

模型橋梁床版の疲労実験と余寿命診断の試み

FATIGUE TESTS OF REINFORCED CONCRETE SLAB MODELS OF A HIGHWAY BRIDGE AND AN ATTEMPT TO DIAGNOSE THEIR RESIDUAL LIVES

川口昌宏*・川口 隆**・原田浩二***・高橋三雅****

By Masahiro KAWAGUCHI, Takashi KAWAGUCHI,
Kohji HARADA and Mitsumasa TAKAHASHI

The authors have been studying the damage of RC slabs of bridge by 1/10 scale model made of microconcrete under a wheel running load. The relation between the magnitude of the wheel load and number of cycles to failure (*S-N* curve) were obtained. They made clear the failure mechanism of RC slab under a wheel running load, and investigated the effect of the differences of curing condition and loading speed on the failure. Furthermore the diagnoses of residual life of RC slab models against fatigue loading were carried out by non-destructive testing method.

Keywords: reinforced concrete slab, fatigue, non-destructive-testing, running load

1. ま え が き

鋼道橋鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と略称する）の損傷が報告されて以来10数年が過ぎ、その間この損傷原因を追求するために多く研究が行われてきた。この損傷は疲労現象としてとらえられ、定まった何点かの荷重位置に荷重を移しながら行う多点繰返し載荷実験と、走行する輪荷重を本格的にシミュレートした輪荷重走行実験が行われている（Table 1）。それらによって、損傷の原因、疲労耐力の低下度および損傷のメカニズム等がしだいに明らかになりつつある。

これらの研究と並行して、著者らは輪荷重走行下におけるRC床版の損傷疲労について、時間上、経済上の理由からマイクロコンクリートを使った模型橋梁床版を用いて研究を行い^{1)~6)}、*S-N*曲線を得ることができた。さらに、RC床版の疲労破壊機構を実験的に明確にし、養生条件および載荷速度の違いによる影響についても考察した。

Table 1 Reported studies.

研究者	所 属	主 な 実 験	床版厚 (cm)	主な損傷の原因	疲労耐力の低下度
岡田 ⁷⁾	京都大学等	移動繰返し載荷実験	17 および 18	先行曲げひび割れの進展による貫通ひび割れ。	静的耐力の1/2。 水が透過した場合は静的耐力の1/5。
和田 ⁸⁾	首都高速 道路公団	移動繰返し載荷実験 輪荷重走行実験	16 8	過載荷重による ひび割れ発生。	—————
後藤 ⁹⁾	日本道路公団	移動繰返し載荷実験	15	乾燥収縮等による 過度の貫通ひび割れ。	静的耐力の 約35%。
園田 ¹⁰⁾	大阪市立大学	一定荷重走行実験	7.2	—————	<i>S-N</i> 曲線。
松井 ¹¹⁾	大阪大学	一定荷重走行実験	19	走行荷重によるわ じりモーメントと 配力鉄筋断面に作 用する歪曲せん断 力の交差。	<i>S-N</i> 曲線。

また、非破壊試験を用いて疲労破壊に対してRC模型床版の余寿命診断の可能性について検討した。

2. 使用材料

(1) マイクロコンクリート

マイクロコンクリートとは、コンクリート構造物の模型実験に用いるモデル用の材料として使われる粗骨材最大寸法の小さいコンクリートをいい、一般的にはほぼモルタルに相当する¹²⁾。

これは従来静的模型材料としては使用されてきたが、疲労強度を求めるための模型材料としては実例がない。

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部交通土木工学科 (〒274 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

** 正会員 日本大学理工学部交通土木工学科副手 (現・首都高速道路技術センター)

*** 学生会員 工修 日本大学大学院 (同上)

**** 学生会員 日本大学大学院 (同上)

Table 2 Mix proportion of microconcrete.

W/C (%)	S/C (%)	Percentage of Weight (%)		
		Water	Cement	Sand
6.5	25.0	15.7	24.1	60.2

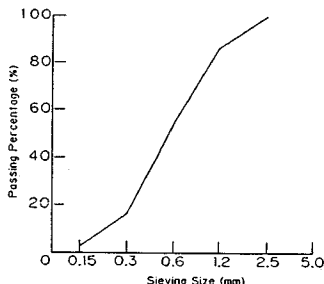


Fig. 1 Grain size curve.

そこで、マイクロコンクリートの疲労特性を求めるために一連の実験を別に行っている¹³⁾。それによればマイクロコンクリートの疲労特性は S-N 図上でみると、普通コンクリートと軽量コンクリートとの間に位置する。本実験で用いたマイクロコンクリートの配合と使用した骨材の粒度曲線を示す (Table 2, Fig. 1)。なお、セメントは普通ポルトランドセメントである。

(2) 鉄筋

模型実験用の鉄筋として、市販の焼きなまし鋼線を用いた。この鋼線は直径が 2 mm、断面積が 3.14 mm² の丸鋼である。鉄筋の平均降伏応力は 253 MPa、平均破断応力は 325 MPa である。

3. 供試体

(1) 形状

輪荷重走行実験で使用する輪荷重走行試験機 (Fig. 4) が円軌道を走行することから、供試体の形状を扇型と決定した。なお、各実験とも条件を等しくするために同一形状とした。

(2) 配筋

Fig. 2 に配筋を示す。主鉄筋の有効高を 16 mm、鉄筋間隔を主鉄筋・配力鉄筋方向ともに 15 mm とした。また、鉄筋比は 1.31% となった。供試体を試験装置にボルト締めするので、ボルト孔周辺は補強のためステンレス金網で覆った。さらに、他の 2 辺には補強筋を 15 mm 間隔にそれぞれ 4 本ずつ入れた。

(3) 打設および養生

型枠は、アクリル製で同時に 12 枚打ち込むことができる。打ち込む際には、鉄筋のかぶりを保つためにスペーサーとして薄いアルミ板を使用した。マイクロコンクリートの練りませ方法は、まず砂とセメントをモルタル

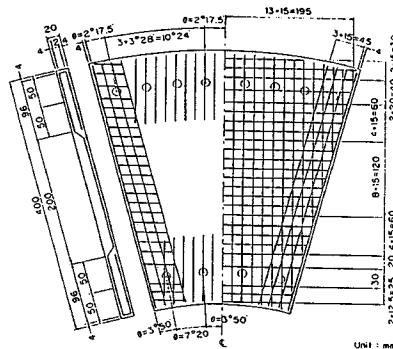


Fig. 2 Bar arrangement.

ミキサーに入れて 15 秒間かきませ、次に水を加えて 1 分間かきませる。そして 5 分間放置して再び 1 分間かきませる¹⁴⁾。打設後、アクリル板でふたをして 24 時間後に脱型を行った。なお、輪荷重走行面の平滑性を保つため、型枠の底面が供試体の上面となるように表裏逆に打設した。この打設法が強度にどのように影響するかは検討していない。打設パッチと養生条件の相違により供試体は WA, AA, WB, AB の 4 タイプに分けられる。打設は A, B (2 文字目の記号) の 2 グループに分けて行った。各グループについて 2 タイプの養生条件、すなわち標準水中養生 (1 文字目の記号 “W”) と 1 週間湿潤養生した後空中養生 (同記号 “A”) を実施した。

試験時の供試体は、両養生条件ともに強度が十分安定したと思われる 2 か月以上経過したものを実験した。

なお、空中養生を施した供試体には乾燥収縮によるひびわれは肉眼ではみられなかった。

4. 実験方法

(1) 静的実験

静的実験における支持条件は、2 対辺固定支持 (供試体曲線部) および 2 対辺自由支持 (供試体直線部) である (Fig. 3)。たわみは渦電流効果を利用した非接触変位計を用いて、載荷点直下の床版中心部で測定した。さらに、養生の違いが静的強度へどのように影響するかを調べるために、WB, AB グループについてはマイクロコンクリートの吸水率試験を行った。この試験方法は、コンクリート標準示方書 (昭和 55 年版) による細骨材の吸水率試験方法を参考にした。

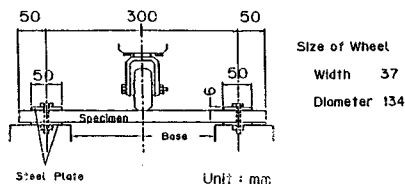


Fig. 3 Supporting condition under a static load.

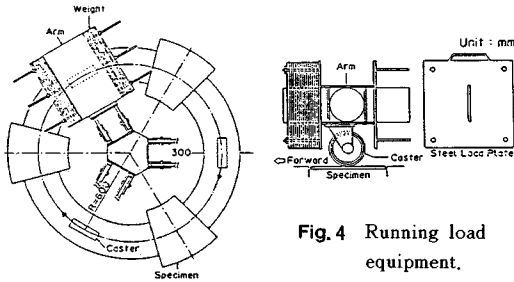


Fig. 4 Running load equipment.

(2) 輪荷重走行実験

輪荷重走行実験で用いた試験機を示す (Fig. 4)。直径 1.2 m の円軌道上を、重荷重用の市販のキャスターを取り付けた 3 本のアームが回転し、1 枚 23 kg の鉄板をキャスターの前後に取り付けることによって荷重調整する。荷重はアーム 1 本上に 1 t まで載荷可能である。走行荷重は静的耐力に対する比で表わす。載荷速度は 9 から 115 回転/分まで調整可能である。

この実験では、版端側に支持台を用いて版を支持し衝撃を緩和した。この支持台により支持条件は、供試体曲線部では固定支持、供試体直線部では弾性支持となる。このため、静的実験と走行実験とは異なる境界条件である。2 種類の境界条件下の静的耐力はほぼ同じであることが予備実験から判明しているため、便宜上、静的実験は供試体直線部で自由境界条件のもとで行った。床版の据え付けにあたっては石膏を用い安定を期した。たわみ測定のために、WB、AB グループについてはマイクロコンクリートの吸水率試験も行った。

衝撃係数は、供試体中央部での静止荷重の弾性たわみと走行荷重による動的弾性たわみとの比を求め、1 を超える分を衝撃の効果として % 表示する。その際のたわみは実験初期のたわみをもとにした。

5. 実験結果および考察

(1) 静的実験結果

結果を Table 3 に示す。WB、AB グループについてはそのマイクロコンクリートの吸水率試験結果も同表に示す。また、それぞれのグループについて $\phi 5 \times 10$ cm シリンダー供試体によるマイクロコンクリートの力学的性質を Table 4 に示す。養生による強度の違いを比較すれば、 $WA > AA$ 、 $WB > AB$ であり水中養生の方が相対的に強い。また、吸水率試験結果に着目すると平均吸水率は空中養生の場合の方が高く空隙が相対的に大きいことを示している。

次に、本実験結果を角田氏¹⁵⁾と松井氏¹¹⁾による実物大 RC 床版の押し抜きせん断耐力の提案式による計算値と比較した。その結果を Table 5 に示す。計算にあたっては弾性変形によるキャスターの接地面積の変化を考慮

Table 3 Static strength and percentage of water absorption.

Curing	Group Name	Loading Area (cm ²)	Contact Pressure to Failure (MPa)	Failure Load (kN)	Average Failure Load (kN)	Percentage of Water Absorption (%)	Average Percentage of Water Absorption (%)
Water Curing	WA	12.6	11.08	13.92	14.19	—	—
		12.6	11.44	14.46			
	WB	13.6	12.95	17.62	16.79	14.2	13.2
Air Curing	AA	12.3	11.13	13.73	13.49	—	—
		12.3	10.76	13.24			
	AB	13.3	12.56	16.73	16.36	17.1	16.0
		13.1	12.20	15.99		14.8	

Table 4 Mechanical properties of microconcrete.

Curing	Group Name	Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus $\times 10^4$ (MPa)	Poisson's Ratio	Tensile Strength (MPa)
Water	WA	27.2	0.20	0.21	2.4
Curing	WB	38.7	0.20	0.23	3.7
Air	AA	31.4	—	—	2.2
Curing	AB	31.8	0.31	0.22	4.9

Table 5 Comparison of the experimental results with calculated ones by Kakuta's and Matsui's formula.

Curing	Group Name	①		②		③	
		Experimental Values (kN)	Calculated Values by Kakuta's Formula (kN)	①/②	Calculated Values by Matsui's Formula (kN)	①/③	
Water Curing	WA	13.92	9.61	1.45	9.46	1.47	
		14.46	9.61	1.50	9.46	1.53	
	WB	17.62	10.74	1.64	13.03	1.35	
		15.96	10.64	1.50	12.88	1.24	
Air Curing	AA	13.73	9.91	1.39	9.61	1.43	
		13.24	9.91	1.34	9.61	1.38	
	AB	16.73	10.10	1.58	16.22	1.10	
		15.99	10.14	1.65	14.56	1.10	

した。すなわち、キャスターの荷重変位関係 (P : 荷重 [kgf], Δr : 変位 [mm]) は、

$$P = 100.0 \cdot \Delta r^2 + 445.3 \cdot \Delta r$$

接地長算出式 (キャスター進行方向)

$$a = 2\sqrt{2} \times r \times \Delta r - (\Delta r)^2$$

ここで、 r はキャスター半径 (= 67 mm) である。

よって、接地面積 A は b をキャスター幅とすると、

$$A = 2b\sqrt{2} \times r \times \Delta r - (\Delta r)^2$$

本実験結果では、両氏の提案式による計算値よりも大きな値を示している。その原因として計算式が主として単純支持された床版の結果をもとにしており、本床版とは境界条件が相違しているためと考えられる。次に、各グループの代表的な荷重とたわみの関係を示す (Fig. 5)。

破壊時の上下面の破壊状況は、どのグループも上面の破壊範囲に比べて下面の破壊範囲が著しく広く、載荷点直下部がピラミッド状に押し抜けて破壊に至っている (Photo 1)。上面の陥没穴は終局後に車輪の押し抜きに

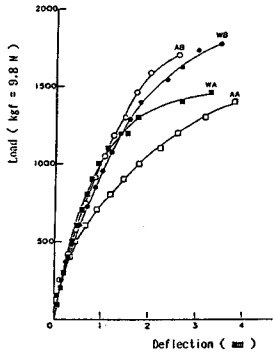


Fig. 5 Load-deflection curve under a static load.

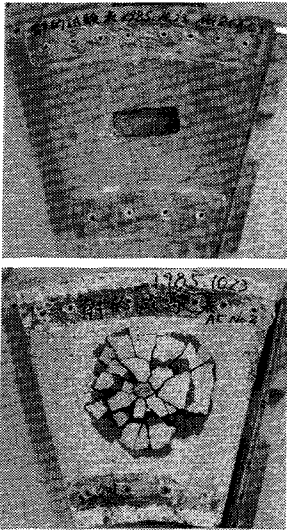


Photo 1 Cracks under a static load.

より拡大した。また、下面のひびわれ形態は載荷点直下部では亀甲状のひびわれがみられるが、ほとんどが載荷点直下部を中心とした放射状のひびわれが支配的であった。したがって、最終的な破壊のモードはRC床版の典型的な静的破壊モードである押し抜きせん断破壊（パンチング破壊）であるといえる。また、上面の固定支持付近に沿ったひびわれは、負の曲げモーメントによるものと考えられる。

なお、どの供試体も鉄筋の破断はみられなかった。

(2) 輪荷重走行実験結果

Table 6 に輪荷重走行実験結果を示す。Photo 2 に示す破壊時の上下面の破壊状況は、どのグループもほぼ同様である。供試体上面についてみると、キャスター走行部では陥没し、他の部分ではほぼ主鉄筋方向に沿ったひびわれが生じている。また固定支持による負の曲げモーメントにより、配力鉄筋方向にひびわれを生じている。供試体下面のひびわれは、ほとんどが亀甲状で、静的実

Table 6 Results of wheel running test and percentage of water absorption.

Curing	Group Name	Loading Speed (cycle/min)	Weight of the Wheel (%)	Impact Factor (%)	Weight of the Wheel and Impact (%)	Number of Cycles to Failure (cycle)	Percentage of Water Absorption (%)	Average Percentage of Water Absorption (%)		
Water Curing	WA	96	41.9	80.0	75.4	2917	—	—		
		48	41.9	59.9	67.0	7668				
		58	40.3	34.0	54.0	10776				
		48	40.3	28.1	51.6	5931				
		38	38.7	4.5	43.3	89736				
	58	35.6	27.0	45.2	107886					
	WB	60	27.4	43.5	39.3	193100			13.5	14.0
		60	23.3	16.7	27.2	118356			13.8	
		10	27.4	25.0	34.2	45741			14.3	
		60	23.3	50.0	35.0	357543			14.2	
Air Curing	AA	43	40.8	48.9	60.6	3520	—	—		
			40.8	33.6	54.4	1430				
			39.1	71.7	67.1	2510				
			35.7	26.7	45.2	2613				
			34.1	23.3	42.0	9801				
	AB	60	28.1	31.8	37.0	8235			15.6	
		60	28.1	26.7	35.6	5400			17.1	
		9	28.1	20.0	33.7	19070			17.5	

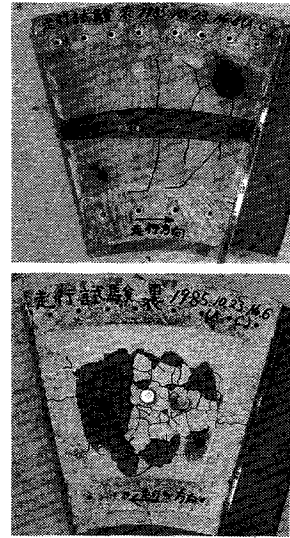
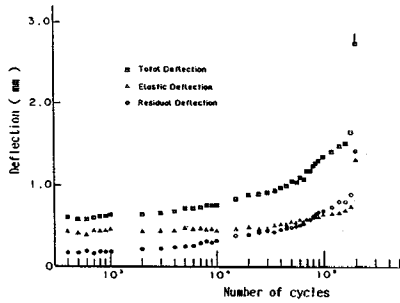


Photo 2 Cracks under a wheel running load.

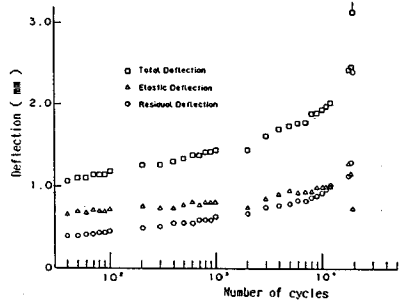
験でみられる放射状のひびわれはみられない。また、荷重が出る側を中心に、マイクロコンクリートの剝離がみられた。これは陥没が生じてキャスターが惰性で回転してしまうための衝撃の影響と思われる。なお、どの供試体にも鉄筋の破断はみられなかった。

次に、たわみと繰返し回数については、養生条件および走行速度の違いによる著しい特徴の違いはみられなかった。代表的なたわみと繰返し回数の関係を示す (Fig. 6)。それらによると、走行回数に伴って総たわみ、弾性たわみ、残留たわみは徐々に増加する。また、弾性たわみの増加度は他のたわみの増加度より小さく、載荷

後半から破壊寸前になると残留たわみが弾性たわみより大きくなる。さらに、残留たわみの増加の割合をみるために残留たわみの増幅量を求め、残留たわみ増幅量と走行回数との関係を探った。代表的な例を養生条件ごとに示す (Fig. 7)。ここでいう残留たわみ増幅量とは、ある回数からある回数までの残留たわみの増加量を指す。それ

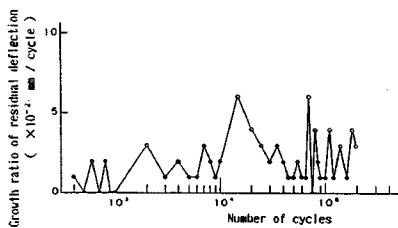


(a) Water curing (WB-1)

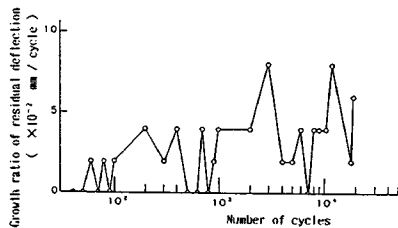


(b) Air curing (AB-3)

Fig. 6 Relations between deflection and number of cycles under a wheel running load.



(a) Water curing (WB-1)



(b) Air curing (AB-3)

Fig. 7 Relations between growth ratio of residual deflection and number of cycles.

らの図から両養生条件ともに残留たわみ増幅量が安定せず、常にたわみが増加していることを示している。

次に、Table 6の静的耐荷力に対する載荷荷重比 S と繰返し回数 N (回) との関係 ($S-N$ 曲線) を示した図 (Fig. 8) から、空中養生を施した供試体の疲労強度は、水中養生を施した供試体のそれよりも低い値を示しているのがわかる。一方、Table 6の吸水率試験結果をみると、空中養生の場合の平均吸水率は相対的に高く、空隙が多いことを示している。空隙が多いために、疲労試験においても強度は低下し、破壊回数で1桁程度の差が現われると考えられる。

輪荷重走行下では走行荷重のほかに衝撃荷重が付加される。この衝撃荷重は載荷荷重比、走行速度、床版の剛性等の関係より、各供試体によって異なってくる。したがって、各供試体によって走行荷重比に衝撃を考慮した場合の走行+衝撃荷重比が異なり、それによる $S-N$ 曲線を得ることができる (Fig. 9)。図から、衝撃を考慮するとデータのばらつきが大きいことがわかる。このばらつきは、初期曲げひびわれの進展による剛性の急激な変化のもとでの不安定なたわみをもとに衝撃係数を評価しているためと考えられる。しかし、床版の剛性は走行載荷を受ける間に変化するが、終局時を除き走行回数が増すにつれて衝撃係数は大体安定した値を示し、しかも初期の値よりかなり低い値をとるようである。

さて、Fig. 8にみられるように、本実験によって得ら

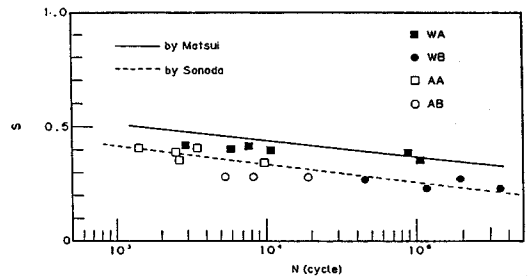


Fig. 8 $S-N$ relation under a wheel running load (neglecting the impact effect).

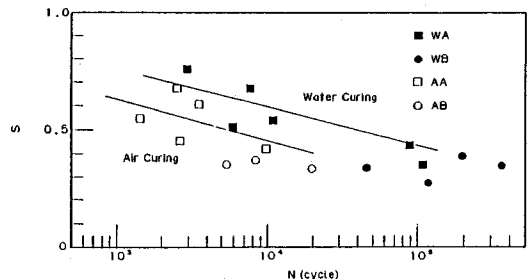


Fig. 9 $S-N$ relation under a wheel running load (including the impact effect).

れた $S-N$ 曲線（衝撃を無視した場合）と園田氏¹⁰⁾、松井氏¹¹⁾による実物大に近い RC 床版によって得られた $S-N$ 曲線とを比較すれば、実物大に近いこの両者の RC 床版によって得られた $S-N$ 曲線とはほぼ一致している。ただし、7 cm 厚の園田氏の結果により近い。

6. 弾性波による非破壊検査

(1) 検査方法

RC 床版の劣化時のひびわれ進展により、音響学的性状（弾性波の伝達性状）が変化すると考えられ、この変化を知ることにより劣化状態を知り得るかを検討した。測定方法は、超音波探傷器より振動子（100 kHz）を用いて【以下、超音波パルス】、あるいは金属棒で叩くこと【以下、打診】により供試体に弾性波を発生させ、ピックアップ（応答周波数 2 Hz から 40 kHz）でその加速度を検出し、アンプで増幅した後、シグナルアナライザーで波形処理を行い X-Y レコーダに書かせた。なお、解析周波数は 100 kHz を上限とした。

また、本試験に先立ち、等方性材料であるアクリル製供試体表面に切溝を入れ、切溝の有無によるオートパワースペクトラムの変化が顕著に現われる振動子・ピックアップの取り付け位置を検討した。この結果より RC 模型床版に取り付ける発・受振器の位置を Fig. 10 のように決定した。打診に比べて、超音波パルスを用いたときに、検査精度のよい結果が得られた。オートパワースペクトラム結果を Fig. 11 に示す。

これらの図をみると、どの RC 模型床版も走行回数

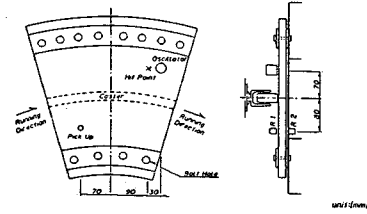


Fig. 10 Non-destructive test.

が増すにつれ卓越した周波数成分が低下し、全体的に低周波数域に広く分布する傾向がある。特に 5 kHz 以下と 15~25 kHz の間の山の成長が顕著である。これは、ひびわれが増加、進展するにつれ、エネルギーの小さい比較的高い周波数成分が徐々にこれらのひびわれに吸収され、比較的低い周波数成分が主に伝わることと、当初の弾性波の反射面が上下面が主であるのに対し、走行荷重により発生するひびわれの影響を受けて、より多くの反射面をもつことになり、複雑な振動をするからだと考えられる。

(2) データ解析

これらのオートパワースペクトラムを定量的にみるために以下の 3 項目について解析を行った。

① オートパワースペクトラムの面積比：ある周波数で区切り（本解析では 20 kHz）、低周波数/高周波数の面積比を計算しその変化を調べる（Fig. 12）。

② ピーク変動：オートパワースペクトラムの中で卓越した周波数（ピーク）の変化を調べる。Fig. 13 の例をみると、走行初期に比べ破壊に近づくにつれ周波数成

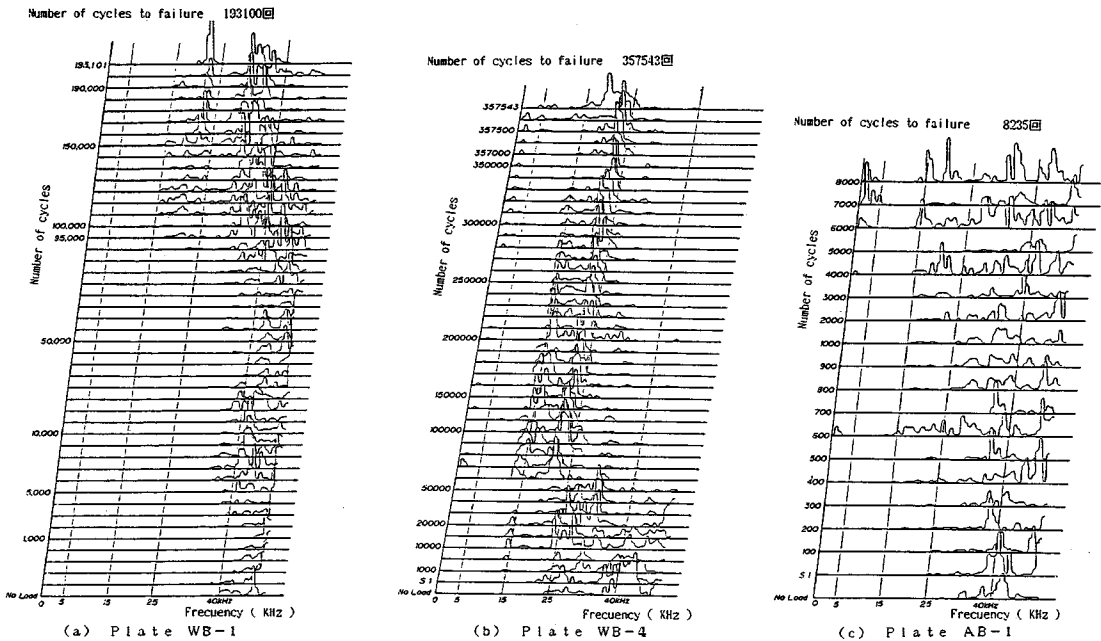


Fig. 11 Auto power spectrum of ultrasonic pulse testing.

分は低くなる傾向がみられたがピークのみの変動をみるとあまり統一性がない。

③ フィルター解析：RC 模型床版をフィルターと考えると一定のパワーを入力すると、出力パワーは、RC 模型床版の変化によって左右される。ひびわれが増すと、エネルギーが吸収され出力パワーが減少すると考えられるので、この減少を調べる。Fig. 14 に示すように走行回数が増すにつれフィルター解析値（走行回数 N 回時 / 走行回数 0 回時の出力パワー比）が減少する傾向があり、破壊直前にはほとんど 0 に近づく。

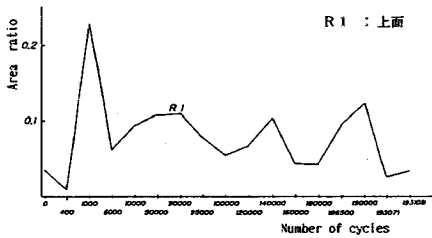


Fig. 12 Relation between area ratio of higher frequency in auto power spectrum and number of cycles (WB-1).

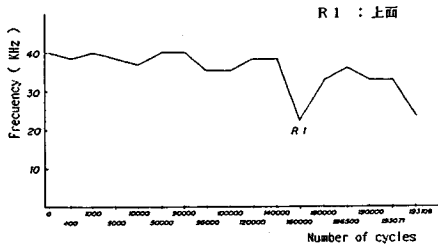


Fig. 13 Peak fluctuation of auto power spectrum (WB-1).

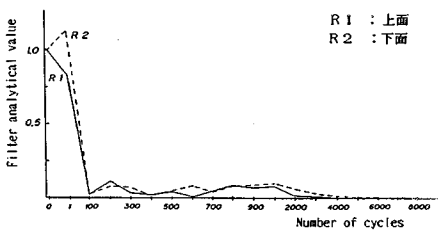
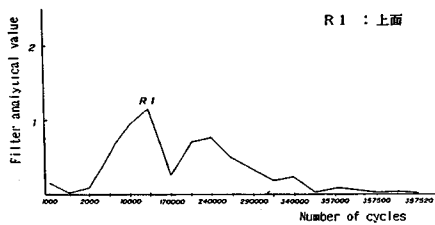


Fig. 14 Filter characteristics.

7. 走行する輪荷重を受ける RC 床版の疲労破壊機構の考察

(1) 輪荷重走行による交番断面力

定点載荷では、版の断面力はほぼ零からおのおのの最大値の間を同一符号で変動する。しかし、走行載荷では、各断面に作用する曲げモーメント M_x 、 M_y は同一符号で変動するが、配力鉄筋断面に作用する垂直せん断力 Q_y (Fig. 15) とねじりモーメント M_{xy} (Fig. 16) は符号が交番する。

したがって、 M_{xy} と Q_y による応力振幅は定点載荷の場合の倍になることである。よって、この交番する断面力が、走行する輪荷重を受ける RC 床版の疲労強度低下に強く影響していると考えられる。

(2) 疲労破壊機構モデルの考察

走行する輪荷重を受ける RC 床版の疲労破壊機構は、(1) で述べた交番断面力と、実験における目視観察やたわみ測定に加え、非破壊検査を行った結果を利用して次のように考えられる (Fig. 17 参照)。この破壊機構については、交番応力の影響に注目し走行荷重による疲労試験を行っている園田⁽¹⁰⁾や、松井⁽¹¹⁾らによる提案と本すじにおいて同様である。

a) 載荷初期に、主鉄筋方向の曲げモーメント M_x によって床版下面に配力鉄筋方向のひびわれが生じる。

b) また、配力鉄筋方向の曲げモーメント M_y によ

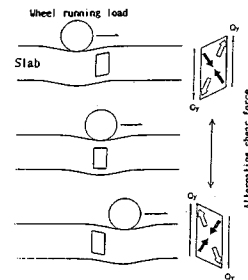


Fig. 15 Alternating shear force under a wheel running load.

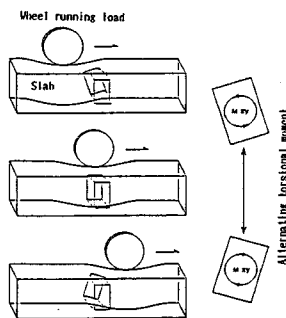


Fig. 16 Alternating torsional moment under a wheel running load.

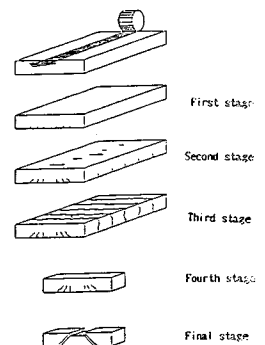


Fig. 17 Concept of fatigue failure mechanism.

て床版下面に主鉄筋方向のひびわれが生じる。よって床版下面は亀甲状のひびわれとなる。また、床版上面には配力鉄筋断面に交番して作用する集中荷重下の三次元的な応力によって、主鉄筋方向のひびわれが生じる。

c) さらに、曲げひびわれの先端応力集中と配力鉄筋断面に作用する交番する垂直せん断力 Q_y によって、主鉄筋方向（橋軸直角方向）のひびわれが進展して貫通ひびわれとなる。交番するねじりモーメント M_{xy} がこの破壊を促進する。

d) この主鉄筋方向の貫通ひびわれによって、床版は荷重進行方向への連続性を失い、あたかもいくつものはりが主鉄筋方向へ横に並んでいるような状態となる。したがって、走行する輪荷重を1本1本のはりが支えるような状態となり、荷重が走行することによりはりの片振り疲労となる。

e) d) によって、はりのせん断抵抗力が限界まで低下したとき、主鉄筋方向に直交する面で最終的にせん断破壊する。

(3) 疲労破壊機構のケース・スタディ

本実験で用いた模型 RC 床版の疲労破壊機構について破壊回数 193 100 回の供試体を例にとり、供試体上面の写真 Photo 3 と非破壊検査結果 Fig. 11 (a), たわみの測定値 Fig. 7 (a) を参考に検討する。なお、供試体下面のひびわれについては、ビデオ撮影によって観察したが解像力不足で十分には捕えることができなかった。

A) Fig. 11 (a) より、まず 6 000 回付近で 40 kHz 以下の周波数成分を含むようになり、この時点でわずかながら床版に何らかの劣化があったと思われる。そこで、Fig. 7 (a) によると、6 000 回から 7 000 回にかけて残留たわみの急激な増加がみられる。

Photo 3 をみると、90 165 回で目視によって床版上面には主鉄筋方向のひびわれと、固定支持付近に沿って配力鉄筋方向のひびわれ、床版下面には亀甲状のひびわれが確認できた。床版下面の亀甲状ひびわれは M_x , M_y によって生じたと考えられ、床版上面の走行面上主鉄筋方向のひびわれは、集中荷重下の交番して作用する配力鉄筋断面の局部的応力によるものと考えられる (モデル b))。また、走行部から固定辺に延びる主鉄筋方向のひびわれは、松井氏によると、載荷点から橋軸方向に少し離れた部分に集中して作用するねじりモーメント M_{xy} による面内応力によるとしている¹¹⁾。したがって、このひびわれは、交番して作用するねじりモーメント M_{xy} と配力鉄筋断面の垂直せん断力 Q_y との相互作用によるものと考えられる。

固定支持に沿った配力鉄筋方向のひびわれは、負の曲げモーメントによるものと考えられる。

B) 94 140 回で床版上面の主鉄筋方向のひびわれがさ

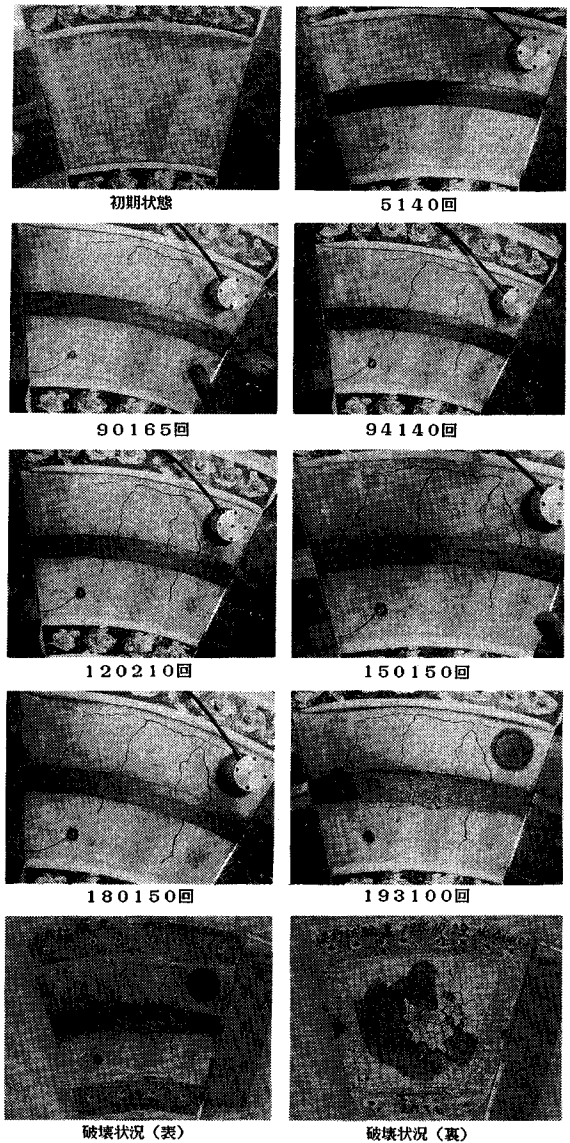


Photo 3 Surface and rear surface cracks under a wheel running load.

らに伸長したのが目視で確認できた。この主鉄筋方向のひびわれの成長は、床版下面の主鉄筋方向のひびわれ先端における応力集中と、配力鉄筋断面に作用する垂直せん断力 Q_y 、交番するねじりモーメント M_{xy} によるものと考えられる。一方、残留たわみの増幅量は 9 000 回から 15 000 回、65 000 回から 70 000 回、75 000 回から 80 000 回にかけて急激な増加がある。非破壊検査によると 95 000 回あたりで、オートパワースペクトラムは 40 kHz 以下に広域分布し、40 kHz あたりの周波数成分が著しい成長をみせる。このあたりが大きな変化点（第一急変点）と思われ、主鉄筋方向のひびわれにより、床版

が劣化したと考えられる。

以上のように、この主鉄筋方向のひびわれの成長は床版にかなりのダメージを与えたと考えられる。そして、95 000 回付近でこのひびわれは貫通ひびわれになったと考えられる(モデルc)。よって、この時点で床版は荷重進行方向への連続性を失い、あたかもいくつものひびが主鉄筋方向に平行して横に並んでいるような状態となりこれ以降は荷重が走行することによりはりの片振り疲労となる(モデルd)。残留たわみの増幅量は、95 000 回付近以降からその著しい変化がみられ、たわみが安定せず常に増加していることを表わしている。

C) 120 210 回で床版上面の主鉄筋方向のひびわれがさらに成長し、荷重が入る側(写真左側)にもう一本主鉄筋方向のひびわれが目視で確認できた。これらの主鉄筋方向のひびわれの成長原因はB)で述べた理由と同様である(すなわち、モデルc)。非破壊検査によると、100 000 回以降では、95 000 回でみられるようなスペクトラムを示しており、さらに分布が低周波数に移り15kHzあたりの山が成長し始めている。

D) 150 150 回で床版上面の主鉄筋方向と固定支持に沿った配力鉄筋方向のひびわれが、著しく成長したのが目視によって確認できた。非破壊検査によると、150 000 回時点のオートパワースペクトラム上で15kHzあたりの山の成長が著しく、ピークに達するほどであり、もう1つの大きな変化点(第二急変点)のように思われる。したがって、床版の周波数特性は走行初期と比べて完全に低下し、床版は疲労により多くのひびわれが増加・成長していると考えられる。

以上のことから、150 000 回付近で床版の破壊が近いと考えられる。

E) 180 150 回での床版上面でのひびわれは、目視の範囲内ではほとんど変化はみられなかった。非破壊検査によると、目視のひびわれ進行と同様150 000 回以降のオートパワースペクトラムに大きな変化はなかった。また、オートパワースペクトラムは2つのピークを示しているように思われる。

F) 193 100 回で破壊に至った。最終的には主鉄筋に直交する面で押し抜きせん断破壊した(モデルe)。

以上に述べてきた疲労破壊機構は、他の供試体についてもほぼ同様であった。

疲労破壊機構を裏付けるために非破壊検査も行ったが、これは有効な手段といえる。つまり、たわみによるある程度の劣化度を推測することができるが、すべての供試体が必ずしも決まったたわみのときに破壊するとは限らないので、定量的な判断が困難である。しかし、ここで用いた非破壊検査によって、定量的な判断ができそうである。すなわち、ある構造物についてオートパワー

Table 7 Relation between transition points and number of cycles.

Number of specimen	AB-2	AB-1	WB-3	WB-2	WB-1	WB-4
Number of cycles to failure	5400	8235	45741	118356	193101	357543
to first transition	200	600	9000	8000	95000	60000
to second transition	5000	7000	36000	108000	150000	350000

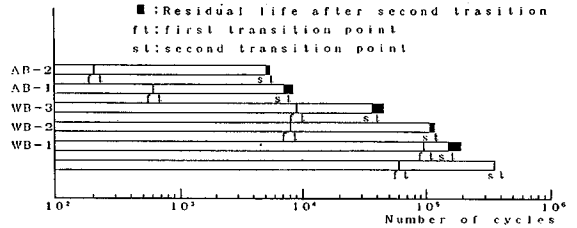


Fig. 18 Relation between transition points and number of cycles.

スペクトラムのピークが低い周波数域に現われると、その構造物に何らかの破壊が生じ、構造物全体として軟らかくなったと考えられるからである。

8. 余寿命診断の試み

6. の弾性波による非破壊検査の結果を用い、RC 模型床版の余寿命診断を行った。前述したように、何種類かの方法の中で、超音波パルスを用い、ピックアップを上面に取り付けたものにより結果が得られたので、余寿命診断もこの結果を用いた。診断方法は、オートパワースペクトラム自体の変化と3種類の解析結果を用いて診断の可能性を検討した。

以上の傾向から、特にオートパワースペクトラムにおいて、RC 模型床版が破壊に至る間に2つの著しい変化点(急変点)が認められた。第一の急変点は比較的早い走行回数時にみられ、第二の急変点は比較的破壊直前に現われる。第二急変点が現われた後、それまでの走行回数の1, 2割程度の走行で破壊している (Table 7, Fig. 18)。

このことから、ある程度 RC 模型床版の余寿命は推測できると思われる。オートパワーの変化の観察とフィルター解析を組み合わせて急変点を指摘するには、個々の床版で特徴があり慣れた者でないといわりにくい。したがって、よりわかりやすい指標をさらに検討しなければならない。

9. 結 論

本研究の範囲内で明らかになったことを以下に示す。

(1) 輪荷重走行下の $S-N$ 曲線を得ることができた。また、それは実物大 RC 床版とはほぼ同様の傾向を示した。よって、模型を用いることによって現状の RC 床版の疲労強度を捕らえることが可能ではないかと考えられる。

(2) 養生条件の違いは、鉄筋コンクリート床版の静的耐荷力および輪荷重走行下の疲労強度に影響を与える。すなわち、空中養生を施した場合にそれらの強度は低下する。特に、疲労強度の低下は著しい。

(3) 載荷速度の違いによる疲労強度への影響は、直接的には、速度の違いによる衝撃係数の違いによるものであると考えられる。

(4) 輪荷重走行下の鉄筋コンクリート床版について、疲労破壊機構のモデルを仮定し、この仮定を弾性波による非破壊検査、たわみ、残留たわみ増幅量、および目視観察によって説明することができた。

(5) 構造物中を伝播する弾性波の周波数スペクトル解析により構造物の劣化状態をある程度推測できる。

謝 辞：本研究は日本大学理工学部交通土木工学科の卒業研究として、昭和 56 年度、鶴岡考一（現在三洋証券）、藤崎信夫（現在ケミカルグラウト（株））、昭和 57 年度、宇佐美正春（現在東武鉄道（株））、片岡充英（現在仙台道路エンジニア（株））、昭和 58 年度、岡 英人（現在佐藤工業（株））、横川 均（現在常盤道路サービス（株））、渡邊貞之（現在（株）東光コンサルタンツ）、久米 卓（現在不二測量（株））、昭和 59 年度、曾和直哉（現在メトロ設計（株））、武内 伸（現在佐藤工務店）、土田喜康（現在大日コンサルタント（株））、昭和 60 年度、石田寿光（現在（有）石田工務店）、折谷正弘（現在関口組）が行った研究をもとにまとめたものである。また、元副手の鈴木英実氏（現在神奈川県庁）同じく椎名啓雄氏（現在国際航業（株））の助言ならびに協力に対し深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 川口 隆・川口昌宏・岩田吉永：無限走行載荷装置の作製，日本大学理工学部学術講演会論文集，理工系教育，pp. 156～157，昭和 56 年度。

- 2) 川口 隆・川口昌宏：RC 床版の走行荷重による疲労試験，日本大学理工学部学術講演会論文集，土木系，pp. 388～390，昭和 57 年度。
- 3) 川口 隆・川口昌宏：マイクロコンクリート模型橋梁床版の疲労実験，日本大学理工学部学術講演会論文集，土木系，pp. 351～353，昭和 58 年度。
- 4) 川口 隆・川口昌宏：橋梁床版の疲労実験，土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，pp. 245～246，昭和 59 年 10 月。
- 5) 原田浩二・川口昌宏：橋梁床版の疲労実験，土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，pp. 987～988，昭和 60 年 9 月。
- 6) Kawaguchi, M., Kawaguchi, T. and Harata, K. : Fatigue Tests of Reinforced Concrete Slab Models of a Highway Bridge under a Running Load, Proceedings of the First East Asian Conference on Structural Engineering & Construction, pp. 1383～1391, Bangkok, Thailand, January 15-17, 1986.
- 7) 岡田 清・岡村宏一・園田恵一郎・島田 功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状，土木学会論文報告集，第 321 号，pp. 49～61，1982。
- 8) 和田克哉：橋りょうにおける鉄筋コンクリート床版の疲労と補強，コンクリート工学，Vol. 21, No. 6, pp. 14～26，1983。
- 9) 後藤祐司：鋼橋 RC 床版の破損機構に関する一考察，橋梁と基礎，Vol. 17, No. 8, pp. 111～115，1983。
- 10) 園田恵一郎・堀川都志雄・船越博行：輪荷重反復下での R. C. 床版の挙動，土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp. 81～82，昭和 58 年 9 月。
- 11) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，pp. 113～161，昭和 59 年。
- 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，pp. 1019～1021，技報堂出版，昭和 53 年。
- 13) 川口昌宏・柳沼善明・藤田敏郎：マイクロコンクリートの疲労強度，土木学会論文報告集，第 378 号，1987 年 2 月。
- 14) Evans, D. J. BSc and Clarke, J. L. MA, PHD, MICE : A comparison between the flexural behaviour of small-scale microconcrete beams and that of prototype beams, Cement and Concrete Association TECHNICAL REPORT 542, pp. 7～8, March 1981.
- 15) 角田与史雄・井藤昭夫・藤田嘉夫：鉄筋コンクリートスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 299 号，pp. 105～115，1974 年 9 月。
(1986. 4. 16・受付)