

テーパシールドに関する基礎的研究(第1報)

A Basic Study of Tapering Shield, I.

齊藤 顕次* 松井 健一**
Kenji Saito Kenichi Matsui

長谷部廣行*** 岡田 隆治****
Hiroyuki Hasebe Takaji Okada

平岡 博明*****
Hiroaki Hiraoka

要 約

通常のシールド工法で、大きな膨張性地圧が発生する地山を掘削することは、シールドの周囲に作用する大きな地圧のため、シールドの推進力がきわめて大きくなり、困難である。

しかし、シールドの外形に若干の傾斜角をつけたテーパシールドでは、シールドの推進力が減少することが、模型実験によって明らかになり、その結果、大きな膨張性地圧が発生する地山でのテーパシールドによる掘削の可能性が、明白になった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験条件
- § 3. 実験方法
- § 4. 模型地盤
- § 5. 実験装置
- § 6. 実験手順
- § 7. 実験結果及び検討
- § 8. おわりに

§ 1 はじめに

数10kgf/cm²の膨張性地圧が作用する地山をシールド工法によって掘削する場合、通常のシールドでは、シールドの周囲に作用する大きな地圧によって、地山とシールドとの周面摩擦がきわめて大きくなり、シールドを推進させるためには非常に大きな推進力を要し、掘削は不可能となる。

シールドの外形に若干の傾斜角をつけたシールド（以下テーパシールドと称する）では、その外面の傾斜によつ

て、地山との周面摩擦の作用する状態が変化し、シールドの周囲に作用する大きな地圧の一部が推進力に転化するので、シールドの推進に要する推進力が減少すると考えられる。

この傾斜角による推進力の減少の効果を実証するためには、実際にテーパシールドに地圧を作用させ、推進力を測定することが必要である。実物大実験は不可能であるが、模型実験によって、推進力を測定することは可能である。

本報文は、テーパシールドに関する基礎的研究として、テーパシールドによる推進力減少の効果を実証するために行つた模型実験について述べたものである。

§ 2 実験条件

実験にあたって、次の基本的な条件を設定した。

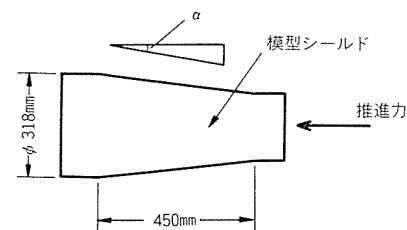


Fig-1 模型シールドの形状
Shape of shield model

*技術研究所係長
**技術研究所
***技術研究所
****技術研究所
*****技術研究所

- 1) 模型シールドは、Fig-1のような形状で、外径318mm、長さ450mmとする。シールド外形の傾斜角は、
 - (1) Case1 ; $\tan\alpha = 0$
 - (2) Case2 ; $\tan\alpha = 1/100$
 - (3) Case3 ; $\tan\alpha = 1/50$
 の3種類とする。
 - 2) 模型シールドには、模型地盤を通して 30kg f/cm^2 (2940kPa)の周圧を作用させる。
 - 3) 模型地盤は、見かけの粘着力 $C=2.0\text{kgf/cm}^2$ (196kPa)、せん断抵抗角 $\phi = 10^\circ$ なる強度特性を有するものとする。
- これらの条件は、実際に存在する膨張性地山及び実際の規模のシールドの縮尺を考慮して決めたものである。

§ 3 実験方法

Fig-2の説明図に示すように、模型シールドの周囲に模型地盤を作製し、油圧によりゴムスリーブを通して模型地盤に周圧を加えた。

周圧を一定に保ち、模型シールドの一端に模型シールドが動き出すまで荷重を加え、模型シールドの載荷重(推進力)、変位量及びびずみ量を測定した。

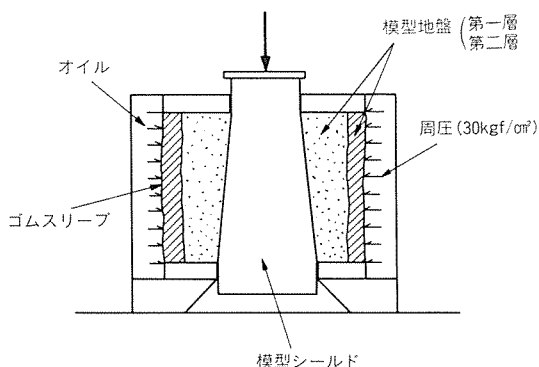


Fig-2 実験方法説明図
Explanation of model testing

§ 4 模型地盤

模型地盤は、Fig-2の説明図に示すように二層構造になっている。模型シールドに接する第一層は、§ 2実験条件の3)項に該当する地盤で、厚さ100mmである。ゴムスリーブに接する第二層は、ゴムスリーブと一体となって、第一層及び模型シールドに周圧を伝えるもので、厚さ50mmである。

模型地盤は、セメント、ベントナイト及び水を練りま

ぜて硬化させたもので、その配合をTable-1に示す。

Table-1 模型地盤の配合(1m³当り)
Mix proportion of ground model materials

	セメント	ベントナイト	水	地盤作製法
第1層	310kg	620kg	663kg	張り付け
第2層	690kg	69kg	756kg	流し込み

第一層の地盤材の24時間後のせん断強さをFig-3に示す。第二層の地盤材の一軸圧縮強さは、22時間後で 1.79kgf/cm^2 (175kPa)である。

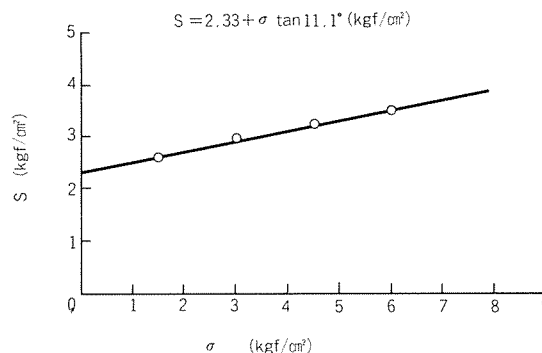


Fig-3 第一層地盤材のせん断試験(圧密等圧せん断)
Test result of direct shear test for the first layer (CD Test)

第一層は、模型シールドを建て込んだのち、模型シールドの周囲に地盤材を手で張り付けて作製した。第二層は、第一層を作製したのち、ゴムスリーブ及び型枠を設置し、第一層とゴムスリーブの間に地盤材を流し込んで作製した。

§ 5 実験装置

実験装置の全景をPhoto-1に示す。



Photo-1
実験装置
Testing device

5-1 模型シールド

模型シールドは、銅製（STPG管で作製した）で、その形状の詳細をFig-4に示す。

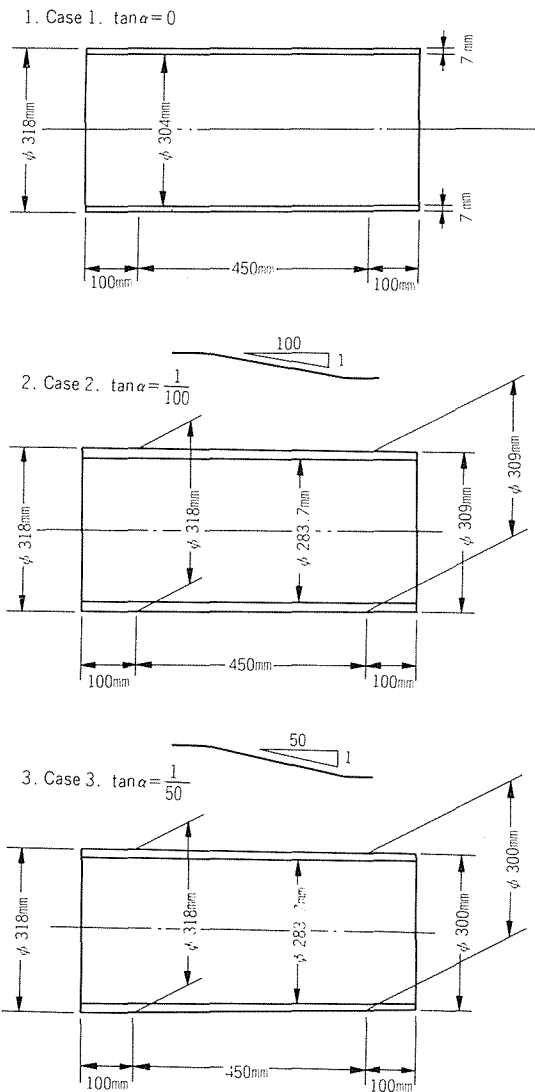


Fig-4 模型シールドの詳細
Details of shield model

全長650mmのうち周圧が作用する部分は、中央部の450mmである。

5-2 圧力容器

模型地盤に周圧を加える圧力容器をFig-5, Photo-2に示す。

圧力容器は、厚さ24~25mmの鋼板を加工して作製した。油圧を模型地盤に伝達するゴムスリーブは厚さ3mmの軟質のゴム板を加工したものである。ゴムスリーブの上部定着板は、Fig-4の模型シールドの形状に応じて3種類作製した。

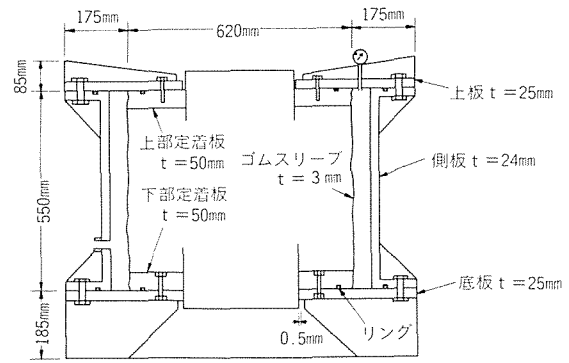


Fig-5 圧力容器
Pressure chamber

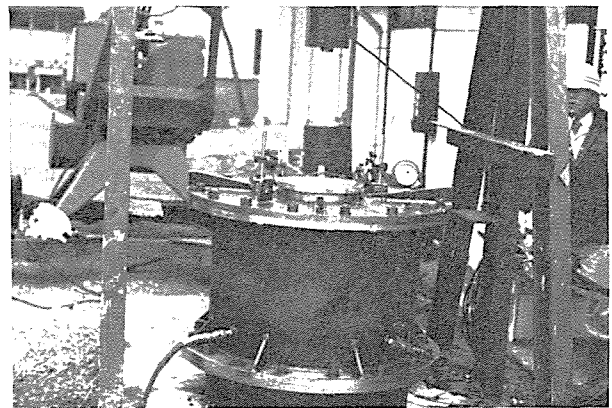


Photo-2 圧力容器
Pressure chamber

5-3 加力装置

周圧及び荷重の加力装置をFig-6に示す。

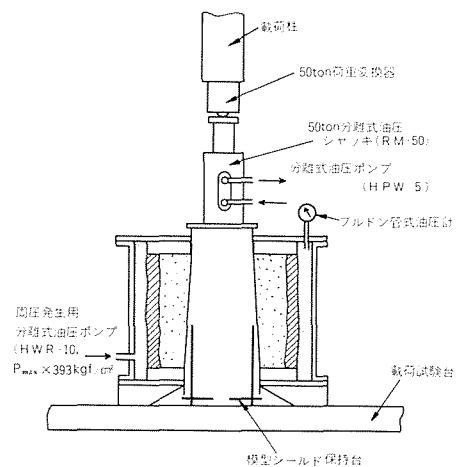


Fig-6 加力装置
Loading equipments

周圧は、分離式油圧ポンプ（HPW-10）を用いて発生させ、荷重は、50tf分離式油圧ジャッキ（RM-50）と分

離式油圧ポンプ (HPW-5) を用いて加えた。周圧の読み取りは、最大圧力 50 kgf/cm² (4900 kPa) のブルドン管式油圧計を、荷重の読み取りは、最大荷重 50 tf (490 kN) の荷重変換器を用いて行った。

5-4 計測装置

模型シールドには、ひずみを測定するために、各シールドの内側にひずみゲージを貼付けた。シールド中央部に円周方向と軸方向のひずみを測定する二軸ゲージ (FCA-6-1L) を 4 箇所、シールドの载荷端に軸方向のひずみを測定する一軸ゲージ (KFC-5-C1-11) を 4 箇所貼付した。

実験の計測システムを Fig-7 に、計測装置を Photo-3 に示す。

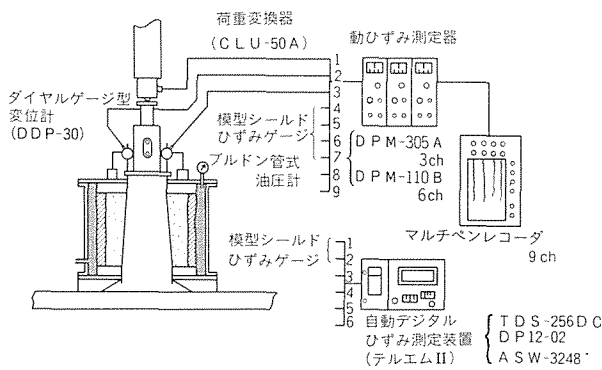


Fig-7 計測システム Measuring system



Photo-3 計測装置 Measuring apparatus

模型シールドの変位は、2 個のダイヤルゲージ型変位計 (DDP-30) で測定した。

荷重変換器、ダイヤルゲージ型変位計及び模型シールド中央部のひずみゲージは、動ひずみ測定器で計測し、マルチペンレコーダに記録した。模型シールド载荷端と中央部の一部のひずみゲージは、自動デジタルひずみ測

定装置で計測した。

§ 6 実験手順

载荷試験台の上に模型シールド保持台と圧力容器の底板を据える。底板にはゴムスリーブの下部定着板を取り付けて置く。底板に模型シールドを建て込んだのち、第一層の地盤材を手で貼り付ける (Photo-4 参照)。第一層を作製したのち、下部定着板にゴムスリーブを定着する。



Photo-4 第一層地盤の作製 Making the first layer by hand

ゴムスリーブに型枠を被せ、第一層とゴムスリーブの間に、第二層の地盤を流し込み、そのまま 24 時間養生して模型地盤を硬化させる。

養生後、型枠を外して模型地盤の表面を整形し、上部定着板を載せてゴムスリーブを定着する (Photo-5 参照)。

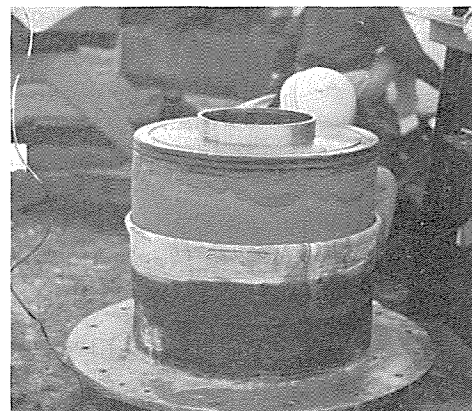


Photo-5 上部定着盤及びゴムスリーブ Upper fixing disk and fixed rubber sleeve

圧力容器の側板を取り付け、ゴムスリーブと側板の間にオイルを充てんし、上板を取り付けて圧力容器を組み立てる。模型シールドの保持台を約 50 mm 下げる。

载荷用油圧ジャッキを除いた加力装置及び計測装置を

設置し、油圧ポンプで模型地盤に周圧を加える。周圧を加える時点で計測を開始する。

ブルドン管式油圧計による周圧の読みが、30kgf/cm² (2940kPa)に達した時点で、荷重用油圧ジャッキを設置し、周圧を30kgf/cm² (2940kPa)に保持しながら模型シールドに荷重を加える。

荷重が最大値に達し、さらに模型シールドの変位が進んで荷重が一定値になった時点で、荷重を止めて実験を終了させる。

§ 7 実験結果及び検討

実験結果をTable-2に計測データの記録例をFig-8に示す。

Table-2 実験結果表
List of test results

Case	周圧	無載荷	荷 重 (tf)		シールド変位量 (mm)	シールド中央部実測ひずみ	
			最大荷重	最小荷重		$\epsilon_{\theta} (\times 10^{-6})$	$\epsilon_s (\times 10^{-6})$
Case1 (0)	30kgf/cm ²	無載荷	—	—	0	-385.84	131.64
		載 荷	24.26	16.38	(0.38)	(-347.81)	(18.95)
Case2 (1/100)	30kgf/cm ²	無載荷	—	—	1.02	-157.96	47.76
		載 荷	17.52	9.30	(0.35)	(-150.38)	(24.81)
Case3 (1/50)	30kgf/cm ²	無載荷	—	—	2.29	-175.38	49.95
		載 荷	13.34	5.85	(0.66)	(-176.10)	(14.41)

注1) ϵ_{θ} : 円周方向ひずみ, 2) ϵ_s : 軸方向ひずみ, 3) ()内は最大荷重に達したときの値, 4) 正: 引張ひずみ, 負: 圧縮ひずみ

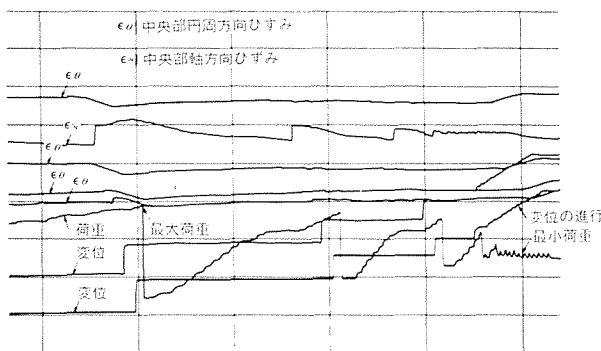


Fig-8 Case 1 (0)の計測記録
Record of test result of case 1

7-1 シールドの周圧による変位

模型地盤に周圧を加えると、模型地盤は圧密され、模型シールドは、シールド外形の傾斜に応じて、押し下げられる方向に変位する。この変位は、周圧によってシールドに推進力が働いていることを示している。

周圧が30kgf/cm² (2940kPa)に達するまでに生じた変位量は、Fig-9のようになり、このときシールドに働いた推進力は、シールド外形の傾斜1/100で3tf/m² (29.4kPa), 1/50で6tf/m² (58.8kPa)である。

7-2 シールドに作用する周圧

模型地盤に30kgf/cm² (2940kPa)の周圧を加えたとき、模型シールドの中央部に生じるひずみの実測値と解析値

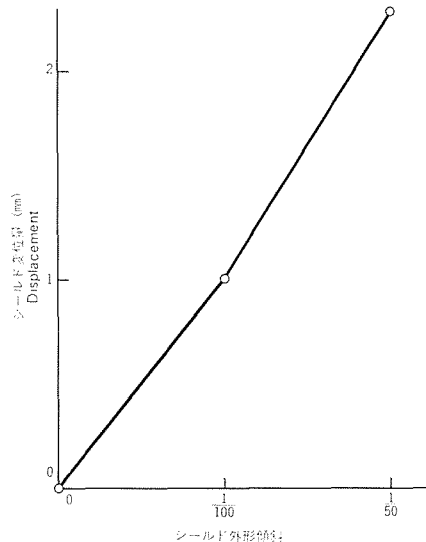


Fig-9 模型シールド変位量(周圧30kgf/cm²)
Relationship between displacement and external inclination of shield model at 30kgf/cm² cell pressure

Table-3 模型シールドのひずみ量(周圧30kgf/cm²)
Measured strain of shield model at 30kgf/cm² cell pressure

	中央部実測ひずみ		中央部ひずみ解析値	
	$\epsilon_{\theta} (\times 10^{-6})$	$\epsilon_s (\times 10^{-6})$	$\epsilon_{\theta} (\times 10^{-6})$	$\epsilon_s (\times 10^{-6})$
Case1 (0)	-385.84	131.64	-317.3	95.2
Case2 (1/100)	-157.96	47.76	-143.0	43.3
Case3 (1/50)	-175.38	49.95	-169.3	51.8

は、Table-3のようになる。

Table-3に示すひずみの解析値は、「シールド模型実験計画(応力解析)」^{※1}の報告書によるもので、模型シールドに直接30kgf/cm² (2940kPa)の周圧を作用させて、模型シールドのひずみ量を計算したものである。

このひずみ解析値と実測ひずみとの比較から、模型地盤に加えた30kgf/cm² (2940kPa)の周圧は、模型シールドにも作用しているものと考えられる。

7-3 シールドの推進力

周圧を30kgf/cm² (2940kPa)に保持して模型シールドに荷重を加えると、模型シールドの変位と荷重は、Fig-8の記録に示す動きをする。

シールドに荷重を加えると、シールドの変位は徐々に増加する。荷重がある値に達するとシールドは急激に大きな変位を示し、荷重も急激に低下する。再び荷重を加えると前と同様な動きを示すが、前の値に達しないうちにシールドは急激に大きく変位し、荷重も急激に低下する。このようなことを2、3回繰り返したのち、シールドの変位は進行状態を示し、荷重はある一定な値を示す。

※1 “シールド模型実験計画(応力解析)”昭和55年12月, 土木設計部

最初に示す値は、載荷重の最大値であり、最後に示す一定値は、載荷重の最小値である。最大荷重は、シールドを動かすのに必要な推進力(最大推進力)であり、最小荷重は、動きだしたシールドの進行を維持するために必要な推進力(最小推進力)である。推進力は載荷重をシールドの表面積で除した値として表示する。

最大荷重に達するまでにシールドは、0.35~0.66mm変位する。最小荷重を示すまでには、さらに5.93~10.76mm変位する。

載荷の過程では、模型シールドに発生しているひずみに、ほとんど変化が見られないことから、シールド外形の傾斜がこの程度ならば、模型地盤と模型シールドとの接触は、十分維持されているものと考えられる。

載荷重及び推進力の最大値、最小値を求めると、Table-4のようになる。

Table-4 載荷重及び推進力の値
Values of load and driving force

	模型シールド表面積 (m ²)	載荷重 (tf)		推進力 (tf/m ²)	
		最大値	最小値	最大値	最小値
Case1(0)	0.450	24.26	16.38	53.91	36.40
Case2(1/100)	0.443	17.52	9.30	39.55	20.99
Case3(1/50)	0.437	13.34	5.85	30.53	13.39

Table-4の値から、シールド外形の傾斜と推進力の関係を図示すると、Fig-10のようになる。

Fig-10によれば、シールド外形の傾斜の存在によって、推進力が大幅に低下することは明らかである。最大推進

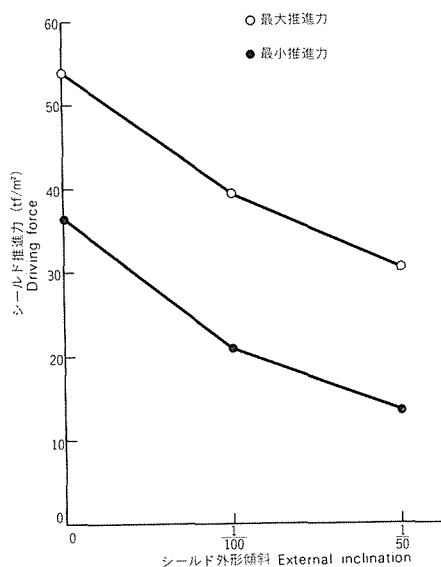


Fig-10 模型シールド推進力(周圧30kgf/cm²)
Relationship between driving force and external inclination of shield model at 30kgf/cm² cell pressure

力は、1/100の傾斜で27%、1/50で43%低下している。最小推進力では、1/100の傾斜で42%、1/50で63%低下している。

7-4 推進力の検討

模型地盤と模型シールドとの間に働くせん強さは、(1)式で表すことができる。

$$Sa = Ca + \sigma \cdot \tan \delta \text{ ----- (1)}$$

ここに、 Sa :せん断強さ、 Ca :模型地盤と模型シールドとの間の付着力、 σ :垂直応力(周圧)、 δ :模型地盤と模型シールドとの間の摩擦角

外形に α なる傾斜角を有するシールドに接して、 σ なる周圧を受ける地盤内粒子は、Fig-11のような動きを示す。すなわち、Fig-11においてシールドがA→A'に変位すると、周圧を受けている地盤内粒子は、シールドの表面に接触しながらB→B'に移動する。このとき、シールドと地盤との間にせん断力が作用する。

シールドに p なる力(推進力)を加えるとFig-11に示すシールドと地盤の動きと、(1)式から、シールドには、Fig-12に示す力が作用するものと考えられる。

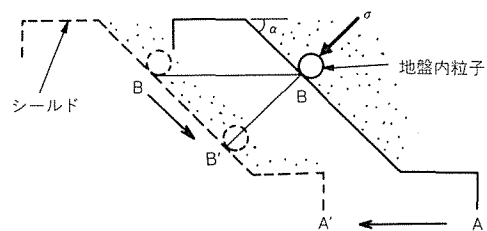


Fig-11 シールドと地盤の動き
Movement between shield model and ground model

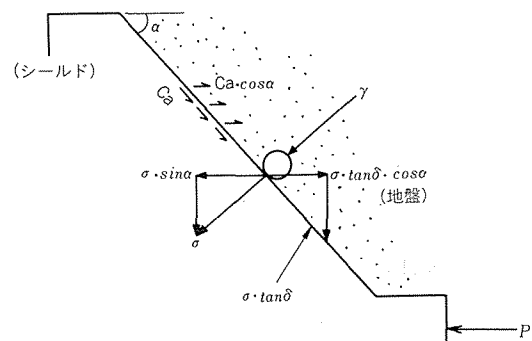


Fig-12 シールドに作用する力
External force worked on shield model

シールドの推進方向の力のつり合いを考えると、これらの力関係は、(2)式で表される。

$$p + \sigma \sin \alpha = C_a \cdot \cos \alpha + \sigma \tan \delta \cdot \cos \alpha$$

$$\therefore p = C_a \cos \alpha + \sigma \tan \delta \cdot \cos \alpha - \sigma \sin \alpha \dots\dots\dots (2)$$

(2)式の $C_a \cdot \cos \alpha$ は付着力を, $\sigma \tan \delta \cdot \cos \alpha$ は摩擦力を, $\sigma \sin \alpha$ は周圧によって生じる推進力を表している。

(2)式において $\alpha = 0^\circ$ とすると, $p = C_a + \sigma \tan \alpha$ となり, (1)式と同じものになる。

推進力の最大値と最小値の差は, シールドと地盤との間の付着力の有無によるものと考え、最大推進力は(3)式で, 最小推進力は(4)式で表すことができる。

$$\text{最大推進力 } p_{max} = C_a \cdot \cos \alpha + \sigma \tan \delta \cdot \cos \alpha - \sigma \sin \alpha \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{最小推進力 } p_{min} = \sigma \tan \delta \cdot \cos \alpha - \sigma \sin \alpha \dots\dots\dots (4)$$

シールド外形の傾斜による推進力の変化の要因を知るために, Table-4 の推進力の実測値, (3)式及び(4)式を用いて, (2)式の各項の値を計算すると Table-5 のようになる。

Table-5 推進力成分の計算
Calculated results of driving force

	α (°)	σ (tf/m ²)	$C_a \cdot \cos \alpha$ (tf/m ²)	$\sigma \tan \delta \cdot \cos \alpha$ (tf/m ²)	$-\sigma \sin \alpha$ (tf/m ²)	C_a (kg/cm ²)	δ (°)
Case1(0)	0	300	17.51	36.40	0	1.75	6.92
Case2(1/100)	0.573	300	18.56	23.99	-3.00	1.86	4.57
Case3(1/50)	1.146	300	17.14	19.39	-6.00	1.71	3.70

Table-5 によれば, シールドの推進力の変化は, 付着力の変化ではなく, シールド外形の傾斜に応じて必然的に生じる周圧による推進力のほかに, 摩擦力の変化によって生じている。摩擦力の変化は, 摩擦角の変化である。Table-5 で求めた付着力及び摩擦角とシールド外形の傾斜の関係を図示すると Fig.-13 のようになる。

Fig.-13 によれば, 付着力はほとんど変化しないが, 摩擦角はシールド外形の傾斜に応じて減少している。

以上の検討により, シールド外形の傾斜によるシールドの推進力の減少は, 周圧による推進力の発生のおかげに, 地盤とシールドとの間の摩擦角の減少という形で表れているといえる。

§ 8 おわりに

模型実験によって, テーパーシールドによる推進力の減少の効果を実証することができた。このことは, 通常のシールドでは, 掘削できないような膨張性地圧が生じる地山を, テーパーシールドで掘削することが可能であることを示している。

テーパシールドの推進力の減少は, 傾斜角の存在によ

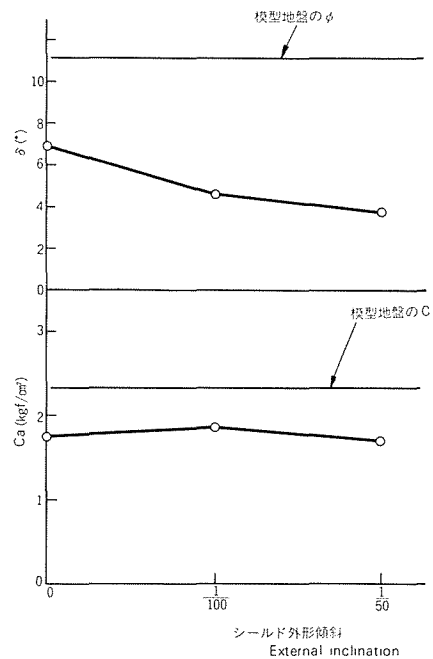


Fig-13 付着力 (C_a) 及び摩擦角 (δ) の値
Change of C_a value and δ value due to external inclination of shield model

って, 周圧による推力の発生のおかげに, 地盤とシールドとの間の摩擦角が変化するためである。

テーパシールドによる推進力の減少の効果が, 周圧や地盤の性質によって, どのように変化するのかを解明することが今後の課題である。

本模型実験は, シールド委員会の決定に基づいて実施されたもので, 実験にあたって, 御指導を頂きました各委員並びに関係者各位の御協力に深く感謝いたします。