

## 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

Unified Examination of Highway Bridge Slabs Using Wheel Load Running Machine with Crank System.

大西 弘志\*, 永田 淳\*\*, 長屋 優子\*\*\*, 鈴木 統\*\*\*\*

Hiroshi ONISHI, Jun NAGATA, Yuko NAGAYA, Osamu SUZUKI

\*博士(工学) 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\*株式会社横河ブリッジ 技術本部 技術研究所 研究課 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27)

\*\*\* (独) 土木研究所 構造物研究グループ 橋梁チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

\*\*\*\*石川島播磨重工業株式会社 北海道支社 (〒060-0002 札幌市中央区北 2 条西 4 丁目 1 番地)

The fatigue of reinforced concrete bridge slabs is one of the most important phenomena in the maintenance of highway bridges. The account of mechanism of fatigue of RC slabs is given by many previous studies using wheel load running machines in some institutes. But there are many differences among the testing condition in each wheel load running machine. It is impossible to compare the results of fatigue tests given by different wheel load running machines simply. Then the project to make the data to compare the results of fatigue tests given by various testing machines was carried out.

*Keyword: RC slab, wheel load running test, fatigue durability, unified examination*

キーワード：RC 床版，輪荷重走行試験，疲労耐久性，共通試験

### 1. はじめに

道路橋 RC 床版のひび割れ損傷は、わが国における道路橋に発生する重要な損傷のうちの一つであると認識されている<sup>1)</sup>。道路橋 RC 床版のひび割れ損傷の発生機構に関しては既に発表されている数多くの研究成果により説明がなされている<sup>2)</sup>。これらの研究において、輪荷重走行試験が大きな役割を果たしたことは周知のことであり、現在においても床版研究において重要な位置を占めている。現在、わが国において稼動している輪荷重走行試験機は 10 数台が確認されている。輪荷重走行試験機の形式としては、フライホイール等の回転力を往復運動に変換するクランク式(鉄輪式、図-1 参照)と移動台車に駆動装置を搭載する自走式(ゴムタイヤ式)に大別される。これらの形式の相違に起因する影響に関しては未だに十分な検討がなされているとは言いがたい。さらには、同形式の試験機であっても、供試体となる床版の支持条件や輪荷重の載荷方

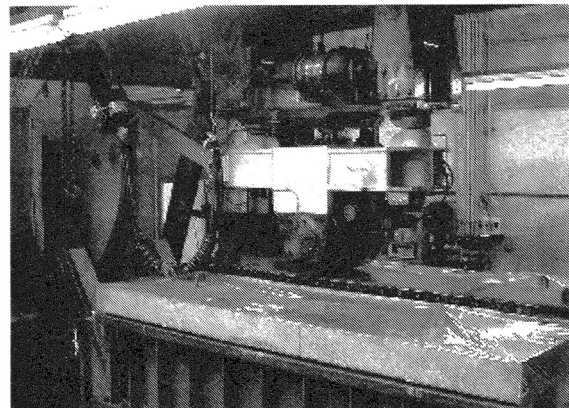


図-1 クランク式輪荷重走行試験機

法による影響が十分に検討されておらず、複数の輪荷重走行試験機を用いた場合のデータの取りまとめに関して明確な手法が示されていないのが現状である。そこで、本研究では、道路橋 RC 床版の疲労耐久性を評価するための統一的手法を提案することを目的として、共通の仕様を有

表-1 クランク式輪荷重走行試験機の性能<sup>3)</sup>

項目		大阪大学	(独) 土木研究所	横河ブリッジ	石川島播磨重工業
性能	最大荷重(kN)	294	490	196	490
	載荷時 走行速度	1680 往復/時	2000 往復/時	1020 往復/時	1800 往復/時
	走行範囲(m)	2.0	3.0~1.0	2.0	3.0~1.0
試験体最大寸法 (m, 幅×長さ)		2.0×3.0	3.3×4.5	4.8×12.0	5.3×4.5

する供試体床版（以下、供試体と呼ぶ）を用いて複数の輪荷重走行試験機を用いた試験を実施した。

## 2. 試験方法

### 2.1 輪荷重走行試験機

本研究で使用したクランク式輪荷重走行試験機を表-1に示す。これらの試験機のうち、基本的な試験が実施され、S-N 曲線が示されているものは大阪大学<sup>1)</sup>と独立行政法人土木研究所<sup>3)</sup>の試験機である。また、石川島播磨重工業の試験機に関しては S-N 曲線に関係する参考となるデータが公開されている<sup>4)</sup>。

クランク式試験機の駆動機構は、モーター等で構成される動力システムからの力をフライホイールの軸に伝達することによってフライホイールを回転させ、フライホイールに生じた回転運動を台車とフライホイールの間を連結するロッドを介して台車の往復運動に変換させるというものである。この機構を有する試験機では動力システムが台車とは別に存在するため、載荷に必要な周辺設備の条件が許す限り、高速での荷重移動が可能なシステムとなっている。また、車輪に鉄輪を用いていることが多く、ゴムタイヤでは載荷できない大きな荷重での試験が可能であり、床版の破壊寿命を調べるための促進試験を行うのに向いている。

クランク式の走行試験機で車輪に鉄輪を用いた場合、車輪を直接供試体に接触させると載荷荷重は線荷重として供試体に作用するため、適切な試験を実施することができない。そこで、クランク式の走行試験機を有する各機関においては荷重載荷面積を確保するために様々な形式の軌道を車輪と供試体の間に設置し、より実交通荷重に近い荷重条件を再現している。軌道の中でも荷重載荷面積を確保するために設置されるブロック類には様々な形式（図-2）があり、これらのブロックの形式により荷重分布に差異があると見られており、試験における重要なパラメータ

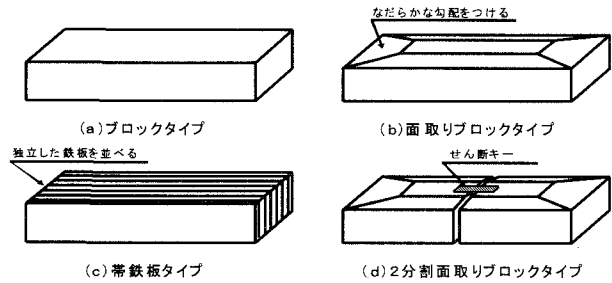


図-2 輪荷重走行試験機用載荷ブロック

のうちの一つとなっている。

クランク式試験機を用いた既往の研究において、S-N 曲線の式が提示されているのは大阪大学と土木研究所であり、石川島播磨重工業の試験機ではこれらの2つの試験機で示された曲線と試験結果の比較を行っている。

大阪大学で実施された既往の研究によれば、RC 床版の S-N 曲線は昭和 39 年道路橋示方書を適用した供試体の実験データを用い、次のような式で示される。

$$P/P_s = -0.07166 \log N + 0.7292 \quad (1)$$

ただし、 $P$  : 載荷輪荷重  
 $P_s$  : 供試体の押抜きせん断耐荷力  
 $N$  : 荷重走行回数

ここで、式(1)で用いられている  $P_s$  は供試体の破壊形態として梁状化を前提にしたときの押抜きせん断荷重( $P_{sx}$ )ではなく、通常の静的耐荷力試験で得られる押抜きせん断荷重を算定する際に用いられ、次の式で与えられる値である。

$$P_s = \tau_{s,max} \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + \sigma_{t,max} \{2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m\} \quad (2)$$

ただし、

$a, b$  : 載荷版の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長 (mm)

$x_m, x_d$  : 主筋断面、配力筋断面の引張側コンクリート無視時の中立軸有効高さ (mm)

$d_m, d_d$  : 主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ (mm)

$C_m, C_d$  : 引張側の主鉄筋、配力鉄筋のかぶり (mm)

$\tau_{s,max}$  : コンクリートの最大せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{t,max}$  : コンクリートの最大引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

表-2 供試体の諸元 (単位 : mm)

試験体略称	試験体寸法	床版支間	主鉄筋			配力鉄筋			載荷ブロック	実施機関
			呼び	有効高	間隔	呼び	有効高	間隔		
阪大1 阪大2	幅 2200 長さ 3000 厚さ 190	2000	D16 (D16)	160 (30)	150 (300)	D13 (D10)	146 (43)	300 (300)	(b)	大阪大学
土研	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500							(a)	(独) 土木研究所
IHI	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500							(d)	石川島播磨重工業(株)
YBC	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500							(c)	(株)横河ブリッジ

※表中の ( ) の値は圧縮鉄筋, ブロック種別は図-2 参照のこと

これに対し, 現在では精度を高めるため, 供試体に梁状化が発生した状態を想定した押し抜きせん断耐荷力 ( $P_{sx}$ ) を用いて輪荷重を無次元化した次の式が示されている.

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.51965 \quad (3)$$

ここで, この式において荷重を無次元化するために用いられている  $P_{sx}$  は式(4)で与えられる値である.

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} x_m + \sigma_{lmax} C_m) \quad (4)$$

ただし,  $B$ : 梁状化した時の梁の幅 (mm)

$$B = b + 2d_a \quad (5)$$

土木研究所における既往の研究では, 式(3)と同様の形式を有する次の式を S-N 曲線式として提示している.

$$\log(P/P_{sx}) = -0.0545 \log N + \log 0.9565 \quad (6)$$

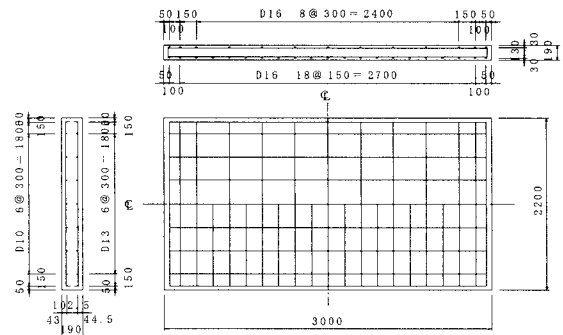
この式と式(3)を比較すると明らかに曲線の傾きや切片が異なっており, このことは支持条件や載荷板の寸法が異なることによって S-N 曲線を変更しなければならないことを示唆している.

## 2.2 供試体

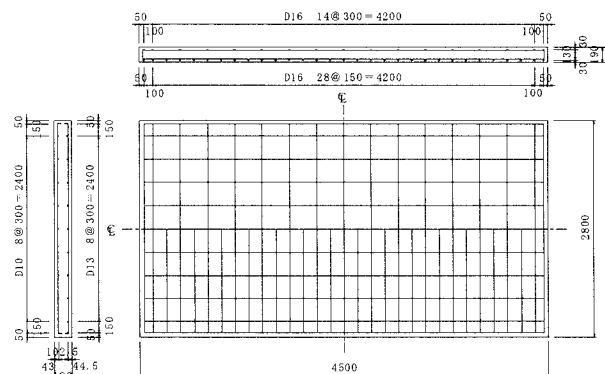
本研究で使用した供試体の諸元を表-2 と図-3 に示す. また, 使用したコンクリートの設計条件を表-3 に示す. 今回の試験で使用した供試体は床版厚を 190mm に統一し, 供試体の幅や長さ, 床版支間を試験機に合わせて変化させている. 大阪大学の試験機で使用した供試体の寸法は 190mm×2200mm×3000mm (床版支間 2000mm) であるのに対し, それ以外の試験機で使用された供試体の寸法は 190mm×2800mm×4500mm (床版支間 2500mm) である. 本研究で試験に使用された各試験機の載荷ブロックの形式は表-2 中に示すとおりであり, 載荷荷重は 157kN を基本の荷重として試験を実施した.

表-3 コンクリート配合条件

セメント種類	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)
普通ポルトランドセメント	24	8	25



(a) 阪大1, 阪大2試験体



(b) 土研, IHI, YBC試験体

図-3 供試体の形状

表-4 計測項目一覧

計測項目	方法	計測箇所	計測点数
(1)たわみ(載荷時, 残留)	変位計	供試体下面	7
(2)鉄筋ひずみ(載荷時, 残留)	ひずみゲージ	供試体下面・上面	34
(3)コンクリートひずみ(載荷時, 残留)	ひずみゲージ	供試体下面・上面	8
(4)ひび割れ発生状況	目視(メッシュ 200mm)	供試体下面・上面	—
(5)ひび割れの動的挙動	3方向変位計 πゲージ	供試体下面ひび割れ	2 最大7箇所

### 2.3 計測項目

今回実施した輪荷重走行試験における計測項目は表-4に示すような内容に設定した。これは、各試験機関における計測項目のばらつきを避けるための設定であり、必要最低限の項目を設定している。供試体に発生するたわみと鉄筋及びコンクリートのひずみは輪荷重を供試体中央に静的に載荷した状態で計測した。また、供試体中央のたわみや鉄筋のひずみ、ひび割れの挙動に関しては輪荷重を走行させた状況での動的な計測を実施した。

## 3. 試験結果

### 3.1 結果の概要

本研究では使用する供試体の材料特性に起因するばらつきを極力回避するために、供試体のコンクリート打設を全て同じ日(H16.9.2)に行った。また、輪荷重走行試験に関しては試験実施機関の事情を考慮しつつ、H16.10.28からH17.5.7にかけて順次実施した。

大阪大学で実施した試験では、供試体を2体使用して試験を実施した。先に試験した供試体(以下、阪大1)では157kNの輪荷重が40,000回走行したときに押し抜きせん断破壊が生じた。続いて試験した供試体(以下、阪大2)では試験開始後早期における破壊を避けるため、輪荷重を137kNに減少させて走行試験を実施した。その結果、輪荷重走行回数が626,000回に達したときに押し抜きせん断破壊が生じた。土木研究所で試験を実施した供試体(以下、土研)では、1,260,000回の輪荷重走行試験を実施したが破壊には至らなかった。石川島播磨重工業(株)で試験された供試体(以下、IHI)では、輪荷重走行回数が1,066,000回に達した時点で供試体に押し抜きせん断破壊が確認された。(株)横河ブリッジで実施された試験では、輪荷重を3,250,000回走行させたが、供試体(以下、YBC)は荷重走行終了時においても未破壊の状態であった。

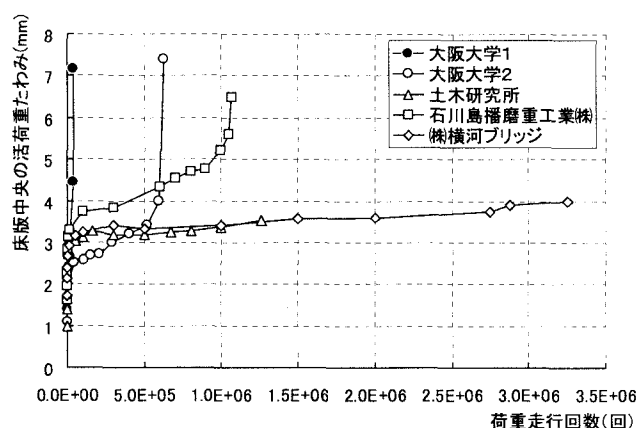


図-4 供試体中央の活荷重たわみの経時変動(1)

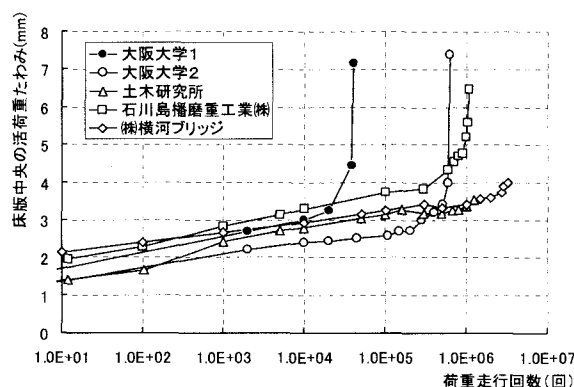


図-5 床版中央の活荷重たわみの経時変動(2)

### 3.2 たわみの計測結果

今回の試験で確認できた各供試体の中央の活荷重たわみの推移を図-4に示す。図中の阪大2のデータに関しては比較のために計測データを157kN換算したものを示している(以下のデータに関しても同様の処理を実施している)。この図を見ると、今回の試験において、供試体の挙動に大きな差が見られたことが確認できる。大阪大学の試験機とその他の試験機の間では床版支間に違いがあるので注意が必要であるが、大阪大学で試験された2体(阪大1、阪大2)とIHIに関しては、劣化速度の差はあるものの、研究企画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状況にあったことが確認できる。また、

試験の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示した図(図-5)をみると、試験開始後荷重走行回数が10,000回に到達するまでの間は供試体ごとの大きな相違が確認できていないことから、今回の試験結果のばらつきは供試体に有意な初期欠陥があったためではなく、供試体自体の品質に起因するばらつきが反映されたものであると推察することが出来る。

供試体中央におけるたわみの動的計測結果から求められた、動的振幅量の経時変動を図-6に示す。今回の試験において押し抜きせん断破壊を生じた阪大1阪大2とIHIの中央におけるたわみの動的振幅の挙動では、破壊の直前にたわみの振幅が大幅に増加する傾向が見られるが、今回の試験において破壊しなかった土研とYBCではこのような傾向は認められず、緩やかな増加傾向を示しているものの、安定した挙動を示している。これらのことから、今回の試験で破壊しなかった2体の供試体に関しては試験終了時点においても十分にその耐力を保っていたと判断できる。

今回試験した供試体の橋軸方向中央線に沿った活荷重たわみの分布状況の例を図-7、図-8に示す。これらの図を確認すると、今回の試験で使用した供試体では全体的に劣化が進行していることが確認できる。また、今回の試験において破壊を確認することが出来なかった土研やYBCでは、図-8に示すように、試験開始後の一定期間が経過した時点から、たわみの増加が確認できなくなったが、土研では1,260,000回、YBCでは3,250,000回の時点でわずかにたわみが増加していることが確認できた。

### 3.3 ひずみの計測結果

#### (1)主鉄筋ひずみ

主鉄筋の活荷重ひずみの計測例として、供試体中央の主鉄筋に配置されたゲージにより計測された結果を図-9、図-10に示す。図-9は上側主鉄筋、図-10は下側主鉄筋において計測された活荷重ひずみの経時変動である。まず、図-9を確認すると、今回の試験で押し抜きせん断破壊を呈した供試体(阪大1、阪大2、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、破壊を生じなかった供試体(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、下側主鉄筋の活

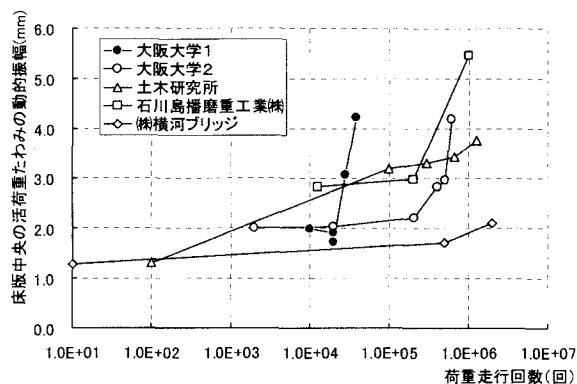


図-6 供試体中央活荷重たわみの動的振幅量の経時変

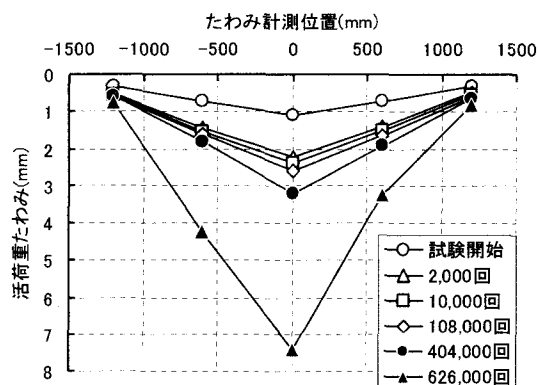


図-7 活荷重たわみの分布 (阪大2)

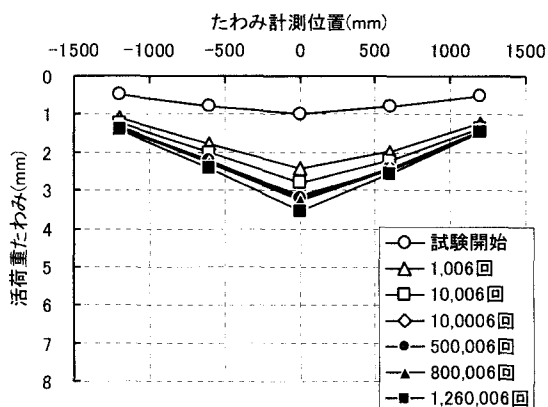


図-8 活荷重たわみの分布 (土研)

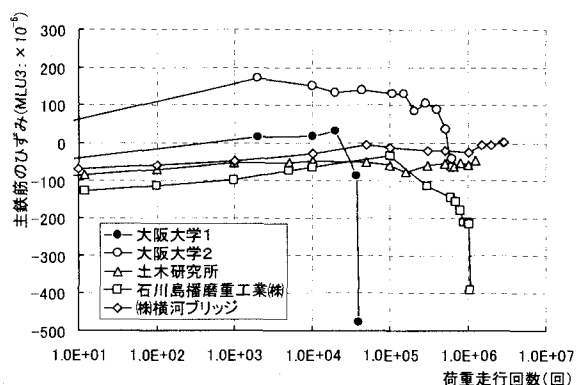


図-9 主鉄筋における活荷重ひずみの経時変動 (計測位置: MLU3)

荷重ひずみを確認すると、上側鉄筋のひずみほど大きな変動は無いものの、阪大1、阪大2、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。

### (2)配力鉄筋ひずみ

配力鉄筋の活荷重ひずみの計測例として、供試体中央の配力鉄筋に配置されたゲージにより計測された結果を図-11、図-12に示す。図-11は上側配力鉄筋、図-12は下側配力鉄筋において計測された活荷重ひずみの経時変動である。上側配力鉄筋のひずみを確認すると主鉄筋のときと同様に阪大1、阪大2、IHIにおいて圧縮ひずみの急増が確認できている。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ひずみが増加する傾向にあるが、試験の終盤に至るまでひずみの急増を示すことは無かった。

## 3.4 ひび割れの発生状況

### (1)供試体下面のひび割れ発生状況

供試体下面におけるひび割れの観察結果の例を図-13に示す。本研究で実施された一連の輪荷重走行試験では、供試体の下面にはこの図に示されたようなひび割れの形成が確認されたことから、今回の試験において供試体の劣化を適切に再現できたと判断することが出来る。また、これらの観察結果から与えられるひび割れ密度の経時変動を図-14に示す。この図において表現の都合上、荷重走行回数 1,500,000 回までのデータしか掲載していないが、YBC においては試験終了時に至るまでひび割れ密度は増加傾向を示していない。今回の試験結果を比較すると、阪大2のひび割れ密度が試験の最終段階においても  $14\text{m}^2$  に届かず、全体的に低い値となっている。それ以外の供試体で比較すると、阪大1と土研、IHIとYBCのひび割れ密度が比較的同程度の値を示しながら推移している。その後、早期に破壊した阪大1を除く3体の供試体では25万回以降においてひび割れ密度の増加が極めて緩やかになっている。これらの供試体の中で、破壊したIHIは試験終了時において  $17.17\text{m}^2$  のひび割れ密度であるが、土研、YBCにおいては、 $16\text{m}^2$  程度かそれ以下のひび割れ密度になっている。

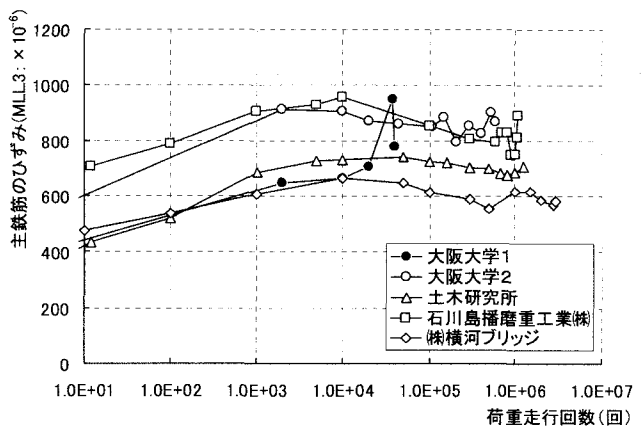


図-10 主鉄筋における活荷重ひずみの経時変動 (計測位置: MLL3)

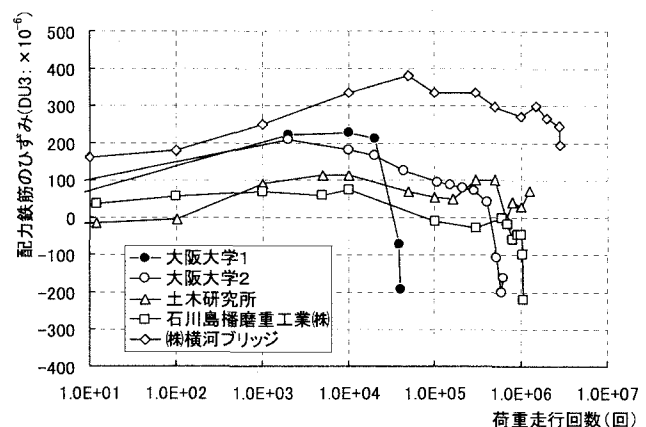


図-11 配力鉄筋における活荷重ひずみの経時変動 (計測位置: DU3)

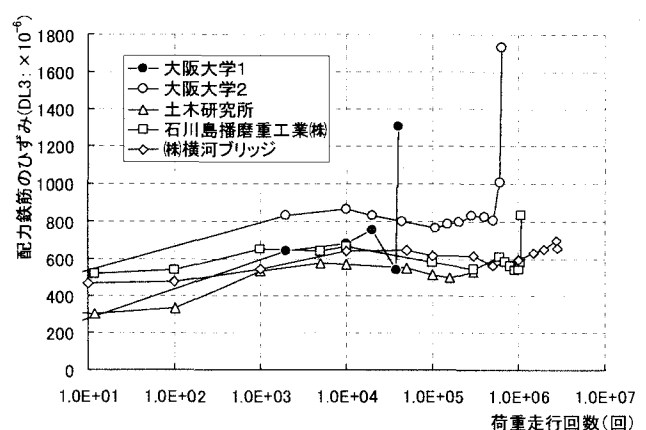


図-12 配力鉄筋における活荷重ひずみの経時変動 (計測位置: DL3)

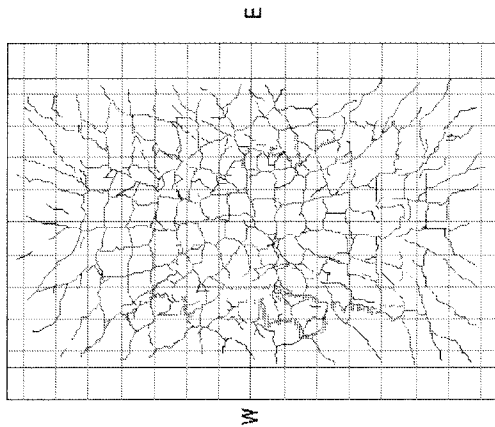


図-13 供試体下面のひび割れ観察結果（阪大1）

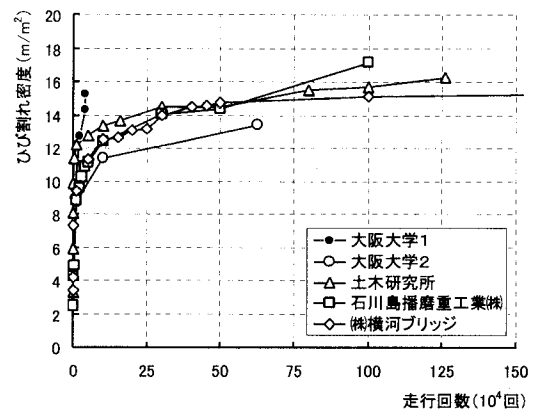
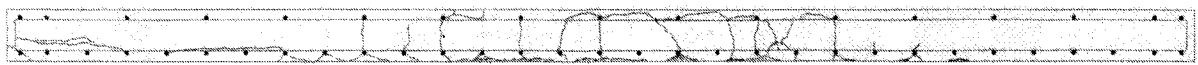
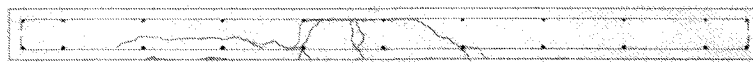


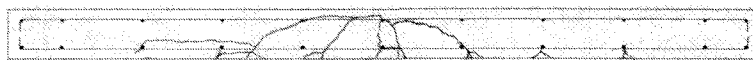
図-14 供試体下面のひび割れ密度経時変動



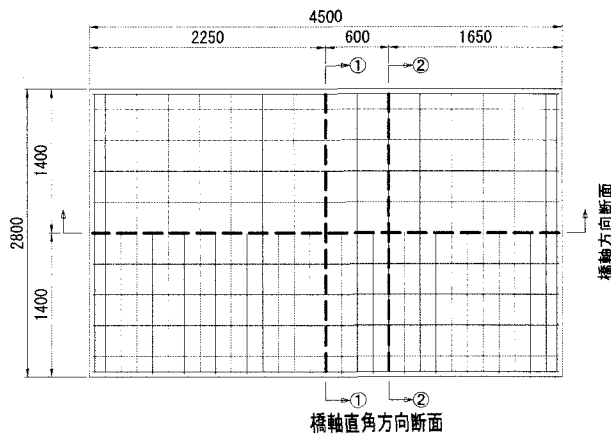
(a) 橋軸方向断面



(b) 橋軸直角方向断面①



(c) 橋軸直角方向断面②



(d) 供試体切断位置

図-15 供試体切断面におけるひび割れ観察結果（YBC）

### (2) 供試体切断面内のひび割れ発生状況

供試体を切断した際に確認できる、供試体内部のひび割れ発生状況の観察結果の例を図-15に示す。本研究で試験を行った供試体のうち土研を除く4体を切断しその内部のひび割れ発生状況を確認した結果、どの供試体においてもこの図に示されるのと同様のひび割れが確認できている。

割れ部における3つの方向に関する挙動（開き、ずれ、段差）に特有の波形を確認することができた。また、ひび割れ毎の挙動の違いに着目するため、ひび割れ部における開きとずれの計測値の関係を図-17に示すと、供試体（阪大2）においては橋軸方向に生じたひび割れよりも橋軸直角方向に発生したひび割れの方が大きな動きを示し、供試体の劣化に伴ってその動きがより増大していた。

### 3.5 ひび割れの動的挙動

今回の試験において確認できたひび割れの動的挙動の計測結果の例を図-16、図-17に示す。図-16を見るとひび

### 4. まとめ

本研究では、同時に製作したRC床版を用いて、異なる試験条件を採用している輪荷重走行試験機による試験を

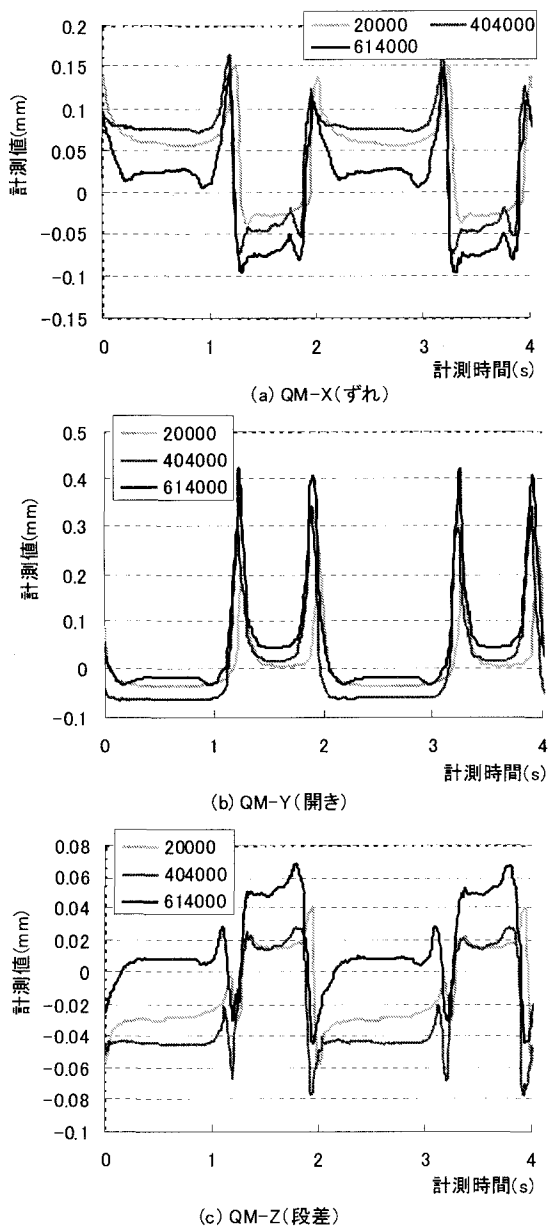


図-16 ひび割れの動的挙動 (阪大2)

実施した。その結果、どの試験機においても実橋における床版と同様の劣化機構を再現できること、供試体が破壊に至るまでの過程において、供試体の劣化速度に大きな差が生じることが確認できた。RC床版に限らずコンクリート系床版の S-N 関係の統一的評価にはこの原因を明らかにすることが必要であるため、今後、継続して検討を行う。

## 5. おわりに

本論文で示した一連の成果は (財) 災害科学研究所において企画、実施された「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

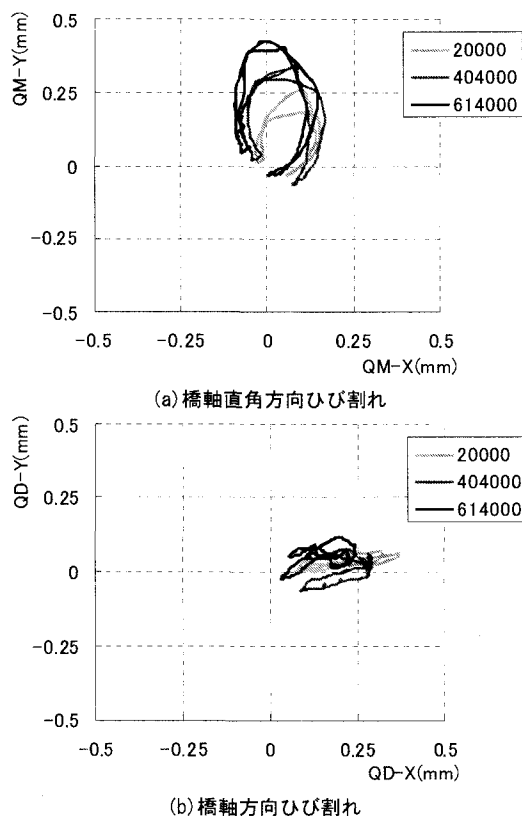


図-17 ひび割れの動的挙動における開き量(X)

と水平ずれ量(Y)の関係 (阪大2)

評価 (28 社共同研究)」の一部として実施された輪荷重走行試験のうち、クランク式試験機を用いた走行試験により与えられたものである。ここに記して上記研究に関係された各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば、西川、村越、上仙他：橋梁の架替に関する調査結果 (Ⅲ)，土木研究所資料 第 3512 号，1997.10
- 2) 例えば、松井：橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の寿命予測—，安全工学 Vol.30 No.6，pp.432-440，1991.
- 3) 例えば、内田、西川：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第 1 回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.37-42，1998.11
- 4) 大西、松井、渡邊：分割型荷重板を用いた輪荷重走行試験機による RC 床版の S-N 曲線の検討，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.223-228，2003.6