

# 二次しらす地盤の動的力学特性と液状化ポテンシャル

高田 誠<sup>1</sup>・北村 良介<sup>2</sup>・北田 貴光<sup>3</sup>・富山 貴史<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 中央開発株式会社 (元鹿児島大学大学院 工学研究科博士後期課程 (システム情報工学専攻))  
(〒890-0052 鹿児島市上之園町14-30-202)

<sup>2</sup>正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市都元一丁目21-24)

<sup>3</sup>正会員 中央開発株式会社 東京支社 (〒332-0035 埼玉県川口市西青木三丁目4-2)

<sup>4</sup>正会員 ㈱アイ・エヌ・エー (元鹿児島大学大学院 工学研究科博士前期課程 (海洋土木工学専攻))  
(〒816-0964 福岡県大野城市南ヶ丘1-1-15)

鹿児島県内の沖積平野の表層地盤には、背後のしらす台地の浸食・運搬・堆積作用を受けた“二次しらす”が厚く分布している。本論文では、新たな視点より二次しらす地盤の変形・強度特性を考察し、鹿児島県沖積平野部の液状化特性について検討を加えている。得られた主な結果は次のとおりである。(1)二次しらす地盤では、動的せん断応力比の深さ方向の低減が、通常の砂質土地盤とは異なる。(2)二次しらす地盤に固有な低減係数を導き、得られたN値を2倍に評価することにより、妥当な液状化ポテンシャルの評価が行える。(3)鹿児島市内の液状化判定結果より、中部地域は液状化の可能性が相対的に低く、南部地域・海岸線・河川沿いでは相対的に高い。

**Key Words :** *Alluvial secondary Shirasu, dynamic properties, dynamic shear strength, characteristic dynamic deformation, liquefaction potential*

## 1. まえがき

地震国である日本の中で鹿児島県は、地震の発生頻度が少ない地域とされている。またプレートテクトニクスからみた地震環境や被害地震記録<sup>1)</sup>をみても、鹿児島市近傍においてマグニチュード7以上の地震が発生する可能性のある震源は日向灘沖に限られている。したがって、鹿児島県本土に広く分布するしらすの動的変形・強度特性については研究の成果が非常に少ないのが現状といえる。しかしながら、目前に活火山桜島を控えていることや、1997年3月と5月には、鹿児島県北西部地方を震源とする、マグニチュード6クラスの地震が発生していることから、その動的特性の解明は急務であると考えられる。

このような背景のもと、本論文では新たな視点より、鹿児島県内に広く分布する二次しらす地盤の、液状化ポテンシャルの評価法について検証するとともに、鹿児島市内沖積平野のハザードマップ作成を行ったものである。

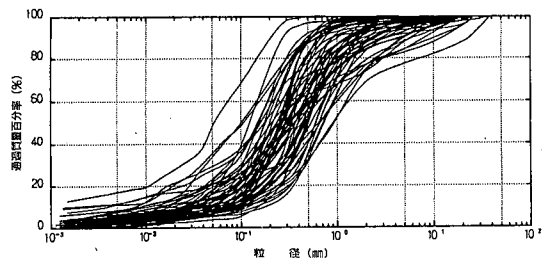


図-1 二次しらすの粒径加積曲線<sup>2)</sup>

## 2. 二次しらすの粒度組成

図-1は、二次しらすの粒度分布<sup>2)</sup>を示したものである。この図に示すように、二次しらすは細粒分を5~30%程度含有するシルト質砂に分類され、均等係数の小さい砂質土と比較すると、一般に液状化しにくいと判断される。しかし、1997年に発生した鹿児島県北西部地方の地震では、川内市・阿久根市の埋立地を中心に液状化現象が多く確認されている<sup>3)</sup>。

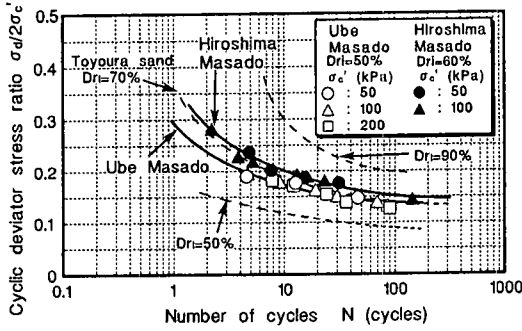


図-2 緩詰めしらすの液状化強度曲線<sup>4)</sup>

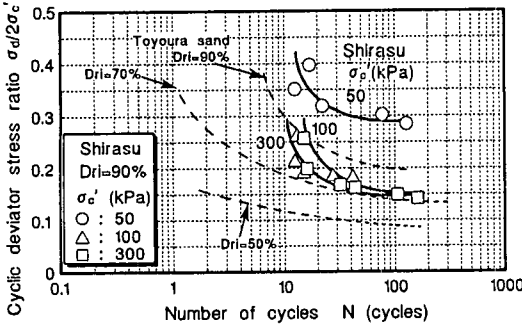


図-3 密詰めしらすの液状化強度曲線<sup>4)</sup>

### 3. しらすの動的強度特性

図-2, 3は、兵動ら<sup>4)</sup>が行ったしらすと標準砂の繰返し強度試験結果を示したものである。兵動らはこの試験結果から、しらすの動的強度特性について、次のように考察している。

- ① 緩詰めしらすは有効拘束圧の増加に伴い、繰返し強度は増加する傾向がある。
- ② 密詰めしらすは、有効拘束圧の増加に伴い、繰返し強度は減少する傾向がある。
- ③ ①, ②から、しらすの非排水せん断挙動は、標準砂と異なり、顕著な拘束圧依存性を示す。

一方、高田ら<sup>5)</sup>は、鹿児島県内の二次しらす地盤を対象に実施されたN値は、有効拘束圧(土被り圧)が大きくなっても低いという特徴を有すること、せん断強度パラメータの推定やせん断波速度、杭の周面摩擦力の推定に際し、N値の2倍評価が適切であることを示している。よって、通常の砂質土に対して開発された液状化簡易判定法(例えば「岩崎・龍岡の方法<sup>6)</sup>」、以下『土研法』と略す)で提案されている経験式に、二次しらす地盤で得られた測定N値を直接代入すると、二次しらす地盤の液状化特性を適切に反映した判定がなされない可能性がある。

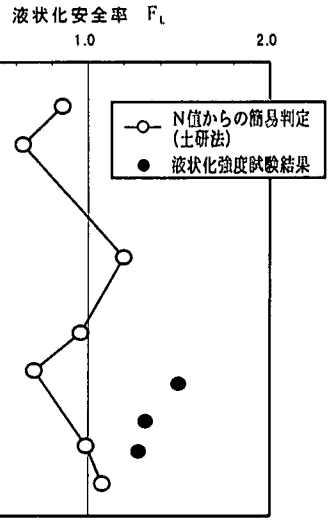


図-4 実験結果と簡易判定結果との比較<sup>7)</sup>

表-1 液状化検討条件

項目	仮定条件
自然地下水位	GL-1.0m
土層の湿潤時単位重量	11.8 kN/m <sup>3</sup>
土層の飽和時単位重量	14.7 kN/m <sup>3</sup>
50%通過粒径	0.4 mm
測定N値	10
地表面最大水平加速度	150 gal

表-2 液状化計算結果

N値	動的せん断力比		液状化安全率 F <sub>L</sub>
	L	R	
10	0.274	0.234	0.854
20		0.337	1.230

図-4は、畑中ら<sup>7)</sup>による液状化強度試験結果と土研法との比較を行ったものである。この図に示すように、N値から求めた液状化強度(土研法)よりも、原位盤凍結法により採取した乱さない試料の液状化強度が大きい傾向がある。この結果は、二次しらす地盤の液状化強度をN値から推定すると、かなり過小に評価している可能性を示唆している。

図-4の結果を得るための諸条件(自然地下水位・単位体積重量:50%通過粒径等)は明らかでないので、表-1に示す条件を用いて、GL-10mの位置の液状化安全率を求めた。その結果、表-2に示すように測定N値を2倍に評価すると、図-4で示したGL-10mの位置での液状化強度試験結果に近い値が得られた。このことは、測定N値を2倍に評価することの妥当性を示しているものと考えられる。

表-3 しらす地盤の動的変形特性

地層名	二次しらす	一次しらす
有効土被り圧 $\sigma'_v$	< 294.3	441.5 ~ 686.7
N 値	$\approx 10$	$\approx 20$
せん断波速度 $V_s$	$100 \cdot N^{1/3}$	$120 \cdot N^{1/3}$
初期せん断剛性率 $G_0$	$0.75 \rho_t \cdot V_s^2$	$0.65 \rho_t \cdot V_s^2$
動的変形特性	$\frac{G}{G_0} = 1 - \frac{h}{1 + \exp(-2.152 \cdot \log \gamma - 6.746)}$ $h = \frac{0.39}{1 + \exp(-2.370 \cdot \log \gamma - 7.423)}$	$\frac{G}{G_0} = 1 - \frac{h}{1 + \exp(-1.839 \cdot \log \gamma - 5.503)}$ $h = \frac{0.25}{1 + \exp(-2.019 \cdot \log \gamma - 6.097)}$

ここに、 $\sigma'_v$ : 有効土被り圧 (kN/m<sup>2</sup>)、N: N値、 $V_s$ : せん断波速度 (m/sec)  
 $G_0$ : 初期せん断剛性率 (kN/m<sup>2</sup>)、 $\rho_t$ : 湿潤密度 (g/cm<sup>3</sup>)、h: 減衰定数  
 $\gamma$ : せん断ひずみ

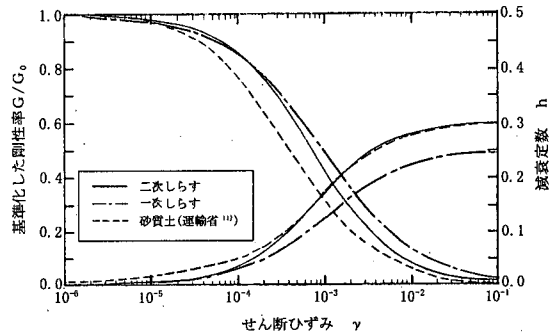


図-5 しらす地盤の動的変形特性

#### 4. 二次しらす地盤の動的変形特性

地盤の動的変形特性 (ひずみ依存性) を把握しておくことは、地震応答解析を含む動的変形挙動の予測のために重要となる。通常の砂質土・粘性土の場合、動的変形挙動の非線形モデルは、各研究機関で種々提案されている (例えば文献 8) 参照)。しかし、特殊土とされるしらすでは、未だ動的な非線形モデルが提案されていない。

なおしらすの接頭語としていろいろな用語が用いられているが、本論文では、一次しらす、二次しらすという用語を用い、それらに対して次のように定義することにする。

**一次しらす:** 火砕流堆積物の非溶結部。鹿児島市内およびその周辺では、入戸火砕流堆積物 (約 2.4 万年前 (更新世)) が厚く堆積しているため、しらすは入戸火砕流堆積物の非溶結部と同義語として用いられることがある (狭義)。

**二次しらす:** 火砕流が堆積した後、侵食・運搬・堆積作用を受け、他の場所に堆積したもの。洪積しらす、沖積しらすを含むが、沖積しらすと同義語として使われることが多い。

表-3 は、鹿児島県内で実施された P S 検層結果および乱さない試料による繰返し三軸試験結果<sup>9), 10)</sup> から、二次しらすと一次しらすの N 値とせん断波速度  $V_s$  の関係、せん断波速度  $V_s$  と初期せん断剛性率  $G_0$  (室内試験結果を統計処理) の関係、動的変形特性 (室内試験結果を統計処理した  $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$ ) を示したものである。

図-5 は表-3 に示した動的変形特性 ( $G/G_0$ ,  $h \sim \gamma$  関係) を図として示したものである。この図から、しらす地盤の動的変形特性は次のように要約される。

- ① 液状化の対象となる有効土被り圧の小さい二次しらすの方が一次しらすよりも、せん断ひずみの増加による剛性率の低減は大きい傾向がある。
- ② 相対密度 (N 値) の大きい一次しらすは、二次しらすよりも、 $10^{-4}$  以上のひずみレベルでせん断剛性が高い傾向がある。

③ 一次しらすは二次しらすと比較して、減衰定数が小さく、加速度の低減が小さい傾向が伺える。

④ 運輸省港湾局<sup>11)</sup> で提案される砂質土の一般的特性と比較すると、二次しらす・一次しらすともにせん断ひずみの増加に伴う剛性率の低減は小さい傾向がある。また減衰定数について二次しらすは、通常の砂質土と同様なせん断ひずみの依存性を示すのに対し、一次しらすは各ひずみレベルで通常の砂質土よりも小さい傾向が伺える。

よって液状化の対象となる二次しらすは、せん断ひずみの増加に伴う剛性の低減が小さいという結果から、通常の砂質土とは異なった地震時挙動を呈することが予想される。

#### 5. 地震時地盤内せん断応力

地震時に、深さ  $z$  の土中要素に働く慣性力は、地表最大水平加速度  $\alpha_{max}$  に質量を乗じたものとなる<sup>12)</sup>。土中要素に生じる最大せん断応力  $\tau_{max}$  は、土中要素の慣性力と底面の抵抗力のつりあい関係から求められるが、実際の地盤では、土は変形する物体として挙動するので、深くなるほど実際に生じる最大せん断応力は、剛体と仮定したものより小さくなる。そこでその程度を低減係数という概念を導入し地盤内のせん断応力を求めている。

表-3、図-5 に示したように、液状化の対象となる二次しらすの地震時の挙動は通常の砂質土と異なることが予想されたことから、今回、鹿児島市内の二次しらす地盤を対象に、卓越周期の異なる地震波 3 種類を用い、重複反射理論による地震応答解析 (プログラム (SHAKE)<sup>13)</sup>) を行った。なお地震応答解析実施に際しては、表-3、図-5 で提案したしらす地盤の動的変形特性を用いた。

この地震応答解析により得られた動的最大せん断応力

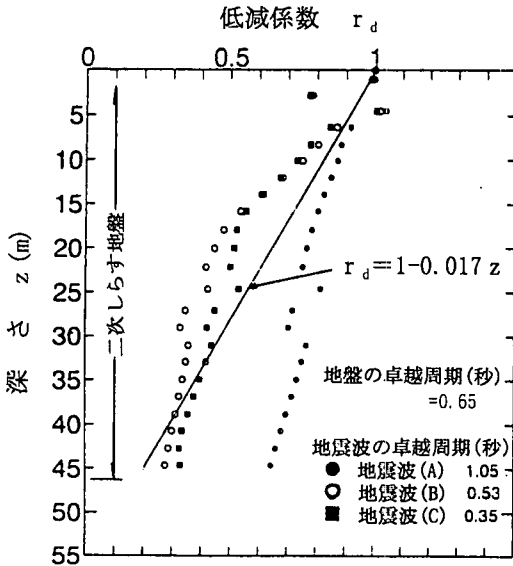


図-6 鹿児島市北部地域の深さ方向の低減係数

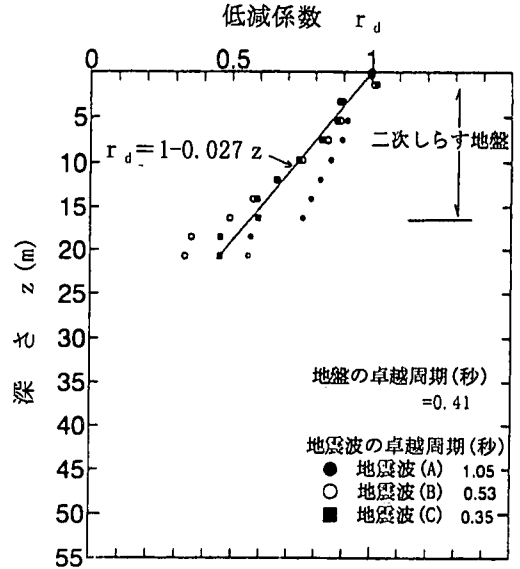


図-7 鹿児島市中部地域の深さ方向の低減係数

( $\tau'_{max}$ )の深度分布を、剛体地盤での最大せん断応力 ( $\tau_{max}$ ) で基準化( $\tau'_{max}/\tau_{max}$ )したものを図-6~8に示す。これらの図から二次しらす地盤の深さ方向の低減係数  $r_d$  は、一般の低減式(例えば土研法;  $r_d=1-0.015z$ ;  $z$ : 深さ(GL-m))とは異なることがわかる。すなわち、二次しらす地盤の深さ方向の低減係数  $r_d$  は、次式で表すのが最適である。

(二次しらす地盤の層厚が、25m以上の鹿児島市北部・南部地域)

$$r_d = 1 - 0.017 \cdot z \quad (1)$$

(二次しらす地盤の層厚が、25m未満の鹿児島市中部地域)

$$r_d = 1 - 0.027 \cdot z \quad (2)$$

式(1)、(2)で示したように、二次しらす地盤では、地盤の卓越周期が長周期の場合、深さ方向の低減率は一般に提案されているものとはほぼ同等であり、短周期の場合深さ方向の低減率は、一般の低減式によるものと比較すると大きい低減率を示すことがわかる。すなわち鹿児島市中部地域では、土研法あるいは日本道路協会「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」<sup>14)</sup>(以下『道路橋示方書』と略す)で示される地盤中の最大せん断応力よりも、かなり小さいせん断応力が地震時に生じることが予想される。

低減係数はばらつきが大きく、提案した(1)、(2)は低減係数の平均的な変化を表したものであるが、7章では

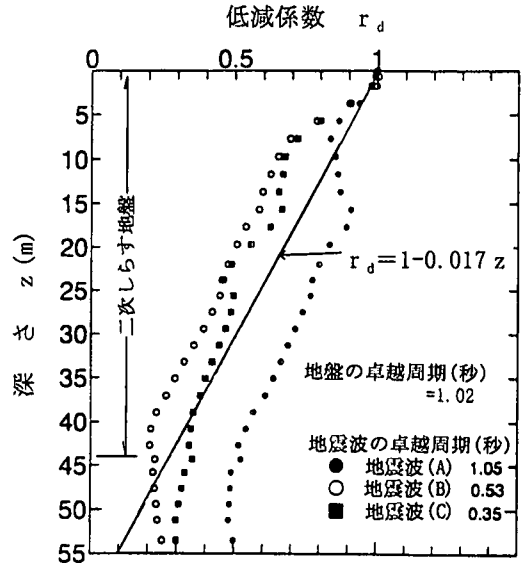


図-8 鹿児島市南部地域の深さ方向の低減係数

これらの式を用いて液状化の判定を行っている。

## 6. $F_L$ 法を用いた液状化ポテンシャルの評価

1997年3月と5月に発生した鹿児島県西北部地方の地震(マグニチュード6クラス)により、阿久根市~上川内周辺において、地盤の液状化現象がみられた。写真-1は、阿久根漁港に隣接する埋立地において確認された噴砂現象を撮影したものである。

本章では  $F_L$ 法を用い、二次しらす地盤の液状化ポテンシャルの評価法について提案・検証する。

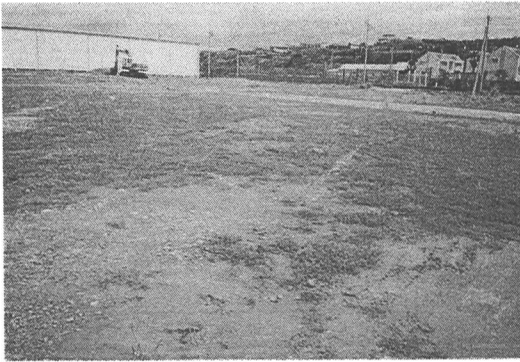


写真-1 阿久根市で観察された噴砂現象

表-4 噴砂・標準砂の物理特性

試料	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	最大 間隙比	最小 間隙比	50%通過粒径 (mm)
噴砂	2.70	1.172	0.684	0.17
標準砂	2.64	0.978	0.605	0.17

表-5 非排水繰返しせん断試験条件

供試体作成方法	空中落下法	B値	0.97
セル圧	294.3 kN/m <sup>2</sup>	背圧	196.2 kN/m <sup>2</sup>
有効拘束圧	98.1 kN/m <sup>2</sup>	相対密度	50~54%

(1) 噴砂の物理試験結果

表-4は阿久根漁港に隣接する埋立地で噴砂した砂の物理試験結果を示すものである。表には参考として標準砂の物理特性も示した。表に示したように、土粒子密度は2.70g/cm<sup>3</sup>と通常の砂質土と同等以上の値を呈している。一般に、しらすの土粒子密度は標準砂よりも小さいが、試験結果をみると大きな値となっている。噴砂試料は、侵食・運搬・堆積・液漂・再堆積過程で、しらす以外の材料を含んだことを唆しており、鹿児島市周辺の二次しらすとは異なっている可能性がある。

(2) 液状化強度試験

現地より採取した二次しらすを空中落下法により相対密度50%を目標として作成し、液状化強度試験（非排水繰返しせん断試験）を行った。表-5は実験条件を示している。

図-9は、試験の結果得られた繰返し回数と繰返しせん断強度比の関係である。同図には標準砂の関係<sup>4)</sup>も併せて示した。この図より有効拘束圧98.1kN/m<sup>2</sup>においては、二次しらすと標準砂はほぼ同様の液状化強度を呈し、繰返し回数20回での繰返しせん断（液状化）強度比は0.12と非常に小さい値を呈している。

(3) 液状化強度試験結果の検討

龍岡・岩崎ら<sup>15)</sup>は、繰返し回数20回での繰返しせん断強度比Rと相対密度D<sub>r</sub>(%)の間にほぼ次の関係があるこ

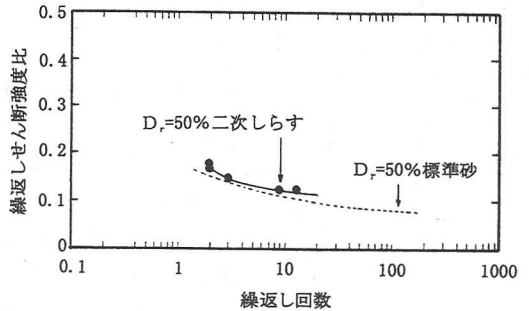


図-9 繰返し回数と繰返しせん断強度比の関係

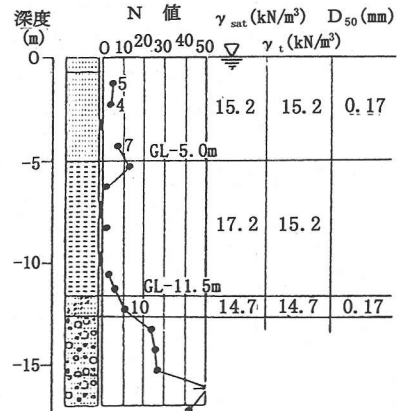


図-10 阿久根漁港外港地区柱状図<sup>3)</sup>

とを示している。

$$R = 0.0042 \cdot D_r \pm 0.2 \quad (3)$$

この式でD<sub>r</sub>=50%とすると、液状化強度比はR=0.21±0.2となり、今回実施した試験結果は平均ラインと下限ラインの中間的強度付近にある。

またN値とD<sub>r</sub>の関係は、Meyerhof<sup>16)</sup>の次式が提案されている。

$$D_r = 21 \times \sqrt{\frac{N}{(0.01 \cdot \sigma'_v + 0.7)}} \quad (4)$$

ここで、有効土被り圧σ'<sub>v</sub>=98.1kN/m<sup>2</sup>とすると、逆算されるD<sub>r</sub>=50%でのN値はおよそ10となる。なお高田ら<sup>3)</sup>は二次しらすのN値は2倍に評価できることを示しており、この概念にしたがうとN値は5となり、図-10に示す阿久根漁港外港地区で実施されたボーリングデータ<sup>3)</sup>の表層砂質土のN値に一致する。

(4) 二次しらす地盤の液状化ポテンシャルの評価法

阿久根漁港外港地区で実施されたボーリングデータ

(図-10<sup>3</sup> 参照) を用い、石原らの提案する方法<sup>17)</sup>に準じて  $F_L$  および沈下量を求めた。

計算条件・方法は次のとおりである。

- ①測定された  $N$  値は 2 倍に評価して、式(5)、(6)より正規化  $N$  値・相対密度を求めた。

$$N_1 = \frac{1.7}{0.01 \cdot \sigma'_v + 0.7} \cdot 2N \quad (5)$$

$$D_r = 21 \times \sqrt{N_1 / 1.7} \quad (6)$$

ここに、 $D_r$  : 相対密度 (%) ,  $N_1$  : 正規化  $N$  値,  
 $N$  ; 実測  $N$  値,  $\sigma'_v$  ; 有効土被り圧 (kN/m<sup>2</sup>)

- ②動的せん断応力比  $L$  の計算に際し、地表面最大水平加速度  $\alpha_{max}$  は科学技術庁防災科学技術研究所「強震ネット」ホームページにより、阿久根市近傍の川内市で観測された 300gal を採用した。

- ③動的せん断強度比  $R$  および動的せん断応力比  $L$  ・液状化安全率  $F_L$  は、次式から求めた。

$$R = 0.0042 \times D_r + 0.225 \times \log_{10}(0.35 / D_{50}) \quad (7)$$

$$L = \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot (1 - 0.027 z) \quad (8)$$

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (9)$$

ここに、 $g$  : 重力加速度 (980cm/sec<sup>2</sup>)  
 $\sigma_v$  : 全上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\sigma'_v$  : 有効土被り圧 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $z$  : 液状化検討深度 (m)

表-6 に液状化ならびに沈下量の計算結果を示す。表に示したように地表面最大水平加速度 300gal の地震規模に対し、砂質土層はいずれも液状化する結果が得られ、液状化安全率  $F_L$  から推定される沈下量は約 12cm 程度である。なお計算に用いたボーリングデータは阿久根漁港外港地区のもので、埋立地ではこのボーリングデータの上位にさらに緩い地盤が 3~4 m 程度造成されていることを考慮すると、埋立地の累積沈下量は少なくとも 20cm 以上は生じていることが予想される。

写真-2 は、鹿児島県北西部地方の地震発生後に撮影した阿久根漁港新港地区水揚げ場付近の沈下状況である。建物支柱部は支持杭の施工により沈下を生じていないと仮定し、岸壁の側方流動を無視すると、エプロン部は 20~30cm 程度の沈下が発生している。これは先に示した液状化安全率より求めた累積沈下量とほぼ等しく、二次しらす地盤における計算方法の妥当性を示すものと考えられる。

表-6 液状化安全率および沈下量の計算

液状化検討深度 (GL-m)	1.30	2.30	4.30	12.30
実測 $N$ 値	5	4	7	10
全上載圧 $\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	19.82	35.02	65.43	186.68
有効土被り圧 $\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	7.06	12.46	23.25	78.77
正規化 $N$ 値	22.0	16.4	25.4	22.6
相対密度 $D_r$ (%)	75.6	65.3	81.2	76.6
動的せん断強度比 $R$	0.39	0.35	0.41	0.39
動的せん断応力比 $L$	0.83	0.81	0.76	0.48
液状化安全率 $F_L$	0.47	0.43	0.54	0.81
体積ひずみ $\epsilon_v$ (%)	1.95	2.5	1.65	1.4
液状化対象深度及び沈下量	0~1.5m 2.9cm	1.5~3.5m 5.0cm	3.5~5.0m 2.5cm	11.5~12.6m 1.5cm
累積沈下量 (cm)	11.9cm			

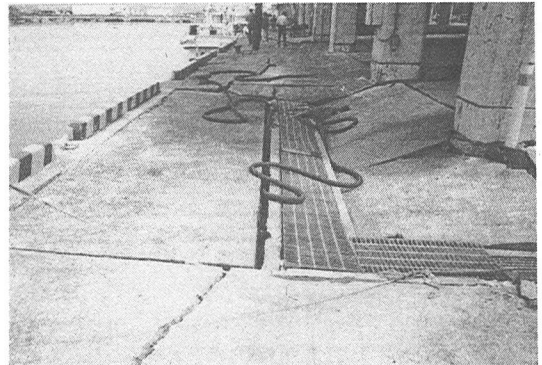


写真-2 阿久根漁港エプロン部の沈下

## 7. 鹿児島市沖積平野の液状化判定

二次しらす地盤において液状化ポテンシャルの評価を行う場合、 $N$  値の 2 倍評価および動的特性の特異性から深さ方向の低減係数は式(1)、(2)を用いることが有効であることを示した。本章では、これらの成果を現在最も広く使われている道路橋示方書の方法に導入し、鹿児島市沖積平野部の液状化ハザードマップを作成した。計算条件は次のとおりである。

- ① グリッド内ボーリングデータの採用条件

液状化計算に用いたボーリングデータの総数は 164 本であり、各グリッド内で参照したボーリング本数は 1~4 本である。なお同一グリッド内に複数のボーリングデータが存在する場合、砂質土層が厚く、相対密度 ( $N$  値) が最も小さいデータを採用した。

- ② 塑性指数  $I_p$

しらすは一般に NP (不活性) であることが知られており、 $I_p \leq 15$  とした。

- ③ 地震動タイプ



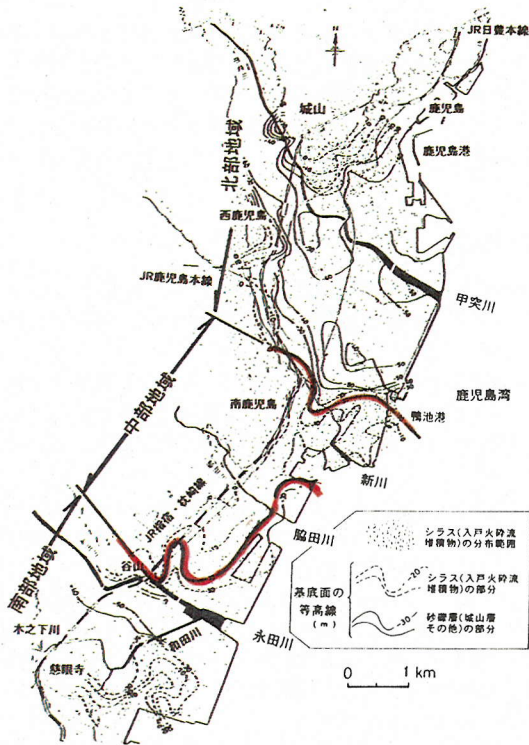


図-11 鹿児島市における沖積層基底面の等高線図<sup>2)</sup>

プレート境界に生じる大規模地震を想定し、タイプ I 地震動で検討した。

④ 地盤種別の判別

地盤種別は地盤の固有周期から、図-11<sup>2)</sup> に示す沖積層基底面の等高線図を参照し、沖積層の層厚 < 25m では II 種、沖積層の層厚 > 25m では III 種とした。

⑤ 地域別補正係数の判別

鹿児島県の地域別補正係数は道路橋示方書によると、地震の発生頻度の少ない地域とされていることから、奄美大島を除き  $c_z = 0.7$  である。しかしながら、桜島の存在や、活断層の存在を考慮し、地域別補正係数は 1 ランク上の  $c_z = 0.85$  とした。

⑥ 地震時せん断応力比の算出

地震時せん断応力比の算出に当たり、深さ方向の低減係数  $r_d$  は、二次しらすの層厚に応じ、式(1)、(2)を選択した。

⑦ 繰返し三軸強度比の算出

繰返し三軸強度比の算出にあたり、測定 N 値の取扱いは、表-2 の結果から、測定 N 値を 2 倍に評価して換算 N 値を求め、繰返し三軸強度比を計算した。

鹿児島市内沖積平野部の液状化ポテンシャルの計算結果を図-12 に示した。この図から、鹿児島市沖積平野部の液状化判定結果を要約すると、次のとおりである。

① 鹿児島市鴨池港～新川沿い及び北部地域のしらす台

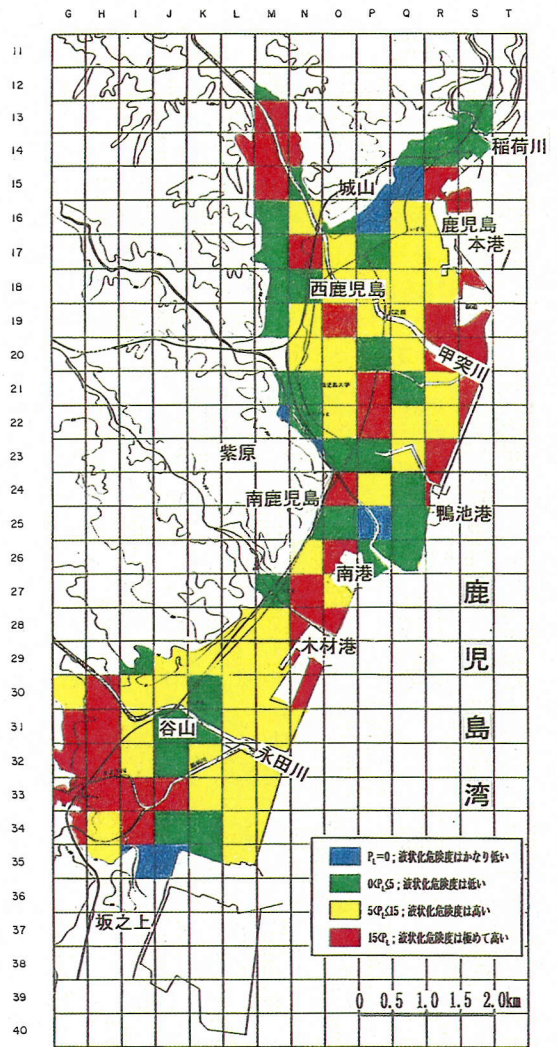


図-12 鹿児島市の液状化ポテンシャル計算結果

地周縁部では、 $P_L \leq 5$  のグリッドが相対的に多く、地震時液状化発生の可能性は比較的小さい。

- ② ①の結果は、一次しらすの出現標高が浅い箇所と一致する。
- ③ 鹿児島市北部・南部地域は、 $5 < P_L$  のグリッドが 60% 以上と多く、中部地域と比較して地震時液状化発生の可能性が高い。
- ④ 鹿児島市北部地域は、約 65% のグリッドが  $5 < P_L$  となっており、鹿児島市南部地域は、約 80% のグリッドが  $5 < P_L$  となっている。よって、鹿児島市の沖積平野部において、北部・南部地域は地震時液状化の可能性が高いと判断される。
- ⑤ 鹿児島港～甲突川最下流部～鴨池港北部、南港～永田川最下流部においては、 $5 < P_L$  のグリッドが多く、地震時液状化発生の可能性は高い。

- ⑥ ③～⑤は、沖積層基底面深度に起因した結果である可能性が高い。すなわち二次しらす層の層厚が厚いグリッドでは、地震時液状化発生の可能性が高く、薄いグリッドでは液状化発生の可能性は小さい傾向が伺える。
- ⑦ これらの結果は鹿児島市沖積平野部を構成する二次しらす地盤の、N値の深度分布形態を反映しているものと考えられる。すなわち台地周縁部ではN値が深さに比例して増大する傾向があり、海沿いの沖積平野部では50～60m程度の深さまで、N値が10～20前後と小さいケースが多く見られるためである。

以上の結果から、特に地震時液状化発生の可能性の高い鹿児島市北部・南部地域の、特に海岸線沿いの埋立地・河川最下流部においては、液状化対策の実施が必要と考えられる。

## 8. まとめ

鹿児島県内の沖積平野部に分布する二次しらす地盤の、動的変形・強度特性を把握し、液状化の検討を行うため、既往資料を収集し、新たな視点より解析を行った。その結果、次のような結論を得た。

- ① 動的せん断強度比をN値から推定する場合、N値を2倍に評価して計算した方が、動的強度試験結果との対応が良い。
- ② 動的変形特性の内、基準化した剛性率とせん断ひずみの関係から、二次しらすの方が一次しらすよりも、せん断ひずみの増加による剛性率の低減は大きい傾向がある。
- ③ 減衰定数とせん断ひずみの関係をみると、一次しらすは二次しらすよりも減衰定数が小さく、加速度の低減が小さい傾向がある。
- ④ 地震応答解析の結果、二次しらす地盤では地盤内せん断応力の低減係数が、通常の砂質土地盤とは異なることを明らかとした。すなわち、相対密度の小さい二次しらすの層厚が25m以上の場合、通常示される低減係数とほぼ同等の低減係数を、25m以下の場合、低減係数は大きい傾向がある。
- ⑤ 鹿児島県北西部地方で液状化現象が確認された阿久根漁港をモデルに、液状化安全率から沈下量を求めた。その結果エブロン部で観測された沈下量とほぼ同等の結果が得られ、今回提案した液状化ポテンシャルの評価方法の妥当性を示した。
- ⑥ 鹿児島市沖積平野部を対象に液状化の検討を行った。その結果中部地域は地震時液状化発生の可能性が相対的に小さいことが明らかとなった。
- ⑦ また北部・南部地域の海岸線・河川最下流部において、特に地震時液状化発生の可能性が高い結果が得られた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、鹿児島県土木部、鹿児島市建設局、運輸省第四港湾建設局鹿児島港湾空港工事事務所・下関調査設計事務所、日本道路公団福岡建設局ならびに志布志石油備蓄株式会社から貴重なデータを提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，1991.
- 2) 鹿児島市地盤図編集委員会：鹿児島市地盤図，徳田屋書店，1995.
- 3) 高田誠，北村良介，木場英明：阿久根しらすの動的力学特性とその評価法，1997年鹿児島県北西部地震被害調査研究報告書，鹿児島大学北西部地震被害調査研究会，pp. 103-106，1998.
- 4) 兵動正幸，荒牧憲隆，岡林 巧，中田幸男，村田秀一：破砕性土の定常状態と液状化強度，土木学会論文集，No.554/III-37，pp. 197-209，1996.
- 5) 高田誠，北村良介，北田貴光：二次しらす地盤の力学特性の評価，土木学会論文集，No.561/III-38，pp. 237-244，1997.
- 6) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム，pp. 641～646，1978.
- 7) 畑中宗憲，杉本三千雄，鈴木善雄，姥哲郎：原位地盤凍結法により採取した乱さない沖積シラスの液状化特性，基礎工，pp. 85-89，1984.
- 8) Ishihara, K.: Soil Behavior in earthquake Geotechnics, Oxford Science Publications, pp. 127-151, 1996.
- 9) 危険物保安技術協会：志布志石油備蓄基地建設タンク基礎・地盤検討委員会報告書，1988.
- 10) 鹿児島県総務部，県庁舎建設事務局：グリーンセンター敷地地盤詳細調査報告書，1992.
- 11) 運輸省港湾局技術課：液状化対策技術マニュアル（案），1985.
- 12) 土質工学会：土質・基礎工学のための地震・耐震入門，pp. 112-114，1985.
- 13) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE - A computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site, EERC72-12, 1972.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，pp. 91-94，1996.
- 15) Tatsuoka, F., Iwaki, T., Tokita, K., Yasuda, S., Hirose, M., Imai, T. and Konno, M.: A Method for Estimating under Cyclic Strength of Sandy Soils using Standard Penetration N-values, Soils and Foundations, Vol. 18, No. 3, pp. 43-58, 1978.
- 16) Meyerhof, G. G.: Discussion for Session 1, Proc. 4th International Conference on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 3, p. 110, 1957.
- 17) 石原研而，吉嶺充俊：地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下量予測，第26回土質工学研究発表会，pp. 767～770，1991.

(1998. 3. 18 受付)



# DYNAMIC PROPERTIES OF ALLUVIAL SECONDARY SHIRASU GROUND AND ITS LIQUEFACTION POTENTIAL

Makoto TAKADA, Ryosuke KITAMURA, Takamitsu KITADA  
and Takashi TOMIYAMA

The surface layers of alluvial plains in Kagoshima are almost covered with the alluvial secondary Shirasu which is eroded by the rainfall, transported from the Shirasu plateaus and deposited on the alluvial plain. In this paper the dynamic properties of alluvial secondary Shirasu ground are referred and discussed by the results of previous research work from a new view point, and a method is proposed to estimate the liquefaction potential of alluvial secondary Shirasu ground. The main results are summarized that (1) the decrease of dynamic shear stress ratio with depth is different from usual sandy soil, (2) by using the inherent decreasing coefficient of shear strength for the alluvial secondary Shirasu and twice N-value obtained by SPT, the liquefaction potential can be reasonably estimated, and (3) the liquefaction potential in the southern part, near coastal line and along rivers, Kagoshima City is relatively higher than one in the northern part.