

4 ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発

4.1 第4章の構成

この章では、ニッケル鉱荷崩れ評価試験法の開発について述べる。

4.2 節では船舶における固体ばら積み貨物の荷崩れの危険性について概観し、特に問題となる貨物はニッケル鉱であることを明らかにする。

4.3 節では、貨物の剪断抵抗係数や粘着力といったパラメータに基づく、荷崩れ発生の可能性（以下、「荷崩れ危険性」と呼ぶ。）の基礎的な評価法について述べる。具体的には、地盤工学における斜面の安定性評価の手法の、固体ばら積み貨物（ニッケル鉱）の荷崩れ危険性評価への応用について、実験結果を含めて述べる。

4.4 節では、本研究により現場試験用に新たに開発した「ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法」について述べる。開発した評価試験法の仕様は ANNEX C に示す。

4.5 節では、ニッケル鉱の安全運送における注意事項をまとめる。

4.2 荷崩れ防止と荷崩れの危険がある貨物

4.2.1 荷崩れを起こし易い貨物の運送方法

一般のばら積み船はタンカーに設けられるような縦通隔壁を有しておらず、ある程度以上の規模の荷崩れが発生すれば、船舶は異常傾斜を起こし、場合によっては転覆することもある。貨物の流動性が高く、荷崩れを防止することができない場合は、縦通隔壁またはこれに類する設備を設ける、または、穀類を運搬する際のように、船倉内の隙間を無くすなどの方法で、荷崩れの際の貨物の重心の移動量を抑制し、且つ、十分な復原性を持たせる必要がある。しかし、縦通隔壁のある船で固体ばら積み貨物を運送するのは効率が悪い。また、鉱石専用船といった船を別とすれば、汎用のばら積み船は載貨係数（Stowage Factor）が 1 より大きい貨物（見かけ比重が 1 より小さい貨物）でも満載重量まで積載できるように設計されているため、船倉に隙間なく貨物を積み付けることも、穀類のように載貨係数が大きい場合は別として、効率が悪い。実際、船体強度上の問題がない場合には、一部の船倉を空にして積載する alternate loading（隔倉積み）や block loading により、載貨係数が 1 より小さい貨物でも、船倉内に隙間なく積付けることができる。しかし、船体強度上の問題で、このような積付を行えないばら積み船もあり、また、こうした積付を行った場合には、使用できる荷役装置の数が減る等の原因による荷役時間の増大や、満載重量まで貨物が積載できないといった問題がある。

4.2.2 荷繰り方法

固体ばら積み貨物の荷崩れを防止するためには、荷繰り（Trimming）がなされる。荷繰りには、図 4.1 に示すように、二通りの方法がある。一つは A で示したように、貨物のパイルのスロープの角度を小さくする方法で、これは、非粘着性物質にも適用できる荷繰り方法である。もう一つは B で示したように、貨物のパイルの頂部を

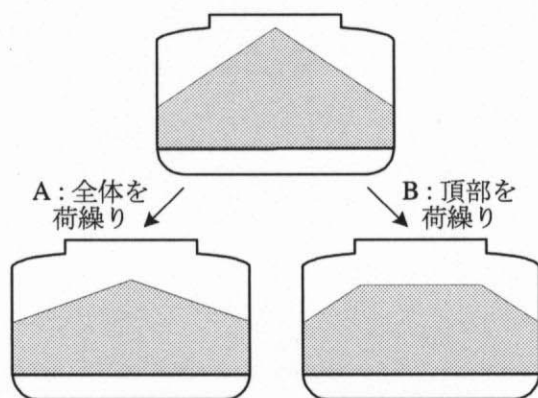


図 4.1 荷繰り方法-1

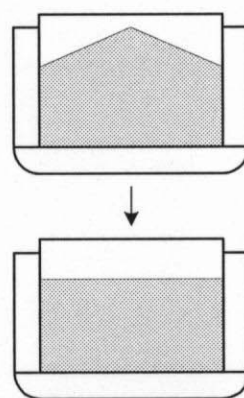


図 4.2 荷繰り方法-2

荷繰りし、スロープの規模を小さくする方法で、粘着性物質のみに適用できる方法である。また、いわゆるボックス型のばら積み船を用いた場合や、特別な装置を用いた場合は、図 4.2 に示すように、貨物のパイルを平坦に荷繰りできる場合もある。

荷繰りには設備や労力を要するため、荷繰りを行わなくても荷崩れの危険性がない貨物を運送する場合には、実施しないことも多い。荷繰りが必要か否か、また、どの程度の荷繰りが必要かは、荷送人から船長に提出される貨物資料に記載することが義務付けられている。即ち、必要な荷繰りの程度を判断することは、荷送人の責務である。非粘着性物質については静止角に基づき荷繰りの程度を決定すべき旨が規定されている（c.f. 2.4.3）が、多くの場合、要否を含む荷繰りに関する判断は、経験によっている。

4.2.3 荷崩れの危険性のある貨物

第 1 章で述べた事故のうち、荷の移動による 17 件の事故の概要⁽⁴⁾を表 4.1 に示す。表の欄は左から順に、載貨重量、事故の発生日、備考、全損事故（○で示したもの）、死者及び行方不明者の数、事故時の船齢及び船倉の数である。備考欄には、貨物に関する情報が記載されている。貨物の種類別に、事故の件数及び死者及び行方不明者の数をまとめると、表 4.2 の通りである。

表 4.1 荷の移動によるばら積み船の事故の概要 (MSC 74/INF.10 より)

DWT	Date of event	Note	Total loss	Number of fatalities	Age of ship at casualty	Number of cargo holds
15147	29-Apr-89	Cargo shifted & foundered Timber loaded	○	0	18	3
19469	30-Jan-91	Cargo shifted Containers/vehicles/machinery loaded		0	17	4
20203	08-Jun-98	Cargo shifted & presumed to have foundered Diammonium phosphate loaded	○	24	23	-
20932	30-Jul-91	Cargo shifted Holds flooded & foundered Steel products loaded	○	0	21	5
21241	23-Jun-87	Cargo shifted Holds flooded & presumed to have foundered Lead concentrates loaded	○	0	17	6
21297	26-Aug-98	Cargo shifted Capsized & sank Nickel ore loaded	○	10	2	5
21373	09-Jun-90	Cargo shifted Nickel ore loaded		0	7	4
21735	26-Mar-84	Cargo shifted No.2 hold flooded Tin plate loaded		0	3	4
21951	31-Dec-97	Cargo shifted Timber loaded		0	16	-
23757	23-Apr-85	Cargo shifted Accommodation flooded Logs loaded		0	8	4
24090	15-Aug-85	Cargo shifted No.4 hold flooded Container loaded		0	13	5
25504	01-Jul-81	Cargo shifted Lumber loaded		0	1	4
26369	20-Feb-96	Cargo shifted No.5 hold flooded Logs loaded		0	5	-
26548	25-Mar-88	Cargo shifted Timber loaded		0	14	5
30190	27-Dec-80	Cargo shifted FPT & No.1 hold flooded & sank Timber loaded	○	0	7	-
30413	16-Dec-88	Cargo shifted & capsized Nickel ore loaded	○	20	8	5
36800	10-Oct-99	Cargo shifted No.1 hold flooded Containers loaded		0	7	5

表 4.2 貨物別の事故件数及び死者・行方不明者の数

貨物	事故件数			死者・行方不明者数
	全損	その他	小計	
材木・丸太	2	5	7	
コンテナ等		3	3	
鉄製品・ブリキ	1	1	2	
鉛精鉱	1		1	
リン酸二アンモニウム	1		1	23
ニッケル鉱	2	1	3	30
小計	7	10	17	53

表に示した貨物のうち、材木・丸太、コンテナ等、鉄製品・ブリキの荷崩れは、貨物の固定（固縛）が不適切であったと考えられる。鉛精鉱は液状化物質であり、液状化の事故であった可能性もある。リン酸二アンモニウムは、乾燥状態では非粘着性物質であり、BC Codeによれば、静止角は30度、載貨係数は1.2 m³/tonである。これらの値は、過去に報告された例であって、事故を起こした船舶に積載されていた貨物の静止角や載貨係数は異なる可能性がある。2.4.3節で述べた通り、静止角が30度の非粘着性物質は「穀類のように自由に流動する貨物」に分類され、穀類と同様の荷崩れ対策を実施して運送すべきものである。事故を起こした船舶に積載されていた貨物がこうした性状のものであったか否かは不明であるが、一般に、リン酸二アンモニウムの積付・運送には、特別な注意を払う必要があると考えられる。

粒状物質の荷崩れによる5件の事故の中で、ニッケル鉱によるものは3件を占め、また、死者・行方不明者も多く発生している。よって、荷崩れによるばら積み船の事故の防止を考える際の対象貨物としては、ニッケル鉱は最も重要なものと言える。ニッケル鉱は露天掘りされた天然の土であり、大きな塊をも含む粘土状の物質である。粘土状物質は、一般に、水分を多く含むと剪断強度が低下し、荷崩れの危険性が高くなる。表 4.1には含まれていないが、前述のチタン鉄鉱^{(44),(45)} (Illmenite sand/clay)も粘土状物質の荷崩れによる事故の可能性がある(c.f. 3.8)。以下、ニッケル鉱を主たる対象として、荷崩れ危険性の評価法について述べ、さらに、ニッケル鉱の安全運送対策について述べる。

4.3 荷崩れ危険性の基礎的評価法

4.3.1 荷崩れ危険性の基礎的評価法と斜面の安定性評価法

荷崩れ危険性を評価するには、基礎として、貨物の剪断強度を計測し、計測された剪断強度を用いて斜面の安定性解析を実施する必要がある。地盤工学における斜面の安定性の評価と、固体ばら積み貨物の荷崩れ危険性の基礎的評価の違いは以下の通りである。

- (1) 斜面の安定性を評価する際には、雨水等に起因する浸透流を考慮する必要があるのに対して、ばら積み船の貨物倉は風雨密であり、荷崩れ危険性の評価の観点からは、航海中に船倉内に水が侵入することは想定しなくて良いと考えられる。そのため、固体ばら積みの荷崩れ危険性の評価においては、貨物内部への水の浸透を考慮しない、即ち、貨物は概ね均質と考え、剪断強度等の貨物の物性値は、貨物内部の場所によらず一定として扱う。但し、積付時の貨物の水分値は貨物の剪断強度に影響を与えるため、考慮する。
- (2) 土の剪断強度を計測する際には、「乱さない試料」を採取することが基本である。一方、固体ばら積み貨物は、積み荷役や荷繰りの結果として船倉内にパイルをなすのであり、元々「乱された試料」に相当する。よって、剪断強度の試験においては、試料を適切に締固めて供試体を形成することになる。
- (3) 固体ばら積み貨物の荷崩れの評価においては、船舶の動揺を考慮する必要がある。

(1)の条件、即ち、貨物の物性値が貨物内部の場所によらず一定となるためには、荷役時に貨物の一部に雨水等が侵入しないことが前提となる。4.4.2 節で述べる通り、実際の荷役においても、貨物への雨水等の侵入防止対策は講じられるので、ここでは、この条件を採用する。

船舶の動揺に起因する加速度の評価法としては、液化ガス運搬船のタンク設計⁽⁴⁶⁾やコンテナの固縛の評価⁽⁴⁷⁾においては、船体運動の応答関数及び波浪統計に基づき、加速度の長期予測を行い、十分な安全性を確保するため、例えば 20 年の間に出現する最大期待値を求める方法⁽⁴⁸⁾も用いられることもあるが⁽⁴⁹⁾、ばら積み貨物の荷崩れの評価における加速度の想定については、明確な基準は無い。加速度の想定については、4.3.4.2 節で述べる。

4.3.2 剪断強度計測法

4.3.2.1 代表的剪断強度計測法

固体ばら積み貨物、中でも粘土状物質は、土と同様に、水分により剪断強度が変わる。よって、積付の際の水分値に幅がある貨物については、水分値との関係において剪断強度を計測する必要がある。

2.4.3 節で述べた傾斜箱試験 (c.f. A.4.6.3) も非粘着性物質に対する剪断強度試験法の一つであるが、粘着性物質にも適用できる剪断強度計測法には、三軸圧縮試験と一面剪断試験がある。

三軸圧縮試験は剪断強度を計測する際の基礎的試験法である。一面剪断試験は、三軸圧縮試験より簡便である反面、供試体における剪断の位置が定められており、供試体の中で最も滑り易い部分で剪断を起こした場合の力を計測するものではないという欠点を有する。

本研究では、ニッケル鉋を用いて三軸圧縮試験と一面剪断試験を実施し、その結果を比較することにより、ニッケル鉋の剪断強度を一面剪断試験で評価することによって問題がないかを確認した。以下、それぞれの試験法について概説し、ニッケル鉋を試料とした場合の試験結果について述べる。

4.3.2.2 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験装置⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵²⁾を図 4.3 に模式的に示す。供試体は柔軟なスリーブの中に形成される。容器の中の気圧を調整することにより、供試体に作用させる拘束圧を調整した状態で、供試体に上から荷重を作用させた際の変位と荷重の関係を計測する。供試体の体積変化は、圧力を作用させるための水位の変化より計測する。拘束圧力と軸方向の荷重から、供試体に作用する応力を求め、モールの応力円を考慮して、剪断強度を決定する。

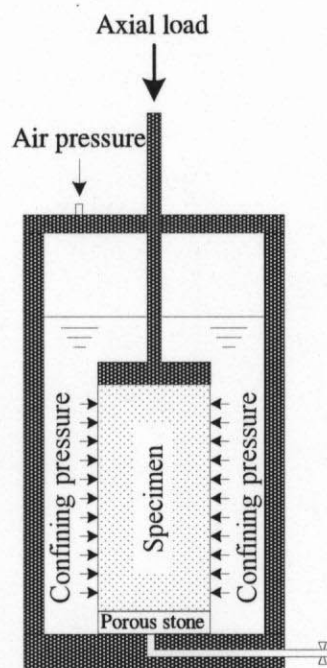


図 4.3 三軸圧縮試験装置模式図

4.3.2.3 一面剪断試験

一面剪断試験装置を図 4.4 に模

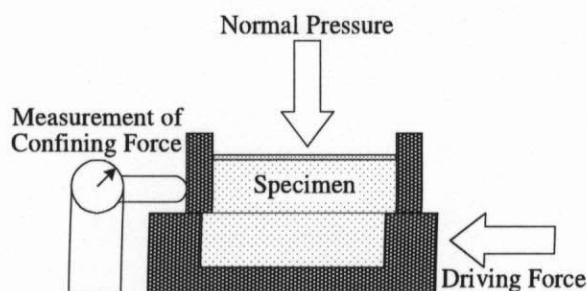


図 4.4 一面剪断試験装置模式図

式的に示す。図に示した装置を用いた場合は、上から直圧力を作用させ、剪断箱の下部（下箱）を駆動させた際にの変位及び上箱の拘束に要する力を計測する。この他にも、下から直圧力を作用させ、上箱を駆動する際の下箱の拘束に要する力を計測する「三笠式」もある。一面剪断試験には、供試体の体積を一定に保ったまま実施する定体積剪断試験もあるが、本研究における一面剪断試験は、定圧剪断試験であり、供試体の厚さ、即ち体積は計測しているが制御していない。

4.3.3 ニッケル鉱に関する三軸圧縮試験と一面剪断試験の比較

4.3.3.1 試験結果の比較に用いた試料

フィリピンの Rio Tuba で積み出されたニッケル鉱を用いて、三軸圧縮試験により計測した剪断強度と一面剪断試験によるそれを比較した⁽⁵³⁾。試料の最大粒径は 5.6 mm とした。粒径分布を図 4.5 に示す。試料の固体比重は 2.91 であった。

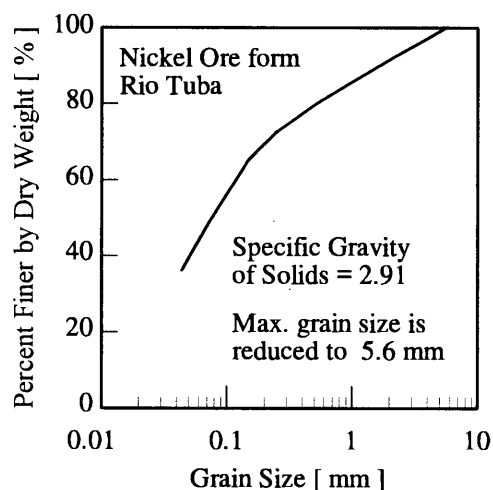


図 4.5 試料の粒径分布

4.3.3.2 三軸圧縮試験結果

水分値が 38.6 %及び 43.1 %の試料を用いて三軸圧縮試験を実施した。それぞれの水分値の試料について、拘束圧 σ_c を変化させ、4回の試験を実施した。供試体の直径は約 75 mm、高さは約 150 mm である。軸歪み速度は毎分 0.5 %とした。水分値 38.6 %の実験では、試料を 30 kPa でタンピングを行って供試体を形成したが、水分値 43.1 %の試料は、供試体中に大きな空隙ができることを防ぐため、試料を強制的に型枠に押し込んで供試体を形成した。結果を図 4.6 及び図 4.7 に示す。

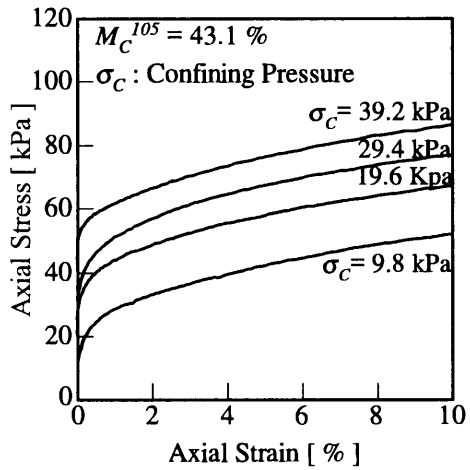
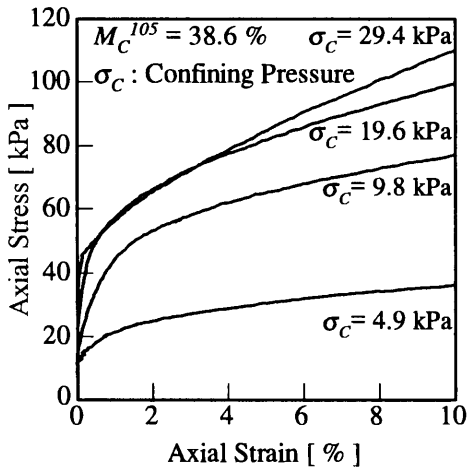


図 4.6 ニッケル鉍の三軸圧縮試験結果-1 図 4.7 ニッケル鉍の三軸圧縮試験結果-2

図の横軸は軸歪み、縦軸は軸応力、即ち、図 4.3 で示した軸力による応力に拘束圧を加えた値である。軸応力は明確なピークを示さないため、剪断強度の解析には軸歪 8%に対応する軸応力を用いた。また、軸歪 8%の際の供試体の体積に基づき、間隙比を求めた。剪断強度の解析結果をそれぞれ図 4.8 及び図 4.9 に示す。

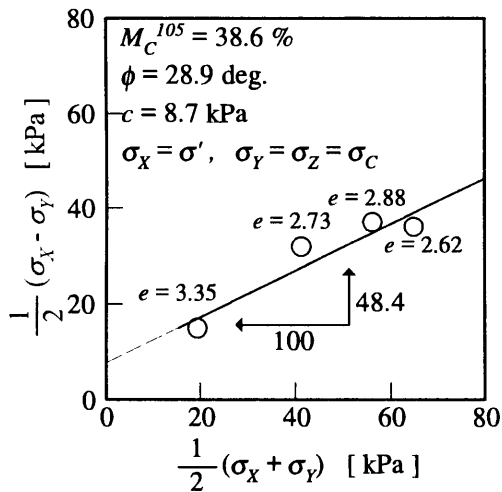


図 4.8 ニッケル鉍の剪断強度-1

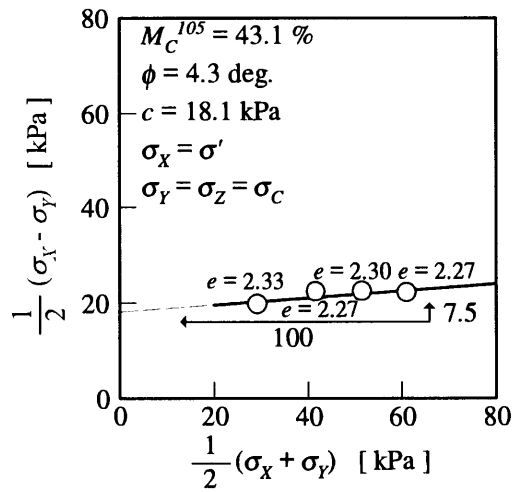


図 4.9 ニッケル鉍の剪断強度-2

図において、グラフの傾きは内部摩擦角 ϕ の正弦であり、グラフと縦軸との交点の値を内部摩擦角の余弦で割った値が粘着力である。

4.3.3.3 一面剪断試験結果

同じ試料を用いて、水分値を変えて一面剪断試験を実施した。実験に用いた試験装置は丸東製作所製 S08-A 型である。この装置は、図 4.4 に示したように、供試体の上方から重錘により鉛直荷重をかけ、上箱の水平移動を拘束した状態で下箱を駆動

する形式である。上箱と下箱のクリアランスの調整機構は無く、摺動面には潤滑油を塗布する。重錘の重量は、治具を介して供試体上面に作用する。剪断箱の内径、即ち供試体の直径は 60 mm である。供試体の高さはスペーサーにより調整する。以下の実験では約 30 mm に調整し、剪断面は供試体のほぼ中央にくるようにした。下箱の駆動速度、即ち剪断速度は毎分 1 mm に調整した。

水分値 33.4 %~40.4 %の実験では、30 kPa でタンピングを行うことにより供試体を形成した。これより高い水分値の試料では、供試体中に大きな空隙ができることを防ぐため、試料を強制的に剪断箱に押し込んで供試体を形成した。水分値 33.4 %の試料は、剪断変位 5~7 mm の時剪断力がピークを示したため、この値を抵抗剪断力とした。他の実験では、剪断力は明確なピークを示さなかったため、剪断変位が 8 mm の時の値を抵抗剪断力とした。また、抵抗剪断力に対応する体積から空隙比を求めた。結果を図 4.10 から図 4.17 に示す。

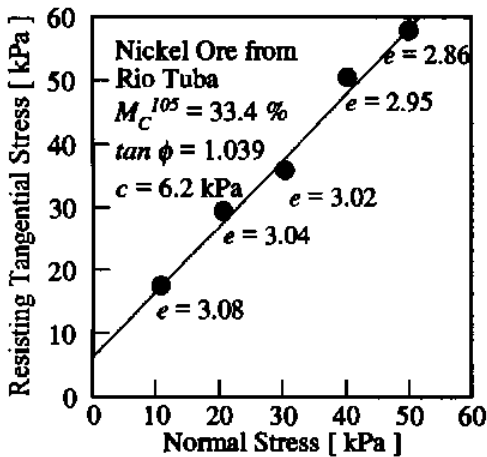


図 4.10 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-1

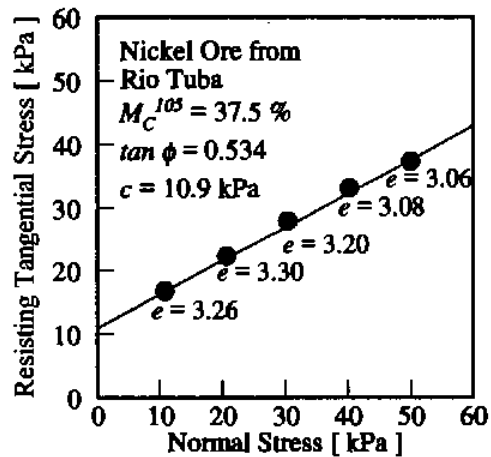


図 4.11 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-2

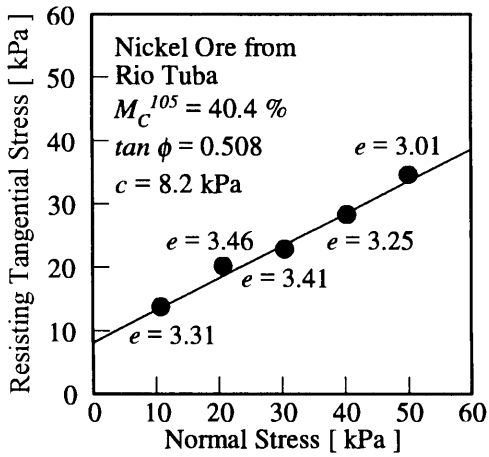


図 4.12 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-3

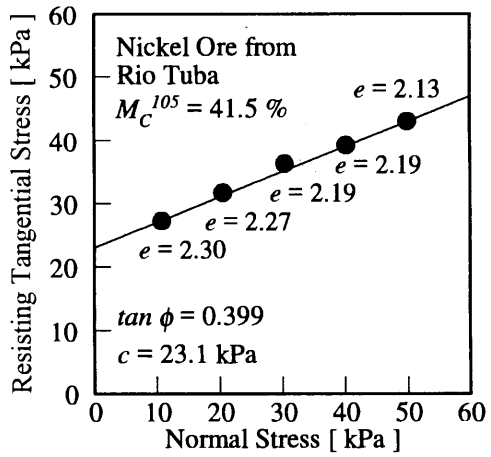


図 4.13 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-4

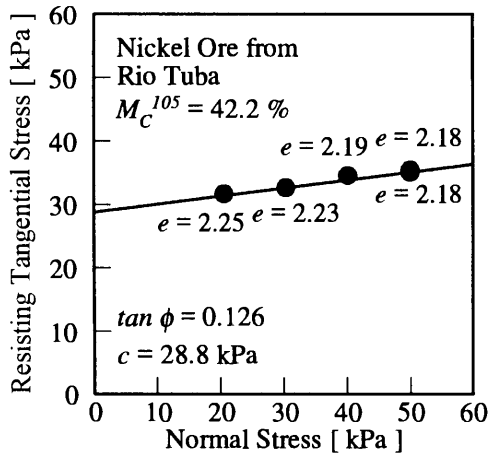


図 4.14 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-5

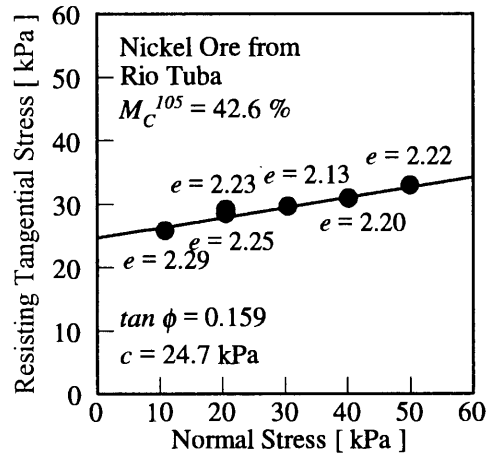


図 4.15 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-6

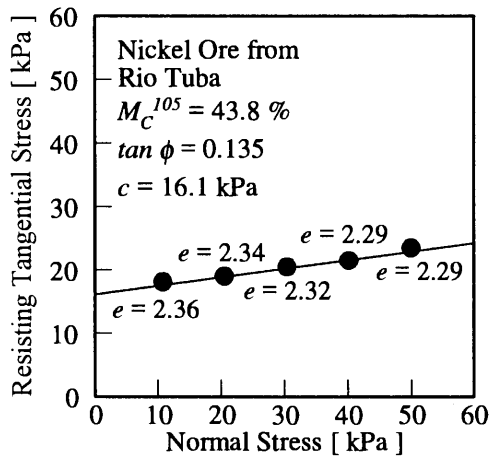


図 4.16 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-7

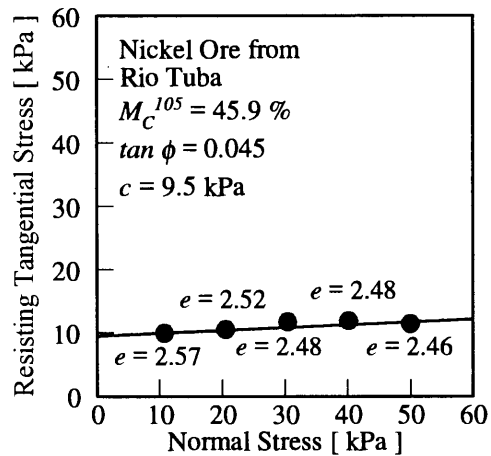


図 4.17 Rio Tuba Nickel Ore の一面剪断試験結果-8

図の横軸は直応力、縦軸は抵抗剪断応力である。グラフの傾きが剪断抵抗係数、即ち、一面剪断試験により得られる内部摩擦係数であり、直応力が零の時の抵抗剪断応力が粘着力である。

4.3.3.4 三軸圧縮試験結果と一面剪断試験結果の比較

三軸圧縮試験と一面剪断試験で求めた内部摩擦係数／剪断抵抗係数及び粘着力を水分値との関係において図 4.18 に示す。図の横軸は水分値、縦軸はそれぞれ内部摩擦係数／剪断抵抗係数及び粘着力である。丸で示した値は一面剪断試験に基づく解析結果、三角で示したのが三軸圧縮試験に基づく解析結果である。白抜きの記号は内部摩擦係数／剪断抵抗係数であり、塗りつぶした記号は粘着力である。間隙比は実験時の平均の間隙比を示している。

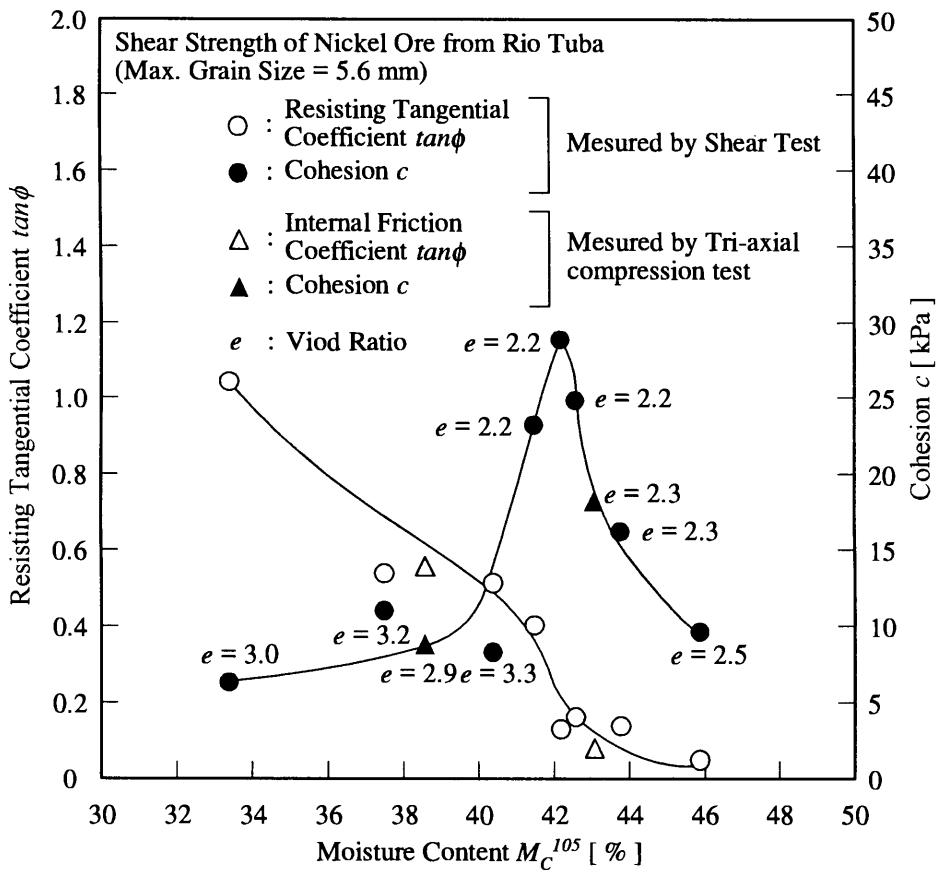


図 4.18 Rio Tub Nickel Ore の水分値と剪断強度の関係

図より、この試料、即ち篩分けにより最大粒径を調製したニッケル鉱については、三軸圧縮試験結果と一面剪断試験結果は概ね一致していると言える。このことから、最大粒径を調製した一定程度の水分を含むニッケル鉱については、一面剪断試験で

剪断強度を計測しても問題無いと考えられる。

4.3.4 その他のニッケル鉱の水分値と剪断強度の関係

ニッケル鉱の水分値と剪断強度の関係を把握するため、さらに、積み出し港の異なるニッケル鉱を用いて一面剪断試験を実施した⁽⁵⁴⁾⁻⁽⁵⁶⁾。試料は、Gebe（インドネシア）、Hiatuan（フィリピン）及び Karembe（ニューカレドニア）から日本に輸入されたものを用いた。最大粒径は、上記試料と同様に、5.6 mm に調製した。試料の固体比重はそれぞれ 2.91、2.79、2.75 であった。各試料の粒径分布を図 4.19～図 4.21 に、各試料に関する一面剪断試験結果を図 4.22～図 4.45 に示す。

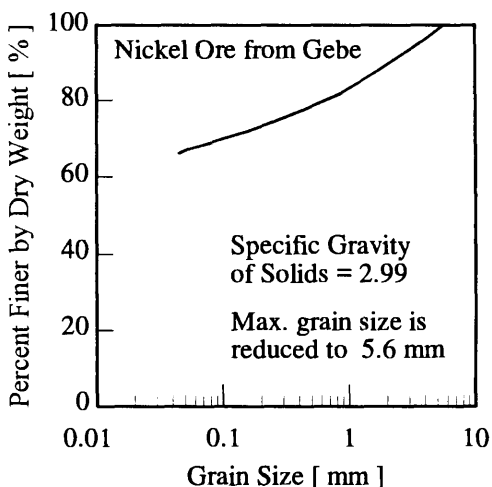


図 4.19 Gebe Nickel Ore の粒径分布

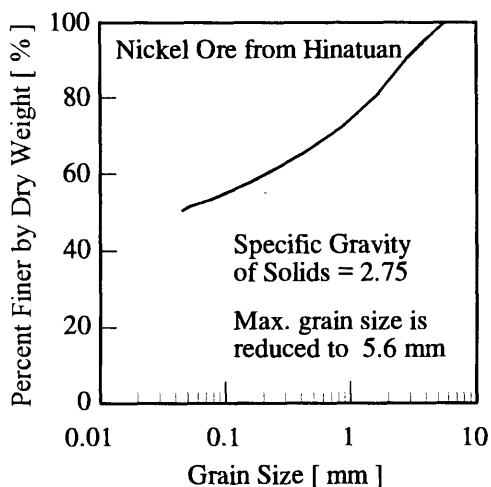


図 4.20 Hiatuan Nickel Ore の粒径分布

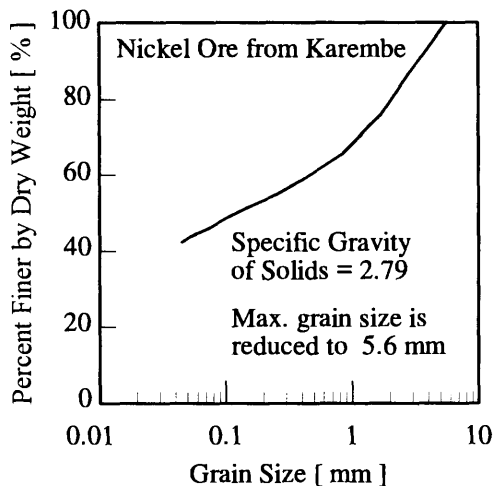


図 4.21 Karembe Nickel Ore の粒径分布

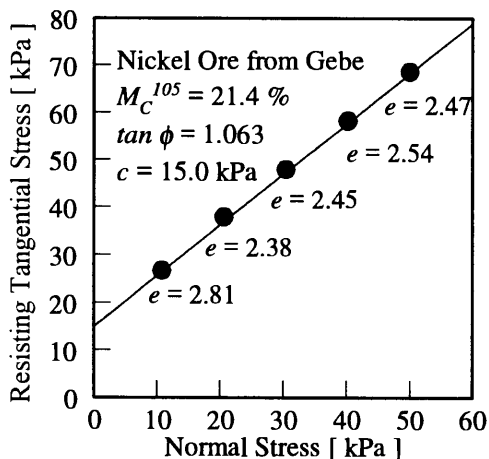


図 4.22 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-1

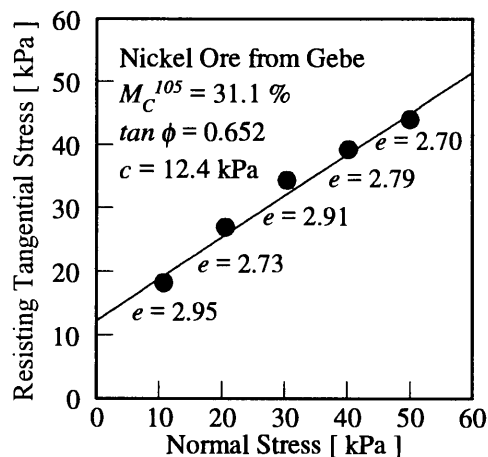


図 4.23 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-2

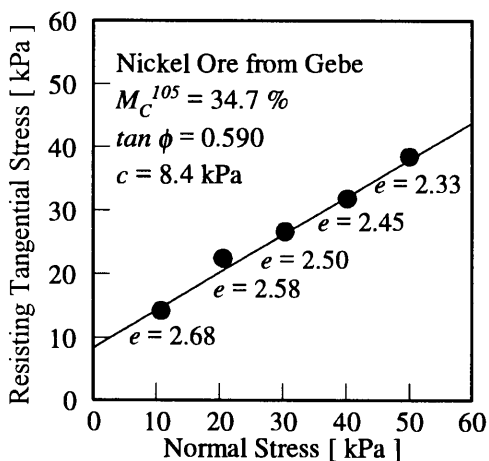


図 4.24 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-3

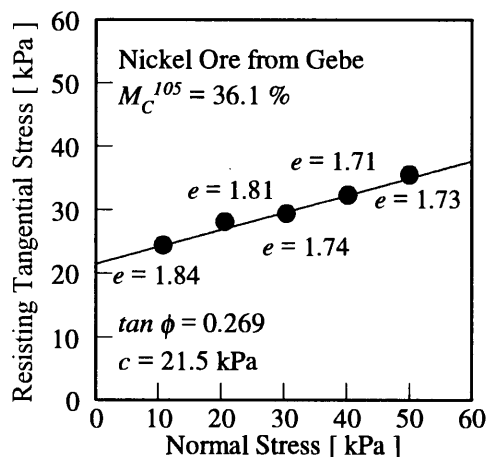


図 4.25 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-4

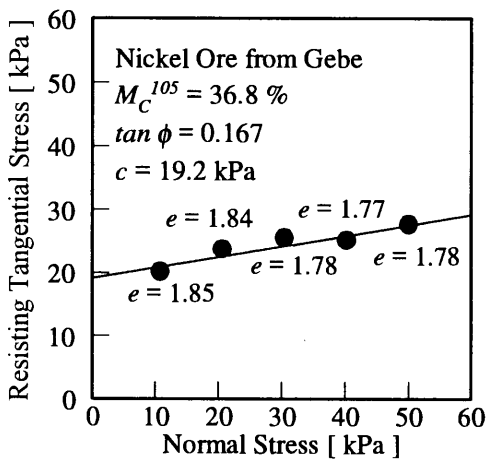


図 4.26 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-5

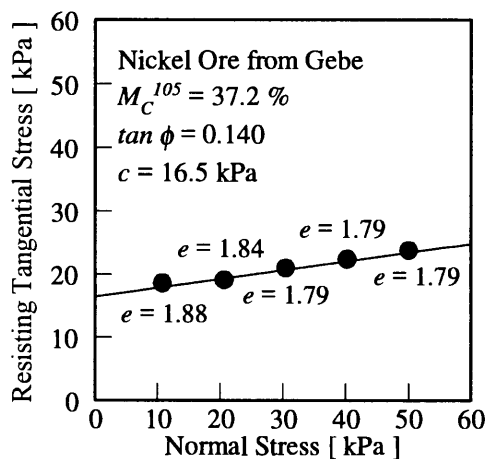


図 4.27 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-6

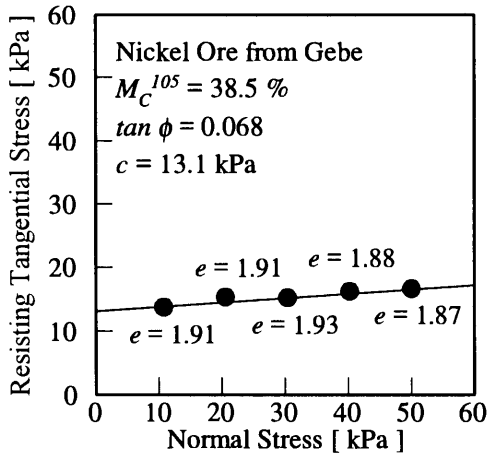


図 4.28 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-7

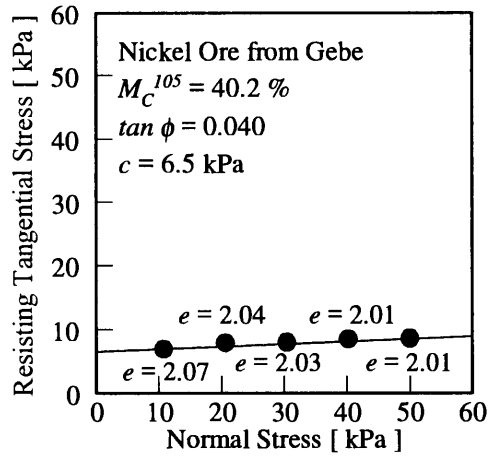


図 4.29 Gebe Nickel Ore の
一面剪断試験結果-8

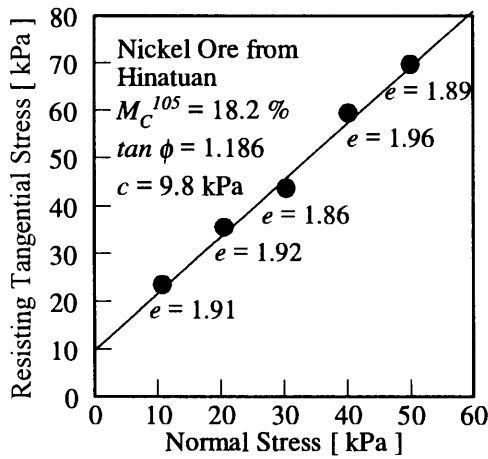


図 4.30 Hinatuan Nickel Ore の
一面剪断試験結果-1

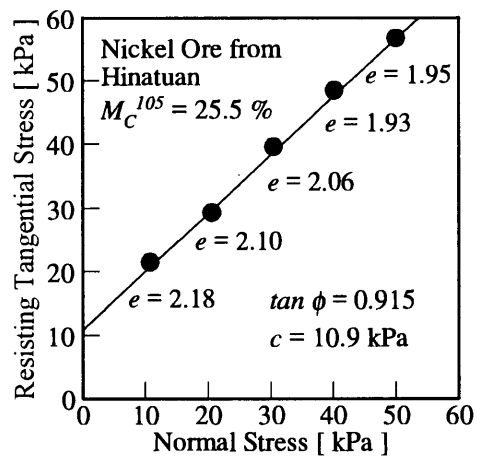


図 4.31 Hinatuan Nickel Ore の
一面剪断試験結果-2

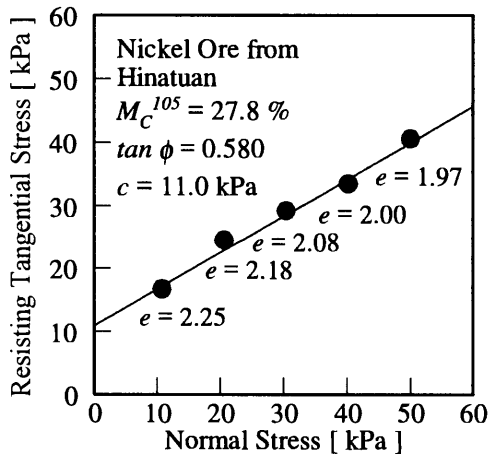


図 4.32 Hinatuan Nickel Ore の
一面剪断試験結果-3

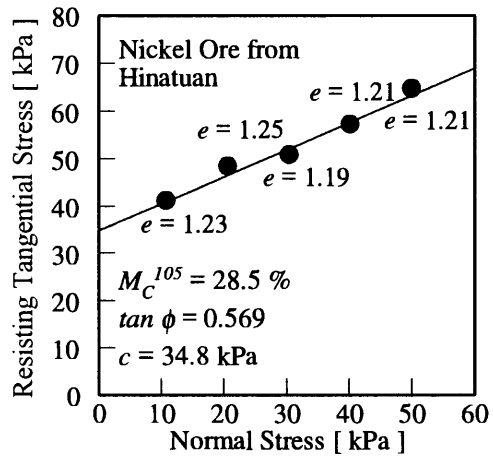


図 4.33 Hinatuan Nickel Ore の
一面剪断試験結果-4

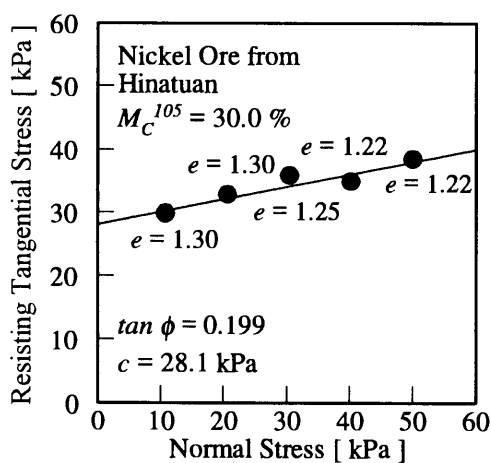


図 4.34 Hinatuan Nickel Ore の一面剪断試験結果-5

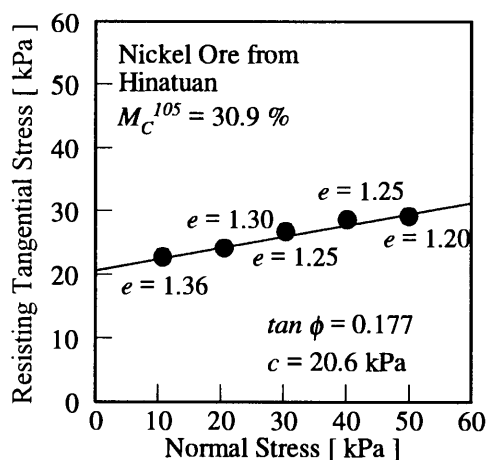


図 4.35 Hinatuan Nickel Ore の一面剪断試験結果-6

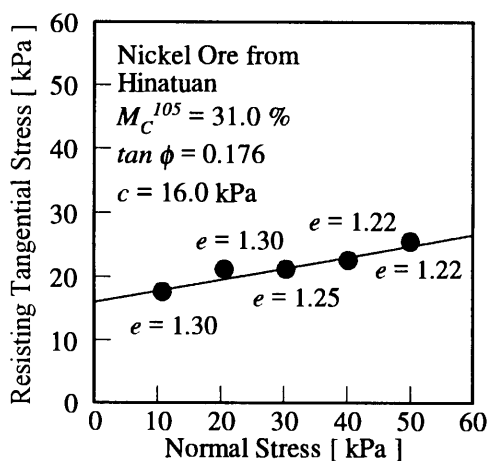


図 4.36 Hinatuan Nickel Ore の一面剪断試験結果-7

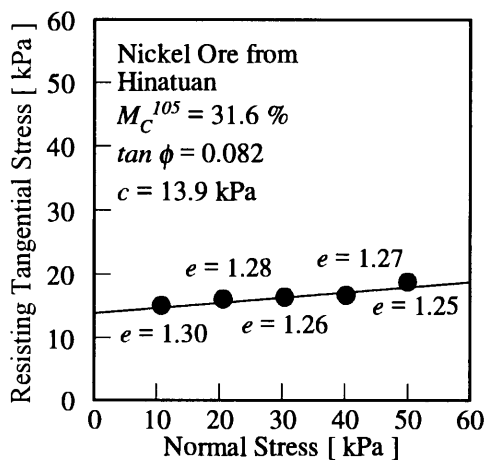


図 4.37 Hinatuan Nickel Ore の一面剪断試験結果-8

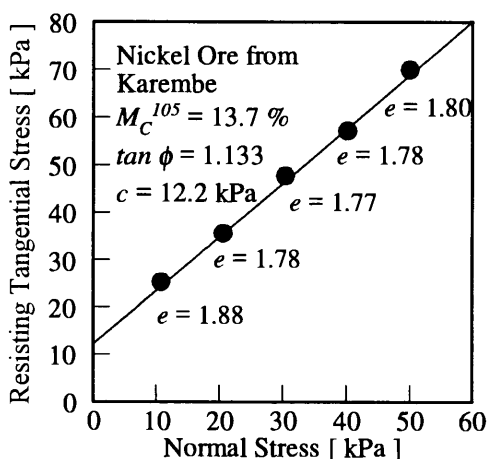


図 4.38 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-1

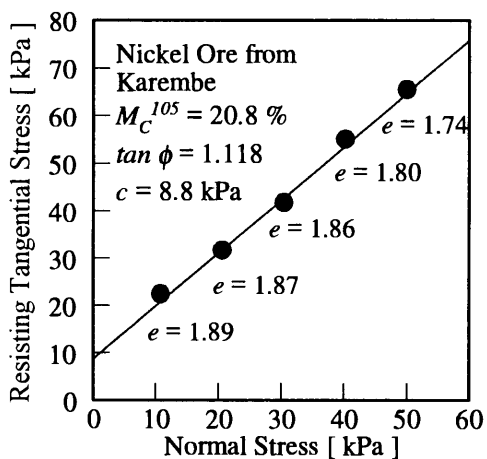


図 4.39 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-2

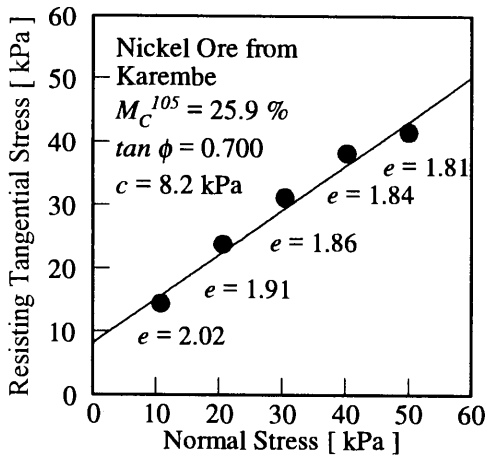


図 4.40 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-3

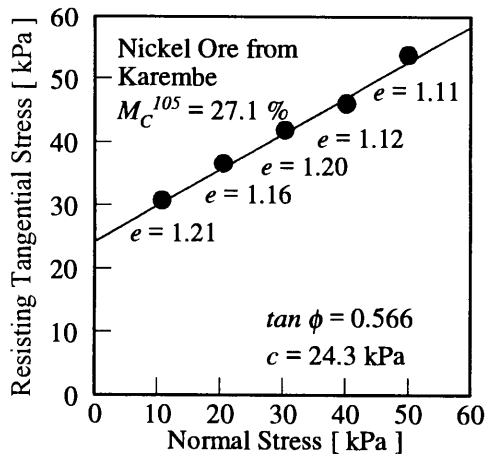


図 4.41 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-4

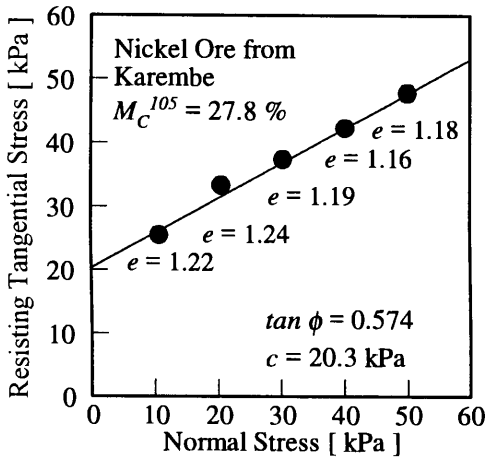


図 4.42 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-5

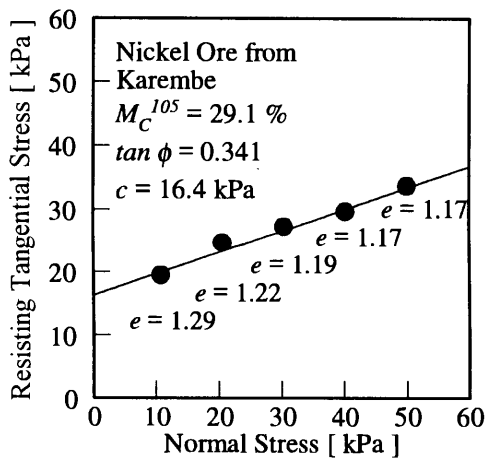


図 4.43 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-6

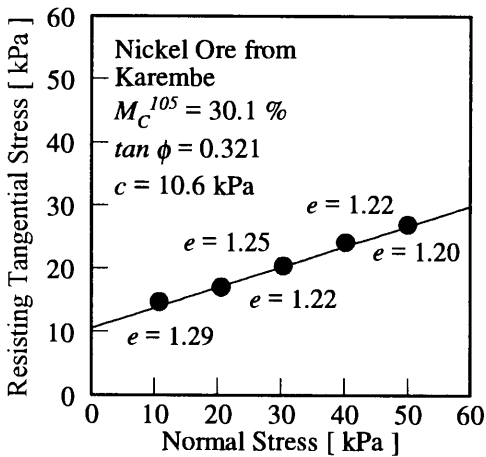


図 4.44 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-7

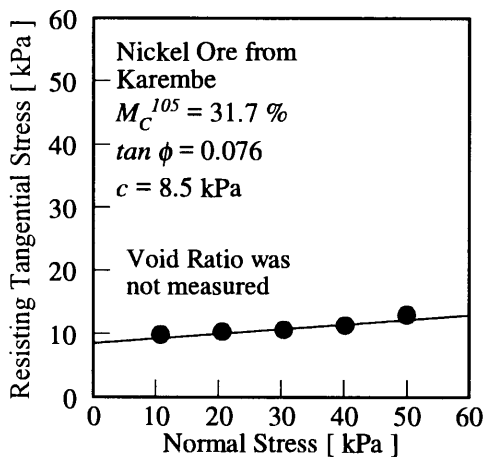


図 4.45 Karembe Nickel Ore の一面剪断試験結果-8

Rio Tuba からのニッケル鉱の場合と同様に、剪断力が明確なピークを示さない場合は、剪断変位 8 mm における剪断力を抵抗剪断力とした。各試料の各水分値における締固め方法、抵抗剪断力のピークの有無及抵抗剪断力を解析した剪断変位を表 4.3 に示す。

表 4.3 一面剪断試験における締固め方法、抵抗剪断力及び解析剪断変位

積出港	水分値 [%]	締固め	剪断力のピークの有無	解析剪断変位
Gebe	21.4	30 kPa タンピング	有り	3~4 mm
	31.1	30 kPa タンピング	無し	8 mm
	34.7	30 kPa タンピング	無し	8 mm
	36.1	強制的試料挿入	一部有り	5~8 mm
	36.8	強制的試料挿入	一部有り	約 8 mm
	37.2	強制的試料挿入	一部有り	7~8 mm
	38.5	強制的試料挿入	無し	8 mm
	40.2	強制的試料挿入	無し	8 mm
Hinatuan	18.2	30 kPa タンピング	有り	3~4 mm
	25.5	30 kPa タンピング	有り	約 8 mm
	27.8	30 kPa タンピング	無し	8 mm
	28.5	強制的試料挿入	有り	3~6 mm
	30.0	強制的試料挿入	一部有り	6~8 mm
	30.9	強制的試料挿入	一部有り	7~8 mm
	31.0	強制的試料挿入	無し	8 mm
	31.6	強制的試料挿入	無し	8 mm
Karembe	13.7	30 kPa タンピング	有り	約 3 mm
	20.8	強制的試料挿入	有り	5~8 mm
	25.9	強制的試料挿入	無し	8 mm
	27.1	強制的試料挿入	有り	5~7 mm
	27.8	強制的試料挿入	有り	5~8 mm
	29.1	強制的試料挿入	一部有り	6~8 mm
	30.1	強制的試料挿入	無し	8 mm
	31.7	強制的試料挿入	無し	8 mm

各試料の剪断強度と水分値の関係を図 4.46~図 4.48 に示す。

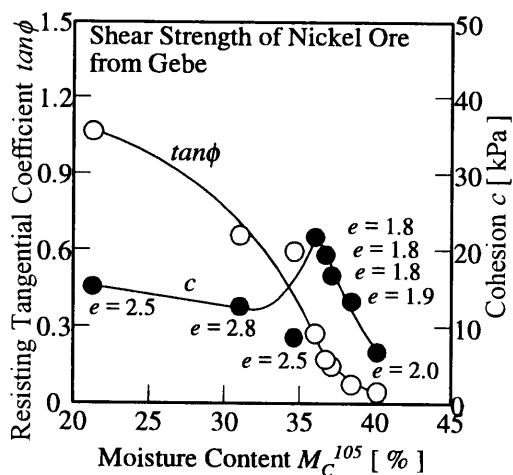


図 4.46 Gebe Nickel Ore の剪断強度

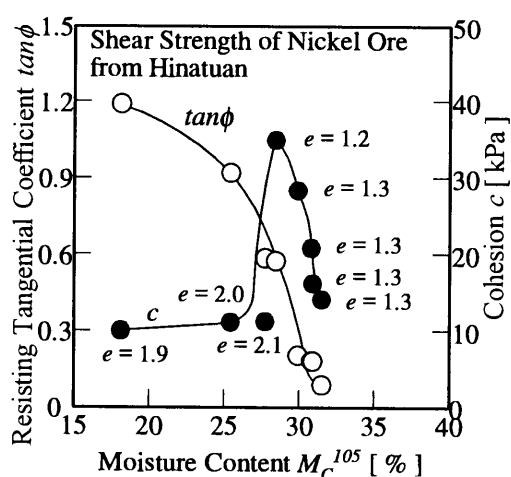


図 4.47 Hinatuan Nickel Ore の剪断強度

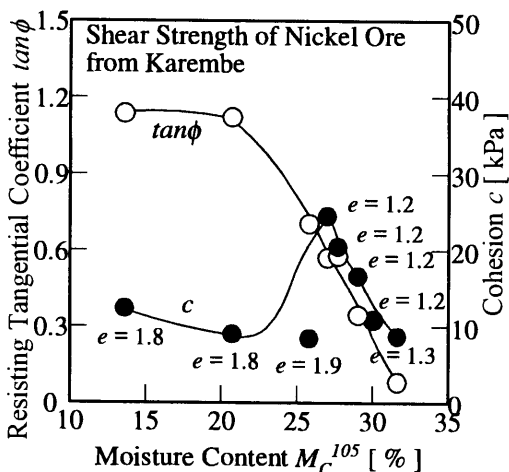


図 4.48 Karembe Nickel Ore の剪断強度

図 4.18、図 4.46、図 4.47 及び図 4.48 より、ニッケル鉱の場合、水分値の上昇とともに剪断抵抗係数は単調に減少し、粘着力はある水分値でピークを示すことが分かる。なお、これらの図において、粘着力のピークに対応する水分値より僅かに低い水分値の供試体の粘着力の計測結果が低い値を示しているのは、前述の通り、供試体を形成する際の締固め方法が異なることにより、これらの供試体では間隙比が大きいためである。そのため、図中のグラフは、実際の貨物では水分値が変化しても間隙比は急激に変化しないであろうことを考慮してひいた。以上により、ニッケル鉱はその産地（積み出し港）により粒径分布が異なり（c.f. 図 4.19～4.21）、また、粘着力がピークを示す水分値も様々であることが確認できた。

4.3.5 荷崩れ危険性の数値解析

4.3.5.1 解析方法

一面剪断試験等により得られた剪断強度に基づき、荷崩れ危険性を判定するには、地盤工学における斜面の安定性解析に倣って、貨物のパイルのスロープの安定性を解析すれば良い^{(50),(57)}。

粒状物質の内部摩擦について、図 4.49 に示すようにクーロン則が成り立つと仮定する。粘着力 c 、内部摩擦角（剪断抵抗角） ϕ 、剪断面に対する圧縮直応力 σ_N 及び抵抗剪断応力 τ_R の関係は(4.1)式の通り。

$$\tau_R = c + \sigma_N \cdot \tan \phi \quad (4.1)$$

但し、 σ_N は有効直応力である。間隙圧が無視できる場合は全応力に一致する。

計算は全て二次元で行った。

船倉の横断面上で、図 4.50 のように積付けられた貨物のパイルに一定の加速度が作用した場合を考える。ここで、加速度は重力加速度を含む。荷崩れはある特定の連続した線、いわゆる滑り線に沿って起こる。滑り線の形状は、過去の経験から粘着性物質については円弧を用いることが適当とされているため、

円弧と仮定する。一つの滑り線を仮定し、その線上において圧縮直応力 σ_N から求めた抵抗剪断応力 τ_R を積分し、円弧の半径をかけたものを抵抗モーメント M_R とする。また、剪断応力 τ について同様の計算をしたものを滑りモーメント M_O とする。仮定した滑り線に対する安全率 F は(4.2)式で定義できる。

$$F = \frac{M_R}{M_O} \quad (4.2)$$

多くの滑り線について安全率 F を計算し、最小値を臨界安全率 F_C 、対応する滑り線を臨界滑り線とすれば、臨界安全率により荷崩れ危険性が評価できる。滑り線上の剪断応力 τ 及び抵抗剪断応力 τ_R を求める方法についてはこれまでに多くの研究がな

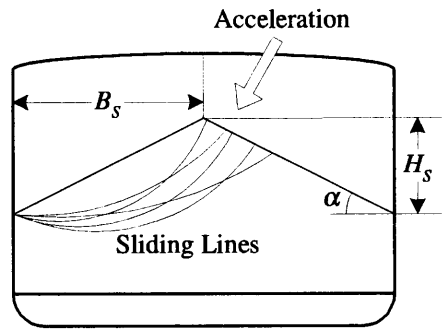
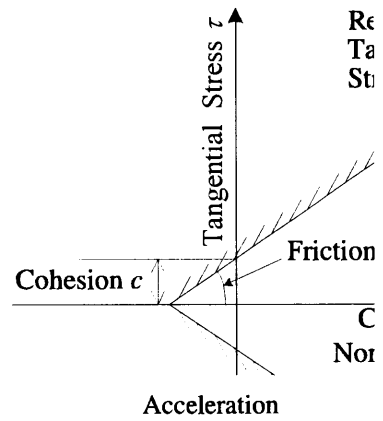


図 4.50 積付形状と滑り線

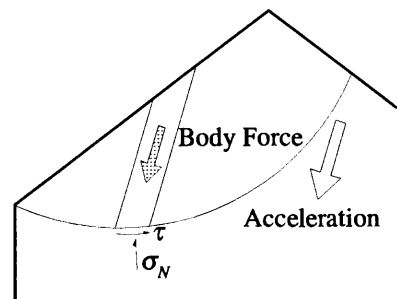


図 4.51 要素分割及び応力計算

されているが⁽⁵⁸⁾、本研究では、地盤工学で広く用いられてきた Fellenius 法（スウェーデン法）を用いた。この方法では、図 4.51 のように、滑り線上の貨物のパイルを加速度の方向に沿って幾つかの要素に分割し、各要素には、その要素の質量に応じて加速度による力が作用し、その力は要素の下線で受け持たれると仮定して、滑り線上の圧縮直応力 σ_N と剪断応力 τ を求める。また、抵抗剪断応力 τ_R は(4.1)式より求められるため、滑り線に対する安全率が得られる。

荷崩れが船倉側壁を横切るような線上で発生することは考え難い。また、4.3.1 節で述べた通り、本研究では、貨物の物性値は場所によらないと仮定したため、滑り線上の貨物のパイルの形が相似であれば、滑り線上の貨物の質量が大きいほど粘着力の影響が小さくなり、この計算法では安全率が小さくなる。よって、臨界滑り線は貨物のパイルのスロープの下端を通ると考えられるため、臨界安全率を求めるには、図 4.50 のように、こうした滑り線についてのみ計算を行えば良い。

地盤工学では、Fellenius 法で解析を実施した場合については、ダム等の重要な構造物については臨界安全率 1.5、斜面、盛土等では臨界安全率 1.3 が基準とされ、臨界安全率 1.2 未満は安定に疑問があるとされている⁽⁵⁹⁾。

本研究において開発したニッケル鉋荷崩れ危険性評価試験法は、ニッケル鉋に荷崩れの危険性がある場合にこれを指摘することを目的としており、必ずしも、十分な安全性（剪断強度）を有する貨物のみを選別することを目的としていない。そのため、過大な安全余裕を見込むことは、避ける必要がある。このことを考慮して、固体ばら積み貨物の場合は、恒久的に利用される構造物の設計とは異なるため、臨界安全率 1.2 を荷崩れ危険性の判定基準とする⁽⁵³⁾。なお、貨物の頂部を平坦に荷繰りした場合、即ち図 4.1 の B のように荷繰りした場合についても、臨界安全率は同様の方法で計算できる。

4.3.5.2 ニッケル鉋の荷崩れ危険性の数値解析

4.3.5.1 節で述べた通り、荷崩れ危険性の数値解析を行うには、以下のパラメータを決定する必要がある。

- (1) 貨物の見かけ密度
- (2) 貨物のパイルの形状、寸法
- (3) 想定する加速度

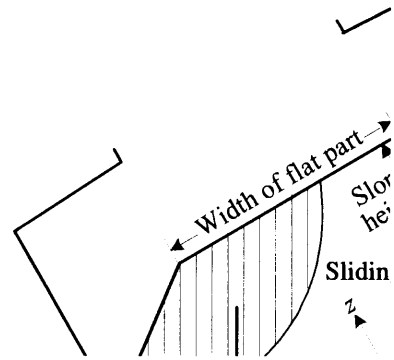
以下、図 4.18 及び図 4.46～図 4.48 に示した各ニッケル鉋の剪断強度、即ち剪断抵

抗係数と粘着力を用いて、荷崩れの数値解析を行った結果について述べる。貨物は荷繰りしたと仮定して、図 4.52 に示す形状とした。

貨物頂部の平坦部の幅は 13 m、スロープの幅は 7 m とした。スロープの高さは 3~5 m 程度と考えられるため、ここでは 4 m とした。

4.3.1 節で述べた通り、船舶の貨物に作用する加速度の設定方法については、これまでに多くの研究がなされている。一方、2.4.3 節で述べた通り、BC Code の荷繰り基準では、加速度としては 30 度の静的な横傾斜を想定していると考えられる。これらを考慮して、また、荷崩れの危険性がある場合にこれを指摘するとの目的勘案すれば想定する加速度（船体運動）は運航中の船舶の状況との対応が容易に理解できることが望ましいこともあり、ここでは、簡単のため、BC Code の荷繰り基準の考え方に倣って 30 度の静的横傾斜を想定した。

船体運動と荷崩れの関係について言えば、荷崩れにとって問題となる主たる船体運動は横揺れであり、単純な横揺れを考えれば、横傾斜角が最大の時には回転角速度は零となることから、荷崩れの評価においては、回転角速度の影響を考慮する必要は無いと言える。回転角加速度は、横揺れ角度が最大の時に最大となり、回転角加速度により貨物各部に作用する体積力は、船舶の回転中心との位置関係にも依存する。荷崩れに大きな影響を及ぼすのは、図 4.52 の y 軸方向の力であり、回転角加速度に起因する y 軸方向の力は、z 軸方向の位置により異なる。図 4.52 のように船舶が傾斜した場合は、船舶の回転角加速度は半時計回りの方向であり、船舶の回転中心より低い位置、即ち z 座標が小さい位置では、回転角加速度による y 軸方向の体積力の慣性力は正の向き、即ち荷崩れを抑制する向きに作用する。コンテナの固縛に関する各種の基準について調査した結果⁽⁶⁰⁾によれば、船舶の回転中心の z 座標は、Lloyd Register of Shipping (LRS : 英国の船級協会) の基準では船舶の型深さの半分または喫水の大きい方の値を、American Bureau of Shipping (ABS : 米国の船級協会) の基準では船舶の型深さの半分と喫水の平均値を用いることとされている。即ち、船舶の回転中心の z 座標は、船舶の型深さの半分から喫水程度に想定されていると言える。一方、ばら積み船の船倉は、通常、載貨係数 1.39~1.67 m³/ton 程度の貨物を積載できるように設計されており⁽⁸⁾、ニッケル鉱の載貨係数は 0.6 m³/ton 程度であ



ることから、ニッケル鉱の平均的積付深さは船倉の深さの 40 % 程度になると考えられる。このことから、ニッケル鉱の貨物のパイル内の滑り線上の各点の z 座標は、二重底の深さを考慮しても、船舶の回転中心の z 座標よりさほど大きくはないと考えられる。よって、ニッケル鉱の荷崩れ評価においては、甲板上コンテナの固定の評価の場合等とは異なり、横揺れの回転角加速度は支配的なパラメータではないと考えられる。但し、臨界安全率の計算において回転角加速度の影響を正しく考慮するには、有限要素法によって貨物内部の応力分布を求め、これを滑り線に沿って積分することにより安全率を求める方法⁽⁵⁷⁾、いわゆる弾塑性解析を実施する必要がある、今後の課題である。実際の船舶の運動は複雑であり、4.3.1 節で述べた通り、液化ガス運搬船のタンク設計⁽⁴⁶⁾やコンテナの固縛の評価⁽⁴⁷⁾においては、船体運動の応答関数及び波浪統計に基づき、加速度の長期予測を行い、例えば 20 年の間に出現する最大期待値を求める方法⁽⁴⁸⁾が用いられることもある⁽⁴⁹⁾。このようにして y 軸方向及び z 軸方向の設計加速度を決定した上で、本研究で用いた荷崩れ数値解析法を用いる場合は、加速度の方向に沿って貨物の要素分割を行った上で、重力加速度より大きい加速度が作用するとして計算を行う必要がある。加速度設定の高度化も今後の課題である。

船舶の貨物は、4.3.1 節で述べた通り、「乱された試料」に相当し、締固めの程度により見かけの密度は異なる。実際の運送を考慮すれば、ニッケル鉱の載貨係数は $0.6 \text{ m}^3/\text{ton}$ 程度と言われているが、詳細なデータがなく、また、剪断強度の計測では、締固め方法は規定しているが、見かけ密度（間隙比）を所定の値に合わせるように調製していない。そのため、貨物の見かけ密度は、剪断強度と対応させることとし、剪断強度試験時の試料の見かけ密度に基づき決定する。一面剪断試験及び三軸圧縮試験における Rio Tuba、Gebe、Hinatuan 及び Karembe から積み出された試料による供試体の単位体積重量を図 4.53～図 4.56 に示す。図において、白丸は各試料の各水分値における試験時の平均の単位体積重量を意味する。ここでは、各図のグラフで示した単位体積重量を貨物の見かけの密度として、荷崩れの数値解析を行った。前述の通り、水分値が大きくなると密度が急激に上昇するのは締固め方法の違いによるものであり、これらの図は、実際の貨物の見かけの密度と水分値の関係を代表するものではない。解析により得られた水分値と臨界安全率の関係を図 4.57～図 4.60 に示す。

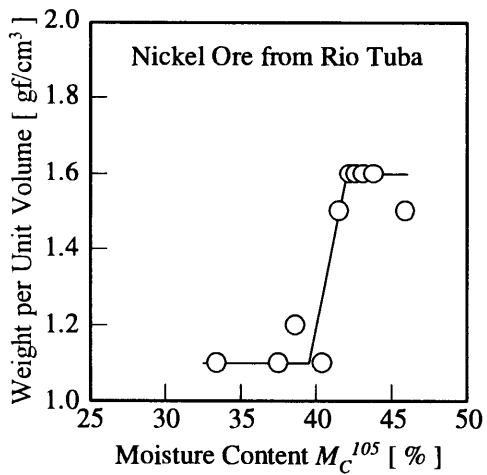


図 4.53 Rio Tuba Nickel Ore の見かけの単位体積重量

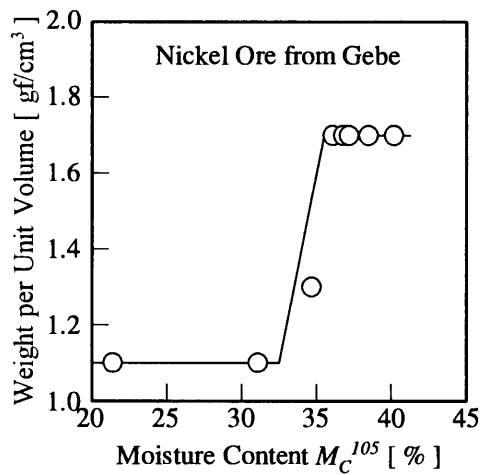


図 4.54 Gebe Nickel Ore の見かけの単位体積重量

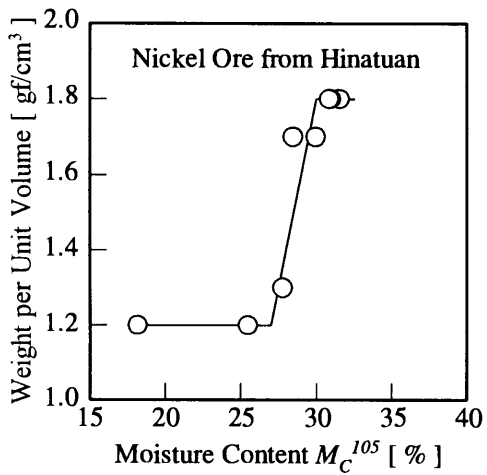


図 4.55 Hinatuan Nickel Ore の見かけの単位体積重量

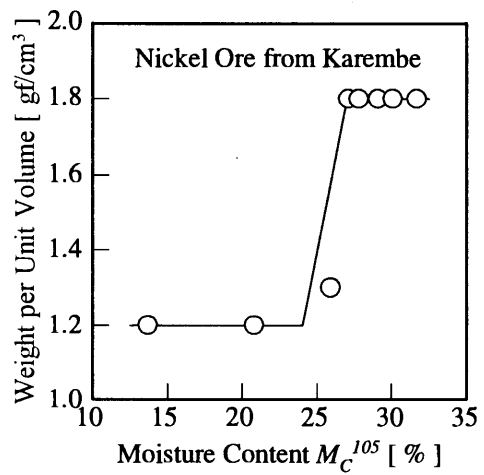


図 4.56 Karembe Nickel Ore の見かけの単位体積重量

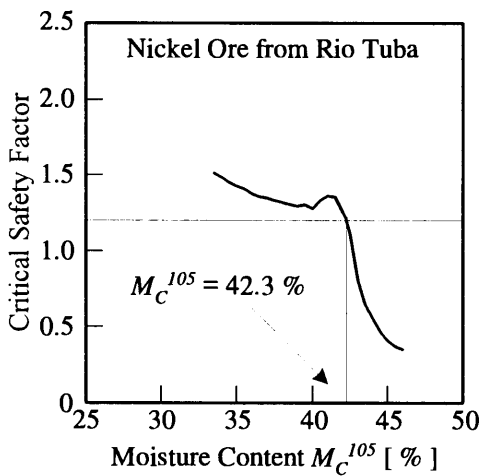


図 4.57 Rio Tuba Nickel Ore の水分値と荷崩れ危険性の関係

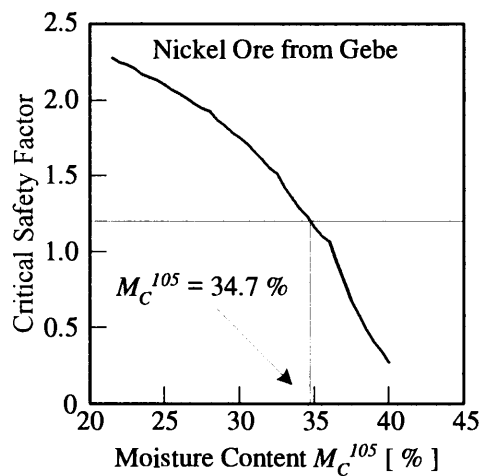


図 4.58 Gebe Nickel Ore の水分値と荷崩れ危険性の関係

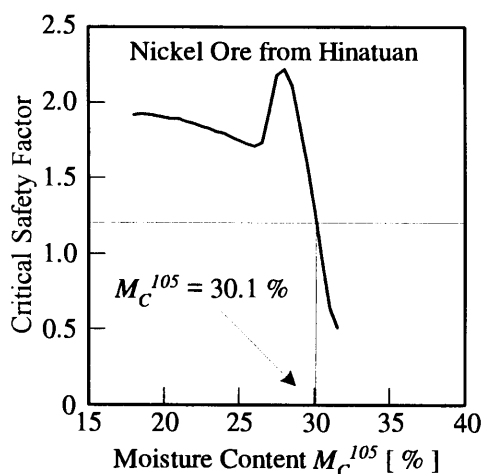


図 4.59 Hinatuan Nickel Ore の水分値と荷崩れ危険性の関係

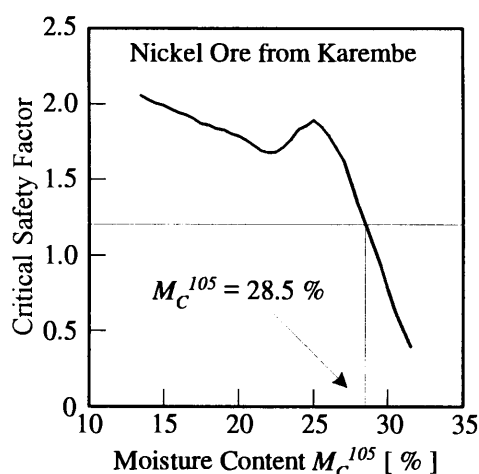


図 4.60 Karembe Nickel Ore の水分値と荷崩れ危険性の関係

図 4.57～図 4.60 の横軸は水分値、縦軸は臨界安全率である。図より、水分値が粘着力のピークに対応する値を超えると臨界安全率は急激に低下する、即ち、荷崩れ危険性が増すことが分かる。グラフが臨界安全率 1.2 の線と交わる点の水分値は、それぞれ 42.3 %、34.7 %、30.1 %及び 28.5 %である。荷崩れ防止の観点からは、それぞれのニッケル鉱は、この試料の水分値に対応する水分値を超えると荷崩れの危険があると考えられる。

4.3.6 荷崩れ危険性の基礎的評価法の問題点

前述の評価法をニッケル鉱の運送実務で用いるには以下の問題がある。

- (1) 運送実務では、貨物の価値を把握するため、篩分けを行わない状態で水分値を計測するのに対して、荷崩れ危険性があると判断される前述の水分値は最大粒径を 5.6 mm とした場合の値である。水分値は試料の最大粒径により異なるため、前述の値は、貨物申請資料にある水分値には対応しない。
- (2) 同一の港から積み出されるニッケル鉱であっても性状は様々であり、荷崩れ危険性の判定のためのクライテリアは、頻繁に決定する必要がある。一方、試料の水分値を変えて一面剪断試験を実施するには、最低でも数日を要する。よって、荷崩れ危険性の基礎的評価法は実務的ではない。

こうした問題点に対処するため、以下に述べるニッケル鉱荷崩れ危険性評価法を開発した。

さて、荷崩れ危険性の基礎的評価法では、剪断強度の試験（三軸圧縮試験及び一

面剪断試験)の際に貨物(元の試料)から除去した粒子が、貨物の荷崩れの危険性に及ぼす影響を考慮してない。4.2.3 節において、ニッケル鉱は露天掘りされた天然の土であり、大きな塊をも含む粘土状の物質であると述べたが、別の表現を用いれば、ニッケル鉱は粘土の中に一定程度の塊(石)が混入したものとも言える。ニッケル鉱に含まれる塊の最大粒径は一般に 200 mm 程度である。実際、拳大の粒子や幼児の頭程度の大きさの粒子も一定程度含まれ、こうした粒子が占める割合はニッケル鉱の種類(産地等による差異)により異なる。そして、大きい粒子が含まれることは、含まれない場合と比較して、荷崩れを起し難くする効果があると考えられる。こうした大きな粒子の影響をも含めて荷崩れの危険性を評価するには、最大粒径を調製しない試料を用いて剪断試験を行うことが考えられるが、試料の最大粒径を 200 mm として一面剪断試験を行うには、供試体の厚さは 800 mm 以上とする必要があり、また、供試体の直径は少なくとも厚さの 2 倍以上とする必要があるため、最大粒径を調製しない試料を用いて一面剪断試験を行うことは容易ではない。一方、ニッケル鉱のパイルの斜面の規模は船の半幅のオーダーであり、また、大角度の横揺れ等の船体運動の周期は、少なくとも数秒以上である。即ち、船体動揺の加速度は、地盤工学における斜面の安定性評価の一つの重要な要素である地震時の加速度と比較すれば、周期が長いと言える。さらに、4.4 節で述べる通り、一面剪断試験の際に除去した試料(粒径 6.7 mm 以上)は、最大粒径を 100 mm とした場合、乾燥重量ベースで、最大 45 % (図 4.63 参照、Boakaine の場合)であり、最大粒径 100 mm 以上の粒子は少ないことから、少なくとも元の試料の半分程度は、一面試験の際の試料に含まれていると言える。以上を考慮すれば、剪断強度試験の際に除去された粒子の荷崩れ防止への寄与を無視して荷崩れ危険性の評価を行うことは、安全側であり、今後より安全余裕を減らせる可能性を残してはいるものの、不適切ではない。剪断強度試験の際に除去された粒子の影響を荷崩れ危険性の評価に取り入れることは今後の課題である。

4.4 ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発^{(62), (63)}

4.4.1 ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の必要性及び位置付け

粘着性物質であるニッケル鉱は、図 4.18 及び図 4.46～図 4.48 に示した通り、水分値が一定の値を超えると剪断強度が著しく低下し、荷崩れ危険性が急激に高まる。1998 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（同年 8 月 27 日付琉球新報より。c.f. 表 4.1）。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。また、ニッケル鉱運送中のばら積み船の異常傾斜事例も複数報告されている。

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繰り返し荷重が作用した際の間隙圧の上昇による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、4.3 節で述べた通り、基本的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。これにより、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。）は得られる。しかし、一面剪断試験や三軸圧縮試験は荷役現場において実施するには適さず、また、少なくとも数日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た。そのため、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。）を開発した。

陸上では、地盤の強度を簡便に評価する方法として静的機械式円錐貫入試験⁽³⁰⁾（ポータブルコーン貫入試験。以下、単に「円錐貫入試験」と呼ぶ。）が行われる。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にし、試料の調製方法等試験手順や荷崩れ危険性の評価基準を決定するための研究を実施した。

円錐貫入試験は、粘性土や腐植土などの軟弱地盤を対象とするもので、試験により得られる円錐貫入抵抗（ある深さにおいて円錐を土中に貫入させるのに要する力の最大値を円錐の底面積で割った値）は、剪断強度として無視できるほど内部摩擦

係数が小さい土の粘着力と良い相関を示すことが知られている^{(29),(30)}。これに対してニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法は、本来であれば、見かけ密度、内部摩擦係数（剪断抵抗係数）、粘着力の三つのパラメータで評価すべき荷崩れ危険性を、円錐貫入力（試料に円錐を貫入させるのに要する力）という一つのパラメータで評価しようとするものである。

試験法の開発においては、ニッケル鉱の種類（産地等による差異）によらない荷崩れ危険性の判定基準を決定することが必要である。ニッケル鉱の種類によらない判定基準が決まれば、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がニッケル鉱の種類により異なるのは、4.3 節で述べた通りである。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の一つである円錐貫入力を用いれば、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。

研究においては、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」を規定し、ニッケル鉱の種類によらない「代表円錐貫入力のクライテリア」を設定した。

4.4.2 ニッケル鉱の運送・積荷役状況

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。2000 年初頭における主な積み出し港を表 4.4 に示す。

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。

表 4.4 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
ニューカレドニア	Moneo	Nakety
	Karembe	Tontouta
	Thio	Kouaoua
	Teoudie	Boakaine
	Poya	Quinne
	Kopeto（開発中）	

ニッケル鉱の積付の多くは、写真 4.1 に示す通り、バージと船のグラブによる沖荷役で行われる。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、写真 4.2 に示すように、船のグラブを用いて荷繰りが行われる。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、写真 4.3 に示すように、貨物のパイルには斜面が残る。

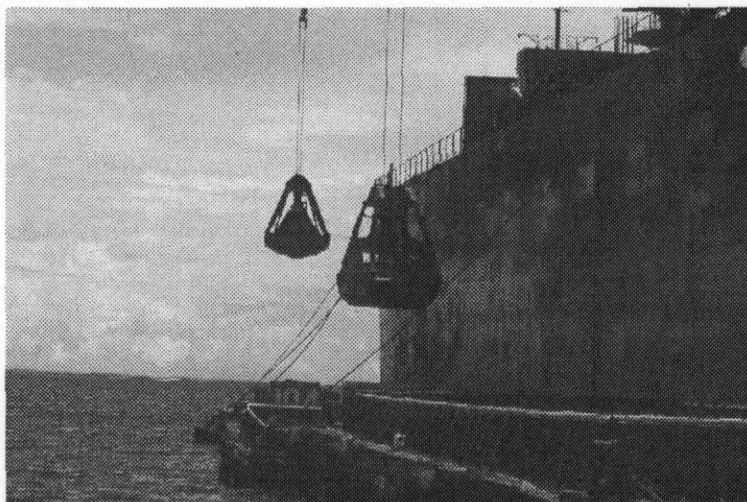


写真 4.1 ニッケル鉱の積荷役（船のグラブによる沖荷役）

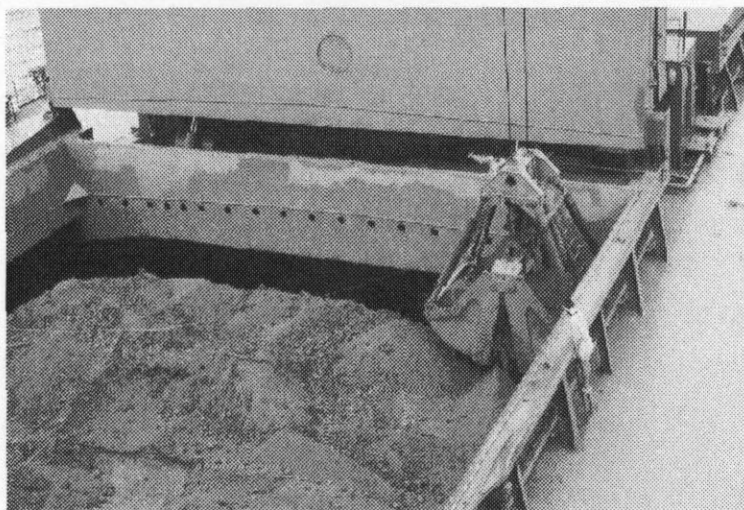


写真 4.2 船のグラブによる荷繰り（最終段階）

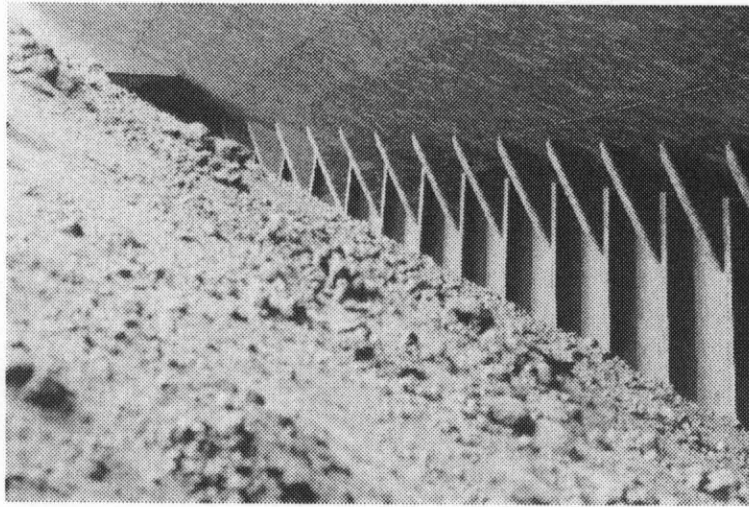


写真 4.3 船倉内のニッケル鉱のパイルの斜面（荷繰り後）

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

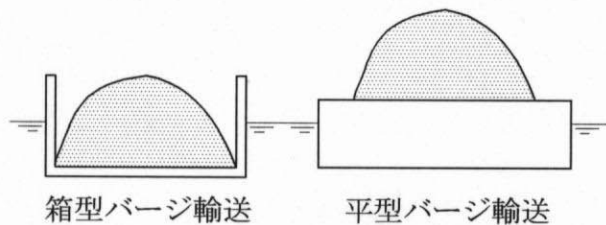


図 4.61 バージ上への貨物の積載

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、バージ運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 4.61 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。なお、写真 4.1 のバージは、箱形である。

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) 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) 荷役中における貨物への水の侵入の防止

(2-1) 雨中荷役の禁止

(2-2) バージ上の貨物への海水打ち込みの防止

(3) 十分な荷繰り

貨物への雨水等の侵入防止対策は、実際の荷役時にも実施される。そのため、本研究では、4.3.1 節で述べた通り、貨物の物性値が貨物内部の場所によらず一定として荷崩れの数値解析を行う。

4.4.3 ニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験法に関する研究の概要

試験法の開発における主な課題は、試験法の仕様の決定、代表円錐貫入力のカリテリアの設定及び試験法マニュアルの整備である。

試験法の仕様を決定する際の課題の一つは、まず、篩分けの必要性を明にすることである。篩分けの必要性については 4.4.5 節で述べる。篩分けを行った試料を用いての試験法の開発では、装置の仕様を決定するとともに、試験の繰返し回数及び代表値（代表円錐貫入力）の取り方を決定した。また、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。

代表円錐貫入力のカリテリアの設定について、以下の事項を実施した。

- (1) 試料の粒径分布等基礎的特性を把握
- (2) 試料の水分値と剪断強度の関係の計測
- (3) 荷崩れが危険となる剪断強度試験用試料の水分値（水分値の一次カリテリア）の解析
- (4) 水分値の一次カリテリアのニッケル鉍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。）への換算
- (5) 水分値と代表円錐貫入力の関係の評価
- (6) 各試料の荷崩れ限界水分値に対応する代表円錐貫入力の把握
- (7) 代表円錐貫入力のカリテリアを決定

ニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験法の開発の流れを図 4.62 に示す。また、本研究により開発された試験法のマニュアルを ANNEX C に示す。

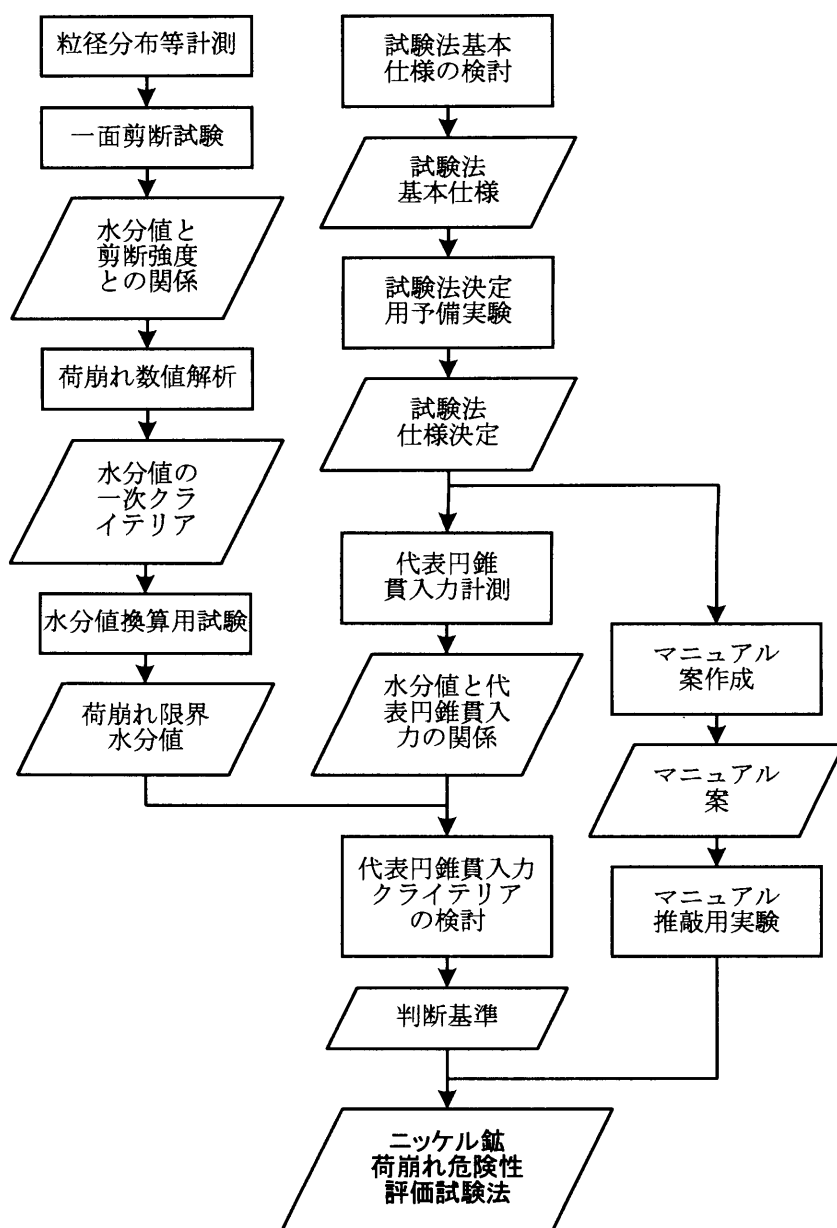


図 4.62 ニッケル鉛荷崩れ危険性評価試験法開発の流れ

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。

試験回数、荷崩れ危険性の判定方法については後述する。

4.4.4 試験法開発に用いた試料

4.3 章で述べた試料とは別に、5 種類のニッケル鉱を試料として用いた。以下、それぞれの試料を単に積み出し港の名前を取って、Gebe, Tontouta, Rio Tuba, Pomalaa, Boakaine と呼ぶ。各積み出し港と国の関係については、表 4.4 を参照されたい。

表 4.5 試料の固体比重

Ports of loading for nickel ore	Specific Gravity of Solids
Gebe	2.95
Tontouta	2.85
Rio Tuba	2.89
Pomalaa	2.92
Boakaine	2.79

各試料の固体比重を表 4.5 に示す。最大粒径を 100 mm とした場合の各試料の粒径分布を図 4.63 に示す。

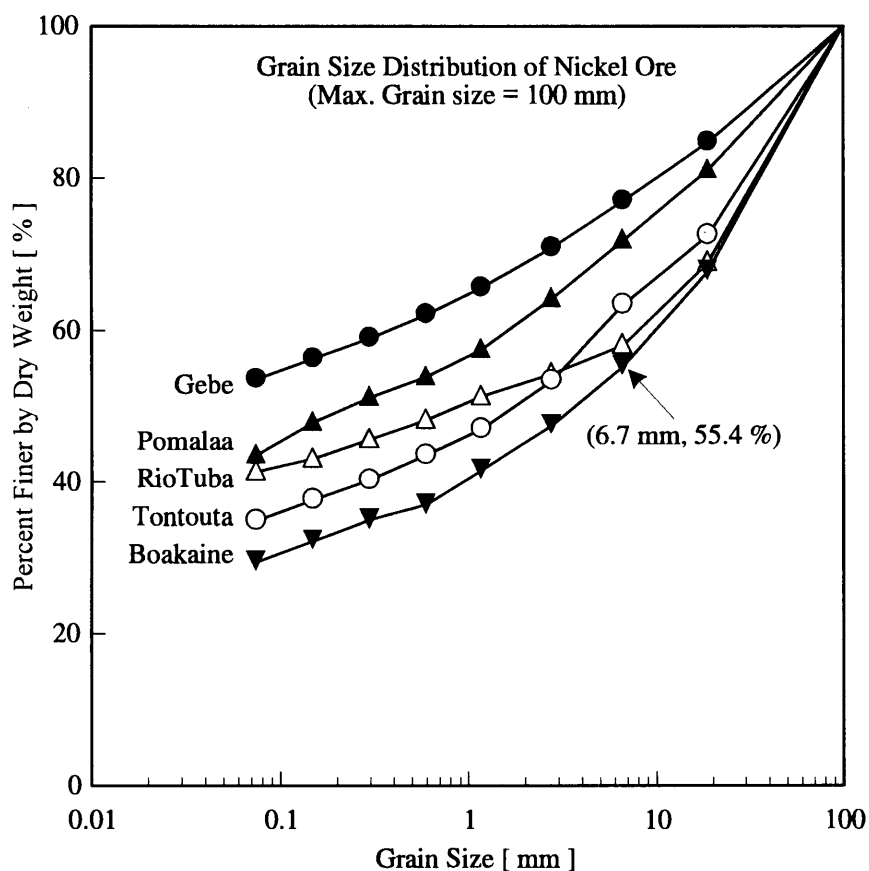


図 4.63 各試料の粒径分布 (最大粒径 100 mm)

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、一面剪断試験時の最大粒径 6.7 mm 以下の試料の通過重量百分率は、最も低い Boakaine の場合 55.4 %であった。なお、以下の実験において、最大粒径 100 mm の試料の水分値は、大太平洋金属株式会社、株式会社日向製錬所及び日本冶金工業株式会社に計測していただいた。試料を取り分ける際には、写

真 4.4 に示すように、正しく縮分を行った。縮分とは、偏りが無いように試料の一部を抽出するため、地盤工学において一般的に用いられる方法で、図 4.64 に示すように、試料を薄く広げた上で適当な数の山に分割し、試料を取り分けるものである。地盤工学では、こうした試料の抽出方法を用いることにより、抽出した試料の粒径分布や水分値の偏りを防いでいる。

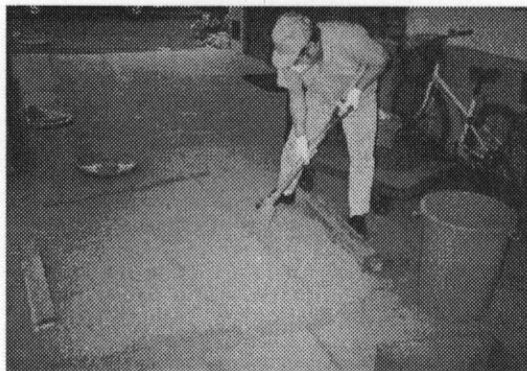


写真 4.4 縮分の様子

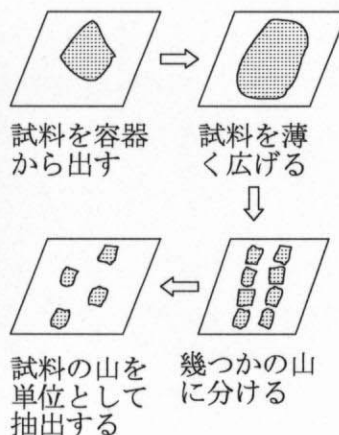


図 4.64 縮分

4.4.5 篩分けの必要性に関する調査・検討

4.4.5.1 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、ニッケル鉱の種類によらず、即ち、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の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、写真 4.5 に示すように数トンの試料を用意し、適宜水を加えるとともにショベルカー等を用いて攪拌することにより水分値を調製しつつ、写真 4.6 に示すように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。

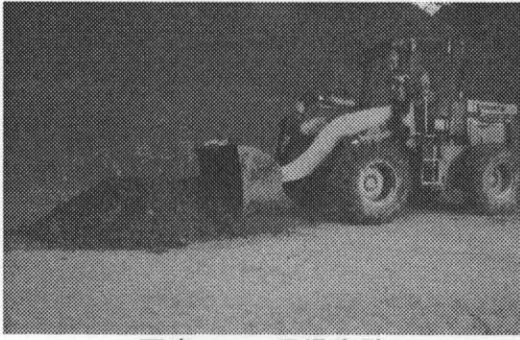


写真 4.5 現場実験

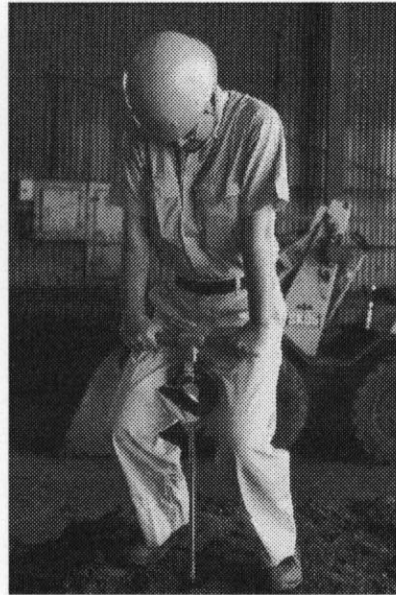


写真 4.6 現場円錐貫入試験

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、Boakaine 鈹は試料の水分値が最初から高かったため、試験した水分値の範囲は 22 % (c.f. 表 4.7) 以上であったのに対して、後述の方法で最大粒径 100 mm の試料における水分値の上限を求めると 21.2 %であった (c.f. 4.4.8.4)。即ち、Boakaine 鈹については、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、水分を含んだままの試料を強制的に篩を押し通すことにより最大粒径を 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ての円錐貫入試験 (写真 4.7 参照) の結果と、篩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、篩分けの必要性を判断した。その結果、試料により、篩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、篩分けが必要と判断したので、以下に述

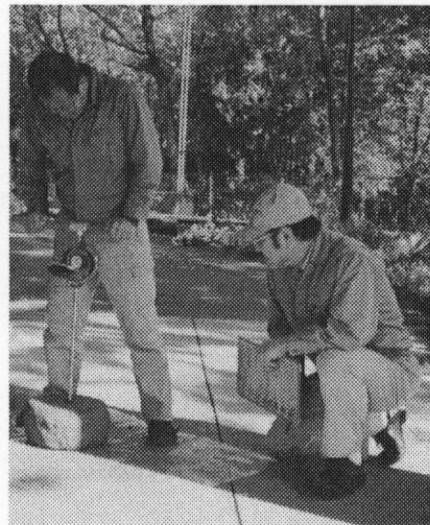


写真 4.7 最大粒径 19 mm 試料の円錐貫入試験 (容器無し。実験室試験)

べる。

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、例えば貨物の水分値を計測する際には、貨物 40,000 ton に対して 15 kg の試料を 800 箇所から採取し約 0.03 %の精度を得る等、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、試料の抽出に関する判断は荷送人及び荷受け人に委ねることとし、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発においては検討の対象とはしなかった。

4.4.5.2 篩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。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 4.6 及び表 4.7 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 4.6 Pomalaa 鉱の試料重量及び水分値 (D < 100 mm)

試料重量 kgf	加水時刻	加水重量 kgf	採取時刻	採取重量 kgf	試料 番号	水分値 [%]		
						*1	*2	平均値
3425.29						28.3	28.9	28.6
3400.74			10:05	24.55	1	28.3	28.9	28.6
3379.85			10:35	20.89	1	28.3	28.9	28.6
3395.28	11:45	15.43				28.6	29.2	28.9
3410.20	11:45	14.92				28.9	29.6	29.2
3385.56			13:36	24.64	2	28.9	29.6	29.2
3365.62			14:00	19.94	2	28.9	29.6	29.2
3380.24	14:26	14.62				29.2	29.9	29.6
3394.97	14:26	14.73				29.6	30.2	29.9
3375.87			15:06	19.10	3	29.6	30.2	29.9
3359.95			15:11	15.92	3	29.6	30.2	29.9
3374.67	8:46	14.72				29.9	30.5	30.2
3389.99	8:46	15.32				30.2	30.8	30.5
3369.57			9:15	20.42	4	30.2	30.8	30.5
3348.60			9:45	20.97	4	30.2	30.8	30.5
3363.46	9:50	14.86				30.5	31.1	30.8
3378.58	9:50	15.12				30.8	31.4	31.1
3356.86			10:30	21.72	5	30.8	31.4	31.1
3338.00			11:10	18.86	5	30.8	31.4	31.1
3352.75	11:15	14.75				31.1	31.7	31.4
3367.51	11:15	14.76				31.4	32.0	31.7

表 4.7 Boakaine 鈹の試料重量及び水分値 (D < 100 mm)

試料重量 kgf	加水時刻	加水重量 kgf	採取時刻	採取重量 kgf	試料 番号	水分値 [%]		
						*1	*2	平均値
3236.11						22.2	22.9	22.6
3214.67			10:55	21.44	1	22.2	22.9	22.6
3192.52			10:55	22.15	1	22.2	22.9	22.6
3203.47	11:00	10.95				22.5	23.2	22.9
3209.31	11:00	5.84				22.6	23.3	23.0
3186.82			13:05	22.49	2	22.6	23.3	23.0
3165.98			13:05	20.84	2	22.6	23.3	23.0
3176.25	13:50	10.27				22.9	23.6	23.2
3182.46	13:50	6.21				23.0	23.7	23.4
3160.40			14:00	22.06	3	23.0	23.7	23.4
3138.77			14:00	21.63	3	23.0	23.7	23.4
3148.61	8:30	9.84				23.3	24.0	23.6
3156.11	8:30	7.50				23.5	24.2	23.8
3135.92			9:45	20.19	4	23.5	24.2	23.8
3116.02			9:45	19.90	4	23.5	24.2	23.8

*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、後に述べるニッケル鈹荷崩れ危険性評価試験法と同じで、それぞれ毎秒約 1 cm、約 15 cm とした。試験において使用した装置の円錐貫入力測定範囲が 500 N であったため、円錐貫入力が 500 N 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 4.8 及び表 4.9 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 4.8 Pomalaa 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 [N]				
1	327	238	210	170	156
2	334	261	217	184	159
3	350	287	238	215	170
4	359	301	238	219	175
5	371	308	252	229	177
6	373	313	257	238	180
7	397	322	268	240	182
8	397	324	280	252	184
9	404	331	282	252	196
10	404	345	285	254	201
11	418	355	294	257	201
12	422	357	313	261	203
13	443	366	322	273	208
14	448	380	327	280	208
15	455	385	327	280	210
16	457	397	345	292	222
17	462	404	378	292	229
18	462	415	448	299	236
19	469	420	467	299	245
20	485	420	467	308	266
21	over	429	474	322	287
22	over	443	over	322	287
23	over	448	over	327	355
24	over	464	over	383	378
25	over	471	over	397	478
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 4.9 Boakaine 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 [N]			
1	175	154	110	84
2	184	159	121	91
3	205	163	128	98
4	208	177	133	114
5	210	182	145	117
6	233	205	159	121
7	233	215	168	121
8	238	217	168	135
9	247	217	170	152
10	252	217	173	154
11	257	226	187	180
12	259	229	217	184
13	280	231	257	201
14	285	233	257	201
15	294	238	303	205
16	315	264	432	215
17	327	275	over	217
18	327	303	over	217
19	355	343	over	238
20	371	343	over	273
21	373	355	over	280
22	390	411	over	338
23	408	432	over	397
24	443	467	over	471
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 4.10 に示す。

表 4.10 最大円錐貫入力の代表値の例 (単位 : N)

試料		Pomalaa					Boakaine			
水分値		28.6	29.2	29.9	30.5	31.1	22.6	23.0	23.4	23.8
Minimum		327	238	210	170	156	175	154	110	84
平均値	3/30 data	337	262	222	190	162	188	159	120	91
	6/30 data	352	285	235	209	170	203	173	133	104
	10/30 data	372	303	253	225	178	219	191	148	119
	15/30 data	393	325	274	240	187	237	204	180	144

4.4.5.3 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 となるように篩分けを行い、容器を用いずに、円筒形の供試体を形成し、円錐貫入試験を実施した。供試体は、篩分けした試料を手で押し固める、試料の固まりを地面に落とす等の方法により形成した。形成した供試体の形状は、写真 4.7 に示したものと同様である。

試料は、表 4.6 及び表 4.7 の「試料番号」に示した各状態において抽出し、篩分けしたものをを用いた。篩分けした試料、即ち、最大粒径 19 mm の試料の水分値計測の結果を、対応する最大粒径 100 mm の試料の水分値と併せて、表 4.11 に示す。

表 4.11 最大粒径 19 mm 試料の水分値

Pomalaa			Boakaine		
試料番号	水分値 [%] (D < 19 mm)	水分値 [%] (D < 100 mm)	試料番号	水分値 [%] (D < 19 mm)	水分値 [%] (D < 100 mm)
1	31.4	28.6	1	26.5	22.6
2	31.2	29.2	2	27.0	23.0
3	32.1	29.9	3	27.4	23.4
4	32.3	30.5	4	27.6	23.8
5	32.7	31.1			

円錐貫入試験は、一つの試料について、試験毎に供試体を形成し直して、7 回行った。結果を表 4.12 及び表 4.13 に示す。

表 4.12 Pomalaa (D < 19 mm)
円錐貫入試験結果

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 [N]				
1	over	324	282	203	229
2	397	331	236	191	168
3	362	336	294	217	145
4	385	345	243	196	170
5	失敗	317	275	201	166
6	420	362	229	203	180
7	350	341	261	196	173
平均	383	337	260	201	176

表 4.13 Boakaine (D < 19 mm)
円錐貫入試験結果

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 [N]			
1	159	100	89	82
2	135	112	91	75
3	147	152	89	103
4	133	112	110	100
5	140	110	89	105
6	149	117	89	82
7	121	103	98	86
平均	141	115	94	90

篩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 鉱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 4.65 及び図 4.66 に示す。

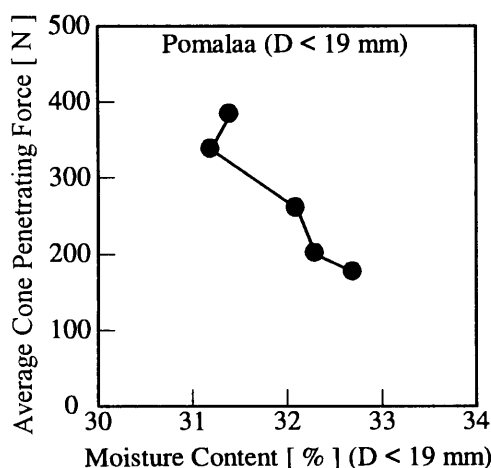


図 4.65 最大粒径 19 mm 試料に関する平均円錐貫入力 - Pomalaa

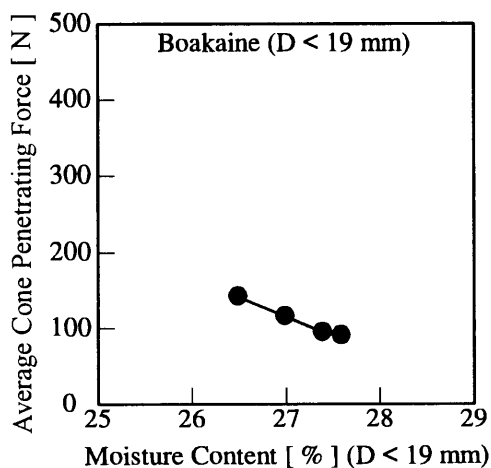


図 4.66 最大粒径 19 mm 試料に関する平均円錐貫入力 - Boakaine

4.4.5.4 篩分けの有無と代表円錐貫入力

表 4.10 に示した篩分けを行わない試料の円錐貫入力の代表値と、表 4.12 及び表 4.13 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 4.67 及び図 4.68 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。c.f. 表 4.11）に基づいてグラフを作成した。図中、太線は最大粒径 19 mm の試料の平均円錐貫入力、細線は篩分けを行わない試料（最大粒径 100 mm）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。

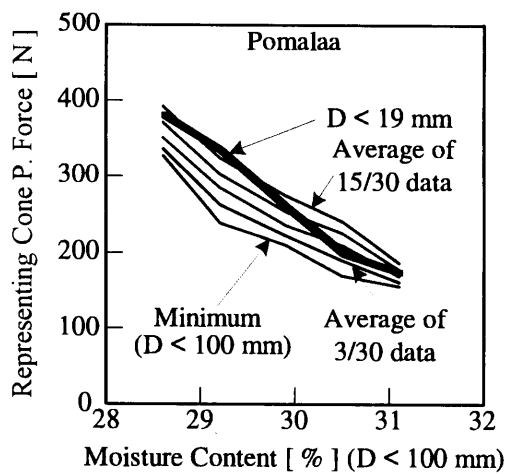


図 4.67 試料の最大粒径が円錐貫入力に及ぼす影響 - Pomalaa

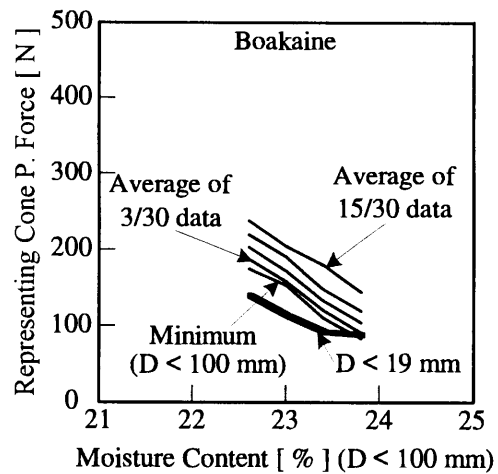


図 4.68 試料の最大粒径が円錐貫入力に及ぼす影響 - Boakaine

これらの図より、代表値の取り方によらず、篩分けを行わない試料の代表円錐貫入力と、篩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、円錐貫入力が多い場合、即ち、貨物の剪断強度が多い場合は、篩分けの有無の影響が試料によって異なることが分かる。

4.4.5.5 篩分けの必要性の検討

図 4.63 に示した通り、Boakaine は Pomalaa と比較して、大きな粒子を多く含む。図 4.68 より、Boakaine の試料では、水分値が低い場合、即ち剪断強度が多い場合、篩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。後述の通り、試料に含まれる比較的大きな粒子が円錐貫入力に及ぼす影響は、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、試料の篩分けを行わない場合、粒径 19 mm を超える粒子の影響がさらに強く表れると言える。

さて、以上の試験の目的は、4.4.5.1 節で述べた通り、篩分けを行わない試料を用いて、ニッケル鉋の種類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を確認することであった。また、4.3.6 節で述べた通り、本研究では、荷崩れの危険性の評価は、基本的には、最大粒径を調製した試料を用いた剪断強度試験（一面剪断試験）結果に基づいて行う。よって、円錐貫入試験時の試料の

最大粒径は、最大粒径を調製した試料を用いた一面剪断試験結果に基づく荷崩れ危険性との関係を考慮して検討する必要がある。このように評価した荷崩れ危険性のクライテリアと円錐貫入力の関係について言えば、円錐貫入試験時の試料の最大粒径が一面剪断試験時のそれに近い方が、荷崩れ危険性のクライテリアに対応する代表円錐貫入力のばらつきが少ないと考えられ、また、後述する通り、最大粒径を 19 mm とした場合の荷崩れ危険性のクライテリアに対応する代表円錐貫入力のばらつきについては、図 4.122 に示す結果が得られている。一方、図 4.67 と 4.68 から分かる通り、円錐試験時における最大粒径を 19 mm とした場合と比較して、粒径調製をしない場合は、試験回数を多くして代表円錐貫入力の設定方法を工夫したとしても、荷崩れ危険性のクライテリアに対応する代表円錐貫入力のばらつきはさらに大きくなると考えられるため、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法においては、試料の最大粒径を調製することとした。

4.4.6 ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の仕様

4.4.6.1 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、ニッケル鉱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鉱に対する試験法としては、円錐貫入試験と比較して、結果のばらつき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、ニッケル鉱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のみを円錐貫入試験の結果として用いることにした。

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、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法においても、締固めを行う。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、ニッケル鉱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、ランマを用いて突固めによる締固めを行い、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。

4.4.6.2 試験装置等の仕様

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が、一面剪断試験結果に基づく荷崩れ危険性の基本的評価では、一定以上の大きさの粒子の影響を考慮していない (c.f. 4.3.6)。これに対して、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ことが必要であり、荷崩れ危険性のクライテリアに対応する代表円錐貫入力のばらつきが小さいことが望ましい。そのため、篩分けを行わない試料についても実験を行い、大きな粒子は試料から除去することにした (c.f. 4.4.5.5)。以下に述べる試験容器の大きさ及び締固め方法を考慮して、試料の最大粒径は 19 mm とした。

試料の最大粒径及び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、 $4,000 \text{ cm}^3$ に決定した。試験容器と円錐の大きさの関係を図 4.69 に示す。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 4.14 に示す。

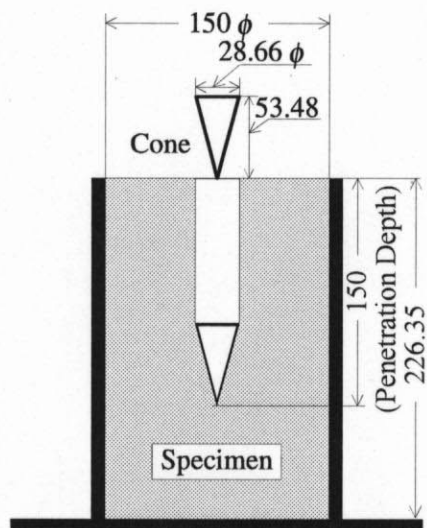


図 4.69 試験容器と円錐

表 4.14 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]	突固め層数	層当たり突固め回数	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

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。

開発した試験法における試料の挿入及び締固めの条件をまとめると表 4.15 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 4.15 ニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験法における締固め条件

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

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。

4.4.6.3 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（最大粒径：19 mm）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。円錐貫入試験結果を図 4.70 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供試体の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。

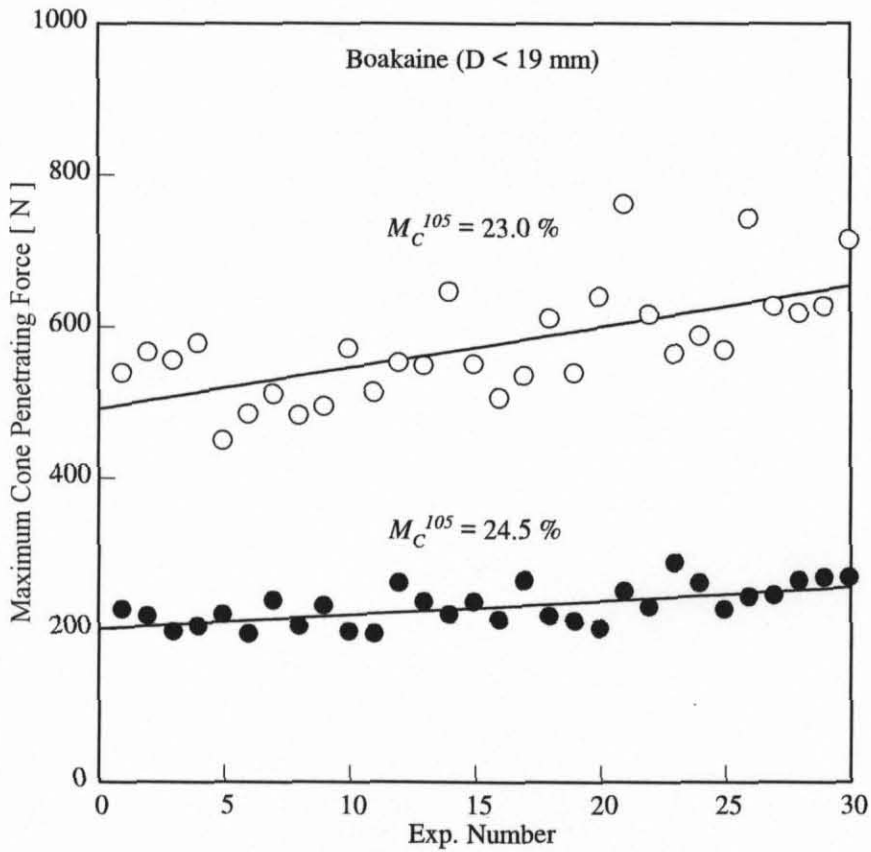


図 4.70 円錐貫入予備試験結果

各最大円錐貫入力はこの直線上の値に対する比率の度数分布を図 4.71 に示す。図より、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。

試験の繰り返し回数を決めるため、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 4.72 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、

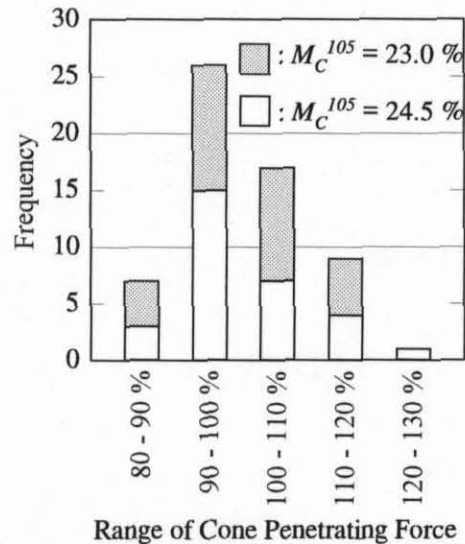


図 4.71 トレンド線に対する比率の度数分布

細線は当該実験の前後のデータを含む計 3 データのうちの最低値、太線は当該実験の前後の 2 データを含む計 5 データのうちの最低値である。この図より、試験回数 3 回の場合と 5 回の場合で、最大円錐貫入力に最低値には、特に最大円錐貫入力に 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。

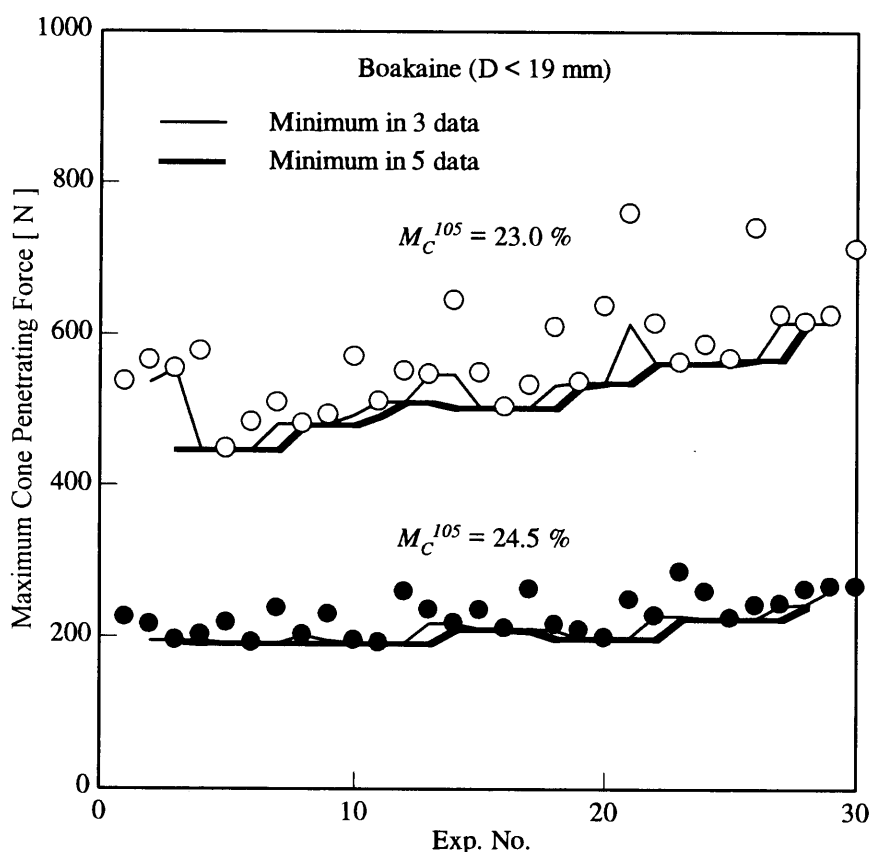


図 4.72 試験回数と最大円錐貫入力の最低値

以上をまとめると、ニッケル鉍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、最大円錐貫入力の最低値（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。円錐貫入試験には二名を要し、3 回の試験の所要時間は 2~3 時間程度である。

4.4.7 水分値の一次クライテリア

4.2 節で述べた通り、一面剪断試験と荷崩れの数値解析により、各試料について、水分値の一次クライテリアを決定した。一面剪断試験の条件を表 4.16 に示す。

表 4.16 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

試料の均一性を確保するため、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。

試料の最大粒径を 6.7 mm としたのは、
 供試体の厚さは供試体の直径の 1/2 程度ま
 でに抑える必要があること及び試料の最
 大粒径は供試体の厚さの 1/4 以下に抑える
 必要があることを考慮して、また、篩分
 けの影響を減らすため最大粒径はなるべく
 大きいことが望ましいことを考慮した
 ためである。最大粒径を 6.7 mm とした場
 合の各試料の粒径分布を図 4.73 に示す。
 この図は、図 4.63 の一部を抽出した図に
 相当する。

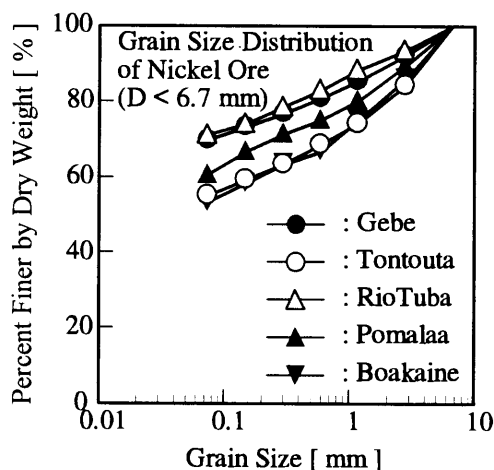


図 4.73 試料の粒径分布

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 4.74 に示す。

図は、水分値 36.4 % の Gebe 鉱に関する試験結果であり、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 σ_N 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、各試料の間隙比を解析した。各試料に関する剪断強度の解析結果を図 4.75～図 4.104 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。剪断抵抗係数及び粘着力と水分値との関係を図 4.105～図 4.109 に示す。

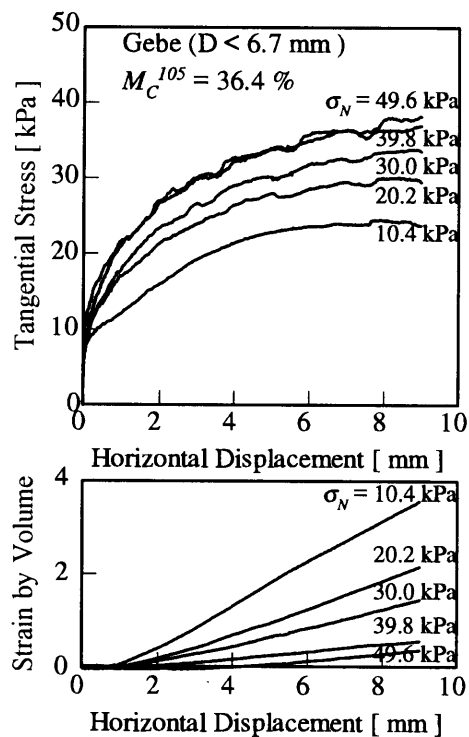


図 4.74 一面剪断試験結果の例

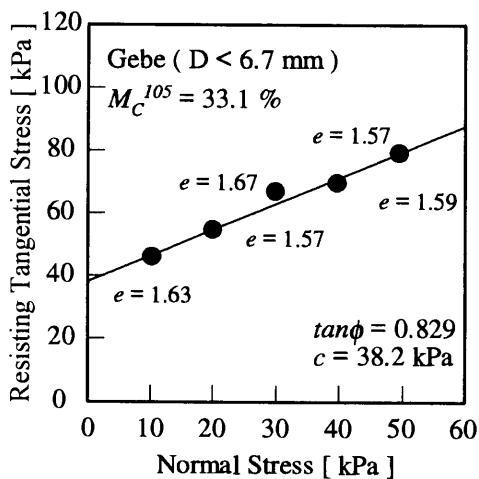


図 4.75 剪断強度 Gebe - 1

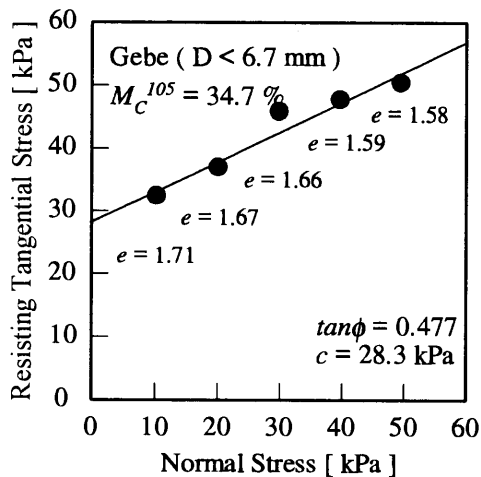


図 4.76 剪断強度 Gebe - 2

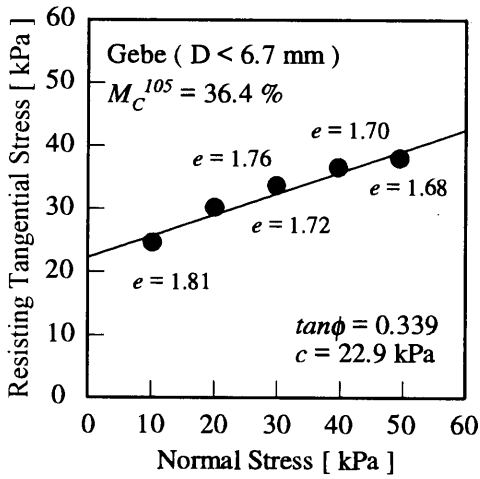


图 4.77 剪断强度 Gebe - 3

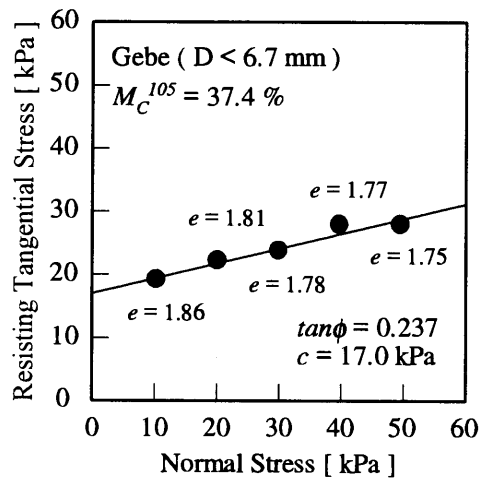


图 4.78 剪断强度 Gebe - 4

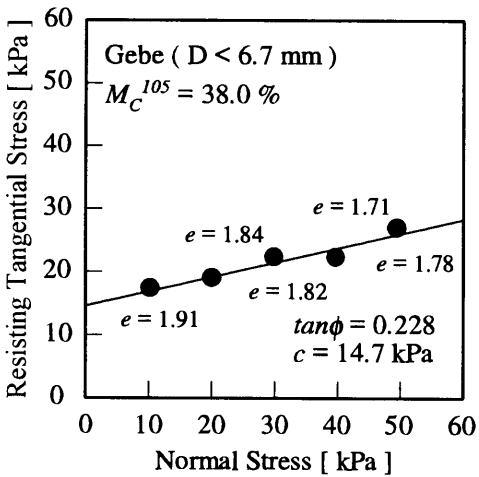


图 4.79 剪断强度 Gebe - 5

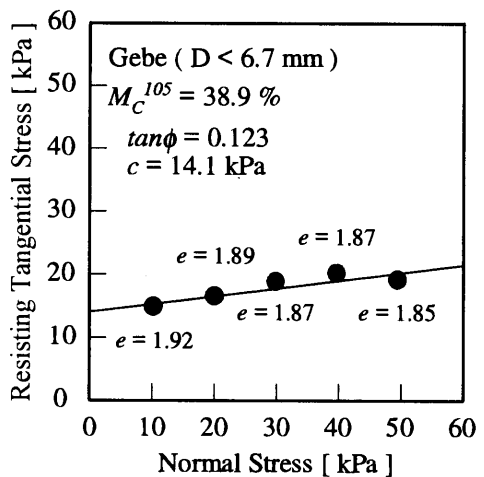


图 4.80 剪断强度 Gebe - 6

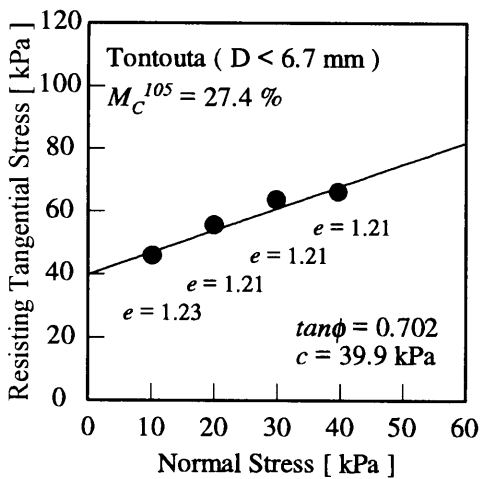


图 4.81 剪断强度 Tontouta - 1

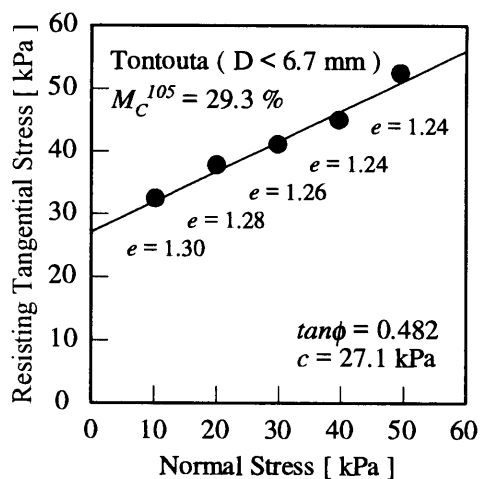


图 4.82 剪断强度 Tontouta - 2

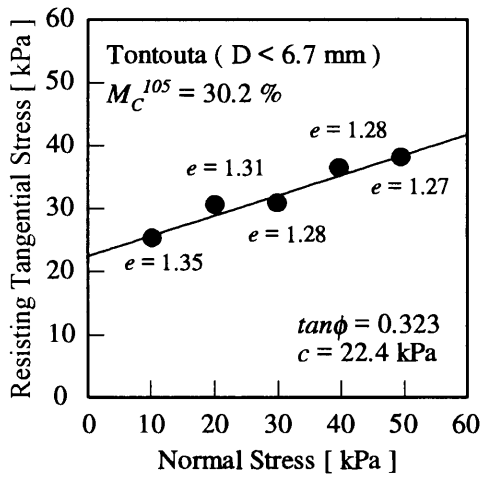


图 4.83 剪断强度 Tontouta - 3

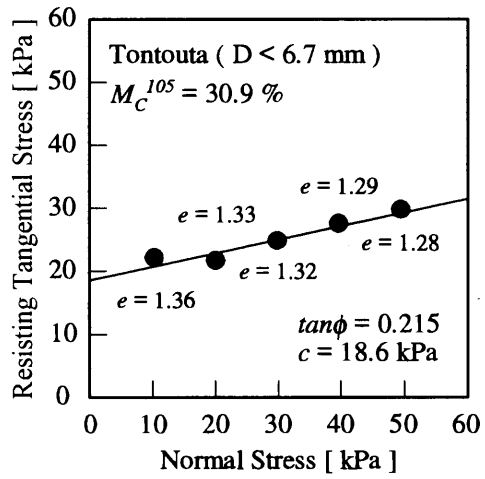


图 4.84 剪断强度 Tontouta - 4

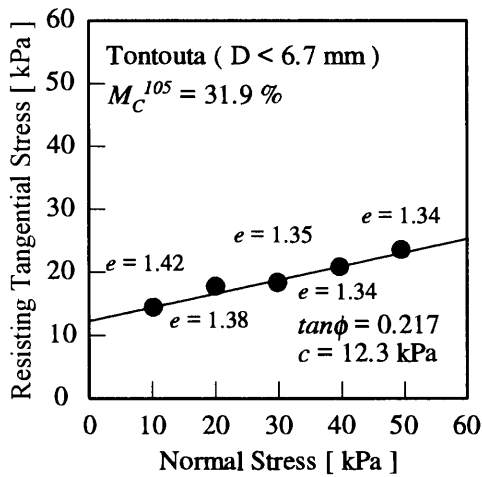


图 4.85 剪断强度 Tontouta - 5

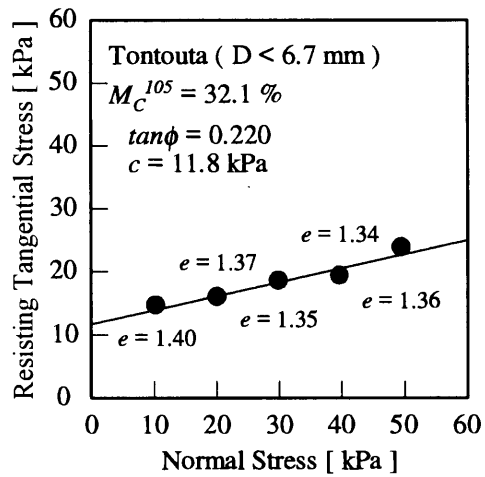


图 4.86 剪断强度 Tontouta - 6

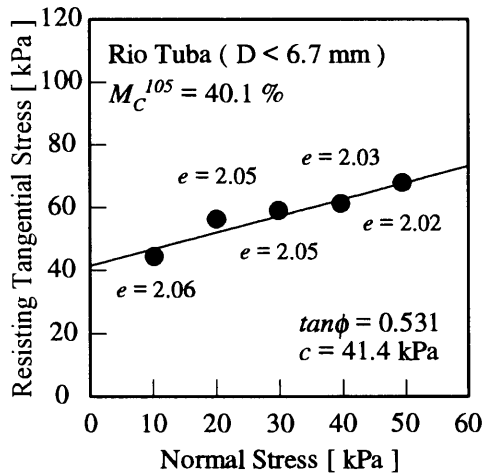


图 4.87 剪断强度 Rio Tuba - 1

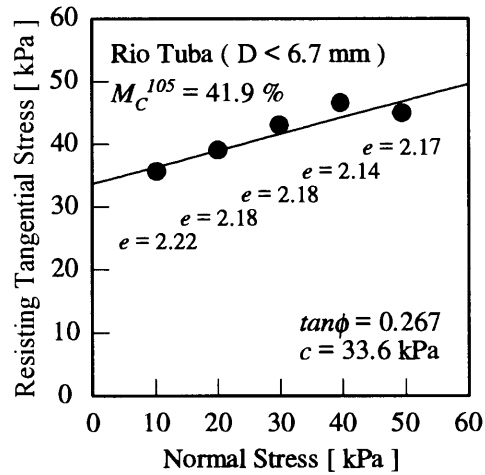


图 4.88 剪断强度 Rio Tuba - 2

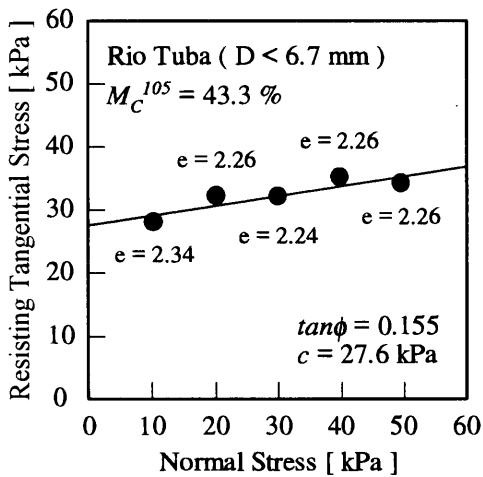


图 4.89 剪断强度 Rio Tuba - 3

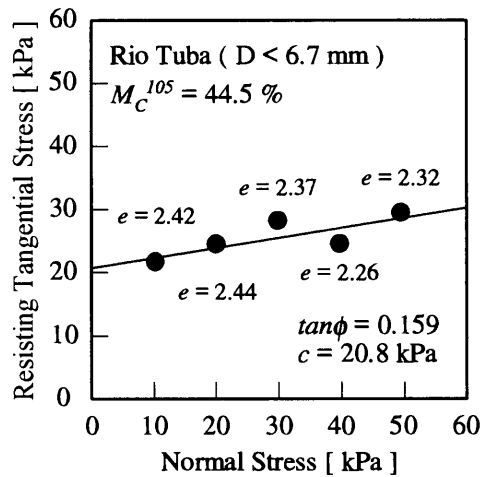


图 4.90 剪断强度 Rio Tuba - 4

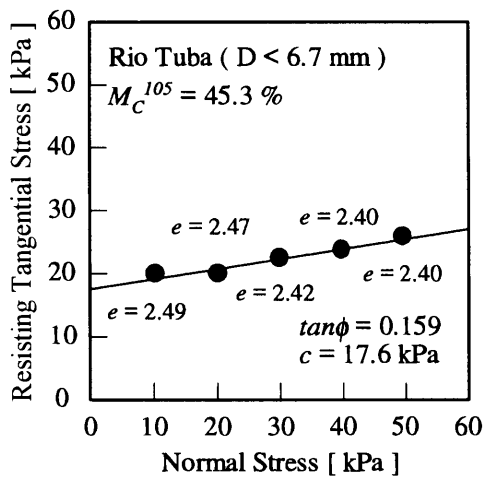


图 4.91 剪断强度 Rio Tuba - 5

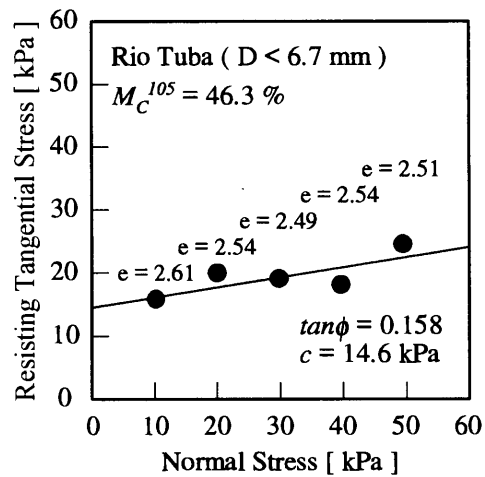


图 4.92 剪断强度 Rio Tuba - 6

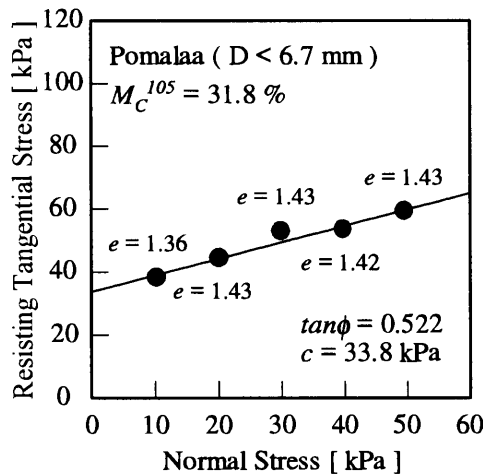


图 4.93 剪断强度 Pomalaa - 1

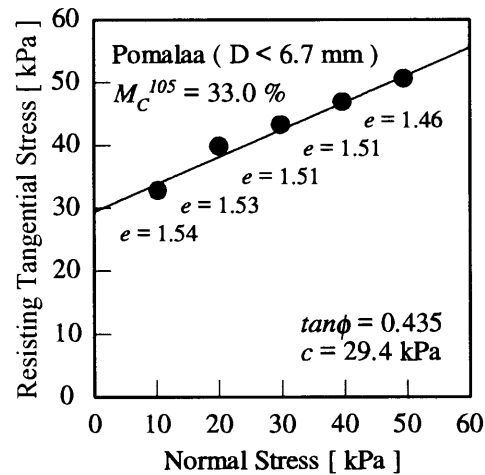


图 4.94 剪断强度 Pomalaa - 2

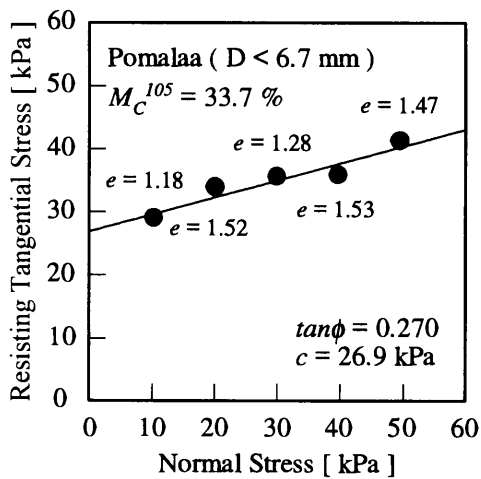


图 4.95 剪断强度 Pomalaa - 3

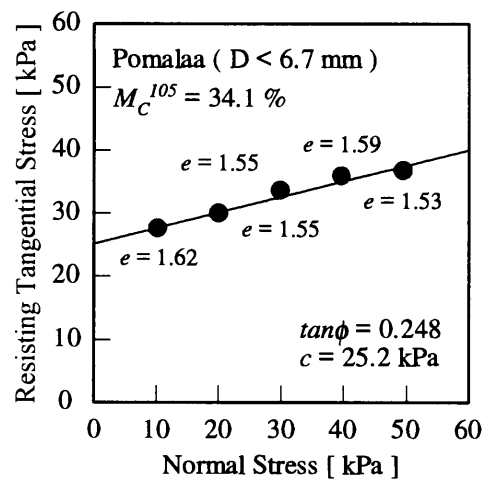


图 4.96 剪断强度 Pomalaa - 4

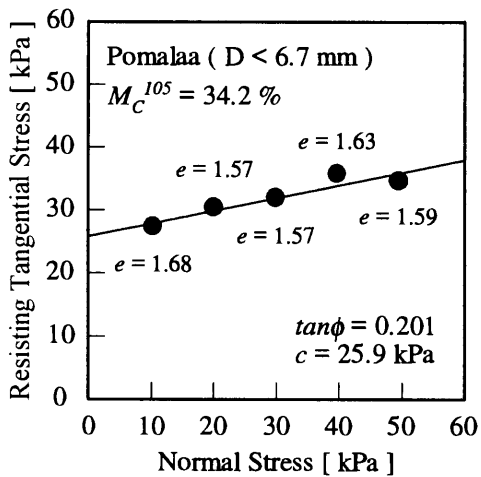


图 4.97 剪断强度 Pomalaa - 5

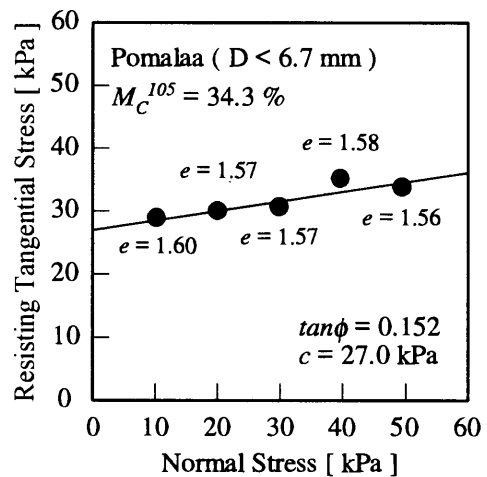


图 4.98 剪断强度 Pomalaa - 6

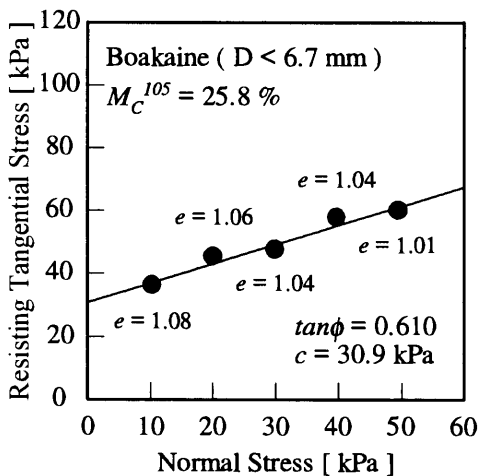


图 4.99 剪断强度 Boakaine - 1

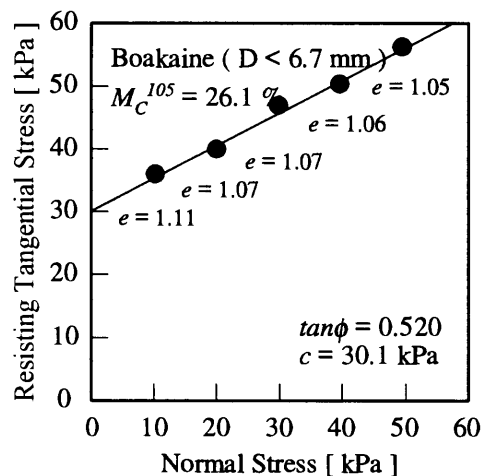


图 4.100 剪断强度 Boakaine - 2

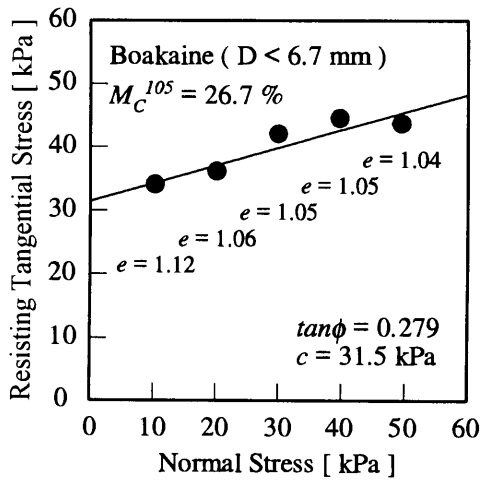


图 4.101 剪断強度 Boakaine - 3

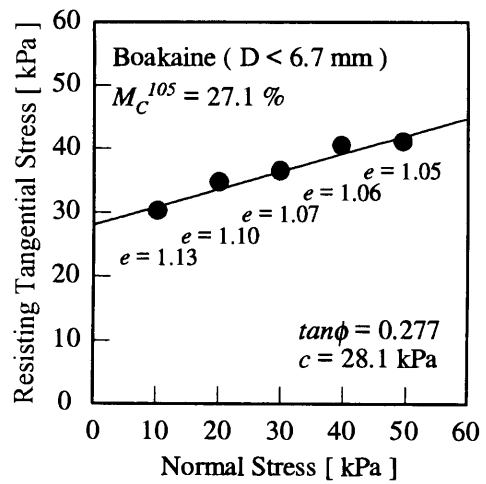


图 4.102 剪断強度 Boakaine - 4

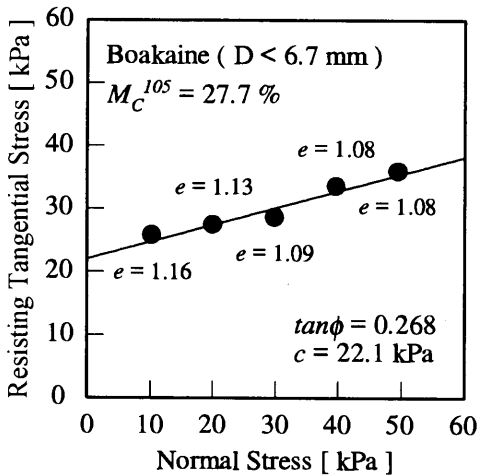


图 4.103 剪断強度 Boakaine - 5

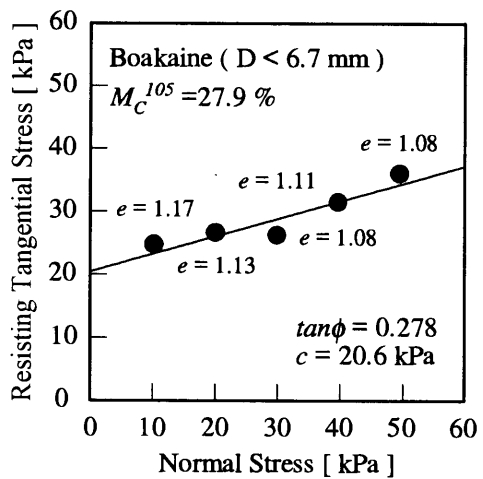


图 4.104 剪断強度 Boakaine - 6

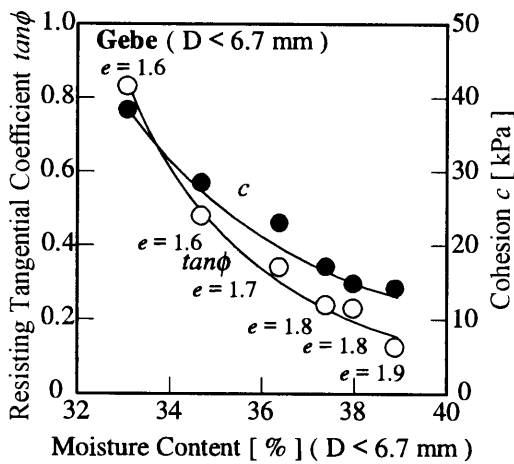


图 4.105 剪断強度と水分値 Gebe

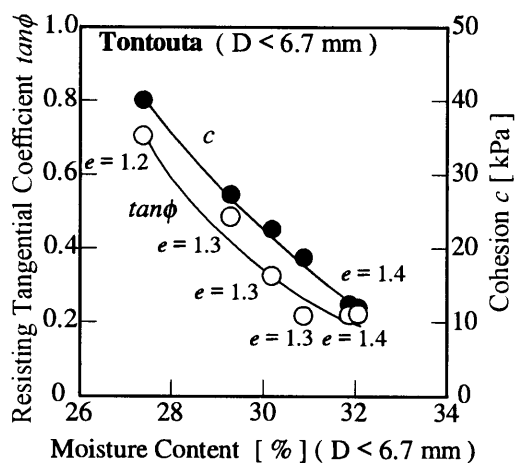


图 4.106 剪断強度と水分値 Tontouta

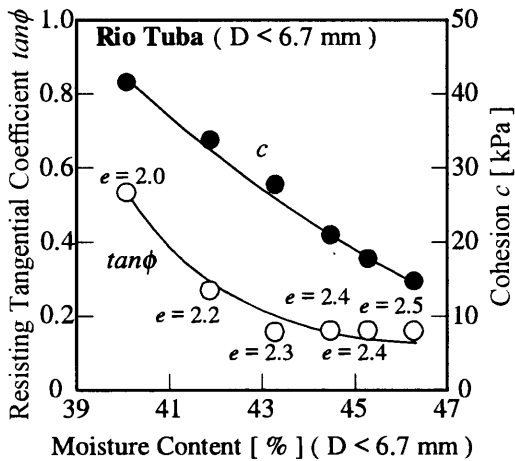


図 4.107 剪断強度と水分値 Rio Tuba

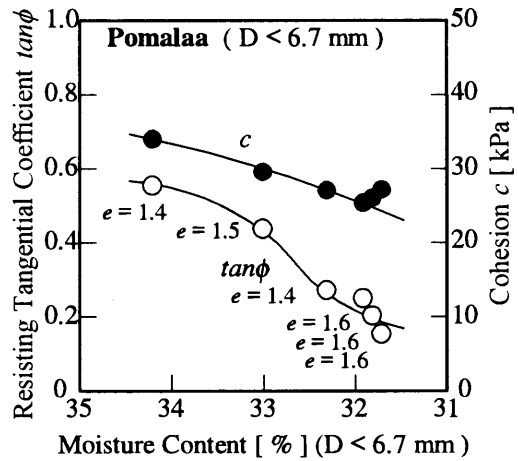


図 4.108 剪断強度と水分値 Pomalaa

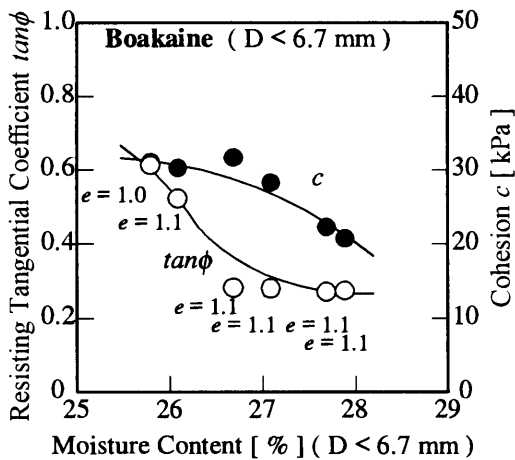


図 4.109 剪断強度と水分値 Boakaine

図 4.105～図 4.109 に示した剪断強度と水分値との関係を用いて、荷崩れの数値解析を行った。図に示した通り、剪断強度を計測における水分値の範囲は約 3 %であり、これらの範囲は、図 4.18 及び図 4.46～図 4.48 に示した剪断強度計測における水分値の範囲 (約 14～20 %) のうち、粘着力のピークを超えて水分値の増加とともに粘着力が急激に下がっていく範囲に相当する。

荷崩れ数値解析における加速度としては、4.3 節と同様に、BC Code の荷繰り基準に倣って 30 度の静的横傾斜を想定した。また、貨物は可能な限り荷繰りされていると仮定した。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調査した結果を表 4.17 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7 m、貨物のパイル頂部の平坦部の幅としては13 mを想定した。

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⁽⁵³⁾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、3~5 m程度を想定すべきであると考えられたため、5 mとした。

貨物の見かけの単位体積重量は、一面剪断試験時の試料の密度を勘案し、表 4.18 に示す値を用いた。

荷崩れ数値解析の結果を図 4.110~図 4.114 に示す。図において臨界安全率 1.2 に対応する水分値を求めることにより、水分値の一次クライテリア、即ち、最大粒径 6.7 mm の試料における荷崩れ危険性のある水分値を求めることができる。水分値の一次クライテリアを表 4.19 に示す。

表 4.17 ばら積み船の船幅とハッチ幅

	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

表 4.18 想定単位体積重量

Ports of loading for nickel ore	Unit Weight [gf/cm ³]
Gebe	1.69
Tontouta	1.78
Rio Tuba	1.55
Pomalaa	1.75
Boakaine	1.83

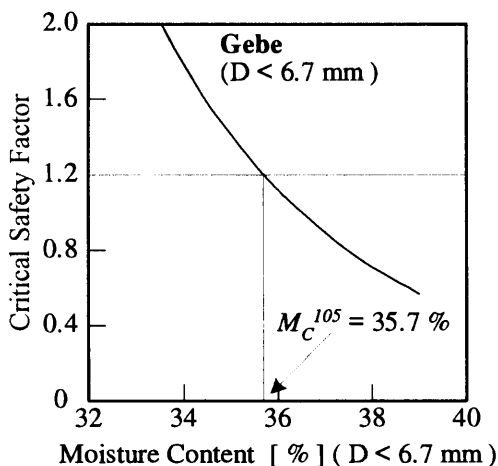


図 4.110 水分値と臨界安全率 - Gebe

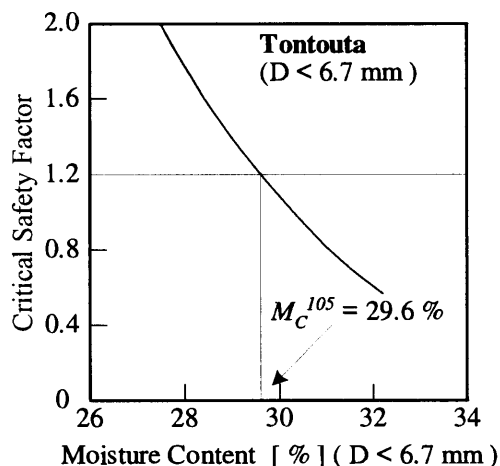


図 4.111 水分値と臨界安全率 - Tontouta

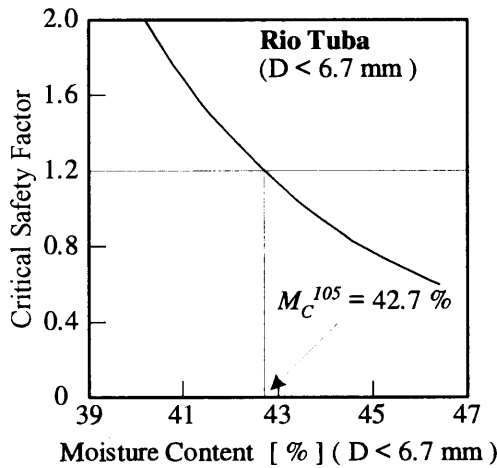


図 4.112 水分値と臨界安全率- Rio Tuba

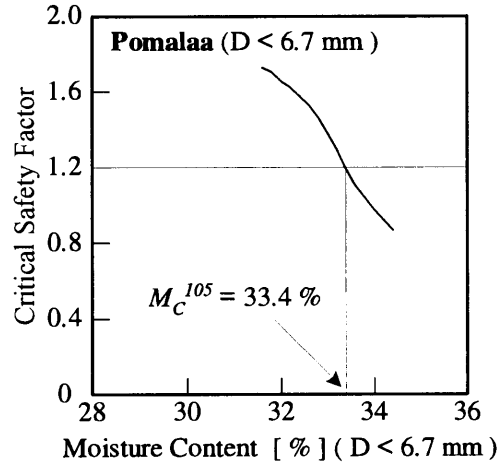


図 4.113 水分値と臨界安全率- Pomalaa

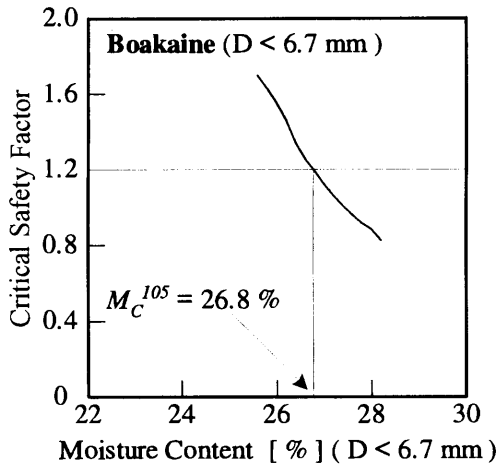


図 4.114 水分値と臨界安全率- Boakaine

表 4.19 水分値の一次クライテリア

Port 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

4.4.8 水分値の換算

4.4.8.1 水分値換算の考え方

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に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るため、水分値を適切に換算する必要がある。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に換算する際の一つの考え方は、一定以上の大きさの粒子は水分を含まないと仮定することである^{(54),(55)}。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を含む試料の水分値は低くなり、この水分値を用いて評価することは安全側ではあるが、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。

研究においては、まず、試料の最大粒径と水分値の関係を実験により直接求めることを試みた。実験では、予め粒径分布を計測した最大粒径 19 mm の試料の水分調整を行うことにより、一定程度の粘着力を有する湿った試料を用意し、これを十分に均質にしたうえで二つに分け、一つはそのまま水分値（最大粒径 19 mm）を計測し、残りは、呼び径 6.7 mm の篩を手で押し通して、最大粒径を 6.7 mm とし、その水分値（最大粒径 6.7 mm）を計測した。その結果、呼び径 6.7 mm の篩を押し通して、最大粒径 19 mm の湿った試料の中から、水分値計測を行うのに十分な量の最大粒径 6.7 mm の試料を得るのに手間取り、得られた最大粒径 6.7 mm の試料は作業中に乾燥している恐れがある等の理由により、この実験では、十分な精度が確保できないことが分かった。そのため、試料の最大粒径と水分値の関係を、実験で直接求めることは断念した。

ここで、篩の上に残る試料、即ち、最大粒径 6.7 mm の試料を抽出した残りの試料の水分値を計測しなかったのは、粘土状物質であるニッケル鉱では、粘着力がある状態では、最大粒径 19 mm の試料から、粒径 6.7 mm 以下の粒子を全て取り去ることは不可能であることによる。これは、粒径 6.7 mm 以上の粒子の周りに細かな粒子が付着することによる。粘着力のある最大粒径 100 mm の試料から最大粒径 19 mm の試料を抽出する実験においても、同様の理由で、篩の上に残る試料の水分値は計測しなかった。

一方、粒径 6.7 mm から 19 mm の試料の水分値（細かな粒子が付着していない場合の値。篩いの上に残った試料の水分値とは異なる。）を、通過重量百分率を考慮して計算したところ、この水分値は、元の試料、即ち最大粒径 19 mm の試料の水分値が一定以上である場合、元の試料の水分値によらないとの傾向が見られた⁽⁶⁴⁾。このことは、以下のように解釈できる。

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論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。4.3 節で述べた通り、乾いた状態のニッケル鉱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が粒子接点でメニスカスを形成することに起因す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、試料の水分値が粘着力のピークに対応する水分値を超えた場合には、粒子の中に含まれる水分値は、その最大値に近いと考えられる。前述の傾向、即ち、理想的な篩分けが行われたと仮定した場合に篩の上に残るであろう粒子の中に含まれる水の量が、元の試料の水分値によらない傾向は、以上の通り解釈できる。

さて、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の評価を目的としている。本研究の対象となる水分値の範囲では、理想的な篩分けが行われたと仮定した場合に篩の上に残るであろう粒子の中に含まれる水の量は、その最大値に近いと考えられる。

以上の検討により、本研究では、6.7 mm～19 mm の粒子を抽出し、これらの粒子が含み得る水分値を計測して、粒径分布（最大粒径 19 mm の試料中に含まれる最大粒径 6.7 mm の試料の乾燥状態における通過重量百分率）に基づき、最大粒径 6.7 mm の試料の水分値から、最大粒径 19 mm の試料の水分値を推定することにした。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た。以下では、この考え方に基づく水分値換算の式を示した上で、最大粒径 100 mm の湿った試料から最大粒径 19 mm の試料を抽出した実験結果に基づき、この水分値換算方法の有効性について、検討する。

4.4.8.2 水分値換算の式

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、空気の質量は無視する。

$$M_c = \frac{M_w}{M_w + M_s} \quad (4.3)$$

$$M_w = \frac{M_c \cdot M_s}{1 - M_c} \quad (4.4)$$

$$M_s^S = p \cdot M_s^T \quad (4.5)$$

$$M_s^L = (1-p) \cdot M_s^T = \frac{1-p}{p} M_s^S \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} M_w^T &= M_w^S + M_w^L = \frac{M_c^S \cdot M_s^S}{1-M_c^S} + \frac{M_c^L \cdot M_s^L}{1-M_c^L} \\ &= \frac{M_c^S \cdot M_s^S \cdot (1-M_c^L) + M_c^L \cdot M_s^L \cdot (1-M_c^S)}{(1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

ここで、(4.6)式を(4.7)式に代入すると

$$\begin{aligned} M_w^T &= \frac{M_s^S \cdot \{M_c^S \cdot p \cdot (1-M_c^L) + M_c^L \cdot (1-p) \cdot (1-M_c^S)\}}{p \cdot (1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)} \\ &= \frac{M_s^S \cdot \{p \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L\}}{p \cdot (1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} M_c^T &= \frac{M_w^T}{M_w^T + M_s^T} = \frac{M_w^T}{M_w^T + \frac{1}{p} \cdot M_s^S} \\ &= \frac{p \cdot M_w^T}{p \cdot M_w^T + M_s^S} = \frac{\frac{p}{M_s^S} \cdot M_w^T}{\frac{p}{M_s^S} \cdot M_w^T + 1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

(4.8)式より

$$\frac{p}{M_s^S} \cdot M_w^T = \frac{p \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L}{(1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)} \quad (4.10)$$

ここで、(4.9)式に(4.10)式に代入すると

$$\begin{aligned} M_c^T &= \frac{\frac{p}{M_s^S} \cdot M_w^T}{\frac{p}{M_s^S} \cdot M_w^T + 1} = \frac{\frac{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L}{(1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)}}{\frac{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L}{(1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)} + 1} \\ &= \frac{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L}{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L + (1-M_c^S) \cdot (1-M_c^L)} \\ &= \frac{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L}{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L + 1 - M_c^S - M_c^L + M_c^S \cdot M_c^L} \\ &= \frac{P \cdot M_c^S + (1-p) \cdot M_c^L - M_c^S \cdot M_c^L}{1 - (1-p) \cdot M_c^S - p \cdot M_c^L} \end{aligned} \quad (4.11)$$

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 : 篩分けした試料（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分けした試料の乾燥状態における通過重量百分率

(4.11)式は、通過重量百分率 p 、篩分けした試料の水分値 M_c^S 、所定の粒径範囲の粒子の水分値 M_c^L を、元の試料（篩分け前の試料）の水分値 M_c^T を求める式である。この式を用いて、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。

4.4.8.3 水分値換算方法の有効性の検討

4.4.8.1 節で述べた通り、最大粒径 19 mm の湿った試料から最大粒径 6.7 mm の試料を抽出して水分値を比較する実験の結果は、湿った試料の篩分けに手間取り、最大粒径 6.7 mm の試料の水分値の計測精度に問題があると考えられるため、水分値の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 鉱及び Boakaine 鉱に関する揚荷役現場実験 (c.f. 4.4.5) においては、篩分けを行わない試料については最大粒径を 100 mm として水分値を計測するとともに、揚荷役現場で最大粒径 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。この実験では、特に手間取ることもなく水分値計測を行うのに十分な量の試料（最大粒径 19 mm。重量は 7~10 kg 程度）が得られたため、この試験結果に基づき、前述の水分値換算方法の有効性を確認する。

最大粒径 100 mm の試料の水分値の計測は、4.4.4 節で述べた通り、精錬所に計測していただいた。水分値計測においては、揚荷役現場における円錐貫入試験の前後に篩分けしていない試料（3 トン程度。c.f. 表 4.6, 4.7）から、100 mm 以上の粒径の粒子を除いて、10 kg 以上の試料を 10 箇所採取し、精錬所のクラッシャーで粉砕した後、縮分 (c.f. 4.4.4) により採取した試料の水分値を計測した。この実験においては、採取した試料の重量及び水を加えた量を計測し、各円錐貫入試験に対応する水分値を求めた。最大粒径 19 mm の試料は、揚荷役現場で湿った試料を篩を押し通すことにより採取した後、その場で全重量を計測し、試料を実験室に持ち帰り乾燥した後に、乾燥重量を計測した。

最大粒径 100 mm の試料と最大粒径 19 mm の試料の水分値を表 4.20 及び表

4.21 に示す。表において"*1"で示した欄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"で示した欄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 (c.f. 表 4.6、表 4.7、表 4.11)。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検討する。

表 4.20 最大粒径と水分値-Pomalaa

試料 番号	水分値 [%]		
	最大粒径 100 mm M_C^T		最大粒径 19 mm M_C^S
	*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 4.21 最大粒径と水分値-Boakaine

試料 番号	水分値 [%]		
	最大粒径 100 mm M_C^T		最大粒径 19 mm M_C^S
	*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 鈹及び Boakaine 鈹に含まれる 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 4.22 に、Pomalaa 鈹及び Boakaine 鈹の 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 4.22 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 M_C^L
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 4.115 及び図 4.116 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 4.20 及び表 4.21 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、本研究で用いる水分値の換算方法は、元の試料の水分値を総じて低めに与える傾向があるものの、最大粒径 19 mm の試料の水分値を最大粒径 100 mm の試料の水分値に換算するには、有効な方法であると言える。このことは、必ずしも、本研究で用いる水分値の換算方法が最大粒径 6.7 mm の試料の水分値を最大粒径 19 mm の試料の水分値に換算するのに有効であることを意味するものではないが、最大粒径 19 mm の試料と最大粒径 6.7 mm の試料の水分値の関係について言えば、湿った試料を用いて篩分けを行う水分値換算の実験よりは有効であると考えられるため、本研究では、この方法を用いる。

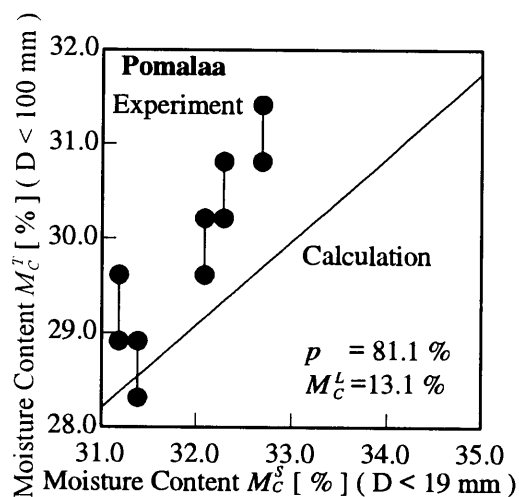


図 4.115 換算水分値と実験値の比較
Pomalaa

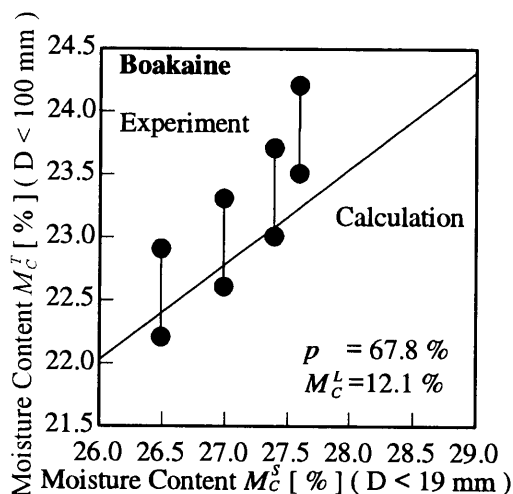


図 4.116 換算水分値と実験値の比較
Boakaine

4.4.8.4 水分値の一次クライテリアの換算

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、ニッケル鉍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。そのため、上述の方法により、水分値の一次クライテリアを最大粒径 19 mm 試料の水分値に換算した。結果を表 4.23 に示す。

表 4.23 水分値換算結果

試料	Gebe	Tontouta	Rio Tuba	Pomalaa	Boakaine
通過重量百分率 (乾燥状態) (p) ($D < 6.7 \text{ mm}$ in $D < 19 \text{ mm}$) [%]	90.8	87.6	84.3	88.7	81.7
6.7~19 mm 粒子の最大水分値 (M_c^L) (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 (M_c^S) ($D < 6.7 \text{ mm}$) [%]	35.7	29.6	42.7	33.4	26.8
荷崩れ限界水分値 (M_c^T) ($D < 19 \text{ mm}$) [%]	34.4	28.2	40.5	31.7	24.8

表の下段が、最大粒径 19 mm の試料の荷崩れ限界水分値、即ち、水分値の一次クライテリアに対応する、荷崩れが危険となる水分値である。なお、試料の最大粒径を 100 mm とした場合の水分値のクライテリアは、Pomalaa 鉍では 28.9 %、Boakaine 鉍では 21.2 %であり、前述の通り、Boakaine 鉍の揚荷役現場における試験では、この水分値に対応する円錐貫入試験結果は得られなかった (c.f. 4.4.5.1)。

4.4.9 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 19 mm 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た。各試験の結果を図 4.117～図 4.121 に示す。図の横軸は水分値、縦軸は最大円錐貫入力である。

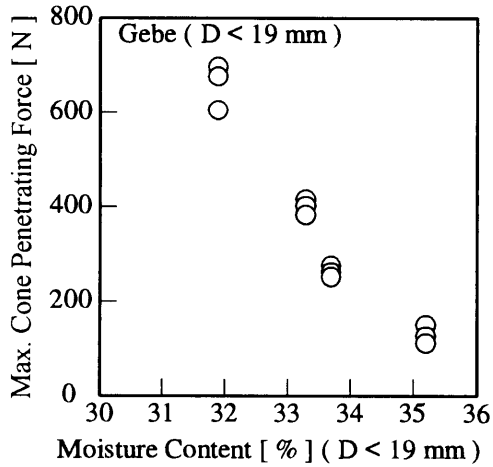


図 4.117 円錐貫入試験結果 - Gebe

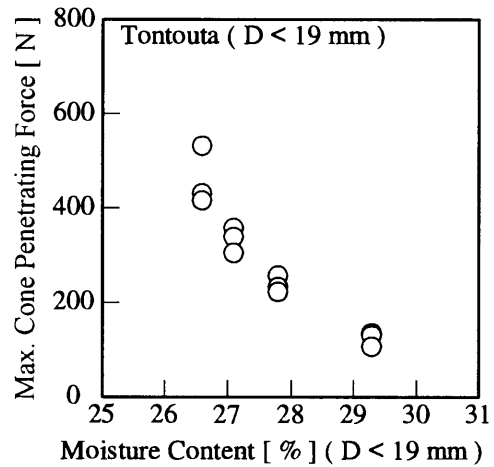


図 4.118 円錐貫入試験結果 - Tontouta

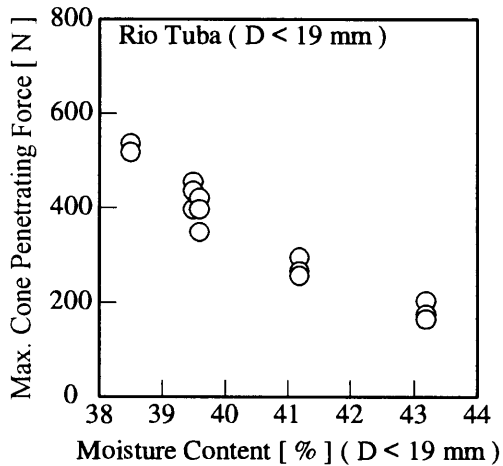


図 4.119 円錐貫入試験結果 - Rio Tuba

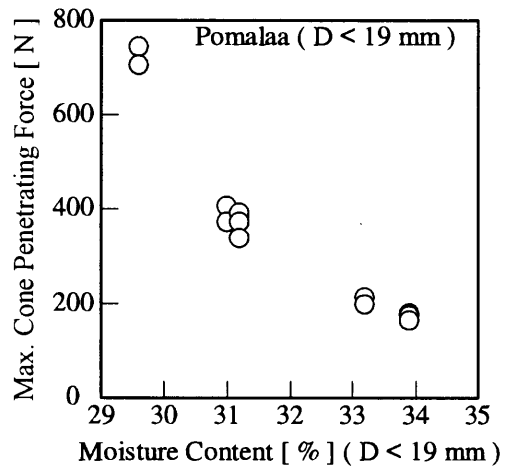


図 4.120 円錐貫入試験結果 - Pomalaa

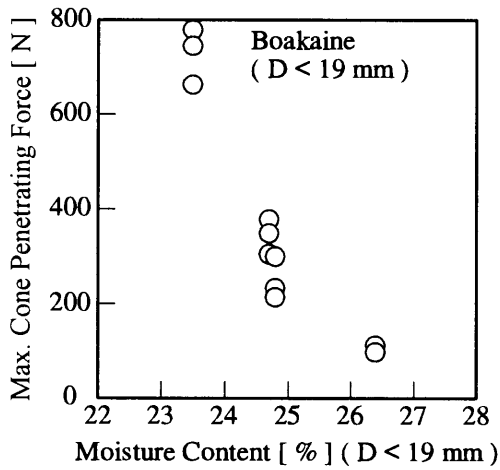


図 4.121 円錐貫入試験結果 - Boakaine

三回の試験による最大円錐貫入力のはらつきは、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、供試体の重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見かけの単位体積重量、間隙比及び飽和度を表 4.24 に示す。表より、間隙比の再現性は高いこと、即ち、締固め方法は試料の間隙比の再現性の観点からは妥当であることが分かる。

表 4.24 円錐貫入試験用供試体重量計測結果

試料	水分値[%]	見かけの単位体積重量 [g/cm ³]				間隙比	飽和度 [%]
		No.1	No.2	No.3	平均		
Gebe	31.9	1.765	1.765	1.768	1.766	1.45	95
	33.3	1.725	1.725	1.730	1.727	1.56	94
	33.7	1.715	1.710	1.715	1.713	1.59	94
	35.2	1.680	1.673	1.675	1.676	1.71	93
Tontouta	26.6	1.830	1.843	1.845	1.839	1.11	93
	27.1	1.815	1.823	1.830	1.823	1.15	93
	27.8	1.798	1.795	1.798	1.797	1.20	92
	29.3	1.768	1.768	1.765	1.767	1.28	92
Riotuba	38.5	1.618	1.623	1.625	1.622	1.90	95
	39.5	1.578	1.595	1.588	1.587	2.01	94
	39.6	1.568	1.583	1.585	1.578	2.03	93
	41.2	1.560	1.553	1.555	1.556	2.16	94
	43.2	1.528	1.515	1.523	1.522	2.35	94
Pomalaa	29.6	1.798	1.810	1.800	1.803	1.30	94
	31.0	1.755	1.758	1.765	1.759	1.41	93
	31.2	1.748	1.763	1.760	1.757	1.42	93
	33.2	1.710	1.705	1.713	1.709	1.56	93
	33.9	1.695	1.685	1.703	1.694	1.61	93
Boakaine	23.5	1.903	1.910	1.898	1.903	0.91	94
	24.7	1.863	1.870	1.858	1.863	0.99	93
	24.8	1.853	1.855	1.853	1.853	1.00	92
	26.4	1.830	1.830	1.823	1.828	1.07	93

図 4.115～図 4.119 に示したデータに基づき、代表円錐貫入力、即ち、最大円錐貫入力の三回の試験における最低値を求めた。結果を図 4.122 に示す。

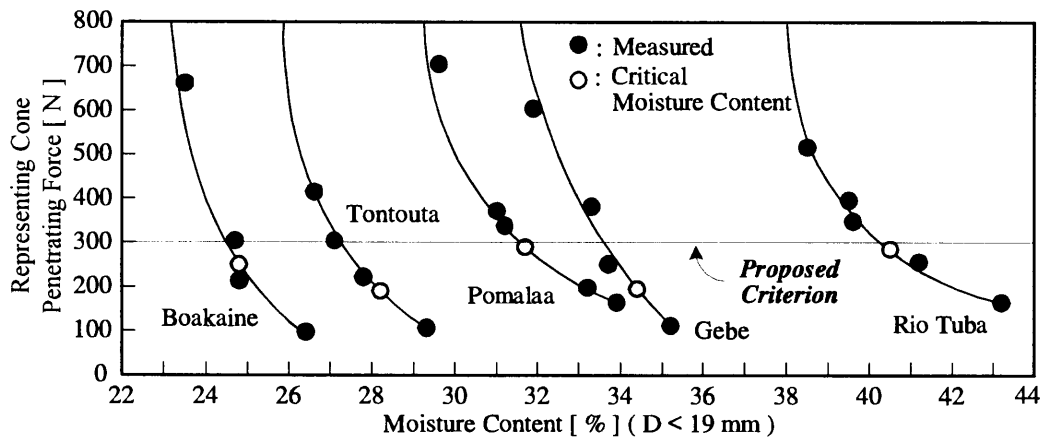


図 4.122 水分値と代表円錐貫入力の関係

図の横軸は最大粒径 19 mm 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。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 4.25 に示す。

表 4.25 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

次に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検討する。表 4.26 は、水分値の一次クライテリア（最大粒径 6.7 mm）に対応する剪断抵抗係数及び粘着力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 4.26 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 から、 $\tan\phi = 0.26$, $c = 28.5$ kPa までの幅があることが分かる。一方、試料の見かけの単位体積重量は、1.55 (Rio Tuba) から 1.83 (Boakaine) gf/cm^3 の範囲であり、剪断抵抗係数や粘着力と比較して、見かけの単位体積重量の差異は小さい。

貨物の見かけの単位体積重量を $1.7 \text{ gf}/\text{cm}^3$ とし、前述の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 4.123 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。グラフは単位体積重量を $1.7 \text{ gf}/\text{cm}^3$ 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

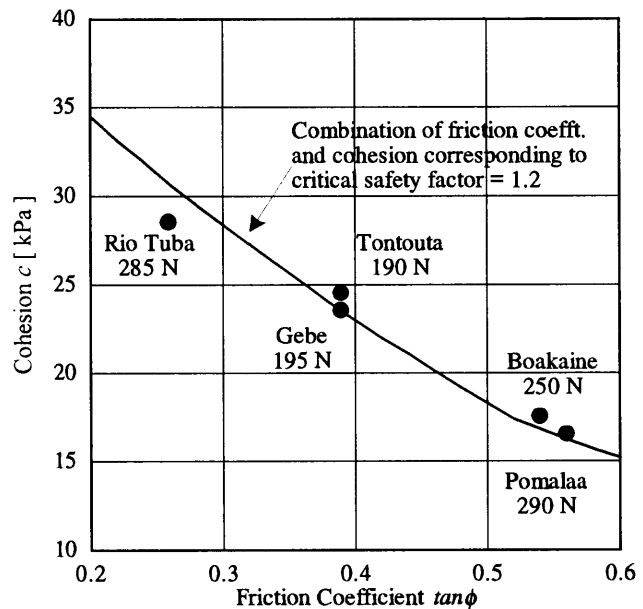


図 4.123 臨界安全率 1.2 に対応する剪断強度

断抵抗係数と粘着力（表 4.26 参照）、試料名と共に示した数値は、荷崩れ水分値、即ち臨界安全率 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が、剪断抵抗係数と粘着力の組合せにより異なることを示している。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よると考えられる。

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 4.26 に基づき、安全余裕を見込まずに最大値を丸めて、300 N を提案する。

4.4.10 ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法のまとめ

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。

この試験法は、ニッケル鉱（ガーニライト系ニッケル鉱）にのみ適用すべきものであり、他の貨物に対する適用の可否は不明である。

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荷崩れ危険性の観点から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する。

4.5 ニッケル鉱の運送における注意事項⁽⁶⁵⁾

4.5.1 ニッケル鉱運送上の注意の種類

ニッケル鉱の安全運送のためには、まず、危険と考えられる貨物を船積みしないことが肝要であるが、運送実務の観点からは、様々な安全上の注意事項を検討しておくことも重要である。

ニッケル鉱を安全に運送するには、まず、貨物の性状、特に荷崩れの危険性を関係者が理解することが重要であり、また、安全対策には、荷送人、荷役関係者、船舶の乗組員等が関係する。注意事項としては、運送前に考慮すべきもの、荷役の際に考慮すべきもの、航海中に考慮すべきもの及び荷崩れが発生した際のものと考えられる。以下、各注意事項について述べる。

4.5.2 ニッケル鉱の荷崩れ危険性の認識

荷送人が貨物の正しい性状を船舶に申請することは、安全運送の基礎である。貨物の移動による船舶の転覆事故や異常傾斜事故の結果として、ニッケル鉱は水分値が高いと移動の危険性が高いことは認識されてきた。しかし、ニッケル鉱の移動は液状化とは異なる現象であり、液状化物質に対する試験法はニッケル鉱には適用できない旨は、未だ十分に理解されておらず、一部の荷送人は、ニッケル鉱に対してIMO フローテーブル法を実施し、水分値が高く荷崩れの危険性が高いニッケル鉱を「船積みに適する」と申請している例が報告されている。液状化物質の試験法である運送許容水分値決定法は、全て、繰り返し荷重による液状化の特性を評価するためのものであり、ニッケル鉱のように、液状化が発生しなくても、剪断強度の不足により不足により荷崩れが発生する恐れのある貨物には運送許容水分値決定法は適用できないことを理解する必要がある。

4.5.3 貨物の性状の判定及び船舶の選定

安全上は積載するニッケル鉱の水分値を下げることを望ましい。少なくとも、荷崩れが危険となる剪断強度しか有しない貨物は、船積みを要請しないことが重要であり、そのための判定方法は4.4節に示した。

ニッケル鉱を運送する船舶としては、貨物のパイルを船倉全体にわたって平坦に荷積みできるボックス型等のばら積み船 (c.f. 図 4.2) が望ましい。また、貨物の水分値が高い場合は、ジャンピング・ロードを実施できるよう、また、横揺れを少な

くするため波に対して船を立てられるよう、十分な強度を有する船（老朽船でない船）が望ましい。

4.5.4 荷役の際に考慮すべき事項

荷役の際には船とターミナルの綿密な打ち合わせの下、合意された計画に基づいて協力して実施すべきことが重要である。特にニッケル鉱の荷役においては、荷役中における貨物の水分値の増加の防止に配慮する必要がある。具体的には、雨の際には船倉を閉鎖しバージ上の貨物にもカバーをかけること、貨物を積んだバージ上への海水の打ち込みが懸念される場合には荷役を中断することが、貨物の水分値の増加の防止に資する。また、荷繰りは、少しでも荷崩れの危険性を低減させるよう、可能な限り入念に実施すべきである。

4.5.5 航海中の安全対策及び非常時対策

航海中は貨物の状態を頻繁に確認することも重要である。可能であればウェザールーティングサービスを利用するなどして気象情報にも注意し、また、荒天時には針路を変更するなどして、横揺れを抑える操船をすることが望ましく、特に、荷崩れの兆候が発見された場合には、横揺れを抑える必要がある。

一度荷崩れが発生し、船舶が異常傾斜した場合についてであるが、カウンターバラストニングにより船舶をアップライトに保つことは、過去の転覆事故例及び異常傾斜の例から、基本的には実施すべきではないと考えられる。これは、荷崩れする貨物は、状況によっては反対側にも移動する可能性があり、カウンターバラストニングを行った場合、貨物が反対側に移動した際にはさらに転倒モーメントを増大させることになるためである。特に、**Top Side Tank** にカウンターバラストをとることは、復原力の減少をも招くため、実施すべきではないと考える。一度船舶が異常傾斜したら、操船法（減速、針路変更）と併せて、安全な場所への退避等を考慮すべきである。

5 結言

5.1 固体ばら積み貨物の運送状況及び分類方法

本研究では、まず、日本に輸入される貨物のうち、金額ベースで約 2 割が固体ばら積み貨物であることを示すとともに、総トン数 1000 トン以上の世界の船舶のうち、載貨重量ベースで約 3 割がばら積み船（気体及び液体貨物ばら積み船を除く）であることを示した。そして、固体ばら積み貨物の運送は日本の経済活動にとって不可欠であるとともに、ばら積み船は世界の荷動きの基幹を担っていることを述べた（c.f. 1.1）。次に、ばら積み船の事故統計を調査し、全体としては老朽化した船の事故が多いが、貨物の移動による事故は船齢によらないことを確認するとともに、貨物に起因する事故の防止も重要な研究課題であることを示した（c.f. 1.2）。そして、貨物に起因する危険性を、貨物の移動による危険性と、火災や有毒ガスの発生等の化学的危険性に大別できることを述べた（c.f. 1.3）。

本研究の目的のひとつは、固体ばら積み貨物の荷崩れ及び液状化に係る諸要素を総括することである。そのため、貨物の安全運送に関する注意事項を多く含む各種安全基準について、特に貨物に関する情報提供の観点から分析した（c.f. 第 2 章）。

安全基準のうち、固体ばら積み貨物の安全運送の基本となるのは「固体ばら積み貨物に関する安全実施基準（BC Code）」である。BC Code では、固体ばら積み貨物を大略表 5.1 の通り区分している。

表 5.1 BC Code における固体ばら積み貨物の区分

固体ばら積み貨物		
危険物	化学的危険性を有する物質	液状化物質 ^{*1} (例えば、微粉精鉱)
	MHB ^{*2} (例えば、石炭)	
	液状化物質 ^{*1} 且つ MHB ^{*2} (例えば、硫化金属精鉱、粉石炭)	化学的危険性を有せず、液状化の恐れのない物質
非危険物		

注 1 BC Code には液状化物質のリストがあるが、このリストは全ての液状化物質を網羅したものではない。

注 2 ばら積み時のみ化学的危険性を有する物質（Materials Hazardous only in Bulk）。国土交通省令「特殊貨物船舶運送規則」では「固体化学物質」と呼ばれる。

現時点では、BC Code には液状化物質であり且つ危険物である貨物は記載されていない無いため表に示した通り貨物を分類したが、表は、全ての液状化物質が非危険物であることを保証するものではない。

「荷の移動 (Cargo Shifting)」 (c.f. 第 1 章、特に 1.4) の観点からは、貨物は表 5.2 に示すように区分できる。

表 5.2 「荷の移動」の観点からみた固体ばら積み貨物の区分

湿った貨物	乾燥した貨物
粘着性物質 ^{*1}	非粘着性物質 ^{*2}
液状化物質	液状化物質以外

注 1 BC Code には、全ての湿った貨物は粘着性物質である旨、記載されている。

注 2 BC Code には、乾燥状態において非粘着性物質となる貨物のリストがあるが、このリストは全ての非粘着性物質 (乾燥状態) を網羅したものではない。

貨物の液状化を防止するための基本的対策は、貨物が液状化物質 (航海中に液状化する恐れのある物質) である場合は、予め当該貨物の運送許容水分値を決定しておき、運送の前に貨物の水分値 (船積み水分値) を計測したうえで、船積み水分値が運送許容水分値を超える場合は貨物を船積みしないことである。

貨物の荷崩れを防止するため、貨物が非粘着性物質である場合は、貨物の静止角を求め、静止角に基づき所定の荷繰りを行う。静止角が 30 度未満の非粘着性物質は「穀類のよう自由に流動する貨物」と呼ばれ、穀類と同様に、貨物の移動を拘束する「荷止め板」を設ける、貨物が船倉内で流動することを前提として船舶の復原力を確保する等の措置を取る必要がある。粘着性物質の場合は、荷送人の提出する貨物に関する情報 (貨物申請資料) に基づいて、必要な荷繰りを行う。

固体ばら積み貨物を安全に運送するためには様々な安全対策を実施する必要があるが、中でも、貨物に関する情報を正確に把握し、これを船長またはその代理人に提供することは、荷送人の責務である (c.f. 2.2)。荷崩れ (必要な荷繰りの程度) や液状化に係る情報の提供に関して言えば、まず、液状化物質の範囲が明らかでないという問題がある (c.f. 2.4.4)。また、液状化が起こらない場合でも、剪断強度の不足により荷崩れを起こす貨物がある。荷崩れの危険性について荷送人から正しい情報が提供されておらず、運送中に事故が発生している貨物としては、ニッケル鉤が挙げられる (c.f. 4.2.3)。

本研究の主目的は、貨物の移動による事故を防止するために必要な技術を開発することであり、そのためには、これら二つの問題点、即ち、液状化物質の範囲及びニッケル鉤の荷崩れ危険性の評価の問題を解決することが重要であるとの考えに基づき、液状化物質判別法及びニッケル鉤荷崩れ危険性評価試験法を開発した。

5.2 液状化物質判別法の開発

液状化物質の運送方法は安全基準に定められているが、従来は液状化物質の範囲を規定する基準が無く、特に我が国において、ある貨物（特に鉱滓）が液状化物質か否かを判定する方法の開発が求められていた。

液状化現象の有無は、物質の性質と繰り返し荷重の条件により決まる。3.2.2 節で述べた通り、液状化が発生しないための条件としては以下が挙げられる。

- (1) 繰り返し荷重が作用しない。
- (2) 物質が十分な粘着力を有する。（物質が非常に細かな粒子により構成されている。）
- (3) 物質の水分値が低い。（物質の飽和度が低い、即ち、空隙に占める水の体積の割合が低い。）
- (4) 物質が大きな粒子で構成されている。（細かな粒子を含まない。）

一方、船舶は波浪により動揺し、また、機関やプロペラ、波浪による衝撃等の起振源があり、船体の振動は程度の差こそあれ避けがたいものである。よって、航海中の貨物には必ず何らかの繰り返し荷重が作用すると言える。そのため、固体ばら積み貨物が航海中に液状化する恐れがある場合は、そうした貨物を船舶に積載しないことが重要であり、具体的には、貨物の船積み水分値を制限する措置がとられる。

ある貨物が液状化物質か否かを判定する一つの方法は、IMO フローテブル法または貫入法（c.f. A.4.7.5）により流動水分値（Flow Moisture Point）を計測することである。流動水分値が問題なく計測できる貨物は、基本的には液状化物質であると判定できる。しかし、流動水分値が計測できないことは、液状化物質でないことを保証するものではない（c.f. 2.4.4, 3.3.1）。そのため、「通常の排水状態において、液状化が発生するだけの水分を保持することができない物質は、航海中に液状化する恐れが無い」との考えに基づき、「液状化が発生するだけの水分を保持することができない」ことを確認するための試験法として、液状化物質判別試験法を開発した。

この試験法では、排水に関する条件を規定するため、試料を一度飽和状態にして、所定の条件下で排水を行い、排水後の飽和度により試料が「液状化が発生するだけの水分を保持すること」ができるか否かを評価する。試料が「通常の排水状態」においてどれだけの水を含むことができるかは、試料の透水性に依存し、試料の透水性は試料の締固め条件により異なるため、締固めの方法も規定した。試験条件の設定及び判定用クライテリアの設定のため、各種の試料を用いて試験を実施し、その

結果、開発した試験により、液状化物質を識別できることを確認した。試験の概要は以下の通り。

- (1) 試料の固体部分の密度を計測する。
- (2) 試料を乾燥する。
- (3) 内径 146 mm の容器に、落下部質量 350 g、落下高さ 20 cm のランマーを用いて、一層当たりの落下回数をそれぞれ 42, 42, 43, 43, 43 回として、5 層に分けて試料を挿入・締固める。
- (4) 試料の入った容器内部の空気の抜き、水を入れることにより、試料を飽和状態にする。
- (5) 余分な試料を除去し、体積 $1,700 \text{ cm}^3$ (高さ約 10 cm) の供試体を形成する。
- (6) モールド底部に設けられた直径 3.1 mm の孔から 30 分間排水させ、供試体の重量及び水分値を計測し、排水後の飽和度を求める。
- (7) 排水後の飽和度が 70 %未満であれば、その試料は液状化物質では無いと判定する。

さらに、粒径分布に基づく液状化物質の判定方法について実験的に研究し、鉾津等の石炭以外の物質については、最大粒径を 9.5 mm とした試料の有効径 D_{10} が 0.1 cm を超えれば、また、石炭については、最大粒径を 19 mm とした試料の有効径 D_{10} が 0.2 cm を超えれば、液状化物質ではないと判定する方法を提案した。

液状化物質を運送する際には、船積みに先立って運送許容水分値を決定するとともに、船積み毎に、貨物の水分値を計測する必要がある。また、日本では運送許容水分値の決定及び船積み水分値の計測は第三者機関が実施することが義務付けられている。そのため、ある貨物が液状化物質と判定されれば、その貨物の運送にはより多くのコストを要する。よって、液状化物質の範囲、即ち規則の適用範囲は、適切に決定する必要があり、本研究は安全且つ円滑なばら積み貨物の運送に資すると言える。

5.3 ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発

ニッケル鉱は露天堀りされた天然の土であり、大きな塊をも含む粘土状物質である。この物質は、水分値が高くなると剪断強度が低下し、船舶で運送した場合に荷崩れを起こすことがある。実際に、ニッケル鉱を運送している際に、荷崩れが原因と考えられる事故が発生し、行方不明者が発生している。ニッケル鉱のばら積み運送中の事故を防止するには、その荷崩れ危険性を評価することが必要であり、荷役現場で用いることのできる簡便な試験法が求められていた。

貨物の荷崩れの危険性を評価するには、基本的には、試料の水分値を変化させて、三軸圧縮試験または一面剪断試験により剪断強度を計測し、得られた剪断強度を用いて、地盤工学における斜面の安定性解析に倣って荷崩れ危険性に関する数値解析を実施すれば、荷崩れが危険となる試料の水分値を求めることができる (c.f. 4.3)。しかし、この方法では、試料の篩分けによる水分値の変化を補正する必要があること及び実施に時間がかかりすぎることから、ニッケル鉱の運送実務に供するには不十分であることが分かった (c.f. 4.3.6)。そのため、家屋を建設する際の地耐力調査等で用いられる円錐貫入試験を基礎とする「ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法」を開発した。

試験においては、試料の最大粒径を 19 mm に調製し、モールド内に試料を挿入し突固めによる締固めにより供試体を形成し、円錐貫入試験を実施する。モールドの寸法及び締固め方法は、関係する JIS 規格を参照しつつ決定した。試験回数は、同一の試料 (2 水分値) について 30 回の円錐貫入試験を繰り返し実施することにより、三回の試験を実施した際の最低値を「代表円錐貫入力」とすることにした。

荷崩れ危険性の判定のためのクライテリアを決定するため、5 種類の試料の水分値を変えて一面剪断試験を行い、得られた剪断強度を用いて荷崩れの数値解析を実施することにより、一面剪断試験用試料 (最大粒径 6.7 mm) の水分値のクライテリア (水分値の一次クライテリア) を求めた。水分値の一次クライテリアは、乾燥状態における試料の通過重量百分率と、粒径 6.7 mm~19 mm の粒子が含み得る水分値 (計測結果) に基づき、円錐貫入試験用試料 (最大粒径 19 mm) の水分値に換算した。さらに、最大粒径 19 mm の試料を用いて、水分値を変化させて、所定の手順で試料をモールドに挿入し、締固めたうえで、円錐貫入試験を実施することを、各水分値について 3 回繰り返し、水分値と代表円錐貫入力の関係性を求めた。そして、各試料について、換算した水分値のクライテリアに対応する代表円錐貫入力を求め、

試料によらない代表円錐貫入力クライテリアとして 300 N を提案した。

以上をまとめると、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験は、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、その最小値が 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と判定できる。この試験法により、荷崩れ危険性のあるニッケル鉱を荷役現場（貯鉱場）において判別することが可能となった。即ち、本試験法の開発は、安全運送に資するものとする。

さらに、船の選定、貨物の性状の評価、荷役の際の注意事項（雨の際の中断、バージ上への海水の打ち込みの防止）、荷繰り、ウェザールーティングの利用を含む操船上の注意、荷崩れが発生した際の対処（トップサイドタンクへのカウンターバラストの積載の危険性）等についてまとめた（c.f. 4.5）。これらの注意事項も、ニッケル鉱の安全運送に資するものとする。

5.4 まとめ及び今後の課題

本研究では、まず、固体ばら積み貨物の安全運送に関する諸要素を総括し、特に貨物に関する情報提供に着目して、二つの問題点を指摘した。液状化については、ある貨物が液状化物質か否かを判定する方法が確立されていないという問題である。これについては「液状化物質判別法」を開発し、液状化物質の運送に関する規則的確な適用を可能にした。一方、ニッケル鉱は液状化物質ではないが、水分値が高くなると荷崩れの危険性があり、実際に事故が発生している。この貨物については適切な荷崩れ危険性の評価法が無いことが問題であったため、「ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法」を開発した。即ち、固体ばら積み貨物の移動に起因する事故を防止するために、特に重要と考えられる二つの技術的な問題点を解決した。

開発した試験法の位置付けを明らかにし、固体ばら積みに関する情報提供に資するため、石炭や穀類を除く固体ばら積み貨物の荷崩れ及び液状化に係る性状の基本的な評価の流れを図 5.1 に示す。図において、ゴシック体の斜体で示したのが、本研究の成果である。

本研究では、二つの試験法を開発し、荷崩れ及び液状化に係る貨物の情報を従来以上に詳細に把握することを可能にしたが、今後は、以下の課題が残されている。

- (1) 液状化物質判別法の試験実績の集積と、さらに多くの物質に関する評価結果に基づく試験法の有効性の確認
- (2) ニッケル鉱荷崩れ危険性評価法の適用例と同試験法を適用した貨物の輸送実績（荷崩れの有無、船舶の動揺の状況）の集積及び同試験法の有効性の確認

特に、ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法における判断のクライテリアは、過度の安全余裕を見込まないことに配慮して設定・提案したが、荷崩れの危険性評価における大きな粒子の取り扱いに関する問題を残しており、今後さらに安全余裕を減らす余地が無いとは言い切れないため、試験並びに運送実績の集積と、これに基づくクライテリアの見直しが有効と考えられる。

ばら積み船の安全運航は重要な課題であり、貨物に起因する事故も今後さらに低減する必要がある。本研究が固体ばら積み貨物の安全運送の一助となることを願ってやまない。

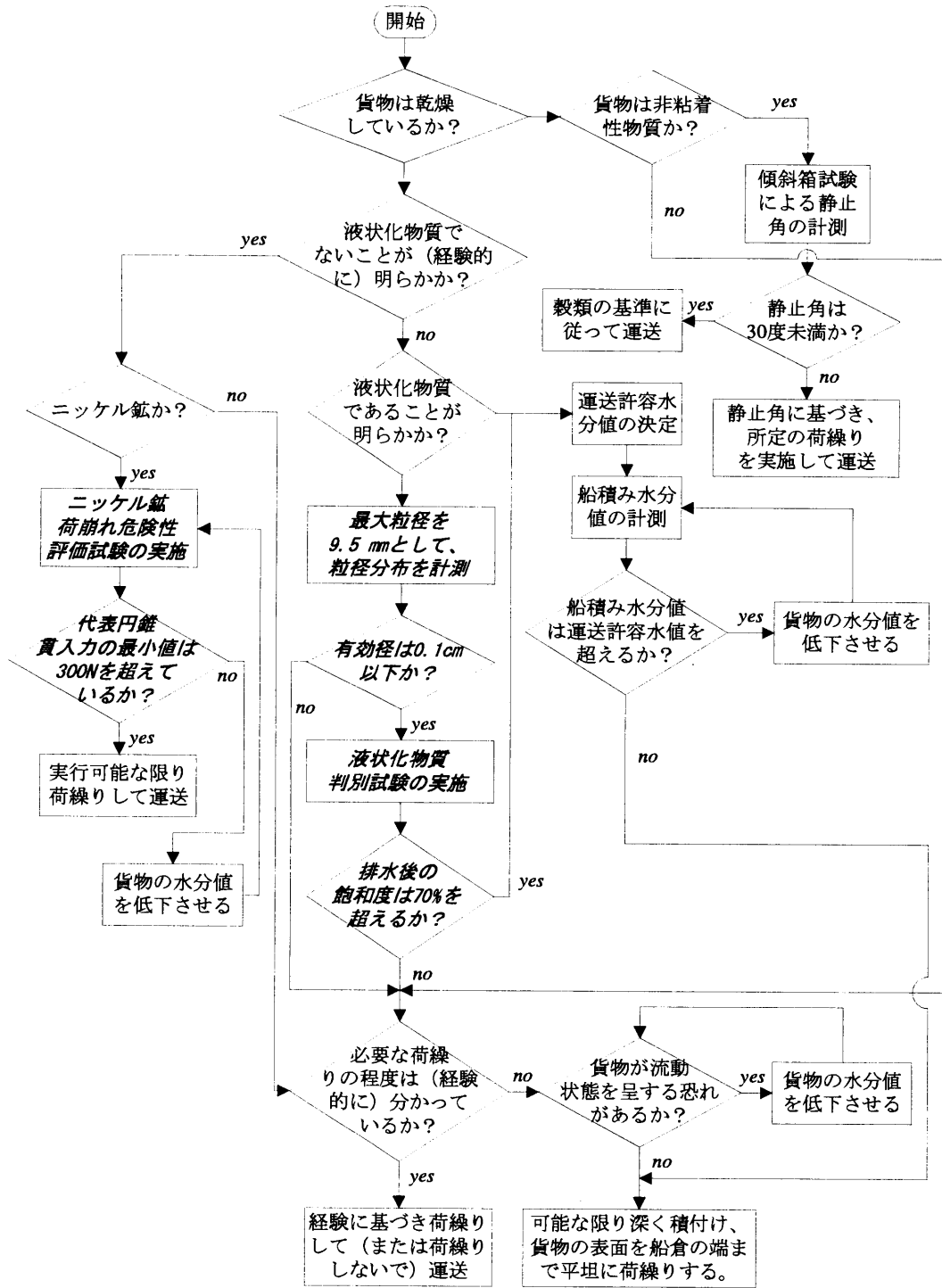


図 5.1 固体ばら積み貨物の荷崩れ及び液状化に係る性状の基本的評価の流れ

5.5 謝辞

本研究の一部は、(社)日本造船研究協会(第78基準研究部会、部会長:宝田直之助先生。当時。以下、所属等は全て当時とする。)及び(社)日本海事検定協会研究(IMO対応委員会、委員長:浦環先生、その他委員会)との共同研究として、日本財団のご支援の下、実施したものである。

研究の実施に際しては、東京大学生産技術研究所浦環先生に研究全般にわたってご指導を賜った。また、同研究所能勢義昭氏、坂巻隆氏には、三軸圧縮試験の実施等においてご指導・ご協力を賜った。液状化物質判別法及びニッケル鉍荷崩れ危険性評価試験法の開発に際しては、田中正人氏、村山雅己氏をはじめとする(社)日本船舶品質管理協会船舶艙装品研究所各位にご協力いただいた。試料の分析の一部は日本海事検定協会理化学研究所に実施していただいた。ニッケル鉍の揚荷役現場における試験においては、前述の方々に加え、日本海事検定協会飛延孝男氏及び船舶技術研究所装備部山尾崇氏にご協力いただいた。また、実験用試料の手配に際しては、日本鉍業協会、住友金属鉍山株式会社、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。ニッケル鉍荷崩れ危険性評価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船舶技術研究所装備部宮田修氏にご協力いただいた。各種安全対策の検討においては、前述の鉍山関係各社の方々及び船会社の多くの方々から、貴重なご示唆を賜った。ニッケル鉍ばら積み運送に関する実船試験では、Capt. Kevin D'MelloをはじめとするM/V GOLDEN WINGの乗組員の方々、八戸港湾運送株式会社の方々にお世話になった。

液状化物質判別試験の開発においては、POPEK氏(ポーランド)をはじめとする同国際通信グループ各位(豪、加)には、試料を御提供いただくとともに、ご討論を賜った。

末筆ながら、本研究にご協力いただいた方々に深く謝意を表す。

参考文献

- (1) IMO, International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Consolidated Edition 2001.
- (2) IMO Meeting Document, MSC 74/5/3, "BULK CARRIER SAFETY, Report on FSA Study on Bulk Carrier Safety", Submitted by Japan, 2001
- (3) IMO Meeting Document, MSC 74/INF.9, "BULK CARRIER SAFETY, Report on FSA Study on Bulk Carrier Safety", Submitted by Japan, 2001
- (4) IMO Meeting Document, MSC 74/INF.10, "BULK CARRIER SAFETY, Step 2 of FSA on Bulk Carrier Safety (Risk Analysis)", Submitted by Japan, 2001
- (5) IMO Meeting Document, MSC 74/INF.11, "BULK CARRIER SAFETY, Step 3 of FSA Study on Bulk Carrier Safety", Submitted by Japan, 2001
- (6) IMO Meeting Document, MSC 74/INF.12, "BULK CARRIER SAFETY, Step 4 of FSA Study on Bulk Carrier Safety", Submitted by Japan, 2001
- (7) IMO, International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Consolidated Edition 2001
- (8) IMO, Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes, 2001 Edition
- (9) IMO, International Maritime Dangerous Goods Code, 2000 Edition
- (10) IMO Meeting Document, DSC 7/4, "Review of the BC Code, including evaluation of properties of solid bulk cargoes", note by the Secretariat, 2002
- (11) 海難審判庁裁決録－平成 8 年門審第 112 号。貨物船第八久美丸乗組員死傷事件
- (12) IMO document, MSC/Circ.908 "Performance specification for the measurement of the density of bulk cargoes", 1999
- (13) 国土交通省令「特殊貨物船舶運送規則」（成山堂、船舶六法－上巻、平成 13 年版）及び同告示（日本海事検定協会、特殊貨物検査関係規則集）
- (14) 田中正人、浦 環、「石炭の運送許容水分値の測定法の開発」、日本航海学会論文集第 80 号、pp 125 - 131、1989
- (15) 田中正人、浦 環、「ばら積み貨物の流動水分値の測定法の開発」、日本航海学会論文集第 84 号、pp 45 - 51、1991
- (16) IMO Meeting Document, BC 29/5/11, "Development of new criteria in respect of liquefaction and sliding failure in bulk cargoes - Determination of flow moisture point", Submitted by Japan, 1988
- (17) IMO Meeting Document, BC 30/5/1, "Development of new criteria in respect of liquefaction and sliding failure in bulk cargoes - Reasons for proposed amendments (BC 29/5/11) to the BC Code", Submitted by Japan, 1988

- (18) IMO Meeting Document, BC 31/3/2, "Development of new criteria against shifting of bulk cargoes", Submitted by Japan, 1990
- (19) IMO Meeting Document, BC 31/INF.4, "Development of new criteria against shifting of bulk cargoes - Tentative results of international co-operation experiment on the penetration method", Submitted by Japan, 1990
- (20) IMO Meeting Document, BC 31/INF.5, "Development of new criteria against shifting of bulk cargoes - Supplementary data for determining the conditions of the penetration method for mineral concentrates and similar materials", Submitted by Japan, 1990
- (21) IMO Meeting Document, BC 32/3/7, "Inclusion of Penetration Method in BC Code", Submitted by Japan, 1992
- (22) IMO Meeting Document, BC 32/INF.5, "Results of the Joint Experiment Programme on Penetration Method", Submitted by Japan, 1990
- (23) IMO Meeting Document, DSC 5/5/7, "Review of the bc code, including evaluation of properties of solid bulk cargoes, Transport of sugar in bulk", Submitted by France, 1999
- (24) 永瀬英生、他、「講座：液状化メカニズム・予測法と設計法－ 3. 液状化のメカニズムと定義」、土と基礎 Vol.48 No.8、地盤工学会、2002年8月
- (25) IMO Meeting Document, DSC 6/5/1, "Review of the BC Code including evaluation of properties of solid bulk cargoes - Report of the correspondence group", Submitted by Australia, 2001
- (26) 日本海事検定協会、「貨物の液状化特性に関する研究」平成 6/7 年度中間報告書、1996
- (27) 岡二三生、他、「講座：液状化メカニズム・予測法と設計法－ 4. 液状化判定法（その1）」、土と基礎 Vol.48 No.9、地盤工学会、2002年9月
- (28) 松田博、他、「地盤工学において用いられる水砕スラグの特性」、土と基礎 Vol.48 No.6、地盤工学会、2002年6月
- (29) 土質工学会編、土質工学ハンドブック、技報堂、1965
- (30) 地盤工学会編、地盤工学ハンドブック、1999
- (31) S. OTA, T. URA, et al., Evaluation of the Liquefaction Potential of Solid Bulk Cargoes, Fourteenth International Symposium on the Transport of Dangerous Goods by Sea and Inland Waterways (ISTDG), 2001
- (32) 日本海事検定協会、「貨物の液状化特性に関する研究」報告書、1997
- (33) IMO Meeting Document, DSC 2/12/1, "Evaluation of properties of solid bulk cargo -

- New procedure for evaluating liquefaction potential of solid bulk materials", Submitted by Japan, 1997
- (34) DSC 3/INF.6, "Amendments to the BC Code including evaluation of properties of solid bulk cargoes", Submitted by Poland, 1998
- (35) DSC 3/11/5, "Comments on the proposed new test procedures for evaluating liquefaction potential of solid bulk materials (DSC 2/12/1)", Submitted by Canada, 1998
- (36) IMO Meeting Document, DSC 4/5/5, " Review of the BC Code, including evaluation of properties of solid bulk cargoes - New procedure for evaluating liquefaction potential of solid bulk materials", Submitted by Japan, 1997
- (37) IMO Meeting Document, DSC 4/5/4, "Additional investigations into Japanese liquefaction potential test for solid bulk materials", Submitted by Poland, 1999
- (38) IMO Meeting Document, DSC 5/5/8, "Progress report of the Correspondence Group on Evaluation of the Liquefaction Potential of Solid Bulk Cargoes", Submitted by Japan, 2000
- (39) IMO Meeting Document, DSC 6/5/3, "Report of the Correspondence Group on Evaluation of the Liquefaction Potential of Solid Bulk Cargoes", Submitted by Japan, 2001
- (40) Ishihara, K. and Takatsu, H., "Effect of overconsolidation and K_0 conditions on the liquefaction characteristics of sands", Soils and Foundations (土質工学会論文報告集) , Vol. 19, No.4, 59-68, Dec. 1979
- (41) Koseki, J. and Ohta, A., "Effects of different consolidation conditions on liquefaction resistance and small strain quasi-elastic deformation properties of sands containing fines", Soils and Foundations (地盤工学会論文報告集) , Vol. 41, No.6, 53-62, Dec. 2001
- (42) 日本造船研究協会、「ばら積み貨物の安全輸送に関する研究」、第7基準研究部会「国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書の別冊」、平成2年度報告書、1991
- (43) IMO Meeting Document, DSC 5/5/1, "Review of the BC Code, including evaluation of properties of solid bulk cargoes", Submitted by Austria, 1999
- (44) IMO Meeting Document, DSC 6/5/4, "Review of the BC Code, including evaluation properties of solid bulk cargo - Transport of Ilmenite sand in bulk", Submitted by Finland, 2001
- (45) IMO Meeting Document, DSC 7/INF.5, "Review of the BC Code, including evaluation

- properties of solid bulk cargo - Transport of Ilmenite in bulk", Submitted by Finland, 2002
- (46) IMO, International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), 1999 Edition
- (47) (社) 日本造船研究協会第 234 研究部会、「船舶のカーゴセキュアリングシステムの研究」平成 11 年度報告書、2000
- (48) 福田淳一、「船体応答の統計的予測」日本造船学会耐航性に関するシンポジウムテキスト pp.99-119、1969
- (49) T. Nakamura, S. Ota & Y. Nakajima, "Evaluation of expected maximum values of forces acting on containers and lashing rods on a container ship", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 6, Issue 1, Society of Naval Architects of Japan, 2001
- (50) 太田進、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、pp 131 - 137、1990
- (51) IMO Meeting Document, BC 32/3/16, "Precautions for Cargoes Containing Fine Particles such as Nickel Ore", Submitted by Japan, 1993
- (52) 浦 環、他、「石炭の飽和度と液状化の関係に関する基礎的研究」、日本航海学会論文集第 80 号、pp 133 - 140、1989
- (53) 太田進、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、pp 31 - 38、1992
- (54) OTA S. et al., "Determination of Upper Bound of Moisture Content of Nickel Ore in Bulk", 8th Congress of International Association of Institute of Navigation (IAIN), 1994
- (55) 太田 進、他、「ばら積みニッケル鉱の水分値の上限の決定法」、日本航海学会誌 123 号、pp 5 - 8、1995
- (56) IMO Meeting Document, Annex 2 of BC 33/3/2, "Upper Bound of Moisture Content of Nickel Ore Based on Static Shear Strength", Submitted by Japan, 1994
- (57) 太田 進、「固体ばら積み貨物の安全輸送に関する研究（第 1 報：荷崩れ数値解析法の開発）」、第 53 回船舶技術研究所研究発表会講演集 pp 152 - 155、1989
- (58) 例えば、土田孝、他、「実用分割法円弧すべり解析における新しい計算法」、地盤工学会論文報告集、Vol. 42, No.2, 139-152, Apr. 2002
- (59) 松尾新一郎編著、新稿土質工学、山海堂、1984 初版発行

- (60) 日本造船研究協会、「船舶のカーゴセキュアリングシステムの研究」、第 234 研究部会、平成 9 年度報告書、1998
- (61) 日本造船研究協会、「ばら積み貨物の安全輸送に関する研究」、第 7 基準研究部会「国際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究報告書の別冊」、平成元年度報告書、1990
- (62) 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 187 号、2000
- (63) 太田進、他、「ニッケル鉱荷崩れ危険性評価試験法の開発」、船舶技術研究所報告第 38 巻第 1 号、2001
- (64) 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、1998
- (65) 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 12 年度報告書、pp 179 - 186、2001