

# 高強度コンクリートを用いた ホワイトトッピング舗装の動的挙動

竹津ひとみ<sup>1</sup>・西澤辰男<sup>2</sup>・小幡浩之<sup>3</sup>・佐々木巖<sup>4</sup>・國府勝郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 石川工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ1) s053208@ishikawa-nct.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 石川工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条タ1)

<sup>3</sup>正会員 太平洋セメント株式会社中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2)

<sup>4</sup>正会員 (独)土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

<sup>5</sup>正会員 工博 首都大学東京教授 都市環境工学専攻 (〒194-8508 東京都八王子市南大沢1-1)

高強度繊維補強コンクリートを用いたホワイトトッピング舗装 (HSC-WT) の交通荷重による力学的挙動を調べるために、試験舗装を建設して走行載荷試験を実施した。15万回までの走行回数の下で、目地からのグラウトとパネルの剥離は見られたが、ひび割れの発生はなかった。3DFEMによる動的挙動を解析し、実測したひずみと比較した結果、アスファルト層の粘弾性効果は小さかった。同定された数値パラメータを用いて応力解析を行い、発生する応力がパネルの強度を下回ることを確認した。

**Key Words** : High Strength Concrete-White topping, dynamic behavior, 3 dimensional finite element method, visco-elastic property

## 1. はじめに

わが国の舗装の大部分を占めるアスファルト舗装は、車輪走行位置にタイヤ荷重による過度な残留変形を生じやすい。また道路の交差点付近などは車両の制動力による波状流動変形が観測される。このような変形は表層に限られ、構造的には問題がない場合が多い。このような舗装に対して、表面に薄いコンクリート層を施工して補修するホワイトトッピング工法が開発されている<sup>1)</sup>。

一方、コンクリート材料分野においては、セメントをベースとした反応性粉体をマトリックス相とした高強度繊維補強コンクリートが開発されている<sup>2)</sup>。

本研究においては、これらの技術を組み合わせた高強度繊維補強コンクリートを用いた超薄層ホワイトトッピング (High Strength Concrete-Whitetopping : HSC-WT) の開発を目指している。この舗装は、コンクリートの高い強度を活かすために、厚さわずか30mmの高強度繊維補強コンクリートパネルを既存のアスファルト舗装の上に敷いた構造を持つ。コンクリートパネルは、工場で作成され、現場にて設置される。このような構造においては、コンクリート版に比べアスファルト層が厚いため、その力学的な挙動が無視できない。

そこで、本研究においては、HSC-WTの合理的な構造設計法を確立するために、その力学的挙動について、走行載荷試験および動的3次元有限要素法によって調べることを目的とした。そのために、これまでの研究結果<sup>3,4)</sup>を踏まえて改良されたHSC-WT構造において走行載荷試験

を実施し、その結果を3DFEMで解析した。これらの結果に基づいてアスファルト層の粘弾性パラメータを同定し、HSC-WTの構造モデルを構築した。モデルを用いて応力解析を行い、パネルに生ずる応力について検討した。

## 2. 過去の走行載荷試験<sup>3,4)</sup>

すでに実物大走行試験を行っていくつかの知見を得ているので、ここでその概要を述べておく。この試験においては、(独)土木研究所の線形走行路試験載荷試験装置にHSC-WTの試験舗装を建設し、49kN輪荷重を20万輪走行させた。HSCパネルの寸法は1m×1.7m×30mmであり、パネル下面は凹型の直径5mmの小さな穴で覆った形状をもたせた。アスファルト舗装との接着にはグラウトを用いた。各目地の下に幅400mm、長さ1700mmの鉄製あるいはHSC製の板をパネルの下に設置した。定期的に車輪荷重による動ひずみを計測し、さらに輪荷重の走行に伴うパネルのひび割れ状況、打音によるパネルとグラウトの接着状況を調べた。

その結果より以下のことが判明した。

(1) 10万輪載荷の頃より、目地補強版が無い工区において目地周辺から円弧状にひび割れが生じた。しかしこのひび割れはごく表層のひび割れであり、構造に影響を及ぼさないことが分かった。

(2) 実験開始初期より、目地周辺よりグラウトとパネルの間に剥離が生じていた。これはパネル下面の凹型の穴へのグラウトの充填が不十分であったためである。

(3) 設置に時間を要する目地補強版の効果は明確ではなかった。

(4) 3DFEM による粘弾性解析によって、実測ひずみを表現できることがわかった。

(5) 解析によれば、目地縁部付近でパネルとグラウトの隙間があると、パネル表面に比較的大きな応力が発生する。

(6) パネルとグラウトの間に隙間がなければ、パネルに発生する応力は5MPaとなり、HSCパネルの曲げ強度20MPaよりも小さい。

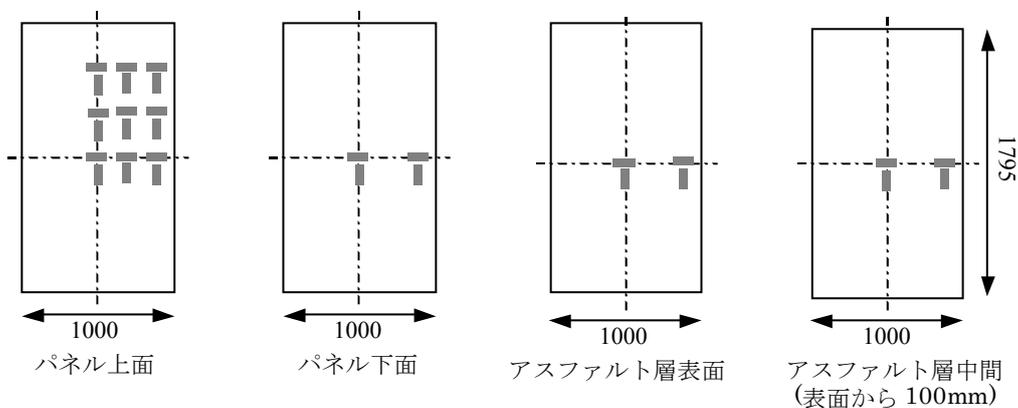
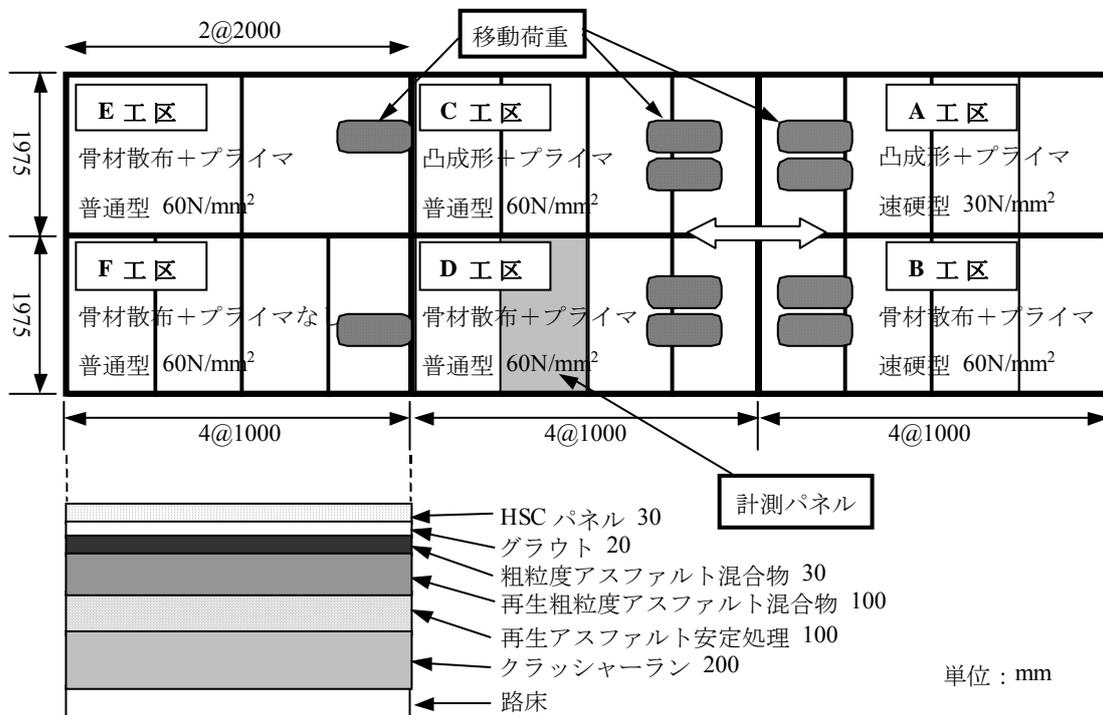
これらより、グラウトとパネルの接着が非常に重要であることがわかった。これらの知見に基づいて、新たな

走行載荷試験を実施することとした。

### 3. 走行載荷実験

#### (1) 試験舗装

土木研究所の線形走行路試験載荷試験装置に新たにHSC-WTの試験舗装を建設した。直線試験区間は全長160mであり、荷重車両を試験区間に沿って往復させるものである。HSCによるホワイトトッピング舗装の試験舗装は直線試験区間の中央12mの区間に建設された。荷重車両は実物のトレーラーを改良したものであり、前軸は40kN、後軸は複輪で210kNであり、それぞれの軸重は105kNとなっている。



今回の試験では効果の見られない目地補強版を無くし、

グラウトの種類及びパネル下面の形状を変化させて実験を行った。図-1 に試験舗装の平面図と断面構成を示す。パネル下面の形状は、骨材が露出したような形状のものを骨材散布型とし、直径 5mm の円柱突起を並べたものを凸成型とした。プライマは、接着を良好にするためにパネル裏面に塗布した薬剤の種類である。グラウト材はセメントグラウトとし、普通型、速硬型を用いた。横の数字はセメントグラウトの強度を示している。HSC パネルの厚さは 30mm、グラウト層はおおむね 20mm、その下に粗粒度アスファルト混合物層 30mm、再生粗粒アスファルト混合物層 100mm、再生アスファルト安定処理 100mm、クラッシャーラン 200mm となっている。なお、今回の試験舗装はパネルとグラウトのみを入れ替えたため、密粒度アスファルト混合物層以下は既設のものであり未補修である。

## (2) 载荷試験

試験舗装上に荷重車両を往復させ、走行直後、1.5 万輪、3 万輪、5 万輪、10 万輪、15 万輪後に表面のひび割れやグラウトの剥離の状態を観測した。

図-2 に示すような位置に、ひずみゲージを設置した。深さ方向ではパネル上面、パネル下面、アスファルト基

層上面に取り付け、アスファルト基層中間部には埋め込みひずみ計を設置した。アスファルト層中間のひずみの応答は不良であったため、今回の解析からは除外した。パネル上面では、図-2 に示す位置の X 方向、Y 方向に計 18 個のひずみゲージを取り付けた。パネル下面、アスファルト層上面、アスファルト層中間ではそれぞれ 4 個のひずみゲージを取り付けた。施工直後、1.5 万輪後、10 万輪後に、荷重通過によるひずみをサンプリング間隔 0.02 秒で計測した。ひずみ計測の際、移動荷重の速度を 5、10、15km/h に変化させ、速度の影響を見ることにした。

## (3) 試験舗装の結果

今回の実験では、15 万回载荷後にもひび割れは確認されなかった。グラウトの剥離の状態としては、施工時にグラウト未充填であった箇所から剥離が拡大した。また、载荷回数が増えるにつれて目地付近より剥離が発生したが、各工区間の差異は小さかった。前回の試験より大幅に剥離が減少し、耐久性が向上したことが確認された。これは、パネル下面の形状の改良による効果もあると考えられる。

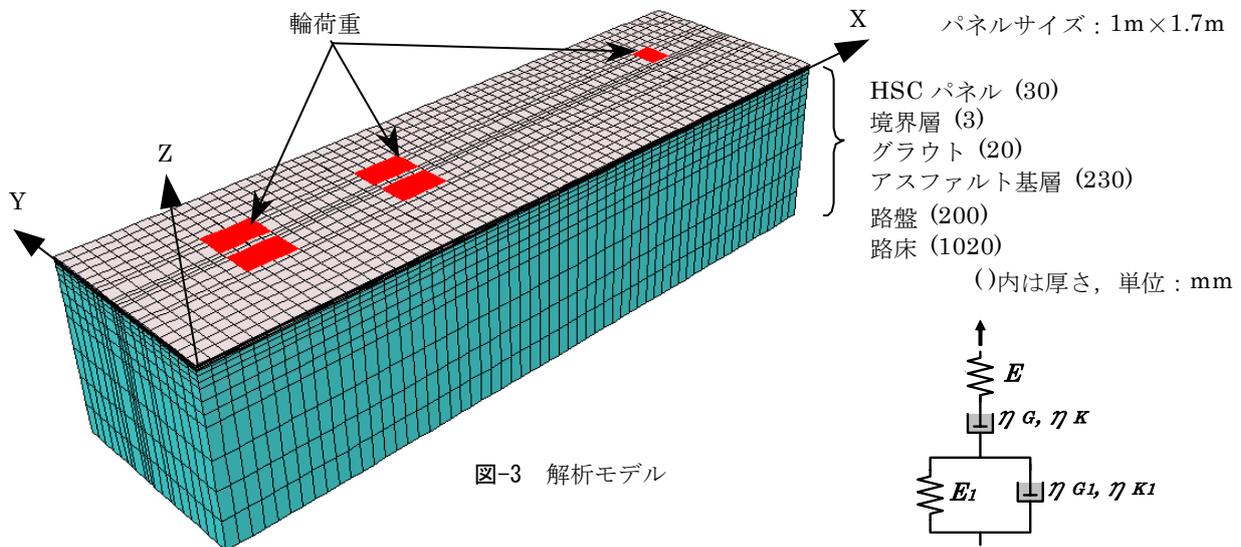


図-3 解析モデル

表-1 材料定数

項目	E or E1(MPa)	ポアソン比
HSCパネル	30,000	0.2
グラウト	10,000	0.2
アスファルト層	7,000	0.35
路盤	330	0.35
路床	30	0.35

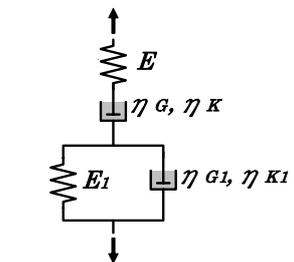


図-4 粘弾性モデル

表-2 粘性係数

CASE	$\eta_G, \eta_{G1}$ (MPa*sec)	$\eta_K, \eta_{K1}$ (MPa*sec)
1	50,000	100,000
2	10,000	100,000
3	—	—

#### 4. 解析方法

試験舗装で得られたひずみデータと、3DFEM による解析データの比較を行い粘弾性パラメータを同定する。まず、粘弾性パラメータを仮定して、3DFEM によって移動荷重による HSC パネル表面、パネル下面、アスファルト層表面の応答を求める。その解析結果から最も実測値に近いひずみを出したパラメータ値をこの舗装構造の材料定数とする。

HSCパネルは  $1 \times 1.7\text{m}$ 、厚さを  $30\text{mm}$  とした。パネルとグラウト層の間には境界層を設け、その境界層のばね定数を変えることによってパネルとグラウトの接着状態を表現した。すなわち、完全接着(粗)と隙間がある状態(滑)の2種類である。パネルの目地部分には荷重伝達はないものとした。グラウトは厚さを  $20\text{mm}$  とした。試験舗装における粗粒アスコン、密粒度アスコン、再生アスファルト安定処理層は全て同じ材料とし、厚さ  $230\text{mm}$  のアスファルト層とした。路盤は  $200\text{mm}$  とし、その下に路床を  $1020\text{mm}$  設けた。要素分割、移動荷重は図-3に示

す。また、各層の材料定数を表-1に示す。アスファルト層以外は弾性体と仮定した。アスファルト層には図-4に示すような4要素Burger粘弾性モデルを用いた。表-2はアスファルト層に対して仮定した粘弾性パラメータ値を示している。CASE1はCASE2に比べて粘性係数が大きい。比較のため、CASE3は弾性体モデルとした。これらの値は前回の解析<sup>3,4)</sup>で用いたものほぼ同じ値である。

移動荷重として試験舗装で使用された試験車両を想定し、前輪  $19\text{kN}$ 、タンデムの後輪を  $51\text{kN}$  とした。荷重の位置は、試験舗装でのタイヤの位置に合わせた。また、解析で仮定した移動速度は試験舗装の結果より平均をとった。その結果、 $5\text{km/h}$ 、 $10\text{km/h}$ 、 $15\text{km/h}$  に対してそれぞれ、 $7.3\text{km/h}$ 、 $12.3\text{km/h}$ 、 $16.0\text{km/h}$  であった。動的解析における解析時間は  $7.3\text{km/h}$  の場合は8秒、時間きざみを  $0.04$  秒とした。  $12.3\text{km/h}$  と  $16.0\text{km/h}$  の場合は解析時間を4秒、時間きざみを  $0.02$  秒とした。

#### 5. 解析結果

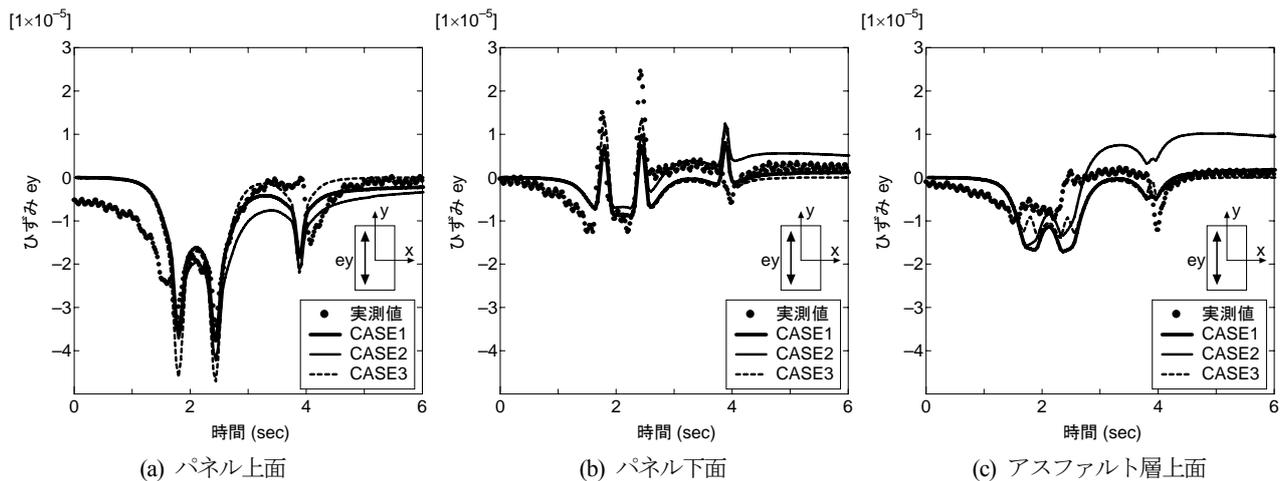


図-5 Y方向ひずみに及ぼす材料定数の影響

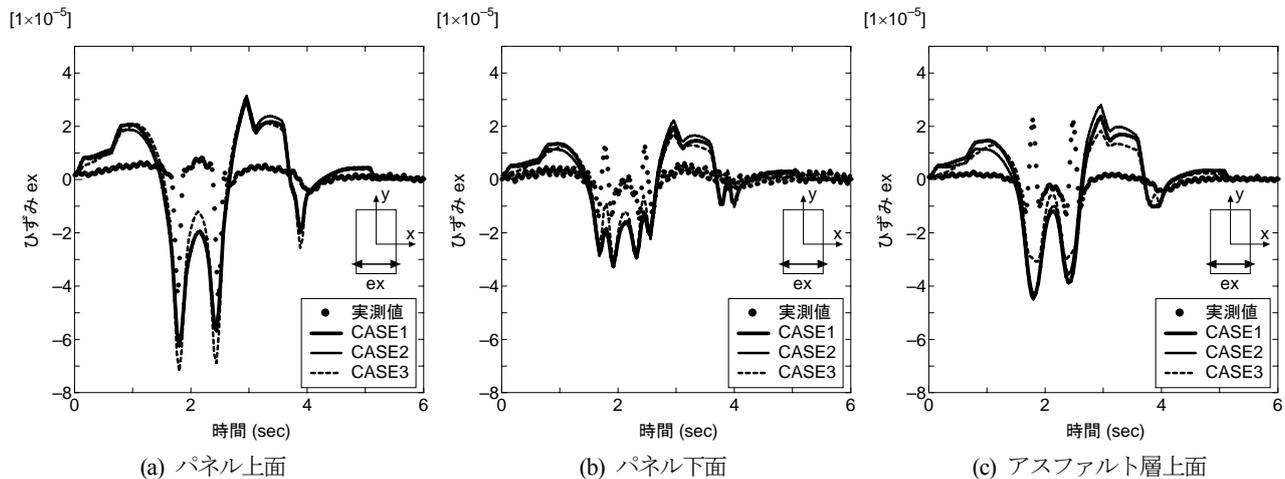


図-6 X方向ひずみに及ぼす材料定数の影響

### (1) 材料定数の影響

時速 7.3km/h の場合のパネル中央における Y 方向ひずみの試験結果と解析結果の比較を図-5 に示す。パネル上面において、移動荷重が通過したときにひずみのピークが現れる。実測値と解析値の全体的な履歴は一致している。どの場所においても、粘性係数が大きくなるとひずみのピークの値は大きくなる。CASE 1 と CASE 3 はピークを除いてほぼ同様のひずみ履歴を示す。ピーク付近の値は CASE1 が実測値に近く、移動荷重通過後における値は CASE3 が実測値に近い。パネル下面においては、移動荷重の通過する直前は圧縮ひずみとなり、荷重直下では引張ひずみとなっている。解析値のピークは実測値に比べて比較的小さい。また、移動荷重通過後は圧縮ひずみとなり、その状態から緩やかに元に戻っていく。アスファルト層上面では、移動荷重通過時に、圧縮ひずみとなっている。

同時速、同条件での X 方向のひずみを、試験結果と解析結果で比較したものを図-6 に示す。パネル上面におい

る。パネル下面では、移動荷重の直前に圧縮ひずみとなった後、荷重直下で引張ひずみとなる。移動荷重通過後再び圧縮ひずみとなり、緩やかに元の状態に戻る。圧縮ひずみの解析値は試験結果に比べて小さくなった。アスファルト層上面のひずみは試験結果は引張であるのに対し、解析結果は圧縮となった。

以上の結果より、解析値は実測値の全体的な傾向をよく捉えていることが確認された。今回の実験は比較的気温の低い時期に行われたため、アスファルト層の粘弾性の影響はわずかであり、粘弾性パラメータとしては CASE1 が最も妥当なものとする。CASE1 の粘性係数 50,000MPa\*sec は前回の解析で同定された値 10,000MPa\*sec (CASE2) よりも大きいものとなっている。これは、前回の走行試験が夏の終わりから秋にかけて実施されたため、アスファルト層の温度が高くなったことが理由である。したがって、前回の粘弾性パラメータには夏のもの、今回の値には冬のものと考えられることができる。

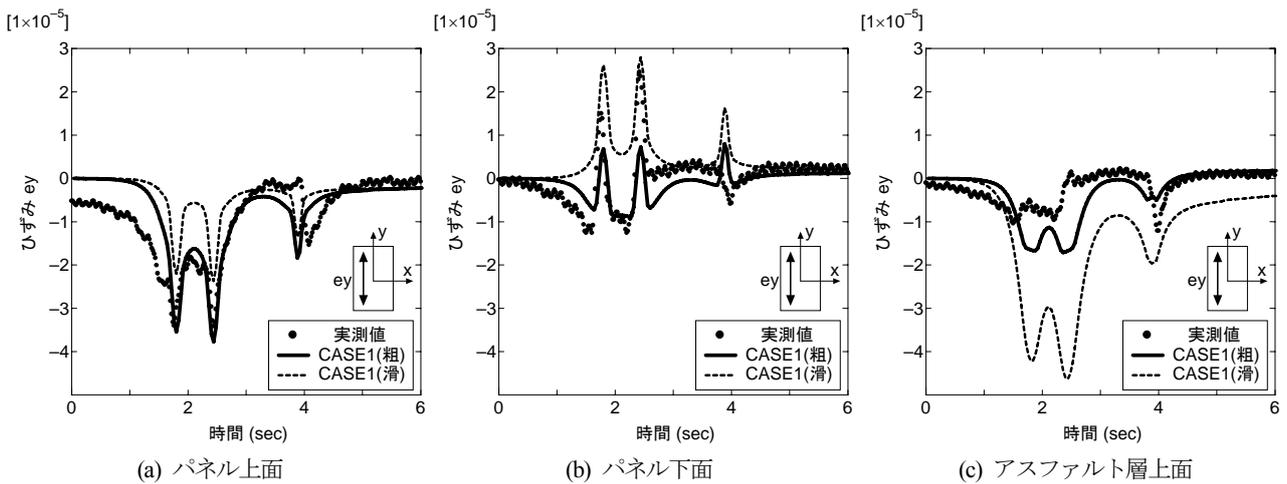


図-7 Y 方向ひずみに及ぼすパネルとグラウトの接着の影響

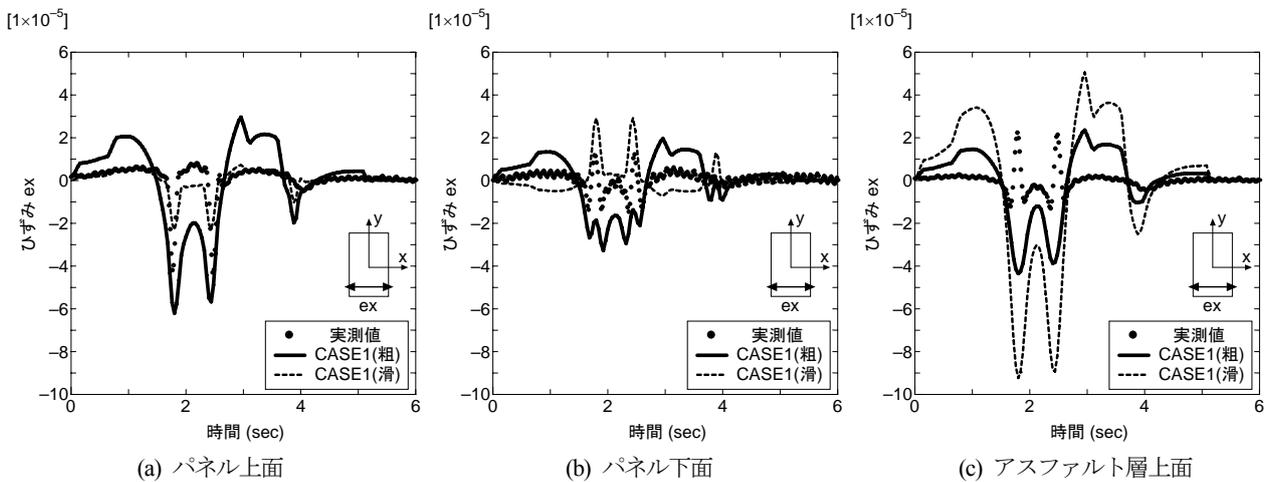


図-8 X 方向ひずみに及ぼすパネルとグラウトの接着の影響

て、ひずみのピークは実測値と解析値がほぼ一致してい

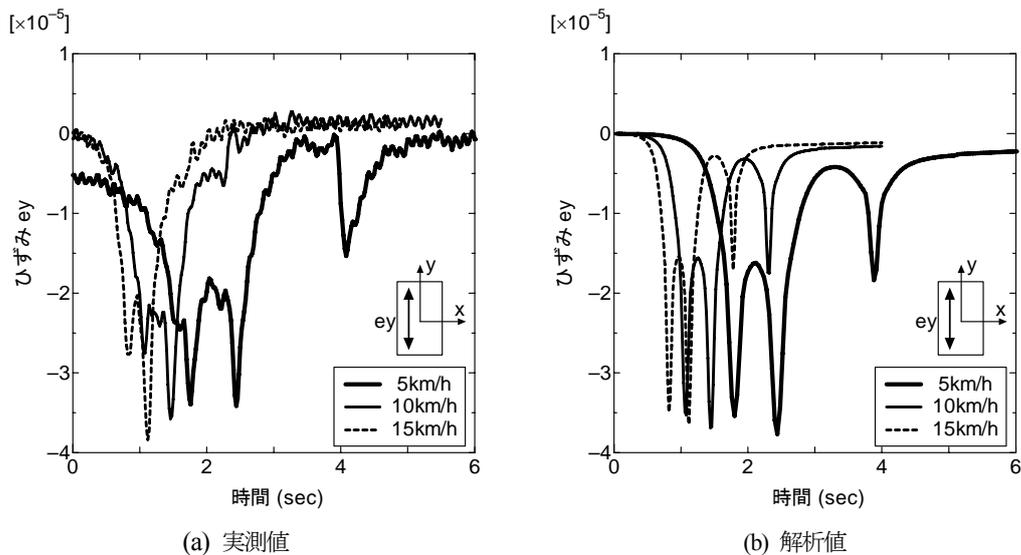


図-9 速度の影響 (Y方向ひずみ)

表-3 Y方向ひずみの速度の影響

	(a) パネル上面		(b) パネル下面		(c) アスファルト層上面		
	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	
5km/h	-3.40E-05	-3.76E-05	2.47E-05	7.32E-06	5km/h	-9.55E-06	-1.71E-05
10km/h	-3.57E-05	-3.68E-05	1.87E-05	7.24E-06	10km/h	-9.19E-06	-1.71E-05
15km/h	-3.83E-05	-3.66E-05	15km/h	8.53E-06	15km/h	-1.23E-05	-1.71E-05

## (2) 境界層の条件の影響

パネルとグラウトの間が接着している状態（粗）とそうでない状態（滑）を比較する。アスファルト層の材料定数としてはCASE1を用い、境界層の水平方向のばね定数の値を小さくして、滑の境界条件とし、その解析を行った。

時速7.3km/hでのY方向ひずみにおける粗と滑の比較を図-7に示す。パネル上面において、粗の状態に比べ滑の状態の方がひずみは小さくなっている。また、粗の状態では緩やかにひずみのピークに向かって変化していたのが、滑の状態では急激にひずみのピークに向かっている。パネル下面において、実測値も粗の状態もひずみのピークの前後で圧縮ひずみになっているが、滑の状態ではすべて引張ひずみである。アスファルト層上面では、実測値、粗の状態に比べ、滑の状態ではひずみが大きくなり、実測値と大きく異なる。

同時速、同条件でのX方向のひずみを試験結果と解析結果を比較したものを図-8に示す。パネル上面において、粗の状態に比べ、滑の状態のひずみは小さく出ている。パネル下面では、粗の解析ひずみのピークは引張であり、実測値に近い。アスファルト層上面においては、試験結果は引張ひずみであるのに対し、解析結果は粗の状態も滑の状態でも圧縮ひずみとなった。これらの結果より今回の試験舗装においてはパネルとグラウトの接着は良好であったといえる。

## (3) 速度の影響

7.3km/h, 12.3km/h, 16.0km/hの3種類の速度での試験結果と、CASE1でのそれぞれの速度における解析結果を比較した。

図-9は、試験結果とCASE1におけるパネル上面でのY方向ひずみの比較である。実測値は速度が速いほどピーク値が大きくなっているが、解析値は速度が速いほどピーク値は小さくなっている。

表-3に、パネル上面、パネル下面、アスファルト層上面におけるY方向のひずみの最大値をまとめた。パネル上面では、実測値は速度が大きくなるとひずみも大きくなった。一方、解析値は速度が大きくなるとひずみは小さくなった。パネル下面では、実測値に速度が速くなるとひずみが減少するが、解析値ではその影響が少ない。アスファルト層上面では、実測値は速度が大きくなるとひずみは小さくなったが、解析値は速度が変わってもひずみは変化しなかった。全体として、実測値には速度の影響が見られるが、解析値においてはその影響が少ないといえる。

## 6. 応力解析

試験結果と解析結果よりCASE1を冬期モデルのパラメータとし、CASE2を夏季モデルのパラメータとした。それらのパラメータを用いて、パネル上面、パネル下面

に発生する応力を調べた。

(1) 材料定数の影響

図-10 は、材料定数 CASE1, 7.3km/h でのパネル中央部の X 方向の応力を、粗と滑の状態を比較したものである。パネル上面は粗、滑の状態共に圧縮応力となっている。粗の状態での最大値は 2.5MPa となったのに対し、滑の状態では 1MPa 程度になった。一方パネル下面では、粗の状態において圧縮応力 1MPa 程度に対し、滑の状態では 1MPa 程度の引張応力となった。滑の状態ではパネルの上下面で、応力の値が同じで符号が逆で完全に曲げの状態になっている。

図-11 は、同時速、同条件下での CASE2 での X 方向

の応力を粗と滑の状態と比較したものである。パネル上面において、最大圧縮応力は 2.5MPa 程度となった。パネル下面に発生する応力は、圧縮応力で 1MPa, 引張応力で 0.5MPa となった。これより CASE1, CASE2 における応力は、HSC パネルの曲げ強度 20MPa より小さく、全体としてパネルの応力はあまり問題とならないことが分かる。

(2) 速度の影響

図-12 は、CASE1, CASE2 における移動荷重の時速 7.3km/h, 12.3km/h, 16.0km/h の 3 種類での X 方向の応力を、パネル上面で比較したものである。CASE1, CASE2 共に速度の影響はほとんど見られない。

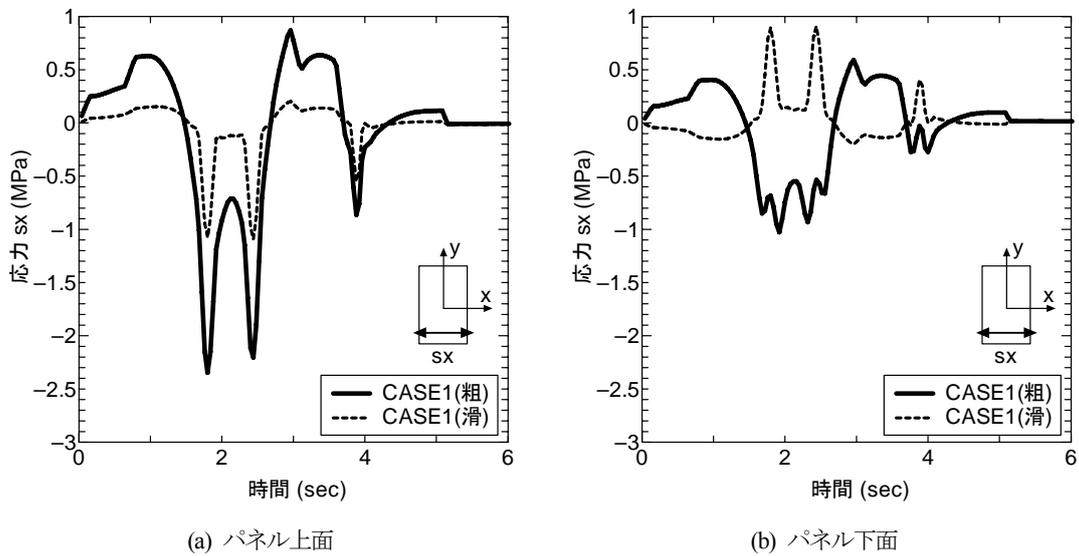


図-10 CASE1における応力 (冬季)

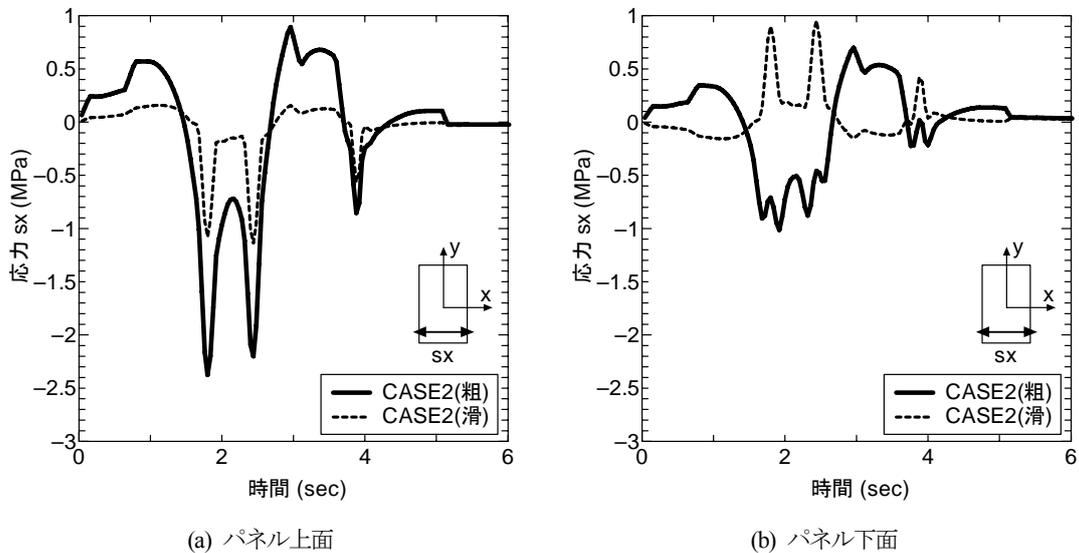


図-11 CASE2における応力 (夏季)

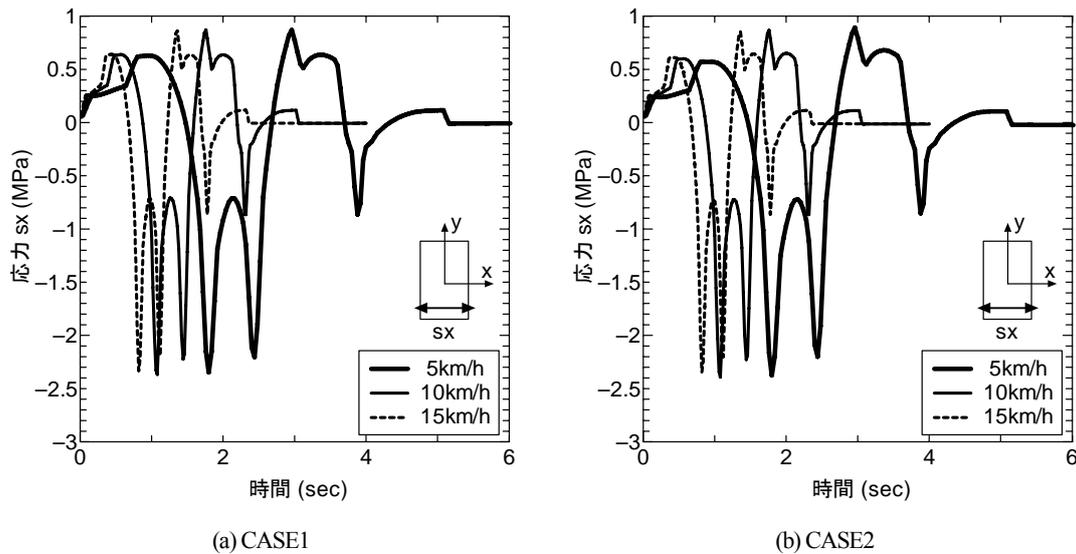


図-12 速度の影響

## 7. まとめ

本研究では、HSC-WTの動的な力学的応答を調べるために、試験舗装において走行荷重によるひずみを実測した。この走行試験を3DFEMで解析し、アスファルト層の粘弾性パラメータを同定した。その結果を用いてパネルに発生する応力について検討した。その結果をまとめると次のとおりである。

- (1) この試験舗装は冬季に行われたため、パネル内のひずみに及ぼすアスファルト層の粘弾性の影響は少ない。
- (2) HSCパネルとグラウトが接着、非接着での状態で実測値と解析値を比較した結果、接着状態にあることが判明した。このことにより、パネル下面に発生する引張ひずみは減少した。
- (3) 応力解析の結果、パネルに発生する応力はHSCの曲げ応力より十分に小さい。
- (4) パネルとグラウトが接着されることにより、パネル

下面に発生する引張応力が小さくなる。

- (5) HSCパネルに発生するX方向の応力に及ぼすアスファルトの粘性係数及び速度の影響は小さい。

## 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.
- 2) コンクリートライブラリー第113号: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 土木学会, 2004.
- 3) Nishizawa, T., et al.: Dynamic Behavior of Ultrathin Whitetopping Structure With High-Strength Concrete Under Traffic Load, Proceedings International Conference on Best Practices for ULTRATHIN and THIN Whitetoppings, Field Testing, Research, and Development, pp. 151-175, 2005.
- 4) 西澤辰男, 他: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた超薄層ホワイトトッピングの力学的挙動, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集2000.

## DYNAMIC BEHAVIORS OF WHITE TOPPING STRUCTURE WITH HIGH-STRENGTH CONCRETE

Hitomi TAKETSU, Tatsuo NISHIZAWA, Hiroyuki OBATA, Iwao SASAKI and Katsuro KOKUBU

This paper deals with dynamic behaviors of a whitetopping pavement structure with a surface layer of high strength fiber reinforced concrete panel (HSC-WT) under traffic road. A test pavement of HSC-WT was constructed on an accelerated loading facility and was subjected to moving axle loads. After five hundred thousand axle passes, small gaps developed between HSC panel and grout near joint, but any crack didn't develop. Analysis of the loading test with dynamic 3DFEM and comparison of the result with the measured data revealed that visco-elastic effect of the asphalt layer was relatively small. Stress analysis using the identified visco-elastic parameters confirmed that the stresses in the panel due to axle load are much less than the strength of the HSC panel.