

東京低地における沖積砂質土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響

(A Consideration on Grain Size of Alluvial Sands and Relationships
between Fines and Liquefaction Resistance in Tokyo Lowland)

亀井祐聡ⁱ⁾ (Masaaki Kamei)
 森本 巖ⁱⁱ⁾ (Iwao Morimoto)
 安田 進ⁱⁱⁱ⁾ (Susumu Yasuda)
 清水善久^{iv)} (Yoshihisa Shimizu)
 小金丸健一^{v)} (Kenichi Koganemaru)
 石田栄介^{vi)} (Eisuke Ishida)

キーワード：N 値／液状化強度／細粒分含有率／沖積砂質土
／有楽町層(IGC：D3/D7)

1. はじめに

一般的に液状化判定を行う場合、 N 値と粒度試験結果が多く用いられる。粒度に関するデータが無い場合には、既存の土質名から判断することがよく行われる。しかし、柱状図に記載される土質名は目視による判断で行われることが多く、土質名とその土質の粒度特性との関係は必ずしも明確ではない。特に東京低地の沖積砂層は細粒分をかなり含んだ細砂、シルト質細砂で構成されることが多く、目視での判断は難しいため、土質名のみから液状化判定を行う場合、実際とは異なった細粒分の設定をする可能性もあると考えられる。また、東京低地に分布する砂の液状化強度は細粒分に強く依存することが知られているため⁵⁾、細粒分が液状化判定の結果を大きく左右するとも考えられる。

本研究では、対象とする地域や地層の特性を考慮して砂の細粒分の設定を行えば上述の問題を改善できると考え、東京及びその周辺の低地(以降、東京低地と呼ぶ)で実施された粒度試験結果を分析し、砂質土の細粒分含有率の地域性、 N 値と細粒分含有率の関係等について検討した。

さらに東京低地における、沖積砂質土の繰返し非排水三軸試験を行い、細粒分が液状化強度に及ぼす影響について検討した。これらのデータに基づき沖積砂質土の液状化強度推定式を作成し、その適用性を検討するために、関東地震において液状化履歴がある地点と無い地点に対し液状化判定を行った。またこの液状化判定手法を GIS に導入し、液状化のゾーニングを行った。

2. 上部有楽町層の砂質土の粒度特性に関する検討

東京及びその周辺の低地部には三角州等の沖積砂層が広く分布し

ている。これは、現在より6000年前以降の、主に河川の堆積物による地層であり、有楽町層の上部砂層と呼ばれる³⁾。砂層の下には厚い軟弱なシルト・粘土層が存在する。砂層の厚さは場所により異なり、厚いところでは10 m 程度ある。なかには氾濫平野的な地形で砂層が無い、あっても非常に薄いところも存在する。最表層には近年の人工改変により、多くの場所で埋立・盛土層が分布している。しかし東京湾岸の埋立地を除いて、一般に地下水位以下の埋立・盛土層は薄い。従って、東京低地で液状化が広く発生するか否かは、上部有楽町層が液状化するかどうか大きく影響されると考えられる。

液状化が生じる可能性のある層は、地下水位以下の沖積砂層と埋立土層である。東京低地部の砂の液状化強度は細粒分に強く依存することが指摘されており⁵⁾、 N 値をもとに液状化強度を推定する場合には、細粒分含有率を適切に設定する必要がある。また、埋立土層を構成する材料は臨海部を除き不明なことの方が多く、ボーリング柱状図等からその物性を特定し、液状化の可能性について議論することは困難である。そこで沖積層を対象に、東京低地においてボーリング調査に伴い実施された沖積土の粒度試験データにより、堆積環境を考慮した粒度特性に関する検討を行った。

2.1 使用したデータ

使用したデータのうち、砂質土を表-1に、シルト質土(シルト質砂、砂質シルト、シルトを指す)を表-2に示す。資料数は砂質土が32、シルト質土が37である。表において、砂質土とシルト質土の区分は細粒分含有率35%を目安としている。

データは東京低地(荒川低地、中川低地を含む)と多摩川低地での地盤調査結果から抽出したものである。砂質土については、主に河川沿いの自然堤防地帯のデータから構成されている。表-1には河口からの距離も示してある。整理した河川は、荒川・隅田川、中川・古利根川及び多摩川である。

これらのデータは G.L. - 数 m から10 m 程度の深さを対象に整理した。特に砂質土については5 m 深さ前後のデータがほとんどである。これは本研究が液状化を対象としているからである。

このようなデータに基づき、河川に沿って細粒分の地域性があるかどうか、また細粒分含有率と N 値等との間に相関があるかどうかを検討した。

2.2 沖積砂質土の河口からの距離と細粒分含有率の関係

表-1の沖積砂層データについて、河口からの距離と細粒分含有率との関係をプロットしたものが図-1である。河川は、①多摩川、②中川・古利根川(以降、中川と呼ぶ)、③荒川・隅田川(以降、荒川と呼ぶ)の3種に分類した。データが少ないのであまりは

ⁱ⁾ 基礎地盤コンサルタンツ(株)防災部(千代田区九段北1-11-5 森倉館3F)

ⁱⁱ⁾ 基礎地盤コンサルタンツ(株)防災部

ⁱⁱⁱ⁾ 東京電機大学理工学部建設環境工学科

^{iv)} 東京ガス株式会社

^{v)} 東京ガス株式会社

^{vi)} 日本技術開発株式会社

(2001. 6. 20 原稿受付・討議期限 2003. 3. 1 要請があれば1ヶ月の期限延長可能)

表-1 整理に用いた砂質土のデータ

ボーリングデータ			粒度特性		河口からの距離	
深度(m)	土質名	N値	FC (%)	D ₅₀ (mm)	河川名*	距離(km)
5.3	細砂	17	15	0.218	A	27.6
4.3	細砂	7	15	0.341	A	23.1
6.3	細砂	14	12	0.156	A	23.1
5.2	細砂	17	21	0.156	A	13.0
6.2	中砂	19	6	0.362	A	13.0
4.3	レキ混細砂	15	8	0.620	A	9.5
2.3	細砂	5	23	0.138	A	7.5
4.3	細砂	10	19	0.169	A	7.5
3.3	シルト質細砂	4	20	—	A	6.3
4.0	細砂	16	11	0.308	A	5.2
7.0	細砂	12	24	—	A	2.1
6.5	シルト混細砂	4	28	—	A	2.1
2.5	微細砂	13	3	—	N	24.8
3.3	細砂	19	11	0.309	N	21.3
5.3	細砂	25	11	0.281	N	21.3
4.3	細砂	21	10	0.219	N	16.7
5.4	細砂	10	9	0.193	N	7.3
4.3	シルト質砂	10	22	0.147	N	7.3
5.3	細砂	17	12	0.194	N	3.7
6.3	細砂	12	23	0.149	N	3.7
3.3	細砂	5	28	0.138	N	3.4
5.3	細砂	10	26	0.142	N	3.4
6.3	細砂	10	30	0.129	N	-1.6
7.3	細砂	12	14	0.169	N	-1.6
4.3	砂レキ	37	6	6.36	T	8.9
5.3	砂レキ	28	1	13.3	T	8.9
4.3	細砂	11	12	0.243	T	5.9
3.3	レキ混砂	20	10	0.389	T	6.0
4.3	レキ混砂	22	10	0.621	T	6.0
4.3	細砂	6	25	0.145	T	1.8
8.5	細砂	10	21	0.162	T	0.5
7.5	シルト質細砂	15	14	0.186	T	0.5

*河川名：A→荒川・隅田川，N→中川・古利根川，T→多摩川
距離：現河口からの概算距離(km)

っきりとしたことは言えないが、全体に上流側ほど細粒分が少ない砂が堆積しているという関係が窺える。河口からの距離が増大するとともに細粒分が少なくなる傾向は多摩川が最も強く、ついで中川、荒川の順となっている。多摩川沿いについては、上流側の地盤浅部はN値の高いレキ層となっており、また中川については上流にきれいな砂が堆積しているためこのような傾向になっているものと考えられる。

2.3 沖積砂質土のN値と細粒分含有率の関係

同じデータを用いて、河川毎にN値と細粒分含有率に相関があるかどうか調べた。図-2はN値と細粒分含有率との関係を示したものである。かなりバラツキは多いものの、N値が大きいかほど細粒分含有率は小さいという関係を示している。河川による差はみられないようである。このように東京低地の有楽町層の砂層はN値が大きいかものはきれいな砂で、逆にN値が小さいものは細粒分が多い砂であることが多いことが分かった。

ところで、過去に新潟地震や日本海中部地震で液状化したとされる自然地盤の砂はN値が10程度かそれ以下で、細粒分が10%以下のきれいな砂であるとされている²⁾⁶⁾⁷⁾。こういった砂と比較して上部有楽町層の砂は細粒分が非常に多いことが分かる。また上部有

表-2 整理に用いたシルト質土のデータ

ボーリングデータ			粒度特性		
深度(m)	土質名	N値	FC (%)	PC (%)	D ₅₀ (mm)
6.3	シルト質砂	2	35	16	0.127
5.3	シルト質細砂	2	35	16	0.197
6.3	シルト質細砂	1	35	20	0.129
8.3	砂質シルト	1	38	19	0.123
8.3	シルト質細砂	3	41	5	—
6.4	シルト	1	41	21	0.119
7.3	シルト質細砂	1	43	20	0.178
6.3	シルト質細砂	3	43	7	—
8.3	砂質シルト	2	43	14	0.101
5.4	砂混シルト	0	44	19	0.107
7.4	砂混シルト	0	45	23	0.103
11.3	砂質シルト	1	45	20	0.089
8.3	シルト混細砂	4	48	19	0.084
7.3	シルト質細砂	6	51	—	0.075
12.3	砂混シルト	4	51	17	0.017
9.3	砂質シルト	0	51	23	0.071
9.3	砂質シルト	1	52	15	0.070
8.3	砂質シルト	2	54	19	0.066
8.4	砂質シルト	3	60	23	0.055
10.4	砂質シルト	2	63	28	—
6.3	シルト狭細砂	3	64	26	0.044
8.3	シルト混細砂	3	64	22	0.040
8.4	砂混シルト	0	70	29	0.045
7.3	砂混シルト	3	72	24	0.027
10.4	砂質シルト	1	77	30	0.023
14.4	砂混シルト	1	78	28	0.032
8.3	砂混シルト	0	78	29	0.026
7.4	砂質シルト	1	79	25	0.028
6.5	シルト	0	79	13	0.043
9.5	シルト	2	79	23	0.037
7.4	砂混シルト	0	80	32	0.020
9.4	シルト	1	83	31	0.019
8.4	砂質シルト	1	86	25	0.018
7.4	砂混シルト	0	88	36	0.010
12.4	砂混シルト	1	92	37	0.012
7.4	砂混シルト	1	94	38	0.011
4.4	砂混シルト	0	95	29	0.011

楽町層には新潟砂のように細粒分の少ない比較きれいな砂も存在するが、このような砂はN値が高めの傾向にある。

2.4 上部有楽町層のN値と細粒分含有率の関係

前述のデータは細粒分が30%以下で、ボーリング柱状図の土質名は主に細砂であった。液状化判定の際には、シルト質砂や砂質シルトといった土質も考慮しなければならないこともあることから、こういったデータも含めて議論する。

まず細粒分に含まれる粘土分について検討する。図-3に細粒分含有率と粘土分含有率の関係を示す。幾分バラツキはあるものの、有楽町層の土質の細粒分のうち粘土分は40%前後含まれており、豊富であることが分かる。ただし、図-3で砂質土に関しては沈降分析を行っていないものが多く、粘土分含有率が不明であるデータが多い。

次に、粘土分含有率及び平均粒径とN値との関係を調べた結果を図-4、図-5に示す。粘土分含有率とN値との関係は、細粒分含

有率と N 値の関係と同様の傾向を示すが、 N 値が5以下で粘土分が急激に増加しているのが分かる。 N 値と平均粒径との間にもある程度相関がみられる。平均粒径が0.1 mm 程度以上になると粒径

に比例して N 値が大きくなるのが分かる。

図-6に細粒分含有率と N 値との関係を示す。同図には、土質名から推定した代表的な細粒分含有率の値⁵⁾も示している。 N 値が小

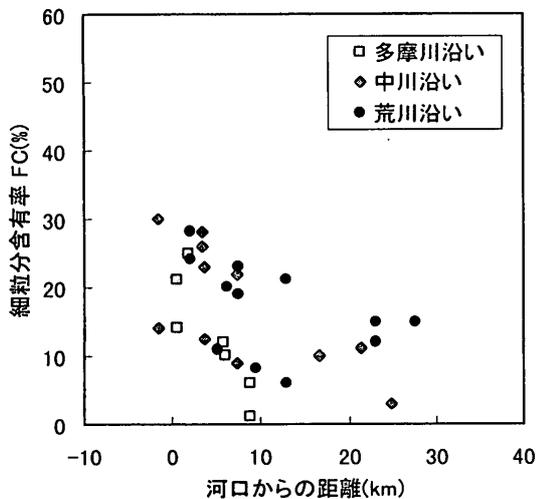


図-1 河口からの距離と細粒分の関係

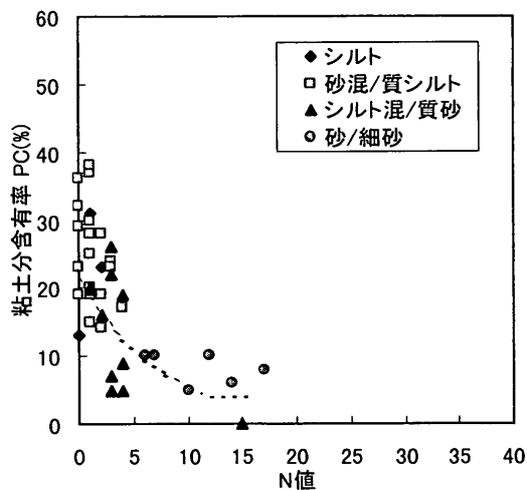


図-4 N 値と粘土分の関係

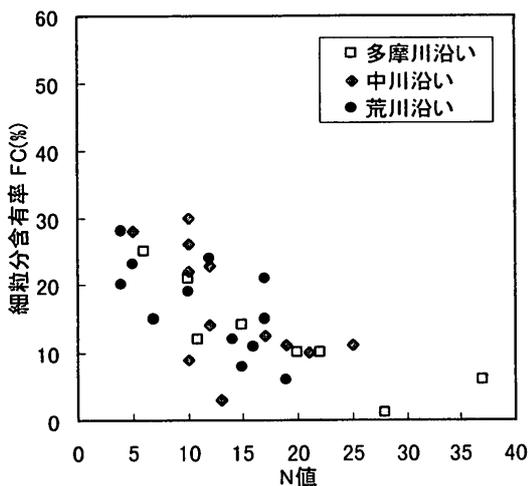


図-2 砂質土の N 値と細粒分の関係

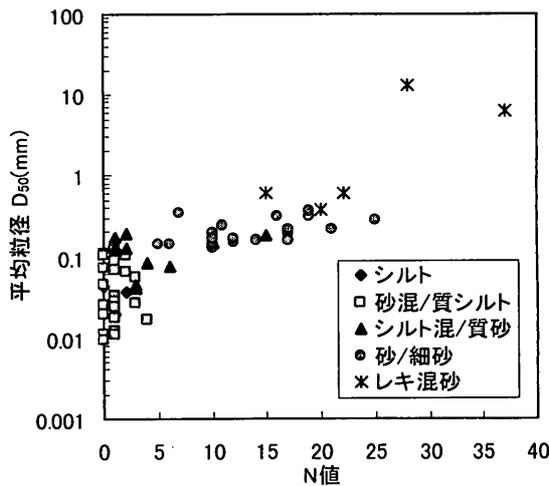


図-5 N 値と平均粒径の関係

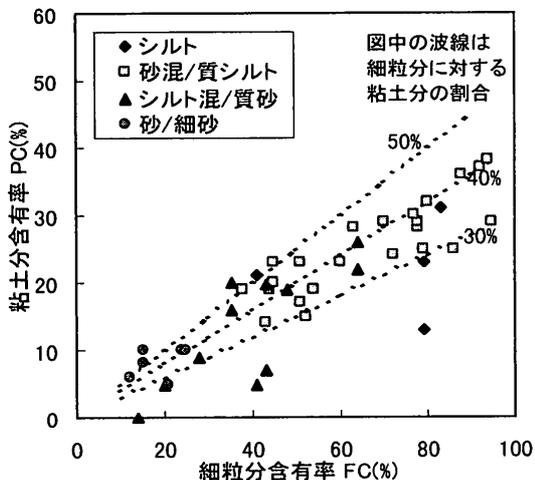


図-3 細粒分に含まれる粘土分

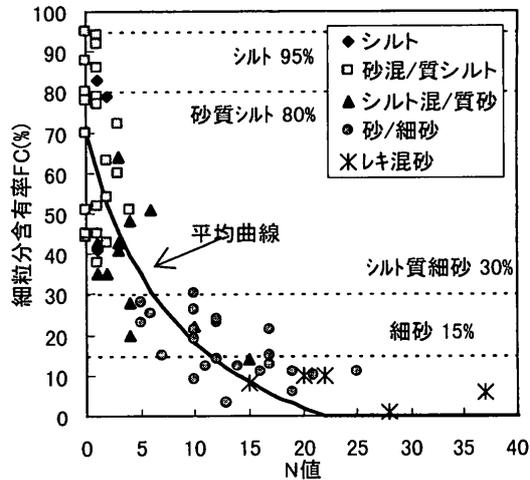
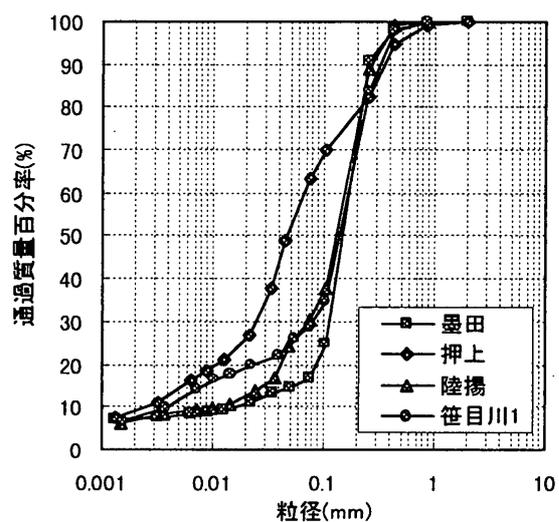


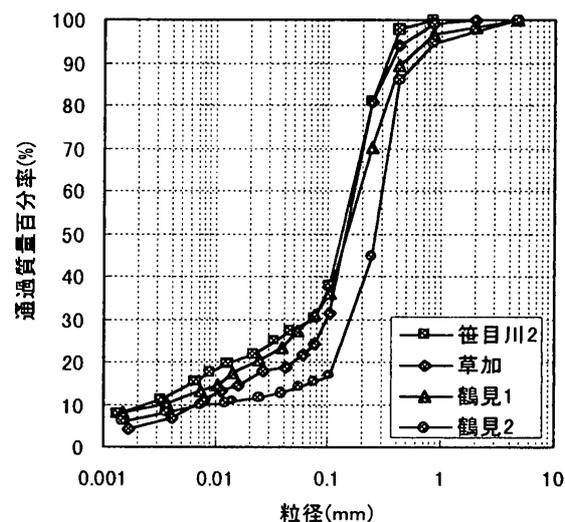
図-6 沖積層の N 値と細粒分の関係

表-3 細粒分を多く含む砂の液状化強度試験結果

地点	深度 (m)	該当深度 N 値	湿潤密度 (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	相対密度 (%)	平均粒径 D_{50} (mm)	細粒分 FC (%)	粘土分 PC (%)	試験拘束圧 (kPa)	液状化強度 Rl_{20} ($DA=5\%$)
隅田	4.8	10	1.882	1.502	0.872	86.4	0.150	17	8	50	0.40
押上	2.5	4	1.809	—	—	—	0.047	64	14	30	0.50
陸揚	5.4	8	1.831	1.374	0.797	69.4	0.132	30	9	60	0.31
笹目川1	5.9	2	1.823	1.652	0.985	96.9	0.141	29	12	70	0.31
笹目川2	7.5	2	1.846	1.658	1.004	107.4	0.138	30	13	80	0.27
草加	3.0	4	1.794	1.534	0.893	75.6	0.148	24	8	50	0.40
鶴見1	7.5	6	1.934	1.549	0.908	105.9	0.154	31	12	80	0.45
鶴見2	8.4	7	2.036	1.194	0.694	96.9	0.271	15	9	90	0.30

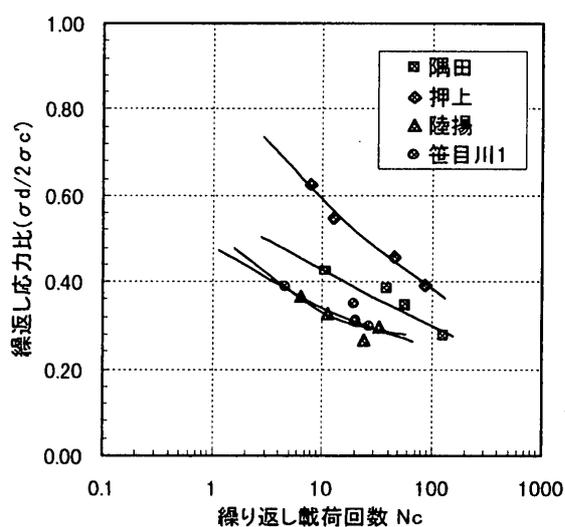


(a) 墨田・押上・陸揚・笹目川地点

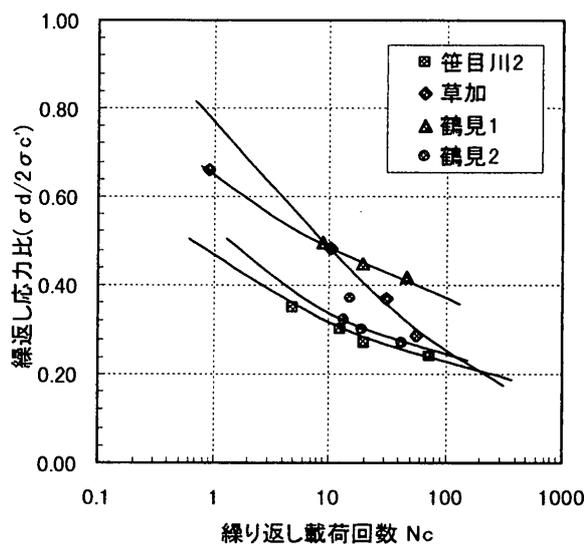


(b) 笹目川・草加・鶴見地点

図-7 細粒分を含む砂質土の粒径加積曲線



(a) 墨田・押上・陸揚・笹目川地点



(b) 笹目川・草加・鶴見地点

図-8 細粒分を含む沖積砂の液状化強度

表-4 液状化試験データ一覧表

試験番号	深度 (m)	平均粒径 D_{50} (mm)	細粒分含有率 FC (%)	粘土分含有率 PC (%)	N 値	試験拘束圧 (kPa)	液状化強度 R_{L20} (DA=5%)
S-1	6.9	0.309	4	—	21	80	0.45
S-2	4.5	0.284	5	—	19	40	0.32
S-3	5.4	0.185	8	—	8	60	0.31
S-4	4.5	0.332	9	—	12	50	0.26
S-5	14.0	0.202	10	—	10	110	0.34
S-6	7.0	0.166	11	5	14	90	0.42
S-7	5.0	0.293	12	4	8	50	0.31
S-8	7.5	0.186	14	—	15	90	0.30
S-9	5.5	0.169	15	—	9	80	0.42
S-10	9.0	0.184	15	8	12	70	0.35
S-11	14.2	0.242	18	8	6.5	140	0.31
S-12	7.1	0.180	18	7	7	70	0.29
S-13	11.5	0.168	20	—	6	130	0.32
S-14	4.5	0.180	21	—	4	50	0.30
S-15	8.5	0.162	21	5	12	100	0.31
S-16	3.5	0.172	23	9	3	50	0.33
S-17	10.5	0.134	23	9	5	100	0.34
S-18	12.5	0.158	25	9	6	120	0.27
S-19	6.4	0.178	27	14	1	50	0.36
S-20	5.0	0.140	28	11	3.6	40	0.43
S-21	12.5	0.129	30	13	1.5	160	0.25
S-22	11.0	0.145	30	17	2	150	0.25
S-23	6.4	0.137	30	13	3	100	0.33
S-24	15.0	0.166	32	19	2	170	0.28
S-25	5.2	0.121	33	7	6	80	0.31
S-26	10.5	0.129	34	13	6.5	100	0.32
S-27	8.4	0.138	38	19	0	80	0.33
S-28	9.5	0.114	39	8	3	110	0.30
S-29	10.4	0.115	41	17	0	110	0.29
S-30	4.2	0.106	42	12	0	60	0.37
S-31	4.4	0.092	43	12	4.5	30	0.35
S-32	2.9	0.084	45	13	0	30	0.35

さい領域では細粒分含有率は非常にバラツキの範囲が広いが、粘土分含有率と N 値の関係よりも両者の対応が明瞭であり、液状化強度の推定にも使いやすいと考えられる。ここで上部有楽町層の N 値と細粒分含有率 FC の関係を下式に示すような曲線で表現した。

$$FC = \begin{cases} 916/(N+9.21) - 29.5 & (N < 22) \\ 0 & (N \geq 22) \end{cases} \quad (1)$$

液状化判定に大きな影響を及ぼす可能性のあるシルト質砂や砂質シルトといった土質は、細粒分の分布範囲が非常に大きい。特にシルト質砂は細粒分の点からみれば、細砂に属したり、砂質シルトに属したりするようである。上部有楽町層のこのような砂については、土質名から細粒分含有率を一律に設定するよりも、N 値を考慮して細粒分含有率を設定する方がより合理的であると考えられる。

ただし前述のように N 値と FC の関係はバラツキの範囲が広いことから、式(1)の解釈として、ある流域では大局的にみれば、任意の粒度特性を有する材料は一定の締め具合になるように堆積していると考えられる。よってこの関係は個別の地点の詳細な検討を行うことを意図したものではなく、多量のボーリングデータを扱うゾーニング等を行う場合に有効であると考えられる。

3. 細粒分を多く含む沖積砂質土の液状化強度

東京及びその周辺の低地部 6 地点において、沖積層から細粒分を多く含む砂質土の不攪乱試料を採取し、室内土質試験で液状化強度を把握するとともに、粒度や液塑性などの物理特性を調べた。試験データは 8 個である。

試料の採取は、草加と押上では、該当深さまで掘削後、ブロックサンプリングを行い、その他はボーリング機械によるシンウォールチューブサンプリングにより行った。

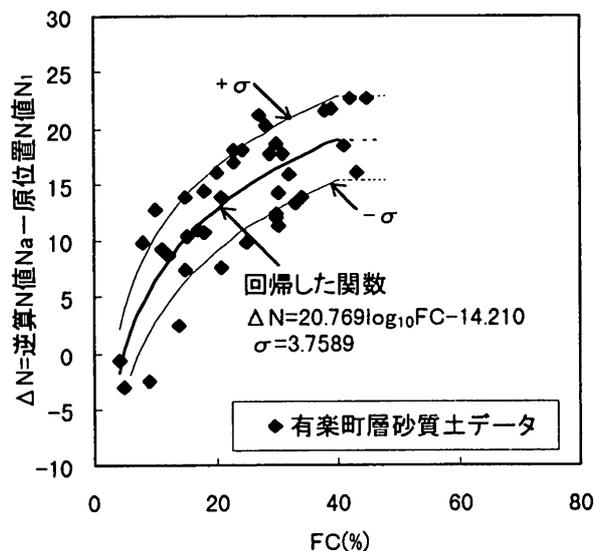


図-9 細粒分補正関数

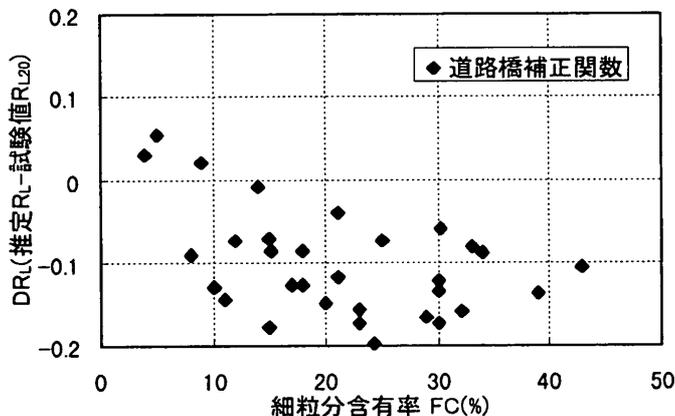


図-10 道路橋式による強度推定

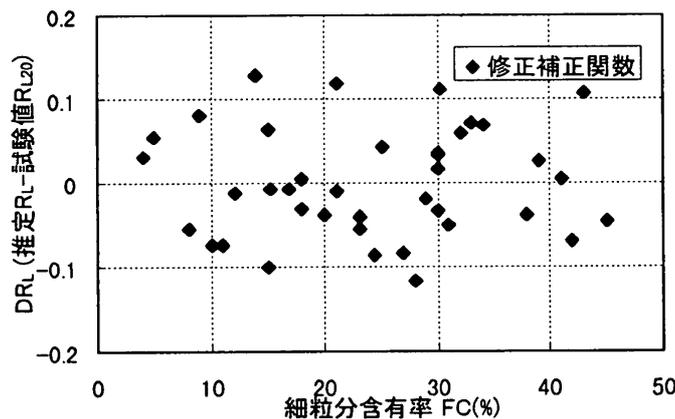


図-11 修正した細粒分補正関数を用いた強度推定

3.1 沖積砂質土の土質試験結果

土質試験の結果を表-3にまとめた。また、図-7には粒径加積曲線、図-8には液状化強度曲線を示す。採取した深さは 3~8 m で、N 値は大きいもので 10 とゆるい砂である。平均粒径は 0.15 mm 程度と細粒で、粘土分を 10% 前後含んでいる。細粒分含有率は

15~64%で、押上の試料が砂というよりはシルト質であるのを除けば、概ね細粒分を多く含む砂質土を採取することができた。

繰返し三軸試験における供試体の飽和化の操作は地盤工学会の基準 JGS0541-2000⁴⁾に従って行った。この結果、間隙水圧係数 B 値は 0.96 以上であった。

液状化強度 R_L (繰返し回数 20 回、両振幅軸ひずみ 5% の応力比) は概ね 0.3~0.4 の範囲にあり、全体の傾向としては、細粒分が多いため N 値が低いわりにそれほど小さな液状化強度ではないことが分かった。

3.2 沖積砂の細粒分が液状化強度に及ぼす影響

表-3 に示したデータ (押上を除く計 7 つ) に、東京及びその周辺における低地部で採取された沖積砂質土の既往液状化試験データ (データ数 32) を加えて整理し、細粒分含有率 FC と液状化強度 R_L の関係を検討した。表-4 に試験データを示す。

道路橋示方書⁸⁾に示されている下式 (以下、道路橋式) を用いて、実際の液状化強度 R_L から補正 N 値 N_a を逆算した。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \times (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、補正 N 値 N_a は有効土被り圧 98 kPa 換算の N 値 (N_1 値) と細粒分含有率 FC による補正項 ΔN の和として規定されるものである。

逆算した N_a から原位置の換算 N 値である N_1 を差し引いた値 ($\Delta N = N_a - N_1$) と FC の関係を図-9 に示す。この図から、細粒分による液状化強度の増分をみることが出来る。細粒分が少ないきれいな砂では当然 ΔN は小さく、細粒分が多い砂ほど ΔN は大きくなっている。特に FC が 30% 程度までは細粒分の増加にともなって敏感に強度が増加するようである。そこで回帰を行い次のような関数をあてはめ、上部有楽町層における細粒分の補正関数とした。

$$\Delta N = \begin{cases} 0 & FC < 5\% \\ 20.769 \times \log_{10}(FC) - 14.210 & 5\% \leq FC < 40\% \\ 19 & FC \geq 40\% \end{cases} \quad (3)$$

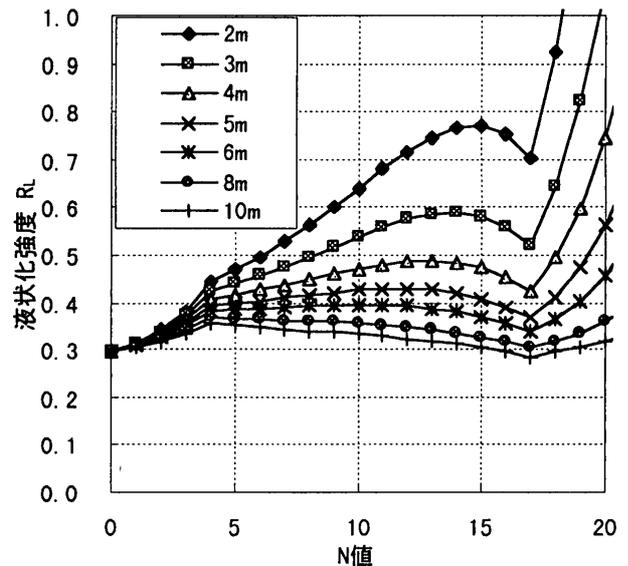
ここで、 FC が 40% 以上はデータが少なく、この領域で単調増加関数を仮定すると、 R_L を過大評価してしまう可能性があるため、便宜的に $\Delta N = 19$ で一定となるものと仮定した。

図-10 には道路橋式を用いて推定した結果を、図-11 には式 (2) に上部有楽町層の細粒分補正関数式 (3) を組み合わせた式 (以下、提案式と呼ぶ) より推定した結果を示す。道路橋式では細粒分が多くなるほど推定値が試験結果を下回る傾向にあるが、提案式による推定では細粒分によらず約 ± 0.1 の精度で推定することができている。

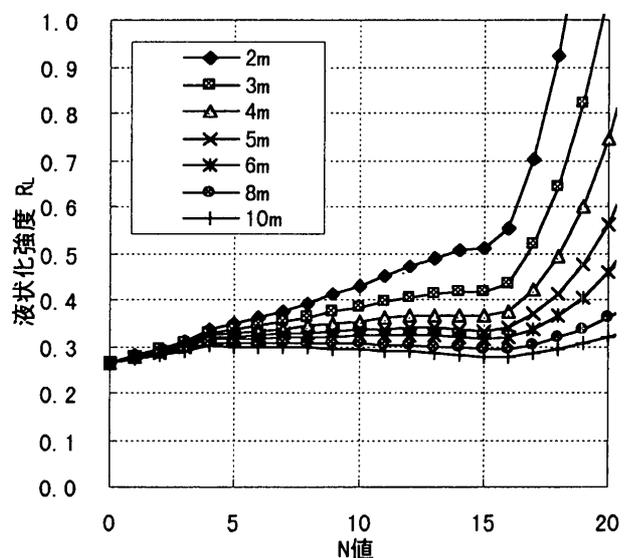
3.3 N 値と FC の関係を用いた液状化強度推定

上部有楽町層の土を対象に検討した沖積土の N 値と FC の関係と沖積土データにより適正化した液状化強度推定式を組合せた液状化強度推定手法について検討する。各種ゾーニングのため大量のボーリングデータを扱う場合、粒度データがないことが多いため、 N 値と上載圧から一義的に R_L を推定することができれば大変都合がよい。

図-12(a) に式 (1), (2), (3) を用い、土の単位体積重量 γ を $17.7 \text{ kN/m}^3 (= 1.8 \text{ tf/m}^3)$ 、地下水位を G.L.-1.8 m として計算した N 値と R_L の関係を示す。 N 値が大きくなるに従い R_L が大きくなるというような単調増加の関係ではなく、 N 値 17 付近で極小値をとり、再び R_L が急激に大きくなるという複雑な形状をしている。これは、式 (3) に示す細粒分補正関数と式 (1) に示す N 値と



(a) $\Delta N \sim FC$ 関係は式 (3) 使用



(b) $\Delta N \sim FC$ 関係は $-\sigma$ の関係使用

図-12 N 値と液状化強度の関係
($\gamma = 17.7 \text{ kN/m}^3 (1.8 \text{ tf/m}^3)$, W.L. = G.L.-1.8 m で計算)

FC の関係の相性によるもので、特に細粒分の補正の影響が道路橋式に比べかなり強いことが主な原因である。

また上載圧が小さいときの R_L が極端に大きくなっているのは、細粒分による補正に加え、上載圧による補正を受け補正 N 値 N_a が大きくなるためである。

もちろん同じ粒度特性の土を想定した場合、硬ければ硬いほど液状化強度が大きくなるのが自然であり、 N 値と R_L の関係は右上がりになるべきである。ところが図-12 に示す関係は、それぞれの N 値に対応した細粒分を含む土の液状化強度であるため、一つの曲線で FC の異なる別の土の強度を示していることから、必ずしも右上がりの関係になる必要はない。しかし、 $FC = 4\%$ や 17% で曲線が急変する現象を説明することは困難である。これは FC と ΔN の関係、 R_L と N の関係を組み合わせることで結果的に生じたもので、特に物理的な意味合いは薄いと考えるのが妥当である。

このような曲線のうねりを減らすため、主な原因である細粒分補正関数 ($FC \sim \Delta N$ 関係) を見直した。前述の図-9には帰式と $\pm 1\sigma$ を考慮した曲線を示している。 -1σ を考慮した曲線は、概ね有楽町層データの下限付近にあり安全側であるといえる。式(4)に -1σ を考慮した関数を示す。

$$\Delta N = \begin{cases} 0 & FC < 8\% \\ 20.769 \times \log_{10}(FC) - 18 & 8\% \leq FC < 40\% \\ 15.27 & FC \geq 40\% \end{cases} \quad (4)$$

上記の $FC \sim \Delta N$ 関係を用いた N 値と R_L の関係を図-12(b)に示す。計算条件は図-12(a)と同じである。低上載圧になるほど急に液状化強度が大きくなる現象も緩和され、屈曲もかなり小さくなっている。広域で様々な土質を対象とする液状化判定を行う場合は図-12(b)の関係をを用いた推定の方が安全側で、より適切であると思われる。

よって以下の議論では、沖積土の細粒分補正関数として式(4)に示す -1σ を考慮した $FC \sim \Delta N$ 関係を用いるものとし、これと式(2)に示す液状化強度推定式を組み合わせたもの(以下、提案式と呼ぶ)により検討を行う。

3.4 適用事例

これまで述べてきた上部有楽町層の N 値と FC の関係及び提案式の適用性を検討する。対象地点は東京都の墨田区隅田と葛飾区西亀有の2地点である¹⁰⁾¹¹⁾。なお、関東地震では、両調査地点のうち前者は液状化履歴が無く、後者は液状化したとされている¹²⁾。

隅田地点の地盤は、図-13(a)に示すように、表土下に厚さ約5m、 N 値が5~10程度のゆるい沖積砂質土層、その下が非常に軟弱なシルト層となっている。細砂層の細粒分は10~30%、直下のシルト混じり細砂層は、20~50%程度と非常に細粒分を多く含んでいる。液状化強度は砂層で0.35~0.45と高く、シルト層で0.3弱となっている。

一方西亀有地点の地盤は、図-13(b)に示すように、 N 値10~30程度の全体的に締まった細砂・中砂が卓越しており、細粒分含有率は一部を除き10%程度かそれ以下で、隅田地点の砂とはかなり異なる。液状化強度は盛土下のシルト質微細砂層で0.3~0.35でそれ以下の土層では概ね0.2~0.3である。

これらの地盤について、提案した細粒分補正の式(式(4)に示す $FC \sim \Delta N$ 関係)を用いて液状化強度を推定した結果を図-13に示す。

細粒分含有率 FC の深度分布図には試験値の他に、土質より推定された代表値⁵⁾及び N 値と FC の関係式(1)から推定した値を示している。液状化強度の深度分布図は試験値に加え、実際の N 値と FC のデータを用いオリジナルの道路橋式で推定した強度と同データを用い提案式(式(4)の $FC \sim \Delta N$ 関係と式(2)の N_a と R_L の関係)で推定した強度、また式(1)を利用し N 値から推定した FC を用い提案式で推定した強度(図-12(b)に対応)を示している。

隅田地点では、 N 値より推定した細粒分含有率が深さ方向に増大する傾向が実際の地盤とよく対応している。その絶対値も7m以深のシルト層で約20%の開きがあるものの砂質土層は良く一致している。シルト層での誤差が比較的大きいが、提案式による液状化強度推定では、式(4)に示すように FC が40%以上で一定の強度補正としているので影響はない。液状化強度は FC に試験値を用いた道路橋式で推定すると試験値に対し過小評価となるが、 FC に試験値を用いた提案式による推定は良好な結果である。ただしそれでも試験値より小さめの値となっているのは、細粒分の補正関数として -1σ を考慮したものをを用いているのが原因の一つであると考えら

れる。また N 値と FC の関係を利用した強度推定の結果は、 FC に試験値を用いた結果と類似している。

西亀有地点では、 N 値より推定した細粒分含有率が4~8m深さの細砂~中砂層において細粒分が少ない傾向が実際の地盤とよく対応している。しかし深部の細砂層のように10~20%程度外れているところもあり、代表値の方が良い一致を示している。液状化強度は、シルト質砂層で良い一致を示すところもあるが、 N 値20以上の細粒分が比較的少ない中砂層や細粒分を含む深部の細砂層は大きく異なっている。また N 値から推定した FC を用いた提案式による推定強度は、全体的に墨田地点のものよりもずれが大きく、 FC の推定誤差が原因であると考えられる。 N 値20以上締まった砂の層において、道路橋式、提案式とも試験値よりも液状化強度を大きく評価しているのは、試験値が通常のサンプリング手法により採取した試料に基づくものであるのに対し、道路橋式及び提案式(きれいな砂に対しては道路橋と同等)は、 N 値の高い砂に対し凍結サン

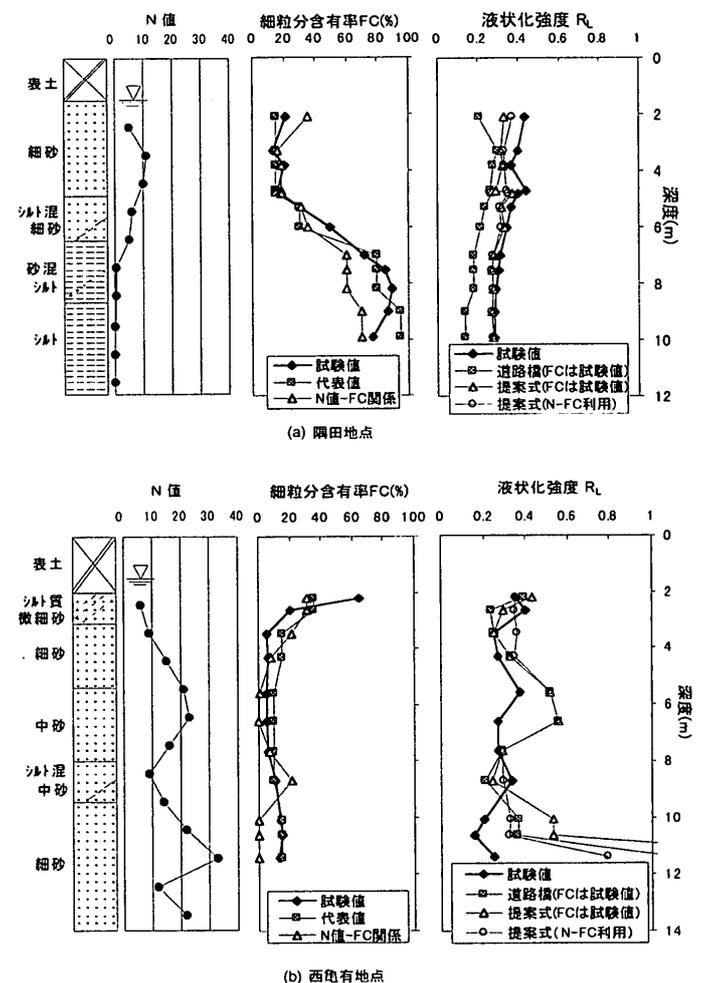


図-13 液状化強度の推定結果

凡例：【 FC の深度分布図】

試験値：室内試験結果、代表値：土質名からの推定値、 N 値- FC 関係： $N \sim FC$ 関係(式(1))による推定値

代表値は文献1)を参考に設定(シルト=95%、砂質/混じりシルト=80%、シルト質微細砂=35%、シルト混じり細砂=30%、細砂=15%、中砂/シルト混じり中砂=10%)。

【 R_L の深度分布図】

試験値：室内試験結果、道路橋(FC は試験値)：道路橋式による推定値(FC は試験値を使用)、提案式(FC は試験値)：提案した $FC \sim \Delta N$ 関係(式(4))と $N_a \sim R_L$ 関係(式(2))による推定値(FC は試験値を使用)、提案式($N \sim FC$ 利用)： $N \sim FC$ 関係(式(1))により設定した FC を用い、式(4)と式(2)を利用した推定値(図-12(b)に対応)

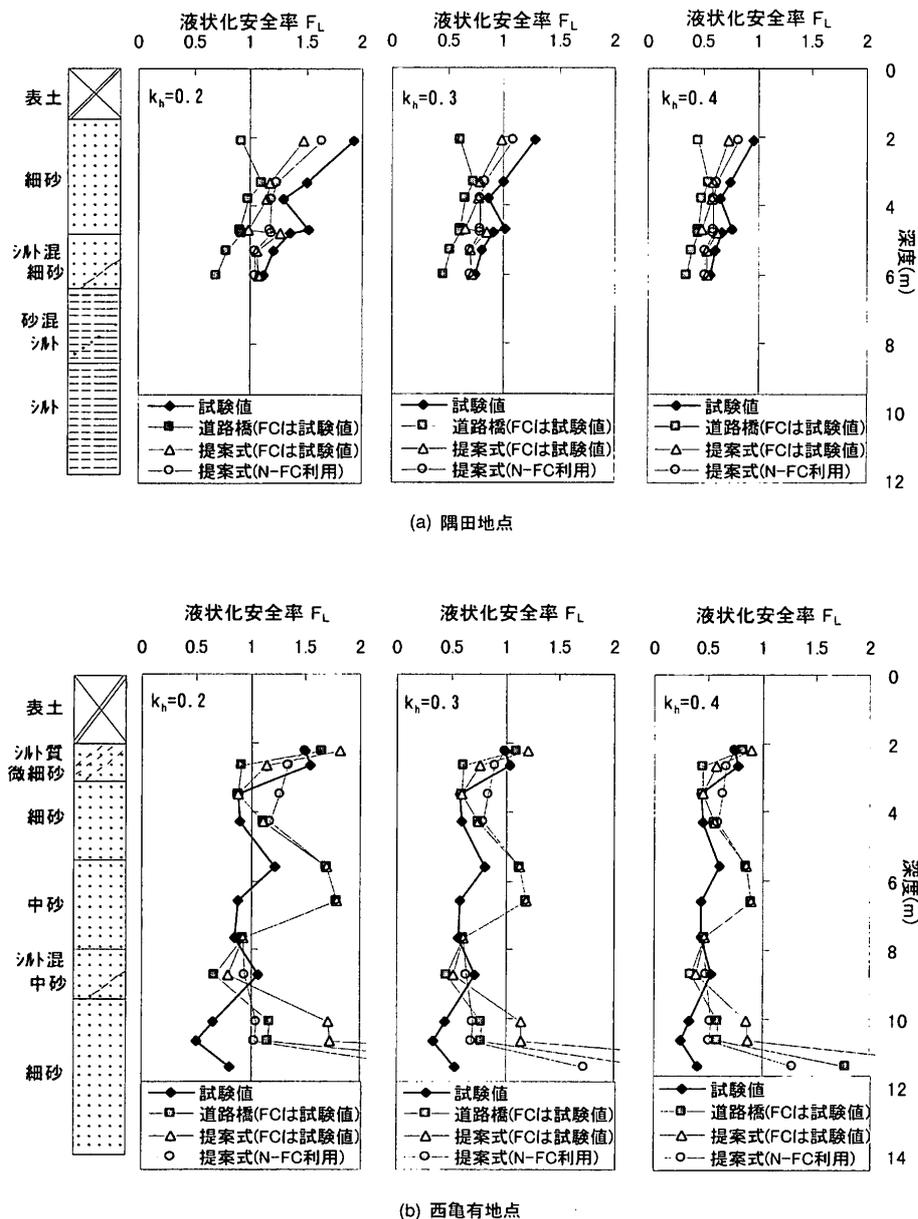


図-14 液状化判定結果

凡例: 試験値:室内試験結果, 道路橋(FC は試験値):道路橋式による推定値(FC は試験値を使用), 提案式(FC は試験値):提案した $FC \sim \Delta N$ 関係(式(4))と $N_s \sim R_L$ 関係(式(2))による推定値(FC は試験値を使用), 提案式($N-FC$ 利用): $N-FC$ 関係(式(1))により設定した FC を用い, 式(4)と式(2)を用いた推定値(図-12(b)に対応)

プリングによる試料を用いた結果より導かれたものであることが原因の一つであると思われる。

近年凍結試料と通常のサンプリング試料の液状化強度に関する研究が行われており, 例えば N 値が20程度の土では凍結サンプリングによる強度がトリプルチューブサンプリングによる強度の1.7~2.0倍程度大きくなるが, N 値5~10程度の土では1.0倍かこれを少し超える程度との報告がある⁹⁾。本検討は細粒分を含む N 値10程度かそれ以下のゆるい砂の液状化強度を適切に評価するのが目的であり, このような土質に対してはシンウォールチューブサンプラーで注意深く採取することにより, 十分な品質の試料採取が可能であると考えられる。

隅田地点のような細粒分を多く含むゆるい地盤については提案式を用いれば, 液状化強度をより適切に推定することができる。西亀有地点の地盤においても細粒分を含むゆるい砂質土に対しては同様である。一方西亀有地点のような地盤に対しては, N 値と FC の関

係の適用性はあまり良くなく, この関係を用いた液状化強度推定をするとき誤差が大きくなることが分かった。

隅田, 西亀有の地盤について液状化判定を行った結果を図-14(a), 図-14(b)に示す。液状化強度 R_L の値は, 試験値のほか, 道路橋式や提案式(FC は粒度試験の結果使用), $N-FC$ 関係を利用した提案式の値を用いた。設計震度は $k_h = 0.2, 0.3, 0.4$ で計算した。

液状化履歴のない隅田について, 道路橋式では $k_h = 0.2$ でも砂層のほとんどが $F_L = 1.0$ を下回るのに対し, 試験値や提案式では1.0を越えている。また N 値と FC の関係を利用した提案式の結果は, FC に試験値を用いた結果と設定する k_h によらずほぼ類似している。 $k_h = 0.3$ のケースでは, 道路橋式で全面的に F_L が1.0を下回り, 提案式では砂質土層最上部で1.0を越えているが, それ以深が1.0を下回っている。試験値では砂質土層中部が $F_L = 1.0$ 程度, 砂質土層下部は1.0を下回っている。 $k_h = 0.4$ ではどの手法を使っても判定対象

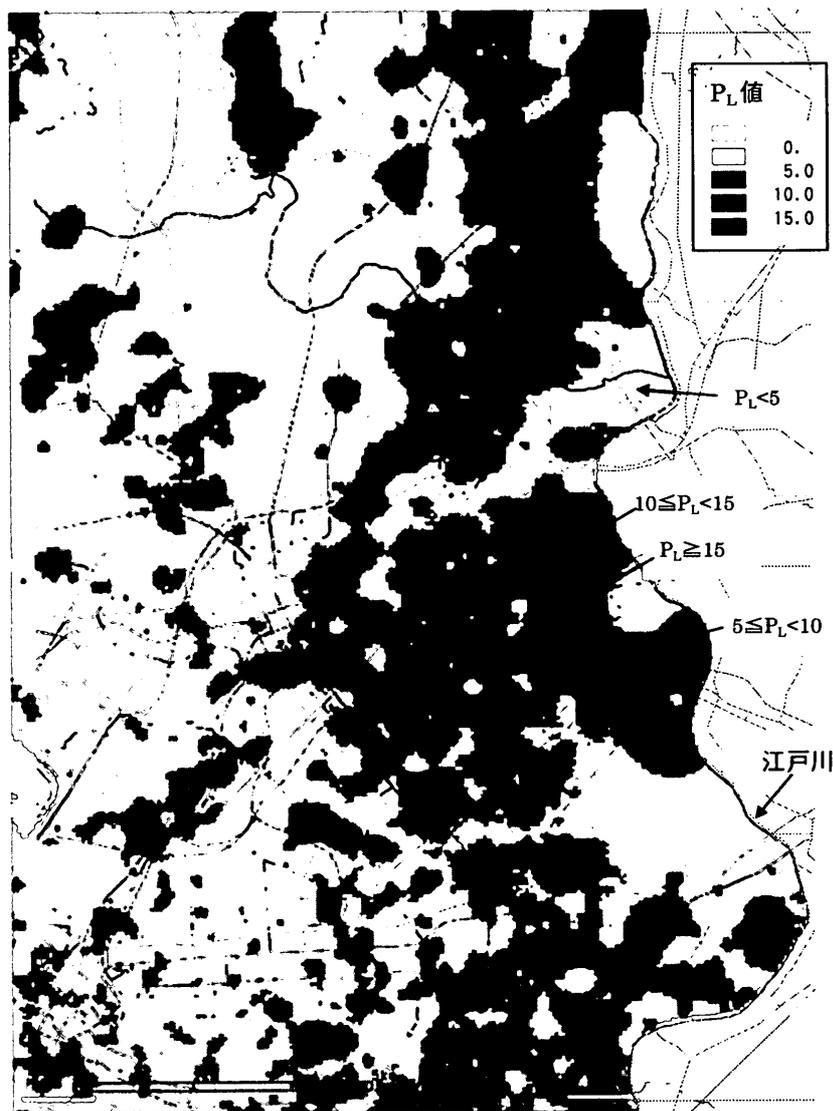


図-15 P_L 値分布図 ($k_h=0.3$)

層の全てが $F_L=1.0$ を下回る。

西亀有地点では細粒分が少ない土が多いので、提案式と道路橋式の結果はそれほど大きく変わらない。試験値による計算で、 $k_h=0.3$ 以上ではほぼ全ての深度で F_L が 1.0 を下回る。提案式や道路橋式の計算では、 $k_h=0.3$ で、 N 値の高い層は 1.0 を下回らないが、 N 値の低い層は 1.0 を下回る。 $k_h=0.4$ ではどの方法を使っても砂層のほとんどが $F_L=1.0$ を下回る。

4. 地理情報システムを用いた東京低地の液状化推定

有楽町層が広がる東京の東部低地に対して、地理情報システム (GIS)¹⁾ を利用して、 F_L 法に基づき、面的な液状化推定を行う。液状化強度の推定式は前述の首都圏地盤でのデータに基づいて道路橋式を修正した提案式を使用する。設計震度 k_h は関東地震レベルを想定して 0.3 とした。判定対象とする土層は道路橋示方書に準じて FC が 35% 以上の土質は判定対象外とし、大多数の FC が 35% を超える粘土、シルト、砂質シルトは除外した。また提案手法では FC は N 値から推定することとしており、 FC が 35% のときの N 値は 5 であるが、 FC と N 値の関係はバラツキが大きいため N 値が 5 以下を液状化しないということで足切りするとかなり危険側の判断をする可能性もあることから、少し安全側をみて N 値 3 以下を判

定対象外として計算した。ここで、細粒な土質でも埋立土については 1987 年千葉県東方沖地震や 2000 年鳥取県西部地震などで埋立地盤の液状化事例があるが、このような土については本検討の対象外であり、あくまでも沖積砂質土が対象である。

これらの条件により計算した P_L 値分布を図-15 に示す。対象地域は東京東部の葛飾区を中心とした低地及び隣接する三郷市をはじめとする埼玉県南部の低地である。 P_L 値が 5 以上で液状化の可能性があると仮定すれば、 N 値が小さい地盤が広がる低地部にもかかわらず、 P_L 値が 5 以上の領域はある程度限定された結果となった。これは、提案した FC と ΔN の関係により液状化強度を沖積土の試験結果に合わせて道路橋よりも大きめに評価していることと、特に N 値が 3 以下の主にシルトや砂質シルトといった土層を判定対象外としていることが原因であると思われる。

次に東京低地の液状化推定法である東京都土木技術研究所 (以下、都土研) による結果⁵⁾ と比較すると、本検討で P_L 値が 10 以上となった地点は、都土研の示している「液状化の可能性大」の領域かその付近にあることが多く、判定結果は全体として大きく変わらない。一方、 P_L 値が 5 以下で液状化がほとんど発生しないと考えられる地域は、都土研の結果よりかなり狭い。但し、都土研の液状化地図には P_L 値による判定だけでなく、表層砂層から算出した F_L

値による判定結果も考慮されている上、設計震度(地表面加速度)も堆積層の厚さで地域により異なる(概ね地表面加速度0.25G)ので厳密な比較はできない。

5. まとめ

東京及びその周辺の低地地盤に属する沖積データを用いて、河川沿いの砂質土の河口からの距離と細粒分含有率 FC の関係、及び N 値と FC の関係について検討を行い、河川により差はあるものの上流ほど細粒分の少ない砂が堆積する傾向があることが分かった。また全ての河川で N 値が大きいくほど細粒分の少ないきれいな砂となっていることが判明し、これより上部有楽町層の N 値と細粒分含有率 FC との関係式を定めた。

さらに東京低地において、細粒分を多く含む沖積砂の不攪乱試料を採取し、液状化強度試験を行った。液状化強度 R_L (繰返し回数20回、両振幅軸ひずみ5%)は概ね0.3~0.4の範囲にあり、全体の傾向としては、細粒分が多いためか N 値が低いわりにそれほど小さな液状化強度ではないことが分かった。

またこれらの試験結果に東京低地で行われた既往の液状化強度試験結果を加えて FC が R_L に及ぼす影響について検討し、道路橋式を基に上部有楽町層の液状化強度推定式を作成した。この結果、細粒分を多く含む砂については道路橋式に比べて液状化強度の推定精度を向上することができた。

提案した液状化推定手法の適用性を検討するために、関東地震で液状化履歴がある地点と無い地点で液状化強度推定及び液状化判定を行った。細粒分を多く含む N 値の小さい地盤については、道路橋式に比べ液状化強度をより適切に推定することで、これにより液状化判定を行えば液状化の予測精度を高めることができることが分かった。東京やその周辺の低地部においては細粒分を含むゆるい砂質土が広く分布していることから、提案式を用いる方が妥当であると考えられる。

またこの提案式を用いて東京の低地部でGISを用い面的な液状化判定を行った。この結果ゆるい地盤が広がる低地部にもかわらず、 F_L 値が5以上の領域はある程度限定された結果となり、液状化履歴分布と比べると、比較的良く対応する結果となった。

6. 今後の課題

粒度特性に関する検討については、特に上流側のデータが不足するなど、河口からの距離と細粒分間に定量的な議論が出来なかった。今後は不足している地域のデータを増やして分析することが必要であると考えている。また N 値と細粒分含有率 FC の関係や液状化強度の推定式について、現状での適用範囲は沖積の砂質土層のみであるので、適用可能な土層の範囲についての検討を行ってきたい。

液状化強度推定式も同様に対象土層は沖積層のみであるので、今後は臨海部に広がる埋立地盤に対する評価も行う必要があると考えている。また、東京低地部の2地点で液状化推定手法の適用性を検討したが、液状化履歴の有無に着目し比較した場合、液状化の程度をはっきりさせるほどの違いは出てこなかった。今後は関東地震等の事例を踏まえて、さらなる検証を行い、液状化判定及びゾーニングの精度向上を図っていきたい。

謝辞

本研究は財団法人地震予知総合研究振興会の研究の一環として行ったものである。関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 磯山龍二・石田栄介・安田 進・東畑郁生・清水善久・小金丸健一(2001): 超高密度地震計ネットワークを用いたリアルタイム液状化空間分布推定方法, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, 1, 409-412.
- 2) 運輸省第一港湾建設局(1988): 昭和62年秋田港土質特性分析調査資料編.
- 3) 貝塚爽平(1993): 東京湾の地形・地質と水, 築地書館, 13-17, 85-90.
- 4) (社)地盤工学会(2000): 土質試験の方法と解説-第一回改訂版-, 635-657.
- 5) 東京都土木技術研究所(1987): 東京低地の液状化予測, (社)地盤工学会.
- 6) 土木学会(1966): 昭和39年新潟地震災害調査報告, 29-48.
- 7) 土木学会(1986): 1983年日本海中部地震災害調査報告書, 232-238.
- 8) 日本道路協会(1996): 道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編, 94-95.
- 9) Hatanaka, M., Uchida, A. and Oh-oka, H. (1995): Correlation between the liquefaction strengths of saturated sands obtained by in-situ freezing method and rotary-type triple tube method, *Soils and Foundations*, 35, (2), 67-75.
- 10) 松本浩一・安田 進・清水善久・小金丸健一・岩谷 裕(2000): 東京の沖積砂層における液状化強度の問題点, 土木学会55回年次学術講演会概要集, 3 (A), 238-239.
- 11) 安田 進・清水善久・小金丸健一・糸井秀利・小鹿大介(2001): 関東地震で液状化した地点から採取した試料の特性, 土木学会第28回関東支部技術研究発表会講演概要集, 376-377.
- 12) 若松加寿江(1991): 日本の地盤液状化履歴図, 東海大学出版会.