

III-2-2 舗装の耐久性を考慮した路床の性能規定に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
 研究期間：平 13～平 16
 担当チーム：舗装チーム
 研究担当者：伊藤正秀，坂本康文

【要旨】

新技術の開発促進、建設コストの縮減を図るため、社会資本の設計基準についての性能規定化が進められている。舗装構造については既に性能規定化が図られているが、舗装を支える路床・路体についても今後性能規定化が必要とされている。その場合、路床は舗装と一体となって交通荷重を支えるものであるため、舗装が構築された状態でどのような性能を要求するのかという検討が必要である。さらに、今後の理論設計への展開を踏まえると、疲労破壊輪数の評価についてはこれまでの CBR や締固め度といった材料性状や施工状態に基づく指標ではなく、完成後の弾性係数等の物理定数を指標とする必要がある。そこで、本研究では、理論的解析および実験等の実証手法により、路床性能を評価する指標および目標値の検討を行った。その結果、設計交通量に応じた路床上面での許容圧縮ひずみにより、過去の供用実績に基づいた舗装の耐久性を担保する性能規定のあり方を提案することができ、本提案により建設コストの低減に寄与できることを示した。

キーワード：路床，路体，性能規定，多層弾性解析，圧縮応力，圧縮ひずみ

1. はじめに

平成 13 年 6 月「舗装の構造に関する技術基準」¹⁾（以下、「技術基準」）の策定によって、舗装の性能規定化が正式に定められ、新技術の開発促進やコスト縮減に向けた動きが活発になっている。

土木研究所では、舗装路面の性能や評価法に関する研究を進めるとともに、平成 13 年度から路床の性能規定化に向けた研究に着手している。路床の性能規定は、単に土工の施工が合理化されるだけでなく、舗装の理論設計法構築の進展も期待できるものである。

路床の性能規定化を行うにあたっては、舗装の機能と性能に応じた路床に要求される性能の提案と、要求性能を担保する施工・品質管理手法の開発が必要となる。当チームでは、路床に要求される性能の提案を目的とした調査・検討を行ったので、以下に報告する。

2. 研究の背景・方向性

「技術基準」によれば、舗装に使用する材料や舗装各層の厚さについては規定せず、一定輪数通過後の変形量の目標値を満足すればよいと定めるなど、最終的な舗装としての性能のみを定めている。

舗装は、路床の強さに応じて設計される。その舗装を支える路床・路体については、従前のおり CBR と締固め度等によって管理される、いわゆる仕様規定で施工されており、このことが現場において、性能に基づく新しい設計法への移行が浸透しない大きな原因

となっている。

路床の性能を規定するとはどういうことか、その概念を図-1に示す。舗装の最終的な評価は、最上部の路面で受ける。そして、その路面のたわみ量等によって舗装の耐久性が判断される。路面のたわみ量は、路床も含めた舗装構造によって定まるものであり、これを推定するには、これまでの CBR や締固め度といった材料性状や施工状態に基づく指標ではなく、各材料の弾性係数等を用いた理論解析が必要となる。また、道路工事の発注では、路床までの土工事とその後の舗装工事に分割されることがあるが、舗装の耐久性を確保するためには、路床と舗装を一体として検討することが重要である。

したがって、本研究では、路床単独での性能を捉えるのではなく舗装が構築された状態での路床の性能を示すことを目的として、理論的解析および実験等の実証手法により検討を進めることとした。

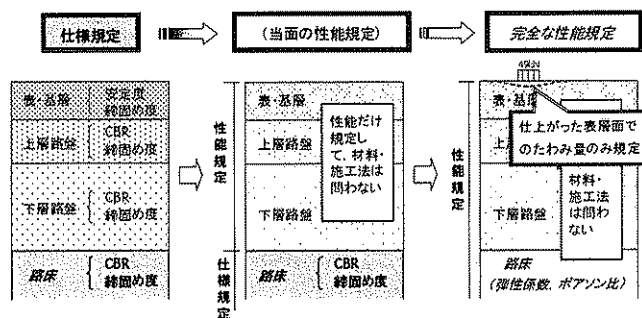


図-1 路床の性能規定の考え方の概念

3. 研究成果

3.1 路床への要求性能に関する既存資料の整理

舗装の機能と性能に応じて路床に要求される性能に関して国内外の資料及び既存基準類等²⁾を調査・整理した。概要を以下に示す。

まず、路床の役割は、交通荷重を受け持つ舗装を支持することであり、その性能は舗装から伝達されてきた荷重を路体に十分分散させ伝達することである。また、路床の支持力やその均一性は、舗装の耐久性にも影響を及ぼすと言われており、路床改良等で積極的に路床に手を加えて舗装を構築することも一般的に行われている。このため、「技術基準」においても、改良された路床も舗装の躯体として設計することにしている。

したがって、改良の有無に係らず路床に求められる性能を整理すると、『舗装と一体となって交通荷重を支持すること』および『舗装から伝達されてきた荷重を路体に十分分散させ伝達すること』であると言える。

3.2 路床性能と舗装設計法の係わり

図-1に示したように、舗装の耐久性に着目した究極の性能規定では、舗装の設計期間だけを提示することになる。この場合、その性能は何らかの方法によって評価できなければならない。

路床の性能は、主として舗装の耐久性に深く関係すると考えられるが、この耐久性は既往の研究では舗装の表面で測定したたわみ量と関係があることがおよそ判明している³⁾。このため、例えば表面のたわみ量等で路床の性能を評価し、これが舗装構造全体の支持力および耐久性に及ぼす影響を解明していくことが必要となる。

路床の性能と舗装の設計法の関係を整理すると図-2のようになる。路床の性能規定を進めるためには、設計的な要素からのアプローチが必要であり、性能に基づく舗装設計を進めていく上でも不可欠なステップである。

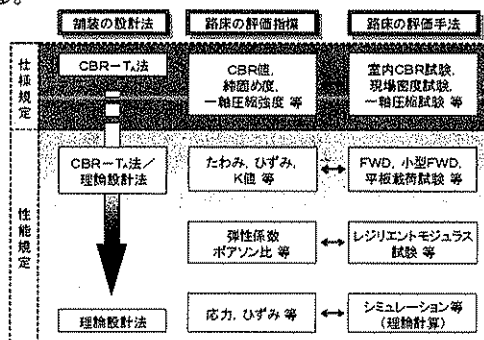


図-2 舗装設計法と路床評価の係わりについての概念

3.3 CBR-T_A法の検証

これまでの舗装のほとんどが経験的設計法と呼ばれ

るT_A法で設計されている。一方、理論的設計方法については、その理論の構築は完成されているが破壊規準については未定であるため、あまり普及していない。そこで、理論設計へ移行するための第一ステップとして、T_A法で設計された舗装と等価な舗装が理論的設計法によって設計できるよう、既存の舗装下の路床・路体にどのような応力やひずみ等が生じているかを把握することとした。

3.3.1 解析条件

「舗装設計施工指針」⁴⁾ (以下、「指針」)の“付表-5.1.2 (C) 信頼性 90%”に示されている26断面(設計期間10年, 設計CBR 2は除く)および表-1(設計期間20年として信頼性90%のT_A-N式から試算)に示す30断面について、多層弾性解析プログラム“GAMES⁵⁾”を用いて49kN載荷時に路床上面および路体上面に生じる応力やひずみ等を算出した。各層の入力条件は表-2に示すとおりであり、載荷半径はFWDによる測定を想定して15cmとした。なお、各材料の弾性係数については、全国での使用材料の違いを考慮した最大値と最小値を仮定し、解析データに幅を持たせた。

表-1 設計期間20年として検討した舗装断面

舗装計画交通量 (台/日・方向)	設計 CBR	加熱アス ルト混合物	瀝青安定処 理路盤材料	粒度調 整砕石	クラッシャ ラン
T<100 (旧L交通)	3	5	—	20	20
	4	5	—	15	20
	6	5	—	15	15
	8	5	—	10	15
	12	5	—	10	10
	20	5	—	10	10
100≤T<250 (旧A交通)	3	5	—	20	40
	4	5	—	20	35
	6	5	—	15	30
	8	5	—	15	25
	12	5	—	15	15
	20	5	—	10	15
250≤T<1,000 (旧B交通)	3	10	—	25	45
	4	10	—	20	40
	6	10	—	20	25
	8	10	—	15	25
	12	10	—	15	15
	20	10	—	10	10
1,000≤T<3,000 (旧C交通)	3	10	10	30	45
	4	10	10	25	40
	6	10	10	20	30
	8	10	10	15	25
	12	10	10	10	20
	20	10	8	10	10
3,000≤T (旧D交通)	3	15	15	30	50
	4	15	15	30	35
	6	15	10	30	30
	8	15	10	25	25
	12	15	10	15	20
	20	15	10	—	25

表-2 各層の入力条件

材 料	弾性係数 E (MPa)		ポアソン比 ν
	E1	E2	
加熱アスファルト混合物	10,000	6,000	0.35
瀝青安定処理路盤材料	6,000	3,000	0.38
粒度調整砕石	600	300	0.40
クラッシャラン	200	100	0.40
路床・路体 ^{注)}	(10×CBR)		0.45

注) 路体は、路床と同一材料で連続した層とみなした。

3.3.2 発生応力について

(1) 路床上面

各交通量における路床の弾性係数と路床上面に生じる鉛直方向の圧縮応力との関係の一例を図-3に示す。

同じ弾性係数であっても、対応する交通量が多いほど圧縮応力は小さくなっている。これは弾性係数が大きくなっても同じ傾向を示しており、舗装厚さに見合った荷重分散効果が現れているものと考えられる。また同一の交通量で見ると、弾性係数が大きいほど路床上面に作用する圧縮応力も大きくなっており、弾性係数が大きいほど舗装厚さが薄くなることで路床が受け持つ荷重も大きくなっている。

弾性係数だけでなく路床の一軸圧縮強度との比などでの検討も必要と考えるが、弾性係数と一軸圧縮強度の関係は路床土の種類によって異なるため、性能規定化は非常に煩雑なものとならざるを得ない。したがって、路床上面に作用する圧縮応力単独では性能規定の指標には適さないものと考えられる。

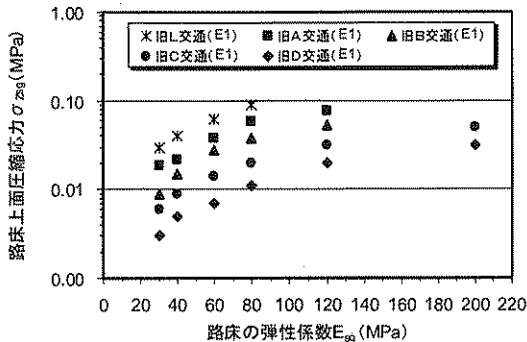


図-3 路床の弾性係数と σ_{zg} の関係 (E1, 10年設計の場合)

(2) 路体上面

「指針」では、従前の「アスファルト舗装要綱」(以下、「要綱」)での考え方を踏襲し、路床厚の設計に対する規準例として『改良された地盤等および路床の厚さは、路体上面の圧縮応力が 4×10^{-3} MPa以下となるようにする。』としているが、その根拠は示されていない。

解析結果の一例を図-4に示すが、今回の解析条件では、路体上面に生じる圧縮応力の規準値を満足しているとは言い難い。これは、従前の「要綱」の設計輪荷

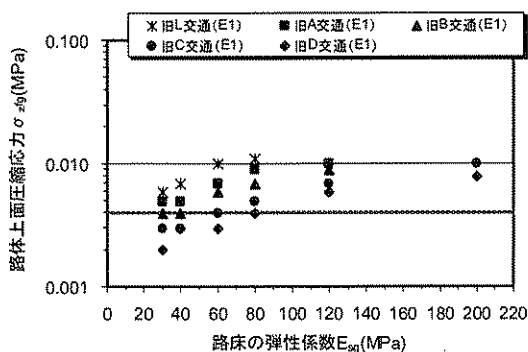


図-4 路床の弾性係数と σ_{zg} の関係 (E1, 10年設計の場合)

重が、現在のように1種類(49kN)ではなく、交通量ごとに設定されていたため異なった結果が得られたものと考えられる。いずれにしても路体上面に生じる応力は、前述の路床と同様の傾向があり、規準値には適さないと考えられる。

3.3.3 発生ひずみについて

(1) 路床上面

各交通量における路床の弾性係数と路床上面に生じる鉛直方向の圧縮ひずみとの関係の一例を図-5に示す。同じ弾性係数で見ると、交通量が多くなるほど圧縮ひずみは小さくなっており、これは弾性係数が大きくなっても同様である。一方、同一の交通量で見ると、弾性係数が大きくなってもほぼ一定の値を示しており、舗装厚さに係わらず交通荷重に対して路床上面に生じる圧縮ひずみを一定値に保つという設計思想が窺える。

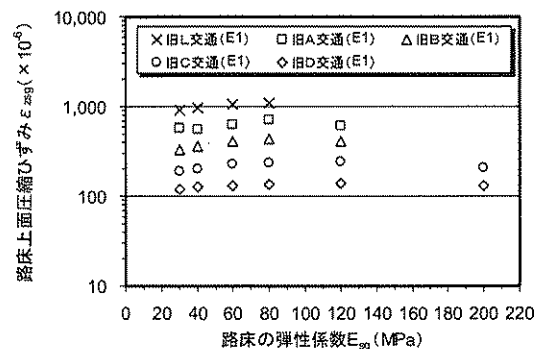


図-5 路床の弾性係数と ϵ_{zg} の関係 (E1, 10年設計の場合)

AI(米国アスファルト協会)の舗装設計法では、路床上面の圧縮ひずみと許容輪数の関係に基づいて、路床の永久変形に対する破壊規準値を設けている³⁾。今回の路床上面の圧縮ひずみの全解析結果について、「技術基準」に示されている交通量ごとの疲労破壊輪数との関係を整理すると図-6のようになる。AI式は今回の解析値内に包含されており、累積換算輪数とひずみの回帰式はAI式と若干勾配は異なるものの、強い相関関係が得られた。

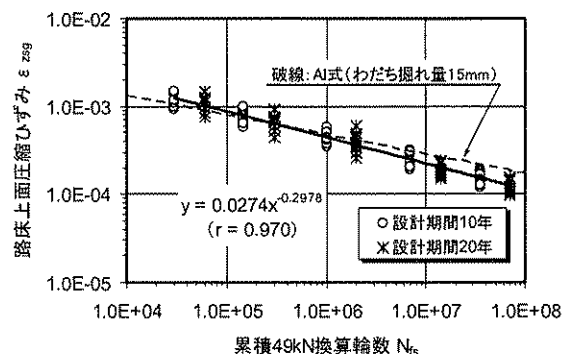


図-6 累積換算輪数と ϵ_{zg} の関係

したがって、前述の圧縮応力とは異なり、交通量に

応じた路床上面の圧縮ひずみを規定することで、これまでの供用実績に裏付けされた舗装体の疲労耐久性を担保することができるものと考えられる。

また、設計期間 10 年と 20 年で解析したものが同じ回帰線上にあることから、要求に応じた設計期間の選択が可能となり、その場合にも TA 法に準じた舗装の耐久性が確保されることになる。

(2) 路体上面

各交通量における路床の弾性係数と路体上面に生じる鉛直方向の圧縮ひずみとの関係の一例を図-7 に示す。路床上面の圧縮ひずみと同様に、舗装厚さに係わることなく、路体上面においてもそこに生じる圧縮ひずみはほぼ一定となっている。

路体上面の圧縮ひずみと「技術基準」に示されている交通量ごとの疲労破壊輪数との関係を図-8 に示す。路体上面でのひずみに比べてばらつきは大きいものの、強い相関関係が認められ、設計期間 10 年と 20 年で解析したのも同一回帰線上にある。

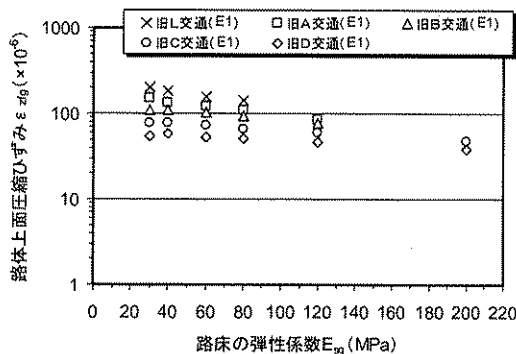


図-7 路体の弾性係数と ε_{zg} 関係 (E1, 10 年設計の場合)

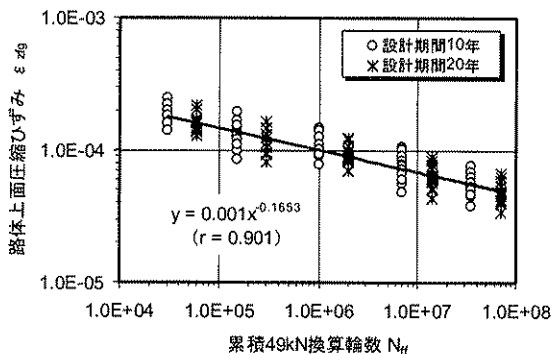


図-8 累積換算輪数と ε_{zg} の関係

「技術基準」では、設計 CBR 算出時の路床の厚さは 1m を標準としているが、一方ではそれ以外の厚さで設計することも否定していない。今回の解析結果から判断すると、図-8 中の回帰式が路床の厚さを 1m 以外に設定する場合の規準式になり得るものとする。

3.4 実大実験による理論解析の検証

理論解析の結果を検証するために、土木研究所舗装

走行実験場内に試験舗装を構築し、舗装内部のひずみや応力等を計測した。

3.4.1 試験舗装の概要

試験舗装は、図-9 に示すような 2 断面で検討した。平面形状は、いずれの断面も幅 5m、長さ 10m である。ひずみ計、土圧計については、荷重車走行に伴う経時変化が測定できるように外側わだち部の直下に埋設し、水分計については中央側へ、熱電対は路肩側へ荷重車の走行による影響を避けるように設置した。なお、水分計は路床土の含水状態の把握のため、熱電対はアスコン層の平均温度でたわみ量を補正するために設置した。

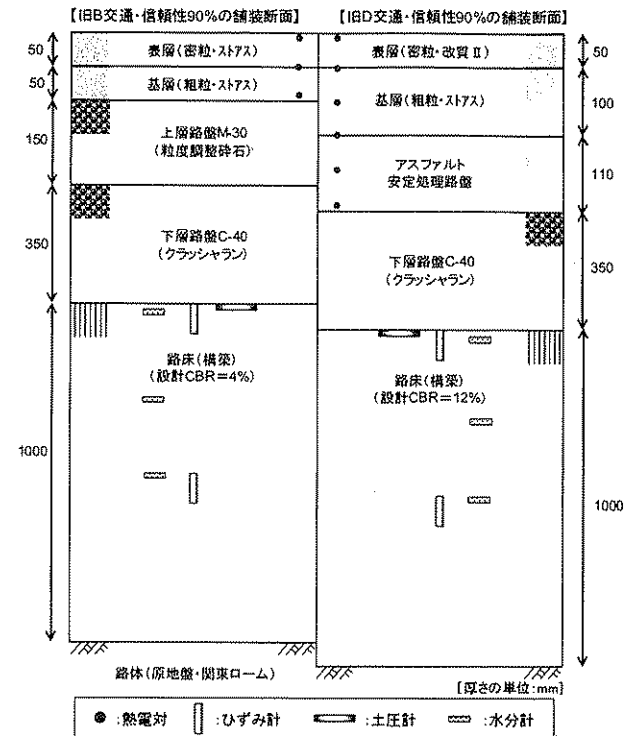


図-9 試験舗装の断面構成

3.4.2 計測および解析方法

ひずみ計と土圧計の計測は、FWD (Falling Weight Deflectometer) による 49kN 荷重時の動的データとした。荷重は、荷重車走行の供用前とし、計器埋設位置の直上から延長方向に 2m 離れた地点まで 50cm 間隔で行った。また、FWD のたわみ量についても、逆解析時の初期入力値の影響を考慮し、動的な時系列データを収集した。

解析は、図-10 に示すような 3 通りの方法で行った。これは、現段階で検討可能なすべての方法を取り上げたものであり、ひずみの算出には前述の GAMES に加えて、逆解析用の多層弾性解析プログラム“BALM99 (静的)⁶⁾”および“DBALM97 (動的)⁷⁾”を用いた。レジリエントモジュラス試験は、室内試験から得られる

各材料の弾性係数を比較対象とするために行った。

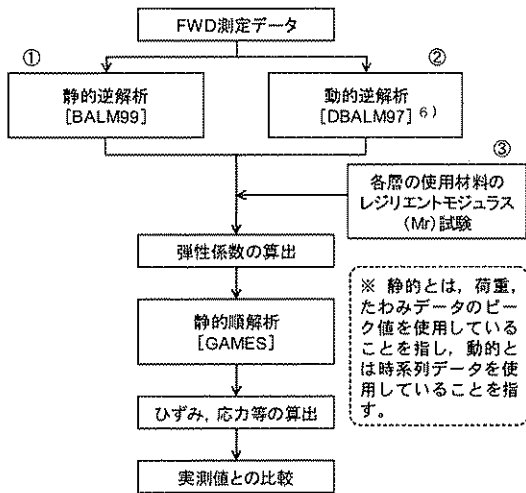


図-10 試験舗装データの解析フロー

3.4.3 計測および解析結果

FWD 載荷試験による実測値と解析値の関係について、路床中間部 (50cm 深さ) での鉛直方向の圧縮ひずみを図-11に、路床上面の圧縮ひずみを図-12に、路床上面の圧縮応力を図-13に示す。

3通りの解析方法の中で、どれが正かを断言できるだけのデータは持ち合わせていないが、いずれの方法でも、数値が大きければ実測値との一致度は高く、数値が小さいほど実測値から乖離する傾向が認められる。これは、載荷位置の微妙なズレ等が影響しているためと考えられるが、図-14に示すように設計に使用する計器直上で載荷した時の値 (最大値) では解析値と実測値は概ね一致している。

今後は、同様な調査データの蓄積・解析の継続が必要であり、それによって実測値の良否の判断も可能となり、そのデータを設計へフィードバックすることが、理論的設計法を照査する上での重要な鍵となってくる。

3.4.4 実大実験のまとめ

本検証実験結果から、実際の舗装でも理論解析で得られた数値と同等のひずみや応力が生じていることが確認できたことから、理論解析によって求めた路床上面に生じる圧縮ひずみ等で路床の性能を規定することの有効性が検証できたものとする。

3.5 新基準調査データによる検証

全国 27 路線で実施している新基準調査の平成元年から平成 12 年までの FWD 測定データを理論解析し、実路での路床上面の圧縮ひずみとわだち掘れの関係を調べた。なお、圧縮ひずみは施工直後での良否判断を前提として、調査の初期値を使用した。

路床上面の圧縮ひずみとわだち掘れ量の関係を図-15に示す。わだち掘れ量の区分で 15mm 以上と表記

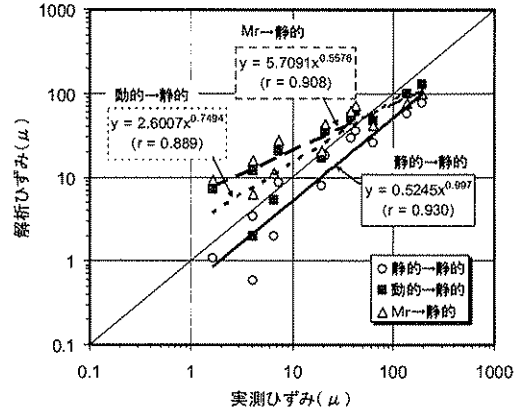


図-11 路床中間部における圧縮ひずみの実測値と解析値の関係

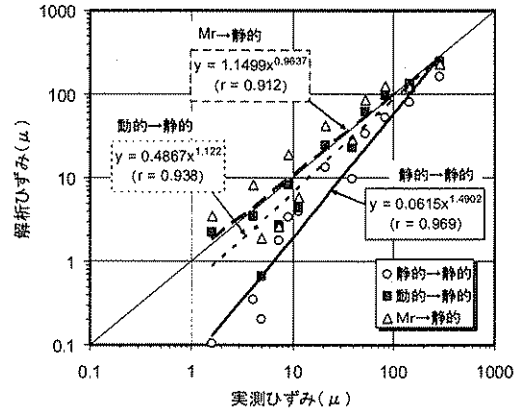


図-12 路床上面における圧縮ひずみの実測値と解析値の関係

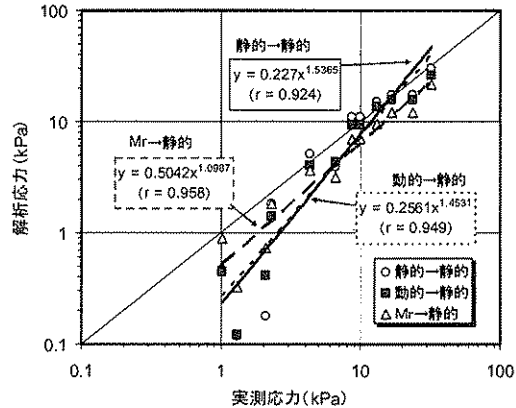


図-13 路床上面における圧縮応力の実測値と解析値の関係

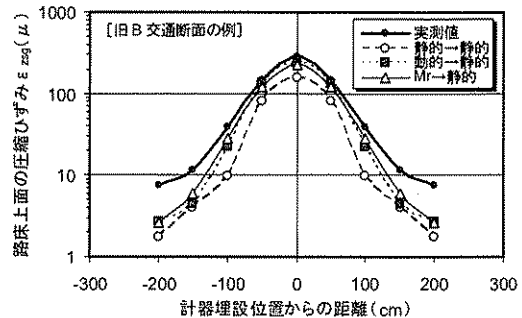


図-14 測定位置 (計器からの距離) とひずみの関係

したものは 15mm 以上となった調査時の累積 49kN 換算輪数とし、15mm 以内と表記したものについては測

定データの最終年における累積 49kN 換算輪数としてプロットした。

図-15 から、路床の圧縮ひずみ、交通荷重の通過回数とわだち掘れ量の間に関係性は認められるが、判然としたものではない。その一因として、新基準調査の対象路線は重交通路線（旧 C・D 交通）がほとんどであり、軽交通路線のデータが含まれていないことが挙げられる。今回得られた関係を実証するためには、実路におけるより多くのデータの蓄積が必要である。

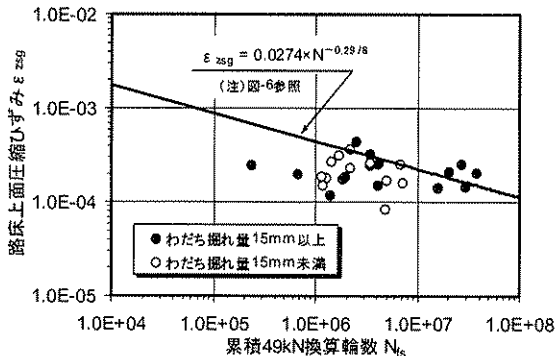


図-15 累積換算輪数と ϵ_{zsg} の関係

3.6 路床を性能規定した場合の費用効果

舗装完了後に路床上面に生じる圧縮ひずみを性能指標として規定した場合、これまでの材料種別ごとに定められていた等値換算係数ではなく、個々の材料の弾性係数を用いることになる。

これによって、例えば路盤材料であれば規定値を満足すればすべて同一の材料として扱われていたものが、弾性係数で評価されることで、材料特性の違いが構造に反映されることになる。

下層路盤に着目した具体例を図-16 に示す。これは図-6 の関係式を用いて路床上面に生じる圧縮ひずみが等しくなるように理論解析から算定したものである。弾性係数 200MPa の材料（例えば、クラッシュランのような粒状材）では厚さ 15cm 必要とされるものが、

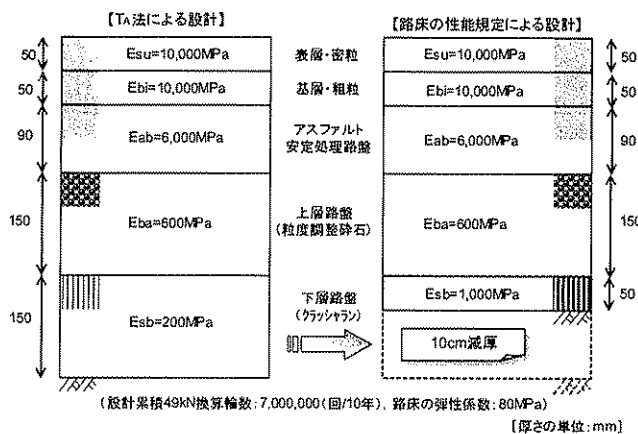


図-16 TA法と路床上面の圧縮ひずみに基づいた設計法の比較例

弾性係数 1,000MPa の材料（例えば、水硬性スラグのような自硬性のある材料）であれば必要厚さ 5cm となる。現在の市場価格では、同種の材料であればほぼ同価格であり、弾性係数の大小により価格は変動しないと仮定すると、少なくとも厚さが減じられた分はコスト低減が期待できる。

このように、路床の性能規定を推進することで、自由な設計が行えるだけでなく、建設コストの低減にも大いに寄与するものと考えられる。

4. まとめ

本研究の成果をまとめると次のようである。

- 設計交通量に応じた路床上面での許容圧縮ひずみを規定することで、過去の供用実績に基づいた路床の性能規定ができる。その場合の許容圧縮ひずみの目標値は次式で表わされる。

$$\epsilon_{zsg} = 0.027 \times N^{-0.298} \quad \dots \text{式 (a)}$$

ここで、 ϵ_{zsg} ：路床上面の圧縮ひずみ

N ：設計累積 49kN 換算輪数

- 設計交通量に応じた路体上面での許容圧縮ひずみを規定することで、過去の供用実績に基づいて路床の厚さを自由に設計することができる。その場合の許容圧縮ひずみの目標値は次式で表わされる。

$$\epsilon_{zfg} = 0.001 \times N^{-0.165} \quad \dots \text{式 (b)}$$

ここで、 ϵ_{zfg} ：路体上面の圧縮ひずみ

N ：設計累積 49kN 換算輪数

- 上記の提案により、材料個々の強度特性に応じた舗装構造設計が可能となり、新材料・新工法の導入を促進し、建設コストの縮減にも寄与できるものとする。

ただし、今後も継続した同種データの蓄積・解析が重要であり、それを理論設計へフィードバックすることが、舗装の耐久性を向上させるための大きな課題と言える。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：『舗装の構造に関する技術基準・同解説』, 2001.7
- 2) 例えば、「各国及びEAPAの舗装の性能評価に関わる技術基準の動向について」, (社) 日本道路建設業協会, 1999
- 3) The Asphalt Institute: "Thickness design - Asphalt pavements for highways and streets", Manual Series No.1 (MS-1), 1981
- 4) (社) 日本道路協会：『舗装設計施工指針』, 2001.12
- 5) 松井ほか：「鉛直および水平に円形等分布の荷重作用を受ける舗装構造の弾性解析」, 土木学会舗装工学論文集 第6巻, 2001.12
- 6) 松井ほか：「FWD 試験による弾性係数推定の精度向上に関する検討」, 土木学会舗装工学論文集 第3巻, 1998.12
- 7) 東ほか：「FWD による時系データの舗装構造評価への適用」, 土木学会舗装工学論文集 第3巻, 1998.12