

FWD及び走行車両による舗装体ひずみの計測と解析

岳本 秀人¹・久保 裕一²・安倍 隆二³

¹正会員 北海道開発土木研究所 (〒062 - 8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番)

²北海道開発土木研究所 (〒062 - 8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番)

³正会員 北海道開発土木研究所 (〒062 - 8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番)

理論的設計法においては、舗装各層に発生するひずみを力学解析手法により求め、構成材料の疲労特性から破壊年数を推定する。このため、走行する交通荷重に応じたひずみを精度良く求めることが重要である。今回、 T_A 法および多層弾性理論を用いた設計寿命の異なる舗装の試験施工を実施し、FWDによる支持力評価や車両走行試験による舗装体のひずみの実測を試みた。本研究は、理論的設計手法の確立を目指して解析条件の検討を行い、多層弾性理論解析結果の妥当性を検証するものであり、ひずみの実測値と解析値の比較結果について報告する。

Key Word : pavement structural design, multilayer elasticity theory, strain, FWD, dynamic loading

1. はじめに

ライフサイクルコスト(以下LCCとする)の低減の観点から、新材料・新工法の積極的な導入を図ることが求められているが、使用実績の少ない材料や舗装構造の採用を容易にするためには理論的設計法の確立が必要である。このような観点から平成13年度に策定された「舗装の構造に関する技術基準¹⁾」は、設計法を限定せずに新技術を採用できることとしている。理論的設計法においては、走行する交通荷重に対する舗装各層のひずみ算定の精度向上が重要な課題である。近年、国内においても優れた多層弾性理論プログラムが開発されてきているが、精度向上のためには載荷条件や各舗装構成材料の弾性係数など実態に即した解析条件を設定することが求められる。

そこで、アスファルト混合物層(以下As層とする)にひずみ計を埋設した試験舗装区間においてFWDによる支持力評価や車両走行試験によるひずみの実測を試みた。本研究は、LCCの低減の観点から多層弾性理論による設計方法の確立を目指して、ひずみの実測値や解析値との比較により理論解析結果の妥当性の検証を行い、解析条件の検討を行うものである。

2. 調査研究概要

(1) 試験舗装

本試験舗装は、積雪寒冷地における多層弾性理論による設計手法の確立を目指して、舗装体の力学的挙動の把握及び長期的耐久性の確認を目的として、一般国道238号の稚内市声間(図-1参照)に整備した。交通区分は第4種1級、舗装計画交通量は1000台以上3000台未満台/日(旧C交通)であり、片側2車線の歩道側を試験施工の区間としている。



図-1 試験舗装箇所

試験施工に用いた舗装断面は図-2 に示すとおりであり、経験に基づく TA 法及び多層弾性理論によってそれぞれ構造設計を行った。各施工断面における供用性を早期に把握するため、1 工区および 2 工区には信頼性 50% で設計期間 2 ~ 4 年の比較的アスファルト混合物層の薄い断面を設定した。なお、試験施工区間のうち、平成 15 年度秋期に 1, 2, 3, 4 及び 5 工区が完成しひずみ計測が可能であるが、6 及び 7 工区は未完成である。

FWD 及び走行車両の動的載荷により As 層下面に発生するひずみを計測するため、動的なひずみ変化の計測が可能なひずみ計「イ」メント ストレイト トランス デューサー (PAST- -AC) を各工区の As 層に埋設した。PAST- -AC の構造を図-3 に、材質・仕様を表-1 に示すとおり、ひずみゲージの両端にステンレス製の定着部が取り付けられており、ゲージを被覆材でカバーすることにより耐久性

と耐熱性が確保され、加熱アスファルト混合物の機械施工によっても設置することが可能となっている。

(2) FWD 調査

各試験舗装断面において FWD による載荷を行い、埋設した PAST- により As 層下面のひずみを計測した。計測するひずみは道路横断方向とし、図-4 に示すとおりひずみ計を道路横断方向に設置し、さらに、道路横断方向のひずみ分布を把握するため、載荷位置を変えて計測を行った。また、舗装各層の弾性係数を把握するため FWD たわみから逆解析を実施し、As 層、路盤および路床の弾性係数を算出した。これらの弾性係数を用いて多層弾性理論解析により As 層下面ひずみを解析し、FWD によるひずみの実測値と比較した。

	1 工区	2 工区	3 工区	4 工区	5 工区	6 工区	7 工区
設計方法	TA法	多層弾性理論 TA法	多層弾性理論	多層弾性理論	TA法	多層弾性理論	TA法
設計期間	2年設計	3年設計(多層弾性) 4年設計(TA法)	25年設計	20年設計	20年設計	20年設計	20年設計
信頼性	信頼性50%	信頼性50%	信頼性50%	信頼性90%	信頼性90%	信頼性90%	信頼性90%

	1 工区	2 工区	3 工区	4 工区	5 工区	6 工区	7 工区
As層	5cm	4+5=9cm	4+5=9cm	4+5+5+6+7=27cm	4+5+5+6+6=26cm	4+5+5+4=18cm	4+6+5=15cm
下層路盤	75cm	71cm	71cm	53cm	60cm	62cm	100cm
路床	210cm	210cm	190cm	140cm	154cm	200cm	275cm
	現地盤(岩盤)						

図-2 試験舗装断面図

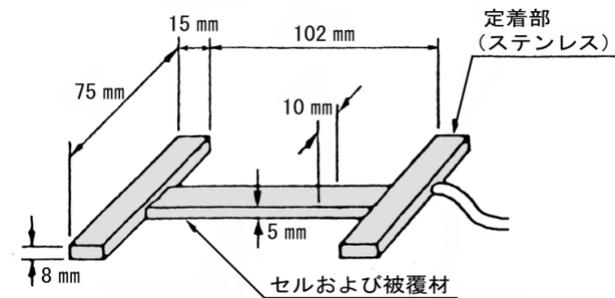


図-3 PAST- の構造

表-1 PAST- の仕様

型式	FTC A (アスファルト)
定格出力	1,500 μ ストレイン以上
温度範囲	-30 ~ 150
セルの材質	エポキシ - ファイバークラス
セルの弾性係数 E	2,200 MPa
コーティング	エポキシ - シリコン - P F T - チタニウム

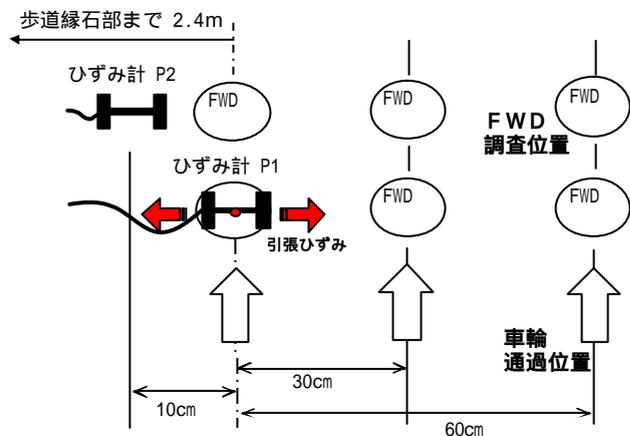


図-4 ひずみ計設置位置と載荷位置

(3) 走行車両によるひずみ計測

各試験舗装断面において 20t ダンプトラックを走行させ, As 層下面のひずみを計測する. FWD と同様に図-4 のとおり車両走行位置を変えて計測を行った. 走行車両の荷重条件において, 前述した FWD たわみの逆解析により求めた弾性係数を用いて, 多層弾性理論解析により理論ひずみを算出し, 走行車両によるひずみの実測値と比較した.

3. FWD による舗装体ひずみの計測と解析

(1) FWD たわみ測定と逆解析

各工区における各層の弾性係数を把握するため FWD 調査を実施した. 図-5 に 1 工区における最大たわみの分布, 図-6 に各工区の平均 D_0 および平均 D_{150} を示す. 一般に FWD 調査における載荷中心における表面たわみ D_0 は舗装構造全体の支持力を, 載荷中心から 150cm 離れた表面たわみ D_{150} は路床のみの支持力を評価した値と考えられている²⁾. 各工区の D_0 の平均値は 296 ~ 820 μm であり, たわみはアスファルト混合物層が薄くなるほど大きくなる傾向が見られる. 一方, 各工区の D_{150} の平均値は 49 ~ 60 μm の範囲となり, 大きなばらつきは見られない.



写真-1 FWD たわみ計測状況

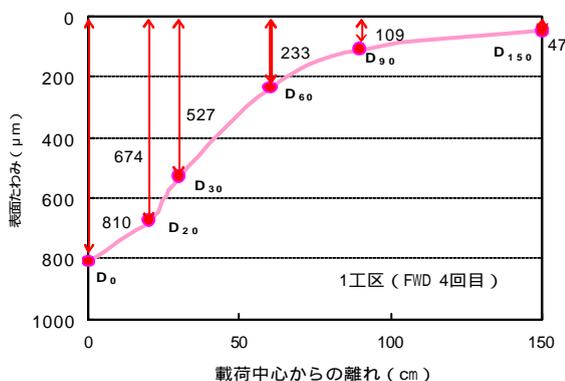


図-5 最大たわみ量の分布 (1 工区)

FWD たわみ計測値により逆解析プログラム LMBS³⁾を用いて求めたアスファルト混合物層, 路盤, 路床および原地盤 (風化が進んだ岩盤) の弾性係数を表-2 に示す.

(2) FWD 載荷によるひずみ計測と解析

1 工区において FWD の衝撃荷重によって変化する荷重, D_0 および As 層下面ひずみの時系列変化を計測した結果を図-7 に示す. 載荷時間は約 0.03 秒であり, 舗装の表面たわみは荷重の増加開始よりもやや遅れて発生しているが, 増加開始から減少終了までは, 約 0.03 秒である. また, As 層下面のひずみの発生開始時はたわみの発生開始時と合致させて時系列変化を示しているが, その後の変化傾向も一致していることが分かる.

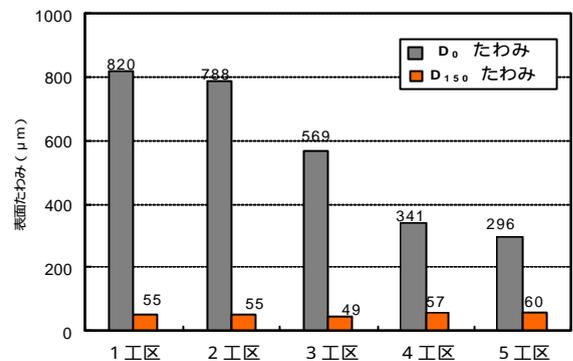


図-6 各工区における平均 D_0 および平均 D_{150} たわみ

表-2 各工区における弾性係数一覧

	弾性係数 (MPa)				
	1 工区	2 工区	3 工区	4 工区	5 工区
舗装体平均温度 (°C)	11	11	9	3~5	7
アスファルト混合物層	22133	6682	13639	11739	9039
路盤	106	113	137	142	86
路床	124	99	92	211	177
現地盤 (岩盤)	293	260	390	159	207

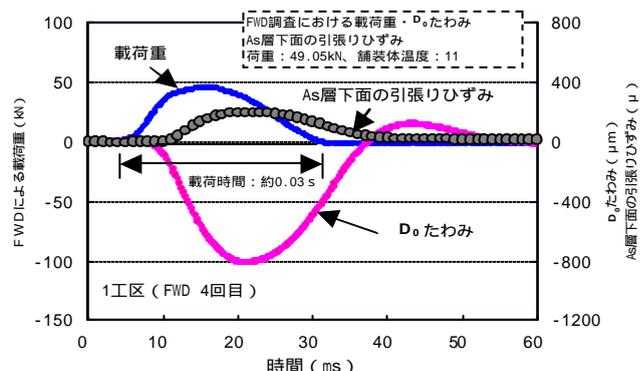


図-7 たわみ及びひずみの時系列変化

次に、FWD 荷重位置を横断方向に移動させて計測したAs層下面の引張りひずみと、表-2の弾性係数を用いて多層弾性理論プログラム GAMES⁴)により解析した理論値の比較を、図-8(1工区)及び図-9(4工区)に示す。最大ひずみは解析値がやや大きいものの実測値と近似した分布となっている。各工区における最大ひずみを比較した結果を図-10に示す。各工区とも解析値が実測値よりもやや大きい傾向にあるが、大きな誤差はなかった。

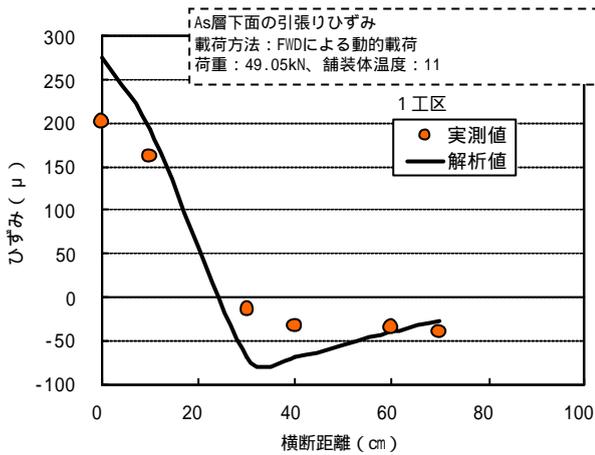


図-8 As 層下面ひずみの横断方向分布 (1工区)

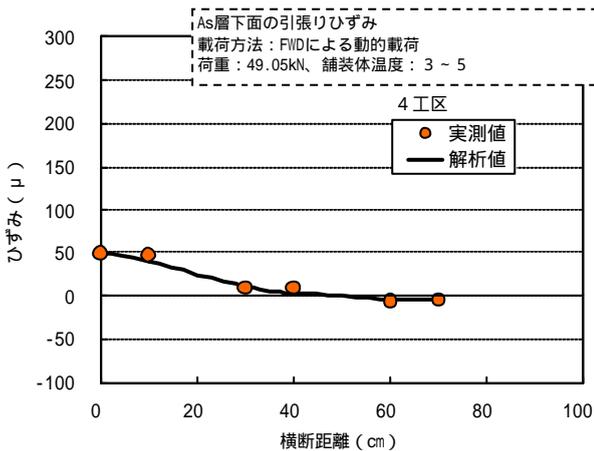


図-9 As 層下面ひずみの横断方向分布 (4工区)

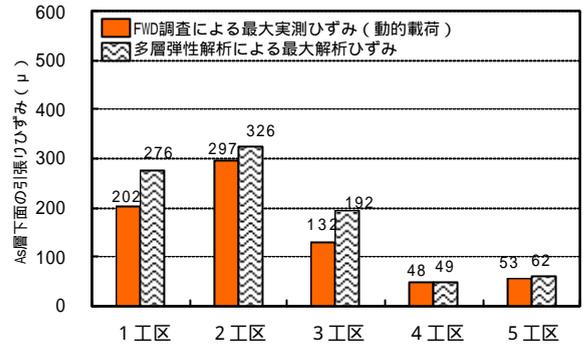


図-10 各工区におけるAs層下面最大ひずみの実測値と解析値

4. 車両走行によるひずみ計測と理論値

各試験舗装断面において写真-2に示すとおり、20t ダンプトラックを走行させ、As 層下面のひずみを計測した。さらに、多層弾性理論解析プログラム GAMES⁴)によりAs層下面のひずみを解析し、実測値と比較することとした。

(1) ひずみ計による計測結果

1工区において20t ダンプを10, 20及び30km/hで走行させた際のひずみの変化を図-11に示す。ここで走行速度は正確な値ではなく、ドライバーがスピードメータにより確認して調節している目標値である。前輪、第2軸及び第3軸の後輪の通過に伴い、As層下面のひずみが3回増大しており、走行速度が高くなるほど荷荷時間が短い。前輪が通過する際のひずみの増加開始から減少終了までを前輪による荷荷時間とすると1.04~0.44秒であり、FWDによる荷荷時間である0.03秒と比較して大幅に長いことが分かる。



写-2 走行車両による舗装体ひずみの計測状況

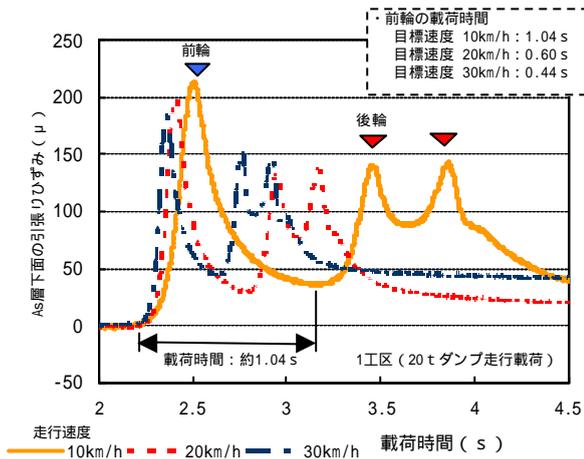


図-11 走行車両によるひずみの時系列変化 (1工区)

(2) FWD 試験結果の逆解析による弾性係数の補正

路盤、路床の弾性係数の値は表-2 のものを用いた。As 層の弾性係数は「舗装に関する AASHTO 指針⁵⁾」に従い、車両走行によるひずみ測定時の舗装体温度に換算し、さらに、FWD と走行車両の載荷時間の違いから、載荷時間とレジリエントモジュラスに関する研究結果⁶⁾を参考に補正した。その結果を表-3 に示す。

(3) 載荷条件

これらの弾性係数を用いて GAMES により解析した走行車両通過時の As 層下面の横断方向ひずみの縦断方向分布を、図-15 に横断方向分布を図-16 に示す。解析における載荷条件は図-12 に示す全車輪を載荷した場合と、図-13 に示す前輪 (シングルタイヤ) のみ及び図-14 に示す後輪 (第2軸、ダブルタイヤ) のみを載荷した場合とを比較した結果、図-15 及び 16 に示すとおりほぼ一致した。このため、解析上は他の車輪の影響がほとんどないと考えられ、これ以降の解析はひずみを求める載荷位置の輪荷重のみで行うこととした。

表-3 走行車両による載荷時間と弾性係数の補正值

20 t ダンプ走行時		弾性係数 (MPa)				
目標走行速度	舗装体平均温度 (°C)	1工区	2工区	3工区	4工区	5工区
10 km/h	載荷時間	1.04	0.87	1.28	1.81	1.19
	弾性係数	15534	4797	8489	6971	5945
20 km/h	載荷時間	0.60	0.65	0.75	0.74	0.97
	弾性係数	16652	4977	9082	7686	6085
30 km/h	載荷時間	0.44	-	-	-	-
	弾性係数	17318	-	-	-	-

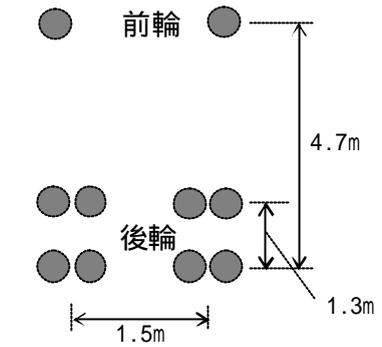


図-12 走行車両の荷重配置

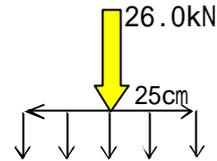


図-13 前輪荷重 (シングルタイヤ)

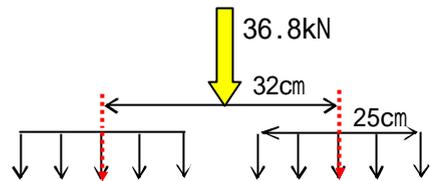


図-14 後輪荷重 (ダブルタイヤ)

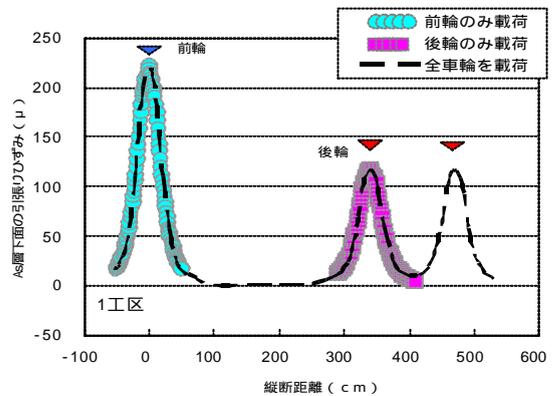


図-15 ひずみの縦断方向分布

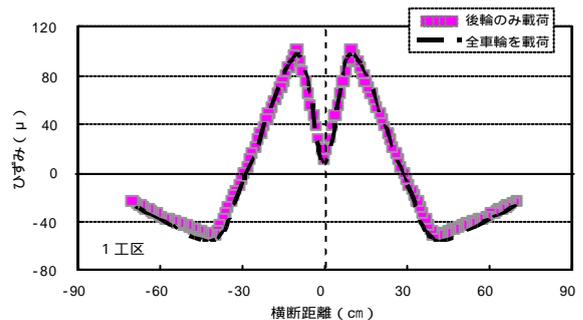


図-16 ひずみの横断方向分布 (後輪)

(4) 前輪荷重時のひずみの解析値と実測値

次に車両通過位置を横断方向に変化させてひずみを計測し、前輪通過時の横断方向ひずみの横断方向分布状況を推定した結果と、GAMES による解析結果を図-17(1工区)及び図-18(4工区)を示す。前輪荷重時におけるひずみの分布状況の解析結果は1工区及び4工区とも実測値と同様の傾向を示している。

また、各工区における最大ひずみの解析値と実測値との関係を図-19に示す。解析値は荷重時間によるAs層弾性係数の補正(表-3)を行った場合と行わなかった場合を示しており、補正によって精度が向上していることが分かる。また、実測値と比較して補正後の解析値はやや小さな値となっている。

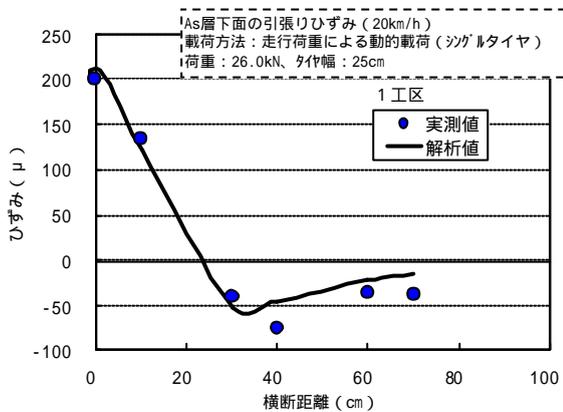


図-17 前輪荷重によるひずみの横断方向分布の計測値と解析値(1工区)

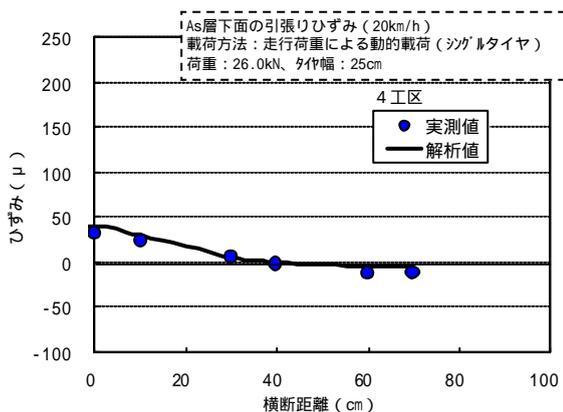


図-18 前輪荷重によるひずみの横断方向分布の計測値と解析値(4工区)

(5) 後輪荷重時のひずみの解析値と実測値

次に1工区における後輪通過時の横断方向ひずみの横断方向分布状況の実測値と解析値の比較を図-20示す。As層下面ひずみの解析は図-14に示す2つの円形等分布の荷重条件で行った。その結果、ダブルタイヤのそれぞれの中心付近でひずみが最大となっている。一方、実測値は荷重位置中心で最大となり、異なる傾向を示している。

また、各断面における最大ひずみの解析値と実測値との比較結果を図-21に示す。これによると実測値と比較して解析値が小さな値となっており、比較的誤差が大きい。さらに荷重位置中心におけるAs層下面のひずみの解析値も図-21に併せて示しているが、実測値は荷重位置中心ひずみが最大ひずみとなっており、これと比較

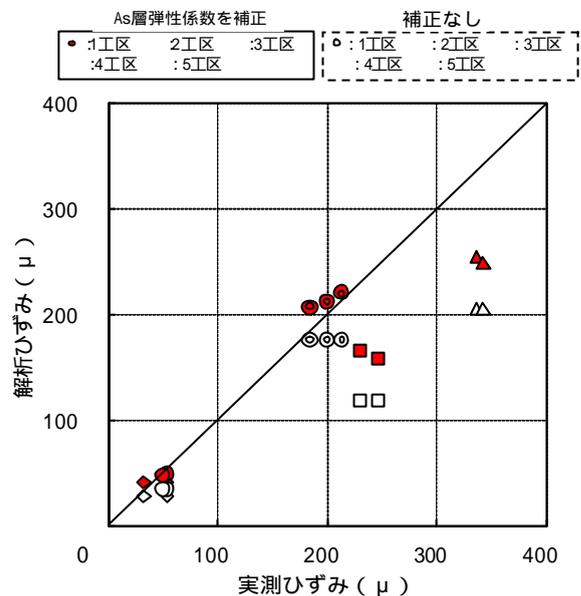


図-19 前輪荷重による最大ひずみ(各工区)

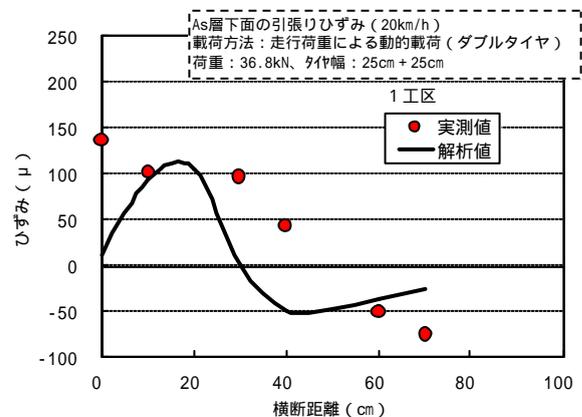


図-20 後輪荷重によるひずみの横断方向分布の計測値と解析値(1工区)

して大幅に小さな値となっている．以上のことから，設計上図-14 のような荷重モデルを用いることは誤差が大きいと考えられる．

後輪載荷条件について図-22 に示す単独円形の等分布荷重を仮定し，解析した結果を図-23 に示すとおり，実測値と比較的近いひずみの分布状況となったが，最大ひずみは実測値よりも小さい．適切な荷重条件については，今後データ蓄積し，さらに検討する必要がある．

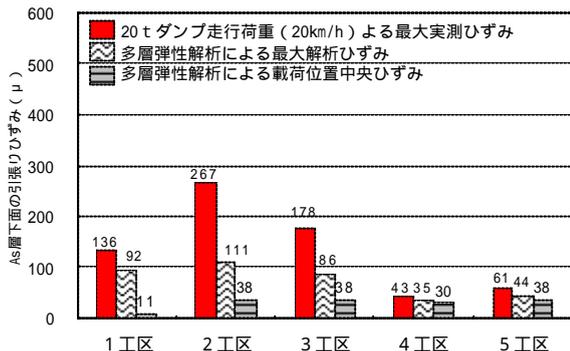


図-21 各工区における後輪載荷による最大ひずみ及び載荷位置中心ひずみ

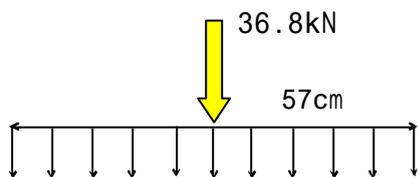


図-22 後輪載荷条件の変更

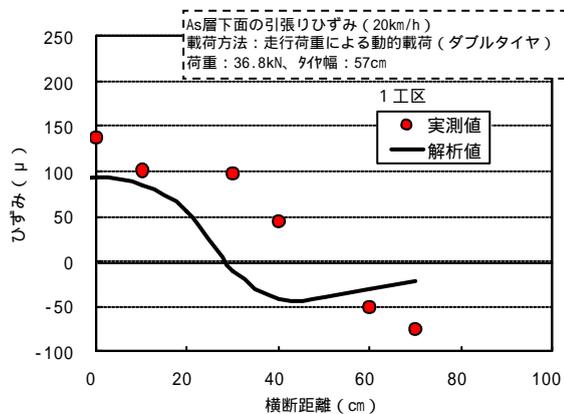


図-23 後輪載荷によるひずみの横断方向分布の計測値と単独荷重による解析値 (1 工区)

(6) 走行速度の影響

車両走行速度を変化させて載荷した場合の載荷時間とAs層下面のひずみの関係を図-24 に示した．1 工区は 10, 20 及び 30km/h を目標として走行し，4 工区は 10 及び 20km/h を目標として走行した．解析値は目標速度 20km/h の載荷時間の 1/3 についてもひずみを算定した．車両走行速度が高いほど載荷時間が短くなり，ひずみは減少する傾向にあるが，その影響は小さいことから，設計上は一定の走行速度を想定して解析を行っても大きな問題はないと考えられる．

5. まとめ

今回，As 層にひずみ計を埋設し，FWD 及び走行車両によって載荷し，As 層下面のひずみ計測を行った．さらに多層弾性理論解析値と比較した結果，以下の事項が確認された．

- (1) FWD 表面たわみの逆解析によって求めた舗装各層の弾性係数を用いて，多層弾性理論解析により FWD 載荷時の As 層下面のひずみを求めた結果は，ひずみ計による実測値と近い値となった．
- (2) 前輪あるいは後輪単独載荷の条件で解析した車輪付近の As 層下面ひずみの分布は，車両の他の車輪の荷重の影響をほとんど受けない．
- (3) 走行車両と FWD の載荷時間の違いを考慮して As 層の弾性係数の補正を行い，走行車両の前輪による As 層下面ひずみの解析を行った結果，補正を行わなかった場合と比較して実測値に対する精度が向上した．

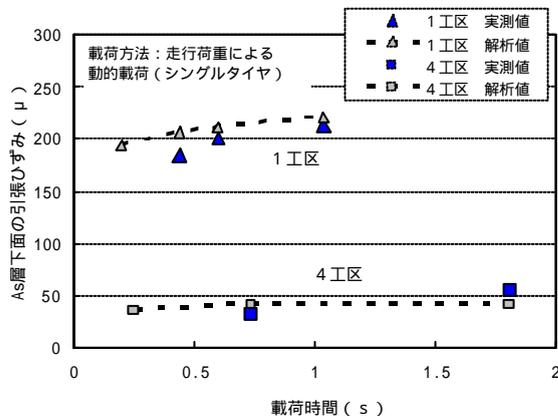


図-24 走行車両による載荷時間と As 層下面ひずみ

(4) 走行車両の後輪載荷条件を2つの円形等分布荷重でモデル化し, As 層下面のひずみを解析した結果を実測値と比較すると誤差が大きかった.

(5) 車両走行速度を変化させて As 層下面のひずみを計測した結果, 走行速度によるひずみへの影響は小さかった.

6. おわりに

LCC の低減に向けて新技術を導入するためには, 舗装の理論的設計方法を早急に確立していくことが重要である.

今後, 走行車両による舗装体ひずみ解析の精度向上に向けて, 後輪(ダブルタイヤ)の載荷モデル, As 層内の温度勾配の影響, FWD たわみの動的逆解析による舗装各層の弾性係数推定, 材料試験によるレジリエントモジュラスの適用など解析条件のさらなる検討に取り組みたい.

また, 路床上面のひずみ計測や試験舗装の供用性評価のための追跡調査を行っていきたい.

7. 参考文献

- 1) 舗装の構造に関する技術基準・同解説: 社団法人 日本道路協会, pp. 146~148, 2001. 12
- 2) FWD 運用マニュアル(案): 財団法人 道路保全技術センター, pp. 20, 1996. 3
- 3) パソコンによる舗装の多層弾性解析: 姫野賢治, アスファルト, Vol. 32, No. 161, pp. 69-72, 1989
- 4) 鉛直および水平方向に円形分布の荷重作用を受ける舗装構造の弾性解析: 松井, マイナ, 董, 小澤, 土木学会舗装工学論文集 第6巻, 2001
- 5) 舗装に関する AASHTO 指針: 社団法人 セメント協会, pp. 405, 1986
- 6) アスファルト混合物のレジリエントモジュラス: 阿部, 宇佐美, 丸山, 姫野, 第47回年次学術講演会, pp. 118-119, 1992

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF PAVEMENT STRAIN BY FWD AND TRAVELING VEHICLES

Hideto TAKEMOTO, Yuichi KUBO and Ryuji ABE

In the theoretical design of pavement, strains that occur in pavement layers are obtained by a mechanical analysis and the number of years to fatigue failure is estimated based on the fatigue characteristics of materials. It is very important to accurately estimate the strain induced by traveling vehicles. We installed test pavement sections designed for different design periods which were calculated by TA method and multilayer elasticity theory. We evaluated the bearing capacity of test pavements by FWD, measured strains by vehicle-traveling test. To establish a theoretical design, we compared measured strain to theoretically evaluated strain to determine whether the theoretical method gives valid results.