# 固体接触による船体荷重発生メカニズムの研究(粒状貨物)

構造強度部 \*田中 義照、佐久間正明、安藤 孝弘

## 1 まえがき

本研究は、ばら積み貨物船あるいは鉱石運搬 船の貨物倉に積載した石炭、鉄鉱石等の粒状貨 物が船体運動により加速度を受けるとき、その 慣性力が船体構造に荷重として作用するメカニ ズムを明らかにするため、重点基礎研究「固体 接触による船体荷重発生メカニズムの研究」に おいて、平成12年度に実施した。

ばら積み貨物船の貨物倉内底板あるいは船側 外板を模擬した防撓板模型(パネル、防撓材の 板厚および防撓材間隔は、40,000 トン級のばら 積み貨物船の約 1/3 スケール)を製作し、防撓 板上に積載した乾燥砂の押込みによる面外曲げ 実験を実施した。パネルおよび防撓材において 計測されたひずみ応答を参照して、有限要素法 (FEM)を用いた逆解析により押込み荷重発生メ カニズムをシミュレートした。

## 2 実験

#### 2.1 実験方法

## 2.1.1 防撓板模型

防撓板スパン方向の圧力分布の非一様性(パ ネルおよび防撓材に発生する押込み圧力の分担 比)のパネル剛性の影響を検討するため、パネ ル部の板厚を変えた防撓板模型を3体製作した (模型1~3とする)。模型の形状および寸法を 図-1に示す。使用材料は軟鋼(SS400)で、 材料の機械的性質を表-1に示す。 2.1.2 実験装置および載荷用治具

実験は構造強度部の 500 トン大型構造物試験 装置で行った。防撓板模型は試験機ベッドに支 持治具を介して固定するとともに、模型上に乾 燥砂を積載するための槽(深さ1 m)を設置し、 試験機クロスヘッドに取り付けた剛な負荷治具 により乾燥砂を防撓板模型に押し付ける。模型



tp=8.75(模型1),5.83(模型2),3.10(模型3)

図 - 1 模型の形状および寸法

表 - 1 材料の機械的性質

板厚	降伏応力	引張強度	ヤング率	使用部材	
mm	MPa	MPa	GPa		
8.75	272	428	212	模型1のパネル、横桁	
5.83	319	434	213	模型 2 のパネル	
4.44	264	414	204	防撓材	
3.10	291	437	209	模型 3 のパネル	



図 - 2 模型の設置状況

および治具の設置状況を図 - 2 に示す。

# 2.1.3 供試砂の性状

実験には、嵩比重 1.47、平均粒径 0.38mm、安 息角 33deg、塗装鋼板との壁面摩擦角 30deg の 乾燥砂を使用した<sup>1)</sup>。

# 2.1.4 計測項目および計測方法

押込み実験においては、防撓材の縦曲げひず み4点(S1~S4)、パネルの曲げひずみ3点(P1 ~P3)、試験機ロードセルによる全体荷重、お よび、クロスヘッド変位をサンプリング周波数 50Hz でデジタル集録したほか、圧力測定フィル ム(プレスケール)により防撓板上に発生する 圧力分布を記録した。防撓板の曲げひずみは、 パネルおよび防撓材とも4枚の1軸ひずみゲー ジによりブリッジを組み(模型のパネルおよび 防撓材の中央に発生する引張ひずみ、および、 端部に発生する圧縮ひずみの差が2倍の感度で 計測される)、各部材近傍に発生する平均的な押 し込み圧に対する曲げひずみ応答を計測する方 法を採用した。ひずみゲージ貼付位置および計 測点番号を図-3に示す。 2.1.5 水圧負荷実験

押込み実験に先立ち、各模型の水圧負荷実験







## 図-4 水圧負荷実験結果(模型1)

を行うとともに、水圧負荷時の FEM 計算を行 い、曲げひずみ応答を比較した。一例として、 模型1の計測値(Exp.)および計算値(Cal.)を 併せて図-4に示すが、両者の応答値は良く一 致しており(模型2、3も同様)後述する防撓 板の曲げひずみ応答値からの押込み圧力分布の 推定(FEM による逆解析)が可能であることが 確認された。

## 2.1.6 押込み実験方法

実験は図 - 2 に示すように満載した供試砂(約 1m<sup>3</sup>)の表面から圧縮荷重を負荷して防撓板を 曲げ変形させた。荷重の負荷速度は 0.14 mm/sec 以下の準静的負荷とし、無負荷 最大負荷 無 負荷を 4 回繰り返した。各模型について最大荷 重 Pmax を 98 kN および 196 kN とした 2 ケース ずつの実験を行った。

## 2.2 実験結果

2.2.1 全体荷重 - 変位関係

各押込み実験において計測された全体荷重と 押込み変位の関係を図 - 5 に示す。いずれの模 型においても、第1回負荷の全体荷重 - 変位関 係はほぼ同じ曲線をたどっており、押込み過程 の再現性を確認できる。また、最大負荷時の押 込み変位量を比較すると、パネルの板厚が薄い ほど変位が大きくなることがわかる。

## 2.2.2 防撓板の曲げひずみ応答

図 - 6 に各模型実験において計測された防撓 板の中央パネル P2 および防撓材 S2 の曲げひず み応答を全体荷重に対して示す。すべての部材 の曲げひずみ応答は、第1回目の負荷過程にお いて荷重とほぼ比例関係にある。また、繰返し 荷重によって生じる供試砂の締め固まり、およ び、壁面の摩擦力(鉛直方向下向き)により、 除荷時の残留変位(図 - 5)、および、部材の残 留ひずみは増加するが、その増分率は徐々に小 さくなっている。これらの結果から、供試砂の 押込み荷重繰返し過程においては、積み込み状 態から第1回負荷を受ける状態で、弾性的な荷 重 - ひずみ関係を示し、その後、除荷が発生す る(逆向きの慣性力を受ける)と、大きなヒス テリシス曲線を描いてひずみが減少する。これ らの曲線は、その負荷過程における最大押込み 荷重の大きさによりほぼ一様な曲線を描くため、 押込み荷重(慣性力)と部材に発生するひずみ 応答の関係を定式化することが可能となる。







図 - 5 全体荷重 - 変位関係



図 - 6 全体荷重 - 曲げひずみ応答関係

# 3 FEMによる押込み圧力の推定

3.1 計算方法

図 - 7 に示すように防撓板模型表面を4つの 領域に分割(対称性を考慮)し、各領域ごとに 均一な圧力 Qj(j=1,2,3,4)が生じるとき(領域 の幅は、Q1 を 140mm、Q2,Q4 を 220mm、Q3 を 30mm とした)、パネルおよび防撓材 S1(S4)、P1 (P3)、S2(S3)、P2 の曲げひずみ応答が Ri (i=1,2,3,4)であると仮定すると、両者の関係 は応答マトリクス Kij(i=1,2,3,4、j=1,2,3,4)を



図 - 7 FEM 計算における単位荷重負荷領域

用いて次式で表される。

{Ri} = [Kij]・{Qj} (i=1,2,3,4、j=1,2,3,4)
ここで、Kij は領域 j にのみ単位圧力が生じると
きの部材 i の曲げひずみ応答を示す。この応答
マトリクス[Kij]を FEM 計算によりあらかじめ
求め、[Kij]の逆マトリクス[Kij]<sup>-1</sup>を用いれば、
押込み荷重実験における各部材の曲げひずみ応
答値から、各領域に発生する押込み圧力{Qj}が
次式により計算できる。

 $\{Qj\} = [Kij]^{-1} \{Ri\}$  (i=1,2,3,4, j=1,2,3,4)

ー例として、模型1の応答マトリクス[Kij]は、 表-2に示すようになる。表より明らかなよう に、パネルの曲げひずみ応答はパネル上に作用 する圧力に、また、中央2本の防撓材 S2 およ び S3 の曲げひずみ応答はパネルと防撓材両方 の圧力に主に依存する。

3.2 押込み圧力分布の推定結果

前節で述べた方法により、実験各ケースにお ける押込み圧力分布を推定した結果を図 - 8 に 示す。最大荷重 196kN 時にパネルに発生する押 込み圧力はほぼ一様で各模型とも 0.08MPa 程度 であるが、防撓材 S2 (S3)上の領域に発生する 押込み圧力の最大値は、模型1では 0.12 MPa、 模型2では 0.18MPa、模型3では 0.21MPa に達 した。最大押込み荷重を受圧面積で除した公称 最大圧力 0.20MPa とこれらを比較すると、それ ぞれ、60 %、90 %、105 %である。また、これ らの防撓材上では除荷時に見かけ上、負の圧力 が残留する。これは、防撓材に比べて剛性の小 表-2 応答マトリクス(模型1)

	Q1	Q2	Q3	Q4
S1,S4	209.5	468.3	17.8	7.9
P1,P3	-2.6	423.9	2.1	1.5
S2,S3	23.0	440.4	111.0	455.9
P2	5.6	-13.6	1.3	438.5

# 注) 圧力 0.1 MPa あたりのひずみ× 10<sup>6</sup>







さいパネル上の領域により大きな押込み圧力が 残留するため、本推定に用いた粗い領域分割に よる逆解析では、防撓材上の領域に計算上、負 の圧力が現れると考えられる。このように防撓 材上に押込み圧力が集中する現象は、圧力測定 フィルムによる圧力計測結果からも確認されて おり、模型1で 0.10MPa、模型2で 0.15MPa、 模型3で 0.20MPa 程度であり(0.05MPa 刻みの 圧力換算マーク使用)、押込み圧推定結果と良い 相関があった。

#### 4 考察

今回の実験結果から、防撓板上に発生する押 込み圧力は防撓材上の領域で高く、パネル中央 部では低いことがわかった。また、模型1~3 での計測値を比較するとパネルの板厚が薄い模 型ほど押込み圧力の非一様性が高いことがわか る。このことは押込み圧力のスパン方向分布の 非一様性がパネルの板厚(剛性)の影響を受け ることを示している。図 - 9に防撓材上の領域 に発生する圧力 O3 とパネル上の領域に発生す る圧力 Q4 の比をパネル板厚に対して示す。図 よりパネルの剛性がある程度大きくなると押込 み圧の分担比は1に近づき、逆にパネルの剛性 が小さい領域では分担比がほぼ 2.6 となる。実 船で用いられる防撓板のパネルと防撓材の剛性 比はこの中間の領域であるため、剛性比を変え た模型実験をより詳細に行う必要がある。

また、粒状貨物による新造船の設計荷重、あ るいは、経年船の余寿命評価における荷重設定 では、これらの現象を考慮して、防撓材上に発 生する圧力をパネル上の圧力より高く設定する 必要があると考えられる。この際、上記のパネ ルと防撓材の剛性比を勘案したものであること が望ましいが、設計荷重の合理的な設定を行う ために、パネルの剛性の影響について今後更な



図 - 9 パネル板厚と押込み圧分担比の関係

る検討を行う予定である。

## 5 まとめ

ばら積み貨物船あるいは鉱石運搬船の貨物倉 を模擬した防撓板模型を製作し、乾燥砂を用い て押込み荷重実験を行い、以下の結論を得た。 1)供試砂の押込みによって防撓板に発生する 曲げひずみ応答は、押込み荷重と比例関係があ る(第1回目の負荷)。その後、除荷が発生する とヒステリシスループを描いてひずみ応答が減 少し、壁面の摩擦力および供試砂の締め固まり により各部材にはひずみが残留する。

2)防撓板模型の各部材に発生するひずみ応答の FEM 逆解析により、防撓板に発生する押込 み圧力分布の推定が可能である。

3)防撓構造に発生する押込み圧力分布は、防 撓材上で最大となるが、このスパン方向の押込 み圧力の非一様性はパネルの剛性に依存する。

### 参考文献

 田中義照他: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、第 186 号、pp.445
 ~ 453(1999).