

新日本製鉄(株) 正員 山本 諒
 新日本製鉄(株) 正員 川瀬健夫
 (株)コルバック 正員 ○ 岡田 寛

1. まえがき 近年、海洋で採掘される石油、ガス資源開発の進展に伴い、各種海洋施設、構造物の建設が急速に進められている。これら施設、構造物に支配的な外力は波浪であり、これは一般の地上構造物に働く荷重とは著しく異なった周期性を有する動的荷重である。したがって、このような海洋の施設、構造物の設計にあたっては、その動的特性や動的応答について充分検討しておく必要がある。ここでは、固定式スチンガーを用いたレイバージ工法により一定張力下で敷設中の海底パイプライン(バージ部、スチンガー部を除くサブバンド部)に対し、(1)固有振動周期 (2)波力、潮流力、カルマン渦揚力、レイバージ動揺等の振動外力による動的応答 (3)敷設作業規制 の3点に関し、解析あるいは検討した点について述べる。

2. 解析の前提 ここでは、対象とした海底パイプラインが、大きな張力を受けていること、海底着底点の支持条件が明確でないこと、などその取扱いに複雑な点があるが、最終的に一般に次式で示される多質点系の線形モデルとして解析した(図-1参照)。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

ここに; $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$: 静的な釣合状態からの質点の変位およびその速度、加速度ベクトル

$[K] = [K_E] + P[K_G]$: 剛性マトリックス ($[K_E]$: パイプの梁としての普通の弾性剛性マトリックス

P : 張力, $[K_G]$: 幾何剛性マトリックス)

$[M] = [M_p] + [M_w]$: 質量マトリックス ($[M_p]$: パイプ自身の質量によるもの, $[M_w]$: 海水の付加質量によるもの、集中質量系で考えているので $[M_p]$, $[M_w]$ はいずれも対角マトリックス)

$[C] = \alpha [K]$: 減衰マトリックス (α : 比例定数)

$\{F(t)\}$: 動的外力, 次の3種類を考えた;

i) 波力, 潮流力— (2)式で与えられる波力強度式により時々刻々に変化する節点集中荷重として自動算定した(波力理論は微小振幅波理論を用いた)。

ii) カルマン渦揚力— (3)式で与えられるカルマン渦揚力強度式から、時々刻々に変化する節点集中荷重として自動算定した。

iii) レイバージ動揺によるL.O.P.の強制変位— L.O.P. (Lift off Point, 図-1参照)の各方向の変位量 $\delta(t)$ が(6)式の形で与えられる時、(6)式を動的外力とした。

$$q = \frac{w_0}{2g} C_D V |V| + \frac{w_0}{g} C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

$$q = \frac{w_0}{2g} C_L D \cdot \sin(2\pi f t) \quad (3)$$

$$f = S \cdot V / D \quad (4)$$

$$\delta(t) = \delta_0 \sin(\omega t + \epsilon) \quad (5)$$

$$F(t) = -M_{12}\ddot{\delta} - C_{12}\dot{\delta} - K_{12}\delta \quad (6)$$

C_D : 抗力係数 S : ストロークル数

C_M : 質量力係数 V : 水の粒子速度

C_L : 揚力係数 D : パイプの外径

g : 重力加速度 w_0 : 海水の比重量

構造モデルの支持条件は次のように考えた;

- L.O.P. { 完全固定支持
- 回転バネ支持
- ピン支持
- 着底部 { ピン支持
- ピン-ローラ支持

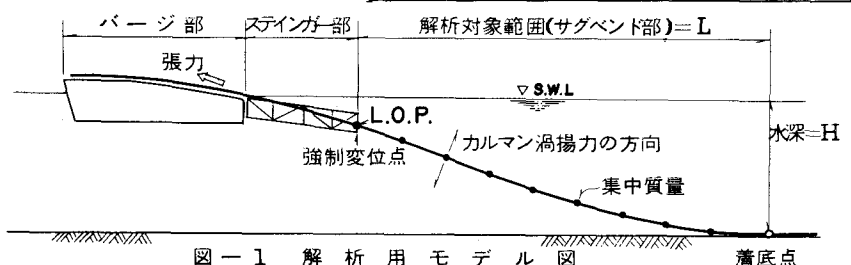


図-1 解析用モデル図

3. 解析の結果 $D=323.8\text{mm}, t=12.7\text{mm}, H=75\text{m}$

$L=275\text{m}$ のパイアラインに対し、まず解析を行った。表-1に着底部支持条件をピン・ローラーとして求めた固有周期を示す。この結果から、1次の固有周期が非常に長く、問題となる外力の周期、2~6秒と一致する次数は4次より高次であることがわかる。応答解析はモーダル・アナリシスを用いて、L.O.P. 固定、張力 $P=7\text{ ton}$ の場合につき、減衰係数 $\alpha=0.1$ (1次モード減衰係数約1%)として5ケース解析した。各ケースの条件と最大応答応力を表-2に示す。その結果、ケース1,2はL.O.P.が海面下13mのせいか、応答応力はきわめて小さく、またケース3のカルマン渦揚力によるものは 1000 kg/cm^2 程度であり、応力レベルとしては問題のないものとして考えてよい。L.O.P.強制変位のケース4については着底部が他の支持条件の場合にも解析したので表-2と一緒に示す。これらの結果から、 α が小さい場合には、強制変位の周期が固有周期に近いとかなり高い応力が発生すると言えらる。

以上のことから、敷設中の海底パイアラインの支配的外力は、レイバージ等の動揺にもとづく強制変位によるものと考えられよう。そこで $D=323.8\text{mm}$ $t=9.525\text{mm}$ で、コンクリートコーティングしたパイアラインに対し、その敷設作業規制の目的でL.O.P. 固定と回転バネの支持条件で $\delta(t)=1 \cdot \sin(2\pi t/T)\text{ m}$ ($T=2\sim 6$ 秒)として、 T に対し最大応答応力 σ をプロットしたので図-2に示す ($P=18\text{ ton}, H=75\text{m}, C=300\text{ m}$)。図-3は、L.O.P. 固定で $T=4$ 秒の場合に、L.O.P. で最大応力が発生する時の変形状態と曲げモーメント図である。

4. 結論 (1) 固定式スチンガーを用いたレイバージ工法による敷設中のパイアラインに支配的応力を生じさせるのは、レイバージ動揺によるL.O.P.の強制変位である。(2) 減衰力の大きさによるが、パイアラインが共振状態に接近したときは、張力を変化させることにより共振から脱することができる。(3) 敷設作業の打ち切り、あるいはバージの方向変換の判断基準となる波浪条件を σ - T 曲線から得られる。

5. あとがき 今後の課題としては、境界条件の明確化、振動特性(付加質量、減衰などに関する諸係数)の定量化などを計り、スチンガー部分、バージ部分を合わせたパイアライン全体を一体化して、その動的挙動を把握することが必要であり、また、実際現場における観測結果とあわせて実用化を試みる必要がある。

表-1 固有周期(秒)

支持条件	固定	回転バネ*	ピン	固定
次数	張力 $P=7\text{ ton}$	張力 $P=7\text{ ton}$	張力 $P=7\text{ ton}$	張力 $P=9\text{ ton}$
1	27.96	28.93	30.44	25.06
2	12.49	12.93	13.53	11.35
3	7.49	7.77	8.10	6.92
4	5.03	5.22	5.41	4.72
5	3.60	3.74	3.86	3.42
6	2.70	2.81	2.88	2.60
7	2.10	2.18	2.22	2.04
8	1.68	1.74	1.76	1.64

* $k\theta = 235\text{ t}\cdot\text{m}/\text{rad}$

表-2 各解析ケースの荷重条件と最大応答応力

ケース	種類	波高(m)	周期(秒)	潮流速度(ノット)	方向	最大応力(kg/cm^2)
1	波力	1.5	3.27	2.0	P/L	0
2	波力	2.0	3.78	2.0	P/L	0
3	カルマン渦揚力		1.75	2.0	P/L直角	1046
4	強制変位	1.5	3.27		鉛直	1957
5	強制変位	2.0	3.78		鉛直	2752, 1307 1866**

* L.O.P.バネ支持のとき, ** 張力9 tonのとき

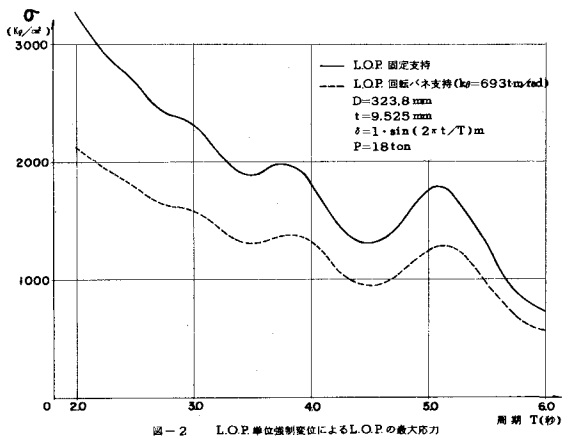


図-2 L.O.P.単位強制変位によるLOPの最大応力

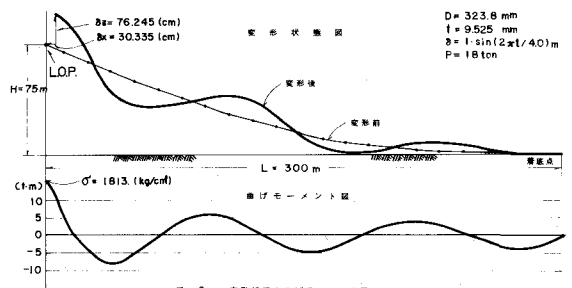


図-3 変形状態と曲げモーメント図