

海洋油田開発における固定式プラットフォームの計画、設計および建設作業の問題点と手順

日本オイルエンジニアリング 榊 山下敢一 鈴木正宏

1 はじめに

1-1 海洋油田開発における最近の特徴

ここ2-3年の特徴的な動きは、次の通りである。①更に深い海域の開発が進んでいること - 例えば、カリフォルニア沖約214mの水域。②気象条件の厳しい海域での開発が進んでいること - 例えば、北海。③新しい型式の海洋構造物が実現している - 例えば、エコフィスク油田海中貯油タンク。④海底仕上げ、海底採油技術が実用化しつつあること。⑤わが国でも、全天候型半潜水型掘さく装置が稼動しはじめたこと。⑥海洋工事船舶でも、旋回型クレーン船が稼動しはじめたこと。

1-2 海洋油田開発方式の検討

もう一つの大きな特徴は、わが国でもいよいよ大陸棚の深い部分の開発が具体化しようとしていることである。水深80mをこえる海洋油田の開発にあたって、まず次の3方式が検討される。①海底仕上げ、海底採油による。②海底仕上げと固定式プラットフォームの併用。③固定式プラットフォームによる方法。技術的検討、採算検討の結果、固定式プラットフォームを採用することとなると、次に坑井の掘さく方法が論じられる。①移動式掘さく装置を用いる。②テンダーバージ同伴型プラットフォームを用いる。③全塔載型プラットフォームによる。一般に、①は機動性にすぐれるから試掘用に用いられ、②はプラットフォーム費用を節約することができ、③は①、②に較べて天候の影響を受けることが少いとされている。

もつと浅い水浅であれば、開発方式にはさまざまな手法が可能であつた。しかし、水深が増すにつれプラットフォーム費用は高価になるから、プラットフォームの機能を集約化し、あるいは、海上の処理を減らして、プラットフォーム数と費用を節約しようという傾向が顕著になる。

1-3 海洋プラットフォームの型式の選定

構造物が大型化し、それに伴つて施工用機械、船舶が大きくなるにつれて、部材数を減らして、構造物の骨組みを単純化することが可能になつてきた。最近では、全塔載型プラットフォームとして次の型式が多く用いられている。①8脚のテンプレート型プラットフォーム。②4脚の塔型プラットフォーム。ここで、テンプレート型 (Template type) とは次の3つの部分から成立つものを言う。①杭打ちのためのさや管と杭の横ブレース材とから成る溶接パイプ造の立体骨組構造 (一般に、ジャケットと呼ぶ)、②海底にジャケットを固定するための杭、③上載設備を乗せるためのデッキ。深い水深に用いるテンプレート型プラットフォームでは、ジャケット杭のほかにスカート杭が用いられている。塔型プラットフォームとは比較的に数の少ない大径の脚をもつたもので、ジャケット杭を省いてスカート杭だけが用いられる。塔型プラットフォームはバージに積んで運ぶかわりに、設置地点まで浮かして運び、注水して設置することが多い。また、スリーブパイプのように、大きな1本の部材から成るものを井筒型プラットフォームと呼んでいる。ここでは、海洋プラットフォームを海洋構造物一般ではなく、油田で用いる狭義のプラットフォームに限定して述べることにする。

2 海洋プラットホームの設計条件

2-1 海洋プラットホームの等級の考え方

海洋油田の構造物では、その安全性の等級を採用した設計条件の年間を通じての生起頻度の逆数で表わしている。例えば、年間1パーセントの生起頻度をもつ暴風条件（再現期間100年）に対して設計したプラットホームはクラス100であると言われる。等級は①構造物の使用期間、②構造物の油田における重要性、等を勘案して決定されるが、ここで、判断の基準として「充分安全な確率」とはどの程度かと言うことが問題となる。油田の構造物では、年間1パーセント、全寿命期間に対して20ないし30パーセントが多く用いられているようである。これから後述の設計荷重の組合せ条件がどのようであれ適正な設計条件を選ぶことが可能となる。

2-2 自然条件の決定法

設計条件として再現期間の大きい風や波の諸元が要求される。このような海上の風や波の推定は長期間の実測記録に基くことが望ましいが、実際問題として、そのような恵まれた場合は少い。海上の船舶や掘さく装置で得た観測記録を至近の陸上観測地点での長期記録と対比して整理し、超過確率分布から風向別設計風速を決定することが多い。

また、設計波（沖波）は継続風の記録から推定することが多い。風の記録を風向風速別に整理して、継続時間と再現期間の関係を求めれば、これからSMBの方法またはスペクトル法を用いて、再現期間ごとに生起し得る最大の沖波を推定することができる。わが国では、従来SMBの方法が多く用いられてきたが、風域が移動する場合や海底地形が複雑な場合、遮蔽物がある場合などの補正方法に経験的要素が大きいうらみがあった。最近ではスペクトル法を用いて、かなりの精度で波の推定を行うことが可能になってきている。

波の推定のもう一つの方法は、過去の気象記録の中からいくつかの厳しい場合を選び出して、ケーススタディを行なうやり方であつて、前の方法を定量的な方法とすれば、これは定性的方法と言つてもよい。資料の選定が適正であるほど、その水域の特性をよく反映することができる。スペクトル法を用いて波を推算すると、顕著なうねりの影響が現われることが多い。このような場合の設計波（沖波）の取扱いとしては、実用的に成分波の自乗和の平均を取っているが、必ずしも理論的に割切れている訳ではない。構造物の建設地点での設計波としては、波向別設計波（沖波）に微小振巾波またはストークス波理論による波の変形、減衰の影響を考慮し、その最大波を用いている。

直立する円柱に波が来襲する場合に、円柱に働く波圧は周知のように次式によつて求めることができる。波峰附近では水粒子の運動の鉛直成分は小さく、無視できるから（絶対座標系で示して）、

$$dFx = \frac{W}{2g} Cd \cdot D \cdot U^2 \cdot dz + \frac{w}{g} Cm \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} dz$$

ここで、Fx：単位部材長当り波力、W：海水密度、D：部材径、U：水粒子水平方向速度、Z：部材長さ、Cd：抗力係数、Cm：質量力係数

直立する円柱の代わりに任意の骨組構造物を考えると、次のような手順で波圧を求めることができる。①波座標系に骨組座標を入力する、②各骨組部材上の点(Xi、Yi、Zi)の波の水粒子の速度Ui Wiおよび加速度 $\frac{\partial U_i}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial W_i}{\partial t}$ を求める、③水粒子の速度、加速度を部材座標系(x、y、z)に変換して

部材座標系成分とし、これを用いて部材に働く波圧 dF_y 、 dF_z を求める。④ dF_y 、 dF_z を再び絶対座標系に変換して dF_x 、 dF_y 、 dF_z+h を求め、これを全部材上の点について積分して全波力、転倒モーメントを得る。ここで、簡単のために、上の座標変換を省略して、波の進行方向についての見付面積を用いたとすると、構造物に働く波圧にはかなりの誤差を生じることが判つている。さて、骨組構造物では構造物に最大波力を与える位相は、波峯位置を少しずつずらして計算を繰返して求めなければならない。一方、特定の部材についてはその位相で部材に最大波力を与えるとは限らないから、波力による曲げモーメントの影響を考慮に入れておく必要がある。そして各波向について計算を繰返す。複雑な形状をした部材における遮蔽効果については、水理実験によつて概略値を知るのがよい。波による水面変化は波力による転倒モーメントを増加させるように働くので、計算に加える。

海洋プラットホームに働く流れには、①潮流、②海流、③風送流 等がある。潮流は比較的短期間の観測によつて調和分解することができるが、海流は長期間の観測によつてもおよその値を知り得るに過ぎない。風送流は風の継続時間によつて大巾に異なる。したがつて、流れが主な設計条件となる場合以外は、およその推定値を設計に用いていることが多い。

深い海の土質調査の方法には多くの困難が付きまといつている。その理由は、単に安定した調査作業用足場が得にくいと言ふばかりでなく、調査方法そのものにかかわる次のような問題を含んでいるからである。①観察による環境との対比ができないこと、②調査数が絶対的に少なく、孤立した地点の調査に止つてしまいがちなこと、③深度が大きいために、現位置試験の精度が落ちること、④資料の採取に困難が伴ふこと。基礎杭の設計のための土質調査は次の点に重点を置いている。①土層深さ、区分を確定すること、②杭支持力を算定するのに必要な土質数値を求める。③土の弾性係数を知る、④洗掘に対する海底面の土の性状、

2-3 プラットホーム上での作業条件

海洋油田開発に使用されるプラットホームのうちで、とりわけ全塔載型プラットホームの設計条件が他のプラットホームと異つてゐるのは次の2点においてである。①上載荷重が大きいく、②使用条件（作業条件）が変化すること。一般に、全塔載型プラットホームの作業条件の推移は次のように考えられている。①プラットホームを建設すると、まず、掘さく装置を載せて採収井を掘さくする。掘さく作業中にはさまざまな荷重状態が発生する。②掘さく作業中に試油ガス作業が行なわれる。③掘さく完了後、掘さく装置を撤去し、生産設備を載せて生産作業を行なう。④生産開始後、坑井の改修が必要となることがある。このうちで掘さく作業中の上載荷重は例えば次の通りである。①掘さく装置 1,440 t、②油井用鋼管 330 t、③掘さく用資材 1,170 t、④合計 2,940 t、また⑤強引荷重 350 t、これらの荷重は作業段階によつて変化し、掘さく坑井位置によつて移動する。したがつて設計条件としては、作業条件のさまざまな場合を考えなければならない。

2-4 荷重条件の組合せと安全率

一般的に組合せ荷重条件とその場合の材料の許容応力度、基礎安全率を示すと次の通りである。

- | | | |
|---------------------------|----------------------|-------------------|
| ①掘さく作業中に最も厳しい自然条件が発生した時、 | $\sigma_a = 0.8 F_y$ | $F \cdot S = 1.5$ |
| ②平常の自然条件下で最も厳しい掘さく作業を行つた時 | $\sigma_a = 0.6 F_y$ | $F \cdot S = 2.0$ |
| ③生産作業中に最も厳しい自然条件が発生した時 | $\sigma_a = 0.8 F_y$ | $F \cdot S = 1.5$ |

④平常の自然条件下で最も厳しい生産作業を行つた時 $\sigma_a = 0.6 F_y$ $F \cdot S \cdot = 2.0$

⑤軽荷時に最も厳しい自然条件が発生した時 $\sigma_a = 0.8 F_y$ $F \cdot S \cdot = 1.5$

3 骨組形状の評価

3-1 立体骨組構造解析の手順

海洋プラットホームの設計計算は（どのような立体構造解析プログラムを用いるにせよ）海底面に原点をおく絶対座標系を用いて構造物の形状を入力する。これに対して、荷重条件の入力データは絶対座標系で入力することもあるが、部材の一方の格点を原点とする局部座標系（部材座標系とも言う）で入力する方が便利ことが多い。同様に、外力に対する部材の性能を示す部材断面諸係数も局部座標系で示したほうが便利である。絶対座標系と局部座標系の関係は、当然プログラムの中で厳密に定義されていなければならない。

さて、構造解析の結果得られる部材応力は、一般に局部座標系で出力され、一部の釣合い条件（支点反力や変位量）が絶対座標系で出力される。局部座標系で打出される部材応力には、①軸方向力 F_x 、②せん断力 F_y 、 F_z 、③ねじりモーメント M_x 、④曲げモーメント M_y 、 M_z の6成分が含まれるが、その場合に主応力が局部座標面上に現われるように、あらかじめ局部座標系が定義されていることが必要である。主応力が座標面上にあるとすると、断面に生じる最大応力度は比較的容易に計算することができる。電子計算機に主応力面に関する断面諸係数を入力しておいて、部材縁に生じる最大応力度を打出することも容易である。しかし、一般には、次のような理由から、部材応力度を機械的に打出すのではなく、一度骨組の応力状態を評価してから断面計算に進むことが多い。①ある長さを有する部材軸方向の応力分布を検討するため。②ある部材断面のどの部材縁に最大応力度を生じるか検討するため、③部材の局部挫屈の影響を配慮するため。

海洋プラットホームのような複雑な立体骨組構造では、主応力のどの成分が大きいのか、一般的に限定することができないから、最大応力度を生じるであろう部材縁について等価応力度を求めて、これが許容応力度より小さいことを確かめなければならない（Misesの条件）。

3-2 局部挫屈、鋼管溶接継手

海洋プラットホームの設計に使用する強度計算の規準選択にあたって考慮しなければならない要素は次の通りである。①材質および構造要素について汎用性の高いこと、②鋼管構造について適用し易いこと、③安全率が適正であること、④短期荷重に対する許容応力度の割増規定が適正であること、⑤衝撃、疲労について具体的規定があること、⑥溶接の許容応力について規定があること。残念ながら国の諸規準にはこれらの点を満足するものがない。国際的にはAISCの規準が多く用いられている。

海洋プラットホームの構造上の特徴の一つは、その部材に鋼管が多く使用されることである。しかも、①部材を直接溶接している。②部材の径肉厚比 D/T が30をこえ、100近くなることもある。③格点に多くの部材が集中する。④主管と支管の比 D/d が3以上となることがある。⑤荷重のうち動的荷重の割合が大きい。

海洋という特殊、かつ複雑な環境下で大きな繰返し応力を受けるので、鋼管溶接継手の強度については従来から多くの研究が行なわれ、継手形状にも歴史的な変遷がある。現在では継手の肉厚を増す

方法が多くとられている。降伏点の高い、肉厚の材料を使用した溶接継手には完全な溶け込みを有するグループ溶接を用い、実際に溶接施工法試験を実施して具体的な溶接方法を決定している。

3-3 海洋プラットホームの地震時の挙動

水深が増すにつれて地震時の挙動が問題となつてきた。その特徴は次の通りである。①デッキ上に極端に大きな荷重が集中している、②立体トラス部は大きな剛性を示し、カラム部と基礎杭は大きな横方向たわみを生じる。とくに杭のスウェイの影響が大きい、③固有周期がかなり大きい、④水の粘性抵抗が働らく、⑤鋼構造であるから、はつきりした線形の復元特性を示す。海洋プラットホームの動的特性を明らかにするためには、まだまだ多くの困難が残っているが、さまざまな角度からの追求が試みられている。

4 海洋プラットホームの基礎杭

4-1 杭の支持力

海洋プラットホームの基礎杭の特徴は次のように要約できる。①非常に大きな軸方向力が働らく、例えば、押込力で3000t、引抜力で1000t、②同時に、大きな水平力が働らく— 200t程度。③海底面附近の地盤が軟弱で、かつ洗掘が予想されることが多い— 曲げモーメントが大きい。

静力学的支持力公式を用いて長尺杭の支持力を求める方法については既に一応の合意ができていますが、海洋の支持杭についての具体的な土性値（例えば、粘着力C、肉部摩擦力 ϕ など）および係数（例えば、土圧係数Kなど）の評価の段階で多くの問題がある。

API RP 2Aでは杭支持力に対する安全率として、さきにかかげた値を示しているが、その根拠として次の理由が考えられる。①自重が小さく、上載荷重が大きい、上載荷重は最大値を用いていること、②プラットホームはたわみ性に富み、建築物等に比して基礎の弾性変形の影響が小さい、③短期の風や波の荷重は瞬間的で、短時間の荷重に対して土の強度が一般に大きくなること。④長尺の杭が用いられるため、どちらかと言えば安定した支持力が得られること。

水平力に対してジャケットと杭の連続性を確保するためにセメントグラウト等を施す場合が多い。その結果杭はジャケットから伝達される3次元的な力に対して、上端を拘束された突出した杭として働らく。洗掘等による突出長によつて、杭に生じる曲げモーメントの大きさは大巾に変化するが、一般的に言つて、曲げモーメントに耐えるために必要とする杭肉厚が軸方向力に対して必要な肉厚をこえることもまれではない。杭に生じる応力を3次元的に解いた場合に、その主応力は座標系の座標面上に現われるとは限らないから、一般的には、まず主応力面を求めてそれに対する等価応力から必要肉厚を計算している。その結果、海洋プラットホームに用いられる杭は海底面附近で著しく肉厚となり、ジャケット内および海底面下で肉厚を減じることが多い。

4-2 杭の打込み

さきに述べたような大きな支持力に打克つて杭を打込むことができるかどうか。しかも、肉厚部分が海底面附近にくるように所定の根入深さに打止めることができるかどうか、ということが施工上大きな問題となる。海洋プラットホームに用いる杭の重量は、入手し得るハンマー重量に対して、陸上の杭の場合とは比較にならないくらい大きい。波動方程式を用いた解析法によつて、打撃エネルギーの伝達の機構がかなりよく解明されるようになってきたが、それにも拘らず過去の実績では予測した

通りの打込効率で打込み得なかつた場合が多くある。

このような場合の対策として、海洋プラットホームの建設作業では①杭内を掘進して再度打込む、②杭先にパイロット孔を掘進して打込む、③杭先を掘広げて打込む、④支持力不足となつた場合には、杭先を掘進して小径の補助杭を挿入し、セメントグラウトによつて杭と結合する、などの方法が用いられている。この時の支持力の評価については、経験的に土圧係数 K を減じて用いる。

ジャケットと杭のグラウトのためのパッカーには次の3つがある。①杭にゴムパッカーを取付ける、②グラウトノズルを2段に取付け、最初のグラウトによつてジャケット下端と杭をシールする方法、③ジャケット下端に水圧式ゴムパッカーを取付ける方法。補助杭を挿入するために杭先端以下まで掘進した場合のセメンチングの方法には次の3つがある。①掘さく坑内にセメントを充填してから補助杭を挿入する、②補助杭にパッカーをつけておいてセメントを圧入する。③補助杭を海上までつないでにおいて、セメントプラグを用いて圧入し、セメント圧入後補助杭は途中で切断して上部を回収する。

5 海洋プラットホームの建設

5-1 建設作業の手順

海洋プラットホームの建設作業の手順は次の2つに大別される。①組立てー積出しーバージによる輸送ー吊下ろしー据付けー杭打ちーデッキ設置、②組立てー進水ー浮上曳航ー沈設ー据付けー杭打ち。前者はテンプレット型プラットホームに対応し、後者は塔型プラットホームに対応している。海洋プラットホームの建設作業では500t吊ないし800t吊の旋回クレーンを塔載した大型バージを使用して作業を集約して行ない、極めて短時間で海上作業を完了するのが特徴で、海上で素材を組立てて建設するような場合はまれである。大型のテンプレット型プラットホームではジャケット重量が大きくなるため、ジャケットをいくつかに分割して製作し、海上で組立てることもあつた。その後、進水用バージが用いられるようになり、現在では3000t近いジャケットをバージで輸送し、バージに注水、傾斜させ、あるいはジャッキで押して進水させる方法が①の応用として用いられている。進水用バージにはあらかじめ進水用レールや進水用回転腕木が取付けられていて、ジャケットの重心が腕木の上に乗ると回転して容易にバージから離脱し得るように工夫されている。一方ジャケットには補強やフロートが取付けられ、ジャケットが進水時応力に耐え、かつ進水してから安定を保つように設計される。

5-2 浮体の安定

進水したジャケットを引起して据付ける場合にも浮体の安定が問題となるが、塔型プラットホームの曳航、沈設ではより決定的な意味をもつ。大型のジャケットを浮上させるために、ジャケット脚の両端を密閉し、必要に応じフロートを取付ける。このジャケットの安定問題は次の3つの段階に区分される。①曳航中、②沈設時、③据付時。

曳航中の安定条件としては、波や風に対する安全率、共振が問題となる。沈設時の条件としては①徐々に注水して回転させるための手順、②注水区画、③注水装置、④一部に流体が入つた時の安定性、⑤中空部材の水圧に対する強度、⑥クレーンによる援助の方法、吊金具位置、等が問題となる。また、所定の位置に設置し終つた段階で①のクレーンを外した時の外力に対する安定性、②密閉装置、フロートの取外しの方法、等が問題となる。