

細粒分を含む砂によって造成された海岸埋立地盤の液状化強度特性 (塑性指数と液状化強度との関係)

Liquefaction Potential of Fine-Containing Sands of Reclaimed Deposits
—The Relation between Plasticity Index of Soils and Resistance to Liquefaction—

原 田 光 男 (はらだ みつお)

東京電力㈱富津火力建設所 副長

浦 沢 義 彦 (うらさわ よしひこ)

東京電力㈱富津火力建設所 次長

白 井 伸 一 (しらい しんいち)

東京電力㈱富津火力建設所 課長

1. ま え が き

1987年12月17日午前11時に発生した千葉県一ノ宮沖約8 km, 深さ約58 kmを震源とする「千葉県東方沖地震」(マグニチュード6.7)は, 千葉県を中心とする広い範囲に液状化を発生させた。

液状化の発生は, 地形的には海岸埋立地が最も多く, 次いで砂丘, 後背地, 河川堤防等の順となっており¹⁾, 東京湾沿岸に立地する埋立地盤の液状化強度特性を知るうえで, 今回の液状化履歴は大きな意味を持つと言える。

「千葉県東方沖地震」では, 噴砂の物理的特性から, 細粒分を多く含む割には低塑性な砂が液状化したと考えられており, このような砂によって造成された海岸埋立地の液状化強度がクリーンな砂と同程度に小さいことが明らかとなった²⁾。

液状化強度は, 一般的には, 粒度の揃ったいわゆるクリーンな砂に比べ, 細粒分を多く含む砂の方が大きくなると考えられているが, 古関ら³⁾は, 鉦さい等の低塑性な試料で, 細粒分が多くなるとかえって液状化強度が低下することを示しており, 今回の液状化現象は, このような低塑性の細粒分を含む砂の液状化強度特性を反映したものと考えられる。

石原ら⁴⁾は, 細粒分を含む砂の液状化強度が, 細粒分に含有される粘土の「種類」や「量」に深く関係していることを示し, この「種類」や「量」を同時に評価するパラメーターとして塑性指数(I_p)を用いることを提案している。

粘土の「種類」とは, 粘土粒子を構成している鉦

物により, 粘土粒子間の結合力が異なることを示しており, Skempton⁵⁾(スケンプトン)は, このような粘土粒子間の結合力を「活性度」(Collodial "Activity")と呼び, 鉦物の種類により一意的に決まることを示している。

一方, 粘土の「量」とは, 粘土分含有率(Clay fraction)の大小を表し, この含有率により, 粘土を含む砂の粒子間結合力が左右されることを示している。

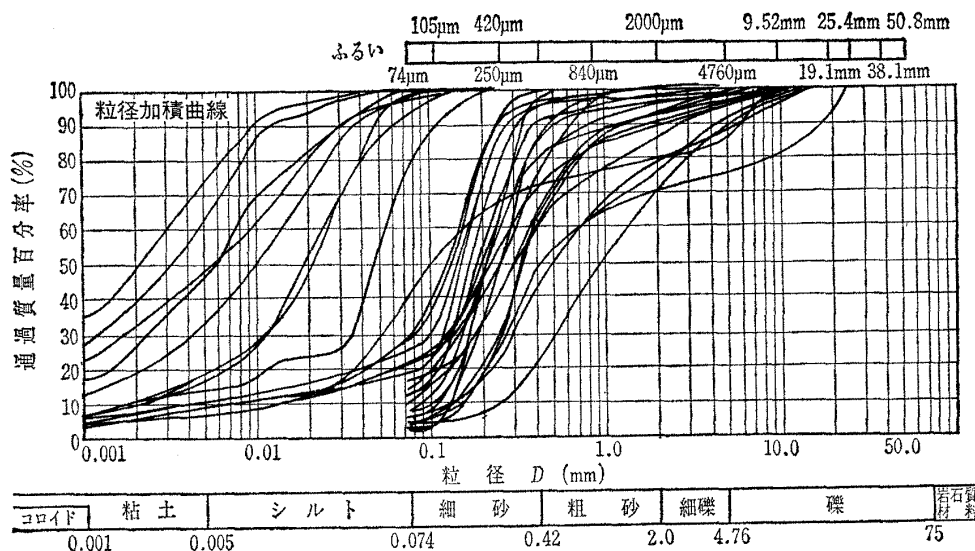
本論は, 「千葉県東方沖地震」の際に液状化した海岸埋立地盤の液状化強度特性を把握する目的で, 昭和40年代後半から昭和50年代に造成された千葉県下の海岸埋立地盤を対象に, 塑性指数と液状化強度の関係を求めたものである。

今回は, 現地採取土を乾式の分級器を用いて, 粘土, シルト, 砂の3材料に分離し, これらの混合割合を変えて作成した試料について, 物理試験や三軸液状化試験を実施した。特に, 分級により得られた粘土材についてはX線回折を行い, 粘土鉦物の同定を試みるとともに, 液性限界, 塑性限界試験を行い, その活性度を求めている。

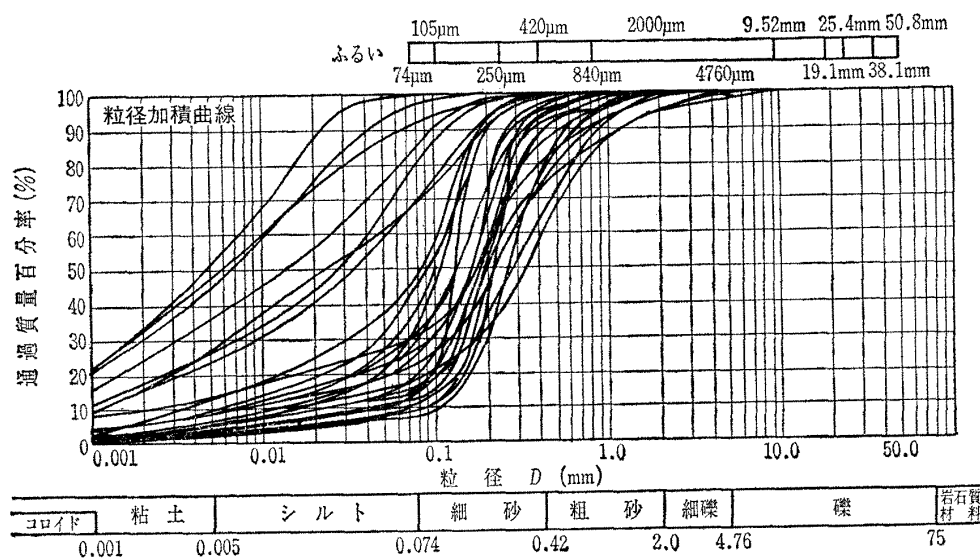
2. 細粒分を多く含む砂によって造成された海岸埋立地盤

2.1 検討対象箇所の地質

検討の対象としたのは, 富津市から袖ヶ浦町にかけて分布する海岸埋立地である。地層構成は, 表層が層厚3 m~4 m, N 値1~19(平均 N 値6)の埋立層で, その下に層厚0 m~4 m, N 値1~40(平



図—1 富津側の粒径加積曲線



図—2 袖ヶ浦側の粒径加積曲線

均 N 値16)の沖積砂層が堆積している。埋立層は、前面の海域の浚渫によるものである。

沖積砂層より下部は、沖積粘土層もしくは N 値30以上の洪積砂層となっている。

本論では、表層の埋立層を海岸埋立地盤と呼ぶ。

2.2 粒度特性

当該埋立地盤の粒径加積曲線を富津側（富津市、君津市、木更津市の埋立地盤）と袖ヶ浦側（袖ヶ浦町の埋立地盤）に分けて図—1, 2に示す。富津側、袖ヶ浦側とも、平均粒径が0.1 mm～0.3 mm程度、均等係数が15前後の砂粒度が主体であるが、一部に、細粒分含有率が50%を越え、粘土分（5 μ m以下）を20%以上含む細粒土も存在している。

表—1は、日本統一土質分類法を用いて、図—1, 2に示した試料の土質分類を行った結果である。

当該埋立地盤の場合、細粒分が15%以上、50%未満の砂質土が全体の3～4割を、また、細粒分を50%以上含む細粒土が全体の約2割を占めており、全体としては、細粒分を多く含むものとなっている。

図—3は、細粒分含有率（シルト+粘土）と粘土分含有率の関係を示したものである。

細粒分含有率が大きくなると粘土分含有率も大きくなる傾向が認められ、原点を通る直線として最小自乗近似を行うと次式を得る。

$$p_c = 0.38 F_c \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F_c は細粒分含有率（74 μ m以下）、 p_c は粘土分含有率（5 μ m以下）を示す。

一般に、粒度試験を行って細粒分含有率を求めることは比較的容易であるが、粘土分含有率を求めることは、比重浮ひようによる測定等を伴い、多大な時間と労働がかかる。

今回のように、細粒分含有率

と粘土分含有率の間に(1)式のような関係があれば、細粒分含有率から粘土分含有率を求めることができ、粘土分含有率の推定が容易となる。

3. 試料の採取と分級

3.1 試料採取

試料は、富津市新富25番地の海岸埋立地から採取

表—1 当該埋立地盤の日本統一土質分類の結果

土 質 名		富津側陸上部	袖ヶ浦側陸上部
砂粒土	砂 ($F_c < 5\%$)	5(15%)	0(0%)
	細粒分まじり砂 ($5\% \leq F_c < 15\%$)	10(30%)	11(33%)
	砂質土 ($15\% \leq F_c < 50\%$)	10(30%)	15(45%)
細粒土 ($F_c \geq 50\%$)		8(25%)	7(22%)
合 計		33(100%)	33(100%)

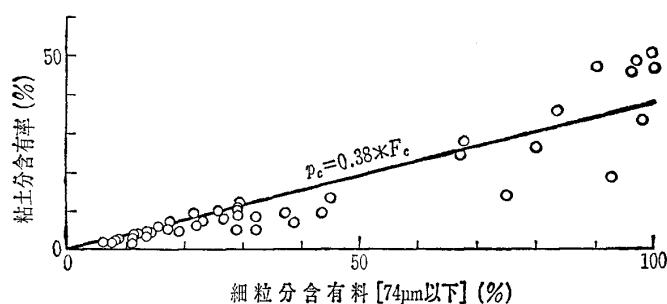


図-3 当該埋立地盤の細粒分含有率と粘土分含有率の関係

した。富津市から袖ヶ浦町にかけて分布する海岸埋立地の地質学的成因がどの程度同一視できるか不明であるが、ここでは一つの例として上記試料を用いることとした。

3.2 分級

細粒分を含む砂の液状化強度特性を評価するパラメーターとして、塑性指数を用いることが提案されているが、前述のようにこの塑性指数は、細粒分の中の粘土の活性度と粘土分含有率の積で与えられる。この細粒分の中に含まれる粘土の活性度を求めるため、当該埋立地から採取した試料を、乾式の分級器を用いて、粘土 (5 μm 以下)、シルト (5 μm ~ 74 μm) および砂 (74 μm ~ 2 mm) の3材料に分級した。

分級にあたっては、まず最初に、採取した試料を、2 mm 以上の礫分と 2 mm 以下(砂+シルト+粘土)とにふるい分け、次いで、2 mm 以下の試料を高速気流乾燥器 (最高温度 100℃、乾燥時間 0.7 sec) にかき、単一粒子の状態まで分散された粉体とした。

表-2 現地採取試料の分級結果

分 級 材	分 級 重 量 (kg)
砂 (74 μm ~ 2 mm)	640 (85.3%)
シルト (5 μm ~ 74 μm)	33 (4.4%)
粘土 (5 μm under)	11 (1.5%)
ロ ス	66 (8.8%)
合 計	750 (100.0%)

表-3 分級材の粒度特性

粒 度 特 性	砂	シルト	粘 土*
細礫分 (4.76 mm ~ 2 mm) %	0	0	0
粗砂分 (2.0 mm ~ 0.42 mm) %	14	0	0
細砂分 (0.42 mm ~ 74 μm) %	84		
シルト分 (74 μm ~ 5 μm) %	2	93	11
粘土分 (5 μm 以下) %		7	89
最 大 粒 径 mm	2.00	0.074	0.008
60% 粒 径 mm	0.23	0.044	0.0027
30% 粒 径 mm	0.16	0.031	0.0018
10% 粒 径 mm	0.11	0.020	0.0010
均 等 係 数 U_c	2.1	2.2	2.7

*粘土分については、光透過沈降法を原理とする粒度測定器 (ミクロン・フォトサイザー、測定範囲 0.1 μm ~ 100 μm) を用いて測定したものとす。

これを基本的には、回転慣性力の差や流体抵抗力の差を利用した乾式の分級器にかけ、砂分と細粒分に分離し、更に、細粒分をシルトと粘土に分離した。

現地から約 1 t の試料を採取し、礫分を除いた乾燥試料 0.75 t に対し分級を行った。分級の結果得られた砂、シルト、粘土の量を表-2 に示す。

表-3 および図-4 は、分級した結果得られた3材料の粒度特性を示したものであるが、これら分級

された材料の純度は、砂で98%、シルトで93%、粘土で89%程度となっており、純度の高いものである。

4. 粘土鉱物の同定とその活性度

4.1 X線回折

現地採取試料を分級して得られた粘土 (5 μm 以下 89%) に対し、X線回折を行った。表-4 は、その結果を主要な部分についてまとめたもので

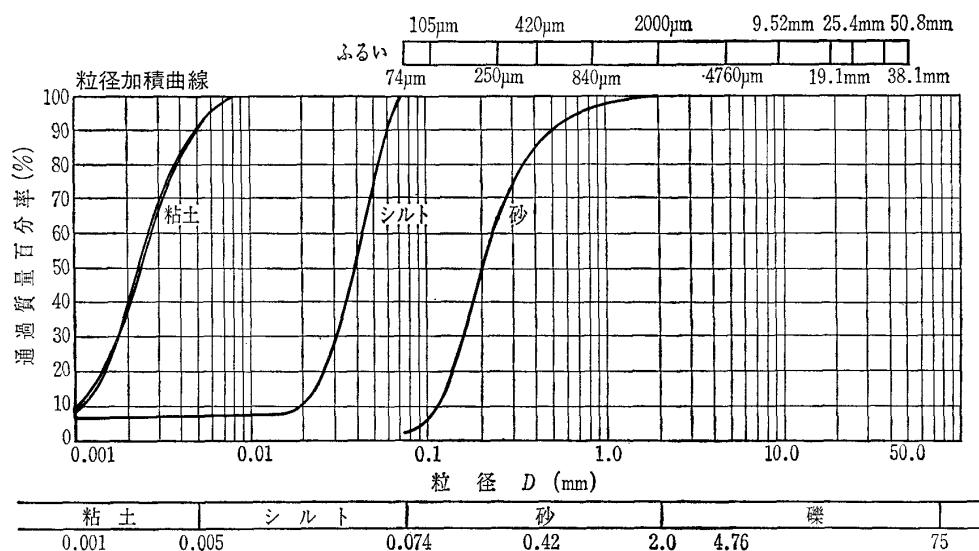


図-4 現地採取土を分級して得られた粘土、シルト、砂の粒度特性

表-4 粘土材のX線回折結果(スペクトル強度順)

入射角度 $\theta(^{\circ})$	結晶格子 間隔 $d(\text{\AA})$	スペクトル 強度 (比率)	同 定 物 質
26.6	3.35	1.0	石英, 長石, 雲母, カオリン類
7.8	11.32	0.5	雲母
19.7	4.50	0.5	雲母, カオリン類
27.7	3.22	0.5	長石, カオリン類
29.3	3.20	0.4	長石, カオリン類

($\lambda=1.54184 \text{\AA}$)

ある。今回のX線回折では、石英、長石、雲母類、カオリン類が検出されたが、当該粘土の場合は、これらの混合物であり、X線回折のピークが重なり合っているため、定量的に鉱物の同定を行うことはできなかった。

X線回折で検出された石英や長石は造岩鉱物であり、岩石の物理的・力学的風化の過程で生成されたもので、一次鉱物に分類されたものである。一般に、このような鉱物は、微細な破片でも塑性を示さないことが知られている。

一方、カオリン類は、一次鉱物の化学変化により生成されたもので、いわゆる粘土鉱物と呼ばれる二次鉱物である。

Skempton⁵⁾は、粘土を構成する各種鉱物について、その活性度を求めているが、今回検出された鉱物は、いずれも不活性(Inactive)に分類されたものである。

4.2 粘土の活性度(液性限界, 塑性限界試験)

分級して得られた粘土について、実際に液性限界, 塑性限界試験を行い、活性度を求めた。

表-5に、分級して得られた粘土のコンシステンシー特性を示す。

Skemptonは、活性度を $2\mu\text{m}$ 以下の粘土分の含有率と塑性指数の関係で定義しているが、日本では、粘土の粒径区分を $5\mu\text{m}$ 以下としていることから、本論では、活性度を $5\mu\text{m}$ 以下の粘土分の含有率と塑性指数の関係で定義づけることとした。

表-5 粘土材のコンシステンシー特性

項	目	試験結果
液性限界	$w_L(\%)$	99
塑性限界	$w_p(\%)$	44
塑性指数	I_p	55

注) 試験に用いた粘土材は、今回の分級により得られたもので、粘土分($5\mu\text{m}$ 以下)が89%, シルト分($5\mu\text{m}\sim 74\mu\text{m}$)が11%である。

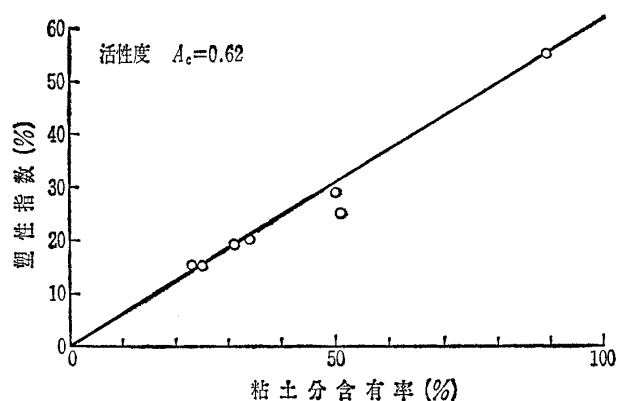


図-5 粘土分含有率と塑性指数の関係(ただし、粘土分含有率は $5\mu\text{m}$ 以下のもの)

表-6 粘土分含有率とコンシステンシー特性

試料	粒 度 (%)			液性限界 $w_L(\%)$	塑性限界 $w_p(\%)$	塑性指数 I_p
	粘土分	シルト分	砂 分			
1	23	60	17	37	22	15.0
2	25	60	15	38	23	15.0
3	31	46	23	41	22	19.0
4	34	43	23	40	20	20.0
5	50	50	0	57	28	29.0
6	51	49	0	54	29	25.0
7	89	11	0	99	44	55.0

表-5のコンシステンシー特性から、粘土の活性度を求めると以下のとおりで、当該粘土の活性度は0.62となる。

$$\begin{aligned} \text{活性度}(A_c) &= I_p / 5\mu\text{m以下の粘土分含有率} \\ &= 55 / 89 = 0.62 \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

Skempton⁵⁾は、粘土を構成する鉱物が同一であれば、粘土分含有率と塑性指数が比例し(原点を通る直線で近似され)、含有される粘土の活性度が一意的に決まることを示したが、この点について、当該埋立地盤を対象に検証した結果が表-6および図-5である。これは、今回分級して得られた粘土、シルト、砂の混合割合を変えて作成した試料について、液性限界, 塑性限界試験を行い、粘土分含有率と塑性指数の関係を求めたものである。

その結果、粘土分含有率と塑性指数は、ほぼ、次式で近似され、比例関係にあることが分かる。

$$I_p = 0.62 p_c \cdots \cdots (3)$$

(3)式のような関係が得られていれば、試験によって塑性指数が求められない低塑性の試料に対しても、その粘土分含有率から塑性指数を推定することができる。

5. 塑性指数と液状化強度

5.1 試料の作成

三軸液状化試験の試料は、図—3に示した当該埋立地盤の細粒分含有率と粘土分含有率の関係を考慮し、分級して得られた粘土、シルト、砂の混合割合を変えて、細粒分（シルト+粘土）の含有率を変化させたものである。

試料の作成にあたっては、混合材料に水を加え良く練り混ぜ、内径5.04cmのステンレス製の圧密容器に入れ、総重量0.5 kgf/cm²の段階荷重をかけて圧密した。

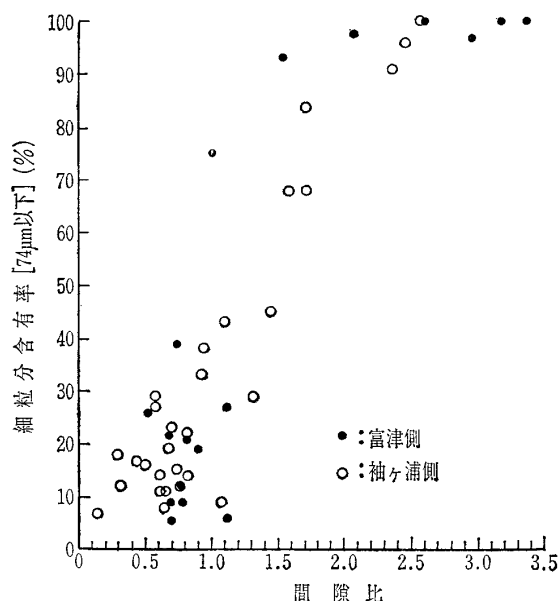
圧密容器で作成した試料の物理的性質については、表—7を参照されたい。

この圧密試料から直径5cm、高さ10cmの円柱供試体を整形して三軸セルにセットし、有効拘束圧0.5 kgf/cm²で圧密したのち、供試体を非排水状態にして、正弦波による繰返し荷重を与えた。

表—7からも分かるように、圧密容器を用いて試料を作成した場合、細粒分が多くなると間隙比が大きくなる傾向が認められる。

図—6は、実際の埋立地盤から採取した試料の細粒分含有率と間隙比の関係を示したものであるが、圧密容器で作成した試料と同様な傾向が認められ、試験試料と原地盤の間隙比は、ほぼ一致していると言える。

このようなことから、間隙比が一定でなくても、今回作成した試料は、実際の埋立地盤の堆積状況を



図—6 海岸埋立地盤の細粒分含有率と間隙比との関係

十分に模擬できていると判断し、三軸液状化試験を実施した。

一方、今回作成した供試体は、圧密や拘束圧の点では、原地盤をある程度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ージング効果については考慮されていない。しかし、原地盤が前面の海域を浚渫して造成された人工地盤であり、若材齢であることを考えれば、このような供試体の液状化強度と原地盤の液状化強度とは大きく異なるものではないと考えた。

5.2 試験結果

圧密容器を用いて作成した液状化強度を表—7に示す。液状化強度としては、20回の繰返しで、5%両振幅ひずみが生じるような応力比を用いている。また、表—7には試験により求めた塑性指数と、粘土分含有率から(3)式に示す関係から計算した塑性指数を併記した。

表からも分かるように、本試料の場合、細粒分含有率が50%程度（粘土分含有率が15%程度）であっても、塑性指数は、N.P.（計算から求めた塑性指数は10以下）となって、低塑性であることが分かる。

クリーンな砂に近いA試料の液状化強度が0.250であるのに対し、細粒分を12%～50%程度含むB～Hの試料の液状化強度は、0.193～0.250程度となっており、クリーンな砂の液状化強度と同程度かそれ以下となっている。

表—7 圧密容器で作成した試料の物理的性質と液状化強度

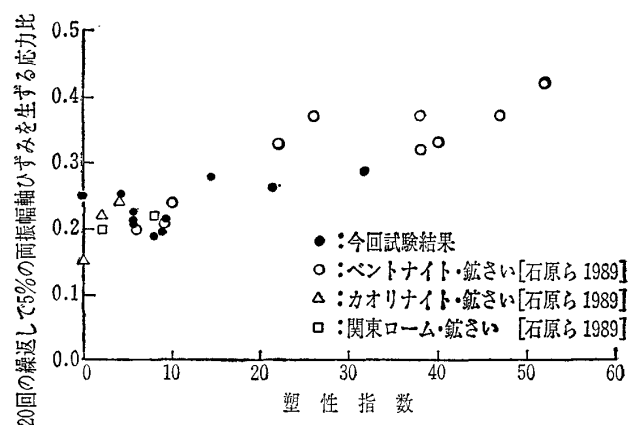
試料名 ¹⁾	粒度(%)			圧密後の間隙比	塑性指数		液状化強度 ⁴⁾
	粘土分	シルト分	砂分		$I_p^{2)}$	$I_p'^{3)}$	
A(0/3)	0	3	97	0.734～0.768	NP	0	0.250
B(7/12)	7	5	88	0.667～0.721	NP	4.3	0.250
C(9/15)	9	6	85	0.662～0.678	NP	5.6	0.225
D(9/24)	9	15	76	0.558～0.642	NP	5.6	0.215
E(9/32)	9	23	68	0.611～0.637	NP	5.6	0.210
F(14/25)	13	12	75	0.636～0.644	NP	8.1	0.193
G(14/32)	14	18	68	0.637～0.650	NP	8.7	0.198
H(15/50)	15	35	50	0.677～0.720	NP	9.3	0.215
I(23/85)	23	62	15	0.843～0.897	15.0	14.3	0.280
J(34/77)	34	43	23	1.010～1.037	20.0	21.1	0.265
K(51/100)	51	49	0	1.435～1.497	25.0	31.6	0.288

1) (粘土分含有率/細粒分含有率)、細粒分は粘土分とシルトの和

2) 0.42mmふるいを通過する試料に対して行った液性限界・塑性限界試験から求めた塑性指数

3) 粘土の活性度 $A_c=0.62$ に粘土分含有率を掛けて求めた塑性指数

4) 20回の繰返しで5%の両振幅ひずみを生じる応力比



図一7 塑性指数と液状化強度の関係

「千葉県東方沖地震」の際の噴砂の粒度特性から、従来液状化しやすいと考えられていたクリーンな砂に加え、細粒分を15%以上含む砂粒土や細粒土が数多く液状化したことが報告されているが¹⁾、今回の結果は、このような報告と整合すると考えられる。

図一7は、塑性指数と液状化強度の関係を示したものである。図には、石原ら⁴⁾が、ベントナイトやカオリナイト等を豊浦標準砂に混ぜて試験した結果を併記した。

図からも分かるように、検討の対象としている試料が異なるにもかかわらず、これらの試験結果は調和的で、低塑性なものほど液状化強度が小さくなる傾向が認められる。

このような結果は、海岸埋立地盤等、細粒分を含む砂の液状化強度が、塑性指数によりある程度推定できることを示唆したものであると言える。

6. ま と め

本論では、千葉県下の海岸埋立地盤から採取した試料を砂、シルト、粘土の3材料に分離し、これらの材料を当該地盤の粒度特性を模擬するように混合して作成した試料について、物理試験や液状化強度試験を実施した。

得られた結果は、次のとおりである。

- 1) 今回採取した埋立地盤に含有される粘土分(5 μm 以下)は、石英、長石、雲母類、カオリン類等の非活性な鉱物から構成されており、その活性度は、0.62程度であった。
- 2) 当該埋立地盤の場合、細粒分を50%程度含むものであっても低塑性であり、液状化強度はク

リーンな砂と同程度もしくはそれ以下となっている。

- 3) 塑性指数と液状化強度の関係は、試料が異なるにもかかわらず、石原らの既往の研究成果と調和的で低塑性なものほど液状化強度が、小さくなる傾向が認められた。

一般に、細粒分を多く含む砂は、クリーンな砂に比べ液状化強度が大きくなると考えられているが、当該埋立地盤のように、細粒分を多く含むものであっても、低塑性な場合には、液状化強度がクリーンな砂に比べ大きくならない場合があるので、十分な注意が必要である。

一方、当該埋立地盤の場合、①細粒分含有率と粘土分含有率が比例する、②細粒分に含まれる粘土の活性度が求められれば、このような細粒分を含む任意の砂の塑性指数は、粘土分含有率との関係から計算により求めることができる、等が分かった。

今後更に検討が進み、細粒分を多く含む砂によって造成された埋立地盤の塑性指数と液状化強度の関係が明確になれば、上記①、②を利用して、粒度試験の結果(細粒分含有率)から、容易に液状化強度を推定することが可能となる。

最後に、本検討を進めるにあたり、東京大学石原研而教授には、終始御指導を賜りました。誌上を借りて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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講演概要集，pp. 943～946，1988.
- 2) 沼田淳紀・太田直之・森伸一郎・境野典夫・長谷川昌弘・滝本幸夫：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)，第20回土木学会地震工学研究発表会講演概要集，pp. 241～244，1987.
- 3) 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講演概要集，pp. 595～596，1986.
- 4) Ishihara, K., Koseki, J.: Cyclic Shear Strength of Fine-Containing Sands, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 101～106, 1989.
- 5) A.W. Skempton: The Collodial Activity of Clay, Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 57～61, 1953.

(原稿受理 1990.3.2)