

アスファルト

第48巻 第218号 平成17年10月発行

218

特集

特集にあたって	笠原 篤	1
力学的 - 経験的舗装設計指針		
- 生まれ変わったAASHTO舗装設計指針 -		
土木学会舗装工学委員会舗装設計小委員会		2

< アスファルト舗装技術研究グループ・第50回報告 >		
	峰岸 順一	48
第15回 IRF世界道路会議参加報告		
井 真宏・岩岡宏美・高馬克治・中村 健		49
環境に関する各国の研究動向 (第3回E&E会議より)		
鎌田義秋・小柴朋広・鈴木秀夫		
	千原正規・矢野辰明	51
< 統計資料 > 石油アスファルト需給統計資料		63

ASPHALT

有限責任中間法人 日本アスファルト協会
THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION

第84回 アスファルトゼミナール開催のご案内

有限責任中間法人 日本アスファルト協会

拝啓 時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

当協会主催の「アスファルトゼミナール」を下記要領にて開催致します。

皆様、お誘い合わせの上ご参加下さいます様申し上げます。

敬 具

記

- 1.主 催 有限責任中間法人 日本アスファルト協会
- 2.協 賛 社団法人 日本アスファルト乳剤協会、日本改質アスファルト協会
- 3.後 援 国土交通省、社団法人 日本道路建設業協会
- 4.開催月日 平成19年2月15日(木)～2月16日(金)
- 5.開催場所 メルパルク広島
〒730-0011 広島県広島市中区基町6-36 ☎082-222-8501(代)
- 6.内 容 裏面「プログラム」参照
- 7.申込方法 平成19年1月20日までに、下記ホームページより、申し込みフォームを使用してお申し込み下さい。
<http://www.askyo.jp/zemi2007>
折返し(7日以内)E-mailにて参加受講書をお送りいたします。
- 8.申込問合せ キュービシステム株式会社 アスゼミ担当 溝手(みぞて)まで
☎03-5256-0051
- 9.内容問合せ コスモ石油株式会社コスモアスファルトカンパニー 企画部
保康一郎・今井優喜まで ☎03-3551-8018(代)
- 10.参加費 無料
- 11.参加人数 300名(締切日以前でも定員になり次第締め切らせていただきます。)
- 12.その他 当日申込受付はできませんので、必ず上記方法でお申し込み下さい。



開催日時

平成19年2月15日(木)～2月16日(金)

開催場所

メルパルク広島

〒730-0011 広島県広島市中区基町6-36

☎082-222-8501(代)

会場案内図

JR広島駅から路面電車で15分

広電宮島口行・江波行「紙屋町西」停留所下車

JR広島駅からバスで10分

9番のりば「広島バスセンター」停留所下車

山陽自動車道 広島インターより車で約30分

プログラム

- 舗装の維持管理の新しい方向 -

第1日目 平成19年2月15日(木) 13:10~17:40

(敬称略)

1. 挨拶

13:10~13:15

有限責任中間法人 日本アスファルト協会
ゼミナール委員長

熊 本 正 義

2. トキの野生復帰を目指して

13:15~13:20

有限責任中間法人 日本アスファルト協会
アスファルト舗装技術委員長

矢 野 善 章

3. 舗装管理目標の考え方

13:20~14:40

独立行政法人 日本高速道路保有・債務返済機構

菊 川 滋

(休憩 14:40~14:50)

4. 荒廃する日本としない為の道路管理

14:50~16:10

国土交通省道路局国道・防災課 道路保全企画官

茅 野 牧 夫

(休憩 16:10~16:20)

5. (タイトル未定)

16:20~17:40

国土交通省大臣官房・技術調査課 建設技術調査官

笹 森 秀 樹

第2日目 平成19年2月16日(金) 9:30~12:50

6. 平成19年度道路予算

9:30~10:30

国土交通省道路局 道路経済調査室長

深 澤 淳 志

(休憩 10:30~10:40)

7. アスファルト乳剤協会による維持修繕工法の動向

10:40~11:40

社団法人 日本アスファルト乳剤協会 技術委員

伊 藤 亮

(休憩 11:40~11:50)

8. (タイトル未定)

11:50~12:50

日本改質アスファルト協会 事務局長

深 代 勝 弘

(講師は都合で変更になる場合があります)

特集にあたって

笠原 篤

北海道工業大学 社会基盤工学科 教授 工博

AASHTO舗装設計法は、1950年代に実施されたAASHTO道路試験の結果に基づき、当時の最新のコンピュータと統計解析技術を駆使して作られた設計法である。実際のトレーラの走行によって観測された破壊形態から、舗装構造と交通荷重の関係を見出した。このように現場の経験に基づいた設計法を経験的設計法といい、AASHTO舗装設計法はその代表格である。この設計法は、わが国を含む世界の舗装設計法に大きな影響を与えた。AASHTO設計法は、その後いくつかの改訂作業が行われたが、基本的な設計思想は不変であった。ところが、昨今の舗装技術の進展に対して、このような経験的設計法の欠点が顕著となってきた。すなわち、限られた交通荷重と限られた気象条件（イリノイ州オタワ、シカゴの西南西130km）の結果に基づいているため、当時予想できなかった交通量や、舗装材料、舗装構造に適用することが困難になってきたのである。

そこで、AASHTOでは、舗装設計法を全面的に見直すことにした。この作業は、NCHRP 1-37A「Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II」という研究プロジェクトとして実施された。それは、設計法の開発、運用、普及活動を含め6年間、総額650万ドルの大型研究プロジェクトである。当初2002年に公開の予定であったが、設計思想が根本的に変わったことと、ソフトウェアの形で公開されることになっていたため開発作業が遅れ、2004年ようやく公開されることになった。正式名称はM-E Pavement Design Guide: (M-E pdg)であり、AASHTOと2002は名称から外れている。

本特集は、このM-E pdgのエッセンスをアスファルト舗装に関連する部分を抜き出して紹介するものである。本文をお読みいただければお分かりになると思うが、経験的設計法から力学的設計法に大きく舵をとって姿を現した設計法の内容は驚くべきもの

である。基本は力学的な解析に基づいて、舗装の破損を予測することである。すなわち、ソフトウェアの実態は舗装破損予測ツールといえる。破損予測モデルはかなり精緻なものであり、いざさか理想的すぎると思われる部分も多いが、とにかく理屈を追い求める思想は一貫している。従来設計法では、パフォーマンスを予測する式が1つだけだったが、この設計法では数多くの理論式がでてくる。ソフトウェアなので式自体を計算する必要はないが、式の計算に必要な多くの入力を適切に行うためには、基本的な理論を理解しておくことが必要である。そのためのヘルプ機能があるが、これがまた1,000ページ以上と膨大である。このような複雑な設計法を現場に普及させるには相当な努力が必要であろう。実際、普及教育活動は、研究プロジェクトにおいても最も重要視されている部分である。

具体的な内容はともかくとして、このような思い切った設計法の改良に取り組むアメリカの姿勢には敬服する。そこには、舗装技術者のリーダーシップと広いビジョンが感じられる。連邦政府や州政府の機関は全体的な研究計画を策定して国民に対する説明を行い、必要な資金を確保した。民間のコンサルタントや施工会社はスタッフや労力を供給し、それらの協力の下で大学は理論的な研究を精力的に行った。M-E pdgはこのような産学官の連携の成果であり、アメリカの舗装技術の懐の深さを見せ付けた格好である。この研究プロジェクトによって、多くの若手の舗装の技術者や研究者が育ち、彼らが現在の舗装研究の中心になっている。このことによって、アメリカの舗装技術が次世代にうまく継承されたといえるだろう。この設計思想が、わが国の舗装設計法の「道しるべ」ともなることを期待したい。

なお、この特集は土木学会舗装工学委員会舗装設計小委員会の活動内容の一部である。原稿執筆作業を行っていただいた委員に幸甚の謝意を表する。

力学的 - 経験的舗装設計指針

- 生まれ変わったAASHTO舗装設計指針 -

土木学会舗装工学委員会舗装設計小委員会

第1章 序論

1.1 背景

経験的舗装設計法の代表であるAASHTO Pavement Design Guide (DG) は、1950年代に実施された大規模なAASHTO道路試験結果に基づいたもので、信頼性および供用性指数といった概念を導入した画期的な設計法であった。この設計法は、アメリカ合衆国の80%以上の州で採用されているばかりでなく、わが国や世界の舗装設計法にも大きな影響を及ぼしている。しかしながら、限られた条件下の試験結果に基づいて外挿によって求められた設計式は、近年の交通事情にはそぐわないこと、新しい舗装材料に対応できないことなどが問題となっていた。そこでAASHTOは、1998年に産学官の共同作業チームを結成し、DGの大幅改定作業に着手した。以来7年、北米の優秀な人材と莫大な資金を投じて実施された改訂作業の結果、2004年にMechanistic-Empirical Pavement Design Guide (以下、M-E pdg) として公開された。経験的設計法から力学的設計法に大幅にシフトしたその内容は先進的であり、再びアメリカ合衆国のみならず、世界の舗装技術に大きな影響を及ぼすことは間違いない。

1.2 特徴

M-E pdgで新しくなったのは、以下のような点である。

- ① AASHTO道路試験に基づいた経験的設計法から、理論解析による挙動モデルをLTPPでキャリブレーションし、それに基づいた力学的経験的設計法にシフトしたこと。
- ② 多層弾性解析やFEM解析などの構造解析と逐次的破損予測を組み合わせたこと。
- ③ 入力データの信頼度を考慮した階層入力という考え方を導入したこと。
- ④ 等価換算軸数の考え方を放棄し、軸重分布や走行位置分布を直接考慮するようにしたこと。
- ⑤ 気象条件から設計に必要な入力条件を準備する統合気象予測モデルとして整備したこと。

- ⑥ 気象、交通、材料条件の詳細なデータベースをバンドルし、破損予測を行うためのソフトウェアとして配布されていること。

設計の流れを図-1に示す。第1段階では、地盤、気象、交通条件から破損予測に必要な諸量を求めるとともに、舗装断面(設計案)を仮定する。また信頼性もここで決定する。第2段階では、舗装断面の設計条件のもとでのパフォーマンスを予測し、照査する。第3段階では、LCC解析や施工条件などの技術的検討によって、最適断面を決定する。

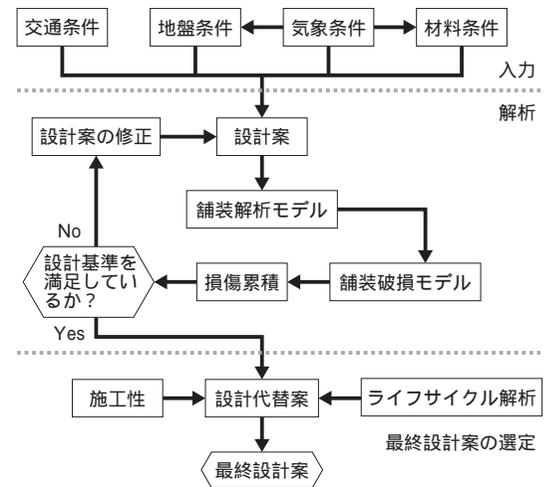


図-1 設計の流れ

この設計法の要は、舗装のパフォーマンス予測を、構造解析に基づいた破損モデルによって行っている点であり、力学的設計法にシフトしたといわれる所以である。破損モデルは、設計期間における舗装の力学的な応答を時系列で求め、その結果に基づいて舗装の破損を予測していく。このような解析法を逐次的破損損傷解析(Incremental Distress & Damage Accumulation)と呼んでいる。このために気象条件から解析に必要な舗装体内の温度、湿度、材料特性の逐次的な変化を求めるソフトウェアを開発した。

破損予測モデルの信頼性については、長期観測舗装区間Long Term Pavement Performance (LTTP)などの現場データに基づいてキャリブレーションによって検証すると同時に、他のいろいろな条件にも対応できるような柔軟性も確保した。この部分に経験的設計法の考え方が残っている。このようなことからDGは、力学的経験的設計法 (Mechanistic Empirical Method : M-E) と呼ばれている。

1.3 設計条件の評価

1.3.1 階層入力

設計に必要な条件を入力する際に、階層入力という考え方が導入された。すなわち、計画の重要度に応じて設計入力を3つのレベルに分類する：

- ①レベル1：最も高い精度、すなわち最も低い誤差を伴う入力である。このレベルは、早期破損が重大な結果をもたらすような重交通で重要な道路に適用される。入力データは、室内試験や現場での試験の結果に基づく。このレベルでの入力データを得るためには多くの時間と費用を必要とする。
- ②レベル2：中程度の精度、すなわち中程度の誤差を伴う入力であり、従来のDGにおける典型的な入力値に相当する。レベル1の入力値を得るための時間や予算に余裕がない場合に適用する。入力値は、DGの中で用意されているデータベースに基づいて決定する。
- ③レベル3：もっとも低い精度の入力値となる。このレベルは、早期破損がそれほど深刻な結果をもたらさない道路舗装に適用される。その地域の平均的な値あるいは、アメリカ合衆国全体の平均値である既定値を用いる。

1.3.2 荷重条件

M-E pdgは、等価換算軸数の考え方を放棄した。そのかわりに、交通荷重条件としてFHWAの車種分類に基づき、それらの軸重分布、走行速度、走行位置分布などを非常に詳細に入力することが必要である。レベル1では、これらのデータをWIMによって求めるとしているが、一方でレベル3入力の既定値のためのデータベースが装備されている。

1.3.3 気象条件

舗装の応答は、温度や湿度あるいは水分量、地下水位などによって変化する。このような変化を推測するために、M-E pdgでは、舗装体内温度、湿度を時間単位で予測し、それらの変化による舗装材料の特性値の変化まで推測するモデルを開発した。統合気象モデル

(Enhanced Integrated Climate Model : EICM) と呼ばれるこのモデルでは、現場の位置情報から気象データベースを使ってその地点の気象を予測し、舗装の設計期間中における舗装構造あるいは路床内での温度と水分の変化を、気象データから時間単位で予測することができる。

1.3.4 材料条件

設計に必要な材料条件に関する入力としては、以下のようなものが必要である。

- ①舗装の構造応答の計算に必要な材料特性
- ②破損・遷移作用に対する付加的材料の入力
- ③気候条件モデルに必要とされる付加的材料の入力

舗装の応答を予測する構造解析に必要な材料特性については、SHRP (Strategic Highway Research Project) 計画などの最新の材料研究の成果に基づいている。たとえば、アスファルト混合物の温度・荷重速度依存性を表現するために、アスファルト混合物の複素弾性係数のマスターカーブを用いる。また、粒状材料については、拘束圧による非線形性を考慮したレジリエント係数値を採用している。

1.4 パフォーマンス予測と照査

1.4.1 舗装のパフォーマンス

M-E pdgが対象とする舗装のパフォーマンスは、アスファルト舗装においては、わだち掘れ、疲労ひび割れ (底面および表面)、低温ひび割れ、コンクリート舗装においては、疲労ひび割れ (底面および表面)、目地段差、角かけ、パンチアウトである。また、すべての舗装において供用性の指標としてIRIが採用されている。これらの破損形態および供用性の、設計期間にわたる時間的な変化を予測する。設計期間にわたる交通量変動やEICMモデルによって予測された気象の変動、それに伴う舗装材料特性の変化を、時系列で逐次予測していく。その結果、図-2に示すような破損の経時変化すなわちパフォーマンスカーブが得られる。

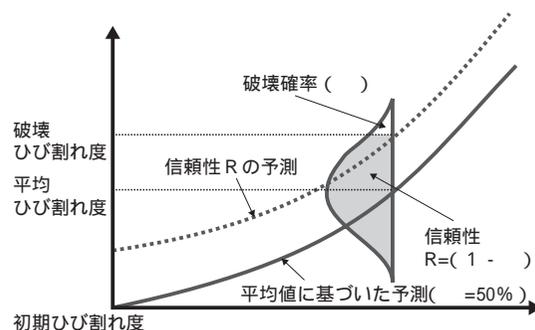


図-2 ひび割れ予測曲線

さらにこのパフォーマンスカーブは、図 - 3 に示すように与えられた信頼性に対応したものが出力される。

1.4.2 キャリブレーション

構造解析によって得られる舗装の力学的な応答と舗装の破損指標の関係をキャリブレーションによって求め、その結果に基づいてパフォーマンス予測モデルが開発された。たとえば疲労ひび割れの場合、疲労解析によって計算される疲労度と舗装のひび割れ度の関係を、LTPPなどのデータから求めている。その結果の1部が図 - 4 である。また、わだち掘れ予測式もキャリブレーションされている(図 - 5)。このようなキャリブレーションによって、解析結果と現場の状況を対応づけるとともに、モデル自体の精度を知ることができる。このような過程を踏むことで信頼性ごとのパフォーマンスカーブの予測が可能になるのである。

1.5 全体の構成

M-E pdglはソフトウェアとして供給される。ソフトウェアを起動すると図 - 6 のような画面が現れる。交通、気象、構造、材料に関する多くの入力項目に適切

な値をインプットする。そのあと計算を実行すると、設計条件の下で、想定した舗装断面のパフォーマンス曲線が出力され、設計基準を満足するかどうかの判定を行う。基本的にこのソフトウェアは、舗装のパフォーマンス予測を行うものであり、最適断面の決定はユーザに委ねられている。

このソフトウェアのヘルプとして、1,000ページ以上に及ぶ膨大な文書が付属している。その構成は以下のとおりである。ソフトウェアを使いこなして実際の設計を行うためには、これらの文書を理解することが必要である。さらに、ソフトウェアには付属していないが、さまざまなバックデータが付録として公開されている。これらは、この設計法の改訂のための基礎資料となる。

第1編 Introduction

第1章 Background, Scope, and overview

第2編 Design Input

第1章 Subgrade/Foundation Design Inputs

第2章 Material Characterization

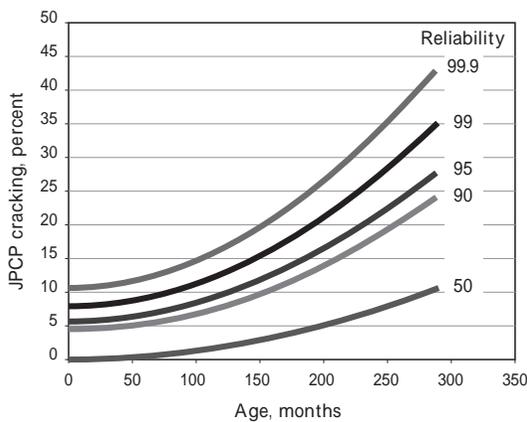


図 - 3 信頼性に基づいたひび割れ予測

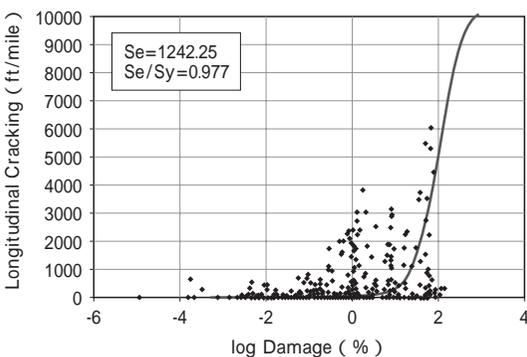
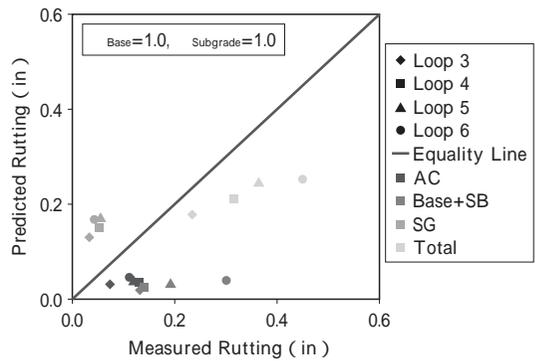
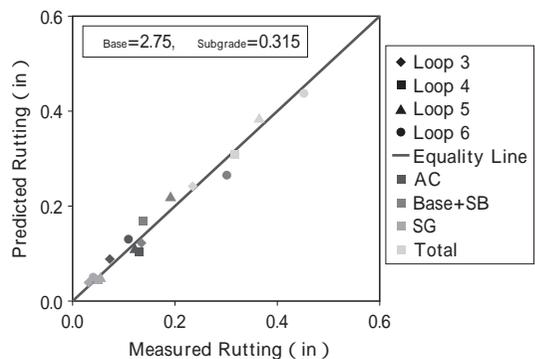


図 - 4 疲労度とひび割れ率



(a) キャリブレーション前



(b) キャリブレーション後

図 - 5 わだち掘れ予測式のキャリブレーション

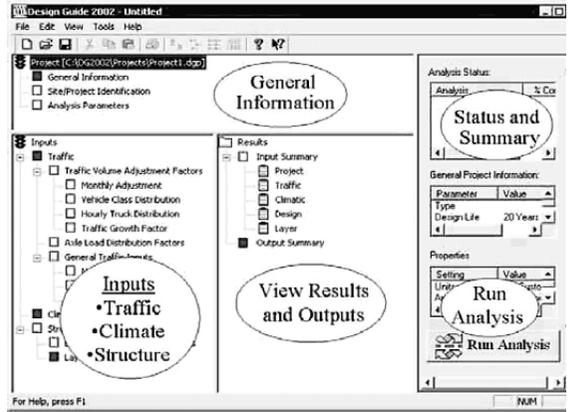
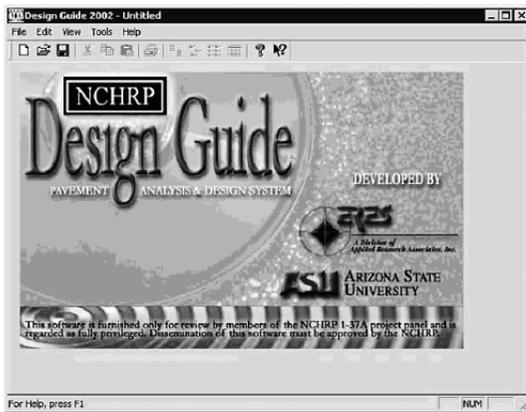


図 - 6 起動画面と入力画面

- 第 3 章 Environmental Effects
- 第 4 章 Traffic
- 第 5 章 Evaluation of Existing Pavements for Rehabilitation
- 第 3 編 Design Analysis
 - 第 1 章 Drainage
 - 第 2 章 Shoulders
 - 第 3 章 Design of New and Reconstructed Flexible Pavement
 - 第 4 章 Design of New and Reconstructed Rigid Pavements
 - 第 5 章 Rehabilitation Strategies
 - 第 6 章 AC Rehabilitation
 - 第 7 章 PCC Rehabilitation Design
- 第 4 編 Low Volume Roads
 - 第 1 章 Low Volume Road Design
- 付録
 - 付録A Glossary of Terms
 - 付録B Pavement Strategy Selection
 - 付録C Life Cycle Cost Analysis Guidelines
 - 付録D User's Guide
 - Design Guide Software and Design Examples

1.6 まとめ

M-E pdgはアメリカ合衆国の舗装研究の集大成である。DGは経験的設計法として優れたものであったが、それに満足することなく理想的設計法を追求し実現していく姿勢と、それを支える制度は見習うべきである。DGの改訂作業の中で多くの若い研究者が育ち、優れた舗装技術が次世代へ継承されていく。このことが設計法を策定していく最大の意義といえる。

第 2 章 路床、地盤

本章では新しい舗装の設計に対し、路床あるいは地盤の設計パラメータを決定するための手順とガイドラインを提供しており、舗装地盤の特性化、地盤調査、室内試験、地盤改良と強度増加の 4 つから構成されている。

2.1 舗装地盤の特性化

設計の手順として、既設舗装に適用するのか新設舗装に適用するのかに関わらず、地盤や路床は何らかの形で特性化される。特性化とは、舗装の設計に必要な層弾性係数（レジリエント係数あるいはヤング係数の近似値）を求めるプロセスのことを言う。特性化するための基本的な入力データは、アスファルト舗装でもコンクリート舗装でも同じである。既定値を使ってもよいが、その場合設計コストは小さくなるかわりに舗装構造の過大設計のリスクは増える。

路床あるいは地盤を特性化するために以下の手段がある。

- ①乱されない試料もしくは、再構成された試料での室内試験
- ②類似の路床材料を持つ既存舗装の非破壊試験
- ③コーン貫入試験
- ④これまでの経験

弾性係数を得るために以下のような基本的な手法がある。

- ①繰返しレジリエント係数試験。AASHTO T307 「路床 / 路盤材料のレジリエント係数」
- ②NDTデータの解析あるいは逆解析。ASTM D4694 「重錐落下衝撃荷重装置によるたわみ」および D4695 「一般的な舗装面たわみ測定」、ASTM D5858 「多層弾性理論を使った舗装材料の弾性係

数を計算するためのガイド」

③他の材料物理量との相関関係

2.2 路床土の室内試験

使用される土あるいは地盤の土の代表試料で行われる室内試験プログラムの範囲は、設計の重要性あるいは土の状態によって異なる。舗装の設計に必要な室内試験および解析が表 - 1 に示されている。

表 - 1 舗装設計のための最低限必要な室内試験

室内試験の種類	深い切土	高い盛土	現地盤
水分量および乾燥密度	✓		✓
アッターベルグ限界	✓	✓	✓
粒度分布		✓	✓
膨張・伸縮量	✓		✓
透水性	✓		
圧密		✓	
せん断および圧縮強度	✓	✓	✓
レジリエント係数	✓	✓	✓

2.2.1 室内試験の種類

(1) 分類試験

主な地盤の土を分類するために、最低限以下の試験が実施される。

- ①AASHTO T87, 乱された土の試料調整方法
- ②AASHTO T88, ふるい分け試験
- ③AASHTO T89, 液性限界試験

(2) 収縮 - 膨張試験

路床土の膨張または収縮が問題となる場合、試験は現場で予想される繰返し荷重をできるだけ忠実に再現しなければならない。収縮による体積変化を決定するための試験は、体積あるいは線収縮係数試験である。AASHTO T92「土壌の収縮係数」、AASHTO T258「膨張性土壌の決定」が使われる。

(3) 透水性試験

舗装の地盤としては、室内透水性試験はほとんど実施されない。透水係数の値が必要なときは、地盤の代表的な供試体で試験を実施する。試験はAASHTO T215（粒状土の透水試験（定水位））に従う。

(4) 圧密試験

沈下が重要な要因であり、沈下量が相関関係から算定できないときは、地盤の代表的な供試体圧密試験を実施する。これらの試験は、AASHTO T216「土の一次元圧密特性」に従う。

(5) せん断と支持力試験

以下に、土層の強度特性を測定する用いることができる試験を示す。

①AASHTO T223, 粘性土のペーンせん断試験

②AASHTO T296, 粘性土の非圧密非排水圧縮強度のための三軸圧縮試験法

③AASHTO T297, 粘性土の圧密非排水三軸圧縮試験

現場の土壌の強度を測定するためのもう1つの試験は、動的円錐貫入試験（DCP）である。

(6) 繰返しレジリエント係数試験

舗装設計において路床土を特性化するために、各々の主要な土層について、繰返し荷重によるレジリエント係数試験が行われる。この試験は、AASHTO T307またはNCHRP 1-28A「土と粒状材料の共通試験法」の最新版に従う。供試体の状況や荷重条件は、舗装建設後の状態を反映させなければならない。

(7) 特別な試験

有機含有量と炭酸塩含有量のような、特別な土壌特性を決定しなければならないことがある。どのような試験が必要となるかは、主として必要な情報の量と種類によるので、一般的なルールはない。

2.2.2 地盤の現位置レジリエント係数の選定

現位置でのレジリエント係数を室内の繰返し三軸圧縮試験から決定するためには、水平および鉛直応力を算定し、そこに静止土圧を加算する。以下のような段階的な手順を踏む：

①静止土圧係数 k_0 を算定する。粘性土では、静止土圧係数は通常ポアソン比 μ の関数と考えられる：

$$k_0 = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad \text{式(1)}$$

非粘性土の場合、静止土圧係数は、せん断抵抗角の関数となる：

$$k_0 = 1 - \sin \quad \text{式(2)}$$

転圧された土や過圧密土の場合、静止土圧係数は上記の式で得られた値よりも大きい。

②室内試験で試験された地盤を含む仮定された舗装構造に対する厚さや弾性係数を仮定する。

③レジリエント係数を決定する地点における鉛直応力 σ_z を計算する。

$$\sigma_z = \sigma_1 + p_0 \quad \text{式(3)}$$

ここに、

σ_1 = 多層弾性理論によって計算された荷重による鉛直応力

p_0 = その上の層の自重による鉛直応力

$$p_0 = (D_0) + \sum_{i=1}^{n-1} (D_i) \quad \text{式(4)}$$

ここに、

D = 層の厚さ
= 層の密度

i = 上の層の番号。レジリエント係数を計算する層が n になる。

- ④レジリエント係数を決定する深さにおける要素の全水平応力 σ_3 を計算する。

$$\sigma_3 = \sigma_{x,y} + k\alpha(p_0) \quad \text{式(5)}$$

ここに、

$\sigma_{x,y}$ = 多層弾性理論によって計算される荷重による水平応力

- ⑤構成則を用いて全鉛直および水平応力に対するレジリエント係数を計算する。
- ⑥仮定したレジリエント係数と上の値を比較する。もし、計算された応力が室内試験で測定されたレジリエント係数の5%以内の値となれば、その値がレジリエント係数として採用される。

2.3 特殊な地盤条件の特定とその対策

良好な長期パフォーマンスを確保するためには、路床土の適切な処理が重要である。M-E pdgでは、凍上や土の膨張による縦断凹凸の対処方法ではなく、そのような問題の発生自体を最小にする方法を与える。ここでは、軟弱で圧縮性の土、膨張性の土、地下水の流れあるいは飽和した土および凍上しやすい土の問題を取り上げる。

2.3.1 圧縮性の土

破壊しやすく圧縮性の高い土は、大きな沈下や変形をもたらす、舗装に悪影響を及ぼす。現在の路床が締め固め基準を満足しない場合、以下の方法が考えられる：

- ①圧縮性の層が薄い場合、適切な含水比を持った土に置き換えて締め固める。
- ②別の適切な盛土材料で置き換える。AASHTO T180に従う。
- ③表面から動的締め固めを行う。
- ④特に飽和している場合には、水平あるいは鉛直ドレーンで排水する。
- ⑤圧縮性の土の層が厚い場合には、舗装建設の前に余盛りして圧密させ、建設時に取り去る。

2.3.2 膨張性の土

膨張性の土は季節ごとの含水比の変化によって体積変化を起こす。AASHTO T258では膨張する疑いのある土の条件が示されている。路床の水分が大きく変動する場所で膨張性の土に遭遇した場合、膨張性の土の体積変化を最小限にとどめるために以下の処置が取ら

れる：

- ①膨張性の層が薄い場合には、土の置き換えを行う。
- ②縁部の路床の水分の消失を防ぐために、舗装の幅を広くする。
- ③膨張性の路床粘土の上の部分をかきほぐして安定処理し、再転圧する。
- ④過圧密の土を切り出す場合、表面下の土を完全に取り除き、舗装を建設する前に膨張させる。
- ⑤そのままにしておく場合には、最適含水比以上で締め固める。

2.3.3 表面下の水

粒状路盤や路床へ水が浸入すると、それらの強度やレジリエント係数は低下する。水分の流れの季節変動は、膨張性の土の体積変化を引き起こす。切土の部分では地下水が特に重要である。飽和した土や表面下の水に遭遇した場合、地盤や路床の特性を改善するために以下の処置が取られる：

- ①表面付近の場合、締め固め技術を用いて、水分の多い土を強化する。
- ②土の置き換えを行う。
- ③適当な土によって盛土して路床の高さを上げる。
- ④以下の条件があれば、ドレーンを使う：
 - ・地下水面が高い。
 - ・細粒分が多く、シルト質の土で、飽和すると軟化する。
 - ・切土すると、下の層から水がにじみ出る。

2.3.4 凍上性の土

凍上現象は、縦断凹凸、ひび割れ、水の滞留、支持力の低下をもたらす。凍上を起こしやすい土に遭遇した場合、改善するために以下の処置が考えられる：

- ①基本的に凍上を起こしにくい土（F3とF4のグループ）で置き換える。
- ②路床条件の突然の変化を無くするために、凍上のしやすい孤立している部分を排除する。
- ③凍上しやすい土のグループF1、F2およびF3に対しては、融解期の路床強度の減少を考慮して舗装構造を強化しておく。
- ④次の3つのプロセスの1つによって土の細粒分の影響を排除して安定化する。1)セメントのようなもので物理的・化学的な方法で固定化させる。2)水分移動をブロックして、凍結面への水分の量を減らす。3)土の水分の凍結点を変える。

2.4 路床改良および強化

問題のある路床の適切な処置は、舗装全体の良好な

長期的パフォーマンスを確保するために非常に重要である。路床上面の土の組成、含水比および密度の均一にすることが重要である。路床の改良あるいは強化には、安定処理、厚い粒状路盤、排水、不織布およびカプセル化などの方法がある。

2.4.1 安定処理

安定処理は以下の2つの理由で実施される：

- ①軟弱土を乾燥させ締め固めを容易にするための建設足場とする。安定処理された土は舗装の設計において構造層とはみなされない。土の改良とも呼ばれる。
- ②軟弱土の強化や塑性や圧縮性の高い土の体積変化を防ぐ。この場合、安定処理された土は、設計において路床の強化としてみなされる。

安定処理には、石灰、セメントおよびアスファルトが使われる。粘性土の改良には、液体の石灰が広く使用されている。安定処理によって土の強度は増加するので、これによって路床土のレジリエント係数が高くなり、舗装厚を薄くできる。

2.4.2 厚い粒状層

厚い粒状路盤とは、18インチ以上の厚さを持つ路盤のことである。厚い粒状路盤には、荷重支持力の増加、凍上対策、排水の改善などいくつかの利点がある。粒状材料の強度やスティフネスは、CBRやレジリエント係数で評価される。

2.4.3 表面下排水

路床強化における表面下排水の役割は、次の3つである：

- ①地下水面の高さを低くする。
- ②舗装の下の横方向の水の流れを断ち切る。
- ③舗装表面から進入する水を排除する。

2.4.4 不織布

不織布は土の条件を改良する地盤材料の一種である。

これらは工場で製作されたポリエチレン材料で、人工物の一部として土あるいは舗装と接する（ASTM D 4439）。最も一般的な使用法は、盛土や地盤の強化、水の流れの遮断、排水の改良などである。不織布には、ジオテキスタイル、ジオグリッド、ジオメンブレンなどがある。これらを組み合わせて、ジオコンポジットとして使用することがある。

2.4.5 土のカプセル化

膜材料による土のカプセル化（MESL）は、不透水の膜で土を覆うことによって土の水分量を最適なレベルに保つ方法である。設計期間にわたって、最適含水比におけるレジリエント係数が保たれる。道路の維持管理や他の施設の設置で掘り返すような場合にはこの方法を使えない。

第3章 材料

本章では、M-E pdgが必要とされている材料特性について記述している。そこにはSHRPにおける材料研究の最新の成果が反映されている。その内容は先進的かつ詳細であり、舗装関係者にとってはM-E pdgの中で最も興味深い部分である。ここでは、材料特性の考え方や枠組みを簡単に述べ、アスファルト材料の部分についてはやや詳しく述べる。

3.1 材料入力枠組み

材料特性の入力と本設計の他部分との相互関係は図-7に示すとおりで、材料特性モデル、気候条件モデル、交通条件モデル、構造モデル、および供用性予測の各部分における相互関係が表されている。M-E pdgに必要となる材料特性に関する入力は、以下のサブカテゴリーに分類される。

- ①舗装の構造応答の計算に必要な材料特性
- ②破損・損傷過程に関連する付加的材料の入力
- ③気候条件モデルに必要とされる付加的材料の入力

第1カテゴリーは、輪荷重が作用したときに舗装内部の応力、ひずみ、変位の状況を推定するために必要となる材料特性である。第2のカテゴリーは、破損や平坦性のモデルに直接取り込まれる材料に関するすべての入力である。第3のカテゴリーは、舗装断面の温度と含水の状況を定めるための気候モデルに取り込む材料関係の入力である。

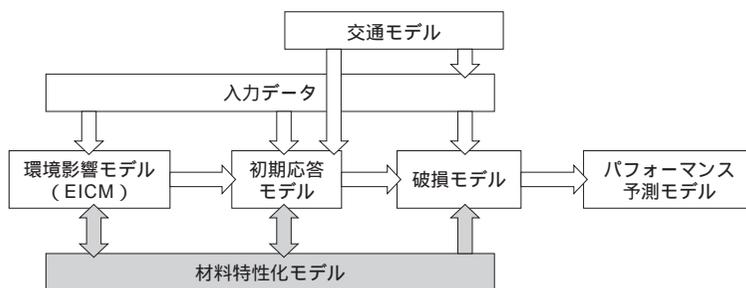


図-7 材料特性モデルとM-E pdgにおける位置づけ

3.1.1 考慮すべき材料因子

表 - 2. 主要材料の区分

(1) 時間依存性

多くの材料特性には時間に依存した変動があるので、M-E pdgでこのような変動を考慮することは重要である。一般的に、舗装材料の特性は化学的および物理的作用、気候の影響によって時間的に絶えず変化しているため、これらを設計で考慮しなければならない。

(2) 時間・温度の影響

アスファルト材料は温度と載荷速度に非常に敏感である。アスファルトは粘弾性 - 塑性材料であるため、高温あるいは長時間載荷（例えば車両の低速走行）においては、アスファルト混合物のスティフネス（弾性係数）は粒状材料のそれに近くなる。これとは逆に、低温あるいは高速載荷では、アスファルト混合物は弾性に近くなり、スティフネスはPCCの値と同程度になる。M-E pdgでは、時間・温度換算則に基づくアスファルトのマスターカーブを使って、この

ような設計期間に予想される温度や車両速度のアスファルト混合物の性状に及ぼす影響を考慮している。

(3) 非線形挙動

弾性係数の値が材料の応力状態に依存している場合は、そのような非線形性を考慮する。多くの材料は応力レベルがかなり高くなるとこのような挙動を呈するが、M-E pdgでは粒状路盤材と路床材料だけは応力状態にかかわらず非線形材料と考えている。入力階層構造になっているので、設計法ではこの影響を考慮して最高レベルのM-E解析を行っている。舗装の粒状材料に対して非線形スティフネスを使用する非線形解析が求められる場合、アスファルト舗装の応答（応力、ひずみ、変位の値）計算には有限要素法を用いる必要がある。アスファルト舗装の粒状材料に非線形性を考えなくてもよい場合は、線形多層弾性解析で応答を求める。

3.1.2 材料区分

アスファルト舗装やコンクリート舗装では、種々の種類と品質の材料が組み合わせられて使われる。M-E解析と舗装構造の評価に必要な特性に基づいて、本設計ガイドに適用できるような材料の分類法が開発された。この分類法は表 - 2 に示すとおりであり、アスファルト系材料、PCC材料、化学的安定処理材料、非安定処理粒状材料、路床土、およびベドロックの6つの主要材料に区分されている。

<p>アスファルト系材料 加熱アスファルト混合物 (HMA) 密粒度 中央プラント混合 現位置リサイクル SMA 加熱アスファルト混合物 開粒度 加熱アスファルト混合物 細粒度 常温アスファルト混合物 中央プラント混合 現位置リサイクル</p> <p>PCC材料 無クラック版 クラック版 ひび割れ/シート 破碎/シート ラバー化材料</p> <p>化学的安定処理材料 セメント処理骨材 ソイルセメント 石灰セメントフライアッシュ 石灰フライアッシュ 石灰安定処理土 開粒度セメント処理骨材</p>	<p>非安定処理粒状路盤材・下層路盤材 粒状上層路盤材・下層路盤材 砂質下層路盤材 常温再生アスコン（骨材として使用） 再生骨材（かきほぐし含む） 現位置粉砕材 常温再生アスコン舗装材（加熱アスファルト混合物に上層路盤材・下層路盤材を加えたもの）</p> <p>路床土 砂利を含んだ土 (A-1; A-2) 砂質土 ゆるい砂 (A-3) 密な砂 (A-3) シルト質の砂 (A-24; A-25) 粘土質の砂 (A-26; A-27) シルト質土 (A-4; A-5) 粘土 低塑性土 (A-6) 乾燥・硬質 湿質固結 飽和・軟質 高塑性土 (A-7) 乾燥・硬質 湿質固結 飽和・軟質</p> <p>ベドロック 固結, 高密, 連続破碎, 風化したもの</p>
---	---

最も複雑な材料区分は「アスファルト系材料」である。なぜならば、これらの材料の応答や挙動は、温度、載荷時間、配合、製造方法、および損傷の程度（新規と補修後）によってかなりの影響を受けるからである。

土質系材料の主な材料特性であるスティフネスは、応力状態（非線形性）と現場の含水比に多大な影響を受ける。一般的に、粒径の大きい材料は拘束圧が高くなるとスティフネスも大きくなる。これとは対照的に、粘土質材料では偏差応力や八面体応力が増加するとスティフネスが減少する傾向にある。土質系材料のどちらの区分も応力に依存（非線形性）しているが、応力レベルが高くなるとそれぞれ逆の挙動を呈する。

永久変形（繰返しせん断変位）は、比較的弱い材料の層や保護されていない層において重要である。この区分の材料は高い非線形性を呈することから、現時点の最新逆解析手法では室内試験で得られるような非線形定数を現位置で正確に推定することができない。したがって、実際の荷重が設計のM-E解析時のものと比較してどうなのかを確認するために、NDT調査においては細心の注意を払う必要がある。

ベドロックの区分も重要である。舗装の近くに存在している場合、正しい応力、ひずみ、変位を推定するために、設計者はその大きなスティフネスの影響を考慮しておく必要がある。特に、逆解析が修繕の解析に用いられる場合には重要である。

3.1.3 階層的入力手法の概念

本設計ガイドにおける材料入力値の選定・決定手順には、階層的（レベル）概念が導入されている。簡単で最も実用的な階層的入力概念は、舗装設計に払われる工学的努力がそのプロジェクトの相対的な重要性、規模、コストと調和しているべきである、という考え方に基づいている。レベル1は、現在最も実用的な作業であり、すなわち包括的な室内試験あるいは現場試験が含まれている。これとは対照的に、レベル3ではわずかな試験あるいは全く試験なしで経験に基づいて最も妥当な入力値を推定することを設計者に求めている。レベル2の入力では、室内あるいは現場で測定した別の材料特性からその相関関係によって入力値を推定している。

3.2 アスファルト系材料の入力値

アスファルト系材料の区分についての議論は以下の分類に落ち着いた（表 - 2 参照）。これらの材料は舗装の表層、上層路盤、下層路盤に使用される。

- ①加熱アスファルト混合物 - 密粒度
 - ・中央プラント混合
 - ・現位置リサイクル
- ②加熱アスファルト混合物 - 開粒度
- ③加熱アスファルト混合物 - 細粒度
- ④再生アスファルト混合物
- ⑤再生加熱混合物（中央プラント混合）
- ⑥再生常温混合物（中央プラント混合あるいは粒度調整）

3.2.1 新設あるいは打換え設計への層スティフネス

アスファルト系材料のスティフネスは、時間 - 温度に依存する動的弾性係数（ E^* ）で表される。新規および補修設計の E^* を得るための、各種の階層の入力レベルに対するその概要を表 - 3 に示す。

(1) 動的弾性係数推定の概要

アスファルト混合物のスティフネスは、温度、載荷速度、経過時間、およびバインダースティフネス、骨材配合、バインダー量、空隙率などの材料特性の関数であることが知られている。温度と載荷速度の影響を考慮するために、すべての解析レベルでのアスファルト混合物のスティフネスは、標準温度が70°F [19] のマスターカーブから決定する。

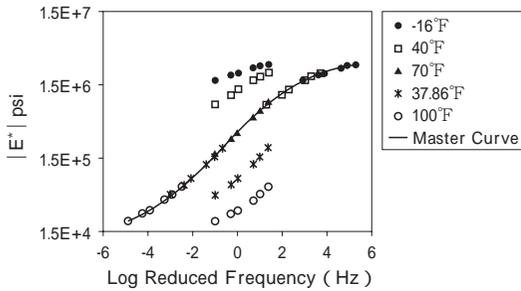
(2) マスターカーブとシフトファクター

マスターカーブは時間 - 温度換算則に基づいて作成される。まず基準とする標準温度を選定し（ここでは70°F [19] ）、それから種々のデータを時間軸について移動して一本の滑らかな曲線を得る。このように時間に基づいて作成したスティフネスのマスターカーブは、材料の時間依存性を表現している。マスターカーブ作成のための各温度のシフト量は、その材料の温度依存性を表現している。したがって、載荷速度と温度の影響を完全に表現するためにはマスターカーブとシフトファクターの両方が必要とされる。このような作業で作成されたマスターカーブの一例とそのときのシフトファクターを図 - 8 に示す。

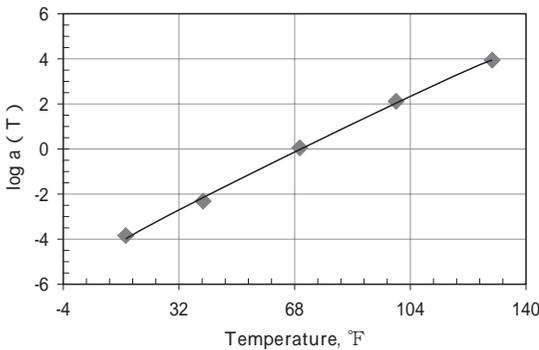
表 - 3 各階層の入力レベルにおける新設および補修設計のアスファルト動的弾性係数

材料区分	レベル	動的弾性係数を得る手順
アスファルト系材料	1	その混合物に適する載荷周波数、温度で E^* （動的弾性係数）の室内試験を実施する（NCHRP 1-28A）。推奨バインダー（AASHTO T315）に対して、ある温度域、 $\omega = 1.59\text{Hz}$ （10rag/s）で複素せん断スティフネス（ G^* ）および位相角（ δ ）試験を実施する。 バインダーの試験データから、混合・締固め温度に対する $A - VTSi$ を推定する。 エージングを含め、その時間 - 温度依存性を正しく表すアスコンのマスターカーブを作成する。
	2	E^* の室内試験は不要。 E^* の予測式を使用する。 推奨バインダー（AASHTO T315）に対して、ある温度域、 $\omega = 1.59\text{Hz}$ （10rag/s）で G^* - 試験を実施する。 軟化点、絶対粘度および動粘度、あるいはブルックフィールド粘度計などの通常のアスファルト試験データからそのバインダーの粘度かスティフネスを推定する。 混合・締固め温度に対する $A_i - VTSi$ を推定する。 エージングを含め、その時間 - 温度依存性を正しく表すアスコンのマスターカーブを作成する。
	3	E^* の室内試験は不要。 E^* の予測式を使用する。 バインダーのPG、粘度、あるいは針入度に基づく本設計ガイドのソフトが提供している、一般的な $A_i - VTSi$ 値を使用する。 エージングを含め、その時間 - 温度依存性を正しく表すアスコンのマスターカーブを作成する。

Reference Temperature 70°F



(a) マスターカーブ



(b) シフトファクター

図 - 8 マスターカーブとシフトファクターの概要

動的弾性係数のマスターカーブは下記の式(6)のS字関数で表される。

$$\log(E^*) = \frac{E_{max}}{1 + e^{-k(\log t - \log t_r)}} \quad \text{式(6)}$$

ここに、

E^* : 動的弾性係数

t_r : 標準温度時の載荷時間

k : 係数；与えられたデータに対して、 k は E^* の最小値を、 E_{max} は E^* の最大値を表す。

$\log t$: S字関数の形状を表すパラメータ

係数 k は骨材粒度、バインダー量、空隙率に依存している。係数 E_{max} はアスファルトバインダーの性状と k の値によって決まる。S字関数が標準温度におけるスティフネスの時間依存性を表し、シフトファクターがスティフネスの時間依存性を表している。一般的シフトファクターは式(7)で表される。

$$t_r = \frac{t}{a(T)} \quad \text{式(7)a}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[a(T)] \quad \text{式(7)b}$$

ここに、

t_r : 標準温度での載荷時間

t : 所与の温度での載荷時間

$a(T)$: 時間関数のシフトファクター

T : 所与の温度

したがって、任意の温度の、任意の載荷時間より式(7)を用いて、標準温度での載荷時間が計算される。そして、この標準温度での載荷時間を式(6)に代入して、適切なスティフネスが求められる。

マスターカーブとそれに付随するシフトファクターは、NCHRP 1-28Aの動的弾性係数試験がAASHTO T320のせん断試験「Determining Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Test (SST)」のどちらかによる試験結果をシフトすることにより求められる。この方法はレベル1の解析で用いられる。式(6)と式(7)、および実試験データを使用して非線形最適化が必要となる。レベル2とレベル3の解析では、式(8)に示す推定式からマスターカーブが直接得られる。材料の規格あるいは混合物の Volumetric Design等の情報からこの式を用いて、ある温度、載荷速度、エージング状態におけるアスコンの動的弾性係数を推定することができる。

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932 \left(\frac{V_{b,eff}}{V_{b,eff} + V_a} \right) - 0.002841 V_a - 0.058097 V_a - 0.802208 \left(\frac{V_{b,eff}}{V_{b,eff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 V_a + 0.003958 V_a - 0.000017 V_a + 0.005470 V_a}{1 + e^{-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(V_{b,eff})}} \quad \text{式(8)}$$

ここに、

E^* : 動的弾性係数, psi

V_a : バインダー粘度, 10^6 Poise

f : 載荷周波数, Hz

V_a : 空隙率, %

$V_{b,eff}$: 有効バインダー量, 体積%

$_{34}$: 3/4インチ [19.0mm] ふるい残留質量%

$_{38}$: 3/8インチ [9.5mm] ふるい残留質量%

$_4$: No. 4 [4.75mm] ふるい残留質量%

$_{200}$: No.200 [0.075mm] ふるい通過質量%

式(8)は式(6)のS字関数で表すこともできる。式(9)は、式(8)の動的弾性係数を式(6)のマスターカーブの形で書き直したものである。

$$\log(E^*) = \frac{E_{max}}{1 + e^{-k(\log t - \log t_r)}} \quad \text{式(9)}$$

ここに、

E^* : 動的弾性係数

t_r : 標準温度時の載荷時間

: E^* の最小値

+ : E^* の最大値

, : S字関数の形状を表すパラメータ

式(8)と式(9)から以下の関係が導出される。

$$\begin{aligned}
 &= 3.750063 + 0.02932 \cdot 200 - 0.001767 \cdot (200)^2 \\
 &\quad - 0.002841 \cdot t_r - 0.058097 V_a - 0.802208 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \\
 &= 3.871977 - 0.0021 \cdot t_r + 0.003958 \cdot 38 - 0.000017 \cdot 38^2 \\
 &\quad + 0.005470 \cdot 34 \\
 &= -6.03313 - .393532 \log(t_r) \\
 \log(t_r) &= \log(t) - c(\log(t_r) - \log(t_r)) \\
 &= 0.313351 \\
 c &= 1.255882 \tag{式10}
 \end{aligned}$$

(3) バインダー粘度

所定の温度におけるアスファルトバインダーの粘度は、上記の動的弾性係数式やソフトファクターにおいて重要な入力パラメータである。劣化していない所与の温度におけるバインダー粘度は、式(11)に示すASTMの粘度温度関係から求められる。

$$\log \log \eta = A + VTS \log TR \tag{式11}$$

ここに、

η : 粘度, cP

TR : 温度 (単位は蘭氏)

A : 回帰式の切片

VTS : 回帰式の傾き

階層的入力のレベル1においては、式(11)中のAとVTSはAASHTO T315の「Determining the Rheological of Asphalt Binder Using Dynamic Shear Rheometer (DSR)」に基づいて実施した動的せん断粘度計試験のデータから推定できる。また一方で、全ての入力レベルにおいて、AとVTSは粘度を含む、軟化点、針入度などの一連の既往バインダー試験から得ることができる。

(4) エージングの影響

動的弾性係数に及ぼすエージングの影響は、総合エージングシステムを使うことによって考慮している。このシステムは、長期供用による老化と同じように、混合、締固めの際に生じる粘度の変化をスティフネスで表現する。総合エージングシステムは次の4つのモデルで構成されている。

①オリジナル混合、敷均しモデル

②表面エージングモデル

③空隙調整モデル

④粘度 - 深さモデル

オリジナル混合、敷均しモデルは、混合および締固め時の短期エージングを表現する。次に、表面エージングモデルは、混合、敷均し時の粘度を使用してある期間の舗装表面におけるバインダー粘度を推定する。そして、必要ならば、表面エージングモデルによる表面粘度は、空隙率調整モデルを使って調整される。最後に、深さに基づく粘度が粘度 - 深さモデルによって決定される。総合エージングシステムの出力は、その舗装における任意時間、任意深さのバインダー粘度の推定値である。総合エージングシステムはM-E pdgのソフトウェアの主要部分である。

短期エージングに対する総合エージングシステムは式(12)で表される。式中のcode値は、混合、敷均し粘度 (RTFO) の二重対数とオリジナル粘度の二重対数の比をとった硬化率 (HR) と関連がある。表 - 4 にcodeの推奨値をまとめる。

$$\begin{aligned}
 \log \log(\eta_{t=0}) &= a_0 + a_1 \log \log(\eta_{orig}) \\
 a_0 &= 0.054405 + 0.004085 \times \text{code} \\
 a_1 &= 0.972035 + 0.010886 \times \text{code}
 \end{aligned} \tag{式12}$$

ここに、

$\eta_{t=0}$: 粘度, cP

η_{orig} : オリジナル粘度, cP

code : 硬化率 (標準が0)

表 - 4 codeの推奨値

混合、敷均しの硬化抵抗性	硬化率の予想値	code値
良	HR < 1.030	- 1
標準	1.030 < HR < 1.075	0
悪	1.075 < HR < 1.100	1
かなり悪い	HR > 1.100	2

表面の状態による供用中粘度のエージングモデルは式(13)で表される。このモデルは双曲線関数で表され、環境の影響を長期エージングで考慮している。すなわち、パラメータA中の平均年間気温で環境条件を考慮している。

$$\log \log(\eta_{aged}) = \frac{\log \log(\eta_{t=0}) + At}{1 + Bt} \tag{式13}$$

ここに、

$$A = -0.00416 + 1.41213(C) + (C) \log(Maat)$$

$$+ (D) \log \log(\eta_{t=0})$$

$$B = 0.197725 + 0.0683841 \log(C)$$

$$C = 10^{(274.4946 - 193.831 \log(T_r) + 33.9366 \log(T_r))}$$

$$D = -14.5521 + 10.47662 \log(T_r) - 1.88161 \log(T_r)$$

a_{aged} : 老化後の粘度, cP

$t_{=0}$: 混合, 敷均し時粘度, cP

$Maat$: 平均年間気温, °F

T_r : 温度 (単位は蘭氏)

t : 時間, 月

空隙調整ファクターは, 表面エージングモデルの粘度に対して空隙の影響を考慮する。式(14)は老化粘度に空隙を考慮するものである。空隙調整ファクター F_v は, 式(15)で与えられるある時間の空隙率から求められる。そして, ある時間の空隙率は式(16)を使って初期空隙率から推定される。

$$\log \log(a_{aged}) = F_v \log \log(a_{aged}) \quad \text{式(14)}$$

$$F_v = \frac{1 + 1.0367 \times 10^{-4} (VA) t}{1 + 6.1798 \times 10^{-4} (t)} \quad \text{式(15)}$$

$$VA = \frac{VA_{orig} + 0.011(t) - 2}{1 + 4.24 \times 10^{-4} (t) Maat + 1.169 \times 10^{-3} \left(\frac{t}{orig\ 77} \right)} + 2 \quad \text{式(16)}$$

ここに,

VA_{orig} : 初期空隙率

t : 時間, 月

$Maat$: 平均年間気温, °F

$orig$: 温度77°F [25 °C] のオリジナル粘度, MPoise

最終的に, 深さモデルが, 表面エージングモデルおよび混合, 敷均し時粘度による老化粘度と深さで表される。この粘度と深さの関係は式(17)ようになる。

$$t_z = \frac{t(4 + E) - E(t_{=0}) (1 - 4z)}{4(1 + Ez)} \quad \text{式(17)}$$

ここに,

t_z : 時間 t で深さ z の老化粘度, MPoise

t : 表面の老化粘度, MPoise

z : 深さ, インチ

$$E = 23.83e^{(-0.0308 Maat)}$$

$Maat$: 平均年間気温, °F

マスターカーブとシフトファクターのところでは, 温度とエージングの影響を考慮したシフトファクターを得るために, 式(9) (log trの項) に老化粘度が使われる。これらのシフトファクターとマスターカーブをオリジナル混合物に使用することにより, 任意の深さ, エージング, 温度, 載荷速度の動的弾性係数が求められる。

3.3 その他の材料

ここまでのアスファルト材料についての記述でわかるように, M-E pdgに必要なアスファルト材料のスティフネスの値を具体的に決定する方法が示されている。その中で一貫しているのは, 構造解析に必要な材料の力学的特性を, 仮定した材料モデルの構成則に従っていかに定量化するかという命題である。基本的には室内試験によって必要なパラメータを求めなければならないが, それができないときのために, これまでの研究成果に基づいた値の与え方も示されている。アスファルト材料に特徴的な, 温度時間依存性, 老化などの影響も定量的に示されている。特に, 配合からアスファルト混合物のスティフネスを評価する式は非常に有用である。このような式を開発するためには多くの実験が計画的に行われたことは容易に想像できる。舗装の設計においては材料を的確に特性化することが重要であり, それには材料実験の積み重ねが必要であることを再認識させられる。これ以降では, それぞれの入力レベルに応じたアスファルト材料に関する具体的な値の入力方法が詳細に述べられている。

これと同様の内容が, コンクリート材料および粒状材料さらには土質材料についても記述されている。記載内容の密度の濃さと詳細さには驚くばかりである。

第4章 環境の影響

環境的な条件はアスファルトおよびコンクリートの両方の舗装のパフォーマンスに著しく影響する。外的な要因には, 降水量, 気温, 凍結融解のサイクルおよび地下水位がある。一方, 内的要因としては, 舗装材料の水分や凍結融解によるダメージの受けやすさ, 舗装の排水性能, 内部への水の浸透しやすさがあり, 外的要因と互いに影響し合う。

第1章でも述べたとおり, M-E pdgにおいては, 気象条件から設計に必要な入力条件を準備する統合気象予測モデルを開発するとともに, 設計法の中に組み入れている。本章では, 統合気象モデル (EICM) の概要を紹介した後, EICMモデルに必要な入力データの設定方法について述べ, 併せて当該モデルを用いた弾性係数修正係数 E_{env} と舗装内部の温度と水分の分布の求め方についても簡単に言及する。

4.1 EICMの概要

4.1.1 EICMの構成

EICMでは, 舗装の設計期間中における舗装構造あるいは路床内での温度と水分の変化が考慮される。

EICMは1次元の熱水分フロープログラムであり、数年間にわたる供用期間中の気象条件下における舗装と路床材料の特性の変化をシミュレートするものである。EICMは、以下の主要な3つのパーツで構成されている：

- ・イリノイ大学で開発された気象 - 材料 - 構造モデル (CMSモデル)
- ・米国のCRRELで開発された凍上融解モデル (CRRRELモデル)
- ・テキサス大学で開発された浸透と排水のモデル (IDモデル)

4.1.2 EICMの舗装設計法 (M-E pdg) への組み込み
EICMのソフトウェアはM-E pdgのソフトウェアに組み込まれ、完全にリンクしながら必要な計算をすべて行う。ユーザ入力は、M-E pdgのソフトウェアを通じて行われる。入力データの処理結果は、材料、構造的応答およびパフォーマンス予測の3つのパートで利用される。このように気象条件は設計のあらゆる段階で考慮され、舗装設計の精度を高めることに役立つ。

4.1.3 EICMの役割

舗装の設計処理全体におけるEICMの役割は、粒状路盤のレジリエント係数の評価など、次に示す12のタスクをこなすことである。なお、各タスクの位置付けを舗装種別等によって整理したものを表 - 5 に示す。

- (1) マニュアル利用者が決定する項目
 - ①初期状態における粒状材料の M_R (最適含水比, 最大乾燥密度) (対象: 粒状路盤)
- (2) EICMにより決定される項目 (対象: アスファルト舗装とコンクリート舗装)
 - ②水分量の変化および季節変動 (初期状態から平衡状態へ) (対象: 路床, 粒状路盤)
 - ③水分量の変化が初期状態の M_R に及ぼす影響 (対

象: 路床)

- ④凍結が M_R に及ぼす影響 (対象: 路床, 粒状路盤)
- ⑤凍結状態から融解・復元した際の M_R への影響 (対象: 路床, 粒状路盤)
- ⑥舗装応答およびダメージ計算における M_R の時間的な変動の利用 (舗装全体)
- ⑦瀝青材料における, 時間の関数としての温度変化の影響 (アスファルト混合物層)
- (3) EICMにより決定される項目 (対象: コンクリート舗装)
 - ⑧コンクリート版と基層の毎日・毎時の温度変化 (コンクリート版の温度勾配, 目地の開き, アスファルト混合物層の弾性係数の評価に利用)
 - ⑨非線形温度勾配の線形勾配への変換 (コンクリート版のそりと温度応力の算定に利用)
 - ⑩月毎の有効線形温度勾配の出現確率 (コンクリート版のそり)
 - ⑪選定した地域における凍結指数と凍結融解サイクル数 (路床 M_R の変化, コンクリート版の凍結融解による破壊)
 - ⑫月平均相対湿度 (月単位のコンクリート版のそり変形の評価に利用)

4.1.4 EICMの主な出力

EICMの出力データには、他のソフトウェアで用いられないことのない出力データ (内部出力) と、構造計算など他のソフトウェアにおける入力データとなる出力データ (外部出力) の2種類がある。

- (1) EICMの内部出力 (他のプログラムで利用されない出力)
 - ① w : 含水比 (容積比) と温度 (利用者の入力に基づいた, 各ノードにおける時系列データ)
 - ② S : 飽和度 (= w / w_{sat} (飽和時の含水比))

表 - 5 EICMで扱うタスクの位置付け

主要原因	部 位	タスクの番号		タスクの内容 (原因 結果)
		アスファルト 舗装	セメントコン クリート舗装	
水 分	路床	②③	②③	水 M_R の変化
	粒状路盤	①②	①②	同上
	アスコン層	-	-	滞水 長期的には、はく離
	コンクリート版	-	⑫	相対湿度 (温度) そり
温 度	路床	④⑤	④⑤⑪	凍結融解 (水分) M_R の変化
	粒状路盤	④⑤	④⑤	同上
	アスコン層	⑦	⑧	温度 弾性係数の変化
	コンクリート版	-	⑧⑨⑩⑪	温度 (勾配) そり, 目地の開き
時 間	舗装全体	⑥	⑥	M_R の経時変化 舗装応答, ダメージ

- ③ S_{opt} : 最適含水比における飽和度, S_{equit} : 平衡状態における飽和度 非凍結時における粒状路盤材の修正係数 F_v
 - ④ 温度 各ノードにおける凍結の判定, 凍結時における修正係数 F_f
 - ⑤ RR : 回復比 (凍結時とそれに続く融解時の比), RF : 回復時の減少係数 回復時の修正係数 F_R
- (2) EICMの外部出力 (他のプログラムで利用される出力)
- ① F_{env} : F_R , F_v から計算される粒状路盤 M_R の修正係数 多層弾性・FEM解析へ
 - ② アスファルト混合物層の深さ方向の中央における温度 : 1ヶ月または2週間ピッチで, 平均, 標準偏差などを算出 疲労, わだち解析へ
 - ③ アスファルト混合物層 : 表面および深さ方向1インチ毎の温度 (時間毎) 温度クラック
 - ④ 粒状路盤の平均含水比 (容積比) 粒状路盤の永久変形解析へ
 - ⑤ コンクリート版の1時間毎の温度 目地有りコンクリート舗装 : ひび割れ, 損傷モデルへ, 連続鉄筋コンクリート舗装 : パンチアウト解析へ
 - ⑥ 凍結融解サイクル数と凍結指数 目地有りコンクリート舗装の供用性予測へ
 - ⑦ 月毎の相対湿度 コンクリート版の水分勾配の算定へ

4.2 EICMに必要なインプット - 温度と水分の状態をモデル化するために

舗装設計に必要なEICMからの出力を得るためには, かなりの量の入力データが必要である。M-E pdgを柔軟に運用するために, 階層レベル (1, 2, 3) が設けられている。気候モデルのための入力は大きく, 次のようなカテゴリに分類される。これらの情報は, プログラムを利用するうえで重要となることから, 割愛せずにできる限り詳述する。

- ① 一般情報
- ② 天候関連の情報
- ③ 地下水関連の情報
- ④ 排水と路面特性
- ⑤ 舗装構造と材料

4.2.1 一般情報

当該カテゴリにおいては, 次の入力が気象モデルと特に関係する。

- ① 路盤 / 路床の施工完了の年月 (新設舗装の場合に必要)

- ② 既設舗装の施工完了の年月 (アスファルト, コンクリート舗装のオーバーレイの場合に必要)
- ③ 舗装施工の年月 (新設および補修の両方で必要。アスファルト混合物のスチフネス予測, コンクリートのゼロ応力温度の評価のための情報)
- ④ 交通開放の年月 (施工後いつ交通開放されたか?)
- ⑤ 舗装のタイプ (新設・補修の区分, アスファルト・コンクリートの舗装種別)

4.2.2 天候関連のデータ

増加するダメージの蓄積の解析に求められる気象解析を貫徹するため, M-E pdgでは次の5つの天候関連パラメータが時間毎に必要である。

- ① 1時間毎の気温
- ② 1時間毎の降水量
- ③ 1時間毎の風速
- ④ 1時間毎の日射率 (雲で覆われたことを定義するのに利用)
- ⑤ 1時間毎の相対湿度

M-E pdgのアプローチにおいては, 天候関連情報はプロジェクト現場の近くの気象台から得られる。全米に60から66ヶ月分のデータを所有している気象台が800近くある。その他の気象台ではそれほど多くのデータは持っていないが, 設計には少なくとも24ヶ月分の気象データが必要である。

4.2.3 地下水位

地下水位は, 年間平均値もしくは四季毎の平均値とする。レベル1では, 設計に先立ち, ボーリングを行って確認する。レベル3の情報ソースは, National Resource Conservation Serviceによるレポートである。この情報は, 舗装の基盤の水分状態を判断するためのものであり, できる限り正確に収集する必要がある。

4.2.4 排水と路面の特性

(1) 路面の短波長の吸光率

この入力は, アスファルト舗装, コンクリート舗装の両方に関係する。層表面の短波吸光率は, 配合, 色およびテクスチャで決まる。この値は, 直接舗装に吸収される太陽エネルギーの量と関係する。一般に, 明るく反射する路面は短波吸光率が低い。

ちなみに, レベル毎の対応は以下のとおりである:

- ① レベル1 : 試験室で測定することが望ましい。
- ② レベル2 : 適用しない。
- ③ レベル3 : 既定値を使う。(日焼けした舗装 (グレイ) : 0.80 ~ 0.90, 新設舗装 (黒) : 0.90 ~ 0.98, 古いコンクリート層 : 0.70 ~ 0.90)

(2) (雨水)の浸透

このパラメータは、舗装の設計期間中に舗装内部に水が浸透する可能性を定義するものである。M-E pdgの中では、なし、軽度（降水量の10%が浸透）、中度（降水量の50%が浸透）、重度（100%が浸透）の4段階に分かれており、この値に基づいて、EICMでは最上部の粒状層の水分量を算出する。各段階を選択するにあたっては以下の点に留意する：

- ①軽度：路肩に十分なシールが施されている場合など。路肩排水が用いられている場合もこれを採用する。
- ②中度：あらゆる種類の路肩、PCCの補修、古くひび割れた舗装上でのアスファルトオーバーレイ
- ③重度：新設、更新時の舗装には適用しない。

(3) 排水距離

結果的に生じる排水距離をいう。具体的には、舗装の横断あるいは縦断方向の合成勾配にそって測定される距離。舗装の最も高い位置から排水口までの距離として測定される。EICMの中では、初期湿潤状態にある粒状の上層あるいは下層路盤から水が抜けるまでの時間を計算するのに用いられる。

(4) 路面の横断方向の勾配

横断方向の路面勾配は上記のとおり上下層路盤から水が抜ける時間を計算するために必要である。

4.2.5 舗装構造・材料の入力

(1) 層厚

EICMでは、温度や水分の分布をより正確に求めるため、層をいくつかに分割する。ユーザが処理を行う必要はなく、プログラムが自動的に実施する。

(2) 瀝青系材料の特性

アスファルト舗装やオーバーレイの設計にはいくつかの瀝青材料にかかわる特性値が必要であるが、舗装システムにおける熱の流れを制御するものとしてEICMでは、次のパラメータが必要である。

- ①路面の短波吸光率
- ②温度伝導率：K
- ③熱および温度容量：Q

(3) PCC材料の特性

PCCにおいても、瀝青系材料と同様、温度伝導率、熱容量、路面短波吸光率がEICMによる温度と水分の評価に必要である。新設PCC、既設PCC上のアスファルトオーバーレイ、既設アスファルト舗装上のPCCオーバーレイ時に用いられるPCC材料の特性を評価するための推奨方法がマニュアル中に示されている。

(4) 締めめられた粒状材料の特性

①容積関連パラメータの決定

このカテゴリで注目されるパラメータは、最大乾燥密度 (d_{max})、比重 (G_s)、最適含水比 (w_{opt}) である。これらのパラメータが既知ならば、計算によって初期飽和度 S_{opt} 、最適含水比 (容積比) w_{opt} 、飽和含水比 (容積比) w_{sat} が求められる。このような計算は、M-E pdgソフトウェアおよびEICMの内部出力の一部分として行われる。

②飽和度、最適含水比、飽和時の含水比の評価

これらの値は d_{max} 、 w_{opt} および G_s からEICMの内部において計算される。

③平衡含水比

補修時に必要な情報であり、新設時には不要である。パラメータは、現場から試料を採取して直接実験により求めるのが望ましい。

④飽和時の動水伝導率

飽和時の動水伝導率 k_{sat} は、締め固められた粒状材料の一過性の水分分布を決定したり、排水特性を計算するために必要である。

⑤乾燥時の温度伝導性と乾燥時の熱容量

EICMは、土の最新の水分量にしたがって温度伝導率 (K) および熱容量 (Q) の初期値を自動的に調整する。

⑥土と水に関する特性曲線 (SWCC) のパラメータ

SWCCは、与えられた土の水分量とサクシヨンの関係を定義する指標である。マニュアルにはSWCCを決定するための各種パラメータの求め方も示されている。

4.3 EICMによる計算 - M_R を修正するための複合環境影響修正係数 F_{env}

4.3.1 F_{env} と設計の関連性

M-E pdgの中で粒状路盤材料のレジリエント係数は、以下のファクタに基づき、あらゆる場所と時間において計算される。

- ①応力状態
- ②水分/密度のばらつき
- ③凍結/融解の影響

応力状態による特性の変化はレベル1の入力の場合にのみ考慮されるが、 M_R への水分と温度の影響はいずれのレベルに関しても環境影響修正係数 F_{env} として取り込まれる。あらゆる場所ならびに時間の M_R は式 (18) で表現される。

$$M_R = F_{env} \cdot M_{Ropt} \quad \text{式(18)}$$

ここに、 M_{Ropt} は、最適含水比、最大乾燥密度状態において様々な大きさの応力が作用したときの M_R である。式(18)から明らかとなり、応力による変動と気象条件による変動は独立に扱われている。

4.3.2 環境調整因子、 F_{env} の計算

ある時間、ある位置におけるレジリエント係数 M_R は合成環境調整因子 F_{env} と最適状態のレジリエント係数 M_{Ropt} の積で求められる(式(18)参照)。

F_{env} の推定法は、3つのケースと2つのレベルにおいて記述されている。

(1) 3つのケース

- ①凍結した状態：凍結材料 - F_F (凍結した材料の因子)
- ②融解中の状態：凍結が起きる前の状態である融解材料 - F_R (融解材料の因子)
- ③凍結していない/十分に融解した/ノーマルな状態：凍結していない、あるいは十分に融解した材料 - F_U (凍結していない材料の因子)

(2) 2つのレベル

- ①各ノードポイントにおける場合：EICMにおいて、舗装構造は、水分、吸水、温度がある時間 t において計算されるノードの配列によって特性づけられる。
- ②各層(基層、路盤、路床)に対する場合：凍結している、融解中、および凍結していない材料は一つの層の中に共存することができることに注意が必要。合成調整因子の計算は、ある層の材料がすべて同じ状態(凍結していない、あるいは融解中)の時に有効である。

4.4 EICMによる計算 - 舗装システムにおける温度の決定

EICMの主要な構成パーツであるEICMのCMSとCRRELモデルでは主として温度計算が行われる。本節では、両モデルについて解説する。

(1) CMSモデル

CMSモデルはイリノイ大学で開発され、舗装システムに基づく凍結と温度分布を決定するための一次元有限差分の熱伝達モデルである。モデルは潜熱の放射、対流、伝導、および効果を考慮し、蒸散、凝縮、蒸発、および昇華は考慮していない。また、降水量と水分浸透によって引き起こされる熱流束は無視される。モデルへの入力、舗装材料の熱容量、舗装材料の熱伝導率、舗装路面吸収能と放射率、気温、風速、日射などである。

(2) CRRELモデル

M-E pdgで使用される二つ目のモデルはCRRELモデルであり、凍結と融解浸透の深さを予測するために利用される。

4.4.1 CMSモデルの境界条件 - 熱流束境界条件

舗装体内温度は表面の大気条件によって支配される。気温を測定するのは簡単であるが、気温と舗装路面温度の間には、直接相関がない。舗装温度を推定するために、CMSモデルで用いられたエネルギーバランスは次のように表される。

$$Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0 \quad \text{式(19)}$$

ここで

Q_i = 入って来る短波放射

Q_r = 反射した短波放射

Q_a = 入って来る長波放射

Q_e = 出ていく長波放射

Q_c = 対流熱伝達

Q_h = 蒸散、凝縮、蒸発、および昇華の効果

Q_g = 地面で吸収されたエネルギー

式(20)における熱の移動は図-9のように表される。表面での正味の全波長の放射は Q_n である。

$$Q_n = Q_s - Q_l \quad \text{式(20)}$$

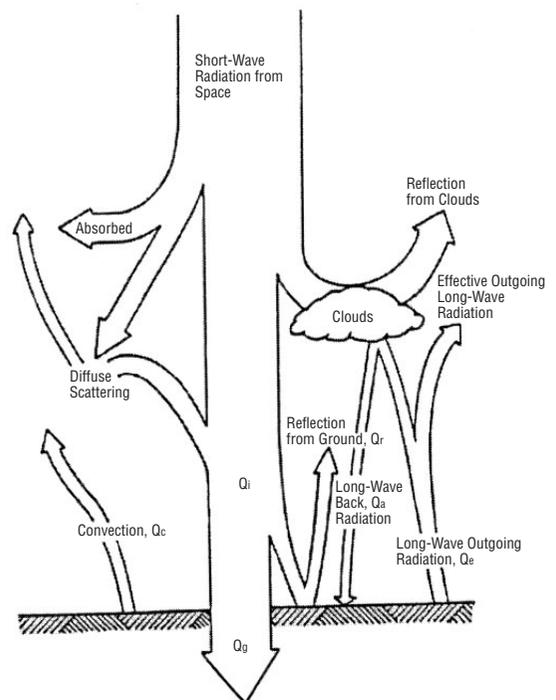


図-9 日当たりのよい日における舗装路面と大気間の熱の移動

ここで

Q_s = 正味の短波放射

Q_l = 正味の長波放射

$$Q_s = Q_i - Q_r \quad \text{式(21)}$$

$$Q_l = Q_a - Q_e \quad \text{式(22)}$$

なお、解析に係わる代表的な要因とその扱いは以下のとおりである。

①風速

熱伝達係数の計算で必要となる。

②日射

EICMのデータを完成するために最寄りの測候所の日射データが使用される。

③気温

測候所データは最高と最低の気温だけが記録されているが、EICMの計算には時間毎のデータが必要である。

④降雨

降水量と浸透量から舗装内に生じる熱流束は、表面熱流束境界条件を定式化する際には考慮されていない。また、それをエネルギー収支に取り入れる方法も検討されていない。

4.4.2 温度分布プロフィール

舗装システムにおいてアップデートされた温度データは、舗装路面での対流と放射の計算に使用される。

(1) アスファルト舗装解析のための温度データ

M-E pdgにおいて、舗装が凍結融解を受ける場合、凍結/融解の期間として1カ月を基本とするが、舗装材料特性における迅速な対応のためには15日間(半月)まで変更できる。

EICMは0.1時間(6分毎)の比較的短い時間ステップで温度を計算する。ある月(または、半月)におけるこの温度は正規分布をする。

温度はアスファルト舗装解析を行うために、2つの形式で出力される。1つはわだち掘れと疲労の解析において、また、もう一つは温度ダメージで用いられる。

①わだち掘れ/疲労温度データ

路面温度と0.25インチにおける温度は、表面での疲労(表面からのひび割れ)を推定するのに用いられる。表面と0.5インチでの疲労ひずみは、表面からのひび割れを推定するために熱的ひずみと重ねられる。

②熱破損温度データ

熱破損解析は1時間ごとの温度データを必要とする。表面、0.5インチ、およびアスファルト層中の全

深さにおける温度が必要である。

(2) コンクリート舗装分析のための温度データ

コンクリート舗装設計における温度データは、JPCPでの欠陥や疲労ひび割れなどを予測するために使用される。さらに、凍結融解サイクル数、年平均降水量および年平均凍結指数などのパラメータは、様々なJPCPやCRCPの構造的破損モデルにおける温度情報から計算される。温度データの他の用途としては、JPCPのジョイント開き-閉じモデルとCRCPのひびわれ幅モデルがある。

第5章 交通

5.1 交通条件の設定

交通データは、舗装の設計には最も重要な入力項目である。入力すべき交通データは、アスファルト舗装およびコンクリート舗装で共通である。舗装の設計に必要な典型的な交通関連データは以下のようなものである。

- ①基本となる年大型車交通量(設計計算の基本として用いる年)
- ②車両の走行速度
- ③大型車交通の方向ごとおよび車線ごとの分担率
- ④車両(大型車)の車種分類ごとの相対頻度分布
- ⑤軸重相対頻度分布
- ⑥軸および車輪配置
- ⑦タイヤの特性と空気圧
- ⑧大型車の走行位置相対頻度分布
- ⑨大型車交通量の増加率

M-E pdgでは、ESAL(等価換算軸)数を入力する必要はない。交通データの収集方法としては以下のような手段がある。

- ①Weigh-In-Motion(WIM):設置式軸重計
- ②Automatic Vehicle Classification(AVC):自動車両感知計
- ③Vehicle Counts(VC):車両計数計

本章では、設計に必要な交通入力データ、およびそれらの既定値が示されている。ただし、ここでは、データの概要のみ示す。

5.2 交通特性の階層的概念

- ①レベル1:過去から将来にわたる交通特性に関する非常に正確な情報がある場合。舗装設計を行う路線において過去の交通量や交通荷重分布などのすべてのデータが蓄積されており、将来についてもかなりの精度でその特性が予測できる。あるいは

は似たような交通事情の路線の詳細なデータが援用できる場合。

②レベル2：過去から将来にわたる交通特性に関するある程度正確な情報がある場合。舗装設計を行う路線の交通特性について、その州や地域の特性に関する情報を援用できる。たとえばFHWAの交通観測指針2001版などを用いる。

③レベル3：過去から将来にわたる交通特性に関する正確な情報が不十分な場合。十分な交通データがなく、一般的な既存値を用いる。たとえば、一般的な平均日大型車交通量が大型車の割合のデータしかない場合やおおよその推定値を用いる場合。レベル1や2は、交通量が多く破損して補修する場合にユーザに対する影響の大きい道路の設計に用いる。

5.3 交通特性に関するデータの要素と取得

舗装の設計に必要な交通荷重や交通量およびその取得方法は、レベルごとに表-6のようにまとめられる。

5.4 交通特性化の仮定

M-E pdgにおいて、交通を特性化するために用いられる仮定は以下のようなものである。

- ①政治的、経済的な変化がなければ、それぞれの大型車に対する軸種別ごとの軸重相対頻度分布の年毎の変化はない。ただし、大型車種別ごとの変化はありうる。
- ②同じ季節内であれば、それぞれの大型車に対する

軸種別ごとの軸重相対頻度分布や大型車種別ごとの分布に変化はない。

5.5 交通を特性化するために必要な入力 具体的には以下のような入力項目がある。

- ①基本となる年の交通量
- ②交通量調整係数
 - ・月別調整係数
 - ・車両別分布
 - ・時間別大型車分布
 - ・交通増加率
- ③軸重分布係数
- ④一般的な交通入力
 - ・軸数や大型車台数
 - ・軸の配置
 - ・ホイールベース

これらの入力について、各入力レベルごとにまとめると以下ようになる。

5.5.1 基本となる年の交通量

(1) 2方向年平均日大型車交通量(AADTT)：クラス4から13の大型車の日交通量

- ①レベル1：その現場において測定されたWIM、AVC、VCのデータあるいは将来の交通量に調整されたもの。過去3年間のデータの平均を用いる。またこの3年間の増加率から将来交通量を予測する。

表-6 3つの階層入力に必要な交通データ

データ要素/車両		入力レベル		
		1	2	3
大型車交通 および時間 の因子	大型車方向係数	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
	大型車車線係数	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
	大型車クラスあたりの軸 タイプごとの軸数	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
	軸および車輪間隔	階層レベルは適用しない		
	タイヤ圧	階層レベルは適用しない		
	大型車伸び率	階層レベルは適用しない		
	車両走行速度	階層レベルは適用しない		
	大型車走行位置分布	階層レベルは適用しない		
大型車分布 および量に 関する変数	大型車月別分布	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
	大型車時間別分布	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
	基準年のAADTあるいは AADTT	階層レベルは適用しない		
	基準年の大型車クラスご との分布	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
	大型車クラスごとの軸重 分布	その現場のWIMあるいはAVC	その地域のWIMあるいはAVC	国のWIMあるいはAVC
舗装設計のための大型車 分類	階層レベルは適用しない			
大型車混入率	階層レベルは適用しない			

②レベル2：州や地域で取得したWIM，AVC，VCのデータあるいは将来の交通量に調整されたもの。

③レベル3：AADTから推計されたもの。あるいはその地方の経験値。

(2) 車線分担率：全体の交通量に対する当該車線の交通量の割合。

1方向あたりの大型車率：方向別分布係数(DDF)は方向ごとの大型車交通量の比率である。

①レベル1：その現場におけるWIM，AVC，VCによるデータ。

②レベル2：その州あるいは地域におけるWIM，AVC，VCによるデータ。

③レベル3：平均的な値あるいは，経験値。55%

(3) 車線別大型車率：車線ごとの大型車交通量の割合(LDF)

①レベル1：その現場におけるWIM，AVC，VCによるデータ。

②レベル2：その州あるいは地域におけるWIM，AVC，VCによるデータ。

③レベル3：平均的な値あるいは，経験値。

・片側1車線道路：LDF=1.00

・片側2車線道路：LDF=0.90

・片側3車線道路：LDF=0.60

・片側4車線道路：LDF=0.45

(4) 車両走行速度：TRB, Highway Capacity Manual, AASHTO A Policy on Geometric Design of Highway and Streets (Green Book) による。

5.5.2 交通量調整

交通量の月ごとの変動を考慮する。その際の月別調整係数(MAF)は以下のように表される。

$$MAF_i = \frac{AMDDT_i}{\sum_{i=1}^{12} AMDDT_i} \times 12$$

ここに，

MAF_i = i月の月別調整係数

$AMDDT_i$ = i月の月平均日大型車交通量

MAF_i の合計は12である。既定値はあらゆる種別に対して1.0である。

①車両別分布：表 - 7に示す車種ごとの交通量の割合。

②時間分布係数(HDF)：時間ごとのAADTTの割合。

③交通量増加率(GR)：増加なし，線形増加および指数増加の3種類がある。

5.5.3 軸重分布係数

クラス4からクラス13までの軸配置ごとにWIMによって定める：

①単軸：3,000lbから40,000lbまで1,000lb間隔

②タンデム軸(2軸)：6,000lbから80,000lbまで2,000lb間隔

③トライデム軸(3軸)からクワド軸(4軸)：12,000lbから102,000lbまで3,000lb間隔

5.5.4 一般的な交通関係の入力

すべてのデータはレベル1～レベル3の原則に従う。

①平均走行位置：端のレーンマークから車輪の外側までの距離。既定値は18inch。

②走行位置分布：既定値はガウス分布で標準偏差は10inch。

③レーン幅：既定値は12ft。

④大型車種別ごとの軸数：既定値。

⑤軸の配置：メーカーのカタログやデータベースを参

表 - 7 FHWAの車種分類(クラス)

	分類	定義
1	Motorcycles	すべての2輪あるいは3輪のモーターバイク
2	Passengers Cars	すべてのセダン，クーペおよびステーションワゴンなどの乗用車
3	Other Two-Axle, Four-Tire Single Unit Vehicles	乗用車以外の，2軸，4輪の自動車。ピックアップトラック，キャンパー，モーターハウス，救急車，ミニバスなど。
4	Buses	バス
5	Two-Axle, Six-Tire, Single-Unit Trucks	単一の車体で，2軸，6輪のトラック
6	Three-Axle Single-Unit Trucks	単一の車体で，3軸のトラック
7	Four or More Axle Single-Unit Trucks	単一の車体で，4軸以上のトラック
8	Four or Fewer Axle Single-Trailer Trucks	4軸以下の牽引型トラック。
9	Five-Axle Single-Trailer Trucks	5軸の牽引型トラック。
10	Six or More Axle Single-Trailer Trucks	6軸以上の牽引型トラック。
11	Five or fewer Axle Multi-Trailer Trucks	5軸以下の複数車両の牽引型トラック。
12	Six-Axle Multi-Trailer Trucks	6軸の複数車両の牽引型トラック。
13	Seven or More Axle Multi-Trailer Trucks	7軸以上の複数車両の牽引型トラック。

照すること。

- ⑥ホイールベース：メーカーのカタログやデータベースを参照すること。典型的な例としては、短、中、長に対して12, 15, 18ftである。
- ⑦タイヤの形状と空気圧：空気圧の既定値は120psiである。

5.6 入力手順

入力されたデータは、M-E pdgのソフトウェアによって処理される。その結果として出力されるものは、各時間あるいは各月ごと、それぞれの輪重および走行位置ごとの、単軸数、タンデム軸数、トライデム軸数、クワッド軸数、大型車トラクター数（コンクリート舗装の表面ひび割れ解析に必要）である。

具体的な手順は以下のとおり：

- ①時間増分を決める。
- ②基本となる年のAADTTを決める。
- ③基本となる年の大型車種別相対分布を決める。
- ④それぞれの軸種別および大型車種別に対する軸重分布を決める。
- ⑤交通量増加関数を決める。
- ⑥解析期間にわたる軸数を、それぞれの時間増分に対して、軸重、軸種別ごとに算定する。
- ⑦軸配置や車輪荷重の詳細を指定する。

5.7 現場におけるAVCおよびWIMデータ取得のための交通サンプリング計画

正確な交通予測を行うためには、実際の交通を計測することが望ましい。ここではAVCやWIMによる交通流計測の一般的なガイドラインが記述されている。

第6章 排水および路肩

6.1 排水の必要性

舗装内の過度な水分が重交通に対する舗装の耐久性を著しく損なうことは、現在では良く知られた事実である。凍結温度以下でも舗装の耐久性に影響する。

図-10のように、路床及び舗装の水分はいろいろなところからやってくる。高い地下水からのサクシオンや蒸発、側溝などからの流れ、表面排水の浸入などである。ある研究によれば、40%の雨水が舗装に浸入すると言われている。

過剰な水分による問題は次の3つに分類される：

- ①長い間飽和することによる舗装や路床の軟化
- ②水分との相互作用による材料の分離
- ③水分の飽和による層間の分離

1986年のDGにおいても水分の重要性は認識されて

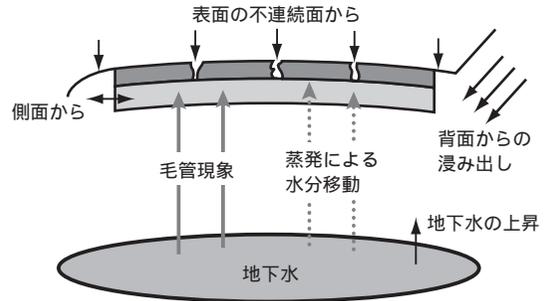


図-10 舗装体内の水分のいろいろな源

おり、この影響は設計式に排水係数として考慮されている。排水係数は排水層を設けることによって増加するようになっている。

M-E pdgでは、粒状材料や路床材料のスティフネスに及ぼす水分の影響を、降雨や温度の要因、地下水の変動、材料の特性などと直接関連させて考慮している。さらに水分の影響は、コンクリート舗装のエロージョンや、粒状材料や路床材料の凍結融解作用にも関連させている。従来のDGと異なり、排水係数のような形でなく、EICMによって予測された気象から、直接各層の剛性や強度を予測する。逐次の破損損傷解析によって、このような予測が可能となり、排水の効果を明示的に取り扱っている。

ただし、排水の影響は、キャリブレーションに用いた現場データの範囲に限られているので、排水の利益を明確にするためには、さらに調査研究が必要である。

6.2 排水処理に対する一般的な考慮点

排水設計の目的は、舗装の路盤、路床やその他の水分に敏感な材料が、水の高い飽和状態となることを防ぐことにある。HMAやPCCも含めることが多い。対策としては、次の4つのアプローチをとる：

- ①舗装構造に浸入する水分を防ぐ。
- ②水分に影響されない材料を用いる。
- ③水分に起因するダメージを最小限にする舗装構造とする。
- ④舗装構造に浸入した水分をなるべく早く排除する。

いかなるアプローチも、単独では重交通下で水分の影響を完全になくすことはできない。したがって、いくつかの方法を組み合わせる必要がある。

6.2.1 水分の浸入の防止

概念的には、舗装への水の浸入を防ぐことが最善の方法である。しかしながら、舗装にはいろいろな場所

から水が浸入してくるので、完全にそれらを遮断することは不可能である。とはいえ、それらを最小にすることは可能である。具体的な手段としては以下のようなものがある。

①排水勾配 表面排水

②目地やひび割れでのシール

6.2.2 水分に影響されない材料の使用

水分に影響されない材料は、水分の影響を減らすか遅らせるだけであり、完全にその影響を排除することはできない。

①貧配合コンクリート路盤 (LCB), セメント安定処理路盤 (CTB)

②アスファルト安定処理

③細粒分を制限した粒状路盤 (砕石路盤)

6.2.3 水分によるダメージを最小にするための設計

耐水分抵抗性を持った材料を用いる以外にも対策がある。HMA舗装については以下のような設計が考えられる：

①路肩まで含めて同じ表層とする。

②路床と安定処理路盤の間に粒状路盤を施工する。

③舗装の下に適切な排水溝を設置する。

6.2.4 表面下排水 (subsurface drainage) による自由な水分の排除

次の3つの排水システムが考えられる：表面排水，地下水の排水，路盤排水。

6.3 路盤排水の種類

種類としては、縦断方向の側方排水に開粒の排水層を設置することから密粒路盤を側面に出すだけのものなど、さまざまなものがある。よく用いられている方法について述べる。

6.3.1 タイプIa：側方排水パイプを設置した透水路盤

この方法は、図-11に示すように、透水路盤層、不透水層、側方排水パイプ、排水口、ヘッドウォール、側溝やストームドレインからなる。

6.3.2 タイプIb：排水施設を持たない透水路盤

この設計は、図-12に示されるように、透水路盤が側面に出ており、路盤の水は直接排水溝に流される。この排水システムは縦断方向の勾配が無いときに用いられる。

6.3.3 タイプIIa：側方パイプを持つ水に強い路盤

路盤がLCBのように水に強い路盤の場合には、縦断方向の側方排水パイプを設置するとよい。図-13のように開粒の埋め戻し土でパイプを覆う。

6.3.4 タイプIIb：側方排水パイプとポーラスコンクリート路肩を持つ水に強い路盤

この設計を図-14に示す。タイプIIaと違う点は、側方排水パイプの埋め戻しの部分にポーラスコンクリートを用いている点で、コストは高くなる。

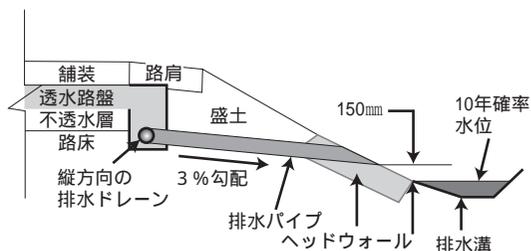


図-11 側方排水を設置した透水路盤



図-12 排水設備を持たない透水路盤

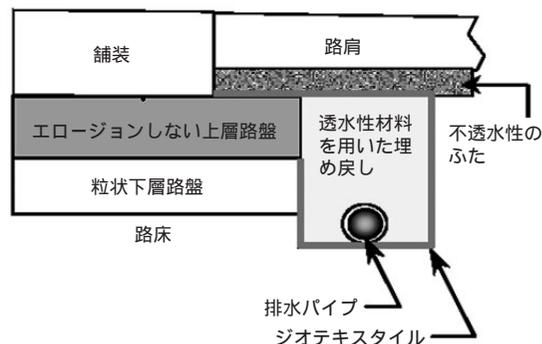


図-13 側方排水パイプを持つ水に強い路盤

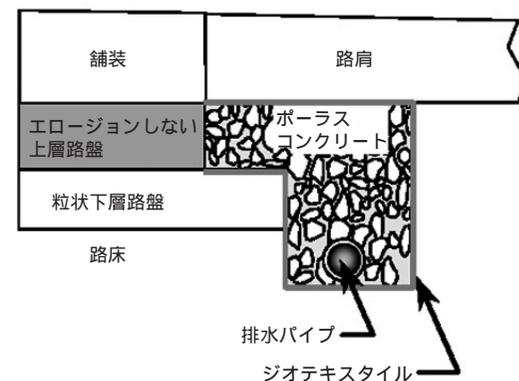


図-14 ポーラスコンクリート路肩を持つ水に強い路盤

6.3.5 タイプⅢ：側面が外に出ている密粒度の粒状路盤

この設計は、DGABの側面が外に出ており、直接排水溝につながっている。

6.4 路盤排水の設計

以下のような段階を経て設計を行う。これによって、M-E pdgによる構造的破損を評価する際に、排水システムの利点を活かしたを用意することができる。

第1段階：排水システムのニーズ

第2段階：排水システムの代替案の選択

- 通常あるいは高強度HMA舗装
- フルデプスHMA舗装
- 目地付き無筋コンクリート舗装
- 連続鉄筋コンクリート舗装

第3段階：水理設計

- 透水路盤の水理設計
- 不透水層の設計
- 側方排水設計

第4段階：排水設備を持つ舗装断面の決定

第5段階：構造解析の実行

さらに、すでにある排水設備の維持管理をどのように実施するかについてのガイドラインも与えられている。

6.5 路肩の幾何構造

広く舗装された路肩は、停車する車両を車線から分離する領域であり、交通量の多い道路には欠かせない施設である。すべての州際道路には、外側では幅10ft、内側では幅4ftの舗装された路肩が義務づけられている。路肩では、全天候性で十分な構造を有していなくてはならない。交通量の少ない道路では、草地の路肩が許されている。

駐車帯としての機能のほかに、車線舗装に対する縦方向の支持を与え、作業場所や平面曲線の視距にもなる。路肩の幅は、2ftから幹線道路の12ftまでである。推奨幅は「道路および街路の構造設計」に記載されている。

路肩は車線と同一平面内にあり、適切な排水勾配を有する。アスファルトおよびコンクリートで舗装された路肩の横断勾配は2～6%、砂利の場合は4～6%、草地の場合は8%である。推奨勾配は「道路および街路の構造設計」に記載されている。

車線と同様に舗装されていることが望ましいが、舗装していない場合、車線の幅を広くすることが勧められる。広くなった車線は、荷重走行位置を縁部から離

すことによって縁部応力やたわみを減少させ、危険な縁部の片落ちを防ぐ。レーンマークから2ft程度広くすることが勧められる。その場合凹凸のついたレーンマークが望ましい。

6.6 路肩の構造設計

ここではアスファルト路肩のみ説明する。

6.6.1 交通荷重

路肩舗装の厚さは、そこに作用するであろう交通荷重の大きさや頻度に基づいて決定されなければならない。しかしその予測には大きな変動が伴う。トラックの進入、維持修繕時の車道としての使用、路肩の車線への組み込みなどは、路肩舗装のパフォーマンスに大きく影響する。夜間の大型トラックの駐車による静止荷重も考慮しなくてはならない。過去の同様の路肩のパフォーマンスを考慮して設計すべきである。

6.6.2 一般的に考慮すべきこと

①路肩は、維持管理を容易にするために、車線と同じ材料で建設する。

②幹線道路においては、路盤の種類や厚さは車線と同様とする。コンクリート路肩の場合、水が縦目地に溜まらないように勾配をつけることが大切である。材料が異なる場所は支持力が変化するために問題が生ずる場合が多い。路盤材料は、適当に日に曝して水はけを良くしておく。凍上しやすい場所では、その対策を講じておく。

③排水能力が小さい200番ふるい6%以上の粒状路盤はさけるべきである。

④大型車交通量の多い郊外的高速道路においては、路肩は本車線と同じ荷重支持力をもった舗装構造にしておく。これによって、建設が経済的になり、水の滞留を防ぐ。また維持作業時や緊急時に一時的な車線として使用できる。

⑤路肩に停車するトラックの数を設計において考慮すべきである。このような停車は夜間のインターチェンジのランプに多く、このような荷重を考慮していない路肩に深刻な損傷をもたらす。アスファルト材料が路肩に用いられているときには、停止荷重を速度の遅い荷重に近似する。

6.6.3 アスファルト路肩

①本線と同じ舗装をしない場合、縁部荷重を軽減するために、本線の舗装を広げることを考えるべきである。1ft程度広げることで効果がある。

②郊外的高速道路や幹線道路以外では、本線より薄い舗装の路肩でも許される。路肩の舗装の厚さは

LCCの評価と同じ条件化での過去の経験に基づくべきである。

- ③重交通道路には、プラント混合のアスファルト混合物を用いることが勧められる。表面処理のみでは荷重を支えきれず、かなりの維持作業が必要になる。

- ⑥層材料と路床土の性質
- ⑦交通量と荷重
- ⑧気候
- ⑨その他の因子（例えば、ユーティリティ、クリアランス等）

ここでは、舗装評価に用いる手順と、既設舗装の状態を評価し、推奨できる修繕の選択肢を設計するために必要な入力データの種類について述べる。

7.2 評価のための準備

7.2.1 評価項目

総合的な舗装の状態を評価し、問題点を説明できるようにするためには、次のような項目が考えられる。

- ①構造的適性（荷重に関連）
- ②機能的適性（ユーザに関連）
- ③路盤排水機能
- ④材料の耐久性
- ⑤路肩の状態
- ⑥過去に実施された補修管理作業の範囲
- ⑦プロジェクト内部における舗装の状態あるいはパフォーマンスのばらつき
- ⑧その他の制約（例えば、橋下と横方向のクリアランスおよび交通規制）

7.3 データ収集の手引き

7.3.1 データの分類

図-15は収集した色々な種類のデータの時系列を示している。舗装評価の前に収集されたデータは、データの種類にかかわらず履歴データである。目視調査、非破壊および破壊試験のような舗装評価時に収集されたデータはベンチマークデータとして区別する。また、履歴データは、インベントリデータとモニタリングデータで構成されている。これらのデータの質は舗装の評価に大きく影響する。

第7章 補修のための既設舗装の評価

M-E pdgでは、既設舗装についてプロジェクトレベルの評価、データ収集の手引き、総合的な状態評価と問題点の提示の仕方について詳細な説明がある。舗装を維持管理の意思決定の手順として、1) 修繕のための既設舗装の評価、2) 補修代替案の作成、3) ライフサイクルコストの分析、があり、本章はその中の既設舗装の評価の位置づけにある。

既設舗装を評価するに当たり、a) 必要なデータとその収集の仕方、b) 評価する項目、c) 各項目を評価するのに必要なデータ、d) 各評価項目について損傷の種類とレベル、を求めている。その結果を用いて総合的に評価することと、問題点がある場合について、その問題の程度と問題が発生した原因についても明らかにし、最後にデータ分析し、明らかになったことに基づき、作成する報告書に盛り込む内容について説明している。

7.1 はじめに

修繕を実施するまでのプロセスは、第1段階で、必要なデータを収集、分析する。第2段階で、修繕の選択肢を立案し、予備設計を行う。第3段階で、費用分析を行い、且つ色々な制約条件を考慮して最適な修繕設計を決定する。ライフサイクルコストを考慮した信頼できる費用効果の高い修繕プロジェクトを立案するために、既設舗装から重要なデータを如何に収集し詳細に分析するかが必要である。そのようなデータは、次のように分類されている。

- ①車線の舗装の状態（例えば、損傷、平坦性、路面摩擦、たわみ等）
- ②路肩の状態
- ③維持管理作業の履歴
- ④舗装設計上の特徴（例えば、層厚、路肩の種類、目地間隔、車線幅等）
- ⑤幾何設計上の特性

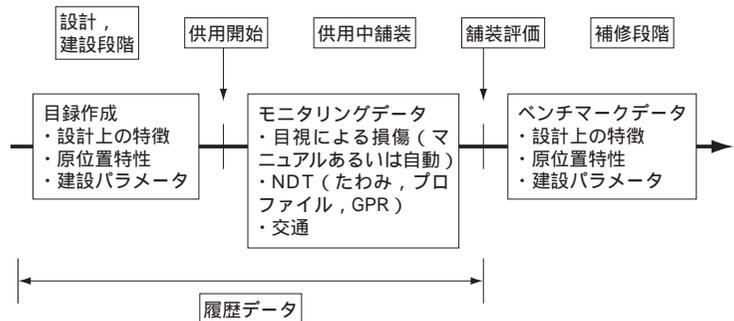


図-15 データ獲得の流れ

7.3.2 総合状態評価に必要なデータ

使用するデータは、その情報源と信頼度によりレベル1からレベル3まで3段階に分類されている。舗装の評価項目ごとに対応する因子とデータレベルを表 -

8に整理した。これらのデータを用いて対象プロジェクトを類似した区間に分類する。分類法は理想的方法とたわみの累積差法などがある。理想的方法とは、1) 舗装の種類、2)建設履歴の違い(補修と主要な維持管

表 - 8 舗装評価のための入力レベルの定義

項目	因子	データのレベル		
		1	2	3
構造的 適性	荷重に関連する損傷	プロジェクト全体の50～100%を目視調査	プロジェクト全体の10～50%を目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
	非破壊試験 (NDT: たわみ試験)	プロジェクトに沿って500ft以下の間隔でNDTを実施	プロジェクトに沿って500ft以上の間隔でNDTを実施	履歴データの利用あるいはプロジェクトに添って選択した場所で限定的にNDTを実施
	非破壊試験 (GPR試験)			
	非破壊試験 (プロファイル試験)			
	破壊試験 (コア採取, DCP)	プロジェクトに沿って2000ft以下の間隔でコアを採取	プロジェクトに沿って2000ft以上の間隔でコアを採取	履歴データを用いるかプロジェクトに沿って限定的にコアを採取
維持管理データ	履歴データと目視調査	履歴データ	履歴データ	
機能的 評価	非破壊試験 (プロファイル試験) - IRI	プロジェクト全体にわたり試験を実施する	プロジェクト内の選択した区間で試験を実施する	履歴データを使用する (舗装維持管理データ)
	非破壊試験 (摩擦試験) - FN	プロジェクト全体にわたり試験を実施する	プロジェクト内の選択した区間で試験を実施する	履歴データを使用する (舗装維持管理データ)
路盤排水	気候データ	M-E pdgの気候の部分を参照		
	水分に関連する損傷	プロジェクト全体を, 100%排水調査を実施	プロジェクトのサンプル区間の100%排水調査を実施	プロジェクト全体の車上からの調査
	水分による損傷加速の兆候	プロジェクト全体を, 100%排水調査を実施	プロジェクトのサンプル区間の100%排水調査を実施	プロジェクト全体の車上からの調査
	路盤排水施設の状態	プロジェクト全体を, 100%排水調査を実施	プロジェクトのサンプル区間の100%排水調査を実施	プロジェクト全体の車上からの調査
	表面排水施設の状態	プロジェクト全体を, 100%排水調査を実施	プロジェクトのサンプル区間の100%排水調査を実施	プロジェクト全体の車上からの調査
材料耐久 性	耐久性に関連する表層の損傷	プロジェクト全体を, 100%排水調査を実施	プロジェクトのサンプル区間の100%排水調査を実施	プロジェクト全体の車上からの調査
	路盤の状態 (侵食あるいはストリップング) あるいは汚染	プロジェクトに沿って50ftごとに試験を実施	プロジェクトに沿って500ftごとに試験を実施	履歴データの利用あるいはプロジェクトに沿って限定的に試験を実施
路肩	表面状態 (損傷と目地)	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
プロジェクト内の 変動	変動してそうな範囲とその範囲の状態を明らかにする	プロジェクト全体を100%調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
その他	交通容量と幾何形状	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
制約	迂回路が存在?	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
	交通規制せずに建設可能?	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
	オフピーク時に建設可能か?	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
	橋下のクリアランスの問題	プロジェクト全体の中にあるすべての橋を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の中にある橋の車上からの調査
	横方向の障害の有無	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査
	公共施設の問題	プロジェクト全体を100%目視調査	プロジェクト内で選択したサンプル区間の100%目視調査	プロジェクト全体の車上からの調査

関連するすべての調査 (例えば, 目視, 排水等)。レベル1, 2は典型的にベンチマークデータであり, レベル3は完璧な調査から得られたベンチマークデータと履歴データの限られた形式からなっている。

理を含む), 3) 舗装断面の違い(層材料の種類と厚さ), 4) 路床の種類と支持性能の違い, 5) 過去および将来の交通量の違い, 6) 平坦性や破損レベルのような舗装状態の違い, などを考慮して図 - 16 のように対象プロジェクトを分割して解析区間を選定する。評価は舗装状態における車線ごとの変動を含む必要がある。

7.3.3 破損調査

実行可能な補修選択肢の決定に必要な重要なインプットは舗装の状態である。目視調査で損傷の種類、損傷程度と損傷量を把握する必要がある。特定の状態において人力による調査、自動化された調査、記録写真、そして低空航空写真などすべて用いて、舗装の状態を決定するのに必要なデータを経済的に収集する。長期的展望から経済的に維持管理していくためには、徹底的に調査することが重要である。

目視調査の収集法として、古くから手動調査が用いられてきたが、現在特別仕様の計測車を用いた自動調査に移行する過程にある。表 - 9 にアスファルト舗装に関して破損の種類と原因を整理した。

7.3.4 平坦性測定 / データ

舗装の平坦性は、道路ユーザに最も明らかなパラメータであるので、舗装パフォーマンスの重要な尺度

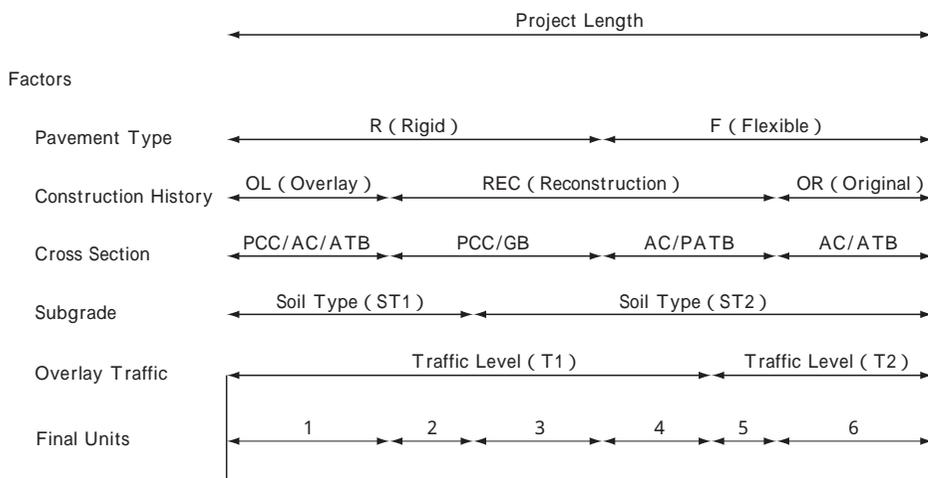
であり、指標であると広く考えられている。路面の平坦性は、また車両の走行費用や安全性にも大きく影響する。平坦性は路面の偏差を定量化する指標である。

平坦性は乗心地あるいはラフネスとも呼ばれている。舗装の測定したプロファイルを定量化する指標として、プロファイルインデックス (PI), メイのラフネスインデックス, インターナショナルラフネスインデックス (IRI) などいくつかの指標がある。

7.3.5 路面摩擦

舗装の表面摩擦は、舗装上の自動車のタイヤが滑動するのに対して抵抗する力の尺度になるので、高速道路での自動車の安全性の指標と考えられている。摩擦抵抗は、タイヤが回転を妨げられ舗装表面に沿って滑動するとき、発生する力である。摩擦抵抗は、しばしば舗装の特性と考えられているが、実際は舗装表面特性と自動車のタイヤの両方の特性である。

多くの道路局で異なる試験法を用いて摩擦抵抗を測定し、報告がなされている。これらの中で最も良く用いられる摩擦抵抗は、摩擦係数 (μ), スキッドナンバー (SN), フリクションナンバー (FN), 英国ペンドラムナンバー (BPN) とインターナショナルフリクションインデックス (IFI) がある。



区間番号	1	2	3	4	5	6
Pavement type	Rigid	Rigid	Rigid	Flexible	Flexible	Flexible
工事歴	Overlay	Reconstruction	Reconstruction	Reconstruction	Reconstruction	Original
Cross section	PCC/AC/ATB	PCC/GB	PCC/GB	AC/PATB	AC/PATB	AC/ATB
Subgrade	ST1	ST1	ST2	ST2	ST2	ST2
Traffic	TL1	TL1	TL1	TL1	TL2	TL2

図 - 16 区間分割の理想的な方法

表 - 9 アスファルト舗装とコンポジット舗装の損傷の一般的分類

一般的損傷	損傷の種類 ^{1, 2, 3}	主な原因
ひび割れ	疲労ひび割れ	荷重
	縦方向ひび割れ(わだち)	荷重
	リフレクションクラック	荷重, 材料, 気候, 建設
	横断方向ひび割れ	材料, 気候
	ブロックひび割れ	材料, 気候, 建設
表面の変形	わだち掘れ	荷重, 材料
	ショビング	荷重
表面の欠陥	ラベリング	材料, 気候, 建設
	ブリーチング	材料, 気候, 建設
その他の損傷	車線と路肩の段差	材料, 気候, 建設
	ボンピング	荷重, 材料, 気候, 建設
パッチングとポットホール	パッチの悪化	荷重, 材料, 気候, 建設
	ポットホール	荷重

1. リストにある損傷の種類は、気候条件が厳しく、排水が悪い、悪化が起りやすい典型的な条件であることを注意しよう。
2. リストにあるほとんどの損傷は平坦性と表面のすべり抵抗で特徴づける舗装の機能に影響する。
3. リフレクションクラックやわだち掘れのような損傷は原因がたくさんある。

7.3.6 排水調査

排水調査は、ボンピング、D-クラッキング、目地劣化、段差、隅角部破損のような舗装構造内部の水分により発生、または加速するような水分に関連する損傷を明らかにすることを意図している。さらに、排水調査は、また特異な霜柱と春先の解氷を含む凍結とその後の融解による舗装の損傷が明らかになる。

7.3.7 非破壊試験

舗装の評価のため数種類のNDTシステムを利用できる。これらのシステムや方法は試験装置で計測できる舗装の特性により分類できる。

- ① 舗装構造の応答 - たわみ試験 (FWD)
- ② 層厚と舗装欠陥の検出 - 地盤探査レーダ試験 (GPR)
- ③ 材料の弾性応答と材料の欠陥検出 - 表面波試験 (SASW), インパクトエコー (I-E) 試験, インパルス応答 (I-R) 試験

FWD, SASW, I-E, I-R試験は、静止して計測するため交通規制が必要となるのが欠点である。これに対してGPRは高速で走行しながら計測できる。最も広く用いられているたわみ試験装置は衝撃荷重装置 (例えば、FWD) である。

7.3.8 破壊試験

歴史的に破壊試験と非破壊試験は組み合わせて舗装の強度とパフォーマンスを評価 (既設舗装の状態評価) するために用いられてきた。特定のプロジェクトに関しデータ収集の範囲を決定し、不必要な情報の収集を避けて費用を最小限に止めることはエンジニアの責任

である。どのデータ収集過程でもいくつかの特に重要なパラメータがある。それらは次のようなパラメータである。

- ① 原位置材料特性 (例えば、弾性係数, 強度)
- ② 層厚
- ③ 層材料の種類
- ④ 一般的状態と材料の耐久性を調べるためコアの試験

破壊試験において重要なことは、採取したコア試料の強度試験を行うことと層の厚さと材料の種類を決定あるいは確認することである。

7.4 総合的状态評価と問題定義

本節では舗装の総合的状态を評価し、その重要な問題点を明らかにするための指針を示している。

7.4.1 構造的適性

舗装の構造的適性は、現在の構造的適性と将来の構造適性がある。現在の構造的適性とは舗装劣化の現在のレベルと担当機関が構造的破壊と見なしている劣化レベルとの差で判断する。構造的破壊のレベルに達していない舗装は、構造的に適していると考えることができる。将来の構造的適性とは、その舗装が予測される交通荷重に耐える余力があることを意味している。

目視調査から損傷の種類と損傷のレベルと現時点のアスファルト舗装の構造的適性を表 - 10から判断できる。また、舗装を構成する各層の弾性係数あるいはレジリエント係数はおおよその範囲が決められているので、非破壊試験の結果がこの範囲の値を下回れば何か問題があることを示唆している。

表 - 10 現在のアスファルト舗装の構造的適性を評価するための損傷の種類とレベル

損傷の種類	道路の種類	損傷レベル区分		
		不適	やや不適	適切
疲労ひび割れ, わだち付近の百分率	高速道路	> 20	5 ~ 20	< 5
	主要道路	> 45	10 ~ 45	< 10
	地方道路	> 45	10 ~ 45	< 10
わだちの縦方向ひび割れ, ft/mi	高速道路	> 1060	265 ~ 1060	< 265
	主要道路	> 2650	530 ~ 2650	< 530
	地方道路	> 2650	530 ~ 2650	< 530
リフレクションクラック, ひび割れ幅, in	高速道路	> 0.5	0.25 ~ 0.5	< 0.25
	主要道路	> 0.75	0.5 ~ 0.75	< 0.5
	地方道路	> 0.75	0.5 ~ 0.75	< 0.5
横断方向ひび割れ, 間隔, ft	高速道路	< 100	100 ~ 200	> 200
	主要道路	< 60	60 ~ 120	> 120
	地方道路	< 60	60 ~ 120	> 120
わだち掘れ, 両わだちでの平均深さ, in	高速道路	> 0.4	0.25 ~ 0.4	< 0.25
	主要道路	> 0.6	0.35 ~ 0.6	< 0.35
	地方道路	> 0.8	0.4 ~ 0.8	< 0.4
ショッピング, わだち付近の百分率	高速道路	> 10	1 ~ 10	None
	主要道路	> 20	10 ~ 20	< 10
	地方道路	> 45	20 ~ 45	< 20

7.4.2 機能的適性

機能的適性の主要な尺度は平坦性とすべり抵抗である。本章の最初で述べたように平坦性は乗り心地や走行可能性と同意である。M-E pdgではIRIを舗装の平坦性指標として用いている。

7.4.3 適切な排水性

ここで述べる排水性能とは外的要因と内的要因の機能がある。外的排水要因とは、舗装への水分供給を調節する、周囲の気候的条件である。年降水量の多い地域、集中豪雨の降る地域、季節によりかなりの降雨のある地域、凍結・融解のある地域は一般に排水に対して特別な配慮が必要である。内的排水因子は、舗装システムの水分作用に影響する道路の設計特性である。

排水特性が原因の損傷は、舗装表面の損傷や既存排水施設にある欠陥で確認できる。既設舗装の設計と建設記録を収集し、評価することに加えて、排水の適切な評価は目視による損傷調査と排水調査を行い、それぞれの結果を詳細に分析する。

7.4.4 材料の耐久性

材料の耐久性問題は舗装材料と周辺環境との間で起こる有害な化学的あるいは物理的作用の結果である。

アスファルト舗装に発生する問題とその原因は以下の通りである：

- ①舗装のショッピング（膨張）、ブリーチング、わだち掘れで確認できる水分による損傷（剥離）- アスファルト混合物の空隙率が高く密度が低いとき、

あるいはNo.200のふるいを通過する材料が多く含まれているとき、舗装の下層や中間層で水分が閉じ込められたため起こる。

- ②ラベリング - 閉め固めが十分でないため、寒くて湿度の高い環境で建設されたため、汚れた骨材を使用したため、不適切なアスファルトセメント“ドライ”ミックスとの配合、あるいは建設時ACミックスの温度を上げすぎたためにより起こるAC材の分離。
- ③ブリーチング - 配合でアスファルト量が多すぎ、空隙が少なかったり、プライムコートやタックコートの量が多すぎることにより起こる。
- ④非拘束の上層路盤や下層路盤が路床からの細粒土が混入しているとき。

舗装材料の耐久性は目視調査とコア採取から得られる情報を用いて評価できる。表 - 11は、観察された耐久性に関連する損傷の種類とレベルに基づき、材料の耐久性が注意を喚起すべき問題があるかどうかを判断する指針を示している。

7.4.5 維持管理への適用

目視調査と地域の維持管理者との討議により、過去の舗装の維持管理が限界を超えているかどうかを決定するのに必要な情報を得られる。

3種類的高速道路クラスに関して、舗装構造条件がどの維持管理レベルがやや不適や不適に低下すると思われるかについてのM-E pdgの提案が示されている。

表 - 11 アスファルト舗装およびコンポジット舗装の材料の耐久性を評価するために推奨される損傷と種類とレベル

耐久性に関連する損傷	道路の種類	損傷レベル区分		
		不適	やや不適	適切
ラベリング, 全面積の百分率	高速道路	粗骨材の消失	-	細骨材の消失
	主要道路	> 50	10 ~ 50	< 10
	地方道路	> 100	45 ~ 100	< 45
わだち掘れ, 両わだちでの平均深さ, mm	高速道路	> 10	6 ~ 10	< 6
	主要道路	> 13	9 ~ 13	< 9
	地方道路	> 20	10 ~ 20	< 10
ショビング, 両わだち面積の百分率	高速道路	> 10	1 ~ 10	なし
	主要道路	> 20	10 ~ 20	< 10
	地方道路	> 45	20 ~ 45	< 20
ブロックひび割れ, ひび割れ幅, mm	高速道路	見かけられる	-	なし
	主要道路	> 6	-	< 6
	地方道路	> 6	-	< 6
ブリージング, 両わだち面積の百分率	高速道路	> 10	5 ~ 10	< 5
	主要道路	> 25	10 ~ 25	< 10
	地方道路	> 50	20 ~ 50	< 20
ストリップング (安定処理された路盤 / 下層路盤)	すべて	分離あるいはストリップングのため大部分のコアの採取が不可能, 路肩へ細粒土のパンピングが観察される	分離あるいはストリップングのため採取ができないコアがある. 路肩へ細粒土のパンピングが観察される	コアはほとんどすべて健全な状態である. 舗装の下からの細粒土のパンピングは見当たらない
粒状材路盤の汚染	すべて	路床細粒土が粒状上層路盤 / 下層路盤に混入		

7.4.6 路肩の適性

既設路肩の設計および状態は舗装の総合的評価を行うとき考慮されるべきである。なぜなら、計画された補修は、路肩を構成する材料（AC, PCC, 粒状）の種類と存在する損傷の種類に依存しているからである。路肩の適性を評価するのに必要な状態の情報には、少なくとも、目視損傷調査のデータを含んでいるべきである。NDTデータがあると、路肩が将来トラック荷重の作用を受けることが予測されるとき、特に有益である。

7.4.7 プロジェクト内の変動

プロジェクト内のばらつきの形には下記のようなものがある。

- ①プロジェクト全体にわたる状態のばらつき
- ②状態に関する車線と車線の間隔のばらつき（車線間でトラック交通量の典型的な違いのための貴重な観察）
- ③交差点やインターチェンジで起こるばらつき（低速走行するトラックによる）
- ④橋の前後付近で起こるばらつき（沈下, プッシング, 過剰な目地開口幅による）
- ⑤切土, 盛土区間のばらつき

異なる状態の区間を線引きし、その結果を広範囲の設計および建設データと比較することにより、ばらつきの原因を明らかにすることができる。

第8章 アスファルト舗装の設計

8.1 はじめに

M-E pdgに示されている設計法は、深さ方向に材料の品質が低下する一般的層構造のものと、安定処理層間に未処理の粒状層があるサンドウィッチ構造、フルデプスなど、全てのアスファルト舗装に対応している。また、この設計法は、一般的な密粒度加熱アスファルト（HMA）混合物を用いた舗装を設計する際に最も適合するものであるが、砕石マッシュアップアスファルト（SMA）混合物、ポリマーで改質されたアスファルト（PMA）混合物、リサイクル材を含んだアスファルト（RAP）混合物にも適用可能である。

8.2 設計の手順

設計手順の概略は図 - 17に示す通りで、データ入力、解析、計画の選定からなる。

8.2.1 データ入力

データ入力では、設計対象地における地盤支持力、アスファルトコンクリートや他の舗装構成材料の特性、交通荷重、気象、舗装構成、設計・施工特性などの数値データを入力する。なお、このM-E pdgで示されている設計方法は、ウェブページ上からダウンロードできる設計プログラムの使用を前提としており、入力すべきデータ群はかなり詳細な項目に分かれている。また、設計期間内における舗装のパフォーマンス規定値（許容値）を設定し、その規定値に対して要求する信

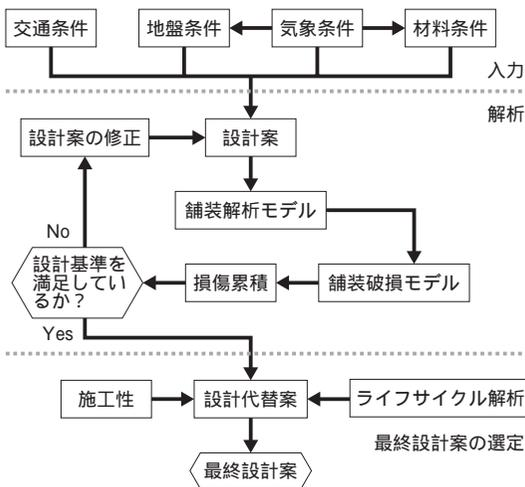


図 - 17 たわみ性舗装の設計手順の全体図

信頼性のレベルを選択する。具体的には、わだち掘れ、疲労ひび割れ、低温ひび割れ、平坦性に對する許容可能な信頼性を選択する。更に、設計期間全体を通して必要となる交通条件、材料条件および気象条件の季節変動も入力する。

データ入力に際して、設計者はプロジェクトの重要度、入力データの得やすさなどから、入力データのレベルを選定することになる。入力データレベルは、レベル1～レベル3の3段階になっており、レベル1はプロジェクトサイトでの試験・調査結果、レベル2は統計データ、レベル3は地域毎の既定値を用いることになる。つまり、入力データの質は次のようになる。

8.2.2 解析の概要

解析には、破損形態の予測と平坦性の予測の2つの段階がある。破損形態予測には次の5項目があり、これらの破損形態が進行した場合には平坦性に影響を及ぼすため、破損形態の解析の後に平坦性の検討が行われることになる。

(1) 底面の疲労ひび割れ

車輪通過位置の亀甲状ひび割れ (Alligator crack) によって明らかになるひび割れで、一般的な許容値は、車線の面積に対して25～50%程度。

(2) 表面の疲労ひび割れ

車輪走行位置の縁部に発生する縦ひび割れで、一般的な許容値は1,000ft/mile以下。

(3) 化学的安定処理層の疲労ひび割れ

(1)、(2)の疲労ひび割れを増長するもので、一般的な設計損傷指数 (Design Damage Index) は25%程度。

(4) 低温クラック

アスファルト混合物の極端な収縮によって横断方向に一定間隔で発生するひび割れで、一般的な許容値はオーダーで1,000ft/mile程度。

(5) 永久変形 (わだち掘れ)

表層から路床までの全層の永久変形の総和として求められるもので、一般的な許容値は0.3～0.5inch程度。

(6) 平坦性

平坦性の評価指標として、国際ラフネス指数 (IRI) が用いられる。IRIは(1)～(5)の破損形態の進行に伴って増加することになる。一般的にIRIの初期値は50～100inch/mileで、終局の値 (設計期間の終了時) は150～250inch/mileの範囲となる。

何れの予測値も個別に信頼性の検討を行うが、レベルの設定は任意である。例えば、信頼性90%というのは、設計者が100の設計を行った場合、そのうち90のプロジェクトでの予測値が限界値を超えないことを意味している。なお、この設計ガイドで示されている(1)～(6)のパフォーマンスモデルは、フィールドデータによるキャリブレーションが行われている。そのため、パフォーマンスモデルの予測値の信頼性は50%となる。

また、(1)～(6)の予測値は各々のパフォーマンス基準を満たすのは勿論であるが、最終的に平坦性がパフォーマンス基準を満たさなかった場合には、設計条件を修正し、その基準を満たすまで(1)～(6)の解析を繰り返す必要がある。

8.2.3 応答解析方法

わだち掘れや疲労ひび割れを予測するためには、交通荷重や環境要因の変化に伴う舗装の応答を求める必要がある。M-E pdgでは、舗装の応答解析に多層弾性理論 (Multi Layer Elastic Theory: MLET) の解析プログラム「JULEA」と有限要素法による解析プログラム「DSC2D」を用いる。なお、「JULEA」は線形弾性問題のみに利用し、「DSC2D」は非線形弾性問題を解くために利用する。

応答解析を行う際に必要となる入力パラメータには、層厚、各季節における深さ方向の温度分布、各季節における深さ方向の水分分布、弾性特性値、非線形特性値、荷重スペクトル (車両タイプと荷重の頻度)、タイヤの接地圧分布と接地面積、などがある。なお、深さ方向の温度分布および水分分布はEICMによって算出される。EICMによる1カ月間あるいは半月間の温度解析結果は図 - 18に示すように正規分布となり、設計に際しては20%毎に5段階の頻度分布に区切り、こ

れをサブシーズンと称している。

解析にあたっては、舗装各層を幾つかの分割層に分ける。特筆すべき点は、表層の上部0.5インチ分が劣化を受け、弾性係数（ E^* ）が増加するとしている点である。JULEAあるいはDSC2Dでの深さ方向の解析ポイントは次のようになっている。

疲労解析

- ① 舗装表面（ $z=0$ ）
- ② 舗装表面から0.5インチ下方（ $z=0.5$ ）
- ③ アスファルト層，安定処理層下面

わだち掘れ解析

- ① 舗装構成層あるいは分割層の中間点
- ② 路床表面
- ③ 路床表面から6インチ下方

また、解析では車輪通過位置分布を考慮し、図-19に示すように走行位置が変化したときの計算着目点のダメージを算出し、最もクリティカルな箇所を求めることになっている。なお、図-19では水平方向に5つの計算着目点を設定しているが、実際には11の着目点について計算を行う。

8.2.4 計画の選定

計画の選定は、疲労ひび割れ、わだち掘れ、平坦性に関して、これらの項目の規定値を満足する舗装構造のうち、ライフサイクルコストが適正なものを選択することとなる。

8.3 永久変形（わだち掘れ）の予測手法

永久変形（わだち掘れ）量は、式(23)に示すように表層から路床までの全層の永久変形の総和として求められるものであるが、これが適応し得る範囲は図-20に示すとおりであり、塑性流動はこの限りではない。しかし、実際にはHMA層のわだち掘れはHMA層上方の3～5インチの範囲内で生じるものであるので、舗装に携わる技術者はこのことを認識しておく必要がある。また、HMA層および路盤層の締固め不足は、過度なわだち掘れを引き起こすので、十分な締固め管理が必要になる。さらに、路床のわだち掘れが大きくなる場合は、石灰やセメントによる安定処理や路床表面の排水を促すようにすれば良い。

わだち掘れを予測するための計算着目点は、1) 各層（路盤層を数層に分割した場合には各分割層）の中心、2) 路床表面、3) 路床表面から6インチ下方である。

$$RD = \sum_{i=1}^{n \text{ layers}} \rho^i \cdot h^i \quad \text{式(23)}$$

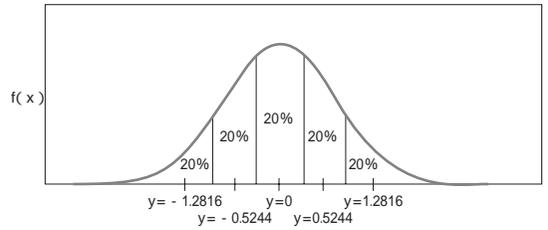


図-18 ある解析期間における温度分布

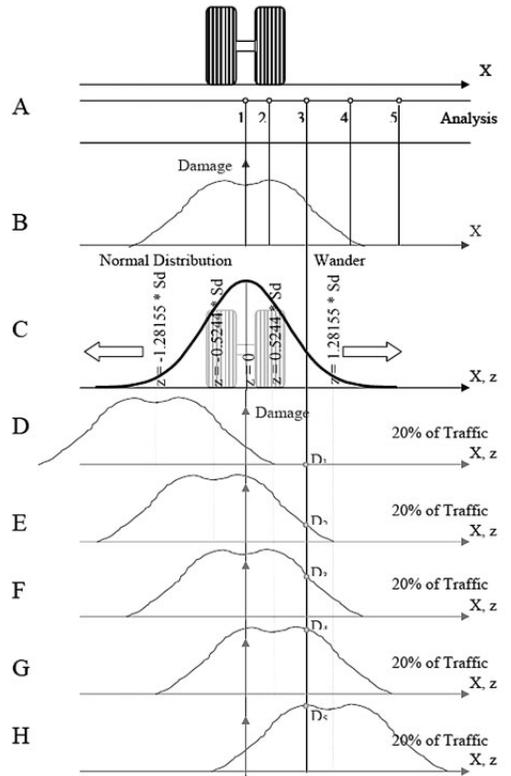


図-19 車両走行位置分布を考慮した疲労解析

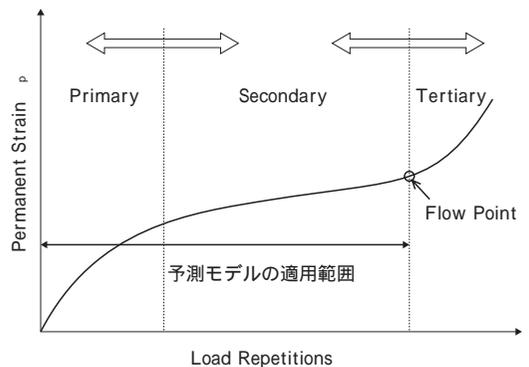


図-20 典型的な舗装材料の永久変形特性

ここに,

RD : 舗装の永久変形量

$nsublayers$: 分割した層数

p^i : 分割層*i*の全塑性ひずみ

h^i : 分割層*i*の厚さ

8.3.1 アスファルト混合物の永久変形

アスファルト混合物層の永久変形は式(24)により求めることができる。

$$\frac{p}{r} = r_1 \cdot a_1 \cdot T^{a_2 \cdot r_2} \cdot N^{a_3 \cdot r_3} \quad \text{式(24)}$$

ここに,

p : 繰返し載荷*N*回での累積塑性ひずみ (in/in)

r : アスファルト混合物の回復ひずみ (配合割合, 温度, 載荷時間の関数) (in/in)

N : 繰返し載荷回数

T : 温度 (°F)

a_1 : 非線形回帰係数

r_1 : Field Calibration Factor

上式は, NCHRP 9-19: "Superpave Models" では次のようになる。

$$\frac{p}{r} = 10^{-3.15552} T^{1.734} N^{0.39937} \quad \text{式(25)}$$

また, "National Field Calibrated Model" では, $r_1 = 0.509$, $r_2 = 0.9$, $r_3 = 1.2$ となり, 以下の式が得られている。

$$\frac{p}{r} = k_1 \cdot 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244} \quad \text{式(26)}$$

$$k_1 = (C_1 + C_2 \cdot depth) \cdot 0.328196^{depth} \quad \text{式(27a)}$$

$$C_1 = -0.1039 \cdot h_{ac}^2 + 2.4868 \cdot h_{ac} - 17.342 \quad \text{式(27b)}$$

$$C_2 = 0.0172 \cdot h_{ac}^2 - 1.7331 \cdot h_{ac} + 27.428 \quad \text{式(27c)}$$

ここに,

h_{ac} : アスファルト層の厚さ

$depth$: 計算ポイント (分割層の中心) までの深さ

8.3.2 粒状路盤・路床の永久変形

粒状路盤および路床の永久変形推定式を式(28), (29)に示す。

$$a(N) = GB \left(\frac{0}{r} \right) e^{-\left(\frac{p}{n}\right)} \cdot v \cdot h \quad \text{式(28)}$$

$$a(N) = SG \left(\frac{0}{r} \right) e^{-\left(\frac{p}{n}\right)} \cdot v \cdot h \quad \text{式(29)}$$

$$\log = -0.61119 - 0.017638 \cdot W_c \quad \text{式(30a)}$$

$$\log \left(\frac{0}{r} \right) = \frac{e^{(p)} \cdot a_1 \cdot E_r^{b_1} + e^{(p/10)} \cdot a_9 \cdot E_r^{b_9}}{2} \quad \text{式(30b)}$$

$$C_0 = \ln \left(\frac{a_1 \cdot E_r^{b_1}}{a_9 \cdot E_r^{b_9}} \right) \quad \text{式(30c)}$$

$$p = 10^9 \left[\frac{C_0}{1 - (10^9)} \right]^{\frac{1}{0.64}} \quad \text{式(30d)}$$

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{E_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} - 0.3586 \cdot GW^{0.1114} \right] \quad \text{式(30e)}$$

ここに,

a : 粒状路盤層の永久変形量 (in)

GB : 粒状路盤のキャリブレーション・ファクタ (=1.673)

SG : 路床のキャリブレーション・ファクタ (=1.35)

r : 回復ひずみ (in/in)

v : 平均回復ひずみ (in/in)

h : 層厚 (in)

W_c : 含水比 (%)

E_r : レジリエントモジュラス (psi)

GWT : 地下水位の深さ (ft)

$a_1 = 0.15$, $b_1 = 0.0$, $a_9 = 20.0$, $b_9 = 0.0$

Tseng and Lyttonによると, 路床材料の永久変形は式(31)によって求められる。

$$p(z) = (p_{z=0}) \cdot e^{-k \cdot z} \quad \text{式(31)}$$

ここに,

$p(z)$: 深さ*z*での鉛直方向の塑性ひずみ

$p_{z=0}$: 路床上面 ($z=0$) での鉛直方向の塑性ひずみ

z : 路床上面からの深さ

k : 回帰式によって得られる材料定数

また, 式(32)より次式が得られるので, これによって $z=0$, $z=6$ インチの塑性ひずみを求める。

$$p = \left(\frac{0}{r} \right) \cdot e^{-\left(\frac{p}{n}\right)} \cdot v \quad \text{式(32)}$$

式(31)から 6 インチ下方の塑性ひずみを求めると,

$$p(6) = p_{z=6} = p_{z=0} \cdot e^{-6k} \quad \text{式(33)}$$

であるので, 両辺の自然対数をとると, 定数*k*は次のように求めることができる。

$$\ln p_{z=6} = \ln p_{z=0} - 6k$$

$$k = \frac{1}{6} (\ln p_{z=0} - \ln p_{z=6}) = \frac{1}{6} \ln \left(\frac{p_{z=0}}{p_{z=6}} \right) \quad \text{式(34)}$$

殆どの場合, $\ln p_{z=6} < \ln p_{z=0}$ であるが, 場合によってはこれが逆転するため, $k=0.000001$ を限界値として定めることで逆転時の問題をクリアしている。

また, 式(31)より求まる永久変形増分を路床表面からベッドロックまで ($0 \sim h_{bedrock}$) 積分すると, 式(35)の通り路床の永久変形量が求まる。

$$= \int_0^{h_{bedrock}} p(z) dz = \int_{p,z=0}^{h_{bedrock}} e^{-k \cdot z} \cdot dz$$

$$= \int_{p,z=0} \left(\frac{1 - e^{-k h_{bedrock}}}{k} \right)$$

式(35)

ここに、

：路床の永久変形量 (in)

$h_{bedrock}$: 路床面からベドロックまでの深さ (feet)

これらの予測モデルを用いた解析結果と実測結果の関係は図 - 21に示すとおりである。

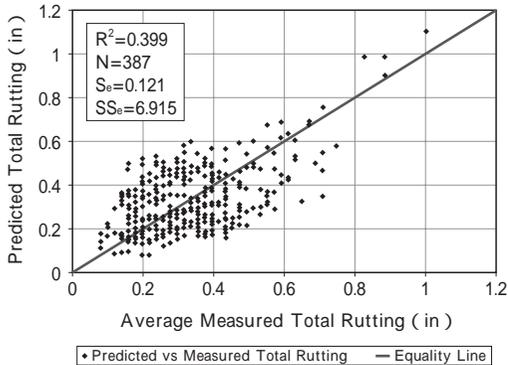


図 - 21 全わだち掘れ量の予測値と実測値の関係

8.3.3 信頼性

任意の信頼性レベルのわだち掘れ量は以下の式で求めることができる。

$$RD_P = \sum_i (RD_i)$$

式(36)

$$+ \left(\sqrt{Se_{RDAC}^2 + Se_{RDGB}^2 + Se_{RD SG}^2} \right) \cdot Z_p$$

$$Se_{RDAC} = 0.1587 RD_{AC}^{0.4579}$$

式(37a)

$$Se_{RDGB} = 0.1169 RD_{GB}^{0.5303}$$

式(37b)

$$Se_{RD SG} = 0.1724 RD_{SG}^{0.5516}$$

式(37c)

ここに、

RD_P : 信頼性レベルPのわだち掘れ量 (inch)

RD_i : 平均入力値に基づいたわだち掘れ量の計算結果 (信頼性50%に相当, inch)

Se_{RD_i} : わだち掘れ量の標準誤差

Z_p : 標準正規偏差 (片側分布)

8.4 アスファルト混合物層の疲労解析

疲労解析を行うための計算着目点は、1) 舗装表面、2) 舗装表面から0.5インチ下、3) アスファルト混合物層下面である。なお、1)、2)は舗装の表面ひび割れの解析に必要な項目であるが、これは舗装表面から0.5インチ分が劣化により硬化(弾性係数が増加)す

るため、HMA層を2層に分けて疲労抵抗を検討するためである。

8.4.1 疲労損傷解析

疲労損傷は、式(38)に示すMiner則にしたがって算出される。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

式(38)

ここに、

D : 疲労損傷

T : 区間数

n_i : 区間*i*での輪荷重の繰返し数

N_i : n_i に対応した許容繰返し数

許容繰返し数 N_i とは、あるレベルの輪荷重が作用したとき、その輪荷重によって疲労破壊が生じる繰返し回数のものであり、一般的には式(39)に示す引張りずみとアスファルト混合物のスティフネスの関数で表わされる破壊規準式から求める。

$$N_f = C \cdot k_1 \cdot \left(\frac{1}{r} \right)^{k_2} \left(\frac{1}{E} \right)^{k_3}$$

式(39)

ここに、

N_f : 疲労ひび割れに至る繰返し回数

r : Critical Locationでの引張りずみ

E : スティフネス

$k_1 \sim k_3$: 室内実験により得られる材料定数

C : 室内試験結果と現場での実現象を調整するための定数

M-E pdgでは、底面ひび割れ、表面ひび割れの両モードの疲労ひび割れに対応した式(40)~(41)を提案している。なお、 hac はアスファルト層の厚さ(in.)である。

$$N_f = 0.00432 \cdot k_1' \cdot C \cdot \left(\frac{1}{r} \right)^{0.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.261}$$

式(40)

・底面ひび割れ

$$k_1' = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot hac)}}}$$

式(41a)

・表面ひび割れ

$$k_1' = \frac{1}{0.01 + \frac{12.0}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 \cdot hac)}}}$$

式(41b)

なお、式(39)~(41)によって求めた疲労損傷度 D と実際のひび割れ発生状況との関係は、式(42)によって求めることができ、設計者がひび割れ発生状況を予測できるようになっている。

式(42)は米国内24州に設置された82のLTPP対象区間での測定結果から求めたもので、図 - 22、図 - 23に示すように、式(42)aは441個、式(42)bは408個の測定データが対象となっている。また、図 - 22、図 - 23からわかるように、疲労損傷度 $D = 1.0$ すなわち $\log D (\%) = 2.0$ のときに、 $FC_{bottom} = 50\%$ 、 $FC_{top} = 5280\text{ft/mile} = 1\text{ mile/mile}$ となっている。

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 \cdot C_1' + C_2 \cdot C_2' \cdot \log_{10}(D^{*100}))}} \right) \left(\frac{1}{60} \right) \quad \text{式(42)a}$$

$$FC_{top} = \left(\frac{1000}{1 + e^{(7.0 - 3.5 \cdot \log_{10}(D^{*100}))}} \right) (10.56) \quad \text{式(42)b}$$

ここに、

FC_{bottom} : 車線内に占める底面ひび割れの割合 (Alligator crackの面積割合, %)

D : 疲労損傷度

$C_1 \sim C_2'$: 係数 ($C_1 = 1.0$, $C_1' = -2 \cdot C_2$, $C_2 = 1.0$, $C_2' = -2.40874 - 39.748 \cdot (1 + hac)^{-2.856}$)

FC_{top} : 表面ひび割れの長さ (ft/mile)

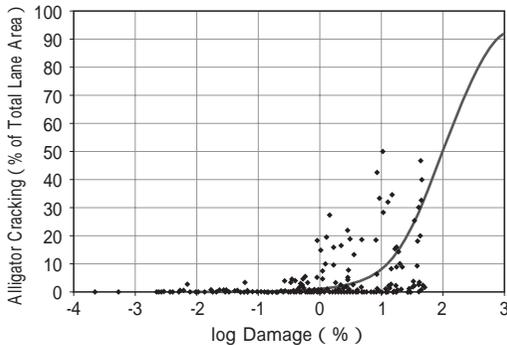


図 - 22 底面ひび割れと疲労損傷の関係

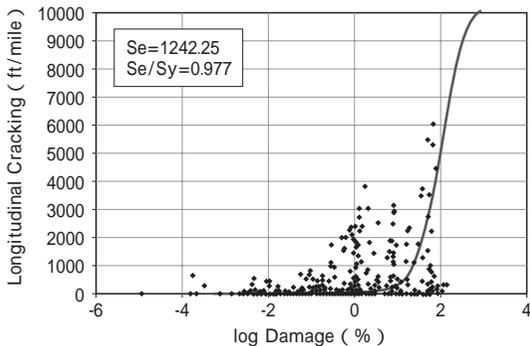


図 - 23 表面ひび割れと疲労損傷の関係

8.4.2 信頼性

任意の信頼性レベルの疲労ひび割れ量は以下の式で求めることができる。

$$FC_P = (FC_i + Se_{FC_i} \cdot Z_p) \quad \text{式(43)}$$

$$Se_{FC_{bottom}} = 0.5 + \frac{12}{\left(1 + e^{1.308 \cdot 2.949 \cdot \log D}\right)} \quad \text{式(44a)}$$

$$Se_{FC_{top}} = 200 + \frac{2300}{\left(1 + e^{1.072 \cdot 2.1654 \cdot \log D}\right)} \quad \text{式(44b)}$$

ここに、

FC_P : 信頼性レベルPでのひび割れ予測値 (% or ft/mile)

FC_i : 50%の信頼性を有するひび割れ予測値 (前述の FC_{bottom} or FC_{top} , % or ft/mile)

Se_{FC_i} : ひび割れ FC_i の標準誤差

Z_p : 平均値からのずれ (標準正規偏差, standard normal deviate)

8.5 化学的安定処理 (CSM) 層の疲労解析

CSM層 (Chemically Treated Base : CTB) の疲労ひび割れはCSM層下面から発生し、舗装表面から直接的に観察することはできないため、これを正確に把握することは難しい。CSM層の疲労ひび割れに関しては以下のような条件が考えられる。

- ① HMA層直下にCSM層がある場合は、CSM層の疲労ひび割れがHMA層に伝達し、舗装表面にひび割れが発生する。
- ② HMA層とCSM層の間に粒状層がある場合には、CSM層の疲労ひび割れがHMA層に及ぼす影響は無視し得る。
- ③ CSM層の疲労損傷度は増加するため、CSM層の弾性係数 (ECSM) は低下し、HMA層の引張ひずみが増大するため、結果としてHMA層の亀甲状ひび割れを促進することになる。

CSM材料の疲労挙動のモデルは幾つかあるが、M-E pdgでは次の式を用いている。

$$\log CTB_{Damage} = \frac{0.972 \cdot e_1 - \frac{t}{MR}}{0.0825 \cdot e_2} \quad \text{式(45)}$$

ここに、

CTB_{Damage} : CSM層の疲労損傷度 ($D = n / N_f$)

N_f : CSM層の許容繰返し数

t : 最大の交通荷重によってCSM層の下面に生じる引張応力 (psi), MR : CSMの28日曲げ強度 (psi)

e_1, e_2 : 現場調査に基づくキャリブレーションファクタ

: 荷重作用位置、荷重の種類を変化させてクリティカルなものを求める。

CSM層の疲労解析は、2～4週間を一区切りとして実施する。そのため、次の解析期間では、上述の通りCSM層の疲労損傷の増加に伴う層弾性係数(ECSM)の低下を考慮しなければならない。次の解析期間の層弾性係数は以下の式によって求める。

$$E_{CSM}(t) = E_{CSM}(\min) + \frac{E_{CSM}(\max) - E_{CSM}(\min)}{1 + e^{(-4 + 14^D)}} \quad \text{式(46)}$$

ここに、

D : CSMの疲労損傷度(10進法)

$E_{CSM}(t)$: 疲労損傷度 D でのCSM層弾性係数(psi)

$E_{CSM}(\max)$: 疲労損傷を受けていない状態でのCSM層弾性係数の最大値(psi)

$E_{CSM}(\min)$: 全層破壊後のCSM層弾性係数の最小値(psi)

CSM層の疲労損傷度とCSM層のひび割れとを関連付ける経験式として以下の式がある。

$$C = \frac{1000}{1 + e^{1 \cdot D}} \quad \text{式(47)}$$

ここに、

C : 500フィートの舗装区間におけるCMS層のひび割れ長さ

D : CSMの疲労損傷度(10進法)

また、現時点ではキャリブレーションファクタを決定し得るデータが無いことから、 $c_1 = c_2 = 1.0$ を用いている。

8.6 低温ひび割れ

M-E pdgに記載されている低温ひび割れモデルは、以前SHRP A-005で開発された方法を改良したものである。

オリジナルの低温ひび割れモデル(TCMODEL)とソフトウェアから、1) Superpave間接引張試験(IDT)からの生データをアスファルト混合物の粘弾性特性へ変換する解析的技術の改良、2) 更新された解析手法と新しい現場データを反映したTCMODELの再キャリブレーション、3) TCMODELアプローチの包括的な説明書の作成、といった大規模な更新が行われた。

8.6.1 低温ひび割れモデル

舗装に発生が予想される横断ひび割れの数は、ひび割れ深さとひび割れ量(ひび割れ頻度)の関係から予測する。

$$C_f = c_1 * N \left(\frac{\log C / h_{ac}}{c_2} \right) \quad \text{式(48)}$$

ここに、

C_f : 発生した温度ひび割れの数

c_1 : 現場キャリブレーションによって決定される帰係数

$N(z)$: (z)に対する標準正規分布

c_2 : 舗装のひび割れ深さの対数の標準偏差

C : ひび割れ深さ

h_{ac} : アスファルト舗装の層厚

ある冷却サイクルによるひび割れ伝播の数は、ひび割れ伝播のParis則を用いて予測する。

$$C = A K^n \quad \text{式(49)}$$

ここに、

C : 冷却サイクルによるひび割れ深さの変化

K : 冷却サイクルによる応力強度要素の変化

A, n : アスファルト混合物の破断パラメータ

各パラメータは、アスファルト混合物のクリープコンプライアンスから求められ、22区間のSHRP GPS、14区間のカナダSHRP(C-SHRP)、そして5区間のMnROADで観察された低温ひび割れデータによってキャリブレーションされた。

8.6.2 低温ひび割れに対する構造的な応答モデル

加熱アスファルト混合物層の温度ひび割れの大きさを予測するには多くの要因が影響する。層厚のように、ほとんどのパラメータは、設計期間を通して一定である一方で、季節や舗装の供用年数によって変化するものがある。正確に温度解析結果を得るには、明らかに異なる応力を生じるすべてのケースについて個別に評価する必要があるが、M-E pdgでは、いくつかの仮定を行って解析している。

8.6.3 低温ひび割れ予測手法

低温ひび割れは、以下のステップに沿って予測する。

(1) 入力データの収集

アスファルト混合物の間接引張モードの特性を用いる。解析レベルによって1または3温度条件(0, -10, -20)で試験を行う。全解析レベルで-10における引張強度を求める。試験時間、アスファルト層厚そして温度収縮係数なども必要である。

(2) クリープコンプライアンスのマスターカーブ開発

MASTERというデータ解析プログラムを用いて、時間～温度シフトファクタ(a_T)を求め、PronyとPowerモデルフォームを使って統計的にクリープコンプライアンスモデルにフィットさせ、クリープコンプライアンスマスターカーブを求める。

(3) 温度応力の予測

粘弾性変換理論を用いてコンプライアンス $D(t)$ とアスファルト混合物の緩和モジュラス E を関係づける。

EICMモデルから得る温度データとこのパラメータから、アスファルト層内の任意の深さ、任意の時刻の温度を予測することができる。

(4) 低温ひび割れ長さの成長計算

応力強さ係数*K*と混合物のクリープコンプライアンスと強度から得られる破断パラメータ*A*と*n*を求め、Paris則に基づいた破断メカニズムを用いてひび割れ長の成長を計算する。

(5) 温度ひび割れ長さの計算

ひび割れ度（延長500フィートの舗装に発生した温度横断ひび割れの長さ）は、ひび割れ深さの確率分布とHMA層厚に対するひび割れ深さ比とひび割れ率の間の関係から予測する。

LTPPデータベースから22のGPS区間、カナダC-SHRPから14区間、イリノイ州Peoriaの1区間、そしてミネソタDOTからMnROADの5区間のデータを用いて、低温ひび割れモデルのキャリブレーションを実施した。キャリブレーションは、設計期間内の実際の舗装の温度履歴データと履歴データの平均に基づいた予測温度について評価することで行った。

8.6.4 低温ひび割れを減少させるための設計の修正

低温ひび割れに関係する最も重要な要素は、混合物のスティフネスである。予測した温度ひび割れを減少させるためには、混合物のスティフネスを小さくすることによって設計を修正し、それを繰り返す必要がある。一般に、通常用いているよりも小さいPGグレードを使用することで最も効果的に行うことができる。

もう一つ重要な要素は、アスファルト層厚である。温度ひび割れの予測モデルで用いられている力学モデルに基づくと、舗装厚が厚いほどひび割れが長くなり、深さ方向へ伝播していく。

8.7 平坦性

平坦性の予測モデルはHMAが敷設されている路盤条件（未処理、アスファルト安定処理、化学的安定処理）によって異なっている。なお、予測モデルの項目には表面ひび割れ長さの解析結果は直接的に反映されておらず、「縦ひび割れのシーリング長さ」として入力するようになっていることに注意する必要がある。

8.7.1 未処理の粒状路盤上にある場合

$$IRI = IRI_0 + 0.0463 \left[SF \left(e^{\frac{age}{20}} - 1 \right) \right] + 0.00119 (TC_L) + 0.1834 (COV_{RD}) + 0.00384 (FC) + 0.00736 (BC) + 0.00115 (LC_{SNWP})_{MH}$$

式(50a)

ここに、

IRI : *IRI*の予測値 (m/km)

*IRI*₀ : *IRI*の初期値 (m/km)

SF : サイトファクター (式(50b)参照)

$e^{age/20} - 1$: 時間項 (ageの単位は年)

*COV*_{RD} : わだち掘れ深さの変動係数 (20%と仮定)

(*TC*_L) : 横断方向の全ひび割れ長さ (m/km)

(*FC*) : 車輪通過位置の疲労ひび割れ (%)

(*BC*) : ブロックひび割れ率 (%)

(*LC*_{SNWP})_{MH} : 車輪通過位置外側の縦ひび割れのシーリング長さ (m/km)

$$SF = \left(\frac{(R_{SD}) \{ P_{075} + 1 \} \{ PI \}}{2 \times 10^4} \right) + \left(\frac{\ln(FI + 1) \{ P_{02} + 1 \} \{ \ln(R_m + 1) \}}{10} \right)$$

式(50b)

ここに、

*R*_{SD} : 月間降雨量の標準偏差 (mm)

*P*₀₇₅ : 0.075mmふるいの通過質量百分率

PI : 土の塑性指数

FI : 年平均凍結指数 (-days)

*P*₀₂ : 0.02mmふるいの通過質量百分率

*R*_m : 年平均降雨量 (mm)

この予測式を検証するのに用いられたデータ数は353個で、*r*²=0.620である。また、求められた*IRI*の信頼性は次式によって求められる。

$$IRI_P = IRI + STD_{IRI} \cdot Z_P$$

式(51)

$$IRI_P = 100\%$$

ここに、

*IRI*_P : 信頼性レベル*P*での*IRI*予測値 (m/km)

IRI : 50%の信頼性を有する*IRI*予測値 (m/km)

*STD*_{IRI} : *IRI*の標準誤差

*Z*_P : 平均値からのずれ (標準正規偏差, standard normal deviate)

また、*IRI*の標準偏差は、次式で求められる*IRI*の分散の平方根を計算すれば求めることができる。(全ての項目は独立変数として扱う)

$$Var[IRI] = Var[IRI_0] + (0.0367 \cdot e^{age/20} - 0.0367) Var[SF] + 1.05625 \times 10^{-5} Var[(FC)] + 1.67445 \times 10^{-5} Var[COV_{RD}] + 1.1236 \times 10^{-6} Var[(TC_L)] + 4.9562 \times 10^{-5} Var[(BC)] + 2.4336 \times 10^{-6} Var[(LC_{SNWP})_{MH}] + S_e^2$$

式(52)

ここに、

Var[] : 分散を表わす記号

S_e^2 : モデル全体の誤差の分散=0.15 (m/km)²

8.7.2 アスファルト安定処理路盤上にある場合

$$IRI = IRI_0 + 0.0099947(age) + 0.0005183(FI) + 0.00235(FC) + 18.36 \left[\frac{1}{(TC_s)_i} \right] + 0.9694(P)_i \quad \text{式(53)}$$

ここに、

$(TC_s)_i$: 大きく開いた横断ひび割れの開きの平均値 (m, 低温ひび割れモデルから求めるもの)

$(P)_i$: 全車線面積に対するひび割れのパッチ面積率 (%)

この予測式を検証するのに用いられたデータ数は428個で、 $r^2=0.499$ である。また、求められたIRIの信頼性は式(51)によって求められ、同式中に用いられる STD_{IRI} は次式で求められるIRIの分散の平方根を計算すれば求めることができる。

$$Var[IRI] = Var[IRI_0] + 3.047 \times 10^{-5} Var[(FC)] + \left[\frac{-33.59}{((TC_s)_i + 1)^2} \right]^2 Var[(TC_s)_i] + 0.90802 Var[P_i] + S_e^2 \quad \text{式(54)}$$

8.7.3 CSM路盤 (CTB) 上にある場合

$$IRI = IRI_0 + 0.00732(FC) + 0.07647(SD_{RD}) + 0.0001449(TC_L) + 0.00842(BC) \quad \text{式(55)}$$

$$SD_{RD} = 0.665 + 0.2126(RD) \quad \text{式(56)}$$

ここに、

SD_{RD} : わだち掘れ深さの標準偏差 (mm)

RD : 平均わだち掘れ深さ (mm)

この予測式を検証するのに用いられたデータ数は50個で、 $r^2=0.830$ である。また、求められたIRIの信頼性は式(51)によって求められ、同式中に用いられる STD_{IRI} は次式で求められるIRIの分散の平方根を計算すれば求めることができる。

$$Var[IRI] = Var[IRI_0] + 5.358 \times 10^{-5} Var[(FC)] + 5.848 \times 10^{-3} Var[SD_{RD}] + 2.0996 \times 10^{-8} Var[(TC_L)] + 7.0896 \times 10^{-5} Var[(BC)] + 4.473 \times 10^{-8} Var[(LC_{SNWP})_{MI}] + S_e^2 \quad \text{式(57)}$$

第9章 補修

本章では、プロジェクトレベルでの実行可能な補修戦略を決定するための方法について述べる。補修に関する設計の流れは図 - 24 のようになるが、既設舗装の

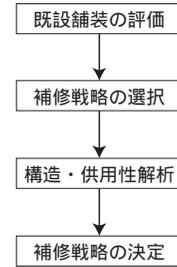


図 - 24 補修の設計の流れ

評価については「第7章 評価」を参照するものとし、以下では、補修戦略の選択・決定、および設計の解析について述べる。

9.1 実行可能な補修戦略の選択・決定

実行可能な補修戦略は、舗装の破損を特定してそれを補修し、再発防止や損傷を最小限にとどめるのに有効である。ここでは、既設のアスファルト舗装、コンクリート舗装およびコンポジット舗装の補修戦略について示す。

アスファルト舗装には、粒状路盤上の加熱アスファルト (HMA) 舗装、安定処理路盤上のHMA舗装およびフルデプスHMA舗装が含まれる。コンクリート舗装には、目地ありポルトランドセメントコンクリート (PCC) 舗装、目地あり鉄筋コンクリート舗装 (JRCP) および連続鉄筋コンクリート舗装 (CRCP) が含まれる。また、既設舗装には、PCC上のHMA舗装、HMA舗装上のPCC、PCC上のPCCのようなコンポジット舗装も含まれる。

9.1.1 主要な補修戦略の概要

補修戦略とは、補修のタイプ、補修量を明確にし、いつ補修すべきかというものであり、予想されるパフォーマンスとコストを十分に検討する必要がある。補修戦略には、以下の観点が求められる。

- ① 構造的な条件
- ② 機能的な条件
- ③ 路盤排水条件
- ④ 材料の耐久性の条件
- ⑤ 路肩の状態

主要な補修戦略には、次のようなものがある。

- ① 拡幅車線を要しない改築
- ② 拡幅車線を要する改築
- ③ 構造的オーバーレイ
- ④ 非構造的オーバーレイ
- ⑤ オーバーレイを伴わない補修

(1) 拡幅車線を要する(要しない)改築

改築は、既存のアスファルト舗装、コンクリート舗装およびコンポジット舗装に適用される。アスファルト舗装では、疲労ひび割れやわだち掘れ、はく離のような問題を抱えている道路等に適しており、コンクリート舗装では、ひび割れが多い舗装や路盤に問題がある場合、Dクラックが発生している舗装等に適している。

(2) 構造的オーバーレイによる補修

構造的オーバーレイは、舗装を修復するために様々な措置を行うものであり、以下のように分類される。

①HMAによるオーバーレイ

- ・ 既設のアスファルト舗装上
- ・ 既設のコンクリート舗装上またはコンポジット舗装上(健全なPCCスラブ上)
- ・ 破碎された(Rubblizing, Crack/Break and Seat)コンクリート舗装上

②既設PCC上のPCCによるオーバーレイ(付着/非付着型PCCオーバーレイ)

③既設HMACあるいはコンポジット舗装上のPCCによるオーバーレイ

(3) 非構造的オーバーレイによる補修

非構造的オーバーレイは、既設のアスファルト舗装あるいはコンクリート舗装の乗り心地や路面摩擦を改善するために施され、それによって既設舗装の縦断の小さな凸凹を修正し劣化等を抑制できる。一般に3 in.以下の厚さで施工され、既設舗装の交通荷重が少なく構造的に十分で、材料の耐久性の問題が影響しない場合にのみ有効である。

(4) オーバーレイを伴わない補修

オーバーレイを伴わない補修方法には、以下のようなものがある。舗装の状態によって、どの処理を使用すべきかを選択するかが求められ、適切な計画、施工およびタイミングが重要となる。

①アスファルト舗装：パッチング、ポットホール補修、クラックシール、チップシールの敷設、マイクロサーフェシング、コールドミリング

②コンクリート舗装：スラブの安定化、全層打ち換え、部分打ち換え、ダウエルバーの改良、縦横のひび割れや目地のステッチ、ダイヤモンド切削、目地やひび割れの再シール

(5) その他の補修

①路盤排水の修繕/改良

路盤排水の改良は、アスファルト舗装とコンクリート舗装の両方に適用でき、既設舗装構造の中に

排水管や排水口を、あるいは路肩の路盤に透水しやすい良質な材料を設置することである。

②路肩の修繕

アスファルト舗装の路肩は、ひび割れや舗装端部にすき間が生じた場合に修繕が必要である。コンクリート舗装の路肩においては、ひび割れや路肩舗装目地にポンピングの兆候が認められた場合に修繕が必要となる。

9.1.2 既設舗装等の再生利用

舗装構築に適用可能な廃棄物や副産物に関する知識を深めるために、FHWAの舗装構築における廃棄物および副産物のユーザ・ガイドライン等が作られている。それらには、回収されたHMACやPCCの再利用、安定処理した材料やフライアッシュのような産業廃棄物について十分な情報が示されている。例えば、舗装関係から回収された材料を使用する場合の適用性を判定するための技術的評価に必要な条件、環境問題や経済的考慮等が示されており、既に舗装の各層に、廃棄物や副産物が再利用されている。

9.1.3 可能な戦略の選定方法

与えられた舗装の状態に基づいて、実行可能な補修戦略を構築するために必要な特定の措置を決定する場合には、考慮すべき解析と技術者の判断が求められる。実行可能な補修戦略を展開するためには、図-25に示されたステップを用いる。

(1) ステップ1～4：既設舗装の状態・損傷原因の特定・明確化、および制約の特定
舗装補修措置の選択プロセスのステップ1～4では、



図-25 実行可能な補修戦略を決定するためのステップ

既設舗装の総合的なコンディションの評価および全体的な問題の特定を行う。これらは、様々な調査や試験から得られた情報を基に、評価区間が良好か否かを評価するものである。不適切な状態に達する前に舗装の補修を計画し、設計・施工することが大切である。

(2) ステップ5：主要な補修戦略と補修措置の選択

ステップ5では、潜在的な補修戦略を識別する。ステップ5の最初のタスクは、舗装の劣化問題を解決するために適用可能な措置の様々な組み合わせの識別である。措置の各組み合わせは、与えられた補修戦略として定義される。次に、候補となる戦略はプロジェクトの制約を受け、その制約に適合するものが実行可能な補修戦略となる。

(3) ステップ6：可能な補修戦略の予備設計の作成

このステップでは、ステップ5で特定された可能な戦略のために予備設計を検討する。実行可能な補修戦略は、その舗装の将来の予測交通量と気候の結果に大きく影響される。また、補修戦略の予想寿命と信頼性の正確な評価も、設計の一部として、パフォーマンスモデルあるいは過去の経験を用いて決定される。

(4) ステップ7：可能な補修戦略のライフサイクルコスト分析（LCCA）

ライフサイクルコスト分析（LCCA）は、供用期限が終了するまでに必要となる補修戦略のすべてのコストを積み上げて算出するものであり、以下のように分類できる。

- ①管理者コスト：初期補修コスト，将来の維持修繕コスト，将来の処分価値
 - ②利用者コスト：交通遅延コスト，車両運転コスト，事故不快コスト
- (5) ステップ8：補修に影響を及ぼす非貨幣的要因の決定

補修戦略のライフサイクルコストは、異なる設計戦略を総合的に評価するために考慮すべき要素の一つにすぎない。考慮すべき他の要素としては、施工中の交通規制・作業員の安全、潜在的な基盤や気候の問題などがあるが、これらの要因は、貨幣に換算することは困難であるが評価の過程では考慮する必要がある。これは、一般的な方法（同じコストの異なる戦略の絞

り込みのような方法）あるいは判定マトリックス等によって検討した後に、重み付けされた道路管理者の方針と基準の採用により算出できる。

(6) ステップ9：好ましい補修戦略の決定

好ましい補修戦略は、最も適切に破損の原因を評価しており、すべての制約を満足している期間は、既存の劣化の修復と再発防止の両方に効果的である。一般に、与えられたプロジェクトの好ましい補修戦略は、以下のようにでなければならない。

- ①費用対効果に優れること
- ②既設舗装の特定の問題を解決すること
- ③将来の問題を防ぐこと
- ④プロジェクトにおける既存のすべての制約に取り組むこと

ただし、様々な制約（例えば、利用可能な資金）によってネットワークレベルでの最適化が優先され、各プロジェクトの最適化を制限することもあり得るので、好ましい戦略が必ずしも最適とは言えない。

9.2 設計解析

ここでは、既設アスファルト舗装を加熱アスファルト混合物（Hot-Mix Asphalt：HMA）により補修する場合を中心に記述する。ただし、9.2.1、9.2.2では、既設舗装がコンクリート舗装、コンポジット舗装の場合も含む。

9.2.1 補修設計プロセス

既設舗装は、一般的なアスファルト舗装、厚いHMA層を有するアスファルト舗装、フルデプス舗装、安定処理層を有する半剛性舗装、コンポジット舗装、コンクリート舗装であるが、解析上は、図-26に示すように、HMAが表層にある舗装、分割されたコンクリート舗装、健全なコンクリート舗装の3種類になる。

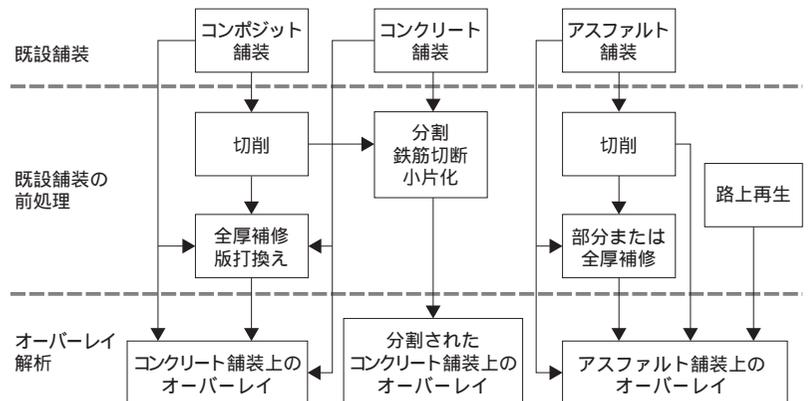


図-26 アスファルトオーバーレイのプロセス

3種類のオーバーレイの解析では、次のような破損を予測する。

- ・荷重要因のHMA層の疲労（表面発生と底面発生
の両方）
- ・荷重要因の化学的安定処理層の疲労
- ・HMA層の永久変形
- ・粒状材層の永久変形
- ・HMAの表層の温度疲労

これに加えて、コンクリート舗装のオーバーレイではコンクリート版の損傷を、3種類のオーバーレイではコンクリート舗装のリフレクションクラックやHMA層のひび割れも考慮する。そして、これらの破損に基づいてIRIを算定する。

9.2.2 補修設計の入力因子

HMAによる補修設計に使用する入力因子は、次のように分類される。

(1) 一般事項

プロジェクト、設計期間、既設舗装の設計時期、オーバーレイの予定時期、交通開放予定時期、既設舗装構造

(2) 現場/プロジェクト名称

(3) 解析パラメータ

破損の種類とその性能規準は任意に選ぶことが可能である。

①初期平坦性

②破損/性能規準

性能を表す指標は次のとおりであり、その規準は信頼度に応じた破損もしくは平坦性の最大値で示される。設計時には、これから、必要に応じて一つ、二つもしくは全てを選べばいい。その際には、室内試験・現地計測から地域・州ごとの標準値といった、三つのレベルのものから一つ選ぶ。

- ・わだち掘れ
- ・HMA層の縦ひび割れまたは表面ひび割れ
- ・オーバーレイ層、既設HMA層、化学的安定処理層の亀甲状ひび割れまたは底面ひび割れ
- ・既設JPCPの目地等による横ひび割れ
- ・既設CRCPのパンチアウト
- ・平坦性

(4) 交通

交通データは、1～4軸の車種ごとに適切な区分を設けて、荷重の分布を定める。

(5) 環境

環境としては、舗装と路床の温度と水分をEICMを

用いて決定する。

(6) 排水ならびに表面特性

(7) 舗装構造 - オーバーレイ層、既設舗装、排水ならびに表面特性

アスファルトオーバーレイの設計は繰返し計算によって行われる。すなわち、まず試設計を行って解析をし、その構造が必要となる性能を満足しないならば、修正を施して再び解析するというように、性能を満足する構造が得られるまで繰返し計算を行うということになる。

解析できるオーバーレイ層は4層までであり、(HMAは3層まで、他の材料は1層)、既設舗装とオーバーレイ層を併せて14層までである(既設舗装のHMA舗装は1層)。複数のHMA層が使用できることは、HMAとして異なった材料を使用できるという利点がある。

9.2.3 既設アスファルト舗装上のアスファルトオーバーレイ

HMAによるオーバーレイは、既設舗装がアスファルト舗装もしくは半剛性舗装の場合に適した方法である。ただし、既設舗装が撤去をしなければならないほどの状態な場合には使用できない。

(1) 下層の排水状態

排水機能はオーバーレイ前に検討する必要がある。特に水分による損傷を受けている場合には重要である。

(2) オーバーレイの前処理

オーバーレイの前処理は、既設舗装の破壊状態の評価、平坦性の改良、均一な支持基盤を作るために必要となる。前処理を行う範囲は経験と工学的判断の両方によって決めなければならないが、オーバーレイ後、1、2年の性能に影響するようなものについては補修すべきである。

前処理の方法としては、亀甲状ひび割れに対するオーバーレイの前処理、縦ひび割れに対するオーバーレイの前処理、横ひび割れに対するオーバーレイの前処理、わだち掘れに対するオーバーレイの前処理、切削、路上再生といったものがある。

(3) 性能規準

性能の指標は、わだち掘れ、亀甲状ひび割れ、縦ひび割れ、横ひび割れ、平坦性である。

(4) 設計信頼性

設計入力値として平均値が用いられると、予測される性能指標は信頼度50%のものである。必要に応じて、高い信頼性レベルでのものも得られる。

(5) 既設舗装の評価

HMAによるオーバーレイの設計において肝要な因子は既設舗装の構造評価である。変形係数ならびに既設アスファルト舗装舗装の初期値を決定するための方法を記述する。

1) 路床ならびに粒状材路盤

①弾性特性

路床、粒状材路盤の場合、各層の変形係数と現時点での永久変形がオーバーレイの解析に必要である。レベル1の方法としては非破壊試験結果を逆解析することにより得られる弾性係数が、レベル2では変形係数と簡易試験による材料特性との間の相関関係が、レベル3の場合は土質分類に基づいた表が用いられる。

②初期永久ひずみ

オーバーレイ前に粒状材層に累積される永久ひずみは解析時の重要な入力因子である。この入力値はレベルによらず、各層のわだち掘れ量になる。レベル1の場合、これは掘削調査によって推定されるのに対し、レベル2と3では設計者が入力する。

2) 安定処理材

安定処理層においては、その変形係数と疲労による損傷が重要な入力因子になる。設計においては、オーバーレイ前の損傷とそれ以後の交通による損傷がこの変形係数に反映されなければならない。変形係数は損傷の関数として表され、初期値から低下していく。なお、この初期値は材料品質の関数であり、一軸圧縮強度から推定される。

レベル1では現時点での損傷レベルにおける変形係数と初期変形係数が、レベル2、3では初期変形係数と損傷度が必要とされる。

3) アスファルトコンクリート

既設アスファルト混合物層は1層として扱われるので、前処理の影響を十分反映させる必要がある。解析においては3種類の入力因子、すなわち、変形係数、現時点における疲労損傷度、現時点における永久ひずみが必要である。

①変形係数ならびに疲労損傷

アスファルト混合物層の変形係数は温度、載荷速度、材齢による変化を考慮できるマスターカーブによって表される。レベル1の場合には損傷のないときのマスターカーブ作成用の現場コアに加えて、初期損傷度と損傷のあるときのマスターカーブ作成用の非破壊試験の逆解析が必要である。レベル2では、

損傷のない変形係数についてはレベル1と同じ方法により求められ、初期損傷度と損傷のある変形係数について詳細な舗装表面性状で調査に基づいて求められる。レベル3の場合試験は必要としない。

②初期永久ひずみ

オーバーレイ前のアスファルト混合物層の永久ひずみの推定は重要な入力因子である。レベルによらず、入力はわだち掘れとなる。レベル1の場合は舗装の掘削により得られた値であるし、レベル2、3の場合は設計者が入力する値である。

(6) 試設計

オーバーレイ構造の試案は、既設舗装の状態、将来の交通状況、事前処理を考慮に入れて選択する。その場合の厚さは経験に基づいて決定する。

(7) 破損予測

オーバーレイの構造設計と解析を考える場合、以下の破損に注目する必要がある。

- ①縦ひび割れ
- ②亀甲状ひび割れ
- ③温度ひび割れ
- ④HMA層のわだち掘れ
- ⑤粒状材層のわだち掘れ
- ⑥安定処理層の変形係数の低下
- ⑦安定処理層の疲労ひび割れ
- ⑧リフレクションクラック

オーバーレイ構造の解析にあたっては、オーバーレイ層における破損の発生箇所と既設舗装の破損発生箇所を考える必要がある。前者の場合は、オーバーレイ層の構成として4種類が考えられ、それぞれに対して表-12に示す発生箇所が想定できる。後者の場合は以下のような発生箇所が想定される。また、これらの破損はIRIを予測する際にも使用される。

- ①亀甲状ひび割れ
- ②HMA層のわだち掘れ
- ③粒状材層のわだち掘れ
- ④安定処理層の変形係数の低下

(8) 試設計の性能評価と設計の修正

性能評価は予想される破損と設計者入力による規準との比較によって行われる。これらの規準値を超えることのないように繰返し計算により舗装構造を決定する。この試案を修正するための方針は、新設ならびに打換え舗装に対するものが使用できる。

オーバーレイが舗装の破損に及ぼす影響は、亀甲状ひび割れとわだち掘れに対しては大きいものの、横ひ

表 - 12 オーバーレイ層における破損発生箇所

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
破 損	全てHMA	最下層に粒状材	中間に粒状材	最下層に安定処理
縦ひび割れ	HMA最上層	HMA最上層	HMA最上層	HMA最上層
亀甲状ひび割れ	HMA最下層	HMA最下層	HMA最下層 HMA粒状材直上層	HMA最下層
温度ひび割れ	HMA最上層	HMA最上層	HMA最上層	HMA最上層
HMA層のわだち掘れ	HMA全層	HMA全層	HMA全層	HMA全層
粒状材層のわだち掘れ	なし	粒状材層	粒状材層	なし
安定処理層の変形係数の低下	なし	なし	なし	安定処理層
安定処理層の疲労ひび割れ	なし	なし	なし	安定処理層
リフレクションクラック	HMA最上層	HMA最上層	HMA最上層	HMA最上層

ひ割れ、IRIに対しては小さい。図 - 27にはわだち掘れの場合を示す。この場合の設計条件は以下のとおりである。

- ①建設場所：米国中西部
- ②交通量：1800万台（トラック）
- ③既設舗装：HMA - 7.5インチ，粒状材 - 12インチ，路床（A-1-b）
- ④設計期間：20年

既設舗装の状態がオーバーレイ後の破損に及ぼす影響は、亀甲状ひび割れに対して非常に大きい（図 - 28）。

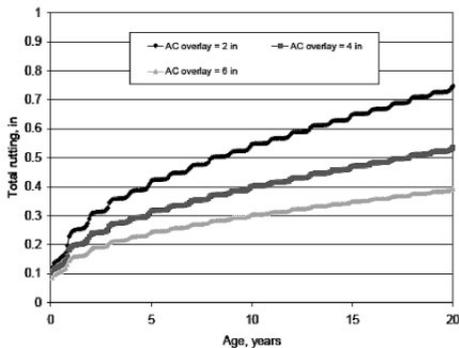


図 - 27 オーバーレイ厚がわだち掘れ量に及ぼす影響

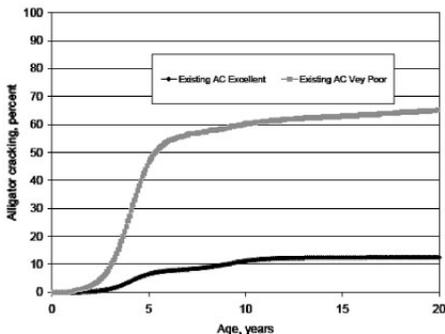


図 - 28 既設舗装が亀甲状ひび割れに及ぼす影響

この場合の設計条件は以下のとおりである。

- ①建設場所：米国中西部
- ②交通量：1800万台（トラック）
- ③既設舗装：HMA - 5インチ，セメント安定処理 - 4インチ，路床（A-6）
- ④設計期間：20年

第10章 プログラム

10.1 概要

M-E pdgのプログラムは、インターネット上で2004年7月に公開された。

本設計法は以下のURLからダウンロードして、プログラムをインストールすることができる。

<http://www.trb.org/mepdg/home.htm>

設計法プログラムは56MBに圧縮されている。気候データはアメリカの各州ごとに準備されているので、必要な州の圧縮ファイルをダウンロードする必要がある。マニュアルはPDFファイルとしてホームページからダウンロードできるが、現在は印刷不可となっている。印刷可能なPDFファイルは設計法のプログラムをインストールすると、ハードディスク上にヘルプファイルのディレクトリが自動的に作成され、そこに保存される。そのファイルを利用するとよい。

M-E pdgのホームページの画面を図 - 29に示す。設計法プログラム（ソフトウェア）をダウンロードするときは、画面中央の **Software** をクリックする。さらに、図 - 30は **Guide** をクリックしたときのマニュアルの選択画面を示したものである。

インストールした後のプログラムの操作手順を簡単に紹介する。詳細な手順は付録Dの「User's Guide」であるPDFファイル形式のマニュアルを参照のこと。

なお、設計法プログラムはパソコンを常時インターネット接続した状態にしておかないと、稼動しないことに注意する必要がある。

インストールした後の画面は、図 - 31 に示すように、画面中央から左側にプロジェクトの情報、入力条件（交通量、気候、舗装構成）、結果（入力条件の要約、出力結果の要約）の領域があり、画面右側上部にプログラムを動かしたときの進捗状況を示す領域がある。画面上の各項目の左側に四角のアイコンが付けられており、未入力のときは赤色に、一部入力しているときは黄色に、完全に入力を済ませたときは緑色になり、解析の進捗状況を確認できるように配慮されている。

10.2 新設アスファルト舗装の設計

新設アスファルト舗装の設計に必要な入力条件は、第1章から第9章で述べたように膨大な項目がある。ここでは、プログラムの画面構成にしたがって、一般情報、交通量条件、気候条件、材料条件に分け、入力条件の一部を表 - 13 に示してみた。

表 - 13 入力条件の一部

一般条件	一般情報 設計期間 路盤 / 路床の施工年月 舗装の施工年月 交通開放年月 設計のタイプ	材料条件	アスファルト混合物 一般 材料のタイプ 層厚 有効バインダ量 空隙率 単位体積重量 ポアソン比 熱的特性 熱伝導率 熱容量 粒度 19.5mmふるい残留量 9.5mmふるい残留量 4ふるい残留量 200ふるい通過量 バインダ 種類
	供用性の基準 初期のIRI 終期のIRI 表面ひび割れ (縦断クラック) 底面ひび割れ (疲労クラック) 温度ひび割れ (横断クラック) 化学安定処理層の疲労ひび割れ 永久変形量 (ACのみ) 永久変形量 (合計)		粒状材、路床材 種類 層厚 強度特性 レベル 解析のタイプ ポアソン比 拘束圧係数 弾性係数 ICM入力条件 塑性指数 4ふるい残留量 200ふるい通過量 D60 最大乾燥密度 比重 飽和水圧伝導率 最適含水比 飽和度
	交通量調整係数 月別調整係数 車両別分布 時間別車両分布 交通量増加率		交通量条件
軸荷重分布係数 一般交通量入力条件 軸 / 大型車の数 軸配置 車輪間隔	交通量条件	交通量条件	交通量条件
気候 経度 緯度 高度 地下水位	気象条件	気象条件	気象条件



図 - 29 ホームページの画面



図 - 30 マニュアルの選択画面

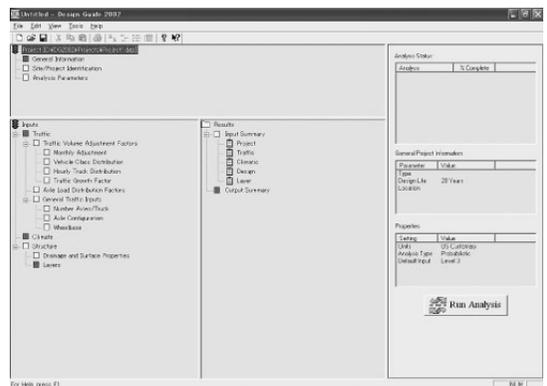


図 - 31 メイン画面

入力条件をすべて設定し、プログラムを動かして計算が終了すると、自動的にMicrosoftのExcelが立ち上がり、計算結果がすべて出力される。主な出力結果として、入力条件の要約、信頼性の要約（目標基準値と

予測値等の比較）、各破損の月別累積予測値の要約、設計期間中の各破損の予測値とグラフがある。表 - 14 に信頼性の要約の出力例を、表 - 15に月別累積予測値の要約の出力例の一部を示す。

表 - 14 信頼性の要約の出力例（新設アスファルト舗装）

Project: AC Conventional Example. dgp Reliability Summary

Performance Criteria	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	179.5	95	265.7	0.04	Fail
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking)(ft/500)	5000	95	10600	1.25	Fail
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking)(%)	25	95	99	0	Fail
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking)(ft/mi)	1000	95	344	100	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	95			N/A
Permanent Deformation (AC Only)(in)	0.2	95	0.12	90.19	Fail
Permanent Deformation (Total Pavement)(in)	0.5	95	0.72	3.86	Fail

表 - 15 月別累積予測値の要約の出力例の一部

Predicted distress: Project AC Conventional Example. dgp

Pavement age		Month	Logitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Rutting (in)	Total Rutting (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)
mo	yr									
1	0.08	October	7010	0	0	0.006	0.221	75.1	20545	115.64
2	0.17	November	8270	0.0004	0	0.006	0.246	75.7	41091	116.21
3	0.25	December	8760	0.0013	0	0.006	0.261	76.2	61636	116.71
4	0.33	January	8810	0.0014	0	0.006	0.267	76.4	82181	116.95
5	0.42	February	9120	0.0057	0	0.007	0.299	77.1	102727	117.64
6	0.5	March	9500	0.016	0	0.008	0.317	77.8	123272	118.37
7	0.58	April	9820	0.0304	0	0.009	0.331	78.4	143817	118.99
8	0.67	May	10000	0.0466	0	0.011	0.341	79	164363	119.52
9	0.75	June	10100	0.0596	0	0.014	0.352	79.4	184908	119.95
10	0.83	July	10200	0.0707	0	0.018	0.363	79.8	205453	120.33
11	0.92	August	10300	0.087	0	0.02	0.371	80.2	225998	120.73
12	1	September	10300	0.109	0	0.021	0.377	80.6	246544	121.19
13	1.08	October	10400	0.146	0	0.022	0.381	81.2	267911	121.71
14	1.17	November	10400	0.201	0	0.022	0.384	81.8	289278	122.32
15	1.25	December	10400	0.262	0	0.022	0.386	82.3	310645	122.87
16	1.33	January	10400	0.347	0	0.022	0.389	82.9	332012	123.47
17	1.42	February	10400	0.466	0	0.022	0.392	83.6	353379	124.12
18	1.5	March	10400	0.582	0	0.023	0.395	84.1	374747	124.7
19	1.58	April	10400	0.748	0	0.023	0.4	84.8	396114	125.38
20	1.67	May	10400	0.86	0	0.025	0.406	85.3	417481	125.87
21	1.75	June	10500	0.952	0	0.027	0.412	85.7	438848	126.28
22	1.83	July	10500	1.03	0	0.03	0.418	86.1	460215	126.67
23	1.92	August	10500	1.11	0	0.032	0.424	86.5	481582	127.07
24	2	September	10500	1.22	0	0.033	0.428	87	502949	127.51
25	2.08	October	10500	1.43	0	0.033	0.431	87.5	525171	128.07
26	2.17	November	10500	1.68	0	0.034	0.433	88.1	547393	128.68
27	2.25	December	10500	1.86	0	0.034	0.434	88.6	569615	129.15
28	2.33	January	10500	2	0.6	0.034	0.436	89	591836	129.58
29	2.42	February	10500	2.44	0.6	0.034	0.442	89.7	614058	130.3
30	2.5	March	10500	2.85	0.6	0.034	0.445	90.4	636280	130.96

表 - 14の設計例によれば、各破損の予測値は横断方向クラックを除いて、目標とした基準値を上回ってしまい、設定した舗装は設計期間中に破損することになる。

10.3 感度分析

K. D. Herboldの「Flexible Pavement Design - The Mechanistic-Empirical Way」¹⁾に書かれている感度分析の概念図の一部を紹介する。図 - 32に加熱アスファルト混合物の厚さの影響を、図 - 33にクラック発生に対する気候のちがいによる影響を、図 - 34に車両の速度の影響を示した。

アイオワ州立大学の技術レポート²⁾では、設計法プログラムの設計入力条件を調査した感度分析の影響の程度をまとめている。アスファルト舗装の感度分析の概要を表 - 16に示す。

表から、アリゲータクラックは路盤の強度、路盤の厚さ、交通量（AADT）に大きく影響を受け、わだち掘れ（全層）は交通量（AADT）、路盤の厚さと種類、表層材料のポアソン比、気候に大きく影響を受けることがわかる。

10.4 設計例

ここでは、設計条件を変化させたときの破損の数値を比較するため、M-E pdg のプログラムを実際に動かして設計を試みた。主な入力条件は以下のように仮定した。

- ・プログラムでは気候の入力条件がアメリカ全土に限定されているので、わが国の気候条件を考慮できない。そこで、代表地としてカリフォルニア州のSAN FRANCISCOを選定した。
- ・交通量のデータはAADT（年平均日交通量）を除き、デフォルトのままとした。
- ・交通量はAADTを100, 1,000とした。
- ・表層（アスコン層）、上層路盤（粒調材）、下層路盤（粒状材）、路床の4層構造とした。
- ・路床のCBRは3, 6とした。
- ・設計期間は10年とした。
- ・その他、不明な設定項目はデフォルトの数値のままとした。

10.4.1 舗装厚さと設計CBRを変化

表 - 17は舗装厚さ（表層と路盤の厚さ）と路床の設計CBRを変化させたときの設計期間終了時の破損値を示したものである。得られた結果をまとめると次のようになる。

- ・表層の厚さを厚くすると、全層のわだち掘れは大

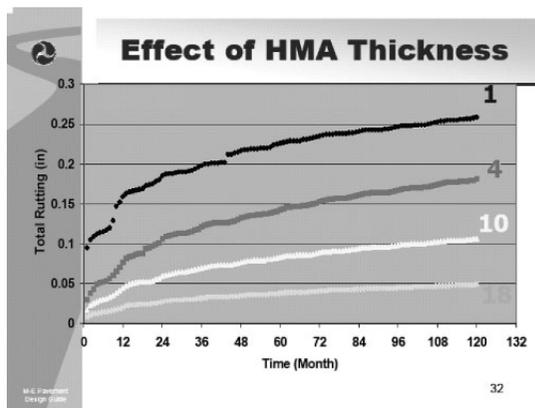


図 - 32 加熱アスファルト混合物の厚さの影響¹⁾

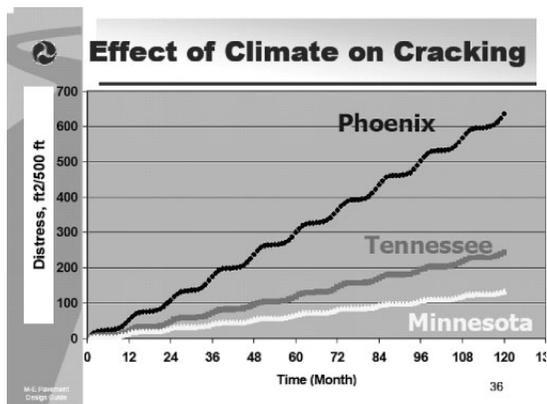


図 - 33 クラック発生に対する気候の影響¹⁾

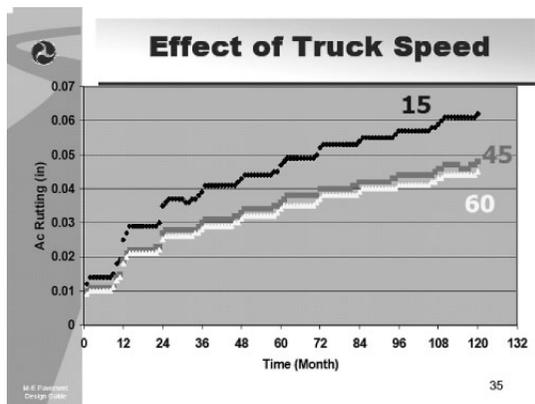


図 - 34 車両の速度の影響¹⁾

きく減少するが、表層のわだち掘れは若干減少する。一方、ひび割れは表層の厚さが10cmの場合に大きくなる傾向がみられた。

- ・路盤の厚さを厚くすると、縦断方向ひび割れおよび疲労ひび割れは小さくなり、全層のわだち掘れ

表 - 16 感度分析の概要²⁾

	入力条件	クラック			わだち掘れ					平たん性
		縦断方向	アリゲータ	横断方向	ACC表層	ACC路盤	路盤	路床	計	
一般情報	ACC層の厚さ	C	E	E	E	E	E	E	E/D	E
ACCの 混合物 特性	最大粒径	C	E	E	E/D	E	E	E	E/D	E
	ASのグレード	A	E	A	D/C	E	E	E	D/C	D/C
	Vbe/Va/VMA	B	E	B/A	D	E	E	E	D	D/C
	単位体積重量	D/C	E	E	E/D	E	E	E	E/D	E
	ボアソン比	D/C	E	E	C	E	E	E	C	E
ACCの 熱特性	熱伝導率	C	E	D	E/D	E	E	E	E	E
	熱容量	B	E	E	D/C	E	E	E	D/C	D
交通量	タイヤ空気圧	B	E	E	D	E	E	E	D	E
	AADT	B	D/C	E	A	C	E	E	A	E
	交通量分布	B	E	E	D	E	E	E	D	E
	速度	B	E	E	C/B	E/D	E	E	C/B	E
	走行位置分布	D/C	E	E	E	E	E	E	E/D	E
気候	場所のちがい	B	E	A	C	E/D	E	E/D	C	C
路盤	層厚	C/B	C/B	E	B	E/D	E	E/D	B	D
	Mr	D/C	A	E/D	B	D/C	E/D	E/D	B	B/C
下層路盤	層厚	D/C	E	E	E	E	E	E/D	E	E
	Mr	E	E	E	E	E	E	E	E	E
路床	Mr	A	D	E	E	E	E	E/D	E/D	E/D
他	骨材の熱係数	E	E	E	E	E	E	E	E	E

凡例 A : Extreme sensitivity B : Very sensitive C : sensitive D : Low sensitivity E : Insensitive
ACC : アスファルト混合物 AS : アスファルト Mr : レジリエント係数

表 - 17 舗装厚さと設計CBRを変えたときの設計例

舗装構成 (cm)	アスコン	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
		粒調材	10	10	10	15	15	15	10	10	10	15	15	15
		粒状材	10	10	10	20	20	20	10	10	10	20	20	20
路床CBR	(%)	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	
交通量	AADT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Longitudinal Cracking	(ft/mi)	0.09	0.1	0.03	0.04	0.02	0.4	0.16	0.47	0.89	0.09	0.10	0.74	
Alligator Cracking	(%)	0.4	2.3	0.4	0.2	1.5	0.3	0.3	1.9	0.3	0.2	1.4	0.3	
Transverse Cracking	(ft/mi)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Subtotal AC Rutting	(in)	0.10	0.09	0.05	0.1	0.08	0.05	0.11	0.09	0.05	0.11	0.08	0.05	
Total Rutting	(in)	0.72	0.56	0.42	0.63	0.49	0.38	0.57	0.44	0.33	0.52	0.40	0.30	
IRI	(in/mi)	82.4	82.5	81.5	82.2	82.1	81.5	82.3	82.3	81.5	82.2	82.1	81.4	

も小さくなる。

- ・設計CBRを大きくすると、疲労ひび割れは若干小さくなり、全層のわだち掘れも小さくなる。表層のわだち掘れは変化がみられない。
- ・IRIはいずれの場合も変化がみられない。

10.4.2 交通量を変化

表 - 18は交通量を変化させたときの設計期間終了時の破損値を示したものである。得られた結果をまとめると次のようになる。

- ・交通量を減らすと、すべての破損の数値が小さくなる。

- ・交通量を減らすとIRIは減少する。

10.4.3 気候を変化（場所を変化）

表 - 19は気候条件を変化させたときの設計期間終了時の破損値を示したものである。

- ・カリフォルニア州のSan FranciscoとLos Angelesでは破損の数値にほとんど影響を与えないが、ChicagoやAlaskaのような寒冷地では低温ひび割れが発生し、IRIの数値も大きくなる。
- ・温暖地としてMiamiを選定したが、わだち掘れは大きくなり、New Yorkと同程度のわだち掘れとなっている。

表 - 18 交通量を変えたときの設計例

舗装構成 (cm)	アスコン	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
	粒調材	10	10	10	15	15	15	10	10	10	15	15	15
	粒状材	10	10	10	20	20	20	10	10	10	20	20	20
路床CBR	(%)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
交通量	AADT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	100	100	100	100	100	100
Longitudinal Cracking	(ft/mi)	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alligator Cracking	(%)	0.4	2.4	0.4	0.2	1.5	0.3	0	0.1	0	0	0.1	0
Transverse Cracking	(ft/mi)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Subtotal AC Rutting	(in)	0.1	0.09	0.05	0.1	0.08	0.05	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
Total Rutting	(in)	0.72	0.56	0.42	0.63	0.49	0.38	0.44	0.34	0.26	0.38	0.30	0.23
IRI	(in/mi)	82.4	82.5	81.5	82.2	82.1	81.5	81.4	81.4	81.3	81.4	81.4	81.3

10.5 まとめ

本章はM-E pdgのプログラムの概要，入力条件およびプログラムを稼働させたときの設計例について述べたものである。特に，設計例は限られた条件のもとでの結果を紹介したものであるため，条件を広範囲に設定して再計算する必要がある。紙面の都合で説明不足が否めないため，M-E pdgの付録等を参照していただきたい。

参考文献

- 1) [http://bridge.ecn.purdue.edu/spave/Technical Info/Pavement Design Guide/3. Flexible Module.pdf](http://bridge.ecn.purdue.edu/spave/Technical%20Info/Pavement%20Design%20Guide/3.%20Flexible%20Module.pdf)
- 2) B. Coree, H. Ceylan and D. Harrington; Implementing the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Implementation Plan, IHRB Project TR-509, Iowa State University, 2005.5

表 - 19 気候条件を変えたときの設計例

舗装構成 (cm)	アスコン	10	10	10	10	10	10
	粒調材	10	10	10	10	10	10
	粒状材	10	10	10	10	10	10
路床CBR	(%)	3	3	3	3	3	3
交通量	AADT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
場所		SF	NY	MI	CH	LA	AK
Longitudinal Cracking	(ft/mi)	0.1	0.17	0.32	0.14	0.19	0.09
Alligator Cracking	(%)	2.3	3.1	5.2	2.6	3.2	1.6
Transverse Cracking	(ft/mi)	0	0	0	2112	0	2110
Subtotal AC Rutting	(in)	0.09	0.20	0.23	0.13	0.13	0.07
Total Rutting	(in)	0.56	0.69	0.74	0.61	0.62	0.56
IRI	(in/mi)	82.5	105.5	93.1	135.2	83.8	131.3

SF : San Francisco CH : Chicago NY : New York
LA : Los Angels MI : Miami AK : Alaska

執筆者一覧

(五十音順)

氏名	所属	執筆章
遠藤 桂	(財)道路保全技術センター	舗装研究部
金井 利浩	鹿島道路(株)	管理本部企画部企画課長代理
坂本 康文	独立行政法人土木研究所	基礎道路技術研究グループ(舗装)
高橋 修	長岡技術科学大学	環境・建設系助教授
竹内 康	東京農業大学	地域環境科学部生産環境工学科助教授
西澤 辰男	石川工業高等専門学校	環境都市工学科教授
野村 敏明	ニチレキ(株)	経営企画部長
八谷 好高	国土交通省	国土技術政策総合研究所空港研究部空港新技術研究官
姫野 賢治	中央大学	理工学部土木工学科教授
松井 邦人	東京電機大学	理工学部建設環境工学科教授
吉村 啓之	前田道路(株)	技術研究所副所長

第15回 IRF世界道路会議参加報告 & 環境に関する各国の研究動向 (第3回E&E会議より)

今回の前半は、アスファルト舗装技術研究グループが初めて海外へ情報発信した第15回IRF世界道路会議の参加報告です。日本の舗装技術の現状を海外へ紹介することを目的としてメンバー4人が、本年6月にタイのバンコクで発表した内容です。次回以降に会議の発表論文(全206編)を紹介していく予定です。

後半は、2004年にオーストリアウィーンで開催され

たヨーロッパの国際会議(E&E会議)の論文の中から環境に関する論文を抽出して紹介します。現在ヨーロッパで、舗装に関連したどのような環境問題が着目されているかが理解できます。我が国も各種環境問題に舗装から取り組んでいるところですので参考となると考えています。

(研究グループ代表幹事: 峰岸順一)

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

峰岸順一 東京都土木技術研究所技術部舗装研究室

阿部長門	東亜道路工業(株)技術部	佐々木 巖	独立行政法人土木研究所
井 真宏	西日本地研(株)		材料地盤研究グループ新材料チーム
市岡孝夫	前田道路(株)技術研究所	佐藤雅規	ジオサーチ(株)
岩岡宏美	世紀東急工業(株)技術研究所	鈴木 徹	大林道路(株)技術研究所
岩塚浩二	(株)パスコ道路センター	鈴木秀夫	昭和シェル石油(株)
打田幸平	日進化成(株)事業本部	高橋茂樹	東日本高速道路(株)千葉管理事務所
江向俊文	前田道路(株)技術研究所	高橋光彦	大成ロテック(株)技術研究所
櫻野 誠	東亜道路工業(株)技術研究所	千原正規	日本道路(株)技術研究所
鎌田 修	独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究舗装チーム	塚越智浩	常盤工業(株)技術研究所
鎌田義秋	ニチレキ(株)道路エンジニアリング部	中村 健	長岡技術科学大学環境・建設系
鎌田孝行	常盤工業(株)技術研究所	長谷川淳也	日本道路(株)
金井利浩	鹿島道路(株)企画部	林 信也	鹿島道路(株)技術研究所
加納孝志	大成ロテック(株)技術研究所	増山幸衛	世紀東急工業(株)技術部技術一課
岸田正憲	(株)パスコ道路センター	焼山明生	日進化成(株)技術研究所
高馬克治	ニチレキ(株)技術研究所	山脇宏成	(株)ガイアートクマガイ技術研究所
小柴朋広	世紀東急工業(株)技術研究所	矢野辰明	鹿島道路(株)技術研究所
小関裕二	大林道路(株)技術研究所	保本敏伸	ニチレキ(株)技術研究所
		森嶋洋幸	前田道路(株)技術本部技術研究所

計35名

第15回 IRF世界道路会議参加報告

井 真 宏* 岩 岡 宏 美** 高 馬 克 治*** 中 村 健****

1. はじめに

第15回IRF (International Road Federation) 世界道路会議が2005年6月14日から18日までの5日間、タイのバンコクで開催された。

バンコク大会のテーマは、「21世紀における道路の管理と運用」であり、世界各国から厳選された多くの論文が寄せられ、活発な議論が展開された。

アスファルト舗装技術研究グループでは、海外への情報発信を目標に、日本における近年の研究動向や技術体系を調査しており、これらをまとめた論文(「R&D by PPP in Pavement Technology Development in Japan」邦題「日本における舗装技術の変遷 - 官民協力による技術開発 - 」)が採用され、本大会で発表する場を得ることが出来た。今回は、発表に至るまでの経緯と発表の様子、またバンコク市内の舗装の状況等を紹介する。

2. 会議参加までの経緯

論文を発表するには、まず論文概要を提出し、これが審査されて採用か否かが決定される。採用となった場合のみ論文が提出できるという仕組みである。また、会議の聴講は、申込をすれば誰でも可能である。

筆者らの、会議参加に至るまでの経緯は次のとおりである。

- ①IRF世界道路会議の情報を得る：平成16年5月初旬
IRFホームページ、雑誌等より情報を得た。
- ②論文概要提出：平成16年5月末
論文概要を1ページ程度にまとめて提出した。
- ③採用発表予定日：平成16年6月30日
この日は、何の情報も得られなかった。
- ④採用決定の連絡：平成16年8月30日
採用発表予定日の5日後、主催者より概要の応募数が多い為、発表が遅れるとの連絡を頂いた。国際会議では、このようなことは頻繁にあるようである。

当初の予定から2ヶ月後、採用決定の連絡を頂いた。また、論文と共に発表者名と顔写真および経歴等紹介を提出するよう指示があった。

- ⑤論文提出：平成16年10月31日
論文を4ページにまとめて提出した。

- ⑥写真等提出：平成17年1月31日

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震により、発表者と一時的に連絡が取れない状態になってしまったため、写真等の提出が出来ない状態であった。幸い発表者は無事であったのだが、この旨を主催者へ相談したところ丁寧な返事を頂き、写真等の提出期限を3ヶ月先に延期して頂いた。

- ⑦参加申込：平成17年3月16日

発表者および聴講者の参加申込をした。

- ⑧発表時間等の連絡：平成17年5月

主催者より発表セッションの開催時間およびプレゼンテーション用資料の提出について連絡を頂いた。

- ⑨会議開催：平成17年6月14～18日

3. 会議

会議はバンコク国際貿易展示センター (BITEC) にて開催され、開会式、展示会、全体会議、テクニカル

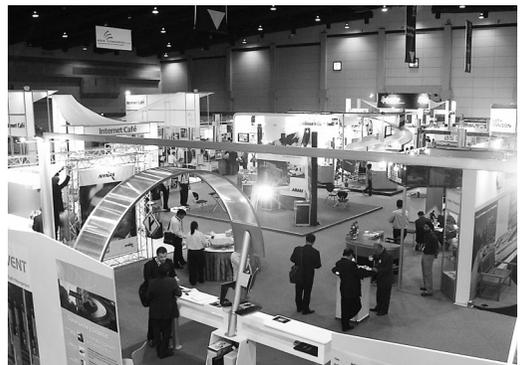


写真 - 1 展示会場

*い まさひろ 西日本地研(株)技術開発室

**いわおか ひろみ 世紀東急工業(株)技術研究所

*** こうま かつじ ニチレキ(株)研究開発センター

**** なかむら たけし 長岡技術科学大学環境・建設系

セッション、閉会式、テクニカルビジット等から構成されていた。

3.1 全体会議

全体会議では、7つのテーマについて講演がおこなわれた。この7つの会議では、同時通訳にて日本語での聴講が可能であった。

3.2 ワーキングセッション

今回はマスタープラン、アセットマネジメント、リサイクルといった約30の分野、37のセッションに分かれて論文発表と意見交換がおこなわれた。

一般的なセッションがおこなわれた会議室は100名程度が聴講できる広さで、発表は進行役より発表者の経歴等が紹介された後、プレゼンテーション、質疑応答という流れで進められた。1時間30分のセッションでは発表者が4名程度、2時間30分のセッションでは発表者が6～8名にて構成されていた。各発表者の発表時刻と発表時間は厳密には決められておらず、セッションの持ち時間を発表者達が共有する形態で進められた。発表時間は意見交換等の状況により調整され、一つの論文につき20分～30分程度であった。

筆者らの論文は構造設計セッションに割り振られ、発表は長岡技術科学大学の中村が担当した。



写真 - 2 発表風景

3.3 展示

会場併設の展示場において、世界各国の道路技術に関する展示がおこなわれた。国別ブースの他、WIRTSCHAFTSUNIONやCOLASなどの会社別ブースがあり、景観舗装を施してあるものや実験の実演、道路設置物の実物展示等、工夫を凝らした展示に多くの技術者が集まっていた。

3.4 テクニカルビジット

技術視察として7つの現場見学コースが設けられており、どれかひとつに参加することができた。

4. バンコクの道路写真紹介

バンコク市内の道路の様子を紹介する。



写真 - 3 バンコク市内の道路

市内の車道は、主に密粒度混合物や砕石マスキックのようなアスファルト分の多い目の詰まった舗装、コンクリート舗装が多く見られた。市内に開粒度混合物は見当たらなかったが、バンコク大学にて独自の現場透水量試験機を開発する等の研究はおこなわれている。

路面には、気温や交通量が厳しいにも関わらず、目をひくような大きなわだちは発生していなかった。

市内の歩道には、インターロッキングブロック舗装や、タイル舗装が多く見られた。陥没やひび割れ箇所が多くあり、補修作業中の場所もあった。



写真 - 4 バンコク市内の歩道

5. おわりに

筆者らは国際会議への参加経験が少なく、国内会議との違いに戸惑うことが多々あった。関係者の皆様の多大なる御尽力のもと、無事に発表を終えることが出来たことに感謝を申し上げます。

また今後、国際会議へ参加される方々に、参考のひとつとして読んでいただければ幸いです。

環境に関する各国の研究動向

(第3回E&E会議より)

鎌田 義秋* 小柴 朋広** 鈴木 秀夫***
 千原 正規**** 矢野 辰明*****

はじめに

Eurasphalt & Eurobitume Congress (以下、E&E会議)は 欧州アスファルト舗装協会(EAPA:European Asphalt Pavement Association)と欧州アスファルト協会(Eurobitume:European Bitumen Association)が共同で主催する国際会議である。E&E会議は、4年毎に開催されており、1996年に第1回フランスストラスブール大会、2000年に第2回スペインパロセロナ大会、2004年に第3回オーストリアウィーン大会が開催された。

第3回E&E会議は、2004年5月12日～14日に開催され、アスファルト材料メーカー・施工会社・コンサルタンツ・大学などの道路および舗装関係者ら55カ国から850人が参加し、総数229編の最新の研究成果等が紹介(写真-1参照)された。



写真-1 第3回E&E会議開催の状況
 (http://www.eecongress.org/default_2004.htm参考)

また、本会議はテーマ毎に8つのテクニカルセッション(表-1)に分類されている。

セッション4では、各国の安全・環境への取り組みや動向等を紹介している。表-2に、セッション4の各論文を分類別に示す。

表-1 テクニカルセッション(第3回E&E会議)

テクニカルセッション	テーマ	論文数
セッション1	適用・革新的解決策	36
セッション2	常温・中温化・リサイクル	30
セッション3	添加材・アスファルト特性	25
セッション4	安全・環境	29
セッション5	老化・耐久性・低温性状	31
セッション6	耐流動・高温特性	26
セッション7	配合設計・特性	33
セッション8	性状予測・基準、指標	19

表-2 セッション4の分類(第3回E&E会議)

分類	論文数
廃棄物・再生	8
騒音・すべり	8(3・5)
タール・ヒューム・再生	6
常温・中温化(環境関連)	4
大気・温室効果	2
燃料効率	1

セッション4では、「廃棄物の再生利用」、「路面特性と騒音・すべり抵抗性の関係」、「タール・ヒュームに対する安全対策」、「常温・中温化」に関する論文が多く、これらが欧州での環境に対する主要な課題であるといえる。

本報告は、第3回E&E会議(2004)のセッション4の論文29編の概要と、その中から地球環境問題に関する代表的な論文を分類別に選定し、詳細にまとめたものである。

1. セッション4の論文概要

セッション4の全29編について、以下にその概要を紹介する。

*かまだ よしあき ニチレキ(株)道路エンジニアリング部
 **こしば ともひろ 世紀東急工業(株)技術研究所
 ***すずき ひでお 昭和シェル石油(株)技術商品部

****ちはら まさのり 日本道路(株)技術研究所
 *****やの たつあき 鹿島道路(株)技術研究所

<p>(1) A. C. A. De Jonghe, W. Van den bergh, J. Verheyen (ベルギー) 「No.009」</p> <p>(2) THE USE OF REDUCED ROOFING FELT WASTE AND RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AS A WARM-MIXED AGED-BITUMEN BOUND BASE (aB³) FOR ROADS</p> <p>(3) 屋根用フェルト廃棄物と再生アスファルト舗装の加熱混合型劣化アスファルト路盤材 (aB³) としての再生利用</p> <p>(4) 1997年にアスファルト舗装とグースアスファルトへの再生屋根用フェルトの研究を行い、1998年は、屋根用フェルトと再生アスファルト合材の劣化アスファルト路盤材へ再生利用する研究を行った。また2001年には、アスファルトの混合と舗装設計法プログラムの研究がされ、試験結果(ホイール、マーシャル、ITT、疲労抵抗、耐支持力)、経済性、環境への影響をバランスよく判断し、劣化アスファルトの路盤材への適用が判定できるようになった。</p>
<p>(1) M. D'APUZZO, B. FESTA (イタリア) 「No.037」</p> <p>(2) THE EVALUATION OF THE EVOLUTION OF ROAD SURFACE FRICTION- A CASE STUDY IN NAPLES' DISTRICT</p> <p>(3) 道路表面摩擦の評価 - ナポリ地区における研究事例 -</p> <p>(4) 路面摩擦力予測により、維持作業をいつ何処で行うかを知ること、より安全な摩擦レベルに回復できる。これらは劣化に関わる各要素に影響され、特に大型車交通量と紫外線での摩擦力減少の評価は重要である。このため、ナポリで高性能改質アスファルト舗装と従来アスファルト舗装で交通量、紫外線、摩擦力、テクスチャの測定を約2年間実施した。2つの等価破損評価基準で早い時期に摩擦力低下モデルを表すことができた。</p>
<p>(1) J. CARSWELL (イギリス) 「No.043」</p> <p>(2) THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN ASPHALT APPLICATIONS</p> <p>(3) アスファルト舗装の施工における再生材料の活用</p> <p>(4) 廃棄物の道路舗装への活用として、アスファルト混合物中の含有物が再生可能であるかが、多くの材料で調査されている。アスファルト製造業者は、健康と環境への負荷、路面性状の低下、過度の費用などに該当する材料を使用すべきではない。環境問題に積極的な姿勢を取るとは、作業上の技術、プロセスでの評価に関わるものである。同様に他製造物の使用や提供をする場合でも適性を評価するために慎重な調査が必要である。当論文はアスファルト舗装の建設での将来の問題を追求し、廃棄物と再生利用の方針と実施を見直すものである。</p>
<p>(1) E. BEUVING (オランダ) T. DE JONGHE (ベルギー) D. GOOS (ベルギー) 「No.068」 T. LINDAHL (スウェーデン) A. STAWIARSKI (ベルギー)</p> <p>(2) FUEL EFFICIENCY OF ROAD PAVEMENTS</p> <p>(3) 道路舗装の燃料効率</p> <p>(4) エネルギー消費は、交通量に依存し、2～5%が道路施工、維持作業で使用される。したがって、種々の舗装路面による燃料消費の影響を知ることは重要である。燃費は、舗装種の違いでは重要ではなく、良好な表面特性であることが重要である。最適な道路維持は、燃費と温室ガス放出を制限することが必要である。環境保護(温室ガス放出)、省エネ、交通騒音および安全性と快適性を確保すること等、広く考えることが必要である。</p>
<p>(1) S. VANSTEENKISTE A. VERHASSELT (ベルギー) 「No.082」</p> <p>(2) THE DEVELOPMENT OF FIELD METHODS FOR A RAPID AND SENSITIVE SCREENING OF TAR IN RECYCLED ASPHALT PAVEMENT</p> <p>(3) 再生アスファルト舗装におけるタールの迅速かつ正確な現場測定法の開発</p> <p>(4) 道路施工、アスファルト製造、再生設備でタールを含むRAP(再生アスファルト舗装)を確認するため迅速、高感度、高精度の検知手段が必要である。当調査は、加熱と常温の再生、廃棄処理を適切かつ容易にするために行った。試料の多環芳香族炭化水素類(PAHs)は、溶剤抽出か真空昇華法で採取し、汚染溶液からの芳香族炭化水素分離は、UVスペクトル測定もしくは蛍光測定で行った。UVスペクトル分析は、石炭誘導体の効果を評価し、最大吸収診断により定量化できた。</p>
<p>(1) N. ABE, A. INOUE (日本) 「No.088」</p> <p>(2) UTILIZATION OF AUTOMOBILE SHREDDER-DUST IN COLD-TEMPERATURE PAVEING METHODS</p>

<p>(3) 常温舗装技術における車の破砕ダストの利用</p> <p>(4) 廃棄車両の約30%は部品として再利用し、50%は原料として再利用される。車の20%は破砕ダストとして残る。破砕ダストの粒径は調整可能である。この破砕ダストは150 μm以上で溶けるためアスファルト舗装やチップング材には使用できない。このため、破砕ダストはマイクロサーフェシング、他常温舗装への利用が考えられた。破砕ダストは重量で25%、容積で約50%をマイクロサーフェシング材料として利用可能であることが分かった。</p>	
<p>(1) Ripke, O (ドイツ) 「No.092」</p> <p>(2) REDUCING TRAFFIC NOISE BY OPTIMISING HOT-MIX ASPHALT SURFACE COURSES</p> <p>(3) 表層加熱アスファルト混合物の最適化による交通騒音の低減</p> <p>(4) 排水性舗装や他の加熱アスファルト混合物 (HMA) による表層は、騒音を低減する可能性がある。排水性舗装は騒音低減に効果があるが、バインダーの劣化と空隙詰まりが引き起こす持続性の低さという問題が未だある。SMAの表面は音響特性的に好都合であることが証明されているが、現在のところ、最高の音響特性を有しているというわけではない。しかしながら、本設計法により、改善の可能性があることが分かった。</p>	<p>(1) M. Hugener, P. Mattrel, L. Emmenegger (スイス) 「No.119」</p> <p>(2) EMISSION MEASUREMENTS FROM TAR-CONTAINING BINDERS</p> <p>(3) タールを含有したバインダーの室内放出量測定方法</p> <p>(4) タールを含んだバインダーはスイスのいくつかの地域で1990年まで大量に使用された。再利用された高いPAH含有量のアスファルトは処分されなければならない。本研究計画は、PAHを含有したタールバインダーとヒュームの関連性を評価するために始められた。研究室での予備実験結果では、PAH放出量はバインダーのタール含有量に一次線形的に依存しており、温度においては指数関数の相関関係の可能性があることが分かった。</p>
<p>(1) Reinhold Rühl (ドイツ) 「No.123」</p> <p>(2) THE GERMAN BITUMEN FORUM-CO-OPERATION IN PARTNERSHIP</p> <p>(3) ドイツの瀝青材料に関する共同討論会</p> <p>(4) 瀝青材料からのヒュームとエアロゾルの健康への危険性の可能性は、ここ数年の議論の主題である。なぜなら、「タール」と「瀝青材料」という言葉の使用についての区別がしばしば不明確となっているためである。瀝青材料に関する共同討論会は、合理化された討論において加熱瀝青材料からのヒュームとエアロゾルの分類と限界値を設定するきっかけとなった。本報告では、瀝青材料に関する共同討論会の取組みと、いくつかの重要な研究成果について述べている。</p>	<p>(1) P. A. Landa, T. Kneepkens, J. Th. v. d. Zwan (ベルギー) 「No.140」</p> <p>(1) LOW TEMPERATURE-ASPHALT, A PRODUCTION PROCESS WITH THE POSSIBILITY TO PRODUCE AND PAVE HOT MIX ASPHALT AT TEMPERATURES BELOW 100 °C OR 212°F</p> <p>(3) 低温アスファルト (アスファルト温度が100 °C または212°F 以下で製造・舗装する工程で作られた加熱アスファルト混合物)</p> <p>(4) 本装置は、連続的に稼動する常温再生プラントにおいて利用できる発泡システムである。バッチ式パグミルミキサー内の高温で埃の立つ環境には、噴射孔と付属物の稼動における保護と安全のため、より強固な設計が必要である。最初の発泡装置は実験室において、配合設計と性能に関する研究が実施され、プラントで製造されたアスファルトによりいくつかの試験走行路が作られ、実際の性能について検討を行った。</p>
<p>(1) Bolk, Ir. H. J. N. A., van Meeteren, Ir. C. M. A., and van der Zwan, Ir. J. Th. (オランダ) 「No.147」</p> <p>(2) Thermal conversion of tar-containing asphalt combined with the asphalt production process: Results of the demonstration project</p> <p>(3) タール含有アスファルト混合物の熱転換：その実機試験結果</p> <p>(4) 本処理法は人体に有害なPAHs等を含むタールを特殊な熱変換を使って完全に除去するというものである。アスファルト合材製造過程に熱変換機を組み合わせたという全く新しい方法である。この処理法によってタールは特殊な反応を経て燃焼工程で完全に除去される。更にその過程で発生したエネルギーはアスファルト合材製造過程で効果的に利用され、残留した不純物の少ない骨材はアスファルト混合物骨材として再利用される。</p>	

<p>(1) M. M. Jacobs and J. J. Fafie (オランダ) 「No.157」</p> <p>(2) Improvement of the early life skid resistance of stone mastic asphalt by gritting or sanding</p> <p>(3) 骨材散布または砂散布による砕石マチックアスファルト (SMA) の初期すべり抵抗性の改善</p> <p>(4) SMAは変形に対する高い抵抗性と騒音低減効果を有するため、オランダでは一般的なアスファルト合材であるが、研磨されたSMAの摩擦レベルが規格に適合しなくなるという問題を生じた。細かく砕かれた骨材または砕砂でSMAを研磨する施工がいくつかの工区で行われた。その結果、初期の摩擦レベルは十分に増大し、また、骨材散布はSMA層の安定度に悪い影響を及ぼさず、音響特性も変わらないことが分かった。</p>
<p>(1) S. DreeBen, R. Ciupe and J. Harders (ドイツ) 「No.185」</p> <p>(2) Rapid high throughput screening test of polycyclic aromatic hydrocarbons contained in reclaimed asphalt and bitumen</p> <p>(3) リサイクル合材及びピチュメン中に含まれる多環芳香族炭化水素 (PAH) の迅速高処理スクリーニング試験</p> <p>(4) 土や埋め立てられるアスファルト合材、並びに、ピチュメンのPAHによる汚染の程度を即時フィードバックするための迅速高処理スクリーニング試験が開発された。この試験方法は現場スクリーニング又は、適切な校正をすることによってPAHの全量を定量化することができる。本方法は、ポリマーの細片を希釈されたサンプル中に浸漬することによるものである。</p>
<p>(1) A. A. Mohamed, R. Muniandy and M. O. hamzah (マレーシア) 「No.194」</p> <p>(2) Texture depth determination for stone mastic asphalt (SMA)</p> <p>(3) 砕石マチックアスファルト (SMA) の表面状態の深さ測定</p> <p>(4) 本論文は、タイヤの舗装面への接触に寄与する路面状態の深さについて記述したものである。実際の現場における挙動をシミュレートし、その結果、骨材のかど張り状態、粗骨材、アスファルト量、空隙率及び密度の5つの因子は、SMAの表面状態深さに影響を与えることを明らかにした。</p>
<p>(1) Lorthar Druschner and Frank Stephan (ドイツ) 「No.197」</p> <p>(2) Porous asphalt - A contribution to skid-resistance</p> <p>(3) 排水性舗装 - すべり抵抗性への寄与</p> <p>(4) 排水性舗装のすべり抵抗性の評価方法として、本検討ではWehner/Schulze (PWS) 試験方法並びに、SRM (すべり摩擦係数測定装置) とSCRIM (横すべり摩擦抵抗測定車) が適用された。本研究の結果、排水性舗装は長期間に渡って相当なすべり抵抗性を示すことが分かった。しかしながら、このためには少なくともPolished Stone Value (PSV) 55の高い摩耗抵抗性を持つ砂利を使用する必要がある。</p>
<p>(1) Lothar Druschner (ドイツ) 「No.198」</p> <p>(2) LOW TEMPERATURE ASPHALT-EXPERIENCE IN ROLLED ASPHALT</p> <p>(3) 中温化アスファルト (ロールドアスファルトでの実験)</p> <p>(4) バインダーにパラフィンを追加材として加えることは温度を低減するのに適した方法の一つである。パラフィンは元のバインダーの粘度を低下させ、製造温度および施工温度を30 低減することができる。これは、高い締固め度を得ることにもつながる。しかも温度低減効果だけでなく、バインダーのスティフネスも増加させ、重交通道路用に適したバインダーとなる。</p>
<p>(1) Jean-Francois GAL-Michel Ballie (フランス) 「No.216」</p> <p>(2) NEW KEROSENE RESISTANT BITUMEN MIXES WITHOUT COAL TAR BY PRODUCTS</p> <p>(3) コールタールを使用しない新しい耐油性混合物</p> <p>(4) 耐油性混合物は、一般的にコールタールバインダーにPVC (塩化ビニル樹脂) を添加し製造されている。これらのバインダーは石油等に対して優れた抵抗力を持つ。しかしながら、コールタールは高い中毒性を持ち、発ガン性物質を含んでいる。COLAS社が行った研究によって新しい耐油性混合物が開発された。これは樹脂を含んでおり、PVC入りのコールタールバインダーを使用した混合物と同等の耐油性能を持つ。</p>
<p>(1) Michel CHAPPAT, Julien BILAL (フランス) 「No.221」</p> <p>(2) ECOLOGICAL PAVEMENT LIFE CYCLE ANALYSIS OF STANDARD PAVEMENT STRUCTURES</p>

<p>(3) 環境にやさしい舗装を標準的な舗装構造として使用したときのライフサイクルの分析</p> <p>(4) 本報では舗装構造の違いによる、地球温暖化と資源消費量への影響について述べる。薄層舗装、改質アスファルト、常温舗装、路上再生工法、セメントコンクリートについて、環境負荷とライフサイクルに関して検討を行った。その結果、環境にやさしい舗装として常温舗装と再生工法が有望であることがわかった。</p>
<p>(1) E. SANTAGATA, M. BASSANI (イタリア) 「No.225」</p> <p>(2) ASSESSING THE EFFECTS OF REFUSE DERIVED PLASTICS USED AS ADDITIVES IN BITUMINOUS MIXTURES</p> <p>(3) 廃プラスチックを添加材としてアスファルト混合物に利用した場合の効果の評価</p> <p>(4) 廃プラスチックをアスファルト混合物に添加材として用いた場合の効果について室内評価を行った。2種類の低密度ポリエチレン (LDPE) について検討した。混合物の評価はマーシャル安定度試験、間接引張試験、繰返し間接引張試験によって行った。その結果、最適な廃プラスチックの種類と添加量を決定することができた。</p>
<p>(1) G. D. AIREY, A. C. COLLOP, N. H. THOM, S. E. ZOOROB (イギリス) 「No.248」</p> <p>(2) USE OF STEEL SLAG AND RECYCLED GLASS IN BITUMINOUS MIXTURES</p> <p>(3) アスファルト混合物への鉄鋼スラグとリサイクルガラスの使用</p> <p>(4) 本報は、鉄鋼スラグ、高炉スラグ、およびリサイクルガラスを使用したアスファルト混合物について、力学的特性の把握を行った。力学的特性の把握として、ノッティンガムアスファルトテスト (NAT) を使用して評価を行った。その結果、各副産物を混入したアスファルト混合物の力学的特性の変化を把握することができた。また、各副産物を混入したアスファルト混合物の適用範囲について検討を行った。</p>
<p>(1) W. D. H. WOODWARD, J. H. JELLIE, A. R. WOODSIDE (イギリス：北アイルランド) 「No.255」</p> <p>(2) THE EARLY LIFE SAFETY OF HIGH STONE SURFACINGS</p> <p>(3) 骨材の配合率が高い舗装の初期の安全性</p> <p>(4) 本報では、高いPSV値を有する骨材 (PSV 65) と針入度100のポリマー改質バインダーを使用した14mmのSMA混合物を適用した路面の3年間のすべり抵抗を観測した結果を報告する。すべり抵抗は複雑に様々な要因が影響し、要因として混合物特性、交通量および車種、作用する応力、および環境条件などがあり、これらによってアスファルト舗装の寿命にさまざまな段階があることが確認できた。</p>
<p>(1) W. D. H. WOODWARD, A. R. WOODSIDE, J. H. JELLIE, D. R. ALLEN (イギリス) 「No.257」</p> <p>(2) THE USE OF GULLY WASTE IN THE MANUFACTURE OF ASPHALT MATERIALS</p> <p>(3) アスファルト舗装材料としての下水汚泥の使用</p> <p>(4) イギリスでは、新骨材の使用と廃棄物の埋め立て処分には税金が課されるため、リサイクル技術の研究・開発が盛んである。本報は、アスファルト舗装材料としての下水汚泥の適用性を検討したものである。下水汚泥をホットロールアスファルトの細骨材として使用し、アスファルト舗装材料への適用性について評価を行った。その結果、細骨材として利用することが可能であることが実証できた。</p>
<p>(1) Paul Phillips, Graeme Richards (イギリス) 「No.272」</p> <p>(2) THE USE OF MIXED POLYMER WASTE PRODUCTS TO PRODUCE PAVING GRADE ASPHALT</p> <p>(3) アスファルト舗装におけるポリマー廃材の利用</p> <p>(4) イギリスでは、効率的に再利用することができないプラスチック廃棄物であるMPWPの再生利用が問題となっている。本報では、MPWPとチャイナクレイ廃材を特殊な工程を経て結合させたプラスチック骨材を製造し、この骨材で粗骨材量の10%を代替したアスファルト混合物を作製した。室内試験の結果、良好な混合物性状が得られ、試験施工において高い耐久性とすべり抵抗性を確認することができた。</p>
<p>(1) BROSSEAUD, ANFOSSO LEDEE (フランス) 「No.291」</p> <p>(2) SURFACE PAVEMENTS WITH LOW ROLLING NOISE LEVEL AND HIGH ADHERENCE: EVALUATION OF THE FRENCH RESEARCHES, DEVELOPMENT OF THE PRODUCTS.</p> <p>(3) 舗装路面におけるタイヤの低回転時の騒音レベルと高い付着性について</p> <p>(4) 公共調査研究所と民間企業は、路面騒音低減のために新たな舗装の開発を行っている。これらの研究開発は、双方</p>

が協力することで、舗装業界として路面騒音の基礎的な段階として位置づけられる。騒音を発生する主要因について調査することで、騒音測定の概要や騒音に関する詳細なデータベースを作り上げた。

- (1) M. PASETTO, N. BALDO (イタリア) 「No.298」
- (2) CATALOGUING POAD PAVEMENTS ON THE BASIS OF THE ACOUSTIC PERFORMANCE OF THE SURFACINGS
- (3) **舗装路面の騒音低減効果に関する規格の作成**
- (4) 舗装路面において、健全状態と劣化している状態についての騒音低減効果についての報告である。タイヤが回転する際に発生する騒音の周波数は、選定された舗装の材料面だけでなく、平坦性等についても要素として考慮する必要がある。これらは主に都市部でのオーバーレイによる排水性舗装に関するもので、路面標識による音響効果もまた研究により確認されている。この規格の作成は、路面騒音に影響する舗装の劣化状態を段階的に把握する上で明確に役に立つものである。

- (1) Jean-Pierre ANTOINE, Jerome MARCILLOUX (フランス) 「No.315」
- (2) ROAD, AGROCHEMISTRY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT
- (3) **道路に関する農業化学と継続的發展**
- (4) 植物性フラックスは、農業の派生物である菜種メチルエステル (RME) である。大気温度の上昇に関連する温室効果ガスについて、石油フラックスとRMEのライフサイクルにおけるSO₂等の排出量を比較し、RMEの有効性を確認した。さらに、揮発性有機化合物 (VOC) 排出量等も測定し、RMEの有効性を確認している。石油フラックスとRME間のコスト差は、ほとんどなく、RMEの価格は、石油の価格よりも安定している。さらにRMEの引火点は石油よりも高いため、安全面で良好である。

- (1) R. VAN WIJK (オランダ) 「No.324」
- (2) THE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ACT, ENERGY EFFICIENCY IN THE DUTCH ASPHALT INDUSTRY
- (3) **オランダのアスファルト産業界のエネルギー効率に関する環境管理行動**
- (4) 温室効果ガスの排出を減らすため、民間と省庁との間で長期共同研究 (LTA) の契約を締結した。LTA-1は、1990年～2000年の期間で実施し、LTA-2は、2001年～2012年の12年間の期間で実施している最中である。LTA-2では、アスファルトプラントにECS (エネルギーケアシステム) を有していることを要件にした。ECSとは、エネルギー効率の改善を実現するための主要なシステムのことである。

- (1) W. Barthel (ドイツ) J. -P. Marchand (フランス) M. von Devivere (ドイツ) 「No.354」
- (2) WARM ASPHALT MIXES BY ADDING A SYNTHETIC ZEOLITE
- (3) **合成ゼオライト添加による中温化アスファルト混合物**
- (4) 加熱アスファルト混合物の製造および施工温度低減の意味するところは、エネルギー消費量削減である。さらに、ヒュームの削減により、環境への影響が改善される。アスファルトを注入すると同時に、予熱した砂および石の混合物内に、aspha-min剤を添加することによって水蒸気が発生しフォームド効果を与え、混合物のワーカビリティが高まる。

- (1) Agnès JULLIEN, Anne VENTURA, Pierre MONERON, Michel SCHEMIDT, David. GAILLARD (フランス) 「No.368」
- (2) LIFE CYCLE INVENTORY OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT
- (3) **再生アスファルト舗装 (RAP) のライフサイクル記録**
- (4) 2001年、フランスの重交通道路において選定された舗装が破碎され、再生アスファルト舗装 (RAP) として試験施工が行われた。再生材混入率は0, 10, 20, 30%と変化させている。この試験施工の目的は、再生材の最適混入率を決定するために行われ、4工区はそれぞれ摩耗層と基層から構成されている。

2. 「廃棄物の再生」に関する論文

アスファルト舗装におけるポリマー廃材の利用 (No.272)

2.1 概要

イギリスでは、他のプラスチック製品中から効率的に再利用することができない合成ポリマープラスチック廃材 (Mixed Polymer Waste Plastic : 以下MPWP) を大量に発生している。現在、巨額の費用をかけてこれらの材料を焼却するか、埋め立て地に送っている。

一方、チャイナクレー廃材のような細骨材の廃棄物も、採石場での生産、保管場所、再生利用方法において問題となっている。

加熱、結合、圧縮、および破碎という工程を経て、これら2つの材料はプラスチック骨材として結合することができる。

本文では、アスファルト混合物の粗骨材容量の10%をプラスチック骨材に代替することにより、良好な混合物の試験結果が得られたことが報告されている。

2.2 プラスチック廃材の発生

イギリス政府の行った調査によると、表-3に示すように、プラスチック廃材は他の主要な工業廃棄物よりも非常に多い結果となった。また、表-4に示すように、現在、プラスチック廃材の再生利用は非常に少ない。

表-3 イギリスの主要な廃材の総量

廃材	トン数(百万t)
ガラス	2.15
ゴム	0.40
古紙	0.40
プラスチック	3.00

表-4 プラスチック廃材の利用に関する調査

利用法	発生元		計
	商業/工業	一般	
埋立てとエネルギー利用	0.912	2.458	3.370
再生	0.496	0.012	0.508
計	1.408	2.470	3.878

(2001年, 単位: 百万t)

2.3 プラスチック廃材の処理

人工骨材の製造において最も有効なプラスチック廃材として選定されたものはMPWPである。シングルポリマーは値段が高いことと、合成ポリマーは他のプラスチック製品よりも再生骨材の製造に適している特性があるためである。

このMPWPは一般廃棄物や自動車廃棄物から入手できる。

プラスチック廃材は以下のような工程を経て再生骨材に加工される。製造工程の概略図を図-1に示す。

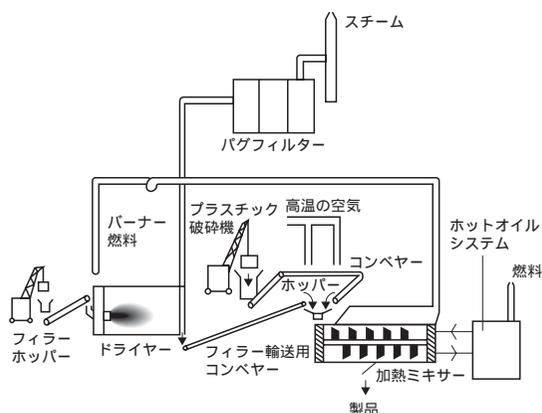


図-1 プラスチック骨材の製造工程

①回収

最も安価なプラスチック廃材はパッケージ等に使われる一般廃棄物である。また、自動車工業においては、破碎した自動車の一部がプラスチック廃材として利用される。

②破碎

プラスチック廃材は工場において最大粒径が50mm以下のチップやリボン状に破碎される。破碎工程によって、廃材のかさは減少し、混合に適した状態となる。

③細骨材廃材

MPWPに5mm以下の細骨材を合成すると、充填材のような働きをするため、物理的な強度が得られる。チャイナクレーや鑄物砂等から発生するさまざまな細骨材が適用可能である。

④プラスチックと細骨材の合成

MPWPと細骨材を150 ~ 180 に加熱し、バグミルミキサーによって混合する。プラスチックは溶解し、細骨材と結合する。溶解した物質は型に流し込まれ、冷却した後に強固だが密度の低い物質となる。

2.4 プラスチック骨材の性状

(1) 粒度

実用性の面から、骨材は楕円形で、最大粒径50mmに固めてから破碎した。表-5に一般的な骨材の粒度分布を示す。

(2) 物理的性質

選定した細骨材とMPWPの混合比は、30 : 70, 60 : 40, 70 : 30である。密度、吸水量、摩耗等の試験を行い、一般的な骨材と比較した。各骨材の物理的性質を表 - 6 に示す。

プラスチック骨材は一般的な骨材に対し、すりへり率や摩擦抵抗性が同等であったが、密度が低く、耐衝撃性が低いことが分かった。

2.5 プラスチック骨材を用いたアスファルト 混合物の製造

(1) 配合

プラスチック骨材は道路用砕石に適した物理的特性をいくつか持っているため、アスファルト混合物に適用できると考えられた。

筆者らは、SMAに似た混合物を検討し、名称を「PLASMATEX」とした。検討を行った本混合物の配合を表 - 7 に示す。

表 - 5 プラスチック骨材の粒度分布

BS410ふるい目 (mm)	通過百分率 (%)
28	100
20	93
14	79
10	64
5	36
2	15
1.18	10
0.600	7
0.425	6
0.300	4
0.150	3
0.075	1

(2) 製造

本混合物は、プラスチックが骨材ホッパーに直接投入可能な、バッチ式プラントで製造された。

(3) 施工

MIX AとMIX Bについて試験施工を行った。

MIX Aは粘着性が高く、敷均しが困難であった。

MIX Bは問題なく敷均すことができた。プラスチックがやや溶けている状態であったため、転圧作業は従来のSMAよりも容易であった。しかしながら、高いキメ深さを得るためには、いくらか表面を均し、修正する必要がある。

2.6 結論

プラスチック骨材はプラスチック廃材と細骨材や廃材から発生するフィラーを合成することによって製造される。

この骨材は以下のような活用が期待される。

- ・廃棄物となるプラスチックやフィラーの処分
- ・コストの削減

表 - 7 PLASMATEXの配合

種類	品質	配合率 (%)	
		MIX A	MIX B
プラスチック骨材	ナントリディア園産ダスト70% MPWP (20 ~ 5 mm) 30%	10	10
粗骨材	14mmバードンヒル産	63.5	64.7
細骨材	チャイナクレール廃材50% ナントリディア園産ダスト50%	12	14
フィラー	クロイドン産再生フィラー (MIX A) グリニッジ産再生フィラー (MIX B)	8	5.3
バインダー	BP 40/60 Pen (MIX A) BP 100/150 Pen (MIX B)	6.2	5.7
繊維	-	0.3	0.3

表 - 6 主骨材とプラスチック骨材の物理的性状

試験項目	骨材		トレント砂利	30%自然砂 70%MPWP	コーンウォール産花崗岩	70%チャイナクレール廃材 30%MPWP	60%チャイナクレール廃材 40%MPWP
	ナントリディア園産骨材	70%ナントリディア園産ダスト 30%MPWP					
	主骨材	プラスチック骨材	主骨材	プラスチック骨材	主骨材	プラスチック骨材	プラスチック骨材
骨材すりへり試験 (AAV) ¹	11	1.6	1.0	2.0	3.0	1.8	1.7
骨材研磨試験 (PSV) ²	71	60	37.46	55	53	62	61
骨材衝撃試験 (AIV) (乾燥) ³	23	1	14	1	20	1	1
10% Fines (湿潤) (kN) ⁴	140	-	320	1170	230	-	-
乾燥密度 (t/m ³)	2.63	1.57	2.56	-	2.61	1.60	1.52
表乾密度 (t/m ³)	2.64	1.62	2.59	-	2.63	1.67	1.55
みかけ密度 (t/m ³)	2.72	1.65	2.65	1.14	2.68	1.72	1.57
吸水率 (%)	1.1	2.9	1.3	-	1.2	4.2	2.1
マイクロバル試験 (MDE)	43	2	-	-	-	2	3
粒子形状/表面粗さ (BS812)	偏平/粗面	不規則/蜂の巣状	不規則/平滑	不規則/蜂の巣状	偏平/粗面	不規則/蜂の巣状	不規則/蜂の巣状

1 Aggregate Abrasion Value BS 812 Pt 113 1990

2 Polished Stone Value BS 812 Pt 114 1990

3 Aggregate Impact Values BS 812 Pt 112 1990

4 10% Fines Aggregate Crushing Test BS 812 Pt 111 1990

- ・安価な細骨材の活用
- ・一般的な骨材の代替品としての活用

(1) プラスチック骨材の特性

骨材としては試験値にややばらつきが多くなった。これは、プラスチック骨材の特性が、骨材よりもプラスチックそのものの特性に大きく左右されるためと考えられる。

プラスチック廃材と細骨材の配合比は、試験結果から70:30か60:40(=細骨材:廃材)が最も適している。

(2) アスファルト混合物

プラスチック骨材はアスファルト混合物に適していると考えられる。プラスチック骨材は、アスファルトを補うことで、転圧作業、粘着力、スティフネスなどを改善する。

今後はすべり抵抗性等、より多くの試験を行い、データを蓄積し、工法を確立する。

3. 「中温化」に関する論文

合成ゼオライト添加による中温化アスファルト混合物(No.354)

3.1 環境問題の様相

1995年では全世界でのCO₂発生量は、約230億tで、ドイツではそのうち、約9億tである。

CO₂排出量削減のEU目標値は1990年から2010年まで15%と定義されている。ドイツにおける政府目標値は1990年ベースの削減率25%で、既に2005年に達成している。

3.2 試験

(1) 中温化アスファルト混合物

加熱アスファルト混合物の製造および施工温度低減は、エネルギー消費量削減という環境問題へ貢献できるといわれている。さらに、ヒュームの削減により、環境への影響改善ができるといわれている。フランスおよびドイツでは、加熱アスファルト混合物における製造温度は、150 から250 である。グースアスファルトでは、250 を用いる。

これより後で述べる工法原理は、混合物に添加剤を0.3%加えて、製造および敷均し温度を約30 低減可能とするものである。

(2) ゼオライト

ゼオライトは、結晶水ケイ酸アルミニウムである。ゼオライトは、自然環境内に存在し、人工的にも生産されている。

合成ゼオライトの性状は、主な性質である粒状性が

大変均一な構造および品質である。天然ゼオライトと合成ゼオライトとは、水分を保持する能力が異なり、また水分を解放する挙動も異なる。アスファルト混合物混合温度の低減目的のために、特殊ゼオライト“asph-min”が開発された。

(3) 中温化アスファルト混合物の製造

この中温化技術は、既存の混合方法に改良を必要としない。アスファルト混合プラントのタイプにより(バッチ式またはドラムミキサー)、混合温度は、130 から145 までをとることができる。これは、約30 の混合温度低減が可能であることを意味する。

この添加剤は、大きな袋または特殊サイロで現在貯蔵されている。添加剤の投入は特殊装置を通して行われる。繊維添加と同様な手順で投入可能である。重要なことは、ゼオライトの添加は混合を遅らせないことである。

(4) ゼオライトの性状およびその作用

aspha-minの特別な構造は、固体結晶水を分子間隙に貯蔵する能力をつくることである。aspha-minを添加することによって水蒸気が発生し、フォームド効果によって施工性が改善する。重要なことは、いくつかの段階でアスファルト混合物に水分を解放していることである。約100 に徐冷されるまで、混合物の締固め性状を観察した。混合物のワーカビリティは、温度変動なしに増加した。さらに混合工程においてバインダーの分離はおこらず、これはバインダー骨材間接着が良好であることを示した。

(5) 排出量の削減

混合温度を30 から35 低減すれば、エネルギー消費量は30%削減される。いくつかの試験結果から、加熱アスファルト混合物年間製造量6,500万tでは、CO₂排出量は40万tの削減となる。製造の低温化は、ヒュームおよび大気浮遊物質の排出量削減も意味する。製造温度低減が26 であれば、ヒューム排出量削減は75%となる。

プラント製造現場での測定値は、混合温度が175 から140 に減少したとき、実際にヒューム排出量削減が90%を超える結果となった。

臭気の評価においても有効な結果が見られた。測定値から、ゼオライトを添加し製造温度を低下したすべてのケースにおいて、臭気単位(GE's)数の低下が見られた。

(6) ワーカビリティおよび供用性能

アスファルト混合物は、ゼオライトを使用すれば製

造温度を低減でき、従来のアスファルト混合物製造と同様に取り扱うことができる。同じアスファルト混合物の同一温度における比較試験を実施した。ゼオライト添加剤aspha-minの温度低減効果を示すためにフランスの混合物タイプ：(BSBG) 0/10にaspha-minの添加有り無しで評価した。この混合物は、基層用として5 cmで敷均された。混合物の製造温度を170 および140 とし、転圧方法を2方法(即時および放置後)実施した。

下記の試験工区が施工された

- ①混合温度170 ゼオライトなし(以下, ①)
- ②混合温度140 ゼオライトあり(以下, ②)
- ③混合温度140 ゼオライトなし(以下, ③)

使用混合プラントはバッチ式プラントである。このアスファルト混合物の温度測定点は、出荷時点、現場到着時点(運搬時間約1時間)、フィニッシャーのホッパー内、フィニッシャーのスクリー部、およびフィニッシャーのスクリード部である。結果を表-8に示す。

表-8 試験施工結果

製造方法	転圧方法	厚さ (cm)	空隙 (%)	5 cm換算空隙	弾性係数 (MPa)
①	即時	6.1	6.7	6.0	11000
②	即時	4.8	5.3	6.6	12400
③	即時	6.0	8.5	9.2	10400

ゼオライトありの製造に関して、特に問題は無かった。製造方法②は、仕様範囲内の空隙率(5.3%)を許容するが、①では6.7%であった。弾性係数測定による力学性状は変動しなかった。

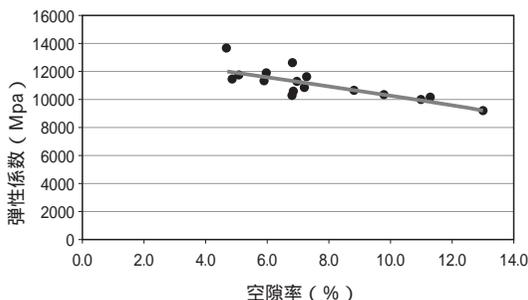


図-2 空隙率(%)と弾性係数(Mpa)

(7) 性状についてのまとめ

ゼオライト試験工区の第1回施工から、3年が経過した。第1回目の範囲では表面性状に有意な変化は見られず、変形もみられなかった。中温化またはゼオラ

イト添加中温化アスファルト混合物が従来型加熱アスファルト混合物と遜色ないことを示す。さらに、中温化アスファルト混合物は、製造時における加熱が抑えることができるため、酸化劣化を減少させることが期待できる。

3.3 結論

aspha-minの添加は、特別な問題を起こさず、貯蔵性(または取扱い容易さ)の点でも制限はなかった。

ゼオライトの添加は混合時間を延長させないので、出荷能力は従来型加熱アスファルト混合物の場合と変わらなかった。

混合温度を約30 低下させることにより、エネルギー消費量を削減させた。エネルギー消費量の削減は、CO₂の大気中への排出量削減につながる。ヒュームおよび臭気の排出低下と組み合わせれば、環境問題改善になる。さらに、低温度になるとアスファルト混合プラントの減耗および破損度合いは低下する。また、混合温度の低下が使用アスファルトの酸化劣化反応を遅らせ、混合物の寿命を伸ばすことになる。

施工時の外気温は、約30 から氷点近くまでさがる。これらすべての温度条件下で、従来どおりの混合と製造をしたアスファルト混合物と比較したが有意な差は得られなかった。ゼオライトを添加すると、混合物の単価は増加するが、燃料消費量の削減、プラントの減耗および破損の減少によりコスト削減ができる。さらに費用対効果の算出は、作業環境改善のみ対象とするのではなく、ヒューム、臭気およびCO₂の大気中への排出量削減も対象としている。これらすべての因子をアスファルト混合物の製造および舗装業界に取り入れることが重要であり、それが道路建設においてアスファルト混合物の継続的な使用に貢献できるであろう。

4. 「大気・温室効果」に関する論文

道路に関する農業化学と継続的発展 (No.315)

2000年E&Eパルセロナ大会で、石油(または炭素)フラックスの代替えとして、植物油メチルエステル(VOME)を利用した新世代の無水アスファルトパイナダが紹介された。以来、代替えの方法は、瀝青混合物の貯蔵から乳剤にまで広がった。これらの各プロジェクトは、環境負荷を抑制する考えに基づき行ったものである。なお、石油または炭素フラックスとは地表面における単位時間、単位面積で輸送(交換)される物質やエネルギーなどの量のことであり、ここでは石油の炭素放出・吸収による移動量のことである。

目的は、①スプレイヤー散布での揮発性有機化合物（揮発性有機物）減少②現場での作業環境改善③引火点以上での製造と貯蔵の安全性向上である。植物油（菜種）メチルエステル（以下RME）は、蒸気または揮発性有機物を発生しないことから、引火点以上での危険性を抑制する。農学的に石油（または炭素）フラックスは、環境に対して影響をおよぼすといわれ、RMEの優位性を実際にフィールドで確認する必要がある。

ライフサイクル分析により、水への揮発性有機物排出、エネルギーや温室効果が解明できる。

また、自動車エンジンでRMEと化石燃料の燃焼性について比較したがほとんど差はなかった。しかし、RMEを道路に適用した際の燃焼性は全くなかったことは注目すべきことである。そこで、エネルギー効率と温室効果について評価を行った。ライフサイクルの各段階を図-3に示す。

図-3は、石油フラックスに関する有害性と産出について示したものである。また、欧州連合共同農業政策を勘案することは重要である。この政策は、休閑地の開発で植物の生産性を制限するものである。RMEは、これらの休閑地で生成される。

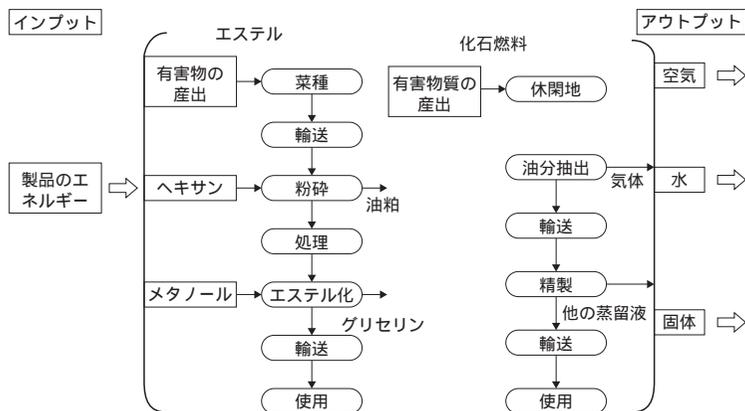


図-3 石油フラックスとRMEのライフサイクルの比較

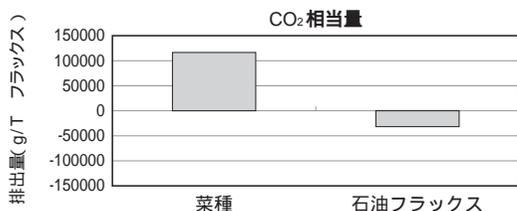


図-4 石油フラックスとRMEの二酸化炭素排出の比較（+方向は吸収、-方向は放出を示す）

4.1 エネルギーへの影響

再生可能と非再生可能エネルギーの結果を表-9にまとめた。

表-9 再生可能と非再生可能エネルギーの結果

	RME	化石燃料
再生可能エネルギー (GJ/T)	155	-
非再生可能エネルギー (GJ/T)	55	190
合計 (GJ/T)	210	190

RMEは、石油フラックスより再生可能エネルギーは155GJ/Tと大きく、また非再生可能エネルギーは石油フラックスより5.5倍少ない量である。

4.2 温室効果の影響

大気汚染に関する最初の研究は、温室効果に寄与する気体の排出についてである。温室効果を示す8種類の気体（SO_x・CO₂・NO_x・CH₄・NMHC・NH₃）の排出を石油フラックスとRMEについて比較した。各気体の集中的な排出は、温室効果に悪影響をおよぼすことは明らかである。図-4に石油フラックスとRMEの二酸化炭素の排出について示す。

石油フラックスは、1 t 当たり30gの二酸化炭素を放出するのに対し、RMEは1 t 当たり130kg吸収する。

したがって、RMEは大気中の二酸化炭素排出量を大きく減少させる効果がある。

また、光合成によるCO₂吸収の効果は重要である。光合成により、RMEは95%のCO₂を貯蔵する。このような効果から、RMEは道路利用でもCO₂の排出が抑制されることになる。

4.3 揮発性有機物（VOC）の影響

VOC排出は、特に都市部でオゾン汚染の原因となる場合がある。RMEの気化は、オゾン汚染を抑制するのに非常に有効な方法である。これらの結果を図-5に示す。

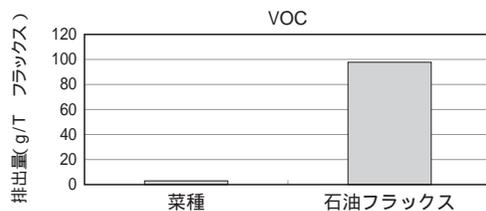


図-5 石油フラックスとRMEのVOC排出量の比較（+方向は排出を示す）

なお、揮発性有機物とは、揮発性が非常に高い有機化合物であり、トリクロロエチレン・農薬などがある。地表では大気中に拡散するが、地下水に残留することから、水道などの汚染物質として重要視されている。

4.4 水への影響

水への影響を確認するために、主に4種の測定(図-6)を行った。化学酸素要求量(COD)の問題と同様、水に含まれる有機物質は、動物と植物にとって高い危険性がある。また、生物学的酸素要求量(BOD)も比較している。さらに、富栄養化現象への効果(植物中の窒素、リン、微量元素などのような栄養分増加の抑制)は、石油フラックスよりかなり優位である。

なお、懸濁物とは水中に存在している懸濁粒子である。化学酸素要求量(COD)とは、水中の有機物などを酸化剤で酸化するときに消費される酸化剤の量を酸素の量に換算したものであり、有機物のおおよその目安として用いられる。また生物化学酸素量(BOD)とは、水中の汚染物質(有機物)が好気性バクテリアなどの微生物により、無機化あるいはガス化(酸化分解)される際に消費される酸素量のことであり、数値が大きくなると水質が汚れていることを意味する。また溶解物質とは、水中に溶解する物質の量であり、水質汚濁状況を図る指標である。

RMEは、CODは高いがBODと溶解物質は低い。また、富栄養化への効果も石油フラックスよりかなり有効である。

4.5 結論

ライフサイクル分析により、環境について比較を行った。RMEは、石油フラックスより非再生可能エネルギーの消費を大きく減少できる。また、VOCの排出と温室効果に有効である。また、ライフサイクル分析は環境維持開発または環境発案政策のみを評価するものではなく、道路施工の現場作業で、ヒューム減少などの労働条件改善の報告もある。経済的観点では、石油と植物性フラックスのコストの差は小さい。しかし、RMEの価格は、石油より安定である。また引火点は、揮発性有機物を含むものより180と高いことから、より安全な製造が可能である。「社会活動」の観点から、RMEはより一定レベルで管理がしやすく、販路も一定である。これらの理由からRMEは、無水アスファルトまたは乳剤への利用ができる。それをバイオフィラックスと呼び、アツピア近郊での環境的観点による積極的な施工がその実例である。

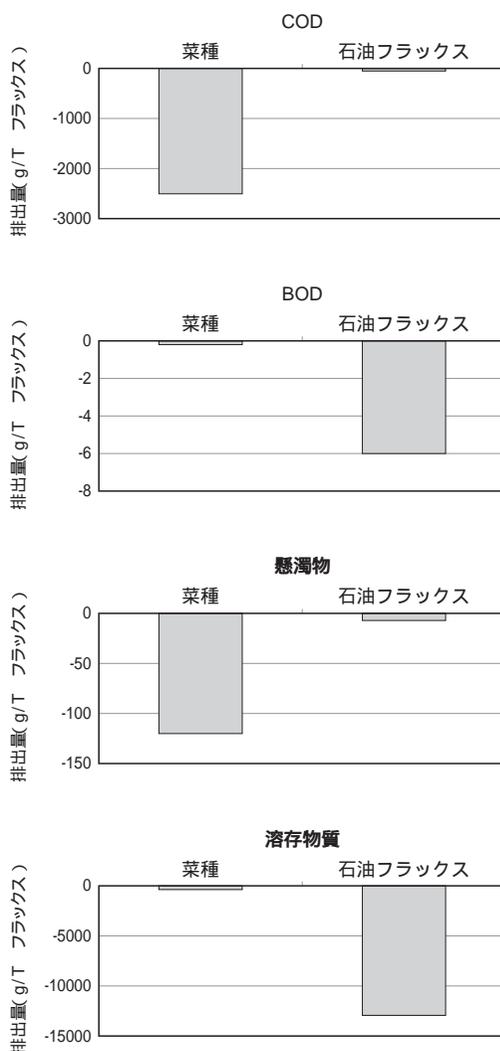


図-6 水中に溶解する石油フラックスとRMEの浮遊物質COD、BODの比較(-方向は溶出が多い)

おわりに

近年、環境問題として「地球温暖化」「廃棄物の増大」「有害化学物質による大気汚染」「エネルギー問題」「作業環境問題」等さまざまな問題が指摘される中、我々は常にそれらを意識し、積極的に取り組んでいかなければならない。このような環境問題は、我が国だけではなく世界的規模で取り組むべき課題といえよう。

最後に、第3回E&E会議(2004)の環境に関する各国の論文を紹介したが、我々は今後もこれらの研究成果や適用事例等を一情報として集約し、環境問題についてさらに対策を検討し、実施していく必要がある。

<統計資料>

1. 石油アスファルト需給実績（総括表）

（単位：千t）

年 度	供 給					需 要					
	期初在庫	生 産	対前年 度比(%)	輸入	合 計	販 売 (内需)	対前年 度比(%)	輸出	小 計	期末在庫	合 計
15 年 度	226	5,492	(104.8)	0	5,719	3,891	(87.0)	282	4,173	262	4,435
16 . 7 月	243	506	(129.7)	0	749	267	(93.7)	31	299	259	558
8 月	259	448	(108.4)	0	707	279	(98.5)	32	311	268	579
9 月	268	436	(105.5)	0	704	295	(93.1)	20	315	244	559
7 ~ 9 月	243	1,390	(114.2)	0	1,632	842	(95.0)	83	926	244	1,169
10 月	244	480	(96.7)	0	724	323	(88.2)	18	341	242	583
11 月	242	463	(95.9)	0	705	376	(107.1)	11	387	206	593
12 月	206	591	(105.3)	0	797	363	(94.8)	14	377	250	627
10 ~ 12 月	244	1,534	(99.6)	0	1,777	1,061	(96.5)	43	1,104	250	1,354
17 . 1 月	250	456	(109.7)	0	707	266	(100.9)	26	292	244	547
2 月	255	508	(92.7)	0	763	315	(87.4)	18	333	264	597
3 月	264	674	(99.4)	0	938	485	(93.6)	25	510	250	760
1 ~ 3 月	250	1,638	(99.8)	0	1,888	1,066	(93.3)	69	1,135	250	1,385
16 年 度	262	5,671	(103.3)	1	5,934	3,693	(94.9)	299	3,993	250	4,243
17 . 4 月	250	392	(94.7)	0	642	238	(103.6)	31	269	266	535
5 月	266	327	(97.9)	0	592	218	(103.0)	35	253	265	518
6 月	265	383	(105.8)	0	648	233	(82.5)	39	272	265	536
4 ~ 6 月	250	1,102	(99.2)	0	1,352	689	(95.2)	105	794	265	1,059

2. 石油アスファルト内需実績（品種別明細）

（単位：千t）

年 度	内 需 量						対 前 年 度 比					
	ストレート・アスファルト				ブ ロ ー ン ア ス フ ア ル ト	合 計	ストレート・アスファルト				ブ ロ ー ン ア ス フ ア ル ト	合 計
	道路用	工業用	燃焼用	計			道路用	工業用	燃焼用	計		
15 年 度	3,079	112	548	3,739	152	3,891	97.0	59.1	58.5	86.9	88.8	87.0
16 . 7 月	195	7	54	257	11	267	86.2	84.1	142.0	93.9	88.8	93.7
8 月	200	8	60	268	11	279	90.3	90.3	143.3	98.5	97.1	98.5
9 月	239	10	32	280	15	295	92.9	100.3	86.3	92.3	109.9	93.1
7 ~ 9 月	634	25	146	805	41	842	89.9	91.8	125.1	94.8	99.3	95.0
10 月	244	11	55	310	13	323	83.2	97.9	121.0	88.6	79.9	88.2
11 月	291	14	55	361	15	376	106.8	137.6	102.0	107.0	109.3	107.1
12 月	286	12	50	349	14	363	93.0	139.0	94.8	94.4	106.6	94.8
10 ~ 12 月	821	38	161	1,020	41	1,061	94.0	123.3	105.1	96.5	97.5	96.5
17 . 1 月	191	11	50	252	13	266	98.6	116.0	110.3	101.3	92.9	100.9
2 月	241	12	51	304	11	315	83.1	97.1	111.5	87.3	88.5	87.4
3 月	411	14	47	473	12	485	90.9	110.6	113.9	93.3	104.9	93.6
1 ~ 3 月	843	37	149	1,029	37	1,066	90.1	107.2	111.8	93.2	95.1	93.3
16 年 度	2,863	119	561	3,543	150	3,693	93.0	106.0	102.3	94.8	99.0	94.9
17 . 4 月	162	9	55	227	10	238	89.1	125.1	187.1	103.6	103.3	103.6
5 月	146	7	54	208	10	218	89.5	140.7	167.7	103.4	95.5	103.0
6 月	165	8	45	218	15	233	75.0	126.8	105.8	81.2	108.9	82.5
4 ~ 6 月	473	25	155	653	36	689	83.7	129.9	148.0	94.8	103.1	95.2

〔注〕(1) 内需量合計は、石油連盟発行「石油資料月報」より引用。

(2) 道路用ストレート・アスファルト = 内需量合計 - (ブローンアスファルト + 燃焼用アスファルト + 工業用ストレート・アスファルト)

有限責任中間法人 日本アスファルト協会会員

社 名	住 所	電 話
[メーカー]		
出光興産株式会社	(100-8321) 千代田区丸の内3-1-1	03(3213)3134
コスモ石油株式会社	(105-8528) 港区芝浦1-1-1	03(3798)3874
三共油化工業株式会社	(103-0025) 中央区日本橋茅場町1-7-7	03(5847)2611
株式会社ジャパンエナジー	(105-8407) 港区虎ノ門2-10-1	03(5573)6000
昭和シェル石油株式会社	(135-8074) 港区台場2-3-2	03(5531)5765
新日本石油株式会社	(105-8412) 港区西新橋1-3-12	03(3502)9122
[ディーラー]		
東北		
株式会社男鹿興業社	(010-0511) 男鹿市船川港船川字海岸通り1-18-2	0185(23)3293
カメイ株式会社	(980-0803) 仙台市青葉区国分町3-1-18	022(264)6111
関東		
朝日産業株式会社	(103-0025) 中央区日本橋茅場町2-7-9	03(3669)7878
株式会社アスカ	(106-0032) 港区六本木4-11-4	03(5772)1505
伊藤忠エネクス株式会社	(153-8655) 目黒区目黒1-24-12	03(5436)8211
エムシー・エネルギー株式会社	(100-0011) 千代田区内幸町1-3-3	03(5251)0961
コスモ石油販売株式会社	(104-0032) 中央区八丁堀3-3-5	03(3551)8011
コスモアスファルトカンパニー		
関東礦油エネルギー株式会社	(107-0051) 港区元赤坂1-1-8	03(5474)8511
竹中産業株式会社	(101-0044) 千代田区鍛冶町1-5-5	03(3251)0185
中西瀝青株式会社	(103-0028) 中央区八重洲1-2-1	03(3272)3471
株式会社南部商会	(108-0073) 港区三田3-13-16	03(5419)9861
日東商事株式会社	(170-0002) 豊島区巢鴨4-22-23	03(3915)7151
丸紅エネルギー株式会社	(101-8322) 千代田区神田駿河台2-2	03(3293)4171
ユニ石油株式会社	(107-0051) 港区元赤坂1-7-8	03(3796)6616
中部		
鈴与商事株式会社清水支店	(424-8703) 清水市入船町11-1	0543(54)3322
松村物産株式会社	(920-0031) 金沢市広岡2-1-27	0762(21)6121

有限責任中間法人 日本アスファルト協会会員

社名	住所	電話
近畿・中国		
出光アスファルト株式会社	(531-0071) 大阪市北区中津6-3-11	06(6442)0031
三徳商事株式会社	(532-0033) 大阪市淀川区新高4-1-3	06(6394)1551
昭和瀝青工業株式会社	(670-0935) 姫路市北条口4-26	0792(26)2611
千代田瀝青株式会社	(530-0044) 大阪市北区東天満2-10-17	06(6358)5531
富士商株式会社	(756-8501) 小野田市稲荷町10-23	0836(81)1111
株式会社松宮物産	(522-0021) 彦根市幸町32	0749(23)1608
横田瀝青興業株式会社	(672-8057) 姫路市飾磨区細江995	0792(33)0555
四国・九州		
今別府産業株式会社	(890-0072) 鹿児島市新栄町15-7	0992(56)4111
三協商事株式会社	(770-0941) 徳島市万代町5-8	0886(53)5131
西岡商事株式会社	(764-0002) 仲多度郡多度津町家中3-1	0877(33)1001
平和石油株式会社高松支店	(760-0017) 高松市番町5-6-26	0878(31)7255

編集顧問	編集委員			
多田宏行	委員長：中村俊行			
	安崎裕	大坪義治	服部潤	峰岸順一
	神谷恵三	田井文夫	姫野賢治	森久保道生
	栗谷川裕造	塚越徹	山本泰幹	吉村啓之
	小島逸平	野村健一郎	溝淵優	

アスファルト 第218号

平成17年10月発行

有限責任中間法人 日本アスファルト協会

☎ 105-8412 東京都港区西新橋1-3-12

新日本石油株式会社 エネルギー・ソリューション1部内

問い合わせ先

・昭和シェル石油株式会社 中央研究所 森久保道生

TEL 046-285-0829

・新日本石油株式会社

エネルギー・ソリューション1部

塚越徹

TEL 03-3502-9134

印刷所 キュービシステム株式会社

☎ 104-0061 東京都中央区銀座1-21-7

GNビル4F TEL 03-3538-3171(代)

Vol.48 No.218 APRIL 2005

Published by **THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION**