

## 中越・中越沖地震で繰返された液状化被災地盤上の建物基礎の不同沈下メカニズムに関する研究

環境防災研究室 修士 2 年 布川 博一  
指導教員 大塚 悟, 磯部 公一

液状化, 不同沈下, 再液状化, 模型実験

### 1. はじめに

液状化に関する研究は、従来から多く行われておりいくつかの貴重な知見が得られている。また、液状化は多くの地震で発生しており、近年では、1995 年の兵庫県南部地震や 2004 年の新潟県中越地震、2007 年の新潟県中越沖地震で確認され、液状化は地震によって発生する地盤変状としては、よく知られている。

液状化に関する知見は、土木、建築において幅広く活用されているが、液状化対策として実際に被害低減に活かされているのは、大型公共工事や大型建築物などごく限られた範囲にとどまっている。特に個人が所有する小型建築物では、液状化に対する対策はほとんど見られず、地震時に液状化による地盤変状により被害を受けるケースが後を絶たない。

また、新潟県においては 2004 年の中越地震と 2007 年の中越沖地震と短期間に 2 度の地震被害を受け、柏崎市や刈羽村では地震に伴う液状化被害が繰り返される“再液状化”被害が見られた。新潟県において 2004 年の中越地震と 2007 年の中越沖地震と短期間に 2 度の地震被害を受け、柏崎市や刈羽村では地震に伴う液状化被害が繰り返された。

このような背景を踏まえ、本研究では 2007 年に発生した新潟県中越沖地震の被害から、柏崎市松波 2 丁目において現地調査を実施した。これらの調査をもとに、地盤が建物被害に与える相関性及び不同沈下メカニズムについて振動台模型実験を用いて考察した。また、柏崎市や刈羽村で見られた繰返しの液状化について、従来の液状化の知見を活用しながら、その力学的特性を把握するために各種三軸圧縮試験、振動台模型実験を行い、そのメカニズムについて考察を行った。

### 2. 現地調査

#### (1) 柏崎市松波 2 丁目<sup>1)</sup>

松波 2 丁目は、JR 越後線東柏崎駅の北方約 1.5 km に位置する松波住宅団地である。この地域は鯖石川河口に近い右岸にあって、荒浜砂丘の後背地に位置している。かつてやや高かった北側の砂丘砂を削っ

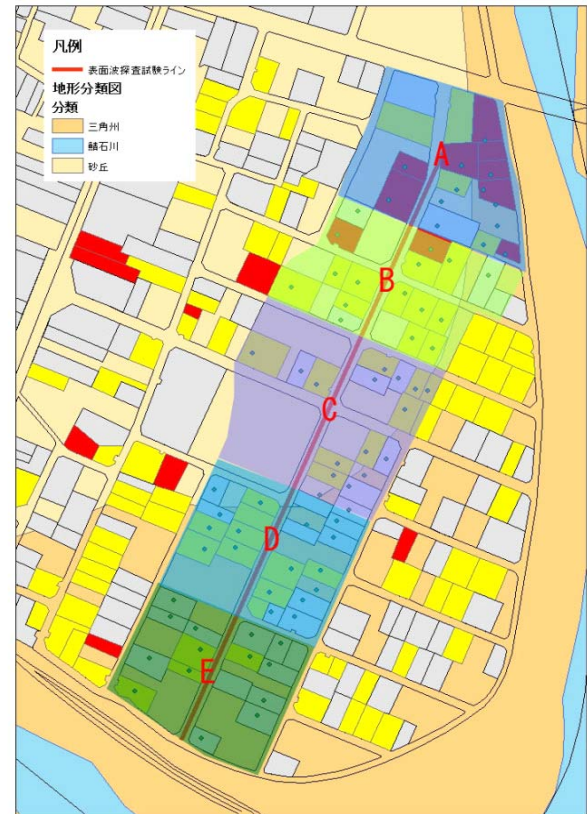


図-1 松波 2 丁目の被害の概要

て南側の鯖石川の氾濫原（当時松林）に盛土し、昭和 48 年から 51 年にかけて宅地化された。現地では、地震後に地盤調査と建物の不同沈下量の計測を行った。図-1 に松波 2 丁目の平面図と宅地応急危険度判定の結果を示す。図では、地層構成の変化と宅地被害の関係を明確に示すため、表面波探査試験（測線 M-1）を中心として左右約 50 m の宅地が入るよう 5 つの範囲を抽出した。罹災証明発行台帳より同範囲の罹災証明データを、A～E の 5 つのエリアに分けて集計し、下記の式より被災率を算出した。

図-2 に、同地区において南北方向に実施した表面波探査試験（測線 M-1）とスウェーデン式サウンディング試験、ボーリング試験の結果を合わせて示す。地盤調査から境界線を挟んで締まった砂質土（砂丘）上に緩い砂質土（三角州）が堆積しており、地震では三角州が液状化したと考えられる。

図-1 より得た各エリアの被災率と表面波探査試験から定めた地層境界の相関を示したグラフを図-3 に示す。図-3 より最も被災率の高いエリアは A で、被災率 56.92 % とほとんどの建物で半壊以上の被害を受けている。全エリアの平均被災率は 25.84 % であり、C 以降は平均被災率の下回る被災率で推移していることが分かる。

計測した建物の不同沈下量をエリアごとに集計したグラフを図-4 に示す。被災率同様に、建物の不同沈下量もエリア A, B で大きくなっており、被災率が高いところで建物の不同沈下量が大きくなっており、被害を受けた建物のほとんどで不同沈下が発生している。以上から地形変化が建物の被災率と不同沈下に大きく関係していることがわかる。

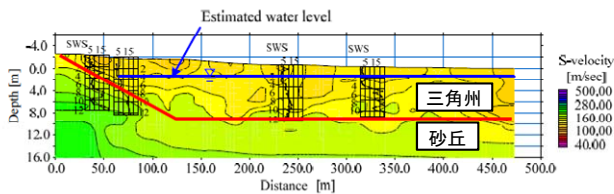


図-2 表面波探査試験の結果 (M-1)

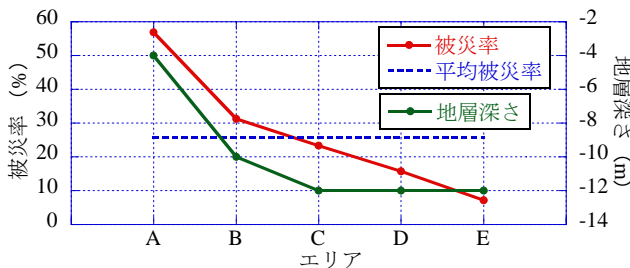


図-3 各エリアの被災率と地層深さの関係

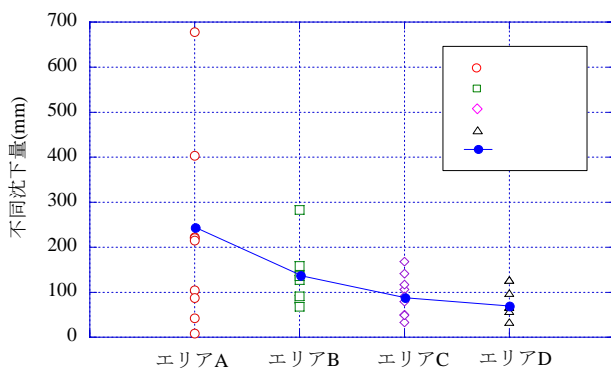


図-4 計測した建物の不同沈下量の結果

(2) 刈羽村稲場地区

刈羽村稲場地区では、中越地震と中越沖地震で 2 回の繰り返し被害が起きている。中越地震では、M 6 クラスの余震の多発と、台風 23 号による集中豪雨が被害を拡大した。

この地区は地下水位が非常に高く、地表面の-40～70 cm に存在しており、砂丘地盤は液状化を起こしやすい粒径範囲にあることから潜在的に液状化被害を受けやすい地域であった。このようなことから、刈羽村稲場地区では、中越地震後と中越沖地震後に現地調査を実施した。図-5 に示すお宅にご協力頂き、地震後にそれぞれ表-1 に示す現地試験を実施した。調査した住宅も、中越地震、中越沖地震の際に液状化に起因する地盤被害により半壊の被害を受けた。それぞれの結果を以下に示す。

表-1 現地調査で実施した試験

時期	規格	実施試験
中越地震後	JIS A 1219	標準貫入試験
	JIS A 1221	スウェーデン式サウンディング試験
	JGS 1122	地盤の弾性波速度検層方法
中越沖地震後	JIS A 1219	標準貫入試験
	JGS 1435	電気式静的コーン貫入試験 (三成分)
	JGS 1421	孔内水平載荷試験

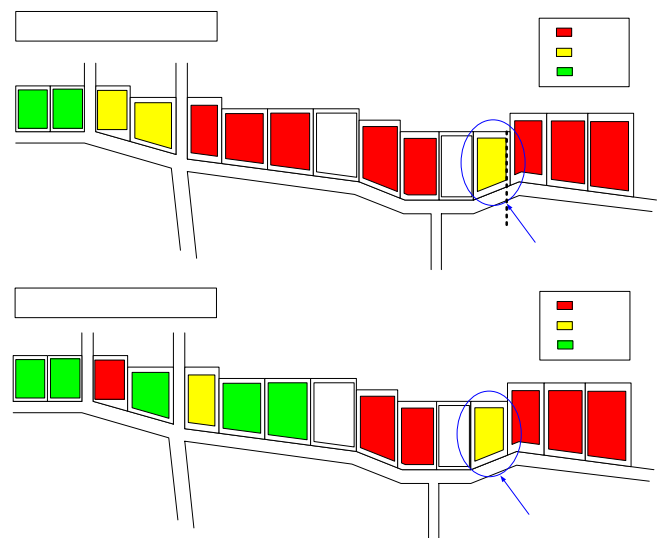


図-5 刈羽村稲場地区の調査地点

(上：中越地震後、下：中越沖地震後)

図-6 に中越地震後に実施した表面波探査試験の結果を示す。図-6 から地表面から 4 m 付近までは S 波速度が 160 m/s<sup>2</sup> 以下の部分であり、砂質土であれば N 値が約 15 以下を示し、軟弱地盤が広がっていることがわかる。4 m より深い場所では S 波速度が 220 m/s<sup>2</sup> 程度と大きくなっていることから、おおむね 4 m 付近を境に地盤が異なることがわかる。図-7 から柱状図から稲場地区一帯は、砂質土であり荒浜砂丘の後背地に位置しており、S 波速度の大きい 4 m から深い部分は古砂丘に分類され、4 m より浅い部分は新砂丘に分類される。

この表面波探査試験の結果と整合するように、図-7 に示す標準貫入試験の結果も N 値が 15 以下の場所が 4 m まで付近まで続いている。また、中越地震、

中越沖地震と 2 度の地震を受けたにもかかわらず、深度の浅い部分での N 値の違いはほとんど変化がみられていない。

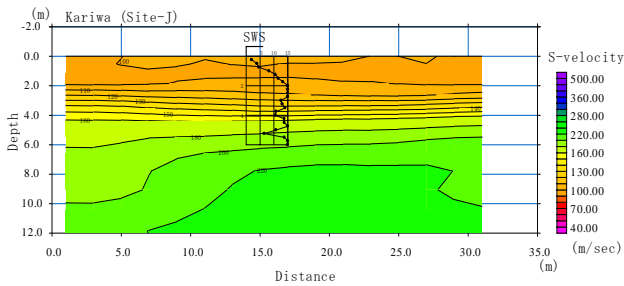


図-6 中越地震後に実施した表面波探査試験

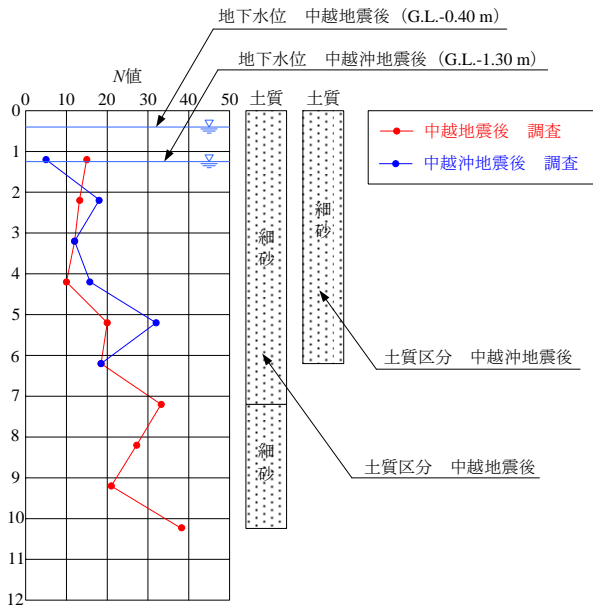


図-7 標準貫入試験の結果

### 3. 三軸圧縮試験

刈羽村稲場地区での調査をもとに繰返し液状化について、従来の液状化の知見を活用しながら、その力学的特性を把握するために各種三軸圧縮試験を行った。

試験試料は、刈羽村稲場地区より採取した自然砂（刈羽砂と呼称）を用いて行った。刈羽砂の物性値を表-2に示す。

表-2 刈羽砂の物性値

最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	1.688 g/cm <sup>3</sup>	最大粒径	2.00 mm
最小乾燥密度 $\rho_{dmin}$	1.373 g/cm <sup>3</sup>	60% 粒径 D60	0.45 mm
土粒子密度 $\rho_s$	2.770 g/cm <sup>3</sup>	50% 粒径 D50	0.40 mm
最大間隙比 $e_{max}$	1.018	30% 粒径 D30	0.30 mm
最小間隙比 $e_{min}$	0.641	10% 粒径 D10	0.25 mm
		均等係数 $U_c$	1.80
		曲率係数 $U_c$	0.80

試験ケースは、現地調査で採取した不かく乱試料と、再構成試料の非排水繰返しせん断試験と再液状

化を想定して、繰返しひずみの大小の違いによる 2 種類の再構成試料の繰返し定ひずみせん断試験を行った。試験では、供試体を飽和させ、有効拘束圧  $p' = 100$  kPa、背圧  $BP = 100$  kPa、周波数 0.1 Hz の条件で、表-3、表-4に示す繰返し応力振幅比で試験を実施した。

表-3 試験ケース（繰返し・飽和）

試料名	間隙比 $e$	繰返し応力振幅比
刈羽砂（凍結サンプリング試料）	0.770~0.813	0.124
		0.179
		0.219
		0.275
刈羽砂①（かく乱試料）	0.796	0.141
		0.175
		0.205
		0.241
		0.324

表-4 試験ケース（繰返し・定ひずみ履歴・飽和）

試料名	間隙比 $e$	繰返し定ひずみ	回数	繰返し応力振幅比
刈羽砂②（かく乱試料） [小ひずみ履歴供試体]	0.866	DA = 0.2 %	200	0.221
				0.265
				0.309
刈羽砂②（かく乱試料） [大ひずみ履歴供試体]	0.866	DA = 2 %	20	0.121
				0.172
				0.235
				0.277

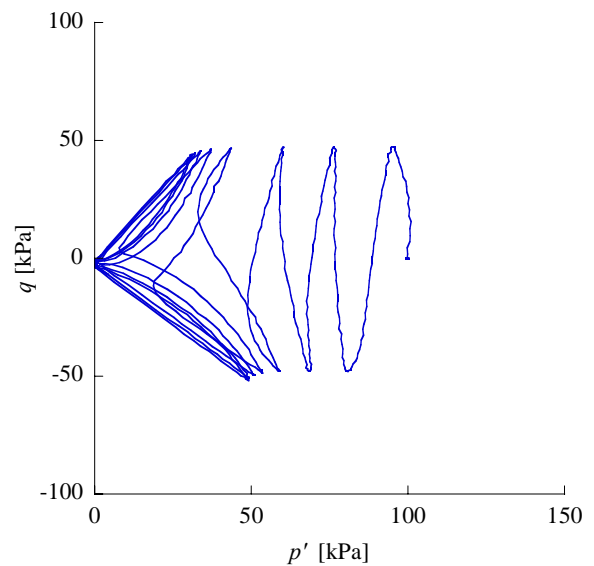


図-8 有効応力経路

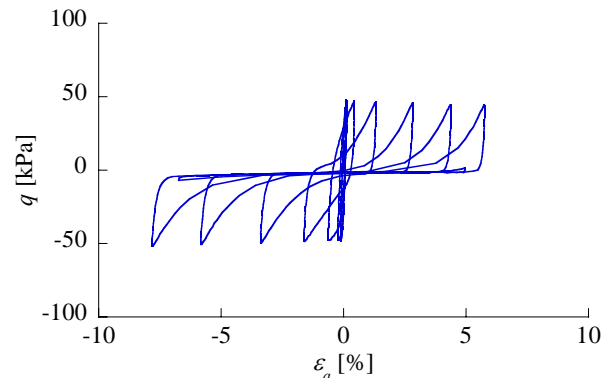


図-9 軸差応力  $q$ -軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係

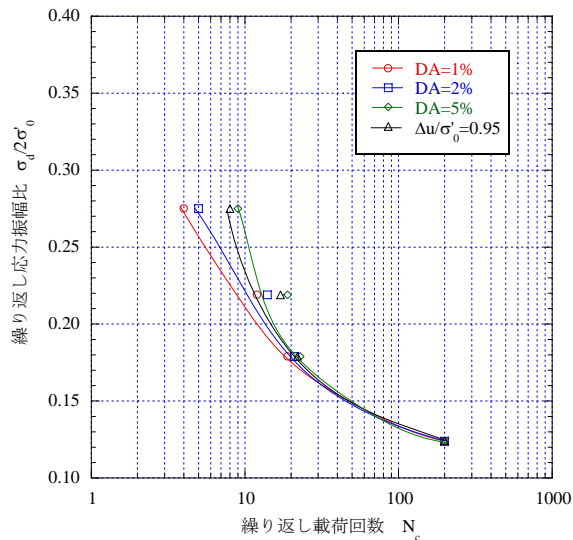


図-10 液状化強度曲線（現地サンプリング試料）

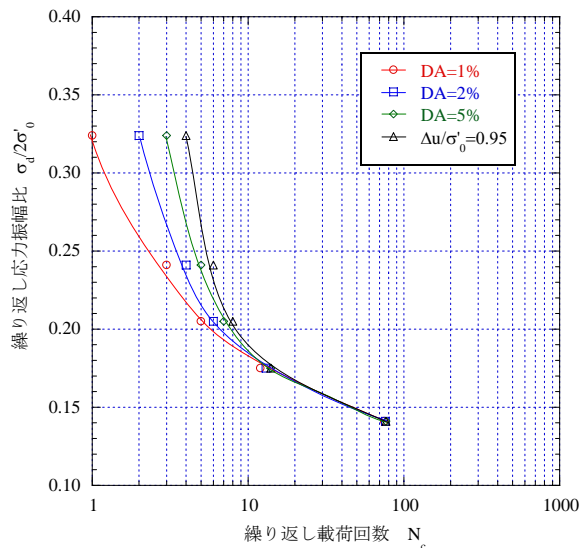


図-11 液状化強度曲線（再構成）

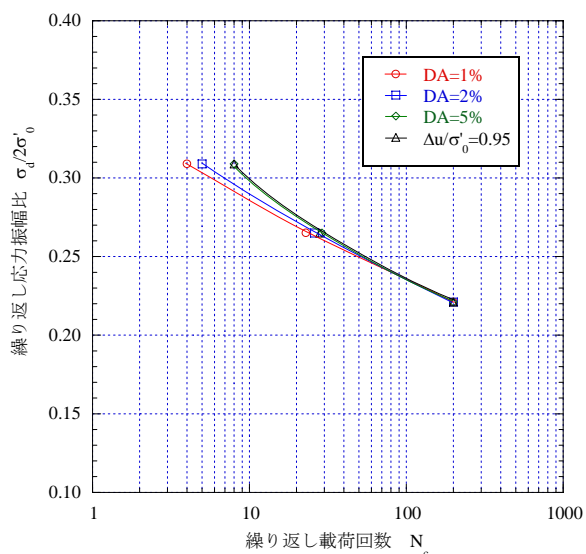


図-12 液状化強度曲線（小ひずみ履歴）

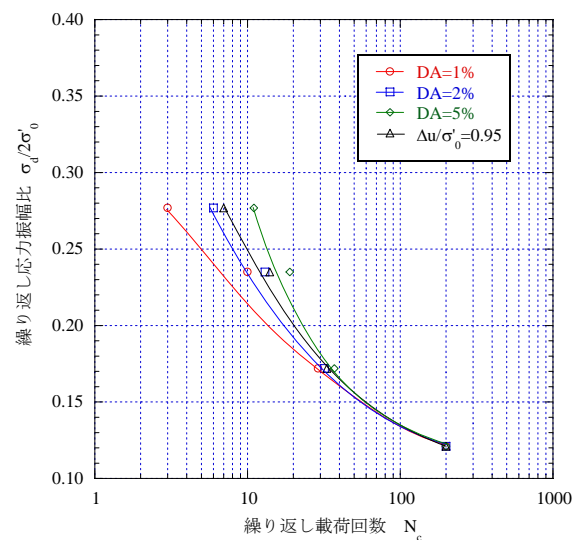


図-13 液状化強度曲線（大ひずみ履歴）

各ケースにおける液状化強度曲線を図-10～13に示す。液状化強度曲線から、試料の液状化強度は図-14に示すような結果になった。

すべての試験において、図-8のように繰返し載荷に伴い有効応力が減少し、最終的には0に達し液状化に至っている。しかし、この液状化は広義の意味での液状化であり、載荷に伴い有効応力が回復し、除荷に伴い再び0になるサイクルを繰り返すサイクリックモビリティの状態に至っている。また、図-9に示すように繰返し載荷に伴い、ひずみの進展も見られた。

#### ①現地試料と再構成試料の比較

上記から繰返しひずみを与えていないケースに対して比較を行うと、最も液状化強度の小さい通常の繰返しせん断試験を実施した供試体は、図-14に示す強度曲線のカーブが急で、応力比の増加に対して著しくひずみの進展がみられることがわかる。再構成試料と同様に現地サンプリング試料は、度重なる液状化により相対密度が上昇したことにより、再構成の供試体に比べ液状化強度が大きくなっていることがわかる。

#### ②現地試料とひずみ履歴を受けた再構成試料の比較

図-14から、現地サンプリング試料と小ひずみ (DA = 0.2%) を与えた供試体、大ひずみ (DA = 2%) を与えた供試体を比較すると、最も液状化強度が大きいのは小ひずみ (DA = 0.2%) を与えた供試体であり、大ひずみ (DA = 2%) を与えた供試体と現地サンプリング試料は近い液状化強度を示した。図-14から前者の液状化曲線と後者の液状化強度曲線は、曲線の形が大きく異なっている。これを図-15の再構成供試体作製時の各セッションにおける相対密度の変化から、

相対密度と液状化強度関係を比較する。

図-15 から現地サンプリング試料は供試体相対密度がおおむね  $Dr = 55\% \sim 65\%$  と密度がもっとも大きく、大ひずみ ( $DA = 2\%$ ) を与えた供試体は  $Dr = 50\%$  程度、小ひずみ ( $DA = 0.2\%$ ) を与えた供試体は  $Dr = 45\%$  程度の順となった。

一般に一度液状化した地盤は、間隙水の排水による体積収縮で地盤の密度は上昇する。また、密度の高い地盤ほど液状化抵抗は大きいとされている。しかしながら、図-14 と図-15 から、最も相対密度の大きい現地サンプリング試料が最も液状化強度が小さいという一般的な概念とは逆の結果を示している。

この相対密度が高いにもかかわらず液状化強度がさほど上がらない原因として、いくつかの知見がなされている。Finn<sup>2)</sup> らの研究では、最初の液状化において生じたひずみ量によって再液状化のしやすさが異なることが示されており、小さなひずみしか経験しなかった場合には再液状化しにくく、また大きなひずみを経験すると再液状化しやすくなることを示している。これは、ひずみ履歴に伴う土粒子構造の違いと関係しており、小さなひずみしか経験しなかった場合は土粒子構造が安定的な構造になりやすく、逆に大きなひずみを経験すると劣化した状態になりやすいと考えられる。この知見は図-14 による小ひずみ ( $DA=0.2\%$ ) を与えた供試体と大ひずみ ( $DA=2\%$ ) を与えた供試体の液状化強度の違いからも説明ができる。同じく 2004 年の中越地震と 2007 年の中越沖地震により大きなひずみを受けた現地サンプリング試料も同様と推察される。

また、山口<sup>3)</sup> らは再液状化と上向きの浸透流の関係から液状化による中層部と上層部のせん断抵抗比が増加しない理由として、底層部から排出された間隙水が上向きの浸透流となって中層部と上層部の密度増加を妨げるとともに、土粒子のかみ合わせをゆるくする働きをしている可能性について述べている。これは、刈羽村現地調査の標準貫入試験、コーン貫入試験から地震後も 4 m より浅い部分では  $N$  値の増加が見られないことと関係していると考えられる。

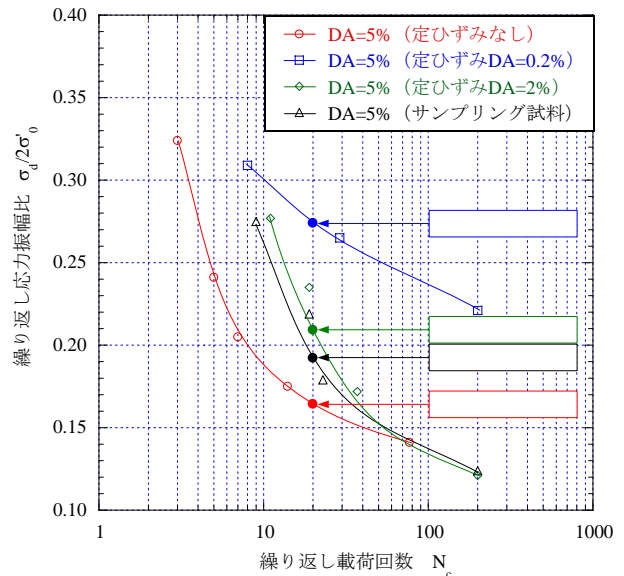


図-14 各ケースにおける液状化強度の比較

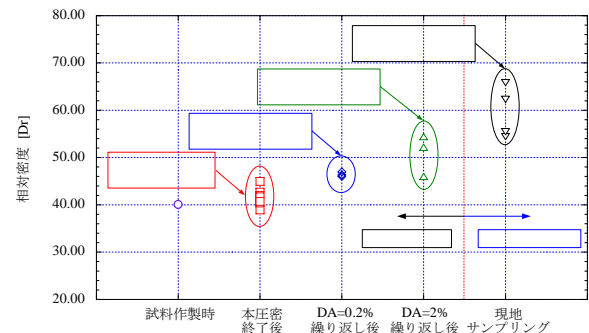


図-15 相対密度変化と液状化強度の比較

#### 4. 振動台模型実験

振動台模型実験では、新潟県中越沖地震で液状化による建物の不同沈下被害が顕著見られた柏崎市松波 2 丁目地区をモデルとした。

実験ケースを図-17、表-3 に示す。図-16 より模型地盤は、よく締まった砂丘を想定した非液状化層 ( $Dr = 100\%$ ) と、三角州を想定した液状化層 (目標密度  $Dr = 40\%$ ) に分けて作製した。建物模型は基礎だけをモデル化し、重量は地盤との相似比に従い  $7.8 \times 10^{-3}$  kN とした。建物の設置ポイントは地層傾斜の有無、液状化層厚の大小を含めて 5 つのポイントでそれぞれ建物の両端部で沈下量を計測した。実験条件を表-4 に示す。加振前の地下水位は  $GL. -25$  mm に設定し、加振時の入力加速度は 8 Hz、40 波の正弦波を目標加速度 250 Gal (図-16) で加振を行った。計測器は、図-18 に示すように地盤内に水圧計と加速度計、建物では変位計と加速度計を設置してデータはサンプリング周波数 1000 Hz の動ひずみ計測器により収録した。

表-3 実験ケースと建物模型の設置位置

Case	地盤密度 (%)	入力加速度 (gal)	地下水位 (mm)	土槽左端からの距離 [L] (mm)
CaseA-1 (設置ポイント①)	Dr=31.09	226.18	30.2	217.5
CaseA-2 (設置ポイント②)	Dr=37.72	259.90	32.0	292.5
CaseA-3 (設置ポイント③)	Dr=41.21	252.96	29.0	405
CaseA-4 (設置ポイント④)	Dr=37.16	261.89	29.0	517.5
CaseA-1 (設置ポイント⑤)	Dr=41.95	256.93	32.2	592.5

※現性がとれており、紹介は代表的なものを掲載

表-4 実験条件

入力波形	正弦波(スロープ付) 8Hz 40波
目標加速度 [gal]	250
家屋基礎模型重量 [g]	774
接地圧 [kPa]	0.34

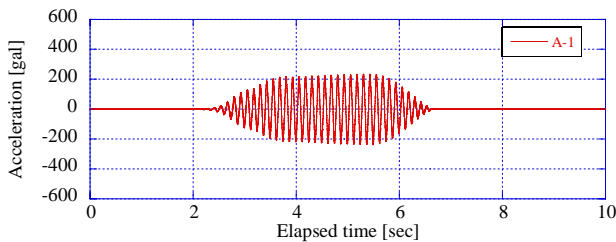


図-16 振動台入力加速度

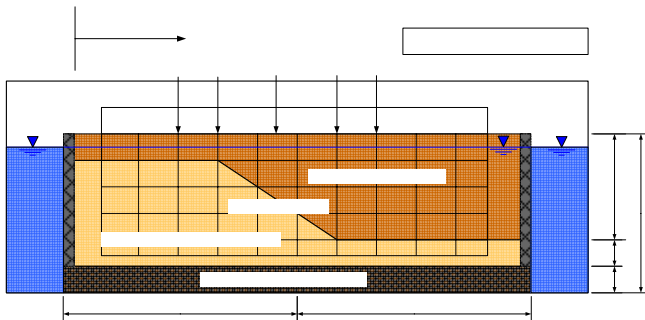


図-17 模型概略図

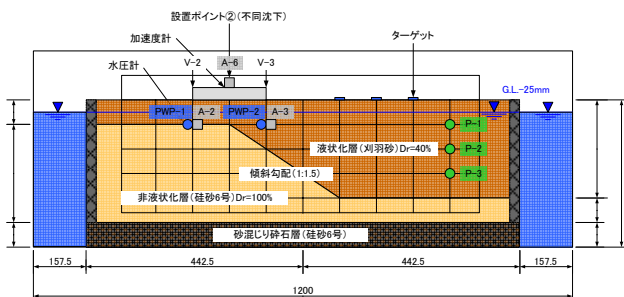
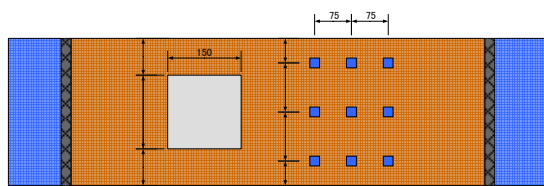


図-18 計器配置図 (例 CaseA-2)

土槽の左端からの距離(L)

- ① ② ③ ④ ⑤

①液状化層厚と沈下量の関係

図-19 に CaseA の各設置ポイントで計測した沈下量を, 土槽の左端からの距離を基準に示す. また, グラフ上に非液状化層(色つき)と液状化層(白)の地層境界線をあわせて示している. 図-19 から建物の沈下量は液状化層厚と比例関係にあり, 液状化層厚が小さいところでは, 建物沈下量も小さく, 液状化層厚が大きくなると沈下量も大きくなる.

一方, 図-20 には液状化層厚と沈下量を比とした相対沈下量を示す. 相対沈下量は式 4.1 により算出した. 図-20 から相対沈下量で見ると, 液状化層厚の小さいところで相対沈下量が大きく, 液状化層厚の大きいところでは相対沈下量は小さくなっており, 反比例関係の結果となった. 沈下量を相対的に見れば, 液状化層厚が小さいところの方が, 層厚の大きさに対して大きく沈下していることを示している.

(式) 4.1

$$\text{相対沈下量} = \frac{\text{建物沈下量}}{\text{液状化層厚}}$$

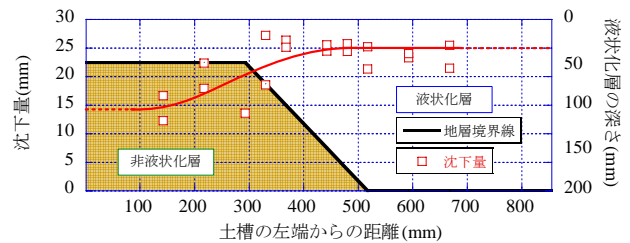


図-19 各設置ポイントで観測した沈下量

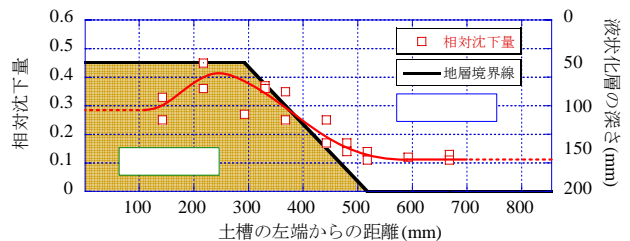


図-20 各設置ポイントでの相対沈下量

②液状化層厚と不同沈下量の関係

図-21 に CaseA の各設置ポイントで計測した左右の沈下量の差をとり, 建物設置した中心の不同沈下量を求めた. 同じく土槽の左端からの距離を基準に示す. また, グラフ上に非液状化層(色つき)と液状化層(白)の地層境界線をあわせて示している.

図-21 から建物の不同沈下量は設置ポイント②~④で大きくなっている. 特に, 設置ポイント②では, 他に比べて大きく顕著に不同沈下が発生したことが設置ポイント①~⑤(建物中心)

わかる。この不同沈下が発生した設置ポイント②～④では、建物直下の液状化層厚が地層傾斜により左右が変化している。特に、液状化層厚が小さい設置ポイント②は、地層傾斜の影響を大きく受けたため、他の設置ポイントよりも顕著に不同沈下が発生したと考えられる。

図-22 には建物中央の液状化層厚と不同沈下量を比とした相対不同沈下量を示す。相対不同沈下量は式 4.2 により算出した。図-22 から相対不同沈下量でも設置ポイント②～④で大きくなっており、相対的に見ても、液状化層厚が小さく、地層傾斜している場所で不同沈下が起りやすいと考えられる。

(式) 4.2

$$\text{相対不同沈下量} = \frac{\text{不同沈下量}}{\text{建物中央直下の液状化層厚}}$$

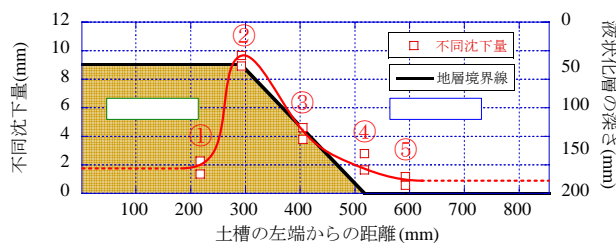


図-21 各設置ポイントでの不同沈下量

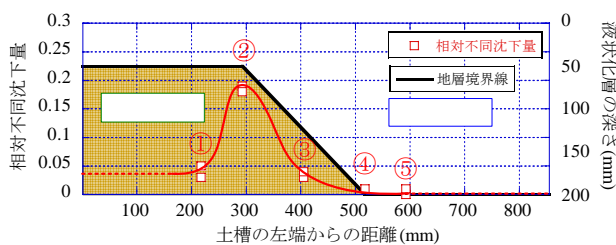


図-22 各設置ポイントでの相対不同沈下量

### ③液状化層厚と加速度の関係

図-23 に CaseA の各設置ポイントの建物模型上で計測した加速度を、土槽の左端からの距離を基準に示す。また、グラフ上に非液状化層（色つき）と液状化層（白）の地層境界線をあわせて示している。

図-23 から建物に設置した加速度は、設置ポイント①、②では大きく、設置ポイント③～⑤では小さくなっている。加速度が大きくなっている設置ポイントでは、建物直下の液状化層厚が小さく、液状化による減衰効果が発揮されなかったと考えられる。また、設置ポイント②では、これに加えて地層傾斜による加速度の跳ね返りを受けていると考えられるために、さらに大きくなっている。一方で、加速度

が小さくなった設置ポイントでは、液状化による減衰効果が発揮されたためと考えられ、この減衰効果は、液状化層厚が大きくなるにつれて大きくなっていることがわかる。

これを図-24 に示す加速度応答倍率で整理すると、設置ポイント①、②では建物で観測した加速度は、入力加速度よりも大きく増幅しており、一方で、設置ポイント③～⑤では、建物で観測した加速度は、入力加速度よりも小さく減衰している。この結果からも加速度の大小は、液状化層厚の変化と反比例の関係にあるといえる。

(式) 4.3

$$\text{加速度応答倍率} = \frac{\text{建物で観測した加速度}}{\text{振動台入力加速度}}$$

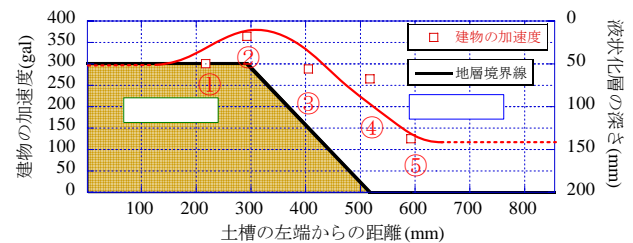


図-23 各設置ポイントでの建物の加速度

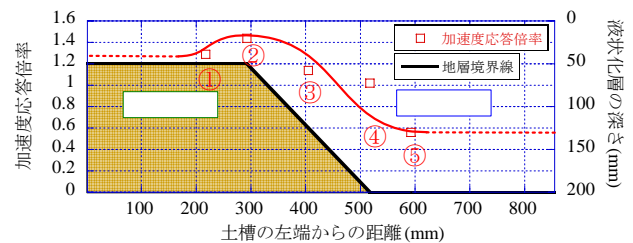


図-24 建物の加速度応答倍率

### ④液状化層厚の過剰間隙水圧比の関係

図-25 に CaseA の各設置ポイントの地盤内で計測した過剰間隙水圧比を、それぞれの設置ポイントで平均値にしたものを、土槽の左端からの距離を基準に示す。また、グラフ上に非液状化層（色つき）と液状化層（白）の地層境界線をあわせて示している。過剰間隙水圧比の算定にあたっては、建物の設置圧も考慮して求めている。

図-25 から地盤内の過剰間隙水圧は、液状化層厚が大きくなると発生水圧も大きくなる比例関係を示している。この発生水圧の大きさが、加速度の増幅、減衰にもかかわっていると考えられる。

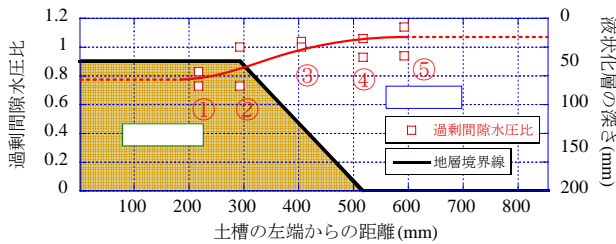


図-25 各設置ポイントでの過剰間隙水圧比

## 5. 結論

- 1) 刈羽村現地調査から、標準貫入試験やコーン貫入試験の N 値は中越・中越地震後で大きな違いがなく、液状化による密度増加による非液状化層地盤強度の上昇は見られなかった。同様に動的せん断結果からも刈羽村現地サンプリング試料は、中越・中越沖地震での液状化により地盤の相対密度が上昇したと考えられるが、繰返しせん断試験から液状化強度はさほど大きくなっていなかった。動的せん断結果からも液状化抵抗が依然として小さい点で一致しており、未だに現地地盤の潜在的な液状化の危険性は高いといえる。
- 2) 柏崎市松波 2 丁目での現地調査から、砂丘と三角洲の地層境界で被災率が高く、その建物のほとんどが液状化によって不同沈下が発生したことが主要因であった。振動台模型実験から不同沈下メカニズムは、液状化層厚が小さいところでは、液状化の発生時間が短く、沈下量は小さいが、液状化に伴う加速度の減衰効果は発揮されず加速度は増幅する。一方で液状化層厚が大きいと、液状化の発生時間が長く、沈下量は大きく加速度は減衰傾向を示した。この 2 つの違いが大きい地層境界では、不同沈下量が大きい。これは調査結果とも一致し、現地でも同様のメカニズムで被害が発生したと考えられる。

液状化層

## 参考文献

- 1) 社団法人 地盤工学会, 2007 年新潟県中越沖地震災害調査 報告書, 2007
- 2) 山口 晶, 再液状化メカニズムに関する実験的研究, 日本地震工学会論文集 第 8 巻, 第 3 号, pp,48, 2008
- 3) Finn,W.D.L,Branaby,P.L.and Pickering,D,J:Effects of Strain History on Liquefaction of Sand , J,SMFE,ASCE,Vol96,No SM6,pp ,1917-1933, 1970
- 4) 社団法人 地盤工学会 土質試験 基本と手引き 第 1 回改訂版