

図 B.3 試料の最大粒径が円錐貫入力に及ぼす影響 - Pomalaa

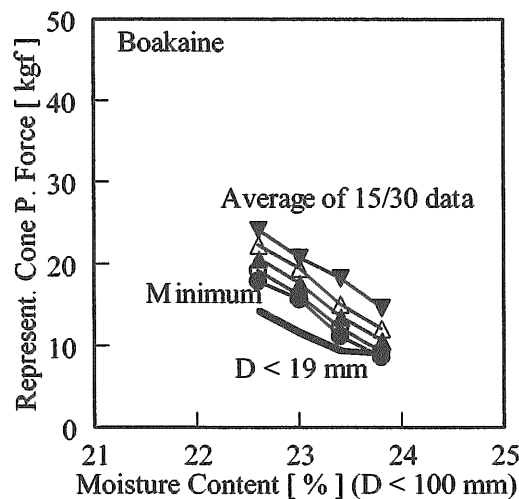


図 B.4 試料の最大粒径が円錐貫入力に及ぼす影響 - Boakaine

これらの図より、代表値の取り方によらず、篩い分けを行わない試料の代表円錐貫入力と、篩い分けを行った試料の代表円錐貫入力との関係は、試料により異なると言える。特に、円錐貫入力が高い場合、即ち、貨物の剪断強度が高い場合は、篩い分けの有無の影響が試料によって異なることが分かる。

## 5 考察

図 4.1 に示した通り、Boakaine 鉱は Pomalaa 鉱と比較して、大きな粒子を多く含む。図 B.4 より、この試料では、水分値が低い場合、即ち剪断強度が高い場合、篩い分けを行わない試料の最大円錐貫入力は、その最低値であっても、最大粒径 19 mm の試料の平均円錐貫入力より大きな値を示すことが分かる。こうした試料では剪断強度が大きくなると、円錐貫入試験の際に、円錐が直

接大きな粒子に衝突しない場合であっても、大きな粒子による円錐の貫入に対する拘束が最大円錐貫入力に影響を及ぼすと考えられる。

本文 3.3 節に示した通り、大きな粒子による円錐の貫入に対する拘束の影響は、試料の最大粒径を 19 mm に調製した場合でも見て取れるが、試料の篩い分けを行わない場合、大きな粒子の影響がさらに強く表れると言える。以上の考察に基づき、試料によらない円錐貫入力のクライテリアを設定するには、篩い分けが必要と判断した。

## 付録 C 水分値の換算方法に関する調査・検討

### 1 調査・検討の概要

本研究では、水分値をパラメータとして剪断強度・荷崩れ危険性と代表円錐貫入力を関係付けているのに対して、剪断強度計測（一面剪断試験）と代表円錐貫入力計測（円錐貫入試験）の際の試料の最大粒径は異なっているため、水分値を適切に換算する必要がある（本文 4.3 節参照）。

これまでの研究<sup>(4)-(7)</sup>では、剪断試験用試料の水分値の一次クライテリアを、最大粒径の異なる試料の水分値の上限に換算する際に、一定以上の大きさの粒子は水分を含まないとの仮定を設けていた。この水分値換算方法では、換算により得られた大きな粒子含む試料の水分値の上限は低くなり、安全側ではあるが、代表円錐貫入力のクライテリアの設定に用いるには適当ではない。そのため、水分値の換算方法について調査・検討した。

まず、最大粒径が既知の湿った試料中の粒子を、よりメッシュの細かな篩を押し通して篩分けし、元の試料及び篩下試料の水分値を計測することにより（以下、この試験を裏漉し水分値試験と呼ぶ。）、通過重量百分率に基づき、理想的に篩い分けが行われた場合の篩上試料（以下、仮想篩上試料と呼ぶ。）の水分値の計算を試みた。その結果、この裏漉し水分値試験そのものは必要な精度を確保し難いため、水分値換算のための試験法として適切では無いことが分かったが、同時に、仮想篩上試料の水分値は元の試料の水分値によらないという傾向を見出し、検討の一助となった<sup>(9)</sup>。その結果、本文 4.3 節に述べた水分値換算方法を採用した。

以下、本研究で用いた水分値換算方法について解説するとともに、その精度について論じる。

### 2 水分値換算方法の検討

ニッケル鉱に含まれる水は、粒子内部に含まれるものと、粒子の間隙に含まれるものがある。粒

子の間隙に含まれる水は、さらに吸着水と遊離水に分けて議じられる場合もあるが、ここでは区別しない。粒子の間隙に含まれる水の量は、篩い分けにより粒径分布が変われば大きく変化すると考えられるが、試料の水分が一定の値を超えた場合、粒子の中に含まれる水の量は殆ど変化しないと考えられる。過去の研究<sup>(7)</sup>により、乾いた状態のニッケル鉍に水を加えていくと、水分値が一定以上になったところで急激に粘着力が大きくなることが示されている。こうした粘着力は、主として粒子の間隙の水（特に吸着水）による吸引力によると考えられるため、こうした吸引力が作用する前の状態では、水分の多くは粒子に含まれていると考えることができる。即ち、ニッケル鉍の粘着力が急激に大きくなる水分値とは、水分が粒子の中だけには入りきれない程の水分値であると考えられる。本研究では、試料が乾いた状態については論じておらず、過大な水分値に起因する粘着力の低下による荷崩れの危険性について検討している。こうした水分値の範囲では、前述の仮想篩上試料の水分値は、粒子の中に含まれる水の量の最大値に近いと考えられ、試料の水分値が一定以上であれば、篩下試料の水分値によらないと考えるのが妥当である。よって、水分値の換算においては、篩い分けにより取り除かれる所定の粒径範囲の粒子内部に含み得る最大の水分値を計測し、この水分値を篩上試料の水分値として用いれば良いと考えられる。

以上の考察に基づき、水分値換算方法を決定した。

### 3 水分値換算の式

乾燥状態における通過重量百分率は実験により求めることができ、所定の粒径範囲の粒子が含み得る最大の水分値は、粒子を長期間水に浸し、その周囲の水を手早く拭き取って水分値を計測することで求めることができる。よって、通過重量百分率及び所定の粒径範囲の粒子が含み得る最大の水分値に基づき、篩下試料の水分値から、元の試料の水分値を求めることができれば、水分値の換算が行える。式は以下の通り。但し、空気質量は無視する。

$$M_C = \frac{M_W}{M_W + M_S} \quad (C.1)$$

$$M_W = \frac{M_C \cdot M_S}{1 - M_C} \quad (C.2)$$

$$M_S^S = p \cdot M_S^T \quad (C.3)$$

$$M_S^L = (1-p) \cdot M_S^T = \frac{1-p}{p} M_S^S \quad (C.4)$$

$$M_W^T = M_W^S + M_W^L = \frac{M_C^S \cdot M_S^S}{1 - M_C^S} + \frac{M_C^L \cdot M_S^L}{1 - M_C^L} \quad (C.5)$$

$$M_C^T = \frac{M_W^T}{M_W^T + M_S^T} = \frac{M_C^S \cdot p + M_C^L \cdot (1-p) - M_C^S \cdot M_C^L}{1 - p \cdot M_C^L - (1-p) \cdot M_C^S} \quad (C.6)$$

ここで、

$M_C$  : 水分値

$M_S$  : 固体部分の質量

$M_W$  : 水の質量

$T$  : 元の試料（最大粒径 A）を意味する上付きの添え字

$S$  : 篩下試料（最大粒径 B,  $B < A$ ）を意味する上付きの添え字

$L$  : 粒径範囲 B~A の粒子を意味する上付きの添え字

$p$  : 元の試料中に含まれる篩下試料の乾燥状態における質量の割合

(C.6)式（本文 4.3 節(2)式に同じ。）を用いて、最大粒径の小さい試料の水分値を、最大粒径が大きい試料の水分値に換算できる。

### 4 水分値換算方法の有効性の評価

前述の通り、裏漉し水分値試験は精度を確保し難いため、その結果は、水分値換算方法の精度を確認するためのデータとしては適当ではない。一方、Pomalaa 鉍及び Boakaine 鉍に関する揚荷現場実験（付録 B 参照）においては、篩い分けを行わない試料については最大粒径を 100 mm とし水分値を計測するとともに、最大粒径 19 mm の試料を、篩を押し通すことにより抽出し、その水分値を計測した。表 C.1 及び表 C.2 に、水分値の計測・計算結果を示す。表において"\*1"で示した蘭の数値は円錐貫入試験前の水分値計測結果に基づくもの、"\*2"で示した蘭の数値は円錐貫入試験後の水分値計測結果に基づくもの、太字は計測した水分値、斜体は計測した水分値並びに加水量及び試料採取量に基づく計算値である。これらの表に示したデータに基づき、本研究で用いた水分値換算方法の有効性を評価できる。

表 C.1 最大粒径と水分値 - Pomalaa

試料番号	水分値 [%]		
	最大粒径 100 mm		最大粒径 19 mm
	*1	*2	
1	28.3	28.9	31.4
2	28.9	29.6	31.2
3	29.6	30.2	32.1
4	30.2	30.8	32.3
5	30.8	31.4	32.7

表 C.2 最大粒径と水分値 - Boakaine

試料番号	水分値 [%]		
	最大粒径 100 mm		最大粒径 19 mm
	*1	*2	
1	22.2	22.9	26.5
2	22.6	23.3	27.0
3	23.0	23.7	27.4
4	23.5	24.2	27.6

最大粒径 100 mm の Pomalaa 鉱及び Boakaine 鉱に含まれる 19 mm 未満の粒子の乾燥状態における通過重量百分率は、それぞれ 81.1 % 及び 67.8 % であった。表 C.3 に、Pomalaa 鉱及び Boakaine 鉱の 19~100 mm の粒子を長期間水に浸した後、周囲の水を拭って水分値を計測した結果を示す。

表 C.3 粒子の含み得る水分値 (19 < D < 100 mm)

試料	試料重量	乾燥重量	水分値
Pomalaa	3695.0 g	3626.3 g	13.1 %
Boakaine	4184.5 g	4090.6 g	12.1 %

表に示した 19~100 mm の粒子の最大水分及び乾燥状態における通過重量百分率を用いて、水分値の換算を行い、その結果を比較したものが図 C1 及び C.2 である。図の横軸は最大粒径 19 mm の試料の水分値、縦軸は最大粒径 100 mm の試料の水分値である。図中の黒丸は表 C.1 及び表 C.2 に示した水分値であり、グラフは、水分値の換算結果である。これらの図より、本研究で用いた水分値の換算方法は、元の試料の水分値を総じて低め（安全側）に与える傾向があるものの、有効な方法であると言える。

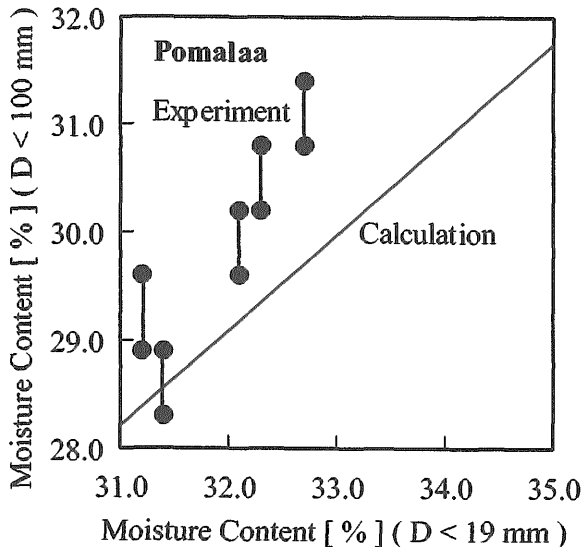


図 C.1 換算水分値と実験値の比較 - Pomalaa

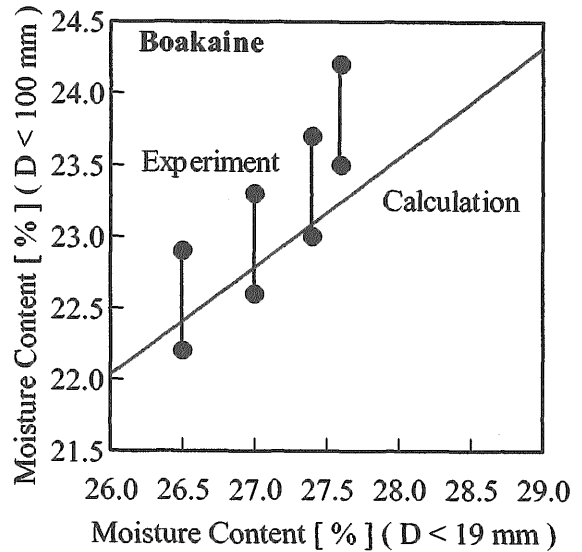


図 C.2 換算水分値と実験値の比較 - Boakaine

付録 D 試験結果の詳細

1 一面剪断試験結果

一面剪断試験においては、剪断変位、剪断力、上下変位の時系列を計測し、剪断力は剪断応力に、上下変位は体積歪みに換算した。剪断変位と剪断応力及び体積歪みの関係の一例を図 D.1 に示す。

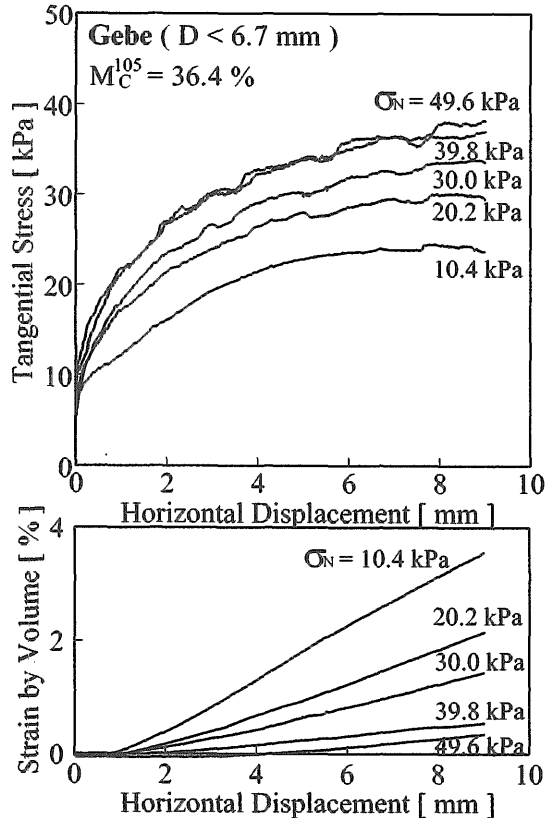


図 D.1 一面剪断試験結果の例

図は、水分値 36.4 % の Gebe 鉱に関する結果であり、図の横軸は剪断変位（水平変位）、縦軸は剪断応力及び体積歪みを表す。各グラフは直応力 " $\sigma_v$ " をパラメータとする剪断変位と剪断応力及び体積歪みとの関係である。剪断応力が明確なピークを示す場合にはそのピーク値を、この試料のように剪断応力が明確なピークを示さない場合は剪断変位 8 mm における剪断応力を抵抗剪断応力とした。また、抵抗剪断応力に対応する剪断変位における体積歪みを用いて、各試料の間隙比（間隙部分の体積と固体部分の体積の比）を解析した。なお、他の実験結果に関する同様の図は、参考文献(1)に記載されている。

各試料に関する剪断強度の解析結果を図 D.2 ~ 図 D.31 に示す。図の横軸は直応力、縦軸は抵抗剪断応力であり、" $e$ " は間隙比を意味する。グラフの傾きは、" $\tan\phi$ " で示した剪断抵抗係数であり、直圧力零における値が " $c$ " で示した粘着力である。各図に示した剪断抵抗係数と粘着力を水分値との関係において示したものが、図 4.2 ~ 図 4.6 である。

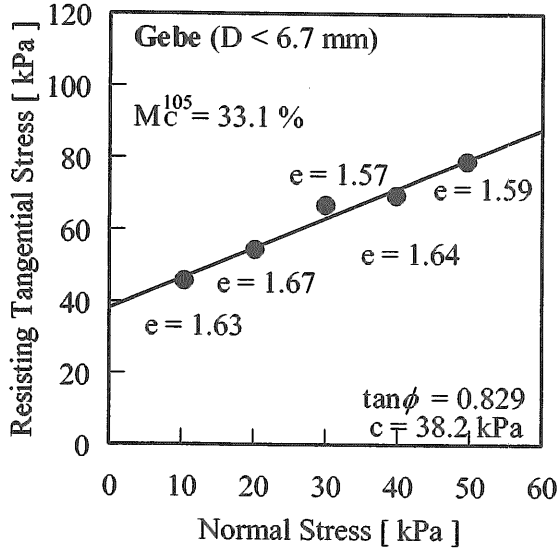


図 D.2 剪断強度 Gebe - 1

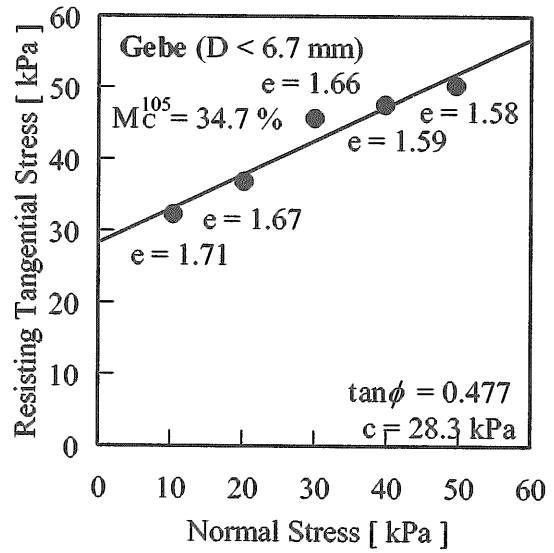


図 D.3 剪断強度 Gebe - 2

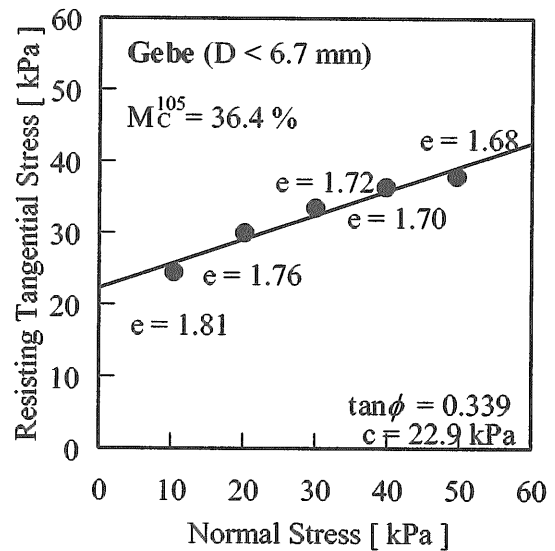


図 D.4 剪断強度 Gebe - 3

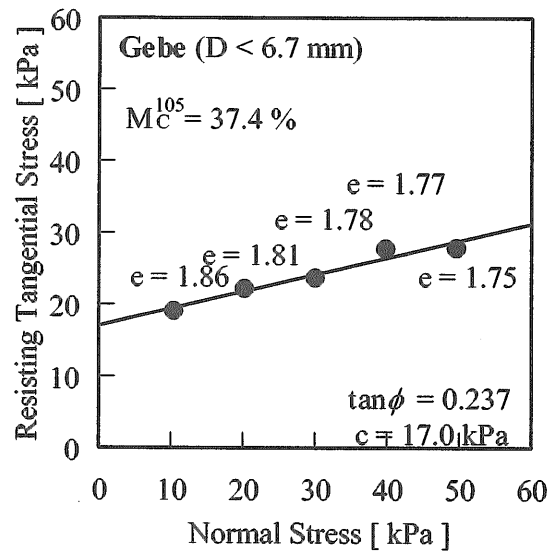


図 D.5 剪断強度 Gebe - 4

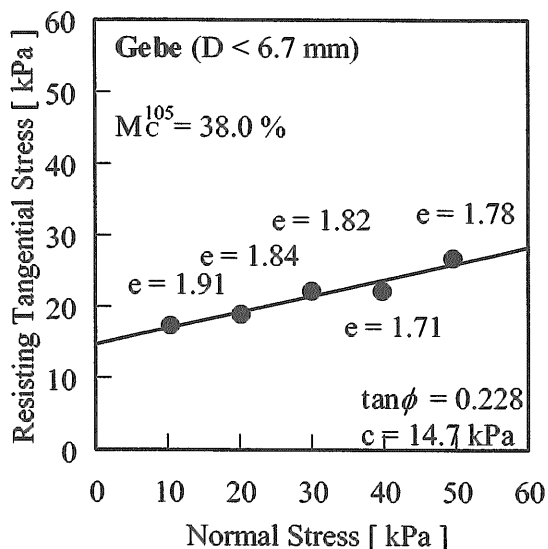


図 D.6 剪断強度 Gebe - 5

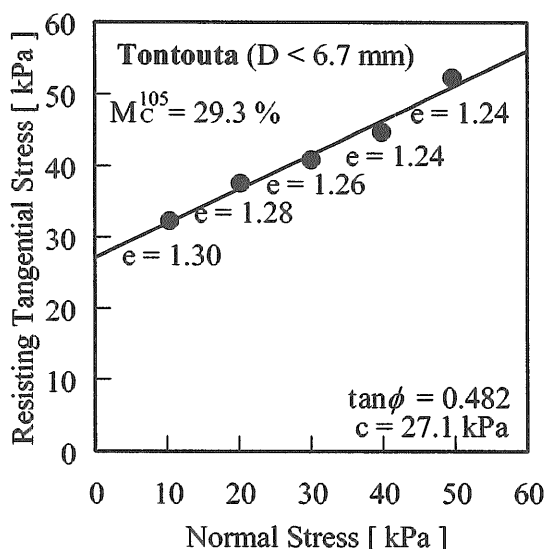


図 D.9 剪断強度 Tontouta - 2

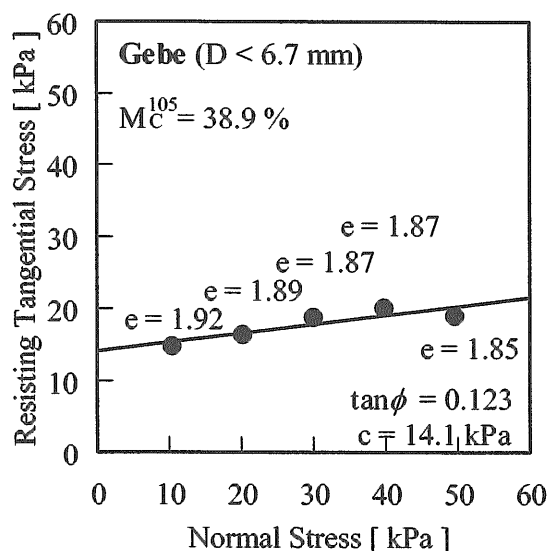


図 D.7 剪断強度 Gebe - 6

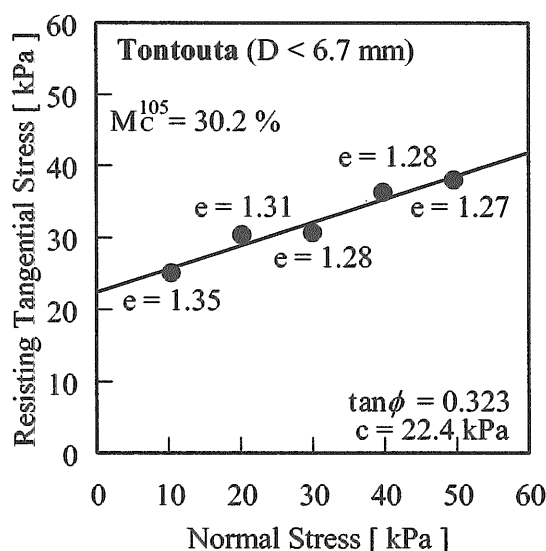


図 D.10 剪断強度 Tontouta - 3

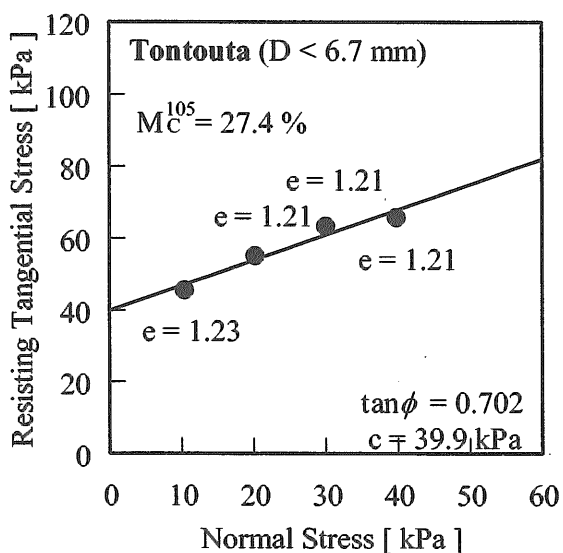


図 D.8 剪断強度 Tontouta - 1

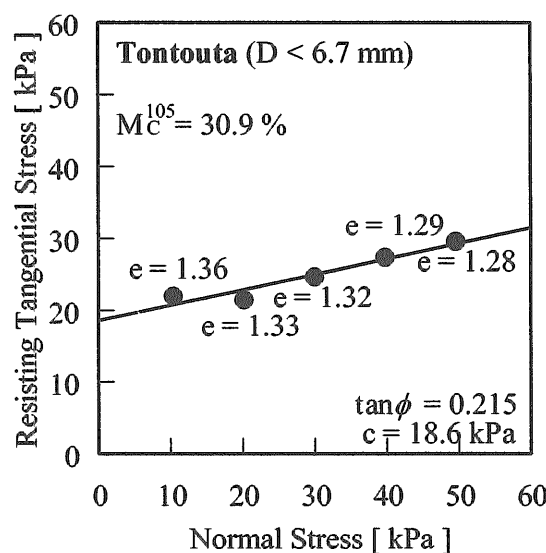


図 D.11 剪断強度 Tontouta - 4

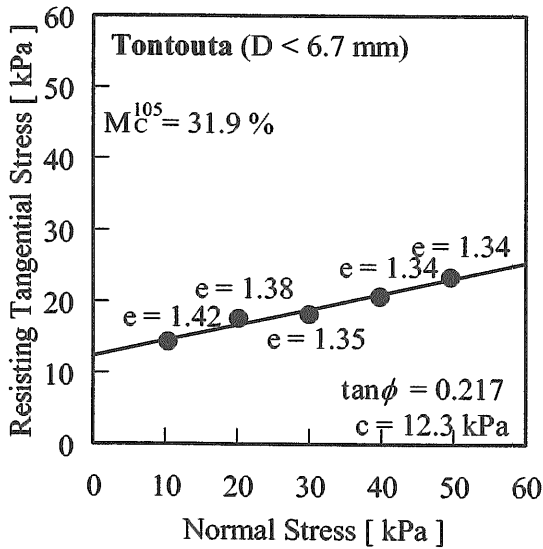


图 D.12 剪断强度 Tontouta - 5

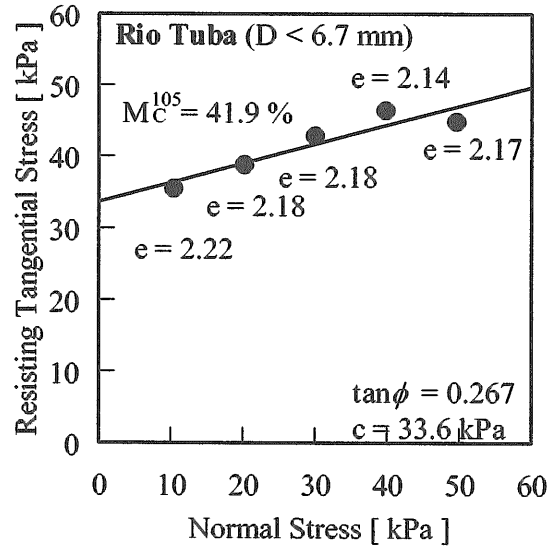


图 D.15 剪断强度 Rio Tuba - 2

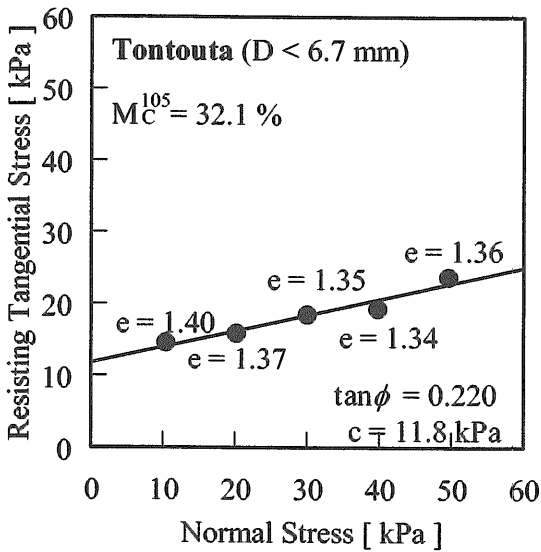


图 D.13 剪断强度 Tontouta - 6

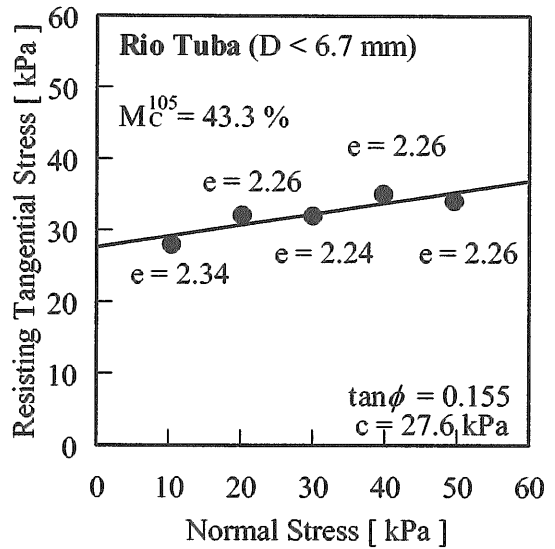


图 D.16 剪断强度 Rio Tuba - 3

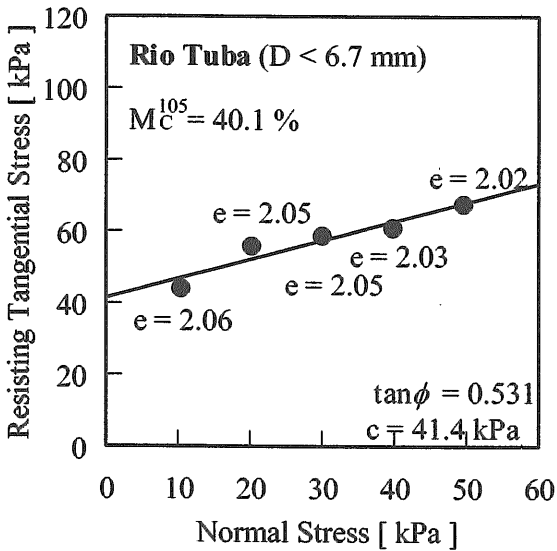


图 D.14 剪断强度 Rio Tuba - 1

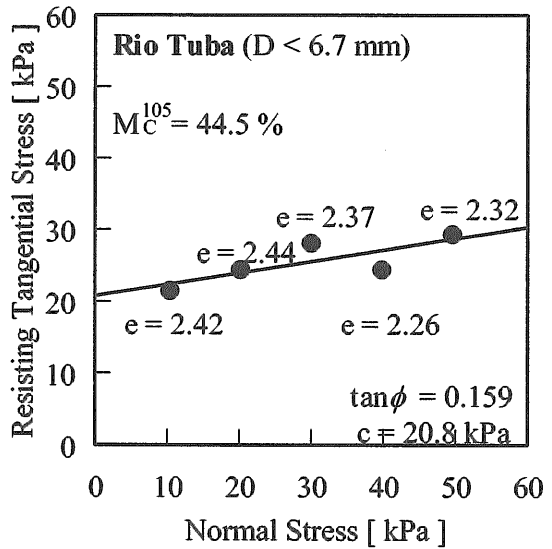


图 D.17 剪断强度 Rio Tuba - 4

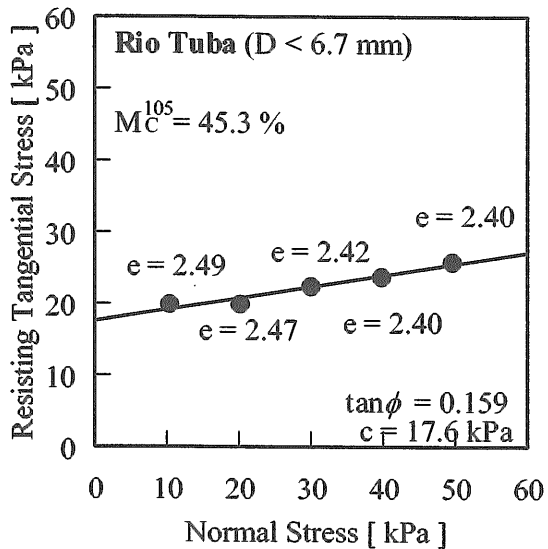


図 D.18 剪断強度 Rio Tuba - 5

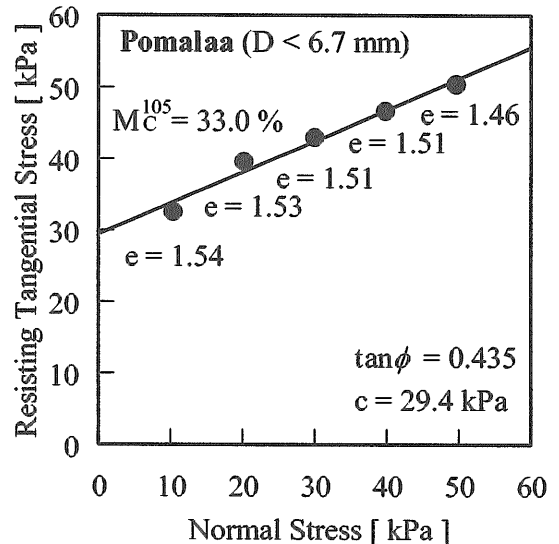


図 D.21 剪断強度 Pomalaa - 2

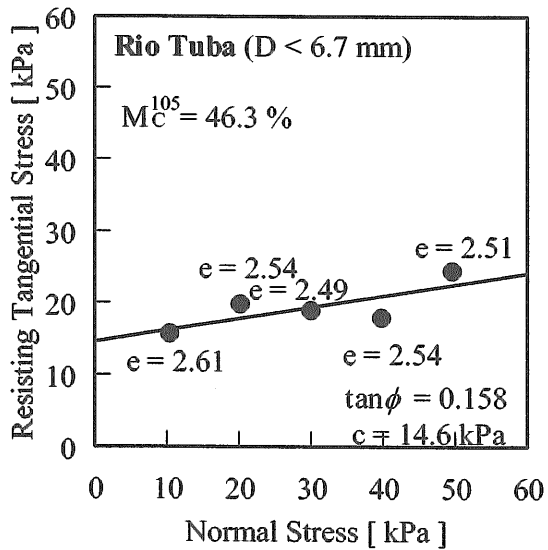


図 D.19 剪断強度 Rio Tuba - 6

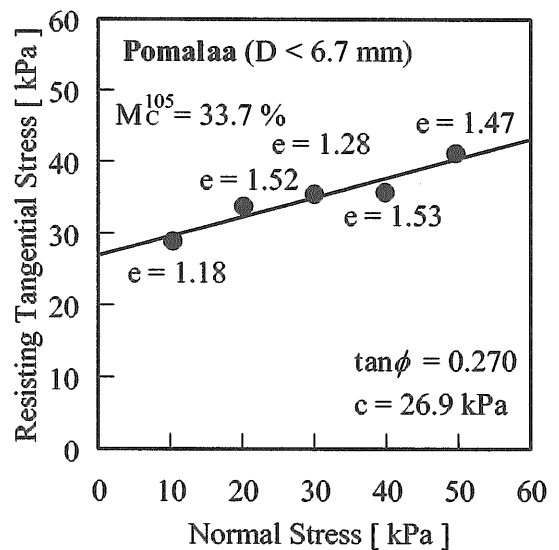


図 D.22 剪断強度 Pomalaa - 3

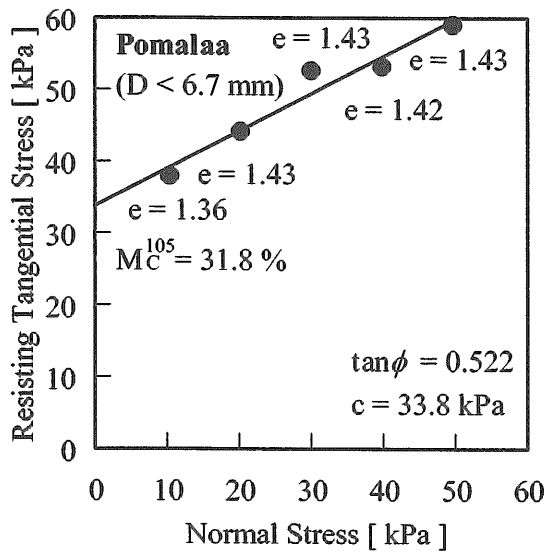


図 D.20 剪断強度 Pomalaa - 1

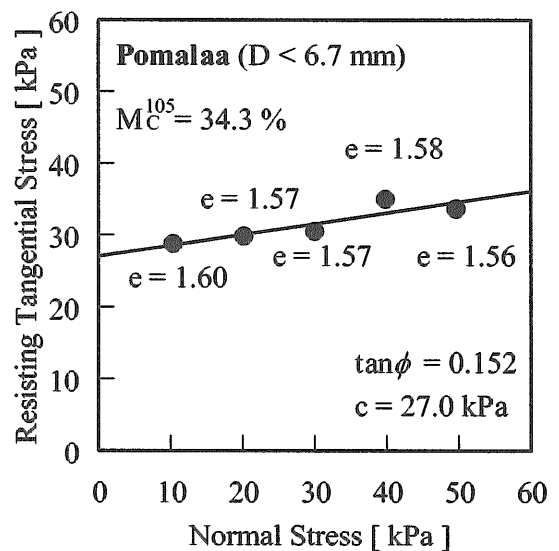


図 D.23 剪断強度 Pomalaa - 4

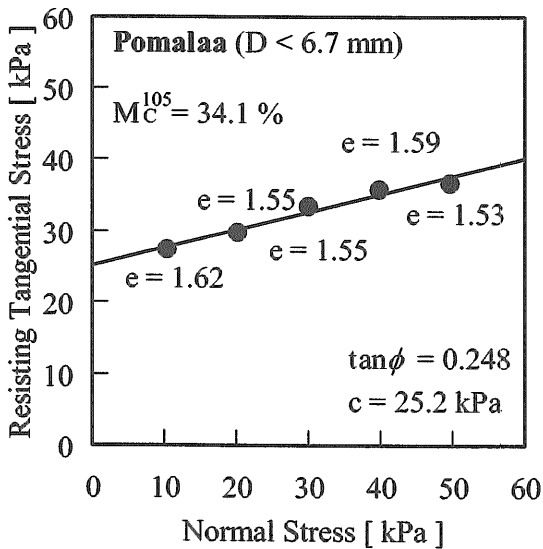


图 D.24 剪断强度 Pomalaa · 5

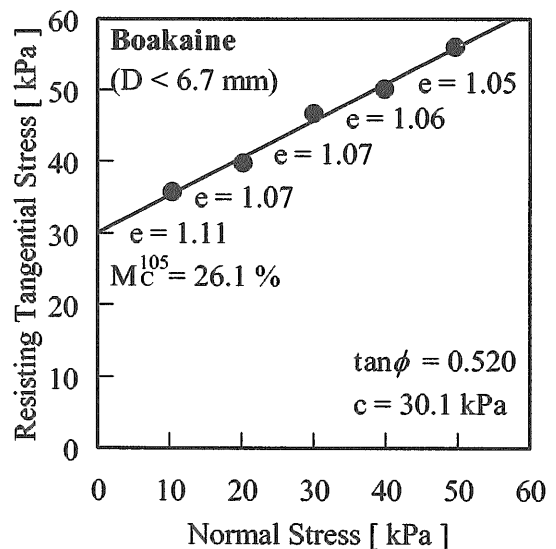


图 D.27 剪断强度 Boakaine · 2

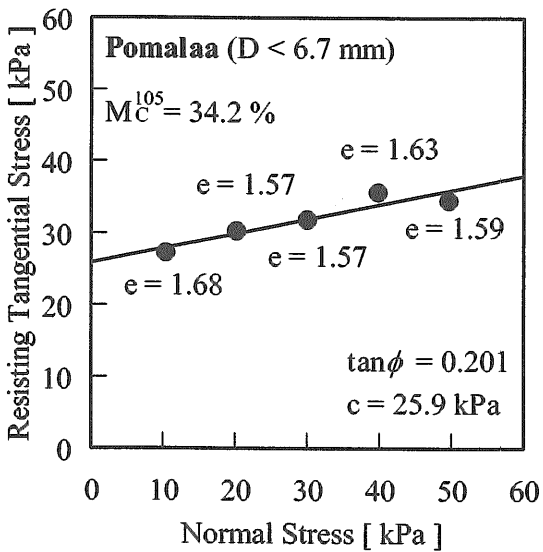


图 D.25 剪断强度 Pomalaa · 6

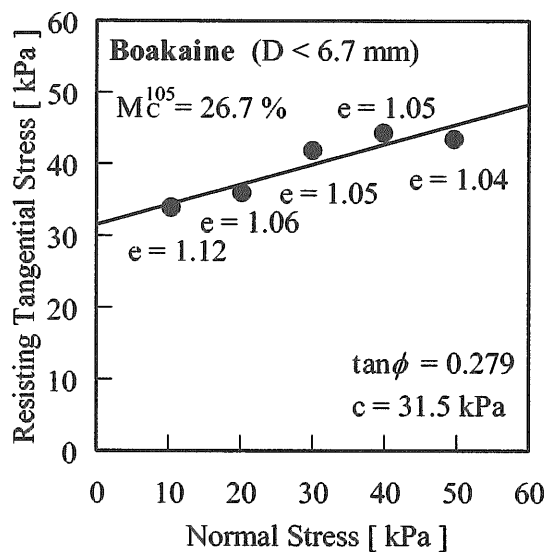


图 D.28 剪断强度 Boakaine · 3

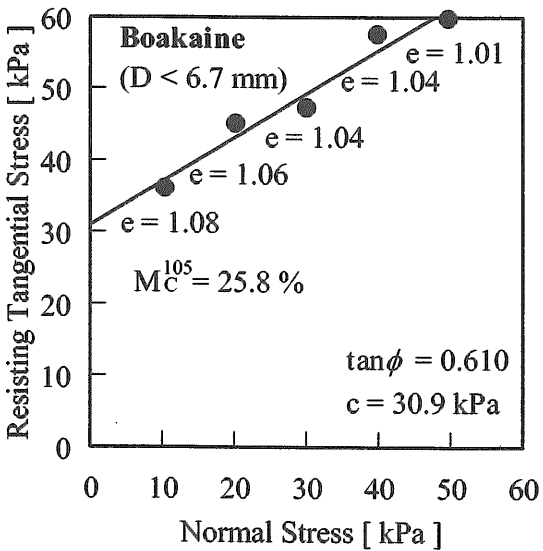


图 D.26 剪断强度 Boakaine · 1

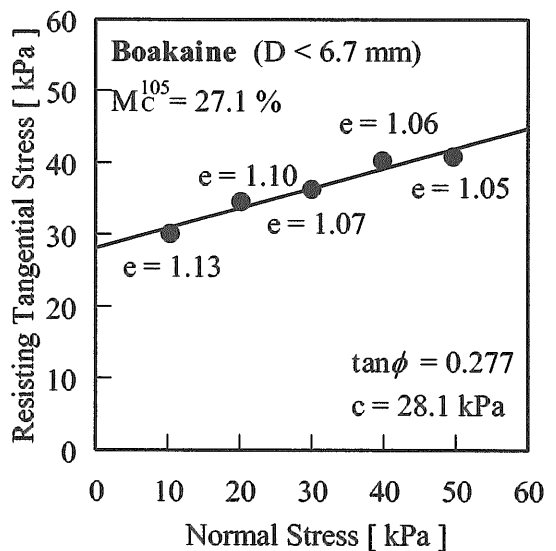


图 D.29 剪断强度 Boakaine · 4



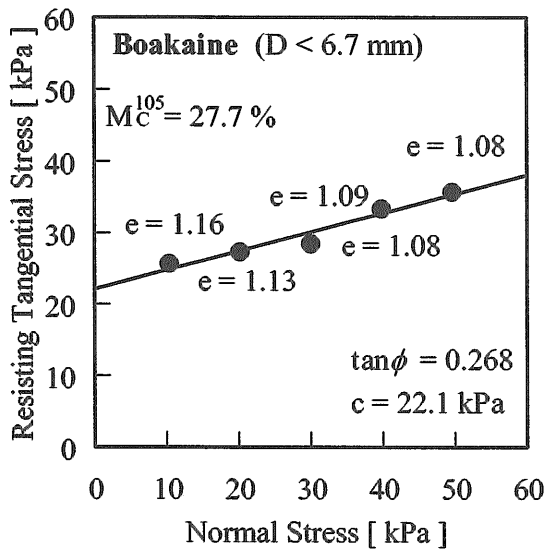


図 D.30 剪断強度 Boakaine - 5

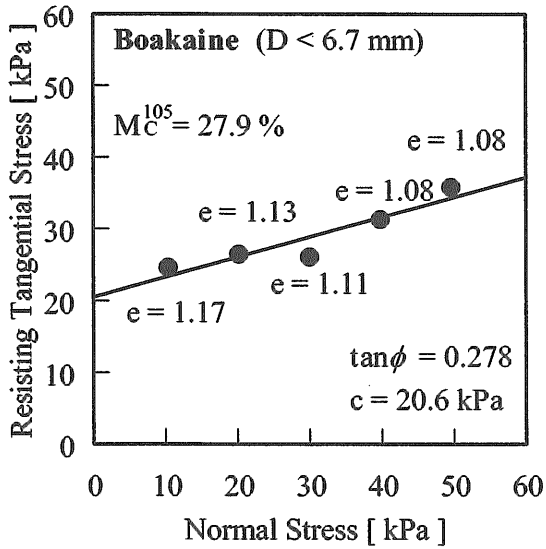


図 D.31 剪断強度 Boakaine - 6

2 ニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験結果

本文 4.4 節において、水分値と代表円錐貫入力  
の関係を図 4.13 に示した。ニッケル鉍荷崩れ危  
険性評価試験法の参考として、各試料に関する最  
大円錐貫入力を図 D.32~D.36 に示す。図の横軸  
は水分値、縦軸は最大円錐貫入力である。

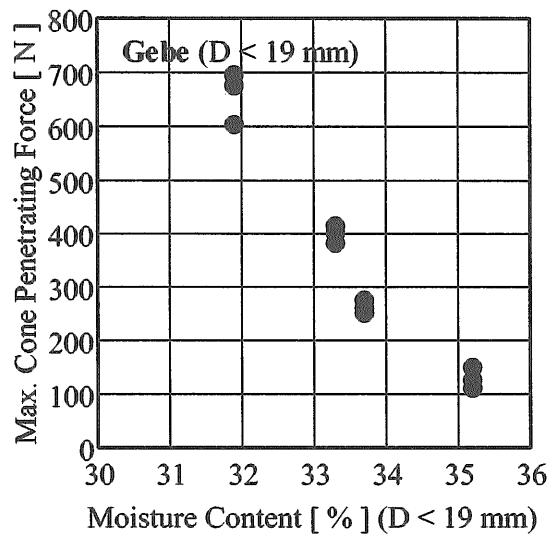


図 D.32 最大円錐貫入力 - Gebe

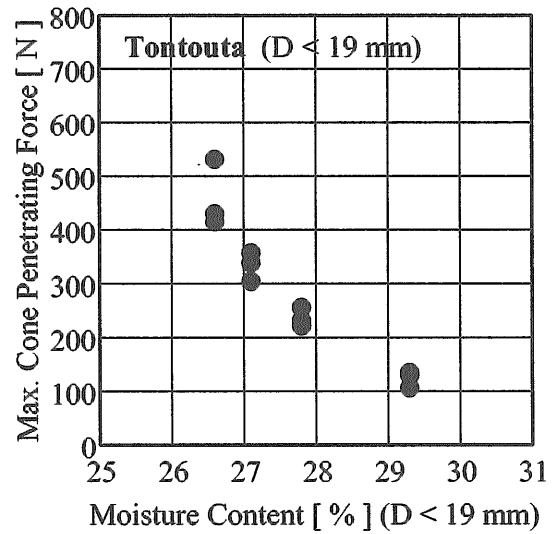


図 D.33 最大円錐貫入力 - Tontouta

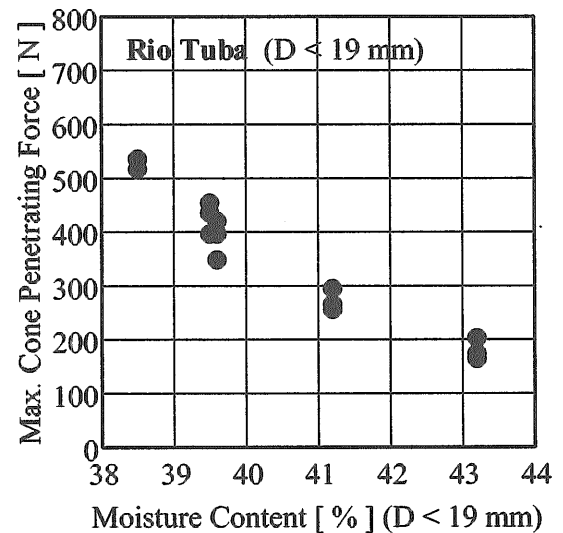


図 D.34 最大円錐貫入力 - Rio Tuba

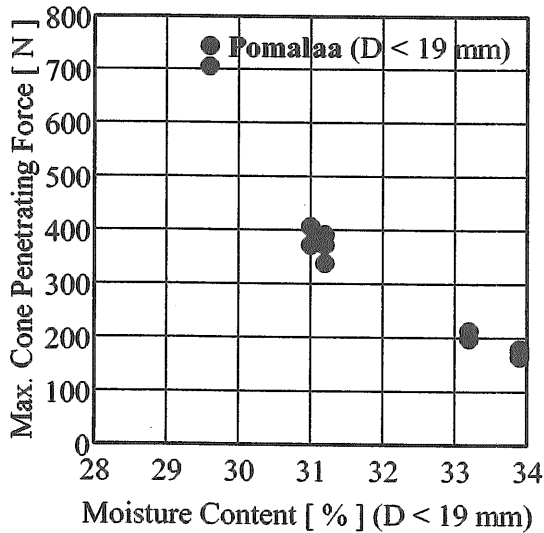


図 D.35 最大円錐貫入力 - Pomalaa

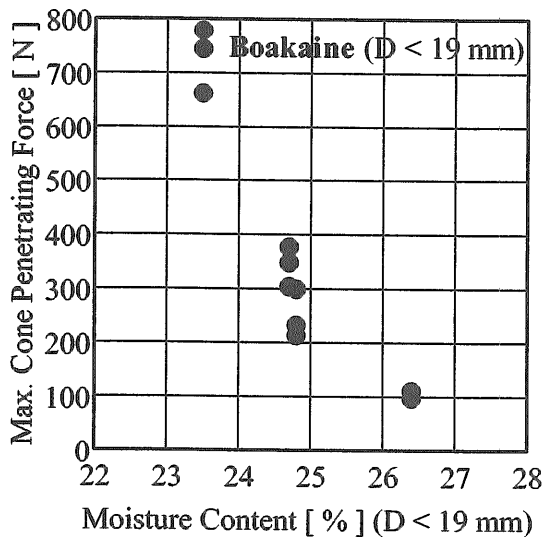


図 D.36 最大円錐貫入力 - Boakaine

三回の試験による最大円錐貫入力のばらつきは、代表円錐貫入力 300 N 程度の試料については、大きな粒子を多く含む Boakaine 鉱であっても、100 N 程度に収まっていることが分かる。なお、円錐貫入力が試験実施者の体重を超えた場合、円錐を速やかに供試体に貫入させることができなかつたため、有意な最大円錐貫入力は 800 N 程度までと考え、800 N を超える値は記載していない。

ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験には、供試体の質量の計測は含まれていないが、本研究においては、参考のため計測した。各円錐貫入試験時の供試体の密度、平均間隙比及び飽和度（付録 E 参照）、即ち、間隙中の水の体積の割合を表 D.1 に示す。表より、試料の締固めの再現性が高いことが分かる。

表 D.1 円錐貫入試験用供試体密度計測結果

試料	水分値[%]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]				間隙比	飽和度[%]
		No.1	No.2	No.3	平均		
Gebe	31.9	1765	1765	1768	1766	1.45	95
	33.3	1725	1725	1730	1727	1.56	94
	33.7	1715	1710	1715	1713	1.59	94
	35.2	1680	1673	1675	1676	1.71	93
Tontouta	26.6	1830	1843	1845	1839	1.11	93
	27.1	1815	1823	1830	1823	1.15	93
	27.8	1798	1795	1798	1797	1.20	92
	29.3	1768	1768	1765	1767	1.28	92
Riotuba	38.5	1618	1623	1625	1622	1.90	95
	39.5	1578	1595	1588	1587	2.01	94
	39.6	1568	1583	1585	1578	2.03	93
	41.2	1560	1553	1555	1556	2.16	94
	43.2	1528	1515	1523	1522	2.35	94
Pomalaa	29.6	1798	1810	1800	1803	1.30	94
	31.0	1755	1758	1765	1759	1.41	93
	31.2	1748	1763	1760	1757	1.42	93
	33.2	1710	1705	1713	1709	1.56	93
Boakaine	33.9	1695	1685	1703	1694	1.61	93
	23.5	1903	1910	1898	1903	0.91	94
	24.7	1863	1870	1858	1863	0.99	93
	24.8	1853	1855	1853	1853	1.00	92
	26.4	1830	1830	1823	1828	1.07	93

付録 E 試験法及び用語の解説

1 固体ばら積み貨物の物性値

1.1 真密度 (solid density)

真密度（固体密度）とは、固体ばら積み貨物のうち水や空気（間隙）を除いた固体部分の密度であり、一般に  $\rho_s$  で表される。

1.2 水分値 (moisture content)

水分値とは、試料中の水の質量の割合であり、一般に  $M_c$  で表される。固体ばら積み貨物の水分値は、試料全体の質量に占める水の質量の割合、いわゆる全水分値（本文 2 節参照）で表すのが一般的である。

1.3 粒径分布 (grain size distribution)

粒径分布とは、試料中に含まれる所定の粒径範囲の粒子の割合であり、本文の図 4.1 に示したような、粒径加積曲線 (grain size accumulation curve) により表される。粒径加積曲線の横軸は粒径であり、対数目盛で表す。縦軸は通過重量百分率であり、一般に、試料の乾燥状態の質量に基づいて表す。

1.4 見かけ密度 (bulk density)

固体ばら積み貨物の見かけ密度は、容器に試料を入れ、試料の質量を計測し、これを容器の容積で割ることにより得られる値であり、一般に  $\rho_v$  で表される。固体ばら積み貨物の見かけの密度は、試料の真密度、水分値、粒径分布のみならず、容

器に試料を詰め込む方法、いわゆる締固め方法によっても異なる。

1.4 間隙比 (void ratio) 及び飽和度 (degree of saturation)

間隙比とは、固体部分の体積に対する間隙(空気や水)部分の体積の割合であり、一般に  $e$  で表される。飽和度とは、間隙部分の体積に占める水の体積の割合であり、一般に  $S_r$  で表される。

図 E.1 に模式的に示すように、試料に占める固体、水、空気の部分の体積をそれぞれ  $V_s$ ,  $V_w$ ,  $V_a$  とすれば間隙の体積  $V_v$  は次の式で表せる。

$$V_v = V_w + V_a$$

間隙比  $e$  及び飽和度  $S_r$  は以下の式で定義できる。

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

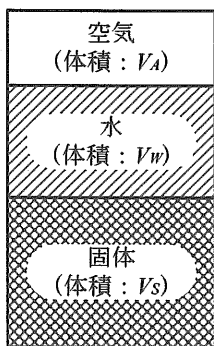


図 E.1 固体ばら積み物質の模式図

2 一面剪断試験と剪断強度

2.1 一面剪断試験、粘着力及び剪断抵抗係数

一面剪断試験とは、供試体に直圧力を作用させた際に、供試体を剪断するのに要する力を計測する試験である。本研究で用いた装置は、図 E.2 に模式的に示すように、重錘により供試体の上面から直圧力を作用させ、剪断箱の上部の水平運動を拘束した状態で、剪断箱の下部を駆動し、剪断箱の上部を拘束するのに要する力を計測するものである。

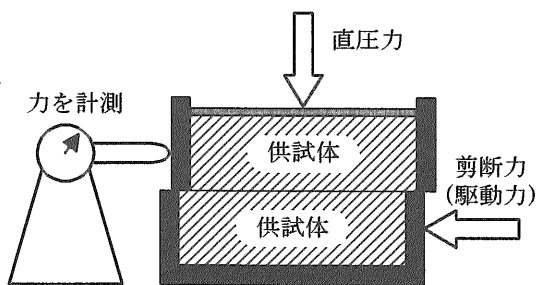


図 E.2 一面剪断試験の原理

直圧力を変化させて試験を行うことにより、図 E.3 に示すように、試料の剪断抵抗角(一面剪断試験により計測した内部摩擦角)及び粘着力が得られる。剪断抵抗角の正接が剪断抵抗係数(内部摩擦係数)である。

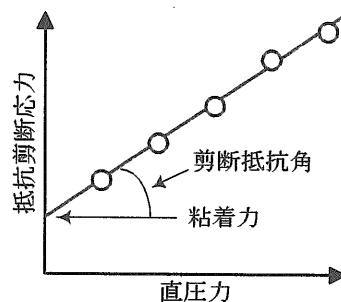


図 E.3 一面剪断試験結果

図 E.4 に示すように、供試体内のある面が滑りを起こすか否かは、微視的には、その面に作用している剪断応力と、直圧力に応じた抵抗剪断応力による。剪断応力が抵抗剪断応力より小さければ、その面では滑りを起こさないと云える。

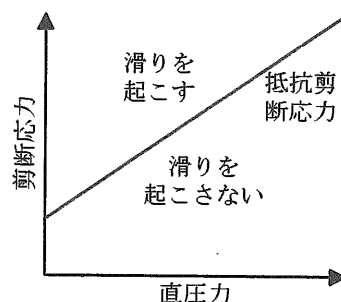


図 E.4 抵抗剪断応力と滑り

固体ばら積み物質の剪断強度とは、抵抗剪断応力と直圧力の関係に他ならず、粘着力と内部摩擦係数(剪断抵抗係数)で代表される。

固体ばら積み物質の剪断強度計測法としては、他にも三軸圧縮試験がある。三軸圧縮試験では、供試体の最も弱い部分が破壊する際の力を計測できるのに対して、一面剪断試験では、剪断面が予め定められているため、供試体の最も弱い部分が破壊する際の力を計測できないという欠点がある。一方、三軸圧縮試験は一面剪断試験と比較して手間がかかり、試験に長時間を要する。

2.2 粘着性物質と非粘着性物質

非粘着性物質とは、粘着力が零の物質であり、その他の物質は粘着性物質である。

BC Code<sup>(3)</sup> では、全ての湿った物質は粘着性物質である旨を述べるとともに、乾燥状態で非粘着性物質となる物質名をリストアップしている。

3 円錐貫入試験

円錐貫入試験とは、住宅を建てる前等に実施される地盤の強度の調査(地耐力調査)で良く用いられる簡便な試験である。この試験は、図 E.5 に模式的に示すように、先端に円錐型の貫入ビットが付いたロッドを人力で地面に下向きに挿入す

るのに要する力（円錐貫入力）を計測するものである。

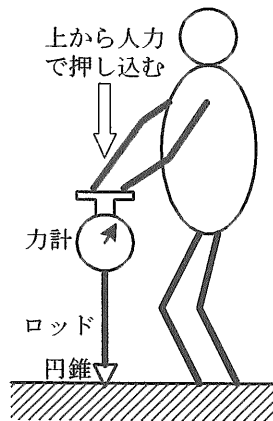


図 E.5 円錐貫入試験のイメージ

地耐力調査では、ロッドを継ぎ足しながら適当な深さまで地面に円錐を貫入させるが、本研究においては、容器内に形成された供試体に先端の深さ 15 cm まで円錐を貫入させる。

本研究で用いた装置は、円錐貫入力に応じて歪みを生じるリングをロッドの上に有し、リングの歪みをダイヤルゲージ計測するものである。