

コンクリート舗装の目地部における荷重伝達の 評価法について

Evaluation Method for Joint Load Transfer Efficiency in Concrete Pavements

中川 伸一* 川村 和幸** 笠原 篤*** 西沢 辰男****
Shinichi NAKAGAWA, Kazuyuki KAWAMURA,
Atsushi KASAHARA and Tatsuo NISHIZAWA

本報文は、1993年4月に開催された FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND REHABILITATION における発表文を和訳加筆し、紹介するものである。

コンクリート舗装の目地は舗装版の不連続点であり、コンクリート舗装の設計にあたっては、目地部分の力学的評価が重要となる。コンクリート舗装は通常、目地や縁部など、交通荷重による負担が集中する位置のコンクリートの疲労度を推定して設計される。フォーリング・ウェイト・デフレクトメータ (Falling-Weight-Deflectometer, 以下, FWD) は非破壊試験機の一つであり、舗装体のたわみを迅速、かつ簡便に測定でき、目地の力学的挙動の推定に有用なものである。従来から、目地部の舗装のたわみから算出される荷重伝達率 (Ef) により、目地の支持力が評価されてきた。しかし、荷重伝達率はコンクリートの目地の力学的挙動を直接的に表わすものではない。それは、舗装のたわみ量の比から指標を算出したものであり、力学的なモデルに基づいたものではなかったからである。つまり、交通荷重の下での目地の挙動を力学的に評価するためには、目地を適切にシミュレートした力学的モデルの導入が必要となる。力学的モデルの導入により、コンクリート版や路盤に生じる応力の大きさを推定し、さらに、疲労曲線を組み合わせることにより、疲労度の推定が可能になる。

筆者らは、FWD 測定と有限要素法 (FEM) を結びつけた目地挙動の力学的解析手法を確立するために、目地を適切にシミュレートするモデルを検討した。ひびわれが生じた目地を伝わる力は、水平方向の応力と曲げモーメントは無視できるほど小さく、せん断応力だけと想定できる。そこで、目地をせん断バネに置き換えたモデルを用いた力学的構造評価法を開発した。

せん断バネモデルを用いて、目地部での FWD たわみからの逆解析により、コンクリート版および路盤の弾性係数とともにせん断バネ係数を求めた。また、コンクリート版の疲労耐性を推定するために、せん断バネ係数を変化させて、コンクリート版内の最大引張り応力および路盤に生じる最大圧縮応力を算出した。

結論として、目地の力学的挙動はせん断バネモデルでシミュレートでき、せん断バネ係

*維持管理研究室研究員 **同室長 ***北海道工業大学工学部土木工学科教授 ****国立石川工業高等専門学校土木工学科助教授

数の大きさは荷重伝達率に代わって用いることが合理的である。
《コンクリート舗装；FWD；荷重伝達率；FEM；せん断バネモデル》

The joints of concrete pavements are considered to be the links in pavement structure. When designing concrete pavements, mechanical evaluation of joints is very important. Concrete pavements are usually designed with consideration of the degree of concrete fatigue in such weak portions of the slabs as the joints and edges under exposure to traffic load. As the Falling Weight Deflectometer (FWD) is a nondestructive testing machine which can measure the deflection of a pavement slab quickly and simply, it is very useful in predicting the mechanical behavior of the joints in pavement. The effectiveness of joint supports has been evaluated so far using load transfer efficiency (E_f), which can be obtained by calculating the joint deflections in the pavement. However, the load transfer efficiency does not directly indicate the mechanical behavior of the concrete joints, because it is not a value which is obtained by using a mechanical model, but is an index value obtained by calculating its proportion to the deflection. That is to say, it is necessary to employ a mechanical model in which the joints can be properly simulated in order to evaluate the mechanical behavior of the joints under traffic load. With the mechanical model, estimations of the degree of fatigue in concrete slab and of stresses in the subbase become possible.

In order to develop a technique in which FWD measurement and the finite element method would be combined to mechanically analyze joint behavior, the authors have studied a model by which concrete joints can be properly simulated. Since the horizontal stress and the bending moment are so small and can be neglected in the joints where cracks are grown, it can be assumed that only the shearing stress is transmitted. Hence, a mechanical method for structural evaluation of joints which are replaced with shear springs has been developed.

Keywords: concrete pavement, FWD, load transfer efficiency, FEM, shear spring model.

1. はじめに

コンクリート舗装において、膨張、収縮、反りなどのコンクリート版の動きを許容し、版中に発生する応力を低減するために、種々のタイプの目地が設けられる。しかし一方で、これらの目地は構造的な弱点となる。コンクリート舗装の破壊は多くの場合、目地の部分から進行する。目地は載荷されている側の版と載荷されていない側の版の間で、応力が伝達される構造でなければならない。その目的で、スリップバーが通常用いられる。応力伝達能力が、コンクリート舗装のサービス性能に与える影響は大きい。

しかし、ローラー転圧コンクリート舗装（以

下、RCCP）の目地ではスリップバーが用いられず、無補強目地が一般的である。この無補強目地の荷重伝達能力は、目地の溝の下に生じるひびわれの幅に依存する。

RCCPを含めたコンクリート舗装では、荷重伝達能力を合理的に評価する手法を確立することが重要である。従来、荷重伝達能力は、載荷されている側の版と載荷されていない側の版のたわみの違いにより評価されてきている。

しかし、コンクリート版の荷重伝達能力がこのたわみの違いで的確に評価されているか疑問。荷重伝達率は目地の力学的挙動を直接表わしてはいないといえる。そこで、目地の挙動

を力学的に評価しようとするとき、力学的なモデルを導入し、目地を適切にシミュレートする必要がある。

すなわち、交通荷重により目地部分のコンクリート版や路盤に発生する応力を正確に計算するためには、力学的モデルの確立が是非とも必要になる。

本研究では、目地を適切にシミュレートした力学的なモデルを構築する目的で、以下のような事項を検討した。

- ① RCCP の試験道路の建設
- ② 目地部での FWD によるたわみ測定
- ③ たわみからの荷重伝達率の算出
- ④ せん断バネモデルの提案
- ⑤ FWD たわみからの逆解析によるせん断バネ係数の決定
- ⑥ せん断バネモデルを用いた目地部近傍の応力計算

2. 木古内試験舗装

木古内試験舗装は 1989 年 7 月に北海道内の国道に建設され、10 月に供用が開始された。試験道路が建設された木古内町は図-1 に示すように北海道南部に位置し、最大凍結深さはおよそ 900 mm、最大凍結指数は約 $400^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$ である。交通荷重の量は供用開始後にポータブル軸重計により測定された。その結果、5 t 換算輪数で約 800 輪であった。

この試験道路には、通常のコングリート舗装（プレーンコングリート舗装、以下 PCP）と

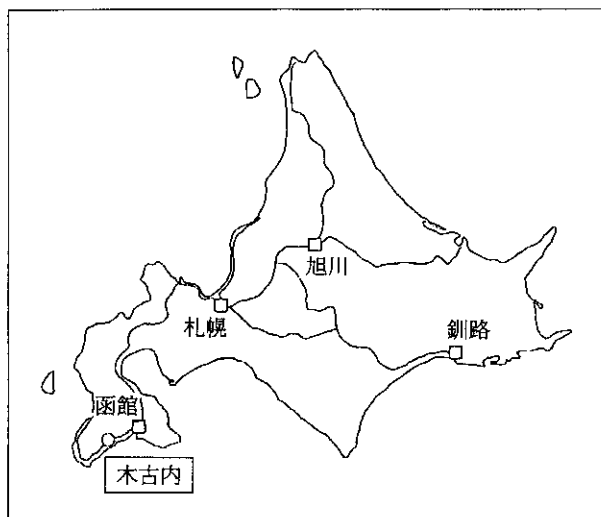


図-1 木古内試験舗装の位置

表-1 曲げ強度試験結果
(材令 28 日)

	曲げ強度 (kg/cm ²)			
	個々の値			平均値
RCCP	70.5	69.9	60.6	66.0
PCP	44.0	46.1	45.5	45.2

RCCP の両方が舗装された。コンクリートの設計基準曲げ強度はいずれも $45 \text{ kg}/\text{cm}^2$ とされた。現場切りだし供試体による材令 28 日での曲げ強度試験結果は、表-1 に示されている。RCCP の曲げ強度の平均値は約 $66 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、PCP は $45 \text{ kg}/\text{cm}^2$ であり、どちらも基準強度を満足するものであった。

試験舗装の延長および目地間隔は、図-2 に示されている。両者の舗装構造は図-3 に示さ

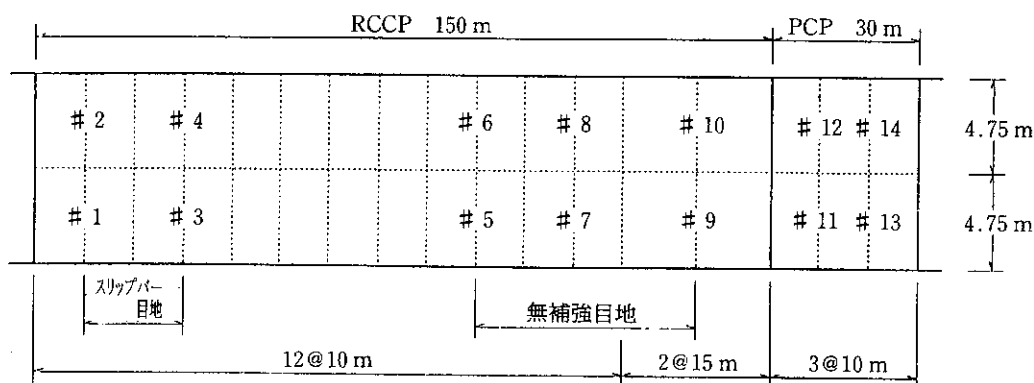


図-2 木古内試験舗装の平面画および目地間隔

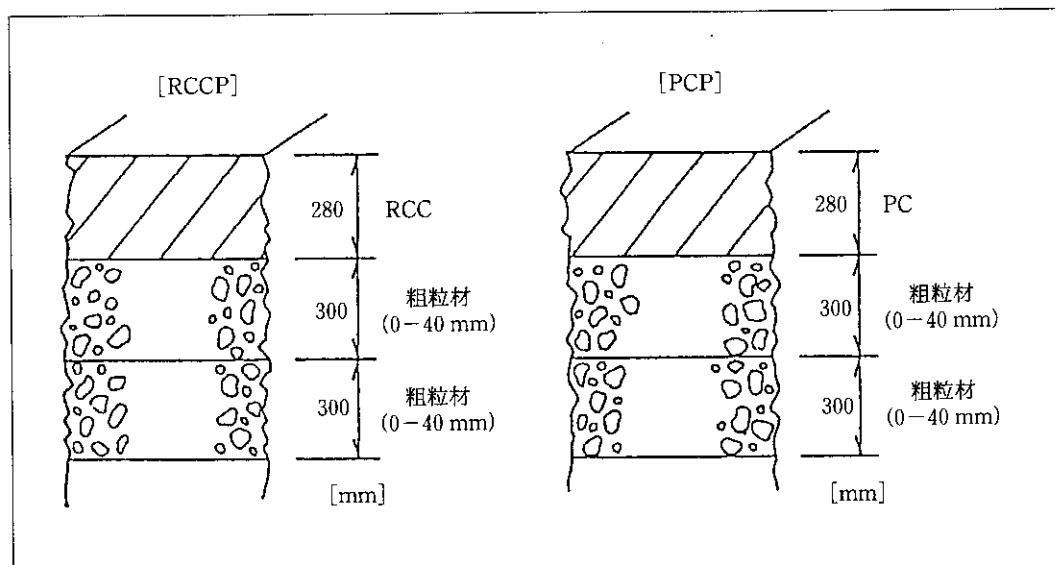


図-3 舗装構成

れているように同一であり、厚さ 300 mm の凍上抑制層を持っている。

この試験舗装の主目的は、RCCP の目地部の応力伝達を明らかにすることである。RCCP には無補強目地とスリップバー目地の両方が設置され、PCP にはスリップバー目地が設置された。

RCCP における無補強目地はコンクリート

版の上面から深さ 70 mm、幅 8 mm の溝をカッターにより切削する方法で設置された。このようにして設置した切削溝の下部分のコンクリート版には、舗設後にひびわれが生じる。ひびわれが生じた後、せん断力の伝達は、ひびわれ面の骨材のかみ合わせのみによることとなる。RCCP におけるスリップバー目地に用いられた鉄筋は長さ 700 mm、直径 28 mm であり、

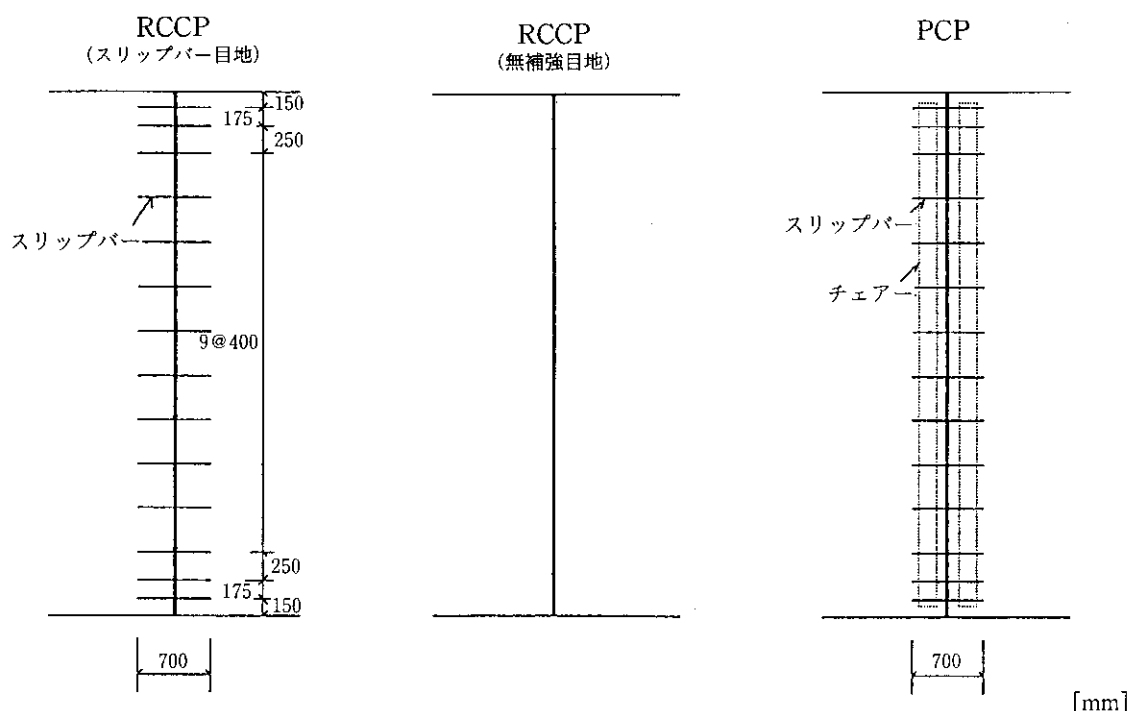


図-4 目地の平面画

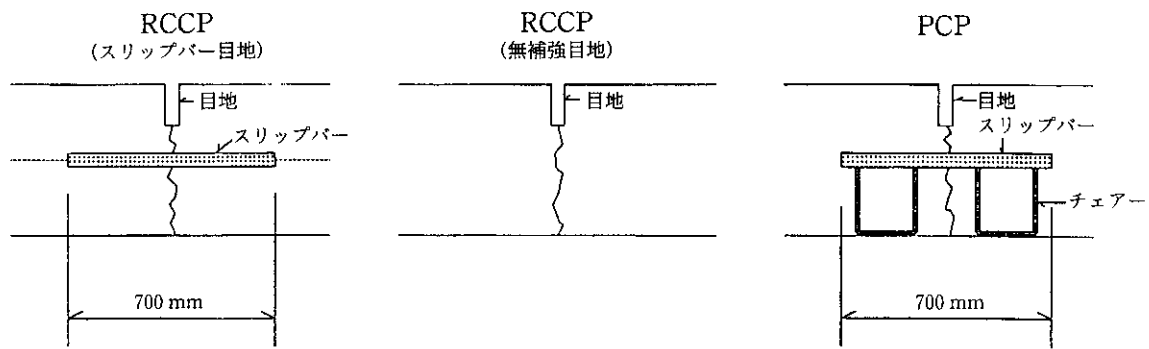


図-5 目地の断面図

片側半分 (350 mm) にはアスファルト乳材が塗布されている。スリッパバー目地を設置する区間の RCCP は、鉄筋を設置するために厚さ 140 mm の 2 層として施工した。

PCP のスリッパバー目地の構造も RCCP と同じである。目地間隔は 10 m を標準とし、

RCCP の一部に 15 m を設けた。目地の詳細は、図-4, 5 に示されている。

3. FWD によるたわみ測定

目地部のひびわれの調査のため、1989 年から 1991 年までの毎年 11 月に FWD によるたわみ

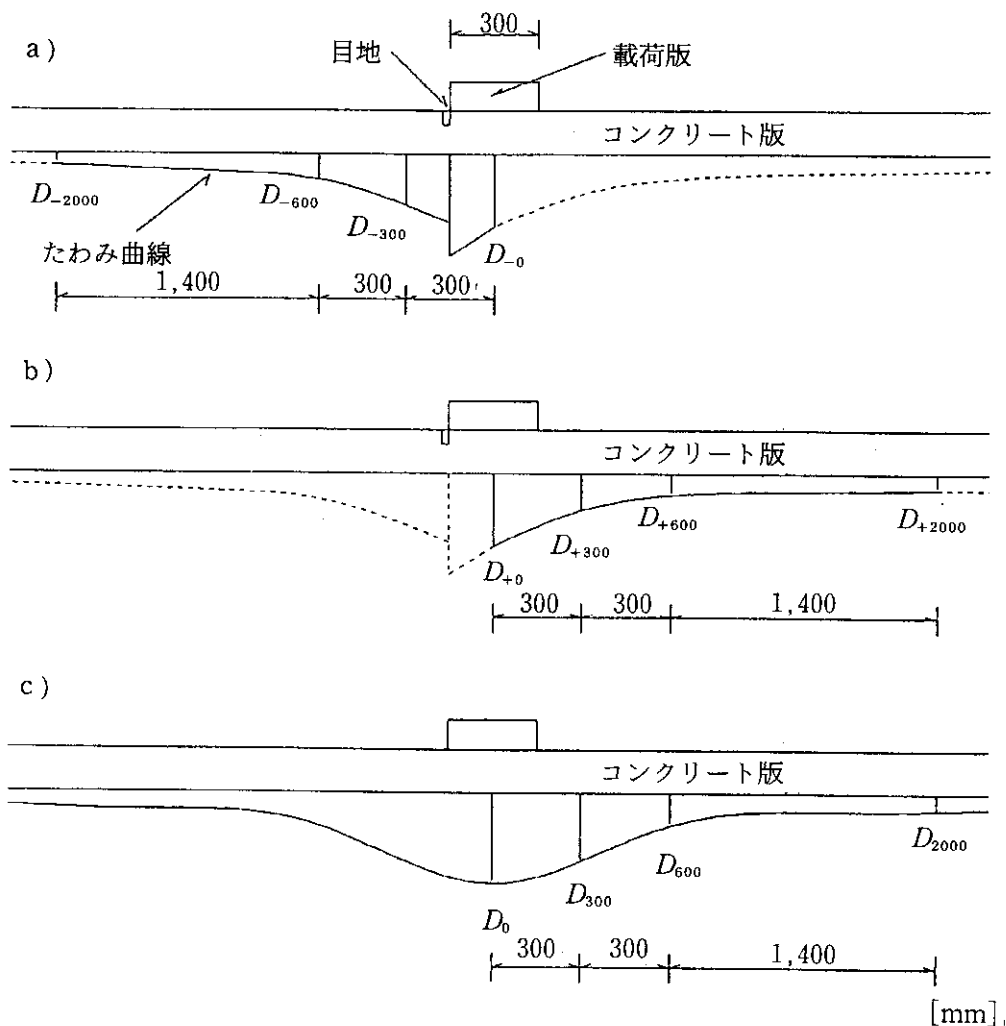


図-6 たわみ曲線

測定を行った。

FWD は舗装表面に重錘を落下させ、表面の複数の点のたわみ量を測定するものである。載荷板の直径は 300 mm であり、落下荷重はおよそ 5,000 kg である。たわみ量測定位置は載荷板の中心から 0, 300, 600, 2,000 mm とした¹⁾。

目地部分のたわみ測定においては、図-6 に示すように載荷板の縁が目地に接するように載荷版を設置し、載荷されている側の版と載荷されていない側の版のたわみを測定した²⁾。

4. 荷重伝達率

応力やたわみの伝達を妨げるひびわれが生じていない場合は、FWD 載荷によるたわみ曲線は図-6 c) に示されているように載荷板の中心に対して対称となる。しかし、目地部分にひびわれが生じていて、応力の伝達が十分でない場合は、たわみ曲線は図-6 a), 6 b) に示されるようにひびわれの位置において不連続になる。また、ひびわれが生じていても、応力の伝達が良好であれば、その中間的な曲線となる。

荷重伝達率による評価法は、この特性に着目し、目地付近のたわみ量の比の違いから、目地での力の伝達の程度を評価する手法である。荷重伝達率 (Ef) は、載荷されている側の版上で

目地から 150 mm 離れた位置におけるたわみ量と、載荷されていない側の版上で目地から 150 mm 離れた位置におけるたわみ量から求められる。その計算式は、式-(1)に示されている。

$$Ef = \frac{D_{-300}}{(D_0 + D_{-300})/2} \times 100 [\%] \quad \cdots (1)$$

ここで D_0 は載荷板の中心位置でのたわみ量、 D_{-300} は目地を挟んで載荷板の中心から 300 mm の位置でのたわみ量を表わす³⁾。

各目地での FWD 測定たわみ量と荷重伝達率 (Ef) は、表-2 に示されている。RCCP の無補強目地における荷重伝達率の時系列変化を図-7 に、また、スリップバー目地については図-8 に示されている。図-9 は、PCP のスリップバー目地での荷重伝達率の時系列変化を示した

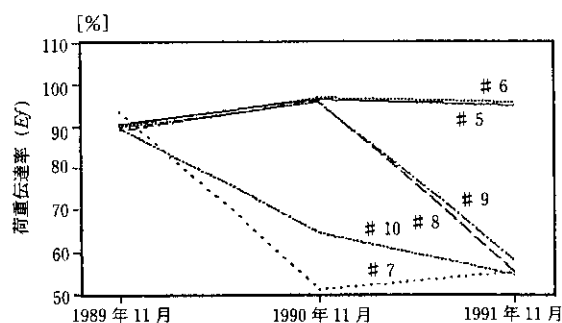


図-7 荷重伝達率の経年変化 (RCCP の無補強目地)

表-2 FWD たわみと荷重伝達率 (Ef)

舗装の種類	目地の種類	目地番号	1989年11月			1990年11月			1991年11月		
			D_0	D_{-300}	Ef	D_0	D_{-300}	Ef	D_0	D_{-300}	Ef
RCCP	スリップバー目地	# 1	127	88	81.9	81	73	94.8	82	75	95.5
		# 2	120	98	89.9	93	84	94.9	116	104	94.5
		# 3	114	95	90.9	151	114	86.0	139	107	87.0
		# 4	122	105	92.5	140	134	97.8	158	122	87.1
	無補強目地	# 5	123	102	90.7	88	82	96.5	94	85	95.0
		# 6	129	106	90.2	99	93	96.9	115	106	95.9
		# 7	123	108	93.5	218	75	51.2	236	90	55.2
		# 8	128	103	89.2	94	87	96.1	196	75	55.4
		# 9	126	103	90.0	99	91	95.8	226	92	57.9
		# 10	128	104	89.7	198	94	64.4	221	83	54.6
PCP	スリップバー目地	# 11	141	119	91.5	122	110	94.8	150	131	93.2
		# 12	118	92	87.6	107	97	95.1	139	109	87.9
		# 13	209	110	69.0	127	107	91.5	161	132	90.1
		# 14	218	121	71.4	138	111	89.2	164	119	84.1

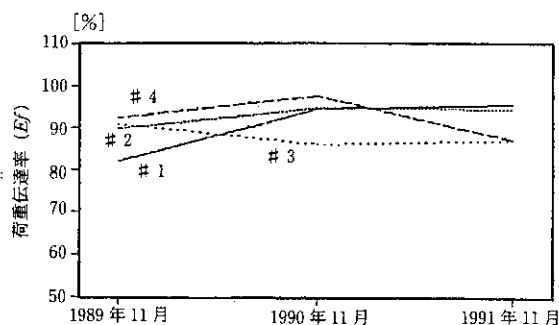


図-8 荷重伝達率の経年変化
(RCCPのスリップバー目地)

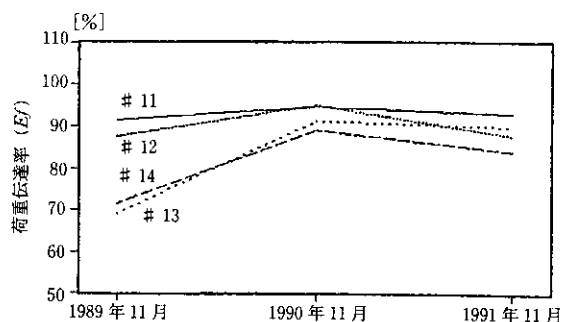


図-9 荷重伝達率の経年変化
(PCPのスリップバー目地)

ものである。

RCCPの無補強目地(図-7)においては、 E_f は供用開始後2年においても100%近くを示すものと、突然60%程度まで降下するものがあることがわかる。前者ではひびわれが発生して

おらず、後者ではひびわれが発生したものと推定できる。RCCPにおいて目地間隔10~15mの場合、供用開始後2年においても無補強目地にひびわれが生じていないものが存在することが明らかとなった。

一方、RCCP、PCPのスリップバー目地(図-8、9)においても、荷重伝達率(E_f)が低下している場合があるが、 E_f は最低でも80%程度であり、無補強目地より高い値を保っている。このことは、ひびわれが発生した後にスリップバーが荷重を伝達するために、 E_f は比較的高い値を示すと考えられる。

E_f は測定されたたわみ量の比から求められたものであり、応力やひずみなどの構造的パラメータに関する理論を伴っていないため、 E_f とコンクリート版の負担の程度を議論することはできない。したがって、たわみ測定の結果を反映させることができる適当な力学的モデルを用いて、構造パラメータに関する議論を行う必要がある。

5. セン断バネを用いた力学的モデル

荷重に対するコンクリート舗装の挙動を力学的に表現しようとするモデルは、種々提案されている。

ここでは、目地を含めたコンクリート舗装の荷重に対する挙動を表現するモデルとして平板

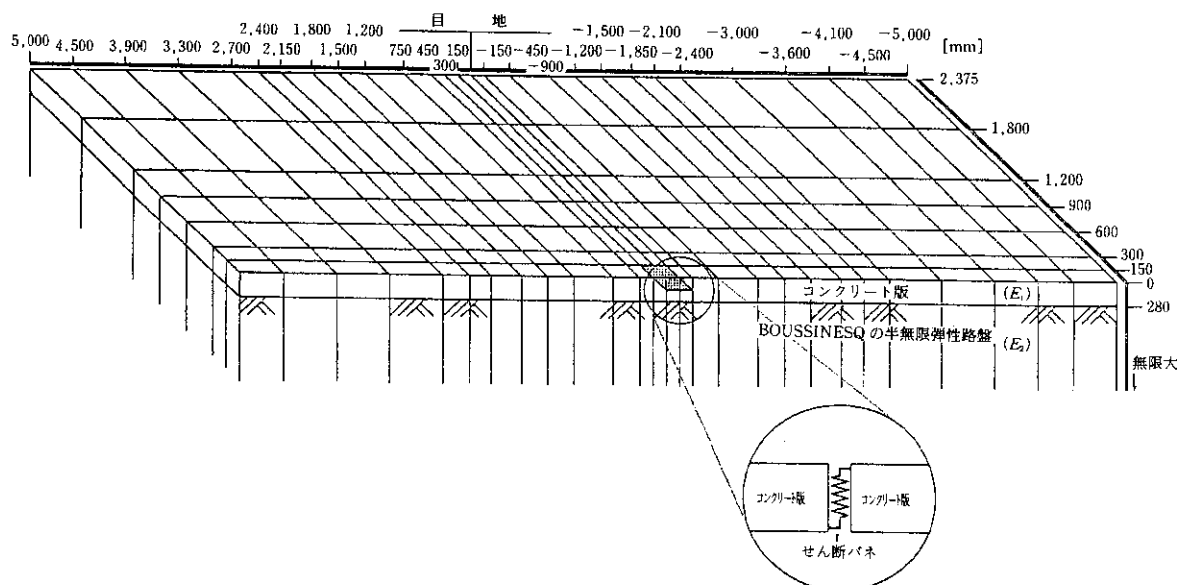


図-10 セン断バネモデル

有限要素法を採用した。コンクリート版は平板理論に基づく平板要素に分割され、路盤の影響は平板への反力として扱われる。路盤モデルとしては、Boussinesq の半無弾性体を採用した。

目地部を伝わる力はせん断力によってなされることから、目地要素をせん断バネで表わし、平板要素に接続させることとした。そのせん断バネ係数の大きさが、目地の荷重伝達能力を表わす指標となる。図-10 に、せん断バネモデルを示す^{4)~8)}。

6. せん断バネモデルを用いた逆解析

ここでは、FWD により測定された目地部のたわみから、非線形の最小自乗法を用いた逆解

析により、コンクリートの弾性係数($E1$)、路盤の弾性係数($E2$)、せん断バネ係数(Gf)を求めることとした。

木古内試験道路の5つの目地(#3, #4, #7, #11, #12)について、ワークステーションにより逆解析を行った。5つの目地で測定され

表-4 逆解析の入力データ

コンクリートのポアソン比	0.2
路盤のポアソン比	0.35
FWD 荷重	5,000 kg
コンクリートの弾性係数 ($E1$)	未 知
路盤の弾性係数 ($E2$)	
せん断バネ係数 (Gf)	

表-3 5つの目地において測定されたたわみ量

測定時期	目地 番号	たわみ 値 [μm]							FWD 荷重 [kg]
		D_{-2000}	D_{-600}	D_{-300}	D_{-0} D_{+0}	D_{+300}	D_{+600}	D_{+2000}	
1990年11月	# 3	49	101	114	151 152	123	107	48	4,998 4,998
1990年11月	# 4	50	112	134	140 141	121	102	44	4,957 4,998
1990年11月	# 7	35	66	75	218 216	182	151	62	4,998 4,998
1990年11月	#11	42	91	110	122 119	100	83	38	4,998 4,916
1990年11月	#12	40	81	97	107 108	88	75	35	4,957 5,039

表-5 逆解析結果

	1990年11月	1990年11月	1990年11月	1990年11月	1990年11月
	# 3	# 4	# 7	#11	#12
目 地 の 種 類	RCCP スリッパ 目地	RCCP スリッパ 目地	RCCP 無 補 強 目地	P C P スリッパ 目地	P C P スリッパ 目地
コンクリートの弾性係数 ($E1$) (kg/cm ²)	475,000	426,000	553,000	450,000	544,000
路盤の弾性係数 ($E2$) (kg/cm ²)	1,700	1,670	1,450	2,090	2,320
せん断バネ係数 (Gf) (kg/cm)	3,080	451,000	4.88	32,800	53,500
コンクリート版内の最大引張応力 (kg/cm ²)	13.5	9.1	16.0	10.8	10.7
平均平方誤差の平方根 (μm)	0.264	0.104	2.266	0.130	0.224

たたわみ量は表-3に、入力データは表-4に示されている。FWDの載荷板は直径300mmの円形であるが、逆解析では一辺300mmの正方形として扱った。求められたコンクリートの弾性係数($E1$)、路盤の弾性係数($E2$)、せん断バネ係数(Gf)の値は表-5に示されている。また、平方平均誤差の平方根(Root Mean Square Error)は表-5にあわせて示したように、 $0.1 \sim 2.3 \mu\text{m}$ と非常に小さい値であった。逆解析結果は表-5に示されるように、コンクリートの弾性係数($E1$)は $4.2 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、路盤の弾性係数は $1.4 \times 10^3 \sim 2.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ の範囲にある。一方、せん断バネ係数は $5 \text{ kg/cm} \sim 4.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ と目地によって大きく異なった。

7. せん断バネモデルを用いた応力計算

交通荷重下で、コンクリート版の目地部近傍に生じる曲げ引張り応力にせん断バネ係数がいかなる影響を与えるかを検討した。荷重は5,000kg、載荷範囲は一辺300mmの正方形とした。最大曲げ引張り応力が生じる場所は載荷板の中央である。コンクリート、路盤の弾性係数は、前述の逆解析結果の平均値(それぞれ $4.9 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、 $1.7 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)として、せん断バネ係数(Gf)を $1.0 \text{ kg/cm} \sim 1.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ の範囲で変化させて、曲げ引張り応力を

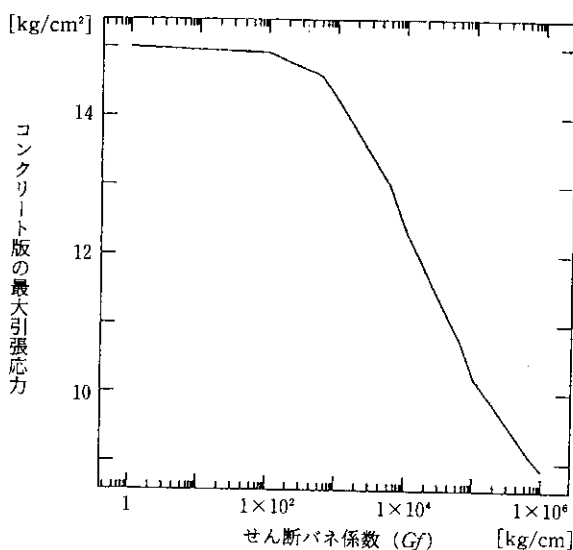


図-11 せん断バネ係数(Gf)の影響によるコンクリート版内の最大引張り応力の変化

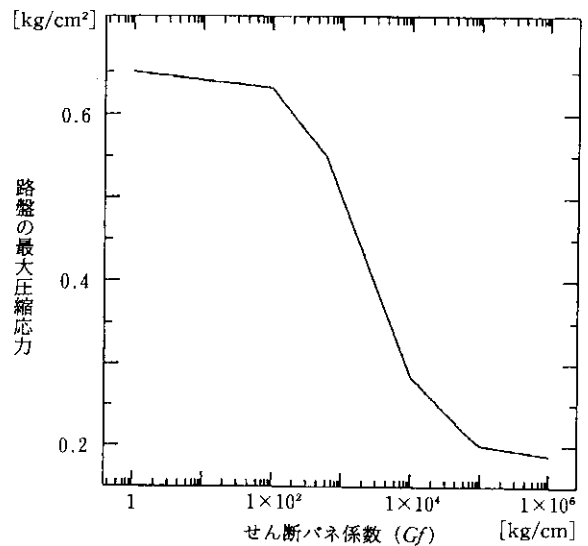


図-12 せん断バネ係数(Gf)の影響による路盤の最大圧縮応力の変化

算出した。その結果を図-11に示した。

Gf が $1.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ という値は、ひびわれが発生していない状態と想定することができ、このときの最大応力はおおよそ 9 kg/cm^2 程度であった。一方、 $Gf = 1 \text{ kg/cm}$ という値はひびわれが発生し、力の伝達が皆無に近い状態と想定でき、このときの最大応力はおおよそ 15 kg/cm^2 程度であり、前者に比較しておおよそ70%も増加することがわかる。また、 Gf が $1.0 \times 10^2 \text{ kg/cm}$ より小さい場合、最大曲げ引張り応力の大きさに変化が少ないことがわかる。

また、せん断バネ係数が路盤上面の圧縮応力にいかなる影響を与えるかを検討した。その結果は、図-12に示されている。 $Gf = 10 \times 10^6 \text{ kg/cm}$ のとき 0.2 kg/cm^2 程度であるのに対して、 $Gf = 1.0 \text{ kg/cm}$ のときは 0.7 kg/cm^2 程度と3倍以上に増加することがわかる。また、 Gf が極端に大きい場合、小さい場合には路盤の圧縮応力の変化が少ないこともわかる。

8. 結 論

本研究においては、FWDによるたわみ測定とせん断バネを用いた有限要素法解析を組み合わせ、コンクリート舗装の目地の荷重伝達能力について評価する手法を提案した。ここで得られた成果を要約すれば、次の通りである。

1) 目地を持つコンクリート舗装の荷重に対す

る挙動を説明するせん断バネモデルを提案した。

- 2) 目地部分の荷重伝達能力をせん断バネ係数の大きさによって表現した。
- 3) せん断バネ係数 (Gf) の値は $5 \text{ kg/cm} \sim 4.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ の範囲であった。
- 4) たわみの比から定まる荷重伝達率の変化はおよそ $0.5 \sim 0.9$ の範囲であるのに対して、せん断バネ係数 (Gf) はおよそ $5 \text{ kg/cm} \sim 4.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ の範囲であり、伝達状態の違いが明確に表わされた。
- 5) せん断バネ係数 (Gf) がコンクリート版内の曲げ引張り応力や路盤上面の圧縮応力に与える影響を示すことができた。

参考文献

- 1) A. Kasahara, H. Kudo and T. Sugawara: Estimation of in Situ Elastic Moduli of Pavement Structural Layer with Falling-Weight-Deflectometer Deflection Basion, Proc. of Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Volume 1, pp. 590-596, 1987.
- 2) Kasahara, A. and Yoshida, H.: Evaluation of Bearing Capacity of Asphalt Pavement with Low temperature Transverse Crackings, Proc. of Paving In Cold Areas 3, pp. 109-125, 1988.
- 3) 福手 勤, 八谷好高, 山崎英男: コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能, 港湾技術研究所報告 第21巻 第2号, pp. 207-236, 1982.
- 4) Huang, Y. H. and Wang, S. T.: Finite Element Analysis of Concrete Slabs and Its Implication for Rigid Pavement Design, HRR, Vol. 446, pp. 55-69, 1973.
- 5) Chou, Y. T. and Huang, Y. H.: A Computer Program for Slabs with Discontinuities in Layered Elastic Solids, Proc. of the 2nd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, pp. 79-85, 1981.
- 6) Tabatabaie, A. M. and Barenberg, E. J.: Finite Element Analysis of Jointed or Cracked Concrete Pavements, TRR, No. 671, pp. 11-17, 1978.
- 7) Nishizawa, T., Fukuda, T. and Matsuno, S.: A Refined Model of Doweled Joints for Concrete Pavement Using FEM Analysis, Proc. of the 2nd international Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, pp. 735-745, 1989.
- 8) Inoue, T. and Matsui, K.: Structural Analysis of Asphalt Pavement by EWD and Back-calculation of Elastic Layered Model," Proc. of the 3rd International Concrete on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp. 425-434, 1990.