

ホワイトトッピングの目地部における荷重挙動

東本崇¹・小関裕二²・濱田秀則³・西澤辰男⁴

¹正会員 大林道路技術研究所 開発研究室研究員（〒336-0027 さいたま市沼影 2-12-36）

²正会員 博（工） 大林道路技術研究所 開発研究室長（〒336-0027 さいたま市沼影 2-12-36）

³正会員 博（工） 港湾空港技術研究所 構造部材料研究室長（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

⁴正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科（〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条）

ホワイトトッピングは、既設アスファルト舗装上にコンクリートを薄層でオーバーレイするものである。一般の道路舗装では、クリティカルな応力が発生する自由縁部を対象として版厚を設計できる。しかし、空港舗装の場合、目地部に発生する応力を用いることが合理的である。そこで、本研究では、試験舗装版を作製し、目地部での荷重試験を実施して、目地部に生じるひずみを測定した。また、解析モデルに3次元FEMを使用し、実測ひずみと解析ひずみを比較することにより、設計に必要なパラメータを決定した。さらに、FWD試験を実施し、目地部の荷重伝達機能の評価を行ったが、目地の種類による違いを明確にすることはできなかった。

Key Word : whitetopping, loading performance of joints, three dimensional finite element method, FWD

1. はじめに

ホワイトトッピングは、既設アスファルト舗装上に薄層でコンクリートオーバーレイする修繕工法¹⁾である。本工法は、欧米諸国では盛んに研究、施工されており²⁾³⁾⁴⁾、わが国でも2001年10月に（社）セメント協会が主催し、千葉県の実道に本工法が施工されており、修繕工法の一つとして見直され始めている。

本工法の構造上の基本的な考え方は、アスファルト混合物（以下アスコン）層とコンクリート版を付着一体化させることによる複合平板効果により板としての剛性を高めて、コンクリート版に生じる曲げ応力を軽減させること、通常のコンクリート舗装よりも目地間隔を短くすることにより、コンクリート版に生じる温度応力を軽減させること、である。

本工法は、わだち掘れや摩耗対策の修繕工法として重交通道路への適用が期待されると同時に、航空機やトーイングトラクターのような重い荷重が走行する空港舗装においても適用が期待できる工法であるといえる。

わが国の空港コンクリート舗装版厚設計の考え方は、荷重荷重による荷重応力をウェスターガードの中央部荷重公式を用いて算出し、その値がコンクリートの設計強度を設計反復回数ごとに設定されている安全率で割った値を超えないようにコンクリート版厚を決定している⁵⁾。これは、空港舗装は広大で面的な舗装であるため、航空機の手輪が舗装の自由

縁部を走行することはほとんどなく、すべての目地に適切な荷重伝達装置を設置しているため十分な荷重伝達が期待できるとの考えに基づいている⁵⁾。しかし、ホワイトトッピングの目地構造はダミー目地であり、目地部の荷重伝達は骨材のかみ合わせによるものであるため、中央部荷重を対象として版厚を決定した場合、目地部が構造上の弱点になるおそれがある。一方、わが国の道路におけるコンクリート舗装版厚の設計は土木研究所公式に基づいている⁶⁾が、これは自由縁部をクリティカルな場所としたものである。しかし、前述したように、空港舗装では自由縁部を手輪が走行することはほとんどないため、自由縁部を対象として版厚を設計することは、ともすれば過剰な版厚を導くこととなり、不経済であると考えられる。これらのことから、ホワイトトッピングを空港舗装に適用する場合の版厚設計には、目地部に発生する応力を用いることが合理的であると考えられる。

そこで、本研究は、ホワイトトッピングの広範囲な普及を図るため、特に空港舗装への適用を見据えて、目地部の荷重挙動を確認することを目的とした。まず、試験舗装版を作製し、目地部での荷重試験を実施して、目地部に生じるひずみを測定した。また、解析モデルに3次元FEM⁷⁾を使用し、実測ひずみと解析ひずみを比較することにより、設計に必要なパラメータを検討した。さらに、FWD試験を実施し、目地部の荷重伝達機能の評価を試みた。

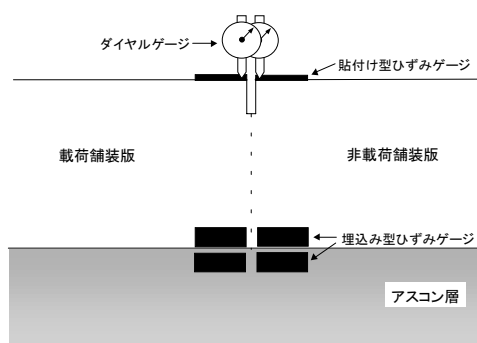
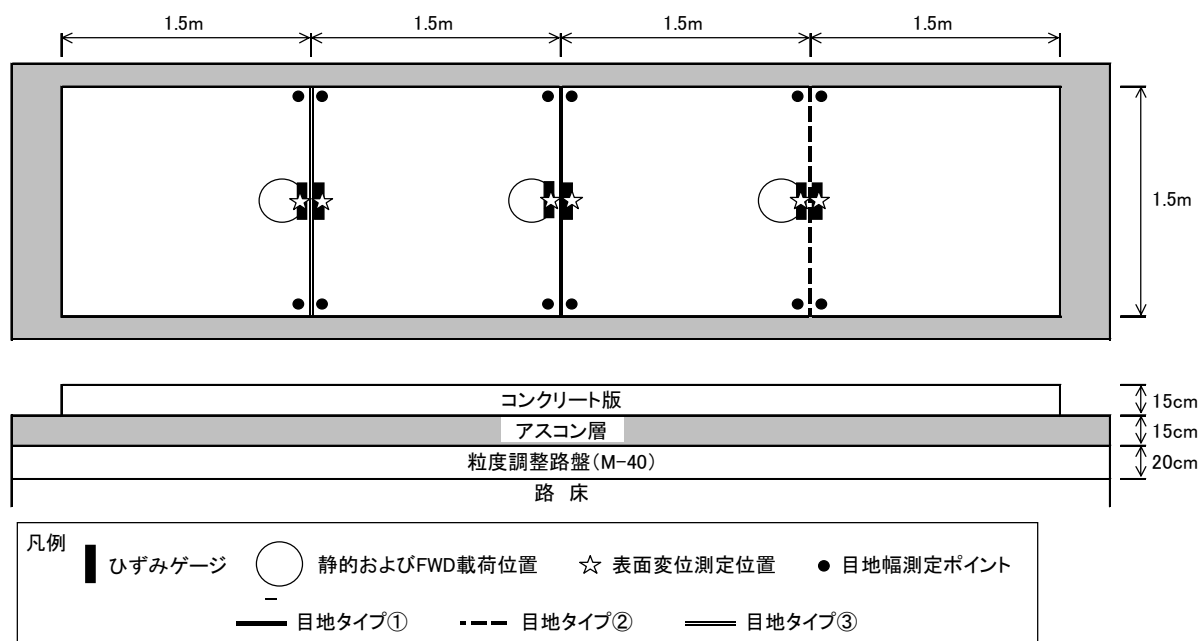
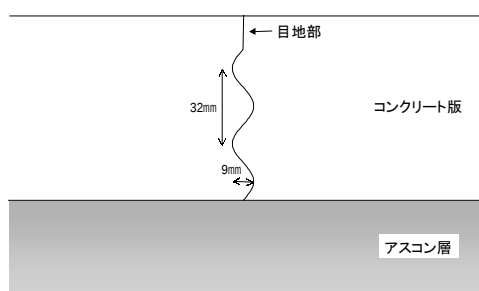


表 - 1 FWD の仕様

製造会社	コマツエンジニアリング(株)
型式	KOMATSU FWD M50-1
載荷方式	単重錘方式
載荷荷重	49kN (最大98kN)
載荷版直径	30cm (4分割方式)



2. 載荷試験概要

(1) 試験舗装版

本研究のために作製した試験舗装版を図 - 1 および写真 - 1 に示す。舗装断面は、コンクリート版厚が 15cm、アスコン層が 15cm、粒度調整路盤 (M-40) 20cm、以下路床である。なお、層間の付着性状を高

めるため、アスコン層の表面はウォータージェットで処理を施している。ウォータージェットの施工条件は、過去の研究⁸⁾において最も良好な付着性状が得られた条件(水圧 117.6MPa 移動速度 3.0m/min、水量 0.0162m³/min)とした。

ホワイトトッピングの目地の構造は、通常、コンクリート版厚の 1/3 程度の深さまでカッターで切断してひびわれを誘発するダミー目地である。本研究では、目地部における載荷挙動の確認が目的であるため、通常のダミー目地にひびわれが生じないことも考慮して以下に示す 3 種類のタイプの目地を設けた。

- ・目地タイプ : 通常のダミー目地
- ・目地タイプ : 通常のダミー目地に載荷荷重によ

り強制的にひびわれを誘発した目地

・目地タイプ：図 - 2 に示すようなひびわれの形状を波形で模擬した突合わせ目地

各種類の目地の配置は図 - 1 に示すとおりである．なお，目地間隔は 1.5m とした．

(2) 試験概要

a) ひずみ測定方法

ひずみの測定位置の平面図および断面図を図 - 1 および図 - 3 に示す．図に示すように目地を挟んで隣接する版の対称となる位置の目地近傍にひずみゲージを設置している．深さ方向は，コンクリート版上面，下面およびアスコン層上面である．ひずみの測定方向は目地に沿って平行方向である．使用したひずみゲージは，コンクリート版上面は貼付け型ひずみゲージ KC-70-120-A1-11 (株共和電業製)，コンクリート版下面は埋込み型ひずみゲージ SKW-10484 (株共和電業製)，アスコン層上面は埋込み型ひずみゲージ SKW-10437 (株共和電業製) である．

載荷試験は，コンクリート材齢 7 日 (3 月)，1 か月 (4 月)，3 か月 (6 月) に実施した．直径 30cm の円形載荷板にラフタークレーンのアウトリガーを反力として油圧ジャッキにて 9.8kN から材齢 7 日は 49kN まで，材齢 1 か月および 3 か月は 98kN まで 9.8kN 毎に静荷重をかけ，9.8kN 毎に載荷舗装版と目地を挟んだ非載荷舗装版に生じるひずみを同時に測定した．載荷位置は図 - 1 に示すように自由縁部から 75cm の目地の中央部で載荷板の円周が目地に接する位置 (載荷板中心が目地から 15cm 離れた位置) である．なお，アスコン層中間部に熱電対を埋込み，ひずみ測定時のアスコン層の温度を測定している．また，目地を挟んだ両側にポイントを埋込み，ひずみ測定時の目地幅の開きを測定した．

b) 表面変位測定方法

ひずみの測定と同時に，ダイヤルゲージにより表面変位の測定を行った．測定位置は図 - 1 および図 - 3 に示すとおりひずみ測定箇所と同じ位置である．表面変位測定結果から式(1)を用いて荷重伝達率 E_{ff} を算出した⁹⁾．

$$E_{ff} = \frac{d_u}{(d_l + d_u)/2} \times 100 \quad (1)$$

ここで，

E_{ff} ：荷重伝達率， d_l ：目地部の変位 (載荷舗装版)

d_u ：目地部の変位 (非載荷舗装版)

c) FWD 試験方法

ひずみ測定日と同日に FWD 試験 (49kN 荷重) を

行った．FWD の仕様を表 - 1 に示す．載荷位置は図 - 1 に示すとおりである．FWD たわみから式(2)を用いて荷重伝達率 e_{ff} を算出した⁹⁾．

$$e_{ff} = \frac{D_{30}}{(D_0 + D_{30})/2} \times 100 \quad (2)$$

ここで，

e_{ff} ：荷重伝達率， D_0 ：載荷版中心のたわみ

D_{30} ：載荷版中心から 30cm のたわみ

3. 試験結果および考察

(1) ひずみ測定結果

ひずみ測定結果を図 - 4 に，ひずみ測定時のアスコン層の温度および目地幅の開きを表 - 2 に示す．なお，ひずみの測定結果は 3 回測定した平均値である．また，目地タイプは，コンクリート版側面での観察結果から，材齢 3 か月においても目地部にひびわれが誘発されていなかった．

図 - 4 より，目地タイプの非載荷版以外は，載荷荷重とひずみに線形の関係があることがわかる．

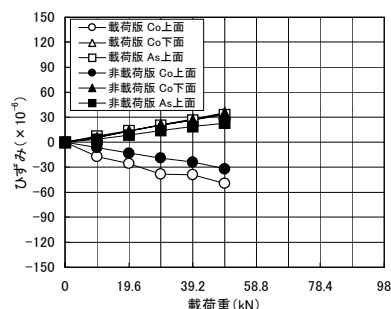
目地タイプは，目地部にひびわれが誘発されていないことから，載荷舗装版と非載荷舗装版のひずみは同程度となっている．コンクリート版下面とアスコン層上面のひずみがほとんど同じ大きさであるため，コンクリート版とアスコン層の付着は良好であると考えられる．

一方，目地タイプは，載荷荷重が小さいときには非載荷舗装版にはひずみが生じておらず，ある程度載荷荷重を加えた段階からひずみが生じており，載荷舗装版と非載荷舗装版のひずみに大きな差がある．これは，図 - 5 に示すように，ひびわれ (この場合はひびわれを模擬したもの) に隙間があるため，載荷荷重がある段階になるまで骨材のかみ合わせが起こらず，また，コンクリート版下面のひずみとアスコン層上面のひずみに差があることから，境界面の付着が低下し，はがれが生じることにより非載荷舗装版がアスコン層の変形に追随していないものと考えられる．過去の研究において，ホワイトトッピングでは，目地間隔が大きくなると境界面の付着が高くて，そり応力により縁部や隅角部のアスコン層上部で，はがれが生じる可能性があることがわかっている¹⁰⁾¹¹⁾．

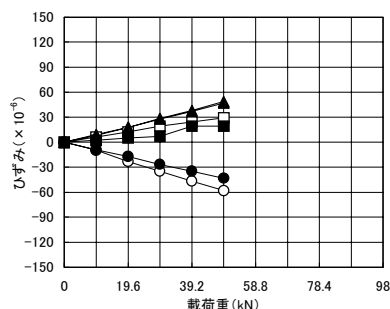
目地タイプは，載荷舗装版と非載荷舗装版のひずみに若干の差はあるものの，コンクリート版下面のひずみに着目してみると，載荷舗装版，非載荷舗装版ともほとんど同じ大きさになっている．これは，目地幅の開きがタイプに比べて小さいため，骨材のかみ合わせにより荷重伝達されていることと，コンクリート版下面のひずみとアスコン層上面のひず

コンクリート材齢7日

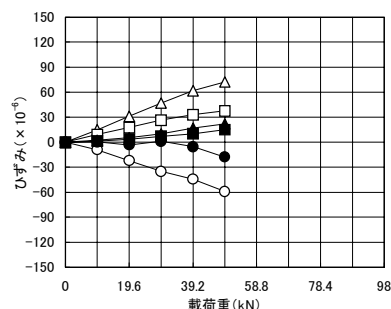
目地タイプ①



目地タイプ②

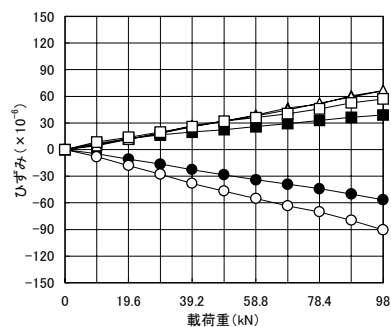


目地タイプ③

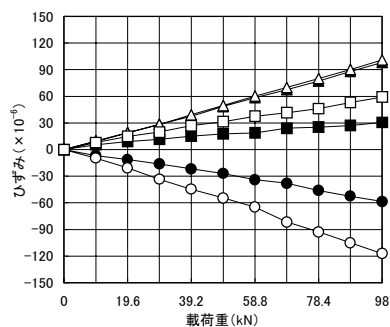


コンクリート材齢1か月

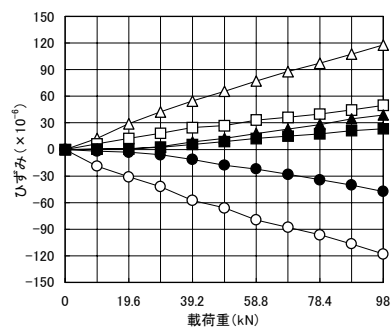
目地タイプ①



目地タイプ②

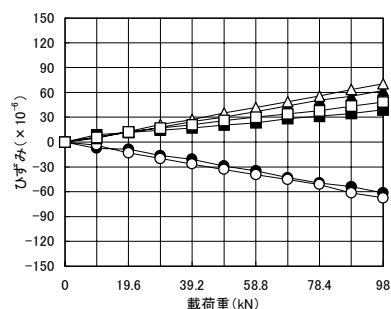


目地タイプ③

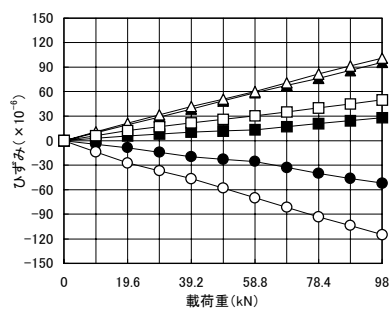


コンクリート材齢3か月

目地タイプ①



目地タイプ②



目地タイプ③

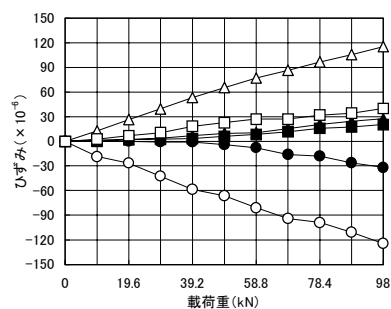


図 - 4 ひずみ測定結果

表 - 2 アスコン層の温度および目地幅の開き

目地タイプ	アスコン層温度(°C)			目地幅の開き(mm)		
	材齢7日	材齢1か月	材齢3か月	材齢7日	材齢1か月	材齢3か月
①	12.5	16.1	20.7	ひびわれ誘発されず		
②	12.5	15.7	20.4	0.03	0.13	0.13
③	13.1	16.1	21.6	0.34	0.31	0.29

みの差があまりないことから、境界面の付着は良好と考えられるため、非載荷舗装版も下層のアスコン層の変形の影響を受けて同じように変形しているためだと考えられる。このように、目地タイプは、目地タイプと の中間的な性状を示している。

また、載荷時のアスコン層の温度は約 12～20 と差があるが、各材齢ともひずみの大きさは同程度であった。

コンクリート版下面のひずみの大きさを目地タイプ毎に比較してみると、目地タイプ < 目地タイプ < 目地タイプ の順になっている。目地タイプ

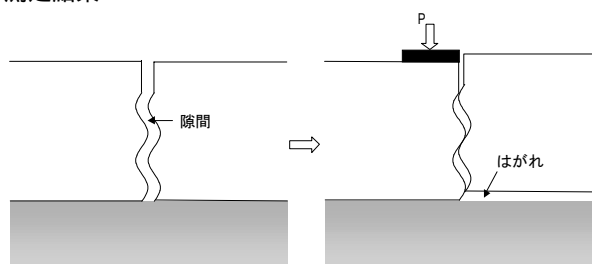


図 - 5 目地タイプ の載荷時の挙動

については強制的にひびわれを誘発し、目地タイプは、ひびわれを模擬した突合わせ目地であるが、ひびわれが誘発された実際のダミー目地に近い挙動をしていると思われる。すなわち、ホワイトトッピングにおいては、施工当初は目地タイプのような挙動をし、ひびわれが誘発されて目地タイプの状態になり、さらに目地幅の開きが大きくなり、また、境界面の付着が低下すると目地タイプに近い挙動をすると予測される。

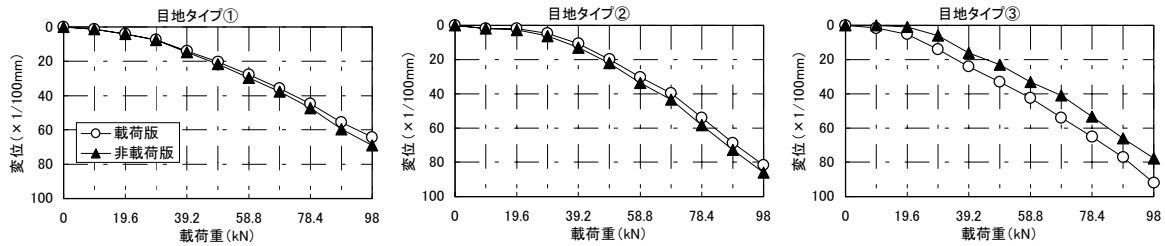


図 - 6 表面変位測定結果（材齢 1 か月）

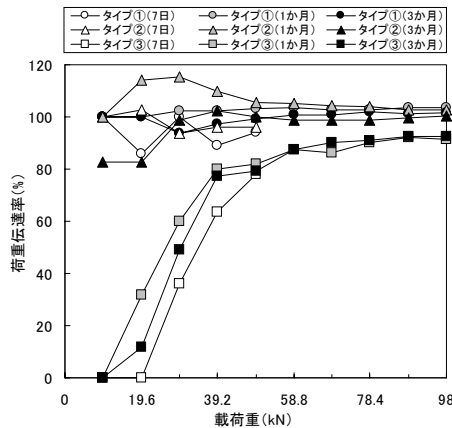


図 - 7 表面変位による荷重伝達率 E_{ff}

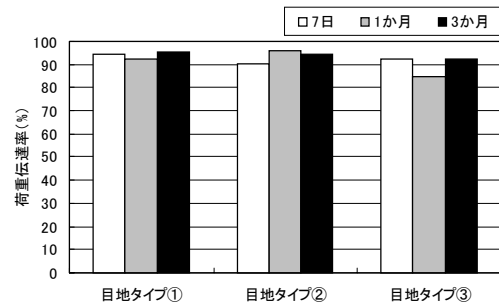


図 - 8 FWD たわみによる荷重伝達率 e_{ff}

(2) 表面変位測定結果

ひずみ測定時のコンクリート版の表面変位の測定結果を図 - 6 に示す。なお、ここでは、材齢 1 か月の結果を示す。また、表面変位から算出した荷重伝達率 E_{ff} を図 - 7 に示す。図 - 6 より、ひずみの測定結果と同様に、目地タイプ 1 は載荷荷重の大きさにかかわらず、載荷舗装版と非載荷舗装版の変位が同程度となっており、両版が同じ挙動をしているが、目地タイプ 2 は載荷荷重が小さいときには非載荷舗装版には変位が生じておらず、ある程度載荷荷重を加えた段階から変位が生じており、載荷舗装版と非載荷舗装版の変位に差が出ている。

荷重伝達率 E_{ff} を見てみると、目地タイプ 1 は載荷荷重が小さいときは測定誤差によるばらつきは見られるが、ほぼ 100% 前後で一定であるが、目地タイプ 2 は、載荷荷重の増加にともない荷重伝達率も増加している。また、その増加の割合は 49kN までは大きく、それ以上の載荷荷重では一定の値に収束している。載荷荷重が 49kN 以上になると E_{ff} は 80% 以上となる。

(3) FWD 試験結果

FWD 試験結果から荷重伝達率 e_{ff} を算出した。結果を図 - 8 に示す。各目地タイプとも、荷重伝達率は 80~100% の範囲にあり、通常のコンクリート舗装では健全であると評価する数値である。しかし、表面変位測定結果から、荷重が 49kN 以上になると E_{ff} も 80% 以上になることから、49kN で測定した F

WD 結果からは、目地の違いを明確にすることはできないと考えられる。

4. 3DFEM による解析

(1) 3DFEM

解析には 3 次元有限要素プログラム Pave3D⁷⁾ を用いた。試験舗装版の要素分割を図 - 9 に示す。対称性を考慮して 1/2 の領域を要素分割した。コンクリート版、アスコン層、路盤・路床は 8 節点のソリッド要素に、目地およびコンクリート版とアスコン層の境界面は境界面要素で分割している。境界面要素を図 - 9 に示す。

目地部の荷重伝達は境界面要素のばね係数で表現する¹²⁾。すなわち面に垂直方向のばね係数 k_n 、面に平行な方向のばね係数 k_s および k_t である。これらのばねによって 2 つの面の変位差に比例する力が伝達される。したがって、これらの値が大きいほど面間の荷重伝達能力が高いことになる。ここでは、目地のばね係数を $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^4 \text{GN/m}^3$ とした¹²⁾。

同様にコンクリート版とアスコン層の付着の程度も境界面要素のばね係数で表現する¹²⁾。コンクリート版とアスコン層が接着している場合は、すべてのばね係数を高くする。境界面にすべりが生じている場合には k_s および k_t の値を小さくする。またそのとき、はがれをモデル化するために k_n の値は変位差が正の場合には 0 となるようにした。コンクリート版とアスコン層の境界面のばね係数は 1.0×10^{-2} (unbond) $\sim 1.0 \times 10^4 \text{GN/m}^3$ (bond) とした¹²⁾。

(2) 解析条件

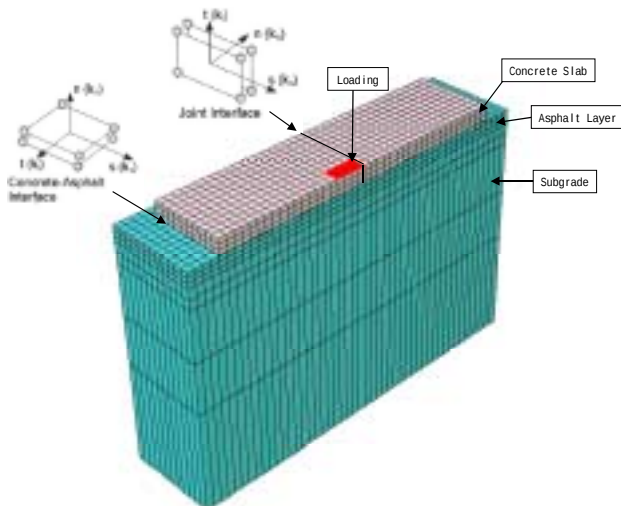


図 - 9 3DFEM による要素分割と境界面要素

表 - 3 解析条件

項目	入力値
コンクリート版	
弾性係数 (MPa)	29,400
ポアソン比	0.2
版厚 (cm)	15
目地	
ばね係数 (GN/m ³)	k_s k_t k_n $1.0 \times 10^{-1}, 1.0 \times 10^2, 1.0 \times 10^3, 1.0 \times 10^4$
Co-As境界面	
ばね係数 (GN/m ³)	k_s k_t k_n $1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^2, 1.0 \times 10^3, 1.0 \times 10^4$
アスコン層	
弾性係数 (MPa)	490, 980, 2,940, 4,900
ポアソン比	0.35
版厚 (cm)	15
路盤・路床	
弾性係数 (MPa)	180
ポアソン比	0.35
版厚 (cm)	220
荷重	
載荷荷重 (kN)	49
載荷板形状 (cm)	30 × 30

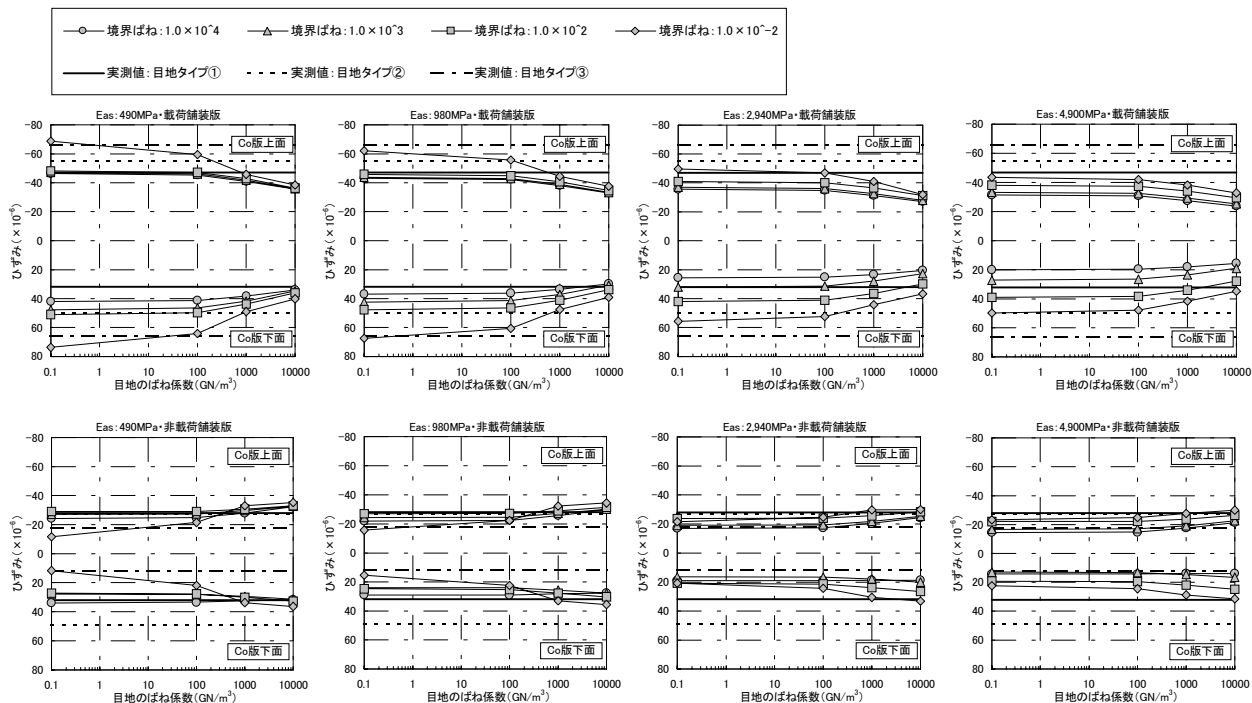


図 - 10 実測ひずみと解析ひずみの比較

解析に使用した条件を表 - 3 に示す。コンクリート版および路盤・路床の弾性係数を一定にして、目地およびコンクリート版とアスコン層の境界面のばね係数およびアスコン層の弾性係数を変化させた。なお、路盤・路床の弾性係数は、基盤アスコンで測定した FWD たわみを、中央大学の姫野教授が開発した逆解析プログラムソフト LMBS¹³⁾により逆解析した結果を用いた。

(3) 実測ひずみと解析ひずみの比較

コンクリート版の実測ひずみと解析ひずみの比較を図 - 10 に示す。なお、各材齢で実測ひずみに差がなかったことから、ここでは材齢 1 か月の実測値の

みを記す。目地および境界面のばね係数の影響を見るため、アスコン層の弾性係数を一定にして、境界面のばね係数毎に目地のばね係数を変化させた場合のコンクリート版に生じるひずみの解析結果である。図より、目地のばね係数が大きくなるほど載荷舗装版のひずみは小さくなり、非載荷舗装版のひずみが大きくなっていることがわかる。このように、目地のばね係数により、目地部の荷重伝達が表現できる。また、境界面のばね係数が大きいほど載荷舗装版のひずみは小さくなっており、境界面の付着の状態も表現できている。このように、目地および境界面のばね係数とアスコン層の弾性係数を変化させることにより、各目地タイプのひずみをシミュレーション

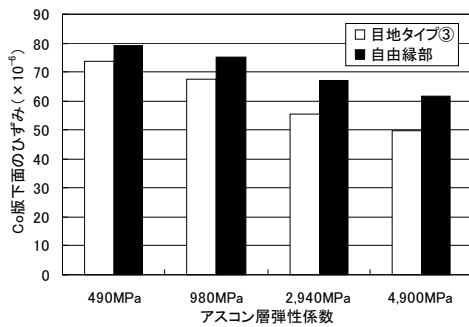


図 - 11 目地部と自由縁部とのひずみの比較

できることがわかる。

各パラメータを決定するため、実測ひずみと解析ひずみの平均平方誤差 (RMS) を算出した。RMS から、最も適切な条件として以下に示す値が導かれた。

- ・目地タイプ
目地のばね係数： $1.0 \times 10^3 \sim 10^4 \text{GN/m}^3$
境界面のばね係数： $1.0 \times 10^3 \sim 10^4 \text{GN/m}^3$
アスコン層弾性係数：490～980MPa
- ・目地タイプ
目地のばね係数： $1.0 \times 10^{-1} \sim 10^3 \text{GN/m}^3$
境界面のばね係数： $1.0 \times 10^{-2} \sim 10^2 \text{GN/m}^3$
アスコン層弾性係数：490～980MPa
- ・目地タイプ
目地のばね係数： $1.0 \times 10^{-1} \sim 10^2 \text{GN/m}^3$
境界面のばね係数： $1.0 \times 10^{-2} \text{GN/m}^3$
アスコン層弾性係数：490～980MPa

3章でも考察したように、目地タイプは目地の荷重伝達は大きく、付着も良好であるため、ばね係数はどちらも大きい値となり、目地タイプはどちらも小さい値となる。目地タイプは、その中間のばね係数となる。また、本モデルを用いる場合のアスコン層の弾性係数は、春季で490～980MPa程度となる。

目地部の応力低減効果を確認するため、本解析で得られた最も厳しい条件である目地タイプの条件を用いて、自由縁部のコンクリート版下面に生じるひずみを算出し、目地タイプの解析結果との比較を行った。図 - 11 に結果を示す。図より、目地タイプの条件でも、自由縁部よりもひずみが小さくなることから、応力低減効果があることがわかる。

5. 結論

本研究では、ホワイトトッピングの目地部での載荷試験を実施し、ひずみおよびたわみを測定することにより、目地部の載荷挙動を調べた。また、3DFEMによる解析ひずみと実測ひずみを比較することによ

り、解析モデルの妥当性と設計に必要なパラメータを検討した。材齢3か月までの結果であるが、本研究により明らかになったことをまとめると以下のようになる。

載荷試験結果から、ホワイトトッピングでは、目地幅の開きの増加とともにコンクリート版に生じるひずみが大きくなる。

載荷試験結果および有限要素解析の結果から、ひびわれが誘発された目地部では、Co - As 境界面に付着低下が生じていることが推察される。

目地部の開きによって、目地の荷重伝達性能が異なり、荷重が小さいときにそれが顕著となる。したがって、49kNで行ったFWD試験結果からは、目地の評価を正確にできない可能性がある。

3次元有限要素プログラムPave3Dでは、目地部の荷重伝達および境界面の付着の程度を境界面要素のばね係数で表現することができ、目地部の載荷挙動をシミュレーションすることができる。

目地のばね係数を考慮した有限要素解析により、合理的な設計が可能となる。

6. おわりに

ホワイトトッピングの目地部の載荷試験から、目地部の載荷挙動および荷重伝達について、いくつかの知見を得た。しかし、今回の検討は、材齢3か月までの結果で行っており、また、ダミー目地にひびわれが誘発されていないことから、ひびわれを模擬した目地における評価だけにとどまった。今後、さらに追跡調査を行い、ホワイトトッピングの目地部の挙動を明らかにしていきたい。

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, pp.60-61, 1996.1.
- 2) R.J.Risser, S.P.LaHue, G.F.Voigt, J.W.Mack : Ultra-Thin Concrete Overlays on Existing Asphalt Pavement, 5th International Conference on Concrete Pavement Design & Rehabilitation, Vol.2, pp.247-254, 1993.
- 3) J.Silfwerbrand, O.Petersson: Thin Concrete Overlays on Old Flexible Pavement, 7th International Symposium on Concrete Roads, Session 2, pp.41-46, 1994.
- 4) J.H.Silfwerbrand: Whitetoppings-Swedish Field Test and Recommendations, 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, Vol.2, pp.231-244,

- 1997.
- 5) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要領，1999.4.
 - 6) (社)日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，pp.221-230，1984.2.
 - 7) 西澤辰男：3次元FEMに基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，土木学会舗装工学論文集，第5巻，pp.112-121，2000.12.
 - 8) 東本崇，福手勤，西澤辰男，國分修一，濱田秀則：ホワイトトッピングの付着強度，土木学会舗装工学論文集，第4巻，pp.209-214，1999.12.
 - 9) 八谷好高，上中正志：空港コンクリート舗装の目地・ひびわれ部の挙動 - 荷重伝達機能と版厚算定法への反映 - ，港湾技研資料，No.710，1991.6.
 - 10) 中川達裕，西澤辰男，東本崇：ホワイトトッピングにおけるコンクリート版のそりによるアスファルトの引張応力，土木学会第57回年次学術講演会概要集，第5部，pp.805-806，2002.9.
 - 11) 東本崇，小関裕二，濱田秀則，西澤辰男：ホワイトトッピングのひびわれ形状と層間の付着について，土木学会第57回年次学術講演会概要集，第5部，pp.807-808，2002.9.
 - 12) 西澤辰男，村田芳樹，中川達裕：薄層ホワイトトッピング工法におけるコンクリート版のそり応力，土木学会舗装工学論文集，第6巻，pp.176-185，2001.12.
 - 13) ELSA for Windows
(<http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/hoso-ml/download.html>)

LOADING PERFORMANCE OF JOINTS IN WHITETOPPING

Takashi TOMOTO, Hiroji KOSEKI, Hidenori HAMADA and Tatsuo NISHIZAWA

Whitetopping is a thin concrete overlay on asphalt pavements. In case of road pavement, design thickness of whitetopping would be decided based on critical stress that develops at longitudinal free slab edge. However, in case of air field pavement, design thickness would be decided based on stress at joints of whitetopping. In this study, we constructed the field trial of whitetopping, conducted loading tests and measured strains in the concrete and asphalt layers. By comparing measured and analyzed strains using three dimensional FEM, we obtained bonding parameters and spring moduli of joints. Furthermore, we conducted FWD tests and calculated load transfer efficiency of joints. Results showed that structural evaluation of joints would be difficult by FWD deflection.