

ゴムタイヤ式輪荷重走行疲労試験機による RC 床版のはり幅の検討

Examination of girder width of RC slab in rubber tire type wheel running fatigue testing

関口幹夫^{*1}, 長屋優子^{*2}, 横山広^{*3}, 大西弘志^{*4}

Mikio Sekiguchi, Yuko Nagaya, Hiroshi Yokoyama, Hiroshi Onishi

^{*1} 東京都土木技術センター 技術調査課 (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

^{*2} 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ橋梁チーム (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

^{*3} ショーボンド建設(株) 中部支社 (〒920-0362 石川県金沢市古府 1-140)

^{*4} 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

In evaluation of durability with the results of wheel running fatigue testing for RC slabs of highway bridges, a method of punching shear force with P_{sx} , proposed by Matsui is often utilized. Since, in this method, the girder width (B) of RC slabs, made as girder by penetrated cracks caused to main reinforcement direction, is calculated with the relation between lengths of loading pad to distributing reinforcement direction (running direction) and thickness of slab, it seems the girder width (B) is able to be associated with interval between 2 penetrated cracks.

In this paper, to aim at penetrated cracks interval, it is studied with principal component analysis with reference data, and so on, what the deference among testing machines, supporting condition, and characteristics of slabs is associated with them. As the result, a unified S-N curve with revised P_{sx} was proposed, based on penetrated cracks interval not to be affected by deference among testing machines and supporting condition so much.

Key words: wheel running fatigue testing, girder width, punching shear force, penetrated cracks interval, S-N curve

キーワード: 輪荷重走行疲労試験装置, はり幅, 押抜きせん断耐力, 貫通ひび割れ間隔, S-N 線図

1. はじめに

実物大 RC 床版試験体の輪荷重走行疲労試験が実施できる試験装置は、クランク式の鉄輪載荷ブロック方式と自走式のゴムタイヤ載荷方式が存在する。過去の実績は、載荷スピードの速いクランク式が多く、代表的な S-N 線図は、大阪大学¹⁾ (以下、阪大) と (独) 土木研究所²⁾ (以下、土研) によって提案されている。しかし松井¹⁾ の P_{sx} を使用した押抜きせん断耐力による S-N 式の評価では、両者は一致しない。その理由として試験装置のタイプは同じでも、試験体の大きさや床版支間の違い、載荷板寸法の違いなどが影響しているものと考えられている。

一方、自走式ゴムタイヤ載荷方式は、スピードが遅いため試験の実績は少ない。S-N 式の提案は試験装置が同一のショーボンド建設 (以下、ショーボンド) と東京都の試験装置によるデータを合せた横山³⁾ らによるものが唯一である。この S-N 式も鉄輪載荷方式の阪大と土研の S-N 式のいずれとも一致しないことが判っている。

P_{sx} を使用した評価では、主鉄筋方向 (本論文では、橋軸直角方向) に発生する貫通ひび割れによるはり状化したはり幅 B を鉄輪の載荷板の配力筋方向の幅 b と床版厚の関係より算定する。したがって、はり状化したはり幅 B は、貫通ひび割れ間隔と見なすことができる。

本検討は、 P_{sx} による評価で重要な要素であるはり幅 B に相当する床版上面の貫通ひび割れ間隔を求めるととも

に主成分分析および重回帰分析⁴⁾ を行い、試験装置の違いや支持条件の相違がどのような関連性を持っているかについて検討する。次に、支持条件が他の試験装置と大きく異なるゴムタイヤ式の東京都の P_{sx} の評価において、貫通ひび割れ間隔の実態を考慮したはり幅 B の算定に基づく修正 S-N 式を検討する。

2. 試験体のサンプル

検討の対象試験体は、過去に発表された文献^{2), 3), 5), 6), 7)} から、RC 床版で未補強の中から走行荷重が一定で破壊した 34 体を抽出した。表-1 に試験体の形状寸法、支持条件、配筋、コンクリート圧縮強度、載荷板の寸法、載荷荷重、破壊時の走行回数、 P/P_{sx} 、文献番号を示す。ゴムタイヤ式は東京都 12 体、ショーボンド 7 体の計 19 体である。鉄輪式は土研の 11 体のほか土木学会共通試験⁵⁾ の IHI (石川播磨重工) 1 体、YBC (横河ブリッジ) 1 体および阪大 2 体の計 15 体である。なお、YBC 試験体は、未破壊であるが破壊に近い状態と推察されるので検討の対象にした。

3. 貫通ひび割れ間隔の検討

3.1 貫通ひび割れ間隔の測定結果

東京都の主な試験体上面の貫通ひび割れ間隔 (以下、貫通ひび割れ間隔) の測定例を図-1 に示す。なお、東京都

表-1 サンプル試験体の諸元と試験結果

載荷方式	機関	試験体No.	試験体	試験体寸法 床版支間方向 × 橋軸方向 支間(mm)	床版厚 (mm)	主鉄筋			配力鉄筋			コンクリート強度 f'c (N/mm ²)	載荷板又はタイヤ接地寸法		載荷荷重 P(kN)	走行回数 N(回)	P/P _{ss}	文献番号
						圧縮側(引張側)												
						呼び径	有効高 (mm)	間隔 (mm)	呼び径	有効高 (mm)	間隔 (mm)		a(mm)	b(mm)				
ゴムタイヤ式	東京都	1	S39-16-20	2920×4500 支間2500 2辺単純支持 1辺弾性支持 (横桁) 1辺自由端	167.0	D16(D16)	65(132)	300(150)	D13(D13)	70(107)	300(300)	33.9	230	390	157	3,020	0.590	6)
		2	S39-16-30		173.0	D16(D16)	45(143)	300(150)	D13(D13)	65(118)	300(300)	39.5			157	5,000	0.565	
		3	H08-20-20		205.0	D16(D16)	75(170)	200(100)	D16(D16)	100(155)	300(150)	33.6			157	390,000	0.376	
		4	H08-20-30		202.0	D16(D16)	65(172)	200(100)	D16(D16)	85(142)	300(150)	36.3			157	1,449,000	0.410	7)
		13	S39-19-20		188.5	D16(D16)	63(157)	125(125)	D10(D13)	91(143)	300(300)	52.5			157	592,208	0.471	
		14	S39-19-30		188.0	D16(D16)	34(159)	125(125)	D10(D13)	54(145)	300(300)	47.8			157	592,008	0.487	
		18	S39-19-30		190.4	D16(D17)	34(159)	125(125)	D10(D13)	54(145)	300(300)	43.1			157	600,000	0.475	
		19	S47-18-20		177.5	D19(D19)	41(137)	240(120)	D19(D19)	61(120)	300(300)	31.4			157	102,531	0.549	5)
		20	S47-18-30		180.0	D19(D19)	46(138)	240(120)	D19(D19)	71(119)	300(300)	40.1			157	849,529	0.513	
		25	S47-20-20		200.5	D19(D19)	40(160)	250(125)	D16(D16)	59(148)	200(100)	26.2			157	322,764	0.477	
26	S47-20-30	201.2	D19(D19)	42(161)	250(125)	D16(D16)	59(146)	200(100)	33.1	157	904,198	0.451						
29	共通試験	196.5	D16(D16)	41.4(158)	300(150)	D10(D13)	43(143.1)	300(300)	34.3	157	225,161	0.462						
ショールボンド建設	東京都	1	S-39-19-1	2800×3500 支間2500 2辺単純支持 2辺弾性支持	190.0	D16(D16)	30(150)	300(150)	D10(D13)	43(146)	300(300)	37.1	346	404	220	562,315	0.443	3)
		2	S-39-19-2		190.0							40.1	362	428	250	85,157	0.483	
		3	S-39-19-3		190.0							45.1	362	428	250	28,900	0.480	
		4	S-39-19-4		190.0							45.1	378	451	280	26,600	0.521	
		5	S-39-16-1		160.0							37.1	346	404	220	26,798	0.529	
		6	S-39-16-2		160.0							42.3	362	428	250	7,934	0.570	
		7	S-39-16-3		160.0							30.3	315	347	160	329,802	0.441	
		26	共通試験		194.2							41.4(158.0)	300(150)	D10(D13)	43(143.1)	300(300)	30.7	
鉄輪式	(独)土木研究所	1	RC39-1	2800×4500 支間2500 2辺単純支持 2辺弾性支持	190.0	D16(D16)	30(157)	300(150)	D10(D13)	43(143)	300(300)	26.9	500	200	157	27,392	0.488	2)
		2	RC39-2									28.6			176	59,078	0.538	
		3	RC39-3									13.6			105	1,423,112	0.413	
		4	RC39-4									29.7			196	881	0.594	
		5	RC39-5									31.1			167	45,034	0.501	
		6	RC39-6									28.4			147	130,828	0.450	
		7	RC39-7									25.4			152	272,329	0.480	
		8	RC39-8									27.1			118	2,750,073	0.366	
		9	RC39-9									26.6			157	224,764	0.490	
		10	RC47-1									29.9			210	148,927	0.593	
IHI	共通試験	193.6	44.4(157.7)	300(150)	D10(D13)	43(143.3)	300(300)	28.8	500	200	157	1,066,163	0.448	5)				
		196.5	50.7(158.6)					31.9	500	200	157	*3,250,000	0.427					
		193.8	43.8(154.3)					34.3	300	120	157	40,000	0.517					
		198.0	52.2(159.5)					34.3	300	120	140	626,000	0.445					

*: 未破壊

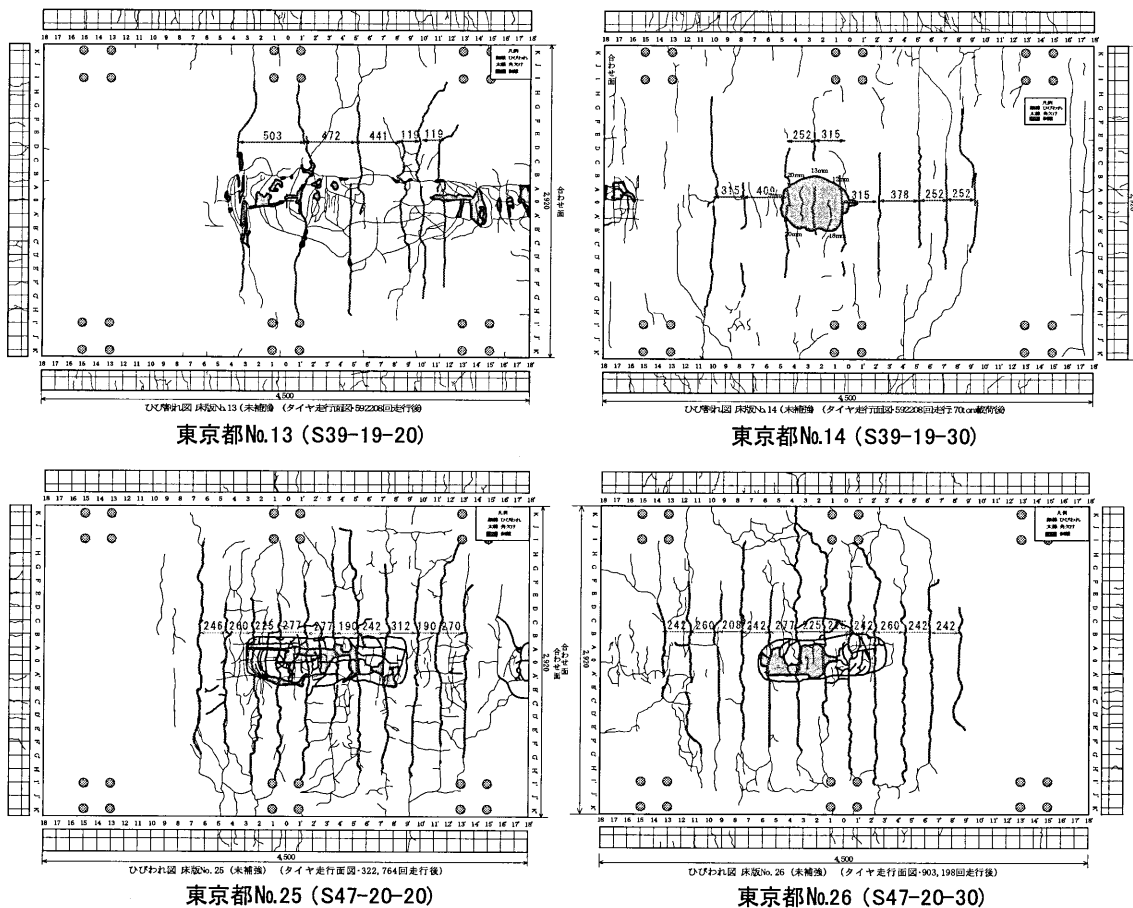
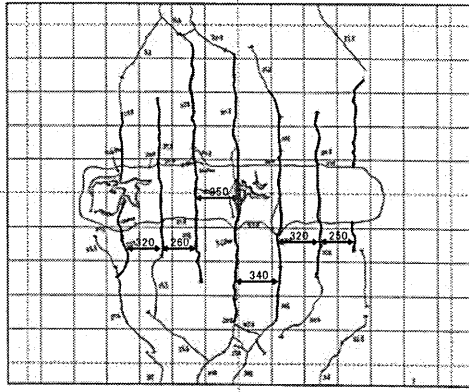
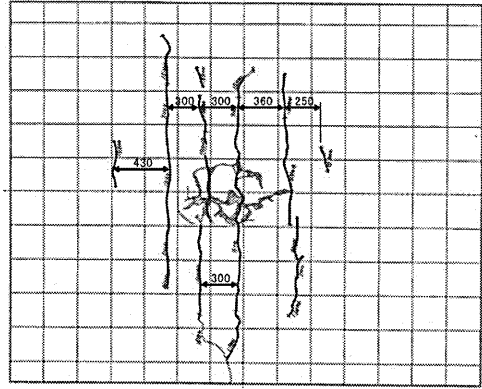


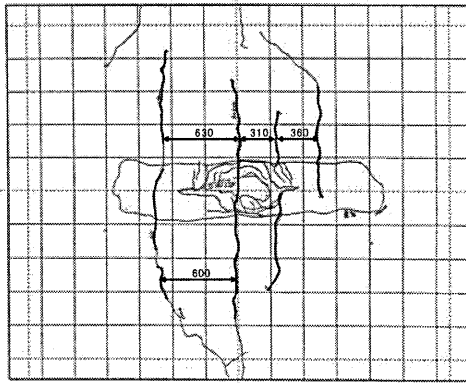
図-1 東京都試験体の上面貫通び割れ間隔



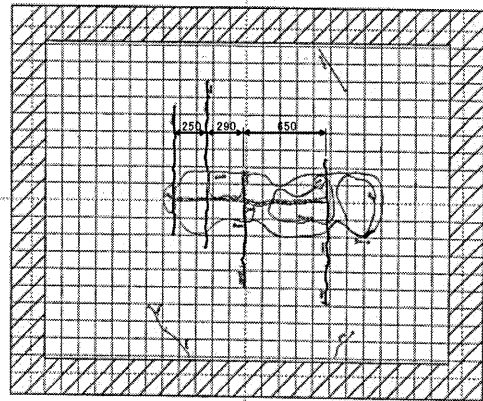
SB 1 (S39-19-1)



SB5 (S39-16-1)

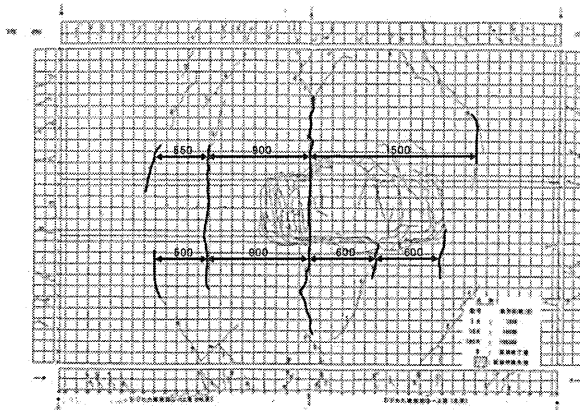


SB2 (S39-19-2)

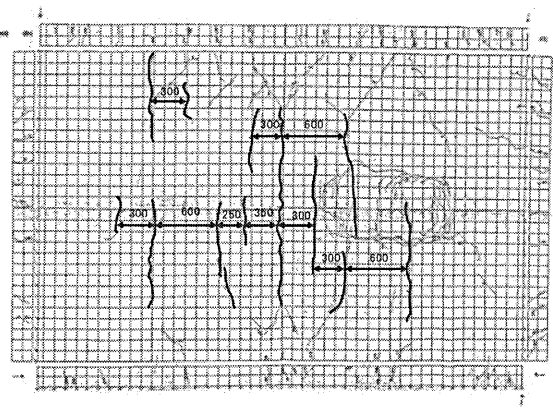


SB6 (S39-16-2)

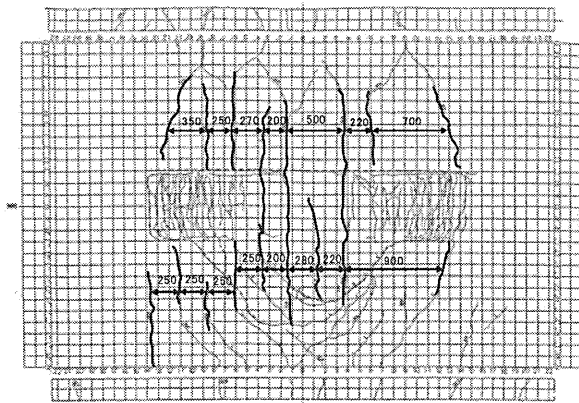
図-2 ショーボンド試験体の上面貫通ひび割れ間隔



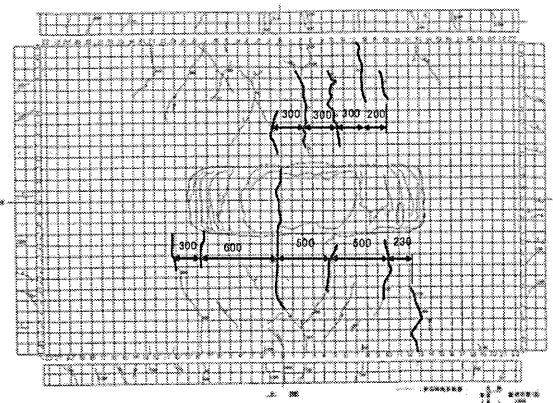
土研1 (S39-1)



土研3 (S39-3)



土研2 (S39-2)



土研10 (S47-1)

図-3 (独) 土木研究所試験体の上面貫通ひび割れ間隔

のNo.1~4は、床版上面にアスファルト舗装を舗装した供試体のため貫通ひび割れ間隔の検討対象から除外している。図-1では貫通ひび割れは太線で表示している。左右の試験体は中央で接触（横桁上で弾性支持）した状態でセットとされ、走行範囲は中央から左右3.5mの範囲で、試験体の外側の短辺には支持桁がない自由辺である。自由辺側の1m区間は走行しない載荷パターンが特徴である。

試験体No.13と14は昭和39年鋼道路橋示方書（以下、道示）の基準床版であり、配筋は同一であるがコンクリートの強度を変えている。No.13の方が自由辺側に発生している貫通ひび割れが少ない傾向が見られる。貫通ひび割れ間隔は、No.13は330.8mm、No.14は326.8mmである。No.25とNo.26は昭和47年道示基準の床版厚20cmで、貫通ひび割れ間隔は249.2mmと242.3mmであり、昭和39年道示基準の試験体に比べて貫通ひび割れ間隔が狭いが、コンクリートの強度がNo.13、14に比べ小さいことが影響していると考えられる。

ショーボンド試験体の主な貫通ひび割れ間隔の測定例を図-2に示す。試験体の配筋筋方向長辺の寸法が3.5mで東京都の4.5mに比べ1mほど短い。床版の支持条件は、一般的な長辺は単純支持、短辺は弾性支持である。試験体の両側にダミー床版を配置して、走行荷重は完全に通過する載荷パターンが特徴である。ショーボンドの試験体は、すべて昭和39年道示基準である。東京都に比べてひび割れの本数が少ない傾向が伺える。床版厚19cmの貫通ひび割れ間隔は、SB1は285mm、SB2は400mmである。床版厚16cmのSB5は433.3mm、SB6は274.3mmである。

鉄輪式の土研の主な試験体の貫通ひび割れ間隔の測定例を図-3に示す。昭和39年道示基準の床版厚19cmの配筋条件はすべて同一である。土研1の貫通ひび割れ本数は他の試験体に比べ少なく、貫通ひび割れ間隔も656.3mmと他の試験体の2倍程度大きかったものの、破壊状況は他の試験体と同様である。土研2は291.1mmである。その他の昭和39年道示基準の土研試験体は、概ね300~400mmである。土研10は、昭和47年道示基準で貫通ひび割れ間隔は338.3mmである。なお、ひび割れ図を省略したその他の試験体の貫通ひび割れ間隔は、表-2の分析データに示した。

3.2 はり幅Bと貫通ひび割れ間隔の関係

はり幅Bの計算値と貫通ひび割れ間隔の関係を図-4に示す。ゴムタイヤの東京都とショーボンドのはり幅Bの計算値は、タイヤ幅bが土研の鉄輪の載荷板bに比べて約2倍大きいため、鉄輪載荷方式に比べ1.5倍程度大きく算定される。一方、測定値は概ね200~400mmの範囲に分布し

表-2 分析データ

載荷方式	供試体 No.	はり幅 (mm)		貫通ひび割れ間隔 (mm)		載荷板寸法 (mm)		床版厚 (mm)	下側主筋間隔 (mm)	上側主筋間隔 (mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	上限荷重 (kN)
		B	r	a	b							
ゴムタイヤ式	東京都	13	676.0	330.8	230	390	190	125	125	52.5	157	
		14	680.0	326.8	230	390	190	125	125	47.8	157	
		18	680.0	226.9	230	390	190	125	125	43.1	157	
		19	630.0	311.0	230	390	180	120	240	31.4	157	
		20	628.0	288.8	230	390	180	120	240	40.1	157	
		25	686.0	249.2	230	390	200	125	250	26.2	157	
		26	682.0	242.3	230	390	200	125	250	33.1	157	
		29	676.3	299.1	230	390	190	150	300	34.3	157	
		ショーボンド	ショーボンド	1	695.0	285.0	346	404	190	150	300	37.1
2	719.0			400.0	362	428	190	150	300	40.1	250	
3	719.0			306.7	362	428	190	150	300	45.1	250	
4	742.0			332.5	378	451	190	150	300	45.1	280	
5	635.0			433.3	346	404	160	150	300	37.1	220	
6	659.0			274.3	362	428	160	150	300	42.3	250	
7	578.0			280.0	315	347	160	150	300	30.3	160	
鉄輪式	(独) 土木研究所	1	482.0	656.3	500	200	190	150	300	26.9	157	
		2	482.0	291.1	500	200	190	150	300	28.6	176	
		3	482.0	385.7	500	200	190	150	300	13.6	105	
		4	482.0	342.9	500	200	190	150	300	29.7	196	
		5	482.0	300.0	500	200	190	150	300	31.1	167	
		6	482.0	300.0	500	200	190	150	300	28.4	147	
		7	482.0	287.5	500	200	190	150	300	25.4	152	
		8	482.0	420.0	500	200	190	150	300	27.1	118	
		9	482.0	375.0	500	200	190	150	300	26.6	157	
		10	502.0	338.3	500	200	200	125	250	29.9	210	
		26	478.2	338.6	500	200	190	150	300	30.7	157	
		IHI	487.2	311.7	500	200	190	150	300	28.8	157	
		YBC	486.6	289.3	500	200	190	150	300	31.9	157	
		阪大A	398.3	300.0	300	120	190	150	300	34.3	157	
阪大B	406.7	222.0	300	120	190	150	300	34.3	140			

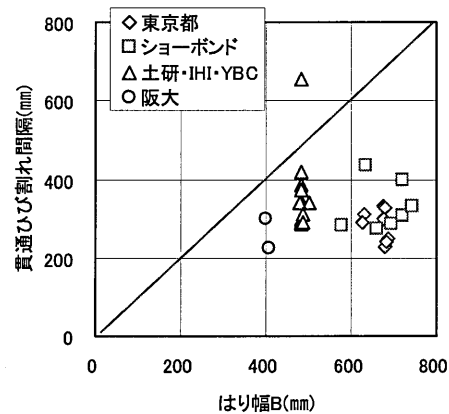


図-4 はり幅Bと貫通ひび割れ間隔

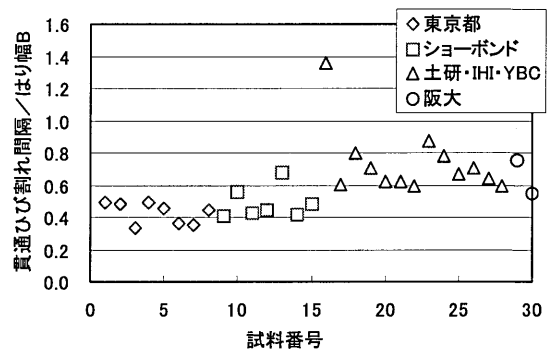


図-5 (貫通ひび割れ間隔/はり幅)の関係

ており、はり幅Bの計算値より小さい結果となった。また、図-5には測定値と計算値の比(r/B)の関係を示す。試料番号1~15のゴムタイヤ平均値は0.456、鉄輪の平均値は0.726であり両者には差異が認められる。

3.3 主成分分析

表-2のはり幅Bを除く分析データを使用して主成分分析を行った。分析対象行列は相関行列とした。図-6(a)は主成分1と主成分2の固有ベクトルの関係であり、横軸の主成分1ではa(载荷長さ), dx(上側主鉄筋間隔), mx(下側主鉄筋間隔), b(载荷板幅), fc(コンクリート強度)の影響が大きい。縦軸の主成分2はp(荷重)とt(床版厚)が大きい, また図-6(b)では主成分1と主成分3の関係であり, 主成分3はr(貫通ひび割れ間隔)が単独で大きい。

主成分1と主成分2, 主成分1と主成分3の得点分布を図-7に示す。主成分得点の分布は, 図-7(a)の横軸は, プラス側が鉄輪, マイナス側にゴムタイヤが分布して, 明らかに载荷方式の違いが判る。縦軸のプラス側はP(荷重)の大きいものが分布する。ゴムタイヤは東京都とショーボンドに分かれて分布しており, 両者は異なることを示唆している。また, 図-7(b)の縦軸のr(貫通ひび割れ間隔)は, 機種による差は少ないことが読み取れる。

3.4 重回帰分析

表-2のデータを基に貫通ひび割れ間隔を目的変数, その他のはり幅Bを除く項目を説明変数とする重回帰分析を行った。決定係数は0.206で精度の良い回帰式は得られない。重回帰係数が大きい因子は, 下側主鉄筋間隔, コンクリート強度, 床版厚の順であったが, 貫通ひび割れ間隔に強く影響する説明変数はない。回帰式による観測値と理論値の関係は, 図-8に示す残差で評価すると概ね±100mm以内に推定される。試料番号16(土研1)の試験体の残差は, +300mmと他に比べ明らかに大きいことから例外データと見なせる。

4. P_{sx} によるS-N線図の検討

4.1 押抜きせん断耐力 (P_{sx})

松井¹⁾の押抜きせん断耐力 (P_{sx}) は式(1)である。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} x_m + \sigma_{tmax} C_m) \quad \dots \text{式(1)}$$

ただし,

$$B = b + 2d_d$$

B: はり状化したRC床版のはり幅(mm)

b: 载荷板の配力鉄筋方向の辺長(mm)

d_d : 引張側配力鉄筋の有効高さ(mm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度(N/mm²)

x_m : 引張コンクリート断面無視時の主鉄筋断面の上縁から中立軸までの距離(mm)

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度(N/mm²)

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり(mm)

ゴムタイヤ式試験装置は, 大型航空機用シングルタイヤ

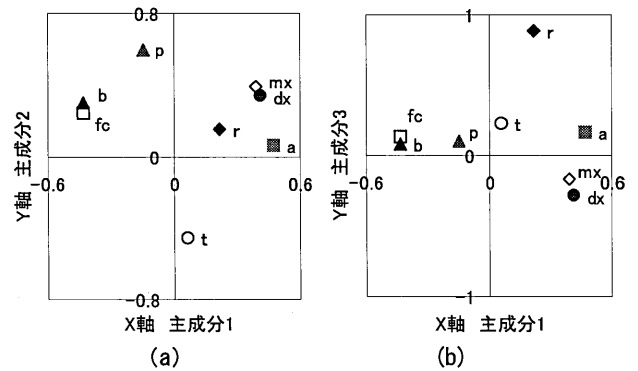


図-6 固有ベクトル

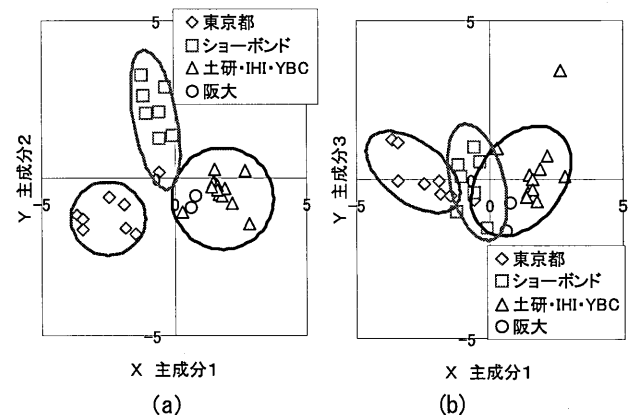


図-7 主成分得点の分布

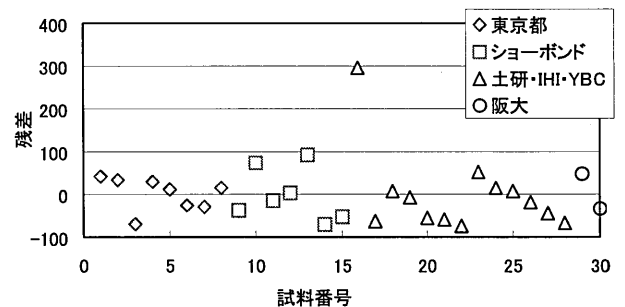


図-8 重回帰分析の残差

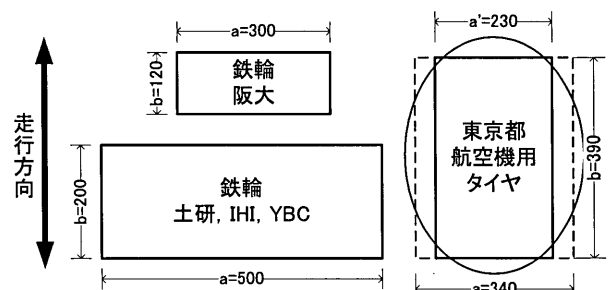


図-9 载荷板とタイヤの接地形状

を使用している。鉄輪の载荷板とゴムタイヤ接地形状は図-9に示すように。鉄輪の载荷板寸法aとbは, $a > b$ の関係であるが, ゴムタイヤでは $a < b$ と逆転する。ここでは, S-N線図のSは, 松井の提案する式(1)を使用して P/P_{sx} で無次元化した値で検討する。

4.2 一定荷重データのS-N線図

表-1の文献データの試験装置別のS-N線図を図-10に示す。試験体の床版支間と支持条件が同一で、走行範囲が異なるショーボンド(SB)のゴムタイヤと鉄輪のS-N線図はほぼ一致する。一方、試験体の支持条件に自由辺を有する東京都のゴムタイヤのS-N線図は、ショーボンドのS-N線図の下方にスライドする。下方にスライドした理由は二つ考えられ、一つは支持条件の相違である。二つ目は、タイヤの橋軸直角方向の長さaが230mmで土研の載荷板500mmに比べ小さく、作用せん断力は変わらないが曲げモーメント M_x は20%大きく作用⁵⁾していたことである。

前記二つの理由により東京都の試験体は、早期に破壊したものと推察されるが、その影響を適切に考慮するまでに至っていない。そこで、東京都の貫通ひび割れ間隔は、他の試験装置と同程度であることを考慮して、 P_{sx} 算定の載荷幅(b)を阪大の120mmと土研の200mmの平均値160mmと仮定して評価した結果を図-11に示す。ショーボンドのゴムタイヤ式と鉄輪式のS-N線図に一致する。ここでの東京都の P_{sx} の修正方法は、共通のS-N式を検討する簡易な手法と考えられる。

5. まとめ

本検討では、はり状化したはり幅と見なせる貫通ひび割れ間隔を求め、主成分分析等により検討した。また、載荷方式の異なる鉄輪とゴムタイヤの P_{sx} によるS-N線図について検討した。以下に本検討で得られた知見を列挙する。

- (1) 貫通ひび割れ間隔は、鉄輪式とゴムタイヤ式のいずれの試験体においても、土研1の例外を除くとその間隔は200~400mmの範囲にあり大差ない。また、はり幅Bの計算値の40~80%と小さい。
- (2) 試験体の諸元、載荷条件、貫通ひび割れ間隔に関する主成分分析は、鉄輪式とゴムタイヤ式では、第一主成分と第二主成分の得点分布が異なり、試験装置の違いが明瞭に存在するが、貫通ひび割れ間隔の重回帰式は、精度が低く、床版の諸元、載荷方式のいずれにも強く影響されない。
- (3) 床版支間と支持条件が同一の鉄輪式とショーボンドのゴムタイヤ式の P_{sx} によるS-N線図は、走行範囲が異なってもほぼ同じ結果になる。
- (4) 主鉄筋方向の短辺に自由辺を有する東京都のゴムタイヤ式 P_{sx} によるS-N線図は、ショーボンドのS-N線図の下方にスライドする。その原因は、支持条件のほかに曲げモーメント M_x が鉄輪式に比べ20%大きく作用していた影響が考えられる。
- (5) 東京都の貫通ひび割れ間隔は、他の試験装置の結果と同程度であることを考慮して、 P_{sx} 算定の載荷幅bを阪大と土研の平均値で評価して、共通のS-N線図を得る簡易な修正法を提案した。

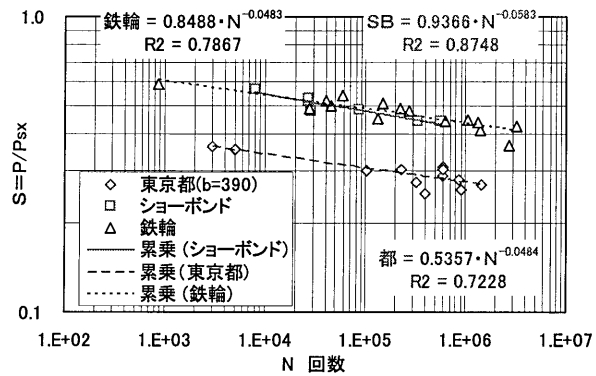


図-10 試験装置別のS-N線図

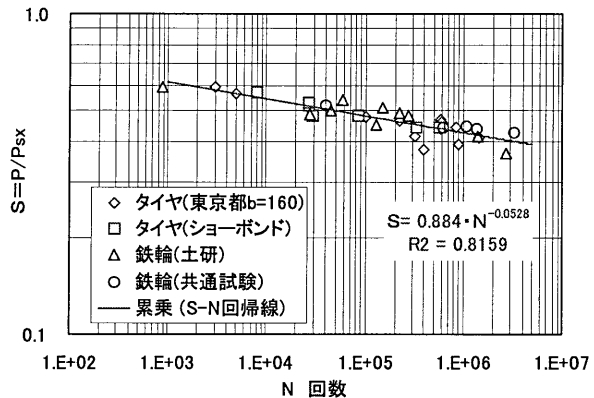


図-11 修正S-N線図

6. おわりに

支持条件が他の試験装置と大きく異なる東京都ゴムタイヤ式の修正 P_{sx} は、載荷幅bを貫通ひび割れ間隔が他の試験装置の試験体と同程度で大差ないことを根拠に修正した。しかし、曲げモーメントが20%ほど大きく作用していた影響を合理的に考慮していない。今後、曲げ作用の影響を適切に考慮するための検討が必要である。

参考文献

- 1) 松井繁之：橋梁の寿命予測，安全工学 Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第28号，2003.
- 3) 横山広，長屋優子，関口幹夫，堀川都志雄：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，pp.49-54, 2002.
- 4) 例えば圓川隆夫：多変量のデータ解析，朝倉書店，1990.
- 5) (財)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，平成18年3月.
- 6) 関口幹夫，宍戸薫：RC床版の輪荷重走行疲労実験，平成11年東京都土木技術研究所年報，pp.107-116.
- 7) 関口幹夫，宍戸薫，森俊介：RC床版の輪荷重走行疲労実験，平成14年東京都土木技術研究所年報，pp.89-100.