

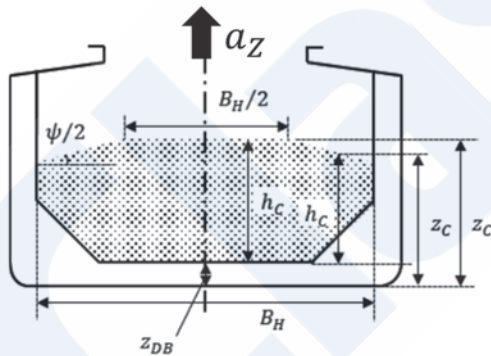
鉛直方向加振時の粒状貨物による内圧の合理的な推定方法

開発本部 技術研究所, 東京大学 生産技術研究所 桑野研究室

1. はじめに

鉄鋳粉やニッケル鋳等の粒状貨物の輸送において、波浪による外圧に加えて、船殻は船体運動に伴い生じる船体加速度に起因する貨物からの内圧を受ける。粒子間の摩擦によって、粒状貨物はせん断抵抗を有し複雑な挙動を示す。粒状貨物はコンテナ等の固体貨物とは異なり流動性を示す一方で、過去の実船計測における二重底骨部材のひずみが液体貨物とみなした場合に比べて小さくなるという構造応答の変化が示唆された¹⁾。

本会鋼船規則C編¹⁾では鉛直加振時の粒状貨物の荷重について式(1)、(2)の通り規定する(図1)。式(1)、(2)は液体貨物荷重評価式を基に、粒子と船殻内面との摩擦影響を考慮して定められた。過去の実船計測結果²⁾や模型試験の結果³⁻⁵⁾によって、粒子の摩擦が粒状貨物による内圧に寄与すると示唆されているものの、メカニズムや影響に関して明らかでない部分が残されていたことから、安全側に規定されている。

図1 ばら積貨物船¹⁾

$$P = K_c \rho_c (g + a_z) h_c \quad (1)$$

$$K_c = \cos^2 \alpha + (1 - \sin \psi) \sin^2 \alpha \quad (2)$$

P : 粒状貨物を積載する船倉内の圧力,

K_c : 静止土圧係数,

ρ_c : 粒状貨物の密度 (t/m^3),

g : 重力加速度 (m/s^2),

a_z : 鉛直方向船体加速度 (m/s^2),

h_c : 貨物積み高さ (m),

α : 考慮するパネルの水平面に対する傾斜角,

ψ : 粒状貨物の安息角

上記の背景から、本会は粒状貨物による内圧に関して研究を行ってきた。これまでの本会の研究によって、構造応答の変化が「アーチ効果⁶⁻⁸⁾」と呼ばれる荷重の再分配に起因すると示された⁹⁾。アーチ効果は土木分野において知られる現象である。

図2(a) (落とし戸試験) に示すように粒状物質を支持する領域の一部、ここでは床ブロックが降下すると粒子のアーチが形成され、アーチに沿って荷重が再分配される現象である。アーチ効果は以下の流れで生じる。はじめに床ブロックが降下すると、降下する床の上方に存在する粒子のうち、図2(b)のように、床近傍の粒子は床に追従して降下するが、床から離れた粒子は追従せずその高さに留まる。追従しない粒子は粒子同士の摩擦の作用によって支えられることで粒子アーチが形成され、その結果、アーチに沿って荷重が根元へと再分配される。

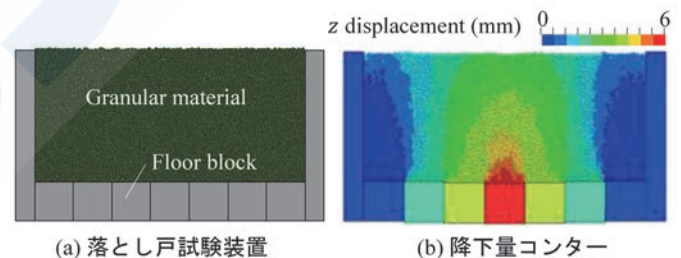


図2 落とし戸試験におけるアーチ効果

しかしながら、船舶分野におけるアーチ効果は以下の点で土木分野とは異なっており、本会は基礎的な実験的検討や数値解析による検討を進めてきた。

- ①船体の運動に伴う内底板のたわみの変化とアーチ効果による荷重再分配との相互の影響を考慮する必要がある
- ②船体運動によって繰り返し外乱を受ける
- ③無限遠の地盤中での現象ではなく、船倉内部に積載された貨物内部の現象であり、二重底や船側等の船体構造の影響を受ける

本稿では、弾性体底板を用いた揺動試験の構想、及び、試験に先立って実施した連成解析の検討について報告する。

2. アプローチ

本稿のアプローチについて、数値解析の原理及び実験的検討を概説する。

2.1 DEM-FEM連成解析

上述の通り、船倉における粒状貨物に生じるアーチ効果を検討するためには、貨物と船体が相互に及ぼす影響を考慮した連成解析を行う必要がある。本稿では貨物粒子の挙動を個別要素法 (Discrete Element Method) で求めて、容器の変形を有限要素法 (Finite Element Method) で解くDEM-FEM連成解析を用いた。解析には汎用ソフトウェアLS-DYNAを使用した。

個別要素法¹⁰⁾は、貨物粒子を剛体球の離散要素で表し、要素同士の接触力を外力として運動方程式を解いている。法線方向及び接線方向の接触をばね・ダンパモデルで定式化しており、要素の接触に応じたばねの縮みから接触力を算出する。接線方向はクーロン摩擦に基づいた摩擦力が作用する。

有限要素は個別要素から受ける荷重によって変形し、次のステップにおいて個別要素への接触力として伝達されることで、双方向の連成解析が実施できる。

粒子のパラメータは表1に示す値を用いた。事前に実施した解析¹¹⁾において、粒子を充填した容器を傾けたときに粒子が移動し始めた角度として計測した安息角は30.3°であった。また、三軸圧縮試験を模した解析において内部摩擦角が20.0°、粘着力が5.0 kPaであった。

表1 粒子物性値

Property	Value
Coefficient of friction between discrete elements	0.25
Coefficient of friction between discrete elements and shells	0.25
Radius of discrete elements (mm)	3.0
Young's modulus of discrete elements (MPa)	71600
Poisson's ratio of discrete elements	0.23
Density of discrete elements (t/mm ³)	7.6×10 ⁻⁹

2.2 実験的検討

2.2.1 揺動装置

東京大学生産技術研究所との共同研究として、弾性体底板を用いて鉛直揺動に対するアーチ効果を評価するための揺動実験を進めている。本稿では試験装置の構想について紹介する。十分なたわみが生じ、かつ揺動時に塑性変形の生じないように、底板はジュラルミン製厚さ1.0 mmの板を用いる。底板の

変形を阻害しないよう、圧力は受圧面が40.0 mm四方、厚さ0.45 mmの薄膜シート状のセンサを用いて、底板の変形は磁気センサを用いて計測する。

従来の土圧計測では土圧計やロードセルを用いることが多いものの、底板の変形に影響を及ぼす恐れがある。薄膜センサは軽量・薄型かつ、センサ自身も底板に合わせて変形可能なことから、本装置において適切と考える。

鉛直方向での揺動中における弾性体底板での土圧計測例が極めて少ないことから、本装置での実験に先駆けて2.2.2項に述べる落とし戸実験を行った。

2.2.2 落とし戸実験

通常、土木分野では底板の離散的な降下によるアーチ効果の検討が行われるため、船舶における内底板のたわみのような、連続的な底板の降下は検討されていない。そこで、本装置を用いた揺動試験に先立って、落とし戸試験装置を用いてアーチ効果における降下形状の影響を調査した。

落とし戸試験は東京大学生産技術研究所において実施された。本稿では概要のみ紹介するため、詳細についてはHirano et al.(2023)¹²⁾を参考にされたい。

試験装置を図3に示す。アルミ製の剛な床ブロックを底に配置し、モーター駆動によって降下させた。各ブロックの降下量は中央 (図4, No.11-15) が6.0 mm、両隣 (図4, No.6-10及び16-20) が4.0 mm、端 (図4, No.1-5及び21-25) が2.0 mmである。ブロック下に配置するロードセルを用いて荷重を計測した。

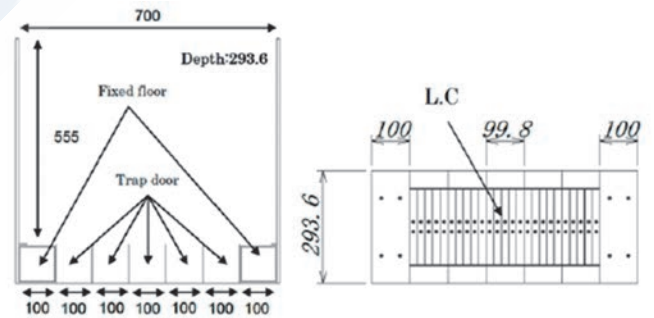


図3 落とし戸試験装置¹¹⁾



図4 落とし戸試験における荷重評価点¹¹⁾

中央ブロックの降下量に対する荷重変化の時刻歴を図5に示す。中央部はブロック降下に応じて荷重が急激に減少する。両隣のブロックでは、降下量2.0 mm前後までは荷重が増加するものの、以降は

減少に転じる。両端部の荷重は徐々に増加する。図6に示す荷重分布の通り、初期状態では位置による荷重の差が見られないが、降下後はアーチ効果が見られ、分布形状は最終状態に依ることが分かった。また、ブロックの境界付近において荷重が増加する様子が見られた。

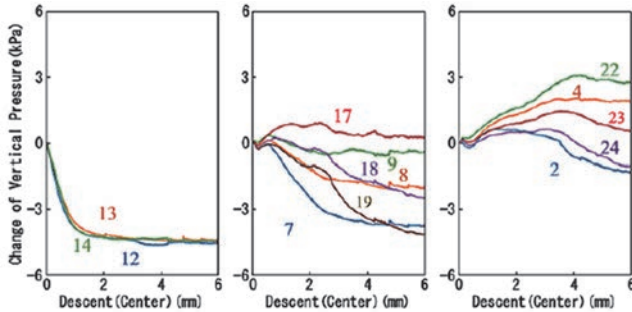


図5 落とし戸実験における荷重時刻歴 (Case C)¹²⁾

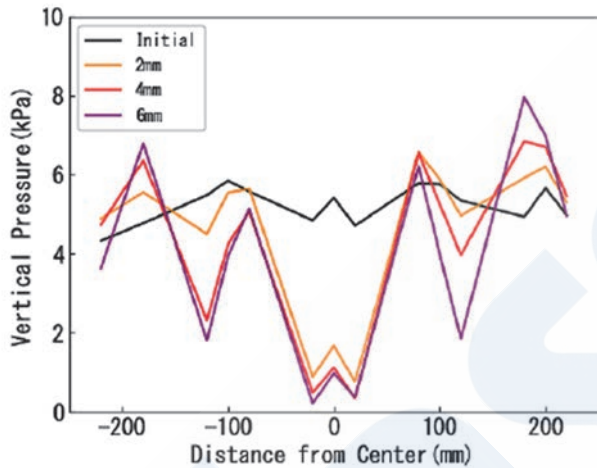


図6 落とし戸実験における荷重分布 (Case C)¹²⁾

上記の検討に加え、アーチ形成条件の因子を調査した。貨物積み高さ h_c と幅 B の関係を調査するために貨物積み高さ h_c を変更したところ、 $h_c/B \geq 0.40$ の場合にアーチが形成された。粒径が小さな場合は僅かな降下量で幅の広いアーチが形成されると示唆された。また、ロードセルと薄膜センサとの土圧の比較を行い、両者に大きな違いがないことを確認した。揺動試験を用いた動的応答の計測に関して継続的に研究を進める予定である。

3. DEM-FEM連成解析

落とし戸実験によって離散的ではあるものの内底板の変形に近い状態でのアーチ効果を確認することができた。別途実施した落とし戸試験を模したDEM解析においても、降下ブロック上にアーチが形成され、荷重が再分配することを確認している。

本章では、DEM-FEM連成解析を用いた弾性体底板におけるアーチ効果の検証結果について紹介する。

3.1 弾性体底板におけるアーチ効果

落とし戸試験装置では、剛な床ブロックを強制的に変位させた場合にアーチが形成される。一方、船舶では、船体運動に伴う貨物からの荷重によって底板の変形が生じる。このような相互影響を考慮するために、弾性体底板を有する容器を用いてDEM-FEM連成解析を行った。本稿では概説に留めるため、詳細はYanagimoto et al. (2022)⁹⁾を参考にされたい。

解析モデルを図7に示す。船倉の微小な長さを切り出した擬似二次元モデルとするため、連続の境界条件となるよう前後に剛体壁を設けた。前後壁と粒子との摩擦係数は0とした。側壁は剛体として、内底板を弾性体でモデル化した。

はじめに自重を载荷して安定させた後に、容器剛体部に鉛直上方向の加速度 a_z を付与して一方向に運動させる。 a_z は重力加速度 g の0.3倍とした。

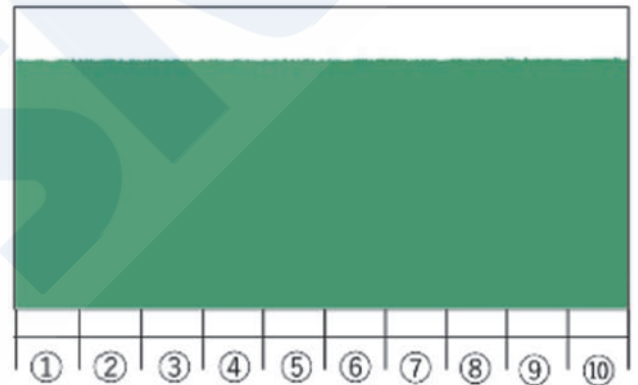


図7 底板部の荷重評価点⁹⁾

荷重分布を図8に示す。図8における荷重は、底板全体の平均圧力に対する評価領域の圧力の比として算出する。最も効果の高い場合において、アーチの内側となる容器中央(図8⑤⑥)では底板平均値の0.85倍、アーチ端部(図8①⑩)では1.2倍が作用する。

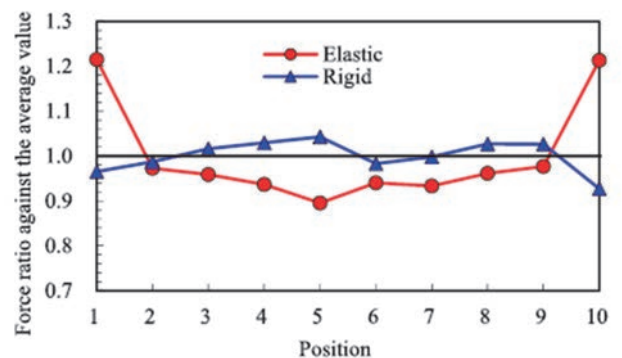


図8 底板における荷重分布⁹⁾

貨物積み高さ h_c と容器幅 B との比について、2.2.2項の落とし戸実験と近い傾向を示しており、 $h_c/B \geq 0.33$ のときにアーチが形成された。 h_c/B が小さくなる程アーチ効果が小さくなる。さらに、貨物粒子の半径が1.5, 2.0, 3.0 mmの場合に差がないこと、底板のヤング率及びポアソン比がアーチ効果に影響しないことを確認した。

3.2 底板の不均一剛性影響

落とし戸試験は剛体床ブロックによる離散的な変形に起因してアーチが形成され、固定床ブロック境界付近への荷重集中が見られた。一方で、3.1節の弾性体底板モデルでは、アーチ内側における荷重集中は見られなかった。3.1節では単純化した底板を用いていたが、実際の船体底板の変形は船倉幅全域での全体変形に加えて、ガーダー間の局部変形が重畳した複雑な形状を示すことから、本章では局部変形に起因するアーチ効果が、全体変形によるアーチ効果に及ぼす影響を調査した。

解析モデルを図9に示す。内底板に加えて、二重底及びびガーダーを模した弾性体シェル要素を設けた。重力加速度 g の0.15倍まで単調に増加する a_z を付与した。粒子等の条件は3.1節と同様である。

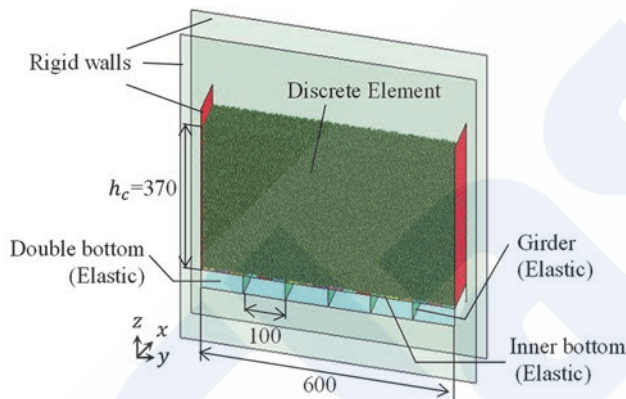


図9 ガーダー付きモデル

解析結果を以下に示す。 $a_z = 0.15g$ における応力鎖コンターを図10に示す。応力鎖 (force chain) とは、周囲の要素との接触力から求まる粒子に作用する主応力方向の力を示す可視化手法である¹³⁾。応力鎖が大きな場合、周辺粒子に対して、主応力方向の大きさと方向に連続性があることを意味する。図10から、船倉幅のスパンを有するアーチが形成され、さらに、船倉幅スパンのアーチの内側にガーダーを跨いだ小さなアーチが形成されると分かる。

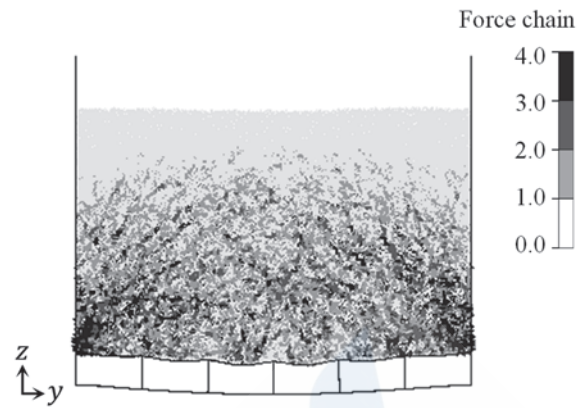


図10 Force chainコンター

図11に示す通り、全体変形と局部変形が重畳した形状のたわみが生じた。ガーダー間の中点では、動的荷重によるたわみの増加量が少なく、中点を根元とした局部アーチが形成されたものと考えられる。図12の荷重分布において、局部的なアーチの根元が位置すると考えられるガーダー間の中点では、ガーダーの真上よりも荷重が集中している。これは、応力鎖と底板のたわみに基づく推測と一致する。

さらに、図12の荷重分布において、全体アーチによる荷重分配と局部アーチによる分配の効果が重畳すると示唆される。したがって、実際の船体構造のような複雑な形状においても、アーチ効果が発生し、重畳した状態で発現すると推察される。

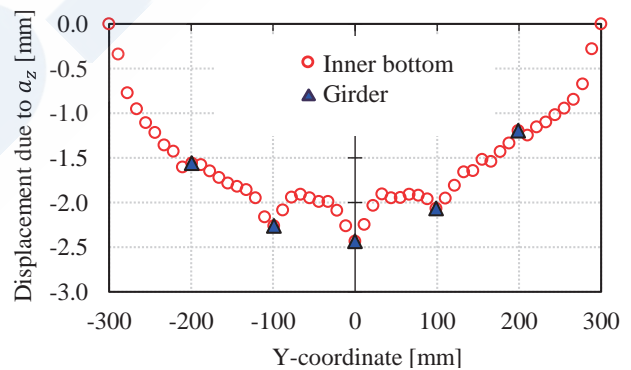


図11 鉛直方向加速度 a_z に起因するたわみの増加量

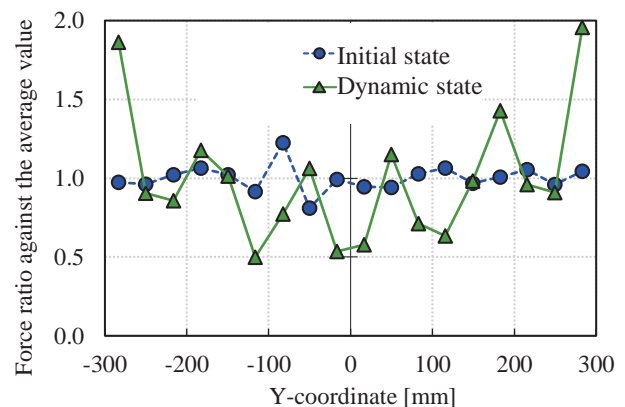


図12 荷重分布

3.3 三次元容器の底板アスペクト比影響

前節まで、微小長さを切り出した二次元的状態におけるアーチ効果の評価結果を紹介した。実際の内底板は長手方向にも変形するため、幅方向のアーチだけではなく、長手方向にもアーチが生じて荷重分配に影響を及ぼす可能性がある。そこで、図13に示す容器を用いて、板の三次元変形に起因するアーチ効果について調査した。

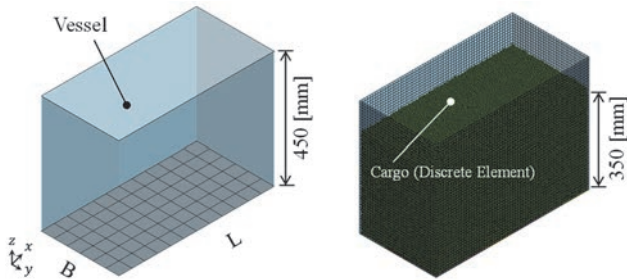


図13 三次元モデル

貨物積み高さ h_c と幅との比がアーチ形成条件並びにアーチ降下に寄与することを踏まえて、図14の通り容器底板の長さ L と幅 B との比 L/B を1.0~2.0まで変化させて、底板アスペクト比 (L/B) と荷重分布との関係性を評価する。加振は $a_z=0.3g$ まで単調に増加する一方向鉛直加速度を付与した。側壁は剛体シェル要素、底板を弾性体シェル要素でモデル化した。

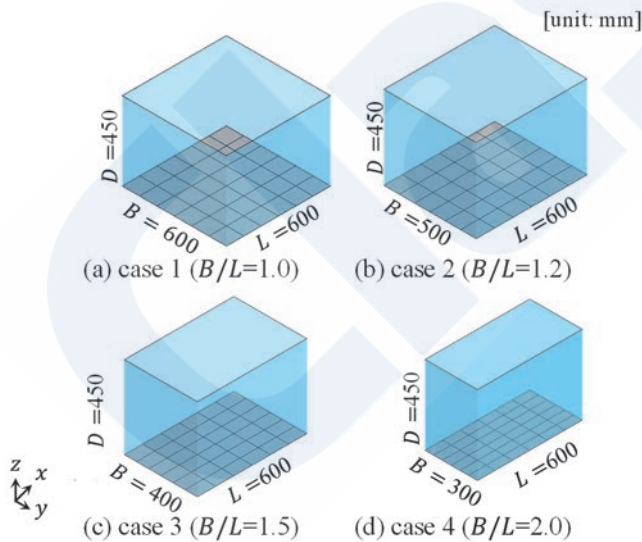


図14 各ケースのFEモデル

$a_z=0.3g$ での容器底板アスペクト比 (L/B) が異なるCase 1~4における動的荷重の分布について、容器長さ L 方向の分布を図15に、容器幅 B 方向の分布を図16に示す。尚、分布はいずれも平均値で正規化している。

図15に示す長さ方向分布では、いずれも中央の圧力は平均値よりも低くなっている。端は正方形底板のCase 1は平均よりも大きく、その他では平均に近い値を示す。

図16に示す幅方向分布において、中央は全ケースとも平均より小さく、端はいずれも平均よりも大きくなっており荷重が集中している。また、正方形底板のCase 1では幅方向と同程度であるが、その他のアスペクト比が1を超過するCase 2~4では幅方向の方が大きい荷重が作用している。さらに、アスペクト比 L/B が大きく、細長い底板になるほど、幅方向での端に荷重が集中する。

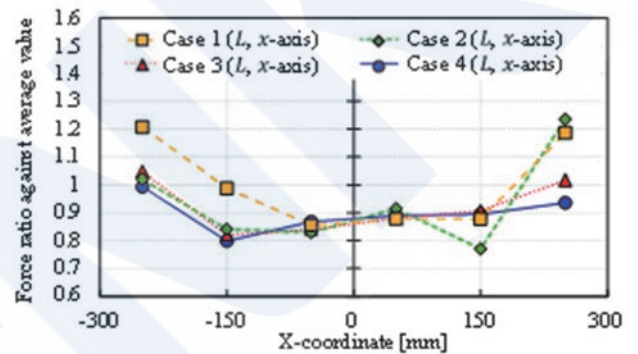


図15 容器底板アスペクト比 (L/B) が異なるCase1-4における容器長さ L 方向の荷重分布 ($a_z=0.3g$)

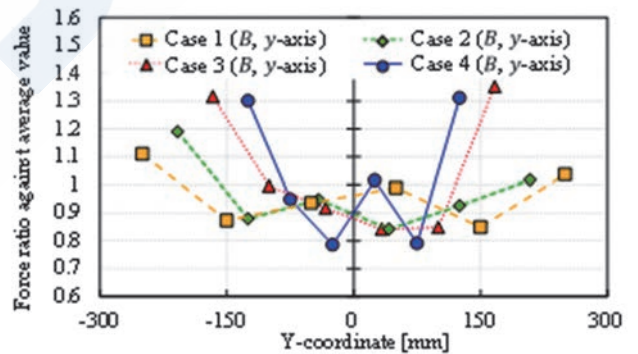


図16 容器底板アスペクト比 (L/B) が異なるCase1-4における容器幅 B 方向の荷重分布 ($a_z=0.3g$)

アスペクト比によってアーチ効果の強さが異なる原因について次のように考察する。アーチ構造の模式図を図17に示す。アーチが荷重を支持するとき、アーチの両端には鉛直反力に加えて水平反力 H が生じる^{14) 15)}。

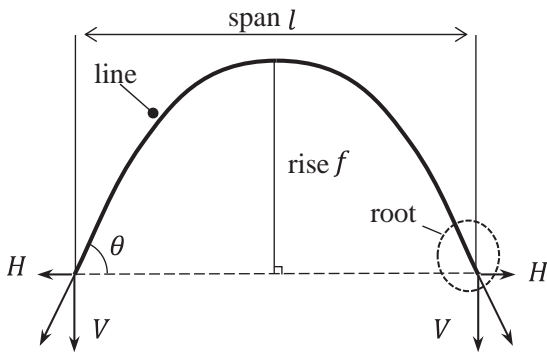


図17 アーチ構造

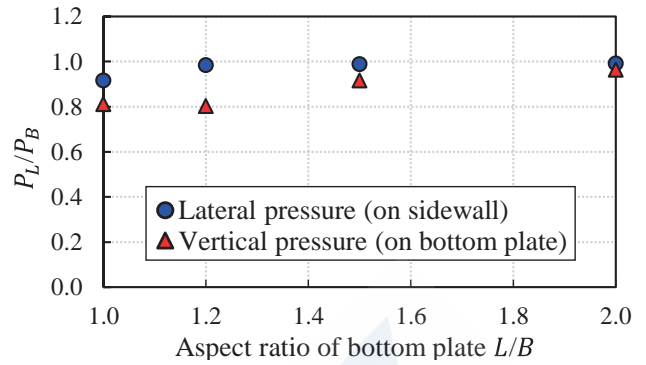


図19 短辺及び長辺方向の荷重の比と底板アスペクト比との関係性

水平反力は側壁あるいはアーチの外側の粒子によって支持される。図18に示す領域における $a_z=0.3g$ のときの圧力 (p_L^{lateral} : 長さ方向アーチの根元の側圧, p_B^{lateral} : 幅方向アーチの根元の側圧, p_L^{vertical} : 長さ方向アーチ根元の底板圧力, p_B^{vertical} : 幅方向アーチ根元の底板圧力) を調査した結果を図19に示す。図19によると、アスペクト比に関わらず側圧は両方向で概ね等しいが、アスペクト比が大きな程短辺方向のアーチの根元に位置する荷重の方が大きい。これは、同等の水平反力が作用する場合、アーチ高さに対してアーチ幅が小さく縦長なアーチの方が鉛直反力を大きく取ることになるためと思われる。この傾向は、先行研究の落とし戸模型を用いた実験⁸⁾において、同じ h_c の場合は容器幅が小さなケースの方がよりアーチ効果が強いとの結果と同様の傾向であるといえる。

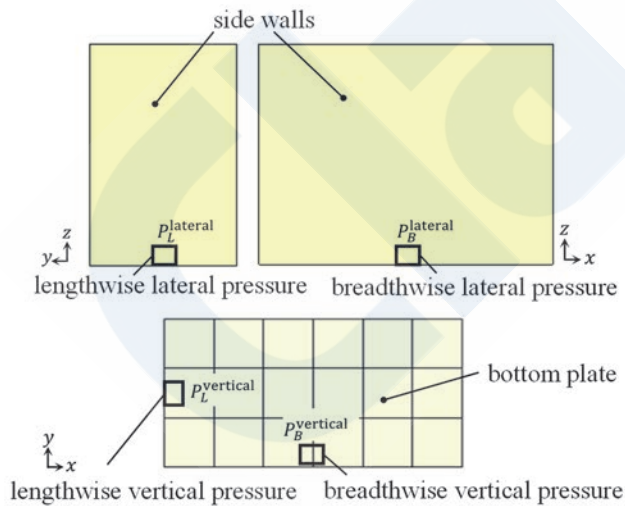


図18 側壁及び底板における荷重の計測領域

4. まとめと今後の展望

粒状貨物は、同じ船体鉛直方向加速度を受けたときの液体貨物による荷重に対して小さな荷重を生じることが指摘されていたものの、そのメカニズムについては明らかになっておらず、本会は研究を進めてきた。

文献調査や先行研究の分析の結果から、上記の液体貨物との相違はアーチ効果に起因するものと考えた。そこで、貨物粒子と底板の運動の相互の影響を考慮するべく、弾性体底板を有する容器を用いた揺動実験やDEM-FEM連成解析による評価を行った。本稿では、実用的な問題の解決につながる第一歩として行ったこれらの検討を紹介した。

本稿に示した検討によって、アーチ効果に関して貨物積み高さとの比が影響を及ぼすこと、不均一剛性底板の場合には局部変形と全体変形によるアーチ効果が重畳すること、底板のアスペクト比が影響を及ぼすことが明らかにされた。

アーチ効果を考慮することで、より構造設計を合理的に行うことができると期待されることから、動的応答に関する模型実験の実施やアーチの形成・崩壊条件の検討を継続して行い、鋼船規則へのフィードバックを目指す予定である。

参考文献

- 1) 一般財団法人 日本海事協会：鋼船規則C編 船体構造及び船体艙装 1編 共通要件, 2024.
- 2) 倉本ら：鉍石圧力の実船試験と設計荷重の考察, 日本造船学会論文集, 1987巻, 162号, pp. 276-283, 1987.
- 3) 田中ら：粒状貨物による艙内圧の実験的検討, 日本造船学会論文集, 1999巻, 186号, pp. 445-453, 1999.
- 4) 田中ら：粒状貨物による倉内圧の実験的検討—

- その2 粒状貨物荷重の設定法について一, 日本造船学会論文集, 2022巻, 192号, pp. 713-721, 2002.
- 5) 藤ら: 個別要素法および有限要素法による連成解析を適用した鉱石圧推定手法に関する研究, 日本船舶海洋工学論文集, 28巻, pp.63-74, 2018.
 - 6) Handy: The Arch in Soil Arching, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (3), 302-318, 1985.
 - 7) Terzaghi et al.: *Soil Mechanics in Engineering Practice Third edition*, Wiley-Interscience, 100-141, 1996.
 - 8) Ali et al.: Particle-scale insight into soil arching under trapdoor condition, *Soils and Foundations*, 60 (5), 1171-1188, 2020.
 - 9) Yanagimoto et al.: Numerical investigation of dry bulk cargo load during ship vertical motion, *Ocean Eng.*, 266 (3), 112970, 2022.
 - 10) O'Sullivan: *Particle Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective*, CRC Press, 2011.
 - 11) 鶴田ら: 個別要素法を用いた横方向加振時の粒状貨物荷重に対する壁-粒子間摩擦係数影響の評価, *土木学会論文集*, 80巻 (2024) 15号, 23-15025, 2024.
 - 12) Hirano et al.: Experimental investigation of the effect of granular arching under trapdoor condition on the load acting on the bottom plate, *10th Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies Forum*, C-7-01, pp.1-9, 2023.
 - 13) Peters et al.: Characterization of force chains in granular material, *Phys. Rev. E.*, 72, 041307, 2005.
 - 14) 渡辺: 鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリート 設計計算入門/23, *コンクリート工学* 14巻 (1976) 4号, pp.64-72, 1976.
 - 15) Makarov and Kalinovsky: Methods of regulating thrust in design of arch bridges, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 451 (2018) 012054, 2018.