傾斜井におけるストリングの軸力

中 村 常 太*

(平成3年1月18日受付, 3年3月14日受理)

Axial Loads of Strings in Directional Wells

By

Tsuneta NAKAMURA

Abstract: The buoyed weight method, and the weight (in the air) and pressure method have been used to calculate the weight of a string in a well. These methods have also been used to determine an axial load at any point in a string. Though an axial load must be determined, for instance, to make a bi-axial correction of collapse resistance of a casing and to practice the tri-axial stress casing design method, conventional methods to know axial loads can not be applied to strings in directional wells.

A theoretical investigation of loads in strings in directional wells was performed. Then a simple method to determine axial loads of strings in directional wells was developed. The key parameters of this method are vertical lengths of pipes, weight (in the air)/foot of pipes and hydrostatic pressures on pipes. The axial loads at the surface calculated with this new method almost coincide with actual field data.

This paper presents the investigation of loads in strings in directional wells and describes the new method to determine axial loads of strings. This paper also describes an idea how to predict drags of strings in directional wells.

1. はじめに

ケーシングに引張り力が働くと、引張り力が無いときと比べて、その圧潰耐力は減少し内圧耐力は増加する。一方圧縮力が働くと、逆にその圧潰耐力は増加し内圧耐力は減少する。以上は広く知られるところであるが、ケーシング設計においては、引張り力が働いたときの圧潰耐力の減少のみを考慮するのが一般的である。「ケーシングの圧潰耐力」と「ケーシング圧潰耐力の2軸補正」については「API bulletin 5C3」に規定されており、石油資源開発㈱でもその規定に従って圧潰についてのケーシング設計を行っている。ケーシング圧潰耐力の補正手順を図1に示す。この方法では、坑井内のケーシングの軸力(石油資源開発㈱では降下直後の状態を採用)を計

ケーシングデータ(サイズ、重量、グレード)を用意する

求める深度におけるケーシングの軸力を計算する(坑井の曲がりによる影響も考慮する)

2軸応力楕円の式により、求める深度におけるケーシングの最小降伏強度を補正する

圧潰モードの境界(D/t)を計算し、求める深度におけるケーシングの圧潰モードを決定する

決定された圧潰モードにおけるケーシングの圧潰耐力を計算する

* 石油資源開発株式会社 作井部

図1 軸力を考慮したケーシング圧潰耐力の計算手順(API bulletin 5C3)

算し、それと2軸応力楕円の式からそのパイプの最小降伏強度を補正する。そして補正された最小降伏強度により、そのパイプの圧潰モードを決定し圧潰耐力を計算する。

一方、3軸応力法によりケーシング設計を行う場合にも、坑井内のケーシングの軸力を正しく知ることが不可欠である。また、ドラグの無い状態でのストリング（ケーシングを含む）の軸力あるいは自重（懸垂重量）の理論的な値を知ることが、実際の吊荷重がどの程度のドラグを含んでいるかを知る上で重要である。

このように坑井内ストリングの任意の深度における軸力を知ることが、ケーシングやドリルストリングの設計において、また実作業上の様々な許容値・限界値等を知る上で重要である。

垂直井内のストリングの軸力計算法（後述）は広く知られている。しかし、その方法を傾斜井内のストリングにそのまま適用することはできない。また、ドラグの無い状態での傾斜井内のストリングの吊荷重を、垂直井内のそのように、空中重量×浮力係数で求めることは

できない。極端な例として、水平坑井内の水平区間のストリングは、坑壁の垂直抗力によって支えられているのであって地表から懸垂されているのではない。従って水平坑井内のストリングの自重（懸垂重量）は、ドラグが無いものとしても空中重量と浮力係数によっては求められない。

この論文は、新たに導かれた、ドラグの無い状態での傾斜井内のストリングの簡便な軸力計算法について述べるものである。また、傾斜井内のストリングのドラグ計算についても言及する。

2. 傾斜井におけるストリングの自重の実際

傾斜井におけるストリングの自重の実際をディリッドリングレポート他から調査した。ケーシングの自重については、降下後の管動時の吊荷重を分析しない限りは、その実際の値を知ることが難しい。そこで調査の対象をドリルストリングの自重に絞り、ここ数年の間に掘削された傾斜井における、ドリルストリングの「自重」（オフボトムでストリングを回転させた時の吊荷重）と

表1 傾斜井におけるドリルストリング自重の実際と計算値の比較

坑井名	坑 径 (インチ)	掘削深度 (m)	泥水 比重	坑底での 傾斜角	○ ストリング 回転時 の自重 (t)	○ 揚荷重と 降荷重の 中間値 (t)	各パイプ長と 浮力係数による 計算自重 (t)	従来の軸力 計算法による 計算自重* (t)	○ 新軸力計算 法による計 算自重 (t)
A	8-1/2	2,094	1.68	46°00'	55	56.5	74.4	81.3	58.2
	12-1/4	1,314	1.58	46°45'	46	46.5	59.6	64.0	48.3
B	8-1/2	3,566	1.33	48°30'	87	92.0	116.3	120.4	91.7
	12-1/4	2,537	1.18	43°00'	76	78.0	97.4	102.8	78.6
C	8-1/2	3,561	1.45	35°00'	96	109.0	111.4	117.7	101.4
	12-1/4	2,864	1.60	30°15'	87	93.0	99.2	105.0	91.2
D	8-1/2	3,003	1.76	26°00'	90	92.0	98.2	103.0	97.9
	12-1/4	2,007	1.30	3°30'	84	—	84.6	86.5	86.3
E	8-1/2	2,345	1.24	14°00'	75	78.5	84.4	87.1	82.6
	12-1/4	1,307	1.16	22°00'	56	54.0	60.5	62.4	57.2
F	8-1/2	2,305	1.47	22°00'	63	64.5	79.4	84.1	70.3
	12-1/4	2,135	1.22	26°10'	62	68.0	80.3	84.2	69.7
G	8-1/2	2,205	1.23	53°30'	55	57.5	80.6	86.1	61.0
	12-1/4	1,553	1.16	52°00'	48	49.0	66.3	70.0	52.8
H	8-1/2	4,805	1.63	17°15'	130	137.0	144.3	150.6	147.5

◎管径変化点のショルダーエリア及びボトムエリアには、以下の数値を使用した。(単位 cm²)

×	5" HWDP	5" DP	ボトム
8" DC	203.14	—	284.21
6-1/2" DC	101.34	—	182.41
5" HWDP	—	47.04	—

* 垂直井における軸力計算法をそのまま傾斜井に適用した場合の計算自重

(管径変化点及び坑底に作用する泥柱圧を垂直深度で計算するのみを変更)

◎ 8-1/2" 坑の坑内編成:

8-1/2" ビット×6-1/2" DC×5" HWDP×5" DP

◎ 12-1/4" 坑の坑内編成:

12-1/4" ビット×8" DC×5" HWDP×5" DP

ドリルストリングの揚荷重・降荷重の中間値を調査した。吊具重量は差し引き、正味のドリルストリング重量を求めた。

以上により調査した自重と、各パイプ長と浮力係数による計算自重、従来の軸力計算法による計算自重（坑底および管径変化点に作用する泥柱圧を垂直深度で計算する以外は、垂直井における方法と同じ）、およびこれから解説する新軸力計算法による計算自重を坑井毎にまとめたのが表1である。自重の実測値（ストリング回転時の自重と、揚荷重・降荷重の中間値）は、多少のドラッグを含んでいる可能性はあるものの、「真の自重」（ドラッグの無い状態での地表の懸垂重量）に近い値と考えられる。一方、各パイプ長と浮力係数による計算自重は、いずれの坑井においても自重の実測値よりかなり大きく、時に揚荷重よりも大きくなり、「真の自重」を表しているとは到底考えられない。従来の軸力計算法による計算自重についても同様である。このことは、浮力係数による自重計算法、あるいは従来の軸力計算法が傾斜井には適用できないことを示唆する。液体で満たされたコップの中に吊り下げられたパイプの重量は、その形状にかかわらず空中重量×浮力係数で求められる。しかし傾斜井内のストリングの重量は、たとえドラッグの無い状態であっても坑壁のどこかでその一部が支えられているので、空中重量と浮力係数のみでその自重を算出することはできない。前述のように、水平坑井では水平区間のストリングでは坑壁の垂直抗力によって支えられており、地表からは懸垂されていない。

一方、これから解説する新軸力計算法による計算自重は、各坑井とも、自重の実測値と非常に近い値である（表1中○印参照）。この新しい手法は、現実と矛盾していないと言える。ただし深い坑井では、ツールジョイントの影響による若干の誤差が生じる。これは、垂直井に対し従来の軸力計算法を適用した場合にも現れる誤差であり、パイプの単位長さ当たりの空中重量を補正すれば解消できるものと考えられる。

3. パイプに働く浮力

3.1 鉛直なパイプに働く浮力

ショルダーの無い鉛直なパイプに働く浮力の考え方を図2に示す。液面はパイプの上端にある。水平方向の力は泥柱圧による力ですべて相殺されるので、鉛直方向に作用する力のみを次のように考える。

吊荷重(泥水中重量)

=パイプの空中重量－パイプの底面にかかる力
(浮力)

パイプの底面にかかる力

$$\begin{aligned} &= \text{坑底圧力(パイプの底面にかかる圧力)} \times \text{底面積} \\ &= [0.1\rho \times L] \times [\pi/4(OD^2 - ID^2)] \quad (\text{kgf})^{\text{注1)}} \\ &= [\pi/4(OD^2 - ID^2) \times 100L] \times \rho \times 0.001 \quad (\text{kgf}) \\ &= \text{パイプの体積} \times \text{泥水密度} \end{aligned}$$

パイプにショルダーがある場合には、そこに作用する上または下向きの力（泥柱圧による力）を考え合わせれば良い。浮力はパイプの底面（およびショルダー面）に作用する泥柱圧による力と考えても、アルキメデスの原理と何ら矛盾しない。

3.2 傾斜したパイプに働く浮力

ショルダーの無い傾斜したパイプに働く浮力の考え方を図3に示す。液面はパイプの上端にある。パイプの底面と側面にかかる力の鉛直方向の成分の合力を浮力と考える。

$$\begin{aligned} \bullet \text{パイプの底面にかかる力} &= \text{坑底圧力} \times \text{底面積} \\ &= [0.1\rho \times L \cos \theta] \times [\pi/4(OD^2 - ID^2)] \\ &\dots\dots\dots \text{①} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{①の鉛直上向き成分} &= \text{①} \times \cos \theta \\ &= 0.1\rho \times \pi/4 L \cos^2 \theta \times (OD^2 - ID^2) \quad \dots\dots\dots \text{②} \end{aligned}$$

・パイプの外面にかかる力(パイプの中心軸に垂直・上向き)

図2 鉛直なパイプに働く浮力

注1) 図2,3において、各記号の単位を ρ (g/cm^3), L (m), OD (cm), ID (cm) とすると、本章における力の単位は kgf となる。

図3 傾斜したパイプに働く浮力

(中心軸に垂直な切断面の鉛直面への投影において、パイプ外周の楕円と等面積の長方形を考える)

=微小圧力差×その圧力が作用する面積

$$= [0.1 \rho \times \pi/4 OD \sin \theta] \times [OD \times L] \dots\dots\dots ③$$

・パイプの内面にかかる力(パイプの中心軸に垂直・下向き)

=微小圧力差×その圧力が作用する面積

$$= [0.1 \rho \times \pi/4 ID \sin \theta] \times [ID \times L] \dots\dots\dots ④$$

・パイプの内・外面にかかる力の合力(パイプの中心軸に垂直・上向き)

$$= ③ - ④$$

$$= 0.1 \rho \times \pi/4 L \sin \theta \times (OD^2 - ID^2) \dots\dots\dots ⑤$$

⑤の鉛直上向き成分 = ⑤ × sin θ

$$= 0.1 \rho \times \pi/4 L \sin^2 \theta \times (OD^2 - ID^2) \dots\dots\dots ⑥$$

・パイプ全体の浮力 = ② + ⑥

$$= 0.1 \rho \times \pi/4 L (OD^2 - ID^2)$$

$$\times (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

$$= 0.1 \rho \times L \times \pi/4 (OD^2 - ID^2) \dots\dots\dots ⑦$$

鉛直なパイプと比べて、底面にかかる力は泥柱圧減少分小さくなり、その鉛直上向き成分は傾斜角に従いさらに小さくなる。しかし、パイプ内・外面の受ける力の合力の鉛直上向き成分がそれを補填し、結局鉛直上向き成分の合力は、鉛直なパイプの底面にかかる力と等しくなる。つまり図3中で、浮力ベクトル⑦が①と⑤に分解される。

3.3 坑井内のストリングに働く浮力

このようにパイプに働く浮力は、泥柱圧による力の鉛直方向成分の合力であり、パイプの傾斜角にかかわらず一定である。ドラッグの無い状態での傾斜井内のストリングの自重(懸垂重量)が、空中重量に浮力係数を掛けた値すなわち空中重量から浮力を差し引いた値より小さいのは、坑壁の垂直抗力がストリング重量の一部を保持しているに他ならない。

4. 坑井内のストリングの軸力

4.1 垂直井におけるストリングの軸力

垂直井におけるストリングの軸力図(深度対軸力)の例を図4に示す。左方が圧縮、右方が引張りである。ストリングに働く水平方向の力は、泥柱圧による力ですべて相殺されている。そして鉛直方向には、パイプの空中重量と浮力が働く。全深度にわたりパイプの断面積が均一であれば、前述のとおり浮力は坑底圧力×底面積なる上向きの力として底面のみに働く。底面はこの浮力による圧縮を受けている。そして深度が小さくなるにつれて、パイプの空中重量勾配(単位長さ当たりの空中重量)に従いこの圧縮力は低下し、ある深度で引張りに転じ、地表では自重(懸垂重量・吊荷重)となる。管径変化点があれば、それらに応じたショルダーフォースが働く。こうして求めた自重は、空中重量に浮力係数を掛けた値(泥水中重量)と理論的に等しい(前述)。任意の深度におけるストリングの軸力を求める場合には、このような軸力図を考えるのが一般的である。

以上の考え方は世界的に広く認められており、石油資源開発例でもケーシング設計における圧潰耐力の2軸補正時等の軸力計算法として採用されてきた。傾斜井については、パイプの底面とショルダー面に働く泥柱圧のみを変更(垂直深度による値を使用)してこの方法を適用していた。しかし、同じストリングを垂直井に降下した場合と傾斜井に降下した場合とで自重の計算値が異なり、また垂直井においてのみその計算値が空中重量と浮力係数による泥水中重量と等しくなるので、傾斜井における自重の計算値を検証するためにこのスタディーを始めた。そして、傾斜井内のストリングについては、泥柱圧を変更するのみではこの方法を適用できないことが判明し、傾斜井における新たな軸力計算法が導かれた。次節でそれを解説する。

4.2 傾斜井におけるストリングの軸力

4.2.1 傾斜井内のストリングに働く力

傾斜井内のストリングに働く力は、パイプの空中重量、泥柱圧による力、坑壁の抗力、地表での懸垂力(吊荷重)、およびドラッグである。それらの例(垂直→増角→

図 4 垂直井におけるストリングの軸力図

図5 傾斜井内のストリングに働く力

沿角)を図5に示す。ここではパイプの剛性による力は無視している。増(減)角部では、その区間両端に働く張力の分力の反力としての抗力が坑壁に働く。これは、滑車においてそれを支える腕の力と理解すれば良い。以下に図5のストリングを例として、傾斜井内のストリングに働く力を区間毎に区切って考える。

4.2.2 垂直区間のパイプに働く力

水平方向には、泥柱圧による力のみが作用し、それらはすべて相殺されている。鉛直方向には、下の区間からの張力、この区間のパイプの空中重量、および地表での張力(吊荷重)が働く。軸力図で考えれば、これら二つの張力をパイプの空中重量勾配の直線で結ぶことになる。この区間に浮力は働かない。また理想的な状態においては、垂直区間のドラグは0である

4.2.3 沿角区間のパイプに働く力

沿角区間内の微小区間のパイプに働く力を図6に示す。

パイプの中心軸方向(軸力方向)には、微小区間両端の張力、空中重量の $\cos \theta$ 成分、およびドラグが働く。中心軸に垂直な方向には、空中重量の $\sin \theta$ 成分、微小区間の側面からの浮力、および坑壁の垂直抗力が働く。

・沿角微小区間の軸力変化(増)分

$$\Delta T = W \Delta L \cos \theta \pm \mu (W \Delta L \sin \theta - \Delta F_b)$$

ドラグを0とすれば

$$\begin{aligned} \Delta T &= W \Delta L \cos \theta \\ &= W \times (\Delta L \cos \theta) \end{aligned}$$

・ドラグが0の場合の沿角全区間の軸力変化(増)分

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta T &= W (\Sigma \Delta L) \cos \theta \\ &= W \times L_h \cdot \cos \theta \end{aligned}$$

・沿角微小区間のドラグ

$$\begin{aligned} &= \pm \mu (W \Delta L \sin \theta - \Delta F_b) \\ &= \pm \mu (W' \Delta L \sin \theta) \end{aligned}$$

・沿角全区間のドラグ

$$\begin{aligned} &= \pm \mu [W' (\Sigma \Delta L) \sin \theta] \\ &= \pm \mu (W' L_h \cdot \sin \theta) \end{aligned}$$

ドラグの無い状態における沿角微小区間の軸力変化分は、単位長さ当たりのパイプ空中重量×沿角微小区間の垂直距離となる。よって沿角全区間の軸力変化分は、単位長さ当たりのパイプ空中重量×沿角区間の垂直距離となる。軸力図では、沿角区間両端の垂直深度をパイプの空中重量勾配で結ぶことになる(ショルダーがあればそれを考慮する)。

垂直抗力中の ΔF_b は、図3におけるベクトル⑤、つまりアルキメデスの原理での「浮力」の $\sin \theta$ 成分と等しいので、空中重量の $\sin \theta$ 成分と ΔF_b の合力は、この微小区間の泥水中重量(空中重量×浮力係数)の $\sin \theta$ 成分と等しい。従って沿角全区間のドラグは、沿角区間のパイプの泥水中重量の $\sin \theta$ 成分に摩擦係数を掛けたものとなる。

4.2.4 増(減)角区間のパイプに働く力

増角区間内の微小区間のパイプに働く力を図7に示す。沿角区間との違いは、微小区間両端の張力が一直線上に乗らないので、それらの $\sin(\Delta \theta/2)$ 成分の反力としての垂直抗力が付加されることである。つまり坑壁の垂直抗力は、これらの垂直抗力と、空中重量の $\sin \theta$ 成分と微小区間の側面からの浮力の反力としての垂直抗力との合力になる。

・増角微小区間の軸力変化(増)分

$$\Delta T = W \Delta L \cos \bar{\theta} \pm \mu F_n$$

ドラグを0とすれば

$$\begin{aligned} \Delta T &= W \Delta L \cos \bar{\theta} \\ &= W \times (\Delta L \cos \bar{\theta}) \end{aligned}$$

・ドラグが0の場合の増角全区間の軸力変化(増)分

図6 沿角区間のパイプに働く力

図7 増角区間のパイプに働く力

$$\Sigma \Delta T = W \times \Sigma (\Delta L \cos \bar{\theta})$$

・増角微小区間のドラグ

$$\begin{aligned} \pm \mu F_n &= \pm \mu [W \Delta L \sin \bar{\theta} - \Delta F_b \\ &\quad - (T' + \Delta T') \sin (\Delta \theta / 2) \\ &\quad - T' \sin (\Delta \theta / 2)] \\ &= \pm \mu [W \Delta L \sin \bar{\theta} \\ &\quad - (T' + \Delta T') \Delta \theta / 2 - T' \Delta \theta / 2] \\ &= \pm \mu (W \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta \\ &\quad - \Delta T' \Delta \theta / 2) \\ &= \pm \mu (W \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta) \end{aligned}$$

・増角全区間のドラグ

$$= \pm \mu \Sigma (W \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta)$$

・この微小区間について、方位角変化も考慮した場合の坑壁の垂直抗力を考えると水平方向について上記と同様に考えて

$$\begin{aligned} F_{nh} &= [Th' \sin (\Delta \phi / 2)] \times 2 \\ &= Th' \Delta \phi \\ &= (T' \sin \bar{\theta}) \Delta \phi \\ N &= \sqrt{F_n^2 + F_{nh}^2} \\ &= \sqrt{(W \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta)^2 + (T' \Delta \phi \sin \bar{\theta})^2} \end{aligned}$$

よって方位角変化も考慮した場合の増角微小区間のドラグは

$$\begin{aligned} \pm \mu N \\ = \pm \mu \sqrt{(W \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta)^2 + (T' \Delta \phi \sin \bar{\theta})^2} \end{aligned}$$

ドラグの無い状態における増角微小区間の軸力変化分は、沿角微小区間同様、単位長さ当たりのパイプ空中重量×微小区間の垂直距離となる。よって増角全区間の軸力変化分は、単位長さ当たりのパイプ空中重量×増角区間の垂直距離となる。軸力図では、増角区間両端の垂直深度をパイプの空中重量勾配で結ぶことになる(ショルダーが有ればそれを考慮する)。

微小区間の空中重量の $\sin \bar{\theta}$ 成分と側面からの浮力の合力は、沿角微小区間同様この微小区間の泥水中重量の $\sin \bar{\theta}$ 成分と等しい($W \Delta L \sin \bar{\theta} - \Delta F_b = W \Delta L \sin \bar{\theta}$)。

一般に、真の軸力とスタビリティフォース^{注2)}の差

注2) スタビリティフォース (SF)

$$= A_i P_i - A_o P_o$$

(引張りが正)

パイプの内・外圧が等しい場合、

$$SF = (A_i - A_o) P$$

$$= - \text{パイプの断面積} \times \text{泥柱圧}$$

この時、スタビリティフォースは泥柱圧による圧縮力になる。しかし周囲圧力による圧縮力なので、軸力がそれを上回る圧縮力にならない限りストリングがバックリングすることはない。

バックリングに作用する力は、真の軸力からスタビリティフォースを差し引いた力で、バックリングフォースと呼ばれる。

に相当する力(バックリングフォース)が、ストリングのバックリングに寄与すると言われる。図7において、坑底近くの微小区間における真の軸力(T)は、たとえストリングがオフボトムの状態(坑底から離れた状態)であっても、ストリングの底面に働く泥柱圧により非常に大きな圧縮力となる(図4、図8参照)。しかし坑底近くの増角区間で、曲がったストリングがこの大きな圧縮力の分力によって下方に強く押し付けられる(一種のバックリングを起こす)ことはない。バックリングフォースが0(オフボトム状態のストリング最下部)であれば、パイプと垂直方向に坑壁に作用する力は、この微小区間の泥水中重量の $\sin \bar{\theta}$ 成分のみになると考えられる。従って増角区間において、ドラグを計算するために F_n を議論する場合、 T は T' (バックリングフォース)に置き換えるのが妥当であろう。この場合、各深度におけるスタビリティフォースはそれぞれの微小区間における図3でのベクトル①と等しいので、ドラグが無いときの $\Delta T'$ は、微小区間の空中重量の $\cos \bar{\theta}$ 成分とアルキメデスの原理での「浮力」の $\cos \bar{\theta}$ 成分の差、すなわちその微小区間の泥水中重量の $\cos \bar{\theta}$ 成分となる。従ってある深度における(ドラグを含んだ) T' は、それ以深の微小区間における泥水中重量の $\cos \bar{\theta}$ 成分の累計とドラグの累計の和となる。ある微小区間のドラグは、そこでの T' 他により計算される。要するに、増角区間においてドラグを計算するために垂直抗力を論ずる場合には、沿角区間と同様に泥水中重量ですべてを考えれば良い。

減角区間についても増角区間と全く同様である。微小区間の軸力変化分は、その区間のパイプ空中重量の $\cos \bar{\theta}$ 成分とドラグの和となる。ドラグの無い状態においては、これは単位長さ当たりのパイプ空中重量×微小区間の垂直距離となり、減角全区間の軸力変化は、単位長さ当たりのパイプ空中重量×減角区間の垂直距離となる。垂直抗力については、 $\Delta \theta$ が負の値となるのみが異なる。

4.2.5 軸力計算方法のまとめ

以上の各区間毎に、ドラグが無いときの軸力変化分とドラグをまとめたのが表2である。ここで注意すべきことは、ドラグを考えない場合の(深度による)軸力変化は、すべての区間において、単位長さ当たりのパイプ空中重量とその区間の垂直距離で考えれば良いということである。表中の下線部はそれぞれの区間の垂直長さである。軸力にドラグを考慮する必要の無い場合、左欄の計算式に従い、垂直深度対軸力の図を描く。要は垂直・増・減・沿角にかかわらず、パイプの空中重量勾配で管径変化点の垂直深度間を結ぶ。この方法により、直線のみで非常に簡便な軸力図を描くことができる。

表2 傾斜井内のストリングに働く軸力 (方位角変化は考慮していない)

区間または場所	ドラッグが無いときの軸力変化分	ド ラ グ
垂 直 区 間	$W \times Lv$	$0(+\alpha)$
増・減角区間	$W \times \Sigma(\Delta L \cos \bar{\theta})$	$\pm \mu \Sigma(W' \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta) (+\alpha)$
沿 角 区 間	$W \times Lh \cdot \cos \theta$	$\pm \mu (W' Lh \cdot \sin \theta) (+\alpha)$
ストリングの底面	一坑底圧力×底面積	—
管 径 変 化 点	±泥柱圧×ショルダー面積	—
合 計	一坑底圧力×底面積+W×垂直長さ (±泥柱圧×ショルダー面積) (*)	$\pm \mu [\Sigma(W' \Delta L \sin \bar{\theta} - T' \Delta \theta) + W' Lh \cdot \sin \theta] (+\alpha)$

下線部：各区間の垂直長さ

(*)：ドラッグが無い状態での自重

管径が均一の場合：W×垂直深度－坑底圧力×底面積

管径変化点がある場合：同一管径毎の(W×管径変化点間の垂直長さ)の合計－坑底圧力×底面積±管径変化点毎の(泥柱圧×ショルダー面積)

ドラッグを考慮する場合には、上記で求めた軸力に右欄の力(ドラッグ)を付加する。増・減角区間については、微小区間毎にドラッグを累積しなければならない。ここで言うドラッグとは、理想的な状態での滑り摩擦である。実際の坑井においては、砂の滞留・落ち込み、坑壁の迫り出し、棚他による様々な揚降負荷を生ずる可能性があるため、表中では、これらをその他のドラッグ(α)として各区間に付加した。

4.2.6 傾斜井における軸力計算例

以上の計算法により、ドラッグが無い場合のドリルストリングの軸力を計算した例(軸力図)が図8である。この坑井の掘削深度における傾斜は、 $46^{\circ}00'$ である。この方法による計算自重は、ストリング回転時の自重、および揚荷重と降荷重の中間値(いずれも実測値)に非常に近い。浮力係数による計算自重、および従来の軸力計算法による計算自重は、揚荷重よりも大きく、「真の自重」を示しているとは到底考えられない。これらの計算を複数の坑井に対して行ったのが表1であるが、同様のことが他の坑井についても言える。

5. ストリングの軸力計算の適用

5.1 軸力計算の手法

表2に従い、ドラッグが無いときのストリングの軸力、およびドラッグを計算する。前者は前述のように容易に手計算で求められるが、後者のうち「増・減角区間」については、その中の微小区間に作用する力の積算が必要のため、コンピュータプログラムを利用するのがその現実的な計算手法となろう。いわゆる「トルク・ドラッグ予測プログラム」もいくつか開発され、市販されている。特

に水平掘の発展に伴い、近年その開発は目覚ましい。それらがどの程度の機能を有しているかは不明であるが、ドラッグを考慮した軸力を求めるために、いずれこういったプログラムは不可欠であり、その仕様検討が必要となろう。

以下に、ストリングの軸力計算の具体的適用について述べる。

5.2 ドラッグを考慮しない場合の軸力計算の適用

ドラッグを考慮しない場合、単位長さ当たりのパイプ空中重量、管径変化点の垂直深度、底面とショルダー面の面積、およびそれらに働く泥柱圧により、任意の深度におけるストリングの軸力を、手計算で容易に求めることができる。この場合の軸力計算は、以下の目的で行われる。

5.2.1 ケーシング設計における圧潰耐力の2軸補正 (計算例：図9)

「1. はじめに」で述べたように、引張り力が働いたときのケーシングの圧潰耐力の低下をその設計に組み込む際に、坑井内のケーシングの軸力を知る必要がある。石油資源開発(株)では、ケーシング降下直後の状況を想定してこの2軸補正を行うので、ケーシング降下時の泥水比重を用いて表2の計算を行い、軸力図(垂直深度対軸力)を描いている。さらに「増・減角区間」については、「曲げ」による引張り荷重(bending load)を考慮している。この計算例が図9である。これは、図1において2段目の作業である。

5.2.2 3軸応力法によるケーシング設計

3軸応力法によりケーシング設計を行う場合には、任意の深度におけるパイプの軸方向応力、半径方向応力そして円周方向応力を知る必要がある。その軸方向応力は、

坑井内のケーシングの軸力から計算される。

5.2.3 ストリングのドラッグの実測

坑井内のあらゆるストリングについて、ドラッグが無い状態での自重の理論値をあらかじめ知っておけば、そのストリングの実際の吊荷重から実際のドラッグの値を知る

ことができる。これにより、例えば坑内状況を予測することができる。

5.2.4 最大ビット荷重の計算(計算例：図10, 図11)

軸力図を考慮ることにより、最大ビット荷重 (available WOB) を求めることも可能である。垂直井にお

図8 傾斜井におけるドリルストリングの軸力例 (坑井 A 8-1/2" 坑)

図9 傾斜井におけるケーシングの軸力例 (圧潰耐力の2軸補正に使用)

けるドラグの無い状態でのドリルストリングの軸力の計算例が、図10である。ビットに荷重をかけると「オフボトム時の軸力」線が左方にシフトする。圧縮のバックリングフォースがドリルカラー（DC）のみにかかるようにビット荷重をかけるものとすれば（安全率は考えていない）、DC上端の軸力がDCのスタビリティフォース

ス線と交わった時に最大ビット荷重がかかることになる。この時ヘビーウェイトドリルパイプ（HWDP）の下端もHWDPのスタビリティフォース線と交わる。この例では、最大ビット荷重は23.13tである。これは、DCの単位長さ当たりの重量、長さ、および浮力係数から計算したDCの泥水中重量と等しい。

図10 軸力図による最大ビット荷重の計算例（垂直井）

図11 軸力図による最大ビット荷重の計算例（傾斜井）

傾斜井の場合の計算例が、図11である。縦軸は垂直深度になる。垂直井の場合と同様に、DC 上端の軸力がDCのスタビリティフォース線と交わった時に最大ビット荷重がかかることになる。その時のビット荷重は20.03tである。これは、DCの単位長さ当たりの重量、長さ、および浮力係数から計算したDCの泥水中重量に $\cos \theta$ (θ : 傾斜角)を掛けたものに等しい。ここで注意すべきは、HWDPに圧縮のバックリングフォースをかけないならば、傾斜井の場合、DCの泥水中重量が最大ビット荷重とならないことである。

単に最大ビット荷重を知るだけであれば、軸力図を描かずとも浮力係数等によりそれを求めることはできる。

5.2.5 その他

坑井内のストリングの自重の理論値があらかじめ求められれば、実作業上の様々な許容値・限界値等を知ることができ、適正なストリング計画が立てられる。

5.3 ドラグを考慮する場合の軸力計算の適用

5.2の計算結果にドラッグ分を付加するのだが、「増・減角区間」のドラッグについては微小区間での繰り返し計算が必要となるので、現実にはコンピュータプログラムを利用することになる。もしそのプログラムがこちらの要求する機能をすべて有しているとすれば、以下のことが可能になる。

5.3.1 ケーシングの引張り設計

石油資源開発㈱におけるケーシングの引張り設計では、ケーシング降下中に各パイプがエレベータに吊られた時の状況を想定し、それぞれのパイプの下に吊られている全パイプの泥水中重量に安全係数または安全差荷重を加えたものを設計荷重としたマージナルロード法を採用している。

しかし、理想的なケーシングの引張り設計は、ケーシング降下開始からセメンチング終了または抑留対策・抜管終了までの間に、それぞれのパイプ(全パイプ)が遭遇するであろう最大引張り荷重を考慮したものでなければならない。例えば降下終了後坑井深部に位置するパイプは、その下に吊られているパイプの泥水中重量こそ小さいものの、坑井内に大きなドックレグがあれば、そこを通過するときの曲げ荷重(bending load)は大きなものとなり、また大きなドラッグも働くので、引張り荷重はかなり大きなものとなり得る。

降下されるすべてのパイプに対して、坑内状況や作業状況に応じた軸力変化をドラッグを含めてシミュレーションするプログラムがあれば、ケーシングの完全な引張り設計が可能となる。

5.3.2 トルク・ドラッグの予測

ドリルストリングやケーシングのトルク・ドラッグを予

測することが可能となる。いわゆる「トルク・ドラッグ予測プログラム」の利用である。これにより、適正なストリング計画が可能となる。

5.3.3 バックオフ荷重の設定

ストリングの軸力およびドラッグを正確に知ることができれば、地表の吊荷重から、バックオフポイントにおける軸力を正しく推測することができる。これにより、バックオフの際にバックオフポイントに所期の軸力を与えることができる。

5.3.4 水平坑井の掘削計画

ストリングの軸力、ドラッグおよびトルクを正確に知ることができれば、水平坑井におけるドリルストリング、ケーシング、チュービング等の設計をより厳密に行うことができる。また適正な坑跡設計も可能となろう。

5.3.5 その他

その他、ストリングの軸力をドラッグを含めて正しく知ることが、坑内状況の推測、抑留の防止や適正なストリング設計等に役立つ。

6. ま と め

傾斜井におけるストリングの軸力について考察した。そして、ドラッグを考慮しない場合の簡便な軸力計算法が新たに導かれた。また、傾斜井におけるストリングのドラッグについて、その基本的な計算方法を考察した。

垂直井であれ、傾斜井であれ、ドラッグを考慮しない場合のストリングの軸力は、単位長さ当たりのパイプ空中重量、管径変化点の垂直深度、底面とショルダー面の面積、およびそれらに働く泥柱圧によって、任意の深度に対して容易に計算することができる。そして得られた軸力は、ケーシング圧潰耐力の2軸補正、3軸応力法によるケーシング設計他、様々なことに応用できる。

ドラッグを考慮する場合には、微小区間毎の垂直抗力・ドラッグを考えるが、それらの積算にコンピュータプログラムが必要となる。そのプログラムを利用できれば、ストリングの軸力計算はさらに幅広く応用される。

様々な坑内状況や作業条件に対応可能な軸力計算プログラムが開発されることを期待する。

記 号

A	: 楕円の長径
A_i	: パイプ内周円の面積
A_o	: パイプ外周円の面積
B	: 楕円の短径
FB	: 浮力係数
ΔFb	: 微小区間に働く浮力
F_n	: 微小区間に働く垂直抗力

Fnh : 微小区間に働く垂直抗力の水平方向成分
 h : 楕円と等面積の長方形の高さ
 ID : パイプの内径
 L : パイプの長さ
 ΔL : 微小区間の長さ
 L_v : 垂直区間の長さ
 L_h : 沿角区間の長さ
 N : 全角度変化を考慮したときの垂直抗力
 OD : パイプの外径
 P : 泥柱圧
 P_i : パイプの内圧
 P_o : パイプの外圧
 SF : スタビリティフォース
 T : 軸力 (引張りが正)
 ΔT : 微小区間の軸力変化
 T' : バックリングフォース ($=T-SF$)
 $\Delta T'$: 微小区間のバックリングフォース変化
 Th' : バックリングフォースの水平方向成分
 W : 単位長さ当たりのパイプ空中重量
 W' : 単位長さ当たりのパイプ泥水中重量
 ($=W \times \text{浮力係数}$)
 $W_{1,2,3}$: 区間のパイプの空中重量
 α : その他のドラッグ
 θ : 沿角区間の傾斜角
 $\bar{\theta}$: 増・減角微小区間の平均傾斜角
 θ_d : ある深度における傾斜角
 $\Delta \theta$: 傾斜角変化率 (増角: +, 減角: -)
 μ : 坑壁の摩擦係数 (通常 0.25~0.40)
 ρ : 泥水密度
 ϕ : 方位角
 $\Delta \phi$: 方位角変化率

略 号

API : American Petroleum Institute
 DC : ドリルカラー
 DP : ドリルパイプ

HWDP : ヘビーウェイトドリルパイプ
 KOP : 増角開始点
 TD : 掘削深度
 VD : 垂直深度
 WOB : ビット荷重

参 考 文 献

- American Petroleum Institute, 1989: API Bulletin 5C3-Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties-fifth edition. 5-16, API.
 GOINS, W.C., 1980a: Better understanding prevents tubular buckling problems PART 1. *World Oil*, January 1980, 101-106.
 GOINS, W.C., 1980b: Better understanding prevents tubular buckling problems PART 2. *World Oil*, February 1980, 35-40.
 GREENIP, J.F. Jr., 1989: How To Design Casing Strings For Horizontal Wells. *Petroleum Engineer International*, December 1989, 34-38.
 HAMMERLINDL, D.J., 1978: Basic Fluid and Pressure Forces on Oilwell Tubulars. *JPT.*, January 1980, 153-159.
 JOHANCSEK, C.A., FRIESEN, D.B. and DAWSON, R., 1984: Torque and Drag in Directional Wells-Prediction and Measurement. *JPT.*, June 1984, 987-992.
 LUBINSKI, A., ALTHOUSE, W.S., and LOGAN, J.L., 1962: Helical Buckling of Tubing Sealed in Packers. *JPT.*, June 1962, 655-670.
 LUBINSKI, A., 1988: Developments in Petroleum Engineering volume two. 157-178, Gulf Publishing Company.
 SHEPPARD, M.C., WICK, C., and BURGESS, T., 1986: Designing Well Paths To Reduce Drag and Torque. SPE 15463.