

図-3 摩耗量測定器

図-1 で砂が全体として左の方に移動したため、3本設置した鋼管のうち流速の大きい左端の鋼管のデータをとった。重防食鋼管杭は、鋼管表面を①ポリエチレン、②ウレタンエラストマー、③耐摩耗ウレタンでそれぞれ被覆したものを用いた。これらと比較のため表面にサンドブラストをかけた裸鋼管についても実験を行った。流れの条件は周期 $T=7.4$ 秒で、流速振幅 $u_0=300$ cm/s, 200 cm/s の2ケースである。例えば、この流れを水深 10 m の微小振幅波の底面流速と考えると、それぞれ波高 8.1 m と 5.4 m の暴浪時の波に相当する。この流れを3日間作用させ、鋼管の高さ方向、円周方向の摩耗量分布を測定した。底質として比重 $s=2.65$ 、平均粒径 $d=4.0$ mm の砂と、 $d=0.75$ mm の珪砂の2種類を用いた。両方の砂とも、表面は滑らかで、比較的球に近い形状である。 $d=4.0$ mm の砂の場合には、実験中砂自身が摩耗し水が土色で不透明になったが、平均粒径は変化しなかった。

摩耗量の測定は、図-3 に示される摩耗量測定器を用いて行った。鋼管の両端から 3 cm のテープを貼った所を基準とし、ダイヤルゲージを鋼管の母線方向に移動して摩耗量を測定した。摩耗量が微小であるため、測定する時は鋼管の母線方向に正確にダイヤルゲージを移動させなければならない。測定箇所は、主流方向を0度として90度迄の間を30度おきに合計4箇所取った。この摩耗量測定器の精度は 1/100 mm である。

3. 実験結果

粒径 0.75 mm の珪砂の場合、裸鋼管で実験を行った時の実験後の表面は、鋼管の底質表面近く及び母線の角度の小さい領域ではかなり底質表面から上方まで、他の部分で発生している赤錆が取れて黒くなっていた。しかし、流れを一週間作用させても摩耗量は 0.01 mm 以下で非常に少なく測定できなかった。以下に粒径 4.0 mm の砂の場合の摩耗特性について述べる。

図-4 に摩耗量の測定結果の一例を示す。これは、裸鋼管の摩耗前と摩耗後の測定結果を示したもので、 Z に鋼管上部の基準線から母線の下向き方向の距離を、 Y

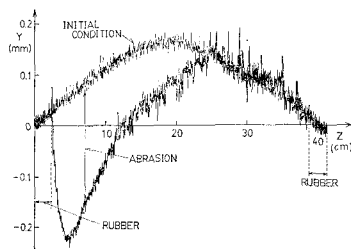


図-4 摩耗量の測定例

には鋼管両端の基準面の高さを0とし、そこから母線に垂直方向の距離を取った。上の実線が流れの作用前、下の実線が流れの作用後のものである。この2本の線の Y 軸方向の差が摩耗量であり、 $Z=2\sim 24$ cm の部分で摩耗が発生している事がわかる。摩耗した面を見てみると、裸鋼管の場合は銀色に光り表面が少しなめらかになり、ウレタンエラストマーの場合は光沢を失い表面がざらざらしていた。ポリエチレンと耐摩耗ウレタンの場合は見た目には余り変化がなかった。

図-5 は、流速振幅 $u_0=300$ cm/s の場合の実験終了後の底面地形の概略を示したものである。鋼管から離れた場所では砂層厚は 44 cm となっている。鋼管周辺部では、鋼管の影響により洗掘され、鋼管表面で最大 10 cm 程洗掘されている。この鋼管表面における砂層底面の位置は、上部基準線から約 12 cm 下方にある。また、流速振幅 $u_0=200$ cm/s の時は、砂層底面が 300 cm/s の時より低い位置にある。しかし、その形状は流速振幅 300 cm/s の時と同じ様に鋼管周辺部では洗掘されている。

図-6 は、裸鋼管の場合の流速振幅 300 cm/s の時の摩耗量 δ の分布特性を示したものである。縦軸には摩耗量 δ を、横軸には鋼管上部の基準線から母線の下向き距離 Z をとった。また、摩耗量を求める際には、図-4 で示したグラフの細かいぎざぎざをなめらかにした。図-6 より、摩耗量は円周方向では0度と30度の断面で同程度で一番大きく90度の断面で一番小さいことがわかる。また、このグラフは流速振幅が 300 cm/s の時のものなので、前述の様に底質表面は $X=12$ cm の所

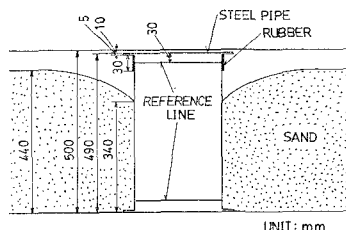


図-5 断面図

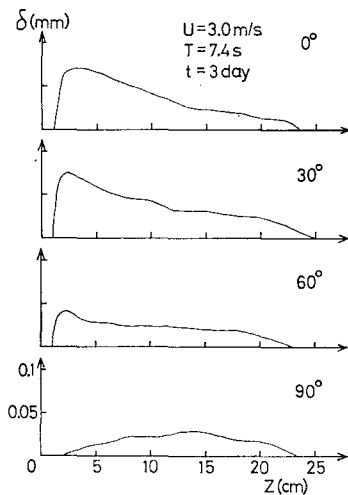


図-6 摩耗量分布

にある。このことを考慮にいと、底質表面より上の領域では摩耗量は0度と30度の断面で最大で90度の断面で最小となるが、底質表面より下の領域では、円周方向で摩耗量は余り変化しないことがわかる。底質表面より上の領域の摩耗は主に浮遊した砂粒子の鋼管への衝突によるものと考えられる。一方、底質表面より下の領域での摩耗は、液状化状態のようになった砂によって鋼管側面がこすられる事が主な原因と考えられる。最大摩耗量は0度と30度の断面で底質表面より約数 cm 上で発生し、裸鋼管の場合3日間で 0.07 mm に達する。これは、1 カ月に直すと 0.7 mm となり、現地での年間約 1 mm 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。摩耗量の分布形状は被覆材の種類や流速振幅によらず、ほぼ同じであった。しかし、流速振幅が変化すると底質表面の位置が変化するので、分布形状は X 軸方向に移動したものになる。

図-7 は各種重防食鋼管杭の1日当りの最大摩耗量 δ m を流速振幅別に示したものである。流速振幅 200 cm/s の時の耐摩耗ウレタンの場合、摩耗量が少なく、この

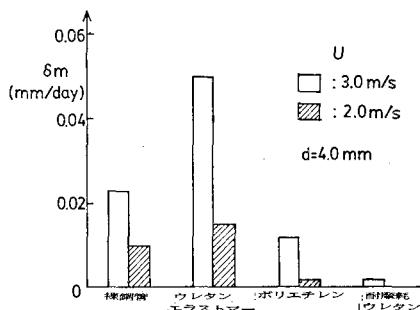


図-7 重防食鋼管杭の最大摩耗量

表-1 耐摩耗被覆材の特性

被覆材料	硬度 (ショア D)	液体ホーニング (mm)
裸鋼管 (SS41)		0.45
ウレタンエラストマー	63	6.08
ポリエチレン	55	1.68
耐摩耗ウレタン	28	1.03

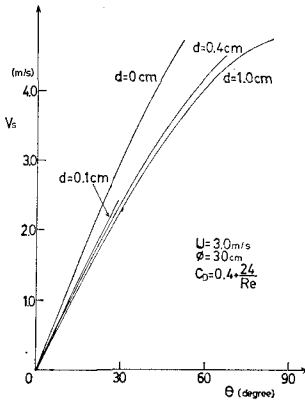
測定器では測定できなかった。流速振幅 300 cm/s の場合の各被覆材の最大摩耗量を比較すると、裸鋼管の 0.023 mm/日を 1.0 とした時、ウレタンエラストマーは 2.0、ポリエチレンは 0.5、耐摩耗ウレタンは 0.1 となる。また、流速振幅 200 cm/s の場合は、各材質とも摩耗量は 300 cm/s の場合の 0.3~0.4 倍になっている。

表-7 は材質特性のうち摩耗量と関係が深いと考えられる硬度と液体ホーニングを示したものである。液体ホーニングとは、粒径 120 μ m のガラスビーズを容積比 1:3 (ガラスビーズ:水) で水と混合し、それを 4 kg/cm² に圧縮された空気と一緒にノズル径 8.3 mm の噴射ガンから 50 mm 離れたサンプルに90度の角度で 7 l/分の量を3分間噴射させた時の最大摩耗量である。まず、硬度と図-7の最大摩耗量の関係を見ると、硬度が大きくなる程最大摩耗量も大きくなっている。これは、硬度が小さいと材質が軟らかいため、弾力で衝突のエネルギーを吸収するためだと考えられる。しかし、硬度が非常に小さい場合は逆に摩耗しやすくなることは容易に想像できるので、どの程度の硬度が摩耗を防ぐために適当であるのかは今後の検討が必要である。液体ホーニングと最大摩耗量との関係は裸鋼管を除いた合成樹脂系の3つの被覆材の場合には液体ホーニングが大きい程摩耗量は大きくなっている。現地スケールの摩耗実験は、装置も大がかりで時間もかかり大変であるが、液体ホーニングの実験は比較的簡単である。合成樹脂系の耐摩耗被覆材については、摩耗のしやすさが液体ホーニングによりある程度予想できることがわかったので、今後液体ホーニング試験の改良を進めていく予定である。

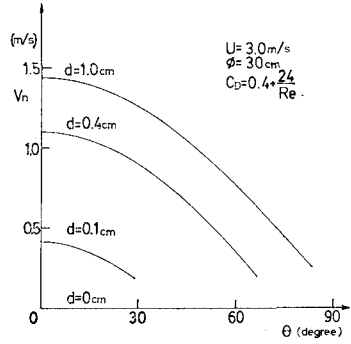
4. 砂粒子の衝突特性

設計上最も重要な最大摩耗量は、底質表面より数 cm 上の位置 (図-6 では $Z=2\sim 3$ cm) で発生することがわかった。この位置では、浮遊した砂粒子が鋼管に衝突して摩耗が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。

流れは非定常であるが、ここでは第一歩として定常と



図—8 砂粒子の衝突速度の接線方向成分



図—9 砂粒子の衝突速度の法線方向成分

考える。また、砂粒子は揚力や重力により鉛直方向にも運動するが、基本的な衝突特性を調べるため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 $\vec{u}$ (u, v) は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 \left\{ 1 + \frac{\phi^2}{4} \frac{(y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right\} \\ v &= -u_0 \frac{\phi^2}{2} \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 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 : 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ているので、砂粒子に関する運動方程式は式 (2) となる。

$$\begin{aligned} M \frac{d\vec{U}}{dt} + C_M m \frac{d(\vec{U} - \vec{u})}{dt} \\ = m \frac{d\vec{u}}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho_w A |\vec{u} - \vec{U}| (\vec{u} - \vec{U}) \dots\dots (2) \end{aligned}$$

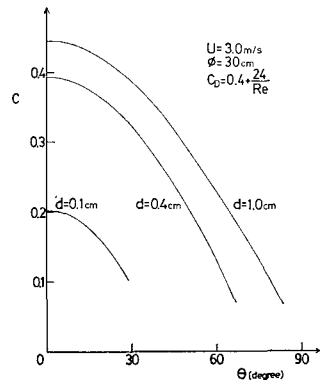
ここに、 $\vec{U}$: 砂粒子速度、 M : 砂粒子の質量、 m : 砂粒子が排除した水の質量、 C_M : 付加質量係数、 C_D : 抗力係数、 ρ_w : 水の密度、 A : 砂粒子の投影面積である。式 (2) ではベセッ項は影響が小さいと考え省略している。式 (2) を x 方向と y 方向の運動方程式に書き直し、変形を行うとそれぞれ以下になる。

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \frac{1+C_M}{s+C_M} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{3C_D}{4d(s+C_M)} \sqrt{(u-U)^2 + (v-V)^2} (u-U) \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{1+C_M}{s+C_M} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{3C_D}{4d(s+C_M)} \sqrt{(u-U)^2 + (v-V)^2} (v-V) \\ &\dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

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 (1971) は、壁面の影響による C_D, C_M の

変化は粒子が壁面ごく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への C_D, C_M の変化の影響はたかだか数%で小さい事を報告している。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 $x=-5.5\phi, y$ は種々の位置に静止しているとし、その後の運動を式 (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。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。計算条件のうち、 $\phi=30\text{cm}, u_0=300\text{cm/s}$ は一定とし、衝突速度等の円周方向の分布特性と粒径の効果に着目した。以下に結果を示す。

図—8, 図—9 は、各々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 を示したものである。図中 $d=0$ は水粒子の鋼管表面の速度である。 $d=0$ 以外では、曲線が終わっている点より大きい角度では砂粒子は鋼管に衝突しない。これは、図—10～図—11 でも同様である。この砂粒子が衝突しなくなる角度は粒径が小さいほど小さく、粒径が小さな砂は、殆ど鋼管にぶつからずにそれてしまうことがわかる。ある粒径についてみる



図—10 衝突する砂粒子の体積

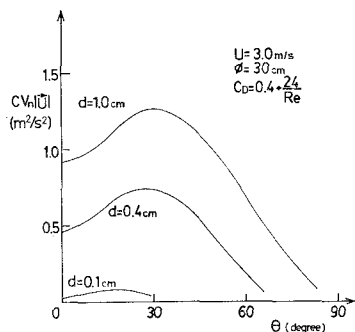


図-11 衝突エネルギーの円周方向分布

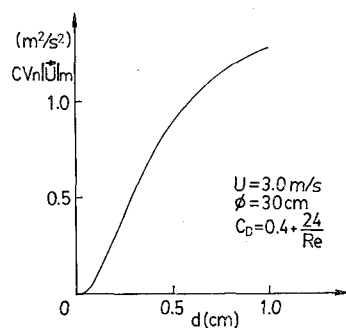


図-12 衝突エネルギーと粒径との関係

と、角度が大きいくほど V_s は大きく V_n は小さくなっている。また、粒径が大きいくほど V_s は小さく V_n は大きくなっている。以上の結果は粒径が大きい程慣性力が大きく流体運動への追随性が悪いためである。粒径の影響は V_s より V_n に顕著に現れることがわかる。

図-10 は、上流側 ($x = -5.5\phi$) で y, z 方向の単位面積を単位時間を通して砂粒子の体積を 1 とした場合、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 C を示したものである。この C は、砂粒子の初期位置と衝突位置から求める事ができる。ある粒径についてみると C は角度が小さいほど大きく、粒径が大きいくほど C は大きくなっている。これも粒径が大きい程慣性力が大きく、鋼管にぶつかり易いためである。

図-11 は、摩耗に最も関係していると考えられる $CV_n|\vec{U}|$ を示したものである。 $CV_n|\vec{U}|$ 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成分の相対値を表し、以下これを簡単に衝突エネルギーと呼ぶ。粒径が大きい程衝突エネルギーは大きく、最大値をとる角度も大きくなっている。 $d=0.4$ cm の砂について図-6 の摩耗量分布と比較するとある程度一致している事がわかる。

図-12 は、衝突エネルギーの最大値 $CV_n|\vec{U}|_m$ と粒径 d との関係を示したものである。 $CV_n|\vec{U}|_m$ は粒径が大きい程大きいが、 $d=1$ mm 以下では殆どゼロでそれ以上で急激に大きくなることがわかる。 $d=0.75$ mm の $CV_n|\vec{U}|_m$ は $d=4.0$ mm の約 $1/25$ であり、実験で $d=0.75$ mm の砂の場合に殆ど摩耗しなかった事がある程度説明できる。

5. 結 論

本研究で得られた主な結果は以下のようである。

(1) 砂の粒径 4.0 mm, 流速振幅 300 cm/s, 周期 7.4 秒という実海域波浪時相当の条件では、裸鋼管で設計上錆による腐食量として許されている 0.1 mm/年より遙かに大きい漂砂摩耗 (0.023 mm/日) が発生することが確認された。

(2) 最大摩耗量は、各材質とも主流方向に対して 0 度と 30 度の断面で底質表面より数 cm 上で発生し、流速振幅、粒径に大きく影響されることがわかった。

(3) しゅんせつ船の排砂管等のライニング用として開発された耐摩耗ウレタンは、漂砂摩耗にも有効であり、裸鋼管の $1/10$ 程度迄摩耗量を減少できる。

(4) 最大摩耗量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。

(5) 粒径が 1 mm 以下の砂では非常に砂の衝突エネルギーは小さく、浮遊砂の衝突による摩耗は余り発生しない事が推測できる。

参 考 文 献

- 石橋 毅 (1983): ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理的研究, 土木学会論文報告集, No. 334, pp. 103~112.
- 沢本正樹 (1971): 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.
- 山下貞二 (1966): 流体固体輸送工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 381~397.
- 山下俊彦・佐伯 浩・浅川典敬・佐藤光一・飯屋国義久 (1989): 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.