HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	鋼床版舗装のぜい性領域における引張破壊性状と縦亀裂の評価法に関する一考察
Author(s)	山本, 泰幹; 森吉, 昭博
Citation	土木学会論文集. E, 62(2), 286-294 https://doi.org/10.2208/jsceje.62.286
Issue Date	2006-04
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40195
Type	journal article
File Information	moriyoshi_PJSCE-E62.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

土木学会論文集E　Vol.62 No.2, 286-294, 2006. 4

鋼床版舗装のぜい性領域における引張破壊性状と縦亀裂の評価法に関する一考察

山本　泰幹[1]・森吉　昭博[2]

[1]正会員　首都高速道路株式会社　建設管理部技術管理室（〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1）
E-mail:y.yamamoto1414@shutoko.jp
[2]北海道大学大学院　工学部土木工学科（〒060-8628 札幌市北区北十三条西8）
E-mail:moriyosi@eng.hokudai.ac.jp

鋼床版舗装の縦亀裂に対して，首都圏の最低気温付近でも生じるぜい性破壊現象に着目し，各種混合物のぜい化点付近における引張破壊性状を検討した．この結果，骨材粒度やアスファルトの種類によって混合物の破壊性状が異なるため，載荷条件（荷重・速度）が同じ場合でも，縦亀裂の発生状況が変化することがわかった．そこで，ぜい性領域における縦亀裂の判定法として，混合物の引張破壊ひずみやぜい化点に基づき，舗装表面の発生ひずみを数値的に評価する方法を提案する．本手法は，長期フィールド試験でも良好な結果を得ている．また，新しい混合物や種々の構造形式でも縦亀裂の判定を容易に行うことができるため，これまでになかったぜい性領域における舗装破壊の定量的評価が一般的に可能となる．

Key Words : *steel deck , asphalt pavement, longitudinal cracking, brittle point*

1. まえがき

道路橋の鋼床版は，輪荷重に対してたわみやすく，とくに主桁腹板上では局部的に大きな変形が生じるため，これに追従して舗装にも局部ひずみが発生する[1]．このため，鋼床版舗装用の混合物の選定にあたっては，想定される局部変形下では，縦亀裂が発生しないようにする必要がある．

鋼床版舗装の技術は，本州四国連絡橋の建設に際して，昭和48年より10数年間の長期にわたり広範な調査研究が行われ，それ以前に比べると飛躍的に発展した[2]．しかし，その後の関西国際空港の連絡橋の建設に際し，平成元年より5年間にわたり鋼床版舗装の縦亀裂の対策に関して調査研究が行われ，その成果に基づきひび割れ防止目地が施工されたように，建設する橋梁構造の特徴によっては，縦亀裂の検討や対策が必要となる場合がある[3]．

鋼床版の局部変形に伴う舗装の縦亀裂の抑制に配慮して，本州四国連絡橋の橋面舗装基準（以下，本四基準と呼ぶ）では，繰返し曲げ試験等の試験条件で，活荷重による腹板上のデッキプレートの最小曲率半径を20m以上，かつ縦リブ間の局部たわみを0.4mm以下と定めている[4]．道路橋示方書（以下，道示と呼ぶ）の鋼床版の構造細目の解説に，この規定が平成8年の改訂から追加されている[5]．

この鋼床版の構造細目は，本四基準に適合する混合物に対する規定であるが，一般にはこれ以外の混合物を使用する場合がある．したがって，本四基準に適合しない混合物を使用する場合は，想定される局部変形に対して，縦亀裂が発生しないかを評価する必要と考えられる[6,7]．

これまでの鋼床版舗装の破壊特性の研究は，混合物の疲労特性もしくは曲げ特性に関するものが大半であり，ぜい性領域における舗装破壊の定量的な評価法の提案にはいたっていない[8]．

かりに車両が制限速度で走行時に，混合物の選択によって，首都圏の最低気温（-5℃）付近の環境下でもぜい性破壊が生じることがあれば，鋼床版舗装にとって致命的な損傷となりかねない．また，混合物の強度や破壊ひずみは，橋梁建設地の外気温の影響を受けるため，各地域の環境条件の違いにも適用できる縦亀裂の評価法が必要である．

最近の動向としては，排水性混合物を鋼床版舗装に適用した実績が増加しつつある[9~11]．一方では，既設橋梁の鋼床版溶接部における疲労損傷が報告されている[12]．デッキプレートの局部変形を抑制するために，SFRC(鋼繊維補強コンクリート)舗装を適用した例もあり[13]，近い将来，疲労損傷対策等の視点から，デッキプレート厚さ，縦・横リブの寸法・形状や配置等を変革した新しい鋼床版構造が開発される可能性もある．したがって，前述の

規定を新しい混合物や種々の構造形式に対しても，一様に適用していくことには，限界があると考えられる．

そこで，ぜい化点より低い温度で起きるぜい性破壊現象に着目し，実橋計測のひずみ速度に基いた各種アスファルト混合物の引張試験を行い，その引張破壊性状について検討した．また，種々の鋼床版構造の設計や，種々の混合物を選定する際にも適用できる鋼床版舗装のぜい性破壊の評価法として，混合物の引張破壊ひずみやぜい化点に基づき，舗装表面の発生ひずみを数値的に評価する方法を提案する．

これにより，これまでになかったぜい性領域における舗装破壊の定量的評価を，新しい混合物や構造形式でも，一般的に行うことができる．一方では，橋梁建設地の環境条件や種々の鋼床版構造に適した混合物の選定が可能となる．また，新たな混合物の開発に結びつくことも考えられるため，ここに報告するものである．

2. 舗装破壊の照査方法の現状と課題点

前述の本四基準の規定は，本州四国連絡高速道路株式会社が当時の建設省土木研究所に委託して行われた繰返し曲げ試験の結果に基づいている[14]．

この試験方法は，試験温度-10℃のとき，舗装と鋼板からなる長さ700mmの合成ビーム供試体について，支間距離300mm（リブ間隔300mm相当）の3点支持で，2点載荷による繰返し曲げ試験である．この試験結果において，舗装体中央の振幅ひずみが400μm~500μmに達すれば，混合物に亀裂が発生し易くなることから，本四基準の縦リブ間の局部たわみ0.4mmが規定されている[15]．

腹板上のデッキプレートの最小曲率半径20mについては，前述の繰返し曲げ試験で使用された9種類の混合物（細粒度アスファルト混合物，密粒度アスファルト混合物，グースアスファルトを上下層で組合せ）に対して，-10℃における変形係数の推定値2,000N/mm^2~5,000N/mm^{2}のうち，曲率半径が最も大きくなる2,000N/mm^{2}を用いて，当時計画されていた本州四国連絡橋の橋梁について求めたものである[16]．本州四国連絡橋の鋼床版上の舗装は，表層：密粒度アスファルト混合物，基層：グースアスファルトが採用されており[17]，約10年を経た鋼床版舗装が健全な状態にあると報告されている[18]．

なお，鋼床版の構造，建設地点の気象条件および使用材料等が本州四国連絡橋と異なる鋼床版舗装にも，一律に本四基準を適用することは適当でない．

首都圏の鋼床版橋梁においても，実際にいくつかの舗装の縦亀裂の事例が報告されている[19)~21)]．このうち首都圏の海洋上に建設されて，平成元年に供用を開始した斜張橋の鋼床版舗装において，主桁腹板上に断続的な縦断方向の縦亀裂がほぼ全長にわたり発見された[21]．この鋼床版構造を**図-1**に示す．縦亀裂の発見は，開通から約2年半後であるが，実際にはこれよりも早い段階で発生し，目視で確認できるようになったところで発見されたと考えられる．

舗装構成は，表層厚40mm，基層厚40mmであり，表層用混合物には，ゴム入りストレートアスファルト60~80をバインダに使用した粗粒度ギャップアスファルト混合物（以下，粗粒度ギャップ混合物と呼ぶ）が適用されている．粗粒度ギャップ混合物は，耐わだち掘れ，および耐すべり抵抗性に優れる舗装として開発されている[22),23)]．また，基層用混合物にはグースアスファルトが適用されている．なお，橋梁建設地の最低気温は，-5℃程度である．

この鋼床版構造に，T荷重相当（デュアルの後輪1組あたり100kN）の輪荷重を載荷したときの主桁腹板上のデッキプレートの変形量をシェル要素を用いた弾性FEM解析で推定した．鋼床版のUリブ形状はU-300×220×6である．隣接する主桁間とダイヤフラム間の範囲で，舗装の剛性効果をデッキプレートの板厚に等価に換算してモデ

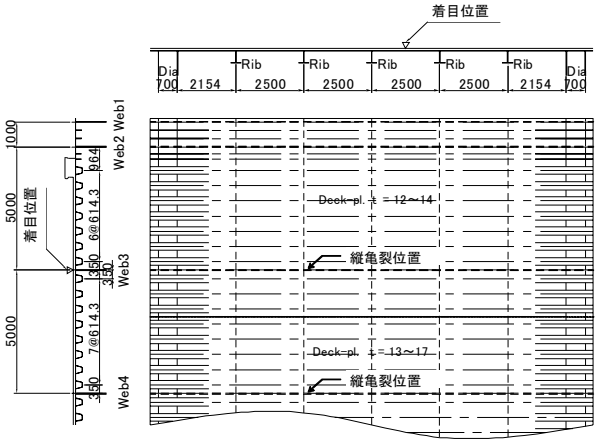
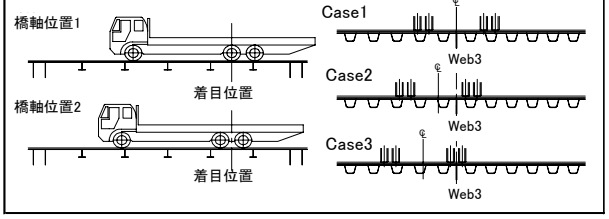


図-1　舗装の縦亀裂の生じた鋼床版構造

表-1　主桁腹板上のデッキプレート変形量の解析結果

項　目	輪荷重の位置						規定値
	橋軸位置1			橋軸位置2			
	Case1	Case2	Case3	Case1	Case2	Case3	
主桁腹板上の曲率半径(m)	450	183	154	323	183	406	20
主桁と第1縦リブ間のたわみ差(mm)	0.04	0.2	0.07	0.05	0.19	0.04	1.0(0.4)

（　）内は縦リブ間のたわみ量の規定値



ル化した．デッキプレートの板厚は一律12mmとし，最小25mm間隔で要素分割した．荷重は主桁腹板上で影響が大きくなるように，輪荷重の位置を移動して推定した．混合物の変形係数は本四基準の2,000N/mm^{2}である．

解析結果を**表-1**に示す．主桁腹板直上に輪荷重を載荷したときに，最大でも曲率半径にして154m(橋軸位置1, Case3)であり，規定値の曲率半径20mよりも，かなり安全側である．また，主桁の腹板直近に輪荷重を載荷したときに，主桁と第1縦リブ間のたわみ差は最大で0.2mm(橋軸位置2, Case2)であるが，これについても，本四基準の縦リブ間の許容たわみ0.4mmを第１縦リブ位置に置換した値1.0mmよりも安全側である．

以上のように，本四基準に適合する混合物以外を選択する場合には，鋼床版の曲率半径やたわみの規定値を満足しているにもかかわらず，1~2年半の極端に短い年数で舗装の縦亀裂が起きる場合があることがわかる．

前述の道示の規定は，鋼床版の設計を行う際に，床版の剛性をある程度上げることで，舗装の縦亀裂に対して一定の制限を与えることには有効と考えられる．しかし，種々の混合物の舗装の縦亀裂の発生について，定量的な評価指標として扱うことは難しいと考えられる．

3. 鋼床版舗装のぜい性領域における引張破壊性状

(1) 舗装の縦亀裂の引張試験による定量的評価

本研究では鋼床版舗装の混合物の選定に際し，舗装の縦亀裂の発生について他の諸材料と同様，力学的な評価を加えることを新たに試みた．

これまでの舗装の研究からすれば，アスファルト混合物は，かなりの規則性をもち，理論的解析ができる材料であるといえる[24)~27)]．しかし，これまでの鋼床版舗装の設計では，局部変形の影響を解析で評価せずに，使用材料が選定されることもあった．

この理由としては，アスファルト混合物の強度やひずみなどの物理性状が，温度やひずみ速度が異なると変化するため，解析が煩雑であること等が挙げられる[28)]．一方，鋼床版舗装の力学試験の評価値に関する基準は，本四Ｉ型の改質アスファルト混合物に対して，曲げ試験の破断ひずみ6,000 μm以上（-10℃，50mm/min）という数値が，本四基準にあるのみであり，これによると「現在のところ規定の根拠となるものが得られていない」とされている[4)]．

徳光らは，ぜい化点といった見地から，混合物の破壊性状を検討している[29)]．密粒度混合物（ストレートアスファルト）を対象とした破壊試験であるが，ぜい性領域

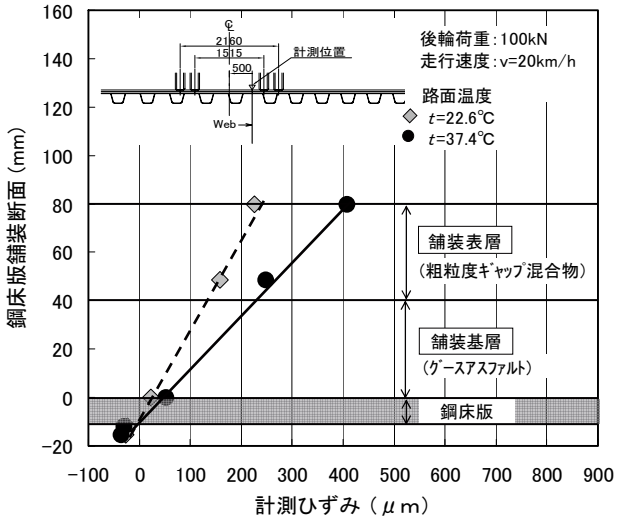


図-2　車両走行時の鋼床版舗装断面の計測ひずみ

における引張破壊ひずみは，数百 μm程度である．かりに，ぜい性領域における縦亀裂であれば，大変形の曲げ作用で発生するのではなく，数百 μm程度の舗装表面における微小な引張ひずみで発生するものと考えられる[3),14),21)]．

このようなことから，われわれは，混合物の種類によっては，極端に短い年数で鋼床版橋に起きる舗装の縦亀裂は，冬季の低温時における混合物のぜい性破壊現象で起きているのではないかと推測した．

このため，鋼床版舗装用に用いられる各種アスファルト混合物のぜい性領域における引張破壊性状について，実橋計測と室内試験により詳細に検討した．

(2) ひずみ速度とぜい化点

前述の長大斜張橋と同じUリブ構造の未供用部の実橋鋼床版（同じ舗装構成）で，主桁腹板近傍の横リブ中間部における鋼床版下面，舗装の上・下面および内部のひずみを動的に計測した．載荷したのは，総重量200kN（デュアルの後輪１組あたり80kN）の車両である．ここで，鋼床版の設計活荷重であるT荷重相当（デュアルの後輪１組あたり100kN）の輪荷重として評価するため，動的計測のひずみは1.25倍（100kN/80kN=1.25）して補正している．走行速度vは，5km/h~40km/hの間で変化させている．また，v=20km/hについては，終日計測を行い路面温度の影響を調べた．

一例として，20km/hの速度で主桁腹板の直近を車輪が走行したときの，横リブ中間部における主桁腹板上の舗装断面の同時性を考慮した最大ひずみの計測結果を**図-2**に示す．路面温度t は22.6℃と37.4℃である．車両走行時には路面温度にかかわらず，車両走行時のアスファルト舗装はデッキプレートと一体で挙動して断面の平面保持がされており，舗装表面で最大ひずみが発生することがわかる．

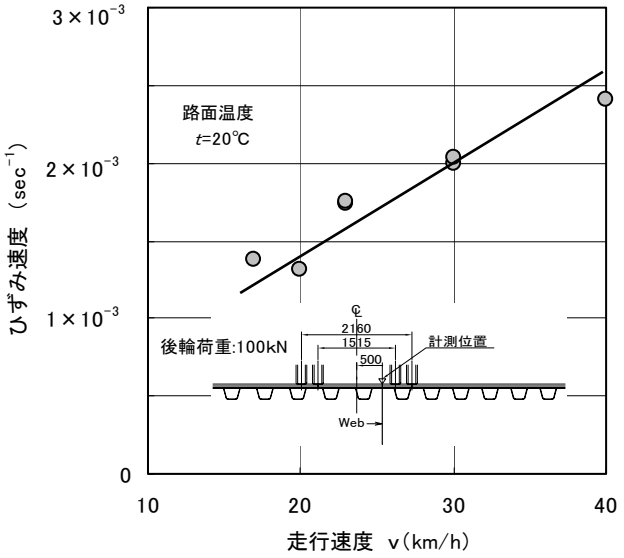


図-3　鋼床版舗装のひずみ速度と走行速度の関係

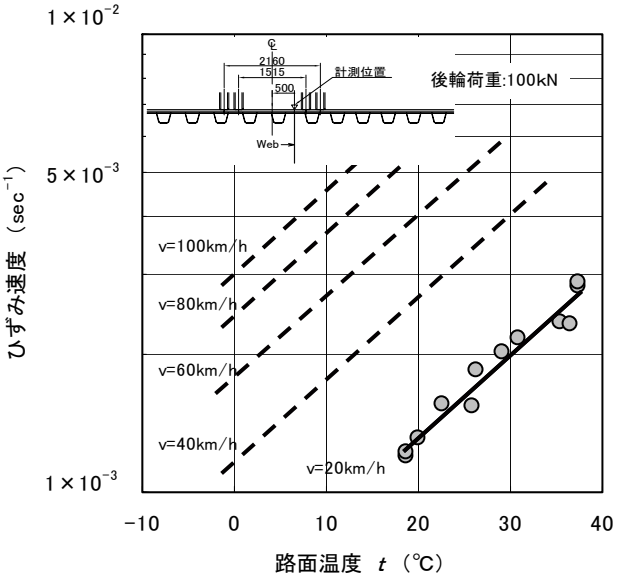


図-4　鋼床版舗装のひずみ速度と路面温度の関係

走行速度と鋼床版舗装のひずみ速度の関係を図-3に示す．ここで，ひずみ速度は，動的計測の最大ひずみと載荷時間（ひずみが0から最大ひずみに到達する時間）の比として定義する．また，路面温度とひずみ速度の関係を図-4に示す．v=20km/hは実測データであり，v=40km/h~100km/hのひずみ速度は，目安として波線で示している．これは，図-3より，走行速度の増加割合とひずみ速度の増加割合がほぼ等しい関係にあるため，図-4のv=20km/hのひずみ速度に，各走行速度vと20km/hの速度比率を乗じて推定したものである．かりに，舗装に加わる荷重が同じであっても車両速度や路面温度により，ひずみ速度は異なり，車両速度が速く，また路面温度が高くなるほど，ひずみ速度が大きくなる傾向がある．車両速度がv=80km/h~100km/h付近のとき，0℃付近のひずみ速度を図-4より外挿すれば，おおむね3×10^{-3}/sec程度の大きさであるため，混合物の引張試験の変形速度を0.3mm/sec（供試体の長さ10cm）とした．土工部における舗装のひずみ速度は，おなじ車両速度のとき，おおむね10^{-3}オーダーであることが知られている[30]．鋼床版舗装の計測結果から推定したひずみ速度のオーダーもこれと等しい．

なお，徳光らの研究[29]によれば，ひずみ速度1オーダーの変化に対して，ぜい化点の変化は約6℃，引張強度σ_{tc}の変化は0.59N/mm^{2}程度である．また，ひずみ速度が異なっても試験温度tとの関係（$\sigma_{tc}-t$曲線）は，ほぼ同一形状となる．したがって，任意のひずみ速度ε_aにおける引張強度σ_{ta}は，以下の式から求めることができる．これにより，任意のひずみ速度におけるぜい化点が求まる．

$$\sigma_{ta} = \{\log(\dot{\varepsilon}_a/\dot{\varepsilon}_0)\times 0.59 + \sigma_{t0}\}\, e^{\beta\cdot t_r} \qquad (1)$$

表-2　混合物の引張試験に使用したバインダの標準的性状

試験項目	混合物名	バインダの標準的性状		
		粗粒度ｷﾞｬｯﾌﾟ混合物	密粒度混合物	排水性混合物
	バインダ種	ｺﾞﾑ入りｽﾄﾚｰﾄｱｽﾌｧﾙﾄ 60～80	鋼床版舗装用改質ｱｽﾌｧﾙﾄ	鋼床版舗装用高粘度改質ｱｽﾌｧﾙﾄ
針入度(25℃) 1/10mm		60 を越え 80 以下	60 以上	40 以上
軟化点 ℃		44.0～52.0	70.0 以上	80.0 以上
伸　度(10℃) cm		—	50 以上	—
伸　度(15℃) cm		100 以上	—	50 以上
三塩化エタン可溶分 %		99.0 以上	—	—
フラースぜい化点 ℃		—	-12 以下	-20 以下
タフネス(25℃) N･m		5.0 以上	—	—
テナシティ(25℃) N･m		2.5 以上	—	—
引火点 ℃		260 以上	280 以上	260 以上
密度(15℃) g/cm3		1,000 以上	—	—
薄膜加熱質量変化率 %		0.6 以下	0.6 以下	0.6 以下
薄膜加熱針入度残留率 %		55 以上	65 以上	65 以上
粗骨材のはく離面積率 %		—	5 以下	5 以下
60℃粘度 ×10⁴Pa･s		—	2.0 以上	2.0 以上
曲げ破断ひずみ(-20℃) cm/cm		—	80×10^{-3} 以上	80×10^{-3} 以上

ここに，

β：ぜい化点より高温域および低温での定数（図-5の山形の曲線$\sigma_{tc}=\sigma_{t0}\,e^{\beta\cdot t}$より求まる）

σ_{t0}：基準ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_0$におけるぜい化点での引張強度(N/mm^2)

t_r：任意のひずみ速度$\dot{\varepsilon}_a$における換算温度$t_r=t+t_d$(℃)

t：基準ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_0$における試験温度(℃)

t_d：基準ひずみ速度$\dot{\varepsilon}_0$におけるぜい化点T_0，任意のひずみ速度$\dot{\varepsilon}_a$のぜい化点T_aの差$t_d=\log(\dot{\varepsilon}_a/\dot{\varepsilon}_0)\times 6$(℃)

(3) 各種混合物のぜい性領域における引張破壊性状

各種アスファルト混合物について，ぜい化点を求める

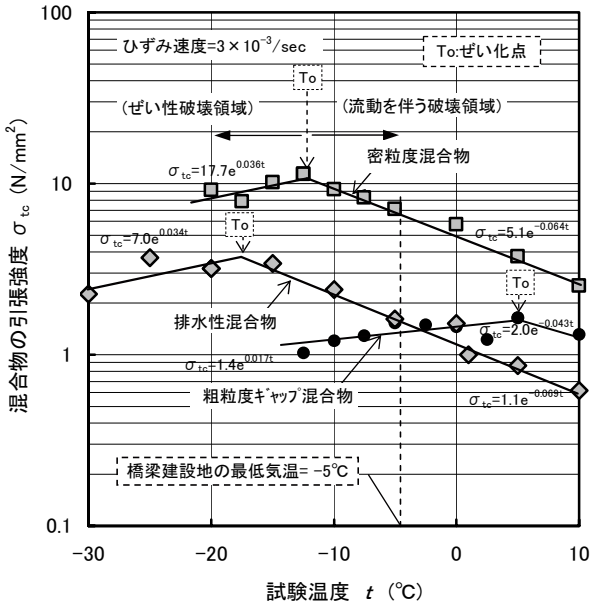


図-5　各種混合物の引張強度と試験温度の関係

表-3　引張試験に使用した鋼床版舗装用排水性混合物の標準的性状

項　目	基準値	試験名
安定度　kN	3.5 以上	マーシャル安定度試験
空隙率　%	20 程度	透水性アスファルト混合物の密度試験
動的安定度　回/mm	4,000 以上	ホイールトラッキング試験
透水係数　cm/s	1×10^{-2} 以上	定水位透水試験
はく離率　cm/cm	5 以下	水浸ホイールトラッキング試験

ために，ひずみ速度3×10^{-3}/secで温度をパラメータにした引張試験を行った．供試体寸法は，2.5cm×2.5cm×10cmである．使用した引張試験機は，INSTRON社製の電気-油圧サーボ方式の載荷装置（最大荷重73.5kN）である．供試体に鋼製治具(2.5cm×2.5cm×1.0cm）をエポキシ樹脂で突き合わせ接着し，これをユニバーサルジョイントの付いた固定治具に装着して試験を行った．

引張強度σ_{tc}と試験温度tの関係結果を求めた結果を**図-5**に示す（引張試験の破壊ひずみε_{tc}と試験温度tの関係については，次章で述べる）．混合物の種類は，以下の３種類である．

1) 首都高速道路の規格[28]にある粗粒度ギャップ混合物
2) 首都高速道路における標準的な鋼床版舗装用の排水性混合物[31]（以下，排水性混合物と呼ぶ）．
3) 本四基準の規格に適合し，改質アスファルトⅠ型よりも軟化点やひずみ追従性を向上した鋼床版舗装用改質アスファルトを用いた密粒度アスファルト混合物（以下，密粒度混合物と呼ぶ）．

各混合物の引張試験に使用したバインダの標準的性状は，**表-2**に示すとおりである．また，排水性混合物の標準的性状は**表-3**に示すとおりである．試験温度は，おおむね-25℃~10℃の範囲で2.5℃~5℃きざみとした．

図-5に示すように，引張強度σ_{tc}と試験温度tの関係は，山形の曲線を描き，この山のピークが，アスファルト混合物のぜい化点である．これを境に，低温側ではぜい性破壊領域，高温側では流動を伴う破壊領域と定義され[29]．アスファルト舗装にとって致命的な損傷となりかねないぜい性破壊による縦亀裂の発生を抑制するためには，混合物のぜい化点の温度を路面の最低温度よりも低くする必要がある．また，この山形の曲線の水平位置や高さの大小関係により，それぞれのアスファルト混合物の引張破壊性状を比較することができる．この図から，以下に示すような注目すべき結果が得られた．

①ぜい化点T_0の温度は，粗粒度ギャップ混合物は5℃，密粒度混合物は-12.5℃，排水性混合物は-17.5℃である．橋梁建設地の最低気温をかりに-5℃とした場合，粗粒度ギャップ混合物はぜい性破壊領域である．一方，密粒度混合物と排水性混合物は，流動を伴う破壊領域である．

②粗粒度ギャップ混合物は，密粒度混合物と比べるとぜい化点の温度が5℃と高く，引張強度も小さいため，ぜい性破壊が起こりやすいといえる．

③排水性混合物のぜい化点温度は，-17.5℃と低いため，ぜい性領域のぜい性破壊は起こりにくい．しかし，流動を伴う破壊領域では，引張強度が小さいため骨材の飛散等，別の破壊モードの可能性も考えられる．

以上のように，かりに，同じ車両が同じ温度で鋼床版上を走行しても，混合物の種類の違いにより，混合物の引張強度や破壊モードは，全く違う性状を示すことがわかる．また，最低気温の環境条件（北海道等の寒冷地や鹿児島等の温暖地の違い）によっても，混合物の引張破壊性状の評価は異なる．

このため，鋼床版舗装の選定にあたっては，橋梁建設地の最低気温と混合物のぜい性領域の引張強度特性を把握して，使用材料を選定することが必須の条件といえる．

4.　鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂の仕組みと評価法

(1) ぜい性領域における舗装の縦亀裂の仕組み

前述の斜張橋の舗装から採取した粗粒度ギャップ混合物について，ひずみ速度3×10^{-3}/secで温度をパラメータにした引張試験を行い，引張破壊ひずみε_{tc}と混合物の変形係数E_aの関係で整理した結果を**図-6**に実線で示す．変形係数E_aは，引張試験の引張強度σ_{tc}と引張破壊ひずみε_{tc}の比として定義する．混合物の種類により，変形係数と温度の関係は異なる．このため，全ての混合物について

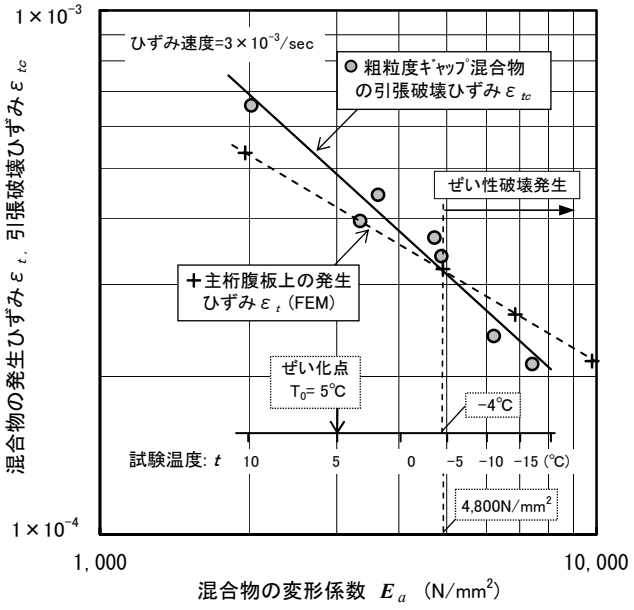


図-6　粗粒度ギャップ混合物の引張破壊ひずみと発生ひずみの関係

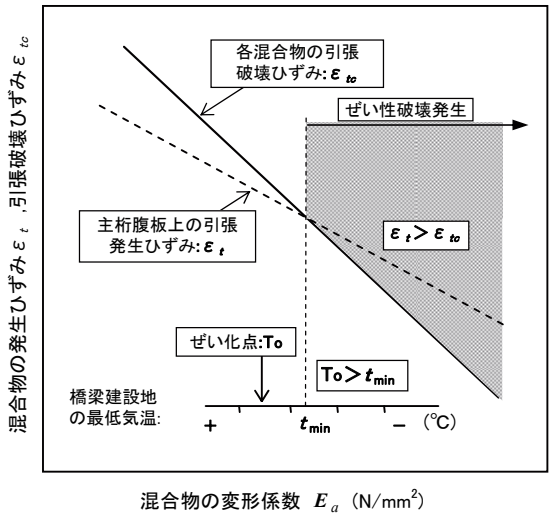


図-7　鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂の判定方法を表した模式図

扱えるように，横軸は変形係数E_aの関係で表した．ただし，試験温度tと粗粒度ギャップ混合物のE_aとの関係が考察できるように，E_aに対するtとの相関を求め，図中にtの横軸を併記した．

一方，T荷重相当デュアルの後輪１組あたり100kN）の輪荷重をデッキプレートの変形が最大となる，横リブ中間部の主桁の腹板直上に載荷したとき，主桁腹板上の舗装表面の発生ひずみε_tとE_aの関係の解析結果を図中に点線であわせて示す．解析方法は，前述の実橋計測の結果から，高速走行時のアスファルト混合物のひずみが弾性挙動を示すことを確認したため，弾性FEM解析で行った．断面方向の温度分布の影響については，鋼床版の舗装断面の温度を計測した結果，ほぼ均一のため無視した．

図-6より，粗粒度ギャップの引張破壊ひずみε_{tc}と混合物の変形係数E_aの関係を表す直線（実線）の傾きは，主桁腹板上の発生ひずみε_tとE_aの関係を表す直線（点線）の傾きよりも大きい．また，混合物の変形係数E_aがおよそ4,800N/mm^{2}以上になると，発生ひずみが破壊ひずみを超えることがわかる．したがって，この交点でアスファルト舗装の破壊が起きることがわかる．

一方，E_aが4,800N/mm^{2}以上になるときの試験温度tは，約-4 ℃に相当することがわかる．**図-5**の粗粒度ギャップ混合物のぜい化点T_o=5℃の位置を図中に矢印で示しているが，約-4℃はこれよりも低温側であるため，ぜい性破壊領域である．

したがって，アスファルト舗装温度が下がる冬季の低温時（この橋梁建設地点の最低気温は-5℃)に，T荷重を超える大きさの車両が，かりに主桁の腹板付近を１台走行すれば，主桁腹板上のアスファルト舗装がぜい性破壊する可能性があるといえる．このときの破壊ひずみは，3.3×10^{-4}程度の微小な引張ひずみである．なお，姫野らは，土木研究所の舗装走行実験場で1年間計測された舗装温度を分析し，舗装の表面温度が大気温度を下回ることはほとんどない結果を報告している[30]．

このように，実現象として極端に短い年数で起きている主桁腹板上の舗装の縦亀裂は，混合物の選択によっては，首都圏の最低気温付近の環境下で，ぜい性的に起きる可能性のあることが，アスファルト混合物の引張破壊特性の力学的視点から説明された．

ここで説明した方法は，全ての鋼床版の構造に対しても適用することが可能である．また，新しい混合物や種々の構造形式に対しても，鋼床版舗装の縦亀裂の判定を一般的に行うことができる．

(2) 鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂の判定方法

本四基準以外の混合物を適用する場合には，橋梁建設地の最低気温や採用する鋼床版構造から決まる舗装の発生ひずみを数値的に評価する必要がある．これは，新しい構造形式を採用する場合も同様であり，建設地の環境条件や種々の鋼床版構造に適した混合物の選定が可能となる．

鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂を防ぐための判定方法をまとめる．

縦亀裂の判定では，最初にひずみ速度を**図-4**で述べた手順で求めてから引張試験を行う．混合物の変形係数E_aと引張破壊ひずみε_{tc}の関係を求めて，**図-7**の模式図のように整理する．そして，以下に示すように，橋梁建設地の最低気温t_{min}における発生ひずみε_tと引張破壊ひずみε_{tc}の大小関係，および，ぜい化点 T_oと橋梁建設地の最低気温 t_{min}の大小関係の2点を比較すれば，ぜい性領域の舗装

破壊が起きるか否かを容易に判定することができる．なお，ぜい性破壊が起きる（ⅰ）の場合は，**図-7**の模式図でパターン掛した範囲である．

(ⅰ) $\varepsilon_t > \varepsilon_{tc}$ かつ $T_o > t_{min}$ の場合
: 舗装のぜい性破壊が起きる．
(ⅱ) $\varepsilon_t < \varepsilon_{tc}$ の場合
: 舗装のぜい性破壊が起きない．

ここに，

ε_t : 橋梁建設地の最低気温 t_{min} における鋼床版舗装表面の発生ひずみ (μm)

ε_{tc} : 橋梁建設地の最低気温 t_{min} における各種アスファルト混合物の引張破壊ひずみ (μm)

T_o : 各種アスファルト混合物のぜい化点 (℃)

t_{min} : 橋梁建設地の最低気温 (℃)

ここで，各種アスファルト混合物のぜい化点T_oは，**図-5**に述べたとおり，引張強度と試験温度の関係より求められる．また，前述の式(1)から，任意のひずみ速度におけるぜい化点を求めることができる．

なお，本来t_{min}は，舗装表面の最低温度とすべきであるが，前述の土木研究所での舗装表面の温度計測結果より，大気温度を使用しても，実用上とくに問題はないと考えられる．

また，厳密にいえばアスファルト舗装の破壊ひずみε_{tc}は，供用後の経年劣化の影響を考慮する必要がある．前述の実橋から採取した混合物は，供用後約8年が経過している．そこで，実橋舗装の粗粒度ギャップ混合物を新規に作成して，引張試験を行った結果を**図-8**に示す．実橋舗装の破壊ひずみは，新規舗装と比べると6割程度である．したがって，舗装の耐用年数をかりに10年とすれば，現状の舗装設計では破壊ひずみを5割程度として評価しておくのが適当と考えられる．

(3) 長期フィールド試験による検証

前述の鋼床版舗装用バインダを使用した密粒度混合物について，引張破壊ひずみと変形係数の関係を求めた結果を**図-9**に示す．また，主桁腹板上の舗装表面の引張ひずみの解析結果（**図-6**で示した点線）を図中にあわせて示す．

引張破壊ひずみε_{tc}とE_aの関係を表す直線の傾きは，FEM解析による主桁腹板上の引張ひずみε_tとE_aの関係を表す直線の傾きとほぼ平行であり，低温域の変形係数でも，**図-6**の粗粒度ギャップ混合物のように，直線同士は交差していないことがわかる．また，t_{min}= -5℃のときの引張破壊ひずみは約1×10^{-3}であり，前述の粗粒度ギャップ混合物と比べると約3倍大きい．すなわち，この混合物を前述の斜張橋の鋼床版舗装に適用すれば，経年劣化の影響を考慮しても，低温域においても良好な伸び特性を発揮し，舗装の縦亀裂の発生を防止できる可能性があると考えられる．

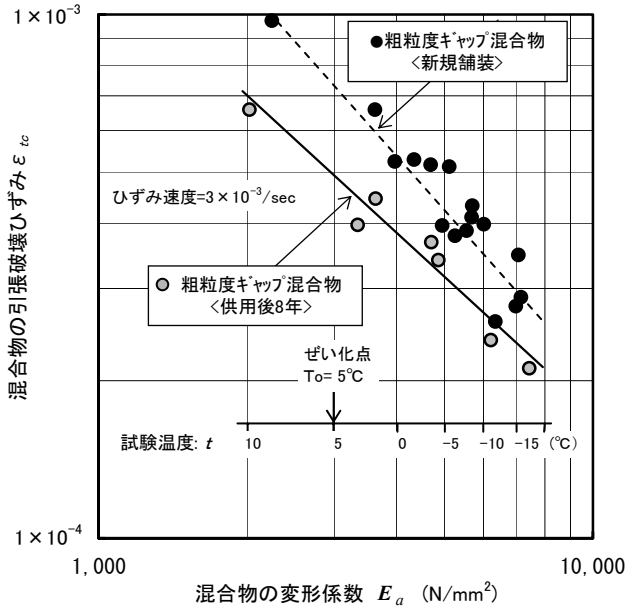


図-8　経年劣化に伴う粗粒度ギャップ混合物の引張破壊ひずみの変化

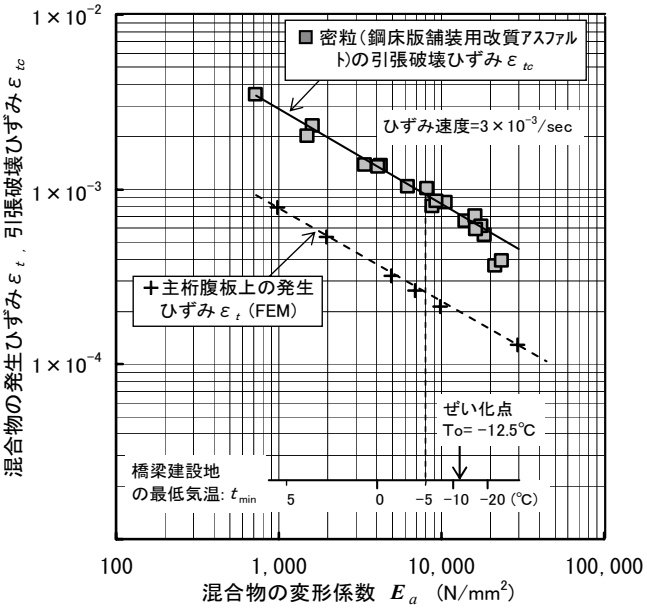


図-9　密粒度混合物（鋼床版舗装用改質アスファルト）の引張破壊ひずみと発生ひずみの関係

実際に，この鋼床版舗装用バインダを使用した密粒度混合物を実橋鋼床版の橋面舗装の一部（延長約400m×2車線）に試験的に適用して，平成11年から長期フィールド試験を行っている[33]．すでに6度の冬場を越しているにもかかわらず，ほぼ全てが健全な状態にある．このため，FEM解析の発生ひずみと混合物の引張試験の破壊ひずみ値を対比し，ぜい化点の大きさを含めて，橋梁建設

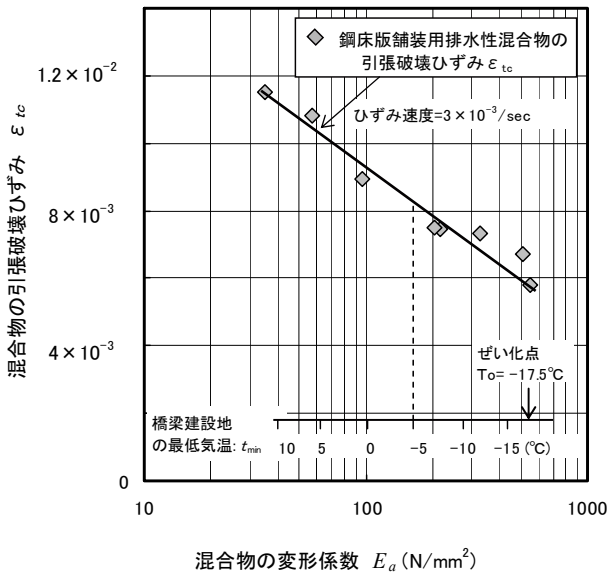


図-10　鋼床版舗装用の排水性混合物の引張破壊ひずみと変形係数の関係

地の最低気温での大小関係を比較評価する本手法は，鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂を防ぐのに，非常に効果的である．

(4) 鋼床版舗装用排水性混合物の性状

鋼床版上に排水性舗装を適用する際に，排水性混合物は，密粒度混合物などの一般的な混合物と比較して接着面積が小さいため，たわみ追従性が課題となる[34]．そこで，骨材の把握力，粘着力が高い高粘度改質アスファルトを使用して，たわみ追従性を向上させている．前述の首都高速道路における標準的な鋼床版舗装用の排水性混合物について，引張破壊ひずみε_{tc}と変形係数E_aの関係を求めた結果を**図-10**に示す．排水性混合物のt_{min}= -5℃のときの引張破壊ひずみは約8×10^{-3}であり，前述の密粒度混合物と比較しても非常に大きいことがわかる．また，鋼床版舗装用の排水性混合物のぜい化点は，**図-5**に示したように，−17.5℃と低く，ぜい性領域の舗装破壊に対しては十分余裕がある．このため，その力学性能を再評価すれば，より経済的な鋼床版舗装用の排水性混合物を開発できる可能性もあると考えられる．

5. まとめ

鋼床版舗装の縦亀裂に対して，首都圏の最低気温付近でも生じるぜい性領域の破壊現象に着目し，各種アスファルト混合物のぜい化点付近における引張破壊性状を検討した．ここで得られた結論を要約すると，以下の通りである．

(1)　実橋計測のひずみ速度に基いた各種アスファルト混合物の引張試験を行い，その破壊性状について検討した．この結果，載荷条件や温度条件を同一としても，骨材粒度やアスファルトの種類が異なると混合物の引張性状が変化する．すなわち，縦亀裂の発生状況が変化することが明らかなった．

このため，鋼床版舗装の選定にあたっては，橋梁建設地の最低気温と混合物のぜい性領域の引張強度特性を把握して，使用材料を選定することが必須の条件といえる．

(2)　アスファルト混合物の引張破壊性状をFEM解析と対比して詳細に検討した．この結果，実現象として極端に短い年数で起きている鋼床版舗装の縦亀裂は，混合物の選択によっては，首都圏の最低気温-5℃付近の環境下でもぜい性的に起きる可能性があるといえる．

したがって，本四基準以外の混合物を適用する場合には，橋梁建設地の最低気温や採用する鋼床版構造から決まる舗装表面の発生ひずみを数値的に評価する必要がある．これは新しい構造形式を採用する場合も同様である．

(3)　鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂を防ぐためには，FEM解析の発生ひずみと混合物の引張試験の破壊ひずみ値を対比し，ぜい化点の大きさを含めて，橋梁建設地の最低気温での大小関係を比較評価すれば，舗装破壊が起きるか否かを容易に判定することができる．

本検討の手法は，実橋の長期フィールド試験でも良好な結果を得ているため，鋼床版舗装のぜい性領域における縦亀裂を防ぐのに，非常に効果的である．

(4)　これにより，建設地の環境条件や種々の鋼床版構造に適した混合物の選定が可能となる．また，新しい混合物や種々の構造形式についても，同様に適用できるため，鋼床版舗装のぜい性領域における舗装破壊の定量的評価が一般的に可能となる．

謝辞：本研究の遂行にあたって，首都高速道路株式会社中込秀樹氏をはじめとする関係諸氏に御支援を頂いた．また，三菱重工(株)森直樹氏，JFEエンジニアリング(株)小泉幹男氏，猪村康弘氏，(株)NIPPOコーポレーション荒井明夫氏に御協力を頂いた．ここに記して深謝する．

参考文献

1) 多田宏行：橋面舗装の設計と施工，pp.25-37，鹿島出版会，1996.
2) 佐々木道夫：橋面舗装と鋼床版：アスファルト，Vol.38，No.187，pp.44-53，1996.
3) 角和夫：関西国際空港における橋面舗装，アスファルト，Vol.38，No.187，pp.29-35，1996.

4) 本州四国連絡高速道路株式会社：橋面舗装基準（案），1983.
5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ 鋼橋編，pp.273-274，2002.
6) Thul, H. and Reinitzhuber, F.K.: International Association for Bridge and Structure Engineering, *Symposium on Wearing Surfaces for Steel Bridge Decks of Lightweight Construction*, pp.5-53, 1968.
7) 飯島尚，小島逸平，岩崎尚義：鋼床版舗装の全国現況調査，土木技術資料，Vol.25，No.3，pp.129-134，1983.
8) 吉田隆輝，森吉昭博，高野伸栄：アスファルト混合物の引張の破壊性状とその応用，石油学会誌，Vol.44，No.5，pp.312-316，2001.
9) 中込秀樹，半野久光，大塚敬三，金成克弘：高速埼玉大宮線における排水性舗装の試験施工，舗装，Vol.34，No.2，pp.3-9，1999.
10) 樋口敦見：鋼床版における排水性舗装－伊勢湾岸自動車道路・名港トリトンー，土木施工，Vol.39，No.7，pp.68-73，1998.
11) 山端一浩，山田優，袴田文雄，前川順道：水浸ホイールトラッキング試験による橋梁床版上排水性舗装の耐久性の検討，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.21-29，1998.
12) 三木千壽，菅沼久忠，冨澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No.780／Ⅰ-70，pp.57-69，2005.
13) 細谷悦雄，川端道雄：鋼床版のSFRC舗装，舗装，Vol.39，No.3，pp.3-6，2004.
14) 飯島尚，小島逸平，岩崎尚義：鋼床版舗装混合物の疲労特性，土木技術試料，Vol.23，No.2，pp.79-84，1981.
15) 村上憲司，新田篤志：鋼床版舗装，本四技報，Vol.22，pp.22-29，1982.
16) 村上憲司，山岸一彦：本四連絡橋の鋼床版舗装の設計基準，舗装，Vol.19，No.6，pp.3-10，1984.
17) 鳥海隆一：本州四国連絡橋の鋼床版上の舗装，舗装，Vol.22，No.9，pp.4-8，1987.
18) 樋口康三：本州四国連絡橋公団における橋面舗装，アスファルト，Vol.38，No.187，pp.25-28，1996.
19) 内田喜太郎，西澤辰男，姫野賢治，野村健一郎：鋼床版の表面縦ひび割れに関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.4，pp.103-110，1999.
20) 大井正美，米島耕一，黒澤弘文：東京外環道路における鋼床版舗装の試験舗装結果からの一考察，舗装，Vol.36，No.1，pp.18-21，2001.
21) 山本泰幹，森清，小泉幹男，須藤聡，森直樹：鋼床版舗装の線状ひび割れ調査，土木学会第51回年次講演会概要集1-A，pp.1008-1009，1997.
22) 首都高速道路株式会社：舗装設計施工基準，1994.
23) 川田成彦，牧田篤弘：首都高速道路公団における橋面舗装，アスファルト，Vol.38，No.187，pp.8-13，1996.
24) 笠原篤，菅原照雄：不規則なひずみ波形に対するアスファルト混合物の動的応答に関する研究，土木学会論文報告集，No.277，pp.123-132，1978.
25) 西澤辰男，姫野賢治，佐藤亮一，佐藤育正：鋼床版舗装の構造解析法に関する研究，土木学会論文集，No.627/V-44，pp.103-112，1999.
26) 韮澤憲吉，芳村仁：鋼床版舗装の局部曲げと内部応力，構造工学論文集，Vol.33A，pp.351-359，1987.
27) 森直樹，森清，山本泰幹，秋山洋，小泉幹男：鋼床版舗装の力学性状の実験的研究，土木学会第51回年次講演会概要集1-A，pp.1006-1007，1997.
28) 菅原照雄：アスファルト混合物の力学的性状について，土木学会論文報告集，No.207，pp.73-81，1972.
29) 徳光克也，森吉昭博，天野隆明，笠原彰彦：ぜい化点を利用したアスファルト舗装におけるアスファルトの選択法，石油学会誌，Vol.40，No.3，pp.220-223，1997.
30) 笠原篤，岡川秀幸，菅原照雄：アスファルト混合物の動的性状とその舗装構造の力学解析への利用，土木学会論文報告集，No.254，pp.107-117，1976.
31) 山本泰幹：首都高速道路の鋼床版上の高機能舗装，アスファルト，Vol.47，No.216，pp.27-33，2004.
32) 姫野賢治，渡辺隆，勝呂太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究，土木学会論文集，No.366／V-4，pp.123-132，1986.
33) 斉藤一成，山本泰幹，荒井明夫：鋼床版橋面舗装のひび割れ補修工法の検討，第24回日本道路会議論文集，pp.414-415，1999.
34) 池田拓哉，久保和幸，池田雄一：排水性混合物の曲げ特性について，第22回日本道路会議論文集，pp.436-437，1997.

(2005. 6. 22 受付)

A STUDY ON TENSILE FRACTURE PROPERTIES AT LOW TEMPERATURE OF ASPHALT PAVEMENT ON STEEL DECK BRIDGES AND EVALUATION METHOD OF LONGITUDINAL CRACKING

Yasumiki YAMAMOTO and Akihiro MORIYOSHI

This paper pays attention to brittle fracture phenomenon at low temperature to investigate the cause of longitudinal surface cracking of asphalt pavement on steel deck bridges, and examined fractue properties around the brittle point of asphalt mixtures with tensile tests and FEM analysis. The results revealed that the asphalt mixtures considered in this study have different fracture properties and a certain mixture possibly fracrures under a pareticular loading and temperature condition where the other materials do not. Based on the brittle point and failure tensile strain, a method of numerically evaluating the possibility of occurrence of surface cracking on an asphalt mixture was developed, which can be easily applied to new types of asphalt materials and various types of bridge structures. This method was validated by long term field observation on an actual pavement on a steel deck.(It allows the geneal and quantitative evaluation of brittle pavement fracture, which has never been possible.)