

東北地方太平洋沖地震による 東京湾岸エリアの噴砂特性に関する考察

石川 敬祐¹・安田 進²

¹東京電機大学理工学部建築・都市環境学系助手
(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail:ishikawa@g.dendai.ac.jp

²東京電機大学理工学部建築・都市環境学系教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail:yasuda@g.dendai.ac.jp

東北地方太平洋沖地震によって、東京湾岸エリアの埋立地で広い範囲で液状化被害が発生した。湾岸エリアの液状化被害の特徴として、埋立地の広範囲での液状化の発生、液状化に伴い噴出した噴砂量が非常に多かったことが挙げられる。本報告は、湾岸エリアの噴砂の粒度特性や透水特性、ボーリング実験による擬似液状化実験を実施し、噴砂の噴出特性に関して検討を実施した。その結果、湾岸エリアの噴砂は、細粒土を含む均質な細砂が主体であり、透水特性は、 $10^{-6}(\text{m/s})$ オーダーであった。ボーリング実験の結果、細粒土を含む噴砂試料では、水の噴出と同時に土粒子も噴出し、地表に堆積する傾向を示した。一方、豊浦砂の様な粒径が少し大きい透水性の良い試料では、水の噴出に伴う土粒子の噴出は確認できなかった。噴水時の土粒子の浮き上がり易さは、粒径の2乗に関係し、一方落下し易さは粒径の3乗に関係することから、湾岸エリアの様な細粒土を含む細砂が液状化すると噴砂量が多く発生することが考えられる。

Key Words : *liquefaction, sand boil, grain size distribution, permeability*

1. はじめに

2011年3月11日に宮城県沖を震源とする東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震での液状化被害は、東北地方から東京湾岸までの広範囲の埋立地や旧河道に及んだ。甚大な被害だった東京湾岸エリアは、震央から約380kmも離れているにもかかわらず、大変広い範囲で液状化が発生し、家屋やライフライン施設等に甚大な被害を与えた。本地震による東京湾岸エリアの特徴的な被害として、埋立地の広範囲での液状化の発生、液状化に伴い噴出した噴砂量が非常に多かったことが挙げられる。筆者等は、地震直後からの現地踏査において採取した湾岸エリアの噴砂試料の粒度特性や透水特性を調べ、またボーリング実験による擬似液状化現象時の噴砂の堆積に関する実験を行って噴砂量の多い原因を検討した。さらに、同様に噴砂量が多かったニュージーランドのChristchurch地震との比較検討を行った。

2. 東京湾岸エリアでの液状化発生状況

東京湾岸エリアは、江戸時代より埋め立てが始ま

り、特に第2次世界大戦以降に多くの埋め立てが行われてきている。既往の地震被害によって液状化が発生した地震は、1923年関東地震および1987年千葉県東方沖地震のみである¹⁾。関東地震では東京月島で液状化が発生し、千葉県東方沖地震では千葉市から木更津市の広範囲で液状化が確認されている。それに対し、東北地方太平洋沖地震による液状化発生箇所については、現地調査を実施した結果を図-1に示す。同図の作成には、2011年2月にニュージーランドで発生した地震に対して調査した方法を用いた²⁾。同図は、現地踏査において、①道路や宅地に噴砂が見られて激しい液状化を生じている場合：赤実線、②道路や宅地に噴砂が見られない場合：青実線で示している。また、現地踏査時に噴砂を採取した地点を緑ポイントで示している。同図より、東京のお台場から千葉市の千葉港付近までの広範囲で液状化が発生したことが確認できる。特に甚大な被害であったのが浦安市であり、また、市川市から習志野市でも広い範囲で液状化が確認された。液状化による構造物の被害としては、戸建て住宅の沈下や傾斜、ライフライン施設の機能損傷が数多く発生した。これに対し、中層構造物等の杭基礎構造の建造物や基

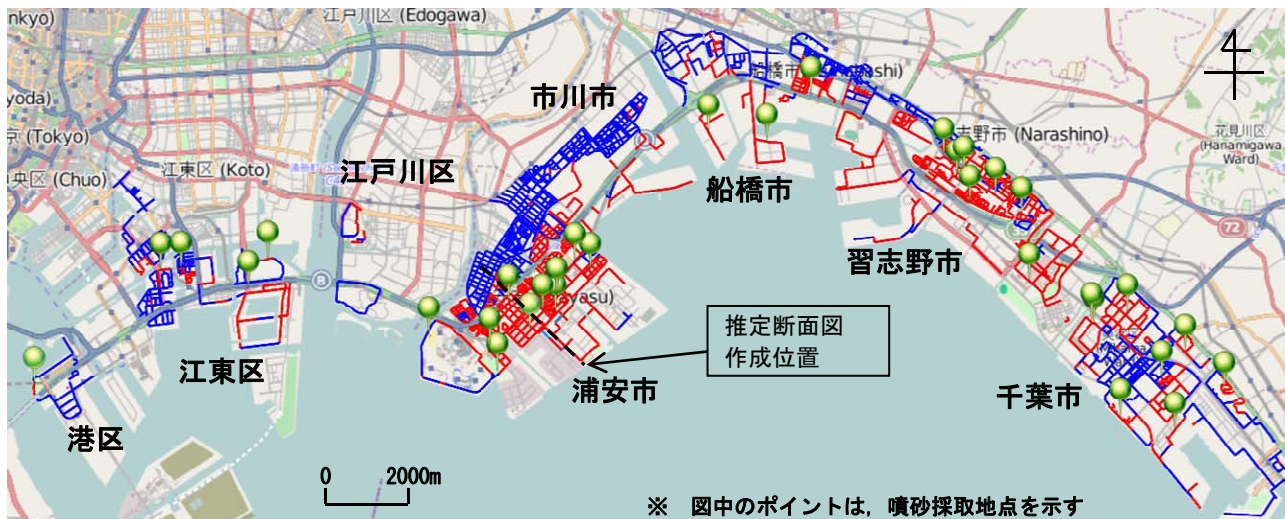


図-1 現地調査結果及び噴砂採取位置図



図-2 浦安市で確認した噴砂の堆積状況

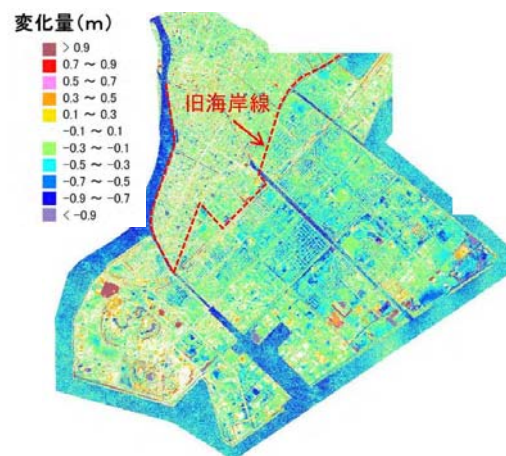


図-4 浦安市全域の地震後の地盤沈下量



図-3 住宅地で発生した多量の噴砂（千葉市）

礎地盤を改良している区画では、構造物被害は確認されなかった。一方で、地盤に着目すると、歩道部の突き上げや地盤沈下、噴出した噴砂量が非常に多かったことが特徴的である。図-2,3に現地調査において確認した噴砂の堆積状況を示す。

筆者らが確認した噴砂の最大の厚さは30cm程度である。噴出した噴砂は、図-3のように道路を覆うほどで多量に噴出していた。一方、現地で確認した地盤の沈下量は50cm程度であった。浦安市では、地震後の地盤地下量を公表している。図-4に地震後に測定された航空レーザー計測による地震前後の差分値を示す³⁾。同図より、地震後の地盤の沈下量は、液状化の発生が多い地域で30～50cm程度の沈下が確認され、部分的には50～90cm程度沈下した地区もあるようである。旧海岸線より北部の液状化が確認されていない地域では、液状化地域と比べて地盤



図-5 Christchurch での噴砂の状況（本震）



図-6 Christchurch での噴砂の状況（余震）

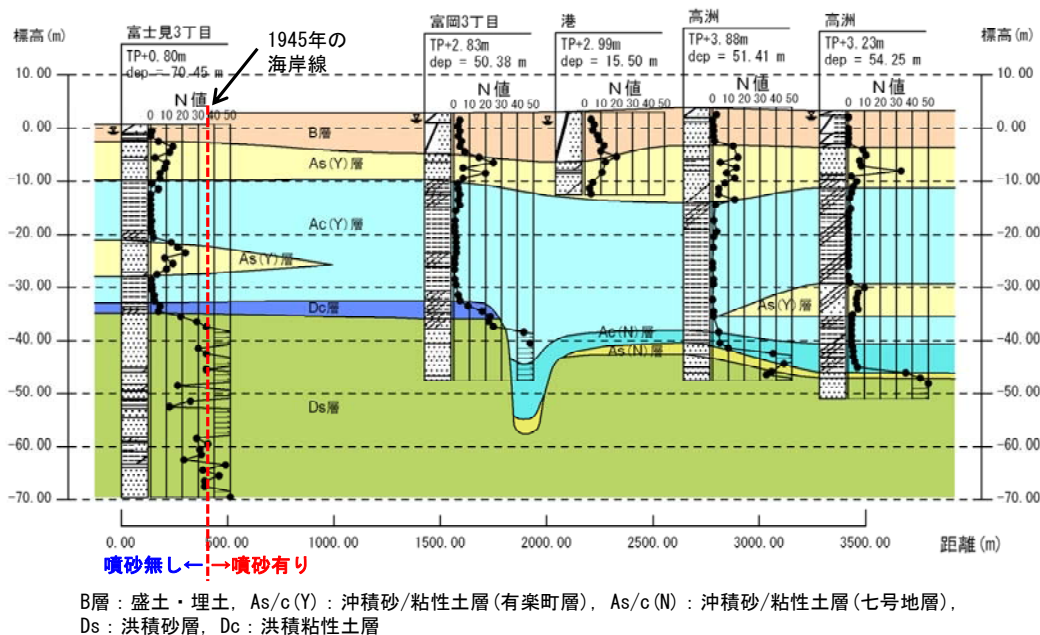


図-7 浦安市の中央部の推定土質断面図（富士見-高洲）

沈下量は軽微であった。さらにこれらの地域以外にも被害が激しかった箇所もあると思われる。東京湾岸エリアの液状化被害状況は、Christchurchにおける本震及び余震時の被害状況と非常に似ていた。両者の共通点は、液状化した範囲が非常に広い点や発生した噴砂の量が膨大であった点である。図-5,6には、筆者等がChristchurchの現地踏査時に同一場所を確認した噴砂の堆積状況である。Christchurchでの液状化では、本震時の液状化と余震時の再液状化、さらに余震時の再々液状化が確認されている。浦安市の中央部の北西-南東方向の推定地層断面図を図-7に示す⁴⁾。噴砂が確認された地区は、1945年の海岸線を境（図中の赤破線より右側）に埋め立てられた地区である。地下水位は、GL-1~-2m程度であり浅い位置に水位面が存在している。液状化地区のB層のN値は、0~9回（平均3回）と非常に緩い状態だったと考えられる。また、B層の層厚は、7~9m程度であった。As層は、N値が2~33回（平均10回）であり、中位の締まり具合であった。このことから、液状化層としては、地下水位以深のB層が対象と考えられる。

3. 湾岸エリアの噴砂の粒度特性

現地踏査において採取した噴砂の粒径加積曲線を図-8に示す。また、各地区の粒度組成の平均値を表-1に示す。同図より、採取した噴砂の細粒分含有率 F_c は、各採取地区の平均値で3.8~42.5%と多く含まれている。均等係数 U_c は、1.99~3.49であり、各地区ともに粒度組成は均質な土質で構成されている。また、塑性指数 I_p は、全ての試料でNP(Non-Plastic)であり、噴砂に含まれる細粒土はシルトを主体とする非塑性な土質であった。一部、千葉市美浜区高浜7丁目の噴砂試料は、 $F_c=82.4\%$ 、 $I_p=30.6$ が確認された。噴砂の全体的な傾向は、シルト質砂から砂質シ

ルトであり、粒径の細かい砂質土主体であった。

東京湾岸エリアの噴砂の粒度特性とChristchurchで液状化した噴砂の粒度特性²⁾を図-9に示す。同図より、両者で発生した噴砂の粒度組成は非常に類似していることが分かる。以上のことから、両地点での噴砂量が非常に多かった原因の一つとして、非塑性な細粒土を含む粒径の細かい砂質土の影響が考えられる。

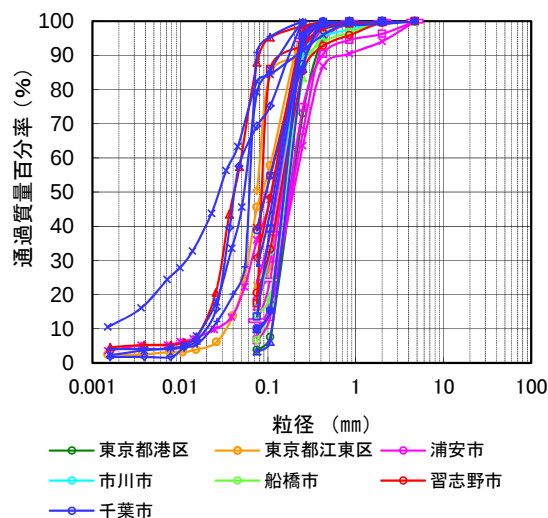


図-8 各地区の噴砂の粒径加積曲線集積図

表-1 各地区の噴砂の粒度組成一覧表

採取地区	試料数	礫分 (%)	砂分 (%)	細粒分 (%)	D50 (mm)	U_c	I_p
東京都港区	1	0.3	95.9	3.8	0.199	1.99	NP
東京都江東区	4	0	70.4	29.6	0.121	3.49	NP
浦安市	9	1.2	83.0	15.8	0.164	3.29	NP
市川市	1	0.1	82.2	17.7	0.150	-	NP
船橋市	2	0.1	89.4	10.5	0.175	2.26	NP
習志野市	5	0.2	66.7	33.1	0.098	2.81	NP
千葉市美浜区	10	0.1	57.4	42.5	0.106	2.61	Np~5.7

千葉市美浜区高浜7丁目： $F_c=82.4\%$ 、 $W_L=73.9\%$ 、 $I_p=30.6$ と(MH)であった。

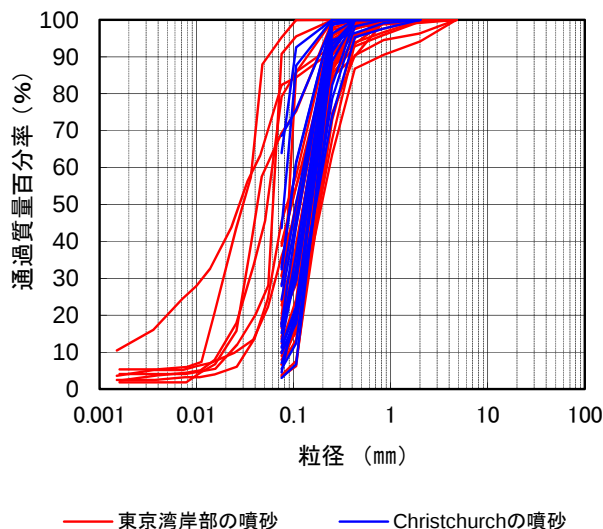


図-9 両地震による噴砂の粒度特性の比較

4. 液状化した砂の噴出し易さに関する実験

東京湾岸エリアやChristchurchでの液状化時の噴砂量の多さを検討する目的で浦安市鉄鋼通りで採取した噴砂試料（以下、浦安砂と示す。）を用いて、ボーリングによる擬似液状化実験を実施した。また、細粒土を含まない豊浦砂（ $F_c=0\%$ ）を用いて土質試料の違いを比較した。

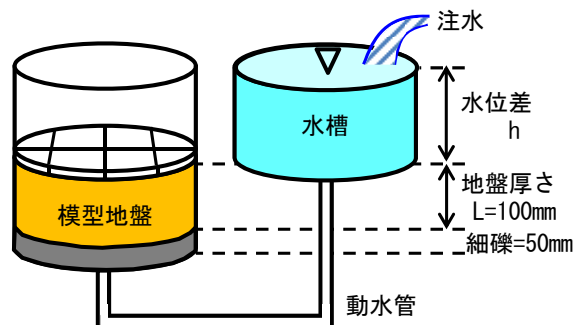
4.1 実験方法

液状化による噴砂現象は、ボーリング現象で再現することとした。試験装置の概念図を図-10 a)に示す。試験装置は、直径300mmの亚克力管を使用し、模型地盤の下部に細礫（ $\phi 5\text{mm}$ ）層を50mm敷き詰めフィルター層とし、水槽からの水が直接模型地盤へ当たらないように配慮し、フィルター層の上部に模型地盤を100mmの厚さで作成した。模型地盤の表層部には、歩道等に敷き詰められているインターロッキングブロックを模擬し、図-10 b)に示すブロックを配置し、ブロック上に噴出した試料の堆積厚さを計測することとした。その際の噴出した試料の堆積厚さは、噴出を3分間継続し、初期の水頭位置（ $h=0$ ）に戻し、地下水位が模型地盤面（ $GL=0.0$ ）に戻ったときの堆積厚さを測定した。実験に用いた各試料の物性を表-2に示し、試験条件を表-3に示す。

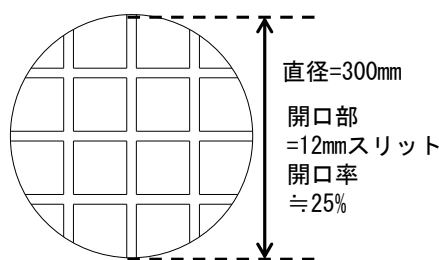
表-2 土質試料の物性値一覧表

土質試料	浦安砂	豊浦砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.643	2.65
礫分 (%)	0.0	0.0
砂分 (%)	64.0	100.0
細粒分含有率 F_c (%)	36.0	0.0
平均粒径 D_{50} (mm)	0.1123	0.1700
塑性指数 I_p	NP	NP
最大間隙比 $e_{\max}$	1.477	0.996
最小間隙比 $e_{\min}$	0.828	0.613

試験時の模型地盤の密度は、Terzaghi-Peckによる N 値と相対密度の関係⁵⁾より、非常に緩い場合～密な場合の4ケース実施した。その際のモデル地盤の透水係数は表に示す通りである。また、各密度条件に対し、動水勾配(h/L)を3種類変化させて実施した。



a) 擬似液状化試験装置



b) ブロック配置図

図-10 試験装置の概念図

表-3 試験条件一覧表

○ 浦安砂の試験内容

Case	相対密度 D_r (%)	動水勾配 h/L	透水係数 k_{15} (m/s)	備考
1～3	20	1.00, 1.25, 1.50	$6.17\text{E}-05$	非常に緩い
4～6	30	1.00, 1.25, 1.50	$2.60\text{E}-05$	緩い
7～9	50	1.00, 1.25, 1.50	$1.70\text{E}-05$	締まった
10～12	70	1.00, 1.25, 1.50	$1.00\text{E}-05$	密な

○ 豊浦砂の試験内容

Case	相対密度 D_r (%)	動水勾配 h/L	透水係数 k_{15} (m/s)	備考
1～3	20	1.00, 1.25, 1.50	$3.98\text{E}-04$	非常に緩い
4～6	30	1.00, 1.25, 1.50	$3.50\text{E}-04$	緩い
7～9	50	1.00, 1.25, 1.50	$3.07\text{E}-04$	締まった
10～12	70	1.00, 1.25, 1.50	$2.25\text{E}-04$	密な

4.2 実験結果

実験後の砂の堆積状況の一例として、相対密度 $D_r=30\%$ 、動水勾配 $h/L=1.5$ 時の浦安砂と豊浦砂の模型地盤状況を図-11,12に示す。同図に示すように、浦安砂はブロック上の全面に噴出した砂が堆積しているのに対し、豊浦砂ではブロック上に多少の砂が見られる程度で浦安砂ほど堆積はしていない。

浦安砂のボーリング時の傾向は、透水性が低いことから徐々に水がしみだし、模型地盤内での弱層部よりパイピング破壊的に噴出し、その際に多くの試料が噴水と一緒に噴出する傾向であった。一方、豊浦砂は、浦安砂に比べて透水係数が1オーダー程度大きいいため、水位差が上昇すると共に水は全面より

浸出したが浦安砂のような噴出的な現象ではないため試料の噴出はほとんど発生しなかった。

各検討ケースでの浦安砂の模擬液状化実験結果を図-13に示す。図中の平均値は、各ブロック上に堆積した砂の厚さの平均を示し、最大値は、最も堆積した値を示している。同図より、各密度において動水勾配が増加するに従い、噴出した砂の堆積厚さが増加している傾向を示している。



図-11 浦安砂の試験前・後の状況

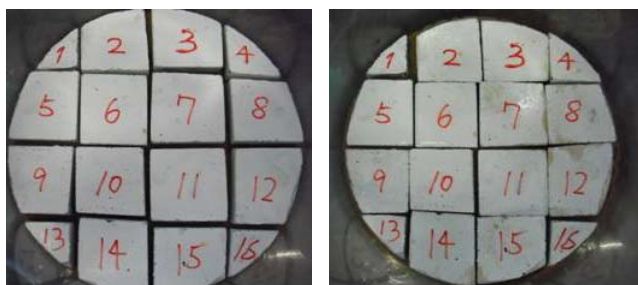


図-12 浦安砂の試験前・後の状況

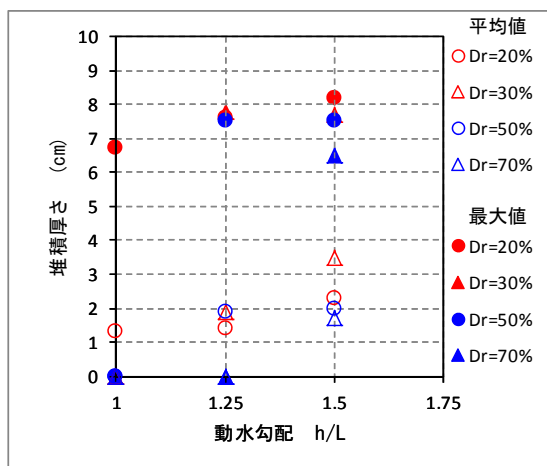


図-13 浦安砂の動水勾配と堆積厚さの関係

また、地盤密度が密な状態となると噴砂量が減少している。最も密な $Dr=70\%$ では、動水勾配が $h/L=1.5$ 時に初めて噴砂が生じた。一方、豊浦砂で同様な実験をしたが、浦安砂の様にブロック上に試料が計測するほど堆積するような結果は確認できなかった。

5. 液状化時の噴水による土粒子の浮き上がり易さに関する実験

地震によって発生した過剰間隙水圧は、地震後に消散しようと働き、地表に達したものが噴水であり噴砂現象である。この際に、土粒子の違いによって噴水での浮き上がり易さが異なると考えられる。ここでは、簡易な模型実験で浦安砂と豊浦砂の浮き上がり易さの違いに関して比較検討した。

5.1 実験方法

土粒子の浮き上がり易さに関する実験の試験装置概要を図-14に示す。試験装置は、直径94mmの亚克力管を2本用いて、一方の亚克力管を昇降することで水頭差を付け、もう一方の水槽下部より流水が噴き上がる簡易な構成である。ある一定の水頭差（流速）の際の、浦安砂及び豊浦砂が水槽内で浮遊し停滞する際の水頭差及び流速を計測した。また、試験時の土粒子は、流水水槽の中央付近に直接投入している。試験に用いた試料の物性値は、表-2に示す通りである。

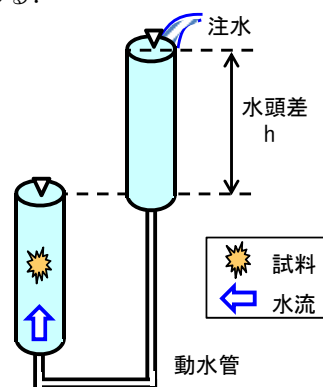


図-14 土粒子の浮き上がり試験装置

5.2 実験結果

実験の結果を図-15に示す。同図より、土粒子が水槽内に浮遊し停滞する水頭差は、粒径の細かい浦安砂で54.5(cm)で浮遊するのに対し、豊浦砂では94.0(cm)で浮遊することが分かった。また、その際の流速は、浦安砂で1.7(cm/s)であり、豊浦砂では2.3(cm/s)となった。試料の違いによる流速の違いは、約1.4倍の違いである。

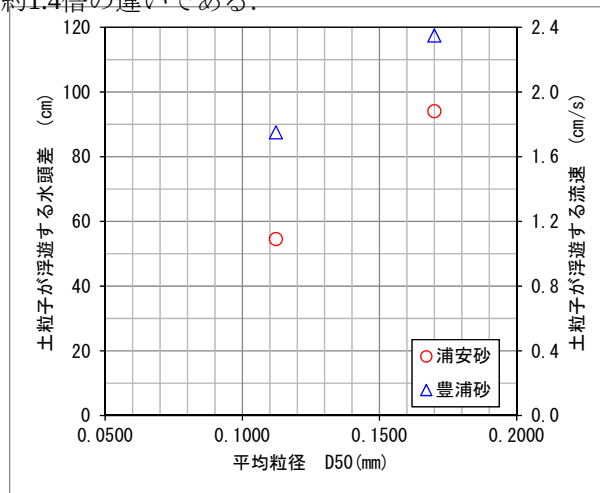


図-15 平均粒径と水頭差、流速の関係

土粒子の浮き上がり易さに関して、土粒子を球形と仮定し、その半径を r とすると、土粒子の表面積及び体積は以下の通りである。

$$\text{土粒子の表面積(cm}^2\text{)} : S = 4\pi r^2$$

$$\text{土粒子の体積(cm}^3\text{)} : V = (4/3)\pi r^3$$

土粒子が重力によって下に落ちようとする（沈降）力は、以下の通りである。

$$\text{沈降する力} : W = V\gamma' = (4/3)\pi r^3 \times \gamma' \quad \cdots (1)$$

但し、 γ' ：土粒子の水中単位体積重量

一方、土粒子が水槽下部からの水の流れによって浮き上がろうとする力は、以下の通りである。

$$\text{流水により浮き上がる力} : F = \alpha S = \alpha 4\pi r^2 \quad \cdots (2)$$

但し、 α は水の流速に起因する定数である。

土粒子が水槽下部からの噴水の流れにのって上昇するためには、“ $F > W$ ” となる。そこで、沈降する力 W と浮き上がる力 F の比をとると、

$$L = F/W = \alpha 4\pi r^2 / \{(4/3)\pi r^3 \gamma'\} \\ = 3\alpha / r\gamma'$$

ここに、“ $3\alpha / r\gamma' > 1$ ” の場合に土粒子が上昇することを意味する。

従って、土粒子の粒径が大きいと上昇しなくても、土粒子の半径 r が小さい、つまり粒径が小さくなるといって土粒子が上昇し易くなる。

(1), (2)式より、“ $F = W$ ” の時の土粒子の浮き上がる際の流速に起因する定数 α を各試料の平均粒径で求めると以下の通りである。

$$\text{浦安砂} : \alpha = r\gamma' / 3 = 0.019\gamma'$$

$$\text{豊浦砂} : \alpha = r\gamma' / 3 = 0.028\gamma'$$

以上のことより、土粒子の水中単位体積重量 γ' を一定と仮定すると、浦安砂と豊浦砂では、噴水時の土粒子の浮き上がり易さで約1.5倍程度の違いがあることがわかる。また、実験結果では、土粒子が浮遊する際の流速で約1.4倍程度の違いを示すことから平均粒径から求めた推測値とほぼ同程度の値を

示している。

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震時には、東京湾岸エリアで広範囲にわたって液状化が発生し、液状化に伴い噴出した噴砂量が多いことが現地踏査で確認された。

膨大な噴砂が発生した原因としては、以下の通りである。

- ① 噴砂した試料は、粒径が比較的均質な細粒分を多く含む細砂であった。また、含まれる細粒分は非塑性な土質であった。
- ② 細粒分を含むため透水性が悪く、多くの繰返しせん断で過剰間隙水圧が蓄積され、やがて地盤内の弱部より噴出が始まったと考えられる。
- ③ 土粒子の噴出し易さは、土粒子の径に影響され東京湾岸エリアの埋立土のような粒径の細かい試料は特に噴水時に上昇し易い材料であったと考えられる。

謝辞：模型実験を実施する際に、肥後成一氏、石田将貴氏（東京電機大学生）にご協力頂いた、末筆ながらお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 若松加寿江：日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版
- 2) (社) 地盤工学会：2011年ニュージーランド Christchurch地震による被害に対する災害緊急調査団報告書, 地盤工学会, 2011
- 3) 浦安市：東日本大震災への対応
- 4) 千葉県：千葉県地質環境インフォメーションバンク
- 5) (社) 地盤工学会：地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例, pp328, 2009

Study of sand boiling characteristics along Tokyo Bay during the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake

Keisuke ISHIKAWA, Susumu YASUDA

Liquefaction occurred in a wide range of reclaimed land in Tokyo Bay. Features of the damage which occurred a large amount of sand boiling. In this report, the boiled sand grain characteristics. Permeability characteristics. We conducted experimental model to measure the amount of sand boiling. Test results, Urayasu sand ($F_c=36\%$), soil and water erupted along. Toyoura sand ($F_c=0\%$) is the only water erupted. As a result, fine-grained soil is found to be a large amount of sand boiling.