

# テーパシールドに関する基礎的研究 (第2報)

## Basic Study of Tapering Shield Machine (II)

齊藤 顕次\*      広川 文明\*  
 Kenji Saito      Fumiaki Hirokawa  
 平岡 博明\*\*  
 Hiroaki Hiraoka

### 要 約

テーパシールドにおける推進力減少の要因を、C・B硬化体（セメント・ベントナイト硬化体）と傾斜角を有する鉄板とのせん断試験によって検討した。その結果、C・B硬化体と鉄板との間の摩擦角が低下してせん断応力がやや減少した。

### 目 次

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

### §1. はじめに

著しい膨脹性地圧が作用する地山をシールド工法で掘削する場合、通常のシールドに作用する高周圧による大きな推進力を、シールド外形に若干の傾斜角をつけることによって減少させることができると考え、その有効性を実証するために模型実験を行った。<sup>1)</sup>

この推進力の減少量は、シールド外形の傾斜量、地圧の大きさ、地山の強度、等に関係するものと考えられる。推進力の減少の要因を明らかにするためには、地盤とシールドとの関係を、容易に繰り返しが可能な土と鉄板とのせん断試験によって再現し、土の強度、鉄板表面の傾斜角、垂直応力及びせん断応力の相互関係を明らかにすることが必要である。

本報文は、先の模型実験に引き続いて、推進力の減少の要因を明らかにするために行ったせん断試験について

述べたものである。

### §2. 試験方法

Fig.1の試験装置に示すように、あらかじめ作製した試料をせん断箱の中に入れて片面に傾斜をつけた鉄板の上に置き、垂直荷重を作用させて試料を押しつけながら鉄板を引っ張り、試料と鉄板とのせん断抵抗を測定した。

試料の一軸圧縮強さ ( $q_u$ )、鉄板の傾斜角 ( $\alpha$ ) 及び垂直応力 ( $\sigma$ ) を変化させて試料と鉄板との間に働くせん断応力 ( $\tau$ ) を求めた。

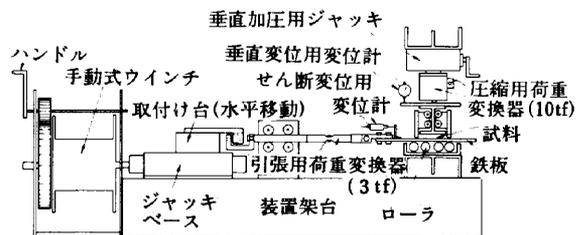


Fig.1 せん断試験装置

### §3. 試験条件

試験にあたって、次の条件を設定した。

- 1) 鉄板の表面の傾斜角 ( $\alpha$ ) は、
  - (1)  $\tan \alpha = 0$       (直板)
  - (2)  $\tan \alpha = 1/100$     (傾斜板)
  - (3)  $\tan \alpha = 1/50$     (傾斜板)

の3種類とする。

\* 技術研究部技術研究所係長  
 \*\* 技術研究部技術研究所

2) 垂直応力( $\sigma$ )は、5.0kgf/cm<sup>2</sup>(490kPa)、10kgf/cm<sup>2</sup>(980kPa)、15kgf/cm<sup>2</sup>(1470kPa)、20kgf/cm<sup>2</sup>(1960kPa)、30kgf/cm<sup>2</sup>(2940kPa)、の5種類とする。

3) 試料は、セメントとベントナイトの硬化体(以下C・B硬化体と称する)とし、垂直応力と供試体作製の容易さを考慮して、一軸圧縮強さ( $q_u$ )をFig.2の配合と強度の関係図に示す。4.0kgf/cm<sup>2</sup>(392kPa)、8.0kgf/cm<sup>2</sup>(784kPa)、16kgf/cm<sup>2</sup>(1568kPa)、27kgf/cm<sup>2</sup>(2646kPa)、の4種類を目標とする。

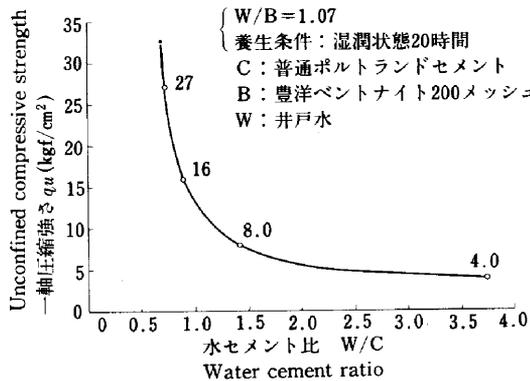


Fig.2 C・B硬化体の配合と強度の関係

#### § 4. 試験装置

せん断試験装置をFig.1, Photo 1, に示す。

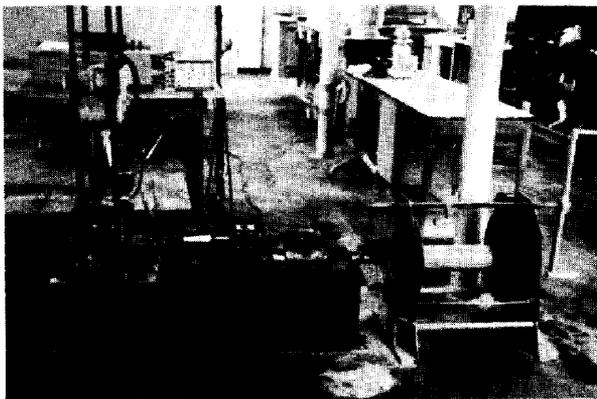


Photo1 せん断試験装置

手動式ウインチのハンドルをまわしてジャッキベースの取付け台を移動させ、容量3tf(29.4kN)の引張用荷重変換器を通してローラ上の鉄板を引っ張り、せん断抵抗を測定した。

試料には、垂直加圧用ジャッキで、容量10tf(98kN)の圧縮用荷重変換器を通して垂直荷重を加えた。鉄板は、

表面の黒皮を除去したもので、その大きさは、長さ350mm、幅130mm、厚さ10mmである。また、試料の寸法は、100mm×100mm×20mm、である(Photo 2 参照)。

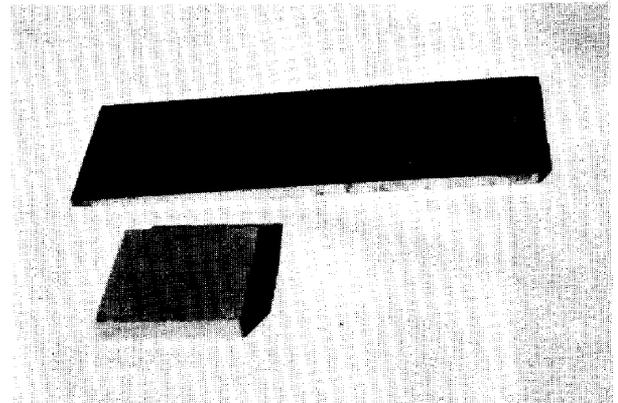


Photo2 鉄板と試料(C・B硬化体)

引張用荷重変換器(自作)、圧縮用荷重変換器(LC-10TE)、及び垂直変位、せん断変位用の2つの変位計(DDP-30)による各計測値は、動はずみ測定器(DPM-305A及び110B)を通してマルチペンレコーダに記録した。

#### § 5. 試験手順

所要の強度に対するセメント、ベントナイト及び水の配合を、Fig.2の配合と強度の関係図より求める。

ベントナイトに水を加えて泡立て器で、15分間攪拌する。更に、セメントを加えて5分間攪拌してセメント、ベントナイト、水の混合物を作製する。

C・B硬化体の一軸圧縮強さを知るために、 $\phi$ 5cm×10cmのモールドに混合物を詰めて、一軸圧縮試験用供試体を2個作製する。せん断試験には、10cm×10cm×2cmの型枠に混合物を詰めて、せん断試験用供試体を5個作製する。

供試体は、底に水を入れたデシケータの中で、20時間、19°C、の湿潤状態で養生する。20時間の養生後、供試体を取り出してそれぞれ、一軸圧縮試験、せん断試験を実施する。

せん断試験用の供試体は、鉄板と完全に密着するように鉄板の傾斜に合わせて片面を成形する。

試験装置に供試体を設置したのち、所定の垂直荷重を加えて圧密させる。圧密による体積変化が生じなくなった時点で、垂直荷重を維持しながら鉄板を引っ張り、せん断抵抗を測定する。せん断変位が25mmに達したとこ

ろで試験を終了させる。せん断速度は5~8 mm/minとした。

§ 6 . 試験結果及び検討

せん断の結果、Fig.3のような測定記録が得られた。

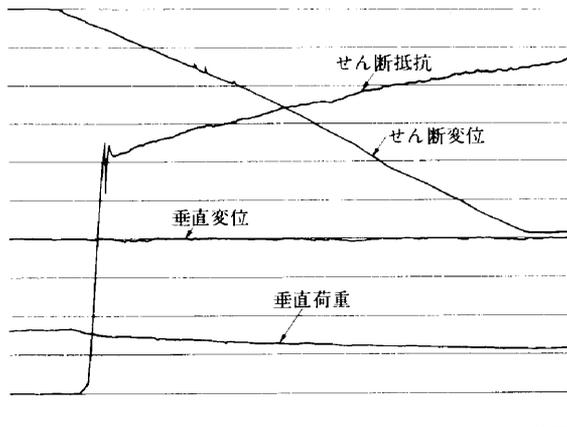


Fig.3 測定記録  
( $\tan \alpha = 0, \sigma = 20\text{kgf/cm}^2, q_u = 7.7\text{kgf/cm}^2$ )

これらの測定記録によると、せん断応力とせん断変位の関係を示す曲線を、Fig.4 に示すように分類することができる。

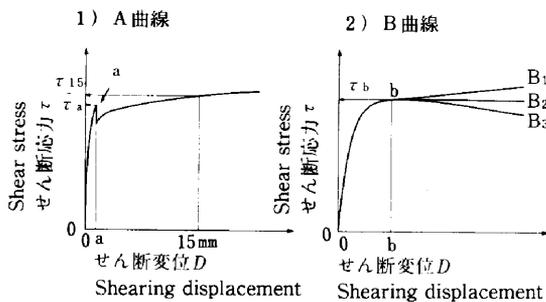


Fig.4  $\tau$ -D曲線の分類

A 曲線は、せん断応力が図中の a 点から一時低下し、その後上昇するもので、B 曲線は、せん断応力が b 点から直線的に変化するもので、上昇する B<sub>1</sub>形、ほとんど平行になる B<sub>2</sub>形、下降する B<sub>3</sub>形に分類される。

A 曲線の a 点までのせん断変位は1~2 mmである。a 点は鉄板の滑り出しが生じる点であり、その直後に鉄板と接触している試料との密着が損われ、一時的にせん断応力が低下するものと考えられる。B 曲線の b 点は、せん断変位が4 mm 以上あり、鉄板に接触している試料全面で、せん断抵抗が生じている点と考えられる。従って、求めるせん断応力( $\tau$ )として、A 曲線では、a 点の値( $\tau_a$ )とせん断変位(D)が15mm 進んだ時点の値( $\tau_{15}$ )

を、B 曲線では、b 点の値( $\tau_b$ )とした。

Table 1 に  $\tau$ -D 曲線の分類とともに、 $\tau_a, \tau_b$  の値を、Table 2 に  $\tau_{15}$  の値を、それぞれ示す。

Table 1  $\tau_a$  と  $\tau_b$  の値

鉄板の傾斜 $\tan \alpha$	C・B 硬化体の 一軸圧縮強さ $q_u$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	垂直応力 $\sigma$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )					$\tau$ -D 曲線 の分類
		5	10	15	20	30	
0	4.0	1.61	2.21	2.71	3.67	4.18	A
	7.7	2.35	3.39	4.53	5.33	6.48	A
	15.6	2.46	4.51	6.95	8.36	9.27	A
	24.0	3.20	5.90	9.40	11.70	17.70	B <sub>1</sub>
	32.6	2.40	6.70	9.60	12.80	17.40	B <sub>1</sub>
1 100	4.0	1.43	1.94	2.36	2.66	4.35	A
	7.3	2.57	3.77	4.26	4.84	6.40	A
	16.6	2.74	4.76	6.89	8.56	11.07	A
	28.7	2.62	5.44	8.04	10.0	15.60	B <sub>2</sub>
1 50	3.5	1.48	1.87	2.16	2.76	4.07	A
	7.5	2.13	3.77	4.26	5.18	6.45	A
	16.7	2.50	4.90	6.50	9.10	11.20	B <sub>2</sub>
	19.0	2.30	4.80	7.20	10.00	12.40	B <sub>3</sub>
	27.9	3.00	5.80	8.30	11.00	15.60	B <sub>3</sub>

注) せん断速度 5~8 mm/min

Table 2  $\tau_{15}$  の値

鉄板の傾斜 $\tan \alpha$	C・B 硬化体の 一軸圧縮強さ $q_u$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	垂直応力 $\sigma$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )				
		5	10	15	20	30
0	4.0	1.6	2.4	3.1	4.2	4.9
	7.7	2.7	4.6	5.6	6.4	7.7
	15.6	3.4	6.1	8.5	10.5	11.4
1 100	4.0	1.2	2.0	2.9	3.2	4.5
	7.3	2.5	3.6	4.8	5.5	7.4
	16.6	2.9	4.8	7.3	8.9	12.9
1 50	3.5	1.3	1.8	2.7	3.2	4.4
	7.5	2.2	3.9	4.4	5.5	7.2

注) せん断速度 5~8 mm/min

Table 1 によれば、A 曲線は C・B 硬化体の一軸圧縮強さが低い場合に、B 曲線は高い場合に見られる。

以後の検討では、A 曲線で示される C・B 硬化体の低強度領域のせん断応力について検討する。

$\tau_a, \tau_{15}$  の値は、C・B 硬化体の強度に大きく関係しており、Table 1~2 から  $q_u$  と  $\tau$  の関係を図示し、その代表例を Fig.5~6 に示す。 $q_u$  と  $\tau$  の関係はバラツキはあるものの、図中に示す曲線群によって近似することができる。これらの曲線群により、任意の強度の C・B 硬化体に対して  $\tau_a, \tau_{15}$  の値を求めることができる。

従って、各傾斜の鉄板に対して一定の強度を有する C・B 硬化体の  $\tau$  を求めることができるので、各鉄板の傾斜効果について、 $\tau$  の値で評価することができる。例えば、C・B 硬化体の強度  $q_u = 5.0\text{kgf/cm}^2$  (490kPa)、垂直応力  $\sigma = 20\text{kgf/cm}^2$  (1960kPa)、に対する各傾斜鉄板の  $\tau_a, \tau_{15}$  の値を図示すると、Fig.7 のようになり、鉄板

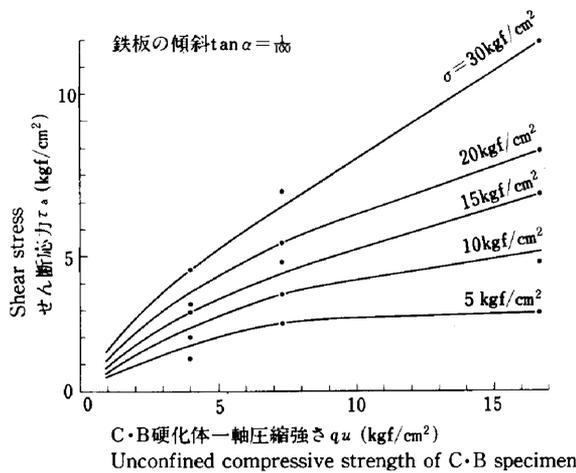


Fig.5  $\tau_a - q_u$  曲線 ( $\tan \alpha = \frac{1}{100}$ )

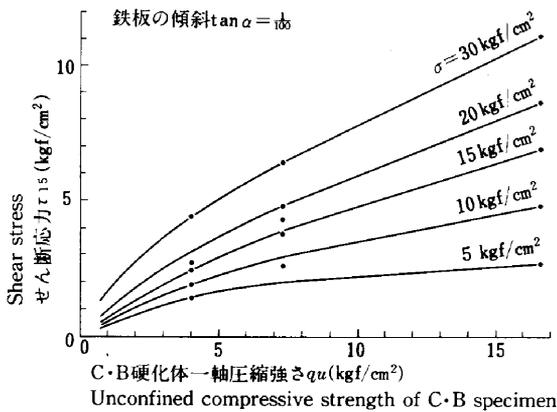


Fig.6  $\tau_{15} - q_u$  曲線 ( $\tan \alpha = \frac{1}{100}$ )

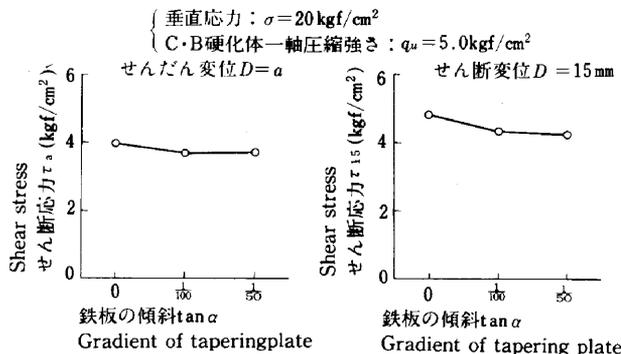


Fig.7 鉄板の傾斜とせん断応力

の傾斜角が大きくなるにともないせん断応力は低下している。

各曲線群から $\tau$ と $\sigma$ の関係を求めると、ほぼ直線関係が得られ、鉄板とC・B硬化体との間に働くせん断応力を、次式で表すことができる。

$$\tau(D) = C + \sigma \cdot \tan \delta(D)$$

ここに、 $\tau(D)$ ：せん断応力

$C$ ：鉄板とC・B硬化体との間の付着力

$\delta$ ：垂直応力  
 $\sigma(D)$ ：鉄板とC・B硬化体との間の摩擦角  
 $\tau(D)$ 、 $\delta(D)$ 、としたのは、 $\tau$ と $\delta$ がせん断変位 $D$ の関数であることを示している。

$D=a$ 及び $D=15\text{mm}$ における $C$ と $\delta$ の値を、C・B硬化体の強度、鉄板の傾斜ごとに算出したものが、Table 3である。

Table 3 付着力( $c$ )と摩擦角( $\delta$ )の値

鉄板の傾斜 $\tan \alpha$		C・B硬化体一軸圧縮強さ $q_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )						
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	
0	$D=a$ の場合	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.5	0.8	1.0	1.0	1.4	1.4
		$\delta$ (度)	4.6	5.7	6.8	8.5	8.8	10.2
	$D=15\text{mm}$ の場合	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.8	0.9	1.1	1.1	1.1	1.3
		$\delta$ (度)	4.3	6.8	8.7	11.3	13.5	14.6
100	$D=a$ の場合	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.5	0.7	0.9	0.8	1.1	1.0
		$\delta$ (度)	3.4	4.6	5.7	8.0	8.8	10.2
	$D=15\text{mm}$ の場合	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5
		$\delta$ (度)	3.7	5.7	7.1	8.3	9.6	10.6
50	$D=a$ の場合	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.7	1.0	1.1	1.2	1.2	1.1
		$\delta$ (度)	3.1	4.0	5.3	6.8	8.8	10.5
	$D=15\text{mm}$ の場合	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	0.6	0.8	0.9	1.0	1.2	1.2
		$\delta$ (度)	3.7	5.4	7.4	9.1	10.2	11.3

Table 3より、せん断変位による $C$ の変化をFig.8に、 $\delta$ の変化をFig.9~11に示す。

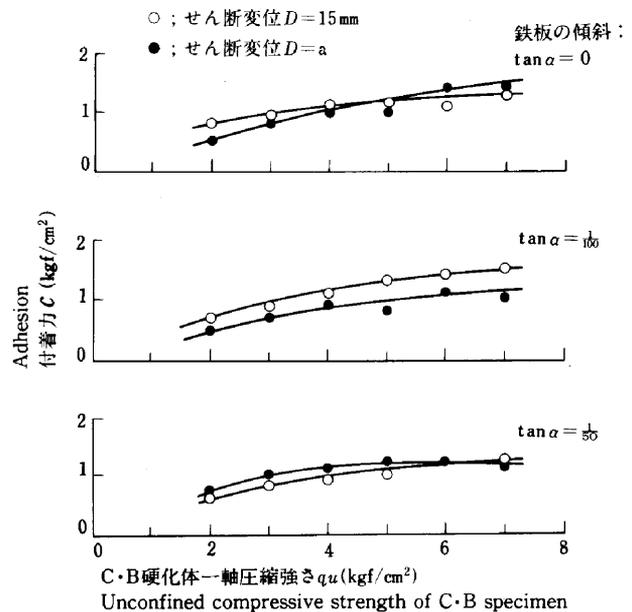


Fig.8  $C$ と $q_u$ の関係

Fig.8によれば、付着力にはC・B硬化体の強度による変化やせん断変位による差が余り見られない。

Fig.9~11によれば、摩擦角はC・B硬化体の強度によって大きく変化する。傾斜板( $\tan \alpha = \frac{1}{100}$ 及び $\frac{1}{50}$ )では、せん断変位による摩擦角の差はそれほど大きくないが、直板( $\tan \alpha = 0$ )では、C・B硬化体の強度の増加

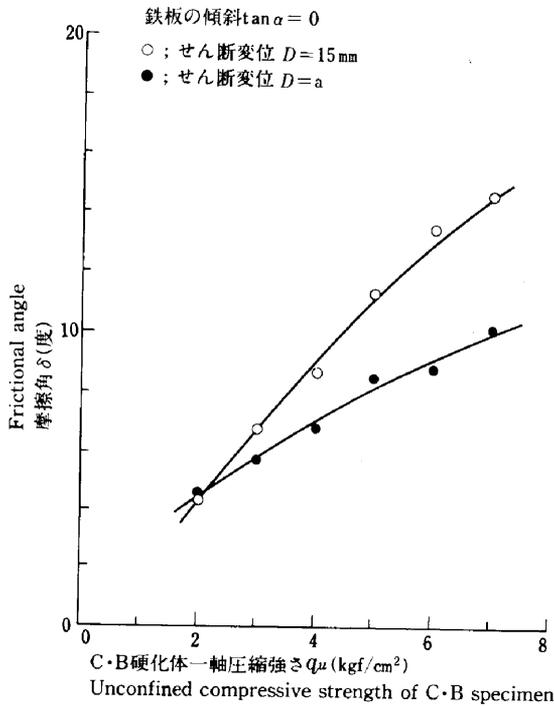


Fig.9  $\delta$ と $q_u$ の関係

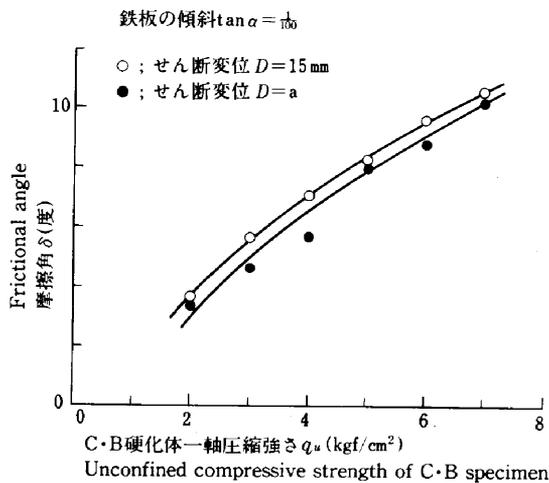


Fig.10  $\delta$ と $q_u$ の関係 ( $\tan \alpha = 1/50$ )

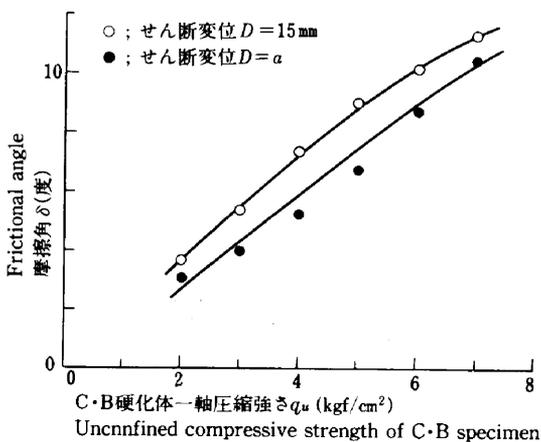


Fig.11  $\delta$ と $q_u$ の関係 ( $\tan \alpha = 1/50$ )

とともにせん断変位による摩擦角の差が大きく拡がっている。

従って、鉄板とC・B硬化体とのせん断応力の変化は、摩擦角の変化としてとらえることができる。また、摩擦角はせん断変位の関数として現れている。

せん断変位の増加にともなう摩擦角の増加は、鉄板とC・B硬化体との接触面において、硬化体の固結粒子群がせん断の進行につれて緊密化し、すべり摩擦が増加するためであると考えられる。この緊密化の程度は、硬化体の強度や鉄板の傾斜に関係する。

Table 3より、鉄板の傾斜と付着力の関係を Fig.12 に、摩擦角の関係を Fig.13 に示す。

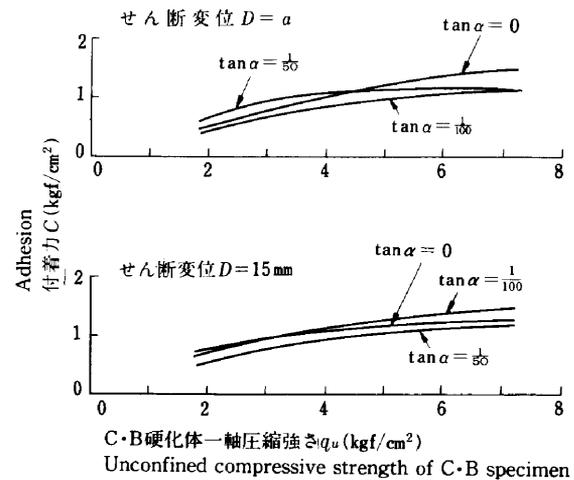


Fig.12  $\tan \alpha$ と $C$ の関係

Fig.12によれば、付着力は鉄板の傾斜やせん断変位に関係なく、C・B硬化体の強度によってわずかに増加する。

Fig.13では、摩擦角は鉄板の傾斜によって大きく変化する。せん断初期( $D = a$ の場合)では、硬化体の強度が小さくなるにつれて、直板のすべり摩擦が傾斜板より大きくなることを示している。せん断中( $D = 15 \text{ mm}$ の場合)では、硬化体の強度が大きくなるにつれて、硬化体の表面粒子の緊密化が直板に大きく作用して、傾斜板より大きなすべり摩擦が生じている。C・B硬化体の強度とともに摩擦角は大きくなるが、いずれの場合でも、直板は傾斜板より大きな摩擦角を示している。鉄板の傾斜量による差異はほとんど認められない。

以上の検討により、低強度のC・B硬化体と鉄板とのせん断試験において、傾斜鉄板におけるせん断応力の減少は、傾斜角の存在によって硬化体と鉄板との摩擦角が減少するためであると考えられる。

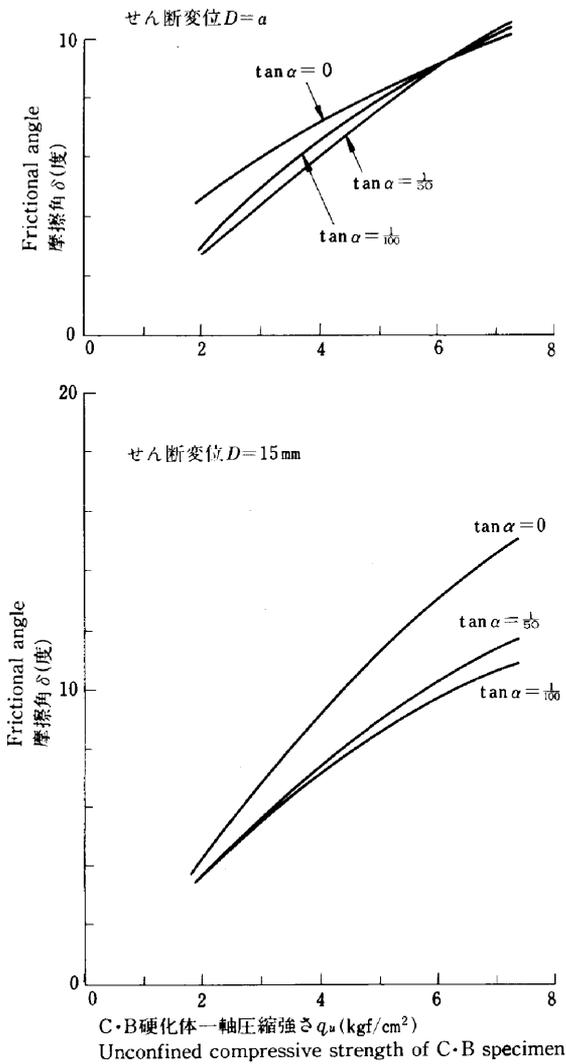


Fig.13  $\tan \alpha$  と  $\delta$  の関係

§7. おわりに

本試験は試料に対して一軸方向のみに垂直荷重を作用させる試験であり、先の模型実験のように二軸方向に垂直荷重を作用させる実験とは異なっている。鉄板の傾斜の有無によるせん断応力の減少や、傾斜量によるせん断応力の差が、模型実験のようにきわだった形で現れてこないのは、試料に作用する荷重状態の差異によるものと思われる。

実機への応用にあたっては、シールドの断面形状（円形断面）、地山の変形速度、シールドの掘進速度が大きな問題となり、今後、考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 齊藤・松井・長谷部・岡田・平岡：テーパシールドに関する基礎的研究(第1報), 西松建設技報, Vol.5, PP.16~22, 1982.