

深海域海底パイプライン敷設時における 荒天時作業規制について

山 本 淳*・川 瀬 健 夫*

1. 緒 言

近年、海底エネルギー資源開発の活発化に伴い、数多くの石油、ガス掘削生産用プラットフォームおよび石油、ガス輸送用海底パイプラインが建設されている。また海洋開発の対象とする海域が浅海域から深海域へと進出するに伴って苛酷な自然条件下での海洋工事実施が余儀無くされており、体系化された施工管理が強く要請されている。本報告は敷設船工法、特に4点支持スティンガーを使用した海底パイプライン敷設時における荒天時作業管理の確立を目指したものであり、パイプライン敷設作業管理部分をスティンガーと敷設パイプに分離し、それぞれの部分についての施工管理手法を確立し、これらを基に海底パイプライン敷設時における荒天時作業基準を与えようとするものである。さらにこの管理手法を裏付けるべく、最大水深 55m での水道管敷設工事においてスティンガーおよび敷設パイプの挙動についての現場測定を実施し、それらの結果もあわせ示した。

2. 荒天時作業管理法

図-1 に示す敷設船工法による海底パイプライン敷設系をスティンガー部と放出点 (Departure Point) から着底部までのパイプライン部に分割し検討するものとする。スティンガーに作用する力としては、自重、浮力、敷設パイプの重量、波力、潮流力および敷設船の動揺による慣性力等が考えられる。4点支持スティンガーの場合、特に敷設船の動揺による慣性力が支配的なものとなる。自重、浮力、敷設パイプの重量を静的荷重とする

と、波力、潮流力および敷設船動揺に対するスティンガーの振動方程式は次のように表わされる。

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

ここで、 $[M]$ は質量マトリックス (付加質量を含む)、 $[C]$ は減衰係数マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ は構造物の加速度、速度、変位ベクトル、 $\{F\}$ は外力ベクトルである。

波力は次式で算定する。

$$F = C_D \frac{\rho}{2} A \dot{U} |\dot{U}| + C_M \rho V \ddot{U} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 C_D は抗力係数、 ρ は海水の密度、 A は部材の投影面積、 C_M は質量力係数、 V は部材の体積、 $\dot{U}$, $\ddot{U}$ は水粒子速度 (潮流速も含む)、加速度であり、今回は $\dot{U}$, $\ddot{U}$ を微小振幅波理論により求めた。

敷設船動揺による外力は近似的に次式で算定する。

$$F = -\dot{M}\ddot{Z} - C_D \frac{\rho}{2} A \dot{Z}_{rms} \dot{Z} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $\dot{Z}$, $\ddot{Z}$ は敷設船のスティンガー取付部での動揺速度、加速度である。 $\dot{Z}_{rms}$ は敷設船のスティンガー取付部での動揺速度の自乗平均平方根である。

以上の外力に対して、波浪は規則波とし、また敷設船のスティンガー取付部での鉛直方向動揺速度、加速度を調和関数で表わし、 $C_D=0.5$, $C_M=1.5$, $h=1\%$ としてモーダルアナリシスによってスティンガーの応答変位および部材応力度を算定した。スティンガーに関しては部材応力度および格点部の応力度が API-RP-2A¹⁾ に規定されている許容値 (部材に圧縮力と曲げモーメントが同時に作用した時の許容値および鋼管格点部のパンチング・シアに対する許容値) に達する時をもってスティンガーの作業限界とした。敷設船の Heave, Roll, Pitch によるスティンガー取付部での鉛直加速度および Pitch 角変動量とスティンガー先端変位との関係は 図-2 である。これらの慣性力によって部材応力度および格点部の応力度が許容値に達するときのスティンガー先端変位は 図-3 の点線上の値である。図-3 において δ_p は回転慣性力によるスティンガー先端変位を、 δ_h は鉛直慣性力によるスティンガー先端変位を表わす。次に自重、浮

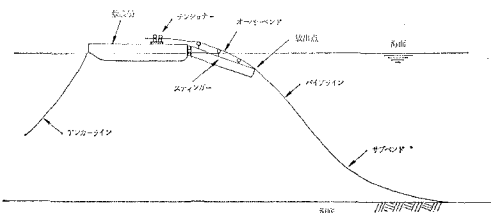
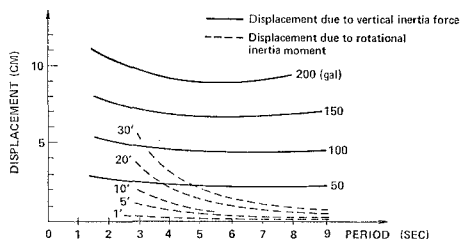
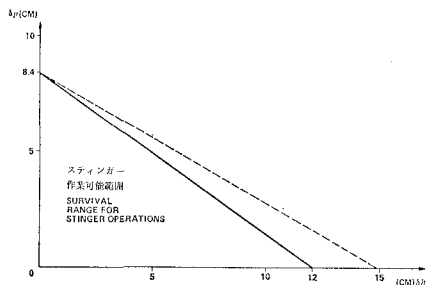


図-1 敷設船工法による海底パイプラインの敷設

* 正会員 新日本製鐵(株) 相模原技術センター



図—2 鉛直加速度、Pitching 角およびそれらの周期とスティンガー先端変位



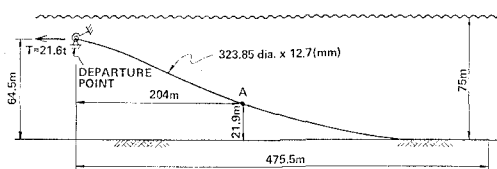
図—3 スティンガー作業可能範囲

力、敷設パイプ重量等の静的荷重とスティンガーに直接作用する波浪(表—1)および波浪と同一方向の1ノットの潮流を考慮すると図—3の実線が限界値となる。スティンガー部材に発生する応力度のうち、波力、潮流および静的荷重による応力度の割合は斜材の軸応力度(f_a)について最大で30%、曲げ応力度(f_b)については最大で14%程度であり、また主部材(弦材)の f_a は最大で9%、 f_b は最大で13%程度であり、4点支持スティンガー部材に発生する応力度の大部分は敷設船の動揺による応力度である。以上よりスティンガーの荒天時作業規制としては、スティンガー取付部において鉛直加速度、Pitch 角およびそれらの周期を測定し、図—2より δ_p 、 δ_h を求め、それらの値が図—3で示される横軸、縦軸と実線で囲まれる部分にあるか否かによって作業管理を行うことができる。

一方パイプラインに関しては放出点から着底部までを対象にモデル化した。図—4はパイプライン部解析モデルである。放出点以深では波浪そのものによる影響は小さいので敷設船動揺による放出点の上下変動および回転角変動に注目して解析することとした。これらをパイプラインへの強制変動量として次式で算定した。

表—1 スティンガー解析用波浪

Wave Height (m)	Wave Period (sec)
1.0	2.67
1.5	3.27
2.0	3.78
4.0	5.34



図—4 パイプライン解析モデル

$$F = -M_{12}\ddot{\delta} - C_{12}\dot{\delta} - K_{12}\delta \dots \dots \dots (4)$$

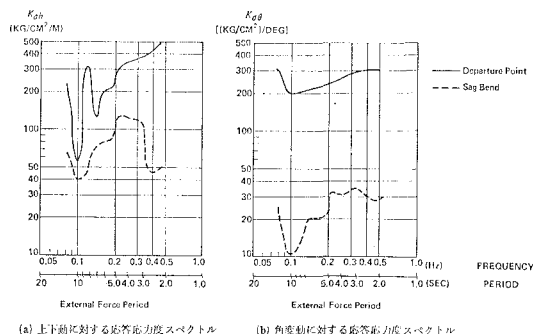
ここで、 δ 、 $\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\delta}$ は強制変動量およびその速度、加速度である。 M_{12} 、 C_{12} 、 K_{12} は作用させる強制変動量に対応する部分の質量、減衰および剛性マトリックスである。

放出点に単位の調和強制上下動および単位の強制角変動を与え放出点および点A(図—4)の応答応力度スペクトルを計算する。図—5は各振動数ごとの単位の強制変動によってパイプに発生する動的応力度を示した応答応力度スペクトルである。図—5より一般に敷設船動揺による動的応力度は放出点で大きくなることがわかる。現場における敷設パイプの応力度管理にあたっては、事前に図—5に示した敷設パイプ主要点の応答応力度スペクトルを作成しておき、スティンガー上に設置した首振りローラーの上下動、角変動およびその周期を測定する。次にそれらの測定された変動量と応答応力度スペクトルより敷設パイプに発生する動的応力度を放出点の上下動と角変動による応力度の自乗和平方根として次式で算定する。

$$\sigma_{DY} = \sqrt{(h \cdot K_{sh})^2 + (\theta \cdot K_{\theta})^2} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 σ_{DY} は敷設船動揺によってパイプに発生する動的応力度、 h は放出点での首振りローラーの上下動、 θ は放出点での首振りローラーの角変動、 K_{sh} は放出点での単位の上下動に対する応答応力度スペクトル値、 K_{θ} は放出点での単位の角変動に対する応答応力度スペクトル値である。このようにして敷設パイプに関しては式(5)によって敷設中の動的応力度を把握し敷設の管理を行うことができる。

以上のように4点支持スティンガーを使用する場合に



図—5 パイプラインの応答応力度スペクトル

おける海底パイプライン敷設工事の荒天時作業実施にあたっては敷設船のスティンガー取付部での鉛直加速度、Pitch 角およびそれらの周期を測定し、図-2、図-3 によってスティンガーの作業を管理し、同時に放出点での首振りローラーの上下動、角変動およびそれらの周期を測定し、式 (5) による敷設パイプに発生する動的応力度を知って荒天時の作業規制を行うことができる。

3. 現場測定

昭和 50 年 11 月に 4 点支持スティンガーを装置した敷設船“くろしお”による九州、御所浦町海底配管敷設現場（最大水深 55m）において、敷設中のスティンガーおよび敷設パイプの安全管理手法を裏付けするための測定を行なった。

測定は図-6 に示すように Roll、Pitch 等の敷設船動揺量、スティンガー取付部での鉛直加速度、スティンガー主要部材(弦材)のひずみ量、敷設パイプ放出点での首振りローラーの上下動加速度および角変動を測定した。なお敷設パイプの寸法は 216.3φ×12.7 である。敷設作業実施中海象は比較的静穏であったが 1 両日に渡って最大波高 2m 程度のはば横波を受け、その時の測定値を基に理論解析値との比較を行なった。表-2 は測定されたスティンガー弦材の応力度とスティンガー管理手法の基礎

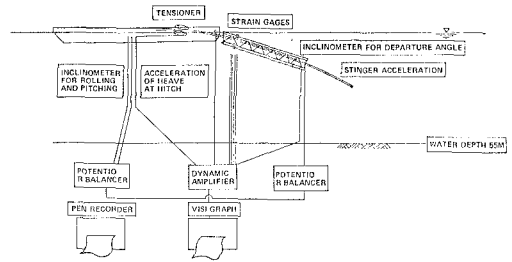


図-6 現場測定システム

となっている理論解析による弦材の応力度であり、測定値は理論値よりも小さ目になっている。平均すると測定値は理論値の 77% 程度であった。スティンガーに関しては前述の管理手法は安全側であるといえよう。一方敷設船の動揺によるサグベンド部の応力変動は実測したパイプ放出点の変位および角変動より解析的に求めると表-3 のようになる。表中の合成応力度はテンション 7 ton を作用した場合の静的応力度 780 kg/cm² に敷設船動揺による動的応力度を合成したものである。最大発生応力度で降伏応力度 (2 200 kg/cm²) の 66% に過ぎないものと推定された。以上のように今回の現場測定期間中は海象条件が静穏であったため、すべての作業が順調に進み、荒天時作業規制に至る状態はなかった。

表-2 スティンガー弦材に発生した応力度（測定値と計算値）

Date	Wave condition	Axial stress (kg/cm ²)	Horizontal bending stress (kg/cm ²)	Vertical bending stress (kg/cm ²)	Measurement Theory
11/9 23:00	$H_{max}=2.0\text{ m}$ $H_{1/3}=1.45\text{ m}$ $T=5.0\text{ sec}$	243	32	113	0.65/0.64/0.91
11/10 2:00	$H_{max}=2.0\text{ m}$ $H_{1/3}=1.47\text{ m}$ $T=4.7\text{ sec}$	243	22	117	0.65/0.44/0.94
11/10 4:00	$H_{max}=2.0\text{ m}$ $H_{1/3}=1.46\text{ m}$ $T=4.6\text{ sec}$	311	37	128	0.83/0.74/1.02
11/10 5:00	$H_{max}=2.0\text{ m}$ $H_{1/3}=1.44\text{ m}$ $T=4.9\text{ sec}$	305	37	121	0.81/0.74/0.97

表-3 敷設船動揺も考慮したパイプライン発生応力度

Wave period (sec)	Order of frequency	Measured value		Stress response	Estimated dynamic stress (kg/cm ²)	Total stress (kg/cm ²)
2.5	3rd	$\Delta\theta$ (deg)	± 0.083	840 kg/cm ² /deg	70	855
	Mode	Δh (cm)	± 1.0	30 kg/cm ² /cm	30	
4.4	2nd	$\Delta\theta$ (deg)	± 0.667	905 kg/cm ² /deg	605	1 460
	Mode	Δh (cm)	± 10	31 kg/cm ² /cm	310	
5.0	—	$\Delta\theta$ (deg)	± 0.833	300 kg/cm ² /deg	250	1 050
		Δh (cm)	± 11	9 kg/cm ² /cm	99	

$\Delta\theta$ =departure angle variation Δh =heave at departure point

4. 結 語

今回の海底パイプライン敷設作業管理手法はスティンガーおよび敷設パイプの発生応力度の面から荒天時作業規制を可能にしたが、実際の海底パイプライン敷設作業においては、スティンガーおよび敷設パイプの応力度管理の他に溶接作業、アンカー打換え、操船等のその他の多くの作業があり、今後海底パイプライン敷設に必要な

多種多様の作業を含めた総合的な荒天時作業管理の確立を進める考えである。

参 考 文 献

- 1) American Petroleum Institute: API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform, 6th Ed. (1975).