

IV-11 舗装の機能的破損に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：舗装チーム

研究担当者：吉田武、寺田剛、新田弘之

【要旨】

車両の大型化をはじめとした重交通化により、車輪の走行位置付近に縦方向に表面から下方に発生するひび割れ（わだち割れ）が問題になっている。本研究はわだち割れ発生メカニズムの解明、縦ひび割れに対応した設計法、わだち割れ抑制方法の検討及びわだち割れを抑制する材料・施工法を開発するため、文献調査、全国実態調査、多層弾性理論を用いたモデル解析および縦ひび割れ評価試験等を行った。その結果、①わだち割れは路床・路盤の影響及び性能低下が原因で発生しない。表層混合物の性能が影響し、Wタイヤの中央部またはタイヤ縁部に発生する。②わだち割れを抑制する材料・施工法として、劣化しにくい材料、空隙の小さい材料、アスファルト量が多く膜厚を厚くする材料、粘度が小さい材料が有効であることが分かった。

キーワード：わだち割れ、縦ひび割れ、評価試験、メカニズム、抑制材料

1. はじめに

アスファルト舗装の破壊形態に、アスファルト舗装の車輪の走行位置付近において、写真-1に示す縦方向に発生しているひび割れが最近多く見られる。この現象は表面から発生したひび割れが、縦と下方向に進行しているのが特徴で、わだち割れや表面縦ひび割れ（本報告書では以下、縦ひび割れという）とも呼ばれている（外国では Top down crack と呼ばれている）。現行のアスファルト舗装の構造設計では、ひび割れは、アスファルト混合物層の底面から発生するという考えに基づいており、この種のひび割れには対応していない。最初1本の縦ひび割れが入り、放っておくとそこから無数のひび割れが広がり補修の原因にもなっている箇所も出てきている。今後、表面縦ひび割れが深刻な道路の破壊につながる事が予想されるため、表面縦ひび割れ発生メカニズムの解明と対策が急務となっている。本研究では、表面縦ひび割れの発生メカニズムの解明の手掛かりを得るための文献調査、表面縦ひび割れの実態の確認のため全国実態調査、FWD現地調査、モデル解析、現道から採取したコアからの目視観察と劣化度合いの調査及びわだち割れを抑制する材料・施工法を開発するため表面縦ひび割れ評価試験を行った。

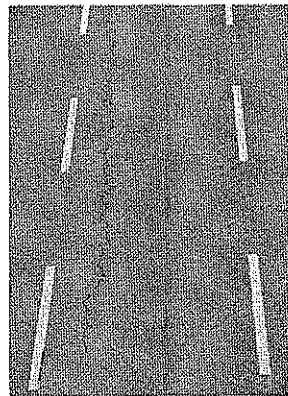


写真-1 表面縦ひび割れ

2. 研究方法

2.1 文献調査

これまでに行われた縦ひび割れに関する文献調査を行い、縦ひび割れの発生場所、発生原因、発生メカニズム及び対策等について調査を行った。

2.2 全国実態調査

2.2.1 全国縦ひび割れ実態調査の解析

昭和 61 年に表-

1に示す全国 32 箇所縦ひび割れの実態調査を行なっている。その時のデータを用いて単相関分析を行い、縦ひび割れが入る原因について確認調査を行った。表-2に縦ひび割れに影響があるか検討を行った要因項目を示す。

2.2.2 全国実態調査

平成 11 年に全国実態調査として、当時の建設省各地方建設局、北海道開発局、沖縄総合事務局を対象に縦ひび割れが発生している路線について、表-3に示す詳細データの収集と発生している箇所のコアを採取し縦ひび割れ発生要因の実態を調査した。全国 96 の

表-1 調査箇所

地域	箇所数
東北	2
北陸	4
中部	6
近畿	6
中国	6
四国	2
九州	6
計	32

表-2 検討した要因項目

項目	番号	項目
1 回	26	空隙率
2 回	27	アスファルト量
3 ア	28	合計厚(H)
4 ス	29	TA
5 フ	30	設計CBR
6 ア	31	アスファルト性状
7 ル	32	軟化点
8	33	安定度
9 の	34	フロー値
10 性	35	混合
11 状	36	物性
12	37	状態
13	38	吸水量
14	39	骨材
15	40	粒度
16	41	粒度2.5mm通過
17	42	粒度0.074mm通過
18	43	車線幅
19	44	層数
20	45	1層目の種類
21	46	2層目の種類
22	47	3層目の種類
23	48	4層目の種類
24		5層目の種類
25		補修可否

事務所に対して行い、67 の事務所から縦ひび割れ有りの回答を得た。

表-3 収集した詳細データ

(1)対象区間データ		
①路線番号	⑥交通量区分	⑪躯体構造物の種類
②距離標	⑦供用開始時期	⑫埋設管の有無
③センサ箇所を特定可能な情報	⑧補修時期	⑬日照を遮る物の有無
④上下線の別	⑨ひび割れ発生時期	⑭同一構造延長
⑤車線位置	⑩ひび割れ率	⑮表面縦ひび割れ発生延長
(2)構造データ		
①断面構成	②TA	③設計CBR
③ひび割れ図	④表面縦ひび割れ状況写真	⑤抜き取りコア

2.3 コアの目視観察と劣化度合いの調査

2.3.1 コアの目視観察

縦ひび割れが発生した現場より採取したコアについて縦ひび割れ発生状況を目視観察した。

2.3.2 コアの劣化度合いの調査

アスファルトの劣化と縦ひび割れの関係を調査するため、現場から採取したコア（ひび割れ有りとしひび割れ無し）の表層部分を上下方向に三等分し、回収したアスファルトの劣化状態を組成分析機（TLC/FID：Thin Layer Chromatography / Flame Ionization Detector）を用いて調査した。

2.4 FWD試験現地調査

路盤、路床の支持力不足が縦ひび割れ発生に起因していないか確認するため、縦ひび割れが発生している道路の支持力をFWD試験機で試験した。

2.5 モデル解析

文献調査の結果、載荷重により表面に引張ひずみが発生するが、発生場所はタイヤ縁部とタイヤ真下の二つの見解があった。そこで、鉛直等分布荷重がシングルタイヤまたはWタイヤに載荷した場合の路面に発生する引張ひずみの位置を検討した。

①解析手法：多層弾性理論（GAMES）によるモデル解析

②載荷条件-1：円形等分布鉛直荷重、輪荷重：シングルタイヤ24.5kN、接地圧：0.62MPa、載荷半径：11.3cm

③載荷条件-2：円形等分布鉛直荷重、輪荷重：Wタイヤ49kN、載荷中心間隔：32cm、接地圧：0.62MPa、載荷半径：11.3cm

④舗装構造と弾性係数：表層：5cm、 $E=4500\text{kg/cm}^2$ 、基層：5cm、 $E=2500\text{kg/cm}^2$ 、As処理：15cm、 $E=3300\text{kg/cm}^2$ 、粒状材：40cm、 $E=2000\text{kg/cm}^2$ 、路床： $E=400\text{kg/cm}^2$ ¹⁾

2.6 引張りひずみ発生有無の確認試験

実際の舗装でも自動車が走行した場合、引張ひずみ

が生ずるのか、舗装上にひずみゲージを貼り付けトラック走行時のひずみ量を測定した。

2.7 縦ひび割れ評価試験

縦ひび割れが入る原因と対策方法を確認するため、疲労試験機を用いた縦ひび割れ評価試験とホイールトラッキング試験機（以下、WT試験機）を用いた縦ひび割れ評価試験を行った。

2.7.1 疲労試験機を用いた縦ひび割れ評価試験

図-1に示す治具を装着した疲労試験機を用いて、表-5に示す試験条件により、縦ひび割れが発生するか評価試験を実施した。試験した混合物及びアスファルトの種類を表

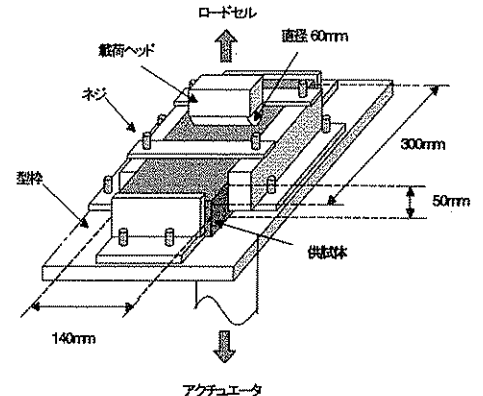


図-1 表面縦ひび割れ抵抗性評価試験治具

表-5 表面縦ひび割れ抵抗性評価試験条件

試験方法	繰り返し疲労試験
制御方法	荷重制御
載荷治具の直径	60mm
載荷荷重	4.903kN
周波数	サイン波 1Hz
試験温度	30°C・40°C・50°C・60°C
試験時間	120分
供試体サイズ	300×140×50mm
供試体混合物種類	密粒度アスファルト混合物13(密粒13) 細粒度アスファルト混合物13(細粒13) 密粒度キャップアスファルト混合物13(密粒G13) 砕石マッシュアスファルト13(SMA13) 密粒度アスファルト混合物20(密粒20)
供試体アスファルト種類	ストリートアスファルト(ストアス) プラントミックス改質Ⅱ型アスファルト(改質Ⅱ型)
供試体劣化方法	80°C、14日間

5に示す条件で劣化させ、同様の試験を行った。ひび割れの評価方法は、発生したひび割れの合計長さとした。なお、供試体の短辺方向でひび割れが重複している場合は、重複した長さを減じた値をひび割れ長さとした。

2.7.2 WT試験機を用いた縦ひび割れ評価試験

実際のダンプトラックが走行した時のわだち割れを再現するため、WT試験機にWタイヤを装着しわだち割れに関する評価試験を行った。図-2に試験状況の概略図を示

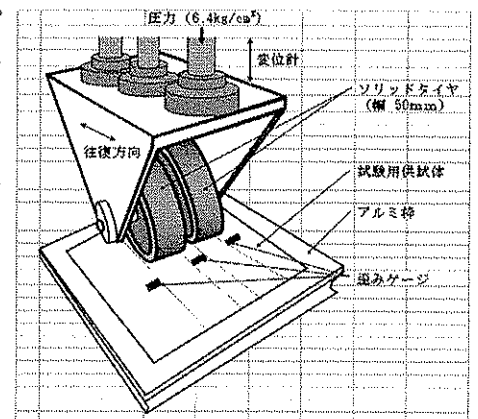


図-2 試験概略図

す。

粒度（密粒13、密粒20、密粒G13、細粒13）ごとに試験温度を複合温度（40℃:10h+10℃:14h）に変えた場合、わだち割れ発生の有無を試験した。また、劣化の有無を評価するため同様の供試体を混合物用PAVで劣化（100℃、20時間）させ、わだち割れ発生の有無を試験した。

3. 研究結果

3.1 文献調査結果

縦ひび割れに関する文献は、外国も含めると全部で70件あった。これらの文献調査により、以下の4項目について整理した。その結果を表-5に示す。

- (1) ひび割れが入る場所
- (2) 縦ひび割れが入る原因
- (3) 縦ひび割れが入るメカニズム
- (4) 縦ひび割れ対策

表-5 文献調査結果

調査項目	原因の内容(多い順)	件数
縦ひび割れが入る場所	①車輪通過(走行)部付近、または走行軌跡部	15
	②車輪通過部の内側と外側、あるいは片側、または中央付近	5
	③走行車線、走行車線の中央線寄り(IWP)	5
	④アスファルト混合物層が厚い舗装	5
縦ひび割れが入る原因	①表層アスファルト(混合物)の劣化	17
	②温度(温度応力)	12
	④施工時(混合物)、施工法に関わるもの	8
	③重交通荷重(重交通量)	7
縦ひび割れのメカニズム	①高温時タイヤ縁部付近の最大引張ひずみ	9
	②ヒーリング(再癒着)作用により消滅	7
	③タイヤと路面の境界での半径方向(水平)応力	6
	④舗装の塑性特性による残留応力	3
	⑤ひび割れがある場合、ひび割れ先端付近に引張ひずみが集中し、ひび割れの発達を促す。	3
	⑥縦リブ直上の引張ひずみ(鋼床版上舗装)	3
	⑦アスファルトおよび混合物の材料特性	2
縦ひび割れ対策	①材料(アスファルト)の劣化対策	11
	③補修工法	7
	④建設時の対策	6
	②応急処置	4

3.2 全国実態調査結果

3.2.1 全国縦ひび割れ実態調査の解析結果

縦ひび割れ率と表-2に示した施工データ及び回収アスファルトの性状等の調査項目との単相関係数の結果を表-6に示す。ひび割れ率が0.846と相関係数が一番高かったのは、ひび割れ率の中に縦ひび割れがカウントされたため相関が高くなったものと思われる。また2~4層目の種類の相関も高くなったのは、基層や路盤の種類が少なく偏ったため相関が高くなったものと思われる。縦ひび割れ率と相関が高く縦ひび割れ発生の原因として影響があると思われた項目は、大型

車交通量と累積大型車交通量であった。またアスファルトの劣化の指標となる芳香族分は相関係数は0.508と縦ひび割れの原因と考えられる項目の中では高くなっており、アスファルトの劣化が縦ひび割れ発生に影響があると思われた。

表-6 相関係数結果(R²)

項目	相関係数(R ²)	番号	項目	相関係数(R ²)
1 回収アスファルトの性状	0.197	26	空隙率	0.125
2 針入度	0.033	27	アスファルト量	0.026
3 アスファルテン	0.123	28	合計厚(H)	0.281
4 レジン分	0.374	29	TA	0.261
5 芳香族分	0.508	30	設計CBR	0.454
6 飽和分	0.144	31	アスファルト性状	針入度 0.121
7 回収率	0.485	32	軟化点	0.097
8 吸光度比	0.427	33	安定度	0.004
9 重量平均分子量	0.061	34	フロー値	0.033
10 数平均分子量	0.062	35	密度	0.034
11 分子量分散度	0.039	36	空隙率	0.058
12 アスファルテンの沈降度	0.191	37	アスファルト量	0.013
13 コアの厚さ	0.44	38	吸水量	0.15
14 密度	0.231	39	骨材粒度	粒度2.5mm通過 0.228
15 軟化点	0.008	40	粒度0.074mm通過	0.006
16 伸度	0.194	41	車線幅	0.406
17 粒度2.5mm通過	0.092	42	層数	0.244
18 粒度0.074mm通過	0.311	43	1層目の種類	0.342
19 ひび割れ率	0.846	44	2層目の種類	0.686
20 わだち割れ率	1	45	3層目の種類	0.518
21 横断凹凸	0.424	46	4層目の種類	0.533
22 たわみ量	0.319	47	5層目の種類	0.424
23 全交通量	0.367	48	補修可否	0.059
24 大型車交通量	0.783			
25 累積大型車	0.738			

3.2.2 全国実態調査結果

平成11年に行った全国実態調査の結果から以下のことが分かった。

(1) 地域別の影響

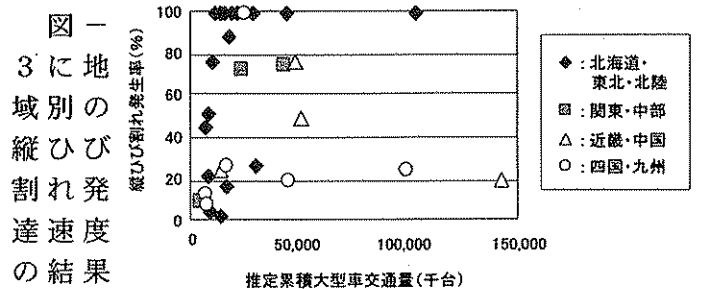


図-3に地域別の縦ひび割れ発達速度の結果を示す。この結果、北海道・東北・北陸等の比較的寒冷な地域では、縦ひび割れの発達速度が速く、近畿・中国・四国・九州の比較的温暖な地域では、その発達速度が遅いことが分かった。

$$\text{縦ひび割れ発生率}(\%) = \frac{\text{表面縦ひび割れ発生延長(km)}}{\text{同一構造延長(km)}} \times 100$$

$$\text{推奨累積大型車交通量(台)} = 24\text{時間大型車交通量(台/日)} \times 365(\text{日/年}) \times \text{供用年数(年)}$$

(2) 構造に関する検討

1) 躯体構造物の影響
躯体構造物の種類による縦ひび割れ発生区間数を調べたところ、トンネルあるいは橋梁といった構造物上

ではひび割れ発生がなく、ほとんど土工上の舗装がひび割れていた。

2) 設計CBRの影響

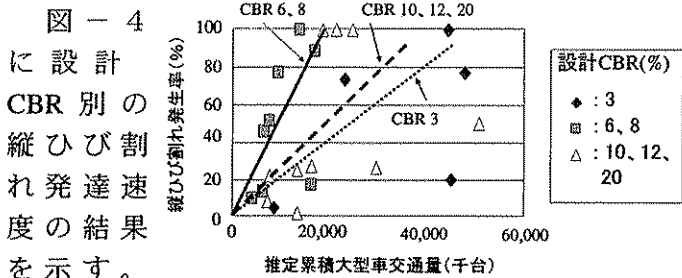


図-4 CBR別の縦ひび割れ発達速度結果

異なる設計 CBR 下では、縦ひび割れの発達速度に傾向が伺えるが、ばらつきが大きくはっきりしたことは言えない。

3) TAの影響

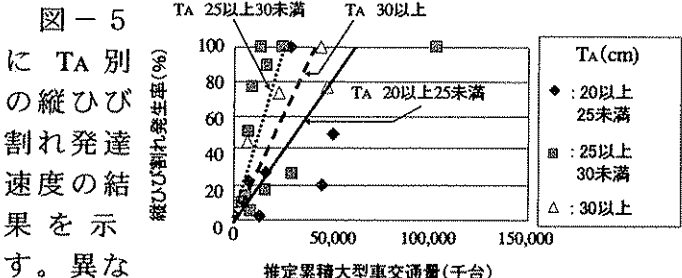


図-5 TA別の縦ひび割れ発達速度結果

では、縦ひび割れの発達速度に傾向が伺えるが、ばらつきが大きくはっきりしたことは言えない。

(3) 交通に関する検討

1) 交通量区分による影響

交通量区分別の縦ひび割れの発生状況を調べたところ、交通量が多い箇所においては、縦ひび割れの発生頻度が高いがすべての交通区分の道路に縦ひび割れが発生していた。

2) 車線の影響

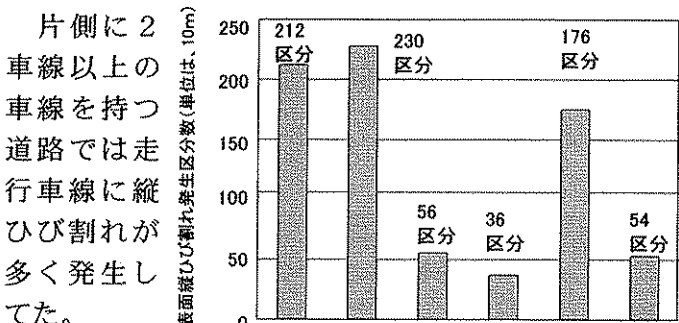


図-6 車線位置の縦ひび割れ発生結果

3) 横断方向位置の影響

図-6に車線のどの位置で縦ひび割れ発生しているかひび割れ図から求めた結果を示す。

この結果、縦ひび割れは、車輪走行部の中央と左側の車輪走行部の左側で多く発生することが分かった。

3.3 コアの目視観察と劣化度合いの調査

2.3.1 コアの目視観察

縦ひび割れが発生した現場より採取したコアについて縦ひび割れ発生状況を目視観察した。コアの一例を写真-2に、結果の概要を表-7に示す。コアの観察結果では、すべてのコアは写真-2のように上面から入っており、目視観察の結果では、劣化が進行しているように見られた。

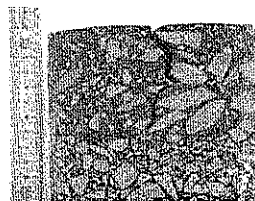


写真-2 コアの一例

表-7 コア目視観察結果の概要

①舗装表面、ひび割れ面のアスファルトが劣化しているように見られる。
②混合物層の分離が見られる。
③混合物層の厚さに関わらずひび割れが発生している。
④ひび割れの進行による骨材の破壊はほとんど見られない。

2.3.2 コアの劣化度合いの調査

図-7と8に組成分析の結果を示す。この結果、ひび割れ部(ひび割れ有り)はひび割れ近傍部(ひび割れ無し)より芳香族分が10%程度少なく、レジンは5~10%程度多かった。アスファルテン分、レジンは軟化点、

動粘度を大きく、針入度を小さくし、飽和分、芳香族分はその逆の効果があることから、ひび割れの有無とアスファルトの劣化は関連があると考えられる。また、ひび割れ近傍部では上部が中間、下部と比べて芳香族分

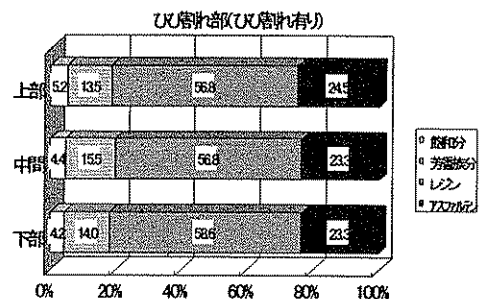


図-7 組成分析試験結果(ひび割れ有り)

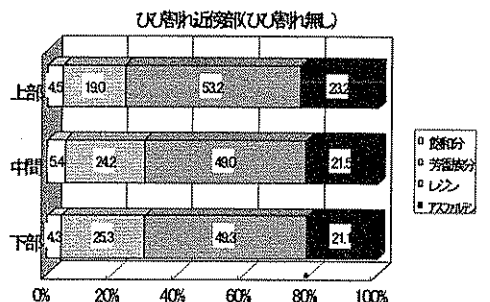


図-8 組成分析試験結果(ひび割れ無し)

が少なく、レジンが多いことから、劣化は表面から進行していると考えられる。

2.4 FWD試験現地調査

図-9に縦ひび割れ発生状況と舗装全体の支持力を示すD0たわみの結果を、表-8に各特性値の平均値を示す。図中及び表中の×印は、縦ひび割れが亀の子状に発達、○印は縦ひび割れなし、△印はわだち割れが少しの箇所である。図-9の結果、D0たわみは、「○：縦ひび割れなし」、「△：縦ひび割れ少し」に比べ、「×：縦ひび割れが亀の子状に発達」の地点がやや大きくなっている。

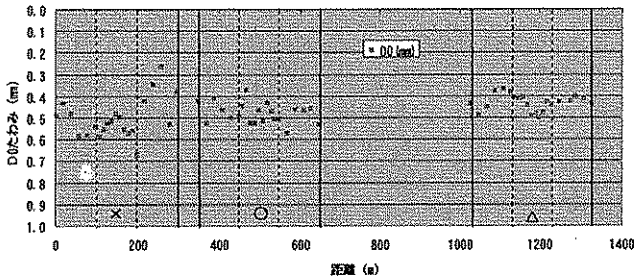


図-9 縦ひび割れ発生状況とD0たわみの結果

表-8 縦ひび割れ発生状況と各特性値の平均値

	路面性状○	路面性状△	路面性状×
データ数(個)	21	26	16
D0たわみ(mm)	0.45	0.46	0.55
D150たわみ(mm)	0.13	0.13	0.15
アスコ層の弾性係数(MPa)	6300	6200	6100
アス安の弾性係数(MPa)	3100	3100	3000
粒調砕石の弾性係数(MPa)	200	180	130
クラッシャーランの弾性係数(MPa)	140	130	80
路床の弾性係数(MPa)	76	73	61

また、表-8からは、各層の弾性係数では、アスコ層、アスファルト安定処理層(アス安層)で路面性状「×」の箇所が、わずかに小さい値となっているものの著しい差異はみられない。ただし、路盤、路床については、路面性状「○」、「△」に比べ、路面性状「×」はやや小さい値となっている。

舗装各層の特性値は、路面性状の変化とともに表-8に示すように「○」から「×」の値へと推移していったと考えられる。現時点においても路面性状「○」の箇所の各特性値をみると構造的に大きな不具合は生じていないといえる。このことから、今回着目した縦ひび割れの発生は、構造的な支持力の不足に起因するものではないと考えられる。

2.5 モデル解析

多層弾性理論を用いて鉛直等分布荷重がシングルタイヤに載荷した場合の路面に発生する引張ひずみの位置を解析した結果を図-10に、また、Wタイヤに載荷した場合の引張ひずみの位置の結果を図-11に示す。この結果、シングルタイヤでは、タイヤ直下で500 μ m程

度の圧縮ひずみが発生し、タイヤ縁部で250 μ m程度の引張ひずみが発生した。このことから、シングルタイヤでもタイヤ端部に縦ひび割れが発生すると推定できる。また、Wタイヤでは、タイヤの端部に250 μ m程度の引張ひずみが発生し、Wタイヤの中央部でそれより大きい400 μ m引張ひずみが発生する。このことから、縦ひび割れが一番発生するのは、Wタイヤの中央部と思われる。

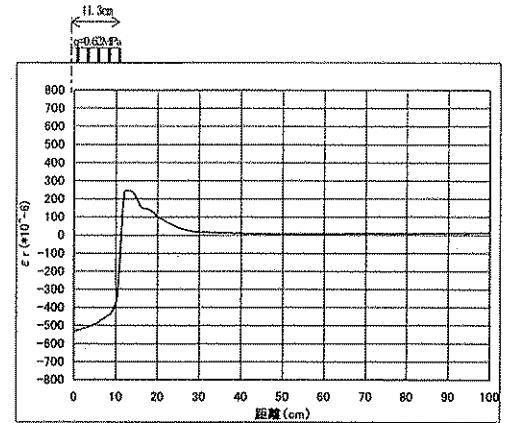


図-10 シングルタイヤの解析結果

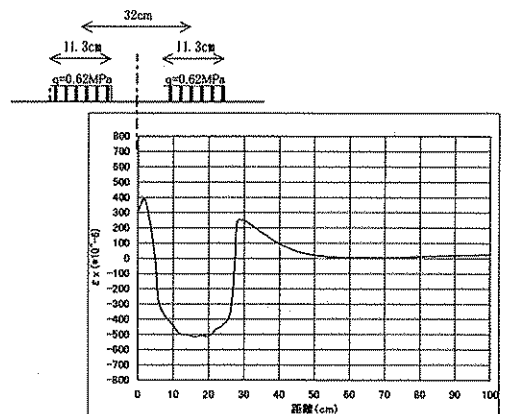


図-11 Wタイヤの解析結果

2.6 引張りひずみ発生有無の確認試験

写真-3に舗装上にWタイヤのトラックを走行させて引張ひずみを測定している状況を示す。ひずみゲージを貼付けた位置は図-12の示す位置である。

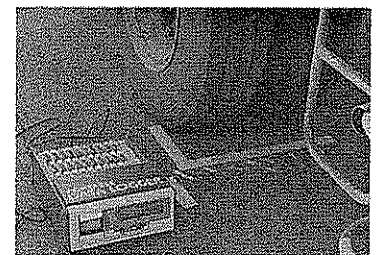


写真-3 測定状況

トラック走行時のひずみ量を測定した結果を図-13に示す。この結果、引張ひずみが一番大きかったのはWタイヤの中央部③であり、モデル解析で推定した結果が実際の舗装上で実証できた。

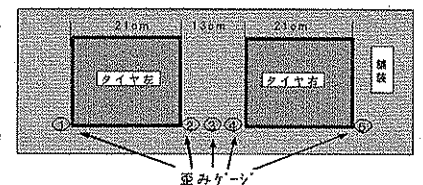


図-12 ひずみゲージ貼付け位置

2.7 縦ひび割れ評価試験結果

2.7.1 疲労試験機を用いた縦ひび割れ評価試験

疲労試験機を用いた評価試験の結果、密粒13、密粒

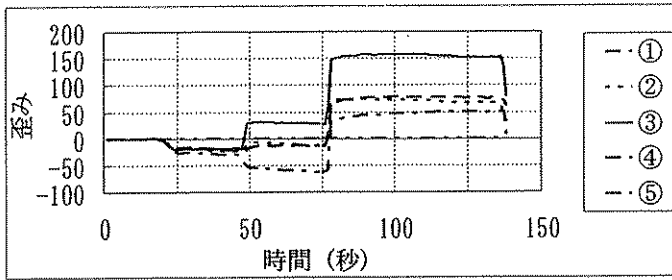


図-13 自動車走行時のひずみ量測定結果

20、密粒ギャップ13の混合物はひび割れは発生しなかった。細粒13およびSMA13でひび割れが発生した。図-14にひび割れが発生した混合物の結果を示す。ひび割れ長さが一番大きくなった温度は、劣化していない供試体では30℃、劣化させた供試体は40～50℃であった。これは、劣化していない混合物は、硬く脆くなっていないためひずみ追従性が小さい低温域でひび割れが大きく発生し、劣化した混合物は劣化すると硬く脆くなるため、高温時のひずみ量に追従できなくなってひび割れたものと思われる。また、改質アスファルトの方が縦ひび割れ抵抗性が強いようである。

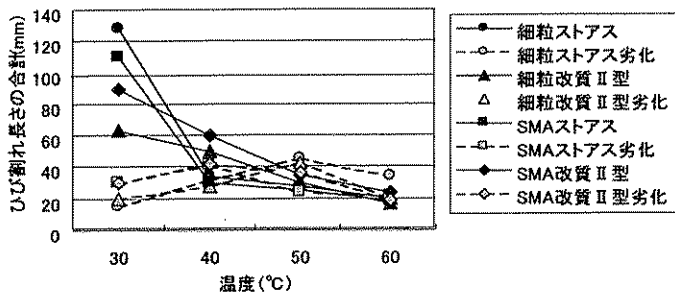


図-14 縦ひび割れ評価試験結果(疲労試験)

2.7.2 WT試験機を用いた縦ひび割れ評価試験

WT試験機を用いた評価試験の結果を表-9に示す。この結果、ひび割れが発生したのは、密粒(13)のストアスと細粒(13)の劣化有りの混合物で、複合温度の40℃の時にWタイヤの真ん中にひび割れが発生した。このことより、縦ひび割れ発生にメカニズムとして、シングルタイヤよりWタイヤの影響を受けやすく、舗装が劣化して夏期の暑い時期にひび割れが発生したと想定できる。

表-9 縦ひび割れ評価試験結果(WT試験)

供試体	アスファルトの種類	劣化無し		劣化有り	
		ひび割れ有無	ひび割れ発生時間	ひび割れ有無	ひび割れ発生時間
密粒(20)	ストアス	無し	—	無し	—
密粒(13)	ストアス	無し	—	有り	33.9h
	改質II型	無し	—	無し	—
密粒G(13)	ストアス	無し	—	無し	—
細粒(13)	ストアス	無し	—	有り	15h

2.8 縦ひび割れ抑制方法

これまでの結果から、縦ひび割れを抑制する方法を提案すると以下の通りである。

- 1) 縦ひび割れ抑制方法としては、劣化対策(劣化しにくい材料の選定、施工時の十分な締め固め、アスファルト表面のはく離対策)とひび割れが発生後の進行を抑制する下層材料のはく離対策や初期段階でのひび割れ注入あるいは維持・補修対策が有効と思われる。
- 2) 縦ひび割れを抑制する材料・施工法として、劣化しにくい材料や引張ひずみ追従性のある材料が有効であることが分かった。そのためには、空隙を小さくする、アスファルト膜厚を厚くする、アスファルトの粘度を小さくすることで、その方法は、アスファルト量を多くした配合や粘度が小さいアスファルトの使用、アスファルト量が多い細粒度アスファルト混合物、SMA、改質アスファルト等が有効である。耐流動性も考慮するならSMAや改質アスファルトが有効である。

4. まとめ

本研究では、以下のことが分かった。

- 1) 縦ひび割れが入る場所は、Wタイヤ中央付近及びタイヤ縁部で、走行車線から入る。
- 2) 縦ひび割れが入る原因は、表層のアスファルトの劣化が第1原因と考えられる。
- 3) 縦ひび割れが入るメカニズムは、夏季の路面が高温の時、劣化したアスファルト舗装表面部に交通荷重による引張ひずみが発生し、微細なひび割れが起きる。その後交通荷重や秋・冬季の温度低下による応力(収縮)により発達するものと考えられる。
- 4) 縦ひび割れの発生は、構造的な支持力の不足、TA、に起因するものではないと考えられ、設計法を変更する必要はなく、表層混合物の選定で対応できると思われる。
- 5) 縦ひび割れの抑制方法として、劣化対策、縦ひび割れ抑制材料及び施工方法を提案した。

今後は、提案を行った縦ひび割れ対策に有効な材料や方法について、現場での検証を行っていく必要がある。また、これらの成果は、舗装設計施工指針及び舗装施工便覧に反映する予定である。

参考文献

- 1) 西沢他：「アスファルト舗装におけるわだち割れ周辺のひずみ状態に関する研究」、道路建設、No.538、pp48～55、1992.11