HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ

学校法人北海学園 北 海 学 園 大 学 北 海 斎 科 大 学

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

研究論文

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,桟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 の模型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.

- 1. まえがき
- 2. 構造安定論の構造モデル
- 3. 構造安定論と船舶算法の共通性
- SEP の構造モデルと回転ばね剛性
 の算定
- 3.2 構造安定論と船舶算法の相反関係
- 4. 模型実験
 - 4.1 実験計画
 - 4.2 実験結果と考察
- 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

- 目 次
- 5.2 自由振動の固有周期
 5.3 自由振動からの考察
 6. SEP の安定条件
 7. 沖ノ鳥島 SEP の安定性評価
 7.1 安定性の考察
 7.2 転覆のメカニズム
 8. あとがき
 参考文献
 付図 〈実験用模型と注水状況〉

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 キアップした後桟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(桟橋) 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⁾



(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



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⁾.

$$P_{cr} = K_s / L_{cr} \tag{1}$$

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=∞)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



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に示す剛体棒 – 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原モー 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に示す剛体棒 - 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



$$M_{R} = \frac{2}{3}f \ b\cos\theta = \frac{b^{3}}{12}l \ \sin\theta \tag{2}$$

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/cm³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.

$$K_{s} = M_{R}'(\theta = 0) = \frac{b^{3}}{12}l = I_{y}$$
(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/cm³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.

$$GM = I_y / V - (G_t - d/2) \tag{4}$$

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また 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、

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

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.

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

$$\tag{6}$$

また、式(6)から次の関係式が導かれる.

$$\frac{GM}{L_{cr}} + \frac{L_{act}}{L_{cr}} = 1 \tag{7}$$

あるいは

$$\frac{GM}{L_{cr}} + \frac{P_{act}}{P_{cr}} = 1 \tag{8}$$

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 *Lact/Lcr*や限界荷重比*Pact/Pcr*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(準静的) に加えて限界荷重 *Pact* (=*W*_t)とその時の荷重高さ *Lact* を求める.一方、実験計測値の限界荷重 *Pact*

表1 模型構成パーツの諸元

Pontoon	BxLxD	A(cm2)	W(g)	Iy or Ks
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	P2 Φ70x137		41	
	Pontoon F1 F2(S2) F3(S3) F4 Spacer S1 S2(F2) S3(F3) Water P1 P2	Pontoon BxLxD F1 163x240x39 F2(S2) 110x197x37 F3(S3) 132x197x52 F4 158x226x91 Spacer D(cm) S1 2 S2(F2) 3.7 S3(F3) 5.2 Water Cylinder P1 Φ62x192 P2 Φ70x137	Pontoon BxLxD A(cm2) F1 163x240x39 391 F2(S2) 110x197x37 217 F3(S3) 132x197x52 260 F4 158x226x91 357 Spacer D(cm) - S1 2 - S2(F2) 3.7 - S3(F3) 5.2 - Water Cylinder - - P1 Φ62x192 30.2 P2 Φ70x137 38.5	Pontoon BxLxD A (cm2) W (g) F1 163x240x39 391 126 F2 (S2) 110x197x37 217 105 F3 (S3) 132x197x52 260 122 F4 158x226x91 357 260 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_{acl})と構造安定論による理論値 ($L_{cr}=K_s/W_l$)の比によって判断する.その比は $L_{acl}/L_{cr}=1.0$ 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

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
А	F1	S1+S3	P1	379	718	12.80	1.835	11.881	12.063	0.985	8661	0.182	0.015
В	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
С	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
Е	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
Н	F3(S3)	S2	P1	180	519	8.36	2.004	7.354	7.276	1.011	3776	-0.078	-0.011
Ι	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
Κ	F4	S2	P1	248	587	13.44	1.644	12.622	12.654	0.997	7428	0.032	0.003
* 1	B'. D'は再	現実験	SEP N	IKKEI ⁹⁾	$V = 1856 \text{ m}^3$	10.87 m	3.16 m	9.29 m	10.5 m	0.886	19466	1.19	0.114

表2 模型実験の結果

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 Ks 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/Lcr<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.



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) $L_{cr}=K_s/W_r$ (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}*≒1.0となっているが(図9参



記号	諸元	数量	単位	備考			
l	桟橋長さ	30	m	中間とりまとめ	参照		
d	桟橋幅	20	m	中間とりまとめ参照			
h	桟橋高さ	5	m	中間とりまとめ参照			
w	桟橋重量	739	t	中間とりまとめ	診参照		
L	レグ長さ	47.5	m	中間とりまとめ	参照		
Ľ	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	W1×4			
w+w'	桟橋とレグの重量	1427	t	w+w'			
w''	桟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(桟橋下端部からの距 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/m³	中間とりまとめ参照			
D	喫水	3.16	m	中間とりまとめ参照			
С	浮心(桟橋下端部からの距 離。上方向が正)	1.58	m	D/2			
V	排水容積	1856.29	m ³	$\ell \times d \times D - r^2 2 \times \pi \times D \times 4$			
h	桟橋の断面2次モーメント	20000	m ⁴	ℓ×d ⁻ 3/12			
2	レグの断面2次モーメント	133.52	m ⁴	$\pi \times (2r)^{-} 4/64 + r^{-} 2 \times \pi \times (d/2 - 3.5)^{-} 2$			
1	喫水面の長軸に対する断 面2次モーメント	19465.93	m4	I1-I2×4	傾心が重心よりも上にあ		
GM	傾心と重心の距離(上方向 が正)	1.19	m	る場合は、重力によ IW-(G-C) 傾いた方向とは逆の			
喫水に対		00	0/	CM/D×100			

表3 沖ノ鳥島 SEP の諸元と安定性

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

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

うとするため安定

GM/D×100

38 %

(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 Lact の方が理論値 Lcr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⁾.

3.5

する割合

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 $W_t(kgf)$ を質量の分布状態から 浮体であるポンツーン $M_{\theta}(kg)$, レグ m(kg/m)お よび搭載物 M₁(kg)に分類して考える⁵⁾.この構 造モデルが初期傾斜角 θ₀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



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.

$$\theta_c = \frac{\theta_0}{1 - P_{act}/P_{cr}} \tag{10}$$

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

また,式(9)中の傾斜角速度ωは次式から求められる.

$$\omega = \sqrt{\frac{K_s - Q}{I}} \tag{12}$$

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ω=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 $W_t(\text{ton} \cdot \mathbf{f})$ 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⁾.

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

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

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¹¹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⁵¹.

図 11 中に,沖ノ鳥島 SEP が不安定になる傾斜 角 θ_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¹¹).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⁷⁷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 *Lact/Lcr* <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*Pact/Pcr*=1.0 付近









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 *Pact*/*Pcr*=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, Pcr が大きい (Pact/Pcr が小さい)ので安定





図 14 荷重に対する安定条件")

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⁾⁶⁾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.

$GM \searrow \theta_0$	(17)
$\overline{L_{cr}} > \overline{\theta_u}$	(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 Lact/Lor(=Pu/Por) =0.886 そして図13 に船舶算法の指標 GM/Lor (=1-Lact/Lor)=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 こと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)



(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 でみると、 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 θ_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.

$$K_s \theta - PL \sin \theta = 0 \tag{18}$$

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.

$$M_s = K_s \theta - PL \sin\theta \tag{19}$$

式(19)を用いて、沖ノ鳥島 SEP の Ms 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 $L = 10.5 m = L_{cr}$ そ 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<Lcr の場合は初期傾斜角(Ks 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、その後に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 動解析による振動幅



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²⁰.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^{41~77}.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=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のようになる.

- (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 Lact/Lcr あるいは Pact/Pcr 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 Ler 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_sθ 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・再発防止検討鵜委 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)