

土圧計測用小型門型ロードセルの設計と遠心模型実験への適用について

今村眞一郎¹・野本 寿¹・斎藤禎二郎²・上野勝利³・藤井斉昭⁴

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

²正会員 工修 西松建設株式会社 土木設計部 (〒105 東京都港区虎ノ門1-20-10)

³正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (〒321 栃木県宇都宮市石井町2753)

⁴正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

砂地盤におけるシールドトンネル覆工に作用する土圧計測のため、模型に装着可能な小型門型一方向ロードセルが設計・製作された。本論文では、遠心模型実験を対象としたロードセルの設計法と土圧検定法が述べられている。設計では、三次元FEM解析の適用性についても検討が行われ、摩擦力や偏心荷重がひずみ出力に及ぼす影響度の検討において、この解析法の有効性が確認された。また、土圧検定では検定線の非直線性およびヒステリシス特性が考察され、受圧板有効径とたわみ量の関係をもとにロードセルに必要な剛性が評価された。さらに、検定用土槽壁面摩擦の処理の重要性についても検証が行われた。

Key Words : load cell, load cell authorization, centrifuge model test, design method, modeling, construction process, calibration curve

1. はじめに

地中構造物に作用する土圧を知ることは、構造物設計法の妥当性や構造物の安全性を評価する上で重要である。このため、現場計測または模型実験による計測が行われるが、前者が特定された条件下での計測であるのに対し、後者は地盤等の条件を任意に変化させた計測が可能な点に特長がある。特に、小型模型に重力加速度の n 倍の加速度を作用させることの可能な遠心模型実験は、地盤と構造物の相互作用の解明のための有効な方法で、近年積極的に採用されるようになってきている。筆者らは、シールドトンネルの覆工に作用する土圧に関する遠心模型実験を行っているが、研究の第一段階として水理条件を除外した乾燥砂地盤を対象としている^{1)~3)}。この種の実験では、現場計測と比較して、土被り厚さやテールポイド厚さを変化させたパラメトリックスタディが可能であるという利点がある反面、信頼性の高い実験結果を得るために土圧計の精度に関する検証が要求される。

土圧計に関する既往の研究では、砂地盤を対象として市原ら^{4), 5)}は、土圧計の仕様(形状、剛性など)、土圧計の設置深さおよび検定用土槽壁面から

の離れ等の条件の違いによる影響を定量的に評価している。さらに、松澤ら^{6)~8)}は、Trollope & Lee⁹⁾、Kallstenius & Bergau¹⁰⁾の研究を参考に小型の土圧計を製作し、加圧装置を用いた土圧の検定結果から信頼性が得られる計測範囲について、受圧板のたわみ量等に対する制限値を示している(表-1参照)。また、液圧による検定と砂地盤を用いた検定では結果が異なること、さらに地盤の密度、設置深さおよび境界条件によっても異なることを示し、砂地盤中の土圧計測では地盤の変形特性が検定結果に影響を与えることを明らかにしている。しかし、これらの研究は、重力場における土圧計の検定についてまとめたもので、遠心模型実験を対象としたものではない。一方、遠心模型実験による各種構造物に関する土圧計測事例は数多く報告されているが、土圧計の設計法や遠心力場における検定について報告された例は、ほとんど見当たらないのが現状である。このようなことから、遠心力場における土圧計の検定方法を明確にし、実験の信頼性を確立する必要があると考えられる。

本論文は、筆者らが開発した遠心力場におけるシールド模型に使用している土圧計測用小型門型一方向ロードセル(以下、土圧計)について、その設計法と遠心力場における検定法を示すとともに、検

表-1 土圧計の満たすべき制限

要因	制限
受圧板のたわみ量	$D/\delta \geq 2,000$ (W.E.S ¹¹⁾) $\geq 2,000$ (Trollope&Lee ⁹⁾) $\geq 10,000$ (Kallsteniusら ¹⁰⁾) $\geq 100,000 \sim 200,000$ (松澤 ⁶⁾)
受圧板の反力係数	$d\delta/dp \leq (1\sim 2) \times 10^{-8}$ (m/kN/m ²) (Trollopeら ⁹⁾) $\leq (1\sim 2) \times 10^{-9}$ (m/kN/m ²) (松澤ら ⁶⁾)
受圧板の有効径	$D/D_{50} > 50$ (Kallsteniusら ¹⁰⁾)

ここに、D：受圧板の有効径 (mm)
 δ ：受圧板の変位量 (mm)
 p ：受圧板に作用する圧力 (kN/m²)
 D_{50} ：平均粒径 (mm)

表-2 模擬管寸法表

管種	v=1mm 実験		v=2mm 実験	
	外径	内径	外径	内径
シールド管	100	98	100	96
覆工管	98	60	96	56
排土管	55	51	50	46

単位 (mm)

定結果等を考察し得られた2, 3の知見について報告するものである。

2. 遠心実験用シールド模型と土圧計

本節では、シールド模型の概要、土圧計の設置可能寸法および開発経緯について述べる。

(1) シールド模型の概要

シールド実験で筆者らが考えている施工過程の模擬方法の説明図を図-1に示す。シールド模型は、シールド管、覆工管、排土管の3重管で構成される。掘進過程は3重管が一体となって前進することで、テールボイド発生過程は掘進を停止しシールド管のみが後退し、覆工管が地盤中に露出することで模擬する。

実験は、テールボイド量 (v=1,2mm) の違いによる覆工土圧の変化を把握することを研究目的の1つとしているため、各管の寸法を表-2に示すとおり計画した。

(2) 土圧計の設置可能寸法

覆工管断面図を図-2に示す。土圧計の管半径方向の寸法 (土圧計の高さ) は、シールド管内径および

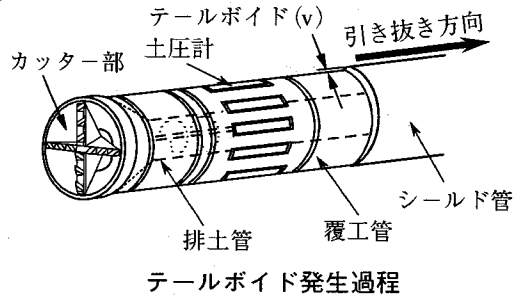


図-1 シールド実験模擬方法説明図

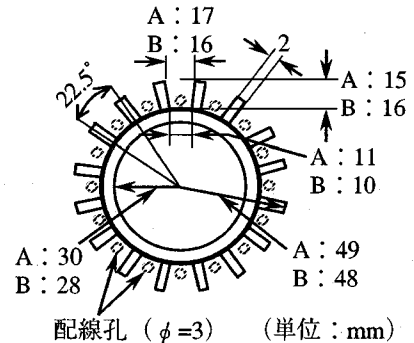


図-2 覆工管断面図

排土管外径寸法と土圧計固定に必要な覆工管板厚 (4mm) によって決まり、当実験では、v=1mm実験用土圧計 (以下、土圧計A) で15mm、v=2mm実験用土圧計 (以下、土圧計B) で16mmとなる。また、周方向の寸法 (土圧計の幅) は土圧計の設置間隔によって決まるが、当実験では周方向に16等分した22.5° 間隔での設置を最小として計画していることから、固定部で土圧計Aで11mm、Bで10mm以内、受圧板部で土圧計Aで17mm、Bで16mm以内となる。なお、縦断方向の寸法は、カッター部寸法やシールド管引き抜き寸法により決まることになるが、周方向に比べ余裕があり、A, B共に50mm以内であれば設置可能となる。

しかし、このような設置条件に対し、適当な寸法の市販の土圧計が無いことから、新たに2種類の土圧計を製作することにした。

(3) 開発経緯

シールド実験は、テールボイドv=2mmの条件で始めたため、最初に土圧計Bを製作した。この製作に当たっては、遠心模型実験で予測される計測ノイズの影響を少なくするため、起歪部の剛性を低くし、低い応力レベルで大きなひずみ量を検出するように計画した。しかし、後述するように土圧検定にお

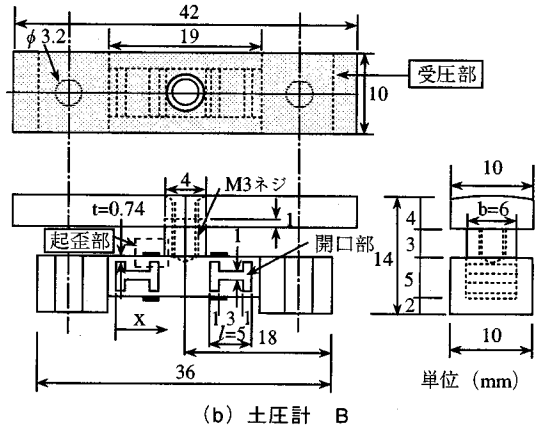
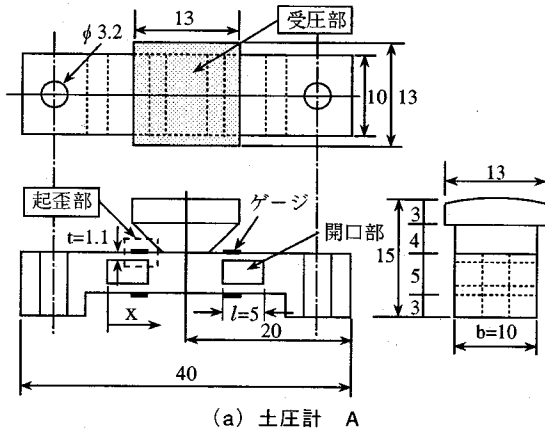


図-3 土圧計概要図

ける直線性や土圧の载荷と除荷時における同圧力レベルでの土圧計の出力の一致性に関する性能が期待したよりも劣っていたため、土圧計Aでは起歪部の剛性を高めることにした。

3. 土圧計の設計

本節では、土圧計の設計に当たって検討した主な内容を述べる。

(1) 設計条件の設定

土圧計の設計条件は、以下の3点を基本とした。

- ①大きさは、覆工管に設置可能なものとする。
- ②受圧面は、覆工管曲率に合わせた形状とする。
- ③計測可能範囲（以下、容量）は、実験で予想される圧力とし、土圧計Aで981kN/m²、Bで491kN/m²とする。

(2) 型式の選定

土圧計の型式には、一重ダイヤフラム型、二重ダイヤフラム型、グレッツェル型およびロードセル型がある。ロードセルには様々な形式があり、受圧面の形状などに自由度も高いが、高剛性・高感度化、小型化などで設計条件を満足することのできる門型ロードセル型式を採用した。

(3) 形状の決定

土圧計の形状は、佐藤ら¹²⁾および谷¹³⁾が開発した土圧計（2方向ロードセル）の構造を参考に、図-3、表-3に示すものを設計した。また、参考として土圧計Aの覆工管装着状況を写真-1に示す。

表-3 土圧計設計諸元

仕様	A	B
材質	ニッケル・クロム・モリブデン鋼 (SNCM439)	ステンレス (SUS630)
計測圧力 (kN/m ²)	981	491
受圧板寸法 (mm×mm)	13×13	10×42
荷重換算値 (N)	166	206
実測定格出力 mV/V (4倍 (μ))	0.464 (927)	2.09 (4173)
有効径 (mm)	13	10
D/δ	6880	778
dδ/dp (m/kN/m ²)	1.93×10 ⁻⁹	2.62×10 ⁻⁸
D/D ₅₀	65	50

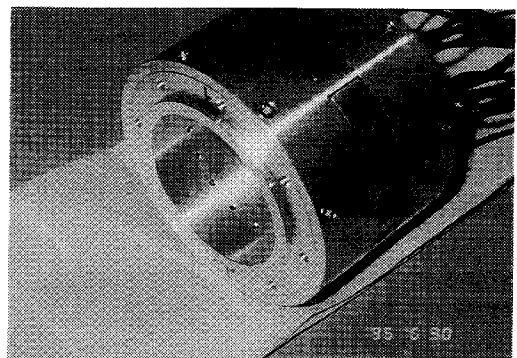
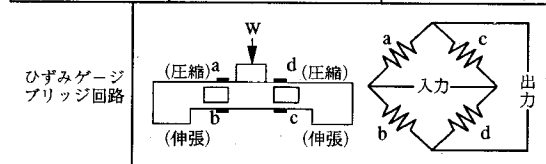


写真-1 土圧計A 覆工管装着状況

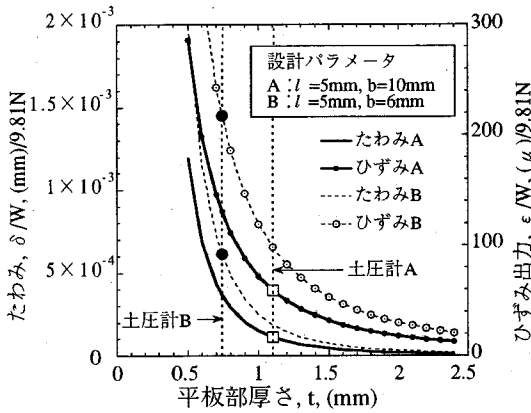


図-4 設計曲線

この土圧計は、受圧部と起歪部で構成される。受圧部は、覆工管曲率に合わせた加工を行うとともに、受圧部面積を土圧計Aで169mm²、Bで420mm²とした。これは、土圧計Bでは、低い計測圧力でも荷重換算値を高くすることにより、ひずみ量を大きく出力することを目的としたためである。

また、受圧部の短辺長さは、受圧部変位に伴う砂のアーチ作用と深く係わることが予想される。このため、土圧計の型式が異なるものの表-1に示す受圧板の有効径の制限値を確保することとし、Aで13mm(D/D₅₀=65)、Bで10mm(D/D₅₀=50)とした。

(4) 起歪部の設計

起歪部のシステムは、梁の一部に開口部を設け、荷重作用時に開口部上下の平行平板部に発生するひずみを計測することを基本としている(表-3下図参照)。この梁は、荷重作用時に一様曲げモードと平行平板曲げモードの和として変形するが、後者が卓越すると仮定し、スパン2lの両端固定梁として平行平板部外側のひずみεとたわみδの最大値を求めると、それぞれ式(1)、式(2)(以下、理論式)で表すことができる。

$$\epsilon_{\max} = \pm \frac{3 \cdot W \cdot l}{4 \cdot E \cdot b \cdot t^2} \quad (1)$$

$$\delta_{\max} = \frac{W \cdot l^3}{4 \cdot E \cdot b \cdot t^3} \quad (2)$$

ここで、W：作用荷重(N)

l：平板部横の長さ(mm)

E：弾性係数(kN/m²)

b：平板部奥行き幅(mm)

t：平板部の厚さ(mm)

ひずみゲージは、ゲージ長0.2mm、ゲージ幅1.4mm、

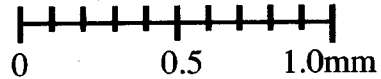
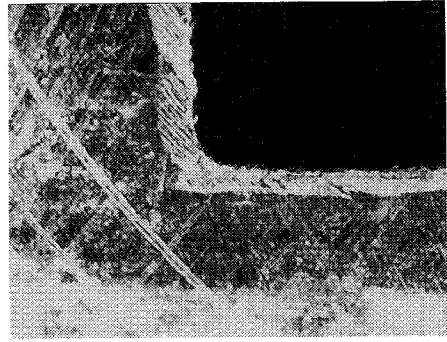


写真-2 開口部コーナー加工状況

ゲージ抵抗値120Ωのものを用いた。ゲージ貼り付け位置は、表-3下図に示す4箇所とし4ゲージ法と呼ばれる温度補償と誤差補償を考慮したホイートストンプリッジを構成した¹⁴⁾。なお、ホイートストンプリッジの入力電圧は2V、ひずみゲージのゲージ率は約2であるため、計測器によって得られる出力電圧値は理論式の約4倍の値が(V)単位で計測されることになる。本研究では慣例に従い、この計測値を土圧計のひずみ出力と見做す。したがって、以降に示すひずみ出力εの値は全て式(1)のε_{max}の4倍の値である。また、ゲージ接着部は防湿と保護を目的としてゴム系コーティングを施している。

平行平板部の寸法は、作用荷重をベースに平板部の長さ、厚さ、幅および弾性係数の組み合わせで設計することになるが、同時に加工精度、部材の許容応力度および制限値(表-1)等が関係する。土圧計Bの設計では感度を高めるため、単位荷重当たりのひずみ出力(ε/W)を200μ/9.81N、許容応力度245MN/m²程度以下を基準に、平板部の長さを5mm、厚さは加工可能な最小肉厚に近い0.74mm、幅を6mmとした。なお、この場合、開口部形状はねじりや直角方向荷重に対する剛性を考慮しH型とした。また、土圧計Aでは、剛性を向上させるため長さ5mmをそのままに、厚さ1.1mm、幅10mmとし、開口部形状は矩形とした。

以上のことから、平板部厚さ(t)、単位荷重(W=9.81N)当りのたわみ(δ/W)およびひずみ出力(ε/W)の関係を表したものを、図-4に示す。

(5) 起歪部の加工精度

起歪部のコーナー加工精度等を確認するため撮影した顕微鏡写真を写真-2に示す。この種の土圧計で

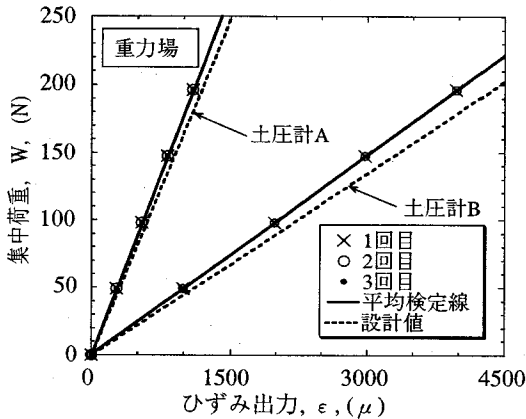


図-5 集中荷重検定結果

は、上下の平板厚さが等しいこと、開口部コーナー形状が同一であることが計測精度の点で重要なポイントとなるが、この写真撮影によりコーナー部内接円の半径が0.1mm程度でそれぞれ均等に加工されていることや直線部においてもワイヤーカット（レーザー）による加工精度が高いことが確認された。

4. 土圧計の検定

土圧計の性能把握のため、重力場における集中荷重検定、遠心力場において砂による土圧検定および装着時自重検定を行った。

(1) 重力場集中荷重検定

土圧計の基本性能を確認する目的で、荷重換算値（容量×受圧板面積）に近い集中荷重（A,BともW=196N）による検定を3サイクル行った。このときのひずみ計測間隔は載荷、除荷過程とも49Nピッチとした。なお、土圧計は、ひずみゲージと起歪部のなじみの関係で製作直後の検定でヒステリシスが目立つ場合があるため、集中荷重による繰返し載荷を30回程度行っている。

検定結果を図-5に示すが、土圧計A,Bとも各サイクルにおける出力に差がなく、直線性が確保されるとともにヒステリシスも認められない。また、検定結果（以下、検定線）は理論式をもとに算出したひずみ出力（ ϵ ）に比べ土圧計Aで約7.1%、Bで約6.3%と同程度の低い値の誤差となり理論式との対応が良い。このように、土圧計は開口部形状の影響を受けず、ほぼ計画どおり製作されていることが判る。

(2) 遠心力場土圧検定

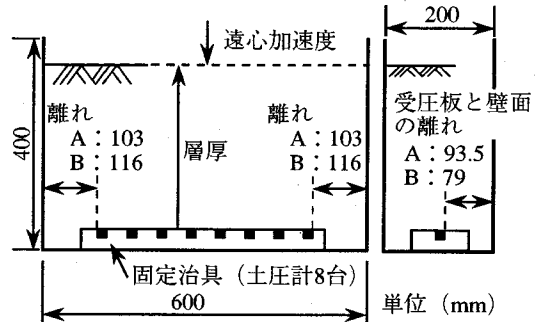


図-6 検定用土槽

表-4 検定条件

条 件	土圧計 A			土圧計 B			
	10	20	30	4.5	7.0	12	17
層厚(cm)	10	20	30	4.5	7.0	12	17
実験回数	3	3	3	3	3	3	3
単位体積重量 γ_d (kN/m ³)	14.4 14.9	15.1 15.2	15.2 15.3	14.9 15.1	14.6 15.0	15.0 15.3	15.0 15.2
最大理論応力 (kN/m ²)	142 147	291 295	433 436	66.8 67.5	101 104	177 181	248 254
最大加速度(m/s ²)	981						
設置条件	治具に固定						
地盤材料	気乾豊浦標準砂 (D ₅₀ =0.20mm)						
地盤作製法	空中落下法						
壁面摩擦処理	メンブレン(厚さ0.2mm) グリース:シリコングリース (KS-63G)						
壁面と砂の摩擦角	処理有り $\phi=0.7^\circ$ 、処理無し $\phi=38^\circ$						

遠心力場における土圧検定は、土圧計自重の影響を補正するための自重検定と土圧計を砂地盤中に埋設して計測する検定の2つの検定から成り、両者の差し引きにより校正係数を得る。

a) 補正用自重検定

検定用土槽の概要図を図-6に示す。この土槽には、土圧計を固定するための治具を底部に剛結しており、土圧計設置後遠心載荷装置にこれを搭載し検定を行う。検定は、最大加速度を981m/s²とし、この検定を3サイクル行った。このときのひずみ計測間隔は載荷、除荷過程とも196m/s²ピッチとした。

検定結果は、各サイクルでの非直線性およびヒステリシスも認められず、平均検定線で加速度981 m/s²におけるひずみは土圧計Aで60 μ 、Bで155 μ である。したがって、この平均検定線を用い、土圧検定の各加速度レベルにおけるひずみを補正することにした。

b) 土圧検定

土圧検定は、シールド実験を考慮して表-4に示す

表-5 載荷過程の検定式

土 圧 計	層 厚	検定式 $\sigma = a \cdot \epsilon + b$, 相関係数 r					
		壁面処理有り			壁面処理無し		
		a	b	r	a	b	r
A (No.14)	10cm 平均	0.846	4.16	0.9968	0.838	7.01	0.9959
	20cm 平均	0.779	3.62	0.9943	0.812	5.94	0.9971
	30cm 平均	0.836	8.97	0.9868	0.905	9.24	0.9956
	10~30cm 全平均	0.825	4.27	0.9901	0.889	3.77	0.9936
B (No.7)	4.5cm 平均	0.142	-1.25	0.9958	0.161	-2.50	0.9957
	7.0cm 平均	0.156	-2.98	0.9977	0.163	-3.51	0.9976
	12cm 平均	0.161	-5.55	0.9974	0.178	-6.81	0.9962
	17cm 平均	0.166	-9.45	0.9961	0.206	-7.45	0.9978
	4.5~17cm 全平均	0.162	-5.82	0.9971	0.194	-9.96	0.9901

検定条件で実施し、データ整理に当たっては自重検定の平均検定線を用いて補正済のものを表示することにした。また、検定土槽の壁面摩擦の影響を見るため摩擦処理無しの条件での検定も行った。検定での載荷サイクルは加速度レベルを0→392→196→589→196→785→196→981→196m/s²に変化させて行っている。これは、後述する載荷・除荷過程で発生する非直線性とヒステリシスを確認するためである(図-12参照)。なお、計測間隔は補正用自重検定と同じである。土圧計表面の応力度は、検定地盤の鉛直方向の加速度レベルが各位置で変化しているため、作製地盤の単位体積質量をもとに積分計算で算出する。この値と計測されたひずみを対応させ応力-ひずみ関係を整理する。

応力-ひずみ関係で整理した壁面摩擦処理有りのケースの土圧検定結果の一例を図-7に示す。この例は、土圧計A16台、B8台の検定結果の平均的なものである。

載荷過程の直線性は、土圧計Aは良好であるが、Bは若干劣る。また、除荷過程では各層厚で残留ひずみが明らかに認められ、その程度は土圧計AよりBの方が大きい。

集中荷重検定線と土圧検定線を比べると、同一応力レベルで土圧計Aのひずみ出力は集中荷重より大きく、Bのそれは小さい。これは、土の圧縮性や土圧計の形状などの影響によるもので、土圧計Aでは正の応力集中が、Bでは負の応力集中が生じていることを示している。

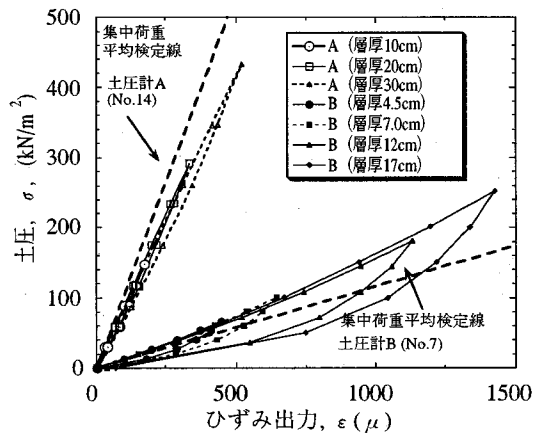


図-7 土圧検定結果

c) 検定式

土圧計A (No.14), B (No.7) を例に、載荷過程の検定結果を一次式で統計処理したものを(以下、検定式)を表-5に示す。この表では、各層厚毎(3回分)および全層厚のデータを用いた検定式を壁面処理有りおよび無しに別けて示しているが、検定式の勾配に着目すると、図-7で明確でなかった層厚の違いによる検定線の特徴を把握することができる。

土圧計A壁面処理有りでは、各層厚における勾配の差が少ない。しかし、処理無しでは層厚が30cmになると勾配が急増し、壁面摩擦の影響(サイロ効果¹⁵⁾)の発生が認められる。なお、両ケースの全層厚検定式の勾配の差は6.3%である。土圧計B壁面処理有りでは、層厚の増加に伴う勾配増があり、応

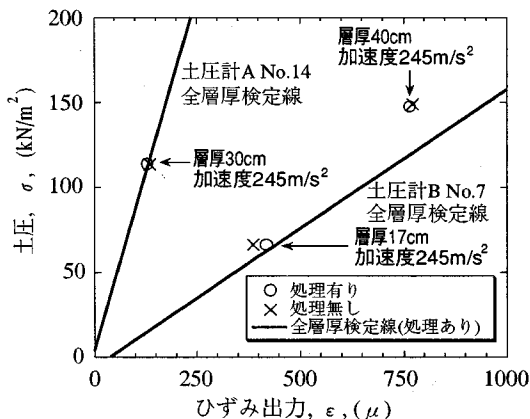


図-8 シールド土槽での壁面摩擦検証

力レベル増に伴う土圧計の変形に起因する土圧計近傍に発生するアーチ作用の発生が認められる。

また、壁面処理無しでも、層厚の増加に伴う勾配増があるが、その程度が処理有りに比べて大きく、アーチ作用に加えてサイロ効果の発生も認められる。なお、両ケースの全層厚検定式の勾配の差は14.5%である。

以上のことから、土圧検定では層厚の増加に伴い壁面摩擦の影響を受けるようになるので、壁面摩擦の処理に配慮が必要となること、層厚の違いにより検定式が変化するので実験条件に合わせた層厚で検定を行う必要があることが判る。

d) シールド実験と土圧検定

シールド実験では地盤を重力場で作製した後、所定の遠心力を作用させる。その後、この地盤中をシールド模型が施工過程を模擬する。したがって、覆工土圧計測位置での地盤の初期条件、すなわち壁面摩擦の影響の有無について確認しておくことが必要となり、シールド実験土槽でこれを検証することにした。

実験土槽寸法は、700×240×700mm（幅、奥行、高さ）で検定用土槽より大きい。シールド実験の実験条件は覆工管土被り10～40cm、加速度245m/s²が予定されていた。したがって、検証はこの実験条件にできるだけ合わせることにし、壁面処理有り、無しの2ケースについて土圧計Aを用いたものが層厚30cm、Bを用いたものが層厚17cm、40cmで行うことにした。また、加速度は最大589m/s²を作用させることにした。

この検証結果を図-8に示すが、両ケースとも同一応力レベルでひずみ出力に顕著な差が無く、シールド

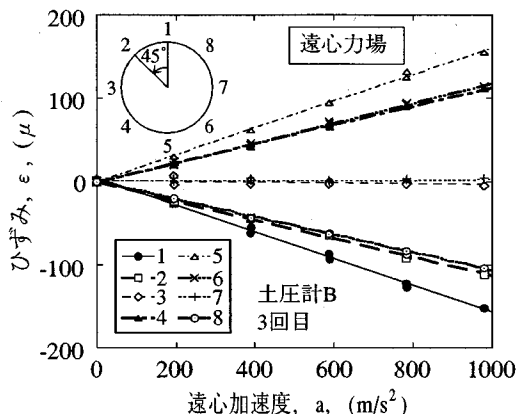


図-9 装着時自重検定結果

実験土槽では、壁面処理無しの条件でも壁面摩擦の影響が覆工土圧計測位置に及んでいないことが確認された。すなわち、シールド実験土槽の覆工土圧計測位置における土圧計のひずみ出力は、壁面処理の有無にかかわらず、検定用土槽の壁面処理有りの出力と同程度となることが確認できた。

したがって、シールド実験は地盤製作作業の容易な壁面処理無しの条件で行うことにし、データ整理に当たっては検定用土槽で得た全層厚検定式（壁面処理有り）を用いることにした。なお、図-8にはこの検定式を示しているが、検証結果との対応が良いことが判る。

以上のように、検定用土槽と実験土槽の寸法が異なる場合には壁面摩擦の影響についての検証が必要となる。

(3) 装着時自重検定

この検定は、シールド実験で土圧計が覆工管に装着された状態での各加速度レベルでの自重の影響を補正するためのものである。ここでは土圧計Bの結果を図-9に示すが、各設置位置での対称性が良く表れている。また、加速度が土圧計の横方向から作用する位置にあるNo.3, 7では、自重による影響がひずみ計測に表れていないことが判る。

(4) FEM解析による検証

理論式および土圧検定との対比、また、受圧面に作用する摩擦力等の影響を検証するためFEM解析(SIGNAS)を行った。

a) ひずみ量の対比

FEM解析は、二次元解析で起歪部のひずみが安定

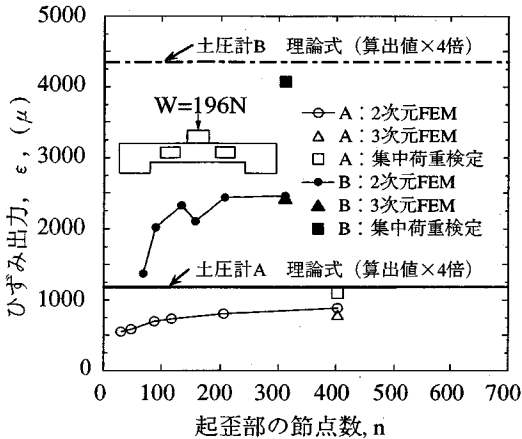


図-10 二次元解析による起歪部節点数とひずみ出力の関係

する分割数を参考に、三次元解析での分割を決めた。荷重 $W=196\text{N}$ を作用させた場合の二次元解析での起歪部節点数とひずみ出力の関係を図-10に示す。また、この図には、理論式をもとに算出したひずみ出力($4 \cdot \epsilon_{\max}$)、集中荷重検定値および三次元FEM解析値をそれぞれ示している。

FEM解析結果では二次元および三次元解析結果がほぼ一致しているにもかかわらず、理論式をもとに算出したひずみ出力とはかなり差があり、土圧計Aで誤差25%、Bで誤差40%程度となった。この原因はFEM解析における分割数と分割形状による影響と、特に土圧計Bでは起歪部開口形状が複雑であることの影響が現れたものと考えられる。

b) 摩擦力等の影響

覆工土圧の計測では、土圧計が覆工管の周方向に設置されているため、受圧面に垂直な方向荷重以外にも、周平行方向に摩擦力等が作用することが予想される。このため、図-11に示す3種類の単位荷重を作用させ、起歪部に発生するひずみ量を比較することにした。その結果はケース①の荷重が作用するときのひずみ出力をそれぞれ100%として、各荷重ケースにおけるひずみ出力比率を算出して図-11の下部に表にまとめて示す。これから、受圧板周平行方向の荷重による影響は一方向ロードセルに表れないことが検証され、装着時自重検定と同様の結果となった。

5. 検証結果の考察

土圧検定結果 (壁面処理有り, A No.14, B No.7)

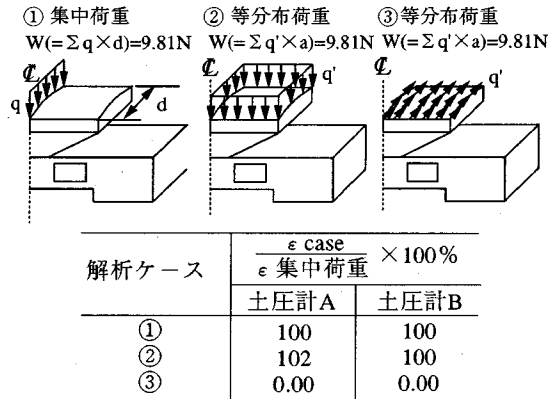


図-11 三次元解析による各荷重ケースにおけるひずみ出力比率

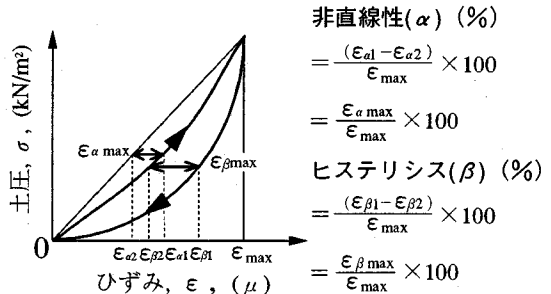


図-12 非直線性およびヒステリシスの定義

をもとに、図-12に定義する非直線性およびヒステリシスと、受圧板の有効径(D)と中央部位置(δ)との比 D/δ および復元力に関する係数 $d\delta/dp$ との関係について考察する。

(1) 直線性

土圧検定における各層厚毎の最大応力度から式(2)を用い δ を求め、土圧検定で得られた非直線性 α と D/δ の関係をプロットしたものを図-13に示す。

α は、おおよそ土圧計Aで-4%~2%、Bで4~8%に分布する。土圧計Aでは、応力レベルが低いほど、非直線性が大きくなる。応力レベルの大小による非直線性は、土と土圧計の相対的な剛性差の影響を受ける。低い応力レベルでは、土の剛性が土圧計の剛性と比べて相対的に低いため、負の応力集中が生じ(図-7)、層厚が増え応力レベルが大きくなると土の剛性も上がるため、土と土圧計の変形の差がなくなり、負の応力集中が減少するため非直線性が小

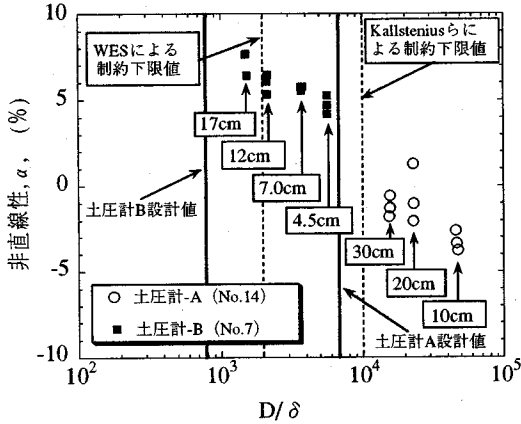


図-13 D/δ と非直線性の関係

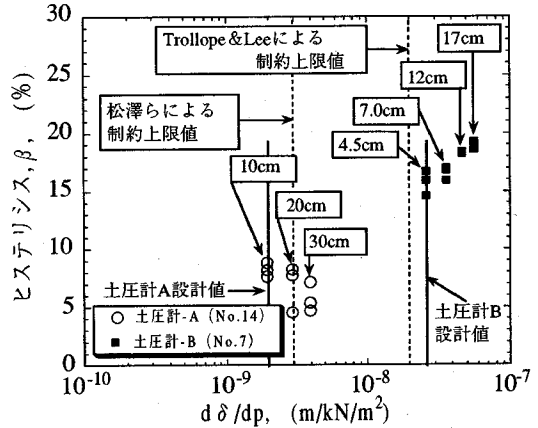


図-14 $d\delta/dp$ とヒステリシスの関係

さくとなると考えられる。

一方、土圧計Bでは、応力レベルが大きくなるほど、非直線性が大きくなる。土圧計の剛性が低いと、低い応力レベルから土の剛性が土圧計の剛性よりも上回り、アーチ作用による正の応力集中を生じる。小型門型ロードセルは、荷重の作用とともに受圧板が一様に変位するため、受圧板上の砂にアーチ作用が発生すると考えられる。さらに、応力レベルが大きくなるほど土圧計の変形が大きくなるため、アーチ作用による影響が大きくなると考えられる。

したがって、土圧計Aでは応力レベルが高くなるほど α が0に近づき、土圧計Bでは α が+側に大きくなる。

土圧計A、Bについて α の絶対値を比較すると、剛性の高い土圧計Aの方が小さく、直線性がほぼ確保されている。このことから、この種のロードセルでは、 α を $\pm 5\%$ 以下に収めるためには、 D/δ の設定を 10^4 程度以上にする必要があると考えられる。また、砂のアーチ作用に関して D/D_{50} の影響については、今回の土圧検定結果からだけでは判定できなが、 D/D_{50} が土圧計Aで65、Bで50とあまり差が無いため、これによる α への影響は少ないものと考えられる。

(2) ヒステリシス

各層厚毎の検定でのヒステリシス β を求め、復元力に関する係数 $d\delta/dp$ および D/δ との関係プロットしたものを図-14、15に示す。なお、図-14では層厚の違いによる β を見るため、データを離して記入しているが、設計値の位置が正しい表示となる。

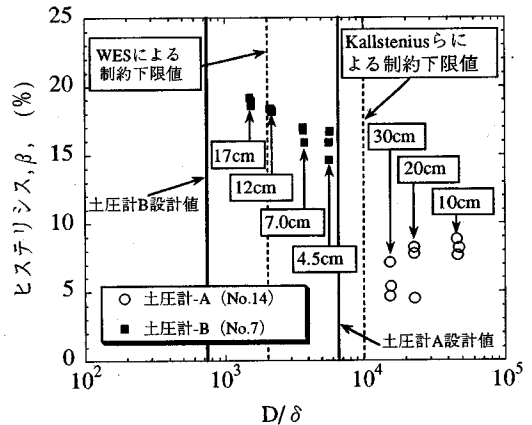


図-15 D/δ とヒステリシスの関係

β は、受圧板の復元力特性に大きく関係すると考えられるが、今回の検定では図-14に示すように土圧計Aで4~9%、Bで14~20%の範囲に分布する。また、分布の程度は、土圧計Aでは各層厚で大きな差は無く、Bでは層厚が増す毎に β 値が若干大きくなる傾向を示す。このため、載荷時に生じた δ と関係し除荷時のアーチ作用（載荷時と逆の現象）も考えられるため、図-15に示すように D/δ との関係でも整理した。これから、図-14と同様な傾向が認められ、基本的には $d\delta/dp$ による影響が支配的なものの、復元力の小さな土圧計ではわずかではあるが D/δ による影響も加わることが認められた。

筆者らが実施しているシールドトンネル覆工土圧計測¹⁾では、載荷過程における計測となり除荷過程で認められるヒステリシスは大きな問題にな

らないが、この種の土圧計を繰り返し载荷に伴う土圧の変化計測あるいは振動土圧の計測に用いる場合には β を小さくするための制限が必要になる。

今回の結果では、壁面処理有りの条件でも、土圧計Aの β が4~11%の値となっており、 $d\delta/dp$ または D/δ を更に厳しく設定する必要があると考えられる。また、2種類の $d\delta/dp$ による検定であったため明確に定量化はできないが、 $d\delta/dp \leq 1 \times 10^{-9}$ (m/kN/m²) は必要ではないかと推察される。

6. 結論

本研究で得られた土圧計の設計法と遠心模型実験への適用についての要点を以下に述べる。

- ①土圧計は、平行平板曲げモードの弾性解析式を用いて設計可能である。また、FEM解析は、受圧板面に平行に作用する摩擦力等の影響を評価する上で有効である。
- ②土圧計検定線の直線性を確保するため、設計条件の1つとして $D/\delta \geq 1 \times 10^4$ とすることが必要と考えられる。
- ③土圧計検定線のヒステリシスを少なくするため、 $d\delta/dp$ を厳しく設定する必要がある、その値として $d\delta/dp \leq 1 \times 10^{-9}$ (m/kN/m²) が目安になると考えられる。
- ④土圧計を用い遠心力場で土圧計測をする場合には、重力場集中荷重検定線を使用せず、遠心力場土圧検定線を使用し、測定の信頼性を高めることが必要である。また、このとき検定条件や実験条件に合わせた自重検定を行い、検定値を補正することも重要である。
- ⑤土圧検定で、層厚が厚くなった場合、壁面摩擦の影響が現れることが確認された。このため、土圧検定は壁面処理を行い検定線を求めることが必要である。また、遠心模型実験で使用する土槽の壁面処理を行わない場合には、土圧計測位置での壁面摩擦の影響について確認しておく必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重な御助言ならびに御指導を頂いた宇都宮大学工学部 横山幸滿教授、広島大学工学部 日下部 治教授、群馬大学工学部 萩原敏行助教授、西松建設株式会社 藤井利侑氏および三戸憲二氏に対し心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 野本 寿, 三戸憲二, 今村眞一郎, 上野勝利, 日下部 治: 遠心载荷用シールド模型実験装置の開発, 土木学会第49回年次講演会概要集, III, pp.1352-1353, 1994.
- 2) 今村眞一郎, 野本 寿, 上野勝利, 藤井齊昭: 小型門型ロードセルの遠心模型実験への適用について, 第30回土質工学会発表講演集, pp.1707-1710, 1995.
- 3) 萩原敏行, 日下部 治, 野本 寿, 三戸憲二: 乾燥砂中の剛な埋設管に作用する土圧測定の試み, 土木学会第44回年次学術講演会, III, pp.936-937, 1989.
- 4) 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, 第135号, pp.8-15, 1966.
- 5) 市原松平: 土圧計の検定と作動, 材料, 第22巻, 第238号, pp.2-7, 1973
- 6) 松澤 宏, 森 富雄, 田中義章: 低圧小型土圧計に関する研究, 土質工学会論文集, Vol.22, No.2, pp.103-112, 1982.
- 7) 松澤 宏, 石井恒久: 土中土圧計4種の作動に関する研究, 土木学会論文報告集, 第203号, pp.29-44, 1972.
- 8) 松澤 宏, 森 富雄, 尾崎師成: 土圧計検定土槽内の応力分布, 研究発表会講演概要集, 土木学会中部支部, pp.178-179, 1979.
- 9) Trollope, D.H. and Lee, I.K.: The Measurement of Soil Pressures, Proc. of the 5th Int. Conf. on SMFE, Vol. II, pp.493-499, 1961.
- 10) Kallstenius, T. and Bergau, W.: Investigations of Soil Pressure Measuring by Means of Cells, Royal Swedish Geotechnical Institute, Proc. No. 12, Stockholm, 1956.
- 11) Osterberg, J.: Soil Pressure Investigation, Interim Report, Vicksburg (U.S. Waterways Experiment Station. Techn. Memorandum No.201-1), 1944.
- 12) 佐藤剛司, 龍岡文夫, 生原 修, 山田真一: 2方向ロードセルの試作とその特性について, 土木学会第38回年次講演会概要集, III, pp.285-286, 1983.
- 13) 谷 泰弘: 切削加工分野で使用されるロードセルについて, 生産研究, 34巻6号, 1982.
- 14) 渡辺 理: ひずみゲージとその応用 (改訂版), pp.63~77, 日刊工業新聞社, 1981.
- 15) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, pp.182-215, 1943.

(1995. 10. 5 受付)

DESIGN AND PERFORMANCE OF COMPACT LOAD CELL FOR MEASURING EARTH PRESSURE IN A CENTRIFUGE

Shinichiro IMAMURA, Toshi NOMOTO, Tejiro SAITO, Katsutoshi UENO
and Nariaki FUJII

A compact load cell of gate type was newly designed and manufactured, which can be inlaid in a model tunnel for measuring earth pressure on a lining of the shield tunnel in sand. The paper describes its design concept and performance of the load cell in a centrifuge. Applicability of three dimensional elastic FE analysis was also examined and usefulness of the FE analysis was confirmed for studying factors affecting on strain, such as frictional force and eccentric loading. Non-linearity and hysteresis characteristics of calibration curves were investigated, from which a relationship between diameter of deflecting membrane of the load cell and deflection was deduced to evaluate required rigidity for a certain stress range. Importance of lubrication on side walls of calibration chamber was also demonstrated.