



舗装と交通荷重における地盤工学

2. 舗装と交通荷重における地盤工学—概論

吉田 信之 (よした のぶゆき)

神戸大学准教授

八谷 好高 (はちや よしたか)

財港湾空港建設技術センター 審議役

竹内 康 (たけうち やすし)

東京農業大学教授

関根 悦夫 (せきね えつお)

財鉄道総合技術研究所軌道・路盤研究室 室長

2.1 はじめに

舗装は、交通荷重を支える立派な基礎構造物であるが、地盤工学ではこれまであまり注目されてこなかった。舗装は、最も身近なインフラである道路のほか空港や鉄道でも交通荷重を支持する基礎構造物として重要な役割を担っている。また、環境負荷が小さく、安全、快適で円滑な交通を確保することも重要な役割である。

さて、道路を例にとると、舗装にはいろいろあるが¹⁾、図-2.1に示すアスファルト舗装とコンクリート舗装がほとんどを占める。路面から順に表層、基層、路盤、路床、路体(元地盤)といった多層構造でできており、一般には表層から路盤までを舗装と呼んでいる。空港舗装の場合も同じであるが道路と比べるとより多くの層と厚さからなっている。鉄道の場合は、道路や空港の舗装と異なり、図-2.2のように、上から軌道、路盤、路床という構成で、レール面が交通荷重を受けることとなる。

舗装の構造設計の基本は、路面で受ける交通荷重が下層へ各構成層の負担が小さくなるよう合理的に伝播するように、各層の構成や材料を決めることである。

本章では、舗装に対して地盤工学が貢献できる事項について道路舗装の構造設計を中心に紹介する。紙数の制

約上、すべての事項を詳細に記述することができなかったことをあらかじめことわっておく。

2.2 舗装設計—現在・過去・未来

2.2.1 アスファルト舗装の設計法

本節では、我が国の道路舗装の構造設計の変遷を中心に懐述し、最近の構造設計法についても言及する。

我が国のアスファルト舗装の構造設計は、1950年に道路工法叢書第6集として発行されたアスファルト舗装要綱がバックボーンとなっている。これには、1901年に発表されたマサチューセッツ公式を取り入れた設計法が示されている。輪荷重は45度の広がりを持って下層へ伝播していくと考えて層厚を決定する方法である²⁾。すなわち、路面で受ける交通荷重が路床に悪影響がでないほど小さくなるよう経験的手法によって舗装厚を決定するということである。その後、アスファルト舗装要綱は主に路床土および交通荷重の取り扱いの変更を中心に更新されていくことになる。なお、1950年の初版から1992年改訂版までの構造設計法の変遷については多田³⁾に詳しくまとめられているので是非参照されたい。

さて、我が国の舗装構造設計にCBR設計法が導入されたのは1961年版(第1回改訂版)である。路床土の設計CBRから舗装合計厚を、路盤材の修正CBRから各層厚を決定する方法である。ちなみに、路床とは人工的に処理しない自然状態の土の部分を行い、切土区間では天然地盤であり、盛土区間では路盤の下の土の部分であるとしている。また、アスファルト混合物の配合設計にマーシャル安定度試験を導入したのもこのときである⁴⁾。

次に、現在でも主流となっているCBR- T_A 設計法の土台が築かれたのは1967年版(第2回改訂版)である。AASHTO道路試験で定義されている舗装厚指数および相対強度係数の考えを取り入れて、アスファルトコンクリート等値厚 T_A と等値換算係数 a_i を導入した。これによって初めて、舗装の構造設計時に各構成層の強度特性をアスファルトコンクリートとの相対的強度としてではあるが考慮できるようになった⁵⁾。構造設計は、各層材料の等値換算係数と各層厚の積の和として設計 T_A を計算し、これが必要等値厚 T_A を下回らないように舗装構成と舗装厚を決定するというものである。ここで、必

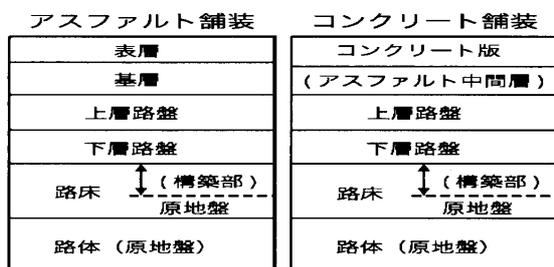


図-2.1 道路舗装の代表的な舗装構成(文献1)を一部修正)

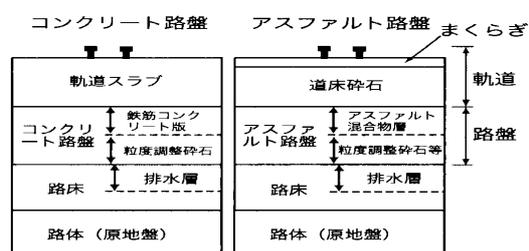


図-2.2 鉄道の代表的な舗装構成

要等値厚 T_A および舗装合計厚 H は設計 CBR と設計輪荷重のべき関数で表されているが、利便性を考え典型的な値を表形式で与えている⁷⁾。また、このときに交通条件として大型車交通量区分 (A~D) を導入し、交通量区分ごとに設計輪荷重を定めた。路床については舗装の下の厚さ約 1 m の部分をいい、盛土区間では盛土仕上がり面より、切土区間では掘削面より、また改良区間では改良面よりそれぞれ約 1 m 下の部分であるとしている。路床の定義はこれ以降、2001年版までかわらない。

その後の大きな変化の兆しは1992年版 (第4回改訂版) に見られる。すなわち、構造設計法について、“その他の方法”として初めて多層弾性解析による理論的設計法が紹介されたことである。さらに、2001年に舗装の構造に関する技術基準が制定され、性能規定が導入された。これに伴い構造設計の仕方も経験的な手法から理論的な手法への移行が推奨されることになる。実際、2001年の舗装設計施工指針 (初版) の構造設計では、多層弾性解析による理論的設計法について第4回改訂版アスファルト舗装要綱よりも詳しく解説し推奨した。さらに、米国流の損傷度、ひび割れやわだち掘れに関する破壊基準の考え方を導入している。舗装設計施工指針は2006年に改訂され、設計法については別途舗装設計便覧として新たに発刊した。理論的設計法の普及・浸透を狙ったものである。

一方、日本の舗装構造の設計法に大きな影響を及ぼしてきた米国はどうであったか。AASHTO 舗装設計指針を例に見てみると、1972年版から1993年版までは1956~1960年に実施した AASHTO 道路試験に基づいて開発されマイナー改訂されたものであった。設計手法は経験主義的であり90年代の交通事情に対応できなくなりつつあった。そこで、1996年のワークショップで“舗装設計指針はできる限り力学に基づいて改訂されるべき”との結論に達し、2002 AASHTO 舗装設計指針の開発が始まった。これまでの経験的手法を理論的設計法に全面改訂し2004年に素案を公開し、現在実務利用への最終段階にある。図-2.3は、設計フローである。この設計指針の構築に当たっては、カリフォルニア大学バークリー校をはじめ米国の大学の研究成果がかなり反映されていることは注目に値する。

現在、我が国のアスファルト舗装の構造設計は、路床土の設計 CBR と等値厚 T_A を用いた経験的設計法 (T_A 設計法)、あるいは多層弾性構造解析を伴う理論的設計

法で行う⁸⁾。 T_A 設計法は実績もあることから現在でも主流の設計法である。一方、理論的設計法は、前述のように1992年のアスファルト舗装要綱に“その他の方法”として初めて紹介され、2001年、2006年版の舗装設計施工指針ではより詳細な説明が加えられてはいるが、地方自治体の多くではまだ実践に移されていないのが実情であろう。

さて、構造設計する上での設計条件は、交通条件、荷重条件、環境条件、材料条件、破壊基準の五つに大別できる。言うまでもなく T_A 設計法では破壊基準は不要である。

まず、 T_A 設計法から概述する。路床土の設計 CBR と交通条件が重要なインプットデータである。一般に、設計 CBR が3より小さい軟弱地盤あるいは設計 CBR が3以上ではあるが、地盤の排水性が低かったり凍上しやすい地盤の場合には路床地盤を改良することになる。交通条件は、設計期間における平均の1日1方向あたりの大型車交通量が100台未満を L 交通、100以上250台未満を A 交通、250以上1000台未満を B 交通、1000以上3000台未満を C 交通、3000台以上を D 交通と区分したものである。さらに、各交通区分に対する10年間の累積 5 t (49 kN) 換算輪数は、それぞれ30000回、150000回、1000000回、7000000回、35000000回としている。ただし、2006年度に A~D 交通区分を N4~N7 交通区分と称し、さらに L 交通を細分化して15台未満を N1 交通、15以上40台未満を N2 交通、40以上100台未満を N3 交通とした。また、2001年版舗装設計施工指針が発刊されるまでは舗装の設計期間は10年であったことに注意しておく必要がある⁹⁾。

これら路床土の設計 CBR と交通条件によって二つの制約条件が決まる。まず、交通区分によって、ここに示していないが表層と基層の最小の合計厚が定められる。次に、設計 CBR の値と各交通区分に対応する累積 5 t (49 kN) 換算輪数を用いて次式から必要 T_A が定まる⁹⁾。なお、舗装設計便覧には典型的な T_A 値が表形式で与えられている。

$$T_A = \frac{3.84 N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 N はもともと設計期間10年に対応する1方向あたりの累積 5 t (49 N) 換算輪数であり、 CBR は路床土の設計 CBR である。なお、2001年版舗装設計施工指針では、式(2.1)を信頼度90%に対応する式と位置付けている。

構造設計は、まず舗装構成 (層数、層厚) を仮定し、各層の材料を表-2.1の舗装材料と等値換算係数一覧から選択して、次式で設計時の等値厚 T'_A を計算し、この設計 T'_A が前述の必要 T_A より大きくなるように、舗装構成と構成材料を選定することである。

$$T'_A = a_1 T_1 + a_2 T_2 + \dots + a_n T_n \dots \dots \dots (2.2)$$

ここで、 n は総層数、 T_1, \dots, T_n は各舗装構成層の層厚、 a_1, \dots, a_n は各層材料の等値換算係数 (表-2.1) である。

次に、図-2.4に示す現行の理論的設計法である。舗

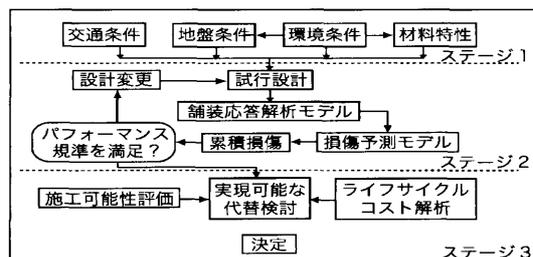
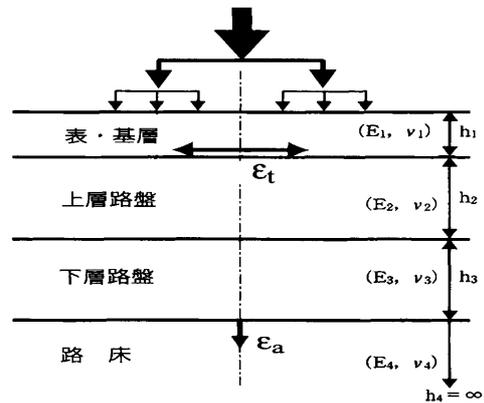


図-2.3 2002 AASHTO 舗装設計指針の設計フロー
—(文献6)を一部修正—

講座

表一.2.1 舗装材料と等値換算係数一覧¹⁾

使用する位置	工法・材料	条件	等値換算係数 a_i
表層・基層	加熱アスファルト混合物	ストレートアスファルトを使用, 各混合物の性状はマーシャル安定度試験にて規定	1.00
上層路盤	瀝青安定処理	加熱混合: 安定度 3.43 kN以上	0.80
		常温混合: 安定度 2.45 kN以上	0.55
	セメント・瀝青安定処理	一軸圧縮強度: 1.5~2.9 MPa	0.65
	セメント安定処理	一軸圧縮強度: 2.9 MPa (7日養生)	0.55
	石灰安定処理	一軸圧縮強度: 0.98 MPa (10日養生)	0.45
	粒度調整砕石・粒度調整鉄鋼スラグ	修正 CBR: 80 以上	0.35
下層路盤	クラッシュラン、鉄鋼スラグ、砂など	修正 CBR: 30 以上	0.25
		修正 CBR: 20 以上 30 未満	0.20
	セメント安定処理	一軸圧縮強度: 0.98 MPa (7日養生)	0.25
	石灰安定処理	一軸圧縮強度: 0.7 MPa (10日養生)	0.25
	水硬性粒度調整鉄鋼スラグ	修正 CBR: 80 以上 一軸圧縮強度: 1.2 MPa (14日養生)	0.55
	水硬性粒度調整鉄鋼スラグ	修正 CBR: 80 以上 一軸圧縮強度: 1.2 MPa (14日養生)	0.55



図一.2.5 多層線形弾性解析におけるひずみの着眼点 (文献1を一部修正)

損傷解析では、ひび割れとわだち掘れに対する検討を行う。ひび割れに対する検討は、アスファルト混合物層の疲労破壊 (bottom-up 疲労ひび割れのみ) を対象としており、まず次式で表される破壊基準式にアスファルト混合物の物性値と構造解析で得られたアスファルト混合物層下面での水平方向引張りひずみ ϵ_t を代入して破壊回数 N_f を求める¹⁾。

$$N_f = S_A \left[18.4 \cdot C \cdot \left\{ 6.167 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{0.854} \right\} \right] \dots (2.3)$$

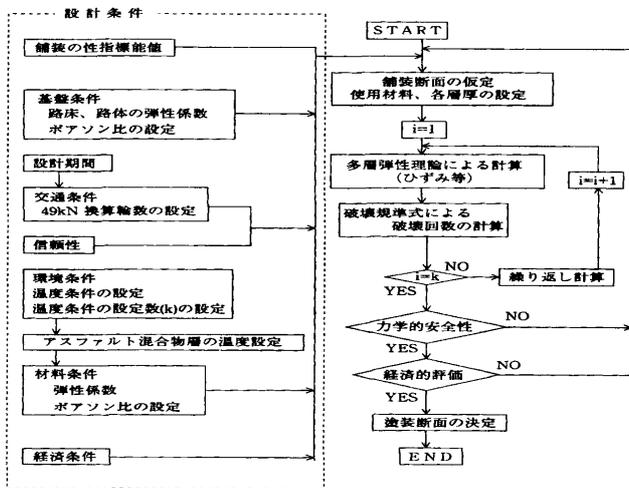
ここで、 S_A は日本の実路ひび割れ率と対応させるための調整係数、 E はアスファルト混合物層の弾性係数、 C はアスファルト混合物中の空隙容積とアスファルト容積の関数である。なお、この破壊基準式は、もともと Finn ら¹⁰⁾ が室内疲労試験から誘導した式を米国アスファルト協会の Shook ら¹¹⁾ が AASHO 道路試験のひび割れ率20%に対応するように18.4を付加し、さらにアスファルト混合物の配合の違いを考慮するために補正係数 C を付加したものである。

次に、わだち掘れに対する検討は、まず、次の破壊基準式に、構造解析で得られた路床上面での鉛直方向の圧縮ひずみ ϵ_a を代入して破壊回数 N_f を求める。

$$N_f = S_C \left\{ 1.365 \times 10^{-9} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_a} \right)^{-4.477} \right\} \dots (2.4)$$

ここで、 S_C は日本の実路わだち掘れ量と対応させるための調整係数である。なお、この式の $\{ \}$ 内は米国アスファルト協会が Monismith ら¹²⁾ や Santucci¹³⁾ の研究成果を採用したものであり、12.7 mm (半インチ) 以下のわだち掘れに対応するものである。

最後に、線形累積損傷理論であるマイナーの仮説¹⁴⁾ を利用して、ひび割れおよびわだち掘れに対する検討から得られたそれぞれの破壊回数から破壊に至るまでの総輪数をそれぞれ算定して、各総輪数が要求される必要総輪数 (疲労破壊輪数と呼ぶ) 以上になるように舗装構成や層厚を決定する。ちょうど、必要 T_A と設計 T'_A の比較検討と同じである。ちなみに、10年設計期間の場合、式(2.1)に対応する疲労破壊輪数は、交通区分 N1~N7



図一.2.4 我が国の理論的設計法¹⁾

装の構造解析 (舗装応答解析とも呼ぶ) と損傷解析がキ要素である。

構造解析は、表層から路床、原地盤も含めて解析対象領域として軸対称多層線形弾性論に基づいて解析し、図一.2.5に示すようにアスファルト混合物層 (表層・基層) の下面に生ずる水平方向の弾性引張りひずみと路床上面に生ずる鉛直方向の弾性圧縮ひずみを計算するものである。ここで、多層弾性解析を行うためには各層の弾性係数とポアソン比が必要である。舗装設計便覧⁸⁾ では、アスファルト混合物、舗装用コンクリート、セメント安定処理混合物、粒状材料の4種類について典型的な値を例示している。なお、アスファルト混合物のスティフネス (弾性係数) には温度依存性があることから、環境条件として設定した舗装温度に対するスティフネスを求めて構造解析する必要がある。例えば、1年を4分割して春 (3, 4, 5月)、夏 (6, 7, 8月)、秋 (9, 10, 11月)、冬 (12, 1, 2月) について平均温度がそれぞれ20°C, 30°C, 15°C, 10°Cであったとすると、それぞれに対応するスティフネスで解析するというのである。また、载荷条件も重要なインプットデータであるが、これについては次の2.3で述べる。

に対してそれぞれ1500回、7000回、3万回、15万回、100万回、700万回、3500万回と定めている⁸⁾。

さて、前節でも述べたように米国では2002 AASHTO 舗装設計指針が実践に移されようとしている。舗装構造の設計フローは図—2.3に示したとおりである。インプットデータは3層の階層構造（レベル1、レベル2、レベル3）になっている。ここでは、インプットデータのうち未固結地盤材料のレジリエントモジュラス（復元変形係数）の設定の方法を紹介するにとどめる。最もシンプルなレベル3の場合、AASHTO 土質分類および統一土質分類に対応して各地盤材料のレジリエントモジュラスのデフォルト値を提示しており、そこから該当材料の値を選択する。レベル2になると表—2.2のように地盤材料の指示的特性からレジリエントモジュラスを推定する形式になり、さらにレベル1では特性化試験を実施してレジリエントモジュラスを次式で表し、構造解析に供するということになる。

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、 M_r はレジリエントモジュラス、 θ は主応力、 τ_{oct} は八面体せん断応力、 p_a は無次元化応力で大気圧、 k_1, k_2, k_3 は回帰定数である。

構造解析は多層線形弾性解析あるいは軸対称非線形弾性有限要素解析で行うことになっている。

また、設計で考慮する損傷形態は、わだち掘れ、ひび割れ、平坦性であり、損傷解析は増分形で行う。すなわち、各損傷の増加過程を時間軸（輪数）に対して描くことである。ひび割れについては疲労破壊で典型的な bottom-up のみならず、top-down のひび割れについての基準式も示している。また、表層から路床までの累積塑性変形量をわだち掘れと定義し、計算方法を示している。平坦性については IRI（国際平坦性指数）をひび割れとわだち掘れの関数で表現している。

さて、我が国でもいち早く、カリフォルニア大学バークレー校を修了した西（神戸大学名誉教授）率いる研究グループが、海外の動向を見据えて非線形弾性有限要素解析をコアとする理論的な構造設計法について研究を行っていた（例えば、15）。図—2.6はそのパフォーマンスカーブを予測するフロー^{16),17)}であり、円形走行試験（車線中心半径12m・車線幅4mの円形試験路上に荷重車2

表—2.2 2002 AASHTO 舗装設計指針レベル2のレジリエントモジュラス（文献6より抜粋）

強度/指示的性質	推定モデル	備考	標準試験法
CBR	$M_r = 2555 \times (CBR)^{0.64}$ (psi)	CBR (%)	
R	$M_r = 1155 + 555 \times R$ (psi)	R = 抵抗値	締固め土の膨張圧およびR値試験 (AASHTO T190)
ai	$M_r = 30000 (ai/0.14)$ (psi)	ai = AASHTO層換算係数	AASHTO舗装設計指針
PI および粒度	$CBR = 75 / (1 + 0.728 (wPI))$	wPI = $P200 \times PI$ P200 = 200 番ふるい通過% PI = 塑性指数 (%)	ふるい分け試験 (AASHTO T27) 液性塑性限界試験 (AASHTO T90)
DCP	$CBR = 292 / (DCP)^{1.12}$ (%)	DCP = 動的コーン指数 (mm/打撃)	舗装用動的コーン貫入試験法 (ASTM D6951)

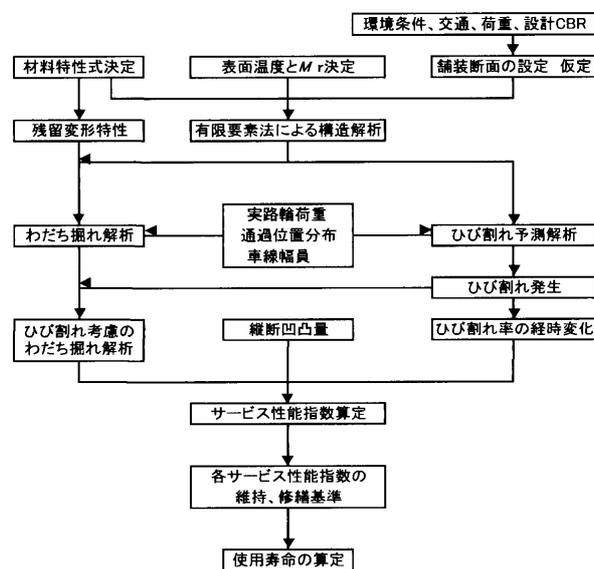
台を連続走行させる耐久性評価試験）への適用を行っている¹⁸⁾。各要素技術については改良すべきところが残されているが、フレームワークは2002 AASHTO 設計指針の該当部分と比較しても見劣りしないものである。特に、ひび割れ率、わだち掘れ、縦断凹凸量と時間あるいは走行回数との関係に着目した点は、ライフサイクルコストやアセットマネジメントが強調される昨今の状況を考えると先見の明があったと言える。

アスファルト舗装の構造設計法は更なる展開が期待できる。我が国独自の構造設計法を構築すべく、様々な側面について地道に研究していくことが必要であろう。

2.2.2 コンクリート舗装の設計法

コンクリート舗装では、コンクリート版の剛性が路盤に比べてはるかに高いため、交通荷重の分散を主としてコンクリート版が担っている。また図—2.7に示すように、コンクリート舗装にはアスファルト舗装とは異なり目地が存在する。これは、コンクリート版の膨張や収縮、そりなどある程度自由に生じさせて、温度応力などの応力を低減させる目的で設置されるが、舗装の連続性が失われるために、構造的な弱点となる。そのため、タイバー（縦目地補強鉄筋）やダウエルバー（横目地補強鉄筋：かつてはスリップバーと呼ばれていた）などを用いて目地の補強を行う。なお、戦後の道路舗装に占めるコンクリート舗装の割合は、昭和31年の62%をピークに減少し、現在では5%に満たない。しかし、コンクリート舗装はアスファルト舗装よりも耐久性があり、アスファルト舗装に比べ燃料消費量が5.6~12.2%低減するとの調査研究報告もある¹⁹⁾。また、コンクリート舗装の弱点であった養生時間の長さは、近年の技術発達により1日程度まで短縮が可能になってきている。これらの他に路面温度低減効果や明度の向上といったメリットもあり、今後の研究の発展が期待できる。

我が国におけるコンクリート舗装の設計マニュアルは、昭和23年（1948）に（財）日本道路協会から発刊された「道路工法新書」の「第4輯 セメントコンクリート舗



図—2.6 パフォーマンスカーブ予測解析フロー¹⁶⁾

講座

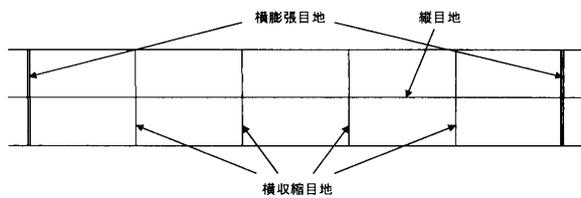


図-2.7 コンクリート舗装の目地

装工法」が最初のものであり、米軍や米国ポルトランドセメント協会の設計法の紹介にすぎないものであったと言われている。その後、昭和30年（1955）に「道路工法叢書」の第9集として「セメントコンクリート舗装要綱」が発刊され、昭和39年、47年、55年、59年に改訂がなされた。そして、上述されているように、アスファルト舗装要綱とセメントコンクリート舗装要綱とを統合した「舗装設計施工指針」および「舗装設計便覧」の発刊を経て現在に至っている。

一方、土木学会では、昭和61年（1986）にコンクリート標準示方書にダム・舗装編としてコンクリート舗装設計法が示され、平成8年（1996）に限界状態設計法を取り入れた舗装編として再編された。その後、平成14年の改定を経て、平成19年（2007）に舗装編にアスファルト舗装の設計を加え、「舗装標準示方書」として体系化された。

一般に、コンクリート舗装の設計は、路盤厚設計とコンクリート版厚設計の2部構成となっている。

路盤厚設計は、路盤面で所定の支持力が得られるよう厚さを決定するもので、舗装標準示方書ではコンクリート版のたわみの基準値を満足するものであれば良いとしており、明確な値は記載されていないが、舗装設計便覧では経験的に定まった表-2.3に示す目標値（ K 値）が挙げられており、図-2.8にしたがい路盤厚を決定することになっている。

コンクリート版厚の設計に関しては、舗装設計便覧では経験的設計法と理論的設計法が、舗装標準示方書では理論的設計法のみが示されている。経験的設計法は、交通量と路床の設計 CBR に基づいてカタログ的に断面を決定するものであるため、ここでは理論的設計法の枠組みについてのみ述べることにする。なお、以下に述べる版厚設計法は、我が国で最も多く用いられている普通コンクリート舗装を念頭に置いたものである。

舗装設計便覧の版厚設計は、コンクリート版の疲労解析により照査されるものであり、設計期間内に疲労ひび割れが発生しないことが版厚決定の条件となる。これに対し舗装標準示方書では、疲労解析だけではなく、目地部から浸入した雨水と交通荷重によって生じる目地部の段差解析、段差やひび割れによる国際ラフネス指数（IRI）解析等によって照査できる枠組みとなっている。

ここで、両設計法において共通している疲労ひび割れに対する照査方法について簡単に述べることにする。

図-2.7に示したように、連続鉄筋コンクリートを除くコンクリート舗装は、一定間隔で存在する縦目地と横目地に区切られたコンクリート版を連結させたものであ

表-2.3 コンクリート舗装種類と路盤の所要支持力係数（ K_{30} ）

項目	路盤面における所要支持力係数	
	$N_1 \sim N_4$	$N_5 \sim N_7$
交通量区分	$T < 250$	$T \geq 250$
舗装計画交通量（台/日・方向）		
普通コンクリート舗装	150 MPa/m 以上	200 MPa/m 以上
連続鉄筋コンクリート舗装		
転圧コンクリート舗装	200 MPa/m 以上	200 MPa/m 以上

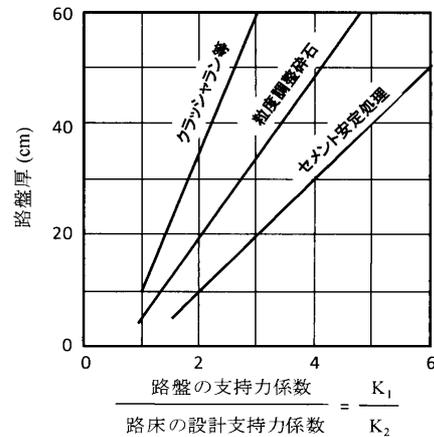


図-2.8 路盤厚の設計曲線

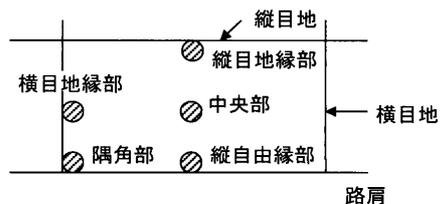


図-2.9 コンクリート版の応力計算位置

る。そのため、車両が通過する際に生じる曲げ応力（輪荷重応力）の大きさは、輪荷重の作用位置によって異なる。荷重の作用位置を大きく分けると、図-2.9に示すとおりであり、縦自由縁部において輪荷重応力は最大となる。また、コンクリート版には版表面と版下面の温度差によって温度応力が生じ、温度条件によっては自由縁部での温度応力は輪荷重応力よりも大きな値となる。そのため、コンクリート版の疲労ひび割れに対する照査は、縦自由縁部における輪荷重応力と温度応力の合成応力を用いて行われる。

疲労解析では、合成応力の大きさはコンクリートの曲げ強度に対する比（応力レベル）として表される。そして、設計期間内にコンクリート版に作用する応力レベル i の繰返し回数 n_i と、応力レベル i のみを負荷し続けた場合にコンクリートが破壊に至るまでの繰返し回数 N_i から、次式に示すマイナー則によって疲労損傷度 FD を求める。

$$FD = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \dots\dots\dots (2.6)$$

式(2.6)からわかるように、疲労ひび割れは実繰返し回数 n が許容繰返し回数 N と等しくなったとき、すなわち FD が 1 に達したときに発生することになる。したがって、コンクリート版厚は、設計期間内での FD が 1 未

満であり、かつ経済性を考慮して限りなく1に近くなる条件のものを採用することとなる。これにより、疲労ひび割れに対する照査が行われることとなる。

また、舗装標準示方書において取り入れられている目地部での段差量は、目地部から浸入した雨水と交通荷重による路盤のエロージョンによって生じるとしたものであるが、段差量の推定式は米国ポルトランドセメント協会（PCA）によるもの²⁰⁾であり、我が国の破損データがフィードバックされたものではない。そのため、今後のデータ収集およびエロージョンに関する理論的なアプローチが期待される。

2.3 地盤内応力、接地圧と移動荷重

前節でも見たように、舗装の構造解析を行う場合、多層弾性解析であろうと有限要素解析であろうと荷重はインプットデータとして重要である。ここでは道路舗装の場合を中心に述べる。

2.3.1 荷重条件と接地圧

荷重条件は、軸重、輪荷重、タイヤ接地面積、接地圧などである。

まず、大型車両には何種類かあるが、例えば10t ダンプトラックであれば図-2.10に示すような輪配置が一般的であろう。前軸が単輪で、後軸は複軸かつ複輪である。前軸と後軸の舗装への相乗作用はその間隔を考えると、アスファルト舗装の場合にはほとんど無視できるであろう。一方、複軸複輪については、軸間隔および輪間隔が小さいことから、舗装温度や舗装厚によっては相乗作用を考慮する必要がある。

次に、図-2.11はタイヤ接地面積の一例^{22),23)}である。なお、多層弾性解析では軸対称問題として構造解析する

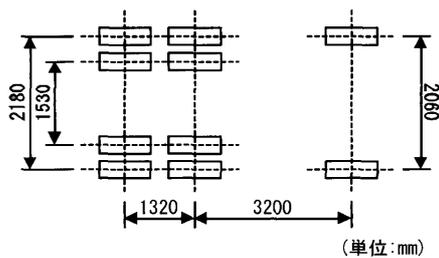


図-2.10 ダンプトラックの軸、輪の配置図の一例(文献21)を一部修正)

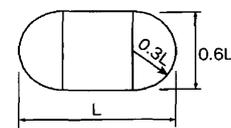


図-2.11 タイヤ接地面積の一例^{22),23)}

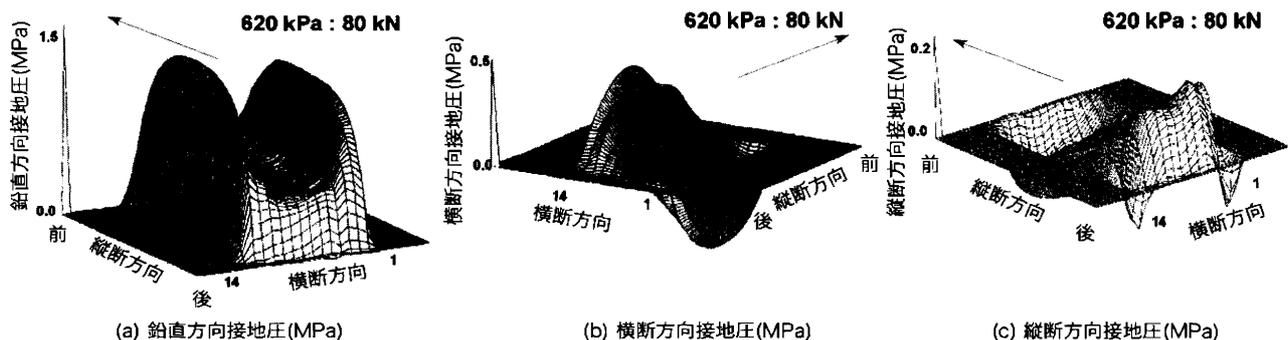


図-2.12 等分布ではない各方向接地圧の一例²⁴⁾

ことから、このような矩形と半円を組み合わせた形状を利用することはなく、同じ面積を有する等価円を使用するが多い。また、タイヤ空気圧とタイヤに作用する全荷重から接地半径を計算する場合もある(例えば、²²⁾)。

さて、構造解析における載荷圧は、輪荷重が等分布荷重であると仮定して、輪荷重をタイヤ接地面積で割って求めているのが一般的である。例えば、舗装設計便覧⁸⁾では、輪荷重を接地半径113 mmの円形接地面積に0.61 MPaの等分布鉛直応力でモデル化し解析している。一方、最近の接地圧に関する研究では、接地圧は必ずしも等分布ではないことが報告されている。接地圧はタイヤ縁部直下とタイヤ中心部直下で異なりタイヤ空気圧と載荷重に依存している。載荷重が大きい場合図-2.12(a)に示すようにタイヤ縁部直下では接地圧が大きくなるが、タイヤ中心部直下では載荷重の影響は小さく主にタイヤ空気圧の影響を強く受ける傾向にあると言われている^{24),25)}。ただし、タイヤの種類によっては中心部直下で大きくなりタイヤ縁部直下でやや小さくなる場合もある。さらに、接地圧としては鉛直応力のみに着目しているが、図-2.12(b)(c)に示すようにタイヤ-路面間には横断方向および縦断方向の応力も生じることが報告されている^{24)~26)}。しかしながら、これらの成分と舗装損傷との関連についてはほとんど分かっていない。

2.3.2 地盤内応力と移動荷重

地盤内応力というとき、半無限線形弾性体の表面に鉛直集中荷重が作用した場合に弾性体内に生ずる応力分布を与える Boussinesq の解がまず頭に浮かぶ。

舗装では、前節で述べたように、タイヤ輪荷重の接地面積を円で近似する 경우가少なくなく、また平板載荷試験や FWD では円形載荷板を利用することから円形載荷の場合の解析解は有用である。また、図-2.13に示すように、載荷板と地盤との剛性の違いも注意すべき点である。載荷重が同じ場合、剛性板の表面鉛直変位はたわみ性板の約79%になり、路面のたわみ量から逆解析によって弾性係数を算出する場合にはたわみ性板か剛性板か

講座

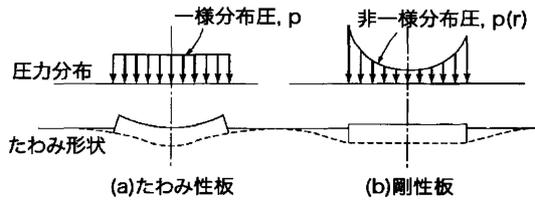


図-2.13 載荷板と地盤の剛性の違いと接地圧(例えば, 23)

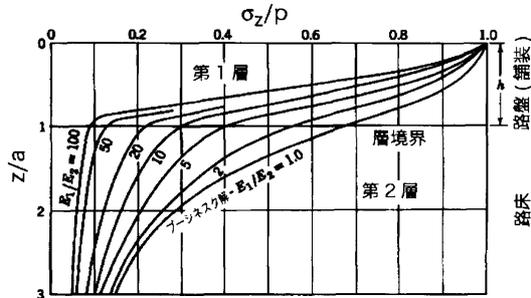


図-2.14 層状による応力分布の変化²⁹⁾

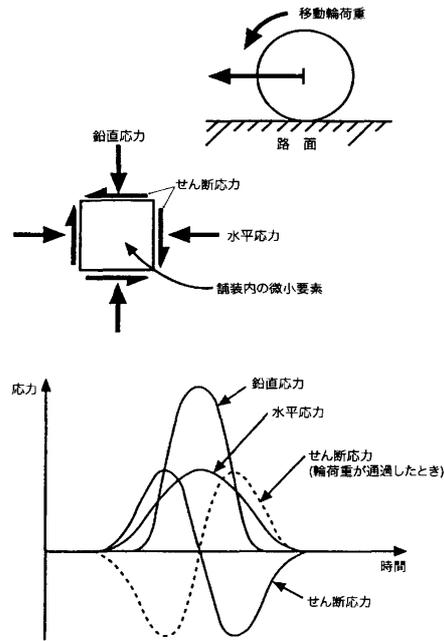


図-2.15 輪荷重の移動に伴う地盤内応力の変化(文献30)を一部加筆)

を正しく見極めることが重要である。

Burmister^{27)~29)}が2層系および3層系の基礎式を誘導しその有用性を示した。その後、他研究者が図表形式で解を提示したことによってBurmisterの基礎式を意識することがなくなり実務への利便性は高まった。それらについては参考文献^{22),23)}にうまく取りまとめられているので、ご参照願いたい。2層系の場合の鉛直応力の分布を図-2.14に示すが²⁹⁾、各層の弾性係数の違いが応力分布に及ぼす影響が少なからず確認できる。

さて、輪荷重が路面上を移動するとき、地盤内応力は図-2.15のように変化し主応力の回転を伴う(例えば, 30)。舗装内の応力分布については、非線形弾性有限要素解析によると複輪の片側輪中心直下では図-2.16のようであり、また、例えば路盤層中心に着目すると2点での応力変化は図-2.17のようである¹⁵⁾。これらは冬季のアスファルト混合物のスティフネスを用いて計算した場合であるが、季節が違っても、すなわちアスファルト混合物層のスティフネスの大きさが違うと路盤内に生ずる応力変化が異なり応力比も様々であり得ることが推察できる¹⁵⁾。これらのことは、2.5で述べるように室内実験で変形係数を求める場合に留意すべき点である。

また、載荷速度の影響も無視できない。アスファルト混合物が粘性を有するため、車両速度の違いやアスファルト混合物の温度によって下層に生ずる応力および載荷時間が大きく異なる。この点に最初に着目したのはBarksdale³¹⁾であり、粘弾性解析結果をAASHTO道路試験結果で補正して載荷時間-深さ-車速関係図を示した。岡本ら²¹⁾は、鉛直土圧の実測パルスをハーバーサイン波で近似してえられた載荷時間をプロットしBarksdale図の有用性を支持するとともに、アスファルト混合物のスティフネスの違い(すなわち、季節の違い)が載荷時間に及ぼす影響も反映させる必要があることを示唆している。いずれにしても、これらは繰返し三軸圧縮試験における載荷時間を選定する場合の参考にすべき図であ

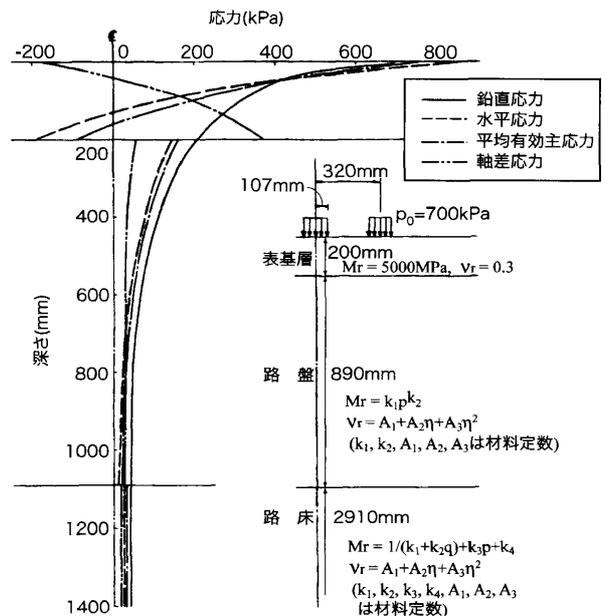


図-2.16 輪荷重載荷による各応力の分布(文献15)に加筆)

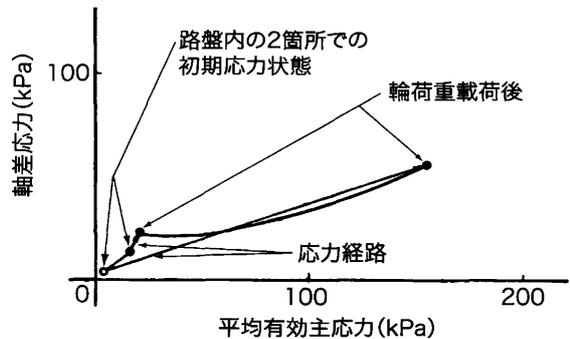


図-2.17 輪荷重載荷による路盤内2点での応力変化(文献15)に加筆)

る¹⁵⁾。

2.4 舗装の損傷と解析

2.4.1 アスファルト舗装

舗装の損傷形態は様々である³²⁾。ここでは、我が国の舗装の構造設計で着目するひび割れとわだち掘れについて述べる。

わだち掘れは、図—2.18に示すように輪荷重の通過に伴って生ずる路面の沈下であり、アスファルト混合物層の変形が卓越する場合も少なくないが各舗装構成層の累積塑性変形量の和である。

舗装設計施工指針では、2.2.1でも触れたようにわだち掘れに対する検討は行っているものの、路床上面に作用する鉛直応力の大小で耐わだち掘れ性を判断するという便宜的なものである。一方、2002 AASHTO 舗装設計指針は、式(2.7)に示すように各層の塑性変形量の累積の時間変化を計算していくという増分形での検討になっている。かなり実現象を反映した検討になっているが、各層の塑性変形 ϵ_p^i は弾性変形から推測する式になっており、更なる改良が必要である。

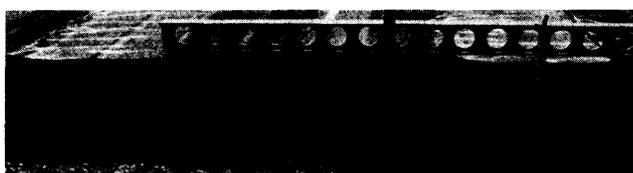
$$RD = \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n [\epsilon_p^i \cdot h^i]_{j,k} \dots \dots \dots (2.7)$$

ここで、 RD はわだち掘れ量（全塑性変形量）、 ϵ_p^i は i 層の全塑性変形量、 h_i は i 層の層厚、 l は荷重レベル数、 m は細分季節数（分割期間数）、 n は層数である。ちなみに、未固結材の場合、式(2.7)の [] 内は次式で計算する⁶⁾。

$$\delta_a(N) = \beta_1 \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) \cdot e^{-(\rho/N)^\beta} \cdot \epsilon_v \cdot h \dots \dots \dots (2.8)$$

ここで、 δ_a は当該層の塑性変形量、 N は繰返し回数、 ϵ_0 、 β 、 ρ は材料定数、 ϵ_r は室内実験でこれら材料定数を求めたときの弾性ひずみ、 ϵ_v は構造解析で得られる鉛直弾性ひずみ、 h は当該層の層厚、 β_1 は修正係数であり未処理粒状路盤材で1.673、路床土で1.35である。

ひび割れは、文字どおり路面に現れるひび割れであるが、交通荷重による疲労によるひび割れ(疲労ひび割れ)と極低温度時あるいは温度変化によるひび割れ(温度応力ひび割れ)に大別できる。疲労ひび割れには、アスファルト混合物層下面から始まり路面に伝播する bottom-up 疲労ひび割れと路面からアスファルト混合物下層に向かって伝播する top-down 疲労ひび割れがある。舗装設計施工指針では bottom-up 疲労ひび割れのみを検討項目にしているが、2002 AASHTO 舗装設計指針では top-down 疲労ひび割れも検討項目になっている。ただし、2.2.1でも触れたが、疲労ひび割れに関する破壊基



図—2.18 わだち掘れの実測例

準は、室内疲労試験結果から誘導された破壊基準式を実路で観察されたひび割れ率と対応するように調整したものである（これが半理論的と言われるゆえんの一つである）。一例として、図—2.19に2002 AASHTO 舗装設計指針のアスファルト混合物の疲労ひび割れの予測の考え方を示し、その bottom-up 疲労ひび割れの場合の疲労破壊式を式(2.9)に、また式(2.11)にひび割れ率の予測式を示す⁶⁾。

$$N_f = 0.00432 \cdot k_f \cdot 10^{4.84(V_b/V_s + V_b - 0.69)} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.9492} \cdot \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281} \dots \dots \dots (2.9)$$

ここで、 N_f は疲労ひび割れが生ずるまでの繰返し回数、 ϵ_t は危険箇所での水平引張りひずみ、 E はアスファルト混合物のスティフネス、 h_{ac} はアスファルト混合物層の層厚、 k_f は次式で表される。

$$k_f = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \cdot h_{ac})}}} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$FC_{bottom} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 \cdot C_2 + C_2 \cdot C_2 \cdot \log_{10}(D - 100))}} \right) \cdot \left(\frac{1}{60} \right) \dots \dots (2.11)$$

ここで、 FC_{bottom} は bottom-up 疲労ひび割れ率、 D は bottom-up 疲労損傷度（図—2.19参照）、 C_1 と C_2 はともに1.0、 C_1' は $-2C_2$ 、 C_2' は次式で表される。

$$C_2' = -2.40874 - 39.748 \cdot (1 + h_{ac})^{-2.856} \dots \dots \dots (2.12)$$

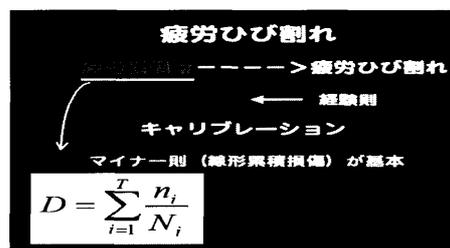
さて、図—2.19中の疲労損傷度の計算は、次式に示す線形累積損傷理論の一つであるマイナーの仮説¹⁴⁾を用いている。

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \dots \dots \dots (2.13)$$

ここで、 n_i はひずみレベル i を負荷する繰返し回数、 N_i はひずみレベル i のみを負荷し続けた場合に媒体が破壊に至るまでの繰返し回数である。すなわち、式(2.13)の左辺を疲労損傷度 D と定義し、式(2.9)で計算した N_f とその期間に経験した累積輪数からその時点での累積損傷度 D を求め、式(2.11)に代入してそのときのひび割れ率を推定するということである。なお、式(2.11)では D はパーセントで表記されていることに留意する。

2.4.2 コンクリート舗装

ここでは、2002 AASHTO 舗装設計指針において示されたコンクリート舗装設計法と我が国のコンクリート舗装設計法の差異を明確にするために、AASHTO 舗装設計指針の普通コンクリート舗装の設計法について紹介する。



図—2.19 疲労ひび割れの予測の考え方

講座

AASHTO 舗装設計指針では、粒状材料や路床の特性はレジリエントモジュラスで定義されているが、コンクリート舗装の設計を行う際にはこれらの材料定数を K 値に変換し、ISLAB2000と呼ばれるFEMプログラムを用いている。ただし、すべての応力計算をFEMで行うには膨大な時間を要するため、様々な条件下での計算結果を学習させたニューラルネットワーク(NN)を導入し、これによって応力計算を行っている。

AASHTO 舗装設計指針での普通コンクリート舗装設計は、舗装標準示方書と同様に、(1)疲労ひび割れ、(2)目地部段差、(3)国際ラフネス指数(IRI)による平坦性によって照査することとなっている。設計法の枠組みは、AASHTO 舗装設計指針と舗装標準示方書に大きな違いは無いが、疲労ひび割れの照査に関しては、AASHTO 舗装設計指針では図-2.20、2.21に示す二つのひび割れモードを想定している。図-2.20はbottom-upの疲労ひび割れ、図-2.21はtop-downの疲労ひび割れの発生条件を示している。

我が国の設計法では、bottom-upの疲労ひび割れの照査のみを行っている。そのため、図-2.21に示す温度勾配が負の場合の温度応力はマイナス(版下面では圧縮ひずみが発生)となり、輪荷重応力を軽減することになる。図-2.21のようなひび割れは我が国では確認されていないが、発生する可能性は十分にある。そのため、図-2.21のようなひび割れ発生モードについても今後検討する必要があるかも知れない。

AASHTO 舗装設計指針での疲労解析におけるもう一つの特徴は、アスファルト舗装と同様、図-2.22に示すように疲労損傷度とひび割れ率の関係式を示し、疲労解析結果と損傷度合いを結びつけているところにある。これにより経時的なひび割れ率の変化を推定可能となる。



図-2.20 正の温度勾配と荷重応力が作用した場合⁶⁾



図-2.21 負の温度勾配と荷重応力が作用した場合⁶⁾

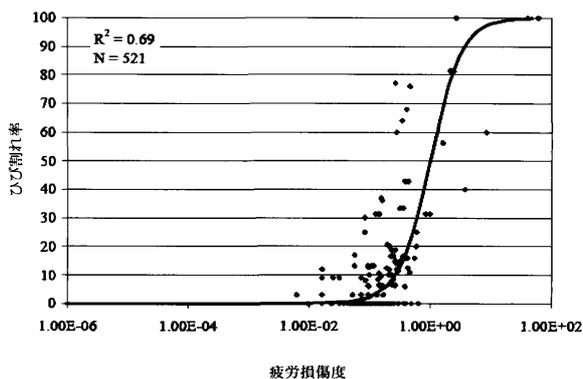


図-2.22 疲労損傷度とひび割れ率の関係⁶⁾

またAASHTO 舗装設計指針では、設計期間内の各層の弾性係数や時間温度分布をEICM (Enhanced Integrated Climatic Model) と呼ばれる統合気象モデルを使って計算する。EICMは全米の気象データ、地下水位データを網羅しており、設計対象地の気象台あるいはNational Climatic Data Center (NCDC) のデータベースから、①気温/hr、②降雨量/hr、③風速/hr、④日照割合/hr、⑤相対湿度/hr、⑥地下水位を取得し、コンクリート版に作用する温度応力の変化、路床や他の層の季節ごとの弾性係数の変化を算出し、疲労解析等に用いられる。

コンクリート版の温度勾配の推定もさることながら、設計時に地下水が土質材料のレジリエントモジュラスに及ぼす影響を把握することは重要である。しかし、我が国においてこのようなデータを測定した例はほとんど無いため、更なるデータ収集が必要になるものと考えられる。

2.5 試験法

舗装の構造設計を理論的手法で行おうとすると、2.2でも述べたように各構成層のレジリエントモジュラスとポアソン比が必要である。

我が国では舗装材料のレジリエントモジュラスに関する試験法についての研究はほとんど行われてこなかったというのが実情である。これは、地盤材料の変形強度に関する試験方法が詳しく調査研究されてきたのとは大きく異なる点である。

さて、路盤路床材のレジリエントモジュラスを求めるために、拘束圧一定で軸差応力をハーバーサイン波で繰返し載荷する繰返し三軸圧縮試験が行われる³³⁾。なお、舗装試験法便覧・別冊³⁴⁾に掲載されている路盤路床材のレジリエントモジュラスに関する試験法はAASHTO基準の該当試験法の翻訳版に近く、またAASHTOでは随時見直しが行われている点に注意が必要である。試験を行う上で、事前に決めておく必要のある重要な要素は応力レベルと載荷時間、休止時間、載荷回数であろう。応力レベルは実路の当該層中に発生するであろう応力をカバーするように決める。AASHTO試験法では原則0.1秒載荷時間、0.9秒休止時間としているが、2.3.2で触れたような載荷時間-深さ-車速関係から求めるか、実情に合った載荷時間を設定することになる。ところで、2.3で述べたように輪荷重の通過によって生じうる応力経路は様々である。欧州ではレジリエントモジュラス試験の応力経路として、図-2.23に示すようにAASHTO試験法(CEN-B)以外に、異なる応力比での繰返し三軸圧縮試験(CEN-A)が検討されている³⁵⁾。

一方、ポアソン比については、研究レベルではレジリエントモジュラス試験を実施する際に供試体の半径方向の変形も同時に計測して非線形式で表現する場合があるが、実務レベルでは舗装の応答に大きな影響はないとして推定値を用いることが多い。ちなみに、AASHTO 舗装設計指針では、入力レベル1では直接測定するよう

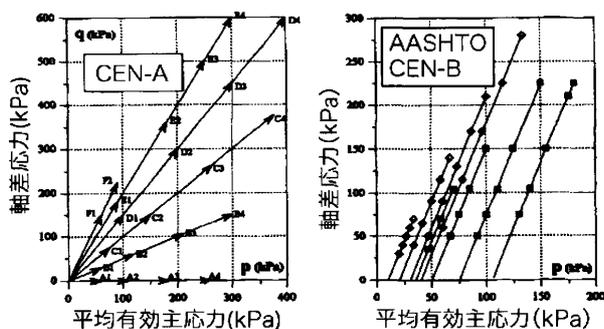


図-2.23 繰返し三軸圧縮試験の応力経路(文献35)に加筆)

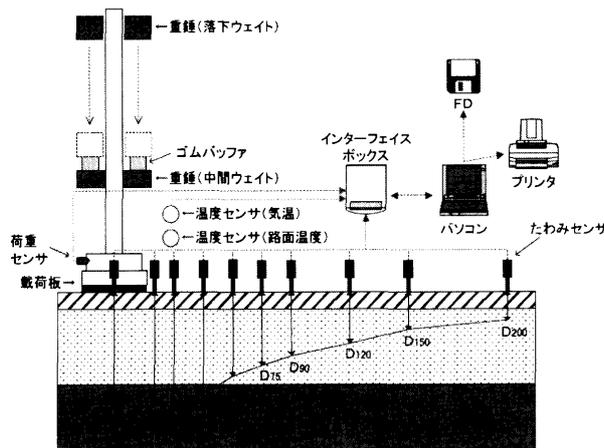


図-2.24 FWDの概要(文献36)に加筆)

に指示しているが(ただし具体的な測定方法は示されていない), レベル3では典型的な値を例示している。

舗装材料のレジリエント特性については, 少なくとも主応力の回転, 異方性等が及ぼす影響については未解明なところが少なくない。

ところで, 舗装分野で利用されている原位置調査法としてフォーリング・ウェイト・デフレクトメーター(FWD)がある。これは, 図-2.24に示すように重錘を落下させて路面に衝撃荷重を加えた時に路面に生ずるたわみ量を複数のセンサーで測定する装置である³⁶⁾。たわみ量やたわみの形状に基づいて, 各舗装構成層の弾性係数を逆解析によって算定したり, さらに舗装の健全度などを評価するために用いられている(例えば, 37))。多箇所を迅速に調査できるという点でも, 今度さらに用途が広がるものと期待される。また, 衝撃荷重は小さいが小型のFWDもあり, 路盤や路床の支持力評価に用いられている。

2.6 おわりに

本章では, 舗装の構造設計法について特に地盤工学と係わりが深いであろう内容について紹介した。参考文献をできるだけ多く列挙することを心がけた。

2.1でも述べたように, 紙数の制約かつ筆者の得手不得手もあり浅く広く記述するに留まったことは否めない。その点では, 読者諸氏には3章以降を含めて8章まで読み通していただくことによって本講座はもとより本章も完結するものと考えていただいた方がよいであろう。

最後に, 舗装にはやるべきことが山積しているということをお少なからずご理解いただければ, 本章の役割は果たせたのではないかと考える次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：舗装設計施工指針，日本道路協会，2001。
- 2) 阿倍頼政：我が国の構造設計法に対する基本的考察，アスファルト，日本アスファルト協会，Vol. 28, No. 144, pp. 3~22, 1985。
- 3) 多田宏行：舗装技術の変遷，語り継ぐ舗装技術 道路舗装の設計・施工・保全，第2章，鹿島出版会，230p., 2000。
- 4) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，丸善，pp. 29~30, 1961。
- 5) 植下 協・加藤 晃：道路工学，朝倉土木工学講座12，朝倉書店，pp. 133~136, pp. 175~178, 1978。
- 6) AASHTO: Development of the 2002 Guide for the design of new and rehabilitated pavement structures: Phase II, NCHRP Project 1-37A, 2006。
- 7) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，丸善，pp. 29~30, 1967。
- 8) 日本道路協会：舗装設計便覧，日本道路協会，2006。
- 9) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，丸善，pp. 29~30, 1992。
- 10) Finn, F. Saraf, C., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W. Abdullah, A.: The use of distress prediction subsystems for the design pavement structures, Proceedings, 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Michigan, USA, Vol. 1, pp. 3~38, 1977。
- 11) Shook, J. F., Finn, F. N., Witczak, M. W., Monismith, C. L.: Thickness design of asphalt pavements—The Asphalt Institute Method, Proceedings, 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Delft University of Technology, The Netherlands, Vol. 1, pp. 17~44, 1982。
- 12) Monismith, C. L. and McLean, D. B.: Design Considerations for Asphalt Pavements, Report No. TE 71-8, University of California, Berkeley, USA, 1971。
- 13) Santucci, L. E.: Thickness design procedure for asphalt and emulsified asphalt mixes, Proceedings, 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Michigan, USA, Vol. 1, pp. 424~456, 1977。
- 14) Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue, Transactions, ASME, Vol. 67, pp. 159~164, 1945。
- 15) 西 勝：たわみ性舗装の力学，舗装に関する最近の問題と新しい技術，昭和53年度講習会テキスト，土木学会関西支部，pp. 1~34, 1979。
- 16) 西 勝・遠山俊一・大橋一公・恒藤博文：円形走行試験結果に基づくアスファルト舗装パフォーマンスカーブの構築，建設工学研究所報告，第37号，pp. 45~64, 1995。
- 17) Nishi, M., Yoshida, N., Toyama, S., Koid, T. H.: A subsystem for serviceability evaluation of asphalt pavements, Proceedings, 2nd International Conference on Road & Airfield Pavement Technology, Singapore, pp. 95~105, 1995。
- 18) Nishi, M., Sato, Y., Yoshida, N.: Performance of Flexible Pavements with slag bases, Proceedings, 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Haifa, Israel, Vol. 1, pp. 125~130, 1983。
- 19) 日刊建設工業新聞：特集記事，2007。
- 20) PCA: Thickness Design for Concrete Pavements, Portland Cement Association,

講座

- 21) 岡本 歩・宮原哲平・吉川 弘・吉田信之・船越寿明・井奥哲夫・森英一郎・荒井猛嗣：実路試験舗装で計測した舗装内鉛直土圧の動的応答に関する一考察，第61回土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，No. 5-127，pp. 251~252，2006.
- 22) Yorder, E. J. and Witczak, M. W.: Principles of Pavement Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
- 23) Huang, Y. H.: Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- 24) De Beer, M., Fisher, C., Jooste, F. J.: Determination of pneumatic tyre/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers, Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Washington, USA, Vol. 1, pp. 179~227, 1997.
- 25) Blab, R.: Introducing improved loading assumptions into analytical pavement models based on measured contact stresses of tires, Proceedings, International Conference on Accelerated Pavement Testing, Nevada, USA, Paper Number CS5~3, 1999.
- 26) De Beer, M.: Reconsideration of tire-pavement input parameters for the structural design of flexible pavements, Proceedings, 10th International Conference on Asphalt Pavements, Quebec, Canada, File No. 10111, CD-ROM, 2006.
- 27) Burmister, D. M.: The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways, Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, pp. 126~144, 1943.
- 28) Burmister, D. M.: The general theory of stresses and displacements in layered soil systems, Journal of Applied Physics, Vol. 16, pp. 84~94, 126~127, 296~302, 1945.
- 29) Burmister, D. M.: Evaluation of pavement systems of the WASHO Road Test by layered systems methods, Highway Research Board, Bulletin 177, pp. 26~54, 1958.
- 30) Brown, S. F.: Soil mechanics in pavement engineering, Geotechnique, 46, No. 3, pp. 383~426, 1996.
- 31) Barksdale, R. D.: Compressive stress pulse times in flexible pavements for use in dynamic testing, Highway Research Record, 345, pp. 32~44, 1971.
- 32) 松本孝之：2-1 破損の種類と維持修繕工法，舗装の維持修繕，佐藤信彦監修，小坂寛己・奥平真誠編，建設図書，pp. 44~75，1992.
- 33) AASHTO: Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials, AASHTO Designation: T 307-99, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Part 2B: Tests, pp. T307-1~T307-41, 2003.
- 34) 日本道路協会：舗装試験法便覧別冊，日本道路協会，1995.
- 35) Correia, A. G.: Soil mechanics in routine and advanced pavement and rail track rational design, Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures, pp. 165~187, 2001.
- 36) 道路保全技術センター：活用しよう！FWD，道路保全技術センター，65p.，2005.
- 37) 丸山輝彦・阿倍長門・雑賀義夫・姫野賢治：FWDによる舗装の構造評価および補修設計システムの開発，土木学会論文集，No. 484/V-22，pp. 61~68，1994.