

噴砂の粒度組成

沼田 淳紀¹・森 伸一郎²

¹正会員 工修 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関町木間ヶ瀬 5472)

E-mail:atsunori_numata@tobishima.co.jp

²フェロー会員 博士(工学) 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

液状化によって生じた噴砂は、その発生原理から液状化した土層の情報を多く保持し、しかも、採取が容易であるので数多くの試料の分析が可能であり、採取方法などに注意すれば、液状化しやすい粒度組成を推定するための大きな手掛かりになると考えられる。このような理由から、噴砂を数多く収集しその粒度組成について分析を行った。対象とした噴砂は、近年発生した 13 地震の液状化地点より採取されたもので、合計 823 試料である。本論文では、噴砂の採取地点と粒度組成を示し、海岸埋立地に代表される若齢な地盤と沖積地盤に代表される地盤で採取された噴砂の違い、噴砂の粒度組成の特徴および範囲とその工学的意味を明らかにし、液状化し得る粒度組成の細粒側の下限値を見出した。

Key Words: earthquake, erupted sand, fines, grain size, grain size distribution, liquefaction, sand, sand boil, silt, reclaimed land

1. はじめに

本論文は、近年の液状化が生じた 13 地震で採取された噴砂 823 試料を用いて、実際の液状化で生じた噴砂の粒度組成の特徴を明らかにしたものである。

本論文で噴砂とは、地震により液状化し泥水状になった土が地盤内から噴出し地表に堆積したものと定義する。このような土には、細粒なシルトや粗粒な礫も含まれるが、慣例により統一的に噴砂と呼ぶこととする。

土の物理的性質と液状化特性の関係を明らかにすることは、地盤の液状化の可能性を知る上で基本的かつ重要なことの一つであり、今までにも、地震被害調査や要素試験などの各種実験が数多く実施され、設計にも反映されてきた^{1, 2, 3}。一般的に、粒度組成が粗くなれば排水性が増すので、また、逆に細くなれば粘着力が増すので液状化しにくくなると考えられている。このため、土の物理的性質の中でも粒度組成は、液状化しやすい土質を知る上で重要な指標である。

このような観点から渡辺⁴は、1964 年新潟地震直後に、パイプフローテーション工法に有効な粒度組成の範囲を液状化しやすい粒度組成の範囲として示した。後に土田⁵は、渡辺のデータに加え振動台実験結果と噴砂の粒度組成を用いて液状化しやすい土の粒度組成の範囲を示した。設計で用いることを前提とした粒度組成の範囲を決定するに当たり、細粒側は主に噴砂のデータが用いられ、粗粒側は主に振動台実験結果が用いられている。こ

の範囲は、現在の港湾基準⁶へも反映されている。また、米国の橋梁の耐震設計基準である ATC-32⁷でも、液状化しやすい粒度組成として、港湾基準とはほぼ同様なものが示されている。しかしながら、その後多くの地震が生じ、液状化も数多く発生しているにもかかわらず、液状化研究の黎明期に求められたこの液状化しやすい土の粒度組成の範囲の検証や見直しが行われてきたとはいえない。

繰返し非排水三軸試験などによる要素試験によっても、粒度組成と液状化強度について研究が実施されてきた。Lee and Fitton⁸は、主に均等粒径の調整された土を用いて 50%粒径と液状化強度の関係を示した。古閑⁹は、砂、ベントナイト、鈳滓などを用いて細粒分含有率と液状化強度の関係は相関が低いこと、森ら¹⁰は、液状化で生じた噴砂を用いて、粘土分含有率が 10%以下であるとき細粒分含有率が約 0~100%の範囲で異なっても液状化強度には差が認められないことを示した。また、桑野ら¹¹、黄ら¹²、佐藤ら¹³は、砂にシルトや粘土を混合した人工的な試料を用いて、細粒分含有率がある値のときに液状化強度が最低値を示すことを明らかにした。

実際に液状化した地盤を調査し、その液状化した土層の粒度組成を調べれば直接的に液状化した土の粒度組成を求めることができる。しかし、地震後、噴砂の状況などから平面的に液状化地点を特定できたとしても、ボーリング調査で地盤内の液状化の状況を知ることは難しく、推定の域を脱しない。地盤内の液状化の状況を知る方法

としてトレンチ調査が有効である。地震により地盤が液状化すると、液状化した土が泥水状となり亀裂などを伝わり地表に噴出する。この痕跡は地震後にも残るので、トレンチ調査は、地震後に地表より亀裂を辿り、噴出した土の供給源を探ることによって液状化した地層の状況を直接観察するというものである^{14,15}。しかしながら、この調査は費用も時間もかかるので数多く実施するのは事実上不可能である。

そこで、筆者らは容易に採取できる噴砂に着目して調査・研究を進めてきた。噴砂は、その発生機構から、実際の地震で液状化した土が主体であり、液状化した土の性質を知る上できわめて有効な情報源である。しかし、噴砂は、泥水状となって噴出孔内を上向きに流動する過程および噴砂丘の斜面を流下する過程で分級が起こると考えられるので、噴砂と液状化した層の粒度組成が異なるという意見もある¹⁶。一方、噴砂は液状化層の粒度組成と一致したと報告されている事例研究^{17,18}もある。このように、噴砂と液状化した土の粒度組成の一致性については十分に研究されていない。したがって、現時点では、噴砂によって求められた粒度組成が直接そのまま液状化しやすい土の粒度組成を示すとは断言できない。しかし、今後どのような条件で粒度組成が一致しないのかが明らかになれば、噴砂から求められた粒度組成が有効に活用されると考えられる。また、噴砂は、実際に液状化した多数の地点からの採取が可能であり、粒度組成などの物理的特性の広範な実現象を捉えるのにきわめて有効な方法と考えられる。

このような立場から、筆者らは1987年千葉県東方沖地震以降、地震後に現地調査を行い、液状化の状況を綿密に観察・記録するとともに、数多くの地点から液状化で生じた噴砂を採取し分析してきた。本論文では、これまでに採取してきた噴砂の採取地点と粒度組成を各地震ごとに示すとともに、分析結果をまとめ噴砂の粒度組成の特徴を明らかにし、さらに、土田^{9,10}による液状化しやすい土の粒度組成の範囲に対応する噴砂における粒度組成の範囲とそれぞれの限界値の工学的意味を示し、液状化し得る粒度組成の細粒側下限値を見出した。

2. 噴砂の採取方法

本論文で示す粒度組成は、あくまでも噴砂の粒度組成であり、噴砂の粒度組成は液状化した土の粒度組成の傍証に過ぎない。しかしながら、液状化した土の粒度組成を知るのが最終的な目的であること、その過程では、両者がどのように異なるかと言った定量的な知見が必要になることを踏まえると、両者の一致性を念頭に置く必要がある。この点で、噴砂の採取方法は重要な問題であり、

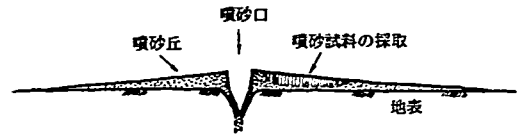


図-1 噴砂丘の構造と噴砂の試料採取位置¹⁹

採取方法次第では噴砂と液状化した土との関連性を全く見出せなくなると考えられる。そこでここでは、噴砂の採取方法と、その背景となった現在までの知見の概要について示す。

図-1に、噴砂丘の構造と噴砂試料の採取位置を示す。噴砂は地面の亀裂などの開口部を貫いて地表に噴出するが、その噴出する部分もしくは噴出した部分の痕跡を噴砂口、および、噴砂口につながる噴出した土で満たされた亀裂を砂脈と呼ぶ。噴砂口より泥水状となって噴出した土と水は、周囲に拡散する過程で土粒子が堆積して、噴砂口に近いところでは厚く、遠ざかるにつれて薄い丘陵状の構造を持つ。このことからこれを噴砂丘と呼ぶ。噴砂丘の形成過程は、液状化のため泥水状となった土と水が地表の開口部から勢い良く噴出することから始まり、その勢いが低下して、噴砂丘の表面を懸濁水が緩やかに流下し終わってゆく^{19,20}。それぞれの過程と位置で、堆積する粒径が異なると考えられるので、噴砂を採取する方法と箇所は重要な問題である。

そこで噴砂は、原則として図-1に示すように、噴砂口に近い噴砂丘中腹部より採取した¹⁹。噴砂丘の表面には内部の土より明らかに細粒な土が堆積している場合が多いので、原則として噴砂丘の表面を取り除いてから試料を採取した。また、地表面の土が混入しないように十分注意した。

1987年千葉県東方沖地震の液状化でできた噴砂丘各部における粒度組成の調査では、噴砂口内の土は噴砂丘に比べかなり細粒である場合があること、噴砂丘各部ではほとんど差異が認められないことがわかっている²⁰。また、粒度配合の良いまき土を用いた簡易振動実験では、噴砂丘の外周部や噴砂口内部より採取した試料は細粒分を多く含んでいるが、図-1に示したような範囲で試料を採取した場合には、液状化層と粒度組成が一致することが確認されている²⁰。また、液状化跡のトレンチ調査結果から、砂脈内の土の粒度組成は、砂脈内では土粒子が分級されるので、噴砂や液状化した土の粒度組成とは関係がないことがわかっている¹⁹。さらに、噴砂の粒度組成が液状化層の粒度組成と一致したと報告されている事例研究^{17,18}もある。

なお、噴砂口内部に堆積した噴砂の表面部分や噴砂丘外縁部の窪地などに堆積した表面部分、あるいは、噴砂丘の極表面部分や噴砂丘が丘のように形成されず薄く堆

表-1 液状化調査対象地震の諸元と噴砂採取地点数

地震名	発生年月日 (現地時間)	マグニチュード	震源位置			最大震度階 ○内は気象庁旧震度階 との対応値	諸元発表機関	液状化限界 震央距離 R(km) ^{注5)}	噴砂試料採 取地点数
			緯度 deg	経度 deg	深さ km				
千葉県東方沖地震	1987. 12. 17	Mj=6.7	34.35N	140.48E	58	V ^{注1)}	気象庁	36	89
ロマ・ブリエタ地震	1989. 10. 17	Ms=7.1	37.04N	121.88W	19	VI ^{注2)} (V)	USGS	62	42
フィリピン・ソロン島地震	1990. 7. 16	Ms=7.8	15.66N	121.23E	25	VII~IX ^{注3)} (V~VII)	USGS(震源帯はフィリピン火山地震研究所)	195	9
鋼路沖地震	1993. 1. 15	Mj=7.8	42.85N	144.38E	107	V ^{注1)}	気象庁	255	109
能登半島沖地震	1993. 2. 7	Mj=5.6	37.65N	137.30E	25	V ^{注1)}	気象庁	30	48
北海道南西沖地震	1993. 7. 12	Mj=7.8	42.78N	139.20E	58	V ^{注1)}	気象庁	255	140
ノースリッジ地震	1994. 1. 17	Ms=6.7	34.21N	118.54W	19	IX ^{注2)} (VI)	USGS	30	12
北海道東方沖地震	1994. 10. 4	Mj=8.1	43.37N	147.67E	30	VI ^{注1)}	気象庁	430	121
三陸はるか沖地震	1994. 12. 28	Mj=7.5	40.43N	143.75E	0	VI ^{注1)}	気象庁	150	7
兵庫県南部地震	1995. 1. 17	Mj=7.2	34.61N	135.00E	14	VII ^{注1)}	気象庁	88	142
鹿児島県北西部地震	1997. 3. 26	Mj=6.3	31.98N	130.37E	8	5+	気象庁	18	17
	1997. 5. 13	Mj=6.2	31.95N	130.30E	8	6-	気象庁	15	
台湾集塊大地震	1999. 9. 21	M _L =7.3	23.85N	120.81E	7	VI ^{注4)} (VI~VII)	台湾中央気象局	140	13
鳥取県西部地震	2000. 10. 6	Mj=7.3	35.4 N	133.4 E	11	6+	気象庁	105	74

Mj: 気象庁マグニチュード
Ms: 表面波マグニチュード
M_L: ローカルマグニチュード

注1) 旧気象庁震度階
注2) 修正メリカリ震度階
注3) 改正ロッシフォレル震度階
注4) 台湾の震度階
注5) 気象庁マグニチュードに換算して計算。

積した部分より採取した噴砂を粒度分析すると、シルトや粘土分を多く含む結果を得ることが多い。したがって、噴砂の中では特異と考えられるこのような部分より採取された試料は、本論文の目的とは異なるので、ここでは検討対象から外した。ただし、一般には、このような特異な位置から採取されたと推察される噴砂の粒度組成も、噴砂の代表的値としてしばしば報告されているので注意する必要がある。

3. 各地震における噴砂の試料採取地点と粒度組成

本章では、液状化が発生した地震における液状化調査の概要を述べ、噴砂の採取地点と噴砂の粒度組成を示し、各地震の調査結果から明らかになったことをまとめる。

噴砂の特徴を把握するために、現地調査においては、できる限り液状化の生じた全地点を確認するとともに、そこで確認された噴砂を採取するように努めた。この結果、後述する13地震において、1994年三陸はるか沖地震を除き、液状化地点のほぼ全域より噴砂を採取できた。

(1) 調査概要

表-1に、噴砂を採取した液状化調査対象13地震の諸元と採取した地点数を示す。本論文では、ここに示す823試料のデータを用いている。実際に採取した試料はさらに多いが、土質試験を実施していないものや、本論文の主旨から外れるので除いたものもある。また、採取地点が不明なものもデータからは外した。以降の検討では、総数が823とならないものがあるが、これは、試料によっては対象とする項目のデータが求められていない場合があるためである。

噴砂の塑性指数は、基本的には全ての試料がNPであると考えて良い。ただし、シルトの卓越した噴砂について、あえてかなり丁寧に塑性限界を求めたところ、塑性指数は10以下であった¹⁰⁾。したがって、噴砂はいずれも非塑性または低塑性である。

本章における各地震の噴砂採取地点の図においては、細粒分含有率 Pf (粒径 0.075mm 以下含有率) が 50% 以上のシルトに分類される噴砂を採取した地点を○で、50% 未満の地点を●で示した。また、噴砂の採取は行っていないが噴砂が確認されている地点も△で併記した。さらに、図中には、栗林ら²⁰⁾が示した液状化の生じる限界震央距離を示した。限界震央距離は式(1)で示される。ここで、Mは気象庁マグニチュードであるが、その他のマグニチュードが示されている場合は、宇津²¹⁾による各種マグニチュード間の平均的な関係図を用いて気象庁マグニチュードに換算して限界震央距離を求めた。

$$\log_{10} R = 0.77M - 3.6 \quad (1)$$

ここで、R: 液状化限界震央距離(km)

M: 気象庁マグニチュード

粒度組成は、海岸埋立地で生じた噴砂とそれ以外の地盤で生じた噴砂を分けて示した。海岸埋立地には人工島や干拓地も含まれる、それ以外の地点には自然地盤、旧河道、宅地などの造成地、埋戻し地盤、砂鉄などの採取跡地、砂浜などが含まれる。粒度組成の図には、比較のために港湾基準に示される均等係数 U_c が 35 未満の場合の「特に液状化の可能性あり」(以降、範囲 A と呼ぶ)と「液状化の可能性あり」(以降、範囲 B と呼ぶ)のそれぞれの範囲を示した(図-3参照)。なお、港湾基準では、液状化しやすい粒度組成の範囲を均等係数の大きい

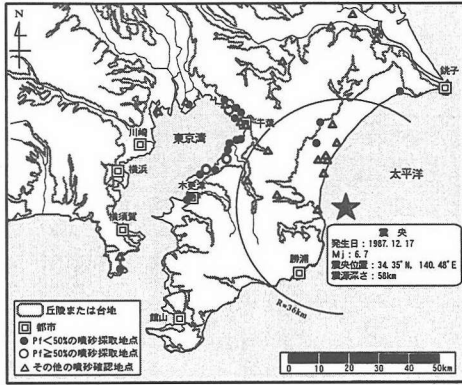
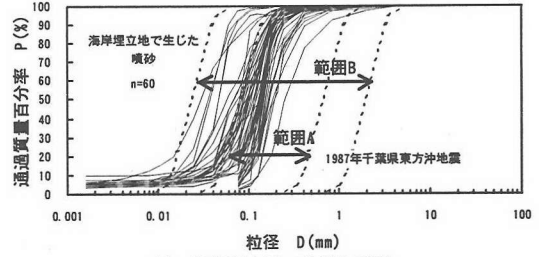
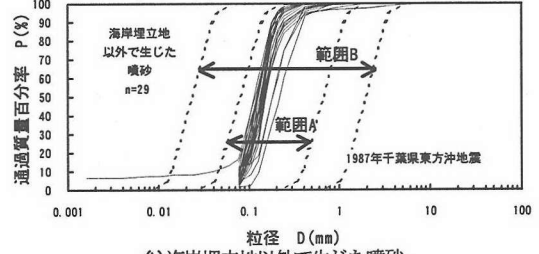


図-2 1987年千葉県東方沖地震における噴砂採取地点²⁰⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂

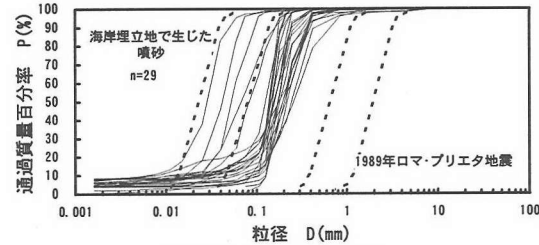


(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

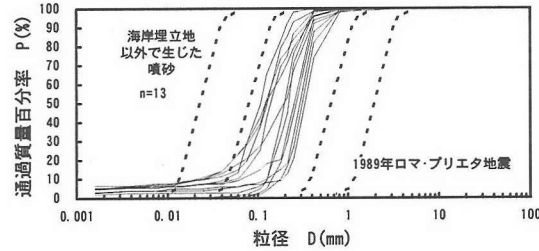
図-3 1987年千葉県東方沖地震で生じた噴砂の粒度組成²⁰⁾



図-4 1989年ロム・ブリエタ地震における噴砂採取地点²⁰⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-5 1989年ロム・ブリエタ地震で生じた噴砂の粒度組成²⁰⁾

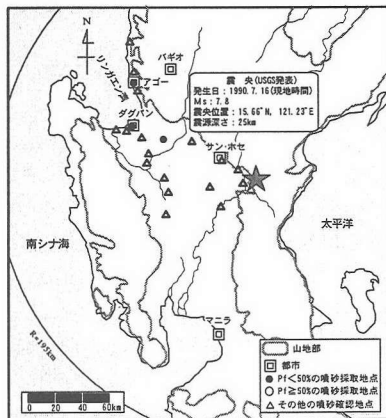
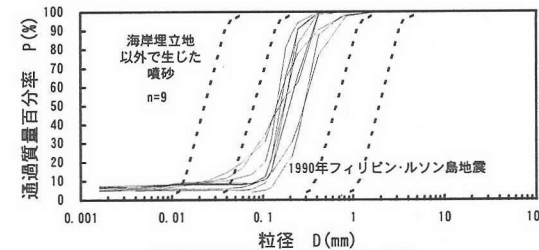


図-6 1990年フィリピン・ルソン島地震における噴砂採取地点²⁰⁾



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-7 1990年フィリピン・ルソン島地震で生じた噴砂の粒度組成²⁰⁾

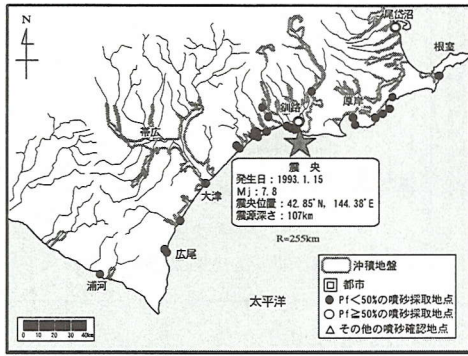
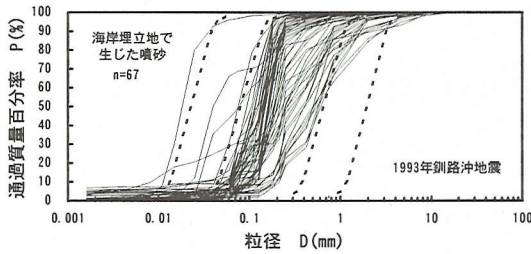
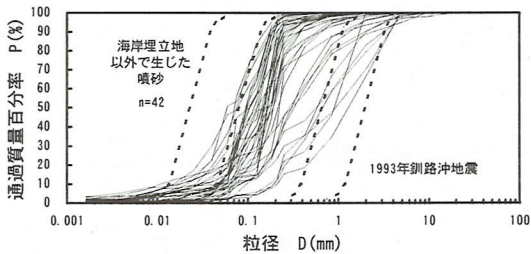


図-8 1993年釧路沖地震における噴砂採取地点¹⁷⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-9 1993年釧路沖地震で生じた噴砂の粒度組成¹⁷⁾

場合と均等係数の小さい場合に分けており、両者の境界を均等係数35としている。

一般的に、細粒分を多く含む土ほど液状化強度が高いと考えられていること、震央距離が小さいほど地震動強さが大きくなることを考え合わせると、細粒分が多い噴砂は相対的に震央距離が小さい範囲で分布することが予想される。そこで、そのような観点からも記述する。

(2) 1987年千葉県東方沖地震²⁰⁾ (図-2, 図-3)

この地震では、限界震央距離を越えた東京湾沿いの海岸埋立地で数多くの液状化が発生した。図-3より、海岸埋立地以外で生じた噴砂は範囲Aに入るが、海岸埋立地で生じた噴砂の中にはそれを越えて細粒側におよぶものがあることがわかる。このような細粒な噴砂の発生地点は、特に震央付近に分布している訳ではなく、その他の噴砂と同様に東京湾に面する海岸埋立地に分布している。



写真-1 1993年釧路沖地震で採取した最も細粒な噴砂の顕微鏡写真

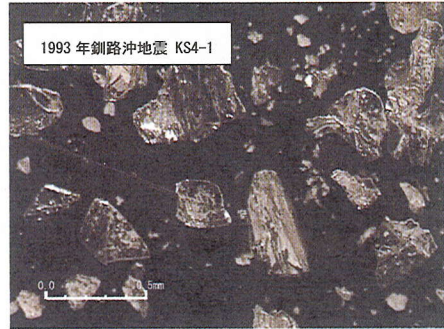


写真-2 1993年釧路沖地震において河川堤防で採取した噴砂の顕微鏡写真



写真-3 1997年鹿児島県北西部地震において海岸埋立地以外で生じた噴砂の内細粒側の噴砂の顕微鏡写真

(3) 1989年ロマ・プリエタ地震²⁰⁾ (図-4, 図-5)

この地震も1987年千葉県東方沖地震同様に、限界震央距離を越えたサンフランシスコ湾北部の海岸埋立地で多くの液状化が生じた。また、アラメダの海岸埋立地ではシルトに分類される細粒な噴砂も確認された。なお、アラメダは他と比べて特に震央距離が小さいわけではない。

(4) 1990年フィリピン・ルソン島地震²⁰⁾ (図-6, 図-7)

この地震では、ダグバンをはじめとするリングエン湾岸地方、沖積平野部の広い範囲で液状化が生じ、リング

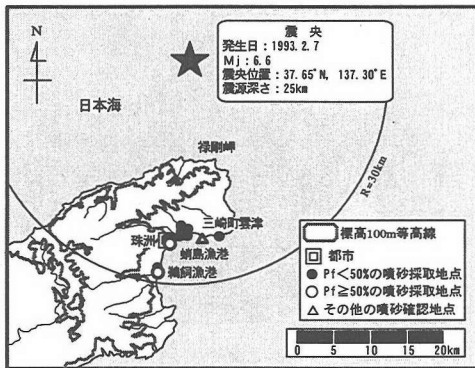


図-10 1993年能登半島沖地震における噴砂採取地点⁷⁾

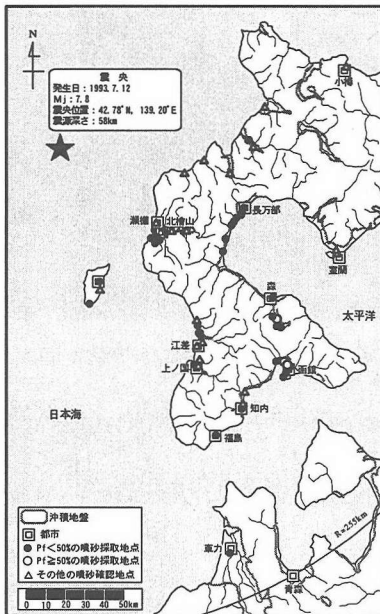
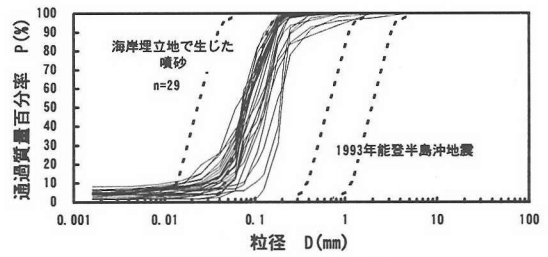


図-12 1993年北海道南西沖地震における噴砂採取地点¹⁰⁾

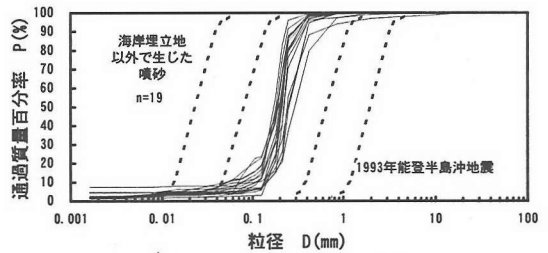
エン湾岸の一部の低地では集落全体が水没した。噴砂の粒度組成は、いずれも範囲Aに入っていた。

(5) 1993年釧路沖地震⁷⁾ (図-8, 図-9)

この地震では、限界震央距離が255kmとかなり大きい割に液状化発生地点の広がりが小さかった。この原因の一つとして、地震発生時が冬季であり凍土が地表面に存在していたことがあげられている。この地震においても釧路港始め多くの海岸埋立地で液状化が生じた。内陸では、宅地造成地において火山灰質土の噴砂が確認され、その他の埋戻土や盛土材料と考えられる噴砂も確認された。図-9に示す最も細粒な噴砂が確認された地点は、別海町の尾岱沼漁港の下水処理施設敷地内にあり、噴砂は、写真-1に示すように火山ガラスを含み、埋め立てに用いた火山灰であった。この粒度組成が、本論文で示す粒度

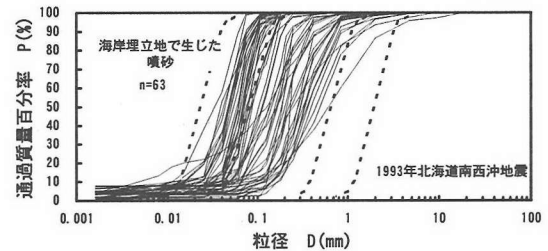


(a) 海岸埋立地で生じた噴砂

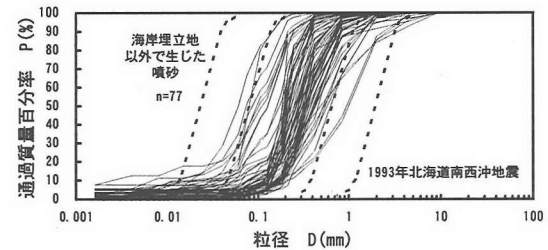


(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-11 1993年能登半島沖地震で生じた噴砂の粒度組成⁷⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-13 1993年北海道南西沖地震で生じた噴砂の粒度組成¹⁰⁾

組成の下限値である。また、(b)の海岸埋立地以外で生じた噴砂は、ほとんどが範囲Aの下限値よりも粗粒側である。4試料が、細粒側の範囲Aに対応する50%粒径0.08mmよりも細粒側になっているが、このうち3試料は、河川堤防または盛土造成地で生じた噴砂であり、海岸埋立地と同様に人工改変された若齢な地盤だと言える。写真-2に、このうち河川堤防で採取した噴砂の顕微鏡写真を示す。火山ガラスが卓越し火山灰であることがわかる。

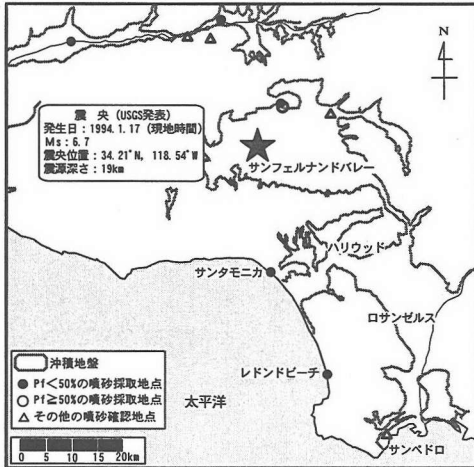
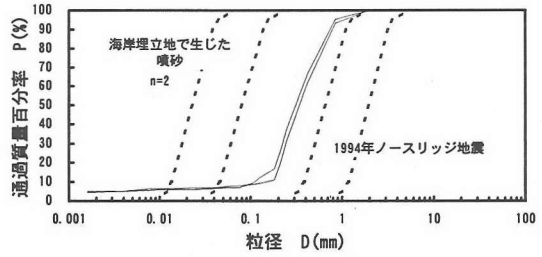
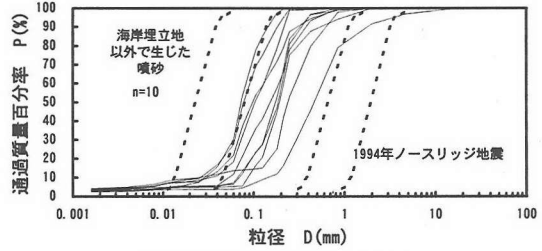


図-14 1994年ノースリッジ地震における噴砂採取地点³⁰⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-15 1994年ノースリッジ地震で生じた噴砂の粒度組成³⁰⁾

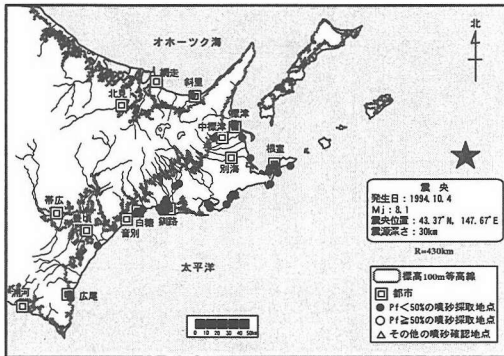
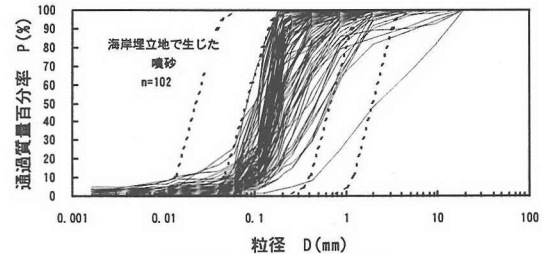
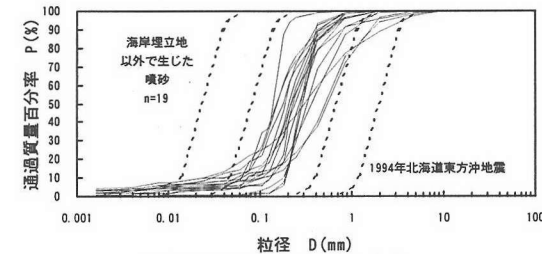


図-16 1994年北海道東方沖地震における噴砂採取地点³⁰⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-17 1994年北海道東方沖地震で生じた噴砂の粒度組成³⁰⁾

(6) 1993年能登半島沖地震²⁷⁾ (図-10, 図-11)

この地震の噴砂確認地点は、海岸埋立地、自然地盤、埋戻し地盤である。特に、海岸埋立地の噴砂は規模が大きく、液状化しやすい地盤であったと考えられる。粒度組成は、海岸埋立地で生じた噴砂が港湾基準に示される範囲Aの下限値付近に集中し、その他の地点の噴砂は、範囲Aの中央付近に位置することがわかる。

(7) 1993年北海道南西沖地震^{18), 28)} (図-12, 図-13)

この地震では、限界震央距離とほぼ一致する範囲の、海岸埋立地、旧河道、砂鉄採取跡地などで噴砂が確認され、噴砂はシルト、火山灰質土、火砕堆積物、スコリア、礫などであった。特に、震央距離約170kmの函館では、シルトが卓越した噴砂が多く確認された。その中でも、函館市浅野町北埠頭の岸壁と背後地は、1965年に浚渫埋立により造成され、1968年十勝沖地震では最も被害が大きかった地点である²⁹⁾。その当てもシルトが卓越した噴砂が確認されている³⁰⁾。なお、港湾基準の液状化の生じやすい粒度組成の下限値は、1968年十勝沖地震の際

に液状化により発生した噴砂を参考に決定されている⁹⁾。海岸埋立地以外で生じた噴砂は、大半が範囲Aの下限値より粗粒である。3試料が細粒側の範囲Aを越えて50%粒径が0.08mmより細粒側にあるが、このうち1つは森町の造成されたグラウンドで確認されたものであり、赤褐色の火山灰が多い土で埋め立てられた若齢地盤である。これが、3試料の中では最も細粒である。

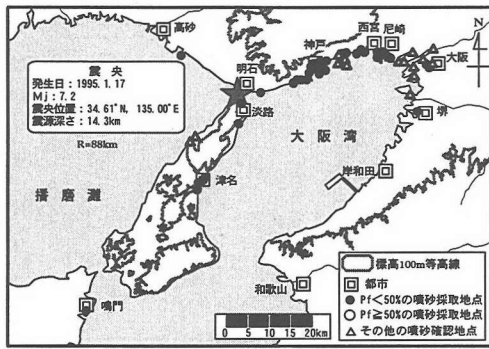
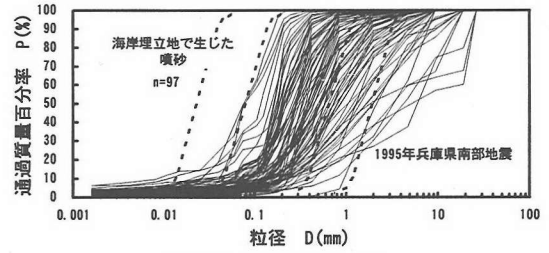
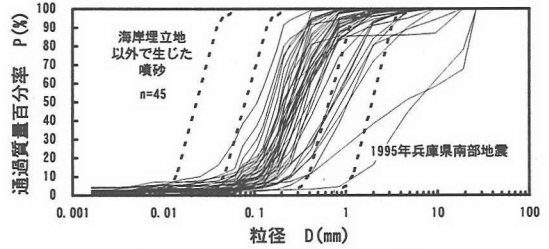


図-18 1995年兵庫県南部地震における噴砂採取地点³³⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-19 1995年兵庫県南部地震で生じた噴砂の粒度組成³³⁾

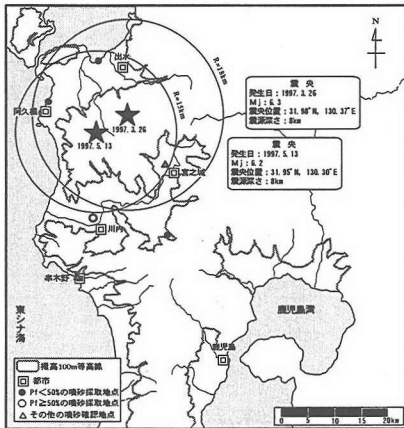


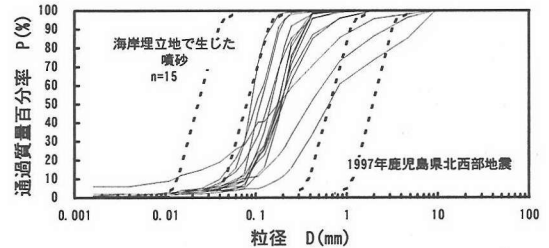
図-20 1997年鹿児島県北部地震における噴砂採取地点³⁴⁾

(8) 1994年ノースリッジ地震³⁵⁾ (図-14, 図-15)

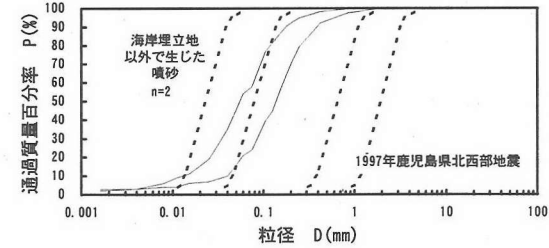
この地震では大きな地震動に起因する被害が多かったが、海岸埋立地、旧河道、使用されなくなったダムの上流側堆砂地、砂浜などで液状化が発生した。液状化による被害はいずれも軽微であったが、限界震央距離より遠い、レドンドビーチとサンペドロでの海岸埋立地における被害が相対的に大きかった。噴砂の粒度組成は、いずれもほぼ範囲A内であった。2試料が細粒側の範囲Aを越え50%粒径が0.08mmより細粒側であるが、この2つは当時使用されていないフィルダムであるサンフェルナンドダムの上流側法尻付近で採取されたものであり、ダム上流側に堆砂した若齢な地盤が液状化したものと推測される。

(9) 1994年北海道東方沖地震³⁶⁾ (図-16, 図-17)

この地震では、1993年釧路沖地震で液状化した多くの地点で再液状化現象が生じた。噴砂の確認された最も震央距離が大きな地点は広尾の380kmであり、限界震央距離430kmと概ね一致している。液状化地点の多くが若齢の海岸埋立地であるが、内陸部では、宅地造成地や埋戻し地盤での液状化が目立った。噴砂の粒度組成は、海岸埋立地で採取されたものが細粒であるが、その下限が港



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-21 1997年鹿児島県北部地震で生じた噴砂の粒度組成³⁴⁾

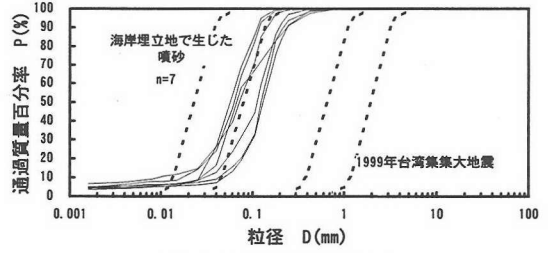
湾基準の範囲Aの下限値とほぼ一致している。

(10) 1995年兵庫県南部地震³³⁾ (図-18, 図-19)

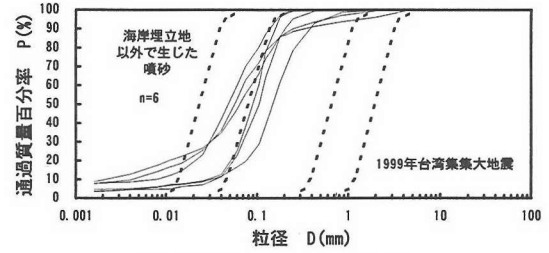
この地震では、神戸から大阪にかけての大阪湾沿いの海岸埋立地のほぼ全域にわたり液状化が生じた。神戸ポートアイランドなどの海岸埋立地では、今まで粒度配合が良いために液状化しにくいとされていたまき土が液状化し、多くの地点で噴砂が確認された。この中には、



図- 22 1999年台湾集集大地震における噴砂採取地点³⁹⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図- 23 1999年台湾集集大地震で生じた噴砂の粒度組成³⁹⁾

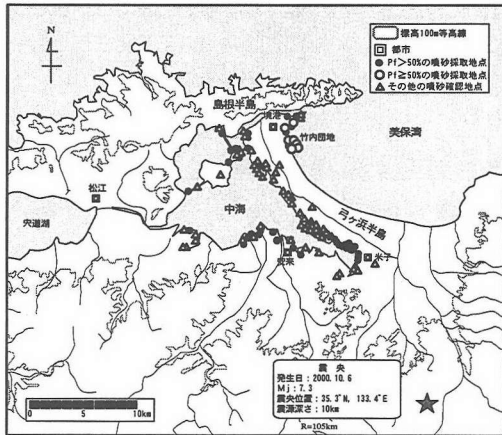
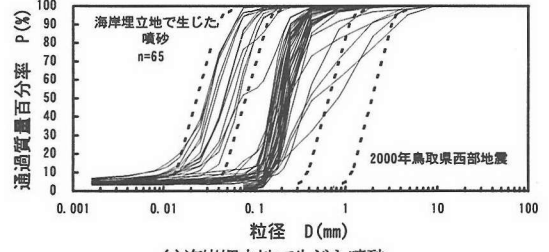
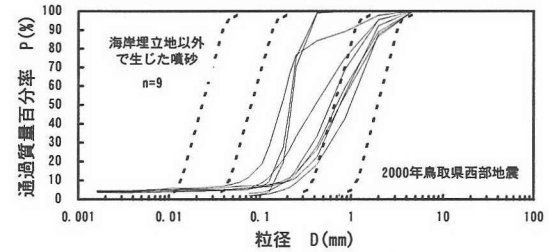


図- 24 2000年鳥取県西部地震における噴砂採取地点³⁹⁾



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図- 25 2000年鳥取県西部地震で生じた噴砂の粒度組成³⁹⁾

人頭大の粒径も確認された。噴砂の粒度組成は、その下限値が図- 19に示すように港湾基準の範囲Aの下限値と一致し、粗粒側は粒度配合が良いものも多く、図に示される港湾基準の範囲Bを越えている。ただし、港湾基準に示される均等係数が3.5以上の場合の範囲と比較すると噴砂の粒度組成は概ね上限値に近い。なお、図中の最大粒径は、JISA1204に示される粒度試験に用いられるふるい目によっており、土粒子の実寸を示していない。また、現地では大きな粒子のみが主体となるような噴砂は認められなかったため、粒度試験には、大きな粒子が散見される場合もそのような粒子は除き、主体となる部分の粒子のみを採取した。結果的に、26.5mmより大きな粒子を除いたことになる。

(11) 1997年鹿児島県北西部地震³⁹⁾ (図- 20, 図- 21)

この地震では、3月26日の地震に引き続き、5月13日には近傍で同規模の地震が発生した。噴砂は、限界震央距離を越えた地点においても確認されている。噴砂の確認された地点は、干拓地を含めた海岸埋立地と宅地造成地であり、いずれも人工改変された若齢の地盤であった。写真- 3は、海岸埋立地以外で生じた噴砂の内、細粒側の噴砂の顕微鏡写真である。川内市内の宅地造成地で採取

したものである。火山ガラスが卓越し火山灰であることがわかる。

(12) 1999年台湾集集大地震³⁰ (図-22, 図-23)

この地震では、大きな断層変位と大きな地震動に起因する被害が多かったが、液状化による被害も発生している。液状化の生じた範囲は、限界震央距離と比較すると震央北西部の限定された狭い範囲であった。噴砂の確認された地点は、海岸埋立地、河川周辺、自然地盤、埋戻し地盤である。この中でも、中寮開閉所では、山地上で噴砂が確認されたが、噴砂箇所はいずれも切り盛りを行った盛土部分や構造物基礎の埋戻し地盤であった。図-23(b)に示した海岸埋立地以外で細粒な噴砂が確認された地点は、中寮開閉所であり、前述と同様に人工改変された若齢な地盤といえる。

(13) 2000年鳥取県西部地震³⁰ (図-24, 図-25)

液状化が生じた地点は、限界震央距離が105kmであるのに対しておよそ30km圏内の中海周辺の狭い範囲であった。液状化地点は、ほとんどが干拓地を含む海岸埋立地や宅地造成地であり、若齢の人工地盤であった。弓ヶ浜半島北東部の竹内団地では、シルト分の卓越した噴砂が大量に確認された。図-25(a)に示した範囲Bの下限值に近い細粒の噴砂は、竹内団地または竹内団地に近い昭和町の海岸埋立地で採取されたものである。海岸埋立地以外で生じた噴砂は範囲Aの中央付近から上限値付近に分布している。

(14) まとめ

実際に生じた各地震における噴砂の調査結果、および、調査結果からわかった共通的な特徴を以下にまとめる。

- a) 液状化の生じる限界震央距離を越えた地点においても、多くの地震で噴砂が確認され、噴砂確認地点は、海岸埋立地、旧河道、宅地造成地、埋戻し地盤などの人工改変地が目立ち、特に、海岸埋立地が多い。
- b) 一般に、土が細粒になるほど液状化しにくくなるとされ、細粒な噴砂採取地点と震央距離に特徴がある可能性があるが、シルトの卓越した噴砂が確認された地点は、その他の噴砂が確認された地点と少なくとも震央距離において差異は認められない。
- c) 噴砂の粒度配合は、多くは均等係数10以下で均等粒径であった。その粒度配合は粗粒なものに比べ、細粒なものほど均等粒径になる傾向が認められる。
- d) 噴砂の粒度組成は、細粒分含有率が100%近いものもあるが、いずれも粘土分含有率がほぼ10%以下であり、コンシステンシーは非塑性または低塑性である。
- e) 海岸埋立地で生じた噴砂は、シルトが卓越する場合があり、港湾基準の範囲Aよりも細粒側の粒度組成も確

認され、その下限値は範囲Bの下限値に近い。

- f) 海岸埋立地以外で生じた噴砂の中にも港湾基準の範囲Aより細粒なものが認められるが、これらの大部分は宅地造成地や埋戻し地盤などの人工改変された若齢な地盤で認められたものであり、火山灰を主体とした土である場合が多い。
- g) 逆に、沖積地盤などの自然地盤では範囲Aを大幅に越えて細粒な噴砂は認められず、範囲Aを越えている場合もほぼ範囲Aの下限値に近い。
- h) 1995年兵庫県南部地震では、他の地震と比べてはるかに大きな粒径の土までも噴砂として認められた。

なお、前述のように、海岸埋立地以外でも1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震、1994年ノースリッジ地震、1997年鹿児島県北西部地震、1999年台湾集集大地震では、範囲Aを越えて細粒な噴砂がある。これらの内、埋戻し地盤などの人工改変された若齢な地盤より採取された噴砂10試料については、若齢と言った観点から同様に若齢な海岸埋立地と一緒に考えた方が良いと判断し、以降では、海岸埋立地として示すこととする。したがって、海岸埋立地は内陸部を含めた人工改変された若齢な地盤であり、海岸埋立地以外は主に沖積地盤に代表される地盤と考えて良い。

4. 海岸埋立地とそれ以外の地点で生じた噴砂の比較

各地震について、海岸埋立地とそれ以外の地点で生じた噴砂で粒度組成に違いがあることを示したが、ここでは、このような違いを全地震についてまとめる。

(1) 50%粒径

50%粒径 D_{50} は、粒度組成における平均的な粒径を表す代表的な指標であり、特に、均等係数が類似したものの同士の粒度組成を比較するには都合が良い。そこで、50%粒径を用いて、各地震の海岸埋立地とそれ以外の地点で生じた噴砂の範囲を示すとともに、両者の違いを統計的に明らかにする。

図-26に、森ら³⁰の結果に、1990年フィリピン・ルソン島地震以降の地震データを加え、各地震で生じた噴砂の50%粒径の範囲を海岸埋立地とそれ以外の地点に分けて示す。図中には、既往の調査結果より1964年新潟地震³⁰、1968年十勝沖地震³⁰、1978年宮城県沖地震³⁰、1983年日本海中部地震³⁰のデータも加えた。また、図中には目安のために港湾基準³¹に示される均等係数が $U_c < 3.5$ の場合の範囲Aも併記した。

全体的にみると、港湾基準の範囲に多くのものが入

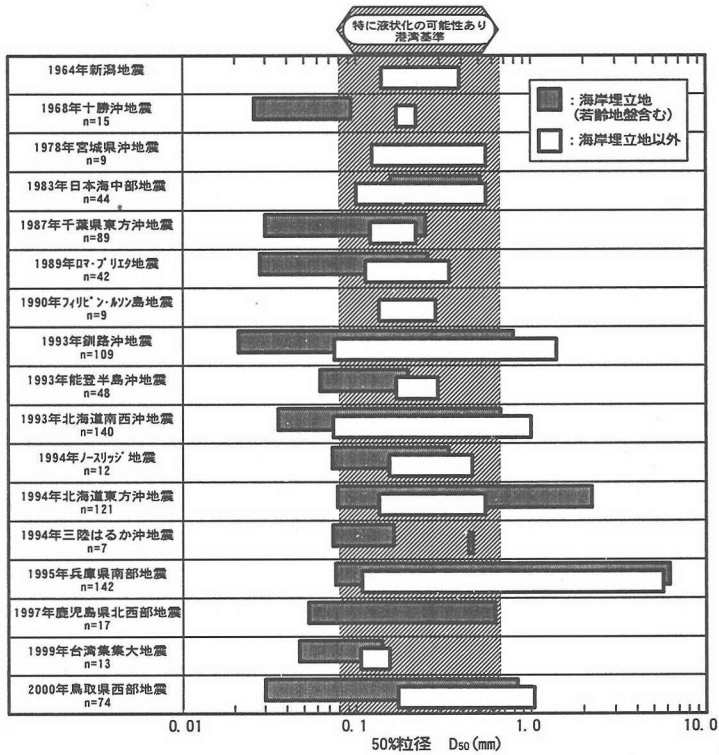


図-26 各地震で生じた噴砂の50%粒径の範囲

ているが、これより細粒側の噴砂があり、いずれも海岸埋立地で生じたものであることがわかる。海岸埋立地以外の地盤では、噴砂の粒度組成の下限値は範囲Aとほぼ同じである。

粗粒側の範囲Aの上限値を大幅に上回っているのは1995年兵庫県南部地震である。この地震では、海岸埋立地やその他の地盤といった種別に関係なく広い粒度組成の範囲で噴砂が確認されたことがわかる。

図-26は、一つでも離れた値があれば広範囲となるので、統計的な検討が必要になる。図-27は、50%粒径をφスケールで示したときの噴砂の頻度分布と、累積相対頻度分布を海岸埋立地とその他に分けて示したものである。ここで、φスケールは地学の分野で用いられるもので、式(2)で定義される。頻度分布を示すには、φスケールが便利なのでこれを用いた。

$$\phi = -\log_2 D \quad (2)$$

ここで、D: 粒径(mm)

地盤工学で使用される粒径Dとφを比較すると、表-2に示すようになる。粘土とシルトの境界であるD=0.005mmはφ=7.64、シルトと砂の境界であるD=0.075mmはφ=3.74、砂と礫の境界であるD=2mmはφ=-1となる

表-2 粒径Dとφスケールの比較表

φ	D (mm)
7.00	0.008
6.00	0.016
5.00	0.031
4.00	0.063
3.00	0.125
2.00	0.25
1.00	0.50
0.00	1.0
-1.00	2.0
-2.00	4.0
-3.00	8.0
-4.00	16.0
7.64	0.005
3.74	0.075
2.00	0.25
1.25	0.42
-1.00	2.00
-2.25	4.76

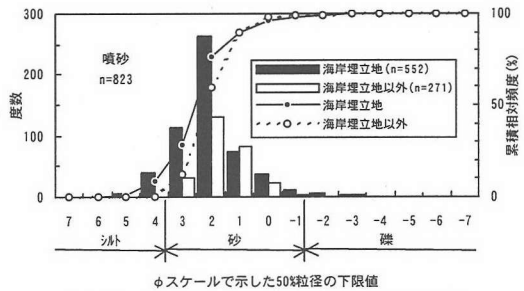
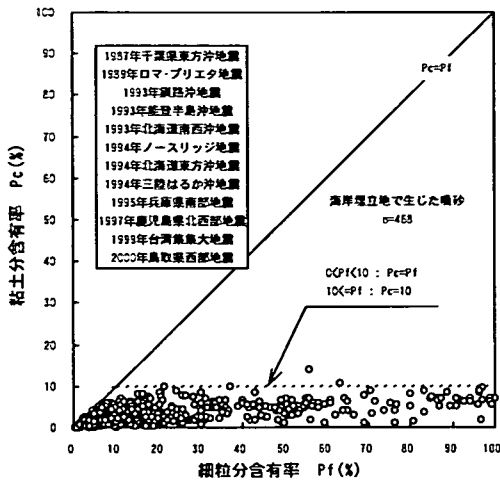
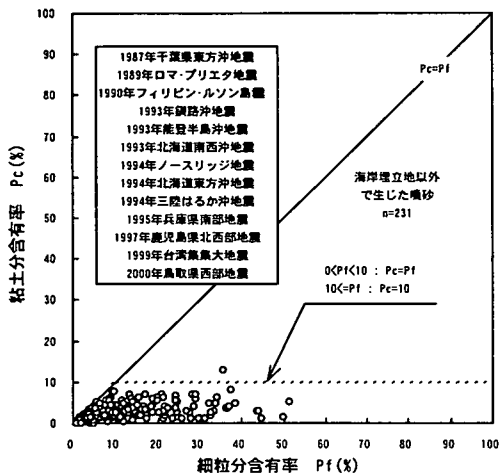


図-27 φスケールで示した50%粒径の頻度分布



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂



(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-28 噴砂の細粒含有率と粘土含有率の関係

ので、 $\phi=8, 4, -1$ がそれぞれの境界のおおよその目安になる⁴⁾。図の横軸の ϕ の数値は、各区分範囲の下限値を示し、例えば0~-1の範囲の場合は-1と示した。

全体的には、噴砂の多くが砂の目安の範囲に入る。噴砂の試料数の比較では、海岸埋立地がその他の2倍に近く、液状化に対しては特に海岸埋立地に注意する必要があることがわかる。

累積相対頻度では、海岸埋立地の噴砂がその他に比べ全体的に細粒側である。4以上のものが海岸埋立地以外では0%であるのに対して、海岸埋立地では8%あり、シルトに分類されるような細粒な土が海岸埋立地で多く採取されたことが統計的にも明らかである。

以上より、海岸埋立地ではその他の地点と比較して噴砂が多く確認され、範囲Aを下回る細粒なものが多いと

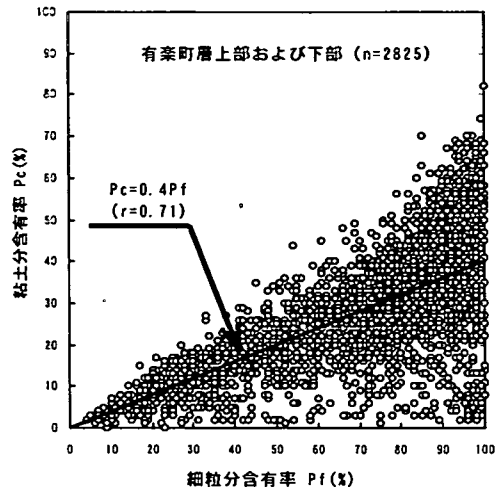


図-29 沖積地盤における細粒含有率と粘土含有率の関係⁴⁾

いう有意な差が認められること、沖積地盤が主体であるその他の地点では、範囲Aを大きく下回るものがないことが明らかになった。

このように、海岸埋立地とそれ以外の地盤で細粒側の下限値が異なる理由として、埋立地盤に比較し堆積してから長い年月が経過していると考えられる沖積地盤では、細粒な土が経年変化により液状化しにくくなることが推測される。

(2) 細粒含有率と粘土含有率の関係

噴砂の粒度組成は細粒分を多く含む場合があるが、粘土含有率はほとんどが10%以下であった。そこで、細粒含有率と粘土含有率の関係を海岸埋立地とそれ以外の地点で生じた噴砂について比較する。

図-28に、噴砂の細粒含有率Pfと粘土含有率Pcの関係を海岸埋立地で生じたものとその他のものに分けて示す。海岸埋立地では細粒含有率が100%近いものまで存在しているが、その他の地点では、細粒含有率の上限は50%程度で、多くは40%程度以下であることがわかる。一方、噴砂の粘土含有率はいずれにおいてもほぼ10%以下という特徴があることがわかる。

5. 噴砂の粒度組成の特徴

実際の地震による液状化で生じた噴砂の粒度組成の特徴を調べることは、今後、液状化しやすい土または液状化しない土の粒度組成を明らかにしていく上にも、また、噴砂と液状化した土層の粒度組成の違いを明らかにする上にも重要である。

ここでは、代表的な沖積地盤と噴砂との違いを明らかにし、噴砂の平均的な粒度組成を定式化するとともに港湾基準の液状化しやすい粒度組成に対応する噴砂の粒度組成の範囲を示す。

(1) 沖積地盤との比較

図-28に示したような特徴的な細粒分含有率と粘土分含有率の関係と、沖積地盤におけるこの関係を比較する。

図-29に文献(42)より沖積地盤の代表として、砂質土主体である有楽町層上部とシルトまたは粘性土主体である有楽町層下部の地盤の細粒分含有率 Pf と粘土分含有率 Pc の関係^④を示す ($r=2825$)。ばらつきが多いが、両者の平均的な関係はほぼ直線関係にあり、原点を通る直線に一次回帰すると式(3)が得られる。

$$Pc = 0.4Pf \quad (r=0.71) \quad (3)$$

ここで、Pc : 粘土分含有率(%)
Pf : 細粒分含有率(%)

このように、沖積地盤では、平均的には粘土分含有率が細粒分含有率の4割程度の割合で存在することがわかる。したがって、細粒分含有率が100%近くまで多くなっても粘土分含有率が10%以下という関係は、主に海岸埋立地で生じた噴砂の特徴的な粒度組成であることがわかる。ただし、図-29からもわかるように、自然地盤にも粘土分は少ないが細粒分の多い土が存在しているのも事実である。

(2) 噴砂の50%粒径と中央均等係数の関係

噴砂は概ね均等粒径であるが、粒度曲線の勾配は土粒子粒径が大きくなるにしたがい緩くなる傾向が認められる。粒径加積曲線における勾配は、粒径に対する頻度を意味しており、多くの場合、最急勾配は最大頻度に対応する。3章で示したように、最急勾配は通過質量百分率50%前後で見られるものが多い。そこで、代表的な粒径としての50%粒径 D_{50} と、粒度組成を代表すると考えられる50%粒径付近の最急勾配に着目して、噴砂の平均的な粒度組成の定式化を試みる。

なお、ここでは均等係数に替わるものとして式(4)で定義される中央均等係数を用いることとする。

$$Ucc = D_{60}/D_{30} \quad (4)$$

ここで、Ucc : 中央均等係数
 D_{60} : 60%粒径(mm)
 D_{30} : 30%粒径(mm)

均等係数は、10%粒径 D_{10} に対する60%粒径 D_{60} の比であり、勾配の逆数に相当する。しかし、3章で示したよ

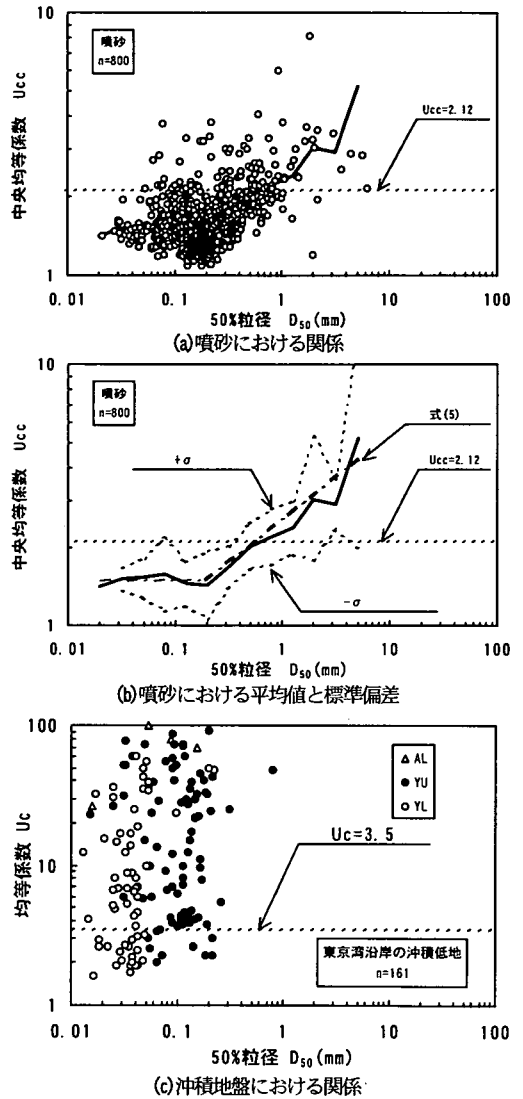


図-30 噴砂の50%粒径と中央均等係数の関係

うに、粒度曲線は10~20%粒径付近より細粒側で勾配が緩くなるため、均等係数は最急勾配部分を反映する指標とはならない。このような理由から、式(4)で定義された中央均等係数を代表的な粒度曲線の勾配を示す指標として導入した。このように定義した場合、10%粒径から60%粒径の間の粒度曲線が直線と仮定すると、港湾基準に示される均等係数 $Uc=3.5$ は $Ucc=2.12$ に相当する。

図-30(a)に、噴砂の50%粒径と中央均等係数の関係を示す。50%粒径が小さい部分では中央均等係数が小さく、50%粒径が大きくなるとともに中央均等係数が大きくなる傾向が認められる。特に、50%粒径が0.2mm付近以下の範囲では、中央均等係数は大部分が2.12以下であることがわかる。図中には50%粒径を対数軸上で等間隔に分

割し、各区分ごとに中央均等係数の平均値を求め実線で示した (b) に、求められた平均値と標準偏差を示す。50% 粒径が 0.2mm 以下では、標準偏差分のばらつきを考慮しても中央均等係数がほとんど港湾基準の 2.12 以下になっていることがわかる。(c) に、図-29 と同様に文献(42)より沖積層 AL、有楽町層上部 YU、有楽町層下部 YL の自然堆積した沖積地盤より集められたデータを用いて、50% 粒径と均等係数の関係を示す。なお、これらのデータは標準貫入試験のペネ試料を用いていると考えられるので、サンプラー内径 35mm の影響を受けていると考えられる。全体的にばらつき、噴砂のような相関は全く認められない。したがって、このような土の性質は噴砂の特徴であることがわかる。

(b) に示した平均値を 50% 粒径が 0.2mm で折れる 2 本の直線で近似すると、噴砂の粒度組成モデルとして式(5) が得られる。

$$\begin{aligned} U_{cc} &= 1.5 \quad (0.02\text{mm} \leq D_{50} < 0.2\text{mm}) \\ U_{cc} &= 2.36 D_{50}^{0.27} \quad (0.2\text{mm} \leq D_{50} < 5\text{mm}) \end{aligned} \quad (5)$$

なお、 $D_{10} \sim D_{60}$ 間の粒度曲線を直線と仮定すると、

$$U_{cc} = U_c^{0.6} \quad (6)$$

より、式(5)は均等係数との関係式として式(7)のように表すことができる

$$\begin{aligned} U_c &= 2.0 \quad (0.02\text{mm} \leq D_{50} < 0.2\text{mm}) \\ U_c &= 4.18 D_{50}^{0.45} \quad (0.2\text{mm} \leq D_{50} < 5\text{mm}) \end{aligned} \quad (7)$$

噴砂の多くは、粒度組成の通過質量百分率約 30~80% の範囲で粒度曲線が直線的であるので、50% 粒径前後の粒度組成の主体をなす部分は、粒度曲線の勾配として近似することができる。式(5)は、この勾配の逆数を表したもので、通過質量百分率 30~80% 程度の範囲における噴砂の粒度組成のモデルである。

図-31 に、式(5)から推定される粒度組成を示した。図中には、港湾基準⁹⁾に示される均等係数が大きい場合と小さい場合の液状化しやすい粒度組成の範囲も示した。推定された粒度組成の勾配は、細粒側では均等係数の小さい場合の範囲 B および範囲 A にほぼ一致している。粗粒側では、均等係数が大きい場合に近く、範囲 A ではほぼ勾配が一致していることがわかる。一方、細粒側では均等係数の大きい場合、粗粒側では均等係数の小さい場合の粒度組成と推定された粒度組成は異なる。この点について、特に細粒側の均等係数が大きい場合の港湾基準の範囲については、これのもととなる粒度組成の範囲を定めた土田⁹⁾は、範囲 A の下限値が安全側過ぎる可能性が

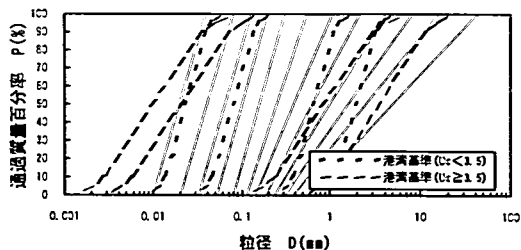


図-31 式(5)より推定される粒度曲線の勾配と港湾基準に示される粒度組成の比較

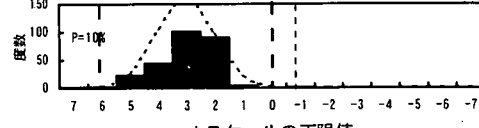
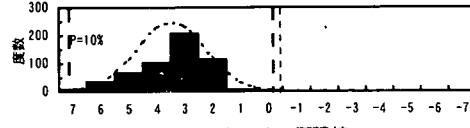
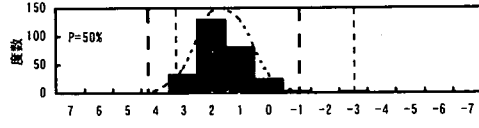
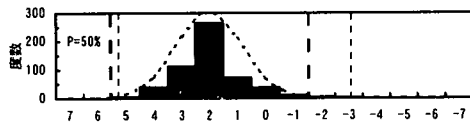
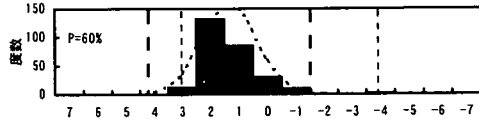
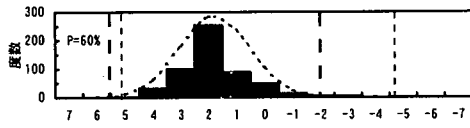
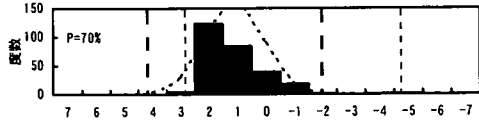
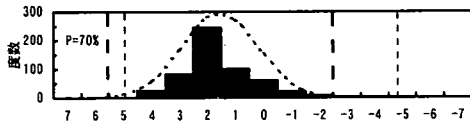
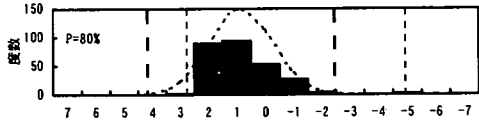
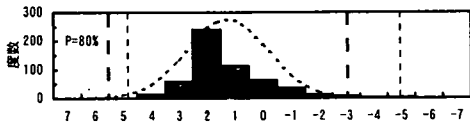
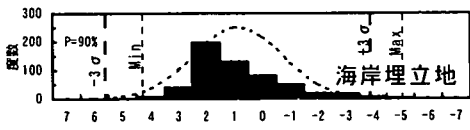
あること、また、範囲 B の下限値は事例としてはなかったもので、粘土分 30% 以上ならば粘着力により液状化現象が生じないであろう、という仮定に基づき定めたことを述べている。したがって、噴砂データに基づき推測すると、特に細粒側については、港湾基準が均等係数を大きく設定し過ぎている可能性がある。

図-31 に示されるように、式(5)は細粒側では均等粒径で、粗粒になるほど粒度配合が良くなることを示している。このようになる理由として、以下が推測される。一般的な土の粒度組成は、式(3)に示したように細粒分含有率が増加すれば平均的には粘土分を多く含むようになり、粘着力が増し液状化しにくくなると考えられる。しかし、粒度組成が全体的に細粒になっても粘土分が少ない土も存在していて、このような粒度組成の土の内、特に若齢な液状化しやすい状態のものが地震時に液状化し噴砂となって地表に現れる。このため噴砂は、50% 粒径が細粒になっても粘土分含有率が増加せず 10% 以下となる。一方、粗粒側は、一般的には土が粗粒になるほど透水性が大きくなるので、液状化しにくくなる。地盤中には、50% 粒径が大きく均等粒径な土や、粒度配合の良い土が存在すると考えられる。50% 粒径が大きく均等粒径な土は、細粒分を含まないことになるので透水係数が大きく液状化しにくい、50% 粒径が大きくても粒度配合が良くある程度の細粒分を含むものは透水係数が低く保たれるので液状化しやすくなる。地震時にはこのような地盤が液状化し地表に噴砂となって現れるので、噴砂もこのように 50% 粒径が大きくなった場合には、粒度配合が良くなる傾向を示すと考えられる。

(3) 噴砂の粒度組成の範囲

ここでは、噴砂の粒度組成の範囲を統計的分析も加えて検討する。

図-32 に、採取した噴砂の通過質量百分率 P が 10~90% の範囲における 10% ごとの P に対する粒径の頻度分布を海岸埋立地とその他の地点に分けて示す。横軸は図-27 と同様に ϕ スケールであり、各区分範囲の下限値を示した。各図は各通過質量百分率に対する頻度分布を示している。例えば P=50% の頻度分布図は、50% 粒径 D_{50}



(a) 海岸埋立地で生じた噴砂

(b) 海岸埋立地以外で生じた噴砂

図-32 噴砂の各通過質量百分率におけるφスケールで示した粒径の頻度分布

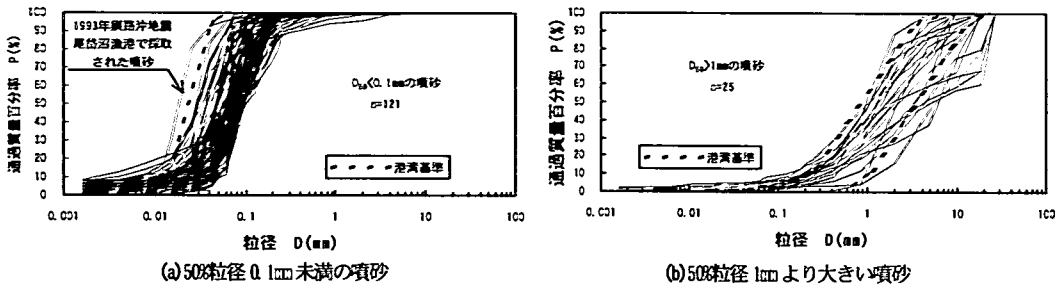


図-33 下限値付近および上限値付近における噴砂の粒度組成

に対する ϕ スケール値の頻度分布図を示していることになる。図中の破線は、それぞれ最大・最小値および平均値より $\pm 3\sigma$ 離れた粒径である。また、図中には、平均値と標準偏差より求められる正規分布関数を点線で示した。

(a)は、海岸埋立地で生じた噴砂である。P=40~70%の範囲では分布の平均値付近が正規分布に近く、最大値(Max), $+3\sigma$, 平均値(正規分布の頂点), 最小値(Min)は、検討対象とした通過質量百分率が減少するにともない ϕ スケールの値は大きくなる(粒径が小さくなる)が、 -3σ の値は、P=20~90%の範囲でほとんど変化せず最小値より大きく(細粒に)なり、 ϕ スケールの大きな部分(細粒な部分)における裾野の広がり、正規分布とはならないことがわかる。このように、 ϕ スケールの大きな範囲(細粒な範囲)では、頻度分布が正規分布のような裾野の広がりを示さないことから、粒径に対し噴砂には細粒側にある限界値が存在していると考えられる。一方、 ϕ スケールの小さい範囲(粗粒な範囲)では、裾野が大きく広がり、正規分布に近い広がり、明らかな限界値は特に認められない。

(b)は、海岸埋立地以外で生じた噴砂である。 ϕ スケールの小さい範囲(粗粒な範囲)では、最大値, $+3\sigma$, 頻度分布の裾野の広がりが、ほぼ海岸埋立地で生じた噴砂と同様であり、 ϕ スケールの大きい範囲(細粒な範囲)では、(a)と同傾向は同様であるがその値は小さい方へ(粗粒側へ)移動している。

以上のように細粒側と粗粒側では、粒度組成の頻度分布形状が異なる。そこで、図-33に、(a)50%粒径が0.1mm未満と、(b)50%粒径が1mmより大きい全噴砂の粒度組成を示す。図-33(a)によれば、最も細粒側の粒度曲線は、港湾基準の下限値より細粒で、全体の分布から大きく外れている。これは1993年釧路沖地震の時に尾岱沼漁港で採取されたもので、埋め立てに用いた火山灰である。この粒度組成は、他の粒度組成の頻度分布と比較して特異なデータと判断し除くこととする。このようにすると、ほぼ港湾基準の下限値で粒度曲線は突然なくなり、噴砂の粒度組成の下限はほぼ港湾基準の下限値に存在してい

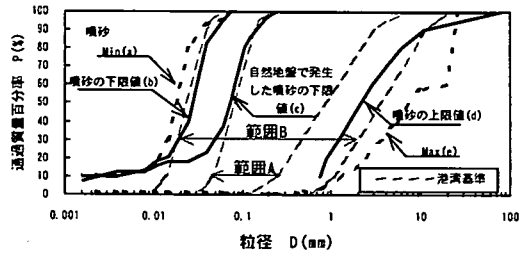


図-34 噴砂823データより求められた粒度組成の限界値

ることがわかる。

図-33(b)によれば、粒径が粗粒になるにしたがい徐々にデータ数が減少し、噴砂の発生件数が少なくなる様子が見られる。特に、港湾基準の範囲AとBの中央付近より粗粒になるとかなり数が減少する。なお、(b)で粒度曲線が入り乱れているが、これは粒径が大きくなるほど試験に大量の試料が必要になるが、これが必ずしも十分でなかったことが原因の一つと考えられる。

以上を踏まえて、図-34に噴砂の粒度組成の限界値を示す。図中には、港湾基準の範囲を比較のために細い破線で併記した。ここで用いた港湾基準は、図-31の考察より、細粒側は $U_c < 35$ の場合、粗粒側は $U_c \geq 35$ の場合とした。また、本論文で使用した全噴砂の最小値(a)と最大値(e)を参考のために太い点線で示した。

噴砂の粒度組成範囲の細粒側は、頻度分布が正規分布のような裾野の広がりを示さず、下限値が存在していると考えられたことから、噴砂の下限値を図-33(a)に示した1本の特異値を除いた最も細粒な値とした(b)。また、海岸埋立地に代表される若齢な地盤で採取された噴砂と、沖積地盤に代表される海岸埋立地以外の地盤で採取された噴砂では、粒度組成の下限値が明らかに異なる。そこで、図中には、海岸埋立地以外で採取された噴砂の最も細粒な値も下限値として示した(c)。粗粒側は、図-32によれば頻度分布が正規分布に近い広がり呈している。ここでは、噴砂の大半のデータが入る範囲の目安として、海岸埋立地のデータで平均値から $+3\sigma$ 離れた範囲を噴砂

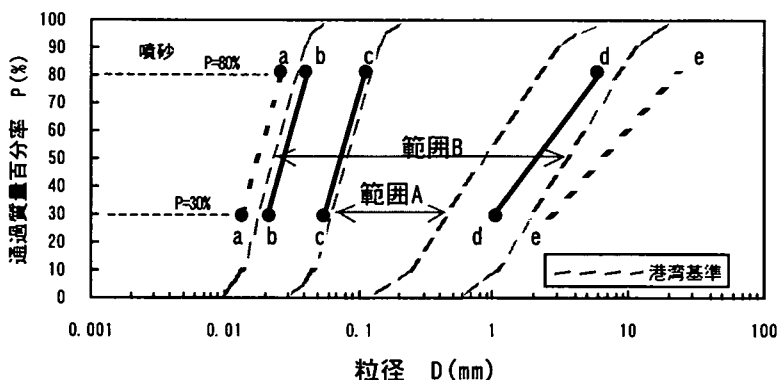


図-35 噴砂の粒度組成の限界値

の上限值とした (d)。これを越える粗粒なデータは、本論文では823データ中9件で約1%である。

図-35は、図-34のポイントを簡明にしたものである。前述の通り、通過質量百分率30~80%の範囲では、粒度曲線は片対数紙上でほぼ直線である。また、50%粒径と中央均等係数の間には、式(5)に示した関係があることから、図-34より求められる50%粒径より、通過質量百分率30~80%の範囲で噴砂の粒度組成範囲の限界値を直線と仮定して求めた。

以上より、図-35に示した限界値a~eは、以下のような意味を持つ。

aは、本論文で求められた最も細粒な値である。他のデータの頻度分布と比較すると特異なデータであるが、参考のために示した。この値は、火山灰による埋立地盤で採取された噴砂であり、これが他と比べて特異なデータとなった原因とも考えられる。このように、火山灰の液状化についてはかなり細粒な土も噴砂となり得る可能性を否定できないので、図には特異なデータではあるが覚えて記載した。火山灰は、粒子形状が先鋭である場合が多く、このような形状は大きなダイレイタンスを発揮しやすいと考えられ、火山灰の液状化については、今後の大きな課題である。

bは、噴砂の下限値である。噴砂は、火山灰のような特殊な場合を除き、この下限値より細粒なものは認められない。噴砂には、このような下限値が存在している。したがって、これより細粒な土は液状化しないと考えられる。

cは、沖積地盤に代表される地盤から採取した噴砂の下限値である。沖積地盤ではこれより細粒な土は液状化しないと考えられる。bとcの間には、海岸埋立地に代表される若齢な地盤で採取された噴砂が入る。bとcの違いは、このように堆積年代に関係しているもので、沖積地盤であっても海岸埋立地のように若齢であればbに近い粒度組

成の土の液状化も今後発生すると考えられる。

dは、統計的に求めた噴砂の上限値である。噴砂はこれよりも多くの場合が細粒であるが、これより粗粒なものが皆無という意味ではなく少ないという意味である。

eは、本論文で求められた最も粗粒な値である。本論文ではこれより粗粒な噴砂が確認されていないことを意味する。粗粒側の頻度分布形状は正規分布と同じような広がりを示すことから、今後さらに粗粒な粒径が確認される可能性は否定できない。dとeの間に入る噴砂の大半は、1995年兵庫県南部地震で採取されたものであり、本論文のデータ中の約1%を占める。この地震は、内陸直下型の地震であり、気象庁震度階でVIIが観測されたことから地震動が大きかったこと、また、噴砂の多くがまさ土であったことが特徴である。したがって、これらを考慮すると、粗粒側の限界値は、地震動の大きさや土質の特殊性の影響を大きく受けている可能性が考えられる。

6. 結論

近年発生した13地震の液状化で、海岸埋立地や沖積地盤などで生じた噴砂823試料を調べ、噴砂の粒度組成について以下が明らかになった。

- (1) 噴砂は、いずれも非塑性または低塑性で、粘土分含有率は10%以下であるが、特に海岸埋立地で発生した噴砂の細粒分含有率は0~100%の広い範囲に分布する。このような粘土分含有率が10%以下であるが細粒分含有率が0~100%である関係は、自然堆積した沖積地盤におけるこの関係とは大きく異なる。
- (2) 海岸埋立地に代表される若齢な地盤で採取された噴砂には細粒分含有率が100%に近いシルトの卓越したものがあるが、沖積地盤に代表される地盤で採取さ

- れた噴砂では、港湾基準の「特に液状化する可能性あり」の下限より大幅に細粒なものは認められない。
- (3) 噴砂の粒度組成は、細粒側では均等粒径で、粗粒側になると粒度配合が良くなる傾向がある。このような関係は、自然堆積した沖積地盤のデータでは認められない。これより噴砂の50%粒径と中央均等係数の平均的な関係として噴砂の粒度組成モデルを定式化した。
- (4) 噴砂の粒度組成範囲として、特異ではあるが確認された最も細粒な値、噴砂の細粒側の下限値、沖積地盤に代表される地盤で採取された噴砂の下限値、噴砂の大部分が入る粗粒側の上限値、確認された噴砂の最も粗粒な値を示した。
- (5) 海岸埋立地に代表される若齢な地盤と沖積地盤に代表される地盤から採取された噴砂の粒度組成には、それぞれ細粒側に下限値が存在している。したがって、それぞれの地盤ではこれより細粒な土は、特殊な場合を除き、液状化しないものと考えられる。

謝辞：本研究において、石原研而教授（当時、東京大学。現在、中央大学）には、細粒分と粘土分の分析結果や研究のポイントに対する示唆を戴いた。土田肇博士（現在、新日本製鐵（株））には、資料を御提供戴き、港湾基準作成当時の個々のデータの意味を御教示戴くとともに、液状化しやすい土に対する御意見を戴いた。また、本論文で使用した多数の噴砂の採取および分析に当たっては、飛鳥建設（株）の多くの方に協力して戴いた。これらの方々 に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：第13章地盤の液状化、港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp.281-288, 1999.4.
- 2) 日本道路協会：75砂質地盤の液状化の判定、道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.91-95, 1996.12.
- 3) 日本建築学会：45節地盤の液状化判定、建築基礎構造設計指針, pp.163-169, 1988.1.
- 4) 渡辺 隆：新潟地震におけるパイロフローテーションの効果、土と基礎, 13-2, pp.27-33, 1965.2.
- 5) 土田 肇：砂質地盤の液状化現象に関する工学的研究、北海道大学博士学位論文, 34p, 1978.10.
- 6) 土田 肇：砂質地盤の流動化の予測と対策、昭和45年度港湾技術研究所講演会講演概要, pp.(3)1-33, 1970.12.
- 7) Applied Technical Council: ATC-32 Improved seismic design criteria for California bridges, Provisional recommendations, California Department of Transportation,

- pp.89-92, 1996.
- 8) Lee, K.L. and Fitton, J.A.: Factors affecting the cyclic loading strength of soil, *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations*, ASTM, STP 450, pp.71-95, 1968.
 - 9) 古関 潤一, 石原 研而, 藤井 光久: 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, pp.595-596, 1986.6.
 - 10) 森伸一郎, 沼田淳紀, 境野典夫, 長谷川昌弘: 埋立地の液状化で生じた噴砂の諸特性, 土と基礎, 39(2)97, pp.17-22, 1991.2.
 - 11) 桑野二郎, 飯村博忠, 中沢博志, 杉原弘一, カオリンを含む砂の液状化強度, 土木学会第50回年次学術講演会, 第III部門, pp.506-507, 1995.9.
 - 12) 黄大振, 柳沢 栄司, 菅野高弘: シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.25-33, 1993.3.
 - 13) 佐藤 正行, 小田匡寛, 風間彦秀, 小瀬木克己: 細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.271-282, 1997.3.
 - 14) 寒川 旭: 地震考古学, 中央公論社, 251p, 1992.10.
 - 15) 沼田淳紀, 森伸一郎, 陶野 郁雄, 遠藤 邦彦: 液状化で生じた砂脈と噴砂に関する一考察, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.311-324, 1999.12.
 - 16) 吉見 吉昭: 液状化土の粒度・塑性特性と液状化抵抗, 土と基礎, 39(8)403, pp.49-50, 1991.8.
 - 17) 森伸一郎: 1993年釧路沖地震における液状化発生地点と液状化被害, 土質工学会北海道支部技術報告集第34号, pp.14-23, 1994.2.
 - 18) 森伸一郎, 沼田淳紀, 三輪滋, 柴田 登: 1993年北海道南西沖地震における液状化調査, 土質工学会北海道支部技術報告集第34号, pp.64-73, 1994.2.
 - 19) 森伸一郎: 液状化地盤中の杭基礎構造物の防災技術に関する研究, 京都大学博士学位論文, pp.13-154, 1997.4.
 - 20) 沼田淳紀, 染谷 昇: 簡易振動実験による液状化によって噴出した土の粒度組成, 第34回地盤工学研究発表会, pp.2079-2080, 1999.7.
 - 21) 森伸一郎, 滝本 幸夫, 長谷川昌弘: 1987年12月17日千葉県東方沖地震における液状化調査, 土木学会第43回年次学術講演会, 第III部門, pp.458-459, 1988.10.
 - 22) 栗林 栄一, 龍岡 文夫, 吉田 精一: 明示以降の本邦の地盤液状化履歴, 土木研究所彙報第30号, pp.1-9, 1974.12.
 - 23) 宇津 徳治: 地震学第2版, 共立出版, p.129, 1984.10.
 - 24) 森伸一郎, 滝本 幸夫, 長谷川昌弘: 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, pp.943-946, 1988.6.
 - 25) 森伸一郎, 沼田淳紀: 1989年ロマ・プリアタ地震における液状化調査と噴砂の物理的性質, 第25回土質工学研究発表会, pp.67-70, 1990.6.
 - 26) 三輪滋, 戸早 孝幸, 森伸一郎, 関 眞一: 1990年フィリピン・ルソン島地震被害調査(その2: 液状化による被害), とびしま技報 建築, (1991No.24), pp.111-127, 1991.3.

- 27) 森伸一郎, 三輪滋, 関真一: 1993年2月7日能登半島沖地震における液状化調査, 土木学会第48回年次学術講演会, 第1部門, pp.32-33, 1993.9.
- 28) 森伸一郎, 沼田淳紀, 若松加寿江: 付録 1993年北海道南西沖地震における液状化地点地図, 1993年北海道南西沖地震災害調査報告書, 地盤工学会1993年地震災害調査委員会, pp.421-490, 1997.11.
- 29) 1968年十勝沖調査委員会: 1968年十勝沖調査報告, 1971.
- 30) 土質工学会震害調査委員会: 1968年十勝沖地震による地盤震害調査概要, 土と基礎, 16.9, No.538, pp.5-17, 1968.9.
- 31) 沼田淳紀, 森伸一郎: 1994年ノースリッジ地震における液状化調査, 土木学会第49回年次学術講演会, 第III部門, pp.636-637, 1994.9.
- 32) 沼田淳紀, 森伸一郎, 三輪滋: 1994年北海道東方沖地震における液状化, 第31回地盤工学研究発表会, pp.1221-1222, 1996.7.
- 33) 沼田淳紀, 森伸一郎, 三輪滋: 1995年兵庫県南部地震における液状化調査, 第23回地震工学研究発表会, pp.221-223, 1995.7.
- 34) 染谷昇, 沼田淳紀, 森伸一郎, 三輪滋, 池田隆明: 1997年鹿児島県北西部地震の液状化地点と噴砂の物理特性, 第33回地盤工学研究発表会, pp.891-892, 1998.7.
- 35) 沼田淳紀, 森伸一郎, 幸左賢二, 原忠: 1999年台湾集集大地震における液状化, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2289-2290, 2000.6.
- 36) 鳩本栄治, 沼田淳紀, 染谷昇, 三輪滋, 池田隆明, 大野孝二: 2000年鳥取県西部地震における液状化, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2149-2150, 2001.6.
- 37) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Analysis of soil liquefaction, Niigata earthquake, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, No.SM3, pp.83-108, 1967.5.
- 38) Tohno, I. and Yasuda, S.: Liquefaction of the ground during the 1978 Miyagiken-oki earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.3, pp.18-34, 1981.
- 39) 土木学会日本海中部地震震害調査委員会: 1983年日本海中部地震震害調査報告書, 1986.10.
- 40) 応用地質調査事務所: 1983年5月26日日本海中部地震被害調査報告, 1984.1.
- 41) 森伸一郎, 沼田淳紀: 10地震における液状化噴砂の特徴, 土木学会四国支部第5回技術研究発表会, pp.190-191, 1995.5.
- 42) 東京都土木技術研究所: 東京都総合地盤図1, 東京都地質図集3, 技報堂, 1977.8.
- 43) 森伸一郎, 沼田淳紀: 沖積層の細粒分含有率と粘土分含有率, 第26回土質工学研究発表会, pp.865-868, 1991.7.

(2002.1.9 受付)

GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF ERUPTED SANDS DUE TO LIQUEFACTION

Atsunori NUMATA and Shin'ichiro MORI

A sand sample erupted by liquefaction is one of the keys to estimate the grain size distribution of liquefiable soils. When the sampling of erupted sand is appropriately performed, the erupted sand can provide substantial information on liquefied layers. Moreover, since such a sample is easily obtainable from the liquefied site, reasonable evaluation of the liquefiable grain size distribution based on a large number of samples is possible. In this study, using 823 samples obtained from liquefied sites due to 13 earthquakes, the following aspects were examined: 1) the difference in grain size distribution between samples taken from young aged grounds (e.g., reclaimed lands), and samples taken from grounds composed mainly of Holocene deposits; 2) the properties of grain size distributions of the erupted sands; and 3) comparison with the conventional criteria of grain size distribution of liquefiable soil. It was found that there exist finer limits in the grain size distribution of liquefiable soils for young aged ground and Holocene deposits, respectively.