

# 土の“液性限界”試験法の変遷と問題点

三木五三郎

材料試験法がある時期に定められ、しだいに変遷し、さらに改良されようとするときに、どのようなことが問題となるかということ、土の分類特性の一つを試験する液性限界試験法を例にとり、主としてその測定装置を中心として考察してみる。

## 1. ま え が き

土を大まかに分けると、砂質の土と粘土質の土となるが、後者は水の含み方によって、またいろいろの性質を示す。すなわち、からからにかわいた粘土のかたまりは、指の間で押しつぶそうとしても困難なほどかたいのに、これに水を加えるとやわらかくなり、水が多くなるとついには液状にもなる。つまり土はその含水量によってコンシステンシーが変化し、固態状から半固態状、塑性状、液状と変化するわけであるが、実はその境界の含水量は土の種類によって異なっている。逆にいえばその境界に当たる含水量を一定の方法で試験することを決めると、この含水量に注目することによって粘性土の分類ができることになる。

このような目的で粘性土が塑性状と液状の境界付近の性状を示すときの含水量を“液性限界”と決め、その境界に当たる状態を規定するのは、スエーデンの土壤学者 Atterberg が 1911 年ごろ提案した方法が現在まで用いられてきている。すなわち 1920 年代に米国の道路技術者が土の工学的な分類試験にこの方法を利用し始め、これを ASTM が 1935 年に規格として採用してからは、米国のみならず世界的にも、広く使われてきたわけである<sup>1)</sup>。

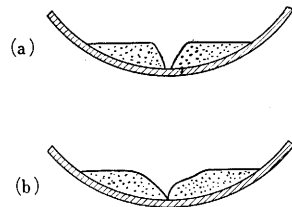
しかしこのようにして現在実用されている液性限界の試験法は、かならずしも細かなところまでつねに一定であるとは限らない。そのわずかと思われる差異が試験結果に影響をおよぼし、各時代ないしは各所で求められたデーターの比較を困難にしていることも事実である。また多量の試験をこなすべくするためには、試験法そのものを改良したいという要求も生じ、この場合にも従来の方法で蓄積されたデーターといかに比較できるかが問題となる。

以下には一般の材料試験がもつ問題点の一端を考えるという意味もあって、例を土の液性限界試験法にとり、その変遷と、それに伴って起こってきた問題点について若干述べてみたいと思う。

## 2. 液性限界の試験法

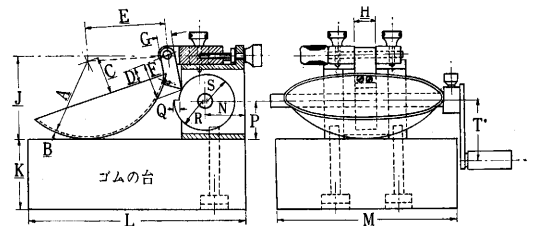
もともと Atterberg が提案した方法は、5g ほどの土を直径 10~12 cm の丸底の蒸発ザラに入れ、水を加えてのり状に練り返し、これに若干量のかわかして粉状に

した土を加えて含水量を変えながら、その都度つぎのような試験を繰り返す。すなわち厚さ 1 cm 弱の薄層に土



第 1 図 液性限界の測定

を押し広げて、その中にへらでV字型のミゾを切り(第1図(a)参照)、このサラを手でたたくことにより、両側から土が流れてミゾがくずれる様子を見る。そしてミゾの底で土が



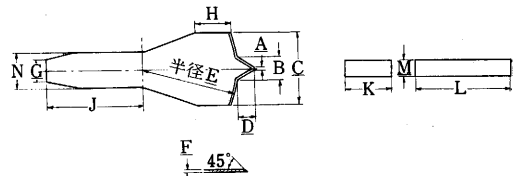
寸法 (アンダーラインは必須のもの)

文字	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>F</u>	<u>G</u>
mm	54±0.25	2±0.25	27±0.25	12.5±0.25	56±0.5	25±0.5	10±0.25
in	2 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	5/64	1 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	1/2	2 <sup>7</sup> / <sub>32</sub>	1	2 <sup>5</sup> / <sub>64</sub>

文字	<u>H</u>	<u>J</u>	<u>K</u>	<u>L</u>	<u>M</u>	N	P	Q	R	S	T
mm	16±0.25	60±1	51±1	152±1	127±1	27	28	5	21.5	19	45
in	5/8	2 <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	2	6	5	1 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	1 <sup>13</sup> / <sub>32</sub>	3/16	2 <sup>7</sup> / <sub>32</sub>	3/4	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>

(a) 液性限界測定器



寸法 (アンダーラインは必須のもの)

文字	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>F</u>
mm	2±0.25	11±0.25	40±0.5	8±0.25	51±0.5	1.6±0.1
in	5/64	7/16	1 <sup>5</sup> / <sub>16</sub>	5/16	2	16 S.W.G.

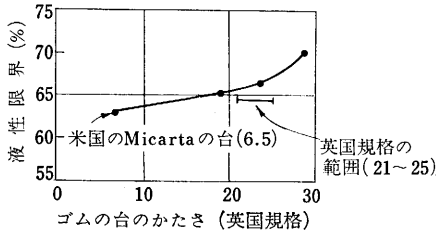
  

文字	<u>G</u>	H	J	K	L	<u>M</u>	N
mm	12.5±0.5	19	51	25	51	10±0.25	19
in	1/2	3/4	2	1	2	2 <sup>5</sup> / <sub>64</sub>	3/4

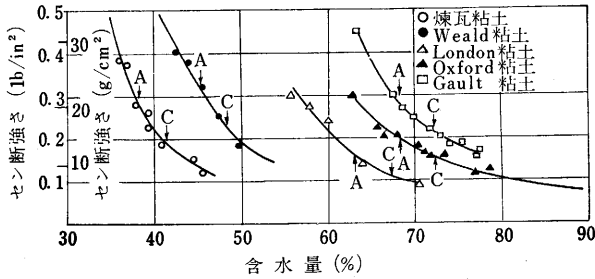
(b) ミゾ切り器と高さ検定器

(黄銅またはステンレススチール)

第 2 図 液性限界測定装置 (BS 1377 Test 2-61)



(a) 液性限界測定装置の台のかたさが液性限界測定値に及ぼす影響 (試料土は Oxford 粘土)



A : Micartaの台の装置で求めた液性限界  
C : 英国規格の装置で求めた液性限界

(b) 5種の英国の土について求めたせん断強さと含水量の関係  
第 3 図 ゴムのかたさの影響<sup>3)</sup>

ちょうど触れ合うような状態 (第 1 図 (b) 参照) になるときの含水量が、その土の液性限界だとするものである。この試験法を改良して測定に機械装置を用いることを提案したのが米国の A. Casagrande<sup>2)</sup>で、サラを金属性にしてカム機構によりゴム製の台の上に 1cm の落下を繰り返し行なえるようにし、ちょうど 25 回の落下回数でミゾの底が触れ合うような含水量を液性限界とすることにした。この落下回数の決め方は、機械装置を用いても従来の Atterberg の方法と同じ結果を与えるものとして考えられたもので、ASTM は両方法いずれをも規格として認めることとした。以後この方法は液性限界試験法の主流として世界的に使用されてきているわけであるが、装置そのものの細目は、作られた年代や国によって若干の差異があり、これが問題点を提供してきているのである。第 2 図には参考までに、もっとも新しく、しかも厳密な規格例として、英国規格によるものを図示してみた。

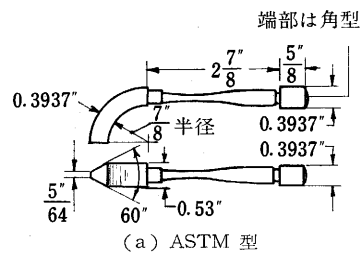
### 3. Casagrande の試験装置の問題点

では、この試験装置の問題点はどこにあるのであろうか。そのおもなものをつぎに考えてみたい。

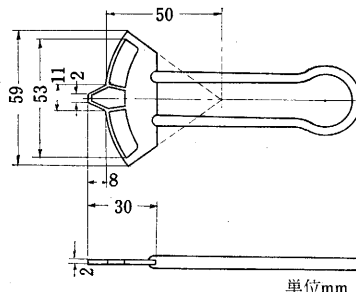
まずもっとも重要なのはサラを落下させるときの受け台の材質である。最初は 1930 年代に電気器具に広く用いられていたエポナイトが使われ、規格としては“かたいゴム”としか記されていない。ところが第 2 次世界大戦による物資不足の影響と、その後急激に進出したプラスチックの関係で、エポナイトはしだいに入手難となり、1946 年には Casagrande 自身の研究で、従来のものにもっとも近似した試験結果を与えるものとして、

Westinghouse 電気株式会社製の製品である Micarta No. 221 を採用することにした。ところがこのころ英国ではこれよりかなりやわらかいゴムを使っており、規格が決まったとき (1948 年)<sup>1)</sup>にはゴムのかたさを英国規格で 21~25 と規定してしまっただけで、しかしこの差が試験結果にかなりの影響を与えることはその後しだいに明らかにされた。第 3 図はその一例で<sup>3)</sup>、(a) 図にはある一種の土についてゴムのかたさが測定値に及ぼす影響を示しているのに対し、(b) 図では英国法と米国法との差を室内ペーン試験を用いたせん断強さの差として求めている。ということは、もともと液性限界試験とは、土が塑性状と液状との間にあるような含水状態での一定のせん断強さを測定しようとしているものと考えられるからである。そして、けっきよくのところ現状では、米国と英国とでは、液性限界値の解釈を変える必要のあることを、Casagrande も認めている<sup>4)</sup>。

サラの中で土にミゾを切るミゾ切り器の形にも問題がある。Atterberg はただヘラを使っただけであったが、米国の道路技術者たちは、現在 ASTM の規格に決められているような一定断面をもつ棒状のミゾ切り器を使い始めた (第 4 図 (a) 参照)。ところが Casagrande はミゾの幅や角度のほかにも両側の高さまで規制するため第 2 図 (b) に示すような形で板状のものを提案したのである。しかも ASTM の規格は、サラの落下装置としては Casagrande のものを採用しながら、ミゾ切り器としては



(a) ASTM 型



(b) Hoványi の改良型

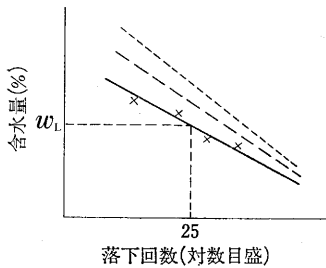
第 4 図 各種のミゾ切り器

従来使われていた棒状のものを踏襲した。そこで米国のみならず各国の規格にもこの両者の使用が混在して、事実上は測定者の好みによって使い分けられているのが現状である。ではこの両者の使用によってどのような差があらわれるのであろうか。棒状のものでは一定の形のミゾを切り終わるのに数回の操作を必要とするのに対し、板状のものでは一回で高さまで一定のミゾが切れる。しかし板状のものでは塑性の低い土の場合に、ミゾを切るときに両側の土を引きちぎる傾向を生じて好ましくない。いずれにしても両方法ともミゾ切り器を動かす方向に両側の土を押し動かす傾向が残るが、

これをふせぐためにはミゾの部分の土を初めから切りとってしまふ改良型の提案もでてきている(第4図(b)参照)<sup>5)</sup>。

4. 試験法を簡素化する試み

Casagrande は液性限界の測定装置を考案しただけで



第5図 流動曲線

なく、その測定法そのものを“流動曲線”の利用によって非常に簡単にした。流動曲線とはある土の液性限界の試験をするとき、ミゾがちょうど底のところまで触れ合うようになる段階の含水量と、そのときの落下回数の対数との関係曲線で(第5図参照)、これはこれが実験的に直線となることを確かめたわけである。すなわち Atterberg の方法ではしだいに試料土の含水量を少なくしながら試行的に何回も測定を繰り返し、ようやく液性限界に等しい含水状態の場合を作り出したときに、その含水量を測定して初めて液性限界が決まるのに対し、この直線を使うと適当に液性限界付近で 3, 4 種の含水状態を作っておのおの含水量と落下回数を測定しさえすれば、いきなり液性限界を図上で求めることができるわけである。

ところが数多くの土の試験をこなしてゆくためには、ある一つの土に対して 3, 4 種の含水状態についての試

験を行なうことすら面倒と考えるようになり、一点法という簡略法が登場してくる。これは米国の道路技術者が用いたもので、けっきょく普通の土の場合、液性限界値が決まっていると流動曲線の傾斜が一定値となることを統計的に知ったことから始まる。しかもその傾斜は液性限界値に比例して大きくなっているのである(第5図参照)。

したがってある土に対して液性限界  $w_L$  に近いある一つの含水量  $w$  での落下回数  $N$  を測定すれば、あらかじめ準備しておいた実験式なり図表なりにこのデータを入れさえすれば、かなりの精度で液性限界そのものを求めることができる。そしてこの場合の実験式としてはつぎの2種の型が用いられている。

$$w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^\beta \tag{1}$$

$$w_L = w \frac{\log N_a - \log 25}{\log N_a - \log N} \tag{2}$$

(1) 式は実は  $\log w$  と  $\log N$  との関係曲線が一定傾斜  $\beta$  をもつ直線であることを示すが、 $N$  が 25 の付近では、 $w$  と  $\log N$  ともほぼ直線関係を示すこともなり、この場合にはその平均的な傾斜すなわち流動曲線の傾斜は、 $\beta$  が一定のときに  $w_L$  に比例して増大することは次式から明らかである。

$$\frac{w_1 - w_2}{N_2 - N_1} = w_L \frac{(N_1/25)^\beta - (N_2/25)^\beta}{N_2 - N_1}$$

ここに  $w_1$  と  $w_2$  は  $w_L$  付近の含水量、 $N_1$  と  $N_2$

第1表 一点法に関する提案式

提案者	所属	年次	液性限界 $w_L$ を求める提案式	落下回数 $N$ の測定範囲	備考
WES		1949	$w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{\tan \beta}$ $\tan \beta$ : 0.115 0.125 0.130 平均 0.121	20~31 15~41	{ 正確には 20~31 一般には 15~41 グラフを準備
J. H. Cooper & K. A. Johnson	Washington State Highway Department	1950		17~36	直接図表を利用
F. R. Olmstead & C. M. Johnston	Bureau of Public Roads	1954	$w_L = \frac{w}{1.419 - 0.3 \log N}$	22~28	計算には計算尺を利用
W. J. Eden	National Research Council of Canada	1955	WES 式で $\tan \beta = 0.100$	15~35	
AASHTO		1957	$w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121}$	15~40 22~28	{ ±5% の精度では 15~40 正確には 22~28 計算には2種のノモグラフと計算尺を利用
L. E. J. Norman		1959	$w_L = \frac{w}{1.388 - 0.277 \log N}$ $w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0.092}$	LL < 50: 17~35 50 < LL < 120: 20~30	主として英国の土について整理し、Géotechnique に発表
H. Y. Fang	AASHTO Road Test	1959	$w_L = w + I_f \log \frac{N}{25}$	17~36	測定含水比 $w$ に応じて $I_f$ を図表から求め、 $I_f \log \frac{N}{25}$ を図表から計算して $w_L$ を求める。
ASTM		1961	$w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0.12}$	20~30	計算には表を利用
BS		1961	$w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0.092}$	15~35	

はそれに対応する落下回数である。

また (2) 式は  $w=0$  のときに流動曲線がかならず  $N_a$  点をとるとの仮定から導かれている。

最近このような一点法は各方面で注目をひき、第 1 表に示すような提案式がつつぎと現われ、1961 年からは ASTM と BS でも簡略法としてではあるが試験法の規格の中にとり入れられた。

ただこのような方法はあくまで第 6 図のような関係が成り立つ普通の土について使えるものであり、たとえば有機質土であるとか、筆者の手もとで整理した二三の日本の火山灰土などでは不都合が生ずることもある。

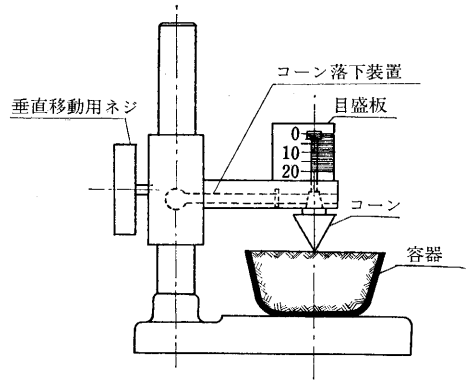
また精度をよくするためには、任意に選ぶ含水状態なるべく液性限界に近い方がよいわけで、そのためには測定者の経験が大切であるとともに、落下回数がある範囲をこえるような含水状態では一点法を使ってはいけないという制限 (第 1 表参照) も守らなければならない。

5. コーン法による液性限界の決定

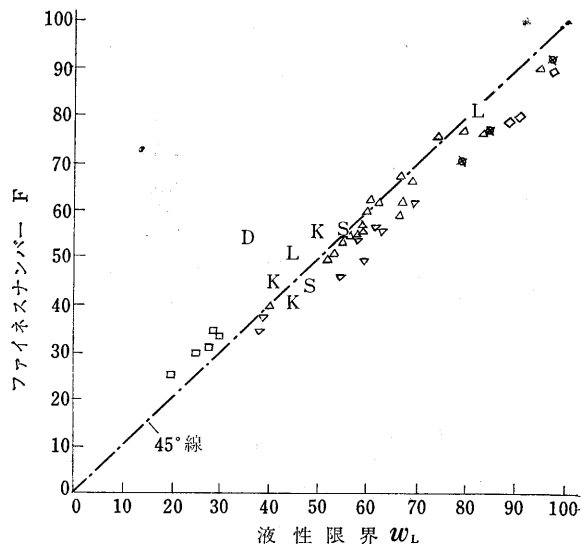
液性限界は上述のとおり半世紀にわたって Atterberg 法を基調として求められてきたわけであるが、この方法には実は土の静的な性質を動的な試験で推定しようとする非常に根本的な無理があることは明らかである。3. で述べたように、液状に近い含水状態での一種のセン断強さを求めるのに、試料土の衝撃による流動状況を測定対象とすることには理論的には確かに無理があり、ただ測定技術上簡便な方法を採用してきただけだともいえるのである。これに対して、このかなり弱いセン断抵抗をコーン貫入試験ではかろうとする試みはスエーデンですでに 1910 年代から行なわれており、最近では精密な室内ベーン試験なども利用できる。ただこの場合の問題は、試料土の含水量の変化に応ずるセン断強さの推移をただ正確に測定するというのではなく、その土の分類特性として従来求められている液性限界に匹敵するセン断強さをいかにして簡便・迅速に求めうるかということにある。

このような観点から、最近ではコーン貫入試験を液性限界試験法として採用しようとする試みが行なわれるようになり、その代表的なものとしては、スエーデンの、前述の古くから行なわれてきた方法の再利用の提案があげられる<sup>6)</sup>。

これは第 7 図に示すような装置を用いて行なうもの



第 7 図 コーン試験装置<sup>6)</sup>



第 8 図 ファイネナンバーと液性限界との関係<sup>6)</sup>

で、コーン先端角は 60°、コーン部分の自重は 60g を標準とする。このコーンを最初、繰り返して容器中に詰められた試料土の表面に接して保持し、ついでコーンを自重で試料土中に貫入させて、その沈下量を測定する。その沈下量がちょうど 10 mm であるような含水量を、その土のファイネナンバー F と称し、この F が普通の土では従来の液性限界と非常によく一致することが実験的に確かめられている (第 8 図参照)。

なお液性限界を一点法で求めるのと同様に、この F を一点法で求めるには測定した含水量  $w$  に対して次式を利用できるとしている。

$$F = Mw + N$$

ここに  $M, N$  はコーンの沈下量  $h$  (mm) に対して関係づけられた定数で、第 2 表で与えられる。

6. 関連するその他の問題点

今までには液性限界の測定装置を中心として、試験法に関するいろいろの問題点を考えてきた。ところが土の性質を試験する場合には、実はつねに別の面で非常に大

第2表 M, N と h との関係

h mm	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	
7	1.21	1.20	1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.14	1.13	M
	-3.5	-3.4	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	N
8	1.12	1.11	1.11	1.10	1.10	1.09	1.09	1.07	1.07	1.06	M
	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	N
9	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.02	1.01	1.01	1.00	M
	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	N
10	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	M
	±0	+0.1	+0.2	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5	+0.5	+0.6	+0.7	N
11	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.92	M
	+0.7	+0.8	+0.9	+0.9	+1.0	+1.1	+1.1	+1.2	+1.3	+1.3	N
12	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	M
	+1.4	+1.4	+1.5	+1.5	+1.6	+1.7	+1.7	+1.8	+1.8	+1.9	N
13	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	M
	+1.9	+2.0	+2.0	+2.1	+2.1	+2.2	+2.2	+2.2	+2.3	+2.3	N
14	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84	M
	+2.4	+2.4	+2.5	+2.5	+2.5	+2.6	+2.6	+2.7	+2.7	+2.7	N

切で、しかも問題の多いことがあるのである。

それは試料としての土の準備の仕方の問題である。一般の分類試験では一度空気乾燥して、こなごなに砕いた土の試料を準備するのが普通であるが、この空気乾燥の度合が異なると顕著に試験結果が違って求められる土がある<sup>7)</sup>。またとくに液性限界の場合には、測定を開始するときの試料土の含水量にも問題があり<sup>8)</sup>、水を加えて練り返す時間にも関係がある<sup>9)</sup>。

こうして試験結果は個人的な測定誤差のほかにも、かざかざの影響を受け、けっきょくいかにしてつねに安定した結果を求めるかは、まことにむずかしい問題といわなければならない。また従来の方法を改良しようとするとして、今までのデーターと新しいデーターとの関係を一義的に決めることも一般には困難なことであろう。

実は現在われわれは、土の分類試験のような日常的な試験方法は高度に自動化して能率をあげようという問題にとりくんでいる。その手初めとして液性限界の試験法をふり返ってみたのが本論の趣旨でもあったのである。

(1963年9月7日受理)

文 献

- 1) ASTM: D 423 T-35 T, 38 T, 39, 54 T, 59 T, 61 T  
AASHO: T 89-54, 57  
BS 1377 Test 3-48, Test 2 (A)·2 (B)-61  
JIS A 1205-50  
DIN 4016-B 3-58
- 2) A. Casagrande: Research on the Atterberg Limits of Soils, Public Roads, 13, 8, Oct. 1932
- 3) L. E. J. Norman: A Comparison of Values of Liquid Limit Determined with Apparatus Having Bases of Different Hardness, Géotechnique, VIII, 2, June 1958
- 4) A. Casagrande: Notes on the Design of the Liquid-Limit Device, Géotechnique, VIII, 2, June 1958
- 5) P. Hoványi: A New Grooving Tool, Géotechnique, VIII, 2, June 1958
- 6) R. Karlsson: Suggested Improvements in the Liquid Limit Test, with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays, Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, Aug. 1961
- 7) 神山光男: 試料の乾燥状態が土の稠度におよぼす影響, 土と基礎, No. 31, 1959. 2
- 8) 松本練三: 土の液性限界試験における注水量の影響, 土と基礎, No. 12, 1955. 11
- 9) 内田一郎・松本練三: 土の Atterberg 限界測定に対する時間の影響, 土木学会誌, 38, 1, 1953. 1

次 号 予 告 (12月号)

研究解説

試験台による自動車の研究 —特に運動性能について—	平中	尾島	收隆
バナジウム現象法の研究	菊吉本	池永多	真忠健 一司一
自動車車体線図作成への写真測定の応用	丸大	安島	隆太 和 市

研究速報

イオン交換膜電解透析における濃度分極現象	妹本山	尾田 辺	和武 学 子 郎
----------------------	-----	------	-------------

総 索 引 (1963年)

生 研 ニ ュ ー ス