

噴泥防止に対するジェットグラウト工法の応用(その1)

清水 勇
伝 田 篤
(土木技術部)

§ 1. はじめに

わが国は国土が狭いだけでなく、平坦地の多くはいわゆる沖積層と呼ばれる軟弱な地層からなっている。

そこで、新たに海を埋立てた土地を活かすことを余儀なくされ、土地の効果的活用の必要性和技術の進歩が今日種々の軟弱地盤を改良する方法を生みだし、役立たせることを可能とした。

軟弱地盤改良工法には種々の工法が存在しているが、従来その多くは、サンドドレーン、サンドコンパクション工法等が、その将来性を買われ現在でも多く使用されている。

一方、1975年頃から、生石灰やセメントペーストを用いて地盤を攪拌しつつ化学的に処理しようとする攪拌工法が見られ始めた。さらに、この工法とジェットグラウト工法の併用方式が考えられつつあり、地盤改良の施工範囲を広げてきたものといえよう。

ジェットグラウト工法は、従来様々な施工箇所において主に止水を目的として、薬液注入工法の一つとしてかなり多く使用されている。

特に本報では、鉄道路線に最も多く生じる地盤特有の「噴泥現象」に対処するため、比較的浅層を対象として高圧ジェットグラウト工法(MIP-J工法; 仮称)を採用することとなった。そこでこの適用性を把握するため、種々の内容をもった一連の実験工事を行なったその結果報告である。

なお、地盤の噴泥現象の機構や、これに前記工法で対処しようとすることは、比較的新しい試みであり、現段階では、実験工事を経て本工事への適用性および可能とする施工範囲を決定することは止むを得ないと考えられる。

ここに筆者は実験の全容を紹介する意向であるが、紙面の関係上関連する小実験に関しては割愛し、計画設定の過程および結果と若干の考察、またその工法の適用の可否についてのみ述べたことをお断りしておきたい。

§ 2. 噴泥について

鉄道路盤には、軌道の健全な機能を阻害する噴泥、過大な保守労力を必要とする沈下などの問題がある。

鉄道路線は一般に図-1に示す断面からなり、路盤とは狭義には道床と接する面から深さ300mmの部分を行い、広義には盛土の場合、軌道を支承する盛土本体全部をいうこともある。

噴泥が起ると道床および路盤の支持力が低下し、軌道の持つ弾性がなくなり、軌道が狂い、そのため保守労力を増加させ、重大な事故の原因にもなる。

噴泥とは、道床内の微粉体や路盤を構成する土粒子が列車荷重の影響により、道床間げき内を上昇して道床を汚染するという現象、あるいはこの汚染する物質を行い、この上昇を媒介するのは、道床や路盤に含まれる水分の運動であり、噴泥は一般に「道床噴泥」と「路盤噴泥」とに分類されている。

2.1 道床噴泥

道床噴泥は、道床自身の破碎による粉末、施工時に道床に含まれていた粘性土、外部から風などによって持込まれるじんあいや、レールの削りくずなどが道床粒の間げきに充満して不透水層をつくり、そのために地表水が道床内、とくにマクラ木下面付近に滞留して噴泥する場合である。この場合は、地表面的な現象であって、噴泥は主としてマクラ木周辺に噴出する。

2.2 路盤噴泥

地表水または地下水により軟化した路盤の土が道床の間げきを上昇するものであり、土質工学的に問題なのは

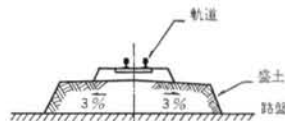


図-1 路盤の断面



写真-1 噴泥を生じた状況

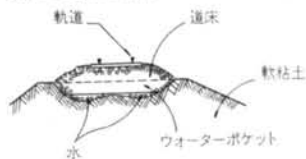


図-2 ウォーターポケットの断面



図-3 実験地点案内図

この噴泥である(写真-1)。

この発生の原因は、路盤の土質、路盤および道床の排水状態、列車荷重の大小、速度に関係があると考えられている。

噴泥の発生機構は、今のところ十分には解明されていないが、不良な路盤材料が地表水または地下水により、含水量が多くなり、軟弱化してせん断強さが低下することになる。このため道床粒が容易に路盤中にめり込み、図-2にみるようにウォーターポケットを形成し、これが列車の繰り返し荷重により加圧、減圧のいわゆるポンプ作用を受け路盤表面がこねかえされて、道床の間げき中を上昇し、道床表面に噴出し、この作用が終ると噴泥の大部分が再び道床内へ吸い込まれるという経過を繰り返す。

ウォーターポケットの成長の限度は、明確化されてい

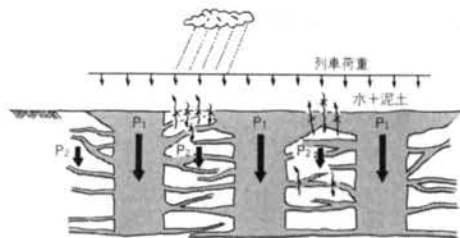


図-4 噴泥防止機構概念図

ないが、国鉄の路盤でその深さが1mを越えているものは極めて少ないという報告もある。

§ 3. 実験工事について

3.1 実験計画設定の経過

本実験は図-3に示す「東京都町田市」の東急電鉄榊田園都市線延長工事区間において実施したものである。

現在線軌道路盤では、すでに噴泥が発生しており、保線管理上の支障をきたし、この路盤を良質材料に置換する工法で対処する計画が進められていた。しかし、営業線であるため作業時間および作業空間等に大きな制約を受け、計画した工法では莫大な工期と工費を要することから、これに替る改良工法の選定が望まれた。

そこで、サンドパイルの圧入、改良型MIP、高圧ジェットグラウト工法等を様々な面から検討し、高圧ジェットグラウト工法が最適であろうとの結論に達し、本工法の妥当性についての具体的な計画を行なうことになった。

もとより、噴泥の発生する主要原因として、「水の存在」、「土自体の性質」、「繰り返し列車荷重」が考えられており、噴泥防止工法では、これら1つの排除、軽減、改良することで対処が可能とされている。参考までに、表-1に噴泥防止工法例を示しておく。

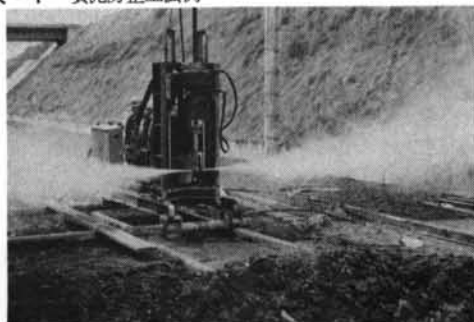
そこで、図-4に示すような概念を基に、列車荷重の大半を造成杭で負担(支持)させ、各杭間路盤へ作用する列車荷重を軽減させ、原地盤をセメントペーストでサンドイッチ状にはさみ、水、泥土の出入りを阻止し、一種の造成ソイルセメント杭にして全般的に土質の改良を行なおうとしたものである。

3.2 本工法の概要

本工法は、写真-2に示すように、台車トロにスピンドル型ボーリングマシンを設置したもので、図-5に示す施工過程を経て行なうものである。すなわち、先端にペーストの噴射ノズルを装備したボーリングロッドを回

噴泥因子	原因の排除	工法の目的	工法例	摘要	
水	A. 路盤に水を入れない	① 路盤表面を防水層でおおう	(1)路盤面被覆工法 (2)薬液注入(撒布)工法	盛土、地下水の比較的低い切り取り区間 (1)はいちじるしい噴泥区間 (2)は軽微な噴泥区間	
		② 地下水位を下げる ③ 地表水の流入を防ぐ	(3)側溝掘り下げ工法	地下水位が高い区間	
		B. 線路の排水をよくする	① 地下排水をよくする	(4)センタードレーン工法	地下水位が高い区間
	(5)切窓工法			側溝に集中できないため線路内に滞水している区間	
	(6)垂直砂くぐり工法			比較的浅いところに圧力水をもたない砂礫層がある所	
	② 路盤表層の排水をよくする		(7)排水管理設工法 (8)簡易排水管理設工法 (9)盲溝工法	盛土区間および地下水位が比較的低い切り取り区間で、地下水が噴泥に関係していない区間 初期的噴泥、軽微な噴泥区間	
	③ 道床の排水をよくする	(10)道床更換	道床の排水の悪い区間		
	土	C. 土質を良くする	① 排水のよい土または噴泥しがたい土を用いる	(1)路盤置換工法	切り取り区間などで地下水位高く、地下水が噴泥に関係している区間
			② 安定処理を行なう	(2)焼結工法 (3)路盤安定処理工法	ボーリング可能な区間で土質不良区間
			③ バラスト路盤へのめり込みを防ぐ	(4)メッシュ工法	盛土区間地下水の低い切り取り区間で軽微な噴泥区間
D. 路盤に作用する荷重を小さくする		① 荷重を分散させる	(5)道床厚増加工法	比較的軽度の噴泥区間で10cm以上の線路こう上可能な区間	

表一 1 噴泥防止工法例

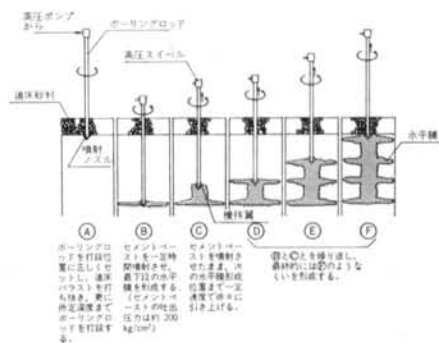


写真一 2 スピンドル型ボーリングマシンと噴射状況

転させながら、道床バラストを打抜き、さらに回転させながら、改良下端深度（道床バラスト下の地表面から深度1mまで）まで貫入させる。その後高圧プランジャポンプ（PG-40）により、約200kg/cm²前後の高圧でペーストを噴射させながら、ボーリングロッドを回転させ、徐々に引き上げていく。最後に噴射ノズルが道床バラスト下端に達したらペーストの噴射を停止し、ロッドを引抜くという方法である。

3.3 計画設定の予備的概念

噴泥防止工法の成功、不成功は現段階では改良後の調査によるか、予備的な実験工事を行なうことによるかの手段に頼ることは止むを得ないと考えられる。



図一 5 施工順序方法

しかし、あらゆる観点において問題を山積みした地盤改良工法では、施工実績の蓄積による総合的評価を待つことに異論はないが、工法選定に対する基礎的問題を最小限把握しておく必要性は常にあると考えられる。

すなわち、機械性能や施工性等と共に噴射注入した材料と土質との対応性、噴射注入可能な材料の性質等、種々の基本的性質の把握が必要とされる。

3.3.1 目標管理基準の設定

国鉄建設局編「土構造物の設計施工指針(案)」によれば、噴泥発生の初因は道床粒の路盤土へのめり込みであるとして、その道床粒のめり込みが形態的に現場C.B.R試験に類似している等の点から、国鉄技術研究所にお

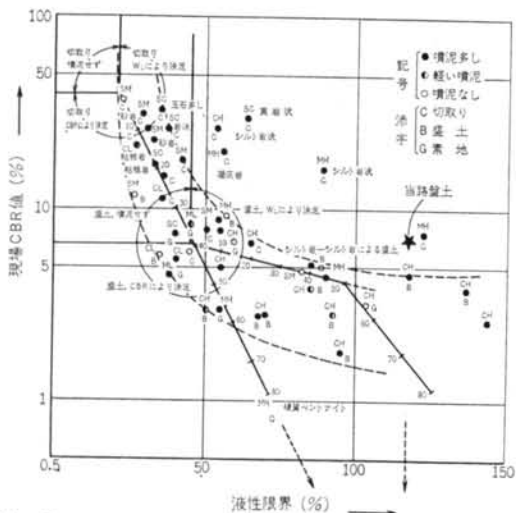


図-6 保護土層の厚さを求める方法

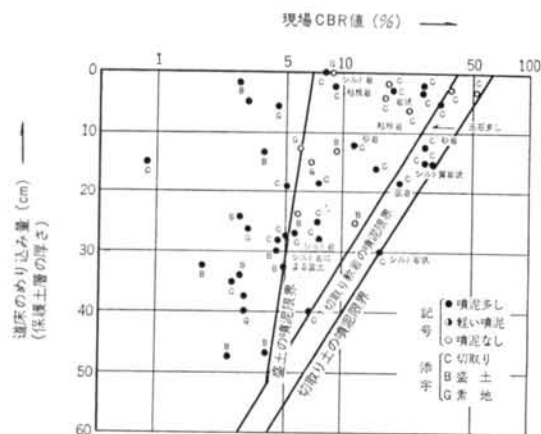


図-7 「現場C. B. Rおよび道床のめり込み量」と「噴泥発生」の関係

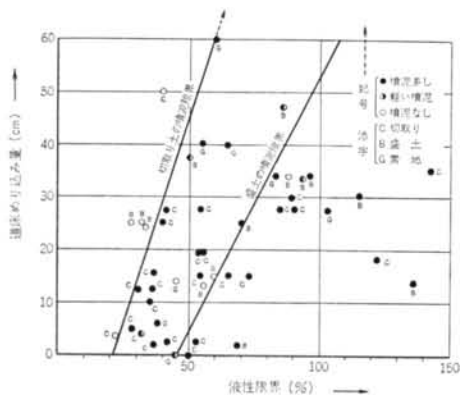


図-8 「液性限界～道床のめり込み量」の関係

		現場 C. B. R (%)
盛土部分		> 7
	WP ≤ 20cm	> 40
切土部分	20 < WP ≤ 40cm	> 25
	WP < 40cm	> 10

注) WP : 道床のめりこみ量

表-2 現場C. B. R基準値

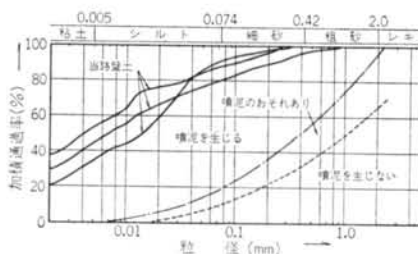


図-9 噴泥化しやすい路盤土の粒径分布範囲と当路盤土の粒径分布

いて、噴泥地点の全国的な調査を実施し、図-6, 7, 8の関係を明らかにしている。

いわゆる現場C. B. Rと液性限界とより、保護土層の厚さの決定に際しては、上記2者のいずれかによって決め、保護土層厚を決めている。

本計画では、既設線の補修工事という観点からすれば、改良効果の基準の設定には図-8を用いるのが最も有効的であると判断した。

本実験では、表-2のような基準を設定し、ペースト配合を決め、新設線の一部であり、めり込み量が測定できない等を考え、現場C. B. R > 40となるような配合を使用することにした。

また、土質工学会編「土質試験法」によれば、一般に適当な土の圧縮強度があれば、凍結融解、湿潤・乾燥等の耐久性の基準に合格するという経験的事実があるとし、基準としての値を決定するまでには至っていないとしながらも、一応一軸圧縮強さが30kg/cm²という値を掲げている。本実験では、参考値として扱い直接的な目標とはしないものとした。

一方、全国的不良路盤調査結果から、噴泥しにくい土、しやすい土は、土の粒度曲線とコンシステンシから決められることが、昭和41年の路盤委員会の検討ではほぼ明らかにされ、噴泥化しやすい路盤土の粒径分布範囲として、図-9に示す1つの基準図を掲げている。

これに本実験地の地盤の粒度組成を照合してみると、噴泥発生の可能性が極めて高いということがわかる。

さらに、砂質ローム性の路盤での噴泥が非常に多く、

これは砂質ロームの路盤が最も噴泥を発生しやすいということを意味するものではないが、砂質ロームから構成される場合が多いということを示唆している。

3.4 実験方法（主旨）の設定

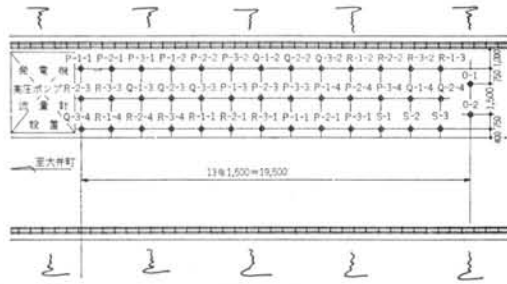
本実験は、営業線における新噴泥防止工法の確立および防止効果の確認を目的としているが、特に本実験では概略の目安をつける意味で、大略次に示す3項目を設定した。

- (i) 実験—1；セメントペーストの適性配合
 - 杭打設前の路盤土の室内C.B.R値
 - 杭打設前の路盤土の一軸圧縮強さ
- (ii) 実験—2；最適打設方法
 - ボーリングロッドの引き上げ速度、回転数、ノズル径と打設杭形状調査
- (iii) 実験—3；施工性および杭打設配置
 - 道床パラスト、レールを敷設しての施工性

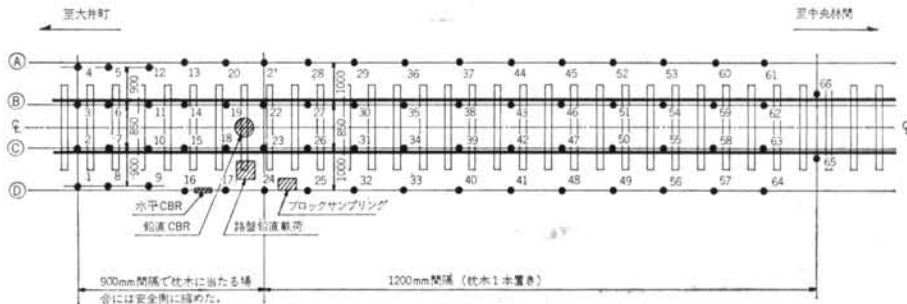
3.4.1 実験の種類と打設配置

(i) 実験の種類

主要使用材料は、早強ポルトランドセメント、超早強ポルトランドセメントの2種とし、イントルージョンエイドを各々1%混入した。水セメント比は、40, 50, 60%とし、路盤土に対する体積混入率を20, 30, 40%について行なった。その他、施工性も考慮しノズル径を2, 2.4, 2.8mm（いずれも両ノズル）、2.4, 2.6mm（いずれ



図—10 実験—2の杭打設配置と杭名称



図—11 実験—3の杭打設配置と杭名称

も片ノズル)とし、ロッド回転数は12, 22, 42.4 rpm とした。さらにロッド引き上げ速度は20, 40, 60, 80 cm/minとし、上記各々の組合せをもって実施した。

(ii) 打設配置

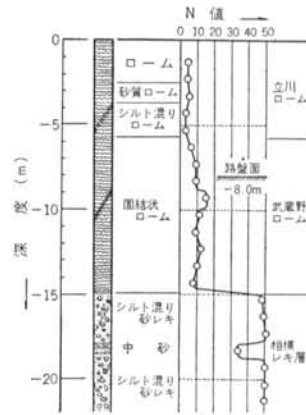
実験—2では図—10、実験—3では図—11に示すように打設した。

3.5 実験地点の地盤状況

この付近周辺地盤構成は、大略図—12に示すものである。G.L.-5.00mまでは立川ローム層で覆われ、さらにG.L.-15.00mまでは武蔵野ロームとなっており、これに深は相模礫層と続いている。

実験地点は、写真—3に見るように、G.L.-8.00mの深さが路盤となっている。この路盤土は関東ロームのうちでも武蔵野ロームと呼ばれているもので、土質定数はおよそ下記のようなものである。

- 液性限界 (W_L) → 115.8%
- 塑性限界 (W_P) → 58.1%
- 自然含水比 (W_n) → 106.4%
- 塑性指数 (I_P) → 57.7%
- 現場C.B.R値 → 7.14%



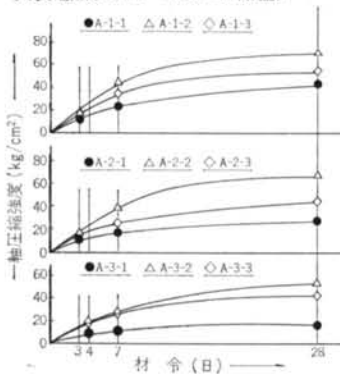
図—12 実験地点周辺の土質柱状図

§ 4. 実験結果および考察

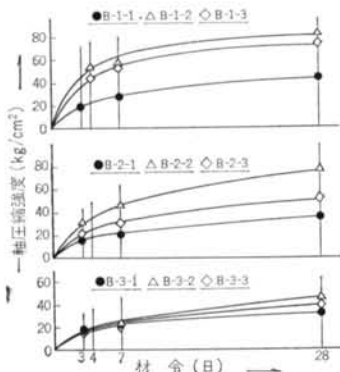
4.1 実験—1



写真—3 実験地点(G. L.—8.00mが路盤)



図—13 各配合の一軸圧縮強度と材令の関係(早強ポルトランドセメント)

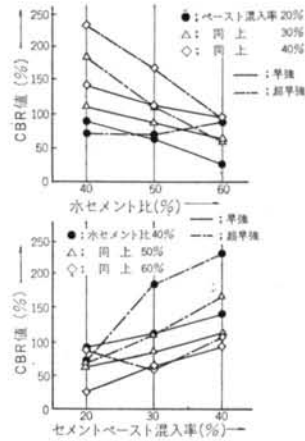


図—14 各配合の一軸圧縮強度と材令の関係(超早強セメント)

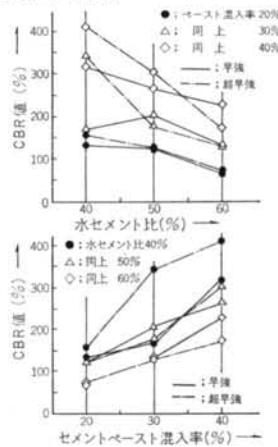
セメントの種類、水セメント比に関し、材令による強度の伸びを示したのが図—13, 14である。

この結果、セメントの種類による差が明確で、超早強セメントの方が強度発現が早く、強度の伸び率は若干小さくなっている。

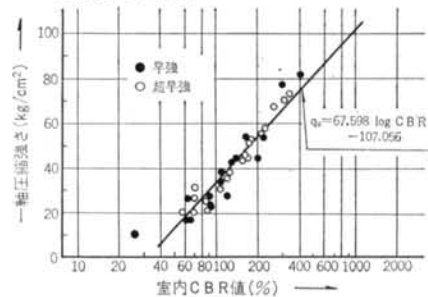
なお、材令28日の強度は、 30kg/cm^2 以上の値を確保し



図—15 材令7日C. B. R値と水セメント比・セメントペースト混入率との関係



図—16 材令28日C. B. R値と水セメント比・セメントペースト混入率との関係



図—17 一軸圧縮強度と室内C. B. R値との関係

ている。

また、室内C.B.R試験の結果では、図-15, 16に示すように材令7日, 28日での水セメント比およびセメントペースト混入率の関係で示したが、セメント種類による相違はみられず、混入率増加に伴ない、むしろ水セメント比の違いによる変動は小さくなっている。

さらに、C.B.R値と一軸圧縮強さ(q_u)との間には、図-17に示すように以下の関係が得られた。

$$q_u = 67.598 \log C.B.R - 102.056 \quad \dots(1)$$

4.2 実験-2

実験-1は、基本に力学的性状を把握し、セメント混入率を決定する主旨で、早強セメント、水セメント比50%を使用することを設定した実験である。

図-18および写真-4, 5に杭の形成状況の代表的なものを示したが、ほとんどの杭に杭芯から枝状にセメントペーストが伸びており、円板状になっているものが大多数であった。また数本の杭には、房状になった突起物

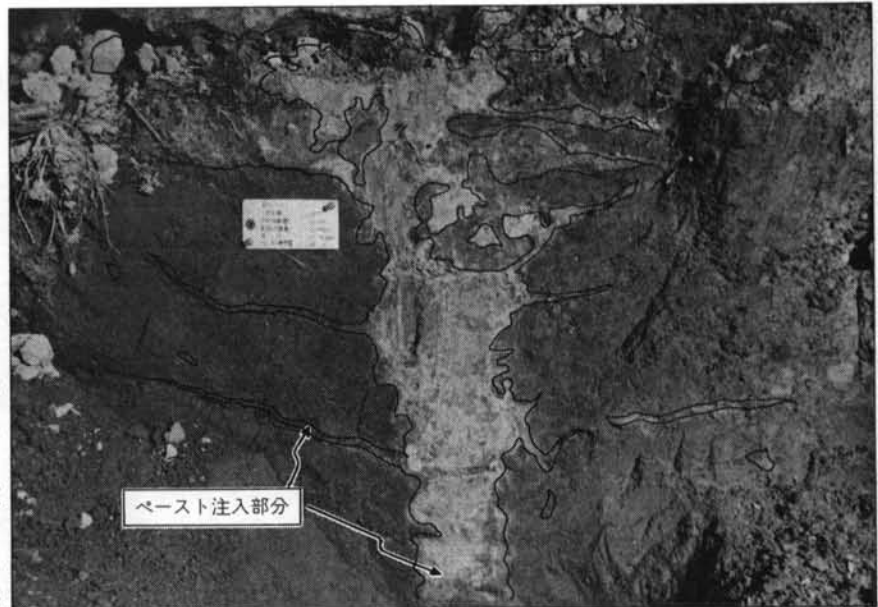


写真-4 枝状になったセメントペースト(Q-1-3杭)

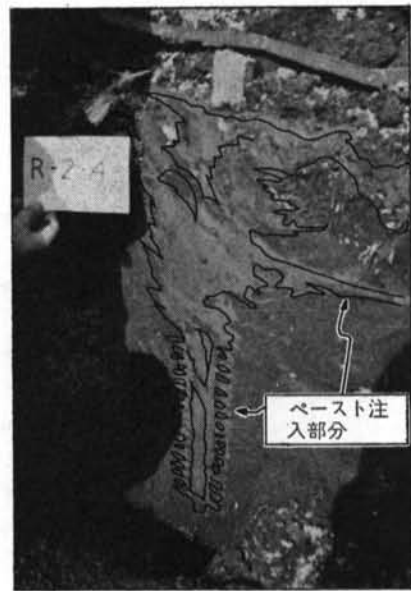


写真-5 房状になったセメントペースト(R-2-4杭)

設置杭番号	Q-1-3	設置杭番号	R-2-4
ノズル径 (mm)	2.4	ノズル径 (mm)	2.8
ロッド回転数 (r.p.m)	12	ロッド回転数 (r.p.m)	22
引き上げ速度 (cm/min)	60	引き上げ速度 (cm/min)	80
実測引き上げ速度 (cm/min)	60	実測引き上げ速度 (cm/min)	77.9
掘削深度 (m)	0.75	掘削深度 (m)	0.75

	Q-1-3	R-2-4	
圧力計の読み (kg/cm ²)	75	圧力計の読み (kg/cm ²)	76
流量計の読み (l/min)	53	流量計の読み (l/min)	47
ペースト使用量 (g)	70	ペースト使用量 (g)	47
ペースト注入時間 (分・秒)	1':10"	ペースト注入時間 (分・秒)	0':55"

図-18 杭打設後の形成状況 (代表例)

がみられ、ロッドの回転数に対して引き上げ速度が早すぎたためにできたものと判断し、再度回転数と引き上げ速度の妥当性を調査した(図-19)。また、便宜的に杭径が30cm以上形成されていたものについてみると、噴射圧力が100kg/cm²未満のものでは、わずか1/5弱の杭が満足に形成されていなかった。

このため、噴射圧力は100kg/cm²以上必要とし、引き

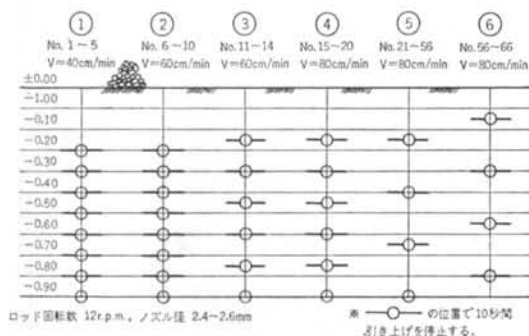


図-19 実験-3における打設方法

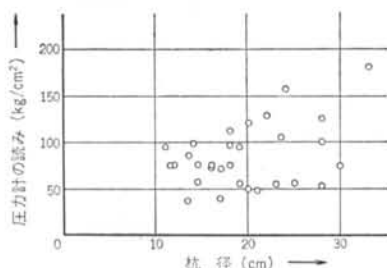


図-20 実験-2における径杭と圧力の関係

上げ速度が40cm/min, 回転数12rpmであれば一応30cm以上の杭形成が可能と判断した。

一方, セメントペーストの噴射圧力については, 粘性流体圧送の場合は100kg/cm²以下の圧力しか得られず, 図-20からも理解される。

図-21には, 噴射圧力とノズル孔の断面積の結果を示したが, 断面積が4.524~6.283mm²では噴射圧力が急激に減少しており, 6.283mm²以上では圧力の減少はきわめて小さい。

図-22は, 噴射圧力とセメントペーストの流量との関係を示したものであるが, PG-40の規格流量である60 l/minを示すものはほとんどなく, 40~50 l/minが大半であった。この状況は, すでに図-20でも示したように杭の形成に関係してくるわけであるが, 路盤土の不均一性および高圧ポンプの能力といったものによることが理由として考えられる。

4.3 実験-3

実験-2で決定した打設方法を確実なものとするため図-20に示した方法を試みた。この結果, 引き上げ速度と停止間隔との関連でみると, 掘削調査の結果ほぼ10cm間隔が最良の効果を示している。一方, セメントペーストの注入量(大半が85 l/本~100 l/本に含まれる)の多少によるレールの浮き上がり量の問題, 施工効率, 経済性の問題を考慮し, 一応, 平面的に打設間隔は900mm

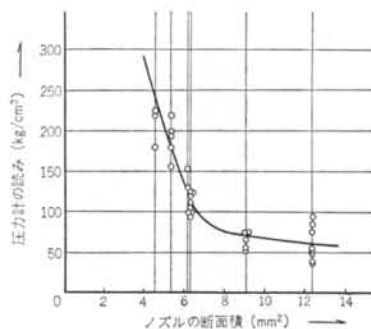


図-21 実験-2における圧力とノズル孔の面積との関係

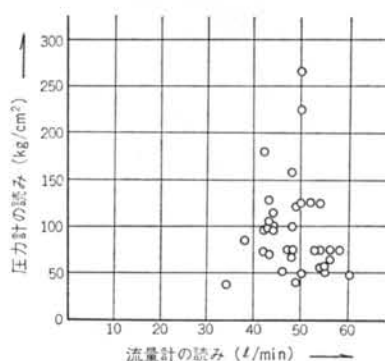


図-22 実験-2における圧力と流量の関係

前後が妥当であるものと判断した。

以上, 実験結果およびこれらに関する所見を述べたが, この他, 今後の適用に関して十分に可能性のあるものとするため, かなりの追加実験を行なっている。特にこれらの工法は, 現地盤の性質と常に関連して検討されなければならないので, 実験後の調査による評価が現状ではかなり重要な作業となっている。その1つに列車の荷重の分担率, および繰り返し荷重を受けた地盤の挙動について, 具体的に把握していかなければならない。

実験の過程および結果から, ほぼ噴泥に関して採用できる見通しができたものと考えられるが, 工法開発の技術には, 常に経済性と並行させて考えなければならない難問が残されているといえよう。

§ 5. おわりに

本報では, 噴泥という鉄道路盤に特に生じるという現象を紹介すると同時に, これらの防止対策として高圧ジェットグラウト工法が実験工事において採用可能であるという結論を得たその報告にとどめた。

すでに, これらの実験工事の内容を基盤にして本工事

へ踏切り、種々の成果を上げている段階であり、噴泥防止対策工法として徐々に確立されようとしている。

今回は、特に防止対策による地盤（改良地盤）の変形特性について調査したので報告する予定である。

また、攪拌工法と本工法との併用工法に関する可能性についても十分反映できる見通しがついたものと推察される。

なお、この報告にあたり、実験の総合的な担当者であり、本文作成の協力者であったプレバクト運営課の伝田氏および関係諸氏に感謝し、筆者等の研究課題でもある攪拌工法との併用工法を可能にするべき基本的な実験結果を提供していただいたことにも重ねて敬意を表する次第である。

<参考文献>

- 1) 清水建設(株)土木技術部プレバクト運営課：“東急噴泥防止工法実験報告書” 昭和52年10月
- 2) 西亀・伊藤：“鉄道の路盤について” 土と基礎 20巻6号 (1972)
- 3) 土質工学会編：“鉄道路盤（土質工学ハンドブック）”
- 4) 伊藤：“噴泥対策と新路盤工” 鉄道技術研究資料 第34巻9号 (1977)
- 5) 国鉄建設局編：“土構造物の設計施工指針(案)”
- 6) 土質工学会編：“土質試験法”

