

粒径・管径の効果に着目した漂砂による鋼管の摩耗特性

山下俊彦*・佐伯 浩**・仙田昌功***
染矢武彦****・佐藤光一*****・仮屋園義久*****

1. はじめに

近年、構造物の海洋への進出はめざましく、使用される鋼管杭の数も増加している。漂砂の激しい海域では、鋼管に錆等による腐食よりはるかに大きい(約10倍)漂砂摩耗が発生していることが、現地調査及び実験により確認されている(Culbertson, 1949; 山下ら, 1989; 山下ら, 1990)。漂砂の激しい海域での構造物の耐久性を考慮する際、漂砂摩耗は無視出来ないものであり、その特性の解明が必要であると考えられる。山下ら(1990, 1991)は、漂砂摩耗は砂粒子が鋼管に衝突することによって発生し、摩耗量には主に砂粒子径、流速が関係することを報告している。また、理論的に得られる砂粒子の鋼管への衝突エネルギーは、 d/ϕ (粒径と管径の比)及び流速が大きい程大きく、摩耗量も多いと予想されている。

そこで本研究では、鋼管の漂砂摩耗への砂粒径と鋼管径の効果に着目し、まず振動流装置を用いた系統の実験により鋼管の漂砂摩耗特性への粒径と管径の効果を定量的に明らかにする。次に昨年までの理論的研究で得ている砂粒子の衝突エネルギーと実験によって得られた摩耗特性を比較検討することにより、摩耗機構及び衝突エネルギーによる摩耗量推定の可能性を考察する。

2. 実験装置及び方法

漂砂による摩耗現象についての相似則はないため、実験は現地スケールで行う必要がある。そこで実験には、実海域暴浪時の漂砂現象を再現できる大きな流速の出せるU字管振動流装置を用いた。実験の詳細は山下ら(1990)で報告した。

実験条件及び最大摩耗速度 表-1 に示す。今回の実験では、粒径と管径の効果を考えるため、底質としては、比重 2.65 の平均粒径 $d=0.75\text{ mm}$, 1.5 mm の珪

表-1 実験条件および最大摩耗速度

CASE	流径 d (mm)	管径 ϕ (cm)	流速 u_0 (cm/s)	周期 T (s)	実験時間 t (Hr)	最大摩耗速度 δ_m (mm/day)
1	7	7.6	360	7.1	38	0.118
2		14.0	340		72	0.067
3		26.7	310		38	0.044
4	4	7.6	340	7.1	72	0.051
5		14.0	320			0.025
6		26.7	250		73	0.012
7			280	7.4		0.020
8			210	72	0.008	
9			320		0.025	
10	1.5	7.6	380	7.1	72	0.023
11		14.0	370			0.018
12		26.7	330			0.008
13	0.75	26.7	300	7.4	168	0.0007

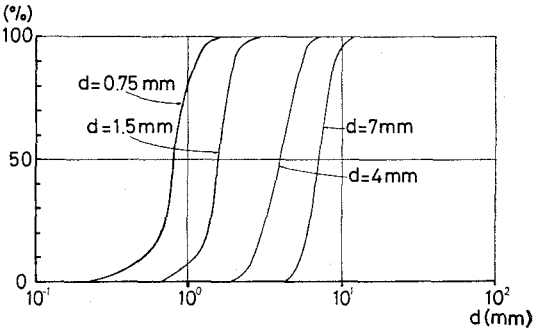


図-1 粒度分布

砂と 4 mm, 7 mm の砂利の 4 種類の砂を用いた。その粒度分布を図-1に示す。また砂粒子の形状は丸みをおびた比較的球形に近いものである。鋼管は材質 SS41 で管径 $\phi=7.6\text{ cm}$, 14 cm , 26.7 cm の 3 種類を用意した。摩耗速度を実験初期から一定とするため、鋼管の表面にはサンドブラストをかけ表面の黒錆をとった。流れの条件として、周期を 7.1 s と 7.4 s に固定し、流速振幅は $2.1\text{ m/s}\sim 3.8\text{ m/s}$ の範囲のものを用いた。摩耗速度への流速の効果を調べた case 6~8 以外は、すべて流速

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
*** 工修 愛知県庁
**** 学生員 北海道大学大学院 修士課程
***** 工修 新日本製鉄(株) 建材開発技術部
***** 工修 新日本製鉄(株) 君津技術研究部

振幅 3.0 m/s 程度の流速を用いた。この流れを水深 10 m の底面流速と考えると波高 8.1 m の暴波時の波に相当する。実験時間は、測定可能な摩耗が発生するまでを基準とし 38~168 時間とした。摩耗量は、あらかじめ鋼管の上下端に幅 2 cm のゴム巻き付けて摩耗しないようにしたところを基準として、流れの主流方向に対し $\theta = 0$ 度から 15 度おきに 90 度まで母線方向に 7 箇所測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 摩耗量分布

図-2 はそれぞれの角度における摩耗量 δ の鉛直方向の分布例を示したものである。 z 軸は管の上部を基準に下向きに取った。鋼管の摩耗量がゼロの部分 ($0 \leq Z \leq 1$ cm, $Z \geq 19.5$ cm) は、ゴムを巻き付け摩耗しないようにしたところである。点線は管近傍での底面の位置を示し、点線より右側は砂に埋没している部分である。実線は鋼管による洗掘の影響を受けていない地点での底面の位置である。図-2(a) は、今回の摩耗量の測定結果の典型的パターンであり、図-2(b) は、 d/ϕ が小さい条件でのみ発生するパターンである。まず、図-2(a) の

典型的パターンについて述べる。点線より左側の底質底面より上の領域では、摩耗量は 0° から 45° 付近で大きく、 90° 方向にいくに従って小さくなっている。最大摩耗量は、 15° から 30° の断面で鋼管による洗掘の影響のない地点での底面位置（実線）より少し上で発生している。この領域の摩耗は主に浮遊した砂が鋼管に衝突することによって発生しているものと考えられる。点線より右側の砂に埋没している部分では、上部に比べて摩耗量は少なく摩耗量の円周方向分布はあまりない。この領域の摩耗は、主に液状化状態ようになった砂によって鋼管側面が擦られることによって発生していると考えられる。 d/ϕ が小さくなると、最大摩耗発生点は z 軸にそって下に下がる傾向があり、その例を示したのが図-2(b) である。これは d/ϕ が小さくなると管の周辺が大きく洗掘されるためだと考えられる。

3.2 砂粒子の衝突特性と摩耗速度

設計上最も重要となるのは最大摩耗量あるいは最大摩耗速度（1日当たりの最大摩耗量）である。前述の実験結果より、最大摩耗速度は底質表面より少し上の位置で発生し、この位置での摩耗は浮遊した砂の鋼管への衝突によって起こっていると考えられる。山下ら（1990, 1991）は、浮遊した砂の鋼管への基本的な衝突特性を調べるため、流れを定常とし、さらに鋼管前面の流れをポテンシャル流れと仮定し、その流れの下での浮遊した砂粒子の運動を理論的に解析して、砂粒子の鋼管への衝突速度、衝突個数及び衝突エネルギーを求めている。以下では、最も重要な最大摩耗速度及び最大摩耗速度発生位置での円周方向の摩耗速度分布への砂粒子径と管径の効果を考察する。その際、砂粒子の衝突エネルギーと摩耗速度を比較検討することにより、摩耗機構及び衝突エネルギーによる摩耗量推定の可能性も考察する。衝突速度等の求め方の詳細は前論文に譲るが、摩耗速度に最も関係していると考えられる無次元衝突エネルギー ($cV_n|\vec{U}|/u_0^2$ で定義) について説明しておく。 c は鋼管表面の単位面積に衝突する砂粒子の個数に比例した量、 $\vec{U}$ は砂粒子の鋼管への衝突速度、 V_n は $\vec{U}$ の鋼管表面に直角方向の成分である。すなわち、 $cV_n|\vec{U}|$ は、単位面積、単位時間当た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す。これを簡単に衝突エネルギーと呼ぶことにする。無次元衝突エネルギー $cV_n|\vec{U}|/u_0^2$ は衝突エネルギーを流速振幅 u_0 の 2 乗で割って無次元化したものである。

3.3 流速の効果

図-3 は、case 6~9 について最大摩耗速度 $\dot{\delta}_m$ と流速振幅 u_0 の関係を示したものである。底質粒径は 4 mm で鋼管径は 26.7 cm の場合である。実験数が少ないので正確な関係はわからないが、摩耗速度は流速の 2~3 乗に比例していると考えられる。この摩耗速度と流速振

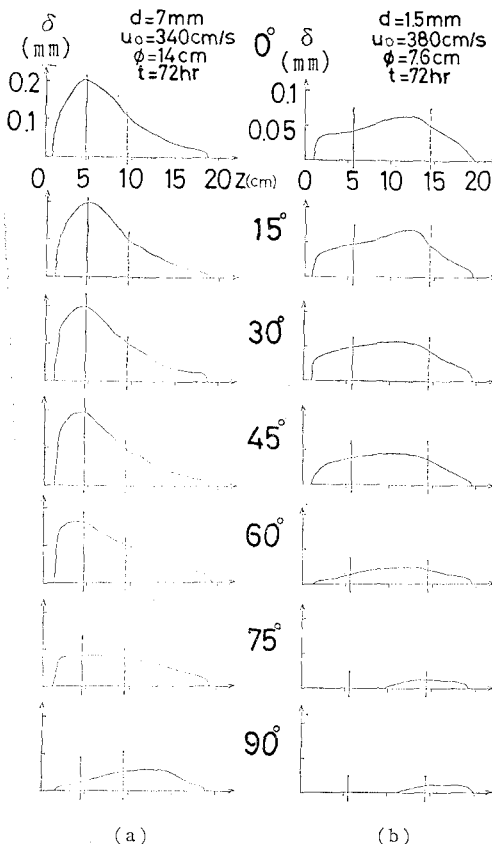


図-2 摩耗量分布

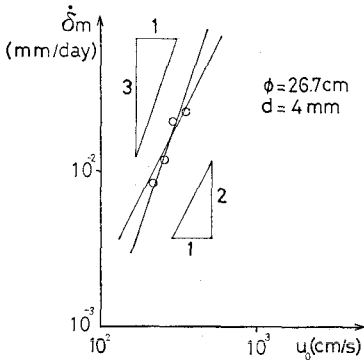


図-3 最大摩耗速度と流速の関係

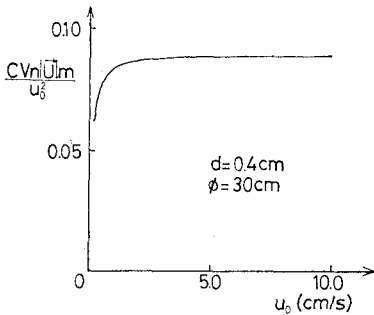


図-4 無次元最大衝突エネルギーと流速の関係

幅の関係はコンクリート柱の場合でもほぼ同様である(山下ら, 1992)。今後、両者の正確な関係を把握する必要がある。

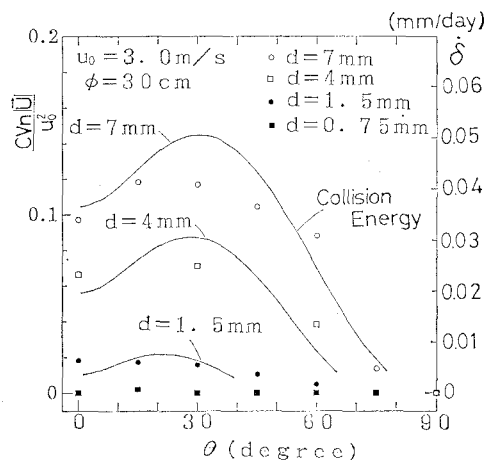
図-4 は、砂粒子径 4 mm、管径 30.0 cm の条件の場合について無次元最大衝突エネルギー(縦軸)と流速振幅の関係を示したものである。この条件では、流速振幅が 2 m/s より大きくなるとほぼ一定値となり、衝突エネルギーは流速振幅の 2 乗に比例することがわかる。流速振幅が小さいときに衝突エネルギーが小さくなるのは、砂粒子が水粒子に追随しやすくなり、鋼管に衝突することなく移動するためだと考えられる。ただし、この計算では鋼管の影響のない位置での濃度は流速によらず一定としている。図-3 の摩耗速度と流速振幅の関係を図-4 と比較すると、摩耗速度が流速の 2 乗に比例することは濃度が一定、摩耗速度が流速の 3 乗に比例することは濃度が流速に比例することに対応すると考えられる。最大摩耗速度が発生するような底面付近のシートフロー状態の濃度と流速振幅の関係は明らかでなく、摩耗速度と流速振幅の関係と共に今後明らかにしていく必要がある。

本研究では、砂粒子の鋼管への衝突エネルギーから摩耗速度の推定が可能かどうかに着目しているため、両者を比較する必要がある。しかし、摩耗速度と流速振幅の関係が前述の様に正確にわかっていないので、本研究で

は、衝突エネルギーは流速 3 m/s で計算し、摩耗速度は摩耗速度が流速の 2 乗に比例するとして流速 3 m/s の値に換算して比較することにした。この理由は以下のようである。流速振幅 3 m/s の流れは、前述の様に波高約 8 m の波に対応し、実際の海岸での設計最大波程度である。すなわち、実際の海岸ではほとんどの場合流速振幅 3 m/s 以下であり、摩耗速度が流速の 2 乗に比例とした場合は 3 乗に比例とした場合よりも摩耗速度を大きめに見積ることになり、摩耗速度と流速振幅の正確な関係がわかっていない現時点では設計上安全側を取るべきと考えた。以下の議論は摩耗速度が流速の 3 乗に比例するとして進めても今回の実験は流速 3 m/s 付近で行っているためあまり変わらない。すなわち、今後の研究により摩耗速度と流速の関係がわかった段階でその関係を用いればよい。また、以下の無次元衝突エネルギーと摩耗速度の比較は、各図ごとに両者が最も良くあうように一定の倍率をかけて行っている。その値は、流速 3 m/s において、無次元衝突エネルギーが 1 に対して、摩耗速度が図-5 で 0.35 mm/day、図-6 で 0.26 mm/day、図-7 で 0.26 mm/day、図-8 で 0.17 mm/day、図-9 で 0.21 mm/day である。

3.4 粒径の効果

図-5 は、摩耗速度への粒径の効果を見るため、最大摩耗速度発生位置での摩耗速度 δ の円周方向分布の一例を示したものである。管径は 26.7 cm で一定とし、砂の粒径 $d=7$ mm, 4 mm, 1.5 mm, 0.75 mm の場合について表わしたものである。実線は昨年までの理論的研究から得た管径 30 cm の無次元衝突エネルギーの円周方向分布である。実験から得られた摩耗速度と無次元衝突エネルギーの円周方向の分布はどの粒径に対してもほぼ一致し、 $15^\circ \sim 30^\circ$ で最大値をとる分布である。また粒径の効果として、粒径が大きい程摩耗速度は大き


 図-5 摩耗速度の円周方向分布 ($\phi=\text{const.}$)

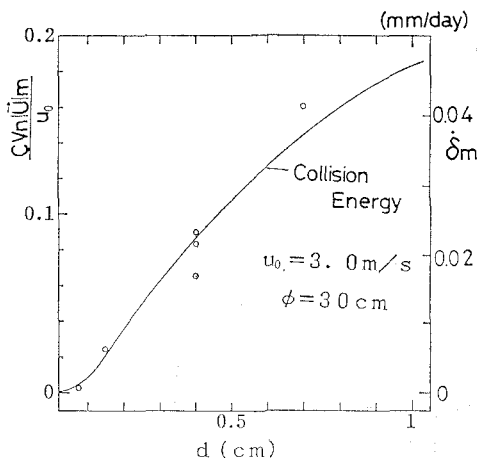


図-6 最大摩耗速度と粒径の関係

く、摩耗も広い範囲で起きていることがわかる。これは砂粒子の慣性の効果であり、粒径が小さい程水の流れに追随しやすく、鋼管に衝突しにくいためである。

図-6 は、最大摩耗速度 $\dot{\delta}_m$ 及び無次元最大衝突エネルギーと粒径の関係の一例を示したものである。衝突エネルギー（実線）の計算の際には管径 $\phi=30$ cm で、摩耗速度の実験値は $\phi=26.7$ cm のものである。この図より、両者はよく一致し粒径が大きくなると摩耗速度が急激に大きくなることがわかる。粒径 $d=0.75$ mm の様に管径に対して粒径が極端に小さい場合には、ほとんど摩耗が発生しないということがわかる。

3.5 管径の効果

図-7 は、管径の効果を見るため、最大摩耗速度発生

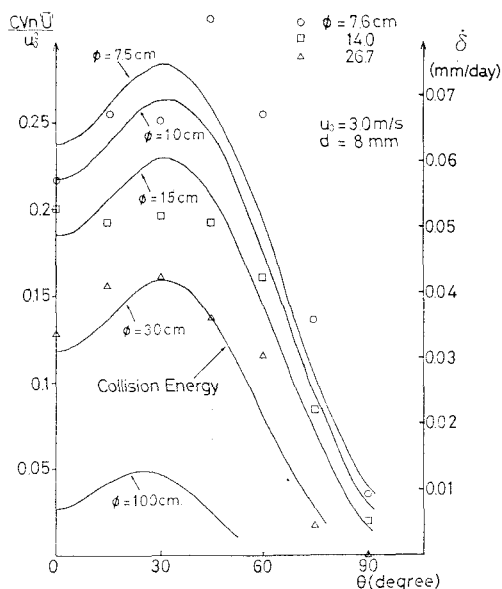
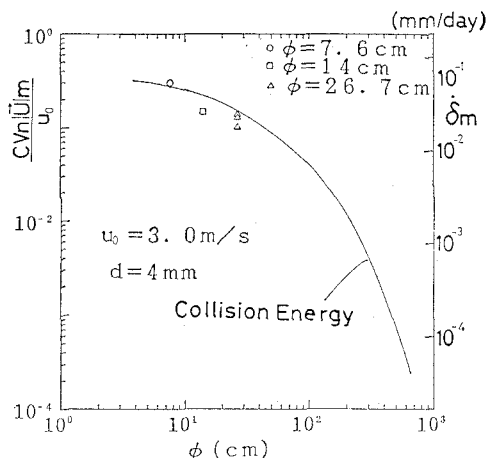
図-7 摩耗速度の円周方向分布 ($d=\text{const.}$)

図-8 最大摩耗速度と管径の関係

位置での摩耗速度 $\dot{\delta}$ と無次元衝突エネルギーの円周方向分布の一例を示したものである。実験で用いた砂の粒径は 7 mm の場合である。各々の管径についても摩耗速度と衝突エネルギーの円周方向の分布はよく一致しているが、粒径の大小関係とは逆になっている。すなわち、管径が小さいほど摩耗量は大きく、摩耗する範囲も広い。この理由は、管径が大きくなると、管のまわりの流れ場への鋼管の影響が広範囲におよび、砂粒子が水の流れに追随しやすく、鋼管に砂が衝突しにくくなったためだと考えられる。

図-8 に、最大摩耗速度 $\dot{\delta}_m$ 及び無次元最大衝突エネルギーと管径の関係を比較した一例を示す。この図においても両者はよく一致し、同じ砂粒子径の場合には管径の大きい方が摩耗しにくことがわかる。

3.6 粒径・管径比の効果

3.4, 3.5 で述べた様に摩耗速度への砂粒子径と鋼管径の効果は逆であることがわかった。また、山下ら (1991) の研究によると、理論的に求める無次元最大衝突エネルギーは、 d/ϕ というパラメータをとると d/ϕ によらず一つの曲線で表すことができることが報告されている。図-9 は、横軸に d/ϕ というパラメータをとり、無次元最大衝突エネルギーと今回の実験で得られたすべての最大摩耗速度を比較したものである。この図より、 d/ϕ というパラメータをとると摩耗速度も、 d/ϕ によらず一つの曲線で表せることがわかる。よって、漂砂摩耗を考える際には、 d, ϕ の2変数でなく d/ϕ 1変数でよいことがわかる。 d/ϕ に対する最大摩耗速度と無次元最大衝突エネルギーの変化は今回のすべての実験データでよく一致し、理論的に求める衝突エネルギーから最大摩耗速度の推定が可能である。両者の比例関係は、流速 3 m/s において、無次元最大衝突エネルギーが 1 に対して、最大摩耗速度は 0.21 mm/day である。

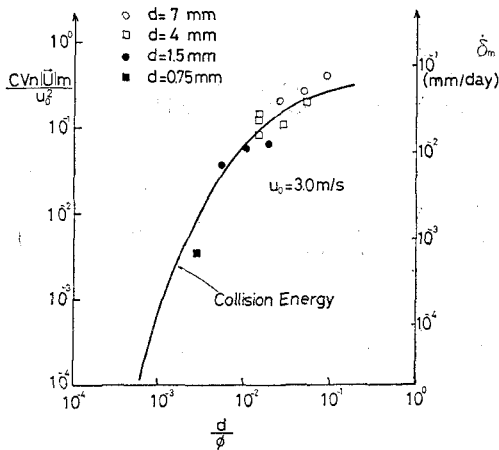


図-9 最大摩耗速度と d/ϕ の関係

4. 結 論

本研究では、設計上最も重要である最大摩耗量が発生する高さでの鋼管の摩耗速度と砂粒子の衝突エネルギーへの砂粒子径と鋼管径の效果に着目して考察を進めてきたが、得られた主要な結論は以下の様である。

①最大摩耗速度が発生する高さでの摩耗は、浮遊した砂粒子が鋼管に衝突することによって発生することが確

められた。

②摩耗速度及び砂粒子の衝突エネルギーについては、粒径と管径は逆の效果があり、 d/ϕ で統一的に扱うことができる。

③ d/ϕ が大きい程、摩耗速度は大きく摩耗する範囲も広い。

④摩耗速度と砂粒子の衝突エネルギーとの間には比例関係(流速 3 m/s において、無次元衝突エネルギーが 1 に対して、摩耗速度は 0.21 mm/day)が成立し、衝突エネルギーから摩耗速度の推定が可能である。

参 考 文 献

- 山下俊彦・佐伯 浩・浅川典敬・佐藤光一・仮屋園義久(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.
- 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久(1990): 漂砂による重防食鋼管杭の摩耗特性に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 37, pp. 394-398.
- 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久(1991): 漂砂による重防食鋼管杭の摩耗特性と砂粒子の衝突エネルギーに関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 231-236.
- 山下俊彦・佐伯 浩・染矢武彦・仙田昌功(1992): 漂砂によるコンクリート柱の摩耗特性に関する研究, (投稿中)
- Culbertson W. Ross (1949): Deterioration of Steel Pile Groins at Palm Beach, Florida, Corrosion, 5, pp. 339-342.