

付着型薄層ホワイトトッピング工法に関する基礎的研究

野田悦郎¹・孔 永健²・笠原好則³

¹正会員 日本道路(株)技術研究所 (〒146 東京都太田区多摩川2-11-20)

²正会員 Ph. D 同上

³非会員 同上

破損したアスファルト舗装に薄層のコンクリートオーバーレイを施工する修繕工法、薄層ホワイトトッピング工法が欧米で研究されている。本研究では我が国への適用可能性について小規模モデル実験等を通して、主にコンクリート版と既設アスファルト舗装の界面性状および実際の温度環境に置かれた場合の構造特性を中心に基礎的な研究を行った。①薄層コンクリート版(厚さ8~9cm)と既設下層アスコン層の温度特性、②界面のせん断応力とせん断強度の関係に及ぼすコンクリート版の温度差と既設アスコン層の温度の影響、③舗装構造のクリティカルなポイントなどを明らかにした。

key words :thin bonded concrete overlay(whitetopping)on existing asphalt pavement, interface shear strength and shear stress,pavement temperature,FEM analysis, damage analysis

1. はじめに

我が国の道路舗装のほとんどを占めるアスファルト舗装において、重交通道路における流動わだち掘れは供用性を著しく低下させる原因となっている。流動わだちを生じないコンクリート舗装による修繕が望ましいものの、通常のコンクリート舗装の場合には、養生期間が必要であること、厚さが厚いためかなりフォーメーションが上がることなどのために、一般的には適用が困難である。しかし、前者に関しては、早期強度が発現するコンクリート材料も開発されていることから、残された課題は如何にフォーメーションを上げないように構造的な耐久性を有する薄層コンクリートオーバーレイ修繕工法を確立するかにある。

欧米では、破損したアスファルト舗装の修繕工法として、既設アスファルト舗装上にコンクリート舗装を施工する、通称”ホワイトトッピング”工法¹⁾が研究されている。ホワイトトッピング工法は、広義的にアスファルト中間層上の通常のコンクリート舗装といった新設の場合も含むが、一般には破損した既設アスファルト舗装上のコンクリート舗装施工

法を意味する。このホワイトトッピング工法にも、既設のアスファルト舗装を単に路盤とみなし設計施工される工法と、ultrathin whitetopping と呼ばれる薄層の付着型コンクリートオーバーレイ工法があり、近年は後者に関する研究²⁾³⁾⁴⁾がなされている。本文は、この薄層付着型コンクリートオーバーレイが我が国にも適用の可能性について小規模モデル実験等を通して、主にコンクリート層と既設アスファルト舗装の界面性状および実際の温度環境に置かれた場合の構造特性を中心に基礎的な研究を行ったので報告するものである。

2. 薄層ホワイトトッピングの既往の研究と、想定した我が国での適用

(1)薄層ホワイトトッピングの既往の研究

Risserら²⁾は1991年に米国で試験施工を実施した。ホワイトトッピング(以下WT)の厚さ8.9cm, 5.1cm、目地間隔1.83m, 0.61mのものを既設アスコン舗装(以下既設AC層)10.2cm上に施工したものであり、約1年経過した時点では良好な供用性を示したと報告している。またJ. Silfwerbrand³⁾はスウェーデンで版

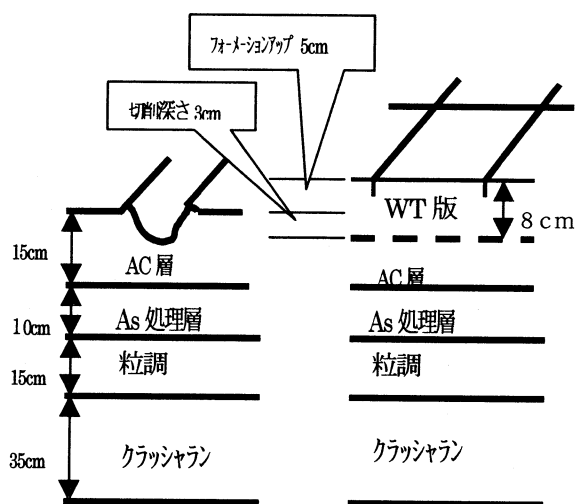


図-1 薄層WTの概念図

厚7cm、目地間隔1.25mから3.5mの試験施工を行い、大型車交通量が比較的に多いにも係わらず良好な供用を示していると報告している。いずれの場合も、①既設AC層との付着確保を前提に既設AC層表面の切削、②短い目地間隔、③10cm以下の薄層コンクリート（スリップバなし）が共通している。そして良好な供用性を示した理由として、薄層コンクリート舗装が既設のアスファルト舗装と付着して一体化した挙動を示していることを上げている。特にRisserらの試験舗装に関しては既存のWestergaardモデルや、FEMの1層版モデル(ILLI-SLAB)では破壊しなかった理由を説明できず、2層版モデル（同じくILLI-SLAB）のみが破壊しなかった理由を説明できるとし、それを用いた設計因子の感度分析を行っているが、明確な設計理論にはなっていないなど、設計・供用性の究明などにまだ多くの課題が残されている⁴⁾。

(2) 想定した我が国での適用

わだち掘れ破損が卓越しているのは重交通路線であることから、D交通、路床設計CBR6の既設アスファルト舗装を例に、薄層WT工法の適用を想定した概念を図-1に示す。すなわち、既設のわだち掘れの除去と、付着効果の向上を目的としたAC層表面の切削3cmを行い、その後に8cm程度の超速硬もしくは超早強コンクリートを打設し、無散水カッタにて目地を25mmほど切削する。

3. 実験研究の概要

表-1 打設した超早強コンクリートの配合と性状

s/a(%)	骨材の最大寸法mm	単位量(kg/m ³)					
		早強セメント	混和剤DD1	水	粗骨材	細骨材	
40	20	380	20	160	1060	692	
曲げ強度(kgf/cm ²)				曲げ弾性係数(kgf/cm ²)			
現場		標準		標準			
1	3	1	3	7日	28日	7日	28日
45.1	52.2	55.7	66.6	67.3	71.3	338000	359000

WT工法では、特に、舗装体温度が舗装の挙動に大きく影響すると考えられる。すなわち、上層はコンクリート舗装版であるので、必然的に生じるであろうコンクリート版の温度勾配（温度差）による発生応力、下層の既設AC層が温度により弾性係数が変化することによる応力の変化、これらが輪荷重応力および温度応力の合成として、WT版内応力、既設AC層の引張ひずみ、付着を前提として挙動すると設計すべきである薄層WT構造のWT版と既設AC層のせん断応力に関係してくると思われる。そこで、本研究では、①図-1のWT舗装構造を模した小規模モデルを作成し、舗装体温度を経時的に測定し、WT舗装の舗装体温度特性を明らかにし、②WT版と既設AC層の付着せん断強度を実験的に求め、③以上を踏まえ、FEMプログラムを用いて、発生する応力、ひずみを推定し、およびそれらから推定される界面の応力、舗装体の疲労特性等について考察した。

(1) 小規模モデル実験

小規模モデル実験の概要を図-2に示す。既設アスファルト舗装厚は15cmあり、J. Silfwerbrandが提案するWT工法の要件である既設AC層厚が12cm以上の要件は満足していると考えた。目地間隔は前述の既往の試験施工の実績を考慮して1.2mとした。なお、既設AC層の表面は付着確保のため、小型表面切削機で切削した版（版A、版B）としない版（版C）を設定した。切削深さは1cm弱であった。使用したコンクリートは表-1に示す配合・性状の超早強コンクリートとし、目地はコンクリート打設翌朝、無散水型カッタにて深さ2.5cm切削した。熱電対はWT版表面、中心、下面、既設AC層内に配置し、打設直後から1時間毎に自動連続測定を行った。夏期にその測定も実施した。

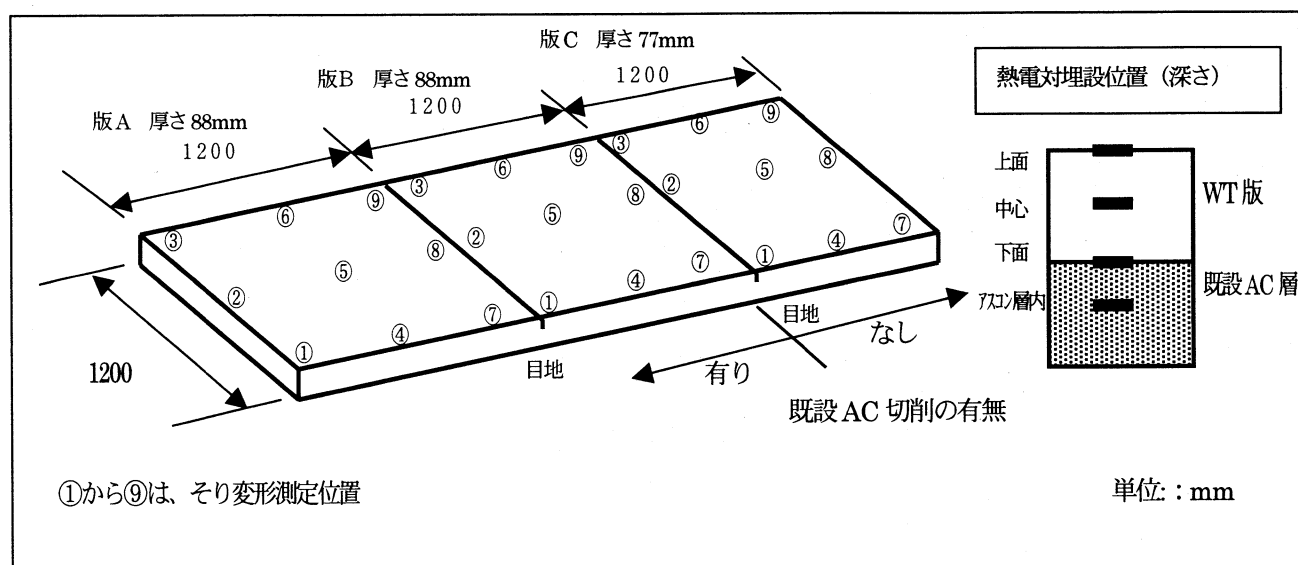


図-2 小規模モデル実験の概要図



写真-1 界面せん断強度試験

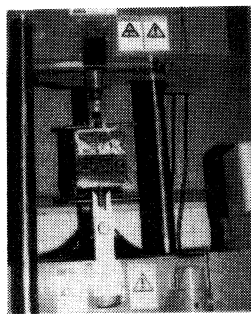
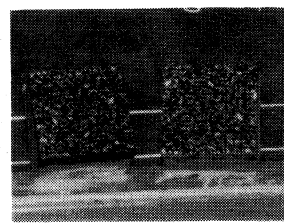


写真-2 界面引張強度試験



(2) 界面強度実験

あらかじめ密粒アスコンで作成した供試体表面を上述の小型切削機で表面切削した供試体としない供試体について、小規模モデル実験で用いたコンクリートを打設し、所定の養生後切り出し、写真-1, 2に示すように界面のせん断強度試験と引張強度試験を行った。

4. 実験結果

(1) 温度特性

夏の時期の代表的な舗装体温度の日変化を図-3に示す。

深さ方向の温度分布測定事例は図-4aに示す。上面温度と下面温度の平均と中心温度はほぼ図-4bのように1:1に対応しており、WT版内の深さ方向の温度分布はほぼ線形であり、非線形による内部応力の発生は小さいと考えられる。

図-5は1時間毎に測定したWT版の温度差(=WT版の上面と下面の温度差)の時間的な割合を示したものである。参考にセメントコンクリート舗装要綱⁹⁾の版厚15cmの場合も示しているが、WT版は薄層のため版温度差の最大値は9℃と小さく、その時間割合は±1℃前後に集中している。

図-6は隣接するアスファルト舗装の内部温度とWTの下層既設AC層の内部温度を比較したものである。高温領域になるほど、両者の温度の差は大きく、WT版の下層既設AC層の最大温度50℃を越えることはなく、隣接アスファルト舗装よりも約10℃低い。

WT工法の構造を解析する場合、WT版の温度差と、下層の既設AC層内部温度の組み合わせデータが必要であることから、図-7に示すようにWT版の温度差ごとについて、下層の既設AC層内部温度発生頻度分布を求めた。

(2) WT版の付着とそり変形

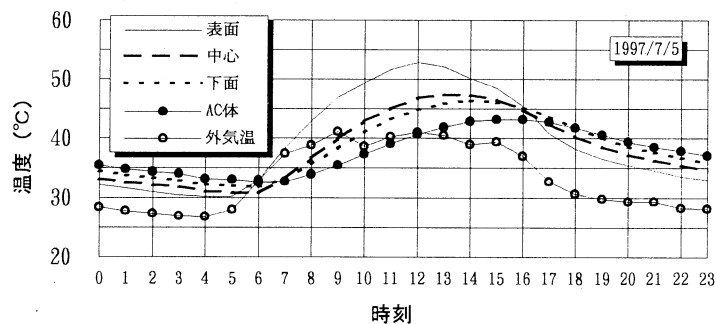


図-3 舗装体温度の日変化例

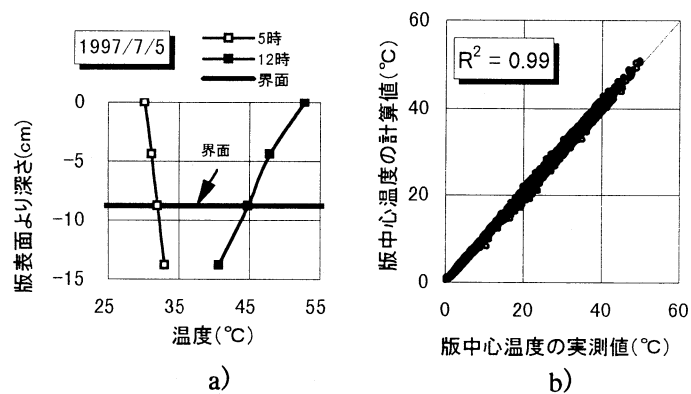
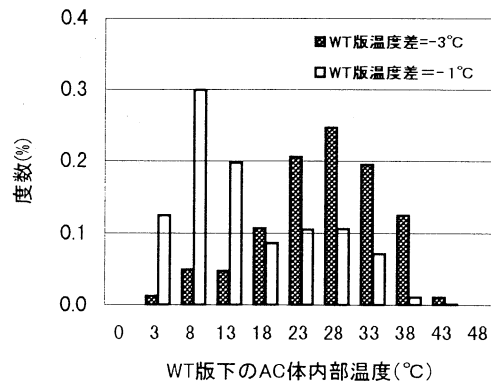


図-4 版厚方向の温度分布

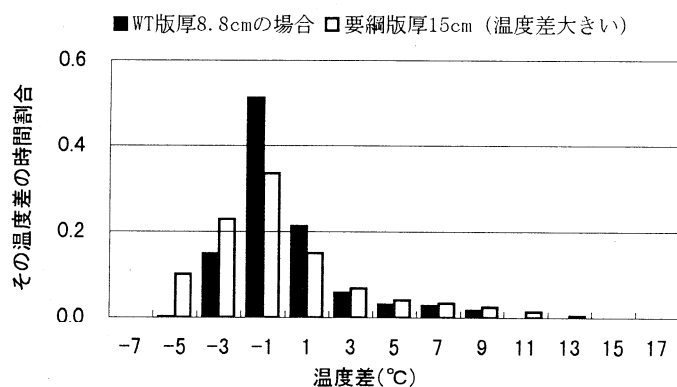
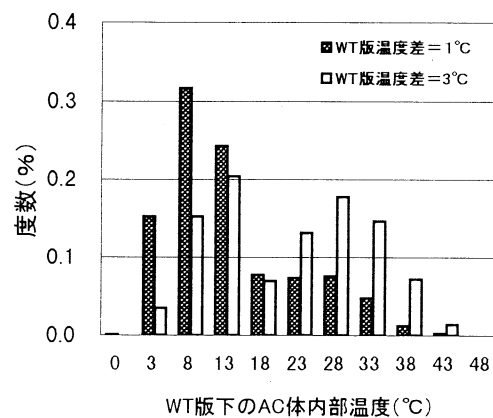


図-5 WT版の温度差の頻度分布

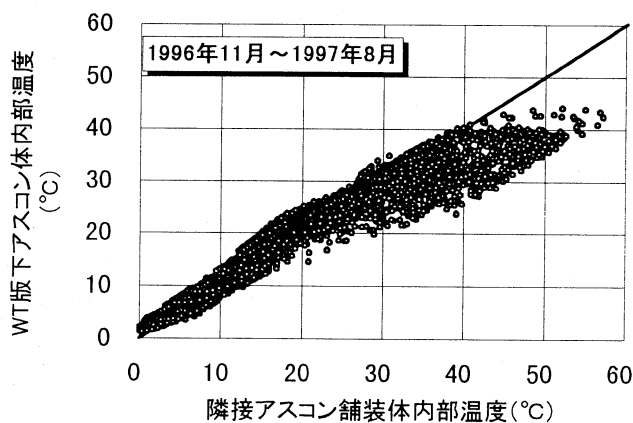
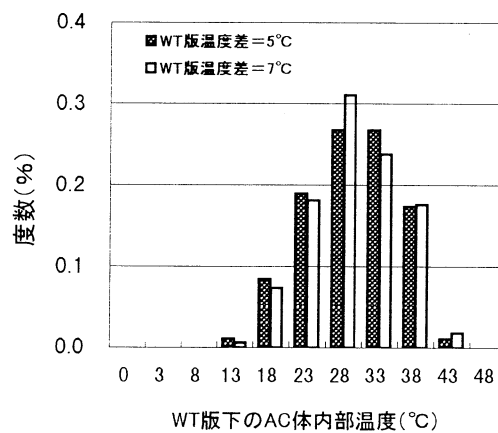


図-6 WT版下のアスファルト舗装体温度

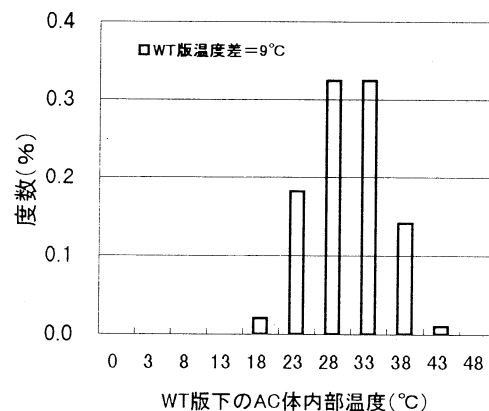


図-7 WT版下のAC層内部温度発生頻度

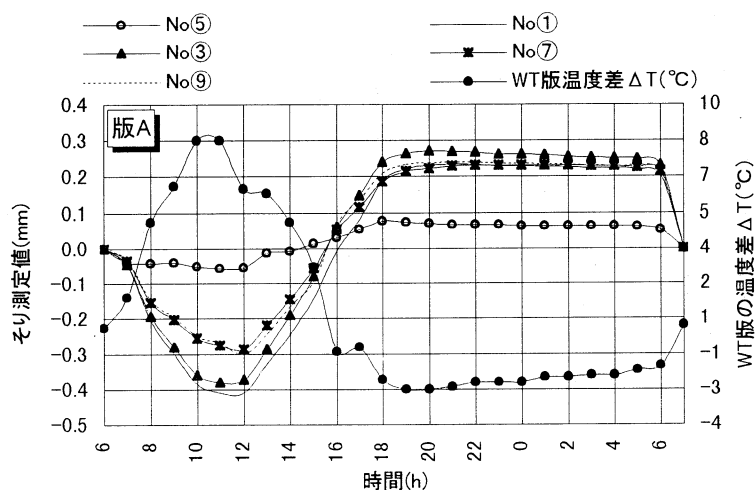


図-8 そり測定結果の一例

打設後半年経過した時点で、小規模モデル版の版A自由縁部側にWT版と既設AC層の間にわずかなはく離が観察されたので、1.2m四方の縁部と中央部にて、変位計によって日変化によるそり変形の測定を試みた（図-2参照）。

温度差0の時を起点として、垂直変位量の日変化を測定した結果の一例を図-8に示す。これによれば、版周辺部では温度差負の状態では上面側に変形し、温度差正の状態では版中央で上面側に変位し、周辺部では下面側に変位し、温度勾配に即したそり変形を示していることがわかる。

同一温度差における版Aと版Bの変位量を比較したのが図-9である。自由縁部側の版Aのそり変位量は、版Bのそり変位量よりも大きく、版Aの自由縁部周辺で非付着の状態になっていると推察される。今回の小規模モデル実験では、施工延長が3.6mと短いため、設けた2箇所の目地にもひびわれは誘導されず、結果的に端部の付近に既設AC層とのはく離（非付着状態）が生じたものと考えられる。今回の小規模モデル実験では、版の深さの1/3程度の目地切削を行い、ひびわれを誘導しようとしたが、目地切削はさらに厚さの1/2程度以上で切削し、ひびわれを誘導する方が温度によるそりや軸方向収縮に起因するはく離において有効な対策ではないかとの知見が得られた。

(3) 界面強度

せん断試験はGrzybowski⁶⁾の試験法を参考にして、選定した。また、アスファルト表面の切削効果におけるせん断試験の結果を検証することを目的として界面の直接引張試験も実施した。

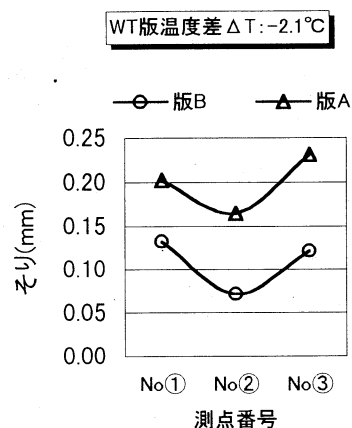


図-9 版A自由縁部と版B拘束縁部のそり

表-2 界面のせん断強度と引張強度(kgf/cm²)

強度試験種別	試験時供試体温度	界面 AC の処理		試験条件
		切削	なし	
せん断強度	20℃	30.2	35.2	ストローク制御で、1mm/Min
	50℃	19.1	21.5	
引張強度	20℃	5.9	8.7	荷重制御で500N/sec

界面に関する強度試験結果を表-2に示す。4. (1)の温度特性測定結果を踏まえ、WT版とAC層の付着せん断強度については最もせん断応力がクリティカルとなる50℃の場合と平均的な温度としての20℃を選定した。これによれば、50℃の場合のせん断強度は常温20℃の場合の60%程度まで低下している。またAC層を表面切削しない場合のせん断強度は、引張強度もそうであるが、切削した場合よりも大きい結果を示した。欧米の施工では表面切削が工法の成功には不可欠とされており、用いたアスコン供試体が新規に作成したものであること、表面切削による粗面が通常機械のものよりも小さかったことなどが理由と考えられるが、さらに実路の実験などで検証していきたい。

5. WT舗装構造の解析

(1) 解析モデルと解析条件

WTの構造解析に関して、下層のAC層をWinkler支承と見なして版厚を決めるACPAのガイドライン⁷⁾があるが、Mackらの調査研究と解析結果⁴⁾によれば、

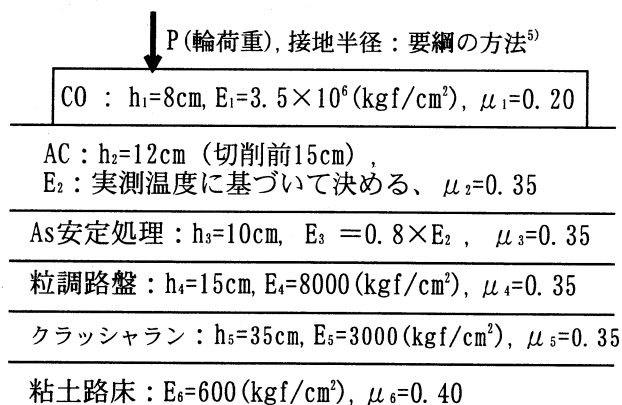


図-10 解析対象とする舗装構造⁸⁾

、この種類のモデルは実際の舗装の挙動を説明することはできないと指摘している。すなわち、既設アスファルト舗装と複合版的な効果を考慮する解析モデルがホワイトトッピングの構造解析に適している。薄層ホワイトトッピングは重交通道路に適用される想定から、図-10に示すようなD交通における舗装構造断面において、AC層がWT版と一体化して複合版的に挙動する2層版モデルを扱えるHUANGのFEM構造解析プログラム⁹⁾を用いて舗装体の応力・ひずみの試算を行った。

コンクリート版の目地間隔は120cmとし、骨材かみ合わせ目地の荷重伝達効果を考慮せず、四方がすべて自由縁部である最も厳しい载荷条件を選定した。

既設AC層の弾性係数については、密粒アスコンの繰り返し曲げ試験で得られている複素弾性率と温度・载荷速度(周波数)の関係に、車両走行速度50km/h程度の周波数を入れて求めた複素弾性率と温度の関係に、実測した舗装体の温度を代入して推定した。この推定を図-7の測定結果に適用し、WT版の温度差毎に対するアスファルト舗装の弾性係数の統計平均を表-3に示すように求め、以後の解析の入力データとした。

AS安定処理上層路盤の弾性係数はその等値換算係数からアスファルト層の80%とした。粒状路盤、下層路盤および路床の弾性係数はCBRの100倍とした。

(2) 界面のせん断応力の解析

輪荷重5ton~10tonの場合において、WT版の温度差9℃において、既設AC層の温度が20℃の場合と50℃の場合のせん断強度とせん断応力の関係を図-11に示した。これより輪荷重が大きくなるほど、既設AC層の温度が高くなるほど、界面のせん断応力は大

表-3 WT版の温度差と、その時に求めた既設AC層の弾性係数の統計平均

WT版の温度差 ΔT (℃)	アスファルト舗装体の弾性係数 (kgf/cm^2)
9	19731
7	20564
5	20843
3	40535
1	67364
-1	61610
-3	27488
-5	23173

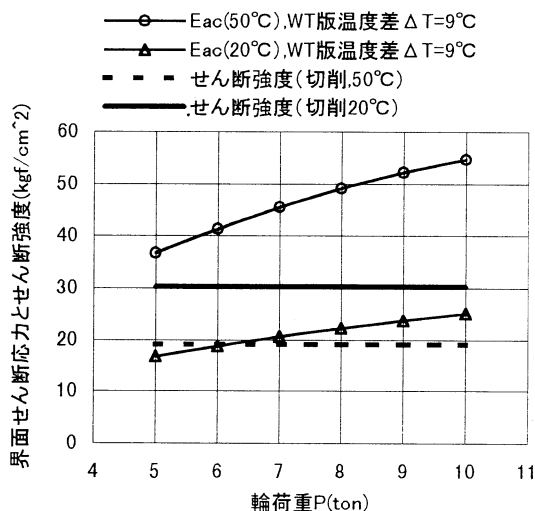


図-11 せん断強度とその場合のせん断応力

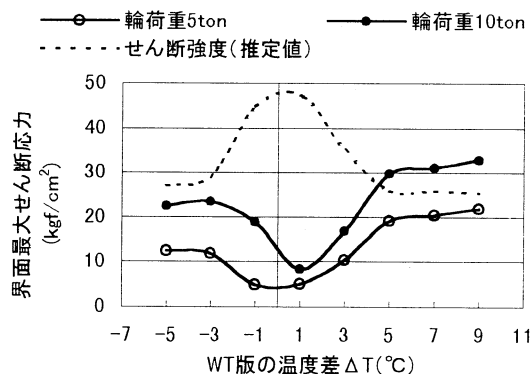


図-12 界面せん断性状に対するWT版温度差の影響

きくなり、特に既設AC層の温度が50℃の場合、発生頻度は著しく小さいものの、界面のせん断強度を上回り、载荷位置の界面が非付着の状態になる可能性が大きいことを示している。

また表-3の関係をを用い、せん断強度が温度50℃と20℃で線形の関係があると仮定して、WTの温度差別のせん断応力(輪荷重5t, 10t)とせん断強度の関係を示したのが図-12である。この図より、輪荷重

10tonの場合にはWT版の温度差が大きくなると、せん断強度を上回る可能性があることを示している。

(3) 疲労解析

薄層ホワイトトッピングの経験は新しいため、長期供用性に関する実測データはない。Risser²⁾の追跡調査によれば、約11ヶ月（累積5ton換算輪数約264,420輪）に供用した時点では、かなり良い供用性を示しているが、これは789輪／日程度の5ton換算輪数でC交通以下の場合に相当する。

本文では図-12に示したような重交通(D交通)道路に適用することを想定している。ここで、コンクリート版の疲労性状を事例解析を通じて検討した。また、既設アスファルト舗装の構造的寄与を考慮していることから、アスファルト層の曲げ疲労性状も含めて検討した。

a) WT版の曲げ疲労性状

荷重の入力条件¹⁰⁾は表-4に示す。疲労曲線は次の式¹¹⁾を用いた。

$$\log N_d = \{(a - \sigma_{rd}/f_{bm}/b) \cdot \gamma_{cr} \quad (1)$$

$$N_d \leq 2 \times 10^6$$

$$a = 1.11364 + 0.00165P_f$$

$$b = 0.09722 - 0.00021P_f$$

ここに、 P_f ：疲労破壊確率(%)、 γ_{cr} ：疲労寿命に関する材料係数、一般に1.0としている。

表-4に示した輪荷重分布と、図-5に示したWT版の温度差の発生頻度、および表-3に示したWT版温度差別の既設AC層の弾性係数を用いて、曲げ応力を算出し、材令28日標準養生曲げ強度71.3(kgf/cm²)と3日の現場養生曲げ強度52.2(kgf/cm²)を用いて、式(1)の疲労曲線に基づいてWT版の疲労度を求めた。図-13に示すように、解析期間20年の疲労度は1.0(100%)以下であり、界面の付着状態を前提として、D交通でも長期間供用することができると判断される。

b) 既設下層AC層の疲労

従来の研究においてWT版の応力状態だけに注目して検討を行っている²³⁾⁴⁾。薄層WTの場合はコンクリート版への既設AC層以下の構造的寄与を考慮していることから、必然的に既設AC層以下の負担が大きくなると考えられた。そこで既設AC層下面の疲労度を計算されたひずみより計算した。AC層の弾性係数はその供用時の温度条件によって大きく変わり、温度条件毎に検討しなければならない。a)と同様にWT版の温度差と既設AC層の弾性係数の組み合わせで、

表-4 計算に用いた輪荷重分布

荷重群(ton)	輪数／1日	荷重群(ton)	輪数／1日
0～1	16610	5～6	623
1～2	3611	6～7	378
2～3	3091	7～8	176
3～4	1978	8～9	86
4～5	1005	9～10	36

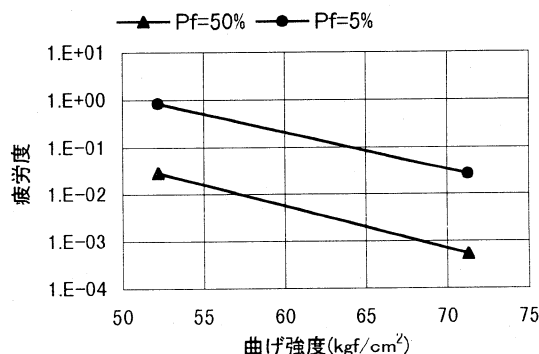


図-13 WT版の疲労抵抗

輪荷重毎のAC層下面のひずみを算出し、AIの疲労曲線⁹⁾より既設C層の疲労度を計算した。結果的には20年間の供用には持たない結果を示した。これは用いたHUANGのFEM解析プログラムでは連続体の下層AC層を上層のWT版と同様に目地が入った状態として解析しており、今回想定したモデルでは1.2m四方の1枚版を用いたことから大きなひずみが計算されたと考えられる。すなわち、実際には不連続ではない既設AC層の荷重伝達性を無視したためと考えられ、今後小規模モデル版への載荷実験などを通して、実験的にその値を特定していきたい。

6. おわりに

既設アスファルト舗装上の薄層コンクリートオーバーレイ（ホワイトトッピング）工法の我が国への適用性についての基礎的な検討を小規模モデル実験と界面の付着強度実験と、それらのデータに基づいたFEM解析を通じて行った。主要な結果は以下の通りである。

(1) 薄層のコンクリート版（厚さ8～9cm）のオーバーレイによって既設AC層の温度はオーバーレイしない場合よりも低くなり、隣接アスファルト舗装の最高温度が60℃の場合に対し、ホワイトトッピング下の既設アスコン層の最高温度は50℃であった。

(2) 界面のせん断応力とせん断強度の関係において、コンクリート版の温度差、輪荷重が大きいほど、既設アスコン層の温度が高いほど非付着になる可能性が高いことがFEMによる試算の結果より推定できた。

(3) コンクリート版と既設アスコンが付着している状態では、コンクリート版の疲労度は概ね重交通の長期供用に耐えられると推定されたが、下層の既設アスコンの負担がかなり大きくなることが推定された。

今後の課題としては、①コンクリート版と既設アスコン層を一体とした場合の既設アスコン層の荷重伝達効果を実験的に特定していくこと、②界面の付着の耐久性の確認、③小規模モデル実験舗装の採取供試体の界面付着強度の確認、④実路における試験施工による載荷荷重下の舗装の発生応力の確認、⑤適切なWT版の目地へのひびわれ誘導の最適手法の確立、⑥実路における供用性（ひびわれ、角かけ、段差、はく離、そり等）の確認などが挙げられる。

わだち掘れは主に重交通道路での発生が顕著であり、舗装の修繕管理では最も大きな比重を占める要素と指摘されている。現状は耐流動性ACオーバーレイによる修繕が主流であるが、欧米諸国のように、ホワイトトッピングによる修繕工種の選択も必要であろう。特に重交通道路に薄層ホワイトトッピングの適用が可能であれば、大きな社会便益にもなると考えられ、さらに検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 野田悦郎：ホワイトトッピングについて、道路建設、No. 576, 1996. 1
- 2) Risser, R. J., Lahue, S. P., Voigt, G. F., & Mack, J. M.: Ultra-Thin Concrete on Existing Asphalt Pavement, Proceedings, 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, April 1993.
- 3) J. Silfwerbrand: Whitetopings—Swedish Field Tests 1993–1995, Swedish Cement and Concrete Institute.
- 4) James W. Mack, Lawrence W. Cole, & J. P. Mohsen: Analytical Consideration for Thin Concrete Overlays on Asphalt, Transportation Research Record 1388, 1993.
- 5) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱、平成4年
- 6) W. Grzybowska, J. et al.: Application of Geosynthetics to Overlays in CrACow Region of Poland, Proceedings of the Second International RILEM Conference, 1993.
- 7) ACPA: GUIDELINE FOR CONCRETE OVERLAYS OF EXISTING ASPHALT PAVEMENT, 1991.
- 8) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、平成4年12月
- 9) Yang H. Huang: Pavement Analysis and Design, 1993.
- 10) 建設省土木研究所：「車両重量調査結果の解析」（解析編）、昭和56年8月
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書（舗装編）、平成8年

BASIC STUDY ON ULTRA-THIN WHITETOPPING

Etsuro NODA, Yong-Jian KONG, Yoshinori KASAHARA

This paper covers the basic study on ultra-thin white topping that is also been developed in European countries and U.S.A. The aims are to find out its applicability through making mini model experiments, research on the interface shear stress under various temperature and traffic loads by FEM program. As the results, the characteristics of slab temperature and underlying existing asphalt pavement, the effects of the pavement temperature on the interface shear stress and bending stress, and fatigue damage are revealed.