

14

新しい薬液注入工法

——“テラファーマ”について——

主任研究員 新見 芳 男
中西 正 俊

§1. 薬液注入工法

注入工法とは、目的の地盤の中に凝結剤を注入して固結させ、地盤の強度を増強させようという工法である。従来用いられていた注入剤としては、セメントベントナイトなどに水を加えて懸濁液としたものや、瀝青材に水を加えた乳濁液があるが、これらは全て注入剤の粒子を含有している。これらの粒子は土粒子がある程度以上に細くなると、その土粒子のろ過作用を受けて地盤中に浸透しなくなる。

一般に懸濁液の場合は、その粒径の10倍以上の粒径がないと浸透困難であると言われている。たとえばセメントのふるい分けを行なってみると、もっとも多いのは粒径40 μ 内外のものであるが、JISでは88 μ ふるいの残分が10%以下ということになっており、砂の粒径が1mm以上あれば注入可能なはずであるが、実際にはもっと困難で、砂質地盤には注入できないものとされている。このため細い砂質地盤、シルト質地盤に注入するには、粒子を含まない薬液を注入することが最近盛んに行なわれるようになった。

その薬液には、ケイ酸ソーダを主剤とし、アルミン酸ソーダ・重炭酸ソーダ・塩化カルシウムなどを加えたケイ酸系統の薬液（商品名ケミゼクト、ハイドロックなど）、あるいはアクリル酸カルシウムを主剤とし、その重合に必要な数種の触媒等を加えた薬液（商品名AM-9）などがある。ここに紹介するものは、主剤としてリグニンと重クロム酸塩を配合したもので（商品名、テラファーマ Terra Firma）、当社の関係会社である日本コンクリートケミカルズKKが、特許実施権をもって製造しているものである。

薬液注入工法はダム・堤防・根切りなどの漏水防止工法としても効果があり、漏水防止のためのみに用いられ

ることも多い。しかし現在までのところ注入工法の本命はやはりセメント注入であって、薬液注入は仮設的なものと考えなければならないようである。

§2. テラファーマの用途と性質

まず技術メモから、用途と性質について簡単に引用してみよう。

『Terra Firma が用いられるのは、掘削作業中、砂を固定するため、ゆるい砂の地耐力を増すため、砂中を水が移動するのを防ぐためなどである。』

『Terra Firma ケミカルグラウトは、200メッシュより15%も細かい砂を透過する。』

『大部分が沈泥や粘土であるような土壌には浸透しない。このことは、この種の土壌が水を透さないのと同じである。』

『Terra Firma はイントルージョングラウトの安定作業用の下地として優れている。特に細かい砂が多い場合は効果がいちじるしい。』

2.1 テラファーマの性状

テラファーマ粉末

外観	黄褐色粉末
容積密度	約52ポンド / 立方フィート
比重	1.91
可溶性	攪拌により完全に水に溶ける
安定性	乾燥状態で貯蔵すれば、いつまでも安定している

テラファーマ溶液

外観	暗褐色透明液
比重	1.15~1.19
粘度 ⁽¹⁾	Terra Firma 1に対し、水 4・5・6 の

場合表-1 のとおり。

表-1 粘度比数表

水		20°C	1.0050	センチポアズ	理科年表による
"		20.2°C	1.0000	"	"
テラファーマ	1:4	68°F	1.9	"	メーカーのテクニカルメモ
"	1:5	"	1.8	"	"
"	1:6	"	1.6	"	"
AM9		68°F	1.2		カタログ値

注(1)Maag によって提出された基本法則によると、注入材に対する地盤の透水係数と水に対する透水係数は、両者の動的粘性係数と反比例するという。

2.2 ゲル化の時間

溶液は温度が高いほど、また濃度が高いほど早くゲル化する。硬化時間は数分から数時間までの範囲で変えられる。その関係は図-1 に示す。普通に用いられる調合比は1:4か、1:5である。1:3という濃い調合比は、特別に早いゲル化を必要とする場合に用いられ、1:6という薄い調合比は、完全な浸透を目的とする場合に用いられる。

2.3 テラファーマで処理した土壌

当所実験室において、三角フラスコおよびバットの中に標準砂の乾燥したもの、湿ったもの、飽水したものな

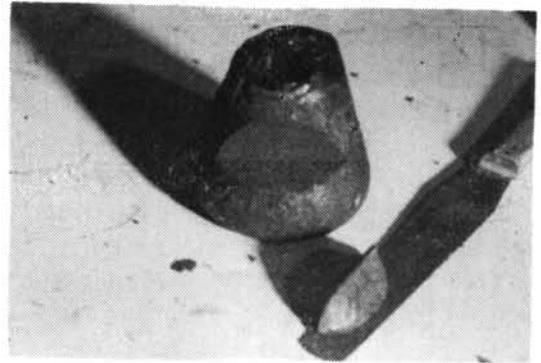


写真-1 固結の状況

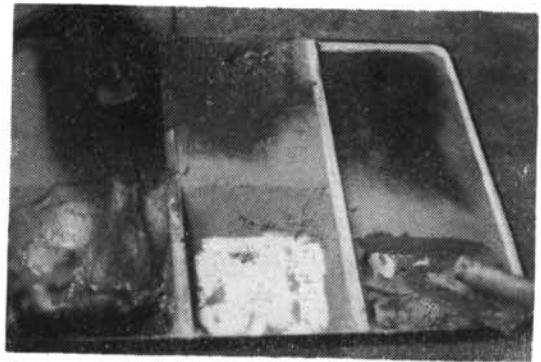


写真-2 浸透の状況

どを入れて硝子管を立て、50~100cm の head を保って注入し、固結と浸透の状況をみた(写真-1, 2)

次に標準砂に同容積の Terra Firma 液を加え、混合して径 5cm×高10cm のモールドに詰め、ゲル化後脱型し、試料成型機にかけてテスト・ピースを作り、翌日試験した。

表-2 圧縮強さ

配合	1:4	1:5	備考
一軸圧縮強さ (kg/cm ²)	1.55 平均 1.78 1.66	1.11 平均 1.16 1.11	室温 20°C
	1.64	1.06	

技術メモによれば、強さは砂の粒子の大きさが減少するに従って、また突き固めの程度が増すに従って増加する。処理される砂が水で飽和されている場合には、希釈が起こることがある。

剪断強さは大体1:2.5の割合で、圧縮強さに比例して変わる。

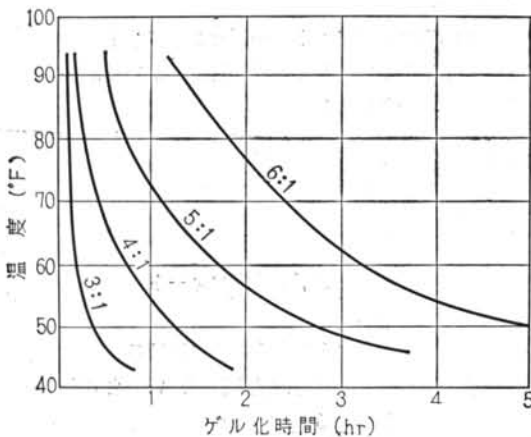


図-1 Terra Firma の調合比と温度とゲル化時間の関係

2.4 セメントグラウト用下地としての用途

Terra Firma はセメントグラウト施工用の下地として優れている。細砂が存在する場合は特に効果がある。1:5の溶液をセメントグラウトの施工に先立って注入すれば、注入されたグラウトの収まりを良くし、所要注入圧力を減ずるのに極めて有効なことが実証された。

これは後に述べるように、川崎ゼネラル石油現場、東鉄管理局現場で使用し、驚くべき効果をおさめた。このことは、従来のセメント注入の考え方に対し全く新しい事実であるが、理論的にはまだ解明されていない。

3.2 注入および揚水観測の計画

注入用インサートの位置を、中央揚水井戸を中心として半径2mの円周上に設け、その間隔を約1.13m(42')として、合計11本とした。その注入順序などは図-2 のとおりである。

中央の揚水井戸としては径200mm、長7,000mmの鋼管が埋め込まれた。掘さくはエゼクターにより、周囲には5mm程度の荒砂をつめた。この鋼管の下部3,000mmをストレナーとし、巾5mm、長さ200mmのスリットをつくった。(図-3)

観測用井戸として、S-N, E-W の各方向には中心より

§ 3. 現場注入試験

以上の如き資料と予備実験から、透水係数の 10^{-3} cm/sec 程度の微砂質の地盤ならば、ある程度圧力をかければ十分に砂中に浸透して空隙中の水とおき換え、ゲル化するのではないか。このような現象が起これば注入孔を中心にゲルで固結された円柱ができるであろう。さらにこの円柱をいくらかオーバーラップさせて施工すれば、遮水壁ができるであろうと考えられた。

1961年5月～7月に川崎市大師河原先理立地のゼネラル石油現場において以上のような考え方が実現できるかどうか、その他の注入工事施工上の資料を求めるために現場注入試験を行った。

3.1 予備調査

京浜工業地帯地質図表(昭和33年・神奈川県)および当研究所土質研究部に蒐集されている資料により、附近の地盤の調査を行なうと共に、新しい埋立地であるため、新たに試験位置においてボーリングを行なった。その結果は附録1に示す。

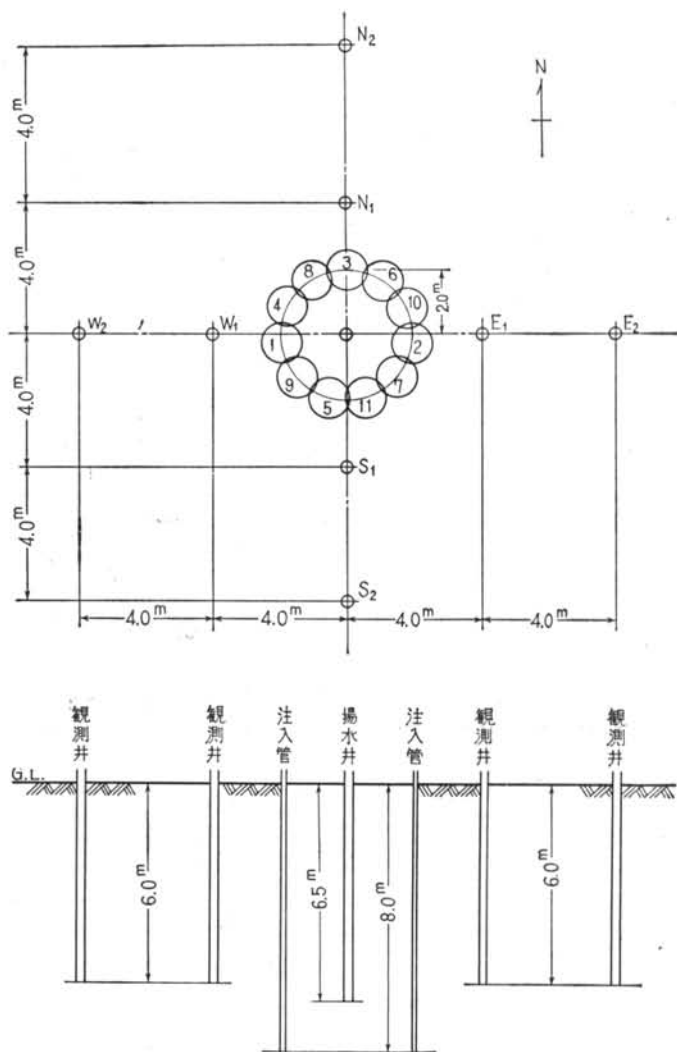


図-2 Terra Firma グラウト実験配置図

各4mおきに

N₁, N₂, N₃ S₁, S₂, S₃
E₁, E₂ W₁, W₂

の各水位観測用のパイプを設けた。これらの関係位置は
図-2 および写真-3 の如くである。写真はS方向より
N方向を望む。櫓はパイプ打込用、中央2人の人物が揚
水井戸を囲んでいる。

3.3 注入用機械類その他

グラウトミキサー (写真-4)

2 段式 各槽 180 l

上槽 ミキサー 下槽 アジテーター

ポンプ (写真-5)

大和ボーリング製DPⅢ型, 5HP×50l/min

注入パイプ 3/4"ガス管

打込時には、先端にリベットを用いた。なお第2回
注入試験では、パイプ周囲からの噴き出しを少なく
するため、突出部のないボーリングロッドを使用し
た。

水位測定装置

ベンチマークより、各観測用パイプの上端高さを測
定しておいて、パイプ上端からの水位は、電灯用差
込みプラグのようなもので、先端が水面に接するこ
とによって短絡させ、テスターによって読み、その
時のリードワイヤーの長さから計算する方法をとっ
た。

表-3 注 入 表 (第1回)

No.	注入深さ G.L.より(m)	注 入 量 (バッチ)	所要時間 h m	濃 度 T.F:W	摘 要	月/日
1	8.00~3.20	14	1.46	1:4	注入中揚水井より T.F の泡が出る	6/10
2	8.00~4.90	8	1.04	1:4	" 揚水井の水位あがる	"
3	8.00~6.40	2	.35	1:4	揚水先端まで水位上昇のため中止	"
4	8.00~7.25	2	.30	1:4		"
5	8.00~6.50	2	.57	1:4		6/12
6	8.00~6.95	3	1.17	1:6		"
7	8.00~5.33	6	2.29	1:6		6/13
8	8.00~5.50	4	1.20	1:6		"
9	8.00~6.67	3	1.23	1:6		"
10	8.00~6.80	2	.27	1:6	No. 7 注入孔より噴出	"
11	8.00~5.0"	5	1.44	1:4		6/14

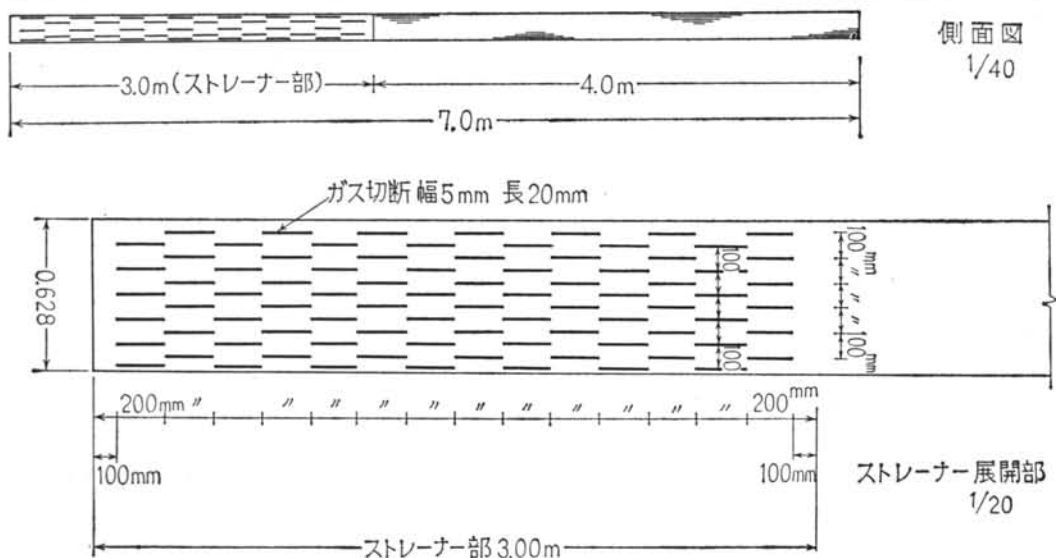


図-3 揚水井戸ケーシング図

写真-3

S方向よりN方向を望む。櫓はパイプ打込用中央2人の人物が湯水井戸を囲んでいる



3.4 注入前の揚水試験

注入開始前に、地盤の総合的な透水係数を知るために揚水試験を行なった。この時の観測水位は、注入後の観測水位と共に図-4、図-5に示す。

3.5 注入作業

第1回の注入試験の注入深さ、注入量、所要時間、調査その他は第3表のとおりである。

注入深さの8.00mは最初に注入パイプを打込んだ深さを示し、約10cm引き揚げて注入を開始し、予定土量の30%注入されるものとして、パイプ30cmの引揚げに対して約119lの注入を行なった。これを繰返してパイプ周辺より薬液が溢流するまで続けた。浅い方の深さは溢流のために中止した時の深さを示している。

注入量はパッチ数で示されているが、1パッチはTerra Firma 20kg1袋に対し、記入の濃度で水が加えられている、したがって1パッチの溶液の容積は必ずしも同一ではない。

3.6 薬液はどこに入ったか

第1本目の注入で、注入位置から2.00m離れた揚水井戸にTerra Firmaの泡が見られた。No. 2, No. 3の注入では揚水井戸の水位が上がり、ついに溢れ出るような状態になった。すなわち、注入された薬液の相当部分が揚水井戸に逸出しているということが想像されるに至ったが、この原因は



写真-4 グラウトミキサー

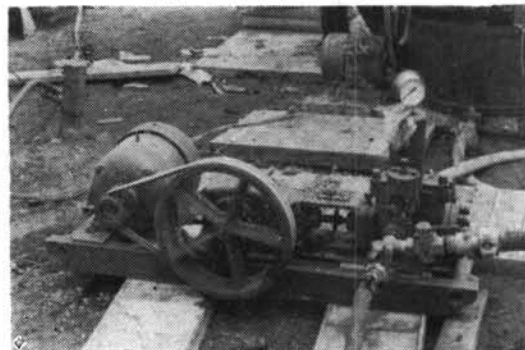


写真-5 注入用ポンプ

1. 注入前に揚水試験を行なったため、揚水井戸に向かって水道ができており、主としてその水道に向かって浸透して行った。

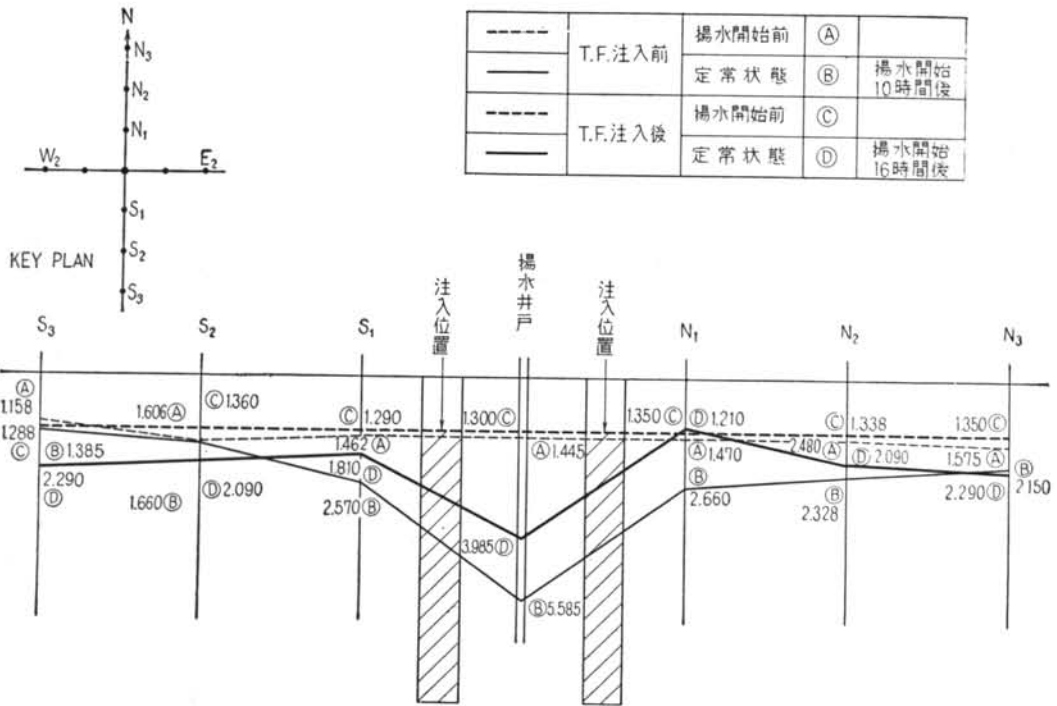


図-4 揚水試験 (N-S)

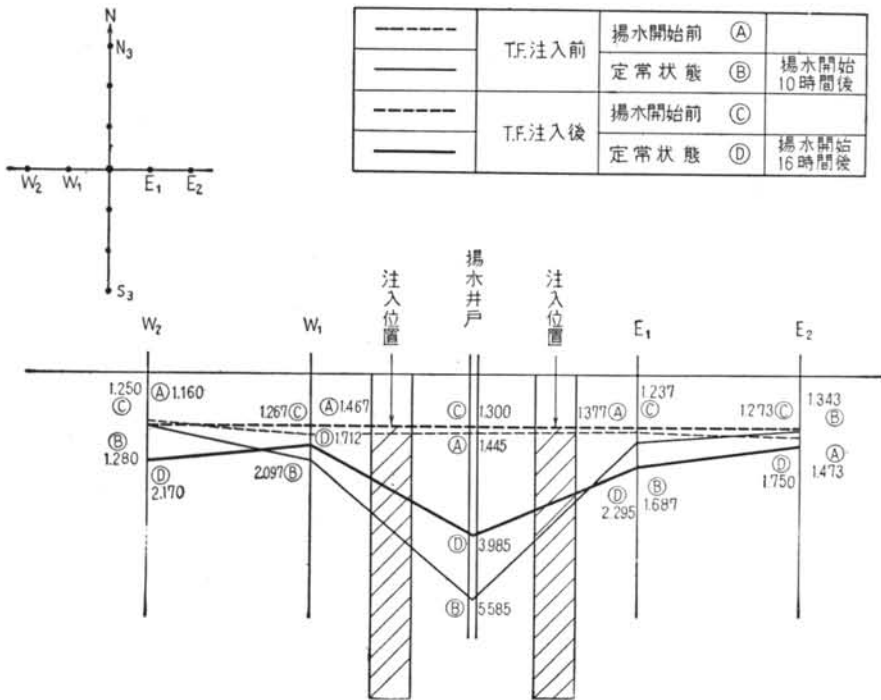


図-5 揚水試験 (E-W)

2. Terra Firma 溶液自体の性質としても、細砂質地盤に均等に浸透して行くことよりも、地盤の中で絞り方のゆるい部分にのみ進んで行く

のではないかと考えられた。

3.7 止水ということ（所見）

注入孔を中心として、ゲルで固結された円柱ができ、しかもそれがあらゆる地盤に対して期待できれば、薬液注入としては理想的である。このような事は実験室的に、注入される地盤が同じ固さに締り、同じ含水量をもち、注意深く注入された場合、特にAM-9のように粘性の低い薬液では作ることができる。

しかし一般的に現地では、一様に締った地盤というものはなく、固く締った部分やゆるく締った部分が交ざり合っている。このような場合、土壌の個々の粒子が非常に細かければ、グラウトは土壌塊を通して平面または溝を切り開いて進み、土壌を圧搾し、グラウトの実質的な塊を残して固め、望みの結果を提供するのが普通である。

また砂の粒子が比較的荒い場合には、まず比較的ゆるい絞り方、したがって透水係数の大きい部分に浸透してゆき、その層の厚さとゲル化によってその部分の透水係数が小さくなると、次の透水係数のやや小さい部分に浸透してゆくことになる。今回の注入試験でもこの考え方を裏付けるようなデータが出ている。模型的な遮水膜はできなくとも、結果として所定の場所の土質安定または止水ができればよいのであって、従来のケミゼクトなどの浸透固結の状態と同様に考えてよい。ゆるい所、水道のあった所が固結されればよいと思う。各注入孔から注入された薬液が中央の揚水井戸から上がってきたことは、注入前の揚水試験によって水道ができたことを示すものであり、これがかえって第1回の注入試験を成功させた要因であろう。

3.8 揚水試験（その1）

注入後、揚水井戸の下部にはやわらかなゲルがたまっていた。これは薬液が揚水井戸に出るまでに、相当に水で希釈されていたことを示すものである。井戸内の水替えを行なったが水位は回復しなかった。すなわち揚水井戸の周囲は完全に固結されて、止水は完全に成功した。

3.9 揚水試験（その2）

止水は完全に成功したが、これだけでは注入効果を十分に判定できないので、揚水井戸の底から更に下方にハンドオーガーで掘削した。この時は Terra Firma ゲル

でやや固結された砂を引き上げることができた。井戸の下端-6.500mから更に60cm程度掘下げたところで湧水があったので、翌日揚水試験を行なった。この結果は注入前の揚水試験の結果と比較できるように図-4、図-5に示されている。

注入前の揚水試験においては、定常状態になったとき、揚水井戸の水位がもっとも低く、たとえばN方向においてはN₁、N₂、N₃と離れるにしたがって水位が高くなるという通常の状態を示した。

注入後においては、揚水井戸の水位は前よりも高いがもっとも低く、N₁がもっとも高く、N₂、N₃と離れるにしたがって低くなった。これから判定すればN₁の内側に遮水層があり、N₁部分からはあまり揚水されず、かえって遠いN₂、N₃部分から揚水井戸の下部孔を通して揚水されていると考えられる。すなわち揚水井戸に対しては、ほとんど完全に止水の目的を達したと見てよい。

この注入前後の揚水試験から、地盤の透水係数をテーム式により計算してみると

$$k = \frac{2.30Q}{\pi} \frac{\log r_2 - \log r_1}{(h_2 + h_1)(s_1 - s_2)}$$

k : 透水係数(cm/min)

Q : 揚水量(m³/min)

r_1, r_2 : 揚水井戸より各観測孔の距離(m)

h_1, h_2 : 不透水層より水位低下位置までの高さ(m)

s_1, s_2 : 各観測孔の水位低下量(m)

注入前 $k=4.05 \times 10^{-3}$ (cm/min)

注入後 $k=1.94 \times 10^{-3}$ (cm/min)

であった。

§ 4. 第2回現場注入試験と掘さく

第1回の注入実験においては、止水工法としてある程度の見通しを得たが、注入孔周囲におけるスウェーデン式サウンディング、ボーリング、土壌の化学分析による薬液の検出等の検討、および注入量などから判断して円筒形遮水壁の完全な形成は考えられなかった。これは主として注入前の揚水により地盤中に水道となったゆるい層ができ、薬液もこれに沿って進んだためと考えられた。

このため事前の揚水試験を行わず、注入完了後に揚水井戸を掘ることにして第2回の現場注入試験を行なった。

場所は同敷地内で第1回の注入場所から約20m離れた

所、注入位置は半径2.00mの円周上に12ヶ所とした。パイプのジョイント用ソケットの下部は引揚げに伴って空洞となるので、これを避けるためボーリングロットを使用した。また Terra Firma の固結状況を見るために、揚水試験完了後-5.00mまで掘削を行なうことにした。

4.1 注 入 作 業 (図-6)

注入状況は表-4 のとおり、大体において第1回よりも多量に注入できた。これは注入用パイプとしてボーリングロットを使用したこと、後に掘削してみて判明したことであるが、-3.00m 附近に厚さ50~60cmの粘土層があり、注入に必要な上部ウエイト (一般に「ふた」と

呼ばれる) になっていたためと考えられる。

注入中他の注入孔からの噴出も見られた。

注入量合計は Terra Firma で2,000kg、溶液にして約 7,000 l であった。

4.2 セメントペーストの注入

Terra Firma がイントルージョン・グラウトの安定作業用の下地として優れていることは前述したが、これを追試する意味で、第2回 No. 7 注入孔から外側 30cm の位置に、注入パイプを深さ5.00mまで打込み、セメントミルクの注入を行なった。これは-5.00m~-2.50mの間において、1:2のセメントミルクで、セメント5袋

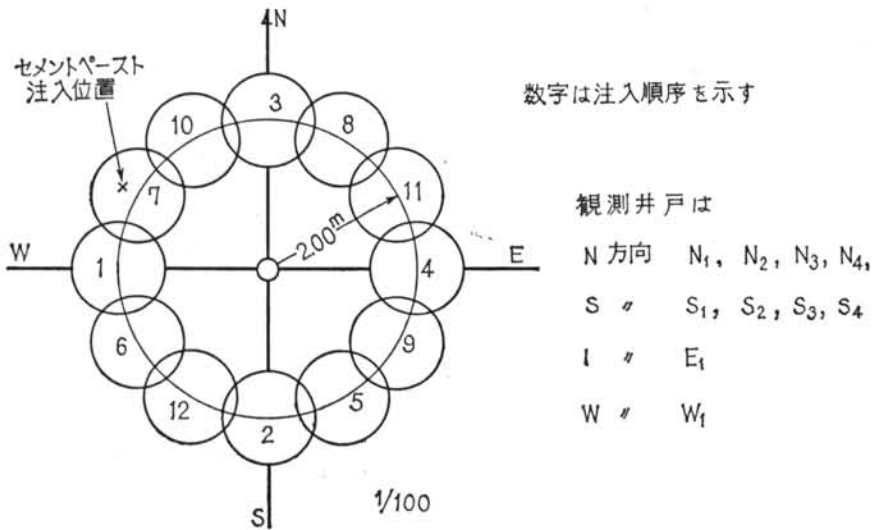


図-6 注 入 孔 位 置 図

表-4 注 入 表 (第2回)

No.	注 入 深 さ G.L.より(m)	注 入 量 (バ ッ チ)	所 要 時 間 h m	濃 度 TF:W	備 考	月/日
1	8.00~2.15	17	4.35	1:4		6/21
2	8.00~4.50	11	2.00	1:5		6/22
3	8.00~1.35	16	3.43	1:5		"
4	8.00~4.85	11	2.37	1:4		6/27
5	8.00~4.20	4	1.37	1:4		"
6	8.00~3.25	7	1.50	1:4	No. 5 から噴出 終了前 No. 10 注入管打込中	"
7	8.00~3.05	16	2.12	1:4	6.00mにて噴出	6/29
8	8.00~2.40	15	1.37	1:4		"
9	8.00~3.20	15	1.48	1:4	No. 10 より噴出	6/30
10	8.00~4.40	6	1.16	1:4		"
11	8.00~5.40	10	0.53	1:4		"
12	8.00~4.00	6	1.02	1:4		7/1

写真-6

白線部がセメントペースト



写真-7

サンドウィッチ状の Terra Firma
とセメントペースト



分を楽に注入することができた。後に堀削して見ると、セメントミルクは単独では砂中に入って行かなかった。層をなして進行した Terra Firma の中央に、やはり層状に進んで固結し、サンドイッチ状になっていた（写真-6, 7）

4.3 注入後の揚水試験（第2回）

注入完了後、中心部に第1回に用いた揚水井戸用パイプを埋め、最後の約1mはモンケンで叩き込み、下端を-6.50mとして内部の土砂を堀り上げた。

揚水試験は各種の状態において6回に分けて行なったが、回復法の公式から次のような計算結果を得た。

- 第1回 $2.15 \times 10^{-4} (\text{cm/sec})$
- 第2回 $3.53 \times 10^{-4} (\text{＃})$

第3回 $1.80 \times 10^{-4} (\text{＃})$

第4回 $1.99 \times 10^{-4} (\text{＃})$

平均 $2.37 \times 10^{-4} (\text{cm/sec})$

これは注入前の $4.05 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ に比較し、相当の改良が見られたわけである。

4.4 処理された土壌の状態

堀さくの進行に伴って見られたことは、注入孔の周囲は、20~30cmの広がりをもった範囲のみが固結されていたに過ぎない。（写真-8）

-5.00mから採取された資料でも、同様な浸透状態を示している。（写真-9）ただし地盤のゆるいと考えられる部分では、水平方向に層をなして大きく広がり、その厚さは1~5cm程度で、方向によって相当の差異があ

写真-8

注入孔跡と浸透状況

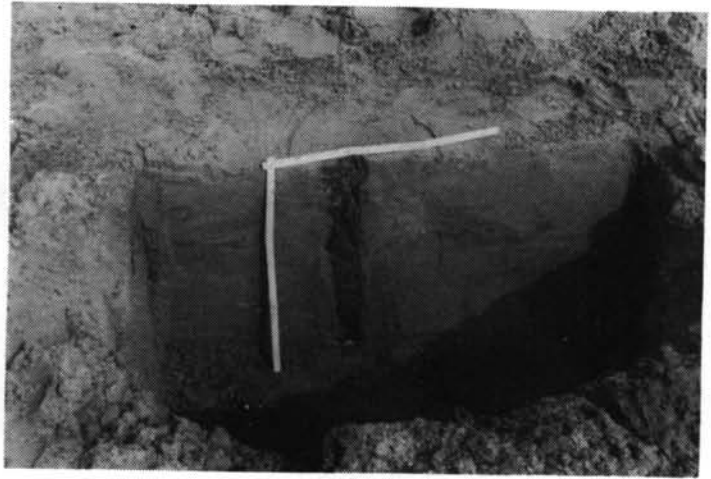


写真-9

-5.00mから採取された固結土塊



った。固結された部分は水中に入れても崩壊せず、透水性はまったくないが、それ以外の部分では殆んど薬液の存在は認められず、水中に入れると直ちに崩壊した。

また写真-10に示すように、-3.00m附近の粘土層を上に向かって薬液が進んだ個所が見られた。このような部分はまた写真-11に見られるように、揚水井戸を中心にして半径約1.20mの円を画いて、比較的薄い円筒状の壁を形成していた。

§ 5. 建物基礎地盤の安定工法 (東鉄管理局現場の場合)

現在施工中の東鉄管理局現場では、根切り底深さ-14.00m、シートパイル打切梁3段架けで、北側にはシート

パイルから約1m離れて地上3階、地下1階の朝日生命別館があり、基礎杭のない部分がある。この沈下、移動を防ぐため、建物下部に薬液およびセメント注入を行なった。

注入深さは-8.50m~4.50mで、No. 2, No. 3ともTerra Firma 約300kg、溶液にして約1.500 lを注入し、1か所当りセメント500kgを注入することができた。

この現場では2段目切梁に応力計を取付け、絶えず切梁にかかる土圧を測定できるようになっているので、注入による圧力変化を見るため、注入箇所はその切梁当りを選んだ。切梁1本の負担面積は約14m²で、常時25ton程度の土圧がかかっていた。土圧計に現われた変化は図-7の如くであり、注入終了後圧力は次第に下がり、時間の経過と共に注入以前よりも少なくなっているのは、



写真—10 砂層が薬液で完全に固結されている

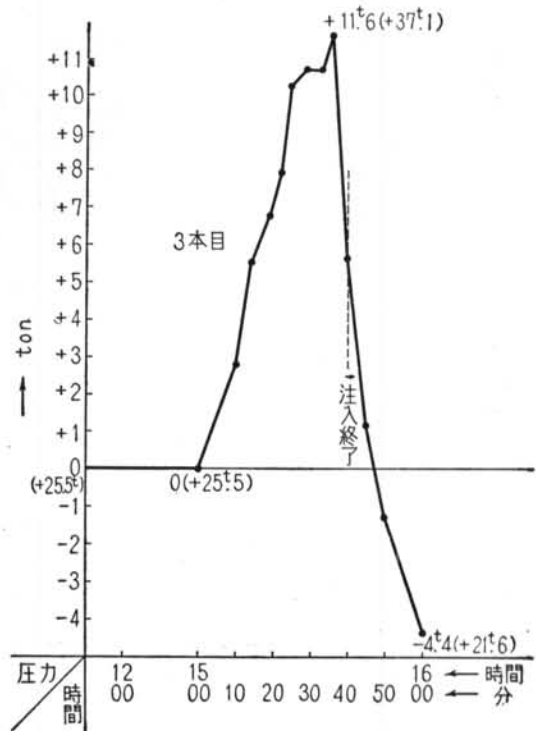
非常に興味ある現象である。

§ 6. 実験 所 見

1. Terra Firma は砂質地盤にも容易に注入することができるが、その広がり方は地盤の締め具合により必ずしも一様ではない。
2. Terra Firma は地盤の締め方のゆるい所、水みちになった部分に浸透して固結しても、十分に止水の効果をもつことが判明した。
3. Terra Firma はセメント注入の下地として、事前に注入しておくことは非常に有効であり、他の薬液注入には見られない大きな用途が期待される。
4. Terra Firma は標準注入量により予定量を注入し終っても、必ずしも止水の効果を期待できない場合もあるので、止水の目的には注入できるだけ十分に注入し、遂に注入圧力が上がるまで継続すべきである。



写真—11 薄い円筒状の壁を見下ろす



図—7 Terra Firma 注入による土圧計の変化
(朝日生命側1段梁取付)

5. Terra Firma 注入は、各種の目的・土壌に対して数多くの経験と実験的試みが積み重ねられれば、優秀な土壌安定工法および止水工法として、広い応用範囲をもつことができよう。

附 録

ボーリング断面図 ①

工事名	ゼネラル石油敷地地質調査工事
場 所	川崎市泉管理立地地先
期 間	昭和36年5月24日～昭和36年5月25日
技術者	斎藤 瑛二

