

任意形状の水底に置かれたパイプに作用する流体力

吉田 常松*・植松 幹夫**

1. ま え が き

現在の海洋開発は海洋石油・ガス等の採掘産業によってリードされていると言っても過言ではない。世界の原油埋蔵量の約 30% が海洋にあると推定されている。このような中で、石油を輸送する海底パイプラインの需要は非常に高く、1981 年 6 月現在、全世界で建造または計画中の海底管の総延長は約 4500km にも達している。

さて、海底管は一般的に波や潮流で滑動しないように、パイプの周囲にコンクリートを巻いたうえで、海底に掘られたトレンチの中に敷設される。ところが、トレンチ内のパイプに作用する流体力の評価を誤ると、パイプが流されたり、逆に必要以上のコンクリートを巻いてパイプを重くしてしまうことにもなる。流体力を正しく求めることが、海底管の施工能率と安定性を向上させる大きな要因のひとつとなっている。

水底に置かれた物体に流体が作用すると、一般的に抗力、慣性力と揚力が発生する。J. C. Wright⁽¹⁾ は平坦な水底に置かれたパイプに作用する波力を、理論および実験的に求めている。また、W. T. Jones⁽²⁾ は平床上的のパイプに一樣流を作用させて、実験的に抗力係数と揚力係数を求め、設計用の図表にまとめている。この他にも多くの研究^{(3)~(5)}があるが、これらはいずれも平床上の場合であって、トレンチのような凹凸のある水底にパイプが置かれた場合の流体力に関しては、研究例がない。

トレンチ内のパイプに作用する流体力を求めるには、まずトレンチ内の水粒子運動を求めなくてはならない。更に水粒子運動と流体力を関係づける各種流体力係数を求める必要がある。ここでは、研究対象をトレンチ問題に限定せず、任意形状の水底にパイプがおかれた場合に問題を広げて、種々の解析を実施した。

なお、本論では流体力の作用機構や理論解析法の詳細な検討は行っていない。主として設計の立場から、流体力の評価手法について、検討を試みた。

2. トレンチ内のパイプに作用する潮流力

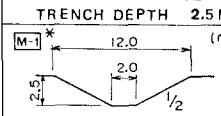
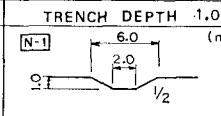
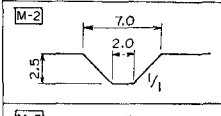
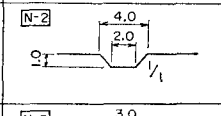
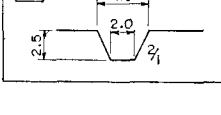
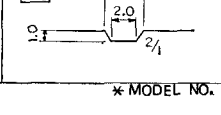
2.1 トレンチ形状

パイプラインを海底にじかに置いたままにしておくと、波や潮流により移動し、破損・漏洩事故を起こす恐れがある。そこで、海底にトレンチを掘り、その中にパイプを敷設するのが一般的である。

トレンチは、掘削機の性能や海底土質によって種々の形状を有す。トレンチの底幅は掘削機の大きさによって自ずと決められるが、法面勾配は土質によって 1/2 から 2/1 程度まで変化する。また、トレンチ深さは海底管の必要土被高によって決定される。

本研究では実際の敷設工事を想定して、表-1 に示すような形状のトレンチについて実験と解析を行なった。

表-1 トレンチの形状 (実物)

TRENCH DEPTH 2.5 M		TRENCH DEPTH 1.0 M	
M-1		N-1	
M-2		N-2	
M-3		N-3	

* MODEL NO.

2.2 トレンチ内の潮流速分布

(1) 潮流実験

パイプに作用する潮流力を求めるには、まずトレンチ内の流速分布を調べる必要がある。表-1 に示した実物トレンチの 1/13.5 の模型を回流水槽 (12×0.5×0.5 m) 内に設けて、二次元的な流速分布を計測した。

トレンチ内の流速の実測例を図-1 に示す。トレンチのそとで流れが一樣な所の流速 (“基準流速” と称す) を 1.0 として、トレンチ内の流速をこれで無次元化した。また、トレンチ底部の流速と基準流速との比をレイノルズ数 R_0 (代表寸法; 水深 40 cm, 流速; 基準流速) ペー

* 正会員 日本鋼管(株) 津研究所

** 正会員 工修 日本鋼管(株) 津研究所

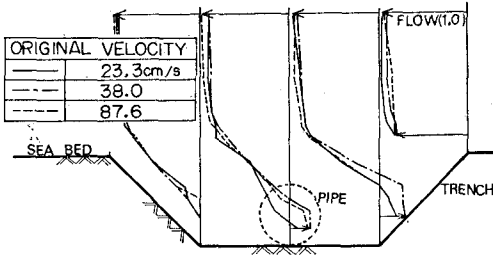


図-1 トレンチ内の潮流速実測例 (N-2)

スにプロットしたものを図-2に示す。これらの図よりトレンチ内の流れの特性として次のようなことが分かった。

- トレンチ内の流速は基準流速と比べて深さ方向で急激に減少している。この流速比は、M-1の低流速時を除いて全てが0.3以下になっており、トレンチによる流速の低減効果は非常に大きい。
- トレンチの底部付近では流向が逆転しており、内部で回転流が生じていることが分かる。

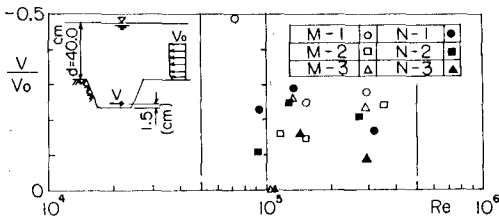


図-2 トレンチ底部の潮流速低減率

(2) 潮流分布の計算

水底が任意形状をなしている場合の流れ分布を求めるために、有限要素法による解析を行なった。ここでは、粘性項と慣性項を含む Navier-Stokes 方程式を、流れ関数を用い、Galerkin 法⁶⁾にて離散化した。また、離散化後の非線型連立方程式は Newton-Raphson 法⁷⁾にて解を収れんさせた。流れは二次元である。

M-3 モデル (縮尺 1/13.5) を用いてトレンチ内の流速分布計算を試みた。計算時の基準流速は 1.0 cm/sec, 動粘性係数は 0.05 cm²/sec で、水深は 40 cm とした。

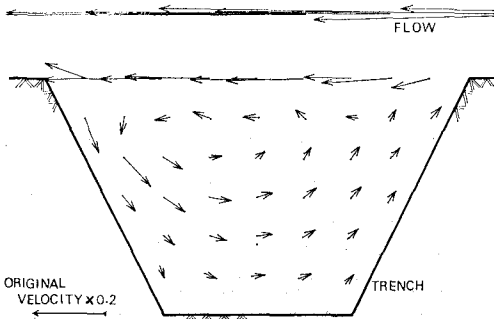


図-3 FEM によるフローパターン (M-3)

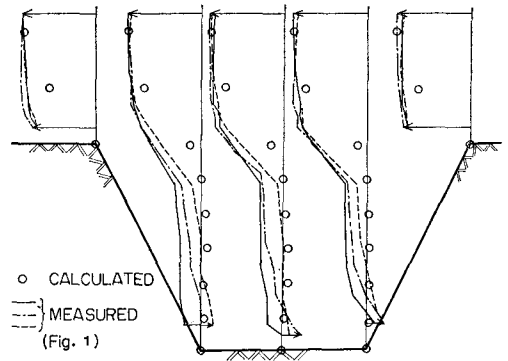


図-4 FEM 解析値と実験値の比較 (M-3)

計算された流速分布は図-3の通りである。また、水平流速につき実験値と比較したものを図-4に示す。両図から、トレンチ内では回転流が生じており、基準流速と比べても非常に小さくなることが確かめられた。

しかし、現状では本解析法を使って高レイノルズ数での計算ができないので、特に境界層の取扱いに問題が残っている。トレンチ内の流速の計算値が実験値と比べて小さいのは、実験時には乱流境界層が形成されるのに、計算上は層流状態で解析しているのが原因と思われる。

ただし、以上のような欠点はあるものの、トレンチ内の流れのパターンおよび概略の流速を知るには本解析法は有効である。

2.3 パイプに作用する潮流力

前項の実験で用いたトレンチ模型の中に 40φ のパイプを置き、パイプに作用する潮流力を計測した。図-5に一例として計測された抗力を示すが、抗力、揚力共に平床または自由流水中に置かれた場合と比べて、非常に小さい値になることが分かった。本実験の範囲内では抗力は 1/10 以下、揚力は 1/7 以下であった。

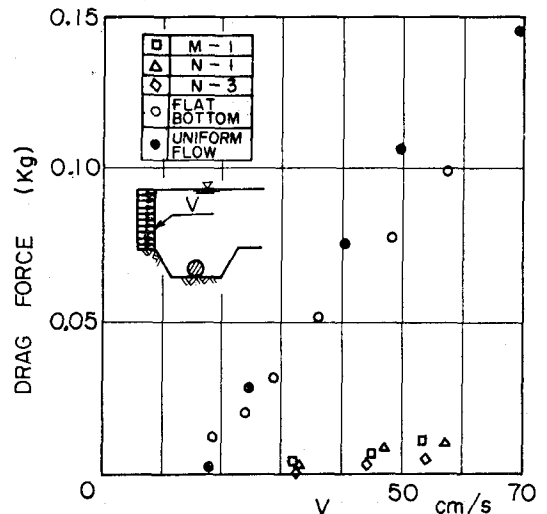


図-5 パイプに作用する潮流力 (抗力)

この実験から抗力係数 C_D および揚力係数 C_L を計算すると、図-6, 7 のようになる。なお、計算の際に用いた流速は、図-8 のようにパイプがない時の水底部の流速を、パイプ径にわたり2乗平均したもので（“有効流速”と呼び、 v_{eff} で表わす）、次式のように定義するものとする²⁾。

$$v_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{D} \int_{h-D}^h v(z)|v(z)| dz \dots \dots \dots (1)$$

図-6, 7 の C_D と C_L はばらついているが、その原因はパイプ近傍の流速が図-8 のように反転しているため、(1) 式の v_{eff} に誤差が生じやすいためと思われる。

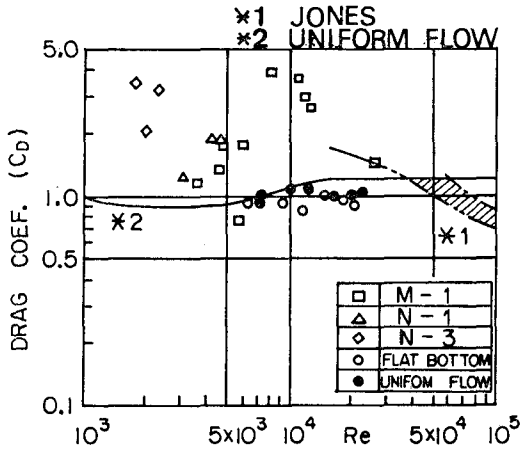


図-6 潮流による抗力係数

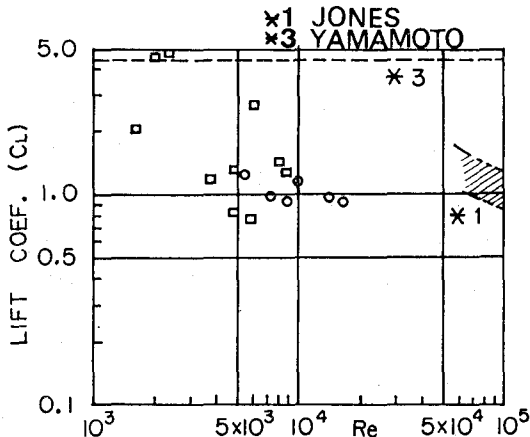


図-7 潮流による揚力係数

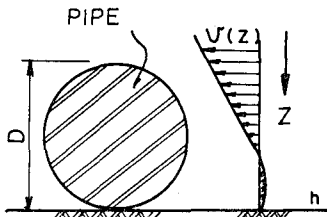


図-8 トレンチ底部の潮流速分布

図-6 には参考までに文献 2) の実験曲線 (図中 *1 印) と、一般的な自由流水中の実験結果 (*2 印) も示す。*1 は平床上に置かれたパイプについての実験結果である。今回のトレンチ問題では C_D が 4 近くの値を示すことがあり、流れの乱れを考慮すると、 C_D としてはこの程度の値までをとる必要があると思われる。

図-7 の C_L グラフには文献 2) による曲線 (図中 *1) と文献 1) による理論解 (図中 *3, 4.49) を示す。実験結果はばらついているが、最大値は理論解に近い値を示す。

3. トレンチ内のパイプに作用する波力

3.1 水底形状が任意のときの水粒子運動

水底が任意形状の所へ波が入射して来た時、波浪特性がどのようなかということは、今回の海底管の問題に限らず、海洋構造物全般に関連する問題である。本論では、トレンチ以外にマウンド (潜堤のようなもの) が水底にある場合の波浪特性を実験および理論的に調べた。

(1) 波浪実験

表-1 のトレンチの 1/4.23 縮尺模型の他に、半円形、台形等のマウンド模型を用いて波浪実験を行なった。これらの模型を造波水路 (60×3×2 m) の底部に、水路全幅 (3 m) にわたって設置した。実験波としては、水粒子運動が水底まで届くように比較的長周期のもの (1.67~3.0 秒) を選んだ。実験結果の一例を図-9 に示す。本節では特にトレンチ問題に限って波浪特性を考察すると、以下のようなことが分かった。

波による水粒子運動はトレンチ底まで入り込むが、潮流のようにトレンチ内で逆流することはない。波による水粒子運動は半波高を基本振幅とする回転運動であるので、運動振幅がトレンチ幅と比べて小さい時は、この回転運動がトレンチ内にそのまま入り込むことになる。図-10 は M-1 および N-1 トレンチの中央部直上の水粒子速度分布を平床の場合と比べたものである。平床の場合と比べて M-1, N-1 とともにトレンチ底部では 50~60 % の水平流速が生じていることが分かる。潮流の場合は基準流速と比べて 3 割以下に低下してしまうが、波の場合はトレンチによる低減効果が小さい。

(2) 理論解析

ここではトレンチに対象を限定せず、水底が任意形状をなしている場合の波浪特性を計算した。解析手法としては、計算対象が二次元で、水底形状が任意であることを考慮して、井島らによる領域分割法⁸⁾を採用した。

任意の水底形状を対象として、波による水粒子速度を計算した一例が図-9 の実線である。トレンチおよびマウンド共に、計算値と実験値は全般的によい一致を示している。特にトレンチの場合は、水粒子運動がトレンチ

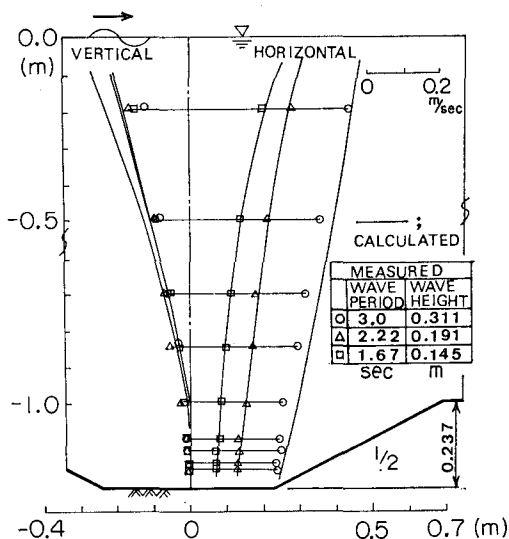


図-9 (1) トレンチ内の水粒子運動 (N-1)

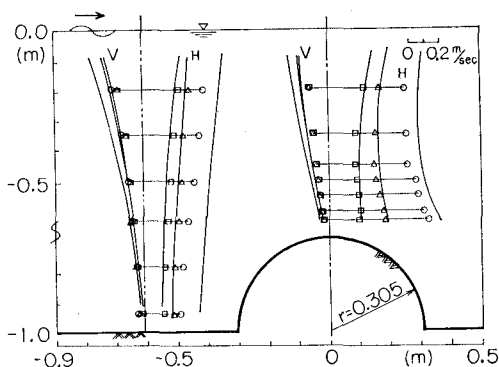


図-9 (2) 半円マウンド近傍の水粒子運動

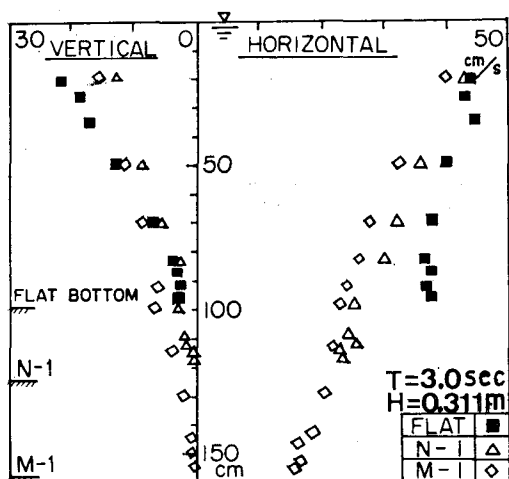


図-10 平床とトレンチ部分の水粒子速度の比較

内部にまで入り込んでいる様子が計算でも確かめられた。また、半円マウンドでは水底部で水粒子速度が加速される様子が計算された。

以上のように、本解析法は水底が任意形状の時の波浪特性を計算することができるので、海底管に限らず一般の海洋構造物に対して非常に有効であることが分かった。しかし、本法は微小振幅波を対象に線型解を求めるものであるため、非線型波の場合や、渦、はく離のある時には適用に限界があることを考慮する必要がある。

3.2 トレンチ内のパイプに作用する波力

ここでは、M-1, N-1 トレンチ模型の底部にパイプを置いて波力を計測した。模型は表-1の実物と比べて1/4.23の縮尺となっている。また、パイプは150mm径のものを用いたので、実物では635mmとなる。

さて、波浪中の物体には一般的に抗力、慣性力および揚力が作用する。しかし、水底部では水面付近と比べて水粒子運動が比較的小さいので、海底管には水平方向に慣性力が卓越して作用するようになる。本実験でもパイプ模型の径が大きいため、波との位相を考慮した上、揚力と慣性力についての解析を行なった。

実験から得られた慣性力係数 C_M を Keulegan-Carpenter 数ベースに描いたものを図-11に示す。同図に

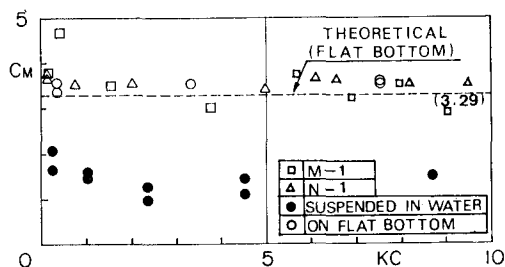


図-11 波による慣性力係数

は平床上および流体中にパイプを置いた時の結果も示す(○印と●印)。また破線は、パイプを平床上に置いた時の、ポテンシャル理論による解で、3.29と求められている¹⁾。実験では平床上およびトレンチ底ともに、ほぼ理論解に近い結果が得られ、トレンチ内でも波による慣性係数は平床上の値を使用してよいことが分かった。

次に、揚力係数 C_L を Re ベースに描いたものを図-12に示す、破線はポテンシャル理論による解¹⁾である。

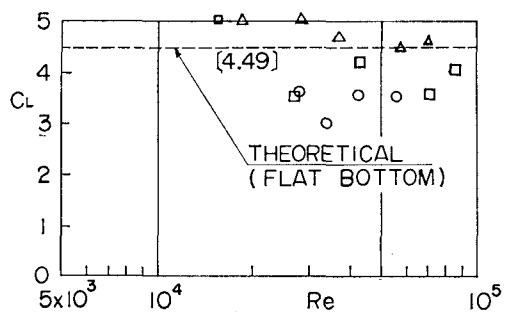


図-12 波による揚力係数

結果がばらついているのは揚力自体が小さく、かつパイプ近傍の水粒子速度の評価が難しいためであるが、 C_L の値としては5.0程度の値をとることができる。

4. 考察および結論

本論は海底のトレンチ内に置かれたパイプに波力や潮流力がどのように作用するかについて、実験および理論的に研究したものである。また、水底が任意形状をなしている時の波浪特性についても、解析と実験を試みた。ここでは、トレンチ内のパイプに作用する流体力を実用上いかに評価したらよいか考察して、結論としたい。

- (1) トレンチ内のパイプに作用する流体力は、潮流力よりも波力の方が卓越する。波による水粒子運動はトレンチ内部まで入り込むので、波力に対する考慮が必要である。
- (2) 波力については以下の手順により計算する。
 - a) トレンチ内の水粒子運動を実験または理論計算(領域分割法等)により予測する。
 - b) 慣性力と揚力を計算する時は、水粒子速度と加速度はパイプ中心部の値を用い、 C_M としては3.29、 C_L としては4.49~5.0を用いる。
 - c) 波力においても抗力が優勢な場合は、トレンチ内でも水粒子運動にほとんど乱れがないので、平床上に置かれたパイプに波が作用する場合の結果を用いて計算する。
- (3) 潮流力については以下の手順により計算する。
 - a) トレンチ内の潮流速分布を実験または理論計算(FEM等)にて予測する。
 - b) 本文(1)式により有効流速 v_{eff} を計算する。
 - c) 抗力と揚力は v_{eff} を用いて計算する。この際 C_D と C_L にいかなる数値を用いるかが問題であるが、

v_{eff} を過少評価する恐れがあるので、 C_D としては4.0、 C_L としては4.49を用いるのが望ましい。

- (4) 本文表—1の形状のトレンチ内部にパイプを置いた場合の潮流力は、平床上に置いた場合と比べて大略1割程度に低下する。
- (5) 水底が任意形状をしている時の潮流速分布を計算するには有限要素法が、また波による水粒子運動に対しては領域分割法による解析手法が有効である。

以上の結論には、over estimateの所もあるかと思われるが、これらは設計・施工をするという立場からまとめたものであり、今後、流体力の作用機構や諸係数について、より詳細な検討を進める所存である。

参 考 文 献

- 1) Wright, J. C. and T. Yamamoto: Wave forces on cylinders near plane boundaries, ASCE, Vol. 105, No. WW1, 1979.
- 2) Jones, W. T.: Forces on submarine pipelines from steady currents, ASME Paper 71-UnT-3, 1971.
- 3) Knoll, D. A. and J. B. Herbich: Wave and current forces on a submerged offshore pipeline, OTC 3762, 1980.
- 4) Garrison, C. J. and F. H. Gehrman: Wave forces on bottom-mounted large-diameter cylinder, ASCE, WW4, 1975.
- 5) Jones, W. T.: On-bottom pipeline stability in steady water currents, Journal of Petroleum Technology, Mar. 1978.
- 6) Kawahara, M. and T. Okamoto: Finite element analysis of steady flow of viscous fluid using stream function, Proceeding of JSCE, No. 247, 1976.
- 7) Kawahara, M., N. Yoshimura and K. Nakagawa: Analysis of steady incompressible viscous flow, in Finite Element Method in Flow Problems, 1974.
- 8) 井島武士・周 宗仁: グリーンの公式による2次元水面波の境界値問題の解析, 土木学会論文報告集, 第252号, 1976.