

6. 輪荷重走行疲労試験機を用いた道路橋床版の共通試験

Unified Examination of Highway Bridge Slabs That Uses Wheel Running Machine

技術調査課 関口幹夫

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、東京都管理の橋梁においても環状 7 号線の駒留陸橋を始め 40 年代中頃から床版の抜け落ち（押し抜きせん断破壊）が発生して大きな問題となった。昭和 50 年代から大学・公的研究機関等での室内実験および実橋の調査等により損傷メカニズムの研究が多方面で行われてきた。特に、これらの損傷メカニズムの解明では、大阪大学が開発した輪荷重走行試験機を活用した実験的研究が大きく寄与した¹⁾。その後、実物大試験体による輪荷重走行試験装置の導入が活発化し、平成 8 年に建設省土木研究所が 2 台導入し、平成 9 年には東京都土木技術研究所が導入した。

輪荷重走行試験機は、任意の荷重を作用させながら試験体上を輪荷重が往復運動するもので、国内には実物大試験体を扱える機種が十数台設置されている。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するクランク式（鉄輪式）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。この 2 つのタイプの試験機はそれぞれに特長を有しているものの、両者の相関は取れていない。また、同じクランク式においても機種間の相関は必ずしも明確になっているとは言いがたく、各機関の試験結果の評価において十分には整合が図られていないのが現状である²⁾。

このような背景のもと、土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会（平成 13 年 11 月～平

成 16 年 11 月）では、RC 床版の疲労耐久性を統一的に評価するためには、同一の条件で製作された試験機を用いて同時に試験を行う必要があると考え、RC 床版の共通輪荷重走行試験を計画した³⁾。この計画は平成 16 年 6 月より、(財)災害科学研究所と民間企業 29 社との共同研究⁴⁾として実施に移され、表 1 に示すクランク式（鉄輪）の(独)土木研究所（1 体）と大阪大学（2 体）、自走式（ゴムタイヤ）の東京都土木技術研究所（1 体）と山口大学（2 体）のほかに、民間企業の自主参加としてクランク式（鉄輪）の石川島播磨重工業（株）と(株)横河ブリッジ（各 1 体）を合わせた 6 台 8 体の試験体により試験が行われた。

共通試験で得られた試験データは、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試験方法分科会（平成 17 年 4 月～）において整理と考察が加えられ、平成 18 年 7 月開催の道路橋床版シンポジウムにおいて、成果の一部となる論文 3 編^{5, 6, 7)}が分科会報告の形で発表されている。

本文は、共同研究報告書および前記 3 編の分科会報告の論文を取りまとめたものである。まず共通試験の試験装置と試験条件の概要を述べる。次に自走式ゴムタイヤ（東京都）とクランク式（鉄輪）の代表的な測定データ（土木研究所、IHI）の比較を行う。最後に共通試験で得られた結果を既往の $S-N$ 関係と比較するとともに、試験体間の結果の差異を把握するために FEM で床版のたわみと断面力を計算した結果の概要について報告する。FEM では床版をシェル要素でモデル化し、輪荷重の接地圧分布の影響、

表-1 試験体の一覧

試験体略称	試験体寸法 (mm)	床版支間 (mm)	主鉄筋 ()内は圧縮鉄筋			配力鉄筋 ()内は圧縮鉄筋			載荷方法	載荷ブロック	実施機関
			呼び	有効高 (mm)	間隔 (mm)	呼び	有効高 (mm)	間隔 (mm)			
阪大1 阪大2	幅 2200 長さ 3000 厚さ 190	2000							クランク式	大阪大学	
土研	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500						独立行政法人 土木研究所			
山口大1 山口大2	幅 2200 長さ 4000 厚さ 190	2000	D16 (D16)	160 (30)	150 (300)	D13 (D10)	146 (43)	300 (300)	なし	山口大学	
東京都	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500							なし	東京都 土木技術研究所	
IHI	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500							クランク式	石川島播磨重工業株 (自主参加)	
YBC	幅 2800 長さ 4500 厚さ 190	2500								榊横河ブリッジ (自主参加)	

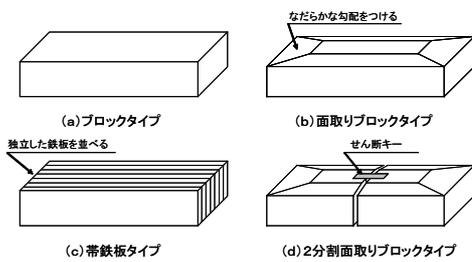


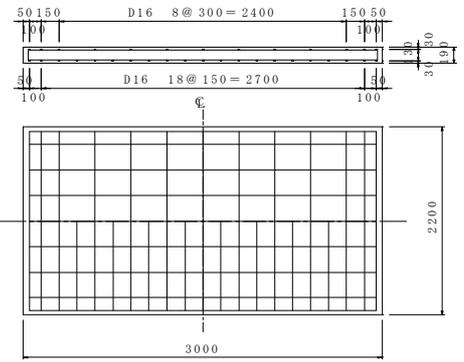
図-1 載荷ブロック

床版の平面度の影響（版全体の反りの影響）も検討している。

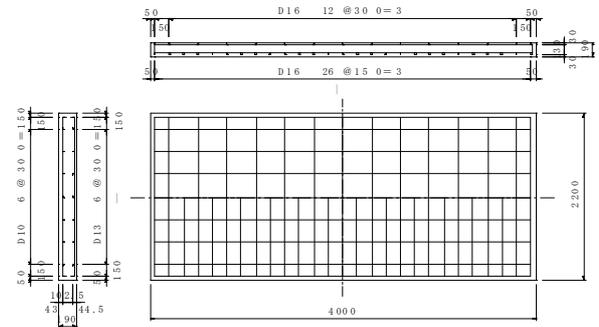
2. RC床版の共通輪荷重試験

2.1 試験体

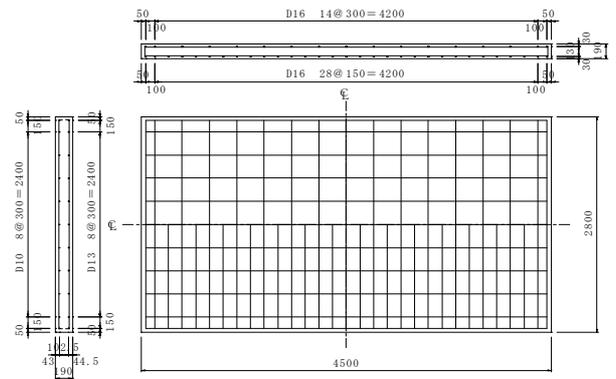
試験体の一覧を表-1に、載荷ブロック（クランク式鉄輪の場合、鉄輪が直接床版と接しないように間に挟む軌道を構成する載荷板）の種類を図-1に示す。また、試験体の形状および寸法を図-2に示す。試験体は、配力鉄筋量が現行基準と比較して少なく、損傷事例が多く見られる昭和39年道路橋示方書に準じて製作した8体のRC床版である。試験体の厚さ190mmと鉄筋の配置は一定とし、床版支間は過去の試験の実績をふまえて2.0mおよび2.5mとした。コンクリートは設計基準強度 $\sigma_{28} = 24\text{N/mm}^2$ の普通コンクリート（粗骨材最大寸法25mm、スランプ8cm、空気量4%）とし、静岡県富士市にある(社)施工技術総合研究所内のヤードで平成16年9月2日に8体同時にコンクリートを打設して製作した。なお、鉄筋ひずみ計測位置は共通の仕様とし、鉄筋のひずみゲージの貼付も同じ仕様で行った。以下では簡単



(a) 阪大1、阪大2試験体



(b) 山口大1、山口大2試験体



(c) 土研、東京都、IHI、YBC試験体

図-2 試験体形状

のために各機関の試験体を表-1の略称で呼ぶこととする。

2.2 試験装置

共通試験で使用した輪荷重走行試験装置の一覧を表-2に示す。写真-1(a)にクランク式鉄輪タイプ（大阪大学）と写真-1(b)に自走式ゴムタイヤ（東京都）の例を示した。鉄輪タイプはクランク式のため走行スピードが速く、鉄輪で載荷するため大きな

表-2 輪荷重走行試験機

設置機関	大阪大学	(独) 土木研 究所	横河ブリッジ (YBC)	石川島播磨重 工業(IHI)	東京都土木 技術研究所	山口大学	
駆動方式	クランク式				自走式	自走式(牽引式)	
性能	最大荷重(kN)	294	490	196	490	245	147
	載荷時走行速度	1680往復/時	2000往復/時	1020往復/時	1800往復/時	350往復/時	—
	走行範囲(m)	2	3~1	2	3~1	6.5	3.6
	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	3×10	3×4
載荷 方式	車輪(タイヤ型式)	鉄輪				航空機用窒素ガス 入りゴムタイヤ	ソリッドゴムダ ブルタイヤ
	載荷ブロック型式 接地寸法(mm)	b 300×120	a 500×200	c 500×200	d 500×200	340×410	550×240



(a) クランク式(鉄輪)



(b) 自走式(ゴムタイヤ)

写真-1 輪荷重走行試験機

荷重で試験ができることから短期間に疲労破壊させることが可能なタイプである。各機関のクランク式試験装置は表-2に示したように仕様が異なるほか、鉄輪の下に敷く軌道の載荷ブロックの形状(図-1参照)が異なっているのが特徴である。

写真-1(b)に示すゴムタイヤ方式に分類される自走式は、東京都と同じタイプが大阪工業大学とショーボンド建設(株)にあり、試験可能な供試体の長さは異なるものの装着するタイヤは空気入りの大型航空機用タイヤと大型トラック用タイヤで性能はほぼ同じである。このタイプは、空気入りタイヤで載荷するためクランク式鉄輪に比べより実橋に近い載荷方式といえる。しかしゴムタイヤは鉄輪に比べ載荷荷重を大きくできないことと、走行スピードが遅いため試験に時間がかかる欠点もあるが、走行範囲が長いことから試験体を複数枚並べて同時に試験できるメリットを持っている。一方、同じゴムタイヤ式でも山口大学の試験機は、タイヤに空気が入らないソリッドタイヤ(通称ノーパンクタイヤ)を装着しているため、空気入り大型トラックタイヤ(最大100kN)より大きい145kNの荷重を作用できることが特徴である。また、山口大の試験装置は、正確に

はタイヤを駆動させる方式ではないが、ここではゴムタイヤであることから自走式に分類している。

2.3 載荷方法

試験時の載荷荷重は「道路橋床版の調査研究小委員会」の検討³⁾をもとに、157kNの荷重を一定載荷することを原則とした。この荷重の大きさは、過去の軸重の観測結果の最大値に相当するとともに、昭和39年当時の設計輪荷重8tfの2倍に相当する。ただし、山口大は試験機最大荷重147kNの一定載荷で試験した。また、大阪大学では阪大1試験体の157kN載荷が早期に破壊したことを受けて、阪大2試験体は140kNの一定載荷で試験した。走行試験機の載荷位置は床版支間中央とし、載荷幅と走行範囲は各試験機の仕様に基づいて決定した。

2.4 試験体の支持条件

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支持した。試験体の4支持辺をそれぞれ長辺・短辺と呼び(図-3参照)、長辺は試験体と主桁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、短辺は端横桁を利用

表-3 試験体支持条件

	支持条件	支間長 (mm)	端横桁間隔 (mm)	主桁支持	端横桁 (弾性支持辺)
阪大 1	長辺：2辺単純	2000	2850	単純 (線支承)	H248×124×5/8
阪大 2	短辺：2辺弾性				
土研	長辺：2辺単純 短辺：2辺弾性	2500	4200		H300×300×10/15
東京都	長辺：2辺単純 短辺：1辺弾性, 1辺自由	2500	—		H488×300×11/25 (片側のみ)
IHI	長辺：2辺単純 短辺：2辺弾性	2500	4200		H498×400×16/25
YBC	長辺：2辺単純 短辺：2辺弾性	2500	4200		H300×300×10/15

表-4 計測項目一覧

計測項目	方法	計測箇所	計測点数
たわみ	変位計	床版下面	7
鉄筋ひずみ	ひずみゲージ	下側・上側	34
コンクリートひずみ		床版下面・上面	8
ひび割れ発生状況	目視観察		全面
ひび割れ密度	中央1.6m×1.6m区間	床版下面・上面	200mmメッシュ
ひび割れの動的挙動	3方向変位計 又はエゲージ		2以上

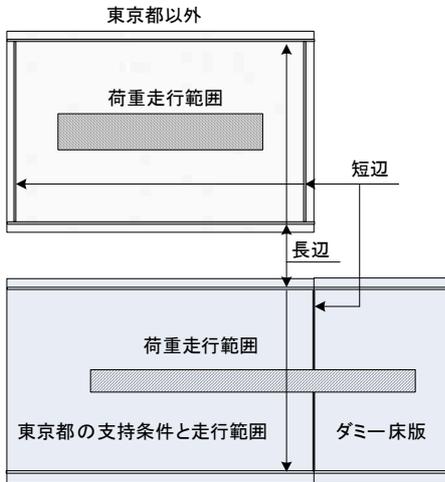


図-3 床版支持辺の呼称

した弾性支持条件とすることを標準とした。ただし、東京都試験体では短辺の片側を自由端とし、弾性支持桁上をタイヤが通過する方式となっている。各試験機での支持条件をまとめて表-3に示す。また、各試験機の規格の違いにより支間長、端横桁間隔とサイズ、浮き上り防止方法などは異なっている。

2.5 測定項目と方法

たわみ、鉄筋およびコンクリートのひずみの計測位置や数量、ひび割れの状態調査などの方法については、共通仕様に基づいて表-4に示す方法とした。試験開始時に床版試験体と同時に作成したコンクリートテストピースの圧縮強度、引張強度試験を行い、弾性係数、ポアソン比も測定した。荷重時の荷重ブロックまたはタイヤの面圧の確認方法は、感圧紙を使用して計測した。また、たわみ、ひずみ、ひび割

れ密度等の計測のタイミングは、走行回数1回、10回、100回、1000回、・・・を基本とし、測定方法は静的荷重時の計測と走行荷重時の動的計測とした。貫通ひび割れの幅、ずれ、段差(鉛直変位)の3成分の動きの計測は、3成分変位計の使用を原則とした。破壊後の供試体はダイヤモンドカッターを使用して4分割し、切断面のひび割れ状況をスケッチと写真で記録した。また、出来形の確認として床版厚、鉄筋間隔、かぶりを計測した。

3. 試験結果

3.1 出来形と破壊走行回数

山口大を除く試験条件(出来形を考慮)と破壊時走行回数の試験結果を表-5に示した。出来形(版厚、鉄筋位置、コンクリート強度)は設計値をほぼ満足していたが、阪大と東京都の試験体でそりが確

表-5 試験条件と試験結果

試験体	試験条件 (出来形考慮)								試験結果 走行回数*2 N(回)
	荷重 荷重	荷重板辺長 (b橋軸方向)	床版厚	圧縮側 鉄筋位置	引張側 鉄筋位置	引張側配力 筋位置	コンクリート 圧縮強度	ヤング 係数	
	P (kN)	a×b (mm)	h _s (mm)	d _m ' (mm)	d _m (mm)	d _d (mm)	f' _c (N/mm ²)	E _c (N/mm ²)	
土研*1	157	500×200	(199.3)	(39.6)	(166.5)	(149.6)	30.7	21723	(1,260,000)
阪大 1	157	300×120	193.8	43.8	154.3	139.2	34.3	25026	40,000
阪大 2	140	300×120	198.0	52.2	159.5	143.3	34.3	25026	626,000
東京都*3	157	230×390	196.5	41.4	158.0	143.1	34.3	25026	225,161
IHI	157	500×200	193.6	44.4	157.7	143.6	28.8	20040	1,066,163
YBC	157	500×200	196.5	50.7	158.6	143.3	31.9	22830	(3,250,000)

*1) 土研試験体の床版厚、鉄筋位置は電磁波レーダーによる推定値

*2) (走行回数)の試験体は未破壊

*3) 東京都の荷重板辺長は接地外形 340×410 mmから楕円形と溝を考慮した純接地面積相当

認された。なお、山口大学は2体の試験を実施したが供試体1は走行回数16万回で短辺側の端部が破壊しており、ひび割れの状態から判断すると通常の押抜きせん断破壊ではないことから、支持条件に問題があったことも考えられ、また山口大供試体2もスケジュールの都合により29万回未破壊の状態での試験を終了している。したがって山口大の試験結果は以降の検討から除外する。破壊した試験体は、4体でその走行回数は4万回(阪大1)~106万回(IHI)であり、土研は126万回(中断)、YBCは325万回でも破壊しなかった。破壊回数は大きくばらついた結果となった。

3.2 タイヤと鉄輪の主な測定データの比較

ゴムタイヤ自走式と鉄輪クランク式試験機の違いが測定結果にどのように影響しているか概観するため、東京都試験体と床版寸法、支間、載荷荷重が同一の鉄輪クランク式で破壊したIHIと未破壊で中断の土研試験体の結果を基に、破壊形態(ひび割れ状態)、ひび割れ密度、たわみ、鉄筋ひずみ、鉄筋ひずみから求まる中立軸について比較検討した。

3.2.1 ひび割れの状態

(1) ひび割れパターン

初期ひび割れは、タイヤの東京都供試体では1回目の120kNで版中央部にて確認された。床版上面と下面のひび割れ発生パターンは、東京都の結果と鉄輪代表例としてIHIの結果を図-4に例示する。なお、図-4の格子線は200×200mmである。

床版上面のひび割れ発生パターンに着目すると東京都供試体は図-4(a)で主鉄筋方向の貫通ひび割れが圧縮主鉄筋間隔300mmと一致する間隔で発生しており、はり化の可能性が認められる。また、右端のハッチングの範囲は砂利化に近い状態にあり、タイヤ走行面が10~30mm陥没して押抜き破壊面が確認される。一方、図-4(b)のIHI供試体では、上面のひび割れは、主筋方向に入っているものの、その間隔は東京都のような規則性は明瞭でない。

床版下面のひび割れパターンは、東京都供試体図-4(c)では、格子状のひび割れが走行範囲全体にわたって発生し、押抜きせん断破壊面は主鉄筋方向セ

ンターから600~800mmにあり、その角度は約45度である。一方、IHI供試体図-4(d)の下面ひび割れパターンも走行範囲内は概ね東京都と変わらず格子状に発生し、押抜きせん断破壊面の角度も約45度であり、両者には大きな差異は見られない。

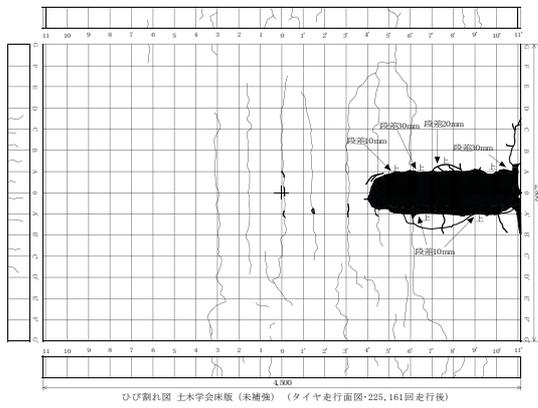
(2) 切断面のひび割れ状態とはり化幅

版中央で十文字に切断した断面の状態を写真-2に示す。橋軸方向に切断した主鉄筋切断面の比較では、写真-2(a)の東京都はひび割れ本数が多く、ひび割れ幅も大きい。また、圧縮鉄筋位置に沿って発生する水平ひび割れは、砂利化に近いような破壊面が明瞭である。さらに主鉄筋間隔(150mm)又はその2倍の間隔で下面から上面に貫通しているひび割れが多く、はり化幅は300mm程度である。一方、写真-2(b)のIHI下面のひび割れ幅は、東京都に比べ小さく貫通ひび割れ本数も少ないが、圧縮鉄筋に添う水平ひび割れの領域も、多くの水平ひび割れが確認されるものの、砂利化まで破壊は進展していない。また、はり化していると見られるひび割れは、ほぼ圧縮主鉄筋間隔300~400mm程度である。

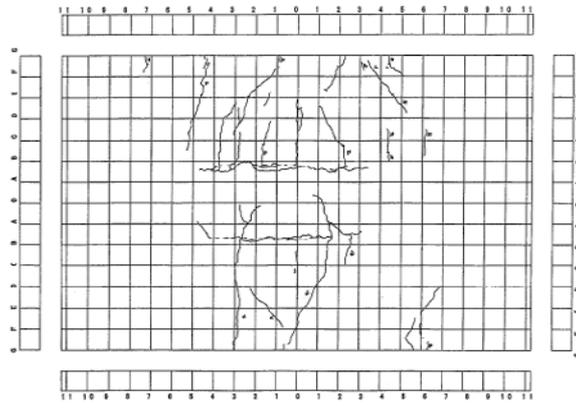
橋軸直角方向切断の配力鉄筋切断面の比較では、写真-2(c)の東京都の押抜きせん断破壊面は、版中央切断位置より弾性支持の横桁よりにあるため、写真の切断面のひび割れでは、写真-2(d)のIHI供試体ほど明瞭にせん断破壊面が確認できないが、押抜きせん断ひび割れ破壊面の角度は概ね45度である。一方、写真-2(d)のIHI供試体のひび割れは、載荷ブロック直下に圧縮鉄筋に添って明瞭な水平ひび割れが確認でき、また載荷ブロックの端から概ね45度のせん断破壊面も明瞭に確認できる。したがって、両者には大きな差異はないといえる。

(3) ひび割れ密度の経時変化

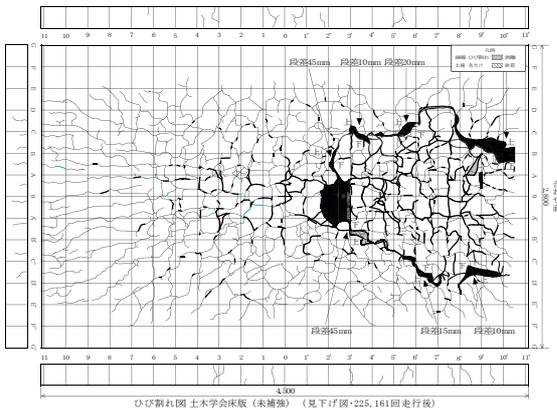
床版下面のひび割れ密度の経時変化を図-5に示す。試験前のひび割れはいずれも発生していない。走行回数1万回のひび割れ密度は、東京都9.6m/m²、IHI8.8m/m²で大差ないが土研は12.2m/m²でやや大きい発生状態であった。その後のひび割れ密度の経時変化では東京都は急激に増加したのに対してIHIと土研は、20万回以降緩やかに増加し100万回までほぼ同じである。また、破壊時の最大ひび割れ密度



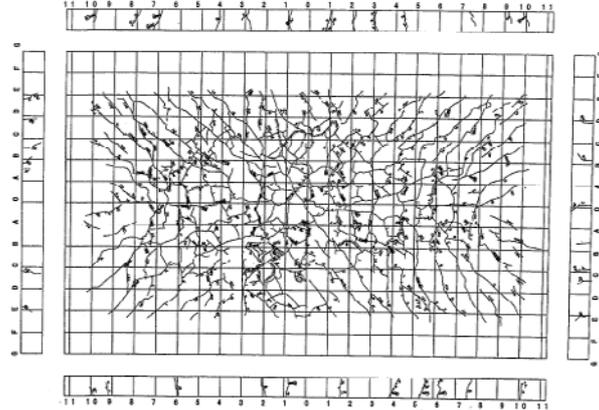
(a) 東京都 上面



(b) IHI 上面



(c) 東京都 下面



(d) IHI 下面

図-4 ひび割れの比較



(a) 東京都 主筋切断面



(b) IHI 主筋切断面



(c) 東京都 配力筋切断面



(d) IHI 配力筋切断面

写真-2 切断面

は東京都 $18 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、IHI は $17 \text{ m}^2/\text{m}^2$ でほぼ同程度である。したがって、ひび割れの進展スピードにタイヤと鉄輪では大きな差異が認められるが、破壊時のひび割れ密度は同程度とみなせる。

3.2.2 たわみ

図-6 に活荷重たわみの経時変化を示す。試験機は異なるものの図中のたわみの理論計算値は東京都と土研 (IHI は土研と同じで重なるため省略) はほぼ同等である。供試体が破壊した東京都供試体と IHI 供試体は活荷重たわみが引張無視の計算値を超

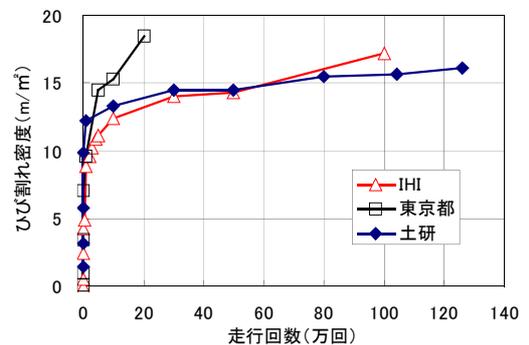


図-5 ひび割れ密度の経時変化

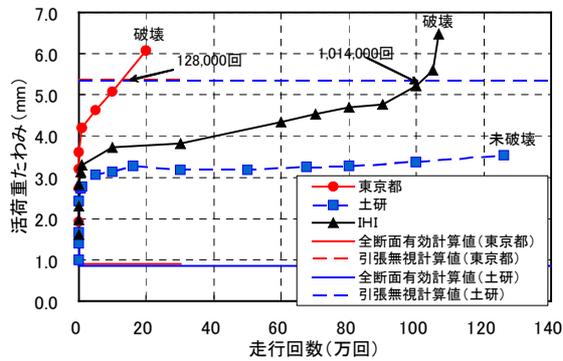
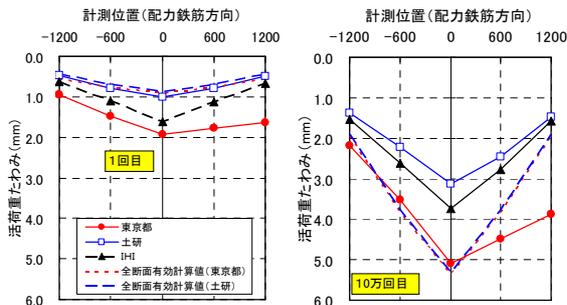
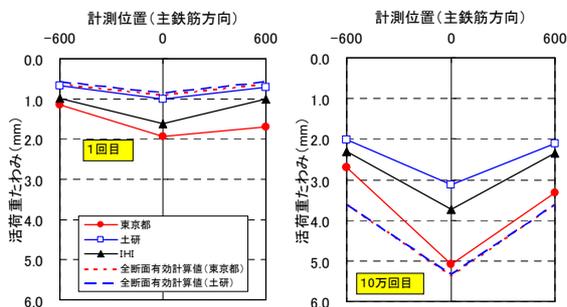


図-6 たわみの経時変化



(a) 主鉄筋方向



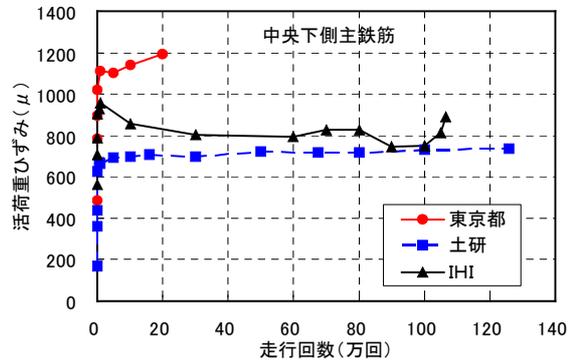
(b) 配力鉄筋方向

図-7 活荷重たわみ分布

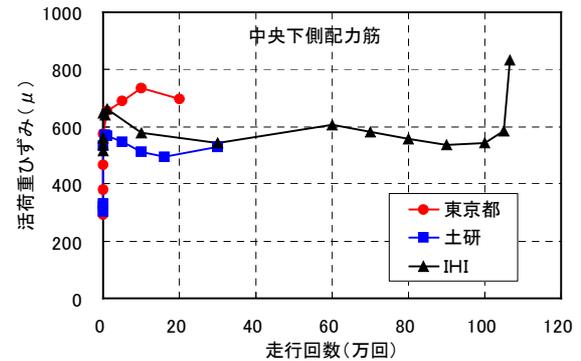
えているが土研供試体は引張無視の計算値よりも低いレベルで活荷重たわみが停留している。活荷重たわみが引張無視の値を超える走行回数を破壊時の走行回数で除した比は、東京都が 0.64 に対して IHI 供試体は 0.95 であった。

図-7(a)主鉄筋方向、(b)配力鉄筋方向ともに活荷重たわみの分布では 1 回目载荷ですでに東京都供試体の活荷重たわみが他の供試体と比較して大きくなっており、10 万回目载荷ではその差が拡大している。(a)主鉄筋方向 10 万回の分布形状に着目すれば、東京都供試体の中央 (0 点) と -600 mm の傾きが大きくなっておりゴムタイヤ幅と鉄輪の载荷ブロック幅の大小が影響しているものと推察される。

3.2.3 鉄筋ひずみ



(a) 主鉄筋



(b) 配力鉄筋

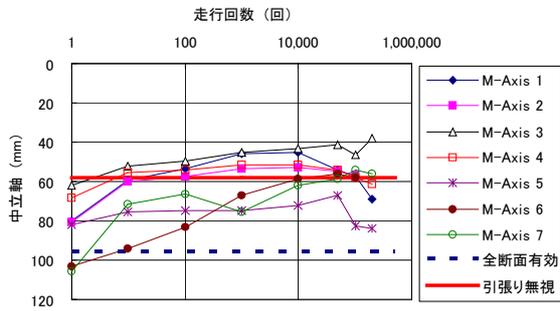
図-8 中央部のひずみの経時変化

図-8 は供試体中央下側鉄筋ひずみにおける活荷重成分の経時変化の例を示したもので、(a)主鉄筋、(b)配力鉄筋ともに破壊に至った供試体の方がひずみレベルも高くなっている。東京都供試体と IHI および土研供試体と比較すれば、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。特に東京都供試体の主鉄筋ひずみの初期の増加量が大きく、主鉄筋方向の活荷重たわみ分布と同様に、载荷幅が影響しているものと推察される。

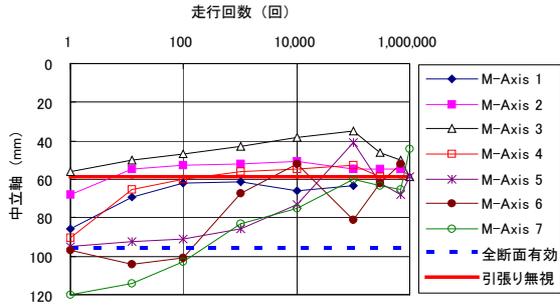
3.2.4 中立軸の経時変化

主鉄筋の引張りひずみと圧縮ひずみから計算した中立軸を図-9 に示す。東京都、IHI (土研は IHI とほぼ同じのため省略) いずれも走行 1 回目は、全断面有効とコンクリート引張断面無視の計算値の間にあり、走行回数が増えるに伴って引張無視の計算値に近づくか計算値を超え、破壊直前には引張無視の計算値近傍に収束するような変化が認められた。

配力筋方向の中立軸の経時変化を図-10 に示す。東京都の配力鉄筋ひずみは断線が多く計測値は少ないが、床版中央 D-Axis3 の変化は走行 1 回目から引張無視の計算値近傍に推移している。以上のことか

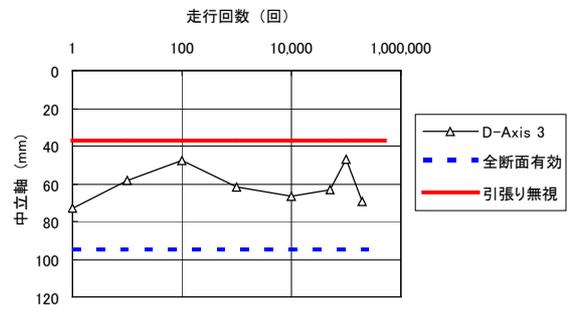


(a) 東京都

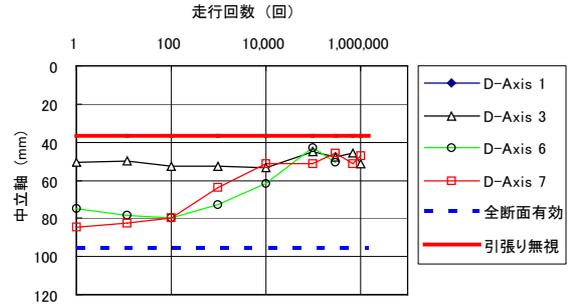


(b) IHI

図-9 主鉄筋方向中立軸の経時変化



(a) 東京都



(b) IHI

図-10 配力筋方向中立軸の経時変化

ら中立軸の推移はタイヤも鉄輪もほぼ同様と見なせる。

4. 押抜きせん断耐力 (P_{sx}) の評価

表-5 の出来形を考慮した試験条件と試験結果を基に、はり化した RC 床版の押抜きせん断耐力 (P_{sx}) を算出した結果を表-6 に、 P_{sx} で整理された既往の疲労強度曲線と試験結果との比較を図-11 に示す。

なお、表-5 のコンクリートのヤング係数は式(1)で算出した。式(1)は大阪大学の研究で採用されているヤング係数推定式である。

$$E_c = 900 \cdot (f'_c - 29.4) + 20580 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

RC 床版の押抜きせん断耐力は式(2)で算出する。

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

$$B = b + 2d_d \quad (3)$$

$$\tau_{smax} = 0.252f'_c - 0.00251f'_c{}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.269f'_c{}^{2/3} \quad (5)$$

表-6 押抜きせん断耐力計算結果

試験体	x_m (mm)	B (mm)	C_m (mm)	τ_{smax} (N/mm^2)	σ_{tmax} (N/mm^2)	P_{sx} (kN)	P/P_{sx}
土研	51.6	499	32.8	5.37	2.63	363	0.433
阪大 1	47.2	398	39.5	5.69	2.84	304	0.517
阪大 2	48.8	407	38.5	5.69	2.84	315	0.445
東京都	47.6	676	38.5	5.69	2.84	515	0.305
IHI	51.9	487	35.9	5.18	2.53	350	0.448
YBC	50.2	487	37.9	5.48	2.7	368	0.427
東京都*1	47.6	416	38.5	5.69	2.84	317	0.496

*1: タイヤ載荷幅 b を写真-3の $b=130\text{mm}$ と仮定した。

ただし、

B : はり化した RC 床版のはり幅(mm)

a, b : 載荷板の主鉄筋方向の辺長、配力鉄筋方向の辺長(mm)

x_m : 主鉄筋断面の上縁から中立軸までの距離(mm)、(引張域のコンクリート断面積を無視して算出)

d_d : 引張側配力鉄筋の有効高さ(mm)

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり(mm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度(N/mm^2)

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度(N/mm^2)

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

P_{sx} の算出では、はり化した RC 床版のはり幅 B を算出するために載荷板の橋軸方向辺長 b が必要である。クランク式試験機ではブロック状の載荷板を採用しているため b は明確である。一方、ゴムタイヤを採用している自走式試験機は載荷荷重の大きさによってタイヤ接地面の大きさが変化する特性がある。表-5 中の東京都試験体では、157kN 載荷時の実測結果（写真-3）に基づき $b=390$ mmとした。

図-11 には、既往の研究による疲労強度曲線（ $S-N$ 線）として、式(6)～式(8)を図示した。

松井による $S-N$ 線⁸⁾；

$$\log_{10} \frac{P}{P_{sx}} = -0.0784 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.52 \quad (6)$$

(独)土木研究所による $S-N$ 線⁹⁾；

$$\log_{10} \frac{P}{P_{sx}} = -0.0545 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 0.957 \quad (7)$$

自走式（ゴムタイヤ）試験機の $S-N$ 線¹⁰⁾；

$$\log_{10} \frac{P}{P_{sx}} = -0.101 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.38 \quad (8)$$

材料強度と出来形を考慮して P_{sx} を算出すると、図-11においてクランク式試験機による試験体破壊時走行回数のプロットは式(7)土研式の近傍に集まる結果となった。

一方、自走式の東京都試験体は、輪荷重接地面が

橋軸方向に長いことに起因して、他の試験体よりも P_{sx} が大きく計算され、結果的に $S-N$ 関係では他の試験体と比べてかなり下方にプロットされた。

クランク式試験機による結果については一つの $S-N$ 線に集約できる可能性があるが、自走式試験機による結果とクランク式による結果とを統一的に評価するには、コンクリート強度や床版出来形の考慮だけでは不十分である。

クランク式と自走式の破壊時走行回数に差をもたらす要因としては、(a)輪荷重の接地面の状態（面圧の広がり）、(b)試験体の支持方法の差異による床版作用断面力の相違、(c)床版端部を輪荷重が走り抜けるか否か、が挙げられる。特に、輪荷重の接地面については、ゴムタイヤを採用する自走式試験機では荷重の大きさによって輪荷重の接地面の大きさが変わることで、接地面の形状が橋軸直角方向よりも橋軸方向の方が長い形状であること、タイヤ中心とタイヤ側辺に近い位置では接地長さが異なることなどの特徴があり、破壊時走行回数を整理する上でこれらの取り扱いに留意が必要と考えられる。

表-6、図-11 では、東京都試験体（自走式）の P_{sx} 算出の前提となるはり化した床版のはり幅は、式(3)から $B=676$ mmとなる。その一方で、東京都試験体の上面ひび割れ発生状況では、橋軸直角方向の貫通ひび割れの間隔は上面主鉄筋の配置間隔に近い 300 mm程度であった。一方、今回のクランク式版大の載荷ブロック $b=120$ mmのはり化幅は、上面のひび割れの観察では不明瞭であるが、主筋切断面のひび

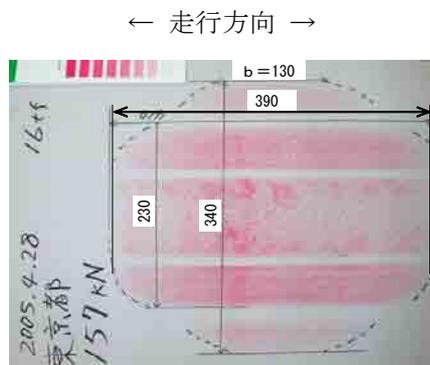


写真-3 東京都の輪荷重接地面の大きさ

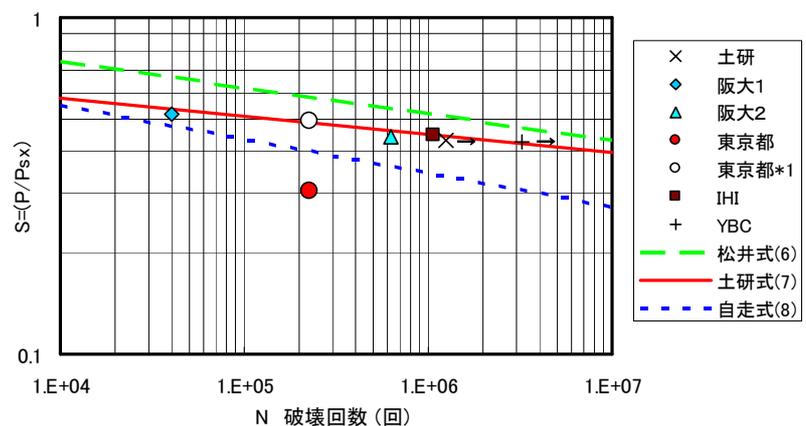


図-11 $S-N$ 線と試験結果

割れ間隔は供試体 1 が配力筋間隔の 300 mm 程度、供試体 2 も同程度であった。また、載荷板 $b=200$ mm で破壊した IHI 供試体の切断面の観察では、不明瞭であるがほぼ圧縮主鉄筋間隔の 300~400 mm と判断された。さらに、今回破壊しなかった土木研究所の試験機の過去の報告⁹⁾によれば、昭和 39 年道示仕様に準ずる版厚 190 mm の上面のひび割れ状態は、ほぼ圧縮主鉄筋間隔の 300 mm 程度となっている。したがって、東京都のタイヤ式では、式(3)で求めたはり幅 B は実際よりも大きな値を与えていると考えられる。

試みとして、表-6 の東京都*1 の P_{sx} の計算では、はり幅 B を写真-3 のタイヤ側辺の接地長 $b=130$ mm を採用した場合の試算結果である。この試算結果も図-11 に示したが、クランク式の $S-N$ 線式 (7) の土研式上にシフトした。この試みは単に 1 個の試験体であり、タイヤ式の結果をクランク式に補正する方法と結論付けるには早計であるが、簡便であり検討の余地が有るものと推察できる。

式(3)のはり幅 B は、 $S-N$ 関係の縦軸側 (荷重比) に影響を与えるパラメータであり、RC 床版のように $S-N$ 線の傾きが緩やかな場合には、実験結果の整理やその解釈に大きな影響を及ぼす。クランク式と自走式との結果を統一的に扱うためには、自走式の場合のはり幅 B について、既往データも含めた検証が今後必要と考えられる。

5. 作用断面力に関する解析

(1) 試験体の支持条件

今回の共通試験において、試験機関ごとに異なる

試験体支持条件 (表-3) や輪荷重接地面の条件の相違により、試験体の作用断面力に差が生じていたことが考えられる。そこで、シェル要素を用いた FEM で各試験体の作用断面力を求め、試験体間での断面力の差について検討が行われた。

(2) 曲げ剛性

共通試験の試験体は全て同一配筋で設計し同時にコンクリートを打設したものの、配筋状況やコンクリート強度には試験体間のばらつきが認められた。そこで、FEM では各試験体について実際の配筋状況とコンクリートの実測ヤング係数とを考慮して床版の曲げ剛性を算出した。FEM では主鉄筋と配力鉄筋の配筋位置ならびに鉄筋量が床版の曲げ剛性に寄与することを考慮して、異方性版として取り扱った。各試験体の曲げ剛性を表-7 に示す。

(3) 輪荷重

感圧紙により各試験体の輪荷重載荷面の圧力分布を測定した結果では、接地圧は必ずしも等分布ではないことが観察された。そこで、試験機毎に輪荷重接地圧分布の特徴を考慮して、図-12 に示す接地圧を与えて解析した。なお、図-12 は感圧紙で確認した傾向を大幅に簡略化しており、実際の接地圧分布とそれが解析結果に与える影響については引き続き詳細に検討する必要がある。

(4) 要素分割

要素辺長は、100 mm 程度 (床版厚の 1/2 程度) とし、結果抽出の便から試験体センターライン付近では要素辺長をやや小さくした。解析結果のうち、横せん断力 (面外せん断力) に着目すると、横せん断

表-7 試験体の出来形と曲げ剛性

			設計値	実 測					
				土研	阪大①	阪大②	東京都	I H I	YBC
諸条件	$f'c$	N/mm ²	24.0	30.67	34.34	34.34	34.34	28.80	31.90
	E_c	N/mm ²	25000	28240	28400	28400	28400	26300	28000
	E_s/E_c		8.00	7.08	7.04	7.04	7.04	7.60	7.14
	床版厚	mm	190.0	(199.3)	193.8	198.0	196.5	193.6	196.5
	主筋有効高(上)	mm	30.0	(39.6)	43.8	52.2	41.4	44.4	50.7
	主筋有効高(下)	mm	160.0	(166.5)	154.3	159.5	158.0	157.7	158.6
	配力筋有効高(上)	mm	43.0	(52.0)	58.3	70.0	54.6	57.3	64.1
	配力筋有効高(下)	mm	145.5	(149.6)	139.2	143.3	143.1	143.6	143.3
全断面有効	主筋方向 $E_c \cdot I_v$	N \cdot mm ² /m	1.60E+13	2.03E+13	1.85E+13	1.96E+13	1.93E+13	1.72E+13	1.90E+13
	配力筋方 $E_c \cdot I_v$	N \cdot mm ² /m	1.46E+13	1.90E+13	1.75E+13	1.86E+13	1.82E+13	1.62E+13	1.79E+13
RC断面 ($E_s/E_c=15$)	主筋方向 $E_c \cdot I_v$	N \cdot mm ² /m	3.73E+12	4.02E+12	3.35E+12	3.59E+12	3.55E+12	3.52E+12	3.56E+12
	配力筋方向 $E_c \cdot I_v$	N \cdot mm ² /m	1.22E+12	1.31E+12	1.13E+12	1.23E+12	1.19E+12	1.20E+12	1.23E+12

注1) 鉄筋位置、床版厚は複数個所を測定した平均値。

注2) 土研供試体の実測値は電磁波レーダーにより推定したもの。

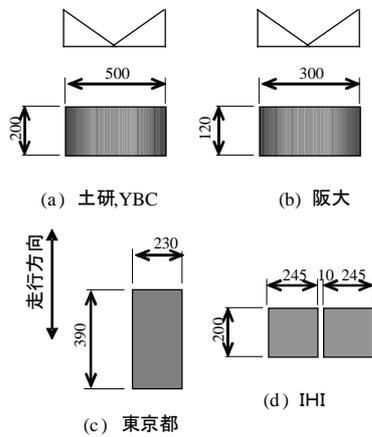


図-12 輪荷重接地圧の取り扱い

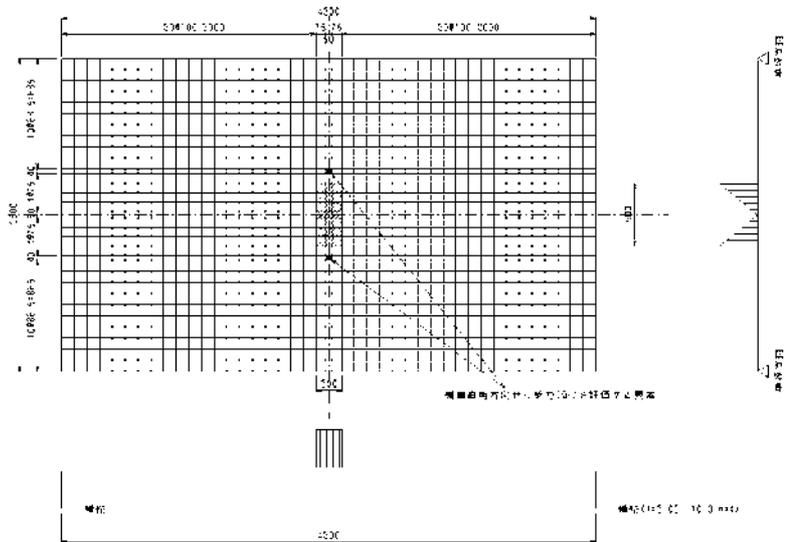


図-13 要素分割（土研試験体）

力は輪荷重載荷面の周辺上で最大値（最小値）をとる。このため、輪荷重載荷範囲に隣接する要素の寸法によって得られる横せん断力の最大値が変化してしまい結果の整理に都合が悪い。そこで、せん断力の評価位置として「輪荷重エッジから主鉄筋断面の有効高さの 1/2 だけ離れた点」を選び試験体間で比較した。要素分割の例として、土研試験体のものを図-13 に示す。

(5) 解析結果

各試験体について、床版の曲げ剛性を全断面有効とした場合と引張域のコンクリートを無視した場合（RC 断面）のたわみと断面力の最大値をまとめて表-8(a)、(b)に示す。これらの結果から、他の試験体より少ない走行回数で破壊に至っている阪大1（4万回で破壊）、東京都試験体（22.5万回で破壊）では、他の試験体より大きな曲げモーメントとせん断力が作用していたと考えられ、作用断面力の差が破壊時走行回数の差を生じていると考えられる。

また、IHI（106.6万回で破壊）のせん断力（ $Q_{x,exp}$ ）は未破壊の土研、YBC よりも 8%程度小さく、曲げモーメントは 7%~10%大きく計算された。破壊時走行回数の序列と断面力の関係より、破壊時走行回数は床版に作用するせん断力のみならず曲げモーメントの影響も少なからず受けていると考えられる。

6. まとめ

(1) 自走式とクランク式の試験機特性の違いについて測定データで比較検討した。得られた知見を以下に示す。

表-8 解析結果

(a) 全断面有効

	たわみ δ_{mas} mm	曲げモーメント				せん断力	
		$M_{x,max}$		$M_{y,max}$		$Q_{x,exp}$	
		kNm/m				kN/m	
土研	0.794	37.3	(1.00)	31.1	(1.00)	100.1	(1.00)
阪大1	0.593	41.0	(1.10)	34.7	(1.12)	131.1	(1.31)
阪大2	0.501	36.6	(0.98)	30.9	(0.99)	116.9	(1.17)
東京都	0.872	46.5	(1.25)	32.0	(1.03)	106.8	(1.07)
IHI	0.941	39.8	(1.07)	33.9	(1.09)	92.4	(0.92)
YBC	0.843	37.1	(0.99)	31.2	(1.00)	99.9	(1.00)

(b) RC 断面

	たわみ δ_{mas} mm	曲げモーメント				せん断力	
		$M_{x,max}$		$M_{y,max}$		$Q_{x,exp}$	
		kNm/m				kN/m	
土研	5.091	47.5	(1.00)	22.8	(1.00)	120.4	(1.00)
阪大1	3.897	50.8	(1.07)	26.1	(1.14)	157.6	(1.31)
阪大2	3.236	45.1	(0.95)	23.5	(1.03)	139.9	(1.16)
東京都	5.891	57.3	(1.21)	22.4	(0.98)	122.2	(1.01)
IHI	5.806	50.6	(1.07)	25.0	(1.10)	112.1	(0.93)
YBC	5.653	46.8	(0.99)	23.3	(1.02)	119.1	(0.99)

注 1) ()内の数値は土研試験体に対する比

注 2) $Q_{x,exp}$: 輪荷重のエッジから主鉄筋断面有効高さの 1/2 だけ離れた点において主鉄筋断面に作用する横せん断力

- 1) 床版試験体はほぼ設計どおりの出来形であったが、破壊した 4 体は 4 万回~106 万回の範囲に、残り 2 体は未破壊で 126 万回 325 万回で中断終了した。破壊時走行回数には大きな差異が生じた。
- 2) ひび割れ発生状況の比較では、下面ひび割れパターンと破壊時ひび割れ密度は両者に差異は観られない。上面のひび割れパターンでは、自走式に規則性が認められ、クランク式では明瞭ではなかった。切断面の観察によるはり化幅は、いずれも圧縮主鉄筋間隔 300 mm 程度であり差異はない結果が得られた。

- 3) 活荷重たわみおよび活荷重鉄筋ひずみの経時変化において両者に大きな差異はない結果が得られた。また、活荷重たわみが異方性を考慮した引張無視の理論値を超過した後に破壊に至っている。しかしながら、橋軸直角方向のたわみ分布では、自走式で傾きが大きくなっており、載荷幅の影響があるものと推察された。鉄筋ひずみの差に関しても載荷幅が影響していると考えられる。
- 4) 主鉄筋ひずみより算定される中立軸の経時変化は、走行 1 回目では全断面有効と引張無視の計算値の間にあるが走行回数が増えると引張無視の値に近づくか超過する傾向は両者共通であった。
- (2) 共通試験で得られた結果を既往の $S-N$ 線と比較した。また試験体間の結果の差異を把握するために FEM で床版のたわみと断面力を計算した。この結果、以下のことが明らかになった。
- 1) クランク式で得られた結果は、既往の研究による $S-N$ 線(土研式)の近傍に集まる結果であり、一つの $S-N$ 線に集約できる可能性がある。
 - 2) 自走式の結果は P_{sx} による整理では、クランク式 $S-N$ 線より下方に位置する結果が得られる。その理由は、はり化幅 B の計算方法にゴムタイヤの接地形状をクランク式載荷板形状に当てはめている結果が影響している。自走式切断面の観察によ

るはり化幅はクランク式とほぼ同じであることから同程度のはり化幅で試算すると、クランク式 $S-N$ 線図上(土研式)にプロットされる。載荷幅の算定方法の見直しが必要と考えられる。

- 3) 自走式とクランク式の結果を統一的に評価するには、コンクリート強度や床版出来形の考慮だけでは不十分であり、(a)輪荷重の接地面の状態(面圧の広がり)、(b)試験体の支持方法の差異による床版作用断面力の相違、(c)床版端部を輪荷重が走り抜けるか否か、といった影響の考慮が不可欠と考えられる。

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評価(28社共同研究)」の輪荷重走行試験により与えられたものである。本共通試験のデータ整理と分析は、現在「道路橋床版の合理化小委員会」に継続され、試験法分科会の委員の多大な協力によりまとめられたことを記し、深謝の意を表す。今後は共通試験で得られたデータをさらに詳細に検討して破壊時の $S-N$ 線の統一化や使用限界状態の $S-N$ 線の設定を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) 阪神高速道路公団、阪神高速道路管理センター(1991): 道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性
- 2) 大西弘志、松井繁之、渡邊裕一(2003): 分割型載荷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、223-228
- 3) 土木学会 鋼構造委員会 道路橋床版の調査研究小委員会 第 1 分科会(2004): 床版の輪荷重走行試験、道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上、1-62
- 4) (財)災害科学研究所(2006): 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社共同研究で委託) 報告書
- 5) 大西弘志、永田淳、長屋優子、鈴木統(2006): 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 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集、31-38
- 6) 関口幹夫、横山広、浜田純夫(2006): 自走式輪荷重走行試験装置を用いた道路橋床版の共通試験、第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集、39-46
- 7) 上条崇、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(2006)、第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集、47-54
- 8) 松井繁之(1991): 橋梁の寿命予測、安全工学 Vol.30、No.6、432-440
- 9) 国土交通省 国土技術総合研究所資料第 28 号(2002): 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験
- 10) 横山広、長屋優子、関口幹夫、堀川都志雄(2004): 自走式試験機による道路橋床版の使用限界の評価、第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集、49-54