

飽和砂層の液状化に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON LIQUEFACTION OF SATURATED SAND LAYER

尾 島 勝*・古 賀 泰 之**

By Masaru Ojima and Yasuyuki Koga

1. ま え が き

砂質地盤の液状化現象の解明は、構造物の設計・施工上の重要な課題である。具体的には、たとえば、構造物設計において考慮すべき最大地震に対し、地盤が液状化するかどうかを予測すること、そしてそれが予測されるときには、その防護策をうちたてることなどである。

このような問題の解決には、まず第一に、液状化現象の起因・空間的規模（伝播深さと広がり）・時間的規模（継続時間）など、液状化機構の基本的性状に関する正しい解析が必要となる。われわれは、すでにこれらについて理論的な解析を行ない若干の考察を行なっているが¹⁾、本研究で

は、前論文中に示された理論展開において導入された実験定数（励起加速度 a_e 、液状化速度係数 R ）などの仮定の妥当性を実験結果に基づいて検討し、さらにそれらの値を実験的に決定すること、ならびに、加振方法・振動継続時間、有効上載圧（拘束条件）、砂層の間げき率・透水係数などの相違が液状化現象におよぼす影響を考察することを目的としている。

第 2 節で本研究に用いた実験装置・計測機器ならびに実験方法について述べ、第 3 節で実験結果およびその考察について述べている。第 4 節では本研究で得られた成果を要約して結語としている。

2. 実験装置・計測機器と実験方法

実験装置としては、Fig. 1 に示すような寸法を持つアクリライト製の直方体砂層とそれに調和振動を与える振動試験機（伊藤整機製、松平式振動試験機 UBC-10 A 型）である。この振動試験機の規格は次のようである。

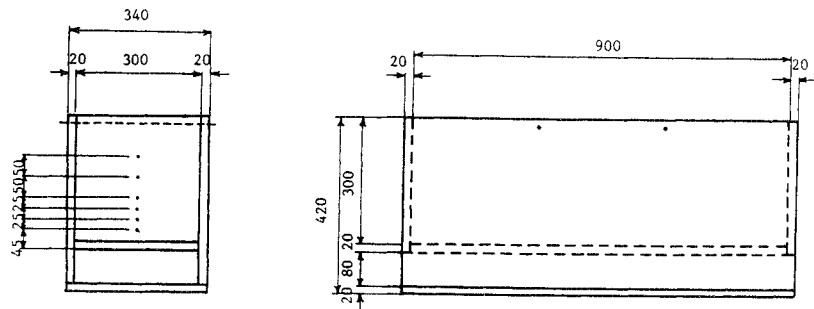


Fig. 1 Dimensions of Experimental Sand Container

標準最大載荷重量	250 kg
標準振動数変化率	1 c/s/sec
最大全振幅	カム駆動方式 (CAM) 40 mm アンバランス・マス駆動方式 (U.B.) 5 mm
振動数変更範囲	CAM 50~600 c.p.m. U.B. 600~3 300 c.p.m.
最大振動加速度	CAM ± 3 g U.B. ± 10 g

振動台 (1 m \times 1 m) 上に取付けられる砂層は Fig. 1 に示すように底版は二重構造になっており砂層としての容量は (30 cm \times 30 cm \times 90 cm) である。また長手方向に 30 cm 間隔で 2 ヶ所に補剛材を取付けて横方向へのたわみを防止している。また左側の図からわかるとおり、2.5 cm あるいは 5 cm 間隔で内径 6 mm の圧力測

* 正員 工修 京都大学工学部助手 土木工学教室
** 正員 工修 建設省土木研究所

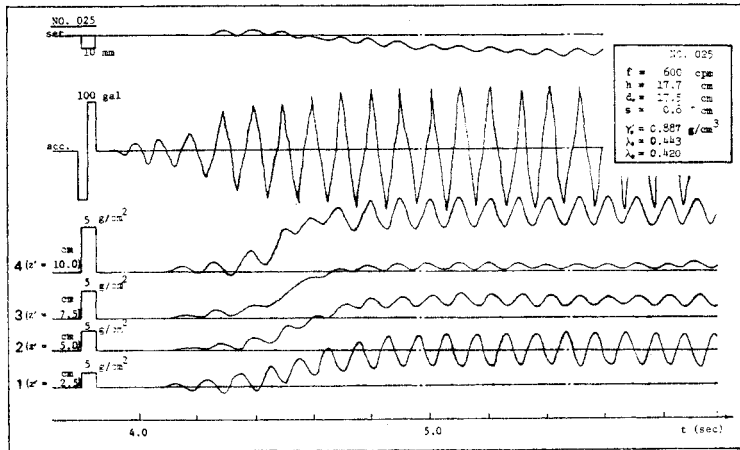


Fig. 2 Example of Experimental Record by Oscillograph Recorder

出力を増幅するストレン・メータ（共和電業製，6CO-50H型），さらに出力を記録する電磁オシログラフ（三栄測器社製，FR-102型ビジグラフ）である。

この実験で用いた圧力変換器は，最大変動圧力 20 g/cm² (DLPU 0.02 型) あるいは 50 g/cm² (DLPU 0.05 型) まで測定できるきわめて高感度・高性能のものであり，間げき水圧の変動量を十分な精度で測定することができる。

Fig. 2 は，砂層が液状化したときの実験記録の一例（実験 No. 025）である。この図の上から順

に沈下量，加速度，間げき水圧（4つ），時間スケールを表わす記録である。変位計，加速度計，水圧計のそれぞれに沈下量，加速度，間げき水圧（4つ），時間スケールを表わす記録である。変位計，加速度計，水圧計のそれぞれ

に沈下量，加速度，間げき水圧（4つ），時間スケールを表わす記録である。変位計，加速度計，水圧計のそれぞれ

Table 1 Characteristics of Experimental Sand Grains

	Specific gravity	Grain size (mm)	Porosity	Grain roughness
TOYOURA Sand	2.62	0.16~0.25	0.38~0.45	square
Glass Grains	2.48	0.17~0.25	0.34~0.40	round

計測用機器としては，振動加速度測定用の加速度計（新興通信社製，BA型2G-120），沈下量測定用の変位計（日本測器社製，508-A型），間げき水圧測定用の圧力変換器（東洋測器社製，DLPU 0.02型差圧計3個，DLPU 0.05型差圧計1個），これらの計器からの

Table 2 Relation between Sand Thickness (d) and Porosity (λ)

Experimental Number	d(cm)	λ	Experimental Number	d(cm)	λ	Experimental Number	d(cm)	λ	Experimental Number	d(cm)	λ
No. 001	23.5	0.450	No. 022	24.8	0.456	No. 025	17.7	0.453	No. 201	24.5	0.396
	23.4	0.449		24.7	0.454		17.6	0.450		24.4	0.394
	23.3	0.447		24.6	0.452		17.5	0.443		24.3	0.392
No. 021	23.2	0.444	No. 024	24.5	0.449	No. 030	17.4	0.440	No. 206	24.2	0.391
	23.1	0.442		24.4	0.447		17.3	0.437		24.1	0.386
	23.0	0.440		24.3	0.445		17.2	0.434		24.0	0.384
No. 101	22.9	0.437	No. 125	24.2	0.443	No. 128	17.0	0.430	No. 301	23.9	0.381
	22.8	0.435		24.1	0.440		16.9	0.427		23.8	0.379
	22.7	0.432		24.0	0.438		16.8	0.424		23.7	0.376
No. 124	22.6	0.430	No. 127	23.9	0.436	No. 130	16.7	0.420	No. 304	23.6	0.373
	22.5	0.427		23.8	0.433		16.6	0.417		23.5	0.371
	22.4	0.425		23.7	0.431		16.5	0.413		23.4	0.368
	22.3	0.422	No. 401	23.6	0.428	16.4	0.410	23.3	0.365		
	22.2	0.419		23.5	0.426	16.3	0.406	23.2	0.362		
	22.1	0.417		23.4	0.423	16.2	0.402	23.1	0.360		
	22.0	0.414	No. 410	23.3	0.421	16.1	0.399	23.0	0.357		
	21.9	0.411		23.2	0.418	16.0	0.395	22.9	0.354		
	21.8	0.409		23.1	0.416	15.9	0.391	22.8	0.351		
	21.7	0.406	23.0	0.413	15.8	0.387	22.7	0.348			
	21.6	0.403	22.9	0.411	22.6	0.346					
	21.5	0.400	22.8	0.408	22.5	0.343					
	21.4	0.398	22.7	0.406							
	21.3	0.395	22.6	0.403							
	21.2	0.392	22.5	0.400							
21.1	0.389	22.4	0.398								
21.0	0.386	22.3	0.395								
Weight of Sand Layer 120.66 kg			Weight of Sand Layer 131.40 kg			Weight of Sand Layer 89.62 kg			Weight of Sand Layer 124.33 kg		

それぞれのキャリブレーション値は図に示すとおりであり、この実験の概要は推察できよう。

液状化時の間げき水圧記録を模式的に描けば、Fig. 3 のようである。この水圧記録における交番変動値がいわゆる間げき動水圧 (p_d) を与え、この交番変動の中心線の基線からのずれが過剰間げき水圧 (u) を与えるものである。

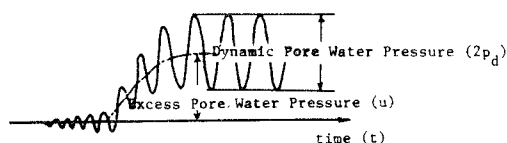


Fig. 3 Definition of Dynamic Pore Water Pressure (p_d) and Excess Pore Water Pressure (u)

実験試料砂としては、豊浦標準砂および研磨用のガラス粒子（東芝化学製）を用いたが、これらの物理諸量は Table 1 に示すとおりである。これらの試料を十分に浸水させたのち、かくはんによって空気を追い出し飽和させ、それを小量ずつ水をはった砂槽中に流下させると同時に噴出水によってクイックサンドを起こさせ、できるだけゆるづめで均一の砂層を作成した。

実験の手順としては、まず実験砂層作成の過程において測定した試料重量と砂層内に占める体積とから見かけの単位体積重量を算出し、別途に測定した試料の真比重から、均一砂層と仮定して初期間げき率を算出しておく。今回の実験における初期砂層厚 d_0 と初期間げき率 λ_0 との関係は Table 2 に示すとおりである。少しこの表の見方について説明しておく。すなわち、実験 No. 001~No. 021 および No. 101~No. 124 での試料重量はすべて 120.66 kg であるが、初期砂層厚は各実験によって異なるため、たとえば、No. 001 では $d_0=23.4$ cm であるから $\lambda_0=0.449$ 、No. 101 では $d_0=22.1$ cm であるから $\lambda_0=0.417$ となる。

すべての計測機器をセットした後振動実験を開始するが、加振力としてはアンバランスト・マス駆動による水平一方向正弦振動を与える。振動数を所定の値に設定したのち振幅を増大させて加速度を上げると同時に、スタータを始動してすべての計測機器からの出力の同時記録を行なった。その一例はすでに Fig. 2 に示されている。振動力の与え方は次節で述べるように 2 通りあるが、計測は過剰間げき水圧 u が完全に逸散して液状化現象が終了したと考えられる時間まで継続した。

3. 実験結果とその考察

(1) 実験の分類

今回行なった実験の諸条件を Table 3 に一括して示す。表中の記号は、 h : 水深 (cm), d_0 : 初期砂層厚 (cm), d_e : 最終砂層厚 (cm), p_0 : 表面上載圧 (g/cm^2), a_{\max} : 振動加速度の最大値 (gal) である。なお、振動条件 (Vibratory Condition) の欄中の Const. および Down は、振動加速度を a_{\max} にした後、そのまま一定に保たせるものと、ただちに減少させるものとを意味する。また、液状化の判定の欄の○, △, ×印は、それぞれ、液状化の指標としての過剰間げき水圧が、各測点において有効上載圧に等しいかあるいはそれに近い値に達したいわゆる砂層の完全液状化とみなせるもの、ある深さまでしか上述の関係を満足しないいわゆる不完全液状化とみなせるもの、過剰間げき水圧が発生せず、したがって液状化しなかったものを意味する。

今回行なった実験を、考察目的別に分類すれば次のようである。

- (i) 試料による分類
- (ii) 振動力の与え方による分類
- (iii) 砂層厚と水位の相対関係による分類
- (iv) 表面上載荷重による分類

これらの系列の目的を簡単に述べれば、(i) は砂層の透水係数、間げき率、構成粒子の粗度など試料砂の物理特性の相違による液状化性状への影響を明らかにすること、(ii) は振動継続時間や振動加速度の増加率・大きさなどの振動力特性の相違による影響を明らかにすること、(iii) は砂層が水中に没している場合の砂層面より上部にある水の影響を明らかにすること、(iv) は表面上載圧の存在により増大する飽和砂層内部の有効応力の相違による影響を明らかにすることである。

以上の目的にしたがって実験を分類したが、実験番号は 3 桁の数字で表わし、最初の数字が 0 は標準砂の加速度 Const. の実験、1 は標準砂の加速度 Down の実験、2 はガラス粒子の加速度 Const. の実験、3 はガラス粒子の加速度 Down の実験、4 は標準砂の上載荷重がある場合の実験を表わし、次の 2 桁の数字はその実験番号を表わすものである。

(2) 液状化現象の基本的性状

a) 液状化の程度と励起加速度

Fig. 4, 5 は、実験番号 013, 021 の結果を示したもので、各測点での過剰間げき水圧 (u) および加速度 (a) の時間変化が描かれている。ここに、各測点は砂層

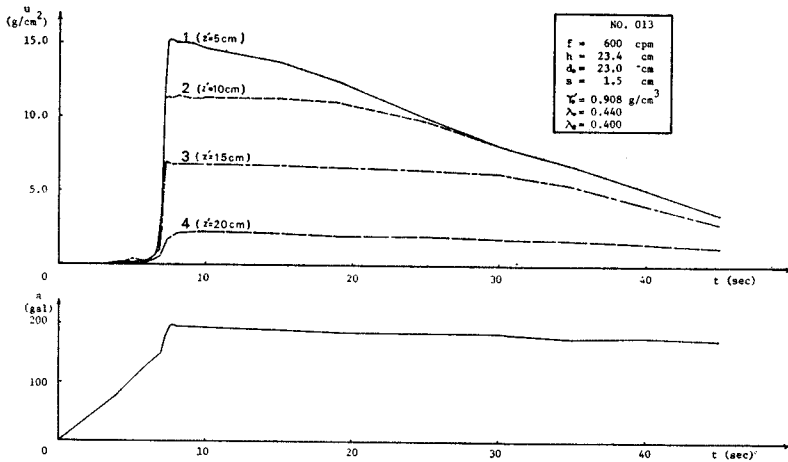


Fig. 4 Change of Excess Pore Water Pressure (u) and Vibratory Acceleration (a) in Experimental Series 0 (most part of the sand layer is liquefied)

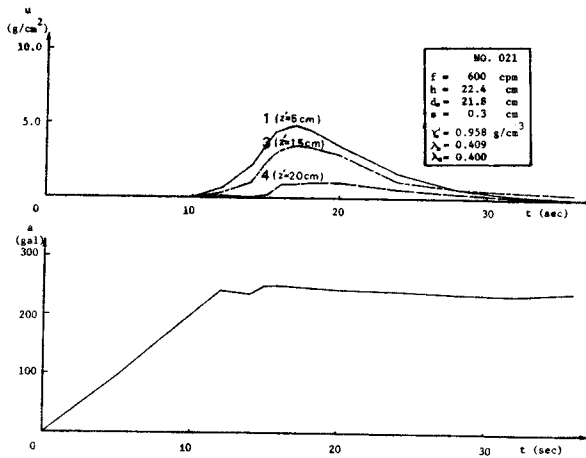


Fig. 5 Change of Excess Pore Water Pressure (u) and Vibratory Acceleration (a) in Experimental Series 0 (Intermediate case between Figs. 4 and 6)

底面を基準にしており、その高さは図中に符号 z' を用いて示した。なお、前報¹⁾では、座標原点を砂層表面にとり鉛直下方を z の正方向にとったことを付記しておく。図中に示した符号は、 f : 振動数、 h : 水深、 d_0 : 初期砂層厚、 s : 沈下量、 r_0' : 初期状態での砂の水中単位体積重量、 λ_0 : 初期間げき率、 λ_e : 最終間げき率を表わす。

砂層がある深さまで完全に液状化しておれば、その点での u の値はその点での有効上載圧 (表面上載圧がない場合は砂層重量) に等しくなることから、液状化の程度を u の値の大きさによって判断することができる。たとえば、Fig. 4 の u の最大値は、測点 1,2,3,4 に対しそれぞれ 15.2, 11.2, 7.0, 2.2 g/cm² であり、測

点 2,3,4 での u の最大値はその点より上にある砂層重量にほぼ等しく、測点 1 での値はそれよりも小さいことから、測点 2 の深さまでの砂層は完全に液状化しており、測点 1 は完全液状化までには至らなかったと判断できる。同様に Fig. 5 の結果を考察すれば、砂層表面近くを除く砂層の大部分は不完全な液状化しか起こしていないことがわかる。

また、 u が一定値を保っている時間は、測点 4, 3, 2, 1 の順に浅いところほど長いことから、液状化の安定化は大体的にみて下層から上層へと進行する

といえよう。

Fig. 6 は、A, B, C, D の順にひき続き行なった一連の実験結果を示したものである。いずれの実験

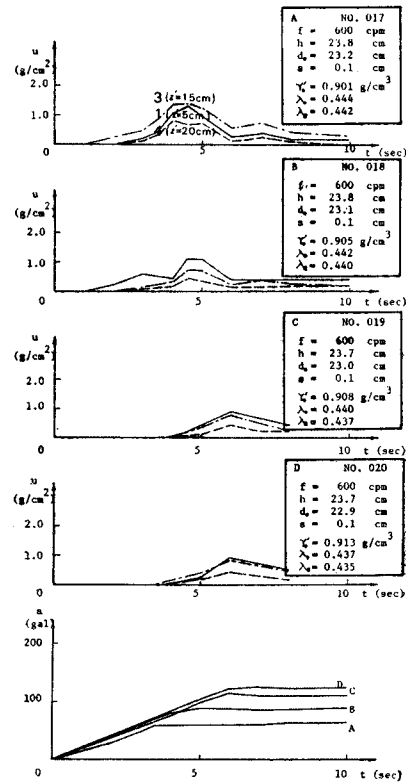


Fig. 6 Change of Excess Pore Water Pressure (u) and Vibratory Acceleration (a) in Experimental Series 0 (A little part of the sand layer is liquefied)

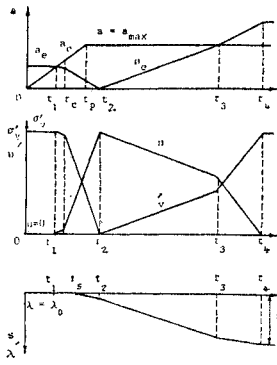


Fig. 7 Illustration of Change of Excess Pore Water Pressure (u), Effective Stress (σ_v'), Porosity (λ), Exciting Acceleration (a_e) and Vibratory Acceleration (a) in Liquefaction Process

も u の値から判断すれば、液状化の程度は小さい。しかし、いったんわずかでも液状化して砂層構造の配列が変わり密になった砂層を再び液状化させるためには、図から明らかなように前よりも大きな振動力を必要とすることがわかる。この現象は、前報で仮定した励起加速度の概念¹⁾を用いて説明することができる。

砂層に作用する振動加速度 a と砂層要素の過剰間げき水圧 u 、有効応力 σ_v' 、間げき率 λ (沈下量 s)、さらに励起加速度 a_e の時間変化を模式的に示したのが **Fig. 7** である。この図を用いて **Fig. 6** の現象を説明すれば次のようである。

時刻 $t=t_1$ で u が増加し始め、それともなって σ_v' が減少するが、 u が増大して σ_v' がゼロになればその点は完全液状化の状態になる。その後時間の経過とともに u が逸散し砂層が収縮して間げき率 λ も減少する。励起加速度 a_e は、砂の粒子構造が緊密であるほど大きい性質を持つとして $a_e = \sigma_v' \cdot \phi(\lambda)$ と仮定した¹⁾ から、時刻 t_1 から減少し始めて t_2 でゼロになり、その後時間の経過とともに増大して、ある時刻 t_3 で振動加速度 a に等しくなる。このとき u はまだ残存しており、その後も逸散して時刻 t_4 でゼロになる。したがって、 a_e は t_4 まで増大することになる。このように、新しい砂層条件での a_e は、先の作用加速度よりも大きな値を持つことになる。したがって、この新しい砂層を再び液状化させるためには、この a_e よりも大きな加速度を作用させることが必要である。

実験系列1のいわゆる加速度 Down の実験結果の例

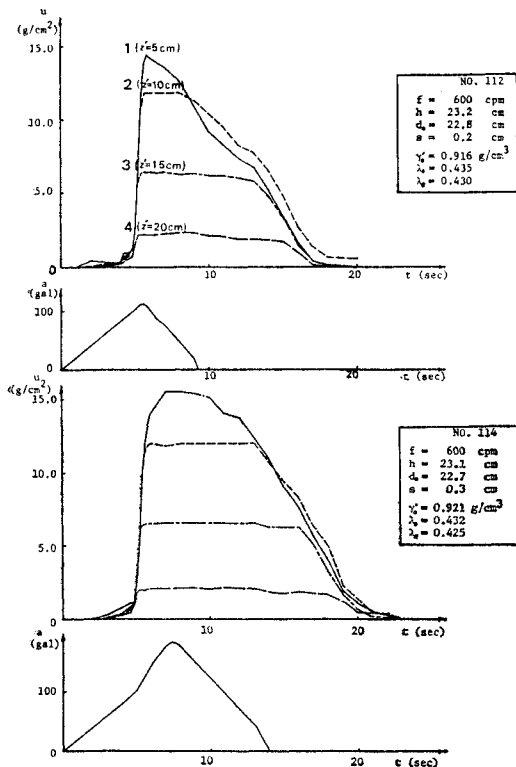


Fig. 8 Change of Excess Pore Water Pressure (u) and Vibratory Acceleration (a) in Experimental Series 1 (Most part of the sand layer is liquefied)

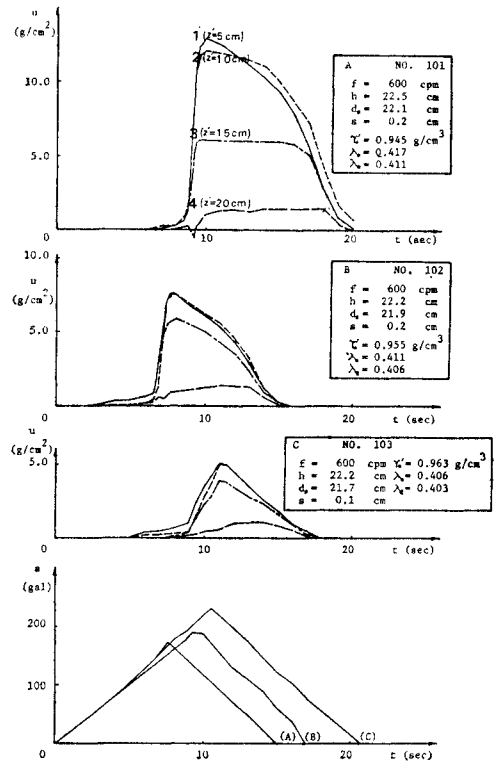


Fig. 9 Change of Excess Pore Water Pressure (u) and Vibratory Acceleration (a) in Experimental Series 1 (A little part of the sand layer is liquefied)

として、Fig. 8 に示した結果は全層にわたり完全液状化に近い状態に達した例であり、Fig. 9 は Fig. 6 と同様の目的で行なった一連の実験結果を示したものである。過剰間げき水圧の発生期の性状は定加速度の実験 Fig. 4, 5 と変わるところはないが、液状化の継続時間、すなわち安定状態に至る時間がはるかに短く、砂層の沈下量も少ないことが定加速度の場合と異なっている。

Fig. 8 の二つの実験 No. 112, No. 114 を比較すると、実験砂層の物理条件はほぼ等しく、与えた振動条件だけが異なっているとみなされるが、この結果から他の実験条件がすべて等しい場合には、振動加速度ならびに振動継続時間が大きいほど液状化の規模、すなわち液状化の深度と継続時間が大きくなることが明らかである。

Fig. 6 および Fig. 9 に示された実験結果から、砂層が密なほど液状化しにくいと同時に、 u の上界勾配が小さくなることから、液状化の進行速度（砂層構造の崩壊速度）も小さくすると推測される。

また、Fig. 9 の B, C すなわち実験 No. 102, No. 103 では測点 1, 2 の u の値がほぼ一致していることから、測点 1 での u は測点 2 までの砂層の液状化による過剰水圧がそのまま伝播しているにすぎず、その点での砂層構造の崩壊はまったく起こっていないと考えられる。すなわち、これらの実験では、少なくとも測点 1 より深い砂層はまったく液状化せず安定であったといえよう。

このような液状化領域の境界あるいはその進行を知るためには、 u の絶対値を知るだけでは不十分であり、 u の深さ方向の変化速度 du/dx を知る必要がある。したがって、このような現象を的確に評価するためには、前報で定義した本質的な液状化度¹⁾を用いることが有効であるといえよう。この本質的な液状化度と作用加速度および励起加速度との関係をつけた液状化速度係数（崩壊速度係数）についての検討は項を改めて述べる。

b) 加振方法・振動継続時間の影響

加振方法による液状化性状の相違を比較するために Fig. 10 を示した。図は、加速度 a 、沈下量 s および各測点における過剰間げき水圧 u の時間性状を比較したものであるが、2つの実験の作用加速度の最大値は約 150 gal, 140 gal とほぼ等しく、各測点の u の最大値もほぼ等しい。したがって、液状化の空間的規模（広が

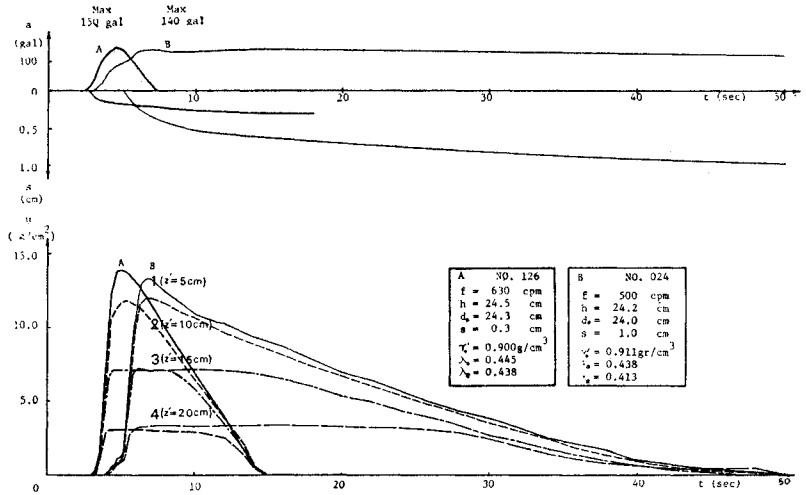


Fig. 10 Comparison between Liquefaction Behaviours in Experimental Series 0 and 1

り)もほぼ等しいと考えられるが、その安定化過程の性状は非常に異なり、液状化の継続時間と最終沈下量とはともに振動が継続される場合の方がはるかに大きいことがわかる。

これらの実験結果から明らかなように、 u の最大値がほぼ等しく液状化の発生過程の性状もほぼ同じであるとされるにもかかわらず、その後の逸散時間や沈下量がまったく異なることから、液状化現象の安定化過程はいわゆる圧密現象とはその機構を異にするものと考えられる。すなわち、すでに Fig. 7 に示したように液状化の安定化過程 $[t_2 \sim t_4]$ において、作用加速度 a が励起加速度 a_e よりも大きい区間 $[t_2 \sim t_3]$ は、本質的には発生過程と同じく振動によって砂層の構造が連続的な崩壊を続けている過程であって、単なる粒子の沈降あるいは砂層の圧密とは異なると考えられる。ところが、 $a < a_e$ となる区間 $[t_3 \sim t_4]$ では、振動力による構造崩壊作用がなくなるからいわゆる過剰水圧の発生効果はなくなり、 u は逸散するだけである。このように、 $a = a_e$ となる時刻 t_3 を境に安定化過程の内部機構は異なるものと考えられる。したがって、 $a = a_e$ となる時刻 t_3 が $[t_2 \sim t_4]$ のどこにあるかによって、液状化の継続時間や沈下性状が決定される。定加速度の実験 No. 024 よりも加速度を再び低下させる実験 No. 126 の方が、 $[t_2 \sim t_3]$ が小さいため Fig. 10 にみられる性状の相違が現われるわけである。

したがって、 $[t_2 \sim t_4]$ がきわめて小さければ、液状化の安定化過程を u の逸散過程、すなわち圧密過程と考える取扱いもできよう。たとえば、衝撃力の作用による液状化現象の安定化過程を圧密過程として考察した研究²⁾もある。

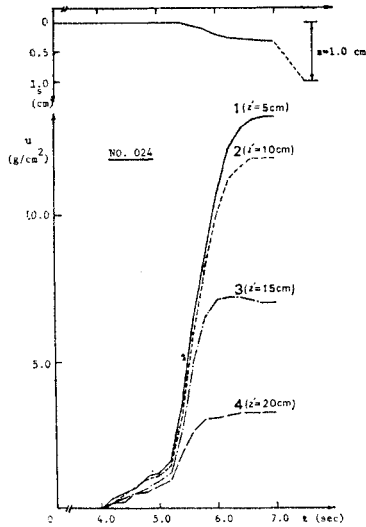


Fig. 11 Behaviours of Excess Pore Water Pressure (u) and Settlement of Sand Layer (s) at the Initial Stage of Liquefaction

c) 液状化の発生過程の性状

液状化の発生過程の性状を考察するために液状化初期の拡大図を Fig. 11, 12 に示した。

Fig. 11 から u が最大値に達するまでの発生過程においては、砂層の沈下はわずかであることがわかる。また、それぞれの測点における u の上昇勾配が異なっていることから、各点での励起限界に応じた構造崩壊が起こっていると考えられる。また、各測点において u が最大になるまでの時間は上部ほど早く、したがって全体的にみれば上層から下層へと完全液状化の領域がひろがっていく現象が確認された。

実験 No. 103 に引続き行なった No. 104 の結果を示した Fig. 12 によると、測点4での u の値が一時的に負になっているが、これはそれまでの液状化実験により上層部の砂がかなり密に詰まったために、振動力が作用するとき砂層が一時的に膨張しようとするダイレイタンス効果によるものと考えられる。このような現象は、液状化実験の繰り返しによって密詰めになった砂層では必ず現われている。

d) 上載圧による影響

Fig. 13 は、水深が砂層厚よりかなり大きい場合の実験結果の一例

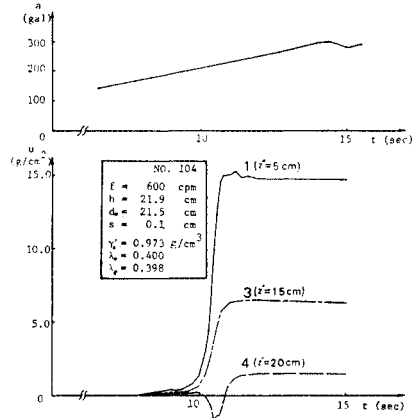


Fig. 12 Dilatancy Effect at the Initial Stage of Liquefaction

である。上部の水はいわゆる上載圧ではないが、振動によって動水圧が発生するために、有効上載圧はその分だけ変動することになる。液状化性状には本質的な相違はないが、液状化発生に必要な加速度がやや大きくなる傾向がうかがわれる。この理由として、砂層表面における動水圧勾配は砂層面上の水深が浅いほど大きいと見かけ上砂粒子に作用する浮力が大きくなること³⁾と関係すると思われる。

Fig. 14 は、砂層上に荷重を載せた実験の一例である。この実験における上載圧のかけ方は、試料砂層面上全体に剛性の強い厚さ 2 cm のポラスマットを敷き、その上に厚さ 2 cm の板をのせ、その上に荷重(重錘)を載せる方法をとった。このようにして上載荷重が砂層に一樣に分布するよう配慮した。初期状態での有効応力

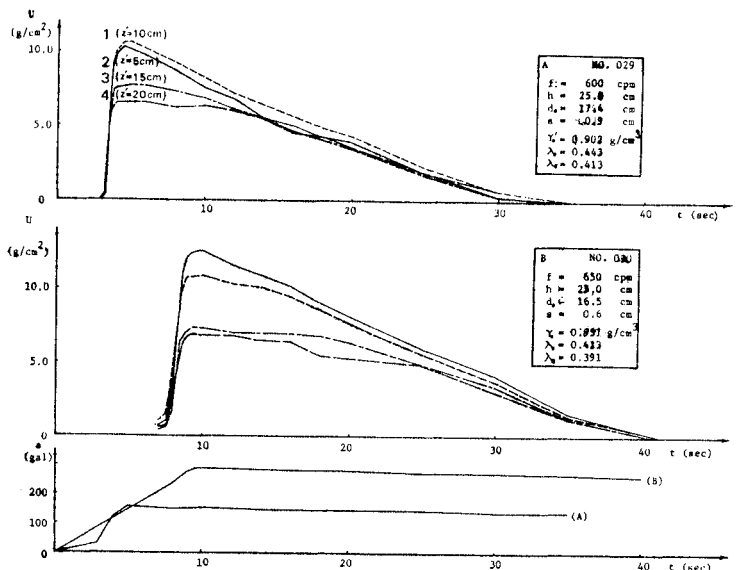


Fig. 13 One of the Experimental Results for Submerged Layer

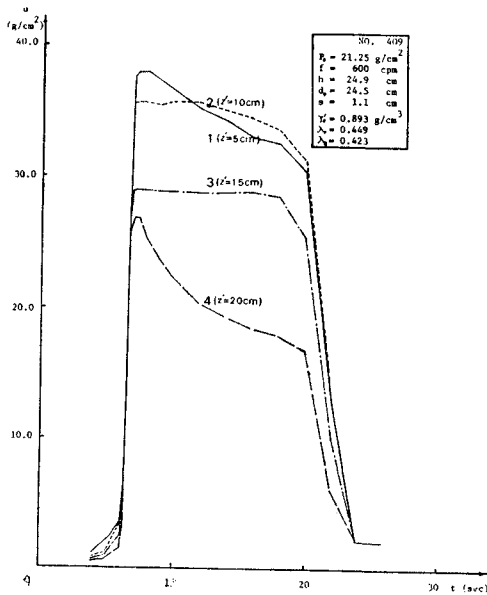


Fig. 14 One of the Experimental Results for Saturated Layer with Surcharge

が上載圧分だけ増加しているために、完全液状化した場合の過剰間げき水圧 u は上載圧分だけ大きくなっている。また、いったん液状化すれば有効応力が低下し、地盤としての支持力をほとんど持っていないと考えられ、液状化の安定化過程では、上載圧があるために、沈下速度・沈下量ともに上載圧がない場合に比べて大きく、また液状化の継続時間も短くなることがわかる。

e) ガラス粒子の試料の液状化

ガラス粒子を用いた実験結果の一例が Fig. 15 であるが、標準砂の場合とくらべて初期間げき率・最終間げき率ともかなり小さい。間げき率は粒度分布あるいは粒子形状に大きく左右されるから、Fig. 15 の結果を標準砂の実験結果と比較して定量的に評価することはできない。ただ、定性的には、標準砂に比べて、ガラス粒子の方が滑らかで丸いため粒子が密につまりやすいこと、粒子の再配列による安定化が速やかに行なわれることなどの理由により、液状化継続時間が短くなるといえよう。

f) 過剰間げき水圧の鉛直分布

Fig. 10 に示した実験 No. 024, No. 126 における過剰間げき水圧 u の鉛直分布性状を、時間 t をパラメーターとして u の上昇期と減衰期とに分けて示したのが

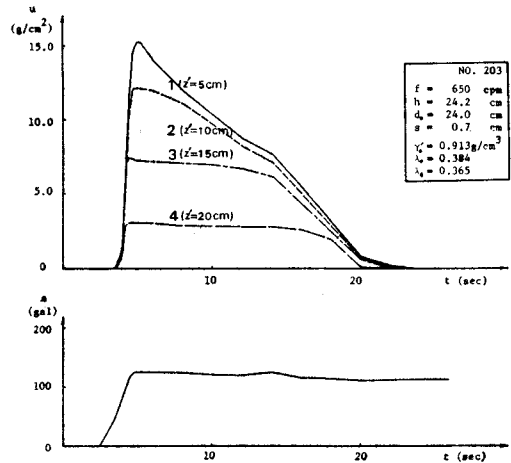


Fig. 15 One of the Experimental Results for Glass Grain Layer

Fig. 16 である。図からわかるように、No. 024 と No. 126 とは加振方法が異なるため u の減衰時間が異なるだけで、各時間での鉛直分布性状は加振方法の相違によって異なるところはない。 u が増大しつつある液状化初期でも、下層においてかなりの過剰間げき水圧勾配があり、下層の各点でも何らかの構造変化が生じていることが明らかである。このような現象を適切に表すためには、すでに述べた液状化度の概念を用いればよい。また、減衰期でも、砂層各点での u がその水圧勾配にしたがって減衰して各点での有効応力がしだいに増加するという過程を経て、最終的な安定状態に至ることがわかる。このような実験結果から、従来の研究^{1),5)} で述べられている安定領域と液状化領域との明確な境界は判別しがたいといえよう。

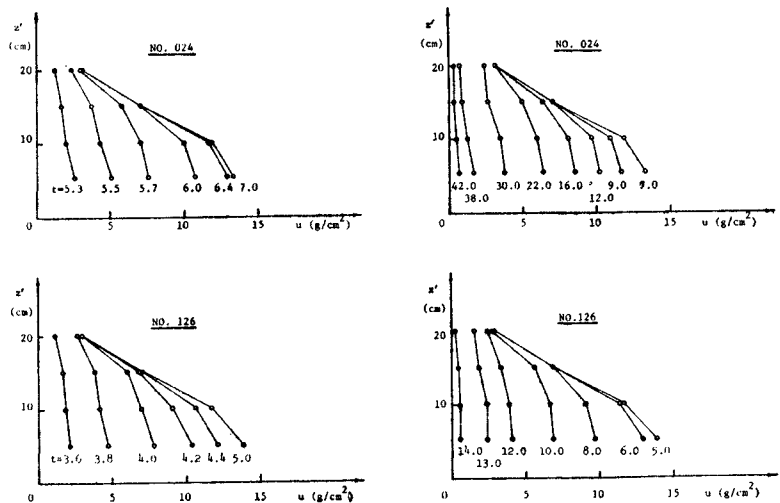


Fig. 16 Vertical Distribution of Excess Pore Water Pressure in Saturated Sand Layer

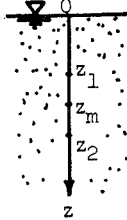
(3) 液状化速度係数および励起加速度の決定

前報¹⁾において、励起加速度 a_e を仮定し、砂層構造の崩壊速度が作用加速度 a とこの a_e との差に比例するとして理論展開を行なったが、この比例定数である液状化速度係数 R および a_e の値は、実験によって決定されなければならないものであった。そこで、今回行なった実験からこれらの値を決定する方法について述べるとともに、これらの値の示す性状について考察した。

まず、励起加速度 a_e の決定法について述べる。

励起加速度 a_e を、 $a_e = (\sigma_v(z) - u(z, t)) \cdot \varphi(\lambda(z, t))$ 、 $(\sigma_v(z))$: 有効上載圧、 $u(z, t)$: 過剰間げき水圧、 $\varphi(\lambda(z, t))$: 間げき率 λ に関する関数と仮定したが、本実験装置ではこの値を直接測定できないし、また一般的にもこの値を測定することはむずかしいと思われる。そこで、次のような方法を用いることにした。

座標 z を右図のようにとり、過剰間げき水圧の測点 z_1, z_2 の中点 z_m における過剰水圧勾配 $\partial u(z_m, t) / \partial z$ を $\partial u(z_m, t) / \partial z = (u(z_2, t) - u(z_1, t)) / (z_2 - z_1)$ で近似する。この値は、通常非負であり、点 z_m が完全液状化の状態に至れば、水中単位体積重量 r' に等しくなる。この r' に対する $\partial u / \partial z$ の比が液状化の程度を表わす本質的な液状化度 L_e である。したがって、 L_e の値がゼロから正に移行するいわゆる動的平衡の破れるときの加速度を a_c とすれば、 a_c とそのときの励起加速度 a_{e_c} との間には次の関係がある¹⁾。



$$a_c = a_{e_c} - \frac{q_c}{q_c - 1} \frac{g}{R r'_c} \kappa_c^2 \left[\frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \right]_c$$

$$\approx (p_0 + r'_c z - u_c) \cdot \varphi(\lambda_c) - \frac{g}{R r'_c} \kappa_c^2 \left[\frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \right]_c$$

.....(1)

ここに、 $q_c = \left(\frac{m_v}{\beta} \right) \cdot \frac{2(1 - \lambda_c)}{\lambda_c} + 1$, $\kappa_c^2 = \frac{K C^2}{q_c g}$, m_v : 構造骨格の圧縮率, β : 水の圧縮率, p_0 : 表面上載圧, R : 液状化速度係数, K : 透水係数, C : 水中音速, g : 重力加速度であり、添字 c は動的平衡の限界状態での諸量であることを意味する。

したがって、 a_c は有効上載圧 $(p_0 + r'_c z)$ 過剰間げき水圧 u_c , 間げき率 λ_c によって異なるから、これらの

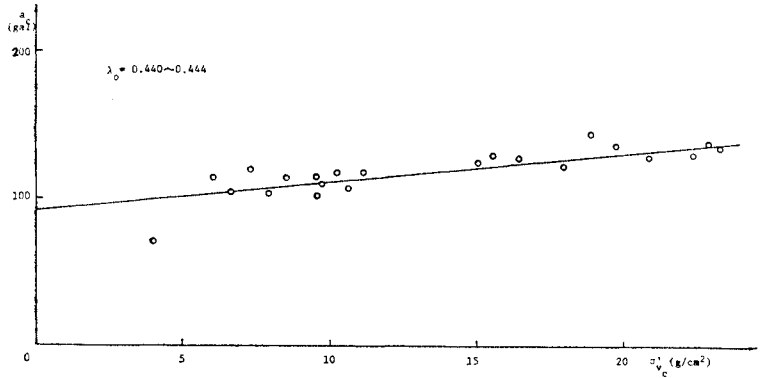


Fig. 17 Relationship between the Acceleration (a_e) and the Effective Stress (σ_{ve}') when the Sand Element is Dynamically in Critical State

関係について考察すれば次のようである。

実験結果から得られた a_c と $\sigma_{ve}' = (p_0 + r'_c z - u_c)$ との関係を示した Fig. 17 から、 a_c は有効応力 σ_{ve}' が増加するにしたがいほぼ直線的に増大することがわかる。図に示された実験値は、初期間げき率 λ_0 が 0.440 ~ 0.444 の砂層の実験結果を整理したものである。他の間げき率でも同様の傾向があるものと思われるが、定量的な考察を行なうためには、広範囲にわたる間げき率での実験が必要であろう。

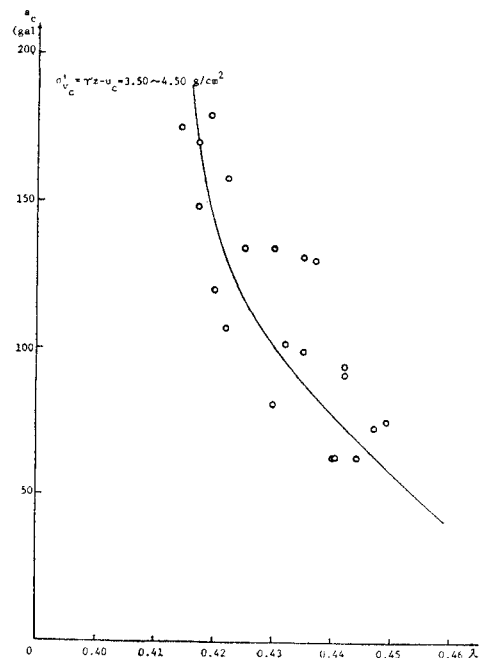


Fig. 18 Relationship between the Acceleration (a_c) and the Porosity (λ_c) when the Sand Element is Dynamically in Critical State

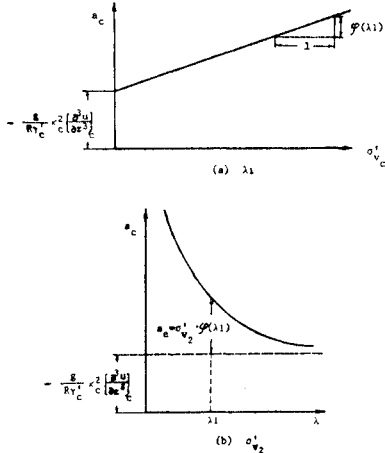


Fig. 19 Illustration for Determining the Exciting Acceleration (a_e)

また、 σ_{v_2}' がほぼ一定 (今回は $3.50 \sim 4.50 \text{ g/cm}^2$) の場合について、 a_c と λ_c との関係を示した Fig. 18 によると、間げき率が小さくなり砂層密度が増大すれば、 a_c は急激に大きくなるのがわかる。

液状化の発生因となる振動加速度と砂層の物理特性との間に上述の関係が見出されたが、実験データから比較的確に決定できる a_c から a_{e_c} を決定するためには、式 (1) の $\varphi(\lambda_c)$ と $\frac{g}{R\tau_c'} \kappa_c^2 \left[\frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \right]_c$ を適確に決定することが重要となる。そのためには λ の広範囲にわたる数多くの実験データをもつことが望ましいが、データが比較的少ない今回は、次のような仮定のもとにこれらの近似値を求めた。

Fig. 19(a), (b) のように、ある λ_1 に対する a_c と σ_{v_2}' の関係および、ある σ_{v_2}' に対する a_c と λ_c の関係が得られているとする。(a) 図において a_c 軸の切片の値は、間げき率が λ_1 のときの

$$-\frac{g}{R\tau_c'} \kappa_c^2 \left[\frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \right]_c$$

を与えることになるが、この値が一定形状のモデルについては、すべての λ に対してほぼ一定であると仮定できれば、(b) 図において横軸 (λ_c) をこの値だけ平行移動させた関係は、 σ_{v_2}' に対する a_{e_c} と λ_c の関係を表わすことになる。したがって、 σ_{v_2}' に対する $\varphi(\lambda_c)$ をこの図から決定することができるが、 σ_{v_2}' と $\varphi(\lambda)$ とは独立で

あると仮定しているから、ここで得られた $\varphi(\lambda_c)$ は σ_{v_2}' の値のいかんにかかわらず用いることができる。

このような方法を Fig. 17, Fig. 18 に適用し $\varphi(\lambda_c)$ を直線で近似すれば、

$$\varphi(\lambda_c) = 390 - 880 \lambda_c \dots\dots\dots (2)$$

$$a_{e_c} = (\sigma_{v_2}' - u_c) (390 - 880 \lambda_c) \dots\dots\dots (3)$$

となる。式 (3) のように得られた励起加速度 a_e は、限界状態でのものであるが、添字 c を除けば任意時刻における仮想的な励起加速度を与えるものと考えてもよからう。したがって、任意時間、任意位置での励起加速度を

$$a_e = (\sigma_{v_2}' - u) \cdot (390 - 880 \lambda) \dots\dots\dots (4)$$

と推定した。

次に、液状化速度係数 R の推定法について述べる。液状化の発生過程の過剰間げき水圧および沈下の性状は Fig. 11 に示したとおりであり、砂層条件は非排水に近い状態であると考えられる。したがって、液状化初期の間げき率は変化しないとみなしてよいため、 $\varphi(\lambda) = \varphi(\lambda_c) = \varphi(\lambda_c)$ である。式 (1) の関係を満足する $\varphi(\lambda)$ を液状化の基本式¹⁾に代入して、 $\varphi(\lambda)$ を消去し R を決定する基本式を求めれば次のようになる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} = \frac{R\tau'}{g} \left(a - \frac{\sigma_{v_2}' - u}{\sigma_{v_2}' - u_c} a_c \right) = \frac{R\tau'}{g} (a - a_c^*) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 a_c^* は各時刻における見かけの励起加速度ともいうべきものである。

そこで、先と同様に過剰水圧記録と加速度記録から、 a_c^* 、 $\partial^2 u / \partial z \partial t$ を決定して、両者の関係を示したのが Fig. 20 である。この図は $a \geq a_c$ 、 $u < p_0 + r'z$ につ

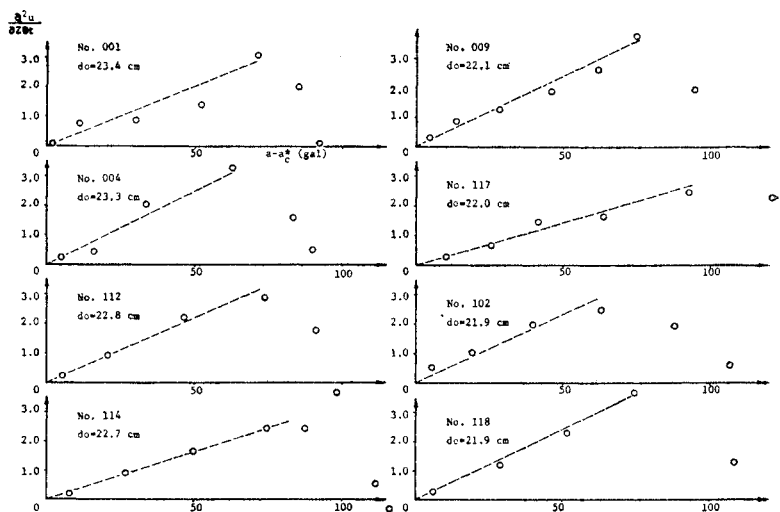


Fig. 20 Relationship between the Value of $\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t}$ and the Value of $(a - a_c^*)$ for Determining the Coefficient of Liquefaction-Velocity

いて描かれたものである。過剰間げき水圧 u が増大して有効応力が減少しゼロに近くなれば、加速度の崩壊作用は急速に低下するが、それまでは、 $\partial^2 u / \partial z \partial t$ と $a - a_c^*$ とは比例関係にあることがこの実験結果からわかる。この比例定数から、 R を決定できるが、個々の実験における a_c の決定のあいまいさ、[式 (5) の誘導過程における省略などがあるため、今回の実験からは、

$$R=40\sim 50 \dots\dots\dots (6)$$

とかなり大まかに推定するとどめた。

以上、実験結果に基づく a_c , R の算定法について考察したが、 a_c , R を正確に決定するためには今回行った実験の砂層モデル・実験方法などに不十分なところがあった。しかし、理論展開の中に導入されたこれらの実験定数の性状についてはかなり明らかにすることができたと思う。なお、本実験から推定した a_c , R の値を用いた数値計算例は前報¹⁾にのせた。

4. 結 語

本研究は、飽和砂層の液状化機構の解明を目的として、液状化現象の基本的性状を実験的に考察するとともに、理論展開に導入された諸量の決定法ならびにその妥当性について検討したものである。その結果をまとめて書けば次のようである。

(1) 本実験で使用した試料は豊浦標準砂と研磨用ガラス粒子であるが、ガラス粒子を用いた場合、初期間げき率、最終間げき率とも標準砂のそれに比してかなり小さい。しかし、間げき率は粒度分布あるいは粒子形状に大きく左右されるから、両者の実験結果をくらべて定量的な評価を与えることはできないが、定性的には滑らかで粒度分布の均一なガラス粒子の方が密につきりやすく、また粒子の再配列による安定化が速やかに行なわれやすいことなどの理由により、液状化の継続時間が短くなるという一般性状が認識された。

(2) ゆるづめの砂層では、与えられる振動力がある値以上になれば、全層においてほとんど同時に構造崩壊が起こることが、過剰間げき水圧性状から明らかにされ、従来からいわれているように液状化の進行は上層から安定化は下層からという概念は再考される必要がある。また密につまった砂層の表面近くにおいてはダイレイタンシー効果による砂層の膨張があることが過剰間げき水圧が負になることがあることから推定できる。

(3) 振動加速度ならびに振動継続時間が大きいほど液状化の規模、すなわち液状化の深度と継続時間が大き

くなることが確認されたが、液状化の程度ならびに液状化領域の進行度(砂層構造の崩壊速度)を評価するためには、過剰間げき水圧 u の絶対値を知るだけでは不十分であり、 u の深さ方向の変化速度 du/dz を知るが必要となる。本実験結果からすでに前報で定義した液状化度の概念が有効であることを実証した。

(4) 加振方法の相違による液状化性状を比較すれば、Fig. 10 のようになる。A, B 2 つの実験において、作用加速度の最大値は約 150 gal, 140 gal であり各測点での過剰間げき水圧の最大値もほぼ等しいことから、液状化の空間的規模もほぼ等しいと考えられるが、その安定化過程の性状は非常に異なることがわかる。このような現象は、いわゆる圧密現象としては説明できず、われわれは、作用加速度と励起加速度との相対関係によってこれを説明した。

(5) 砂層は、有効上載圧が大きく密なほど液状化しにくいことが確認された。

(6) 前報で導入した励起加速度 a_e および液状化速度係数 R などの決定法を示し、今回の実験結果から $a_e = (\sigma_p - u) \cdot (390 - 880 \lambda)$ および $R = 40 \sim 50$ と推定した。しかし、これらの定数はかなり大まかな近似の結果であり、今後さらに検討して修正されるべきものである。

以上本研究で得られた結果を要約したが、これらをもとにして原地盤で起こる液状化現象の予測およびその防止にまで研究を発展させることが必要であることはいうまでもない。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬご指導ご鞭撻を賜った京都大学工学部土木工学教室石原藤次郎先生ならびに、適切にご助言を賜った京都大学工学部交通土木工学教室 赤井浩一先生に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 尾島 勝：飽和砂層の液状化機構に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第 184 号，昭 45. 11, pp. 79~90.
- 2) 谷本喜一・西 勝：衝撃加振による砂層の流動化に伴う沈下機構の研究(英文)，土木学会論文集，第 152 号，昭 43.4, pp. 39~44.
- 3) 土岐 憲三・石黒 良夫：振動時における飽和砂の重量変動について，京大防災研究所年報，第 12 号 B, 昭 44.3, 117~127.
- 4) Florin, V.A. and Ivanov, P.L. : Liquefaction of Saturated Sandy Soils, Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engg. Vol. 1, 1961, pp. 107~111.
- 5) 陶浪貞彦：不安定飽和砂の振動性状，日本建築学会論文報告集，第 114 号，1965, pp. 1~10.

(1970. 8. 27・受付)