

海洋構造物の事故と安全性*

後藤 政志

芝浦工業大学工学部

J. Japan Inst. Metals, Vol. 66, No. 12 (2002), pp. 1215-1226
Special Issue on Materials and Technologies for Risk Society
© 2002 The Japan Institute of Metals
Overview

Accidents and Safety Issue of Offshore Structure

Masashi Goto

Faculty of Engineering Shibaura Institute of Technology, Tokyo 108-8548

An offshore structure is not able to avoid the encounter of the severe storm always, because of the characteristic of the purpose which is to stay at the specified sea area for the operation. This paper describes the design method for typical offshore structure briefly, then explains the some accidents of the offshore drilling rig, and finally presents the fundamental idea about the safety issue based on the investigation of the specific technical problems related to the causes of accidents.

Many rigs for Arab, Mexico, Canada and North sea were constructed at Japanese shipbuilding yards between the 1970's and the 1980's followings the world wide rig construction boom. As Japan has a few rigs and a little information about the accidents of the offshore drilling rigs, according to the Lloyd's lists and some reports related accidents, the accidents of the offshore structures occur often as compared with ships and the scale of the accidents is often beggar than normal ship. Norwegian semi-submersible accommodation platform "Alexander L. Kielland" collapsed and capsized due to fatigue failure at the weld part of the brace at North sea oil field in March 1980.

123 lost their lives by this accident. Also jack up rig "Dan Prince" sank in Araskan waters during wet towing in October 1980. These impact the later design philosophy to establish the residual stability requirements and structural redundancy evaluation requirement for the offshore structures.

(Received June 20, 2002; Accepted September 25, 2002)

Keywords: offshore structure, accidents, safety issue, design, semi-sub, jack up, failure mode, residual stability, structural redundancy, Kielland

1. はじめに

本論文は、かつて世界的な規模の建造ブームの中で、日本においても高度成長期の 1970 年代から 1980 年代にかけて建造のピーク¹⁾を迎えた海洋石油掘削装置(以降石油掘削リグまたはリグと言う)の開発・設計と事故を例に、海洋構造物の事故と安全性について主として設計の観点から解説を試みたものである。したがって、本論文は最新の石油掘削リグ技術の動向を述べることを目的としたものではなく、かつて民間企業においてその開発・設計に従事した若干の経験から、急成長を遂げつつあった 1980 年前後の海洋構造物の代表的な事故事例を通してその設計思想の変遷とその技術的意義に関して述べたものであることをあらかじめお断りしておく。

石油掘削リグは、一般船舶と比較してはるかに技術の歴史が浅いが、大型でしかも移動可能な構造物として特異な形式をしており、技術的に従来にはない新しい設計概念が次々と導入されていた。日本はそうした新しい技術を欧米から導入し、ある面では未消化なまま(この見解が、一般的に同意を

得られるかは、さだかではないが、少なくとも筆者の体験の中ではそのように感じられた。)建造に着手した。もちろん当時、設計・製造の現場では様々な工夫と改善がなされた事は間違いないし、それが日本の海洋部門の技術力アップに繋がったことも確かであろうが、そもそもが新規の技術であることと、技術導入それ故に技術の基本的な部分の把握のしかたに限界があったこともやむを得ないことかと考える。しかしながら、世界中で幾つかの大規模な事故も経験していることから、新しい技術の開発・設計に際して事故を起こさないように、あるいは不幸にして事故が起きてしまった場合、事故の被害を最小限に留めるために、実際の事故はどのような形で起こるかを分析し、また逆に起きた事故が設計思想にどのような影響を与えたか検討してみることは重要なことであり、また海洋構造物の分野では、それをかなり直接的に見ることができるものと考え拙稿を発表する所存である。従来、構造破壊事故事例として、『A・L・キーランド号』²⁾の事故は多くの研究者による報告³⁾がなされているが、同事故を海洋構造物の技術的な特徴との関係から構造・復元性・救命設備等総合的な視点で、明確に位置付けたものは少ないと考える。そのような背景から 1980 年代の海洋構造物の 2, 3 の事故事例とその後の設計の考え方に関して、不十分な部分があると思うが筆者の考えを述べたもので、構造物の安全性を考

* 2002 年 3 月 28 日日本金属学会春期大会において発表

える上で、多少なりと他分野の方々のご参考になれば幸いである。

2. 海洋開発と海洋構造物

海洋開発とは、この地球表面の約 70%の面積を占める広大な海において、エネルギー資源の開発、鉱物資源の確保、海洋スペースとしての活用、動物性蛋白質の食糧としての確保、地球環境問題に関わる調査等非常に多岐にわたる活動で、今後益々発展が期待されるが、そうした活動において洋上に建造・設置される構造物を広い意味で海洋構造物と言う。したがって、代表的な海洋構造物を目的から分類すると石油掘削リグ、海洋石油・ガス生産設備、海流・潮流発電プラント、波力発電プラント、洋上石油備蓄基地、海上空港、海上ホテル・都市、埋立式人工島、コバルト・マンガン団塊開発設備、各種消波装置、沈埋トンネル、海洋牧場・海洋生物増殖プラント等が挙げられる。

3. 代表的な海洋構造物の型式

海洋構造物の中で最も代表的なものが海洋石油関連の構造物であり、生産用の場合は固定式プラットフォームが主で、試掘等は移動式の石油掘削リグが使用され、稼動時は一定海域に留まるがある期間が過ぎると他の海域へ移動可能な特異な形式が採用される場合が多い。ただし、最近は大深度で比較的小規模の油田開発のために、中古のタンカーを改造して(新造タンカーを使用する場合もあるが経済上理由から中古タンカーを利用する例が多い)大型の係留システムを備えた浮遊式石油生産システム(FPSO: Floating Production, Storage and Off-loading)が適用されている。

4. 海洋石油掘削リグの技術的な特徴

海洋石油掘削リグをさらに稼動時の形式から大別すると、浮遊式と海底にトラス形式の脚(以下レグと言う)を着け船体を持ち上げる甲板昇降式リグ(以降ジャッキアップ型リグと言う)に分かれ、浮遊式は自航能力のある船型・自航能力のないバージ型とさらに稼動時の波による動揺特性を改善した半潜水式リグ(Semi-Submarizable Rig)をセミサブ型リグと言う。)に分類される。石油掘削リグは移動可能であり、かつ稼動時には位置保持をし、水深数十から数百メートルの海底を、さらに海底下数千メートルにわたって掘削用パイプとドリルを用いて掘るため波等による動揺特性を軽減することが最も重要な機能となる。したがって、船型やバージ型より、ジャッキアップ型かセミサブ型が主流となっていく。ジャッキアップ型は稼動時に海底に脚を下ろし船体をジャッキアップ(ジャッキユニットというモーター等で主船体を水面上に持ち上げる。)し波による動揺をなくすため水深 120 m 以下では安定性とコスト面で優れているが、水深が深くなると限界あり、それ以上の水深ではセミサブ型の採用が多い。セミサブ型は没水体からコラムを立て半潜水状態で稼動するため通常の船型やバージ型と比べて波による動揺特性が大幅に

改善されている。ただし、位置保持のために大型の係留装置を備えており、稼動水深が深くなるほどその規模も大きくなる。通常のリグの構成は、主船体(ハル)、位置保持装置、掘削設備、ヘリポート、居住設備等からなり、これにジャッキアップ型リグはレグとジャッキシステムが、セミサブ型リグは係留装置、バラスト調整システムと船体動揺を吸収する掘削補助システムが付加される。

石油掘削リグの安全性に関わる技術的な特徴を挙げると下記のようなになる。

4.1 風、波、潮流に抗して位置保持

船舶は通常荒天な海域を回避するが、石油掘削リグに限らず海洋構造物はその目的から荒天時も定位置に留まり厳しい外力に耐える必要がある。

4.2 一般船舶と異なる従来にない構造様式

ジャッキアップ型(着底式)とセミサブ型(浮遊式)はそれぞれ形状・型式が一般船舶と比較して、特殊な形式であり、浮遊安定性(転覆しにくい特性:スタビリティまたは復元力特性と言う)上あるいは構造強度的に、必ずしも冗長度が十分とは言いがたい形式が存在する。また、技術の歴史が浅く稼動実績が少ない為、新形式の構造物の稼動経験上のフィードバック情報が少ない。

4.3 狭い部分に大荷重が集中する構造

板厚 6~7 mm の薄板溶接構造と板厚 20 mm から 100 mm を越すような極厚の溶接構造が混在し、高張力鋼も多用されている。ジャッキアップのレグと船体との荷重伝達部やセミサブのコラムとブレースや主船体との接合部(Fig. 5 参照)等トラスあるいはラーメン構造で一般船舶と比較して非常に大きな荷重が一点に集中するような構造が多い。

4.4 波浪の繰り返し荷重と構造的応力集中部の存在による疲労損傷の可能性

セミサブのブレース接合部、ジャッキアップのトラス部材接合部等、構造的な応力集中部の存在は避けられない場合が多く、また、高張力鋼を多く使用するが、疲労強度の検討は重要である。(一般に高張力鋼は静的な強度ほど疲労強度は上がらない)。海水中の疲労は鋼材の疲労強度曲線(SN 曲線)が大気中の場合と異なり、繰り返し数 N が 10^7 以上でも疲労限が存在せず、所謂腐食疲労となるので小さいが繰り返し数の多い荷重の評価が設計上重要となる場合があるので注意を要する。

4.5 厳しい腐食環境の存在

没水部およびスプラッシュゾーンの鋼材の腐食は海洋構造物の設計上重要である。防食技術としては塗装と電気防食が利用されるが、スプラッシュゾーンとは水面付近で波浪による乾湿の繰り返しを受ける部分で特に厳しい腐食環境として厚膜の塗装等の対策が取られる。海水腐食に関しては通常船級協会が構造部材に対して 2.5~3.5 mm 程度の腐食度を規定しているが、固定式のジャケットでは年間 0.8 mm もの板

厚衰耗が生じた例も報告されている。一般船舶ではあるが、1997 年日本海で沈没したタンカー『ナホトカ』の事故は船体の腐食による強度不足が原因であったとされている⁴⁾。

4.6 移動時の安全性、特に荒天時の浮遊安定性能と曳航速度が遅いことによるリスクの増大

海上輸送は常に自然環境条件に左右される。石油掘削リグは曳航速度が通常数ノット(1 ノットは約 1.8 km/h)から 10 数ノット以下であり、気象・海象の変化を十分予測しないと嵐に遭遇する危険性が高い。

4.7 浮遊時の船体動揺による過大な荷重

特にジャッキアップリグは曳航時に 100~150 m の高さのレグを主船体上方に上げているので船体動揺による大きな慣性力が働きレグや主船体を損傷する危険性がある。

4.8 係留システムの安全性

セミサブ等浮遊式では大規模な係留装置を備えるが、係留用ケーブル等が破断すると衝突、座礁等の事故に繋がる可能性がある。

4.9 衝突・落下・火災等の事故によるリスク

石油掘削リグは稼働海域において、サプライボートやクレーン船等様々な支援船舶が行き来するため、衝突による倒壊、転覆、沈没、火災等の壊滅的な事故に遭遇する危険性を有している。また、元々、海洋石油を掘っているため、時には石油の噴出制御に失敗する暴噴(ブローアウト)や火災・爆発の危険を伴う。掘削作業用のドリルパイプ等の資材をデリック(掘削用の櫓)上から誤って落とすこともある。こうした中小規模の事故に対してそれが二次的に大規模な事故に発展する危険性を有している。

5. 海洋構造物の設計

5.1 海洋構造物の設計概要

石油掘削リグを中心にした海洋構造物の設計方法を概説する。稼働海域や適用法規・船級規則を与件として発注側が稼働海域の稼働水深、風・波・流れ等の海象条件、ヴァリアブル・ロード(掘削用機材等の石油掘削リグに搭載できる合計質量で、船舶で言う載荷重量)、必要により係留条件等の要求仕様を設定する。船級規則というのは、日本海事協会(通称 NK)、米国の ABS⁵⁾、イギリスのロイド(LRS)、ノルウェーのノルスケベリタス(DNV)⁶⁾等に代表的される各国の船級協会が制定する船舶や海洋構造物の技術基準であり、国際的な統一規則も制定されており、基本的部分は大きくは変わらない。基本計画としては、基本構造形式と主要寸法・区画配置・構造計画・主要機器配置を検討する。基本性能計算を経て構造設計が実施される。一般船舶が長い歴史の中で構築されてきた規格計算(所謂 Design by Rules)による設計が多く部分を占めているのに比較して、海洋構造物は、直接解析による設計(所謂 Design by Analysis)が主流で、風や波、潮流から外力を計算し、その外力に対して基本性能計算

や構造解析を実施して設計していくことが多い。これは海洋構造物の歴史が浅いことに加えて一般船舶に比べて構造形式が多様であり、規格計算が適用できない部分が多いからである。

5.2 外力の設計条件

設計上重要な点は、まず外力の算定であり、風・波に関しては当該海域の過去の観測データから稼働状態では 50 年、サバイバル状態では 100 年の再現期間をそれぞれ考えた風速、波浪を用いることが多い。

通常、設計風速は、船級協会規則等で最小値が与えられ、稼働状態であれば 36 m/s(70 ノット)、サバイバル状態(再現期間 100 年)で 51.5 m/s(100 ノット)である。

5.3 波浪と流れおよび流体力の算定

波浪による設計は、特定の「設計波による方法」(「決定論的方法(Deterministic method)」)と不規則波による「統計論的予測方法」がある。海洋の波浪は元来不規則な性質を有しているが、「設計波による方法」は、①長期波浪統計データから再現期間を考慮して個別最大波を求め、それを設計用の規則波とする方法と②波高と波周期の組み合わせをいろいろと変えて規則波中の応答(波による運動や応力)を求め、その応答が最大となる規則波を設計波とする 2 つの方法を比較し、両者の内応答が大きくなる規則波を設計波と定義する方法である。これに対して波浪の不規則性を考慮した波浪スペクトルによる「統計論的方法(Stochastic method)」が用いられる場合もある。

実際の設計条件は海域によるが、カナダ沖等サバイバル状態における最大設計波高は 30~35 m にもおよぶ。また、海域により流れの影響も考慮する必要がある。

与えられた波浪、流れに対して構造物に働く流体力を計算する方法は、ポテンシャル理論を用いる方法とモリソン式という抗力と質量力の和として求める方法がある。前者は、流体力を①静水中の浮体の動揺によるラジエーションフォースと②入射波が浮体に直接与えるフルードクリロフ力および入射波を散乱させる時に生じるディフラクションフォースの和(波強制力)および③粘性による粘性減衰力の合力として求められる。一般に没水体を有する浮体の動揺解析等に用いられる。他方後者のモリソン式は、海底に固定された杭のような細長い構造物の流体力を計算するための式で波浪中で運動する細長い浮体の計算によく用いられる。

6. セミサブ型リグの特徴と設計

6.1 セミサブ型リグの形状と稼働状態

セミサブ型リグの稼働時および移動時の説明図を Fig. 1 に示す。セミサブ型リグはフーチングという楕円体の浮体またはロワーハルという 2 本の長手方向に細長い柱状の没水体の上に太いコラムを立て、型式によりブレースと言うトラス部材を配置し、コラム上部にアッパーハルを載せた立体骨組み構造物で、移動時は喫水を浅くして船体抵抗を小さくし、稼働時はバラスト水を入れて半潜水状態にして、動揺を

軽減させる。

6.2 セミサブ型リグの動揺特性

通常の船型とセミサブ型の横波中における上下方向の動揺特性を比較した模式図を Fig. 2 に示す。横軸に波周期を、縦軸に波による浮体の上下振幅を波高で無次元化した上下揺振幅応答倍率を模式的に示したものである。実際の設計で考慮すべき波周期は約 20 秒以下であるが、波周期が数秒から 20 秒において、ゼミサブ型は入射波に対する上下揺振幅の応答倍率は大幅に低減される⁷⁾。ローリング(横揺れ)やピッチング(縦揺れ)についてもセミサブの応答のピークは長周期側に大きくずれ、船型と比べて動揺特性は飛躍的に改善される。これは、ひとつには船型と比べてセミサブは水線面積を小さくしたことで、水面の変動による浮力の変動が小さくなることとして直感的に理解できるが、厳密な流体力の解釈によると、ある波周期で波浪強制力を構成している、フルードクリロフ力とディフラクションフォースの位相が逆になり打消しあって波浪強制力はほとんどゼロになる点があり⁷⁾、それがセミサブ型の特徴である。

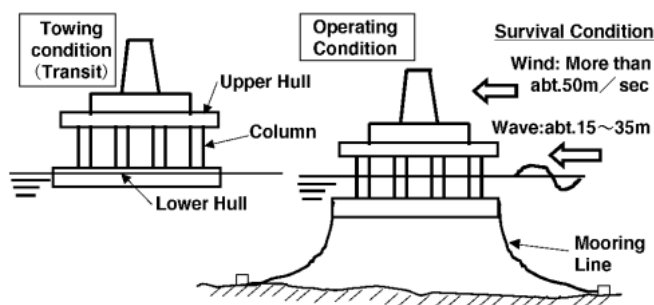


Fig. 1 Operating & towing condition of semi-submersible rig.

6.3 セミサブ型リグの安定性能(復元力特性)

セミサブ型の開発の目的は前述のように、動揺軽減だが、それが浮体の安定性能(復元力特性)に与える影響を検討してみる。Fig. 3 に排水量、長さ、幅を同じにした船型(バージ)とセミサブ型の試設計による比較結果を示す。排水量 16000 トン、長さ 70 m、幅 50 m として、8 本コラム型のセミサブ型の浮体を試算してみる。まず、喫水面の水線面積を比較すると、バージ型 3500 m²、セミサブ型 512 m² と後者は前者の約 15% しかない。これは、どこかに一定の浸水あるいは、同じ荷重をかけた時、セミサブ型の方が 6 倍($\approx 1/0.15$)以上深く沈むことを意味している。また、浮体を横に傾けた場合の復元力はメタセンタ M (浮体は見かけ上メタセンタ位置で吊り下げられた振り子のように動く)の位置と重心 G の距離 GM に比例するが、 M と浮心 B との距離 BM は浮体の水線面の中心軸回りの 2 次モーメント I_w に依存し、 I_w/Δ (ただし Δ : 排水量)で計算される。重心 G の高さを形状から仮

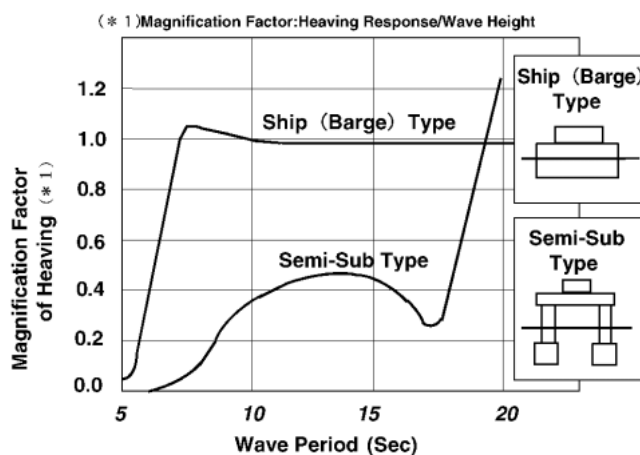


Fig. 2 Motion characteristic of semi-submersible rig. This figure rewritten from a figure in Ref. 7).

	Ship type (Barge)	Semi-sub type
Configuration	Displacement Δ : 16000 ton B: 50 m L: 70 m Draft: 4.5m	Displacement Δ : 16000 ton L: 70 m Draft: 14.8m
Water plane	50m 70m	38m 70m 8m x 8m
Water plane area : A_w	3500 m ²	512 m ² (abt. 15%)
Moment of inertia : I_w	729000 m ⁴	187500 m ⁴ (abt. 26%)
Stability Characteristic (for Heel)	M $KG : 9m$ (assumed) $KB : 2.25m$ $BM = I_w / \Delta = 46.3m$ $GM = KB + BM - KG = 39.6m$	M $KG : 15m$ (assumed) $KB : 5.37m$ $BM = I_w / \Delta = 15.9m$ $GM = KB + BM - KG = 6.3m$
GM	39.6 m	6.3 m (abt. 16%)

Fig. 3 Stability of semi-sub.

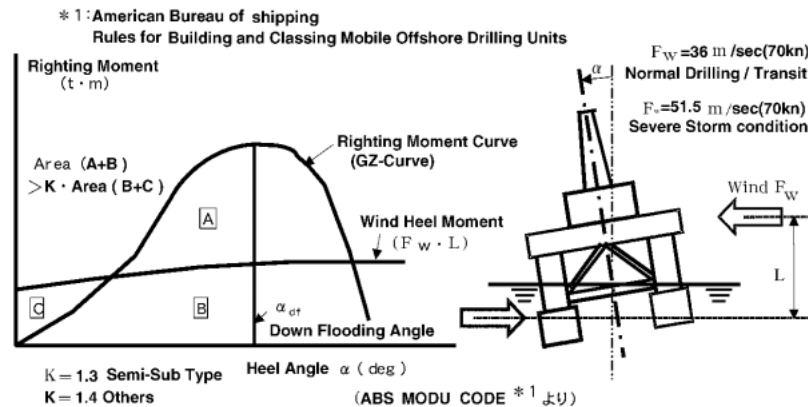


Fig. 4 Dynamic stability curve.

定して、 GM の値を計算すると、バージ型では40 m近くになるのに対して、セミサブ型では6.3 mと後者は前者の16%程度しかない。セミサブ型は通常のバージ型に対して風等の外力や浸水による同じ転倒モーメントに対して傾斜する角度が数倍程度($1/0.16 \div 6$ 倍)大きいことつまり外力に対して傾き安いことを意味している。動揺を低減できるセミサブ型は、船型に比べて小規模な浸水や風等の外力により転覆し易い特性を持つと言える。

この比較は、形状や重心高さ等多くの仮定の上の議論であるため、厳密ではないが、船型(バージ型)とセミサブ型の復元力特性の違いを良く表している。

6.4 動的復元力特性

風荷重による浮体の転覆に関する安全性は、前述の GM の算定と共に Fig. 4 に示した動的復元力曲線⁵⁾により評価される。横軸にリグの傾斜角度 α を縦軸に復元モーメントをとると、この復元力曲線の下側の面積がその角度までリグを傾けるのに必要な仕事量を意味する。リグの傾斜によりある開口が浸水を始める角度を海水流入角(ダウンフラッディング・アングル) α_{df} として、風荷重によるリグを傾斜させるモーメントを風力傾斜モーメント(ウィンド・ヒールモーメント)として復元力曲線に重ねて描くと、復元力による仕事量つまり面積 $(A+B)$ が、その角度までリグを傾斜させる為に必要な外力(風荷重)がする仕事量つまり面積 $(B+C)$ より大きければ、エネルギー論的にみて転倒しないことになる。

6.5 セミサブ型リグの構造設計

Fig. 5⁷⁾に2-ローハル型のセミサブの代表的な構造を示す。セミサブのローハルやコラム、アッパーハル等は全体構造解析に先立って、船舶と同様な防撓板構造として、甲板荷重や各種の機器や搭載物の自重、タンクのオーバーフローを考慮したタンク内水圧や外板の波浪変動水圧、外板損傷浸水時の水圧、係留力、船舶の接舷時の荷重等に対して規格計算や局部強度解析が行われ板厚、防撓材が仮決定される。

セミサブの全体強度を検討するには、静的な重力・浮力の他に、複雑な流体力や船体動揺による動的な荷重を考慮する必要がある。有限要素法(FEM)を用いて立体骨組み構造解析を行うが、稼動時(半潜水状態)とサバイバル状態(半潜水

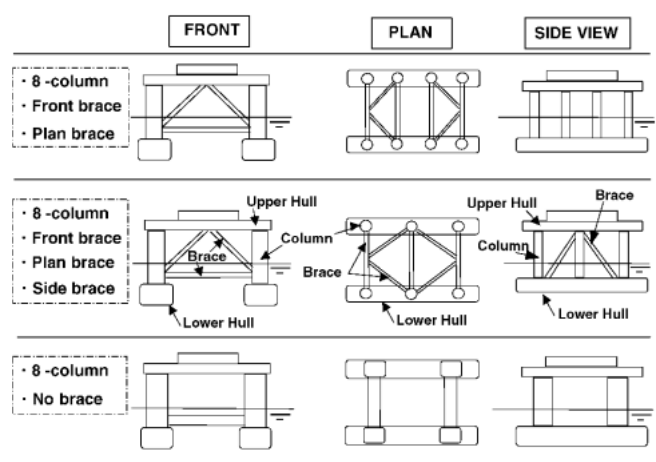


Fig. 5 Typical configuration for 2-lower hull type semi-sub rig. This figure rewritten from a figure in Ref. 7).

状態ストーム時)と移動時に対して解析し各部材の応力評価を行う。波による変動荷重を考慮した全体構造解析の考え方には浮体としての運動応答と弾性構造体としての構造応答を同時に考慮して解く弾性構造応答モデルによる解析と、運動応答と構造解析を別々に分けて2段階で解析する方法がある。前者はメガフロート(1995年からメガフロート「超大型浮体構造物」技術研究組合で大規模な実験研究が行われている。)のように構造体の弾性変形を考慮して浮体の運動を解く必要があるものすなわち構造体の変形と流体力の相互作用を考慮する必要のある場合に用いられる。セミサブのような構造全体を剛体とみなしても影響の少ない構造体では後者のように浮体の運動と構造の解析を別々に切り離して行うのが一般的である。

また、セミサブのブレースの接合部は疲労強度が支配的になる場合があるため、詳細なFEM解析にて局所的な高応力であるホットスポットのピーク応力を求め一般部に対する応力集中係数として評価しておき、全体構造応答で求めた部材応力に、応力集中係数を掛け合わせる形で疲労強度検討用の応力を求める。石油掘削リグの設計耐用年数として20年間に遭遇する最大波に対する応答を求めておき、波高別の発生頻度を考慮して発生応力を求めSN線図(疲労強度線図)を用いて、線形マイナー則により累積被害度を求める。

DNV では、疲労強度評価方法を部材の変動応力の長期分布としてワイブル分布を適用して複雑な設計手順を体系的にまとめている。

7. ジャッキアップ型リグの特徴と設計

7.1 ジャッキアップ型リグの形状と稼動状態

ジャッキアップ型リグの稼動状態および移動時の概要を Fig. 6 に示す。移動する時は、レグを上げジャッキアップ型リグが主船体の浮力で浮いた状態でタグボートで曳航することをウェットトウと言い、短距離の移動や長距離でも初期のジャッキアップ型リグではよく用いられた。その後曳航速度を速めると同時に曳航時の事故のリスク(事故事例を後述する)と保険料を低減するために、長距離の移動時は他の曳航用のバージに搭載して移動するドライトウが主流となった。ドライトウは、サブマージブルバージと言うバラスト水で潜水可能な専用のバージを半潜水状態にして、その真上にリグを引き込みエアブロー(圧縮空気)でバラスト排水してバージの浮力でジャッキアップリグをすくい上げてバージに搭載する。一般に大型の海洋構造物は数千トンから数万トン

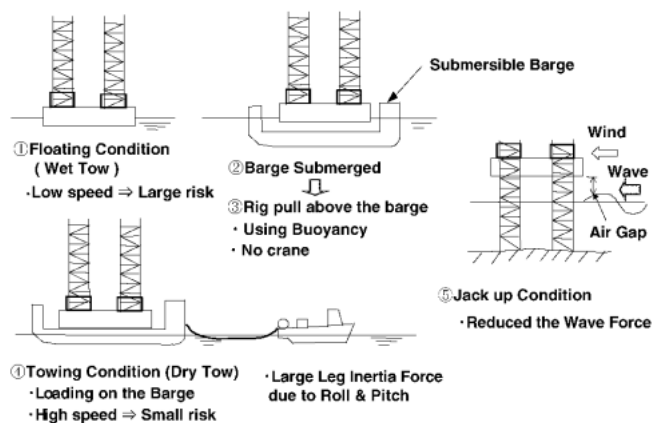


Fig. 6 Operating & towing condition of jack up rig.

になるため、その移動や設置等工事全般にわたって極力クレーンを使わずに水の浮力と重力を利用して、浮体を沈めたり浮かしたりあるいは洋上でひっくり返したりして姿勢制御する技術が発達している。

代表的なジャッキアップ型リグの外観図とジャッキアップ時の荷重のかかり方の説明図を Fig. 7 に示す。

7.2 ジャッキアップ型リグの技術的特徴

7.2.1 ジャッキアップ時の設計上の課題

ジャッキアップ型リグは、稼動時には、レグを海底に下ろし下端にあるフーチングにより全体の質量を支えている (Fig. 7 右図参照)。主船体(ハル)は浮遊時に箱型のバージとして多くの区画に水密隔壁で仕切られた構造をしており、水压や甲板荷重に対する防撓板構造として船級規則による規格計算で設計されるが、質量軽減のため高張力鋼を採用する機会が多い。ジャッキアップ時には、リグ全体の構造設計上は、3本のレグで支持された、水平方向縦横に張り巡らされた梁構造(主船体を水平面内の骨組み構造にモデル化する。)として強度計算する。

稼動時あるいはサバイバル状態においては、風や波と流れによる水平方向の荷重によるレグ下端周りのオーバーターニング(転倒)モーメントが生じる。オーバーターニングモーメントにより、水平荷重が加わった側のレグ下端の反力がマイナスにならない(レグが浮き上がらない)こと、反対側のレグ下向きの荷重が支えられること、さらにその下向きの荷重によりフーチングが海底地盤で支えられることである。この時ジャッキアップリグ全体の安全にとって重要な観点は、海底地盤の耐荷力の確認であり、ジャッキアップ時の海底地盤の破壊や陥没は最悪の場合リグの転倒を招く。しかも、海底土質の力学という通常の鋼構造物の強度と比べてはるかに不確実な要素をもつ性質のものである。よって、地盤強度をボーリング等で確認した上で、水面上少しだけジャッキアップした状態を保ち、あらかじめサバイバル時のオーバーターニング・モーメントによる最大地盤反力を計算しておき、その最大荷重に相当する質量のバラスト水をハル内にあるレグ周囲

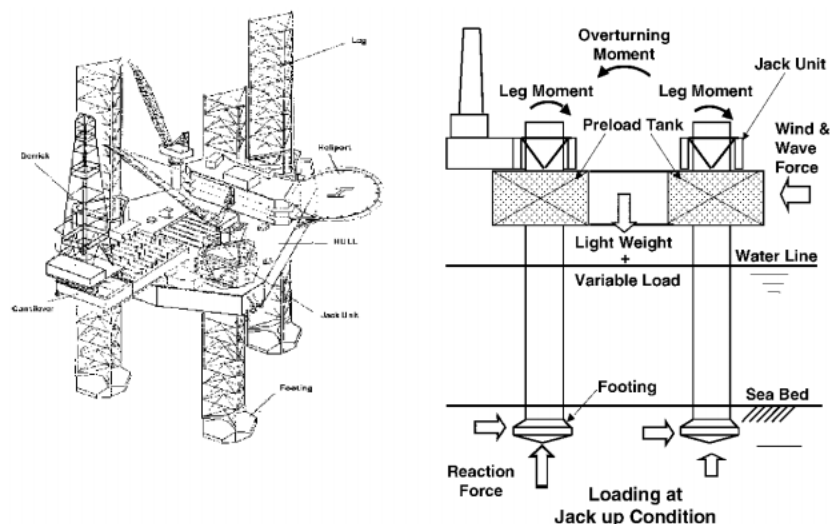


Fig. 7 Configuration of jack up rig.

の区画(プリロードタンクと言う)に注水し、地盤の圧密等を考慮して十分な時間(通常 24 時間程度)プリロードをかけた後バラスト水を捨て、地盤の強度を確認した後 所定の高さまでジャッキアップしてリグとしての稼動に入る。このプリロードで確認できた地盤強度、つまり想定したストーム状態まで転倒に対する安全が確保されたことになる。このプリロードが、ジャッキアップの転倒安全性を保障する重要な概念であるが、それでも時にはレグが急貫入する場合があります。筆者も試運転のプリロード中に約 1.5 m 程度の急貫入を経験している。幸いレグが損傷する事態は免れたが、その時の緊張感は設計に携わる者として生涯忘れることはできない。

レグの強度はレグのトラス構造全体の座屈強度とレグトラス部材の軸圧縮部材としての座屈強度および、荷重伝達部の局所的な強度(パンチングシェア: 面外せん断破壊)に支配される。レグに対するハルからの曲げモーメントのかかり方はジャッキユニットのタイプすなわち、フローティングタイプかフィックスタイプで異なるが、ジャッキユニットをハルに溶接で接合したフィックスタイプ(Fig. 7 左図参照)のジャッキユニットでは、ハルからの曲げモーメントを各レグの上下方向の偶力として生じる鉛直力にして荷重伝達するため、強度的に有利であり、レグ径を小さくでき、鋼材重量を低減できるが、細くしすぎると、座屈強度の低下やレグの急貫入に対する尤度(強度上の)が減少する。

7.2.2 曳航時の設計上の課題

水深 120 m 級のジャッキアップ型リグのレグ長さは 150 m を超える長さとなり、曳航時はこのレグをハル上方へ上げた状態で行うため、重心が高くなり、復元力特性および慣性力による構造強度が重要な技術課題である。

レグにかかる曲げモーメントや、ジャッキユニットにかかる荷重は、ジャッキアップ時より厳しい場合もある。しかもこの曳航時の荷重は繰り返し荷重であるため、構造強度上は疲労強度が重要となる。この曳航時の荷重に対抗するために、時にはレグの上部の一部はずして曳航し、稼動海域に行ってから洋上でレグを接合する方法⁸⁾も用いられている。

曳航時の検討条件は、船級協会等の機関で与えられるが、一般には片振幅 15~20 度で、周期 10 秒程度の船体動揺を考慮した慣性力に対して強度検討を行っている。

8. 海洋構造物の事故統計

世界中で石油掘削リグの建造量が急激に増加した 1970 年から 1980 年当時の移動式プラットフォームの事故統計を Fig. 8 に示す。特徴的なことは、移動式プラットフォーム(移動式リグとリグ以外の同様な構造物を含む)の事故で全構造損傷事故の内、全損事故が 9% もあり、それに重大損傷事故を加えると全体の約 1/4 を占めることである。また、全構造損傷事故を起因事象別に分けると、Fig. 9 に示すように、天候、衝突、暴噴(ブローアウトと言う。制御に失敗し原油やガスが噴出すること。)が上位を占め、次に構造強度、火災が続く。海洋構造物にとっていかに自然条件が厳しいかわかる。同時に構造強度が原因となることが無視し得ない比率であることがわかる。また、別の事故に関する報告⁹⁾に

Accidents statistics of Mobile Offshore Platform in world wide operation during 1970-1980 (according to initiating event and extent of structural damage) Produced from Lloyds' list

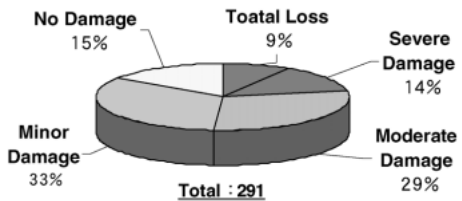


Fig. 8 Number of accidents for mobile offshore platform.

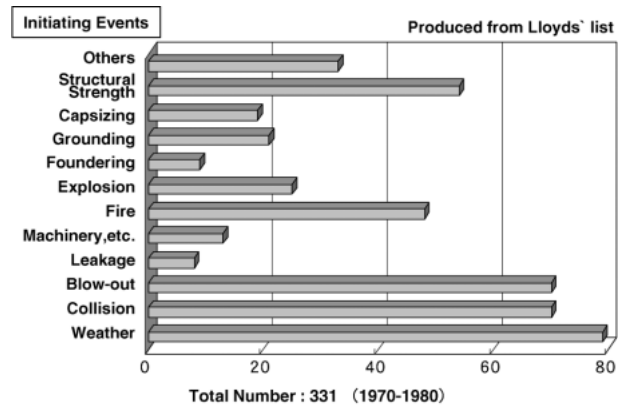


Fig. 9 Accidents statistics of Mobile Offshore Platform based on each initiating event.

よると稼動中に比べて曳航時の石油掘削リグの事故が半数以上を占めると言われている。

9. 代表的な海洋構造物の事故事例

海洋構造物の代表的な全損事故事例を取り上げ、その技術的な原因や背景に関して若干の考察を加えてみる。事故事例の情報は一般になかなか入手しがたい場合も多く、必ずしも正確で十分な情報を網羅できているとはいえない面があるが、手元に入手できた事故報告書や一部の解説等を参考に設計上の特徴を踏まえて技術的な課題との観点から筆者の見解を交えて概説する。

9.1 セミサブ型プラットフォーム『アレキサンダー・L・キーランド号』倒壊・転覆事故

9.1.1 『A・L・キーランド号』の概要

1976 年フランスでペンタゴンタイプの 80 人乗りのセミサブ型リグ(Fig. 10/11 参照)²⁾として開発・建造された。船籍はノルウェー、船級は DNV(Det norske Veritas)であり、その後 1978 年に 384 人乗りのアコモデーション(油田の作業員用洋上ホテル)・プラットフォームとして改造され、北海で稼動中であった。

Fig. 11 に見るように、5 つの丸いフーチングの上にそれぞれコラムが立ち、縦横にブレースというパイプで結ばれ、上部の骨組み構造の上にアッパーハル(デッキハウス)を載せた構造であった。

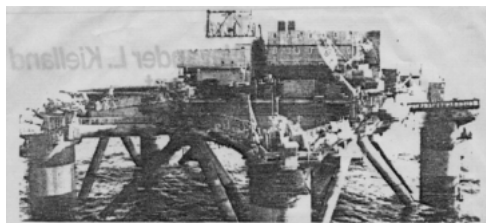


Fig. 10 『Alexander L. Kielland』.

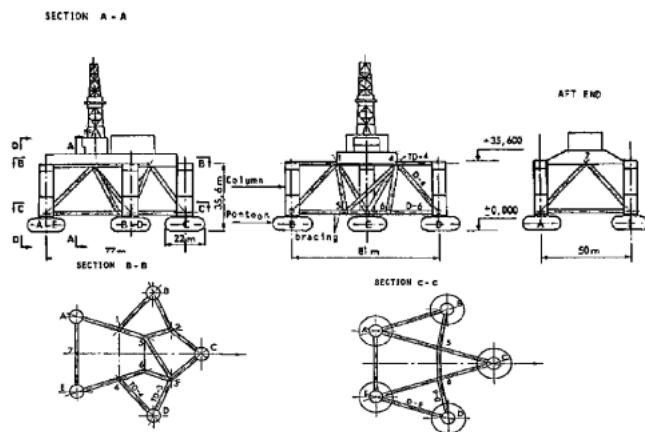


Fig. 11 General layout of 『A. L. Kielland』.

9.1.2 事故の概要と解釈

1980年3月、北海で移動中に Fig. 12 に示す直径 2.6 m、板厚 26 mm の水平方向のパイプ『D-6 ブレース』にハイドロフォン(水中音波探知機)用のサポート(直径 325 mm、板厚 20 mm のフランジ付パイプ)を取り付けた隅肉溶接部から疲労亀裂が発生し、『D-6 ブレース』が破断した。波浪による動揺と流体力による各方向の荷重により支えを失ったコラム D とフーチング D が脱落し、復元力を失い急激に傾斜をはじめデッキハウスの端部が没水し約 35 度程度傾斜した状態で一旦小康を保つ(Fig. 13 参照)が、その後デッキハウス内に浸水し約 20 分程度で転覆²⁾した。

9.1.3 構造破壊・転覆のプロセスと改善項目

事故報告から再現したキーランド号の事故の全体プロセスを Fig. 14 に、また事故シナリオから作成した FT (Fault Tree) を Fig. 15 に示す。FT を作成することは、必ずしも簡単とは言えない場合も多いが、可能な範囲で検討ツールとして用いることは、どのレベルで事故の進展を食い止めるべきかを検討する上で有効である。

まず設計段階で構造強度部材であるブレースに付属品(ハイドロフォン・サポート)を付けることを構造設計部門が知っていたのか、設計部門間の技術情報の伝達に関する疑義があったこと。また、仮に取り付けることを構造設計部門が了解していたとした場合にもブレースの疲労強度をきちんと評価していなかったのではないかと推測される。特に疲労強度部材に隅肉溶接を採用することは問題であり、この種の構造強度設計上は欠陥を残しにくい全面溶け込み溶接を採用するのが常識的である。次に製作・施工であるが、疲労亀裂の起点の破面に塗料が付着していたことから、施工時に欠陥が

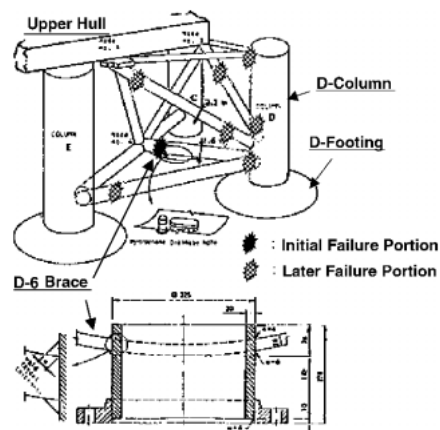


Fig. 12 D-6 Brace failure location.

Upper Hull (Deck House) Flooding
Heel abt. 30~35 deg. after broken D-column.

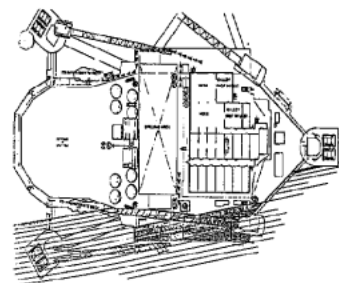


Fig. 13 Progressive flooding condition of 『A. L. Kielland』.

あったと推測され、それは目視検査や非破壊検査等でも発見できなかった。このブレースは水中に没する細長い部材であるため、浮力による曲げモーメントがかからないように孔を空けて水密構造にしていなかったことが、点検時に亀裂を発見しにくかったのではないかと指摘もなされている。なお、こうしたセミサブ型リグのブレースの疲労は、当時必ずしもはじめてというわけではなく、キーランド号より以前 1965 年頃日本で建造された米国籍の 3-フーチング型セミサブ『セドコ 135 型』でも後部水平ブレースの形状変化部(応力集中部)に次々と疲労亀裂が発見され、この種の構造物の疲労強度設計の重要性が認識されていたとも言われている。

技術の先端における情報交換の重要性を改めて感じさせる事例である。さて、こうして直径が大きいとは言えパイプ構造のブレースの疲労亀裂はある大きさに成長し、不安定亀裂となるかあるいは、荷重伝達面積が不足し、過大な応力となり急激に破断したと推測される。通常の船体構造では、板に縦横に防撓材を配置した防撓板構造を縦横に組み合わせた箱型構造をしているため、一部材の破壊がすぐ全体の崩壊に繋がることは、脆性破壊のような不安定破壊でない限りまず生じないと考えて良い。これは、ブレースのような軸力部材からなるトラス構造と箱型の防撓板構造との違いで、前者ではトラス部材の破壊がその部材の耐荷力を喪失させ、その荷重を他の部材が支えきれずに次の破壊が生じ、直ちに構造全体の不安定な破壊に繋がる可能性があるのに対して、後者は荷

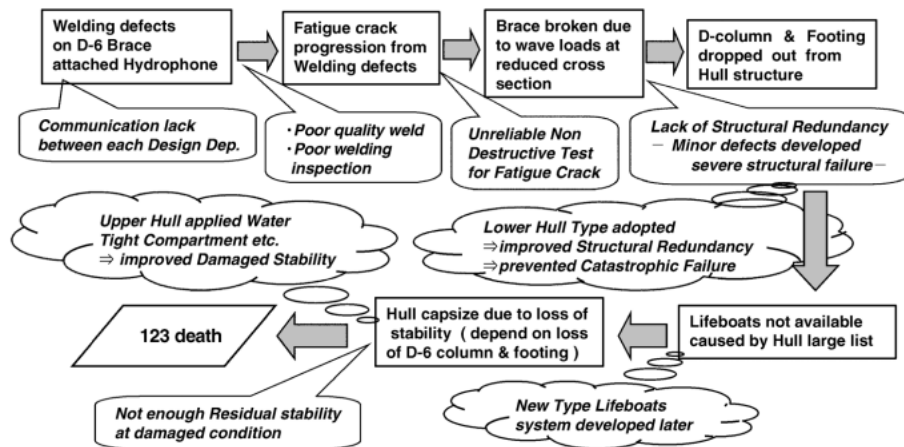


Fig. 14 Structural failure & capsizing process for 『A. L. Kielland』.

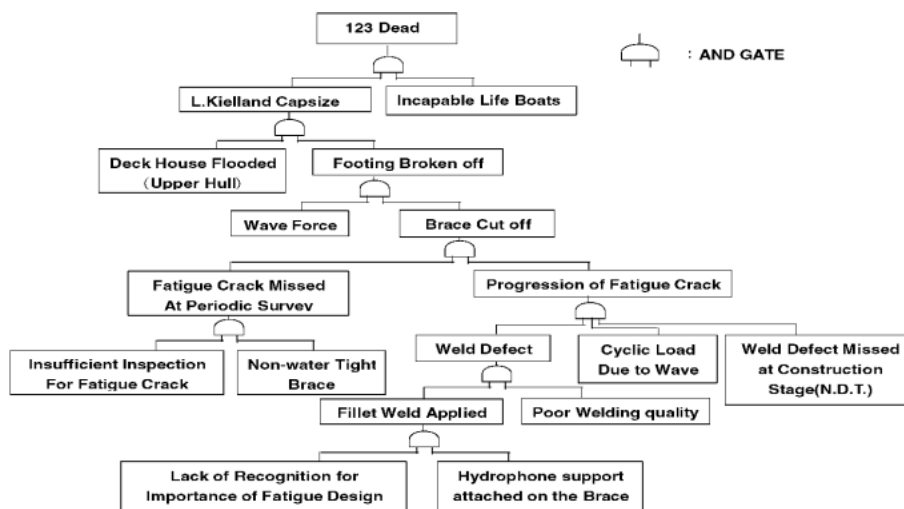


Fig. 15 Fault Tree of A. L. Kielland accident.

重伝達経路が複数存在し、ある部材の損傷後、荷重の再配分が生じ他の部材が肩代わりしてくれる可能性が高い。つまり、構造強度上の冗長度が両者では明確に異なる。冗長度の違いはトラス部材と防撓板構造の座屈強度についても同様な傾向にある。トラス部材(軸力部材)は軸圧縮力によりオイラー座屈を生じると、耐荷力を急速に失いそのまま崩壊してしまうのに対して、防撓板では、まず防撓材で囲まれたパネルが面外に座屈するが、その後さらに荷重を増やしていくと、応力の再配分が生じ、防撓材近傍の板が荷重を支え、防撓板構造全体の座屈あるいは防撓材近傍の断面(座屈後の有効幅)が降伏するまで耐荷力¹⁰⁾は上がっていく。つまり、設計上は所詮許容応力設計がベースになるが、終局強度を考慮した設計を考えれば、構造様式に合わせたより合理的な設計が可能となる。その場合最も重要なことは、その部材の破損モード、例えば材料の降伏であるか疲労であるか座屈であるか、それらの破損モードの発生する可能性を見落とさないことである。その意味で安全性の観点からは解析精度の問題より、むしろ、どのような破損モードを考慮したかということがより重要と言える。ブレースが破断するとコラムとフーチングの脱落まではこの構造形式(Fig. 11/12に見られる立体

トラス構造)と荷重条件からみると防ぎようがないもので、フーチング型のセミサブはブレース破断がそのままリグ全体系の崩壊に繋がる可能性があることが分かる。よってブレースに過大な荷重がかからないように離散的に浮力を受け持つフーチング構造をやめ、2本の大きなローワーハルを持った形にし、かつ両者を何本かのブレースで結合した設計とし、さらに万が一ブレースが破断した場合のセミサブ全体構造の冗長度の解析を行い強度面における従来より一段深いレベルの設計思想を採用するようになった(Fig. 16 参照)。また、Fig. 5の下段に示すようなブレース無しで4-コラム型のラーメン構造とするセミサブ型リグも建造されている。大型ラーメン構造の場合は、例えば疲労等でコラム接合部等に亀裂が入っても、部材が大きく、曲げ荷重主体であるため、全断面が破断するまで相当の時間を要すると考えられ、最終破断に至る前の定期検査時に十分亀裂を発見できると考えられる。

9.2 損傷時復元力特性の新規定と救命艇設備の改善

一般船舶においても、衝突や座礁、外板の構造損傷等から浸水し、沈没あるいは転覆等の大事故になることを防ぐため、構造強度設計とは別に、1区画あるいは2区画の浸水が

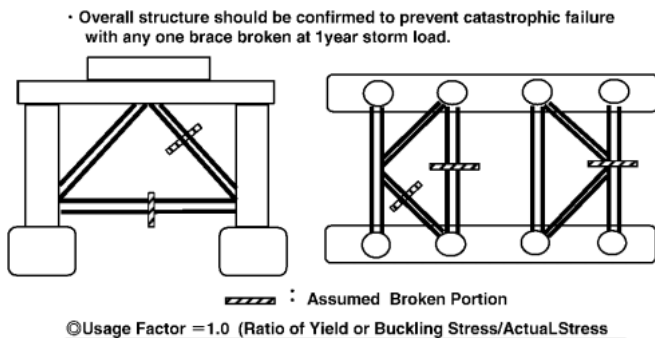


Fig. 16 Redundancy overall structural analysis for semi-sub.

生じたと仮定して損傷時復元性の検討をしている。しかしながら、後述の『オーシャン・レンジャー号』や『A・L・キーランド号』の事故にみられるようにセミサブ型の復元性能が厳しいので、海洋構造物の損傷時の復元性に関してセミサブのコラム外面からの損傷範囲等を厳格に規定し、かつ損傷後の風による傾斜角度からさらに7~10度程度(ABS/DNV)の動揺があっても転覆しないよう詳細な技術基準が造られた。

また、フーチング脱落后、しばらくはアッパーハルが浸水しなければ、傾斜はしても転覆を免れた可能性もあるため、その後の設計では上部構造物の一部に浮力を持たせる設計を要求するようになった。

さらに、傾斜したリグから救命艇を降ろす時、多くの救命艇が構造部材に当たったり、船体動揺の為に水面に降ろせなかったことが指摘され、その後の厳しい環境下で使用可能な救命艇および降下設備の開発が行われた。

9.3 セミサブ型リグ『オーシャン・レンジャー号』沈没事故

『A・L・キーランド号』の事故から2年後の1982年2月、カナダのニューファウンドランド島沖の太平洋上で、当時世界最大級(長さ約122 m/幅約80 m/稼動水深480 m/掘削深度約7600 m/1976年に日本で建造カナダの石油会社所有)のローハル/8コラム型のセミサブ型リグ『オーシャン・レンジャー号』が半潜水状態でバラストコントロールに失敗して沈没し、84名が死亡した。この事故は、セミサブのコラム外板に取り付けられた小さな窓が荒天下で破れそこからバラストポンプ室に浸水し、セミサブリグの姿勢制御用のポンプが作動したまま制御不能に陥り、そのコラムの浮力が大きく失われ、転覆したもので、すでに述べたセミサブ特有の浮遊時安定性能に深く関わる事故である。この事故以降船級規則でもコラム外板に構造強度上弱点となるような開口を開けることを禁止すると共に、主要な機器類の遠隔操作や自動化を含む制御システムの設計の改善をうながした。

9.4 ジャッキアップ型リグ『ダン・プリンス号』沈没

9.4.1 『ダン・プリンス号』の概要

この石油掘削リグは、米国リビングストン社のクラス111型として開発され、日本に技術導入され日本の造船所で1976年に『ボルグステン・ドルフィン』⁸⁾として建造(Fig.



Fig. 17 『Dan Prince』 at jack up condition (Borgsten Dolphin).

17 参照)された米国の船級協会『ABS』のジャッキアップ型リグで、リベリア船籍、稼動水深約90 m、掘削深度約6000 m、長さ約90 m、幅約54 m、leg長さ約127 mのフローティングジャッキユニットタイプである。元々、メキシコ湾内で使用することを考慮して設計されたもので、leg下部のフーチングはハル下部から出ており、曳航時はウエットtowに限られ、10000馬力(BHP)のタグボートで約4ノット(約7.2 km/h)と非常に曳航速度が遅い。その後売却されて『ダン・プリンス号』として就航した。

9.4.2 事故の概要

1980年10月アラスカ沖でウエットtowで曳航中に風速約32 m/秒、波高約15 mのハリケーンに遭遇し、船首前方に大きく張り出したヘリポートがピッチングにより波に叩かれて崩壊、甲板上に固縛が甘かったドリルパイプ等の機材が船体動揺(片振幅約20度、周期約10秒のローリングとピッチング)によりぶつかり、デッキハウスやハッチコーミングの甲板上の構造物に損傷を与えた。また、長いlegにかかる慣性力がジャッキハウス(甲板上にジャッキユニットを納めるように設置された構造物で、legとハルとの荷重伝達によって最も重要な構造物)の甲板接合部に幾つもの亀裂を生じた。大きな亀裂は長さ約5.5 mにも達し、それらの亀裂からハル内部の各区画に大量の水が浸水した。甲板からの浸水だけで何故沈没したのか不明であり、どこか外板の損傷した可能性もありうるが、船体動揺によるlegの慣性力が事故の主要な要因のひとつであることは間違いない。曳航時の疲労強度が問題になる甲板の上部構造との接合部等は亀裂が発生しにくいよう、構造設計上の十分な配慮が必要であった。

9.4.3 『ダン・プリンス号』沈没のプロセスと改善項目

『ダン・プリンス』号の事故の全体プロセスをFig. 18に示す。曳航速度の遅いジャッキアップリグのウエットtowでは、事前の気象・海象の正確な情報の提供が決定的に重要である。嵐に遭遇してから、船体動揺を軽減するためにlegを水中に降ろすことも実施されたが、それでもこの事故を防ぐことはできなかった。また、曳航前のドリルパイプ等機材の固縛が不十分といった基本的な準備の不備が事故原因の一部

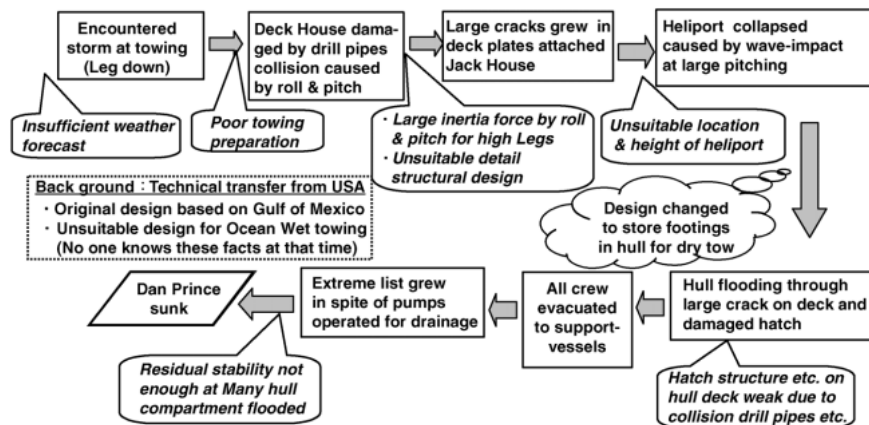


Fig. 18 Sinking process for 『Dan Prince』.

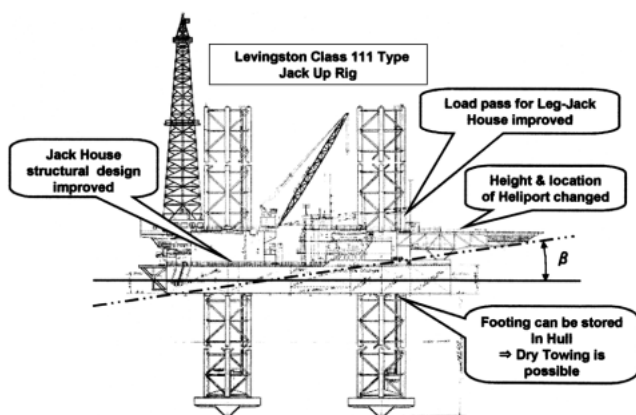


Fig. 19 Design improved items after Dan Prince accident for jack up rig.

を構成している。ローリングとピッチングによるレグにかかる慣性力により、ジャッキハウス等上部構造物の甲板接合部に亀裂が生じ、ヘリポートが波で叩かれ落下する等の構造損傷は、設計上の基本的な問題であるが、本リグがメキシコ湾を対象として開発されたジャッキアップリグであり、日本に技術導入した時点で気がつくべきであったとも思うが、当時の経験の少ない日本の技術陣にとっては難しい問題であったと考える。その後日本で開発したリグにおいてはこうした設計上の経験が生かされた。具体的には、Fig. 19 に示すようにまず①ヘリポートの設置高さを上げ、さらに水平面内の位置としてリグの斜め前方に位置を変えることで、ピッチング角度 α が少なくとも 20 度あるいはそれ以上まで没水しないような設計にすること。また、没水する可能性のある場合は、ヘリポートのパネルを取り外し可能な構造とする。②レグとジャッキハウスの荷重伝達機構を変えること。それはジャッキユニットをフローティングタイプからフィックスタイプに変更しジャッキハウスの構造を抜本的に変えることを意味する。③ジャッキハウスの甲板への取り付け構造の見直し。④そして最も基本的な問題として、フーチングをハル(船体)内部に収納可能なようにし、リグをバージに搭載しドライトウ可能な設計とする等である。

10. 事故の遺産と冗長度を考慮した安全性評価

セミサブ型リグは、ローハル、コラムと比較して相対的にブレースが細いため、疲労、衝突等何らかの原因でブレースが損傷すると部材として完全に破断することも想定されることは、「キーランド号」の事故で示された。その後、セミサブのブレース部材に関しては、Fig. 16 に示すように、原因の如何にかかわらず、いずれかの 1 本のブレース破断を想定し、荷重として 1 年再現期間確率の波浪外力でも全体構造の崩壊に至らないことを確認することが要求されるようになった。DNV 等で、こうした冗長度解析 (Redundancy Analysis) を規定した。リグの基準としてノルウェー(石油関係を含む)では、通常の構造設計に加えて、前述の構造冗長度の解析の他に、過大な荷重に対する終局限界状態の解析、および損傷後の進行性崩壊限界状態 (Progressive な破壊) の解析等を規定している。具体的には 5000 トンのサプライポートが 2 m/s で衝突しても全体構造の崩壊に至らないことおよび、甲板上 17 m 上方から質量 30 t の落下物(ドリルパイプ等)があっても事故の拡大に至らないことを求めている。

船舶の設計では、前述したように外板が破れて浸水した時に、1 つないし 2 つの区画が浸水したと仮定して損傷後の復元力特性を確保する設計をしている。こうした設計思想は他の分野、特に原子力プラントで行われている多重防護の考え方と近い。海洋構造物の設計において、部材損傷や一部の事故条件を考慮しても全体系が壊滅的な被害を起こさない様な設計思想を要求するのは、セミサブ型リグの事故がその特性故に部分的な改良では、事故の連鎖を確実に絶つことが困難であるとの認識から来ていると思われる。新しい技術は常に新しいリスクを負う可能性があること、特にセミサブやジャッキアップのような従来の一般船舶に比べて技術的にすぐれた性能を持つものは、その反面他の技術的な弱点が出てくるものであることを教訓とすべきものとする。新しい概念による重要な構造物の開発・設計に当たっては、“技術の失敗の事例”を総合的にとらえると共に、技術の基本にもどって再評価することが重要で、特に、小さな損傷が全体系のカタ

ストロフへ至る事故の連鎖をどこのレベルで防護できるか、損傷モードと冗長度に関する深い洞察が必要であり、そのためには、構造強度における終局状態の簡便な推定方法の研究が望まれる。

11. ま と め

事故に関する情報はなかなか表に出にくいものであるが、技術の発展にとって重要なものであることは論をまたない。海洋構造物の設計に携わった経験から、少し古い事例であるが、設計の概要と共に過去の2~3の事故事例について考察し、構造・復元性能を含めて安全性に関する議論を展開したが、筆者の力量・知識不足等による誤りあれば、ご指摘いただければ幸いである。

株式会社モデックおよび元三井海洋開発関係の方々から多くの有用な資料を提供いただいたことをここに感謝いたします。また、論文執筆にあたり広くかつ高い見地からご指導いただいた東京工業大学・大学院情報理工学研究科・瀧口克己教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) The Society of Naval Architects of Japan: *Nihon Zosen Gijutsu Hyakunensi* (1997) p. 298-302.
- 2) T. Moan: The Alexander L. Kielland Accident, Proceeding from The First Robert Bruce Wallance Lecture, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute Technology, 1981, p. 1,4-7, 11, 18, 19.
- 3) K. Inoue: Kaiyo Kozobutsu ni okeru kozoanzensei, Bulletin of The Society of Naval Architects of Japan 825, 1998/3, p. 157-161.
- 4) K. Sao: Kaiyo Kogaku Kenkyujo Syuppanbu, *Jyuyu Osen/Ashita no Tameni* 1998, p. 309-312.
- 5) *Rules for Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units*, 2001, American Bureau of shipping (ABS).
- 6) *Rules for Classification of Mobile Offshore Units*, Det Norske Veritas (DNV), 1996.
- 7) K. Yoshida K. Motozuna, Y. Kumakura and Y. Takahashi: kyochu, *Kaiyo Kogaku no Kisochishiki*, Seizandosyoten, 1999, p. 136, 25, 137.
- 8) MODEC, *JACK-UP RIG Kenzo no Ayumi*, p. 22-27, 58.
- 9) H. Maeda, K. Nishimoto and K. Masuda: Casualty Statistics of Offshore Structure, 7th OCEAN ENGINEERING SYMPOSIUM, 1984, The Society of Naval Architects of Japan, p. 97.
- 10) Y. Yamamoto, H. Otsubo, Y. Sumi and M. Fujino: kyochu, *Sen-tai Kozou Rikigaku*, Seizandosyoten, 1986, p. 78-90.