

土 木 研 究 所 資 料

第 577 号

土工機械の作業能力に関する試験調査
ブレード容量に関する一考察(第一報)

昭和 4 5 年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所

2. ブレード容量の理論的考察	1
2・1 概 要	2
2・2 各要因の検討	2
2・2・1 土の性質	4
2・2・2 作業機械の条件	4
2・2・3 ブレード形状	5
2・2・4 作業条件	12
2・2・5 現場作業条件	17
2・3 押土量の検討	19
2・3・1 ブレード試験機による押土量	19
2・3・2 ブレード容量の実験式の検討	19
2・3・3 実車の車輛重量とブレード容量及びブレード寸法	21
2・3・4 実車のけん引力とブレード寸法、掘削可能深さ及び ブレード容量の検討	24
2・3・5 けん引出力と作業量	24
3. 試験方法	26
3・1 試験の手順	26
3・2 試験内容	27

3・2・1 試験の種類	27
3・2・2 試験項目及試験方法	31
3・3 試験機	35
3・3・1 ブレード試験機仕様・構造	35
3・3・2 試験ブレード要目	43
3・4 ブレード試験実験用土の物理特性	45
4. 実験結果	49
4・1 実験結果集計表	49
4・2 各要因と押土量の検討	54
5. ま と め	65
あとがき（参考文献）	67

ブルドーザの性能試験表

4.2.15

ページ	項目	行	誤	正
	目次 指定ページが まちがっている。 又一部訂正		1 実験目的 ----- 1 2 ブレード ----- 1 2.2 各要因 ----- 2 2.2.2 作業 ----- 4 2.2.3 ブレード ----- 5 2.2.4 作業 ----- 12 2.2.5 現場 ----- 17 2.3.2 ブレード ----- 19 2.3.3 <u>実験の車両</u> ----- 21	1 実験目的 ----- 1 2 ブレード ----- 2 2.2 各要因 ----- 4 2.2.2 作業 ----- 5 2.2.3 ブレード ----- 12 2.2.4 作業 ----- 17 2.2.5 現場 ----- 19 2.3.2 ブレード ----- 21 2.3.3 車両 ----- 22
	まえがき	8 11 13 15	ブルドーザ	ブルドーザ
1	実験目的	1	ブレード	ブレード
3	図-1 <u>作業条件</u>		(溝押・掘削・押土等) 運搬距離	(溝押掘削・押土等) 運搬距離
4	2.2.1 土の性質	2 18	・ブレード量に この粘質土の	・ブレード容量に この粘質土の
6		下3	見てみる 建設機械	見てみる。建設機械
7		6 8	わかっている。(9) $F_t = Y_z$	わかっている。(9) $F_t = Y_z$
8		5 9 13	されているトラクター $C=0.2$, $\phi=38^\circ$ 及び $C=0.2$ よりけん引出力	されている <u>国産</u> トラクター $C=0.2Kg/cm^2$, $\phi=38^\circ$ 及び $C=0.2Kg/cm^2$ よりけん引出力
10	表-1		表-1-----容量 <u>測定分類</u> PS/rpm	表-1-----容量(<u>普通ブルドーザ</u>) 機械分類 PS/rpm
11	表-2		表-2-----容量 <u>測定分類</u>	表-2-----容量(<u>湿地ブルドーザ</u>) 機械分類
12	図-4 2.2.3 ブレード形状	6 6	性能試験値 計算推力 $\times 0.63$ 2.4(3)の作業 2.2.1(1)土の	性能試験値(<u>普通ブルドーザ</u>) 計算推力 $\times 0.63$ (<u>普通ブルドーザ</u>) 2.4の作業 2.2.1の土の
13		下2	状態では <u>みかけ</u> 粘着力	状態では粘着力

ページ	項 目	行	誤	正
14		12	<u>γ</u> 水平面と	水平面と
16	b 図		$(H + \underline{H_p})$	$(H + \underline{E_z - t})$
18	掘削押土スピード	16 18 20	おいて <u>む</u> けん引力 $E_z \cdot W_z \cdot \underline{H_p}$ 普通 フルドーサ	おいて <u>は</u> けん引力 $E_z \cdot E_z \cdot W_z \cdot \underline{H_a}$ 普通 <u>ふ</u> フルドーサ
19		1 下2 下1	$\underline{H_p}$ $(2 \cdot 10)$ $\underline{\tan \phi_z}$	$\underline{H_a}$ 消す $\underline{\tan \phi}$
20		1 下2	図-7 (c) より 図-8 の <u>破線</u> のような	図-7 (b) (c) より 図-8 のような
21		12	$0.73(0.85 \cdot \underline{u})$	$0.73(0.85 \cdot \underline{U})$
22		15	$\gamma = 0.5 / K A^{\frac{2}{3}}$ <u>最後に加える</u>	$\gamma = 0.51 \cdot K A^{\frac{2}{3}}$ 尚図-9 の計算フールド容量とは、2・2・2 の表-1・2、図-4 にもとづく掘削深さと、フールド試験にもとづく、押土の形状に関する係数を(2-12)式へ代入して求めたものである。
25	図-11		Y 軸の単位が <u>ね</u> けている。	<u>(PS)</u>
26	3-1 試験 の手順	3 下4 下3	締固め度等：土の <u>試験</u> 用ピット 行なった後 図- 写真-2 <u>場内風景</u>	締固め度等土の <u>試験</u> 用ピット 行なった後、図- 写真-2 <u>試験ピット</u>
27		16 下2 下1	3・3・2 に構造 表-(3)に 表-(4)に	3・3・1 の(3)に構造 表-3に 表-4に
29	表-4 方法		締め固められた路面を一定の深さで掘削押土している試験。押土が地山の場合(DC)、押土がルーズの場合(DL)	締め固められた路面(DC)又はルーズ路面(DL)を一定深さで掘削押土する試験。

ページ	項 目	行	誤	正
35	ブレード試験機	14 下3 下2 下1	掘削最大ストローク <u>4,670 mm</u> (改造後) (---試験機) 1000 Kg.	掘削最大ストローク <u>3,800 mm</u> (改造後) <u>2個 (左・右)</u> (---試験機) <u>3個 (左右垂直)</u> 1000 Kg. <u>1個</u>
37			写真-8 試験機全体	写真-8 試験機
39		図-15	340	<u>※</u> 340 <u>※※</u> 156 ※ ブレードが17 回転式 ※※ ブレードが8~12 固定式
41		3 5	写真-9 三分力計とリフ図 今六角形ト----- nod 1	写真-9 三分力計の <u>検定</u> 今、 <u>図-17に示す円形</u> ト----- node
42		下2	図-18 (d)	図-18 (e)
43	3.3.2 表-6の附属図	下2 下1	ように、ブレードの してある。 BAI	ように、 <u>ブレードが17</u> までは <u>ブレードの</u> (である。 <u>ブレードが8~12</u> <u>までは固定用ブレードである。</u> <u>H (BAI)</u>
45	3.4 表-7 統一分類	2 3 6 10	SOI ₁ SOI ₂ <u>SOI₃-----使用した</u> 試験結果----- SOI ₁ <u>砂 SM</u> SOI ₂ <u>砂 SM</u>	SOI ₃ SOI ₁ 文章をとる。 試験、 <u>コンシステンシー試験</u> <u>結果-----</u> SOI ₁ <u>粘土質砂 SC</u> SOI ₂ <u>砂 SM</u>
47	統一分類		SOI ₁ <u>砂</u> SOI ₂ <u>砂</u>	SOI ₁ <u>粘土質砂</u> SOI ₂ <u>砂をけずる。</u>
49	4.1		表-8 (1)~(b)	表-8 (1)~(4)
50	掘削深さ	3	<u>5</u>	<u>15</u>

まえがき

建設機械の性能を検討するとき考慮しなければならないことは、作業性能の向上、すなわち作業能力の向上と作業効率の向上の考え方である。具体的にいえば前者は作業のスピードアップであり、機械の大型化をめざしているもので、一時間当りの作業能力の増加をはかることであり、後者は同じ作業量のもとにおいて、供給エネルギーを最小にする事、換言すれば、同じ機械においてはできるだけ多くの作業能力を得ることである。

我が国における建設機械の歴史は、ほとんど外国の模倣から出発したものといわれている。したがって作業能力に影響を及ぼす作業装置の形状についても同じことであった。

建設機械のうち、ブルドーザーなど主として土の運搬作業用土工機械の主作業は、土工材料である土を最も効率的に移動させることである。土工機械の作業能力及び作業効率の向上を計るためには、各種作業条件に適した作業装置が効果的に働かなくてはならない。したがって今回はブルドーザーの作業装置であるブレードについての各種検討を行なったものである。

ブルドーザーの作業性能は各種作業条件によって変化し、適確に把握しにくいのが、各種条件について整理検討し、性能向上に役立てる調査研究を行なう必要がある。今回はブルドーザーの作業能力の基本となるブレードの押土容量と作業条件について検討を行ない、それらの条件のうち室内実験を行なうことができるものについて、ブレード試験機を用いて実験を行なったので、その第一報を報告する。今回とりあげたものは、ブレードの一回当り押土量について土と押土量の関係、ブレード形状と押土量の関係、作業条件と押土量の関係、掘削押土量と掘削押土低抗などについて理論的な考察と実験を行なったものである。今後各種掘削押土条件について現地調査も合せ実験研究を行ない、押土容量の基本式を確立し、土工機械の積算基準作製の基礎資料としたい。

1. 実験目的

ブレード容量に関する基本的な考えを確立するため、ブレード試験機を使ってブレード容量に影響を及ぼす各種要因のうち以下の各種要因（土の性質・ブレード形状・堀削深さ・ブレードすくい角・堀削スピード）を変化させて実験を行ない、土の性質と押土量の関係・ブレード形状による押土量の変化・堀削条件と押土量の関係を究明し、以下の問題に対する検討を行なう。

- (1) 押土容量 q と各要因の関係を示す実験式を検討する。
- (2) ブレード容量に関する実験式を検討する。
- (3) ブレードの性能向上、改良を計る資料とする（堀削押土にバランスしたブレード容量と機関出力）

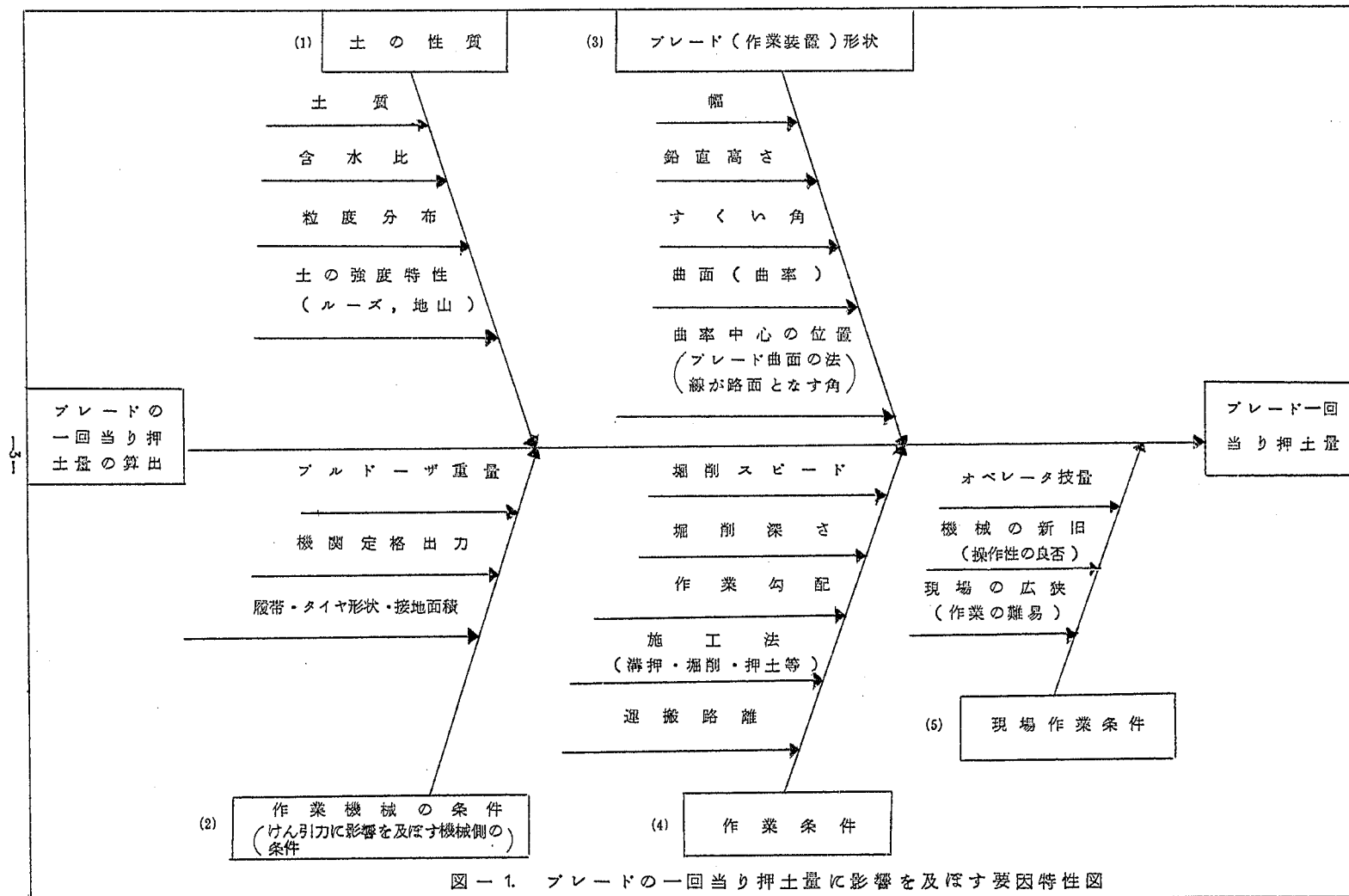
2. ブレード容量の理論的考察

2・1 概 要

ブルドーザの時間当り作業量を決める要因の大きなものは、一般の土工機械の作業能力の検討条件と同じく、機械のサイクルタイム、長期的な各作業要因など現場作業における各作業条件であるが、これらの条件が良好で機械が最高度に能力を発揮したと仮定すると、作業能力に影響を及ぼす要因は一回当りの押土量である。我々がブルドーザの作業能力を式にのせて、計算する基礎とする数値として、一回当りの押土量である ブレード容量 (Q) を用いるが、この値は各種条件により変化するので、適確に把握されておらず、2.3.2に説明するように実験式も各種まちまちである。したがって、今回はこの Q について検討を行なおうとするものである。図-1にブレード容量、すなわち一回当りのブレード押土量に影響を及ぼす要因特性図を示した。

各種作業要因を大きく分けると次のようになる。

- (1) 土の性質 (状態)
- (2) 作業機械の条件 (けん引力に影響を及ぼす機械側の条件)
- (3) ブレード (作業装置) 形状
- (4) 作業条件
- (5) 現場作業条件



2・2 各要因の検討

2・2・1 土の性質(状態)

(i) 土の力学的特性

ここではブレード量に影響を及ぼす土の性質について検討する。(1)(2) クーロンの法則によると粉体がせん断されるときの単位面積当りのせん断強さは次式で示される。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここに σ は単位せん断破壊面の有効圧縮応力(直圧力), ϕ は粉体の摩擦角, c は単位粘着力である。

乾燥している砂質系の粉体ではせん断抵抗は主として粒子間の摩擦力である。このような粉体は間隙水があっても粉体自身の透水係数が大きいためせん断時、間隙水圧は直ちに低下して、粒子間圧力または有効圧力のみが摩擦力を発揮し、一般に間隙水の有無に無関係である。これに反して粘土質系の粉体では任意の箇所の圧力は有効圧力と間隙水圧との和与えられる。したがってこの場合、摩擦力は有効圧力と摩擦係数とをかけたものである。更に飽和状態からやや乾燥すると、有効圧力の他に毛管圧力を生じ、乾燥の度が進むにつれて大きくなる。今、単位面積に対する有効圧力を P_1 、また毛管圧力を P_c とすれば、せん断強さは、

$$\tau = (P_1 + P_c) \tan \phi = P_1 \tan \phi + P_c \tan \phi \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

ここに ϕ はこの粘度質土の内部摩擦角である。式(2-2)の $P_1 \tan \phi$ は純然たる摩擦力である。 $P_c \tan \phi$ は毛管圧力によるせん断抵抗である。毛管圧力は試料の乾湿により異なるから常に一定ではない。これを見かけの粘着力という。この他粘度粒子にはその表面に吸着水を持ち、粘度粒子相互の接触面に作用する電気化学的吸引力や、更に微小粒子であるコロイドの物理化学的性質に基づく粘着力があって、これを真の粘着力と呼んでいる。土は一般に乾燥密度が高い程摩擦角 ϕ は高い。いままでに検討してきたように一般の土砂では式(2-1)で示されるせん断強度を示す。したがって、土を掘削押土するとブレードの前面へは、土のルーズ状態・含水比・粒度分布・掘削深の違いによる掘削押土抵抗がかかり押土形状は一定の見かけ息角を保った斜面を形成する。

(2) 土の見かけの息角

土の力学的特性のところで検討したように、土を一定の高さに積み上げたとき、土の内部摩擦角、粘着力により土はある斜面を作って安定を保つ。その安定の極限状態が土の $C \cdot \phi$ により決まるわけである。それを土のみかけの息角という（最大傾角）。一般の土は粘着力をもっているので、モール円より最大傾角は内部摩擦角 ϕ より大きい所で安定する。

土の粘性が高かったり、含水量が多かったり土粒子のかたまりが大きかったりすると、真の粘着力又は見かけの粘着力の存在により、最大傾角が大きくなる。また、土の粒度分布・土の乾燥密度等も土の最大傾角に影響を及ぼす。以上により、押土量の変化に強い影響を及ぼす土に関する要因は押土の $C \cdot \phi$ による最大傾角である。

(3) 土の強度特性

土のせん断強度と推力については次節で一部検討するが、ブルドーザ等の掘削運搬機械は、路面上で推力をとりながらその路面を掘削する。したがって、路面のせん断強度の強い土では、推力も出るが、作業抵抗も増大するわけである。したがって、実車ではこの推力とバランスした量の掘削押土が行なわれる。したがって、押土量は同じように式（2-1）の $C \cdot \phi$ により決定される。今回はブレード試験機であるので推力は無限と考えてよい。一方、2・2・3においてもふれるが、土がある粘着力を有し、乾燥密度が高い場合ブレードで掘削した後もある一定の土粒子のかたまりとなって存在する。したがって先にも述べたように、最大傾角が大きくなったり、ブレード曲面に沿った力の伝達を行なう。土がルーズ状態の場合は、土の粘着力が小さいので、各土粒子間の力の伝達が行なわれにくいので、掘削押土された土はブレード曲面に沿った動きをしない。

2・2・2 作業機械の条件

ブルドーザの重量・機関出力・履帯・タイヤ形状等、機械的条件によって決まるものについて検討してみる。ブルドーザの掘削押土作業の基本は自らの足（履帯又はタイヤ）を土へくい込ませ、その土が履帯またはタイヤによって変形を受けたときに生ずる水平な抵抗力で車両を推進する。この推力が車両を前進するための力となる。車両は土からえた推力により土の切削押土抵抗及び走行抵抗にうちかって、

前進し掘削押土するのであるが、この動作をささえる推力の要因は、土質と土の状態・ブルドーザ重量（接地圧）・足廻り形状・ブルドーザの機関出力等により決まるもので、これらを総合的に評価するものが上記条件のもとにおけるけん引力である。いくら大出力にしても、土が機械の足廻り装置に対して推力を増大せず、足廻り装置がすべるようになれば、一定けん引力しか出ないことになる。したがって、けん引力に見合った掘削押土作業、すなわち掘削深さ・一回当りの一定掘削、押土容量が決まり、機関の出力増大はけん引力に結びつかない余裕出力すなわち、運搬スピードの増大によるけん引出力の増大等となる（時間当り作業量の増大に影響する）。したがって、掘削押土量の増大に対してけん引力と掘削押土抵抗力は相反する関係にある。以上のようにけん引力は機関の回転力がブルドーザの起動輪に伝えられ、その力より生ずる路面の推力より走行抵抗・勾配抵抗・その他の抵抗力を差し引いた土の掘削運搬作業に使われる力である。したがって、その力は路面と履帯・タイヤ等の足廻り装置との粘着係数（接地圧・足廻り形状・路面状態・土質による影響がある）により限界がある。すなわち、機関によるけん引力を F_m 、推力を F_t とすると、平地における作業状態では次式で示されている。

$$F_m = \frac{T \cdot i \cdot \tau_1}{R} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$F_t = \mu \cdot w \dots\dots\dots (2-4)$$

F_m : 機械側より出し得るけん引力 (Kg)

T : 機関トルク ($m-Kg$)

i : 機関軸より起動輪軸までの総減速比

R : 起動輪ピッチ半径 (m)

τ_1 : けん引効率

μ : 履帯と地面との粘着係数で、土質・土の状態・履帯形状（履帯突起・幅・数）等で変化する。

F_t : 推力 (Kg)

w : 車両重量 (Kg)

今 (2-4) 式をもう少し詳しく見てみる 建設機械が前節で述べた式 (2-1) で示される特性をもった土の上を走行する場合を考える。式 (2-1) を変換して、

$$H = A \tau = A C + W \tan \phi \quad (2-5)$$

A : 建設機械の足廻りの全接地面積

W : 車輻の全重量 (全接地圧力)

とする。ブルドーザが前進するための推力はこの土と、履帯により発生する。式 (2-5) よりブルドーザ等の土の上を走行する車輻の推力 H は土の性質・車輻の全重量・全接地面積によることがわかっている。(9)したがって、上式は次の関係で示される。

$$F_t = \gamma_2 \cdot (A C + W \tan \phi) \quad (2-6)$$

ここに推力は、C・φで計算できるが、実際には土質が均一でなかったり、荷重のかかりかたが集中したり、ブルドーザの履帯の動的荷重などにより、履帯接地面の土の強度常数などが低下して推力は計算より下るものと思われる。そのときの係数を γ_2 とする。

一般にブルドーザの最低速度段では $F_m > F_t$ であるから、前述の理論より最大けん引力は F_t により制限される。

以上により、けん引力の増大すなわち押土量の増大に影響を及ぼすものは、車輻

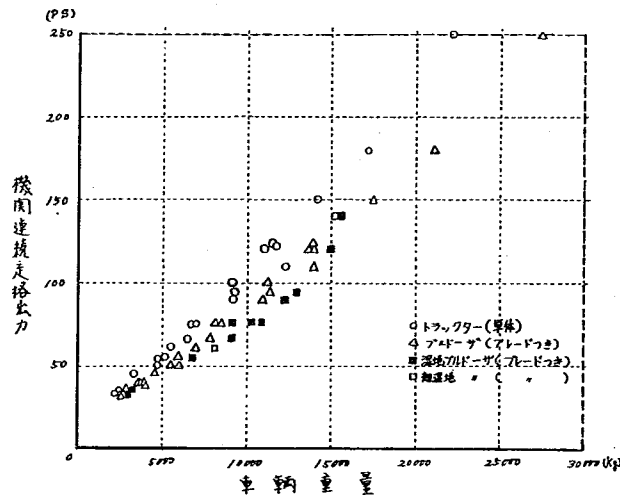


図-2 機関連続定格出力とブルドーザ・トラクタ重量

重量（接地圧）・土の粘着力及び内部摩擦角・足回り形状（タイヤ形状・履帯突起・履帯幅）等が考えられるが、室内実験の困難さもあるので、今回はこれらの条件に対する検討は行なわない。すでに発表されている実験データに基づく検討にとめておく（2.3.2，2.3.3，2.3.4，2.3.5参照）。(3)(9)

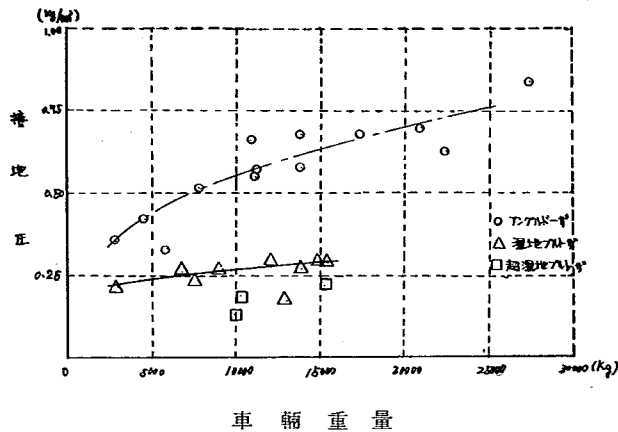


図 - 3 接地圧と車輻重量

現在製作されているトラクター及びブルドーザについて

車輻重量と機関連続定格出力の関係を調べると図-2に示すようになる。車輻重量と出力は一次式で近似される。図-3は車輻重量と平均接地圧との関係を示す。今、普通ブルドーザがしめ固められた砂質土上を走行し、湿地ブルドーザが高粘性土上を走行すると、その時の土の強度特性値がそれぞれ $C = 0.2$, $\phi = 38^\circ$ 及び $C = 0.2$, $\phi = 0$ と仮定して現状のブルドーザのA及びWを式(2-6)へ代入して計算してみると、表-1・2 図-4に示す推力が得られる。またその時、ブルドーザが最低速度段で走行していたとすると、平均走行スピード $V \text{ m/sec}$ $PS = \frac{F_t \cdot V}{75}$ ・ τ よりけん引出力が計算できる。性能試験より実車の最大けん引力Pと車輻重量Wについての関係式を図-4に示したが、ほぼ $P = 0.68W$ の関係がある。推力Hと最大けん引力Pの関係は $P = 0.63H$ となる。式(2-6)より土の強度特性を

考えると、高粘性土上を走行する湿地ブルドーザが低接地圧とならなければならぬ理由がわかる。2.3.4の図-10には実車の性能試験より最大けん引出力と作業量について示してある。

表-1 ブルドーザ推力とブレード容量

測定 分類	全装備重量 (ブレード付)	機関定格出力	ブレード寸法			リ 帯		計算推力 ×0.63	可能な掘削深さ 掘削強度指数 (3.08kg/cm ²)	押土計算 容量	土工指針の 容量 (LH ² ×0.7)	ブレード試験 測定値×64	備 考 (ブレード№)
			巾(L)	高さ(H)	LH ²	接地面積	接 地 圧						
№	ton	PS/npm	mm	mm	m ²	cm ²	kg/cm ²	ton	cm	m ³	m ³	m ³	
1	4.00	39/1,800	1,890	710	0.953	9,180	0.436	3.13	5.4	0.54	0.67		
2	5.50	50/1,800	2,600	650	1.099	11,970	0.459	4.22	5.3	0.82	0.77		
3	5.50	54/1,800	2,600	650	1.099	11,970	0.459	4.22	5.3	0.82	0.77		
4	6.05	50/1,800	2,300	720	1.192	11,970	0.505	4.49	6.4	0.90	0.83		
5	6.06	54/1,800	2,300	720	1.192	11,970	0.506	4.49	6.4	0.90	0.83		
6	7.95	66/1,680	3,089	705	1.533	15,314	0.519	5.84	6.2	1.28	1.07		
7	11.40	94/1,750	3,741	875	2.864	20,199	0.564	8.16	7.2	2.18	2.00		
8	13.90	122/1,800	3,900	932	3.388	24,079	0.577	9.88	8.3	2.84	2.37		
9	14.10	122/1,800	3,900	932	3.388	24,079	0.586	9.97	8.4	2.87	2.37		
10	2.93	35/2,250	2,300	565	0.730	8,250	0.355	2.48	3.6	0.40	0.51		
11	5.95	55/1,800	2,700	670	1.212	11,515	0.517	4.38	5.3	0.88	0.85		
12	11.00	90/1,750	3,350	855	2.449	16,680	0.659	7.52	7.4	1.93	1.71	3.5	≡BN02 (L=3.65m)
13	13.93	125/1,500	3,750	915	3.140	20,548	0.678	9.45	8.3	2.65	2.20		
14	21.10	180/1,850	4,260	1,060	4.787	30,576	0.690	14.24	11.0	4.73	3.35		
15	21.30	180/1,850	4,260	1,060	4.787	30,576	0.697	14.34	11.1	4.76	3.35		
16	27.45	250/2,100	4,640	1,135	5.977	32,816	0.836	17.65	12.5	6.38	4.18		
17	27.55	250/2,100	4,640	1,135	5.977	32,816	0.840	17.70	12.5	6.40	4.18		
18	8.51	75/1,700	3,060	760	1.768	16,000	0.532	6.21	6.7	1.43	1.24		
19	7.00	61/1,600	3,080	700	1.509	12,725	0.550	5.05	5.4	1.08	1.06		
20	8.20	76/1,600	3,090	800	1.978	15,590	0.526	6.00	6.4	1.41	1.38		
21	13.70	120/1,600	3,780	940	3.340	21,662	0.632	9.47	8.2	2.70	2.34		
22	4.55	45/2,500	2,030	590	0.708	10,736	0.424	3.59	5.8	0.62	0.49		
23	11.20	100/1,500	3,600	860	2.660	20,428	0.550	8.09	7.4	2.13	1.86		
24	17.50	150/1,500	4,000	1,040	4.326	26,010	0.673	11.89	9.8	3.75	3.03	4.3	≡BN03 (L=4.11m)
25	3.50	32/2,400	2,200	600	0.792	8,220	0.426	2.76	4.1	0.47	0.55		
26	3.90	32/2,400	1,866	625	0.730	9,450	0.413	3.11	5.5	0.52	0.51		
27	2.60	325/2,500	2,250	550	0.681	8,190	0.318	2.31	3.4	0.37	0.48	0.55	BN04 BN05=224m

表-2 ブルドーザ推力とブレード容量

測定 分類	全装備重量 (プレート付)	機関定格出力	ブレード寸法			リ 帯		計算推力 ×0.63	可能な掘削深さ 掘削強度指数 (3.08kg/cm ²)	押土計算 容量	土工指針 の容量 (LH ² ×0.7)	ブレード試験 測定値 ×64	備 考 (プレートNo.)
			巾(L)	高さ(H)	LH ²	接地面積	接地圧						
No.	ton	PS/rpm	mm	mm	m ²	cm ²	kg/cm ²	ton	cm	m ³	m ³	m ³	
1	9.10	66/1,680	3,045	840	2,149	33,863	0.269	4.27	4.6	0.97	1.50		
2	13.00	94/1,750	3,511	968	3,290	48,747	0.267	6.14	5.8	1.62	2.30		
3	3.10	35/2,250	2,180	585	0,746	14,025	0.221	1.77	2.7	0.27	0.52		
4	6.80	55/1,800	2,750	730	1,466	25,740	0.264	3.24	3.9	0.64	1.03		
5	12.30	90/1,750	3,350	900	2,714	41,920	0.293	5.28	5.2	1.30	1.90		
6	12.30	90/1,750	3,670	925	3,140	50,304	0.240	6.34	5.7	1.67	2.20	2.69	BN02 (I=3.65m)
7	15.52	140/1,500	3,750	1,045	4,095	53,320	0.291	6.72	5.9	1.89	2.87		
8	15.26	140/1,500	4,230	1,045	4,615	68,200	0.224	8.59	6.7	2.59	3.23	3.84	BN03 (I=4.11m)
9	8.10	61/1,600	2,940	800	1,882	32,004	0.253	4.03	4.5	0.88	1.32		
10	9.20	76/1,600	3,100	880	3,401	34,442	0.267	4.34	4.6	1.01	1.68		
11	10.30	76/1,600	3,550	880	2,749	54,600	0.189	6.88	6.4	1.78	1.92		
12	10.00	76/1,600	4,450	580	1,497	78,260	0.128	9.86	7.3	2.08	1.05		
13	15.00	120/1,600	3,780	1,000	3,780	51,342	0.292	6.47	5.6	1.78	2.65		
14	14.00	110/1,600	3,550	980	3,409	51,600	0.271	6.50	6.0	1.75	2.39		
15	3.50	32/2,400	2,380	550	0,720	18,900	0.185	2.38	3.3	0.38	0.50		
16	2.95	32.5/2,500	2,180	550	0,659	13,650	0.216	1.72	2.6	0.26	0.46	0.55	BN01 ≡ BN09 (I=2.24m)

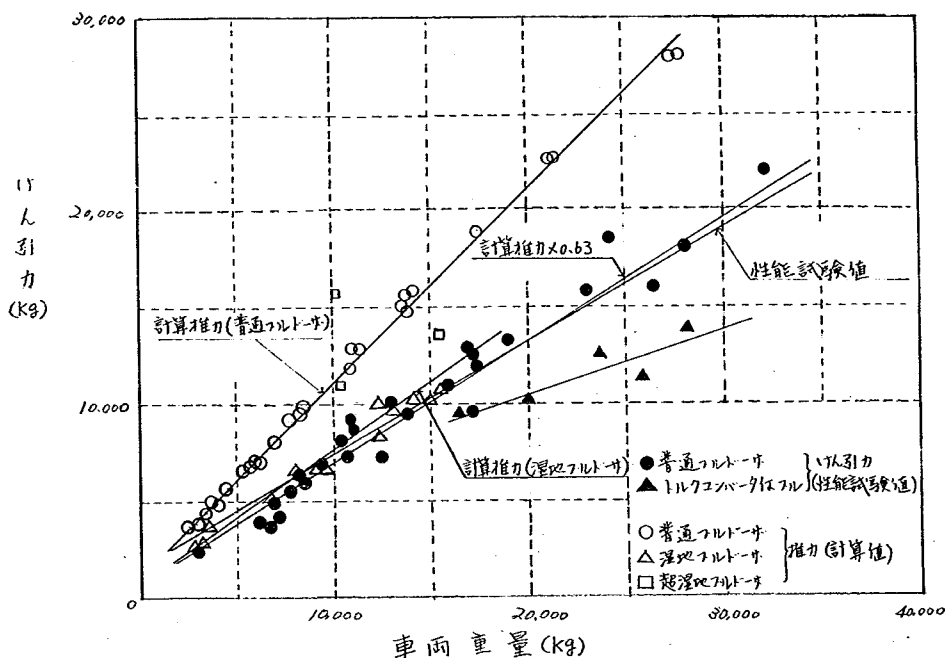


図-4 けん引力と車両重量

なおけん引力と掘削押土抵抗及び押土量についての理論的な検討は、他の報告書で検討する予定である。

2.2.3 ブレード形状 (作業装置)

ブレードの大きさ・とりつけ状態に関するもので、今回の実験の主目的はこの要因のうちブレード幅・ブレード鉛直高さ・すくい角の三つの要因を中心として、2.2.4 (3) の作業条件のうち掘削深さ・掘削スピード・運搬距離 2.2.1 (1) 土の状態のうち土質及び含水比・掘削押土の乾燥密度・せん断強度など、ブレード寸法、作業条件、土の特性と押土量の関係についてブレード試験機を使って実験を行ない、押土量の基本的な関係を見い出そうとしたものである。

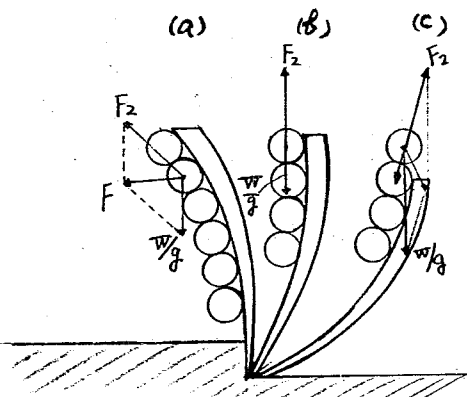
ブルドーザと違ってブレード試験機は、ブレードの容量に対して充分余裕のあるけん引力が出せる構造である。今、ブルドーザのけん引力が充分大きく、掘削押土抵抗がブレード容量の増減により変化しても、けん引力に充分な余力がある場合を考える。すなわち、ブレード形状、土質等による理論的に可能な押土量を検討し、研究目的のところで述べた各項についての検討を行なう。

(1) ブレード高さの影響

今、土が一定の固さで締め固められた状態にあるとき、ブレードにて一定の切削深さで切削すると、ブレード先端は切削抵抗に打ち勝って、前方へ進行する。それと同時に、土はある一群の土粒子のかたまりとなって切削破壊され、ブレード曲面に沿って流れる。

ある有形の土のかたまりは、わずかの力（土のかたまりが切削面及びブレード面をすべって行く力や、ブレード曲面へ押し上げる力）に対しては一種の剛体として働き、自分の前の土のかたまりをブレード進行方向と反対方向へ押しあげ、連続的に力を及ぼすものと考えられる。その力はブレード前面の押土と、ブレード面との摩擦力及び土粒子を押し上げる力であり、各粒子のかたまりは相互に連続的な力を作用している。いま、この粒子のかたまりを土粒子群と呼ぶ。

ここに、幅の充分大きなブレードを考える。切削初期の場合、切削押土された土の粒子群は、ブレードの曲率・すくい角・曲面の法線（曲面の中心と曲率中心を結んだ線）の水平面との傾きにより一定の高さを上昇する。そのとき力のバランスの様子を図一5に示す。



図一5 掘削押土の運動

土を押し上げる力はブレードの曲率に従った接線方向に働き、一方、重力は W/g として働く。その合力の方向は図の F である。細粒分を含んだ土は締め固め状態ではみかけ粘着力をもち、引っ張り力が多少働き、各粒子群の間で連続したかたまりとなって上昇して行く。しかし、ブレードの先端を過ぎると、拘束が

なくなり、不安定状態が起り、ブレードの曲面に沿った押土の形状が不安定状態の直前における位置より合力の方向へ落下する。図-5 (a)・(b)より土粒子群は前面に土がなければ F の方向に落下をする。したがって、ブレード前面へ土が連続的に安定状態になるまでたまることになる。(c)では土はブレード上面にたまらずオーバーフローする。

次に土がブレード前面に充分たまった場合を考える、今図-6 A点の粒子群は下方の粒子群より F_2 の力を受け、ブレードと前面押土と両側にはさまれ、その間の摩擦力（押しつけ力と各粒子群の形状・含水状態による摩擦係数によって決まるものと思われる）に打ち勝って、ブレード曲面に沿って力を伝えながら上昇する。B点においては粒子群の移動方向の拘束状態は開放され、不安定状態となり、粒子群の移動方向は押土形状により影響される。したがって F_2 の力の方向に移動し、 τ 水平面と α_1 の傾きを示す。

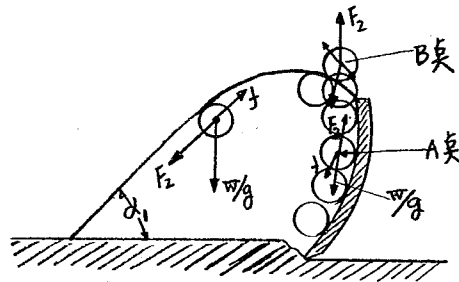


図-6 掘削押土の形状

ここに α_1 は土質・含水比・粒度分布・乾燥密度（土の強度特性）によってある一定の角度を示すもので、乾燥した砂等粘着力のない場合には、これを安息角と称して、土と土との摩擦力によって、土粒子がある斜面を作って安定する角度をいう。したがって、ブレード前面にたまった土は、全体としてブレードの進行に伴って前方へ移動しているが、押土上面後部では連続的に上昇してくる土により、この安息角に近い状態が存在していると考えられる。また、同じ理論により前面の形状も同じような状態になると思われる。したがって、下方より連続的に送られてきた土粒子群は、その付近に集まれば安息角以上になり、斜面をすべり

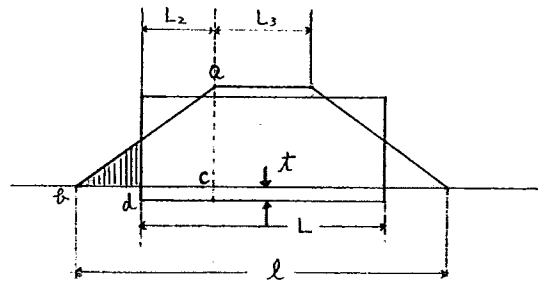
おりて、後方へ落下したり、下方から上昇してくる土粒子群を後方へ落下させる力を及ぼしたり、自身が前方へ落下したりする。

先に述べたように、切削・破壊された粒子群の大きさは、切削深さ・土質・含水状態・掘削押土の乾燥密度・粒度分布等により異なるものと思われる。ある程度固結した土はみかけ粘着力をもち、切削によりブレード先端よりブレード面に沿った動きをする。したがって、土粒子群のみかけ摩擦角及び下方よりの力の影響力の及ぶ範囲の違いにより、押土高さはブレード先端よりある一定値で平衡を保つものと思われる。したがって、押土が飽和状態では土粒子群はブレード高さまでは拘束状態で上昇するので、押土量はブレード高さの上昇につれてふえる。しかし、次に述べるように横幅の影響が及ぶ高さでは、ブレード高さの増大に対して押土量はふえない。

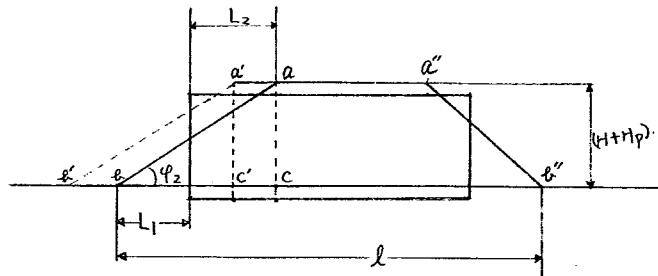
(2) ブレードの横幅の影響

次に横幅の変化による押土量の影響であるが、前節で掘削押土する土質と、土の状態及び掘削深が決まれば、押土の高さが一定値で平衡となることが推論できたが、ブレード側端において、ある押土の瞬間を考えれば前方より見た土の側部の面は、ブレードの高さにおける検討と同じく図-7により、土粒子群が側部下方へすべり下りるときの力の方向であり、土粒子群自身の重量と土の $C \cdot \phi$ による摩擦係数により決まる。土と土との摩擦であるから安息角に近い斜面状態を維持するものと思われる。

(a 図)



(b 図)



(c 図)

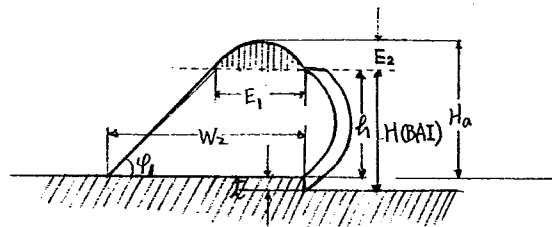


図-7 掘削押土の形状

今ブレードが前方へ移動すると、斜線部分の土は側部へ残していくことになる。したがって、その容量だけ斜面より押土がくずれ落ち、前の安定状態を維持する。その補給量に見合った押土が、ブレードにて掘削されて図-7(a)に示すように斜面 $a-b$ へ補給されればよいわけで、斜面 $a-b$ がブレード幅 L と掘削深さ t 及び安息角 ϕ により決まる斜線部（投影面積）の残して行く量が平衡した所で安定すると考える。この場合 a 点より右側の土は斜面の補給の役割は行なわないが、前方へ落下の後側部へ逃げて斜面の補給量の調整的な役目をはたしたり、後方へ落下するものと考えられる。したがって、 t が増大して掘削量が増大すれば、図-7(b)に示すように押土の側部斜面の線が左へより安定する。すなわち後方へ残して行く量との平衡は掘削量による。掘削量が少なれば $a-b$ が右へよって安定する。以上により側部斜面の位置は掘削深により変動がある。

今ブレード横幅が増減すると、ブレードの高さが斜面の線 $a-b$ と $a'-b'$ の交点より上方の間すなわち H/L が大きいときは、ブレードの横幅の増減に対して押土量の増減は比例しない。ブレードの掘削押土量は横幅の増減による斜面 $a-b$ 点の移動と、 $a-b$ と $a'-b'$ の交点の変動による増減がある。ブレード高さに対して横幅が充分長いときは押土量は横幅に比例する。

(3) すくい角

ブレードの掘削押土面の垂直面が、ブレード前部先端面とのなす角をすくい角と称しているが、これはむしろ掘削抵抗力の問題になる要因である。別のレポートによりブレードの切削抵抗について検討するが、すくい角の違いによる土の破壊面の変化があり、切削された土粒子群の大きさが違って、土のみかけ息角の変化が生じて土量に影響すると思われるが、今回の実験では押土量に影響していないようである。

(4) 曲 率

ブレードの土粒子群の流れが異なるので、押土の平衡状態の形状が異なり、押土量の変化があると思われる。

今回は二種のブレードで検討してみた。

2・2・4 作業条件

この要因は押土における作業の状態で、押土形状が変化するものをあげた。

(1) 掘削押土スピード

作業スピードが増大するにしたいが、必要とする機関出力が大となる。実車では機関トルクは有限であるので、スピードが増せば減速比が小さくなるので、最終トルクすなわち足廻りでの駆動トルクは小さくなる。したがって、土質による最大推力になるまでに機関がオーバーロードとなり、本来の作業である掘削押土に使われる作業けん引力が少なくなり押土が減少する。ブレード試験機ではこの現象は起らないが、振動による土粒子の動きの変化により押土の $c \cdot \phi$ が変化して、みかけの安息角が変化するものと思われる。しかし、今回の実験では影響は少ないようである。

(2) 掘削深さ

2.2.3で述べたように、掘削深さの変化による掘削押土の土粒子群の形で押土の $c \cdot \phi$ が変化する。その影響で斜面の変化がある。またブレードのサイドへ残していく土と掘削による補給量により決まる平衡状態が掘削深により変わるのでブレード試験機では大きな要因となっている。一方掘削深さの増大により、図-5に示す F_2 が変化し土粒子群のしめる位置が変わり押土量に影響する。また、実車においてもけん引力と、掘削押土抵抗のつり合いによって平衡状態があるので、ある一定深さ以上は掘削できない。したがって、掘削深さがきまれば図-7(c)より、 $E_2 \cdot W_2 \cdot H_p$ がきまるものと思われる。

(3) 路面勾配

普通ブルドーザでの掘削押土は勾配を利用して行なうと非常に効率上がる。推力以外に自身の重力を利用できるからで、これは機関の出力を必要としないから効率的である。土は平地の場合でも、斜面の場合でも、同一土質ならば水平面に対しては同じ最大傾角を保つ。したがって、下り斜面で作業を行なうと土量は増大する。今、最大傾角 α_1 、路面傾斜を α とすれば、押土底面の長さ L をブレード高さ H に比例する量とすると、平地では $L = H / \tan \varphi$ 、傾斜では $L = H / \tan (\varphi - \alpha)$ となり L が増大する。

(4) 溝掘削 (スロット方法)

側部への土の逃げを防ぐ掘削方法で当然押土量は増大する。増大量はサイドのバンク高さによるが、2.2.3により押土の高さは一定高さ以上にはふえない。し

かし、土が側部へにげないので図-7の(c)より H_p は増大する。

(5) 運搬距離

押土にあたって逃げる量に対して充分補給があれば当然土量の平衡があるから土量の変化はない。しかし、最初にブレードにいっぱい押土した後、補給が少なければ、2.2.3により平衡点は移動して押土は減少する。実車では最初にブレードいっぱいに掘削して、その後は押土を行なう方法が多いので距離による遞減が起る。

2.2.5 現場作業条件

これは今まで述べてきた四種の要因、すなわち土の性質（状態）、作業機械の条件、ブレード（作業装置）形状・作業条件の影響のもとに本来掘削すべきブレード押土容量が、オペレータの技量・現場の広狭による作業の難易度・機械の新旧による操作の良・不良等により減少する場合である。ブルドーザの作業能力の評価では作業効率として、本来の能力の低下率を考えている。これはブルドーザの最終の能力評価では重要な数値となるが、今回はブレード容量の基本量についての検討であるので、ここではとりあげない。今後土工調査等で実際のブレード容量調査のとき問題となろう。

2.3 押土量の検討

2.3.1 ブレード試験機による押土量

(1) 地山の掘削押土の式

ブレード試験機で押土するとき、掘削押土がブレード前面へたまる様子は前節で述べた。ここでは平衡状態のときを考えると、2.2の図-7より側部へ残して行く土の投影面積 S_1 は

$$S_1 = 2 \times \frac{1}{2} L_1^2 \tan \phi_2 \quad (2.7)$$

従って残して行く土量 Q_1 は、ブレード進行速度を v とすれば

$$Q_1 = L_1^2 \cdot v \tan \phi_2 \quad (2.8)$$

となる。補給量 Q_2 は地山掘削による土量の変化率を L_c とすれば

$$Q_2 = L_c \cdot L \cdot t \cdot v \quad (2.9)$$

平衡条件は、(2.8)、(2.9)より

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.10)$$

$$\therefore L_1 = \sqrt{\frac{L \cdot t \cdot L_c}{\tan \phi_2}} \quad (2.10)$$

図-7 (c)より

$$L_1 + L_2 = \frac{H_a}{\tan \varphi_2} \dots\dots\dots (2 \cdot 11)$$

掘削深さ、 $t = \alpha_h H$ 、押土の形を図-7(a)・(c)に示すように、ブレードの中央は台形、側部は角すいとし上部は二次曲面とする。 $E_1 \cdot E_2 \cdot W_2$ は掘削深さ t に比例するものとする。そのときの比例定数を $\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_w$ とするとブレード押土量は

$$\begin{aligned} g = & \frac{LH^2 \cdot \alpha_h}{2 \tan \varphi_2} \left\{ \frac{2}{3} \alpha_1 \cdot \alpha_2 + (1 - \alpha_h)(\alpha_1 + \alpha_w) \right\} \left\{ 2 \tan \varphi_2 - \frac{4}{3} \frac{H}{L} (1 - \alpha_h - \right. \\ & \left. \alpha_h \cdot \alpha_2) + 4 \sqrt{\alpha_h \cdot L_c \cdot \tan \varphi_2 \cdot \frac{H}{L}} \right\} \dots\dots\dots (2 \cdot 12) \end{aligned}$$

この式より、 $t \cdot L \cdot H \cdot$ 土質 (L_c, φ_2) がきまれば押土量は決定できる。従って、今回のブレード試験ではこれ等の実験値を測定して押土量の式を計算する。

(2) ルーズ状態の押土量

ルーズ状態の土の押土について検討する。ブレードの前進に対して、土がブレード曲面の摩擦力と自身の位置エネルギーの増加に必要な仕事量を与えられない土粒子群であったり、ある一定の粘着力をもった土粒子群にならなければ、掘削押土された土は曲面に沿った力を前方の土粒子群につたえない。従ってブレード前面にたまっている土は、自身の重量による下面の土との摩擦力に打ち勝つ力を与えられないので、他の土へもブレード曲面に沿って力を伝えない。従ってブレードが進行しても、押土は同じ位置にとどまるので、ブレード前面に土が押しつけられてブレードと共に移動する現象が生じる。ある一定量の土が押しつけられると、全体として抵抗が増すとともにあるすべりやすい面ができると一群ごとにもり上った(せり上った)後、全体として前方へ進行して行き、押土形状としては進行方向側部から見ると波うった状態となる。

更に、押して行けば、側部及上部後面は路面状態のかたい場合の形状に近似するが、押土前方では土粒子群による土のすべり面へのせり上りが引き続いて行われる。したがって、充分長く押土すると、図-8の破線のような形状になると思われる。

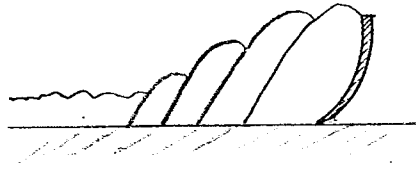


図 - 8 ルーズ土の押土形状

その間の押土抵抗は、ブレード前の土粒子群が下面とすべるための摩擦仕事と土粒子群のもり上りによる位置のエネルギーの増加である。したがって、押土量・掘削押土抵抗は前方へ押しつけられた土が全体として移動して行く時、力の平衡のくづれる点までは増大していく。押土形状はブレードの横及上面の高さによりきまるから、なだらかな山状の形状がブレード前面に長くできるが、やがて先端が不安定状態となって横へ逃げだす、その時点で土量は安定する。この点まではせり上り押しつけが交互にくりかえされる。普通のブルドーザではある点でけん引力のつり合いがとれて押土量がきまるわけである。

2.3.2 ブレード容量の実験式の検討

ブレードの一回当り押土量の計算式として次の各式が示されている。(3)(4)(5)

$$Q_1 = LH^2 \left\{ \frac{1}{2 \tan(\phi + \alpha)} + \xi \right\} \mu \cdot d \dots\dots\dots (2.13)$$

$$Q_2 = K_3 LH^2 \{ K_2 = 10/16, 2.43/3^{1/2}, 0.753, 0.73(0.85 \cdot \nu \text{ ブレード}), 0.8(0.7 \text{ アングルドーザ}), 0.85, 0.86 \} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$Q_3 = K_3 LH (K_3 = 10/16) \dots\dots\dots (2.15)$$

ここに Q : 一回の掘削押土量 (m^3)

L : ブレードの長さ (m)

H : ブレードの高さ (m)

ϕ : 掘削押土の性質によりきまる角度 (度)

α : 掘削押土路面の勾配 (下りは負号をとる) (度)

ξ : 掘削押土の種類によりきまる係数

μ : 掘削押土の種類によりきまる係数

d : 押土距離による押土量の通減率

上式はいずれもブレードの寸法よりきめられている。2・2で述べたようにブレード容量は各種の条件を考慮する必要がある。したがって条件の取り方により計算式が上式のように広い範囲にわたっているものと思われる。今回の試験は充分なけん引力が得られる条件で行なっているので土質及び土の状態・ブレード形状・掘削角度及び深さなどの作業条件に対するブレード容量の検討ができる。

2・3・3 車輻重量とブレード容量及びブレード寸法

国産のブルドーザのブレード寸法を調べると、ブレードのたてよこ比（ブレード高さ／ブレード巾）は大部分が約0.25であり、重量と土工板寸法の関係式は次式で示される。(3)

$$L = 1.55 W^{0.32} \dots\dots\dots (2 \cdot 16)$$

$$H = 0.40 W^{0.32} \dots\dots\dots (2 \cdot 17)$$

$$A = 0.62 W^{0.64} \dots\dots\dots (2 \cdot 18)$$

この式を $g = K L H^2$ へ代入すると

$$g = 0.5 / K A^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (2 \cdot 19)$$

で示される。したがって押土量が $K L H^2$ で示されるとすれば、けん引力が充分あると仮定した国産ブルドーザの押土容量は(2・19)式で計算できることになる。しかし現実には押土量はけん引力により制限されているので、ブレード寸法は無限には大きくなれない。図-9-(b)に国産ブルドーザの $L H^2$ と車輻重量の関係を示したがほぼ直線上に分布している。図-9(a)に今までの性能試験結果より g と A の関係を示した。今 g が $L H^2$ に比例すると仮定すると、 $g = K L H^2$ ($K=1.28 \sim 0.67$).....(2-20)となる。したがって式(2-19)より $g = K_1 A^{\frac{2}{3}}$ となり、 $K_1 = 2.5 \sim 1.31$ となる。性能試験及び資料整理によると良好な路面上では、ブレード各量 ($L H^2$) ・最大けん引出力・機関定格出力はばらつきは多いが、ほぼ車輻重量に比例している。したがって押土量も $L H^2$ で示されればそれらに比例することになる。(図-2, 10, 11)。

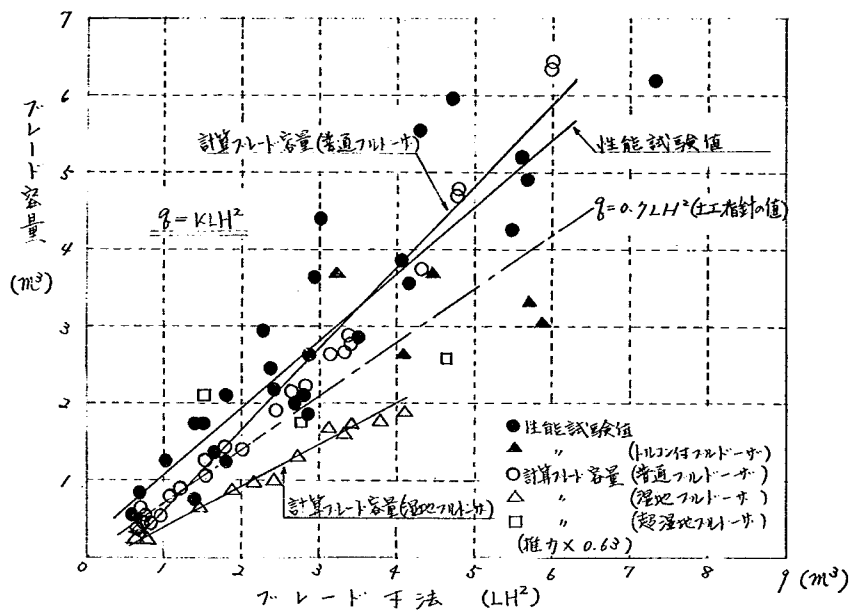


図-9(a) フレートの1回当り押土量とフレート寸法

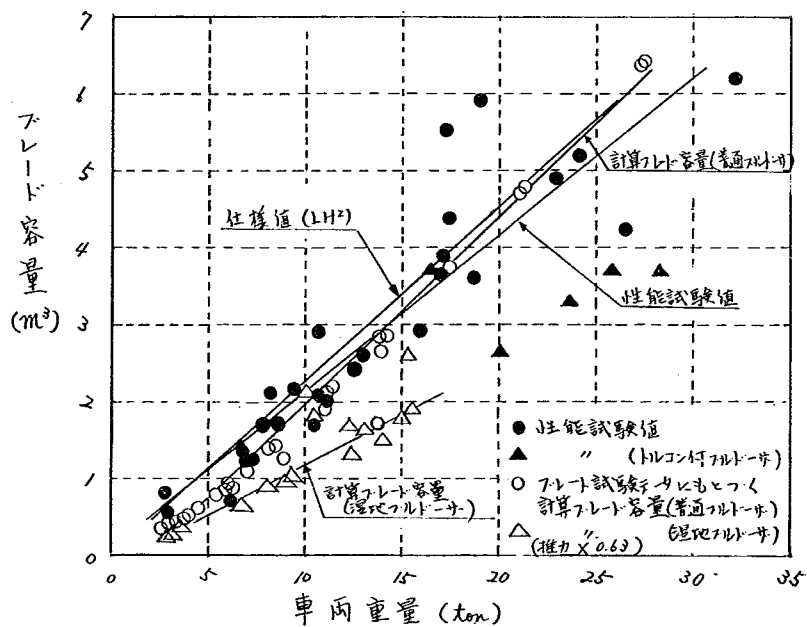


図-9(b) フレート容量と車両重量

2・3・4 実車のけん引力とブレード寸法・掘削可能深さ及びブレード容量の検討

今まで検討してきたようにブレードの押土容量はブルドーザのけん引力が大きな要因となることがわかった。又このけん引力は走行する土によって影響されることもわかった。それに対して掘削抵抗力、すなわち、けん引力を消費する力は走行する土の性質により影響される。したがって、けん引力と掘削抵抗力は相反する関係にある。今、土の性質を仮定して国産のブルドーザの仕様値を用いて推力を計算する。一方ブレード試験機による掘削押土試験で得られた掘削押土抵抗よりブレード寸法による最大掘削深さが推定できれば、ブレード容量が計算できる。即ち、ブルドーザの能力による掘削可能な推力がきまれば、掘削深・ブレード巾・押土高さがきまって最大押土量はある一定値になると思われる。ここでは掘削押土抵抗はブレード試験機の結果をそのまま利用し、細部の検討は文末の文献にて検討することとし、⁽¹⁾表-1・2、図-4にその試算した値が示してある。

2・3・5 けん引出力と作業量 ⁽³⁾⁽⁴⁾

図-10は性能試験場の砂質ロームを掘削運搬距離20mで作業を行なったときの作業土量と最大けん引出力との関係を示したものである。試験時間は、土木研究所の試験が15～20分間、機械化協会建設機械化研究所の試験が5～7分間のものである。これよりサイクル数により、一回当りの押土量が推定できる。2・2・2で指摘したように最大けん引出力と作業土量の間にはかなり密接な関係があることがわかる。この関係式は、ブルドーザがその作業現場で出し得る短期間の最大作業能力を示す。尚図-11には最大けん引出力と車輻重量の関係を示した。2・2・2の図-2機関出力と車輻重量の関係とともに、土の性質と合せ性能向上の検討資料になると思われる。

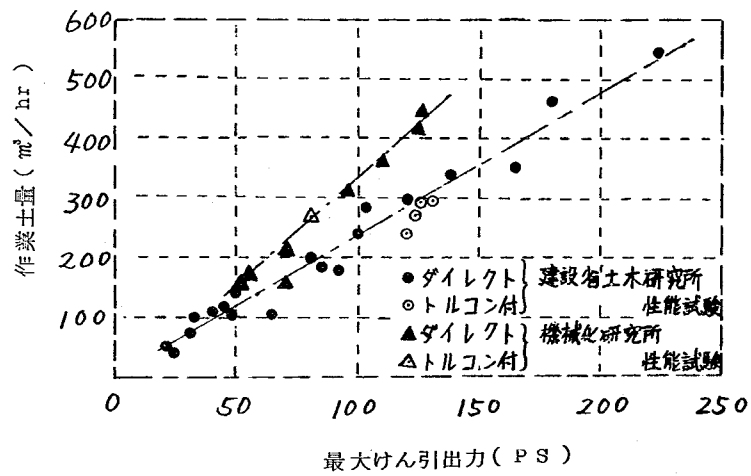


図-10 作業量と最大けん引出力

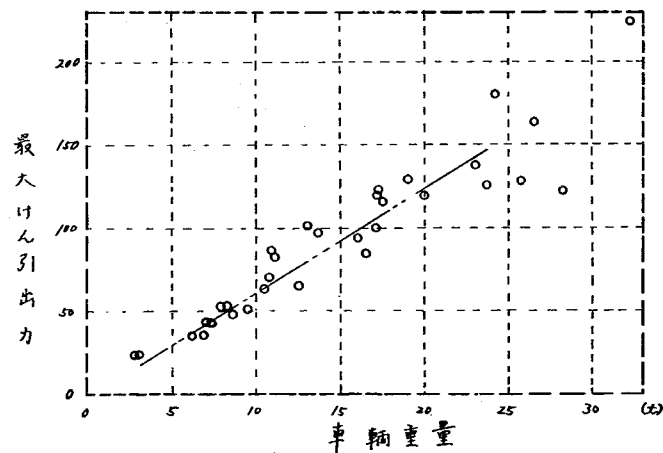
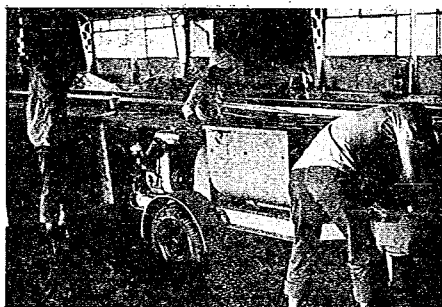


図-11 最大けん引出力と車両重量

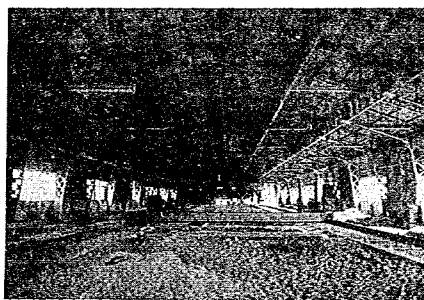
3 試 験 方 法

3・1 試験の手順

土木研究所にある試験ビットにあらかじめ 2000μ 及び 4000μ ふるいに通した表一七に示す5種の土をそれぞれ含水状態・締固め度等・土の実験条件を表一八の試験結果一覧表の掘削初期条件に示すように変化させて、表一六に示す各種のブレードを用いて掘削押土実験をくりかえした。



写真一 土入れ



写真二 場内風景

土の条件を一定に保つのが難かしいので、なるべく含水条件・締固め条件は実験計画にしたがった値に近づけたが、実験前の土の状態を詳細につかみ、データ整理の段階で分類整理を行なった。

実験用ビットの深さは約 $3m$ 、巾はレールピッチ $9m$ である。そのビットへ実験用土を巾 $10\sim 20m$ 、深さ $20\sim 25cm$ に入れ規定の締固め・整形を行なった後図一13・写真一八に示すブレード試験機を用いて試験を行なった。ブレード試験機は型钢にて組立てられた長方形のフレーム内を更に角型にしたフレームの内部にブレード

をとりつけ、そのフレームを電動モータで駆動したウインチにてけん引するようにした。したがってブレードの最大移動距離は 3.8 m となった。尚、ブレード試験機の仕様・掘削力の計測方法については 3・3 でのべる。試験方法は上部を整形し、せん断試験用試料をとった後、設定深さの実験を行なう。次に前回と同じく掘削押土面の整理を行ない、その後土質資料をとって同様に試験をくりかえした。従って、上面と下面では土の性質が異なると思われるのでデータ整理の段階で分類整理を行なった。切削抵抗測定は 3・3・1 の(3)の図-14・15 に示す検出装置を使って測定した。

油圧変換器を用いた測定では荷重が小さいとき、油圧シリンダの摩擦抵抗があるため油圧変換器の出力が非常に小さく出て測定できなかったため、多くの場合けん引力計のよみにもとづく水平力を採用した。但し、けん引力計のよみは走行抵抗を含んでいるので、常に較正を行ないその分を差し引いている。又、垂直の油圧計についても、シリンダ摩擦が多く測定不可能であった。従って測定できる力は水平力 P_x のみであった。

土質資料 SOI: 以後は、切削抵抗測定には図-15 に示す新しい三分力計を取りつけ測定を行なった。これは、水平力・垂直力・モーメントの三分力が同時に測定できるものである。3・3・2 に構造・三分力検出についての理論的な考察及び検定による較正表を示した。

3・2 試験内容

3・2・1 試験の種類

表-8 に今までに行なった試験結果のすべてのデータが整理して集録してある。各種実験要因が入り組んでいたため組み合わせが膨大なものとなったが、特に強いと思われる因子を撰んで実験を行なった。実験は原則として同じ試験を 3 回くり返しその平均値をとった。試験の種類としては、(1)掘削試験、(2)掘削押土試験、(3)押土試験、(4)切削試験、(5)手動切削試験の 5 種を行なった。表-3 にこれまでの試験の期間と内容、表-4 に試験分類を示す。

表 - 3 試験内容と試験期間

記号は表-4・5・6・7参照

整理 NO	実験分類 記 号	実験年月日	実験 回数	試験土質	試験 分類	試験条件 $v \cdot t \cdot \alpha$	使用ブレード NO	試験 目 的
1	B 43-3	43.13~43.25	24	S ₀ I ₁	DC		BNO3	ブレード試験機性能チェック
2	B 43-5	43.22~43.7.10	46	S ₀ I ₁	DC	$t=5,10,15$ $v=0.14,0.19,0.25,0.32,$ 0.38 $\alpha=25,30,35,40,45$	BNO2	掘削スピードの変化による押土量・掘削抵抗の変化を調べる。 掘削角度変化による押土量・掘削抵抗の変化を調べる。 掘削深さ変化による押土量・掘削抵抗の変化を調べる。
3	B43S-7	43.7.24~43.10.29	79	S ₀ I ₁	DC	$t=6,9,12,15$	BNO2	掘削深の違いによる押土量・押土抵抗の変化を調べる。
4	B 43-12	43.1.22~44.2.20	160	S ₀ I ₁ S ₀ I ₂ S ₀ I ₃	DL O	$t=10,20,25,30$ $v=0.1$	BNO1,2,3	ブレード幅による押土量・掘削押土抵抗の違いを調べる。 掘削深さの違いと押土量・押土抵抗の変化を調べる。 土質の違いによる押土量・押土抵抗の変化を調べる。
5	B 44-2	44.2.24~44.3.7	12	S ₀ I ₁	DL	$t=10,15,20,25,30$	BNO2	掘削深の違いによるルーズ土の押土量の変化を調べる。
6	B 44 S-10	44.10.7~44.10.25	55	S ₀ I ₄	DC	$t=5,10,15,20,25,$ $\alpha=29,34,39,44,49,$ 54	BNO1	ブレードすくい角の変化と押土量・押土抵抗の変化を調べる。
					DC	$t=5,10,15$	BNO4	ブレード掘削深さの変化と押土量・押土抵抗の変化を調べる。 含水比の違いと押土量の変化を調べる。
7	B 44-12	44.1.25~45.1.20	59	S ₀ I ₄	DC	$t=5,10,15,20$	BNO9,11	H / Lの違いによる押土量の変化を調べる。 掘削深の変化による押土量の変化を調べる。
					DOC	$t=5,10,15,20$	BNO8,10	
					DOC	$t=10$	BNO9,11	
8	B 45-2	45.1.29~45.2.6	17	S ₀ I ₄	DC DOC	$t=5,10,15$	BNO7	掘削深の違いと押土量・掘削押土抵抗を調べる。
9	B 45-3	45.3.2~45.3.9	52	S ₀ I ₅	DC	$v=0.16$ $t=5,10,15,20$	BNO1	掘削スピードの変化と押土量・掘削押土抵抗の関係を調べる。 掘削深さの違いによる押土量・押土抵抗の変化を調べる。 すくい角の変化と押土量・掘削押土抵抗の関係を調べる。 押土の遞減率について調べる。 切削破壊面の形状と破壊強度と深さ・せん断試験強度の関係を調べる。
					DOC	$t=10, v=0.10, \alpha=39$ $\alpha=24,29,49,54$		
					DC	$v=0.16, 0.24, t=10$		
					DOC	$v=0.16$		
					HC O	$t=6,0.50,4.0,3.0,2.0$		

表-4 試験分類

№	分類 記号	分類名	方 法	測定項目	測定目的
1	DC DL	掘削試験	締め固められた路面を一定の深さで掘削押土している試験。押土が地山の場合(DC)、押土がルーズの場合(DL)	掘削抵抗 押土量 押土形状	掘削及び押土抵抗と押土量の測定
2	DOC DOL	掘削押土試験	締め固められた路面(DOC)又は、ルーズ路面(DOL)を掘削押土しながら、前方へおいたルーズ土の山の押土も行う試験	掘削押土抵抗 押土量 押土形状	ブレード試験機の構造上、移動距離が短かいので、スタート付近でブレード容量をいっぱいにして掘削押土の平衡状態を調べる
3	O	押土試験	締め固められた路面上をブレード先端をすべらせながら前方の土の山を押す試験	押土抵抗 押土量 押土形状	押土の距離による遞減率と押土抵抗を調べる
4	C	切削試験	ある短かい区間の切削を行なう試験で押土量は測定しない	切削抵抗	切削抵抗を調べる
5	HC	手動切削試験	手動にてモータを廻して規定の深さの土を微速にて切削を行なう試験	切削抵抗 破壊面形状	土の切削破壊の様子と破壊面の形状、せん断試験値との比較を行なう



写真-3 掘削押土



写真-4 押土試験

今回のブレード容量に関する試験は表-4の(1)~(3)である。尚、ブレード前面へ土をおいたり、切削前後の土の状態、ブレード押土形状についての観察事項についてはデータ表の備考欄に示す。

3・2・2 試験項目及試験方法

今回の試験の測定項目及び測定器と測定方法は表-5に一括して示した。写真-5, 6, 7にはせん断試験機とせん断試料採取状況及び押土測定の様子を示す。図-12は掘削・押土抵抗力の測定オシログラムを示してある。

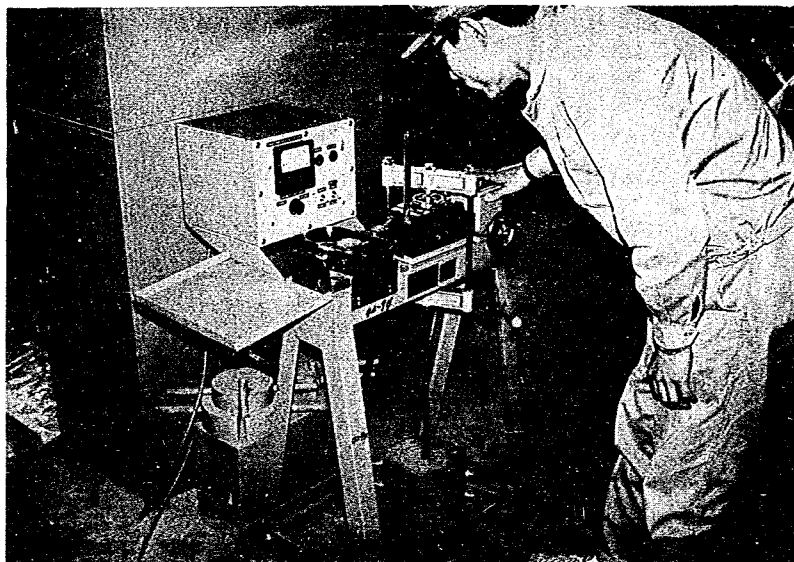


写真-5 せん断試験機



写真-6 資料とり

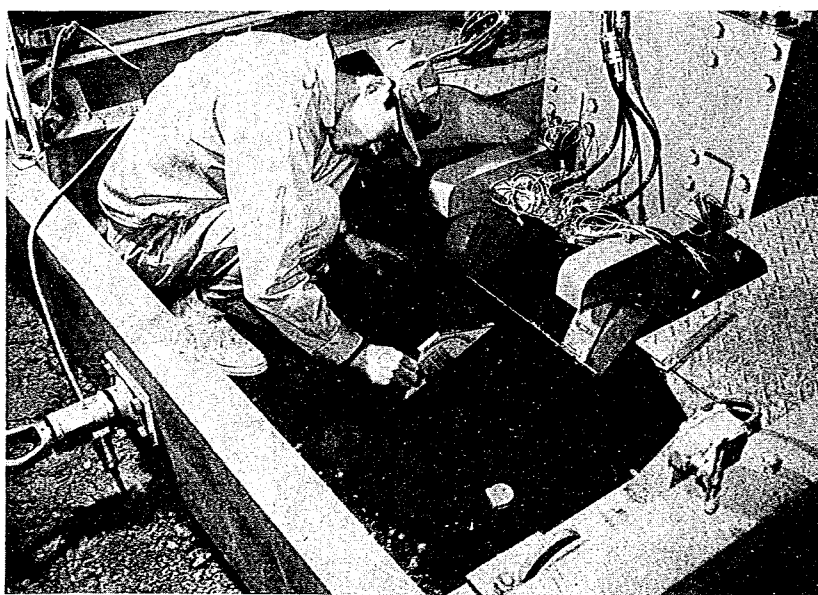
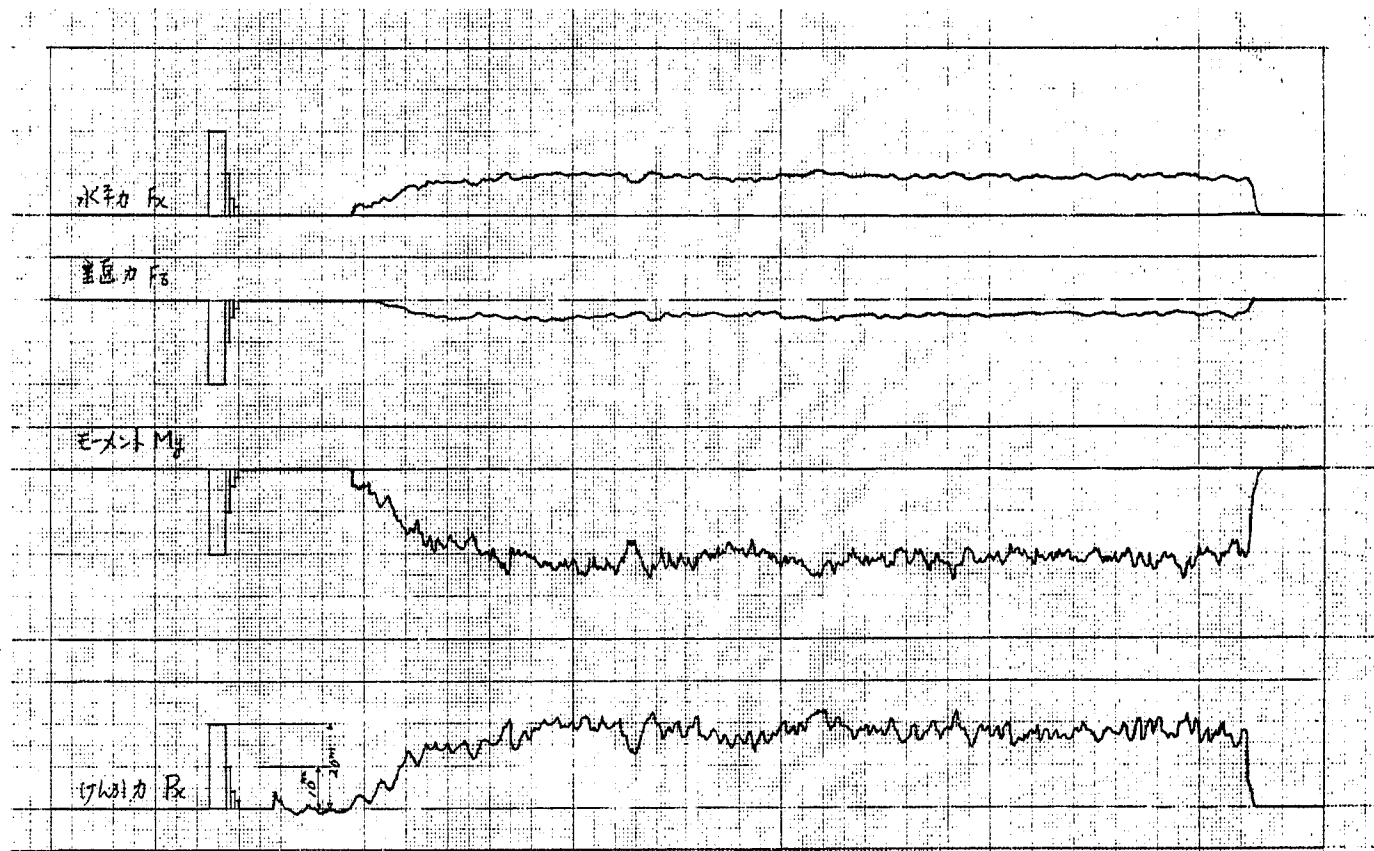


写真-7 押土測定

表-5 測定項目一覧表

分類	測定項目	使用計測器	測定方法
土の物理的性質の試験	土粒子の比重試験	JIS, A, 1202土粒子の比重試験方法に基づく試験器	JIS, A, 1202による試験方法
	含水量試験	JIS, A, 1203, 土の含水量試験方法にもとづく試験器	JIS, A, 1203による試験方法
	単位体積重量試験	地山 一面せん断試験用リング (56.55cc) 押土 モールド(600cc) 秤(サウター 秤量4Kg 感量0.1g)	掘削前の土の単位体積重量は一面せん断試験用リングを試験路面へ打ち込んで資料をとり重量測定をする。押土の場合は、600ccモールドを打ち込んで測定する。
	粒度試験	JIS, A, 1204, 土の粒度試験方法にもとづく試験器	JIS, A, 1204, による試験方法
	液性限界, 塑性限界試験	JIS, A, 1205, 土の液性限界試験方法にもとづく試験器	JIS, A, 1205, による試験方法
土の力学的性質の試験	締固め試験	JIS, A, 1210, 突固めによる土の締固め試験方法にもとづく試験器	JIS, A, 1210, による試験方法
	せん断試験	一面せん断試験器 (円井製作所)	土の切削面を均一に転圧整形した後、 $D=60mm$, $h=20mm$ の円形リングを打ち込んで、試料をとり出し写真(5)に示す試験器でせん断試験を行なう。垂直圧力は、0.5, 1, 2, 3 Kg/cm^2 とした。ルーズ土の場合は押土を試験機につめ測定を行なう。
土量測定	押土体積	物指, 角度計	ブレード前面にたまった、押土の形状角度を左に示した計器にて測定
	押土重量	秤(台秤, 秤量100Kg, 感量0.5Kg)	押土体積測定後、押土の重量を台秤にて測定する。
掘削力	掘削押土抵抗	けん引力計, 三分力計又は油圧変換器 ベンオシロ(渡辺測器WR・211-6C) アンプ(新興通信, DS6/MTY, 渡辺測器WA231-6C)	けん引力, 水平, 垂直, モーメント掘削スピードをベンオシロへ同時に記録する。
その他	掘削深, 掘削角	物指, 角度計	



図—12 測定オシログラム

3・3 試験機

3・3・1 ブレード試験機

(1) 概 要

実験に使用したブレード試験機の概要を図-13・写真-8に示す。尚、この全体図は43年度改造後のものであり、旧形式の全体図及び詳細な仕様については文末の文献を見られたい。⁽¹⁾

(2) 仕 様

全 長	9,300 mm
全 巾	2,440 mm
全 高	1,340 mm
全重量	4,500 Kg
横行スピード	0 ~ 0.55 m/sec (2 km/h)
掘削速度	0 ~ 1.1 m/sec (4 km/h)
掘削最大ストローク	4,670 mm
掘削深 (63 ブレード取り付け・標準切削角)	200 mm
掘削すくい角範囲	-5° ~ 65°
許容最大掘削抵抗値	1,200 Kg

動力装置

原動機	5.5 kW / 1500 rpm (200 V / 50 ϕ , 4 p)
変速機	バイエル変速機 5.5 kW
変 速 範 囲	0.2 ~ 0.8 (高速) 0.067 ~ 0.267 (低速)
減速機	サイクロ減速機
減速比	1 : 11
総減速比	0.00456 ~ 0.0545 (ドラム径300 mm)

計測用ピックアップ

三分力計	容量	水平力 1,000 Kg (改造後)
油圧変換器	"	10 Kg/cm ² (旧型ブレード試験機)
けん引力計	LT-ITC	1,000 Kg

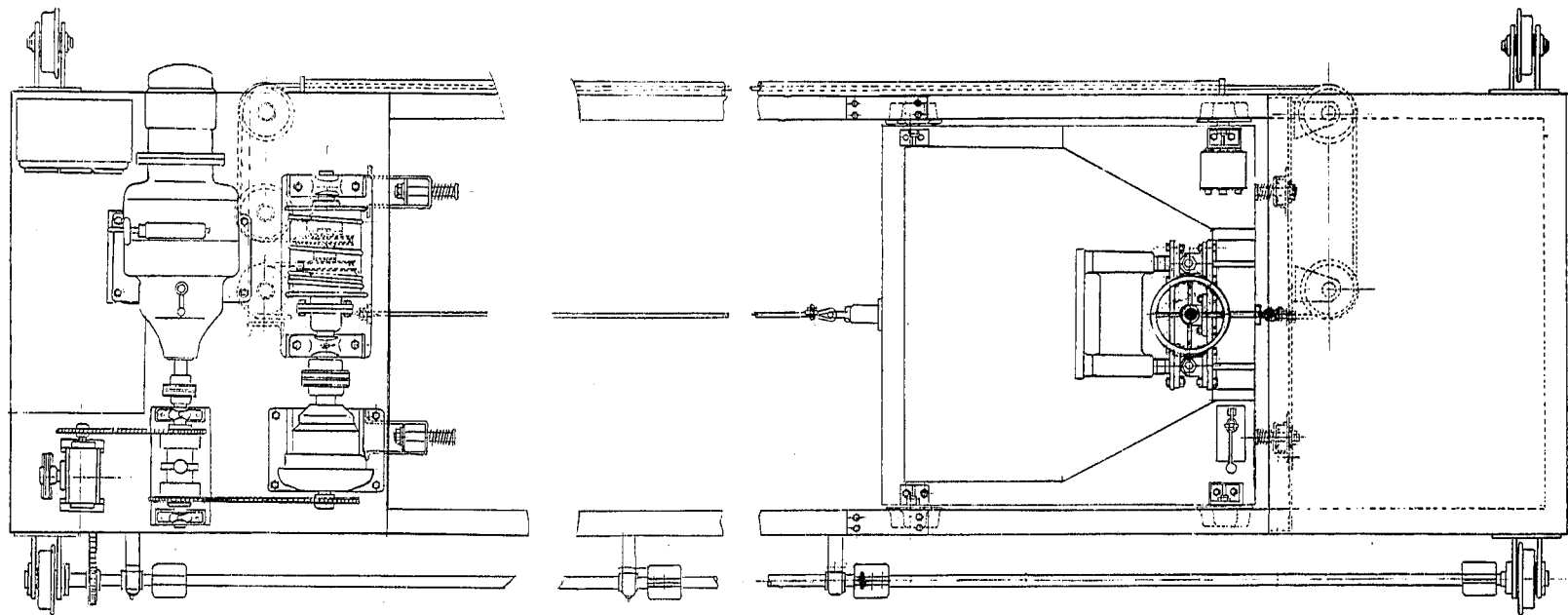
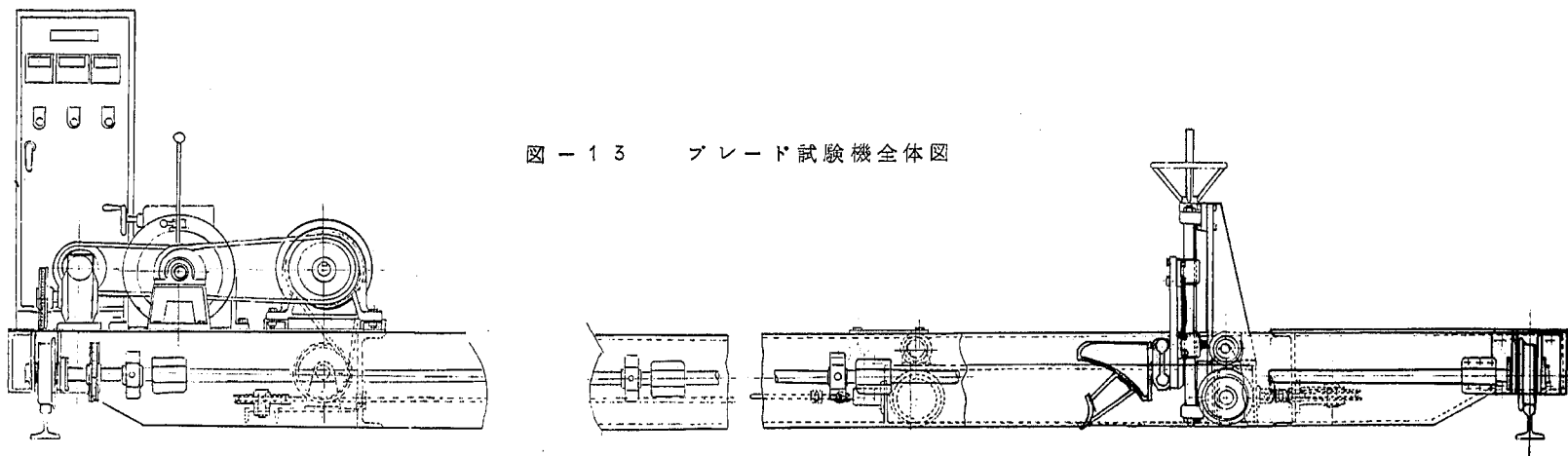


図 - 13 ブレード試験機全体図



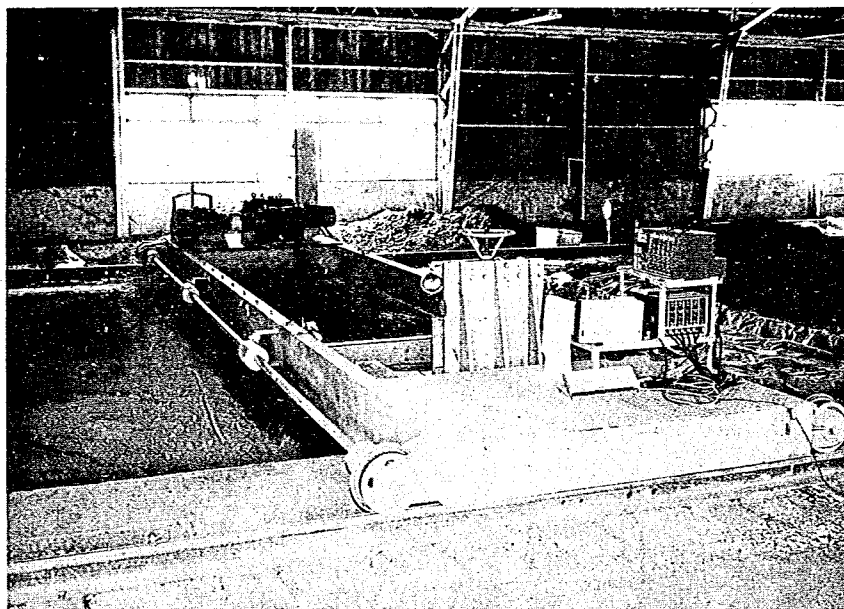


写真 - 8 試験機全体

(3) 掘削押土抵抗力検出装置

掘削押土抵抗力測定には油圧変換器を利用するものと、三分力計によるものの2通りを採用した。土質記号 S0I₂ 以後の実験は三分力計を用いた。図 - 14・15 に検出装置の取り付け図を示す。

20
1
2
3
4
5
6
7
8
9
30
1
2
3
4
5
6
7
8
9
40
1

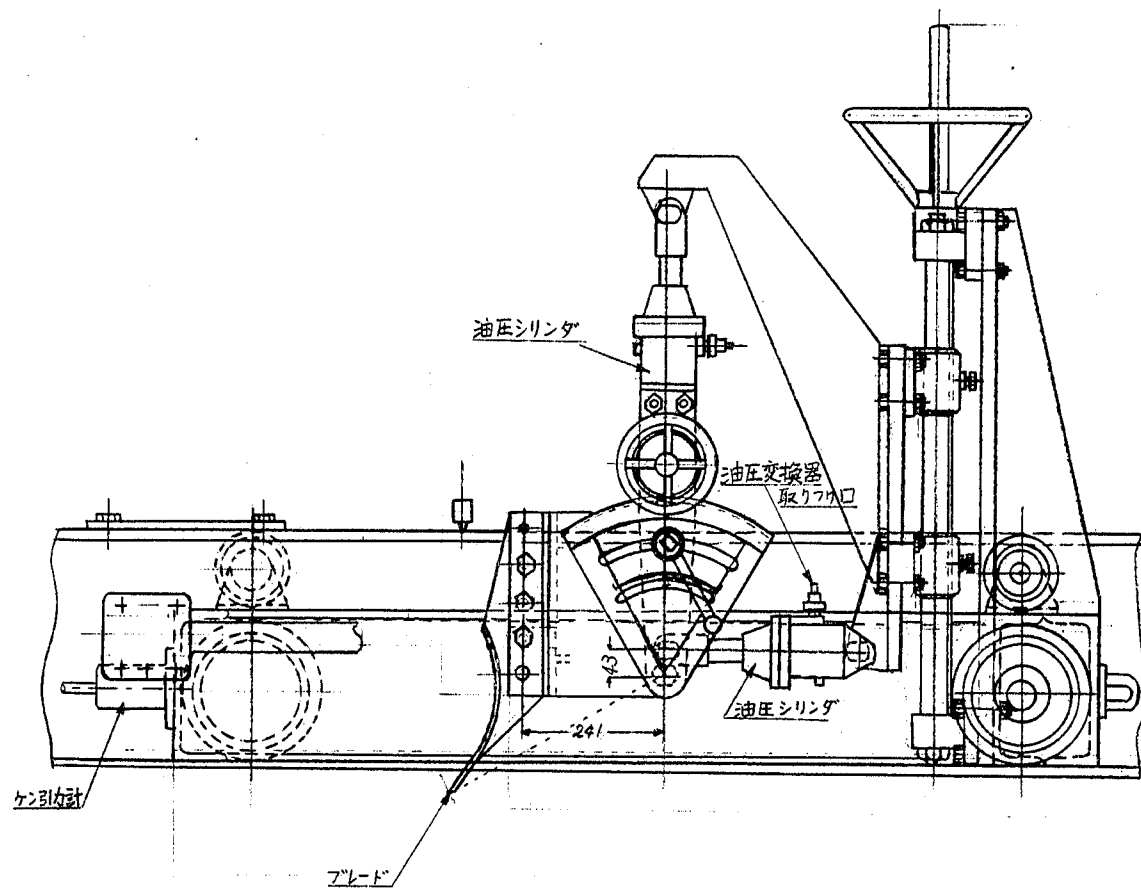


図-14. 油圧式振削抵抗測定器取り付け図

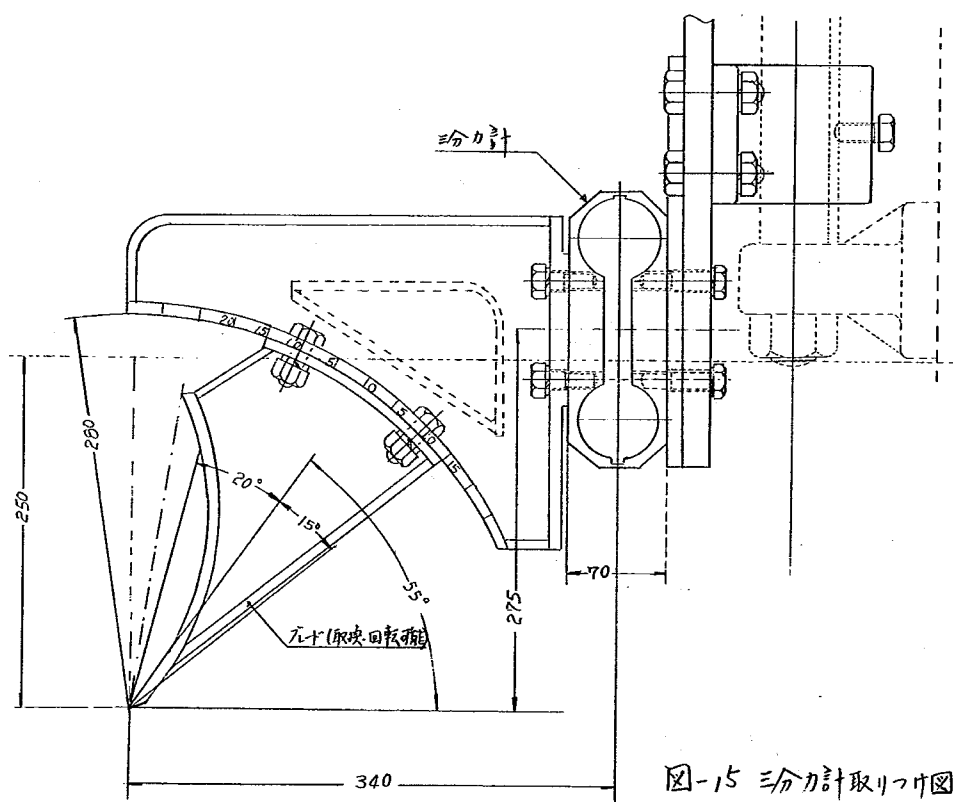
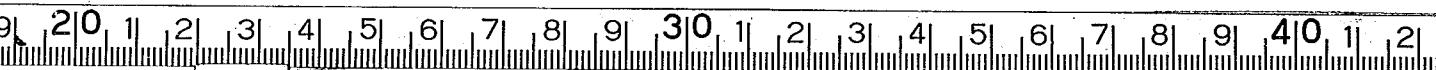


図-15 三力計取りつけ図



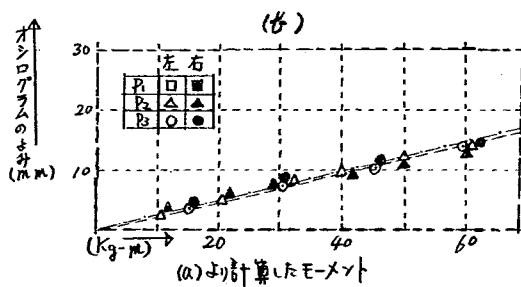
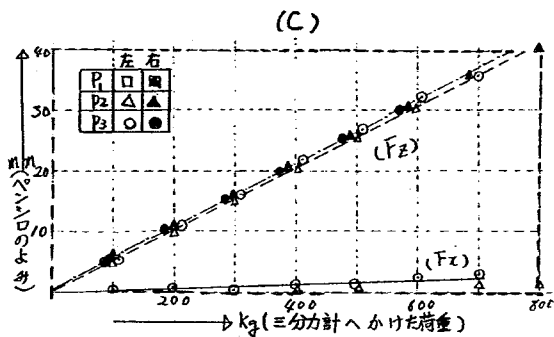
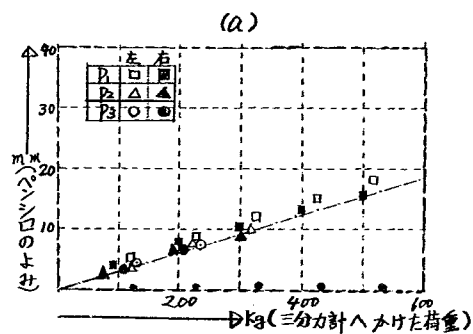
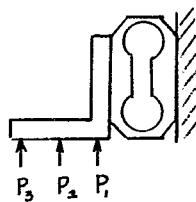
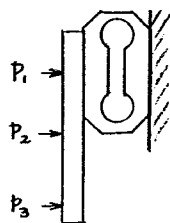


図-16 三分力較正表

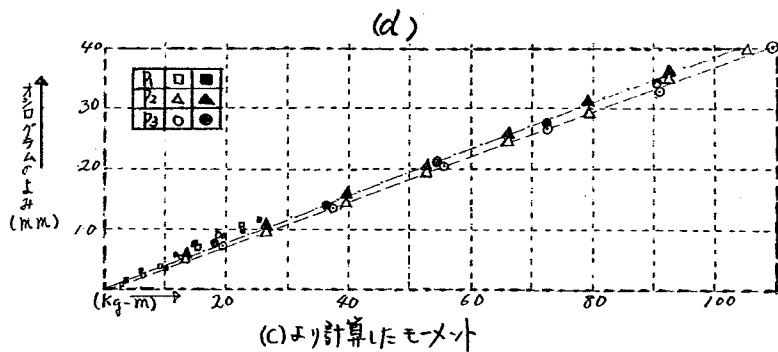


図-16 三分力較正表

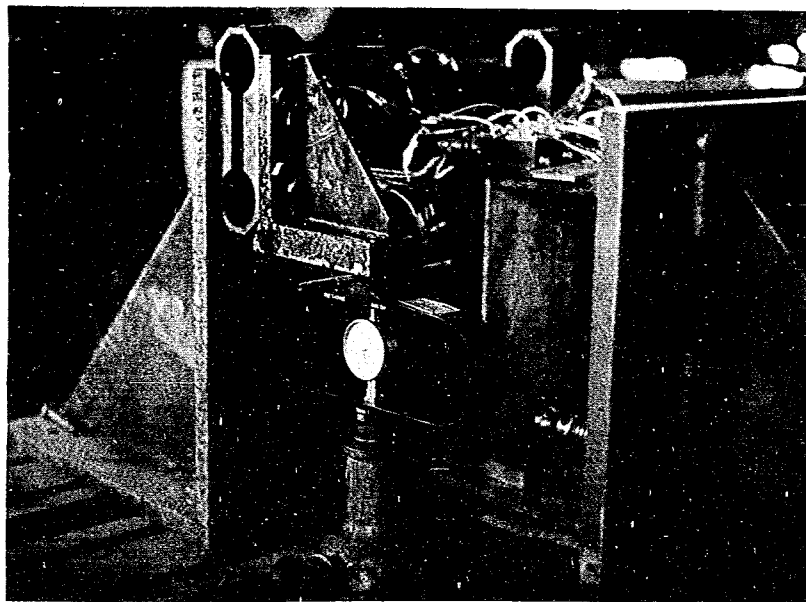


写真-9 三分力計とりつけ図

三分力計は、一つのトランスジューサーにストレインゲージを張り、水平力・垂直力・モーメントを同時に計測しようとするものである。図-18にゲージのとりつけ図を示しておいた。三分力検出の理論的解法をつぎに示す。今六角形トランスジューサーへ水平又は垂直力をかけると、トランスジューサーのある面に、Castiglianosの定理により、Strain node1 ができる。その node では応力の影響が現れない。従ってその面へ各ゲージを張りつけ応力の測定ができる。(6)(8)

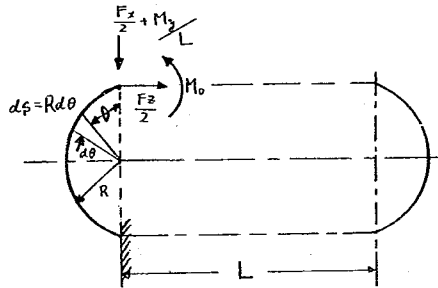


図-17 Castigliano's 定理の説明図

図-17より Castigliano's の定理によると

$$\frac{\partial U}{\partial M_0} = \int_0^\pi \frac{M\theta}{2EI} \cdot \frac{\partial M\theta}{\partial M_0} \cdot R d\theta = 0 \quad (3-1)$$

$$M\theta = M_0 - \left(\frac{F_x}{2} + \frac{M_y}{L} \right) \cdot R \sin \theta - \frac{F_z R}{2} (1 - \cos \theta) \quad (3-2)$$

より、 $\theta = 90^\circ$ は F_z の Strain node であり、 $\theta = 39.6^\circ$ は M_y と F_x の Strain node となる。実際のゲージは製作誤差とか材料の性質、材質の不均一等により異なると思われる。外国の例によると、Al 合金で $\theta = 5.0^\circ$ と 90° に製作している。今回は構造用鋼 (F45C) を使い、 $\theta = 4.0^\circ$ と 90° とした。実際のゲージの結線は左右の三分力計を同時に検出するために図-18(a)に示す方法をとった。

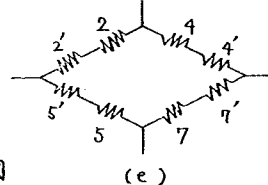
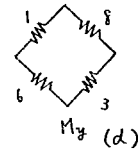
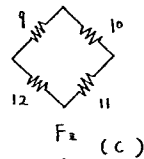
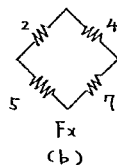
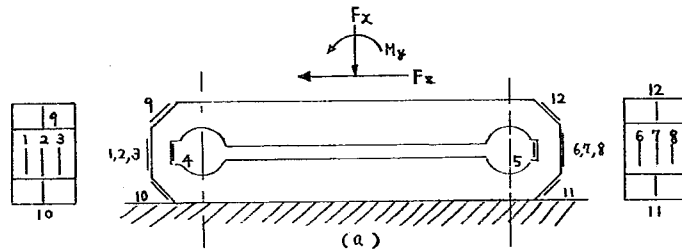


図-18 三分力計ゲージ配置図

3.3.2 試験ブレード要目

表-6に今回の実験に使用したブレード要目について示す。No.1ブレード模型は2t級ブルドーザ、No.2は9t級ブルドーザ、No.3は15t級ブルドーザのブレードのモデルである。No.4～No.7はNo.2ブレードの高さ・曲率を変化させたものであり、No.8～No.12はNo.1のブレードの高さ・曲率を変化させたものである。三分力計を用いた測定装置ではブレードの先端位置と掘削押土抵抗力測定用ピックアップとの位置は、表-6、図-15に示すように、ブレードの掘削位置・すくい角が変化しても常に一定になるような構造に設計してある。

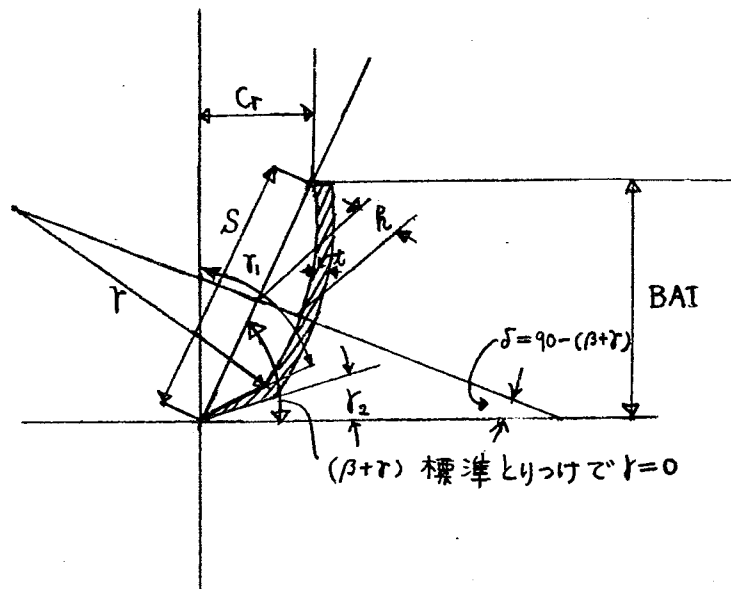


表-6の附図図

表-6 実験用ブレード要目

※標準とりつけの場合

整理No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	備考
項目	巾	高さ	巾×高さ	巾×高さの二乗	弦の長さ	弧の高さ	上端間隙	円弧の半径	円弧の曲率	すくい角	にげ角	とりつけ角	ブレード厚み	ビックアップセンターよりブレード先端水平距離	ビックアップセンターよりブレード先端垂直距離	
記号 ブレード単位 No	BL	BAI	LH	LH ²	S	h	Cr	r ₁	ρ_1	r ₁	r ₂	β	t	LH	LV	
	mm	※mm	※mm ²	※mm ³	mm	mm	※mm	mm	mm ⁻¹	※度	※度	※度	mm	mm	mm	
1	561	135	0.076	0.0102	141.0	26.0	21.0	88	11.4	39	20	81	6	340	275	回第43 転一年 可回度 能製改 作造
2	913	212	0.194	0.0410	218.0	36.5	48.0	200	5.0	35	20	78	6	340	275	
3	1027	259	0.266	0.0689	265.0	45.5	67.0	187	5.3	37	20	76	6	340	275	
4	913	178	0.163	0.0289	182.0	21.0	27.0	200	5.0	40	25	73.5	8	340	275	回第二 転二回 可回製 作作
5	913	227	0.207	0.0470	234.0	52.0	50.5	150	6.7	62	15	73	8	340	275	
6	913	227	0.207	0.0470	234.0	41.0	66.5	170	5.9	45	15	83	8	340	275	
7	913	272	0.248	0.0675	272.0	45.0	1.0	200	5.0	35	25	89	8	340	275	
8	561	88	0.049	0.0043	90.0	13.0	11.0	85	11.8	30.6	15	83	7.5	157	276.0	外注製 作 固定取 りつけ ブレード
9	562	140.6	0.079	0.0111	141.0	20.0	12.0	132	7.6	32.3	10	82	7.5	157	275.5	
10	561	188.9	0.106	0.0200	189.0	28.0	9.0	173	5.8	33.8	10	82	7.5	155	272.5	
11	561	239	0.134	0.0320	240.0	37.0	10.0	213	4.7	30.8	13	81	7.5	155.5	276.0	
12	561	290.5	0.163	0.0473	291.0	43.0	9.5	281	3.6	31.6	23	82	7.5	155.5	277.0	

3・4 ブレード試験実験用土の物理特性

表-7にブレード試験に使用した土の物理特性について示す。SoI₁は川砂を講入したものであり、SoI₃・SoI₄は土木研究所千葉支所内にある土を使用したもので、関東ロームと呼称されているものと思われるが、今まで他の実験等に使われている関係で相当砂分が多い。SoI₂はSoI₁、SoI₃の土をそれぞれ湿潤状態で1:1の重量比に混合したものである。それぞれの土は2mmふるいに通してビット内に入れた。SoI₃についてはローラにて転圧して使用した。SoI₄は4mmふるいを通して実験を行なった。SoI₅については国道16号線沿線の関東ロームと呼称されている土をそのまま搬入して含水調節の後締固めたものである。図-19, 20, 21には土の粒度試験、締固め試験結果を示す。

尚、実験前の土の状態については、試験データ表を参考とされたい。

表-7 ブレード実験用土の物理特性

土質記号	混合比	土 質 分 類		比 重	最大乾燥密度 (g/cm^3)	最適含水比 (%)	コンシステンシー試験			
		三角座標分類 (名称及記号)	統一分類				液性限界 LL(%)	塑性限界 PL(%)	塑性指数 PI(%)	流動指数 I _f
SoI ₁	砂質ローム	砂質ローム(h)	砂SM	2795	1.057	56.0	65.0	51.0	13.4	11.2
SoI ₂	砂:ローム 1:1	砂(g)	砂SM	2601	1.171	27.7	—	—	—	—
SoI ₃	砂	砂g	砂SW	2526	1.652	5.0	—	—	—	—
SoI ₄	砂質ローム	砂質ロームh	粘土質砂SC	2346	1.071	50.3	48.5	35.95	12.55	9.3
SoI ₅	関東ローム	シルト質ロームJ	火山灰質粘性土VH	2832	1.396	10.37	14.90	9.04	5.86	5.30

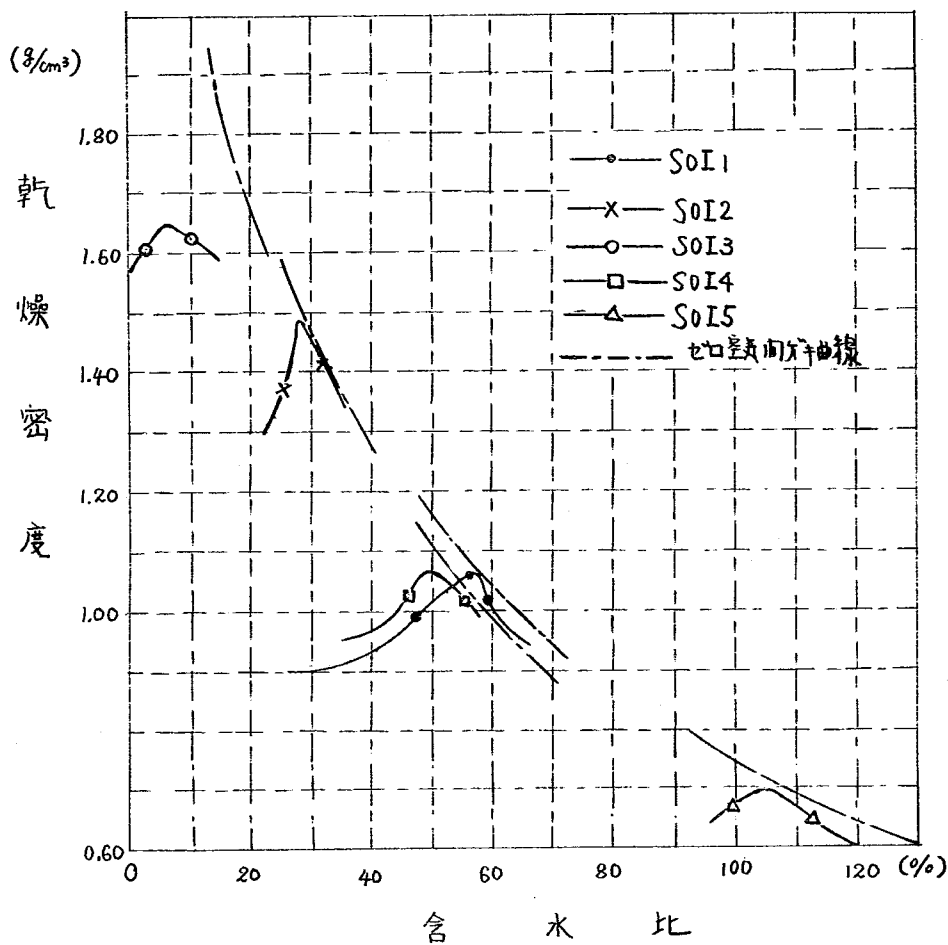
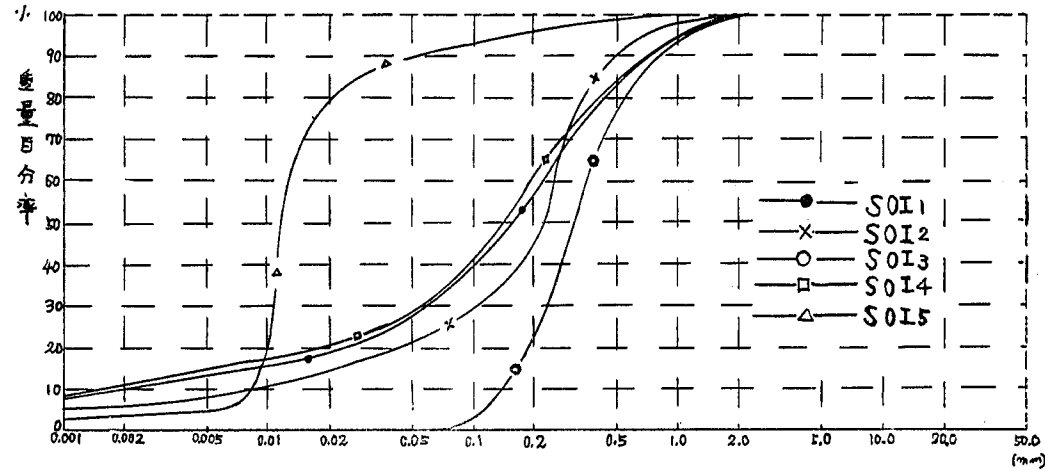


図-19 突固めによる土の締固め試験

試料 番号	レキ分 %	砂分 %	シルト分 %	粘土分 %	コロイド分 %	最大径 mm	60μ径 mm	30μ径 mm	10μ径 mm	均等 係数	不均 係数	200μ径 通過率 %	420μ径 通過率 %	75μ径 通過率 %	三角座 標法に よる分類	統一 分類法	備考
SOI1	0	64.0	21.0	6.0	9.0	2.0	0.210	0.060	0.0018	116.7	9.52	100	80.0	34.0	砂質 ローム	砂	
SOI2	0	77.0	15.0	3.0	5.0	2.0	0.230	0.110	0.0090	27.8	5.38	100	87.0	33.0	砂	砂	
SOI3	0	99.0	0	0	1.0	2.0	0.355	0.240	0.140	2.5	1.16	100	69.0	99.0	砂	砂	
SOI4	0	63.7	21.7	6.1	8.5	2.0	0.200	0.054	0.0014	142.9	10.41	100	80.8	36.3	砂質 ローム	粘土質 砂	
SOI5	0	9.7	86.3	1.0	3.0	0.84	0.0125	0.011	0.0083	1.5	1.17	100	98.1	90.3	シルト質 ローム	粘土質 粘土	

粒径加積曲線



0.001	0.005	0.074	2.0
コロイド	粘土	シルト	砂
			レキ

図-20 粒度試験

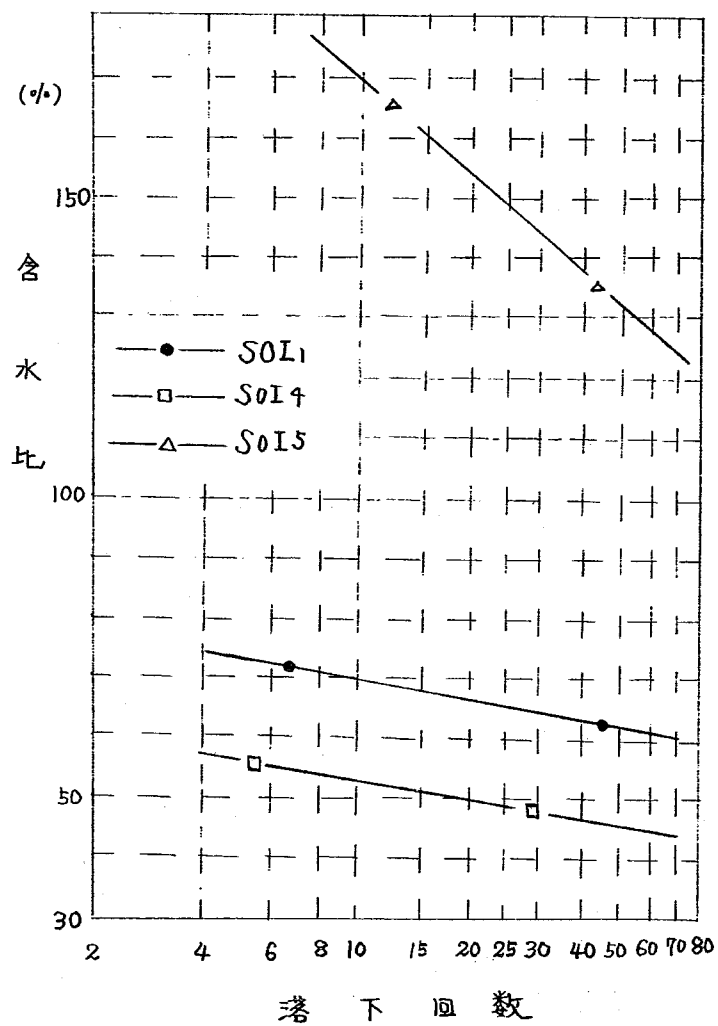


図-21 流動曲線

4. 実 験 結 果

4. 1 実験結果集計表

表-8 (1)~(6)に試験結果集計表を示す。試験分類・土質・ブレードNo等各要因の記号表示はそれぞれの項目に説明してある。

表 8 プレート試験データ集計表

試験条件	プレート分類	土質分類	試験番号	土の掘削初期条件					試験条件				試験結果			
				単位体積重量	乾燥密度	含水比	せん断強さ		掘削深さ	プレート垂直面投影高さ	すくい角(α)	掘削スピード	最終けん引力	掘削押土体積	掘削押土重量	備考
							みかけ粘着力(C)	せん断抵抗角(ϕ)								
単位	№	SO 値	№	g/cm ³	g/cm ³	%	Kg/cm ²	度	mm	mm	度	m/sec	Kg	m ³	Kg	
B-43-5 掘削試験 (DG)	2	1	28,32,60,65,69	1.532	0.977	56.9	0.502	27°54'	5	212	35	0.162	40	0.0224	18.8	
			25,30,31,34,59,61,62,63,64,67,70	1.532	0.964	59.2	0.425	29°26'	10	212	35	0.162	128	0.0390	40.7	
			26,29,33,66,68	1.543	0.993	55.6	0.499	28°20'	5	212	35	0.162	185	0.0531	60.5	
			25,30,31,34,59,61,62,63,64,67,70	1.532	0.964	59.2	0.425	29°26'	10	212	35	0.162	128	0.0390	40.7	
			38,41,44	1.457	0.941	54.9	0.543	24°53'	10	212	35	0.194	105	0.0368	33.3	
			36,39,46	1.457	0.941	54.9	0.543	24°53'	10	212	35	0.255	132	0.0447	38.6	
			35,42,43	1.457	0.941	54.9	0.543	24°53'	10	212	35	0.320	114	0.0386	34.3	
			37,40,45	1.457	0.941	54.9	0.543	24°53'	10	212	35	0.382	83	0.0374	35.1	
			48,52,58	1.457	0.934	55.8	0.427	27°47'	10	218	25	0.255	128	0.0475	42.1	
			50,54,55	1.457	0.934	55.8	0.466	28°10'	10	216	30	0.255	102	0.0417	34.1	
			36,39,46	1.457	0.941	54.9	0.543	24°53'	10	212	35	0.255	132	0.0447	38.6	
			49,53,56	1.457	0.934	55.8	0.466	28°10'	10	208	40	0.255	104	0.0472	39.6	
			47,51,57	1.457	0.934	55.8	0.427	27°47'	10	202	45	0.255	93	0.0490	38.6	

单 位	No.	SOI No.	No.	g/cm^3	g/cm^3	%	Kg/cm^3	度	mm	mm	度	m/sec	Kg	m ²	Kg	
B-438-7	掘削試驗 (D ₀)	2	1	1 1,2 5,2 6, 4 4,5 0,5 3	1,207	0.808	47.4	0.351	28°9'	6	212	35	0.162	35	0.0194	16.4
				3 2,3 8,4 1, 6 0,6 2,6 8	1,164	0.896	63.7	0.219	27°24'	6	212	35	0.162	57	0.0188	21.0
				1 2,1 6,2 0,2 4, 4 6,4 8,5 1,5 2	1,199	0.767	47.4	0.316	29°05'	9	212	35	0.162	37	0.0258	22.8
				3 4,3 5,3 9, 5 8,6 4,6 7	1,166	0.905	63.7	0.213	27°49'	9	212	35	0.162	94	0.0302	31.9
				1 0,1 3,1 4, 4 5,4 7,5 5	1,198	0.765	47.4	0.311	28°59'	12	212	35	0.162	58	0.0340	30.8
				3 3,3 7,4 0, 5 7,6 3,6 5	1,119	0.910	63.7	0.219	27°18'	12	212	35	0.162	169	0.0478	49.3
				1 5,1 9,4 3, 4 9,5 4	1,183	0.743	47.4	0.293	29°37'	15	212	35	0.162	50	0.0431	38.7
				3 1,3 6,4 2, 5 9,6 1,6 6	1,160	0.896	63.7	0.293	27°46'	15	212	35	0.162	195	0.0522	65.0
B-43-11	掘削押土 (D ₀)			6			46.1			10	212	35	0.162	11.2	0.0227	18.0
				5			46.1			15	212	35	0.162	17.9	0.0334	30.0
				4			46.1			20	212	35	0.162	21.2	0.0376	38.5
				3			46.1			25	212	35	0.162	25.4	0.0449	42.0
				1,2			46.1			30	212	35	0.162	62.9	0.0517	55.0
B-448-10	掘削押土試驗 (D ₀)	1	4	1,3,6,1,0	1,780	1.217	40.9	0.75	42°34'	5	135	39	0.162	56.5	0.0075	7.2
				4,8,1,1	1,716	1.228	39.9	0.71	47°0'	10	135	39	0.162	99.2	0.0142	17.6
				2,5,7,1,2,3,7	1,746	1.177	45.7	0.70	43°44'	15	135	39	0.162	214.0	0.0253	26.5
				9,1,4,4,2,4,3	1,644	1.079	52.5	0.66	42°09'	20	135	39	0.162	333.8	0.0332	38.2
				1,3,1,5,1,6,4,6	1,608	1.033	55.8	0.70	38°38'	25	135	39	0.162	558.8	0.0396	49.6
				2,0,3,3,3,5,4,1	1,740	1.169	48.1	0.62	42°52'	10	136.3	29	0.162	300.4	0.0187	23.4
				1,9,2,1,2,6,3,2, 3,4,4,0,4,5	1,715	1.183	45.4	0.62	42°37'	10	136.2	34	0.162	188.1	0.0186	21.5
				4,8,1,1,4,4	1,703	1.204	41.8	0.68	44°11'	10	135.0	39	0.162	93.7	0.0143	17.7
				2,2,2,5,3,1,3,6	1,740	1.216	43.3	0.58	45°23'	10	132.4	44	0.162	100.0	0.0183	20.2
				1,7,2,3,2,7, 3,0,3,8	1,706	1.137	50.1	0.66	39°09'	10	128.8	49	0.162	85.1	0.0193	20.6
				1,8,2,4,2,8, 2,9,3,9	1,750	1.189	47.2	0.62	38°36'	10	124.4	54	0.162	73.4	0.0140	16.7

单 位		No	SOI(No)	No	g/cm ³	g/cm ³	%	Kg/cm ²	度	mm	mm	度	m/sec	Kg	m ³	Kg	備 考
B-45-3	掘 削 試 驗 (DOC)	1	5	1,8	1,356	0.664	104.2	0.595	46	5	135.0	39	0.162	60	0.00727	5.35	
				3,6	1,356	0.664	104.2	0.595	46	10	135.0	39	0.162	106	0.01415	13.25	
				2,7	1,356	0.664	104.2	0.595	46	15	135.0	39	0.162	225	0.02167	20.85	
				4,5	1,356	0.664	104.2	0.595	46	20	135.0	39	0.162	315	0.02776	26.80	
				23,11,13,9	1,360	0.668	103.7	0.563	46	10	137.0	29	0.162	216	0.01629	15.30	
				10,12,14,24	1,360	0.668	103.7	0.563	46	10	129.3	49	0.162	77	0.01816	15.90	
				25	1,367	0.667	104.0	0.630	45	10	124.8	54	0.162	82	0.01687	15.0	
				26	1,367	0.667	104.0	0.630	45	10	136.0	24	0.162	224	0.01632	14.2	
				35,37	1,284	0.614	109.0	0.560	44	10	136.5	34	0.255	151	0.01569	13.4	
				36,38	1,284	0.614	109.0	0.560	44	10	136.5	34	0.382	188	0.01614	14.75	30Kg
	掘 削 押 土 試 驗 (DOC)	1	5	15,22	1,345	0.655	105.3	0.635	46	5	135.0	39	0.162	53	0.00953	4.59	30Kg
				17,20	1,345	0.655	105.3	0.635	46	10	135.0	39	0.162	156	0.01892	16.25	30Kg
				16,21	1,345	0.655	105.3	0.635	46	15	135.0	39	0.162	258	0.02479	24.35	30Kg
				18,19	1,345	0.655	105.3	0.635	46	20	135.0	39	0.162	367	0.03181	33.75	30Kg
				29,32	1,319	0.654	101.6	0.625	44	10	137.0	29	0.162	225	0.01776	16.35	30Kg
				30,31	1,319	0.654	101.6	0.625	44	10	129.3	49	0.162	69	0.01724	15.4	30Kg
				28,33	1,319	0.654	101.6	0.625	44	10	124.8	54	0.162	64	0.01737	14.1	30Kg
				27,34	1,319	0.654	101.6	0.625	44	10	136.0	24	0.162	229	0.01963	16.2	30Kg
				39,41	1,331	0.649	105.2	0.650	46	10	136.5	34	0.255	220	0.01943	17.6	30Kg
				40,42	1,331	0.649	105.2	0.650	46	10	136.5	34	0.382	183	0.01899	17.75	30Kg

单 位		BNO	SONO	No	θ / cm	θ / cm	%	Kg / cm^2	度	mm	mm	度	m / sec	Kg	m^2	Kg	备 考		
B-44-12	掘 削 试 验 (DC)	9	4	17, 21, 25	1.729	1.218	4.19	0.79	$46^{\circ}18'$	5	140.6	32.3	0.162	48.0	0.00706	9.1			
				19, 23, 27	1.704	1.190	4.32	0.79	$46^{\circ}18'$	10	140.6	32.3	0.162	171.5	0.01852	21.4			
				18, 22, 26, 29	1.723	1.208	4.26	0.76	$46^{\circ}36'$	15	140.6	32.3	0.162	333.0	0.03025	34.0			
				20, 24, 28	1.719	1.207	4.25	0.67	$51^{\circ}00'$	20	140.6	32.3	0.162	571.8	0.03469	43.3			
				30	1.720	1.223	4.06	0.68	$52^{\circ}00'$	25	140.6	32.3	0.162	698.7	0.04633	60.9			
		11	4	44, 48, 52	1.630	1.137	4.35	0.59	$46^{\circ}48'$	5	239.0	30.8	0.162	42.9	0.00701	7.0			
				46, 49, 56	1.637	1.149	4.26	0.55	$47^{\circ}42'$	10	239.0	30.8	0.162	79.7	0.01038	12.9			
				45, 51, 53, 54	1.606	1.118	4.38	0.58	$47^{\circ}06'$	15	239.0	30.8	0.162	138.4	0.01824	21.7			
				47, 50, 55	1.600	1.104	4.50	0.64	$46^{\circ}00'$	20	239.0	30.8	0.162	209.9	0.02297	30.6			
	掘 削 押 土 试 验 (DOC)	8	4	4, 7, 10	1.709	1.212	4.09	0.79	$48^{\circ}00'$	5	88.0	30.6	0.162	80.9	0.01114	11.0	15Kg		
				1, 2, 12	1.699	1.196	4.21	0.74	$50^{\circ}00'$	10	88.0	30.6	0.162	236.1	0.01802	19.8	15Kg		
				5, 8, 9	1.677	1.194	4.01	0.83	$44^{\circ}00'$	15	88.0	30.6	0.162	376.9	0.02380	27.1	15Kg		
				3, 6, 11	1.691	1.185	4.28	0.79	$46^{\circ}00'$	20	88.0	30.6	0.162	748.2	0.02585	36.3	15Kg		
		9	4	13, 14, 15, 16	1.713	1.196	4.32	0.66	$50^{\circ}30'$	10	140.6	32.3	0.162	231.5	0.02082	22.6	25Kg		
				10	4	35, 40, 43	1.680	1.158	4.51	0.67	$44^{\circ}00'$	5	188.9	33.8	0.162	34.6	0.00744	9.6	35Kg
						31, 32, 33, 34	1.674	1.146	4.61	0.73	$46^{\circ}30'$	10	188.9	33.8	0.162	113.8	0.01785	19.4	35Kg
						37, 38, 41	1.687	1.145	4.73	0.78	$49^{\circ}00'$	15	188.9	33.8	0.162	220.5	0.02751	33.4	35Kg
		36, 39, 42	1.657			1.140	4.54	0.71	$45^{\circ}35'$	20	188.9	33.8	0.162	451.5	0.04014	45.3	35Kg		
		11	4	57, 58, 59	1.533	1.059	4.47	0.55	$48^{\circ}00'$	10	239.0	30.8	0.162	95.3	0.01474	17.9	45Kg		
B-45-1	(DOC)	7	4	7, 8	1.705	1.171	4.56	0.62	$47^{\circ}00'$	5	272.0	35.0	0.162	11.9	0.02001	19.3			
				4, 5, 6	1.680	1.155	4.55	0.65	$36^{\circ}00'$	10	272.0	35.0	0.162	161	0.03178	41.3			
				1, 2, 3	1.698	1.167	4.55	0.66	$44^{\circ}00'$	15	272.0	35.0	0.162	905.1	0.06009	75.5			
				9, 10, 11	1.692	1.171	4.45	0.58	$44^{\circ}20'$	20	272.0	35.0	0.162	1638.8	0.08304	126.3			
	(DOC)	7	4	12, 13, 14, 15, 16, 17	1.686	1.160	4.54	0.57	$45^{\circ}00'$	10	272.0	35.0	0.162	470.9	0.06233	75.6	山788Kg		

4・2 各要因と押土量の検討

4・2・1 ブレード掘削深さと押土量

図-22は各種ブレードの掘削深さとブレードの押土重量の関係を示したものである。押土重量は掘削深さに比例して増大している。今回の実験ではブレード寸法とともに押土量に最も強く影響を及ぼす要因である。図-23はその時の掘削押土抵抗の一部について示してある。図-32に示すように押土の形状が掘削深さとともに変化するものと思われる。

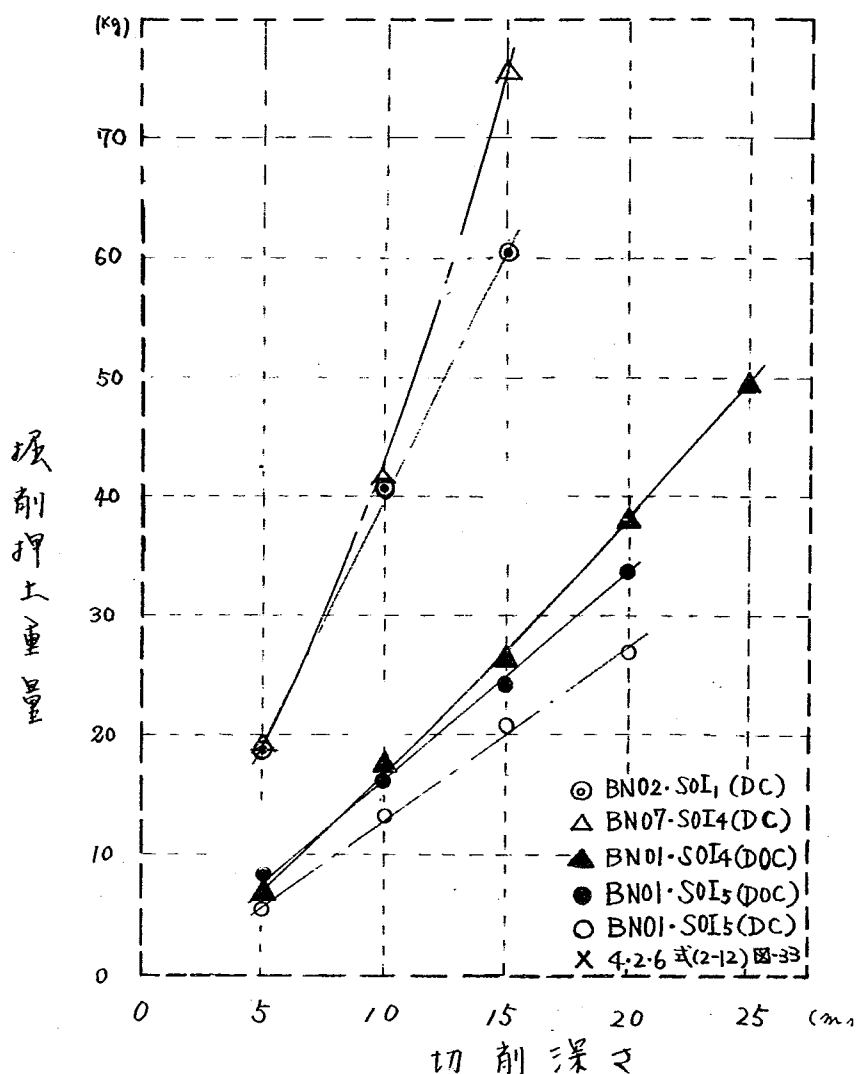


図-22 切削深さの変化と掘削押土量

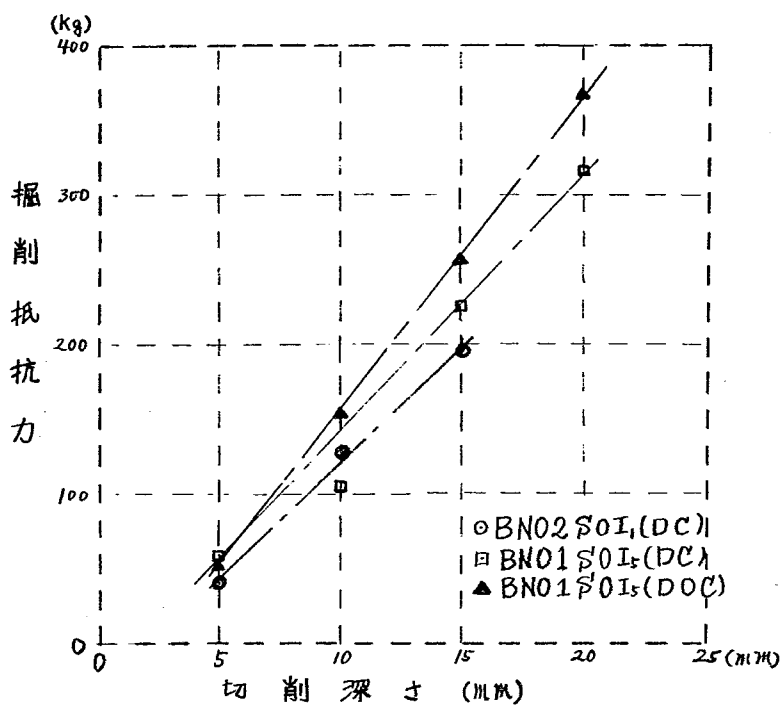


図-23. 切削深さの変化と振削抵抗

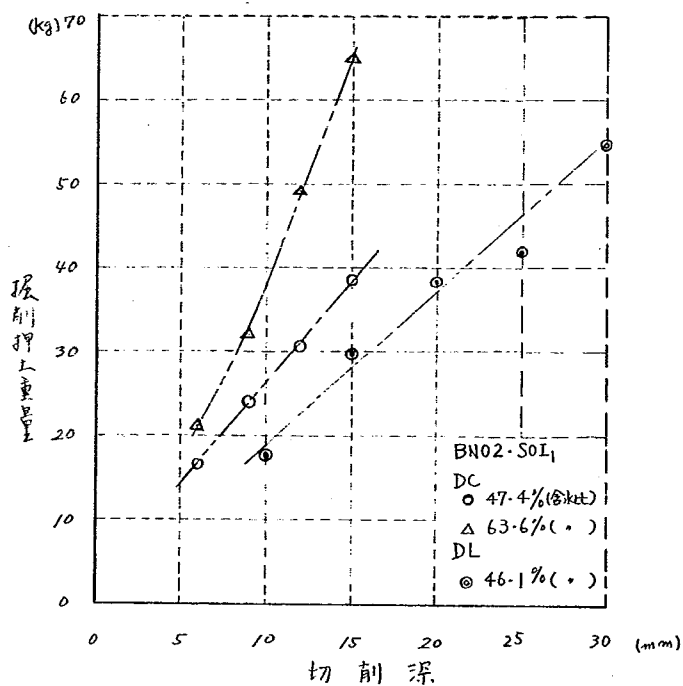


図-24. 切削深・含氷比の変化による振削押上量

4・2・2 ブレードすくい角と押土量

図-25はブレードのすくい角を5°きざみに変化させて掘削押土容量について測定したものである。すくい角の変化の増大するにつれて減少の傾向がでているが、これは同じブレードを回転させて測定しているの、ブレードの高さが減少しているためである。34°を基準にとると54°で約29%の高さが減少する。したがって、これらを考慮すると同じ高さのブレードのすくい角の変化に対して押土量の変化は認められない。

図-26に示すように掘削抵抗力は大きな変化を示しており、垂直力が充分得られるならばすくい角を大きくして掘削押土を行なった方が効率的といえる。

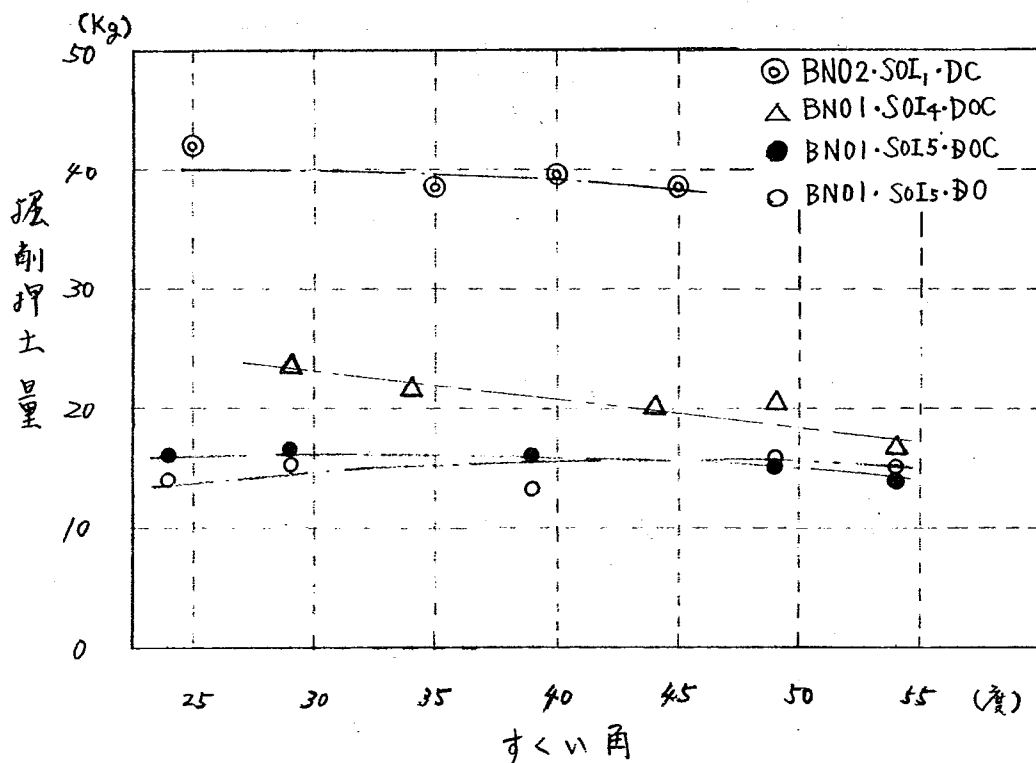


図-25 切削すくい角の変化と掘削押土量

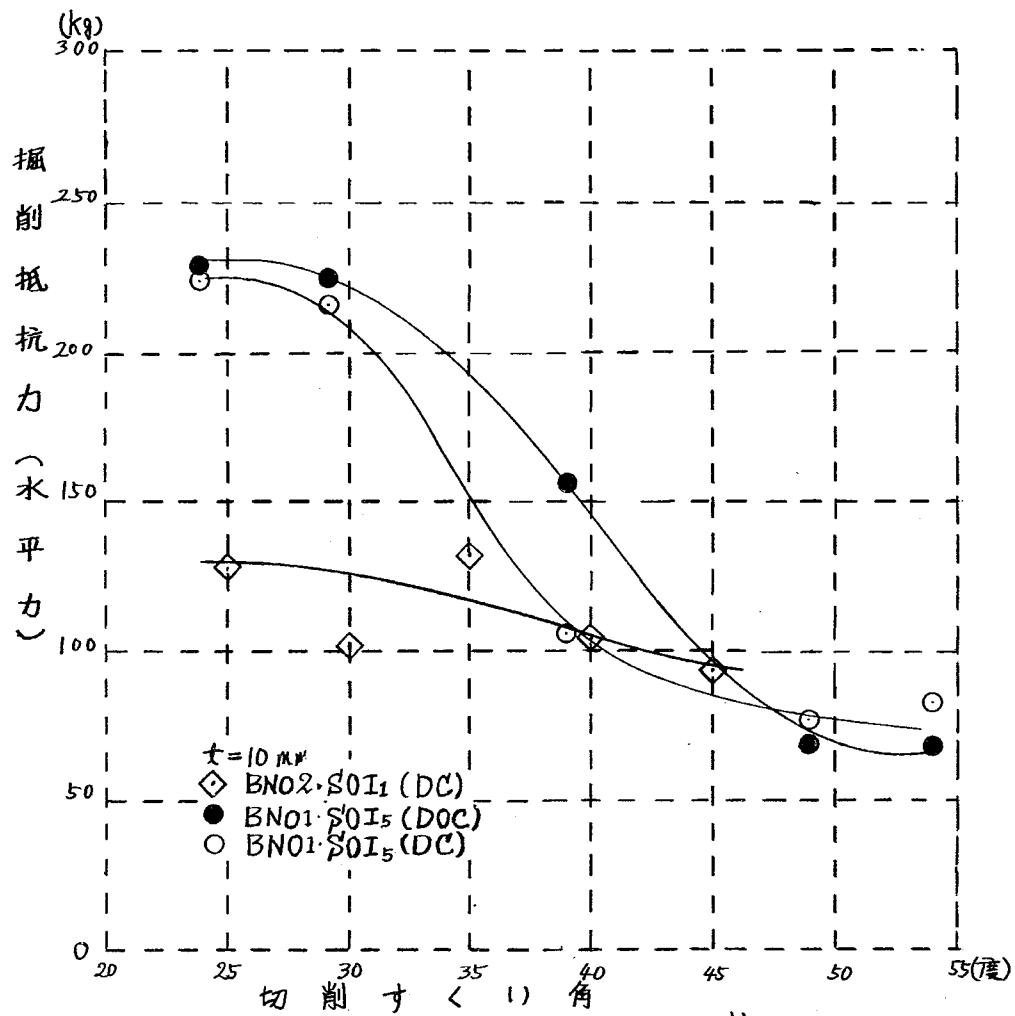


図-26. 切削すくい角の変化と振削抵抗

4・2・3 ブレード寸法と押土量

図-27・28は幅一定で高さを変化させた四種のブレードを用いて掘削試験・掘削押土試験を行なったものである。掘削深さについては図-22と同じ傾向である。図-28よりブレードの縦横比のある一定値で押土量が最大の点がある。国産のブルドーザの縦横比が約0.25であるが、ブレード試験機の結果の最大押土量附近にはほぼ一致している。

掘削深さ・土質・含水比でこのピークは異なると思われるが一応の目安がつかめたとと思われる。

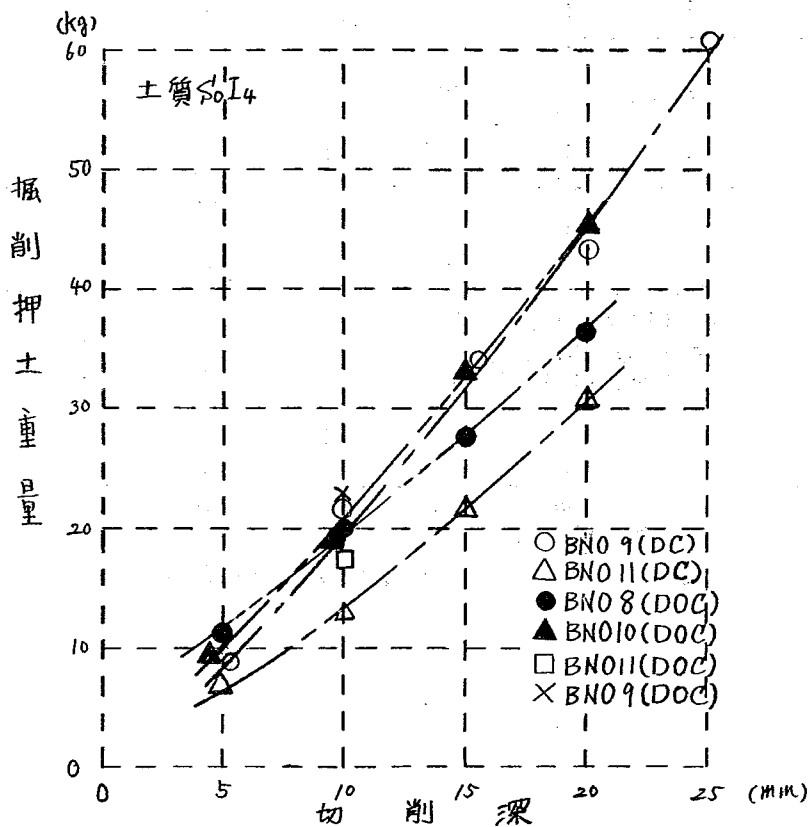


図-27 切削深・ブレード高さの変化と掘削押土量

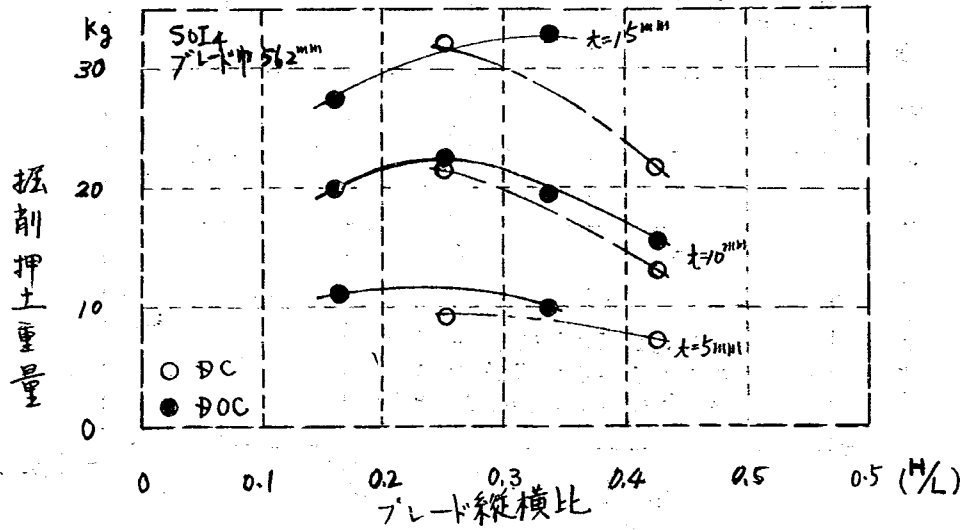


図-28 ブレード高さによる押土量の変化

4.2.4 掘削スピードと押土量

図-29は押土量が掘削スピードに影響される様子をとらえようとしたものである。理論のところで述べたようにわずかに減少するものと思われたが、三種の試験のうちその傾向が出ているものは一種のみであった。図-30はその場合の掘削押土抵抗を測定したものであるが、相当ばらついていて傾向はわからない。

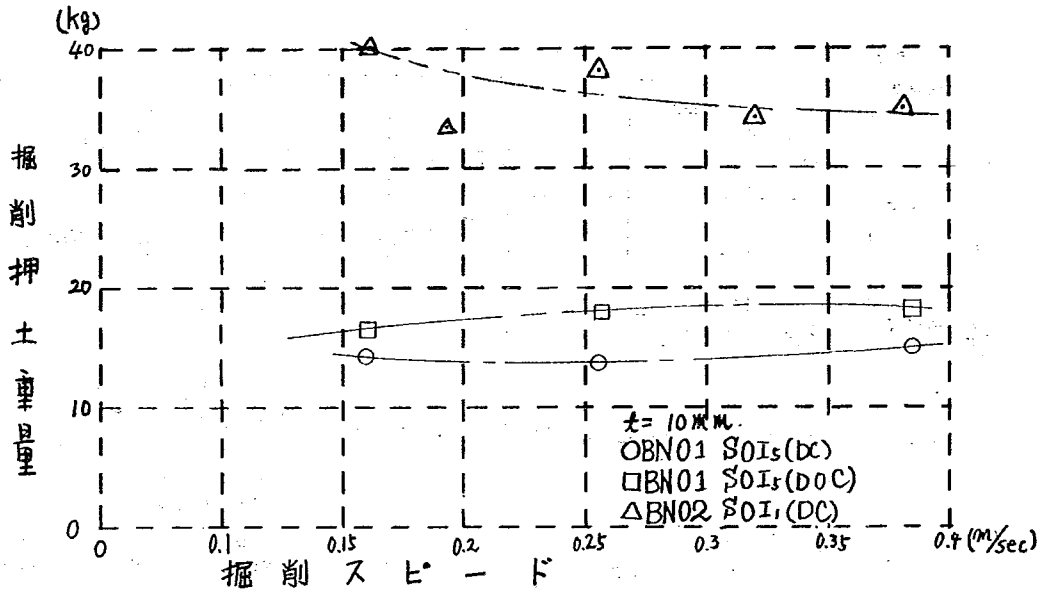


図-29 掘削スピードの変化と掘削押土量

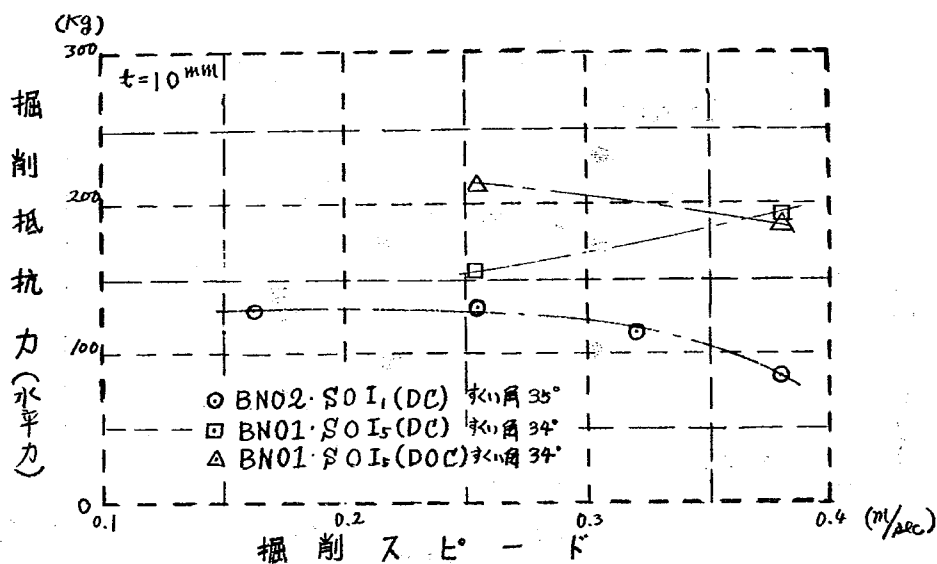


図-30 掘削スピードの変化と掘削抵抗

4・2・5 土質・含水比と押土量

図-31は三種のブレードを用いて、三種の土の含水状態を四段階に変化させて地山の上へ層状において押土実験を行なったものである。この試験方法では土質・含水比の変化に対して押土量は変化が認められなかった。図-24は地山掘削試験結果であるが、含水比の違いがかなり顕著にでている。しかし、このグラフの縦軸は重量表示であるので、これらを体積で示すともっと接近する。

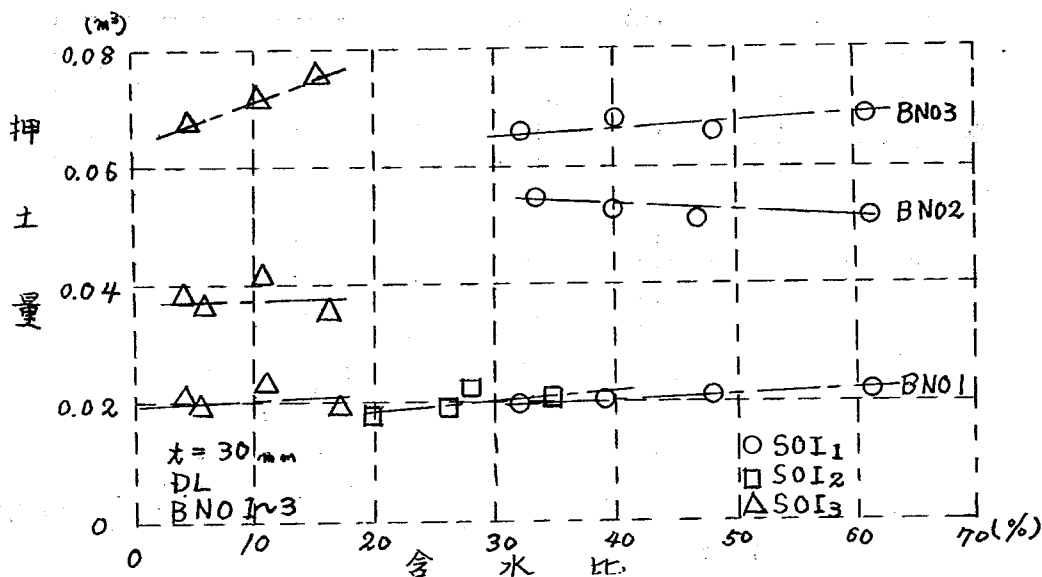


図-31 土質・含水比の変化と押土容積

4・2・6 押土形状と切削深さ

4・2・1で押土量は切削深さに強く影響されることがわかったが、2・2・4(2)で述べた理論の検討と2・3・1のブレード容量の式を組み立てるために押土形状と切削深さについて検討してみた。図-32, 33は押土の上面寸法・下面寸法・安息角と掘削深さについて示したものである(図-7参照)。これらの関係よりブレードNo5・土質はS0I5の実験にもとづいて各形状に関する係数を試算してみる。(2-12)式より $t=10\text{ mm}$ で $\alpha_h=0.074$, $t=20\text{ mm}$ で $\alpha_h=0.148$, $L=56.1\text{ cm}$, $H=13.5\text{ cm}$, $L_c=1.68$, $\varphi_2=38^\circ$, 掘削押土状態 θ_c で $\alpha_1=10$ $\alpha_2=5$ $\alpha_3=20$ より計算できる。(S0I5のルーズ土の単位体積重量は約 0.8 g/cm^3 である)。その結果を図-22に同時に示す。

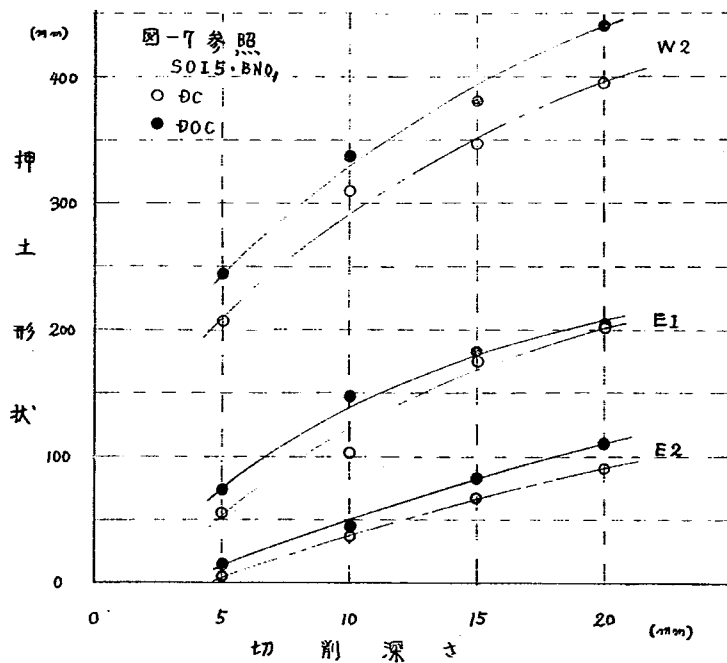


図-32 切削深さの変化と押土形状

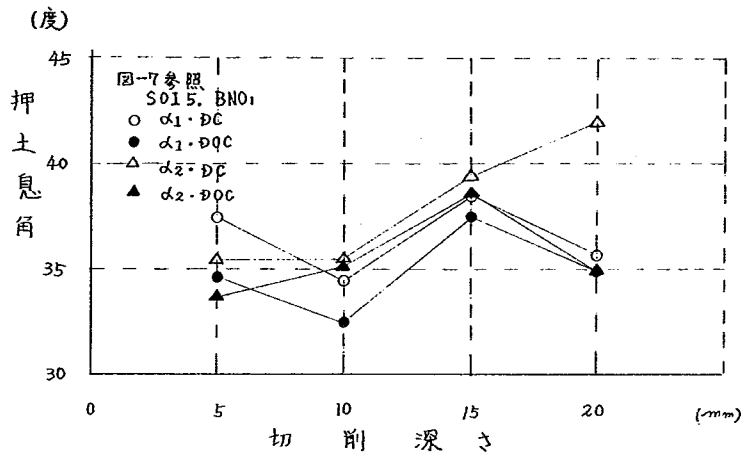


図-33 切削深さの変化と押土息角

4.2.7 その他の問題

押土距離による減速率については2～3実験したがまだまとまっていない。今後実験を行なう必要がある。実車での施工方法は最初にいっぱいの掘削を行なって、その後押土を行なうのでこの要因は重要であると思われる。

路面勾配については実車での試験にゆずるが、これはむしろ理論式から推定できる。

土質・含水比の違いによる押土量の影響についてははっきりした傾向がつかめなかったのので、もう少し進める必要があると思われる。

ブレードの縦横比については一種のみであったが、今後二～三種について実験を行なえば実車についての推定ができると思われる。

4.2.8 ブレード容量の実験式 (ブレード試験機より)

さきに4.2.6で各係数を計算したがこれ等の係数を式(2-12)に代入すると、

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{LH^2 \cdot \alpha_h}{2 \tan \varphi_2} \cdot \left\{ \frac{100}{3} + 30 (1 - \alpha_h) \right\} \left\{ 2 \tan \varphi_2 - \frac{4}{(1 - 4 \alpha_h) \frac{H}{L} + 4 \sqrt{1.68 \alpha_h \cdot \tan \varphi_2 \cdot \frac{H}{L}}} \right\} \quad (4-1) \end{aligned}$$

$\alpha_h \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_w$ は t の函数であり土質により多少変化するが t により大きく変る。 φ_2 は土質・含水比によりわずかわるがほぼ一定値である。 L_c は土の性質・締固め度により大きく変る。したがって、上式はブレード寸法・掘削深さ（けん引力）・土質を加味した押土容量の式となる。

4・2・9 実車の押土容量

2・2・2 では実車の押土容量はけん引力が重要なファクターであることを述べたが、今までの押土容量の式はブレード寸法を基準として計算している。ここで土の推力より各種の土の掘削可能な深さを推定すれば、その時の押土形状が推定でき容量が計算できる。式（4-1）の α_h は t の函数であったが、実車の場合には土の推力と掘削強度が土質とか土の乾燥密度等土の強度特性に影響される。したがって t は土の性質の函数である。

ブレード試験によると、最初にできるだけ多く土を掘削すれば押土量がふえることがわかった。したがって、押土量はブルドーザの最初の掘削能力によるといえる。今その時の掘削抵抗力を P 、ブルドーザのブレード幅を L 、掘削深さを t 、 $C \cdot \phi$ に影響される土の強度特性を α_c とする。ブレード試験機のデータによると SoI_c では $\alpha_c \div 3.049 \text{ Kg/cm}^2$ である。 $P = \alpha_c \cdot L \cdot t$ (4-2)

一方土の推力にもとづくブルドーザのけん引力 P_t は、

$$P_t = \alpha_\eta (A C + W \tan \varphi) = \alpha_p W \text{ (4-3)}$$

式（4-2）・（4-3）より、

$$t = \frac{\alpha_p W}{L \alpha_c} = \alpha_\eta \cdot \frac{W}{L} \text{ (4-4)}$$

性能試験結果では $\alpha_p \div 0.68$ である。したがって $\alpha_\eta = 0.224$ となる。

したがって t はブルドーザ重量・ブレード幅・土質（ α_1 、 α_2 、 α_w ）により異なる。それにつれ押土形状も変化する。

一方ブレード試験では $E = \alpha_1 t$ 、 $W_2 = \alpha_2 t$ と仮定したが、これ等の式と式（4-4）を代入して（2-12）式を変換すると次式が導かれる。

$$\begin{aligned} g = \frac{1}{2} \cdot \alpha_\eta (\alpha_1 + \alpha_w) \cdot W \cdot \frac{H}{L} \left(L - \frac{4H}{3 \tan \varphi_2} + 2 \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_\eta \cdot W \cdot L_c}{\tan \varphi_2}} \right) \\ \cdot d \text{ (4-5)} \end{aligned}$$

ここに d : 距離による逓減率

したがって、ブレードの掘削押土抵抗力試験による α_c とそのときの押土形状より $\alpha_s, \alpha_b, \alpha_w, \phi_s, L_c$, をもとめる。一方けん引力試験による車輻重量 W とけん引力の関係 α_p がわかれば実車の最大押土量が決定される。

式 (4 - 5) は今までの押土量の式のようにブレード寸法ばかりでなく、ブルドーザの重量, けん引力, 土質も考慮した式となっている。

5. ま と め

ブレード試験機によるブレード容量測定により次の事がわかった。けん引力が充分得られる条件で試験を行なうと、掘削深・ブレード巾・ブレード高さの増大がブレード容量の増大をもたらす。しかし、ブレードの縦横比が大きくなると押土量は高さに比例しない。すくい角・土質・土の強度特性の違いによる押土量の変化はみられなかった。含水比の増大による押土量の増大はわずかみられた。掘削スピードの増大に対して押土量はわずかに減少するがはっきりした傾向はみられなかった。運搬距離の増大に対して押土量は減少する。しかし、それに見合った一定深さで掘削すれば一定量は確保される。以下各項についてブレード試験機の結果とそれを用いて実車の場合の推定を行なった。

(1) 土の性質

(a) 土質・含水量・土の状態（ルーズ・地山）

土質・含水量・土の状態による押土のみかけ安息角が異なるので押土量に影響を及ぼすものと思われたが、押土実験の結果では影響は少なかった。したがって、押土のブレード前面の安息角の変化も大きな差はなかった。実車では土質・含水量の変化により掘削押土抵抗が変化するので、ブレードの掘削深が変化して実質的には押土量が増加する。

(b) 土の強度特性

土の強度特性は土質とか土の状態（ルーズ・地山）にも関係しているが、ここでは同じ土質の地山状態で強度特性を変えて実験したが、土の強度による土量の変化は認められなかった。実車ではブルドーザのけん引力の最大点附近で作業をすれば土の強度の変化により掘削深さが変化して押土量が変わると思われる。

(2) ブレード形状

(a) ブレード寸法

ブレードの巾の増大に対して押土量は増大する。ブレード高さの増大に対して押土量は増大するが、ブレードの縦横比が大きくなると掘削による補給量より横へにける量が多くなり、押土量は比例しない。したがって、巾一定のブレードに対して高さを増大するとある点以上ではブレード容量はふえない。現状のブルドーザではブレードの縦横比は約 0.25 となっており、ブレード試験機の結果より見ると最大点附近である。

(b) すくい角

ブレードのすくい角の変化に対しては押土量の変化はない。今回のブレード試験機は同じブレードを回転させてすくい角を変化させたので、ブレード高さが多少変わったがその値を修正した結果では押土量は変化なかった。この要因はむしろ掘削抵抗力に大きく影響する要因で、最も切削抵抗力の少ないすくい角が効率的な掘削押土である。

(3) 作業条件

(a) 掘削深さ

押土量は掘削深さに比例して増大する。したがって、ブルドーザの押土を増すには掘削深さを深くする必要がある。運搬始めてブレードの前面の土量が多い程一定の押土距離における最終押土量は多い。実車では連続して掘削をするのではないので、なるべく深く掘削してブレードにできるだけ多くの土をためた状態で押せば運搬土量は多くなる。しかし現実には掘削深さはけん引力により制限される。ブレード容量の算式に掘削深さも入れるとけん引力の影響を考慮したことになる。

(b) 掘削スピード

掘削スピードによる変化はわずかであった。高スピードにより土の内部摩擦角が変化してみかけ安息角が減少し、押土量に影響があると思われる。実験では押土スピードの増大に対して押土量はわずかに減少している。

(c) 運搬距離

運搬土量は、途中で掘削による補給がないかぎり距離により減滅する。最終押土量は、掘削押土のときにブレード前面にたまった押土量により増減する。その量は掘削深・ブレードの高さ・巾に影響する。

(4) 押土量の計算式の提案

ブレード試験機による押土量の算式は式(4-1)に示される。実車では掘削深さによる制限を受けるので、一定値が存在するものと思われる。 $2 \cdot 2 \cdot 2$ 及び $2 \cdot 3 \cdot 2$ 、 $2 \cdot 3 \cdot 3$ より推定を行ない、上式を利用した実車の押土量の計算式は式(4-5)で示される。この式には、けん引力・土質・車両重量等今までの実験式の関係も考慮した計算式となっている。この式へブレード試験結果を代入して、掘削可能深さと押土量を試算した結果を表-1・2に示す。

あ と が き

過去3年にわたって、多くの組合わされた要因に対する実験計画にもとづき各種の試験をくり返したが、何分試験用土等の条件を一定に保つことがむづかしい要因もあり、データ整理に苦勞をした。しかし、慎重な実験をくり返したので、データのバラツキを比較的少なくする事ができた事を確信する。この試験で一部定量的な推定ができたと同時に定性的な各種の関係はすべて検討できたと思われる。今後は一部検証実験を行なって定量的につめたいと思う。

理論の所で述べたように、実車との結びつきはけん引力との関係をつめる必要がある事を痛感した。したがって、土質と車輛重量・接地面積・接地面の形状によるけん引力の関係を究明できる試験装置を作製して、その面の追求をすればブレード容量ばかりでなく建設機械の作業性・走行性の検討ができると思われる。更に大型のブレード試験機で実験できれば、実車との比較がより正確にできると思われる。今後はこの面の検討を行なうとともに実車による現地調査を行なって実際のブレード容量の実態をとらえたい。尚、ブレード容量に関連する報告書として、“ブレードの切削抵抗について”建設機械の作業性走行性に関するものとして、“建設機械の作業方程式について”をとりまとめ中であるので、実車におけるブレード容量はその面でも検討することになっている。

参 考 文 献

- (1) 富山道三 「土質力学」 コロナ社 1959
- (2) テルザギー・ベック「土質力学・基礎編」 丸善(小野他訳) 1960
- (3) 建設機械化研究所 「建設機械の見方Ⅱ・ブルドーザの試験方法と試験結果」
日本建設機械化協会, 建設の機械化 42年1月(第203号)
- (4) 中野・佐々木 「ブルドーザの性能試験について」
土木研究所資料 41年8月(203号)
- (5) 社団法人・日本道路協会 「ドーザの作業能力の算定」
道路土工指針(第6版) P75
- (6) Tohu Cornelius Siemeus [Mechanics of soil under the influence of Model
Jilelage Jools] Uniuersity of Illinois 1963
- (7) 齊藤・神吉 「土の切削抵抗についての実験報告」
土木研究所報告(89-23) 29年1月
- (8) 藤本・根本 「ブルドーザの土工板形状に関する研究」
建設の機械化 44年7月(第233号)
- (9) M.G. Bekker [Mofility of Cuoss-Country vehicles]
建設の機械化(永盛・根本訳)(第143~144号)
- (10) Gerhard Llrees. [Untersuchungen iiler das Kraftespiel an Jlachbagger
Schneidwerkqeugam in Mittelsand und Schwach bindigem sandigem Schluff
unter besonderer Beriicksichtigung der planierschilde und ebenen Sc-
hiirfkiibelschuiden] Mitteilungen des instituts fiir Baunaschiinen
und Baubetriebe (Heft, 16, 1958) Jechnischen Hochschule Aachen
- (11) 磯部・齊藤 「ブレードによる土の切削・押土抵抗について」
土木研究所資料 45年5月発表予定
- (12) 磯部・佐々木 「模型ブレード試験機」
土木研究所資料 (第297号, 42年7月)