

タイトル	自己昇降式作業台の浮体安定性に対する構造安定論の適用性
著者	當麻, 庄司; Toma, Shouji
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要(24): 1-15
発行日	2024-09-30

自己昇降式作業台の浮体安定性に対する 構造安定論の適用性

當 麻 庄 司*

Applicability of Structural Stability Theory to Floating Stability of Self-Elevating Platform

Shouji Toma*

要 旨

沖ノ鳥島において、栈橋として用いられる自己昇降式作業台（以後 SEP と称する）が 2014 年に浮体として移動中に転覆した。SEP の浮体としての特徴は長いレグ（4 本）により非常に高い重心をもっていること、矩形平面をもつために喫水は小さいこと等、一般の船舶とは大きく異なっている。通常、浮体の安定性は船舶算法のメタセンター高さや復原力曲線で評価されるが、ここではそれとは異なる構造安定論の適用性について検討する。構造安定論とはよく知られている長柱の座屈のように構造系の不安定によって構造物の変形が元に戻らないというものであり、浮体においては転覆を意味する。構造安定論は重心の高い杭打機やクレーン等、軟弱地盤上にある陸上構造物の転倒問題に用いられているが、SEP のように重心が高い浮体も同様な転倒メカニズムをもつことが考えられる。本論文では、その転倒メカニズムを SEP の浮体としての安定性評価に適用できるのか、その可能性を検討する。そのために、SEP のモデルによる転覆実験を実施し、その結果を構造安定論の構造モデルによって検討する。検討の結果、実験で求めた限界荷重は構造安定解析とよく一致し、構造安定論と船舶算法には共通性があることが分かった。そして、事故の起こった沖ノ鳥島 SEP の転覆メカニズムや SEP の安定条件についても、構造安定論による解析から考察する。

目 次

- | | |
|--------------------------|--------------------|
| 1. まえがき | 5.2 自由振動の固有周期 |
| 2. 構造安定論の構造モデル | 5.3 自由振動からの考察 |
| 3. 構造安定論と船舶算法の共通性 | 6. SEP の安定条件 |
| 3.1 SEP の構造モデルと回転ばね剛性の算定 | 7. 沖ノ鳥島 SEP の安定性評価 |
| 3.2 構造安定論と船舶算法の相反関係 | 7.1 安定性の考察 |
| 4. 模型実験 | 7.2 転覆のメカニズム |
| 4.1 実験計画 | 8. あとがき |
| 4.2 実験結果と考察 | 参考文献 |
| 5. 沖ノ鳥島 SEP の構造安定論による考察 | 付図 〈実験用模型と注水状況〉 |
| 5.1 実際値と理論値の比較 | |

キーワード：自己昇降式作業台、浮体安定、沖ノ鳥島 SEP、転倒模型実験、杭打機の転倒、転倒メカニズム

* 北海学園大学名誉教授
Professor Emeritus, Hokkai-Gakuen University
大起コンサルタント(株)
Taiki Consultant, Inc.

1. まえがき

自己昇降式作業台（Self-Elevating Platform, 以後SEPと称する）が2014年3月30日に沖ノ鳥島において浮上移動中に転覆した。図1は転覆前に傾斜している状態を示す¹⁾。このSEPはジャッキアップした後栈橋として使用される予定であった。SEPの構造的特徴は、長いレグにより浮体としては非常に高い重心をもっていること、大きな矩形平面とそれゆえに喫水は小さいこと等、一般の船舶とは大きく異なっている。通常、船舶の安定性は船舶算法によるメタセンター高さや復原力曲線で評価されるが、これによって評価することに疑問を呈し船舶算法を修正して重心高さの要素を考慮した安定性指標の提案もなされている²⁾。

図2は事故報告書¹⁾に記述された転覆に至るまでの時間経過を示す。それによると、SEP（栈橋）は現地で曳航用の台船上から引き出されて間もなく転覆しているが、その原因は流れによる揚力や波による回転エネルギーが動復原力を上回ったためとされている。そして、転覆する前にSEP上のクレーンを移動したことによって振動現象が生

じていたことが報告されている。このことは、動的効果が転覆に関連したことを示唆している。

ここでは、造船工学的な船舶算法とは異なる構造安定論からの評価を試みる。構造安定論とは構造系の不安定によって構造物の変形が元に戻らないというものであり、浮体においては転覆に至ることを意味する。構造不安定の代表的な例として長柱の座屈があるが、筆者はこれまで重心の高い杭打機やクレーン、またジャッキの転倒等様々な転倒現象にも同様な構造モデルが適用できるとして研究を進めてきた^{3)~7)}。SEPのように重心が高



図1 転覆前の沖ノ鳥島 SEP¹⁾

時刻	6:40~7:10	7:11~7:22	7:23~7:24	7:25~7:29	7:30
作業	<ul style="list-style-type: none"> 6:30頃、台船沈降開始 6:40頃までに、台船からの振れ止めライン破断 	<ul style="list-style-type: none"> 7:10、クレーンを右舷側に移動 	<ul style="list-style-type: none"> 7:23までに、小型船により、振れ止めラインを復旧 	<ul style="list-style-type: none"> 7:25以降、振れ止めラインを解除、栈橋引き出し作業を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 引き出し作業を継続
栈橋の動き					
栈橋の状態	<ul style="list-style-type: none"> 台船の沈降により、栈橋が徐々に浮上 クレーンが左舷側6.5mにあったことにより、重心が偏心して左舷側に約9度傾斜 	<ul style="list-style-type: none"> クレーンを右舷側約2.5m（推定）に移動したことにより、偏心は緩和され、左右に回転する運動を誘起 	<ul style="list-style-type: none"> 振れ止めラインの復旧以降、左側への傾斜を保持 	<ul style="list-style-type: none"> 左舷側に傾いた状態から、栈橋を引き出したため、流れによる抵抗力による転倒方向への回転エネルギーが発生 	<ul style="list-style-type: none"> 流れによる抵抗力、流れによる揚力、栈橋上に越波した水塊重量等の作用により転覆

（出典：沖ノ鳥島港湾工事事故についての調査・検討に関する中間とりまとめ¹⁾）

図2 SEP 転覆の経緯

い浮体は杭打機等と同様な転倒メカニズムをもつことが考えられ、本論文ではその適用の可能性を検討する。

杭打機やクレーン等の転倒は軟弱地盤で起こるため、転倒に抵抗する地盤耐力と回転ばね剛性の関係把握が難しかった。しかし、浮体の安定性の場合、浮力による復元モーメントが比較的明確であるため、構造安定論で問題となる回転ばね剛性の把握が容易である。ここでは、まず浮体としてのSEPの模型転倒実験を実施し、その実験結果を構造安定論により解析して適用性を検討する。したがって、ここでの浮体安定の研究結果は、これまで重機類の転倒問題において課題であった回転ばね剛性の問題を解決することにもなり、本論文は重機類の転倒メカニズムを扱った論文^{3)~7)}の検証にもなる。また、ここではSEPの安定条件の考察や沖ノ鳥島SEPの転覆メカニズムについても構造安定論による解析を行い、SEPの浮体安定問題への適用性について検討する。

2. 構造安定論の構造モデル

構造不安定による転倒は構造系そのものが不安定になることから起こるものであり、その基本原理は図3に示す安定曲面で説明することができる⁴⁾。すなわち、凹面上にボールがあればボール(変形)は元に戻るが、凸面上にあればボール(変形)は落ちて戻ることはない。凸面と凹面の境界が不安定になる限界値(中立)である。

よく知られている構造不安定の代表的な例は長柱の弾性座屈であるが、限界値を越えると曲げモーメントがゼロであっても部材は曲がる。同様に、軟弱地盤上の杭打機やクレーンも構造不安定になれば転倒モーメントがゼロでも転倒する。橋桁を支えるジャッキもその基盤構造が十分でない場合は転倒し、橋桁は落下する。このように、構造不安定において予測の難しい点は荷重と変形の

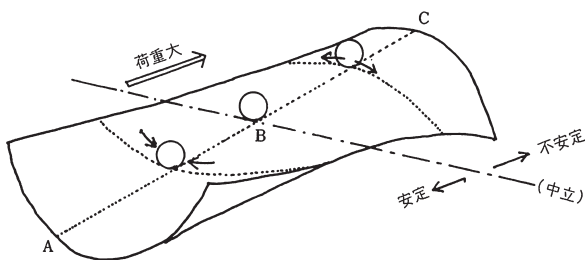


図3 安定性曲面

方向が異なることであり、そのことが盲点となって事故は多様な場面でみられる。

構造不安定現象には、重心が高いことと支持が軟弱であることの二つの共通点がある。このような構造は、不安定(転倒)に至る限界値(固有値)を有する。杭打機やクレーンの転倒がこの構造不安定に関連しているように^{3)~7)}、同様な特徴をもつSEPの浮体安定性に対しても構造不安定が関連しているのではないかと、というのが本論文の主眼である。

杭打機等の転倒問題に用いた構造安定論では、転倒メカニズムを“転倒モーメント型”と“構造不安定型”に分類し、構造不安定型はさらに“座屈転倒型”と“つり合い移行型”に分類している⁴⁾。転倒モーメント型では、堅固な地盤上において転倒モーメントが抵抗モーメントを上回ると転倒する。しかし、構造不安定型では軟弱地盤上の杭打機の構造モデルを図4のように単純化して考えている。すなわち、構造物を高さ L の剛体と仮定し、その上端に荷重 P が作用し、下端は転倒に対して回転ばね剛性 K_s で支持しているとする。この構造モデルには、不安定になる限界荷重(固有値、転倒荷重) P_{cr} が存在し、その値は次式で表される⁸⁾。

$$P_{cr} = K_s / L_{cr} \quad (1)$$

このように、図4に示す構造不安定型の転倒では、荷重が転倒荷重 P_{cr} に達すると転倒モーメントがゼロでも転倒する。一方、転倒モーメント型においては地盤を堅固($K_s = \infty$)であると仮定して転倒モーメントと抵抗モーメントの比較によって転倒安定性を評価する。そのため、事故調査では転倒モーメントの発生源に主眼が置かれる。し

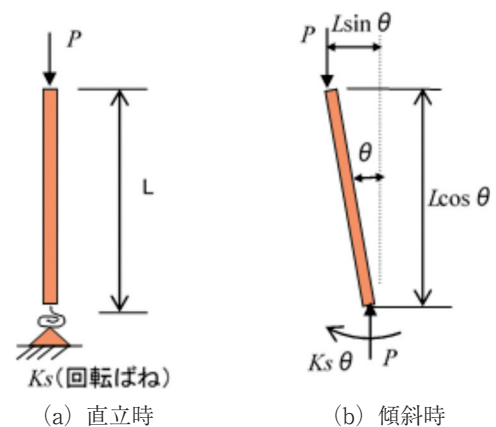


図4 構造モデル (構造安定論)

かし、現実の機械構造物の支持に完全堅固はあり得ないので、転倒モーメント型においても構造不安定型の影響を受けることになり、単に転倒モーメントと抵抗モーメントの比較だけでは解決しない。したがって、構造安定論では後述の安定条件で示すように、限界荷重（式(1)）と変位傾斜角の関係で安定領域を提案している⁷⁾。

浮体の安定性の場合、支持体が水であることから支持基盤が堅固ではない。したがって、転倒モーメント型による転倒は生じなく構造不安定型の転倒が起こる。浮体安定性の評価に用いられる船舶算法では、メタセンター高さ GM で荷重の大きさに対する安全性を考え、変位傾斜角に対しては復原力曲線で安全性を考えている。以下、現在 SEP の安定性評価に用いられている船舶算法とここで浮体の安定性に適用しようとする構造安定論の関係を考察する。

3. 構造安定論と船舶算法の共通性

3.1 SEP の構造モデルと回転ばね剛性の算定

図1のSEPを概観的に示すと図5のようになる。このSEPの浮上状態を、ここでは後述する実験模型の構成から図6に示す構造に置き換えることにする。同図に示すように、模型は下部のポンツーン、上部の重量調整用の水筒およびその中間にある高さ調整用スペーサーの3部分から成る。ここで、SEPの4脚は中央の一本に置き換えて簡略化する。さらに、構造安定論では解析上この構造を先述の図4に示す剛性棒-回転ばね系に単純化する。図4のように単純化された構造モデルは、1次モーメントが関係する静解析において

は全体の重心が一致している限り問題はない。しかし、動解析では2次モーメントが関係してくることから、4隅に配置された4本のレグを中央の1本に集約する簡略化は慣性力に相違が出てくる⁵⁾。

図6(b)は、構造モデルが傾斜した状態を示す。このとき、構造安定論では同図に示すように直立時の浮心 B を固定（支持点）として鉛直力と復元モーメントに置換するが、船舶算法では浮心は移動するとしてメタセンターとそれに伴う復元モーメント（復原と復元の違いに留意）を考える。すなわち、船舶算法では回転中心を浮心とは異なるとするが、構造安定論では固定して浮心にとる。このように支持点をもとの浮心に固定して考えると、図6の構造モデルは図4に示す剛性棒-回転ばねの構造系に単純化することができる。複雑な形状をもつ船体ではこの様な簡略化は大きな誤差をもたらすが、浮体が単純な矩形のポンツーンではその誤差は小さいと考えられる。

図6(b)に示す左右の浮力差 f から、復元モーメント（Righting Moment）は次式のように求められる。

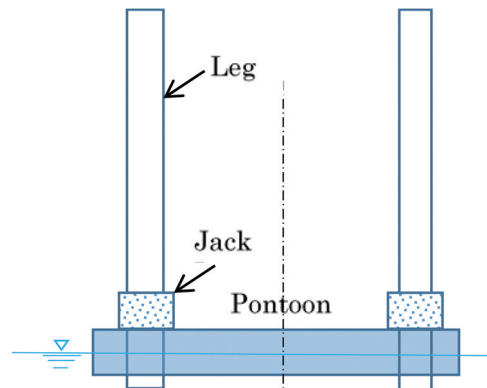


図5 SEPの概観

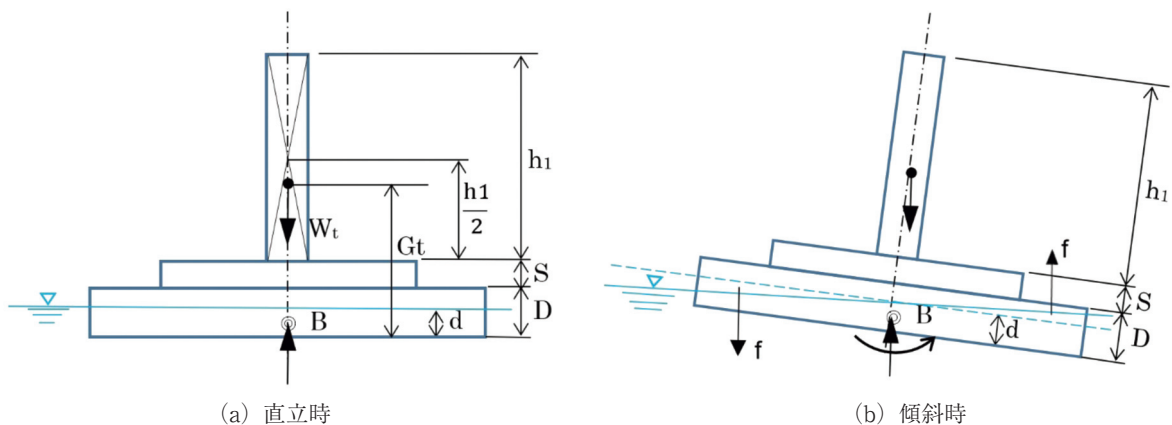


図6 SEPの模型構造

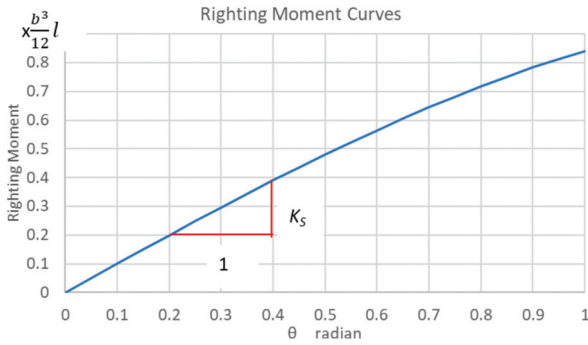


図7 復元モーメント図

$$M_R = \frac{2}{3} f b \cos \theta = \frac{b^3}{12} l \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 M_R = 復元モーメント、 f = 傾斜による浮力差、 b = SEPの幅、 l = SEPの長さ、 θ = 傾斜角

ここで、水の密度 = 1 g/cm^3 とすると、浮力 f はその部分の排水容積に等しくなる。式(2)から縦軸に復元モーメント、横軸に傾斜角をとってプロットすると図7のようになる。ただし、ここでは喫水深さが乾舷を越え復原力が大きく減少することは想定していないので、曲線は上がり続ける。式(1)において、限界荷重を求めるための回転ばね剛性 K_s は、図7の初期剛性を用いることおよび傾斜角 1 radian に対する復元モーメントという定義から、次式のようになる。

$$K_s = M_R'(\theta=0) = \frac{b^3}{12} l = I_y \quad (3)$$

ここに、 I_y = 喫水面の長軸に関する断面 2 次モーメント

以降、構造安定論による限界荷重の理論値を求める場合、上式から求められる回転ばね剛性 K_s を一定（線形）として式(1)に用いる。図4(b)の回転ばね剛性 K_s に式(3)を用いるとき、構造安定論の復元モーメント $M_R = K_s \theta$ は船舶算法の浮力による抵抗モーメント（Righting Moment） M_B に相当していることに留意されたい。

3.2 構造安定論と船舶算法の相反関係

前述のように、船舶算法では浮体の重量（荷重）に対する安定性をメタセンター高さ GM で判定するが、構造安定論では式(1)の限界荷重 P_{cr} およびそれに関連する荷重高さ L_{cr} と回転ばね剛性 K_s で判定する。以降、これら両者の関係を考察する。まず、メタセンター高さ GM はその定義から次の式で表される。ただし、ここでは水の密度を 1

g/cm^3 としているので、排水容積（ V ）と全体重量（ W_t ）は同じ値である。

$$GM = I_y / V - (G_t - d / 2) \quad (4)$$

ここに、 V = 排水容積（ $= W_t$ ）、 G_t = 浮体底面からの重心高さ、 d = 喫水深さ

一般の船舶では浮心が傾斜に伴って移動した I_y も変化するが、ここでは一定とみなす。そうすると、式(3)のように $K_s = I_y$ となり、(4)式は次のようになる。

$$\frac{L_{act}}{L_{cr}} = \frac{G_t - d / 2}{I_y / V} \quad (5)$$

ここに、 $L_{cr} = K_s / W_t$ （式(1)から求められる限界高さ）、 $L_{act} = G_t - d / 2$ （浮心から重心までの実距離）

上の2式から、船舶算法における GM と構造安定論における荷重高さとの関係を表す次式が導かれる。

$$GM = L_{cr} - L_{act} = L_{cr}(1 - L_{act} / L_{cr}) \quad (6)$$

また、式(6)から次の関係式が導かれる。

$$\frac{GM}{L_{cr}} + \frac{L_{act}}{L_{cr}} = 1 \quad (7)$$

あるいは

$$\frac{GM}{L_{cr}} + \frac{P_{act}}{P_{cr}} = 1 \quad (8)$$

ここに、 P_{act} や L_{act} は実際値であり、後述の実験においては実験結果の値を表す。式(7)あるいは(8)から、船舶算法の GM / L_{cr} と構造安定論の P_{act} / P_{cr} (L_{act} / L_{cr}) は相反関係にあることが分かる。

以上の関係について、それぞれ船舶算法を図8(a)に構造安定論を図8(b)に示す。式(6)をみると、船舶算法の GM は構造安定論における荷重の限界高さ L_{cr} と実際高さ L_{act} の差であることから、荷重高さに対する余裕度である。実際の荷重高さ L_{act} が限界荷重高さ L_{cr} に近づくほど GM 値は小さくなり、不安定度が増す。 GM 値がマイナスということは、構造安定論において実荷重 P_{act} が限界荷重 P_{cr} を超え不安定になっていることを意味している。限界高さ比 L_{act} / L_{cr} は限界荷重比 P_{act} / P_{cr} でもあるので式(7)は式(8)と同等である。

他方、船舶算法における GM 値は構造安定論における限界荷重（式(1)）に対する余裕度に通じるものである。しかし、 GM 値は両者の差をとることから無次元値での評価ができないので、通常の船体と SEP のようにタイプの違う浮体との比較

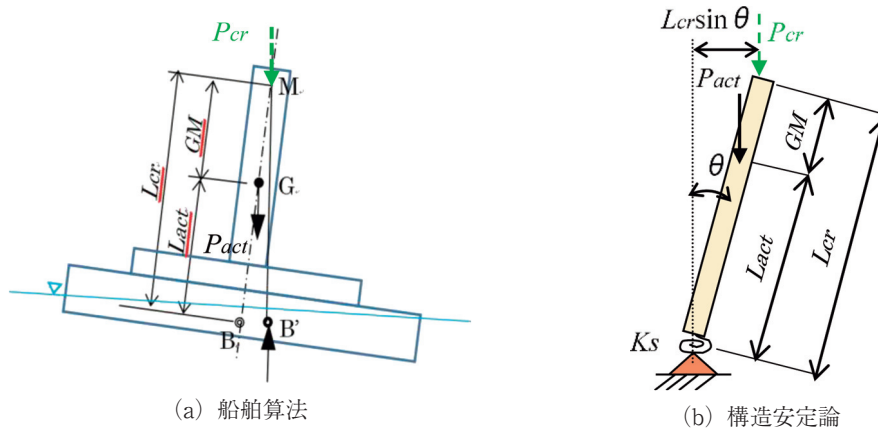


図8 構造安定論と船舶算法の関係

は難しい。一方、構造安定論では限界高さ比 L_{act}/L_{cr} や限界荷重比 P_{act}/P_{cr} を安定性の指標にとるので、構造形式が異なっても比較ができる。なお、式(6)~(8)の各式は後述の実験結果（表2および図9）からも確認することができる。

以上の結果、SEPのような箱型船体は傾斜の初期において、浮心の移動や喫水面積の変化が小さい場合は構造安定論を適用できると考えられる。

4. 模型実験

4.1 実験計画

杭打機やクレーンの転倒問題では式(1)を用いたが、同式がSEPの浮体安定にも適用できるかどうかを確認するため、模型実験を実施した。実験用模型は図6で示したように上部の水筒、下部の矩形船体（ポンツーン）およびその中間の重心位置調整用スペーサーの3部分からなり、これらの部品には市販のプラスチック製容器を用いた（付図参照）。各部分は表1に示すように、矩形船体（ポンツーン）に4種類（F1, F2, F3, F4）、スペーサーに3種類（S1, S2 (=F2), S3 (=FS3)) および水筒に2種類（P1, P2）をそれぞれ組み合わせてSEPの模型とした。各部分の容器寸法と重量を表1に記し、付図にそれらの写真を示す。模型実験は10ケース（A, B, C, D, E, F, G, H, I, J）について実施し、それらの詳細と実験結果を表2に示す。

実験は、付図の写真に示すように模型を水上に浮かべ、水筒に水を転覆するまで徐々に（準静的）に加えて限界荷重 P_{act} (= W_i) とその時の荷重高さ L_{act} を求める。一方、実験計測値の限界荷重 P_{act}

表1 模型構成パーツの諸元

Pontoon	BxLxD	A (cm ²)	W (g)	I _y or K _s
F1	163x240x39	391	126	8661
F2(S2)	110x197x37	217	105	2185
F3(S3)	132x197x52	260	122	3776
F4	158x226x91	357	260	7428
Spacer	D (cm)	-	W (g)	
S1	2	-	30	
S2(F2)	3.7	-	105	
S3(F3)	5.2	-	122	
Water Cylinder		-	W (g)	
P1	Φ62x192	30.2	61	
P2	Φ70x137	38.5	41	

と、式(3)の回転ばね剛性と式(1)により理論的限界荷重高さ L_{cr} を求めて L_{act} と比較する。次節では、このように転覆時の重心高さを実験の実測値と解析値で比較することにより、式(1)がSEPにも適用できるかどうかを検討する。

4.2 実験結果と考察

構造安定論の適用性は、表2内に示す模型実験の実測値 (L_{act}) と構造安定論による理論値 ($L_{cr}=K_s/W_i$) の比によって判断する。その比は $L_{act}/L_{cr}=1.0$ であるべきところ、誤差は5%以内（平均は約2%）でありよい一致を示しているといえる。これらのことから、図4の杭打機等の構造モデルや式(1)の理論値がSEPの安定評価にも適用でき、これに関連する研究^{3)~7)}がSEPの安定評価にも生かされることが分かる。

理論値では重心を点で考えているが、実験では水筒内の水を重りに用いているため自由表面に

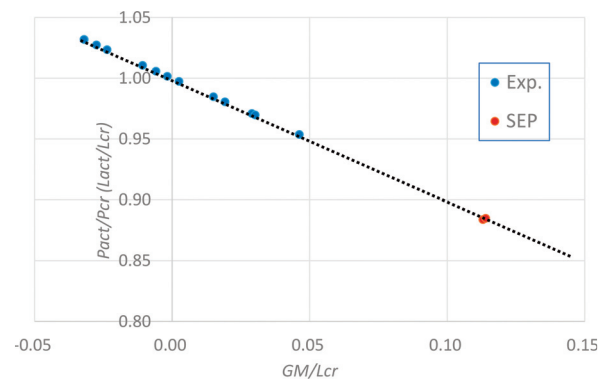
表2 模型実験の結果

Case	Pontoon	Spacer	Water Cylinder	Wn (gf)	Wt (gf)	Gt (cm)	d (cm)	Lact (m)	Lcr (m)	Lact/Lcr (Pact/Pcr)	Iy	GM=Iy/Wt-(Gt-d/2)	GM/Lcr
A	F1	S1+S3	P1	379	718	12.80	1.835	11.881	12.063	0.985	8661	0.182	0.015
B	F1	S1+S2	P1	437	776	12.42	1.984	11.425	11.161	1.024	8661	-0.264	-0.024
B'	F1	S1+S2	P1	430	769	12.31	1.966	11.329	11.263	1.006	8661	-0.066	-0.006
C	F1	S1+S2	P2	493	832	11.76	2.127	10.696	10.410	1.028	8661	-0.286	-0.028
D	F1	S2	P1	500	839	11.73	2.145	10.653	10.323	1.032	8661	-0.330	-0.032
D'	F1	S2	P1	488	827	11.55	2.114	10.491	10.473	1.002	8661	-0.018	-0.002
E	F1	S1	P1	546	885	10.73	2.262	9.598	9.786	0.981	8661	0.188	0.019
F	F2(S2)	0	P1	240	579	5.00	2.672	3.664	3.774	0.971	2185	0.109	0.029
G	F2(S2)	S1	P1	181	520	5.54	2.400	4.336	4.202	1.032	2185	-0.135	-0.032
H	F3(S3)	S2	P1	180	519	8.36	2.004	7.354	7.276	1.011	3776	-0.078	-0.011
I	F3(S3)	S1	P1	243	582	7.31	2.247	6.188	6.488	0.954	3776	0.300	0.046
J	F3(S3)	0	P1	314	653	6.87	2.521	5.608	5.783	0.970	3776	0.175	0.030
K	F4	S2	P1	248	587	13.44	1.644	12.622	12.654	0.997	7428	0.032	0.003
※ B', D'は再現実験			SEP NIKKEI ⁹⁾	V=1856 m ³	10.87 m	3.16 m	9.29 m	10.5 m	0.886	19466	1.19	0.114	

Wn=水の重さ, Wt=総重量, Gt=重心高さ(船体下端から), d=喫水深さ, Lact=重心と浮心の距離, Lcr=Ks/Wt, GM=メタセンター高さ

なっていることに相違がある。また、構造安定論における回転ばね剛性 K_s を一定と仮定しているが、船舶算法では復原モーメント (Restoring Moment) が傾斜の増大に伴い上昇することが示されており¹⁾、それらの影響が理論値と実験値の違いに現れていることが考えられる。これらの要因にもかかわらず誤差は非常に小さいといえる。

表2の実験結果に基づいて、図9にGM(船舶算法)を L_{cr} (構造安定論)で無次元化した GM/L_{cr} と L_{act}/L_{cr} (あるいは P_{act}/P_{cr})の関係を示すが、これらは線形の関係をもっていることが分かる。また、図9は式(7)および(8)を表している。実験結果は転倒時の値であり、 $P_{act}/P_{cr} > 1.0$ あるいは $GM/L_{cr} < 0$ は転倒を意味することから、これらの転倒条件の近辺に位置している。すなわち、船舶算法のGMがマイナスであることは構造安定論における荷重(重量)が限界荷重を超えることと同義である。これは、杭打機の転倒メカニズムの分類⁶⁾においては“座屈転倒型”に相当する。SEPの転倒にはこの他に“つり合い移行型”の転倒も深く関連していると思われる⁴⁾⁵⁾。そして、当然ながら支持基盤が剛体であることを前提とした“転倒モーメント型”は浮体の不安定にはあり得ない。また、図9中に参考のため沖ノ鳥島SEPの値もプロットしているが、上記の転倒範囲から若干離れて安全側にあることが分かる。すなわち、静的には安定にあるといえるが、その余裕度は非常に小さい。

図9 P_{act}/P_{cr} と GM/L_{cr} の関係

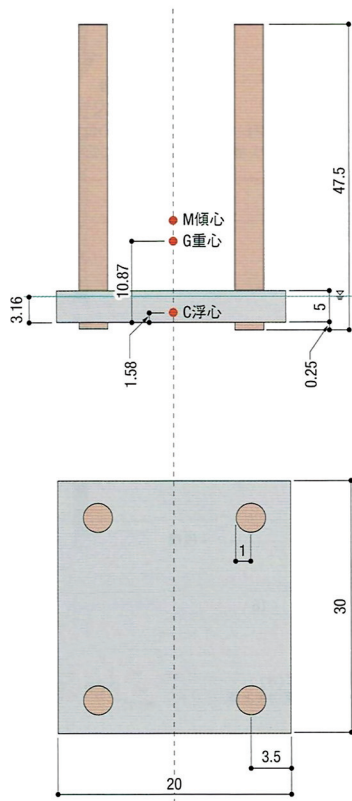
5. 沖ノ鳥島 SEP の構造安定論による考察

5.1 実際値と理論値の比較

転覆した沖ノ鳥島 SEP の諸元と安定性に関する諸数値は、事故を報じた記事⁹⁾から転載した表3に示されている。SEPが転覆した当時のこれらの諸数値については表2の下端にも示されている。それによると、構造安定論によって求められた荷重高さ比が $L_{act}/L_{cr} = 0.886$ となる。ここに、実際値 $L_{act} = 9.29$ mは表3の重心高さGから浮心高さCを引いたものであり、理論値 L_{cr} は式(1) $L_{cr} = K_s/W_t (19466/1853 = 10.5$ m)から静的に求めたものである。

表2の模型実験結果では、各実験ケースの転倒時はほぼ $L_{act}/L_{cr} \approx 1.0$ となっているが(図9参

■ 施工時の安定性検討



国土交通省の「沖ノ鳥島港湾工事事故についての調査・検討に関する中間とりまとめ」や日本港湾協会の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（2007年版）を参考に計算した

表3 沖ノ鳥島 SEP の諸元と安定性

記号	諸元	数量	単位	備考
ℓ	栈橋長さ	30	m	中間とりまとめ参照
d	栈橋幅	20	m	中間とりまとめ参照
h	栈橋高さ	5	m	中間とりまとめ参照
w	栈橋重量	739	t	中間とりまとめ参照
L	レグ長さ	47.5	m	中間とりまとめ参照
L'	レグ下端はみ出し長	0.25	m	中間とりまとめ参照
r	レグ半径	1	m	中間とりまとめ参照
w_1	レグ1本当たりの重量	172	t/本	中間とりまとめ参照
w'	レグ4本の重量	688	t	$w_1 \times 4$
$w+w'$	栈橋とレグの重量	1427	t	$w+w'$
w''	栈橋上の搭載物の総重量	426	t	中間とりまとめ参照
W	全重量(重力)	1853	t	$w+w'+w''$
G	重心(栈橋下端部からの距離。上方向が正)	10.87	m	$(w' \times (L/2 - L') + w \times h/2 + w'' \times h) / W$
ρ	海水密度	1.023	t/m ³	中間とりまとめ参照
D	喫水	3.16	m	中間とりまとめ参照
C	浮心(栈橋下端部からの距離。上方向が正)	1.58	m	$D/2$
V	排水容積	1856.29	m ³	$\ell \times d \times D - r^2 \times \pi \times D \times 4$
I_1	栈橋の断面2次モーメント	20000	m ⁴	$\ell \times d^3 / 12$
I_2	レグの断面2次モーメント	133.52	m ⁴	$\pi \times (2r)^2 / 4 \times \ell + r^2 \times \pi \times (d/2 - 3.5)^2$
I	喫水面の長軸に対する断面2次モーメント	19465.93	m ⁴	$I_1 - I_2 \times 4$
GM	傾心と重心の距離(上方向が正)	1.19	m	$I/V - (G - C)$
喫水に対する割合		38	%	$GM/D \times 100$

傾心が重心よりも上にある場合は、重力によって傾いた方向とは逆の復原力が作用して浮体は戻ろうとするため安定

傾心と重心の距離を喫水深で除した割合は、安全のため5%以上にすることが望ましい。それを大きく上回っている

(出典：設計と異なる仮設計画があだに、日経コンストラクション⁹⁾)

照), 沖ノ鳥島 SEP では実際値 L_{act} の方が理論値 L_{cr} よりも小さく転覆には若干の余裕がある。図2に説明されているように、当然ながら現場では潮流や波等の影響を受けていることも影響していると思われる¹⁾。

5.2 自由振動の固有周期

沖ノ鳥島 SEP の事故報告書¹⁾によると, SEP は転覆前に約 90~100 秒周期のローリングをしていたとのことである。そこで, 次に沖ノ鳥島 SEP の固有周期を構造安定論の動解析から求める。動解析における構造モデルは, 図10に示すように SEP 全体の重量 W_i (kgf) を質量の分布状態から浮体であるポンツーン M_0 (kg), レグ m (kg/m) および搭載物 M_I (kg) に分類して考える⁵⁾。この構造モデルが初期傾斜角 θ_0 をもち, それが瞬間的に解放されると自由振動するが, その場合の傾斜角の時間変化 $\theta(t)$ は減衰や初期角速度がないと

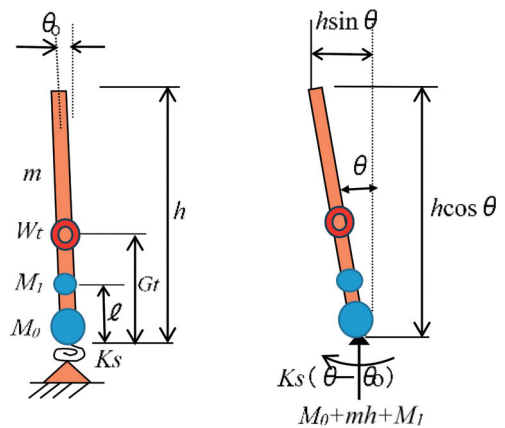


図10 動解析の質量分布

すれば次式で与えられる⁵⁾。

$$\theta(t) = (\theta_0 - \theta_c) \cos(\omega t) + \theta_c \tag{9}$$

ここに, θ_0 = 初期傾斜角, θ_c = 振動の中心角, ω = 傾斜角速度

SEP の自由振動解析において, 式(9)は θ_c を中

表4 沖ノ鳥島 SEP の固有周期

K_s	19465 tfm	
全体重量	1853 tf	
全体重心	9.29 m	
浮心（下端より）	1.58 m	
ポンツーン重量	739 tf	
ポンツーン重心	0.92 m	
搭載物重量	426 tf	
搭載物重心	3.92 m	
レグ重量	14.5 tf/m	
レグ長さ	47.5 m	
レグ重心	21.92 m	
慣性モーメント	692,521 tm ²	2次 M
1次モーメント	17214 tfm	< K_s
傾斜角速度 ω	0.178 rad./sec	
固有周期	35 sec	

※重心は浮心からの距離

心に振幅は $(\theta_0 - \theta_c)$ であることを表している。
そして、それらの算定式は次のように与えられる。

$$\theta_c = \frac{\theta_0}{1 - P_{act}/P_{cr}} \quad (10)$$

$$(\theta_c - \theta_0) = \frac{\theta_0}{1 / \left(\frac{P_{cr}}{P_{act}} - 1 \right)} \quad (11)$$

また、式(9)中の傾斜角速度 ω は次式から求められる。

$$\omega = \sqrt{\frac{K_s - Q}{I}} \quad (12)$$

ここに、 Q =浮心（支持点）に対する1次モーメント、 I =浮心（支持点）に対する2次モーメント

表3のデータと図10の構造モデルに基づいて、式(12)からSEPの傾斜角速度 ω を求めると表4の下部に示すように $\omega = 0.178$ rad./sec となる。この傾斜角速度から固有周期を求めると35秒となり、事故報告書¹⁾に記載されている実測値90~100秒よりはかなり小さい。その原因として、SEPが現実に海上にある場合に比べ、図10のような簡単な構造モデルに置き換えたことにあると思われる。特に、支持点を単純に浮力差だけによる回転ばねに置き換えているのに対し、実際に幅をもつ矩形船体が回転する場合は水の動的な抵抗による影響も考えられる。

表4の算定において、1次モーメントは図10に示す全体の重量 W_i (ton·f) と重心で求めているのに対し、慣性（2次）モーメントは前述のよう

に重量分布の異なるポンツーン、レグおよび搭載物に分類して求めている⁵⁾。表4における慣性モーメント (ton·m²) と1次モーメント (ton·f·m) の単位の違いに注意を要する。

さらに、初期傾斜角速度 $\omega_0 \neq 0$ の場合、傾斜角の時間変化 $\theta(t)$ は次式のようになる⁵⁾。

$$\theta(t) = \sqrt{(\theta_0 - \theta_c)^2 + (\omega_0/\omega)^2} \sin(\omega t + \delta) + \theta_c \quad (13)$$

ここに、位相差 δ は次式で表される。

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\theta_0 - \theta_c}{\omega_0/\omega} \right) \quad (14)$$

当然ながら、この時の振幅は初期傾斜角速度がない場合に比べて大きくなる。沖ノ鳥島SEPの転覆にはこの影響も考えられ、この点について次に考察する。

5.3 自由振動からの考察

ここでは、沖ノ鳥島SEPの転覆過程を構造安定論の動解析から考察する。図11(a)は、初期傾斜角速度 $\omega_0 = 0$ の場合の式(9)によるSEPの自由振動と転覆時の実測傾斜角を比較したものである。青点の理論値は事故報告書¹⁾から自由振動の周期を95秒として式(9)から算定したものであり、図中の赤点は計測された転覆時傾斜角の時間的変化を示している。そして、転覆直前に台船から引き出された時の傾斜角は左舷側約8度(0.14 rad.)であったとされており、これを式(9)における振動の初期傾斜角 θ_0 にとり、またこの時の静的つり合い傾斜角1.6度(0.0279 rad.)を振動の中心角 θ_c にとっている。自由振動における中心角が静的つり合い傾斜角に等しいことは、杭打機の動解析において求められている⁵⁾。

図11中に、沖ノ鳥島SEPが不安定になる傾斜角 $\theta_u = 10.9$ 度(0.19 rad.)を示す(後述の図15復原モーメント曲線を参照¹⁾)。図11(a)から、SEP転覆時の傾斜角と自由振動の解析結果とは振動の初期挙動においては良い一致をみているが、自由振動だけでは転覆角度(安定限度角 θ_u)に達していないことが分かる。このことは、先述の図9において構造安定論の転倒条件に達していないことと整合している。

次に、図11(b)は何らかの原因により初期傾斜角速度 ω_0 が生じた場合について、仮に $\omega_0/\omega = 0.2$ として式(13)をプロットしたものである。この場合は、振幅が大きくなり安定限度角 θ_u を超えて転

覆する。初期傾斜角速度が生じる原因については、波浪や潮流の影響、曳船のロープの引っ張り力あるいはその解放、またSEP底面の台船上面との接触等、様々な要素が考えられる。また、前述のようにレグ4本を中央の1本に単純化した影響により慣性力が過小評価されていることも考慮する必要がある。

ここで、図11(b)の振動曲線は式(13)から算出される曲線の一部を切り取ったものであることを断っておく。以上、様々な仮定と簡略化を前提としながらも、SEPの転覆要因として構造安定論における自由振動挙動が関係していることが読み取れる。

6. SEPの安定条件

ここでは、SEPが安定であるための条件を検討する。杭打機等で用いた図4の構造モデルがSEPにも適用できるとすれば、SEPの安全性に関しても杭打機等の安全基準の検討⁷⁾で示した図12(静解析)が適用できると考えられる。図12中の斜線は、荷重-初期傾斜角関係における転倒(安定)条件であり、次式で表される。

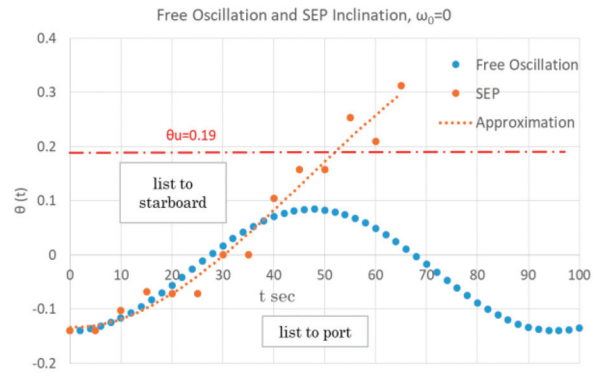
$$\frac{P_{act}}{P_{cr}} + \frac{\theta_0}{\theta_u} < 1.0 \tag{15}$$

あるいは

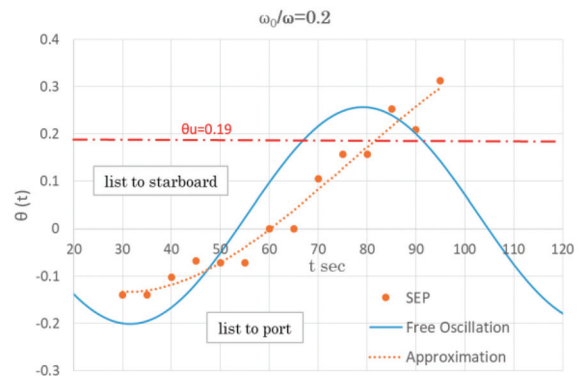
$$\frac{L_{act}}{L_{cr}} + \frac{\theta_0}{\theta_u} < 1.0 \tag{16}$$

ここに、 θ_0 は図10の構造モデルに示す初期傾斜角(荷重がない時の傾斜角)、 θ_u は船舶算法における復原モーメント(Restoring Moment)が最大値になるときの転倒傾斜角(転覆傾斜角)であり、SEPの傾斜角がこれよりも大きくなると不安定になる(後述の図15を参照のこと)。浮体が安定であるためには、図12において荷重と初期傾斜角の関係がこの斜線の内側領域(三角形内)でなければならない。

縦軸の浮体重量(無次元値)が大きいと構造不安定さが増すため、上部の着色部(黄色)は安定性が低く、設計上の不適切部とみなすことができる。ここでは、杭打機の場合の例として $L_{act}/L_{cr} < 0.6$ を安全基準としている⁷⁾。SEPのように重心の高い浮体を式(15)に基づいて図12上にプロットすると、不安定な縦軸上部に位置することになる。前述の転倒実験結果の表2は、図12上では図9でみたように縦軸上部の $P_{act}/P_{cr} = 1.0$ 付近



(a) $\omega_0=0, T=95$ 秒



(b) $\omega_0 \neq 0, T=95$ 秒

図11 転覆時の傾斜角と自由振動との比較

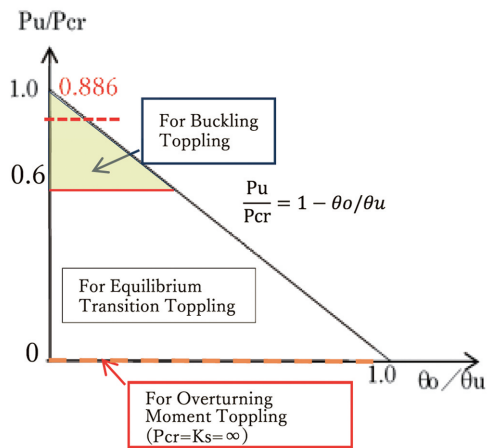


図12 荷重に対する安定条件(静解析)

に集まる。また、後述するように沖ノ鳥島SEPの場合は $P_{act}/P_{cr} = 0.886$ と算定されるので、これを図12中に示すとかなり上部に位置する。

一方、通常の船舶の場合は比較的安定な中央付近に位置すると考えられる。重心が低い通常の船体は、 P_{cr} が大きい(P_{act}/P_{cr} が小さい)ので安定

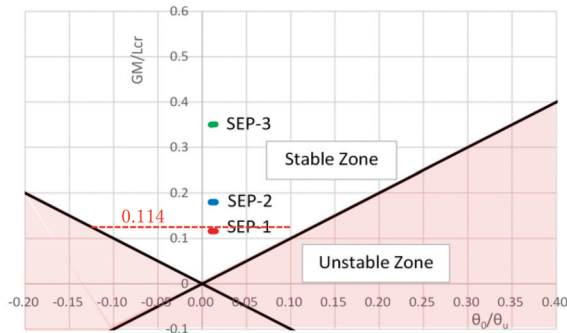


図 13 SEP の安定例

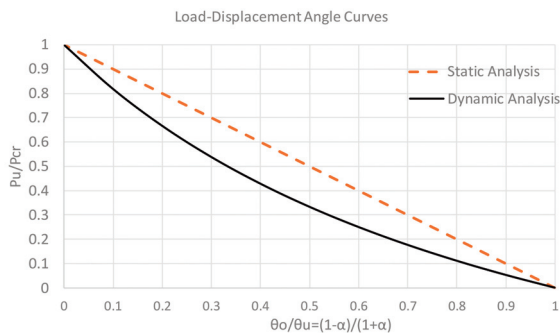


図 14 荷重に対する安定条件⁷⁾

性は図 12 の横軸上近くに位置することになるが、浮体の場合は支持基盤が水なので剛 ($K_s = \infty$) であることはあり得ない。したがって、SEP の場合構造安定論からの縦軸上の限界荷重（船舶算法では GM ）に対する不安定性と横軸上の転倒傾斜角との両面から安定性を論じられなければならない。すなわち、構造安定論における“つり合い移行型”の転倒⁴⁾を考えることになる。

荷重に対する安定条件式(15)を浮体安定評価のメタセンター高さ GM と傾斜角関係との安定条件に置き換えると、式(16)と式(6)を用いて次式が導かれる。

$$\frac{GM}{L_{cr}} > \frac{\theta_0}{\theta_u} \quad (17)$$

図 13 に式(17)の安定条件を図示するが、縦軸に GM をとり、横軸は左右対称に浮体の傾斜角をそれぞれ無次元化して示している。 GM のマイナスは P_{act} が P_{cr} を超えた不安定を意味する。図 13 において、縦軸の GM/L_{cr} が大きいほどまた横軸の初期傾斜角 θ_0/θ_u が小さいほど、安定性が大きい。杭打機（構造安定論）の安定条件式(15)は SEP（船舶算法）の安定条件式(17)と同等であり、したがって図 13 は図 12 と同等であるが、両者は相反関係にある。沖ノ鳥島 SEP の安定性指標は、表

2 の下端および表 3 に示されている。それらは、図 12 に構造安定論の指標 $L_{act}/L_{cr}(=P_u/P_{cr})=0.886$ そして図 13 に船舶算法の指標 $GM/L_{cr}(=1-L_{act}/L_{cr})=0.114$ (点 SEP-1) と示されている。(図 13 中の SEP-1, 2, 3 については後述する。)

図 14 は、軟弱地盤上にある杭打機等の陸上構造物に対して、動解析による結果を含めた安定条件を示している⁷⁾。すなわち、図 14 は図 12 の静解析の安定条件に動解析の結果を重ねたものである。図 14 中の点線で示す静解析に対して、動解析では実線で示すように安定範囲が狭くなる。ただし、図 13 の動解析は杭打機に対する結果であり、SEP のようにより慣性力の影響が大きいと思われる場合は図 13 の動解析結果よりもさらに安定条件が厳しくなることが考えられる。

7. 沖ノ鳥島 SEP の安定性評価

7.1 安定性の考察

沖ノ鳥島 SEP の場合、建設現場で搭載物が追加され荷重が大きくなっていったことが報告されている¹⁾。もしこの追加の搭載物がなかったならば、図 12 の縦軸の荷重値が小さくなる一方、図 13 の GM 値が大きくなり安定化する方向にある。図 13 に、沖ノ鳥島 SEP の安定性に関する 3 つの計算例を示している。SEP-1 は表 2 の数値をとったものであり、SEP-2 は搭載物重量を除去した場合、SEP-3 は SEP-2 からさらにレグの重心を 5 m 下げた場合である¹⁾。このとき、初期傾斜角は $\theta_0/\theta_u=0.01$ と仮に小さくとっている。沖ノ鳥島 SEP で転覆前に観測されている左舷側への傾斜角 8 ~ 9 度は転倒傾斜角 $\theta_u=10.9$ 度にかなり近く、危険な範囲にある（図 15 参照）。

図 13 から、縦軸の GM 値が大きくなることによって転倒に対する安定性が比例して大きくなるのが数値的に把握できる。このように、 GM 値だけではなく、図 13 の安定条件図を用いると SEP の安定性を荷重と変位角の両面から評価ができる。

図 15 は沖ノ鳥島 SEP の船舶算法による復原モーメントを示す¹⁾。復原モーメント M_R (Restoring Moment) は、重力による転倒モーメント M_G (Overturning Moment あるいは Gravity Moment) と浮力による抵抗モーメント M_B (Righting Moment あるいは Buoyancy Moment)

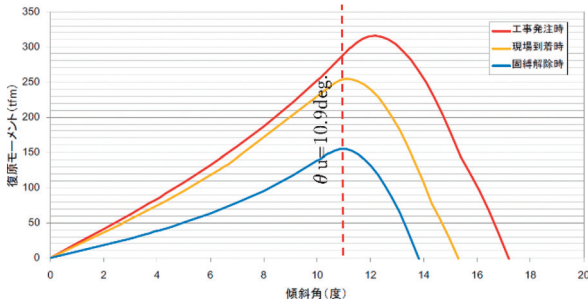


図15 沖ノ鳥島 DEPの復原モーメント¹⁾
(船舶算法)

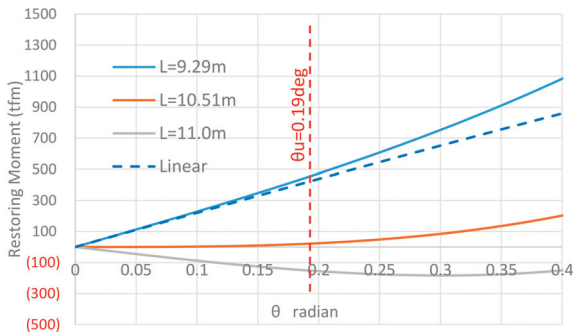


図16 沖ノ鳥島 SEPの復原モーメント
(構造安定論)

の和である。そして、この浮力による抵抗モーメント M_B は、構造安定論の回転ばねによる復元モーメント (Righting Moment) $M_R = K_s \theta$ に相当する (ここで、復原と復元の違いに注意)。

沖ノ鳥島 SEPの安定性図15は、復原モーメントが消失するまでの範囲を示したものであるが、それぞれ上から工事発注時、現場到着時および固縛解除時 (転覆時) である。構造安定論における安定限界角 (または転倒傾斜角) θ_u は、荷重-変位角関係においてそれ以上傾斜が大きくなると不安定 (転覆) になる限界角、すなわち図3安定性曲面における中立を意味している。これを、船舶算法の復原モーメント-傾斜角関係図15で見ると、復原モーメントが右下がり (不安定) になる時の傾斜角に相当し、沖ノ鳥島 SEPのこのときの傾斜角は $\theta_u = 10.9$ 度 (0.19 rad.) であることが分かる。

構造安定論において、図4 (b)の傾斜した構造モデルの力のつり合い式は次のようになる⁸⁾。

$$K_s \theta - PL \sin \theta = 0 \quad (18)$$

上式の第1項は復元モーメント (Righting Moment) であり、第2項は重力による転倒モー

メント (Gravity Moment) である。このときの限界荷重 P_{cr} (転覆荷重、式(1)) あるいは限界高さ L_{cr} は、上式から導かれたものである⁸⁾。今、両者の差である構造安定論の復原モーメント (Restoring Moment) を M_s とすると、次式になる。

$$M_s = K_s \theta - PL \sin \theta \quad (19)$$

式(19)を用いて、沖ノ鳥島 SEPの M_s を算定すると図16に示すようになる。同図には、 $L = 9.29$ m $< L_{cr}$ 、限界値 (中立値) の $L = 10.5$ m $= L_{cr}$ として $L = 11.0$ m $> L_{cr}$ の3ケースを示す。また、参考のため同図中に沖ノ鳥島 SEPの初期傾斜角から線形 (点線) とした場合の M_s を示すが、これをみると各々 $L < L_{cr}$ の場合は初期傾斜角 (K_s 値) が正、 $L = L_{cr}$ はゼロそして $L > L_{cr}$ は負であることが分かる。図15の沖ノ鳥島 SEPの $L = 9.29$ mの復原モーメント曲線は、傾斜角の増大に伴い θ_u までは上昇し、その後下降して不安定になる。一方、図16 (構造安定論) の場合 SEPの傾斜によって喫水が乾舷を越えることは想定していないためどこまでも上昇を続けて行く。このことから、船舶算法による復原モーメント図15からは限界傾斜角 θ_u を求めることができるが、構造安定論の復原モーメント図16からはできない。なお、沖ノ鳥島 SEPについて、図15と図16の復原モーメントの値を比較すると大きな違いがあるが、その原因は残念ながら不明である。

7.2 転覆のメカニズム

沖ノ鳥島 SEPの転覆過程について、事故報告書¹⁾に詳細な記述があり、転覆の原因は流れと波浪等の外力による回転エネルギーが動復原力を上回ったためとされている (図2参照)。ここでは、これとは別の構造安定論の視点から考察してみる。

図17は、剛体-回転ばね系の構造モデル (図4) の静解析による荷重-変位角曲線であり、静的なつり合い状態を表している⁴⁾。図中の各曲線は、異なる初期傾斜角 (荷重がゼロ時の傾斜角) をもつ場合の荷重の増大に伴う変位角の変化を表している。そして、この静的なつり合い曲線は動解析 (式(9)) では振動の中心を表すことになる⁵⁾。

図17に示す2本の矢印線は、ある重量 (赤線は $P/P_{cr} = 0.35$ 、緑線は $P/P_{cr} = 0.6$) をもつ SEPが傾斜角 $\theta_0/\theta_u = 0.05$ から瞬間的に傾斜角が θ_c まで

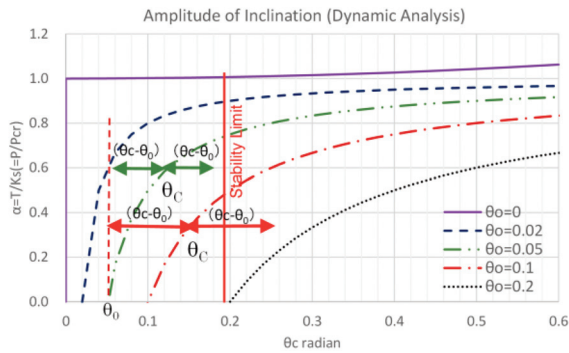


図 17 動解析による振幅

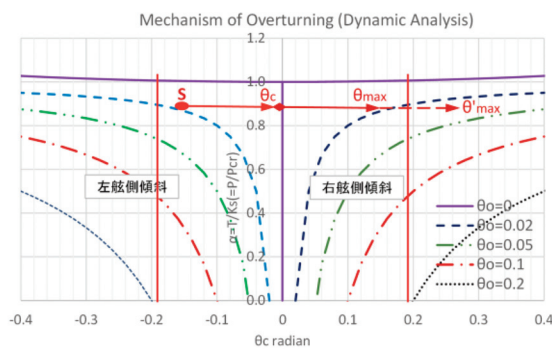


図 18 SEP の転倒メカニズム

増大した時の振動状況を表している⁶⁾。すなわち、もし減衰がなければ初期傾斜角と振動の中心角の差 ($\theta_0 - \theta_c$) に等しい大きさがその時の慣性力による振動幅となる。このとき、図 17 の緑線は安定域内で振動するが、赤線に示すように振動の最大傾斜角が転倒傾斜角 (Stability Limit) θ_u を超えれば転倒 (転覆) する。

このことを前提に、図 18 に沖ノ鳥島 SEP の転覆過程を推察してみる。なお、図 18 での荷重 - 変位傾斜角曲線は図 17 と同じであるが、以下の考察において直接的な関係はない。沖ノ鳥島 SEP (荷重 $P/P_{cr} = 0.886$) の転覆過程において、事故報告書¹⁾ によれば当初は台船との接触や振れ止めラインにより左舷側に約 9 度 (0.16 rad.) 傾いた状態で保持されていた。その時の状態を図 18 の点 S で示す。それが台船から引き出された時、これらの保持力を失ってバランスが崩れ新たなつり合い状態 (振動の中心である図 18 の点 θ_c) に、すなわち事故報告書¹⁾ によれば左舷側傾斜 1.6 度に移行しようとした。このとき、図 17 で説明したように慣性力のためにつり合い状態 (θ_c) を通り過ぎて右舷側の振動の最大傾斜角 θ_{max} ま

で傾斜しようとする⁶⁾。この振動の開始時において、上記保持力を失うことや事故報告書にある波浪や潮流等の外的要因によって振動幅が大きくなり、安定限界角 (Stability Limit) $\theta_u = 0.19$ rad. (10.9 度) を越え θ'_{max} (図 18 の矢印点線部分) まで進むことで転覆したのではないかと推測することができる。

構造安定論は、このように安定性に対して動解析を応用することができるが、船舶算法の GM 値や復原モーメント曲線の評価法は基本的に静解析であると思われる。構造安定論の動解析による慣性力の影響が、SEP の転覆解明に貢献する可能性があると考えられる。

8. あとがき

自己昇降式作業台 (SEP) は、長いレグを有するため重心が高いことや浮体が矩形という通常の船舶と異なる特徴をもつ。このような SEP に、通常の船舶の安定性評価に用いられる船舶算法が適用できるのか、疑問がもたれている²⁾。本論文は、SEP に対し船舶算法とは異なる構造安定論の観点から安定性を評価し、その適用性を検討するものである。構造安定論は、陸上構造物の杭打機やクレーンの転倒問題に用いることが提案されているが^{4)~7)}。ここでは、その解析手法を SEP の浮体安定評価に適用した。

そのために、まず模型実験を実行し、構造安定論の理論値と比較した。その結果、誤差は 5% 以内 (平均 2%) であり、十分に適用性があることが分かった。また、杭打機やクレーンの転倒問題において課題であった回転ばね剛性が、浮体模型実験では浮力による抵抗モーメントから明確に求めることができ、これまでの杭打機やクレーンの解析手法についての妥当性も確認された。

通常の船舶は、限界荷重 P_{cr} やメタセンター高さ GM とともに安定限界角度 (転覆角度) も比較的大きい。一方、SEP は安定限界角が小さく限界荷重による不安定要素が大きく影響する。GM は限界荷重に対する余裕度を表しており、荷重 - 傾斜角関係の安全条件図においては縦軸 (荷重) を考慮していることになる。このことから、船舶算法の GM による安定評価法は構造安定論における“座屈転倒型”に相当している。しかし、SEP のような構造的特徴をもつ浮体の安定性に対しては限界荷重 (転覆荷重) と共に安定限界角 (転覆

角度)を考慮する必要があり、構造安定論で提議された“つり合い移行型”の転倒メカニズムによる安定性評価が適切であると考えられる。

船舶算法は、複雑な船体形状や傾斜により浮心が移動する（喫水面積が変化する）ことに対処できるが、構造安定論では浮心を固定の支持点（回転中心）として考えている。したがって、船舶算法では傾斜の増加とともに復原モーメントが非線形で増加するのに対し、構造安定論では単純に線形 ($K_s = \text{一定}$) と考えている。この点において、構造安定論の適用性に限界があるが、SEPのような単純な矩形船体においては誤差が小さいと考えられる。

これらの結果から、船舶算法と構造安定論の関係をまとめると以下ようになる。

- (1) 船舶算法では浮心が移動するとしてメタセンター高さ GM を求め、構造安定論では浮心を固定（支持点）として限界荷重を求めるという相違があるが、結果的に両者の評価法は同じである。
- (2) 船舶算法のメタセンター高さ GM は絶対値で評価するが、構造安定論における安定性指標は無次元値 L_{act}/L_{cr} あるいは P_{act}/P_{cr} で評価するため構造形式の異なる浮体の比較ができる。
- (3) 船舶算法のメタセンター高さ GM は、構造安定論における限界高さ L_{cr} と相関関係にあり、その安定性評価は、構造安定論における転倒メカニズムの“座屈転倒型”に類似する。
- (4) 船舶算法において、復原モーメントが最大時の傾斜角は構造安定論における安定限界角であり、これを超えると転覆する。
- (5) 船舶算法の浮力による抵抗モーメント M_B は、構造安定論の復元モーメント $K_s\theta$ と同じである。
- (6) SEP の安定性評価は、構造安定論による転倒メカニズムの“つり合い移行型”に相当する次

式によることができる。

$$\frac{GM}{L_{cr}} > \frac{\theta_0}{\theta_u}$$

最後に、構造安定論を転倒問題へ適用した研究はこれまで多くはなく、ここでの見解を含めまだ十分な検証も行われていない。今後、これらに関する幅広い研究が待たれる。

参考文献

- 1) 沖ノ鳥島港湾工事事故原因究明・再発防止検討舘委員会：沖ノ鳥島港湾工事事故についての調査・検討に関する中間とりまとめ、国土交通省関東地方整備局港湾空港部，2014年7月2日。
- 2) 銅谷祐司，澤田達男：矩形船体の浮体としての安定性の指標，日本船舶海洋工学会論文集第33号，2021年6月。
- 3) 當麻庄司：ジャッキの転倒による橋桁落下事故の原因分析，災害事例分析，安全工学会誌，Vol.60, No.5, pp.384-390, 2021年10月。
- 4) 當麻庄司：杭打機の軟弱地盤における転倒メカニズムの解析，工学研究第22号，北海学園大学工学研究科，2022年9月。
- 5) 當麻庄司，世戸憲治：杭打機の軟弱地盤における転倒の動解析，工学研究，第23号，北海学園大学工学研究科，2023年9月。
- 6) 當麻庄司，世戸憲治：軟弱地盤における杭打機の転倒挙動に関する静解析と動解析の比較検討，工学部研究報告，第51号，2024年1月。
- 7) 當麻庄司，Chen, W.F.：構造安定論による杭打機やクレーンの転倒安全基準に関する検討，土木学会北海道支部研究発表会論文集 A-07, 2024年2月。
- 8) Chen, W.F.: and Lui, E.M.: Structural Stability, Theory and Implementation, Chapter 1 General Principles, pp. 11-34, Elsevier, New York, 1987.
- 9) 日経BP：設計と異なる仮設計画があだに，100の失敗事例に学ぶ 設計・施工トラブルの防ぎ方，pp.14-19, 日経コンストラクション，2016年9月。

付図 〈実験用模型と注水状況〉



実験ケース A (F1x(S1+S3)xP1)



実験ケース C (F1x(S1+S2)xP2)



実験ケース D (F1xS2xP1)



実験ケース G (F2xS1xP1)



実験ケース D' (F1xS2xP1)



ケース B' (転倒直前)