

## アラミド繊維シートで下面補強した道路橋 RC 床版の疲労耐久性

### Fatigue Durability of RC Bridge Slabs Strengthened Bottom Surfaced by Aramid Fiber Sheet

中島規道\*, 樋口昇\*\*, 井之上賢一\*\*\*小林健二郎\*\*\*\*, 蔡華堅\*\*\*\*\*, 松井繁之\*\*\*\*\*,  
Norimichi NAKAJIMA, Noboru HIGUCHI, Kenichi INOUE, Kenjiro Kobayashi, Hwa Kian CHAI, Shigeyuki MATSUI,

- \* 工修 三井住友建設 (株) 技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)
- \*\* 工博 三井住友建設 (株) 土木技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央 1-38-1)
- \*\*\* ファイベックス (株) (〒103-0022 東京都中央区日本橋室町 4-4-3)
- \*\*\*\* 首都高速道路 (株) 西東京管理局 (〒104-0041 東京都中央区新富 1-1-3)
- \*\*\*\*\* 工修 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
- \*\*\*\*\* 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Strengthening of reinforced concrete (RC) structures with fiber reinforced plastics has become a popular method. This research investigates the lifespan extension of RC bridge slabs strengthened by aramid fiber sheet (AFS) which subjected to fatigue wheel load. The specimens were subjected to initial damage before bonding of AFS in grid pattern. Fatigue tests by using wheel running machine were conducted. Experimental results reveal that the AFS is capable in improving the fatigue durability of the slabs, and it is verified that the lifespan extension is evaluated by new proposal equation.

Key Words : aramid fiber sheet, RC slab, wheel running test, strengthening, lifespan extension

キーワード : アラミド繊維シート, RC床版, 輪荷重走行試験, 寿命増加率

### 1. はじめに

床版下面にアラミド繊維シートや炭素繊維シートを接着する連続繊維シート接着工法は、損傷を受けたRC床版の補強工法として、疲労耐久性の向上に大きく寄与することが、輪荷重走行試験機による疲労試験等の研究により明らかとされ<sup>1)2)</sup>、実用化も進められている(写真-1参照)。

連続繊維シート接着工法は、上部工の死荷重が増加しない床版下面の補強作業であり、供用状態で施工が可能であるなど、都市部の重交通路線の補強方法として適正を有している。しかしながら、路面での防水工を伴わない場合は排水機能が必要である。全面補強とした場合には供用状況の変化に応じた損傷のモニタリングが困難である等の欠点も有している。

連続繊維シートの補強効果は、ひびわれの動きを抑制し、ひびわれ面の磨耗による劣化を防止して、母床版の疲労耐久性を向上させるとされている。床版の疲労劣化の進行は、松井らにより対数モデルとして定式化されているが、連続繊維シートのみならず、鋼板接着工法、上面増厚工法等の補強工法による補強後の床版の疲労寿命の推定方法に苦慮していることが現状である。

これらの点を踏まえ、本試験においては、帯水防止およびひびわれ観察のために格子状にアラミド繊維シート(以下、AFRPシート)を貼付したRC床版の輪荷重走行

試験を実施した。この中で、連続繊維シートの補強効果を考慮するため、新たに提案された松井-蔡式の適用性に付いても検討を行った。

輪荷重走行試験は、母床版の耐力を変えた2体の試験体について実施し、既往の試験結果<sup>4)</sup>も含めて検討を行なった。

### 2. 試験概要

#### 2.1 床版試験体

AFRPシートの補強効果は、本試験および既往の試験から表-1に示す2シリーズについて検討した。

Aシリーズの試験体は、昭和39年道路橋示方書に基づいて設計され、昭和40年代に竣工した首都高速道路のある区間の代表的な厚さおよび補強筋量の床版とした。後

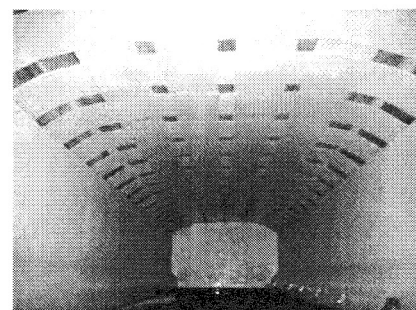


写真-1 格子補強

表-1 試験概要

シリーズ	主な試験因子	AFRP	試験機	備考
A	母床版耐力	1方向格子	大阪大学, 開発土木研究所	
B	シート耐力	1方向格子	大阪大学	文献 <sup>4)</sup>

述の(2)式で計算される押抜きせん断耐力 ( $P_{sx}$ ) の同区間での分布を、図-1に示す。試験体は、その区間の最小耐力となる床版厚さ 150 mm の A1 試験体、および平均的な床版厚さおよび配力筋量となる床版厚さ 160 mm の A2 試験体の 2 体とした。

比較に使用した B シリーズの試験体の形状寸法および AFRP シートの補強パターンは A シリーズとほぼ同一であり、主に補強に使用した AFRP シートの耐力が異なっている。

試験体の代表的な例として、A1 試験体の形状・寸法を図-2に示す。試験体の形状寸法は、長さ 3000mm、幅 2000mm、および床版支間は 1800mm の同一とした。補強は、高弾性タイプのアラミド繊維を 1 方向に配列した幅 250mm の AFRP シートを 100mm の間隔をあけて床版下面に格子状に接着した。貼付パターンは、全ての試験体で同一とした。

各試験体の補強筋の配置状況を表-2に、使用したアラミド繊維シートの機械的性質を表-3にそれぞれ示す。含浸・接着樹脂は、常温硬化型の標準的なエポキシ樹脂を使用した。

## 2.2 試験方法

A シリーズの試験機は、大阪大学および独立行政法人北海道開発土木研究所の輪荷重走行試験機を使用した。2機関の試験機の基本仕様はほぼ同一である。

既設の劣化床版を模擬するため、荷重 100kN で初期載荷を実施した。損傷状態は、既往の試験結果<sup>1)2)</sup>および参考文献<sup>3)4)</sup>に準じて、実橋で詳細調査を要する損傷状態である床版下面での格子状ひびわれの発生を目標とした。

損傷状態の確認後、主鉄筋方向、配力筋方向の順序で AFRP シートを床版下面に接着した。シートの貼付作業は、シート内に予め樹脂を含浸した後に貼付する事前含浸法により床版下面より実施した。

計測は、所定の回数で走行を一時停止し、床版中央への静的載荷により実施した。計測項目は、変位、上下の鉄筋ひずみ、AFRP シートひずみとし、それぞれ主鉄筋方向および配力鉄筋方向の床版中心線に沿って変位計およびひずみゲージを設置して行った。

B シリーズの試験は、大阪大学の輪荷重試験機を利用し、A シリーズとほぼ同様の手順で実施した。

実施した荷重履歴の一覧を表-4に示す。いずれの試験シリーズも輪荷重を階段状に増加させて試験期間の短縮を試みている。

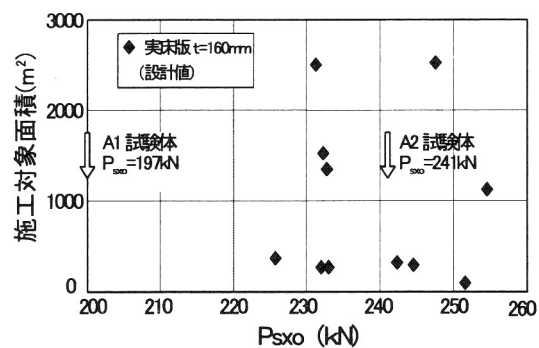


図-1 押抜きせん断耐力分布

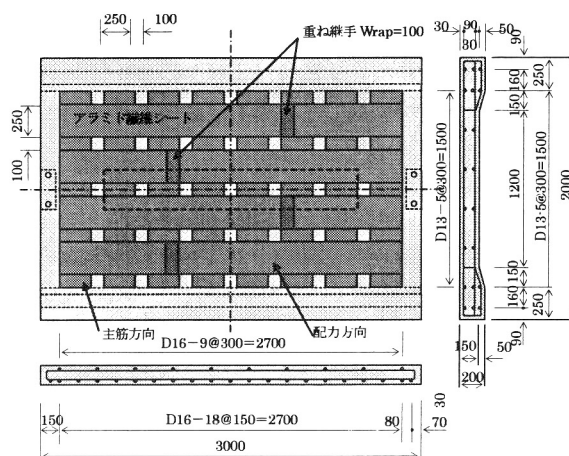


図-2 試験体形状・寸法 (A1)

表-2 試験諸体諸元

試験体	床版厚さ cm	主鉄筋	配力筋	シート耐力 /引張剛性
		下段 上段	下段 上段	
A1	15	D16@150	D13@300	1176 kN/m
	cm	D16@300	D13@300	48.2 kN/mm
A2	16	D16@150	D13@125	1176 kN/m
	cm	D16@300	D13@250	48.2 kN/mm
B1	16	D16@100	D13@250	588 kN/m
	cm	D16@200	D13@250	24.1 kN/mm
B2	16	D16@100	D13@250	882 kN/m
	cm	D16@200	D13@250	36.2 kN/mm

引張剛性=設計厚さ×弾性係数×配置間隔 (250/300)

表-3 アラミド繊維シート

	目付量 g/m²	規格耐力 kN/m	設計厚さ mm	引張強度 N/mm²	弾性係数 kN/mm²
A1	830	1176	0.572	2060	118
A2					
B1	415	588	0.286		
B2	623	882	0.43		

表-4 荷重履歴

試験 体名	予備荷重 100kN	本荷重				荷重回数 × 10 <sup>3</sup>
		100kN	120kN	150kN	170kN	
A1	2.0	100	100	71		
A2	10	100	100	600	400	**
B1	60*	100	100	600	176	
B2	60	100	100	600	200	

\*120kNで荷重, \*\*250kNまで増加

表-5 初期損傷

試験 体名	ひびわれ 密度	活荷重たわみ		
		補強前	補強後	低減率*
	m/m <sup>2</sup>	mm	mm	%
A1	8.0	2.25	1.21	46.0
A2	5.2	0.74	0.59	20.3
B1	9.8	0.79	0.67	15.2
B2	7.0	0.84	0.66	21.3

\*たわみ低減率= (補強前-補強後) / 補強前

表-6 破壊状況

	f <sub>c</sub> MPa	最大荷重 kN	累計回数 ×10 <sup>3</sup>	破壊状況
A1	28.4	150	271	押抜き破壊
A2	38.9	170 (250)	1,200	破壊不明瞭
B1	47.0	170	976	押抜き破壊
B2	43.4	170	1,000	押抜き破壊

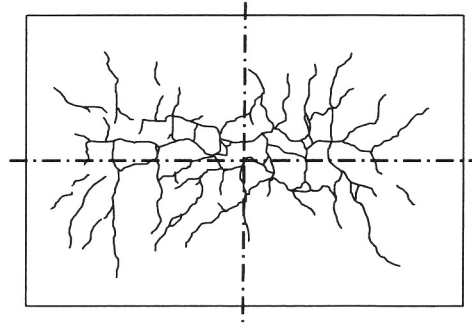


図-3 初期損傷(ひびわれ)状況 (A1)

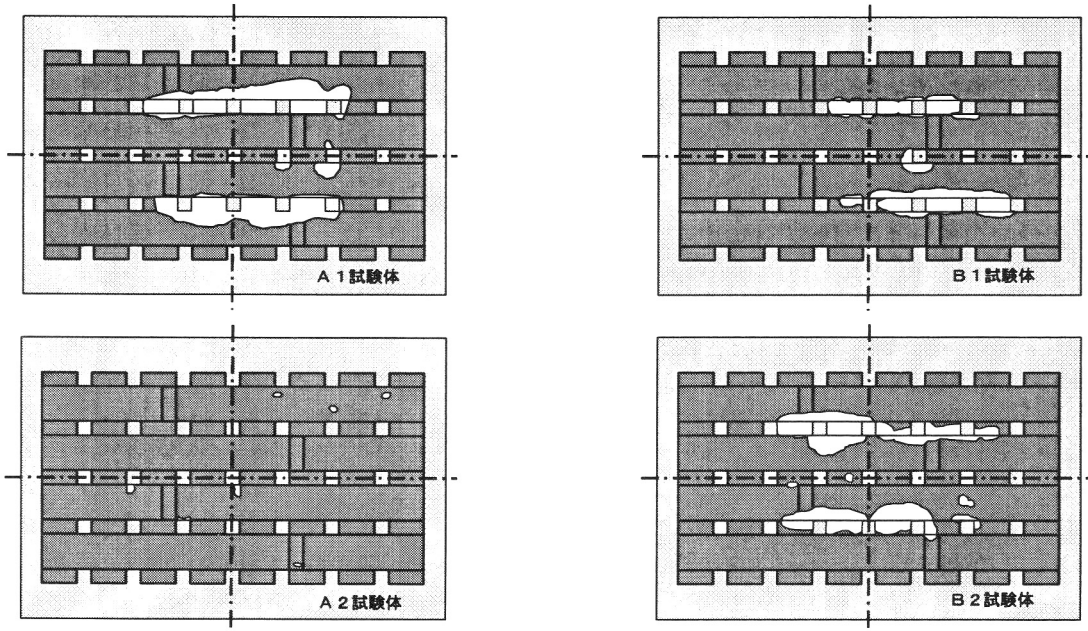


図-4 破壊状況

### 3. 試験結果

#### 3.1 初期損傷

各試験体の初期損傷の一覧を表-5に、ひびわれ発生状況の一例を図-3に示す。

全ての試験体において、予備荷重終了時の初期損傷時には、格子状のひびわれ発生が認められた。そのひびわれ密度は、床版厚さの違いが含まれているものの5.2~9.8m/m<sup>2</sup>程度であった。AFRPシート補強前後の床版中央変位の変化を比較すると、変位の低減率は15.2~46.0%

であった。初期損傷時においてA1試験体の変位が大きくなっているが、この試験体は床版厚さが150mmと他の試験体より薄いことに原因がある。

試験体ごとの個体差が含まれているものの、4体の損傷レベルをほぼ同一なものとして、以降の検討を行うものとした。

#### 3.2 破壊状況

各試験体の破壊状況の一覧を表-6に示す。図-4に

押抜き破壊時のAFRPシートの剥離状況を示す。

A1, B1, B2 試験体では、押抜き破壊の発生時にせん断ひびわれ貫通位置においてAFRPシートの剥離が認められるなど、同様の破壊状況を示している。これらの試験体においては、明瞭な押抜きせん断破壊面の発生を確認して試験を終了した。A2試験体は、予定した荷重履歴が終了した後も荷重を増加させて試験を継続したが、明瞭な破壊面の形成が認められなかった。疲労耐力が極端に大きくなったことの原因を明確にできなかったため、以降の検討では、荷重170kNまでの試験結果を利用するものとした。

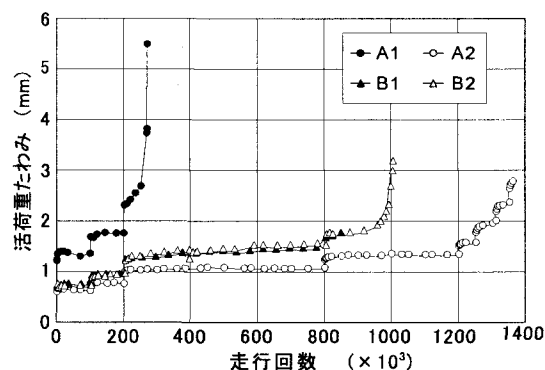


図-5 走行回数と床版中央の活荷重たわみ

### 3.3 走行回数と床版中央変位の関係

走行回数と床版中央変位の関係を図-5に示す。

走行回数の累積により、床版中央の活荷重による変位量がシリーズAおよびBともに2mm程度に達した段階で変位の増加速度が急増し、破壊に至る傾向が認められる。A1試験体は厚さが150mmと他の試験体と比較して薄いにもかかわらず、中央の活荷重変位が2mm程度から変位が急激に上昇している。この寸法形状の試験体に特有の現象である可能性も考えられる。

表-7 AFRPシートの補強効果

	無補強床版 計算値		補強後 試験値	試験値に 基づく 増加率 R1
	Psxo kN	Neq ×10 <sup>3</sup>	Neq ×10 <sup>3</sup>	
A1	197	6.84	77.6	11.4
A2	241	91.2	2,582	28.3
B1	260	229	1,480	6.4
B2	257	201	1,594	7.9

## 4. 疲労寿命の推定

### 4.1 算出方法

RC床版の疲労寿命を予測するための既往の推定式<sup>7)</sup>として、筆者らは式(1)に示す押抜きせん断耐力と破壊回数の関係式、および式(2)に示す押抜きせん断耐力算定式を用いるものとする。

$$\log\left(\frac{P_0}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$P_{sx}$ : 劣化した床版の押抜きせん断耐力  
 $P_0$ : 作用荷重,  $N$ : 走行回数

$$P_{sxo} = 2B \cdot (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{1max} \cdot C_m) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$B$ : 梁の有効幅 ( $B = b + 2d_d$ )

$b$ : 載荷板の配筋方向の辺長

$d_d$ : 引張側配筋の有効高さ

$C_m$ : 引張側主鉄筋のかぶり

$X_m$ : 引張側コンクリートを無視した主鉄筋断面の中立軸深さ。コンクリートの弾性係数は次式による( $E_c = 210000 + 900(\sigma_{ck} - 300)$ )

$\tau_{smax}$ : コンクリートの最大せん断応力度

$$(\tau_{smax} = 0.252\sigma_{ck} - 0.000246\sigma_{ck}^2)$$

$\sigma_{1max}$ : コンクリートの最大引張応力度

$$(\sigma_{1max} = 0.583(\sigma_{ck})^{2/3})$$

補強効果の試験値は、輪荷重試験により得られた破壊回数を基準試験体の破壊回数で除して寿命増加率(R1)として算出した。この際、補強試験体の破壊回数は、マイ

表-8 従来式による補強効果の推定

	AFRPシート補強床版 計算値		式(2) による 増加率 R2	R2/R1
	Psxo kN	Neq ×10 <sup>3</sup>		
A1	210	15.5	2.3	0.20
A2	251	197	2.2	0.08
B1	266	304	1.3	0.20
B2	265	285	1.4	0.18

$$N_{eq} = \sum (P_i/P_0)^m \cdot n_i \quad \dots\dots\dots(3)$$

$N_{eq}$ : 等価破壊回数、 $P_0$ : 基準荷重、

$P_i, n_i$ : 各ステージの荷重、走行回数

$m$ : 係数 ( $m = 12.76 = 1/0.07835$ )

ナー則を仮定した式(3)により、150Nにおける等価破壊回数として換算した。さらに、本試験では、無補強試験体の輪荷重試験を実施していないため、基準となる無補強床版の破壊回数は、式(2)にそれぞれの試験体のコンクリート強度および断面諸量の実測値を代入して押抜きせん断耐力  $P_{sxo}$  を計算した後に、式(1)を用いて算出した。

なお、A2試験体は、前述の通り、明確な破壊を示さなかったため、170kNまでの走行回数を代用して補強効果を算出した。

補強効果の計算値は、AFRPシートを床版内の主鉄筋と

同様に取り扱い式(2)により  $P_{sxo}$  を算出し、この値を式(1)に代入して得られた破壊回数を基準試験体の破壊回数で除して寿命増加率(R2)算出した。

#### 4.2 補強効果

AFRP シート補強前の破壊回数の計算値、補強後の破壊回数および寿命増加率の試験値  $R1$  を表-7 に示す。AFRP シートによる増加率の試験値  $R1$  は、6.4~28.3 まで変動している。A1 試験体と A2 試験体は同一の AFRP シートによる補強に関わらず、補強効果に大きな違いが生じている。

AFRP シート補強後の押抜きせん断耐力、破壊回数、および寿命増加率の計算値  $R2$  を表-8 に示す。寿命増加率  $R2$  は 1.3 倍から 2.3 倍と小さな値であり、表-7 の寿命増加率の試験値  $R1$  との比率は 8% から 20% 程度となっている。

押抜きせん断耐力を評価する(2)式では、母床版の影響因子としてコンクリート強度、床版厚、主鉄筋量など、AFRP シートの影響因子として主鉄筋方向の補強量が考慮されている。このうち、補強による耐力の増分は、補強筋の増加量、すなわち AFRP シートの引張剛性だけに依存している。表-8 の A1 と A2 試験体はシート補強量が同一であり、(2)式に基づく母床版の耐力を考慮した寿命増加率  $R2$  はほぼ同一であるが、試験結果は異なっている。補強効果に影響を及ぼす要因として、AFRP シートの引張剛性以外の因子が存在する可能性が示唆されている。

無次元化した補強後のせん断耐力と寿命増加率との関係を図-6 に示す。4 試験体の相関関係は良好とは言えない。この点からも補強効果の推定には(2)式で考慮されている影響因子以外の項目があると考えられる。

表-9 に試験体の配力鉄筋量の一覧を、図-7 に床版の配力方向の補強量と寿命増加率の関係を示す。補強量は、シート補強量、配力鉄筋量、および両者を加算したものとした。横軸は、鉄筋量とシート補強量それぞれの引張剛性を補強後の押抜きせん断耐力で除した無次元量で、配力筋方向の補強量を示す指標である。

AFRP シート補強量のみを指標とした場合は、A1 試験体と A2 試験体がほぼ同一の指標となるが、寿命増加率が異なっているため、良好な相関にはなっていない。配力鉄筋量のみを指標とした場合は、A1 試験体と B1 および B2 試験体が同一の指標となり、やはり良好な相関関係とはいえない。シート補強量の影響が、それぞれ反映されていないことが認められる。

一方、両者を組み合わせることで、寿命増加率はこの指標と良好な相関関係を有していることが示唆されている。すなわち、配力筋方向に補強が多くなされている場合には、輪荷重の応力が配力筋方向に分配されるため、寿命増加率が伸びるものと考えられる。

これらにより、AFRP 繊維シート補強効果は、主に

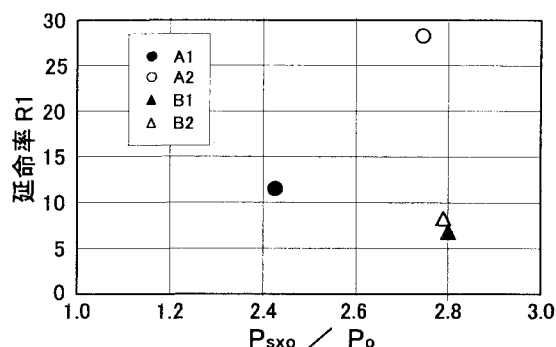


図-6 補強後の押抜きせん断耐力と増加率の関係

表-9 試験体配筋量一覧

試験体	配力鉄筋量	
A1	4.223	cm <sup>2</sup> /m
A2	10.136	cm <sup>2</sup> /m
B1	5.068	cm <sup>2</sup> /m
B2		

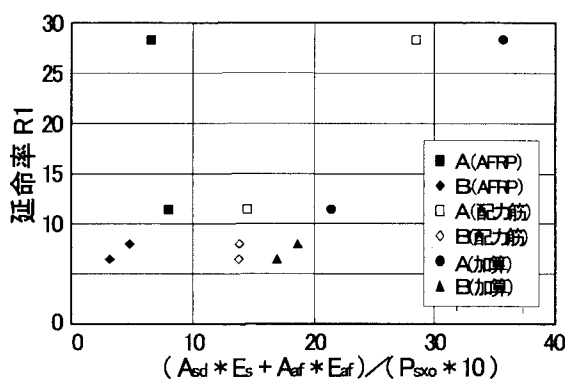


図-7 配力鉄筋方向の補強量と増加率の関係

表-10 松井-蔡式による補強効果の推定

	AFRPシート補強床版 計算値 式(4)		式(4) による 増加率 R3	R3/R1
	Psxi kN	Neq ×10 <sup>3</sup>		
A1	239	80.8	11.8	1.04
A2	291	1,243	13.6	0.48
B1	313	2,413	10.5	1.64
B2	310	2,131	10.6	1.34

母床版が保有する耐荷性状を改善することで発揮され、母床版の配力筋比他の断面緒元の影響を大きく受けるものと判断される。

配力鉄筋方向への荷重分散性能による補強効果を考慮した、松井-蔡らの提案する新たな押抜きせん断耐力算定式により AFRP シートの補強量と疲労寿命の延命効果

を検証する。同式は、連続繊維シートの補強効果が主に母床版のコンクリート断面における押抜き破壊への抵抗領域の増加、および配力筋方向の荷重の分散性状の改善により発揮されるものとして表現された実験式で、(4)式で表される<sup>5)</sup>。この $P_{sxi}$ を(1)式中の $P_{sx}$ に代入し、松井一蔡式を用いた寿命増加率の計算値(R3)を算出した。

$$P_{sxi} = P_{sxo} + 2 \cdot (0.25 \sigma_{tmax} C_d (a + 2d_m)) \dots (4)$$

$a$  : 載荷板の主鉄筋方向の辺長

$C_d$  : 引張側配力筋のかぶり

$d_m$  : 引張側主鉄筋の有効高さ

(4)式の第2項は配力筋方向の荷重の分散性状の改善を考慮した項で、シートの引張剛性に関与しない項となっている。(4)式による押抜きせん断耐力 $P_{sxi}$ を用いて算出した破壊回数および寿命増加率を表一10に示す。

第2項による押抜きせん断耐力の増加は、シートの引張剛性による押抜きせん断耐力の増加より大きな値となっている。このため、破壊回数の増加は大きく、補強後の寿命増加率は10.5倍から13.6倍と算出されている。寿命増加率は試験結果に対して比較的精度よく推定されており、試験結果との比率は48%から164%程度となっている。破壊回数の推定式が対数式であり、その係数も0.1以下と小さいことを踏まえると、R1とR3の値は、概ね一致しているものと判断される。

提案式(4)の計算結果と試験結果との関係をS-N曲線上に表示した図-8において、AFRPシートの補強効果は、シリーズAおよびBにおいては、ともに精度の良い対応関係が認められる。

総じて、母床版の押抜きせん断耐力、AFRPシート補強量、試験の形状寸法および補強シートの種類がそれぞれ異なる4試験体について概ね良好な対応関係が認められることから、AFRPシートの補強効果を母床版の性能改善に帰着させる松井一蔡の提案式(4)の有効性が確認されたと判断される。

## 5. おわりに

連続繊維シート補強による疲労耐久性は、主に床版コンクリートのひびわれの進展を抑えることで向上する。床版のひびわれは、シートの引張剛性により抑制される曲げ引張応力だけでなく、床版下面での面外せん断応力や面内せん断応力によっても進展する。本試験結果における補強量と補強効果の関係は、このような様式のひびわれの進展がシート補強により抑制されることを示唆しているものと考えられる。

アラミド繊維シートを用いて床版下面を格子状に補強したRC床版の輪荷重走行試験で得られた知見を以下に記す。

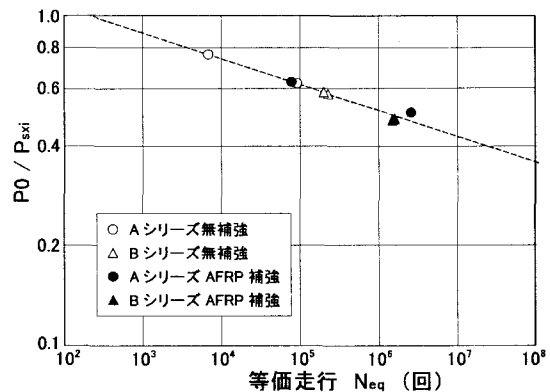


図-8 補強床版の疲労寿命推定

- 1) アラミド繊維シートの補強効果は、主に床版コンクリートが保有する耐荷性状を改善することで発揮される。配力筋量他の断面緒元の影響を大きく受けるため、アラミドシートの引張剛性が補強効果に与える影響は小さいといえる。
- 2) アラミド繊維シートの補強効果は、母床版のコンクリート断面の耐荷性状の向上、および配力筋方向の荷重の分散性状の改善を反映させる疲労寿命算定式(4)により推定することが可能である。

## 参考文献

- 1) 三上他, 「2方向アラミド繊維シート接着補強床版の疲労耐久性評価の一手法」, 第3回床版シンポジウム講演論文集, PP169-174, 2003
- 2) 岡田他, 「格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果」, 第3回床版シンポジウム講演論文集, PP175-180, 2003
- 3) 中島他, 「2方向AFRPシートで補強したRC床版の移動荷重による疲労性状」, 日本コンクリート工学年次論文集 26, PP1567-1562, 2004
- 4) Chai 他, 「Application of AFS in strengthening of deteriorated RC Bridge Slabs subjected to Wheel Load」, 日本コンクリート工学年次論文集 27, PP1531-1536, 2005
- 5) Chai, 「Improvement of RC Slab fatigue durability by FRP Sheet strengthening」, 大阪大学大学院博士課程学位論文, 2006.3
- 6) 旧建設省土木研究所編, 「橋梁点検要領(案)」土木研究所資料第2651号, 1988.7
- 7) 阪神道路公団編, 「道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性」, 1991.12
- 8) 首都高速道路公団, 「構造物等点検要領」2001.4