

# 地中連続壁に囲まれた地盤の液状化抵抗 (その2)

——せん断土槽を用いた振動実験——

宮崎 祐助 石井 雄輔

## Liquefaction Resistance of Soil Enclosed by Diaphragm Walls (Part 2)

——Shaking Table Tests using Shearing Stack Container——

Yusuke Miyazaki Yusuke Ishii

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the liquefaction resistance of a sand layer enclosed by diaphragm walls. Shaking table tests using a shearing stack container were conducted on models in order to study the liquefaction characteristics of such a sand layer. This paper is concerned with the results of the experiments mentioned above. The results obtained were as follows: ① The liquefaction resistance of a sand layer will be increased if the sand layer is enclosed by diaphragm walls. ② The increase in liquefaction resistance will be more effective when the area enclosed by diaphragm walls is small. ③ The effect of surcharge is more effective if the sand layer is enclosed by diaphragm walls. ④ Settlement of the structure due to liquefaction will be small when the sand layer under the structure is enclosed by diaphragm walls.

### 概 要

飽和砂地盤を地中連続壁のような壁体で囲むと、囲まれた内部の地盤は、外部の地盤と比較して液状化しにくくなるという定性的な傾向は従来から知られていた。本報は、このような、壁体で囲まれた内部の地盤の液状化抵抗を調査することを目的として、既報の小型模型実験に引続いて実施した、せん断土槽を用いた模型振動実験の結果をまとめたものである。得られた主たる結論は以下のとおりである。① 地盤を地中連続壁で囲むと、内部の地盤の液状化抵抗は増大する。② 上記の効果は、地中連続壁で囲まれる地盤の平面寸法が小さいほど顕著に現われる。③ 地中連続壁に囲まれた内部の地盤に上載圧が作用すると、内部の地盤の液状化抵抗は増大する。④ 建物の周囲を地中連続壁で囲むと、液状化に伴う構造物の沈下量は、地中連続壁がない場合に比べて小さくなる。

## 1. はじめに

水平な砂地盤の液状化現象に関しては、今日までの研究により大略把握されてきた。しかしながら、これらの研究の多くは地盤についてのみに着目したものであり、基礎構造物が地盤の液状化に及ぼす影響、液状化過程における基礎構造物の挙動に関しては、未だ多くの問題が残されている。特に、地中連続壁によって周囲を囲まれた内部の地盤の液状化抵抗が、外部のそれと比較して高いことは、従来から定性的には認められていたにもかかわらず<sup>1)</sup>、その定量的な評価が困難であったため、実務において利用された事例は少ない。

本報は、既報<sup>2)</sup>の小型模型実験に引続き、地中連続壁によって地盤を囲むことによる液状化防止効果を確認することを目的として実施した、せん断土槽を用いた振動実験の結果についてまとめたものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置

実験に用いた大型動的模型実験装置は①砂試料の貯蔵・

搬入・搬出システム、②せん断土槽、③ボイリング・水締め装置、④大型振動台、⑤テーブル加振システム、⑥制御・計測・演算システム、の諸設備から構成されている。

図-1に示すせん断土槽を、ミニコンによって制御された大型振動台(6,600L×3,500B, 可載重量 50 tonf)に固定し、長手方向に加振した。土槽の大きさは2,500L×1,500B×2,020H(内寸)である。土槽の側壁は、軽量型鋼をベアリングを介して25段積み重ねたもので、側壁の鉛直方向の剛性が高く、かつ水平方向の変形は拘束されないため、側壁の回転は非常に少ない。従って、土槽内の地盤の動きは比較的地盤のそれに近い状態が再現される。

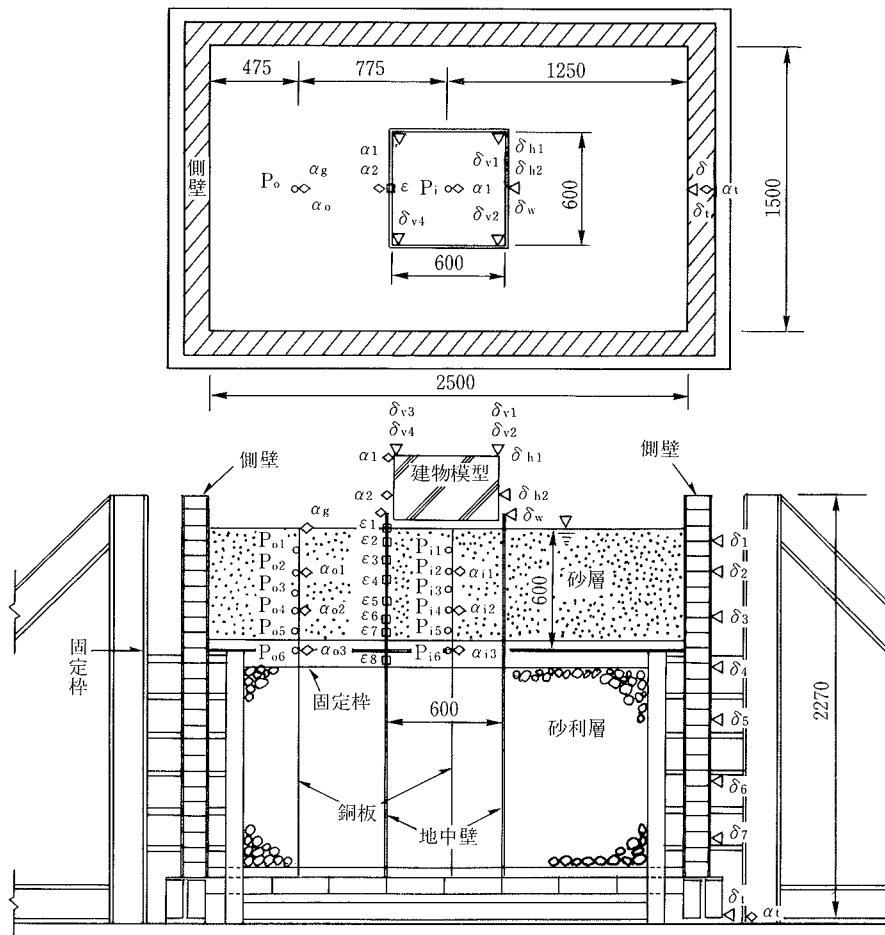
なお、せん断土槽の下部には、模型地盤を簡便に作製するために水締め装置が取り付けられている。

### 2.2 模型地盤作製方法

2.2.1 実験砂の物性 今回の実験では、準標準砂といわれる岐阜県産の珪砂(岐阜砂)を用いた。図-2に岐阜砂の粒径加積曲線を、表-1に物理・力学的性質を示す。

2.2.2 模型地盤の作製方法 支持層の上部に緩い砂質土層が30m堆積した地盤を想定し、模型縮尺を1/50として模型地盤を作製した。具体的な地盤の作製手順を以下に

名称	記号	名称	記号
せん断土槽変位	$\delta_1 \sim \delta_7$	地中壁曲げひずみ	$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_8$
地中壁変位	$\delta_w$	地表面加速度	$\alpha_g$
建物変位 (鉛直)	$\delta_{v1} \sim \delta_{v4}$	地中加速度	$\alpha_{o1} \sim \alpha_{o3}, \alpha_{i1} \sim \alpha_{i3}$
建物変位 (水平)	$\delta_{h1} \sim \delta_{h2}$	建物加速度	$\alpha_1 \sim \alpha_2$
テーブル変位	$\delta_t$	地中壁頭部加速度	$\alpha_w$
間隙水圧 (内)	$P_{i1} \sim P_{i6}$	テーブル加速度	$\alpha_t$
間隙水圧 (外)	$P_{o1} \sim P_{o6}$		

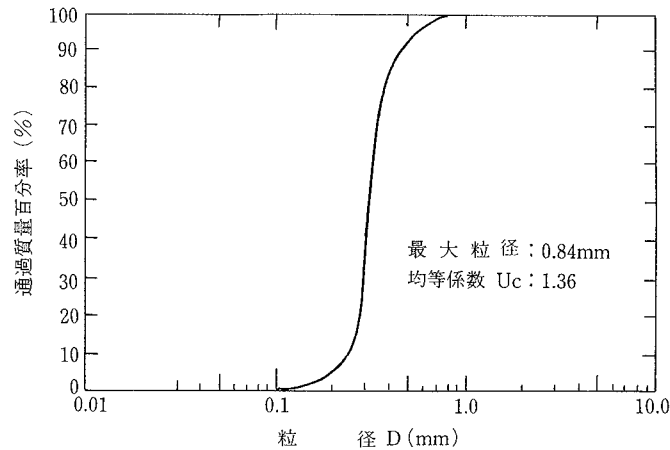


図一 せん断土槽および計測器配置

示す (図一 参照)。

- ① 支持層のせん断変形を拘束するために、土槽内部および外部に固定枠を設置する。
- ② 地中連続壁模型を固定枠に固定する。
- ③ 各計測器を所定の位置に設置する。
- ④ 固定枠上端まで碎石を投入し、十分締固める。
- ⑤ 層厚 60 cm になるように砂を投入する。
- ⑥ 土槽の下部から圧力水を送水し、模型地盤をボイリングさせて地盤を均質化する。
- ⑦ 送水を中止し、土槽下部から排水し、地盤を水締めする。

なお、以後の実験においては上記の⑥以降の手順のみで、均質で再現性のある地盤を、砂を出し入れすることなく簡単に作製することが可能である。



図二 実験砂の粒径加積曲線

上記の手順で作製した模型地盤の物性は表-1に示すとおりである。

なお、地下水位はすべて G. L. ±0.0 cm とした。

2.2.3 構造物模型の概要 地上2階~12階、地下階なしの建物(平面形:30m×30m)を想定し、接地圧に関して相似則を適用して、縮尺1/50の建物の模型を作製した。表-2に建物の模型の一覧を示す。地中連続壁の模型は、曲げ剛性に関して相似則を適用し、板厚8mmのアクリル製とした。外周の地中連続壁および格子壁の設置間隔はそれぞれ60cm, 20cmとした。

なお、水中における各模型の共振振動数は21~27Hzである。

2.3 実験ケースおよび実験手順

2.3.1 実験ケース

① 予備実験 本実験に先立ち、模型地盤・構造物の共振実験、および模型地盤の液状化実験を実施し、地震動の入力振動数、および入力強度を決定した。

② 本実験 地中連続壁に囲まれた地盤の液状化抵抗を評価することを目的として、以下に示すような Case-1~Case-4 の4ケースの実験を実施した。各ケースの実験の

表-1 実験砂・模型地盤の物理・力学的性質

砂	平均粒径 D50	0.325mm	模型地盤	乾燥単位体積重量 $\gamma_d$	1.35 gf/cm <sup>3</sup>
	10% 粒径 D10	0.250mm		飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}$	1.84 gf/cm <sup>3</sup>
	30% 粒径 D30	0.300mm		間 隙 比 e	0.96
	60% 粒径 D60	0.340mm		相 対 密 度 Dr	37.9%
	最大粒径 Dmax	0.84mm		粘 着 力 C	0 tf/m <sup>2</sup>
	均等係数 Uc	1.36		内 部 摩 擦 角 $\phi$	36.1°
	最大間隙比 emax	1.17		S 波 速 度 Vs	60m/s
	最小間隙比 emin	0.616		共 振 振 動 数 $\omega_0$	13Hz
	真比重 Gs	2.65			

表-2 実験ケースおよび実験条件一覧

	実験ケース	実験名	地中連続壁		建 物 模 型	
			有・無	頭部条件	重量(kgf)	高さ(cm)
予備実験	Case 2	O-1	有	ピン	21.6	12
	Case 3	O-2	有	固定	21.6	12
	Case 4	O-3	有	固定	21.6	12
	本実験	Case 1	N-1	無	—	21.6
N-2			無	—	43.2	24
N-3			無	—	86.4	48
N-4			無	—	129.6	72
本実験	Case 2	P-0	有	ピン	0	0
		P-1	有	ピン	21.6	12
		P-2	有	ピン	43.2	24
		P-3	有	ピン	86.4	48
本実験	Case 3	P-4	有	ピン	129.6	72
		F-1	有	固定	21.6	12
		F-2	有	固定	43.2	24
		F-3	有	固定	86.4	48
本実験	Case 4	F-4	有	固定	129.6	72
		FG-1	有	固定	12	12
		FG-3	有	固定	86.4	48
		FG-4	有	固定	129.6	72

概要を図-3に示す。また、実験名称と実験条件の一覧を表-2に示す。

Case-1: 建物の接地圧の影響

Case-2: 地中連続壁の影響・建物の接地圧の影響

Case-3: 地中連続壁頭部の固定条件・建物の質量の影響

Case-4: 地中連続壁頭部の配置形状の影響

2.3.2 実験方法

前述の手順で模型地盤を作製した後、地盤を乱さないように注意して所定の構造物模型を設置し、液状化実験を実施した。なお、土槽の構造上、地盤下部の非排水条件が満足されないことから、上部・下部の両面排水とした。

土槽の加振に用いる地震波形は、E1 Centro (NS 40) とし、地盤あるいは構造物模型の共振振動数をさけ、8 Hz にピークがくるように時間軸を修正した。加振方法は、表-3に示す4ステップの段階載荷方式とした。各ステップにおける地震動の入力強度は、予備実験結果に基づき同表中に示す値とした。なお、各ステップの地震動の継続時間は7.5 sec とし、地盤に発生した過剰間隙水圧が完全に消散した後、次に次ステップの加振を行なった。

2.4 計測項目

測定項目は、地中連続壁の内外の過剰間隙水圧、地中連続壁の曲げひずみ、せん断土槽・地中連続壁・建物(鉛直、水平)・振動台・地表面(沈下)の各変位、地表面・地中・建物・地中連続壁・振動台の各加速度の、計46点である。

表-3 地震入力強度

	入力加速度	備 考
Step-1	18 gal	外部地盤が初期液状化に至らない入力強度
Step-2	29 gal	外部地盤の一部が液状化に至る入力強度
Step-3	60 gal	外部地盤がほぼ完全に液状化する入力強度
Step-4	90 gal	内部地盤も液状化に至る入力強度
Step-5	—	Step-4で内部地盤も液状化に至らない場合

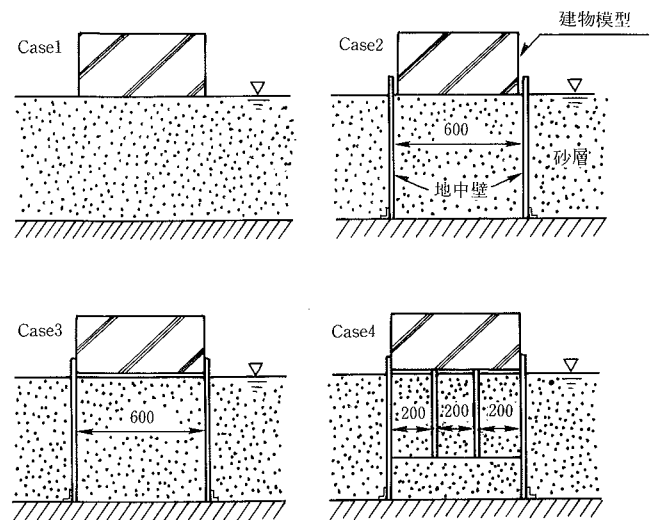


図-3 実験ケースの概要

表-4に測定項目・使用計器の一覧を、また図-1に各測定器の配置を示す。なお、間隙水圧計および地中の加速度計は、土槽の下端に固定された薄い銅板に予め取り付けおき、ポイリングによって地盤を作製する際に、所定の深さ、向きになるよう銅板を緊張して設置した。

表-4 測定項目および使用計器一覧

測定項目	容量・精度	メーカー、型式
間隙水圧	地中壁内側	共和電業 BP-200GRS
	地中壁外側	
ひずみ	地中壁曲げひずみ	共和電業 KFP-5-350-C1-65
加速度	地表面加速度	共和電業 ASW-1A
	地中加速度	
	建物加速度	
	地中壁頭部加速度	
	振動台テーブル加速度	
変位	せん断土槽変位	共和電業 DLT-100A
	地中壁変位	東京測器 SDP-100R
	建物変位 (鉛直)	
	建物変位 (水平)	
	振動台テーブル変位	
	地表面沈下	
	±50mm, 0.5%	
	±10000×10 <sup>-6</sup>	
	±1G, 1%	
	±50mm, 0.1%	

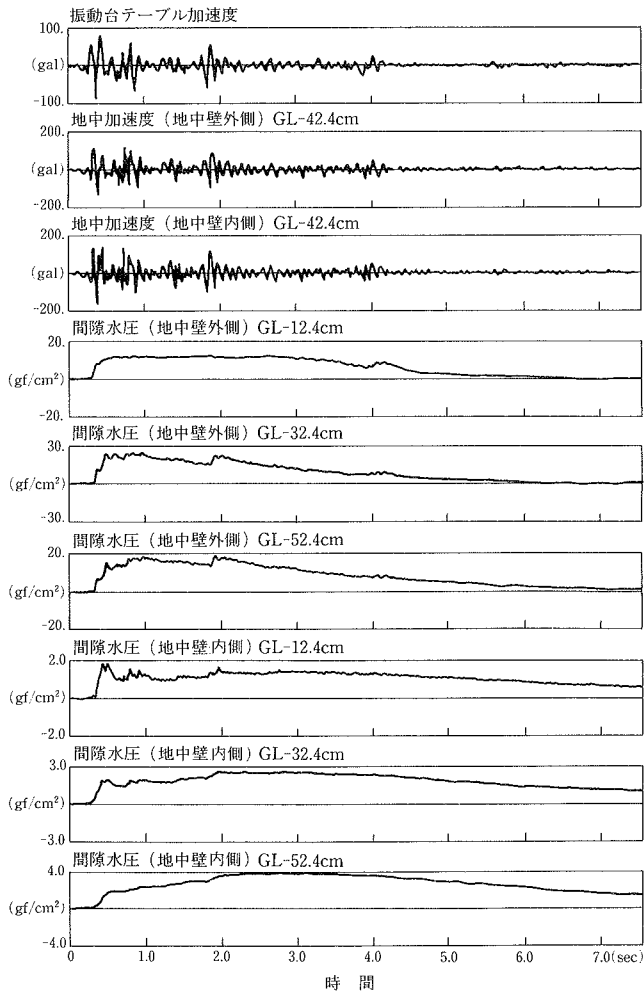


図-4 実験結果の例 (Case-4, FG-3, Step-4)

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 過剰間隙水圧

図-4に実験結果の一例を示す。同図は、Case-4の実験における最終加振時の結果であり、上から順に振動台・地中の加速度、地中壁の内側および外側の地盤の過剰間隙水圧を示している。図-5は、同実験における地中連続壁に囲まれた内部の地盤および外部の地盤に発生する過剰間隙水圧比の経時変化を比較したものである。同図から、外部の地盤ではほぼ全層にわたって液状化が進行しているのに対して、内部の地盤では浅い層は約15%、深い層で約10%程度しか過剰間隙水圧が発生しておらず、地中連続壁による液状化防止効果が認められる。

**3.1.1 地中連続壁の設置間隔の影響** 液状化抵抗の増大に及ぼす地中連続壁の設置間隔の影響を把握することを目的として、図-6にCase-3, Case-4の過剰間隙水圧比の比較を示す。同図は過剰間隙水圧比を縦軸に、地中連続壁の設置間隔を液状化層厚で無次元化した値を横軸に採ったものである。横軸の値はCase-3では1.0, Case-4では1/3になる。同図から、地中連続壁の設置間隔が狭いほど過剰間隙水圧比は小さくなっており、液状化防止効果が高いことがわかる。その効果は、加振加速度が大きいほど、また層が浅いほど顕著である。

**3.1.2 建物重量の影響** 建物の重量は、Case-1, Case-2では内部の地盤に対する接地圧として作用し、Case-3, Case-4では地中連続壁頭部の質量として作用する。以下、

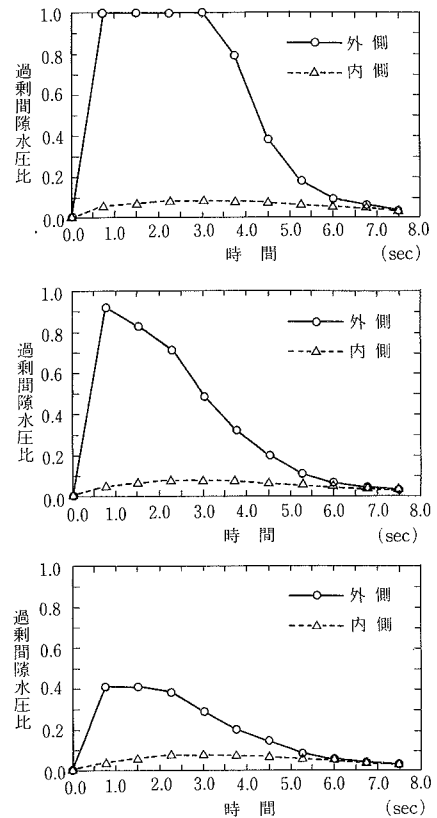


図-5 過剰間隙水圧の比較

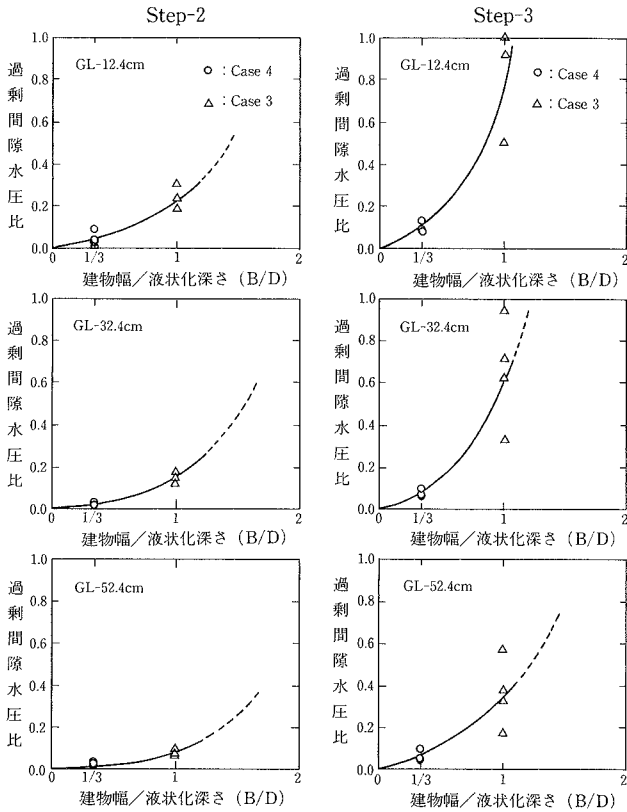


図-6 地中連続壁の設置間隔の影響

それぞれの場合について結果を示す。

(1) 接地圧の影響 図-7に液状化抵抗の増大に及ぼす接地圧の影響を示す。同図の縦軸は内部の地盤の過剰間隙水圧比を外部の地盤のそれで無次元化したものであり、値が小さいほど内部の地盤の液状化の進行が遅れていることを示している。同図から、地盤に上載圧が加わると液状化の発生が遅れ、その効果は上載圧が大きいほど高くなるのがわかる。また、地中連続壁がない地盤では、深い層ではその効果が少なくなるのに対して、地中連続壁に囲まれた内部の地盤では、深い層まで液状化防止効果がおよんでいることがわかる。

(2) 質量の影響 今回の実験の範囲では建物の質量によらず、地中連続壁に囲まれた内部の地盤の過剰間隙水圧比は Case-3 では外部のその40~80%、Case-4 では5~20%程度の値となっており、地中連続壁による液状化抵抗の増大に及ぼす建物の質量の影響は認められない。

3.1.3 加振加速度の影響 地中連続壁に囲まれた内部の地盤の過剰間隙水圧比を外部のそれで無次元化した値は、バラツキはあるものの加振加速度によらずほぼ一定になっており、今回の実験の範囲では、地中連続壁による液状化抵抗の増大に及ぼす加振加速度の影響は小さい。

### 3.2 地中連続壁の応答

液状化過程における地中連続壁の曲げひずみの深さ方向分布は、当然のことながら、地中連続壁頭部の固定条件により、Case-2では頭部自由の場合の分布形状を、Case-3, および Case-4では頭部固定の分布形状を示している。こ

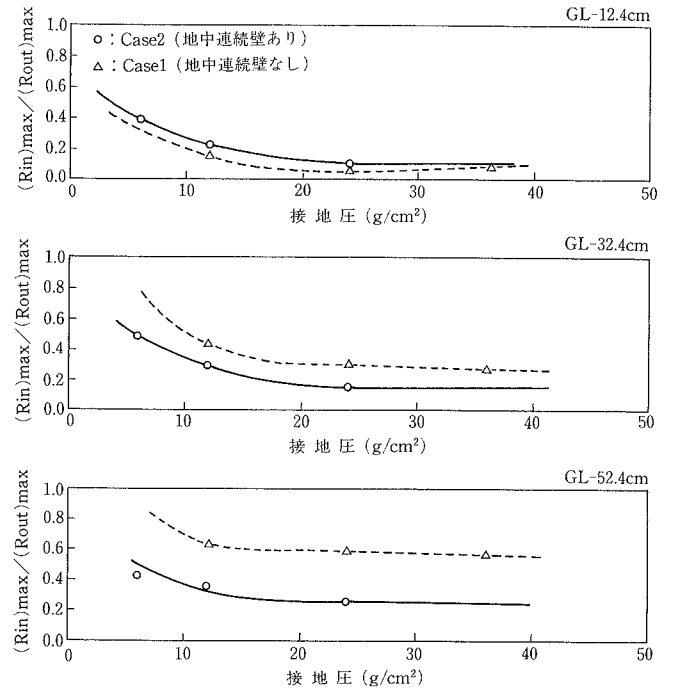


図-7 建物の接地圧の影響

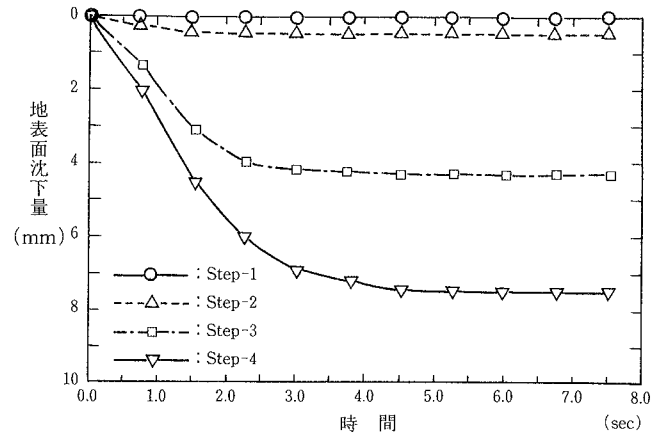


図-8 地表面沈下

の実験においては、Step-2までの段階では過剰間隙水圧比は全層に渡って約0.2~0.3の範囲にあり、Step-3以降では0.6以上になっているが、地中連続壁の曲げひずみも過剰間隙水圧比に対応して、Step-2までは小さな値に留まっております、Step-3以降はひずみが急激に増大している。

また、地中連続壁の頭部の変位、加速度についてもせん断ひずみの場合とほぼ同様の傾向を示しており、過剰間隙水圧比の増大に応じて大きくなっている。

### 3.3 液状化に伴う沈下

3.3.1 地表面の沈下 図-8に液状化過程における地表面沈下量を示す。地表面沈下量は過剰間隙水圧比の上昇が少ない Step-2までは非常に小さい値であるが、過剰間隙水圧比が0.6を超える Step-3以降においては急激に増加している。

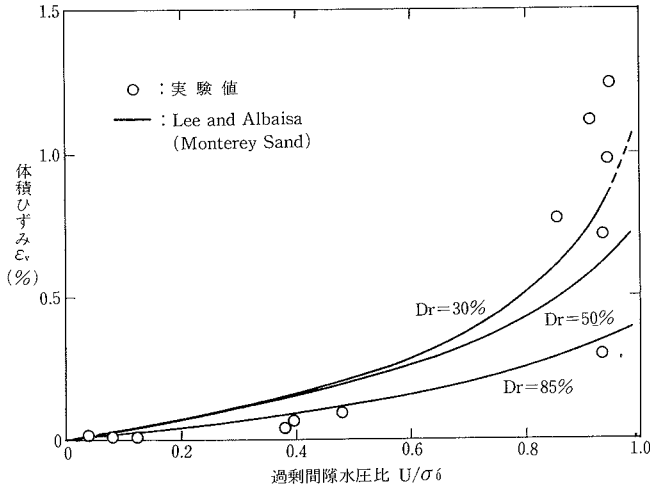


図-9 過剰間隙水圧と体積ひずみの関係

過剰間隙水圧比と、地表面沈下量から推定した地盤の体積ひずみの関係を図-9に示す。同図から明らかなように、過剰間隙水圧比が0.6~0.8以上になると地盤の体積ひずみは急増している。この傾向は、実験条件が異なっているにもかかわらず、同図中に示したLeeら<sup>3)</sup>の結果ともよく一致している。また、液状化に伴う地盤の体積ひずみは、ほぼ完全に液状化した状態においても1.0~1.5%程度以下の値であることがわかる。

**3.3.2 建物の沈下** 液状化に伴う建物の沈下量を図-10に示す。実験条件が異なるので直接比較することはできないが、同一の過剰間隙水圧比における建物の沈下量を比較した場合、地中連続壁のないCase-1に比べて建物の周囲を地中連続壁で囲んだCase-2の沈下量は小さい値を示している。これは、地中連続壁がない場合には液状化に伴う建物の沈下量は、間隙水圧の上昇に伴う支持力の低下による沈下と間隙水圧の消散による沈下の和として表わされる<sup>4)</sup>のに対して、建物の周囲を地中連続壁で囲んだ場合には、地中連続壁によって前者の沈下が抑制されるためと考えられる。

#### 4. まとめ

以上、模型実験結果から、地中連続壁によって周囲を囲まれた内部の地盤の液状化抵抗に関して、下記の点が明らかになった。

- ① 地中連続壁に囲まれた内部の地盤では、外部の地盤に比べて過剰間隙水圧の上昇が遅れる。
- ② 上記の効果は、地中連続壁に囲まれる地盤の平面寸法が小さいほど顕著に表われる。従って、地中連続壁に囲

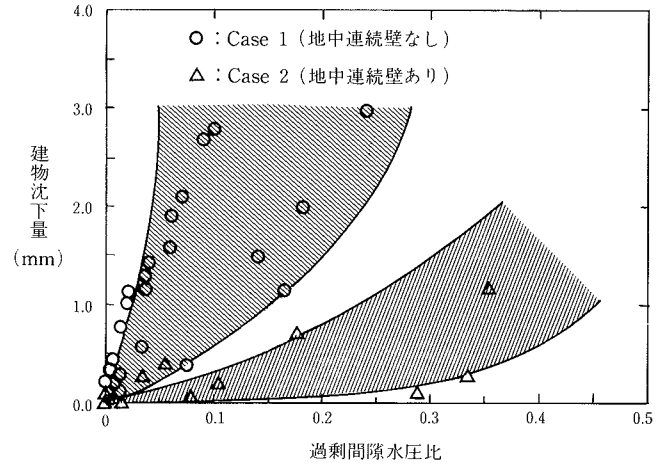


図-10 建物の沈下

まれた内部の地盤を、適切な間隔で格子状に分割すれば内部の地盤の液状化抵抗はさらに増大する。

③ 地中連続壁に囲まれた内部の地盤に上載圧が作用すると、内部の地盤の液状化抵抗は増大する。

④ 地中連続壁の水平変位、曲げひずみの値は、周辺地盤の過剰間隙水圧が上昇するに従って急激に増大する。

⑤ 建物の周囲を地中連続壁で囲むと、液状化に伴う建物の沈下量が、地中連続壁がない場合に比べて小さくなる。

今後、実験を継続し、地中連続壁に囲まれた地盤の液状化抵抗に関して、液状化層厚、地中連続壁の設置間隔の影響を定量化していく必要がある。

#### 謝辞

この実験を進めるに当たって、多くの有益なご指導を頂いた、東京工業大学 時松孝次助教授に、ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 内藤多伸：日本の耐震建築とともに、雪華社、p. 6、(1965)
- 2) 金谷、石井：地中連続壁に囲まれた地盤の液状化抵抗 (その1)、大林組技術研究所報、No. 34、p. 11~15、(1987)
- 3) Lee, K. L., and Albaisa, A., : Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands, ASCE, Vol. 100, No. GT4, p. 387~406, (1974)
- 4) 石井、時松：砂地盤に支持された構造物の簡便な地震時沈下量予測、第22回土質工学研究発表会梗概集、p. 755~758、(1987)