

# 粘土, 砂, 砕石の動的, 静的粘弾性定数 ならびにポアソン比について

## DYNAMIC AND STATIC VISCO-ELASTIC CONSTANTS AND POISSON'S RATIO OF CLAY, SAND AND CRUSHED STONE

畑野 正\*・渡辺 啓行\*\*

By Tadashi Hatano and Hiroyuki Watanabe

### 1. 緒 言

土に関連した構造物につき、応力、変位の分布、あるいは震動挙動等を解析的に求める場合、土の弾性定数、粘性定数、さらにはポアソン比等を知る必要がある。従来この種物理定数が実験的に求められたことはあるが、解析に使用するに必要な具体的な表現はほとんど見あたらない。土の場合これら物理定数が非線型性であること、また立体的応力状態におけるものが必要であること等から正しく求めることがきわめて困難であるためこの種実験があまり行なわれなかったものと考えられる。

ここにこの問題の手がかりとして、三軸圧縮試験という単純化された条件下で得られる範囲の土の動的、静的弾性定数、粘性定数、ポアソン比を求めることを試みたい。

すなわち土の円筒供試体に静的周圧を加え、円筒軸方向に動的、静的荷重を与えて実験を行ない、上述物理定数を求めるのである。したがってこの場合変動荷重の方向は、一方向のみである。土中の応力は三次元的であるから、得られた物理定数を使用して解析を行なう場合、最も主要な変動荷重に対応して物理定数を定めることになり、この意味で近似的取扱いたらざるを得ない。変動荷重を二次元、三次元的に与える場合は将来の問題とした。

土材料をとりあげる場合、その多種多様な種類、性質を考えれば、その物理定数も千差万別であろう。ここでは、粘性土の例として均一で多量に入手しやすい Bentonite をとりあげ、非粘性土の例として砂、またロックフィルダムの堤体材料の例として砕石（ただし、試験体の大きさの制限上から、最大粒径 10 mm とする）をとりあげることにした。

粘性土、非粘性土の物理定数はそれぞれその種類に応じて、おおいに異なるものであろうが、工学模型としての形態は、粘性土と非粘性土とにおいては異なるもののそれぞれの種類において、根本的な差異を有するものとは考えられず、おのおのその定数の数値を変えれば足りると考えられる。

以上の意味において、粘土と砂および砕石の各一種類宛を選ぶこととした。

### 2. 実験の方法

実験装置の概要は図-1のごとくである。圧さく空気により圧力を加えた水により、三軸圧縮セル中のゴム膜で被覆した円筒供試体周囲に一定の周圧を加えた。つぎに油圧パルセーターから送られる油により脈動軸圧力または静的軸圧力を加えた。供試体の変形による周圧の変動を消去するため、水銀柱により、別系統の水圧を供試体に与えた。

軸圧力および周圧はひずみ計による圧力計および水圧計により、軸方向の変形はひずみ計をはった  $\pi$  ゲージにより、ポアソン比を求めるための横方向変形はひずみ計を利用した埋め込みゲージまたは  $\pi$  ゲージにより測定し、これらを電磁オシログラフに同時記録した。

横方向変形の測定における埋め込みゲージは砂と砕石の場合に使用したもので、長手方向に滑動する一組のはめ込み式円筒の両端を円形フランジで閉じ、内部に両端をフランジに固定した  $\pi$  ゲージを装入してある。これにより円筒外面とフランジに囲まれた砂、砕石の円筒長手方向変形が測定される。

粘土の場合における横方向変形は、供試体中央高さに直径をはさんで 2 本の  $\pi$  ゲージを装着して測定した。すなわちこれら  $\pi$  ゲージは周圧を与える圧力水中に設置したのである。

供試体に加える周圧は粘土の場合最大  $4.4 \text{ kg/cm}^2$ 、

\* 正会員 工博 電力中央研究所技術研究所

\*\* 正会員 電力中央研究所技術研究所

Schematic View of the Test Apparatus

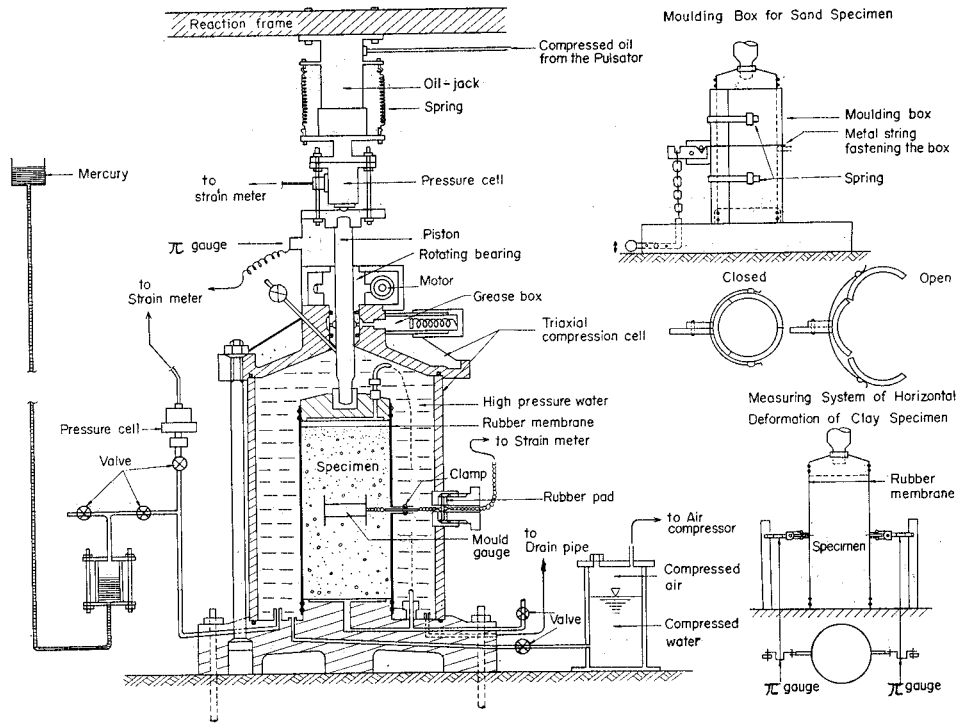


図-1

砂，碎石の場合最大 8.3 kg/cm<sup>2</sup> とした。

供試体は粘土の場合径 7 cm，高さ 14 cm，砂，碎石の場合径 15 cm，高さ 30 cm の円筒型とした。

粘土の材料としては，市販の Bentonite を使用したがその主要な性質は表-1 に示すとおりである。これを一定含水比として成形モールドに 14 層に突き固め 48 時間養生してから実験した。実験終了後含水比を測定したが，その値は 27~31% であった。また密度 1.72~1.84 g/cm<sup>3</sup>，飽和度 85~95% となった。動的，静的の粘土実験とも非排水の条件で行なった。

砂の材料としては，砂分 92.2%，シルト分 7.8%，最大粒径 0.85 mm，均等係数 1.91，比重 2.73 の微粒砂を用いた。水分は 1.4% であった。供試体は成形モールド中にバイブレーターとタンパーにより 6 層につきかためて作り，実験前間げき比  $e_i=0.627\sim0.687$  とした。図-1 に示すように周圧を加えた後，成形モールドを開き軸圧力を加えた。この場合はすべて排水の条件で実験した。

碎石材料としては硬砂岩を砕いたものを用いたが，その粒度は 9.52 mm 以下，99.9%，4.76 mm 以下 55%，2 mm 以下 9.5%，0.84 mm 以下 1.6%，0.42 mm 以下 0.5%，0.25 mm 以下 0.2% であり，比重は 2.69 であった。また水分は 1.1% であった。供試体の成形その他試験法は砂の場合と同様であって実験前間げき比

表-1 Characteristics of Bentonite

Composition	SiO <sub>2</sub> .....77.3%, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....13.5%	
Specific Gravity	2.514	
Grain Size	larger than 74 μ .....17.0% 74~60 μ .....3.5% 60~30 μ .....10.5% 30~20 μ .....7.5% 20~10 μ .....8.5% 10~5 μ .....7.5% 5~2 μ .....11.5% 2~1 μ .....9.0% less than 1 μ .....25.0%	
Liquid Limit	LL .....231.75%	MH by Generalized Classification
Plastic Limit	PL .....31.25%	
Plastic Index	PI .....200.50%	
Liquid Index	IL .....0.10%	
Flow Index	If .....75.00%	
Toughness Index	It .....2.67%	
Shrinkage Ratio	R .....1.69%	
Volumetric Change	C .....359.0%	
Linear Shrinkage	LS .....22.9%	
Optimum Water Content...31.4%, Max. Dry Density 1.27 g/cm <sup>3</sup>		
Cohesion (Triaxial Test in Condition of O.W.C) ...0.96 kg/cm <sup>2</sup>		
Angle of Internal Friction ( " )...8.5°		

$e_i=0.646\sim0.714$  とした。

(1) 動的実験

脈動軸荷重を供試体に与える油圧式パルセーターの能力は，0~2 t の全荷重の間の任意の範囲内で，周波数

表-2 Classification of Tests (Clay)

$a$ (kgcm <sup>-2</sup> ) / $\sigma_{2,3}$ (kgcm <sup>-2</sup> )	0.8~1.5	2.1~2.5	3.1~3.9
0	No. 0C1 (K=7.3) No. 0C2 (K=3.4) No. 0C3 (K=1.5)	No. 0C4 (K=7.5) No. 0C5 (K=3.3) No. 0C6 (K=2.3)	[No. 0C7] (K=6.3) [No. 0C8] (K=3.7) [No. 0C9] (K=2.5)
2.0~2.2	No. 2C1 (K=5.2) No. 2C2 (K=2.0) No. 2C3 (K=1.6)	No. 2C4 (K=4.6) No. 2C5 (K=2.5) No. 2C6 (K=1.3)	No. 2C7 (K=5.9) No. 2C9 (K=1.7)
3.0~3.5	No. 3C1 (K=4.2) No. 3C2 (K=1.7) No. 3C3 (K=1.4)	No. 3C4 (K=3.5) No. 3C5 (K=2.8) No. 3C6 (K=1.6)	No. 3C7 (K=2.8) No. 3C8 (K=1.7) No. 3C9 (K=1.2)
4.1~4.4	No. 4C1 (K=2.7) No. 4C3 (K=1.5)	No. 4C4 (K=3.7) No. 4C6 (K=1.6)	No. 4C7 (K=4.7) No. 4C8 (K=2.6) No. 4C9 (K=1.5)

表-3 Classification of Tests (Sand)

$a$ (kgcm <sup>-2</sup> ) / $\sigma_{2,3}$ (kgcm <sup>-2</sup> )	2.1~2.7	3.3~3.7	4.7~5.0
1.8~2.2	No. 2S1 ( — ) No. 2S2 (K=5.3) No. 2S3 (K=2.8) No. 2S4 (K=1.2)	No. 2S5 (K=7.1) No. 2S6 (K=4.2) No. 2S7 (K=2.8) No. 2S8 (K=1.3)	No. 2S9 (K=5.9) No. 2S10 (K=4.9) No. 2S11 (K=2.6)
3.5~4.5	No. 4S2 (K=4.7) No. 4S3 (K=2.3) No. 4S4 (K=1.3)	No. 4S6 (K=5.5) No. 4S7 (K=2.8) No. 4S8 (K=1.2)	No. 4S9 (K=8.0) No. 4S10 (K=4.4) No. 4S11 (K=2.7)
5.5~5.9	No. 6S1 (K=6.8) No. 6S3 (K=2.8) No. 6S4 (K=1.2)	No. 6S5 (K=6.9) No. 6S6 (K=5.7) No. 6S7 (K=2.9) No. 6S8 (K=1.3)	No. 6S9 (K=6.3) No. 6S10 (K=4.7) No. 6S11 (K=3.0) No. 6S12 (K=1.2)
7.3~8.3	No. 8S1 (K=7.7) No. 8S2 (K=5.0) No. 8S3 (K=2.9) No. 8S4 (K=1.2)	No. 8S5 (K=8.3) No. 8S6 (K=4.7) No. 8S7 (K=2.9) No. 8S8 (K=1.3)	No. 8S9 (K=6.8) No. 8S10 (K=5.3) No. 8S11 (K=3.1) No. 8S12 (K=1.3)

表-4 Classification of Tests (Crushed Stone)

$a$ (kgcm <sup>-2</sup> ) / $\sigma_{2,3}$ (kgcm <sup>-2</sup> )	2.1~2.6	3.3~3.5	4.6~5.1
2.1~2.5	No. 2G1 (K=6.2) No. 2G2 (K=4.5) No. 2G3 (K=2.5) No. 2G4 (K=1.3)	No. 2G5 (K=7.1) No. 2G6 (K=4.5) No. 2G7 (K=2.8) No. 2G8 (K=1.3)	No. 2G9 (K=6.2) No. 2G10 (K=4.4) No. 2G11 (K=3.0) No. 2G12 (K=1.2)
4.0~4.2	No. 4G1 (K=6.8) No. 4G2 (K=5.3) No. 4G3 (K=3.2) No. 4G4 (K=1.3)	No. 4G5 (K=7.2) No. 4G6 (K=5.1) No. 4G7 (K=3.1) No. 4G8 (K=1.3)	No. 4G9 (K=5.3) No. 4G10 (K=4.9) No. 4G11 (K=2.8) No. 4G12 (K=1.2)
7.9~8.3	No. 8G1 (K=7.0) No. 8G2 (K=5.7) No. 8G3 (K=3.1) No. 8G4 (K=1.3)	No. 8G5 (K=7.6) No. 8G6 (K=4.9) No. 8G7 (K=3.0) No. 8G8 (K=1.2)	No. 8G9 (K=6.9) No. 8G10 (K=5.1) No. 8G11 (K=2.9) No. 8G12 (K=1.3)

表-5

	Confined Pressure $\sigma_{2,3}$ (kgcm <sup>-2</sup> )				
	0	1.00	2.20	3.40	4.10
Clay	0	1.00	2.20	3.40	4.10
Sand	—	2.33	6.75		8.15
Crushed Stone	—	2.09	4.11		8.15

0.5~15 c/s, 荷重振幅± (0~1t) である。

周圧を  $\sigma_{2,3}$ , ピストンにより供試体に与える荷重強度を  $a+b \sin \omega t$  とすれば, 全荷重強度  $\sigma_1$  は

$$\sigma_1 = \sigma_{2,3} + a + b \sin \omega t \dots\dots(1)$$

となる。いま

$$K = a/b \dots\dots\dots(2)$$

とし,  $\sigma_{2,3}$ ,  $a$ ,  $K$ , ならびに荷重周波数  $f = \omega/2\pi$  を種々変化して載荷実験を行なったが,  $f$  の変化は

$$0.5 \rightarrow 2.5 \rightarrow 4.0 \rightarrow 6.7 \rightarrow 9.5 \rightarrow 12.0 \rightarrow 6.7 \rightarrow 4.0 \rightarrow 0.5 \text{ c/s}$$

の順序として, しめ固まりによる影響を明らかにするようにした。

粘土, 砂, 碎石における動的実験の種類は表-2, 3, 4 に示すとおりである。

### (2) 静的実験

静的実験は表-5 に示す各段階の周圧  $\sigma_{2,3}$  において行なった。載荷速度はすべて  $(5.1 \sim 5.7) \times 10^{-3} \text{ kgcm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  とした。

## 3. 実験の結果

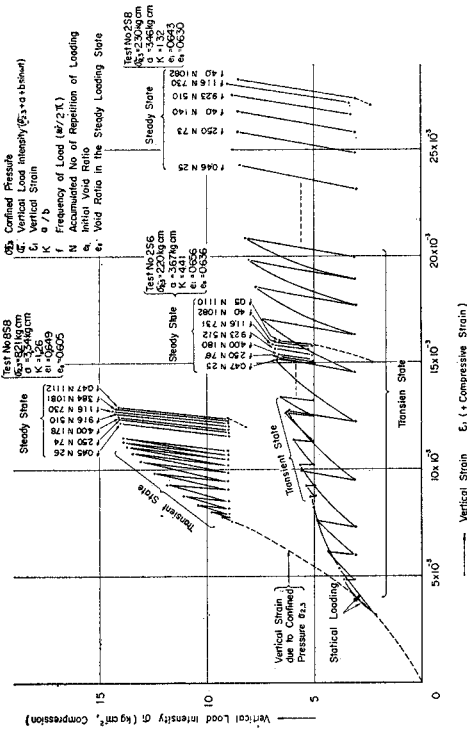
### (1) 動的実験

得られた動的実験における応力とひずみの時間的経過の記録からは, 応力とひずみの間に位相差を明確には認めることはできなかった。したがって, 位相差の問題は実際的には省略して考えてよいと思われる。いまこれら記録から応力とひずみの関係図の例を, 粘土, 砂, 碎石のおのおのにつき記したのが図-2~7 である。図-2~4 は鉛直荷重強度  $\sigma_1$  と, 鉛直ひずみ  $\epsilon_1$  との関係であり, 図-5~7 は鉛直荷重強度  $\sigma_1$  と, 水平ひずみ  $\epsilon_{2,3}$  との関係である。

### (2) 静的実験

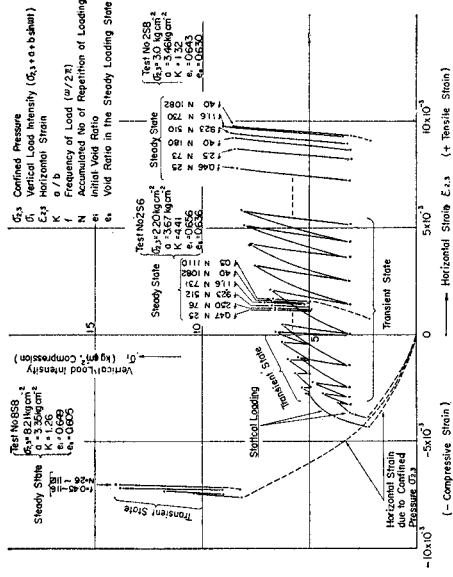
静的実験における鉛直荷重強度  $\sigma_1$  と, 鉛直ひずみ  $\epsilon_1$  の関係図を図-8 に, 鉛直荷重強度  $\sigma_1$  と水平ひずみ  $\epsilon_{2,3}$  の関係図を図-9 に各周圧のレベルに応じて描いてある。

Dynamic Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_v \sim$  Vertical Strain  $\epsilon_v$  (Sand)



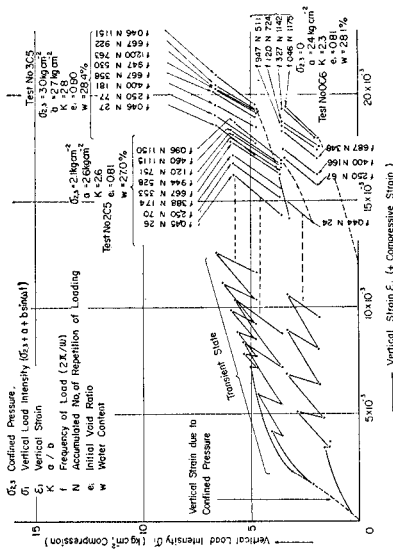
図—4

Dynamic Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_v \sim$  Horizontal Strain  $\epsilon_{2,3}$  (Sand)



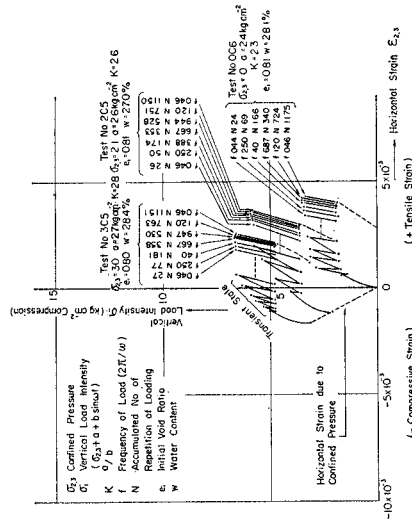
図—5

Dynamic Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_v \sim$  Vertical Strain  $\epsilon_v$  (Clay)



図—2

Dynamic Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_v \sim$  Horizontal Strain  $\epsilon_{2,3}$  (Clay)



図—3

Dynamic Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_1$  ~ Vertical Strain  $\epsilon_1$  (Crushed Stone)

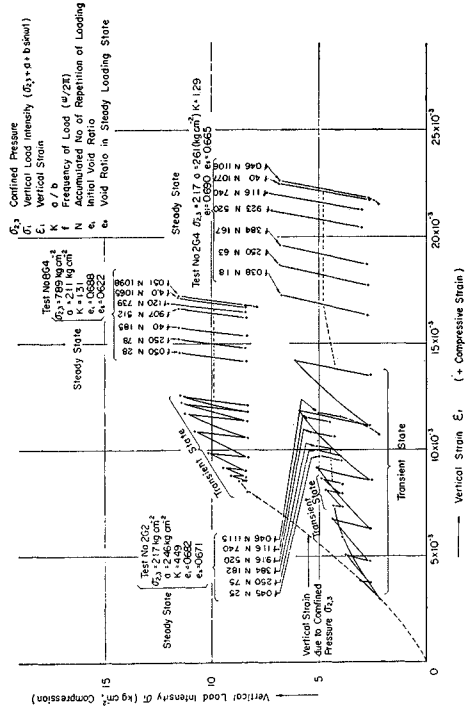


図-6

Dynamic Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_1$  ~ Horizontal Strain  $\epsilon_2$  (Crushed Stone)

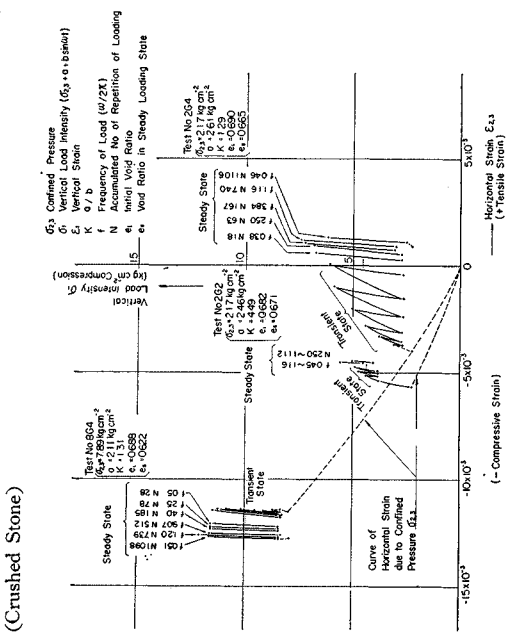


図-7

Static Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_1$  ~ Vertical Strain  $\epsilon_1$

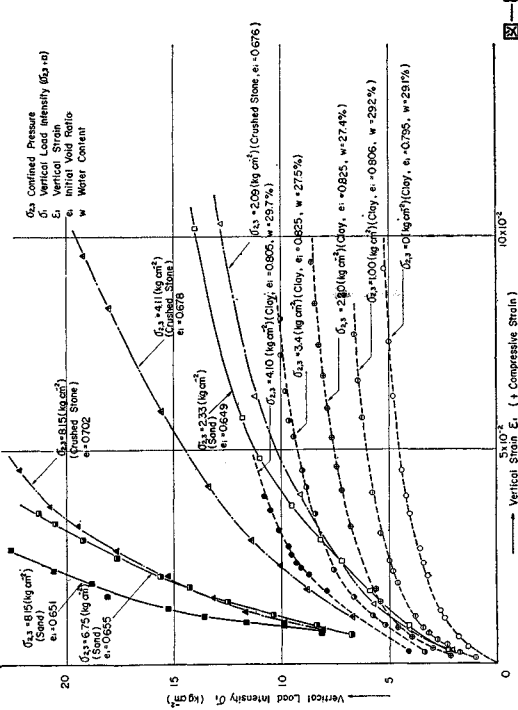


図-8

Static Loading Vertical Load Intensity  $\sigma_1$  ~ Horizontal Strain  $\epsilon_2$

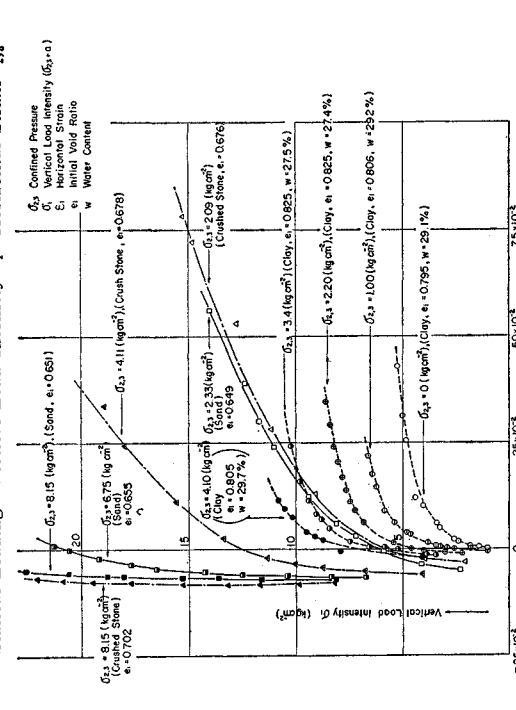


図-9

4. 物理定数の表現

(1) 動的物理定数

式(1)に示す動的荷重強度の振幅  $b$  に対応する鉛直ひずみの振幅を  $\epsilon_{1b}$  とし、同じく荷重強度  $a$  に対応する鉛直ひずみを  $\epsilon_{1a}$ 、水平ひずみの振動部分の振幅を  $\epsilon_{2,3b}$ 、 $a$  に対するものを  $\epsilon_{2,3a}$  とすれば、動的割線弾性率  $E_0$ 、動的ポアソン比  $\nu$  はつぎのように表現できる。

$$E_0 = \frac{b}{\epsilon_{1b}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\nu = \frac{\epsilon_{2,3,b}}{\epsilon_{1b}} \dots\dots\dots(4)$$

また  $\epsilon_{1a}$ 、 $\epsilon_{2,3,a}$  を用いて、平均的な容積変化ひずみをつぎのごとく書くことができる。

$$\epsilon_V = \epsilon_{1a} + 2\epsilon_{2,3,a} \dots\dots\dots(5)$$

以下実験記録から、これらの値を求めて、各試料についての特性を検討し、その結果から力学模型を想定して、これに対する物理定数を計算してみよう。

a) 粘土

図-10 に  $E_0$  と  $f$  の関係を、 $a$ 、 $K$ 、 $\sigma_{2,3}$  の各レベルについて描いてある。明瞭に周波数の増大とともに弾性

Dynamic Modulus of Elasticity  $E_0 \sim$  Frequency of Load  $f$  (Clay)

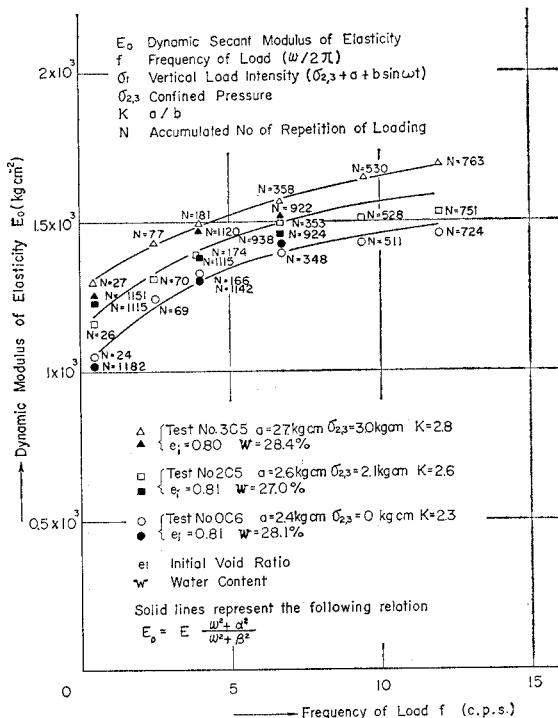


図-10

率が增大するという粘性土としての周波数特性を示しており、 $f$  の増加減少の両過程でその傾向は変わらない。また同一の周波数に対して  $E_0$  の値は時間的経過、繰返し回数によりほとんど変化していない。

図-11 は  $E_0$  と  $K$  の関係を示してあり、 $a$ 、 $\sigma_{2,3}$ 、 $f$  を一定に保つと  $K$  の減少、すなわち  $b$  の増大とともに  $E_0$  が著しく減少する Soft Spring 性を示している。

図-12 は  $\sigma_{2,3}$ 、 $K$ 、 $f$  をほぼ一定にしたときの  $E_0$  と  $a$  の関係を示してあり、 $a$  の増大により  $E_0$  が非常に減少する Soft Spring 性を示している。また  $E_0$  の値は周圧  $\sigma_{2,3}$  が増加するにつれて増大する傾向を明瞭に示している。

Dynamic Modulus of Elasticity  $E_0 \sim K$  (Clay)

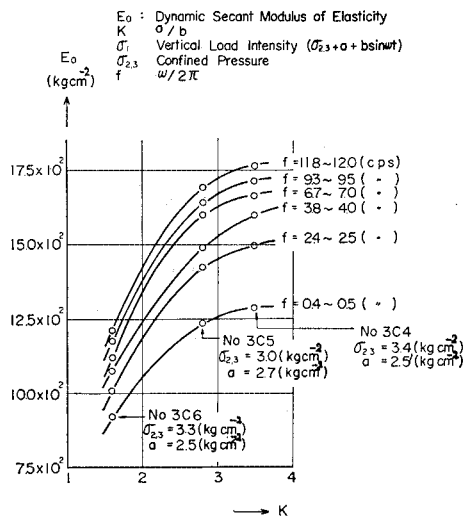


図-11

Dynamic Modulus of Elasticity  $E_0 \sim a$  (Clay)

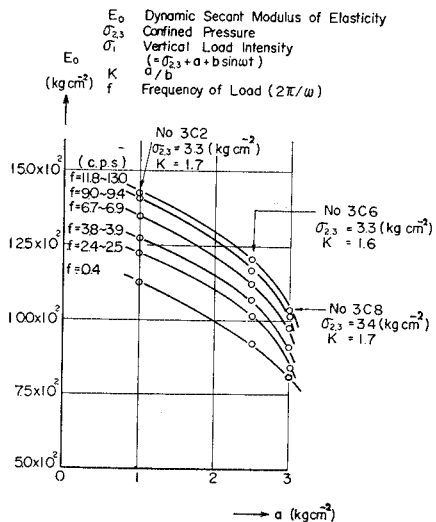


図-12

Volume Change due to Dynamic Loading (Clay)

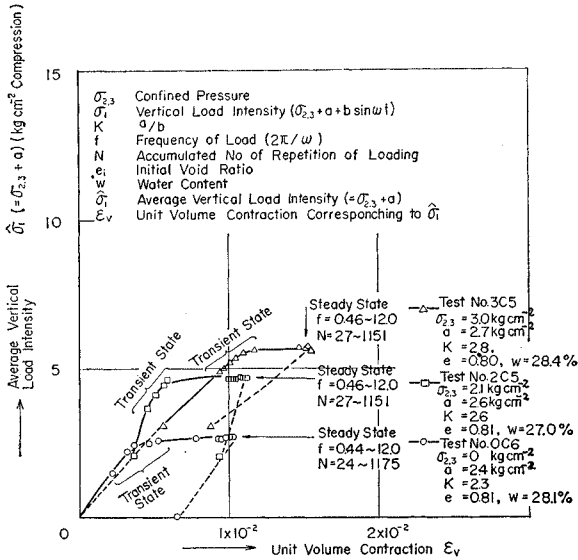


図-13

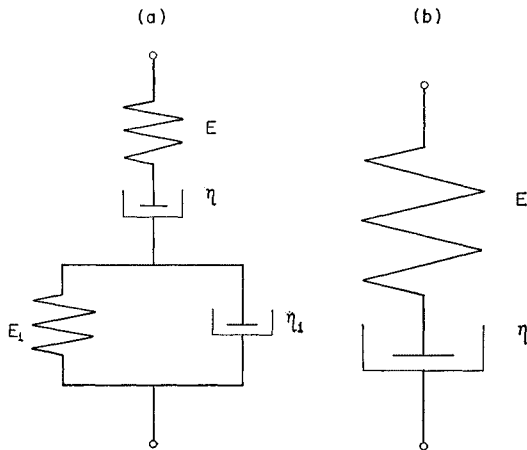


図-14

式(5)にしたがって容積変化を計算し, 平均垂直荷重強度との関係を図にすると図-13のごとくなる。これにより, 永久変形には容積の減少をともない, 永久変形は主として定常的な動荷重によって生ずることが察せられる。

以上の結果から, 本実験における粘土材料の動力学的特性を説明するための力学模型として, 従来一般に使用されている図-14(a)に示す Maxwell-Kelvin 体を探り, その各要素に, ある種の非線型性を加味すればよいことが推察される。

各要素の物理定数を定めるにあたり,  $\sigma_{2,3}, a$  および  $K=a/b$  をほぼ一定としたときの  $f$  の差による  $E_0$  の変化に永久ひずみを基として線型 Maxwell-Kelvin 体とし

ての物理定数  $E, \eta, E_1, \eta_1$  を求め, これらの値が  $\sigma_{2,3}, a$  および  $K$  の変化により, いかにか影響されるかを吟味して最終的に非線型物理定数を定めるものとする。

線型 Maxwell-Kelvin 体に式(1)に示す応力が作用すると, ひずみの振動部分はずのごとくなる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{1,b} &= \left( \frac{1}{E} + \frac{E_1}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} \right) b \sin \omega t \\ &\quad - \left( \frac{1}{\eta \omega} + \frac{\eta_1 \omega}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} \right) b \cos \omega t \\ &\doteq \left( \frac{1}{E} + \frac{E_1}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} \right) b \sin \omega t = \epsilon_{1,b} \sin \omega t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{2,3,b} &= - \left( \frac{1}{E} + \frac{E_1}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} \right) \nu b \sin \omega t \\ &\quad + \left( \frac{1}{\eta \omega} + \frac{\eta_1 \omega}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} \right) \nu b \cos \omega t \\ &\doteq - \left( \frac{1}{E} + \frac{E_1}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} \right) \nu b \sin \omega t \\ &= -\epsilon_{2,3,b} \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

したがって

$$E_0 = \frac{E(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)}{EE_1 + E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} = E \frac{\omega^2 + \alpha^2}{\omega^2 + \beta^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし,

$$\alpha^2 = \left( \frac{E_1}{\eta_1} \right)^2, \quad \beta^2 = \frac{EE_1 + E_1^2}{\eta_1^2}$$

永久ひずみ  $\epsilon_r$  は動的荷重継続時間を  $t_d$  とすれば, つぎのごとく計算できる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{1,r} &= \frac{a + (1-2\nu)\sigma_{2,3}}{\eta} t_d \\ \epsilon_{2,3,r} &= - \frac{\nu a - (1-2\nu)\sigma_{2,3}}{\eta} t_d \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

これらの関係から線型としての各模型要素の数値を計算した結果を表-6に示す。

いま  $K=a/b, \sigma_{2,3}, a$  の3つのうちおのおの2つを一定とし, 一つを増加させた場合のこれらの数値の変化を調べたものを図-15に示してある。図から明らかなように  $E, \eta, E_1, \eta_1$  の各要素ともその数値はつぎの共通の性質を示す。

(a)  $a, \sigma_{2,3}$  を一定とし,  $K$  を減少させると, すなわち  $b$  を増大させると4つの物理定数は減少する。この場合  $K$  の減少に対する物理定数の減少の割合は  $a$  の値が大きいほど小さい。

(b)  $a, K$  を一定とし,  $\sigma_{2,3}$  を増大させると4つの物理定数は増大する。

(c)  $\sigma_{2,3}, K$  を一定とし,  $a$  を増大させると4つの物理定数は減少する。

いまこれらの性質から最も簡単に各要素の定数を式(10)のごとくおき, 表-6の全数値を使用して最適な係数  $C$  を求めることにより非線型性を表示するものとする。

表-6 Calculated Dynamical Visco-elastic Constants of Clay

No.	$\sigma_{2,3}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\alpha$ kg/cm <sup>2</sup>	K	E kg/cm <sup>2</sup>	$E_1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\eta_1$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$\eta_2$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$\nu$	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	W %
OC1	0	1.3	7.3	1.66x10 <sup>3</sup>	2.65x10 <sup>3</sup>	1.84x10 <sup>2</sup>	7.08x10 <sup>4</sup>	0.29	1.81	28.5
OC2	0	1.3	3.4	1.75x10 <sup>3</sup>	6.38x10 <sup>3</sup>	1.86x10 <sup>2</sup>	1.14x10 <sup>5</sup>	0.26	1.83	28.3
OC3	0	1.1	1.5	7.80x10 <sup>2</sup>	1.42x10 <sup>3</sup>	3.52x10 <sup>1</sup>	3.42x10 <sup>4</sup>	0.28	1.81	31.0
OC4	0	2.4	7.5	2.56x10 <sup>3</sup>	7.98x10 <sup>3</sup>	2.46x10 <sup>2</sup>	1.31x10 <sup>5</sup>	0.22	1.81	28.0
OC5	0	2.3	3.3	1.72x10 <sup>3</sup>	4.0x10 <sup>3</sup>	1.54x10 <sup>2</sup>	6.09x10 <sup>4</sup>	0.20	1.81	28.3
OC6	0	2.4	2.3	1.37x10 <sup>3</sup>	3.88x10 <sup>3</sup>	1.29x10 <sup>2</sup>	6.39x10 <sup>4</sup>	0.22	1.78	28.1
OC7	0	4.1	6.3	2.05x10 <sup>3</sup>	7.07x10 <sup>3</sup>	1.87x10 <sup>2</sup>	—	0.29	1.82	28.2
OC8	0	4.5	3.7	1.38x10 <sup>3</sup>	2.65x10 <sup>3</sup>	1.25x10 <sup>2</sup>	3.43x10 <sup>4</sup>	0.44	1.82	28.1
OC9	0	4.5	2.5	1.18x10 <sup>3</sup>	1.68x10 <sup>3</sup>	9.72x10 <sup>1</sup>	—	0.43	1.82	28.8
2C1	2.0	1.5	5.2	2.29x10 <sup>3</sup>	7.45x10 <sup>3</sup>	2.76x10 <sup>2</sup>	1.37x10 <sup>5</sup>	0.25	1.72	29.7
2C2	2.0	1.2	2.0	1.25x10 <sup>3</sup>	4.27x10 <sup>3</sup>	1.46x10 <sup>2</sup>	4.38x10 <sup>4</sup>	0.34	1.75	29.7
2C3	2.1	1.2	1.6	1.08x10 <sup>3</sup>	3.20x10 <sup>3</sup>	1.11x10 <sup>2</sup>	6.44x10 <sup>4</sup>	0.44	1.75	29.7
2C4	2.1	2.1	4.6	2.01x10 <sup>3</sup>	5.22x10 <sup>3</sup>	1.94x10 <sup>2</sup>	1.34x10 <sup>5</sup>	0.27	1.77	29.1
2C5	2.1	2.6	2.6	1.58x10 <sup>3</sup>	3.70x10 <sup>3</sup>	1.40x10 <sup>2</sup>	6.81x10 <sup>4</sup>	0.42	1.81	27.0
2C6	2.1	2.0	1.3	1.23x10 <sup>3</sup>	4.05x10 <sup>3</sup>	1.25x10 <sup>2</sup>	7.30x10 <sup>4</sup>	0.32	1.81	27.9
2C7	2.0	3.9	5.9	2.09x10 <sup>3</sup>	4.31x10 <sup>3</sup>	1.62x10 <sup>2</sup>	5.88x10 <sup>4</sup>	0.46	1.83	28.0
2C9	2.2	3.7	1.7	9.90x10 <sup>2</sup>	1.60x10 <sup>3</sup>	7.60x10 <sup>1</sup>	9.44x10 <sup>3</sup>	0.45	1.82	29.7
3C1	3.5	1.3	4.3	2.47x10 <sup>3</sup>	8.52x10 <sup>3</sup>	3.01x10 <sup>2</sup>	2.80x10 <sup>5</sup>	0.32	1.82	28.4
3C2	3.3	1.0	1.7	1.46x10 <sup>3</sup>	4.59x10 <sup>3</sup>	1.88x10 <sup>2</sup>	1.58x10 <sup>5</sup>	0.26	1.80	27.8
3C3	3.5	1.1	1.4	1.35x10 <sup>3</sup>	4.17x10 <sup>3</sup>	1.34x10 <sup>2</sup>	2.59x10 <sup>5</sup>	0.20	1.81	28.3

No.	$\sigma_{2,3}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\alpha$ kg/cm <sup>2</sup>	K	E kg/cm <sup>2</sup>	$E_1$ kg/cm <sup>2</sup>	$\eta_1$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$\eta_2$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$\nu$	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	W %
3C4	3.4	2.5	3.5	1.82x10 <sup>3</sup>	3.84x10 <sup>3</sup>	1.81x10 <sup>2</sup>	6.48x10 <sup>4</sup>	0.35	1.79	27.1
3C5	3.0	2.7	2.8	1.70x10 <sup>3</sup>	4.40x10 <sup>3</sup>	2.25x10 <sup>2</sup>	6.16x10 <sup>4</sup>	0.33	1.79	28.4
3C6	3.3	2.5	1.6	1.26x10 <sup>3</sup>	3.34x10 <sup>3</sup>	1.21x10 <sup>2</sup>	2.43x10 <sup>4</sup>	0.42	1.81	28.2
3C7	3.4	3.1	2.8	1.37x10 <sup>3</sup>	3.11x10 <sup>3</sup>	1.56x10 <sup>2</sup>	6.33x10 <sup>4</sup>	0.39	1.81	28.3
3C8	3.4	3.0	1.7	1.06x10 <sup>3</sup>	2.65x10 <sup>3</sup>	1.16x10 <sup>2</sup>	1.16x10 <sup>4</sup>	0.48	1.80	28.4
3C9	3.4	3.1	1.2	9.90x10 <sup>2</sup>	3.10x10 <sup>3</sup>	1.04x10 <sup>2</sup>	6.02x10 <sup>3</sup>	—	1.81	27.1
4C1	4.4	1.2	2.7	1.86x10 <sup>3</sup>	6.94x10 <sup>3</sup>	2.36x10 <sup>2</sup>	3.58x10 <sup>5</sup>	0.48	1.81	29.3
4C3	4.4	0.8	1.5	1.44x10 <sup>3</sup>	3.49x10 <sup>3</sup>	1.77x10 <sup>2</sup>	8.88x10 <sup>4</sup>	0.40	1.81	28.2
4C4	4.1	2.2	3.7	2.40x10 <sup>3</sup>	6.47x10 <sup>3</sup>	2.14x10 <sup>2</sup>	1.50x10 <sup>5</sup>	0.26	1.78	27.4
4C6	4.1	2.2	1.6	1.46x10 <sup>3</sup>	3.33x10 <sup>3</sup>	1.22x10 <sup>2</sup>	7.46x10 <sup>4</sup>	0.40	1.84	28.1
4C7	4.2	3.9	4.7	2.28x10 <sup>3</sup>	4.35x10 <sup>3</sup>	2.01x10 <sup>2</sup>	6.07x10 <sup>4</sup>	0.43	1.82	28.8
4C8	4.3	3.3	2.6	1.65x10 <sup>3</sup>	4.10x10 <sup>3</sup>	1.48x10 <sup>2</sup>	5.58x10 <sup>4</sup>	0.41	1.82	28.5
4C9	4.3	3.5	1.5	1.37x10 <sup>3</sup>	3.20x10 <sup>3</sup>	1.12x10 <sup>2</sup>	3.56x10 <sup>4</sup>	0.41	1.84	28.3

E~K Relations for Various Levels of  $\alpha$  and  $\sigma_{2,3}$  (clay)

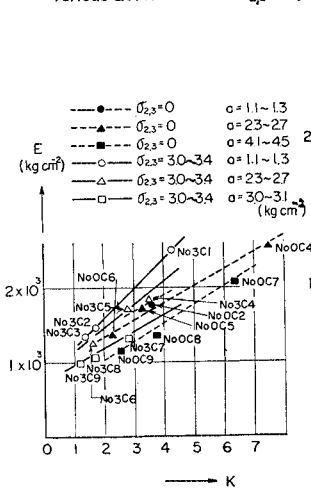


図-15 (a)

E~ $\sigma_{2,3}$  Relations for Various Levels of  $\alpha$  and K (clay)

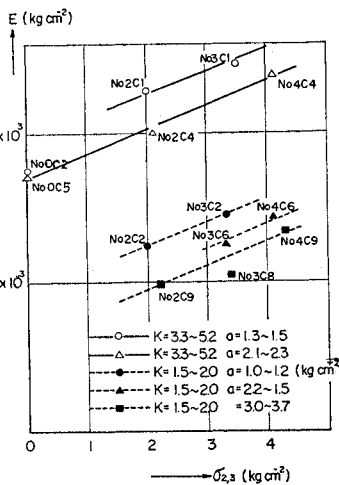


図-15 (b)

E~ $\alpha$  Relations for Various Levels of  $\sigma_{2,3}$  and K (clay)

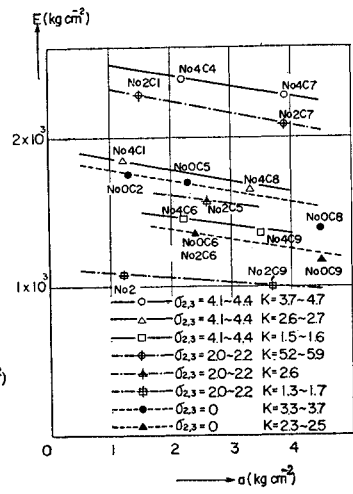


図-15 (c)



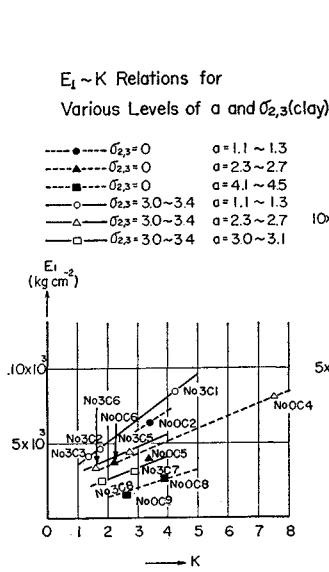


図-15 (d)

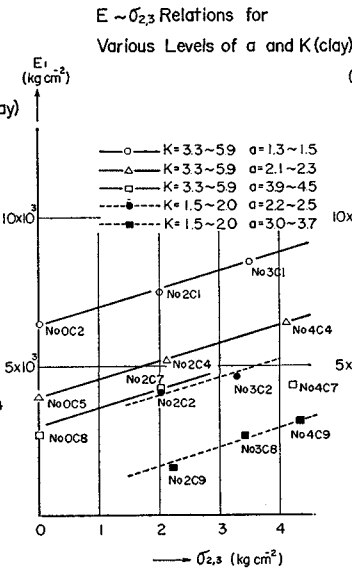


図-15 (e)

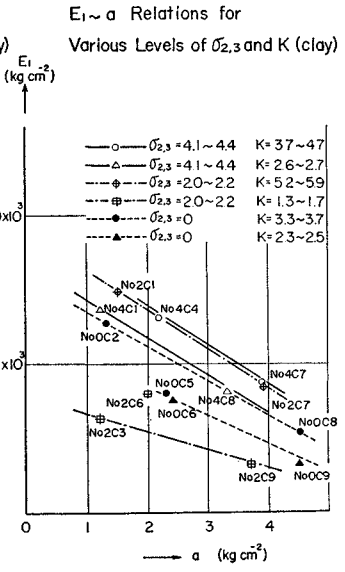


図-15 (f)

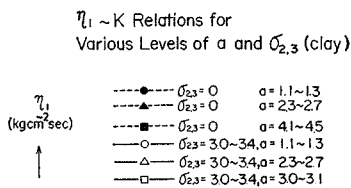


図-15 (g)

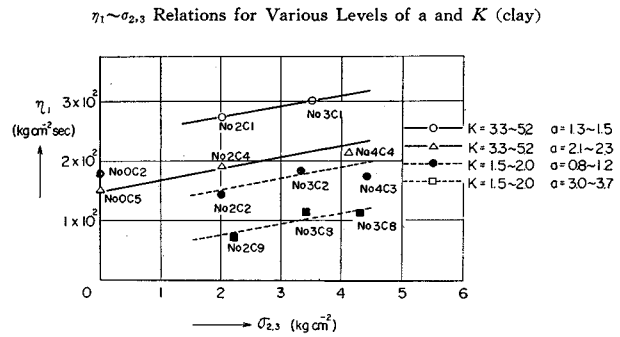


図-15 (h)

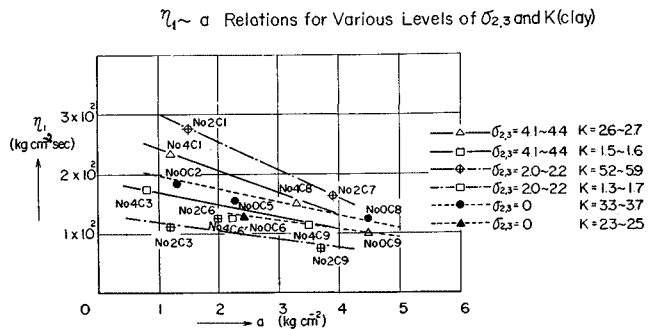


図-15 (i)

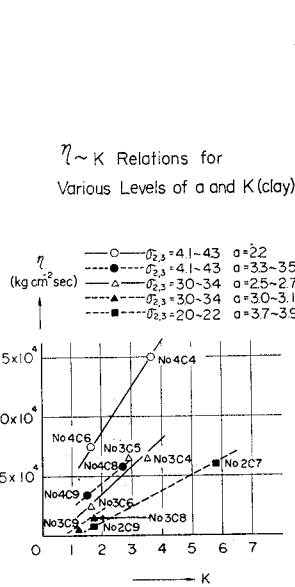


図-15 (j)

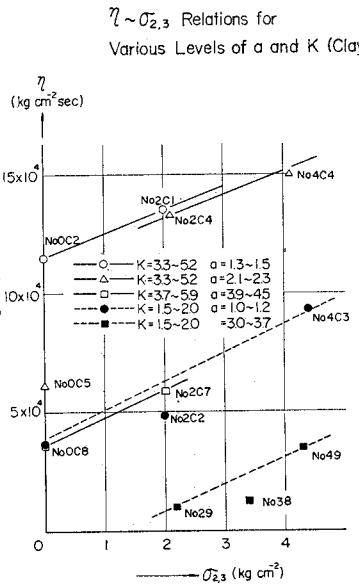


図-15 (k)

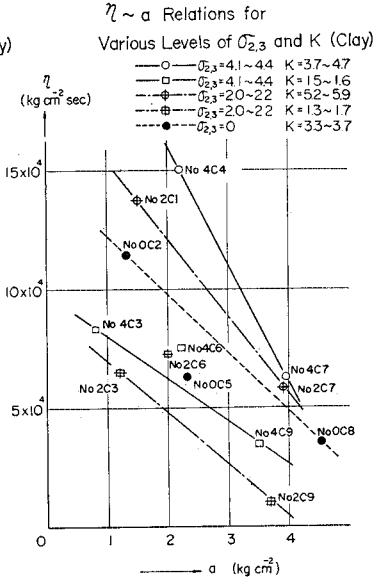


図-15 (l)

Dynamic Poisson's Ratio  $\nu \sim a$  (Clay)

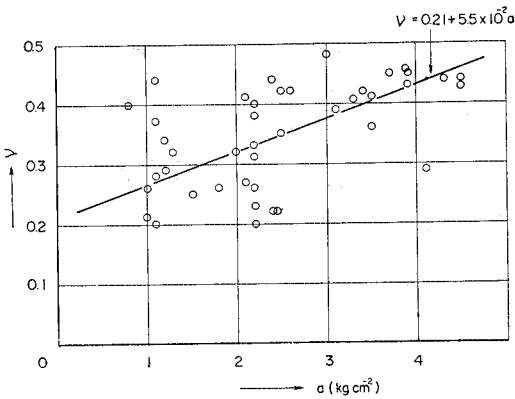


図-16

Dynamic Modulus of Elasticity  $E_0 \sim$  Frequency of Load  $f$  (Sand)

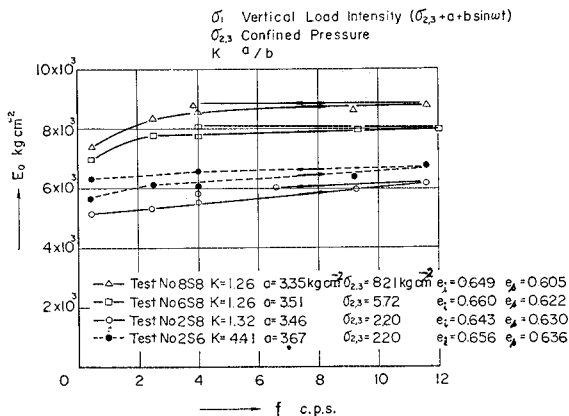


図-17

$$E, \eta, E_1, \eta_1 = C_1 - C_2 a + (C_3 - C_4 a) K + C_5 \sigma_{2,3} \dots \dots \dots (10)$$

計算結果はつぎのごとくである。

$$\begin{aligned}
 E &= 6.76 \times 10^2 - 1.11 \times 10^2 a \\
 &\quad + (3.84 \times 10^2 - 3.85 \times 10 a) K + 1.52 \times 10^2 \sigma_{2,3} \\
 \eta &= 1.37 \times 10^3 - 2.5 \times 10^3 a \\
 &\quad + (5.17 \times 10^4 - 8.5 \times 10^3 a) K + 1.17 \times 10^4 \sigma_{2,3} \\
 E_1 &= 2.44 \times 10^3 - 3.44 \times 10^2 a \\
 &\quad + (1.28 \times 10^3 - 1.30 \times 10^2 a) K + 1.60 \times 10^2 \sigma_{2,3} \\
 \eta_1 &= 8.72 \times 10 - 1.31 \times 10 a \\
 &\quad + (4.76 \times 10 - 5.0 a) K + 6.0 \sigma_{2,3}
 \end{aligned} \dots \dots \dots (11)$$

$$\begin{aligned}
 0.8 \leq a < 4.5, \quad 0 \leq \sigma_{2,3} \leq 4.4, \quad 1.1 \leq K \leq 7.5 \\
 0.5 \leq f < 12 \quad (\text{単位 kg, cm, sec.})
 \end{aligned}$$

動的ポアソン比については、周波数特性および動荷重振幅  $b$  について明瞭な関係は見られない。これを動荷重平均レベル  $a$  について整理すれば、図-16のごとくなのでつぎのごとく表現することとした。

$$\begin{aligned}
 \nu &= 0.21 + 5.5 \times 10^{-2} a \dots \dots \dots (12) \\
 0.5 \leq f < 12, \quad 0.8 \leq a \leq 4.5 \\
 &(\text{単位 kg, cm, sec})
 \end{aligned}$$

b) 砂

図-17は砂における動的割線弾性率  $E_0$  の動荷重周波数  $f$  との関係を示したもので、 $f$  を増加する過程のうち  $0.5 \sim 4 \text{ c/s}$  の範囲内で少しく  $E_0$  は増加するが、それ以外の増加過程および  $f$  を減少する過程ではほとんど変化が見られない。 $0.5 \sim 4 \text{ c/s}$  の増加過程は試料のしまる過程と考えられ、空げき率がほぼ一様ならば  $f$  によ

表-7 Calculated Dynamical Visco-elastic Constant of Sand

Test No.	$\sigma_{2,3}$ kg/cm <sup>2</sup>	a kg/cm <sup>2</sup>	K	E kg/cm <sup>2</sup>	V	$\eta$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$e_i$	$e_s$
2S2	2.0	2.2	5.3	$5.88 \times 10^3$	0.301	$1.95 \times 10^5$	0.646	0.628
2S3	2.2	2.2	2.8	$5.60 \times 10^3$	0.336	$1.28 \times 10^5$	0.643	0.618
2S4	2.1	2.5	1.2	$4.95 \times 10^3$	0.428	$690 \times 10^4$	0.638	0.619
2S5	2.1	3.5	7.1	$6.84 \times 10^3$	0.320	$1.76 \times 10^5$	0.643	0.622
2S6	2.2	3.7	4.2	$6.24 \times 10^3$	0.200	$1.33 \times 10^5$	0.656	0.635
2S7	2.1	3.7	2.8	$6.31 \times 10^3$	0.378	$822 \times 10^4$	0.645	0.628
2S8	2.3	3.5	1.3	$5.62 \times 10^3$	0.485	$472 \times 10^4$	0.643	0.629
2S9	2.1	4.7	5.9	$6.90 \times 10^3$	0.164	$1.41 \times 10^5$	0.637	0.613
2S0	2.2	4.9	4.4	$6.94 \times 10^3$	0.142	$965 \times 10^4$	0.636	0.625
2S11	2.2	5.0	2.6	$6.57 \times 10^3$	0.316	$7.35 \times 10^4$	0.649	0.641
4S2	3.8	2.4	4.7	$6.06 \times 10^3$	—	—	0.643	0.622
4S3	4.3	2.4	2.3	$6.49 \times 10^3$	—	—	0.627	0.604
4S4	3.8	2.3	1.2	$5.69 \times 10^3$	—	—	0.659	0.634
4S6	3.8	3.5	5.5	$7.92 \times 10^3$	—	—	0.642	0.616
4S7	3.6	3.5	2.8	$6.93 \times 10^3$	—	—	0.647	0.616
4S8	4.2	3.7	1.2	$6.52 \times 10^3$	—	—	0.649	0.607
4S9	3.6	4.7	8.0	$7.24 \times 10^3$	—	—	0.653	0.645
4S0	4.0	4.9	4.4	$6.86 \times 10^3$	—	—	0.683	0.653
4S11	3.5	4.8	2.7	$6.93 \times 10^3$	—	—	0.667	0.646
6S1	5.9	2.2	6.8	$7.63 \times 10^3$	0.178	$7.35 \times 10^5$	0.660	0.622
6S3	5.6	2.1	2.8	$7.42 \times 10^3$	0.329	$425 \times 10^5$	0.655	0.619

Test No.	$\sigma_{2,3}$ kg/cm <sup>2</sup>	a kg/cm <sup>2</sup>	K	E kg/cm <sup>2</sup>	V	$\eta$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$e_i$	$e_s$
6S4	5.6	2.2	1.2	$6.57 \times 10^3$	0.334	$2.23 \times 10^5$	0.663	0.623
6S5	6.0	3.5	6.9	$8.32 \times 10^3$	0.190	$5.67 \times 10^5$	0.662	0.616
6S6	5.9	3.3	5.7	$7.77 \times 10^3$	0.315	$4.25 \times 10^5$	0.660	0.621
6S7	5.7	3.4	2.9	$7.38 \times 10^3$	0.310	$3.60 \times 10^5$	0.676	0.635
6S8	5.7	3.5	1.3	$7.62 \times 10^3$	0.393	$1.40 \times 10^5$	0.653	0.609
6S9	5.5	4.8	6.3	$7.84 \times 10^3$	0.128	$3.97 \times 10^5$	0.651	0.609
6S0	5.5	4.7	4.7	$8.71 \times 10^3$	0.262	$4.02 \times 10^5$	0.647	0.606
6S11	5.5	4.8	3.0	$7.86 \times 10^3$	0.345	$2.72 \times 10^5$	0.652	0.613
6S2	5.4	4.9	1.2	$7.07 \times 10^3$	0.397	$1.38 \times 10^5$	0.651	0.605
8S1	8.3	2.2	7.7	$9.10 \times 10^3$	0.225	$1.32 \times 10^6$	0.646	0.608
8S2	8.1	2.4	5.0	$8.75 \times 10^3$	0.163	$2.02 \times 10^6$	0.642	0.606
8S3	7.5	2.3	2.9	$8.22 \times 10^3$	0.269	$7.52 \times 10^5$	0.653	0.609
8S4	8.3	2.2	1.2	$7.80 \times 10^3$	0.312	$7.02 \times 10^5$	0.655	0.609
8S5	8.1	3.5	8.3	$1.021 \times 10^4$	0.215	$9.30 \times 10^5$	0.647	0.606
8S6	8.2	3.8	4.7	$9.47 \times 10^3$	0.241	$7.67 \times 10^5$	0.660	0.616
8S7	8.0	3.6	2.9	$8.79 \times 10^3$	0.214	$6.52 \times 10^5$	0.640	0.594
8S8	8.1	3.4	1.3	$8.38 \times 10^3$	0.354	$3.75 \times 10^5$	0.649	0.605
8S9	8.1	4.8	6.8	$1042 \times 10^4$	0.214	$1.34 \times 10^6$	0.652	0.624
8S0	8.0	4.7	5.3	$8.95 \times 10^3$	0.218	$6.47 \times 10^5$	0.659	0.616
8S11	8.0	4.7	3.1	$9.64 \times 10^3$	0.294	$5.71 \times 10^5$	0.645	0.601
8S12	8.1	4.7	1.3	$9.31 \times 10^3$	0.413	$2.32 \times 10^6$	0.649	0.605

Volume Change due to Dynamic Loadin (Sand)

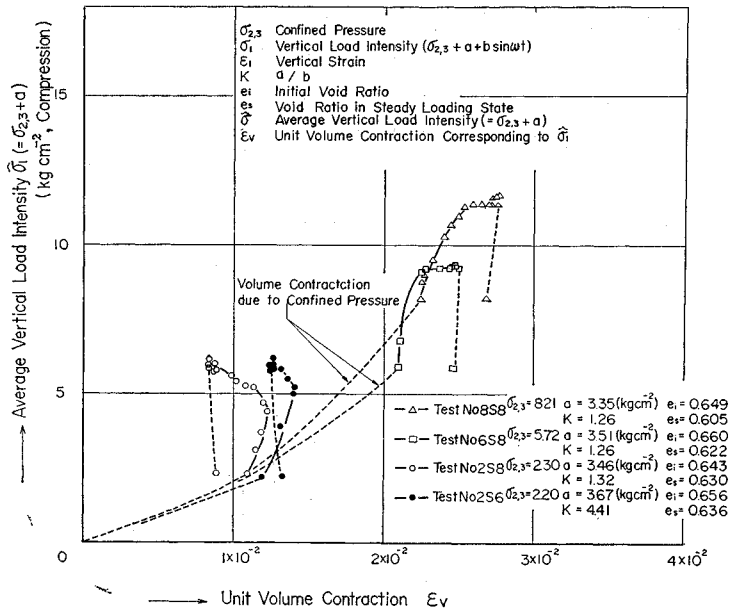


図-18

り  $E_0$  が変化することはないと考えてよいと思われる。

動的割線弾性率の値は、表一7 に知られるように、 $a$ ,  $K$ ,  $\sigma_{2,3}$  の大きさに影響される非線型性をもつものである。

容積変化を調べると 図一18 のごとくで、周圧が小さいとき動的載荷により容積の増大を示すことがあるが、周圧が大きくなると減少していく。また軸方向永久ひずみは動的載荷継続時間  $t_d$ 、動荷重平均レベル  $a$  が大きくなるにつれて大きくなっている。

以上の結果から砂の力学模型として非線型ばねと永久ひずみを表現する要素との直列型を採用するものとする。

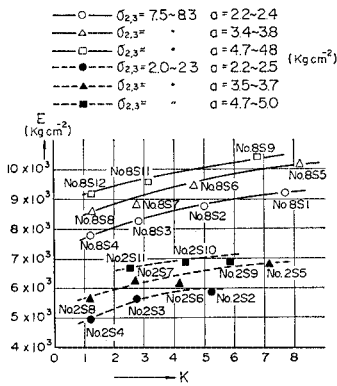
動的載荷継続時間ならびに動荷重レベルとともに増大する永久ひずみを表現する要素としては、ダッシュポットがつぎのように表現されるところから、これを採用することができると考えられる。

$$\epsilon_r = \frac{1}{\eta} \int_0^t \sigma dt \dots\dots\dots(13)$$

砂は本来粘性体ではないが、以上の意味で 図一14 (b) に示す非線型 Maxwell 体を考えれば、その変形特性を表現し得るものといえる。

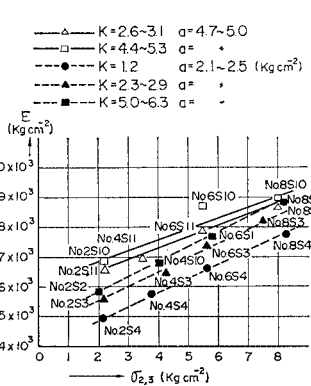
Maxwell 体のばね  $E$  の大きさは表一7 の結果を用いて整理すれば 図一19 に示すようにつぎの性質をもつものであることがわかる。

E~K Relations for Various Levels of  $a$  and  $\sigma_{2,3}$  (Sand)



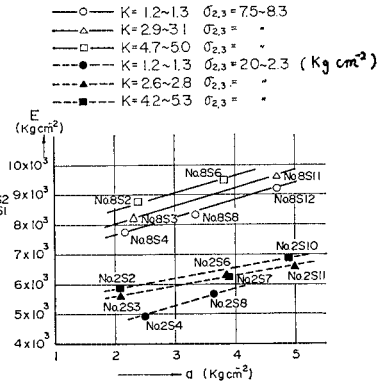
図一19 (a)

E~ $\sigma_{2,3}$  Relations for Various Levels of  $K$  and  $a$  (Sand)



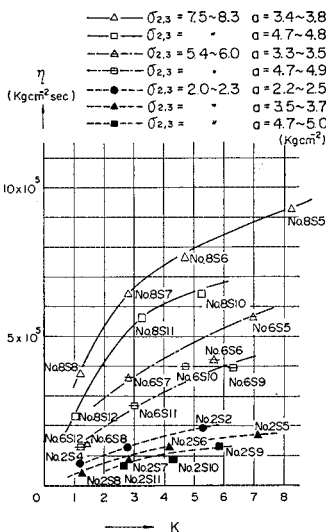
図一19 (b)

E~ $a$  Relations for Various Levels of  $K$  and  $\sigma_{2,3}$  (Sand)



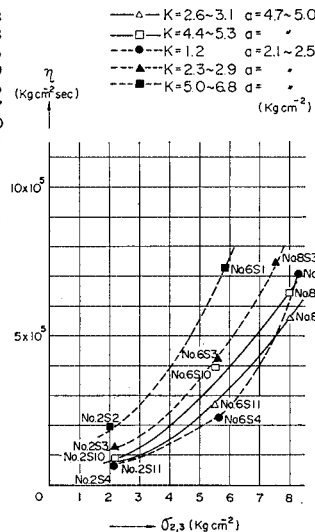
図一19 (c)

$\eta$ ~K Relations for Various Levels of  $a$  and  $\sigma_{2,3}$  (Sand)



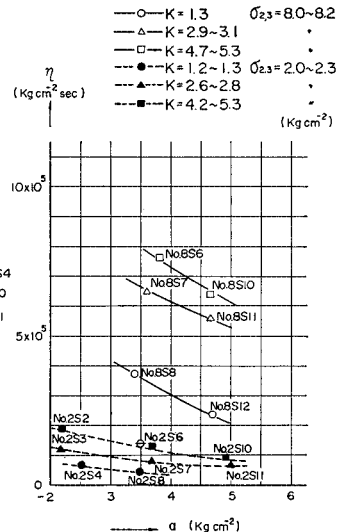
図一20 (a)

$\eta$ ~ $\sigma_{2,3}$  Relations for Various Levels of  $K$  and  $a$  (Sand)



図一20 (b)

$\eta$ ~ $a$  Relations for Various Levels of  $K$  and  $\sigma_{2,3}$  (Sand)



図一20 (c)

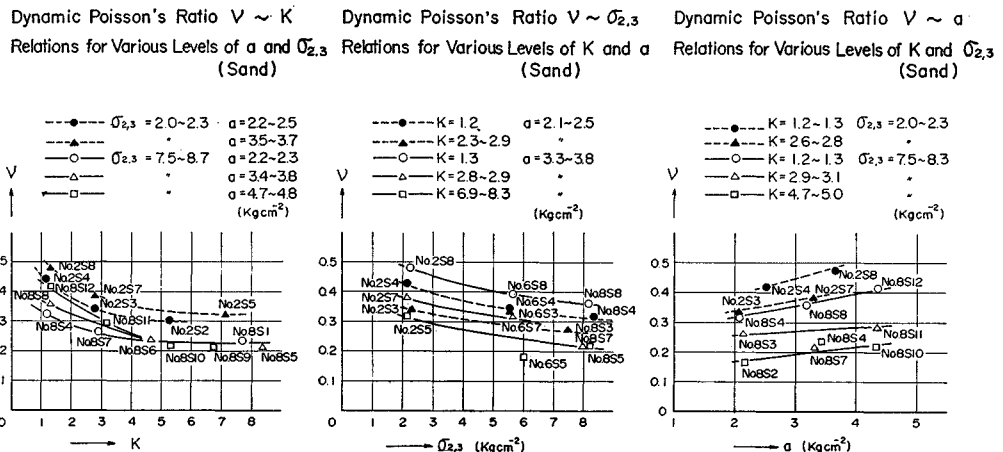


図-21 (a)

図-21 (b)

図-21 (c)

(a)  $a, \sigma_{2,3}$  を一定とし,  $K$  を減少させると, すなわち  $b$  を増大させると  $E$  の値は減少する。

(b)  $a, K$  を一定とし,  $\sigma_{2,3}$  を増大させると  $E$  の値は増大する。

(c)  $\sigma_{2,3}, K$  を一定とし,  $a$  を増大させると  $E$  の値は増大する。

すなわち, 砂においては動荷重振幅  $b$  に対しては Soft Spring 性を示すが, 動荷重平均レベル  $a$  に対しては hard spring 性をもつ。

永久ひずみに対し式 (13), (9) を適用して  $\eta$  を計算すれば表-7 の値となり, これと  $a, \sigma_{2,3}, K$  との関係を整理すれば 図-20 に示すようにつぎの性質をもつものであることがわかる。

(a)  $a, \sigma_{2,3}$  を一定とし,  $K$  を減少させると, すなわち  $b$  を増大させると,  $\eta$  の値は減少する。

(b)  $a, K$  を一定とし,  $\sigma_{2,3}$  を増大させると  $\eta$  の値は増大する。

(c)  $\sigma_{2,3}, K$  を一定とし,  $a$  を増大させると  $\eta$  の値は減少する。

以上の性質と,  $a, \sigma_{2,3}, K$  による  $E, \eta$  の変化の状況から, 次式のごとく表現するものとする。

$$E = S_1 + S_2 K + S_3 \sigma_{2,3} + S_4 a$$

$$\eta = S_5 + S_6 K + \left( S_7 - \frac{S_8}{K^3} - S_9 a \right) \times \sigma_{2,3} - S_{10} \sqrt{\sigma_{2,3}}$$

.....(14)

表-7 の値を使用し, 最適な係数  $S$  を求めてつぎの結果を得た。

$$E = 2.47 \times 10^3 + 2.20 \times 10^2 K + 4.63 \times 10^3 \sigma_{2,3} + 5.54 \times 10^2 a$$

$$\eta = 4.54 \times 10^5 + 1.04 \times 10^4 K$$

$$\left. \begin{aligned} &+ \left( 3.10 \times 10^5 - \frac{2.96 \times 10^4}{K^3} - 1.34 \times 10^4 a \right) \sigma_{2,3} \\ &- 6.50 \times 10^5 \sqrt{\sigma_{2,3}} \\ &2.1 \leq a \leq 4.9, \quad 2.0 \leq \sigma_{2,3} \leq 8.3, \\ &1.2 \leq K \leq 8.3, \quad 0.5 < f \leq 12 \end{aligned} \right\}$$

(単位 kg, cm, sec.)

.....(15)

動的ポアソン比  $\nu$  については  $K, \sigma_{2,3}, a$  との関係を示すと 図-21 のごとくなり, この結果から, 次式のごとく表現するものとする。

$$\nu = S_{11} + \frac{S_{12}}{K} - S_{13} \sigma_{2,3} + S_{14} a \dots\dots\dots(16)$$

表-7 の値を使用し, 最適な係数  $S$  の値を求めてつぎの結果を得た。

$$\nu = 0.234 + \frac{1.88 \times 10^{-1}}{K} - 2.28 \times 10^{-2} \sigma_{2,3}$$

Dynamic Modulus of Elasticity  $E_0 \sim$  Frequency of Load  $f$  (Crushed Stone)

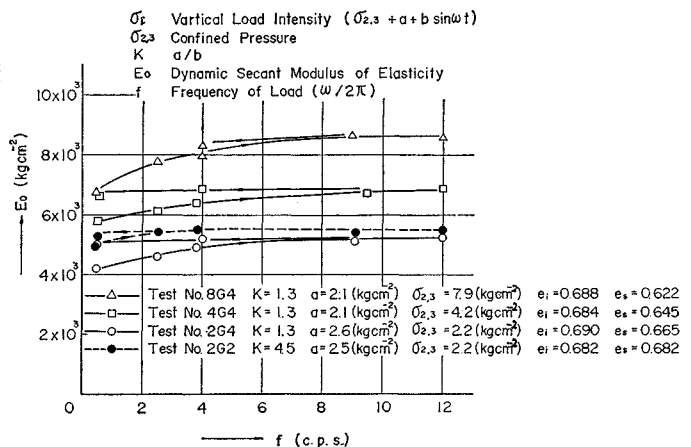


図-22

Volume Change due to Dynamic Loading (Crushed Stone)

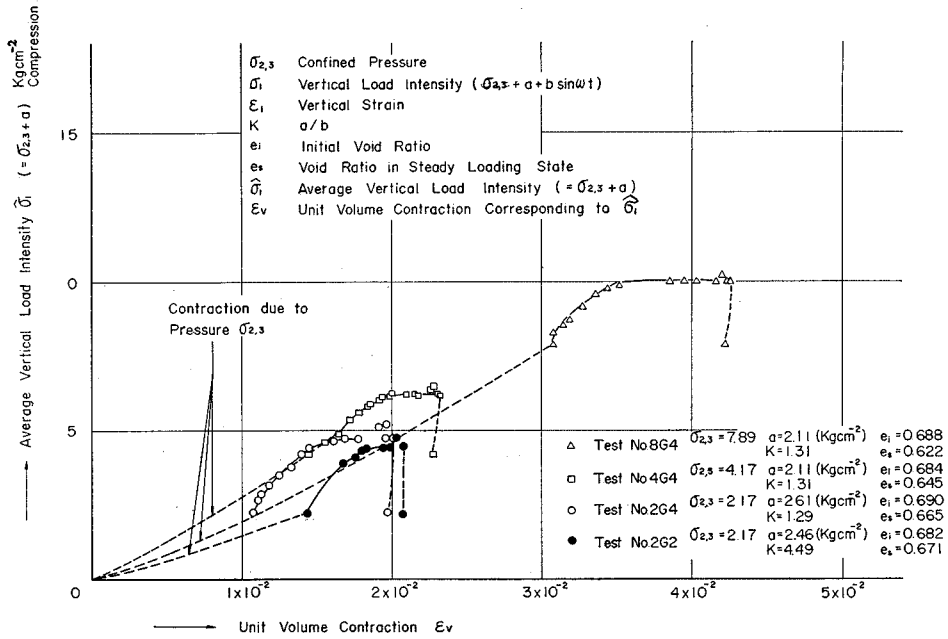


图-23

表-8 Calculated Dynamical Visco-elastic Constants of Crushed Stone

Test No	$\bar{\sigma}_{2,3}$ kg/cm <sup>2</sup>	$a$ kg/cm <sup>2</sup>	$K$	$E$ kg/cm <sup>2</sup>	$\nu$	$\eta$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$e_i$	$e_s$
2G2	2.2	2.2	6.2	$5.85 \times 10^3$	0.248	$1.90 \times 10^5$	0.685	0.668
2G2	2.2	2.5	4.5	$5.31 \times 10^3$	0.244	$1.44 \times 10^5$	0.682	0.671
2G3	2.2	2.4	2.5	$5.20 \times 10^3$	0.303	$9.64 \times 10^4$	0.686	0.670
2G4	2.2	2.6	1.3	$4.88 \times 10^3$	0.339	$5.65 \times 10^4$	0.690	0.665
2G5	2.2	3.3	7.1	$6.03 \times 10^3$	0.278	$8.88 \times 10^4$	0.699	0.670
2G6	2.2	3.5	4.5	$5.94 \times 10^3$	0.297	$1.24 \times 10^5$	0.689	0.667
2G7	2.2	3.4	2.8	$6.07 \times 10^3$	0.313	$1.04 \times 10^5$	0.680	0.655
2G8	2.1	3.3	1.3	$5.22 \times 10^3$	0.464	$3.92 \times 10^4$	0.694	0.659
2G9	2.5	4.7	6.2	$6.33 \times 10^3$	0.222	$1.64 \times 10^5$	0.699	0.690
2G10	2.1	4.9	4.4	$6.23 \times 10^3$	0.165	$1.20 \times 10^5$	0.699	0.685
2G11	2.2	4.7	3.0	$5.94 \times 10^3$	0.269	$3.89 \times 10^4$	0.709	0.689
2G2	2.1	4.9	1.2	$5.03 \times 10^3$	—	—	0.707	0.670
4G1	4.1	2.1	6.7	$6.40 \times 10^3$	0.242	$2.72 \times 10^5$	0.671	0.640
4G2	4.2	2.2	5.3	$6.97 \times 10^3$	0.204	$2.54 \times 10^5$	0.714	0.673
4G3	4.1	2.2	3.2	$7.45 \times 10^3$	0.235	$1.60 \times 10^5$	0.682	0.645
4G4	4.2	2.1	1.3	$6.47 \times 10^3$	0.341	$1.26 \times 10^5$	0.684	0.645
4G5	4.2	3.4	7.2	$7.25 \times 10^3$	0.228	$2.43 \times 10^5$	0.686	0.650
4G6	4.0	3.4	5.1	$7.04 \times 10^3$	0.250	$1.43 \times 10^5$	0.702	0.660
4G7	4.2	3.5	3.1	$7.02 \times 10^3$	0.354	$1.21 \times 10^5$	0.684	0.640
4G8	4.2	3.4	1.3	$6.51 \times 10^3$	0.343	$7.32 \times 10^4$	0.674	0.625

Test No	$\bar{\sigma}_{2,3}$ kg/cm <sup>2</sup>	$a$ kg/cm <sup>2</sup>	$K$	$E$ kg/cm <sup>2</sup>	$\nu$	$\eta$ kg/cm <sup>2</sup> sec	$e_i$	$e_s$
4G9	3.8	5.1	5.3	$7.56 \times 10^3$	—	—	0.661	0.630
4G10	4.2	4.7	4.9	$7.99 \times 10^3$	0.227	$1.49 \times 10^5$	0.664	0.625
4G11	4.0	4.8	2.8	$7.03 \times 10^3$	0.244	$9.30 \times 10^4$	0.646	0.607
4G12	4.2	4.7	1.2	$6.17 \times 10^3$	0.308	$4.70 \times 10^4$	0.697	0.650
8G1	8.1	2.1	7.0	$8.22 \times 10^3$	0.153	$7.98 \times 10^5$	0.686	0.630
8G2	8.2	2.1	5.7	$8.34 \times 10^3$	0.098	$4.96 \times 10^5$	0.696	0.635
8G3	8.2	2.2	3.1	$7.97 \times 10^3$	0.147	$5.40 \times 10^5$	0.673	0.620
8G4	7.9	2.1	1.3	$8.11 \times 10^3$	0.261	$2.05 \times 10^5$	0.688	0.622
8G5	8.2	3.4	7.6	$9.45 \times 10^3$	0.131	$4.30 \times 10^5$	0.689	0.625
8G6	8.0	3.4	4.9	$1.005 \times 10^4$	0.179	$3.83 \times 10^5$	0.681	0.625
8G7	8.0	3.4	3.0	$8.63 \times 10^3$	0.152	$2.94 \times 10^5$	0.693	0.642
8G8	8.0	3.3	1.2	$8.47 \times 10^3$	0.231	$1.59 \times 10^5$	0.690	0.616
8G9	7.9	4.7	6.9	$9.41 \times 10^3$	0.141	—	0.693	0.600
8G10	8.1	4.8	5.1	$9.24 \times 10^3$	0.134	$3.18 \times 10^5$	0.675	0.616
8G11	8.3	4.9	2.9	$9.04 \times 10^3$	0.176	$2.00 \times 10^5$	0.686	0.610
8G2	8.1	4.6	1.3	$8.99 \times 10^3$	0.240	$9.44 \times 10^4$	0.708	0.620

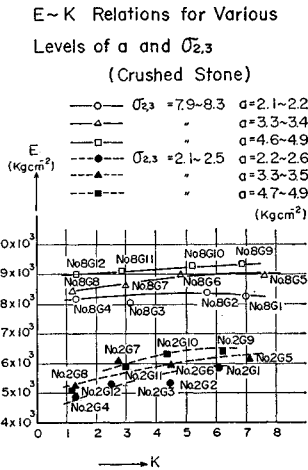


図-24 (a)

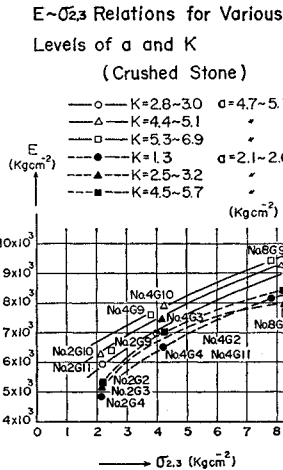


図-24 (b)

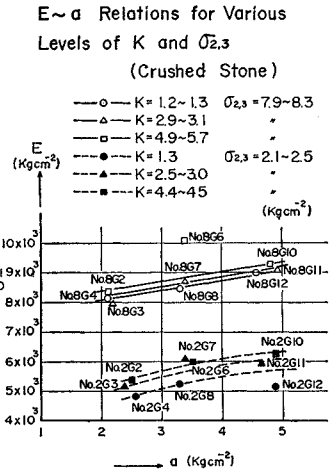


図-24 (c)

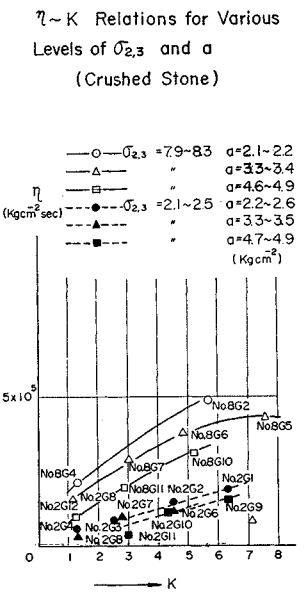


図-25 (a)

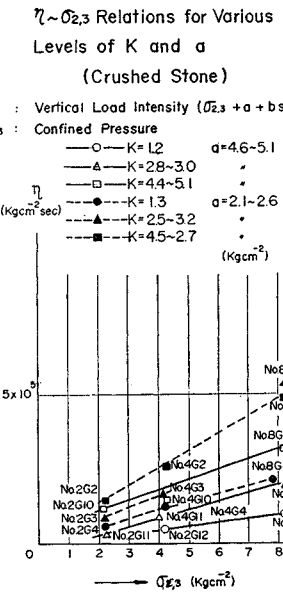


図-25 (b)

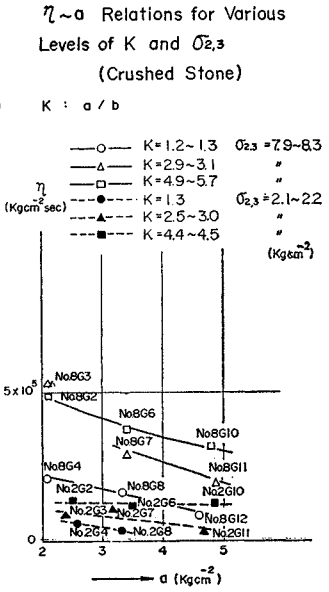


図-25 (c)

$$+3.80 \times 10^{-2} a$$

$$2.1 \leq a \leq 4.9, 2.0 \leq \sigma_{2,3} \leq 8.3,$$

$$1.2 \leq K \leq 8.3, 0.5 \leq f \leq 12$$

(単位 kg, cm, sec.)

.....(17)

と図-25 のダッシュポット  $\eta$  はともにも砂におけると同様の傾向を示している。これら曲線の型から判断して  $E, \eta$  に対しそれぞれ次式のごとく表現するものとする。

$$E = G_1 + G_2 K + G_3 \sigma_{2,3} + G_4 a$$

$$\eta = G_5 + (G_6 + G_7 K - G_8 a) \sigma_{2,3} - G_9 \sqrt{\sigma_{2,3}}$$

.....(18)

e) 砕石

砕石について得られた特性はほとんど砂の場合と同様である。図-22 は、動的割線弾性率  $E_0$  と動荷重周波数  $f$  との関係を表わしており、ほとんど周波数特性のないことを示す。図-23 は容積変化を表わしており、永久ひずみをともなった容積減少を示す。

各実験における物理定数の値は表-8 に示すとおりであり、これから得られた図-24 の Maxwell 体のばね  $E$

表-8 の値から最適の係数  $G$  の値を求め、つぎの結果を得た。

$$E = 2.96 \times 10^3 + 1.34 \times 10^2 K$$

$$+ 5.09 \times 10^2 \sigma_{2,3} + 3.53 \times 10^2 a$$

$$\eta = 3.872 \times 10^5 + (1.106 \times 10^5 + 9.45 \times 10^3 K$$

$$- 8.15 \times 10^3 a) \sigma_{2,3} - 3.59 \times 10^5 \sqrt{\sigma_{2,3}}$$

$$2.1 \leq a \leq 4.9, 2.1 \leq \sigma_{2,3} \leq 8.3,$$

$$1.2 \leq K \leq 6.9, 0.5 \leq f \leq 12$$

(単位 kg, cm, sec.)

.....(19)

動的ポアソン比  $\nu$  についても砂の場合と同様の傾向が

図-26 に示すごとく得られ、つぎの結果を得た。

$$\nu = 0.278 + \frac{1.43 \times 10^{-1}}{K} - 2.65 \times 10^{-2} \sigma_{2,3}$$

$$+ 1.13 \times 10^{-2} a$$

$$2.1 \leq a \leq 4.9, 2.1 \leq \sigma_{2,3} \leq 8.3$$

$$1.2 \leq K \leq 6.9, 0.5 \leq f \leq 12$$

(単位 kg, cm, sec.)

.....(20)

(2) 静的物理定数

静的載荷の場合の荷重強度とひずみの関係から、静的割線弾性率  $E_{0S}$ 、静的ポアソン比  $\nu_S$  を次式で計算する。

$$E_{0S} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_1 \sigma_{2,3} - 2 \sigma_{2,3}^2}{\epsilon_1 \sigma_1 + \epsilon_1 \sigma_{2,3} - 2 \epsilon_{2,3} \sigma_{2,3}} \dots\dots\dots(21)$$

$$\nu_S = \frac{\epsilon_1 \sigma_{2,3} - \epsilon_{2,3} \sigma_1}{\epsilon_1 \sigma_1 + \epsilon_1 \sigma_{2,3} - 2 \epsilon_{2,3} \sigma_{2,3}} \dots\dots\dots(22)$$

これらの計算値を  $\sigma_1, \sigma_{2,3}$  のレベルに応じて表現すれば非線型静的物理定数が得られることになる。

a) 粘土

図-27 は粘土における結果を示してあり、つぎの特性が知られた。

- ① 静的割線弾性率  $E_{0S}$  の値は、 $\sigma_{2,3}$  一定の場合  $\sigma_1$  の増大につれて指数関数的に減少する。
- ② 一定の  $\sigma_1$  に対して、 $\sigma_{2,3}$  が大きいほど  $E_{0S}$  の値は大となる。
- ③ 静的ポアソン比  $\nu_S$  の値は  $\sigma_1$  の増大につれて増大する。

実際の数値的表現は結局次式のごとくなる。

$$E_{0S} = \exp \left[ 2.31 \frac{14.0 + 1.1 \sigma_{2,3}^2 - \sigma_1}{4.8 + 0.45 (\sigma_{2,3})^{1.6}} \right]$$

ただし

Dynamic Poisson's Ratio  $\nu \sim K$   
Relations for Various Levels  
of  $a$  and  $\sigma_{2,3}$  (Crushed Stone)

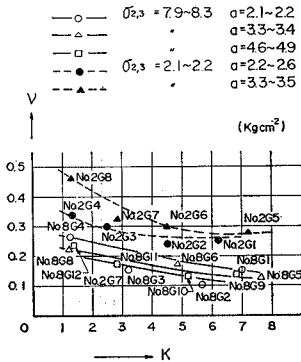


図-26 (a)

Dynamic Poisson's Ratio  $\nu \sim \sigma_{2,3}$   
Relations for Various Levels  
of  $K$  and  $a$  (Crushed Stone)

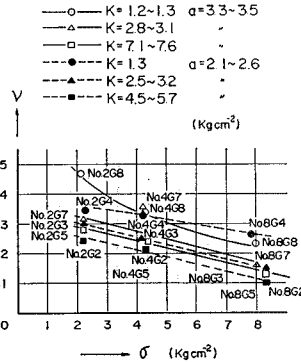


図-26 (b)

Dynamic Poisson's Ratio  $\nu \sim a$   
Relations for Various Levels  
of  $K$  and  $\sigma_{2,3}$  (Crushed Stone)

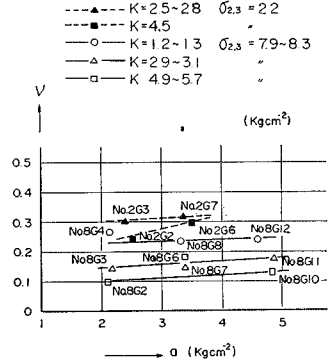


図-26 (c)

Statical Secant Modulus  $E_{0S} \sim \sigma_1$  Relations  
for Various Levels of Confined Pressures  
(Clay)

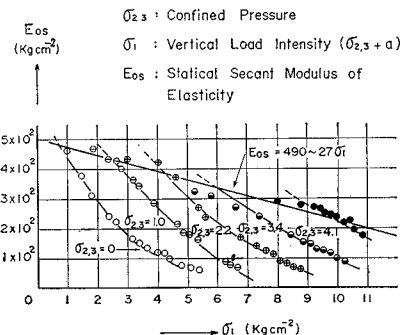


図-27 (a)

Statical Poisson's Ratio  $\nu_S \sim \sigma_1$  Relations  
for Various Levels of Confined Pressure  
(Clay)

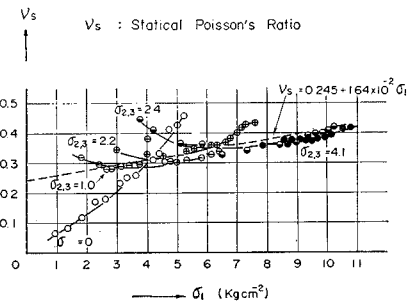


図-27 (b)



Statical Secant Modulus  $E_{0S} \sim$   
Vertical Load Intensity  $\sigma_1$   
(Sand, Crushed Stone)

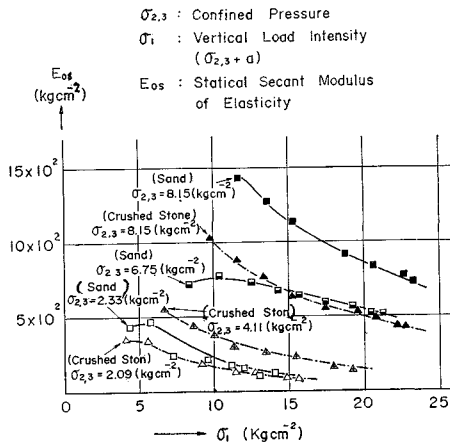


図-28 (a)

Statical Poisson's Ratio  $\nu_S \sim$   
Vertical Load Intensity  $\sigma_1$   
(Sand, Crushed Stone)

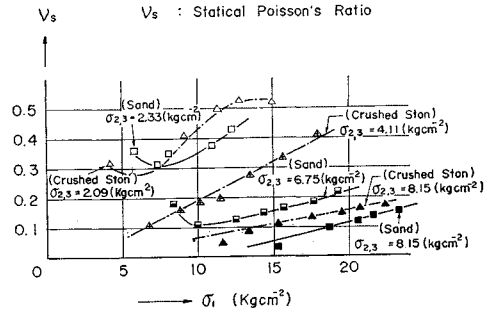


図-28 (b)

$$\exp \left[ 2.31 \frac{14.0 + 1.1 \sigma_{2,3}^2 - \sigma_1}{4.8 + 0.45 (\sigma_{2,3})^{1.6}} \right] \geq 490 - 27 \sigma_1$$

の場合

$$E_{0S} = 490 - 27 \sigma_1 \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$\nu_S = 0.245 + 1.64 \times 10^{-2} \sigma_1 \quad \dots\dots\dots(24)$$

ただし, 式 (23), (24) において

$$0 \leq \sigma_1 \leq 11.0, \quad 0 \leq \sigma_{2,3} \leq 4.1$$

(単位 kg, cm)

**b) 砂**

図-28 には砂における結果を示してあり, つぎの特性が明らかにされた。

① 静的割線弾性率  $E_{0S}$  の値は  $\sigma_{2,3}$  一定の場合  $\sigma_1$  の増大につれて指数関数的に減少する。

② 一定の  $\sigma_1$  に対し,  $E_{0S}$  の値は  $\sigma_{2,3}$  の大きいほど大となる。

③ 静的ポアソン比  $\nu_S$  の値は  $\sigma_1$  の増大につれて増大する。

④  $\sigma_1$  の一定値に対して  $\nu_S$  の値は  $\sigma_{2,3}$  の値の増加につれて減少する。

以上の性質を加味した実際の数値的表現は結局次式のごとくである。

$$E_{0S} = \exp \left[ 2.31 \frac{22.8 + 16.4 \sigma_{2,3} - \sigma_1}{2.93 + 5.24 \sigma_{2,3}} \right] \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$\nu_S = 0.273 - 4.87 \times 10^{-2} \sigma_{2,3} + (2.56 \times 10^{-2} - 1.72 \times 10^{-3} \sigma_{2,3}) \sigma_1 \quad \dots\dots\dots(26)$$

ただし

$$2.33 \leq \sigma_{2,3} \leq 8.15, \quad 6.66 \leq \sigma_1 \leq 23.0$$

(単位 kg, cm)

**c) 砕石**

砕石についての結果も図-28 に示してあり, その特性は砂の場合とほとんど同様である。

実際の数値的表現は結局次式のごとくである。

$$E_{0S} = \exp \left[ 2.31 \frac{24.1 + 11.3 \sigma_{2,3} - \sigma_1}{10.5 + 3.1 \sigma_{2,3}} \right] \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$\nu_S = (5.43 \times 10^{-2} - 5.75 \times 10^{-3} \sigma_{2,3}) \sigma_1 - 3.60 \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots(28)$$

ただし

$$20.9 \leq \sigma_{2,3} \leq 8.15, \quad 6.09 \leq \sigma_1 \leq 23.0$$

(単位 kg, cm)

**5. 結 言**

粘土, 砂, 碎石の各一例につき, その動的・静的弾性定数, 粘性定数, ポアソン比の具体的表現を試みて, 近似的ではあるが以上のごとき結果を得た。

これらの物理定数は, すべて非線型であり本例におけるがごとく, 表現の形式をできるだけ簡単にしたもの結果としてはきわめて複雑である。変動荷重を二軸的, 三軸的にすればさらに複雑なものとなるであろう。

これら物理定数の実際問題への適用は, したがって電子計算機に全く依存することになる。

著者らは引続いてフィルダムの静的・動的解析を例として, これら物理的定数の実際への適用を試みており, 別にこれを発表したいと考えている。

**参 考 文 献**

- 1) 小川・柳沢: 振動応力をうける土の力学的性質, 土質工学研究発表会, 1968年6月。
- 2) 村山・中崎・福岡: 粘土の動的弾性係数について, 土木学会学術講演会, 1965年5月。 (1968.8.21・受付)