

論 說 報 告

第 24 卷 第 1 號 昭和 18 年 1 月

砂の剪断試験に於ける時間の影響

准 員 神 谷 貞 吉*

要 旨 鉄道省標準型土質剪断抵抗試験機⁽¹⁾にて標準砂の剪断試験を行ひ、剪断力載荷速度を種々変化した場合の摩擦係数に及ぼす影響、載荷速度と移動速度との関係、其の他二三の事項について観測し考察したものである。

1. 緒 論

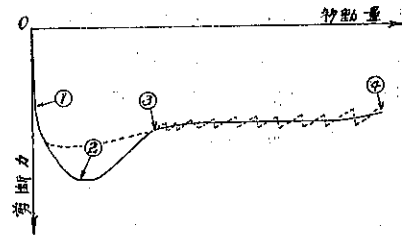
材料試験の結果によると、鋼が弾性限点を越へて可塑性状態に達すると、流れつゝ (flow) 変形する。⁽²⁾ 此の可塑性領域に於ける応力は変形の速さの函数であつて、⁽³⁾ 同じ歪に對する応力は変形の速さと共に増加するものである。荷重の増し方を速くするに従つて変形の増し方も速くなるとすれば、同じ歪に對しては荷重をかへる割合の速い程大なる応力が生ずるわけである。⁽⁴⁾

砂の剪断試験によつて、剪断力～移動量図を描かせて見ると、其の形は 図-1 の様になる。⁽⁵⁾

此の曲線 ① ② ③ ④ の形を見ると、あだかも鋼の応力～歪図と類似した形を示し、可塑変形を想像することが出来る。又實驗中流れの現象を認めることが出来る。

之等二つの事實から砂の剪断試験に於ても、其の剪断力を加へる速度 (此の論文では以後載荷速度と呼ぶ) を増せば、一定垂直荷重 (以後單に荷重と呼ぶ) のもとでは、必ず剪断強度が強くなるであらうと想像し實驗の結果之に該當する事實を得たのである。

図-1. 剪断力～移動量図



2. 實驗方法

(1) 剪断試験機 鉄道省標準型土質抵抗試験機 (三つ割箱式) を用ひた。其の構造は 図-2、剪断力を發生する機構は 図-3 の如くである。其の規模を記すと、

断面積 23 cm × 23 cm, 深さ 23 cm

最大荷重 (N) 1 000 kg, 最大剪断力 (F_0) 1 000 kg

今 図-2 の如く送りハンドルを矢の方向に廻転すれば、錘 W は O を中心として位置を高め、其の結果 a 點に水平推力が働き内部の砂に對しては剪断力 F として作用するのである。此に對して砂の内部では 2 面に剪断抵抗力 F が生ずるから、 $F_0 = 2F$ の關係がある。 F が増加するに従つて砂は此の關係を保ちつゝ剪断移動するから a は左に押し動かされる。此の場合送りを一定にしても、云ひかへればハンドルを一定速度で廻転しても、載荷速度及移動速度を一定に保つことは出来ない。此の事は 図-3 によつて次の様に説明される。

* 旅順工科大学講師 工学士

$$F_0 = W \tan \alpha \times \frac{l_2}{l_1}$$

送りを x とすれば $\tan \alpha = \frac{x}{\sqrt{l_1^2 - x^2}}$

C を一定速度 v で送ると、 t 時間後

$$x = vt$$

従つて $\tan \alpha = \frac{vt}{\sqrt{l_1^2 - (vt)^2}}$

即ち C を一定速度で移動しても $\tan \alpha$ は直線的には増加しない、従つて此の機械では剪断力を一定速度で増加させることは出来ない。

更に a が d だけ左へ移動すれば、C の移動距離は

$$vt = x + d$$

従つて $\tan \alpha = \frac{vt - d}{\sqrt{l_1^2 - (vt - d)^2}}$

即ち砂内部の剪断(移動)速度によつても左右される。併し送りを速くすれば剪断力も速くなり剪断移動も速くなるから、此の實驗では 図-2 の如く等速モーターを使用し第 1 輪, 第 2 輪として種々の直径を持つ數個の輪を組合せ次の如く廻転數を交へて實驗した。

$$n = 2.50, 6.50, 10.70, 18.70, \text{ Rev/min}$$

垂直荷重 N としては 50 kg, 100 kg, 150 kg, 200 kg, 250 kg, 300 kg を選んだ。

(2) 實驗材料 實驗用砂としては、セメント試験用標準砂を用ひ、其の含水量は秤量 1 kg, 感量 0.5 gr. の兩皿天秤を用ひ 200 gr. 試料に就て測定する事の出事ぬ程度のものであつた。

(3) 充填方法 砂の剪断試験に於ては、其の空隙率、充填方法の如何が非常に影響を持つことは既に實驗されてゐる。(6) 私の實驗では此の 2 條件を一様にするため、図-4 の如き器具を使用した。漏斗の先に円錐形の底を針金で釣り之を上部皿に取付けたスプリングまで連結したもので、スプリングを押せば砂が四散する仕掛である。此の器具にて少量づゝ填めた後一旦垂直荷重を 1000 kg までかけ 30 分間静止し後、荷重を取除き、再び所定の荷重をかけた。此の際讀取望遠鏡にて荷重一沈下曲線を求め内部の砂粒組織の異常を知る一助とした。此の如くにして得た空隙率は平均 53%, 沈下量は 1000 kg に對して 2 mm 程度であつたから先づ大体一様に充填し得たと思ふ。

3. 實驗結果

剪断試験中記録したものは剪断力, 移動量, 時間, 廻転數である。前二者は機械に取付けてある自記装置によつて知る事が出来たが、時間の測定は十分にゆかず數秒の誤差がともなつたと思ふ。

図-2. 剪断試験機構造図

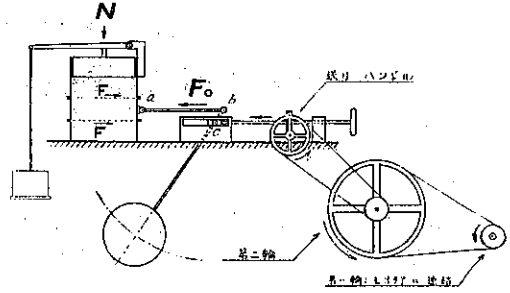


図-3. 剪断力發生機構説明図

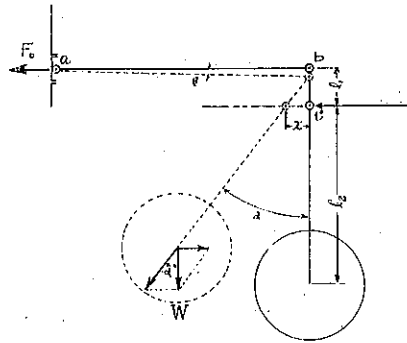
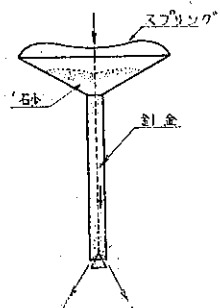


図-4. 砂の充填器



此等記録のうち、図-1 ①②③④の各點に該當する値を示したものが表-1である。

表-1. 測定値表

試料		N=2.50 rev/min				N=100				N=150				N=200				N=250				N=300					
全粒小 P %		53.02				53.30				52.99				53.08				52.37				52.59					
剪断力 F ₀ kg	kg	60	185	150		145	300	265	280	120	480	360	370	140	670	500	430	200	375	610	330	240	320	150	350	250	300
移動量 mm	mm	0	5			0	5	13	46	0	5	70	45	0	6	24	65	0	6	15	27	0	1	20	46		
時間 分-秒	分-秒	3-30	28-00			10-00	19-00	19-00	10-10				15-00	10-00	63-00	90-00	123-00	17-00		15-00	12-00	12-00	22-00	50-00	127-00		
剪断速度 kg/cm ²	kg/cm ²	1.85	6.11			3.50	6.52	3.50	0.77				10.0	7.89	5.10	2.00	11.76	10.17	75.00	2.88	10.90	10.30					
移動速度 mm/分	mm/分	0	0.25			0	0.19	0.26	0.58				0	0.12	0.72	0.62	0	0.10	3.00	0.60	0	0.12					

試料		N=0.50 rev/min				N=100				N=150				N=200				N=250				N=300					
全粒小 P %		52.21				53.96				53.49				52.09				52.81				53.80					
剪断力 F ₀ kg	kg	50	150	150		100	340	280	200	100	425	370	360	180	610	520	510	100	100	600	570	220	820	210	690		
移動量 mm	mm	0	5			30	0	6	17	30	0	1	20	17	0	1	24	49	0	1	20	16	0	0	20	43	
時間 分-秒	分-秒	2-00	15-00			26-00	3-30	18-00	30-30				5-30	11-00	25-00	44-00	6-30	14-00	16-00	58-00	8-00	28-30	13-30	8-00	30-00	50-00	
剪断速度 kg/cm ²	kg/cm ²	25.00	11.11			0	28.57	20.80	30-30				28.00	23.00	6.80	0.52	21.60	24.57	2.50	0.60	15.00	15.00	18.20	27.30	21.71	15.30	
移動速度 mm/分	mm/分	0	0.25			1.60	0	0.26					0	0.60	1.75	1.15	0	0.40	1.91	1.50	0	0.37	2.00	0.60	0.90	1.83	

試料		N=10.10 rev/min				N=100				N=150				N=200				N=250				N=300			
全粒小 P %		53.90				53.65				53.50				53.21				52.10				53.34			
剪断力 F ₀ kg	kg	50	150	110	150	80	340	340	280	115	480	420	300	150	590	515	410	120	240	680	510	210	875	230	735
移動量 mm	mm	0	7	12	46	0	9	17	45	0	7	15	42	0	7	18	45	0	1	18	46	0	1	19	25
時間 分-秒	分-秒	1-30	5-30	10-00	22-00	1-40	15-00		21-00	5-40	13-00	18-00	29-00	1-30	15-00	18-00	28-00	4-30	17-00		30-00	4-30	12-00	23-00	27-00
剪断速度 kg/cm ²	kg/cm ²	33.33	27.00	11.11	6.82	0	28.57	20.80	30-30				38.33	36.20	30.00	12.00	12.22	38.20	26.00	9.20	42.82	18.00	11.11	25.80	11.71
移動速度 mm/分	mm/分	0	1.60	2.00	2.83	0	0.26						0	0.70	1.60	2.10	0	0.60	3.00	2.10	0	0.37	2.00	0.60	2.10

試料		N=18.10 rev/min				N=100				N=150				N=200				N=250				N=300			
全粒小 P %		53.55				53.18				53.68				53.02				52.90				53.52			
剪断力 F ₀ kg	kg	53	173	165	160	80	290	280	280	130	435		330	185	615	540	450	200	690	685	525	240	800	850	100
移動量 mm	mm	0	6	10	41	0	6	16	46	0	11		17	0	10	16	45	0	0	10	16	0	10	15	21
時間 分-秒	分-秒	0-37	4-00	5-00	12-15	1-00	4-30	6-30	14-40	2-00	8-00		16-00	2-00	9-00		15-30	2-00				8-00	10-00	16-00	
剪断速度 kg/cm ²	kg/cm ²	3.78	33.81	30.00	13.11	0	28.57	20.80	30-30	0	65.00	50.80		77.20	75.71		88.11						100.00	100.00	
移動速度 mm/分	mm/分	0	1.06	1.60	2.72	0	1.21	3.00	3.67	0	1.83		0	1.12			0						0	1.71	

- ①: 0 點より ① 點までは殆ど移動量が認められない。自記装置の移動量率大率は 3 倍である。
 - ②: 最大剪断力を示す點。此の點を通過すると ③ 點まで急に速い速度で移動し剪断力が減小する。
 - ③: 剪断作用の始まる點。此の點以後は略送りと同じ速度で移動し、一面砂子にして見ると滑動の状況がはつきり現れる。
 - ④: 移動量 45 mm 附近に採り試験を停止した點。此の附近迄來ると滑動面積減小の影響が出てくる様である。
- ③ 點 ④ 點に就ては山口博士の得られた様な判然たる結果⁽⁷⁾を得ることは出来なかつたが、實驗中約 1/4 は 図-1 の曲線を示し、他は ② ③ の剪断力の差は僅かであつた、即ち 2 點がはつきり現れられなかつた。此の様な場合は移動速度の変化する點 (此の程度の送りの速さでは此所から急に緩かに移動した)、或は 図-1 點線の如く小さい鋸齒状の線が表はれ始める點を ③ 點とした。

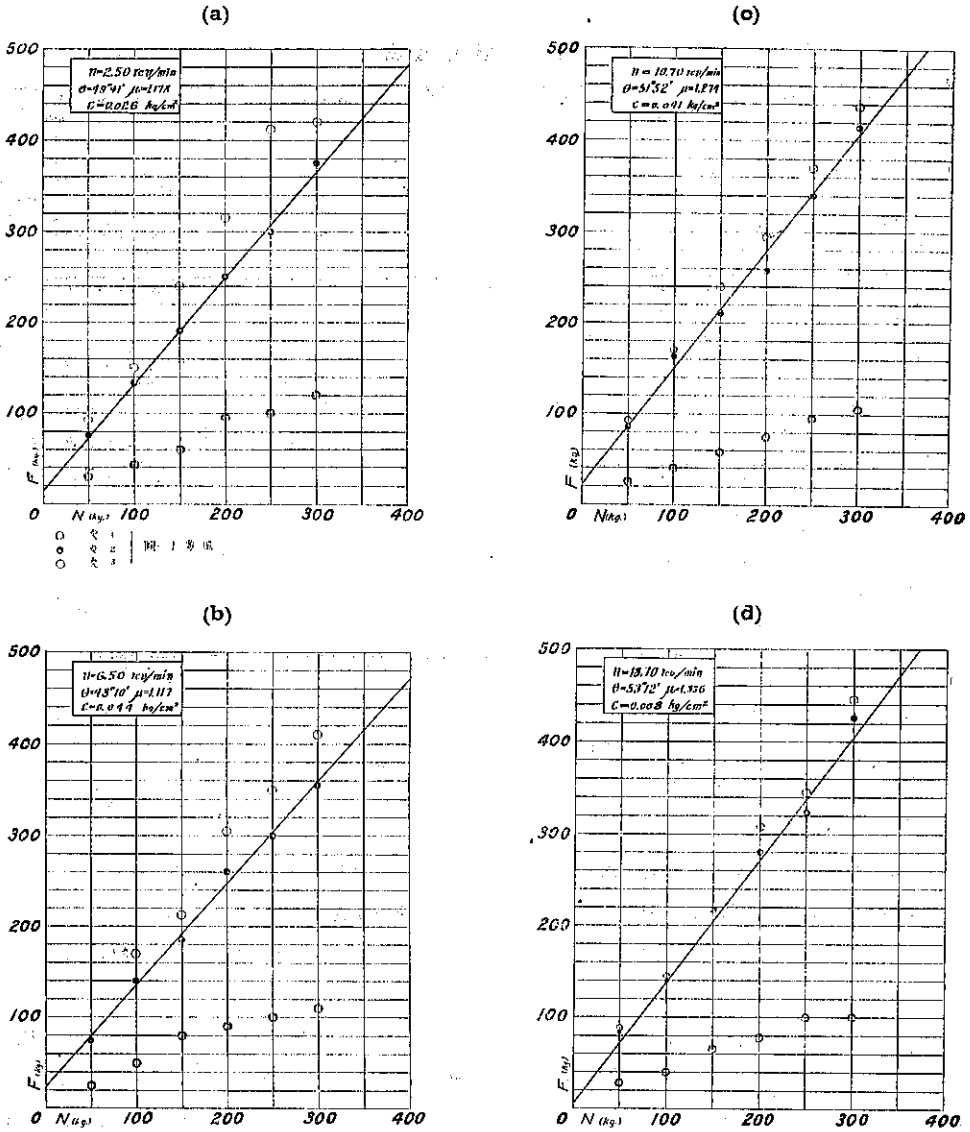
かくして得た 表-1 の値を移して 図-5a~図-5d を畫けば荷重-剪断強度図を得る。

① の如き點が砂の場合常に存在するとすれば、此はあだかも鋼の弾性限點の如く見える點で、砂の剪断強度としては最も安全な所と思はれる。しかも此の僅かの實驗結果から見れば其の位置は時間の影響を全く受けぬ様と思ふ。併し此の事は ① 點附近の状況をもつと細かに、もつと數多く測定しなくては論断することは出来ない。

② 點は伸々一定の値を得る事が出来なくて遂に図に示す様な不規則なものになつた。

次に 0 點から ② 點まで、即ち砂が剪断力に對しちつと持ちこたへてゐる部分について載荷速度と移動速度關の

図-5. 荷重-剪断強度図



係を調べて見る。表-1 によつて 0 點~① 點間の時間、移動量、剪断力から計算して關係を示せば 図-6 の通りである。同図は次の意味を表す。

- (1) 一定荷重 N に対しては剪断力が速く加はる程、移動速度が速くなる。
- (2) 一定剪断載荷速度に就ては、大きな荷重のもとにある砂程、移動速度は小である。即ち大きな荷重のもとにある砂ほど山口博士の見付けられた上降伏點に到達するまで徐々に移動する。

図-6 を更に説明的に書き表はすと 図-7 の様になると豫想されるが、此の各線が直線になるか又如何なる曲線になるかはこれだけの測定値からは決定出来ない。

③の點で砂の内部に剪断滑動現象が始まる。即ち Coulomb の土楔が滑る狀況と全く同じものであつて、單位

図-6. 表-1 の関係図

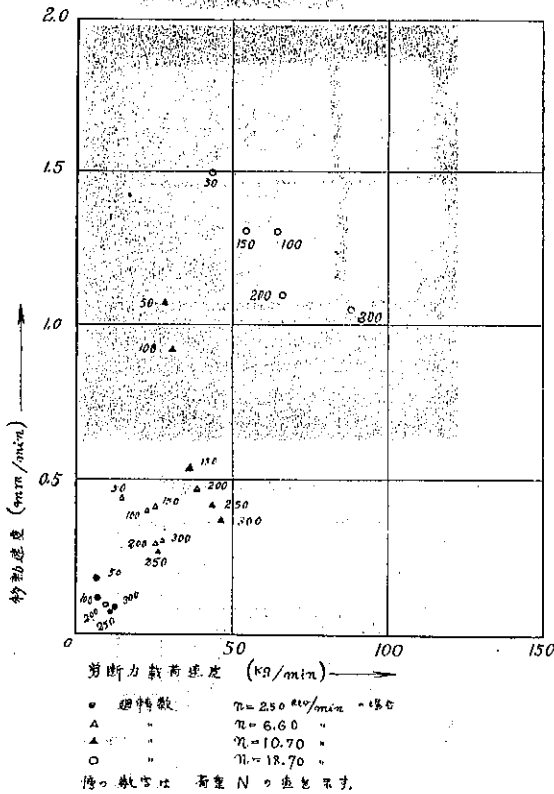
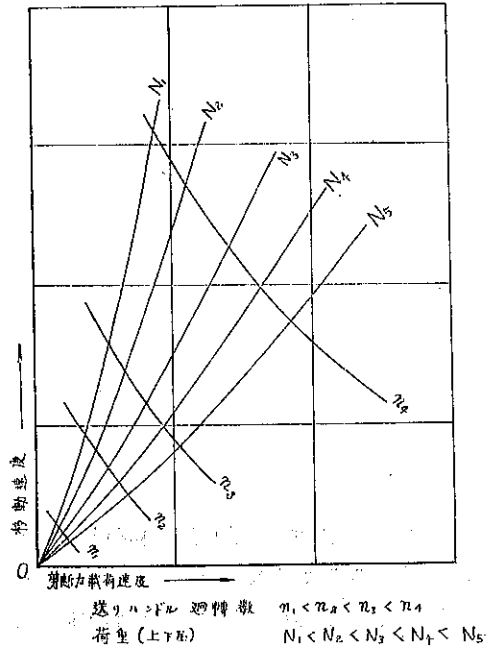


図-7. 図-6 の説明



面積に就ては

$$f = n \tan \theta + c, \quad c: \text{凝集力}$$

総断面積 A について考へれば

$$f \cdot A = n \cdot A \tan \theta + c \cdot A, \quad F = N \tan \theta + C \quad \text{又は} \quad N \mu + C$$

θ : 摩擦角, $\mu = \tan \theta$: 摩擦係数

表-2. 降伏点に至るまでの移動速度と剪断荷速度との関係

n (Rev/min)	移動速度 (mm/min)			摩擦係数 μ	摩擦角 θ	凝集力 c (kg/cm ²)
	最 大	最 小	平 均			
2.50	0.64	0.58	0.61	1.178	49°41'	0.026
6.50	1.75	1.15	1.55	1.117	48°10'	0.044
10.70	2.83	2.36	2.12	1.274	51°52'	0.041
18.70	4.27	3.67	3.62	1.336	53°12'	0.008

③の値を代入して最小自乗法によつて θ, μ, c を求めれば、図-5に示した如くなる。表-1より③④間の移動速度を採つて見ると、表-2或は図-8の如くなる。摩擦係数は移動速度と共に増加する事を知る⁽⁵⁾が、凝集力については明瞭な傾向を得ることが出来なかつた。此の機械のハンドルを速く廻すと摩擦係数が大きく出ること

図-8. 移動速度と摩擦係数及凝集力との関係

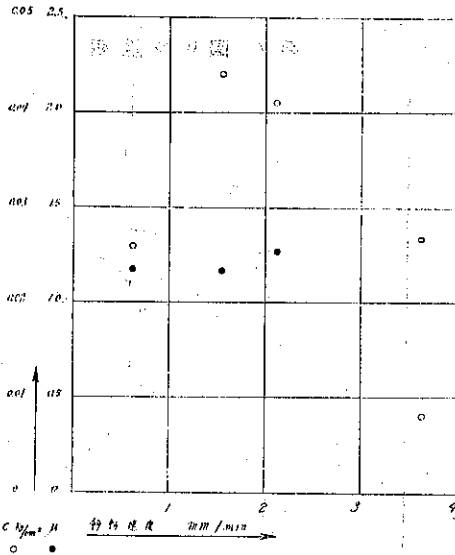


図-9. 非常に早く移動した場合
内部の砂の運動の一例

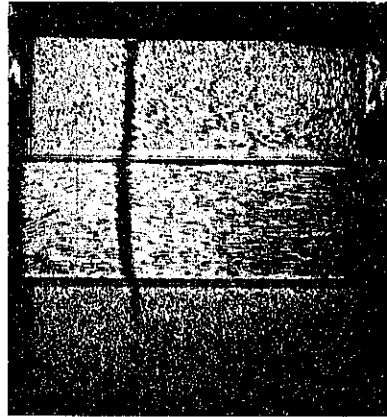
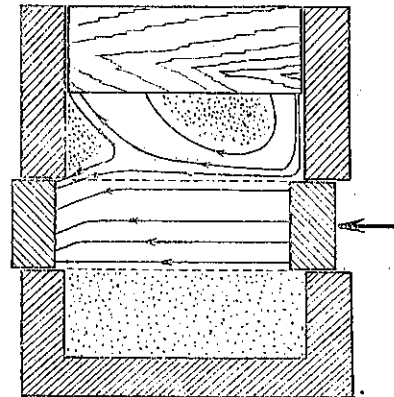


図-10. 図-9の説明



になる。此の問題は更に非常に速く移動する場合、或は緩に移動する場合など 廣範圍にわたつて調べる必要があると思ふ。試に非常に急に押した場合、内部の滑動の状況を寫した所 図-9 を得た。内部に渦狀の運動の起つてゐるのを見る。図-10 は其の説明図である。此の様な場合剪断抵抗力は非常に大きく出て来て、結局非常に急激な荷重に對する土の抵抗については考へ方を変へねばならない¹⁰⁾ 理由の一つを示すと思ふ。

4. 結 語

以上得た結果を要約すると

- (1) 摩擦係数は剪断力載荷速度と共に増加する傾向を有す。凝集力については不明である。
- (2) 高圧のもとでは降伏現象は低圧の場合より徐々に起る。
- (3) 急激な荷重をうけた場合は異つた剪断現象が生じるらしい。

而して今後此の問題を更に進めるために、

- (1) 自記装置に時間を記録する方法、
- (2) 剪断力を直接に任意の速度でかけること、
- (3) 移動量の廣大率を大にすること、
- (4) 含水量の測定。

等留意したいと思ふ。

文 献

- (1) 鉄道省土質調査委員会報告第 1 輯 p. 33.
- (2) W. C. Unwin: The Testing of Materials of Construction. 1910. p. 72.
- (3) A. Náday: Plasticity 1931. p. 21.
- (4) " " " p. 273.
- (5) 山口昇: "砂の剪断試験に際し現れたる降伏現象," 第 3 回工学大會講演集(土木関係) 昭. 11.7 p. 42
鉄道省土質調査委員会報告第 4 輯, 昭. 11.4 p. 158.
- (6) 小野諒兄, 眞井耕象, "乾燥砂並濕潤砂の土質力学的研究" 土木學會誌第 23 卷第 6, 7 號 p. 593.
- (7) 山口昇: 前出 (5).
- (8) 土の剪断試験の検討, 土木工学, 昭 10.9.
(附録) 地質工学 p. 65 によれば上下圧荷重の載荷時間の長短は其の影響に大差なく, 攪集力の変化も大して認められなかつたが, 摩擦角の変化は剪断速度の小な時に小さく約 1 cm/min 以上の速度では殆ど一定値を示すとのことである。剪断速度を私の論文では移動速度とした。
- (9) 山口昇: "土の力学の最近の趨勢に就て" 土木學會第 1 回年次學術講演會講演集, 昭. 12.9 p. 37.