

高速道路舗装の構造的損傷に関する一考察

阿部 勝義¹・神谷 恵三²・佐藤 正和³

¹正会員 日本道路公団試験研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

²正会員 日本道路公団試験研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

³正会員 日本道路公団試験研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

供用から10数年経過した高速道路において、舗装が構造的な損傷を起し、厚層打換えが必要となつた事例も見られるようになり、その工事費や交通規制に伴う社会損失を考えるとその影響は図りしれないものがある。このようなことから、舗装構造についても橋梁やトンネルなどの構造物と同様、半永久構造物と同等に考える必要があり、長期間にわたり安定した舗装路面を提供しつつ、厚層打換えを要さない舗装構造とすべきである。本研究では、高速道路における交通荷重を考慮した交通履歴と舗装の構造的な損傷との関係から、長期的に安定した舗装構造であるための条件を明らかにした。

Key Word : *japanese expressways ,structural damages, axle loads, falling weight deflectometer dynamic deflection, strain*

1. はじめに

アスファルト舗装の損傷には、経年劣化により舗装表面にクラック等の発生が見られる表面的な損傷から、アスファルト層（表層+基層+アスファルト安定処理路盤、以下「As 層」という）全体にクラック等が発生し、As 層の打換えが必要と判断される損傷まで、様々な損傷がある。本文では、特に、As 層の打換えが必要と判断される舗装の損傷を「構造的損傷」と定義する。

近年、JH で管理している高速道路の舗装において、構造的損傷を起し、アスファルト層全体を打換えなければならなくなつた事例が見られている。その工事費用や交通規制に伴う社会損失は多大なものとなっており、長期的に安定した舗装構造とすることが必要不可欠な状況となっている。

しかし、高速道路における交通履歴と舗装の構造的損傷について報告されているものは、国内ではほとんど無いのが現状である。

一方、海外の報告例では、Newcomb らにより、高速道路舗装の損傷による打換えや補修工事が与える社会的損失を重視し、ある一定以上の舗装厚や舗装材料を確保する設計方法により、表層及び基層は劣化状況に応じて定期的な打換えを前提とすることで、半永久構造物と同等な耐久性の確保に向けた取り組みが紹介¹⁾されている。

JH における舗装構造の設計は CBR-T_A 法を採用しており、設計期間を10年としている。交通履歴と舗装の構造的損傷について、設計法と比較検討した事例はないが、20年以上もAs層の打換えをしないで、健全な状態で現存する箇所が多数存在するのも事実である。

そこで本研究では、Newcomb らの報告にあるように、適切な舗装厚を確保し、As 層下面のひずみレベルを一定値以下とすることで、半永久的な舗装構造とすることができる²⁾と提案されている点に着目し、高速道路においても同様な傾向を示すのかについて検討を行った。なお、検討の手順は以下のとおりとした。

- ① 交通履歴である累積10t換算軸数の推定精度を向上するために、高速道路本線に設置してある本線軸重計データの傾向から、路線ごとに10t軸換算係数を推定する。
- ② FWD 測定地点の損傷状態を定量的に把握するため、5段階の損傷レベルを設定する。これに基づき、実測したFWD測定値を損傷レベルにより分類する。
- ③ 累積10t換算軸数、損傷レベル、FWDのたわみ量やAs層下面のひずみとの関係を整理することで、長期的に安定した舗装構造としての条件を整理する。



図-1 本線軸重計

2. 交通履歴の評価

交通履歴と舗装の構造的損傷の関係を整理する上で、設計軸荷重を精度良く算出することは非常に重要である。本研究ではこの交通履歴について、JHの舗装設計要領で用いられている10t換算軸数の累積により評価することとした。10t換算軸数は次式³⁾により算出される。

10t換算軸数

$$= \text{通過大型車台数} \times 10\text{t換算係数} \quad (1)$$

JHの舗装設計要領では、現在のところ10t換算係数=0.85としているが、これは1972～1980年の東名高速道路の軸重測定結果より求めたものである。

そこで、10t換算係数をより正確に算出するため、東名高速道路(清水～静岡 上下線)、名神高速道路(京都南～茨木 上下線)、山陽自動車道(河内～西条 上り線)に設置されている本線軸重計(図-1)のデータを使用し、大型車交通量と10t換算係数の関係を見直した。

データの整理方法は、本線軸重計のデータからシングル軸、タンデム軸、トライデム軸ごとに合計軸荷重 $P(t)$ と通過軸数を抽出し、大型車1台当たりの10t換算係数を、次式³⁾によって求めた。

$$\text{大型車1台当たり} \quad \text{10t換算係数} = \frac{\sum_i a_i \cdot M_i}{K} \quad (2)$$

ここに、

a_i = 軸重換算係数

シングル軸…… $a_i = (p_i / 10)^4$

タンデム軸…… $a_i = (p_i' / 18)^4$

トライデム軸… $a_i = (p_i'' / 26)^4$

p_i = シングルの軸重(t)

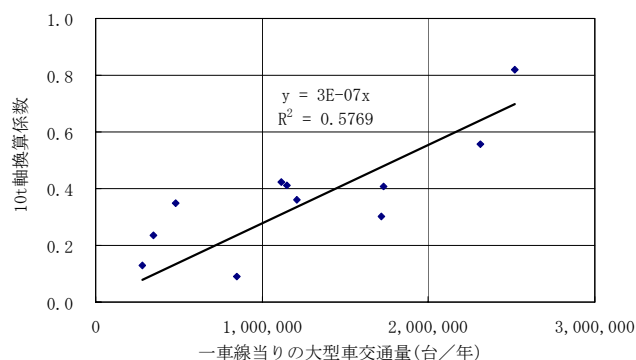


図-2 大型車交通量と10t換算軸数の関係

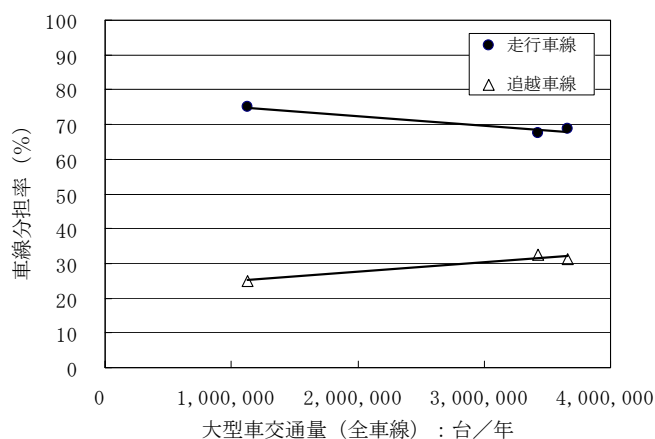


図-3 大型車交通量と10t換算軸数の関係

p_i' = タンデム軸(2軸)の合計軸重(t)

p_i'' = トライデム軸(3軸)の合計軸重(t)

M_i = 軸重 p_i, p_i', p_i'' (t)の通過軸数(軸)

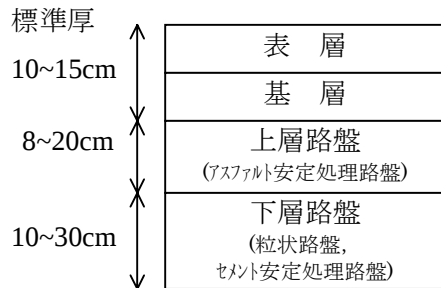
K = p_i, p_i', p_i'' の測定時の大型車台数(台)

図-2は本線軸重計のデータを上下線別・車線別に整理することにより、一車線当たりの大型車交通量と10t換算係数の関係を示したものである。図から、大型車交通量と10t換算係数には一定の相関が見られ、大型車交通量が多くなると10t換算係数も大きくなる傾向が見られる。

また、図-3は片側2車線の本線軸重計のデータより、大型車交通量(走行車線+追越車線)と車線分担率の関係を整理したものである。この図から、大型車交通量に対する走行車線及び追越車線の車線分担率の差が小さく、ほぼ一定であると判断し、車線分担率は中間値である走行車線：追越車線=70%：30%とした。これにより、区間交通量から車線毎の大型車交通量を推定し、図-2に示す回帰式により、交通実態に見合った精度の高い10t換算軸数の算出が可能となり、舗装に影響を与える交通履

表－1 構造的健全及び構造的損傷の定義

項 目	舗装種別	弾性係数の 設定値(MPa)	内 容
構造的健全	表基層	8,000	新規路線での実測値を反映
	上層路盤	5,000	
	下層路盤	150～2,000	
	路床	60～300	
構造的損傷	表基層	5,000	クラック等が発生し、As 層の 打換えが必要と判断される損傷 状態
	上層路盤	2,000	
	下層路盤	40～100	
	路床	60～300	



図－4 高速道路の標準的な舗装構成
及び層厚

歴を累積 10t 換算軸数という指標を用いて、評価することが可能である。

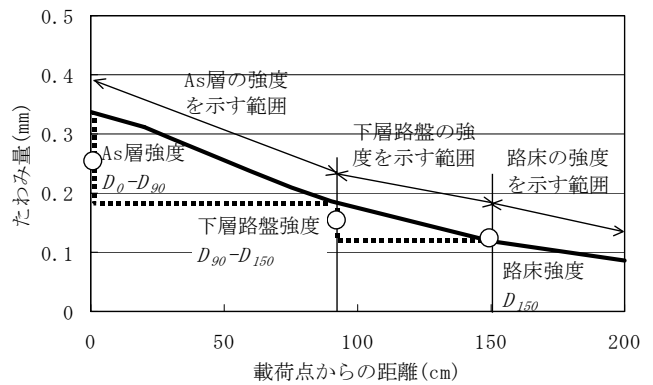
3. 舗装の損傷状況の定量評価

次に、評価地点における舗装の損傷程度を定量的に評価する方法を述べる。通常、舗装の損傷状況を把握する場合、FWD によるたわみ量の測定が行われる。しかし、FWD による舗装構造の健全度を定量的に評価する方法について、確立されたものがないのが現状である。そこで、FWD 測定によるたわみ量から推定した FWD 損傷率という指標を用いることで、舗装構造の損傷状態を定量的に評価し、損傷程度のレベル分けを行った。

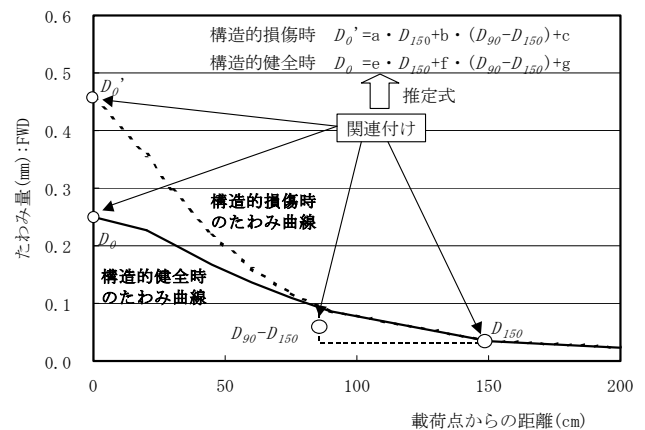
損傷状態の定量化にあたり構造的健全及び構造的損傷の定義を表－1 のとおりとした。構造的健全とは新規路線の舗装構造と同程度の強度を有している状態であり、構造的損傷とは、舗装路面にクラック等が発生し、As 層の打換えが必要と判断される損傷状態とする。各状態における舗装各層の弾性係数については、新規路線や供用路線において、FWD 測定やコア採取などの調査により得られたデータを基に設定したものである。

(1) 高速道路の舗装構成

高速道路の標準的な舗装構成及び層厚は図－4 に



図－5 FWD たわみ曲線と
舗装各層の強度との関連



図－6 健全・損傷時の D0 推定式概念

示すとおりである。舗装全厚は 35cm～55cm 程度である。舗装構成は表層、基層、上層路盤、下層路盤の 4 層を標準としており、下層路盤は粒状路盤又はセメント安定処理路盤により構成され、上層路盤はアスファルト安定処理路盤が原則である。また、表層工種については、密粒や高機能(排水性)となっており、近年は高機能舗装が標準である。

(2) 健全・損傷時の推定

本研究では、FWD 測定による舗装構造の損傷状況の評価方法として、健全や損傷時のたわみ量の基準を設定し、測定値と基準値を比較する方法とした。しかし、路床強度や下層路盤強度は測定地点毎に違うため、As 層が健全な場合であってもたわみ量は変化する。したがって、FWD 測定地点の路床強度や下層路盤強度を把握し、その情報をもとに基準たわみ量を算出する必要がある。

高速道路の舗装は、舗装厚と舗装構成が前述の範囲内であるので、一般の道路よりもパターン化されている。このため、図－5 に示すとおり、たわみ曲線の部位と舗装各層の強度を関連づけることが可能

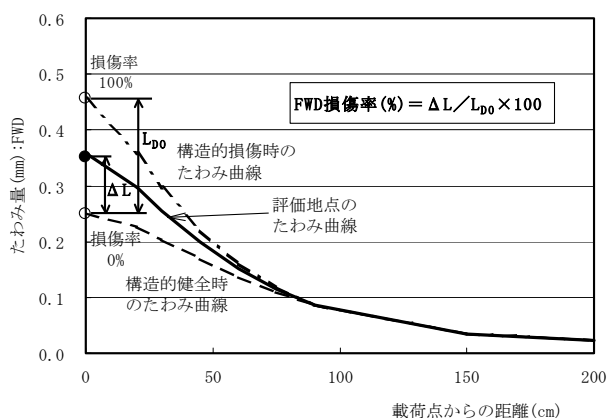


図-7 FWD 損傷率の定義

表-2 損傷レベルの定義

損傷レベル	FWD損傷率	損 傷 状 態
LV0 (構造的健全)	0%以下	新設時と同程度の構造強度がある健全なレベル
LV1	0%～30%以下	表層部分のみの損傷
LV2	30%～60%以下	表層+基層程度までの損傷
LV3	60%～100%以下	As層(表層+基層+アスファルト)全体に及ぶ損傷
LV4 (構造的損傷)	100%以上	舗装体(As層+下層路盤)の構造的破壊

である⁴⁾。その特性を利用することで、たわみ曲線の D_{150} (FWD の載荷点から 150cm 地点のたわみ量)より路床強度の評価が可能となり、 $(D_{90}-D_{150})$ より下層路盤強度の評価が可能となる。同様に As 層の強度は (D_0-D_{90}) により評価が可能である。図-6 は構造的健全時及び構造的損傷時の D_0 (FWD の載荷点直下(0cm)のたわみ量)と D_{150} 及び $(D_{90}-D_{150})$ の関連づけから得られる各状態の D_0 の推定式について、その概念を示している。

この推定式は、舗装構成及び舗装厚毎(1cm 毎)に表-1 に示す各層の弾性係数から順解析により得られた $D_0, D_{150}, (D_{90}-D_{150})$ の各たわみ量を用いて、重回帰分析により得られる回帰式である。下層路盤や路床のように弾性係数の設定範囲があるものについては、数段階に弾性係数を変化させて、たわみ量の計算を行っている。これにより、構造的健全時及び構造的損傷毎に得られた推定式は式(3)及び式(4)のように示すことができる。

構造的損傷時

$$D_0 = a \times D_{150} + b \times (D_{90} - D_{150}) + c \quad (3)$$

構造的健全時

$$D_0 = e \times D_{150} + f \times (D_{90} - D_{150}) + g \quad (4)$$

ここで、a,b,c,d,e,f,g は重回帰分析による係数(各係数は舗装構成、舗装厚毎に設定)

この推定式により、FWD 測定地点の任意のたわ



図-8 損傷レベルと舗装の採取コアの状態

み曲線の D_{90} 及び D_{150} から構造的健全時及び構造的損傷時の基準となる D_0 たわみ量の推定が可能となり、FWD 測定の D_0 と比較することで、As 層の健全度を評価することが可能となる。次にこの健全度を定量的に評価する手法について述べる。

(3) 健全度の定量的評価

図-7 に示す FWD 損傷率とは、FWD 測定により得られた D_0 が構造的健全時と比べ構造的損傷時の D_0 にどの程度近いかを百分率で示したものであり、次式のとおりに定義する。

$$\text{FWD 損傷率}(\%) = \Delta L / L_{D0} \times 100 \quad (5)$$

ここに、

ΔL : FWD 測定の D_0 と構造的健全時の D_0 の差

L_{D0} : 構造的損傷時の D_0 と構造的健全時の D_0 の差

※ 構造的健全時及び損傷時の D_0 については荷重 49kN、混合物温度 20℃のたわみ量とする。

※ FWD 測定の D_0 については荷重補正(49kN)及び温度補正⁵⁾(20℃)を適用する。

FWD 測定の D_0 が構造的健全時の D_0 以下であれば FWD 損傷率は 0%，構造的損傷時と同じ場合には FWD 損傷率は 100%となり、その中間的な損傷程度についても定量的に示すことが可能である。

表-2 は損傷レベルの定義を示しており、FWD 損傷率とコア採取等の現地調査結果の関係から、損傷レベルを設定し、舗装構造の損傷状態を LV0～LV4 の 5 段階の評価に分類することとした。各損傷レベルにおける代表的な舗装の採取コアの状態は図-8 に示すとおりである。舗装のクラックの深さは、LV1 では表層部分に、LV2 では表層+基層部分まで、また LV3 では As 層全体に達しており、損傷レベル

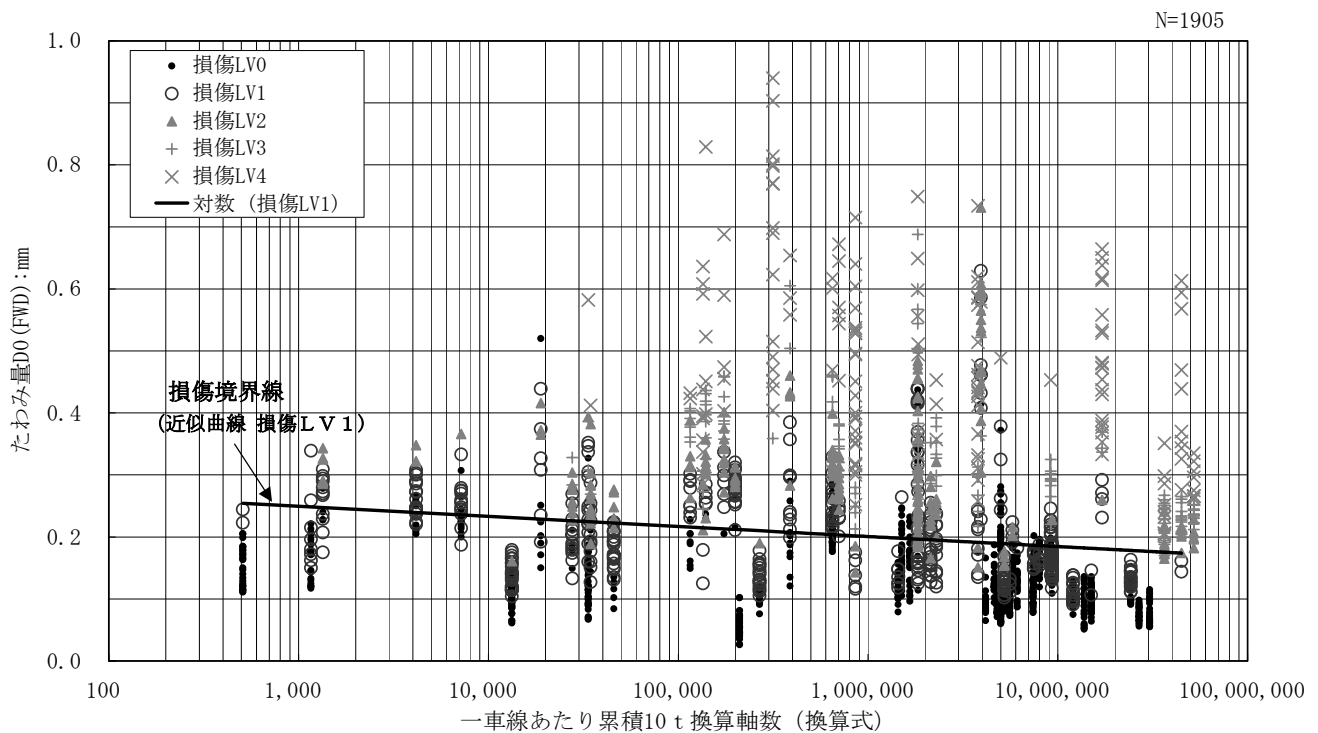


図-9 累積 10t 換算軸数と D_0 たわみ量の関係
(損傷レベル別)

が大きくなるごとに舗装のクラックが深くなること
がわかる。また、LV4 とは、As 層の損傷程度は
LV3 と同程度であるが、下層路盤については、As
層の損傷による雨水等の影響により、表-1 の構
造的損傷に定義されるような下層路盤の強度が極端
に低下した状態である。

4. 交通履歴と構造的損傷の関係

(1) たわみ量と交通履歴の関係

高速道路の FWD 測定結果 (64 区間, 1905 地点)
について、FWD 損傷率による損傷レベルの分類を
行った。次に交通センサスによる大型車交通量と車
線分担率 (車線分担率は走行車線 : 追越車線 =
70% : 30%) から、車線毎の年間大型車交通量を算
出し、図-2 の関係より 10t 軸換算係数を求めた。
供用期間における車線毎の累積大型車交通量を求め、
(1)式により車線毎の累積 10t 換算軸数を算出した。
この車線毎の累積 10t 換算軸数と FWD 測定の D_0 (荷
重補正 (49kN), 温度補正 (20°C)) の関係を整理したもの
を図-9 に示す。この図から、累積 10t 換算軸数が
同じでも、各損傷レベルにおける D_0 は一定では
ない傾向が見られる。これは、 D_0 が路床・下層路盤
の強度や舗装厚の違いにより、損傷レベルを決定す
るの基準たわみ量に変化するため、同じたわみ量でも、

損傷レベルが異なると考えられる。

各損傷レベルにおいて、表層のみの損傷である損
傷 LV1 までは主に表層の劣化による損傷と考えられ
るが、それ以上の LV2 以上では損傷レベルが大き
くなるほど舗装構造に与える影響が大きくなること
から、構造的健全部と構造的損傷部の境界を LV1 とし
て、その回帰曲線を算出し、この境界線を損傷境界
線と定義する。この損傷境界線は、図-9 に示すよ
うに累積 10t 換算軸数が大きくなるにつれ、 D_0 た
わみ量が小さくなる傾向が見られおり、 T_A 法などの構
造設計法の考え方や舗装技術基準の疲労破壊輪数の
考え方と概ね一致する。しかし、損傷境界線の D_0
の変化が小さいことから、 D_0 で 0.2mm 程度が舗
装構造の長期的な安定を維持するための限界値と考
えることができる。これは川村ら⁶⁾により提案され
た健全部と損傷部の境界値とも一致した結果となっ
ている。

(2) ひずみと交通履歴の関係

Newcomb らの報告によると、適切な舗装厚を確
保し、As 層下面の引張りひずみレベルを一定値以
下とすることにより、半永久的な舗装構造の構築に
重点を置いている。また、その引張りひずみの限界
値は 50~70 μ 程度である²⁾と報告されている。

そこで、理論設計法と同様、As 層 (As 安定処理

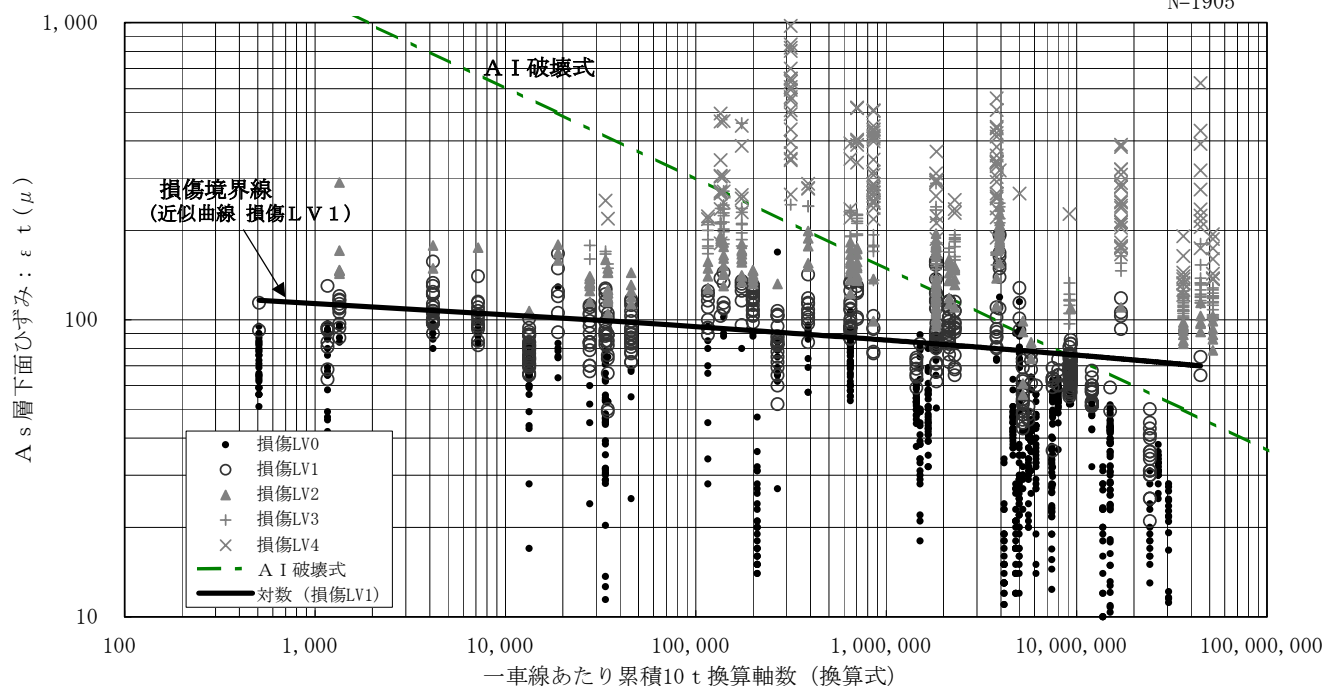


図-10 累積 10t 換算軸数と As 層下面のひずみ ε_t の関係 (損傷レベル別)

層)の下面の引張りひずみ ε_t に着目し、累積 10t 換算軸数と損傷レベルの関係について整理した結果を図-10 に示す。なお、As 層下面の引張りひずみ ε_t は、FWD 測定のためみ量(荷重補正(49kN),温度補正(20°C))を多層弾性理論に基づく逆解析により弾性係数を算出し、それを順解析することにより計算された値を使用している。また、図-10 には、図-9 と同様に構造的健全部と構造的損傷部を分ける損傷境界線を損傷 LV1 の回帰曲線を図示した。図から、概ね引張りひずみ ε_t が 100 μ 付近において、累積 10t 軸数が大きくなるとともに、引張りひずみが低下する右下がりの傾向が示されている。

これにより、長期的に安定した舗装構造とするためには、損傷境界線の右端の傾向に示されるように、最低でも As 層下面の引張りひずみ ε_t を 70 μ 以下とする必要があると思われる。これは前述したひずみの限界値と同程度である。

また、理論設計法で使用される AI 破壊式を参考に示している。AI 破壊式は次式⁷⁾のとおり示すことができる。

$$N_{FA} = S_A (18.4(C)(6.167 \times 10^{-5} \times \varepsilon_t^{-3.291} \times E^{-0.854})) \quad (5)$$

ここに、

N_{FA} : アスファルト混合物層の許容 49kN 輪数

S_A : 設定したひび割れ率による定数

ε_t : アスファルト混合物下面の引張りひずみ

$C: C=10^M$

$$M = 4.84(V_b/(V_b + V_v) - 0.69)$$

ここに、

V_b : アスファルト混合物層の最下層に使用するアスファルト混合物のアスファルト量(容積%)

V_v : アスファルト混合物層の最下層に使用するアスファルト混合物の空隙率 (%)

E : アスファルト混合物層の弾性係数(MPa)

なお、図-10 に示す AI 破壊線は、(5)式において、 $SA=1.0, C=0.32, E=5000(\text{MPa})$ の条件下で算出したものであり、49kN 輪数=10t 換算軸数としている。

上記条件により算出した AI 破壊線は、損傷境界線とは大きく異なる傾向を示している。これは、高速道路の舗装構成に最低舗装厚が設けられていることや路床・路盤から構築していることなどの理由から、As 層下面のひずみの大きな舗装構成が存在しないことや、交通特性が大きく影響しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究は、高速道路における交通履歴と舗装構造

の損傷との関係を把握することを目的に、累積 10t 換算軸数とたわみ量・As 層下面のひずみ及び舗装構造の損傷レベルとの関係から、その関連性や傾向について整理を行った。その結果をまとめると以下のようになる。

- ① 舗装構造を長期的に健全な状態で維持するためには、 D_0 を 0.2mm 程度以下とすることが必要と考えられる。
- ② 長期的に安定した舗装構造を構築するための設計条件として、As 層下面のひずみの限界値を 70μ 程度とする必要性を確認できた。この値は David らの報告による As 層下面のひずみの限界値と同程度である。
- ③ 高速道路における累積 10t 換算軸数と損傷形態について、AI 破壊式と比較することにより、実際の損傷実態と大きく異なる傾向が得られた。

本研究により得られた、舗装構造を長期的に健全に維持するための必要条件として、たわみ量及び As 層下面のひずみの基準を整理することができた。

今後、この基準等を応用することで損傷箇所の必要舗装厚の算定や、舗装構造の健全度評価などに適用を図っていきたい。

参考文献

- 1) Newcomb,E.N,Huddleston,I.J,Buncher,M:U.S. Perspective on Design and Construction of Perpetual Asphalt Pavements, Ninth International Conference on Asphalt Pavement, pp.1-2,2002
- 2) Newcomb,E.N,Huddleston,I.J,Buncher,M:U.S. Perspective on Design and Construction of Perpetual Asphalt Pavements, Ninth International Conference on Asphalt Pavement, p.7,2002
- 3) 設計要領第一集 舗装編, 日本道路公団,p.7,2004
- 4) 阿部勝義, 神谷恵三, 佐藤正和:FWD のたわみ曲線を用いた健全度評価, 第 25 回日本道路会議論文集, CD-ROM 論文番号 09P09,2003
- 5) 雑賀義夫, 阿部長門, 姫野賢治, 丸山輝彦:FWD から得られる特性値の温度補正に関する検討, 舗装,Vol30,No.8,pp.10-15,1995
- 6) 川村和将, 七五三野茂, 小松原昭則:高速道路におけるアスファルト舗装構造の実態調査および分析, 日本道路公団試験研究所報告 Vol.36,pp10-17,1999
- 7) 舗装設計施工指針, (社)日本道路協会, pp187-189,2001

A STUDY ON STRUCTURAL DAMAGE OF PAVEMENTS IN JAPANESE EXPRESSWAYS

Katsuyoshi ABE, Keizo KAMIYA, Masakazu SATO

Some of the sections in service over 10 years in Japanese expressways have been structurally damaged and have to be repaired by replacing with thick asphalt materials. This requires unacceptable repair costs and traffic regulation with social nuisance during the repair work. Like in the structures of bridge and tunnel, that of pavement should be almost permanently durable with no needs to be repaired for structural damages. In this study structural conditions for pavements to be stable in long-term years are specified, based on the relationship between equivalent single axle loads and structural damages of the pavements in the expressways.