

土木研究所資料

ブルドーザの掘削押土能力に 関する試験調査

昭和61年2月

建設省土木研究所
機械施工部機械研究室

Copyright © (1986) by P.W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ブルドーザの掘削押土能力に 関する試験調査

機械研究室 室長 樋下敏雄^{*}
主任研究員 江本 平^{*}
樋野親俊^{**}
持丸修一

要 旨

本調査は、ブルドーザによる掘削押土作業におけるブレード（土工板）に作用する掘削押土抵抗力に影響を及ぼす要因およびブレード容量、最適押土条件などを把握するために実大実験を行い、掘削押土抵抗並びに土工量を測定するとともに、理論式による計算結果との比較を行った。その結果、砂質土に関する限り、適当な土質定数を用いればその掘削押土抵抗をほぼ推定できることが確認できた。

キーワード：建設機械、ブレード、土工、掘削、掘削押土抵抗、ブルドーザ

* 現 建設機械化研究所 主任研究員

** 現 中国技術事務所 機械課

ま え が き

ブルドーザは、土工機械の中でも油圧ショベルについて広く土工作業に使用されている機械である。ブルドーザの前面に取り付けられたブレード（土工板）により、掘削押土作業を行うわけであるが、ブレードにより押土運搬できる土量すなわちブレード容量や掘削押土に必要とされる推進力は、対象とする土の粘着力やせん断力などの土質条件によって左右される。しかしながら、現在のところ土質条件が掘削押土の作業能力に及ぼす要因については十分解明されているとはいえない。このため、本調査ではブレードに作用する掘削押土抵抗に影響を及ぼす要因およびブレード容量などを把握するために、実大のブレード試験装置を用いて検討を行ったものである。

また、ブルドーザによる掘削押土作業の自動化を進めるに当っては、掘削押土抵抗と土量との関係を把握しておく必要があり、それらのデータを得ることも今回の調査の目的であった。

目 次

まえがき

1. 概 要	1
2. ブレードによる土の掘削に関する理論的研究の現状	2
2.1 平面刃による土の掘削	2
2.2 A. R. Reece のブレード掘削理論	2
3. ブレード掘削押土実験	5
3.1 実験方法	5
3.1.1 土の準備	5
3.1.2 ブレード試験装置	5
3.1.3 掘削押土抵抗および土工量の計測	7
3.2 実験条件	7
3.3 土質定数の測定	8
4. 実験結果と考察	9
4.1 実験結果	9
4.2 掘削押土量の検討	9
4.2.1 掘削深さの影響	9
4.2.2 掘削角度の影響	12
4.2.3 土質条件の影響	12
4.3 ブレード容量算定式の検討	13
4.4 掘削押土抵抗の検討	14
4.4.1 掘削深さの影響	14
4.4.2 掘削角度の影響	15
4.4.3 土質条件の影響	16
4.5 掘削押土抵抗の水平分力の推定	17
あ と が き	23
参 考 文 献	24
後 付 写 真	25
付 属 資 料	33

1. 概 要

本試験調査は、ブルドーザによる土の掘削押土作業における掘削押土抵抗や土工量が、土質条件およびブレード姿勢によって受ける影響を把握する目的で行ったものである。

実験は、建設省土木研究所構内の掘削模型実験施設を使用して行い、砂質土と粘土について掘削角および掘削深さを変えた場合の掘削押土抵抗並びに土工量を測定するとともに、別途計測した土の諸定数を用いた理論式による計算結果との比較を行った。その結果、砂質土に関する限り、適当な土質定数を用いればその掘削押土抵抗をほぼ推定できることが確認できた。

2. ブレードによる土の掘削に関する理論的研究の現状

2.1 平面刃による土の掘削

二次元的な取扱いが可能な平面刃による土の掘削現象に関する理論的研究は、土質力学の受動土圧の理論を応用したものが主流を占めているが、用いられている手法により次の4者に分けることができる。

- a) クーロンの土圧論によるもの。
- b) Ohde の対数ラセン法によるもの。
- c) 極限平衡理論によるもの。
- d) 有限要素法によるもの。

a) は擁壁の受動土圧に関するクーロンの理論を広幅の平面刃に適用したもので、古くは, Osman M. S.¹⁾により、また最近では、畑村、千千岩ら^{2), 3), 4), 5), 6)}により試みられたところである。しかし、クーロンの理論ではすべり面を直線と仮定しており、受動土圧の場合には誤差が大きいため、わずかに滑らかな表面を持つ切刃が小さな切削角で粘着性のない土に対する場合にのみ成立するに過ぎない。

これに対し、b) の対数ラセンを用いる方法は、対数ラセンからなる曲面のラジアルシャーゾーンを考慮したもので、広い範囲の切削角や土質に対しても正確な答を与えるものであるといわれている。

c) の極限平衡理論を用いたものは、土の破壊基準としてモール・クーロンの基準が適合すると考え、これと応力の釣合から、極限平衡方程式とすべり線の方程式を導き、数値的に解く方法である。R. N. Young ら⁷⁾ および市場ら⁸⁾ は乾燥砂に対してこの方法を適用し、計算結果と側面ガラス板で組立てられた土槽による実験結果とを比べて比較的良好に一致するといっている。なお、極限平衡理論を用いた他の方法に Sokolovsky の塑性方程式を差分法によって解くものがある。石塚⁹⁾ はこの方法を用いて平刃による乾燥砂と水締め砂の掘削に関し、計算値と実測値の比較を行っている。その結果によれば、排土板幅が大きく二次元的取扱いができる場合には両者はよく一致するが、粒径が大きく均一な試料で切削深さの深い場合は実験値が下廻ることもあると報告されている。

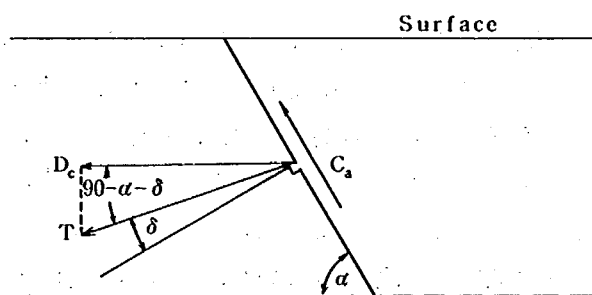
d) は、弾塑性 FEM 解析を平面刃による土の掘削に適用したもので、R. N. Young, A. W. Hanna¹⁰⁾、ならびに市場ら⁸⁾ が試みている。市場らによれば、乾燥砂の場合にはこの方法によっても極限平衡理論同様良好な結果が得られるが計算時間の点では後者の方が優れているとされている。

しかしながら、これらの方法はいずれも二次的に取り扱える平面刃の場合であって、ブルドーザのブレードの場合、わずかにカッティングエッジに対してあてはまるに過ぎない。ブレードの曲面部分を含めた土の掘削理論に関しては、現象の複雑さのゆえに、現在までのところ厳密な解析は行なわれていないが、A. R. Reece による近似解析法が¹¹⁾あるので次にこれを紹介する。

2.2 A. R. Reece のブレード掘削理論

Reece は幅の広いブレードにより押土されている土の動きとこれに作用する力を図-1 に示すように仮定した。すなわち、ブレード前方の土をカッティングエッジによって切削されつつある部分 AID ブレードに添って上昇しつつある部分 ABCD、および前方に堆積して三角柱状になって押土されつ

カッティングエッジAIにかかる水平力は等分
布上載荷重のある場合の平面刃による土の切削の



一方、土とブレードとの間に働く最小の鉛直力 H は、 $H = P \cdot \tan \delta + h \cdot C_a$ であるから、切削部分 AD 上に作用する全載荷重 S は、

$$S = G + H + W_2 = F (\tan \phi_1 + \tan \delta) + h \cdot C_1 + h \cdot C_a + h \cdot m \cdot r_1 \cdots (4)$$

上載荷重 S に基づく切削力の増加分を D_1 ，三角柱 CDE を土の表面に沿ってすべらせるに必要な力の和を Df とすれば、

$$D_1 = b \cdot (S/m) \cdot Z \cdot Nq \cdot \cos \theta \cdots (5)$$

$$Df = b \cdot F \cdots (6)$$

従って、ブレードにより土を掘削押土するときの全水平抵抗力 Dd は、(2)式の DC と(5)式の D_1 および(6)式の Df の和として次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} Dd = D_c + D_1 + Df = b [& r \cdot Z^2 \cdot N_r \cdot \cos \theta + C \cdot Z \cdot N_c \\ & \cdot \cos \theta + C_a \cdot Z (N_a \cdot \cos \theta + \cot \alpha) + (S/m) \cdot Z \cdot Nq \\ & \cdot \cos \theta + F] \cdots (7) \end{aligned}$$

ただし、これらの式で用いられている C_1 、 ϕ_1 等は、ほぐされた土の粘着係数、内部摩擦角であるが、実際にこれを測定することはなかなか困難である。そこで、Reece はこれらの値を地山土の C 、 ϕ から次のようにして推定した。すなわち、砂質土においては一般に最も締った状態とルーズな状態での内部摩擦角の差は約 7° であるので、 ϕ_1 を ϕ より 5° 小さいとした。また、粘着係数 C_1 は地山土のその50%に減少すると仮定し、土と金属間の摩擦角 δ および粘着係数 C_a については、ルーズな状態においても地山と変らないものと考えた。なお、ほぐされた土の単位体積重量 r_1 については、必ずしも測定不可能ではないが、便宜的に地山土の90%という値を使用している。

Reece はブレードに働く掘削押土の水平抵抗を推定するに当って、便宜的に次のような方法を提案している。すなわち、掘削押土抵抗の上限値として、 CD 面全部にせん断力が働くとして求められた前掲の(3)～(7)式による値をとり、下限値として、 $G = 0$ と仮定して得られる次の(8)～(12)式による値をとって、この両者の中間に真の値がくると考え、その平均値をもってブレードによる土の掘削押土抵抗の推定値とするものである。

すなわち、 $G = 0$ ， $P = F$ ， $V = W$ より

$$\begin{aligned} F' &= W_1 \cdot \tan \phi_1 + h \cdot C_1 \cdot \cot \phi_1 \\ &= 1/2 \cdot h^2 \cdot r_1 + h \cdot C_1 \cdot \cot \phi_1 \cdots (8) \end{aligned}$$

$$S' = F \cdot \tan \delta + h \cdot C_a + h \cdot m \cdot r_1 \cdots (9)$$

$$D_1' = b \cdot (S'/m) \cdot Z \cdot Nq \cdot \cos \theta \cdots (10)$$

$$Df' = b \cdot F' \cdots (11)$$

$$Dd' = D_c + D_1' + Df' \cdots (12)$$

$$D = (Dd + Dd')/2 \cdots (13)$$

3. ブレード掘削押土実験

3.1 実験方法

3.1.1 土の準備

実験は、掘削模型実験施設内のピット（幅5 m×長さ40 m×深さ2 m）に砂質土と粘土をそれぞれ搬入して行った。砂質土については、散水装置を用いて必要な加水を行った後、ロータリ耕運機により粉碎混合し、ローラにより転圧を行った後、振動ローラで締固めを行った。粘土については、含水比の調整が困難なため、自然含水比のまま敷均しを行い、ドーザショベルの履帯により締固めを行い実験用地盤を造成した。

実験に使用した砂質土の標準突固め試験（JIS A1210）結果を図-3に黒丸印で示す。なお、図中の白丸印は掘削実験時の締固め状態に対応するものである。

3.1.2 ブレード試験装置

写真-1に示すような6 t級ブルドーザのブレード（長さ243 cm、高さ75 cm）を装着したブレード試験装置を製作し、軟岩掘削実験装置の作業台車に取り付けて実験を行った。この装置は、掘削角 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 、アングル量 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の範囲で可変で、3方向の抵抗力が検出できる。ブレードの断面形状および掘削角度と断面高さとの関係を図-4に示す。

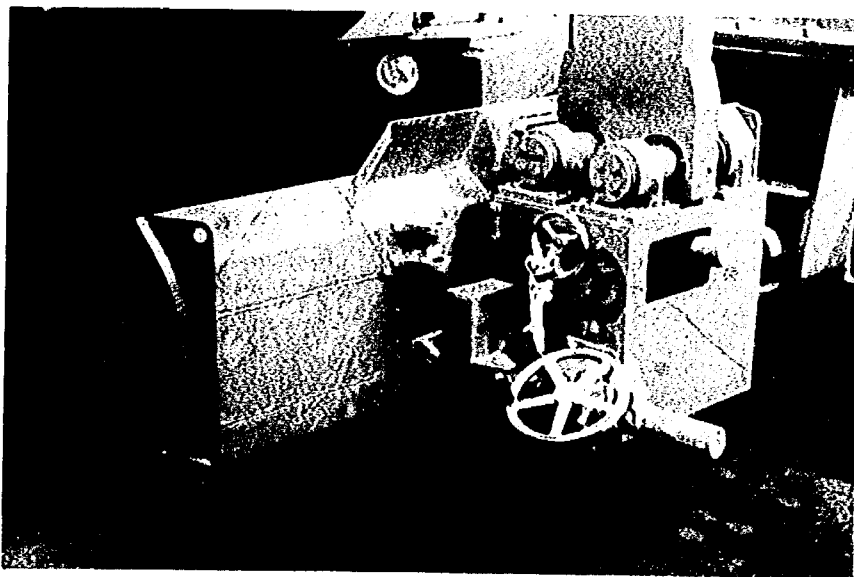


写真-1 ブレード試験装置

試 験 方 法		1.1-a 法
最 適 含 水 比	w_{opt}	16.2 %
最 大 乾 燥 密 度	$r_d \max$	1.675 g/cm^3

(注) 乾燥密度 r_d g/cm^3 , 飽和度 S_r %, 含水比 w % との関係式

$$r_d = \frac{G_s \cdot r_w}{1 + \frac{w \cdot G_s}{S_r}}$$

ただし, G_s は土粒子比重, r_w は水の単位体積重量 = $1 g/cm^3$

$S_r = 100$ % の場合, 上式はゼロ空隙曲線を表わす。

また, 図中の v_a は空間隙率を表わす。

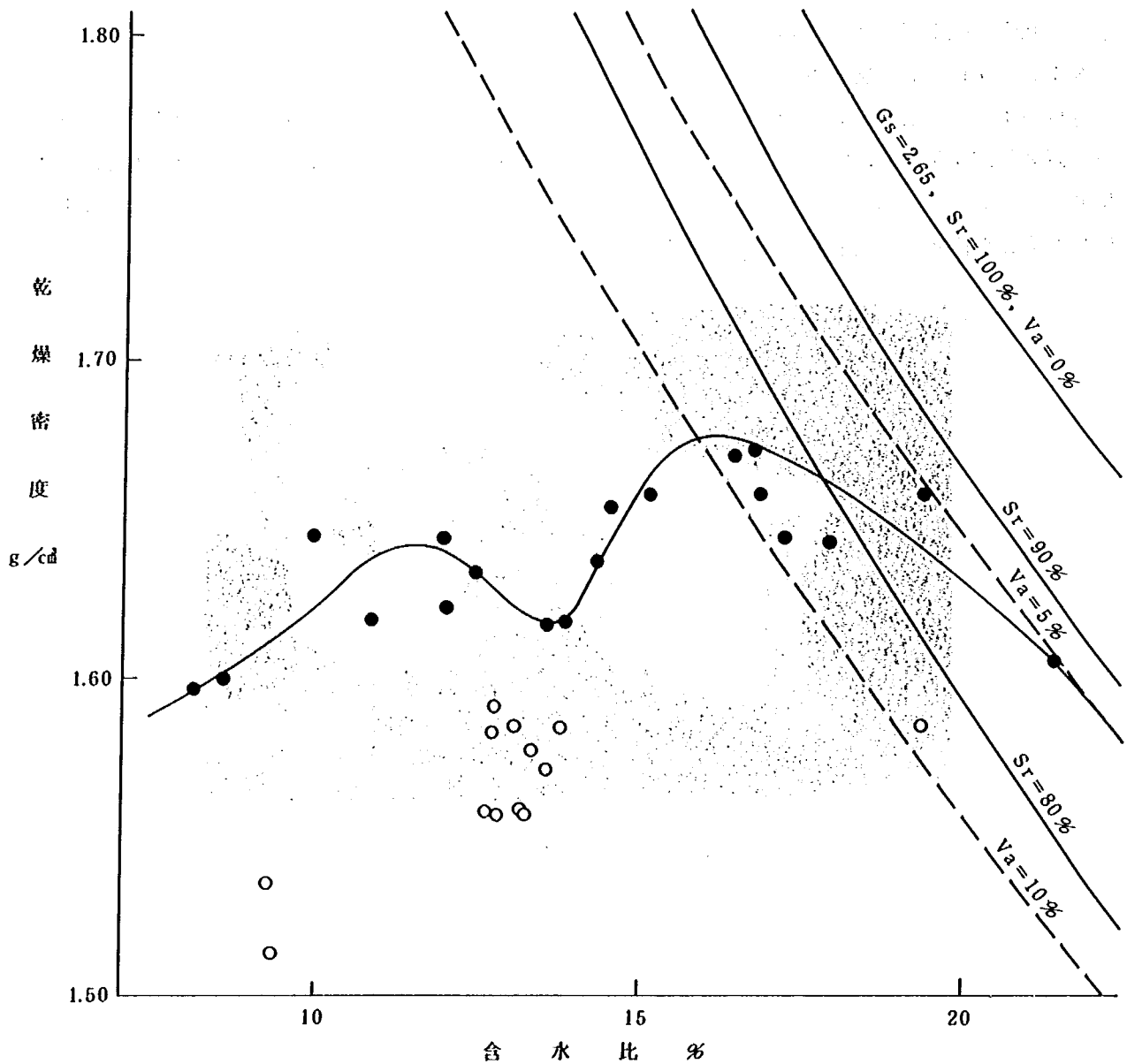


図-3 JIS A1210 (突固めによる土の締固め試験) 記録

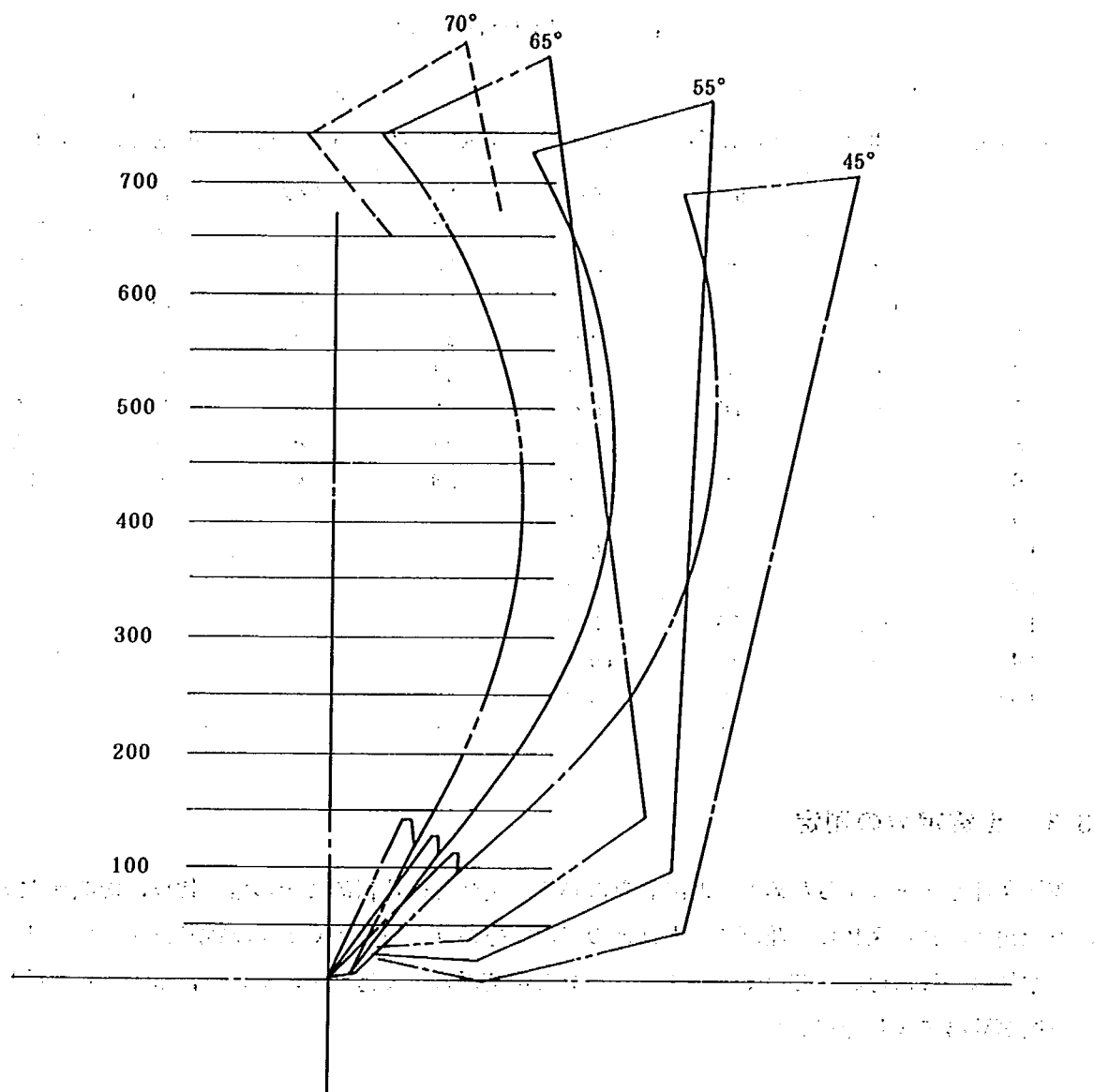


図-4 ブレード断面形状と掘削姿勢

3.1.3 掘削押土抵抗および土工量の計測

掘削押土抵抗の水平分力と鉛直分力については、ブレード試験装置に組込まれたストレインゲージにより測定を行った。

土工量は重量計量を原則とし、ブレード前方に堆積した被削土をバケットに入れ荷重計を介してクレーンで釣上げる方法を採用した。ただし、粘土質土についてはこの方法では計測が困難なため重量計量は行わなかった。押土の容積については、ブレードを幅方向に等分する5断面について10 cm 間隔で堆積土の高さを計測してその体積を算定した。

3.2. 実験条件

実験は土質、含水比、ブレード掘削角および掘削深さをそれぞれ変えて行った。各実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件一覧表

砂 質 土				粘 土			
実験番号	含水比	掘削角	掘削深さ	実験番号	含水比	掘削角	掘削深さ
1	9%	55°	5 cm	16	53%	55°	5 cm
2	"	"	10 "	17	"	"	7.5 "
3	"	"	15 "	18	"	"	10 "
4	13%	"	5 "	19	"	47°	5 "
5	"	"	10 "	20	"	"	7.5 "
6	"	"	15 "	21	"	"	10 "
7	"	46°	5 "	22	"	65°	5 "
8	"	"	10 "	23	"	"	7.5 "
9	"	"	15 "	24	"	"	10 "
10	"	65°	5 "				
11	"	"	10 "				
12	"	"	15 "				
13	18%	55°	5 "				
14	"	"	10 "				
15	"	"	15 "				

3.3 土質定数の測定

実験条件を明確にするためと、理論計算に必要な定数を得る目的で土の含水比 W ，湿潤密度 γ ，内部摩擦角 ϕ ，粘着係数 C ，並びに土と鉄との間の摩擦角 δ ，付着力 C_a 等の測定を行った。土の密度と含水比は一般に行われているカッターコーンと炉乾燥による方法で， C ， ϕ ， C_a ， δ 等はリングセン断試験機により測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

測定された被削土の含水比 W ，湿潤密度 γ ，土の粘着係数 C ，内部摩擦角 ϕ ，土と鉄の付着力 C_a ，摩擦角 δ の値，並びに掘削押土抵抗の水平力 D_x ，鉛直分力 D_z ，押土重量 W ，押土体積 Q の値を表-2に示す。また，これらの基礎データを巻末付属資料に示す。

4.2 掘削押土量の検討

4.2.1 掘削深さの影響

砂質土の掘削押土量に対する掘削深さの影響を図-5および図-6に，また，粘土の場合のそれを図-7に示す。図-5，図-6によれば，砂質土の場合，掘削深さの増大とともに掘削押土重量もほぼ直線的に増加することがわかる。

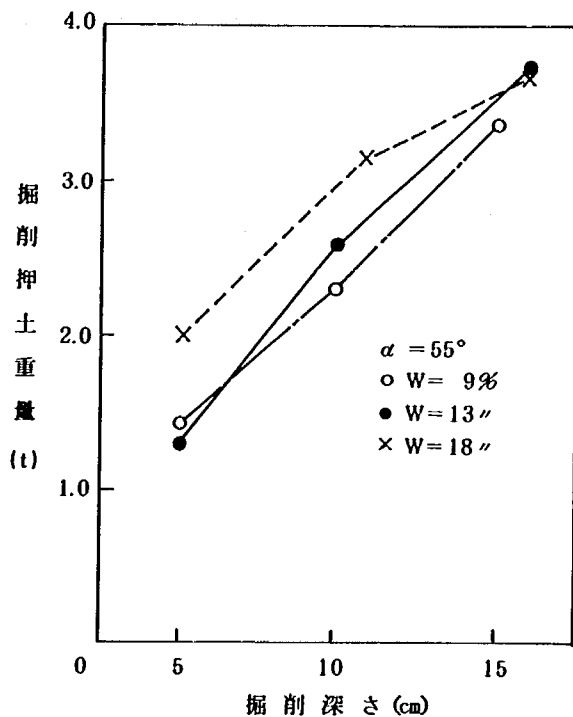


図-5 砂質土の掘削深さと掘削押土重量の関係

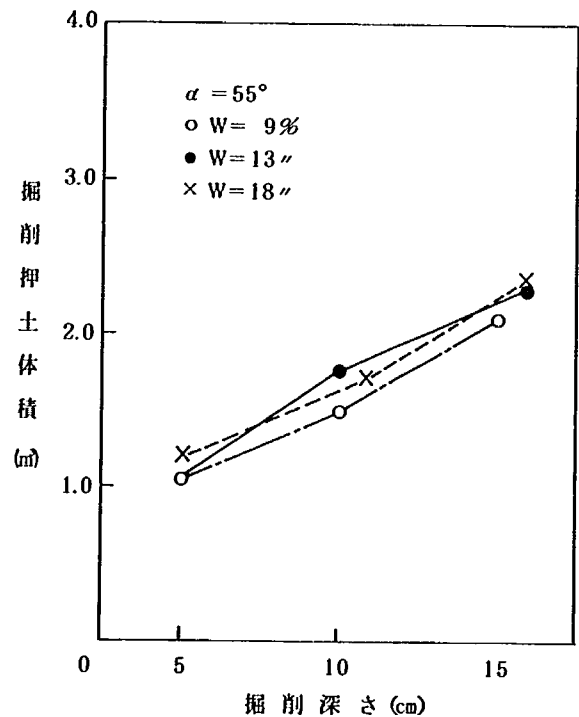


図-6 砂質土の掘削深さと掘削押土体積の関係

粘土の場合も，図-7に見られるようにほぼ同様の傾向を示す。

この理由は，砂質土では掘削深さの増加とともに土のすべり破壊ゾーンが大となり，その結果として，図-1に示した堆積土の角柱部分の長さおよび高さが増大することによるものと考えられる。典型的な例として，掘削角 65° ，含水比13%の場合の堆積土の中央断面形状変化の様子を図-8に示す。

粘土の場合も，同様の理由に基づくものと考えられる。ただ，粘土の場合には掘削深さが大となる

表-2 土質定数および掘削押土抵抗、掘削押土量測定結果

No	土質	含水比 W (%)	湿潤密度 γ (gr/cc)	乾燥密度 γ_d (gr/cc)	土の粘 着係数 C (kg/cm ²)	土の 摩擦角 ϕ (°)	土と鉄の 付着力 Ca (kg/cm ²)	土と鉄の 摩擦用 δ (°)	掘削角 α (°)	掘削深さ Z (cm)	掘削押土抵抗(kg)		押土抵抗(kg)		掘削押土量		掘削 破壊長 m (cm)	備 考
											水平分力 D _x	鉛直分力 D _z	水平分力 D' _x	鉛直分力 D' _z	重 量 (kg)	体 積 (m ³)		
1	砂質土	9.21	1.599	1.464	0.081	29.3	0	22.4	55	5.0	2,100	200	-	-	1,418	1.040	9	
2	"	9.28	1.680	1.537	"	"	"	"	"	10.0	4,200	800	-	-	2,301	1.486	23	
3	"	9.33	1.645	1.513	"	"	"	"	"	15.0	5,300	1,100	-	-	3,364	2.098	40	
4	"	13.83	1.802	1.583	0.070	32.8	"	"	"	5.0	1,600	200	-	-	1,300	1.075	12	
5	"	12.80	1.739	1.590	"	"	"	"	"	10.0	4,400	700	-	-	2,584	1.761	24	
6	"	12.65	1.754	1.557	"	"	"	"	"	16.1	6,400	1,200	-	-	3,710	2.309	31	
7	"	13.17	1.781	1.574	"	"	"	"	46	5.5	1,700	0	-	-	1,590	1.174	23	
8	"	12.80	1.754	1.555	"	"	"	"	"	10.1	3,600	100	-	-	2,368	1.688	19	
9	"	13.61	1.782	1.569	"	"	"	"	"	15.0	5,700	700	-	-	3,201	2.200	33	
10	"	13.35	1.786	1.576	"	"	"	"	65	5.0	2,100	300	-	-	1,558	1.031	10	
11	"	13.10	1.792	1.584	"	"	"	"	"	10.5	5,200	1,500	-	-	3,073	1.909	21	
12	"	12.74	1.784	1.582	"	"	"	"	"	15.1	7,100	2,500	-	-	3,995	2.419	27	
13	"	19.42	1.892	1.584	0.059	33.2	"	25.2	55	5.2	3,000	100	-	-	2,011	1.203	16	
14	"	17.99	1.926	1.632	"	"	"	"	"	11.0	6,000	800	-	-	3,145	1.710	35	
15	"	17.30	1.916	1.633	"	"	"	"	"	16.0	11,000	3,600	-	-	3,658	2.326	46	土工板 支持フレ ーム破損
16	粘土	53.4	1.657	1.080	0.095	2.6	0.026	7.0	"	4.8	4,100	2,600	3,000	500	1,566	0.935	15	
17	"	"	"	"	"	"	"	"	"	7.5	6,000	1,300	3,000	1,100	2,369	1.675	15	
18	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.5	9,000	3,000	5,300	2,300	3,447	2.058	32	
19	"	"	"	"	"	"	"	"	47	5.4	5,000	2,800	3,500	2,000	2,689	1.657	16	
20	"	"	"	"	"	"	"	"	"	6.3	5,000	2,200	3,200	1,600	2,136	1.290	24	
21	"	"	"	"	"	"	"	"	"	9.9	7,000	2,600	3,400	1,000	3,866	2.330	42	
22	"	"	"	"	"	"	"	"	65	4.8	4,400	2,800	-	-	1,709	1.020	17	
23	"	"	"	"	"	"	"	"	"	7.1	6,000	3,900	2,200	0	2,236	1.350	20	
24	"	"	"	"	"	"	"	"	"	11.6	8,200	2,500	3,000	700	3,660	2.210	23	

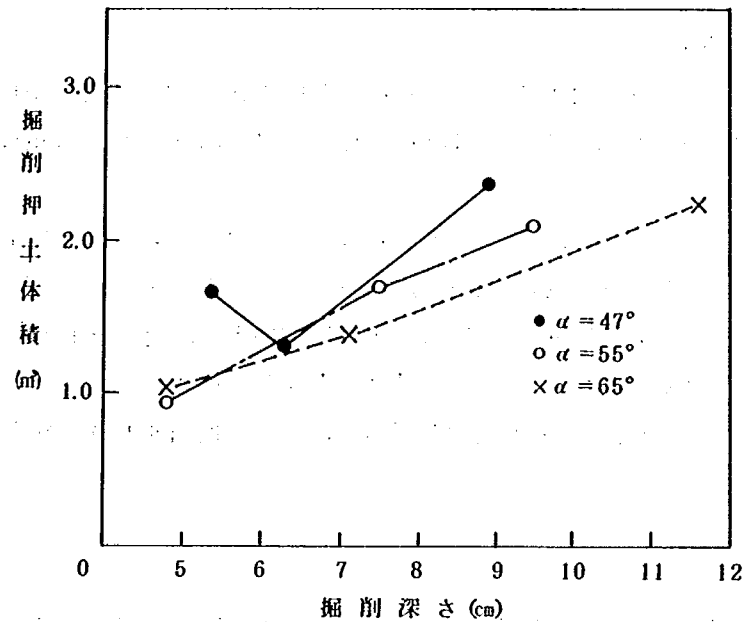


図-7 粘土の掘削深さと掘削押土体積の関係

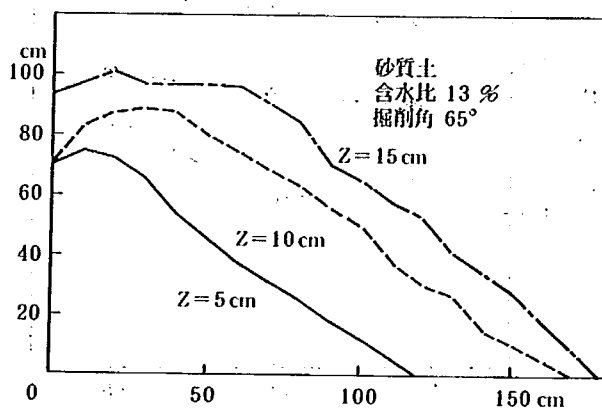


図-8 堆積土の中央断面形状変化

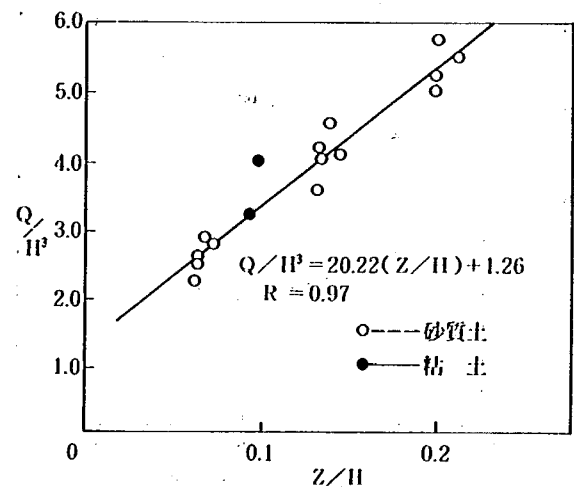


図-9 無次元化した掘削深さと掘削押土量との関係

と被削土の流動状態が大きく変化し、掘削深さの比較的小さい場合にブレードの曲面に沿って前方にロールアウトしていたものが、極端な場合にはブレード前方で柱状に成長するようになる。これは掘削深さが増加するにつれて掘削押土抵抗が増加し、そのため土とブレード間の摩擦抵抗が増大する結果、ブレードの弦に相当する断面で平面的にすべると考えられる。

このような異常値を除外すると、砂質土と粘土の間の土質の違い、含水比、密度、掘削角等の影響を含めても掘削押土量と掘削深さとの間には密接な関係があり、相似条件が満たされたと仮定して、ブレード高さ ($H = 75 \text{ cm}$) により無次元化した掘削深さと掘削押土量をプロットすれば図-9のようになって、これから次の直線回帰式を得ることができる。

$$Q = [20.22 \cdot (Z/H) + 1.26] \cdot H^3 \dots\dots\dots (14)$$

4.2.2 掘削角度の影響

砂質土の掘削押土量に対する掘削角度の影響を図-10および図-11に示す。図-10、図-11によれば砂質土の場合、掘削角45°～65°の範囲では角度が大きくなるほど、押土の重量、体積ともに増加する傾向を示す。

一般に、掘削角度が大きくなるほどブレードが立ってくるのでブレード高さも若干高くなる。 $\alpha = 45^\circ$ と 65° とで比較すると約7.5%後者が高くなる。また、カッティングエッジによる土のすべり破壊ゾーンも α とともに増加する。この両者の影響により掘削押土量に変化を示すものと思われるが、その程度は今回の実験の範囲内では掘削深さの影響よりもかなり小さい。

粘土の場合については、はっきりした傾向が認められないが、掘削押土量に及ぼす掘削角度の影響は更に小さいようである。

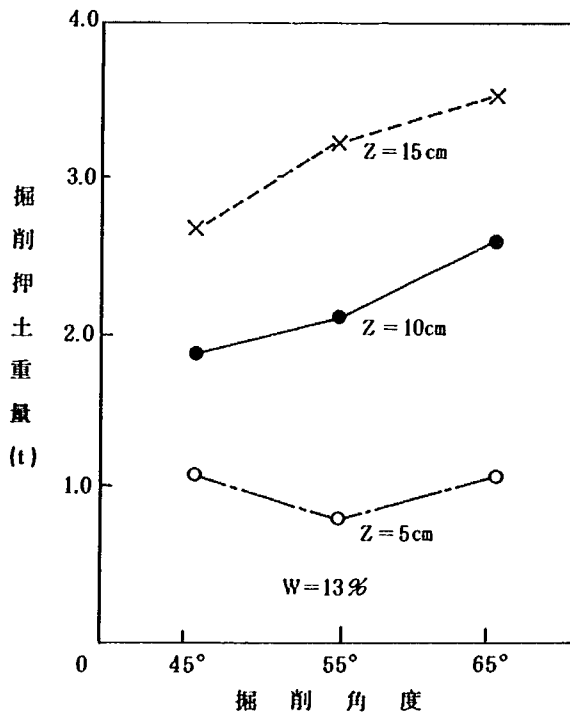


図-10 砂質土の掘削角度と掘削押土重量の関係

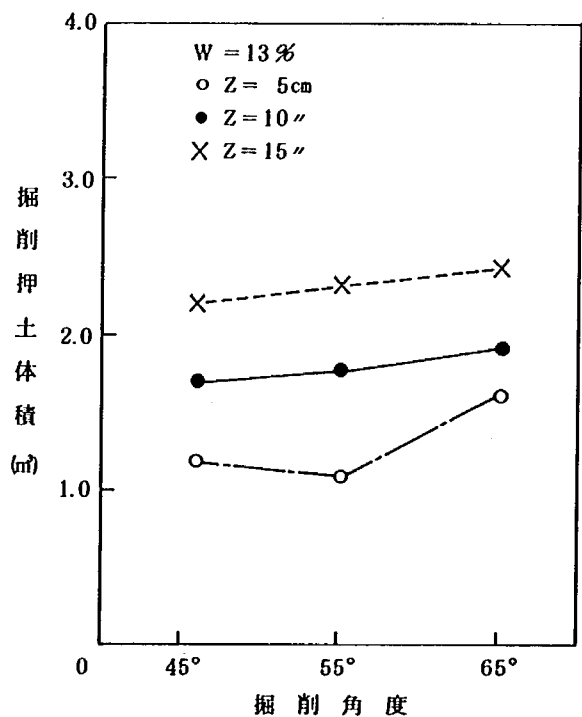


図-11 砂質土の掘削角度と掘削押土体積の関係

4.2.3 土質条件の影響

砂質土について含水比を3段階（9, 13, 18%）に変化させて実験を行ったが、地山状態が掘削押土量に及ぼす影響を図-12および図-13に示す。この結果によれば、土の含水状態は実験の範囲内では押土体積にはほとんど影響を与えていない。これに対し、掘削押土重量は含水比とともに増加している。これは、地山土の単位体積重量が含水比とともに増加していることによるものと考えられ、従って土の含水状態や密度等の土質条件は掘削押土体積には直接影響を与えていないといえる。

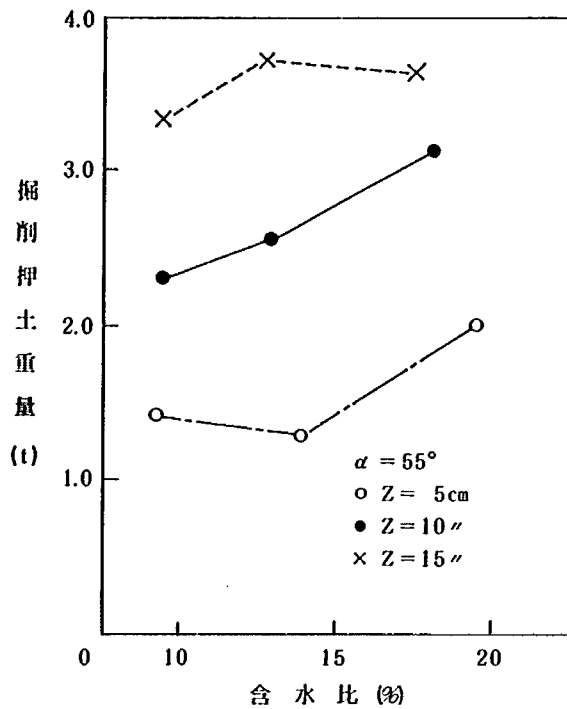


図-12 砂質土の土質条件と掘削押土重量の関係

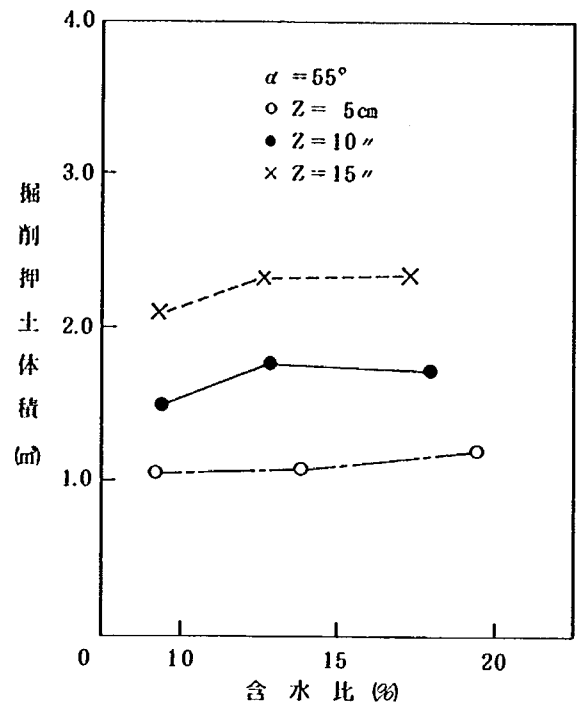


図-13 砂質土の土質条件と掘削押土体積の関係

4.3 ブレード容量算定式の検討

道路土工施工指針によれば、ブルドーザの作業能力算定の基礎データとしての1回の押土量 q を求めるのに、作業実績による方法と次式により算定する方法とがある。

$$q = L \cdot H^2 \left\{ \frac{1}{2} \cdot \cot(\phi + \alpha) + \epsilon \right\} \mu d \quad (15)$$

ここに

q : 1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)

α : 運搬路のこう配 ($^\circ$)

ϕ : 材料により決まる角度 ($^\circ$)

ϵ : 材料により決まる係数

μ : 材料により決まる係数

d : 押土距離による運搬土量低減率

本実験の場合についてこの算定式をあてはめてみると、運搬路のこう配は 0° であり、距離も 20 m 以下で運搬距離による土量の低減を考慮する必要はないから、 $\alpha = 0$ 、 $d = 1$ としてよい。砂質土の場合に対して、 ϕ 、 L 、 H 等は実測値を用いることとし、また ϵ の値は掘削破壊長 m の理論値を用いて (m/H) により推定し、 $\mu = 1$ と仮定して計算した掘削押土量とその実測値を比較したものを図-14の黒丸印で示す。この結果によると、計算値と実測値が比較的近接しているのは掘削深さが 5 cm のグループのみで、掘削深さが大きくなると計算値と実測値は次第に離れてゆく。これは(15)式にお

いては堆積土の高さをブレード高さHに等しいとして固定しているのに対し、実際には前述したようにブレード前方に堆積する土の高さが掘削深さとともに増大するためである。

図-15に砂質土と粘土の一部について得られた、堆積土高さの実測値と掘削深さの関係を示す。これをブレード高さで無次元化すれば、掘削深さと堆積土高さについて次の実験式が得られる。

$$h/H = 1.17 \cdot (Z/H) + 0.80 \quad \cdots \cdots (16)$$

図-14において白丸印で示したものは、(15)式においてHに上式による値を代入して計算した結果であるが、かなり実測値に近づいてきているのが認められる。

以上の結果から、ブルドーザのブレード容最を算定するに当たって(15)式を用いる場合に、堆積土高さhを掘削深さZの関数として、例えば(16)式のような形で与えれば更に合理的な算定が可能になるものと考えられる。

4. 4. 掘削押土抵抗の検討

4. 4. 1 掘削深さの影響

掘削深さZが砂質土の掘削押土抵抗の水平および鉛直分力に与える影響を図-16および図-17に示す。ただし、鉛直分力は上向きの方を正としている。これらの図から砂質土の場合、掘削深さの増大とともに水平および鉛直成分とも大体同じような傾向ではほぼ直線的に増加していることが認められる。

粘土の場合の掘削深さと掘削押土抵抗の関係をみると図-18および図-19に示すように水平分力については、掘削深さの増加とともにやはり直線的に増大しているが、鉛直分力については特に定まった傾向を認めることができなかった。

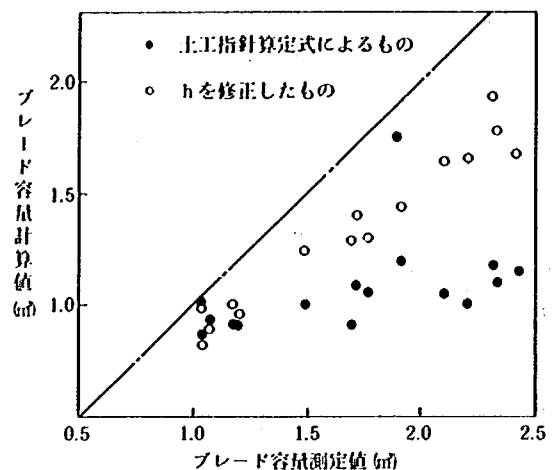


図-14 ブレード容量の計算値と測定値

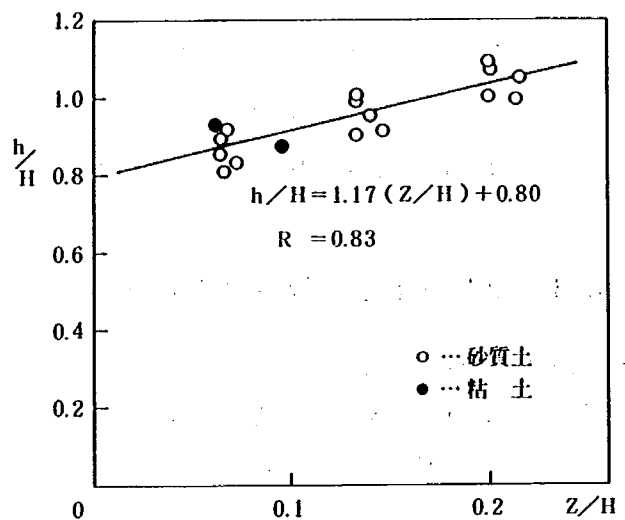


図-15 堆積土高さの実測値と掘削深さの関係

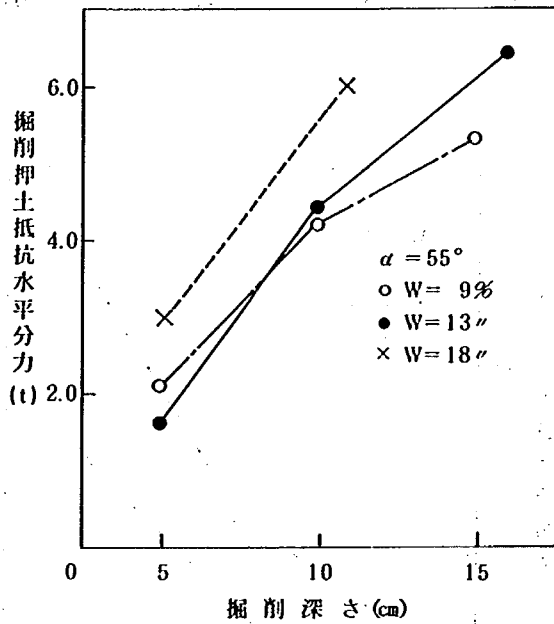


図-16 砂質土の掘削深さと掘削押土抵抗水平分力の関係

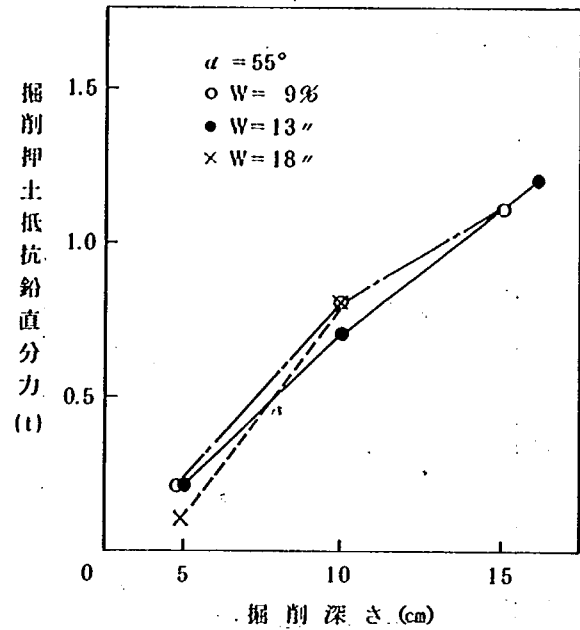


図-17 砂質土の掘削深さと掘削押土抵抗鉛直分力

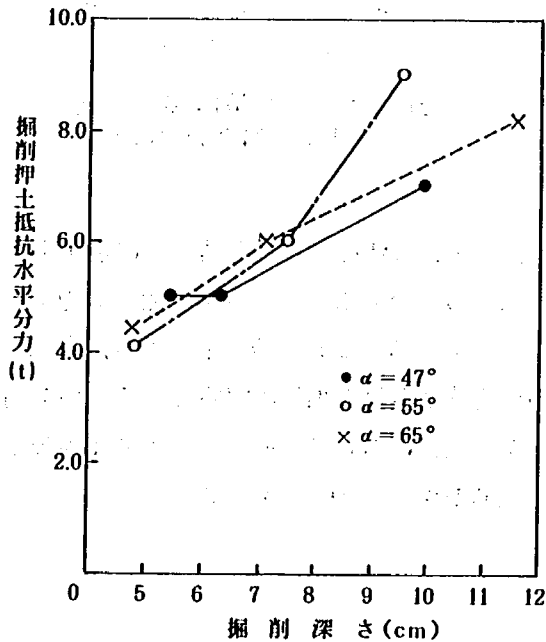


図-18 粘土の掘削深さと掘削押土抵抗水平分力の関係

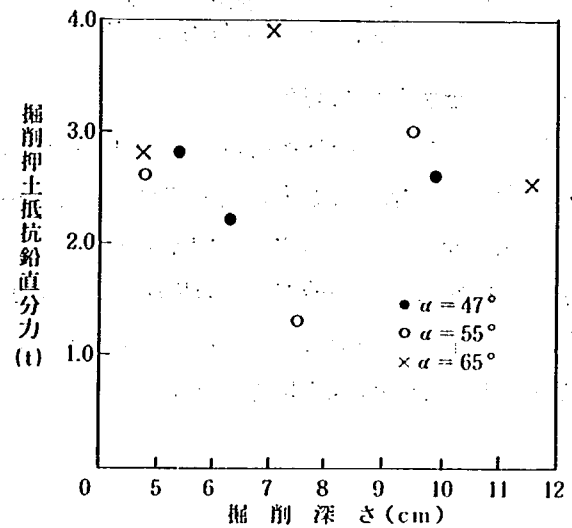


図-19 粘土の掘削深さと掘削押土抵抗水平分力の関係

4.4.2 掘削角度の影響

砂質土の場合の掘削押土抵抗の各成分に対する掘削角度、従ってまたブレード傾斜の影響を図-20 および図-21に示す。今回の実験の範囲内では、掘削角度が大となるにつれ掘削押土抵抗の水平および鉛直分力ともに増加を示しており、特に鉛直成分の増え方が著るしい。これはブレードが立ってく程、カッティングエッジによる土の掘削力の鉛直成分並びにブレード上方の土の重量など下向きに

働く力の要素が少くなり、土の流動に伴う上向きの力が卓越してくるためである。なお、以上の傾向は掘削深さが5 cm の場合には比較的小さい。粘土の場合については、掘削押土抵抗に対する掘削角度の影響はあまり無いようである。

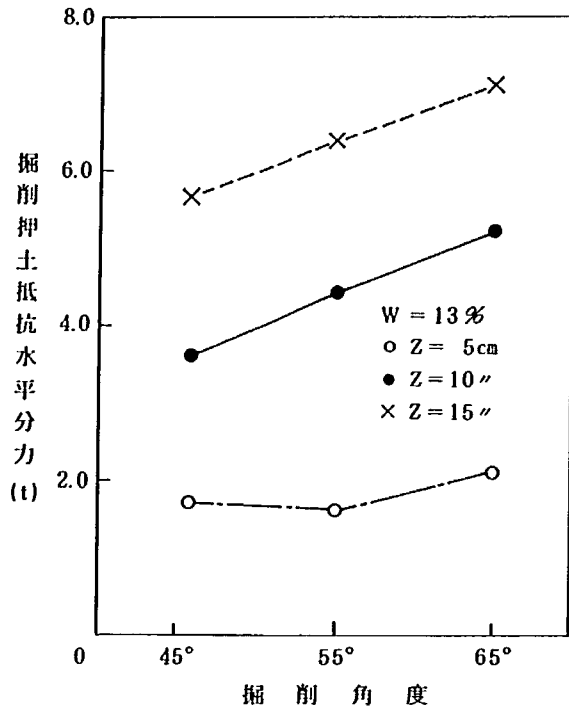


図-20 砂質土の掘削角度と掘削押土抵抗水平分力の関係

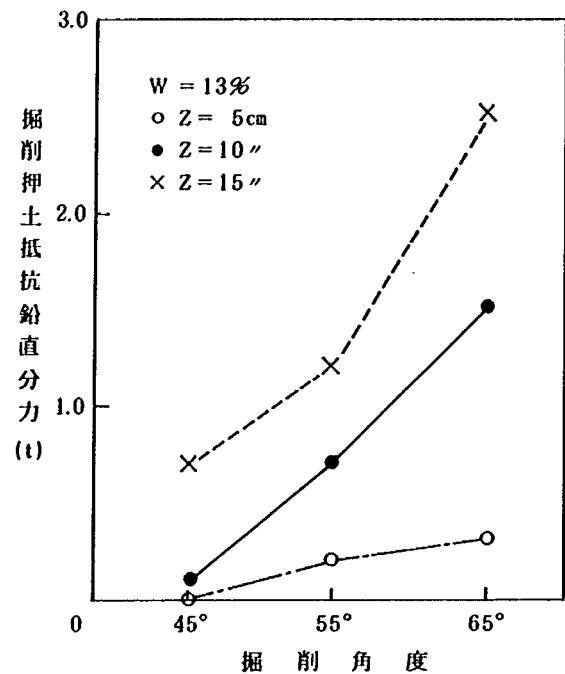


図-21 砂質土の掘削角度と掘削押土抵抗鉛直分力の関係

4.4.3 土質条件の影響

砂質土の場合の土の含水比の増加に対する掘削押土抵抗の変化の状況をみると図-22に示すように地山の含水比の増加は掘削押土抵抗水平分力の増加につながっているようであるが、鉛直分力については、図-23のように含水比の増加に関係なく一定値を示している。これは砂質土の場合、含水比の増加は直接的には土の締固め度の増加、従ってまた土の単位体積重量の増加に関係し、これが掘削押土抵抗の水平分力の増大の一因となっているのに対し、鉛直成分に対しては逆にマイナス要因を増加させる結果、他の要因の増加分とキャンセルしてほぼ一定値を保つものと考えられる。

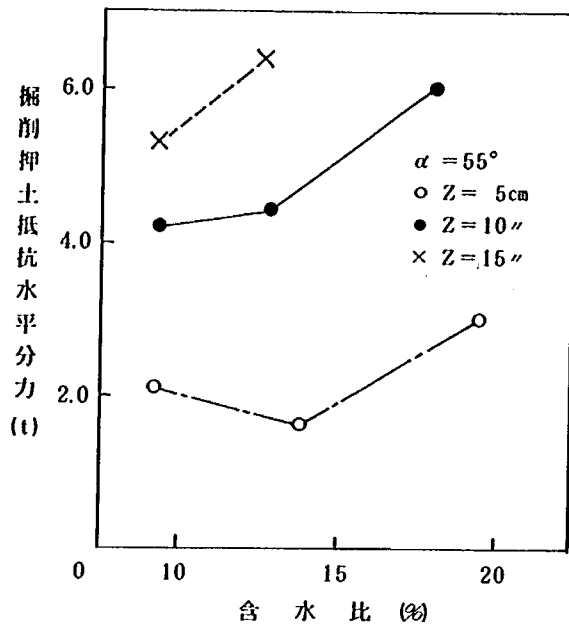


図-22 砂質土の土質条件と掘削押土抵抗水平分力の関係

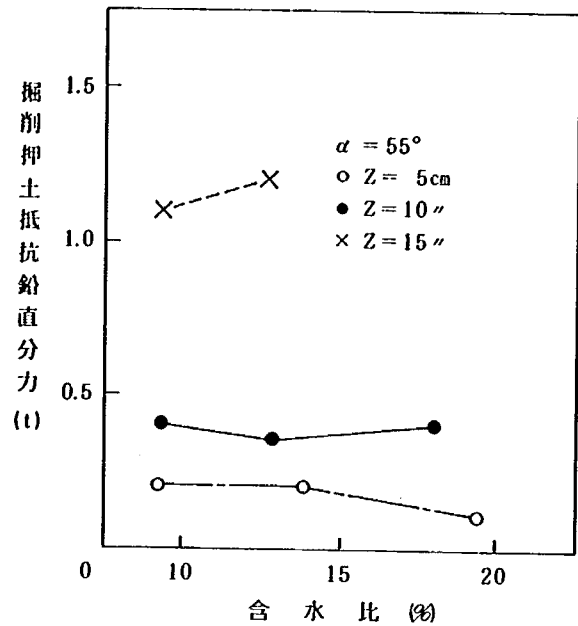


図-23 砂質土の土質条件と掘削押土抵抗鉛直分力の関係

4.5 掘削押土抵抗の水平分力の推定

まえに説明した Reece の方法を用いて砂質土の掘削押土抵抗の水平分力を計算した。その結果を表-3 に示す。この計算に当って、地山土の湿潤密度 r 、粘着係数 C 、内部摩擦角 ϕ 、土と鉄との付着力 C_a 、摩擦角 δ 、掘削角 α 、掘削深さ Z の値としてそれぞれの測定値を使用し、ほぐされた土の密度 r_1 、粘着係数 C_1 、内部摩擦角 ϕ_1 は Reece の提案に従って、 $r_1 = 0.9 r$ 、 $C_1 = 0.5 C$ 、 $\phi_1 = (\phi - 5^\circ)$ と仮定した。また、堆積土の高さ h としてはブレード高さを使用し、 N_r 、 N_c 、 N_a 、 N_q 、 m は Hettiarachi の与えた図表（巻末付属資料参照）により求めた。

図-24 に掘削押土抵抗の水平分力の測定値と上

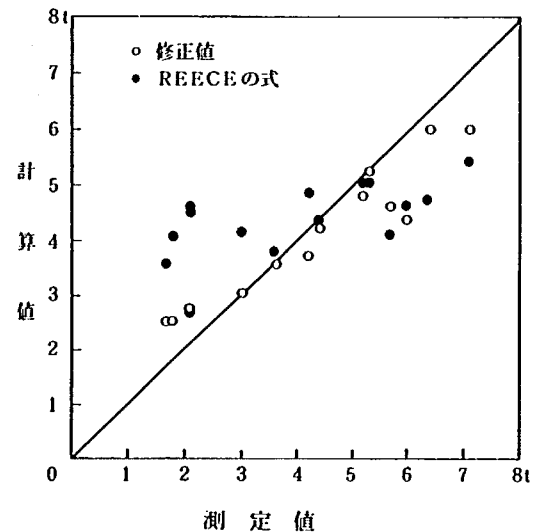


図-24 砂質土の掘削押土抵抗水平分力測定値

記による計算結果の対比を黒丸で示す。この結果によると、掘削押土抵抗が 3.5 ～ 5.5 ton の範囲、すなわち掘削深さが 10 cm のところでは計算値と測定値が非常によい一致を示すがそれ以外の範囲、すなわち掘削深さが 5 cm と 15 cm の場合には、前者では計算値が過大に、後者では過小になっていることが認められる。この原因としては種々のものが考えられるが、まず上述のように仮定された h 、 r_1 、 ϕ_1 等の値が適当であったかどうかについて検討してみる必要がある。

掘削された土の堆積高さ h については、前項でも触れたとおり掘削深さ Z により変化し、 Z に対し

表-3 掘削抵抗水平分力計算結果 (No.1)

No.	Dc (kg)	Dlmax (kg)	Dfmax (kg)	Dmax (kg)	Dlmin (kg)	Dfmin (kg)	Dmin (kg)	Dmean (kg)
1	2 7 3	3.0 4 6	1.6 5 2	4.9 7 2	1.5 7 0	2.2 9 1	4.1 3 4	4.5 5 3
2	5 7 8	3.1 7 1	1.5 1 4	5.2 6 4	1.8 1 1	2.1 0 2	4.4 9 3	4.8 7 8
3	9 1 1	3.1 6 1	1.3 3 9	5.4 1 2	1.9 3 4	1.8 6 9	4.7 1 6	5.0 6 4
4	2 4 5	2.8 3 1	1.3 2 9	4.4 0 6	1.5 3 1	2.0 0 5	3.7 8 3	4.0 9 4
5	5 2 5	2.9 4 1	1.1 6 1	4.6 2 9	1.7 7 0	1.7 6 9	4.0 6 5	4.3 4 7
6	9 1 9	3.0 6 9	1.0 0 4	4.9 9 3	2.0 3 3	1.5 4 0	4.4 9 4	4.7 4 3
7	2 3 5	2.3 0 1	1.2 1 8	3.7 5 6	1.2 7 5	1.8 4 8	3.3 5 9	3.5 5 7
8	4 6 2	2.4 1 9	1.0 8 4	3.9 6 6	1.4 8 6	1.6 5 6	3.6 0 6	3.7 8 6
9	7 3 9	2.5 2 4	9 5 9	4.2 2 3	1.6 8 5	1.4 7 4	3.8 9 9	4.0 6 1
10	3 3 4	3.1 9 6	1.3 8 3	4.9 1 4	1.7 3 1	2.0 8 3	4.1 4 9	4.5 3 2
11	7 5 2	3.4 0 7	1.2 2 2	5.3 8 2	2.0 8 5	1.8 5 3	4.6 9 1	5.0 3 7
12	1.1 4 0	3.5 1 0	1.0 9 3	5.7 4 4	2.3 0 9	1.6 6 8	5.1 1 7	5.4 3 0
13	2 5 1	2.9 6 2	1.2 4 6	4.4 6 0	1.7 5 8	1.8 6 6	3.8 7 5	4.1 6 8
14	5 8 7	3.1 9 1	1.0 8 8	4.8 6 6	2.1 2 1	1.6 3 8	4.3 4 7	4.6 0 7
15	9 2 1	3.2 9 5	9 5 0	5.1 6 7	2.3 3 9	1.4 4 3	4.7 0 3	4.9 3 5

て右上りの直線で近似できることが判明している。
 h が増大すれば上載荷重が増加し、従って掘削抵抗の増大につながることは(1)式より明らかなところであり、 h をほぼ一定として計算された結果と実測値が図-24のようにくい違いを見せる一つの原因がここにあることが推測される。

次に、ほぐされた土の密度 r_1 と地山密度 r の比と掘削深さ Z との関係をみる。カッティングゲージによる掘削深さが変化すると土のすべり破壊ゾーンの大きさも変化し、従って土の密度変化の程度も変わることが当然考えられる。しかも、その程度が被掘削土の粘着係数 C や摩擦角 ϕ の値によって変化し、同一土質であれば密度や含水比の影響を受ける。実験によれば、図-25に示すように土の密度変化の程度を表わす r_1/r の値は、おおよその傾向として掘削深さとともに大となり、土質条件では含水比の増大とともに増加していることが認められた。これは土が乾燥しているほど、また薄く削るほど破碎されやすいという常識とも一致する傾向である。

さて r_1 の値が大きくなれば(3)式の F 、(4)式の S の値が大となり、その結果(6)式の掘削押土の水平抵抗 D_d の値が増大する。ところが、Reeceの提案では r_1/r の値を掘削深さや土質にかかわらず常に一定と仮定しているので、図-24のような傾向を示すことになるのである。

次に、ほぐされた土の摩擦角 ϕ_1 これは h とともに堆積土の形状を決定し、従って堆積土と地盤との摩擦抵抗 F を(3)式により推定する重要なファクターであるが、この値を $(\phi - 5^\circ)$ とすることの当否を図-26により検討してみる。実験の範囲内では掘削された砂質土の堆積角は掘削深さや土質条件の影響を受けることが少なく、おおよそ $35^\circ \sim 40^\circ$ の範囲にあり、平均値が約 38° であることがわかった。一方、掘削前の土の摩擦角 ϕ は $30^\circ \sim 33^\circ$ であるので、堆積角 $\phi_1 = (\phi - 5^\circ)$ とすることは当を得ていない。これは砂質土といえども若干の粘着力を有しているため、内部摩擦角と堆積角が必ずしも一致しないためである。

以上の検討結果からわかるように、 h 、 r 、 ϕ_1 等の値に関する Reece の提案はいずれも事実と若干相異なる点があるので、これらの値に実測値を使用した場合について計算を行ってみた。表-4に入力データを、表-5にその結果を示す。ただし、削られた土相互間の内部摩擦角および堆積土と地盤との間の摩擦角は Reece の仮定どおり $(\phi - 5^\circ)$ としている。

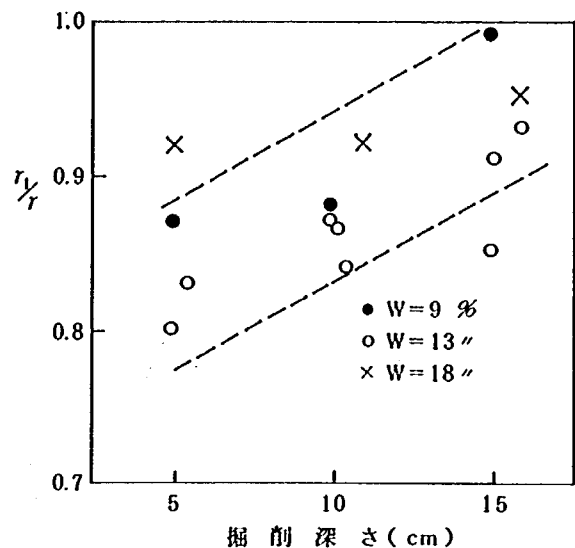


図-25 ほぐされた土の密度と地山密度の比と掘削深さとの関係

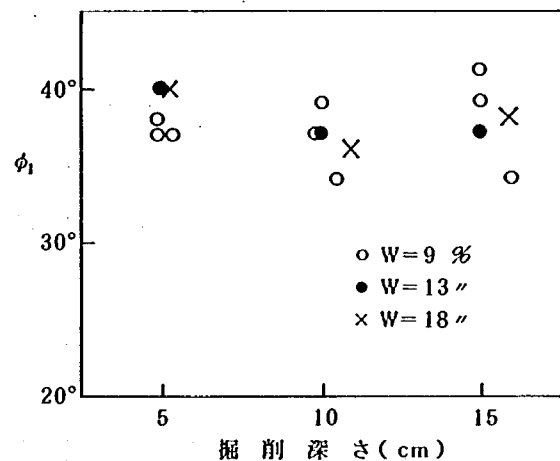


図-26 掘削深さと掘削土の堆積角との関係

表-4 掘削押土抵抗計算入力データ

No.	γ (gr/cc)	$\bar{\gamma}_1$ (gr/cc)	C (kg/cm ²)	ϕ (°)	ϕ_1 (°)	δ (°)	α (°)	z (cm)	h (cm)	h_1 (cm)	Ng	Nc	Nq	Na	m (cm)
1	1.599	1.394	0.081	29.3	40	22.4	55	5.0	68.0	66.9	1.56	2.69	3.10	0.53	11.8
2	1.680	1.471	"	"	37	"	"	10.0	63.0	67.5	"	"	"	"	23.6
3	1.645	1.632	"	"	"	"	"	15.0	58.0	76.1	"	"	"	"	35.4
4	1.802	1.258	0.070	32.8	38	"	"	5.0	68.0	63.7	1.76	2.73	3.51	0.56	13.2
5	1.739	1.505	"	"	37	"	"	10.0	63.0	75.7	"	"	"	"	26.3
6	1.754	1.634	"	"	34	"	"	16.1	57.0	78.6	"	"	"	"	42.3
7	1.781	1.485	"	"	37	"	46	5.5	64.5	62.2	1.69	2.47	3.40	0.48	15.8
8	1.754	1.469	"	"	39	"	"	10.1	60.0	74.1	"	"	"	"	29.0
9	1.782	1.506	"	"	41	"	"	15.0	55.0	81.4	"	"	"	"	43.1
10	1.786	1.410	"	"	37	"	65	5.0	70.0	60.8	1.96	3.69	3.79	0.53	13.4
11	1.792	1.558	"	"	34	"	"	10.5	64.5	71.4	"	"	"	"	28.1
12	1.784	1.623	"	"	39	"	"	15.1	60.0	81.1	"	"	"	"	40.5
13	1.892	1.738	0.059	33.2	40	25.2	55	5.2	68.0	69.1	1.86	3.11	3.70	0.55	13.6
14	1.926	1.763	"	"	36	"	"	11.0	62.0	68.3	"	"	"	"	28.8
15	1.916	1.819	"	"	38	"	"	16.0	57.0	74.3	"	"	"	"	41.9

表-5 掘削抵抗水平分力計算結果 (No. 2)

No.	Dc (kg)	Dlmax (kg)	Dfmax (kg)	Dmax (kg)	Dlmin (kg)	Dfmin (kg)	Dmin (kg)	Dmean (kg)
1	2 7 3	2,0 1 0	7 4 3	3,0 2 7	9 7 3	1,1 9 2	2,4 3 8	2,7 3 3
2	5 7 8	2,5 6 4	8 8 7	4,0 3 1	1,4 5 3	1,3 6 8	3,4 0 0	3,7 1 6
3	9 1 1	3,5 6 4	1,1 1 5	5,5 9 2	2,2 5 7	1,6 8 0	4,8 5 0	5,2 2 1
4	2 4 5	1,8 2 5	6 4 6	2,7 1 7	9 2 8	1,1 1 3	2,2 8 7	2,5 0 2
5	5 2 5	2,9 8 2	9 7 5	4,4 8 3	1,8 0 1	1,5 8 8	3,9 1 4	4,1 9 9
6	9 1 9	4,1 2 6	1,2 5 1	6,2 9 7	2,7 7 0	1,9 5 3	5,6 4 3	5,9 7 0
7	2 3 5	1,7 0 9	7 1 2	2,6 5 7	9 3 0	1,1 9 0	2,3 5 6	2,5 0 7
8	4 6 2	2,4 1 5	8 4 7	3,7 2 5	1,4 8 7	1,4 1 6	3,3 6 6	3,5 4 6
9	7 3 9	3,1 1 7	9 1 1	4,7 6 8	2,1 0 7	1,5 3 1	4,3 7 8	4,5 7 3
10	3 3 4	2,0 1 4	6 6 9	3,0 1 8	1,0 5 2	1,1 2 9	2,5 1 6	2,7 6 7
11	7 5 2	3,3 2 4	1,0 4 5	5,1 2 1	2,0 4 1	1,6 5 7	4,4 5 1	4,7 8 6
12	1,1 4 0	4,1 8 5	1,0 4 1	6,3 6 7	2,8 1 5	1,6 9 6	5,6 5 2	6,0 0 9
13	2 5 1	2,3 0 0	7 5 2	3,3 0 4	1,3 6 3	1,2 3 4	2,8 4 9	3,0 7 7
14	5 8 7	3,1 0 7	8 9 3	4,5 8 7	2,0 9 9	1,4 1 1	4,0 9 8	4,3 4 2
15	9 2 1	4,0 0 1	9 5 8	5,8 8 1	2,9 1 1	1,5 1 9	5,3 5 2	5,6 1 6

この結果を図-24にプロットしたのが白丸印であるが、かなり実測値に近い推定値が得られている。従って、掘削された土の堆積高さ h を前掲の(16)式により求め、土の密度変化や堆積角度を何等かの方法で測定することができれば、Reece の式により実用的に十分な精度でブレードによる土の掘削抵抗の水平分力の値を推定することが可能であるといえることができる。

あ と が き

砂質土と粘土に関し、実物大のブルドーザのブレードを用いた掘削押土実験を実施し、その結果、Reeceの式に若干の修正を加えれば、実用的には十分な精度でブレードによる砂質土の掘削押土抵抗の水平分力の値を推定できることがわかった。

ブレード容量については、道路土工施工指針の算定式と比較したが、ブレードによる土の掘削押土量は掘削深さの影響を強く受けるが、これを考慮すれば、さらにそのブレード容量推定の精度が高まることがわかった。

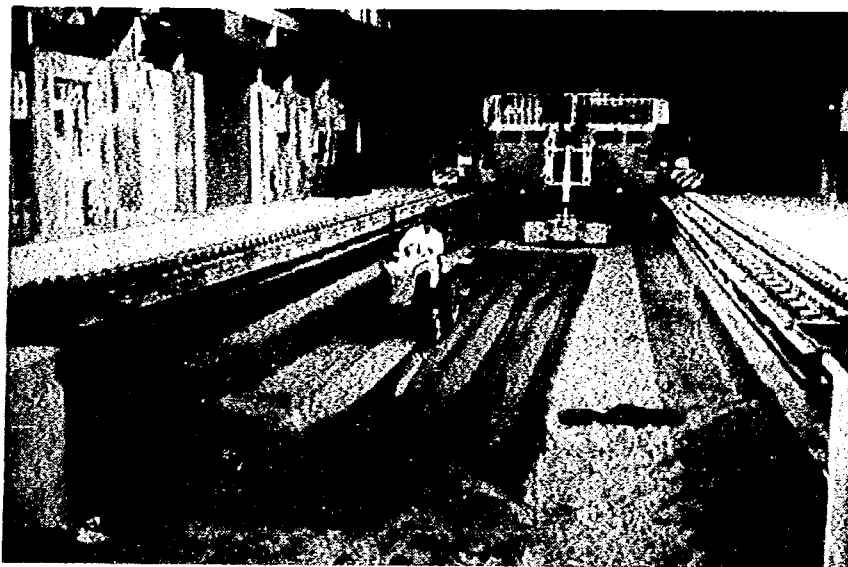
これらの成果については、今後ブルドーザの自動化に当って活用していきたいと考える。

最後に本調査をとりまとめるにあたり貴重な御助言を頂いた(社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所副所長 藤本義二氏に対し、謝意を表します。

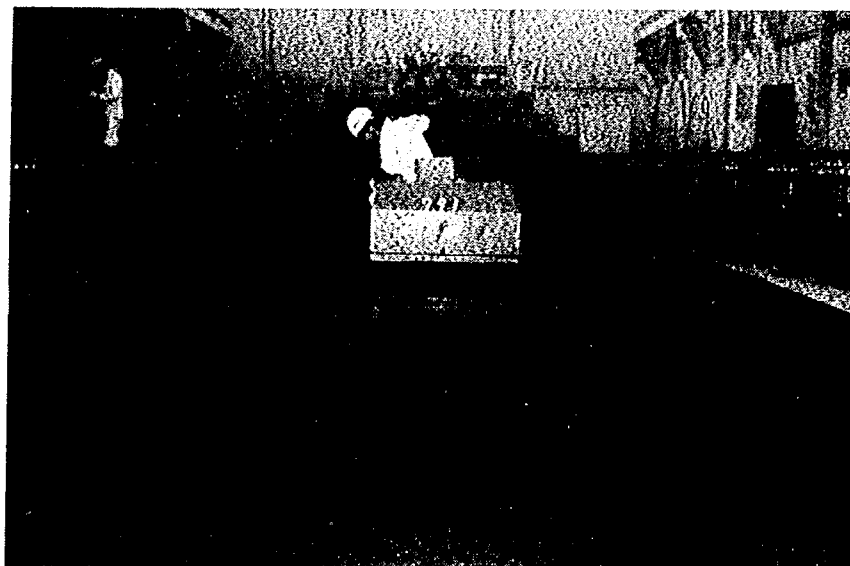
参 考 文 献

- 1) Osman, M. S. , "The mechanics of soil cutting blade", Jour Agric Eng. Res., Vol. 9, No 3, 1964
- 2) 畑村洋太郎, 千千岩健児, 「土の切削機構の解明」(第1報), 日本機械学会論文集40巻, 338号, 1974
- 3) 畑村洋太郎, 千千岩健児, 「土の切削機構の解明」(第2報), 日本機械学会論文集41巻, 347号, 1975
- 4) 畑村洋太郎, 千千岩健児, 「土の切削機構の解明」(第3報), 日本機械学会論文集, No 740-15, 1974
- 5) 畑村洋太郎, 千千岩健児, 「土の切削機構の解明」(第4報), 日本機械学会論文集, No 750-6, 1975
- 6) 畑村洋太郎, 千千岩健児, 「土の切削機構の解明」(第5報), 日本機械学会論文集, No 750-18, 1975
- 7) R. N. Yong, C. K. Chen, R. J. Sullivan, "Application of limit analysis to soil cutting", Proceedings of the 3rd International Conference of the International Society for Terrain - Vehicle Systems, 1969
- 8) 市場悟, 兵頭和也, 「土の切削抵抗に関する基礎研究」, テラメカニクス, 第2号, 1982
- 9) 石塚浩次, 「土および岩の切削抵抗の研究」, 土木学会論文報告集, 第307号, 1981
- 10) R. N. Yong, A. W. Hanna, "Finite element analysis of plane soil cutting", Jour. of Terramechanics, Vol. 14, No 3, 1977
- 11) P. E. R. Cook, A. R. Reece, "Theory of bulldozer action in friable soil", Proceedings of the 2nd International conference of I. S. T. V. S., 1966
- 12) D. R. P. Hettiaratchi, B. D. Witney, A. R. Reece, "The calculation of passive Pressure in two - dimensional soil failure", Jour. of Agric. Engng Res, 1966

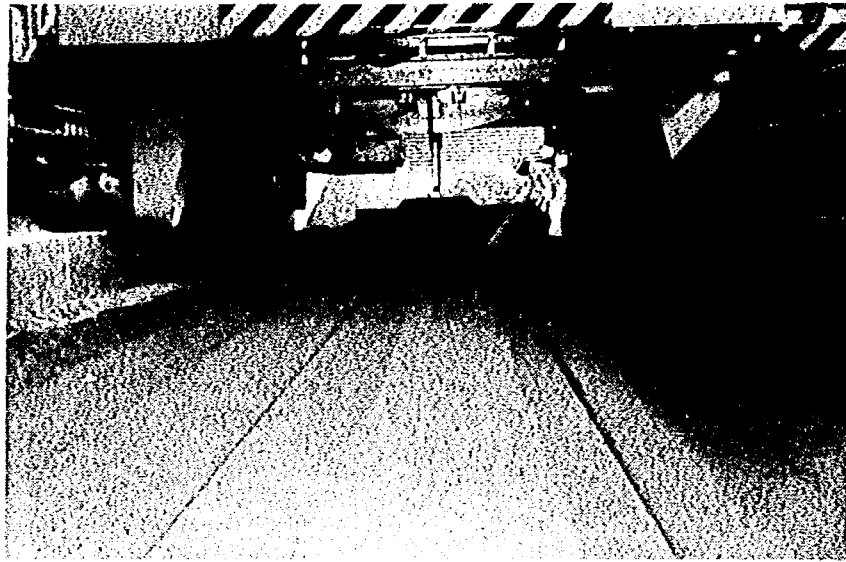
後 付 写 真



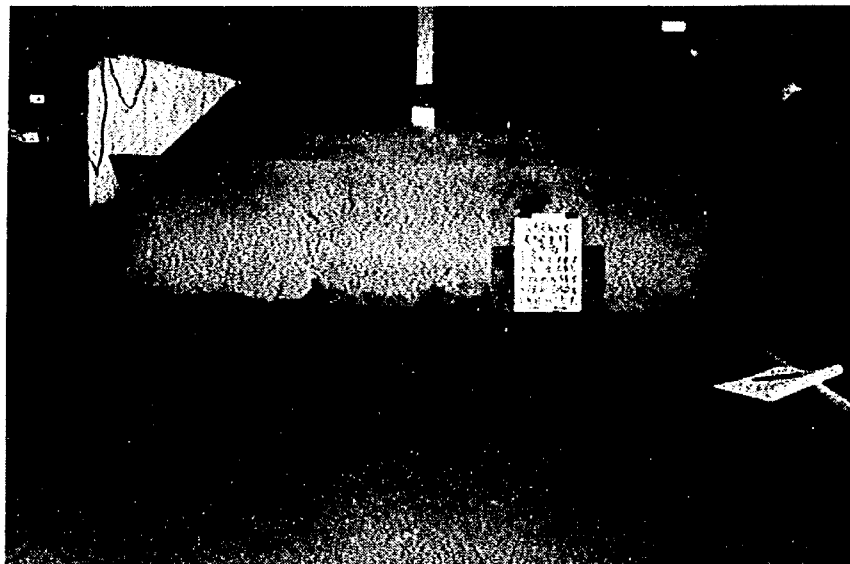
写真－1 実験用地盤の造成（砂質土）



写真－2 実験用地盤の造成（砂質土）
（振動ローラによる転圧）



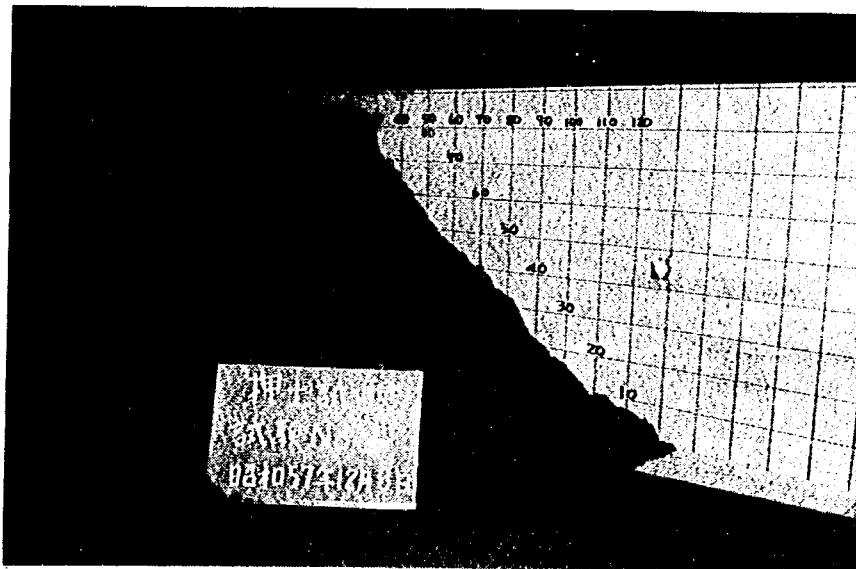
写真－3 砂質土の掘削押土実験



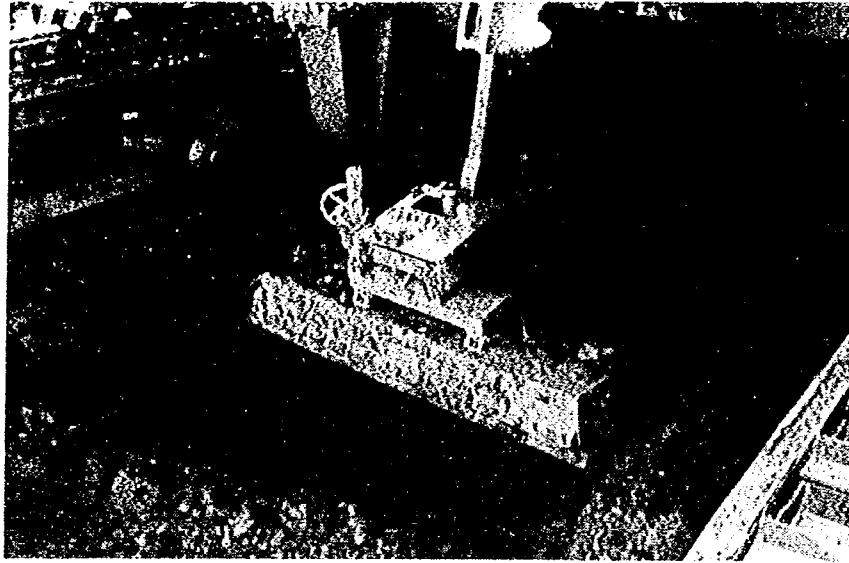
写真－4 砂質土の掘削押土実験（開始時）



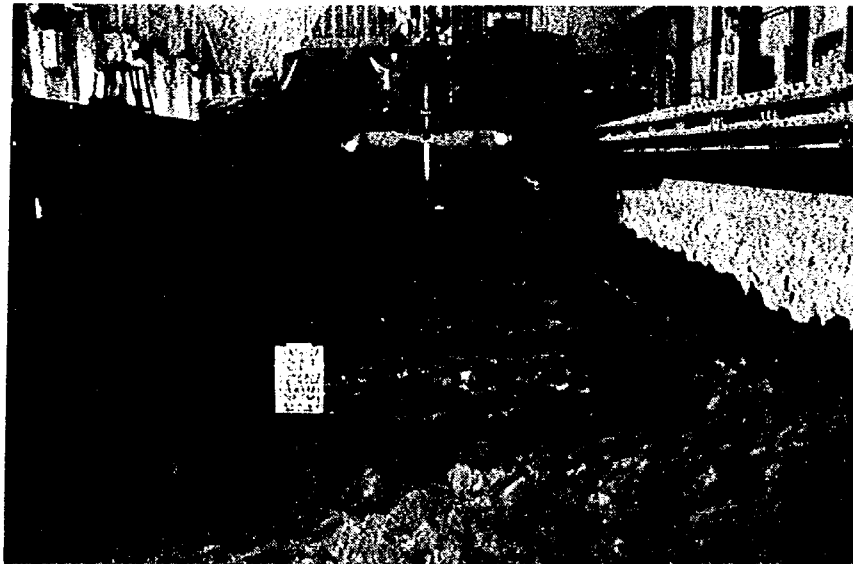
写真－5 砂質土の掘削押土実験（終了時）



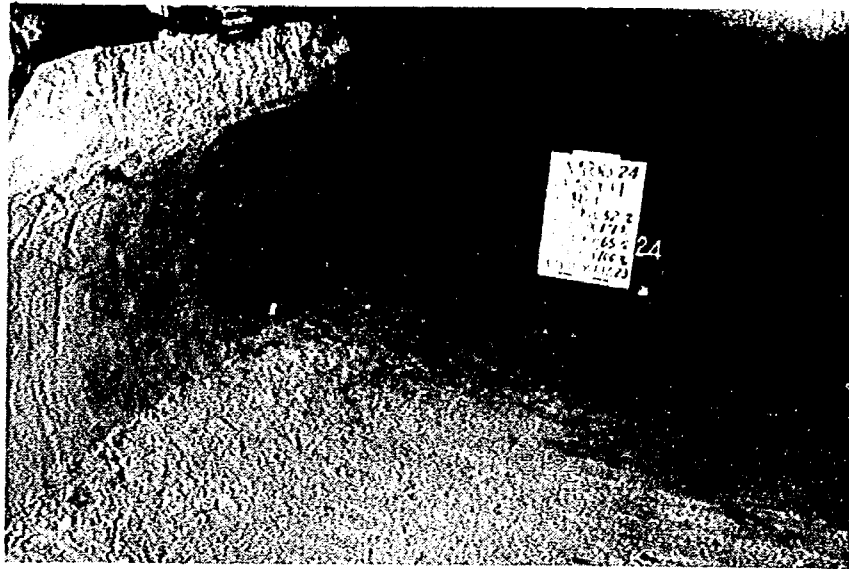
写真－6 砂質土の掘削押土実験
（掘削押土量の測定）



写真－7 実験用地盤の造成（粘土）



写真－8 粘土の掘削押土実験



写真－9 粘土の掘削押土実験（開始時）



写真－10 粘土の掘削押土実験（終了時）

付 属 資 料

1. N_r , N_c , N_q , N_a , m/Z の計算図表	35
2. 砂質土のリングせん断試験結果	44
3. 粘土の一面せん断試験結果	45
4. 砂質土の掘削押土体積測定結果	46
5. 砂質土の堆積角測定結果	61

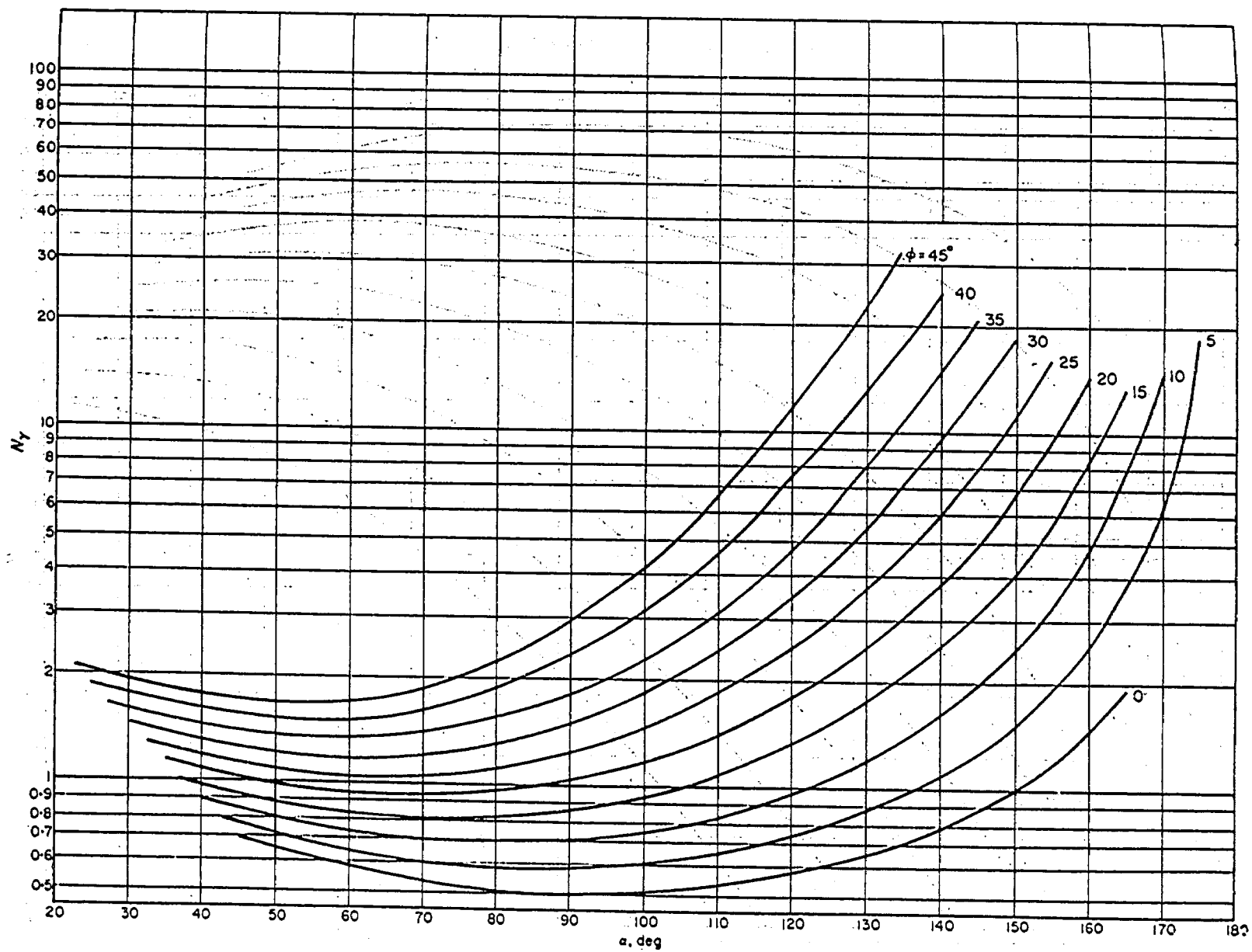


Fig. 1. Relationship between N_γ and α when $\delta = 0$

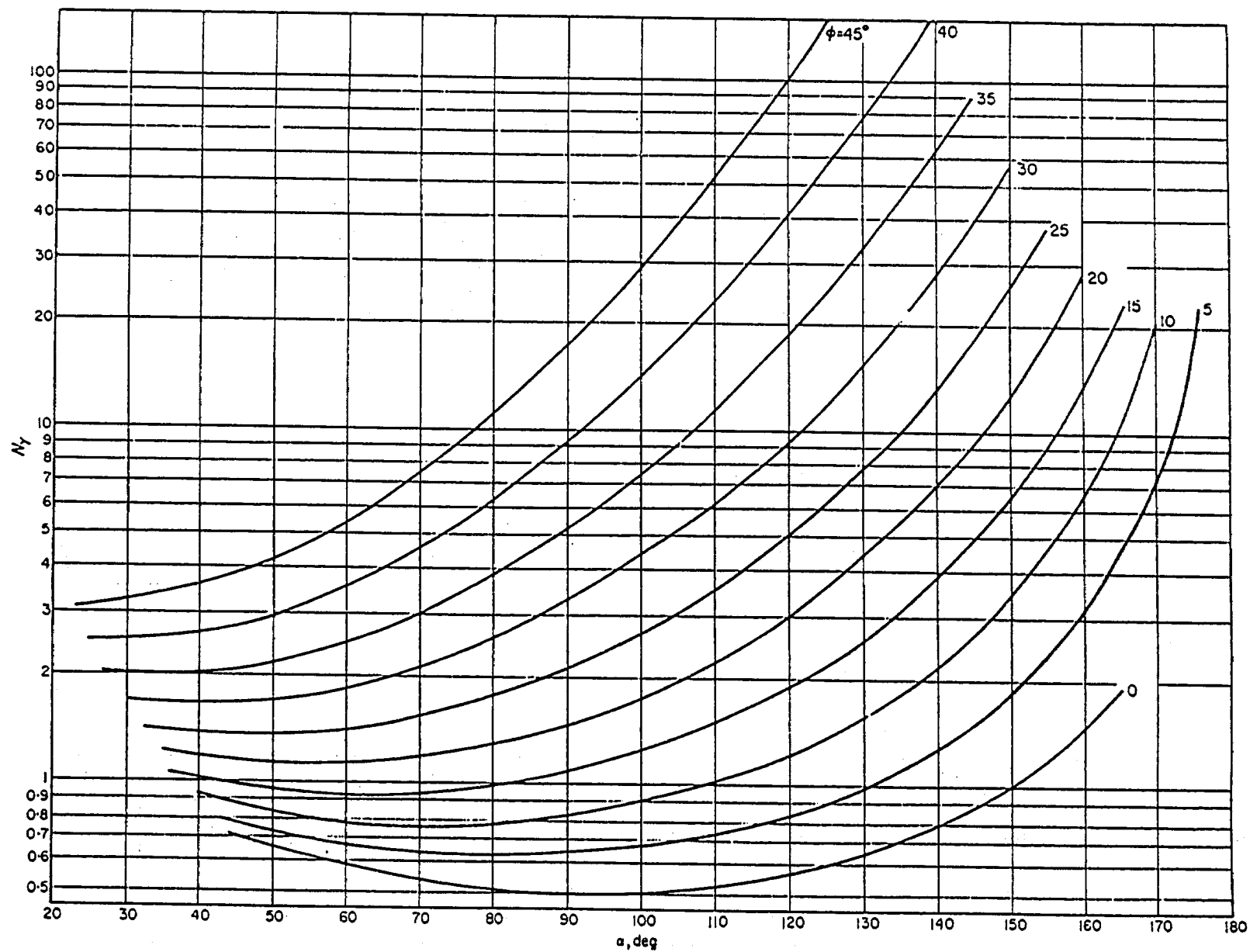


Fig 2. Relationship between N_γ and α when $\delta = \varphi$

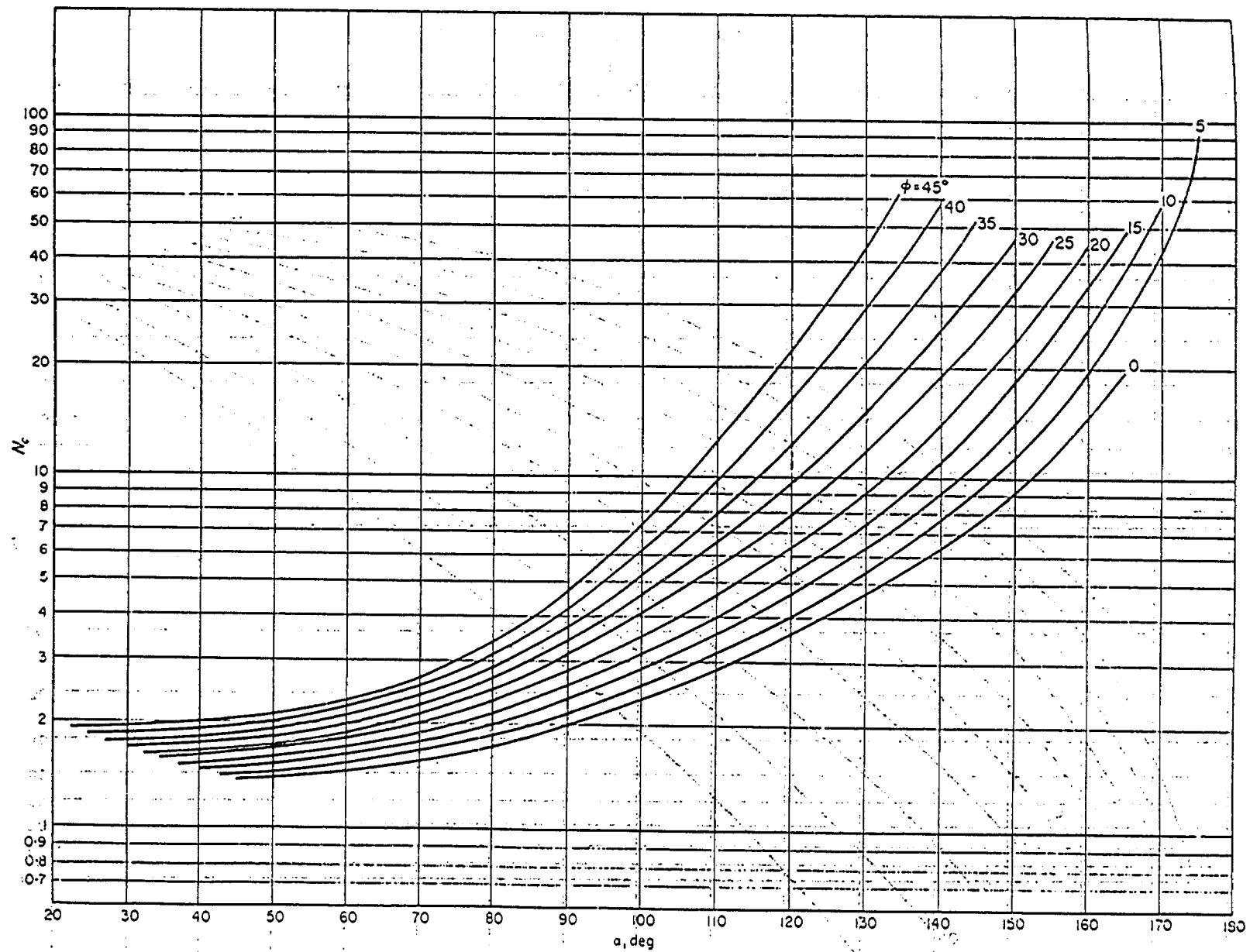


Fig. 3. Relationship between N_c and a when $\delta = 0$

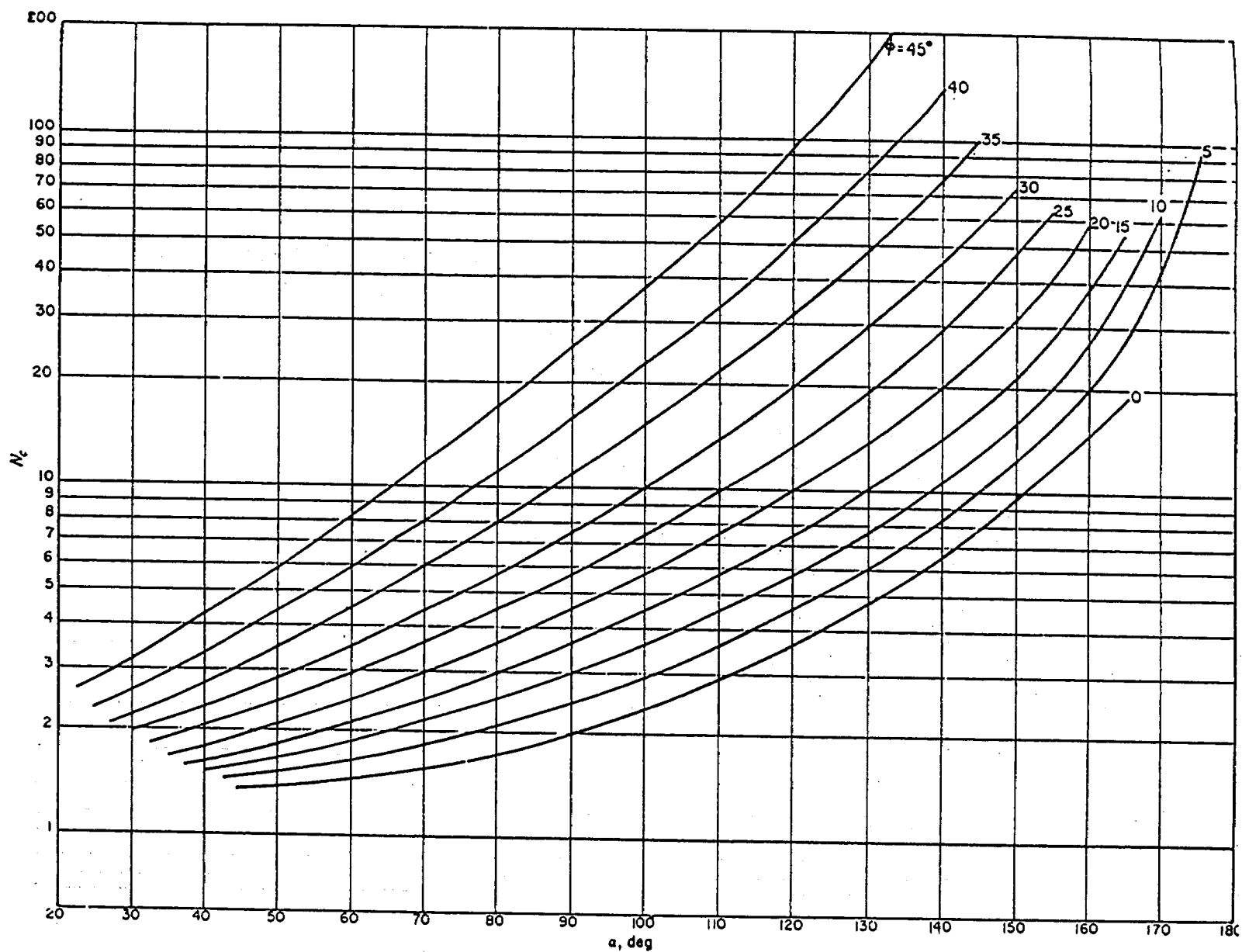


Fig 4. Relationship between N_c and a when $\delta = \phi$

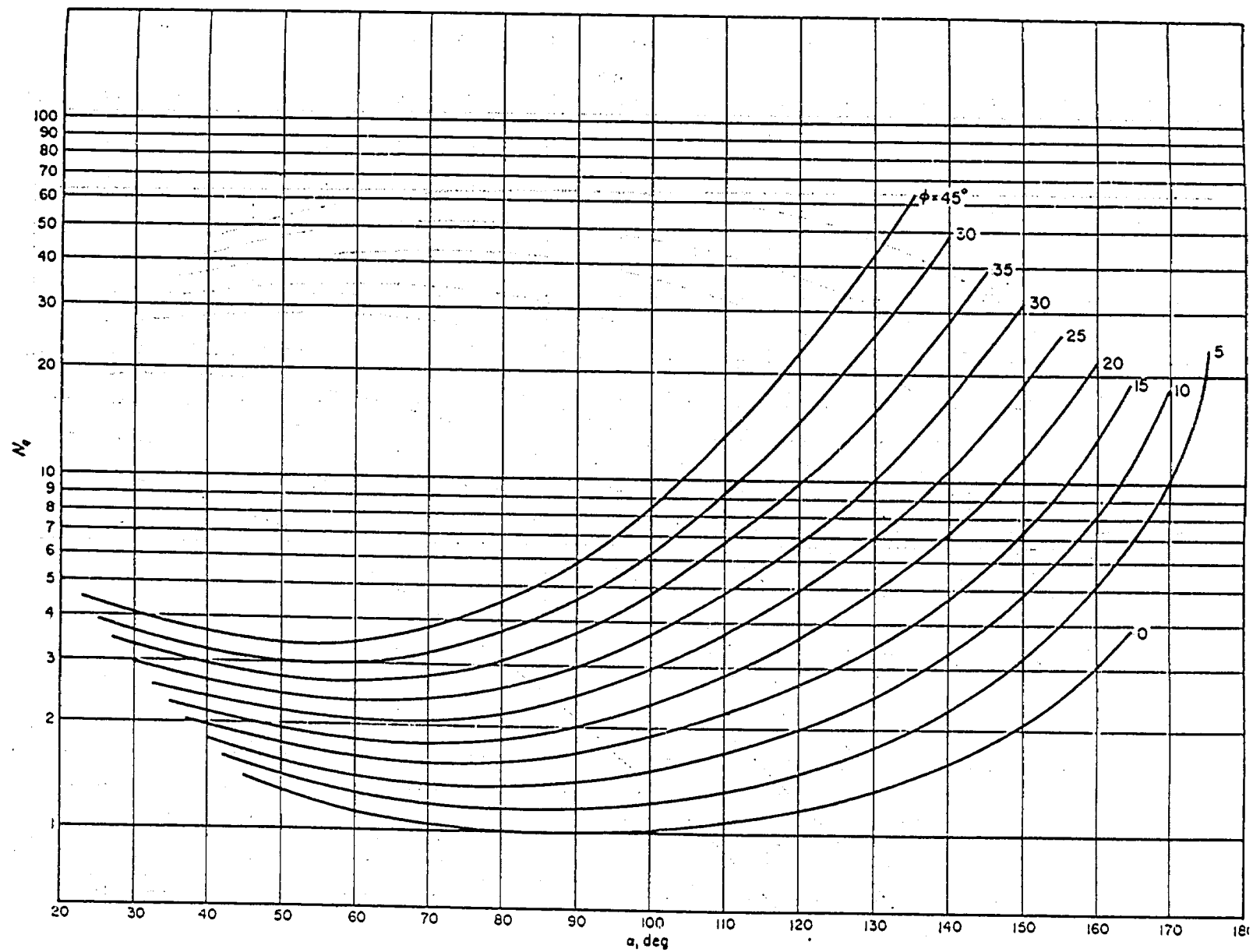


Fig 5. Relationship between N_q and α when $\delta = 0$

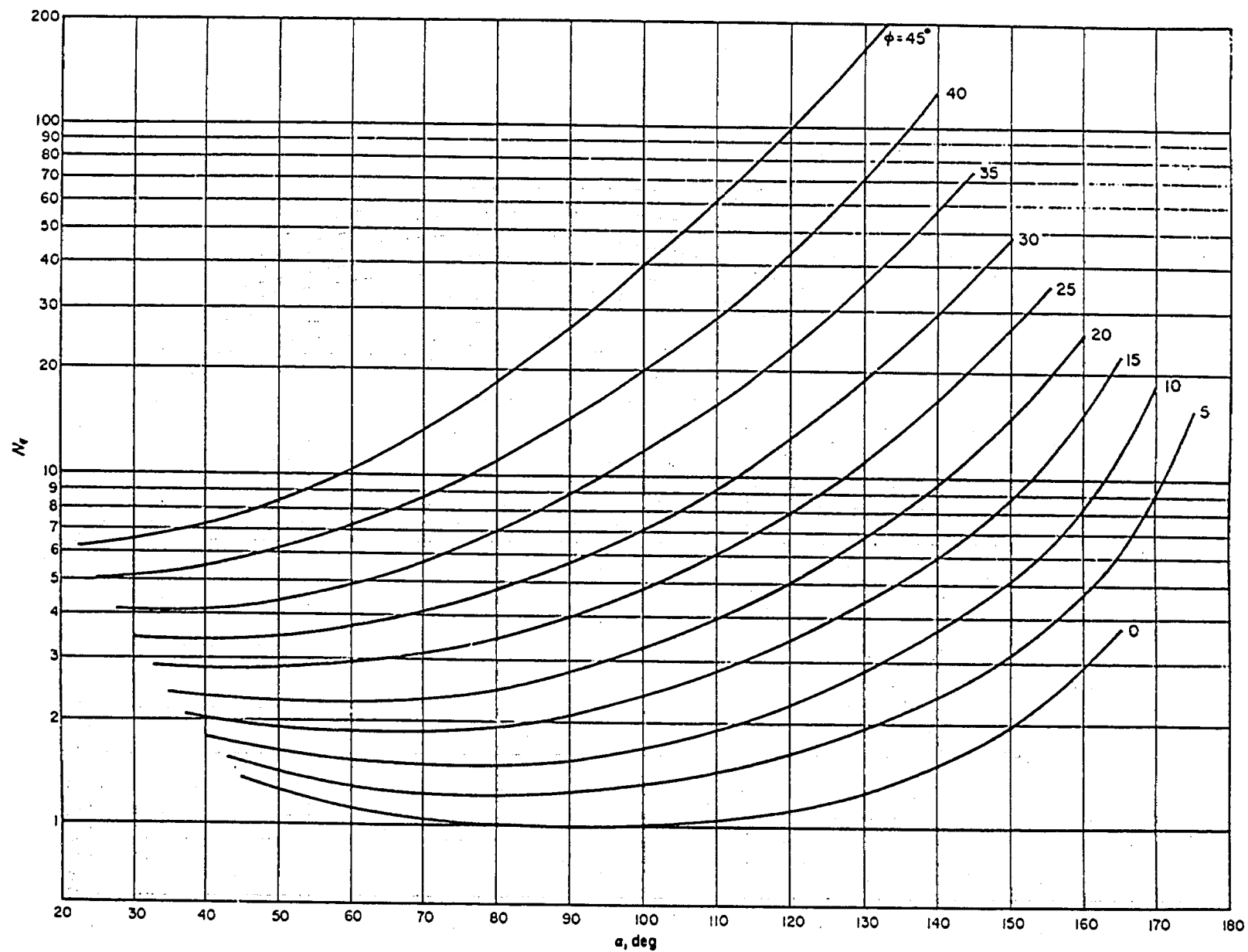


Fig 6. Relationship between Nq and α when $\delta = \phi$

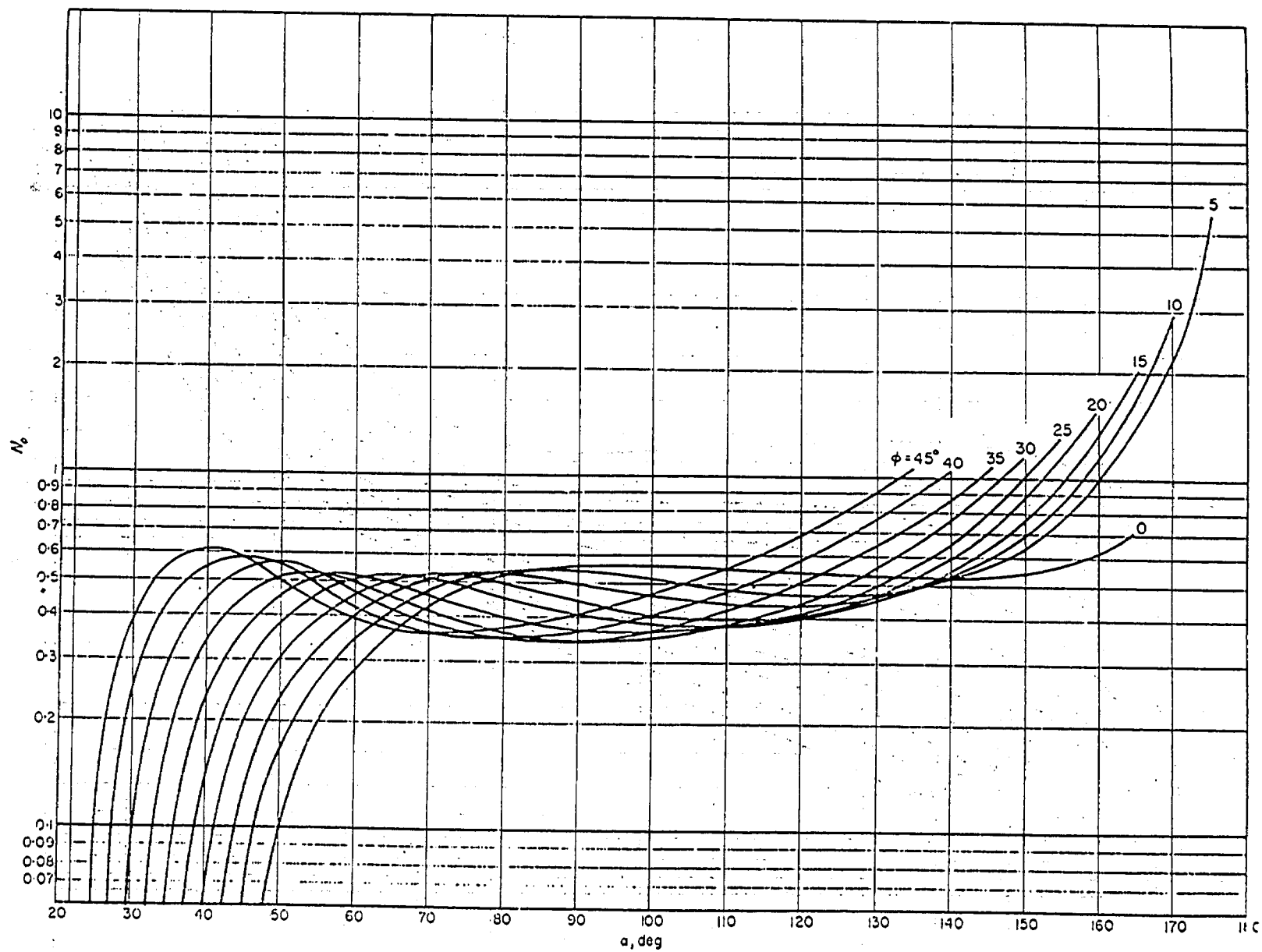


Fig 7. Relationship between N_a and α when $\delta = \phi$

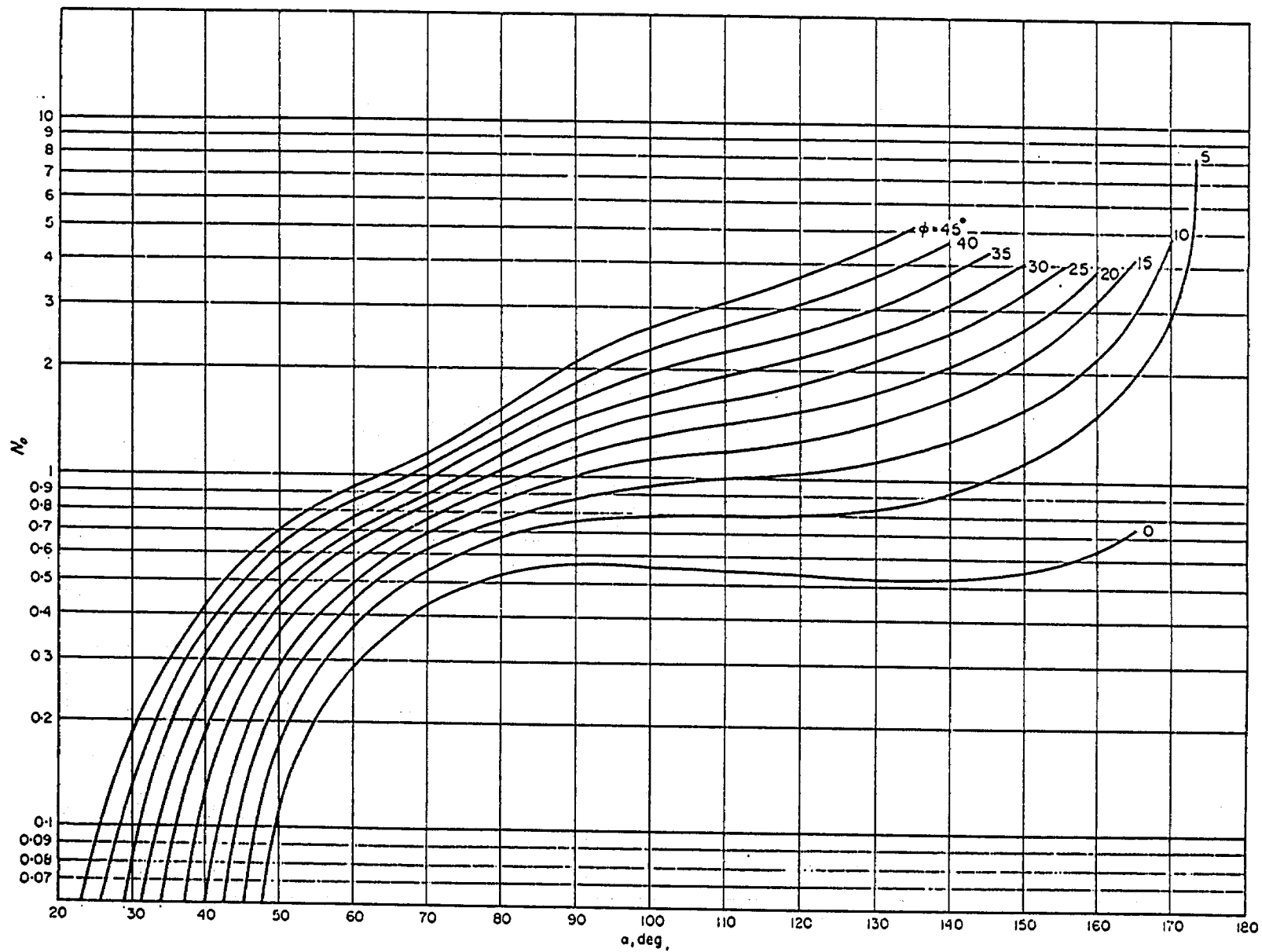


Fig 8. Relationship between N_a and a when $\delta = 0$

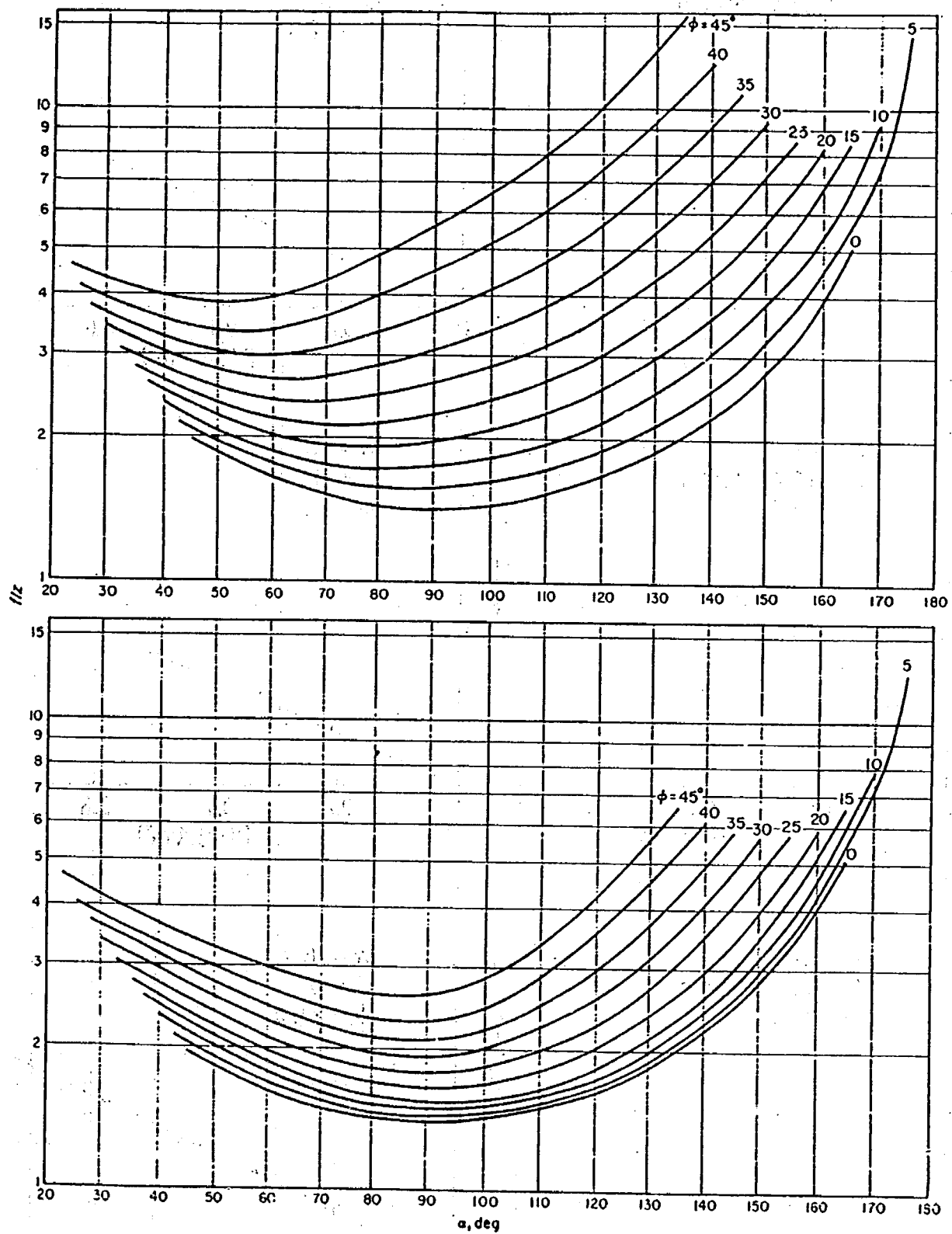
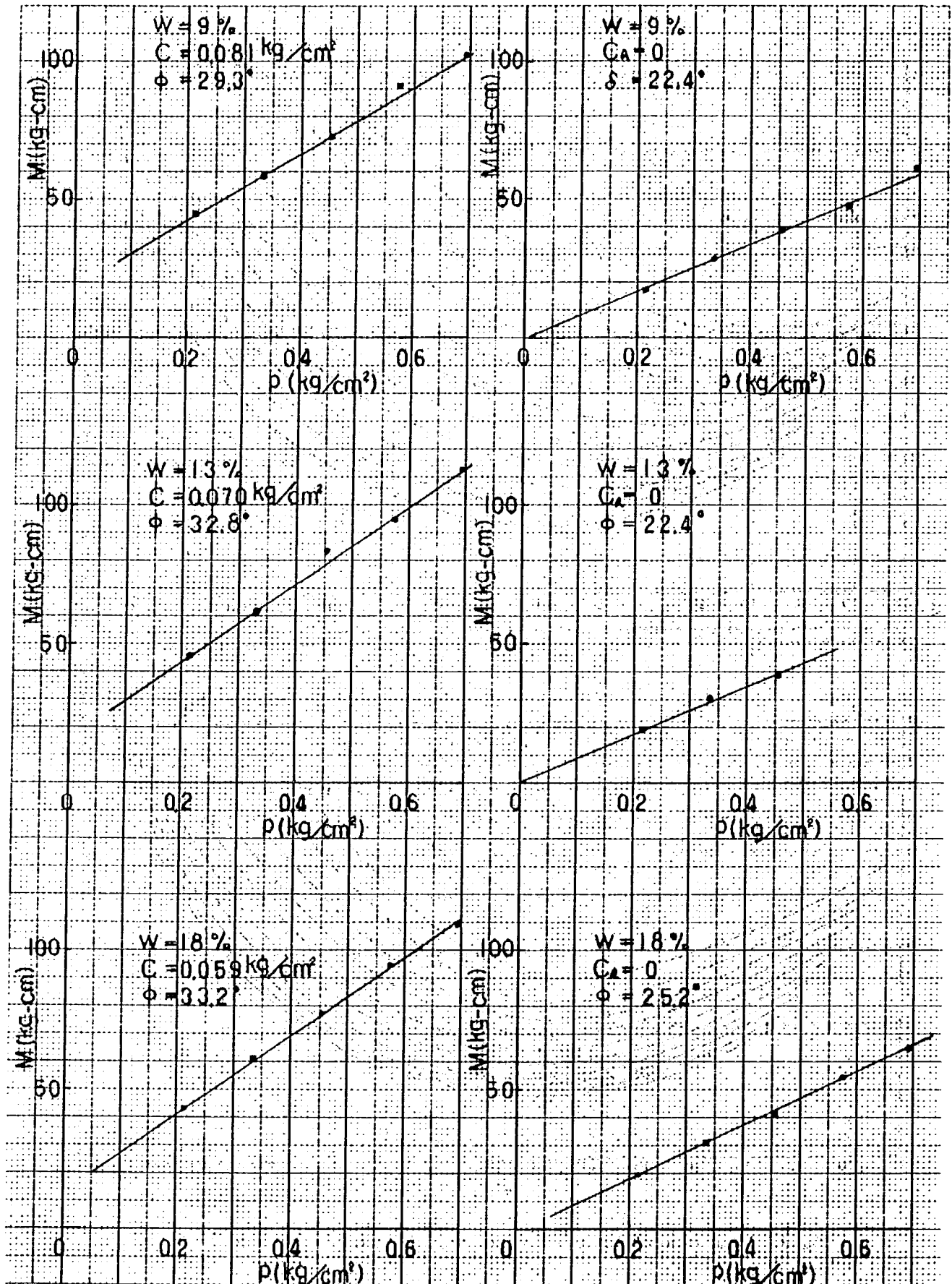
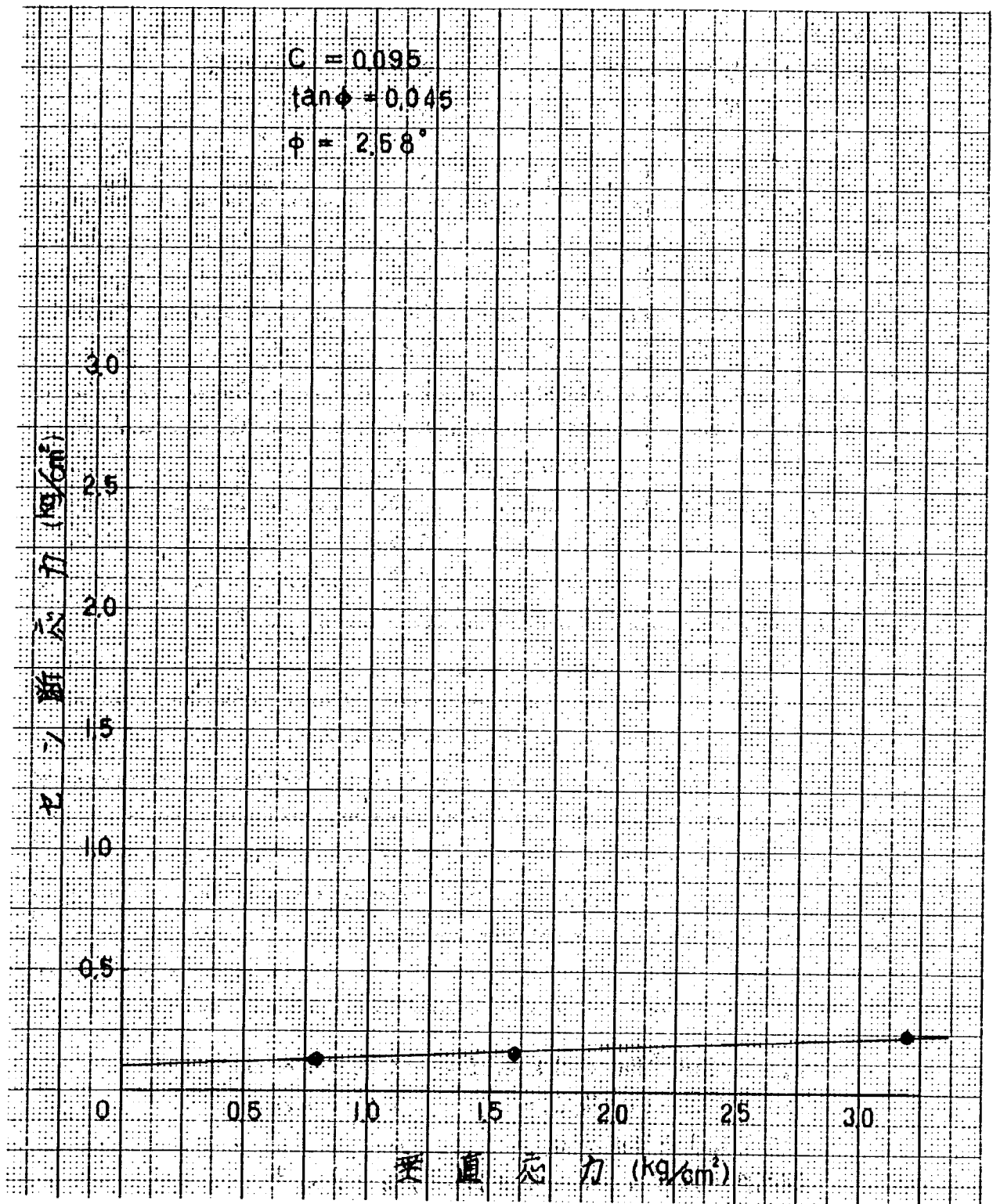


Fig 9. Mean ratio of rupture distance to depth when $\delta = \phi$ (top) and $\delta = 0$

砂質土のリングせん断試験結果



粘土の一面せん断試験結果



試験温度 20℃
 試験速度 0.1mm/min

掘削押土体積測定結果

試験番号： /

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 9.21%

掘削深さ； 5.0 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	4.8	7.2	8.0	7.5	6.8
10	5.0	7.3	8.3	7.5	5.8
20	5.3	6.8	7.8	7.0	5.2
30	4.5	6.0	7.0	6.2	4.8
40	3.5	5.3	5.8	5.0	4.0
50	3.0	4.4	4.8	4.0	3.0
60	2.5	3.4	3.8	3.7	2.5
70	2.0	2.4	3.0	2.5	1.6
80	1.0	1.5	2.5	1.7	1
90	0	1.5	1.7	1.2	0
100		1	1	1	
110		0	0	3	
120				0	
130					
140					
150					
160					
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2 H_0 + \frac{1}{3} H_n) * 10 * 243/5 = 952.300 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 24.000$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 41.000$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1.017 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 1.418 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.374 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 2

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 9.28%

掘削深さ； 10.0 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	50	60	75	65	55
10	55	73	80	80	60
20	52	72	85	80	57
30	55	70	85	78	58
40	50	63	80	70	50
50	46	56	75	67	48
60	39	50	65	55	42
70	30	43	53	46	33
80	27	39	41	41	27
90	21	31	40	33	22
100	17	25	33	26	15
110	10	19	24	20	10
120	6	15	19	12	5
130	3	9	11	7	0
140	0	4	16	3	
150		0	3	0	
160			0		
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \frac{1}{3}H_n) * 10 * 243/5 = 1,406,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 106,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 52,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1,564 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 2,301 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.471 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 3

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 9.33%

掘削深さ； 15.0 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.0	7.5	9.5	7.5	6.7
10	6.0	7.8	9.6	8.3	6.7
20	6.0	7.7	9.8	8.3	6.5
30	6.4	7.7	9.8	8.3	6.4
40	6.0	7.7	9.5	8.0	6.4
50	5.7	7.6	9.3	7.5	5.8
60	5.5	7.4	8.6	6.0	5.3
70	4.7	6.5	7.8	5.8	5.3
80	4.3	5.3	6.9	5.5	4.4
90	2.8	5.0	6.0	5.0	3.4
100	2.2	4.2	5.2	4.0	2.3
110	1.6	3.9	4.5	3.3	2.0
120	1.0	2.9	4.0	2.5	1.5
130	4	2.0	3.3	2.0	1.0
140	0	1.6	2.4	1.1	1
150		1	1.8	6	3
160		2	1.0	0	0
170		0	3		
180			0		
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 1,868,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 132,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 67,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 2,067,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 3,364 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.632 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 4

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 13.83%

掘削深さ； 5.0 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.3	7.0	6.8	6.8	5.7
10	6.6	7.9	7.2	7.0	5.3
20	5.1	6.7	7.2	7.2	4.4
30	4.3	6.6	7.1	6.5	4.0
40	3.8	5.9	6.4	5.4	3.4
50	3.4	4.4	5.0	4.3	2.5
60	2.5	3.5	3.5	3.4	2.0
70	1.8	2.7	2.8	2.6	1.6
80	1.1	1.9	2.2	2.3	1.0
90	.8	1.6	1.7	1.5	.8
100	.0	1.0	1.2	1.1	.3
110		.7	.8	.6	.0
120		.0	.0	.0	
130					
140					
150					
160					
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \frac{1}{3}H_n) * 10 * 243/5 = 967,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 23,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 41,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1,033 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 1,300 \text{ Kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.258 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号: 5

試験条件: 土質: 砂質土、

含水比: 12.80%

掘削深さ: 10.0 cm、

掘削角度: 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.0	7.5	9.5	8.2	5.8
10	6.7	7.7	9.1	8.4	6.8
20	6.5	7.8	9.3	8.5	6.8
30	5.7	7.4	9.3	8.6	5.7
40	5.5	7.2	8.7	7.5	5.7
50	5.0	6.6	8.2	6.8	5.5
60	4.6	5.7	7.5	6.1	4.5
70	3.9	5.0	6.4	5.3	3.9
80	3.5	4.3	5.5	4.6	3.0
90	2.9	3.7	4.5	3.7	2.5
100	2.2	2.7	4.0	2.8	1.9
110	2.0	1.9	2.7	2.5	1.3
120	1.6	1.1	1.9	1.3	1.0
130	5	7	1.4	1.1	4
140	0	5	1.0	7	0
150		0	5	3	
160			0	0	
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 1,594,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 71,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 52,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1,717 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 2,584 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.505 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 6

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 12.65%

掘削深さ；16.1 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	57	75	93	80	65
10	65	80	94	85	72
20	64	83	95	84	73
30	58	91	96	86	70
40	56	92	97	86	68
50	56	90	90	85	67
60	50	84	81	77	60
70	46	75	75	69	53
80	39	65	67	65	44
90	31	58	61	53	38
100	25	49	55	49	29
110	21	40	45	40	26
120	18	37	39	35	20
130	12	29	34	29	15
140	10	25	27	25	7
150	5	19	21	18	4
160	0	15	17	11	2
170		10	15	7	0
180		6	10	3	
190		3	3	0	
200		0	0		

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 2,075,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 135,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 61,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 2.271 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 3,710 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.634 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 7

試験条件： 土質；砂質土、 含水比； 13.17%
掘削深さ； 5.5 cm、 掘削角度； 46°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	5.3	6.5	7.4	7.0	6.5
10	4.6	6.2	7.5	7.0	6.3
20	4.2	5.7	7.1	6.7	5.1
30	3.7	5.5	6.7	6.0	4.3
40	3.5	4.5	6.5	5.8	4.0
50	3.0	4.0	5.5	5.0	3.4
60	2.6	3.6	4.5	3.8	3.0
70	2.0	3.0	3.8	3.3	2.5
80	2.0	2.6	3.0	3.0	2.0
90	1.6	2.2	2.5	2.1	1.5
100	1.0	1.4	1.9	1.6	1.0
110	7	9	1.2	1.1	6
120	4	4	8	5	0
130	0	0	3	0	
140			0		
150					
160					
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \frac{1}{3}H_n) * 10 * 243/5 = 1,053,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 35,000$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = -17,000$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1,071,000$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 1,570 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.485 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 8

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 12.80 %

掘削深さ； 10.1 cm、

掘削角度； 46°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.3	7.8	8.9	7.8	6.0
10	6.3	7.7	9.1	8.4	6.0
20	6.3	8.2	9.4	8.3	5.3
30	6.0	7.9	9.2	8.0	5.2
40	5.6	7.4	8.9	7.2	5.3
50	5.1	6.7	7.9	6.7	4.6
60	4.7	5.8	6.6	5.8	4.1
70	4.2	5.1	6.0	5.2	3.3
80	3.0	4.5	5.5	4.6	2.7
90	2.0	3.8	5.0	3.8	2.2
100	1.5	2.8	4.3	2.8	1.5
110	.8	2.0	3.4	2.0	.9
120	.3	1.2	2.2	1.3	.5
130	0	.5	1.0	.7	0
140		0	.8	.2	
150			.2	0	
160			0		
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \frac{1}{3}H_n) * 10 * 243/5 = 1,541,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 66,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 5,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1,612 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 2,368 \text{ Kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.469 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 9

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 13.61%

掘削深さ； 15.0 cm、

掘削角度； 46°

(単位 cm)

X \ Y	Y	-100	-50	0	50	100
0		58	80	85	80	62
10		60	85	102	84	70
20		64	91	102	90	70
30		62	92	115	90	68
40		62	91	118	85	68
50		62	84	117	83	65
60		58	81	96	75	56
70		49	73	86	68	49
80		40	69	79	58	38
90		33	60	60	49	33
100		28	48	50	39	27
110		19	38	43	30	25
120		12	27	32	26	18
130		5	17	21	18	12
140		3	10	15	11	5
150		0	2	8	6	1
160			0	4	3	0
170				0	0	
180						
190						
200						

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 1,981,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 122,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 22,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 2,125 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 3,201 \text{ Kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.506 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 10

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 13.35%

掘削深さ； 5.0 cm、

掘削角度； 65°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	62	70	70	68	40
10	59	77	74	72	25
20	57	70	72	68	48
30	48	58	65	55	38
40	37	49	53	45	28
50	30	38	45	35	20
60	23	30	37	30	17
70	19	29	31	27	11
80	12	24	25	20	10
90	8	19	18	15	5
100	2	10	12	4	0
110	0	5	5	3	
120		0	0	0	
130					
140					
150					
160					
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 920,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 32,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 153,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1.105 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 1.558 \text{ Kgf}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.410 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 1 / 1

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 13.10 %

掘削深さ； 10.5 cm、

掘削角度； 65°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.0	7.0	7.0	7.0	6.0
10	6.0	7.5	8.3	7.0	6.2
20	6.0	8.0	8.7	7.8	6.5
30	6.0	8.2	8.8	8.0	6.7
40	5.6	7.9	8.7	7.9	6.2
50	5.0	7.1	7.9	7.7	6.0
60	4.6	6.5	7.4	7.0	4.9
70	3.9	5.9	6.8	6.0	4.3
80	3.6	5.1	6.3	5.3	3.6
90	2.1	4.5	5.5	4.7	2.8
100	3.5	3.7	5.0	3.9	2.4
110	1.8	2.9	3.7	3.0	2.0
120	1.0	2.2	3.0	2.3	1.1
130	.8	1.9	2.6	1.8	.8
140	.3	1.4	1.6	1.4	.3
150	0	.6	1.0	.7	0
160		.3	.5	.5	
170		0	0	0	
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \frac{\pi}{4} H_0) * 10 * 243/5 = 1,725,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 96,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 151,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1,972 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 3,073 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.558 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 12

試験条件： 土質：砂質土、

含水比： 12.74 %

掘削深さ： 15.1 cm、

掘削角度： 6.5°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.3	8.5	9.3	9.0	6.2
10	6.8	9.0	9.7	9.2	8.5
20	6.7	9.3	10.0	9.2	6.1
30	6.7	9.3	9.6	9.0	6.3
40	6.5	9.1	9.6	8.5	6.3
50	6.3	8.9	9.6	8.3	5.7
60	5.8	8.2	9.5	7.7	5.3
70	5.2	7.6	9.0	7.1	5.1
80	4.0	7.1	8.4	6.3	4.5
90	3.3	6.3	7.0	5.8	3.8
100	2.3	5.5	6.5	5.1	3.2
110	1.7	4.9	5.8	4.8	2.7
120	1.3	4.3	5.3	3.8	1.9
130	0.5	3.7	4.1	3.1	1.2
140	0	2.9	3.4	2.7	1.0
150		2.2	2.7	2.3	9
160		1.4	1.7	1.3	0
170		1.1	7	5	
180		3	0	0	
190		0			
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 2,165,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 149,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 147,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 2,416 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 3,995 \text{ Ky}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.623 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 13

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 19.42%

掘削深さ； 5.2 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	6.2	7.1	7.4	6.9	6.5
10	6.2	7.7	7.8	7.8	5.8
20	6.0	7.7	7.8	7.4	5.3
30	5.0	6.3	7.5	6.3	5.1
40	4.1	5.4	6.5	5.3	4.4
50	3.4	4.4	5.4	4.5	3.2
60	3.2	3.8	4.0	3.7	2.6
70	2.5	2.9	3.6	2.9	2.1
80	2.1	2.1	2.8	2.4	1.5
90	9	1.9	2.0	2.2	1.2
100	4	1.3	1.0	1.2	5
110	0	1.0	5	7	0
120		4	0	2	
130		0		0	
140					
150					
160					
170					
180					
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 1.074,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 42,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 41,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1.157 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 2,011 \text{ Kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.738 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 14

試験条件： 土質；砂質土、

含水比； 17.99%

掘削深さ； 11.0 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	57	57	61	61	57
10	56	78	75	78	64
20	57	81	83	77	60
30	58	74	86	83	60
40	53	73	85	84	50
50	46	66	83	73	45
60	41	55	77	67	38
70	39	48	62	54	30
80	30	39	45	41	29
90	26	33	41	35	23
100	22	29	39	32	19
110	19	27	32	28	16
120	13	13	28	24	10
130	11	10	18	20	9
140	7	8	10	15	6
150	0	4	5	10	0
160		0	2	7	
170			0	4	
180				0	
190					
200					

$$Q_0 = (1/2H_0 + \sum_{i=1}^n H_n) * 10 * 243/5 = 1.568,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 164,000 "$$

$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 52,000 "$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 1.784 \text{ m}^3$$

$$\text{掘削押土重量 } W = 3,145 \text{ Kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.763 \text{ t/m}^3$$

掘削押土体積測定結果

試験番号： 15

試験条件： 土質；砂質土、

含水比： 17.30 %

掘削深さ： 16.0 cm、

掘削角度； 55°

(単位 cm)

X \ Y	-100	-50	0	50	100
0	51	79	87	69	54
10	55	79	93	78	61
20	61	74	98	88	62
30	63	74	97	87	67
40	58	67	96	93	66
50	58	64	94	84	62
60	56	62	83	78	60
70	50	62	79	73	58
80	40	57	77	65	44
90	32	52	70	62	37
100	27	48	60	55	28
110	20	43	52	50	19
120	19	34	43	41	15
130	11	24	33	32	10
140	5	15	25	25	10
150	4	9	19	19	0
160	0	4	11	12	
170		0	5	7	
180			0	2	
190				0	
200					

$$Q_0 = (1/2 H_0 + \frac{1}{2} H_n) * 10 * 243/5 = 1,984,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{ウィンドローの体積 } Q_1 = 251,000 \text{ cm}^3$$

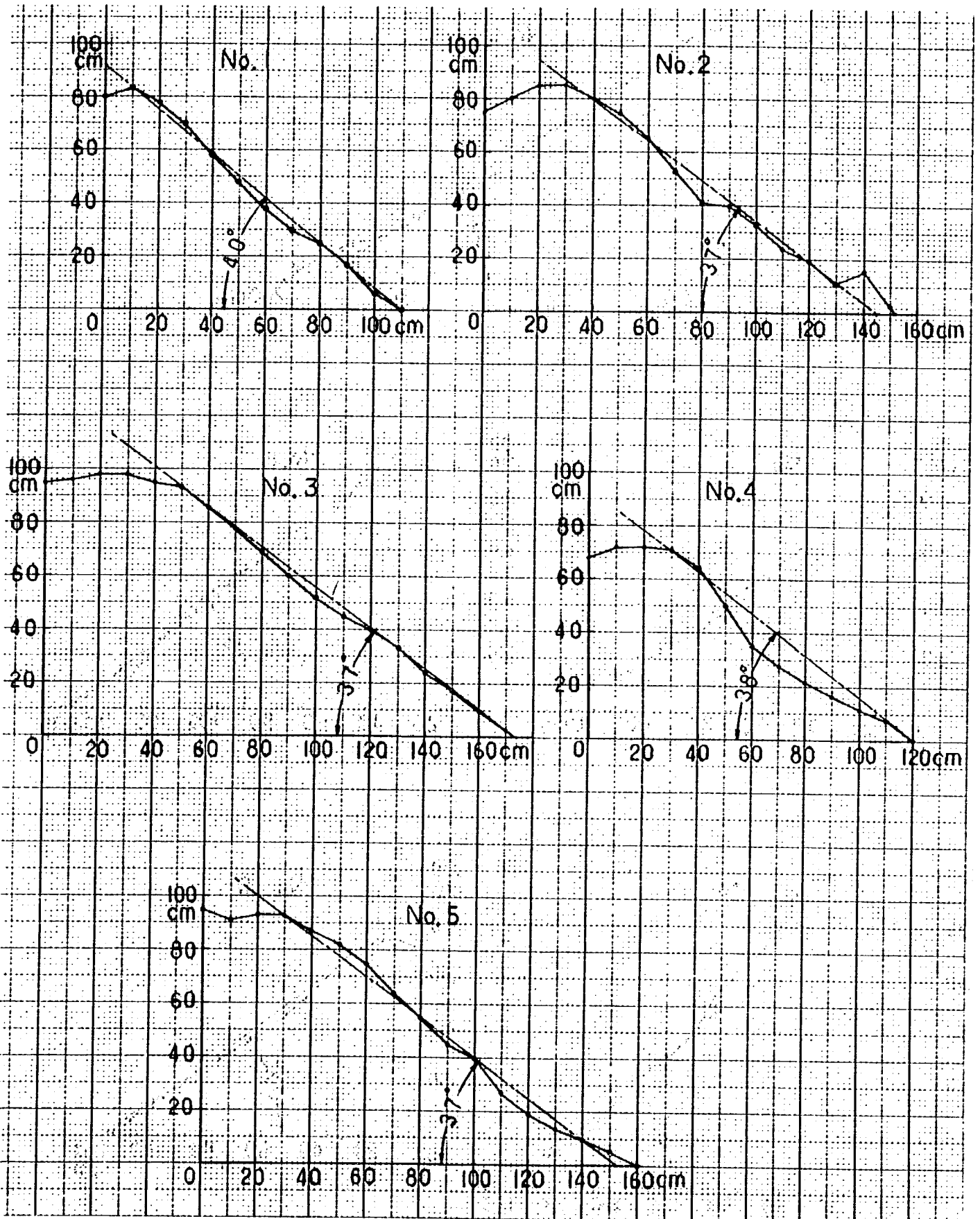
$$\text{土工板による補正量 } Q_2 = 61,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{掘削押土体積 } Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 2,296 \text{ m}^3$$

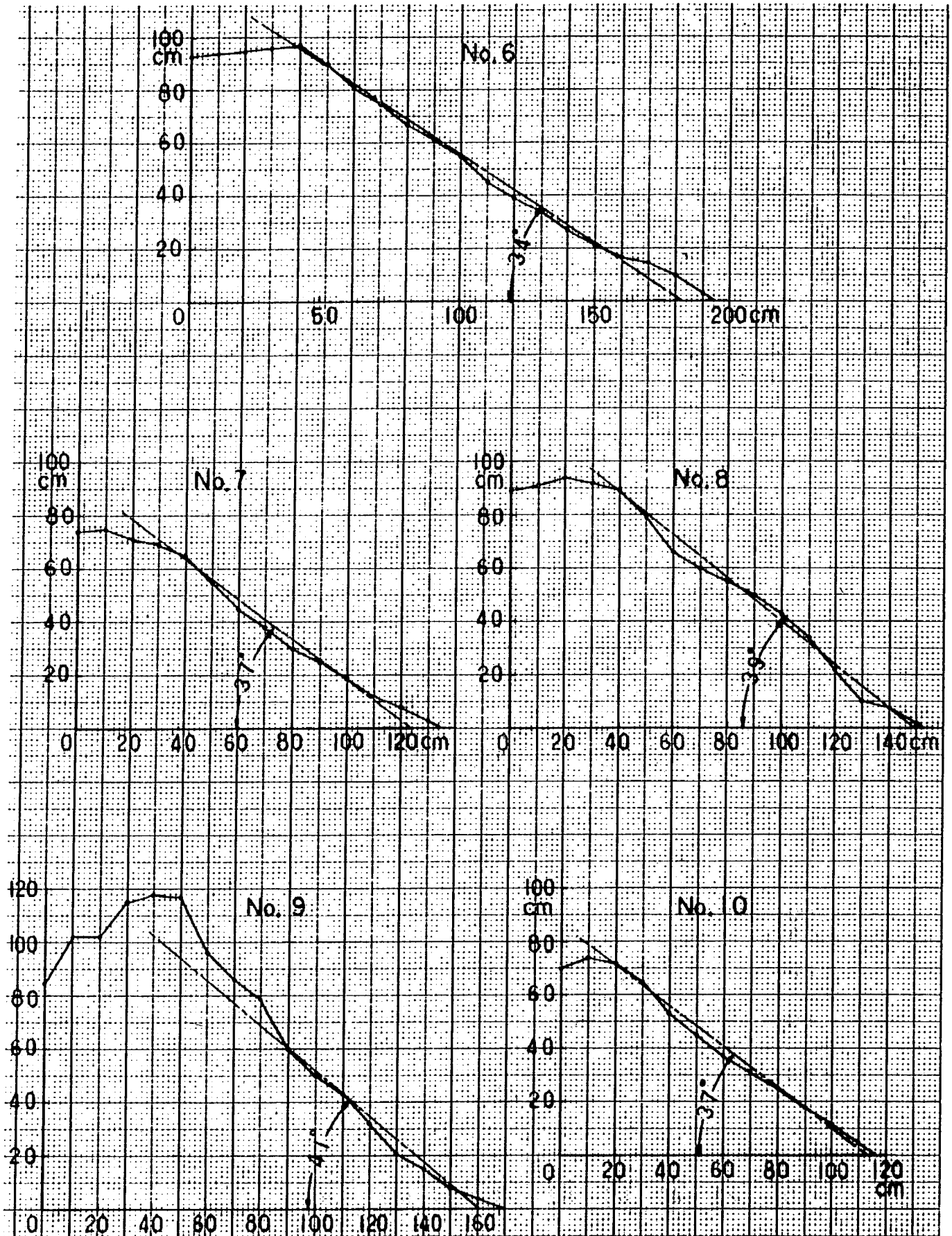
$$\text{掘削押土重量 } W = 4,176 \text{ kg}$$

$$\text{押土の単位体積当り重量 } \gamma = 1.819 \text{ t/m}^3$$

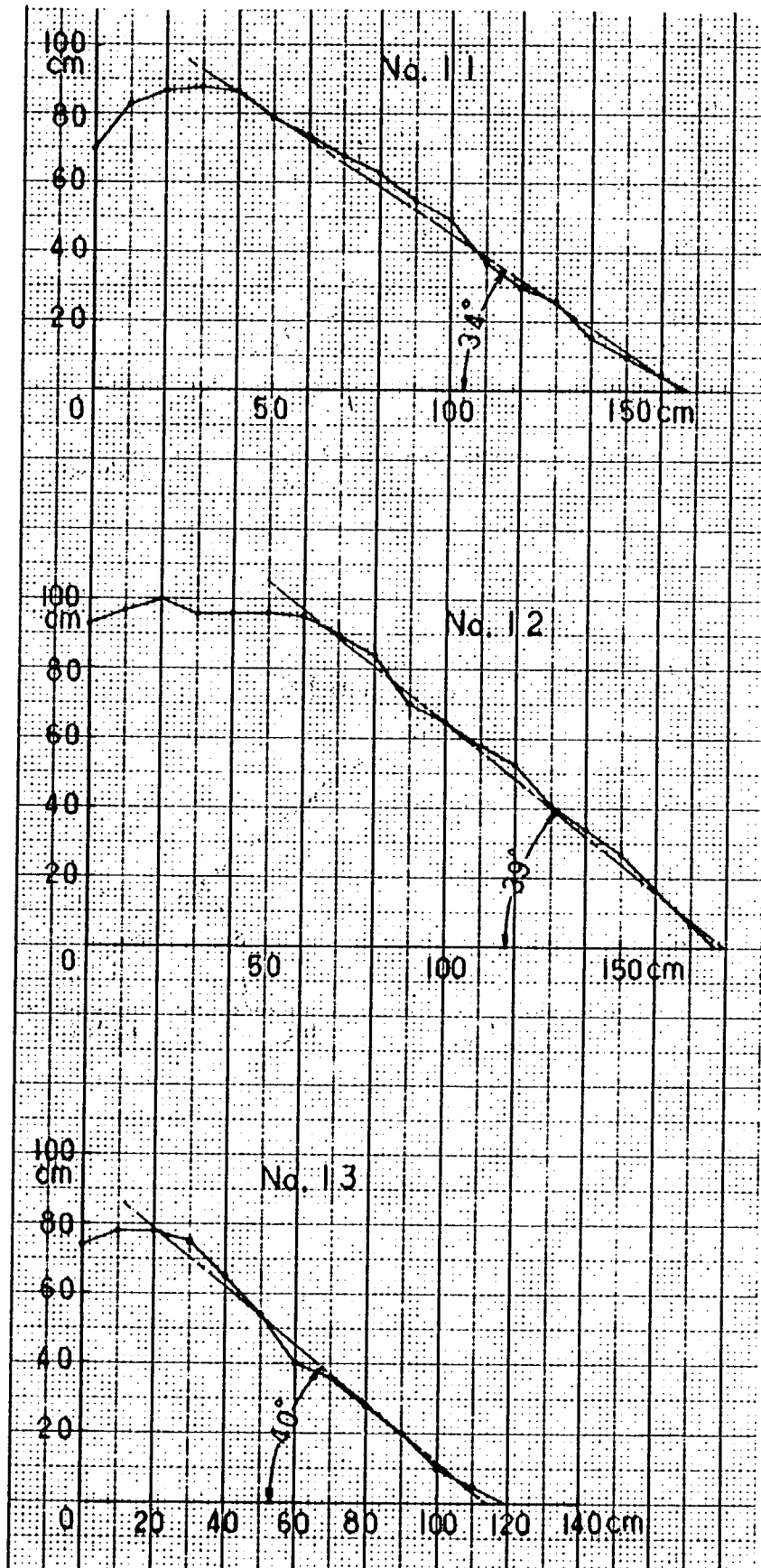
砂質土の堆積角測定結果



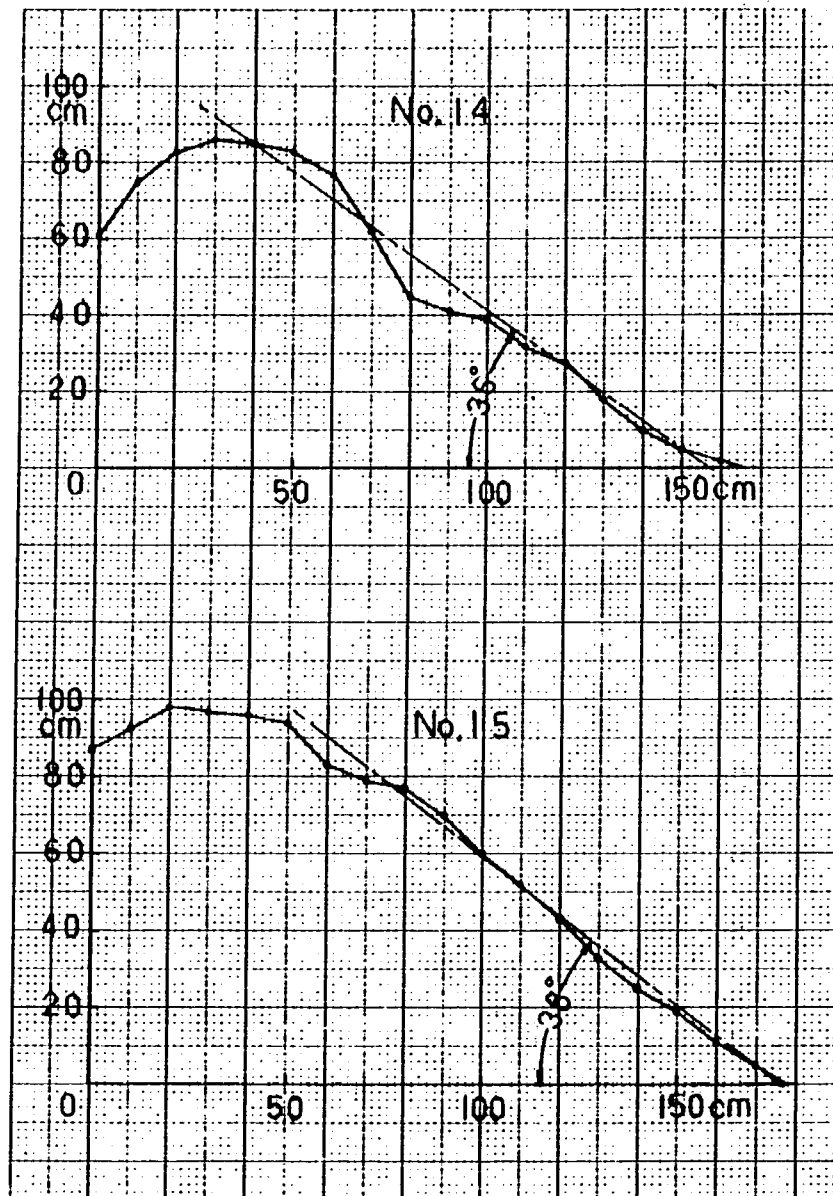
砂質土の堆積角測定結果



砂質土の堆積角測定結果



砂質土の堆積角測定結果



ブルドーザの掘削押土能力に
関する試験調査

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2298号
昭和61年2月(1986)
機械研究室 樋下敏雄
江本 平
樋野親俊
持丸修一

要 旨 本調査は、ブルドーザによる掘削押土作業におけるブレード（土工板）に作用する掘削押土抵抗に影響を及ぼす要因およびブレード容量、最適押土条件などを把握するために実大実験を行い、掘削押土抵抗並びに土工量を測定するとともに、理論式による計算結果との比較を行った。その結果、砂質土に関する限り、適当な土質定数を用いればその掘削押土抵抗をほぼ推定できることが確認できた。

キーワード：建設機械、ブレード、土工、掘削、掘削押土抵抗、ブルドーザ

郵便はがき

は40円
切手を
貼って
下さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町
大字旭一番地
建設省土木研究所
機械研究室 行

No. 147

No. 147

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2298号 部

ブルドーザの掘削押土能力に
関する試験調査

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印