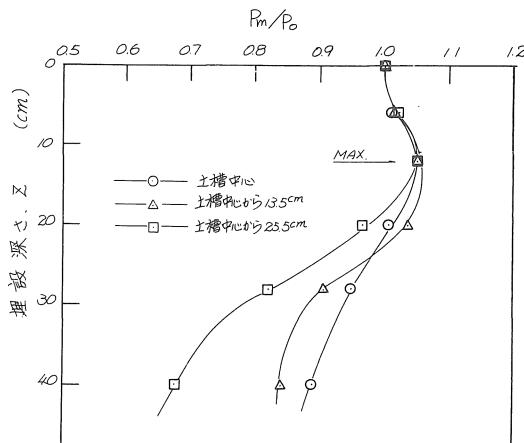
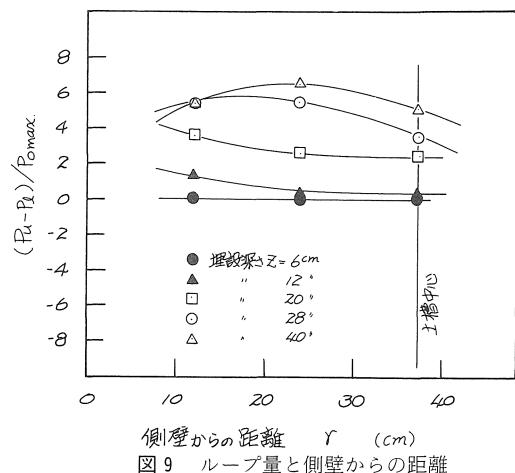
図6 埋設深さと P_m/P_o の関係

図9 ループ量と側壁からの距離

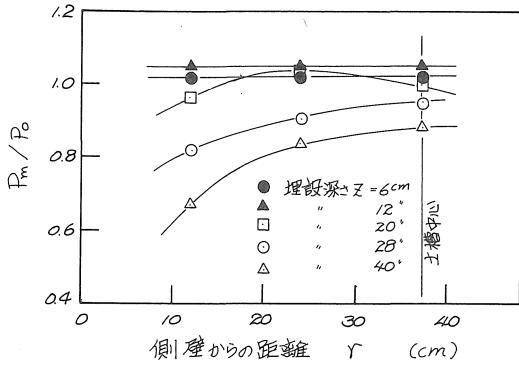
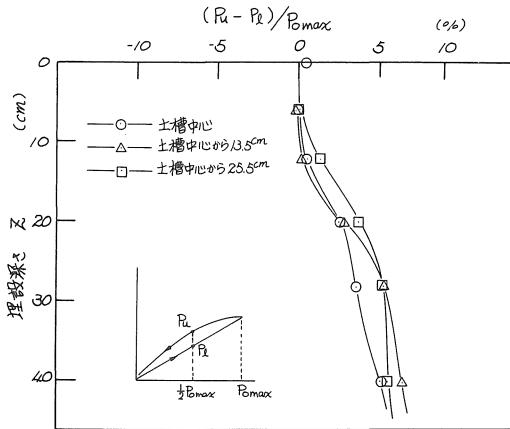
図7 P_m/P_o と側壁からの距離の関係

図8 埋設深さとループ量の関係

量は増加し側壁摩擦の影響を受けていることがわかる。図9は側壁からの距離に対するループ量の関係を示した結果である。図より、Z=6cmにおいては側壁からの距離に関係なくループ量がゼロであることがわかる。また、Z=12cmにおいては側壁に近い位置で1%程度のループ量となっているが、中心ではゼロである。

以上の結果より、現場の土中とは同じ計器作動を与える計器据え付け位置は土槽の中心軸で埋設深さZ=12cmであると考えられる

3 有限要素解釈

検定土槽内の応力分布を実験的に求めた例は多いがこれを解釈的に調べようとした研究はないようである。

筆者らは土槽内の土圧計に作用する鉛直応力を有限要素

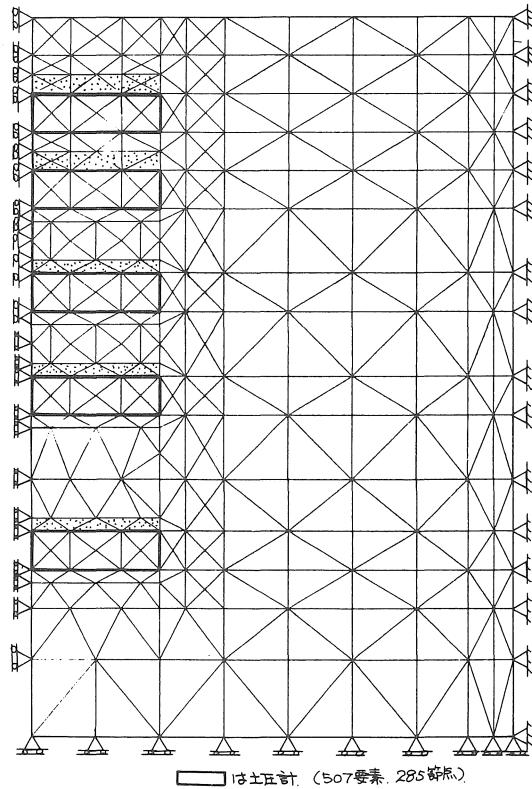


図10 土槽内の有限要素分割

素法により求め検定線を推定した。以下にこの結果を示す。

3.1 解析条件

三次元軸対称問題として解析を行なった。

土の応力～ひずみ関係は Duncan の双曲線近似法を用い接線弾性係数 E_t を次式で与える。

$$E_t = \left[1 - \frac{Rf(1-\sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C\cos\phi + 2\sigma_3\sin\phi} \right]^2 \cdot K \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

ここに、パラメーター K, n, c, ϕ および Rf は $u-u$ 条件で求めた三軸圧縮試験の結果によった。表 2 に各パラメーターの値を示した。また、土圧計は完全弾性体と考え弾性係数は $E = 2.1 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ とした。

側壁および土圧計周辺の土と金属の間の摩擦の影響は要素分割をこれらの部分で他より細かく行なうことにより考慮された (図 10 に要素分割を示す)。

試料表面に与える外力は加圧過程のみとし、試料表面の接点に 1.0 Kg/cm^2 きずみで与えた

表 2

K	n	c	ϕ	R_f
95.2	0.259	Kg/cm^2 0.50	10.4 度	0.60

3.2 解析結果および考察

計器据え付け位置は土槽内の中心軸上とし埋設深さ Z は実験に等しくした。土圧計に作用する鉛直応力は土圧計表面上の要素 (図 10 で点の印をつけた要素) のその値の平均値とした。

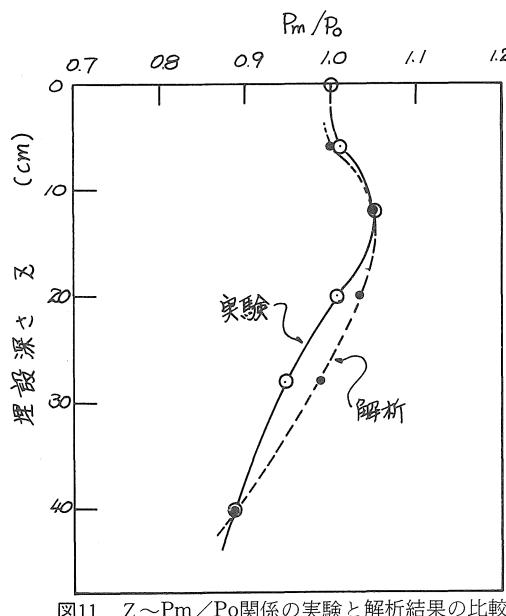


図11 $Z \sim P_m/P_o$ 関係の実験と解析結果の比較

各々の据え付け位置における土圧計表面上の鉛直応力と加圧力の関係を●記号で図 5-1 ～図 5-5 に示した。これらの図から、埋設深さが 6cm と 12cm の結果は実験値と良く合っているようであり、また埋設深さが 20cm 以上の結果においては解析値が実験地より幾分大きくなっていることがわかる。

図 11 は実験から求めた $P_m/P_o \sim Z$ 関係 (図 6) と解析から求めたそれを比較した結果である。図を見ると、解析結果と実験結果は比較的良く合っており、応力集中の最大となる埋設深さは解析的にも推定が可能であると考えられる。

図 12 および図 13 は応力集中の最大となる埋設深さ $Z = 12 \text{ cm}$ 、加圧力 6 Kg/cm^2 における土槽内の変位量および主応力度を示した結果である。これらの図より以下のことが知られる。表面中心付近の沈下量は約 12cm であり実験値に近い値を示している。また、土圧計表面の鉛直応力は加圧力に対し約 106% となっており応力集中が発生していることが知られる。一方、これより深いかまたは側壁に近い場所ではこの値は逆に低下しており、側壁摩擦の影響によって外力の伝達が低下している。

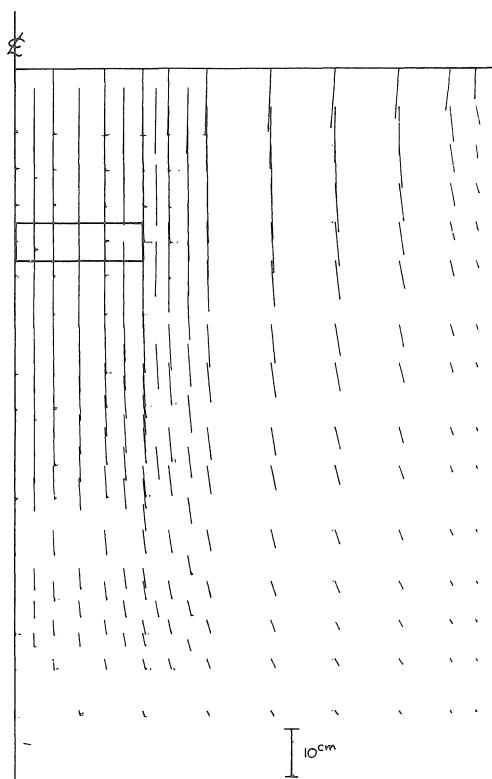


図12 変位図 ($Z = 12 \text{ cm}$)

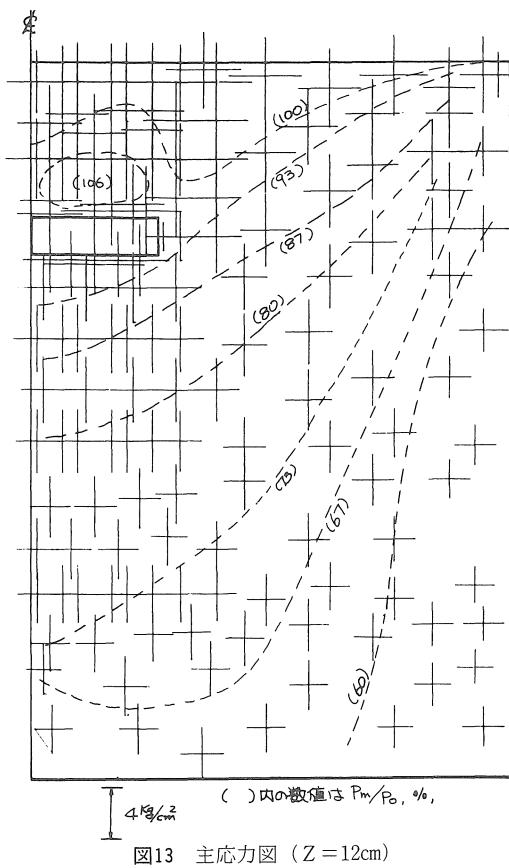


図13 主応力図 (Z = 12cm)

3 あとがき

土圧計の検定に関する研究の第1歩として検定土槽を用いた基礎的実験と有限要素法による解析を行ない一応

の成果が得られたものと考えられる。

実験的には現場とほど同じ状態を試作した土槽内で再現し得ること、土槽内で求めた検定線は側壁摩擦、応力集中の影響によって流体による検定線とは異なることなどが明らかとなつた。また、有限要素解析からは大掛かりな実験によらなくとも解析的に検定線を求め得ることが判明した。

なお、残された課題として土圧計の剛性、土と金属との摩擦力、土圧計の受圧板の可とう性等の性質が解析上十分反映されていないことが挙げられる。今後は実際の挙動により近い解析手法を確立し詳細な研究を進めてゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 市原松平, 古川清: 土圧計の検定に関する実験的研究, 土木学会論文集, 135, 8-15, 1966.
- 2) 市原松平: 土圧計の検定と作動, 材料, 22, 608-613, 1973.
- 3) 松沢宏, 石井恒久: 土中土圧計四種の作動に関する研究, 土木学会論文報告集, 203, 29-44, 1972.
- 4) 市原松平, 松沢宏, 森富雄: 土圧計の検定について, 土木学会第33回年次学術講演会, 585-586, 1978.
- 5) 松沢宏, 森富雄, 尾崎師成: 土圧計検定土槽内の応力分布, 土木学会中部支部, 178-179, 1979.
- 6) 市原松平, 松沢宏, 森富雄, 尾崎師成: 小型土中土圧計の作動特性, 第13回土質工学研究発表会, 881-884, 1978.
- 7) 土質調査法, 土質工学会, 1972.

(受理 昭和56年1月16日)