

地震の液状化噴砂に基づく液状化判定法の提案

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 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

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)

液状化の検討を行う際、対象土層が液状化検討対象となるかどうかを評価することが必ず必要となる。液状化する可能性のある土質を簡易にかつ的確に評価できれば、合理的な設計が可能となる。このような方法の一つとして、粒度組成があげられる。均等粒径な砂は液状化する可能性が高いが、粘性土は液状化しにくい。このように、液状化の生じやすい粒度組成と液状化する可能性の低い粒度組成の間には境界が存在すると考えられる。この境界を明らかにすれば、液状化しやすい土質を評価する指標となる可能性がある。筆者らは、地震後現地調査を行い、液状化によって発生する噴砂を多数採取し分析を行ってきた。ここではその結果を示すとともに、この結果を用いて液状化する可能性の低い土層を判定する方法を提案する。

キーワード:地震, 液状化, 噴砂, 埋立地, 粒度組成

1. はじめに

地盤の液状化は、土の粒度組成が粗ければ排水性が増すので、また、細かければ粘着力が増すので液状化しにくくなると考えられる。このように、土の粒度組成は、液状化しやすい土質を評価する指標になる可能性がある。

液状化しやすい土質の粒度組成について渡辺¹⁾は、1964年新潟地震直後に、パイプロ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^{2),3)}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。この範囲は、現在の港湾基準⁴⁾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-32⁵⁾でも、液状化しやすい粒度組成として、港湾基準とほぼ同様なものが示されている。しかしながら、その後多くの地震で液状化が数多く発生しているにもかかわらず、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十分には行われてきたとはいえない。

そこで、筆者らは容易に採取できる噴砂に着目し、液状化が生じた13地震で採取された噴砂823試料を分析した。ここでは、噴砂の粒度組成の特徴を示すとともに、液状化する可能性の低い土層の判定方法を提案する。

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	発生日月日 (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	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	注2) ()	USGS	62	42
フィリピン・ルソン島地震	1990.7.16	Ms=7.8	15.66N	121.23E	25	注3) (~)	USGS(震度階はフィリピン火山地震研究所)	195	9
釧路沖地震	1993.1.15	Mj=7.8	42.85N	144.38E	107	注1)	気象庁	255	109
能登半島沖地震	1993.2.7	Mj=6.6	37.65N	137.30E	25	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	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	注2) ()	USGS	30	12
北海道東方沖地震	1994.10.4	Mj=8.1	43.37N	147.67E	30	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	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	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	15
台湾集集大地震	1999.9.21	M _L =7.3	23.85N	120.81E	7	注4) (~)	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) 改正ロシアフォレル震度階
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。

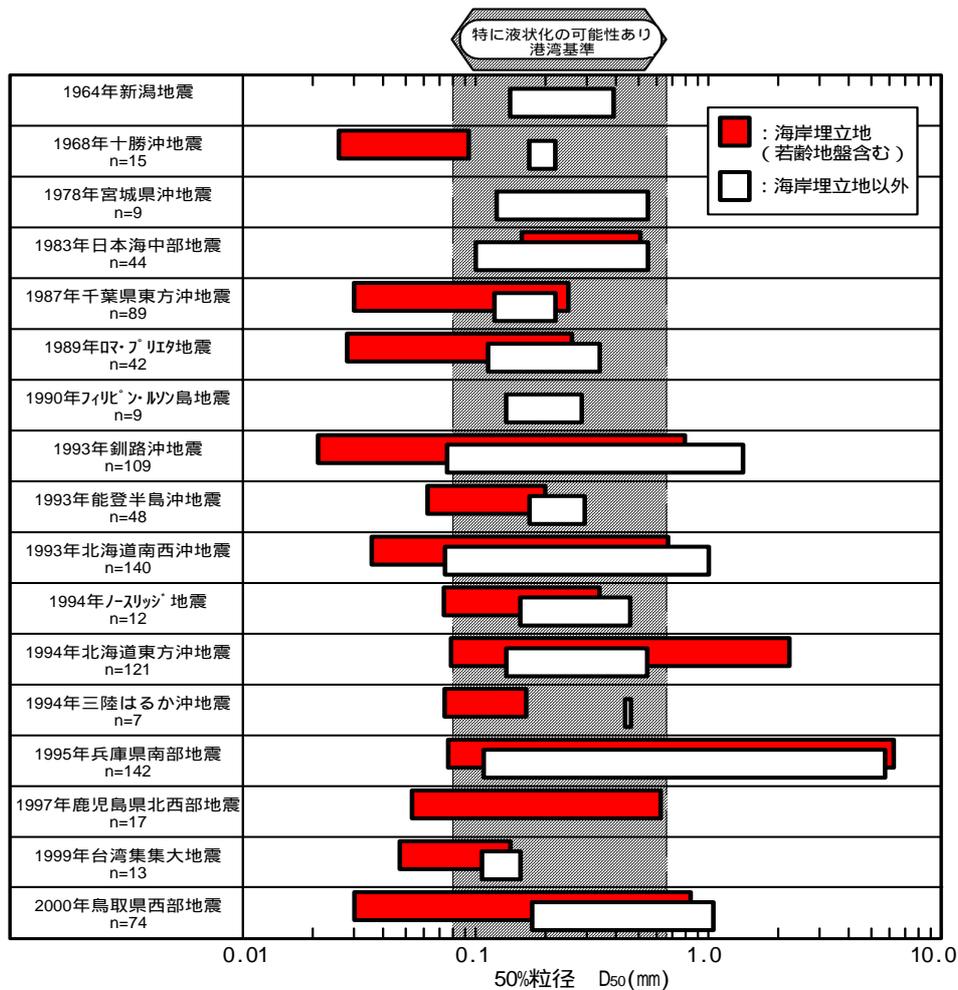


図-1 各地震で生じた噴砂の50%粒径の範囲

2. 調査方法

噴砂を採取する方法と採取箇所は重要な問題であるが、ここでは噴砂は、原則として噴砂口に近い噴砂丘中腹部より採取した⁶⁾。

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た。調査した地震の中には、1994年ノースリッジ地震、1995年兵庫県南部地震、1999年台湾集集大地震など、いわゆるレベル2地震動が発生したと考えられる地震も含まれている。

なお、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。

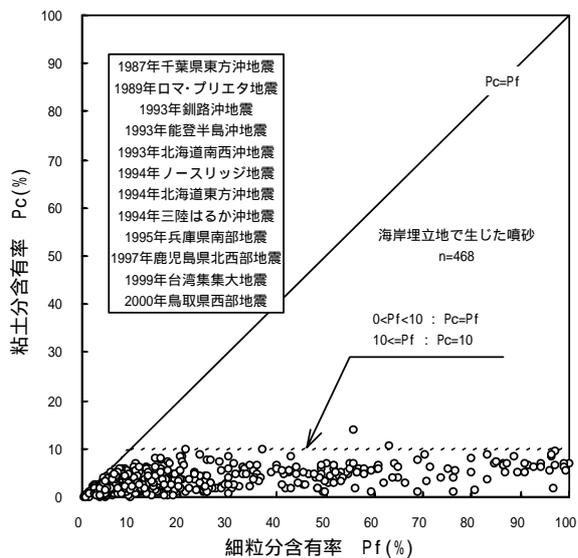
3. 若齡地盤と沖積地盤で生じた噴砂の比較

海岸埋立地に代表される若齡な地盤と、海岸埋立地などに比べると一般的には堆積年代が古い沖積地盤に代表されるその他の地盤で生じた噴砂の比較を行う。

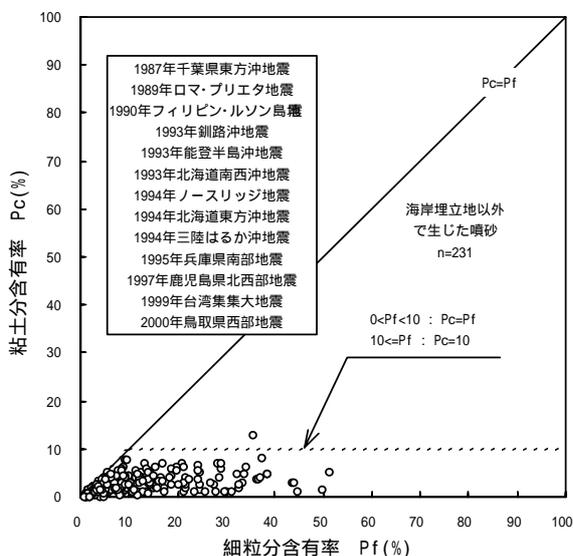
図-1に、森ら⁸⁾の結果に、1990年フィリピン・ルソン島地震以降の地震データを加え、各地震で生じた噴砂の

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。なお、図中の海岸埋立地の噴砂には、若齡地盤という観点から、内陸において発生した噴砂の内、埋戻し地盤などの人工改変地も含めた。図中には、既往の調査結果より1964年新潟地震⁷⁾、1968年十勝沖地震⁸⁾、1978年宮城県沖地震⁹⁾、1983年日本海中部地震^{10,11)}のデータも加えた。また、図中には目安のために港湾基準⁹⁾に示される均等係数が $U_c < 3.5$ の場合の「特に液状化の可能性あり」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が入っているが、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。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。



(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-2 噴砂の細粒分含有率と粘土分含有率の関係

4. 細粒分含有率と粘土分含有率の関係

図-2 に、噴砂の細粒分含有率 Pf と粘土分含有率 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分含有率が 100% 近いものまで存在しているが、その他の地点では、細粒分含有率の上限は 50% 程度で、多くは 40% 程度以下であることがわかる。一方、噴砂の粘土分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。図-3 に文献(2)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⁽³⁾を示す (n=2825)。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

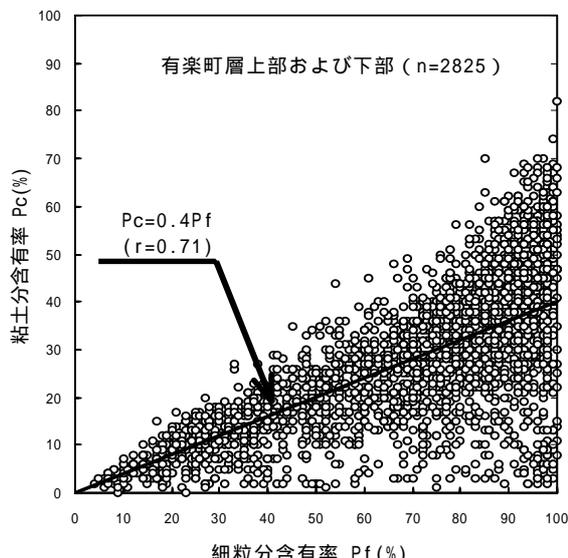


図-3 沖積地盤における細粒分含有率と粘土分含有率の関係⁽³⁾

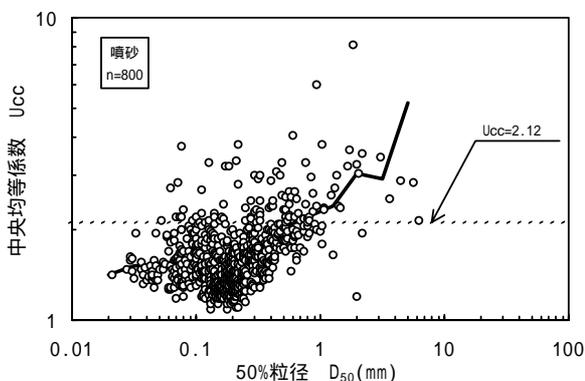


図-4 噴砂の 50% 粒径と中央均等係数の関係

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-3 からわかるように、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。

5. 噴砂の 50% 粒径と中央均等粒径の関係

代表的な粒径としての 50% 粒径 D_{50} と、噴砂の平均的な粒度組成の定式化を試みた。

なお、ここでは均等係数に替わるものとして式(1)で定義される中央均等係数を用いることとする。

$$U_{cc} = D_{60} / D_{30} \quad (1)$$

ここで、 U_{cc} : 中央均等係数

D_{60} : 60% 粒径(mm)

D_{30} : 30% 粒径(mm)

図-4 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(港湾基準⁴⁾に示される $U_{cc}=3.5$ に対応する値)以下であることがわかる。

これより平均値を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(2)が得られる。

$$U_{cc} = 1.5 \quad (0.02\text{mm} \leq D_{50} < 0.2\text{mm})$$

$$U_{cc} = 2.36 D_{50}^{0.27} \quad (0.2\text{mm} \leq D_{50} < 5\text{mm}) \quad (2)$$

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(2)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。

式(2)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、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、このような粒度組成の土の内、特に若齢な土は液状化しやすいと考えられる。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と考えられる。

6. 粒度組成の限界値

噴砂の粒度組成の限界値を統計的分析により検討する。

図-5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。横軸は地学の分野で用いられるスケール($-\log_2 D$, D:粒径(mm))であり、各区分範囲の下限値を示した。図中の破線は、それぞれ最大・最小値および平均値より ± 3 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, 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スケールの値は大きくなる(粒径が小さくなる)が、

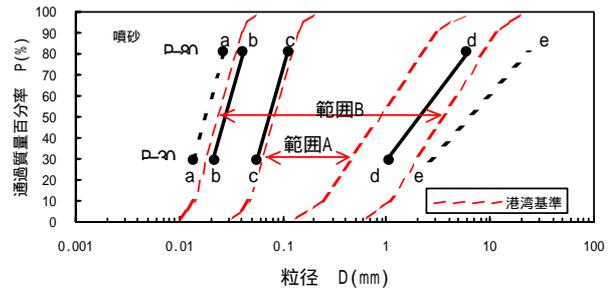


図-6 噴砂の粒度組成の限界値

-3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、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、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、

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を示し、明らかな限界値は特に認められない。

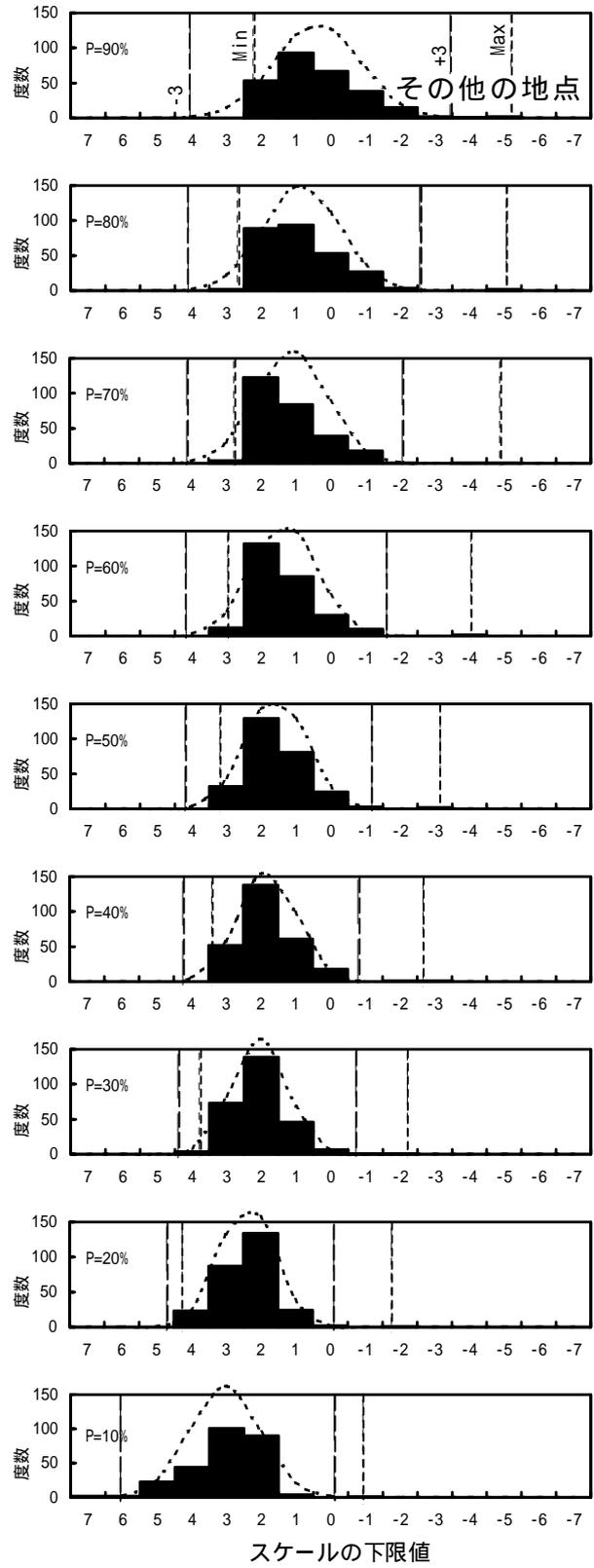
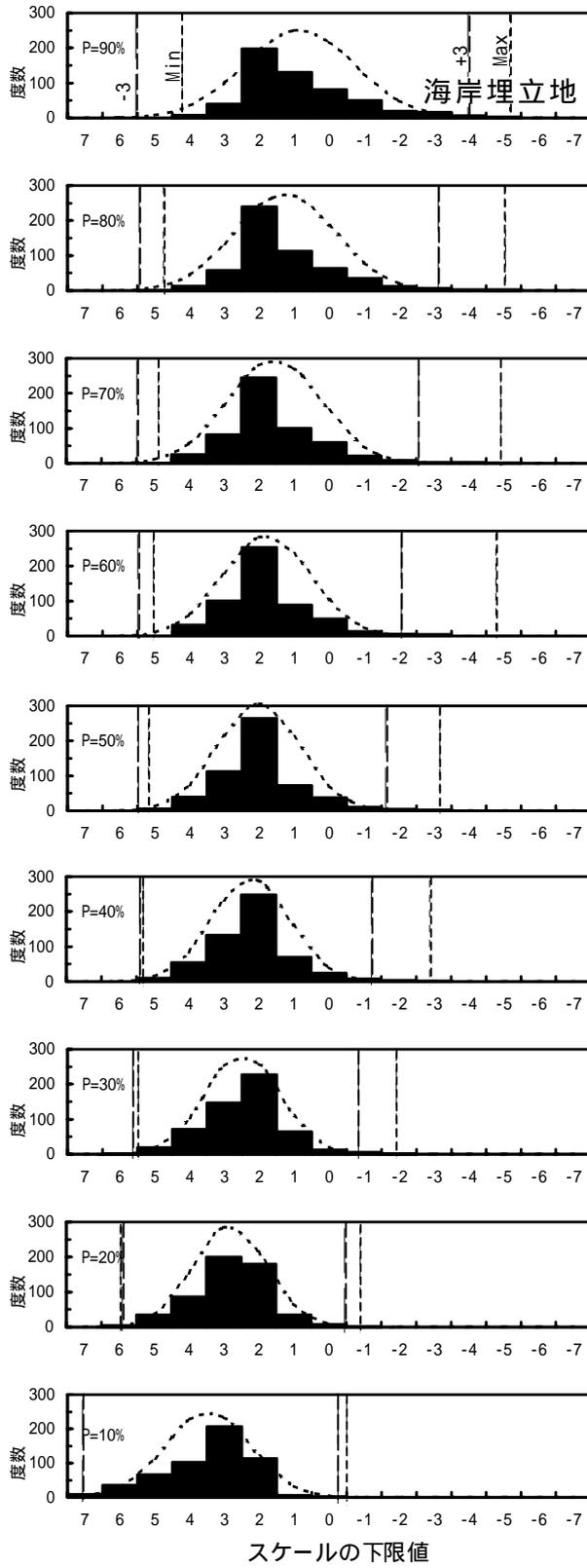
(b)は、海岸埋立地以外で生じた噴砂である。スケールの小さい範囲(粗粒な範囲)では、最大値, +3, 頻度分布の裾野の広がりが、ほぼ海岸埋立地で生じた噴砂と同様であり、スケールの大きい範囲(細粒な範囲)では、(a)と同傾向は同様であるがその値は小さい方へ(粗粒側へ)移動している。

以上より粒度組成の限界値のポイントを簡明にしたものが、図-6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(2)に示した関係があることから、海岸埋立地に代表される若齢地盤と、沖積地盤に代表されるその他の地盤のそれぞれの限界値の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-6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發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



(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 噴砂の各通過質量百分率における スケールで示した粒径の頻度分布

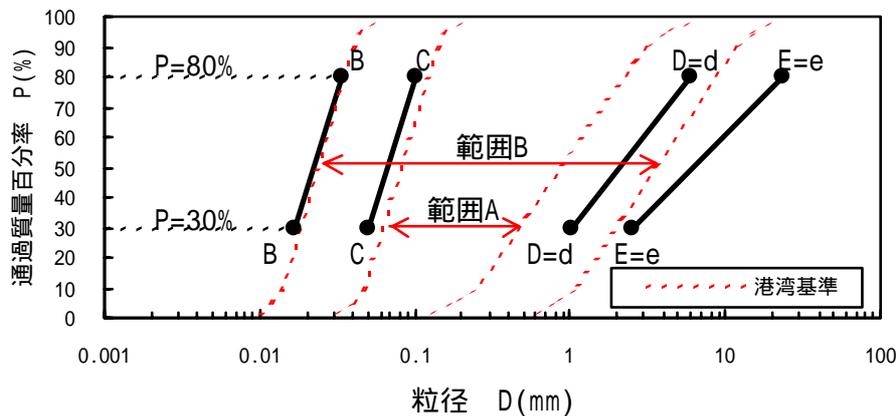


図-7 判定に用いる粒度組成の限界値

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する可能性が低いと考えられる。

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する可能性が低いと考えられる。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と考えられるので、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出すことから、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、気象庁震度階級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。

7. 噴砂の粒度組成を用いた液状化する可能性の低い土層の判定方法

以上の噴砂の粒度組成と堆積年代の特性を用いて、液状化する可能性の低い土層を判定する方法を提案する。

図-7は、判定がしやすいように図-6のそれぞれの限界線を描き直したものである。それぞれB~Eは、前述のb~eに対応する。

粒度組成を用いて、液状化する可能性の低い土層を判定する方法として、図-8に図-7を用いた判定法を示す。まず、火山灰に代表される特殊土は除く。次に、粒度組成を求め、各土層が若齢地盤であるか否かを判別する。若齢地盤とは海岸埋立地や埋戻土などの人工改変地が対象となるが、沖積地盤であっても明らかに堆積年代が最近であればこれも若齢地盤とする。それぞれに判別された土層は、粒度組成より図-7を用いて液状化の可能性について判別する。判別する際、限界線を横切るような粒度曲線も限界線を越えたものと判別する。

現在の港湾基準⁴⁾による判定方法では、種々の均等係数の粒度組成に対して判別しにくい面があった。特に、粒度組成が限界線を横切る場合、その程度によりどのように判別するかは個人差が大きかったと考えられる。また、均等係数の大きな土に対しては、かなり細粒な土までも液状化の可能性のある土に判別されてしまう可能性があった。これらに対して、ここで提案した判別法を用いることで、より明確にしかも合理的に液状化する可能性の低い土層を判定できる可能性がある。

8. まとめ

- (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

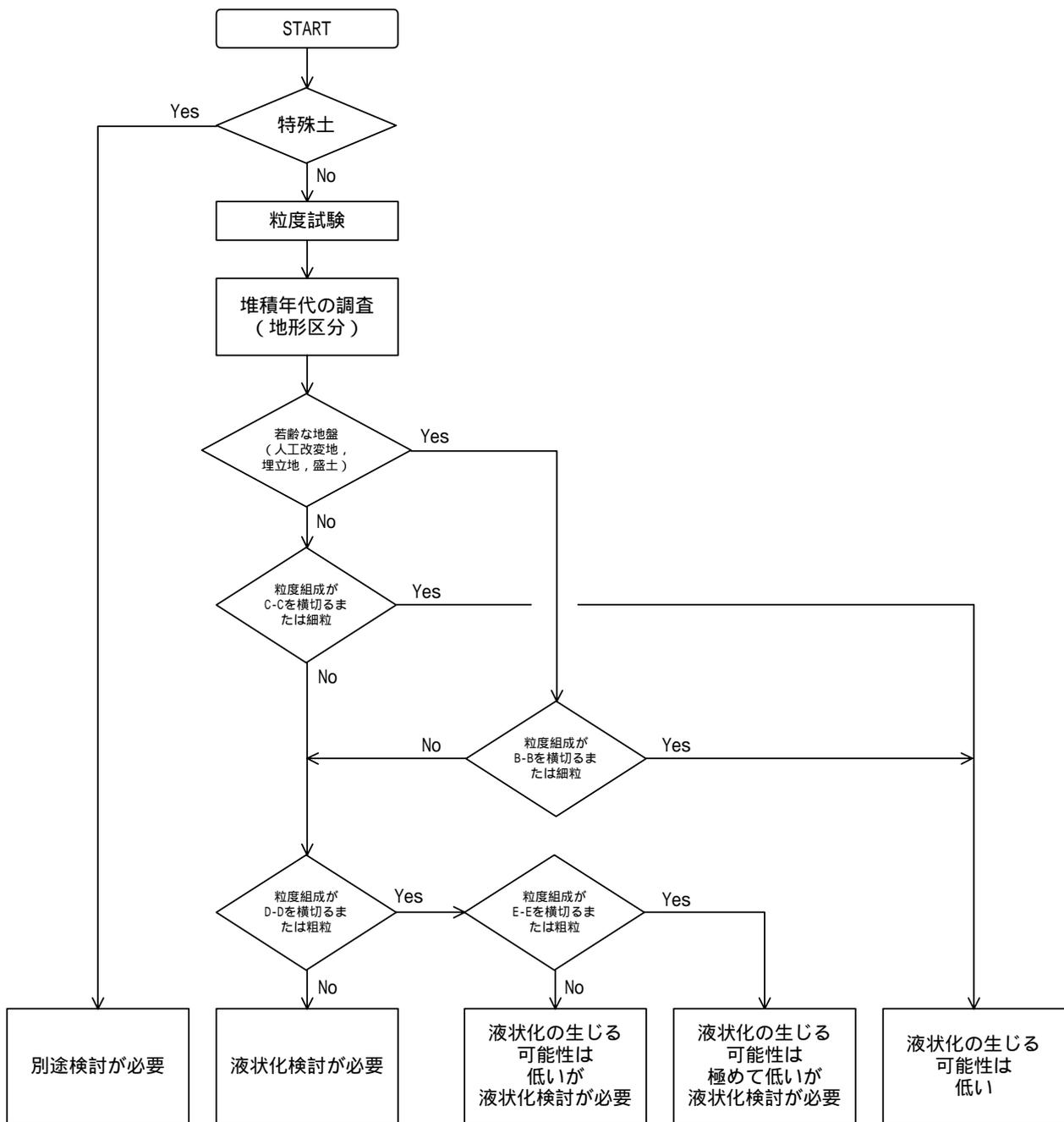


図-8 液状化の可能性の低い土層の判定方法

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。

- (6) 噴砂の粒度組成より得られた特性を用いて、液状化する可能性の低い土層を評価する方法を提案した。

なお、本論文は、文献(14)の主要部分を抜粋再編集し、これに加え、液状化する可能性の低い土層の評価方法を提案したものである。

今後は、逆にこの評価法で過去の地震の液状化・非液状化地点に対して適用性を検証する必要がある。

謝辞：本研究では、石原研而教授（当時、東京大学・現在、中央大学・東京理科大学）に研究の示唆を戴いた。土田肇博士（現在、新日本製鐵（株））には、資料を御提

供戴き，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。これらの方々を中心に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1)渡辺 隆: 新潟地震におけるパイプロフローテーションの効果, 土と基礎, 13-2, pp.27-33, 1965.2.
- 2)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, 345p, 1978.10.
- 3)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.
- 4)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.
- 5)Applied Technical Council: ATC-32 Improved seismic design criteria for California bridges, Provisional recommendations, California Department of Transportation, pp.89-92, 1996.
- 6)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(397), pp.17-22, 1991.2.
- 7)Seed, H.B. and Idress, 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.
- 8)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.
- 9)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.
- 10)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.
- 11)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.
- 12)東京都土木技術研究所: 東京都総合地盤図 , 東京都地質図集 3, 技報堂, 1977.8.
- 13)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.
- 14)沼田 淳紀, 森 伸一郎: 噴砂の粒度組成, 土木学会論文集, No.722/ -61, pp.129-147, 2002.12.