

## 鋼繊維補強コンクリートオーバーレイの設計に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDIES ON STEEL FIBER REINFORCED  
CONCRETE OVERLAY DESIGN

國分修一\*・伊吹山四郎\*\*・瀬戸 薫\*\*\*

By Shuichi KOKUBU, Shiro IBUKIYAMA and Kaoru SETO

The use of steel fibre-reinforced concrete (SFRC) immune to rutting and distortion would provide excellent, smooth and durable overlays on the existing asphalt pavements. This paper aims to find a way of mechanical analysis of the SFRC overlay system and to set up a design method of the SFRC overlay slab thickness.

According to model and full scale loading test, it clearly appears that the SFRC overlay system has a great deal of resistance against actual traffic loads and can be presumed as a multilayered composite pavement which regard the existing asphalt pavement as a part of SFRC slab, and it is further shown that the "yield-line theory" can be applied basically to the design method of slab thickness.

## 1. ま え が き

わが国の主要道路における交通は量および質ともに大きく、アスファルト舗装の多くは流動によるわだち変形を起こしているか、また積雪寒冷地にあつては摩耗による変形を起こしている。このような路面の変形は交通の安全走行を損ない、騒音や振動などの環境公害の原因ともなるので、著しい路面の変形は平坦に修繕する必要がある。しかし、歴青系材料を用いて修繕する場合、路面の変形問題を全面的に解決することはきわめて難しく、舗装の修繕は頻りに実施する必要がある。このため、路面を平坦に保つ耐久的な補修材料を開発することが道路舗装における緊急かつ重要な課題となっている。

一方、昭和49年頃からわが国でも鋼繊維補強コンクリートが研究され始め、普通コンクリートに比べてひびわれ発生に対する抵抗性が著しく大きく、また引張強度、曲げ強度、せん断強度の増大、靱性、耐衝撃性、曲げ疲労性状の向上など優れた特性を有していることが明らかとなってきた<sup>1)~3)</sup>。したがって、鋼繊維補強コンクリ-

ートは、重交通の道路、空港あるいは橋面などの舗装<sup>1),4)</sup>、特に、比較的薄層で変形を修繕しなければならないアスファルト舗装のオーバーレイに用いる場合にはきわめて有効な材料といえる<sup>5),6)</sup>。

しかし、わが国の場合、オーバーレイの建設は歴青系材料で行うのが一般的で、ぜい性材料であるコンクリートを比較的薄層で用いることはわが国の特殊な道路事情と相まってほとんど考慮されたことがなく、またアスファルト舗装上のコンクリートオーバーレイの設計方法に関しても米国における便宜的な手法が紹介されている<sup>7)</sup>にすぎずほとんど検討が加えられていない。特に、鋼繊維補強コンクリートオーバーレイの設計に関しては、コンクリート舗装上のコンクリートオーバーレイに関する経験的な版厚設計式<sup>7),8)</sup>を参考にしたオーバーレイ厚の設計式が提案されている<sup>9)</sup>のみで、アスファルト舗装上の鋼繊維補強コンクリートオーバーレイに関する研究は著しく遅れているのが現状のように思われる。

本研究は上記の事情を考え、アスファルト舗装上の鋼繊維補強コンクリートオーバーレイシステムの有効性の確認とオーバーレイシステムにおけるアスファルト層の機能の評価およびオーバーレイ厚の設計に関する資料を得ることを目的に実施したものであり、供試版と一般道路における載荷実験の成果、これに基づく基本設計式の

\* 正会員 工修 大林道路(株)技術研究所  
(〒336 浦和市沼影2-12-36)

\*\* 正会員 工博 大林道路(株)専務取締役  
(〒101 千代田区神田錦町1-2-1)

\*\*\* 正会員 大林道路(株)技術部長(同上)

提案およびその設計式の妥当性の検討を内容としたものである。

## 2. 供試版における載荷実験

### (1) 実験概要

供試版における載荷実験は、アスファルト舗装上のオーバーレイシステムの耐荷性、有効性の確認とアスファルト層の取扱いの検討および基本設計式を考えるうえでの資料を得ることを目標としている。したがって、実験では図-1に示すような試験舗装を作り、その上に厚さ5 cmで3×3 mの大きさの鋼繊維補強コンクリート供試版を表-1に組合せを示すとおり合計16枚作製した。舗装の支持力は各層において平板載荷試験によって求めており、値は表-1に示すとおりである。また、試験舗装の路床は支持力係数が2.5 kgf/cm<sup>3</sup>の関東ロー

ムであったので、支持力を高めるために30 cm石灰で安定処理した。

載荷実験は、11~12月の冬期間に中央部載荷を、7~9月の夏期に縁部載荷を実施した。供試版表面のひずみおよびたわみは図-1に示すように20 cm間隔で測定しており、このほか、一部の供試版には荷重直下の版底面に埋込型ひずみゲージを配置しさらに路床および路盤に土圧計を設置して、供試版種類、支持層の違いによる差を測定した。また、使用した鋼繊維補強コンクリートの標準養生および現場養生における強度、弾性係数およびポアソン比は表-2に示すとおりである。

### (2) 供試版のひびわれ、たわみおよび応力

#### a) 供試版のひびわれ

供試版のひびわれ発生状況は、版表面に貼付けたひずみゲージと目視により観察した。その一例は図-2に示すようである。碎石層上で供試版の中央に載荷した場合、普通コンクリート版では最初に発見した版表面の微小ひびわれが少しの荷重増加で急激に成長し、ほぼ円形のひびわれが形成され、その直後に放射状のひびわれが発生して急激に崩壊する(図-2(a))。これに対し、鋼繊維補強コンクリート版では最初に発見した微小ひびわれの周辺に新しいひびわれが次々に発生する。載荷重を増加させると、それらのひびわれはしだいに成長するが、成長の停止するものもかなり認められ、最初に発見したひびわれが必ずしも成長を続けるとは限らない。また、供試版表面に形成されるひびわれは、ほぼ円形であるがかなり複雑で不連続なものとなる(図-2(b))。

アスファルト層上供試版の中央に載荷し

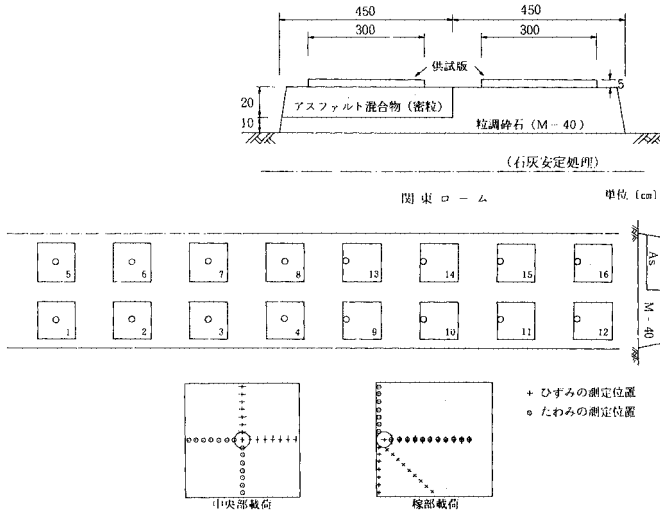


図-1 載荷実験の舗装断面構成と位置

表-1 供試版の種類と舗装の支持力

供試版 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
載荷状態	中央部載荷								縁部載荷								
繊維量(vol%)	0	2.0		0	2.0		1.0	0	2.0		0	2.0		1.0			
粗骨材寸法(mm)	10			25		10			10		25		10				
鋼繊維引張強度(kgf/mm <sup>2</sup> )	-	81	40	-	81	40	-	81	40	-	81	40	-	81	40		
供試版支持条件	砕石層				アスファルト層				砕石層				アスファルト層				
30cm版による支持力係数10月測定(kgf/cm <sup>3</sup> )	(A)	7.8	8.2	9.0	7.5	8.8	10.0	6.5	9.0	8.3	6.2	5.0	5.5	6.0	3.5	4.5	6.2
	(B)	13.8	15.5	15.4	15.7	9.6	7.6	7.8	6.8	20.2	16.0	11.0	16.3	6.2	4.1	4.4	5.0
	(C)	-	-	-	-	14.4	12.8	12.5	10.0	-	-	-	-	11.0	10.2	11.6	14.0

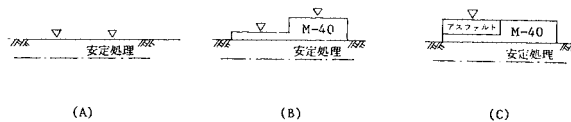


表-2 鋼繊維補強コンクリートの強度と弾性係数, ポアソン比

供試版 No	標準養生		現場養生				ポアソン比	材令 (11)
	曲げ強度平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均	圧縮強度平均 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
1	66.9	554	49.0 ~ 63.5	54.5	661	33.0×10 <sup>8</sup>	0.21	52
2	105.8	598	107.1 ~ 143.9	125.2	658	32.3	0.21	62
3	90.1	529	79.7 ~ 98.6	90.1	591	31.9	0.22	67
4	83.1	517	63.2 ~ 101.1	82.6	544	29.5	0.21	74
5	71.3	403	49.1 ~ 56.0	51.6	395	28.6	0.20	35
6	111.5	685	78.8 ~ 114.1	96.7	652	33.9	0.20	41
7	95.0	633	74.8 ~ 94.6	86.7	596	29.7	0.20	47
8	73.3	639	63.9 ~ 71.8	66.5	640	34.1	0.21	55
9	69.6	577	63.9 ~ 86.2	79.1	653	35.3	0.21	240
10	112.9	619	90.8 ~ 124.3	107.5	701	35.4	0.21	311
11	94.4	597	69.3 ~ 123.4	100.2	717	32.8	0.20	322
12	83.1	566	78.3 ~ 116.0	96.0	656	34.7	0.21	336
13	67.8	588	68.2 ~ 75.0	71.4	666	33.6	0.19	253
14	109.6	625	96.5 ~ 116.6	105.2	688	32.3	0.20	308
15	91.6	595	86.9 ~ 108.3	95.7	676	32.3	0.20	316
16	78.6	583	71.6 ~ 82.7	79.7	625	33.2	0.20	330

鋼繊維補強コンクリートの配合; 水セメント比45%, 細骨率60%, スランプ5 cm  
供試体寸法: φ10×20cm, 10×10×40cm

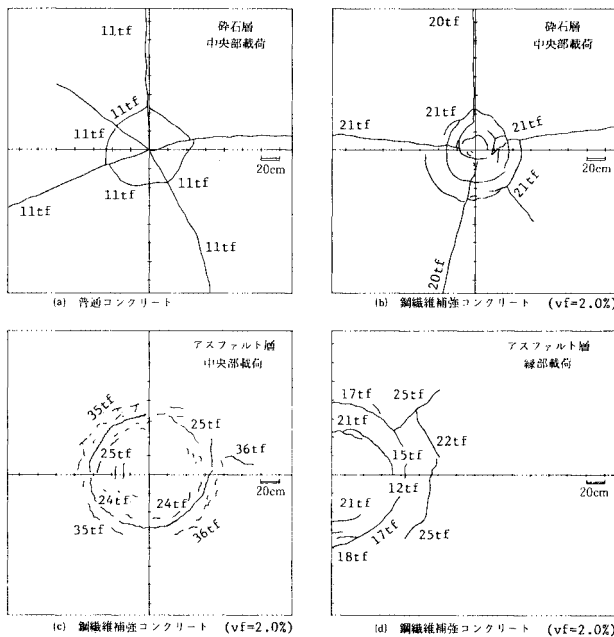


図-2 供試版のひびわれ

た場合のひびわれ発生状況は、普通コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートとも砕石層上供試版の場合とほぼ同様であるが、2, 3の相違点を指摘することができる。

1) アスファルト層上の普通コンクリート供試版では砕石層上供試版の場合と同様に放射状ひびわれが生じて崩壊する。しかし、供試版の鋼繊維維量が多くなると、放射状のひびわれは発生せず、曲げによる供試版表面の微小ひびわれと荷重付近の円形ひびわれによって供試版は破壊する。

2) 供試版表面に生ずるひびわれはアスファルト層上供試版の方が多く、また広い範囲にわたって分布するが、その幅はきわめて小さいものとなる。その中でほぼ円を形成すると認められる細いひびわれが存在する。

3) 供試版表面の円形状ひびわれ発生位置は、アスファルト層上供試版の場合に荷重中心からの距離が大きくなる。などが明らかとなった(図-2(c))。

次に、供試版縁部に荷重した場合、ひびわれは荷重縁と直角な方向のある位置にまず最初に発生し、荷重の増大に従って荷重縁に向かって成長を続ける。また、放射状のひびわれが発生して供試版は崩壊する。縁部荷重における供試版の種類および支持層の違いによるひびわれ状況の相違点は、中央部荷重の場合とほぼ同様である(図-2(d))。

以上に示した供試版のひびわれ状況は、図-3に一例を示したひずみの測定結果からも同様説明できる。

b) 供試版のたわみ

供試版のたわみは、ダイヤルゲージを配置したたわみ計を用いて直接的に測定した。その測定結果の一例は図-4に示すようであり、荷重とたわみの関係は両対数ではほぼ直線である。この関係は、また、半無限地盤における平板荷重試験から得られる式(1)と同等とみなすことができ、地盤状態を表わす直線の勾配と単位沈下量当たりの荷重の大きさを求めると表-3のようになる。

$$\log P = \log \frac{2 \cdot E \cdot a}{1 - \mu^2} + \log w \dots \dots \dots (1)$$

表-3 荷重-たわみ直線の勾配と単位沈下量当たりの荷重

上段：単位沈下量当たりの荷重  
下段：勾配

供試版No	中央部 載荷										縁部 載荷											
	砕石層					アスファルト層					砕石層					アスファルト層						
	1	2	3	4	平均	5	6	7	8	平均	9	10	11	12	平均	13	14	15	16	平均		
荷重範囲 (tf)	2~	2~11	2~11	2~11	×	2~12	2~12	2~12	2~12	×	4~8	5~10	5~10	5~10	×	2~9	2~10	2~10	2~10	×		
縦に直線方向の距離 (cm)	20	1.249 0.705	1.195 0.761	1.260 0.752	1.288 0.789	1.248 0.752	1.346 0.678	1.277 0.677	1.337 0.672	1.345 0.656	1.326 0.671	20	1.288 0.841	1.293 0.866	1.198 0.736	1.190 0.749	1.242 0.798	1.163 0.710	1.228 0.750	1.219 0.697	1.194 0.699	1.201 0.714
	40	1.342 0.707	1.298 0.775	1.348 0.752	1.388 0.800	1.344 0.759	1.403 0.690	1.363 0.669	1.424 0.671	1.417 0.652	1.402 0.671	40	1.409 0.854	1.405 0.831	1.306 0.751	1.299 0.744	1.355 0.795	1.240 0.684	1.337 0.725	1.324 0.693	1.286 0.705	1.297 0.702
	60	1.442 0.709	1.399 0.771	1.424 0.730	1.478 0.793	1.436 0.751	1.492 0.703	1.437 0.634	1.518 0.683	1.484 0.643	1.483 0.666	60	1.511 0.828	1.476 0.776	1.392 0.717	1.360 0.712	1.435 0.758	1.341 0.654	1.445 0.711	1.432 0.700	1.379 0.709	1.399 0.694
	80	1.581 0.738	1.470 0.745	1.491 0.692	1.565 0.785	1.527 0.740	1.570 0.693	1.547 0.670	1.596 0.678	1.572 0.659	1.571 0.675	80	1.619 0.816	1.560 0.761	1.485 0.719	1.415 0.697	1.520 0.748	1.402 0.591	1.554 0.704	1.558 0.741	1.464 0.732	1.495 0.692
	100	-	1.575 0.752	1.533 0.622	1.671 0.792	1.593 0.722	1.662 0.709	1.640 0.680	1.680 0.678	1.601 0.612	1.646 0.669	100	1.672 0.772	1.644 0.762	1.590 0.737	1.479 0.697	1.596 0.742	1.467 0.545	1.672 0.712	1.656 0.740	1.540 0.734	1.584 0.685
勾配平均	0.715	0.761	0.710	0.792	×	0.694	0.666	0.676	0.644	×	0.822	0.799	0.732	0.720	×	0.637	0.720	0.716	0.716	×		
全体	X̄=0.746 S=0.0445 V=6.0%					X̄=0.670 S=0.0227 V=3.4%					X̄=0.768 S=0.0532 V=6.9%					X̄=0.697 S=0.0502 V=7.2%						
荷重範囲 (tf)	11~16	14~30	14~20	×	12~20	12~20	12~20	12~20	×	4~8	5~10	5~10	5~10	×	2~9	2~10	2~10	2~10	×			
縦に平行方向の距離 (cm)	20	1.158 0.602	1.212 0.533	1.247 0.623	1.206 0.586	1.335 0.652	1.278 0.667	1.327 0.658	1.329 0.651	1.317 0.651	20	1.142 0.926	1.166 0.922	1.080 0.804	1.041 0.769	1.107 0.855	1.123 0.872	1.077 0.816	1.103 0.719	1.107 0.686	1.103 0.773	
	40	1.243 0.622	1.279 0.552	1.328 0.641	1.283 0.605	1.387 0.661	1.371 0.675	1.427 0.679	1.413 0.645	1.400 0.665	40	1.299 1.012	1.282 0.917	1.171 0.851	1.137 0.809	1.222 0.897	1.237 0.893	1.165 0.830	1.197 0.721	1.197 0.694	1.199 0.785	
	60	1.328 0.631	1.366 0.589	1.418 0.668	1.371 0.629	1.468 0.669	1.470 0.676	1.523 0.694	1.494 0.650	1.489 0.672	60	1.474 1.036	1.413 0.898	1.293 0.903	1.251 0.850	1.358 0.922	1.378 0.908	1.266 0.828	1.306 0.709	1.277 0.672	1.307 0.779	
	80	1.437 0.692	1.485 0.667	1.532 0.727	1.485 0.695	1.553 0.673	1.560 0.681	1.618 0.700	1.577 0.658	1.577 0.678	80	1.714 1.133	1.571 0.858	1.449 0.946	1.400 0.903	1.534 0.960	1.525 0.895	1.401 0.853	1.428 0.696	1.393 0.680	1.437 0.781	
	勾配平均	0.637	0.585	0.665	×	0.664	0.675	0.683	0.645	×	1.027	0.899	0.877	0.833	×	0.892	0.832	0.711	0.683	×		
全体	X̄=0.629 S=0.0558 V=8.9%					X̄=0.666 S=0.0188 V=2.8%					X̄=0.909 S=0.0928 V=10.2%					X̄=0.780 S=0.0892 V=11.4%						

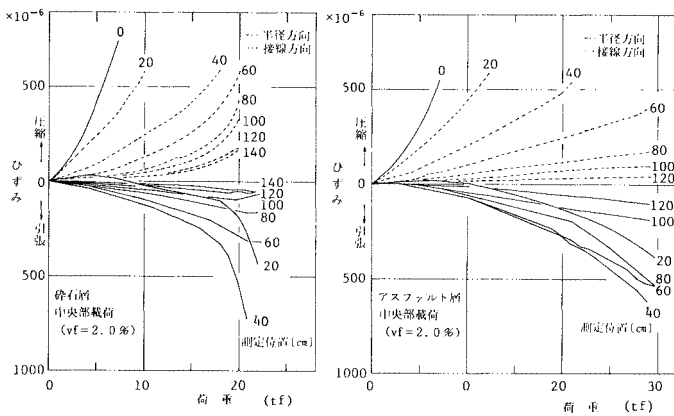


図-3 鋼繊維補強コンクリート供試版表面のひずみ

ここで、 $P$ ：載荷重、 $w$ ：たわみ、 $E$ ：地盤の弾性係数、 $\mu$ ：地盤のポアソン比、 $a$ ：接地半径

表-3の値を比較してオーバーレイシステムを考察すると、中央部載荷の場合、砕石層上供試版の荷重-たわみ直線の勾配は載荷初期段階と破壊荷重付近では明らかに違っており、地盤状態に何らかの変化が起こったことが容易に推察される。しかし、アスファルト層上供試版の場合、直線の勾配は荷重増加によってほとんど変化せず、地盤状態に大きな変化は生じなかったものと考えられる。次に、夏期に実験した縁部載荷の場合、中央部載荷の場合とほぼ同じ状態にあると考えられる載荷縁に直

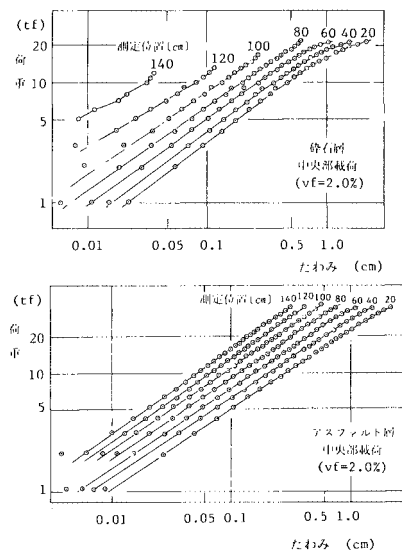
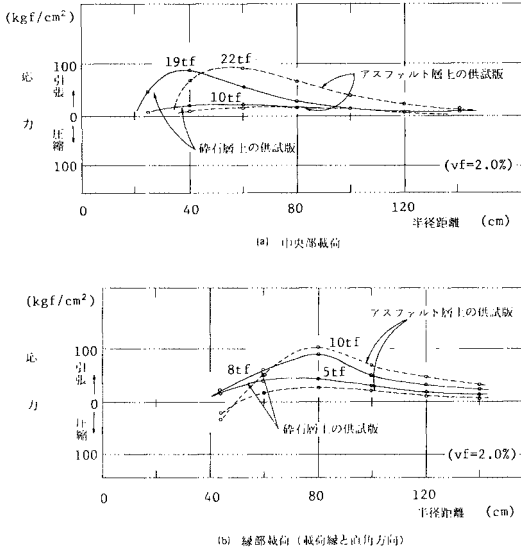


図-4 鋼繊維補強コンクリート供試版のたわみ

角な方向の各位置の荷重-たわみ直線の勾配は、砕石層上およびアスファルト層上供試版とも冬期に実験した中央部載荷の同じ荷重段階での勾配にほぼ一致する。これは、アスファルト層でも砕石層の場合と同様に、夏期と冬期で地盤状態に大きな変化がなかったものと考えられることができる。しかし、単位沈下量当たりの荷重の大きさをみると、砕石層上供試版では中央部載荷と縁部載荷の



図—5 鋼繊維補強コンクリート供試版の半径方向の応力

縁と直角な方向の場合には差はほとんど認められないが、アスファルト層上供試版では夏期に実施した縁部載荷の場合に単位沈下量当たりの荷重の大きさが低下しており、アスファルト層の stiffness の低下がうかがわれる。

したがって、既設のアスファルト舗装を支持層とするオーバーレイシステムでは、載荷重の大小や季節によってその設計手法を変える必要はなく、季節などの違いによってアスファルト層の stiffness の大小を考慮すればよいものと考えられる。

c) 供試版の応力分布

ひずみから計算した碎石層上およびアスファルト層上供試版の応力分布の例は、図—5 に示すようである。これらの結果によると、碎石層上とアスファルト層上供試版の応力状態には明らかな違いがあり、アスファルト層上供試版の場合には最大応力の生ずる位置が碎石層上の場合よりも大きく、また最大応力付近の応力分布の形状も緩やかなものとなっているのがわかる。

弾性床土上平板の剛比半径は式(2)によって求まる<sup>10)</sup>。

$$l = \sqrt{\frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)K}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $l$ ：剛比半径、 $E$ ：平板の弾性係数、 $\mu$ ：平板のポアソン比、 $h$ ：平板の厚さ、 $K$ ：地盤（弾性床）の支持力係数

一般に、弾性床土上の平板では、剛比半径の大きいものほど最大モーメントの生ずる位置が中心より離れ、またモーメント分布も緩やかな形状となる<sup>10)</sup>。本実験の場合、供試版の

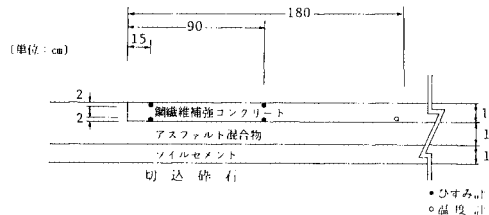
厚さと鋼繊維補強コンクリートの品質は碎石層上およびアスファルト層上供試版とも同一であるので、アスファルト層上供試版における最大応力の発生位置の変化と応力分布形状の変化は主にアスファルト層に原因があると考えられる。すなわち、鋼繊維補強コンクリートオーバーレイシステムにおけるアスファルト層はコンクリート版と一体となって挙動し、両者が複合して機能することにより剛比半径を大きくしたものと考えることができる。

3. 一般道路における載荷実験

(1) 実験概要

オーバーレイシステムにおけるアスファルト層の機能についての考え方はすでに2. で述べたとおりであり、本研究ではコンクリート平板とアスファルト層が一体となって挙動する複合版の概念を適用することにした。本章で述べる載荷実験は、その場合に必要となるアスファルト層の stiffness を求めるために実施したもので、一般道路において実施した大型ダンプトラックによる走行載荷および静止載荷実験を主な内容としている。

試験舗装の断面構成は図—6 に示すとおりで、アスファルト舗装を 15 cm 切削し、版長 50 m、幅員 3.35 m の鋼繊維補強コンクリートオーバーレイを実施したものである。使用した鋼繊維補強コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた表—4 の配合のもので、レーミクストコンクリート工場で製造し、ダンプトラックで現場に運搬し、簡易フィニッシャーで締め固めた後ただちに真空養生を実施した。鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度、弾性係数およびポアソン比の測定結果は併せて表—4 に示すとおりである。



図—6 試験舗装の断面構成

表—4 鋼繊維補強コンクリートの配合と品質

粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水・セメント比 w/c (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
					SF	W	C	S	G	混和剤
25	5±1	4±1	45	60	120	202	449	936	636	1.12

養生条件	曲げ強度 (kgf/cm²)			弾性係数 (kgf/cm²)	ポアソン比
	3	4	7		
標準養生	57.1	65.0	78.1	32.2×10 <sup>4</sup>	0.23
真空養生	58.7	67.4	70.8		

載荷の方法は、輪荷重を5トンおよび3トンに調整したダンプトラックを用い、走行載荷の場合には速度約10 km/hで埋設したひずみ計の直上を走行させ、静止載荷の場合にはダンプトラックをひずみ計の直上で静止させた。ひずみ計および温度計は、鋼繊維補強コンクリートオーバーレイを走行する荷重の載荷時間、発生ひずみ、舗装の温度などを調べる目的で、版端から25 mの図一6に示す位置に埋設した。

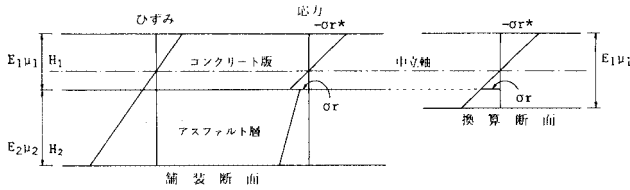
(2) コンクリート平板とアスファルト層の複合版

本研究で適用した複合版の概念は図一7に示すようであり、コンクリート版部分に生ずる応力分布と同じ応力分布が得られるように、2層の厚さを1層のみよりなる場合の厚さに等値換算するものである<sup>11)</sup>。この場合、上下層境界面での滑りの存在が複合性を考えるうえで重要となるが、2.で述べた載荷実験によればコンクリート版とアスファルト層の付着はきわめて良好であり、境界面での滑りは特になく思われた。

式(3)は、複合版厚を求める式である。

$$H^* = \frac{1 + 2\alpha\beta + \alpha\beta^2}{1 + \alpha\beta} H_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha = \frac{E_2(1 - \mu_1^2)}{E_1(1 - \mu_2^2)}, \quad \beta = \frac{H_2}{H_1}$$



図一7 複合版の概念

ここで、 $H^*$ ：複合版厚、 $E_1, E_2$ ：コンクリート版とアスファルト層の弾性係数あるいはスチフネス、 $\mu_1, \mu_2$ ：コンクリート版とアスファルト層のポアソン比、 $H_1, H_2$ ：コンクリート版とアスファルト層の厚さ

(3) アスファルト舗装のスチフネス

アスファルト混合物のスチフネスは、一般に温度、載荷時間、使用アスファルトの性質および混合物の配合によって影響を受ける<sup>12)</sup>。したがって、本載荷実験では鋼繊維補強コンクリート版に埋設された上下のひずみ計の測定値から実際の効果としてのアスファルト層のスチフネスを求めることにし、次に載荷時間を求めることのできる走行載荷実験の場合についてはVan der Poelらの方法<sup>13)</sup>に従って求めた計算結果も比較することにした。

上下ひずみの差から求めた複合版厚とアスファルト層のスチフネスは表一5に示すようである。アスファルト層は、走行載荷の場合約2~5 cm程度、静止載荷の場合約0.3~2 cm程度鋼繊維補強コンクリートの版厚を増したのと同様な効果を示した。また、これに対応したアスファルト層のスチフネスは、走行載荷の場合、冬期で約45 000 kgf/cm<sup>2</sup>、夏期で約20 000 kgf/cm<sup>2</sup>程度となり、静止載荷の場合では冬期に約8 000 kgf/cm<sup>2</sup>、夏期に約1 000 kgf/cm<sup>2</sup>程度となった。アスファルト混合物のスチフネスは多くの研究者達が種々の方法によって求めている<sup>12), 13)</sup>が、オーバーレイシステムにおける実際的な効果としてのスチフネスがここで得られたものとする。また、この値を用いて求めた一連の供試版載荷実験の結果は、5.の基本設計式の検討でも用いられている。

次に、載荷速度を求めることのできる走行

表一5 走行荷重および静止荷重載荷実験結果

実施月	荷重 (tf)	ひずみ指示値 $\times 10^{-6}$				複合版厚 (cm)		複合版厚を算出するために必要なアスファルト層のスチフネス (kgf/cm <sup>2</sup> )	アスファルト層				
		中央	上側下側	縁	上側下側	中央	縁		温度 (°C)	セグメントによるS <sub>St</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	0式によるS <sub>St</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	0式による複合版厚 (cm)	
走行荷重載荷	3月	3	-16.5	/	-27.5	18.0	17.1	15000	37	8.4	500	26000	18.2
			10.5	/	20.0		~						
	8月	5	-19.0	/	-32.0	17.2	16.9	25000					
			14.0	/	24.0								
1月	5	-39.2	/	-91.5	17.1	17.6	17000 ~ 21000	PI -0.49	32.7	10	1300	15.2	
		28.1	/	60.8									
静止荷重載荷	3月	3	-11.1	/	-36.1	20.9	19.0	35000 ~ 54000	50°C	4.9	1200	47000	20.3
			4.2	/	19.1								
	8月	5	-29	/	-36.5	16.7	-	5000					
			22.2	/	44.5		~						
1月	5	-47.0	/	-81.2	16.8	15.6	13000	注) アスファルト層のスチフネスは載荷時間0.2秒 針体積率C <sub>v</sub> = 0.80 として求めた。					
		25.4	/	74.2									
8月	5	-80.0	/	-110.0	15.3	15.3	1000 ~ 2000						
		76.0	/	105.0									
1月	5	-35.0	/	-54.8	16.2	15.8	6000 ~ 9000						
		29.0	/	48.0									

荷重実験の場合、アスファルト層は鋼繊維補強コンクリート版の下面で測定した温度変化とひずみ変化を有していると考えた。アスファルトの性状は現場切取供試体からアスファルトを回収して調べ、Van der Poelらのノモグラムを用いてアスファルトのスチフネスを求めた。また、アスファルト混合物のスチフネスは式(4)から求めた。

$$S_{mix} = S_{bit} \left( 1 + \frac{2.5}{n} \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n \dots\dots\dots (4)$$

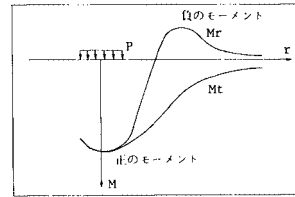
$$n = 0.83 \log(4 \times 10^5 / S_{bit})$$

ここで、 $S_{mix}$ ：アスファルト混合物のスチフネス、 $S_{bit}$ ：アスファルトのスチフネス、 $C_v$ ：骨材体積率

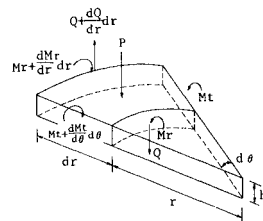
このようにして求めたアスファルト層のスチフネスおよび複合版厚は併せて表一五に示している。前述の結果と比較すると、夏期の場合に差が生じているものの、冬期および春期の場合はよく一致している。まだ多くの場合について検討する必要はあるが、車両の走行する実際のオーバーレイではVan der Poelらの方法によってアスファルト層のスチフネスを求めるのも有効な手段であるように思われる。

#### 4. 鋼繊維補強コンクリートオーバーレイ厚の設計式

舗装が損傷を受けて崩壊してゆく場合、どの時点まで破壊として定義するかはきわめて難解な問題である。これは、走行する交通に対して快適な走行性が満足されるなら舗装は良好な状態にあるとする立場とコンクリート版にひびわれが生じたなら舗装は破壊したとする立場が必ずしも同時に成立しないからである。2. に述べた供試体における荷重実験の結果をもとに鋼繊維補強コンクリートオーバーレイシステムの破壊をみると、結果はいずれも鋼繊維補強コンクリートがひびわれ発生に対して非常に大きな抵抗性を持ち、ひびわれ発生後も優れたひびわれ抑制能力と大きな耐荷力を有していることを示している。また、既設のアスファルト舗装を支持層とするオーバーレイの場合には、そのアスファルト層も耐久的な荷重支持層として期待できることを示している。したがって、本研究では優れた鋼繊維補強コンクリートの特性を利用することを考え、オーバーレイシステムの破壊を次のように定めた。すなわち、弾性床と平板に生ずる一般的な曲げモーメントの図一八を参考にして、負のモーメントによってオーバーレイ表面にひびわれが生ずる時点まで破壊とした。正のモーメントによって生ずるひびわれは、鋼繊維によって連続が保たれ、せん断力の伝達と版の平滑な連続性が確保できると考えられ、また舗装本来の目的であるサービス性からもこのひびわれは許容できるものと考えた。



図一八 コンクリート版に生ずるモーメント



図一九 微小要素のつり合い

本研究では、1960年代に Meyerhof によって提案された降伏線法<sup>14)</sup> (yield-line theory) をもとに、上述のような破壊に対する基本設計式を考えた。この降伏線法の概要は以下のとおりである。

荷重中心から距離  $r$  にある微小要素に作用する力の状態を考えると図一九のようである。要素に働く垂直力およびモーメントのつり合いを考え、さらに高次の微量を無視すると、次の2つのつり合い方程式が得られる。

(垂直力)

$$p \cdot r + Q + r \frac{dQ}{dr} = 0 \quad \therefore \frac{d(rQ)}{dr} = -r \cdot p \dots\dots\dots (5)$$

(モーメント)

$$r \cdot Q + M_t - r \frac{dM_r}{dr} - M_r = 0$$

$$\therefore \frac{d(r \cdot M_r)}{dr} = M_t + r \cdot Q \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $p$ ：荷重強度、 $Q$ ：単位長当たりのせん断力、 $M_r$ 、 $M_t$ ：半径方向および接線方向の単位長当たりのモーメント

さらに、設計式を簡略化するために、版は Winkler 基礎に支えられており、たわみ形状も線形であると仮定すると式(7)、(8)が得られる。

$$p = -k \cdot w \dots\dots\dots (7)$$

$$w = (1 - r/t) w_0 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $k$ ：地盤係数、 $w$ ：版のたわみ、 $t$ ：たわみを線形とした場合の円錐の半径、 $w_0$ ：荷重中心のたわみ

また、破壊は版に生ずる負のモーメントによってひびわれが生ずる状態であり、 $r = b$  で  $M_r = -M_0$  および  $M_t = M_0$  ( $M_0$ ：版の抵抗モーメント) が破壊条件となる。したがって、ランキンの降伏条件を用い、式(5)、(7)、

(8)から降伏条件の範囲内で式(6)を積分して半径方向の曲げモーメント,  $M_r$  を求めると式(9)のようになる。

$$M_r = M_0 + \frac{k w_0 r^2}{6} \left(1 - \frac{r}{2t}\right) - \frac{k w_0 t^3}{6} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{c}{r}\right) \dots (9)$$

また, Losberg によれば<sup>15)</sup>, ひびわれは  $r=b$  の位置に生ずることから,  $r=b$  で  $M_r$  は最大とならなければならず, 式(9)を整理しなおすと次のように破壊たわみを求める式が得られる。

$$w_0 = \frac{12 M_0}{k b^2 \left\{ 3 \left(\frac{b}{c} - 1\right) - \frac{2b}{t} \left(\frac{9b}{8c} - 1\right) \right\}} \dots (10)$$

破壊荷重は式(10)に式(7)および(8)を代入することにより次のように与えられる。

$$P = k \cdot \pi \cdot t^3 \cdot w_0 / 3 \dots (11)$$

さらに, 式(10)と(11)から, 厚さの設計式は次のようになる。

$$H^* = \left[ \frac{3 \cdot P \cdot b^2}{2 f_b \pi \cdot t^2} \left\{ 3 \left(\frac{b}{c} - 1\right) - \frac{2b}{t} \left(\frac{9b}{8c} - 1\right) \right\} \right]^{1/2} \dots (12)$$

ここで,  $f_b$ : 鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度

### 5. 基本設計式の検討

鋼繊維補強コンクリートオーバーレイに関する基本設計式として式(10), (11)および(12)を得たが, 実際の運用にあたっては式の妥当性が確認されていなければならない。本章では, 2. に示した一連の荷重実験の結果をもとに式の適用性を検討する。

基本設計式にはまだ定まっていない定数値  $k$ ,  $b$ ,  $c$  および  $t$  があり, これらの定数値はオーバーレイを設計する際に必要である。設計式の実用性からこれらの定数値は簡単な現場試験などから測定されるものでなければならない。本研究では, 鋼繊維補強コンクリート版あるいはアスファルト層との複合版の剛比半径と対比させて求める方法を提案する。定数値  $b$ ,  $c$  および  $t$  は版のたわみ形状に強く影響を受けるので, 剛比半径と関連して求めることには十分合理性があると思われる。

#### (1) 定数値の決定

##### a) 数値 $k$

$k$  は地盤係数で, 表一(b)断面における平板荷重試験から求めることができると考えていたが, 供試版に関する一連の荷重実験の結果は版の相当大きなたわみを示した。したがって, 0.125 cm 程度の沈下から求める通常地盤支持力係数は数値  $k$  として適当でなく, 版

表一6 地盤係数  $k$  の値

(kgf/cm<sup>3</sup>)

供試版No	砕石層								アスファルト層							
	中央部荷重				縁部荷重				中央部荷重				縁部荷重			
	1	2	3	4	9	10	11	12	5	6	7	8	13	14	15	16
$k_z$	13.8	15.5	15.4	15.7	20.2	16.9	11.9	16.3	9.6	7.6	7.8	6.8	6.2	4.1	4.4	5.0
$k$	1.0	1.1	1.1	1.1	1.4	1.2	0.8	1.2	2.0	1.6	1.6	1.4	1.3	0.9	0.9	1.0
補正式	$k = k_1 \frac{k_2}{k_0}$				$k_0$ : 路盤の支持力係数 $k_2$ : 試験位置での路盤の支持力係数								$k_1$ : 路床の支持力係数			

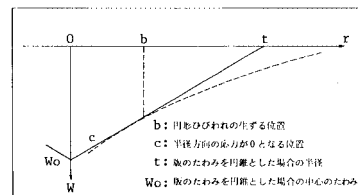
のたわみが大きい場合は路床の影響がかなり大きくなること, 地盤の変形と地盤支持力係数および外力の間には式(7)のようなつり合いがあることなどを考慮して, 数値  $k$  は路床の平板荷重試験の結果から平均的に 1.1 kgf/cm<sup>3</sup> とした。また, 数値  $k$  は場所ごとの変動を反映しなければならず, 平板荷重試験の結果を表一6に示すように補正して検討に用いた。

##### b) 数値 $b$ , $c$ および $t$

数値  $b$  は版に生ずる負の曲げモーメントが最大となる点であって, 版表面の半径方向の応力分布図と円形ひびわれの発生位置から求めることができる。また, 数値  $c$  は破壊たわみ式(10)を求める際の境界点で,  $0 < c < b < t$  で規定される点である。今回の場合, 連続な点として半径方向モーメントが0となる点を選び, 応力分布図で応力が0となる点を採用した。このような点を選定すれば, 版の剛比半径との関係も明確となり, 数値  $b$  との関係からも好都合であると思われた。数値  $t$  は図一10に示すように, 版のたわみ線とたわみが0である線との交点である。この数値  $t$  は, 実際には表一3に示す荷重-たわみ直線の勾配および単位沈下量当たりの荷重から  $b$  点および  $c$  点のたわみを推定して求めるもので, 荷重が増加すると変化する。しかし, 各荷重段階でこの値を求めてみるとだいに一定値に漸近し, 特に破壊に近い状態では荷重を増加してもほとんど変化しないことが明らかとなった。

このようにして求めた定数値と剛比半径との比は表一7に示すようである。数値  $b$ ,  $c$ ,  $t$  の剛比半径に対する割合は, 支持層と荷重条件が決まればほぼ一定となり, 基本設計式を十分簡略できるものと思われる。

#### (2) 破壊たわみおよび破壊荷重の計算値と実測値



図一10 供試版のたわみ変形



表一七 係数  $b, c, t$  の値

供試版 No	砕石層								アスファルト層							
	中央部 載荷				縁部 載荷				中央部 載荷				縁部 載荷			
	1	2	3	4	9	10	11	12	5	6	7	8	13	14	15	16
剛比 $\frac{E_c}{E_s}$	27.5	26.6	26.6	25.9	25.4	26.6	28.5	26.7	40.5	43.1	42.7	44.4	35.2	38.9	38.0	37.1
係数 $b$	41.0	34.0	36.0	38.0	70.0	70.0	78.0	69.0	65.0	60.0	60.0	60.0	76.0	82.0	80.0	80.0
$b/R$	1.5	1.3	1.4	1.5	2.8	2.6	2.7	2.6	1.6	1.4	1.4	1.4	2.2	2.1	2.1	2.2
平均	1.4				2.7				1.4				2.2			
係数 $c$	25	20	20	20	36	40	40	42	35	32	32	32	42	50	49	45
$c/R$	0.9	0.75	0.75	0.75	1.4	1.5	1.4	1.6	0.86	0.74	0.75	0.72	1.2	1.3	1.3	1.2
平均	0.75				1.5				0.75				1.3			
係数 $t$	83.6	89.2	95.1	88.4	127.7	144.7	127.4	146.6	112.7	111.5	109.9	116.1	121.2	128.8	124.3	135.9
$t/R$	3.0	3.4	3.6	3.4	5.0	5.4	4.5	5.5	2.8	2.6	2.6	2.6	3.4	3.3	3.3	3.7
平均	3.4				5.1				2.6				3.4			

表一八 破壊たわみおよび破壊荷重の実測値と計算値

(荷重:  $tf$   
たわみ:  $cm$ )

供試版 No	砕石層								アスファルト層								
	中央部 載荷				縁部 載荷				中央部 載荷				縁部 載荷				
	1	2	3	4	9	10	11	12	5	6	7	8	13	14	15	16	
破壊たわみ	実測	0.97	1.71	1.70	1.64	0.53	0.62	0.76	0.54	1.24	1.09	1.20	1.13	0.55	0.84	0.99	0.94
	計算	1.08	2.45	1.76	1.67	0.46	0.66	0.81	0.58	0.69	1.29	1.27	0.95	0.57	0.99	0.94	0.74
	誤差(%)	111.3	143.3	103.5	101.8	86.8	106.5	106.6	107.4	55.6	118.3	105.8	84.1	103.6	117.9	94.9	78.7
破壊荷重	実測	11.0	17.0	19.2	20.3	7.0	9.0	8.0	7.0	20.9	18.7	21.9	21.0	7.5	9.4	9.8	9.6
	計算	9.9	23.0	16.6	15.0	5.6	7.6	7.1	6.8	16.1	27.1	26.1	18.5	5.5	8.1	7.4	6.2
	誤差(%)	90.0	135.3	86.5	73.9	80.0	84.4	88.1	97.1	77.0	144.9	119.2	88.1	73.3	86.2	75.5	64.6

4. の式 (10) および (11) によって求めた供試版の破壊たわみおよび破壊荷重は表一八に示すようであり、破壊たわみおよび破壊荷重の実測値と比較すると、まず破壊たわみの場合、両者の値はかなりよく一致しているのがわかる。これを計算値/実測値の適合率で示すとほぼ 85~115% の範囲にある。適合率の悪い 2 例 (143.3%, 55.6%) についてはその原因が明らかで、前者は採取した供試体の強度、後者は供試版のたわみ性状に主な原因がある。

破壊荷重の場合、計算値は総体的に実測値よりも小さくなっており、適合率でみるとおおよそ 75~90% の範囲である。破壊荷重を求める式 (11) は線形的なたわみ挙動を仮定しているが、供試版の実際のたわみが対数線形的な挙動であることなどの影響が現われているものと思われる。したがって、実際のたわみ挙動を計算に組み込むことができるなら破壊荷重の計算値と実測値はさらに精度よく一致するであろう。事実、載荷中心の荷重-たわみ線を表一三から推定して破壊荷重を求めると 10% 程度適合率が向上する。

式 (10), (11) および (12) が含む誤差についてさらに考察する。路床・路盤の支持力、鋼繊維補強コンクリ-

ートの強度、さらに測定誤差も含めた式 (10) に影響を及ぼすすべての要因が正規分布の変動を有しているものとするならば、本研究で求めた計算値/実測値で表わす適合率もまた正規分布の変動を有しているものと考えられる。ここで、破壊荷重を求める式は線形的なたわみ挙動の仮定による影響が大きいため、たわみの適合率に着目してその変動程度を調べると、適合率の平均は 1.019 (101.9%) で変動係数は 11.5% となり、式 (10) はかなり精度のよい推定式であることがわかる。すなわち、変動係数に応じた適切な安全率とオーバーレイシステムを構成する各材料の疲労をさらに考慮することにより、式 (10), (11) および (12) を用いて鋼繊維補強コンクリートオーバーレイの設計が可能であると考えられる。

## 6. 結 論

供試版と一般道路における実際のオーバーレイに載荷実験を実施し、既設アスファルト舗装を支持層とする鋼繊維補強コンクリートオーバーレイシステムの有効性、設計法などを検討した。本研究で得られた成果を要約すると以下のようである。

- (1) 供試版における載荷実験の結果、鋼繊維補強コ

ンクリートはひびわれ発生に対して非常に大きな抵抗性をもち、ひびわれ発生後も優れたひびわれ抑制能力と大きな耐荷力を有していることを示した。

(2) 本研究が対象とするオーバーレイシステムにおけるアスファルト層は、鋼繊維補強コンクリート版と一体になって荷重を支持し、鋼繊維補強コンクリート版の厚さを増加させた場合と同等の効果を示した。したがって、オーバーレイシステムとしてアスファルト層のステフネスを適切な方法で求めることにより、アスファルト層とコンクリート版の複合版の概念を適用して鋼繊維補強コンクリートオーバーレイを設計することができることを示した。

(3) 鋼繊維補強コンクリート供試版のひびわれ状況、たわみ性状などの結果から、負のモーメントによって版表面にひびわれが発生した状態をもってオーバーレイシステムの破壊とみなせることを示した。さらにこのような破壊状況に対するオーバーレイシステムの設計方法として、降伏線法による基本式(10)、(11)、(12)が適用できることを示した。

(4) 基本設計式から求めた鋼繊維補強コンクリート版の破壊たわみおよび破壊荷重を実測値と比較して、設計式の妥当性、実用性を確認した。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、終始有益なご助言とご指導を頂いた東京大学生産技術研究所、小林一輔教授ならびに東北大学工学部、福田正教授に深甚の謝意を表する次第です。また、本研究の主要な部分を成す走行載荷実験では、建設省中部地方建設局名古屋国道工事々務所の白村所長、丸山工務課長をはじめとする事務所の皆様および中部技術事務所の皆様に多くのご指導を頂きました。ここに改めて感謝の意を表する次第です。

#### 参 考 文 献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート一特性と応用一、オーム社、1981年。

- 2) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー50号、土木学会、1983年。
- 3) 伊吹山四郎・國分修一・大島朋之：鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労特性、第1回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.421~424、1979年。
- 4) 小林一輔・井上武美：鋼繊維補強コンクリートによる舗装、コンクリート工学、Vol.14、No.6、pp.50~54、1976年。
- 5) 奥野正和・國分修一・桜井 浩・伊藤 毅：鋼繊維補強コンクリートのオーバーレイへの適用、道路建設、No.354、1977年。
- 6) 伊吹山四郎・瀬戸 薫・國分修一：薄層鋼繊維補強コンクリート舗装による路面改良の実施例、舗装、Vol.15、No.5、1980年。
- 7) Design of concrete overlays for pavements, ACI committee 325, Journal of ACI, Aug., 1967.
- 8) Guide to concrete resurfacing designs and selection criteria, publication EB 087, 01 p, Portland Cement Association, 1981.
- 9) Hannant, D. J. : Fibre cements and fibre concretes, John Willey & Sons, pp.182~197, 1978.
- 10) Westergaard, H. M. : Stress in concrete pavements computed by theoretical analysis, Public road, Vol.7, No.2, 1926.
- 11) 福田 正：コンクリート舗装の荷重分散機構に関する研究、土木学会論文報告集、No.242、pp.63~72、1975年。
- 12) Finn, F. N. : Factors involved in the design of asphaltic pavements surfaces, Highway Research Board, National cooperative highway research program report 39, pp.6~24, 1967.
- 13) Yoder, E. J. and Witzczak, M. W. : Principles of pavement design, John Willey & Sons, pp.269~272, 1975.
- 14) Meyerhof, G. G. : Load-Carrying capacity of concrete pavements, Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol.88, SM 3, pp.89~116, June, 1962.
- 15) Losberg, A. : Pavements and slabs on grade with structurally active reinforcements, Journal of ACI, Vol.75, pp.647~657, Dec., 1978.

(1983.8.31・受付)