

論文 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

中島 規道^{*1}・三上 浩^{*2}・田村 富雄^{*3}・角田 敦^{*4}

要旨：2方向に配列されたアラミド繊維シートにより補強したRC床版の疲労耐久性を検討するため、コンクリート面の下地処理方法および補強量を変化させた試験体の輪荷重走行試験を実施した。この中で、1)2方向アラミド繊維シート補強は、主に床版の配力鉄筋方向に補強効果を発揮して疲労耐久性を向上させること、2)繊維シートの剥離は、ひびわれ位置でのせん断変形に起因して発生することなどを明らかにし、疲労寿命推定式の試算を示した。

キーワード：2方向アラミド繊維シート、輪荷重走行試験、疲労耐久性、剥離

1. はじめに

近年、自動車交通量の増加や車両の大型化に伴い、補修を要する鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）が増加しつつある。さらに、車両総重量の規制緩和や設計自動車荷重の増大によるさらなる劣化進行も懸念され、早急な補修対策の実施が求められている。

各種連続繊維シートによる補修・補強工法は、供用下の施工が可能である。死荷重の増加を伴わないなどの利点により、床版の補強工法として適用事例が増えつつある。筆者らはアラミド繊維を2方向に織上げて布状に配列した2方向アラミド繊維シート（以下、AFRPシート）に着目し、種々の条件下における補強効果を検討してきた¹⁾²⁾。この中で、正負に交番するせん断力作用下では、曲げひびわれと両側のかぶりコンクリートに発生した斜めひびわれが交差して躯体から分離するブロック化現象が梁部材の疲労耐久性に与える影響が大きいことなどを明らかにしてきている。

本研究では、AFRPシートで補強したRC床版の疲労耐久性を明らかにすることを目的とし、コンクリートの下地処理方法と補強層数を変化させたRC床版の輪荷重走行試験を実施した。

2. 実験概要

本実験に用いた試験体の一覧を表-1に示す。試験水準は、コンクリート表面の下地処理の影響とし、ディスクサンダーによる表面研磨を行った試験体（A1S）、およびサンドブラストによる粗面処理を行った試験体（A1B）の2体とした。何れもAFRPシートの補強層数は1層とした。なお、比較のため粗面処理とAFRPシート2層とした試験体（A2B）も併せて検討に使用した。

試験体の形状および寸法を図-1に示す。床版

表-1 試験水準

試験体	表面処理	AFRP	備考
A1S	表面研磨	1層	
A1B	粗面処理	1層	
A2B	粗面処理	2層	文献 ²⁾

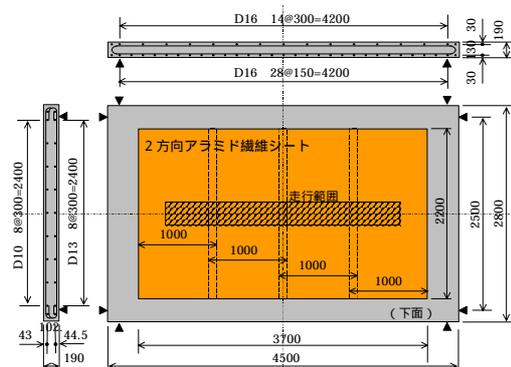


図-1 試験体形状・寸法

*1 三井住友建設（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 三井住友建設（株） 技術研究所 工博（正会員）

*3 ファイベックス（株）

*4 東レ・デュポン（株）

厚 19cm の昭和 39 年道路橋示方書に準拠した R C 床版(以降、S39 床版)として設計・作成した。

使用材料の機械的性質を表 - 2 に示す。AFRP シートは、高弾性タイプのアラミド繊維を布状に織り上げ 2 方向に配列した製品を使用した。直交する 2 方向の特性は、何れも等しい値となっている。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 体の試験は、同一材齢で実施した。なお、A2B 試験体のコンクリート強度は、 37.6 N/mm^2 であった。

既設の劣化床版を模擬するため、荷重 157kN で初期載荷を行った。損傷状態は、文献 3) に基づいて床版上面に数本の貫通ひびわれが発生する状態とした。

損傷状態の確認後、幅 1 m 長さ 2.2m の AFRP シートを配力鉄筋方向の継手長を 100mm として床版下面に貼付した。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。

貼付終了後、特別な養生期間を設けず計測機器の設置完了後、直ちに走行試験を開始した。本載荷は、4 万回ごとに荷重を 20kN 増加させる階段載荷とした。試験機は、独立行政法人土木研究所の輪荷重走行試験機を使用した。

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、上下端筋ひずみ、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。

3. 実験結果

3.1 初期損傷

初期載荷終了時の走行回数と床版中央の変位を表 - 3 に示す。走行回数は、A1S 試験体が 4 万回、A1B 試験体が 2.5 万回で目標レベルに到達した。終了時の変位は、それぞれ 6.2mm と 6.1mm でほぼ同一であった。なお、A2B 試験体は、走行回数 4 万回以降の載荷荷重を 176kN に増加して貫通ひびわれの発生に至らしている。

表 - 2 使用材料の機械的性質

コンクリート	f'_c	E_a	ポアソン比	試験材齢
	N/mm^2	kN/mm^2		
	24.2	23.3	0.165	28
AFRP シート*	t	f_u	E_s	弾性伸び %
	mm	N/mm^2	kN/mm^2	
	0.24	2060	118	1.75
鉄筋	f_y	f_u	E_s	伸び %
	N/mm^2	N/mm^2	kN/mm^2	
D10	372	553	193	21.3
D13	357	516	192	23.6
D16	356	538	197	21.1

*樹脂を含まない繊維換算の値

表 - 3 試験結果一覧

試験体	初期載荷		本載荷	
	走行回 $\times 10^3$ 回	変位 mm	走行荷重 kN	走行回数 $\times 10^3$ 回
A1S	40	6.21	235	162
A1B	25	6.13	214	152
A2B	804*	6.44	314	347

*157kN換算

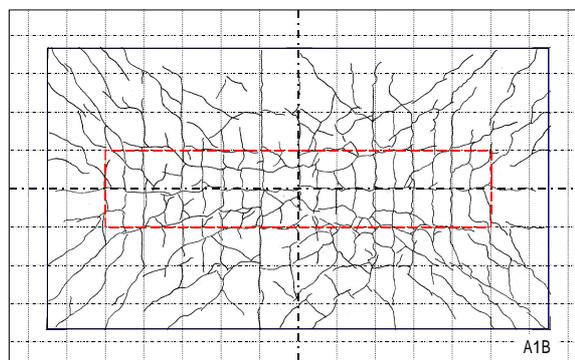


図 - 2 ひびわれ状況 (A1B)

貫通ひびわれ発生時の床版下面のひびわれ発生状況の一例を図 - 2 に示す。A1S 試験体、A1B 試験体共に典型的な格子状のひびわれが認められた。配力鉄筋方向のひびわれ間隔は 150mm 程度であり、主鉄筋の配置位置にほぼ一致した。

3.2 破壊状況

押抜きせん断破壊時の走行回数と荷重を表 - 3 および図 - 2 に示す。表面研磨の A1S 試験体は荷重 235kN ステージの走行回数 16.2 万回で、粗面処理の A1B 試験体は荷重 214kN ステージの走行回数 15.2 万回でそれぞれ押抜きせん断破壊

となり走行試験を終了した。A1S 試験体の破壊荷重は1段大きくなっているが、荷重増加直後の押抜き破壊であり、両者の疲労耐久性に大きな差異はないと判断される。2層補強の A2B 試験体は、補強量の大きさに加えてコンクリート強度の影響もあり、平成 8 年度道路橋示方書に準拠して設計・製作された床版(以降、H8 床版)よりも大きな走行荷重および走行回数を示した。

FRP シートの剥離状況を図 - 4 に示す。表面研磨の A1S 試験体、粗面処理の A1B 試験体共に、走行 12 万回で主鉄筋(走行直角)方向のひびわれに沿った剥離が観察された後に、押抜きせん断破壊が発生した。剥離の発生間隔は、配力鉄筋(走行)方向に 300mm から 600mm 程度で曲げひびわれにほぼ一致していた。さらに、破壊後の切断面の観察によると、梁部材での試験¹⁾と同様に曲げひびわれとかぶりコンクリートに発生した斜めひびわれが交差して躯体から分離するブロック化現象も認められた。ひびわれ位置では、輪荷重の移動により正負に交番するせん断変形が卓越して生じていると判断される。このことから、シート剥離は曲げ変形による面内力よりは、むしろひびわれ位置でのせん断変形による面外力に起因していると推測される。

梁部材の試験¹⁾により表面研磨の動的付着力は、粗面処理に比して小さいことも確認されているが、A1S 試験体は押抜きせん断破壊直前にひびわれ部の剥離の拡大が認められ、対応する結果を示した。なお、何れの試験体も終局時にシートの全面剥離は発生しなかった。

走行回数と剥離の面積の関係を図 - 5 に示す。2層補強の A2B 試験体を含めて剥離の拡大と押抜きせん断破壊の発生間隔は比較的短く、両者が関連した現象であることが示されている。

3.3 変位

走行回数と床版中央の活荷重変位の関係を図 - 6 に示す。何れの試験体においても変位 3.5mm 程度からその増加速度が大きくなっているが、この時の回数は前述の剥離の発生にほぼ対応しており、ひびわれ位置での変形抑制が床

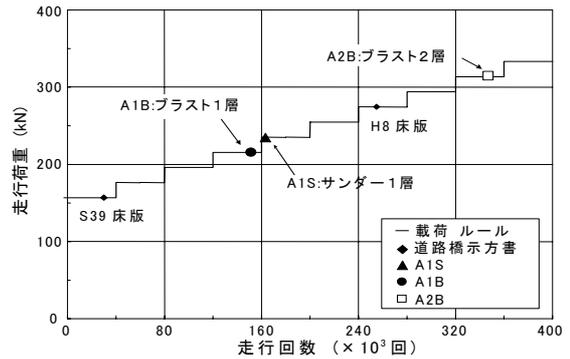


図 - 3 破壊荷重と走行回数

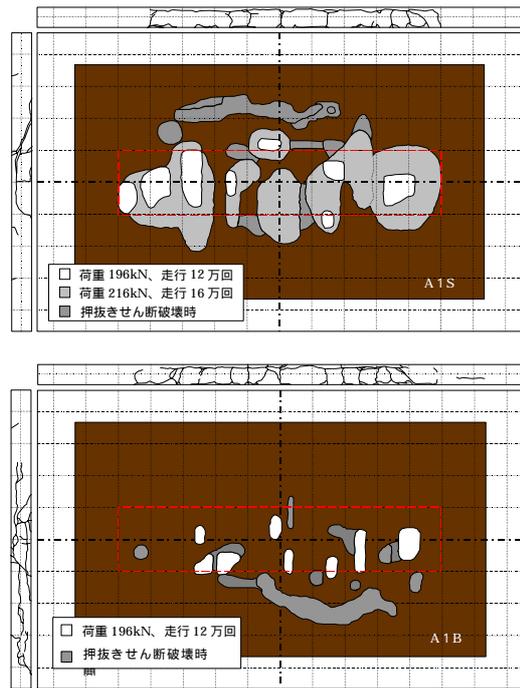


図 - 4 シートの剥離状況

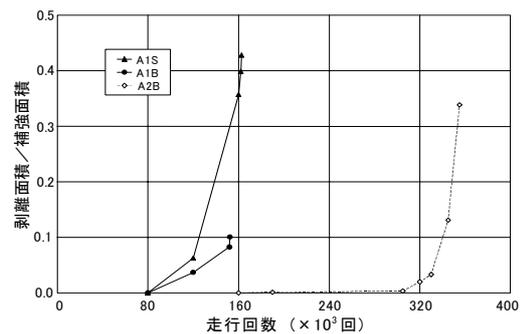


図 - 5 走行回数と剥離の進展

版の延命に重要であることが示唆されている。

表面研磨の A1S 試験体は、粗面処理の A1B 試験体より小さな変位を示し、前述の剥離領域の大きさと逆転した結果を示した。面部材においては、梁部材に比して下地処理の影響が小さく、試験体の個体差のみが現れたためと推測される。

3.4 AFRPシートひずみ

走行回数と AFRP シートひずみの関係を図 - 7 および図 - 8 に示す。AFRP シートひずみは、床版中央部 3 点の活荷重ひずみの平均値として表示した。

主鉄筋（走行直角）方向の AFRP シートひずみは、補強層数によらず同一の走行回数 - ひずみ関係を示している。一方、配力鉄筋（走行）方向は 2 層補強の A2B 試験体が、1 層補強の試験体の 1/2 程度となっている。しかしながら、補強層数の差が 2 倍であることから配力方向の AFRP シートの張力が等しいと捉えることが可能であり、この張力の分担傾向については、次節で考察する。

A1S 試験体では、各ステージ内での AFRP シートひずみの減少が認められる。これは、前述の剥離領域の広さに対応して、ひびわれ部での微小な剥離の進行を示していると推測される。

断面内のひずみ分布を AFRP シートの剥離発生以前の走行回数 8 万回、荷重 196kN について図 - 9 に示す。主鉄筋方向は、何れの試験体もほぼ直線分布となっており概ね平面保持が成立している。しかしながら、配力鉄筋方向において 1 層補強の A1S, A2B 両試験体は、直線からの逸脱が著しい。AFRP シートとコンクリートが一体的な段階であることから、配力筋方向の変形が曲げ的な連続変形となっていない可能性が示唆されている。

3.5 AFRP シートの補強効果

AFRP シート貼付前後の床版中央における活荷重変位、下端筋活荷重ひずみの変化を AFRP シートによる低減率として図 - 10 に示す。

床版変位は、補強の仕様によらず概ね 65% 程度に減少した。配力鉄筋ひずみは主鉄筋ひずみに比べて大きく減少しており、1 層補強 + 粗面処理の A1B 試験体で最大 20% 程度まで低下していることが認められた。補強量の多い A2B 試験体で低減効果が少なくなっているが、これは母床版のコンクリート強度が高く、貫通ひびわれの発生時点においても損傷度合いが他の床版に比

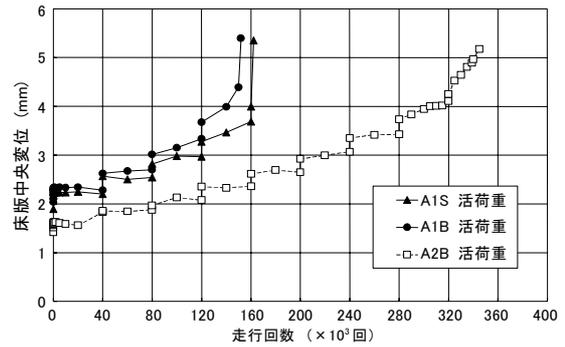


図 - 6 走行回数と活荷重変位の関係

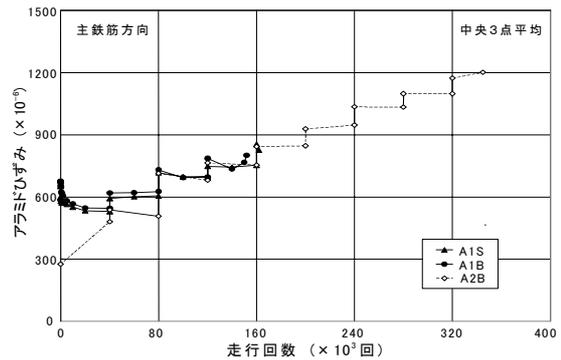


図 - 7 走行回数と AFRP シートひずみの関係

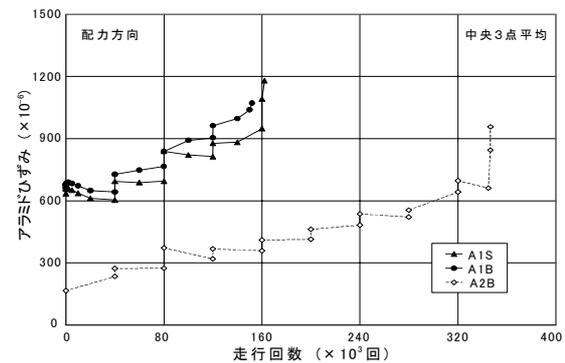


図 - 8 走行回数と AFRP シートひずみの関係

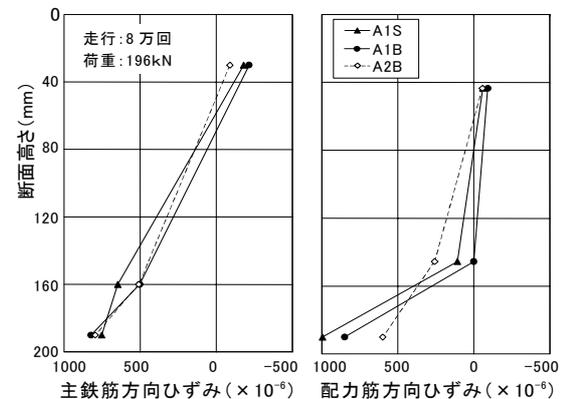


図 - 9 断面内ひずみ分布

して小さく、AFRP シートの補強効果が現れにくかったためと推測される。

断面内で AFRP シートが負担する張力の比率

を分担率として図 - 11 および図 - 12 にそれぞれ示す。分担率は、AFRP シートおよび下端鉄筋の計測ひずみに単位幅の断面積と弾性係数を乗じてそれぞれの張力を算出し、AFRP シート張力を両者の合計で除して求めた。

主鉄筋方向の分担率は、走行開始直後の期間を除きほぼ一定であり、A1S 試験体が 10% 程度、A1B 試験体が 12% 程度、A2B 試験体が 22% 程度と比較的小さな値であった。なお、A2B 試験体の走行 8 万回までは特異な変化が認められるが、これは前述の通り、母床版の損傷度合いの影響によるものである。

配力鉄筋方向の分担率は、A2B 試験体が 50% 程度で推移した。1 層補強の A1S 試験体および A1B 試験体は、初期の分担率は 80% 程度から徐々に低下する傾向を示した。何れも主方向の比率よりも大きく、損傷床版の配力鉄筋方向への応力分配は、主に AFRP シートが分担していると推測される。

4. 疲労寿命の推定

RC 床版の疲労寿命を予測するための推定式は、松井⁴⁾によって式(1)および式(2)として提案されている。AFRP シートの補強量を床版内部の補強鋼材と同様に算定すると、式(2)の中立軸の移動のみとなり、床版の疲労回数 N の変化は僅かな値となる。そこで、本研究では、AFRP シートの補強量と疲労寿命の延命効果の関係を試験結果から求めてせん断耐力比 (P_0/P_{sx}) に乗じて表現することを試みるものとする。

補強効果は、AFRP シート補強試験体の疲労回数を基準試験体の疲労回数で除して延命度 (R) として算出した。この際、等価回数は式(1)上でマイナー側を仮定して荷重 157kN に換算した。コンクリート強度の違いは基準強度を 24N/mm^2 として式(1)上で実強度と基準強度の疲労回数の比を算出し等価回数に乗じて補正した。基準となる無補強床版の走行回数は、文献 5)より試験条件に近い 2 体の平均値を引用した。

AFRP シートの補強量は、弾性係数とシート厚

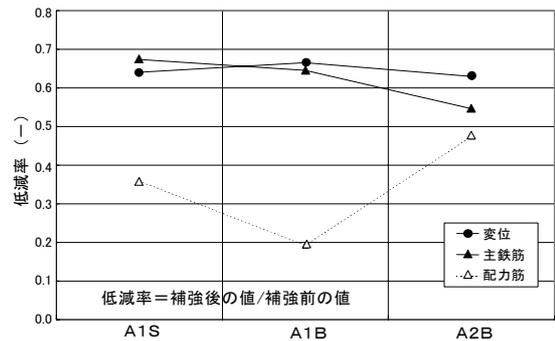


図 - 10 AFRP シートによる低減率

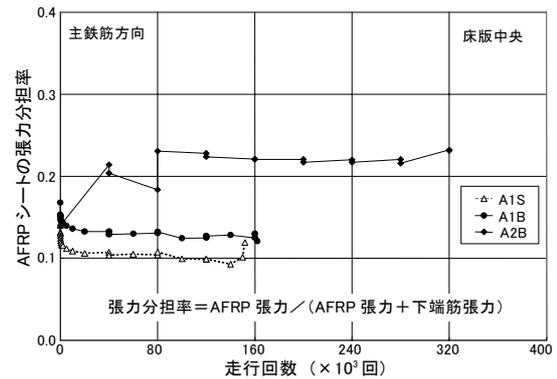


図 - 11 AFRP シートの張力分担率

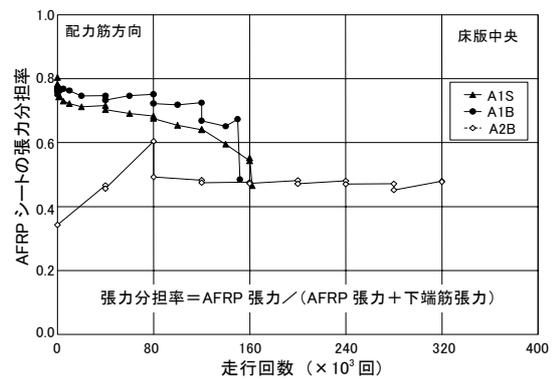


図 - 12 AFRP シートの張力分担率

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

ここに、

- 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
- R : 本検討で算出する延命度

$$P_{sx} = 2B \cdot (\tau_{\max} \cdot X_m + \sigma_{\max} \cdot C_m) \dots \dots \dots (2)$$

- B : 梁の有効幅
- C_m : 主鉄筋断面のかぶり
- X_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ
- τ_{\max} : コククリートの最大せん断応力度
- σ_{\max} : コククリートの最大引張応力度

さの 3 乗の積 ($E \cdot t^3$) を指標とした。この指標は、主鉄筋方向ひびわれに沿った剥離分布、および

配力鉄筋方向の断面ひびき分布などから、ひびわれ位置でのせん断変形への抵抗性、すなわちAFRPシートの局所的な曲げ変形への抵抗性が疲労耐久性に影響を与えていると推測して設定したものである。

これらの数値の一覧を表 - 4 に示す。さらに、求められた乗数 R を式(3)に、修正前後のAFRPシート補強床版のS - N関係を図 - 13 に示す。

$$R=0.798 \cdot (E \cdot t^3)^{-0.117} \quad (3)$$

ここに、

R: 延命度 (補強床版の回数/基準床版の回数)

E: 繊維シートのヤング率 (kN/mm²)

t: 繊維換算のAFRPシートの厚さ(mm)

補正前後の分布勾配の違いは大きく、AFRPシートで補強した床版の疲労寿命の算定には、AFRPシート特有の疲労耐久性の延命効果を考慮する必要があると判断される。なお、式(1)の直線との差異は、試験装置の特性により生じたものと推測される。

なお、本試験はアラミド繊維のみの試験であること、試験体数が少ないことから、E・t³およびRは計算のための便宜上の数値となっている。他の繊維材料を用いた試験結果との比較検討、および算定式へ反映する手法などは今後の検討課題として行きたい。

5. まとめ

2方向アラミド繊維シートで補強したRC床版の疲労耐久性を輪荷重走行試験により検討した。本試験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 2方向アラミド繊維シートの剥離は、主鉄筋方向ひびわれ位置でのせん断変形に起因して発生する
- (2) 2方向アラミド繊維シートは、主に配力鉄筋方向に補強効果を示し、床版の疲労耐久性を向上させる
- (3) 2方向アラミド繊維シートで補強したRC床版の疲労寿命は、既往の算定式にシート特有の延命効果を考慮して推定する必要がある。
- (4) 下地処理方法によって、剥離の発生状況は異なる。

表 - 4 疲労回数の補正

試験体名称	層数	E・t ³ kN・mm	F'c N/mm ²	疲労回 × 10 ³ 回		延命度 R
				等価*1	補正*2	
S39-1	0	-	27.0	27.4	17.9	1.00
S39-9				225	153	
平均				126	85.4	
A1S	1	1.63	24.2	3610	3503	36.2
A1B				2768	2685	
平均				3189	3094	
A2B	2	13.05	37.6	248410	68855	806

*2: 156kN 等価換算, *3 基準強度: 24N/mm²

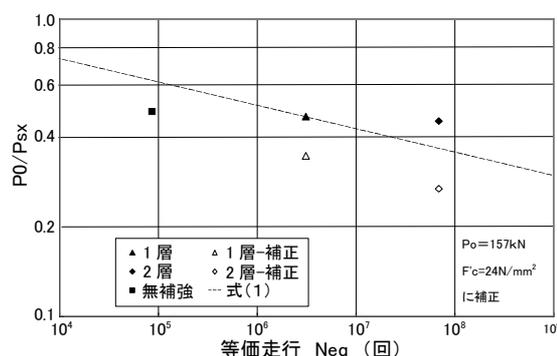


図 - 13 疲労寿命の推定

謝辞 本研究の実施にあたりご協力いただいた(独)土木研究所、ならびにSRIハイブリッド(株)、(株)ポー他、2方向アラミド繊維シート工法研究会の諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1)中島ほか: 2 定点逆位相載荷した2方向AFRPシート補強RC梁の疲労性状, コンクリート工学, Vol.25, No.2, pp.1891-1896, 2003.6
- 2)三上ほか: 二方向ケブラー繊維シートで補強した損傷床版の疲労耐久性, 第2回道路橋床版シンポジウム, pp.83-88, 2002
- 3)旧建設省土木研究所: 土木研究所資料第2651号橋梁点検要領(案), 1988.7
- 4)阪神高速道路公団ほか: 道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性, 1991
- 5)松尾ほか: 既設鉄筋コンクリート床版の補修補強に関する検討, 橋梁と基礎, P25-32, 2000.11