

# 招待論文

## 鉄道路盤の噴泥の実態と対策

### ACTUAL SITUATION OF MUD-PUMPING ON RAILWAY ROADBED AND ITS COUNTERMEASURES

伊能忠敏\*

By Tadatoshi INO

#### 1. ま え が き

鉄道路線の噴泥とは道床中より線路上面へ路盤土もしくは道床の破砕したものが泥土として噴き出る現象をいう。鉄道においては噴泥現象を解明し、効果的な噴泥対策工を選定することが長年の課題であった。噴泥の発生によって軌道の変形が大きくなり、この結果列車走行の安全性を確保するための軌道保守作業が著しく増加する。従来は噴泥現象の解明がなされないまま、現場において試行錯誤的に対策工を施工し、この効果の確認がなされていないのが実情であったが、軌道保守労力が十分確保できたため、対症療法的作業による軌道保守が可能であった。しかし最近では列車の高速化と高密度化に伴う噴泥が多発する傾向があること、軌道保守、保守間合の確保が困難である等の理由により根本的に噴泥現象を見直し、かつ効果的な対策工法を確立する必要に迫られている。ところで、噴泥には路盤土の上昇に起因する路盤噴泥と道床の破砕に起因する道床噴泥の2種類があるが、本論文では噴泥の発生件数の大半を占め、かつ発生機構の解明が不十分であり、対策工法の確立がなされていない路盤噴泥を対象とすることにした。

噴泥に関する過去の国内での研究では昭和30年の西亀ら<sup>1)</sup>による全国主要線区の路盤噴泥調査に遡ることができる。これにより噴泥が生じないための路盤土質条件が明らかにされ、路盤土のコンシステンシー、粒度に関する噴泥発生の限界値が示された。また齊藤<sup>2)</sup>は西亀らの研究成果を整理して噴泥対策工の置換工法の一つである路盤保護土層の厚さをCBR値と液性限界値より決定

した。保護土層厚さは道床の路盤へのめり込みに注目して定めたものである。また、めり込みに関する研究としては山田・小野<sup>3)</sup>らの円筒容器による載荷試験の研究もあり、道床砂利を介して粘性土に静的および動的鉛直荷重を作用させ、載荷振動数および粘性土の含水比が道床沈下に及ぼす影響を調べている。

海外での研究は少ないが、1953年にW. W. Hay<sup>4)</sup>がその著書Railroad Engineeringの中で噴泥を生じやすい路盤土のコンシステンシーを示している。また1972年のAREA Bulletin<sup>5)</sup>には路盤土質と噴泥の程度が示されている。

以上の背景により本論文では過去の研究や実情を十分に検討するとともに噴泥発生機構を究明し、効果的な噴泥防止対策工を提案することを目的としている。すなわち現場調査を広範囲に実施し、噴泥の現状をとらえ、さまざまな角度より分析することにより噴泥の発生要因の抽出や発生過程の推測を行い、室内試験では推測された発生過程の確認をするために模型軌道による繰返し載荷試験を行った。また噴泥発生要因の定量化を行い、噴泥発生現象の初期における路盤への道床めり込み沈下について考察した。さらに噴泥対策工の現地敷設試験を行い、その効果を確認した。以上により噴泥現象はほぼ解明され、効果的な噴泥防止対策工法が提案された。

#### 2. 鉄道路線における噴泥の調査と分析

##### (1) 全国噴泥実態調査

本調査は昭和50年に国鉄在来線（在来線とは新幹線以外の線路をいう）における噴泥の全国的な実情を把握するために実施されたものであり、対象とした線区は上級線（国鉄では線路の重要度にあわせて線路の等級を4

\* 正会員 工博 日本国有鉄道首都圏本部長・常務理事  
(〒100 千代田区丸の内1-6-5)

表一 調査結果総括表

項目	調査結果	備考
調査対象線区延長	17 435 km	A 全線区の 64 %
噴泥発生延長	728 km	B
噴泥発生率	4.2 %	B/A
噴泥箇所数	71 599	C
1 か所当たり噴泥延長	10.2 m	B/C
平均保守周期	58 日	噴泥箇所で加重平均

等級に区別しており、ここでは1,2,3級線を対象とする)の全線区および開業後5年以内の下級線(4級線)である。

調査結果を表一に示すが、これによれば全国平均の噴泥発生率は4.2%であり、延長にして700 km以上にわたり噴泥が多発していることがわかる。調査箇所での噴泥状況を写真一、二に示す。また噴泥発生箇所の10%に相当する箇所を抽出し、線路の曲率、線路勾配、盛土材料、地質条件について検討した結果、次の2点が判明した。

① 一般に噴泥は排水不良になりやすい切取区間に多く発生すると考えられてきたが、盛土区間でも相当数の噴泥箇所がみられた。

② 軌道構造別にみた場合、線路の曲率および勾配については噴泥発生との明白な因果関係がみられないが、レール継目箇所では噴泥が多く発生しており、レール継目と因果関係があると判断された。

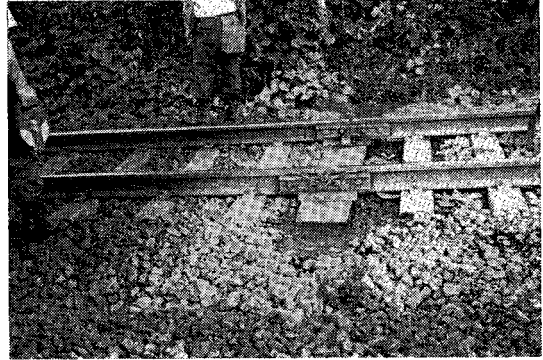
さらに次に示す3つの地質条件と噴泥発生状況の分析を行い、両者の関係を求めた。

- ① 噴泥しやすい地質：第4紀火山噴出物、第3紀層
- ② 中間的な地質：第4紀非火山性堆積物
- ③ 噴泥しにくい地質：古生層、中生層、花崗岩類、貫入岩類、変性岩類

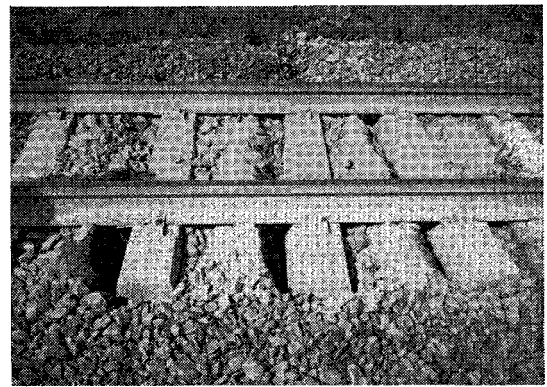
また噴泥発生状況については調査結果を保線区の保守管理区分単位の集計結果に基づき、噴泥発生率(噴泥延長/軌道延長×100)を算出し、次の4段階に分類した。

- ① 5%以上
- ② 3%以上5%未満
- ③ 1%以上3%未満
- ④ 1%未満

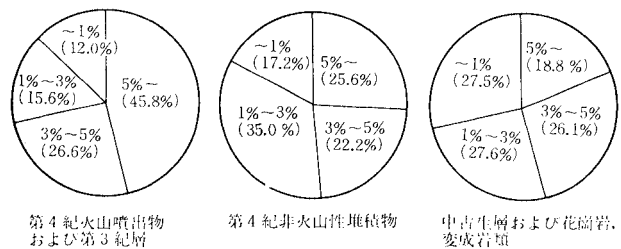
分析結果は図一に示すように噴泥発生率と地質条件とは密接な関係があることがわかる。路盤噴泥の発生要因の1つに路盤の土質が考えられるが、在来線の路盤材料についていえば、これらは原地盤の土、付近の切取り土、トンネルのズリ、あるいは付近の土取り場の土が主体となっている。すなわち路盤材料は大局的には線路周辺の地質に等しいと考えられる。



写真一 噴泥の状況 (レール継目部)



写真二 噴泥の状況 (レール中間部)



(注) カッコ内の数字は全体に対する比率を示す

図一 地質条件別の噴泥発生率

## (2) 噴泥発生の要因分析

噴泥発生に関する分析は従来より行われているが、西亀ら<sup>1)</sup>の研究のように土質条件についてのみ、すなわち1条件について分析したものが主体であり、多くの条件を考慮して分析したものは少ない。

実際の噴泥現象が土質条件のみならずその他の多くの条件のもとに発生していると思われる実態からみれば、十分な分析とは思われない。噴泥現象を解明するには多くの条件を考慮して分析を行うことが必要である。そこで多変量解析による要因分析<sup>6),7)</sup>により、噴泥発生の要因を明らかにし、要因効果の順序づけを行うことにした。分析に用いたデータは東北本線の噴泥実態調査結果であ

る。

a) 東北本線噴泥実態調査の概要

調査区間である東北本線は地質条件が悪く、噴泥延長30.178 km、噴泥発生率5.3%となっており噴泥が多いことがわかる。著者<sup>9)</sup>らは調査区間として59駅間(操作場、駅等も含む)を選定し、昭和51年9月から10月にわたり調査を行った。

調査項目は噴泥状態の観察(路盤噴泥か道床噴泥か等)、噴泥延長、噴泥区間の線路状態(切取、盛土別、レール継目の有無、道床厚、排水状態の良否、路盤材料の良否等)の概要を調べた。また各調査区間に1~2か所(噴泥箇所とその比較対象とした非噴泥箇所を1対とする)の精密調査箇所を設定し、路盤材料、噴泥上の土質試験、路盤強度、道床厚、道床めり込み厚、地下水位等の精密調査を行った。

b) 噴泥発生要因分析

要因分析は以下に示す手順により実施した。

- ① 全調査箇所から分析に使用するサンプルを抽出するとともに噴泥に関与すると考えられる要因を抽出する(サンプル数157, 要因数30, 表-2参照)。
- ② 全体の要因について第1回多変量解析を行う。
- ③ ②で使用した30個の要因の中から要因として独立性の低いものや噴泥の発生に対して相関性が認められないものを除外し要因数を19個にまとめた(要因整理)。
- ④ ③で整理した要因について第2回多変量解析を行う。

分析に使用したサンプル数は路盤噴泥箇所(道床噴泥が同時に発生している箇所も含む)83, 非噴泥箇所74の計157個とした。また抽出した要因は30個であり表-2に示す。第1回目の解析では他の要因と相関が高く

独立性の低い要因や噴泥に対して相関が低いものを除外し、要因数を噴泥も含めて表-2中の要因番号に○印を付した要因19個に低減した。解析結果は次のとおりである。

19個の要因を用いて解析を行った結果、噴泥に対して相関が強い順に要因を示せば表-3のごとくなる。

表-3では上位10番目までの要因を示してあり、11番目からの要因の効果は小さい。これによれば噴泥に対して最も相関が強いのはレール継目であり、以下順に道床厚、液性限界、側溝の機能状態と続く。ここにおいて主要な要因を噴泥発生に関係する条件すなわち荷重、水、土の3条件に分類すれば次のようになる。

レール継目では列車走行時に衝撃荷重が発生し、この結果、路盤圧力を増加させるためレール継目は荷重条件に分類される。道床は列車荷重の分散を目的とするもので、道床厚は同じく荷重条件となり、液性限界は路盤土のコンシステンシーを示すので土の条件となる。また側溝の機能状態は路盤の排水程度を表わすので水の条件となる。以上により噴泥の発生に関係する要因を3条件別にみれば、表-3に示すように荷重の条件が他の条件よりも要因効果としては大きいことがわかる。

(3) 噴泥断面調査

本調査は東海道貨物線、中央本線等で道床および路盤を実際に掘削し、断面観察や各種試験を行ったものであり、前述した全国噴泥調査、東北本線噴泥実態調査とは内容を異にしている。それは前記の2種の調査が噴泥発生の現状把握、発生に関与する要因の抽出および対策手法への示唆という目的をもつものに対して、本調査は現地での噴泥発生の過程、機構等をより詳細に究明するのを目的としている。ところで調査においては実際に道床を撤去し路盤を掘削しなければならず、列車運行下という制約条件のため実施が難しく、これまでほとんど実施された例はなかったが、今回一時的に列車運行を休止した線を主体に断面調査を実施した。ここでは断面調査の概

表-2 要因表

①	噴泥	16	噴泥の種類
2	地形	⑰	密度
③	基盤地質	⑱	土粒子の比重
4	周辺環境	⑲	自然含水比
⑤	土構造の種類	20	粘土分含有量
6	土質分類	21	シルト分含有量
⑦	線路の種類	⑳	液性限界
⑧	レール継目	㉑	液性限界-自然含水比
9	地下水位	㉒	塑性指数
⑩	側溝の種類	㉓	貫入強度
11	側溝の機能状態	㉔	道床厚
⑫	排水障害構造物	27	道床めり込み量
⑬	踏切の影響	㉕	線路縦断勾配
14	対策工法の種類	㉖	0.42 mmふるい通過率
15	特殊条件	㉗	0.072 mmふるい通過率/0.42 mmふるい通過率

表-3 要因効果の順序

No.	要因
1	レール継目
2	道床厚
3	液性限界
4	側溝の機能状態
5	比重
6	土構造の種類
7	塑性指数
8	踏切の影響
9	排水障害構造物
10	線路の種類

要、分析結果とともに、これらの調査から推測される噴泥発生過程について述べる。

a) 調査内容

調査内容は調査箇所により多少異なるが、一般的にはマクラギ3本間の道床を撤去し、さらに道床がめり込んでいる深さまで路盤を掘削し、その掘削断面について以下に示すような各種測定、試験を実施した。

- ① 断面観察
- ② 現場試験（現場CBR試験、ポータブルコーン貫入試験、現場密度試験等）

③ 室内土質試験（自然含水比、粒度、液性限界、塑性限界、比重等）

なお調査箇所は一定区間で表面観察によって噴泥段階（進行状況）が異なると想定される地点が選ばれており、特に東海道貨物線の場合は10～20m間に4つの調査断面を設け、噴泥の線路延長方向の変化についても調査を行った。断面観察の際には泥土の上昇過程に応じて噴泥現象段階を次のように区分した。

- ① 初期：路盤面に接した道床まで泥土が上昇する。
- ② 初期～中期：路盤面上約10cmまで泥土が上昇する。
- ③ 中期：マクラギ下5cm程度まで泥土が上昇する。
- ④ 中期～後期：マクラギ下まで泥土が上昇する。
- ⑤ 末期：マクラギ上面まで泥土が上昇する。

上記の5段階の分類に従い、図-2に東海道貨物線の断面状況の例を示す。

b) 調査結果概要

各箇所の断面調査により以下に述べるような事項が結果として得られた。

まず、図-3に示すように道床の路盤へのめり込み量が増えるに従い泥土の上昇高さも増える傾向がある。ここでは道床めり込み量と泥土上昇高さとして施工基面から計測した最大値を採用しており、路盤構築時の施工基面が明確でない箇所、あるいは路盤表面が平らでない箇所では数cm程度の誤差があると考えられるが、前述の傾向は明確に現われている。これにより泥土の上昇と路盤への道床めり込みとは密接な関係があることがわかる。また当然のことながら、同じ荷重条件であれば路盤の強度が小さいほど道床のめり込み量が多いという傾向がみられた。ただしポータブルコーン貫入抵抗値は箇所ごとおよび深さ方向でバラツキが大きく定量的把握はできなかった。東海道貨物線で実施した調査により図-4

線路起点からの距離	25k943m	25k948m	25k954m	25k964m
噴泥現象段階	初期～中期	中期～末期	末期	初期
断面図				
泥土上昇高 (cm)	11	20	35	0
バラストめり込み量 (cm)	6	18	58	7
路盤土	(SM)	(SC)～(MH)	(CH)	(SM)
線路状態	PCマクラギ、レール中央	PCマクラギ、線目より6m	木マクラギ、線目	PCマクラギ、レール中央
立地条件	切取 (4か所とも同一)			

図-2 断面状況図（東海道貨物線の例）

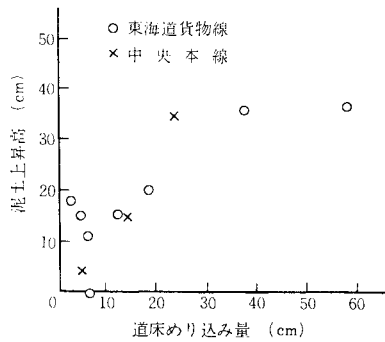


図-3 道床のめり込み量と噴泥上昇高さの関係

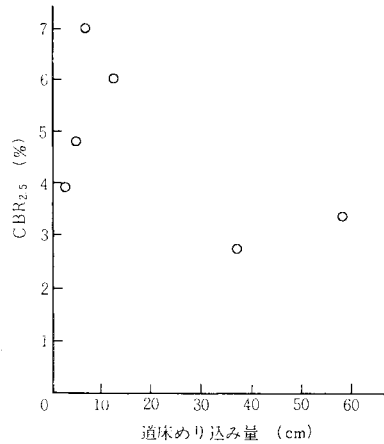


図-4 道床のめり込み量とCBR値の関係

に示すようにCBR値が4%以下になると道床のめり込み量が増えるという結果が得られた。

しかし路盤の強度は含水比に大きく左右されることから、調査時点の強度が道床のめり込みを生じたときの強度と一致しているとはいいがたい面もあるので、含水比等の条件を考慮した室内実験によりめり込み量の関係を明らかにすることが必要である。室内試験については後

述する。

次に泥土上昇の形態に着目すると、まず短い区間に4か所の調査断面を設けた東海道貨物線の場合、噴泥の状態が最も進行しているのはレール継目であり、ここから遠ざかるにつれて泥土上昇高が低下していく状況が明確に認められた(図-2参照)。また他の箇所も含めてみられることであるが、噴泥の初期段階の泥土上昇はまずレール下からマクラギ端にかけての部分から進行するという傾向があった。これらは噴泥現象は初めに荷重条件が最も厳しい箇所から発生し、かつ進行速度もこの荷重条件に大きく左右されることを示している。また他の特徴として、泥土が道床内に上昇している箇所では路盤に水の滞留を生じるような不陸が認められ、噴泥が著しい箇所は完全なウォーターポケットを生じていることが挙げられる。ここでウォーターポケットとは道床が列車荷重により路盤に貫入し、路盤内にパラストポケットを形成したのち、そのパラストポケットに水が滞留した状態をいう(図-9の①参照)。一方、図-2に示すように現場観察によれば噴泥は路盤土が道床中を上昇したものとみることができるが、その粒度特性の一例を図-5に示す。図中の粒径加積曲線のうち、路盤面と示したものは路盤土そのものの粒度分布であり、道床面と示したものは道床上面に噴出している泥土である。またF.L.(施工基面)およびマクラギ下とあるのは道床内の2.0mm以下の部分の粒度分布である。これによれば路盤土と泥土とはその粒度特性は異なり、泥土はほぼ細粒分のみで構成されている。また路盤面から上方に向かうほど道床内の細粒分が増加していく傾向にある。道床内には碎石の細粒化等による細粒分が存在していることが考えられるが、図に示すような増加は路盤から上昇した泥土の影響であると考えられ、泥土は路盤土中の細粒分が上昇したものであると思われる。

c) 噴泥発生過程の推測

前述した断面調査結果および他の調査結果より、噴泥発生過程を以下のように推測することができる。

① 第1段階

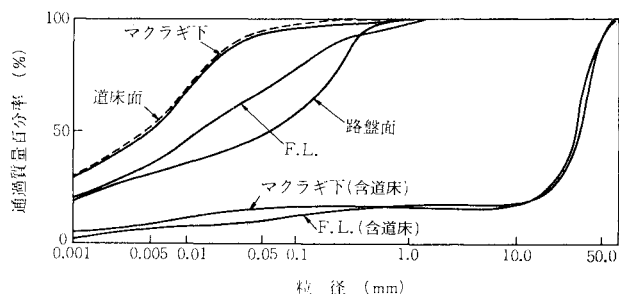


図-5 断面垂直方向の粒径加積曲線(東海道貨物線の例)

列車荷重により道床が路盤内にめり込む。この際レール継目のように衝撃を受けやすい箇所や道床厚が薄い箇所は路盤圧力が増大するので、道床が路盤内にめり込みやすくなる。なお、この道床のめり込みが生じる時点で最も重要な要素は路盤強度であり、強度が十分であれば道床のめり込みは生じることはなく、次の段階である路盤土のリモルディング、泥土の上昇も生じない。列車荷重が小さい場合も同様である。

② 第2段階

道床のめり込みが生じた路盤土は水の存在によりウォーターポケットを形成し、さらに列車荷重によりリモルディングされ強度が低下する。

③ 第3段階

路盤がリモルディングされ強度低下することにより道床の貫入量が増大し、これに伴い路盤土中の細粒分が泥土として道床の間隙を上昇していく。泥土の上昇高さは道床のめり込み量の増大に伴い増加していく傾向にあり、また路盤の強度がある値を越えた時点でめり込み量が急増することが考えられる。これによりウォーターポケットの大きさも大きくなり、列車荷重の繰返しに伴って発生する過剰間隙水圧の影響も大きくなることが考えられる。なお上昇する泥土は路盤土中の細粒分で構成されていることから、粗粒分が大部分である土の場合は道床のめり込みが生じても泥土は上昇しないことになる。

以上の3段階が推測できる発生段階であるが、各段階における要素の条件(道床のめり込み、路盤強度、泥土の上昇に関する含水比や間隙水圧等)の関係については次に述べる室内実験により明らかにされる。

3. 噴泥現象解明のための室内実験

前述の現地調査からの結果と多変量解析により噴泥に関係する要因の種類とその関与程度が把握されたが、その発生機構や発生過程を明確にすることはできず、推測の域を脱するものではなかった。そこで下記の事項に着目し、前章の噴泥の調査と分析により判明した噴泥の発生要因を考慮した各種室内実験を行った。

① 噴泥発生過程の確認

② 噴泥に関係する要因の明確化とその要因の定量化

(1) 模型軌道による繰返し载荷実験

本実験は現場調査で推測された噴泥発生過程を確認するために行うものであり、模型軌道の繰返し载荷により、経時的な路盤土の挙動を路盤の沈下、路盤中の過剰間隙水圧の変化、路盤圧力の変化、マクラギ変位で評価した。また経時的な泥土の上昇を観察し、路盤の挙動と照合した。

## a) 実験装置

実験に用いた軌道，路盤の概略は図-6に示すとおりであり，土槽中に路床として川砂を十分に締め固め，その上に路盤土を厚さ50cmに所定の強度で構築し，1レール，マクラギ2本に相当するレール，マクラギを敷設した。マクラギの寸法は並マクラギ(20×14×210cm)の長手方向の約1/3(60cm)とし，マクラギ間隔は1級線軌道とほぼ同じ60cmとした。レールにはI形鋼(150×7.5×5.5mm)を用いて，実際に線路で用いられている50kgNレールの水平軸に対する断面2次モーメント(1640cm<sup>4</sup>)とほぼ等しい断面とした。道床厚は10cmとし，また路盤，軌道にはノズルにより均等に散水した。

路盤土に使用した土の物理的特性値は表-4に示す。

## b) 実験条件

各種実験条件は表-5に示すとおりであり，荷重は正弦波で0~49kNをレールを介して軌道，路盤に与えた。最大荷重49kNによりマクラギ下面に，196kN/m<sup>2</sup>の圧力が生ずることになる。実験③では浮マクラギ(マクラギ底面が道床面から離れた状態のマクラギをいう)や衝撃荷重が生じにくいように最小荷重9.8kNを押え荷重として与えた。載荷振動数は載荷機構の性能から6Hzとした。滞留水位を道床中または路盤表面とし，滞留水面を常時一定に保つ必要から散水量を5mm/hを標準とした。しかし乾燥の影響による道床の目詰り状態を再現するため実験④の散水は400万回以降，1日に2回，2.5mm/30分の散水を行うことにした。また路盤強度が各実験とほぼ一定になるようにCBRで2~3%程度を目標とした。

## c) 実験結果および考察

噴泥発生過程についてたとえば実験④を用いて説明すれば次のとおりである。実験中の路盤の挙動は図-7に示す。載荷後40万回でウォーターポケットが完全に形成され，このときの路盤沈下，マクラギ沈下とも大きく

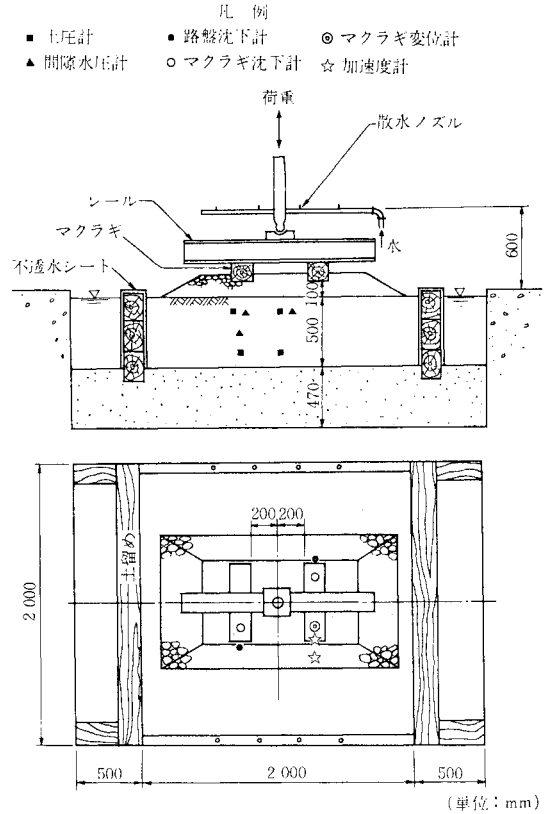


図-6 試験装置の略図

表-4 路盤土の物理的特性

土質	荒木田土
液性限界(%)	44
塑性指数	22
$P_{0.01s}/P_{0.42}$	0.90
最大乾燥密度(mg/m <sup>3</sup> )	1.80
最適含水比(%)	15.6
日本統一土質分類	(CL)

$P_a$ : a mmふるい通過百分率

表-5 各試験条件

実験番号	①	②	③	④	
荷重	荷重振幅(kN)	0~49	0~49	3.8~58.8	0~49
振動数(Hz)	6	6	6	6	6
水	散水	30万回以上5mm/hを30分ごと	同左	同左	30~400万回同左 400万回以降5mm/24h
	滞留水位	F.L.の上10cmに設定	F.L.の上5cmに設定	F.L.の上5cmに設定	F.L.に設定
路盤	土質	荒木田土(CL)	荒木田土(CL)	荒木田土(CL)	荒木田土(CL)
	CBR(%)	2.7	1.8	1.8	2.3
	含水比(%)	28	32	32	23
	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.35	1.33	1.27	1.10
載荷回数(万回)	210	260	300	650	

(注) F.L.とは施工基面を示す

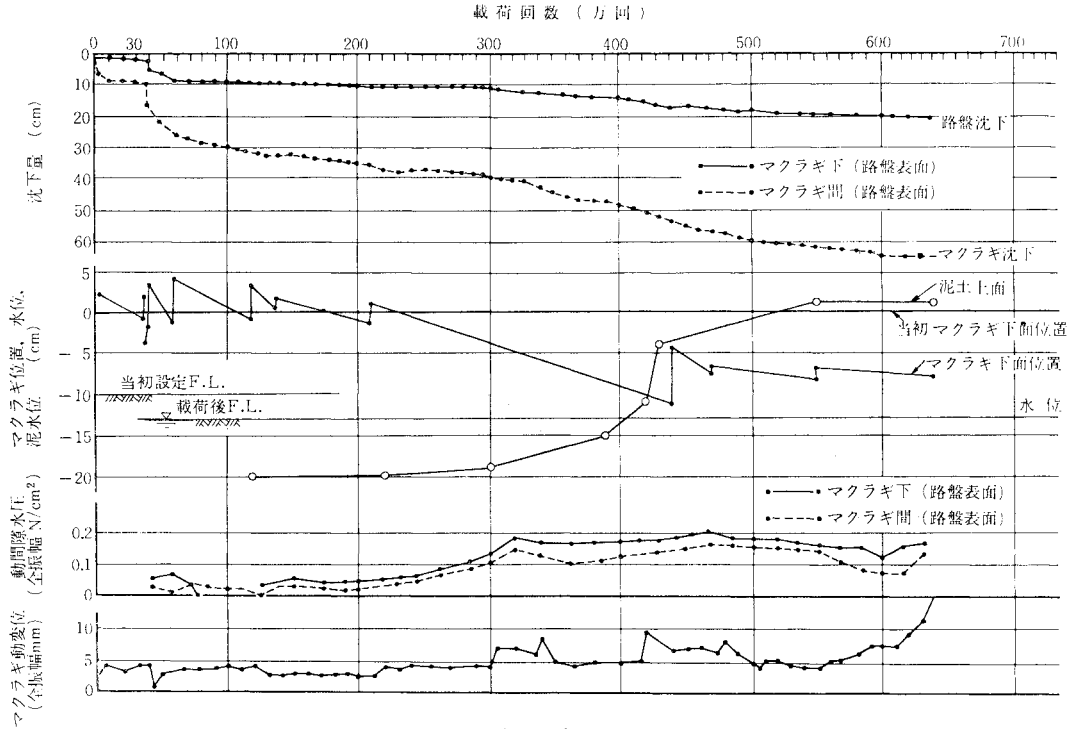


図-7 第4回実験結果

なり、その後これらは増大する傾向がある。そしてこれ以降リモルディングを受けつつ、繰返し荷重のポンプ作用により泥水が道床間隙中を移動するにつれて道床の目詰りを促進していく。この目詰りにより、さらにウォーターポケット周辺は排水困難となりウォーターポケット中の動間隙水圧は大きくなっていく。ここで動間隙水圧とは繰返し荷重とともに発生する過剰間隙水圧の振幅をいう。同時にマクラギ動変位（繰返し荷重により発生するマクラギの動的変位振幅）も増大する。泥水から発達した泥土は動間隙水圧とマクラギ動変位の増大とともに道床表面へと道床中を上昇し、最終的に道床表面に噴出する。

以上が噴泥発生過程であるが、その他の実験①、②、③においても同様な傾向であった。また4種の実験のうち①、②、④は主として滞留水位の影響を把握する実験であり、これらより滞留水位が高いほど泥土の上昇は早いことが判明した。一方、実験③は荷重振幅を他の実験と同じ49 kNとしたが、最小荷重として常に9.8 kNを作用させることにより浮マクラギの状態になるのを防いだもので、この結果マクラギ動変位は最小限に抑制される。これにより泥土の上昇は抑制されることになる。表-5に示した噴泥に至るまでの載荷回数について実験②が260万回であったのに対して、実験③では300万回となっており浮マクラギの影響は泥土上昇と密接な関係が

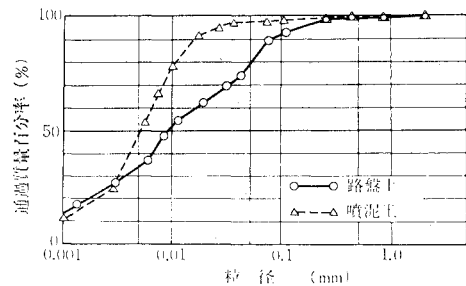


図-8 路盤土と噴泥土の粒径加積曲線

あると思われる。さらに実験④では実験終了後道床上部に含まれていた泥土の物理的特性を構築時の路盤土と比較した。噴泥土は路盤土に比べてコンシステンシー指数はほぼ同じであるが、図-8に示すように細粒分(0.074 mm以下)の混合割合が大きいことがわかる。このことは現場調査でも確認された路盤土の一部である細粒分を主体とした泥土が上昇することを裏付けている。

以上の結果より噴泥発生過程を3段階に区分して整理すれば図-9のようになる。

また各発生段階における間隙水圧について注目すれば、第1段階の道床めり込みは繰返し荷重によって発生した累積過剰間隙水圧が路盤の有効応力を減少させたために発生したと考えられる。この現象は飽和粘性土の振

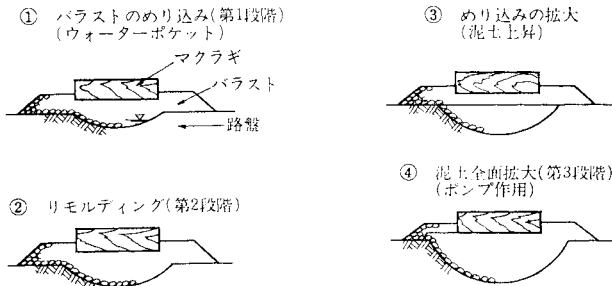


図-9 噴泥発生過程

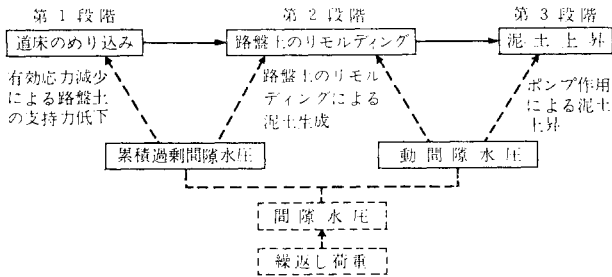


図-10 噴泥発生過程における間隙水圧の役割

動 3 軸試験によって明らかにされている<sup>9)</sup>。累積過剰間隙水圧は第 2 段階である路盤土のリモルディングのときにも作用し、道床のめり込みを助長させる。一方、動間隙水圧は第 2 段階から第 3 段階にかけて大きくなり、特に第 3 段階での泥土上昇に貢献するものと考えられる。これらの発生段階における間隙水圧の役割を図-10 に示す。

## (2) 小型模型による繰返し載荷試験

現場調査より噴泥の初期には道床の路盤へのめり込みがあることが指摘されたが、このことは模型軌道の実験により確認された。そこで道床のめり込み現象をさらに解明するため噴泥に関係する要因をもとに、その各要因の噴泥発生への寄与度の明確化と要因の定量化を行う。すなわち本実験の目的は小型モールドを用いた繰返し載荷を行うことにより路盤土、荷重、水の条件の相違がめり込み沈下に与える影響を把握することである。

### a) 実験装置

実験装置の概略は図-11 に示すとおりであり、小型モールド（直径 0.5 m）中に含水比を調整した試験土を入れ所定の密度になるように締め固め、その表面に道床を模した鋼球（直径 1 cm）を 4 段に敷き、その上に鋼製載荷板を設置した。載荷は電磁油圧式装置により行い、正弦波荷重を鋼製板に加えた。なお、この実験方法は山田・小野ら<sup>3)</sup>による道床圧入実験とほぼ同様のものである。

### b) 実験条件

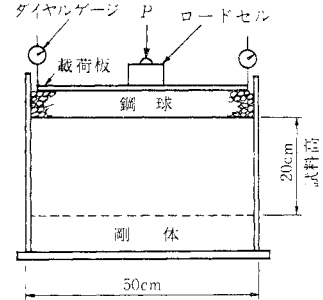


図-11 試験装置の略図

試料土としては粘性土および砂質土とし、荒木田土 (CL)、神立ローム (VH<sub>2</sub>)、山砂 (SM) の 3 種を用いた。実験は各種試料の締め固め程度を 3 種類とし、そのおのおのについて最大荷重 0.10 MN/m<sup>2</sup>、0.17 MN/m<sup>2</sup>、0.29 MN/m<sup>2</sup> の繰返し載荷を行った。なお、これらの実験は水を加えないで行う非滞水条件と載荷板まで水を張った滞水条件の両者について行った。載荷回数はいずれも国鉄上級線（1 級線）の半年間列車通過トン数に相当する 50 万回を基準とした。また載荷回数は列車の軸距（列車の隣接車軸間の距離）と列車速度を考慮して 11 Hz とした。

### c) 実験結果および考察

#### ① 粘性土の場合

非滞水状態において荷重強度が大きい場合でも、含水比が高い場合には噴泥状態となり、噴泥しない場合に比べて沈下は大きくなる。このことはロームについても同様であった。また繰返し回数と沈下量との関係は片対数座標上で、ほぼ直線的となるが、噴泥が発生する条件では 5~10 万回の繰返し回数付近で折線となり噴泥が生じた以降の沈下直線は急勾配となっている。ここで噴泥とは鋼球間隙中に高含水比の泥土が上昇している状態をいい、たとえ鋼球間隙中に土が上昇していても、その含水比が低い場合は噴泥とはいわないこととする。50 万回繰返し載荷後の沈下量  $D_{50}$  と載荷試料土のコーン貫入抵抗値  $q_c$ 、供試体の乾燥密度  $\rho_d$ 、含水比  $W$ 、荷重強度  $P$  の関係を検討し、図-12、13 に示す。これらにより次のことが明らかになった。

(i)  $\rho_d$  と  $D_{50}$  の関係は  $P$  が一定の場合において、1 次の直線で回帰でき  $\rho_d$  が増加すると  $D_{50}$  は減少する。

(ii)  $P$  と  $D_{50}$  の関係は  $\rho_d$  が一定の場合において、2 次の曲線で回帰でき  $P$  が増加すると  $D_{50}$  も増加する。

(iii)  $W$  と  $D_{50}$  の関係は  $P$  が一定の場合において、2 次の曲線で回帰でき  $W$  が増加すると  $D_{50}$  も増加する。

(iv)  $q_c$  と  $D_{50}$  の関係は  $P$  が一定の場合において、2 次の曲線で回帰でき  $q_c$  が増加すると  $D_{50}$  は減少する。



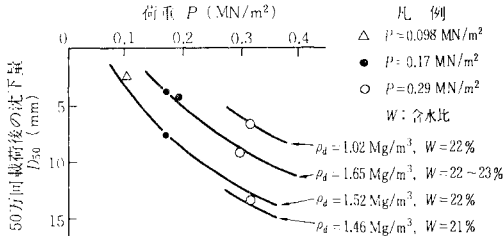


図-12  $\rho_d$ ,  $W$ ,  $P$ , と  $D_{50}$  の関係 (荒木田土: CL)

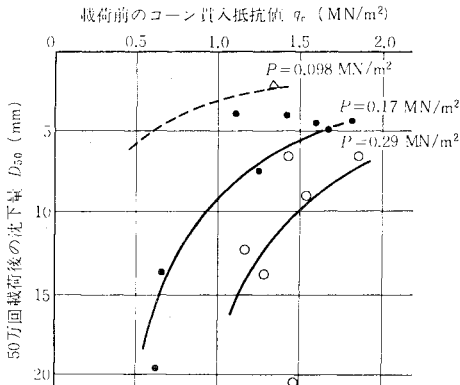


図-13  $q_c$  と  $D_{50}$  の関係 (荒木田土: CL)

これらの関係はロームについてもほぼ同様である。

滞水状態の場合は非滞水と同様な方法により供試体を作製した後、1日間浸水して水位を試料面上5cmに保って繰返し載荷を行った。まず浸水による強度低下は初期強度が小さい場合 ( $q_c \leq 0.5 \text{ MN/m}^2$ )、強度低下率は小さいが、初期強度が大きくなると強度低下率は大きくなること、また浸水による強度低下率は今回実験に供用した範囲では (VH<sub>2</sub>) で約20%、(CL) で約60%であった。滞水の場合の経時沈下は非滞水の場合に比べて供試体の状態が同じでも極端に大きくなり、いずれの場合も噴泥現象を呈していた。

② 砂質土の場合

粘性土と同様な方法により供試体を作製し非滞水、滞水の両状態においておのおの繰返し載荷を行った。また浸水による供試体の強度低下の傾向は粘性土の (CL) の強度低下とほぼ類似の傾向を示した。これは (SM) の粒度構成において細粒分 (0.074 mm) が30%と多く、砂質土ではあるが粘性土の性質を示すためと思われる。また、めり込み沈下に対しては次のことが判明した。

(i)  $q_c$  が小さいほど、また  $P$  が大きいほど沈下量は大きくなる。

(ii) 非滞水と滞水状態とを比べると一般に滞水状態の方が沈下は大きくなるが、浸水後の強度が非滞水に比べて大きい場合は荷重条件が同じでも沈下は小さくなる。

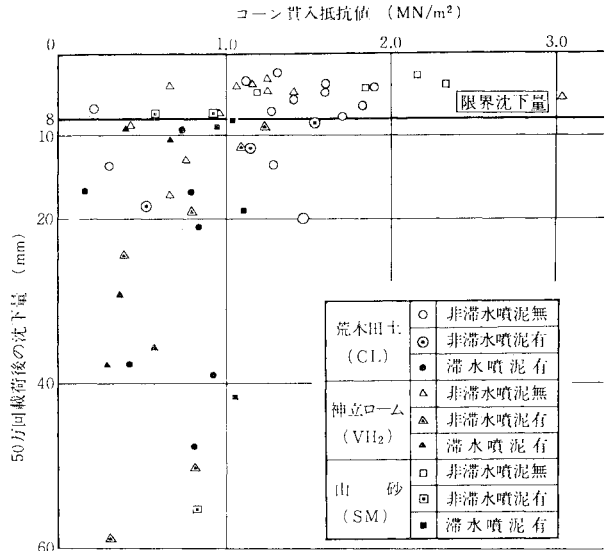


図-14 各種条件における土の貫入抵抗値と50万回載荷後の沈下量の関係

る。

(iii) 荷重強度が大きい場合 ( $P = 0.29 \text{ MN/m}^2$ )、滞水、非滞水に関係なく含水比がある一定値以上になると噴泥が生じる。

次に一連の実験結果について道床めり込み沈下と噴泥現象についての考察を行った。まず実験により得られたすべてのデータを、試料土の載荷前のコーン貫入抵抗値を横軸に、50万回載荷後の沈下量を縦軸に取り、プロットすれば、図-14のようになる。

図-14によれば土質、土の貫入抵抗値、滞水の有無、荷重強度とは無関係に沈下量と噴泥の有無が明確に区分され、ある一定沈下量を境にそれより大きい場合は噴泥を生じ、それより小さい場合は噴泥を生じていないことがわかる。この沈下量を限界沈下量と呼ぶことにし、図-14によれば8mmとなる。また限界沈下量以下の沈下量を示す場合には初期沈下は繰返し回数の初期の段階(数万回程度)で終了し、それ以降はほとんど沈下の進行は認められない。さらに図-14は滞水の場合、土の貫入抵抗値などに関係なくほとんどすべて噴泥していること、荷重強度が0.10~0.29 MN/m<sup>2</sup>の範囲の場合、土の貫入抵抗値と噴泥の有無との相関はないことを示している。また荷重強度  $P$  と貫入抵抗値  $q_c$  はめり込み沈下に対しては  $P$  が大きくなれば沈下量は大きくなり、また逆に  $q_c$  が大きくなれば沈下量は小さくなるというように密接な関係にある。それゆえ  $q_c/P$  により図-14を整理すれば図-15のようになる。

図-15は全試料 (CL, VH<sub>2</sub>, SM) の  $q_c/P$  と50万回載荷後の沈下量の関係を示しており、 $q_c/P$  が6以

上であれば滞水、非滞水、土質にかかわらず、沈下量も前述の限界沈下量（8 mm）以下にすることができる。したがって噴泥も生じないことになる。

以上は室内実験で得られた成果であるが、 $q_c/P$ と沈下量との関係を現場の測定値と照合するために、開業後1年間の路盤面沈下量と路盤のコーン貫入抵抗値  $q_c/P$  荷重強度  $P$  の関係を図-16に示した。これによれば現場の  $q_c/P$  と沈下量の関係も室内実験と類似の関係を示していることがわかる。

4. 各種噴泥対策工法の現場敷設試験

前述した現場調査、室内実験の結果に基づき、噴泥対策工法として比較的適切な工法を選定し、営業線（列車の運行が行われている線路）において対策工法の敷設試験を行った。試験箇所は総武本線の津田沼～幕張間の440 m間であり、同区間に道床厚増加工法、路盤面被覆工法（路盤面を有機化合物のシートを数枚組み合わせることで覆うことにより、路盤の排水と路盤への水の浸透を防ぐ工法）、有機化合物処理工法（有機化合物を路盤土に添加することにより路盤の強度を高める工法）、路盤置換

工法（不良路盤材料を良質路盤材料に置き換える工法）、強化路盤工法（良質路盤材料を用いて路盤強度を高め、かつ表面は遮水機能をもつ工法であり、他の工法に比べて路盤強度が大きい）の5種の対策工法を敷設した。同時にこれらと比較検討するため未対策の普通路盤を比較区間として設けた。測定項目は路盤圧力、経時沈下量、路盤変位量等であり、さらに噴泥発生状況の観察を行った。これらにより以下のことが判明した。

道床厚増加工法においては道床厚を35 cmおよび45 cmとしたが、35 cmの場合は未対策路盤の25 cm道床厚に比べて路盤圧力が約50%の21 kN/m<sup>2</sup>となり路盤圧力の減少がみられた。また、この減少程度は45 cm厚の場合においても同じ程度であり、道床厚を35 cm以上としても路盤圧力の減少という効果に対しては効果が大きいというわけではなかった。路盤圧力に関しては分散効果が最も期待できる強化路盤工法が最も小さいと考えられていたが今回の測定結果では必ずしもそのことは認められなかった。しかし路盤表面にアスファルト舗装を有するため、道床の貫入が防止されるので噴泥を防止するという観点からは有効である。

次に経時沈下量を図-17に示すが、これによれば普通路盤の沈下が最も大きく、対策工法中では路盤面被覆工法が比較的大きい。また両者とも初期沈下が大きく、その後の沈下量も増大していくことがわかる。強化路盤工法、路盤置換工法、有機化合物処理工法は初期沈下も少なく、また初期沈下終了後はほぼ一定の沈下量を保っていく。

さらに実際に断面調査を行い、泥土の上昇高さおよび道床の貫入程度を調査した。普通路盤工法において泥土は道床にかなり混入しており、その厚さは最大20 cmにもおよんでいた。道床厚増加工法では同じく泥土の上昇はみられたが混入量はわずかであり、またその上昇量は最大でも10~15 cm程度であった。一方、強化路盤工法は当然であるが路盤置換工法においても、まったく

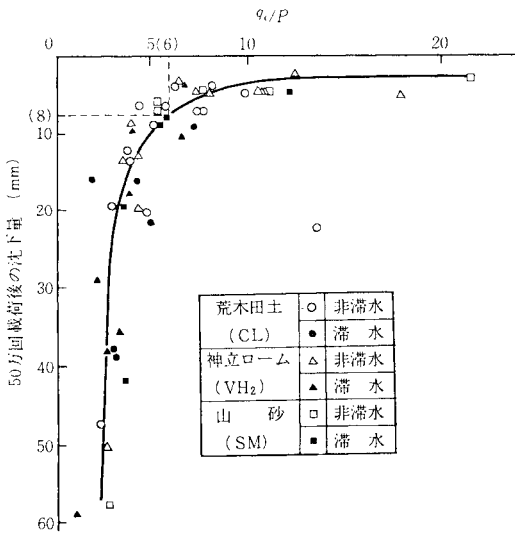


図-15  $q_c/P$  と50万回載荷後の沈下量の関係

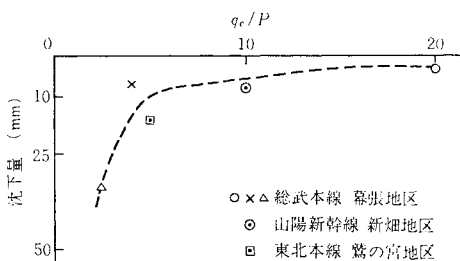


図-16 実路盤面の累積沈下量（開業後1年間）

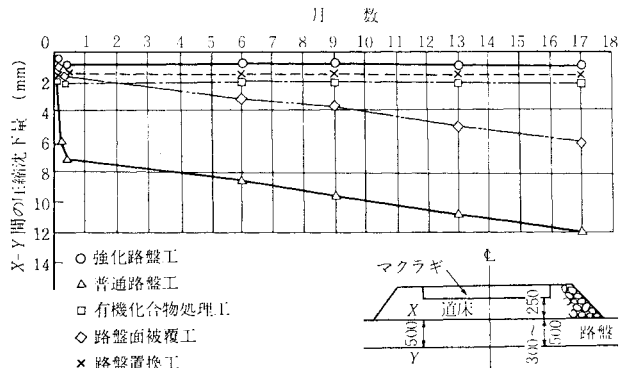


図-17 X-Y間の圧縮沈下量の経時変化

泥土の上昇はみられなかった。さらに路盤面被覆工法はシートの下に排水砂を設けたところでは泥土の上昇はなく、排水砂を設けない箇所ではシートに亀裂が生じ泥土の上昇があった。これらのことより排水砂を設けることが路盤面被覆工法としてのシートの噴泥防止効果を高めるために重要であると考えられる。

5. ま と め

前章までの研究成果を踏まえ本章ではまとめとして、対策工法適用の基本的考え方すなわち噴泥発生要因と対策工法の関係について述べる。

適切な対策工法とは噴泥発生要因を除去する作用を有し、かつ施工性が良好で、安価であるという条件を満たすものである。現地調査の要因分析によれば、噴泥に対して強く関与する要因は「レール継目」と「道床厚」であった。これらは列車荷重による路盤圧力に関する要因として考えることができ、発生機構からみた場合、第1段階である路盤への道床のめり込みに大きく関与する事柄である。したがって、まず第1にこの要因に対処する対策工法を考えることが必要であろう。現象面からみた場合、「レール継目」に対処するものとしてはレールをロングレール化により継目を除去し、衝撃荷重を低減すること、「道床厚」に対しては道床厚を増加させ路盤圧力の減少を図ることが有効と考えられる。しかし噴泥はレール継目のみに発生しているものではなく、レール継目部に比較的発生しやすいということである。すなわち衝撃的な荷重（これは浮マクラギの状態等で発生すると考えられる）に代表されるような過大な列車荷重が問題であり、レール継目部がこのような条件の発生しやすい箇所であるということである。したがって荷重の低減といった面からみた最も基本的な対策としては道床厚増加工法が挙げられる。なお噴泥防止の観点より道床厚は総武本線の現地敷設試験と東北本線の現地調査結果に基づき35cm以上を基本値とした。これは現地敷設試験において道床厚35cmの場合、25cmの場合に比べて著しい路盤圧力減少効果が認められたこと、また現地調査において35cm以上の道床厚が確保されている箇所では他の条件の良否に関係なく噴泥が発生していなかったことによるものである。

次に要因分析の結果より噴泥に対して相関が高い要因として「液性限界」、「側溝の機能状態」が示された。前者は噴泥発生3条件のうち土の条件であり、後者は水の条件である。特に後者は側溝の機能という一面でのみとらえているが、これは現地調査が表面的な観察を主体としていたことから、最も観察しやすい側溝の機能に着目したためである。次に排水に関する対策工法を考えることが必要である。水の存在はリモーディングによる路

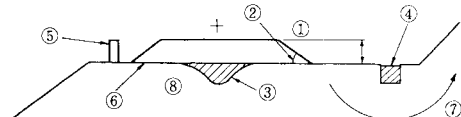
盤土の強度低下、水と混合した路盤土細粒分が泥土として道床中に上昇するという現象に深く関係し、主な噴泥発生要因である。排水工法については線路周辺の地下水位の状態、排水経路など現場の状況に合致した形状、配置とすることが必要である。局所的な噴泥に対しては横断排水工法（線路直角方向に排水管を路盤中に設けること）、広い噴泥には線路側溝、線間排水工法（線路と線路の間の線路長手方向に排水設備を設けること）、また高含水比粘性土等、土そのものの保水性が高い場合は路盤面被覆工法、地下水位が高い箇所では地下水位低下工法、およびこれらの工法の組合せが考えられる。これらの排水工法は排水により路盤の強度低下が生じにくく、この結果リモーディング、泥土上昇といった過程に進行していく可能性が少ないことから最も効果の確実なものと考えられる。

以上、噴泥の発生要因とそれに対する対策上の基本的な考え方を述べたが、これらをまとめれば表—6のごとくなる。ただし、この場合の要因は図—18に示す現場における現象面からみた要因である。なお強化路盤については施工性の点で問題があり、営業線では通常用いにくいいため、ここでは除外した。ここで対策工法についての考え方をまとめると以下ようになる。

表—6 噴泥発生要因と対策工法

		対 策 工 法		
		道床厚を35cmに増加することが可能な場合	道床厚を35cmに増加することが不可能な場合	
排水不良および路盤土不良	① 道床厚の不良	道床厚増加(35cm)	道床厚をできるだけ厚くし、他の工法を行う。	
	路盤面排水不良	② 道床排水不良	道床更換	道床更換
		③ ウォーターボケットの存在	道床厚増加(35cm)	横断排水工法または路盤置換工法または路盤面被覆工法
		④ 側溝不良		側溝新設改良
		⑤ 路盤面上の支障物の存在		路盤置換工法または路盤面被覆工法
	⑥ 路盤の勾配不良	路盤置換工法または路盤面被覆工法		
	⑦ 高い地下水位の存在		路盤置換工法または地下水位低下工法または深い排水工により地下水位を下げ横断排水工か路盤面被覆工法	
	⑧ 高含水比粘性土路盤		路盤置換工法または路盤面被覆工法	

(注) 道床厚増加には道床更換が伴う。番号は図—18に対応



図—18 路盤噴泥の発生要因

① 噴泥発生要因の重要性、噴泥発生機構および対策工法の施工性、経済性等から、対策工法を考える手順としては、まず荷重条件を緩和すること、次に排水対策を検討し、最後に路盤改良を行うことを基本とする。

② 噴泥発生要因は通常複数の組合せになっていると考えられるので、対策工法についても適宜、組み合わせる必要がある。

## 6. おわりに

本研究は著者が長年の課題として従事してきた研究の一部をとりまとめたものであり、この研究成果により、国鉄において噴泥対策は着実に効果を発揮してきている。なお本研究に対しては東京大学の石原研而教授、松本嘉司教授、長岡技術科学大学の池田俊雄教授らに貴重なるご助言をいただき、また国鉄部内の各関係機関より援助をいただいた。特に現場調査では各現場の保線区員ならびに鉄道技術研究所の土質研究室の各位、また室内実験においても土質研究室の各位に協力をいただいた。さらに現場データの収集、整理においては本社保線課の各位、現地敷設試験では東京第一工事局の工事課の各位

に協力をいただき末筆ながら深謝する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 西亀達夫ほか：不良路盤の実態調査，部内資料，1954年10月。
- 2) 齊藤迪孝：盛土施工に関する最近の資料から，部内資料，1959年6月。
- 3) 山田幹雄・小野一良：鉄道線路における噴泥発生機構の基礎研究，土木学会論文報告集，No. 325，pp. 107～118，1982。
- 4) Hay, W. W. : Rail Road Engineering, Vol. 1, pp. 211～212, 1953.
- 5) A. R. E. A. Bulletin, Vol. 74, pp. 81～83, 1972.
- 6) 赤池弘次：情報量規準 AIC とは何か——その意味と将来への展望，数理化学，No. 198，pp. 5～11。
- 7) 坂本慶行：カテゴリカルデータにおける変数選択——プログラム CATDAP を中心に，統計数理研究所集報，Vol. 28, No. 1, pp. 135～155, 1981。
- 8) 在来線路研究会：在来線の噴泥対策の調査研究，1977年7月。
- 9) 伊能忠敏：鉄道路盤の噴泥現象の解明とその防止対策，鉄道技術研究報告，No. 1252，pp. 197～201，1983年11月。  
(1984. 3. 10・受付)