

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⁽¹⁾。

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^{(2),(3)}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⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。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⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾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。

| 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、岸壁で舢舨に貨物を積み、曳船で舢舨をばら積み船の近くに配置し、船のグラブで舢舨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

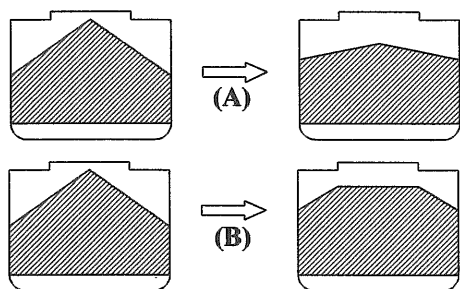


図 1.1 荷繰り方法

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、例えばこの試験により「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。

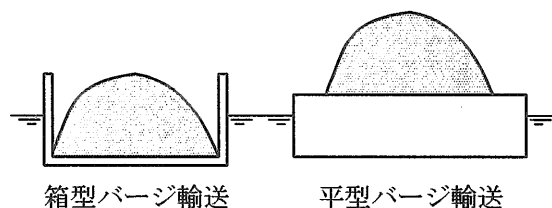


図 1.2 バージ上への貨物の積載

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

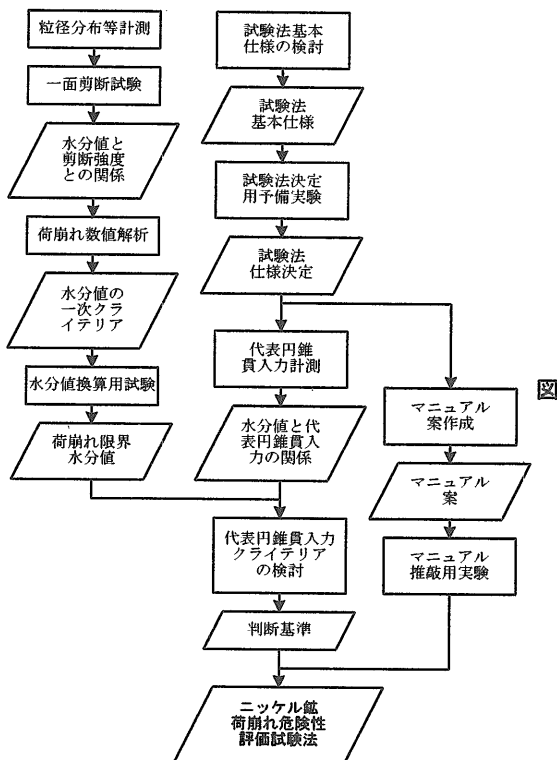
入力クライテリアの設定及び試験法マニュアルの整備に大別できる。

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られることにした。

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 cm³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。

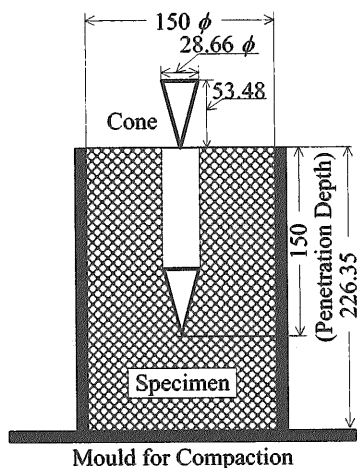


図 3.1 試験容器と円錐

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 ³] | 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 ³] | 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 cm²(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。

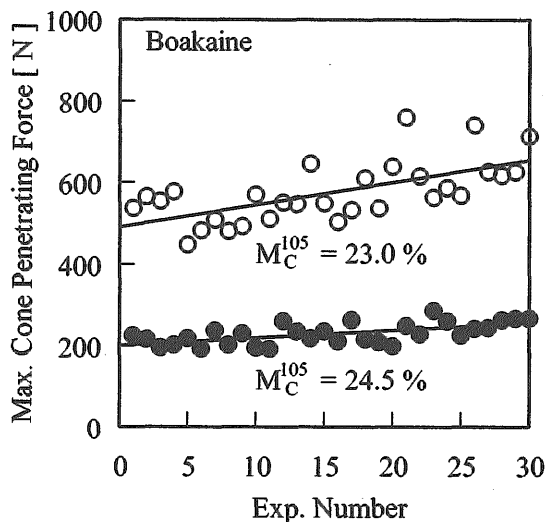


図 3.2 円錐貫入予備試験結果

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。

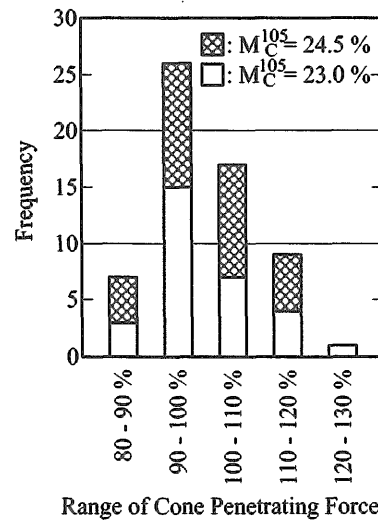


図 3.3 トレンド線に対する比率の度数分布

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。

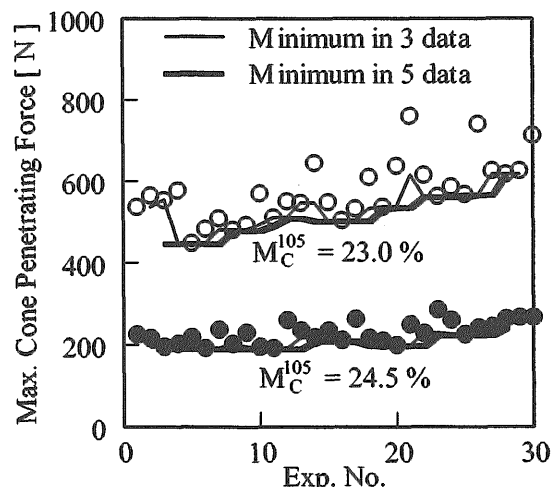


図 3.4 試験回数と最大円錐貫入力の最低値

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/m³)

| Ports of loading for nickel ore | Solid density |
|---------------------------------|------------------------|
| Gebe | 2.95 × 10 ³ |
| Tontouta | 2.85 × 10 ³ |
| Rio Tuba | 2.89 × 10 ³ |
| Pomalaa | 2.92 × 10 ³ |
| Boakaine | 2.79 × 10 ³ |

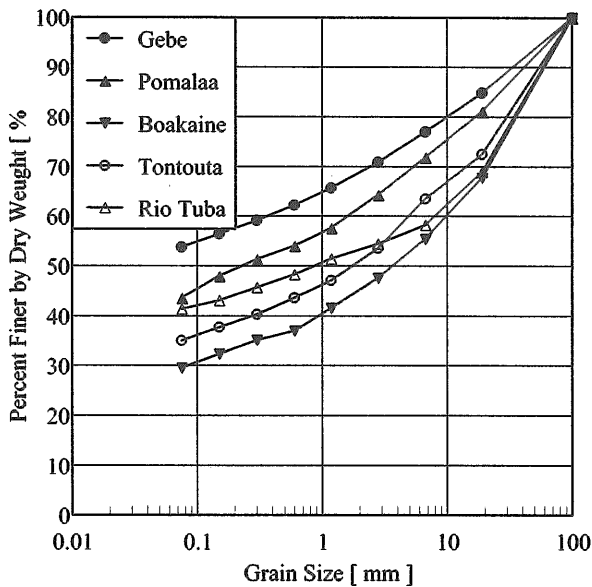


図 4.1 試料の粒径分布

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

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 |

試料の水分調製から実験までには、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。

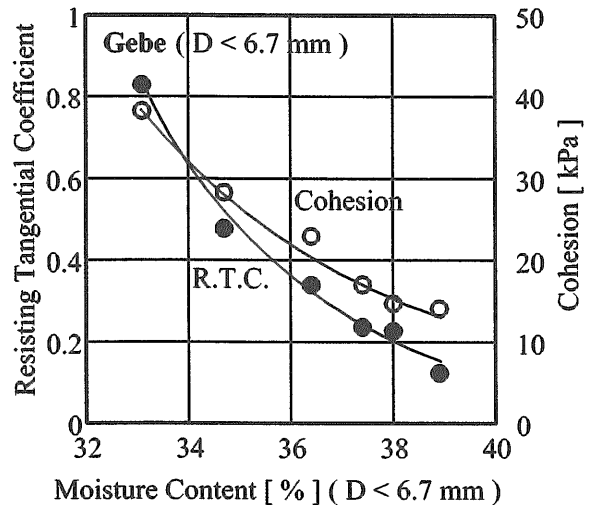


図 4.2 水分値と剪断強度の関係 - Gebe

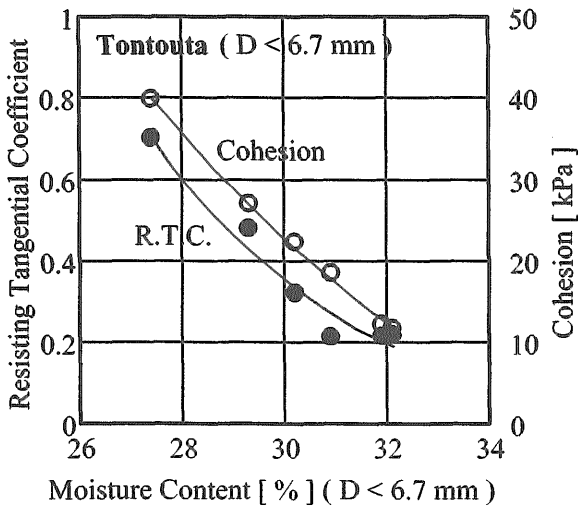


図 4.3 水分値と剪断強度の関係 - Tontouta

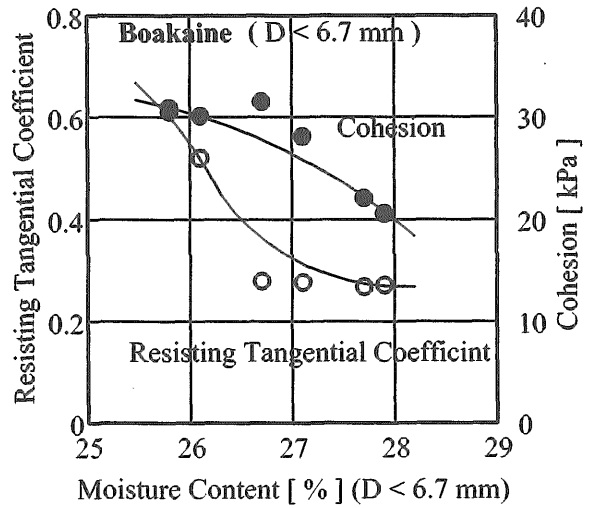


図 4.6 水分値と剪断強度の関係 - Boakaine

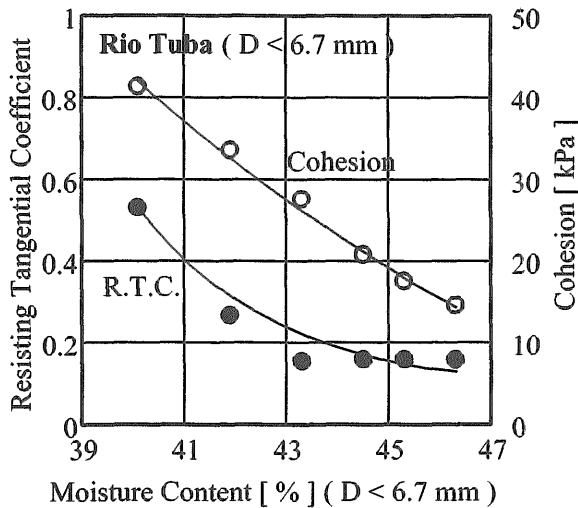


図 4.4 水分値と剪断強度の関係 - Rio Tuba

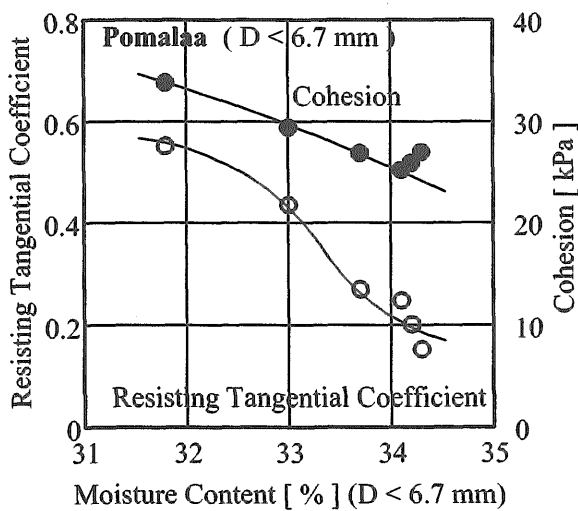


図 4.5 水分値と剪断強度の関係 - Pomalaa

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⁽⁸⁾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。

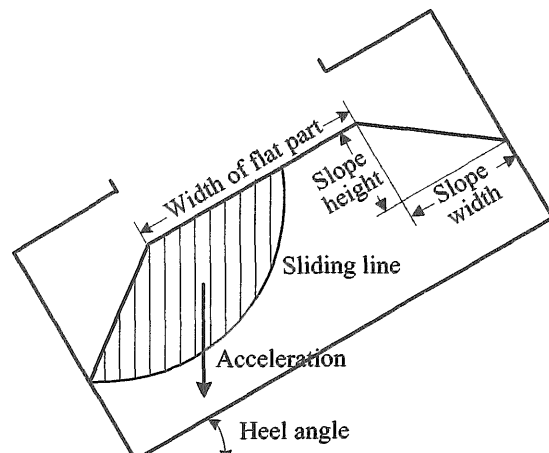


図 4.7 荷崩れ数値解析法

- (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 ³] |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Gebe | 1.69 × 10 ³ |
| Tontouta | 1.78 × 10 ³ |
| Rio Tuba | 1.55 × 10 ³ |
| Pomalaa | 1.75 × 10 ³ |
| Boakaine | 1.83 × 10 ³ |

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。

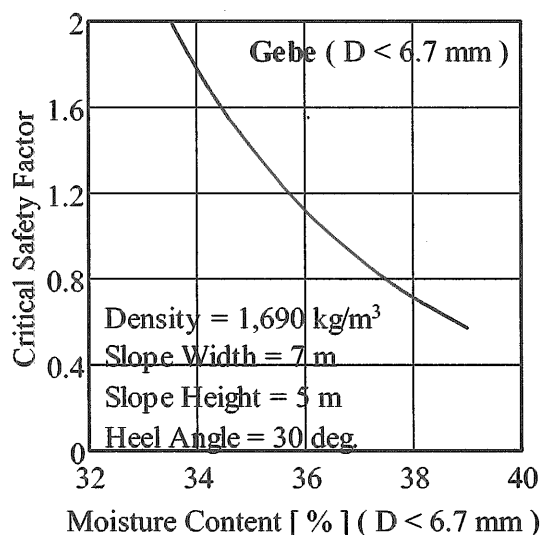


図 4.8 水分値と臨界安全率の関係 - Gebe

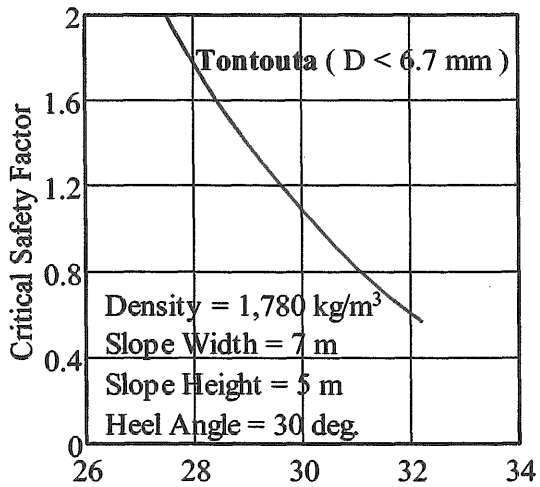


図 4.9 水分値と臨界安全率の関係 - Tontouta

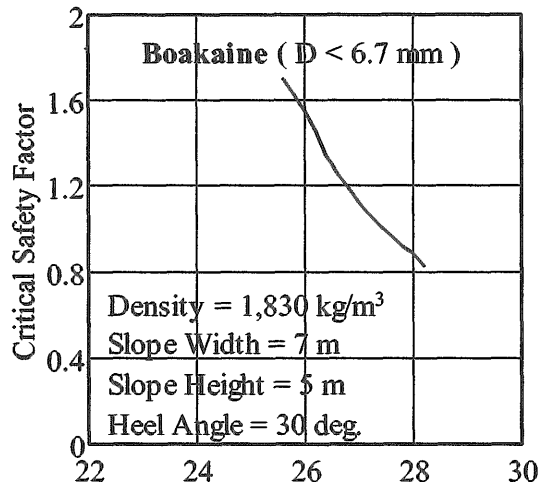


図 4.12 水分値と臨界安全率の関係 - Boakaine

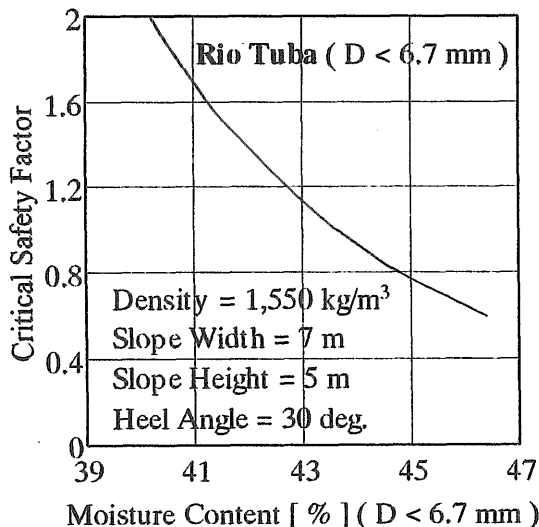


図 4.10 水分値と臨界安全率の関係 - Rio Tuba

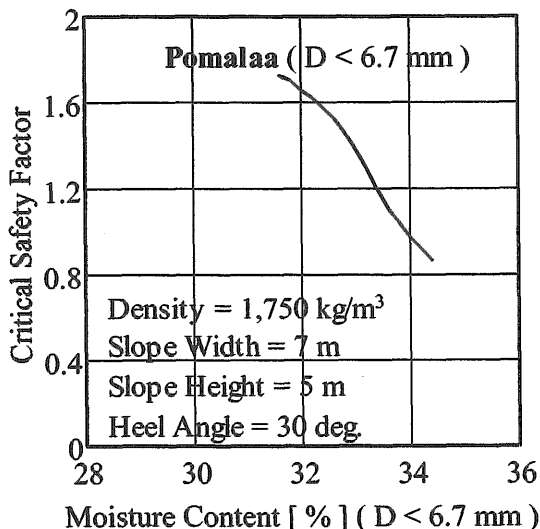


図 4.11 水分値と臨界安全率の関係 - Pomalaa

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