



土 木 研 究 所 資 料

第 665 号

土工機械の作業能力に関する試験調査
ブレードによる土の掘削押土抵抗につ
いての一考察

昭和 46 年 3 月

建 設 省 土 木 研 究 所

まえがき

近年我が国の建設機械の生産はめざましい発展をとげてきた。特に万能作業機械であるブルドーザは、油圧技術、各種材料の耐久性が向上し、機械の寿命とか、各種作業装置の性能が向上して、外国車におとらぬ性能のものが出現するようになった。我が国の建設機械の歴史は外国車の輸入から始ったと言われているが、ようやく我が国に適した機械として定着しつつある。

土木研究所では昭和24年頃より建設機械の性能試験を手がけ我が国の建設機械の性能向上に大いに貢献してきた。又、性能試験と同時に建設機械の耐久性、走行性、作業性についての研究も各種行われ、夫々の成果をおさめている。

ブルドーザ、ショベル、スクレーパ、グレーダ等の土工用建設機械の走行性、作業性を検討することはこれ等の機械の総合的な能力を判定するのに重要な事である。建設機械の作業は自らの足で土より反力をとり同時にその土を掘削運搬を行うので土の性質が作業能力を決める重要なファクターである事はすでに述べてある。⁽¹⁾ さきに当研究室ではブレード試験機を用いてブレードの一回当り押土量についての検討を行なったが、これは各作業要因による可能な押土量について検討したものである。

今回は作業効率という面よりとらえようとするもので、けん引力を消費するもの、すなわち作業抵抗の一つであるブレードの掘削押土抵抗について、ブルドーザのブレードの模型を用いて実験を行なった報告である。

ここでは土質力学の理論をかりて、各作業条件による土の切削抵抗の理論的な検討と実測定との比較を行い、同時に最も効率的な作業条件について検討してみた。

土の切削抵抗は受動土圧の式が適用できる事がわかり、その大きさは土のせん断強度、掘削深さが大きくなる程、ブレードのすくい角が小さくなる程大きくなる。

さきにも述べたように建設機械の作業性、走行性の検討ではけん引力が重要な要因となるが、今回の試験装置は十分なけん引力が得られるものである。

この実験により土の上を走行しながら作業を行う建設機械の性能に影響を及ぼす重要な要素の一つが解明できたと思われる。

土工機械の作業能力に関する試験調査ブレード

ブレードによる土の掘削押土抵抗についての一考察

機械研究室

磯 部 金 治

齋 藤 栄一郎

小 室 日出男

目 次

まえがき

1. 実 験 目 的	1
2. 土の掘削抵抗に関する理論的考察	2
2.1 掘削抵抗と建設機械の走行性、作業性	2
2.2 土の切削機構の検討	3
2.2.1 土の性質と土の力学的試験及び土の破壊に関する理論的考察	3
2.2.2 受動土圧と掘削抵抗	8
2.2.3 押土抵抗	10
2.2.4 掘削押土抵抗の要因分析	10
3. 試 験 方 法	11
3.1 試験方法	11
3.2 試験内容	12
3.2.1 試験の種類	12
3.2.2 試験項目及び試験方法と測定器	15
3.3 試験機	19
3.3.1 ブレード試験機	19
3.3.2 試験ブレード要目	25
3.4 ブレード試験実験用土の物理特性	27
4. 試 験 結 果	30
4.1 切削抵抗力と理論式の適用	30
4.2 掘削抵抗	32

4.3	押土抵抗	35
4.4	掘削押土抵抗と押土容量	37
4.5	実験データ集計表	40
5.	ま と め	44
あ と が き		45
参 考 文 献		46

1. 実験目的

土工用建設機械のうち主として、ブルドーザ、スクレーパ等、土を掘削、運搬する建設機械の重要な性能である掘削押土抵抗の検討を行ない、各作業条件による建設機械の作業性能を把握して、作業装置の改良、建設機械の作業方程式の検討に役立てる。今回は模型ブレード試験機を用いてブレードの掘削押土抵抗を測定し以下の問題に対する検討を行なう。

- (1) 土質、ブレード形状、掘削条件等の作業要因による掘削押土抵抗を調べ、効率的な作業条件の推定を行い、それ等の作業条件による掘削押土抵抗と受動土圧の式を応用した理論値との比較検討を行なう。
- (2) 第1項で検討した理論式へ現場の作業条件を適用して建設機械の作業性、走行性の検討を行なう。
- (3) 第2項で得られた結果を用いて、実車の掘削押土抵抗の推定を行い、土質、機械仕様、その他の作業条件を考慮したブルドーザの性能を推定する作業方程式を導き、作業能力を導く計算式の検討を行なう。

2. 土の掘削押土抵抗に関する理論的考察

2・1 掘削抵抗と建設機械の走行性、作業性

土と建設機械の関係は土の性質が様でなく、かつ土質、含水状況等そのおかれた状態で著しく性質を異にするので、土を対称とする建設機械は性能が大きく変化する。土の性質を示す試験方法は特に建設機械の性能と結びつけたものでは普遍的なものがない。したがって性能の比較、実験の再現性を困難にしている。

建設機械の作業方程式という考え方をさきに検討して報告してあるが、これは土の物理定数 C 、 ϕ や機械仕様に注目してそれ等の性質や作業条件による土のせん断強度より建設機械のけん引力とか、掘削抵抗を推定して走行性、作業性を考えようとするものである。ブルドーザ等の走行車輛が土の上を走行して掘削、押土、けん引作業を行うときの関係式を次式のように仮定する。⁽²⁾⁽³⁾

$$H_1 \geq P_1 + R_1 + R_2 + R_3 \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここに H_1 : けん引力 (機関出力, 車輛重量, 車輛の接地面積, 土の C , ϕ 等で変化)

P_1 : 作業抵抗 (掘削, 押上に使われる抵抗)

R_1 : 車輛のころがり抵抗, 及び空気抵抗, 慣性抵抗 (車輛重量, 足廻り形状等で変化)

R_2 : 土の締固めによる運動抵抗 (車輛重量, 車輛の接地巾, 接地長, 土の C , ϕ 等で変化)

R_3 : 勾配抵抗 (作業勾配で変化)

したがって (2-1) 式の各項の解明ができれば建設機械の各作業条件による走行性能, 作業性能が理論的に解明できる。したがって機種, 土質等の作業条件がきまると (2-1) 式の H_1 , R_1 , R_2 , R_3 がきまる。したがって掘削押土抵抗は余裕けん引力の範囲内で一定値となり掘削する土の強度により掘削深さが一定に保たれる。今回の実験は (2-1) 式の P_1 以外の各項が各種の実験や理論的な検討がなされているように、土の掘削, 押土作業の理論的な検討と実測値との比較検討を行なっている。今まで

の実験ではブルドーザの掘削押土量は掘削深さに比例することがわかったので、 P_v が計算できれば各作業条件によるブルドーザの掘削深さが求まり、作業量が(2-1)式を用いて推定できる。

2・2 土の切削機構の検討

2・2・1 土の性質と土の力学的試験及び土の破壊に関する理論的考察

土の性質は極めて複雑で、しかも多種多様であるが、解析を行うためにはその性質を表わす力学的モデルが必要である。ここでは土が均質なものと仮定して、土のせん断試験を行なった時の力学的性質について検討してみる。⁽⁴⁾

土は外力が作用して土体の内部にせん断応力が発生すると変形する。せん断応力が増し変形が大きくなると、ついに土体は破壊を起こす。この時土体が示す最大せん断抵抗をその土のせん断強さと言っている。この限界を越えると、一般に破壊が起り、すべり面の発生が見られると考えられている。

土のせん断強さ τ を各種の垂直応力をかけて試験を行うと次に示すようにほぼ直線的な関係がある。

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

ここに τ : せん断強さ (Kg/cm²)

σ : 垂直応力 (Kg/cm²)

C : みかけ粘着力 (Kg/cm²)

ϕ : せん断抵抗角 (度)

これは一般にクーロンの法則といわれているものである。 C 及び ϕ はまったく経験的な定数にすぎないので土質及び土の乾燥密度(空気間隙率、飽和度)と含水量によって変るのはもちろん、試験時の排水条件や試験機等にも影響される。

側方支持に対する土圧、側方変位に対する土の抵抗とか斜面の安定をとりあつかう問題を調べるために、安定計算を行う。この計算を行うためには、起り得る切り面の位置を決定し、この切り面に沿って生ずる切り面に対する抵抗を計算する必要がある。この問題をブレードによる土の掘削押土抵抗の理論的な解明に導入してみようと思う。

いますべり面に発生するせん断抵抗は(2-2)式で示される。Cと ϕ は破壊が起る応力状態には全く無関係であると仮定する。この条件は砂と砂利を固めたものと、湿潤砂に対しては近似的に満足される。しかし空気間隙率の大きい粘土では余り満足されない。一方充分に飽和した粘土質土では全然満足されないといわれている。

以下に述べる事は土の単位面積についてのすべり抵抗値は(2-2)式が正しく、適用される条件が厳密に満足されるものと仮定して導かれる。

三軸荷重による試料の傾斜した面に沿って破壊する垂直応力とせん断応力は、モールの応力円で示す事ができる。

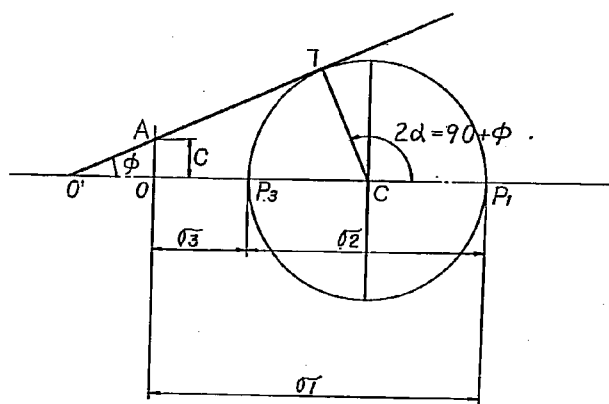


図-1 モールの破壊円

いま図-1が破壊時の応力状態を示すとすれば、A-T線は円に接していなければならぬ。この図-1のモールの破壊円より次式が導かれる。

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2C \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

$$N_\phi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 (N_\phi - 1) + 2C \sqrt{N_\phi} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

ここに N_ϕ : 流れ値 (flow value)

σ_1 : 拘束圧縮強度で拘束圧 σ_3 の函数

精密な研究によると、これ等の円が乾燥砂又はシルトに対する試験結果、又はこの

ような土の飽和した試料の緩速試験の結果をあらわすならば、これ等の円の包絡線は垂直応力とせん断応力の関係を殆んど正確にあらわしている。これに反して、若しこれらの円が任意の土の圧密—急速試験、又は飽和した粘土の緩速試験の結果をあらわすならば如何なる垂直応力に対する土のせん断抵抗の値でも包絡線から得られる縦軸の値よりも幾分か小さい。このような場合は包絡線の接点で決定される平面は、実際に破壊する面と近似的にさえも一致しないといわれている。

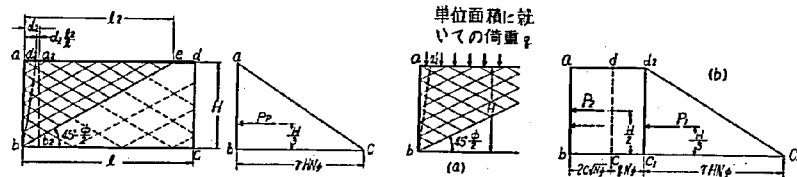
土体はそのすべての部分が、今まさに破壊せんとしているならば、塑性平衡状態にある。ランキンは半無限体の土のすべての部分が均等にひげられるか、圧縮されるかにより生ずる応力条件を研究した。この状態をランキンの塑性平衡状態という。

今砂の場合のある深さにおける塑性平衡状態を考えると、(2-5), (2-6)式より、最大と最小の主応力の比は次の値を越えない。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = N_\phi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{..... (2-7)}$$

したがってランキンの塑性平衡状態では、 $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ の比Kは下式の限界値をとる。

$$\tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \leq K \leq \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{..... (2-8)}$$



図—2 (a) 局所的な受動ランキン状態の場合の図 (b) 受動土圧に対する変形条件が満足される時の滑らかな鉛直壁背後の粘土の破壊、(a) 壁の裏側の断面 (b) 壁の裏側に対する圧力

今単位重さ γ なる砂全体を水平方向に圧縮する。深さ Z における垂直、水平応力の比Kが上の限界値になると、この砂は受動ランキン状態になる。このKが受動土圧係数である。したがって、図—2(a) より σ_3 面は水平線と $45^\circ - \frac{\phi}{2}$ の角をなす。これを一般的塑性平衡状態という。しかし局所的な土の破壊などではこのような現象は起らず、局所的な塑性平衡状態は変形の非常に異なった過程によって生ずる。

塑性帯に生じる応力状態とその塑性帯自身の形は変形の形、並びに土とそれを支持している接触面の精粗に関係する。これ等の要素は変形条件と境界条件を与える。したがって局所的な変形では土全体が塑性平衡状態とならなくて、壁にそった一部のくさび型の部分が図-2(b)に示すように塑性平衡状態となる。壁の背面が粗であると一般に主動土圧は減少し、受動土圧は増大する。

今壁が滑らかな鉛直壁に接触する粘性土の受動土圧を検討してみる。土と等分布載荷荷重 q を支持する壁が土の方へ押される場合 (2-4) 式が満足される状態にくと、水平主応力 σ_1 が最大主応力であるのでこれらの関係を (2-4) 式に代入すると、

$$P = r Z N_\phi + 2C\sqrt{N_\phi} + q N_\phi \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$$P = \frac{1}{2} r H^2 N_\phi + H(2C\sqrt{N_\phi} + q N_\phi) \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

- ここに P : 水平最大主応力
 P : 全受動土圧
 r : 土の単位重さ
 N_ϕ : 流れ値 (flow value)
 C : 粘着力
 q : 等分布荷重
 H : 壁の高さ

が導かれる。この場合の受動土圧は図-2に示すように P を二つの部分 P_1 と P_2 にわけて近似的にとかれる。しかし二つの部分に分けることは壁の裏面が鉛直でかつ完全に滑らかな時、のみ厳密に正しく、他の条件の場合は近似的なものである。壁の裏面が粗であると受動土圧は増大する。したがって、壁面に接する土が移動すると摩擦力が生じ、土圧は壁に立てた垂線に対して δ の角をなして傾いて作用する。この角を壁面摩擦角という (受動土圧のとき合成反力の接線成分が下向きの際の角度を正とする)。

理論的な解析からこの場合の土の裏面の下部はわん曲し、上の部分は直線をなすことがわかっている。すべての壁の裏側は多少粗であるので、ランキン理論を適用するに際して境界条件はめったに満足されない。したがって、この理論に基いて行う

土圧計算には、常に多少の誤差が含まれる。この誤差の大部分はクーロンの理論を使うことによって避けることができる。この方法は切り面の形を平面としているがどんな境界条件に対しても適用でき、この仮定による誤差はランキン理論を使用した場合の誤差に比して一般に小さい。

クーロン並びにランキンの理論は共に壁が自由に動くことができ、かつ、土の隙間に含まれた水は決して浸透圧として働かないという仮定に基いている。更に土の常数は実験から求められる一定の値を持っていると仮定している。壁面摩擦 δ が小さいと切り面は、実際に殆んど平面であり、その誤差は大したことはないが、 δ が大きいとこの誤差は非常に大きくクーロンの方法は使えない。

切り面が平面であるという仮定をせずに、受動土圧を求める方法が提案されているのでこれについて検討してみる。図-3は理想的な粘性土の方へ押される接触面の断面の力のつり合いを示したものである。せん断抵抗は式(2-1)で示され、土の表面は水平であり、壁面摩擦角を δ とし、すべり面は近似的な対数螺旋曲線部分bdと直線部分deから成る。二等辺三角形ade内の土は受動ランキン状態である。それで、鉛直断面df上のせん断応力は0で、この断面に作用する圧力 P_v は水平で式(2-9)で求められる。土体abdfに作用する力は土体の重さ W 、圧力 P_v 、bdに沿って作用する粘着力の合力 C 、abに沿って作用する土と接触面との

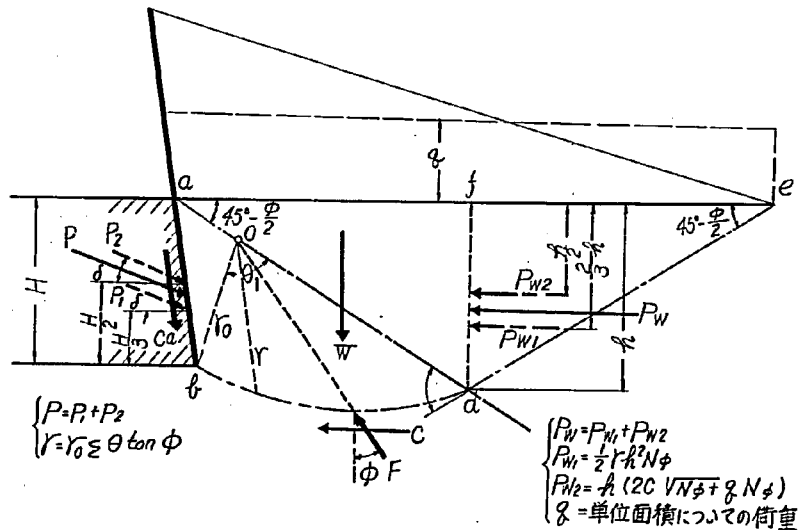


図-3 受動土圧を求める対数螺旋曲線の方法

全附着力 C_a , $b d$ に作用する垂直応力と摩擦応力の合力 F , および受動土圧の垂直成分と摩擦成分との合力である。

受動土圧 P はこれ等の力の関係より計算できる。受動土圧の作用点がわからないので近似的な方法として図-3のように P_1 と P_2 にわけると。 P_1 は W , F , P_{v1} の釣合い方程式で解ける。 P_2 は C と P_{v2} の釣合い方程式より解かれる。 P_1 と P_2 の合力の最小値が受動土圧 P であり、その P と付着力 C_a との合力が全土圧力であり、その力で土は破壊される。したがってこの式をブレードの掘削抵抗力に応用すると、ブレードの全掘削抵抗力はこの値とブレード巾 L の積で示される。

2・2・2 受動土圧と掘削抵抗

前項で検討した粘性土の受動土圧を切り面が平面の場合と対数螺旋曲線を仮定して、今回のブレード試験を行なった作業条件を入れてどの条件が影響が強いかが検討してみると図-4~8のようになる。これより掘削抵抗が受動土圧に関係があるとすれば掘削抵抗は図-3~8, 式(2-10)より、掘削深さ, 粘着力, せん断抵抗, ブレード巾, ブレード面の状況, すくい角等に影響されと考えられる。掘削面及び押土の単位体積重量の変化はほとんど影響を及ぼしていない。今回の掘削抵抗は初期掘削抵抗の安定した状態のデータをよんで各種の掘削条件と比較してある。なお受動土圧の理論値との比較もしておいた。

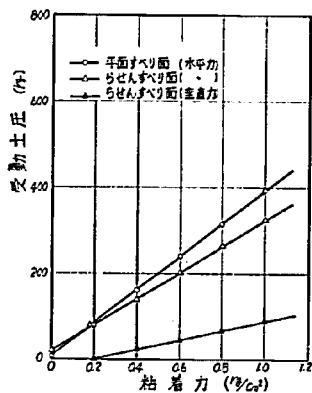


図-4 土の粘着力の変化と受動土圧

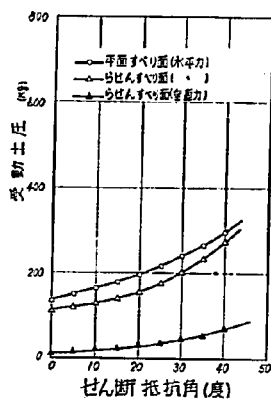


図-5 土のせん断抵抗角の変化と受動土圧

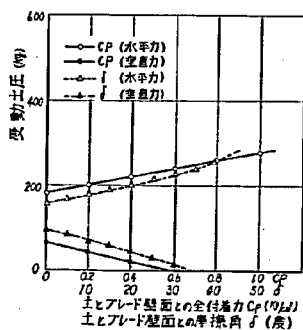


図-6 土と壁面の状態による受動土圧の変化 (らせんすべり面)

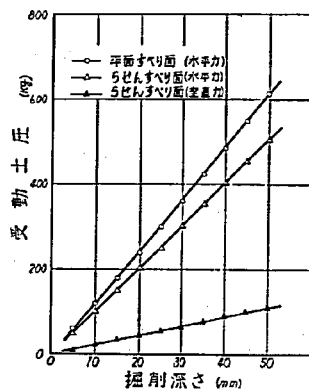


図-7 掘削深さの変化と受動土圧

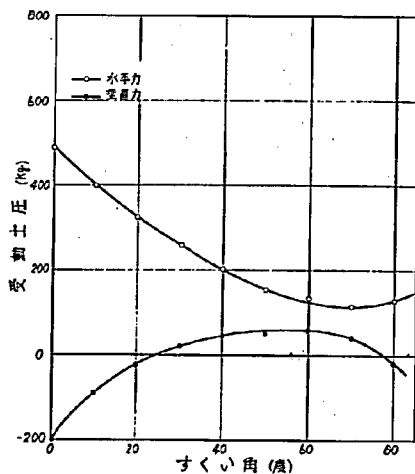


図-8 (a) すくい角の変化と受動土圧 (らせんすべり面)

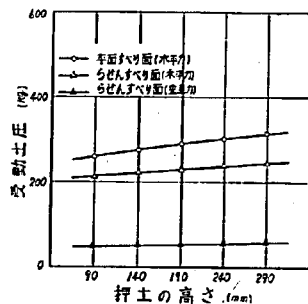


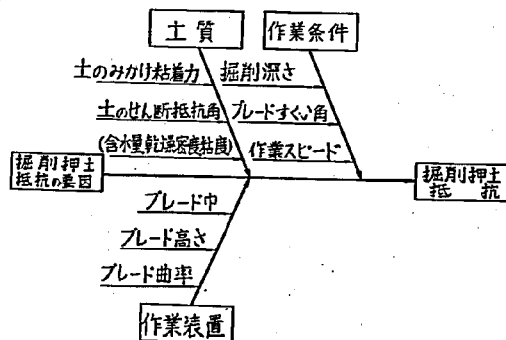
図-8 (b) 押土高さの変化と受動土圧

2・2・3 押土抵抗

押土抵抗はブレードで切削された土がブレードの曲面に沿って上昇するためのエネルギー（上昇スピードは掘削スピード，すくい角と曲率による）と上昇時のブレードと土及び土と土の摩擦抵抗，ブレード前面にたまった押土が土の上をすべっていく時の摩擦抵抗，押土の中で土が回転する時すなわちルーズ土のすべり抵抗のエネルギー等である。したがって，ルーズ土の性質による内部摩擦角と粘着力，掘削スピード，押土重量，押土量（ブレード巾，押土高さ，掘削深さによる），ブレード面の荒さ，すくい角，曲率等が考えられる。尚図一8(b)より押土量の増大が掘削抵抗に影響を及ぼしている。今回の実験は模型ブレードであり，押土抵抗は非常に小さくこれらの分析は困難である。したがって全体の押土抵抗として，最終掘削押土抵抗と初期掘削押土抵抗の差をとって検討してある。実車の場合はディメンションの関係で3乗でいくので押土高さ及び前面の土量が増すほど上記に述べた抵抗が大きくなり，掘削押土抵抗の大きな要件となると思われる。それ等についての検討は4・3に述べてある。

2・2・4 掘削押土抵抗の要因分析

今までに掘削押土抵抗を各種の作業条件について検討してきたが，ここではそれ等のまとめとして要因特性図について検討した。ブレードの掘削押土抵抗に影響を及ぼすものを大きく分類すると図一9のように土質，作業装置（ブレード形状等），作業条件の三グループに分けられると思われる。今回の実験はこれ等の要因の分析を理論的な裏づけや経験に
もとづいて検討し，土質，
土の含水，締め固め状況，
ブレード巾及び高さ，ブレード曲率，掘削深さ，ブレードすくい角，作業スピード等の条件を変化させて実験を行なっている。



図一9 ブレードの掘削押土抵抗に影響を及ぼす要因特性図

3. 試験方法

3・1 試験方法

土木研究所にある試験ピット写真-1にあらかじめ 2000μ 及び 4000μ ふるいに通した表-5に示す5種の土をそれぞれ含水状態・締固め度等の掘削初期条件を変化させて、表-4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。

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。

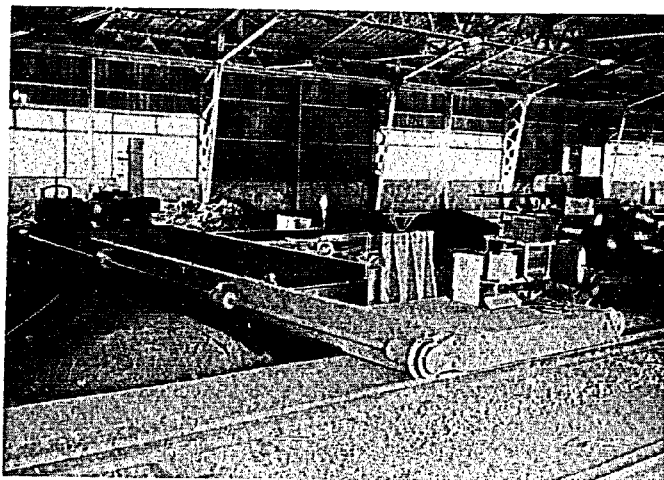


写真-1 試験ピット

試験用ピットの深さは約 $3m$ 、巾はレールピッチ $9m$ である。そのピットへ実験用の巾 $10\sim 20m$ 、深さ $20\sim 25cm$ に入れ規定の締固め・整形を行なった後、図-10・写真-8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 $3.8m$ 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で述べる。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(2)の図-11・12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もので、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、常に校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、以後の切削抵抗測定には図-12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・1の(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校正表を示した。

3・2 試験内容

3・2・1 試験の種類

表-6に今までに行なった試験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のが組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選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-1に今までの試験の期間と内容、表-2に試験分類を示す。

今回のブレードの掘削押土抵抗に関する試験は表-2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データ表の備考欄に示す。

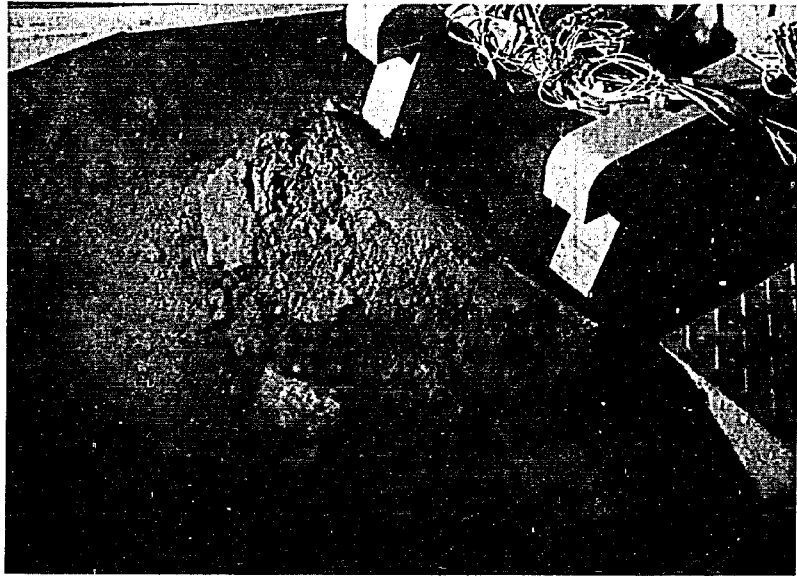


写真-2 掘削押土試験

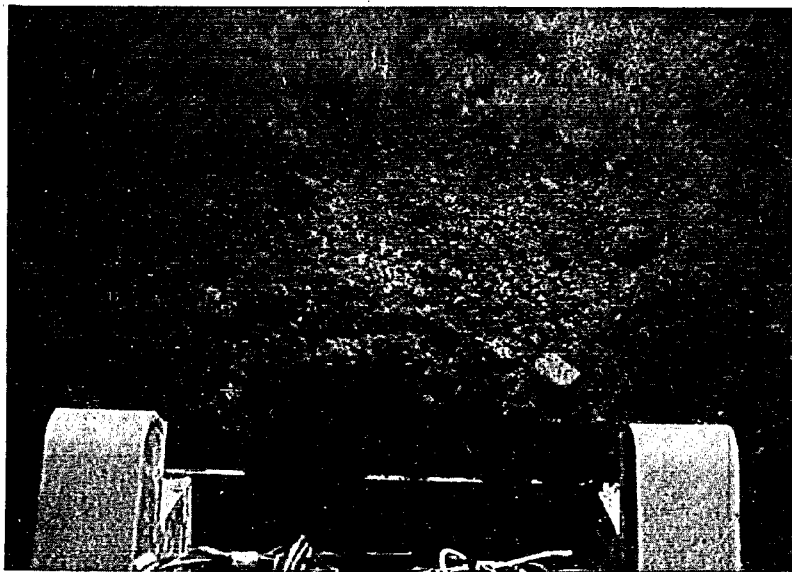


写真-3 押土試験

表-1 試験内容と試験期間

記号は表-2・3・4・5参照

整理 No	実験分類 号	実験年月日	実験 回数	試験土質	試験 分類	試験条件 V・t・ α	使用ブレード No	試験目的
1	B 43-3	43.3.13~43.3.25	24	SOI ₁	DC		BNO3	ブレード試験機性能チェック
2	B 43-5	43.5.22~43.7.10	46	SOI ₁	DC	t=5,10,15 V=0.16,0.19,0.25,0.32, 0.38 $\alpha=25.3,0.35,40,45$	BNO2	掘削スピードの変化による押土量・掘削抵抗の変化 掘削角度変化による押土量・掘削抵抗の変化 掘削深さ変化による押土量・掘削抵抗の変化
3	B43S-7	43.7.24~43.10.29	79	SOI 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
4	B 43-12	43.12.2~44.2.20	160	SOI ₁ SOI ₂ SOI 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 掘削深さの違いと押土量・押土抵抗の変化 土質の違いによる押土量・押土抵抗の変化
5	B 44-2	44.2.24~44.3.7	12	SOI 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
6	B 44 S-10	44.10.7~44.10.25	55	SOI ₁	DC	t=5,10,15,20,25, $\alpha=29.3,43.9,44.4,9.5,4$	BNO1	ブレードすくい角の変化と押土量・押土抵抗の変化 ブレード掘削深さの変化と押土量・押土抵抗の変化 含水比の違いと押土量の変化
					DC	t=5,10,15	BNO4	
7	B 44-12	44.12.5~45.1.20	59	SOI ₁	DC	t=5,10,15,20	BNO9,11	H/Lの違いによる押土量の変化 掘削深の変化による押土量の変化
					DOC	t=5,10,15,20	BNO8,10	
8	B 45-2	45.1.29~45.2.6	17	SOI ₁	DOC	t=10	BNO9,11	掘削深の違いと押土量・掘削押土抵抗
					DC	t=5,10,15	BNO7	
9	B 45-3	45.3.2~45.3.9	52	SOI ₁	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 掘削深さの違いによる押土量・押土抵抗の変化 すくい角の変化と押土量・掘削押土抵抗の関係 押土の過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
					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=60,50,40,30,20		

表-2 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 (DC), 又はルーズ路面 (DL)を一定の深さで掘 削押土する試験	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	押土の距離による透減率と 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 規定の深さの土を徹速に 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

3・2・2 試験項目及び試験方法と測定器

今回の試験の測定項目及び測定方法と測定器は表-3に一括して示した。写真-4, 5, 6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。写真-7は掘削・押土抵抗力の測定オシログラムを示してある。

表一三 測定項目及び測定法と測定器

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 (56.55 cc) 押土 モールド(600 cc) 秤(サウター (秤量4 kg 感量0.1 g))	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, 600 cc 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, $D=60\text{ mm}$, $h=20\text{ mm}$ 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100 kg, 感量0.5 kg)	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	

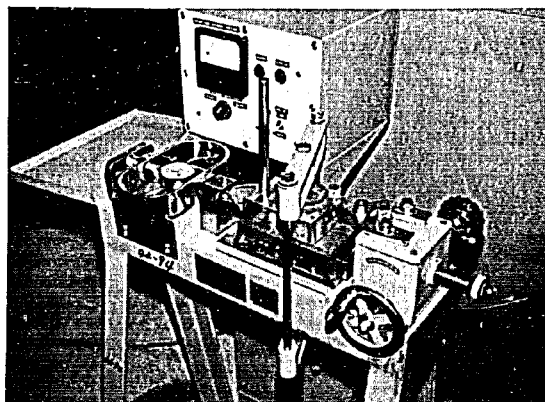


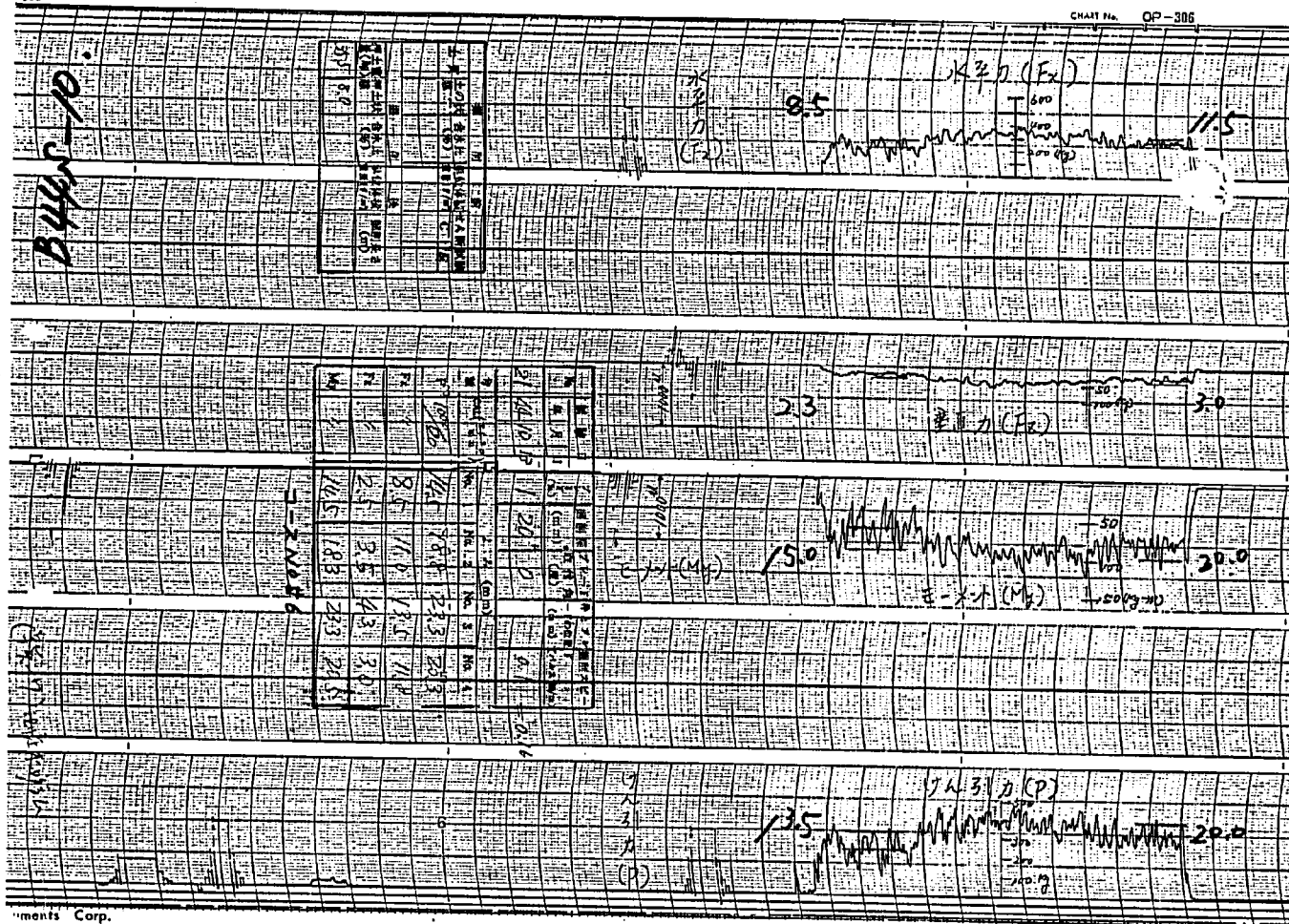
写真-4 せん断試験機



写真-5 せん断試料採取



写真-6 押土測定



(写真-7) 測定オシログラム

3・3 試験機

3・3・1 ブレード試験機

(1) 試験機本体

実験に使用したブレード試験機の概要を図-10、写真-8に示す。尚この全体図は43年度改造を行なったものである。尚細部の構造仕様については文末の文献⁽¹⁾⁽⁵⁾を見られたい。

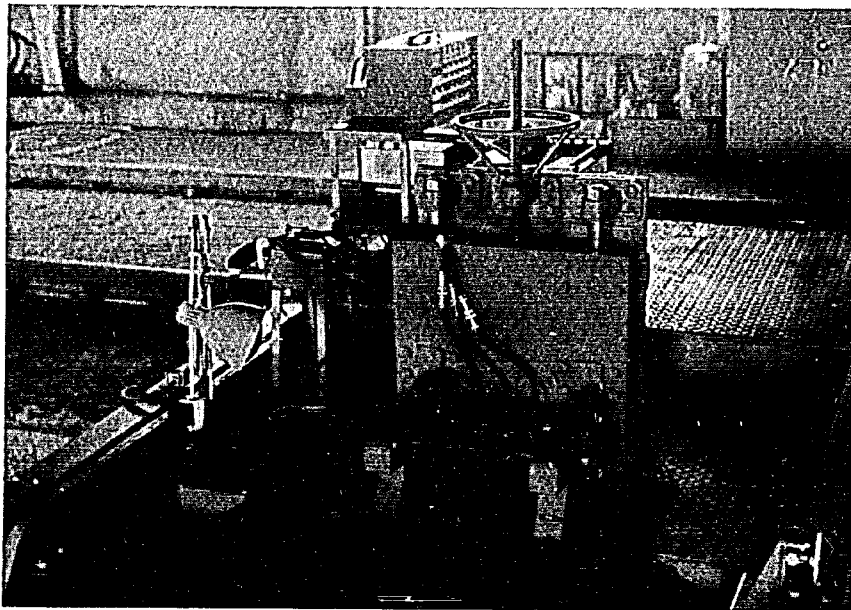


写真-8 ブレード試験機

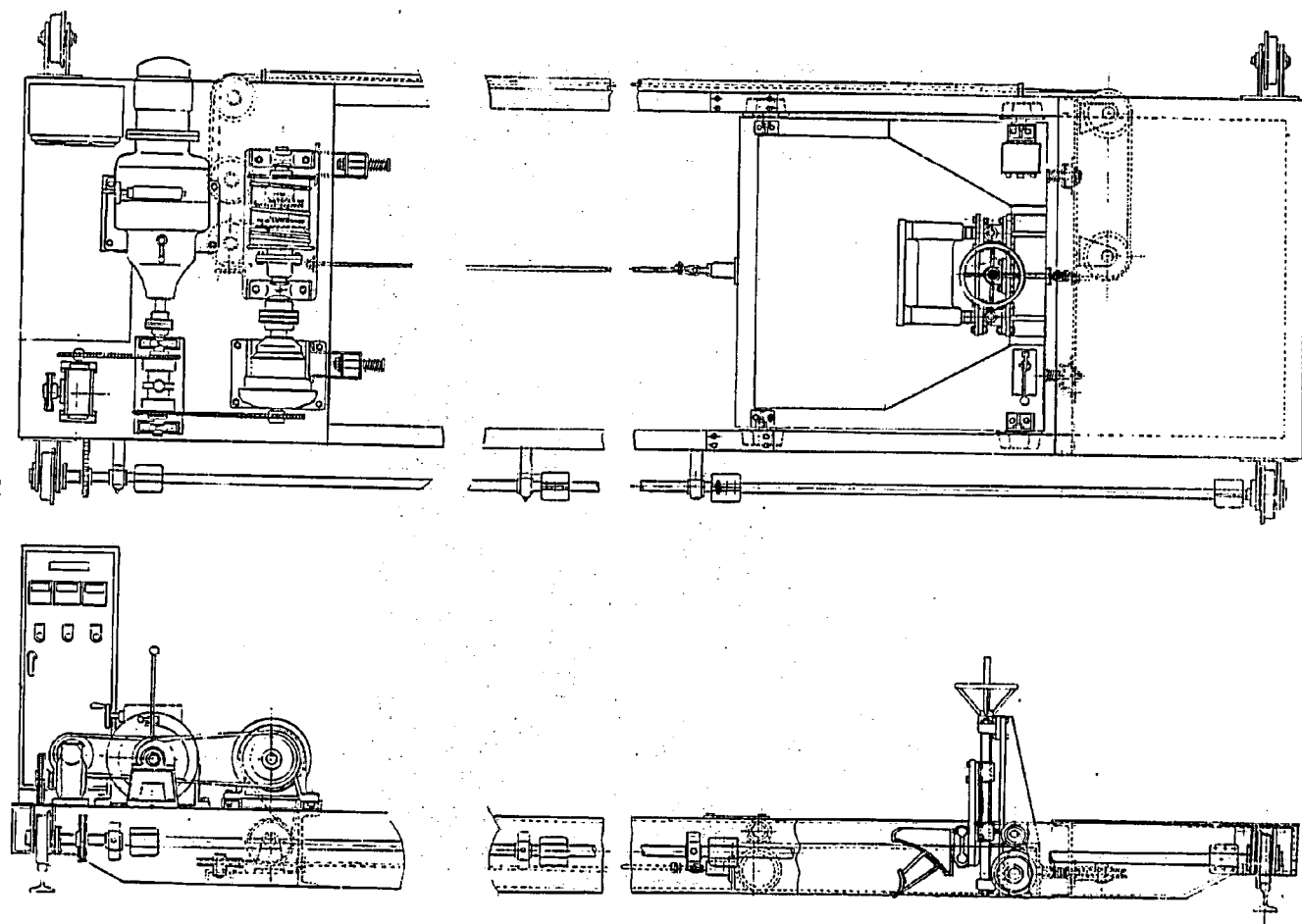


図-10 ブレード試験機全体図

(2) 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SOI₃以後の実験は三分力計を用いた。図-11、12に検出装置の取り付け図を示す。

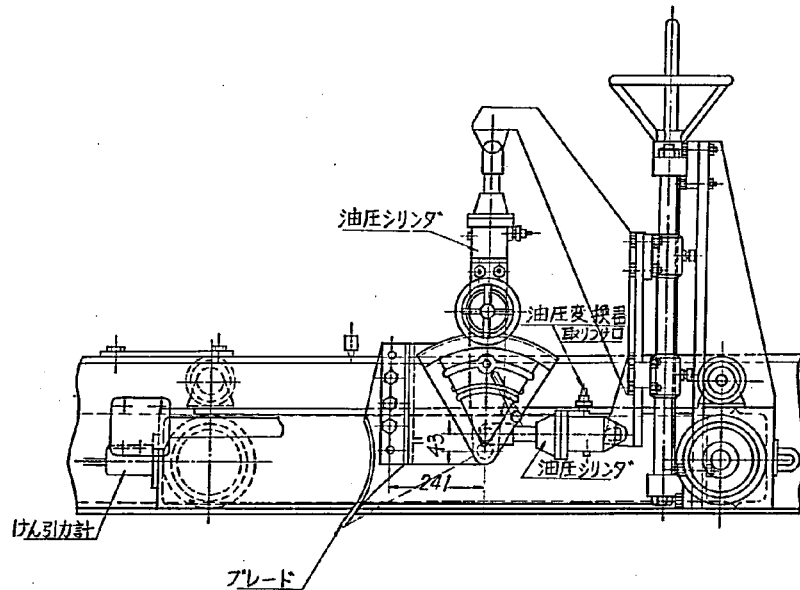


図-11 油圧式掘削抵抗力測定器取り付け図

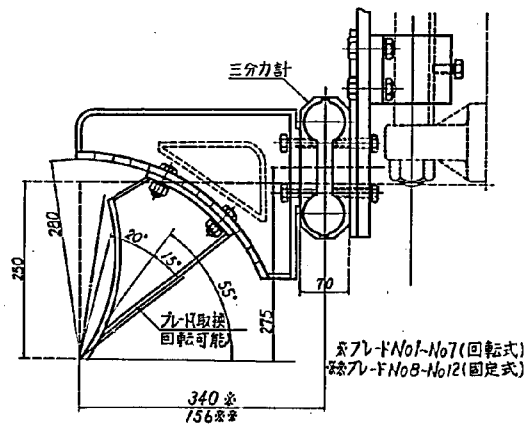


図-12 三分力計取り付け図

三分力計は、一つのトランスジューサーにストレンゲージを張り、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-14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。今図-13に示す円形の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面にCastiglianosの定理でわかるようにStrain node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ると、そのnodeができる力の方向と垂直

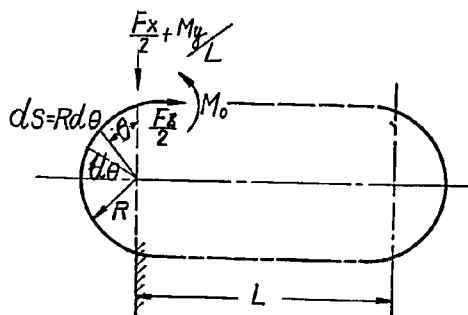


図-13 Castigliano's 定理の説明図

図-13より Castiglianos の定理によると

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

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

より、 $\theta = 90^\circ$ は F_y の Strain node であり、 $\theta = 39.6^\circ$ は M_r 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 $\theta = 50^\circ$ と 90° に製作している。今回は構造用鋼 (S45C) を使い、 $\theta = 40^\circ$ 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-14(e) に示す方法をとった。

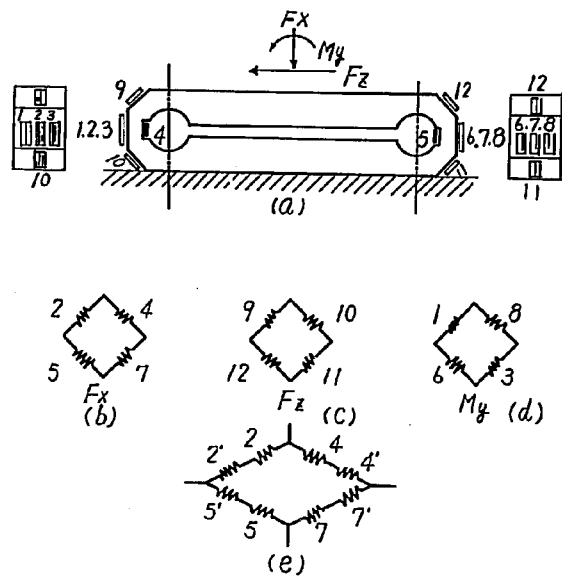


図-14 三分力計ゲージ配置図

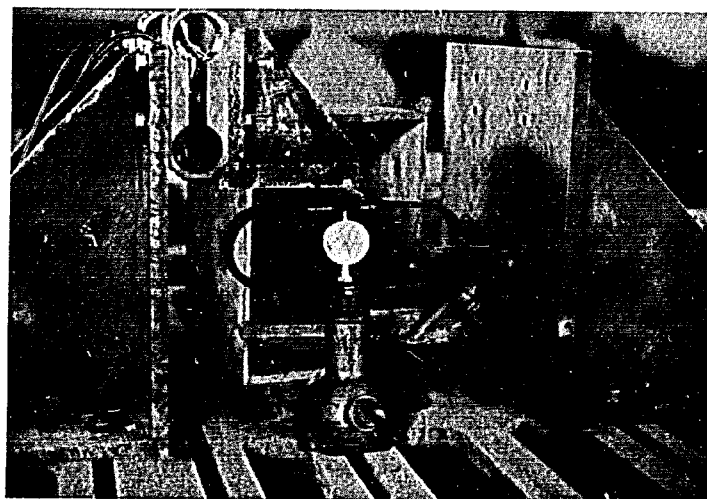


写真-9 三分力の検定

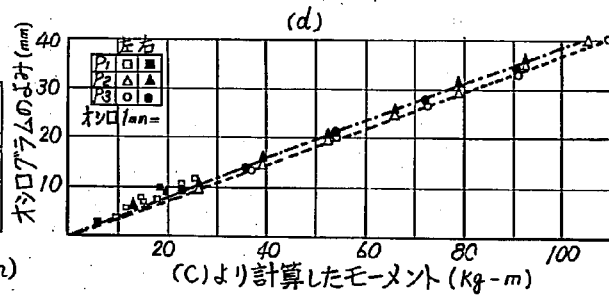
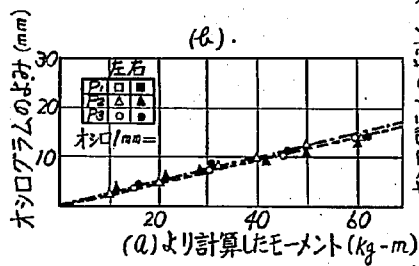
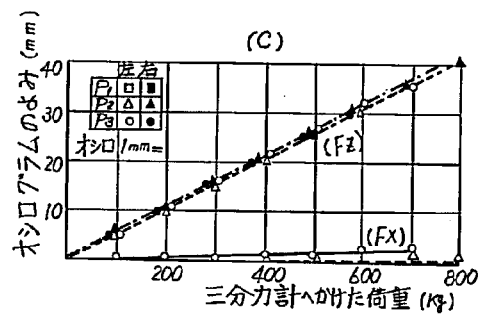
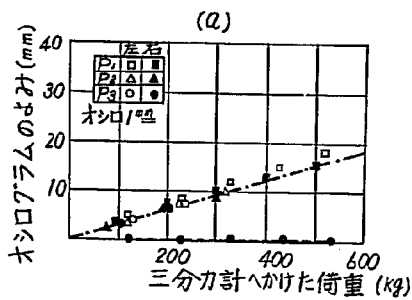
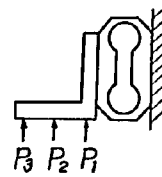
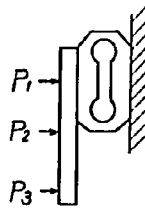


図-15 三分力校正表

3・3・2 試験ブレード要目

表-4, 図-16に今回の実験に使用したブレード要目について示す。 $\#1$ ブレード模型は2t級ブルドーザ, $\#2$ は9t級ブルドーザ, $\#3$ は15t級ブルドーザのブレードの $\frac{1}{2}$ 模型である。 $\#4 \sim \#7$ は $\#2$ 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-4, 図-16に示すように, ブレード $\#1 \sim \#7$ までは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。ブレード $\#8 \sim \#12$ までは固定用ブレードである。

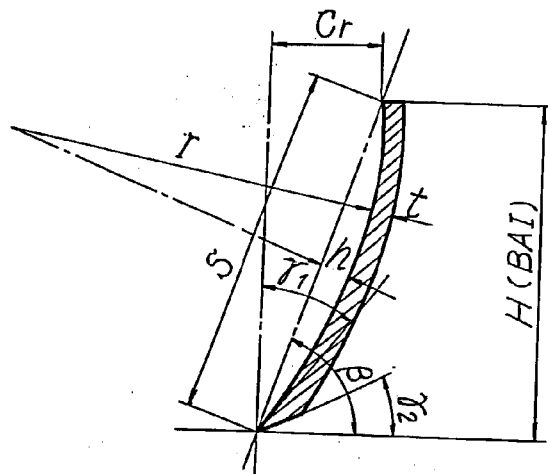


図-16 ブレード断面

表-4 実験用ブレード項目

※ 標準とりつけの場合

項 目	巾	高 さ	弦 の 長 さ	弧 の 高 さ	上 端 間 隙	円 弧 の半径	すくい 角	にげ角	とりつ け 角	ブレー ド厚み	備 考
記号 単位 ブレード BNO	BL	BAI	S	h	Cr	r ₁	r ₁	r ₂	β	t	
	mm	※mm	mm	mm	※mm	mm	※度	※度	※度	mm	
1	561	135	141.0	26.0	21.0	88	39	20	81	6	第一回（関東地建にて）製作 回転可能，43年度三分力計に合せ改造 ビックアップ中心よりブレード先端水 平距離 LH=340 mm ビックアップ中心よりブレード先端垂 直距離 LV=275 mm
2	913	212	218.0	36.5	48.0	200	35	20	78	6	
3	1027	259	265.0	45.5	67.0	187	37	20	76	6	
4	913	178	182.0	21.0	27.0	200	40	25	73.5	8	
5	913	227	234.0	52.0	50.5	150	62	15	73	8	第二回（関東地建製作） 回転可能，43年度三分力計に合せ改造 LH=340 mm LV=275 mm
6	913	227	234.0	41.0	66.5	170	45	15	83	8	
7	913	272	272.0	45.0	1.0	200	35	25	89	8	
8	561	88	90.0	13.0	11.0	85	30.6	15	83	7.5	
9	562	140.6	141.0	20.0	12.0	132	32.3	10	82	7.5	外注製作 固定式 三分力計用
10	561	188.9	189.0	28.0	9.0	173	33.8	10	82	7.5	
11	561	239	240.0	37.0	10.0	213	30.8	13	81	7.5	
12	561	290.5	291.0	43.0	9.5	281	31.6	23	82	7.5	

3・4 ブレード試験実験用土の物理特性

表一5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は川砂を購入したものであり、SOI₁、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ふるいに通してピット内に入れた。SOI₄は4mmふるいに通して実験を行なった。SOI₅については国道16号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。図一17、18、19には土の粒度試験・締固め試験・コンシステンシー試験結果を示す。

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。

表一5 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 IP (%)	流動指数 If
SOI ₁	砂質ローム	砂質ローム (h)	シルト質砂 SM	2.795	1.057	56.0	65.0	51.0	13.4	11.2
SOI ₂	砂:ローム 1:1	砂 (g)	シルト質砂 SM	2.601	1.171	27.7	—	—	—	—
SOI ₃	砂	砂 g	砂 SW	2.526	1.652	5.0	—	—	—	—
SOI ₄	砂質ローム	砂質ローム h	粘土質砂 SC	2.346	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	2.832	1.396	自然含水比(%) 103.7	149.0	90.4	58.6	53.0

粒径加積曲線

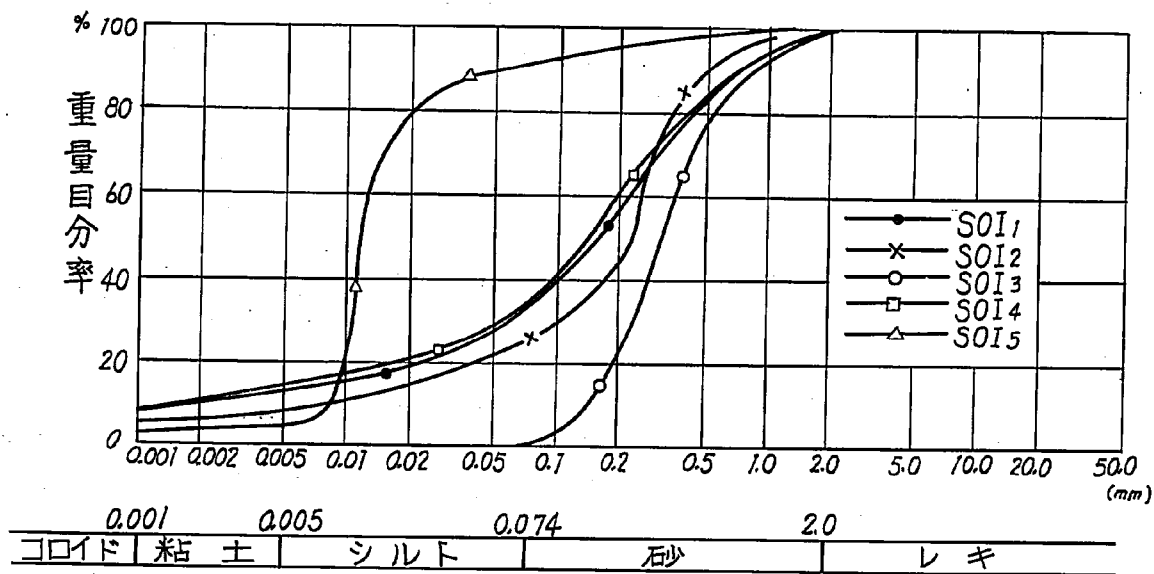
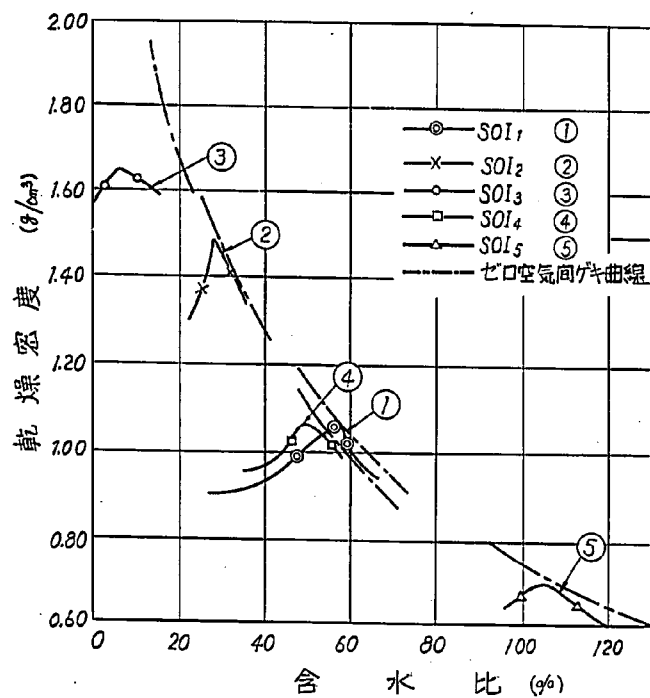
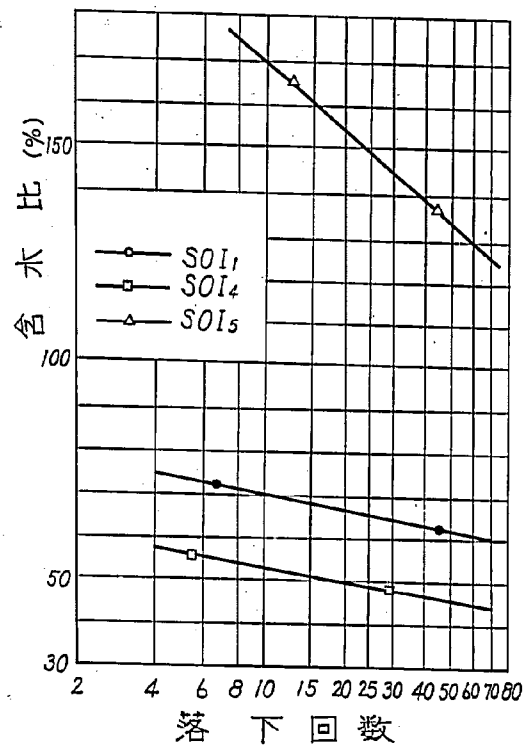


図-17 土の粒度試験



図—18 突固めによる土の締め固め試験



図—19 流動曲線

4. 試験結果

4.1 切削抵抗と理論式の適用

今、2・2の式(2-10)、図-2、3より各試験条件のうち掘削深さ t 、ブレード巾 L 、土の粘着力及びせん断抵抗角 C 、 ϕ 、すくい角 α の試験条件を代入して、平面及び対数螺旋の迂り面を考えた全土圧力の計算値と実測値の関係を示すと図-20、21となる。土の種類は3種、ブレードの種類は6種のデータであるが、45°の線に近づいている。後にのべるように掘削抵抗の変化要因は主として切削深さと C がきいている。実際の切削抵抗は土が均質でなく、かつせん断試験そのものが試験方法等の差があって土の普遍的な性質を示しているか不明であり、あるいは弾性的な取り扱いがそのままあてはまるか、又動的な切削条件が連続して行なわれる場合そのまま受動土圧の式にあてはまるか等多くの仮定が入っているのではらつきが多い。しかし図-20、21の傾向を見ると、ブレードの切削抵抗は C 、 ϕ 、 H 、 L を含んだ受動土圧の式を適用できると思われる。この式を応用して実車の場合の掘削押土抵抗の計算結果を図-22に示す。

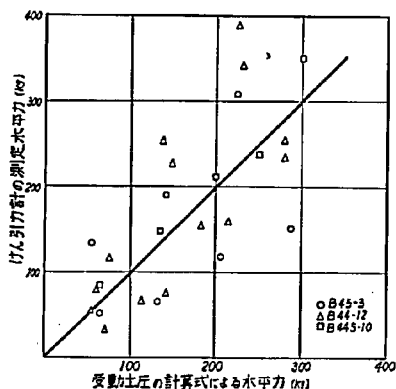


図-20(a) 受動土圧の式と測定値の関係
(平面すべり面)

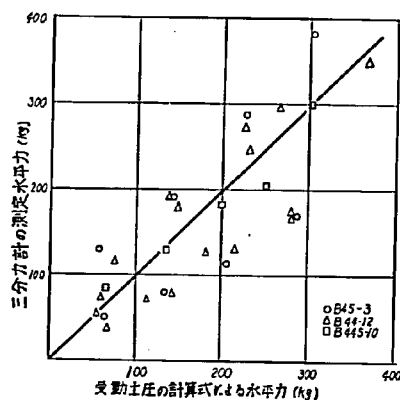


図-20(b) 受動土圧の式と測定値の関係
(平面すべり面)

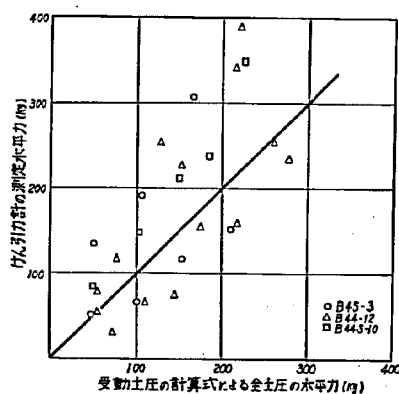


図-21(b) 受動土圧の計算式による水平力と
測定値の関係(らせんすべり面)

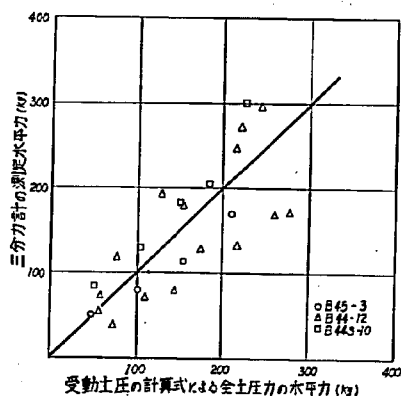


図-21(a) 受動土圧の計算式による水平力と
測定値の関係(らせんすべり面)

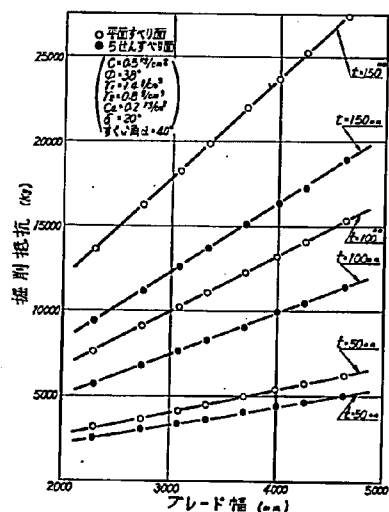


図-22 ブルドーザの掘削抵抗

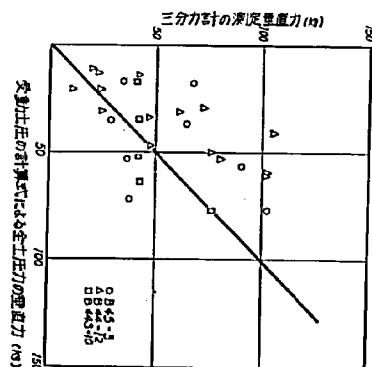


図-21(c) 受動土圧の計算式による垂直力と
測定値の関係(らせんすべり面)

4・2 掘削抵抗

掘削抵抗試験は、土質(C, ϕ), すくい角, 掘削抵抗, スピード, 掘削深さの各種の条件を変化させて行なった。DCは初期掘削抵抗であり, DOCは最終掘削抵抗で押土抵抗も含まれている。図-23, 24, 25, 26はそれ等の結果を示す。掘削抵抗の変化する大きな要因は、掘削深さ、巾、土質、すくい角であり、すくい角ではある点で最適の位置がある。掘削深さの変化に対しては理論式からすると掘削深さに対しては曲線とならなければならないが実測では直線となっている。これは今回の実験条件では(2-10)式の第一の項が第二項に対して非常に小さいので、2・2・2で検討したように影響が少ない。実車の場合は第一項が大ききいてくると推定される。

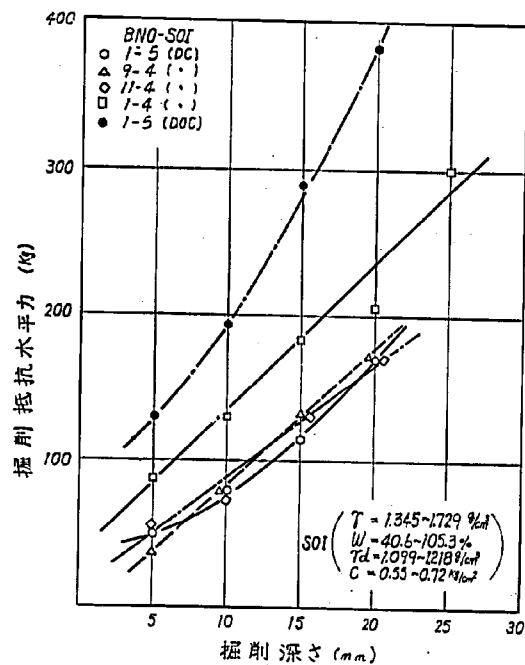


図-23 掘削深さと掘削押土抵抗

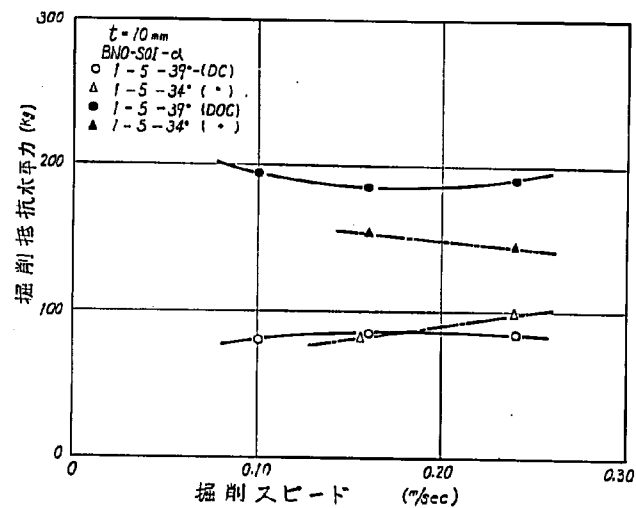


図-24 掘削スピードの変化と掘削抵抗

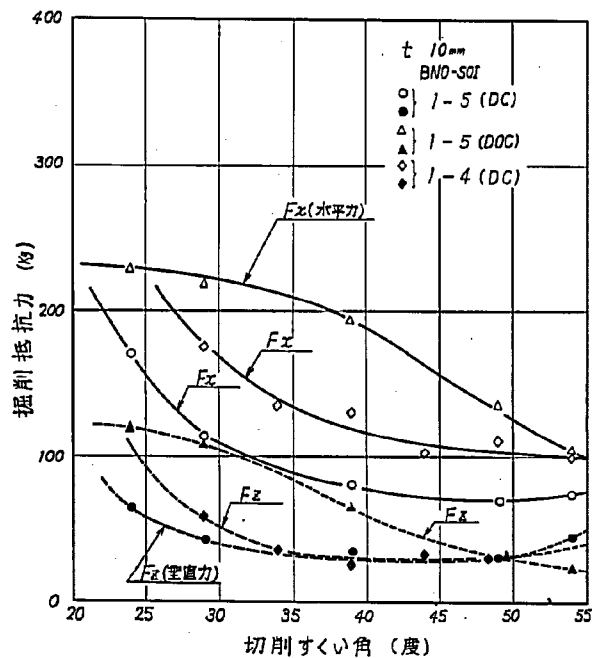


図-25 すくい角の変化と掘削抵抗

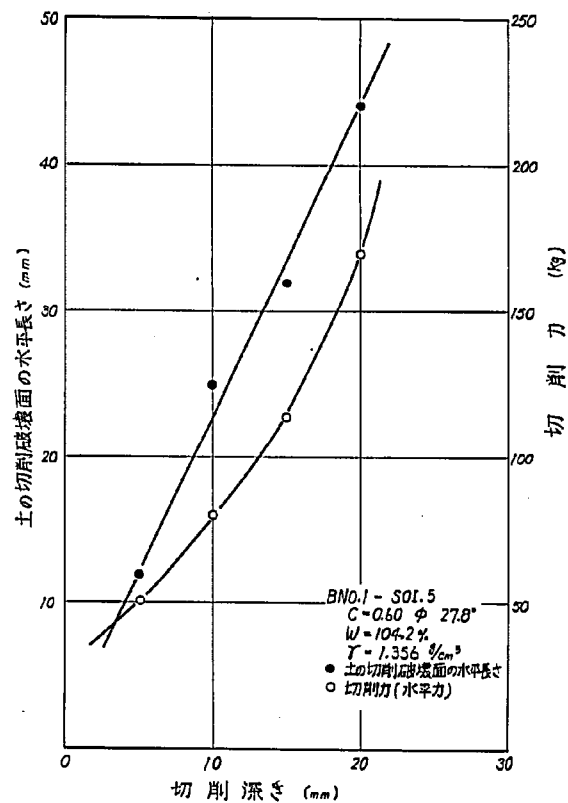


図-26 掘削面の形状と掘削抵抗

4・3 押土抵抗

押土抵抗は最終掘削押土抵抗と初期掘削押土抵抗の差をよみとって検討した。2・2・3でのべたように細部の検討は押土抵抗そのものが小さかったので行なっていないが、土の各係数を推定して計算してみた。実験分類のDOCでは掘削面に土をおいて掘削押土抵抗の測定を行なった。

実車の場合はかなり大きな値が予想される。すなわち掘削抵抗は平面であるが押土抵抗は押土容量であるので3次となりディメンションの関係で実車に引き延ばすと大きくなる。今回の実験値を使って実車の押土抵抗を推定すると図-28のようになる。参考のためにそのときの計算掘削抵抗も示した。計算に使った係数は図-27より押土の単位重量当り抵抗力 1.0 Kg/Kg として計算してある。

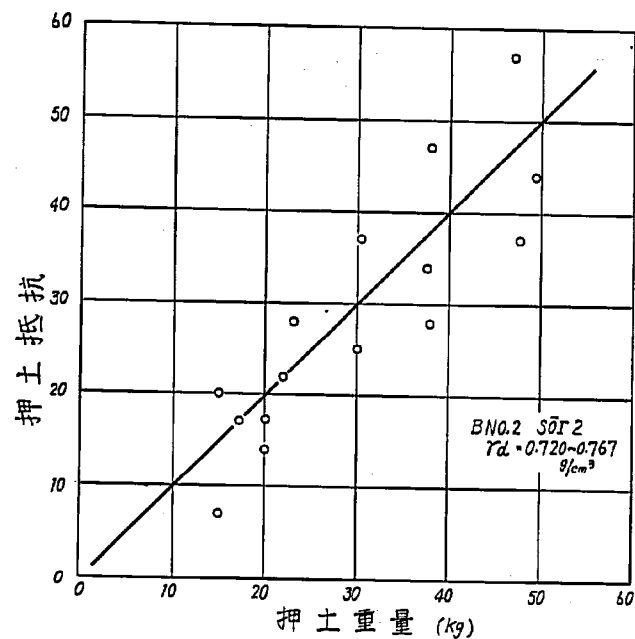


図-27 押土重量と押土抵抗

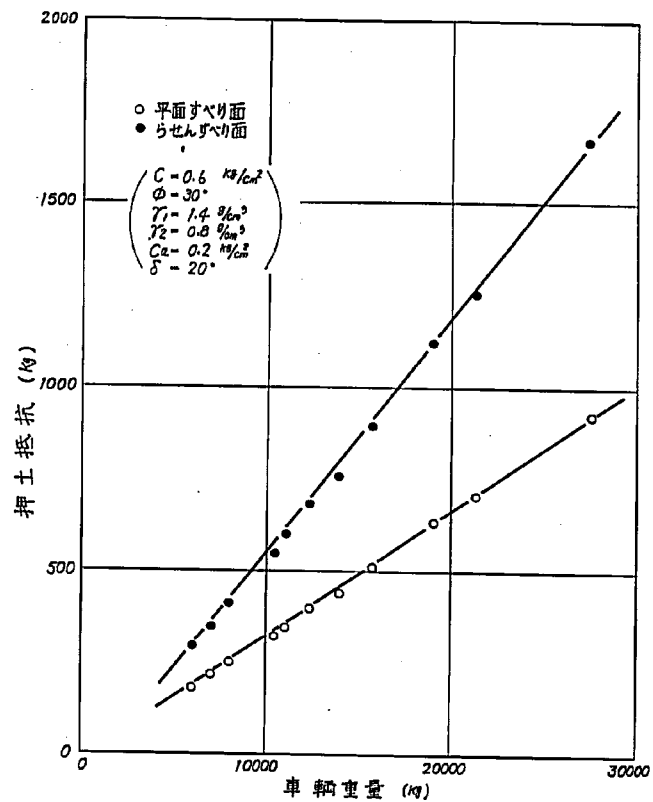


図-28 実車の押土抵抗の推定

4・4 掘削押土抵抗と押土容量

4・1～4・3で検討したように掘削押土抵抗は各種の条件が考えられる。それ等の条件を考慮した実験結果より掘削押土抵抗を推定すると、まず、切削抵抗は受動土圧の式を応用し、押土抵抗を単位押土重量（容積）より推定する。この結果を使って実車の最大掘削押土抵抗を計算すると図一29のとおりとなる。これは車両重量、土質等の条件による最大けん引力まで掘削したと仮定し押土量は文末の文献によった。⁽¹⁾

さきにブレード容量について検討したが、最大押土容積は掘削深さが増大する程増大する事がわかったので、この結果を実車にあてはめて押土容積を計算してみると図一30のようになる。Aはけん引力を $0.68W$ として計算したがBは土のC、 ϕ の式を応用した式を適用した。⁽¹⁾ 後者では土性の悪い場合は自動的に有効けん引力が減少し、それにつれて掘削量、押土抵抗が減少するようになる。この式が土の性質によるブルドーザ走行スピードと結び付けば時間当りの作業量が計算できる。今、土の性質により各ブルドーザの一速の掘削平均スピード及び帰路（3速）の平均スピードの減少率をそれぞれ0.6と仮定し、一定区間の時間当り作業量を計算してみると、図一31のようになる。横軸に移動距離をとって計算すると図一32で示される。現在使われているブルドーザを他の見方からすると、図一33、34になるように機関出力と重量及びブレード容量（ ηLH^2 ）と t との関係があるので、作業量は機関出力が LH^2 とも関係がある。

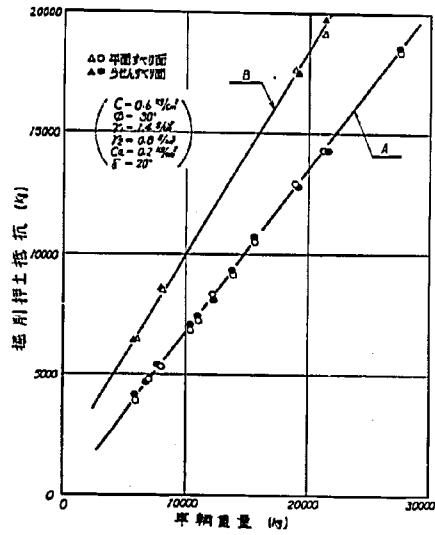


図-29 実車の掘削押土抵抗の推定

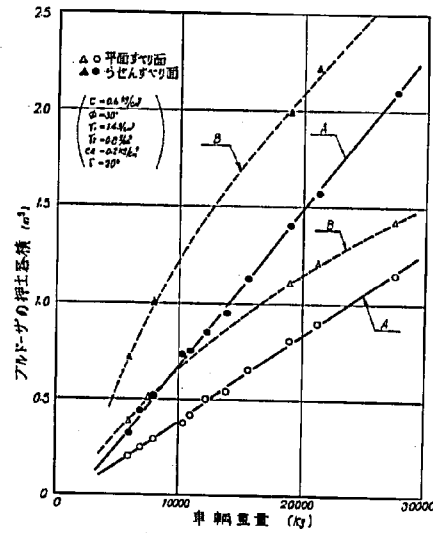


図-30 ブルドーザ(実車)の押土容積

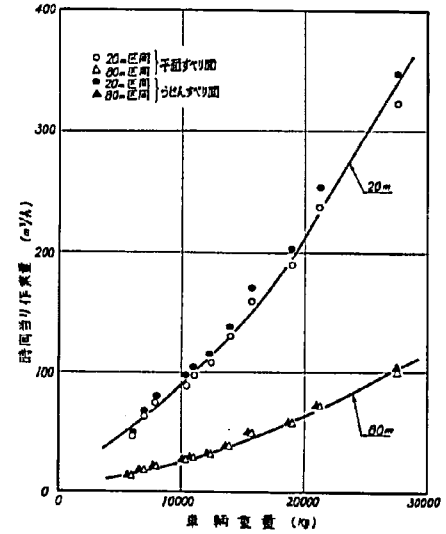


図-31 ブルドーザ重量と時間当り作業量
(一定区間)

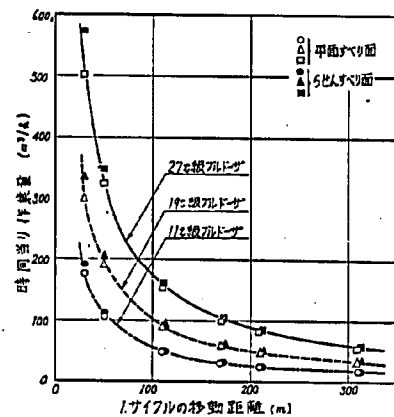


図-32 1 サイクルの移動距離と時間当作業量

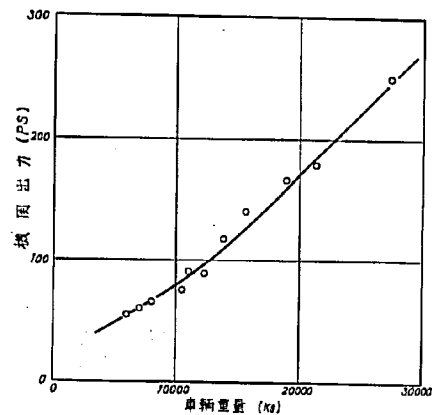


図-33 ブルドーザ重量と機関出力

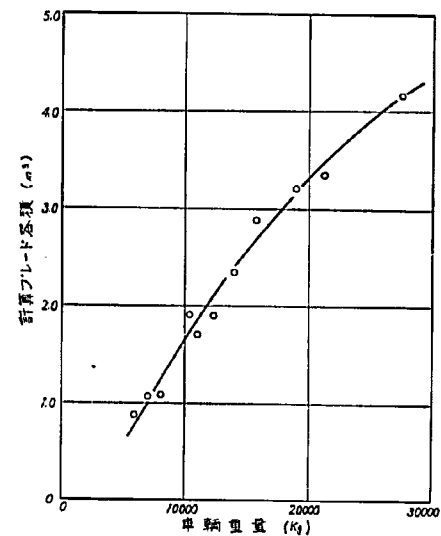


図-34 ブルドーザ重量と計算ブレード容積 ($\eta L H^2$)

4・5 実験データ集計表

今回の実験結果の集計表を文末に一括して示しておいた。各試験条件とか記号は、それぞれの試験分類、土質分類等の項目の表を参照されたい。

表-6 ブレード試験データ集計表

試験分類	ブレード分類	土質分類	土の掘削初期条件					試験条件					試験結果												押土抵抗	備考
			単位体積重量	乾燥密度	含水比	せん断強さ		掘削深さ	面投影高さ ブレード垂直	すくい角(°)	掘削スピード	掘削押土体積	掘削押土重量	初 期				最 終								
						せん断 みかけ力(C)	せん断 抵抗(φ)							けん引 力	水 平 力	垂 直 力	モー メント	けん引 力	水 平 力	垂 直 力	モー メント					
単位	№	SOI (級)	g/cm ³	g/cm ³	%	Kg/cm ²	度	mm	mm	度	m/sec	m ³	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg-m	Kg	Kg	Kg	Kg-m	Kg				
B44S-10 掘削試験 (DC)	1	4	1.690	1.185	43.2	0.72	24.8	5	135	39.0	0.16	0.0105	7.4	85	85	41	17	83	79	37	17					
			1.675	1.147	46.6	0.68	23.8	10	135	39.0	0.16	0.0186	18.3	148	131	42	34	142	121	38	32					
			1.688	1.123	49.1	0.71	25.0	15	135	39.0	0.16	0.0345	28.4	212	183	42	52	299	151	66	61					
			1.650	1.099	50.6	0.66	23.9	20	135	39.0	0.16	0.0463	38.5	238	206	43	68	374	334	99	94					
			1.641	1.110	53.8	0.71	21.9	25	135	39.0	0.16	0.0579	48.4	349	301	77	110	557	542	182	121					
	4	4	1.720	1.199	44.3	0.69	25.8	5	175	40.0	0.16	0.0187	10.5	63	61	32	15	58	54	17	11					
			1.736	1.231	41.3	0.66	26.8	10	175	40.0	0.16	0.0442	34.3	124	119	24	37	118	122	28	33					
			1.794	1.270	41.3	0.78	22.5	15	175	40.0	0.16	0.0525	57.0	186	177	29	57	231	190	46	53					
	1	4	1.804	1.312	37.5	0.78	22.5	5	175	40.0	0.17	0.0222	12.0	66	61	29	16	53	44	23	9					
			1.707	1.179	45.2	0.64	24.3	10	136	29.0	0.16	0.0208	24.3	169	175	58	47	341	295	138	62					
			1.721	1.301	44.2	0.59	26.1	10	136	34.0	0.16	0.0211	18.4	138	135	35	37	239	202	81	45					
			1.774	1.229	44.4	0.76	21.0	10	132	44.0	0.16	0.0172	21.0	108	102	26	29	132	115	39	29					
B44-12 掘削試験 (DC)	9	4	1.684	1.138	48.3	0.64	22.2	10	129	49.0	0.16	0.0166	18.3	118	111	33	31	145	139	44	31					
			1.750	1.184	47.2	0.62	21.7	10	124	54.0	0.16	0.0175	13.8	99	99	31	27	96	87	26	21					
			1.805	1.328	35.9	0.56	27.0	10	129	49.0	0.17	0.0174	19.0	133	122	29	35	155	132	31	35					
			1.729	1.218	41.9	0.68	32.6	5	141	32.3	0.16	0.0117	9.0	32	37	4	11	54	56	7	19					
			1.704	1.190	43.2	0.68	32.6	10	141	32.3	0.16	0.0203	21.3	76	80	11	25	174	149	38	64					
	11	4	1.723	1.208	42.6	0.68	32.8	15	141	32.3	0.16	0.0349	34.0	160	132	26	48	392	259	90	109					
			1.720	1.207	42.5	0.67	32.3	20	141	32.3	0.16	0.0472	43.7	236	172	44	102	596	333	143	152					
			1.630	1.137	43.5	0.59	28.0	5	239	30.8	0.16	0.0118	7.3	56	56	4	20	45	51	7	18					
			1.637	1.149	42.6	0.55	28.7	10	239	30.8	0.16	0.0172	12.7	67	72	5	24	82	85	10	28					
			1.606	1.118	43.8	0.58	28.3	15	239	30.8	0.16	0.0263	21.5	154	128	14	47	140	128	22	44					
				1.600	1.104	45.0	0.64	27.3	20	239	30.8	0.16	0.0344	31.0	255	169	19	77	213	175	42	67				

試験分類	ブレード分類	土質分類	土の掘削初期条件				試験条件				試験結果												押土抵抗	備考
			単位体積重量	乾燥密度	含水比	せん断強さ		掘削深さ	面影高さ	すくい角	掘削スピード	掘削押土体積	掘削押土重量	初 期				最 終						
						せん断力	せん断抗							けん引力	水平力	垂直力	モーメント	けん引力	水平力	垂直力	モーメント			
単位	No	SO1 (No)	g/cm ³	g/cm ³	%	Kg/cm ²	度	mm	mm	度	m/sec	m ³	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg-m	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg-m	Kg	
B44-12 (DOC)	掘削押土試験	8	4	1.709	1.213	40.9	0.79	28.7	5	88	30.6	0.16	0.0152	11.0	117	117	35	42	77	98	19	34		
				1.699	1.196	42.1	0.74	30.3	10	88	30.6	0.16	0.0260	20.0	227	179	60	73	239	193	57	77		
				1.677	1.197	40.1	0.84	25.7	15	88	30.6	0.16	0.0336	27.0	390	272	125	106	384	260	121	108		
				1.691	1.181	42.8	0.79	27.3	20	88	30.6	0.16	0.0374	36.0	612	426	288	159	667	418	237	172		
	10	4	1.713	1.196	43.2	0.66	31.8	10	141	32.3	0.16	0.0238	22.8	292	224	86	77	249	185	57	73			
			1.680	1.158	45.1	0.67	26.0	5	189	33.8	0.16	0.0128	9.7	80	73	34	23	37	46	9	13			
			1.674	1.146	46.1	0.73	28.0	10	189	33.8	0.16	0.0214	19.3	253	193	80	62	125	122	27	40			
			1.687	1.145	47.3	0.78	30.0	15	189	33.8	0.16	0.0318	33.3	342	247	101	81	234	194	79	64			
	11	4	1.657	1.140	45.4	0.71	27.3	20	189	33.8	0.16	0.0392	45.0	462	297	194	103	444	305	163	101			
			1.533	1.059	44.7	0.55	29.0	10	239	30.8	0.16	0.0213	18.0	246	155	49	56	98	98	18	34			
			7	4	1.705	1.171	45.6	0.62	28.0	5	272	35.0	0.16	0.0279	19.0	91	86	19		94	99	18		
					1.680	1.155	45.5	0.65	19.0	10	272	35.0	0.16	0.0447	41.3	60	67	9		133	132	24		
1.698	1.167	45.5			0.66	26.0	15	272	35.0	0.16	0.0636	75.7	227	227	20		737	776	407					
1.692	1.171	45.5			0.58	26.3	20	272	35.0	0.16	0.0732	126.3	426	426	40		1,213	1,289	635					
B45-3 (DC)	掘削試験	1	5	1.686	1.159	45.4	0.57	26.2	10	272	35.0	0.16	0.0617	75.7	550	445	168		462	441	159			
				1.356	0.664	104.2	0.60	27.8	5	135	39.0	0.10	0.0081	5.5	52	51	35		63	59	39			
				1.356	0.664	104.2	0.60	27.8	10	135	39.0	0.10	0.0177	13.0	67	80	29		110	109	37			
				1.356	0.664	104.2	0.60	27.8	15	135	39.0	0.10	0.0243	20.5	119	114	37		227	183	72			
				1.356	0.664	104.2	0.60	27.8	20	135	39.0	0.10	0.0352	27.0	153	170	38		319	297	90			
				1.367	0.670	104.0	0.63	27.0	10	136	24.0	0.10	0.0158	14.0	158	171	63		264	244	106			
				1.360	0.668	103.7	0.56	28.1	10	137	29.0	0.10	0.0177	15.3	113	113	42		219	217	92			
				1.360	0.668	103.7	0.56	28.1	10	129	49.0	0.10	0.0215	16.0	62	69	29		86	92	29			
				1.367	0.670	104.0	0.63	27.0	10	125	54.0	0.10	0.0250	15.0	75	73	43		92	95	34			
				1.245	0.598	108.4	0.54	24.0	10	135	39.0	0.16	0.0221	12.5	70	83	24		116	125	46			
				1.245	0.598	108.4	0.54	24.0	10	135	39.0	0.24	0.0224	13.5	68	83	26		136	144	51			
				1.284	0.614	109.0	0.56	26.0	10	137	34.0	0.16	0.0220	13.0	70	82	27		161	164	62			
1.284	0.614	109.0	0.56	26.0	10	137	34.0	0.24	0.0223	14.5	85	98	28		191	190	69							

試験 分類	ブ レ ード 分類	土 質 分類	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	ブ レ ード 垂 直 さ	す く い 角 (α)	掘 削 ス ピ ード	掘 削 押 土 体 積	掘 削 押 土 重 量	初 期				最 終				押 土 抵 抗	備 考		
						せん 断 強 さ (ϕ)	せん 断 抗 (c)							けん 引 力	水 平 力	垂 直 力	モー メント	けん 引 力	水 平 力	垂 直 力	モー メント				
単位	kg	SOI (%)	g/cm ³	g/cm ³	%	Kg/cm ²	度	mm	mm	度	m/sec	m ³	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg-m	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg-m	Kg		
B45-3 (DOC)	掘削押土試験	5	1	1.345	0.655	105.3	0.64	27.5	5	135	39.0	0.10	0.0124	8.5	135	130	68		69	72	35				
				1.345	0.655	105.3	0.64	27.5	10	135	39.0	0.10	0.0243	16.0	191	193	65		180	157	45				
				1.345	0.655	105.3	0.64	27.5	15	135	39.0	0.10	0.0293	24.0	307	288	90		292	262	81				
				1.345	0.655	105.3	0.64	27.5	20	135	39.0	0.10	0.0424	34.0	419	382	103		405	379	97				
				1.319	0.655	101.6	0.61	28.3	10	136	24.0	0.10	0.0232	16.0	241	231	120		241	228	114				
				1.319	0.655	101.6	0.61	28.3	10	137	29.0	0.10	0.0203	16.5	234	220	109		247	239	104				
				1.319	0.655	101.6	0.61	28.3	10	129	49.0	0.10	0.0235	15.5	121	134	30		75	85	23				
				1.319	0.655	101.6	0.61	28.3	10	125	54.0	0.10	0.0254	14.0	97	105	22		77	82	34				
				1.390	0.630	104.9	0.56	26.0	10	135	39.0	0.16	0.0250	14.3	181	183	69		143	150	49				
				1.390	0.630	104.9	0.56	26.0	10	135	39.0	0.24	0.0267	16.3	186	191	68		161	172	59				
				1.331	0.649	105.2	0.65	28.0	10	137	34.0	0.16	0.0238	17.5	264	254	100		225	223	81				
				1.331	0.649	105.2	0.65	28.0	10	137	34.0	0.24	0.0267	18.0	254	244	96		201	201	75				

5. ま と め

- ・掘削抵抗は受動土圧の式が適用できる。
- ・掘削抵抗の変化する要因は今回の実験では掘削深さ、すくい角、ブレード巾、土のCである。
- ・深削深さは直線となり、理論式の曲線にあてはまらないが、これは今回の実験が模型であり(2-9)式の第一項が非常に小さいと思われる。
- ・すくい角の変化はある角度で急激に小さくなる。
- ・押土抵抗は小さかったが実車の場合はディメンションの関係で掘削押土抵抗の大きな要因となる。
- ・今回の掘削試験の結果を利用してさきに発表してある押土容量の式を(2-1)式に適用すると実車の押土容量と時間当り理論作業量が推定できる。

あ と が き

今回の一連の実験によりブルドーザが土の上を走行して作業を行なう時の掘削押土抵抗に理論式の適用とその結果を用いて実車の作業量の計算まで多くの仮定も入ったが推定できた。建設機械特に土の上を走行して、その土を掘削、押土等を行なう機械の能力の検討を行なう一連の考えが整理されたと思われる。今後はもう少し細部の実験と実物大の実験装置を用いて今までのべてきた理論及び推定値で用いた仮定や諸類値の検証を行なって、土の掘削抵抗のメカニズムとブルドーザ等土の掘削、運搬作業を行なう建設機械の総合的な能力の把握をもう少し定量的につめてみたい。

これにより建設機械のマクロ調査、いわゆる土工調査といわれる建設機械の作業能力の検討のための理論的な裏づけの指針ができたと思っている。

参 考 文 献

- (1) 磯部・斎藤「ブレード容量に関する一考察」, 土木研究所資料(第577号, 45年3月)
- (2) 磯部「土の切削抵抗と押土量」, 第9回土木研究所発表会(45年10月)
- (3) 磯部・吉田「スクレーパの作業能力」, 土木研究所資料(第624号, 45年11月)
- (4) テルザギー・ベック「土質力学・基礎編」, 丸善(小野他訳) 1960
- (5) 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)
- (6) ティモシェンコ
- (7) John Cornelius Siemeus [Mechanics of soil under the influence of Model tilege tools] University of Illinois 1963