

# 粘性土の動的強度特性について (第2報)

—ヒズミ制御法による動的三軸試験の試み—

齋藤 二郎  
平間 邦興

## Studies on Strength Characteristics of Clay under Dynamic Load (Part 2)

Jiro Saito  
Kunioki Hiramata

### Abstract

Since the Niigata Earthquake in 1964, there has been much research work carried out in Japan on the dynamic properties of soils, but this research work has emphasized the study of liquefaction of sand. The dynamic properties of cohesive soils, which are discussed in this paper, although reported in many cases in regard to methods of testing and test results, still requires much research.

Almost all of the tests consist of the stress control method for obtaining the dynamic properties of cohesive soil using dynamic triaxial compression apparatus, but there is a prominent fault in that it is difficult to provide a definition of soil failure itself by this method.

The authors have experimentally made a new dynamic triaxial compression apparatus utilizing a strain control method and have carried out a series of experiments. Good results were obtained and the mechanism of the apparatus as well as some of the results are described.

### 概 要

我が国における土の動的性状に関する研究は1964年の新潟地震以来盛んにおこなわれてきているが、その主流は砂の液状化の研究に置かれてきた。この研究で取扱うような粘性土の動的性状に関しても、試験方法および試験結果などについて数多くの報告はなされてはいるが、この種の研究は今後さらになされるべき分野である。

この内、動的三軸圧縮試験機によって粘性土の動的性質を求めるには、通常、応力制御法によって試験をおこなう場合が殆んどである。しかし、この方法によれば、土の破壊そのものの定義づけが難かしい。

筆者らは、上記の問題の解決を図ってヒズミ制御法による動的三軸試験装置を試作し、実験をおこなってきたが、良好な結果が得られたので、ここで、装置の機構詳細と実験結果のいくつかを明らかにしたい。

### 1. まえがき

三軸圧縮試験機によって粘性土の動的性質を求めるには、通常、応力制御法によって試験をおこなう場合が殆んどである。この方法は既知の大きさの振幅応力がある回数だけ与えて土に生じたヒズミを求める試験であり、破壊に至るまで振幅応力の上限值と下限値が常に規定されているから、動的間ゲキ水圧の測定に疑義のある現状では破壊そのものの定義づけがむずかしいという欠点を有している。

筆者らは、このような問題の解決を図って、あらたにヒズミ制御法による動的三軸試験装置を試作し、実験をおこなってきた。

ここでは、装置の機構詳細と得られた実験結果のい

くつかを明らかにしたい。

### 2. 実験装置

ここでいうヒズミ制御法とは、試験中、試料に加わる下限応力のみを記憶させて規定し、振幅ヒズミを任意に制御することにより上限の振幅応力が測定結果として得られるもので、この際、下限応力は試験条件に対応して任意に規定することが可能である。それ故、破壊時には振幅ヒズミ量に対応して振幅応力に明確なピークの現われることも可能となり、その結果、土の変形の問題ばかりでなく、いわゆる破壊の問題についても動的強度としてある程度明確に把握することができる。

実験装置の大要は図—1に示すように制御部分を除



いて動作波形の基本パターンを図-4に示す。

また振動载荷中の測定例を示したのが図-5であるが、振幅応力の下限值で曲線形状に多少のくずれを見せるほかは、ほぼ安定した载荷状態と判断できるようである。同図にはあわせて、試験時のヒズミと応力の表示例を示す。

### 3. 実験方法

実験に使用した粘性土試料は大阪府堺市泉北地区でG. L. -8.0m付近から採取したものを加水して練返し、再圧密したものである。試験時における試料の物理的性質を表-1に示す。

試験は圧密非排水条件でおこない、あらかじめ対応する側圧で静的試験をおこなったのち、動的試験を実施する。まず静的セン断強さに対する割合で定めた初期最小応力(振幅応力の下限值)を静的に载荷し、破壊に至るまで一定の振幅ヒズミで加振した。

土の組成	砂 (%)	8
	シルト (%)	55
	粘土 (%)	37
含水比 (%)		36.6
真比重 G <sub>s</sub>		2.705
湿潤密度 $\gamma_{土}$ (g/cm <sup>3</sup> )		1.82
コンシステンシー	L. L (%)	69.7
	P. L (%)	27.2
	P. I (%)	42.5

表-1 試料の物理的性質

静的三軸試験	側圧 $\sigma_{3c}$ (kg/cm <sup>2</sup> )		ヒズミ速度		
	0.5, 1.0, 2.0, 4.0		0.1 %/min		
動的三軸試験	側圧 $\sigma_{3c}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	振幅ヒズミ $\Delta\epsilon$ (%)	初期最小応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{min}$ (%) (静的セン断強さに対する割合)	0.5	5
				1.0	20
	0.1	2.0	45		
		4.0	70		
	0.4	0.5	5		
		1.0	20		
	0.8	2.0	45		
		4.0	70		
	および1.6		0.5	5	
			1.0	20	
			2.0	45	
			4.0	70	

表-2 試験条件

以上の試験条件を一括表示したのが表-2である。なお、供試体寸法は 50φ×125mm であり、使用した振動周波数は1Hz、振動波形は正弦波である。

### 4. 実験結果

#### 4.1. 強度定数についての検討

動的载荷時の破壊点を一義的に図-5における軸差応力のピークの点と定め、試験結果をモールの応力円で示したのが図-6であり、これらの結果を一括表示したのが表-3である。今般の実験において動的間ゲキ水圧の測定は供試体下端でおこなったが、载荷速度を考慮すると測定値には疑義があるため、ここでは有効応力解析結果については参考として付記するにとどめた。強度定数に関して、粘着力に有意の差は認められないが、動的内部マサツ角は増加の傾向を示し、また初期応力の影響を大きく受けていることがわかる。また有効応力解析結果について、初期応力と内部マサツ角の関係から、間ゲキ水圧の時間的遅れを推定することができる。

#### 4.2. 応力とヒズミの関係

側圧  $\sigma_{3c} = 4.0 \text{ kg/cm}^2$ 、振幅ヒズミ  $\Delta\epsilon = 0.4\%$  の割合を例にとって、応力とヒズミの履歴を示したのが図-7である。ヒズミ制御法による試験条件の特徴が明確に表われており、9波で破壊が生じたと判断することができる。ここで任意の周期における振幅応力と振幅軸ヒズミの比を動的弾性係数 ( $E_d$ ) とすれば、9波~13波の範囲で最も大きな弾性係数を示しているようである。

	初期応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{min}$ (%)	全応力		有効応力(参考)	
		C <sub>cu</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ cu	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi'$
静的試験	—	0.05	13°20'	0	25°40'
動的試験	20	0.03	14°30'	0.03	17°50'
	45	0	15°40'	0.04	20°30'
	70	0.05	17°00'	0.03	23°10'

表-3 強度定数

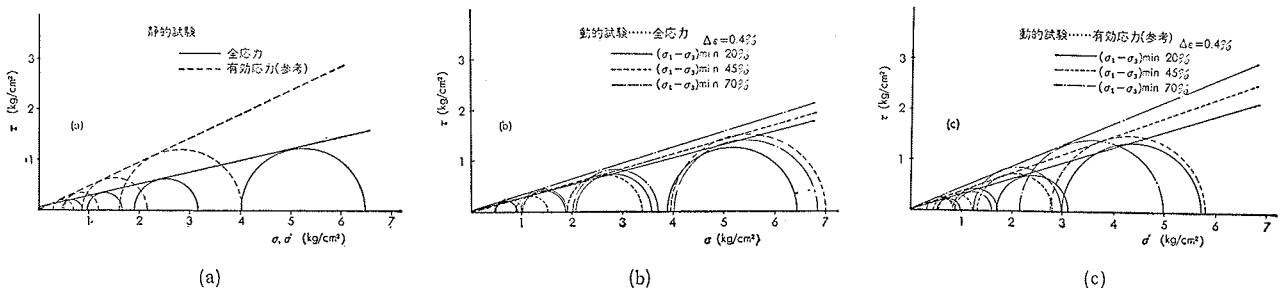


図-6 モールの応力円

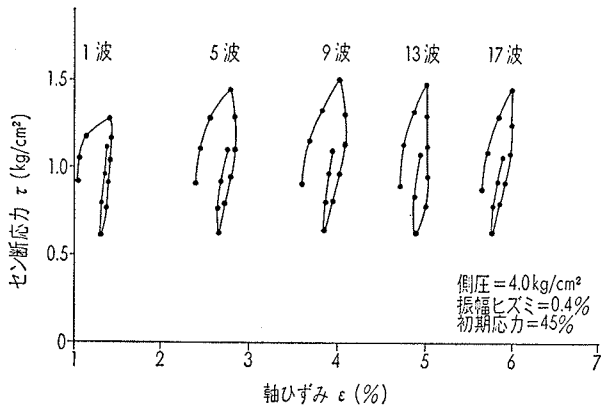


図-7 軸差応力と軸ヒズミの履歴

### 4.3. 振幅応力の最大値と静的セン断強さの比

実験値に一般性を持たせるため、破壊時における振幅応力の最大値を静的セン断強さとの比で表わし、これを側圧に対応させて示したのが図-8である。110～130の範囲に分布しており、側圧の増大とともにいくらか減少の傾向を示すが、有意の差と判断するほどではない。

同様に、載荷過程における振幅応力の最大値の分布状況を静的セン断強さとの比で示したのが図-9である。試験条件によって、破壊に至る載荷回数およ

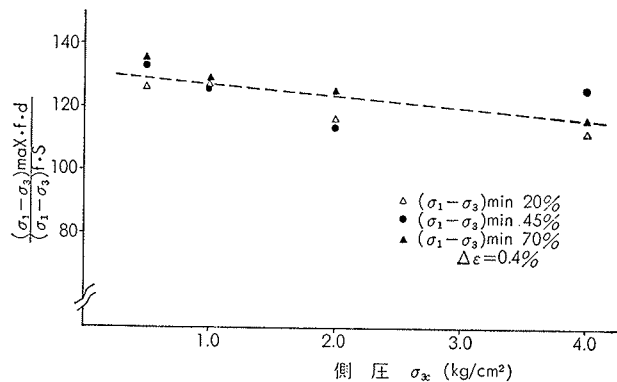


図-8 振幅応力の最大値と静的強さの比 (破壊時)

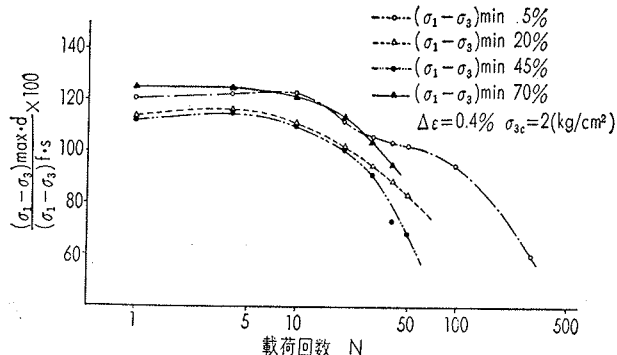


図-9 振幅応力の最大値と静的強さの比の分布

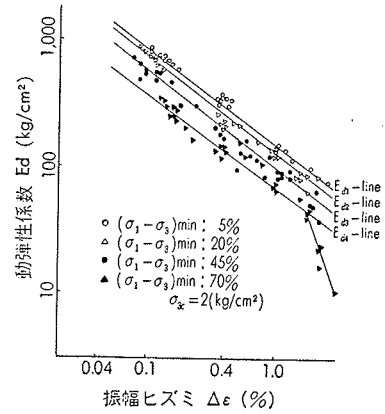


図-10 動的弾性係数と振幅ヒズミ

び破壊後のいわゆる残留強度に明確な差異が認められる。また、載荷回数が30回前後で、大略、静的セン断強さに一致するようである。

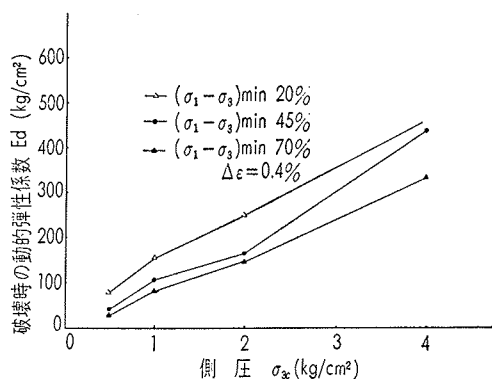
### 4.4. 動的弾性係数と振幅ヒズミの関係

土の動的性質に影響をおよぼす因子のうちで、最も影響の大きいのが振幅ヒズミの大きさといわれている。その関係を明らかにするため、動的弾性係数に対応させて両対数紙上で示したのが図-10である。動的弾性係数は30～900の広い範囲で分布し、振幅ヒズミの影響のきわめて大きいことが理解できよう。初期応力ごとに、かなり明確な直線性が認められ、図に示された各直線は、それぞれ  $Ed_1=143 \cdot \Delta\epsilon^{-0.764}$ ,  $Ed_2=128 \cdot \Delta\epsilon^{-0.768}$ ,  $Ed_3=95 \cdot \Delta\epsilon^{-0.772}$ ,  $Ed_4=68 \cdot \Delta\epsilon^{-0.730}$  で表わされ、ほぼ平行と解釈される。ここで既報<sup>2)</sup>の東京都内で採取した軟弱な沖積粘土について示せば  $Ed=52 \times \Delta\epsilon^{-0.691}$ ,  $Ed'=178 \times \Delta\epsilon^{-0.704}$  となつて殆んど同じ勾配で表わされ、動的弾性係数と振幅ヒズミの間には試料条件に依らず一定の関係の成り立つ可能性があるといえる。一方、同図からは振幅ヒズミのきわめて大きな範囲で直線性が失われて屈曲を示す傾向も予想されるが、現在のデータ量からは、その詳細をさだかにすることはできない。その究明には、土のレオロジー的性状の把握が必要となろう。

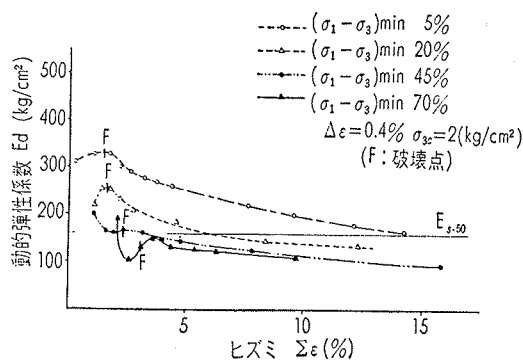
### 4.5. 動的弾性係数の経緯

破壊時における動的弾性係数の値を側圧に対応して示したのが図-11である。初期応力とともに側圧が大きな影響をおよぼしていることが理解できるが図-8に示す結果を考え合わせれば、静的変形係数も同様の傾向を示すと推定することができる。いずれにしても、動的弾性係数の分布幅はきわめて大きいといえよう。

動的載荷過程における動的弾性係数の変化をヒズミの進行に対応させて図-12に示す。同図には参考のため静的変形係数  $E_s \cdot 50$  を併記してある。初期応力の小さいほど動的弾性係数が大きいのは当然の傾向といえ



図一11 破壊時の動的弾性係数



図一12 荷重過程の動的弾性係数の変化

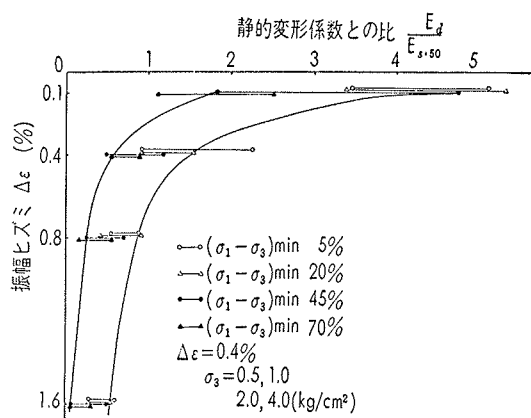
るが、その分布形状も初期応力によって異った傾向を示すようである。また図一12からはヒズミ制御法による動的破壊の特徴として、一般に破壊点で動的弾性係数は大きな値を示し、その後荷重とともに係数の減少していく様子が認められるが、一方、動的弾性係数の最大の点と破壊点は必ずしも一致しないという結果が得られている。

#### 4.6. 静的変形係数との比

振幅ヒズミ、側圧および初期応力などの諸条件をすべて包括し、動的弾性係数と静的変形係数の比を振幅ヒズミに対応して示したのが図一13である。一括表示しているためある幅をもってはいるが、一応の傾向を見い出すことができる。一般に振幅ヒズミが小さいほど動的弾性係数は大きくなるため比の値も大きくなるが、ほぼ 0.4%の振幅ヒズミで変曲を示し、動的弾性係数の急増することが推定される。また平均的には、振幅ヒズミが 0.4%で静的変形係数に一致するようである。

#### 5. あとがき

三軸圧縮試験機を使って粘性土の動的性質を求める



図一13 静的変形係数との比較

場合、現在、一般的に使用されている応力制御法に付随する問題点の解決を図って、試作したヒズミ制御装置の詳細を明らかにするとともに、この試験方法による実験結果のいくつかを示した。

このヒズミ制御法によれば、これまで困難とされてきた粘性土の動的破壊そのものの定義づけも比較的容易におこなうことが可能であり、いわゆる動的強度についてもある程度明確にすることができる。しかしながら、今般試作したヒズミ制御装置そのものが未だ満足できるものではなく、試行錯誤の状態である。現在、改良を試みてはいるが、大方の御叱正を賜われれば幸甚である。

#### 謝 辞

本研究をおこなうにあたっては、日産基礎工業㈱、山下善也、坂田電機㈱、中山淳、両氏の多大なる協力を受けた。また、この研究の一部は法政大学工学部、山門明雄教授の御指導を受けていた秋山修、山下幸夫(現、当社石川工事々務所)、両君に実施していただいた。

ここに記して、深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 斎藤二郎, 平間邦興, “粘性土の動的強度特性について”, 大林組技術研究所々報, No. 6, pp. 108~112(1972)
- 2) 斎藤二郎, 平間邦興, “粘性土の動的セン断特性について”, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集 pp. 197~200 (1972)