

<b>Title</b>	沖積粘土層の鋭敏性・層厚分布が地震動・液状化に与える影響：千葉県浦安市を例にして
<b>Author</b>	大島 昭彦, 山田 卓
<b>Citation</b>	都市防災研究論文集. 1 巻, p.7-12.
<b>Issue Date</b>	2014-11
<b>ISSN</b>	2189-0536
<b>Type</b>	Departmental Bulletin Paper
<b>Textversion</b>	Publisher
<b>Publisher</b>	大阪市立大学都市防災研究プロジェクト
<b>Description</b>	
<b>DOI</b>	10.24544/ocu.20191218-007

Placed on: Osaka City University

# 沖積粘土層の鋭敏性・層厚分布が地震動・液状化に与える影響 ～千葉県浦安市を例にして～

大島 昭彦<sup>1)</sup>・山田 卓<sup>2)</sup>

1) 大阪市立大学 大学院工学研究科 e-mail: oshima@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

2) 大阪市立大学 大学院工学研究科 e-mail: yamada@urban.eng.osaka-cu.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震によって浦安市では甚大な液状化被害が生じた。その原因を追及するために浦安市の3地点で沖積粘土層を採取し、その土質特性を詳しく調べた。その結果、沖積粘土層は鋭敏性が高く、埋没谷地形により局所的に厚く堆積することがわかった。そこで、既存の地盤調査資料から調べた鋭敏性・層厚分布を液状化被害分布と対比してその因果関係を、繰返し三軸試験によって変形特性を求め、鋭敏性・層厚分布が地震動・液状化に与える影響を調べた。

Key words : 沖積粘土, 鋭敏性, 埋没谷, 液状化, 地震動

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震によって千葉県浦安市では甚大な液状化被害が生じた。その原因を追及するために、浦安市高洲、鉄鋼通り、港で各種の地盤調査を行った。その際に液状化層（埋立層と沖積砂層）直下の深度16m以深に堆積する沖積粘土層を連続サンプリングし、その土質特性を詳しく調べた結果、沖積粘土層は超鋭敏性を示し、埋没谷地形によって局所的に厚く堆積することがわかった<sup>1)4)</sup>。この超鋭敏性と層厚分布が上部の埋立層・沖積砂層の地震動・液状化の発生に影響を及ぼす可能性が示唆された。

そこで本論文では、まず浦安市沖積粘土層の鋭敏性を含む土質特性の詳細を示す。次に既存の地盤調査資料から調べた鋭敏性と層厚分布を実際の液状化被害分布と対比してその因果関係を調べた結果を示す。最後に繰返し三軸試験によって求めた微小～大ひずみ域における変形特性（せん断剛性率  $G$ 、履歴減衰率  $h$ ）を示す。また、東大阪地域の鋭敏粘土層の分布も示す。以上から、鋭敏性・層厚分布が地震動・液状化に与える影響を報告する。

## 2. 浦安市沖積粘土層の土質特性

粘土を連続サンプリングしたのは、図1に示す高洲（2011年11月に採取、深度15.5m～31.2m、層厚15.7m）、鉄鋼通り（2012年11月、深度17.0m～57.5m、層厚40.5m）、港（2013年8月、深度16.1m～47.9m、層厚31.8m）の3地点である。高洲と鉄鋼通りの直線距離は約2kmである。

### (1) 高洲沖積粘土層の土質特性

図2に高洲沖積粘土層の土質特性を示す<sup>1)</sup>。図2(1)から、液性限界  $w_L$  は中央部で高く、上・下部で低い弓形分布（深度26mを境に2つ）が見られ、海進・海退の堆積環境の変化を受けている。全体に自然含水比  $w_n$  が  $w_L$  よりも大きく、特に26m以深は図2(2)の液性指数  $I_L$  が2～2.5であり、超鋭敏性を示すことがわかる。図2(3)の圧密降伏応力



図1 浦安市沖積粘土層の採取地点

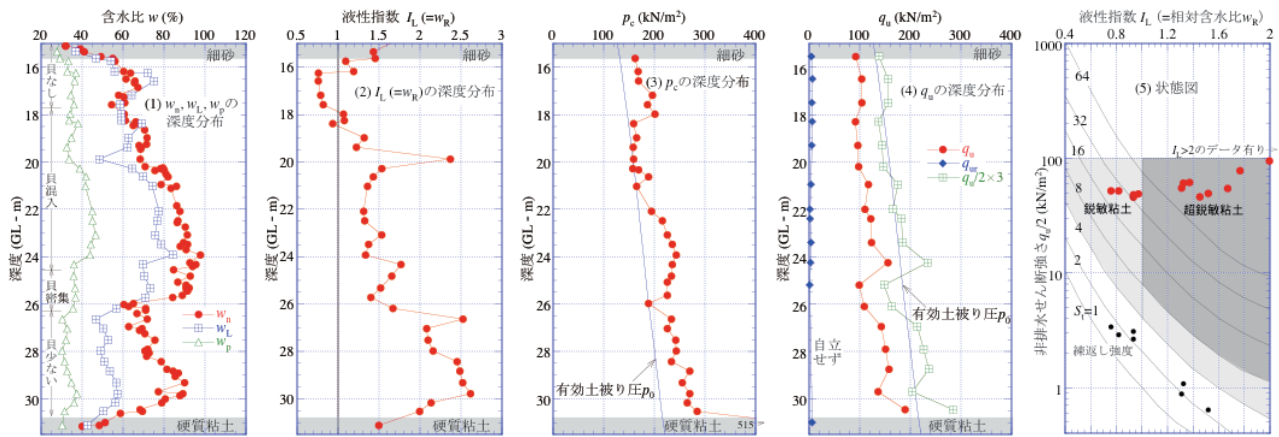


図2 浦安市高洲沖積粘土層の土質特性<sup>1)</sup>

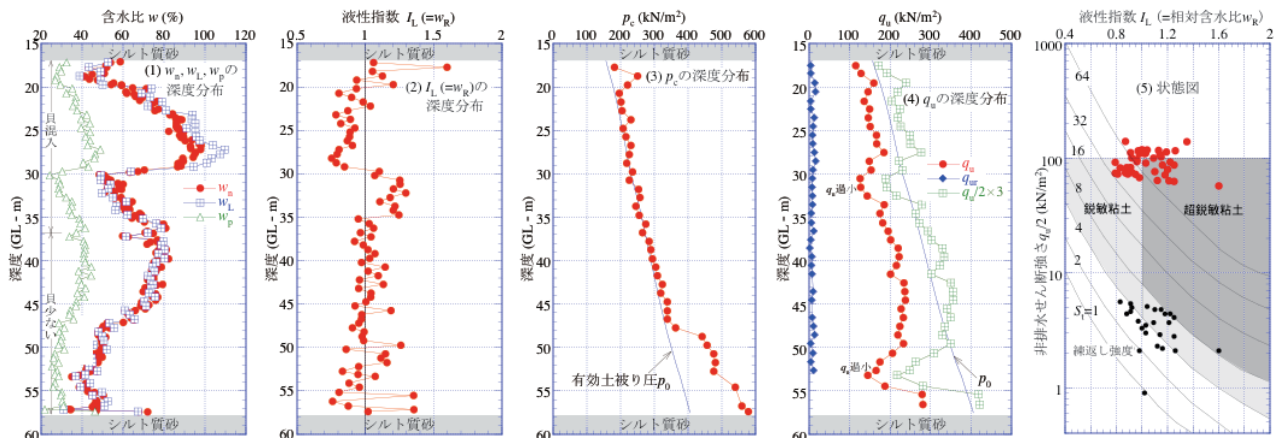


図3 浦安市鉄鋼通り沖積粘土層の土質特性<sup>3)</sup>

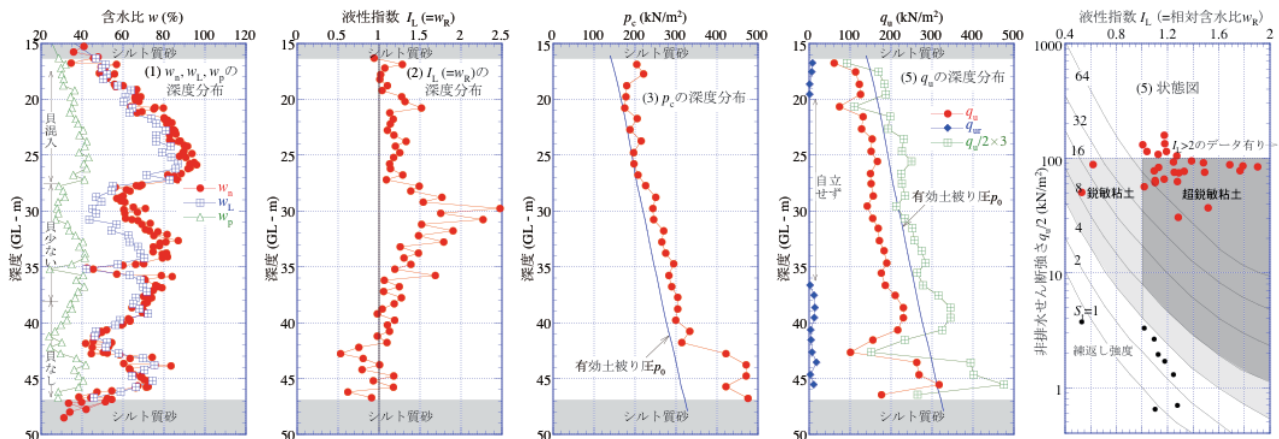


図4 浦安市港沖積粘土層の土質特性<sup>4)</sup>

$p_c$  から、ほぼ正規圧密あるいはわずかに過圧密にあるといえる。図 2(4)の一軸圧縮強さ  $q_u$  から、ほぼ正規圧密 ( $q_u/2 \times 3$  は  $p_c$  相当) であることがわかる。ただし、26m 以深では繰り返すとトロトロの液体状になり、全く自立しなかった。図 2(5)の状態図からも 26m 以深は超鋭敏である (図の右枠外にもデータあり) ことがわかる。

## (2) 鉄鋼通り沖積粘土層の土質特性

図 3 に鉄鋼通り沖積粘土層の土質特性を示す<sup>3)</sup>。当地は埋没谷に位置するため、層厚 40m を超えている。図 3(1)の  $w_L$  から、深度 30m を境に堆積環境が変化して上下 2 つの弓形分布を示している。図 3(2)の  $I_L$  は 1 前後であり、鋭敏ではあるが、高洲ほど超鋭敏ではない。深度 30m 付近までが高洲の全層に相当すると考えられるが、その物理特性が大きく異なる理由は今のところ不明である。図 3(3), (4)の  $p_c$ ,  $q_u$  から、下部以外はほぼ正規圧密にあること (50m 以深の  $q_u$  は過小である)、図 3(5)の状態図から、鋭敏ではあるが、やはり高洲ほどではない。

(3) 港沖積粘土層の土質特性

図4に港沖積粘土層の土質特性を示す<sup>4)</sup>。図4(1)の $w_L$ から、深度27m、42mを境に3つの弓形分布を示しており（深度35mには粗粒物を挟む）、堆積環境の変化を表している。全体に $w_p$ が $w_L$ よりも大きく、特に深度27~35mでは図4(2)の $I_L$ が1.5~2.5を示しており、高洲と同様に超鋭敏性を示すことがわかる。図4(3)の $p_c$ から、ほぼ正規圧密あるいはわずかに過圧密にあるといえる。図4(4)の $q_u$ からもほぼ正規圧密といえる。ただし、深度20~36mでは繰り返すとトロトロの液体状になり、自立しなかった。図4(5)の状態図からも超鋭敏であることがわかる。

3. 浦安市沖積粘土層の鋭敏性・層厚分布と液状化被害の関係

これまで、東京湾に面した浦安市で超鋭敏性粘土が現れることは意外にも知られていなかったようで、本研究によってその存在が明らかとなった。しかし、文献5)で浦安市周辺の既存のボーリングデータがまとめられていた。これに記載された全ての $w_L$ 、 $w_p$ 、 $w_n$ から求めた液性指数 $I_L$ の深度分布を図5に示す。やはり $I_L$ が高い粘土が存在することがわかる。さらに、各地点で、●：深度方向に全て $I_L > 1$ 、●：深度方向に1点以上 $I_L > 1$ 有り、●：深度方向に全て $I_L < 1$ として、 $I_L$ の平面分布を図6に示す。局部的に $I_L$ が高いところがあることがわかる。

図7に浦安市の工学的基盤標高の分布を示す<sup>2)</sup>。原地形にはいく筋もの埋没谷があり、工学的基盤の上に沖積粘

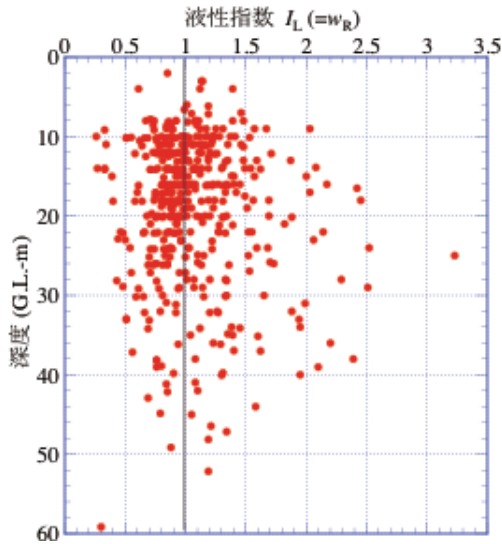


図5 浦安市沖積粘土層の液性指数 $I_L$ の深度分布

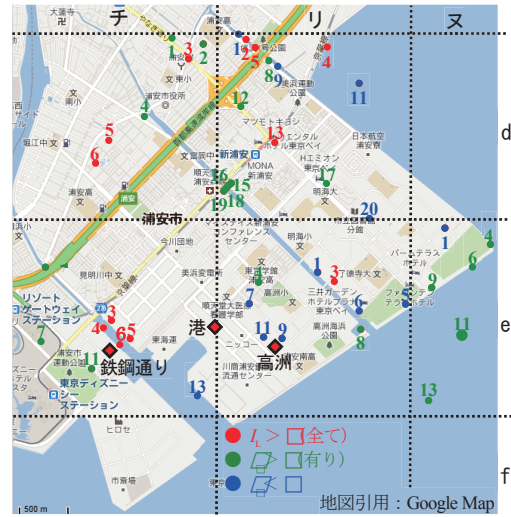


図6 浦安市沖積粘土層の液性指数 $I_L$ の平面分布

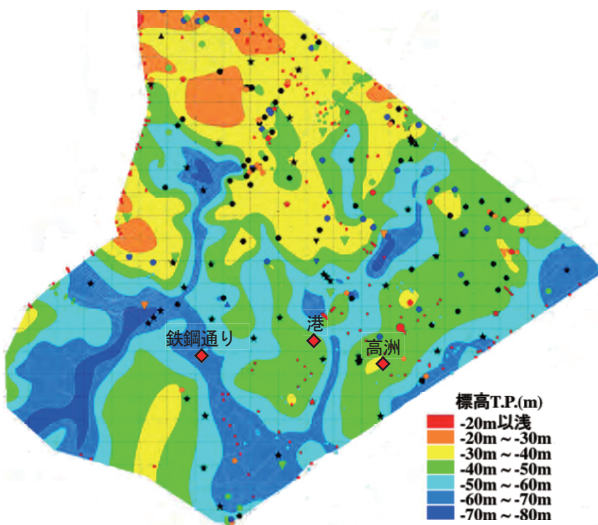


図7 浦安市の工学的基盤標高の分布<sup>2)</sup>

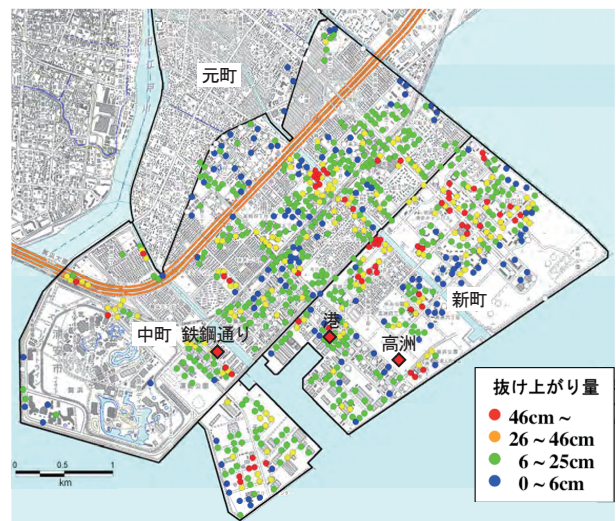


図8 浦安市の杭基礎構造物の抜け上がり量の分布<sup>6)</sup>

土層が局所的に厚く堆積している。先の鉄鋼通り地点は埋没谷に，高洲は尾根部に位置することがわかる。

図8に浦安市の杭基礎構造物の抜け上がり量の分布<sup>6)</sup>を示す。これは液状化後の地表面沈下量の分布に相当し，抜け上がり量が大きい所ほど激しい液状化が生じたことを表す（ただし，今川地区など戸建住宅が多い所は杭基礎でなく，プロットされていないので要注意）。液状化現象は地震動の大きさ（元町で150gal程度）に比べて，これまでにならぬほど激しいもので，海溝型地震の特徴である地震動の継続時間が長かった（計測波形からは2～3分）ことが第一の原因に挙げられる。市域の2/3を占める1964年以降の埋立地（中町，新町）のほぼ全域が液状化した，液状化の程度に地域差を見ることもできる。この地域差は地下水位の高さ，埋立材料の違い，埋立後の地盤改良の有無などによって生じるが，先の沖積粘土層の鋭敏性と層厚分布による影響も考えられる。図6と図8を比較すると，データが少ないためか，必ずしも鋭敏性と液状化の程度に傾向は見られないが，図7と図8を比較すると，谷部の層厚が大きい所で液状化の程度が大きい傾向を見ることができる。

4. 浦安市沖積粘土層の繰返し変形特性

(1) 試験試料と試験方法

表1 試験に用いた試料の諸元と試験条件<sup>10)</sup>

粘土名称	供試体名	z(m)	p <sub>0</sub> (kPa)	OCR	w <sub>n</sub> (%)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub>	I <sub>L</sub>	F <sub>c</sub> (%)	σ <sub>c</sub> (kPa)	e <sub>c</sub>
浦安市港沖積粘土	UM-T5	20.6	171	1.02	79.6	64.4	35.0	29.4	1.52	99.4	113	1.35
	UM-T7	22.6	181	1.04	84.9	80.8	40.6	40.2	1.10	94.2	120	1.94
	UM-T9	24.6	191	1.03	89.2	79.0	38.5	40.5	1.25	95.7	127	2.23
	UM-T11	26.6	201	1.03	81.8	71.5	35.7	35.8	1.29	91.0	133	2.27
	UM-T13	28.6	212	1.18	58.8	47.0	31.6	15.4	1.77	78.6	141	1.50
	UM-T15	30.6	224	1.09	64.3	43.5	27.1	16.4	2.27	85.7	149	1.52
	UM-T17	32.6	235	1.13	80.9	63.1	40.5	22.6	1.79	97.1	156	1.90
	UM-T19	34.6	246	1.20	66.1	57.4	34.9	22.5	1.39	85.3	163	1.84
	UM-T21	36.6	258	1.12	77.0	69.9	41.0	28.9	1.25	97.6	171	1.88
	UM-T23	38.6	269	1.13	69.4	68.1	35.1	33.0	1.04	95.5	179	1.69
UM-T25	40.5	282	1.18	49.2	46.7	26.8	19.9	1.13	80.4	187	1.35	
浦安市高洲沖積粘土	UT-T13	17.3	144	1.29	57.8	64.1	34.5	29.6	0.79	97.4	94	1.52
	UT-T15	19.1	155	1.02	71.7	62.8	34.8	28.0	1.32	99.1	101	1.78
	UT-T19	23.2	176	1.34	91.3	75.8	46.6	29.2	1.53	97.6	117	2.24
	UT-T23	26.7	195	1.16	71.8	46.8	30.4	16.4	2.52	86.1	131	1.72
	UT-T24	27.7	201	1.21	75.5	52.8	32.1	20.7	2.10	86.0	132	1.62
	UT-T26	29.5	210	1.28	90.0	56.7	34.8	21.9	2.52	97.6	141	2.07
大阪市大正区鶴町沖積粘土	OT-T6	13.05	116	1.06	54.8	63.7	22.5	41.2	0.78	99.2	78	1.36
	OT-T8	14.85	128	1.07	58.7	69.5	26.2	43.3	0.75	98.5	86	1.49
	OT-T10	16.65	140	0.99	55.2	71.4	25.6	45.8	0.65	96.9	94	1.38
	OT-T12	18.45	152	1.12	53.6	71.2	25	46.2	0.62	96.6	101	1.377
	OT-T14	20.25	164	1.20	53.5	74.5	25.7	48.8	0.57	97.2	109	1.139

試験に用いた試料は，港（11供試体），高洲（6供試体）沖積粘土層である。さらに比較のため，大阪市大正区鶴町沖積粘土層（5供試体）も実施した<sup>7)</sup>。表1に用いた供試体の平均深度z，有効土被り圧p<sub>0</sub>，過圧密比OCR，自然含水比w<sub>n</sub>，液性限界w<sub>L</sub>，塑性限界w<sub>p</sub>，塑性指数I<sub>p</sub>，液性指数I<sub>L</sub>，細粒分含有率F<sub>c</sub>，圧密圧力σ<sub>c</sub>，圧密終了時の間隙比e<sub>c</sub>をまとめた。3地点の粘土に対して，変形特性を求めるための繰返し三軸試験

(2) 試験結果

JGS 0542) を実施した。圧密条件は等方圧密で，静止土圧係数K<sub>0</sub>=0.5を仮定してσ<sub>c</sub>'=2/3p<sub>0</sub>とした。圧密の終了は3t法で決定した。繰返し載荷荷重は0.1Hzの正弦波で，繰返し回数10回目の軸差応力qと軸ひずみε<sub>s</sub>の関係から等価ヤング率E<sub>eq</sub>と履歴減衰率hを求めた。なお，ポアソン比0.5を仮定して，E<sub>eq</sub>を等価せん断剛性率G<sub>eq</sub>に，ε<sub>s</sub>をせん断ひずみγに換算した値を用いて試験結果を整理した。

繰返し三軸試験より得られた鶴町，港，高洲沖積粘土層のG<sub>eq</sub>及びhと片振幅せん断ひずみγ<sub>sa</sub>の関係をそれぞれ図9(1)～(3)に示す。また，図中にはVucetic and Dobry<sup>8)</sup>によるI<sub>p</sub>ごとのG<sub>eq</sub>～γ<sub>sa</sub>，h～γ<sub>sa</sub>関係を表す曲線を併せて示している。図9(1)の鶴町沖積粘土（I<sub>p</sub>=41.2～45.8）のG<sub>eq</sub>～γ<sub>sa</sub>関係とh～γ<sub>sa</sub>関係は，Vucetic and DobryのI<sub>p</sub>ごとの曲線の範囲内にプロットされることから，I<sub>p</sub>=40程度の粘性土の平均的な変形特性であるといえる。一方，図9(2)，(3)の港沖積粘土（I<sub>p</sub>=15.4～40.5）と高洲沖積粘土（I<sub>p</sub>=16.4～29.6）のG<sub>eq</sub>～γ<sub>sa</sub>関係とh～γ<sub>sa</sub>関係は，Vucetic and Dobry

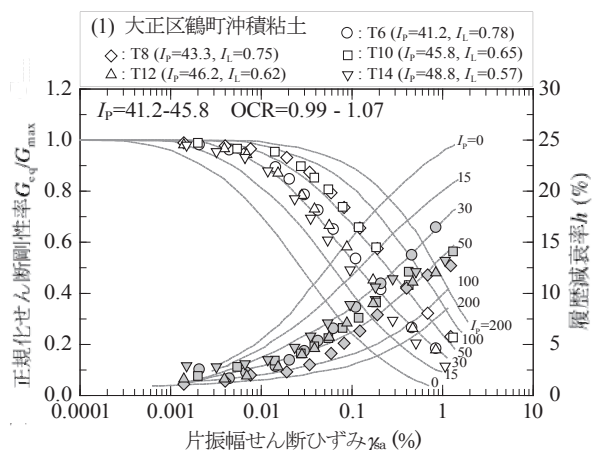


図9 G<sub>eq</sub>及びhとγ<sub>sa</sub>の関係<sup>7)</sup>（つづく）

の曲線では  $I_p=30\sim 200$  の間にあり，剛性が劣化するせん断ひずみレベルが大きく，逆にせん断ひずみが大きくなっても減衰率  $h$  が大きくならないことがわかる。すなわち，低塑性でありながら高塑性粘土に近い変形特性を有すると言える。これは超鋭敏性粘土の発達した骨格構造が繰返しせん断に対して抵抗するため，剛性が落ちにくいと考えられる。このことから，浦安市の超鋭敏性沖積粘土層は地震動に対して減衰しにくい特性を持っていると言え，これがその上の埋立層と沖積砂層の液状化発生に影響を及ぼしたと推察できる。

5. 東大阪地域の鋭敏粘土層の分布

鋭敏性の高い沖積粘土層は東大阪地域でも分布することが知られており，過去の建設工事において思わぬ事故を誘発してきた。図10, 11にそれぞれ大阪地域の沖積粘土層の平均  $N$  値分布， $N$  値=0 層厚による鋭敏粘土層の分布を示す<sup>9)</sup>。これは「関西圏地盤情報データベース」を用いて 250m メッシュごとにとりまとめたものである。東大阪地域では， $N$  値がごく小さい（ $N$  値=0 はロッド又はハンマーによる自沈）軟弱な鋭敏な粘土が広く分布するが，特に旧大和川，旧淀川・安威川の河道（埋没谷に相当）に分布していることがわかる。

過去の地震によって東大阪地域で大きな被害があったことが記録されている。1707年の宝永地震（東南海・南海地震が同時に，かつ東海地震が翌日に発生）では，西大阪に比べて東大阪地域の地震動が大きかったこと（震度7の地震動が推定されている），長時間かつ長周期の地震動であったこと，1854年の安政地震（東南海地震発生後，翌日に南海地震が発生）では，沖積粘土層が厚く堆積する地域での建物倒壊率が高かったことが記録されている<sup>10)</sup>。これは，東大阪地域の軟弱な鋭敏沖積粘土層による影響と考えられる。今後，東大阪地域の鋭敏粘土層の地震動・液状化に与える影響を調べる必要がある。

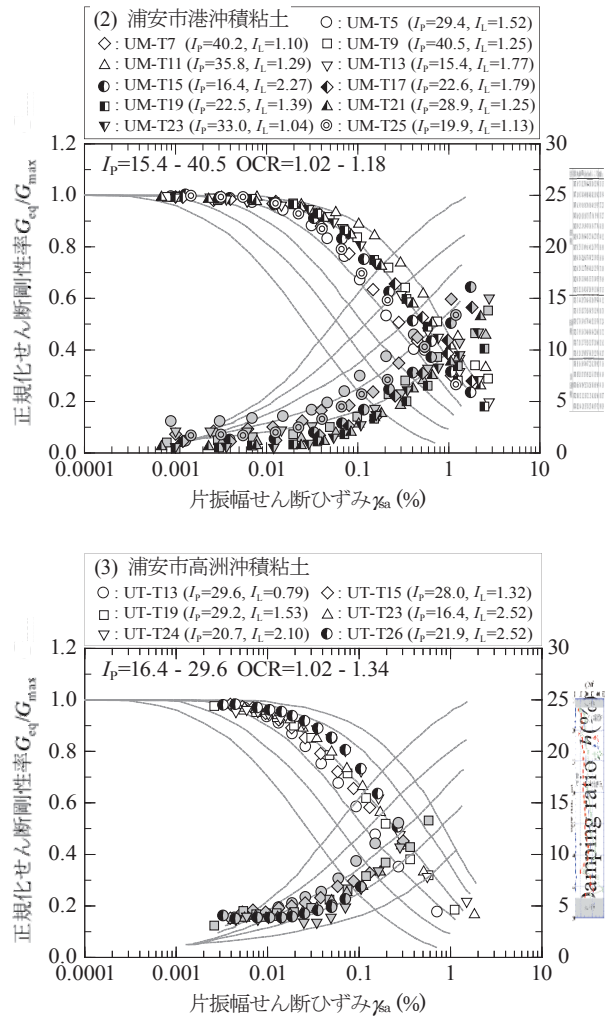


図9  $G_{eq}$  及び  $h$  と  $\gamma_{sa}$  の関係<sup>7)</sup> (つづき)

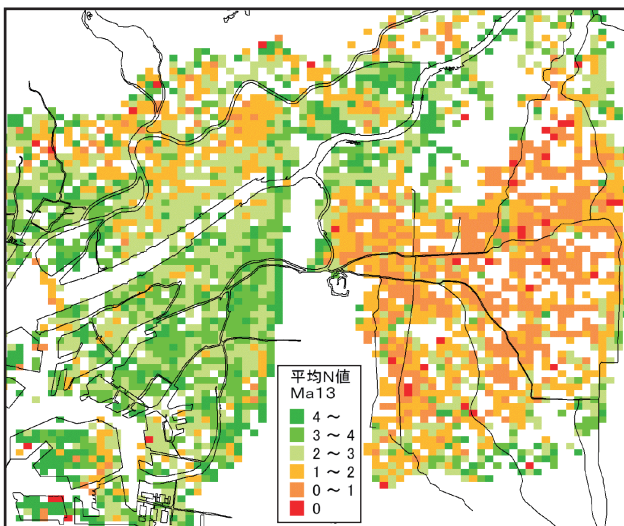


図10 大阪地域の沖積粘土層の平均  $N$  値分布<sup>9)</sup>

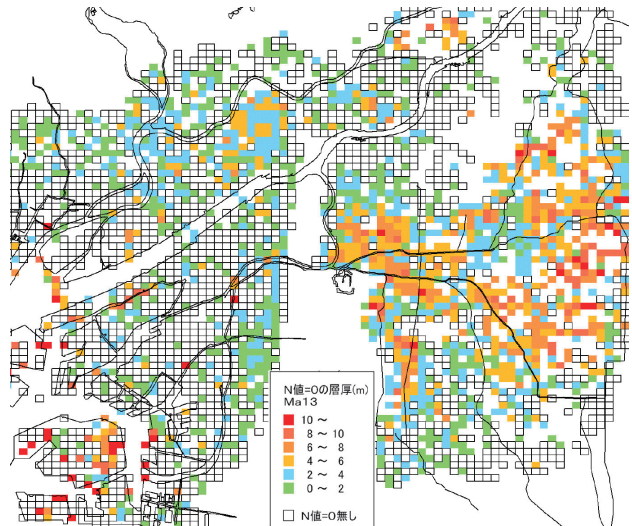


図11 大阪地域の  $N$  値=0 層厚による鋭敏粘土層の分布<sup>9)</sup>

## 6. まとめ

本論文で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 浦安市の3地点で採取した沖積粘土層の土質特性を調べた結果、高洲（層厚15.7m）では全体に自然含水比 $w_n$ が液性限界 $w_L$ よりも大きく、特に26m以深は液性指数 $I_L$ が2～2.5であり、超鋭敏性を示した。鉄鋼通り（層厚40.5m）では $I_L$ が1前後であり、鋭敏ではあるが、高洲ほど超鋭敏ではなかった。港（層厚31.8m）では全体に $w_n$ が $w_L$ よりも大きく、特に深度27～35mでは $I_L$ が1.5～2.5であり、超鋭敏性を示した。
- 2) 既存の地盤調査資料から沖積粘土層の鋭敏性の平面分布を調べ、浦安市の工学的基盤標高の分布から沖積粘土層の層厚分布を調べ、実際の液状化被害分布と対比した結果、沖積粘土層の鋭敏性と層厚分布がその上の埋立層と沖積砂層の液状化発生に影響を及ぼすことが示唆された。
- 3) 浦安市沖積粘土層の繰返し変形特性を調べた結果、等価せん断剛性率 $G_{eq}$ ～片振幅せん断ひずみ $\gamma_{max}$ 関係と履歴減衰率 $h$ ～ $\gamma_{max}$ 関係より、浦安市沖積粘土層は低塑性でありながら高塑性粘土に近い変形特性を有し、剛性が劣化するせん断ひずみレベルが大きく、逆にせん断ひずみが大きくなっても減衰率が大きくならないことがわかった。このことから、地震動に対して減衰しにくい特性を持った粘土層と言え、上部の埋立層と沖積砂層の液状化発生に影響を及ぼしたと推察された。

本論文では、浦安市の超鋭敏性沖積粘土層の分布とそれによる地震動・液状化に与える影響を述べた。その結果は今後発生が予想される首都圏直下型地震での地震動被害、液状化被害に対する対策を考える上での重要な情報を与えると考えられる。今後、さらに調査地点を増やすとともに、超鋭敏性の成因を究明するために、堆積環境や粘土鉱物組成なども調べたい。また、超鋭敏性沖積粘土層の変形特性が上部層の地震動増幅特性に与える影響を地震応答解析によって検討したい。

一方、鋭敏性の高い沖積粘土層は東大阪地域でも分布するので、東大阪地域でもその分布と性状及び地震動・液状化に与える影響を調べ、南海・東南海地震への対策に繋げていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 大島昭彦・鈴木達也・宮田尚樹・和田昌大・久保田耕司・笹尾憲一・平田茂良（2012）：浦安市における各種静的サウンディング試験の比較（その8：SPSと沖積粘土の土質特性）、浦安地盤調査一斉試験報告会論文集，No.83，pp.163-164
- 2) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会（2012）：浦安市液状化対策技術検討調査報告書，<http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/26052/lasthoukoku02-01.pdf>
- 3) 鈴木達也・大島昭彦・久保田耕司・笹尾憲一（2013）：千葉県浦安市沖積粘土層の土質特性の測定例，土木学会第68回年次学術講演会，III-315，pp.229-230.
- 4) 新井瞬・大島昭彦・久保田耕司・深井晴夫・笹尾憲一・栗津和也（2014）：千葉県浦安市沖積粘土層の土質特性と液性限界の経時変化の測定例（第2報），土木学会第69回年次学術講演会，III-044，pp.87-88.
- 5) 千葉県開発庁臨海開発局（1974）：内湾臨海部土質調査資料集(1)A区域(浦安～船橋)。
- 6) 千葉県環境研究センター（2011）：第3報 千葉県内の液状化・流動化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果-浦安地区(1)-」，<http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/26052/lasthoukoku02-02.pdf>
- 7) 春日井麻里・本郷隆夫・山田卓・大島昭彦（2014）：千葉県浦安市沖積粘土層の繰返し変形特性，土木学会第69回年次学術講演会，III-041，pp.81-82.
- 8) Vucetic, M. and Dobry, R. (1991): The effect of soil plasticity on cyclic response, ASCE Geotechnical Journal, Vol. 117, No. 1, pp. 89-107.
- 9) 大島昭彦・盛岡学・福本哲也・春日井麻里・山本浩司（2010）：東大阪地域の鋭敏粘土層の分布域と堆積環境から見たその成因の再検討，日本材料学会，材料，Vol. 59, No. 1, pp. 2-7.
- 10) KG-NET・関西圏地盤研究会（2007）：新関西地盤～大阪平野から大阪湾～，pp.184-186.