

## ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発

太田 進\*、浦 環\*\*、村山 雅己\*\*\*、  
田中 正人\*\*\*\*、飛延 孝男\*\*\*\*\*

### Development of the Test Procedure for Evaluating Danger of Sliding Failure of Nickel Ore

by  
Susumu OTA\*, Tamaki URA\*\*, Masaki MURAYAMA\*\*\*,  
Masato TANAKA\*\*\*\* and Takao TOBINOBU\*\*\*\*\*

#### Abstract

Nickel ore is natural clay containing large lumps. Every year, around four million tons of this material is transported to Japan from Indonesia, New Caledonia and Philippine by bulk carriers of around twenty thousands to forty thousands tons dead weight tonnage. When nickel ore contains much moisture, its shear strength becomes low and piles of nickel ore formed in cargo holds of bulk carriers may slide.

To prevent sliding failure of a bulk cargo, it is necessary to evaluate the shear strength of the cargo prior to shipment. Shear strength of nickel ore can be measured by direct shear tests or triaxial compression tests in a laboratory, and the stability of the cargo pile can be evaluated by slope stability calculation which is utilized in the field of soil mechanics based on the measured shear strength. Such method for evaluation, however, cannot be conducted at the time of shipment of nickel ore, because it takes at least a few days. Taking these issues into consideration, we developed a new in-situ test procedure for evaluating shear strength of nickel ore which can be conducted at places of loading for nickel ore in a few hours in view of prevention of sliding failure. To develop the criterion for judgment on sliding failure of nickel ore, we carried out direct shear tests and slope stability calculations for nickel ore from five ports.

The new test procedure mainly consists of three steps, i.e., removal of large particles, insertion of the sample in the mould and cone penetration test. First, particles larger than 19 mm are removed from the wet sample by passing through an appropriate sieve. Next, the sample is inserted in the mould and compacted to make a consistent specimen. Then the cone is pushed down into the specimen and the maximum value of reaction force is measured. When the force is less than 300 N, the nickel ore should not be accepted for loading without taking special safety measures.

---

\* : 機関動力部  
\*\*\* : 船舶艙装品研究所  
\*\*\*\*\* : 日本海事検定協会

\*\* : 東京大学生産技術研究所  
\*\*\*\* : 船舶艙装品研究所 (当時)

原稿受付 平成12年 6月14日  
審査済 平成12年12月13日

- 目 次 -

1	緒言	
1.1	研究の目的	
1.2	ニッケル鉱の運送・積み荷役状況	
1.3	開発した試験法の位置付け	
2	研究の概要及び成果	
3	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験の仕様	
3.1	試験法の概要	
3.2	試験装置等の仕様	
3.2.1	篩い分け	
3.2.2	試料の挿入及び締め	
3.2.3	円錐貫入試験	
3.3	試験回数と代表円錐貫入力	
4	代表円錐貫入力のクライテリア	
4.1	試料	
4.2	水分値と荷崩れ危険性の関係	
4.2.1	水分値と剪断強度の関係	
4.2.2	荷崩れ数値解析	
4.2.3	貨物パイルの形状及び船体横傾斜	
4.2.4	水分値の一次クライテリア	
4.3	水分値の換算	
4.4	代表円錐貫入力のクライテリア	
5	結言	
参考文献		
付録 A	ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法マニュアル	
付録 B	篩い分けの必要性に関する調査・検討	
付録 C	水分値の換算方法に関する調査・検討	
付録 D	試験結果の詳細	
付録 E	試験法及び用語の解説	

1 緒言

1.1 研究の目的

平成 10 年 8 月 26 日夜、南大東島の南南西約 150 キロの海上で、インドネシアの Gebe 島でニッケル鉱を積載し、我が国へ向けて航行していたパナマ船籍のばら積み船シープロスペクト号が転覆・沈没した。この事故により乗組員 21 名のうち、11 名は救助されたが、10 名が行方不明となった（8 月 27 日付琉球新報）。事故原因の一つは、貨物の荷崩れであると推定されている<sup>(1)</sup>。

粘着性物質（付録 E 参照）であるニッケル鉱は、水分値（付録 E 参照）が一定の値を超えると剪断強度（付録 E 参照）が著しく低下し、荷崩れ発生の可能性（以下、「荷崩れ危険性」と呼ぶ。）が急激に高まることが知られており、これまでも、ニッケル鉱運送中のばら積み船の異常傾斜事例が報告されている。この貨物を安全にばら積み運

送するためには、荷崩れ危険性を評価したうえで、水分値の上限等安全限界を設定する必要がある。しかし、ニッケル鉱の荷崩れは液状化とは異なる現象であるため、液状化物質に対する運送許容水分値決定法<sup>(2),(3)</sup>は適用できない。

安全運送のため水分値の上限を決定するには、水分値を変えて貨物の剪断強度を計測し、得られた剪断強度を用いて、想定される積付条件について荷崩れ危険性を評価すれば良い。ニッケル鉱等の粒状物質の剪断強度を計測する方法には、一面剪断試験（付録 E 参照）や三軸圧縮試験といった実験室試験がある。これまでの研究により、これらの試験による剪断強度計測結果に基づき、ニッケル鉱を安全に運送するための水分値の上限を決定する方法は示されている<sup>(4)-(7)</sup>。しかし、これらの試験は荷役現場において実施するには適さず、また、一週間以上の期間を要することから、荷役現場で用いることができる簡便な試験法の開発が求められている。また、従来<sup>(4)-(7)</sup>には、篩い分けにより最大粒径を小さくした剪断強度計測用の試料に対する水分値の上限（以下、「水分値の一次クライテリア」と呼ぶ。）から、篩い分けされていない貨物の水分値の上限を求める際の水分値の換算方法が安全側に過ぎるという問題があった。そのため本研究は、粘着性ばら積み物質であるニッケル鉱の荷崩れ危険性を評価するための現場試験法（以下、「ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法」と呼ぶ。）を開発することを目的としている。

陸上では、地盤の強度を簡便に評価する方法として円錐貫入試験（付録 E 参照）が用いられる。ニッケル鉱の荷崩れ危険性を評価するにも、基本的には同様の方法を用いることが考えられる。試料の調製方法等試験手順や荷崩れ危険性の評価基準は研究により決定する必要がある。試験法が開発され、ニッケル鉱の種類（産地等による差異）によらない評価基準を決定することができれば、試料の水分値を変化させて試験を実施することにより、航海中に荷崩れを起こす可能性のある水分値の限界を求めることもできる。こうした水分値の限界値は、ニッケル鉱の種類により異なることが知られている。一方、荷崩れの直接の原因は剪断強度の低下であり、水分値の上昇は剪断強度低下の原因と位置付けられる。そのため、評価指標として剪断強度の代表値を用いれば、ニッケル鉱の種類によらないクライテリアを設定できる可能性がある。以下、円錐貫入試験に基づく剪断強度の代表値を「代表円錐貫入力」と呼び、代表円錐貫入力に基づく荷崩れ危険性の評価基準を「代表円錐貫入力のクライテリア」と呼ぶ。

(2)

本研究の目的は、具体的には、「荷役現場で容易に実施できる剪断強度評価試験法」を規定するとともに、「代表円錐貫入力のクライテリア」を設定することである。ここで、荷崩れ危険性から見た代表円錐貫入力のクライテリアは、ニッケル鉱の種類によらないものである必要がある。

1.2 ニッケル鉱の運送・積み荷役状況

ニッケル鉱は、フィリピン、インドネシア、ニューカレドニアから我が国に、毎年合計約400万トン輸入されている。主な積み出し港を表1.1に示す。

**表 1.1 ニッケル鉱の主要積み出し港**

国名	港名	
フィリピン	Rio Tuba	Hinatuan
	Tanganito	
インドネシア	Gebe	Pomalaa
	Moneo	Nakety
ニューカレドニア	Karembe	Tontouta
	Thio	Kouaoua
	Teoudie	Boakaine
	Poya	Ouinne
	Kopeto (開発中)	

主として用いられている船舶は、載貨重量二万トンから四万トン級のばら積み船である。そのため、年間百数十航海、ニッケル鉱を積載したばら積み船が我が国に入港している。

ニッケル鉱の積付の多くは、沖荷役で行われる。即ち、多くの場合、岸壁で舢に貨物を積み、曳船で舢をばら積み船の近くに配置し、船のグラブで舢から船倉に貨物を入れる。そのため、船としては、荷役用のグラブを有するものが一般に用いられ、荷役の最終段階では、船のグラブを用いて荷繰りが行われる。

一般に、荷繰りには、図 1.1 の (A) に示すように貨物のパイルの傾斜を小さくする方法と、(B) に示すように貨物のパイルの斜面の規模を小さくする方法がある。(A) の方法は非粘着性物

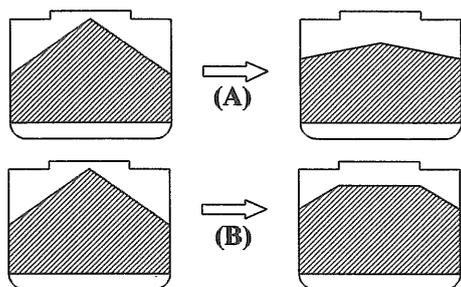


図 1.1 荷繰り方法

質の荷崩れ防止にも有効であるが、(B) の方法は、ニッケル鉱のような粘着物質の荷崩れ防止にの

み有効である。ニッケル鉱の荷繰りでは、一般に (B) の方法が用いられる。

多くのニッケル鉱について行われる船のグラブを用いた荷繰りでは、甲板の下(ハッチ開口部の下以外の場所)の貨物を平坦に均すことができず、図 1.1(B)のように、貨物のパイルには斜面が残る。そのため、荷崩れを防止するには一定程度の貨物の剪断強度が必要である。

1.3 開発した試験法の位置付け

本研究で開発した試験法における荷崩れ危険性判定のためのクライテリアは、荷繰りの実施を前提としたものであり、例えこの試験により「運送に適さない貨物では無い(剪断強度が不足した貨物では無い)」と判定された場合であっても、荷繰りが不十分であれば、荷崩れの危険性があると言える。また、運送しようとするニッケル鉱が、たとえ貯鉱場において十分な剪断強度を有していたとしても、荷役中に貨物の水分が増加して剪断強度が低下すれば、荷崩れを起こす危険性がある。そのため、荷役中には貨物の水分が増加しないよう措置する必要がある。バージを用いた沖荷役を例にとれば、具体的には、降雨の際には荷役を中止し、船倉のハッチを閉めるとともに、バージ上の貨物にはカバーを掛ける等の対策を取ることが肝要である。また、バージ輸送中に貨物に海水が侵入するのを防ぐことも重要であり、特に、図 1.2 に示す平型バージを用いる場合は、十分に静穏な海象下において荷役を行うことが重要である。

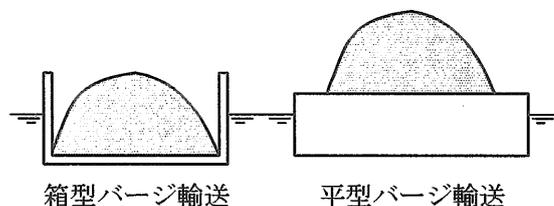


図 1.2 バージ上への貨物の積載

以上をまとめると、ニッケル鉱の安全運送のためには、以下の対策が必要と言える。

- (1) 荷役中における貨物への水の侵入の防止
  - (1-1) 雨中荷役の禁止
  - (1-2) バージ上の貨物への海水打ち込みの防止
- (2) 十分な荷繰り
- (3) 本研究で開発した試験法に基づく貨物の剪断強度(水分値)の評価

2 研究の概要及び成果

研究内容は、試験法の仕様の決定、代表円錐貫

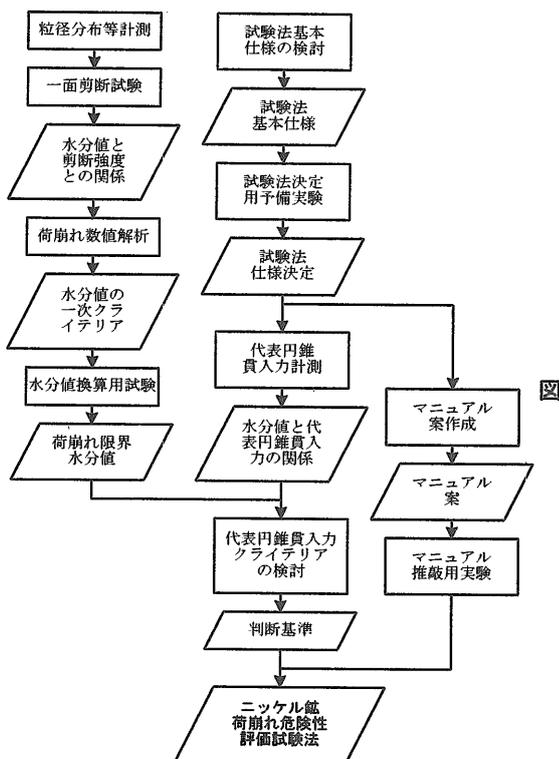
入力クライテリアの設定及び試験法マニュアルの整備に大別できる。

試験法の仕様を決定する際の課題の一つは、試験の繰り返し回数及び代表値（代表円錐貫入力）の取り方の決定であり、この点について実験を実施した。

代表円錐貫入力のクライテリアを設定するため、①試料の粒径分布（付録 E 参照）等基礎的特性を把握するとともに、②試料の水分値と剪断強度の関係を計測し、③荷崩れが危険となる剪断強度試験用試料の水分値（水分値の一次クライテリア）を解析し、④この水分値をニッケル鉋荷崩れ危険性評価試験用試料の水分値（以下、「荷崩れ限界水分値」と呼ぶ。）に換算した。さらに、⑤水分値と代表円錐貫入力の関係を計測することにより、荷崩れ限界水分値に対応する代表円錐貫入力を求め、⑥代表円錐貫入力のクライテリアを決定した。

試験法マニュアルの推敲に際しては、ばら積み貨物に関する試験に馴染みの無い方々にマニュアル案に基づいて試験を実施していただいた。

研究の流れを図 2.1 に示す。また、本研究により開発されたニッケル鉋荷崩れ危険性評価試験法のマニュアルを付録 A に示す。



2.1 研究の流れ

開発した試験法は、以下の三つのステップで構成される。

- (1) 試料から 19 mm 以上の粒子を取り除く。
  - (2) 所定の締固め手順に基づき、試料を試験容器に挿入する。
  - (3) 容器内の試料に円錐を下向きに貫入させ、その際の反力の最大値を計測する。
- (2)と(3)のステップを三回繰り返し、その最大値が 300 N 未満であれば、そのニッケル鉋は荷崩れの危険性があると判定できる。

以下では、試料の水分値は次の式で示される全水分値で表す。なお、上付の数字 105 は乾燥温度（単位：摂氏）を意味する。

$$M_C^{105} = \frac{M_T - M_S}{M_T} \quad (1)$$

ここで、

$M_C^{105}$  : 全水分値

$M_T$  : 試料の総質量

$M_S$  : 試料の固体部分の質量（乾燥質量）

### 3 ニッケル鉋荷崩れ危険性評価試験の仕様

#### 3.1 試験法の概要

円錐貫入試験は、家屋を建築する際の地盤の調査（地耐力調査）においても用いられる簡便な試験法であり、ニッケル鉋荷崩れ危険性評価試験法は、円錐貫入試験を中心として構成した。なお、供試体に細い円筒を貫入させる「プロクター貫入試験」についても検討したが、様々な大きさの粒子を含むニッケル鉋に対する試験法としては、円錐貫入試験と比較して、結果のバラツキが大きいことを確認し、採用しなかった。

円錐貫入試験の結果は、円錐貫入力、即ち、試料に円錐を貫入させるのに要する力により表される。地耐力調査においては、適当な深さ毎に円錐貫入力を計測するが、ニッケル鉋の剪断強度の評価においては、適当な深さまで円錐を貫入させた際の最大円錐貫入力をのみを円錐貫入試験の結果として用いれることにした。

研究開始時点では、試料の篩い分けを行わず、試験実施者がニッケル鉋のパイルに登って円錐貫入試験を実施する方法を想定して研究を進めたが、この方法ではニッケル鉋の種類（産地等）によらないクライテリアを設定することが困難であることが分かったため、試料の最大粒径を調整することにした（付録 B 参照）。

一般に、ばら積み貨物の剪断強度は、水分値や粒径分布が同じであっても、間隙比（付録 E 参照）、即ち間隙部分の体積と固体部分の体積の比によって異なる。そのため、ばら積み貨物の剪断強度を計測するには、間隙比を調整するための締固めが不可欠であり、ニッケル鉋荷崩れ危険性評価

試験法においても、締固めを行うことにした。なお、締固めには各種の方法があるが、再現性確保の観点から、所定の容器に試料を入れて、ランマ(突き固め装置)を用いて締固めを行うことにした。

以上の検討の結果、ニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験法の手順の概要を以下の通り決定した。

- (1) 篩い分けにより試料の最大粒径を調製する。
- (2) 試料を容器に挿入し、ランマを用いて締固めを行い、供試体を形成する。
- (3) 容器内の供試体について円錐貫入試験を実施する。
- (4) 円錐貫入試験結果に基づき、荷崩れの危険性を判定する。

これらの手順のうち、(2)及び(3)の作業は適当な回数繰り返し、試験結果の代表値に基づいて荷崩れの危険性を判定することにした。

### 3.2 試験装置等の仕様

#### 3.2.1 篩い分け

円錐貫入試験装置の円錐が試料への貫入時に大きな粒子に当たった場合、円錐貫入力が増大するのに対して、ニッケル鉍の巨視的な剪断強度は細かな粒子の特性に依存し、大きな粒子が剪断強度に及ぼす影響は有意では無い。そのため、大きな粒子は試料から除去する必要がある。次節に述べる締固め方法を考慮して、試料の最大粒径は19 mmとした。

#### 3.2.2 試料の挿入及び締固め

試料の最大粒径及び次節に述べる円錐と試験容器との間のクリアランスを考慮して、試験容器の内径及び容積をそれぞれ150 mm、4,000 cm<sup>3</sup>に決定した。試験容器と円錐の大きさの関係を図3.1に示す。

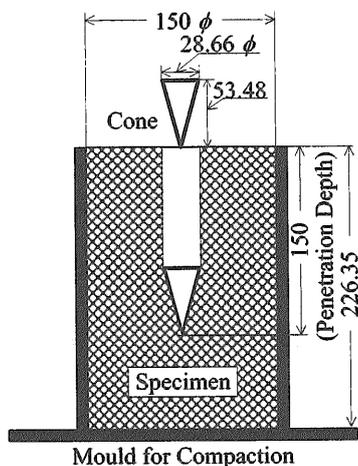


図 3.1 試験容器と円錐

図から分かるように、円錐と試験容器との間のクリアランスは最大粒径の3倍以上とした。

試料の挿入及び締固め方法は、JIS A1210, 1999「突固めによる土の締固め試験方法」に基づいて決定した。この基準に記載されている突固めによる締固め方法5種類を表3.1に示す。モールドの内径が150 mm且つ試料の最大粒径が19 mmという条件に対応するのは、表中のDの方法のみである。そのため、Dの方法に倣って、ランマとしては、質量4.5 kg、落下高さ45 cmのものを用いることにした。

試験容器の深さを考慮して、層の数は5とし、突固めに要する作業量を考慮して、一層当たりの突固めの回数は60回とした。この条件下では、締固め仕事量、即ち単位体積当たりの締固めのエネルギーは、表中のDの方法による場合と比較して約60%となる。

表 3.1 JIS A1210, 1999-突固めによる締固め方法

突固め方法の呼び名	ランマ質量 [kg]	落下高さ [cm]	モールド内径 [cm]	モールド容積 [cm <sup>3</sup> ]	突固め回数	層当たりの突固め回数	許容最大粒径 [mm]
A	2.5	30	10	1,000	3	25	19
B	2.5	30	15	2,209	3	55	37.5
C	4.5	45	10	1,000	5	25	19
D	4.5	45	15	2,209	5	55	19
E	4.5	45	15	2,209	3	92	37.5

試料の挿入及び締固めの条件をまとめると表3.2の通りである。なお、試料を締固めた後、試験容器のカラーを外して試験容器の上縁より上の試料をストレートエッジで切り取り供試体を形成することは、JIS A1210, 1999と同様である。

表 3.2 締固め条件

試料の最大粒径 [mm]	19
試験容器内径 [cm]	15
試験容器容積 [cm <sup>3</sup> ]	4000
ランマ質量 [kg]	4.5
ランマ落下高さ [cm]	45
締固めの層の数	5
一層当たりのランマ落下回数	60

#### 3.2.3 円錐貫入試験

円錐貫入試験装置としては、大型の円錐、即ち、底面積6.45 cm<sup>2</sup>(直径:約29 mm)の円錐を有するものを用いることにした。円錐貫入試験の基準に従って、貫入速度は1 cm/secとした。貫入深さ、即ち、試料の上面から円錐の先端までの深さは、実験の経験に基づき、15 cmとした。

まとめると、円錐貫入試験では、最初に円錐を供試体の上面の中央付近にセットし、毎秒約1 cmの速さで先端の深さが15 cmに達するまで円錐

を貫入させ、その際に要する最大の力を記録する。以下、この力を最大円錐貫入力と呼ぶ。

### 3.3 試験回数と代表円錐貫入力

試料の最大粒径を 19 mm に調製しても、比較的大きな粒子による円錐の貫入に対する拘束により、最大円錐貫入力が大きくなる場合がある。こうした現象が試験結果の再現性に及ぼす影響を少なくするためには、試験を繰り返し実施し、適切に代表値を決定する必要がある。試験の繰り返し回数及び代表値の取り方を決定するため、同一の試料について 30 回の円錐貫入試験を実施した。なお、円錐貫入試験の供試体は、前述の方法で試験毎に形成した。

試験は、比較的大きな粒子を多く含む Boakaine 鉱 (4.1 節参照) を用いて、水分値を変えた二つの試料について実施した。各試料について、試験の最初 (第 1 回目の円錐貫入試験用供試体) と最後 (第 30 回目の円錐貫入試験用供試体) に水分値を計測した。結果を図 3.2 に示す。図の横軸は実験番号、縦軸は最大円錐貫入力であり、図中の白丸及び黒丸は、それぞれ平均水分値 23.0 % 及び 24.5 % の試料に関する計測結果である。直線は、最小二乗法により求めた最大円錐貫入力のトレンドである。なお、直線が右上がりになるのは、試験中に試料の水分値が若干低下することにより、また、締固めの繰返しにより間隙が減少することにより、剪断強度が上昇したためと考えられる。

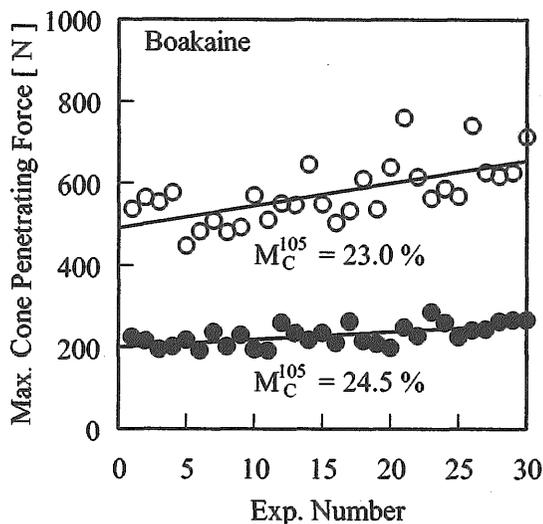


図 3.2 円錐貫入予備試験結果

各最大円錐貫入力のこの直線上の値に対する比率の度数分布を図 3.3 に示す。図 3.3 より、最大円錐貫入力は、円錐の貫入に対する試料中の比較的大きな粒子による拘束により大きな値を示

すことはあるが、一定以上に低くなることは無いと言える。よって、複数回の円錐貫入試験結果を代表させるには、最大円錐貫入力のうち、最も低い値を代表値とすれば良いと言える。以上の検討の結果、代表値としては、最大円錐貫入力の最低値を用いることにした。

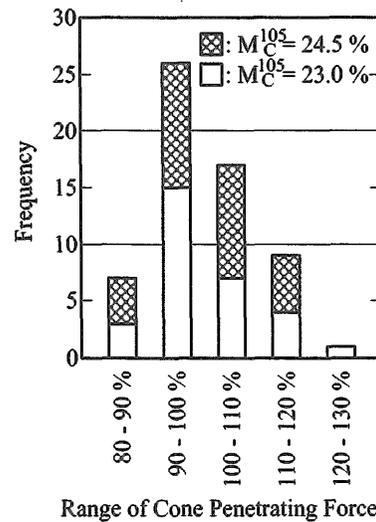


図 3.3 トレンド線に対する比率の度数分布

試験の繰り返し回数を決定するため、円錐貫入予備試験の結果に基づき、試験回数と最大円錐貫入力の最低値の関係を調べた。結果を図 3.4 に示す。図において、白丸及び黒丸は最大円錐貫入力の計測値、細線は、当該実験の前後のデータを含む計 3 データのうち最低値、太線は、当該実験の前後の 2 データを含む計 5 データのうち最低値である。この図より、試験回数 3 回の場合と 5 回の場合で、最大円錐貫入力の最低値には、特に最大円錐貫入力が 200 N 程度の場合には、有意な差は無いと言える。そのため、試験の繰り返し回数は 3 回に決定した。

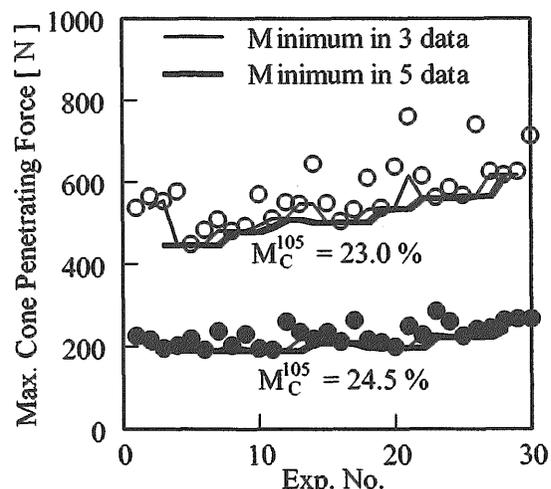


図 3.4 試験回数と最大円錐貫入力の最低値

以上をまとめると、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験においては、円錐貫入試験を3回実施し、最大円錐貫入力 of 最低値(代表円錐貫入力)により試験結果を代表させることにした。

4 代表円錐貫入力のクライテリア

4.1 試料

代表円錐貫入力を決定するため、Gebe, Pomalaa, Boakaine, Tontouta, Rio Tuba 積みの試料を用いて実験を実施した。各試料の真密度(付録 E 参照)を表 4.1 に示す。

粒径分布を図 4.1 に示す。なお、粒径分布は最大粒径を 100 mm とした場合のものである。図において、横軸は粒径(対数)、縦軸は乾燥状態における通過重量百分率である。図より、ニッケル鉱は 0.075 mm 以下、即ち粘土に分類される粒子を多く含むことが分かる。また図より、3.3 節で述べた円錐貫入予備試験で使用した Boakaine 鉱は、大きな粒子を比較的多く含むと言える。

表 4.1 試料の真密度 (単位: kg/m<sup>3</sup>)

Ports of loading for nickel ore	Solid density
Gebe	2.95 × 10 <sup>3</sup>
Tontouta	2.85 × 10 <sup>3</sup>
Rio Tuba	2.89 × 10 <sup>3</sup>
Pomalaa	2.92 × 10 <sup>3</sup>
Boakaine	2.79 × 10 <sup>3</sup>

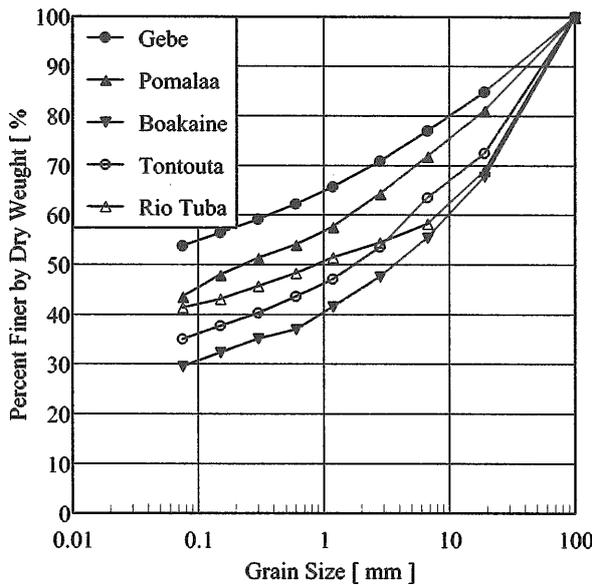


図 4.1 試料の粒径分布

値を変えて一面剪断試験を実施することにより、各試料について水分値と剪断強度の関係を求めた。一面剪断試験の条件を表 4.2 に示す。なお、水分を含むニッケル鉱に関する一面剪断試験結果は三軸圧縮試験結果と良く一致することが確認されている (7)。

表 4.2 一面剪断試験条件

試験装置	丸東製作所製 S-08A
直圧力	重錘による供試体上面からの荷重による
剪断方法	下箱を水平に駆動
剪断力	上箱の拘束に要する力を計測
試験条件	直圧力一定
試料の最大粒径	6.7 mm
供試体の直径	60 mm
供試体の厚さ	約 30 mm
剪断速度	1 mm/min.
最大剪断変位	9 mm

試料の水分調整から実験までには、一週間以上の時間をおいた。供試体は、試料を剪断箱の中にマニュアルで挿入することにより形成し、それぞれの実験における直圧力を 5 分間与えることにより締め固めた。その際、供試体を形成するのに要した試料の質量を求めた。

各試料の水分値と剪断強度の関係を図 4.2~図 4.6 に示す。図の横軸は水分値、縦軸は剪断抵抗係数(付録 E 参照)及び粘着力(付録 E 参照)である。なお、一面剪断試験結果の詳細については、付録 D を参照のこと。

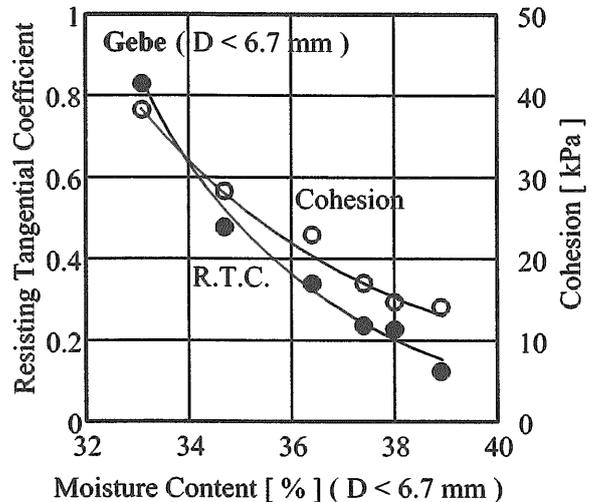


図 4.2 水分値と剪断強度の関係 - Gebe

4.2 水分値と荷崩れ危険性の関係

4.2.1 水分値と剪断強度の関係

最大粒径 6.7 mm の試料を用いて、試料の水分

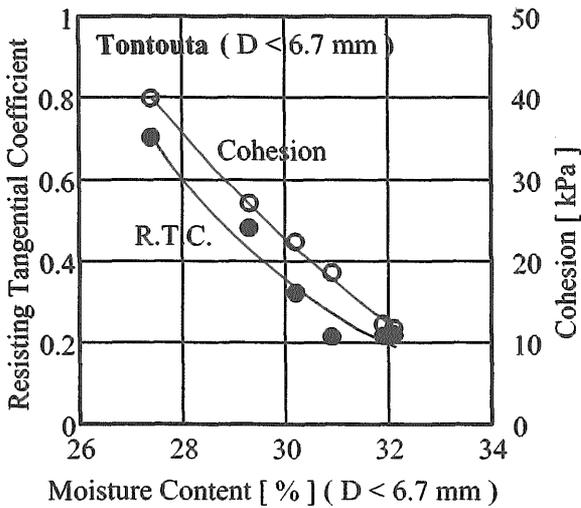


図 4.3 水分値と剪断強度の関係 - Tontouta

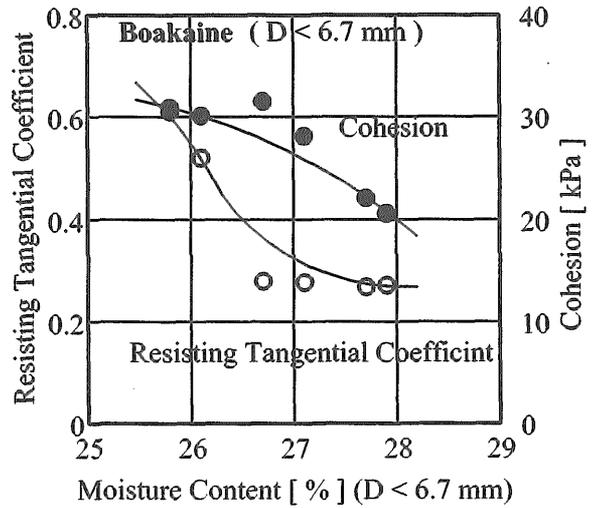


図 4.6 水分値と剪断強度の関係 - Boakaine

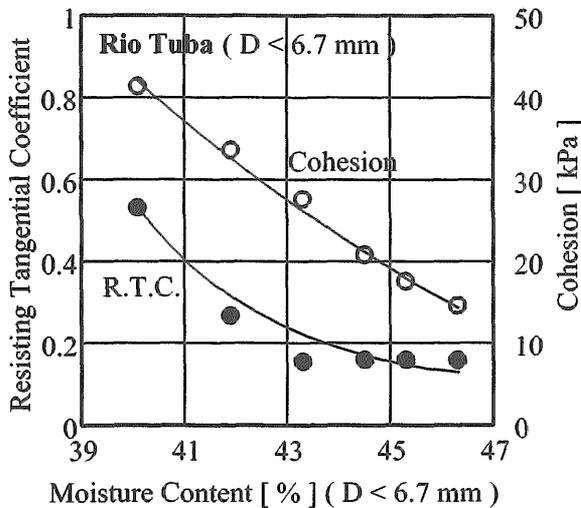


図 4.4 水分値と剪断強度の関係 - Rio Tuba

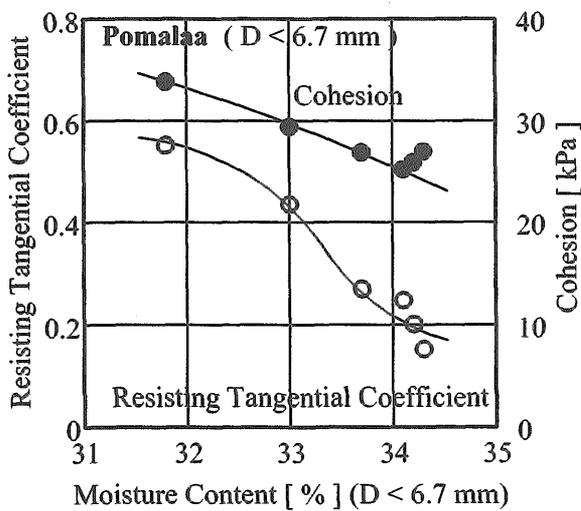


図 4.5 水分値と剪断強度の関係 - Pomalaa

4.2.2 荷崩れ数値解析

水分値と荷崩れ危険性の関係を求めるため、一面剪断試験により得られた剪断強度を用いて、荷崩れの数値解析<sup>(8)</sup>を行った。この解析は、土質工学における斜面の安定性解析に倣ったもので、Fellenius 法と呼ばれる。計算の手順は以下の通り。

- (1) 図 4.7 に示すように、滑り線（ここでは円弧と仮定）を想定し、滑り線上の貨物を加速度の方向に沿って分割し、各要素間の力の干渉を無視して、滑り線上の剪断応力及び直応力を求める。

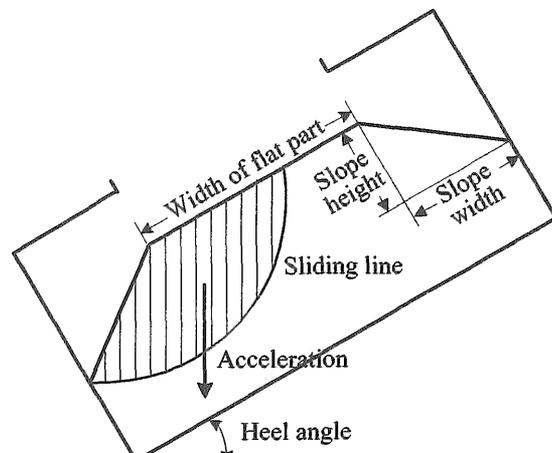


図 4.7 荷崩れ数値解析法

- (2) 貨物の粘着力及び剪断抵抗係数に基づき、直応力から抵抗剪断応力を計算する。
- (3) 剪断応力を滑り線上で積分し、円弧の半径の乗じた値、いわゆる滑りモーメントを求める。

(8)

- (4) 抵抗剪断応力に関する同様の値、いわゆる抵抗モーメントを求める。
- (5) 安全率、即ち、抵抗モーメントと滑りモーメントの比を求める。
- (6) 様々な滑り線を想定して(1)~(5)の計算を行い、安全率の最小値を求める。この最小値を臨界安全率と呼ぶ。
- (7) 臨界安全率に基づき荷崩れの危険性を判定する。

計算に用いたプログラムの入力項目は、貨物の剪断強度(剪断抵抗係数並びに粘着力)及び見かけ密度(付録 E 参照)、パイルの形状(スロープの幅並びに高さ及び平坦部の幅)、加速度条件である。加速度条件としては、静的な横傾斜を想定し、その角度を入力する。出力は臨界安全率及びこれに対応する滑り線(円弧の半径及び端点の位置)である。

ダムのような重要構造物については、この計算法を用いた場合、臨界安全率として完成時には1.5、建造時には1.2を確保することとしている。そのため、海上運送中の貨物の荷崩れに関しては、建造中の構造物に倣って、臨界安全率1.2を評価基準とした(8)。

#### 4.2.3 貨物パイルの形状及び船体横傾斜

計算条件のうち加速度としては、BC Code (3)の荷繰り基準(第5節)等を参照して、30度の静的横傾斜を想定した。貨物は可能な限り荷繰りされていると仮定し、パイルの形状としては、図4.7及び図1.1(B)に示すような形を想定した。このような荷繰りを行った場合、スロープの幅は、船の半幅からハッチの半幅を引いた値程度になることが想定される。ニッケル鉱の運送には載貨重量二万トン級~四万トン級のばら積み船が用いられることを考慮し、スロープの幅を決定するため、このクラスの船の幅及びハッチの幅について簡単に調査した結果を表4.3に示す。表において「スロープ幅」とあるのは、船幅とハッチ幅の差の半分の値である。この結果に基づき、スロープの幅としては7m、貨物のパイル頂部の平坦部の幅としては13mを想定した。

表 4.3 ばら積み船の船幅及びハッチ幅

	船幅	ハッチ幅	スロープ幅
DWT 40,000 ton 級	28.8 m	15.5 m	6.65 m
	29.6 m	17.0 m	6.30 m
	31.0 m	13.6 m	8.70 m
DWT 20,000 ton 級	25.0 m	11.5 m	6.75 m
	22.8 m	9.0 m	6.90 m

貨物パイルのスロープに高さについては、過去

の実船試験結果(7)及びニッケル製錬各社から提供していただいた資料に基づけば、3~5m程度を想定すべきであると考えられたため、5mとした。

#### 4.2.4 水分値の一次クライテリア

各試料について、解析された剪断強度、即ち、図4.2~4.6のグラフの値を用いて、4.2.3節で述べた条件下において荷崩れの数値解析を行った。その際、貨物の見かけ密度は、一面剪断試験時の試料の密度を勘案し、表4.4に示す値を用いた。

表 4.4 想定貨物見かけ密度

Ports of loading for nickel ore	Density [ kg/m <sup>3</sup> ]
Gebe	1.69 × 10 <sup>3</sup>
Tontouta	1.78 × 10 <sup>3</sup>
Rio Tuba	1.55 × 10 <sup>3</sup>
Pomalaa	1.75 × 10 <sup>3</sup>
Boakaine	1.83 × 10 <sup>3</sup>

荷崩れ数値解析の結果を図4.8~4.12に示す。図において臨界安全率1.2に対応する水分値を解析することにより、水分値の一次クライテリア、即ち、最大粒径6.7mmの試料における荷崩れ危険性からみた水分値の上限を求めることができる。水分値の一次クライテリアを表4.5に示す。

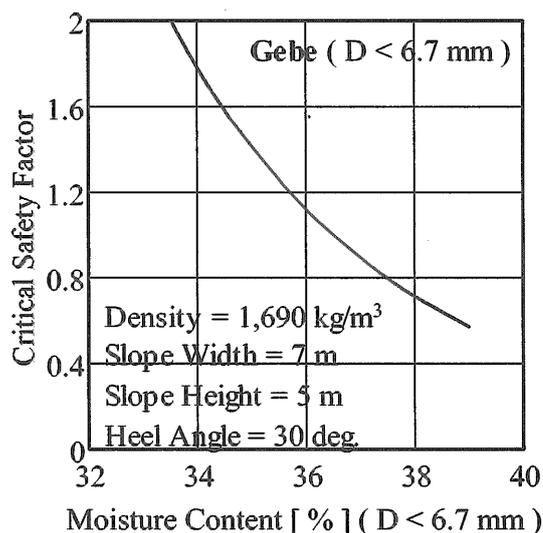


図 4.8 水分値と臨界安全率の関係 - Gebe

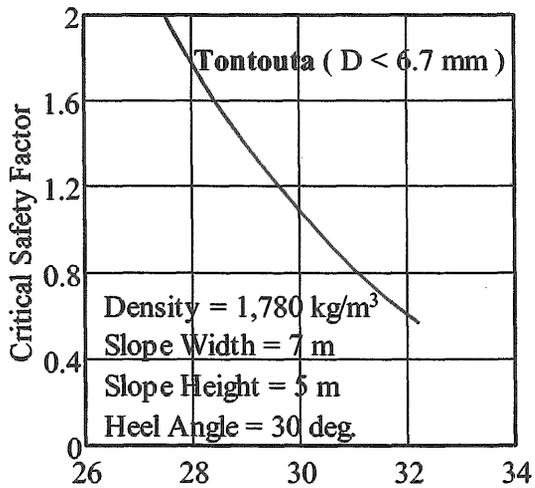


図 4.9 水分値と臨界安全率の関係 - Tontouta

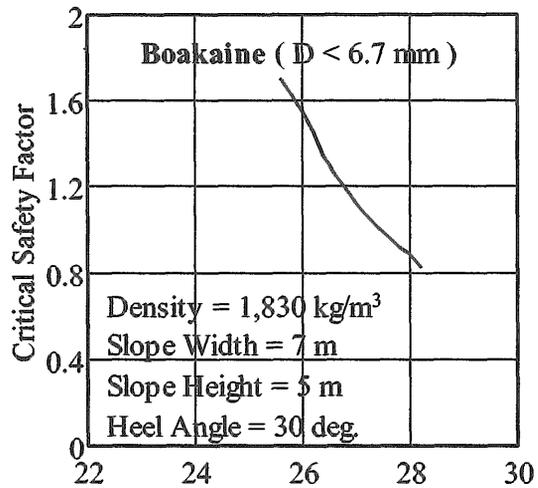


図 4.12 水分値と臨界安全率の関係 - Boakaine

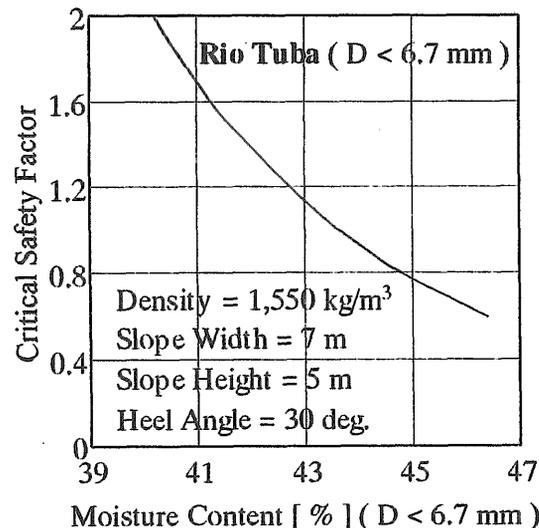


図 4.10 水分値と臨界安全率の関係 - Rio Tuba

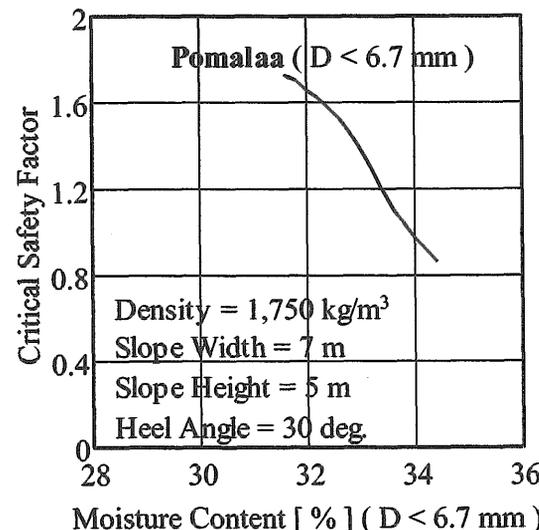


図 4.11 水分値と臨界安全率の関係 - Pomalaa

表 4.5 水分値の一次クライテリア

Ports of loading for nickel ore	Primary criteria of moisture content (D < 6.7 mm) [%]
Gebe	35.7
Tontouta	29.6
Rio Tuba	42.7
Pomalaa	33.4
Boakaine	26.8

4.3 水分値の換算

代表円錐貫入力のクライテリアを求めるためには、水分値の一次クライテリアを、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法用試料、即ち、最大粒径 19 mm の試料の水分値に換算する必要がある。

ニッケル鉱が湿って見える状態では、水分は粒子内部のみならず粒子間の間隙部分にも含まれていると考えられる。こうした状態では、粒子は含み得る限りの水分を含んでいると考えられる。そこで、粒径 6.7 mm ~ 19 mm の粒子を、長期間水に浸した後、粒子の表面の水を拭って水分値を計測した。この水分値は、こうした粒子が含み得る最大の水分値と見なすことができる。

この実験により得られた水分値と、乾燥状態における通過重量百分率を用いることにより、最大粒径 6.7 mm の試料の水分値は、次の式により最大粒径 19 mm の試料の水分値に換算できる。

$$M_C^T = \frac{p \cdot M_C^S + (1-p) \cdot M_C^L - M_C^L \cdot M_C^S}{1-p \cdot M_C^L - (1-p) \cdot M_C^S} \quad (2)$$

ここで

$M_C^T$ : 最大粒径 19 mm の試料の水分値 ;

$M_C^L$ : 粒径 6.7 mm ~ 19 mm の試料の最大水分値 ;

$M_C^S$ : 最大粒径 6.7 mm の試料の水分値 ;

$p$ : 最大粒径 19 mm の試料中に含まれる 6.7

mm以下の粒子の乾燥状態における通過質量率

なお、水分値換算方法に関する研究の詳細については、付録Cを参照されたい。

水分値の換算結果を表4.6に示す。表の下端が、最大粒径19mmの試料に関する水分値の限界、即ち、荷崩れ限界水分値である。

#### 4.4 代表円錐貫入力のクライテリア

水分値と代表円錐貫入力の関係を求めるため、最大粒径を19mmに調製した試料の水分値を変えて、各水分値の試料について、ニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験法に基づき3回の円錐貫入試験を実施し、代表円錐貫入力、即ち、最大円錐貫入力の最低値を求めた。結果を図4.13に示す。

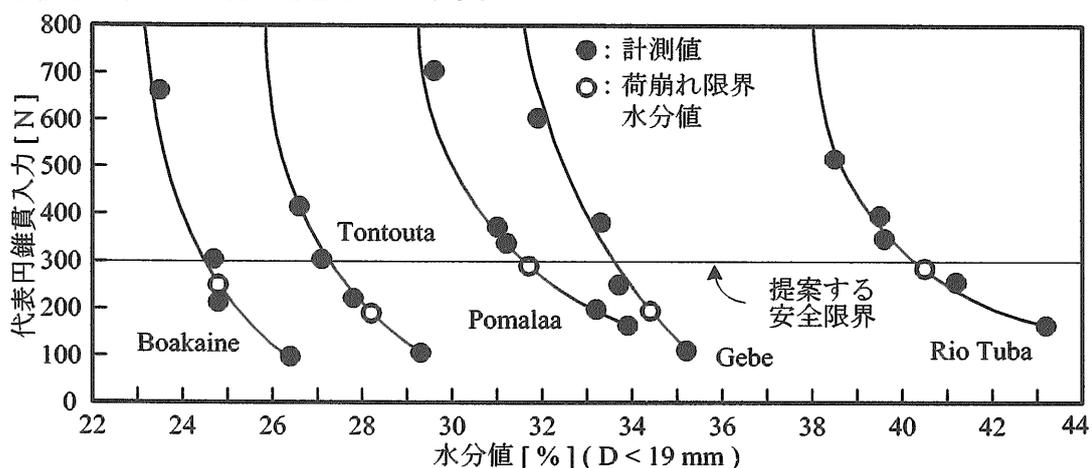


図 4.13 水分値と代表円錐貫入力の関係

図の横軸は最大粒径19mm試料の水分値であり、縦軸は代表円錐貫入力である。図中の黒丸は計測値を示し、グラフは水分値と代表円錐貫入力の関係を意味する。白丸は、荷崩れ限界水分値及びこれに対応する代表円錐貫入力を示す。なお、試験結果の詳細については、付録Dを参照されたい。各試料の荷崩れ限界水分値に対応する代表円錐貫入力を表4.7に示す。

表 4.7 荷崩れ限界水分値に対応する代表円錐貫入力

試料	Gebe	Tontouta	Rio Tuba	Pomalaa	Boakaine
荷崩れ限界水分値 [%]	34.4	28.2	40.5	31.7	24.8
代表円錐貫入力 [N]	195	190	285	290	250

ここで、荷崩れ限界水分値に対応する代表円錐貫入力のばらつきについて考察する。

表4.8は、水分値の一次クライテリア(最大粒径6.7mm)に対応する剪断抵抗係数及び粘着力

表 4.6 水分値換算結果

試料	Gebe	Tontouta	Rio Tuba	Pomalaa	Boakaine
通過重量百分率 (D < 6.7 mm in D < 19 mm, Dry) [%]	90.8	87.6	84.3	88.7	81.7
6.7~19 mm 粒子の最大水分値 (計測結果) [%]	18.7	16.6	24.7	15.2	14.7
水分値の一次クライテリア (D < 6.7 mm) [%]	35.7	29.6	42.7	33.4	26.8
荷崩れ限界水分値 (D < 19 mm) [%]	34.4	28.2	40.5	31.7	24.8

を示したものである。即ち、荷崩れ数値解析の結果、臨界安全率が1.2となる剪断強度を示したものである。

表 4.8 水分値の一次クライテリアに対応する剪断強度

試料	Gebe	Tontouta	Rio Tuba	Pomalaa	Boakaine
水分値の一次クライテリア [%]	35.7	29.6	42.7	33.4	26.8
剪断抵抗係数 ( $\tan\phi$ )	0.39	0.39	0.26	0.56	0.54
粘着力 ( $c$ ) [kPa]	23.5	24.5	28.5	16.5	17.5

表より、剪断抵抗係数  $\tan\phi$  及び粘着力  $c$  の組合せは、 $\tan\phi=0.56, c=16.5$  kPa 乃至  $\tan\phi=0.26, c=28.5$  kPa の幅があることが分かる。一方、試料の見かけの密度は、1,550 (Rio Tuba)~1,830 (Boakaine)  $\text{kg/m}^3$  の範囲であり、剪断抵抗係数や粘着力と比較して、見かけ密度の差異は小さい。

貨物の見かけ密度を  $1,700 \text{ kg/m}^3$  とし、4.3.2

節で述べた貨物パイルの形状及び横傾斜角度の条件下で、臨界安全率 1.2 に対応する剪断抵抗係数と粘着力を求めると、図 4.14 が得られる。図の横軸は剪断抵抗係数（摩擦係数）、縦軸は粘着力である。グラフは密度を  $1,700 \text{ kg/m}^3$  とした場合の臨界安全率 1.2 に対応する剪断抵抗係数と粘着力の組合せ、黒丸は臨界安全率 1.2 に対応する各試料の剪断抵抗係数と粘着力（表 4.8 参照）、試料名と共に示した数値は、臨界安全率 1.2 に対応する代表円錐貫入力である。図は、臨界安全率 1.2 に対応する代表円錐貫入力、剪断抵抗係数と粘着力の組合せにより異なることを示唆している。

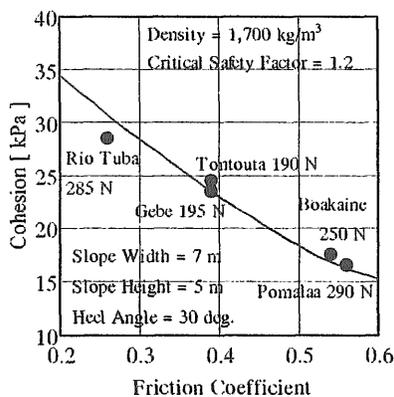


図 4.14 臨界安全率 1.2 に対応する剪断強度

このことから、荷崩れ限界水分値に対応する代表円錐貫入力が試料により異なるのは、荷崩れに関係する三つの物性値、即ち、見かけ密度、粘着力、剪断抵抗係数を、代表円錐貫入力という一つのパラメータで代表させることの限界にあると考えられる。

代表円錐貫入力に基づく荷崩れ危険性判定の限界及び本研究において試験していないニッケル鉱も多いことを考慮すれば、「試験により得られる代表円錐貫入力がこのクライテリアを超えれば安全である」という値を設定するのは妥当ではない。そのため、ニッケル鉱荷崩れ評価試験法の目的は「剪断強度が低いため（荷崩れの危険性があるため）船積みに適さない貨物を判別すること」とし、判定のための代表円錐貫入力のクライテリアは、表 4.7 に基づき、安全余裕を見込まずに最大値を丸めて、300 N とした。

## 5 結言

本研究により、荷崩れ危険性の観点からばら積み運送に適さないニッケル鉱を判別するためのニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法を開発した。この試験法を実施し、代表円錐貫入力が 300 N

未満であれば、そのニッケル鉱は荷崩れの危険性があるため、特別な対策を講じない限り、船積みに適さないと言える。

この試験法の開発により、従来は不可能であった荷役現場における貨物の剪断強度の評価が可能になった。このことにより、直ちにニッケル鉱の安全運送が達成されるものではないが、本試験法は安全運送に大きく寄与するものと考えられる。

本研究は、当所と日本海事検定協会との共同研究として実施したものである。日本海事検定協会における研究は、日本財団の支援を得て、IMO 対応委員会の審議に基づき実施された。試料の分析の一部は日本海事検定協会理化学研究所が実施した。揚荷役現場における試験及び実験用試料の手配に際しては、日本鉱業協会、住友金属鉱山株式会社、大平洋金属株式会社、株式会社日向製錬所及び日本冶金工業株式会社にご協力いただいた。また、当所装備部山尾崇氏（当時）には、揚荷役現場における試験にご協力いただいた。試験法のマニュアルの推敲に際しては、商船三井株式会社竹下修氏及び当所装備部宮田修氏にご協力いただいた。日本海事検定協会 IMO 対応委員会特殊貨物部関係者、日本鉱業協会、大平洋金属株式会社、日向製錬所株式会社、日本冶金工業株式会社、日本財団及び関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 日本海事検定協会：「粘着性ばら積み貨物の安全運送に関する研究－総合報告書」、2000年3月
- (2) S.Ota, et al : "Study on Prevention of Sliding Failure of Nickel Ore in Bulk", 日本造船学会論文集第 186 号 pp301 - 307, 2000
- (3) International Maritime Organization : Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes, 1998 Edition, 1998
- (4) S.Ota & T.Ura : "Determination of Upper Bound of Moisture Content of Nickel Ore in Bulk", International Association of Institute of Navigation 1994 ("Navigation" Vol.123 1995, 日本航海学会)
- (5) IMO document, Annex 2 of BC 33/3/2, 1994, "Upper Bound of Moisture Content Nickel Ore Based on Static Shear Strength", Submitted by Japan
- (6) IMO document, BC 32/3/16, 1993, "Precautions for Cargoes Containing Fine Particles such as Nickel Ore",

Submitted by Japan

- (7) 太田他：「ニッケル鉱ばら積み運送の安全評価」、日本航海学会論文集第 87 号、1992
- (8) 太田他：「ばら積み貨物の荷繰りガイドラインの研究」日本航海学会論文集第 83 号、1990
- (9) 日本海事検定協会 IMO 対応委員会、「危険物の海上運送に関する調査研究」平成 9 年度報告書、MAR. 1998

付録 A ニッケル鉱荷崩れ危険性  
評価試験法マニュアル

Test procedure for evaluating danger of  
sliding failure of nickel ore

1 Scope

When nickel ore contains much moisture, its shear strength becomes low and piles of nickel ore formed in cargo holds of bulk carriers may slide. To prevent sliding failure, nickel ore containing much moisture should not be accepted for shipment. The shear strength of nickel ore can be evaluated by this test procedure in view of the danger of sliding failure.

If a shipper or a master of the ship have doubts that the sliding failure of nickel ore may take place during the voyage, it is recommended to apply this test procedure to the cargo, prior to shipment.

For the evaluation, it is assumed that the cargo pile is trimmed as level as practicable. The assumed width and height of remaining slopes of the cargo pile after trimming at each side are 7 m and 4 m, respectively. The assumed rolling condition is static heel at 30 degrees.

This test procedure should not be applied to solid bulk cargoes other than nickel ore.

2 Terminology

For the purpose of explanation of the test procedure, the following terms are used with the following meanings:

- .1 *Original sample* means a sample of nickel ore without sieving;
- .2 *Sieved sample* means a sample obtained by sieving of which the maximum diameter is 19 mm;
- .3 *Sample* means original sample and sieved sample;
- .4 *Specimen* means a sieved sample filled and tamped in the mould and leveled off along the

brim of the mould without collar;

- .5 *Sieve* is the sieve described in paragraph 3.2;
- .6 *Mould* is the mould described in paragraph 3.3;
- .7 *Collar* is the removable extension piece of the mould;
- .8 *Cylinder* is the cylindrical part of the mould other than the collar;
- .9 *Bottom plate* is the bottom plate of the mould;
- .10 *Compaction hammer* is the tool for compaction described in paragraph 3.4;
- .11 *Hammer* is the part of compaction hammer;
- .12 *Straight edge* is a flat bar for leveling off the sample piled up above the brim of the mould in order to control the volume of specimen;
- .13 *Sample removing apparatus* is the apparatus for removing the sieved sample in the mould described in paragraph 3.5;
- .14 *Cone-penetrometer* is the apparatus described in paragraph 3.6;
- .15 *Cone* is the part of the cone-penetrometer;
- .16 *Penetration depth* is the depth from the brim of the mould without collar to the tip of the cone, during penetration of the cone into the specimen;
- .17 *Cone penetration test* is the test described in paragraph 4.5.2;
- .18 *Cone penetrating force* is the force required to penetrate the cone into the specimen during the cone penetration test;
- .19 *Maximum cone penetrating force* is the maximum value of cone penetrating force obtained by single cone penetration test; and
- .20 *Representative cone penetrating force* means the lowest value of the three figures of the maximum cone penetrating force, which are obtained through cone penetration tests of three times for a sieved sample.

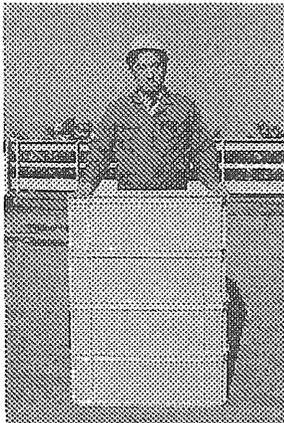
3 Apparatus

The following apparatus and tools are used in the test:

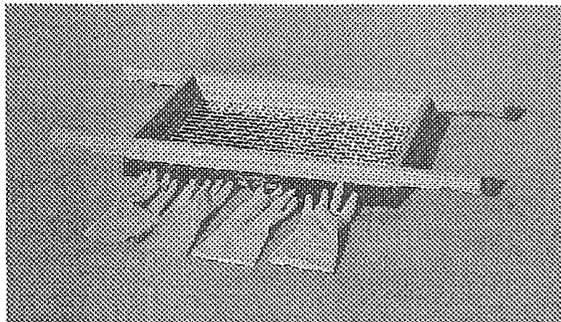
- .1 Containers of suitable size for temporary storage of sample and for sieving (see photo 1);
- .2 A sieve having mesh size of 19 mm (see photo 2) and rubber gloves;
- .3 A cylindrical iron mould of which the inner diameter and the capacity are 150 mm and 4,000 cm<sup>3</sup>, respectively, with a removable extension piece, and a straight edge for the mould (see photo 3 and 4);

- .4 A compaction hammer specified by JIS-A1210 of which the mass of hammer and height of drop are 4.5 kg and 0.45 m, respectively (see photo 5);
- .5 An apparatus for removing the sieved sample from the cylinder of the mould (see photo 6); and
- .6 A cone-penetrometer of which the maximum measurable load is not less than 500 N with the cone of which the base area is 6.45 cm<sup>2</sup> (see photo 7).

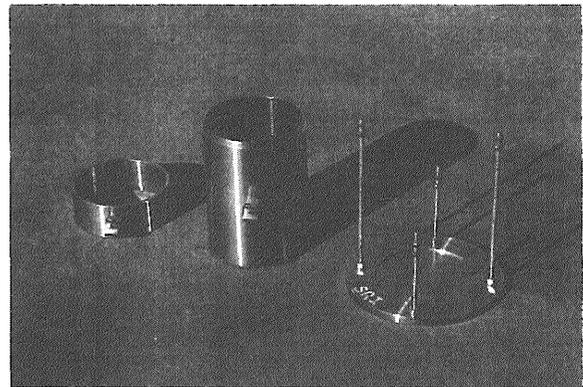
For convenience, it is recommended to have a scoop for inserting the sample into the mould and suitable cleaning tools for the apparatus (see photo 8). It is preferable that the cone-penetrometer is able to indicate the maximum load during the penetration of the cone into specimen. The test can be conducted without a weighing instrument. It is, however, recommended to prepare a weighing instrument of which the maximum measurable weight is more than 150 N, in order to check the quantity of the sample.



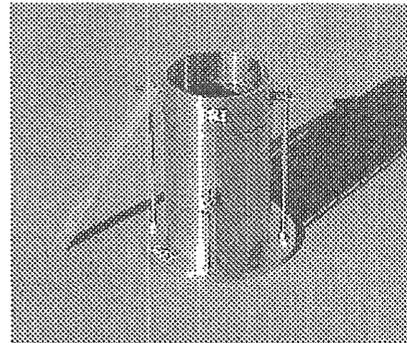
**Photo 1 Containers for storage of sample and sieving**



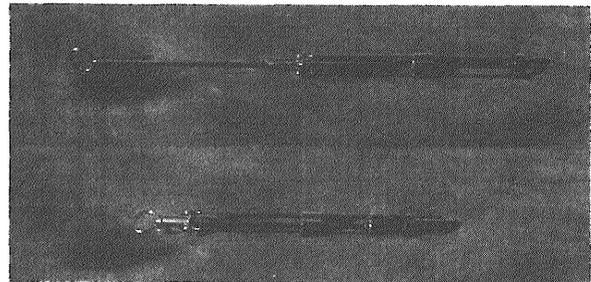
**Photo 2 Sieve (mesh size 19 mm) and rubber gloves**



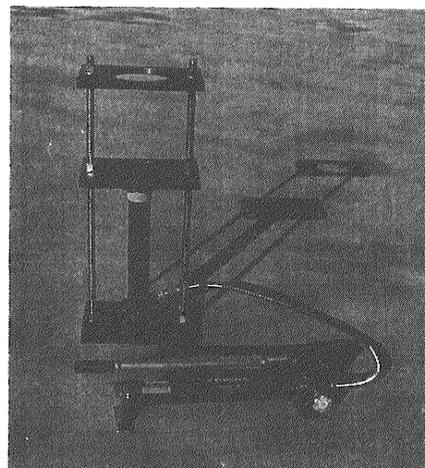
**Photo 3 Mould (dismantled into three parts)**



**Photo 4 Mould (assembled) and straight edge**



**Photo 5 Compaction hammer**



**Photo 6 Sample removing apparatus**

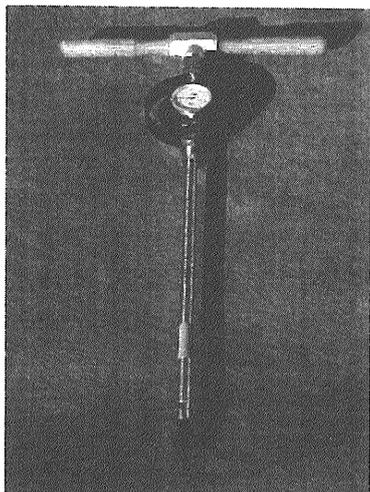


Photo 7 Cone-pemetrometer



Photo 8 Scoop and cleaning tools  
(scoops, brush, scraper, paper towels)

#### 4 Test procedure

##### 4.1 Precautions for the test

During the test, care should be taken to prevent unnecessary change of moisture contents of sample. Especially, the following precautions should be considered:

- .1 The test should be conducted in a sheltered place away from direct sun shine or rain;
- .2 All apparatus and tools contacting sample should be kept as clean and dry as practicable; and
- .3 All procedures should be conducted as quickly as possible.

Great care should be paid while taking the original sample from cargo to be tested.

##### 4.2 Outline of the test procedure

The test procedure consists of the following steps:

- Step 0 : Preparation of apparatus and tools;  
 Step 1 : Preparation of original sample and sieving;  
 Step 2 : Measurement of maximum cone penetrating force; and  
 Step 3 : Judgment.

Step 2 consists of the following steps which are repeated three times.

- Step 2.1 : Forming specimen in the mould using sieved sample by tamping;  
 Step 2.2 : Cone penetration test for the specimen formed by step 2.1; and  
 Step 2.3 : Removal of sieved sample from the mould.

##### 4.3 Preparation of the test (Step 0)

The following procedures should be carried out prior to conduction of the test:

- (1) Check the method for using the sample removing apparatus by using the empty mould;
- (2) Become skilled in dismantling and assembling the mould; and
- (3) Check the method for using the compaction hammer.

Prior to the conduction of the test, all relevant apparatus and tools should be ready for use. The cone-penetrometer should be assembled.

##### 4.4 Preparation of original sample and sieving (Step 1)

###### 4.4.1 Preparation of original sample

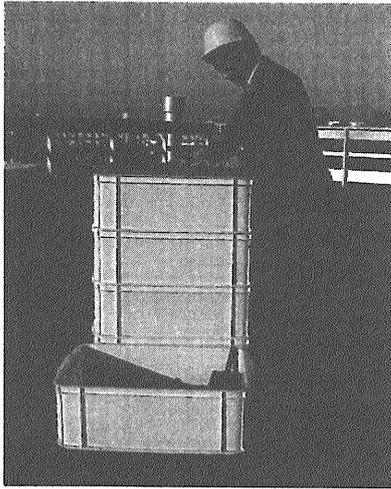
Original sample is prepared in a container. The quantity of original sample required for the test will vary depending on the grain size distribution. Enough quantity of original sample should be prepared to obtain more than 8 kg of sieved sample. After removing large lumps such as a head of infant from original sample, 15 kg is enough, in general.

###### 4.4.2 Sieving (see photo 9)

The sieve is prepared at the top of stacked containers and rubber gloves are put on hands. The container including original sample should not be stacked. The original sample is put on the sieve and sieved sample is stored in the container by being passed through the sieve manually.

When much fine particles remain on the sieve, the moisture content of sieved sample become lower. During sieving, therefore, particles finer than the mesh size remaining on the sieve should be as little as practical, not to decrease the moisture content of the sieved sample.

The quantity of sieved sample stored in the container should be more than 8 kg.



**Photo 9 Sieving**

#### **4.5 Measurement of maximum cone penetrating force (Step 2)**

The procedures described in this paragraph are repeated three times for a sieved sample.

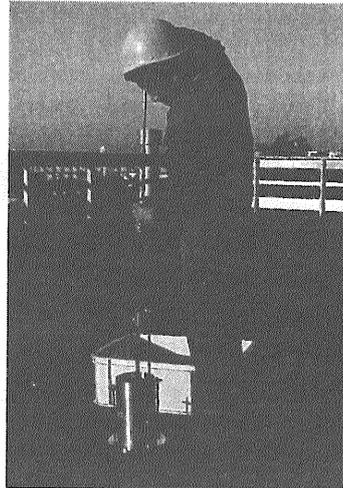
##### **4.5.1 Forming specimen in the mould (Step 2.1)**

Prior to cone penetration test, the specimen is formed in the mould by the following sub-steps:

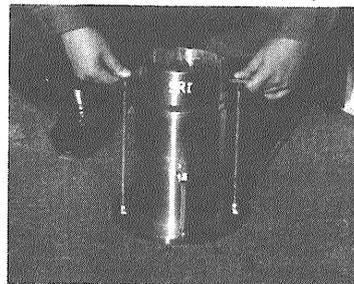
- .1 The mould is assembled by connecting the bottom plate, the cylinder and the collar, properly (see photo 4);
- .2 The sieved sample is filled and tamped in the mould being divided into five layers. Approximately one fifth of the whole sieved sample to be filled in the mould is inserted into the mould and the increment is tamped uniformly over the surface of the increment. Tamping is executed by dropping the hammer 60 times through the guide, 0.45 m each time, for each increment (see photo 10). The dropping height, 0.45 m, is achieved by pulling up the handle of hammer to the end of the guide and releasing the handle while the bottom of the guide is put on the surface of the sieved sample. The performance is repeated for all five layers, respectively; and
- .3 When the last layer has been tamped, insert a suitable flat bar or the straight edge between the sieved sample and the collar of the mould and move the flat bar along inside the collar, to separate the sieved sample from the collar. After separating the sieved sample from the collar, the collar is removed (see photo 11). Then the sieved sample is leveled off along the

brim of the mould using the straight edge (see photo 12), to adjust the volume of specimen. Removed sieved sample is put back in the container for the sieved sample.

The quantity of each increment, that is the sieved sample for each layer, is around 1.6 kg. To control the total amount of sieved sample inserted in the mould, it is recommended to fill the sieved sample along the brim of collar by pushing the sieved sample manually without tamping, at the insertion of the sieved sample for the last (5th) layer.



**Photo 10 Tamping (compaction)**



**Photo 11 Removal of the collar of the mould**



**Photo 12 Leveling off the sample**

##### **4.5.2 Cone penetration test (Step 2.2)**

Two persons are needed for cone penetration test. One person (the tester) penetrates the cone into the specimen and the other person observes the penetration depth and notice the penetration depth to

the tester. The maximum cone penetrating force is measured by the following sub-steps.

- .1 The tip of the cone is set on the surface of the specimen approximately at the center;
- .2 The cone is penetrated into the specimen vertically at the speed of 1 cm per second until the penetration depth reaches to 15 cm (see photo 13); and
- .3 The maximum cone penetrating force during the operation of the cone-penetrometer is read and recorded.

In order to control the speed of penetration as accurate as practical, it is recommended to count the seconds from "one" to "fifteen" during the penetration. It is also recommended to fix the arms to the body and push the cone-penetrometer by utilizing the weight of the tester, during the penetration, in order to reduce the fluctuation of speed of penetration.

When the cone-penetrometer does not have the function for indicating the maximum cone penetrating force, the tester should observe cone penetrating force continuously and read the maximum value.



Photo 13 Cone penetration test

#### 4.5.3 Removal of sieved sample from the mould (Step 2.3)

After the cone penetration test, the sieved sample forming specimen is put back in the container for sieved sample and the apparatus are cleaned by the following sub-steps:

- .1 The mould with specimen is dismantled into two parts, that are the cylinder and the bottom plate;
- .2 The sieved sample in the cylinder is removed by using the sample removing apparatus (see photo 14) and put back in the container;
- .3 The residual sieved sample on the bottom plate is also put back in the container; and

- .4 The cone and rod of the cone-penetrometer and all parts of the mould are cleaned and water on them is wiped.

The sieved sample removed from the mould can be used for the repeated test procedures in step 2 after divided into small lumps and mixed with the other sieved samples.



Photo 14 Removing the sample from the mould

#### 5 Judgment (Step 3)

After the maximum cone penetrating forces are measured three times for a sieved sample, the minimum value of the three lowest cone penetrating forces is selected as the representative cone penetrating force.

In the case that the representative cone penetrating force is less than 300 N, that is 30.6 kgf, it is judged that the shear strength of the original sample is not enough to prevent sliding failure during voyage.

The shortage of shear strength of original sample means that the original sample contains too much moisture to be accepted for loading. In other words, the shortage of shear strength of original sample means that sliding failure of the cargo pile may take place during voyage when moisture content of a certain proportion of the cargo is equal to or more than the moisture content of the original sample.

#### 付録 B 篩い分けの必要性に関する調査・検討

##### 1 調査・検討の概要

何トンものニッケル鉱のパイルに登って円錐貫入試験を実施することにより、パイル全体を一つの試料として荷崩れの危険性を評価できれば、大量の貨物を試料として用いることになるため、代表試料の抽出の問題を回避できる可能性がある。一方、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法は、粒径分布その他の鉱石の性状によらずに適用できなければならない。よって、ニッケル鉱のパイ

ル上での円錐貫入試験を荷崩れ危険性評価試験法として採用できるか否かは、複数回の円錐貫入試験により得られる最大円錐貫入力データを適切に処理することにより、即ち、代表円錐貫入力を適切に定義することにより、試料によらない代表円錐貫入力のクライテリアを設定できるか否かによると言える。そのため、Pomalaa 鉱及び Boakaine 鉱について、ニッケル鉱の揚荷役現場で、数トンの試料を用意し、その水分値を調製しつつ、試料のパイル上で繰り返し円錐貫入試験を実施し、貨物のパイル上での評価試験方法の開発の可能性について調査・検討した。

基本的には、試料のパイル上での円錐貫入試験結果に基づき、別途決定される水分値の上限に対応する最大円錐貫入力の代表値を求め、試料によらないクライテリアが設定できるか否かを検討すれば良い。しかし、揚荷役現場での試験において予め準備された Boakaine 鉱の試料の水分値が高かったため、水分値の上限に対応する円錐貫入試験結果は得られなかった。そのため、揚荷役現場において最大粒径を 19 mm に調製した試料を作成し、容器を用いずに試料を塊にして供試体を形成し円錐貫入試験を実施した結果と、篩い分けを行わずに試料のパイル上で実施した円錐貫入試験の関係に基づき、篩い分けの必要性を判断した。その結果、試料により、篩い分けを行わない場合と行った場合の最大円錐貫入力の代表値の関係が異なることが分かり、篩い分けが必要と判断したので、以下に報告する。

一方、揚荷役現場における試験のため各精錬所を訪問した結果、貨物全体の性質を代表させるための試料の抽出方法については、荷送り人及び荷受け人が多くの知見を有することが分かった。そのため、試料抽出の問題は、開発したニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の価値を損なうものでは無いと考えられる。

## 2 篩い分けを行わない円錐貫入試験結果

試料としては Pomalaa 鉱及び Boakaine 鉱を用いた。試料の粒径分布等については、本文 4.1 節を参照されたい。実験では、約 3 トンの試料を用意し、最初に最大粒径を 100 mm として水分値を計測するとともに、試料の採取量及び試料への加水量を管理し、また、最後にも水分値を計測した。Pomalaa 鉱及び Boakaine 鉱の試料重量及び水分値を表 B.1 及び表 B.2 に示す。表において、太字で示した数字は実測値、斜体で示した数字は計算値である。

表 B.1 Pomalaa 鉱の試料重量及び水分値  
(D < 100 mm)

試料重量 [kgf]	加水重量 [kgf]	採取重量 [kgf]	試料番号	水分値 [%]		
				*1	*2	平均
<b>3425.29</b>				<b>28.3</b>	<b>28.9</b>	<b>28.6</b>
<i>3400.74</i>		<b>24.55</b>	1	<i>28.3</i>	<i>28.9</i>	<i>28.6</i>
<i>3379.85</i>		<b>20.89</b>	1	<i>28.3</i>	<i>28.9</i>	<i>28.6</i>
<i>3395.28</i>	<b>15.43</b>			<i>28.6</i>	<i>29.2</i>	<i>28.9</i>
<i>3410.20</i>	<b>14.92</b>			<i>28.9</i>	<i>29.6</i>	<i>29.2</i>
<i>3385.56</i>		<b>24.64</b>	2	<i>28.9</i>	<i>29.6</i>	<i>29.2</i>
<i>3365.62</i>		<b>19.94</b>	2	<i>28.9</i>	<i>29.6</i>	<i>29.2</i>
<i>3380.24</i>	<b>14.62</b>			<i>29.2</i>	<i>29.9</i>	<i>29.6</i>
<i>3394.97</i>	<b>14.73</b>			<i>29.6</i>	<i>30.2</i>	<i>29.9</i>
<i>3375.87</i>		<b>19.10</b>	3	<i>29.6</i>	<i>30.2</i>	<i>29.9</i>
<i>3359.95</i>		<b>15.92</b>	3	<i>29.6</i>	<i>30.2</i>	<i>29.9</i>
<i>3374.67</i>	<b>14.72</b>			<i>29.9</i>	<i>30.5</i>	<i>30.2</i>
<i>3389.99</i>	<b>15.32</b>			<i>30.2</i>	<i>30.8</i>	<i>30.5</i>
<i>3369.57</i>		<b>20.42</b>	4	<i>30.2</i>	<i>30.8</i>	<i>30.5</i>
<i>3348.60</i>		<b>20.97</b>	4	<i>30.2</i>	<i>30.8</i>	<i>30.5</i>
<i>3363.46</i>	<b>14.86</b>			<i>30.5</i>	<i>31.1</i>	<i>30.8</i>
<i>3378.58</i>	<b>15.12</b>			<i>30.8</i>	<i>31.4</i>	<i>31.1</i>
<i>3356.86</i>		<b>21.72</b>	5	<i>30.8</i>	<i>31.4</i>	<i>31.1</i>
<i>3338.00</i>		<b>18.86</b>	5	<i>30.8</i>	<i>31.4</i>	<i>31.1</i>
<i>3352.75</i>	<b>14.75</b>			<i>31.1</i>	<i>31.7</i>	<i>31.4</i>
<i>3367.51</i>	<b>14.76</b>			<i>31.4</i>	<i>32.0</i>	<i>31.7</i>

表 B.2 Boakaine 鉱の試料重量及び水分値  
(D < 100 mm)

試料重量 [kg]	加水重量 [kg]	採取重量 [kg]	試料番号	水分値 [%]		
				*1	*2	平均
<b>3236.11</b>				<b>22.2</b>	<b>22.9</b>	<b>22.6</b>
<i>3214.67</i>		<b>21.44</b>	1	<i>22.2</i>	<i>22.9</i>	<i>22.6</i>
<i>3192.52</i>		<b>22.15</b>	1	<i>22.2</i>	<i>22.9</i>	<i>22.6</i>
<i>3203.47</i>	<b>10.95</b>			<i>22.5</i>	<i>23.2</i>	<i>22.9</i>
<i>3209.31</i>	<b>5.84</b>			<i>22.6</i>	<i>23.3</i>	<i>23.0</i>
<i>3186.82</i>		<b>22.49</b>	2	<i>22.6</i>	<i>23.3</i>	<i>23.0</i>
<i>3165.98</i>		<b>20.84</b>	2	<i>22.6</i>	<i>23.3</i>	<i>23.0</i>
<i>3176.25</i>	<b>10.27</b>			<i>22.9</i>	<i>23.6</i>	<i>23.2</i>
<i>3182.46</i>	<b>6.21</b>			<i>23.0</i>	<i>23.7</i>	<i>23.4</i>
<i>3160.40</i>		<b>22.06</b>	3	<i>23.0</i>	<i>23.7</i>	<i>23.4</i>
<i>3138.77</i>		<b>21.63</b>	3	<i>23.0</i>	<i>23.7</i>	<i>23.4</i>
<i>3148.61</i>	<b>9.84</b>			<i>23.3</i>	<i>24.0</i>	<i>23.6</i>
<i>3156.11</i>	<b>7.50</b>			<i>23.5</i>	<i>24.2</i>	<i>23.8</i>
<i>3135.92</i>		<b>20.19</b>	4	<i>23.5</i>	<i>24.2</i>	<i>23.8</i>
<i>3116.02</i>		<b>19.90</b>	4	<i>23.5</i>	<i>24.2</i>	<i>23.8</i>

\*1: 円錐貫入試験前に計測した水分値及びそれに基づいて計算した水分値

\*2: 円錐貫入試験後に計測した水分値及びそれに基づいて計算した水分値

以下、試料の水分値は、表の右の欄に示した平均水分値で代表させることとする。

篩い分けを行わずに試料のパイルに登って円錐貫入試験を実施した。円錐貫入試験における円錐貫入速度及び深さは、ニッケル鉱荷崩れ危険性

評価試験法と同じである。試験において使用した装置の円錐貫入力の測定範囲が 50 kgf であったため、円錐貫入力が 50 kgf を超えたものは"over"として記録した。試料調製の際にはショベル等による締固めを行わず、円錐貫入試験を実施する箇所について、質量 10 kg、底面の直径 10 cm の鋼製の円筒（把手付き）を同一地点に高さ約 30 cm から 10 回落とすことにより締固めを実施した。円錐貫入試験は、各試料各水分値について 30 回実施した。試験結果を表 B.3 及び表 B.4 に示す。表に示した最大円錐貫入力は、小さいほうから順に並べたものである。

表に示したデータの代表値としては、最小値を用いる方法及び小さい方のデータの平均値を用いる方法が考えられる。30 データのうち、最小値及び小さい方から 3 (全データの 1/10)、6 (1/5)、10 (1/3)、15 (1/2) データの平均値を表 B.5 及び表 B.6 に示す。

表 B.3 Pomalaa 鈹円錐貫入試験結果

試料番号	1	2	3	4	5
水分値	28.6	29.2	29.9	30.5	31.1
番号	最大円錐貫入力 [kgf]				
1	33.3	24.3	21.4	17.4	16.0
2	34.0	26.7	22.1	18.8	16.2
3	35.7	29.3	24.3	21.9	17.4
4	36.7	30.7	24.3	22.4	17.9
5	37.9	31.4	25.7	23.3	18.1
6	38.1	31.9	26.2	24.3	18.3
7	40.5	32.9	27.4	24.5	18.6
8	40.5	33.1	28.6	25.7	18.8
9	41.2	33.8	28.8	25.7	20.0
10	41.2	35.2	29.0	26.0	20.5
11	42.6	36.2	30.0	26.2	20.5
12	43.1	36.4	31.9	26.7	20.7
13	45.2	37.4	32.9	27.9	21.2
14	45.7	38.8	33.3	28.6	21.2
15	46.4	39.3	33.3	28.6	21.4
16	46.7	40.5	35.2	29.8	22.6
17	47.1	41.2	38.6	29.8	23.3
18	47.1	42.4	45.7	30.5	24.0
19	47.9	42.9	47.6	30.5	25.0
20	49.5	42.9	47.6	31.4	27.1
21	over	43.8	48.3	32.9	29.3
22	over	45.2	over	32.9	29.3
23	over	45.7	over	33.3	36.2
24	over	47.1	over	39.0	38.6
25	over	48.1	over	40.5	48.8
26	over	over	over	over	over
27	over	over	over	over	over
28	over	over	over	over	over
29	over	over	over	over	over
30	over	over	over	over	over

表 B.4 Boakaine 鈹円錐貫入試験結果

試料番号	1	2	3	4
水分値	22.6	23.0	23.4	23.8
番号	最大円錐貫入力 [kgf]			
1	17.9	15.7	11.2	8.6
2	18.8	16.2	12.4	9.3
3	21.0	16.7	13.1	10.0
4	21.2	18.1	13.6	11.7
5	21.4	18.6	14.8	11.9
6	23.8	21.0	16.2	12.4
7	23.8	21.9	17.1	12.4
8	24.3	22.1	17.1	13.8
9	25.2	22.1	17.4	15.5
10	25.7	22.1	17.6	15.7
11	26.2	23.1	19.0	18.3
12	26.4	23.3	22.1	18.8
13	28.6	23.6	26.2	20.5
14	29.0	23.8	26.2	20.5
15	30.0	24.3	31.0	21.0
16	32.1	26.9	44.0	21.9
17	33.3	28.1	over	22.1
18	33.3	31.0	over	22.1
19	36.2	35.0	over	24.3
20	37.9	35.0	over	27.9
21	38.1	36.2	over	28.6
22	39.8	41.9	over	34.5
23	41.7	44.0	over	40.5
24	45.2	47.6	over	48.1
25	over	over	over	over
26	over	over	over	over
27	over	over	over	over
28	over	over	over	over
29	over	over	over	over
30	over	over	over	over

表 B.5 最大円錐貫入力の代表値 - Pomalaa (単位: kgf)

水分値 [%]	28.6	29.2	29.9	30.5	31.1	
Minimum	33.3	24.3	21.4	17.4	16.0	
平均値	3/30 data	34.3	26.8	22.6	19.4	16.5
	6/30 data	36.0	29.1	24.0	21.4	17.3
	10/30 data	37.9	30.9	25.8	23.0	18.2
	15/30 data	40.1	33.2	27.9	24.5	19.1

表 B.6 最大円錐貫入力の代表値 - Boakaine (単位: kgf)

水分値 [%]	22.6	23.0	23.4	23.8	
Minimum	17.9	15.7	11.2	8.6	
平均値	3/30 data	19.2	16.2	12.2	9.3
	6/30 data	20.7	17.7	13.6	10.7
	10/30 data	22.3	19.5	15.1	12.1
	15/30 data	24.2	20.8	18.3	14.7

3 最大粒径を 19 mm に調製した円錐貫入試験結果

揚荷役現場における試験においては、その場で試料を抽出し、最大粒径が 19 mm となるように篩い分けを行い、容器を用いずに試料を固めることにより供試体を形成し、円錐貫入試験を実施し

た。試料は、表 B.1 及び表 B.2 の「試料番号」に示した各状態において抽出し、篩い分けしたものをを用いた。水分計測の結果を表 B.7 に示す。

表 B.7 最大粒径 19 mm 試料の水分値

Pomalaa		Boakaine	
試料番号	水分値 [%]	試料番号	水分値 [%]
1	31.4	1	26.5
2	31.2	2	27.0
3	32.1	3	27.4
4	32.3	4	27.6
5	32.7		

円錐貫入試験は、一つの供試体について 7 回行った。結果を表 B.8 及び表 B.9 に示す。

表 B.8 最大粒径 19 mm 試料に関する円錐貫入試験結果 - Pomalaa

試料番号	1	2	3	4	5
水分値	31.4	31.2	32.1	32.3	32.7
試験番号	最大円錐貫入力 [kgf]				
1	over	33.1	28.8	20.7	23.3
2	40.5	33.8	24.0	19.5	17.1
3	36.9	34.3	30.0	22.1	14.8
4	39.3	35.2	24.8	20.0	17.4
5	失敗	32.4	28.1	20.5	16.9
6	42.9	36.9	23.3	20.7	18.3
7	35.7	34.8	26.7	20.0	17.6
平均	39.0	34.4	26.5	20.5	17.9

表 B.9 最大粒径 19 mm 試料に関する円錐貫入試験結果 - Boakaine

試料番号	1	2	3	4
水分値	26.5	27.0	27.4	27.6
試験番号	最大円錐貫入力 [kgf]			
1	16.2	10.2	9.0	8.3
2	13.8	11.4	9.3	7.6
3	15.0	15.5	9.0	10.5
4	13.6	11.4	11.2	10.2
5	14.3	11.2	9.0	10.7
6	15.2	11.9	9.0	8.3
7	12.4	10.5	10.0	8.8
平均	14.4	11.7	9.5	9.2

篩い分けを行わない試料の場合と比較すれば、最大円錐貫入力のバラツキは小さいため、試験結果は最大円錐貫入力の平均値で代表させる。但し、Pomalaa 鉞に関する実験のうち、水分値が最も低い状態では、円錐貫入力が"over"を示したデータ及び途中で供試体が割れたため有意な最大円錐貫入力が計測できなかったデータが含まれているため、この試料については、残りの 5 データの平均値を実験結果の代表値とする。水分値と最大円錐貫入力の平均値の関係を図 B.1 及び図 B.2 に示す。

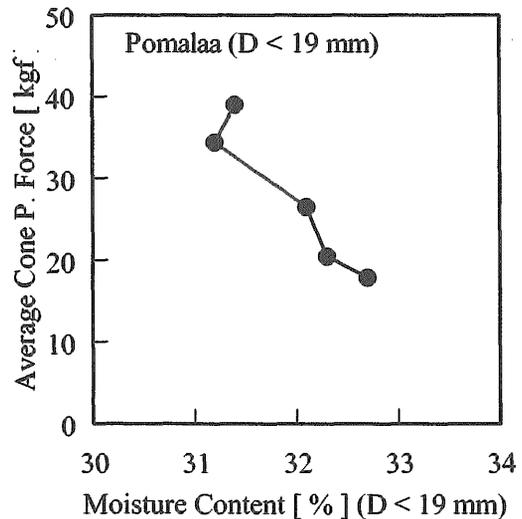


図 B.1 最大粒径 19 mm 試料に関する平均円錐貫入力 - Pomalaa

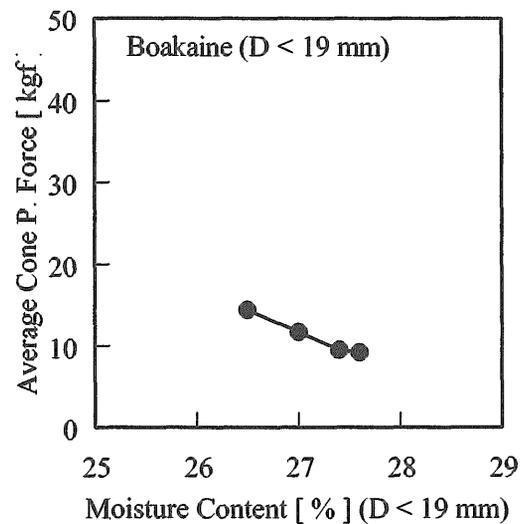


図 B.2 最大粒径 19 mm 試料に関する平均円錐貫入力 - Boakaine

4 篩い分けの有無と代表円錐貫入力

表 B.5 及び表 B.6 に示した篩い分けを行わない試料の円錐貫入力の代表値と、表 B.8 及び表 B.9 に示した最大粒径 19 mm の試料の平均円錐貫入力の関係を図 B.3 及び図 B.4 に示す。図の横軸は、最大粒径が 100 mm の場合の水分値であり、最大粒径 19 mm の試料については、試料を抽出した元の試料の水分値（対応する試料番号の水分値）に基づいてグラフを作成した。図中、記号の無い太線は最大粒径 19 mm の試料の平均円錐貫入力、記号付きのものが篩い分けを行わない試料の代表円錐貫入力であり、下から順に最小値、30 データのうち小さい方から 3、6、10、15 データの平均値である。

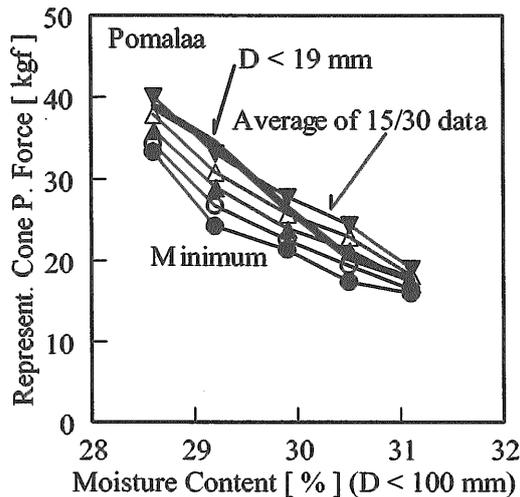


図 B.3 試料の最大粒径が円錐貫入力に及ぼす影響 - Pomalaa

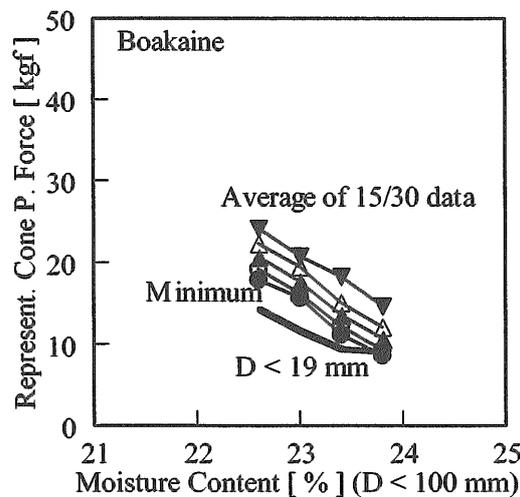


図 B.4 試料の最大粒径が円錐貫入力に及ぼす影響 - Boakaine

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。

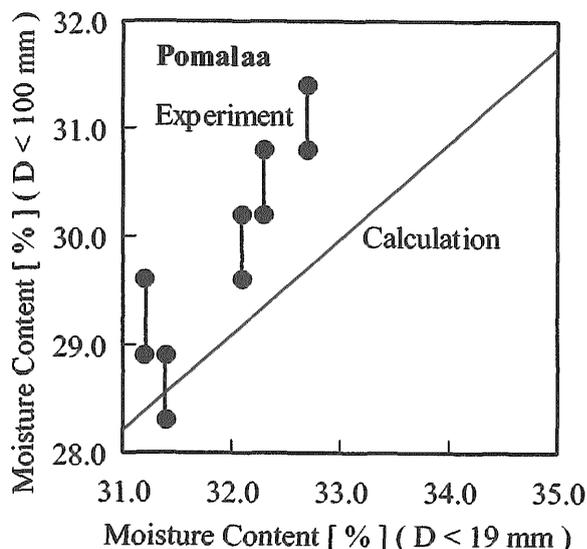


図 C.1 換算水分値と実験値の比較 - Pomalaa

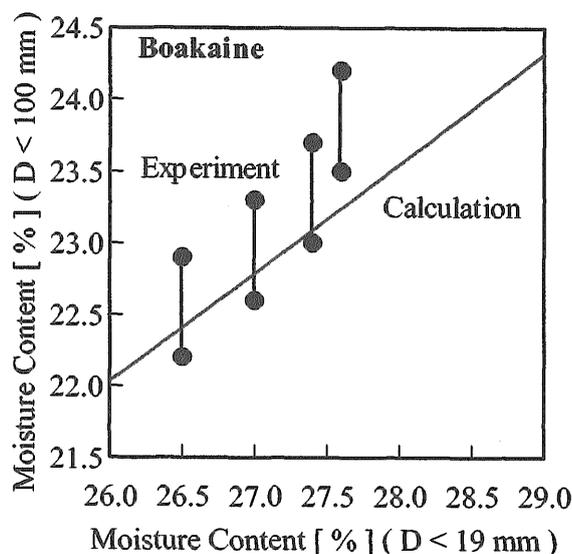


図 C.2 換算水分値と実験値の比較 - Boakaine

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。

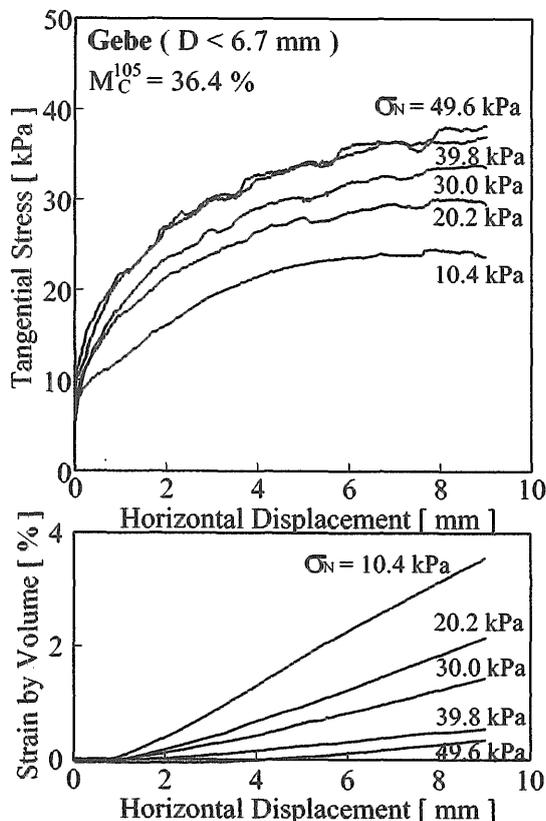


図 D.1 一面剪断試験結果の例

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。

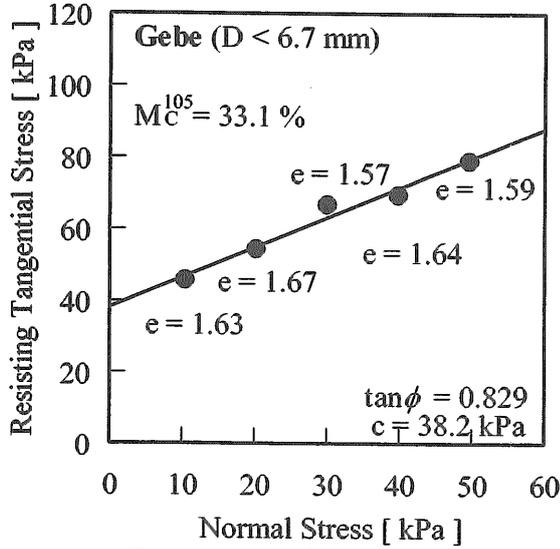


図 D.2 剪断強度 Gebe - 1

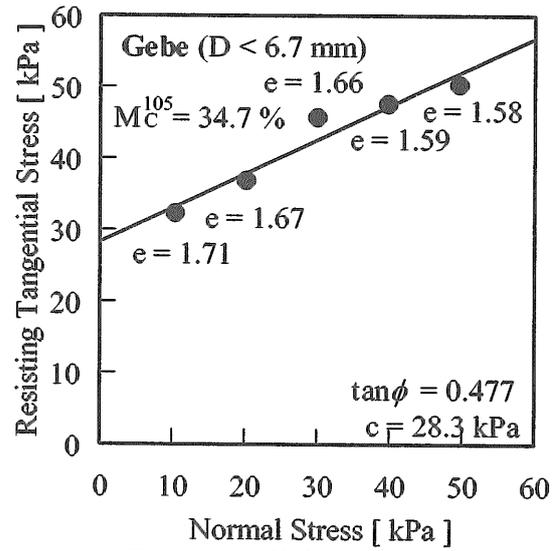


図 D.3 剪断強度 Gebe - 2

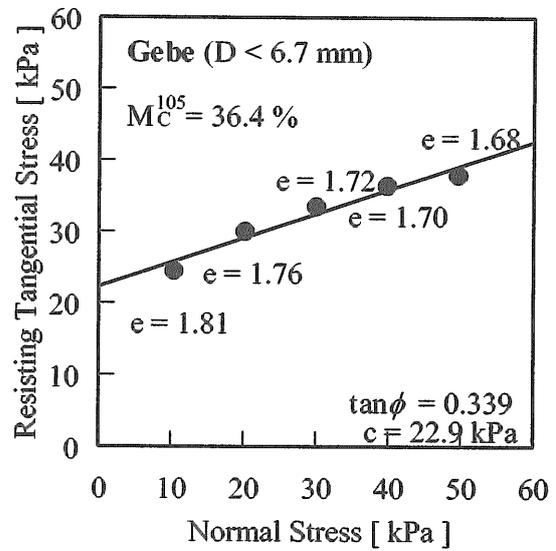


図 D.4 剪断強度 Gebe - 3

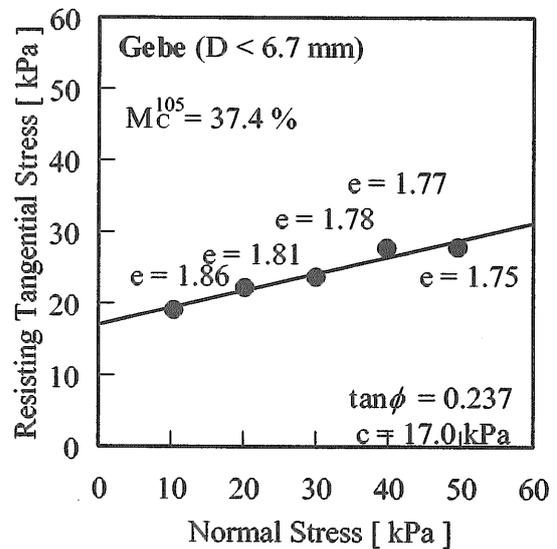


図 D.5 剪断強度 Gebe - 4

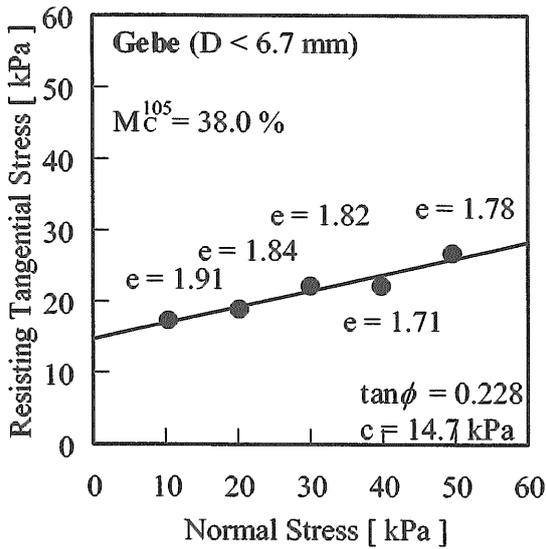


図 D.6 剪断強度 Gebe - 5

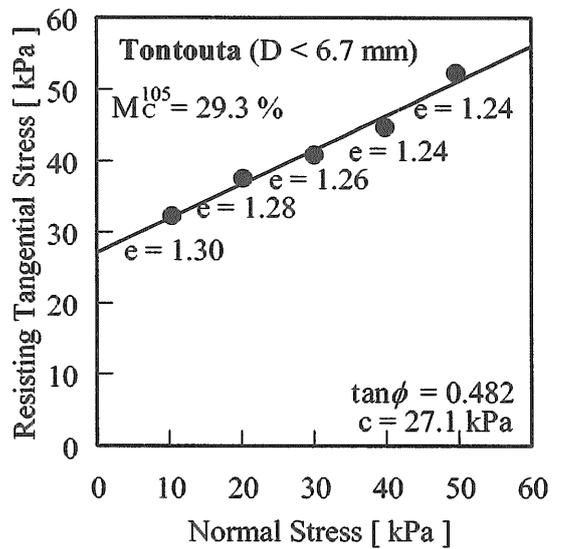


図 D.9 剪断強度 Tontouta - 2

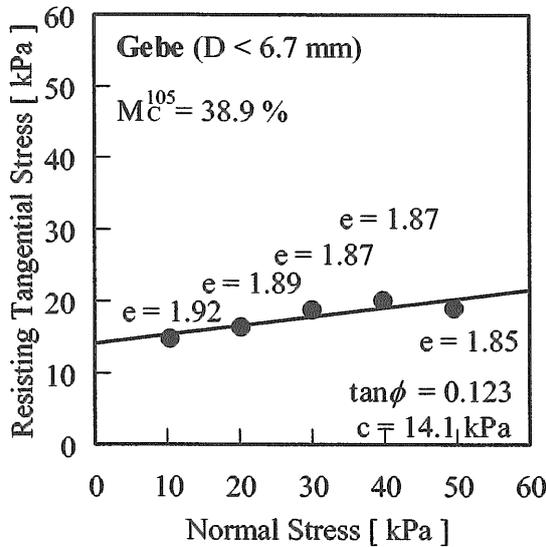


図 D.7 剪断強度 Gebe - 6

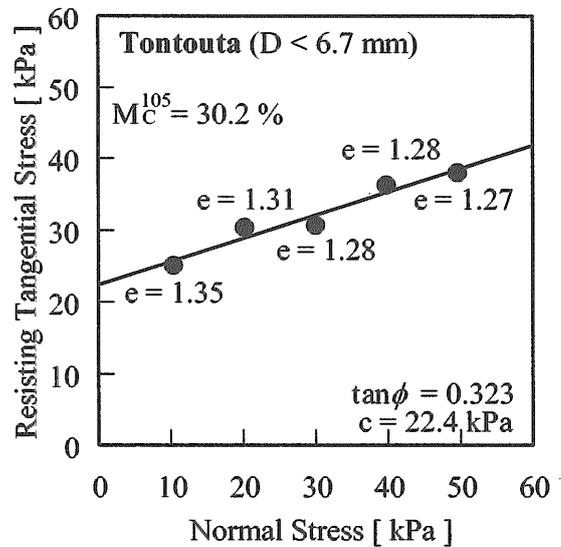


図 D.10 剪断強度 Tontouta - 3

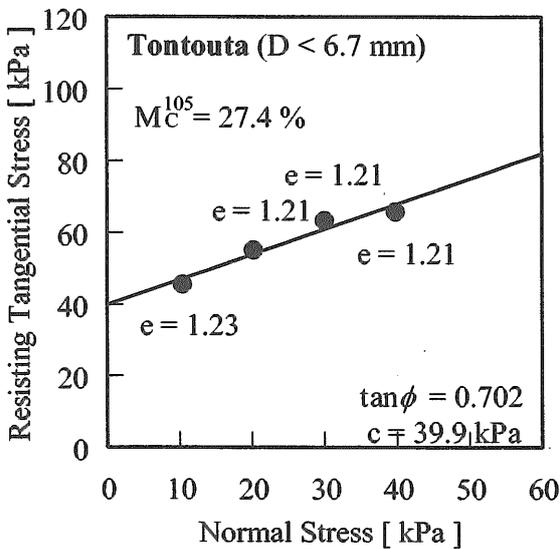


図 D.8 剪断強度 Tontouta - 1

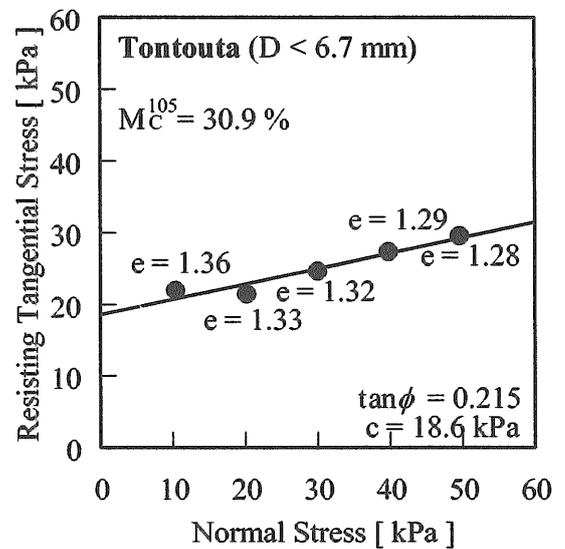


図 D.11 剪断強度 Tontouta - 4

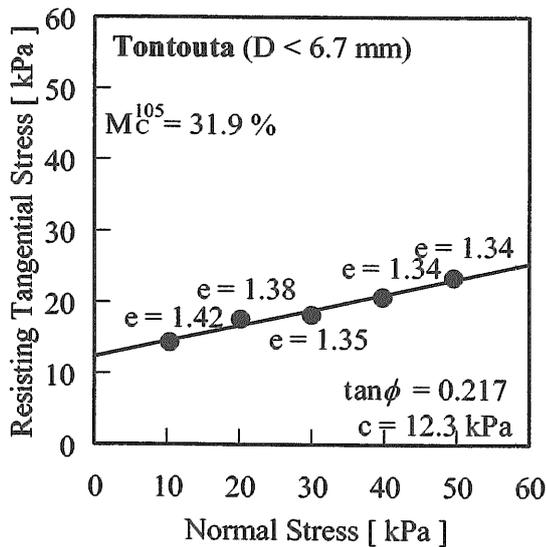


图 D.12 剪断强度 Tontouta - 5

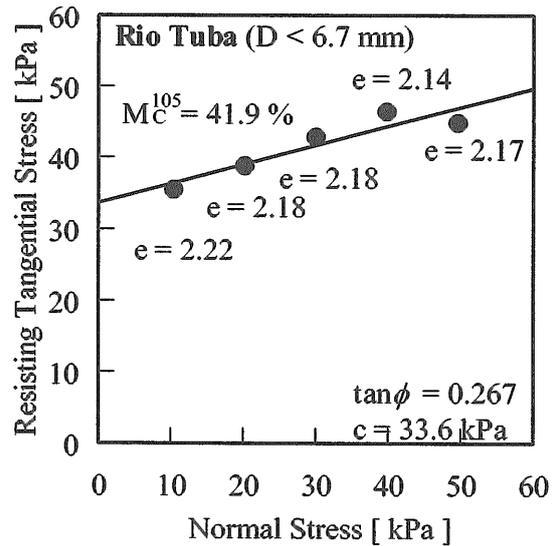


图 D.15 剪断强度 Rio Tuba - 2

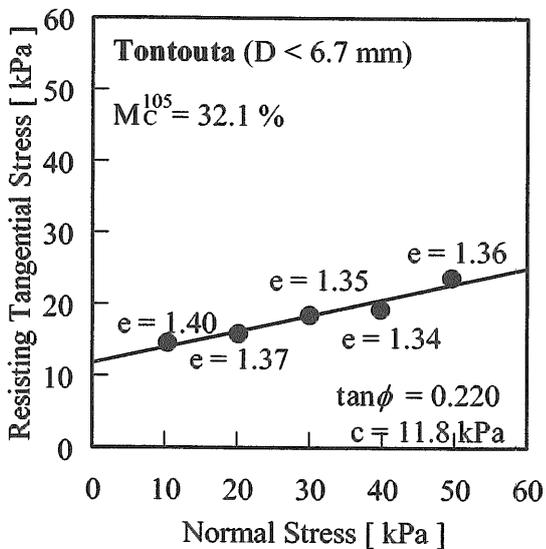


图 D.13 剪断强度 Tontouta - 6

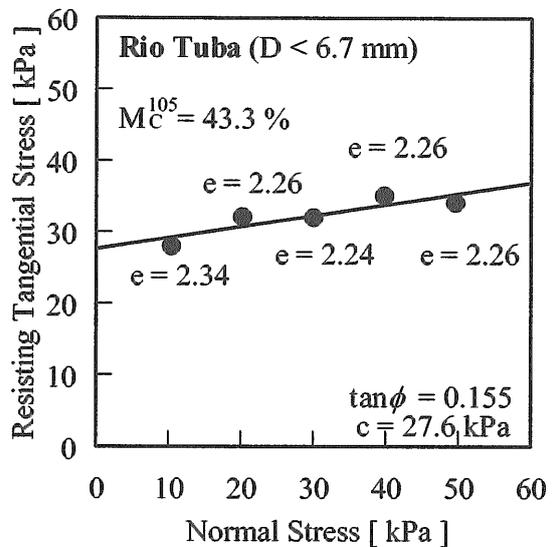


图 D.16 剪断强度 Rio Tuba - 3

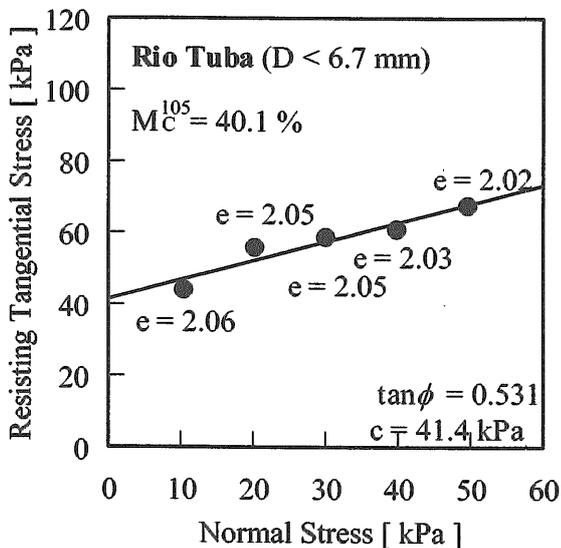


图 D.14 剪断强度 Rio Tuba - 1

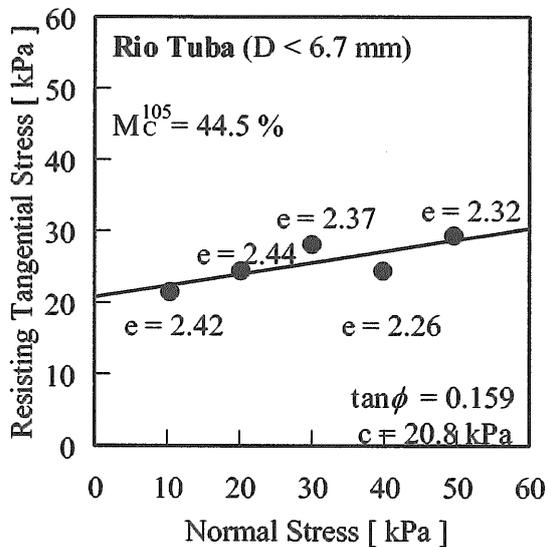


图 D.17 剪断强度 Rio Tuba - 4

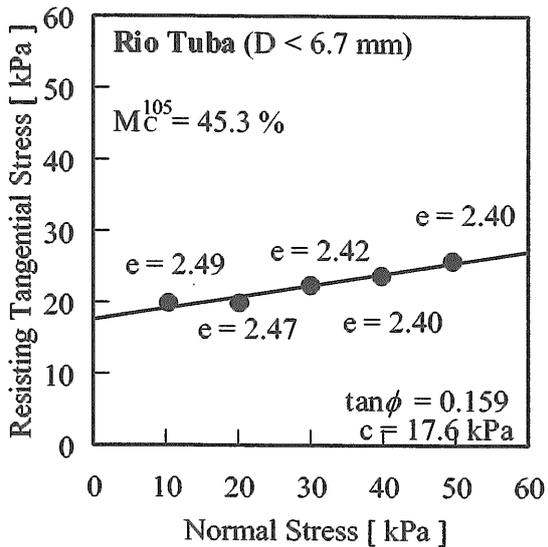


図 D.18 剪断強度 Rio Tuba - 5

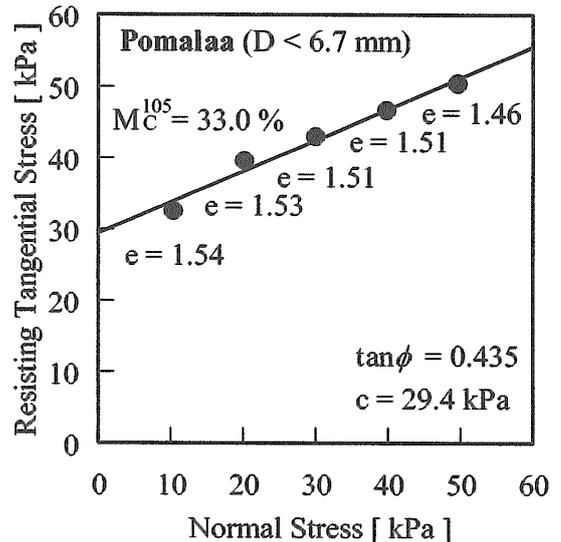


図 D.21 剪断強度 Pomalaa - 2

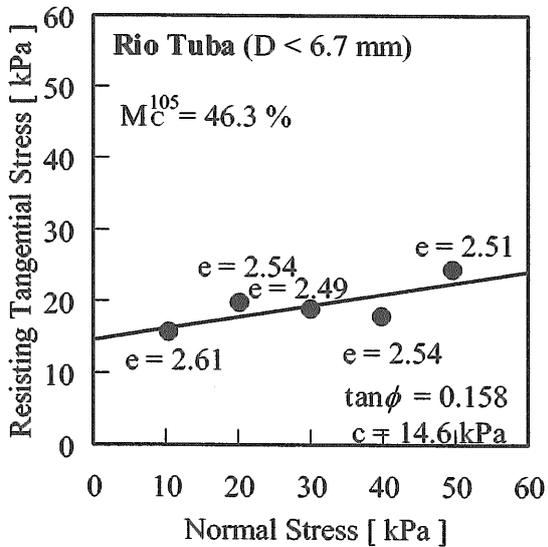


図 D.19 剪断強度 Rio Tuba - 6

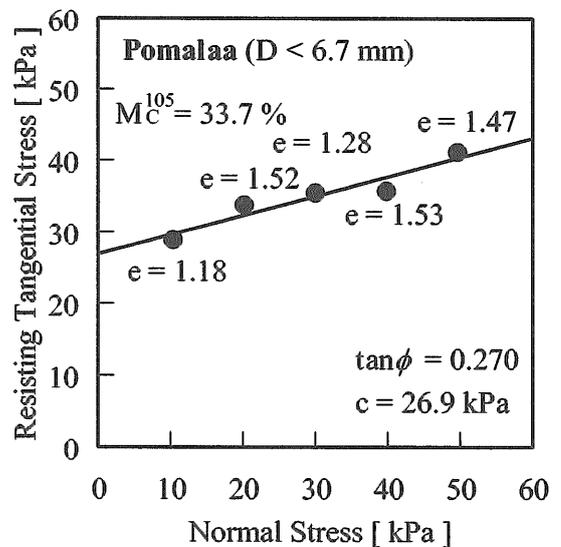


図 D.22 剪断強度 Pomalaa - 3

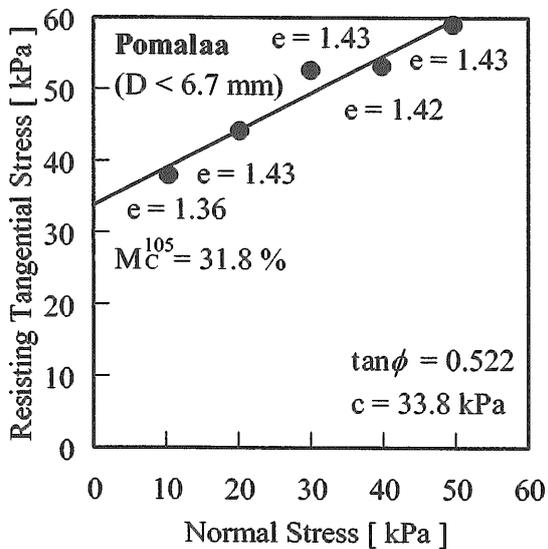


図 D.20 剪断強度 Pomalaa - 1

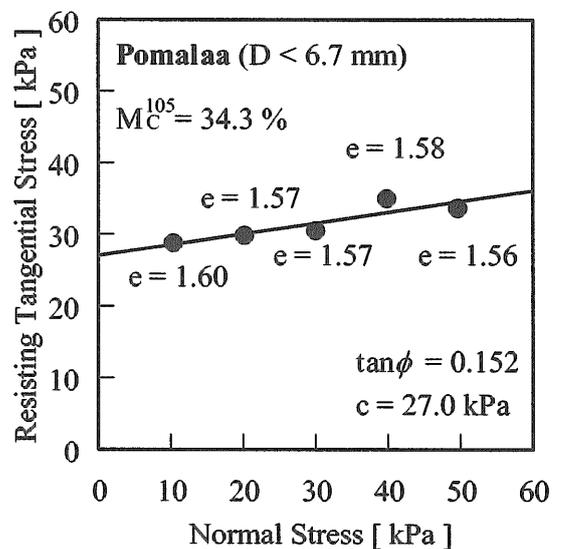


図 D.23 剪断強度 Pomalaa - 4

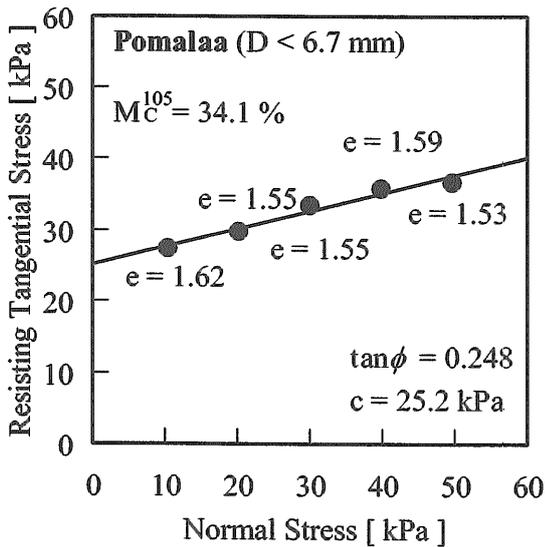


图 D.24 剪断强度 Pomalaa · 5

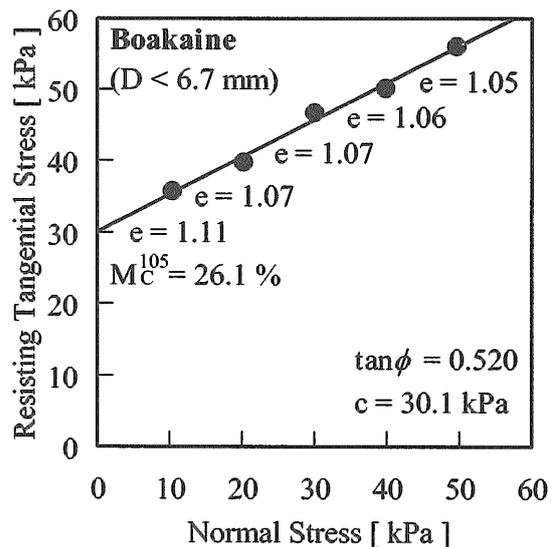


图 D.27 剪断强度 Boakaine · 2

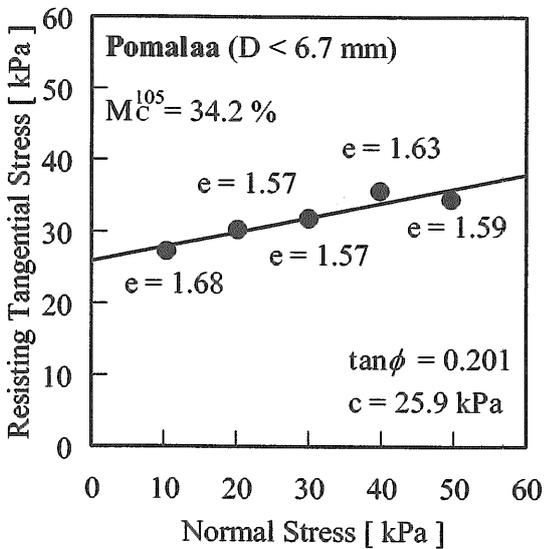


图 D.25 剪断强度 Pomalaa · 6

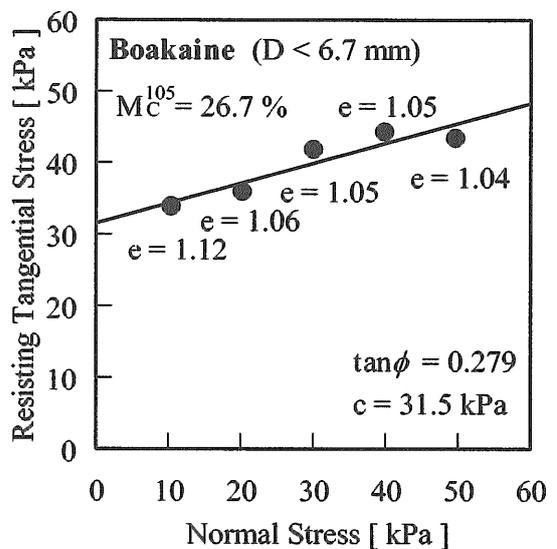


图 D.28 剪断强度 Boakaine · 3

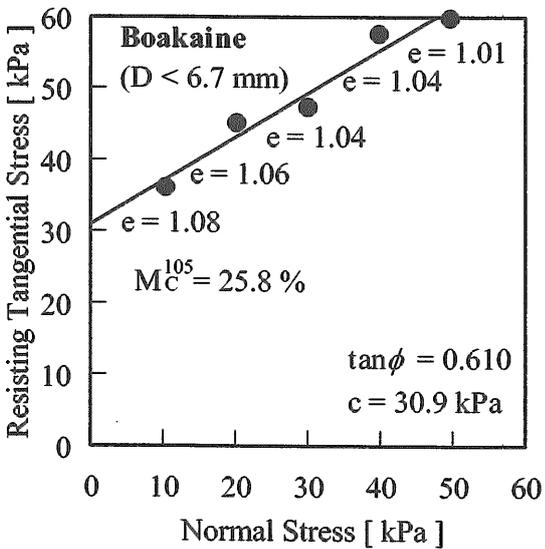


图 D.26 剪断强度 Boakaine · 1

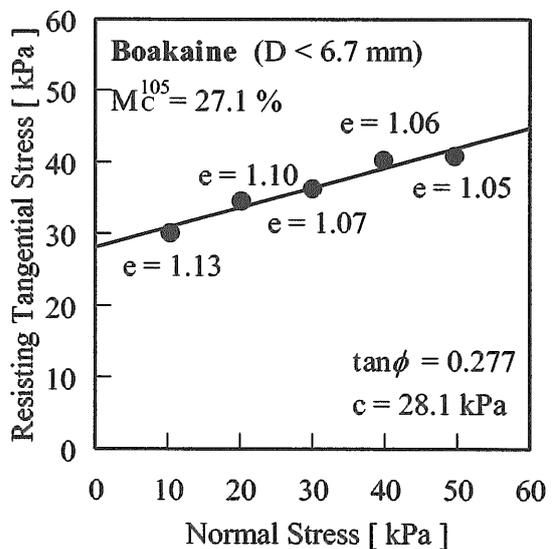


图 D.29 剪断强度 Boakaine · 4

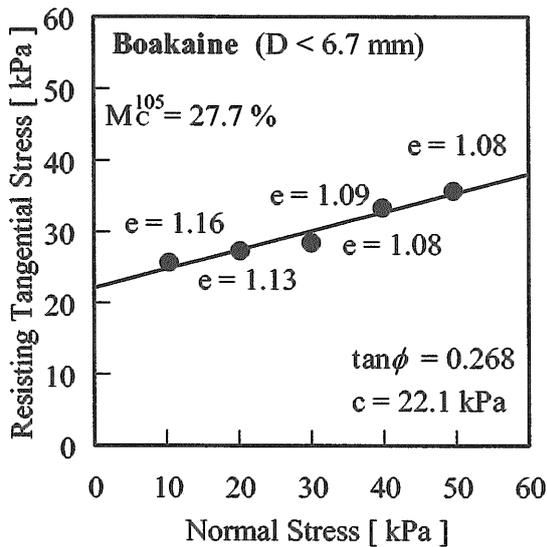


図 D.30 剪断強度 Boakaine - 5

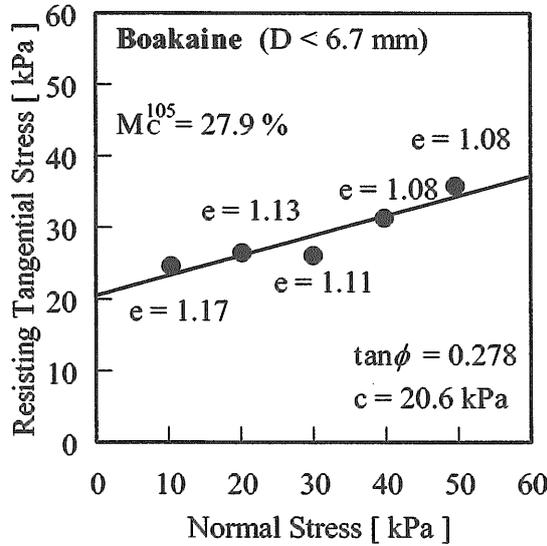


図 D.31 剪断強度 Boakaine - 6

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。

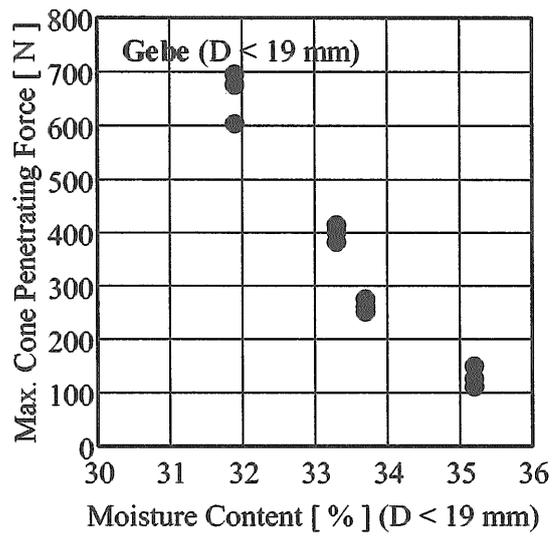


図 D.32 最大円錐貫入力 - Gebe

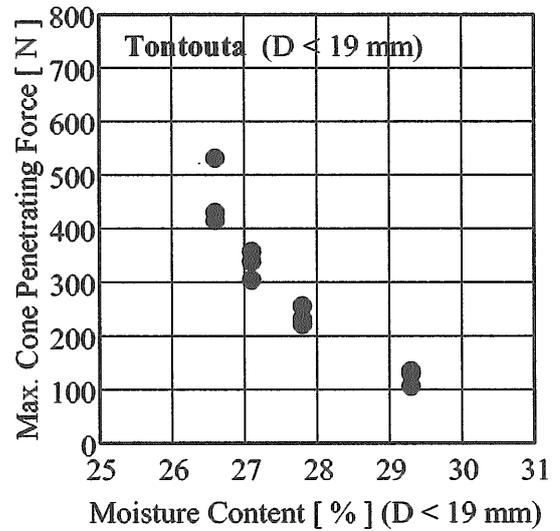


図 D.33 最大円錐貫入力 - Tontouta

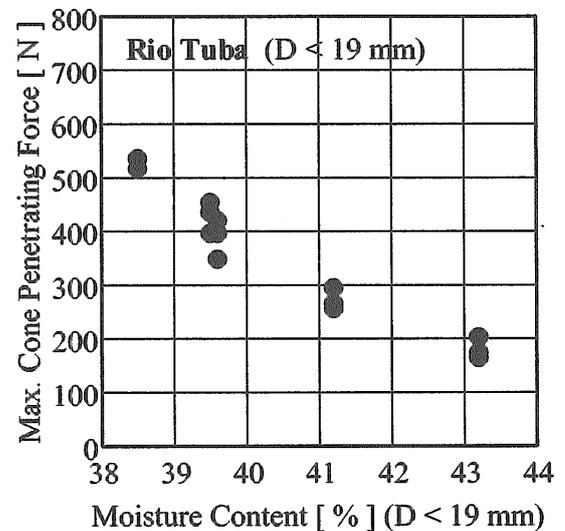


図 D.34 最大円錐貫入力 - Rio Tuba

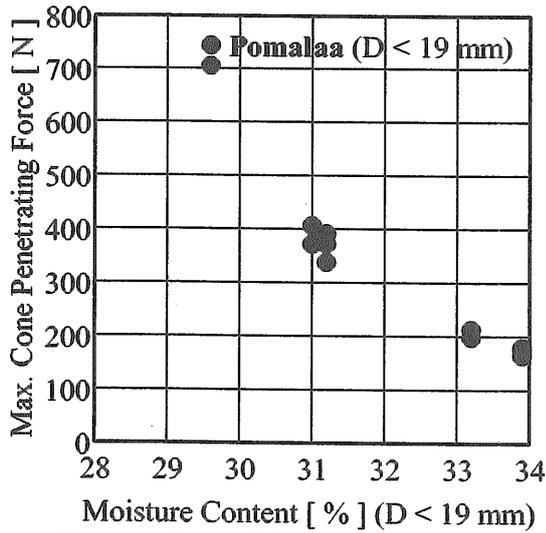


図 D.35 最大円錐貫入力 - Pomalaa

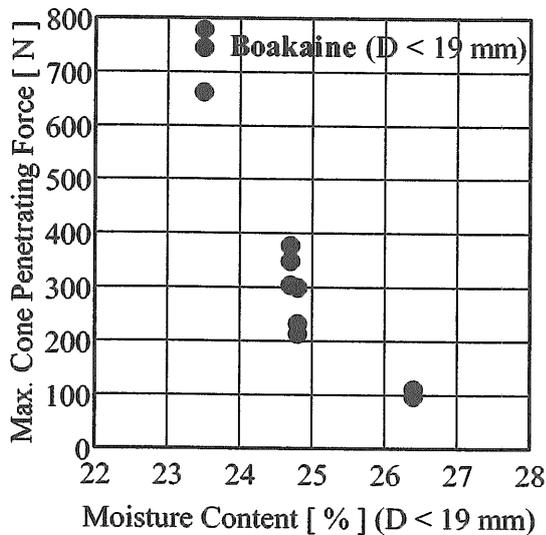


図 D.36 最大円錐貫入力 - Boakaine

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、いわゆる締め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。

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

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

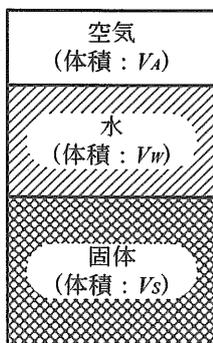


図 E.1 固体ばら積み物質の模式図

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。

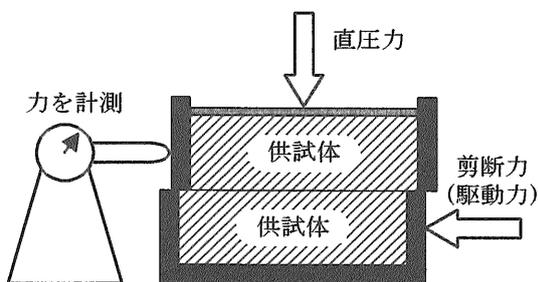


図 E.2 一面剪断試験の原理

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。

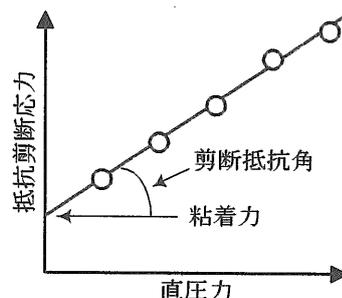


図 E.3 一面剪断試験結果

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。

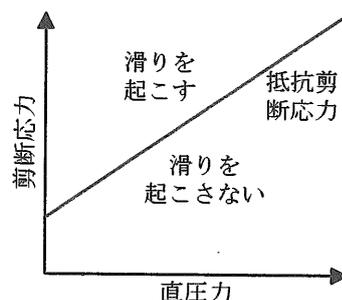


図 E.4 抵抗剪断応力と滑り

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。

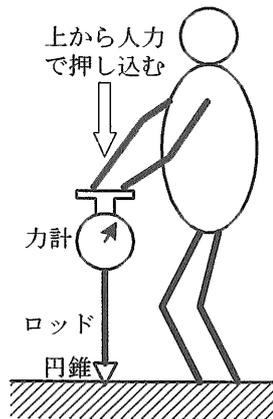


図 E.5 円錐貫入試験のイメージ

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。