

液状化による砂地盤の沈下特性に関する研究

——せん断土槽を用いた振動台実験——

松田 隆 後藤 洋三

Settlement Characteristics of Saturated Sandy Ground Brought Out by Liquefaction

——Shaking Table Tests Using Shearing Stack Container——

Takashi Matsuda Yozo Goto

Abstract

Earthquake damage to a structure located at saturated sandy ground often occurs due to liquefaction arising not only from unbalanced density between structure and ground, but also from permanent deformation of the surrounding ground. Shaking table tests using shearing stack containers were carried out in order to gain an understanding of the behaviors of ground and structure at liquefaction. This report describes experimental results concerning liquefaction of sandy ground, especially the present method which enables dynamic measurements of settlement in sandy ground to be made.

The following results were obtained with these experiments. (1) Settlement of liquefied ground occurs in large quantity at the lower part of the liquefaction zone. (2) Half of the settlement occurs during dissipation of excess pore water pressure. (3) The dissipation velocity of excess pore water pressure has a mutual relationship with settlement velocity.

概 要

地震時の液状化による地盤沈下特性の把握を目的に、せん断土槽を用いた振動台実験を実施した。この実験の特徴は、飽和した模型砂層の動的な地中沈下量を新たな手法によって計測したことである。

液状化実験の結果、(1) 2 m厚の砂層の地表面沈下量は、非液状化時では3 mmと小さいが、液状化した場合には40 mm前後となる、(2) 液状化時の大きな地盤沈下量は液状化層の下部から生じ、この位置での鉛直ひずみは3～7%となる、(3) 地盤沈下量の約半分は加振中に生じるが、加振停止後の過剰間隙水圧の消散中においてもゆるやかに沈下は進行していく、(4) 過剰間隙水圧の消散速度と沈下速度には相関がみられる、ことなどがわかった。

1. はじめに

地震時に砂地盤が液状化すると、構造物は沈下、浮上がり、転倒などの変状をきたすことはよく知られている。これらの変状の原因としては、支持地盤の強度低下、地盤と構造物との間に生じる密度的なアンバランス、それに地盤自体の永久変形などが挙げられる。また、液状化現象による変状は震動時のみならず震動が停止した後においても観測されており、その挙動は非常に複雑である。

ところで、液状化現象のうち過剰間隙水圧上昇のメカニズムに関しては室内要素試験および模型実験によりほぼ解明されていると言って良い¹⁾。しかし、液状化によって生じる大きな変状に関しては、模型実験での観測や地震被災地の調査から現象論的な検討にとどまり、変状の発生機構に関してはいまだ未解明な点が多いのが現状と言える。

そこで、液状化による地盤および構造物の変状特性を把握することを目的に、その第一段階として液状化地盤の沈下性状に注目した振動台実験²⁾を実施した。この実

験の大きな特徴は、過剰間隙水圧と地盤沈下量との経時的な関係を明確にするため、地中の地盤沈下量を時刻歴で計測していることである。この報告は、飽和させた模型砂地盤の作製方法、動的な沈下計測手法をはじめとする実験方法と、応答加速度、過剰間隙水圧ならびに沈下量に関する実験結果を述べるものである。

2. 実験方法

2.1. 模型地盤作製方法

2 mm 以下に粒度調整された山砂を用い、せん断土槽内に模型地盤を作製した。試料砂の物理定数を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。せん断土槽の断面寸法は図-2に示すとおり深さ 2.0 m、長さ 2.5 m、奥行 1.5 m のものである。

模型飽和地盤の作製方法は以下に示す過程で構成される(以後『水締め法』と称す)。

①土砂投入→②土槽底部からの圧力水噴射によるボイリング(かくはんによる均一化)→③振動台加振による混在気泡の逸脱(飽和度の上昇)→④余剰水の排水と土砂の沈降(自然堆積による再現性の確保)

水締め法によって作製された今回の模型地盤の平均的な単位体積重量は 1.91 t/m^3 、相対密度は32%であった。

2.2. 入力波と実験ケース

液化化実験での入力正弦波とした。加振振動数は模型地盤の非液化化時の共振振動数より低いことを条件に 2 Hz とし、波数 N は液化化強度算定に用いられる繰り返し回数を参考に $N=20$ とした。実験ケースは入力加速度振幅をパラメータとし 27~174 gal の範囲で設定した。このとき、各入力ケースにおいて水締め法を用い処女地盤を作製することによって入力段階間の履歴の影響をなくした。

このほか、非液化化時の地盤動特性を把握することを目的とした共振実験(10 gal 一定, 1~14 Hz) およびランダム波入力(Max 13 gal, 周波数帯=0.1~50 Hz) も実施した。

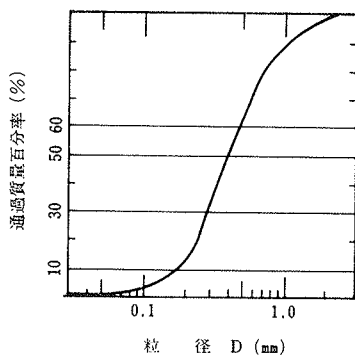


図-1 使用砂の粒径加積曲線

平均粒径 D_{50}	0.40mm
10%粒径 D_{10}	0.17mm
60%粒径 D_{60}	0.48mm
均等係数 U_c	2.82
最小間隙比 e_{min}	0.608
最大間隙比 e_{max}	0.989
単位体積重量 γ	1.91 t/m^3
相対密度 D_r	32%
せん断剛性 G_0	1.215 t/m^2

※砂層全体の平均的な値

表-1 使用砂の物理定数

2.3. 計測項目

計測項目は、図-2に示すように加速度、間隙水圧と沈下で、砂層中の深度方向に関する分布が把握できるように測点を配置した。地表面の沈下に関しては測量による最終沈下のみとした。計測時間は加振開始から過剰間隙水圧が消散するまでの3分間とした。

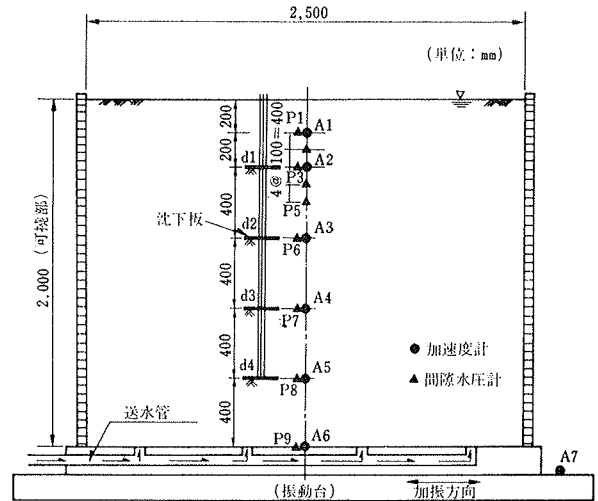


図-2 せん断土槽と計器配置

3. 地中沈下量の

計測方法

3.1. 沈下計測システム

地中沈下計測は図-3に示すとおり、地盤の上下方向の変位に追従する沈下板の運動をロッドが伝達し摺動抵抗型の沈下計で動的に感知するシステムである。沈下板の重量はそれ自体の重量の影響をなくすため、砂の単位体積重量にバラン

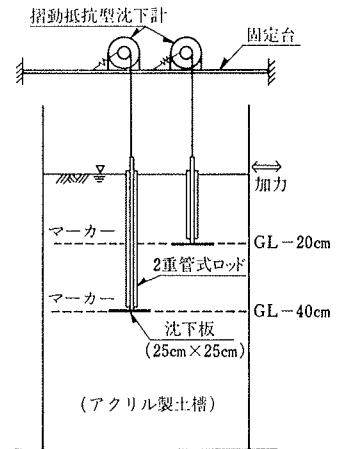


図-3 沈下計測システム

スさせている。また、地中沈下量を伝達するロッドは、土粒子から隔離するとともにロッド自体の変形を防ぐため、鋼製二重管式の構造とした。以後の本文では、システムを総称して沈下計とする。

3.2. 沈下計の性能試験

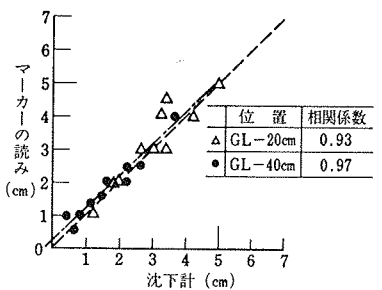


図-4 マーカーの読み値と沈下計出力値との比較

図-3に示すアクリル製の土槽を用いた試験により沈下計の特性を把握した。試験条件を以下に示す。

(1) 表-1に示した試料砂を水中落下方式で散布し地盤を作製した。

(2) 土槽の上部を振動させ地盤を液状化させた。

(3) 砂層に印したマーカを透明なアクリル板を通し目視測定した結果を実沈下量とした。

図-4に GL-20 cm と GL-40 cm 位置での実沈下量と沈下計で計測された値の関係を示す。相関係数はそれぞれ 0.93 および 0.97 と高く、この深さの範囲の砂層に沈下計を適用することは妥当と思われる。

4. 実験結果

4.1. 非液状化時の地盤動特性

砂層の上層部および中央部の共振曲線を図-5に示す。共振振動数は 4.5 Hz であり、このときの GL-20 cm 位置での応答は入力加速度の 4.5 倍である。表-2には S 波検層、ランダム波入力、共振実験の主な結果を示す。このとき、砂層全体の平均的な S 波速度 V_s およびせん断剛性率 G は下式で算定した。

$V_s = 4Hf \dots (1)$ ただし、 H : 層厚 (2 m)

$G = \rho V_s^2 \dots (2)$ f : 卓越振動数 (Hz)

ρ : 土の平均的な質量密度

4.2. 液状化実験結果

4.2.1. 応答加速度と過剰間隙水圧の上昇

(1) 最大値分布

図-6に加速度、過剰間隙水圧および沈下量の最大値分布を示す。過剰間隙水圧分布図から、27 gal 入力では全層とも液状化に至っていないが、わずか 5 gal 増大させた 32 gal 入力で砂層の約 2/5 すなわち GL-80 cm 以浅にあたる広い領域が液状化していること、また、179 gal の大きな入力によっても深い部分の砂層は完全な液状化には至らないことなどがわかる。加速度分布図から、32 gal 以下の入力では上層ほど大きな応答を示すのに対し、液状化に至らせる大きな入力

項目	弾性波試験	ランダム波入力実験	共振実験
卓越振動数(Hz)	10.3	6.44	4.48
最大応答倍率	---	15.3	4.19
最大せん断ひずみ	---	1.73×10^{-4}	7.40×10^{-4}
S波速度 V_s (m/s)	80.0	---	---
せん断剛性率(t/m^2)	1,215	---	---

表-2 非液状化時の地盤動特性

時には非液状化層で最大応答を示していることがわかる。

(2) 経時変化

図-7に代表的な加速度、過剰間隙水圧な

らびにせん断ひずみの経時変化を示す。32 gal 入力時の上層部 (a-1) では 6 波目付近で液状化し、その後せん断波の伝搬が遮断されるため加速度の応答値は低下している。また、液状化前には比較的小さかったせん断ひずみは液状化後にかなり大きな振幅を示すことがわかる。81 gal 入力時には上下層 (b-1, -2) とともに 1 波目で液状化し、加速度応答値の低下も著しい。せん断ひずみは加振直後から過剰間隙水圧の急激な上昇と共に大きな値を示している。ここで、せん断ひずみと後述するせん断応力は図-8に示すように加速度記録から算定²⁾したものである。

図-8に液状化前後におけるせん断応力 τ ~ せん断ひずみ γ 関係の一例を示す。図中の⑤~⑧は図-7 (a-1) 中の加速度波形下に記す波数を示しており、ほぼ⑥~⑦波目でこの層は液状化している。これより、過剰間隙水

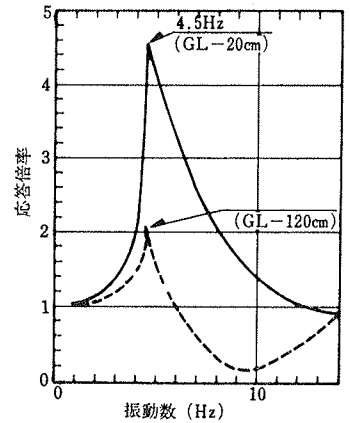


図-5 非液状化砂層の共振曲線

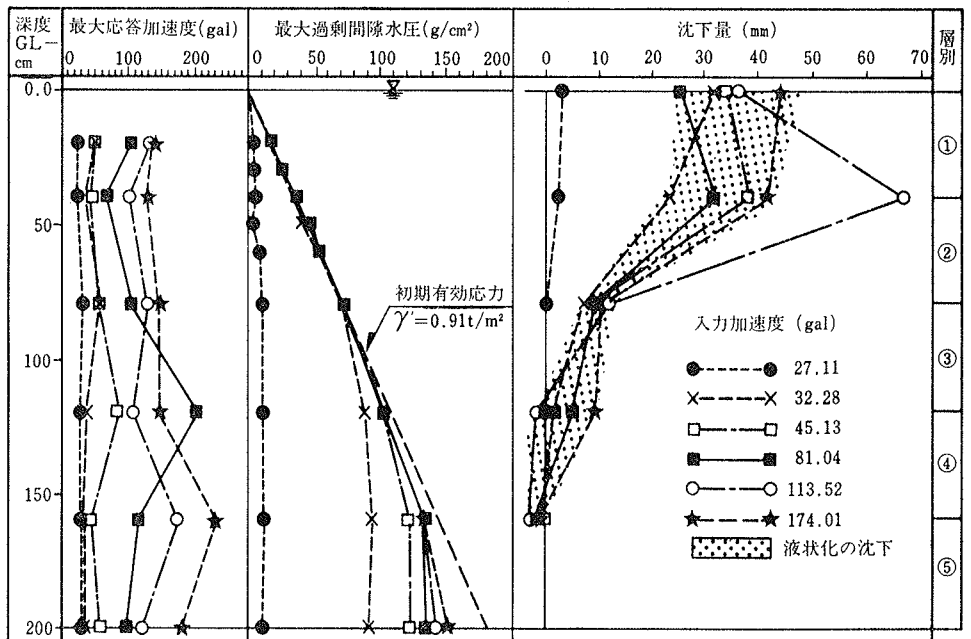


図-6 最大加速度・過剰間隙水圧・沈下量の分布

圧の上昇により有効拘束圧は減少していくため、 $\tau \sim \gamma$ 関係での勾配、すなわち、せん断剛性率の低下傾向が明瞭に現われていることがわかる。

4.2.2. 地盤沈下量

(1) 最大値分布

図-6の沈下分布図から、非液状化時と液状化時とは沈下性状に大きな相違がみられる。すなわち、全層とも液状化しなかった27 gal 入力の場合、地表面沈下量は3 mm 以下と小さく、しかも地中に向いながら減少傾向を示している。これに対して液状化した場合、地表面から GL-40 cm の領域において全砂層厚2 m の1~2% に相当する約25~40 mm の沈下量を示していることがわかる。ただし、液状化に至っていない深い領域での沈下量は比較的小さい。

さらに特徴的なことは、このような大きな沈下は液状化層の下部である第2層 (GL-80~40 cm) から生じていることである。各層上下両端の沈下量の差で表わされる相対変位は第2層において12~32 mm あり、この相対変位と層厚400 mm から算定される第2層の鉛直ひずみは3~7% となる。

(2) 経時変化

図-9に32 gal および113 gal 入力時の沈下量と過剰間隙水圧の経時変化を示す。32 gal 入力時の場合、大きな沈下量を示した GL-40 cm 位置 d_1 に注目すると、加振中と過剰間隙水圧の消散中とで沈下速度は異なるが、それぞれの期間に生じる沈下量はほぼ等しい。すなわち、最終沈下量24 mm の約半分にあたる11 mm は過剰間隙水圧消散中に生じている。113 gal 入力時の場合、やはり d_1 に注目すると、間隙水圧の急上昇と共に加振開始直後の約1秒間に最大値の半分にあたる量が一気に沈下し、その後の加振中および過剰間隙水圧の消散中にかけてゆるやかな速度で沈下は進行していく。ここで、深い位置の d_3 および d_4 は隆起を意味する負の値を示しているが、これは現象として明解な説明はしがたく、計測上の誤差と考えたほうが良いと思われる。

以上のことから、液状化による地盤沈下は加振中のみならず過剰間隙水圧消散中にも生じており、両期間中に発生する沈下量は入力加速度の増大に伴って大きくなる。これは、次に説明するように沈下発生メカニズム

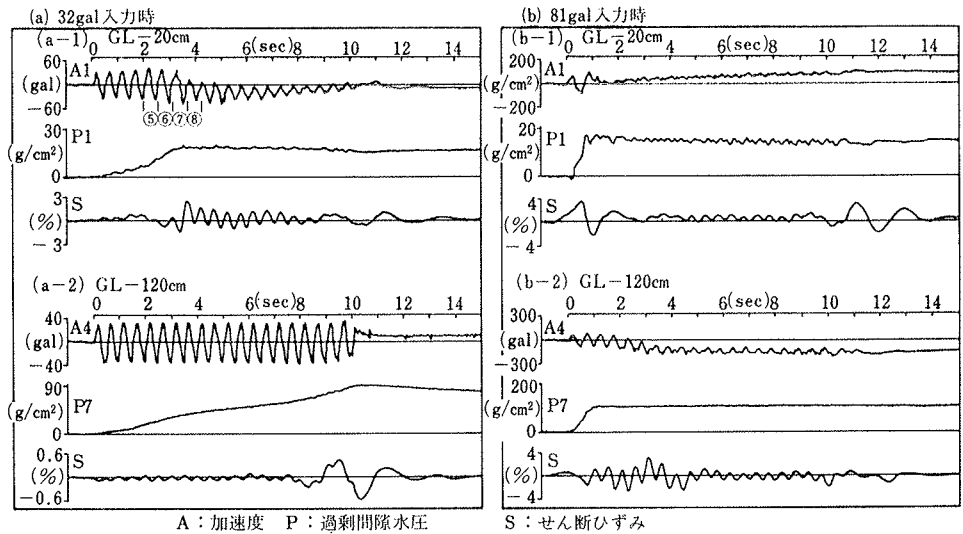


図-7 加速度・過剰間隙水圧・せん断ひずみの経時変化

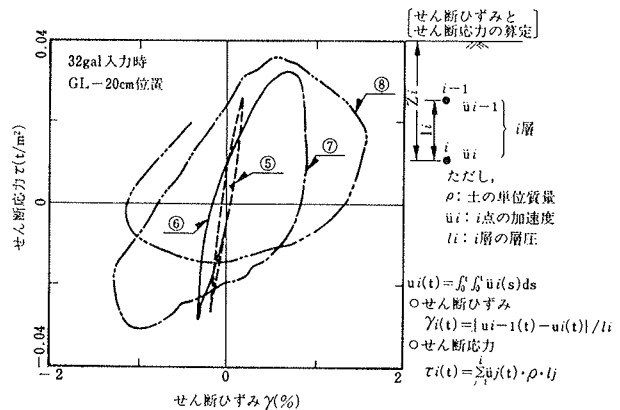


図-8 $\tau \sim \gamma$ 関係

は異なるものの、両期間中に発生する沈下量とも入力加速度の大きさに関与しているためである。すなわち、加振中の沈下は入力加速度に比例する繰返しせん断応力によって生じ、過剰間隙水圧消散中の沈下は懸濁状態における土粒子の沈降によって生じるため、液状化領域の広さに入力加速度が大きく影響しているためと思われる。

過剰間隙水圧消散中における地盤沈下現象に注目してみる。鉛直全応力の変化と間隙水圧の蓄積がないものと仮定すれば、体積ひずみ ϵ_v と過剰間隙水圧 u とは式(3)で与えられている¹⁾。このとき、左辺は沈下速度 V_e に対応し、右辺は過剰間隙水圧消散速度 V_a に対応し、それらは体積圧縮係数 m_v を介し線形の関係にある。

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 ϵ_v : 体積ひずみ
 u : 過剰間隙水圧

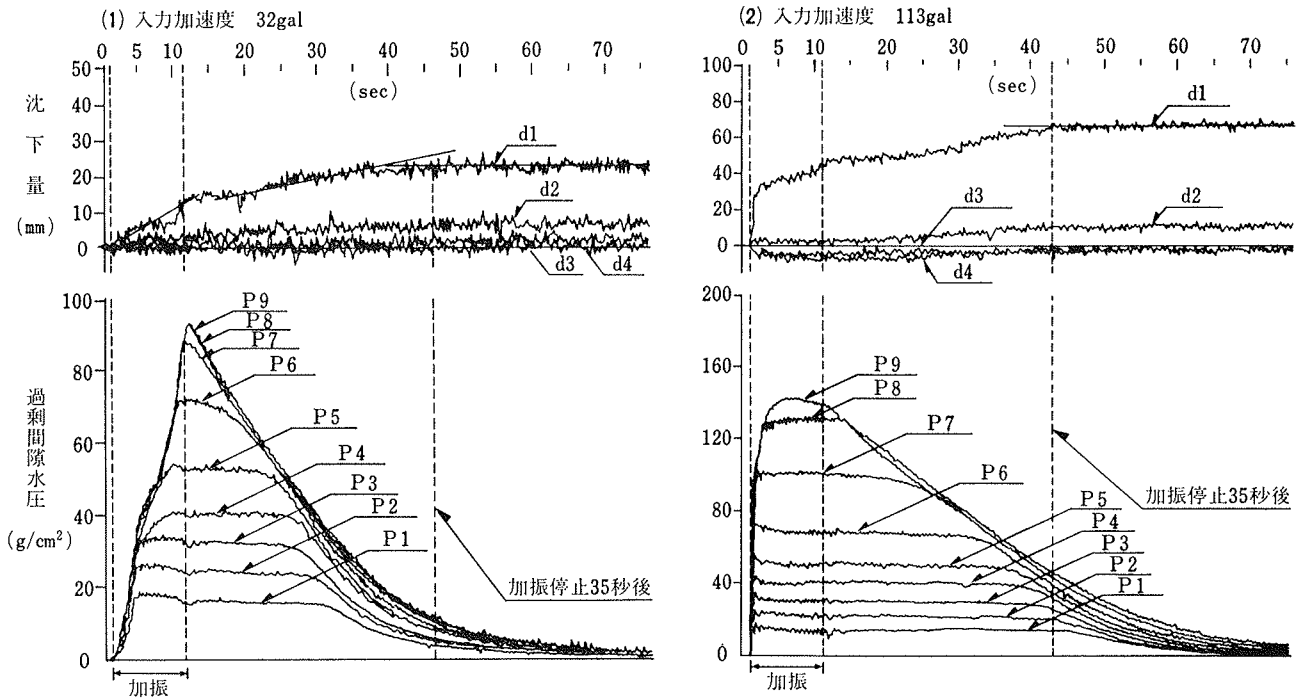


図-9 過剰間隙水圧と沈下量の経時変化

m_v : 体積圧縮係数

図-10に各加振ケースにおける過剰間隙水圧消散速度 V_d と沈下速度 V_c の関係を示すが、ここでも両者の相関はみられる。このことにより、式(3)の基となる一次元圧密理論による消散モデルで過剰間隙水圧消散中の地盤沈下が説明されるものと思われる。

5. おわりに

液状化による地盤の沈下特性を把握することを目的にせん断土槽を用いた振動台実験を実施した。その結果、次のことがわかった。

- (1) 2 m 厚の砂層の地表面沈下量は液状化した場合には 40 mm 前後となり、非液状化時での 3 mm に比し 10 倍以上の沈下を示す。
- (2) 液状化による大きな地盤沈下は液状化層の下部から生じ、この位置での鉛直ひずみは 3~7% であった。
- (3) 液状化による地盤沈下量の半分近くは加振中に生じるが、加振停止後の過剰間隙水圧消散中においてもゆるやかに沈下は進行していく。
- (4) 過剰間隙水圧の消散速度と沈下速度との間に相関がみられた。

ただし、これらの沈下量の絶対値は透水係数、体積圧縮係数および地盤密度に大きく影響されるため、定量的な言及に至るためにはさらにデータの蓄積が必要と思わ

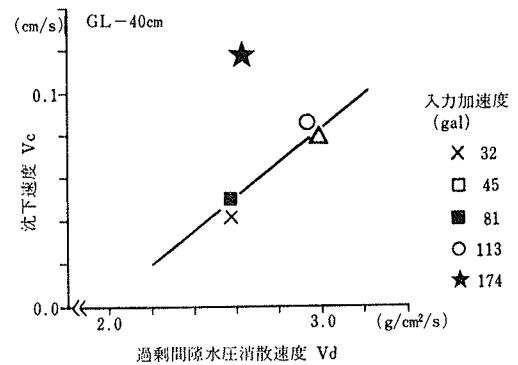


図-10 過剰間隙水圧消散速度と沈下速度との関係

れる。また、深い部分での沈下測定の精度を向上させるため、沈下計測システムの改善は必要であろう。

参考文献

- 1) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化 第4章, 技報堂, (1980), pp. 88~101
- 2) 石原研而: 土質動力学の基礎 第9章, 鹿島出版会, (1976), pp. 236~242
- 3) 松田 隆, 後藤洋三: 飽和砂地盤の液状化実験とその有効応力解析例について, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和61.11), pp. 67~68