

# 新しい設計法による鉄道強化路盤の現場実態調査

須長 誠

正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (土構造) (〒185 国分寺市光町2-8-38)

本論文は、鉄道強化路盤の厚さを従来よりも薄くすることによって建設費の低減を図った新しい設計法の妥当性を検証するために行った現場実態調査の結果について述べる。調査では供用中の強化路盤の表面性状を観察し、また路盤材料を探取して健全度を把握した。また、過去に行った路盤材料の経年変化のデータと合わせ、路盤材料の経年劣化の程度を把握した。その結果、従来よりも厚さを薄くしても問題がないことが明らかとなり、新しい設計法の検証例が確認できた。

**Key Words:** railroad, reinforced roadbed, roadbed thickness

## 1. はじめに

我が国の鉄道では、明治時代の鉄道建設以来、長期間にわたって、盛土区間では盛土表面を均して路盤にし、切取・素地（切取は道路等の切土に相当し、素地は盛土や切取りをせずに原地盤がそのまま路床として使用できるものをいう）区間では同じく表面を均して路盤として使用してきた。したがって路盤を特別なものとして構築することがなかった。これは鉄道建設費を節減し、敷設長さを少しでも延ばすための施策とはいえ、鉄道の導入先の欧州とは異なり、軟弱な地盤と路盤としては不良な土が多い我が国では、降雨等の浸透により路盤が軟弱化し、軌道の道床パラストが繰返しの列車荷重により路盤にめり込み、軌道沈下や路盤の噴泥が生じて軌道保守作業が増加する等の問題が生じた。さらに近年の列車の高速化により問題が大きくなり、また列車運行の高密度化とともに軌道保守作業に必要な列車間合いの確保が困難になつていった。このような状況の中で登場してきた強化路盤は、一般的には道路等で用いられているアスファルト舗装と同様な構造を持つことにより、列車の繰返し荷重に対して優れた耐久性を発揮し、また路盤表面の遮水性の向上により雨水が路盤表面より浸透して路床の強度を低下させることがない等の機能を持ち、軌道保守作業の激減をもたらした。

著者は、図-1に示すように鉄道の軌道保守作業量の減少に寄与している強化路盤の構造を見直して、現在よりも建設費を低減する研究を行った。研究成果のうち、既設の強化路盤の実態調査と実物大の模型による載荷試験については既に報告し<sup>1)</sup>、また列車荷重の大きさ、路盤強度、路床強度等をパラメータとしたFEM解析を行い、その結果を参考にして設計における路盤厚さを検討し、

新しい設計法と従来の厚さよりも薄くした路盤厚さを提案した<sup>2)</sup>。

1例として表-1に新しい設計法による強化路盤厚さを従来の設計法による厚さと比較して示す。本論文では、新しい設計法によって構築された強化路盤の供用中の健全度を把握し、新しい設計法の妥当性を検証するために行った実態調査について報告する。

## 2. 調査箇所

新しい設計法による強化路盤の構築は、平成3年より試行が許可され、平成4年10月に刊行された「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」<sup>3)</sup>によって本格化している。特に北陸新幹線の長野付近ではかなりの延長にわたって構築が予定されているが、完成まではまだ時間がかかる。また完成後、ある程度の期間を経過した後、供用中の実態を調査し健全度を把握するのが望ましい。そこで、かねてより新設計法の研究・検討が行われている頃から、将来の新しい設計法を睨んで、現行の強化路盤厚さを低減して建設した線区があったので、本区間を調査対象として選定した。但し、本区間は「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」に示される路盤厚さの設計が確定される前に工事を着工したため、同標準に示される路盤厚さとは一致していない。

調査対象区は2箇所であり、いずれも首都圏近郊に位置する電車区間である。2線区の線路条件を表-2に示す。従来の設計標準<sup>4)</sup>によれば、横浜線の路盤厚さは普通鉄道の継目軌道区間で  $K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$  ゆえ 50 cm となり、多摩線は普通鉄道ロングレール軌道区間で  $108 > K_{30} \geq 69 \text{ MPa/m}$  ゆえ 55 cm となるが、新しい設計標準<sup>3)</sup>ではそれぞれ 35 cm となる。横浜線の路盤厚さは

表一 1 強化路盤厚さ（普通鉄道、ロングレール）

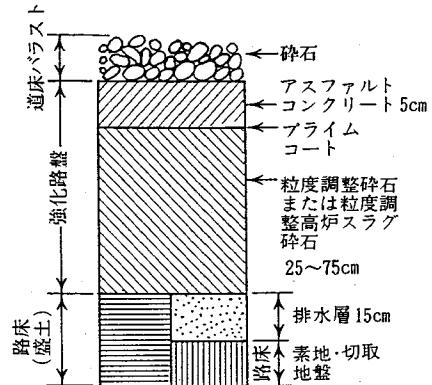
分類		碎石路盤		スラグ路盤	
材料		M.S.C または M.S.S (cm)	排水層 (cm)	H.M.S (cm)	排水層 (cm)
路床条件					
盛土	$K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	15(25)	0	15(25)
盛土	$69 \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	30(50)	0	25(40)
素地、切取	$K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	15(25)	15	15(25)
素地、切取	$69 \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	30(50)	15	25(40)
					15

( ) 内の数値は従来の設計値

M.S.C : 積度調整碎石 (Mechanical Stabilized Crushed Stone)

M.S.S : 積度調整高炉スラグ・碎石 (Mechanical Stabilized Slag)

H.M.S : 水硬性密度調整高炉スラグ・碎石 (Hydraulic Mechanical Stabilized Slag)



図一 1 強化路盤の構造

表二 調査箇所の線路条件

線名	通過トン数 (10 <sup>6</sup> ton)	土構造物 の種類	レール	マクラギ	道床厚さ (cm)	路盤の種類	路盤厚さ (cm)	K <sub>30</sub> 値 (MPa/m)	営業開始から調査 時までの経過月数
横浜線(上り線)	11.1	盛土	50N 長尺レール	PCマクラギ	25	碎石路盤	30	127	47
多摩線(下り線)	9.5	盛土	50N 長尺レール	PCマクラギ	25	碎石路盤	15	90	30

30 cm とほぼ設計値どおりであるが、多摩線ではアスファルトコンクリート層の厚さ 5 cm、粒度調整碎石層の厚さ 10 cm と合計厚さ 15 cm は新しい設計標準値を 20 cm も下回り、同時に施工性確保の限界とも言える厚さになっている。

### 3. 調査内容

調査は営業線であるため夜間の列車間合いを利用して、図一 2 に示すように道床バラストをかき出し、路盤表面を露出させて列車荷重を直接支持する路盤表面部分の目視による観察を行い、健全度の把握を行った。また図一 3 に示す位置よりアスファルトコンクリートをコアサンプラーによって採取し、アスファルトの経年劣化の把握を行った。

ここでサンプル位置の 1 は道床バラストによって被覆されていない箇所であり、同時に路盤の肩付近で施工時の転圧が不足する場合がある箇所もある。

またサンプル位置 2 ~ 7 は道床バラストによって被覆され、特に 3, 4, 7 は列車荷重が路盤に大きく作用する箇所である。これは図一 4 に示すようにレールに作用する輪重はマクラギにかかり、さらに道床バラスト内で斜線で示したように分散し、路盤表面に圧力として作用するためである。

### 4. 調査結果

#### (1) 目視観察結果

路盤表面の観察に先立ち、先ず表面に付着している道床バラストの石粉を清水を用いた高圧噴水により洗浄除去した。路盤表面は 2 線区ともクラック等の変状は認められず、健全であった。また路盤が健全であるため当然ではあるが、列車走行あるいは軌道保守において全く支障は生じていなかった。

#### (2) アスファルトコンクリートの材料試験結果

採取したアスファルトコンクリートを用いて、コアの密度試験と透水試験を行った。密度試験は締め固めたアスファルト混合物の密度試験方法<sup>5)</sup>に基づき、また透水試験は透水に必要な水頭差を確保するため加圧式の透水試験方法を行った。

図一 5 に採取位置とコア密度の関係を示し、図一 6 に採取位置と透水係数の関係を示す。図一 5 によれば多摩線は顕著ではないが、横浜線は路盤の肩付近の採取位置 1 の密度が他の位置の密度に比べ小さくなっている。この理由には、路盤の肩付近のため列車荷重が作用せずアスファルトコンクリートが締まりにくいくこと、施工時の転圧が不足し易い位置のため当初より密度が小さかったためと考えられるが、1 以外での位置での密度によれば路盤圧力が大きく作用するか否かの違いによる密度の違いは明瞭でないことより、列車荷重によるアスファルトコ

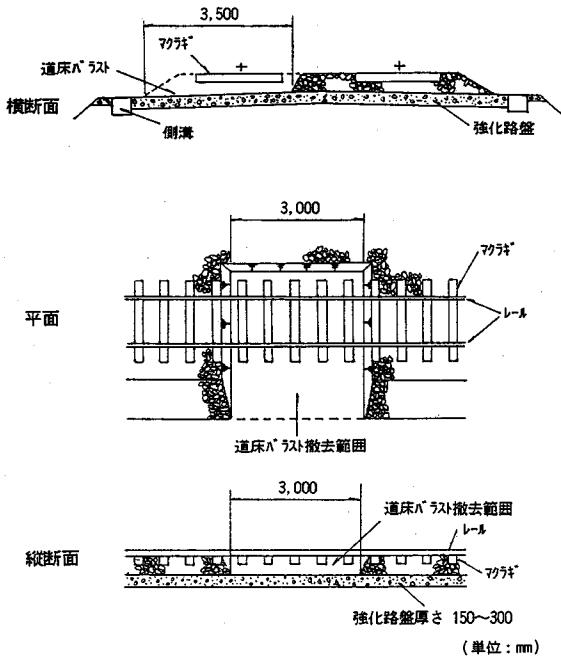


図-2 調査箇所の観察範囲

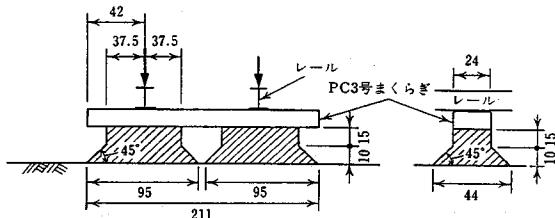


図-4 路盤圧力の作用範囲

コンクリートの締まりは小さく、当初より1の位置でのアスファルトコンクリートは密度が小さかったと考えられる。

但し、多摩線は採取位置の違いによる差異が少ないため、横浜線の場合は単なるばらつきとも考えられる。

図-6の透水係数において横浜線の場合は、コア密度が小さい路盤肩では大きな値となっているが、他の位置での透水係数は概ね、 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  前後の値となっている。鉄道の強化路盤のアスファルトコンクリートには、粗粒度アスファルトコンクリートを用いることになっており、この場合透水係数は概略的には  $10^{-4} \text{ cm/s}$  程度と考えられ<sup>6)</sup>、得られた透水試験値は、やや大きな値を示している。

### (3) アスファルトの材料試験結果

密度、透水試験が終了したコア供試体より自動アブソ

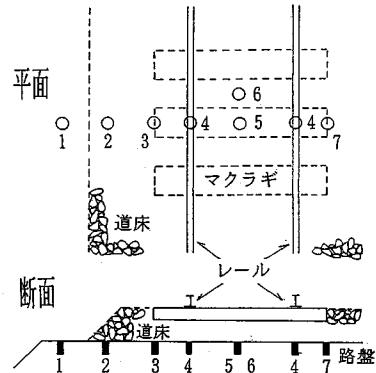


図-3 路盤材料採取位置

ン抽出装置を用いて石油学会規格 JPI-5S-31 に準拠してアスファルトを抽出・回収した。その回収したアスファルトについて物性の劣化の指標となる各種試験を行った。図-7～9にコア採取位置と針入度、軟化点、伸度の関係を示す。

図-7によれば、経年が大きい横浜線の方が針入度が小さくなっている。これらの線区では針入度 60～80 で設計されており、横浜線は不明であるが、多摩線の構築時の針入度試験値は 48 となっていることから、経年による劣化が進んでいると考えられる。特に採取位置 1 は最も低下しているが、これは道床パラストの被覆がなく太陽光が直接照射されるため紫外線劣化の影響を大きく受けたものと考えられる。また採取位置のうち路盤圧力が大きく作用する 3, 4, 7 は路盤圧力が作用しない 1, 2 に比べて針入度の低下が小さい。この傾向は多摩線の方が顕著であり、紫外線劣化の影響が入る採取位置 1 を除いて採取位置 2 と 3 とを比較すると 7 度程度違うことがわかる。鉄道と道路ではアスファルトコンクリート面に加わる圧力の大きさが異なるが（鉄道では速度、列車種別等で異なるが圧力は 60～120 kPa 程度である）、道路では荷重の作用の有無によって針入度が 6 度異なることが報告されており<sup>7)</sup>、鉄道でも同様な傾向が見られた。これは荷重の作用の有無がアスファルトの劣化に関係していることを示している。

図-8によれば、採取位置 1 で横浜線の値が多摩線よりも小さくなっているが、その他は強化路盤構築からの経年が大きい横浜線の方が軟化点が大きく、経年劣化の傾向が見られる。なお多摩線の路盤構築時の軟化点は 52°C であり、横浜線は設計時が 40～52°C となっているが、施工時の値は不明である。

図-9によれば、多摩線、横浜線とともに設計時の伸度は 100～140 cm であるにもかかわらず、10 cm 以下と小さな値となっており、今回の結果はその減少度合いにお

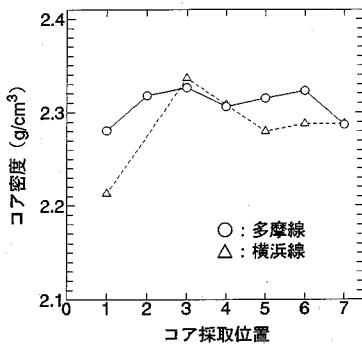


図-5 コア密度

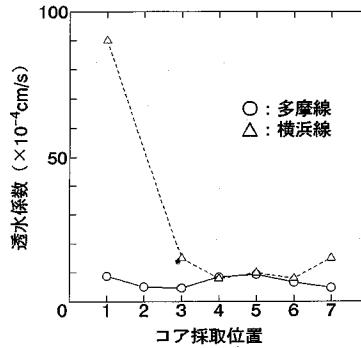


図-6 コアの透水係数

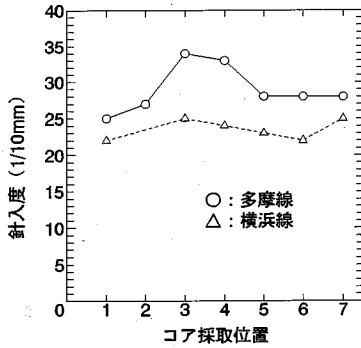


図-7 針入度

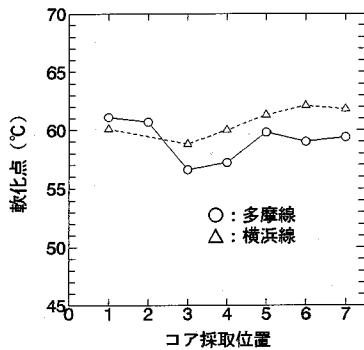


図-8 軟化点

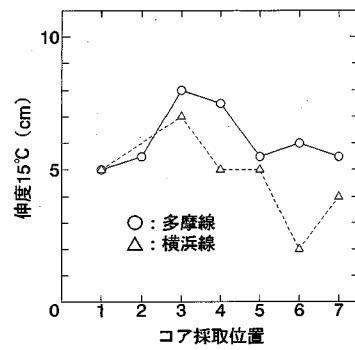


図-9 伸度

いて大きいものがある。

## 5. 考 察

目視による強化路盤の調査によれば、路盤面にはクラック等が見られず、従来よりも薄い路盤厚さでも健全なことが確認された。この理由には、路盤の健全度に影響をおよぼす路床の支持力として横浜線の場合、設計規制値  $K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$  に対して測定値  $K_{30} = 127 \text{ MPa/m}$  であり、多摩線の場合、設計規制値  $108 > K_{30} \geq 69 \text{ MPa/m}$  に対して測定値  $K_{30} = 90 \text{ MPa/m}$  とそれぞれ規制値を満足していたことが挙げられる。また多摩線の路盤厚さが 15 cm でも健全であった理由としては、次のように考えられる。新しい設計法が路盤の構築後の計画列車速度の向上に柔軟に対応できるように普通鉄道の最高速度である 160 km/h を前提として厚さ 35 cm としているのに対して、多摩線は最高速度 95 km/h であり、速度に依存する輪荷重が小さくなつた結果、路盤圧力が減少したためと考えられる。速度 95 km/h の場合、解析上では路盤厚さは 15 cm となり<sup>8)</sup>、現状では問題がないが、この厚さでは後の列車速度向上に対して路盤厚さが不足することになり、その際は何らかの対応策が必要になる。

しかし採取した強化路盤のアスファルトの各種試験値は劣化の傾向を示していた。またその値の中には、劣化の度合いを大きく示しているものもあり、経年劣化の度合いを明確にするため、従来の設計標準で施工された強化路盤ではあるが、経年が大きい箇所と比較して考察する必要があるがわかる。

図-10～12 に経年が 182ヶ月で厚さ 30 cm の中央線の値を加えて経年変化の度合を示す。横浜線と中央線は施工時の値は不明であるが、3 線ともアスファルト量の範囲が 4.5～6.0%，針入度が 60～80 の粗粒度アスファルトコンクリートであるので、横浜線と中央線の施工時の値はともに多摩線程度と考えられる。したがって針入度、軟化点、伸度は経年とともに直線的に劣化していることが推察される。また中央線では多摩線と横浜線に比べて経年が大きいため、さらに劣化しているが、調査時の目視観察ではアスファルトコンクリート面に全く変状が見られず、健全であることが確認されている。しかし、針入度、軟化点、伸度ともに劣化の度合いは、道路等に比べて大きいと考えられる。

名神高速道路の調査によれば、路面性状が良好な箇所は針入度および伸度とも 50 以上が多く、クラックが多い箇所は針入度が 45 以下、伸度は 20 以下となっている。

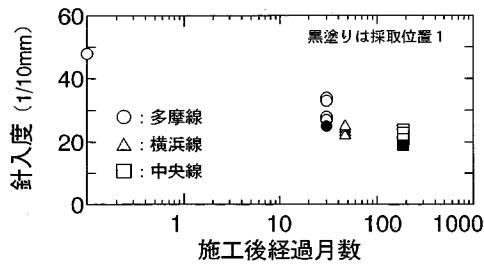


図-10 針入度の変化

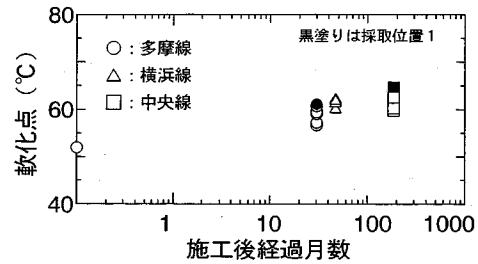


図-11 軟化点の変化

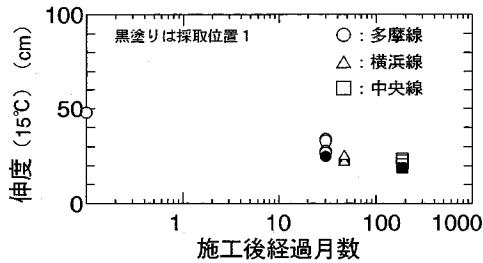


図-12 伸度の変化

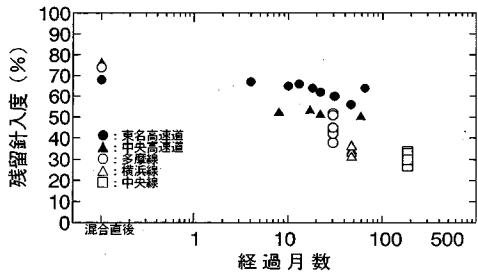


図-13 残留針入度による道路との比較

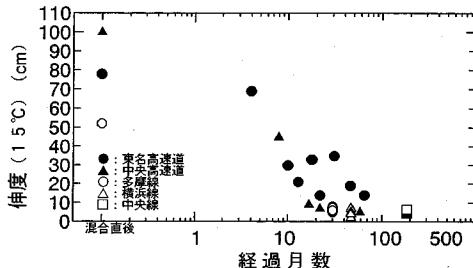


図-14 伸度による道路との比較

また幕張試験舗装の結果によれば、伸度がほぼ 10 cm 以下のときにクラックが発生し、伸度 10 cm 以上ではほとんどクラックが発生していない<sup>9)</sup>。

これら道路の結果を参考にすれば、アスファルトの伸びの指標である伸度の値が重要であると考えられるが、今回の鉄道の結果では先述したように伸度は 10 cm 以下と極めて小さい値となっている。このように鉄道では針入度、伸度ともに小さくても路盤表面が健全であった理由として以下のように考えられる。

鉄道の設計に用いる標準的な輪荷重は 80 kN と道路の標準的な輪荷重 50 kN と比べても小さくはないが、レール面に作用した輪荷重はレールの剛性による荷重分配効果により 5 本程度のマクラギに分配され、またマクラギ下の道床バラストによって路盤面に広く分散される。その結果、路盤面での荷重は、列車速度にもよるが

最大圧力として 60~120 kPa となる。

一方、道路の場合、輪荷重は分散されることなく舗装面に加わり、その値はタイヤの接地面積（タイヤの空気圧、形状等によって変わる）にもよるが、接地面積を円と仮定し式(1)によって求めれば<sup>10)</sup>、輪荷重 49 kN,  $a=17$  cm の場合、接地圧力は 550 kPa となり、鉄道の場合よりも 5~10 倍程度大きくなると考えられる。但し、鉄道と道路でも実際は、走行する車両の種類や速度あるいは走行路面（鉄道ではレール面）の凹凸の状態によって輪荷重の値は異なる。例えば、都市内および近郊の電車専用線の輪荷重は標準的な輪荷重の半分の 40 kN 程度である。したがって、ここでは鉄道、道路とも設計に用いる標準的な輪荷重で比較した。

$$a = 12 + P/9.8 \quad (1)$$

$a$  : タイヤの接地面積 (cm)

$P$  : 輪荷重 (kN)

以上、鉄道では道路に比べて荷重が広く分散され小さくなることが、アスファルトの劣化にもかかわらず健全であった 1 つの理由に考えられる。

図-13 は残留針入度で道路の値<sup>11)</sup>と今回の鉄道の値とを比較したものである。残留針入度の算出にあたっては、多摩線の場合は原アスファルトの針入度が判明しているが、横浜線、中央線の場合は不明であるので、設計時の値が 60~80 の市販アスファルトの性状の平均値である 70 を推定値<sup>12)</sup>とした。同図によれば、鉄道での経年劣化は道路に比べて大きいと考えられる。これには荷重

の大きさ、回数、太陽光の照射の有無、空隙率、アスファルト量、ニーディングの有無（鉄道ではアスファルトコンクリート面に回転する車輪が載荷されないので、道路とは異なりニーディングは生じないと考えられる）等の種々の因子による影響の相違が考えられる。

図-14に伸度の経年変化を道路<sup>13)</sup>と比較して示す。同図より伸度は10ヶ月程度を経過すると急激に減少していく傾向があり、中央高速道の場合には20ヶ月を経過すると10cm以下まで減少している。したがって伸度はある期間が経過すると減少度が急激に進行し、長期間の経年変化の指標としては、適切でないと考えられる。

## 6. まとめ

本調査結果をまとめれば、以下のようになる。

(1) 新しい設計法よりも薄い路盤厚さではあるが、路盤表面にはクラック等の変状ではなく、路床のK<sub>30</sub>値も設計の規制値を満足していたことより健全度が確認された。したがって、新しい設計法の有力な検証例が得られたと考えられる。

(2) 道床パラストの被覆がない路盤の肩付近は転圧不足と太陽光の照射により、道床パラストの被覆がある部分に比べ、経年劣化が進んでいる。

(3) 荷重の影響の大きい部分は少ない部分に比べ劣化の程度が小さいことが認められた。

(4) 経年劣化の程度は道路に比べ、鉄道の方が大きく、この理由には荷重の大きさ、回数、空隙率、太陽光の照射等種々の影響の違いが考えられる。

(5) 鉄道の場合、道路の場合に比べ、アスファルトに経年劣化が大きく見られたが、健全であった理由として荷重が広く分散され、路盤圧力が小さくなることが考えられる。

(6) 伸度は早期のうちに経年劣化が進行し、その後の劣化の変化が小さいため、長期間の経年劣化を示す指標としては適していないと考えられる。

以上のように、新しい設計法の検証として供用中の路盤の実態調査を行ったが、営業線の夜間の列車間合いを利用して行った調査のため、調査空間と調査時間に制約があり、路盤の健全度の確認には目視観察と材料採取しかできなかった。このため、実際の路盤の構造や路床状態の確認、あるいは路盤の支持力測定等は行えず、健全度の確認には十分な調査結果とは言えないが、路盤表面の状態が良好であったことにより一応の確認はできたと

考える。

## あとがき

新しい設計法によって構築される強化路盤のうち設計最大速度で走行することが予定されている北陸新幹線において、今後も健全度の把握に努め、設計法の妥当性の検証を行いたいと考える。

謝 辞：本調査にあたって、横浜線ではJR東日本の横浜保線区の現場職員の方々、多摩線では小田急本社および経営保線区の方々に大変にお世話になった。またアスファルトコンクリートのコア採取と材料試験では東亜道路工業の方々にお世話になり、ここに深謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 須長誠、関根悦夫：鉄道強化路盤の厚さの低減に関する研究、土木学会論文集 No. 498/VI-24, pp.57-66, 1994.9.
- 2) 須長誠、関根悦夫：FEM 解析による鉄道強化路盤厚さの検討、土木学会論文集 No.510/IV-26, pp.43-48, 1995.3.
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物、丸善、1992年3月。
- 4) 日本国鉄道編：建造物設計標準解説 土構造物、日本鉄道施設協会、pp.323-333、1978年3月。
- 5) 社団法人日本道路協会：舗装試験法便覧、pp.574-583、1988年11月。
- 6) 前掲5), p.901.
- 7) 笠原靖、植村正、牛嶋幸司郎：供用中におけるアスファルト舗装の老化の研究、石油学会誌、第18巻1号、pp.30-33、1975年1月。
- 8) 前掲3), pp.289-290.
- 9) 前掲5), pp.342-344.
- 10) 西尾孝彦、長崎慎太郎：路床の支持力特性について—主として地下水位との関連において—試験所報告昭和44年度、p.3、日本道路公団、1970年10月。
- 11) (財)高速道路調査会アスファルト舗装追跡調査結果班：アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書、pp.64-65、1976年2月。
- 12) (社)日本アスファルト協会技術委員会：昭和62年市販アスファルトの性状調査、アスファルト、第31巻第157号、p.70、1988年10月。
- 13) 前掲11), pp.66-67.

(1995.3.6 受付)

# FIELD INVESTIGATION OF REINFORCED ROADBED CONSTRUCTED BY NEW DESIGN METHOD

Makoto SUNAGA

This paper describes the field investigation on the reinforced roadbed in railway which is decreased the roadbed thickness by the new design method. After the ballast covering the roadbed surface was removed, the condition of the surface was observed under the live train, and the samples of the roadbed materials were obtained. The degree of worse in the property of the roadbed materials was compared the other test data.

As a results, it became clear that the reinforced roadbeds constructed by the new design had no problems and the new design method was rational.