

# フォールコーン法による液性塑性

## 両限界の測定 (第3報)\*

鈴木輝之\*\*

(昭和51年9月30日受理)

### Measurement of Liquid and Plastic Limits by Fall Cone Test (Part 3)

by Teruyuki SUZUKI

The purpose of this study is to confirm experimentally that the method of simultaneous determination of liquid and plastic limits by fall cone test can be applied practically. Through several studies on this purpose, it is suggested as a problem of this method that the range of water content at which the  $w-p$  relation can be shown with a straight line on a log scale changes with the method of sample preparation.

In these experiments, it is assured that the change of the method of sample preparation has no troublesome influence, and finally that this fall cone method can be applied practically without any trouble.

#### 1. ま え が き

本研究はフォールコーン法により液性塑性両限界を同時に決定する方法を実用化することを目的として、考えられる種々の問題点に検討を加えるものである。これまでの研究<sup>1-3)</sup>を通じて基準貫入量をコーン形状に対応して一つの値に定めることに関してはほとんど問題のないことが分った。しかし両対数紙上での含水比  $w$  と貫入量  $p$  の関係 (以後  $w-p$  線と略) が直線を示す  $p$  (あるいは液性指数  $I_L$ ) の範囲については、試料の調整法により変化することが示され、とくに JIS 1210 に定める乾燥法により調整した試料については  $w-p$  線が直線となる  $p$  の範囲がせまくなる可能性が示唆された。今回の実験では主にこの点に注目し、JIS 1210 の規定により調整した試料を用意し、これらの試料について本方法の適用性を調べた。この結果当初の予想に反して、乾燥法により調整された試料における  $w-p$  線が直線となる  $p$  の範囲がとくにせまくなる傾向のないことが分り、最終的に本方法を実用化の際の問題点はほとんどないことが判明した。また本報告では今回の実験結果に関することのみでなく、これまでの結果をも合わせて考察を行なっている。

\* 第30回土木学会年講 III 部 (名古屋) にて発表

\*\* 北見工業大学土木工学科

なお本文中で用いる記号は第1報<sup>2)</sup>で一括して示したものと同一である。

## 2. 試料および実験方法

用いた試料は、表1に示す19種類のもので、これらはすべて自然地盤より採取したものである。19種類の試料のうち、採取地点芭露をのぞく18種類は第2報<sup>3)</sup>で用いたものと同じである。第2報では自然採取した粘土を一たん泥水状にし、0.42 mm フルイを通過させ、さらに室内での気乾により  $I_L$  を0.2程度に低下させたものを試料として用いた。これに対し、今回の実験ではこれらの試料を十分に気乾させた後に、乳バチで粉碎し再度0.42 mm フルイを通過させ、粉末状としたものを試料として用いた。このような乾燥処理をすることによって約半数近くの試料は液性限界、塑性限界の一方あるいは両方の値が明らかに変化した。

実験手順は、このようにして調整した試料について、目標貫入量を100 gr コーンで3.0, 4.0, 5.5, 7.0, 9.0 mm として、貫入量がこの値になるように順次水を加えながら貫入試験を行なっていった。このとき加水後の養生は行っていない。コーンの貫入法はコーン先端と平らに仕上げた試料面とが一致した位置よりの自由下で、落下開始30秒後の読みを貫入量としている。

表1 用いた試料

Table 1. List of prepared samples

採取地点	$w_{LL}$ (%)	$w_{PL}$ (%)	$p_{LL}$ (mm)		$p_{PL}$ (mm)	
			100 gr コーン	200 gr コーン	100 gr コーン	200 gr コーン
沼上 (1)	93.0	37.6	9.9	13.7	0.94	1.42
元紋別	83.3	27.7	8.7	11.6	0.98	1.65
芽室 (3)	77.8	33.7	8.4	11.9	0.91	1.56
計呂地 (1)	73.5	28.3	11.3	15.2	0.75	1.40
金華	72.4	28.9	9.8	13.3	1.10	1.95
渚滑	66.4	37.3	8.4	12.5	0.88	1.43
湧別	63.8	23.2	9.5	13.0	0.73	1.32
芽室 (2)	63.1	23.9	9.3	13.0	1.10	1.56
沼上 (2)	63.1	29.5	7.8	11.2	1.05	1.62
興部 (2)	60.3	34.7	9.2	12.5	1.86	3.00
釧路	58.7	24.7	9.7	13.6	0.85	1.56
沙留	58.0	31.3	7.7	11.5	1.06	1.66
幌内	55.4	29.0	7.8	11.4	0.92	1.55
下湧別	55.4	29.9	9.5	12.3	1.27	2.13
芽室 (1)	54.8	35.7	7.0	11.0	0.99	2.20
芭露	45.5	24.1	8.2	12.0	1.50	1.63
小向	44.9	19.8	8.6	11.7	1.60	2.20
計呂地 (2)	44.9	22.3	8.0	11.8	0.94	1.65
紋別	44.8	23.5	8.8	11.8	0.98	1.80

用いた装置は先端角  $90^\circ$ 、重さ 100 gr と 200 gr の 2 種類の円錐形コーンと、内径 60 mm、深さ 30 mm の試料容器をそなえたものである。以上の実験手順および実験装置についてはすべて第 2 報での内容と同じであり、第 2 報と異なるところは、試料の初期状態を  $L_L=0.2$  前後の含水比の状態から乾燥粉末状態にしたところである。

液性塑性両限界に限らず、一般に土の物理試験のための試料は前述の JIS 1210 に定める乾燥法によって準備される場合が多いのであるから、乾燥粉末試料について本方法が適用できるかどうかを確かめる必要がある訳で、今回の実験結果と第 2 報の結果を比較検討することにより、本方法の適用性や試料の初期状態の影響などを調べようとしたものである。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 $w-p$ 線の直線性

塑性領域内における  $p$  の一定の範囲で  $w-p$  線が直線をなすことは本方法が成立するための条件の 1 つであり、本方法を実用化するためには、あらゆる土において  $w-p$  線が直線をなす  $p$  の範囲を見つけておく必要がある。この  $w-p$  線の直線性について、これまでの実験結果と今回の結果を合わせて検討してみる。まず、第 1 報では  $w-p$  線が直線となる  $p$  の下限値は 100 gr コーンで 2.5~3.5 mm の間にあり、第 2 報では 20 個の試料中 17 個までが前述の 5 段階の目標貫入量のうち最も小さい  $p=3$  mm の測定点が直線からはずれている。さらに今回の結果では、第 2 報と同じ目標貫入量であるにもかかわらず、このはずれが見られたのは 19 個の試料中わずか 3 個であり、他の試料は目標貫入量の範囲で  $w-p$  線は直線となった。以上の結果は含水比の調整過程の違いによって  $w-p$  線の直線性が変化することを示しており、第 1 報での実験のように、各含水比段階毎に十分な養生を行なうか、あるいは今回の実験のようにこの養生を行なわず、乾燥状態の試料から実験を始める場合は  $w-p$  線の直線性は比較的良好、また第 2 報での実験のように、ある含水比の状態から始めて、各含水比段階での養生を行なわないような場合は  $w-p$  線の直線性は比較悪くなるということになる。

いま試料中に含まれる水分を加水後十分に養生したときのもの、養生していないときのものに分けてみると、第 1 報では前者のみ、第 2 報では両者の混合、さらに今回の実験では後者のみとなっている。このことと前述の  $w-p$  線の直線性を合わせ考えると、同じ水分でも加水後の養生の有無でその働きが異なり、試料中の水分がそのどちらかみの場合は、含水比と土の性質の変化との関係が比較的一律となり、両方の水分が含まれるときはこの一律性が悪くなるということが考えられる。このような傾向は、試料の調整法の決定においては考慮すべきであらう。

本方法を実用化するときの含水比調整法は、各含水比段階毎の養生は行なわない第 2 報か今回の方法がとられるのであろうから、ここでこの両方の場合において  $w-p$  線が直線を示す  $p$  の下限値を 3 つの実験結果から決めると、100 gr コーンでは 3.5 mm、200 gr コーンでは

5.0 mm ということになる。

### 3.2 基準貫入量

基準貫入量 ( $\bar{p}_{LL}$ ,  $\bar{p}_{PL}$ ) に関する内容は第1報に詳述されている。その値は  $w-p$  直線から決められる液性限界  $w_{LL}$  および塑性限界  $w_{PL}$  におけるコーンの貫入量 ( $p_{KL}$ ,  $p_{PL}$ ) を平均して求められる。このとき  $p_{LL}$ ,  $p_{PL}$  は土によって大きな変動はなく、その平均値である  $\bar{p}_{LL}$ ,  $\bar{p}_{PL}$  の値はあらゆる土に共通した値とみなせることが前提となる。

表2に実験結果を示してある。表中には今回の結果のほかに第1報、第2報および文献(1)の結果も同時に示している。ここで基準貫入量としてある値は、 $p_{LL}$ ,  $p_{PL}$  の標準偏差の範囲をはずれた値を除いて再度平均したものである。表2の4つの実験結果を比較してみると、 $\bar{p}_{PL}$  についてはほぼ同じような結果が出ており、一方  $\bar{p}_{LL}$  については多少ばらつきがあり、さらに今回の実験結果は他の結果に比べて小さくなっている。これを試料調整法の影響とみなすことはできそうもない。このことは第1報と文献(1)とでは試料調整法が同じであるにもかかわらず  $\bar{p}_{LL}$  の値はかなり異なっていることからもうかがえる。いずれにしても、この程度の  $\bar{p}_{LL}$  の

表2 基準貫入量

Table 2. Penetration value at liquid and plastic limits

		コーン重量 (gr)	変動係数	基準貫入量
本 実 験	$\bar{p}_{LL}$	100	11.2	9.0
		200	8.1	12.2
	$\bar{p}_{PL}$	100	26.5	1.0
		200	22.2	1.7
第 1 報	$\bar{p}_{LL}$	100	16.7	9.6
		300	12.6	17.1
	$\bar{p}_{PL}$	100	34.2	1.0
		300	30.5	2.0
第 2 報	$\bar{p}_{LL}$	100	12.1	9.5
		200	11.9	12.9
	$\bar{p}_{PL}$	100	15.0	1.1
		200	11.7	1.6
文 献 (1)	$\bar{p}_{LL}$	100	18.3	10.6
		200	13.5	14.6
		300	12.9	17.6
	$\bar{p}_{PL}$	100	43.6	1.1
		200	46.2	1.8
		300	43.0	2.3

ばらつきは、実用上は問題とはならない。この点については後述する。

ここで本方法で用いるコーン重量について考えてみる。表2に示される実験では、全部で3種類のコーン重量が用いられている。この3つを比べた場合、後述する測定精度の面からは特にどの重量のコーンが適当であるかという判断はつけ難い。しかし、同一の試料においては2種類のコーン重量  $Q_i, Q_j$  とそれに対応する貫入量  $p_i, p_j$  の間には次式の関係がある。

$$p_i/p_j = \sqrt{Q_i/Q_j} \quad (1)$$

第2報では、100 gr コーンにおいては、 $\bar{p}_{PL}$  で(1)式の関係が満足されないことから、このコーンの使用には問題のあることを述べたが、このことは今回の実験結果でも同じであり、やはり100 gr コーンの使用は適当でないようである。一方、300 gr コーンについては  $\bar{p}_{LL}$  の値が大きくなり、試料容器の拘束の影響を無くするためには容器寸法をさらに大きくする必要のあることが示されており<sup>4)</sup>、このようになることは実用上好ましくない。以上のことから表2の3種類のコーンの中では、200 gr コーンが適当なものとなる。もちろん、このコーン重量は最適な重量ということにはならないのかもしれない。しかし、この最適なコーン重量を明確な理由をもって決めることは困難であり、実用的には使用上特に差し支えないもので、さらにきりの良い重量を選ぶ方が得策と思われる。このような考え方からすると、本方法においては200 gr コーンを使用するのが良いことになろう。

つぎに、200 gr コーンを使用するとしたとき基準貫入量をどのようにとるかについて検討してみる。まず  $\bar{p}_{PL}$  についてみると、表2の第1報の結果を除く3つの結果ともほぼ同じ値となっており、これらを単純に平均することにより  $\bar{p}_{PL}=1.7$  mm という値がでてくる。一方  $\bar{p}_{LL}$  についてみると、表2の3つの結果は多少ばらつきが大きく単純に平均するには問題がある。ここで100 gr コーンで、液性限界だけを求めることを目的とした多くの実験結果によれば、 $\bar{p}_{LL}=9.5$  mm が最も妥当のようであるので<sup>5)</sup>、この値と(1)式を用いて、200 gr コーンにおける  $\bar{p}_{LL}$  を計算すると、 $\bar{p}_{LL}=13.5$  mm ということになる。この値は表2の結果と比較してもほぼ中間の値となり妥当な値とみなすことができよう。

以上の検討より、コーン重量を200 gr としたときの基準貫入量の一応の妥当な値として、 $\bar{p}_{LL}=13.5$  mm,  $\bar{p}_{PL}=1.7$  mm がでてきた。しかしこのような試験の基準となるような数値は、できるだけ端数のつかない、きりの良い数値であることが望ましく、また後述する液性塑性両限界の性格上この基準貫入量の値はある程度の幅をもったものとみなすことができるので、ここで実的な面からこの基準貫入量の値について考えてみる。図1および図2は、今回の実験において、200 gr コーンで得られた  $w-p$  直線を正しいものとして、一方で基準貫入量の値をずらしてみたときに、用いた19個の試料について、本方法から求まる液性塑性両限界 ( $w_{CL}, w_{CP}$ ) の平均 ( $\bar{w}_{CL}, \bar{w}_{CP}$ ) と現行法によって求まるそれ ( $\bar{w}_{LL}, \bar{w}_{PL}$ ) との比が、どの程度変わるかを示したものである。この図から表2の基準貫入量が  $\bar{p}_{LL}$  で  $\pm 1.0$  mm,  $\bar{p}_{PL}$  で  $\pm 0.2$  mm 程度変化しても、それによる測定値の変動は平均5%程度であることが分る。このことから、前述の基

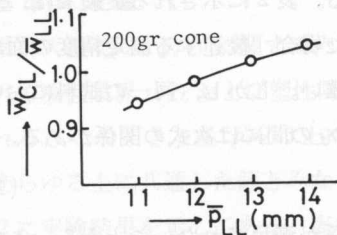


図1  $\bar{p}_{LL}$ による $\bar{w}_{CL}/\bar{w}_{LL}$ の変化

Fig. 1. The change of  $\bar{w}_{CL}/\bar{w}_{LL}$  with  $\bar{p}_{LL}$

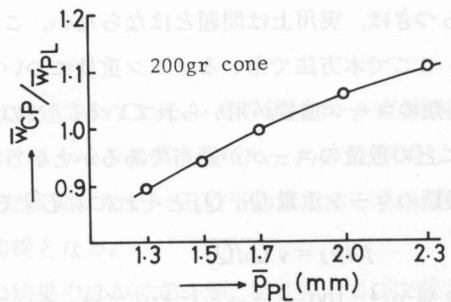


図2  $\bar{p}_{PL}$ による $\bar{w}_{CP}/\bar{w}_{PL}$ の変化

Fig. 2. The change of  $\bar{w}_{CP}/\bar{w}_{PL}$  with  $\bar{p}_{PL}$

準貫入量の値を実用的な観点から、さらにきりを良くするために、 $\bar{p}_{LL}=13.0$  mmあるいは14.0 mm、 $\bar{p}_{PL}=2.0$  mm とすることは可能であると考えられる。

### 3.3 現行法との相関

液性限界、塑性限界の定義は、土の含水比を変えていき土の状態が液状→塑性体→半固体と変化していくときの各状態の境界における含水比ということであるが、この境界は明確な変化点というような形で現われる訳ではないので、この測定値はある定められた測定法によって決まってくる値ということができる。したがって異なった測定法を用いて、異なった値が出されてもその測定値を間違いとすることはできない。このような性格を持つ値の測定法を定めようとする場合に必要なのは、先ず測定者による個人誤差の入る余地のない試験法とすることである。この点についての現行法の問題点としては、液性限界試験において、みぞが15 mmにわたって閉じたとする判断、塑性限界試験においてひも状にした土がきれぎれになったとする判断に個人誤差の入る余地が大きいということがあげられる。これに対して本方法では、試験者はコーンの貫入量をダイヤルゲージ等で読むだけであるから、そこに個人誤差の入る余地はほとんどない。そのほかに現行法の大きな問題点として、液性限界試験装置での落下する皿を受け止める台の材質の問題がある<sup>6)</sup>。これは言い換えれば、装置の明確な規定が困難ということであり、前述のような性格をもつ値の試験装置としてはまずいことになる。この点についても本方法においては装置を規定する場合の困難さはない。

本方法を実用化する場合に今1つ考えなくてはならないことは、すでに現行法による液性塑性両限界の膨大な量の測定が行なわれており、さらにそれらの結果と土の種々の工学的性質との関連がつけられているという現状である。このような状況の下で本方法を行なおうとする場合には当然その測定値は現行法のそれと同じになる必要がある。表2の基準貫入量はこうなるように定めたものであるから、ここではさらにある1つの基準貫入量を決めたときに、多くの土について現行法と本方法との測定値の間にどの程度の差(ここではこれを仮に誤差とよぶ)が出てくるかを以下に述べていく。表3にこの誤差の平均値を示してある。表3中の3つの実験において分ることは、まず第1報での誤差が他に比べて大きいことである。これはこの実験

表3 現行法とフォールコーン法の測定値の差

Table 3. Difference of measured value between the fall cone test and conventional one

		コーン重量 (gr)	$\frac{w_{CL} - w_{LL}}{w_{LL}}$ , $\frac{w_{CP} - w_{PL}}{w_{PL}}$ (%) の分布			左の平均 (%)
			0~5% (個)	5~10% (個)	10% 以上 (個)	
本 実 験	$w_{LL}$	100	16	3	0	3.2
		200	17	2	0	2.5
	$w_{PL}$	100	11	4	4	6.4
		200	11	5	3	5.8
第 1 報	$w_{LL}$	100	14	5	2	4.6
		300	14	6	1	4.0
	$w_{PL}$	100	7	8	6	8.9
		300	5	8	8	9.9
第 2 報	$w_{LL}$	100	16	4	0	3.0
		200	16	4	0	3.1
	$w_{PL}$	100	14	4	2	4.6
		200	15	4	1	3.3

でのフォールコーン法においては、各含水比段階で養生を行なっているのに対して、それに対応する現行法では、その養生を行なっていないことによるものと考えられる。このことは第1報と同じ含水比調整を行なっている文献(1)の誤差を、表2の変動係数によって比較すると、他の実験の場合より大きいことからもうかがえる。つぎに分ることは、 $w_{LL}$ の測定誤差に比べて $w_{PL}$ のそれは大きくなっているということである。これは、現行法による測定値のばらつきにも一因はあろうが、それ以上に本方法における $w-p$ 直線の外挿の際に $w_{PL}$ の側への延長部分が長くなることによるものと考えられる。このことから、本方法によっても $w_{PL}$ の測定値のばらつきは、 $w_{LL}$ のそれに比べて相対的に大きくなることは考えておく必要がある。

図3および図4は、本方法と現行法の測定値の関係を図に示したものである。この図によれば、表3の誤差の平均からも分るように、第2報と本実験とでは、本方法と現行法の相関性に関してはほぼ同じような結果であり、また点群の回帰直線は原点を通っていない。この原点を通らないという事実は、現行法と本方法の関係における1つの傾向として知っておくべき事と考えられる。

現行法による測定値の個人誤差の大きいことはよく言われることであるが、それが具体的な数値として出されている例はあまり見られないので、ここで比較のため、その一例として本学の正課の中で行なわれた学生実験の結果をとりあげてみる。2~3人が1グループとなり、同一の試料と装置を用いて、計11個の結果を出したとき、そのときの平均値からのばらつきを

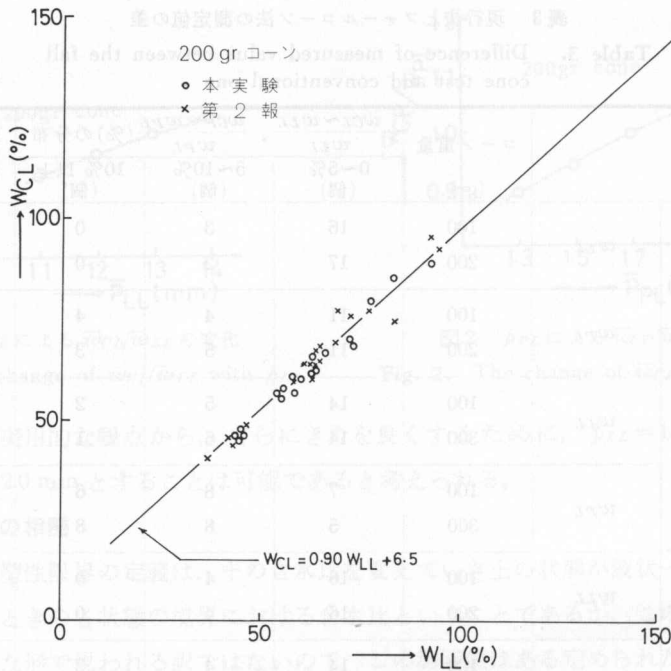


図3  $w_{LL}$  と  $w_{CL}$  の関係

Fig. 3. Relationship between  $w_{LL}$  and  $w_{CL}$

次式によって計算すると

$$\sigma = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

このとき

- $\sigma$ : ばらつきの平均
- $n$ : 測定値の個数
- $\bar{x}$ : 測定値の平均
- $x_i$ : 測定値

$w_{LL}$  の場合  $\sigma = 6.7\%$ ,  $w_{PL}$  の場合  $\sigma = 10.4\%$  となった。これは、この試験について一応の知識のある者が、初めての経験として現行法による試験規定にもとづいて実験を行なったものである。このばらつきには種々の要素が影響してくるから、この数値をそのまま一般的なものと考えすることはできないであろうが、しかし一例とはいえ、現行法においてこのような大きなばらつきが出たのは事実であり、またこのような試験者

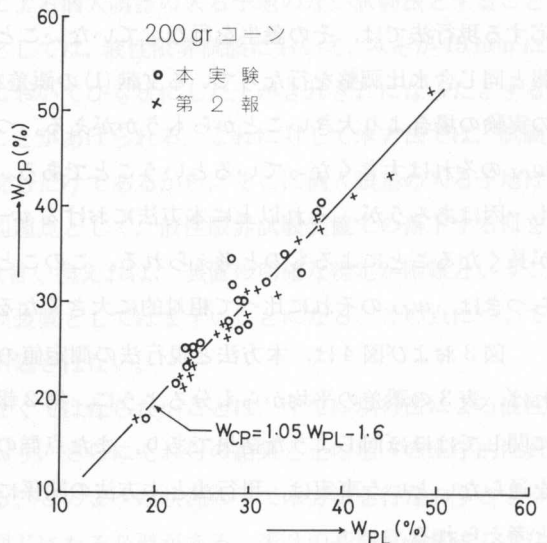


図4  $w_{PL}$  と  $w_{CP}$  の関係

Fig. 4. Relationship between  $w_{PL}$  and  $w_{CP}$



によってこの試験が行なわれることは当然想定しておく必要はある訳で、現行法ではさらに装置の違いによるばらつきも出てくるのであるから、このような現行法の状態に比べて表3の誤差は非常に小さいものであることは容易に理解のできることである。

#### 4. ま と め

以上述べてきたことを要約すると次のようになる。

1)  $w-p$  線は、100 gr コーンで3.5 mm 以上、200 gr コーンで5.0 mm 以上の貫入量であれば試料の調整法に関係なく直線となるので、実際の試験は、この貫入量の範囲で行なうのがよい。

2) コーンの重量は先端角  $90^\circ$  の場合、200 gr が適当のようである。

3) 基準貫入量の値は先端角  $90^\circ$ 、重量 200 gr のコーンの場合  $\bar{p}_{LL} = 13.5$  mm,  $\bar{p}_{PL} = 1.7$  mm となるが、きりを良くするために  $\bar{p}_{LL} = 13.0$  mm あるいは 14.0 mm,  $\bar{p}_{PL} = 2.0$  mm とすることも可能のようである。

4) 現行試験法との測定値の相関性や、現行法における測定値のばらつきなどを考慮すると、本方法は現行法に変わることに於いて問題はとくになく、またその価値は十分にあると思われる。

最後に、今回の実験は、元本学4年目学生藤枝幸二君によって行なわれたものであり、また実験の計画に当たっては、北大工学部北郷繁教授の指導を受けている。ここに記して感謝の意を表わす。

#### 参 考 文 献

- 1) 北郷 繁・佐藤正義：土と基礎，18-6, 9 (1970).
- 2) 鈴木輝之：北見工大研報，5-2, 187 (1974).
- 3) 鈴木輝之：北見工大研報，7-1, 139 (1975).
- 4) 佐野信房・鈴木輝之・北郷 繁：土と基礎，23-11, 39 (1975).
- 5) 北郷 繁・益田栄治：土と基礎，17-9, 5 (1969).
- 6) L. E. J. Norman：Geotechnique, 8, 79 (1958).