

II-14

漂砂による鋼管の摩耗特性と 砂粒子の衝突エネルギー

北海道大学工学部 正員 山下俊彦
北海道大学工学部 学生員 仙田昌功
新日本製鉄 佐藤光一
新日本製鉄 飯屋園義久

1. はじめに

現在、海洋への進出が盛んに行われており、そこには多くの構造物が造られ、使用される鋼管杭の数も増加している。しかし、外洋域では波浪条件が厳しいため、漂砂も激しく、鋼管には錆等による腐食と同時に漂砂による摩耗が発生し、大きな肉厚減少が起こると考えられる。実際に設計上錆による腐食量の許容値は0.1mm/年(海中)であるが、漂砂の激しい海岸では1mm/年以上の肉厚減少が発生したことが報告されている。山下¹⁾らはU字管振動流装置を用いた現地スケールの実験により、①1mm/年程度の漂砂摩耗が発生しうること、②摩耗量には底質の粒径が大きく影響すること、③最大摩耗量は底面より数cm上で発生することを報告している。そこで、本研究では、重要である最大摩耗量に着目し、まず実験により摩耗量分布と最大摩耗量への流速と粒径の効果を調べる。次に、鋼管への浮遊した砂の衝突速度、衝突個数及び衝突エネルギーを理論的に求め、粒径、管径、流速の効果を明らかにする。更に調べた鋼管の摩耗特性と比較することにより摩耗機構を考察する。

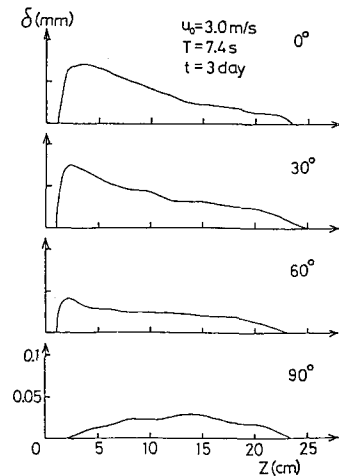


図-1 摩耗量分布

2. 実験結果

漂砂による摩耗現象についての相似則はないので現地スケールでU字管振動流装置を用いて実験を行った。詳細は前論文¹⁾で報告した。流れの条件は周期 $T=7.4$ 秒で流速振幅 $u_0=3\text{m/s}$ 、 2m/s の2ケースについて行った。例えばこの流れを水深10mの微小振幅波の底面流速と考えると、各々波高8.1mと5.4mの暴浪時の波に相当する。この流れを各々3日間作用させた。底質として比重 $s=2.65$ で平均粒径 $d=4.0\text{mm}$ の砂と $d=0.75\text{mm}$ の珪砂の2種類を用いた。また鋼管は鋼管表面を①ポリエチレン、②ウレタンエラストマー、③耐摩耗ウレタンで各々被覆したもの、表面にサンドブラストをかけた裸鋼管の4種類を用いた。摩耗量は鋼管の母線方向にそって測定した。測定箇所は主流方向を0度として90度までの間を30度おきに合計4箇所取った。

実験の結果、粒径0.75mmの珪砂の場合は流れを一週間作用させても摩耗量は0.01mm以下と非常に少なく測定できなかった。よって以下は粒径4.0mmの砂の摩耗特性について述べる。

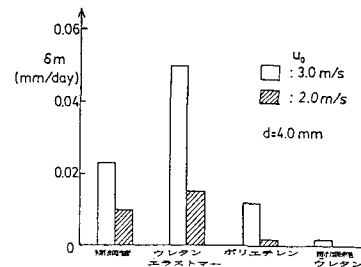


図-2 鋼管の被覆材別の最大摩耗量

図-1 は流速振幅3m/sの時の裸鋼管の場合の摩耗量 δ の分布特性を示したものである。この場合の実験終了時の底質は $X=12\text{cm}$ 以上の所にあった。これから、最大摩耗量は0度と30度の断面で発生し、3日間で0.07mmに達することがわかる。これは1か月に直すと0.7mmとなり、現地での年間約1mmの肉厚減少が漂砂による摩耗である程度説明できることがわかる。最大摩耗量は底質表面から数cm上の部分で発生しその位置での摩耗は浮遊した砂の衝突によって発生していると考えられる。

鋼管の被覆材別の1日当りの最大摩耗量 δ_m を流速振幅別に示したのが図-2である。流速振幅3m/sの場合の各材質の最大摩耗量を比較すると裸鋼管の0.023mm/日を1.0とした時、ウレタンエラストマーは2.0、ポリエチレンは0.5、耐摩耗ウレタンは0.1となる。また、流速振幅2m/sの場合は、各材質とも摩耗量は3m/sの時の0.3~0.5倍になっていることがわかる。

3. 砂粒子の衝突特性

設計上最も重要となるのは最大摩耗量である。前述の実験結果より、最大摩耗量は浮遊した砂粒子の鋼管への衝突により発生していると考えられる。そこで、砂粒子の衝突特性を調べるため鋼管前面の流れをポテンシャル流れで近似し、その流れの下での砂粒子の運動を理論的に解析する。

実際に流れは非定常流で砂粒子は揚力や重力により鉛直方向にも運動するが、ここでは基本的な衝突特性を調べるため定常な流れで砂粒子は同一水平面内で運動すると仮定する。鋼管前面の流れを二次元ポテンシャル流れとすると、水粒子速度 u, v は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 \left\{ 1 + \frac{\phi^2 (Y^2 - X^2)}{4(X^2 + Y^2)^2} \right\} \\ v &= -u_0 \frac{\phi^2 XY}{2(X^2 + Y^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

但し、 X, Y は鋼管の中心を原点とした座標で、 X 軸は主流方向に一致し、下流側を正としている。 u_0 は鋼管の影響のないところの流速である。

水平面内での砂粒子の運動を考えないので、砂粒子に関する運動方程式は次式となる。

$$M \frac{d\vec{U}}{dt} + C_m m \frac{d(\vec{U} - \vec{u})}{dt} = m \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho_w A |\vec{u} - \vec{U}| (\vec{u} - \vec{U}) \quad (2)$$

ここに、 $\vec{U}$: 砂粒子速度、 M : 砂粒子の質量、 m : 砂粒子が排除した水の質量、 C_m : 付加質量係数、 C_D : 抗力係数、 ρ_w : 水の密度、 A : 砂粒子の投影面積である。式(2)ではバセット項は影響が小さいと考え省略している。式(2)を X 方向と Y 方向の運動方程式に書き直し、変形を行うと以下の様になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \frac{1+C_m}{s+C_m} \left(u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} \right) + \frac{3C_D}{4d(s+C_m)} \{ (u-U)^2 + (v-V)^2 \}^{1/2} (u-U) \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{1+C_m}{s+C_m} \left(u \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} \right) + \frac{3C_D}{4d(s+C_m)} \{ (u-U)^2 + (v-V)^2 \}^{1/2} (v-V) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに U, V : 砂粒子の速度の X 方向、 Y 方向成分である。沢本²⁾は壁面の影響による C_D, C_m の変化は粒子が壁面の極近傍を移動する場合に限られるので、粒子の壁面への衝突速度の C_D, C_m の変化の影響はたかだか数%で小さいことを報告している。そこで計算に当たっては、 $C_m=0.5, C_D=0.4+24/Re$ とした。ここに Re : 相対速度を用いたレイノルズ数である。

砂粒子は最初 $X=-5.5\phi$ 、 Y は種々の位置で u_0 の速度で移動しているとし、その後の運動は式(1)、(3)を数値計算し、砂粒子が鋼管に衝突する位置と衝突速度を求めた。ここで ϕ は鋼管の径である。砂粒子の衝突速度は初期位置 X により異なるが、 $X<-5.5\phi$ では、ほぼ同じになるので初期位置は $X=-5.5\phi$ とした。計算では、粒径 d 、管径 ϕ 、流速振幅 u_0 の三つの条件を変化させ、それぞれの衝突速度等への効果に着目した。以下に結果を示す。

図-3 から図-8 は粒径 d の効果についての結果である。

図-3、図-4 は、砂粒子の衝突速度の鋼管表面に沿う成分 V_s と直角方向成分 V_n を水粒子流速振幅 $3m/s$ で割って無次元化したものを示したものである。各々の粒径について比較してみると、 V_s/u_0 は粒径が大きいほど少し小さく、 V_n/u_0 は粒径が大きい程大きくなっている。また V_s/u_0 も V_n/u_0 も粒径が大きい程大きな角度でも衝突している。これは、砂粒子の慣性の効果により、粒径が小さいほど水粒子の流れに追随し易く、鋼管に衝突しにくいためであると考えられる。

図-5 は、初期位置 X で単位面積を単位時間当りに通過する砂粒子の体積に対する鋼管の単位面積に単位時間当りに衝突する砂粒子の体積の割合を C として示したものである。この分布形状は図-4 の分布形状とよく似ており、粒径が大きくなる程、 C の値も大きくなっていて、大きな角度でも衝突している。これも慣性の効果によるものであると考えられる。

図-6 は、摩耗量に最も関係していると考えられる $CV_n|\vec{U}|/u_0^2$ を示したものである。 $CV_n|\vec{U}|/u_0^2$ は、単位面積、単位時間当りの砂粒子の衝突エネルギーの鋼管表面に直角方向の成分を水粒子速度で無次元化したもので、以下これを簡単に無次元衝突エネルギーと呼ぶ。この図より粒径が大きい程無次元衝突エネルギーは大きく、また大きい角度まで衝突することがわかる。

図中の丸印は、粒径 $4.0mm$ の砂の場合に、最大摩耗量をとる高さの位置での円周方向の摩耗量分布の実験値を示したものである。無次元衝突エネルギーと摩耗量分布を比較するとほぼ一致していることがわかる。

図-7 は、無次元衝突エネルギーの最大値 $CV_n|\vec{U}|_{max}/u_0^2$ と粒径 d との関係を示したものである。これから、粒径が $1mm$ 以下のかなり小さい場合には衝突エネルギーはほとんどゼロである。これから実験において粒径 $0.75mm$ の珪砂の場合、ほとんど摩耗しなかった

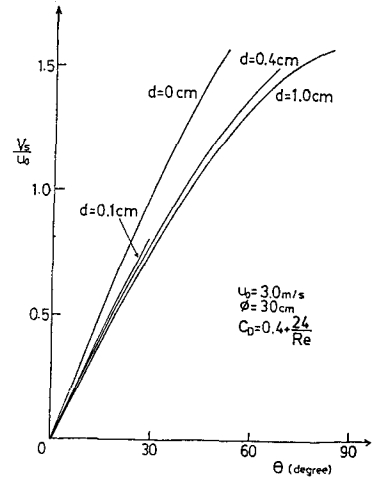


図-3 粒径別の V_s/u_0 の分布図

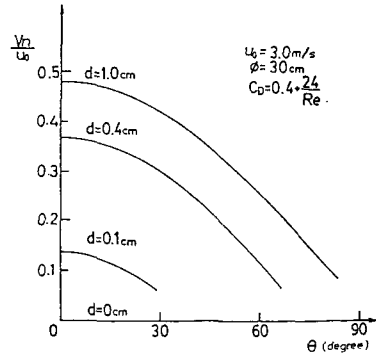


図-4 粒径別の V_n/u_0 の分布図

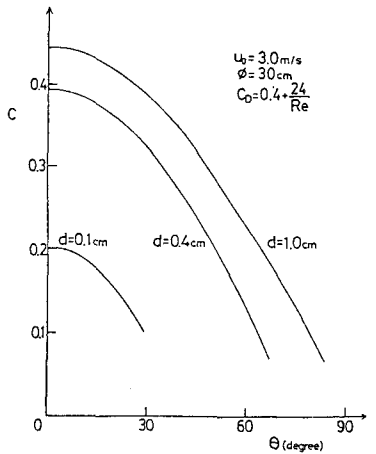


図-5 粒径別の C の分布図

事がある程度説明できる。

図-8は無次元衝突エネルギーの最大値をとる角度 θ_m と粒径 d との関係を示したものである。粒径の小さいところでは急激に増加しているが、大きくなると30度程度で余り変化しなくなっている。これは図-6からもわかるように、粒径が大きい程砂粒子は大きな角度まで衝突し広い分布形になっているためである。

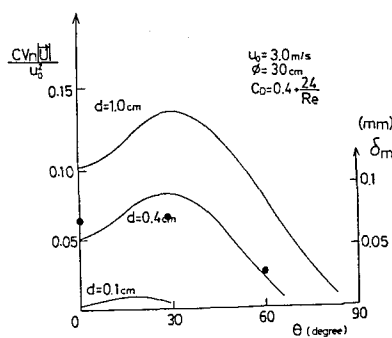


図-6 粒径別の $|CV_n|/u_0^2$ の分布図

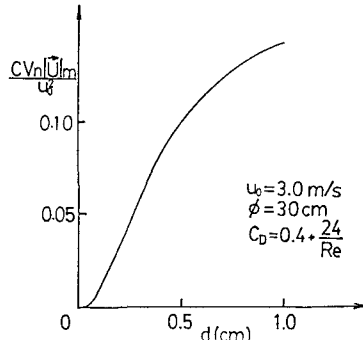


図-7 無次元衝突エネルギーと粒径の関係

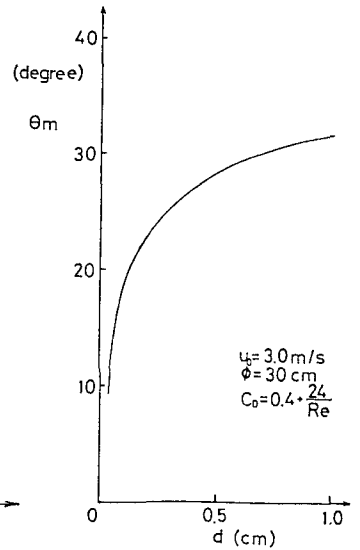


図-8 θ_m と粒径の関係

次に管径 ϕ の効果についての結果を図-9から図-14に示す。

図-9から図-12はそれぞれ V_s/u_0 、 V_n/u_0 、 C 、 $|CV_n|/u_0^2$ と衝突角度 θ との関係を示したものである。分布形状はそれぞれ粒径の効果による図-3から図-6とはほぼ一致している。しかし、粒径 d の大小関係と管径 ϕ の大小関係が逆になっている。これは管径が大きいと流速場への鋼管の影響が広範囲に及び砂粒子が水粒子速度へ追従し易く、鋼管へ衝突しにくくなるためである。

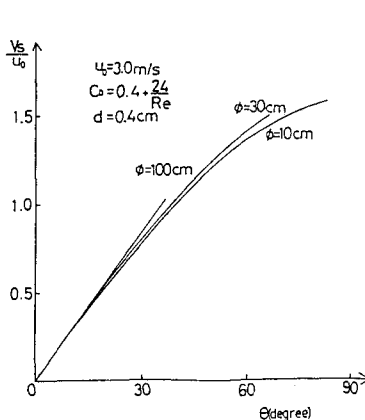


図-9 管径別の V_s/u_0 の分布図

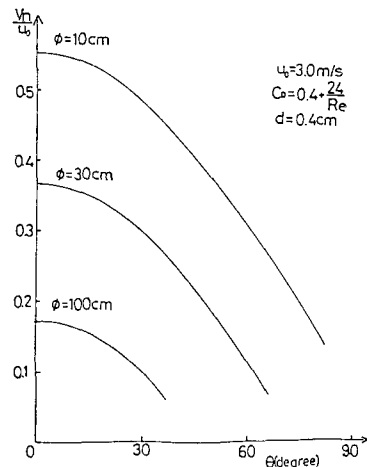


図-10 管径別の V_n/u_0 の分布図

図-13、図-14はそれぞれ $CV_n |\vec{U}_n| / U_0^2$ 、 θ_m と ϕ との関係を示したものである。これらも ϕ が大きくなると値が小さくなり粒径の効果を調べた図-7、図-8と逆の分布形状を示している。以上の d と ϕ に着目した結果から、砂粒子の衝突に関して d と ϕ は逆の関係になっていることがわかる。そこで、 d/ϕ という無次元量を考えてみる。

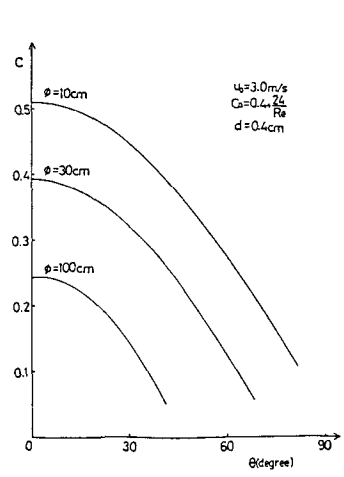


図-11 管径別の C の分布図

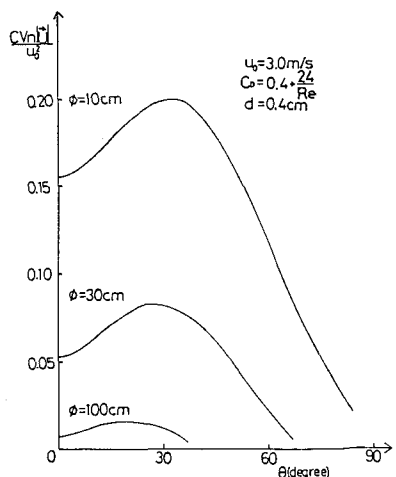


図-12 管径別の $CV_n |\vec{U}_n| / U_0^2$ の分布図

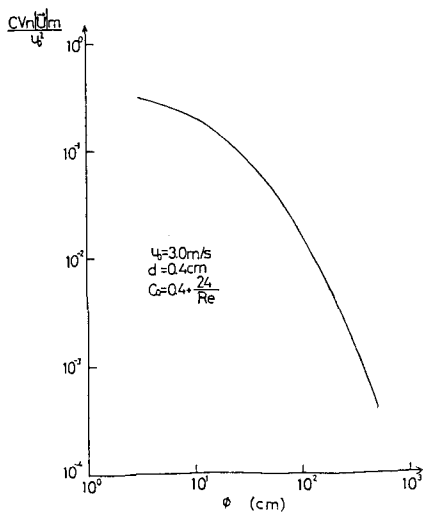


図-13 無次元衝突エネルギーと管径の関係

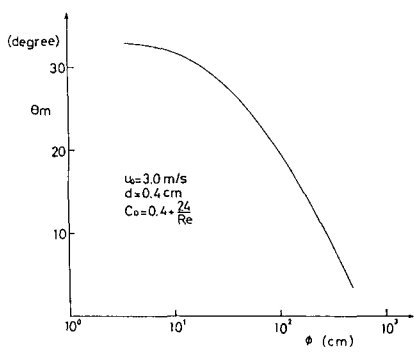


図-14 θ_m と管径の関係

図-15は d/ϕ と $CV_n U_m / u_0^2$ を粒径別にプロットしたものである。これより d/ϕ が大きくなると $CV_n U_m / u_0^2$ は増加し、粒径が異なってもほぼ同じ分布を示すことがわかる。よって鋼管への砂粒子の衝突を考える際には、 d 、 ϕ の2変数ではなく d/ϕ の1つの変数でよいことがわかる。

図-16、図-17は d 、 ϕ を一定にして流速振幅を変化させたときの $CV_n |\vec{U}_m| / u_0^2$ と θ_m との関係を示したものである。両方とも流速が小さい時は少し変化がみられるが、それ以外ではほとんど変化がみられない。 $CV_n |\vec{U}_m| / u_0^2$ が一定ということは衝突エネルギー $CV_n |\vec{U}_m|$ が流速の2乗に比例することである。図-2の実験結果を見ると種々の材質の最大摩耗量は流速振幅2m/sの時は3m/sの時の0.3~0.5倍になっている。これは0.67の2乗の0.45と近い結果であり、衝突エネルギーで摩耗量のある程度推定できるものと考えられる。流速振幅が小さいところで、 $CV_n |\vec{U}_m| / u_0^2$ が小さくなるのは、流速振幅が小さいほど砂粒子は水粒子に追随しやすくなり鋼管に衝突しにくくなるためである。但し、粒径4.0mmの砂の場合には $u_0=0.6$ m/s以下では実際に砂は移動しないため、その領域での計算結果は無意味であり、浮遊した砂の衝突エネルギーは流速の2乗に比例するとしてよいと考えられる。

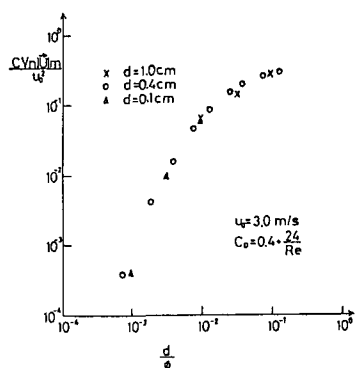


図-15 無次元衝突エネルギー
と d/ϕ の関係

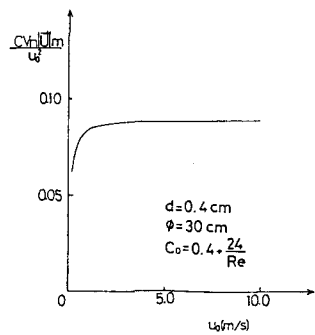


図-16 無次元衝突エネルギー
と u_0 の関係

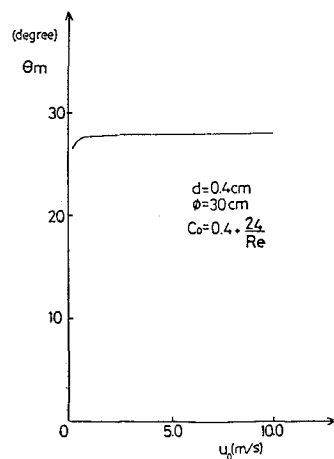


図-17 θ_m と u_0 の関係

4. 結論

本研究から以下のような結論を得た。

- 1) 管径30cmの場合には最大摩耗量の発生位置での摩耗は、浮遊砂の衝突によって発生し、摩耗量の円周方向分布と砂の衝突エネルギーの分布はほぼ一致することがわかった。
- 2) 粒径1mm以下の砂は衝突エネルギーが非常に小さく、浮遊した砂の衝突による摩耗は実際の鋼管ではほとんど発生しないことが推測できる。
- 3) 衝突エネルギー $CV_n |\vec{U}_m|$ はほぼ流速振幅の2乗に比例し、実験で流速振幅2m/sの時の最大摩耗量は3m/sの時の0.3~0.5倍になっていることとほぼ一致する。
- 4) 砂粒子の衝突については、粒径と管径は逆の効果があり、 d/ϕ で統一的に取り扱うことができる。また d/ϕ が大きいほど砂は鋼管に衝突し易く衝突エネルギーも大きくなることがわかった。

参考文献

- 1) 山下俊彦・佐伯浩・浅川典敬・佐藤光一・仮屋園義久：漂砂による鋼管の摩耗に関する実験的研究, 海洋開発論文集 Vol. 5, pp. 109-112.
- 2) 沢本正樹：壁面に衝突する球の仮想質量, 土木学会論文集 No. 191, pp. 77-81.