

(61) 1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の液状化特性
(細粒分含有率の差異の実験的検討)

飛鳥建設㈱ 正会員 沼田淳紀 太田直之
正会員 森伸一郎 境野典夫
正会員 長谷川昌弘 滝本幸夫

1. はじめに

1987年12月17日11時08分に発生した千葉県東方沖地震(M=6.7)では、千葉、勝浦、銚子で震度Vを記録し、広範囲にわたり数多くの噴砂が確認されている。筆者らも翌18日より翌年1月26日にかけて現地調査を行ない、被害と液状化発生状況を調べた。その結果、この地震による液状化発生の特徴として次の3点があげられる。①東京湾の海岸埋立地(特に千葉県)で多くの液状化が確認された。②これまでの地震に比べ震央から遠いところでも液状化が発生した。③噴砂の規模としては小規模であった。¹⁾

また、筆者らは調査において噴砂を21地域から92試料採取し、比重試験、含水量試験、粒度試験、コンシステンシー試験及び粒子形状の観察を行い、今回の地震において発生した噴砂の物理的性質についても明らかにしてきた。それらをまとめると特徴的なこととして次の5点があげられる。①今までの地震における噴砂に比べ細粒分含有率が多く、特に、海岸埋立地の噴砂はその傾向が顕著であり、場所によってはシルトに分類されるものまでであった。¹⁾²⁾②均等係数がおおよそ1.5~4.0と小さく均一であった。¹⁾²⁾③一般の沖積砂層及び埋立砂層に比べて、粘土分含有率が10%未満と少なかった。³⁾④塑性指数が10%未満と低塑性であった。³⁾⑤噴砂に含まれる粘土分の粒子形状は、粒状及び碎屑状のものが優勢であった。⁴⁾

ここではさらに、この地震における噴砂試料を用いて、第一に今回の液状化の原因を明らかにするため、このように細粒分の多い噴砂の液状化強度を知ること、第二に前述の物理的特性をふまえて、細粒分含有率の差異がどのように液状化特性に影響をおよぼすのかを知ることが目的として、再調整試料の供試体を作成し、繰返し三軸試験を実施した。本論文では、その結果を示すとともに若干の考察を加えた。

2. 試料の選定及び物理的特性

筆者らが確認した液状化発生地点は30地点であり、その地点を他機関の調査結果と併せて図-1¹⁾(地質図は堀口編集による)に示す。

上述の研究結果をふまえたうえで、試験試料として、東京湾の海岸埋立地において発生した噴砂試料の中から、次に示す選定根拠により6試料を選んだ。(なお、この6試料は、各々1つの噴砂丘から採取したものである。)すなわちそれらは、①粘土分含有率PCが少ない(W-3を除けばPC=5~6%)、②均等係数Ucが小さい(Uc=1.5~3.1)、という共通する性質を持ち、③細粒分含有率PFが大きく異なる(PF=3.0~92.7%)、④採取量が多い、ということである。表-1に、6試料(試料名は、既発表のものとも一致している。)の物理的特性を示した。このようにして選定した6試料の粒度分布を図-2に示す。また、図-3には選定した試料が、PCがほぼ一定でPFが異なるということを示す平均粒径D₅₀との関係において示した。

なお、これらの図表には比較のために、豊浦標準砂の物理特性を併記した。

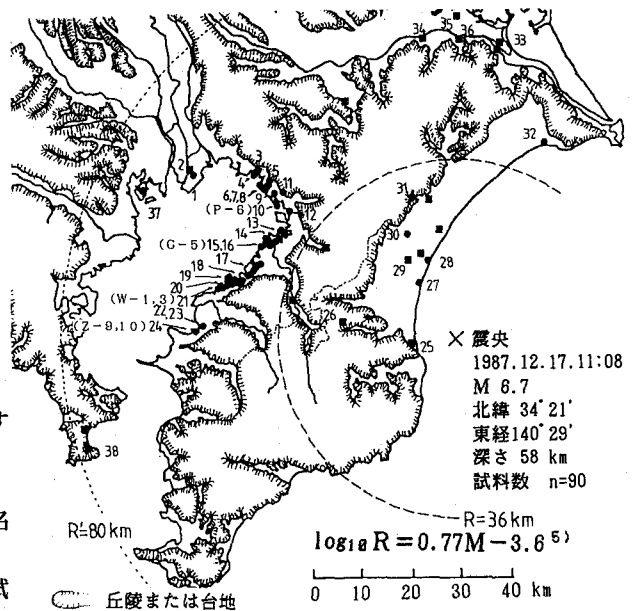


図-1 液状化発生地点の分布¹⁾

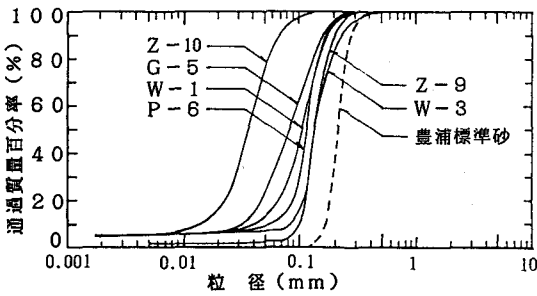


図-2 実験に用いた試料の粒度分布

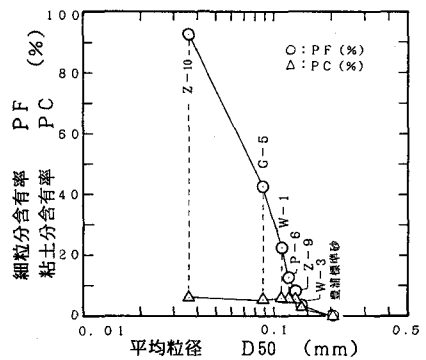


図-3 試料の細粒分含有率・粘土分含有率と平均粒径の関係

3. 供試体作成及び繰返し三軸試験方法

繰返し三軸試験用供試体（直径5cm，高さ10cm）は、炉乾燥試料を内寸法1.5mm×15.0mmの矩形孔を持つ長さ30cmの鉛管⁶⁾を用いて、空中落下法にて作成した擾乱試料である。

安田ら⁷⁾の報告によると、埋立地での経験から、炉乾燥砂を直径1cmのロートを用いて30cmの落下高さで空中落下法で詰めた供試体は、原位置の密度と一致し、この落下高さで豊浦標準砂を詰めるとDr=35.3%となる。このことを参考に、すべての供試体を、落下高さ一定として作成した。なお、落下高さは、前記の安田らの経験と既往のデータとの比較が行ないやすいことを考慮して、豊浦標準砂でDr=50%を得られる38cmとした。作成した供試体の圧密後の間隙比は、PFが多くなると大きくなる傾向がみられるが、どれもDr=50%付近にある。

有効拘束圧 σ_v' については、液状化層の深さを考慮する必要がある。噴砂がみられたいくつかの地域の既存のボーリングデータを検討した結果、液状化層は2~7mの深さであろうと推定した。このことと、既往データとの比較の容易さから、 $\sigma_v' = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

供試体作成後は、二酸化炭素を1時間程度流し、脱気水の通水を排水量が供試体の1~2倍程度になるまで行い、背圧を 2.0 kgf/cm^2 まで上げ、有効拘束圧 0.5 kgf/cm^2 で4~10時間圧密を行ない、B値が0.96以上であることを確認した後に非排水で繰返し载荷を行なった。このよう

表-1 物理的特性一覧表

試料名	Z-10	G-5	W-1	P-6	Z-9	W-3	豊浦砂
採取地	塩浜	五井南	袖ヶ浦	千葉市	塩浜	袖ヶ浦	—
土質分類	ML	SM	SM	S-M	S-M	SPu	SPu
比重	2.655	2.717	2.897	2.700	2.658	2.709	2.64
細粒分含有率 PF (%)	92.7	42.6	22.6	12.6	7.5	3.0	0
粘土分含有率 (%)	≧5 μm PC	6.1	5.2	5.8	5.6	5.5	2.6
	≦2 μm	5.6	—	5.8	5.3	5.5	2.6
10%粒径 D10 (mm)	0.014	0.032	0.042	0.055	0.080	0.10	0.16
50%粒径 D50 (mm)	0.038	0.088	0.11	0.12	0.13	0.14	0.20
均等係数 U _c (mm)	2.9	3.1	2.9	2.4	1.8	1.5	1.3
液性限界 W _L (%)	34.5	—	31.4	30.5	31.0	26.8	NP
塑性限界 W _p (%)	26.3	—	26.1	21.4	25.0	23.4	NP
塑性指数 I _p (%)	8.2	—	5.3	9.1	6.0	3.4	NP
活性度 A _c	1.5	—	0.9	1.7	1.1	1.3	0
最大間隙比 e _{max}	1.720	1.566	1.544	1.352	1.334	1.172	0.975
最小間隙比 e _{min}	0.838	0.850	0.882	0.770	0.790	0.692	0.599
供試体圧密後 相対密度 D _{rc} (%)	50.3 51.7 59.8	58.2 62.3 65.4	55.4 59.6 58.9	48.3	43.6	33.6	52.5 49.4 49.4

※ 豊浦標準砂以外の試料は全て東京湾海岸埋立地の噴砂

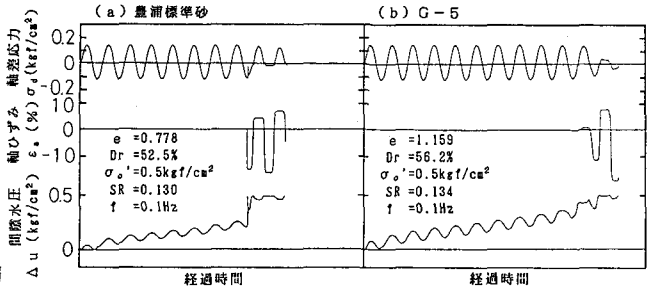


図-4 軸差応力、軸ひずみ、間隙水圧の時刻歴

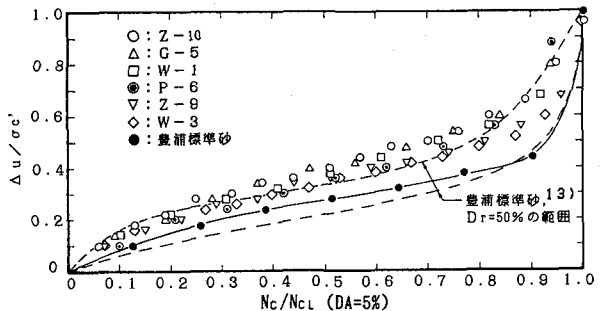


図-5 繰返し回数比と過剰間隙水圧比の関係

に作成された供試体は、密度及び拘束圧の点ではある程度原地盤を再現していると思われるが、粒子間のセメンテーションやエイジング効果については考慮されていない。用いた試験機は、空圧制御式の繰返し三軸試験機であり、載荷周波数は0.1Hzである。

表-1に示した全試料について、まず繰返し荷重一定（繰返し応力比 $SR = \sigma_d / (2\sigma_o')$ ） ≈ 0.13 で試験を実施した。Z-10, G-5, W-1及び豊浦標準砂については、SRを変えて繰返し強度曲線を求めた。なお、噴砂試料は採取量が少ないうえに繰返しを使用した。

4. 繰返し三軸試験結果⁹⁾

図-4に軸差応力、軸ひずみ、間隙水圧の時刻歴の一例を示す。(a)は豊浦標準砂の(b)は細粒分の比較的多いG-5の時刻歴を示した。豊浦標準砂では、間隙水圧比 $(\Delta u / \sigma_o')$ が0.5程度になると間隙水圧は一気に拘束圧に近づき、ひずみ振幅も急増する。一方、噴砂はすべてについて、残留間隙水圧上昇は拘束圧に近づくまで単調に増加する傾向にあり、ひずみ振幅も豊浦標準砂ほど急増しない。そこで、間隙水圧の発生特性を明瞭にするために、 $(\Delta u / \sigma_o')$ と正規化繰返し回数比 N_c / N_{cL} との関係を整理した。ここで、 N_c は繰返し回数、 N_{cL} は両振幅ひずみ $DA=5\%$ に達するときの繰返し回数である。SR=0.13の場合の結果を図-5に示す。この図より、 $(\Delta u / \sigma_o')$ が0.5から1に上昇するのに要する N_c / N_{cL} は、豊浦砂では0.1に満たないのに対し、噴砂では0.13~0.30であるが、噴砂もまた液状化しやすい砂の特徴を表わしているといえる。

図-6に N_{cL} とSRとの関係を示した。図中に示した斜線の範囲は、豊浦標準砂の一斉試験¹⁰⁾より得られたものであるが、筆者らの試験結果が低めの液状化強度を示していることがわかる。 N_{cL} の小さい領域では、噴砂の液状化強度は豊浦標準砂に比べて大きいものの、 $N_{cL}=20$ に対する液状化強度は、豊浦標準砂がSR=0.114であるのに対して噴砂がSR=0.114~0.124であり、噴砂は豊浦標準砂とほぼ同程度に液状化しやすいことがわかる。

5. 既往の研究結果との比較^{9),11)}

異なる3つのSRで載荷したZ-10, G-5, W-1の各試料の強度曲線は、互いにほぼ平行であるので、1つのSRでしか載荷していないP-6, Z-9, W-3の試料についても、そのSRで N_{cL} が最も近い試料の強度曲線に平行な曲線を引いて、 $N_{cL}=20$ 及び30に対する液状化強度を読みとった。

(1) 細粒含有率と液状化強度

PFと液状化強度($N_{cL}=20$ に対するSR)の関係を図-7に示した。この図は、古関ら¹²⁾が行なった鉱さいとベントナイトまたはカオリナイトを混合した人工的な試料について示した図に、筆者らの噴砂の試験結果をプロットしたものである。PFが3~93%と大きく異なる試料の液状化強度にはほとんど差がなく、古関らと同様にPFと液状化強度との相関が低いことがわかる。

(2) 粘土分と液状化強度

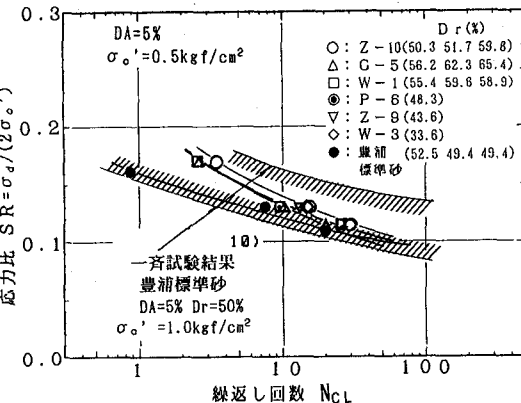


図-6 液状化試験結果

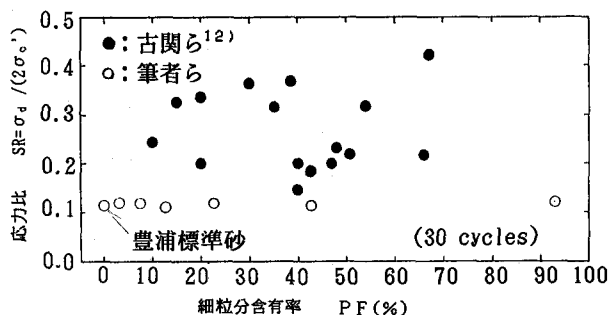


図-7 細粒含有率と液状化強度の関係

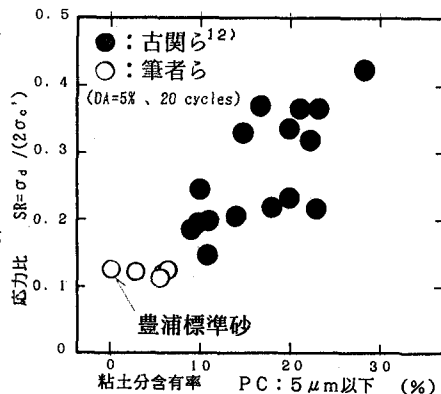


図-8 粘土含有率(5μm以下)と液状化強度との関係¹¹⁾

次にPCや塑性指数IPと液状化強度の関係を既往の研究結果と比較する。図-9及び図-10にそれらの関係を示す。いずれも、古関ら¹²⁾によるものである。この図に今回の噴砂の結果をプロットした。PFが液状化強度の直接的な影響要因とならなかったのに対し、PCやIPについては、試料の種類が異なるにもかかわらず、液状化強度と相関が高いという既往の研究結果と調和的であるといえる。

(3) 平均粒径と液状化強度

今回の噴砂は、また、① D_{50} が小さい②PFの割にPCが比較的少ない③IPが小さく低塑性である、という特徴もある。これらの特徴をふまえて、非粘着性の土として、 D_{50} と液状化に対する強度の関係を既往の研究結果と比較した。図-8に $D_r=50\%$ の場合の D_{50} と $N_{cl}=30$ に対する液状化強度SRとの関係を示す。筆者らの試験結果は低いSRを示すものの、Lee-FittonやSeed-Idrissの結果¹³⁾にみられる傾向とほぼ同様の傾向を示しているといえる。すなわち、今回の地震における噴砂は、その平均粒径はもっとも液状化強度の低い粒径にあたり、シルトにも分類されるような細粒土ではあるが、きわめて低塑性で非粘着性の粒状体の土であったために、今回の地震において多くの液状化を起こしたとみることができる。

6. 結論

1987年千葉県東方沖地震において、特に、東京湾の海岸埋立地で実際に発生した噴砂を用いて三軸試験を実施し、既往の研究結果との比較検討をしたところ、次のことがわかった。

- (1) 噴砂は、豊浦標準砂と比べわずかに液状化強度特性が異なるが、ほぼ同程度に液状化しやすい。
- (2) 細粒含有率は、噴砂についても液状化強度の直接的な影響要因とならない。
- (3) 粘土含有率や塑性指数については、試料の種類が異なるにもかかわらず、液状化強度と相関が高いという既往の研究結果と調和的である。
- (4) 噴砂の平均粒径と液状化強度の関係は、非粘着性試料を用いた既往の研究結果と同様の傾向を示す。
- (5) 以上のことから、粘土含有率が少なく低塑性のシルトは、非粘着性の砂質土と同様かもしくはそれ以上に液状化しやすいといえる。このことが、今回の地震において東京湾の海岸埋立地で多く液状化が発生した要因の一つと考えられる。

参考文献

- 1) 森, 滝本, 長谷川: 1987年12月17日千葉県東方沖地震における液状化調査, 第23回土質工学研究発表会, pp943~946, 1988. 6
- 2) 森, 滝本, 長谷川: 1987年12月17日千葉県東方沖地震における液状化による噴砂の粒度特性, 土木学会第43回年講, pp458~459, 1988. 10
- 3) 森, 池田, 滝本, 長谷川: 1988年千葉県東方沖地震で生じた噴砂のコンシステンシー特性, 第24回土質工学研究発表会, pp267~270, 1989. 6
- 4) 滝本, 森, 長谷川, 上野: 1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の粒子形状の観察, 第24回土質工学研究発表会, pp265~266, 1989. 6
- 5) 栗林, 龍岡, 吉田: 明治以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所彙報第30号, 1974. 12
- 6) 土岐他: 委員会報告I, 土の非排水繰返し試験に関するシキゾクム, pp1~35, 土質工学会, 1988. 12
- 7) 安田, 陶野, 森本他: 千葉県東方沖地震における埋立地の液状化発生特性, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシキゾクム, pp151~158, 土質工学会, 1989. 1
- 8) 長谷川, 境野, 森, 沼田, 太田: 1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の液状化特性(その1), 土木学会第44回年講, 1989. 10
- 9) 森, 長谷川: 細粒含有率の異なる噴砂の液状化特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1989. 10
- 10) 龍岡: 委員会報告II, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシキゾクム, pp7~22, 土質工学会, 1984. 12
- 11) 森, 境野, 沼田, 長谷川, 太田: 1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の液状化特性(その2), 土木学会第44回年講, 1989. 10
- 12) 古関, 石原, 藤井: 細粒分を含む砂の三軸液状化試験, 第21回土質工学研究発表会, pp595~596, 1986. 6
- 13) 安田: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版

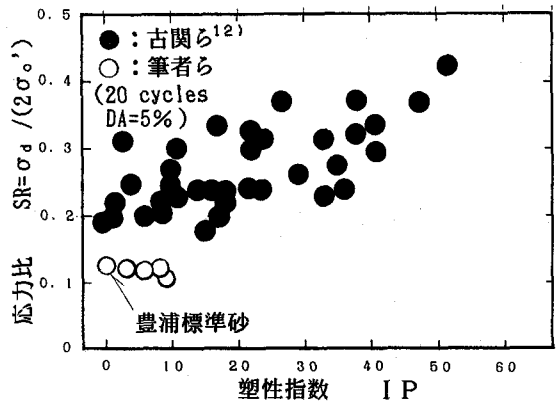


図-9 塑性指数と液状化強度との関係

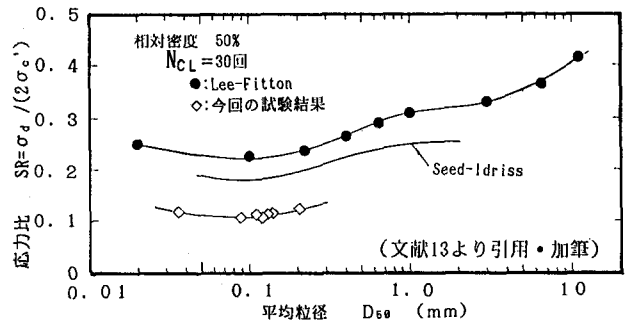


図-10 土の平均粒径と30回の繰返しで液状化に必要な応力比