

漂砂によるコンクリート柱の摩耗特性に関する研究

Abrasion Characteristics of Concrete Pile due to Littoral Drift

山下俊彦*・佐伯 浩*・染矢武彦**・仙田昌功***

Toshihiko Yamashita, Hiroshi Saeki, Takehiko Someya and Yoshinori Senda

A series of abrasion tests of three types of concrete piles were carried out by use of a large scale U-shaped tube which generated a strong oscillatory flow with sand drift. Abrasion rates of usual concrete and underwater concrete are the same and larger than centrifugal concrete. Abrasion rate of concrete is roughly proportional to the 2nd~3rd power of amplitude of velocity. The larger the ratio of sand particle diameter to pile diameter, the larger abrasion rate.

key words : abrasion, littoral drift, concrete pile

1. はじめに

近年、海岸にコンクリート製の構造物が多数設置されている。波浪条件が厳しい外洋域では、漂砂が激しいためコンクリート製構造物には漂砂摩耗が発生していることが報告されている。しかし、その実態はほとんど明らかにされていないのが現状である。一方、鋼管杭には錆による腐食量（0.1 mm/年）よりはるかに大きい漂砂摩耗（1mm/年 程度）が発生したことが報告されている¹⁾。著者ら²⁾は、大型振動流装置を用いた室内実験により年間 1mm程度の漂砂摩耗が発生しうることを明らかにしている。また、鋼管の漂砂摩耗は流速、 d/ϕ （粒径/管径）、が大きい程大きく、その定量的関係を明らかにしている^{3) 4) 5)}。さらに、鋼管の漂砂摩耗速度は浮遊した砂の鋼管への衝突エネルギーで推定できることを報告している⁵⁾。本研究では、まず大型振動流装置を用いて実海域の漂砂現象を再現し、3種類の材質のコンクリートの摩耗特性を流速、 d/ϕ に着目して実験的に詳細に調べる。次に、理論的に求まるコンクリート柱への砂の衝突エネルギーと実験で得られた摩耗特性及び今までの研究で得ている鋼管の摩耗特性とを比較することにより、コンクリート柱の漂砂摩耗機構を考察する。

2. 実験装置及び方法

漂砂による摩耗現象については相似則はないので現地スケールで調べる必要があり、大型U字管振動流装置を用いて実験を行った。詳細は前論文²⁾で報告した。実験条件及び最大摩耗量と最大摩耗速度を表-1に示す。用

CASE	材質	粒径 d (mm)	管径 ϕ (cm)	周期 T (sec)	流速振幅 u_0 (cm/sec)	実験時間 t (Hr)	最大摩耗量 δ (mm)	最大摩耗速度 $\dot{\delta}$ (mm/day)
1	UC	1.5	15.0	7.1	360	48	0.99	0.50
2					170	24	0.16	0.16
3					240	24	0.86	0.86
4					260	24	1.00	1.00
5		4.0	24.0	7.4	310	12	0.78	1.56
6						24	1.24	1.24
7						36	1.49	0.99
8						60	1.95	0.78
9	UWC	7.0	15.0	7.1	350	12	7.99	16.0
10		4.0	24.0	7.4	300	24	1.04	1.04
11	GRC	4.0	15.0	7.4	220	24	0.14	0.14
12					280	24	0.37	0.37
13					390	24	0.65	0.65
14		7.0	15.0	7.1	330	24	10.3	10.3

表-1 実験条件および最大摩耗速度

* 正会員 北海道大学工学部土木工学科 (060 札幌市北区北13西8)
** 学生会員 北海道大学大学院
*** 愛知県庁

いたコンクリート柱の材質は、普通コンクリート(UC)、水中コンクリート(UWC)、遠心力成形コンクリート(GRC)の3種類である。UCおよびUWCの強度は 300kgf/cm^2 、GRCは 1000kgf/cm^2 である。底質としては、比重2.65で粒径 $d=1.5\text{mm}$ の珪砂、 4.0mm と 7.0mm の砂利の3種類を用いた。コンクリート柱の直径は 15cm と 24cm である。流れの条件は、周期を 7.1sec あるいは 7.4sec に固定し、流速振幅は $170\text{cm/sec}\sim 390\text{cm/sec}$ の範囲で14Caseの実験を行った。摩耗量の測定は、ダイヤルゲージをコンクリート柱の母線方向に動かし、 0° （主流方向）から 90° までを 15° おきに7箇所行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 摩耗量分布

写真-1は、現地での消波用コンクリートブロックの漂砂摩耗の一例を示したものである。ブロックの足の太い部分は 90cm であり、最も摩耗しているところでは約 45cm になっている。ブロックを設置してから約4年間で 45cm の摩耗が生じており、年間 10cm 以上の漂砂摩耗が発生している。摩耗の円周方向の分布は、波に対して前面の 0° 方向（波向き方向）で最大、側面に回り込むに従って小さくなっている。波に対して後面では、あまり摩耗していない。これは、このブロックが波打帯にあり、また背後に多くのブロックがあるため戻り流れの速度が小さいためと考えられる。高さ方向の摩耗量の分布は、底面の位置も変化するためはっきりしたことは言えないが、底面付近が最も大きいものと考えられる。なお、この海岸の底質の粒径は、 $2\sim 50\text{mm}$ 程度の範囲で場所的、時間的に大きく変動している。

図-1は、摩耗量 δ の分布特性の一例を角度別に示したものである。このCase9は、直径 15cm の普通コンクリートで流速が 350cm/sec の場合である。横軸の Z は、コンクリート柱上部の基準線から母線方向下向きの距離である。 0° の断面の横軸の下に示してある矢印は、左側がコンクリート柱の影響のない場所での底面の位置、右側がコンクリート柱表面での底面の位置を示す。 $Z>8\text{cm}$ のコンクリート柱が砂で埋まっている場所では、摩耗量は円周方向にあまり変わらない。この領域の摩耗は、主に液状化状態のようになった砂によってコンクリート柱側面がこすられることによって発生していると考えられる。 $Z<7\text{cm}$ の底質表面より上の領域、特に $Z<3.5\text{cm}$



写真-1 現地での漂砂摩耗状況

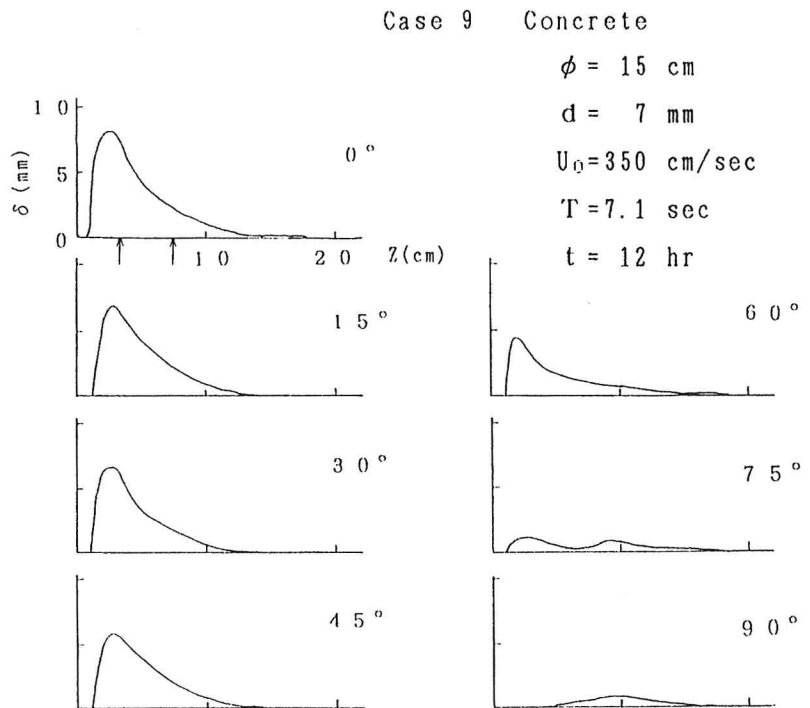


図-1 摩耗量の分布特性

のコンクリート柱により洗掘が起きていない底質表面より上の領域では、 0° で摩耗量が最大で角度が大きくなるにつれて小さくなっている。この領域の摩耗は主に浮遊した砂がコンクリート柱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。この両者の摩耗を比較すると上部の浮遊した砂粒子の衝突による方が大きい。最大摩耗量は、この条件では 0° の断面で底面表面より上の $z=2.5\text{cm}$ 付近で発生し、1日当り 1.6cm に達することがわかる。この値は、年間 10cm 程度の漂砂摩耗は十分起こりうることを示している。摩耗量の分布形状は、コンクリートの種類、粒径、管径、流速によらずほぼ同じである。ただし、 d/ϕ の値が小さくなる条件では洗掘が大きくなり、最大摩耗量の発生する位置が下の方になる。また底質底面より上の摩耗量の分布は、写真-1の現地の摩耗量分布とよく似ていることがわかる。以下は、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について述べる。

図-2は、Case5~8の普通コンクリートの最大摩耗量の時間的变化を角度別に示したものである。最大摩耗量が 1mm 程度までは一定の割合で増加しているが、それ以降は摩耗速度が減少していることがわかる。これは、摩耗量が 1mm を越すと内部の粗骨材がむき出しになってくるため摩耗速度が減るものと考えられる。本来コンクリートの摩耗速度は、ある程度摩耗が進み粗骨材がむき出しになり一定の摩耗速度になった値を取るべきである。しかし、底質粒径 7mm 以外の小さい粒径の場合には摩耗速度が遅く実験時間が非常に長くなるため、以下の議論では粒径 7mm 以外の粒径の砂の場合には、初期の摩耗量が 1mm 程度の場合の一定値を摩耗速度とした。この様にして求めた摩耗速度は本来の摩耗速度よりも小さくなっていると考えられるが、定量的関係は不明である。ただし、GRCの場合にはコンクリート内部は均質に近く、求めた値が本来の摩耗速度に近いものと考えられる。

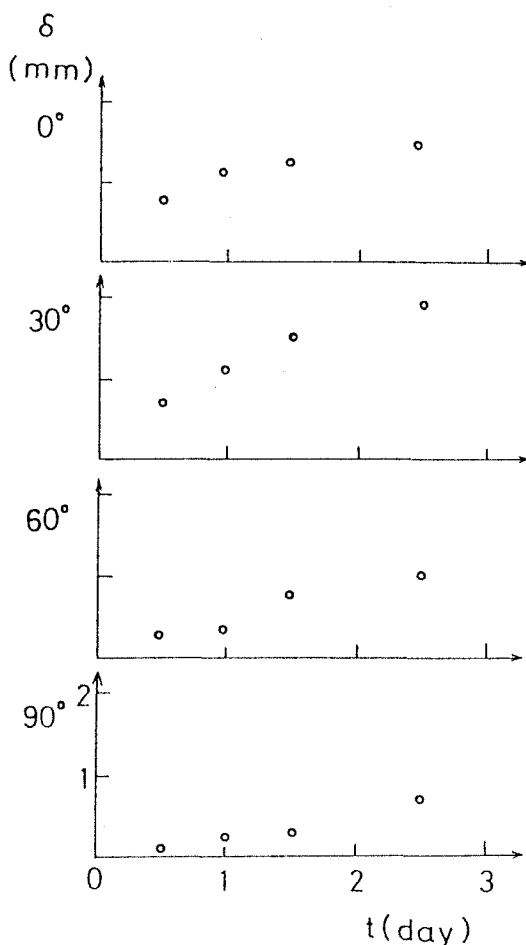


図-2 摩耗量の時間的变化

3.2 砂粒子の衝突特性と摩耗速度

最大摩耗量は、コンクリート柱でも底質表面より少し上で発生することが実験により明らかとなった。この位置での摩耗は、浮遊した砂のコンクリート柱への衝突によって発生していると考えられる。そこで、前報^{3),4)}で求めた砂粒子の衝突特性、特に摩耗量に関係している衝突エネルギーとコンクリートの摩耗速度、さらに今までの研究で得ている鋼管の摩耗速度を比較検討してコンクリート柱の摩耗機構を考察する。

図-3は、流速振幅と最大摩耗速度 $\dot{\delta}_m$ の関係を示したものである。底質粒径は 4mm で、普通コンクリートは直径 24cm 、GRCは直径 15cm 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、両者とも摩耗速度は流速の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幅の関係は鋼管の場合でも

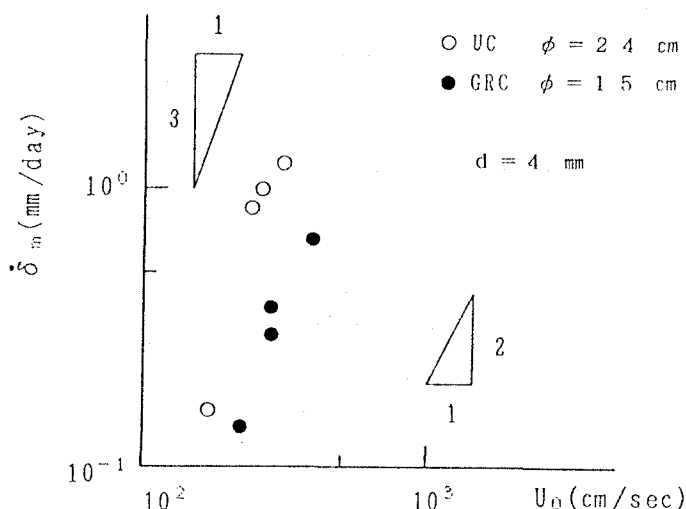


図-3 最大摩耗速度と流速の関係

ほぼ同様である⁵⁾。今後、両者の正確な関係を把握する必要がある。

図-4は、粒径4mmの砂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。この図より、粒径が4mmの砂の場合には、流速振幅が2m/sec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乗に比例していることがわかる。流速振幅が小さいときに無次元衝突エネルギーが小さくなるのは、砂粒子が水粒子に追従しやすくなり、コンクリート柱に衝突することなく移動するためだと考えられる。この計算は直径が30cmの場合であるが、直径が小さい場合にはより小さい流速振幅から衝突エネルギーは一定値となる。しかし、この計算では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と図-4を比較すると、摩耗速度が流速の2乗に比例すると言うことは濃度が一定、摩耗速度が流速の3乗に比例すると言う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様な底面付近のシートフロー状態の濃度と流速振幅と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。

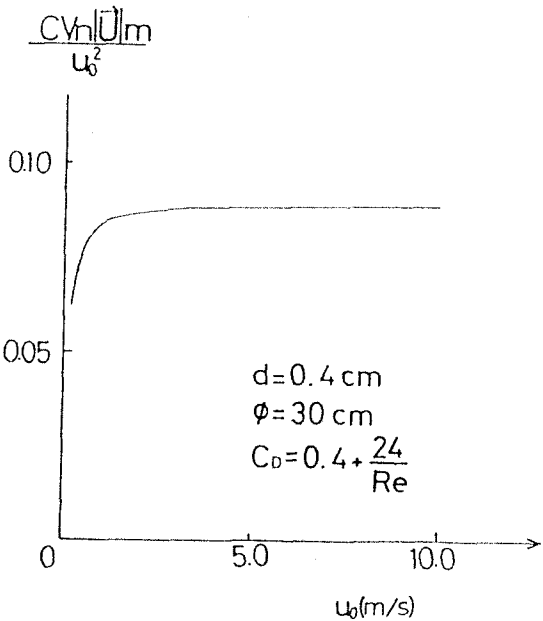


図-4 無次元最大衝突エネルギーと流速の関係

図-5は、最大摩耗量発生高さでの摩耗速度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。

摩耗速度はコンクリートの材質により異なるので、ここでは分布形のみを比較するものとする。普通コンクリートとGRCの摩耗速度の分布形はほぼ同じで、前述の様に0°で最大で角度が大きくなると共に減少している。他のケースも、分布形はほぼ同じである。摩耗速度の分布と衝突エネルギーの分布は全体的には似ているが、衝突エネルギーは30°付近で最大値をとる点が異なっている。一方、鋼管の摩耗速度は無次元衝突エネルギーの分布とよく一致している。摩耗量に関係していると考えられる衝突エネルギーを求める際には、衝撃摩耗と摩擦摩耗に対応すると思われる各々の衝突エネルギーを同じ重みで加えている。衝撃摩耗に対応する衝突エネルギーの重みを重くして全体の摩耗量に関係している衝突エネルギーを求めれば、0°で最大を持つ様な分布形が得られる。以上から、鋼管では衝撃摩耗と摩擦摩耗が同程度に起こるが、コンクリートでは材質がもろいため衝撃摩耗の方が起こり易いと推定される。

図-6は、最大摩耗速度 $\dot{\delta}_m$ 、無次元最大衝突エネルギーと d/ϕ の関係を示したものである。両者を比較するため、衝突エネルギーが1に対して摩耗速度が20 mm/dayとなるようにした。実験は3m/sec

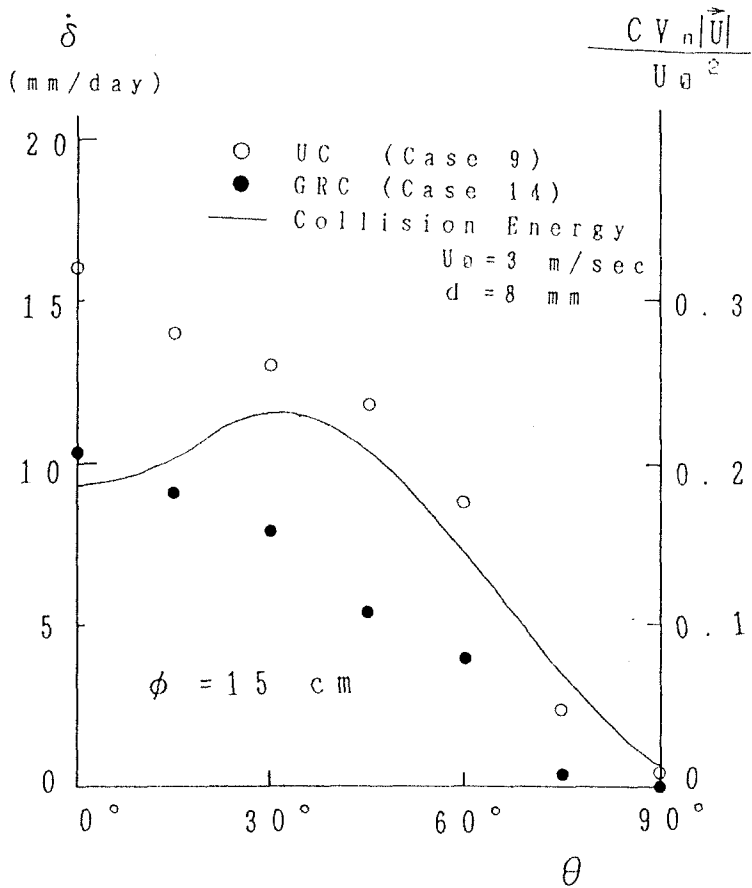


図-5 摩耗速度と無次元衝突エネルギーの円周率分布

程度の流速振幅で行っている
ので、最大衝突エネルギーは
流速振幅3m/secで計算した。
流速振幅3m/secの流れは、水
深10mの微小振幅波の底面流
速と考えると波高8.1mの波に
対応し、実際の海岸での設計
最大波程度である。最大摩耗
速度も摩耗速度が流速の2乗に
比例するとして流速3m/secの
値に換算している。実際の海
岸では、ほとんどの場合流速
振幅3m/sec以下であり、摩耗
速度が流速の2乗に比例すると
した場合は3乗に比例するとし
た場合よりも摩耗速度を大き
めに、安全側に見積ることにな
る。この図より、普通コン
クリートとGRC両方とも d/ϕ が
大きくなる程摩耗速度が大き
くなっている。また、GRCの方
が摩耗速度が普通コンクリート
よりも小さくなっている。こ
れは、GRCの強度が普通コン
クリートよりも約3倍大きい
ためと考えられる。水中コン
クリートと普通コンクリートの
摩耗速度はほぼ同じである。

水中コンクリートは、普通コンクリートに水中不分離剤を混入したものであり、摩耗速度には分離剤は影響しないことがわかる。山下ら⁵⁾の研究によると、鋼管の場合は摩耗速度と衝突エネルギーの d/ϕ に対する分布はよく一致し、衝突エネルギーから摩耗速度の推定が可能であると報告されている。しかし、コンクリートの場合には、 d/ϕ が増加すると摩耗速度と衝突エネルギーが増加する傾向は一致しているが、摩耗速度の増加傾向が非常に大きくなっている。小さい摩耗量でも正確な摩耗速度が求まるGRCの場合にその増加傾向を求めてみると、粒径が7mmの摩耗量は4mmの場合の約25倍である。摩耗速度が d/ϕ に強く影響されることと、図-5の説明で述べたコンクリートはもろく衝撃摩耗の影響が摩擦摩耗より大きいことが関連している様に思われる。しかし、なぜ鋼管では衝突エネルギーと摩耗速度の d/ϕ に対する関係はよく一致するのに、コンクリートの場合に一致しない理由は、現段階では不明確であり今後検討する必要がある。

4. おわりに

本研究で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 現地スケールの実験により、普通コンクリート、水中コンクリート、遠心力成形コンクリート柱の漂砂による摩耗特性を明らかにし、年間10cm程度の漂砂摩耗は実際に起こりうることがわかった。
- 2) 強度の同じ普通コンクリートと水中コンクリートの摩耗速度は同じであること、強度の大きいGRCは摩耗速度が前者に比べて小さいことがわかった。
- 3) 最大摩耗速度は底面より少し上の領域で発生し、この高さでの円周方向の摩耗速度の分布は 0° で最大で 90° に向かうに従って小さくなる。また、この位置の摩耗は浮遊した砂のコンクリート柱への衝突によって発生していると考えられる。一方、底面より下の領域の摩耗速度は円周方向にはほぼ一定である。
- 4) コンクリート柱においても鋼管と同様 d/ϕ が大きい程摩耗速度は大きいことがわかった。しかし、コンクリートの方が d/ϕ が大きくなると急激に摩耗速度が大きくなることがわかった。

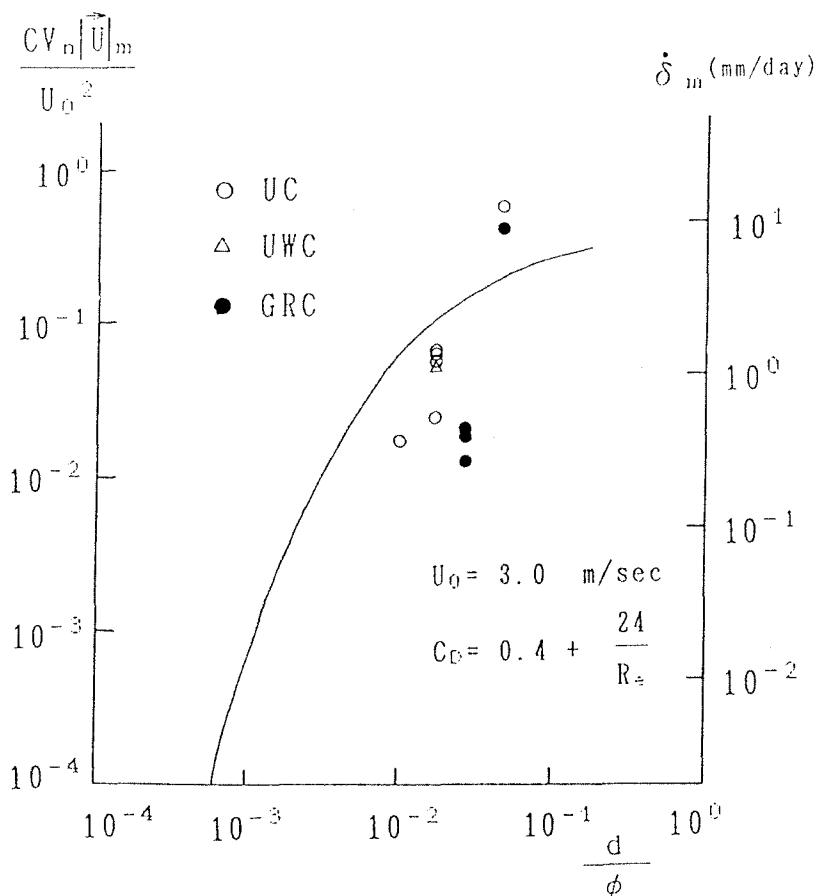


図-6 最大摩耗速度と無次元最大衝突エネルギーへの d/ϕ の効果

参考文献

- 1) Culbertson W. Ross : Deterioration of Steel Sheet Pile Groins at Palm Beach, Florida, Corrosion, 5, pp.339-342, 1949
- 2) 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, 1989
- 3) 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久：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，第37巻，pp.394-398, 1990
- 4) 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・佐藤光一・仮屋園義久：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，海洋開発論文集，Vol.7, pp.231-236, 1991
- 5) 山下俊彦・佐伯 浩・仙田昌功・染矢武彦・佐藤光一・仮屋園義久：粒径・管径の効果に着目した漂砂による鋼管の摩耗特性，海岸工学論文集，第39巻，1992（投稿中）