

固体ばら積み貨物の液状化及び荷崩れに
係る試験法の解説
—IMSBC コード附録2 第1節及び第2節の解説—

太田 進*

Explanation of test procedures on liquefaction and sliding failure of solid bulk cargoes
—Explanation of sections 1 and 2 of appendix 2 to the IMSBC Code—

by

OTA Susumu

Abstract

Liquefaction and sliding failure of solid bulk cargoes are dangerous phenomena, which may result in capsizing of ships. Therefore, properties of solid bulk cargoes related to these phenomena should be evaluated prior to shipment. Appendix 2 to the International Maritime Solid Bulk Cargoes (IMSBC) Code describes the laboratory test procedures, associated apparatus, and standards, and the recommended procedures for evaluating such properties are specified in sections 1 and 2 of the appendix. Liquefaction and sliding failure are well-known phenomena in soil mechanics, i.e., geotechnical, and have been extensively researched. Taking into account that the test procedures recommended in the IMSBC Code were developed using knowledge of soil mechanics and that mariners are usually not familiar with them, this article provides explanations of the respective test procedures specified in these sections, as well as relevant general information on the test procedures for solid bulk cargoes.

* 国際連携センター

原稿受付 令和3年 8月10日

審査日 令和3年11月16日

目 次

1. はじめに	93
2. 固体ばら積み貨物の基礎	93
2.1 地盤工学と固体ばら積み貨物	93
2.2 試料採取と縮分	94
2.3 荷崩れと液状化（荷の移動）	94
2.4 剪断強度	94
2.4.1 剪断強度の式	94
2.4.2 非粘着性貨物と粘着性貨物	95
2.4.3 三軸圧縮試験と一面剪断試験	95
2.4.4 繰り返し三軸試験	97
2.5 固体ばら積み貨物の試験における一般的注意	97
3. 固体ばら積み貨物の物性値と計測法	97
3.1 真密度と粒径分布	97
3.1.1 概要	97
3.1.2 真密度の計測方法	97
3.1.3 粒径分布	98
3.2 水分値、間隙比と飽和度	99
3.2.1 水分値の種類	99
3.2.2 間隙比と飽和度	99
3.2.3 水分値の調製	100
3.3 見かけ密度と締固め	101
3.4 透水性試験	102
4. 運送許容水分値決定法（附録2第1章）	103
4.1 各試験法の概要	103
4.1.1 試験法の種類	103
4.1.2 コードへの取り入れの経緯	103
4.1.3 各試験法の特徴	104
4.1.4 プロクター／ファガベリ試験法等における飽和度のクライテリア	105
4.1.5 粒径に基づく試料の再構成	105
4.2 フローテーブル試験法（IMSBCコード附録2第1.1節）	106
4.3 貫入試験法（IMSBCコード附録2第1.2節）	106
4.4 プロクター／ファガベリ試験法（IMSBCコード附録2第1.3節）	107
4.5 鉄鋳粉用修正プロクター／ファガベリ試験法（IMSBCコード附録2第1.4節）	107
4.6 石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法（IMSBCコード附録2第1.5節）	108
4.7 ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法（IMSBCコード附録2第1.6節）	108
5. 非粘着性貨物と静止角決定法（IMSBCコード附録2第2章）	109
5.1 静止角と荷繰り	109
5.2 傾斜箱試験	109
5.3 円錐の斜面の角度による方法	110
6. おわりに	110
References	110
別紙1 フローテーブル試験法（IMSBCコード附録2第1.1節）（仮訳）	112
別紙2 貫入試験法（IMSBCコード附録2第1.2節）（仮訳）	119
別紙3 プロクター／ファガベリ試験法（IMSBCコード附録2第1.3節）（仮訳）	125

別紙4 鉄鉱粉用修正プロクター/ファガベリ試験法 (IMSBC コード附録2 第1.4節) (仮訳) ……………	128
別紙5 石炭用修正プロクター/ファガベリ試験法 (IMSBC コード附録2 第1.5節) (仮訳) ……………	131
別紙6 ボーキサイト用修正プロクター/ファガベリ試験法 (IMSBC コード附録2 第1.6節) (仮訳) ……………	145
別紙7 静止角決定法 (IMSBC コード附録2 第2節) (仮訳) ……………	150

1. はじめに

固体ばら積み貨物の液状化や荷崩れは、船舶の転覆を引き起こすこともある危険な現象であり、こうした現象に係る貨物の性状は船積み前に評価する必要がある。国際海上固体ばら積み貨物コード (International Maritime Solid Bulk Cargoes Code. 以下「IMSBC コード」と記す。) の附録2 (Appendix 2) は「実験室試験法と必要な装置及び標準 (laboratory test procedures, associated apparatus and standards)」であり、第1節及び第2節には、液状化及び荷崩れに係る推奨試験法が規定している。固体ばら積み貨物の性状の評価方法は、船積み国の主管庁が定めることになっているが、殆どの国が、IMSBC コードに規定されている推奨試験法を採用している。

液状化や荷崩れ (土砂崩れ) は、地盤工学 (土質工学) の分野で良く知られた現象であり、この分野で、多くの研究がなされている。IMSBC コードの推奨試験法も、地盤工学の知見に立脚して開発されており、海員には馴染みの無いものである。本稿は、これら推奨試験法について個々に解説するとともに、固体ばら積み貨物の試験方法に係る基礎的情報を提供するものである。さらに IMSBC コードの推奨試験法の仮訳を添えた。なお、仮訳は2021年1月1日発効の第5版に基づくものである。

本稿では、固体ばら積み貨物の物理的性状については説明するが、危険物や固体化学物質 (MHB: Materials Hazardous only in Bulk) 等の評価に係る化学的性状については言及しない。また、「剪断」「篩」等常用漢字以外の文字も使われており、試料の性状に係わる事項には「調製」を、試験装置の条件 (圧力等) 等に係わる事項には「調整」を用いている点に留意されたい。

2. 固体ばら積み貨物の基礎

2.1 地盤工学と固体ばら積み貨物

前述の通り、斜面の安定性や液状化は、地盤工学の分野における主要なテーマであり、多くの研究がなされてきた。そのため、固体ばら積み貨物の荷崩れや液状化を検討するには、地盤工学の知見に立脚するのが適当である。船倉内の固体ばら積み貨物の荷崩れや液状化は、地盤工学の問題としてみた場合、以下の特徴を有する。

- (1) 土質試験には、ボーリング等の手段により地盤をありのままの状態にて採取する「乱さない試料 (undisturbed sample)」を用いなければならない場合と、「乱した試料 (disturbed sample)」でもよい場合がある。固体ばら積み貨物の試験では、一般には船積み前の試料、即ち「乱した試料」に相当する試料を用いる。土や固体ばら積み貨物のような粒状物質では、供試体の強度は粒子の詰まり具合により異なる。そのため、「乱した試料」を用いての力学的試験においては、締固め (compaction) の方法を規定する必要がある。
- (2) 地盤工学における斜面の安定性評価では、地盤内部への水の浸入及び透水を考慮する必要がある。一方、船舶の船倉は風雨密 (weather tight) であるため、ハッチを開けない限り、船倉内の貨物には、通常は有意な量の水は浸入しない。そのため、固体ばら積み貨物のパイルの安定性 (荷崩れ危険性) における評価は、一般には、透水を考慮する必要はない。
- (3) 地盤には、建物による荷重が作用する。一方、固体ばら積み貨物のパイルには、基本的には貨物の自重と加速度 (重力加速度を含む) に起因する力以外は作用しない。そのため、固体ばら積み貨物の剪断強度の評価では、問題となる力の範囲が、地盤の場合と比較して、桁違いに小さいことが多い。
- (4) 地盤に作用する繰り返し荷重としては、地震の加速度によるものが代表的である。一方、運送中の固体ばら積み貨物には、地震と比較して大きな加速度が、日常的に長時間作用する。

2.2 試料採取と縮分

IMSBC コード第 4.4 節でも指摘されている通り¹⁾、固体ばら積み貨物の試験を行うには、試料が貨物を代表するものでなければならず、そのためには、適切な試料採取方法を採用する必要がある。試料採取方法は IMSBC コード 4.6 及び 4.7 に規定されている。これらの他にも多数の規格があり、試料採取は適切な規格に従って実施する必要がある。

船積み前の試料の採取においては、貨物のストックパイルにおける位置、特に高さによって、試料の性状が異なる点に留意する必要がある。そのため、貨物のストックパイルから試料が採取される際には、高さを変えた複数の場所から、貨物の最大粒径に応じた十分な量が採取される。

採取した試料の全量を用いずに試験を行う場合、基本的には、縮分 (Sample reduction) により代表試料を取り分ける。一般に細かな粒子は試料の山の下部に集積しやすい。そのため縮分の際には、必ず試料を山ごとに取り分ける。図 1 に縮分の概略の手順を示す²⁾。なお、JIS²⁾では、試料を 4 等分し隣接しない 2 山を選びこれを繰り返す「四分法」を推奨している。縮分は、機械を用いて行うこともある³⁾。

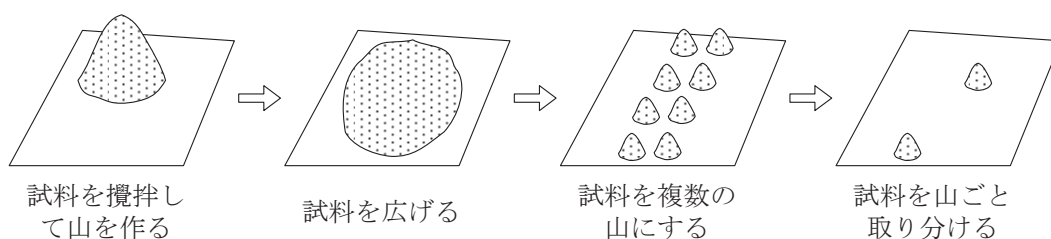


図 1 縮分

2.3 荷崩れと液状化 (荷の移動)

荷の移動 (cargo shifting) には、荷崩れ (sliding failure) と液状化 (liquefaction) がある。荷崩れは剪断強度、即ち (静的) 抵抗剪断応力の不足のため、船体の動揺によって、貨物の山が崩れる現象であり、液状化は、船の動揺や振動等の繰り返し荷重により、貨物の粒子の隙間が減少するように移動しようとして、その結果間隙圧が上昇し、貨物が流動状態を呈する現象である。貨物が完全に流動状態を呈しないまでも、剪断強度の低下により荷の移動を起こすことがある。図 2 は、荷崩れ及び液状化を模式的に示したものである。

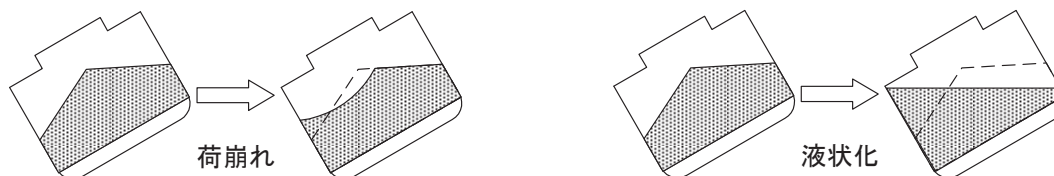


図 2 荷崩れと液状化

2.4 剪断強度

2.4.1 剪断強度の式

荷の移動は貨物の剪断強度 (shear strength) の不足により起こる。剪断強度は抵抗剪断応力で表され、抵抗剪断応力と内部摩擦係数、有効直応力及び粘着力の関係は (2.1) 式の通りである。また、有効直応力、直応力と間隙圧の関係は (2.2) 式の通りである。

$$\tau_R = \tan\phi \cdot \sigma'_N + c \quad (2.1)$$

$$\sigma'_N = \sigma_N - \mu \quad (2.2)$$

ここで

τ_R : 抵抗剪断応力 (resisting tangential stress)

$\tan\phi$:	内部摩擦係数 (friction coefficient)
σ'_N :	有効直応力 (effective normal stress)
c :	粘着力 (cohesion)
σ_N :	直応力 (normal stress)
μ :	間隙圧 (pore pressure)

(2.1) 式を図示すると図3の通り。液状化とは、簡単に言えば、間隙圧 μ が上昇することにより、有効直応力 σ'_N が無くなり、抵抗剪断応力 τ_R が殆ど無くなる現象である。

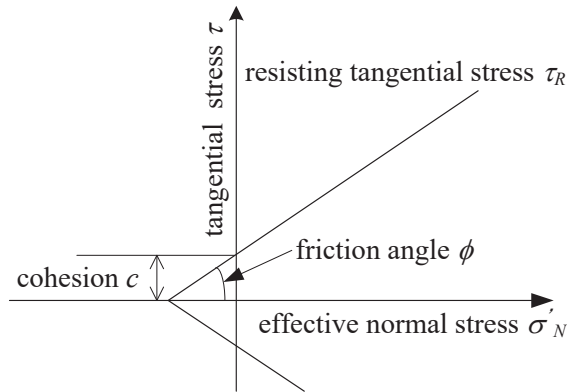


図3 抵抗剪断応力

2.4.2 非粘着性貨物と粘着性貨物

非粘着性貨物 (non-cohesive cargo) とは、理論的には、粘着力 c が零の貨物であり、粘着性貨物とは、有意な粘着力を有する貨物である。しかしながら、微少な粘着力を計測・評価することは容易ではないため、非粘着性貨物は半経験的に判定され、IMSBC コード附録3 (Appendix 3) 第1節にリストアップされている。非粘着性貨物のリストに「乾燥した場合 (when dry)」との但し書きがあるのは、水分を有する貨物の粒子間には毛管力 (capillary force) が作用するため、粘着力が零にならないことによる。

ここで留意すべきは、粘着力は応力と同じ次元を有するため、粘着力の影響は規模により異なることである。僅かでも粘着力があれば、模型規模では貨物の斜面は安定となっても、実規模では容易に崩れる恐れがある。そのため地盤工学における模型試験は、遠心力を利用して、重力が大きくなった状態を模擬して行われることがある。固体ばら積み貨物について言えば、ボーキサイトの液状化に関する研究の一貫として、遠心載荷試験 (dynamic centrifuge test) が実施された⁴⁾。

非粘着性貨物の荷繰りは、IMSBC コード第5章で、貨物の静止角との関係において規定されているが、粘着性貨物 (cohesive cargo) の荷繰りについては、詳細な規定はない。

2.4.3 三軸圧縮試験と一面剪断試験

貨物の剪断強度、具体的には粘着力と内部摩擦係数を計測する基本的方法は、三軸圧縮試験 (triaxial compression test) である。図4は三軸圧縮試験の模式図である。この試験では、ゴムのスリーブの中に形成された供試体の周囲から圧力 (拘束圧: confining pressure) を作用させ、上から荷重を作用させた際の荷重の変化や供試体の変形を計測する。排水/非排水といった条件や圧密 (consolidation) の方法は、試験の目的や試料の性状に応じて決定される。図4に示した方法では、拘束圧を作用させるための水面の高さを読み取ることにより、試験中の供試体の体積変化も計測できるが、より簡便に、供試体の体積変化の計測を行わずに実施する方法もある。

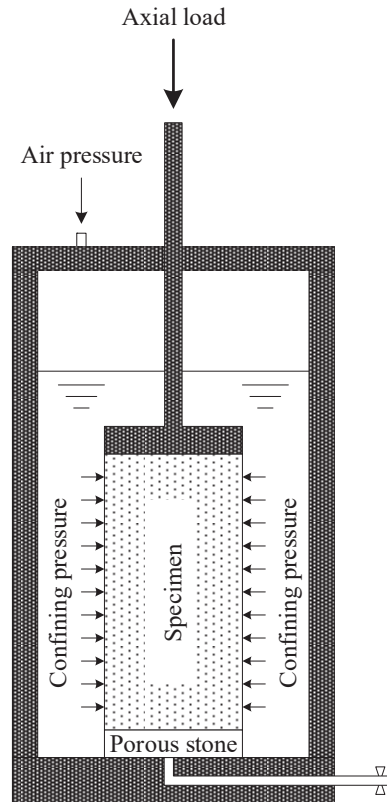


図4 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験より簡便に剪断強度を計測する方法には、一面剪断試験（direct box shear test）がある。図5は一面剪断試験の模式図である。この試験では、円筒形の剪断箱の中に試料を入れ、上から荷重を作用させ、下部の剪断箱を水平に動かした際に上部の剪断箱を拘束するのに要する力を計測する。試料の下部から荷重を作用させた状態で、上部の剪断箱を駆動し、下部の剪断箱を拘束するのに要する力を計測する「三笠式」という方法もある。供試体に作用させる直圧力を一定にする方法と、供試体の体積（厚さ）を一定にする方法があり、試験方法は試験の目的や試料の性状に応じて決定される。

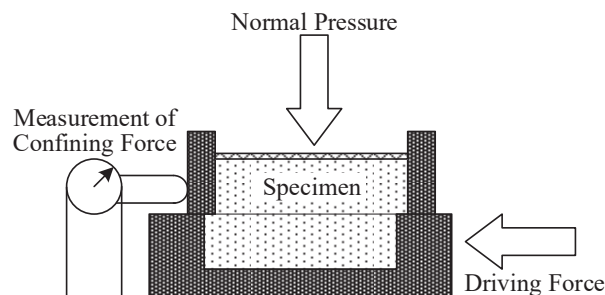


図5 一面剪断試験

三軸圧縮試験でも一面剪断試験でも、供試体の直径は試料の最大粒径の4乃至5倍以上にする必要がある。そのため試料の粒径が大きい場合は、大規模な装置が必要になる。

ここでは詳述しないが、貨物の剪断強度が求めれば、地盤工学における斜面の安定性解析の手法を用いて、所与の加速度（船体運動）条件下における粘着性貨物の荷崩れの危険性評価も可能となる。図6は、計算のイメージを図示したものである。この方法では、図の円弧（滑り線）を様々に変化させ、円弧上における剪断応力と抵

抗剪断応力を計算し、その積分値の比（安全率）を求め、安全率の最小値（臨界安全率）により荷崩れの危険性を評価する。

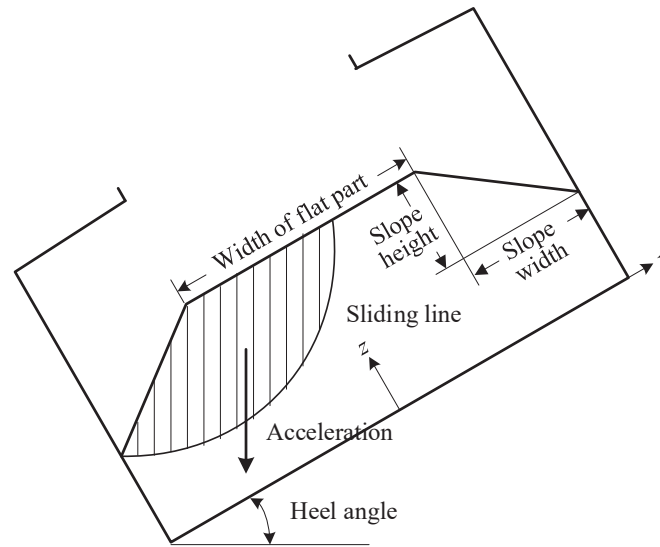


図6 貨物の安定性解析

2.4.4 繰り返し三軸試験

繰り返し三軸試験 (cyclic triaxial test) は、図4に示した三軸圧縮試験と類似の装置を用いて、軸方向の荷重 (axial load) の向きを繰り返し変化させて実施する試験であり、粒状物質の液状化を評価する際の基礎的試験である。この試験は、鉄鉱粉⁵⁾、石炭^{6),7)}、ポーキサイ⁸⁾の液状化に係る研究においても実施された。

2.5 固体ばら積み貨物の試験における一般的注意

各種試験法には、試料の最大粒径が規定されている場合が多い。貨物の最大粒径がこれより大きい場合は、単に、大きな粒子を取り除いて試験すれば良いというものではない。粒径分布が変われば、一般には「別の貨物」と考えるべきであり、粒径調製はむやみに行ってはならない。

粒径調製が水分値に及ぼす影響については、第4.1.5節で説明する。

3. 固体ばら積み貨物の物性値と計測法⁹⁾

3.1 真密度と粒径分布

3.1.1 概要

間隙（空隙）を除く固体部分の密度は、真密度 (density of solids) 呼ばれ、土の場合「土粒子の密度」とも呼ばれる。IMSBCコードの附録2では“density of solid material”とされており計測方法は説明されていない。真密度は、土の試験を実施する際には、殆どの場合に計測される基本的物性値であり、後述する飽和度を求める際にも必要である。また、粒径分布 (grain/particle size distribution) も基本的な物性値であり、地盤工学の分野では、土の実験において試料の真密度または粒径分布が明示されていないことは、それだけで論文原稿を棄却する理由になり得る。

3.1.2 真密度の計測方法

真密度を計測するには、比重瓶 (pycnometer) という、蓋をすると容積が一定になる瓶を用いる。試料は、細かく砕いても良い場合が多い。水の密度補正を除くと、試験では以下の値を計測する。

m_0 : 比重瓶の空質量

- m_w : 水だけが入った比重瓶の質量
 m_t : 水と試料が入った比重瓶の質量
 m_s : 比重瓶に入っていた試料の乾燥質量

水と試料が入った比重瓶の質量を求めるには、試料を含む水を加熱または減圧により沸騰させ、中の空気を水蒸気で置換することによって除去し、その後、常温・常圧になった瓶を水で満たし、質量を計測する。その際、水温も計測しておく。比重瓶に入っていた試料の乾燥質量を求めるには、比重瓶の中の水と試料を全てバットに受け、乾燥してから質量を計測する。もちろん、バットの空質量を計測しておき、適宜差し引く。これらの値から、(3.1) 式乃至 (3.5) 式で、真密度が求められる。なお、水温による水の密度の違いが問題となる場合は（要求される精度によっては）、適宜、水の密度を補正する。

実際には、比重瓶を複数用意して何回かの計測を行う。

水に溶ける物質の場合、水以外の液体を使うこともある。アルコール等の熱膨張係数が大きい液体を用いる場合は、温度管理が特に重要である。

$$w_0 = m_w - m_0 \quad \text{比重瓶に入った水の質量} \quad (3.1)$$

$$w' = (m_t - m_0) - m_s \quad \text{試料と一緒に比重瓶に入った水の質量} \quad (3.2)$$

$$w'' = (m_t - m_0) - m_s \quad \text{試料が押しのかけた水の質量} \quad (3.3)$$

$$V_s = \frac{w_w}{\rho_w} \quad \text{試料の体積. ここで } \rho_w \text{ は水の密度} \quad (3.4)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad \text{真密度} \quad (3.5)$$

3.1.3 粒径分布

粒径分布は、粒径加積曲線 (grain/particle size accumulation curve) で表す。粒径加積曲線の図は、横軸が粒径で通常は対数軸であり、縦軸は乾燥状態における通過質量百分率である。図7は、粒径分布を模式的に示したものである。ある通過質量百分率に対応する粒径を、その百分率に応じて「XX% 粒径」と呼び、 D_{XX} と表す。10% 粒径 D_{10} は有効径と呼ばれ、液状化の危険性を判定するための代表的な粒径と考えられている。

土の場合、(3.6) 式や (3.7) 式で表される均等係数や曲率係数も、粒径分布の代表値として用いられる。

粒径分布を求める際の試料の量は、最大粒径による。例えば JIS A 1204:2020 「土の粒度試験方法」では、最大粒径が 2 mm の場合試料の量は 200 g 以上、最大粒径 75 mm の場合試料の量は 30 kg 以上と規定されている。

粒径分布は、篩い分け（ふるいわけ）した試料の乾燥質量を計測することにより得られるが、粒子の大きさによっては水を用いて篩い分けしたり、さらに粒子が細かい場合は沈降速度から粒径を求めたりもする。

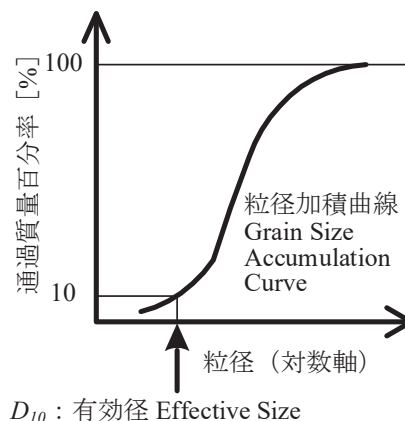


図7 粒径分布の図

$$U_C = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.6)$$

$$U'_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (3.7)$$

ここで

U_C :	均等係数 (uniformity coefficient)
U'_C :	曲率係数 (coefficient of curvature)
D_{10} :	10 % 粒径
D_{30} :	30 % 粒径
D_{60} :	60 % 粒径

3.2 水分値, 間隙比と飽和度

3.2.1 水分値の種類

物質の水分値には, 固体部分の質量に対する水分の質量の比率を表す「正味水分値」(net moisture content または net water content) と, 試料全体の質量に対する水分の質量の比率を表す「全水分値」(gross moisture content または gross water content) がある. 固体ばら積み貨物の場合, 単に「水分値 (moisture content)」と言えば全水分値を意味する. 土の含水比は正味水分値, 含水率は全水分値である.

水分値を求めるには, 水分を含む試料と乾燥した試料の質量を求めればよく, 試料を乾燥するには, 一般には高温乾燥機を用いて 100°C 以上に温度を上げる. バットの空の質量を m_C , 試料を入れたバットの質量を m_A , これを乾燥した質量を m_B とすると, 全水分値 M_C と正味水分値 M'_C は (3.8) 式及び (3.9) 式の通り.

なお, 石炭の場合, 付着水分値 (粒子間の水分) を計測する際は 40°C で乾燥し, 粒子内部の水も含む水分値 (全水分値) を計測する際には, 100°C 以上で乾燥する.

後述する運送許容水分値 (Transportable Moisture Limit: TML) 決定法のうち, プロクター/ファガベリ法 (IMSBC コード附録2 第1.3節乃至第1.6節の4種の試験法) では, 体積ベースの水分値も計算される (縦軸を間隙比として飽和度を直線で示し締め固め曲線をプロットする. その際, 図の横軸は体積ベースの正味水分値 (Net water content in volume) である).

$$M_C = \frac{m_A - m_B}{m_A - m_C} \quad (3.8)$$

$$M'_C = \frac{m_A - m_B}{m_B - m_C} \quad (3.9)$$

3.2.2 間隙比と飽和度

図8は, 固体貨物の固体部分, 水及び空気 (ガス) を模式的に示したものである. ここで, それぞれの体積を V_S , V_W 及び V_A とし, 間隙 (空隙) の体積 (volume of void) を V_V , 全体の体積を V_T とすると, 間隙比 (Void Ratio) e , 空隙率 (空隙率 porosity) n 及び飽和度 (Degree of Saturation) S_r は, (3.10) 式乃至 (3.14) 式の通り定義できる. 即ち, 間隙比は間隙の体積を固体部分の体積で割った値, 空隙率は間隙の体積を全体積で割った値 (通常は百分率で表す.), 飽和度は間隙体積において水体積が占める割合 (通常は百分率で表す.) である.

空気の質量を無視して, 水の密度を ρ_W , 貨物の真密度 (測定値) を ρ_S , 体積 V_T (既知の容積) 当たりの全質量を m_T (測定値), 乾燥時の質量を m_S (測定値), 水分の質量を m_W とすれば, (3.15) 式乃至 (3.18) 式が成り立つ. これらの式により各種体積が求められれば, (3.12) 式乃至 (3.14) 式により, 間隙比, 飽和度等が計算できる. また, 全水分値を M_C , 正味水分値を M'_C 及び見かけ密度 (嵩密度) ρ_V は, (3.19) 式乃至 (3.21) 式でも表せる. 正味水分値と, 間隙比, 飽和度, 水の密度及び真密度の関係は (3.22) 式の通り.

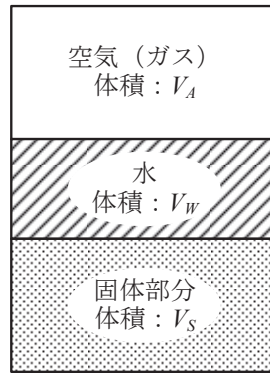


図8 固体貨物の構成要素の模式図

$$\text{空隙体積} \quad V_V = V_W + V_A \quad (3.10)$$

$$\text{全体体積} \quad V_T = V_S + V_W + V_A \quad (3.11)$$

$$\text{間隙比} \quad e = \frac{V_V}{V_S} \quad (3.12)$$

$$\text{空隙率} \quad n = \frac{V_V}{V_T} \quad (3.13)$$

$$\text{飽和度} \quad S_r = \frac{V_W}{V_V} \quad (3.14)$$

$$\text{水分の質量} \quad m_W = m_T - m_S \quad (3.15)$$

$$\text{水分の体積} \quad V_W = \frac{m_W}{\rho_W} \quad (3.16)$$

$$\text{固体部分の体積} \quad V_S = \frac{m_S}{\rho_S} \quad (3.17)$$

$$\text{空隙の体積} \quad V_V = V_T - V_S \quad (3.18)$$

$$\text{全水分値} \quad M_C = \frac{m_W}{m_T} \quad (3.19)$$

$$\text{正味水分値} \quad M'_C = \frac{m_W}{m_S} \quad (3.20)$$

$$\text{見かけ密度} \quad \rho_V = \frac{m_T}{V_T} \quad (3.21)$$

$$\text{正味水分値} \quad M'_C = \frac{S_r \cdot e \cdot \rho_W}{\rho_S} \quad (3.22)$$

常温では水の密度は殆ど変わらないため、間隙比と飽和度が同じであれば、正味水分値は真密度に反比例する。このことは、液状化が問題となる間隙比や飽和度が同じであっても、真密度の大きい貨物では、運送許容水分値は小さくなることを意味する。

3.2.3 水分値の調製

液状化に係る試験を実施する際には、試料の水分値を調製する場合がある。そのため、試料の総質量、加える水の量と水分値の関係は、試験の基礎として知っておくと便利である。試料の水分値調製に係る式は (3.23) 乃至 (3.26) の通り。これらの式から分かる通り、水分値調製のために加える水の量は、試料の質量と、増加させようとする水分値の積を、調製後の水分値を1から引いた値で割った量になる。

実際に水分値を調製する際には、また、試験を行う際には、過度に乾燥していない環境において、手早く実施することも重要である。

$$M_C^1 = \frac{m_W^1}{m_T^1} \tag{3.23}$$

$$M_C^2 = \frac{m_W^2}{m_T^2} = \frac{m_W^1 + m_W^A}{m_T^1 + m_W^A} = \frac{M_C^1 \cdot m_T^1 + m_W^A}{m_T^1 + m_W^A} \tag{3.24}$$

$$(M_C^2 - M_C^1) \cdot m_T^1 = \delta_{MC} \cdot m_T^1 = m_W^A \cdot (1 - M_C^2) \tag{3.25}$$

$$m_W^A = \frac{\delta_{MC} \cdot m_T^1}{1 - M_C^2} \tag{3.26}$$

- ここで
- m_T^1 調製前試料の全質量
 - m_T^2 調製後試料の全質量
 - m_W^1 調製前試料の水分の質量
 - m_W^2 調製後試料の水分の質量
 - M_C^1 調製前試料の水分値 (百分率ではない)
 - M_C^2 調製後試料の水分値 (百分率ではない)
 - δ_{MC} 調製前後の水分値の差 ($M_C^2 - M_C^1$) (百分率ではない)
 - m_W^A 加える水分の質量

3.3 見かけ密度と締固め

IMSBC コード附録 1 の貨物の個別スケジュールには、見かけ密度 (Bulk Density) と載貨係数 (Stowage Factor) の欄がある。IMSBC コード本文第 1.7 節の定義は以下の通り。

- Bulk density means the weight of solids, air and water per unit volume. Bulk density is expressed in kilograms per cubic metre (kg/m³), in general. The void spaces in the cargo may be filled with air and water. (仮訳) 見かけ密度とは、単位体積当たりの固体、空気と水の重量をいう。見かけ密度は一般的にキログラム/立方メートル (kg/m³) で表現される。貨物の空隙は、空気と水で満ちていることがある。
- Stowage factor means the figure which expresses the number of cubic metres which one tonne of cargo will occupy. (仮訳) 載貨係数とは、貨物 1 トンの占める容積を立方メートルで表したものをいう。

ここで留意すべきことは、貨物の載貨係数及びその逆数である見かけ密度は、通常は試料を用いて計測する値ではないことである。船舶に積載されたばら積みの重量は、船舶の喫水計測結果に基づいて計算できる。そして、船倉内に積載された貨物の体積は、多くの場合、貨物の深さを目視で計測した結果に基づき算定される。載貨係数はこうした数値に基づいて推定される半経験的値 (semi-empirical value) である。

第 2.1 節 (1) で述べた通り、固体ばら積み貨物の試料を用いて見かけ密度を計測する場合、締固め (compaction) の方法を規定する必要がある。言い換えると、締固めの条件が異なれば、見かけ密度、さらには試料の間隙比や飽和度も変わり、剪断強度や液状化に係る特性も変化する。そのため、固体ばら積み貨物の試験においては、規定された締固め手順を遵守する必要がある。締固めには、試料に静的圧力を加える方法 (static tamping) と、ランマー (JIS ではランマー (Rammer) だが、IMSBC コードでは Hammer とされている。) を用いて突固める方法 (compaction using a rammer) がある。IMSBC コード附録 2 の各種試験における締固め方法は、概略以下の通り。

- 静的圧力による締固め 第 1.1 節 フローテーブル試験 第 1.2 節 貫入試験
- 突固めによる締固め 第 1.3 節乃至第 1.6 節 プロクター/ファガベリ試験
- 締固めを行わない 第 2 節 傾斜箱試験

なお、所定の強度を有しない現存バルカーの貨物密度に基づく積載制限要件 (SOLAS 条約第 XII 章第 10 規則) の適用に係る見かけ密度の計測法 MSC/Circ.908 “Uniform method of measurement of the density of bulk cargoes” でも、密度計測の際には締固めを行わないこととしている。

突固めによる締固め (突固めによる締固め方法については各種の規格があるが、いずれも米国の技術者であるプロクター (Ralph R. Proctor : 1894~1962) の方法を基礎としている。) では、容器の内径及び深さ、ランマーの質量及び落下高さ、一層当たりの突固め回数及び層の数が規定される。締固め仕事量 (Compactive Effort) は次の式で定義される。

$$E_C = \frac{W_g \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (3.27)$$

ここで E_C 締固め仕事量 (単位: kJ/m³)
 W_g ランマーの重量 (単位: kN)
 H ランマーの落下高さ (単位: m)
 N_B 層当たりの突固め回数
 N_L 層の数
 V モールドの容積 (締め固めた供試体の体積) (単位: m³)

JISA 1210 「突固めによる土の締固め試験方法」には、5 種類の締固め方法が規定されている。このうち 1 リットルの容積のモールド及び 2.5 kg のランマーを用いる方法と、IMSBC コード附録 2 第 1.3 節乃至第 1.6 節の各種プロクター/ファガベリ法の締固め方法を比較すると表 1 の通りである。

締固めに影響を及ぼす諸因子の中で、他の条件を同じにして、含水比 (水分値) だけを変えていくと、乾燥密度が最大となる含水比が存在する。この含水比を最適含水比 (optimum moisture content : OMC。以下では「最適水分値」とも記す。) と言う。後述の通り、幾つかの運送許容水分値決定法では、飽和度に基づくクライテリアを OMC との関係で規定している。

表 1 各種の突固めによる締固め方法の比較

IMSBC コード 附録 2 節番号 ↓	対象	ランマー 質量 [kg]	落下高さ [m]	モールド 容積 [m ³]	突固め 層数	層当り突 固め回数	締固め仕事量 [kJ/m ³]
JISA1210-A	土	2.5	0.3	1.000×10 ⁻³	3	25	551
プロクター/ ファガベリ法	1.3 精鉱等	0.35	0.2	1.000×10 ⁻³	5	25	86
	1.4 鉄鉱粉	0.15	0.15	1.000×10 ⁻³	5	25	28
	1.5 石炭	0.3375	0.15	2.121×10 ⁻³	5	25	29
	1.6 ボーキサイト	0.15	0.15	2.304×10 ⁻³	5	58	28

3.4 透水性試験

透水性も、液状化に関する固体ばら積み貨物の性状である。透水性を計測する方法を図 9 に模式的に示す。透水性が高ければ、その固体ばら積み貨物は液状化しないが、液状化の可否に係る明確なクライテリアは不明である¹⁰⁾。

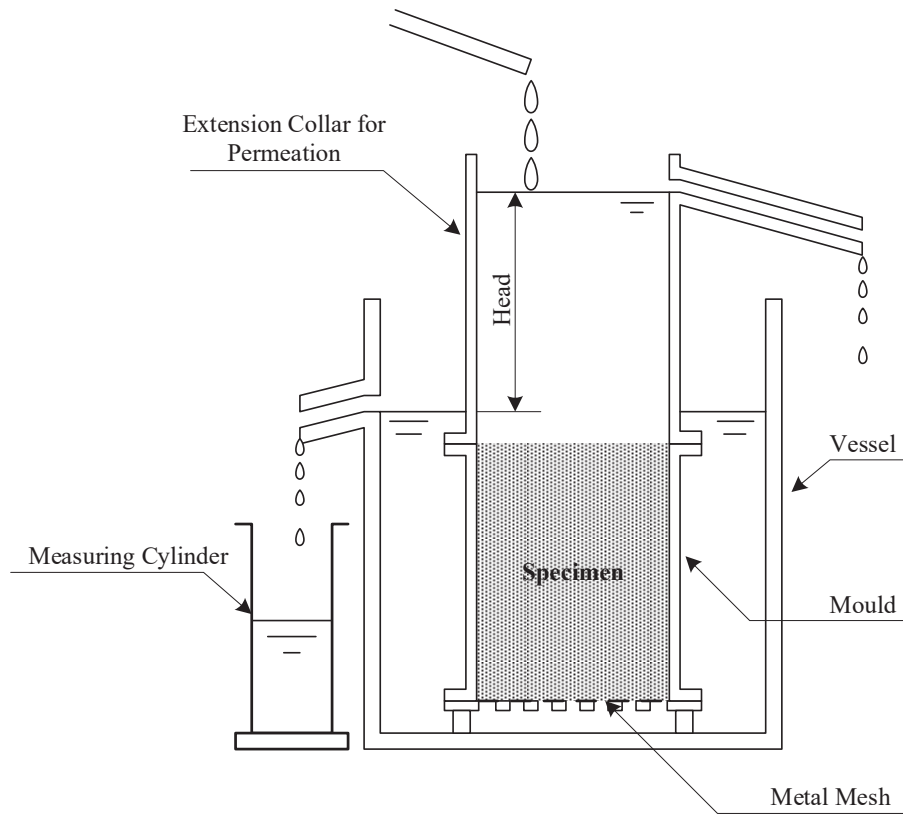


図9 透水性計測の模式図

4. 運送許容水分値決定法 (附録2 第1章)

4.1 各試験法の概要

4.1.1 試験法の種類

IMSBC コード附録2 第1章の冒頭に記載されている通り、この章には、以下の六つの運送許容水分値 (Transportable Moisture Limit. 以下“TML”と記す。)の決定法が示されている。

- .1 フローテーブル試験法 (flow table test)
- .2 貫入試験法 (penetration test)
- .3 プロクター/ファガベリ試験法 (Proctor/Fagerberg test)
- .4 鉄鉱粉用修正プロクター/ファガベリ試験法 (Modified Proctor/Fagerberg test procedure for iron ore fines)
- .5 石炭用修正プロクター/ファガベリ試験法 (Modified Proctor/Fagerberg test procedure for coal)
- .6 ボーキサイト用修正プロクター/ファガベリ試験法 (Modified Proctor/Fagerberg test procedure for bauxite)

別紙1から別紙6に、IMSBC コード附録2 第1.1節～第1.6節、即ちこれら六つの試験法の説明の仮訳を添える。なお、各試験基準には粒径範囲を表すため +2.36 mm 等の表現が用いられている。粒径の数値は、実際には「篩の呼び径」であり「丁度その大きさの粒子」の量は無視できる。よって、粒径分布の表現は「以上」であっても「大きい」であっても、また「以下」であっても「小さい」であっても、実行上は問題ない。そのため仮訳においては、言葉で明記されない限り、こうした言葉の選択には拘っていない点に留意されたい。

4.1.2 コードへの取り入れの経緯

IMSBC コードの基礎になった IMO 文書は、「固体ばら積み貨物に関する安全実施基準 (Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes)」, 通称 BC コード¹⁾である。これらの試験法のうち、フローテーブル試験法 (元々はセ

メント／生コンクリートの柔らかさ／水加減を評価する試験法)は従来から用いられており、BC コードの初版(1979年)から収録されていた。

貫入試験法は、元々は微粉炭用に我が国で開発された試験法で、その後、他の貨物にも適用できるよう拡張された。1993年3月に開催された第32回コンテナ・貨物小委員会(BC 32)で貫入試験法のBCコードへの取り入れが合意され、貫入試験法は1994年版のBCコードに収録された。

プロクター／ファガベリ試験法は、主として北欧で採用されていた方法で、貫入試験法と同時にBCコードへの取り入れが合意され、1994年版のBCコードに収録された。

その後、各種貨物の液状化に起因する事故を踏まえ、また、研究の進展により、鉄鋳粉、石炭、ボーキサイトについては、当該貨物に適した試験法、即ち、以下の試験法が開発された。

- 鉄鋳粉用修正プロクター／ファガベリ試験法
- 石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法
- ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法

これらの試験法は、いずれもプロクター／ファガベリ試験法を基礎としており、取り入れの経緯は以下の通り。

鉄鋳粉用修正プロクター／ファガベリ試験法

- 第18回危険物・固体貨物・コンテナ小委員会(DSC 18)(2013年9月)で合意
- 第21回編集・技術グループ(E&T 21)(2014年4月)で改正案の仕上げ
- IMSBCコード03-15改正で取り入れ(採択)
- 2017年1月1日発効

石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法

- 第2回貨物運送小委員会(CCC 2)(2015年9月)で合意
- 第25回編集・技術グループ(E&T 25)(2016年2月)で改正案の仕上げ
- IMSBCコード04-17改正で取り入れ(採択)
- 2019年1月1日発効

ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法：

- 第4回貨物運送小委員会(CCC 4)(2017年9月)で合意
- 第29回編集・技術グループ(E&T 29)(2018年4月)で改正案の仕上げ
- IMSBCコード05-19改正で取り入れ(採択)
- 2021年1月1日に発効

4.1.3 各試験法の特徴

これら六つの試験法のうち、フローテーブル試験法と貫入試験法は、試料に繰り返し荷重を作用させ、試料が液性を呈する現象、または、剪断強度の低下を評価するもので、試験の結果として流動水分値(Flow Moisture Point: FMP)が得られる。運送許容水分値(TML)はFMPの90%である。(但し、乾燥時の見かけ密度が90 kg/m³を超えるピートモスではTMLはFMPの85%。)

これに対してプロクター／ファガベリ試験法等では、FMPを求めずに、直接TMLを求める。これらの試験法は、試料の締固めの特性と飽和度によりTMLを判定するもので、液状化現象を検出してTMLを決めるものではない。

プロクター／ファガベリ試験法では、締固め時の容器の水密性によっては、液状化の恐れのない物質、例えば細かな粒子を多く含まない土であっても、TMLを決めることが出来てしまう可能性がある。よって、ある貨物が液状化貨物か否かを判定するには、プロクター／ファガベリ試験法は適していない。

フローテーブル法は後述の通り、試料を型枠に詰めて、その後型枠を外して供試体を台の上に形成して試験するもので、試料の性状によっては供試体を形成できない場合も多い。そのため、ある貨物が液状化貨物か否かを判定する試験法としては、適用に限界がある。現時点では、ある貨物が液状化貨物か否かを判定するには、試料の最大粒径が所定の値以下であれば、飽和状態の試料を用いて貫入試験を実施し、供試体の剪断強度が失われないことを確認するのも一つの方法である。

プロクター／ファガベリ試験法の規定には、「この試験法は、石炭やその他の多孔質の物質には適用しないこと」との文がある。これは、我が国の研究¹²⁾により、石炭は条件によっては、飽和度 50 % 程度でも液状化することがある旨が指摘されているのに対して、この試験法の石炭への適用は研究されていなかったためである。

4.1.4 プロクター／ファガベリ試験法等における飽和度のクライテリア

プロクター／ファガベリ試験法等では、所与の締固め条件下において、所定の飽和度に対応する水分値を TML としている。修正プロクター／ファガベリ試験法では、飽和度のクライテリアを最適水分値 (OMC, 第 3.3 節参照) との関係において規定している。TML に対応する飽和度の基準をまとめると、表 2 の通り。

表 2 プロクター／ファガベリ法等の TML に対応する飽和度

試験法	OMC に対応する飽和度	TML に対応する飽和度
Proctor/Fagerberg 試験法	-	70 %
鉄鋳粉用修正 Proctor/Fagerberg 試験法	90 % 以上	80 %
石炭用修正 Proctor/Fagerberg 試験法	70 % 以上	70 %
ポーキサイト用修正 Proctor/Fagerberg 試験法	90 % 以上	80 %
	90 % 未満	70 %

4.1.5 粒径に基づく試料の再構成

修正プロクター／ファガベリ試験法のうち、石炭用とポーキサイト用の試験法は、実際の貨物に適用するため、粒径に基づいて試料を再構成して、試料の最大粒径を 25 mm にする手順を含んでいる。簡単に言うと、石炭用の試験法の試料では、25 mm 以上の粒子は、ある程度低い水分値において同じ質量となる 16 mm から 25 mm の粒子で置き換えられる。また、ポーキサイト用の試験法の試料では、25 mm 以上の粒子が乾燥質量ベースで 10 % を超える場合、25 mm 以上の粒子は、同じ乾燥質量の 6.3 mm (または 6 mm) ～25 mm の粒子で置き換えられる。

貫入試験法は、石炭の一種である微粉炭用に開発された試験法であり、適用できる試料の最大粒径は 25 mm である。では、石炭であれば、貨物から大きな粒子を取り除いたものを試料として、貫入試験法を適用すれば良いと考えるかもしれないが、それは誤解である。

試験法によらず、貨物から大きな粒子を取り除いたものを試料として用いた場合、試料について求めた TML は、そのままでは貨物の TML とはならないことに留意する必要がある。理想的な篩い分けが行われたと仮定し、元の試料の水分値を M_C^T 、篩上試料 (粒径：大) の水分値を M_C^L 、篩下試料 (粒径：小) の水分値を M_C^S 、乾燥質量ベースでの篩下試料の全試料に対する割合を p とすると、(4.1) 式が成り立つ。

一般に大きな粒子は多くの水を含まないことに留意されたい。ここで篩上試料の水分値を零とすると (4.1) 式は (4.2) 式の通り。

(4.2) 式に基づき、篩下試料の水分値を横軸に、元の試料の水分値を縦軸に、篩下試料の通過質量百分率をパラメータとして表すと図 10 が得られる。図より、大きな粒子を除去した試料の水分値は元の試料の水分値より高くなる事が分かる。このことから、大きな粒子を除去した試料の TML が得られたとしても、その TML は、そのままでは元の試料に適用できない可能性があることが分かる。

$$M_C^T = \frac{p \cdot M_C^S + (1 - p) \cdot M_C^L - M_C^S \cdot M_C^L}{1 - (1 - p) \cdot M_C^S - p \cdot M_C^L} \quad (4.1)$$

$$M_C^T = \frac{p \cdot M_C^S}{1 - (1 - p) \cdot M_C^S} \quad (4.2)$$

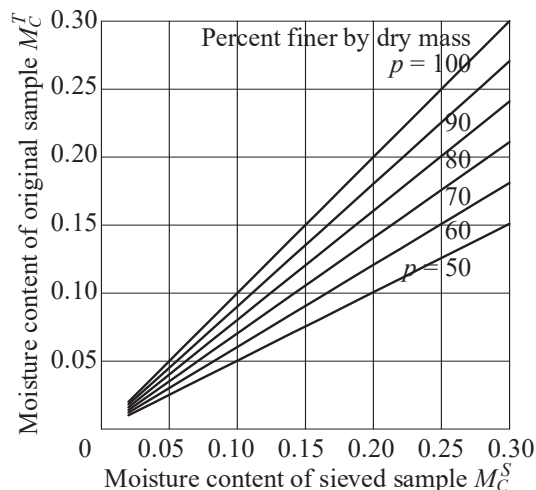


図 10 篩下試料と元の試料の水分値の関係（篩上試料の水分値は零と仮定）

4.2 フローテーブル試験法（IMSBC コード附録 2 第 1.1 節）

この試験は、簡単に言うと、上下に動く台の上に型枠を置き、試料を詰め込んでから型枠を外すことによって供試体を形成し、台を回転する金具（rotated cam）で持ち上げてから落とすことによって繰り返し衝撃を与え、供試体が流動状態を呈するか否かにより、水分値が FMP より上か下かを判定する試験である。供試体の形状は円錐台。型枠は、スペーサーにより台の中心に置かれる。試料を型枠に挿入する際の締固めは、静的に圧力を加えるタンピングによる。試料の挿入は 3 層に分けて行う。予備試験と本試験に分けて実施することになっている。

この試験では、台を金具で持ち上げて落とすことにより供試体に衝撃を与える。よって、台を上下させる金具のみならず、台の設計は全て仕様通りでなければならない。また、マニュアルで操作する試験装置もあるが、ハンドルの回転速度も落下高さに影響するので、回転速度も遵守する必要がある。そして、衝撃荷重を用いる試験であるため、試験装置は十分な剛性を有する場所に設置する必要がある。主な試験条件は以下の通り。

試料の最大粒径	7 mm.
供試体の寸法	供試体は円錐台形で、型枠の内寸は、底面の直径 4 インチ、上面の直径 2.75 インチ、深さ 2 インチ。
締固め方法	静的圧力によるタンピング。3 層。タンパーの直径は 30 mm。タンピング圧力は対象物の見かけ密度と積み付け深さによる。
衝撃力及び回数	台は 12.5 mm の高さまで持ち上げられて落下。毎分 25 回の速さで 50 回落下させる。
液状化の判定	目視。または供試体の直径の変化。
FMP の計算	液状化する最も水分値が低い試料と、液状化しない最も水分値が高い試料の水分値の平均値を FMP とする。
TML の決定	FMP の 90 %（一部のピートモスについては 85 %）を TML とする。

実際の試験で経験されるトラブルとしては、以下が挙げられる。

- 試料が滑り易く供試体が形成できない
- 試料に粘着性があり、型枠が綺麗に外れない→供試体が形成できない。
- 試料が磁気を帯びており、型枠にくっついて供試体が形成できない。
- 振動を与えている間に試料が台の上で滑り、台から落ちそうになる。

4.3 貫入試験法（IMSBC コード附録 2 第 1.2 節）

貫入試験法は、微粉炭の液状化による船舶の転覆事故を契機として、我が国で開発された試験法である^{13), 14), 15)}。この試験法は、振動台の上に設置した円筒形容器に試料を入れ、これに繰り返し加速度を与えた際の試料の状態により、液状化の発生を判定するものである。液状化は、試料の上面に置いたビット（所定の金具）が、試

料に貫入した深さによって判定する。試料を円筒形容器に挿入する際の締固めは、静的に圧力を加えるタンピングによる。試料の挿入は4層に分けて行う。予備試験と本試験に分けて実施することになっている。

円筒形容器には大型(内径:194 mm)と小型(内径:146 mm)があり、基本的には大型容器は石炭用、小型容器は精鉱用である。また、直径15 mmで先端が半球状の貫入ビットも、5 kPa(ロッドを含む重量:88 g)と10 kPa(ロッドを含む重量:177 g)があり、基本的には、5 kPaは石炭用、10 kPaは精鉱用である。大型容器の場合深さ約16 cm(4,700 cm³)、小型容器の場合深さ約10 cm(1,700 cm³)まで試料を入れる。主な試験条件は以下の通り。

試料の最大粒径	25 mm. 但し、小型円筒形容器は最大粒径10 mmまでの試料用。
試料の量	大型円筒形容器:約4,700 cm ³ . 小型円筒形容器:約1,700 cm ³ .
締固め方法	静的圧力によるタンピング. 4層. タンパー及びタンピング圧力はフローテーブル法と同じ.
加速度及び時間	周波数50 Hzまたは60 Hz, 振幅2 g rms(約±2.8 g)の加速度を6分間, 試料の入った容器に作用させる.
液状化の判定	ビット貫入量50 mmがクライテリア. 複数のビットを用いる場合, どちらか一本でも50 mmを超えて貫入すれば液状化が発生したと判定する. なお, 貫入量とは, ビットの高さのホルダー(治具)に対する減少/低下量から, 試料上面の低下/沈降量を引いた値である.

FMPとTML フローテーブル法と同じ。

この試験は、ビットの貫入量が試料の水分値によらず50 mmを超える貨物には適用できない。こうした貨物は一般に、剪断強度が低いいため、液状化の有無によらず、船倉内で移動する可能性が高いので、注意が必要である。また、貨物の上面を平坦に荷繰りしても、特に貨物を浅く積載した場合には、船倉底部で滑りを起こす可能性があるため、注意が必要である。

IMSBCコードに例示されている振動台は、アンバランスマス(unbalance mass)を回転させて加速度を発生させる安価な機構のものであるが、電磁式の振動台を用いることも出来る。但し、試料の磁性によっては、電磁式の振動台だと、試験がうまくいかない場合もある。

アンバランスマスによる安価な振動台に代表されるような、加速度のフィードバック制御機能がない振動台の場合、実試料を用いて事前に加速度レベルを調整しても、円筒形容器内の試料の状態が変化すると(液状化が起こると)、加速度振幅が変化することがある。しかしながら、貫入試験法で得られるFMPへの加速度レベルの影響はさほど大きくないので、多少の加速度の変動に対して神経質になる必要はない。

4.4 プロクター/ファガベリ試験法(IMSBCコード附録2第1.3節)

前述の通り、この試験ではFMPを求めずにTMLを決める。

試験では、プロクター法、即ち、突き固めによる締固めを行い、水分値との関係における見かけ密度、間隙比、飽和度等を求める。所与の締固め条件下で飽和度70%に対応する水分値をTMLとする。主な試験条件は以下の通り。

試料の最大粒径	5 mm.
試料の量	締固め後の試料の体積(モールドの容積)1000 cm ³ .
締固め方法	突き固めによる締固め. 本解説書第3.3節表1参照.
TML	飽和度70%に対応する水分値.

4.5 鉄鉱粉用修正プロクター/ファガベリ試験法(IMSBCコード附録2第1.4節)

IMSBCコードの附録1には「鉄鉱粉(IRON ORE FINES)」と「鉄鉱石(IRON ORE)」の個別スケジュールがあり、この試験法は鉄鉱粉に適用する。鉄鉱粉の個別スケジュールが適用されるのは、10%粒径(D_{10})が1 mm未満であって、且つ、50%粒径(D_{50})が10 mm未満のものであって、35%以上の針鉄鉱(水酸化酸化鉄FeO(OH). goethite)を含まないものである。

試験では突き固めによる締固めを行い、所与の締固め条件下で飽和度 80 % に対応する水分値を TML とする。その際 OMC を求め、OMC に対応する飽和度が 90 % 未満の場合、試験法は適用できない。主な試験条件は以下の通り。

試料の最大粒径	規定されていない。
試料の量	締固め後の試料の体積（モールドの容積）1000 cm ³ 。
締固め方法	突き固めによる締固め。本解説書第 3.3 節表 1 参照。
TML	飽和度 80 % に対応する水分値
OMC	飽和度 90 % 以上に対応しない場合、そのままでは適用できない。

4.6 石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法（IMSBC コード附録 2 第 1.5 節）

この試験法は、試料の粒径を再構成することにより、最大粒径 50 mm までの石炭に適用できる。但し、締固め試験に供する測定試料の最大粒径は 25 mm である。粒径に基づく試料の再構成については第 4.1.5 節を参照のこと。真密度の計測方法等も細かく規定されているが、一部の引用規格は廃止された年版になっている。

石炭は化学的危険性を有するため（MHB）、その種別は B または A & B である。10 % 粒径 (D_{10}) が 1 mm を超え、且つ、50 % 粒径 (D_{50}) が 10 mm を超える場合は、液状化の恐れのない貨物、即ち、種別 B の貨物として良い（石炭の個別スケジュール参照）。また、複数の石炭を混合した貨物の場合、元になる全ての貨物が種別 B の場合以外は、種別 A&B と見なして、液状化に関する試験を行う必要がある。但し、試験を実施した際所定の締固め条件下において、試料から水が抜け落ちることにより、試料の水分値を飽和度 70 % に対応する値まで上げられない場合は、種別 B として良い。

主な試験条件は以下の通り。

試料の最大粒径	50 mm。但し、締固め試験用の試料の最大粒径は 25 mm。
試料の量	締固め後の試料の体積（モールドの容積）2121 cm ³ 。
締固め方法	突き固めによる締固め。本解説書第 3.3 節表 1 参照。
TML	飽和度 70 % に対応する水分値。
OMC	飽和度 70 % 以上に対応しない場合適用できない。

TML が既知の複数の石炭を混合した場合の TML については、IMSBC コード附録 2 第 1.5.4 節（仮訳：別紙 5）を参照のこと。

この試験法では、真密度計測については AS 1289.3.5.1:2006（オーストラリア規格）に従うとしか記載されていないので、以下に、その概要を示す。

- 試料は 2.36 mm で篩下試料と篩上試料分ける。篩下試料の通過質量百分率を計測しておく。
- 篩下試料は、通常の比重瓶（規格では 250 ML の三角フラスコ）を用いて計測する。粒子間の空気を抜くには、13 kPa 以下に減圧して沸騰させる。
- 篩上試料は、細かい粒子を落とすため十分に洗い、試料が抜け落ちないワイヤーバスケット（wire basket）に入れて、水槽に 24 時間浸した後、試料とバスケットの水中における質量を計測する。バスケットの風袋質量（一部水中）を計測し、試料の水中質量を求める。試料の空中における質量、水中における質量及び水の密度から、試料の体積を求め、試料の真密度を求める。
- 篩下試料の真密度、篩上試料の真密度、通過質量百分率より、全試料の真密度を求める。

4.7 ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法（IMSBC コード附録 2 第 1.6 節）

この試験法はボーキサイト粉（BAUXITE FINES）に適用する。ボーキサイト粉の個別スケジュールが適用されるのは、30 % 粒径 (D_{30}) が 1 mm 未満であって、且つ、40 % 粒径 (D_{40}) が 2.5 mm 未満のボーキサイトである。試験を実施した際所定の締固め条件下において、試料から水が抜け落ちることにより、試料の水分値を飽和度 70 % に対応する値まで上げられない場合は、液状化の恐れはないと判定して良い。

ボーキサイトの液状化について研究した結果、船舶で運送するボーキサイトは、これまで考えられてきた液状化現象とは様相が異なり、船体運動等に起因する繰り返し荷重により、貨物の間隙に含まれる水が、貨物のパイルの上部に析出し、水またはスラリー（水とボーキサイト粉による泥状の混合物）の層が貨物上部に形成される

恐れがあり、これによって、貨物のパイルそのものは安定であっても、この水/スラリーが船倉内で移動することにより、船舶の復原性に悪影響を及ぼす恐れがあることが指摘された。この現象は「動的分離 (dynamic separation)」と呼ばれ、ボーキサイト粉の個別スケジュールで言及されるとともに、注意喚起のための Circular¹⁶⁾ が出されている。この試験法で決定される TML は、液状化も動的分離も発生しないと考えられる水分値の上限である。

この試験法では、試料の最大粒径は規定されていない。第 4.1.5 節で説明した通り、この試験法でも粒径に基づく試料の再構成が要求されるが、25 mm 以上の粒子が乾燥質量ベースで 10% 以下の場合、貨物から 25 mm 以上の粒子を除去するだけで良い。

主な試験条件は以下の通り。

試料の最大粒径	規定されていない。但し、締固め試験用の試料の最大粒径は 25 mm.
試料の量	締固め後の試料の体積 (モールドの容積) 2304.5 cm ³ .
締固め方法	突き固めによる締固め。本解説書第 3.3 節表 1 参照。
TML と OMC	OMC が飽和度 90% 以上に対応する場合、TML は飽和度 80% に対応する水分値。 OMC が飽和度 90% 未満に対応する場合、TML は飽和度 70% に対応する水分値。

5. 非粘着性貨物と静止角決定法 (附録 2 第 2 章)

5.1 静止角と荷繰り

IMSBC コード附録 2 第 2 章は、二つの静止角決定法について規定している。第 2.1 節は傾斜箱試験 (Tilting Box Test) であり、第 2.2 節は試料を注いだ際に形成される円錐の角度を計測する試験である。静止角は基本的には傾斜箱試験で決定すべきものである。別紙 7 に、IMSBC コード附録 2 第 2 章の仮訳を添える。

静止角は非粘着性貨物 (本稿第 2.4.2 節参照) のみに適用され、荷繰りの基準となる。非粘着性貨物の荷繰りは、IMSBC コード本文第 5.4 節に規定されている。概要は以下の通り。

静止角 30 度以下: 「穀類のように自由に流動する貨物」であり、見かけ密度に注意しつつ (一般に穀類は見かけ密度が小さい)、穀類と同様に運送する必要がある。即ち、貨物を積載した船倉の余積を少なくして、貨物が船倉内で移動しても復原性が十分に保たれるようにする必要がある。

静止角 30 度超え 35 度以下: 貨物の上面の凹凸が 1.5 m 以内、且つ、船幅の 10 分の 1 以内となるよう荷繰りする必要がある。

静止角 35 度超え: 貨物の上面の凹凸が 2 m 以内、且つ、船幅の 10 分の 1 以内となるよう荷繰りする必要がある。

5.2 傾斜箱試験

この試験は、長さ 600 mm、幅 400 mm、深さ 200 mm で、底部に開口部 30 mm 角、深さ 25 mm のグレーチングを置いた箱 (傾斜箱) に、締固めを行わずに試料を注ぎ、余分な試料をフラットバー (真っ直ぐで丈夫な金属製の板。通常は鋼製で幅 5 cm 程度) で取り去った後、箱を傾けて、ある程度の量の試料が滑り始める角度を求める試験である。箱を傾斜させていくと、試料の表面 (箱の中の供試体の上面) で粒子がさらさら流れ始めるが、求めるべきはその角度ではなく、試料の一部が箱から出るような、有意な滑りが起こった時点の角度を求め、これを静止角とする。傾斜の速度は毎秒 0.3° と決められている。

傾斜箱には振動を与えてはならず、試料は締め固めてはならない。試料を締め固めてしまうと、試料が流れるまでの傾斜角は大きくなる。即ち、試験結果は危険側の数値を与えることになる。

適用できる試料の最大粒径は 10 mm である。グレーチングの開口部に入っていない程大きな粒子を含む場合は、次に述べる円錐を形成する試験法の適用を考えるべきである。

5.3 円錐の斜面の角度による方法

傾斜箱試験が適用できない貨物については、試料をざらざらしたシートの上にゆっくりと注ぎ、その際に形成される円錐の斜面の角度で静止角を決定する方法である。

6. おわりに

IMSBC コードは 2011 年 1 月 1 日に初版が発効、即ち条約上の義務的要件としての効力を有して以来、2 年に一回の頻度で定期的に改訂されており、これまでは奇数年の 1 月 1 日に改定版が発効していた。本稿執筆時点においては、COVID-19 によるパンデミックの影響により、次回改定版の発効は 2023 年 1 月 1 日より遅れる予定であるが、その後はまた奇数年の 1 月 1 日に改定版を発効させるべく作業が進められている。固体ばら積み貨物の運送に関与する荷送り人や船会社等は、常時最新版の IMSBC コードを参照し、理解する必要がある。そうした方々が IMSBC コードを参照される際、本稿がその一助となれば幸いである。

本稿は、国土交通省海事局から当所が令和 2 年度に請け負った「固体ばら積み貨物の安全輸送に関する調査研究」のうち「IMSBC コード附録 2（第 1 節及び第 2 節）の解説書の作成」の報告書に加筆・再構成したものである。本稿の発行をご快諾いただいた国土交通省海事局検査測度課危険物輸送対策室の方々に、この場を借りて謝意を表す。

References

- 1) IMSBC Code 4.4.1 : Physical property tests on the consignment are meaningless unless they are conducted prior to loading on truly representative test samples.
- 2) JIS A 1201:2020 “Practice for preparing disturbed soil samples for geotechnical laboratory tests”
- 3) IMSBC Code, Appendix 2, 1.5.5 “Modified Proctor/Fagerberg test procedure for coal”
- 4) IMO document, CCC 4/INF.10 & Corr.1 “Amendments to the IMSBC Code and supplements - The Global Bauxite Working Group Final Report and Peer Review Letter”, Submitted by Australia, Brazil and Malaysia, 2017
- 5) IMO document, Annex 1 to DSC 18/INF.13 & Corr.1 “Development of amendments to the IMSBC Code and supplements, including evaluation of properties of solid bulk cargoes - The Technical Working Group (TWG) Report #4 “Reference Tests””, Submitted by Australia and Brazil, 2013
- 6) IMO document, Section 9 of Annex 2 to CCC 2/INF.7 “Amendments to the IMSBC Code and supplements - Information supporting the inclusion of a new TML test and to amend the individual schedule for Coal”, Submitted by Australia, 2015
- 7) IMO document, Annex 1 to CCC 3/INF.7 “Amendments to the IMSBC Code and supplements - Additional coal research reports presented to the correspondence group on evaluation of properties of BAUXITE and COAL”, Submitted by Australia, 2016
- 8) IMO document, CCC 4/INF.10 & Corr.1 “Amendments to the IMSBC Code and supplements - The Global Bauxite Working Group Final Report and Peer Review Letter”, Submitted by Australia, Brazil and Malaysia. 2017
- 9) Japanese Geotechnical Society, Japanese Standards and Explanations of Laboratory Tests of Geomaterials, 2nd Edition, 2010
- 10) IMO document, DSC 6/5/3 “Review of the BC Code, including evaluation of properties of solid bulk cargoes -Report of the Correspondence Group on Evaluation of the Liquefaction Potential of Solid Bulk Cargoes”, Submitted by Japan as the coordinator of the Correspondence Group
- 11) IMO Assembly Resolution A.434(XI), adopted on 15 November 1979
- 12) IMO document, BC 30/5/2, “Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes - Development of new criteria in respect of liquefaction and sliding failure in bulk cargoes, Determination of flow moisture point”, submitted by Japan, 1988
- 13) URA Tamaki, “Development of “Penetration Test Procedure” for determining transportable moisture limit of solid bulk cargoes”, Techno marine (Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan), Vol. 766, pp.258-262, 1993

- 14) IMO document, BC 32/3/7, “Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes - Inclusion of Penetration Method in the BC Code”, submitted by Japan, 1992
- 15) IMO document, BC 32/INF.15, “Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes - Results of the joint experiment programme on penetration method”, submitted by Japan, 1992
- 16) CCC.1/Circ.2/Rev.1 “Carriage of bauxite which may liquefy”, 20 September 2017

別紙1 フローテーブル試験法 (IMSBC コード附録2 第1.1節) (仮訳)

1.1 フローテーブル試験

1.1.1 目的

フローテーブルは一般に鉱物精鉱または最大粒径が 1 mm のその他の微細物質に適する。また、最大粒径が 7 mm までの物質にも適用できる場合がある。これより粗い物質には適さず、粘土含有量の高い一部の物質には適当な結果を与えない恐れがある。フローテーブル試験が問題の物質に適さない場合、荷役国の主管庁に承認された方法を採用すること。

以下で規定する試験は、以下を決定するものである。

- .1 貨物の試料 (以下「試験対象物質」と呼ぶ。) の水分値
- .2 フローテーブル装置の衝撃または繰り返し力下における試験対象物質の流動水分値 (FMP)
- .3 試験対象物質の運送許容水分値

1.1.2 試験装置 (図 1.1.2 参照)

- .1 標準フローテーブルとフレーム (ASTM Designation (C230-68) – 第3章参照)
注： この別紙の末尾に、第3章の試験装置の図 (Figure 3) を掲載する。
- .2 フローテーブルの取り付け (ASTM Designation (C230-68) – 第3章参照)
- .3 モールド (型枠) (ASTM Designation (C230-68) – 第3章参照)
- .4 タンパー (図 1.1.2.4 参照) : 必要なタンピング圧力は、校正済みのバネ仕掛けのタンパー (図 1.1.2.4 に例示) , または、直径 30mm のタンパーヘッドを介して制御された圧力を加えることができるその他の適切な設計のタンパーにより与えられる。
- .5 天秤と錘 (ASTM Designation (C109-73) – 第3章参照) 及び適当な試料容器
- .6 ガラス製のメスシリンダー (容量 : 100~200ml) とビュレット (容量 : 10ml) .
- .7 直径約 30cm の半球形のみキシングボウル、ゴム手袋、乾燥皿またはフライパン。これらに代えて、同程度の容量の自動ミキサーを攪拌に使用することもできる。この場合、機械式ミキサーが試験対象物質の粒径を小さくしないよう、また、コンシステンシー¹を低下させないように注意すること。
- .8 約 110°C までの温度制御できる高温乾燥機。空気循環を伴わないもの。



図 1.1.2 フローテーブル及び関係器具

¹ consistency : 変形や流動に対する抵抗の度合。土のコンシステンシー限界とは、液性限界、塑性限界、収縮限界等、含水比による状態変化の境界の含水比の総称である。

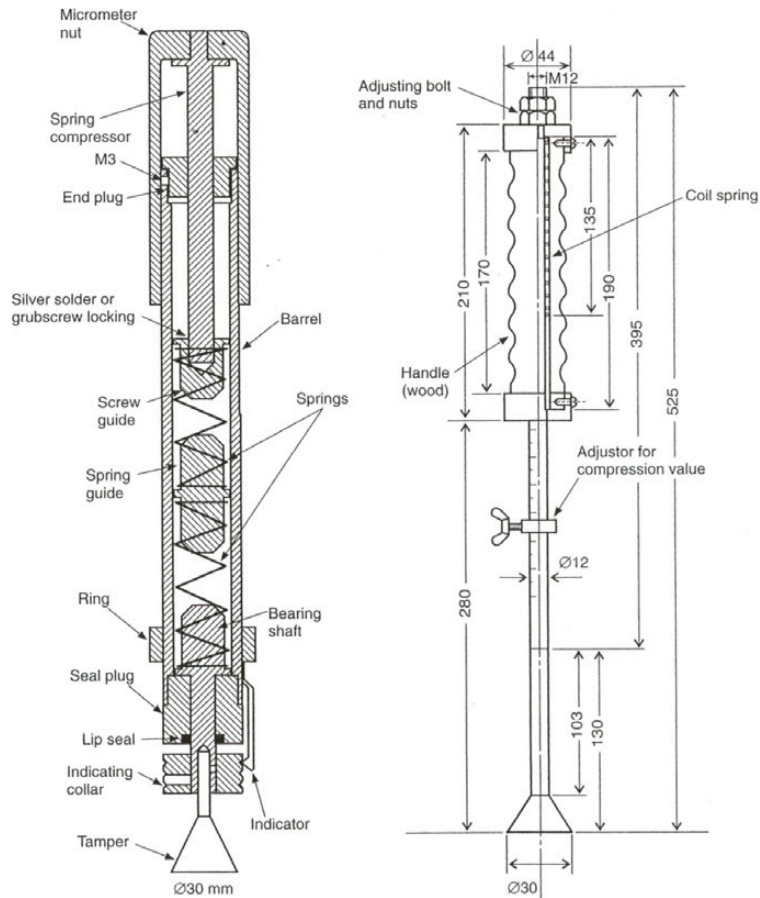


図 1.1.2.4 バネ式タンパーの例

1.1.3 温度と湿度

試料が過度の温度、気流、湿度の変動から保護される部屋で作業することが望ましい。試料の準備と試験の全ての段階は、水分の損失を最小限に抑えるのに妥当な時間内に実施すること。いずれにせよ一日で完了すること。可能であれば、試料容器はプラスチック膜または他の適切なカバーで覆うこと。

1.1.4 手順

流動水分試験に必要な物質の量は、試験する物質の比重によって異なる。石炭の約 2 kg から鉱物精鉱の 3 kg の範囲になる。出荷される貨物を代表する試料を採取すること。経験的には、試料の水分値を FMP に向けて減らすより、増やしていく方が、正確な試験結果が得られる。そのため、予備的な流動水分試験を実施することが勧められる。この試験は一般に以下の手順で実際され、この試験によって、試料の条件、即ち、水の量、及び、本試験に先立って加える水の量または水分値を減らすための空気乾燥の程度を特定できる。

1.1.4.1 試験用試料の準備

試験対象物質の代表試料をミキシングボウルに入れ、完全に攪拌する。三つのサブサンプル (A), (B) 及び (C) を以下の通りミキシングボウルから取り出す。試料の約 5 分の 1 のサブサンプル(A) は、すぐに計量し、高温乾燥機に入れ「到着時」の試料の水分値を測定する。次に、試料総質量の約 5 分の 2 の二つのサブサンプルを取り出す。(B) は予備的流動水分値試験用、(C) は主流動水分値試験用である。

1. モールドへの試料の充填：モールドはフローテーブルの中央に配置され、ミキシングボウルから取り出した物質で、3 段階で充填される。最初の物質の挿入は、タンピング後の深さがモールドの約 3 分の 1 まで充填することを目的とする。これを達成するための試料の量は、物質毎に異なるが、試験対象物質の詰め込みに係る特性について、ある程度の経験をつめば分かる。二番目の試料の挿入

は、タンピング後の深さがモールドの約3分の2まで充填されるようにし、最後の試料の挿入では、タンピング後にモールド頂部のちょうど下まで充填されるようにする（図 1.1.4-2 参照）。

2. タンピング方法：タンピングの目的は、試験される物質の締固めの度合いを、船上の貨物の底部におけるものと同程度にすることである。適正なタンピング圧力は、以下により計算される。

$$\begin{aligned} \text{タンピング圧力 (Pa)} &= \text{貨物の見かけ密度 (kg/m}^3\text{)} \\ &\times \text{貨物の最大深さ (m)} \\ &\times \text{重力加速度 (m/s}^2\text{)} \end{aligned}$$

見かけ密度は、ASTM 規格 D-698 または JIS-A-1210 にあるプロクターCの装置を用いて、船積み時の水分値を有する一つの試料に対する一回の試験で計測できる。

タンピング圧力を計算する際には、もし貨物の積み付け深さに関する情報が得られない場合、あり得る最大の深さを用いること。

または、圧力は表 1.1.4.1 から推定しても良い。

タンピング動作の回数（毎回正しく一定の圧力を加えた場合）は、各層において均一に平坦な表面を完全に実現するため試料の縁まで全体を連続的にタンピングした場合、底部の層で約 35 回、中間の層で約 25 回、最上層で約 20 回となる。

3. モールドの取り外し：モールドが緩むまで横を軽く叩き（モールドを取り外し）円錐台の形をした試料をテーブル上に残す。

表 1.1.4.1

Typical cargo	見かけ密度 (kg/m ³)	貨物の最大深さ			
		2 m <----->	5 m	10 m	20 m ----->
石炭	1,000	20 (1.4)	50 (3.5)	100 (7.1)	200 (14.1)
金属鉱石	2,000	40 (2.8)	100 (7.1)	200 (14.1)	400 (28.3)
鉄精鉱	3,000	60 (4.2)	150 (10.6)	300 (21.2)	600 (42.4)
鉛精鉱	4,000	80 (5.7)	200 (14.1)	400 (28.3)	800 (56.5)
	5,000	100 (7.1)	250 (17.7)	500 (35.3)	1,000 (70.7)

(括弧内の値は、直径 30 mm のタンパーヘッドを介して適用する場合の同等の kgf である。)

1.1.4.2 予備的流動水分値試験

1. モールドを取り外した直後に、毎分 25 回の速さで 50 回、フローテーブルは 12.5 mm の高さまで持ち上げられ落下させられる。試料の水分値が FMP より低い場合、通常、テーブルが連続して落下すると、割れてバラバラになる（図 1.1.4-3 参照）。
2. この時点で、フローテーブルは停止され、試料がミキシングボウルに戻される。そこで 5~10 ml 場合によってはそれ以上の水が表面に撒かれ、ゴム手袋をはめた指または自動ミキサーにより完全に混ぜられる。モールドに再び試料が充填され、フローテーブルは 1.1.4.2.1 の説明の通りに最大 50 回落下させられる。流動状態が発生しない場合は、流動状態に達するまで水をさらに追加してこのプロセスを繰り返す。
3. 流動状態の識別：フローテーブルの衝撃動作は、粒子の再配列による締固めを引き起こす。その結果、任意の水準で物質に含まれる水分の体積（不変）の総体積に対するパーセンテージは増加する。試料の水分値と締固めが、塑性変形が発生するような飽和水準を引き起こした時、流動状態に達したと見なされる²。この時、試料の斜面の形状が変化し凹凸が出来る（図 1.1.4-4 参照）。フローテーブルの繰返し動作により、試料は変形し易くなり（slump³）続け、外側に流れる。物質に

² 条件によっては、塑性流動ではなく粒子間の摩擦が小さいため、水分値が FMP に達する前に、供試体（円錐台）の直径が増加することがある。この状態を流動状態と誤解してはならない。

³ 生コンクリートの slump とは柔軟性の尺度。スランプ試験において型枠を外した際に生コンクリートの供試体の頂部が下がる量。

よっては、上面にも亀裂が発生する場合がある。しかしながら、自由水の析出を伴う亀裂は、流動状態の達したことを示すものではない。殆どの場合、変形の測定は、塑性流動が発生したか否かを判定するのに役立つ。

例えば円錐台の任意の箇所で3 mmまでの直径の増加を示す型板は、この目的に役立つ指針となる。他の観察も役立つ場合がある。例えば、(増加する)水分値がFMPに近づくと、試料の円錐台は型枠にくっつく傾向を示す。さらに、試料がテーブルから押し出されると(供試体がテーブルの上を滑って移動すると)、試料はテーブルに水分の跡(縞)を残すことがある。こうした縞が見られる場合、水分値はFMPを上回っている可能性があるが、跡(縞)がないことは、水分値がFMPより低いことを意味するわけではない。

底面または半分の高さで円錐台の直径を測定することは役に立つ。0.4%から0.5%の増分で水を追加し、フローテーブルの25回の落下を適用すると、最初の直径の増加は通常1 mmから5 mmになり、さらに水を増やすと、底面の直径は5 mmから10 mmになる。

4. 上記の手順の代替として、多くの精鉱の概略のFMPを見つける方法は以下の通り。

水分値が確実にFMPを超えたら、25回の落下後に直径を測定し、さらに水を追加してテストを繰り返す。直径を測定して、図1.1.4-1に示す図を描き、直径の増加を水分値に対してプロットし、2点を通る直線は、FMPに近い値で水分値の軸と交差する。

予備的流動水分値試験が完了したら、主流動水分値試験の試料の水分値を流動点の約1%から2%下に調製する。

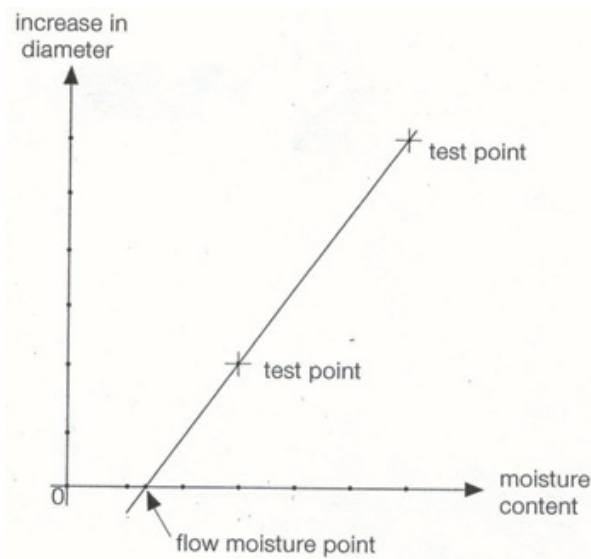


図 1.1.4-1



図 1.1.4-2

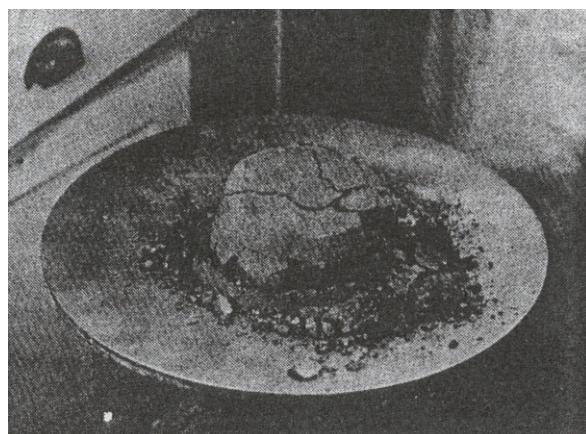


図 1.1.4-3



図 1.1.4-4

1.1.4.3 主流動水分値試験

予備試験で流動状態を呈した場合、サブサンプル (C) の水分値は、予備試験で流動状態を呈しなかった最後の値よりも約 1% から 2% 低い値に調製される。(これは単に、主流動水分値試験を FMP に近すぎる点から開始し、その後、試料を空気乾燥して再開する時間の浪費を防ぐために提案されている。)最後の試験(主流動水分値試験)は、予備的流動水分値試験と同じ方法で、この調製された試料に対して実施されるが、ここでは水の増加分は試験物質の質量の 0.5% 以下とすること(予備的な FMP が低い時は、増分を小さくすること)。各段階の

後、モールドに充填された試料は直ぐに容器に入れ、速やかに質量を計測し、必要に応じて水分の決定のため取り置くこと。これは試料が流れた場合、または次の僅かに水分の多い試料が流れた場合に必要になる。不要な場合は、試料はミキシングボウルに戻すことができる。

流動状態を呈したら、二つの試料の水分値を測定すること。1つはFMPのすぐ上の水分値で、もう1つはFMPのすぐ下の水分値である。二つの水分値の差は0.5%以下でなければならず、これら二つの値の平均をFMPとする。

1.1.4.4 水分値の決定

導入

多くの物質については、水分値を決定するための国際的及び各国の方法が認められていることに留意すること。これらの方法、または同等の結果をもたらす確立された方法を用いること。

精鉱及び類似物質

試料の質量が恒量になるまで乾燥させることが重要である。実際には、105°Cでの適切な乾燥時間の後に、数時間の間隔を空けて試料をさらに計量することで確認される。質量が一定の場合は乾燥が完了しているが、質量が減少している場合は乾燥を継続すること。

乾燥時間の長さは、高温乾燥機内の物質の配置、使用する容器のタイプ、粒子の大きさ、熱伝達率など多くの変数に依存する。5時間の期間は、ある精鉱試料には十分ですが、別の試料には十分ではない。硫化物精鉱は酸化する傾向があるため、これらの物質には、空気循環装置を備えた高温乾燥機の使用は推奨されない。また、試料を高温乾燥機に4時間以上放置しないこと。

石炭

水分値の測定に推奨される方法は、ISO 589:1974「硬質炭—全水分の測定」に記載されている方法である。この方法または同等の結果をもたらす確立された方法に従うこと。

水分値、FMP及び運送許容水分値の計算

m_1 : 到着時のサブサンプルの質量 (1.1.4.1 参照)

m_2 : 乾燥後、到着時のサブサンプルの質量

m_3 : 流動状態を呈する試験のうち最も水分値が低い試料の質量 (1.1.4.3 参照)

m_4 : 流動状態を呈する試験のうち最も水分値が低い試料の乾燥後の質量

m_5 : 流動状態を呈しない試験のうち最も水分値が高い試料の質量 (1.1.4.3 参照)

m_6 : 流動状態を呈しない試験のうち最も水分値が高い試料の乾燥後の質量 (1.1.4.3 参照)

これにより

- 1 到着状態における試料の水分値は以下の通り：

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1}, \text{ in per cent} \quad (1.1.4.4.1)$$

- 2 物質のFMPは以下の通り：

$$\frac{\frac{m_3 - m_4}{m_3} + \frac{m_5 - m_6}{m_5}}{2}, \text{ in per cent} \quad (1.1.4.4.2)$$

- 3 物質の運送許容水分値はFMPの90%である。

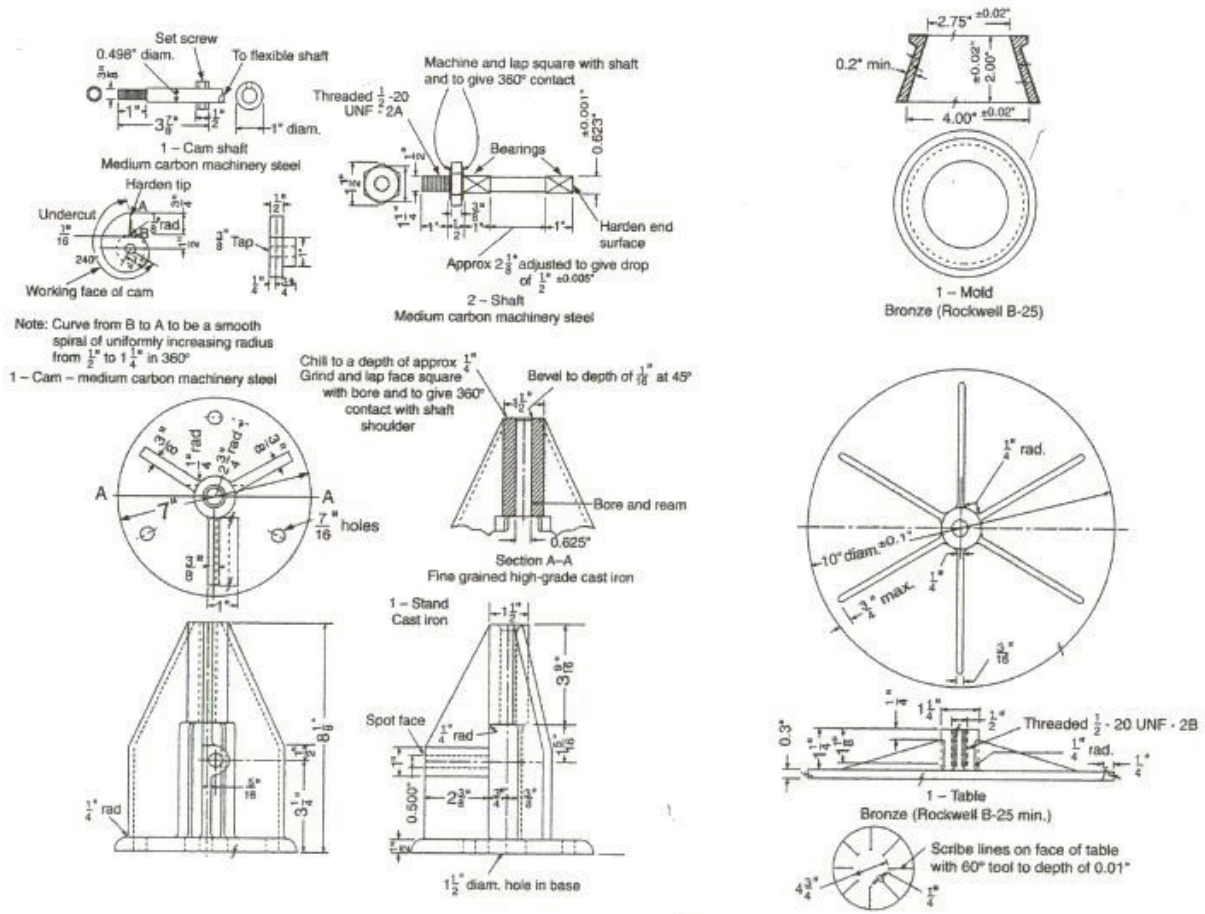
ピートモス

全てのピートモスについては、ASTMまたはCEN (20 L)を用いて見かけ密度を決定すること。ピートは乾燥時の見かけ密度が90 kg/m³より上か下かによって、TMLの求め方は異なる。

1.1.1で述べた通り、以下を決定すること：

- 1 貨物の試料の水分値 (M_c)
- 2 流動水分値 (FMP)
- 3 運送許容水分値 (TML)。TMLは以下の通り決定する。
 - 3.1 乾燥時の見かけ密度が90 kg/m³を超えるピートでは、TMLはFMPの85%
 - 3.2 乾燥時の見かけ密度が90 kg/m³以下のピートでは、TMLはFMPの90%

IMSBC コード附録 2 第 3 章のフローテーブルの図 (図 3)



別紙 2 貫入試験法 (IMSBC コード附録 2 第 1.2 節) (仮訳)

1.2 貫入試験法

貫入試験は、円筒形の容器内の物質を振動させる手順から構成される。流動水分値は、検出器の貫入深さにより決定される。

1.2.1 目的

- .1 貫入試験は、一般に、精鉱、類似物質及び粒径 25 mm までの石炭に適する。
- .2 この試験法では、円筒形の容器に入れた試料に $2 \text{ g rms} \pm 10\%$ (g = 重力加速度) の振動を 6 分間与える。試料の上面に置いたビットの貫入深さが 50 mm を超えたら、試料は流動水分値を超える水分を含むと判定される。
- .3 この試験法は、概略の流動水分値を得るための予備試験と、実際の流動水分値を決定するための主試験を含む。概略の流動水分値が既知である場合、予備試験は省略できる。
- .4 試料を試験する部屋は、1.1.3 の通り準備すること。

1.2.2 装置 (図 1.2.2 参照)

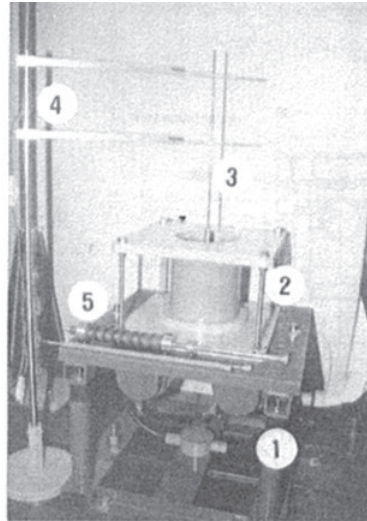
- .1 試験装置は以下により構成される。
 - .1 振動台
 - .2 円筒形容器
 - .3 検出器 (貫入ビット (複数) 及びホルダー)
 - .4 タンパー (1.1.2.4 参照)
 - .5 付属装置 (1.1.2.5~8 参照)
- .2 円筒形の容器を固定できるテーブルを備えたバイブレーター (図 1.2.2.2 参照) は、 3 g rms 以上の加速度で 50Hz または 60Hz の周波数で 30kg の質量を加振できること。また、加速レベルを調整するために制御できること。
- .3 円筒形容器 (図 1.2.2.3-1 及び図 1.2.2.3-2 参照) の寸法は以下の通り

Cylinder size	Inner diameter	Depth	Wall thickness
small	146 mm	202 mm	9.6 mm or more
large	194 mm	252 mm	10.3 mm or more

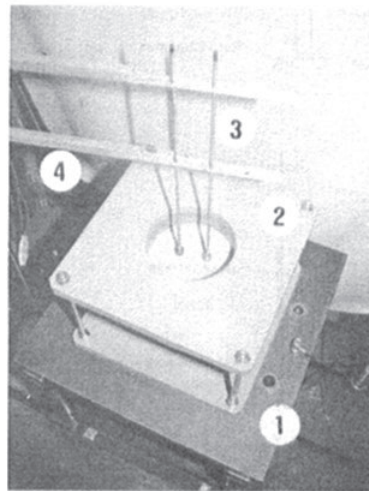
容器は、例えばアクリルや塩化ビニルといった、十分な剛性を有する、磁性のない、透水性のない、軽量の材料で製造されていること。

小型円筒形容器は最大粒径 10 mm 以下の物質のために選定され、大型円筒形容器は最大粒径 25 mm 以下の物質のためのものである。

- .4 貫入ビット (図 1.2.2.4 参照) は真鍮製である。石炭用のビットの質量は 88 g (5 kPa) に、精鉱用のビットの質量は 177 g (10 kPa) に調整されていること。試料が粗い粒子を含む場合は、判定の間違いを無くすため、同じ圧力のビット二つを上面に置くことが推奨される。
- .5 ホルダー (図 1.2.2.5 参照) は、最小の摩擦でビットのロッドが円筒形容器の中心に来るように作ること。二つのビットを使用する場合は、図 1.2.2 に従って配置する必要がある。
- .6 円筒形容器と貫入検出器は、試料の性状と条件、即ち粒径と見かけ密度に応じて選択すること。



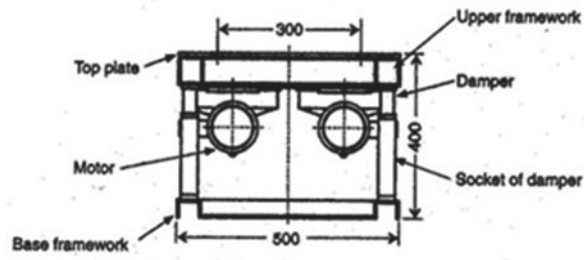
- ① Vibration table
- ② Cylindrical vessel (150 mm diameter)
- ③ Penetration bit (10 kPa)
- ④ Bit holder
- ⑤ Tamper



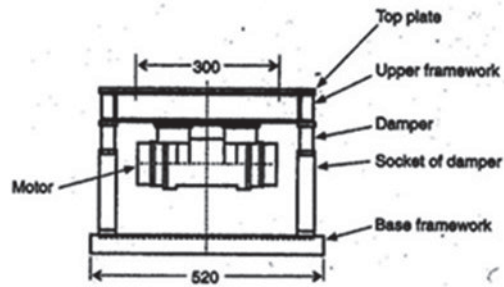
- ① Vibration table
- ② Cylindrical vessel (150 mm diameter)
- ③ Penetration bit (5 kPa)
- ④ Bit holder

图 1.2.2 試驗裝置

FRONT VIEW



SIDE VIEW



VIEW FROM BASE

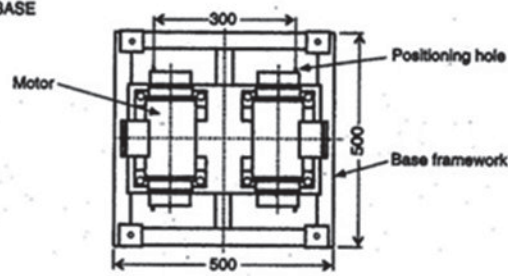
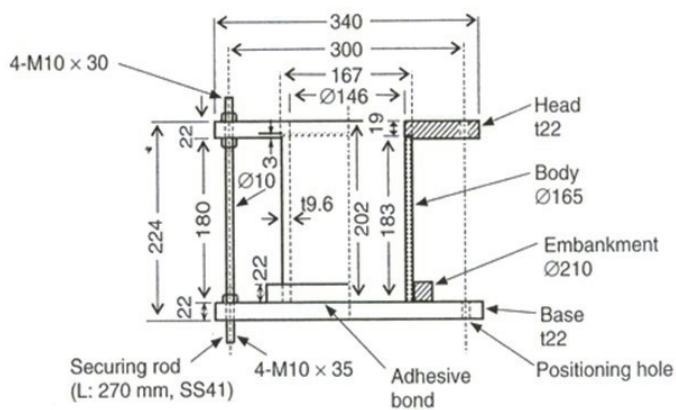


図 1.2.2.2 振動台

SIDE VIEW



PLAN VIEW
after dismounting head and body

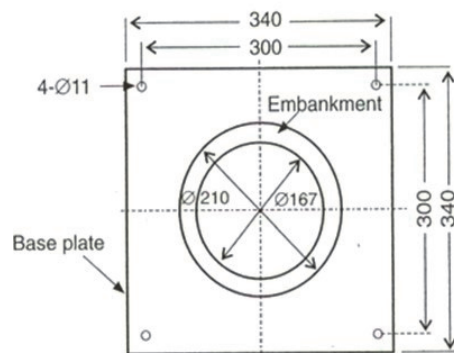


図 1.2.2.3-1 円筒型容器 150 mm 径

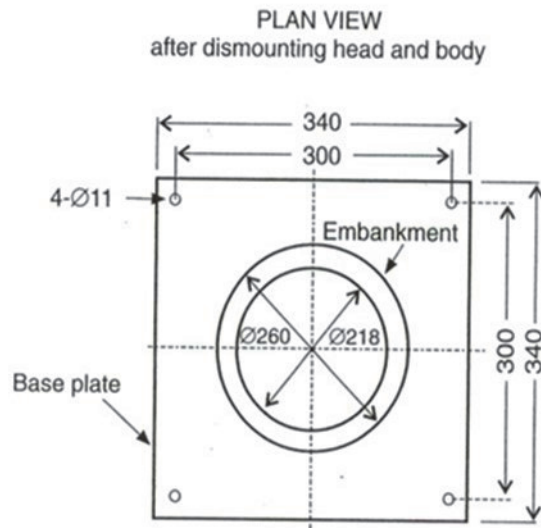
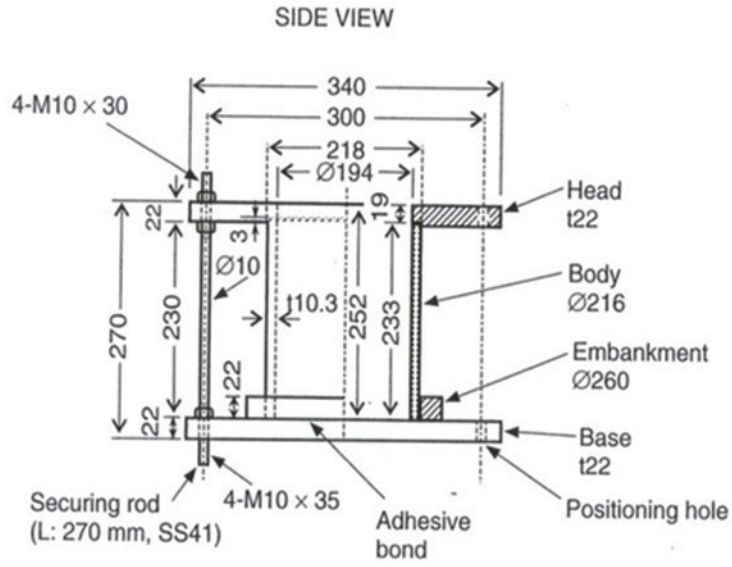
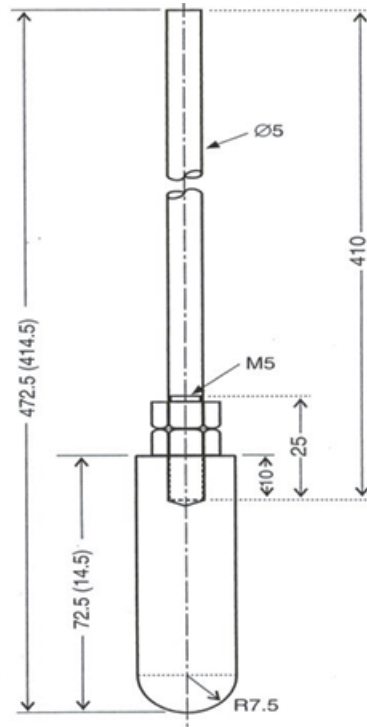


图 1.2.2.3-2 円筒型容器 200 mm 径



(Dimensions indicated in brackets are of the 5 kPa bit)
(unit: mm)

図 1.2.2.4 貫入ビット

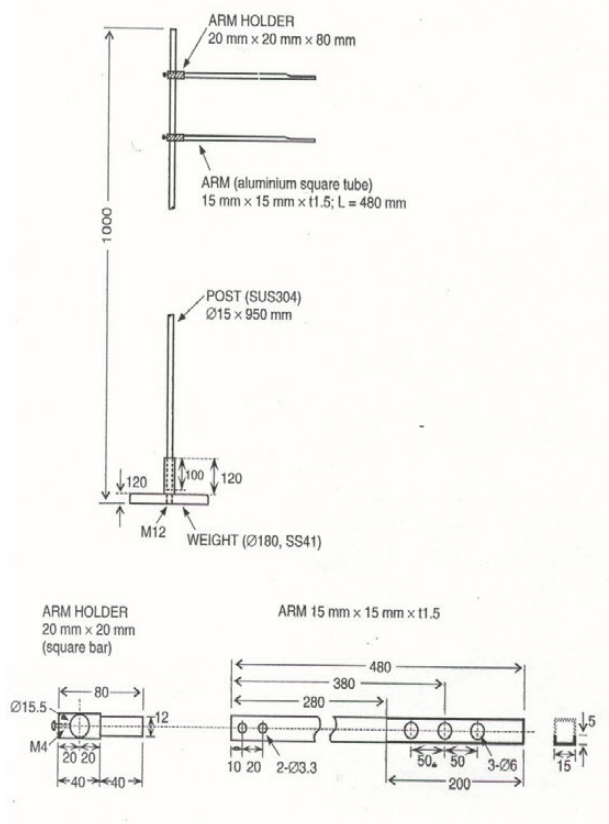


図 1.2.2.5-ビット治具

1.2.3 手順

1.2.3.1 試験用試料及び振動台の準備

- 1.1 必要な試料の量は、選択した円筒形容器の容量の約 6 倍以上である。各容器に充填する試験試料の代表的な量は、小型容器で約 1,700 cm³、大型容器で約 4,700 cm³である。
- 1.2 試料をよく混ぜて、略等量の三つのサブサンプル (A)、(B) 及び (C) に分けること。サブサンプル (A) は、すぐに計量し、高温乾燥機に入れ「到着時」の試料の水分値を測定する。サブサンプル (B) 及び (C) は、それぞれ予備試験と主試験に用いられる。
- 1.3 振動台の振動レベルは、試験を実施する前に加速度計を用いて較正すること。テーブルの加速度は、試料を入れた容器を固定した状態で 2 g rms ± 10 % に調整すること。

1.2.3.2 予備的流動水分試験

この試験は、サブサンプル (B) を使用して、概略の流動水分値を迅速に測定することを目的とする。水は毎回の貫入試験の後に段階的に追加される。流動状態に達したら、流動状態を呈したすぐ上の水分値を計測する。流動状態を呈するすぐ下の水分値は、試料の総質量から最後に追加した水の差し引くことで計算できる。

- 1.1 適切な円筒形容器にサブサンプル (B) を所定のタンパーを使用して各層を追加した後にタンピングし、4 段階で充填する。鉱物精鉱の場合は 1.1.4.1 に示されている圧力で、石炭の場合は 40 kPa で、均一に平坦な表面が得られるまで、物質の上面全体に均等に圧力を加える（タンピングする）。
- 1.2 物質の上面に、ホルダーを通した貫入ビットを置く。
- 1.3 バイブレーターを 50Hz または 60Hz の周波数で 2 g rms ± 10 % の加速度で 6 分間作動させる。要すれば、振動台に取付けられた加速度計の出力を参考に、加速度レベルを確認する。
- 1.4 6 分間の振動の後、貫入深さを読み取る。
- 1.5 貫入深さが 50 mm 未満の場合、液状化は発生していないと判定する。そして
 - 1.1 物質を円筒形容器から取り出し、残りの試料が入ったミキシングボウルに入れる。
 - 1.2 十分に混ぜて、ミキシングボウルの内容物の質量を計測する。
 - 1.3 ミキシングボウルの中の物質の質量が 1 % 以下の水の増加分を振り掛け、十分に混ぜる。
 - 1.4 1.2.3.2.1 から 1.2.3.2.5 に記載された手順を繰り返す。
- 1.6 貫入深さが 50 mm を超えた場合、液状化が発生したと判定する。そして
 - 1.1 円筒形容器内の物質を取り出し、ミキシングボウルに入れる。
 - 1.2 1.1.4.4 に記載された手順で水分値を計測する。
 - 1.3 追加された水の量に基づいて、流動水分値のすぐ下の水分値を計算する。
- 1.7 最初の試験で貫入深さが 50 mm を超えた場合、即ち、到着時の試料が液状化した場合、サブサンプル (B) と (C) を混ぜて、水分を下げるため室温で乾燥する。その後物質をサブサンプル (B) と (C) に分けて、予備試験を繰り返す。

1.2.3.3 主流動水分試験

- 1.1 予備試験に基づき、主試験により流動水分値をより正確に決定すること。
- 1.2 サブサンプル (C) の水分値を、予備流動水分試験で流動を引き起こさなかった最後の値に調製する。
- 1.3 主流動水分試験の最初の試験は、1.2.3.2 に示したのと同じ方法で、この調製された試料に対して実施する。但しこの場合、水の増分の添加は、試験物質の質量の 0.5 % を超えてはならない。
- 1.4 概略の流動水分値が既知の場合、サブサンプル (C) の水分値は、この値の約 90 % に調製すること。
- 1.5 流動状態に達したら、1.1.4.3 に示した通り流動水分値を決定する。

別紙 3 プロクター／ファガベリ試験法 (IMSBC コード附録 2 第 1.3 節) (仮訳)

1.3 プロクター／ファガベリ試験法

1.3.1 目的

- .1 この試験法は最大粒径 5 mm までの細粒および比較的粗粒の精鉱または同様の物質のためのもの。この方法は、石炭やその他の多孔質の物質には使用しないこと。
- .2 この試験を最大粒径が 5 mm を超える粗い材料に適用するには、採用と改善のための広範な調査を要する。
- .3 貨物の運送許容水分値 (TML) は、この試験法により飽和度 70 %に対応する臨界水分値に等しい。

1.3.2 プロクター／ファガベリ試験装置

- .1 プロクター装置 (図 1.3.2 参照) は、着脱式の延長部を備えた円筒形の鋼製のモールド (締固め容器) と、下端が開いたパイプによってガイドされる締固め具 (締固めハンマー) で構成される。
- .2 天秤と錘 (3.2 参照) 及び適当な試料容器
- .3 100°C から 105°C までに温度を制御できる高温乾燥機。空気循環を伴わないものであること。
- .4 適当なミキサー。ミキサーを使用することにより、粒径を小さくしないよう、また、コンシステンシー (第 1.1.2.7 節参照) を低下させないよう注意すること。
- .5 ピクノメーターなど、真密度を測定するための器具。

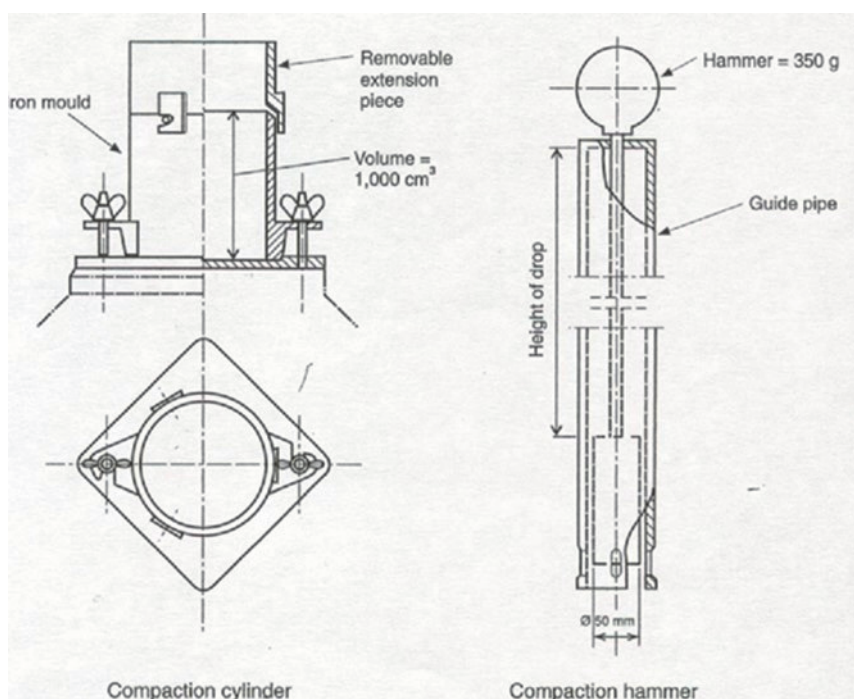


図 1.3.2 プロクター装置

1.3.3 温度と湿度 (1.1.3 参照)

1.3.4 手順

.1 完全な締固め曲線の作成

関連規格 (コード本文 4.7 節参照) に従って採取された代表試料を約 100°C で乾燥する。試験物質の総量は、全試験手順に必要な量の少なくとも 3 倍であること。締固め試験は、5~10 の異なる水分値に対して行う (5~10 の独立の試験)。

試料は、乾燥状態からほぼ飽和した状態（塑性域）の試料が得られるように調製すること。一回の締め試験あたりの必要量は約 $2,000\text{cm}^3$ である。

各締め試験においては、適切な量の水を乾燥した試験物質の試料に加え 5 分間攪拌すること。攪拌された試料の約 5 分の 1 をモールドに入れ、上面を水平に均してから、追加した試料の上面全体を均一に突き固めること。突き固めは、ガイドパイプを通してハンマーを 0.2m の高さから 25 回落とすことによる。この行為は 5 層全てに繰り返す。最後の層を突き固めた後、延長部を外し、試料はモールドの縁に沿って平らになるように取り除くこと。突き固めた試料の入った容器の重量を決定したら、容器を空にし、試料を乾燥して重量を決定すること。

そして、水分値が異なる他の試料に対して試験を繰り返すこと。

2 計算のための定義とデータ（図 1.3.4.2 参照）

- 空の容器，グラム単位の質量： A
- 突き固めた試料を含む容器，グラム単位の質量： B
- 水分を含む試料，グラム単位の質量： C

$$C = B - A$$

- 乾燥試料，グラム単位の質量： D
- 水分，グラム単位の質量（ cm^3 単位の体積に同じ）： E

$$E = C - D$$

容器の容積は 1000cm^3

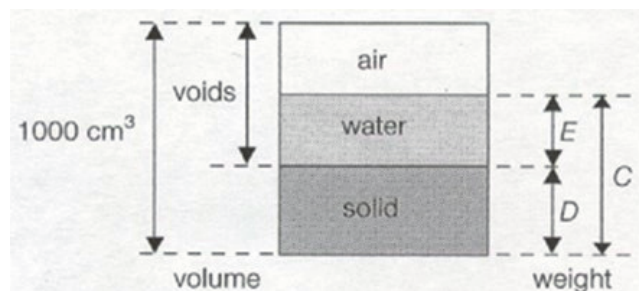


図 1.3.4.2

3 主な性状の計算

- 物質の固体密度（真密度）， g/cm^3 (t/m^3)： d
- 乾燥時の見かけ密度， g/cm^3 (t/m^3)： γ

$$\gamma = \frac{D}{1000}$$

- 正味水分値，質量百分率： e_v

$$e_v = \frac{E}{D} \times 100 \times d$$

- 間隙比： e （空隙の体積を固体部分の体積で割った値）

$$e = \frac{1000 d - D}{D} = \frac{d}{\gamma} - 1$$

- 飽和度，体積ベースの百分率： S

$$S = \frac{e_v}{e}$$

- 全水分値，質量百分率： W^l

$$W^1 = \frac{E}{C} \times 100$$

- 正味水分値, 質量百分率: W

$$W = \frac{E}{D} \times 100$$

4 締固め試験の表現

各締固め試験の結果は, 正味水分値 (e_v) と飽和度 (S) を横軸として, 計算された間隙比 (e) の値を縦座標としてプロットする.

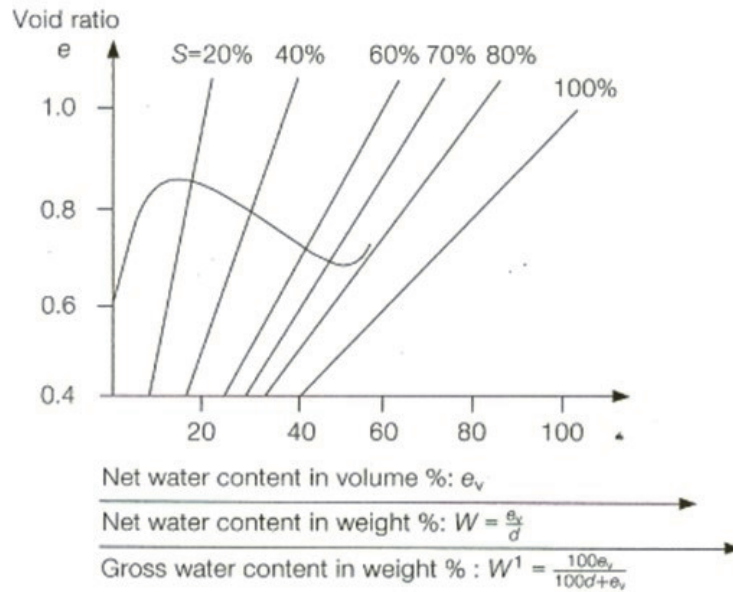


図 1.3.4.5

5 締固め曲線

試験により, 特定の締固め曲線が得られる (図 1.3.4.5 参照).

臨界水分値は, 締固め曲線と飽和度 $S = 70\%$ の線の交点として示される. 運送許容水分値 (TML) は臨界水分値である.

別紙 4 鉄鉱粉用修正プロクター／ファガベリ試験法（IMSBC コード附録 2 第 1.4 節）（仮訳）

1.4 鉄鉱粉用修正プロクター／ファガベリ試験法

1.4.1 目的

- .1 この節で規定される試験法（この試験）は、鉄鉱粉の運送許容水分値の決定のみに用いること。鉄鉱粉の個別スケジュール参照。
- .2 鉄鉱粉は、以下の両方を含む鉄鉱石である。
 - .1 1 mm 未満の粒子を 10% 以上、且つ
 - .2 10 mm 未満の粒子を 50% 以上
- .3 鉄鉱粉の TML は、修正プロクター／ファガベリ試験法により飽和度 80% に対応する臨界水分値に等しい。
- .4 この試験は最適水分値（OMC）に対応する飽和度が 90% 以上の場合に適用できる。

1.4.2 修正プロクター／ファガベリ試験装置

- .1 プロクター装置（図 1.4.1 参照）は、着脱式の延長部を備えた円筒形の鋼製のモールド（締固め容器）と、下端が開いたパイプによってガイドされる締固め具（締固めハンマー）で構成される。
- .2 天秤と錘（3.2 参照）及び適当な試料容器
- .3 100°C から 105°C までに温度を制御できる高温乾燥機。
- .4 手による攪拌のための容器。攪拌過程において、粒径を破碎することにより粒径分布を小さくしないよう、凝集により粒径分布を大きくしないよう、また、コンシステンシー（1.1.2.7 参照）を低下させないよう注意すること。
- .5 適当な規格（例えば ASTM D 5550, AS 1289 等）に従って真密度を測定するためのガスまたは水ピクノメトリー装置

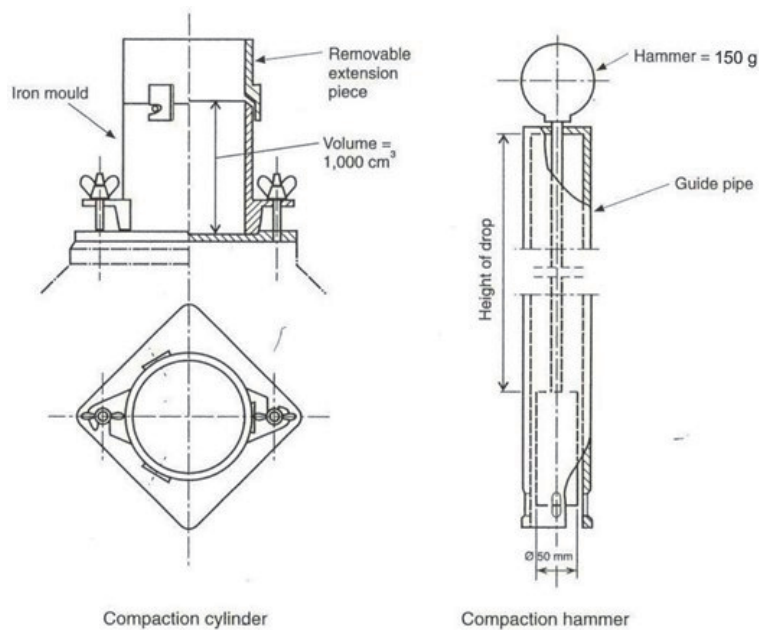


図 1.4.1

1.4.3 温度と湿度（1.1.3 参照）

1.4.4 手順

.1 完全な締固め曲線の作成

関連規格 (コード本文 4.7 節参照) に従って採取された代表試料は, 必要に応じて試料の水分を試験開始に適当な値に下げするため, 約 60 度以下で部分的に乾燥する. この試験のための代表試料は, 水分値計測の場合を除いて, 完全乾燥してはならない.

試験物質の総量は, 全試験手順に必要な量の少なくとも 3 倍であること. 締固め試験は, 5~10 の異なる水分値に対して行う (5~10 の独立の試験). 試料は, 部分的乾燥状態からほぼ飽和した状態の試料が得られるように調製すること. 一回の締固め試験あたりの必要量は約 2,000cm³ である.

各締固め試験においては, 適切な量の水を試験物質の試料に加えること. 試験物質は放置して均一化を図る前に, 穏やかに攪拌する. 攪拌された試料の約 5 分の 1 をモールドに入れ, 上面を水平に均してから, 追加した試料の上面全体を均一に突き固めること. 突き固めは, ガイドパイプを通して 150 g のハンマーを 0.15 m の高さから 25 回落とすことによる. この行為は 5 層全てに繰り返す. 最後の層を突き固めた後, 延長部を外し, 注意して, 試料はモールドの縁に沿って平らになるように取り除き, 試料の上面を平坦にすることを妨げる可能性のある大きな粒子を確実に除去し, 延長部に含まれる物質と交換して, 再度平坦にする.

突き固めた試料の入った容器の重量を決定したら, 容器を空にし, 試料を 105°C で乾燥して重量を決定すること. ISO 3087:2011⁴ 「鉄鉱石-ロットの水分値決定法」を参照のこと. そして, 水分値が異なる他の試料に対して試験を繰り返すこと.

固体物質の密度 (真密度) は, 国際的または国内的に認められた規格, 例えば ASTM D 5550 や AS 1289 (1.4.2.5 参照), に従って, ガスまたは水ピクノメトリー装置を使用して測定すること.

.2 計算のための定義とデータ (図 1.4.2 参照)

- 空の容器, グラム単位の質量 : A
 - 突き固めた試料を含む容器, グラム単位の質量 : B
 - 水分を含む試料, グラム単位の質量 : C
- $$C = B - A$$
- 乾燥試料, グラム単位の質量 : D
 - 水分, グラム単位の質量 (cm³ 単位の体積に同じ) : E
- $$E = C - D$$

容器の容積は 1000 cm³

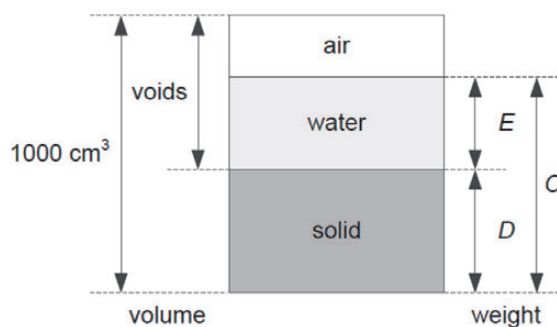


図 1.4.2

.3 主な性状の計算

- 物質の固体密度 (真密度), g/cm³ (t/m³) : d

⁴ 最新版は 2020

- 乾燥時の見かけ密度, g/cm^3 (t/m^3) : γ

$$\gamma = \frac{D}{1000}$$

- 正味水分値, 質量百分率 : e_v

$$e_v = \frac{E}{D} \times 100 \times d$$

- 間隙比 : e (空隙の体積を固体部分の体積で割った値)

$$e = \frac{1000 d - D}{D} = \frac{d}{\gamma} - 1$$

- 飽和度, 体積ベースの百分率 : S

$$S = \frac{e_v}{e}$$

- 全水分値, 質量百分率 : W^1

$$W^1 = \frac{E}{C} \times 100$$

- 正味水分値, 質量百分率 : W

$$W = \frac{E}{D} \times 100$$

4 締固め試験の表現

各締固め試験の結果は, 正味水分値 (e_v) と飽和度 (S) を横軸として, 計算された間隙比 (e) の値を縦座標としてプロットする.

5 締固め曲線

試験により, 特定の締固め曲線が得られる (図 1.4.3 参照) .

臨界水分値は, 締固め曲線と飽和度 $S = 80\%$ の線の交点として示される. 運送許容水分値 (TML) は臨界水分値である.

最適水分値 (OMC) は, 所与の締固め条件下での最大締固め (最大乾燥密度) に対応する水分値である.

この試験の適用性を確認するため, 試験中に水分値と乾燥密度の関係を評価すること. そして OMC と対応する飽和度を決定すること. この試験手順は, 鉱物精鉱の OMC に対応する飽和度は $70\% \sim 75\%$ であるのに対して, 鉄鉱粉の OMC に対応する飽和度は $90 \sim 95$ であるとの知見に基づいて開発された.

OMC に対応する飽和度が 90% 未満の場合, この試験は当該物質に適用できない可能性があり, この試験で決定される TML が高すぎる可能性があるため, 荷送人は然るべき主管庁に相談すること.

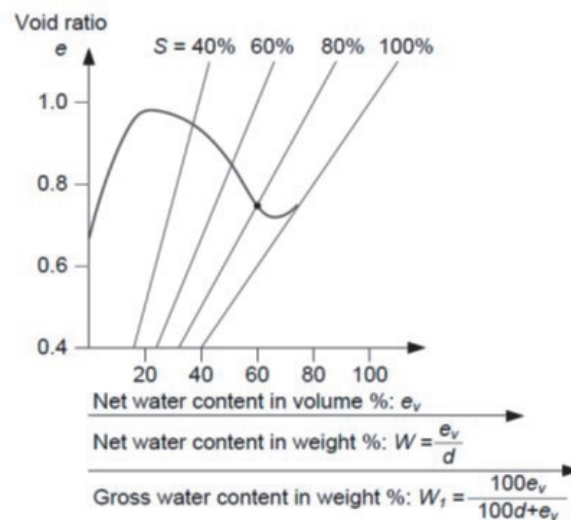


図 1.4.3

別紙 5 石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法 (IMSBC コード附録2 第1.5節) (仮訳)

1.5 石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法

1.5.1 目的

ここでは、公称最大粒径 50 mm までの石炭の運送許容水分値 (TML) の実験室における決定法を詳細に示す。この試験法は、この附録の 1.3 で説明されているプロクター／ファガベリ試験法の修正に基づいている。

この附録の 1.3 に含まれている元の試験法からの主な変更点は以下の通り。

- .1 最大粒径 25 mm への再構成による最大粒径 50 mm の石炭の試験を容易にするための試料調製
- .2 直径 150 mm の締固め容器 (シリンダー) の使用。
- .3 プロクター／ファガベリ D 相当のハンマーを使用した試料の締固め。

運送許容水分値は、試験試料の締固め曲線と飽和度 70 % の線の交点に対応する水分値である。

水分が試料から自由に排出され、試験試料の締固め曲線が飽和度 70 % に達しない石炭の場合は、試験は、この貨物では水が粒子間の隙間を通過し間隙圧は上昇しないことを示している。よって、この貨物は液状化の恐れはない。(コード本文の第 7.2.2 節参照)

試験法は、170 kg 以上の試料を含む石炭のドラム缶が試験所に送られることから始まり、試験所が石炭の試験結果を報告することで終わる。試料採取手順の詳細は、ここには記載しない。但し、試料が貨物の粒径分布を正確に代表することは重要であり、以下に参照すべき引用文書 (normative reference) を示す。

1.5.2 引用文書

以下の文書は、この試験法において参照すること。日付／年が記載されている文書は、その版を適用する。

- AS 1289.3.5.1:2006 (オーストラリア規格) 工学的目的による土の試験方法。方法 3.5.1 : 土の分類試験—土の土粒子密度の測定—標準試験法
- ISO 589:2008 無煙炭—全水分値の測定
- ISO 3310-2:2013 試験用ふるい—技術的要求事項及び試験—第 2 部 : 試験用有孔金属板製ふるい
- ISO 13909-4:2001 硬質炭及びコークス—機械式サンプリング—第 4 部 : 石炭—試験試料の調製

1.5.3 定義

1.5.3.1 運送許容水分値 (TML)

液状化する恐れのある貨物の運送許容水分値 (TML) とは、このコードの第 7.3.2 節の要件を満たす以外の船舶において、安全に運送できると考えられる貨物の最大の水分値である。

1.5.3.2 試験結果

この試験法により決定される運送許容水分値は、試験試料の締固め曲線と飽和度 70 % の線の交点に対応する水分値である。この値を PFD70 値とも呼ぶ (プロクター／ファガベリ—D エネルギーハンマー—70 % 飽和)。

水分が試験試料または円筒形モールドから自由に排出され、試料の締固め曲線の飽和度が 70 % またはそれ以上にならない場合 (1.5.5.3.4 参照)、試験は、この貨物では水が粒子間の隙間を通過し間隙圧は上昇しないことを示している。よって、この貨物は液状化の恐れはない。(コード本文の第 7.2.2 節参照)

1.5.3.3 最適水分値 (OMC)

最適水分値 (OMC) は、所与の締固め条件下での最大締固め (最大乾燥密度) に対応する水分値である。

1.5.3.4 全水分値 (W1)

試料の水分値は水の質量を、固体と水の総質量で割って計算され、全水分値と呼ばれる。全水分値は、ISO 589:2008 に規定される全水分値の求め方により決定される。

1.5.4 二つ以上の石炭を混ぜたものの TML の決定

荷送人が 2 以上の石炭の混合した貨物の積載を意図する場合、荷送人の措置をとれる。

- .1 混合物の代表試料にこの試験法を直接適用して、混合物の TML を決定する、または
- .2 混合物を構成する各石炭の TML の決定に基づいて、混合物の TML を以下により申告する：
 - .1 混合物中の全構成要素の石炭が、種別 A&B の石炭（液状化の恐れのある石炭）であることが分かっている場合：
 - .1.1 混合物の貨物は種別 A&B の石炭として申告すること。
 - .1.2 混合物の貨物の TML は、構成要素の石炭の TML のうち、最も低い値とすること。
 - .2 種別 A&B の石炭が、種別 B とされる石炭と混合される場合
 - .2.1 混合物の貨物は種別 A&B として申告すること。
 - .2.2 TML は、構成要素となる種別 A&B の石炭の TML のうち、最も低い値とすること。
- .3 全ての構成要素の石炭が種別 B のみの石炭である場合、混合物の貨物は種別 B のみの貨物として申告できる。

1.5.5 石炭用修正プロクター／ファガベリ試験法

1.5.5.1 装置

1.5.5.1.1 作業場所

作業場所は、試料が過度の温度、気流、湿度の変動から保護される場所とすること。全ての試料は、プラスチック製の試料袋等の適切な試料容器に保管し、容器は密封すること。

1.5.5.1.2 標準篩

最大粒径 25 mm の試料を再構成するため、ISO 3310-2:2013 に記載されている 16 mm 及び 25 mm 開口の、正方形メッシュの実験用篩が必要。粒子密度の測定のため、2.36 mm の篩上試料と篩下試料を取り分けるため、2.36mm の篩が必要。この目的のためには、2 mm の篩を使用しても良い。

1.5.5.1.3 プロクター／ファガベリ装置

プロクター／ファガベリ装置は、図 1.5.5.1.3.1 に示す、着脱可能な延長部を有する直径 150 mm、高さ 120 mm のステンレス鋼製円筒形モールド（締固めシリンダー）、及び、パイプの下端にガイドされる締固めツール（突き固めハンマー）で構成される。プロクター／ファガベリ装置の概略図を図 1.5.5.1.3.2 に、寸法と公差を表 1.5.6.2 に示す。

1.5.5.1.4 締固めハンマー

この試験では、プロクター／ファガベリ D 相当の締固めハンマーを用いる。寸法等は図 1.5.5.1.3.2 及び表 1.5.6.2 の通り（注：締固めハンマーは、使用するモールドに合わせて仕様を変更してある。）

1.5.5.1.5 高温乾燥機

高温乾燥機は、空気または不活性ガスを強制的に循環させ換気を行い、通常はステンレス鋼製の内部を備え、105°C ± 5°C の範囲内の温度を維持できるものであること。

1.5.5.1.6 天秤

天秤は、到着状態の試料と容器を ± 5 g より高い精度で計量ものであること。

1.5.5.1.7 ピクノメーター

AS 1289.3.5.1:2006 の水ピクノメーター装置を使用して、AS 1289.3.5.1:2006 に従って元の粒径の石炭（粉碎されていない石炭）の密度を決定する。必要な機器は以下の通り。

- 容量 250mL の三角フラスコまたは密度ボトル

- 真空デシケーターまたは他の真空装置
- 105°C 乃至 110°C に設定した高温乾燥機
- 天びん : 1つは±0.05 g 精度, もう1つは±1 g 精度
- 0 度から 100°C の温度計
- 2.36 mm の篩 (1.5.5.1.2 の通り)
- 真空源
- 60°C に設定された恒温水槽
- 蒸留水, 脱塩水, または脱イオン水
- 水が入った洗瓶
- 粒径 2.36mm 以上の試料を保持するためのワイヤーバスケット
- 干渉なしにワイヤーバスケットを保持するための水で満たされた容器
- 水に吊されたバスケットと排水されたバスケットの両方を計量するための秤

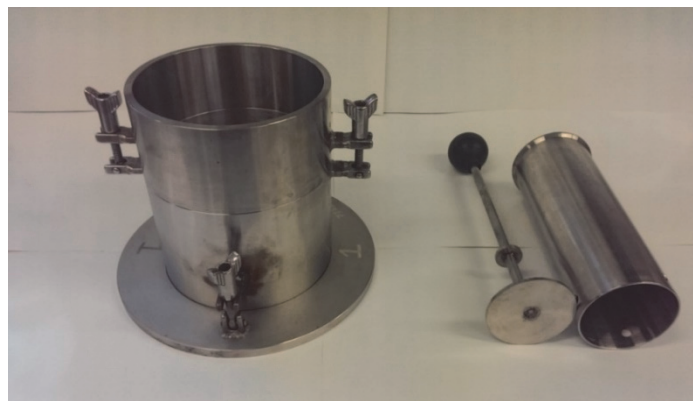


図 1.5.5.1.3.1 プロクター／ファガベリ装置の例, ハンマーとハンマーのガイド

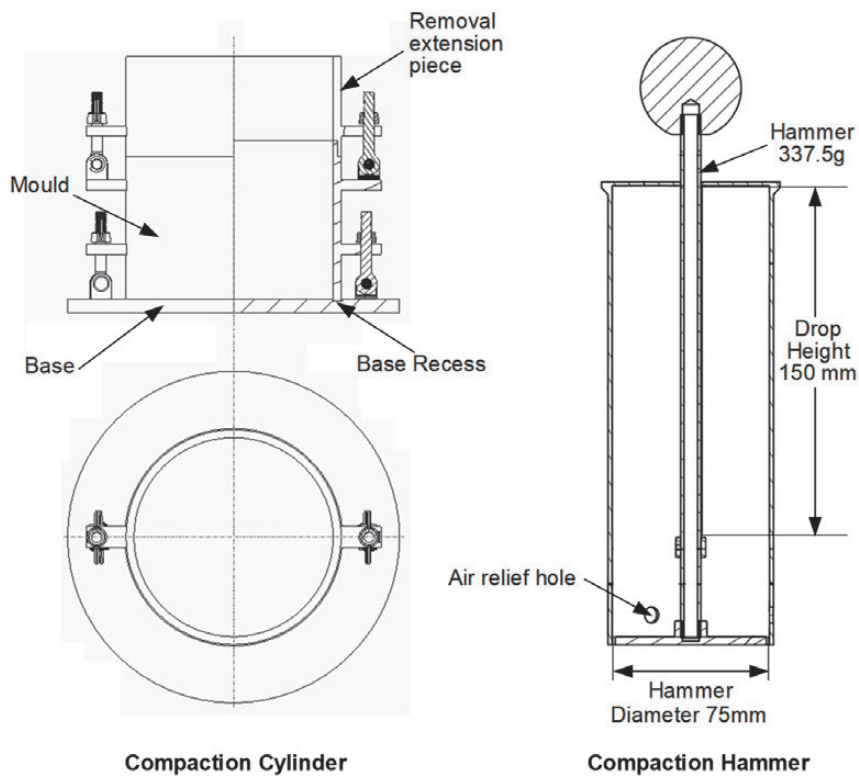


図 1.5.5.1.3.2 プロクター／ファガベリ装置の概略図

1.5.5.1.8 手による攪拌のための容器と試料の準備

試料の保管と取り扱いには、10 L以上の容量の蓋が付いた十分に頑丈なプラスチック製のバケツが必要である。試料の保管と手による攪拌には、頑丈なプラスチック袋（厚さ 200 ミクロン以上）が必要である。

1.5.5.1.9 平坦な削り取り器具 (Flat scraping device)

モールド最上部の上にある延長部に形成された余剰試料を取り除くには、薄い鋼のスクレーパーが必要である。使い易さのため、スクレーパーの寸法は、図 1.5.5.1.9 に示すように、幅 160 mm、長さ 20 mm、厚さ 3 mm から 5 mm であること。

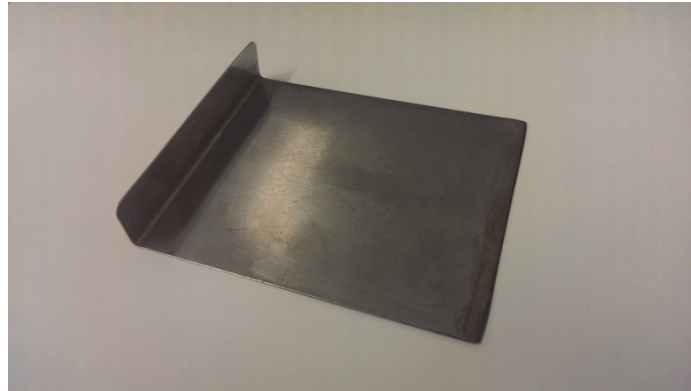


図 1.5.5.1.9 典型的な削り取り器具

1.5.5.1.10 乾燥用トレイ

乾燥用トレイまたは皿は、例えばステンレス鋼やエナメルといった、表面が滑らかで、試料の混入の恐れが無く、耐熱性があること。寸法は、高温乾燥機に入れるのに適当で、且つ、全試料が表面積に対して約 1 g/cm^2 の荷重⁵で入れられるものであること。

1.5.5.1.11 スプレーボトル

試料に噴霧スプレーの水を加えるのに適切なプラスチックボトルが必要である。

1.5.5.1.12 手袋

高温のトレイや皿を取り出すため、耐熱の手袋が必要である。

1.5.5.1.13 試料縮分機

試料をサブサンプルに分け、再構成された試料を試験用に混合するには、ISO 13909-4:2001 に規定される適切な試料縮分機⁶が必要である。

⁵ 2.5 kg の試料を想定すれば、トレイの寸法は 50 cm 角。

⁶ 「縮分機」は JIS M 8811:2000 石炭類及びコークス類—サンプリング及び試料調製方法 (Coal and coke -- Sampling and sample preparation) における名称。石炭は付着性があり手作業によるふるい分けは困難な場合が多い。そのため、機械式のふるい分け (分級) 装置が必要になる。

1.5.5.2 試料採取及び試料の準備

1.5.5.2.1 一般

この試験法は、丈夫なプラスチック袋 (厚さ 200 ミクロン) に密封され、適切なドラム (例えば 220 L) に入った 170 kg 以上の試料を受け取ることから始まる。この包装は確実に、TML 測定の前にサンプルが乾燥しないようにする。

1.5.5.2.2 試料の準備

ISO 13909-4:2001 によって得られた代表試料が必要である。要すれば、風である程度乾燥するか、40°C 以下の温度である程度乾燥させて、篩上試料に微粉が付着する (混入する) のを最小にして、石炭を乾式篩にかけるのに適した開始点まで水分を減らす。この目的のために、試料の水分値が 6 % 未満になるように乾燥しないこと。代表試料のサブサンプルは、水分値を測定する場合を除き、完全乾燥させないこと。

1.5.5.2.2.1 試料の均質化と分割

到着状態の試料を受け取り、ISO 13909-4:2001 に規定される試料縮分機を用いて個々のサブサンプルに分ける。これらのサブサンプルを丈夫なプラスチック袋に入れる。

1.5.5.2.2.2 再構成された試料準備手順

試料に 25 mm を超える粒子が含まれている場合、以下の再構成手順を適用すること。

この手順では、25 mm を超える粒子が試料から除去され、粒径 16 mm から 25 mm の同質量の粒子に置き換えられる。この手順を通じて、TML 試験に十分な質量の、最大粒径 25 mm の最終的な再構成試料が生成される。このサンプルにはが含まれています。

再構成試料を生成するには、二つの方法のどちらかを選択できる。

- .1 到着状態の試料全量を分割して再構成する。
- .2 25 mm を超える粒子を除去し、別のサブサンプルの 16 mm～25 mm の粒子に置き換える。

方法 1 到着状態の試料全量を分割して再構成

- 第 1 段階 到着状態の試料の全量を用いる。
- 第 2 段階 25 mm, 16 mm, 2.36 mm で篩い分ける。2.36 mm の篩い分けが出来ない場合は、2 mm の篩い分けでも良い。
- 第 3 段階 四つの粒径の篩い分け試料をそれぞれ計量し、各粒径の篩い分け試料の割合を計算する。
- 第 4 段階 表 1.5.5.2.2.2.1 で指定された各粒径範囲の試料の割合に基づき、25 mm 以下の各粒径区分から 25 kg の再構成試料を作成するのに必要な質量を取り分ける。
- 第 5 段階 各粒径範囲の試料を合わせる。
- 第 6 段階 再構成試料を十分に攪拌する。
- 第 7 段階 試料を約 8 の代表試料に分割し、それぞれを丈夫なプラスチック袋に入れる。これらの袋の中味がプロクター／ファガベリ試験用の試料である。
- 第 8 段階 2.36 mm (もし 2.36 mm がない場合は 2 mm) の篩を通過する試料は、真密度計測に必要なである。

表 1.5.5.2.2.2.1 再構成粒子比率 (方法 1)

篩い分け試料	量
2.36 mm (または 2 mm) 未満	元の試料におけるこの部分の割合
2.36 mm (または 2 mm) ～16 mm	この部分の割合
16 mm～25 mm	この部分の割合に 25 mm 以上の粒子の割合を加えたもの

方法 2 25 mm を超える粒子を除去し 16 mm～25 mm の粒子で置き換える

この方法は図 1.5.5.2.2.2 及び表 1.5.5.2.2.2.2 の通り。再構成プロセスでは、最初に石炭を 25 mm より大きい粒子と 25 mm より小さい粒子に篩い分けする。TML 試験に十分な質量の試料を再構成するため、16 mm

～25 mm の範囲の石炭粒子が他の試料から取り出され、元の質量から取り除かれた 25 mm を超える試料と同等の質量に基づいて、元の 25 mm 未満の試料加えられる。

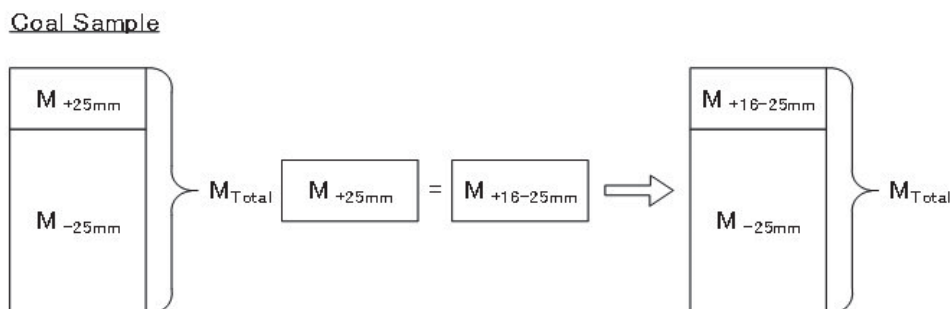


図 1.5.5.2.2.2 試料再構成の概要 (方法 1)

表 1.5.5.2.2.2.2 試料の再構成 (方法 2)

段階	例
1 約 8 のプロクター／ファガベリ試験を実施するのに十分な約 25kg の試料を生成する。	各サブサンプルの袋には 8 kg から 10 kg が含まれていると仮定する。
2 この試料を、25 mm 以上の部分に付着する微粉を最小限に抑えつつ、25 mm で篩い分けする。25mm の石炭の質量を計測する。	25 mm 以上の粒子を 20 %含む石炭の場合、元の試料から 5 kg が除去される。
3 16 mm 及び 25 mm で石炭の 1 つまたは複数のサブサンプルの袋を篩い分けし、十分な量の 16mm～25mm の石炭を作成する。	上の例では、16 mm～25 mm の石炭が 5 kg 必要
4 回転式試料縮分機または同様の装置を用いて、必要に応じて各トレイの試料を合わせて、第 2 段階で除去した 25 mm を超える試料の質量の±0.5 kg の質量の 16 mm～25 mm の石炭を取り出す。	上のケースで 5 kg
5 試料を合わせて攪拌した上で、第 4 段階の 16 mm～25 mm の石炭を、第 2 段階の 25 mm 未満の石炭に追加する。回転式試料分配装置または同様の装置を用いて、約 8 の測定試料に分割する。	
6 再構成された各試料を丈夫なプラスチック袋に入れ、ラベルを貼り、密封する。これでプロクター／ファガベリ試験用の測定試料が得られる。	各袋には約 2.5 kg～3 kg の再構成試料が入るはずである。
7 25 mm 以上及び 16 mm 以下の石炭を廃棄する。	

1.5.5.2.3 初期水分

初期水分は、ISO 589:2008 に規定される方法で、表 1.5.5.2.2.2.2 の第 5 段階の測定試料で測定される。この水分値は、プロクター／ファガベリ締固め曲線を作成するのに必要な水分刻みの指針となる。

1.5.5.2.4 粒子の密度測定

水ピクノメーターの規格 AS 1289.3.5.1:2006 に従って、全粒径範囲の（粉砕されていない）真密度を計測する。真密度は、締固め曲線を描くための間隙比の決定に用いられる。推奨される方法は以下の通り。

- .1 約 10 kg の全粒径の試料を用意し、重量を量ってから、全試料を 2.36 mm で篩い分けする。2.36 mm の篩が利用できない場合は、2 mm の篩を代用できる。以下を記録する。
 - .1 物質の全質量
 - .2 粒径 2.36 mm 以上の物質の質量
 - .3 粒径 2.36 mm 以下の物質の質量
- .2 試料中の 2.36 mm 以下の石炭の百分率を計算する。

- .3 ロータリー試料縮分機のような ISO 13909-4:2001 に規定される試料縮分機を用いて、粒径 2.36 mm 以上の石炭を二つの測定試料に分割する。各測定試料を丈夫なプラスチック袋に入れ、ラベルを貼る。
- .4 粒径 2.36 mm 以下の石炭を二つの測定試料に分割し、各測定試料を丈夫なプラスチック袋に入れ、ラベルを貼る。
- .5 AS 1289.3.5.1:2006 第 5.2 節に従って、2.36 mm 以上の試料の真密度を計測する。規格にある通り、複数回の試験を行うこと。
- .6 上記規格の第 5.1 節に従って、以下により、2.36 mm 以下の試料の真密度を計測する。
 - .1 容量 250 mL の三角フラスコまたは密度ボトルの使用が推奨される。
 - .2 試料袋から、既知の風袋重量のビーカーに 1 L の石炭を注ぐ。
 - .3 1 L の試料の重量を計測し、物質の概略の見かけ密度を求める。
 - .4 試料の一部(通常 0.18×見かけ密度のキログラム単位の質量)を取り出し、フラスコに入れて、ピクノメトリー分析を行う。
 - .5 水槽の温度は 60°C が推奨される。
- .7 AS 1289.3.5.1:2006 の第 6 節の方法により、真密度を計算する。

1.5.5.3 試験手順

1.5.5.3.1 変数と定義

TML の決定に使用される変数と定義を表 1.5.5.3.1 に要約する。主要な変数を図 1.5.5.3.1 に示す。

表 1.5.5.3.1 変数と定義の要約

変数	単位	記号/計算に用いる値
空のシリンダーとベースの質量	g	A
シリンダー、ベース及び突き固められた測定試料の質量	g	B
モールド内の測定試料の湿質量	g	$C = B - A$
モールドから取り出された測定試料の湿質量	g	C_1
モールドから取り出された測定試料の乾燥質量	g	D_1
全水分値	%	W^t
モールド内の測定試料の乾燥質量	g	D
モールド内の水の質量	g	E
シリンダーの容積	cm ³	V
真密度	g/cm ³	d
水の密度	g/cm ³	ρ_w

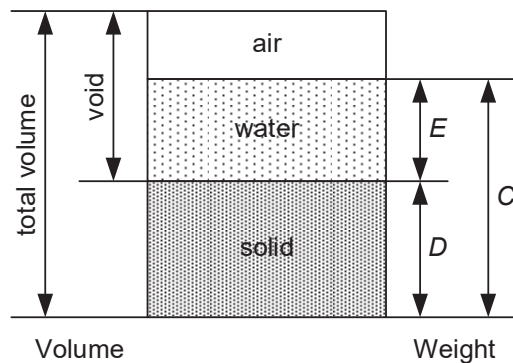


図 1.5.5.3.1 主要変数の模式図

1.5.5.3.2 初期締固め点の確定

初期の締固め点は、初期の水分値で再構成された物質の最初の測定試料を使用して得られる。個々の締固め点の測定毎に、モールドへの試料の詰め込みからモールドと試料の質量計測までの試験の全ての段階は、休憩することなく一気に行うこと。如何なる場合も、石炭は質量計測前に 30 分以上モールド内に放置しないこと。

試験手順は以下の通り。

- 第 1 段階 モールド、カラー（延長部）及び底板を清掃する。ハンマーを点検・清掃し、ガイドパイプ内で自由に動くようにする。
- 第 2 段階 モールドと底板で構成される空のシリンダーの質量 A を測定する。
- 第 3 段階 モールド、カラー及び底板を組み立て、安定したベンチに置く。
- 第 4 段階 測定試料の約 0.5 L（全 2.5 L の 5 分の 1）をモールドに入れて上面を平らに均し、上面を均一に 25 回で突き固める。突き固めの際は、ガイドパイプの全高に渡ってハンマーを垂直に落とし、落下の度にガイドパイプを新しい位置に動かす。モールド内の各層を均一に突き固めるのに必要なパターンを図 1.5.5.3.2 に示す。
- 第 5 段階 第 4 段階をさらに 4 回繰り返し、モールドに 5 層の物質を配置する。延長部を取り付けたまま、最後の層の突き固めた測定試料は、締固めモールドの上部より上にくるようにすること。
- 第 6 段階 最後の層を突き固めたら、内部の締固められた測定試料を乱さないように注意して延長部を取り外す。平坦な削り取り器具を用いて、締固められた測定試料をモールドの上端にそって水平にする（レベリングする）。測定試料のレベリングを妨げる恐れのある大きな粒子を取り除き、延長部に含まれる物質で置き換えて、再度レベリングする。レベリング後も上面に穴が残っている場合は、延長部に含まれるより細かい物質を手作業で埋める。測定試料がさらに締固められないように注意すること。
- 第 7 段階 モールドと締固めた石炭の質量 B を測定し、次式により測定試料の湿質量 C を計算する。

$$C = B - A \quad (1)$$

- 第 8 段階 突き固めた測定試料を含むシリンダーの質量を測定したら、測定試料をモールドから取り出し、測定試料の湿質量 C_1 を測定し、全測定試料を恒量になるまで 105°C の乾燥機で乾燥する。乾燥後、測定試料の乾燥質量 D_1 を測定し、次式により全水分値 W^1 の百分率を計算する。

$$W^1 = \frac{C_1 - D_1}{C_1} \times 100 \quad \% \quad (2)$$

- 第 9 段階 計算された全水分値を用いて、次式により、モールド内の乾燥測定試料の質量 D を計算する。

$$D = C - C \times \frac{W^1}{100} \quad (3)$$

- 第 10 段階 次式により、モールド内の水の質量 E を計算する。

$$E = C - D \quad (4)$$

- 第 11 段階 使用済みの石炭試料を廃棄する。以前に締固められた測定試料は、再利用しないこと。

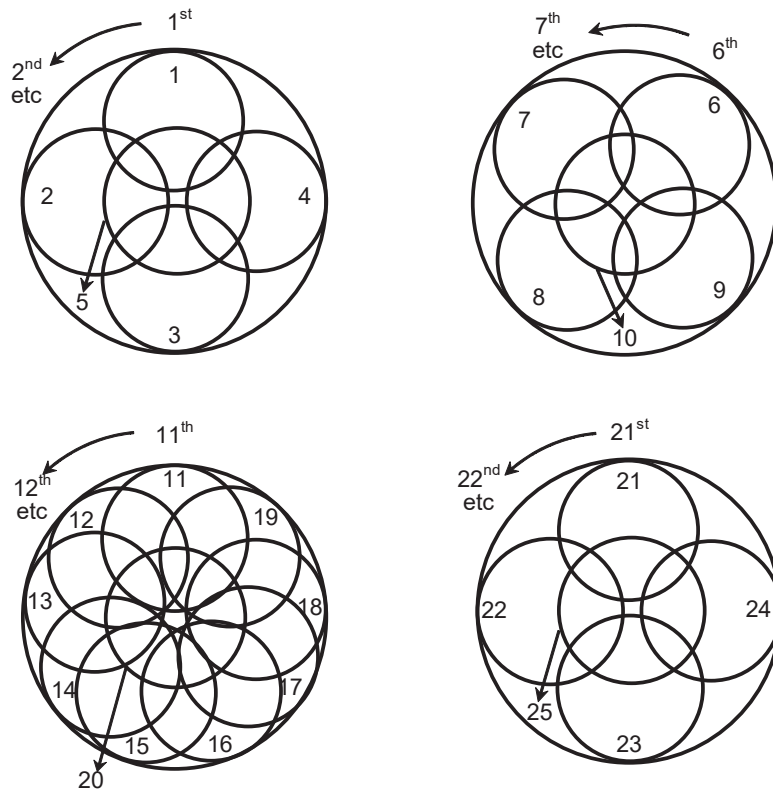


図 1.5.5.3.2 推奨される突き固めパターン

1.5.5.3.3 完全な締固め曲線の確定

水分値の範囲は、ある程度乾燥した状態から殆ど飽和した状態までの測定試料が得られるように調製すること。締固め曲線の各点の迅速な測定に関しては、1.5.5.3.2の注意事項に留意すること。

試験手順は以下の通り。

- 第1段階 締固め試験毎に、事前に決定された水が丈夫なプラスチック袋中の測定試料(約2.5kg)に追加される。追加される水の量は、水分値を次の試験の目標値まで上げるために必要な量である。水は、個々の測定試料の表面に噴霧として追加すること。大量の水を加えると局所的な締固めを引き起こす恐れがあるため、この時点では、水はゆっくりと少しずつ追加すること。
- 第2段階 計算した量の水を加えた後、プラスチックの袋を密封し繰り返し引っ繰り返すことにより、測定試料を十分に攪拌すること。
- 第3段階 測定試料は締固め試験の前に、均一化のため最低12時間は置いておくこと。
- 第4段階 第1.5.5.3.2節の第1段階から第11段階を繰り返す。
- 第5段階 別途用意された水分値の異なる測定試料を用いて、4~7回試験を繰り返し、締固め曲線上の点を少なくとも5取得する。水分値は、以下の通りに選択すること。
 - .1 締固め」曲線を適切に決定するため、少なくとも1点は、最適水分値(OMC)または飽和度(S)70%に対応する値よりも高い水分値にする。
 - .2 PFD70値を効果的に評価するため、少なくとも1点は飽和度(S)70%から80%の間に対応する水分値にする。

OMC(に対応する水分値)が70%を超える場合、飽和度(S)80%に近い点も、正確な評価に役立つ。

1.5.5.3.4 円筒形モールド内の石炭の外観

試験でPFD70値を取得するには、PFD70の水分値以下で実施される全ての試験において、円筒形モールド内の水分分布は均一であること。

同じ石炭試料を用いて異なる水分値で実施した二つの試験の例を図 1.5.5.3.4.1 に示す。左の写真は、比較的飽和度の低い石炭の供試体を示している。延長部を取り外した後も、石炭はそのまま残って点に留意されたい。右の写真は、飽和度が 70% 近傍かそれを超える供試体を示している。延長部を取り外した後も石炭はそのまま残る。どちらの試験も、締め曲線上の有効な点を与えた。



図 1.5.5.3.4.1 部分的に飽和した測定試料（左）とほぼ完全に飽和した測定試料（右）の有効な試験を示す写真

水が粒子間の隙間を通過する石炭は、プロクター／ファガベリ円筒形モールド内における水分の移動（の形跡）を表す。水分の移動は、試料の飽和度が 70% 未満でも起こることがある。

水分移動の形跡は、以下のように各試験の完了時の目視観察から得られる。

- .1 図 1.5.5.3.4.2 に示すように、モールドの底板からの水の漏れが明らかであり、
- .2 円筒形モールドの上端より上の部分は不飽和に見え、測定試料は変形や移動なしにその構造を維持している。

この場合、水分の移動が発生しているため、この石炭では、水は粒子間の隙間を通過する。



図 1.5.5.3.4.2 円筒形のモールド底面からの水漏れがあり（試料内部における）水分の移動を示す試験

1.5.5.3.5 締固め曲線を決定するための重要なパラメータの計算

締固め試験毎に、以下の計算を行う。

- d = 比重瓶法による真密度 $\text{g/cm}^3 (\text{t/m}^3)$ (1.5.5.2.4 参照)
- γ = 乾燥状態における見かけ密度 $\text{g/cm}^3 (\text{t/m}^3)$
- = $\frac{D}{V}$
- e_v = 正味水分値 (体積百分率)
- = $\frac{E}{D} \times 100 \times \frac{d}{\rho_w}$
- ここで ρ_w = 水の密度 $\text{g/cm}^3 (\text{t/m}^3)$
- e = 間隙比 (間隙の体積を固体部分の体積で割った値)
- = $\frac{d}{\gamma} - 1$
- S = 飽和度 (体積百分率)
- = $\frac{e_v}{e}$
- W^1 = 全水分値 (質量百分率) (第1.5.5.3.2節第8段階参照)

1.5.5.3.6 締固め結果の表示

全ての締固め試験結果を適切なスプレッドシート (表 1.5.6.1 に示すものなど) に記録し、このスプレッドシートから、各締固め試験について、縦軸を間隙比 (e)、横軸を正味水分値または全水分値として、計算結果をプロットして、図 1.5.5.3.6 に示す締固め曲線を作成する。

図 1.5.5.3.6 の線は、20%、40%、60%、70%、80%、および 100% の飽和度 (S) での、間隙比 (e) と正味含水量 (e_v) のプロットに対応する。これらの線は、第 1.5.5.3.7 節の式を使用して、間隙比の五つの値に対して計算される。(注: 横軸を全水分値にしてプロットした場合、飽和度に対応するこれらの線は湾曲する。)

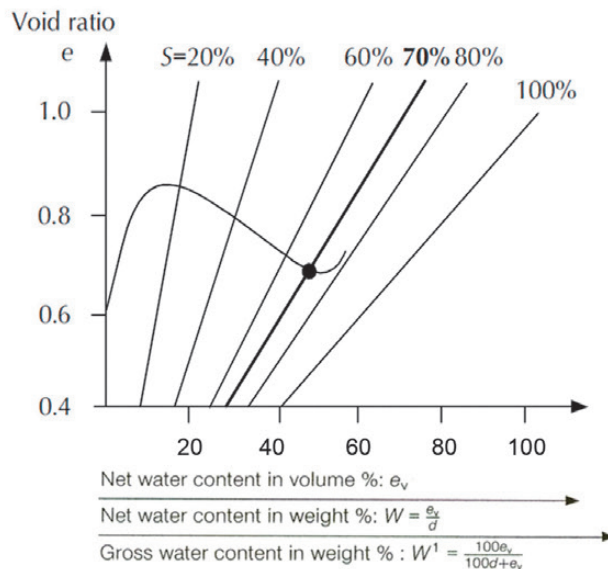


図 1.5.5.3.6 典型的締固め曲線

1.5.5.3.7 締固め曲線の例

修正プロクター/ファガベリ試験法を石炭試料に適用して得られる結果の例を表 1.5.6.1 に示す。対応する締固め曲線と、飽和度 70% の線は、以下のようにプロットする。

結果を表示するのに好ましい方法は、全水分値 (W^1) に対して、間隙比 (e) をプロットし、任意の飽和水準の水分を全水分値としてプロットから直接読み取ることである。方法を図 1.5.5.3.7 に示す。飽和度の線は、次式に従ってプロットされる。

$$e = \frac{W^1}{100 - W^1} \times 100 \times \frac{d}{S}$$

図 1.5.5.3.7 の飽和度 70% の線と締固め曲線の交差は、全水分値 15.4% で発生しており、これが運送許容水分値 (TML) である。この例では、最適水分値 (OMC) は、約 85% の飽和度になっている。

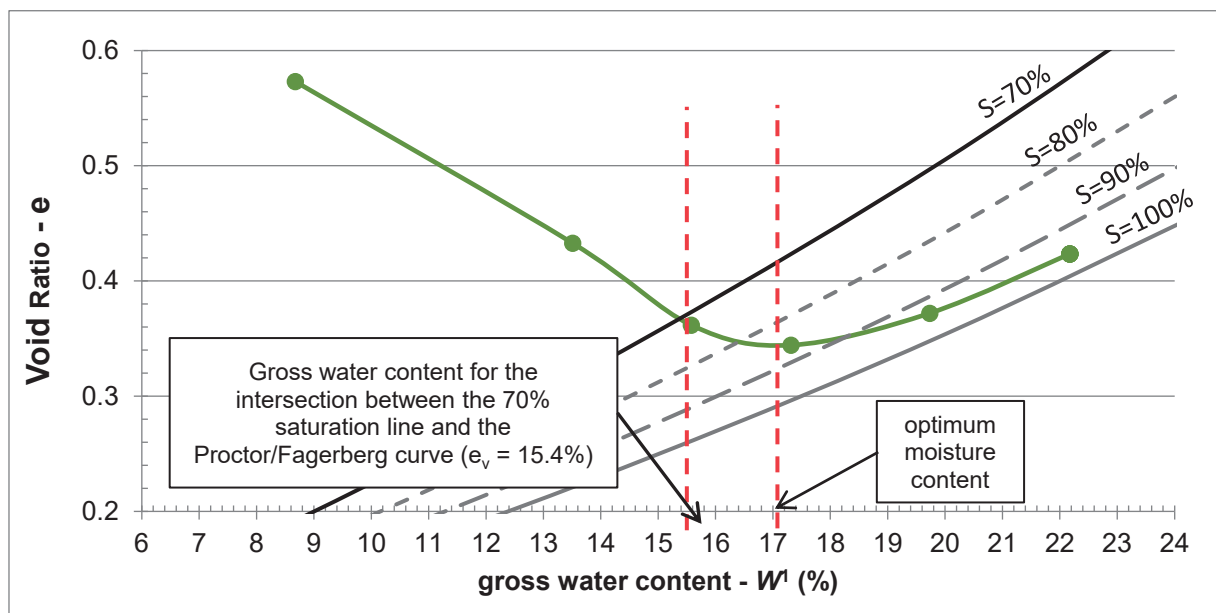


図 1.5.5.3.7 70%, 80%, 90%, 100%の飽和度の線を入れた
間隙比と全水分値で示す測定された締固め曲線の例

1.5.5.3.8 運送許容水分値の決定

1.5.5.3.8.1 PFD70 水分値の決定

PFD70 値は、締固め曲線と、飽和度 $S = 70\%$ 線の交点に対応する全水分値として決定される。最適水分値 (OMC) は、所与の締固め条件下で最大の締固め (最大乾燥密度と最小空隙率) に対応する全水分値である。

この試験法は、OMC に対応する飽和度が 70% 以上である石炭の TML の決定に適用できる。OMC に対応する飽和度が 70% を下回っている場合、この試験はこの石炭には適用されず、PFD70 は過大な TML を与える恐れがある。こうした場合、分析の証書には、OMC に対応する飽和度が 70% 未満であることが記載される必要があり、荷送人は適切な主管庁の指示を仰ぐこと。

1.5.5.3.8.2 締固め曲線の決定可能な最高点が飽和度 70%未満の場合

水が粒子の隙間を通過し、締固め曲線が飽和線 70% に達しないという視覚的な証拠がある石炭では、石炭は自由に水を通すと見なされ、TML 値は適用されない。このコードの第 7.2.2 節を参照すると、こうした石炭は液化の恐れのない貨物であるため種別 B のみに分類される。

1.5.6 試験の報告

修正プロクター/ファガベリ試験法の適用の試験報告には、以下の情報を含むこと。

- .1 試料の識別
- .2 この試験法への一意的参照
- .3 真密度を測定するために採用された適切な規格への参照：

以下のうちどれか.

- .1 試料の運送許容水分値 (TML) , 試料の質量百分率で表される全水分値
- .2 OMC に対応する飽和素が 70 % を下回っており, この試験法は適用できない. または
- .3 試験は, 飽和度 70 % に対応する値を下回る水分値で, 水が粒子間の隙間を通過することを示しており, よってこの石炭は種別 B のみ (非液状化貨物) であるという記述.
- .4 g/cm^3 単位の真密度 d

表 1.5.6.1 石炭の修正プロクター／ファガベリ試験法を用いた石炭試料の TML 測定の場合

日付		シリンダーの径	150 mm
製品		シリンダーの高さ	120 mm
試料		シリンダーの容積	2,121 mL
初期全水分値 (%)	5.6	TML	15.4%
真密度	1,416 kg/m^3		
実験室温度	25°C	粒径区分	
モールドの質量 (A)	7,271 g	実施者	
初期乾燥密度	899 kg/m^3	タンパー	337.5 g

試験番号	追加した水	試料の質量	モールドと試料の質量	トレイ番号	トレイ質量	湿試料とトレイの質量	乾燥試料とトレイの質量	計測された全水分値	全水分値	正味水分値	間隙比	乾燥密度	飽和度	湿見かけ密度	湿試料の質量	乾燥試料の質量	水の質量
	(ml)	(g)			(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%v)	e	(g/cm^3)	(%)	(g/cm^3)	(g)	(g)	(g)
		B							W^1	ev	e	γ	S		C	D	E
1	0.00	9,360.00		T1	602.5	1,656.8	1,565.7	8.64	8.67	13.437	0.573	0.899	23.4	0.985	2,089.0	1,907.8	181.2
				T2	602.3	1,643.1	1,552.5	8.70									
2	150.00	9,692.70		T3	630.7	1,811.7	1,649.6	13.73	13.51	22.097	0.433	0.988	51.1	1.142	2,421.7	2,094.6	327.1
				T4	882.9	2,126.9	1,961.6	13.29									
3	250.00	9,881.60		T5	638.7	2,081.4	1,849.7	16.06	15.58	26.104	0.362	1.039	72.2	1.231	2,610.6	2,204.0	406.6
				T6	632.4	1,822.6	1,643.0	15.09									
4	350.00	9,971.00		T7	882.2	2,349.9	2,095.4	17.34	17.31	29.630	0.344	1.053	86.1	1.273	2,700.0	2,232.5	467.5
				T8	637.9	1,868.8	1,656.0	17.29									
5	450.00	9,996.20		T9	654.3	2,013.2	1,746.5	19.63	19.73	34.780	0.372	1.031	93.5	1.285	2,725.2	2,187.5	537.7
				T10	639.6	1,999.4	1,729.7	19.83									
6	550.00	9,980.00		T11	885.0	2,251.5	1,931.6	23.41	22.17	40.311	0.423	0.994	95.2	1.277	2,709.0	2,108.4	600.6
				T12	883.5	2,181.9	1,910.1	20.93									
7																	
8																	
9																	
10																	

注：上の例では、試験毎に二つの乾燥トレイを使用

表 1.5.6.2 プロクター／ファガベリ用円筒形モールドとハンマー仕様と公差

パラメータ	単位	寸法等	公差
ハンマー質量	g	337.5	± 2
ハンマー直径	mm	75	± 0.2
落下高さ	mm	150	± 2
チューブ (パイプ) 内径	mm	78	± 0.2
チューブ (パイプ) 外径	mm	82	± 0.2
チューブ (パイプ) の厚さ	mm	2	± 0.2
チューブ (パイプ) のクリアランス	mm	1.5	± 0.2
モールド内径	mm	150	± 0.5
モールド内側高さ	mm	120	± 1
モールド容積	cm ³	2,121	± 18
着脱式延長部高さ	mm	75	± 1
ベースから底面までの窪みの深さ	mm	1	± 0.2
モールドとベースの間のギャップ	mm	≤ 0.1	
モールドと延長部の間のギャップ	mm		(0 to + 0.1)
モールドとハンマーの間のクリアランス	mm	≤ 6	

別紙 6 ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法 (IMSBC コード附録 2 第 1.6 節) (仮訳)

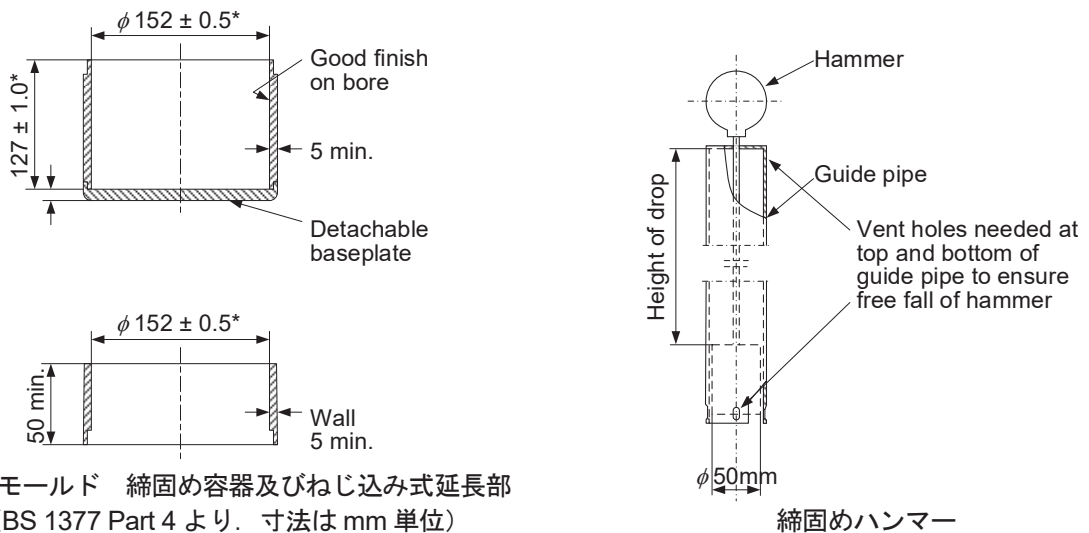
1.6 ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法

1.6.1 目的

- .1 この節で規定される試験法 (この試験) は, 以下の両方を含むボーキサイト貨物の運送許容水分値の決定のみに用いること.
 - .1 30% を超える 1 mm 未満の粒子 ($D_{30} < 1 \text{ mm}$) 且つ
 - .2 40% を超える 2.5 mm 未満の粒子 ($D_{40} < 2.5 \text{ mm}$)
- .2 ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法で試験されたボーキサイトの最適水分値 (OMC) が 90% 以上の飽和度に対応する場合, 貨物の TML は飽和度 80% に対応する臨界水分値に等しい.
- .3 ボーキサイト用修正プロクター／ファガベリ試験法で試験されたボーキサイトの最適水分値 (OMC) が 90% 未満の飽和度に対応する場合, 貨物の TML は飽和度 70% に対応する臨界水分値に等しい.
- .4 水分が試料から自由に排出され, 試験試料の締固め曲線が飽和度 70% に達しない場合は, 試験は, この貨物では水が粒子間の隙間を容易に通過することを示している. よって, この貨物は液状化の恐れはない.

1.6.2 試験装置

- .1 プロクター装置 (図 1.6.2 参照) は, 着脱式の延長部 (モールド頂部へのねじ込み式) を備えた円筒形の鋼製のモールド (CBR モールド) と, 下端が開いたパイプによってガイドされる締固め具 (締固めハンマー) で構成される.
- .2 到着時試料と容器を $\pm 1 \text{ g}$ 以上の精度で計量できる計量天びん (3.2 参照), 及び適当な試料容器.
- .3 100°C から 105°C までに温度を制御できる高温乾燥機.
- .4 手による攪拌のための容器. 攪拌過程において, 粒径を破砕することにより粒径分布を小さくしないよう, 凝集により粒径分布を大きくしないよう注意すること.
- .5 適当な規格 (例えば ASTM D 5550, AS 1289, BS 1377 Part 2) に従って真密度を測定するためのガスまたは水ピクノメトリー装置



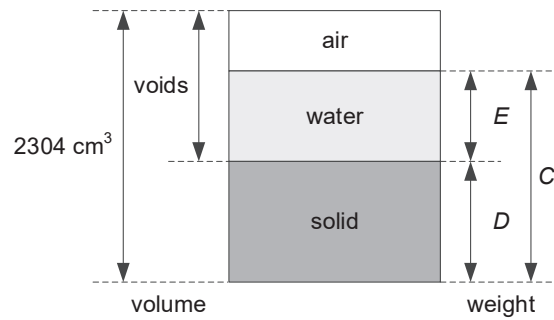


図 1.6.2 装置と定義

1.6.3 温度と湿度（この附録の 1.1.3 参照）

1.6.4 手順

.1 完全な締固め曲線の作成

関連規格（コード本文 4.7 節参照）に従って採取された代表試料を用いること。

.2 試料の均一化と取り分け

ISO 6140:1991「アルミニウム鉱石—試料の準備」⁷に規定されている試料縮分装置を用いて、到着時試料を個々のサブサンプルに分割する。これらサブサンプルを、水分を保持するため、密封できる丈夫なプラスチック製のバケツに入れる。

.3 再構成試料の準備手順

代表試料のうち 25 mm を超える粒子の量が乾燥質量ベースで 10% を超える場合、ボーキサイトの再構成が必要である。この場合以下に示す再構成手順を適用すること（図 1.6.4.3 も参照）。この手順では、25 mm を超える粒子は試料から除去され、同質量の 6.3 mm から 25 mm の粒子で置き換えられる。6.3 mm は標準の篩径である点に留意のこと。

（6.3 mm の篩が）使用できない場合は、6 mm の篩で代用できる。再構成により、TML 試験に十分な質量の最終的な再構成試料が生成される。試料の最大粒径は 25 mm だが、この試料は、25 mm を超える粒子を含む到着時試料の全体の締固め特性を良く再現する。

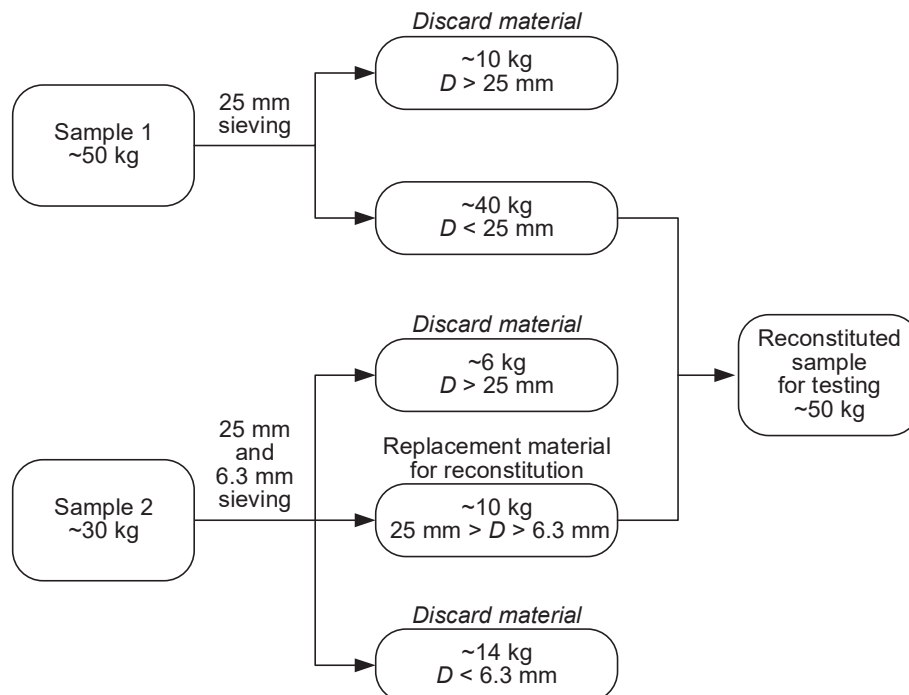


図 1.6.4.3 試料再構成手順の概略図

⁷ この ISO 標準は既に廃止されている。

- 第1段階 試料準備の最初の段階は、25 mmで試料を篩にかけ、25 mmを超える粒子の乾燥質量を測定することである。25 mmの篩に残る物質は廃棄され、25 mmを通過する物質が試験される(図1.6.4.3参照)。再構成が必要な場合、1本のプロクター/ファガベリ締固め曲線を得るのに約40kgのボーキサイトの篩い分け(篩下試料の作成)が必要である。25 mmを超える粒子が乾燥重量ベースで10%以下の場合、再構成は不要である。1本のプロクター/ファガベリ締固め曲線を得るには、合計約50 kgの25 mm篩い分け用ボーキサイトが必要である。これを入力し、再構成が必要ない場合はステップ4に進む。
- 第2段階 再構成が必要な場合、同じ鉱石の別のサブサンプルを25 mmと6.3 mmで篩い分けし、これら二つの篩サイズ間の部分を残す。1本のプロクター/ファガベリ締固め曲線のためには、この粒径(6.3~25 mm)のボーキサイトが約15 kg必要である(図1.6.4.3参照)。
- 第3段階 第2段階で得られる6.3~25 mmの物質を、第1段階で得られる25 mm以下の物質に追加する。追加する6.3mm~25 mmの物質の量は、第1段階で除去・廃棄した25 mm以上のボーキサイトの質量と等しくすること。
- 第4段階 再構成された試料、または、大きな粒子を除去した試料を完全に攪拌する。

4 締固め

締固め試験は、別々の試験で5~10(通常は7)の異なる水分値に対して行う。試験の数は、最適水分値を正確に決定するための水分値を含み、また、完全な飽和またはこれに近い状態を含め、締固め曲線を完全に決定できるものにする。

再構成の要否にもよるが、通常一連の試験には合計で約40 kgから100 kgの篩い分けされていないボーキサイトが必要である。

粒径調整済みの(原文は“the screened bauxite”:再構成したもの又は25 mm以上の粒子を取り除いたもの意味)ボーキサイトを5~10個のサブサンプルに分け、それぞれを密封したプラスチック製のバケツに入れる。サブサンプルの水分値は、到着状態からほぼ飽和状態までの範囲の水分値を得るため、各バケツに適切な量の水を加えて調製する。

通常、一回の試験は到着時の水分値で実施される。より高い水分値で4~8回の試験が実施される。到着時の水分値に応じて、到着時の水分値よりも低い水分値で一・二回の試験が実施される。これらの低水分値試験は、ボーキサイトサブサンプルを室温で部分的に乾燥させることによって得られる。ボーキサイトサンプルは完全乾燥させないように注意すること。一部のボーキサイトは予備乾燥に敏感ではないが、試験対象のボーキサイトについて包括的に実証されていない限り、予備乾燥は許可されないことに注意すること。

サブサンプルは、密封したプラスチック製のバケツで一晩放置して均一化する前に、目標の水分値で攪拌する。確実に均質な試料を試験するため、プラスチック製のバケツの内容物は、締固めの直前に再度攪拌する。

締固め試験に必要なボーキサイトの準備量は約5 kgなので、これが各サブサンプルの目標量である。サブサンプルは、完全な締固め曲線を決定するため、準備された水分値で締固める。

プラスチック製バケツのサブサンプルの約5分の1が、延長部が取り付けられた状態でモールドに充填され(図1.6.2)、平坦にされて、最初の層が形成される。可塑性を示すボーキサイトは、水分が多いと粘着して塊を形成する傾向がある。モールドに物質を入れる際には、軽く手で、塊を小さな粒子に分解することが重要である。

次にボーキサイトは層の表面全体に均一に突き固める。タンピングは、プロクター/ファガベリD法に従って、ガイドパイプを通して150 gのハンマーを58回、毎回0.15m落下させることで行う。ガイドチューブは手で持ち、鉱石の表面に触れるだけで、その上に置かないように配置する。これにより、ハンマーが指定された高さまで落下してボーキサイトを締固めすると同時に、ボーキサイトを圧縮してはならないガイドチューブ自体の重量に起因する余計な(過度の)締固めを回避できる。

この動作は、最後の層はモールド延長部の接合部を埋めるだけになるように、5層全てに対して繰り返す。目的は、五つのほぼ等しい層に締固めすることによって、所定のエネルギーにより均一に締固めされたモールドの容積の試料を生成し、モールドを充填することである。

延長部の中でボーキサイトは、モールド頂部からの高さが1 cmを超えないこと。ボーキサイトの高さが1 cmを超えたことが分かったら、試料の締固め不十分であるため、試験をやり直すこと。

最後の層を突き固めた後、延長部を外し、注意して、試料はモールドの縁に沿って平らになるように取り除き、試料の上面を平坦にすることを妨げる可能性のある大きな粒子を確実に除去し、延長部に含まれる物質と交換して再度平坦にする。

(供試体の上部を) 平坦にする手順は、水平方向に切り取る行為であって、所与のエネルギーで締められた以上に所定の体積に物質を詰め込んでしまう押し込む行為であってはならない。

突き固められた試料を含む容器の重量が測定した後、容器を空にして、ポーキサイト用の ISO 水分測定規格 (ISO 9033:1989「アルミニウム鉱石—ばら積み物質の水分値の測定」⁸⁾) に従って、全試料は 105°C で乾燥し、重量を測定する。そして水分値が異なる他の試料に対して試験を繰り返す。

5 定義と計算のためのデータ (図 1.6.2 参照)

- 空の容器の質量, グラム単位 : A
- 締め固めた試料を含む容器の質量, グラム単位 : B
- 水分を含む試料の質量, グラム単位 : C

$$C = B - A$$

- 乾燥試料の質量, グラム単位 : D
- 水の質量, グラム単位 (cm^3 単位の体積に同じ) : E

$$E = C - D$$

容器の容積 : $2,304.5 \text{ cm}^3$

6 主な性状の計算

- 真密度, 単位は g/cm^3 (t/m^3) : d
- 乾燥状態の見かけ密度, 単位は g/cm^3 (t/m^3) : γ

$$\gamma = \frac{D}{2,304}$$

- 正味水分値, 体積百分率 : e_v

$$e_v = \frac{E}{D} \times 100 \times d$$

- 間隙比 : e (間隙の体積を固体部分の体積で割った値)

$$e = \frac{d}{\gamma} - 1$$

- 飽和度, 体積百分率 : S

$$S = \frac{e_v}{e}$$

- 全水分値, 質量百分率 : W^1

$$W^1 = \frac{E}{C} \times 100$$

- 正味水分値, 質量百分率 : W

$$W = \frac{E}{D} \times 100$$

7 締め固め試験の表現

各締め固め試験の結果は、正味水分値 (e_v) と飽和度 (S) を横軸として、計算された間隙比 (e) の値を縦座標としてプロットする。

⁸⁾ この ISO 標準は既に廃止されている。

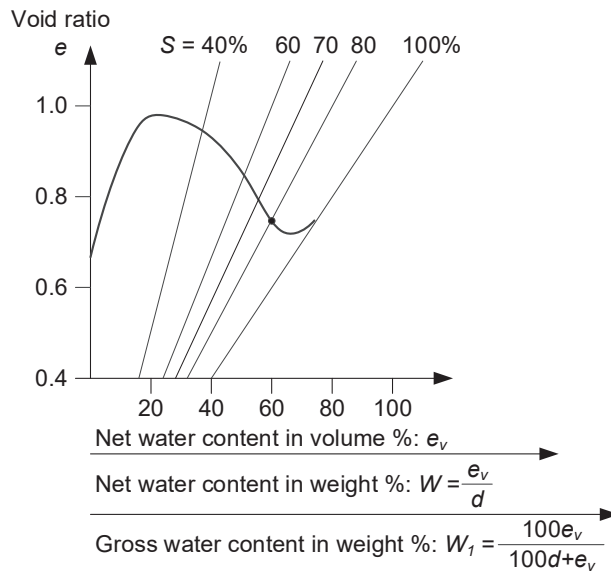


図 1.6.4.7.1

最適水分値が 90 % を超える飽和度で発生した場合のボーキサイト締固め曲線の形
TML は、飽和時 80 % に対応する臨界含水量である。

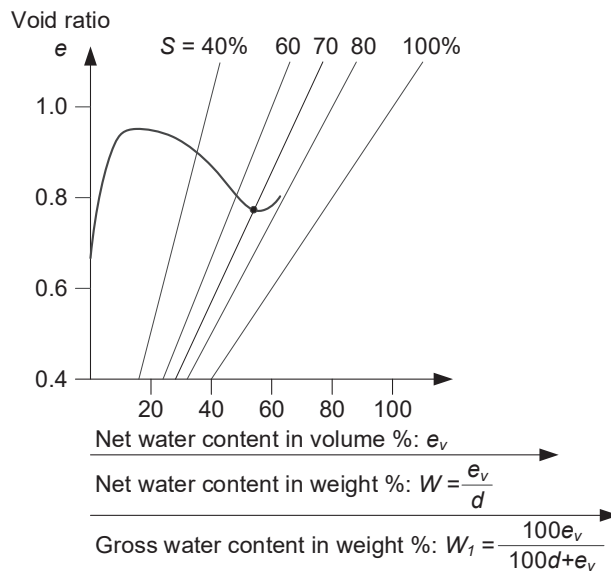


図 1.6.4.7.2

最適水分値が 90 % 未満の飽和度で発生した場合のボーキサイト締固め曲線の形
TML は、飽和時 70 % に対応する臨界含水量である。

8 締固め曲線

試験手順は、特定の締固め曲線を与える (図 1.6.4.7.1 及び図 1.6.4.7.2 参照)。

ボーキサイトの最適水分値 (OMC) が飽和度 90 % 以上で生じる場合、臨界水分値は、締固め曲線と飽和度 $S = 80\%$ の線の交点で示される (図 1.6.4.7.1 参照)。TML は臨界水分値である。

ボーキサイトの最適水分値 (OMC) が飽和度 90 % 未満で生じる場合、臨界水分値は、締固め曲線と飽和度 $S = 70\%$ の線の交点で示される (図 1.6.4.7.2 参照)。TML は臨界水分値である。

OMC 近傍の両側の水分値で十分な数の試験が行われ、OMC が明確に決定できる場合を除いて、 $S = 80\%$ に基づく TML を採用してはならない。(この場合) TML は $S = 70\%$ に基づくものとする。これは締固め曲線の定義が不十分なため、高い OMC が誤って採用されるのを防ぐためである。

締固め曲線が飽和度 70 % に達しない水分値で、試料から水分が非常に容易に排出される場合、試験は水が粒子間の隙間を自由に通過する貨物であることを示す。

別紙 7 静止角決定法 (IMSBC コード附録 2 第 2 章) (仮訳)

2 静止角を決定する手順及び関連する装置

2.1 細かな粒状物質 (粒径 10 mm 未満) の静止角の決定: 実験室または積み荷港で使用するための「傾斜箱試験」

2.1.1 目的

この試験は細かい粒状 (粒径 10 mm 未満) の非粘着性物質の静止角を決定するためのものである。得られた結果は当該物質について本コードの第 5 章及び第 6 章を解釈する際に使用できる。

2.1.2 定義

このテストで得られる静止角は、傾斜箱内の物質の一定量が滑り始めた時の、傾斜箱の水平からの角度である。

2.1.3 試験の原理

この試験で静止角を計測する際には、物質の上面は最初、平坦且つ傾斜箱の基線と平行にすること。傾斜箱は振動させることなく傾斜させ、物質の一定量が滑り始めた時点で傾斜を止める。

2.1.4 装置 (図 2.1.4 参照)

装置は以下の通り。

- 1 フレーム (枠) に取り付けられた上部が空いている箱。箱を制御された状態で傾斜させるため、箱のフレームへの取り付けは、フレームと箱の両方の端部に取り付けられたベアリングを通る軸による。
- 2 箱の大きさは、長さ 600 mm、幅 400 mm、高さ 200 mm。
- 3 傾斜時における箱の底面における物質の滑りを防止するため、底にグレーチング (開口 30 mm×30 mm×25 mm) をしっかり固定される。
- 4 箱の傾斜は、フレームと箱の底部の間に取り付けられた油圧シリンダーによる。必要な傾斜を得るために他の手段を使用しても良いが、振動を排除すること。
- 5 油圧シリンダーを加圧するには、空気またはガスによって約 0.49 MPa (原文の数値は 5 kilopound/cm²) に加圧されたアキュムレータを使用できる。
- 6 傾斜速度は毎秒約 0.3° とすること。
- 7 最低でも 50° まで傾斜させられること。
- 8 シャフトの端には分度器が取り付けられている。分度器のレバーの 1 つは水平となるようネジで調整できる。
- 9 分度器は、箱の上部の水平に対する角度を 0.5° 刻みで測定できるものであること。
- 10 分度器の零点較正用に、水準器またはその他の水平を出す装置を用意すること。

2.1.5 手順

均一にするため、試験する物質は、ゆっくりと注意深く、できるだけ低い位置から箱に注いで、箱を満たすこと。余分な物質は、除去する (動かす) 方向に対して約 45° にしたストレートエッジ (straight edge) によって除去する。そして傾斜を開始し、物質の一定量が滑り始めた時点で傾斜を止める。箱の上面の水平に対する角度を分度器で計測し記録する。

2.1.6 評価

静止角は 3 回の測定の平均とし、0.5° 刻みで求める。

注 可能であれば、試験は三つの独立した試料で実施すること。試験に先立って、シャフトが水平に調整されていることを確認すること。

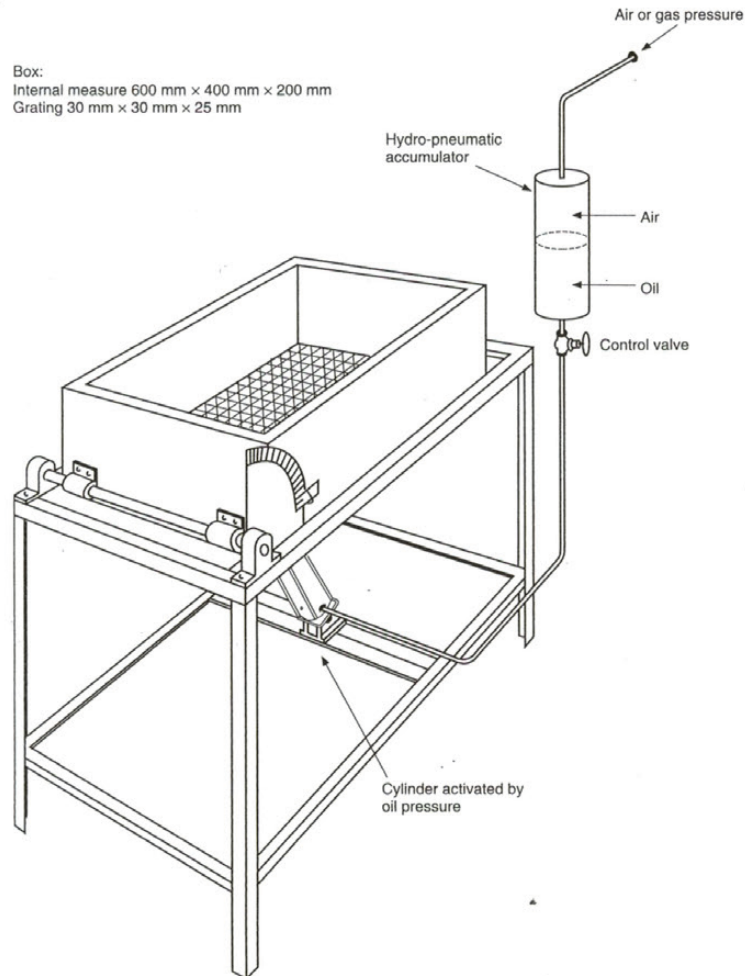


図 2.1.4 傾斜箱の基本スケッチ

2.2 静止角の決定に使用される傾斜箱が利用できない場合の代替または船上での試験方法

2.2.1 定義

この試験では、静止角は、円錐の半分の高さにおいて、円錐の斜面が水平面に対して成す角度である。

2.2.2 試験の原理

静止角を決定するため、対称な円錐が形成されるように、十分な量の試験される物質を、十分に注意して、フラスコからざらざらした紙の上に注ぐ。

2.2.3 装置

試験に必要な機器は以下の通り。

- 振動のない水平な台
- 物質を注ぐざらざらした紙のシート
- 分度器
- 3 リットルのフラスコ

2.2.4 手順

紙を台に置く。10 L の試験する物質を三つの試料に分け、それぞれを以下の方法で試験する。

試料の3分の2(2L)をシートに注ぎ、円錐の生成を開始する。次に、残りの試料を、円錐頂部より数ミリメートルの高さから注意深く注ぐ。その際、円錐が対称に積み上がるよう注意する。これは、試料を注ぐ際に、フラスコを円錐の頂部付近でゆっくりと回転させる(試料を注ぐ)ことで達成できる。

角度を測定する際は、分度器が円錐に触れないように注意する。そうしないと、材料が滑って試験が失敗する恐れがある。

角度は円錐の周囲90度刻みの4箇所計測すること。

他の二つの試料についても試験を繰り返す。

2.2.5 計算

静止角は、測定された12の角度の平均値とし、0.5°刻みで報告すること。この値は、以下の式により、傾斜箱試験による静止角に換算される。

$$a_T = a_S + 3^\circ \quad (2.2.5)$$

ここで a_T = 傾斜箱試験による静止角
 a_S = この調査試験による静止角