

## 金属の摩耗におよぼす砂れき特性と水の影響について

WEAR OF METAL BY GRAVELLY SOIL AT  
SEVERAL STATES OF WATER CONTENT

畠 昭治郎\*・室 達 朗\*\*

By Shōjiro Hata and Tatsuro Muro

## 1. ま え が き

従来、土砂粒による金属の摩耗機構について解析を行なった結果、金属の摩耗量  $M$  を支配する基本的な要因として7個の因子があり、 $M$  はこれら各因子の関数として次式で与えられた<sup>1),2),3)</sup>。

$$M=f(N, k, k', \theta, H_v, n, v) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $N$ は金属表面に作用する個々の土粒子の垂直貫入力であり、砂れきの含水状態、締め固め密度および粒度分布などに支配される土のせん断強度および金属体の堆積土砂中における走行速度に帰因するものである。 $k$  は金属面上を土粒子が走行する場合の土粒子による金属面への引っかかり深さを決定する貫入係数である。また、 $k'$  は金属材料の特性や含水状態による温度差に依存する因子であり、砂れきエッジによって流動させられた金属片の母材からのはく離率である。 $\theta$  は土粒子の隅角部における先端頂角であり、土粒子の形状、円磨度に関係する因子である。 $H_v$  は金属材料のビッカース硬さで、ダイヤモンド圧子を金属面に貫入させた場合の降伏応力によって表面の硬さを表現したものであり、土粒子の金属面への貫入に対する抵抗を意味する。 $n$  は金属面上の個々の土粒子の運動形態を分析したときの滑動土粒子数であり、この値は金属の摩耗面の進行方向となす角度および土粒子相互の拘束度によって変動する。また、 $v$  は金属面と滑動土粒子との間の相対運動速度であり、金属体の形状および土砂特性によって変化する。

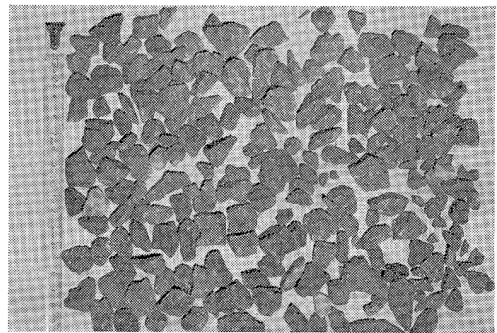
本研究においては、金属の摩耗に影響を与える要因として摩耗材である土砂の物理的性質および土砂れきの含水状態などについて、種々の丸鋼を用いて摩耗試験を行なった。その実験結果より、これらの要因と前述した基本的な7個の要因との関係を明らかにし、掘削工具など

の金属の摩耗量を算定する際、これを実際現場における土砂れきの粒径、形状、密度およびせん断強度や含水状態、および金属硬さなどによって表現する方法について実験的考察を行なった。

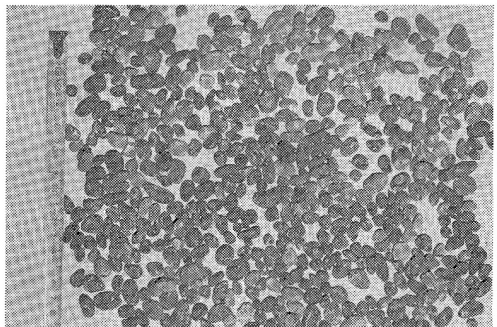
## 2. 実 験

## (1) 試料土砂と金属供試体の特性

土砂れきの諸特性を表-1に示す。それぞれ鉱物組成、粒径、形状および硬さの異なる砂れき、玉石、碎石



(a) 碎石 (粒径 10~20 mm)



(b) 玉石 (粒径 4.7~15 mm)

写真-1 試料土砂れきの一例

\* 正会員 工博 京都大学 教授 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 工修 福井大学 助教授 工学部建設工学科

および砂利より計7種類を選定し、試料土砂れきとした。また、金属材料としては表-2に示すように、種々の硬さを与えるため熱処理を施した炭素工具鋼と機械構造用炭素鋼およびハードフェーシングした溶接肉盛り材を

成形した直径30mm、長さ300mmの丸鋼から計14種類を選定し、金属供試体とした。なお、試料土砂れきおよび金属供試体の一例を写真-1および写真-2に示した。土砂れきの粒度分布は金属との摩耗試験によって土

砂れき自身の摩滅および破砕によって粒度構成が異なるため、試験前および試験後についてふるい分け試験を行ない、それぞれについて粒径範囲、平均粒径、均等係数および曲率係数を算定した。なお、シヨア硬さ試験は、それぞれ100個の砂れきについて実測し、その平均値を示した。また、金属供試体については、試験前と試験後のピッカーズ硬さを測定し、土砂摩耗による金属の加工硬化の影響について調査した。

表-1 試料土砂れきの諸特性

項目	a	b	c	d	e	f	g
分類	砂れき	砕石(原石:硬質砂岩)			玉石		砂利
産地	滋賀県 琵琶湖湖底	大阪府高槻市成合			三重県御浜		京都府久世 郡城陽町
粒径範囲 (mm)	試験前 0.1~5.0 試験後 0.1~1.5	0.1~5.0 0~5.0	4.0~15.0 1.0~15.0	10~20 0.1~20	1.0~5.8 1.0~4.8	4.7~15.0 4.7~10.0	10~25 1.0~25
平均粒径 (mm)	試験前 0.75 試験後 0.70	1.20 1.20	7.8 7.6	14.5 10.8	5.0 3.5	8.5 8.8	21.2 17.5
均等係数	試験前 3.33 試験後 2.16	8.33 172	1.67 2.40	1.38 2.36	1.83 1.85	1.57 1.61	1.90 3.80
曲率係数	試験前 0.90 試験後 1.10	1.33 12.3	0.79 1.38	0.97 1.25	1.20 1.01	1.04 1.07	1.04 1.50
比重	2.65	2.68			2.76		2.64
シヨア硬さ	68.5	60.5			75.3		59.6
鉱物組成 (%)	石英 5.71 長石 93.76 有色鉱物 0.53	36.82 63.18 0.00			92.64 4.73 2.63		41.26 58.36 0.38
細長比 修正円率 <sup>1)</sup>	0.65 0.31	0.64 0.29	0.57 0.27	0.64 0.14	0.64 0.38	0.62 0.58	0.60 0.36

表-2 金属供試体の材質と硬さ測定

記号	材 料 名	化 学 組 成 (%)	熱処理の状態および内容	ピッカーズ硬さ	
				試験前 $H_{vi}$	試験後 $H_{en}$
A	炭素工具鋼3種 JIS G 4401 (1965) SK-3	C 1.01, Si<0.35, Mn<0.50, P<0.030, S<0.030	未 処 理	204±10	205±10
B	炭素工具鋼3種 JIS G 4401 (1965) SK-3	C 1.01, Si<0.35, Mn<0.50, P<0.030, S<0.030	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 480°C 空冷	350±10	395±10
C	機械構造用炭素鋼 JIS G 4051 (1965) S 50 C	C 0.52, Si 0.15~0.35, Mn 0.60~ 0.90, P<0.030, S<0.035	水焼入 850°C 水冷 焼もどし 600°C 空冷	380±10	385±10
D	機械構造用炭素鋼 JIS G 4051 (1965) S 35 C	C 0.37, Si 0.15~0.35, Mn 0.60~ 0.90, P<0.030, S<0.035	高周波焼入	517±30	575±10
E	ハードフェーシング HF-600 JIS Z 3251 DE 2 B-B	C 0.44, Mn 2.34, Si 0.86, Cr 2.48	溶 接 肉 盛	658±50	550±50
F	ハードフェーシング HF 1000	C 2.8, Mn 1.7, Si 0.5, W 56	溶 接 肉 盛	663±50	760±50
G	機械構造用炭素鋼 JIS G 4051 (1965) S 50 C	C 0.52, Si 0.15~0.35, Mn 0.60~ 0.90, P<0.030, S<0.035	水焼入 850°C 水冷	703±30	830±50
H	炭素工具鋼4種 JIS 4401 (1965) SK-4	C 0.90~1.00, Si<0.35, Mn<0.50, P<0.030, S<0.030	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 600°C 空冷	230±10	250±10
I	炭素工具鋼4種 JIS G 4401 (1965) SK-4	C 0.90~1.00, Si<0.35, Mn<0.50, P<0.030, S<0.030	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 500°C 空冷	320±10	330±10
J	"	"	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 400°C 空冷	450±10	440±10
K	"	"	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 320°C 空冷	550±10	590±10
L	"	"	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 250°C 空冷	700±10	730±10
M	"	"	水焼入 790°C 水冷 焼もどし 200°C 空冷	805±10	860±10
N	"	"	水焼入 790°C 水冷	920±10	950±10

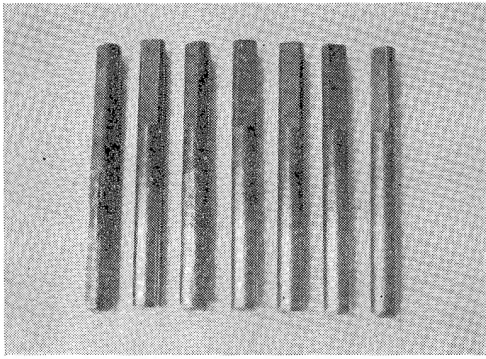


写真-2 金属供試体の一例

(2) 実験装置およびその方法

本実験に使用した摩耗試験機の構造と性能および金属供試体である丸鋼の支持方法については、すでに前報<sup>3)</sup>においてその概略について説明した。円環土槽上を回転する台車上に設置された外径 80.0 cm の回転円板は 5 PS の無段変速機付モータによって駆動されており、金属供試体である丸鋼の走行速度を 50 cm/sec から 240 cm/sec まで 6 段階に変速させた。まず、種々の含水比で砂れきを円環土槽内に充てんし、ローラによって転圧締め固めた。試料土面より鉛直方向に丸鋼を約 8 cm 貫入させ、台車とともに丸鋼をとりつけた回転円板を回転させ、走行速度および丸鋼の硬さとともに締め固め含水比の金属の摩耗におよぼす影響について実験を行なった。次に、砕石土砂（粒径範囲 4.0~15.0 mm）による金属の摩耗におよぼす含水状態の影響について実験を行なった。すなわち、乾燥状態、湿潤状態および水浸状態における金属の摩耗量を比較するとともに、含水比の掘削抵抗におよぼす影響および摩耗量と丸鋼の走行速度および硬さとの関係について明らかにした。なお、土砂れきの水浸状態における丸鋼の摩耗量とその走行速度および硬さとともに土砂れきの諸特性について、その相関性を求めるために実験による解析を行なった。この場合、表-1 に示した 7 種類の試料土砂れきをそれぞれ縦 1.5 m、横 1.5 m、深さ 1.0 m の容器内に充てんし、試料土面より鉛直に約 8 cm 丸鋼を貫入させた状態で台車を固定させ、その容器の直上で丸鋼をとりつけた回転円板のみを回転させ、摩耗試験を行なった。上記のすべての実験において、丸鋼に作用する掘削抵抗は丸鋼支持具に貼りつけたペーパーゲージによるひずみ量から実測し、金属の摩耗におよぼす重要な因子として解析した。なお、丸鋼の摩耗量は、一定の速度で 1 時間ないし 3 時間摩耗させた後、エーテルやアセトンで清浄し、その重量変化を計量した。天秤は秤量 10 キログラム、感量 10 ミリグラムの大型化学天秤を使用し、摩耗量は数百ミリグラム以上の重量差で計測できるように、摩耗の試験時間を調節し

た。また、本実験に使用した丸鋼は、すべて定常摩耗領域にあるものであり、初期摩耗状態である加工硬化による硬さ変化およびエッジ部の形状変化による影響は無視できる。

(3) 種々の含水比で締め固めた砂れきによる丸鋼の摩耗試験

a) 概 説

砂れきの締め固め含水比と乾燥密度との関係を 図-1 に示した。摩耗試験を実施するにあたり、試料土の締め固め含水比は 1.2%、4.0%、10.0% および 23.0% の 4 段階とした。また、台車の回転による丸鋼の走行速度は、回転円板が静止している場合、7.8 cm/sec とし、丸鋼を同時に 3 本、円板の中心角 120 度の間隔でとりつけ、摩耗試験に供した。

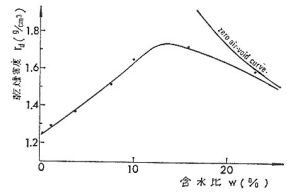


図-1 締め固め曲線（琵琶湖砂）

b) 掘削抵抗と走行速度，含水比との関係

丸鋼が土槽中を走行するときの軌跡はトロコイド曲線

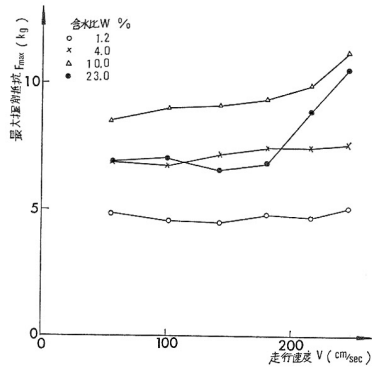


図-2 種々の含水比に対する最大掘削抵抗  $F_{max}$  と走行速度  $v$  の関係（琵琶湖砂）

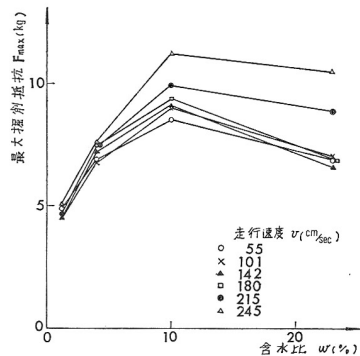
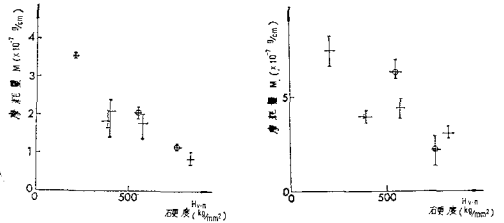


図-3 種々の走行速度に対する最大掘削抵抗  $F_{max}$  と含水比  $w$  の関係（琵琶湖砂）

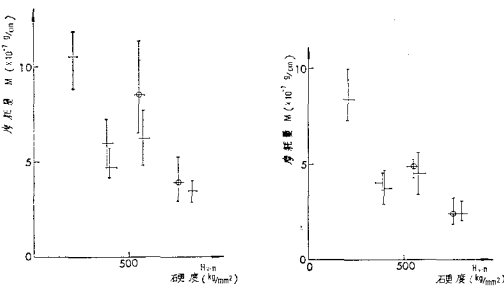
を描くので、掘削抵抗は正弦波に似た波状抵抗を示す。この場合の掘削抵抗は、3本の供試体を同時に稼働させたとき、それぞれの丸鋼に作用する抵抗力であり、この場合、金属の摩耗量に最も相関性が高いと判定された掘削抵抗の最大値の平均値を  $F_{max}$  として整理を行なった。丸鋼の走行速度  $v$  と  $F_{max}$  との関係は 図-2 に示したとおりであり、それぞれ異なる軌跡を描いているにもかかわらず、乾燥状態においては  $F_{max}$  は速度  $v$  にはあまり依存しないようである。しかし、次図からも明らかのように含水比が増大するとともに、速度効果は顕著に発揮されている。次に、締め固め含水比  $w$  と  $F_{max}$  との関係を示す速度  $v$  を補助変数として図示すると、 図-3 が得られた。掘削抵抗  $F_{max}$  は含水比 10% 付近で最大値をとっており、 図-1 に示した締め固め曲線と対応して最大乾燥密度を与える最適含水比において、試料土のせん断抵抗が最も強く発揮されていることを裏付けるものである。また、走行速度の小さい範囲における掘削抵抗の大きさは各含水比に対してそれぞれの乾燥密度の大きさとよく対応している。

c) 摩耗量と硬さ、締め固め含水比および走行速度との関係

金属の供試体は、この場合、表-2 に示す AB...G の計7本の丸鋼を使用した。各締め固め含水比に対して、これらの金属の硬さがその摩耗量におよぼす影響について試験を行なった結果を 図-4 (a)~(d) に示した。この場合、摩耗量の単位は、計量した摩耗重量を全走行距離で除した値として、単位走行距離あたりの摩耗重量 g/cm で整理を行なった。一般に、摩耗量は硬さに反比例して



(a) 含水比  $w=1.2\%$  (b) 含水比  $w=4.0\%$



(c) 含水比  $w=10.0\%$  (d) 含水比  $w=23.0\%$

図-4 種々の含水比に対する摩耗量  $M$  と硬さ  $H_v$  との関係 (琵琶湖砂,  $v=180$  cm/sec)

減少しているが、焼き戻し処理を施した  $H_v$  385 および 395 の丸鋼の摩耗量がその硬さに比較して非常に小さい値を示している点に注目する必要がある。一般に、焼入れ処理を施した鋼は硬くもろいが、焼きもどし処理を施せば鋼のじん性は大になるが硬さは減少する。すなわち、摩耗量は金属の硬さが高くなるほど減少するが、熱処理によってある程度以上硬さを上昇させれば、じん性の高い材料の方が耐摩耗性を増大させることができる。なお、溶接肉盛材である  $H_v$  550 および 760 の丸鋼は他の熱処理した丸鋼に比して摩耗量は比較的大きい値を示している。中でも  $H_v$  550 の方が  $H_v$  760 に比して耐摩耗性が低いのは前者が低炭素鋼であり、後者が高炭素鋼であるためと考えられる。

さて、未処理の丸鋼である  $H_v$  205 の供試体について、丸鋼の摩耗量とその走行速度との関係を各含水比に関して図示すると、 図-5 が得られた。また、丸鋼の摩耗量と締め固め含水比との関係は 図-6 に示したように、前述の掘削抵抗と同様な傾向を示し、最大乾燥密度を与える最適含水比において最も摩耗量は増大している。

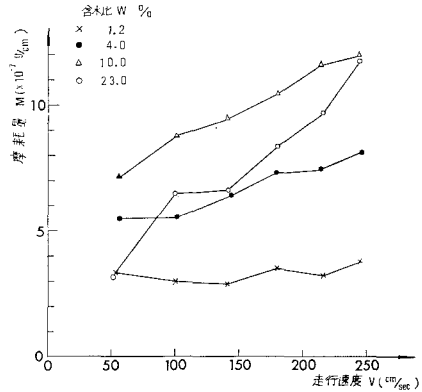


図-5 種々の含水比に対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 ( $H_v=205$ , 琵琶湖砂)

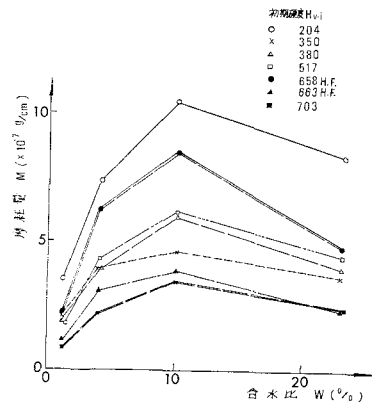


図-6 種々の硬さに対する摩耗量  $M$  と含水比  $w$  の関係 ( $v=180$  cm/sec, 琵琶湖砂)

この場合、図-6において、丸鋼の走行速度を 180 cm/sec として、種々の硬さに対して整理したものである。

d) 摩耗量と掘削抵抗の関係

図-7 は、丸鋼の硬さを  $H_v$  205 とし、種々の走行速度に対して摩耗量と締めめ含水比の関係を示した。このとき、同時に測定した掘削抵抗と丸鋼の摩耗量との関係について、含水比を補助変数として再整理すると 図-8 が得られた。いずれの含水比に対しても、掘削抵抗と摩耗量の関係はほぼ直線関係で対応している。また、両者の関係を金属の硬さに対して整理すると 図-9 となり、走行速度に対して 図-10 を得た。以上の3通りの図より明らかなように、丸鋼の摩耗量と最大掘削抵抗との間には、いずれの場合にも直線関係があり、一般に次式で示す実験式が成立する。

$$M \propto F_{\max} - F_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $M$  は丸鋼の摩耗量、 $F_{\max}$  は最大掘削抵抗であり、 $F_0$  は金属の摩耗を発生せしめない限界掘削抵抗である。

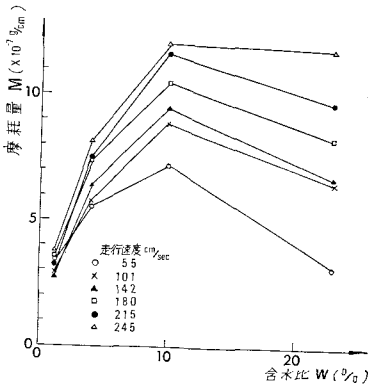


図-7 種々の走行速度に対する摩耗量  $M$  と含水比  $w$  の関係 ( $H_v=205$ , 琵琶湖砂)

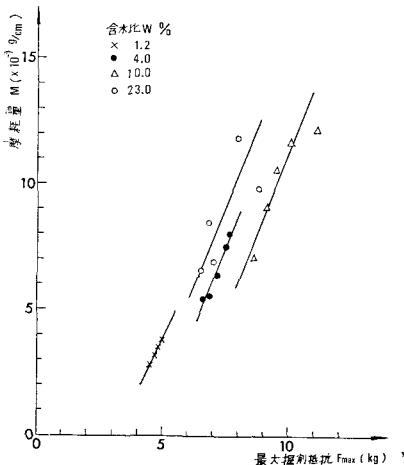


図-8 種々の含水比に対する摩耗量  $M$  と最大掘削抵抗  $F_{\max}$  の関係 ( $H_v=205$ , 琵琶湖砂)

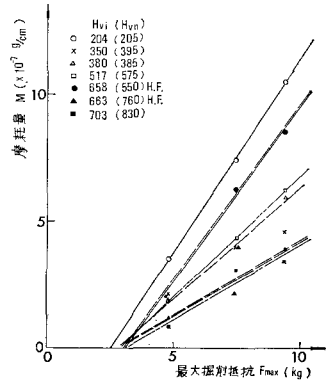


図-9 種々の硬さに対する摩耗量  $M$  と最大掘削抵抗  $F_{\max}$  の関係 ( $v=180$  cm/sec, 琵琶湖砂)

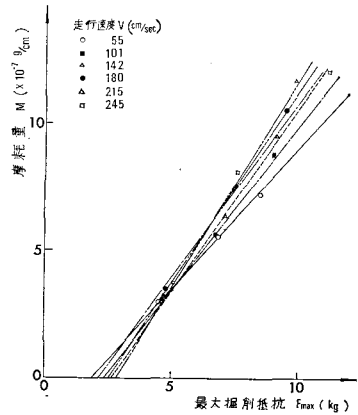


図-10 種々の走行速度に対する摩耗量  $M$  と最大掘削抵抗  $F_{\max}$  の関係 ( $H_v=205$ , 琵琶湖砂)

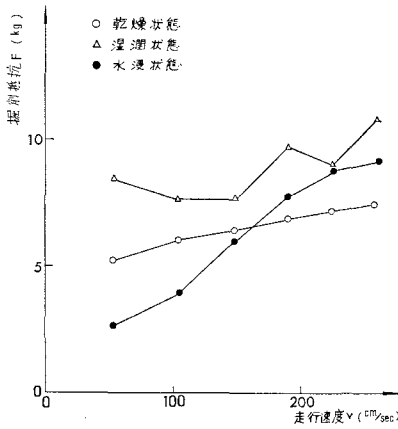
(4) 碎石による丸鋼の摩耗におよぼす水の影響

a) 概 説

碎石(粒径 4.0~15.0 mm)を円環土槽内に充てんし、自然乾燥状態と含水比 2.4%の湿潤状態および試料碎石を完全に水没させた水浸状態において転圧し、前節と全く同様の方法で実験を行なった。この場合、金属の供試体としては、同一の材質 SK-4 を熱処理した表-2 に示す HI...N の計 7 本の丸鋼を使用した。なお、この実験においては丸鋼端部のエッジ部分の影響を除去するため、その部分にキャップを取りつけ、エッジ部が摩耗するのを防止した。本実験においては、粒径の大なる碎石を対象として、まず、乾燥、湿潤および水浸状態について速度の掘削抵抗におよぼす影響を明らかにした。次に、種々の場合について掘削抵抗と摩耗量の関係を明らかにし、掘削抵抗が同じ大きさを示す場合について、種々の金属硬さに対応して、各含水状態の丸鋼の摩耗量の差異におよぼす影響について検討した。

b) 掘削抵抗と走行速度との関係

図-11 は各含水状態に対して、丸鋼に作用する平均

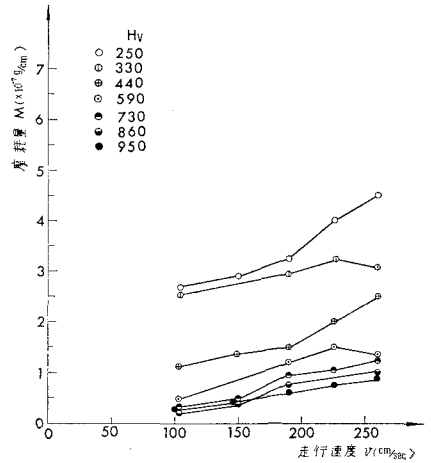


図一11 種々の含水状態に対する掘削抵抗  $F'$  と走行速度  $v$  の関係 (碎石 4.0~15.0 mm)

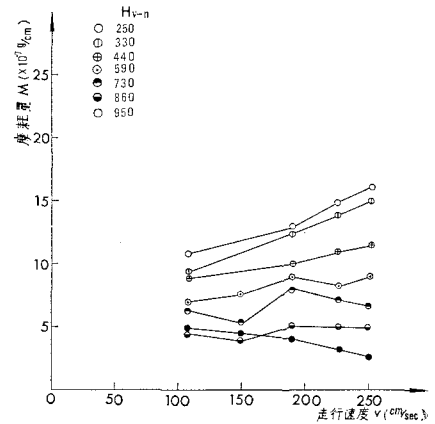
掘削抵抗と走行速度の関係を示したものである。乾燥状態では走行速度の増大とともに、掘削抵抗も一樣に増大している。しかし、湿潤状態ではその現象は複雑であり、走行速度が 100 cm/sec の近傍で一度減少した後再び増大していく傾向が推察される。一方、水浸状態においては走行速度の増大とともに著しく掘削抵抗が上昇し、低速度域における掘削抵抗が他の含水状態と比べて小さい値を示しているのに反し、高速度域においては乾燥状態におけるよりも大きい値を示した。また、湿潤状態においては、いずれの走行速度に対しても掘削抵抗が最も大きい値を示しているのは、転圧ローラによる締固め効果が最もよく発揮されているためと考えられる。試験の結果、試料碎石の乾燥密度は湿潤状態 (含水比 2.4%) において  $1.44 \text{ g/cm}^3$ 、乾燥状態で  $1.41 \text{ g/cm}^3$  であり、水浸状態 (含水比 37.7%) において  $1.34 \text{ g/cm}^3$  であった。

一般に、丸鋼に作用する掘削抵抗を試料土のせん断抵抗力で表現すると、走行速度がきわめて小さい場合の静的せん断抵抗力と走行速度に關与する動的せん断抵抗力に大別される。この場合、静的せん断抵抗力は前述の乾燥密度と対応するものであり、動的せん断抵抗力は、乾燥状態および水浸状態では速度に比例して増大している。この場合、水浸状態においては走行速度の増大に伴って試料碎石は急激な膨張を引き起こすために、間げき水圧は負圧となり、有効応力の増大に伴って碎石粒子間のせん断抵抗力は著しく増大するので、乾燥時に比してその勾配が大となるのである。一方、湿潤状態においては、前述したように、締固め密度が他の含水状態に比べて高いために、掘削前の密度と掘削によるせん断破壊後の密度との差が大きくなり、転圧直後の強度と破壊後の強度との差が他の含水状態に比して増大する。また、3本の供試体による軌跡は互いに重複し、回転円板の回転数が増大するほど台車の走行速度が一定であるために試

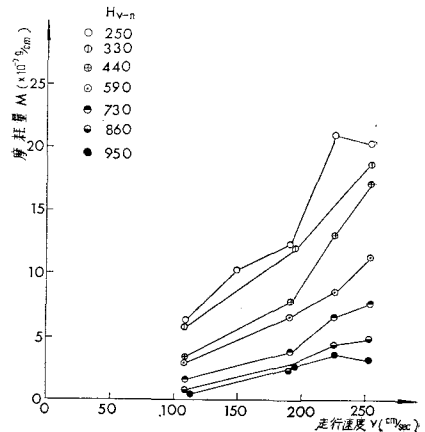
料碎石の破壊が促進され、強度低下は著しくなる。そのために、静的せん断抵抗力は走行速度の増加とともに減少する。この現象と動的せん断抵抗力が走行速度に比例



(a) 乾燥状態



(b) 湿潤状態



(c) 水浸状態

図一12 種々の金属硬さおよび含水状態に対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (碎石 4.0~15.0 mm)

して増大する現象とが重合するために、湿潤状態に特有な掘削抵抗と速度の関係、すなわち、掘削抵抗が走行速度 100 cm/sec の近傍で一度減少した後再び増大していく現象を呈したのである。他方、乾燥および水浸状態においては、かなりゆるい状態で堆積しているために、先行する丸鋼による破壊による影響が湿潤状態に比べて少ないために、走行速度の増大とともに掘削抵抗は順調に増大するのであると考えた。

c) 摩耗量と掘削抵抗の関係

丸鋼の摩耗量と、これを支配する重要な因子の一つである掘削抵抗との関係について種々の角度より検討する。まず、摩耗量と走行速度との関係について、各含水状態に対して、丸鋼の硬さを補助変数として図示すると

図-12 (a), (b), (c) を得た。乾燥および湿潤状態においては、走行速度との相関性は明確でないが、一方水浸状態においては速度効果が著しく発揮されており、摩耗量は走行速度とともに増大することが判明した。これを、両対数紙上に再プロットすると、図-13

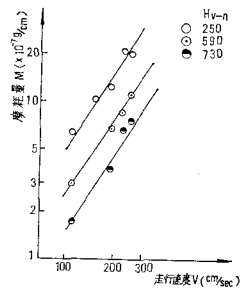


図-13 摩耗量  $\log M$  と走行速度  $\log v$  の関係 (水浸状態, 砕石 4.0 ~ 15.0 mm)

$$M = K \cdot V^n \quad (\text{水浸状態}) \dots\dots\dots (3)$$

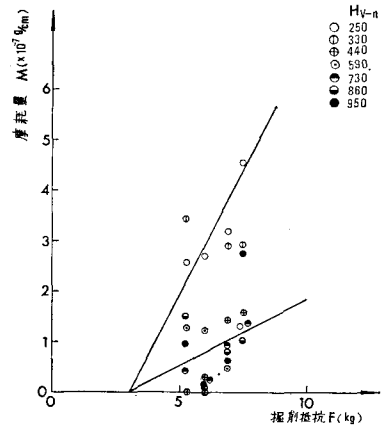
ここに、 $M$  は丸鋼の摩耗量であり、 $V$  はその走行速度である。 $K$  は比例定数であり、この場合、金属の硬さによって変化する。また、指数  $n$  は水浸状態における本実験において 1.5 を得た。

また、図-11 より各含水状態に対する 摩耗量と掘削抵抗の関係硬さを補助変数として図示すると、図-14 (a), (b), (c) が得られた。多少のばらつきはあるが、いずれの場合にも、摩耗量は掘削抵抗に比例して増大していることは明らかであり、式 (2) に導いた実験式がそのまま成立することが、回帰分析を行なった結果判明した。

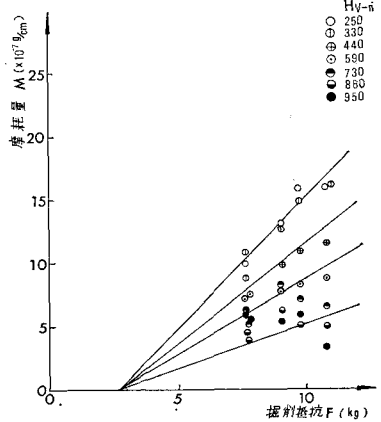
d) 摩耗量と硬さの関係

各含水状態に対して、丸鋼の摩耗量とその硬さの関係について、走行速度および掘削抵抗を補助変数にとって図示すると図-15 (a), (b), (c) が得られた。若干のばらつきはあるが、摩耗量が硬さに反比例して減少することは明白であり、図-4 と同様に前報<sup>6)</sup>において展開した理論式 (12) および (14) を実証するものである。

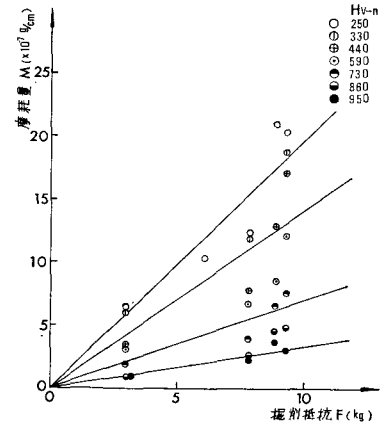
次に、同じ掘削抵抗の値に対して、それぞれの丸鋼の硬さについて摩耗量と硬さの関係を各含水状態に関して明白にすることによって、摩耗におよぼす水の影響によ



(a) 乾燥状態



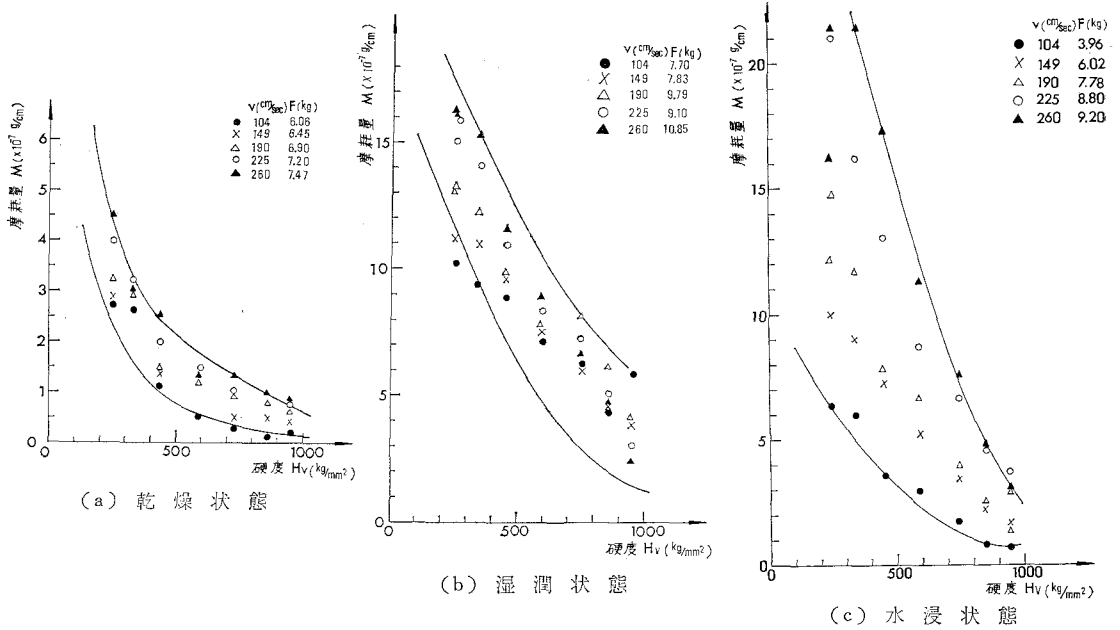
(b) 湿潤状態



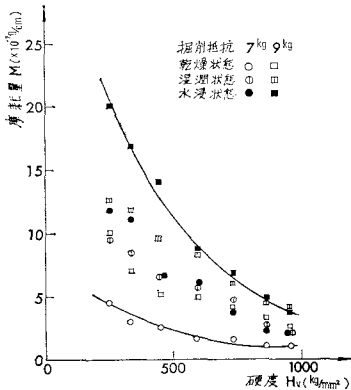
(c) 水浸状態

図-14 種々の金属硬さおよび含水状態に対する摩耗量  $M$  と掘削抵抗  $F$  の関係 (砕石 4.0 ~ 15.0 mm)

る他の因子について検討する。図-15 より、掘削抵抗が 7 kg および 9 kg を選定し、各場合についての摩耗量を読みとり、図-16 を作成した。丸鋼の硬さが十分高くなると含水状態による差異は少なくなるが、一般



図—15 種々の走行速度（掘削抵抗）および含水状態に対する摩耗量と金属硬さとの関係（砕石 4.0~15.0 mm）



図—16 種々の含水状態について、一定の掘削抵抗に対する摩耗量と金属硬さの関係（砕石 4.0~15.0 mm）

に、いずれの硬さに対しても水浸状態における摩耗量が最も大きく、ついで湿潤状態、乾燥状態の順に小さくなっている。この場合、水浸状態における摩耗量は乾燥状態の 4~5 倍であり、湿潤状態においては乾燥状態の 2~3 倍の大きさを示した。このような差異を生ずる原因については後述する。

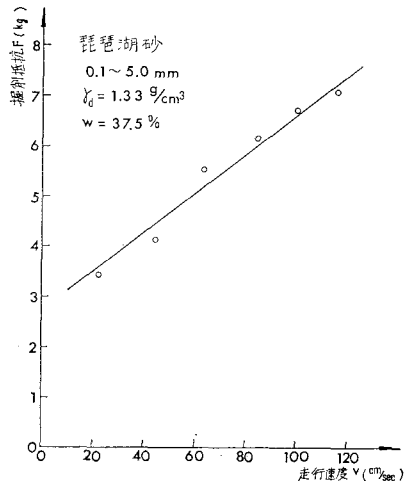
(5) 水浸状態における種々の砂れき・玉石による丸鋼の摩耗特性

ここでは、表—1 に記した種々の試料土砂れき・玉石を水浸状態にした場合について、これらの砂れき特性が丸鋼の摩耗量におよぼす影響について、丸鋼に作用する掘削抵抗と速度の関係および各種の金属硬さを有する丸

鋼の摩耗量と走行速度の関係について明らかにし、試料土の粒度分布や形状特性などの摩耗量におよぼす影響について検討した。

a) 砂れきによる摩耗試験

水浸状態において、自然に堆積させたままの砂れきは、乾燥密度  $1.33 \text{ g/cm}^3$ 、含水比 37.5% であった。この中に丸鋼を貫入させ走行させる場合の掘削抵抗と走行速度との関係は 図—17 に示すとおりであり、速度の増加に比例して掘削抵抗は増大している。その原因については、前述したように、水浸した砂が大きなせん断速度でせん断される場合の負の間げき水圧の発生に帰因する



図—17 掘削抵抗  $F$  と走行速度  $v$  の関係（琵琶湖砂、水浸状態）



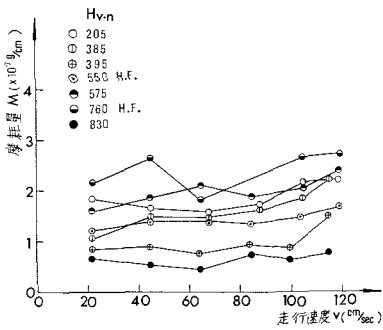


図-18 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (琵琶湖砂, 水浸状態)

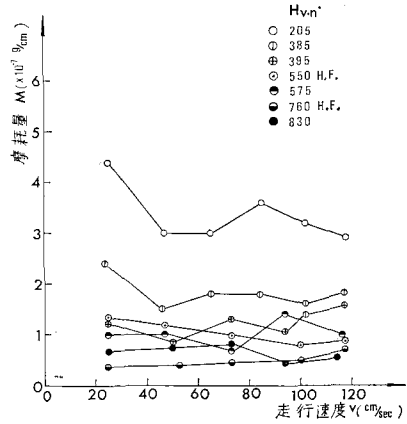


図-20 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (0.1~5.0 mm 碎石土砂, 水浸状態)

ものである。また、種々の金属硬さを有する丸鋼の摩耗量と走行速度との関係を 図-18 に示したが、摩耗量は比較的少なく走行速度との相関性はあまり明りょうでなかったが、走行速度の増大とともに、摩耗量は多少増加していく傾向にある。

b) 碎石土砂による摩擦試験

粒度範囲の異なる3種類の碎石土砂を、それぞれ水浸状態において小型土槽内に自然堆積させた。この場合の乾燥密度および含水比は、それぞれ粒度範囲 0.1~5.0 mm において 1.34 g/cm<sup>3</sup>, 37.1% であり、粒度範囲 4.0~15.0 mm において 1.34 g/cm<sup>3</sup>, 37.7% であり、粒度範囲 10~20 mm において 1.23 g/cm<sup>3</sup>, 44.0% であった。この場合の丸鋼に作用する掘削抵抗と走行速度との関係は、それぞれ 図-19 に示したように、一般に走行速度の増加とともに掘削抵抗は増大するが、粒度が小さい場合には速度効果はあまり発揮されていないことが判明した。また、掘削抵抗の大きさは、碎石土砂のせん断抵抗力に依存することが乾燥密度その他から推察された。次に、それぞれの碎石土砂について、種々の金属硬さを有する丸鋼の摩耗量と走行速度との関係を図示する

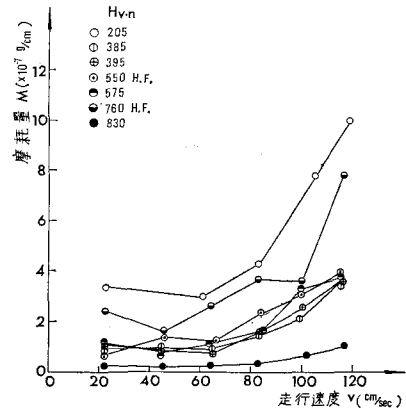


図-21 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (4.0~15.0 mm 碎石土砂, 水浸状態)

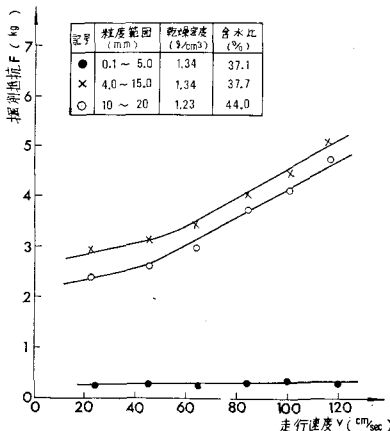


図-19 種々の粒度範囲を有する碎石土砂に対する掘削抵抗  $F$  と走行速度  $v$  の関係 (水浸状態)

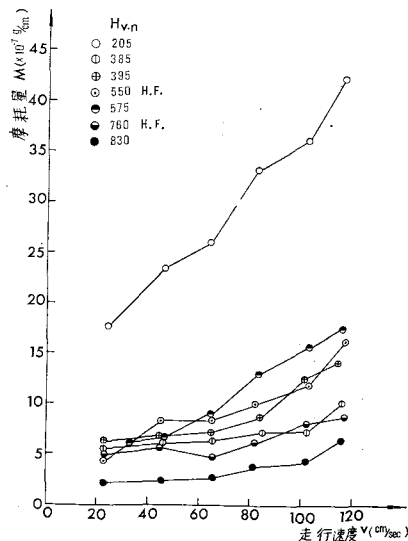


図-22 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (10~20 mm 碎石土砂, 水浸状態)

と図-20, 図-21 および 図-22 が得られた。摩耗量におよぼす速度効果は, 砕石の粒径が増大するほど顕著に発揮されている。

特に粒度範囲 4.0~15.0 mm と 10~20 mm を比較すると掘削抵抗の大きさはかなり近似しているのに対して摩耗量に相当の差がでていいるのは, 粒径による影響を顕著に発揮していることを示している。これは, 金属の材質や熱処理の方法が異なるために, 砕石土粒子による貫入力が増大するほど金属のはく離率や引っかかり硬さの差が大きく影響し, 単なるビッカース硬さだけでは摩耗量の大小を論ずることはできないことを意味する。

c) 玉石・砂利による摩耗試験

乾燥密度および含水比は, それぞれ粒度範囲 1.0~5.8 mm の玉石で 1.68 g/cm<sup>3</sup>, 23.5%, 粒度範囲 4.7~15.0 mm の玉石で 1.69 g/cm<sup>3</sup>, 22.9% および粒度範囲 10~25 mm の砂利で 1.41 g/cm<sup>3</sup>, 33.0% であった。丸鋼に作用する掘削抵抗と走行速度の関係は, 図-23 に示すとおりであり, 走行速度の増大とともに掘削抵抗は増加している。また, 掘削抵抗の大きさは, いずれの走行速度に対しても粒径が増大するほど増加する傾向にある。次に, それぞれの玉石および砂利について, 種々の金属硬さを有する丸鋼の摩耗量と走行速度との関係を図示すると, 図-24, 図-25 および 図-26 が得られた。この場合, いずれの粒度分布に対しても摩耗量は走行速度とともに増大しており, 特に未処理鋼である丸鋼 (H<sub>v</sub> 205) の摩耗量の大きさは熱処理鋼と比較してきわめて高い値を示している。また, 砕石土砂と比較すると, その形状が丸味を帯びているにもかかわらず, その乾燥密度およびショア硬さが高いために, 全体として摩耗量はほぼ同じ粒度分布を有する場合について砕石土砂よりも高い値

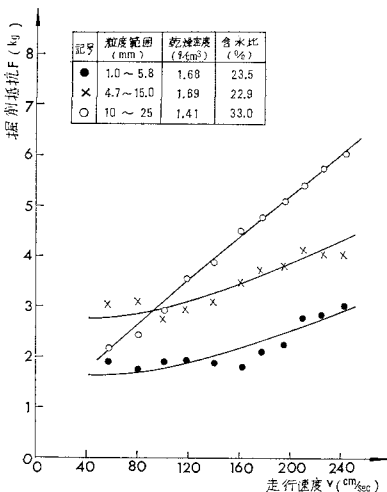


図-23 種々の粒度範囲を有する玉石および砂利に対する掘削抵抗  $F$  と走行速度  $v$  の関係 (水浸状態)

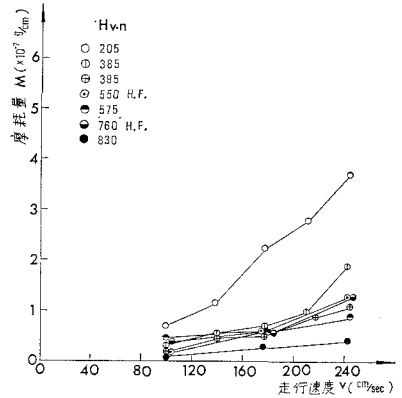


図-24 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (1.0~5.8 mm 玉石, 水浸状態)

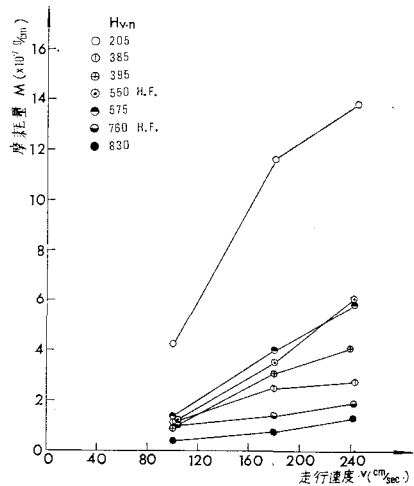


図-25 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (4.7~15.0 mm 玉石, 水浸状態)

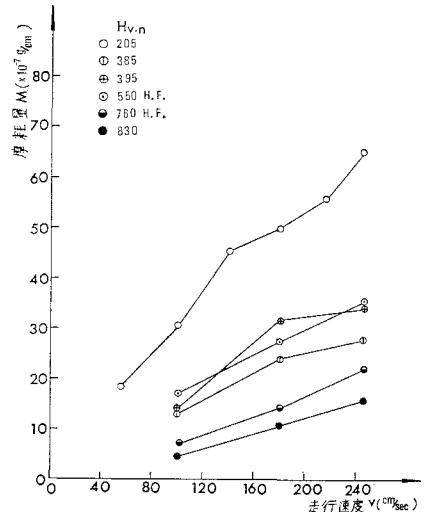


図-26 種々の金属硬さに対する摩耗量  $M$  と走行速度  $v$  の関係 (10~25 mm 砂利, 水浸状態)

を示した。

### 3. 実験結果とその考察

#### (1) 金属の摩耗に及ぼす水の影響（固結土粒子の場合）

個々の土粒子の挙動に対する自由度を全くなくした固結土粒子を金属面に摺動させる場合の金属の摩耗量に対して、水の存在がどのような影響を与えるかについて実験的考察を行なった。まず、固結土粒子として、直径 24.0 cm の回転円板上に設置した耐水研磨紙を使用し、乾燥状態および水浸状態の各場合について試験を行なった。この場合の研磨紙粒子は JIS R 6001 (1956) で規定されている炭化珪素 CC-100 であり、粒度は 210  $\mu$  のふるいを全部通過するものである。金属試料としては、直径 20 mm、高さ 25 mm の円柱形に成形した炭素工具鋼 SK-3（ピッカース硬さ  $H_v$  250）を使用し、これを回転する研磨紙の直上に設置し、荷重を直接載荷することによって接触摺動させ、摩耗試験を行なった。このときの摺動速度は 136.1, 544.2 および 980.0 cm/sec の 3 段階とし、金属面と研磨紙との間の接触面圧は 0.832 kg/cm<sup>2</sup> までの種々の値に対して試験を行ない、金属の摩耗量におよぼす水の影響について明らかにした。この実験の結果は 図-27 (a), (b), (c) で示すように、いずれの摺動速度および接触面圧に対しても金属の摩耗量は乾燥状態における方が水浸状態よりも大きな値を示している。この原因について、金属面と研磨紙粒子との間に発生する摩擦温度が考えられる。次節においては、主として、この点について実験的考察を行なう。

#### (2) 固結土粒子と金属の間に発生する摩擦温度の測定

ここでは、摩擦温度が摩耗量におよぼす影響について考察する。実験装置は前節と同じであるが、研磨紙は JIS R 6001 (1956) で規定されている溶融アルミナ 1 級 AA-40, 60, 100 および 150 であり、それぞれ粒度は 740  $\mu$ , 420  $\mu$ , 210  $\mu$ , および 149  $\mu$  のふるいを全部通過するものである。金属材料は前述と同じ円筒供試体を使用した。摺動面に発生する摩擦温度を測定するために、供試体の中央部に直径 5 mm の穴を摺動面より 1.0 mm の位置まであけて熱電対をそう入し、金属摩耗によって熱電対が摺動面に達したときの温度を測定した。この場合の熱電対は白金-白金ロジウム (13% Rh) であり、発生する熱起電力から摩擦温度を求めた。また、研磨紙粒子の摺動速度は 9.88 m/sec までの種々の値について測定し、接触面圧は、前述と同様に、0.832 kg/cm<sup>2</sup> までの種々の値について試験した。まず、研磨紙の種々の表面あらさおよび各接触面圧の値に対して、摩擦温度と摺動速度の関係を求めると 図-28 (a), (b), (c), (d) が得られた。また、種々の表面あらさおよび摺動速度の値に対して、摩擦温度と接触面上の関係を図示したのが 図-29 (a), (b), (c), (d) である。これより、摩擦温度は摺動速度および接触面上の増加とともに著しく増大することが判明した。また、表面あらさと摩擦温度との間には顕著な関係はみられず、研磨紙粒子の大きさには関係しないと考えてよい。

さて、砥粒子と金属面で構成される摩擦面の真実接触点では瞬間的にかかなりの高温になるが、この摩擦面温度を理論的に計算する方法として F.P. Boden<sup>9)</sup>、曾田<sup>9)</sup>、J.C. Jaeger<sup>9)</sup> は 図-30 (a), (b), (c) に示す摩擦面模型を設定し、理論解を得ている。種々の試算を行なった

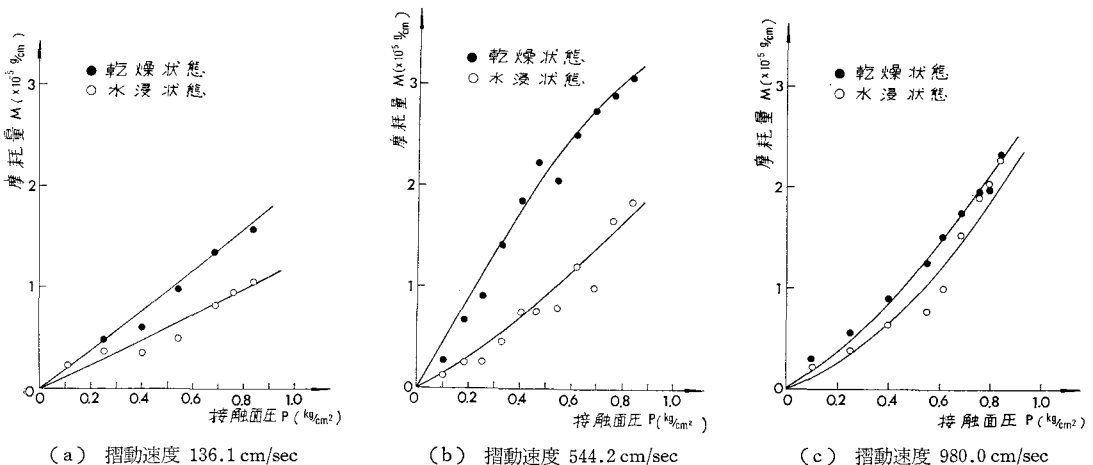
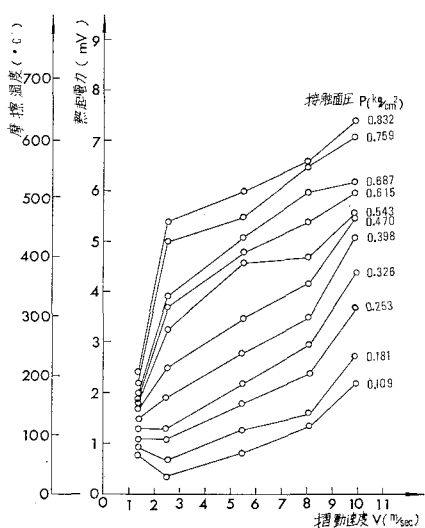
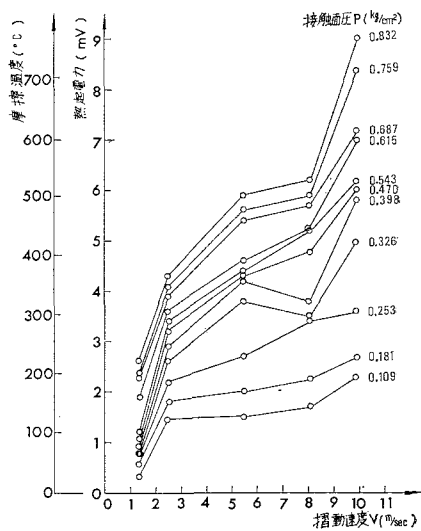


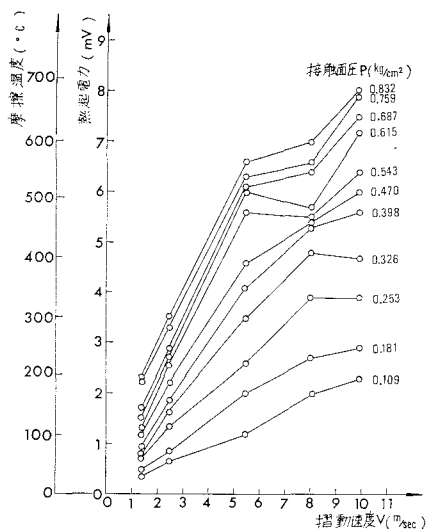
図-27 水の有無に対する摩耗量  $M$  と接触面圧  $P$  との関係



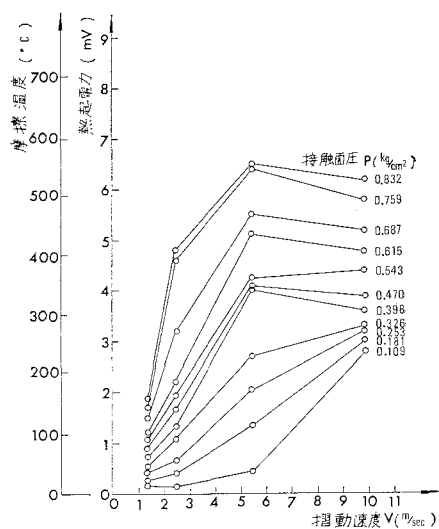
(a) 研摩紙の表面あらさ AA-40



(b) 研摩紙の表面あらさ AA-60



(c) 研摩紙の表面あらさ AA-100



(d) 研摩紙の表面あらさ AA-150

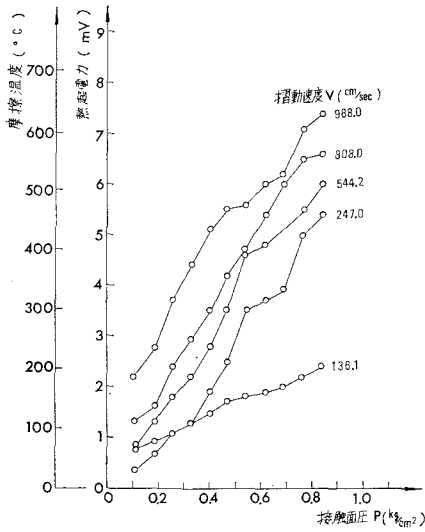
図-28 種々の表面あらさおよび接触面圧  $P$  に対する摩擦温度  $T$  と摺動速度  $v$  の関係

ところ、研摩砥粒子による金属面上の摩擦温度については、J.C. Jaeger の移動熱源の理論が最も真実に近いものであり、その平均値は実測値とかなり一致している。また、最高の摩擦温度は J.C. Jaeger の計算値および F.P. Bowden の模型において真実接触面積より推定される温度より考えると、瞬間的にかなりの温度に達し、金属の溶融点に近い温度となることが認められた。そのために、乾燥時においては、砥粒子による金属面上の摩擦痕での遊離金属のはく離率の増大および熱処理して金属表面硬さの低化などによって摩擦量が增大する。一方、水浸状態において、前述と同じ実験を行なった結果、最も苛酷な摩擦力を与えた場合にも熱起電力は全く

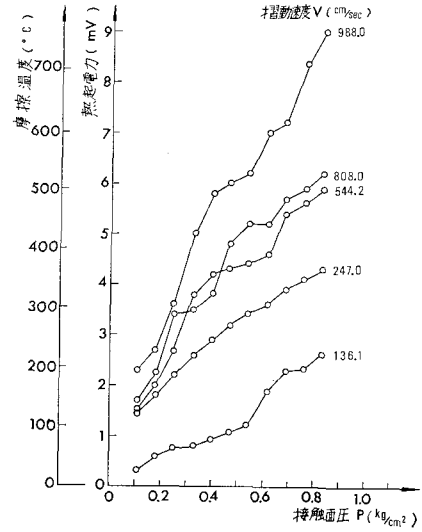
発生せず、水による冷却作用が完全に発揮されていることが実証された。すなわち、固結土粒子による金属面の摩擦量におよぼす水の影響について考えるとき、乾燥状態におけるほうが水浸状態よりも摩擦量が增大するという実験事実を説明するには摩擦温度および発生熱量が重要な要因となることが判明した。

(3) 水浸した堆積土砂による金属摩擦量増大の要因

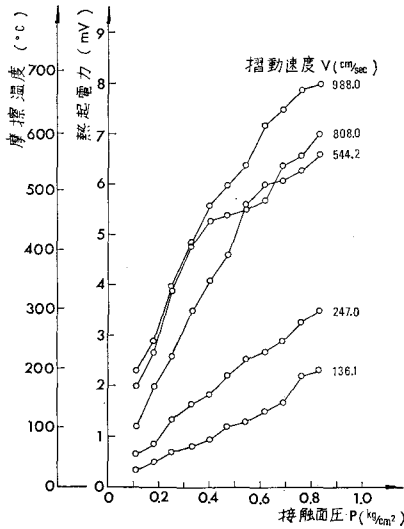
固結土粒子に対する金属面の摩擦量は水浸状態に比して乾燥状態におけるほうが増大することが種々の実験によって実証され、その要因は摩擦温度によって説明された。しかし、ゆるく堆積した砂れきに対する金属の摩擦



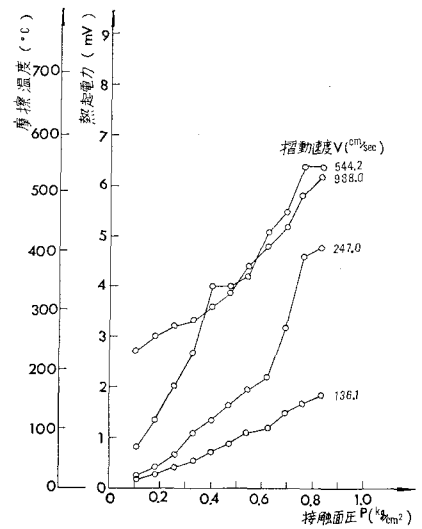
(a) 研摩紙の表面あらさ AA-40



(b) 研摩紙の表面あらさ AA-60



(c) 研摩紙の表面あらさ AA-100



(d) 研摩紙の表面あらさ AA-150

図-29 種々の表面あらさおよび振動速度  $v$  に対する摩擦温度  $T$  と接触面圧  $P$  の関係

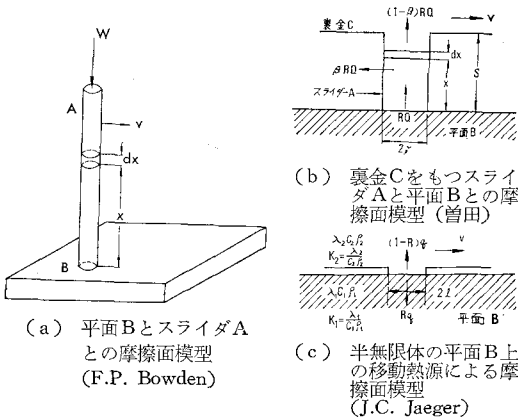


図-30 砥粒子と金属面との摩擦面模型

量については全く逆の現象を示し、乾燥状態に比して水浸状態におけるほうが、かなり摩耗量は増大していることは図-15および図-16より明らかである。その原因については、摩擦温度だけでは説明することができず、堆積土砂が金属面上を走行する場合について、乾燥および水浸状態において発揮する諸特性を詳細に解析し考察する必要がある。まず、実験結果より最も顕著な現象として、丸鋼の掘削抵抗におよぼす速度効果が水浸状態において最も高い値を示したことである。これは、堆積土砂を掘削するときの掘削速度が増大するほど、せん断に伴う土砂の急激な体積膨張により発生する負の間げき水圧が増大し、土粒子間の有効応力が増大するために、せん断抵抗は見かけ上増大したのである<sup>11)</sup>。その増大す

る割合は、間げき水の透水性および土砂の切削性に依存するのである。

さて、この場合の掘削抵抗  $F$  に影響を与える諸因子について、相互の関係を定量的に求めるために次元解析を行なった。まず、掘削抵抗に關係する因子として、掘削抵抗  $F$  (kg), 丸鋼の幅  $b$  (cm), 掘削深さ  $z$  (cm), 土砂の単位体積重量  $\gamma$  (kg/cm<sup>3</sup>), 切削強度指数  $e_s$  (kg/cm<sup>3</sup>)<sup>10)</sup>, 透水係数  $k$  (cm/sec), 丸鋼の走行速度  $v$  (cm/sec) および重力の加速度  $g$  (cm/sec<sup>2</sup>) を考える。これらの物理量の間の関係は、ある関数形

$$f(F, b, z, \gamma, e_s, k, v, g) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

で表わされるとし、 $\Pi$  定理によって、これを無次元積の関係として表わすと、

$$f\left(\frac{F}{b\gamma z^2}, \frac{e_s}{\gamma}, \frac{v}{k}, \frac{v^2}{gz}\right) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

となる。すなわち、掘削抵抗は、

$$\frac{F}{b\gamma z^2} = f\left(\frac{e_s}{\gamma}, \frac{v}{k}, \frac{v^2}{gz}\right) \dots\dots\dots (6)$$

として求められる。この実際の関数形については、前述の実験結果より決定する。

図—17, 図—19 および 図—23 は、いずれも水浸状態において実測した掘削抵抗  $F$  (kg) が丸鋼の走行速度  $v$  (cm/sec) に比例して増大することを示しており、実験式として回帰分析を行なった結果、次式を得た。なお、記号 a, b, ..., g は 表—1 に準ずるものである。

$$\left. \begin{aligned} (a) \quad & F = 3.87 \times 10^{-2} v + 2.75 \\ (b) \quad & F = 8.75 \times 10^{-4} v + 0.25 \\ (c) \quad & F = 2.77 \times 10^{-2} v + 1.45 \\ (d) \quad & F = 2.76 \times 10^{-2} v + 1.80 \\ (e) \quad & F = 5.77 \times 10^{-3} v + 1.30 \\ (f) \quad & F = 7.41 \times 10^{-3} v + 2.30 \\ (g) \quad & F = 2.10 \times 10^{-2} v + 0.90 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで上式で得られた関係式と式 (6) で示した次元解析の結果と比較する。まず、式 (6) 右辺第 3 項  $v^2/gz$  をとり出して変形すると、

$$\frac{F}{b\gamma z^2} = C_D' \cdot \frac{v^2}{gz} \quad (C_D' : \text{係数})$$

$$F = C_D' \cdot b \cdot z \cdot \gamma \cdot \frac{v^2}{g} = C_D \cdot A \cdot \frac{\gamma v^2}{2g} \dots\dots\dots (8)$$

となり、これは流体中に設置された物体の抵抗力を表わす式である。すなわち、破壊された土砂と水との混合液体中を丸鋼が進むときの抵抗である。いま、丸鋼に対する抵抗係数  $C_D$  は 1.00 であり<sup>12)</sup>,  $A = b \cdot z = 24 \text{ cm}^2$ ,  $\gamma = 1.2 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$  なる混合液体を考へて、 $F$  の値を算定すると、

$$F = 1.46 \times 10^{-5} v^2 \text{ (kg)} \dots\dots\dots (9)$$

となり、本実験においては、 $v = 100 \text{ cm/sec}$  以下の低速領域においてはほとんど問題とならない程度の大きさであり、この実験の最高値  $v = 240 \text{ cm/sec}$  でわずかに影響がでる程度である。

したがって、得られた実験式 (7) は、式 (6) の第 1 項と第 2 項について速度  $v$  の 1 次関数で表わされる。

いま、無次元積の関数として

$$\frac{F}{b\gamma z^2} = \left( c_0 + c_1 \frac{v}{k} \right) \cdot \frac{e_s}{\gamma} \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、

$$F = \left( c_0 + c_1 \frac{v}{k} \right) e_s b z^2 \dots\dots\dots (11)$$

を考へる。 $c_0, c_1$  は、実験によって与えられる定数である。

次に、ここで使用した種々の粒度分布を有する土砂れき・玉石に対して行なった実験の結果との対応性について考へた。その結果、式 (7) において速度  $v = 0$  における掘削

表—3 試験に供した試料土砂れきの物理定数

分 類	a	b	c	d	e	f	g
	砂れき	砕	石	玉	石	砂	利
乾燥状態							
湿潤密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.31	—	1.41	—	—	—	—
含水比 $w$ (%)	1.2	—	0.06	—	—	—	—
乾燥密度 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.29	—	1.41	—	—	—	—
間げき比 $e$	1.05	—	0.90	—	—	—	—
飽和度 $S_r$ (%)	3.0	—	0.2	—	—	—	—
切削強度指数 $e_s$ ( $\times 10^{-2}$ kg/cm <sup>3</sup> )	2.00	—	7.69	—	—	—	—
湿潤状態							
湿潤密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.82	—	1.47	—	—	—	—
含水比 $w$ (%)	10.0	—	2.4	—	—	—	—
乾燥密度 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.65	—	1.44	—	—	—	—
間げき比 $e$	0.61	—	0.87	—	—	—	—
飽和度 $S_r$ (%)	43.4	—	7.4	—	—	—	—
切削強度指数 $e_s$ ( $\times 10^{-2}$ kg/cm <sup>3</sup> )	1.50	—	5.67	—	—	—	—
水浸状態							
湿潤密度 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.83	1.84	1.84	1.77	2.07	2.08	1.88
含水比 $w$ (%)	37.5	37.1	37.7	44.0	23.5	22.9	33.0
乾燥密度 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.33	1.34	1.34	1.23	1.68	1.69	1.41
間げき比 $e$	0.99	1.00	1.01	1.18	0.65	0.63	0.87
飽和度 $S_r$ (%)	100	100	100	100	100	100	100
切削強度指数 $e_s$ ( $\times 10^{-2}$ kg/cm <sup>3</sup> )	0.57	0.35	2.63	3.99	1.30	1.37	2.51
透水係数 $k$ ( $\times 10^{-3}$ cm/sec)	0.28	0.21	0.83	1.17	0.95	0.98	1.37
$e_s/k$ ( $\times 10^4$ g·sec/cm <sup>4</sup> )	2.04	1.67	3.17	3.41	1.37	1.40	1.83

注) 記号 abc...g は表—1 に準ずる。

抵抗  $F_0$  と切削強度指数  $e_s$  との関係は、

$$e_s = 1.90 F_0 \text{ (相関係数 } 0.83) \dots\dots\dots (12)$$

となり、また、表—3 において算定した  $e_s/k$  と速度項の係数  $\tan \delta$  との間には、

$$\frac{e_s}{k} = 2.24 \tan \delta \text{ (相関係数 } 0.64) \dots\dots\dots (13)$$

なる関係が得られ、両者ともよく対応することが判明した。したがって、水浸状態における掘削抵抗は、静的試験より求めた土砂の切削強度指数より算定される掘削抵抗と、比例定数を  $e_s/k$  とする速度の1次式に比例する掘削抵抗との和で与えられることが明らかとなり、式(11)が、一般に成立することが実証された。

この水浸状態における掘削抵抗におよぼす速度効果の影響が他の含水状態に比して最も卓越していることは上述の理論によって説明されたが、掘削抵抗と比例関係をもつ金属の摩耗量についても全く同様な傾向を有することは図—7 および 図—15 より明らかである。

このように、金属の摩耗量を支配する要因の一つとして、金属面に作用する土圧である掘削抵抗が工学的に重要な意味をもつのである。すなわち、静的状態における土砂固有のせん断強度特性に影響を与える諸因子(含水比、密度、土粒子の形状および粒度構成など)は、切削強度指数  $e_s$  によって表現され、また、土砂の動的性質として、走行速度は特に水浸状態において、透水係数と関連させて掘削抵抗の増加分として式(11)によって計算されるので、これらの諸因子を掘削抵抗に換算して評価することができる。一例として、砂れきに対する締固め含水比を種々にかえて行なった実験においては、最適含水比近傍における掘削抵抗がいずれの走行速度に対しても最高値をとっていたのに対し、丸鋼の摩耗量も同様に、乾燥密度の最も高くなる最適含水比近傍において最高値をとり、また、他の含水状態に対しても、実験式(2)の妥当性が説明されるのである。また、琵琶湖砂に対する実験においては速度による影響は少ないが、碎石土砂を水浸させた場合は掘削抵抗および摩耗量におよぼす速度の影響が著しいことは前述したとおりである。しかし、図—11 より、掘削抵抗の絶対値は、この場合、すべての走行速度に対して湿潤状態において最高値を得ているにもかかわらず、摩耗量は水浸状態におけるほうが他の含水状態と比較してつねに最高値となっている。この原因としては、碎石土砂の間げきが完全に水で飽和されている状態において、急速なせん断力が作用したとき、負の間げき水圧の発生に伴って、碎石粒子間の有効応力が增大するために、粒子相互の拘束性が不飽和な状態と比べてかなり増大する。そのために、金属面上を走行する碎石粒子の運動形態<sup>2)</sup>を分析すると、滑動する土粒子の割合が増大することは容易に推察することができ

る。このように、水浸状態における滑動土粒子数が乾燥状態や湿潤状態と比べて増大することが、水中における金属摩耗量を増大せしめている第2の要因である。これらの割合を定量的に把握することは、とくに高速度で走行している状態ではかなり困難であるので、摩耗量測定結果より定性的に把握するのにとどめた。すなわち、図—16 に示したように、一定の掘削抵抗に対して摩耗量を整理したときの各含水状態の間での差異は、上述の滑動土粒子数の割合の差によるものと考えてよい。なお、金属面上を滑動する碎石粒子の運動速度は、いずれの含水状態に対しても変化せず、碎石粒子相互の拘束性のために加速度は作用しないと判断した。

#### 4. 結 論

金属の摩耗量に影響をおよぼす基本的な要因として、7個の因子について説明を行ない、実際問題として重要な砂れきの諸特性と含水状態の金属の摩耗におよぼす影響について実験的考察を行なった。その結果を要約すると、次のようになる。

(1) 種々の含水比で締固めた細砂(平均粒径 0.70 mm)について、丸鋼による摩耗試験を行なった結果、最適含水比近傍において摩耗量および掘削抵抗は最大値を得た。また、含水比が増大するとともに摩耗量および掘削抵抗におよぼす走行速度の影響が顕著であった。この場合、各含水比に対して掘削抵抗  $F$  と摩耗量  $M$  との間に、次の実験式が成立した。

$$M \propto F_{\max} - F_0 \text{ (} F_0 \text{ は定数)}$$

ここに、 $F_{\max}$  は丸鋼による掘削抵抗の変動域において最大値(極大値の平均値)をとったものである。

(2) 硬質砂岩を破碎した碎石(粒径 4.0~15.0 mm)について、乾燥、湿潤および水浸状態において、堆積した試料碎石中に丸鋼を貫入させ、掘削試験を行なった結果、掘削抵抗はすべての走行速度に対して湿潤状態が最も高く、乾燥状態では低い値を示したのに反し、水浸状態においては、走行速度の増加に伴って、掘削抵抗は次式で示すように直線的に増大し、速度効果は最も著しく発揮されるという現象を示した。

$$F = \left( c_0 + c_1 \frac{v}{k} \right) e_s b z^2$$

ここに、 $F$  は掘削抵抗、 $e_s$  は切削強度指数、 $v$  は走行速度、 $k$  は透水係数、 $b$  は掘削刃の刃幅、 $z$  は掘削刃の貫入深さであり、 $c_0$  および  $c_1$  は定数である。また、上式は種々の粒径および形状を有する土砂の水浸状態で堆積した場合について丸鋼による掘削試験を行なった実験値とよく一致した。

(3) 金属の摩耗量に重要な影響をおよぼす要因とし

掘削抵抗との相関性はきわめて高い。掘削抵抗は静的状態における土砂固有のせん断強度特性に影響を与える諸因子(含水比, 密度, 土粒子の形状および粒度構成など)を切削強度指数で表現し, また, 土砂の動的性質として走行速度を特に水浸状態における透水係数と関連させることによって掘削抵抗の増分として表現することができる。すなわち, 上述の諸因子を掘削抵抗の大きさに換算して評価できる点で金属の摩耗量と掘削抵抗との関係は工学的に重要な意義を有するものである。

(4) 前述の碎石土砂について, 種々の走行速度を与えて行なった丸鋼の摩耗試験において各含水状態に対する摩耗量の差異は掘削抵抗の大きさの順位とは異なり, 水浸状態において最も高い値を示し, ついで湿潤状態より乾燥状態へと低下していく傾向にある。そこで, 同じ掘削抵抗の値に対して摩耗量は乾燥状態において最も小さく, 湿潤状態から水浸状態へと含水比の増加とともに増大する傾向にある。この傾向は, 本実験で行なったすべての金属硬さに対して見られる現象であり, 特に水浸状態における金属の摩耗量は乾燥状態における値の数倍にも達している。その原因は, 水浸状態において急速なせん断破壊に伴う負の間げき水圧の発生によって土粒子相互の拘束性が増大し, 金属面上の滑動土粒子数が増大したためであると考えられる。

(5) 種々の走行速度および各含水状態に対して丸鋼の摩耗量とその硬さの関係を求めると, 摩耗量はビッカース硬さに反比例して減少することが実証された。なお, 金属の硬さを表現する方法として, この場合, 土粒子が金属面上を走行する場合の貫入係数とビッカース硬さを組合せたマルテンス引っかけ硬さなどについて検討する余地がある。

(6) 固結土粒子と金属面間に発生する摩擦温度を実測した結果, J.C. Jaeger の移動熱源による理論解が実測値とよく一致することが判明した。真実接触面積より推定される温度より考えると, 乾燥状態における摩擦温度は瞬間的にかなりの温度に達し, 金属の溶融点に近い温度となることが認められた。そのために, 砥粒子による金属面上の摩耗痕での遊離金属のはく離率の増大および熱処理した金属表面硬さの低化などによって摩耗量は増大すると考えられる。一方, 水浸状態においては, 水の冷却作用によって摩擦温度は発生しないことが実証された。そのために, 種々の接触面圧および摺動速度に対して摩耗量を実測した結果, 乾燥状態における摩耗量の方が水浸状態に比してつねに高い値を示した。なお, 堆積した土砂粒において乾燥状態において発生する摩擦温

度は固結土粒子ほどは高くならないと予想される。

(7) 土砂れきの粒度が摩耗量におよぼす影響については, 粒子の平均粒径が大きくなるほど, 摩耗量は急激に上昇する傾向にある。これは, 掘削抵抗力の増大とともに, 粒径が大となると単なる引っかけ摩耗だけでなく, 衝撃摩耗による金属破壊域の急激な拡張によるものである。

## 5. あとがき

本文は, 堆積土砂による金属摩耗におよぼす諸要因について, 主として, 含水状態および砂れき特性について二, 三の実験的考察を行ない, 解析の方法を示した。より普遍的な法則性を追究するためには, なおいっそうの実験を重ねる必要があり, 今後の研究課題として追究していきたい。なお, 本実験に際しては, 当時の京都大学大学院学生 西田行宏君, 同工学部学生 栗山 保君の多大のご助力をいただいたことを付記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 島 昭治郎・室 達朗：鋼板の砂質土に対する摩擦および摩耗特性, 土木学会論文集第 157 号, pp. 42~53, 昭和 43 年 9 月。
- 2) 島 昭治郎・室 達朗：ゆるく堆積した砂質土中を走行する金属面の摩耗機構について, 土木学会論文報告集第 192 号, pp. 67~78, 1971 年 8 月。
- 3) 島 昭治郎・室 達朗：土砂による工具エッジ部分の摩耗特性, 土木学会論文報告集第 199 号, pp. 125~135, 1972 年 3 月。
- 4) Matsuo, S. and Nishida, K.: Physical and Chemical Properties of Decomposed-Granite Soil Grains, Soils and Foundations, Vol. VIII, No. 4, pp. 10~20, 1968.
- 5) 小田匡寛・榎本文勇・鈴木 正：砂粒子の形状・組成が砂の土質工学的性質におよぼす影響に関する研究, 土と基礎, 19-2 (156), pp. 5~12.
- 6) Hata, S. and Muro, T.: Mechanism of Friction and Wear of Steel Plate against Solidified Sandy Soil, Memoirs of the Faculty of Eng. Kyoto University, Vol. XXXI, Part 4, pp. 456~489, October 1969.
- 7) Bowden, F.P. and Tabor, D.: The Friction and Lubrication of Solids. Oxford Press, 1950.
- 8) 曾田範宗：摩擦面の温度上昇について, 日本機械学会論文集, 10, 39, I-55, 第 1 部 (1944).
- 9) Jaeger, J.C.: Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contacts. Proceedings of the Royal Society of New South Wales, 76 (1942), 203.
- 10) 島 昭治郎：掘削機構の解明 (I), 建設の機械化, 第 135 号, pp. 71~74, 1961 年 5 月。
- 11) 最上武雄編：土質力学, pp. 517~524. 技報堂, 昭和 44 年。
- 12) 藤本武助：流体の力学と流体機械, p. 139, 養賢堂, 1966 年。

(1972. 3. 10・受付)