# 輪荷重走行試験結果の統一的評価に関する検討

#### A study on uniform evaluation of results of wheel load running test

大西弘志<sup>\*</sup>, 上條崇<sup>\*\*</sup>, 関口幹夫<sup>\*\*\*</sup>, 長屋優子<sup>\*\*\*\*</sup>, 水越秀和<sup>\*\*\*\*\*</sup>, 肥後野孝倫<sup>\*\*\*\*\*\*</sup>, 堀川都志雄<sup>\*\*\*\*\*\*\*</sup> Hiroshi Onishi, Takashi Kamijo, Mikio Sekiguchi, Yuko Nagaya, Hidekazu Mizukoshi, Takanori Higono and Toshio Horikawa

The fatigue of the RC decks has been one of the most important problems on the durability of bridges since 1960's. A wheel load running machine developed, nowadays a number of machines like this one has been utilized in Japan, to investigate the mechanism in extend to the fatigue failure of the RC decks and durability of various decks. Though these machines are roughly categorized in 2 types, self propelled type and crank type, there has never been rule to evaluate the results of wheel load running tests. Then the uniform evaluation of the fatigue durability of RC decks with several types of wheel load running machines is tried to investigate.

Keywords: Reinforced concrete decks, fatigue, wheel load running test, uniform evaluation キーワード: RC 床版, 疲労, 輪荷重走行試験, 統一的評価

# 1. はじめに

道路橋 RC 床版のひび割れ損傷は、すでに昭和40 年代 初期に発生が認められ、大学・公的研究機関等での室内 実験および実橋調査等により損傷メカニズムの研究が行 なわれてきた.特に、これらの損傷メカニズムの解明に は、輪荷重走行試験機の活用による研究が大きく寄与し てきた. この輪荷重走行試験機は、任意の荷重を作用さ せながら往復運動するもので国内に十数機が設置され、 精力的な研究が行なわれてきた.輪荷重走行試験機はそ の構造から、フライホイール等の回転力を往復運動に変 換し鉄輪を介して載荷を行うクランク式試験機と移動台 車に駆動装置を搭載しゴムタイヤを介して載荷を行う自 走式試験機に大別される. ゴムタイヤを利用したクラン ク式が採用されるケースもあるが、ここでは荷重接地面 の状態に着目し、ゴムタイヤ式として整理した。これら 2 種類の試験機は、それぞれに特長を有しているが、試 験機毎に採用されているシステムの相違が試験結果に及 ぼす影響については不明な点も多く、十分な検討がなさ れてきたとは言い難い. この影響の把握には、試験機の 特徴だけでなく、試験体となる床版の支持条件や輪荷重 の載荷方法による違いをも明確にしておく必要がある. また,試験結果の整理方法についても整合が図られてい ないのが現状であり,輪荷重走行試験機を所有する機関 が連携して統一的かつ総合的な試験を実施し,各試験機 において再現される RC 床版の疲労損傷メカニズムを比 較・検討することは,試験方法や評価方法の統一化に向 けたデータの共有・相互活用,さらには RC 床版の維持 管理やメンテナンスに際して有益な情報を与えるものと なる.

本研究は、筆者らが実施した共通試験の結果 <sup>1)</sup>に更な る検討を加え、輪荷重走行試験で得られる結果の統一的 評価に向けて、従来から実施されてきた試験体のたわみ 性状の整理等に加え、試験の進行に伴う鉄筋ひずみの変 動に着目した整理を行う等、データの処理方法に関して 検討を実施した.本稿は、これまでに得られた成果につ いて、試験機毎に存在する試験条件の相違等と関連づけ て述べるものである.

## 2. 共通試験の概要<sup>1)~4)</sup>

諸条件			設計値	試験体名						
				阪大A	阪大B	土研	IHI	YBC	東京都	
压縮強度 (N/m		$(N/mm^2)$	24.0	34.3	34.3	30.7	28.8	31.9	34.3	
ヤング係数		$(kN/mm^2)$	25.0	28.4	28.4	28.2	26.3	28.0	28.4	
床版厚		(mm)	190.0	193.8	198.0	199.3	193.6	196.5	196.5	
	上側主鉄筋	(mm)	30.0	43.8	52.2	39.6	44.4	50.7	41.4	
有効高さ	下側主鉄筋	(mm)	160.0	154.3	159.5	166.5	157.7	158.6	158.0	
	上側配力鉄筋	(mm)	43.0	58.3	70.0	52.0	57.3	64.1	54.6	
	下側配力鉄筋	(mm)	145.5	139.2	143.3	149.6	143.6	143.3	143.1	

表-1 コンクリート材料試験結果

# 2.1 試験体床版

共通試験に用いた試験体の寸法と鉄筋配置を図-1に示 す. 試験体は、配力鉄筋量が現行の基準と比較して少な く,損傷事例が多く見られる昭和39年道路橋示方書に準 じて製作した RC 床版である. 設計床版厚は 190mm に統 一し、床版の幅、長さおよび支間は各機関が保有する輪 荷重走行試験機に応じて変化させた. すなわち, 大阪大 学で用いられた試験体の寸法は、 2200mm×3000mm×190mm(床版支間 2000mm)であり、 山口大学で使用された試験体のそれは, 2200mm×4000mm×190mm (床版支間 2000mm) である. これに対し、その他の機関で試験された試験体の寸法は、 2800mm×4500mm×190mm(床版支間 2500mm)である. 以下,大阪大学の試験体を「阪大 A・B」,(独)土木研究 所の試験体を「土研」、(株) IHIの試験体を「IHI」、(株) 横河ブリッジの試験体を「YBC」,東京都土木研究所の 試験体を「東京都」,山口大学の試験体を「山口大A・B」 と称す.

試験体のコンクリートは施工技術総合研究所内のヤードにて、全て同時に打設した.コンクリートには、普通ポルトランドセメントを使用し、目標スランプは8cm、材齢28日の目標強度は24N/mm<sup>2</sup>とした.粗骨材最大寸法は25mmである.各試験体について確認したコンクリート強度と床版の出来形を表-1に示す.

### 2.2 輪荷重走行試験機

共通試験では、各機関が保有している鉄輪式およびゴ ムタイヤ式輪荷重走行試験機を使用した.大阪大学、(独) 土木研究所、㈱IHIおよび㈱横河ブリッジが鉄輪式試 験機を、また、東京都土木研究所および山口大学がゴム タイヤ式試験機を保有している.各輪荷重走行試験機の 諸元を表-2 に示す.

鉄輪式輪荷重走行試験機(写真-1)では、車輪を直接 試験体に接触させると載荷荷重は線荷重として作用して しまう.そのため、荷重の載荷面積を確保するため、図 -2に示すような様々な形式の載荷ブロックが軌道上に敷 設されている.載荷ブロックの形式は、試験体に作用す る接地圧(荷重分布)に影響を及ぼすため、試験結果の 評価において重要なパラメータのひとつである.各機関 で採用されている載荷ブロックの形式を表-2 中に示す. 他方、ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機では、車輪に大型



(a) 阪大A・B 試験体



(b) 山口大A・B 試験体



図-1 試験体の寸法と鉄筋配置

航空機用シングルタイヤ(東京都)やソリッドゴムタイ プのダブルタイヤ(山口大学)が用いられている.ゴム タイヤ式の場合,接地面積は荷重の増加とともに変化す る.東京都のゴムタイヤ接地面積は,輪荷重157kNのと

		土石油由	最大荷重 (kN)	土仁巨と	おおうちょう	試験条件	
実施機関	載荷方法	定行速度 (往復/時)		走行長さ (m)	載荷仮面積 (mm)	載荷荷重 (kN)	走行長さ (m)
大阪大学		1680	294	2.0	(b) 300×120	157 140	2.0
(独)土木研究所	鉄輪式	2000	490	3.0~1.0	(a) $500 \times 200$	157	3.0
㈱IHI	(クランク式)	1800	490	3.0~1.0	(d) $500 \times 200$	157	3.0
㈱横河ブリッジ		1020	196	2.0	(c) $500 \times 200$	157	2.0
東京都	ゴムタイヤ式	350	245	7.0~2.0	荷重157kNのとき 230×390	157	弾性支持 から3.5
山口大学	(自走式)		147	3.6	$550 \times 240$	147	3.6

表-2 輪荷重走行試験機の緒元



写真-1 輪荷重走行試験機(鉄輪式)



(c)帯鉄板タイプ



図-2 載荷ブロックの形状



図-4 東京都試験体の支持方法

きに幅 230mm×長さ 390mm の走行方向に細長い楕円形 となる<sup>2)</sup>. 山口大学のゴムタイヤ接地面積は, 道路橋示 方書の接地面積である幅 500mm×長さ 200mm より少し 大きな幅 550mm×長さ 240mm である.

# 2.3 床版の支持条件

共通試験では、試験体が橋軸方向に連続な一方向版と して挙動するように、各機関における試験時の支持条件

を統一した. すなわち, 図-3に示すように, 試験体の支 持辺のうち長辺は試験体と主桁との間に丸鋼を設置して 鉛直方向の変位のみを拘束した単純支持条件、短辺は端 横桁を用いた弾性支持条件とすることを標準とした.端 横桁は、主桁垂直補剛材に高力ボルトを用いた摩擦接合 により固定した.ただし、東京都の試験では、図-4に示 すように、輪荷重の走行範囲が 7.0m であることから、 試験体床版とダミー床版(短辺方向の幅がわずかに異な



図-5 床版のたわみ計測位置

る)を輪荷重走行方向に並べ,2枚の床版の間を輪荷重 が往復するものであり,試験体短辺の片側は弾性支持, もう一方の短辺は自由端となっている.

また、載荷時に試験体の四隅が浮き上がる可能性があ るため、これを防止するための治具を用いて試験体を主 桁に固定した.各輪荷重走行試験機の規格の違いにより、 床版支間長、端横桁間隔、端横桁サイズなどが異なって いることから、必ずしもすべての条件が揃っているとは 限らない.

### 2.4 試験方法

試験時の荷重の大きさに関しては、全試験機で同一の 大きさの荷重を床版が破壊するまで載荷することが望ま しい、このことから、共通試験では、

100kN (T荷重のうち1輪分の荷重)

×1.3 (床版支間に対して衝撃を考慮)

×1.2(安全係数)

≒ 157kN

であることから,荷重の大きさを157kN(16.0tf)として 載荷を実施することにした.ここで,安全係数の1.2 は 材料の実強度が設計基準強度よりも高くなることなどに 配慮したものである.

また,文献5)に掲載されている東名高速道路(日本平) での実測調査(1997年)で得られたシングル換算軸重デー タ(複数の車軸の荷重効果をシングル軸に換算)から, 157kNで規準化した片側の等価走行回数(上下線を同量 と仮定)を次式で求めることができる.

$$N_{eq,P=157kN} = \Sigma (P_i / 157)^{-11.21} \times N_i$$
 (1)

ここに、N<sub>eq,P=157kN</sub>: 157kN 換算等価走行回数

*P<sub>i</sub>*: 実荷重(kN)

N<sub>i</sub>:荷重P<sub>i</sub>に対応する走行回数

式(1)で換算を行った結果,文献5)のデータから,157kN の輪荷重が722回/年走行しているとの結論を得ること ができた.1,000,000回の走行実験を実施した場合,約 1385年に相当する試験を実施することになるが,雨水等 の水の影響が損傷速度を最大で30倍程度に増幅するこ と<sup>6</sup>を考えると,実験による載荷負荷は実際の46年~ 1385年と同等との結論になる.このことからも,今回設



図-6 鉄筋ひずみの計測位置



図-7 コンクリートひずみの計測位置

定した荷重は決して過大なものではないことが分かる.

ただし, 阪大B 試験体は, 阪大A 試験体が早期に疲労 破壊したため, 荷重を140kNに低減して実施した.また, 山口大A・B 試験体は試験機の最大載荷荷重の制限から 147kN で実施した.

試験中の計測項目は、静的測定として、輪荷重を試験 体中央に静的載荷した状態で①たわみ、②鉄筋ひずみ、 ③コンクリートひずみ、④ひび割れ発生状況を計測した. また、動的測定として、輪荷重を走行させた状態で①た わみ、②鉄筋ひずみ、③コンクリートひずみ、④ひび割 れ挙動を計測した. それぞれの計測器取り付け位置を図 -5~図-7 に示す.

# 3. 試験結果の概要

共通試験における結果の概略を紹介する.大阪大学では2体試験した.先に試験した阪大Aでは,輪荷重157kNを40,000回走行させたときに押抜きせん断破壊が生じた.大阪大学の試験機は他の試験機に比べて載荷板の平面寸法が小さく,床版に作用するせん断力が大きいことで早期に破壊した可能性,また,阪大Aは試験体がわずかにねじれていたため,周辺の支持条件が不十分になり早期に破壊した可能性などが考えられた.このため,続いて試験した阪大Bでは,試験早期における破壊を避けるために輪荷重を140kNに減少させて走行試験を実施した.その結果,626,000回走行させた時点で押抜きせん断破壊が生じた.(独)土木研究所で実施した土研では,157kN

の輪荷重を 1,342,300 回走行させたときに押抜きせん断 破壊が生じた.(㈱IHIで実施したIHIでは、157kNの 輪荷重を 1,066,000 回走行させたときに押抜きせん断破 壊が生じた.(㈱横河ブリッジで実施した YBC では、 157kN の輪荷重を 3,250,000 回まで走行させたが破壊し なかった.

他方, ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機を用いた東京都の試験では, 157kN の輪荷重を 225,161 回走行させたときに押抜きせん断破壊が生じた.山口大学で実施した試験では,先に試験した山口大 A は, 147kN の輪荷重が190,000 回走行したときに押抜きせん断破壊が生じた.続いて試験した山口大 B は, 147kN の輪荷重を 290,000 回まで走行させたが破壊しなかったため試験を中断した.

以下に各試験機種別で確認された試験結果について概略を示すことにする.

# 3.1 鉄輪式試験機による結果の概要

### (1) ひび割れの発生状況

ひび割れ発生状況は、床版の上面・下面ともに目視に よる観察を行い、確認されたひび割れについてはマーキ ングを行った.その際、マーキングを行うひび割れはそ の幅による選別は行わず、目視で確認できたひび割れ全 てにマーキングした.

ひび割れ観察の結果から得られるひび割れ密度の経時 変動を図-8に示す.ひび割れ密度と走行回数との関係は, 第1段階:載荷初期における急激なひび割れ発生による ひび割れ密度の増加,第2段階:ひび割れ密度が緩やか に増加,第3段階:ひび割れ密度の増加が停留,といっ た3段階に分けられている<sup>7)</sup>.本試験結果においてもこ の傾向が見られ,阪大Aおよび阪大Bを除いた3体の試 験体のひび割れ密度は,走行回数25万回程度で14m/m<sup>2</sup> に達し,それ以降のひび割れ密度の増加は僅かであった. 図-8の結果は阪大A,Bと土研,IHI,YBCの2グルー プに大別できるが,両グループの試験上の違いは床版支 間と載荷板サイズであることから,これらのいずれかも しくは両方がひび割れ性状に影響したものと考えられる.

# (2) たわみの計測結果

活荷重たわみと走行回数との関係を図-9に示す.ただし、阪大Bのデータは比較のために計測データを157kNに換算したものを示している.この図から、各試験体の活荷重たわみの挙動に大きな差が見られた.大阪大学の輪荷重走行試験機とその他の輪荷重走行試験機との間には、床版支間長の違いがあるものの、阪大A、阪大BおよびIHIに関しては、研究当初の想定に近い挙動を示したと判断できる.一方、土研やYBCに関しては、試験の終盤においても極めて安定した挙動であった.また、試験開始直後の挙動を確認するために、横軸を対数軸として試験結果をまとめた図-10を見ると、試験開始直後の走行回数10,000回に到達するまでの間は試験体ごとの大きな相違が確認できない.このことから、試験体には





図-14 下側配力鉄筋の活荷重ひずみの変動

大きな初期欠陥はなかったものと考えられる. その一方 で、最終的な走行回数は試験機ごとに大きくばらつく結 果となっているが、これは、既往の研究<sup>®</sup>で明らかにさ れているように RC 床版の疲労強度曲線の傾きは緩やか であることが理由と考えられる. すなわち、試験体が持 つ強度や寸法のばらつきは、曲げ耐力や押抜きせん断耐 力にわずかな差を生じさせるが、疲労強度曲線の傾きが 緩やかであるために、最終的な走行回数に大きな差が生 じたのではないかと推察する.

#### (3) 鉄筋ひずみの計測結果

試験体中央の上側主鉄筋および下側主鉄筋に配置した ひずみゲージにより計測されたひずみ(活荷重成分)と 走行回数の関係をそれぞれ図-11および図-12に示す.ま ず,図-11 を確認すると,共通試験で押抜きせん断破壊 を呈した試験体(阪大A,阪大B,IHI)においては,試 験の終盤において活荷重ひずみが急激に増加しているこ とが確認できる.これに対し,土研,YBCにおいては, 活荷重ひずみは極めて安定した挙動を示しており,試験 終了時に至るまで,十分な性能を保持した状況であった ことが確認できる.一方,図-12の下側主鉄筋の活荷重 ひずみを確認すると,上側主鉄筋のひずみほど大きな変 動は無いものの,阪大A,阪大B,IHIでは試験終盤に おいて活荷重ひずみのデータに小さな変動が確認できる. 試験体中央の上側配力鉄筋および下側配力鉄筋に配置



図-15 ひび割れ密度の変動 (ゴムタイヤ式)

したひずみゲージにより計測されたひずみと走行回数の 関係をそれぞれ図-13 および図-14 に示す.上側配力鉄筋 のひずみを確認すると,主鉄筋の変動と同様に,破壊近 くで阪大 A,阪大 B, IHI においてひずみの急増が確認 できる.これに対し,土研では活荷重ひずみの値が安定 した状態にある.また,YBC では 10,000 回以降の活荷 重ひずみは圧縮側にシフトする傾向にあるが,試験の終 盤に至るまでひずみの急増を示すことはなかった.

さらに、図-12 と図-14 において、阪大A では破壊直前 のひずみ性状が他の試験体と異なるように見える. すな わち、図-14 の配力鉄筋のひずみは破壊直前に一旦減少 した後、再び増加し、これと同時に主鉄筋のひずみは一 旦増加した後、減少している. 試験体に設置したひずみ ゲージが少ないため、明言するのは難しいが、図-12 と 図-14 に見られる阪大A のひずみの増減は、床版のはり 化現象を捉えたデータと思われる.

#### 3.2 ゴムタイヤ式試験機による結果の概要

ゴムタイヤ式試験機による試験は、東京都と山口大学 で実施されたが、山口大学の試験では、輪荷重走行範囲 と試験体支持条件との兼ね合いから試験体の短辺付近に おいて曲げの影響が顕著で他の試験体とは破壊性状が異 なったため、試験結果の比較では除外することにした. したがって、以下では、東京都の試験結果との比較に土



表-4 各試験体の床版支間, 載荷荷重およびたわみの計算値

試験体名	阪大A	阪大B	山口大AI山口大B		土研	東京都	IHI	YBC
試験実施機関	大阪大学		山口大学		(独)土木研究所	東京都 土木技術研究所	石川島播磨 重工業(株)	(株)横河ブリッジ
床版支間 <i>L</i> [mm]	2000	2000	2000	2000	2500	2500	2500	2500
載荷荷重 <i>P</i> [kN]	157	140	147	147	157	157	157	157
全断面有効たわみ W <sub>0</sub> [mm]	0.404	0.340	0.438		0.734	0.774	0.857	0.796
引張無視たわみ $W_{ m c}$ [mm]	2.06	1.72	1.79		3.47	4.34	3.94	3.98

研およびIHIの試験結果を用いることにした.

## (1)ひび割れの発生状況

床版下面のひび割れ密度の経時変動を図-15 に示す. 試験前のひび割れはいずれも発生していない. 走行回数 10,000 回のひび割れ密度は,東京都が 9.6m/m<sup>2</sup>, IHI が 8.8m/m<sup>2</sup>と大差はないが,土研は 12.2m/m<sup>2</sup>でやや大きい 発生状態であった.その後のひび割れ密度の経時変動で は,東京都は急激に増加したのに対して, IHI と土研は 200,000 回以降緩やかに増加し 1,000,000 回までほぼ同じ である.また,破壊時の最大ひび割れ密度は,東京都が 18 m/m<sup>2</sup>, IHI が 17m/m<sup>2</sup>でありほぼ同程度である.

# (2) たわみの計測結果

活荷重たわみと走行回数との関係を図-16 に示す.東 京都と IHI は活荷重たわみが引張無視を超えているが, 土研は引張無視よりも低いレベルで活荷重たわみが停留 している.活荷重たわみが引張無視の値を超える走行回 数を破壊時の走行回数で除した比は、東京都が0.64 であるのに対して、IHIは0.95 であった.

## (3)鉄筋ひずみの計測結果

試験体中央の下側主鉄筋および下側配力鉄筋に配置し たひずみゲージにより計測されたひずみ(活荷重成分) と走行回数の関係をそれぞれ図-17 および図-18 に示す. 主鉄筋,配力鉄筋ともに破壊に至った試験体の方がひず みレベルも高くなっている.東京都と土研を比較すれば, 主鉄筋および配力鉄筋ともに活荷重たわみと同様にその 差が大きい.特に,東京都の主鉄筋ひずみの初期増加量 が大きくなっており,活荷重たわみの橋軸直角方向のた わみ分布と同様に,載荷幅が影響しているものと推察さ れる.

# 4. 試験結果に対する検討

### 4.1 床版中央の活荷重たわみに関する検討



床版劣化の代表的指標である床版中央の活荷重たわみ について各試験体の試験結果の比較を行う.

床版中央(床版たわみ測定位置 D3)の活荷重たわみの 変動を図-19に示す. どの試験体においても輪荷重走行 回数が増えるにつれて活荷重たわみが増加し,床版の劣 化が進んでいることがわかる.共通試験では試験機関に よって試験機の寸法や仕様が異なるため,それぞれの試 験体で床版支間が同じではない.

表-4 には各試験体の床版支間(L)を示す.この床版支間 の違いを考慮して活荷重たわみを比較するため,図-19 の縦軸である活荷重たわみをそれぞれの試験体の床版支 間で除して整理したものを図-20 に示す.図-19 と図-20 を比較すると,活荷重たわみを床版支間で除して,床版 支間の違いを考慮することによって各試験結果間の差が やや小さくなっている.出来形の違いにより各試験体の 床版厚も異なっていたが,194~199mm 程度の範囲であ り大差がなかったため,ここでは床版厚による無次元化 は行わなかった.

一部の試験体で異なっている載荷荷重および各試験体の出来形の違いを考慮するため、式(2)に示す、松井・前田によるたわみ劣化度 $D_{\delta}^{50}$ を使って試験結果を整理する.

$$D_{\delta} = \frac{W - W_0}{W_c - W_0} \tag{2}$$



ここで,

D<sub>δ</sub>:たわみ劣化度

W:計測された活荷重たわみ

W<sub>0</sub>:床版の全断面を有効とした理論たわみ

W<sub>c</sub>:引張側コンクリートを無視した理論たわみ

式(2)中のW<sub>0</sub>とW<sub>c</sub>の値は、各試験体の載荷荷重、載荷 面形状、載荷面積、試験後の各試験体を切断して測定し た床版厚と鉄筋位置(高さ)および試験体ごとに材料試 験を行って調べたコンクリートの材料定数を考慮して、 薄板理論<sup>9</sup>に基づくプログラムにより各試験体について 計算した.表-4に各試験体の載荷荷重とW<sub>0</sub>とW<sub>c</sub>を示す. 山口大Aと山口大Bについては、試験体の切断を行って おらず床版厚と鉄筋位置の測定値がないため、土研で計 測された床版厚と鉄筋位置の値を用いてW<sub>0</sub>とW<sub>c</sub>を計算 した.

輪荷重走行回数とたわみ劣化度*D*<sub>6</sub>の関係を図-21 に示 す.図-21より、床版劣化の指標にたわみ劣化度*D*<sub>6</sub>を用 いることで各試験結果間の差が図-20よりもさらに小さ くなっていることがわかる.ただし、たわみ劣化度*D*<sub>6</sub> を用いて結果を整理した図-21においても床版全体の平 面度などの試験体ごとに異なっている寸法精度の影響は 考慮できておらず、試験体形状のそりやねじれなどの個 体差による影響は排除できていないことに注意する必要 がある.



図-21 で早期に破壊した阪大 A を除くと,輪荷重走行 回数 10 万回までは各試験体の試験結果が比較的近くな っており,10 万回以降で急激に変化し差が生じている. そこで輪荷重走行回数 10 万回までを取り出したものを 図-22 に示す.図-22 中には阪大 A を除いたデータによる 近似曲線(最小二乗法による)もあわせて示す.この近 似曲線の決定係数(R<sup>2</sup>値)は0.6099 と0.5 以上であり, 比較的よい精度の近似だといえる.

図-22より,各試験結果でグラフの傾きがおおよそ近く なっていることがわかる.そこで,式(3)に示すたわみ劣 化度の増加率*d*<sub>8</sub>の変化を表したものを図-23に示す.

$$d_{\delta,i} = \frac{D_{\delta,i} - D_{\delta,i-1}}{N_i - N_{i-1}}$$
(3)

ここで,

d<sub>δi</sub>:計測ステップiのたわみ劣化度の増加率

D<sub>δi</sub>:計測ステップiのたわみ劣化度

N<sub>i</sub>:計測ステップiまでの輪荷重走行回数

図-23 は、1回の輪荷重走行により床版が受けるダメージ の変化を表しており、個々の床版に対してはたわみの増 加率を意味している. 阪大Aを除き、各試験結果は比較 的一致する傾向があり、特に輪荷重走行回数10万回まで はよく一致している. 図-23の輪荷重走行回数10万回ま でを取り出したものを図-24に示す. 図-24中には阪大A を除いたデータによる近似曲線もあわせて示す. この近 似曲線の決定係数は0.9404と大きく、精度の高い近似で あるといえ、輪荷重走行回数10万回までは各試験体で試 験機が異なっていても、輪荷重の走行により床版が受け るダメージの変化がほぼ同様であることを表していると 考えられる.

このように、床版中央の活荷重たわみを床版劣化の指標として試験結果の比較・分析を行った結果、試験機が 異なっても輪荷重走行回数 10 万回までは、阪大 A を除き各試験機から床版が受けていたダメージはほぼ同等であると考えられる.但し、各試験体の最終走行回数に大



きな差が生じていることから、試験上のわずかな差や試 験体の出来形のばらつきが、床版が終局状態に至るまで の寿命に対して大きな影響を及ぼしていることが示唆さ れる.輪荷重走行試験は種々の条件について入念な配慮 のもとで実施されるべきと考える.

### 4.2 床版の曲率に関する検討

4.1 で検討した床版中央の活荷重たわみから見出され る傾向について確認してみると、床版のたわみから推定 される床版の劣化程度は荷重載荷時に発生する曲げモー メントの大小と関係があると思われたので、床版に発生 する曲げモーメントに関係する指標として、床版の曲率 に着目した検討を実施することにした.ここでは図-25 に示す、床版中央と両側に±600mm 離れた点のたわみか ら床版中央の橋軸方向の曲率(1/r<sub>x</sub>)を式(4)により算出し た.橋軸直角方向の曲率(1/r<sub>x</sub>)をたわみの値を用いて差 分表示すれば、1/r<sub>x</sub>も同様に算出できる.

$$1/r_{y}=(W_{2}-2W_{3}+W_{4})/\lambda^{2}$$
 (4)  
 $t t t t$ ,

W2:計測点2におけるたわみ

W3:計測点3(=中央)におけるたわみ

W4:計測点4におけるたわみ

λ:変位計測間隔

共通試験において確認された床版の曲率の変動を図 -26,27 に示す.これらの図を確認すると、たわみで比 較した場合よりも試験体間でのばらつきが大幅に低減で きており,特に試験開始後10万回までのデータのばらつ きが小さくなっていることがわかる.また、床版の曲率 とたわみにより与えられる劣化度を比較した結果を図



図-29 床版の劣化度と橋軸直角方向曲率の関係 -28, 29 に示す. これらの図を見ると、床版支間の異な

-20,29 にパリ. これじらい因を見るこ, 休放文间の異なる床版のデータを分離することで, たわみ劣化度と床版 曲率の間にかなり良い相関を見出せることがわかった.

# 4.3 ひび割れの発生状況に関する検討

共通試験で確認されたひび割れ密度の変動を図-30 に 示す.この共通試験においては、走行開始10万回程度を 経過した時点でひび割れ密度は概ね12~16m/m<sup>2</sup>の範囲 に分布している.ひび割れ密度とたわみ劣化度を比較し てみると、図-31 に見られるように、ある程度の傾向は 見られるものの、比較的大きなばらつきが見えるという 結果になった.ここで、ひび割れの発生状態の推移を見 やすくするために、縦軸にひび割れ密度比(=ひび割れ 密度/破壊時ひび割れ密度)、横軸に走行回数/は開示走 行回数を用いて実験データを表示してみた.この時の結 果を図-32 に示す.この図を見ると、比較的早期にひび 割れが出やすい試験機(土研、YBC)と多少ひび割れの 発生が後れる傾向にある試験機(東京都、IHI、阪大B) とで傾向が明確に分かれるという結果が得られた.

### 4.4 鉄筋ひずみに関する検討

ここでは、共通試験で計測されたひずみデータのうち、 鉄筋に発生しているひずみに関して検討を加えることに



図-33 ひずみの分離(定義)



する.

今回の検討では、活荷重ひずみの変動を評価するにあたり、図-33に示す計測断面に作用する断面力の中でも曲げモーメントによって生じるひずみの差に相当する $\epsilon_M$ に着目して検討を行う.以下では計測点1~3における主鉄筋において測定された $\epsilon_M$ をM1~M3,配力鉄筋についての $\epsilon_M$ をD1~D3と呼ぶ.試験体の主鉄筋から得られたM1~M3の変動を図-34~図-36に示す.M1の測定結果では東京都以外の測定値が200µ付近に留まり、測定値の変動は小さいものとなっている.

これに対して、M2 と M3 の測定結果では試験体間で 測定値に 400 $\mu$  程度の比較的大きなばらつきが確認でき る.ただし、M2 と M3 の測定値の大小関係と試験体の



図-39 M3/D3 の変動

支間長の間には明確な相関は認められないことから,試 験機の支持条件の差異(床版支間長)に起因するもので はないと考えられる. M2 の測定結果をみると IHI の測 定結果は 10000 回以降一時的に減少する傾向を示してい るが,それ以外の測定結果は安定した値を示している. 床版中央における測定値である M3 に関しても 10000 回 までは増加傾向を示すが,10000 回以降は値が安定して いる.また,各試験体の破壊直前の測定値を確認すると, M1 の測定値の一部は急激に減少しているが M2 と M3 の測定値の一部には増加の傾向を示していることが確認 できる. このような傾向の違いは試験体の違いに関わら ず M1 と M2 の間にその原因となる損傷要因が存在する ことを示唆している.また,配力鉄筋に関する測定値の うち、D3 の測定結果を図-37 に示す.D3 の測定結果を みると、すべての試験体において顕著な減少傾向は認め られない.また、一部の試験体では破壊する直前に大き な増加が認められる.これに対して、D2 の測定結果をみ ると、阪大A以外の試験体では測定値が減少の傾向を示 している.

また、床版中央における2つの方向におけるひずみの発 生状態を比較するためにM3とD3の関係を図-38に示す. この図において各試験体に着目することにより試験体ご とにデータが分離する傾向にあることがわかる.この各 試験体の違いを確認するためにM3/D3の変動を比較し た結果を図-39に示す.この図により、M3/D3の変動傾 向は試験体ごとに異なっており、試験の進行とともに M3/D3の値は低下する傾向にあることがわかった.また、 図-38におけるM3、D3の変化率を次式のように *ΔMI*と 定義してその変動を調べた結果を図-40に示す.

 $\Delta MI = ((M3_{i}M3_{i-1})^2 + (D3_{i}D3_{i-1})^2)^{0.5} / (N_iN_{i-1})$ (5)

△*MI*: 床版中央における (*M3*, *D3*)の変化率 *N<sub>i</sub>*: i番目のデータに対応する荷重走行回数

*M3*<sub>i</sub>, *D3*<sub>i</sub>:i番目の*M3*, *D3* 

図-40をみると今回の検討で求めた指標  $\Delta MI$  はたわみ による劣化度の増加率  $d_{\delta}$ と同様の傾向を示している. こ のような指標に関しては今回の検討で初めて見出された ものであり、その物理的な意味などに関しては今後検討 する必要がある.

# 5. まとめ

本研究により実施された一連の検討の結果,床版の輪 荷重に対する疲労耐久性を統一的に評価するためには, 以下のことに留意する必要がある.

- (1) たわみに関しては、そのままの値で評価することは 困難であるが、たわみ劣化度を導入することにより、 より統一的な評価が実現できる可能性がある.
- (2) 床版の曲率はたわみ劣化度との相関が高い指標であることが明らかになった. 試験体寸法や試験機の相違する場合でも、曲率を用いた評価により試験体の損傷状態の把握ならびに試験体同士の比較が可能と考えられる.
- (3) 試験上のわずかな差や試験体の出来形のばらつきが、 床版が終局状態に至るまでの寿命に対して大きな影響を及ぼしている可能性がある.輪荷重走行試験は 種々の条件について入念な配慮のもとで実施される べきと考える.



### 謝辞

本研究を取りまとめるに当たり,(社)土木学会 鋼構造 委員会 道路橋床版の合理化検討小委員会の各委員には 貴重なご意見をいただいた.また,研究の基となった共 通試験では、民間企業28社に多大な支援を,特に自主参 加頂いた株式会社横河ブリッジならびに株式会社 IHI には貴重なデータを提供していただいた.ここに記して 感謝の意を表す.

### 参考文献

- 大西弘志,永田淳,長屋優子,鈴木統:クランク式試験装置 を用いた道路橋床版の共通輪荷重走行試験,第五回道路橋床 版シンポジウム講演論文集,pp.31-38,2006.7
- 2) 関口幹夫,横山広,浜田純夫:自走式輪荷重走行試験機を用 いた道路橋床版の共通試験,第五回道路橋床版シンポジウム 講演論文集, pp.39-46, 2006.7
- 3) 上條崇, 鈴木孝洋, 大西弘志: 道路橋RC床版の共通試験に 関する解析, 第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.47-54, 2006.7
- 4) 財団法人 災害科学研究所:各種の輪荷重走行試験装置下での床版疲労耐久性と S-N 疲労曲線の統一化についての総合評価(28 社共同研究での委託), 2006.3.
- 5) 安松敏雄,長谷俊彦,篠原修二,長瀬嘉理:交通荷重実態を 考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討,第一回鋼橋床版 シンポジウム講演論文集,pp.77-82,1998.11
- 6) 松井繁之: 道路橋床版, 森北出版, 2007.10
- 松井繁之,前田幸雄:道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一考察,土木学会論文集,No.374, pp.419-426, 1986.10
- 8) 松井繁之:橋梁の寿命予測,安全工学 Vol.30 №6, pp.432-440, 1991
- 9) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会:道路 橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, pp.42-44, 2004.11

(2008年9月18日受付)