砂質地盤における薬液注入の効果判定指標としての N 値に関する実験的研究

(Laboratory Study on the N -Value as an Index to
Estimate the Grouting Effect in Sandy Ground)

森		麟 ⁱ⁾	(Akira Mori)
森		雄 ⁱⁱ⁾	(Mitsuo Mori)
江	本	橋 ⁱⁱⁱ⁾	(Yukitsu Emoto)
阿	部	道 ^{iv)}	(Michio Abe)
田	村	仁 ^{v)}	(Masahito Tamura)

キーワード： N 値／一軸圧縮強さ／室内実験／砂／注入／注入効果 (IGC：K6)

1. ま え が き

薬液注入工法は、止水・強度増加を目的とした地盤改良方法のひとつである。この工法は、簡便迅速で応急処理にも優れる特徴を有しているため、都市部の掘削工事やトンネル工事において広く用いられているが、注入後の地盤改良効果の確認が難しいという問題点を抱えている。設計上の改良範囲に薬液を確実に浸透注入させることができれば問題は少ないが、地盤の不均一性や過剰な注入圧による地盤の割裂現象のため、薬液の注入形態をあらかじめ正確に予測することは困難であり¹⁾、原位置で改良効果を確認することが必要となる。改良効果の確認方法としては、標準貫入試験による N 値²⁾ や現場透水試験³⁾、電気探査⁴⁾、温度計測⁵⁾ による方法など様々であるが、適用範囲が明確でなく試験方法が確立していないものもあるので、現実には十分活用されるに至っていない。

注入前後の N 値の変化から改良効果を調べる方法は、比較的容易なため一般的な判定手法であり実施例も多い²⁾ が、注入によって N 値がどの程度増加すればよいのか不明で、その信頼性はもとより判定の指標になり得るかどうかについても明らかでない部分が多い。注入前後の N 値を比較した現場報告はいくつかある^{6),7)} が、注入後の N 値が薬液の浸透注入が確実に得られた部分のものか、薬液の浸透が不十分で未浸透部分を含んだ部分のものか明らかでない場合が少なくない。なお、ここでいう浸透注入とは、地盤中の土粒子の配列を変えずに間隙中に薬液が満たされるような注入をいう。一般に、地盤の透水係数が大きいと浸透注入が得られやすいが、透水係数が小さいと薬液が地盤中に脈状に侵入するような割裂注入となり、設計上の注入範囲に未浸透部分が残るやすい。また、注入前と注入後の N 値の調査位置がかなり離れている場合もあるので、

N 値の変化が注入効果によるものか地層のばらつきによるものか判断できない場合もある。注入による固結状態の程度（一軸圧縮強さなど）と N 値の変化の関係をすることは、 N 値による注入効果の判定を行なう上で基本になると思われる。

本研究の目的は、砂質地盤において薬液の浸透注入によって固結した場合の N 値の変化を調査して、薬液注入の効果判定指標としての N 値が一軸圧縮強さや注入前の N 値とどのような関係にあるかを明らかにすることである。 N 値の変化を把握するためには、現場の数多くのデータを集めて分析することが最も重要であるが、注入による固結砂の q_u や注入前の N 値が明らかでない場合が少なくない。そこで、本研究では、注入前後の N 値を大型三軸装置を利用した室内貫入試験により実験的に求めて、 N 値の増加に及ぼす固結砂の一軸圧縮強さ、注入前の未固結状態の N 値、相対密度、砂の種類などの影響を調査したものである。

2. N 値に関する既往の研究

標準貫入試験から得られる N 値と土質定数である摩擦角 ϕ や粘着力 c の関係は、従来から数多くの研究がなされている⁸⁾。しかし、これらの調査研究の大部分は、粘着力を有さない未固結な砂もしくは摩擦角のほとんどない粘性土を対象としたものであり、粘着力 c と摩擦角 ϕ を有する固結砂の N 値に関しては不明な点が多い⁸⁾。

薬液で固結した砂は、一般に摩擦角は注入前の未固結なものと大差なく粘着力のみ加えられたものになると考えられている⁹⁾。このため、注入によって砂が固結すると一般に強度が増加するので、 N 値も増加すると考えられるが、固結による N 値の増分が一軸圧縮強さ q_u や粘着力 c とどのような関係にあるのか不明である。

未固結な砂の N 値は、相対密度 D_r (%) や有効上載圧 σ'_v (kgf/cm²) にも影響されると考えられており¹⁰⁻¹⁶⁾、 N 値と D_r 、 σ'_v との関係については式(1)¹⁰⁾などが提案されている。

$$D_r = 21(N/(\sigma'_v + 0.7))^{0.5} \quad (1)$$

今回の研究では、まず未固結砂を対象とした標準貫入試験を実施して、 N 値と D_r 、有効拘束圧の関係を調べた。次に注入による固結砂の貫入試験を実施して固結砂の N 値や固結による N 値の増分と固結砂の q_u 拘束圧などの関係を調べた。なお、本文における拘束圧とは、未固結砂の場合は全て有効拘束圧であるが、固結砂の場合は有効拘束圧の意味が明確でないので外力として加えた拘束圧として示すことにした。

i) 早稲田大学土木工学科 教授 (新宿区大久保 3-4-1)

ii) 明星大学土木工学科 教授

iii) 大木建設(株) 常務取締役

iv) 明星大学土木工学科 助手

v) 建設省建築研究所 主任研究員

(1992. 2. 13 原稿受付・討議期限 1995. 1. 1 要請があれば1か月の期限延長可能)

3. 実験装置及び試料

図-1には、実験装置の概要を示す。供試体の直径、高さはともに約60 cmである。試料を、装置の底板の上に設置した2つ割りモールド（直径60 cm、高さ70 cm）に投入し、所定の密度が得られるようにバイブレーターを用いて締め固めた。モールドの内側にはあらかじめ直径60 cmのゴムスリーブを挿入しており、モールドを取りはずした後拘束圧を与えることができる。

試料を詰め終えた後、鋼製上版を試料の上におき、それにゴムスリーブの上端をかぶせ輪ゴムで締め付け、真空ポンプで負圧を与えた後供試体を自立させる。供試体の外側にアクリル製のセルを設置して三軸室を組み立てた後、セル内に水を満たして拘束圧を作用させ負圧を解放させる。鋼製上版の中央には、直径約10 cmの貫入用孔（ネジ孔）を設けており、この孔と三軸装置の上盤との間を塩化ビニール製の伸縮性の管で接続し、拘束圧を加えた状態でサンプラーの貫入ができるようにしている。なお、供試体に負圧を加えて自立させる段階では、ネジ孔をネジで塞いでおり、サンプラーを貫入させる直前にネジを取り外した。

注入前に相当する未固結な状態の砂の N 値を求める場合は、拘束圧を加えた状態で供試体下端の注入管より水を注入して供試体を飽和させた。拘束圧の大きさは、未固結砂、固結砂ともに1, 2, 3 kgf/cm²の3種類とした。なお、拘束圧により試料の間隙比がなるべく変化しないようにどの供試体でもまず3 kgf/cm²まで圧密し、その後所定の拘束圧を与えた。飽和完了後サンプラーの下端を試料の表面に位置させ、63.5 kgのおもりを電動モーターで引き上げ75 cmの高さから落下させてサンプラーの貫入量とおもりの落下回数の関係を求めた。なお、 N 値は、供試体上端より10 cm程度の予備打ちを行い、それ以降の貫入量に対する落下回数から求めることにしている。固結砂の供試体は、薬液を注入管を通して試料内へ浸透させ、拘束圧を与えた状態でそのまま固結させて作製した。薬液の注入量は供試体間隙の約1.5倍程度とし、余分の注入薬液を供試体上部よりオーバーフローさせた。

試料の密度は、投入した砂重量と負圧を作用させて自立した状態

の試料の寸法からまず初期乾燥密度を求め、拘束圧を加えた際のセルの体積変化量（セル自身の体積膨張量を補正したもの）を考慮して貫入直前の乾燥密度を求めた。

なお、サンプラー貫入中の供試体の体積変化量は、拘束圧を与えているセルに接続したビュレットの水位変化より求めた。拘束圧は、ビュレットの水位変化により若干変化するが、この圧力差によるセルの体積変化の影響はほとんどない。また、サンプラー内への砂の貫入量も測定し、試料の採取状況を未固結砂と固結砂で比較した。

表-1には、試料の間隙比、相対密度、摩擦角、透水係数を示す。図-2には、実験に使用した砂の粒度分布曲線を示す。試料は、市販のケイ砂3号、5号、7号の3種類である。

薬液は、溶液型水ガラス系薬液（硬化材：グリオキザール、促進剤：リン酸）を使用し、所定の一軸圧縮強さ（ $q_u=2\sim3$ kgf/cm², $6\sim8$ kgf/cm², $12\sim14$ kgf/cm²の3種類）が得られるように薬液配合を決定した。薬液の配合は、直径5 cm高さ10 cmのモールドに薬液を溜め、砂を落下投入して固めたいわゆるサンドゲルの1日養生後の強度を参考にして求めることにした。まず、サンドゲルの一軸圧縮強さと薬液の配合の関係から所定の一軸圧縮強さを得るための薬液配合を推定した。薬液の配合に関しては、グリオキザール量や水ガラス量を調整した。次に、図-1の装置にセットした供試体に薬液を注入して、貫入試験後に固結砂の一軸圧縮強さを求めた。所定の強度が得られない場合は、適宜配合を調整して再実験を行った。表-2には、注入薬液の配合を示す。同一の目標改良強度を得るための薬液の配合は砂の種類はもちろん密度によってもやや

表-1 未固結砂の種類

試料	詰め方	間隙比 e	相対密度 D_r	摩擦角 $\phi_d(^{\circ})$	透水係数 k (cm/sec)
試料A ケイ砂3号	緩詰め	0.88~0.86	0.28~0.33	30~33	1.5×10^{-0}
	密詰め	0.70~0.65	0.77~0.94	36~38	8.4×10^{-1}
試料B ケイ砂5号	緩詰め	0.95~0.91	0.22~0.33	28~30	2.7×10^{-1}
	中詰め	0.80~0.79	0.63~0.64	33~36	1.2×10^{-1}
	密詰め	0.71~0.69	0.83~0.87	37~39	9.5×10^{-2}
試料C ケイ砂7号	緩詰め	0.96~0.95	0.52~0.54	33~35	7.0×10^{-3}
	中詰め	0.88~0.87	0.66~0.67	37~38	5.2×10^{-3}
	密詰め	0.70~0.67	0.97~1.01	40~41	3.5×10^{-3}

図-1 室内標準貫入試験装置の概要

図-2 試料砂の粒度分布

表-2 薬液の配合

試料	詰め方	q_u (kgf/cm ²)	配合 (100 l 中, 単位 l)	
試料 A ケイ砂 3 号	緩詰め	1.9~2.1 5.6~6.8	A 液: WG=30, W=20 A 液: WG=44, W=6	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=15, W=35
	密詰め	1.9~2.3 6.2~6.8	A 液: WG=30, W=20 A 液: WG=38, W=12	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=10, W=40
試料 B ケイ砂 5 号	緩詰め	1.9~2.3 6.0~6.7	A 液: WG=25, W=25 A 液: WG=38, W=12	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=10, W=40
		2.4~2.5 6.2~6.4	A 液: WG=25, W=25 A 液: WG=38, W=12	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=10, W=40
	密詰め	2.5~2.7 6.4~7.0 12.9~14.6	A 液: WG=25, WG=25 A 液: WG=38, W=12 A 液: WG=48~49, W=1~2	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=15, W=35
試料 C ケイ砂 7 号	緩詰め	2.4~2.8 6.3~6.7 12.1~14.2	A 液: WG=22, W=28 A 液: WG=35, W=15 A 液: WG=44, W=6	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=15, W=35
	密詰め	2.2~2.7 6.9~7.6 13.4~13.8	A 液: WG=11, W=39 A 液: WG=32, W=18 A 液: WG=42, W=8	B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=10, W=40 B 液: GL=15, W=35

総量100 l で A 液, B 液の等量混合。WG: 水ガラス, W: 水, GL: グリオキザールリン酸は, 一軸圧縮強度が 2~3 kgf/cm² となる薬液を注入する際に気温が低い場合のみ B 液に 100 cc 程度加えた。

表-3 水ガラス系固結砂の種類

試料	詰め方	相対密度 D_r	一軸強度 q_u (kgf/cm ²)	粘着力 c_u (kgf/cm ²)	摩擦角 ϕ_u (°)
試料 A ケイ砂 3 号	緩詰め	0.29~0.30 0.32~0.35	1.9~2.1 5.6~6.8	0.5~0.7 1.4~1.9	29~31 29~30
	密詰め	0.79~0.94 0.89~0.90	1.9~2.3 6.2~6.8	0.5~0.6 1.7~1.9	35~36 32~35
試料 B ケイ砂 5 号	緩詰め	0.29~0.32 0.26~0.31	1.9~2.3 6.0~6.7	0.7~0.8 1.7~2.1	25~31 25~30
		0.68~0.72 0.61~0.68	2.4~2.5 6.2~6.4	0.7~0.8 1.6~1.8	33~35 32~35
	密詰め	0.85~0.94 0.85~1.02 0.85~0.98	2.5~2.7 6.4~7.0 12.9~14.6	0.5~0.7 1.4~1.7 2.4~3.2	36~40 36~39 36~39
試料 C ケイ砂 7 号	緩詰め	0.54~0.58 0.51~0.59 0.46~0.52	2.4~2.8 6.3~6.7 12.1~14.2	0.8~1.0 1.8~1.9 3.3~3.5	30~32 30~31 28~30
	密詰め	0.96~1.01 0.97~1.08 0.93~0.97	2.2~2.7 6.9~7.6 13.4~13.8	0.9~1.1 1.6~1.8 2.6~3.3	38~40 38~40 38~39

異なる。

表-3 には, 薬液で注入固結させた固結砂の一軸圧縮強さ q_u , 粘着力 c_u , 摩擦角 ϕ_u を示している。なお, 固結砂の三軸圧縮試験は, サンプラーの打撃に対する動的な強度特性が重要と考え, 非排水条件で実施した¹⁵⁾。図-3 には, 未固結砂及び固結砂の三軸圧縮試験における応力~ひずみ曲線の一例を示す。実際の注入工事で用いられる溶液型の注入薬液で固結した砂の一軸圧縮強さは 2~5 kgf/cm² であり, 最大でも 15 kgf/cm² 程度である。なお, 今回の実験で使用した薬液は, 実用の薬液としては一般的なものであり, 薬液の配合に関しても実用のものと大差ない。一軸圧縮試験, 三軸圧縮試験における固結砂の供試体 (直径 5 cm, 高さ 10 cm) は, 貫入試験終了後に所定の寸法に切り出したものをそのまま使用しており, 貫入試験毎に一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験を実施してい

図-3 応力~ひずみ曲線

る。貫入試験における固結砂供試体は, 薬液を下部より浸透注入させて固めたものである。固結部分の強度は, 供試体の位置により若干異なり, 下部でやや強く上部でやや弱く, 上下方向の強度のバラツキに対して水平方向のバラツキは少ない傾向にある。ケイ砂 5 号 (密詰め) を $q_u=6\sim8$ kgf/cm² になるような薬液で固めた供試体から上部 (供試体上端より下方 20 cm の範囲), 中央部 (20~40 cm), 下部 (40~60 cm) の 3 つに分けて切り出した供試体の一軸圧縮強さの分布を調べたところ, 上部で 6.1, 5.8, 5.5, 6.2 kgf/cm² (平均値 5.9 kgf/cm²), 中央部で 6.2, 6.1, 6.3, 6.8 kgf/cm² (平均値 6.4 kgf/cm²), 下部で 6.4, 6.7, 6.4, 6.9 kgf/cm² (平均値 6.6 kgf/cm²) であり, 全体の平均値に対して $\pm 10\%$ 前後のバラツキは生じており, 上下方向の強度のバラツキに対して水平方向のバラツキは少なかった。表-3 に示した固結砂の強度特性は, サンプラーが貫入する深度 (供試体上端約 10 cm から約 40 cm まで) を考慮して供試体の中央部から採取した試料を用いて求めたものである。供試体

の品質のバラツキ（密度や一軸圧縮強さなど）が N 値に影響を及ぼすことも考えられるが、未固結砂と固結砂で詰め方が同一であり、3種類の改良目標強度の差異が十分に大きいことを考慮すると、上述した方法で求めた固結砂の強度特性は N 値との関係を検討する上で代表値とみても特に支障はないと思われる。

4. サンプラーの貫入に伴う体積変化と試料長さ

図-4には、打撃回数とサンプラーの貫入長さの関係を示す。 N 値は、貫入長さ30 cmに要する打撃回数であり、注入によって固結すると N 値が増加していることがわかる。打撃回数と貫入長さの関係からみると、1打撃当りの貫入長さは、貫入長さが大きくなるにつれてやや小さくなっている。この理由としては、打撃時におけるサンプラーの貫入長さが大きいほどサンプラー外周面及び内周面の摩擦抵抗が大きくなることが考えられる。打撃回数と貫入長さの関係において、30 cm 貫入させるのに要する打撃回数 (N 値) に対して、上部15 cm 分を貫入させるのに要する打撃回数の割合は、未固結砂、 $q_u=2.3 \text{ kgf/cm}^2$ 及び $q_u=6.7 \text{ kgf/cm}^2$ の固結砂でそれぞれ42%, 43%, 41%である。前章で固結部分の強度は供試体の上部が平均値より小さくなることを述べたが、上部15 cm 貫入させる

のに要する割合は未固結砂、固結砂で大きな違いはない。したがって、固結部分の強度のバラツキや供試体上部の強度が下部よりやや小さくなることが、本実験における N 値に大きな影響を及ぼすことはないと考えられる。

図-5には、貫入長さと貫入中の供試体の体積変化の関係を示す。図中の実線は、サンプラーの肉厚分の体積変化に相当し、供試体の体積膨張量がこれより大きくなっているものは実質的な膨張が生じていることになる。これより小さいものは貫入によって収縮していることになる。図-5より、未固結砂の場合には実質的には体積が収縮しているが、固結砂ではわずかに膨張していることがわかる。筆者らのこれまでの研究¹⁷⁾によれば、砂が薬液で固結するとせん断変形に伴うダイレイタンスが未固結な状態と比較して大きいことが明らかになっており、図-5の結果とも一致している。

図-6、図-7には、30 cm 貫入時の体積変化量の大きさを示す。この体積変化量とは、実測した体積膨張量からサンプラーの貫入体積を減じたものであり、実質的な供試体の体積変化 (+は膨張) である。図-6は、拘束圧 $\sigma_3=1 \text{ kgf/cm}^2$ 、図-7は、拘束圧 $\sigma_3=3 \text{ kgf/cm}^2$ である。これらの図より、貫入中の供試体の体積変化は、全体としては収縮傾向で、未固結砂と比較すると固結砂の収縮量は少ない。体積変化量に及ぼす砂の種類の影響は、あまり認められな

図-4 打撃回数と貫入長さ

図-6 供試体の体積変化量 (有効拘束圧 $\sigma_3'=1 \text{ kgf/cm}^2$)

図-5 貫入長さと体積膨張量

図-7 供試体の体積変化量 (有効拘束圧 $\sigma_3'=3 \text{ kgf/cm}^2$)

図-8 貫入長さ L とサンプラー内の試料長さ L_0

い。また、固結砂は一軸圧縮強さが変化しても体積が収縮する傾向には直接影響しない。拘束圧が小さく相対密度が大きい場合には、体積の収縮量が少なくむしろ膨張傾向を示していることがわかる。

図-8には、貫入長さ L とサンプラーに入った試料長さ L_0 の関係を示す。試料長さは、貫入試験における最終打撃が終了した後、供試体を三軸装置にセットしたままサンプラーの上端よりスケールを挿入して求めた。この図には、3種類の砂の結果がすべて含まれているが、砂の違いによる影響は認められなかった。貫入長さに対する試料長さの割合 (L_0/L) は、試料の N 値にあまり影響されず、未固結砂では約90%前後である。固結砂では、100%前後でありやや大きく120%を超えるものもある。固結砂において (L_0/L) が120%を超えるものは、サンプラー内で試料が多数に分割されて大きな割れ目が生じており、サンプラー内の試料長さを測定する上で、試料長さを過大評価した可能性があると考えられる。全体的にみると試料長さの割合としては、固結砂が未固結砂よりやや大きい両者の差は少なく、80~100%前後であることがわかった。このため、砂礫及び礫地盤を除いた砂質地盤であれば、注入現場においてもサンプラー内にはほぼ100%固結砂を採取できると考えられる。

5. 未固結砂の N 値の支配条件

図-9には、未固結砂の N 値と相対密度 D_r の関係を示している。図には、異なる3種類の砂を用いた結果を示している。同一の相対密度、拘束圧における N 値は粒径の最も小さい7号砂が他の試料砂に比較してやや小さい傾向にあるが、全体としてみると今回使用したタイプの砂に関しては、 N 値と D_r に及ぼす砂の種類の影響は少ないと思われる。図中には、式(1)による計算値(破線)も同時に示す。なお、式(1)の適用にあたっては、側圧係数 $K=0.5$ とし、平均有効主応力 σ'_m を求め、これを有効拘束圧 σ'_3 と等価なものとした。計算値の方が同一の相対密度において N 値が大きくなっているが、この傾向は文献(12)、(13)の実験結果と一致している。式(1)は、側面が剛な鋼管を用いた土槽実験の結果を基にしたものであり、側方が拘束されており、本実験のような三軸装置による一定側圧の場合とは異なる¹⁴⁾。このため、式(1)と今回の実験結果でかなりの差異が生じたと考えられる。

未固結砂の N 値と拘束圧、相対密度の関係が $D_r = A \cdot N^B \cdot \sigma'_m{}^C$ (A, B, C は定数、 σ'_m は平均有効主応力であり本実験の場合は σ'_3 と一致する) で与えられるとして、図-8の実験結果に対して最小

図-9 未固結砂の N 値と相対密度

自乗法により定数 A, B, C を求めるとそれぞれ14.4, 0.58, -0.22となり、式(2)が得られる。相関係数は0.93である。なお、式(2)の σ'_m を有効上載圧 σ'_v とした場合の N 値、 σ'_v, D_r の関係式として、礫分のない砂質土では式(3)が提案されている¹⁶⁾。式(2)と式(3)の定数は、比較的一致していることがわかる。なお、図-9には、式(2)による計算値を示している。計算値と実測値の関係は、砂の種類や相対密度によりやや異なるが、全体的にみれば近い関係にあると考えられる。

$$D_r = 14.4 N^{0.58} / \sigma'_m{}^{0.22}$$

$$N = D_r^{1.72} \cdot \sigma'_m{}^{0.38} / 98$$

(2)

$$D_r = 11.5 N^{0.57} / \sigma'_v{}^{0.14}$$

$$N = D_r^{1.75} \cdot \sigma'_v{}^{0.25} / 72$$

(3)

図-10には、 D_r と σ'_m から式(2)を用いて計算した N 値と実測した N 値の関係を示している。 N 値に関する従来の実験的研究では、側方が拘束された土槽を用いるケースが多いが、文献(14)、(15)では本実験と同様大型三軸装置を用いている。図中の△印及び□印は、

図-10 式(2)による N 値の計算値と実測値

文献14)及び15)における N 値の実測値に対して式(2)を適用した結果であるが、計算値の N 値と実測値が比較的一致している。したがって、これらの結果に対しても式(2)がほぼ適用できると考えられる。

以上の結果より、今回の貫入試験により求めた未固結砂の N 値の大きさは、相対密度や拘束圧から判断すると、既往の研究結果と比較的合致しており、その N 値に対しては式(2)が適用できると考えられる。

6. 固結による N 値の増加

前章では、未固結砂の N 値と相対密度、拘束圧の関係を述べた。薬液で固結した砂の N 値は、未固結砂の N 値と性質が異なるとも考えられるので、固結砂の N 値を支配する要因については不明な部分が多い。しかしながら、薬液の浸透固結による固結砂の摩擦角は未注入砂とほぼ程度であり、せん断強度が拘束圧に大きく左右される砂質系材料に近いと考えられるので、ここでは、固結砂の N 値や固結による N 値の増分が、固結砂の一軸圧縮強さ、相対密度、拘束圧、未固結な状態の N 値などどのような関係にあるか調べることにした。

図-11、図-12には、固結砂の N 値と相対密度の関係を示す。図

図-11 固結砂の N 値と相対密度 (拘束圧 $\sigma_3=1$ kgf/cm²)

図-12 固結砂の N 値と相対密度 (拘束圧 $\sigma_3=3$ kgf/cm²)

-11は拘束圧 $\sigma_3=1$ kgf/cm²、図-12は拘束圧 $\sigma_3=3$ kgf/cm² の場合である。図には、3種類の砂の結果が含まれている。固結砂の N 値は、図-9の未固結砂の場合と同様、相対密度の影響を受け、相対密度が大きいものほど N 値も大きくなっている。図中の実線は、砂の種類を無視して一軸圧縮強さで供試体を区別した場合のほぼ中間値程度を示しており、注入固結による N 値の増分の目安を示している。注入固結による N 値の変化は、同一砂で同一相対密度における図中の縦軸の値の差異に相当し、この大きさは固結砂の一軸圧縮強さはもとより砂の種類や相対密度、拘束圧によってもやや異なる。一軸圧縮強さが12~14 kgf/cm² の場合は、拘束圧1 kgf/cm² では N 値の増分が40~50程度と砂の種類や相対密度の影響は比較的少ないが、拘束圧3 kgf/cm² では N 値の増分が23~60とかなり異なり、相対密度が大きい密なものほど N 値の増分も大きい傾向にある。 $q_u=2\sim3$ kgf/cm²、6~8 kgf/cm² の場合は、 $q_u=12\sim14$ kgf/cm² の場合と比較して、 N 値の増分に及ぼす砂の種類、相対密度、拘束圧の影響は比較的少ない。拘束圧の影響に関しては、未固結砂の場合と同様、概ね拘束圧の大きいものほど N 値も大きくなっているが、固結砂の一軸圧縮強さ q_u が大きく相対密度が小さいと、拘束圧の小さい方の N 値が拘束圧の大きい方の N 値よりむしろ大きくなっている場合がある(例えば、ケイ砂5号緩詰め、 $q_u=12\sim14$ kgf/cm²)。図-9の未固結砂の N 値の実験結果において、未固結な状態における N 値と拘束圧の関係は、相対密度が約30%と小さい場合には拘束圧が1 kgf/cm² と3 kgf/cm² で5前後と比較的小さいが、相対密度100%前後の場合には約20と大きくっており、相対密度が小さいものほど N 値に及ぼす拘束圧の影響が小さくなると思われる。固結による N 値の増加は、固結砂の一軸圧縮強さが大きいほど大きくなるので、固結砂の N 値に及ぼす拘束圧の影響としては、一軸圧縮強さが大きく相対密度が小さいものほど相対的に小さく考えられる。同程度の一軸圧縮強さでありながら、拘束圧の小さい方の N 値が拘束圧の大きい方の N 値より大きくなった理由は明確ではないが、上述したように N

図-13 固結砂の N 値と一軸圧縮強さ q_u

値に及ぼす拘束圧の影響が小さいために実験誤差や実験結果のバラツキの影響を受けやすいことなどが考えられる。

図-13には、固結砂の N 値と q_u の関係を示す。 N 値の大きさは、 q_u が同程度であっても相対密度や砂の種類によって大きく異なり、固結砂の N 値と q_u の直接的な相関関係は認められなかった。固結砂は、その摩擦角が未固結砂とほぼ同等であり砂質系材料に近いので、固結砂の N 値が相対密度や拘束圧（即ち、注入前の未固結な状態の N 値）に左右されることが考えられる。固結砂が砂質系材料に近いことを考慮すると、 N 値と q_u を直接比較するより、 N 値と拘束圧下における強度特性を比較した方が理解しやすいと考えられる。既往の研究では、地盤の強度定数としてせん断強度を取り上げ、 N 値とせん断強度の関係を検討した例^{(18),(19)}があり、ここでも固結砂のせん断強度を指標として N 値との関係を整理することにした。

図-14には、固結砂及び未固結砂の N 値とせん断強度 $((\sigma_1 - \sigma_3)/2)$ の関係を示す。 N 値とせん断強度の関係において、同一のせん断強度では緩い砂の方が密なものより N 値がやや小さくなっている。砂の種類や固結の有無の影響は比較的少ないと考えられる。

薬液注入の効果判定指標として N 値を考えた場合、固結の程度を何らかの形で捉えることが必要となる。これには、前述した一軸圧縮強さ q_u やせん断強度が考えられるが、 q_u を指標にすることができればより実用的であると考えられる。注入の主目的が掘削時の止水及び強度増加であることなどのため、実用上固結の程度は、せん断強度よりも一軸圧縮強さで評価される場合が多い。しかしながら、図-13の固結砂の N 値と一軸圧縮強さ q_u の関係をみると、 q_u の増加とともに N 値は増加し、密詰め供試体ほどその傾向が顕著であるが、両者の間には一義的な関係は認められないので、固結による N 値の増分と一軸圧縮強さや注入前の未固結な状態の N 値との関係を調べることにした。未固結な状態の N 値は、相対密度や拘束圧の影響を反映していることになる。図-15には、固結砂の q_u と注入固結による N 値の増分の関係を示す。 N 値の増分とは、同一の砂で拘束圧と相対密度がほぼ等しい固結砂と未固結砂に N 値の差を表している。この図から、 q_u が大きくなるにつれて N 値の差を表している。この図から、 q_u が大きくなるにつれて N 値の増分が大きくなっていることがわかる。なお、図中の実線は、最小自乗法による一次近似式 ($N = 3.52q_u - 0.93$ 、相関係数0.88) である。破線は、 N 値の増分の上限及び下限を示している。 N 値の増

分と q_u の関係は、砂の種類によってもやや異なり粒径の最も大きいケイ砂3号の場合に増分がやや大きい。 N 値の増分と相対密度の関係では、 q_u が $2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $6 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には相対密度の影響が比較的少なく、 $q_u = 2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ 及び $6 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ で N 値の増分はそれぞれ5前後及び20前後となっているが、 $q_u = 12 \sim 14 \text{ kgf/cm}^2$ となる場合には、密詰めのものほど N 値の増分が大きく、増分のバラツキ（幅）も $20 \sim 60$ とかなり大きい。 q_u に対する N 値の増分のバラツキが大きいため、 N 値の増分と q_u の関係を一義的なものとして捉えることはできないが、注入効果の判定指標として N 値を考慮した場合、注入固結砂の q_u が約 6 kgf/cm^2 を超えるような場合には、 N 値の増分は最低でも10程度以上にはなると思われ、 N 値による効果判定の信頼性は高いと考えられる。 q_u が $2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ 以下の場合には、 N 値の増分が3前後とかなり少ない場合もあり、自然地盤における N 値のバラツキや N 値の測定精度などを考慮すると、注入固結による N 値の増分が明瞭でない場合もあると考えられる。

図-16には、注入前の未固結な状態の N 値と N 値の増分 (ΔN) の関係を示している。固結砂の q_u が $12 \sim 14 \text{ kgf/cm}^2$ と大きい場合

図-15 固結による N 値の増分 (ΔN) と一軸圧縮強さ q_u

図-14 固結砂の N 値とせん断強さ $((\sigma_1 - \sigma_3)/2)$

図-16 固結による N 値の増分 (ΔN) と注入前の N 値

には、 N 値の増分は注入前の N 値が大きくなるにつれて増加しているが、 q_u が $2\sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ や $6\sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は、 N 値の増分に及ぼす注入前の N 値の影響は比較的少なく、 N 値の増分はそれぞれ 5 前後及び 20 前後となっている。図中の◎印は、注入によって N 値がむしろ減少したケースを示している。固結砂（ケイ砂 7 号、 $q_u=2.2 \text{ kgf/cm}^2$ 、拘束圧 3 kgf/cm^2 、 $D_r=96\%$ ）の N 値が 38.5 に対して未固結な状態（拘束圧 $\sigma=3 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $D_r=98\%$ ）では N 値は 41 であり、注入によって N 値が低下している。この理由の一つとして、未固結砂の方が相対密度がやや大きいことや未注入な状態の N 値が大きいことが考えられる。図-12、図-13 で示したように、相対密度が大きく N 値が大きい場合には、相対密度が低い場合と比較して、 N 値に及ぼす相対密度の影響が大きい。固結砂（ケイ砂 7 号、 $q_u=2.5 \text{ kgf/cm}^2$ ）の相対密度 D_r が 97% の場合の N 値は 44 となり、 N 値は固結により 3 だけ増加した結果が得られている。本文では、 $q_u=2\sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ で拘束圧 3 kgf/cm^2 におけるケイ砂 7 号密詰め固結砂の代表試料として N 値が 44 の場合を用いているが、実際の注入でも注入前後の密度は多少変化するので、注入固結しても注入後の N 値がむしろ低下することもあり得ると考えられる。現場測定結果では、注入前の N 値が大きいと注入によって N 値がむしろ低下すること報告されている²⁾。この原因については明確ではないが、原因のひとつには前述したような注入前後の密度の変化が考えられる。その他、表-3 に示したように固結砂の摩擦角は未固結砂よりやや小さくなることも原因のひとつではないかと考えられる。 N 値が大きい即ち硬い地盤では、 N 値の小さい場合と比較してサンプラー先端周辺部の拘束効果がより大きい状態でサンプラーが貫入することになる。固結砂の摩擦角が未固結砂より小さい場合は、粘着力を有していても高い拘束圧のもとでは固結砂のせん断強度が未固結砂より小さくなるので²⁰⁾、 N 値が注入固結によってむしろ低下する可能性も考えられる。ただし、今回の実験に関しては、注入によって N 値が低下する現象を論じることとはデータ数も少なく困難であり、実験誤差の範疇にあるとも考えられる。

7. ま と め

本研究は、薬液注入効果の判定指標としての N 値が固結状況とどのような関係にあるのか把握するため、固結砂の N 値に及ぼす固結砂の一軸圧縮強さ、注入前の N 値などの影響を室内標準貫入試験により実験的に調査研究したものであり、主な結果は以下のとおりである。

1) 貫入中の供試体の体積変化挙動を測定した結果、全体としては収縮傾向で、未固結砂と比較すると固結砂の収縮量は少ない。また、固結砂は、一軸圧縮強さが変化しても体積が収縮する傾向には直接影響しない。拘束圧が小さく相対密度が大きい場合には、体積の膨張傾向を示している。

2) 貫入中にサンプラーに入る試料長さは、未固結砂、固結砂

で差異は少なく、貫入長さに対する試料長さの割合は、80~120% 程度であった。

3) 固結砂の N 値は、未固結砂と同様に相対密度の影響を受け、密詰めもののほど大きい。

4) 注入による N 値の増分は、砂の種類、相対密度、拘束圧により多少異なるが、固結砂の一軸圧縮強さに強く影響される。固結による N 値の増分は、 q_u が $2\sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ 及び $6\sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ になれば、それぞれ 5 前後及び 20 前後となる。

5) 注入固結砂の q_u が約 6 kgf/cm^2 を超えるような場合には、 N 値の増分が注入前の N 値によらず最低でも 10 程度以上にはなると考えられるので、薬液注入の効果判定の指標としての N 値の信頼性は高い。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編 (1985)：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、「現場技術者のための土と基礎シリーズ 9」。
- 2) 柴崎光弘 (1985)：「最新薬液注入工法の設計・施工」，山海堂，pp. 108。
- 3) 薬液注入工法の設計・施工指針 (1989)：(株)日本薬液注入協会。
- 4) 鈴木健夫・浦沢義彦 (1982)：電気抵抗による注入効果の判定について、「第 37 回土木学会年次学術講演会」。
- 5) 川地 武 (1987)：滲水性地盤の止水法に関する土質化学的研究，「学位論文」。
- 6) 間片博之 (1980)：下水道工事における地盤沈下対策（その 3），「下水道協会誌」，Vol. 17, No. 193。
- 7) 藤田圭一 (1976)： N 値を考える 4. N 値の利用例「 N 値および c と ϕ の考え方」，土質工学会編，p. 26。
- 8) 土質工学会編 (1980)：「 N 値及び c と ϕ の考え方」。
- 9) 米倉亮三 (1983)：土の改良における注入薬液の働きとその効果，「基礎工」，No. 10EX, pp. 7~13。
- 10) Meyerhof, G. G. (1957)：Discussion of session 1, Proc. 4th ICSM, Vol. 3。
- 11) De Mello, V. (1971)：「The standard penetration test. A State of the Art Report」，4th Pan. Am. Conf. on SM & FE Puerto Rico, Vol. 1, pp. 1~88。
- 12) 土質工学会編 (1979)：「土質調査試験結果の解釈と適用例」，土質基礎工学ライブラリー 4，pp. 45~46。
- 13) 建築基礎構造設計指針 (1988)：日本建築学会，p. 124。
- 14) 山肩郁男・伊藤淳志・志平祐司 (1984)：三軸加圧状態の砂地盤における標準貫入試験，「日本建築学会大会学術講演梗概集」，pp. 2517~2518。
- 15) 岩崎好規・諏訪靖二ほか (1986)：粗粒材の密度変化に伴う N 値特性とその施工管理への利用，「粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム」，土質工学会，pp. 791~796。
- 16) 吉田保夫・国生剛司 (1988)：砂礫地盤への貫入試験の適用法の提案，「電力中央研究所報告」，U87080, p. 19。
- 17) 森麟・田村昌仁 (1986)：薬液による固結した土の粘着力とダイレイタンスーについて，「土木学会論文集」，No. 370, pp. 123~132。
- 18) 西垣好彦 (1992)：「 N 値の解釈と適用， N 値および c ・ ϕ 考え方と利用法」，土質工学会編，p. 65。
- 19) 小松田精吉 (1993)：現場事例による自然地盤の N 値と強度の関係，「薬液注入工法における注入効果の予測・確認手法に関するシンポジウム発表論文集」，pp. 33~35。
- 20) 森麟，武田安敏 (1972)：薬液注入による砂の強度劣化について，「第 27 回土木学会年次講演会」，第 3 部，p. 511。