

不攪乱試料の相対密度と

N値から推定する相対密度について

Meyerhof

岐阜工業高等専門学校 正会員 吉村優治

1. はじめに

一般の土質調査・試験結果をもとにした簡易な液状化発生予測方法にF_L値法があり、道路橋¹⁾などの耐震設計基準にも取り入れられている。このF_L値法が導き出される過程で砂の締め具合の評価が必要であった。そこでデータ数が多く、しかも容易に入手できるボーリング資料のN値に着目し、このN値から換算した相対密度を用いることでいくつかのF_L値法が提案されてきた。

さて、木曾三川(東から木曾川、長良川、揖斐川)によって造られた濃尾平野は、地震時に液状化を生じ易い地形として注目されており、明治以降だけでも濃尾地震(M=8.4, 1891.10/28)、江濃地震(M=6.9, 1909.8/14)、東南海地震(M=8.0, 1944.12/7)²⁾により各地で液状化が発生している(図1)³⁾。これは、濃尾平野のうち沖積平野部が86%を占め、扇状地帯、自然堤防地帯、三角州地帯の沖積平野の三地形帯が我国の沖積平野のなかで最も典型的に配列していることに起因している。

東海地震(仮称)が心配される今日、濃尾平野全域の液状化発生予測を行い、液状化危険度が大きく被害が予想される重要構造物には何らかの対策を立てることが必要であろう。そこでこの簡易予測をF_L値法で行うとき、主に洪積層と沖積層とからなる水成堆積平野である濃尾平野においても、提案されたF_L値法が導き出される過程で利用されたN値から相対密度への換算が妥当であるか否かを確認しておくことは重要なことであると思われる。

したがって、本論文は不攪乱試料の相対密度とN値から推定する相対密度の一致性の確認が目的であり、F_L値法を用いた濃尾平野の液状化予測のための予備調査報告である。すなわち、N値から相対密度を推定するための、Seed・Idriss^{4) 5)}、岩崎・龍岡⁶⁾、時松・吉見⁷⁾が提案したF_L値法の中で用いられているGibbs・Holtz⁸⁾の実験結果をまとめたMeyerhof⁹⁾の式あるいはこの式を細粒分含有率で補正した式が濃尾平野の堆積土についても利用できるか否かについて述べたものである。

2. F_L値法の簡単な紹介

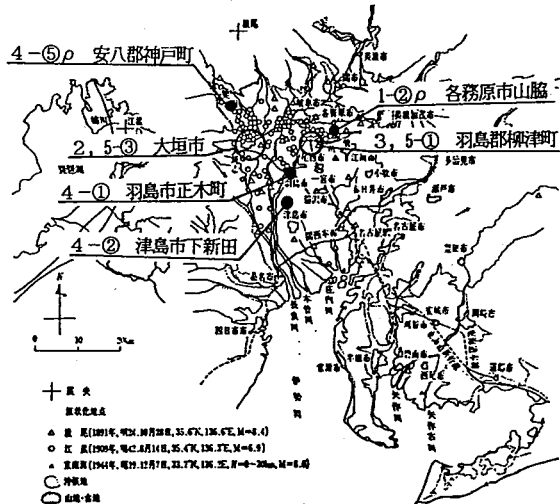


図1 濃尾平野の液状化発生履歴³⁾と試料採取地点

ここでは、F_L値法が多くの研究者によって考案されるに至った背景と簡単な特徴を紹介するのみにとし、それらの簡易予測法が導かれた過程の詳細については省略する。

F_L値を用いる方法の基本は新潟地震(M=7.5, 1964.6/16)²⁾のすぐ後の1967年にSeed・Idriss⁴⁾によって考え出され、その後、多くの地震のデータをまとめて1971年にかなり確立した方法が打ち出された⁵⁾。この方法ではN値から相対密度D_rを、そしてさらに液状化強度比Rを求めるようになっていく。また、Seed¹⁰⁾、Seedら¹¹⁾はその後、液状化・非液状化地点のN値や室内試験のデータを付け加え、地震のマグニチュードMを考慮した新たな簡易予測方法を提案した。これらの最初の論文⁴⁾では、新潟地震の際の液状化の実例に基づいて、Terzaghi・Peck¹²⁾とGibbs・Holtz⁸⁾の両方法によりN値から相対密度を推定し、その平均を用いて液状化災害を解析している。その後の論文⁵⁾では、1802年~1968年に起こった世界の地震のデータに基づいて、現在使われているいくつかのF_L値法の基礎ともいえるかなり確立した液状化の簡易予測方法を提案しており、この過程でN値から相対密度を推定する際にはGibbs・Holtz⁸⁾の方法を用いている。

一方、わが国においてはSeed・Idriss^{4) 5)}の方法などを受けて、石原¹³⁾、岩崎・龍岡⁶⁾、柴田¹⁴⁾、時松・吉見⁷⁾らによって新たな方法が提案され、岩崎・龍岡⁶⁾の方法は道路橋の耐震設計基準¹⁾に、時松・吉見⁷⁾の

証明推定 by Seed et al.

方法は建築の新しい指針¹⁵⁾に用いられている。

石原¹³⁾の方法は既往の液状化試験の結果と新潟地震の調査・解析結果に基づいて考案されたものである。岩崎・龍岡⁶⁾の方法は既往の人工的に詰めた試料の液状化試験結果をまとめ¹⁶⁾、当時盛んに行われ始めていた不攪乱試料の液状化試験の結果と地震応答解析結果をまとめたものであり、砂地盤の粒径の違いを考慮した点に特色がある。さらに時松・吉見⁷⁾の方法は岩崎・龍岡⁶⁾の提案式も参考にして、液状化履歴地点の調査や室内液状化試験をもとに考案されたものである。柴田¹⁴⁾の方法は既往の震害記録から、液状化抵抗をN値から直接的に求めるものである。これらの簡易予測法においても柴田¹³⁾の方法を除いて、各々の予測式が導かれる過程でN値から相対密度を推定しており、その際にはSeed・Idriss⁴⁾⁵⁾の方法と同様に、Gibbs・Holtz⁸⁾の実験結果をまとめたMeyerhof⁹⁾の式あるいはこの式を細粒含有率で補正した式が使われている。

3. N値から相対密度への推定式

上述してきたように、簡易な液状化発生の予測方法であるF_L値法が導かれる過程で土の締め具合が必要であり、多くの場合にはN値から換算した相対密度が用いられ、この換算式はGibbs・Holtz⁸⁾の実験結果に基づいている。

Gibbs・Holtz⁸⁾は、Terzaghi・Peck¹⁷⁾が表1の様なN値と砂の締め具合との関係を見いだしたのと同じ標準的なペネトレーションスプーン(図2)を用いて室内と現場実験を行い、このペネトレーション抵抗と相対密度との間の関係を見いだした。室内試験には図3および写真1に示すような大型の土槽が用いられ、粗砂と細砂の二種類の試料により種々の相対密度の場合のペネトレーション抵抗が調べられた(例えば図4)。また、現場試験では深さ、地下水位を考慮したペネトレーション抵抗と相対密度との関係がまとめられた(図5)。さらに、Meyerhof⁹⁾はこのGibbs・Holtz⁸⁾の実験結果をまとめて、有効上載圧を考慮したN値と相対密度との関係式(1)を提案した。

$$N = 1.7 D_r^2 (p + 10) \quad (1)$$

ただし、D_r：相対密度

p：有効上載圧 (lb./sq.in.)

表1 N値と相対密度¹⁷⁾

No. of Blows N	Relative Density
0-4	Very loose
4-10	Loose
10-30	Medium
30-50	Dense
Over 50	Very dense

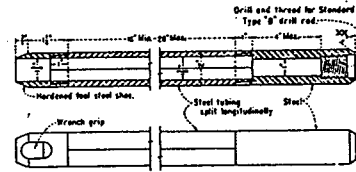


図2 Standard Penetration Spoon⁸⁾



写真1 室内試験の様子⁸⁾

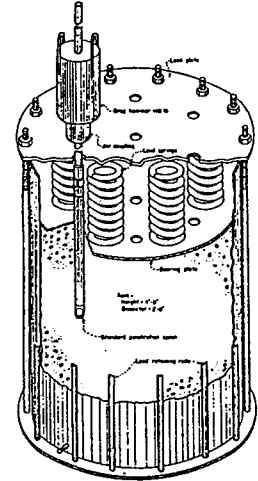


図3 室内試験に用いられた大型土槽⁸⁾

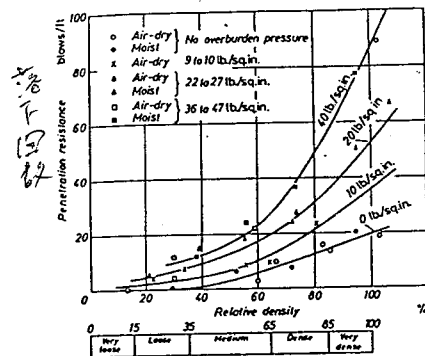


図4 室内試験結果の例⁸⁾

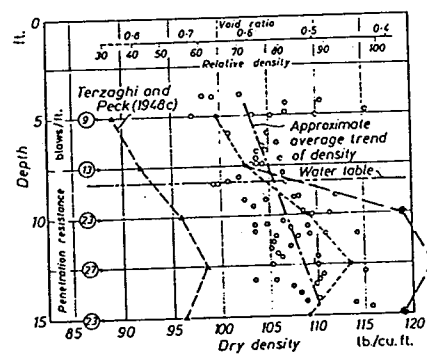


図5 現場試験結果⁸⁾

表2 FCとΔNfとの関係⁷⁾

Fines Content FC (%)	ΔN _f
0 - 5	0
5 - 10	Interpolate
10 -	0.1FC + 4

この式の応力の単位を (kgf/cm²) で書き換え、N 値から相対密度を推定できるようにしたのが式 (1') である。

$$D_r^* = 21\sqrt{N / (\sigma_v' + 0.7)} \quad (1')$$

ただし、D_r* : 相対密度 (%), N 値より推定した値のため * を付してある。

σ_v' : 有効上載圧 (kgf/cm²)

これが多くの F_L 値法が導かれる過程で利用された、N 値から相対密度を換算する Meyerhof⁹⁾ の式である。

時松・吉見⁷⁾ の方法は、F_L 値法を導く過程で Seed・Idriss⁴⁾⁵⁾, Seed¹⁰⁾, 岩崎・龍岡⁶⁾ の研究を利用し、これに多くの液状化履歴地点の調査や室内液状化試験をもとに考案されたものである。この方法では、N 値から相対密度への換算式として Meyerhof⁹⁾ の式 (1') を利用し、これに細粒分の影響を補正する項 ΔN_r を含ませた式 (2) が用いられた。この ΔN_r は、液状化地点の実測 N 値と細粒分含有率 FC の関係をもとに表 2 に従って求められるようになっている。

$$D_r^{**} = 21\sqrt{N / (\sigma_v' + 0.7) + \Delta N_r / 1.7} \quad (2)$$

ただし、D_r** : 相対密度 (%)

σ_v' : 有効上載圧 (kgf/cm²)

ΔN_r : 細粒分含有率による補正值、表 2

に従って決定する。

2. でも若干触れたが、F_L 値法を導く過程で、最初の Seed・Idriss⁴⁾ の方法は新潟地震を基に、1971 年の Seed・Idriss⁵⁾ の方法は濃尾地震を含む 1802 年～1968 年に起きた世界各地の地震を基に、龍岡・岩崎¹⁶⁾ の研究を進展させた岩崎・龍岡⁶⁾ の方法は新潟地震を基に、時松・吉見⁷⁾ の方法は濃尾地震・東南海地震を含む 1891 年～1980 年にわが国で起きた地震と 1933 年～1979 年に起きた世界の代表的な地震を基にしている。また、岩崎・龍岡⁶⁾ の方法では提案した F_L 値法を濃尾地震・東南海地震を含む日本の代表的な 5 つのケースについて適用し、その妥当性を確かめている。こうしてみると、当然の事ながら液状化の研究が広く行われる契機

となった 1964 年に相次いで起きたアラスカ地震 (M=8.3, 3/27), 新潟地震 (6/16) の事例が F_L 値法を導く過程あるいはその適用例の中心にあるが、濃尾平野で起きた液状化を伴った地震についても 1971 年の Seed・Idriss⁵⁾ の方法、岩崎・龍岡⁶⁾ の方法および時松・吉見⁷⁾ の方法で取り挙げられている。

しかし、わが国の地盤、特に沖積平野においても N 値から相対密度を推定する Meyerhof⁹⁾ の式が利用できるか否かについての検討は龍岡・岩崎¹⁶⁾ の研究に見られるのみである。ただし、検討された地盤は新潟市、東京湾沿いの地域と瀬戸内海沿いの沖積地盤および埋立地であった。

4. 濃尾平野の地盤状況

4.1 不攪乱試料の相対密度

粒状体の土を乱さずに採取するのは極めて難しく、凍結サンプリング等の方法が採られている。しかし、自然に堆積している土は必ず細粒分を含んでおり、サンプリングの仕方によっては不攪乱土を採取する事が可能であり、その調査実績¹⁸⁾ もある。本研究では、土木工事現場等から深度 0.2～9.5m に堆積している砂質土を注意深くブロックサンプリングして不攪乱に近い状態で採取し、物理的性質試験を行った。図 1 にその採取場所を、表 3 に試料採取地点の深度、状況および堆積砂の物理的性質をまとめて記した。サンプリングは土を乱さないよう慎重に行ったが、矢板を打設してあ

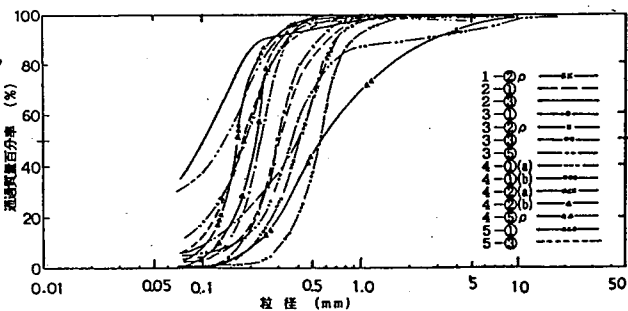


図 6 試料の粒径加積曲線

表 3 試料採取地点の状況と物理的性質

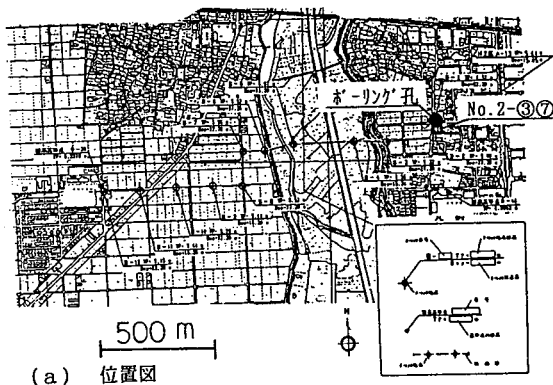
No	試料採取地点	採取深さ (G.L.-m)	地下水位 (G.L.-m)	排水	信頼度	ρ _t (g/cm ³)	ρ _d (g/cm ³)	間隙比 e (%)	S _r (%)	ρ _s (g/cm ³)	細粒分 (%)	e _{max}	e _{min}	D _r (%)	
1-①ρ	各務原市山脇	1.5	4.8	ポンプ	○	1.567	1.341	1.006	16.9	45	2.690	11.4	0.789	1.446	67
2-①	大垣市青柳町	3.8	0.9	なし	△	1.778	1.373	0.958	29.5	83	2.688	2.4	0.715	1.193	49
2-②	今宿町	2.4	2.4	—	△	1.830	1.320	1.056	38.7	99	2.714	35.2	0.886	1.583	76
2-③	2-①と同じ	9.5	0.9	なし	△	1.991	1.741	0.553	14.3	81	2.704	1.2	0.480	0.701	67
3-①	羽島郡柳濤町丸野2丁目	5.0	2.4	なし	△	1.820	1.385	0.930	31.4	90	2.673	2.0	0.762	1.249	66
3-②	丸野2丁目	3.5	3.0	なし	×	1.913	1.467	0.813	30.4	99	2.660	0.4	0.779	1.252	93
3-③	南塚2丁目	4.5	4.0	なし	×	1.694	1.202	1.219	40.9	90	2.618	5.1	0.870	1.605	53
3-④	梅松3丁目	5.5	3.0	なし	×	1.856	1.383	0.926	34.2	99	2.664	31.2	0.647	1.349	60
4-①(a)	羽島市正木町須賀	0.2	1.0	—	△	1.897	1.563	0.701	21.4	81	2.659	5.0	0.881	1.218	96
4-①(b)	同上	0.85	1.0	—	○	1.592	1.492	0.780	6.7	23	2.656	0.1	0.659	1.043	69
4-②(a)	愛知県津島市下新田	2.8	0.5	なし	○	1.428	1.357	0.958	5.3	15	2.657	0	0.700	1.162	44
4-②(b)	同上	1.5	0.5	なし	○	1.429	1.336	1.011	7.0	19	2.687	1.2	0.761	1.271	51
4-③ρ	安八郡神戸町北一色宮内	0.5	1.95	—	○	1.535	1.409	0.911	9.1	27	2.693	0.2	0.645	1.062	36
5-①	羽島郡柳濤町南塚2丁目	1.7	1.8	なし	○	1.450	1.271	1.098	14.0	34	2.667	3.5	0.755	1.279	35
5-②	大垣市八萬町	1.4	0.3	なし	○	1.834	1.373	0.962	33.6	94	2.694	7.1	0.778	1.367	69

る工事現場もあり、表中にその信頼度を併せて記した。また、図6にはその試料の粒経加積曲線を示した。

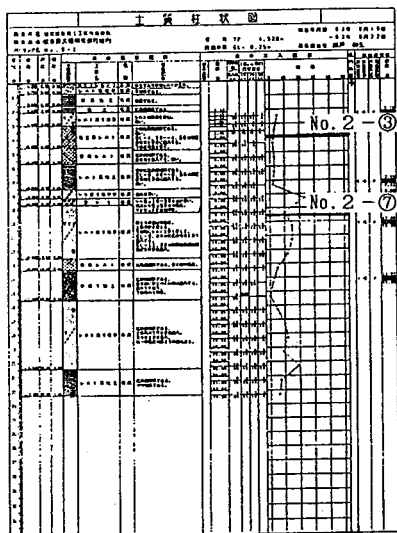
なお、間隙比 e_{max} および e_{min} は、粒径が2mmを越える試料、細粒分含有率が5%を越える試料についても「砂の最大密度・最小密度試験(JIS T 161-1990)」¹⁹⁾方法を適用して求めたが、特に余盛り部分の切取り、団粒化、分級などには十分注意を払った。

4.2 現地盤の柱状図

構造物を築造する場合にはこれに先だって土質調査



(a) 位置図



(b) ボーリング柱状図

図7 大垣市青柳町 (No.2-3-7)

が行われ、そのボーリング資料が保管されている。濃尾平野は東海道新幹線、名神高速道路などの重要構造物があり、ほぼ全域に渡って連続的にボーリング資料²⁰⁾がある。また、上述した不攪乱試料のサンプリングは工事現場等から行っており、表3に示したいくつかの地点についてはサンプリング位置の資料を入手することができた(例えば図7²¹⁾、大垣市青柳町No.2-3-7)。

表3の不攪乱試料の採取地点付近のボーリング試料を図7のように収集し、試料を採取した深度のN値を読み取った。このとき柱状図および土質区分などのデータとサンプリングの際の現地盤の観察、写真および物理試験の結果とを対比することで、ボーリング資料から読み取ったN値が採取した位置の不攪乱土のものであることを確認し、明らかに両者が一致していない場合はここには示さなかった。このように整理した不攪乱土採取位置のN値を表4に記す。

5. 不攪乱試料の相対密度とN値からの換算相対密度

表4に不攪乱試料の有効上載圧 σ_v' 、細粒分(ここでは75 μ m以下)含有率FC、相対密度 D_r 、試料採取位置のN値、式(1')に示すMeyerhof⁹⁾の式から推定した相対密度 $D_{r'}$ 、時松・吉見⁷⁾の方法で細粒分の影響を補正する項 ΔN_r 、式(2)から推定した相対密度を $D_{r''}$ (表には補正されたもののみを記した)をまとめてある。

図8は、この表の推定相対密度 $D_{r'}$ 、 $D_{r''}$ と不攪乱試料の相対密度 D_r との関係を示したものである。図中の実線は $D_{r'}$ あるいは $D_{r''} = D_r$ の関係であり、その上下の破線は $D_{r'}$ 、 $D_{r''} = D_r \pm 10\%$ 、一点鎖線は $D_{r'}$ 、 $D_{r''} = D_r \pm 20\%$ の範囲である。なお、矢印 \rightarrow は、式(1')で推定した $D_{r'}$ から式(2)で推定した $D_{r''}$ の細粒分による補正量を表している。

この図から明らかなように、標準貫入試験のN値から推定した相対密度は不攪乱試料の相対密度と比較的

表4 不攪乱試料の性質とN値および推定相対密度

No	試料採取地点	σ_v' (kgf/cm ²)	FC (%)	D_r (%)	N値	$D_{r'}$ (%)	ΔN_r	$D_{r''}$ (%)
1-② ρ	各務原市山脇	0.23505	11.4	67	-	-	5.14	-
2-①	大垣市青柳町	0.38564	2.4	49	3	34.9	0	-
2-②	今宿町	0.4392	35.2	76	3	34.1	7.52	55.8
2-③	2-①と同じ	0.95051	1.2	67	12	56.6	0	-
3-①	羽島郡柳津町丸野2丁目	0.650	2.0	66	19	78.8	0	-
3-②	丸野2丁目	0.61955	0.4	93	18	73.1	0	-
3-③	南塚2丁目	0.7123	5.1	53	7	46.7	0.1	47.0
3-④	梅松3丁目	0.7708	31.2	60	8	49.0	7.12	65.2
4-①(a)	羽島市正木町須賀	0.03794	5.0	96	-	-	0	-
4-①(b)	同上	0.13532	0.1	69	-	-	0	-
4-②(a)	愛知県津島市下新田	0.16984	0	44	4	45.0	0	-
4-②(b)	同上	0.11435	1.2	51	3	40.3	0	-
4-③ ρ	安八郡神戸町北一色宮内	0.07675	0.2	36	-	-	0	-
5-①	羽島郡柳津町南塚2丁目	0.2465	3.5	35	5	48.3	0	-
5-②	大垣市八島町	0.14676	7.1	69	6	55.9	2.1	60.6

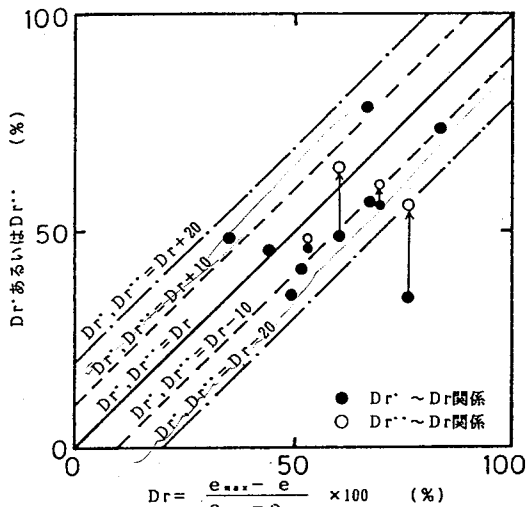


図8 Dr^* , Dr^{**} と Dr との関係

よい一致性を示している。 Dr^* は一試料(2-③)について小さめの推定値があるがこれを除けば、 $Dr^* = Dr \pm 15\%$ 程度、また、細粒分による補正を行った Dr^{**} についてはいずれもさらに一致性が良くなっている。特に2-③の試料の細粒分補正前の推定値 Dr^* はかなり小さかったが、細粒分による補正を行うことで-20%程度の誤差にまでその精度が上がっている。

したがって、濃尾平野の堆積土についても、Gibbs・Holtz⁸⁾の実験結果をまとめたMeyerhof⁹⁾の式を用いて、標準貫入試験のN値から相対密度を15%程度の誤差範囲で推定することができそうである。また、細粒分を多く含む土の場合、Meyerhof⁹⁾の式では小さめの推定値を与える傾向にあるので、細粒分含有率がわかる試料については細粒分の影響を補正する項 ΔN_r を含ませた時松・吉見⁷⁾の式を用いることでさらに推定の精度を上げることができる。

6. 結 論

濃尾平野の深度0.2~9.5mにある不攪乱土の相対密度と、その採取位置付近の標準貫入値Nから推定した相対密度の一致性を確認した結果、以下のことが言える。

(1) 濃尾平野の沖積砂質土についても、N値からMeyerhof⁹⁾の式を用いて推定した相対密度は、不攪乱土の相対密度にはほぼ一致する。ただし、細粒分を多く含む土の場合、やや小さい推定値を与える。

(2) ボーリング資料などから現地盤の細粒分含有率が分かる場合には、細粒分の影響を補正する時松・吉見⁷⁾の式を用いて相対密度を推定した方が、より精度が高い。

しかし、ここで得られた結論は図6に示した粒度分

布の砂質土に関するものであり、これよりも極端に細かい土、粗い土については上述した関係が成り立つか否かの確認が必要であろう。

また、今回は砂質土を注意深くブロックサンプリングして不攪乱試料を採取したが、図8のようにほとんどの試料の相対密度はN値から推定したものよりも大きかった。これは予想はしていたが、サンプリング中に砂が若干密に締まったことも有り得るので、今後はさらに注意してサンプリングを行いたい。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、試料採取および資料提供に御協力頂いた揖斐川工業(株)骨材試験所、大垣市役所水道部、柳津町建設課、また、貴重な御助言を頂いた長岡技術科学大学建設系小川正二教授に対し、心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会:「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」,pp.60-87,1980.
- 2) 宇佐美龍夫:「資料日本被害地震総覧」,東京大学出版会(1975.3)
- 3) 栗林栄一・龍岡文夫・吉田精一:明治以降の本邦の地盤液状化履歴,土木研究所集報,第30号,pp.14-23,39-41,88-93(1974.12)
- 4) Seed,H.B. and Idriss,I.M.:Analysis of Soil Liquefaction:Niigata Earthquake,J.SMFD,ASCE, Vol.93,No.SM3,pp.83-108,1967.
- 5) Seed,H.B. and Idriss,I.M.:Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential,J.SMFD,ASCE,Vol.97,No.SM9,pp.1249-1273,1971.
- 6) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進:砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例,第5回日本地震工学シンポジウム講演集,pp.641-648,1978.
- 7) Tokimatsu,K. and Yoshimi,Y.:Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content,Soils and Foundations,Vol.23,No.4,pp.56-74,1983.
- 8) Gibbs,H.J. and Holtz,W.G.:Reserch on determining the density of sand by spoon penetration test,Proc.,4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,London,Vol.1,PP.35-39,1957.
- 9) Meyerhof,G.G.:”Discussion of session 1”,Proc

- .,4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol.3,p.110,1957.
- 10) Seed, H.B.: Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes, J.GED, ASCE, Vol.105, No.GT2, pp.201-255, 1979.
 - 11) Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. and Chung, R.M.: Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, J.GED, ASCE, Vol.111, No.GT12, pp.1425-1445, 1985.
 - 12) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: 「Soil Mechanics in Engineering Practice」, p.294, Wiley, New York, 1948.
 - 13) Isihara, K.: Simple Method of Analysis Liquefaction of Sand Deposits during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.1-17, 1977.
 - 14) 柴田徹: 砂地盤の液状化抵抗とN値, 第16回土質工学研究発表会発表講演集, pp.621-624, 1981.
 - 15) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 1988.
 - 16) Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Tokida, K., Yasuda, S., Hirose, M., Imai, T. and Konno, M.: A Method for Estimating undrained Cyclic Strength of Sandy Soils using Standard Penetration Resistances, Soils and Foundations, Vol.18, No.3, pp.43-58, 1978.
 - 17) 前掲12)p.267
 - 18) 陶野郁雄: 「液状化層の堆積構造に基づく液状化深度の推定に関する研究」, 昭和61年度文部省科学研究費補助金(自然災害特別研究(1))研究成果報告書(課題番号61020037), pp.108-116, 162(1987.3)
 - 19) 土質工学会: 「土質試験の方法と解説」, pp.106-115(1990.3)
 - 20) 建設省中部地方建設局中部技術事務所: 「濃尾平野の地盤資料目録」, 1978.
 - 21) 大垣市水道部: 「地質調査報告書」, 第54号(1988.10)