

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所

報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

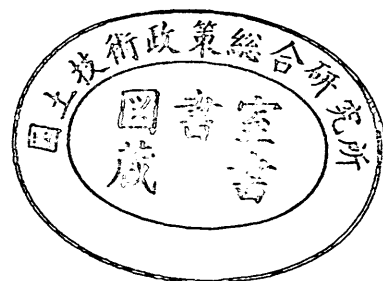
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 20

NO. 2

JUNE 1981

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第20巻 第2号 (Vol. 20, No. 2), 1981年6月 (June 1981)

目 次 (CONTENTS)

1. 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について
.....谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄..... 3
(Experimental Study of Impact Breaking Wave Forces on a Vertical-Wall Caisson of Composite Breakwater
.....Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI and Takao KITATANI)
2. マルチセルラーケーソンの水理特性に関する実験的研究
.....谷本勝利・原中祐人・富田英治・村永 努・鈴木諭司..... 41
(A Hydraulic Experimental Study on Multi-celler Caisson Breakwaters
.....Katsutoshi TANIMOTO, Suketo HARANAKA, Eiji TOMIDA,
Tsutomu MURANAGA and Satoshi SUZUMURA)
3. 螢光砂を用いた砕波帯内における局所的砂移動の観測
.....灘岡和夫・田中則男・加藤一正..... 75
(Field Observation of Local Sand Movements in the Surf Zone Using Fluorescent Sand Tracer.....Kazuo NADAOKA, Norio TANAKA and Kazumasa KATO)
4. 地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究 (第2報)
—野外実大実験—高橋邦夫..... 127
(Experimental Study on the Bending of Batter Piles due to Ground Settlement (2nd Report) —Field Experiment—Kunio TAKAHASHI)
5. 大型タンカーの接岸力に関する研究.....上田 茂..... 169
(Study on Berthing Impact Force of Very Large Crude Oil Carriers
.....Shigeru UEDA)
6. 港湾内貨物流動に関する研究 (第1報)溝内俊一・稲村 肇..... 211
(A Study on the Cargo Flows in Port (1st Report)
.....Toshikazu MIZOUCHI and Hajime INAMURA)
7. 土砂輸送用パイプの摩耗に関する研究 —ライニング材としてのポリウレタン
エラストマの耐摩耗性—岡山義邦・村上幸敏・浜田賢二..... 271
(Studies on the Wear of Slurry Pipelines —Evaluation of the Wear Resistance of Polyurethane Elastomers—
.....Yoshikuni OKAYAMA, Yukitoshi MURAKAMI and Kenji HAMADA)

7. 土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

——ライニング材としてのポリウレタンエラストマの耐摩耗性——

岡 山 義 邦*・村 上 幸 敏**・浜 田 賢 二**

要 旨

ポリウレタンエラストマは最近土砂輸送パイプのライニング材として注目を集めている弾性高分子化合物である。従来の実験によれば、粒径の比較的小さい、浮遊流れと考えられる流動条件下での耐摩耗性はかなり良い評価を与えられているが、鋭いエッジをもつ粗大粒子で、しかも摺動流条件下に対する評価は得られていない。

本報告はこのような粗大粒子に対するポリウレタンエラストマの耐摩耗性を調べたものである。実験は水平ドラム式摩耗試験機により行われ、ドラム壁面に取付けた鋼材 (STPG 38) とポリウレタン 4 種の土砂水による摩耗量を調べ、鋼材とポリウレタンを耐摩耗性について比較した。使用土砂はナイフエッジをもつケイ石で、平均粒径 (d_{50}) が 4 mm と 20 mm の 2 種類であり、細粒子 ($d_{50}=4$ mm) に対して延べ 104 日間、粗大粒子 ($d_{50}=20$ mm) に対して延べ 51 日間の摩耗実験を行った。

この結果、ポリウレタンエラストマは、粗大粒子の場合鋼材に対して 2~12 倍、細粒子に対しては 14~65 倍の耐摩耗性をもち、これは粒径に大きく影響される。また、ポリウレタンによる種別の耐摩耗性においては、今回用いた 4 種の中でも 5 倍程度の差があるが、この差は粒子径にほとんど無関係であることがわかった。

さらに、今回試作した水平ドラム式摩耗試験機は、水平管における摺動流による管底部の摩耗機構にかなり近い摩耗条件を実現し得るということを確認し得た。

なお、本実験における摩耗量は主として各テストピースの重量測定値から求めており、吸水によるポリウレタンテストピースの重量増加分はダミー試験片の吸水量より補正している。

* 機材部 流体輸送研究室長

** 機材部 流体輸送研究室

Studies On The Wear Of Slurry Pipelines
—Evaluation On The Wear Resistance Of Polyurethane Elastmers—

Yoshikuni OKAYAMA*
Yukitoshi MURAKAMI**
Kenji HAMADA**

Synopsis

Polyurethane elastmer is an elastic high molecule compounds, which has recently been used as the material for pipe linings with a high wear resistance against an abrasive solids to be transported in the slurry pipelines. However, the excellent results on the wear of lined pipes were obtained from the experiments under limited flow condition closed to suspended flow, and for small particles. No other results have been reported so far for sharp and large particles, say over 10 mm (d_{50}).

This paper is derived from the wear tests by level rotating drum on which steel and four kinds of polyurethane test pieces are mounted. The tests were performed against solids/water mixtures in order to evaluate wear resistance of polyurethane elastmers in comparison with steel. The solids tested were silica after grinding with sharp edges having the mean particle diameter of 4 mm and 20 mm, and the term of tests were 104 days for small particles, 51 days for large particles.

Through the tests, it was concluded that polyurethane elaster can give a high wear resistance compared with steel, and it is strongly affected by particle size. The ratio of wear rate for steel to that for polyurethane elastmer, R , is ranging 2-12 for large particles, and 14-65 for small particles. The fluctuation in R for the solids with same mean size is mainly caused by the each properties among four kinds of polyurethane tested here, and the degree of fluctuation is not influenced by particle size.

Furthermore, it was recognized that the wear test facility produced for trial can give the type of sliding abrasion, which is locally close to that caused by sliding flow in the actual pipelines.

The measurement of wear rate is mainly based on weighing the test pieces, and the weight of polyurethane samples including the addition due to water absorption was corrected at every measurement by weighing the same kind polyurethane substitutes without abrasion.

* Chief of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division.

** Member of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division.

目 次

要 旨	271
1. ま え が き	275
2. 実験装置と供試土砂	276
2.1 水平ドラム式摩耗試験機	276
2.2 供試試験片の材質と形状	278
2.3 供試土砂の性状	281
2.4 測定項目と測定方法	282
3. 予備実験とその結果	282
3.1 予備実験の目的	282
3.2 予備実験結果	283
4. 粗大粒子に対する摩耗実験	287
4.1 実験方法	287
4.2 実験結果	288
5. 細粒子に対する摩耗実験	294
5.1 粗大粒子実験と異なる設定条件	294
5.2 実験結果	295
6. 結果の考察	299
6.1 水平ドラム方式による鋼材の摩耗特性	299
6.2 相対速度と摩耗に対する影響	302
6.3 土砂の粉化と摩耗量の関係	304
6.4 ポリウレタンの重量補正と計測精度	305
6.5 ポリウレタンの摩耗	307
6.6 ポリウレタンの鋼材に対する耐摩耗性倍数	309
7. 結 論	310
8. あとがき	310
参考文献	311
記号一覧表	311

1. まえがき

土砂混合水のボイプライン輸送が開始された当初から、パイプの摩耗に関する研究は絶え間なく続けられているが、いまだに、定量的にはもちろん定性的にも確立されたといえるような理論は存在しない。したがって、土砂あるいはその他の固形物を輸送するボイプラインを設計する上で、用いられる理論あるいは基礎データは他の流送条件、例えば輸送量、輸送濃度、必要なボイプラインの大きさ、あるいはポンプやそれを含めた動力関係などを決定する場合に応用される理論やデータに比べ、信頼性においてかなり劣る。

もちろん、大口径あるいは大粒径に対する流送条件の決定が現在までの研究成果のみで十分精度良く行えるという意味ではないが、その豊富な研究内容と蓄積されたデータに比べると摩耗に関する研究が量的にまた質的にかなり遅れているという事実は否めない。この理由として考えられることはいろいろあるけれども、一般に摩耗という現象がボイプラインであるなしにかかわらず非常に複雑であるということであろう。

そして、これがパイプの摩耗となるとさらにその複雑性は増加する。それは単なる金属間接触による摩耗と異なり、管内土砂の流動条件を含めた摩耗条件を明確に規定し得ず、他で行われた実験データを比較することが非常に難しいためである。土砂の管内におけるフローパターンは、主として輸送土質、濃度、輸送速度、管径等により変化し、それが管壁摩耗に大きく影響する。浮遊流であれば摩耗は比較的管全体に平均化するが、粒径の大きい砂利などのように摺動して流れる割合が大きくなると摩耗も管底に集中し、側壁の3~5倍に達することも珍しくない¹⁾。

一方、輸送条件からいえば大粒径土砂を大量に、しかも長距離輸送したいという社会的要請も強くなってきている。このことは、ボイプライン設計上、地中管や海底管を含めた構造物としての取扱いがなされなければならないことを意味しており、摩耗に関しても従来浚渫船の排送管に見られるような消耗品の見方ではなく、設計時点でのパイプに対する精度の良い寿命予測が要求されてきていることを示している。

それと同時に大粒径、大量輸送ということから、パイプ寿命を延長する工夫もなされなければならない。すなわち、管材質の開発あるいは耐摩耗性の高い材料を内面

にライニングすることなどが考えられる。

管材質については、Tarjanら²⁾やKarabellss³⁾が、炭素鋼、アルミ、鑄鉄などについてループテストを行っており、またKazanskijら⁴⁾や宮崎ら⁵⁾は実船実験によって浚渫時のパイプ摩耗を普通鋼や特殊鋼と比較している。しかしながら、いずれの場合も普通鋼に対して1~2倍であり、寿命を延長するという目的からいえば、コストを考えても十分とはいえない。

このようなボイプラインを利用した実験の他に、土砂に対する金属材料の摩耗については各種の回転式摩耗試験機を使用して、種々の金属材料の方を土砂中を通過させることにより行われている。堀内ら⁶⁾によれば乾燥土砂に対し、各種高Mn鋼で普通鋼に対し最高で1.5倍、高Cr鑄鉄で最高1.2倍程度となっている。また奥出ら⁷⁾は垂直式回転摩耗試験機と土砂混合水を用いた実験を行い、耐摩耗部品用材として使用されるSNC1の耐摩耗性をSS41に対して約1.7倍と報告しており、普通鋼材に対する耐摩耗性からいえばループテストの結果と大差はない。

このような理由でライニング材がパイプの寿命延長策として適当だと考えられてきた。天然ゴムや合成ゴムは従来からライニング材としていろんな分野で使用されてきているが、このゴムのように弾性をもつエラストマの一種として、最近ポリウレタンエラストマが土砂に対しても高い耐摩耗性をもつことが知られ、注目され始めている。

ポリウレタンエラストマは、線状の長い分子の各所にブリッジをもつ網目構造をした高分子材料であり表-1.1に示すように他のゴムと比較しても高域の硬度、高弾性モジュラス、耐摩耗性等を有している⁷⁾。従来、タイヤ、ベルトなどの他、シール、カップリング、ライナ等の機械部品として使用されてきたが電磁流量計の内壁ライニング材のような使用についても一部実績がある。

しかしながら、本格的な土砂輸送ボイプラインのライニング材として使用された実績は極くわずかであり、その例もテストプラントによるものである。この例をあげると、たとえば、Nguyenら⁸⁾は鋼さい4000万m³を輸送するに際してのテストプラントによる結果を報告しているがポリウレタンエラストマに対しかなり高い評価をしている。また、村上ら⁹⁾は、ダム堆砂輸送に対するテストプラントにポリウレタンライニングを施したパイプをそう入し、耐摩耗性を調べている。厚さを直接測定し

表-1.1 ゴムとポリウレタンエストラマの一般的比較⁷⁾

	硬 度 Shore A	抗 張 力 (kg/cm ²)	伸 び % 破 断 時	引 裂 強 度 (kg/cm)	摩 耗 度 (cc/l-phr)
ウレタンエラストマ軟 (補強剤なし)	55~80	200~500	600~1000	30~ 80	0.3~0.8
天然ゴム { 補強剤なし カーボンブラック配合	80~99	250~600	100~ 700	60~100	0.5~1.3
SBR	30~50	70~150	500~1000	20~ 50	
NBR	50~80	100~300	300~ 600	40~100	2.2~6.0
カーボンブラック配合	50~90	100~250	200~ 500	30~ 60	5.0~10.0
カーボンブラック配合	50~90	70~200	200~ 500	30~ 60	2.0~5.0

ているため量的に議論できるほどの摩耗量は得られていないが、定性的にはかなりの効果をもつことが明らかにされている。

しかしながら、これらの実績はいずれも粒子径が 0.3~0.4 mm の極く小さい土質に対するものであり、10 mm 以上の粗大粒子でしかもシャープなエッジをもつ土砂に対してどこまで応用できるか疑問である。Barker¹⁰⁾は、実験ならびに従来の研究成果を整理し、その中で「solids が大きくなく、しかもシャープでないならば、かなりポリウレタンは効果がある」というように条件を限定した形での評価をしている。さらに、このようなループテストにおいては管径も小さく、流れも浮遊流に近いものとなり管壁との摩耗も衝突摩耗の占める割合が多いと考えられるので、大部分が摺動摩耗となるような粗大粒子の場合とはこの点で異なり、実績の適用については十分な注意を要する。

このように、ポリウレタンエストラマの土砂混合水に対する耐摩耗性についてはかなり高い評価がなされている反面、土砂に対する絶対摩耗量はもちろんのこと、普通鋼材に対する耐摩耗性についても定量的にはほとんど解明されていない。また、従来の研究も粒径が比較的小さいものに限定されており、粗大粒子については実績としても階無に等しく、粗大粒子に注目した研究が必要とされているといえるであろう。

以上の如き背景のもとに、今回ポリウレタンエストラマ(以下ポリウレタンと称す)の粗大粒子($d_{50}=20$ mm)に対する耐摩耗性について、特に摺動流に限定した実験を行った。ベースとなる鋼材としては、圧力配管用炭素鋼(STPG 38)を用い、粗大粒子のためにループテストがかなり困難であったことから、摺動流に比較的近い摩耗条件をもつ水平ドラム式摩耗試験機を試作してこれを用いた。使用土砂は地山切出し直後のナイフエッジをもったケイ石であり、参考のために $d_{50}=4$ mm の細粒子に

についても実験した。

なお、本研究は(社)鋼材倶楽部との共同研究の一環として行ったものであり、前記摩耗試験機の開発および試作を鋼材倶楽部が担当し、摩耗実験ならびにその解析を港湾技術研究所で担当した。本報告は、この実験結果に関するものである。

2. 実験装置と供試土砂

2.1 水平ドラム式摩耗試験機

土砂スラリーによる管摩耗は、液質、土質の影響はもとよりスラリー濃度、流速等の流動条件の影響を大きく受ける。したがって、実験装置は実際の管内流動状態を忠実に再現し得るものであることが望ましい。

しかし、これはパイプラインによるループテストでは実現可能であるが、摩耗試験機による実験ではどのようなタイプのものを使用したとしても限界がある。一方、ループテストで取り扱える固体粒子の大きさは自ずから限度があり、せいぜい平均粒径が数ミリメートルの砂利程度までであろう。 $d_{50}>10$ mm のような粗大粒子になってくると、土砂の前処理、投入方法等の取り扱いがかなり大がかりなものになると同時に、ループ中のポンプ内における摩耗やインペラにおける土砂の粉化なども無視し得ず、結果的に流速条件が大きく変化すると考えられるので実際上室内実験に近い規模で行うことが困難となる。

したがって、粗大粒子に対する摩耗試験機は従来の回転式摩耗試験機に近いタイプのもので、土砂と試験片の接し方を実際の管内流れにおける土砂と壁面の関係に、可能な限り近付けたものが、実験を長時間行う上で、また得られたデータの適用範囲を広げるといって適切なものとなる。

具体的に粗大粒子の管内流れを考えると、今回想定した管径 1 m、真容積濃度 10%、そして輸送速度 5~6 m/s

土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

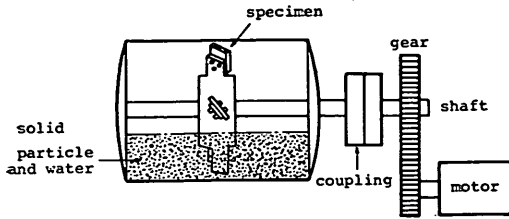


図-2.1 水平ドラム羽根回転式例

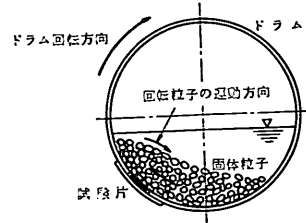


図-2.3 水平ドラム内の土砂の挙動モデル

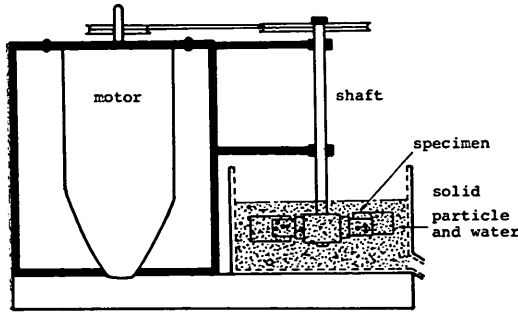


図-2.2 垂直ドラム羽根回転式例

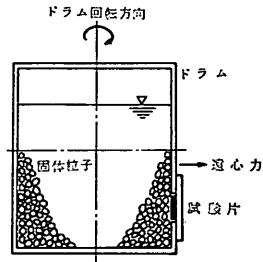


図-2.4 垂直ドラム内の土砂の挙動モデル

の条件下で平均粒径 20 mm の土砂を流したフローパターンは、土砂の一部が転動、跳躍し、大部分は管底部を摺動するいわゆる摺動流となる。このような流動状態での管摩耗は一部は衝突摩耗であるが大部分が摺動摩耗となるだろう。したがって試験片と土砂の摩耗状態が摺動摩耗に支配されるような摩耗試験機を使用する必要がある。

現在実用化されている摩耗試験機は図-2.1 および 図-2.2 に示すような水平ドラム羽根回転式および垂直ドラム羽根回転式が一般的である。

これらはいずれも比較的小粒径の固体粒子（土砂等）を対象にしており、ドラム径も 400 mm~600 mm と小さい。なぜかといえば、粒径が大きくなると固体粒子はドラム下部に沈んでし、羽根を回転させても攪拌されず、実際のパイプラインにおける管内の固体粒子の流動状態からかけ離れたものとなるからである。また、これらの摩耗試験機は試験片をドラム壁面に取付けることは可能であるが、一般には回転羽根に試験片を取付けて試験を行う。したがって、衝突による摩耗を主体に計測することになり、摺動摩耗量の計測には適当でない。

以上の点から考えて、本実験に使用する摩耗試験機はドラム壁面に試験片を取付け得るもので、しかもドラム

が回転する方式のものが適当である。この場合、水平ドラム方式、垂直ドラム方式の二つがある。両方式の特徴を定性的に述べると次のとおりである。

図-2.4 に示す垂直ドラム方式では、試験片が常時固体と接触しているため摩耗試験機の運転時間がそのまま摩耗試験時間となりデータ整理上都合が良いが、図-2.3 に示す水平ドラム方式ではこのような関係にはならない。

ドラム回転方式は、ドラム回転数がある値以上になるとドラム内土砂はドラムと同一速度で回転を始める。この状態が共回り状態であり、この時のドラム回転数が臨界回転数である。垂直ドラム方式では土砂は常に遠心力で壁面に押し付けられており、土砂の自由度も小さく、したがって共回りを始める臨界回転数も低い。また、極端な場合には同一粒子のみが試験片と接触し、他の粒子はほとんど接触しないこともある。これに対し、水平ドラム方式は土砂が上方に移動するにつれて、土砂の自重により壁面から分離しようという傾向が大きく、このため土砂の自由度も垂直ドラム方式より大で、臨界回転数も大きくなる。したがって、垂直ドラム方式よりも水平ドラム方式の方が、管内流動状態での土砂の動きにドラム内土砂の挙動をより近づけさせ得ると考えられる。

以上の考察のもとに水平ドラム方式を選んだが、この

表-2.1 水平ドラム式摩耗試験機の主な仕様

	項目	仕様
回転ドラム	内径	φ984 (内面 8mm 厚ゴムライニング)
	回転数	33.3~133.3 rpm
	周速	1.7~6.9 m/s ($D=\phi 984$)
	駆動	7.5 kW バイエル無段変速機付+プーリ減速 (1:3)
	試験片板数のぞき窓	4板/列×2列=8枚 非駆動側 4ヶ所
	回転羽根	内径(外周)
回転数		100~400 rpm
周速(外周)		4.3~18.0 m/s
駆動		7.5 kW バイエル無段変速機付+プーリ (1:1)
試験片板数		4板/列×2列=8枚

ような摩耗試験機は現在実用化されていないため、本実験用に設計試作した。表-2.1 に水平ドラム式摩耗試験機の仕様を示し、図-2.5 にその組立図を示した。

なお、衝突摩耗についても実験できるように本装置は回転羽根を有している。これはドラム軸に取付けられ、シャフトが回転するにつれて羽根も回転するが、この場合、ドラムの方は停止状態で使用する。ドラムとシャフトの回転方向は逆であり、単独にあるいは同時に運転できるように別々の駆動モータに連結されている。しかし、回転羽根については本実験では使用していない。また、ドラム壁面と土砂との相対速度をできるだけ高めるため、邪摩板をドラム内部に取付けられる構造となっている。これについては、予備実験において使用した。また、写真-2.1~2.3 において本実験装置の外観を示した。

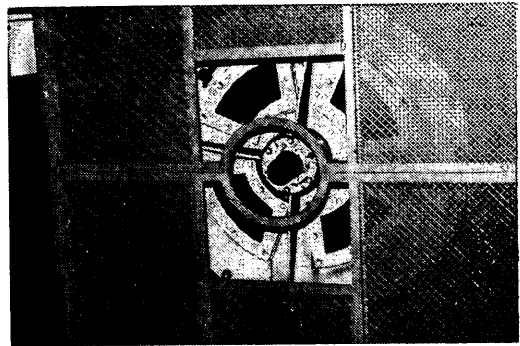


写真-2.2 ドラム側面のぞき窓

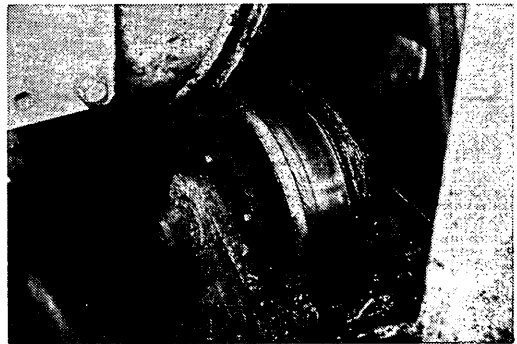


写真-2.3 ドラム回転用コロ部

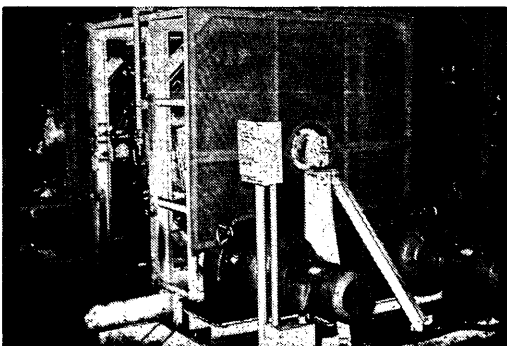


写真-2.1 水平ドラム式摩耗試験機外観

2.2 供試試験片の材質と形状

(1) 試験片の材質

本実験では、ポリウレタンの耐摩耗性を評価するべ-

土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

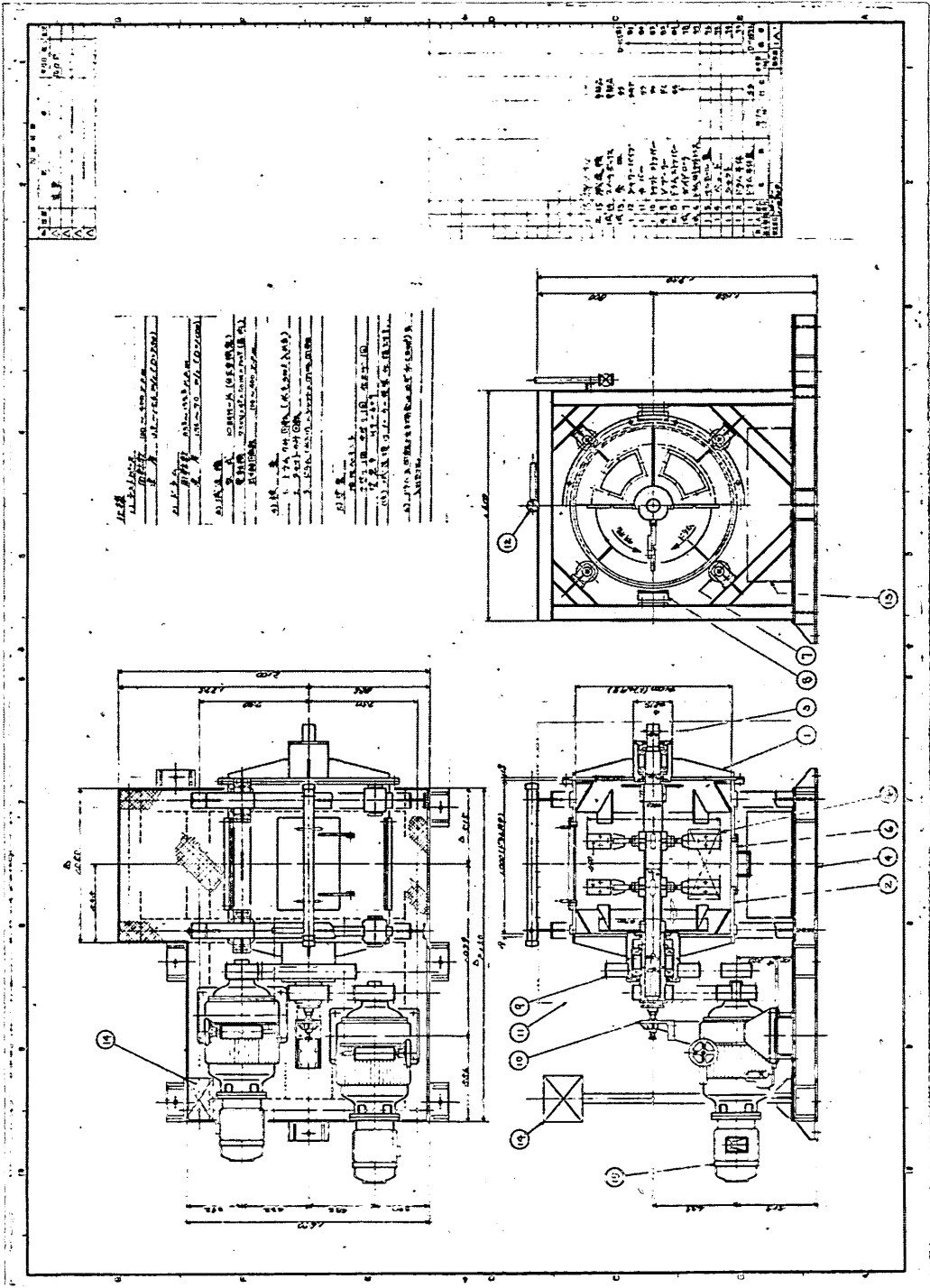


図-2.5 水平ドラム式摩耗試験機組立図

表-2.2 摩耗試験片の種類

材 質	種 類	符号	硬度	備 考
鋼 材	圧力配管用炭素鋼 (STPG 38)	S	—	符号 S. L. P. Q. X は 本実験用の単なる符号 であり商品名ではない。
	ポリエーテル型アジブレン L100 相当品	L	80	
	同 上	P	80	
	ポリエーテル型	Q	83	
	ポリエーテル型	X	81	

表-2.3 鋼材試験片の化学成分

材 質	符号	化 学 成 分 wt%				
		C	Si	Mn	P	S
STPG 38	S	0.15	0.19	0.88	0.019	0.019

表-2.4 鋼材試験片の物性

材 質	符号	比重	機 械 的 性 質			
			降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	硬 度 Hv(10)
STPG 38	S	7.87	28.7	43.7	39.9	124

表-2.5 ポリウレタン試験片の物性

種 類 符 号		ポリエーテル型アジブレン L100 相当		ポリエーテル型	ポリエーテル型				
		L	P	Q	X				
配 合 比	主 剤	100	100	124	100 (XL-1131A)				
	硬化剤	8	8	87 (MC-623) 13 (MC-623-05)	36 (XL-1131B)				
混合時温度 (°C)	主 剤	110	80	30	60				
	硬化剤	120	120	30	60				
硬化条件	一 次	110°C×60分	110°C×60分	60°C×15分	60°C×60分				
	二 次	110°C×180分	110°C×180分	—	45°C×24H				
使用 プ ラ イ マ ー		BU-1 A/B	TS-2394-75	1-A	BU-1 A/B				
硬 度 (JISA)		80	80	83	81				
100% 引張モジュラス (kg/cm ²)		36	40	52	53				
300% 引張モジュラス (kg/cm ²)		58	75	104	164				
引張強度 (kg/cm ²)		402	419	350	312				
引張破断伸び (%)		551	550	470	431				
引裂強度 (kg/cm)		46	49	77	51.5				
テーパー摩耗(mg/10 ³ 回)		H-18 71	H-22 44	H-22 23	H-18 92				
吸 水 率 (wt%)		25°C× 1ヶ月 1.28	70°C× 7日 1.45	25°C× 2週 1.35	70°C× 7日 1.90	23°C× 1ヶ月 1.0	70°C× 1ヶ月 1.5	25°C× 1ヶ月 1.85	70°C× 7日 2.21

ス鋼材として圧力配管用炭素鋼 (STPG 38) を用い、ポリウレタンについては硬度が約 80 のもの 4 種を使用した。これを表-2.2 に示す。また、表-2.3 に鋼材の化学成分、表-2.4 に鋼材の機械的性質、表-2.5 に今回使用したポリウレタンの物性値を示した。

(2) 試験片の形状および取付け方法

ドラム壁面用および回転羽根用試験片の形状を 図-2.6~図-2.8 に示す。鋼材試験片はドラム壁面の曲率に合わせて加工してあるが、ポリウレタン試験片については弾性があるので平板としている。また、吸水率補正用試験片 (ダミー) も、摩耗にさらされる試験片も全く同一形状のものを使用している。

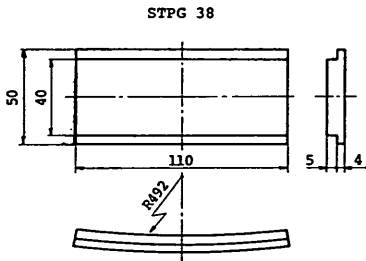


図-2.6 鋼材試験片の形状

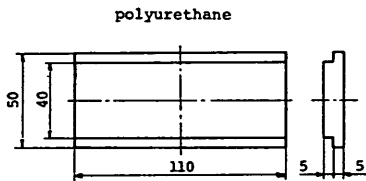


図-2.7 ポリウレタン試験片の形状

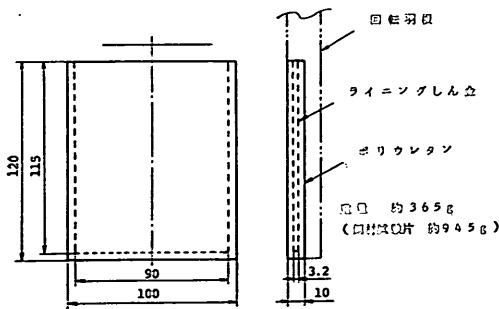


図-2.8 回転羽根用試験片



写真-2.4 試験片のホルダーへの取付け状況

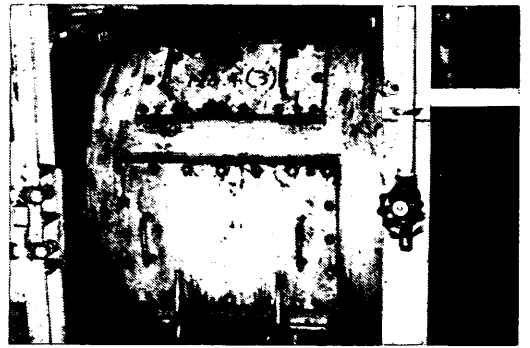


写真-2.5 ホルダーのドラムへの取付け状況

試験片の取付け方法はつぎの通りである。ドラム壁面用試験片は、専用の試験片取付けホルダーを用い、試験片の段付部を押し金具ではさみ込む方法で取付けられる。また、回転羽根試験片は回転羽根にボルトナットで取付けることができる。写真-2.4 は、試験片を専用取付けホルダーに取付けた状態であり、写真-2.5 はこのホルダーをドラムに取付けた様子を示している。

2.3 供試土砂の性状

本実験は前述のように実ラインを想定したものであるから一致でき得る条件はできるだけ実ラインに合わせるようにしている。したがって、供試土砂も地山から得られたばかりのナイフエッジをもつものに限定した。これにより、ポリウレタンが一般的に鋭い角のある土砂に弱いのではないかという評価を確認することができる。表-2.6 は、使用土砂の仕様を示したものであり、図-2.9 はその粒度分布を示している。粗大粒径土砂の 50% 粒径は平均して 21.5mm、細粒子については 3.5mm であった。しかしながら、実験データや解析結果を粗大粒子と細粒子で区別する場合には表示上、土砂の目標粒径

表-2.6 使用土砂の一般性状

平均粒径	$d_{50}=20\text{ mm}$ $\left[\begin{array}{l} d\text{ max}=40\text{ mm} \\ d\text{ min}=2.0\text{ mm} \end{array} \right]$	$d_{50}=4\text{ mm}$ $\left[\begin{array}{l} d\text{ max}=20\text{ mm} \\ d\text{ min}=1.25\text{ mm} \end{array} \right]$
土質	珪石	同左
調合	粒径中央値 (d_{50}) の目標値を 20 mm に碎石加工し, 40 mm 超および 2.0 mm 未満はカットする。	粒径中央値 (d_{50}) の目標値を 4 mm に碎石加工し, 20 mm 超および 1.25 mm 未満はカットする。
粒形	ナイフエッジ	同左
比重	2.65	同左

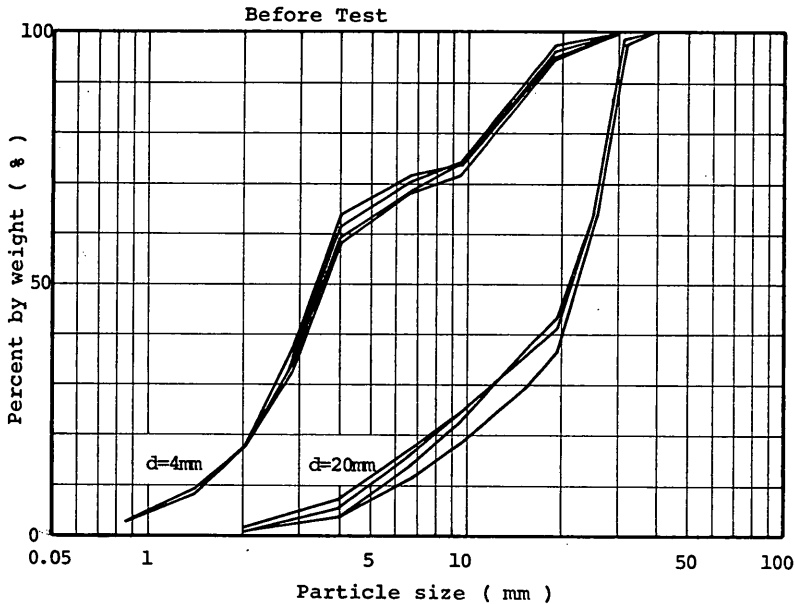


図-2.9 供試土砂の粒度分布

である $d_{50}=20\text{ mm}$ ならびに $d_{50}=4\text{ mm}$ と表わしている。もちろん計算に使用した粒径は測定値をそのまま使用した。

2.4 測定項目と測定方法

表-2.7 に、予備実験ならびに本実験を通じて行った測定項目、測定方法ならびにそれに用いた計測装置仕様を示した。本実験において最も重要な摩耗量の検出は、重量については化学天びんを用い、厚さについてはマイクロメータを用いている。

化学天びんの精度は、鋼材に対して 10mg、ポリウレタンについては 1mg である。なお、マイクロメータの

精度は 0.01mm である。

3. 予備実験とその結果

3.1 予備実験の目的

一般に摩耗試験は長期にわたるのが常であるが、期間中の摩耗条件が適正かどうかを確認するためには一定の周期をもって計測作業を行わなければならない。また、一定の成果を得るのに長時間が必要であるだけに、実験条件の設定は他の実験以上に慎重に行う必要がある。今回は、粗大粒径土砂と細粒径土砂に対する本実験を行う前にかなり綿密な予備実験を行った。ただし、細粒径土

土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

表-2.7 計測項目と計測器

測定項目		計測器	容量	精度
粒度分布		篩	50~1 mm	—
		秤量器	5 kg	1 g
土砂比重		ピクノメーター	—	—
		化学天秤	1 kg	1 mg
スラリー濃度		秤量器	100 kg	1 kg
回転数		タコメーター	500 rpm	1 rpm
スラリー温度		棒状温度計	100°C	1°C
pH		pHメーター	—	0.1
摩耗量	重量	化学天秤	1 kg 200 g	10 mg 1 mg
	寸法	マイクロメーター	25 mm	0.01 mm
写真撮影		35 mm カメラ	—	—
摩耗面の観察		万能表面形状測定器	0.01~600 μ	3 %
ポリウレタン吸水率	乾燥	電熱式乾燥炉	200°C	1°C
	重量	化学天秤	1 kg	1 mg

砂については、粗大粒径に対する本実験終了後に予備試験を行っているので、ここで述べる結果は必ずしも同一時期に得られたものではない。

予備実験の主目的を列記すると次の通りである。

- (i) 臨界回転数を見出し、適正なドラム回転数を決定すること。
- (ii) 投入土砂水の量および濃度を決定すること。
- (iii) 試験片の摩耗速度を求め、適正な計測間隔を決定すること。
- (iv) 投入土砂の粉化を調べ、土砂取替間隔を決定すること。
- (v) ポリウレタン試験片の吸水、蒸発等に関する予備調査を行うこと。

等である。

3.2 予備実験結果

(1) ドラムの臨界回転数

臨界回転数は土砂水がドラムとともに回転し始める回転数であり、理論的にこれを決定することは困難である。むしろ不可能といってよい。このため、土砂のドラ

ム内での挙動観察用にのぞき窓が設けられているが、実際には回転直後にスラリーが濁り出しこのため窓表面を透明に保つことができなかった。

そこで、共回りの回転数をドラム壁と固体との衝突音がなくなる時であると定義し複数の計測員により計測した。その結果は各種の土砂スラリーに対して 図-3.1 に示す通りとなった。図中の数字は土砂スラリーの真容積濃度であり、同一スラリー量に対して幅があるのは回転数を上げていった時の衝突音（土砂が壁面から分離し落下する音）の消滅と、回転数を逆に低下させていった場合の衝突音の発生が同一回転数で起らないためである。

この結果から、同一容量で考えた場合水のみの場合の共回り回転数は、土砂の場合に比べはるかに高い。土砂と水を混合するとこの中間に位置し、濃度が高いほど土砂の場合に近づき、濃度が低いほど水の場合に近づく。

また、本実験の範囲内のスラリー量で考えると濃度一定であれば臨界回転数は横ばいか若干低下する傾向を示すということが判明した。

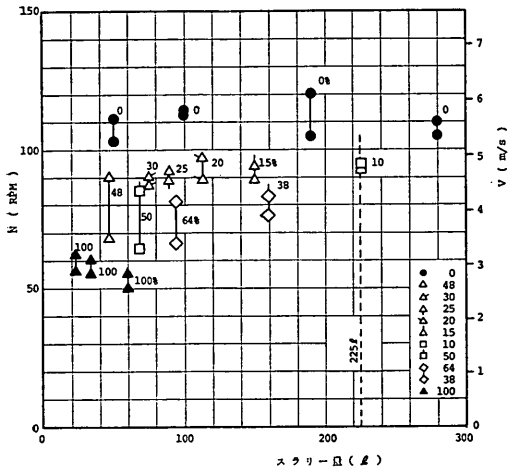


図-3.1 各種スラリーの共まわり開始回転数

次に、実験中の土砂水の量および濃度であるが、これは机上検討の結果次のように定めた。まず、濃度については、実ラインでは 10% 程度であるが、管底部を摺動している部分ではこれよりかなり高いと考えて 15% とした。一方、量的にはドラム内水面が、ドラム軸より下方になければならないという装置上の観点と土砂による面圧をできるだけ多くし摩耗速度を早めたいという実験上の観点から、できるだけ多くしかも軸に影響を与えないということで土砂スラリー量として 225 l とした。これは、土砂 90 kg (容積 33.8 l) に対し海水 191 l の割合となる。なお、海水を使用しているのは想定実ラインにおいて海水を対象としたためである。

この量で臨界回転数を考えると、ほぼ 90~100 回転、ドラム周速にして 4.6~5.2 m/s となり、約 5 m/s で共回りを開始するため実験中のドラム周速は 5 m/s より下で選ばなければならないということになる。

(2) ドラム周速に対する鋼材摩耗量

ドラム内の土砂はフリー状態であるから、ドラム回転中は一定の相対速度で壁面と接触する。この相対速度は、ドラムの回転数によっても異なり、停止時が零で、(1) でみたように 90~100 回転で再び零となる。したがって、ドラム周速を早くすればするほど相対速度が大きくなる訳ではない。

一般に相対速度は摩耗に大きな影響を与えるから、同一実験時間内での摩耗量も必ずしもドラム周速が大きいほど大きくなるとは限らない。もちろん、試験片と土砂の触れる全走行距離から考えると、同一相対速度であれ

ばドラム周速が大きいほど走行距離も長くなるから摩耗量も大きいが、相対速度がドラム周速が大きいほど小さい場合にはそう考えることもできない。

そこで、ドラム周速 2, 3, 4 m/s について、時間を変えて摩耗実験を行い摩耗量を比較してみた。なお、試験

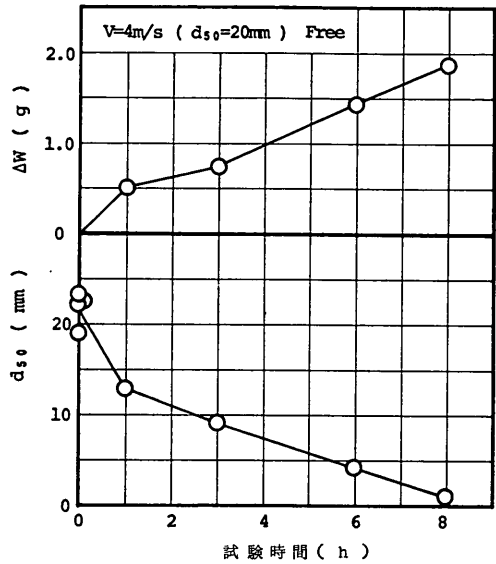


図-3.2 摩耗量と粒径の変化 (4 m/s , フリー, $d_{50}=20$)

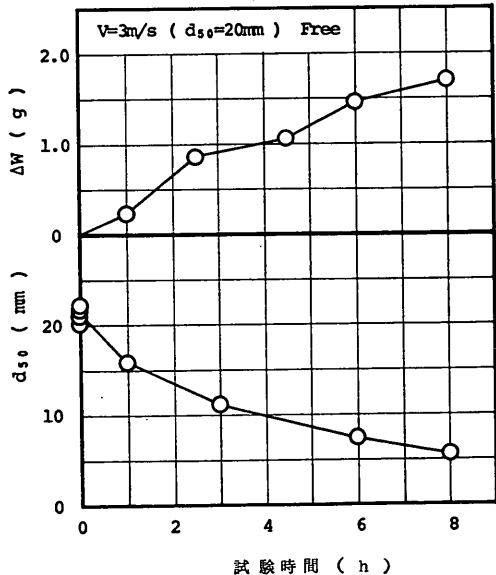


図-3.3 摩耗量と粒径の変化 (3 m/s , フリー, $d_{50}=20$)

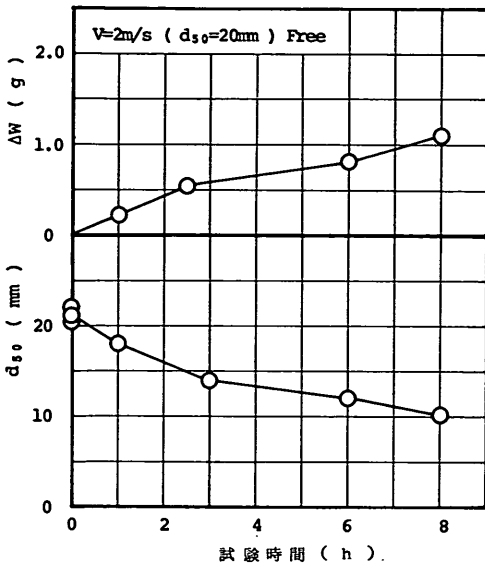


図-3.4 摩耗量と粒径の変化 (2m/s, フリー, $d_{50}=20$)

片としては予備実験中すべて鋼材としポリウレタンは使用していない。

この結果を、図-3.2~図-3.4 に示す。6時間を例にとって摩耗量を見ると、2m/s の場合かなり低く、3m/s と 4m/s ではほとんど同じ摩耗量を示している。6時間内の総ドラム回転数からいえば 4m/s の方が 5 割大きいから、摩耗量が同じということは相対速度が 3m/s の場合の方が大きいことを示している。このことと、摩耗試験機の長時間運転のためにはできるだけ低い回転数がベターであるということから、本実験のドラム周速は 3 m/s を選ぶことにした。

ドラム周速 $V=3\text{m/s}$ ということは、相対速度が仮にこれと同じ 3m/s だと考えても想定実ラインの流速 5~6m/s に比べるとかなり低い。そこで、ドラム内に邪魔板を取り付け土砂を部分的に拘束したらどうなるかを調べた。この時の摩耗量が 図-3.5 に示されている。フリー状態に比べかなり高い摩耗量を示し相対速度もかなり高くなっていると考えられる。

しかしながら、この条件を本実験に採用すると試験時間の短縮は計れるものの、管内摺動流に近い条件にはほど遠くなるだろうと考えられる。このような理由で拘束条件下の摩耗については本報告では参考程度に取り扱うことにした。

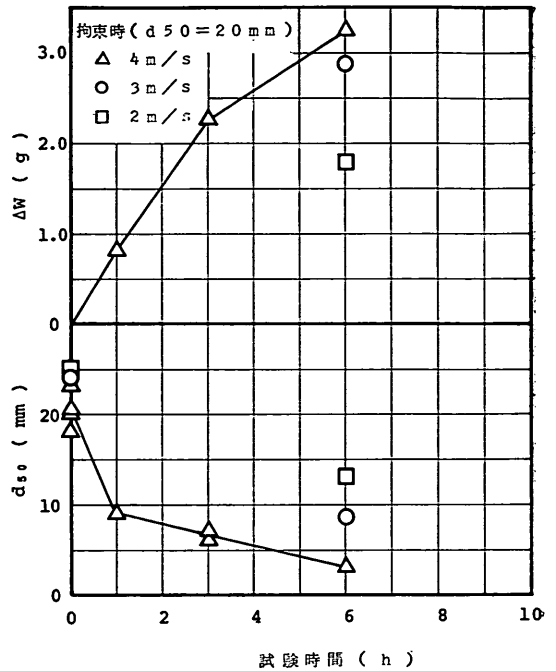


図-3.5 摩耗量と粒径の変化 (拘束時, $d_{50}=20$)

また、図-3.6 は細粒子 ($d_{50}=4\text{mm}$) に対する結果である。前述のように、この予備実験は粗大粒子に対する本実験後に行われたものであり、主として後述の土砂粉化状況を知ることに目的がある。したがって、ドラム周速についても 3m/s のみとなっている。なお、粗大粒子と細粒子について試験時間に対する変化をみると、粗大粒子については 1~3 時間の部分で摩耗量が高い傾向を示す。しかし、細粒子についてはほぼ一定の関係になっている。これは、土砂ナイフエッジの効果が粗大粒子の場合ほど大きい、初期の 1~3 時間で土砂の角がとれてしまうのではないかと考えられる。細粒子については、同種のナイフエッジをもっているのにかかわらず、角のとれ方がそう急激には生じていない。

(3) 土砂の粉化状況

土砂と接触する試験片が摩耗するということは、一方では土砂もかなり粉化することを意味する。さらに、今回のように土砂同志に自由に接触できるということは、壁面との摩擦以上に土砂の粉化が促進されると考えられる。

したがって、一回当たりの土砂使用時間が長すぎるとナイフエッジをもつように土砂を選択した意味が薄れる。

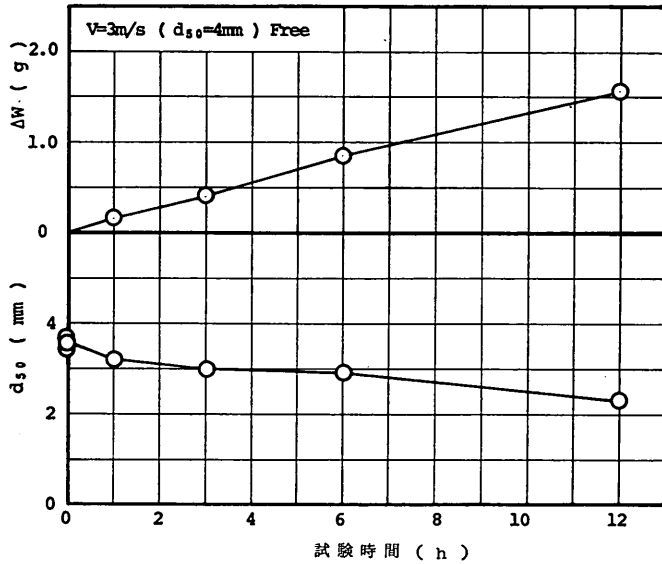


図-3.6 摩耗量と粒径の変化 (3m/s, フリー, $d_{50}=4$)

この意味で予備実験において土砂の粉化を時間的に調べ、適当な取替間隔を定めることは摩耗実験全体にわたって重要なポイントとなる。

図-3.2~図-3.4 に、粗大粒径土砂に対する平均粒径の経時変化をまた 図-3.6 に細粒径土砂に対する平均粒径の経時変化を示した。 $d_{50}=20\text{mm}$ については、初期の粉化が大きく徐々にゆるやかになっている。一方 $d_{50}=4\text{mm}$ の細粒径については全体的に粒径の変化がゆるやかで、初期において粉化が激しいというような傾向は見当らない。いずれにしても、摩耗量の経時変化と非常によく似ている。

粉化の様子を平均粒径のみでなく、粒度分布の変化で示したのが 図-3.7~図-3.9 である。粗大粒径土砂の粉

化の激しさが細粒径に比較してよくわかる。なお、図-3.8 は拘束時粗大粒子に対するもので、邪摩板上、下とあるのは最終的に邪摩板で分離された土砂の上側にある

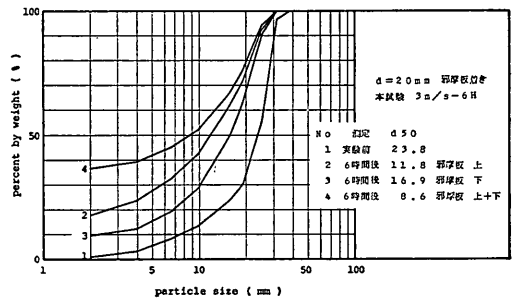


図-3.8 粒径分布の時間的変化 ($d_{50}=20$, 拘束時)

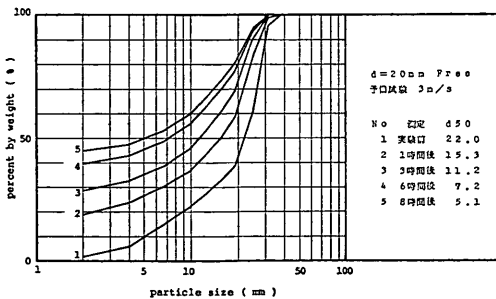


図-3.7 粒径分布の時間的変化 ($d_{50}=20$, フリー)

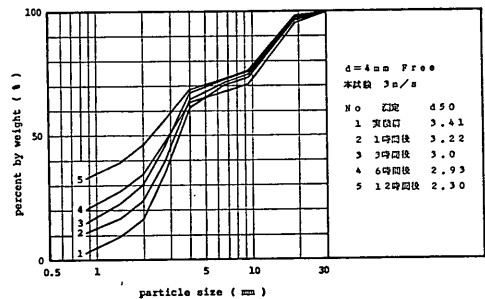


図-3.9 粒径分布の時間的変化 ($d_{50}=4$, フリー)

ものと、下側に残っているものの区別である。上下でかなり差があるが、この例以外のものでもこの傾向が逆の場合もあるので定性的にはっきりしたことはいえない。ただし上、下に対する測定には、流出スラリー分は含まれていない。

土砂の一回当りの取替えは粗大粒子の場合、粉化の状況から見る限り1時間～3時間が適当であるが、実験遂行上1日当りの摩耗実験時間が6時間位であるから、6、12、24時間……というインターバルの方が実験しやすい。また、1日に2回以上も取替えると摩耗時間も6時間取れなくなってくる。したがって、粗大粒子の場合、実験上可能な限り短くするというで6時間間隔で土砂を取替えることにした。

一方細粒子の場合、粉化がゆるやかで6時間取替えとすると、粗大粒子のケースと比べて実験条件に差がありすぎる。したがって、粗大粒子の倍の12時間取替えとした。

(4) ポリウレタンに関する予備実験

ポリウレタンは摩耗量が少しいし、吸水補正などを考えると実験が難しいため短時間で結果を出す予備実験においては使用しなかった。しかし、本実験中の吸水補正やポリウレタン摩耗重量測定上の誤差評価のため、空中での吸水率、時間当りの吸水割合あるいは蒸発割合などの基礎データを求めた。

空中放置状態でも、ポリウレタンは水中の水分を吸収している。今回使用したポリウレタンの強制乾燥状態をベースとした吸水率は、X、L、Q、Pの順に、それぞれ1%、0.7%、0.5%、0.5%であった。これは、最大吸水状態のほぼ30～40%にあたる。

吸水率の変化については、本実験結果(4ならびに5)で触れ、ポリウレタンの吸水、蒸発率が測定精度に与える影響については、6において述べる。

以上の予備実験結果から、本実験は次の要領で実施することにした。

ドラム周速	3m/s
投入土砂量	90kg
投入土砂水体积濃度	15%
使用水	自然海水
土砂取替間隔	6時間(細粒子12時間)
計測間隔	24時間

4. 粗大粒子に対する摩耗実験

粗大粒子として平均粒径(d_{50})20mmの碎石を使用

し、鋼材とポリウレタン4種について166時間(延べ51日間)にわたる摩耗実験を行った。実験は予備実験で決定した条件のもとに行い、この間8回に分けて摩耗量を測定し耐摩耗性倍数の算定ならびに摩耗面の観察を行った。

4.1 実験方法

(1) 実験要領

6時間ごとに土砂を取替え、24時間ごとに計測するという作業条件を予備実験で決定した。6時間という試験時間は1日間の摩耗試験時間であり、24時間は1週間の摩耗試験時間にあたる。

したがって、実験要領としては毎日土砂を取り替え、毎週一回ドラムより試験片を取外して計測することになる。

ドラムにはその壁面に試験片取付ホルダーが4箇所あり、各ホルダーには2枚の試験片が取付けられるので合計8枚の試験片が使用できる。粗大粒子に対する本実験においては、鋼材、ポリウレタンX、Qについて同種のを2枚ずつ使用し、ポリウレタンL、Pについては各1枚とした。ポリウレタン試験片は、それぞれダミー試験片を1枚もっており、試験片が海水に入っている時間と同一時間海水に浸せきし補正用とした。

1日の試験が終ると、ドラムから土砂を排出しポリウレタン試験片については夜間の蒸発を避けるため、ホルダーごと取り外して海水に浸せきした。この作業を1週間続行し、週の終りに計測を行った。計測時にはダミー試験片も海水から取出し試験片と同様重量、厚さを計測した。

また、ドラムの位置による摩耗の偏りを均一化するために、測定終了後の試験片位置は前回位置から変えるようにした。試験片のドラム取付位置は、図-4.1に示す通りであるから、8回のローテーションで初めの位置にもどる。本実験は166時間の実験中7回しか変更してはいないけれども総摩耗量は位置に対してはほぼ均一化されているといつてよい。

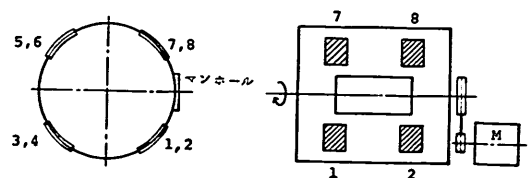


図-4.1 取付ローテーション要領図

(1) 測定項目

(1) 摩耗量

鋼材の摩耗量としては実験前後の重量減少量および板厚減少量の両方を求めた。重量については化学天びんを、板厚についてはマイクロメータを用いた。マイクロメータの測定箇所を 図-4.2 に示す。

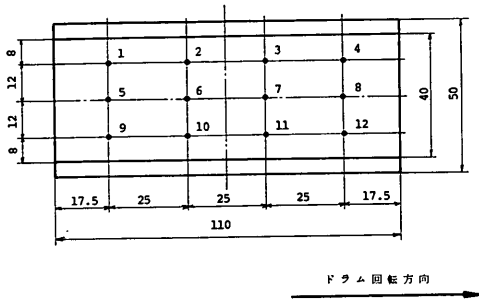


図-4.2 試験片の板厚測定箇所

ポリウレタンについても、化学天びんによる重量減少量とマイクロメータによる板厚減少量をもって摩耗量とした。しかしながら、吸水膨脹のために重量差あるいは板厚差がそのまま摩耗量とはならない。膨脹による板厚補正については適切な方法がないためマイクロメータによる差を摩耗量とした。

今回のポリウレタンの減少摩耗重量の補正に対する考え方は、摩耗条件にさらされないダミーを試験片と同じ時間海水に浸せきしておき、その間の試験片の吸水量をダミーの吸水率から計算して補正するものである。

このような補正方法には次のA法およびB法が考えられる。

$$A法 \quad \Delta W_A = W_0 \cdot \frac{W_{Na}}{W_{0a}} - W_N \quad (4.1)$$

ここで ΔW_A : 試験開始から N 回目の測定時までの摩耗量

W_0 : 試験開始時の試験片重量

W_{0a} : 試験開始時のダミー重量

W_{Na} : N 回目測定時のダミー重量

W_N : N 回目測定時の試験片重量

$$B法 \quad \Delta W_B = \sum_{n=1}^N \left(W_{n-1} \cdot \frac{W_{na}}{W_{n-1a}} - W_n \right) \quad (4.2)$$

ここで ΔW_B : 試験開始から N 回測定時までの摩耗量

W_{n-1} : $n-1$ 回測定時試験片重量

W_{n-1a} : $n-1$ 回計測時ダミー重量

A法とB法の相違は吸水補正を実験開始時の試験片重量に対して行うか、前回測定時の試験片に対して行うかにある。摩耗量が非常に大きい場合はB法の方がA法より精度が高くなるが、摩耗量が少ない場合はほとんど差がない。結果的にもあまり差がなかったのでデータ整理においてはA法を使用した。

また、補正後の重量減少量から式(4.3)により計算した換算板厚減少量を用いて鋼材との比較を行った。

$$\Delta t = \Delta W / \rho A \quad (4.3)$$

ここで Δt : 換算板厚減少量 (mm)

ΔW : 重量減少量 (g)

ρ : 試験片の密度 { 鋼材 0.00787 g/mm³
ポリウレタン 0.0012 g/mm³

A : 摩耗に關与する面積 4400 mm²

鋼材の摩耗量をベースとし、これに対するポリウレタンの摩耗量を評価するために、式(4.4)から耐摩耗性倍数を算出した。

$$R = (\Delta t_p / \Delta t_s)^{-1} \quad (4.4)$$

ここで R : 耐摩耗性倍数

Δt_p : ポリウレタンの換算板厚減少量

Δt_s : 鋼材の換算板厚減少量

なお、同一種の試験片が2枚ある場合の摩耗量は、これの算術平均値を用いている。

(2) 摩耗面の観察

摩耗試験後の試験片表面の観察は、目視ならびに表面粗さの測定によって行った。表面粗さの測定箇所を 図-4.3 に示した。鋼材試験片について長手方向の測定を行っていないのは、試験片がドラム曲率に合わせて加工してあるため粗さ試験機による測定が不可能だったためである。

4.2 実験結果

(1) ポリウレタンの吸水と膨脹

実験期間中のポリウレタン(ダミー)の吸水率経時変化を 図-4.4 に示すが、浸せき日数30日以後は飽和する傾向にある。逆にいえば、30日以上経過しないと飽和しないのでポリウレタンの吸水速度はかなり遅いと考えられる。この吸水率はポリウレタンの種類によって若干異なり、最も小さいのはQとPであり1.7~1.8%である。最も大きいのはXの約2.3%となっている。 図-4.4 に示す吸水率 p は、実験開始前の強制乾燥重量を用いて、

$$p = \frac{W_{wa} - W_{aa}}{W_{aa}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.6)$$

土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

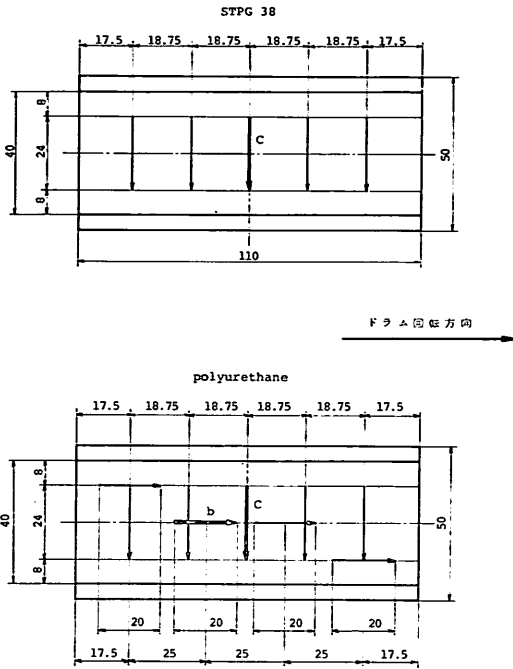


図-4.3 表面あらさ計測箇所と方向

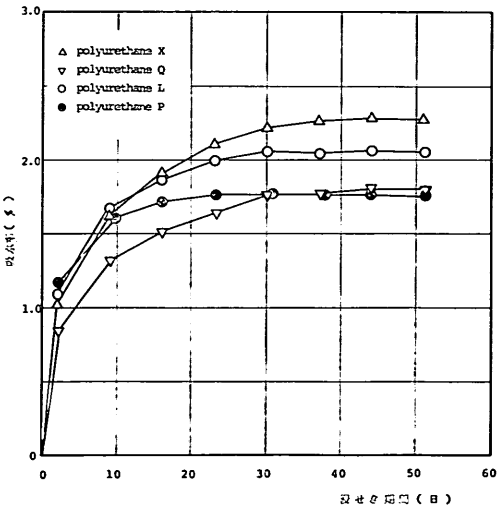


図-4.4 ポリウレタンの吸水率変化 (粗大粒子実験)

ここで W_{wa} : 浸せき後のダミー重量
 W_{da} : 強制乾燥後のダミー重量
 から算出した。

図-4.5 はマイクロメータで測定したダミーの板厚変

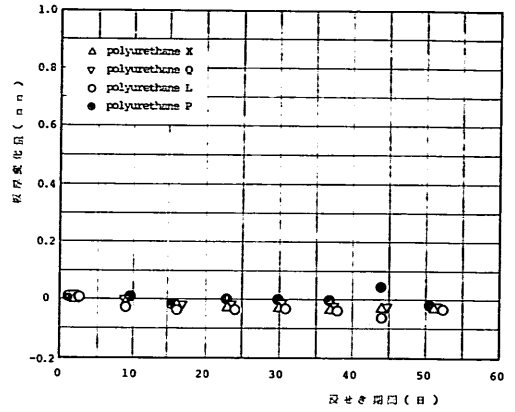


図-4.5 ダミー試験片の板厚変化 (粗大粒子実験)

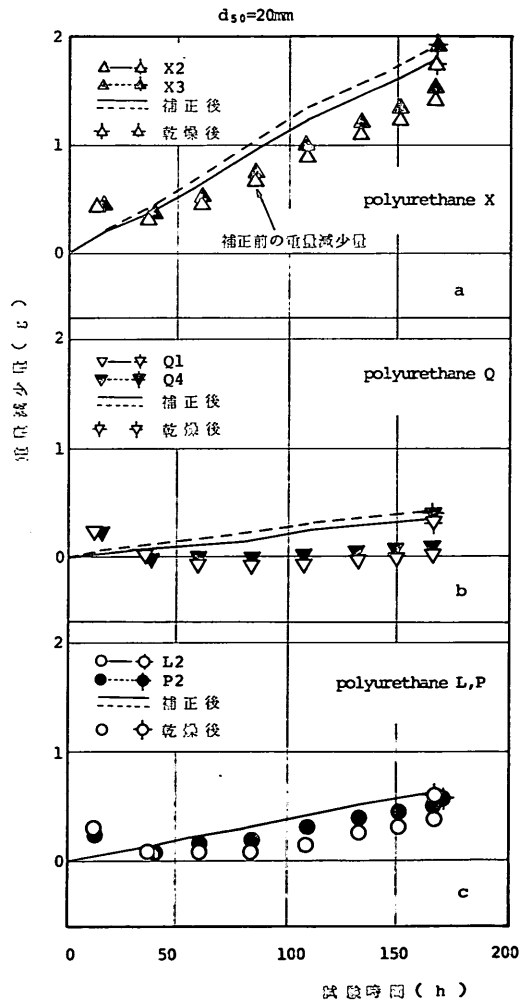


図-4.6 ポリウレタンの摩耗量の経時変化 ($d_{50}=20$)

化を示しているが重量のように明確な経時変化は見られない。ただし、この原因の大部分は微小な変化をマイクロメータ（精度 1/100 mm）のように化学天びんに比べはるかに精度の悪いもので弾性体を測定したことにあると思われる。したがって、マイクロメータによる試験片の板厚測定値は補正していない。

(2) 重量減少量

ポリウレタンの摩耗重量減少量の経時変化を 図-4.6 に示す。ダミーによる吸水補正をしない場合は、摩耗することにより重量が増加するという非現実的傾向が見られるが、補正することによって摩耗量が検出されており、試験時間の経過とともにほぼ直線的に増加している。また、実験前後の乾燥炉における強制乾燥による重量減少量を図中に示したが、補正した重量減少量と良く一致しており、本実験で行った吸水量の補正方法が妥当であったことを示している。

ポリウレタンの補正重量減少量から求めた換算板厚減少量の変化を、鋼材の換算板厚減少量とともに 表-4.1 ならびに 図-4.7 に示した。なお、表-4.1 中、鋼材試験片ならびにポリウレタン試験片 X, Q についてはそれぞれ 2 枚の試験片を使用したがかここにはその平均値を示している。2 枚の試験片の差は 図-4.6 に示すようにほとんどなく平均することに問題はないだろう。

図-4.7 中、鋼材の換算板厚減少量は非常にきれいな直線変化を示しているが、このことより 166 時間にわたる本実験中、実験条件、たとえばドラム回転数、土砂量、濃度などが常に一定に保たれていたことがわかる。

次に、ポリウレタンの耐摩耗性倍数の経時変化を 図-4.8 に示す。最も耐摩耗性の高いのはポリウレタン Q の

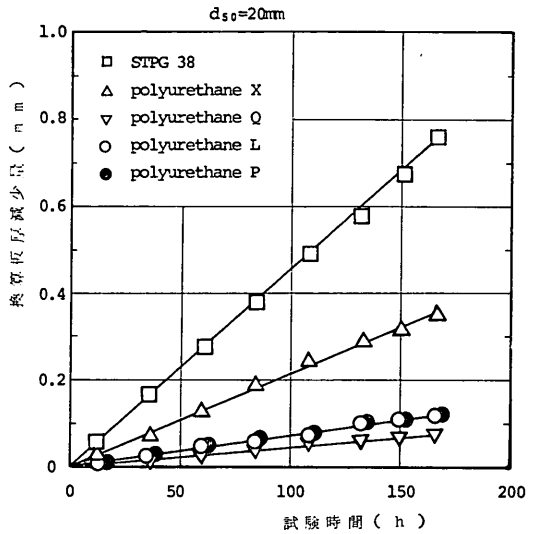


図-4.7 換算板厚減少量の経時変化 ($d_{50}=20$)

9~10 倍であり、次にポリウレタン L, P が 6 倍程度となっている。最も低い耐摩耗性を示すのはポリウレタン X の 2 倍であり、同じポリウレタンでも種類が異なれば 5 倍近くの差が耐摩耗性にあるということがわかる。

(3) 測定板厚減少量

マイクロメータによる板厚の直接測定値から求めた摩耗による板厚減少量の変化を 図-4.9 に示す。粗大粒子のため、ポリウレタンの摩耗も比較的大きく、図-4.7 の換算板厚減少量の変化とほぼ同様の傾向を示している。この両者の関係を比較したのが、図-4.10 であり、良く一致している。

表-4.1 換算板厚減少量（粗大粒子実験）

単位 (mm)

試験時間 (h)	鋼材 (STPG 38)	ポリウレタン				
	S	X	Q	L	P	
12	0.0560	0.0301	0.0100	0.0086	0.0074	
36	0.1629	0.0732	0.0184	0.0273	0.0242	
60	0.2712	0.1281	0.0283	0.0462	0.0482	
80	0.3820	0.1898	0.0376	0.0612	0.0630	
108	0.4864	0.2457	0.0534	0.0787	0.0865	
132	0.5800	0.2896	0.0634	0.0996	0.1004	
150	0.6713	0.3189	0.0690	0.1112	0.1100	
166	0.7584	0.3523	0.0748	0.1210	0.1190	
166 (乾燥前後差)	—	0.3493	0.0659	0.1116	0.1061	

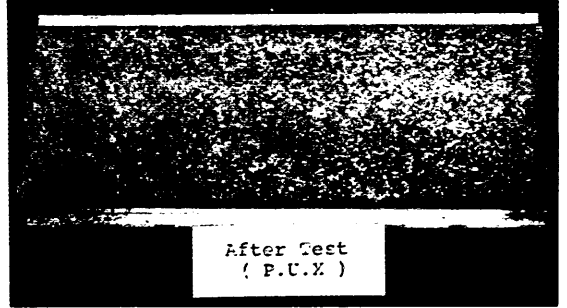
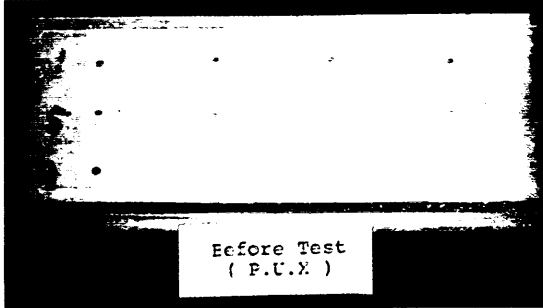
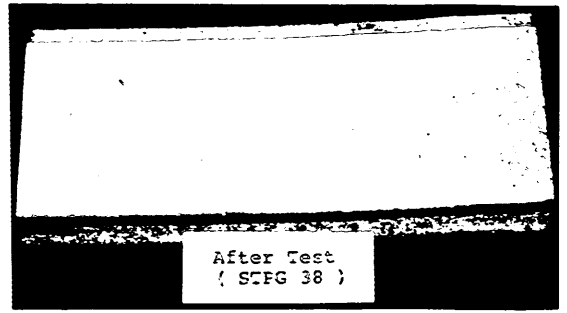
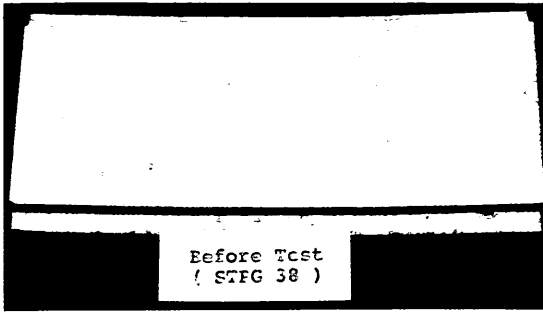


写真-4.1 粗大粒子実験前後の試験片表面 (STPG 38, ポリウレタン X)

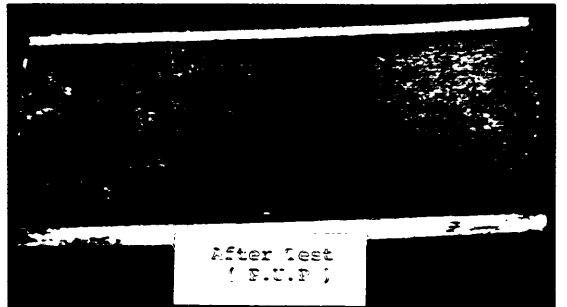
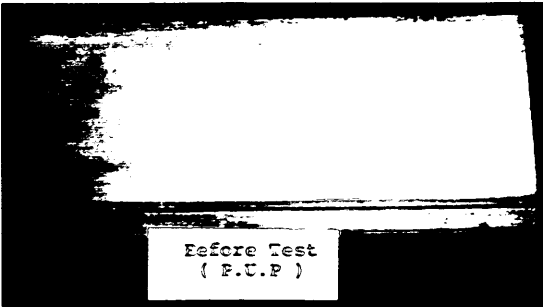
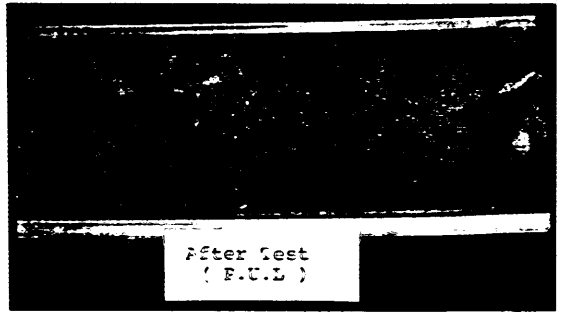
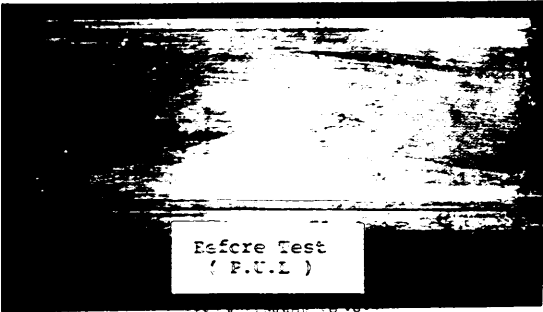
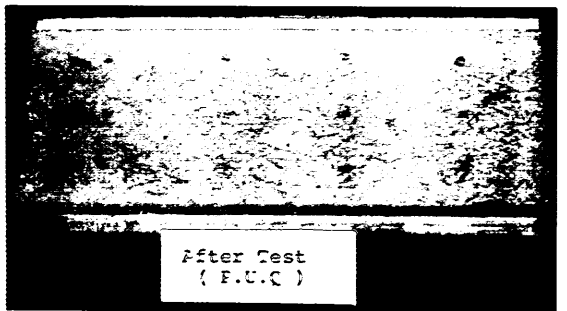
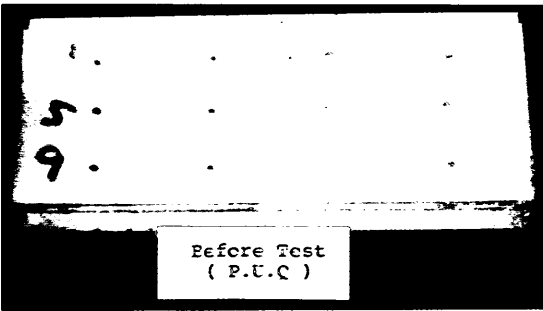


写真-4.2 粗大粒子実験前後の試験片表面 (ポリウレタン Q, L, P)

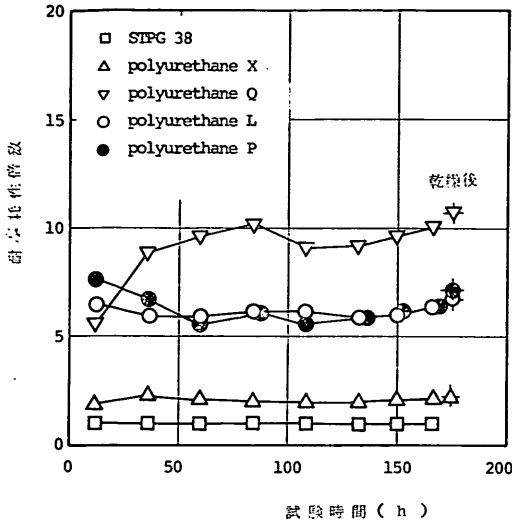


図-4.8 ポリウレタンの耐摩耗性倍数の変化 ($d_{50}=20$)

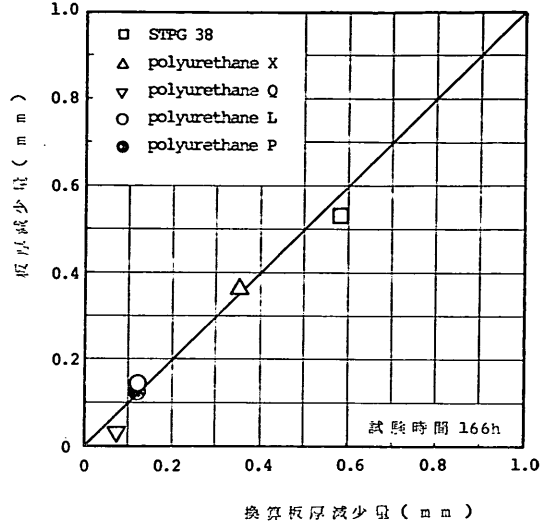


図-4.10 換算板厚と測定板厚の関係 ($d_{50}=20$)

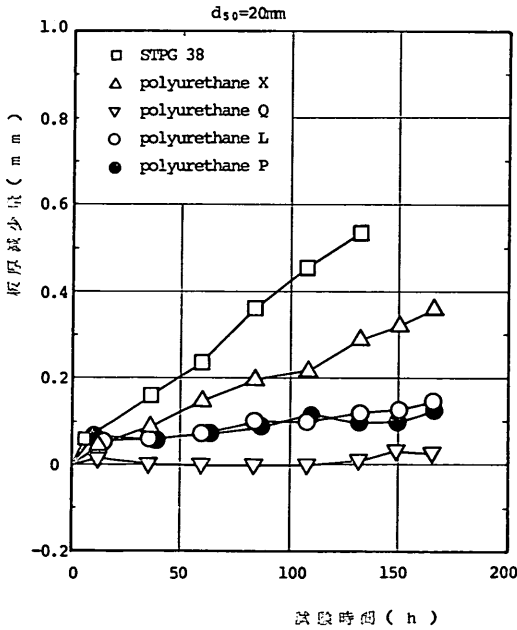


図-4.9 測定板厚減少量の変化 ($d_{50}=20$)

しかしながらこの一致は実験最終の値によるもので図-4.9に示すように摩耗量の小さい範囲ではかなり不一致があるように見受けられる。したがって、途中計測を行わない現地テストのような場合はこの程度の総摩耗

量があれば、吸水膨張の補正をしなくてもマイクロメータによる計測で十分測定可能であるといえるだろう。

(4) 摩耗面の観察

a) 目視観察

摩耗面の粗さは、鋼材試験片よりもポリウレタン試験片の方が大きいように見受けられる。そしてポリウレタンの種類による摩耗面の相違はほとんど認められない。

目視観察の結果を表-4.2に、摩耗面の外観写真を実験前後について、写真-4.1ならびに写真-4.2に示す。

表-4.2 試験片表面の目視観察結果 (粗大粒子実験)

材 料	実 験 前	実 験 後
鋼材試験片	・機械研磨の跡が全面にある。	・研磨の跡は消失し細かく均一な凹凸を生じている。
ポリウレタン試験片	・平滑で鏡面のような光沢を有する。	・光沢を失ない細かい凹凸がみられる。 ・所々に長さ数 mm の引掻痕が発生している。引掻痕には統一した方向性はない。

b) 表面粗さ曲線

表面粗さを、万能表面形状測定器 (SE-3C 型) を用い

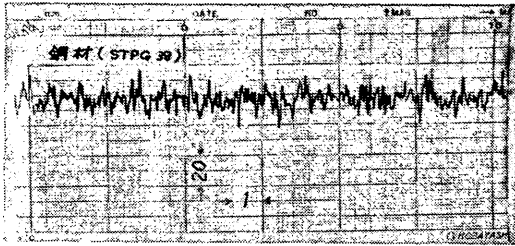


図-4.11 鋼材試験片の表面粗さ曲線 (c 位置, $d_{50}=20$)

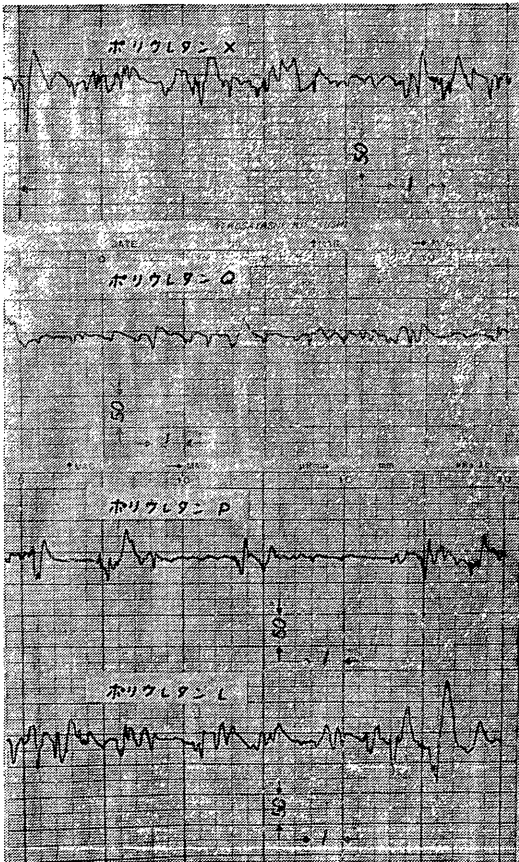


図-4.12 ポリウレタン試験片の表面粗さ曲線 (b 位置, $d_{50}=20$)

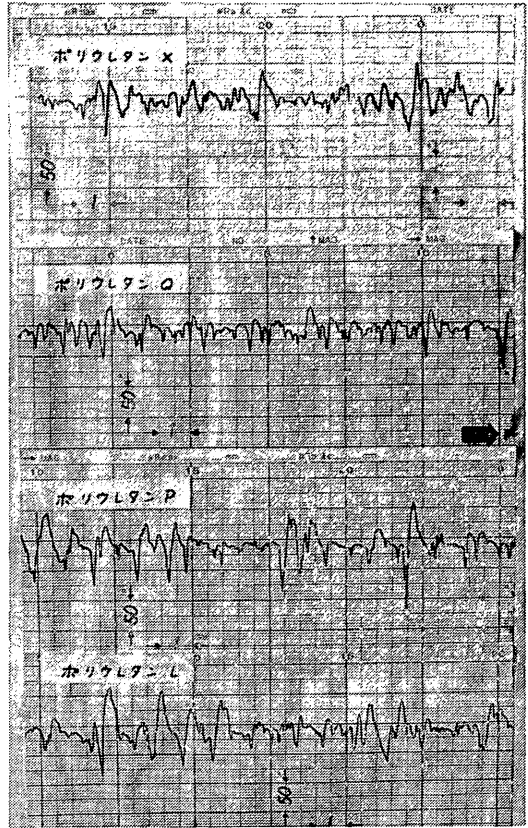


図-4.13 ポリウレタン試験片の表面粗さ曲線 (c 位置, $d_{50}=20$)

て測定した。図-4.11～図-4.13 に示した粗さ曲線はその結果の一例であり、図-4.3 に示す測定箇所のうち b, c 方向 (鋼材については c 方向のみ) についてのものである。鋼材試験片の方がポリウレタンに比べ粗さ曲線の高さが小さく、ピッチも短いようであるが、ポリウレタ

ン試験片表面はピッチが長く、しかも高さの大きい山谷が見られる。これは目視観察にも見られる引掻傷のようなものではないかと思われる。

なお、粗さの H_{max} や形状係数等については 6 において述べる。

5. 細粒子に対する摩耗実験

細粒子として平均粒径 (d_{50}) 4 mm の砕石を使用し、鋼材とポリウレタン 4 種について 264 時間 (延べ 104 日間) にわたる摩耗実験を行った。

5.1 粗大粒子実験と異なる設定条件

この細粒子に対する摩耗実験は、粒子径の違いとそれにとともなう摩耗量の減少から実験時間、計測間隔そして土砂取替間隔が長くなったという点を除いて、粗大粒子に対する実験とほとんど同じ要領で行われた。

したがって、ここでは上記も含めて粗大粒子に対する

実験と異なる点のみを述べる。

(1) 土砂取替および計測間隔

土砂の取替間隔は予備実験で決定した 12 時間毎であり、粗大粒子の場合の 2 倍とっている。また計測間隔は、初期の 2 回計測までは 24 時間毎に行ったが、ポリウレタンの摩耗量が少く、3 回目計測からは 48 時間毎 (2 週間毎) とした。

(2) 試験片

鋼材、ポリウレタンともに粗大粒子に対するものと同種ではあるが新しいものを使用した。なお、ダミーについても同様に試験片と吸水、蒸発特性の近いものをペアで組合わせており、これも新しいものである。

摩耗実験においては鋼材試験片のみを 2 枚、ポリウレタンについては、各種 1 枚とした。また、試験片の取付位置ローテーションについては試験片の数が減ったため、図-4.1 の 2 箇所鋼材のダミーを使用し、左右方向のローテーションは行わなかった。したがって、4 回目の計測時にもとの位置にもどることになる。

(3) 測定項目

細粒子実験に対する測定項目、測定方法、補正方法等はすべて粗大粒子に対する実験と同じである。

5.2 実験結果

(1) ポリウレタンの吸水と膨脹

図-5.1 に、ポリウレタンダミーの吸水率の変化を示

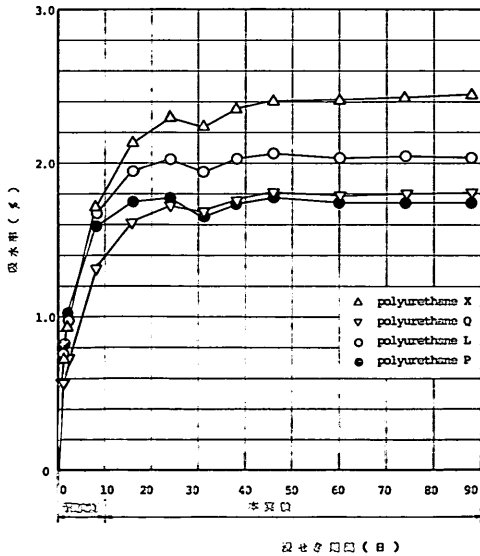


図-5.1 ポリウレタンの吸水率変化 (細粒子実験)

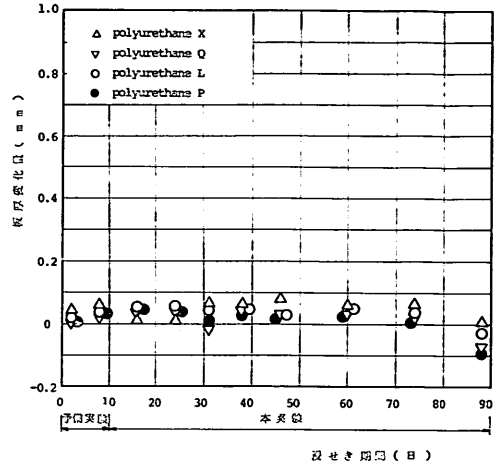


図-5.2 ダミー試験片の板厚変化 (細粒子実験)

す。この場合も飽和するのに 30 日程度を必要としており、飽和後の吸水率も粗大粒子の場合とほとんど変わらない。この場合の吸水率も、細粒子実験前に試験片およびダミーの強制乾燥を行い、式 (4.6) により計算したものである。

また、ダミーのマイクロメータによる板厚の変化を図-5.2 に示すが、図-4.5 の粗大粒子実験に対するものと大差ない。

(2) 重量減少量

ポリウレタン試験片の摩耗重量減少量を図-5.3 に示す。ポリウレタン X については比較的摩耗量も大きく、補正が効果的に行われているが、Q, L, P については摩耗量が小さいため補正しきれないところが多い。全体の実験時間とともに 1 回当りの計測インターバルが短いのかも知れない。

次に、換算板厚減少量の経時変化を表-5.1 ならびに図-5.4 に示した。鋼材試験片についてはほとんど直線的に変化し、全実験期間中における摩耗条件の安定性を示しているが、264 時間の摩耗量で、粗大粒子に対する 166 時間後の摩耗量 (図-4.7) とほぼ同じ量となっている。粒子径の違いによる摩耗量の違いがかなり大きいということがわかる。

ポリウレタンについては、X がかなり大きな摩耗量を示しているが、Q, L, P については非常に少なく、データの信頼性がうすい。すなわち今回行ったような補正も摩耗量がこの程度に小さい場合にはなかなか補正しきれないことがわかる。

このような点を反映して、図-5.5 に示す耐摩耗性倍数もポリウレタンQ, L, Pについては大きく変動している。ポリウレタンXについてはほぼ安定しており、最終値で約 14 倍の耐摩耗性倍数となっているが、他のポリウレタンについては安定した値が得られない。そこで

表-5.1 の乾燥重量差による換算板厚減少量から耐摩耗性倍数を出してみると、Q, L, Pについては、それぞれ 65 倍, 41 倍, 51 倍となっている。

なお、理論的には実験前後の乾燥重量差が最も信頼できると考えられるにもかかわらず本報告では参考程度に

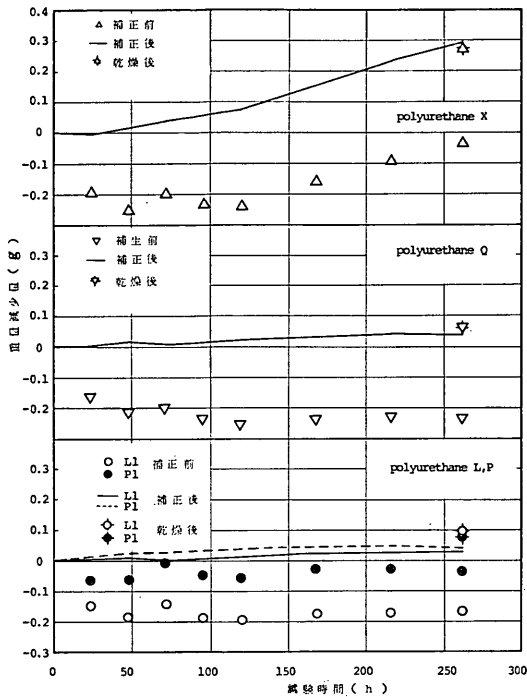


図-5.3 ポリウレタンの摩耗量の経時変化 ($d_{50}=4$)

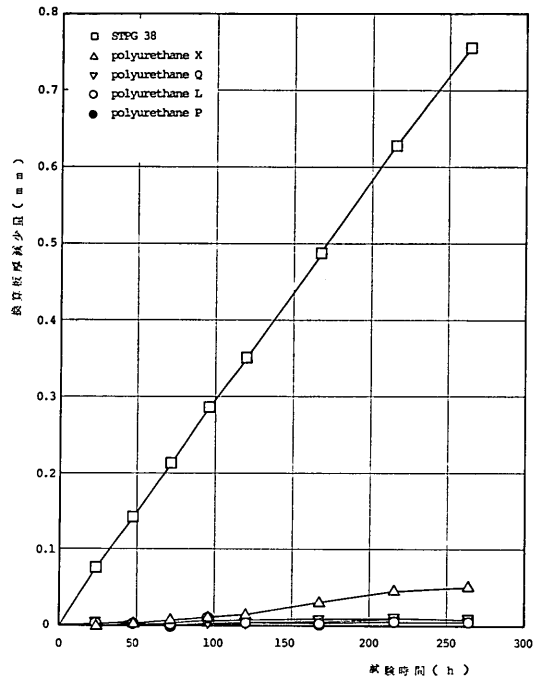


図-5.4 換算板厚減少量の経時変化 ($d_{50}=4$)

表-5.1 換算板厚減少量 (細粒子実験)

単位 (mm)

試験時間 (h)	鋼材 (STPG 38)	ポリウレタン				
	S	X	Q	L	P	
24	0.0768	-0.000145	0.000309	0.00151	0.00269	
48	0.1421	0.00237	0.00267	0.00174	0.00473	
72	0.2125	0.00650	0.00138	0.000578	0.00496	
96	0.2865	0.0106	0.00206	0.000996	0.00682	
120	0.3522	0.0146	0.00434	0.00252	0.00744	
168	0.4865	0.0297	0.00564	0.00428	0.00848	
216	0.6272	0.0446	0.00826	0.00542	0.00871	
264	0.7546	0.0560	0.00737	0.00564	0.00775	
264 (乾燥前後差)	—	0.0517	0.0116	0.0185	0.01470	

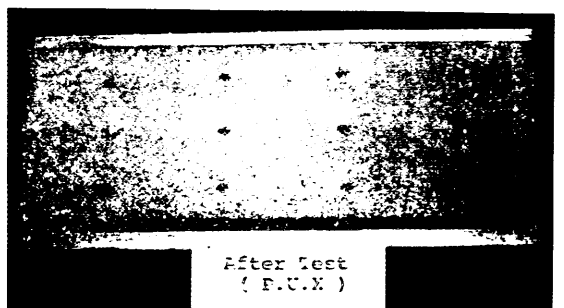
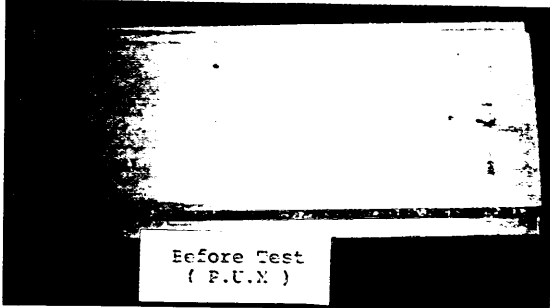
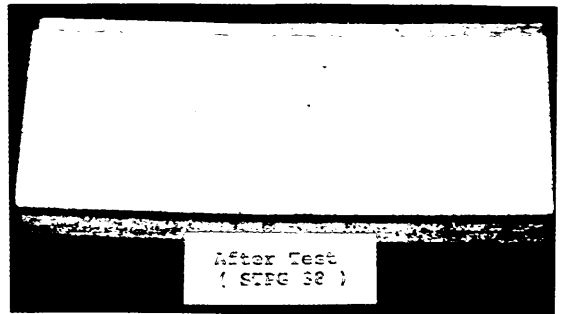
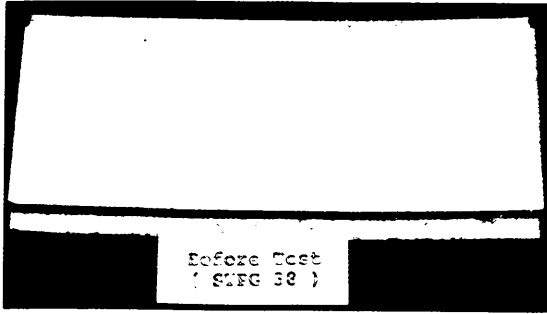


写真-5.1 細粒子実験前後の試験片表面 (STPG 38, ポリウレタン X)

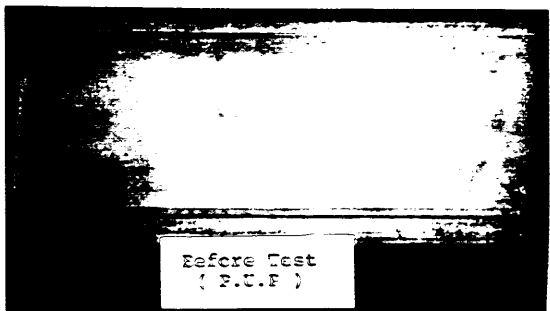
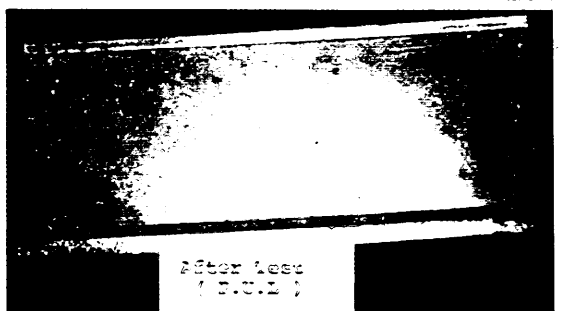
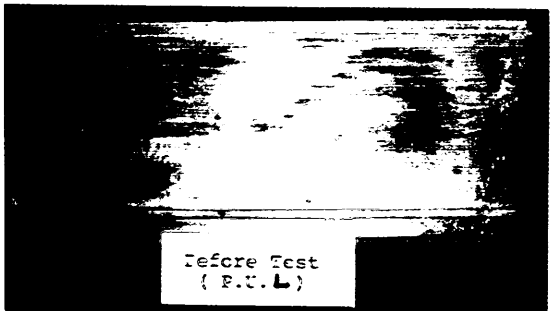
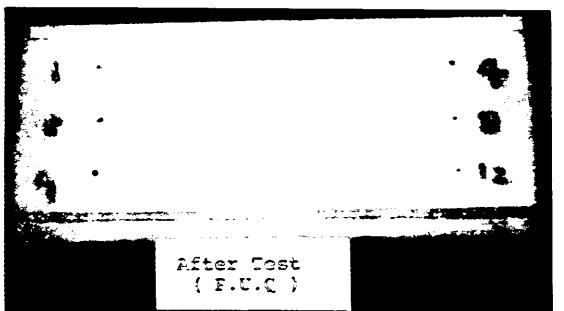
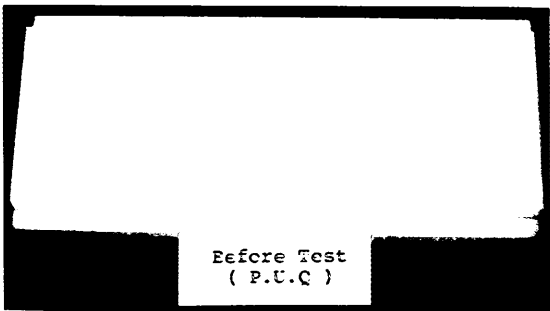


写真-5.2 細粒子実験前後の試験片表面 (ポリウレタン Q, L, P)

土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

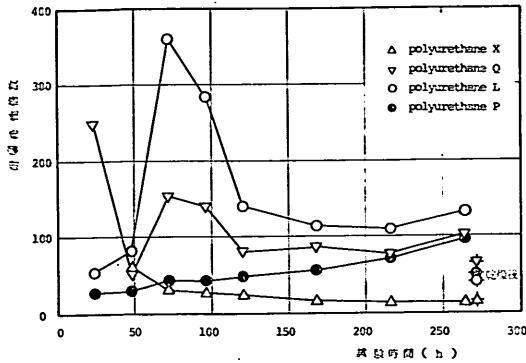


図-5.5 ポリウレタンの耐摩耗性倍数の変化 ($d_{50}=4$)

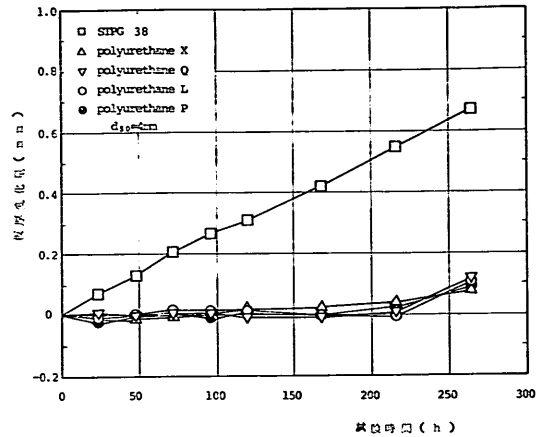


図-5.6 測定板厚減少量の経時変化 ($d_{50}=4$)

取り扱っているのは、強制乾燥させるにしてもポリウレタンは吸水率を飽和させると同じように時間がかかり、このため実験の都合上不完全乾燥のまま終了している場合が多いためである。

(3) 測定板厚減少量

図-5.6 にマイクロメータによる測定板厚の減少量変化を示しているが、粗大粒子の場合のパラッキはあるものの換算板厚減少量の変化にほぼ近い傾向を示していたのに比べると、この場合はポリウレタンX以外はほとんど信頼できる変化とはいえない。

したがって、粗大粒子実験結果のような換算板厚減少量と測定板厚減少量の比較図は示さなかった。なお、鋼材についてはほぼ一致している。

(4) 摩耗面の観察

a) 目視観察

摩耗面の粗さはポリウレタンXと鋼材が粗く、他は表

面に浅く小さな傷が見受けられる。これは目視観察の面から、図-5.4の傾向を裏付けるもので、鋼材とポリウレタンX以外は摩耗が非常に小さかったことを物語っている。目視観察結果を表-5.2に、摩耗面の外観写真を写真-5.1ならびに写真-5.2に示す。

b) 表面粗さ曲線

図-5.7~図-5.9に、表面粗さ曲線の一例を鋼材とポリウレタンについて示した。測定箇所は粗大粒子実験結果と同じく図-4.3のb, c方向である。

6. 結果の考察

6.1 水平ドラム方式による鋼材の摩耗特性

本実験においては、ライニング材としてポリウレタンがどの程度の耐摩耗性をもっているかを調べるのが主

表-5.2 試験片表面の目視観察結果 (細粒子実験)

材 料	試 験 前	試 験 後
鋼 材 試 験 片	・機械研磨の跡が全面にある。	・研磨の跡は消失し細かく均一な凹凸を生じている。
ポリウレタン X	・平滑で鏡面のような光沢を有する。	・光沢を失ない細かく均一な凹凸(鋼材よりもやや深い)を生じている。
ポリウレタン Q		・光沢はほとんど変化なし。
” L		・長さ4mm以下の浅く細い傷が発生している。ほとんどの傷がドラムの傷がドラムの回転方向に向いている。
” P		・傷の量はポリウレタンL, Pはほぼ同量でポリウレタンQはポリウレタンL, Pの約半分である。

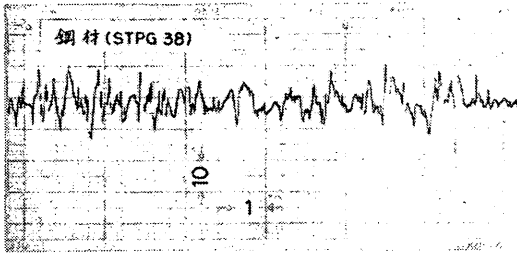


図-5.7 鋼材試験片の表面粗さ曲線
(c位置, $d_{50}=4$)

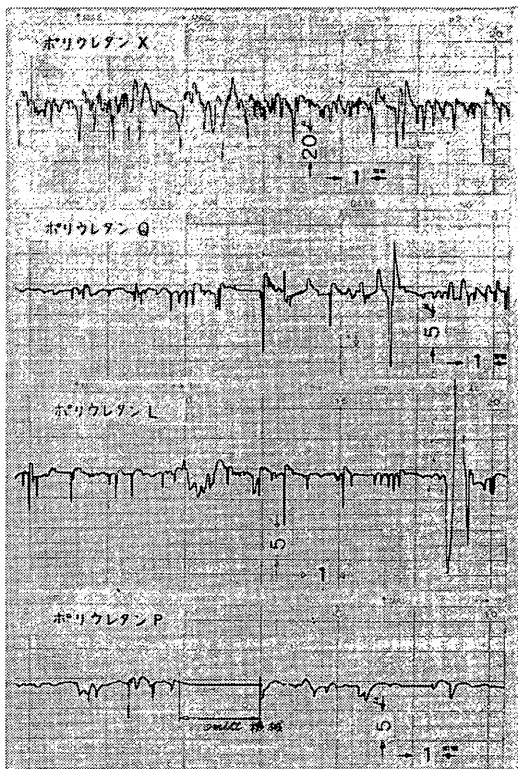


図-5.8 ポリウレタン試験片の表面粗さ曲線
(b位置, $d_{50}=4$)

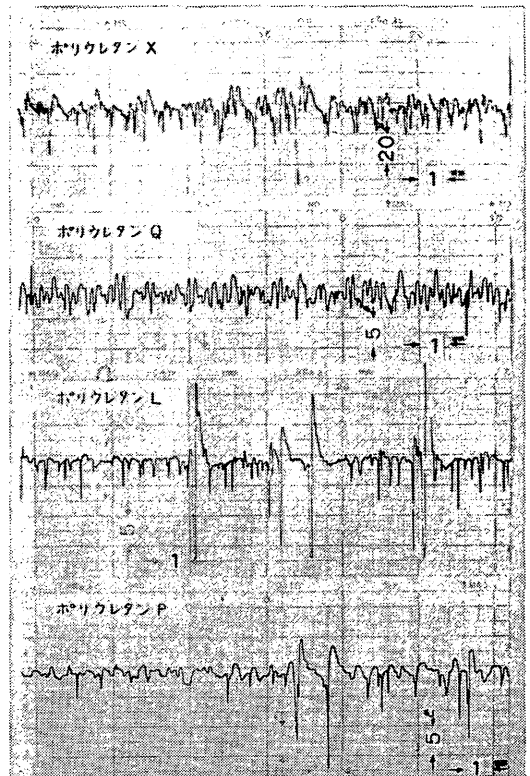


図-5.9 ポリウレタン試験片の表面粗さ曲線
(c位置, $d_{50}=4$)

要な課題であり、基準として比較的摩耗データの多い鋼材を運んでいる。すなわち、一定の条件下で鋼材の摩耗量との比較が量的に把握できれば、パイプライン設計上最小限の目的は達せられる。

しかしながら、この場合においても摩耗試験機を含めた与えるべき摩耗条件が、今回想定したパイプ内の大粒径土砂による摺動流れという条件を大きく外れることは

実験成果の適用範囲をかなり制約することになる。今回使用した水平ドラム式摩耗試験機は、この点も考慮して開発されたものであるが管内の土砂混合水による摩耗機構はかなり複雑であり、摩耗条件が摺動流れをどの程度代表できたのかを議論することはかなり困難である。

第2章でも触れたように本試験装置の特徴は、水平軸を中心として回転するドラム壁面にテストピースを装着し、テストピース自体が壁面を構成している点と、壁面に対し土砂の自重による面圧が重力方向に作用し、しかも土砂の自由度をある程度現実の流れに近づけている点にある。このような特徴はテストピースに対する土砂の衝突を極力抑え、土砂との摩擦摩耗に主眼をおいているためであり、壁面が固定された管内流れとは逆な接触の仕方をしていとはいえ、従来の摩耗試験機に比べるとかなり現実の摺動摩耗機構に近いものといえよう。

このような条件下における鋼材の摩耗量を実際のパイプラインで得られたデータと比較することは前述のよう

に流れの相似性において大きな問題点をかかえている。しかしながら、これを摺動流れに限定し、比較すべき実際データも管底部の摩耗量を採用し、しかも沈殿しやすい大粒径土砂を主たる対象とすればあながち無理な比較とはいえないだろう。そこで、今回得られた鋼材に対する摩耗量を通過土量当りに換算し、現地データとともにプロットし比較検討してみる。

通過土量は、図-6.1-a に示すようなモデルを設定し、パイプ内に水が充滿して水平ドラムの軸方向に流動すると仮定した。したがって、この流れは同 図-b に示すごとく非連続輸送であり、平均化すると

$$Q_s = a \cdot l_s \left(\frac{u}{V} \right) \left(\frac{2\pi R}{V} \right) \quad (6.1)$$

となる。 u は、ドラム壁と土砂の相対速度であり、実際

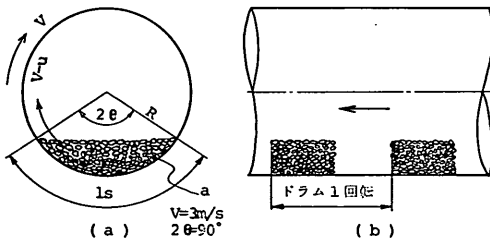


図-6.1 通過土量計算モデル

は u/V は 1 以下であるが $u=V$ として計算した。実際の相対速度は次項で触れるようになり小さいと予想される。

粒径 $d_{50}=20\text{mm}$ と $d_{50}=4\text{mm}$ の本実験における鋼材の摩耗量を、実際の浚渫データとともに 図-6.2 に示した。両方のデータとも、かなり低い値となっているが、これは相対速度 u をドラム速度と同一としたため、一回転当りの接触距離 (式 (6.1) 中の $l_s(u/V)$) が大きく計算され、結果的に通過土量が大き目になっていることも一因であろう。

$$\Delta t \propto d_{50}^{0.75} \quad (6.2)$$

で表わされる¹¹⁾。これに比べると、今回の 20mm 粒径に対するデータはかなり低く、粒径に対する影響が現地データに比べ小さいという印象を与えている。

摩耗に関する粒径の影響が、式 (6.2) で表わせるということに対して今のところ裏付けとなる理論はないが、粒子の管壁衝突エネルギーにおける個々の質量の違いによるという説もある。実際の管内摺動流は、図-6.1 のモデルのように完全にスライドする訳ではなく回転、跳躍、浮遊などのいりまじったもので衝突摩耗も当然含んでいる。これに反し、今回の実験条件はむしろ完全摺動に近い形態であり衝突摩耗の生じる可能性は小さい。このような理由で本実験データの粒径による影響が少ない

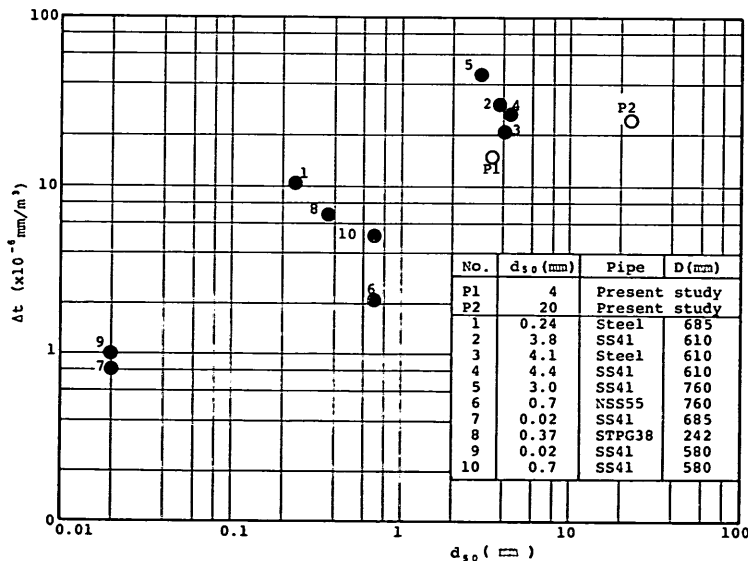


図-6.2 鋼材摩耗量と現地データとの比較

とも考えられる。

さらに、本実験中の粉化による微粒子発生量の違いも粗大粒子に対する摩耗量を少なくさせている一因であろう。表-6.1 は、使用上砂の供給時および回収時の土砂性状を示すものである。表中流出スラリーは、回収箱からオーバーフローし海水とともに流れさった量である。これから、 $d_{50}=20\text{mm}$ の場合には $d_{50}=4\text{mm}$ の場合に比べ倍以上の微粒子が発生している。この微粒子により海水濃度がみかけ上増加し、テストピースに対する土砂の面圧を減少させる効果もあるだろうし、微粒子自体が保護フィルム効果を果たし摩耗量を低減させ得ることは充分妥当な解釈であろう。機械部品等の摩擦摩耗においても、繰返し試験の場合摩擦面から削り取られた摩耗粉が

保護効果をもち摩耗量を減少させるという事実も報告されている¹²⁾。

6.2 相対速度と摩耗に対する影響

ドラム内の土砂の挙動は、図-2.4 で説明したようにかなり複雑であり、相対速度を求めることは非常にむづかしいが、本実験では観察による共回り速度の計測、邪摩板による鋼材摩耗量の計測等から相対速度と摩耗の関係を検討してみた。

邪摩板を使用してドラム内土砂の運動を拘束すると、ドラム壁面と土砂との相対速度はドラム周速に近づいてくる。したがって、ドラム速度を種々に変更し、その時の摩耗量を測定すれば速度に対する摩耗量の変化がわかると考えた。図-6.3 の黒印は邪摩板を使用した時の摩

表-6.1 ドラム内微粒子発生量の差

粒 径 d_{50} (mm)	20	粒 径 d_{50} (mm)	4
ドラム周速度 V (m/s)	3	ドラム周速度 V (m/s)	3
試 験 時 間 (h)	6	試 験 時 間 (h)	6
1 回 当 り 供 給 土 量 (kg)	91.38	1 回 当 り 供 給 土 量 (kg)	86.99
供給土砂中 2mm アンダー (kg)	1.15	供給土砂中 0.85mm アンダー (kg)	2.44
回収土砂中 2mm アンダー (kg)	5.70	回収土砂中 0.85mm アンダー (kg)	9.48
流 出 ス ラ リ (kg)	34.24	流 出 ス ラ リ (kg)	15.16
供給土量に対する流出スラリー (%)	37.50	供給土量に対する流出スラリー (%)	17.40

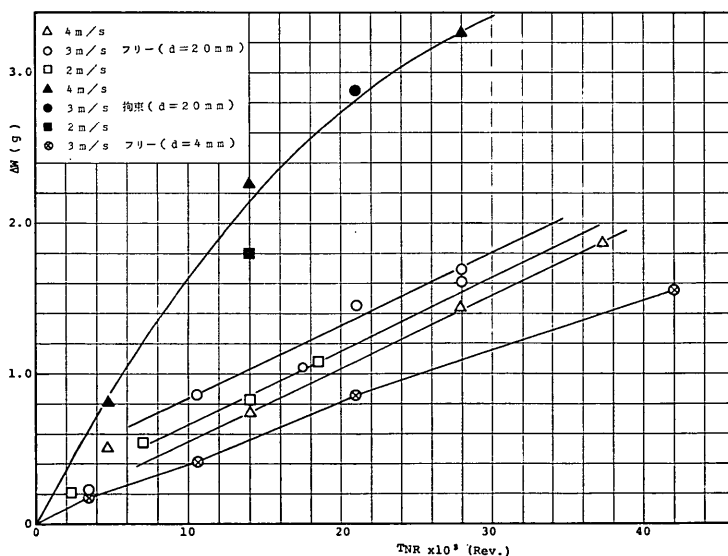


図-6.3 ドラム総回転数に対する鋼材摩耗量の変化

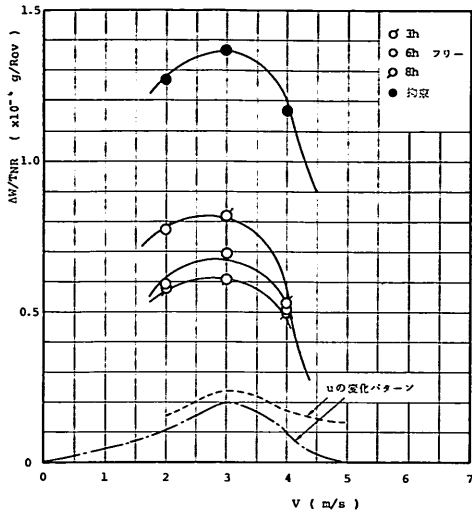


図-6.4 ドラム周速に対する1回転あたり摩耗量

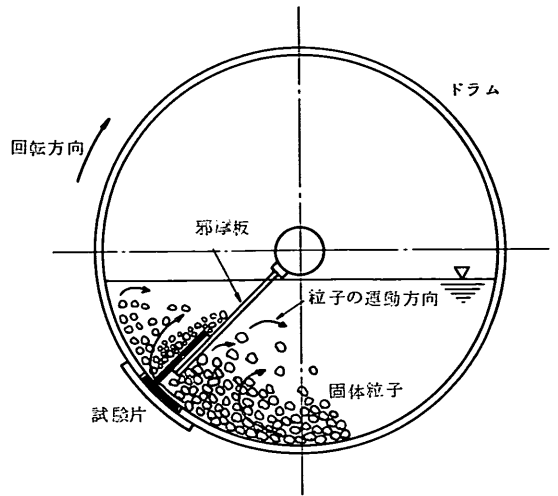


図-6.5 拘束時のドラム内土砂の挙動モデル

耗量を総回転数に対してプロットしたものであるが、ほとんど速度に対する影響が見られない。

そこで、さらに詳しく調べるために1回転当りの摩耗量をドラム速度に対してプロットすると図-6.4に示すように $V=3\text{m/s}$ 付近でピークをもつ変化が得られた。これは従来の回転式摩耗試験機による結果とかなり異なっている。ドラム壁と土砂との間にすべりがあるにせよ、それがドラム周速と一定の関係にあるならば回転式摩耗試験機や平板の土砂による摩耗試験の結果^{13,14)}からして、図-6.4の傾向は右上がりとなるはずである。これが実験誤差であるのか、それとも定性的なものかを確認するためにフリー条件についてのデータを同図に示し比較してみると、3時間、6時間および8時間値ともほとんど同じ傾向を示し、ピークも拘束時と同様にドラム周速が 3m/s の付近に表われている。しかし、摩耗量としては拘束時がかなり高くなっている。

このようなことから、拘束時には摩耗量は増加するけれどもドラム周速に対する変化は、フリーな場合とほとんど変わらず土砂のドラム内壁に対する自由運動は、フリー状態にかなり近いものと考えられる。すなわち、図-6.5に示すような拘束条件では、相対速度を非拘束時に比べて増加させることは可能であるが、前述のようなドラム周速にまで高めることはできない。なお、図-6.5の拘束モデルにおいて、邪摩板は自重のみで土砂を押えているが自重が大きいため、土砂から押されて水平以上に持上がることはなかったけれども、土砂がかみ込

んでドラムとともに邪摩板が一回転するというトラブルは数回発生している。

このように、土砂の自由度をあまり拘束できないにもかかわらず摩耗量は全体的に大きな増加をみせている。これについてはいくつかの要因が考えられる。まず、相対速度がドラム周速に近づかないまでも増加はしているだろうと考えられること、次にある程度拘束しているために土砂とドラム内壁の接触距離が、フリーな場合に比べ大きくなる。さらに、邪摩板とドラム内壁の間にもぐり込んだ土砂によって、押付力が土砂自重や遠心力によるもの以上に増加することなどが考えられる。

相対速度が不明なため、このうちのいずれが主たる原因かは断定できないが、このすべてが程度の差こそあれ摩耗量の増加に寄与しているものと考えられる。

次に、相対速度のドラム周速に対する変化がどのような形をしているのかをみてみることにする。予備実験結果においても触れたが、今回の実験条件、すなわち投入スラリの体積濃度 15%、土砂量 90 kg においてはドラム周速が約 5m/s 付近で共回りを始める。ドラムが停止している時はもちろん相対速度は零である。したがって、ドラムが回転始めると相対速度が増加し始め、どこかでピークをもってドラム周速が 5m/s に近づくと共回り始め、相対速度は再び零となるような変化をするのであろう。

この変化の形と、前述の $V=3\text{m/s}$ 付近で摩耗量のピークがあり、摩耗量と相対速度の間に強い関係があるだ

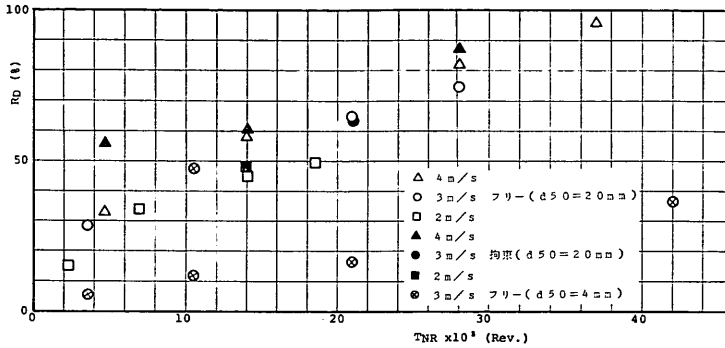


図-6.6 ドラム総回転数と粒径減少率の関係

ろうということを考えると、相対速度の変化パターンは図-6.4 に示すようになるだろう。そして拘束時の摩耗量増加を相対速度の増加のみに限定すると、この場合も摩耗量のピークが 3m/s 付近にあることから、拘束条件下でのドラム周速と相対速度の関係は、同図の点線のようなものと考えられる。ただし、この場合はドラム周速が大きくなって共回りに近づいても、拘束されているため共回りをしない土砂が一部存在し、これによる相対速度が残るから、比較的なだらかに低下してくるものと考えられる。

6.3 土砂の粉化と摩耗量の関係

今回試作した水平ドラム式摩耗試験機は、一種の土砂粉砕機である。この粉砕機構はもっぱら土砂同志の衝突によるものと考えられるが、ドラム内壁との接触による粉化もある程度あるものと思われる。もしそうだとすれば、ドラム内壁に取付けた試験片の摩耗量と関係があるはずである。そこで摩耗量と土砂の粉化の関係を検討してみた。

前出の 図-3.7~3.9 は、摩耗条件ならびに運転時間の差によって粒度分布がどのように変化するかを示したものである。

これから、実験後の平均粒径を求め次式で粒径減少率 R_D を計算する。

$$R_D = \frac{(d_{50})_S - (d_{50})_E}{(d_{50})_S} \times 100 \quad (6.3)$$

ここで $(d_{50})_S$: 投入時平均粒径 (mm)

$(d_{50})_E$: 実験後平均粒径 (mm)

この R_D をドラムの総回転数に対して示したのが、図-6.6 である。傾向的には、総回転数に対する摩耗量の増加とよく似た関係で R_D が増加しているが、同一総回転

数でみるとフリー状態と拘束状態の差がないこと、また 20mm 径に対するフリー実験でドラム速度による差が図-6.3 の摩耗量に対する傾向と比べ逆になっていることなどの特徴がある。すなわち、相対速度とほとんど無関係にドラム周速の高い方、つまり共回り速度に近づくほど粉化が大きくなっている。

これは共回り速度に近いほど壁面に引きずられて上昇した土砂が壁面から分離する時の位置がドラム上方となり、土砂が落下して下部の土砂と衝突するエネルギーが大きくなるためと考えられる。このように考えると、粉

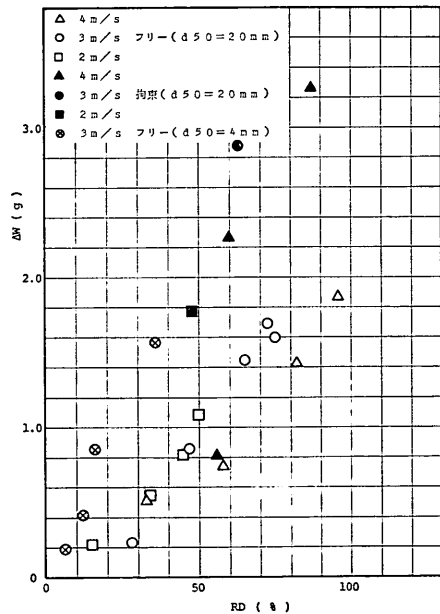


図-6.7 粒径減少率と鋼材摩耗量との関係

化は当然粒径が大きいほど激しいので 図-6.6 の細粒子の場合に、同じ総回転数でも粒径減少率が少ないということも説明できる。

また、拘束条件において摩耗量の増大があるにもかかわらず粉化の程度がフリー条件とほとんど変わらないという結果から、今回使用したようなホルダー面あるいは試験片と粒子が接触することによる土砂粉化への寄与はほとんど見られない。

参考までに、粒径減少率 R_D と摩耗量の関係を 図-6.7 に示す。このように拘束条件や土砂条件の変化により、同じ粒径減少率でも摩耗量に大きな差があり、しかも粒径減少率が 100% に近づいても摩耗量の低下がみられな

い傾向は水平ドラム式摩耗試験機の一つの特徴であろう。

6.4 ポリウレタンの重量補正と計測精度

ポリウレタンの摩耗に関する従来の研究において、その吸水特性のため摩耗量が検出されない場合が多く、このことがポリウレタンの耐摩耗性の定量化を困難にしている原因でもあった。実験結果において述べたように今回は、吸水補正用のダミーを用いこれによりテストピースの吸水量を推定し補正を行った。

補正の方法は、式 (4.1) および (4.2) に示すとおりであるが、この補正計算を可能とするにはそれなりの前提条件が必要である。これを列記すると次のとおりであ

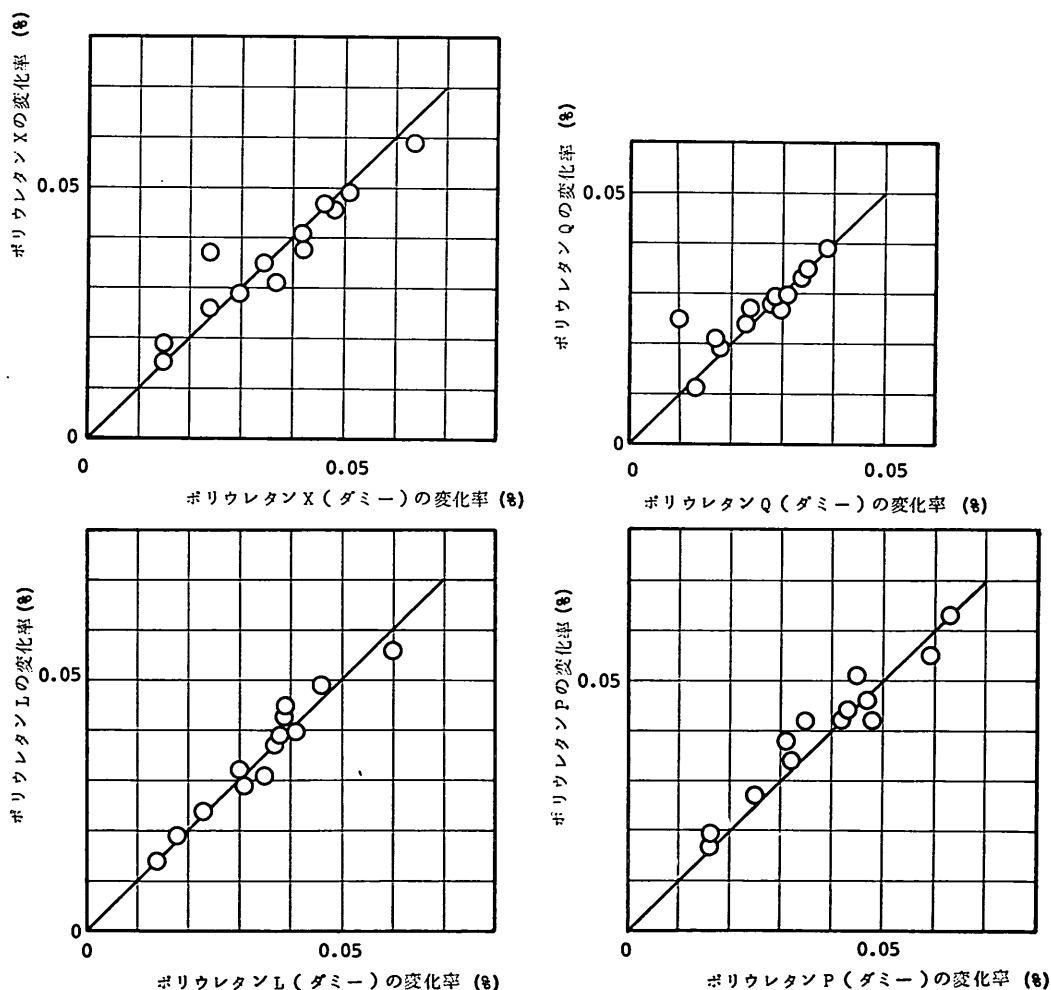


図-6.8 ポリウレタン試験片とダミーとの変化率の一致性

る。

- (i) ダミーと試験用テストピースとの吸水、蒸発の程度が一致していること。
- (ii) 実験時のドラム内環境条件が、ダミー浸せき条件と同一であること。
- (iii) 可能な限りダミー、試験用テストピースとも水に浸した状態とすること。

本実験においては、(ii) については考慮することが実際上不可能であったが、(i) については予備実験により一致性の高いものを選択し、(iii) については計測時を除いてほとんど海水中に浸した状態に保った。

図-6.8 は、ダミーおよびテストピースがある状態から吸水あるいは蒸発した時の変化率を示したものであり、実用上十分な一致性をもっているといえる。また、図-6.9 と 6.10 は、吸水と蒸発の時間的割合を示している。これからわかるように、蒸発する割合は吸水割合の約 10 倍である。したがって、吸水しにくく蒸発しやすいため空中に長時間放置すると、吸水させるにはその 10 倍の時間がかかることになる。また、蒸発に関しては空気中の湿度の影響を受けやすく、図-6.9 に示すようにデータのばらつきも大きくなる。この点水中は安定状態であり、この意味からもできるだけ海水中に浸しておくことが実験データの精度を良くすることにつながる。

このような補正が妥当であるかどうかを検証することは、実験中は不可能である。したがって、今回は実験前後にテストピースを乾燥炉で乾燥させ、その重量差でチェックした。この結果は、それぞれの実験結果に示されているが、細粒子に対する実験のポリウレタン Q, L, P 以外はほぼ満足のいく一致が得られている。

細粒子に対するポリウレタン Q, L, P の不一致は、結論的には摩耗量が少なすぎたための結果であるが、直接的原因は重量計測中の蒸発量にある。計測時間は通常 15 分程度であるから、テストピースとダミーの計測時差は平均的には 7~8 分程度あり、この間の蒸発による誤差は 図-6.9 より平均で約 0.05%/h であるから 8 分程度で 0.007% となる。今、ポリウレタンの重量を 52g とすると、重量で約 3/1000g の誤差を生じることになる。すなわち、1 回当りの摩耗量は測定器の精度が 1/1000g であっても最低 5/1000g 程度なければ補正しきれないということになる。乾燥重量差を一応正しいと考えて 24 時間（測定間隔）当りの摩耗量を計算してみると、X については 0.025g であるからほとんど問題はないが、最も少ない Q については 0.006g しかなく最低所要摩耗量に近い値となっている。このことが、Q, L, P について不安定な原因であり、極端に小さい場合は、いくら摩耗時間を長くしても不安定さが解消することはないといえる。したがって、ポリウレタン等のライニング材の摩耗試験を行う場合は、測定間隔を十分長くとることが最も重要であり、この点に集中した予備試験を行う必要がある。

また、補正を行わずに長時間摩耗試験を行う場合の摩耗量は

$$\Delta W = W_0 - W_n \quad (6.3)$$

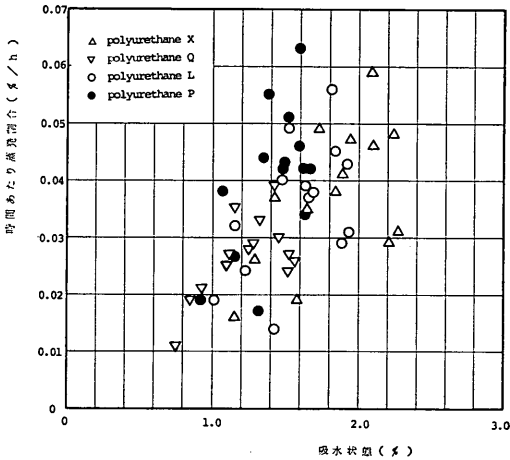


図-6.9 ポリウレタンの時間当りの蒸発割合

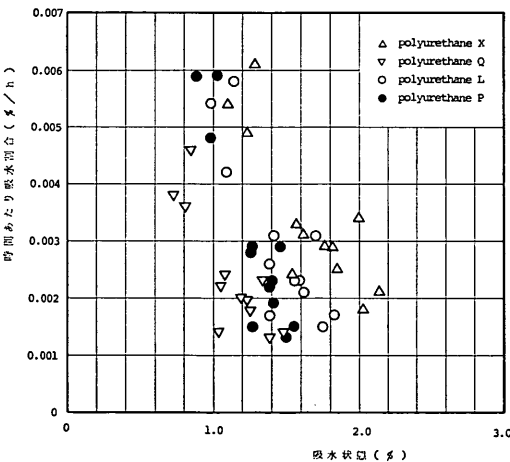


図-6.10 ポリウレタンの時間当り吸水割合

で計算される。これとA法による補正式と比較してみよう。A法の1回当り摩耗量は式(4.1)より

$$\Delta W_A = W_0 \left(\frac{W_{na}}{W_{0a}} \right) - W_n$$

であるから、式(6.3)を使用して

$$\Delta W_A - \Delta W = W_0 \left(-1 + \frac{W_{na}}{W_{0a}} \right) \quad (6.4)$$

が得られる。吸水が飽和すれば式(6.4)の W_{na}/W_{0a} は一定となるから理論的には、 ΔW と ΔW_A は一致することはない。ただし、摩耗実験開始までに十分吸水させておけば $W_{na}/W_{0a}=1$ となり得るから、この場合は、補正する必要はない。この関係は、図-4.6 および 図-5.3 において見られるとおりであり、吸水率がほぼ飽和する頃から補正カーブと非補正データは平行となる。

したがって、補正を行わない場合は、一定値 $(W_{na}/W_{0a}-1)W_0$ が摩耗量に対して無視できるところまで摩耗試験を続ける必要がある。

また、今回の実験においてはポリウレタン重量補正の2方式であるA法(式4.1)とB法(式4.2)の間にはほとんど差がなかったが、この理由は次のとおりであろうと考えられる。式(4.2)において $n=2$ とおくと

$$\begin{aligned} \Delta W_B = & \left(W_0 \frac{W_{2a}}{W_{0a}} - W_2 \right) \\ & + (W_{1a} - W_{2a}) \left(\frac{W_0}{W_{0a}} - \frac{W_1}{W_{1a}} \right) \quad (6.5) \end{aligned}$$

と表わすことができ、これに式(4.1)から ΔW_A を代入し、 $n>2$ に拡張すると

$$\begin{aligned} \Delta W_B = & \Delta W_A + \sum_{n=1}^N (W_{n-1a} - W_{na}) \\ & \times \left(\frac{W_0}{W_{0a}} - \frac{W_{n-1}}{W_{n-1a}} \right) \quad (6.6) \end{aligned}$$

となる。

したがって、A法による補正值はB法に対し常に式(6.6)の第2項に相当する誤差をもつ。ところが、吸水率の変化と摩耗速度が一定の条件下ではこの誤差はほとんど零となる。

今、空中吸水状態から試験を開始したとすれば、吸水率の変化は大きいけれども摩耗量が小さいため、

$$\left. \begin{aligned} W_{n-1a} - W_{na} < 0 \\ W_0/W_{0a} \approx W_{n-1}/W_{n-1a} \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

となって、式(6.6)の第2項は零に近い値となる。一方吸水が飽和しかかると、その項には摩耗もかなり進んでいるから、

$$\left. \begin{aligned} W_{n-1a} \approx W_{na} \\ W_0/W_{0a} > W_{n-1}/W_{n-1a} \end{aligned} \right\} \quad (6.8)$$

となって、この場合も誤差項は零に近い値をとる。今回の試験はおおよそそのような状態にあったのではないかとと思われる。

もちろん、吸水率が飽和した状態から試験を開始すると、式(6.6)の第2項は最初から無条件で零となる。しかしながら、今回の吸水率の変化からみても飽和するのに約1か月を要しており、手軽に実現できる条件ともいえない。

6.5 ポリウレタンの摩耗

ポリウレタンの摩耗量は、 $d_{50}=20\text{mm}$ の粗大粒子に対しては 図-4.7 に示すように今回の試験時間において十分安定した摩耗量の変化を示している。4種類のポリウレタンは硬度がほぼ等しいものを選んでいますが、摩耗量からみればかなり差が出ている。これは重量変化から換算した板厚減少量であるが、板厚を直接測定した結果も、 図-4.9 に示すようにほぼ同様の変化を示す。ただし、ポリウレタンエラストマのような弾性体に対してはマイクロメータによる直接測定は一般的に不向きであると同時に、その精度が重量測定に用いた化学天秤よりはるかに劣ることなどから、かなりのバラツキが見られる。この板厚は 図-4.2 に示した12点の平均であるが測定点による差は見出し得なかった。

一方、細粒子の場合は全般的に摩耗が少なく、 図-5.4 ならびに 図-5.6 でみる限り、ポリウレタンXは比較的安定した経時変化を示しているものの、他のQ, L, Pについては信頼性のある変化とはいえない。

そこで、細粒子実験のポリウレタンQ, L, Pについては乾燥重量差で代用し、ポリウレタンXを100とした場合の他のポリウレタンの摩耗量比と、 $d_{50}=20\text{mm}$ に対する各種ポリウレタンの摩耗量を100とした時の $d_{50}=4\text{mm}$ に対するポリウレタンの摩耗量比を 表-6.2 に示し、ポリウレタン同志を比較してみた。

ポリウレタンPについて若干差があるけれども、全体的にいえば、今回の試験におけるポリウレタン同志の耐摩耗性の差は土砂粒径が変化してもほとんど変わっていないといえる。

次に、ポリウレタン摩耗面の状況を検討してみる。4および5の実験結果において表面の目視観察結果に述べられているが、一般的特徴として粗大粒径、細粒径とも摩耗が進むと光沢を失い、表面に引っかき傷が発生している。なお、細粒子の場合のポリウレタンQ, L, Pにつ

表-6.2 ポリウレタン摩耗量の種類別比較 (厚み基準)

	粒 径	X	Q	L	P
ポリウレタン X の摩耗量を 100 とする。	$d_{50}=20$	100	21	34	34
	$d_{50}=4$	100	21	33	26
$d_{50}=20$ の場合を 100 とする。	$d_{50}=20$	100	100	100	100
	$d_{50}=4$	16	16	15	12

いはほとんど試験前と変らぬ様相を呈しているが、長さ 4 mm 以下の浅い傷が発生している。そして、この傷の量は目視ではあるけれども Q について L, P の約半分程度となっており、乾燥重量差から求めた摩耗量の傾向と一致している。

一方、鋼材試験片の表面は試験前は機械研磨の跡が全面に見られるが試験後は、細かく均一な凹凸になっており、これは粒径が異なっても同じである。

次に、表面あらさを量的に検討するためにあらさ曲線の最大高さ H_{max} と形状係数 k_p を求めてみた。図-6.11 は、 H_{max} と k_p の定義を示している。形状係数 k_p については、図-6.12 (a) に示すように H_{max} の帯の中でごく一部に空間があるような場合 $k_p=1$ となり、逆に一部に突出部があるような場合 $k_p=0$ となる¹⁵⁾。

図-6.13 と 6.14 は粗大粒径に対する鋼材およびポリウレタンの H_{max} と k_p を示したものである。 k_p はい

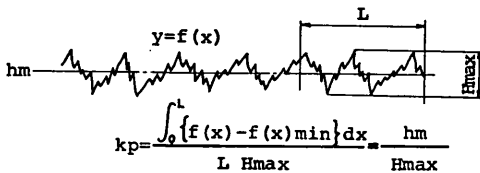


図-6.11 あらさ曲線における H_{max} と k_p

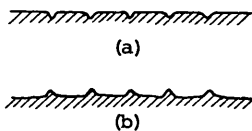


図-6.12 形状係数 k_p の説明

ずれも 0.5 に近く、あらさ曲線が特に変わったものではないことを示している。 H_{max} は、鋼材とポリウレタンでかなり異なり、ポリウレタン H_{max} の方が鋼材に比べて大きく、引っかき傷のような深い傷が発生しているものと考えられる。

細粒子の場合も、図-6.15 と 6.16 に示すように形状係数 k_p ならびに鋼材とポリウレタン X に対する H_{max} は粗大粒子の場合と同じである。しかしポリウレタン Q, L, P については試験前の表面に近く、摩耗のほとんどが目視観察で見られる長さ 4 mm 以下の浅く細い傷によるものだと思われる。

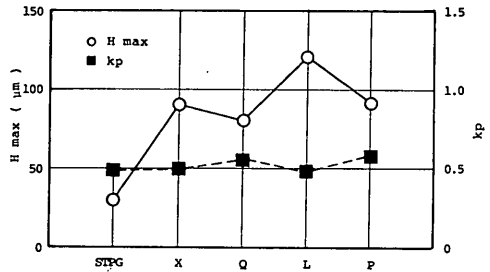


図-6.13 c 方向の H_{max} と k_p ($d_{50}=20$)

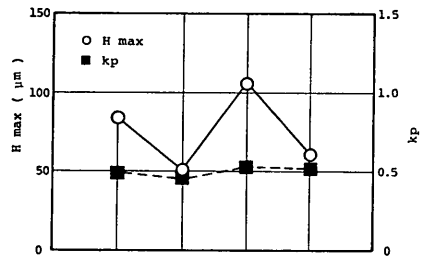


図-6.14 b 方向の H_{max} と k_p ($d_{50}=20$)

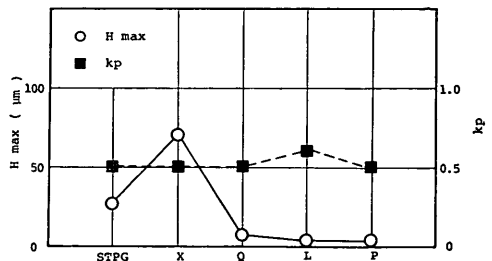


図-6.15 c 方向の H_{max} と k_p ($d_{50}=4$)

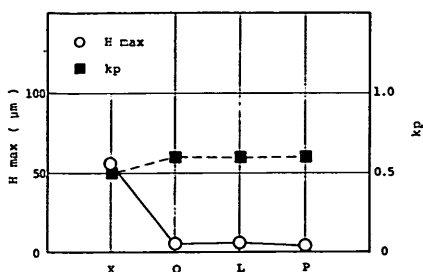


図-6.16 b 方向の H_{max} と k_p ($d_{50}=4$)

6.6 ポリウレタンの鋼材に対する耐摩耗性倍数

ポリウレタンの鋼材に対する耐摩耗性倍数 R は、式(4.4)で示されるように、鋼材の摩耗による板厚減少量に対するポリウレタンの板厚減少量の比で定義している。この経時変化は 図-4.8 ならびに 図-5.5 に示されている。

粗大粒子の場合については、倍数もほぼ安定しているが、細粒子については Q, L, P の変動が激しい。しかし、X については粗大粒子の場合と同様に比較的安定しており、しかも乾燥重量差による結果とも良く一致している。

そこで、Q, L, P については乾燥重量差による倍数を採用し最終的な耐摩耗性倍数をポリウレタン4種について、粒径別に 図-6.17 に示した。 $d_{50}=20\text{mm}$ の場合、ポリウレタン X で鋼材の約 2.2 倍、Q で 11.5 倍、L、P でそれぞれ 6.8, 7.2 倍となっている。

$d_{50}=4\text{mm}$ になると、耐摩耗倍数も増加しポリウレタン X で 13.5 倍、Q で 65 倍、L が 41 倍そして P については 51 倍となっている。このように粒子径の違いによって耐摩耗性倍数が大きく異なる理由を明らかにするには粒径が 2 種類程度では不十分であるが、あえて言及

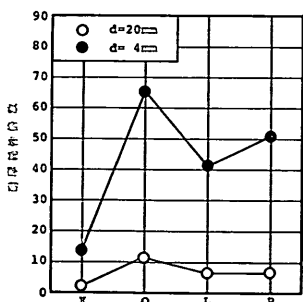


図-6.17 ポリウレタンの種類別耐摩耗性倍数

するならば圭砂のナイフエッジの効果が挙げられよう。ポリウレタンの表面には摩耗が進行するにつれて、鋼材表面とは異なった無数の引っかき傷が生じてきている。

この傷がポリウレタン摩耗の主要因であるとするならば、粒子のナイフエッジが大きく関与していることになる。ポリウレタンの摩耗面は弾力性をもつ面である。土粒子が小さいといくらナイフエッジをもっているにもかかわらず表面に食い込む程度で、むしろ弾性の方が勝る場合が多いだろうが、粗大粒子になるとその反発力に打ち勝って表面をえぐり取ってゆく効果が大きくなるのではないかと思われる。今回使用したケイ石試料を見ると、同じ6時間運転でも粗大粒子の方はほとんどエッジが消滅しているのに反し、細粒子の方は、逆にほとんどエッジが残っているという事実は、上記の摩耗プロセスに対する見方を裏付けるものではないだろうか。

次に、ポリウレタン4種の中で考えると、かなり耐摩耗性に差が生じている。この差をポリウレタンのいろいろの物性から検討するために 表-2.5 をグラフに表わしてみたのが 図-6.18 である。このうち、吸水率についてはメーカーの計測値ではなく今回実験中に得られた値である。

図-6.18 を 図-6.17 の耐摩耗性倍数と比較してみると、100% モジュラス、300% モジュラス、伸びそして

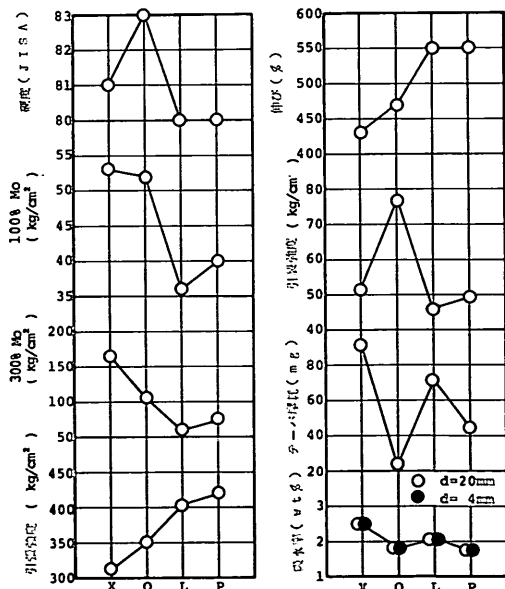


図-6.18 ポリウレタンの種類による物性の違い

引張強度に対してはあまり関係なさそうである。全般的傾向として摩耗特性に近い関係を示すのは引裂強度くらいであろうが、部分的には合わない点もある。ただ、ポリウレタンの摩耗が引かき摩耗が主体であると考えると、引裂強度はそのような特性も一部代表するものであるから傾向として比較的良く一致するのかもしれない。しかしながら、表-2.5にあるようなポリウレタンの物性は、いわば一般仕様であり、これから摩耗特性を代表するような物性を見出すことには無理があり、今後本実験のような摩耗に関するデータを蓄積し、これを材料分野にフィードバックさせることにより明らかになっていくだろうと考えられる。

7. 結 論

最近、土砂輸送用パイプラインのライニング材として注目を集めているポリウレタンエラストマの耐摩耗性を、平均粒径 20 mm というような粗大粒子を主対象として調べた。また、摺動摩耗に限定して実際のパイプラインの摺動流れに近い状態で摩耗実験が行える今回試作した水平ドラム式摩耗試験機の諸特性についても貴重なデータが得られた。予備実験ならびに本実験を通じて明らかになった点を要約すると次のとおりである。

- (1) 今回試作した水平ドラム式摩耗試験機は、衝突摩耗を極力抑え、しかも土砂にかなりの自由度をもたせ得るため、管内の摺動摩耗に近い状態を実現できる装置であることがわかった。
- (2) 水平ドラム式摩耗試験機においては、ドラム回転数よりかなり低いところで相対速度の最大値が生じるから、実際のパイプラインにおける流速をこの相対速度に合わせるように装置を設計することが必要である。
- (3) 摩耗量と土砂の粒径減少率の間にはかなり強い相関があるが、土砂粒径や拘束条件などの摩耗条件が変わると両者の関係も大きく変化する。
- (4) 摺動摩耗の場合、土砂のナイフエッジの摩耗機構による影響は、粒径が大きいほど大であり粒径が小さいとナイフエッジ粒形をもっている初期摩耗の激しさはあまりない。
- (5) 本実験における鋼材の摩耗量は、一定の仮定のもとに通過土量当りに換算すると、従来の粒径が比較的大きい土砂に対する現地データに比べ若干低い程度であった。
- (6) ポリウレタンエラストマの鋼材 (STPG 38) に対

する耐摩耗性は、粗大粒子 ($d_{50}=20$ mm) に対して 2 倍から 12 倍であった。しかし粒径の影響が大きく、細粒子 ($d_{50}=4$ mm) に対しては 14 倍から 65 倍であった。

- (7) ポリウレタンエストラマーの耐摩耗性は、種類によってかなり異なり、今回使用した 4 種類の中でさえ、耐摩耗性の低いものと高いもの間で約 5 倍近い差がある。この差は土砂の粒径が異なってもほぼ同じであり、ポリウレタンエストラマの特性の違いや、硬化条件の違い等によるものと考えられる。したがって、粗大粒子に対しても、種類の選択が適正なら、十分ライニング材として使用に耐えると考えられる。
- (8) ポリウレタンの摩耗量を補正するため今回用いた方法は、ほぼ妥当なものであったが、摩耗量の測定をより正確なものとするためには実験開始前に完全に吸水飽和状態にすることが必要である。しかしながら、ポリウレタンの蒸発は吸水の約 10 倍の速度で進行し、しかも吸水状態が飽和に近いほど激しいため空気中での計測時間をできるだけ短くすることが必要である。
- (9) 摩耗試験後の試験片の表面粗さからみると、鋼材の場合は H_{max} が 20~30 μ 程度の比較的短いピッチの粗さを呈しているのに反し、ポリウレタン表面は H_{max} が鋼材より大きく、しかも不ぞろいな引き傷のようなものが主体となっている。

8. あとがき

従来、ポリウレタンエストラマーは土砂に対する耐摩耗性が良好であるという評価が定性的になされていたが、今回これを定量的に明らかにし得た。粒径が大きく、しかもナイフエッジの如き粒形を持つ陸上土砂に対する場合は万能でもないがポリウレタンの種類によっては良好な耐摩耗特性をもつものもあるので、その使用に当っては注意を要するだろう。しかし粒径の小さい (通常の概念では十分大きい) ものについてのポリウレタンの耐摩耗性はかなり良好で、従来のデータを裏付けるものである。今後粒径の影響に対する定量化、ならびにポリウレタン物性との関係等について明らかにしていく中で、粗大粒子に対しても良好な耐摩耗性ライニング材が開発されてゆくものと考えられる。

なお、本研究の実施にあたり (社) 鋼材倶楽部内パイプライン研究会の方々には種々の面で多大の助力、ある

土砂輸送パイプの摩耗に関する研究

いは貴重な助言をいただいた。また、本研究における試験片表面粗さの計測にあたっては、日本鋼管所有の「万能表面形状測定器 (SE-3C 型)」を使用させてもらった。関係者各位に厚く感謝する次第である。

(1981年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 宮崎昭児：排砂管の摩耗調査その 1, その 2, 作業船, 38 号, pp. 53~64., 42 号, pp. 43~52., S 40.
- 2) I. Tarjan and E. Debreczeni: Theoretical and Experimental Investigation On the Wear of Pipeline Caused by Hydraulic Transport, Hydrotransport 2, 1972, G 1-1~G 1-14.
- 3) A. J. Karabelas: An Experimental Study of Pipe Erosion by Turbulent Slurry Flow, Hydrotransport 5, 1978, E 2-15~E 2-24.
- 4) I. B. Kazanskij, H. J. Mathias and W. Kahle: Some Remarks on Pipe Materials In Connection with Wear Resistance And Dredging Efficiency, Third International Symposium on Dredging Technology, 1980, pp. 137~162.
- 5) 堀内 薫, 松井昭男, 浅村英泰, 早川敏清: 金属の土砂摩耗, 川崎技報, No. 51, 1973, pp. 90~99.
- 6) 宮崎昭児, 奥出 律, 津村悦男: 粗粒径土砂混合水による鋼材の摩耗特性について, 港湾技術研究所報告, 第 10 卷, 第 2 号, 1971, pp. 161~175.
- 7) 岩田敬治: プラスチック材料講座 [2] ポリウレタン樹脂, 日刊工業新聞社, pp. 134~168.
- 8) V. T. Nguyen and F. Saez: Design of Pipeline for a Highly Abrasive and Corrosive Slurry, Hydrotransport 6, 1979, pp. 367~378.
- 9) S. Murakami, T. Kawashima, S. Tsukuhara and T. Okada: Wear Test of Pipe Linings for Hydraulic Transport of Dam Deposit, Hydrotransport 7, 1980, pp. 315~330.
- 10) M. L. Barker and G. F. Truscott: The Development and Operation of Test Facility for Pipeline Abrasive Wear Measurement, Hydrotransport 3, 1974, J 3-33~J 3-50.
- 11) T. Kawashima, et al.: Wear of Pipe for Hydraulic Transport of Solids, Hydrotransport 5, 1978, E 3-25~E 3-44.
- 12) 朝倉書店: 「材料強度工学ハンドブック」, 摩耗, 762 p.
- 13) 山下貞二: 砂粒混在の流水による金属平板の摩耗について, 日本機械学会論文集, Vol. 23, No. 133 (S 32), pp. 646~652.
- 14) 伊勢哲郎: スラリー輸送管の設計, 配管技術, 1973, pp. 78~86.
- 15) 山本健太郎: 計量管理技術双書 (19) 「表面アラサ」, 計量管理協会編, コロナ社, 27 p.

記 号 一 覧 表

A	: 試験片表面積 (mm^2)
a	: ドラム内土砂の軸方向断面積 (m^2)
H_{\max}	: 表面粗さ曲線の最大高さ (μm)
k_p	: 形状係数
l_s	: ドラム内土砂の円周方向長さ (m)
d_{50}	: 50% 平均粒径 (mm)
p	: ポリウレタンの吸水率 (%)
Q_s	: 通過土量換算値 (m^3/H)
R	: 耐摩耗性倍数
R_D	: 粒径减小率
T_{NR}	: ドラム総回転数 (Rev.)
u	: ドラムに対する土砂の相対速度 (m/s)
V	: ドラム周速 (m/s)
Δt	: 換算板厚減少量 (mm)
ΔW	: 重量減少量 (g)
W	: 試験片重量 (g)
ρ	: 試験片密度 (g/mm^3)