

Fe石灰工法の開発と発展

あ べ よりまさ
阿部 頼政*
い きよし
井 清**
みぞぐち たかよし
溝口 孝芳***

Fe石灰工法は、軟弱な路床の上に、消石灰と酸化鉄からなる安定材（Fe石灰）を用いて安定処理層と構築する工法である。本工法の開発は昭和31年にさかのぼる。その後、技術の向上とともに北部九州地方で広く採用されるようになり、現在までの施工実績は約1,850万m²に達している。

Fe石灰を用土（マサ土やシラス）に混入することによって、これら処理土が硬化するのは、強アルカリ化における鉄の形態変化による。ここではこの化学変化を電子顕微鏡写真でとらえている。

処理土の製造にあたっては、路上混合、移動プラントによる混合、定置プラントによる混合の3方式の中から、現場の条件に応じて製造法を選択できるようになっている。

本報文は以上のような工法の概要を紹介するものである。

キーワード：軟弱路床、路床の構築、鉄の化学変化、安定処理、サンドイッチ工法

まえがき

Fe石灰工法（以下、本工法）は、軟弱な路床の上に、消石灰と酸化鉄からなる安定材（Fe石灰）を用いて安定処理層を構築する工法である。

本工法は北部九州地方で主に採用されているが、当該地方の低平地部は、有明粘土（がた土）の沖積層や黒泥（そうら層）、山間部は火山性有機質土等で知られるとおり、路床条件の極めて悪いところが多い。本工法はこのような環境の中から開発された工法で、技術の向上とともに年々施工実績も伸びてきており、最近では年間約140万m²のペースを保っている。

九州の一地方で発達した、いわばローカル工法であるが、軟弱な路床に対する設計、施工は全国的にも関心の深いこと。新しいアスファルト舗装要綱¹⁾でも路床の構築を重要視していること²⁾などから、ここに本工法の概要を紹介する次第である。

1. 開発の経緯

本工法の開発は、創始者（井 月夫）が建設省佐賀国道工事事務所長として赴任した昭和31年にさかのぼる。

国道の修繕工事において、有明粘土（がた土）で知られる低平地の軟弱路床に直面した創始者は在任

中、その対策に苦慮することとなった。当時、軟弱路床を補強する方法としては、厚さ50cmのサンドクッション層を設ける方法がとられていたが、問題はサンドクッション層の支持力が十分でなく、下層路盤の転圧が困難なことであった。そのため、サンドクッション層の川砂に代わる材料、すなわち、直下の軟弱路床を乱さない程度の軽い締固めで、それから上の路盤の転圧に必要な支持力が得られる材料の開発が始まった。

その第1段階では、川砂に20～30%の粘土（赤土）を加えた粒度調整処理土が試みられた。これにより、ごく軽い締固めで30～50のCBRが得られたため、その上の下層路盤のローラ転圧は可能になった。しかし、路盤を施工した状態で降雨があると支持力を失ってしまうことがあったため、第2段階では水硬性を期待して石灰を添加する方法がとられた。このころから、粒度調整に用いていた赤土が単に粒度調整の役割を果たしているだけではなく、石灰との化学反応があって硬化を促していることが分かってきた。そして、鋤床（すきどこ）の形成や赤土を用いた二和土、三和土が鉄分の効果であることに着目し、第3段階では製鉄時に副生する粉塵ダストをさらに添加することとなった。

このようにして誕生したFe石灰安定材（消石灰＋鉄分）は、その後、以下のような発展段階をたどってきている。

* 日本大学 理工学部 助教授 工博

** Fe石灰工業技術研究所 副所長

*** 〃 技術開発室長

① 現位置路上混合による段階

当初は、現位置路床面に、所定量の消石灰と鉄分を撒き出して、スタビライザ等による現位置路上混合方式をとった（昭和41年度工事まで）。

② 工場生産による安定材の供給と、定置プラント方式の導入

現位置路上混合における現場作業の繁雑解消と需要拡大に対応するために、Fe石灰安定材の工場生産を行うこととした。これにより定置プラント方式（碎石工場の粒度調整碎石プラントによる）の導入が可能となり、均質なFe石灰処理土の大量生産が可能となった（昭和42年度工事以降）。

③ 移動プラント方式の導入

その後、交通量の増大と車両の大型化によって、舗装の設計厚の増大を余儀なくされる一方、多くの場合は舗装の計画高を上げることができないために、必然的に路床面が深くなることから、現地付近で入手できる自然土等を用土とするプラント処理土のウェイトが高くなってきた。

また、適用地域が拡大するとともに、定置プラントからの運搬距離が延びたこともあり、比較的簡易な移動プラントを開発して実用に供した（昭和45年度工事以降）。

2. 使用材料の特徴と配合設計

1) 酸化鉄

酸化鉄は、製鉄時に副生する粉塵ダストで、以前は製鉄所の乾式集塵装置で集塵した超微粉（平均粒径 $\leq 1/1,000\text{mm}$ ）を使用していたが、現在は主として表-1に示す、新日本製鐵（株）八幡製鐵所の焼結ダストを用いている。

表-1 微粉酸化鉄の化学的組成〔試料名：焼結ダスト〕

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	その他
94.92	1.02	0.48	0.27	3.31

(TACセンター、新日本製鐵(株)八幡製鐵所)

2) 消石灰

消石灰は、土の安定処理に用いるJIS R9001工業用石灰に規定されている消石灰（特号）で、Ca(OH)₂の含有量が高く、土との反応性の高いものを選択している。表-2に、その化学的組成分析の一例を示す。

表-2 消石灰の化学的組成〔メーカー：位登産業（株）〕

Ca(OH) ₂	CO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
97.72	1.28			1.00	

(TACセンター、新日本製鐵(株)八幡製鐵所)

す。

3) 用土（マサ土、シラス）

現在用いている用土は、北部九州地域では主としてマサ土、熊本県以南ではシラスである。もともと本工法の用土には、川砂に20~30%の粘土（赤土）を加えて砂質ロームないし砂質粘土の土に改良した土を用いてきた。その理由は、用土と安定材が均一に混合でき、軟弱な路床上での軽い締固めによって、その上の粒状材料等のローラ転圧に必要な耐荷力が得られるような土が望ましいからである。この条件に最もよく適合し、現場付近で容易に入手できるのが、北部九州地域ではマサ土であり、南部九州地域ではシラスということである。なお、マサ土やシラス以外の土も広く用いられており、例えば、長崎県地域などでは、低品質の切込碎石（最大粒径30mm）等に必要に応じて採石場の表土等を加える方法がとられている。

4) 配合設計

配合設計に当たっては安定材の添加量と水浸CBRの関係から材齢4日のCBRが60以上で、材齢14日のCBRが材齢4日の1.5倍を満足する添加量を求め、これを設計添加量としている。ただし本工法では、鉄加水酸化物等の形成が十分でないと、処理層の連続性に懸念が生じるため、安定材の最小添加量を100 kg/m³（安定処理土の出来形1 m³当たり）と定めている。

処理土のCBR試験は、舗装試験法便覧³⁾の安定処理混合物のCBR試験にほぼ準拠しているが、供試体の作成だけは軟弱路床の上に施工するという本工法の目的に応じ、次のような変更を加えて実施している。

- ① 突固め回数は各層20回で、5層に分けて突き固め、安定材の添加量は適当と予測される添加量を中心に2%ずつ変化させた4点を標準とする。
- ② 突固め含水比は、自然含水状態（地山）の用土に所定量の安定材を添加したときの含水比とする。

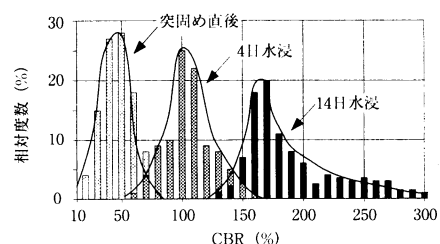


図-1 処理土の材齢によるCBRの分布

5) 処理土の力学的性状

図-1は、平成4年9月から平成5年2月の間にプラントで製造した処理土(387件)につき、CBRの経時変化を相対度数の分布で示したものである。大まかには、供試体作成直後CBRは50、4日水浸CBRは100、14日水浸CBRは170ととらえることができよう。

3. Fe石灰の化学反応機構

1) 鋤床形成の原理

有明海などの干拓地では、鋤床(すきどこ)と呼ばれる硬い層が水田中に形成されることが知られている。すなわちこの層があるため、軟弱な干拓地における牛、馬、耕運機などの作業が可能となっている(図-2)。

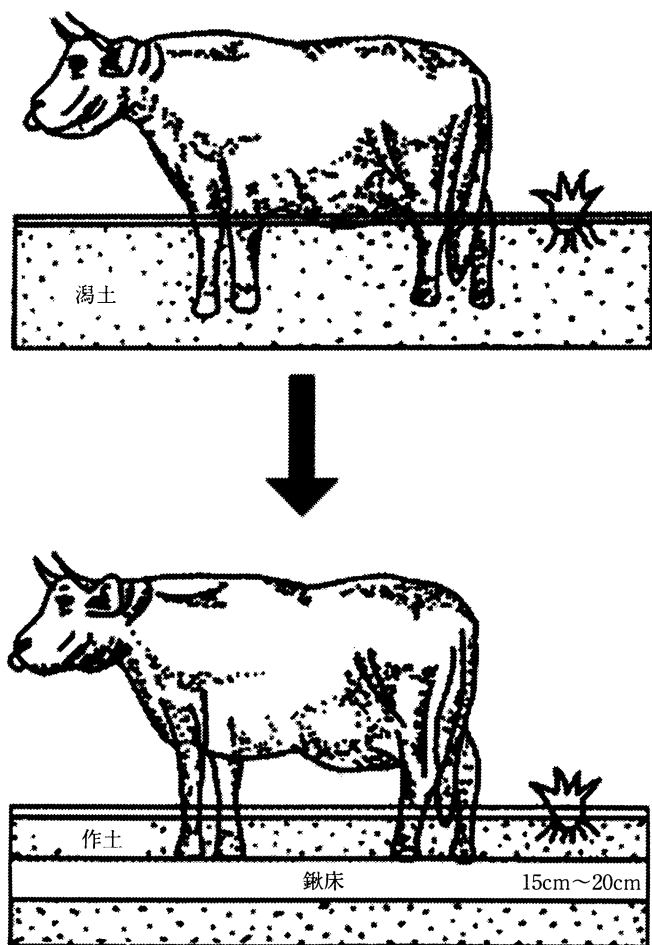


図-2 鋤床の原理

この鋤床形成の原理は次のとおりである。

① 作土中の3価の酸化鉄(Fe_2O_3)は作土中の酸素が不足すると、還元されて2価の水酸化鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ に変化する。

② 2価の鉄は比較的溶けやすく、水の浸透により下層へ移動する。

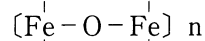
③ 下層に移動した2価の鉄は、酸素の供給等により酸化されて3価の鉄になり、沈積し、次第に結晶化する($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)。

以上のようにして、鋤床が形成されるには60年の歳月を要すると言われているが、Fe石灰はこれを短期間に達成させようとするものである。

2) Fe石灰処理土の反応機構

安定材を添加・混合した処理土の反応機構は、鋤床形成における鉄の形態変化である $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ と同様である。

すなわち、安定材料を土に添加・混合すると、消石灰が土中の水分に溶解して強アルカリの状態となり、結晶質の酸化鉄は水和されて非晶質の水酸化鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ となる。さらに反応が進むと水酸化鉄はゲル状の鉄加水酸化物($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)を形成して、土粒子中に分散される。その後、加圧などの物理的要因と酸素の供給により不可逆的的化学変化を受け、時間的経過に伴って結晶が発達し、架橋構造、



を形成して構造的に安定化する、と考えられる。

3) 電子顕微鏡による反応機構の検証

以上のような反応機構を検証するために、硅石粉末を用土とするFe石灰処理土の突固め供試体(硅石粉末93%、安定材7%)を作成し、走査型電子顕微鏡を用いて鉄成分の形態変化を観察した。なお、ここで硅石粉末を使用した理由は、自然土を用いると、そこに含まれている粘土鉱物が鉄成分と混ざりあって、鉄成分の変化がとらえにくいこと、硅石粉末そのものは結晶がしっかりしているため、強アルカリでも溶ける心配がなく、識別が容易であることなどによる。

また、本実験における供試体の養生は反応機構の時間短縮を図る目的から、突固め後4日間密封常温養生、4日間水浸の後は、5日間100℃蒸気養生、1日間常温養生を繰り返す方法をとった。観察された状況を写真1～6に示す。

① 写真-1は、硅石単体の突固め直後(材齢0日)である。

② 写真-2は、硅石粉末にFe石灰を添加した処理土の突固め直後(材齢0日)で、非晶質物質等は観察されない。

③ 写真-3は、同Fe石灰処理土の材齢28日で、



写真-2 珪石+Fe石灰 (材齢0日)



写真-3 珪石+Fe石灰 (材齢28日)



写真-1 珪石単体 (材齢0日)



写真-4 珪石+Fe石灰 (材齢60日)



写真-6 珪石+消石灰 (材齢60日)



写真-5 現場採取コア (13年経過)

写真-1～6 モデル供試体によるFe石灰処理土の電子顕微鏡写真 (×3,000, 平成4年6月, 宮崎県工業試験場)

酸化鉄の水和反応が進んでゲル状で分布しているのが観察される。

④ 写真-4 は, 同Fe石灰処理土の材齢60日で, ゲル状の鉄加水酸化物が珪石粒子を包んで結晶化が進んでいる状態が観察できる。

⑤ 写真-5 は, 施工後13年経過の広域農道 (佐賀県白石町地先) の現場から採取したカットサンプルで, モデル実験の材齢60日 (写真-4) ときわめて類似している。

⑥ 写真-6 は, 珪石粉末に消石灰だけを添加した処理土の材齢60日のモデルで, 非晶質物質等の変化は観察されない。

以上の写真だけで, 完全な証明ができていたとは言い難いが, 鉄成分の形態変化はほぼ推定どおりであると判断できよう。

4. 構造設計

本工法を適用する場合の構造設計は, Burmisterの2層弾性論を基本としている。ただし, Burmisterの厳密解を使用するのは, 電子計算機が今日ほど普及していなかった開発当時には繁雑であったこと, 一方, 変位係数の図表を使用するのはラフすぎたことなどから, 具体的な計算にあたっては近似度が良いとされているBarberの次式を使用した⁴⁾。

$$\Delta_0 = \frac{1.5 \times p \times a}{E_s} \times F_w$$

$$F_w = \left(\frac{1}{R} \right) + \frac{E_s}{E_h} \times \left(1 - \frac{1}{R} \right)$$

$$R = \left\{ 1 + \left(\frac{H}{a} \right)^2 \times \left(\frac{E_h}{E_s} \right)^{2/3} \right\}^{1/2}$$

ここで,

- Δ_0 : 舗装表面たわみ量 (cm)
- F_u : 変位係数
- E_b : 路盤+表層・基層の平均弾性係数 (kgf/cm²)
- E_s : 路床の平均弾性係数 (kgf/cm²)
- H : 舗装厚 (cm)
- p : 接地圧 (kgf/cm²)
- a : 接地半径 (cm)

すなわち、舗装表面におけるたわみ量の目標値をアスファルト舗装で0.7mm、コンクリート舗装で0.35mmと設定して処理厚を算定してきたわけである。その後、施工実績が増えるにつれ、経験も豊富となったこと、理論とは別に施工上の制約（例えば施工直後の降雨、路盤工における工事用車両の通行など）も明らかになってきたことから、昭和54年以降は、表-3のような標準設計を採用している。これは、処理層を含めた路床の平均弾性係数が表-4の値以上となることを期待したものであり、また、路盤・基層・表層はT_A法によっても設計できるように配慮したものである。なお、現在は、必要に応じて多層弾性論による検討も実施している。

表-3 標準処理圧 (cm), 処理土のCBR=100%の例

原地盤のCBR	交通量区分		
	簡易舗装L.A	B.C	D
0.1~0.5未満	35	40	45
0.5~1.0 "	30	35	40
1.0~1.5 "	25	30	
1.5~2.0 "	20	25	35
2.0~2.5 "			
2.5~3.0 "	15	20	30

表-4 平均弾性係数の目標値

項目	交通量区分		
	簡易舗装L.A	B.C	D
平均弾性係数 (kgf/cm ²)	600	800	1,200
換算CBR (%)	6	8	12

5. 材料の混合方法と施工、管理

1) 材料の混合方法

安定材と用土を混合して処理土を製造する方法には、路上混合方式、移動プラント混合方式、定置プラント混合方式の3種類があり、それぞれの特徴は、以下のとおりである。

① 路上混合方式

対象となる既設路床土に、安定剤との均一な混合が期待できる場合、この方式が採用される。混合はスタビライザ等による。

② 移動プラント混合方式

対象となる既設路床土と安定材との均一な混合が期待できず、かつ現場付近で適当な用土を調達できる場合にこの混合方式がとられる。プラントは、1日の混合能力が最大で400m³のきわめて簡易なものである。

③ 定置プラント混合方式

高品質処理土を大量に必要とする場合、この方式が取られる。用土はマサ土を使用している。また、このプラントは碎石工場における粒度調整路盤材の製造プラントと同じタイプなので、切込碎石や舗装廃材に40~50%の処理土を混合した粒調Fe路盤の製造も可能である。

2) 施工

本工法の施工は、一般の安定処理工法の施工と同様である。処理層の下方には軟弱路床があるので、これを乱さないように軽く転圧することが肝要であるが、本工法に限った施工上の注意というものは特にない。

3) 管理

① 配合設計は表-5の頻度で実施している。

② プラントの管理は表-6のとおりである。

③ 施工管理では、技術員が立ち会うほか、施工時の処理土を採取して、突固め直後の非水浸CBRと材齢4日、14日の水浸CBRを測定している。その頻度は表-7のとおりである。

表-5 配合設計の頻度

施工規模 (m ²)	路上混合	プラント混合
10,000以下	1回	3か月に1回
10,000以上	2回	3か月に1回

表-6 プラント管理の頻度

管理項目	定置プラント	移動プラント
キャリブレーション	1,500m ² ごとに1回	750m ² ごとに1回
目視による確認	500m ² ごとに1回	200m ² ごとに1回
用土の含水比測定	1日1回	1日1回

表-7 処理土のCBR試験

施工規模 (m ²)	頻度
5,000	1,000m ² 当たり1回
5,000~15,000	1,500m ² 当たり1回
15,000~20,000	2,000m ² 当たり1回

6. 施工実績と供用性

1) 施工実績

図-3は、昭和53年度以降15年間におけるFe石灰安定処理土の出来高数量を混合方式別に表したもの

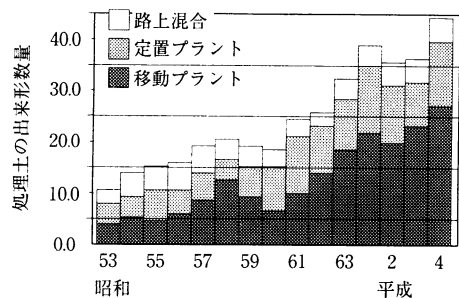


図-3 処理土の混合方式別数量の推移 (単位: 10,000m³)

である。現位置路上混合方式はあまり増加せず横ばい状態、定置プラント方式は微増であるのに対して、移動プラント方式が急増している。

本工法は、昭和45年から福岡県に、昭和48年から佐賀県に採用されることとなったが、表-8、9に示すとおり、本工法の適用面積は福岡県で11%、佐賀県で25%に達している。

なお、両県から、本工法の適用箇所において、路床の支持力不足に起因した補修はこれまでなく、今後10年間の補修計画路線にも、本工法適用箇所の補修は予定されていないとのコメントを得ている。

表-8 福岡県における本施工の適用

路線延長	Fe適用延長	道路面積	Fe適用面積
3.373km	375.0km	26,467,000m²	2,925,000m²

表-9 佐賀県における本施工の適用

路線延長	Fe適用延長	道路面積	Fe適用面積
1.478km	374.9km	10,795,000m²	2,737,000m²

2) 供用性の調査例

本工法は、開発以来約14万件 (1,850万m³) の工事に適用されているため、全数調査は不可能であるが、できるかぎり、コアボーリング、路面性状調査などにより本工法の追跡調査を実施してきている。本節ではそのうち、代表的な2例を紹介したい。

まず、最初は図-4のような舗装構造で18年経過

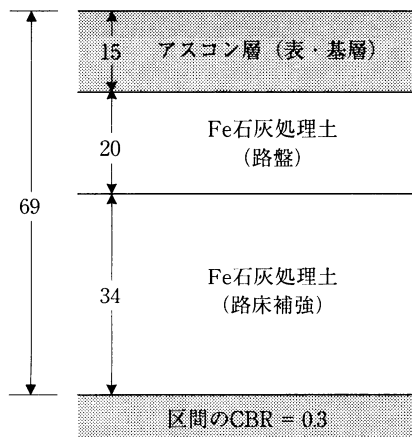


図-4 県道福岡直方線 (宮田地区) の舗装構成 (単位: cm)

した県道福岡直方線 (宮田地区) の例である。

この地区は、遠賀川流域の軟弱地帯 (CBR = 0.3%) であり、低平地で雨期には舗装が冠水状態となることから、路盤にもFe石灰を適用して耐水性を図った。

この路線の大型車交通量は約1,500台/日・1方向であり、隣接した従来の工法区間では新設後数次の補修が行われているが、Fe石灰適用区間は18年間補修を必要とせず、現在でもわだち掘れ、ひびわれの発生はほとんどない。

写真-7に採取したコアの写真、表-10には表層アスファルト混合物の性状を示した。交通荷重の圧縮を受けて空隙率はかなり低下しているものの、安定度は確保されており、回収アスファルトもあまり老化していない。

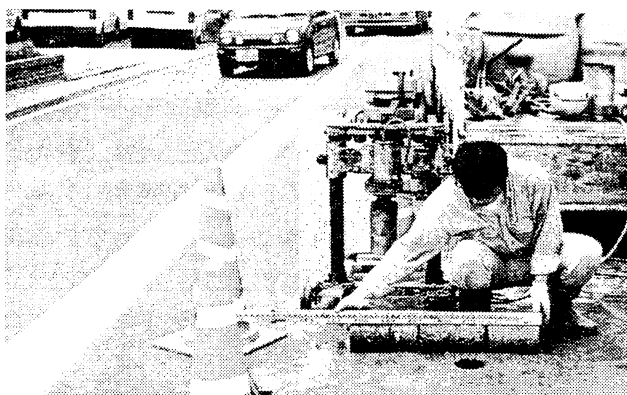


写真-7 18年経過後のFe材のコア採取 (県道福岡直方線、宮田地区)

表-10 既設表層アスコン性状試験結果

試料名	密度 (g/cm³)	最大比重	空隙率 (%)	安定度 (kgf)	フロー値 (1/100cm)	回収 As		
						針入度 (1/100cm)	軟化点 (°C)	
表層アスコン	1	2.422	2.503	3.2	1.649	27	42	55.0
	2	2.469		1.4	1.916			
	3	2.477		1.0	1.235			
	4	2.466		1.5	1.585			
	平均	2.459		—	1.8			

次は県道福岡直方線と県道筑紫野古賀線が平面交差する久山町深井交差点の例である。調査地点の見取図を図-5に示す。交通量区分はC交通で、両路線の大型車交通量にほとんど差がない。

この交差点において、昭和59年度に福岡直方線は置換工法、筑紫野古賀線はFe石灰工法が施工された (図-6)。

7年後、現場にはアスファルト混合物の流動によるわだち掘れが図-7のように発生した。流入部のわだち掘れ深さは、置換工法区間で平均45.5mm、最大55.5mmであるのに対し、Fe石灰工法区間では平均

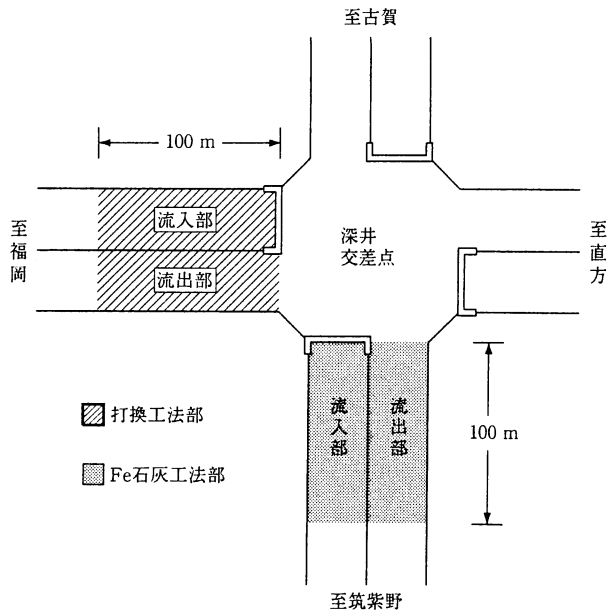


図-5 調査地点

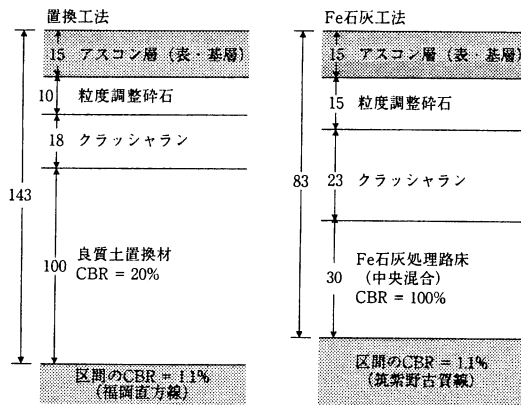


図-6 調査区間の舗装断面 (単位: cm)

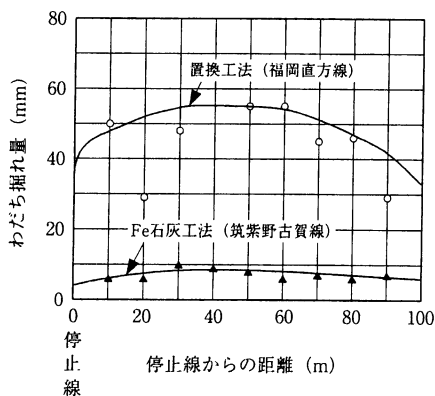


図-7 交差点流入部における流動わだち掘れ深さの比較

5.7mm, 最大9.0mmであった。また、流出部は置換工法区間では平均22.0mm, 最大39.5mm, Fe石灰工法区間では平均4.9mm, 最大6.5mmであった。

3) 不思議な現象

上記の2つの例をもって本工法の特徴を論ずる意

図はないし、また論ずるべきではないが、経済的には本工法を適用するとクラックばかりでなく、流動わだち掘れの防止にも効果のあることが分かっている。

しかし、力学的にこの理由を説明することは困難である。路床に起因するわだち掘れが少ないことは理解できるが、流動わだち掘れが路床の強度に影響されるであろうか。

路床の強度が大きければ、その分表層の荷重分担が軽減される。処理層の下が軟弱地盤であることの特種効果であるなどと想像はできるが、証明は難しい。

また、これはもう本工法の特徴云々というよりも、路床の構築そのものの本質にかかわってくる問題である。今後、様々な区間で追跡調査を続けながら、この不思議な現象を検討していきたいと考えている。

あとがき

Fe石灰工法の概要を紹介した、誌面が限られているため、各項目とも要点のみとなり、不明なところも多くなったかと思われるがご了承ください。新しい舗装要綱で路床の構築にかなりの自由度が与えられた現在、読者の方々に少しでも参考にしていただければ幸いです。

なお、本工法は、道路以外に、干拓堤防の被覆、ダム の構築、鉄道路線の基礎構築などにも広く使われていることを付記する。

謝 辞

本工法の開発と発展にあたっては、北部九州地域における諸官庁の担当者から、長年にわたりご支援をいただいた。その意味で、本工法は官民共同研究の産物といえる。また、研究の面では、建設省土木研究所、宮崎大学、宮崎工業試験所、新日本製鐵(株)八幡製鉄所にご指導、ご協力をいただいた。以上の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

最後になったが、本工法を紹介する機会を与えて下さった「舗装」編集委員会の方々に感謝する。

〔参考文献〕

- 1) アスファルト舗装要綱, 日本道路協会 (1992)
- 2) 橋本: 「より安く」から「よりいいものへ」, 舗装 (1993.4)
- 3) 舗装試験法便覧, 日本道路協会 (1991)
- 4) 植下: 舗装の力学 (第4回), 舗装 (1973.2)