

V-12 赤泥の道路用材料への活用に関する研究

北海道開発局土木試験所 正員 久保 宏

1. ま え が き

最近、各種の産業廃棄物の有効利用や低品質材料の積極的な活用などが、省資源の観点から重要な研究課題となっている。赤泥は、アルミニウム製造工程で産出される産業廃棄物であり、その量は生産されるアルミニウムにはほぼ匹敵する程の大きなものである。この赤泥処理に関しては従来から各種の研究がなされていたが、主として経済的な理由から有効な方法がなく、海岸投棄や埋立てに用いられていたにすぎない。¹⁾ また、この赤泥は産出時に水分を多量に含んでおり、特有の赤褐色を呈していることもあって環境問題との関連などからこれらの処理方法にも限界が生じ、国内はもとより世界中のアルミニウム工場ともその取り扱いに苦慮している現状にある。

一方、北海道のような積雪寒冷地の道路工事では、凍上対策として一般に置換工法が採用されているため、凍上抑制層や路盤に砂や切込砂利などの骨材を大量に必要とすることと最近の天然骨材の枯渇化から、この種の新規道路用材料の開発が望まれている。そこで筆者らは、この産業廃棄物である赤泥の有効な処理、ならびに天然骨材の枯渇に対処するための材料開発の両面から、赤泥の道路用材料への有効利用に関する研究課題に取り組んできた。²⁾

この赤泥の道路用材料への有効利用方法としては、フィルタープレスにかけて脱水した赤泥ケーキをキルンで1,230℃程度に焼成して道路の路盤などに利用すること、ならびにこれを粉末にして表層用混合物のファイラーに用い、そのレンガ色によるカラー舗装に利用すること。さらにもう一つの方法は、プレスで脱水された段階の赤泥ケーキをそのまま道路の路床などの盛土材料として用いることなどである。本文では、赤泥およびその焼成物の性質、ならびに赤泥焼成物の路盤およびアスファルト混合物のファイラーとして用いるための室内実験と現場試験による調査研究などについて述べるものである。³⁾

2. 赤泥とその焼成

(1) 赤泥の成分

原鉱石ボーキサイトからアルミニウムを製造する工程は、ボーキサイトからアルミナ(Al_2O_3)を取り出すアルミナ工程と、熔融塩電気分解によりアルミナからアルミニウム(Al)を取り出す電解工程の二つから構成されている。赤泥はアルミナ工程で、ボーキサイトを粉砕し、苛性ソーダ溶液と混合したのち、加熱と加圧下でアルミナが溶液中に溶解する際に産出される残留物である。このときに一部溶液中に溶解した珪酸(SiO_2)がアルミナ、ソーダと反応して不溶性のソーダライト($3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$)を生成するが、赤泥はこのソーダライトと、もともとボーキサイト中にある酸化鉄(Fe_2O_3)を主成分としたものである。特にこの酸化鉄を42～44%もの大量に含んでいるため赤褐色を呈している。赤泥のこのほかの成分としては少量²⁾アナターゼ(TiO_2)と石灰石(CaO)のみであり、いわゆる重金属的なものはほとんど含まれていない。

物理的な性質としては、乾燥後の粒度が10～30μ以下の細粒のものであり、真比重約2.9、排出時には水分40～50%のフィルターケーキ状である。一般に、海洋投棄、埋立て処分にする場合には、フィルターケーキを水で希釈して、200～700g/lの泥流状にして取り扱っている。

(2) 乾燥状態での赤泥ファイラー

当初、この赤泥を110℃程度で炉乾燥して、舗装用ファイラーとして使用することが考えられた。このため、赤泥のファイラーとしての規格試験およびこれを用いたアスファルトモルタルと細粒度ギャップアスコンの高温安定性やすりへり抵抗性などについて、ファイラーとして通常用いられている石灰石粉の場合との比較検討を行った。この

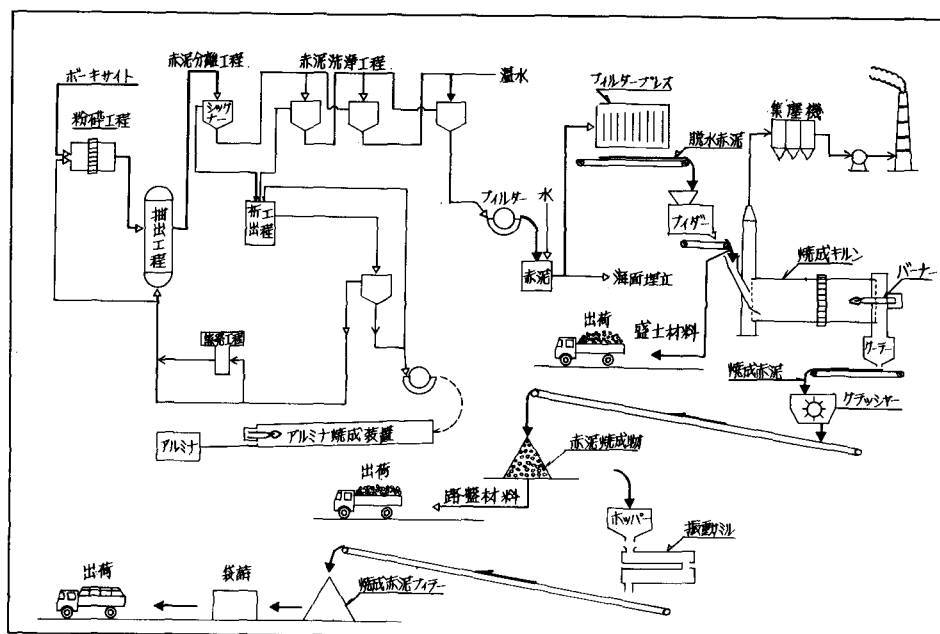


図-1 赤泥焼成物の生産工程図

研究結果は既に報告されているが、²⁾その主要点として安定性とすりへり抵抗性には問題はないことが判明した。しかし、粒度が細粒のためアスファルト吸収性が大きく、特に水浸マーシャル試験による残留安定度が石灰石粉の場合に比べて小さく、耐水性に劣ることが明らかとなった。この段階で、耐水性に劣る原因の究明が必要になるとともに、実用的な対策として石灰石灰との併用による赤泥使用割合の減少を余儀なくされたが、同時に後述するように赤泥を $1,200 \sim 1,250^{\circ}\text{C}$ で焼成することによってこの耐水性の問題は解決されたので、赤泥を単に乾燥したままでファイラーとして使用する研究は中止することとなった。

(3) 赤泥の焼成

赤泥ケーキを加熱してゆくと、 $200 \sim 500^{\circ}\text{C}$ で付着水分が放出され、 $1,000 \sim 1,100^{\circ}\text{C}$ で結晶水がほぼなくなり、焼結が始まる。焼結進行に伴って、ネフェリン ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) や Fe_2O_3 が多くなり、 $1,200 \sim 1,250^{\circ}\text{C}$ の温度で焼結は完了する。¹⁾ 同時に赤泥の色も、淡褐色から濃褐色へと変化してくる。赤泥そのものを突固めた場合、比重は $2.0 \sim 2.2$ 程度であるが、焼成により $2.6 \sim 3.7$ 程度まで上昇し、一軸圧縮強度についても約 50 kg/cm^2 のものが、 $1,000 \text{ kg/cm}^2$ を越すまでになる。¹⁾ また、この赤泥焼成物は水中における崩壊やソダの溶出もなく、道路用材料として良好な特性を備えたものに変わることが明らかとなった。

アルミニウム苫小牧工場では、昭和49年度から月産約100万tonのパイロットプラントを設置し、路盤およびファイラーを製造している。これは赤泥泥しりをフィルタープレスで濾過、脱水して厚さ40mm、水分約30%のフィルターケーキとし、ロータリーキルンで約 $1,200 \sim 1,250^{\circ}\text{C}$ まで加熱焼成する。その後、クラッシャーで破碎しフルイを通じて粒度調整することにより路盤ができ、さらに振動ミルによって粉碎してファイラーが製造される。また、脱水したケーキ状の赤泥は、道路の一般盛土材としてトラックで搬出することになる。図-1は、赤泥の焼成物の生産工程を模式的に図示したものである。

3. 路盤材としての赤泥焼成物

表-1 赤泥焼成物の物性試験とCBR試験

焼成温度 (℃)	比 重	吸 水 量 (%)	ロサンゼルス すりへり減量 (%)	安定性損失量 (%)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm^3)	修正CBR (%)
1,250	3,140	2.9	20.2	1.2	6.0	2.47	89
1,230	2,991	4.4	22.9	0.2	6.3	2.46	87
1,225	2,776	10.1	27.0	1.0	13.0	1.99	32

赤泥焼成物を道路舗装の路盤材料として使用するためには、室内における物性試験および規格試験を行ってその品質を確認しておく必要がある。さらに、この室内試験で合格した路盤材について、実際の現場における施工性、支持力特性、路面性状への影響、経年変化などを調べるために、この材料を国道舗装に試験的に使用した。

(1) 室内試験

表-1は、赤泥焼成物の道路用路盤としての物性試験ならびにCBR試験の結果を示したものである。この表から、安定性損失量の場合を除いて比重、吸水量、すりへり減量の各物性値が、焼成温度の影響を受けていることがわかる。路盤用材料であればその品質規定から約1,225℃の比較的低い温度の焼成でよく、また焼成温度を高くすることによって、厳しい規格値を要求しているアスファルト混合物用の骨材も製造できることが、この表から読みとれる。ここで赤泥焼成物は、微粒子の赤泥ケーキを焼結して塊状にするため、最大粒径を大きくするのがむずかしく、特にパイロットプラントの場合には焼成工程の関係で最大粒径が25mmとなり、北海道開発局道路工事仕様書（以下仕様書という）に示す40mm級切込砕石の粒度範囲のうち、10～20mmのところで細粒側にはずれる。

北海道のような積雪寒冷地では、路盤材として赤泥焼成物を使用する場合に、凍上試験および凍結融解後のCBR保存率の確認が必要である。まず赤泥焼成物のうち5mm以下の試料について、0.074mmふるい通過の含有量を5%から40%まで変化させ、凍上試験を行った。この試験結果によれば、切込砕石についての仕様書に規定されている0.074mm以下含有量15%以下では、凍上の危険性がないことが判明した。また、凍結と融解を2サイクル繰り返した後のCBR保存率は、約50%となり切込砕石の場合とほぼ同程度であった。

(2) 試験舗装

昭和49年度に一般国道36号苫小牧市錦岡の拡幅工事の一部に、赤泥焼成物（焼成温度1,230～1,240℃）を路盤材として用いた場合について試験舗装を行った。³⁾ 図-2は、試験舗装の断面図である。下層路盤40cmを延長50mについて赤泥焼成物とし、比較のために隣接した50m区間に40mm級切込砕石路盤を施工した。それぞれの区間について、メチレンブルー凍結深度計による凍結深さ、路床・路盤支持力、たわみ量、縦断・横断凹凸を凍結前の10月～11月と融解期の4月～5月に測定し、昭和53年10月まで調査を継続した。

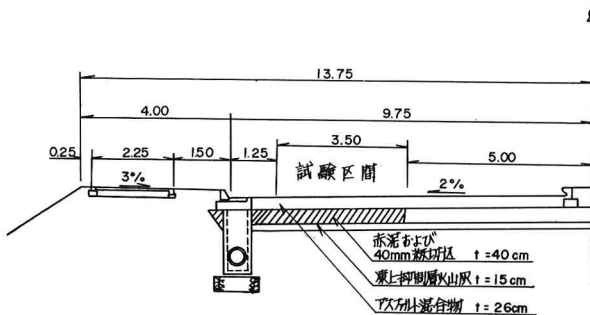


図-2 試験舗装断面図

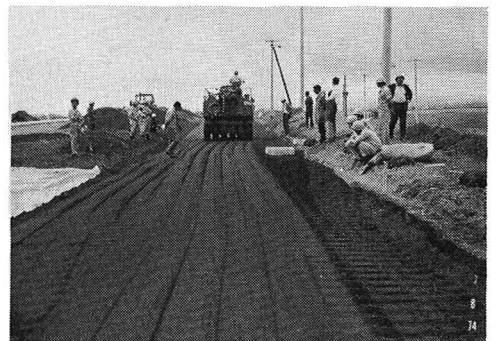


写真-1 赤泥焼成物路盤の転圧

赤泥焼成物の施工性については、粒度分布が前述のように細粒側にはずれること、製造工程から細粒分に丸みが多く、締固めに多少の問題があった。しかし、その後シルト分を適度に多く添加することによってこれは幾分改善された。写真-1は、赤泥焼成物路盤の転圧状況を示している。

支持力測定は図-3にその結果を示すように、路路面、路盤上面にそれぞれ直径30cmの載荷板を埋込んでおき、凍結前と融解期の年2回行った。ここで支持力値の動きは、赤泥焼成物路盤も切込砕石路盤も大差なく、また融解期には両者とも同じような傾向で低下している。

ベンケルマンビームによる復元たわみ量は、舗装上面で複輪荷重5.0ton、タイヤ空気圧6.5kg/cm²の条件で測定した。結果を図-4に示すが、赤泥焼成物、切込砕石両路盤とも復元たわみ量はほぼ一定であり、両者にあまり差異がない。

(3) 赤泥焼成物路盤に対する考察

赤泥焼成物を道路舗装の路盤材として活用するための室内試験ならびに試験舗装の現地調査は、施工後4年経過した昭和53年10月で一応終了した。室内試験結果からは、赤泥焼成物が粒度を除いては道路用路盤材料の規格を満足しており、寒冷地舗装用材料として必要な凍上量の規定、凍結融解後の支持力についても問題のないことが判明した。一方、試験舗装の現地観測結果のうち支持力とたわみ量については、切込砕石の場合と大差のないことがわかった。縦断・横断凹凸の路面性状は、シルト分不足の一部赤泥焼成物路盤で流動が生じて悪化したが、粒度を改善することにより締固めがよくなり、路面性状も切込砕石なみとなった。

道路舗装用の路盤材料は、需要が大量であり、天然骨材の不足もあって赤泥焼成物の活用面からは、コスト面で採算がとれれば将来非常に有望である。今回の試験から一応の目安が得られたが、今後は本格プラントで最大粒径を大きくし、それを砕いて粒度調整するか、舗装の下層路盤の下部もしくは凍上抑制層として使用するのが好ましいものと考えられる。

4. アスファルト混合物用フィラーとしての赤泥焼成物

表層用アスファルト混合物のフィラーとして赤泥焼成物の粉末（以下赤泥フィラーという）を用いた場合の諸性状を検討し、その使用適否を判断するためにマーシャル試験、ラベリング試験などの室内実験を実施した。⁵⁾ これらの結果を踏まえて、昭和52年度から一般国道276号（苫小牧～支笏湖間）の丸山自転車歩行道の舗装に赤泥フィラーが、カラー舗装として用いられた。⁶⁾

(1) 室内試験

赤泥フィラーの試験項目としては、舗装用フィラーの規格試験、アスファルトモルタルにしたときの高温安定性とすりへり抵抗性を調べるためのマーシャル試験およびラベリング試験である。フィラーとアスファルトの重量比F/Aは1.7、2.0、2.3の3種について試験を実施した。

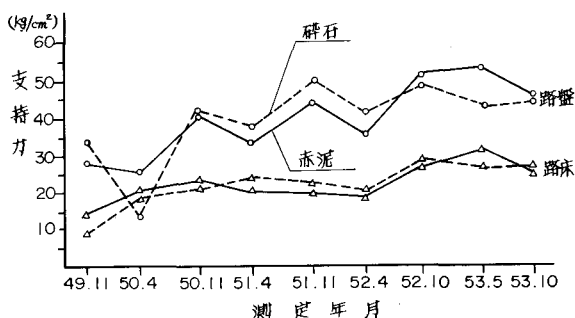


図-3 路床・路盤支持力の経年変化

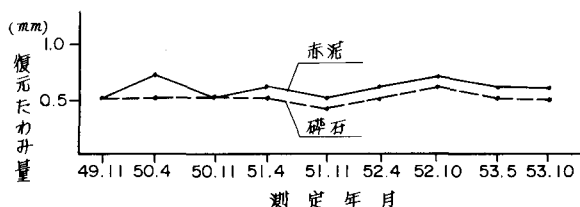


図-4 復元たわみ量の経年変化

本実験に用いたアスフ

表-2 ファイラーの規格試験成績

ァルトは、丸善石油ストレ
ートアスファルト 80～
100、砂は勇払郡厚真町

種 別	比 重	PI	フロー (%)	浸水膨張率 (%)	剥離抵抗性	粒 度 (%)		
						0.297 篩	0.149 篩	0.074 篩
石灰石粉ファイラー	2.778	NP	25.4	1.25	合 格	100	98	89
赤泥ファイラー	3.679	NP	25.5	1.44	合 格	—	—	100

浜厚真産粗砂および伊達市黄金産細砂を 50:50 の割合で混合した合成砂である。石灰石粉ファイラーとの比較での赤泥ファイラーの規格試験成績は、表-2 のようになるが、これから明らかなように石灰石粉ファイラーと赤泥ファイラーとは大きな比重の差はあるが、その他の工学的な意味においてはほぼ同種のものと考えてよい。

初めにアスファルトモルタルの高温安定性を調べるために、アスファルト量を 9.0～12.5%まで 0.5%刻みに 8 種の配合で F/A の異なるそれぞれのアスファルトモルタルについてマーシャル試験を実施した。図-3 は、F/A = 1.7 およびファイラーの種別ごとにマーシャル試験における諸性状を示したものである。この図から、赤泥ファイラーを用いた混合物の安定度は、石灰石粉ファイラーの場合より大きくなり、フロー値は逆に小さくなるのがわかる。また、最適アスファルト量は赤泥ファイラーの方が若干大きくなる。

すりへり抵抗性を調べるラベリング試験は、アスファルト舗装要綱の方法に従って行った。赤泥ファイラーを用いたアスファルトモルタルのすりへり抵抗性は、表-3 に示すように同一 F/A と、ほぼ同じアスファルト量において、石灰石粉ファイラーを用いたものよりすぐれていることがわかる。

前述の炉乾燥させた赤泥をファイラーとして使用した場合の実験で問題となった耐水性に関して、焼成した赤泥ファイラーでのアスファルトモルタルの水浸マーシャル試験結果は表-3 に示すとおりである。これによると、残留安定度はいずれも 95%以上であり、吸水率も 0.5%以下となっており、石灰石粉ファイラーとの間には有意差は認められない。1,200～1,250℃の温度で赤泥ケーキを焼成することによって、そのファイラーとして用いたアスファルト混合物の耐水性の問題は解決されたものといえる。

(2) 赤泥焼成物ファイラーを用いたカラー舗装の施工

室内試験の成果をもとに、昭和 52 年～53 年に苫小牧～支笏湖間の丸山自転車歩行者道のカラー舗装として、赤泥ファイラーを表層用アスファルト混合物に使用した。この丸山自転車道は延長約 2.1 Km で、一部国立公園内を通過することから、周

表-3 水浸マーシャル試験とラベリング試験結果

種 別	F/A	アスファルト 量 (%)	残留安定度 (%)	吸 水 率 (%)	すりへり量 (cm^2)
石灰石ファイラー	1.7	10.5	102	0.3	1.0
	2.0	10.1	97	0.5	0.9
	2.3	9.6	98	0.4	0.8
赤泥ファイラー	1.7	10.7	96	0.5	0.9
	2.0	10.2	107	0.5	0.8
	2.3	10.0	104	0.4	0.7

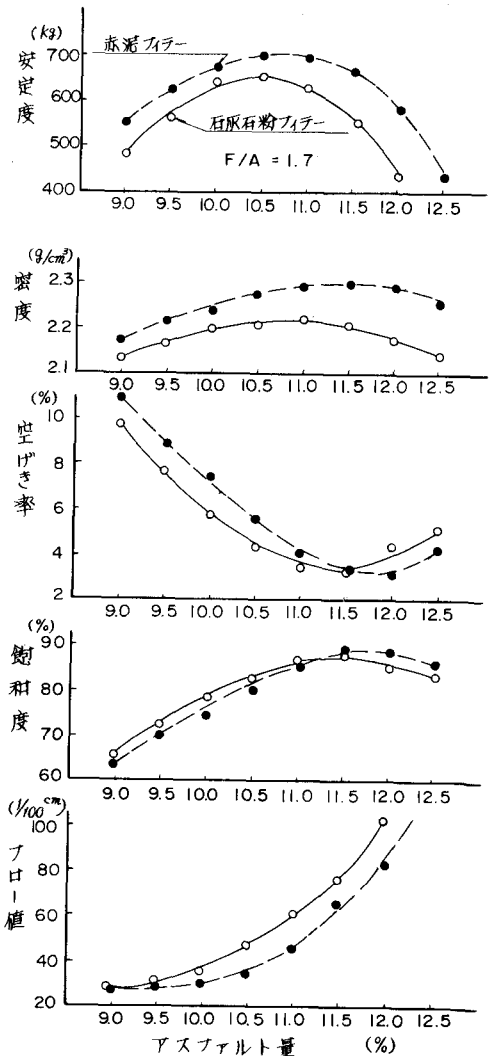


図-3 赤泥ファイラーのマーシャル試験結果

辺の景観との調和を考え、赤泥ファイラーを用いたアスファルト混合物の着色、すなわとカラー舗装として計画したものである。この自歩道の幅員は3m、厚さ3cmの細粒度アスコンに赤泥ファイラーを15%用いて、延長約9kmの舗装を施工した(写真-2)。現地試験では、主に赤泥ファイラーの着色性に注目し赤泥ファイラーの配合比率が、マーシャル試験値やカラー舗装の発色にどの程度の影響を与えるが、また施工性の憂劣について調査した。⁶⁾ アスファルト混合物中の赤泥ファイラー量および細骨材の量の関係から、レンガ色の満足のゆくカラー舗装ができたものと考えられる。また、国道36号苫小牧市ウトナイ湖付近の曲線部の減速マーキングゾーンの舗装にも、運転者の安全走行のために赤泥ファイラーによるカラー舗装を写真-3に示すように昭和54年度施工し、好評を博している。

5. 結 論

産業廃棄物である赤泥について、主にこれを焼成した赤泥焼成物としての活用を述べてきた。ここで得られた主要な結論はおおよそ次のとおりである。

- (1) 赤泥焼成物は、その粒度およびシルト分の割合を考慮すれば、道路の路盤用材料としては切込砕石の場合とほぼ同程度の機能を発揮し、十分使用することができる。
- (2) 現在の赤泥焼成物の製造コストが天然骨材に比較してかなり高価であるが、将来の天然材料の枯渇化と現行の赤泥処理方法の行きづまりから、この赤泥焼成処理による路盤材は有望なものといえる。
- (3) 赤泥焼成物を粉碎して表層用アスファルト混合物のファイラーとして用い、さらにそれをカラー舗装として利用すれば、その付加価値を高めるばかりでなく、通常用いられている石灰石粉の場合よりもすりへり抵抗性や高温安定性がすぐれていることがわかった。また、パーキングエリア、車線分離帯、公園や構内の舗装、自転車道などのカラー舗装として、この赤泥焼成ファイラーを最も低廉なコストで利用することができる。

参 考 文 献

- 1) 茅城 修；赤泥による道路用骨材(路盤材)の製造、化学工場、VOI.18、№7、1978年7月
- 2) 斉藤幸俊；特殊ファイラーを用いたアスファルト混合物に関する実験、土木試験所報告№61、1974年3月
- 3) 久保 宏・中村俊行；赤泥の道路舗装への活用について、土木試験所月報№311、1979年4月
- 4) 久保 宏；層構造解析による凍上対策工法の評価に関する研究(その1)、土木試験所月報№306、1978年11月
- 5) 佐々木政男・西村忠秋；赤泥焼成粉末をファイラーとして使用したアスファルト混合物の性状試験、舗装VOI.11 №11、1976年11月
- 6) 堀田政機ほか；赤泥ファイラーを利用した舗装について、第21回北海道開発局技術論文集、1978年2月

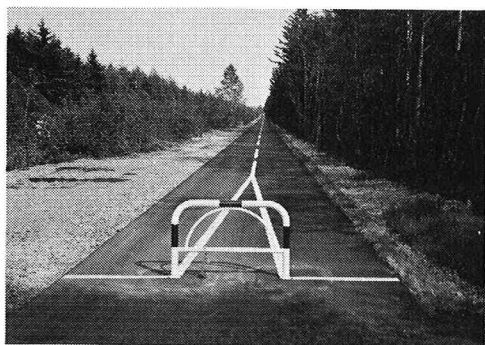


写真-2 丸山自転車歩行者道(苫小牧～支笏湖間)

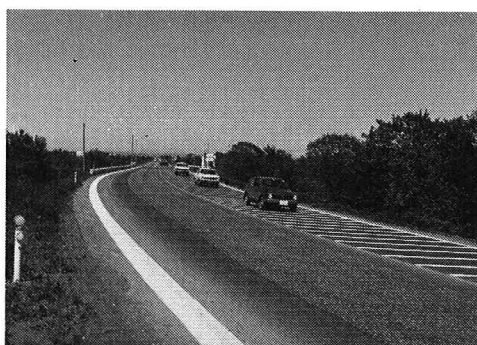


写真-3 減速マーキングゾーンのカラー舗装(苫小牧)