

高圧下における砂—鋼材間の摩擦と粒子破碎

Friction between sand and steel under high normal pressure in consideration of particle crushing

岸 田 英 明* 上 杉 守 道**

1. ま え が き

地盤と構造物との接触面において、なるべく大きな摩擦力が期待される例をあげてみると、摩擦杭の支持力、杭の引抜き抵抗、開端鋼管杭の閉そく効果、擁壁底面の摩擦力、構造物の基礎底面および側面における地震時水平抵抗などがある。また、摩擦をなるべく小さくしたい例としては、杭に働く負の摩擦力、原位置試験用の管と地盤の摩擦、圧密試験や三軸圧縮試験における試験装置と土試料との摩擦などがあげられる。土と構造物の摩擦に関する既往の室内試験としては、Potyondy¹⁾ および江刺ら²⁾ が一面せん断型の装置を用い、また、Brumuntら³⁾ が三軸型の装置を用いて行った研究例がある。しかし、現在までに発表された土と構造物の摩擦試験で最も信頼性の高いものは吉見ら⁴⁾ によるリングねじりせん断型の試験である。この試験方法では、砂供試体のせん断方向に端部がないため垂直応力が均一であり、また砂供試体の変形も一様である。垂直応力が0.25~1.61 kgf/cm² の範囲で静的方向荷重による摩擦試験を行った結果として、摩擦係数は金属の表面粗さに影響されるが砂の密度はあまり影響しないこと、また、砂供試体の体積変化は金属の表面粗さと砂の密度の両方に影響されることを報告している。

垂直応力が10 kgf/cm² を超えるような高圧下においては砂の粒子破碎が生ずるなど低圧下における摩擦とは異なった性状を示すことが十分考えられる。そこで、著者らは高圧下における砂と鋼材の摩擦試験装置を試作し、気乾状態の豊浦標準砂と表面粗さを調整した鋼板とを用いた室内試験を行った。また、垂直応力が10 kgf/cm² 程度であっても繰返し荷重によって砂と鋼材を摩擦した場合には顕著な粒子破碎を生ずることに注目した室内試験も行っている。本稿では、まず既往の研究例から高圧下における砂—鋼材間の摩擦の実験例を紹介し、次に室内試験とその結果について述べる。

2. 高圧下における砂—鋼材間の摩擦の例

砂と鋼材が接触すると、その接触面においては摩擦抵抗をもつようになるが、ほとんどの場合は垂直応力が10 kgf

/cm² 程度未満の比較的低い応力条件下での摩擦である。しかしながら、基礎杭の先端およびその近傍の地盤のようなどころでは拘束応力の極めて高い部分があり、顕著な粒子破碎が観察されている^{5), 6)}。そこで、高圧下における砂—鋼材間の摩擦の例として開端鋼管杭とその内部の砂との摩擦抵抗（すなわち閉そく効果）に関する既往の研究例を以下に紹介する。

駒田ら⁷⁾ は打撃工法により開端鋼管杭の内部に侵入した砂の押抜き抵抗と、杭の鉛直支持力との関連を調べる目的で模型杭（直径約50~200 mm）による実験的研究を行った。実験槽（8×5×4 m）に作成した模型砂地盤（ $\gamma=1.5$ gf/cm³，含水比10%）の中に模型杭を打ち込み、鉛直載荷試験を行ったのち杭を掘り出して、杭先端から侵入した砂の押抜き実験を行っている。その結果、図-1に見られるように、閉そく効果を生じるために有効な管内砂は杭先端から杭径の2~3倍程度の距離までの範囲に限られ、特に先端付近では単位面積当たりの摩擦力が40 kgf/cm² にまで達するという結果を得ている。このことから、砂が非粘性土としての性質を保っているとすれば、摩擦面の垂直応力は40~80 kgf/cm² 程度であることが推定できる。

松浦ら⁸⁾ は鋼管内壁面における垂直応力をより直接的に測定している。実験は図-2のように上端が開放となっている長い鋼管に乾燥砂を充てんして下端から剛な加圧板で押し上げるというものである。このとき、管内部の砂の鉛直・水平方向の圧力分布を感圧フィルムによって測定している。これにより、杭先端付近の鋼管内壁における水平方

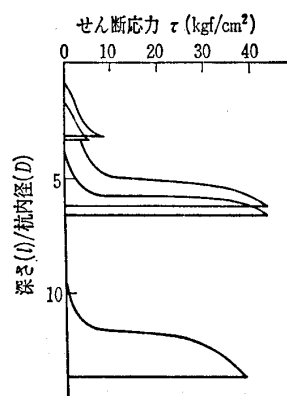


図-1 杭内壁に沿うせん断応力分布⁷⁾

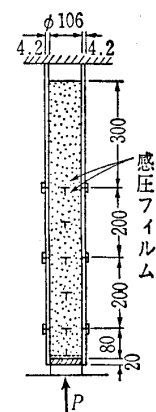
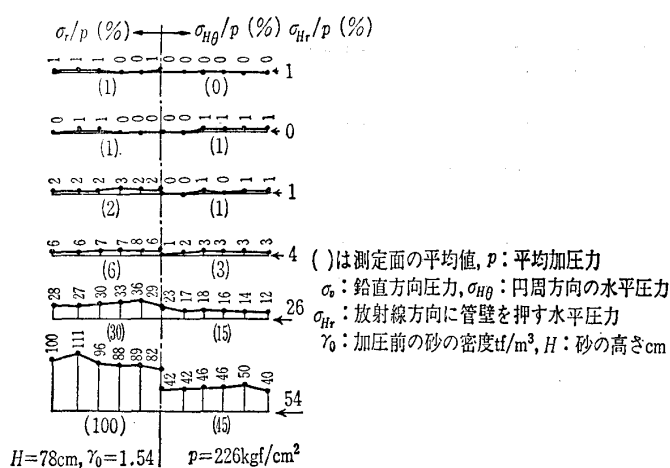


図-2 加圧箱(鋼管)および感圧フィルム配置⁸⁾

*東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科

**東京工業大学助手 大学院総合理工学研究科


図-3 押上試験各部圧力分布測定結果⁸⁾

向の圧力（すなわち、摩擦面の垂直応力）は、図-3に見られるように、平均加圧力（ $p=226 \text{ kgf/cm}^2$ ）の54%、つまり 122 kgf/cm^2 に達するという結果を得ている。

閉そく効果は開端鋼管杭の先端支持力の評価において重要な要因のひとつであるが、以上の研究例から、非常に高い圧力下において砂—鋼材間に摩擦力が作用し、場合によっては、その垂直応力が 100 kgf/cm^2 を超えることもあり得るという実験結果が得られている。

3. 高圧下における砂と鋼材の摩擦実験^{9),10)}

高圧下における砂—鋼材間の摩擦性状を調べる目的で著者らが行った実験的研究では単純せん断型の摩擦試験機を用いた。この装置は図-4の模式図に示すように直方体の鋼材試料を砂試料で挟み、一定の垂直応力を加えた状態で鋼材に水平荷重を加えて引き抜くという形式になっており、鋼材の上下両面が摩擦面となる。図-5は装置の概観である。鋼材試料の上下には長さ 40 cm 、幅 10 cm でく形の穴を有する鋼製リングを積み重ねることにより、それぞれ高さ 2 cm の砂試料を収容できるような容器を使っている。砂と鋼材の摩擦面はこの穴の形すなわち $40 \times 10 \text{ cm}$ の長方形である。使用した砂は気乾状態の豊浦標準砂であるが、 $105 \mu\text{m}$ のふるいを通過した粒子および $250 \mu\text{m}$ のふるいを通過しない粒子は実験前に取り除いた。表-1は、このときの豊浦砂の物理的性質をまとめたものである。砂試料は摩擦試験開始時の相対密度が95%程度になるよう多重ふるいをかけた空中落下法により作成した。鋼材試料は軟鋼の直方体であり、砂との摩擦面をグラインダー、シェーパー等で整形した。摩擦抵抗が鋼材の表面粗さと強い相関性をもつとして、最大高さ R_{max} (JIS B 0601-1970) と摩擦係数との関係を求めている吉見ら⁴⁾ による研究にはまだ議論の余地があるが、ここでは暫定的に R_{max} (基準長さ 2.5 mm) により鋼材の表面粗さを評価することとした。

試験結果の例を図-6に示す。鋼材の R_{max} は $30 \sim 40 \mu\text{m}$ であり、吉見ら⁴⁾ によれば低圧下における摩擦ではこ

表-1 豊浦砂の物理的性質

土粒子比重	G_s	2.64
最大乾燥密度	$\rho_{d\text{max}}$	1.652 (g/cm^3)
最小乾燥密度	$\rho_{d\text{min}}$	1.333 (g/cm^3)
50% 粒径	D_{50}	0.19 (mm)
均等係数	U_c	1.30

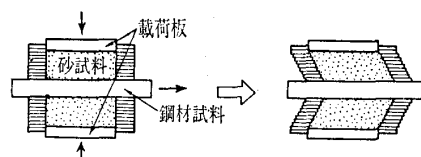


図-4 実験装置模式図

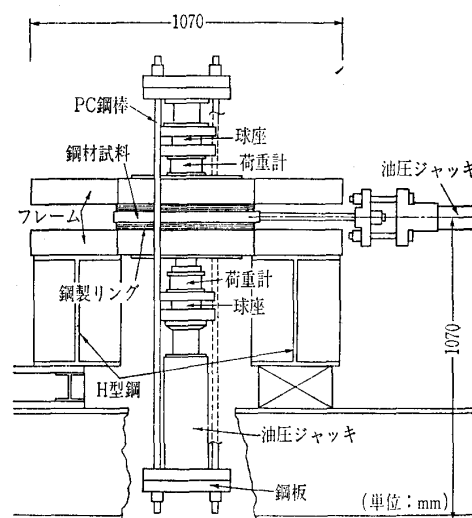


図-5 実験装置概観

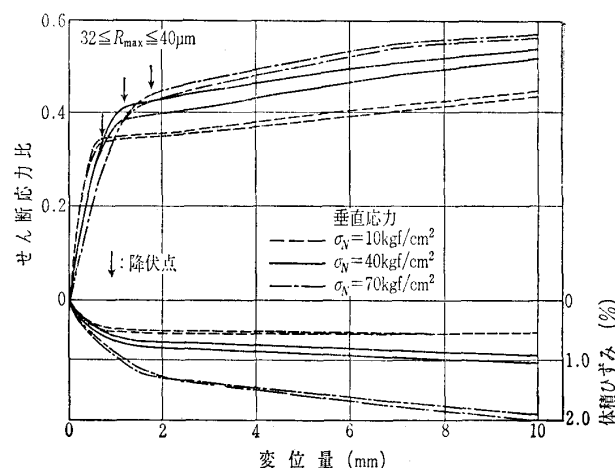


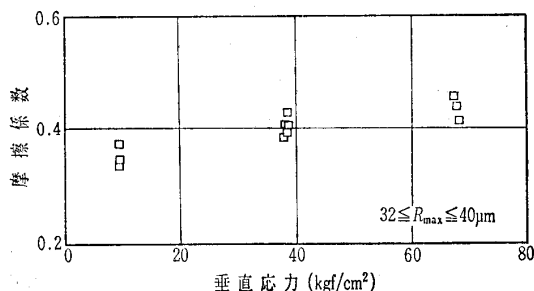
図-6 高圧下における砂と鋼材の摩擦実験結果の例

の範囲での R_{max} の違いによる摩擦係数の変化はあまり大きくないことが分かっている。垂直応力 σ_v は $10, 40, 70 \text{ kgf/cm}^2$ の3種類で行った。変位は鋼材試料の変位そのものであり、これは砂のせん断変形による変位と、摩擦面での滑りによる変位とを合わせたものである。荷重はそれぞれの時点における摩擦応力を垂直応力で除すことにより、せん断応力比として表している。また、体積ひずみについては砂試料の水平断面積が実験中に変化しないものと考え、

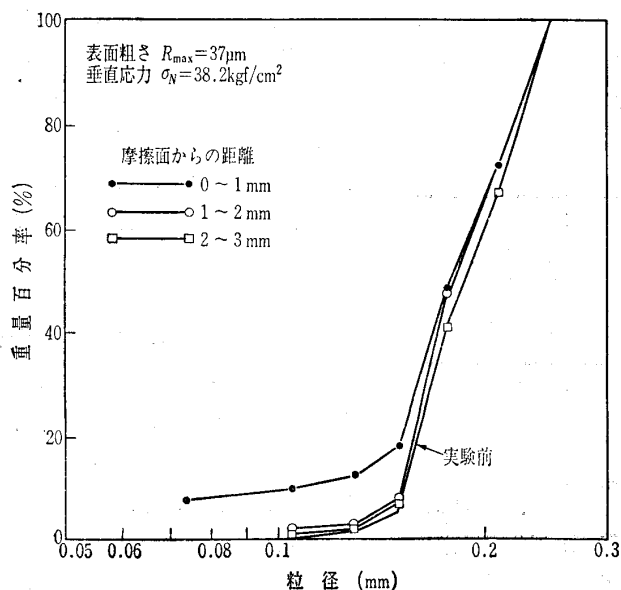
砂試料の高さの変化量と初期状態における高さの比として求めている。

载荷開始直後の水平変位は砂のせん断変形によるものが主であると考えられるが、矢印で示す点を境目として変位の増加が急激になる。これ以後の変位は主として摩擦面の滑りによるものである。最終的に 10 mm 変位させた状態では垂直応力が大きいものほどせん断応力比が大きくなる傾向が見られる。また、滑りを生じた後でも体積膨張は見られないが、これは垂直応力の大きさによるものであると考えられ、垂直応力が大きいものほど体積圧縮量も大きい。本試験ではせん断応力比—変位関係にピークが現れなかったため、上述の矢印で示した点に注目し、この点でのせん断応力比をもって摩擦係数とした。図—7 に見られるように、本実験の垂直応力の範囲では垂直応力が異なっても、摩擦係数はほとんど一定である。

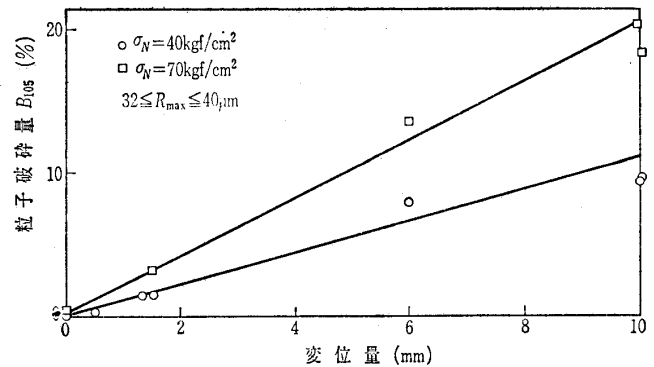
载荷終了後、摩擦面から採取した砂の粒度分析結果を図—8 に示す。粒子破碎は摩擦面付近（特に摩擦面から 1 mm 以内の範囲）で特に顕著である様子が分かるが、この範囲の大きさは垂直応力が違う場合でもあまり変わらないという結果が得られている。粒子破碎の程度を表す方法にはエネルギーを考慮した方法など数種類提案されているが、いずれも各研究の特性を考慮した上で適当と考えられる方法を用いている。本試験に使用した砂は 105 μ m のふるい



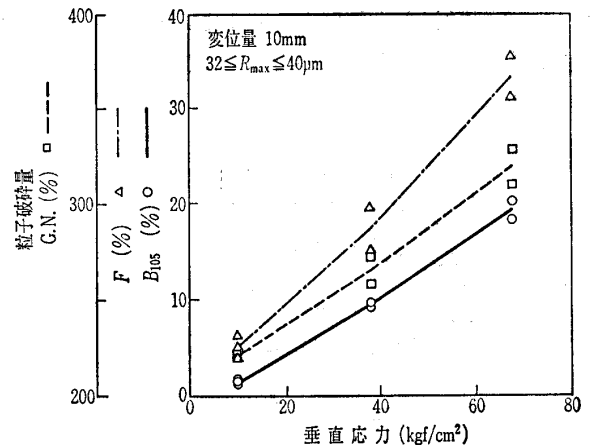
図—7 垂直応力と摩擦係数の関係



図—8 摩擦面付近における粒子破碎の様子



図—9 変位量と粒子破碎量の関係



図—10 垂直応力と粒子破碎量の関係

を通過した粒子をあらかじめ取り除いてあるが、図—8 によれば実験中における細かい粒子の増加が顕著であることが分かる。そこで、本報告では 105 μ m 以下の粒子の重量百分率増加量（以下 B_{105} と呼ぶ）により粒子破碎の程度を表すことにした（口絵写真—10, 11 参照）。

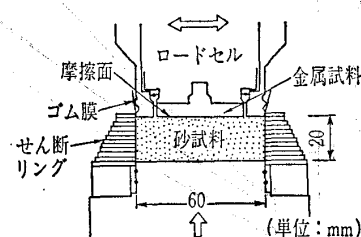
図—9 は鋼材の表面粗さが R_{max} で 32~38 μ m の場合について、変位量の違いによる粒子破碎量の変化の様子を示している。図—6 によれば摩擦面が滑り始めるのは変位が 1~2 mm 程度の範囲であるが、図—9 を見ると摩擦面が滑ってからも変位の増加に伴って粒子破碎が進行していることが分かる。

図—10 は摩擦面から 1 mm 以内の範囲の砂について最終変位 10 mm の試験における垂直応力と粒子破碎量との関係を示したものである。ただし、ここでは前述の B_{105} のほかに、森¹¹⁾が用いた破碎率 F および北郷¹²⁾が用いた粒度数 $G.N.$ によっても粒子破碎量を表している。この図によれば、いずれの表し方によっても、垂直応力の増加に伴って粒子破碎量がほぼ直線的に増加している様子が分かる。

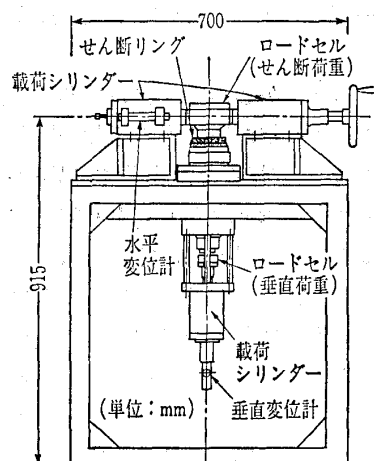
以上のように、高圧下における砂—鋼材間の摩擦では、砂の体積膨張が見られないこと、粒子破碎により摩擦面のごく近傍において径の小さい砂粒子の増加が顕著であること、摩擦面での滑り量の増加に伴い粒子破碎が進行し続けてゆくこと、また、変位量が同じであれば垂直応力が大きいほど破碎量が多くなることなどが実験的に確かめられた。

4. 繰返し荷重による砂と鋼材の摩擦実験^{18), 14)}

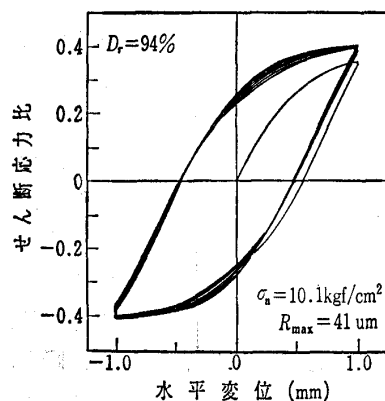
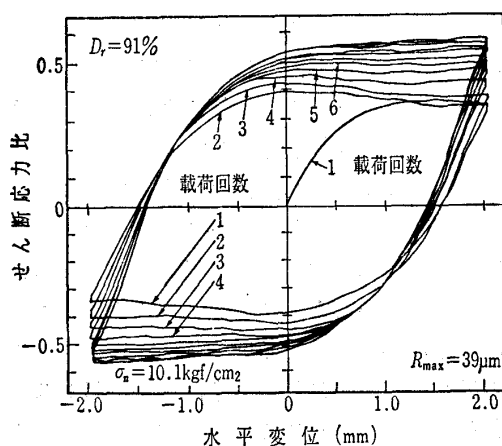
砂—鋼材間の摩擦による砂粒子の破碎は3. で述べた実験のような高圧下の場合にのみ生ずるのではなく、垂直応力が 10 kgf/cm^2 程度であっても繰返し荷重によって摩擦した場合にはかなり顕著な粒子破碎が見られる。図—11は繰返し荷重による砂と鋼材の摩擦試験を行うために著者らが用いた装置の主要部を模式的に表したものである。この装置も基本的には単純せん断型の試験機であるが、金属試料と砂試料との摩擦面は円形である。直径 60 mm の円形の穴を有するアルミリングを重ねて作った容器に砂試料を入れてから金属試料を上側からセットし、垂直応力を加えた状態で水平変位を与え、そのときの荷重等を測定する形式になっている。なお、摩擦面端部における不均一な応力の



図—11 実験装置



図—12 実験装置概観



図—13 繰返し荷重による砂と鋼材の摩擦実験結果の例

影響を受けないように、摩擦力は摩擦面の中央部分のみで測定している。図—12はこの装置の概観である。使用した砂は3.の場合と同じく、気乾状態の豊浦標準砂であり、粒度の調整も同じ方法で行った。また、砂試料は初期の相対密度が90%程度または70%程度となるように多重ふるいをを用いた空中落下法により作成した。鋼材表面はグラインダーで整形し、表面粗さは最大高さ $R_{\max}$ で表すこととした。

図—13は、せん断応力比—変位関係の例である。変位振幅が $\pm 1 \text{ mm}$ の場合はピークが表れず、摩擦面で滑りがはっきりとは生じていないが、変位振幅が $\pm 2 \text{ mm}$ の場合は摩擦面で明らかに滑りが生じた。いずれの場合も正負両方向にほぼ同程度の摩擦抵抗を生じているが、変位振幅が $\pm 2 \text{ mm}$ の場合は最初のうちに現れていたせん断応力比のピークが繰返し回数の増加に伴いなくなってゆくことが観察できる。更に载荷方向が逆転してから滑りを生ずるまでの間の勾配も繰返し回数の増加に伴い大きくなってゆく。これらの特徴は垂直応力を 6 kgf/cm^2 にした場合、および、初期相対密度を約70%にした場合でも同様に表れる。

そこで、繰返し回数の増加に伴う摩擦係数の変化に注目し、実験条件を変えた場合に生じる違いを比較したものが図—14である。変位振幅が $\pm 1 \text{ mm}$ の場合は繰返し回数が増えても摩擦係数はあまり大きくならないが、 $\pm 2 \text{ mm}$ の場合は繰返し回数の増加に伴って摩擦係数が大きくなってゆく傾向が見られる。この違いは、変位振幅 $\pm 1 \text{ mm}$ の場合には摩擦面で完全には滑っていないことと関連するものと考えることができる。また、摩擦係数が増大する程度は砂の初期相対密度が高い場合のほうが顕著であることも図から見てとれる。

繰返し荷重による摩擦実験の後、摩擦面において顕著な粒子破碎が見られたため、摩擦面付近の砂を採取して粒度試験を行った結果が図—15である。粒径加積曲線のうち実線で示したものは実験前の砂による結果であり、繰返し荷重による粒子破碎でも細かい粒子の割合が著しく増加している様子が分かる。そこで、高圧下における摩擦実験の場合と同様に、粒径 $105 \mu\text{m}$ 以下の粒子の重量百分率の増加

量 (B_{105}) によって粒子破碎の程度を表すこととし、これと、砂の初期相対密度との関係を示したものが図—16である。

他の条件が同じであれば、砂の初期相対密度が高いほど破碎量が多くなっていることが分かる。変位振幅が $\pm 2 \text{ mm}$ の場合は、 $\pm 1 \text{ mm}$ の場合よりも顕著な粒子破碎を生じているが、これは摩擦面での滑り量の違いによるものであると考えられる。垂直応力が 10.1 kgf/cm^2 の場合と、 6.1 kgf/cm^2

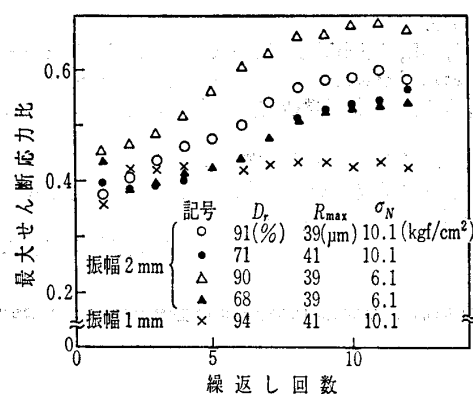


図-14 最大せん断応力比の変化

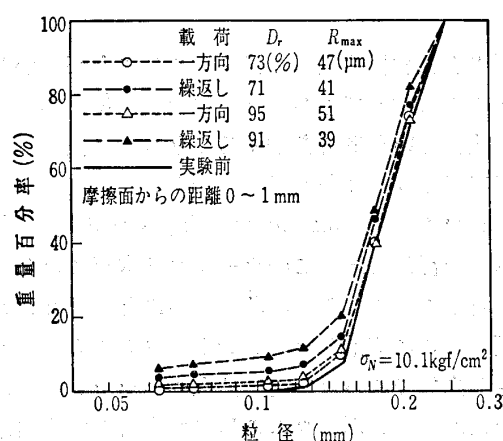


図-15 実験前後の粒度試験の結果

の場合を比較すると前者の方が破砕量が多いが、垂直応力が高いほど破砕量が多くなるという傾向は、高圧下における摩擦による粒子破砕の場合と一致している。同じ装置を用いて行った一方向荷重による実験の場合と繰返し荷重による実験の場合を比較すると、繰返し荷重による実験の方が破砕量が多くなっている。しかし、一方向荷重の場合は最終変位が 10 mm であるのに対し繰返し荷重は ± 2 mm の変位を 12 回与えた後であるため、繰返し荷重の効果を調べるためには更に検討が必要である。

以上のように、繰返し荷重による砂と鋼材の摩擦実験では、正負両方向に同程度の摩擦抵抗を生じ、摩擦係数は繰返し回数とともに増大するが、せん断応力比のピークが次第に失われてゆく様子が観察された。また、砂粒子の破砕は摩擦面で滑りが生じた場合、そして初期状態における砂の相対密度が高い場合、更に、垂直応力が高い場合に顕著であるという結果が得られた。

5. あとがき

高圧下における砂-鋼材間の摩擦の実例として、開端鋼管杭の閉そく効果に関する既往の研究例を紹介した。また、室内試験の例として高圧下における静的・一方向荷重による摩擦実験と繰返し荷重による摩擦実験、およびそれらの結果を紹介した。

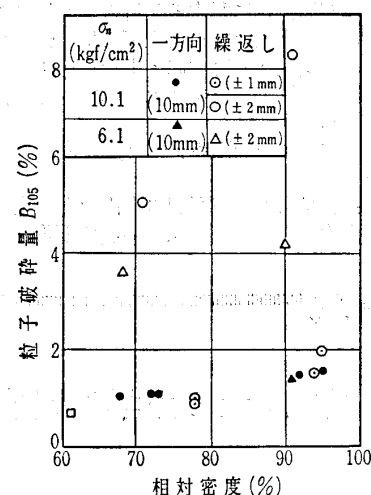


図-16 摩擦面付近の粒子破砕量

砂-鋼材間の摩擦において垂直応力が 10 kgf/cm^2 よりも高い場合や、垂直応力が 10 kgf/cm^2 程度でも繰返し荷重による摩擦力を受ける場合には砂粒子の破砕が生じ、摩擦係数に変化する。これらの変化は十分予想されることであるし、実験的にも確認された。これらを定量的に評価するためには、鋼材の表面粗さおよび粒子破砕量の合理的な表現方法などをはじめとする問題点がいくつかあり、また、摩擦面近傍の滑りのメカニズムなども今後解明されてゆくべき課題である。このため、本報告の内容は現時点までにおいて明らかになったことをまとめた中間報告的な意味をもつものであることを了解されたい。

本報告をまとめるにあたり、実験に関して御協力いただいた元・本学大学院生赤堀弘治君（現・東京電力）、本学大学院生長野太郎君、江口真木君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Potyondy, J.G.: Skin Friction between Various Soils and Construction Materials, Geotechnique, Vol. 11, No. 4, pp. 339~353, 1961.
- 2) 江刺靖行・片岡哲之・安田正幸: 杭の引抜抵抗(その1), 砂地盤について, 電力中央研究所技術研究所報告, 1966.
- 3) Brumund, W.F. and Leonards, G.A.: Experimental Study of Static and Dynamic Friction between Sand and Construction Materials, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 1, No. 2, pp. 162~165, 1973.
- 4) Yoshimi, Y. and Kishida, T.: A Ring Torsion Apparatus for Evaluating Friction between Soil and Metal Surfaces, Geotechnical Testing Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 145~152, 1981.
- 5) 高野昭信・岸田英明・佐伯英一郎: 砂地盤に埋込まれたクイの荷重-沈下特性, 第9回土質工学研究発表会, pp. 533~536, 1974.
- 6) 上杉守道・岸田英明・加藤真一郎: 開端ぐい内部の砂の性質にくい設置が及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 2671~2672, 1983.
- 7) 駒田敬一・山川朝生: くい先端部の開塞効果について, 第28回土木学会年次学術講演会講演梗概集, III, pp. 212~213, 1973.
- 8) 松浦 誠・芳賀保夫: 管内砂の圧力分布(その6), 押上試験の圧力分布, 第18回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1179~1182, 1983.
- 9) 長野太郎・赤堀弘治・上杉守道・岸田英明: 高圧下における

- 砂-鋼材間の摩擦抵抗に対する鋼材の表面粗さの影響, 昭和58年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 29~32, 1983.
- 10) 赤堀弘治・岸田英明・長野太郎・上杉守道: 高圧下における砂と鋼材との摩擦抵抗, 第18回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 273~274, 1983.
- 11) 森 満雄: 火山レキの締固め特性と支持力, 土と基礎, Vol. 13, No. 6-7, 1965.
- 12) 北郷 繁・神谷光彦: 札幌周辺の火山灰土の土質工学的特性(第3報), 土木学会第28回年次講演会概要集, III, pp. 276~

277, 1973.

- 13) Uesugi, M., Kishida, T. and Eguchi, M.: Frictional Resistance between Sand and Steel under Repeated Load, 第18回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 271~272, 1983.
- 14) 江口真木・上杉守道・岸田英明: 単純せん断型試験機による砂と鋼材との摩擦実験, 昭和58年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 33~36, 1983.

(原稿受理 1983.10.27)

ニ ュ ー ス

“海底土の力学に関する IUTAM シンポジウム” 開催さる

1983年9月5日~9日の間に, 英国 Newcastle upon Tyne 大学において, 海底土の力学に関する IUTAM (International Union of Theoretical and Applied Mechanics) 主催のシンポジウムが行われた。参加者は60名余で27編の発表が行われたが, このシンポジウムに占める日本の割合は大きく, 参加者8名で5編の発表を行った。

このシンポジウムに関する情報は, 1981年6月に IUTAM の事務局長の Hult 教授(スウェーデン Chalmers 工科大学)よりの手紙で知らされた。IUTAM の名前は聞いていたが Hult 教授は初めて聞く名前であった。その手紙によれば, 1983年は海底土の力学のシンポジウムを開催したいので, Newcastle upon Tyne 大の Denness 教授を委員長とする計画グループのメンバーとなり準備を進めて欲しいというものであった。10月には Denness 教授からの連絡があり, 英国の L. Maunder と A.M. Wood, 米国の A. Richards の各博士が計画グループのメンバーであること, 参加者はあらかじめ定める80名以内とすること, 発表は25編以内とすることなどが知らされた。Denness 教授も初めて聞く名前であった。

その後の計画グループ内の連絡の結果, 発表の内容は海底面上下数m以内の範囲に限定することとなったが, IUTAM の方針として若い科学者を中心に集まること, シンポジウムへの参加者と発表者の選定は計画グループのメンバーが個人的に行い, 1982年1月までに決定すべきことが伝えられた。この選定のための時間は限られたものであったが, 土質工学会の海洋土質委員会のメンバーのご助力で各方面の問合わせをして, 愛媛大学の柳講師と筆者の2編の発表と出席のことを期限内に連絡することができた。

東海大学の草大教授は Denness 教授と以前からの付き合いであったため, 計画グループメンバーの仕事を実質的にお願いしたが, 東海大学からは2編の発表の申込みが行われた。連絡期限後になって西日本工業大学の安原教授と

東京大学の石原教授も発表の意向のあることがわかり, 発表リストの中に加えてもらった。また, 京都大学の赤井教授は日本代表という形で参加することも後に決まった。本論文の提出期限は1983年6月末日であった。

シンポジウムは Newcastle upon Tyne 大学内の Henderson Hall で行われた。このホールは日本流に言えば学生寮という感じのものであり, 参加者のほとんどはシンポジウム期間中ここに宿泊した。シンポジウムの会場は中庭にある小さな講堂であった。発表は九つのセッションに分けられていたが, シンポジウムの前半は土質工学的問題, 後半が堆積学関係のものに区分けされていた。午前と午後に各4編の発表があったが, 各発表者には35分が割当てられ発表時間は25分とされた。

発表内容が二つに大別されていたため, 参加者も自分の興味のあるところにだけ出席することになり, 実際の出席者数は常時50名ぐらいであった。このように小人数の会合のため打ちとけた雰囲気の中で発表と討議を行うことができ, 今後の国際シンポジウムのあり方の一つの見本のように思われた。スライドの扱いは Denness 教授が1人ですべてを担当するという安直さであり, 昼食と夕食の後にはホール内のパブが開かれるため, ビターを飲みながら討議の続きを各個に行うという具合であった。

シンポジウム期間中に, 計画グループメンバーは各発表論文の査読を依頼された。これは IUTAM のシンポジウムの議事録として一定の品質を待たための要求とのことであり, 採用, 一部修正, 大幅修正, 登載不可の4段階の評価をつけることになった。この評価の集計結果は10月中旬に各発表者に通知され, 所要の手入れをした原稿は12月上旬までに Newcastle に送られ, 現在は議事録の本印刷の作業を行っている。

(文責: 中瀬明男 東京工業大学教授 土木工学科)

(原稿受理 1984.1.9)