Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，1996

論文　連続繊維緊張材を用いた大容量マルチ定着システムの引張強度特性に関する実験的検討

酒井博士[*1]・ 足立幸郎[*2]・ 真嶋光保[*3]・ 宮川豊章[*4]

要旨：本研究では，連続繊維の代表である炭素繊維とアラミド繊維を対象にして，連続繊維緊張材単線での引張強度やひずみについての検討を行った。つづいて，保証荷重130ｔｆを想定した，大容量マルチ定着システムについて引張試験を行い，引張強度特性や定着部の付着特性について検討し，さらに引張疲労試験でシステムの安全性を確認した。これら一連の実験から，単線の引張強度や終局ひずみは正規分布やワイブル分布の適合性がよく，緊張材をマルチとして使用した場合でも統計的推測によりシステムの安全性が評価できることを確認した。

キーワード：連続繊維緊張材，単線，マルチ定着システム，安全性

1．はじめに

外ケーブル工法は，緊張材を部材断面の外に配置することで経済性や施工性が高められることを特徴としているが，主に緊張材の耐久性の観点から，本工法の緊張材に耐環境特性の優れた連続繊維を適用することは，さらに工法の有効性を高める方法の一つと考えられる。しかし，外ケーブル工法の場合，緊張材は配置空間の関係から大容量で少ない本数となる場合が多く，これに適用できる連続繊維緊張材の定着システムの安全性評価手法は必ずしも確立されているとは言い難い。そこで，連続繊維緊張材の外ケーブル工法への実用化を目的とし，PC橋への適用を想定して，定着システムが保証すべき引張荷重（以下，保証荷重と略称する。）を130tfに設定し，炭素繊維緊張材とアラミド繊維緊張材（以下，それぞれCFRP，AFRPと略称する。）を対象にして，マルチ定着システム（以下，マルチと略称する。）の安全性について検討したので報告する。検討は，まず単線の引張試験から強度特性について分析し，次いでマルチの静的引張試験を評価するとともに，引張疲労試験後の残存強度を確認することで，システムの安全性を確認した。

2．実験概要

現在市販されている連続繊維緊張材の中から，代表的なCFRPとAFRPを実験の対象とした。その主要諸元を表－１に示す。

表－１ 連続繊維緊張材の諸元

緊張材	繊維材	繊維結合材	形　状	直径(mm)	ﾒｰｶｰ保証荷重(tf)
CFRP	PAN系	変形ｴﾎﾟｷｼ樹脂	より線状	φ12.5	14.5
AFRP	パラ系	ﾋﾞｽﾌｪﾉｰﾙ型ｴﾎﾟｷｼ樹脂	組み紐状	φ14.7	24.0

実験項目は，単線の静的引張試験，保証荷重を130ｔｆに設定したマルチの静的引張

表－２ 実験項目と供試体数

緊張材	単　線	マルチ定着システム試験	
	引張試験	静的引張試験	引張疲労試験
CFRP	23	5	3
AFRP	30	5	

＊1　（株）ピー・エス　大阪支店　土木技術部　（正会員）
＊2　阪神高速道路公団　保全施設部　工修　（正会員）
＊3　大阪市立大学　工学部　土木工学科　工博　（正会員）
＊4　京都大学　工学部　土木工学科　工博　（正会員）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

試験および疲労試験である。これらの実験項目と供試体数を表－２に示す。

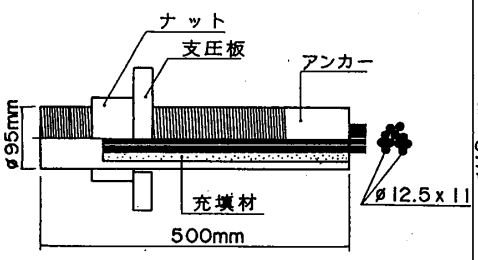
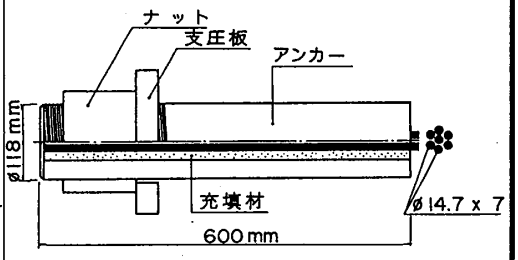
２．１ 単線の引張試験

マルチを構成する単線の引張強度特性を把握することを目的に，試験方法は連続繊維緊張材の引張試験方法（試案）［１］を準用して，荷重とひずみを計測した。なお，破断時のひずみは破断直前の計測値を用いた。

２．２ マルチ定着システムの静的引張試験

実験に用いたマルチの諸元を表－３に示す。定着体鋼材部はステンレス鋼を基本とし，その内部は充填材により緊張材に張力を伝達させる付着型とした。試験方法は，連続繊維緊張材の引張試験方法（試案）［１］および土木学会規準「ＰＣ工法の定着具および接続具の性能試験方法（案）」［２］を準用し，一般雰囲気中で行った。計測項目は，荷重，緊張材および定着体表面のひずみとした。

表－３ マルチ定着システム諸元

項 目	CFRP	AFRP
概略形状		
緊張材構成	φ12.5mm × 11本	φ14.7mm × 7本
鋼材部材質	SUS329J3L	SUS304N2
緊張材定着方法	付着型	付着型
充填材	エポキシ系樹脂	セメント系接着用膨張剤
緊張材試験部長	2000mm	3000mm

２．３ マルチ定着システムの引張疲労試験

表－３の供試体について単調繰返し引張載荷を行った後，２．２と同様の引張試験により残存強度を確認した。繰返し載荷条件としては，外ケーブル工法をPC橋に適用した場合を想定して，下限荷重は緊張材の有効緊張力，振幅荷重は活荷重による張力増加に安全率を乗じたものとし，それぞれ保証荷重の60%，5.3%とした。また，繰返し回数は構造物の耐用年数から想定される300万回とした。

３．実験結果および考察

３．１ 単線の引張試験結果

連続繊維緊張材の破壊確率分布は，一般には正規分布に適合するものとして取り扱われる場合が多いようであるが，一方では，連続繊維緊張材のような脆性材料の場合は，ワイブル分布の適合性がよいとの報告［３］もされている。そこで，実験で得られた引張強度とひずみについてその分布を調べ，両者の関係について検討することにより引張強度特性を明らかにすることとした。

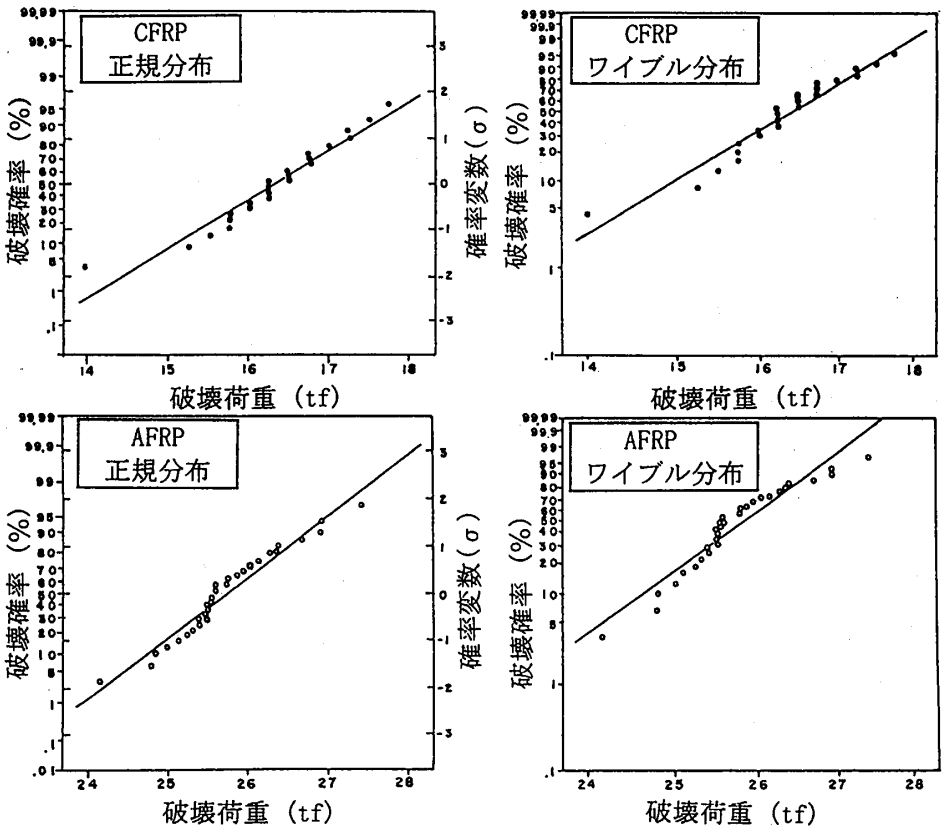
（１）引張強度

本実験で得られた破壊荷重について，正規分布とワイブル分布を適用して各確率紙にプロットしたものを図－１に，また，確率分布の特性値と分布形状の検定［４］結果の一覧を表－４に示す。これらによれば，確率紙での高い相関やカイ二乗検定，Ｋ－Ｓ検定の有意水準などより，両

NII-Electronic Library Service

分布ともに概ね適合度がよいと判断される。ただし，AFRPのカイ二乗検定に見られるように，本実験程度の供試体数では十分な検定結果が得られない場合もある。

一方，著者らは既往の実験結果［5］をもとにして，単線の引張強度に関する検討を行い，表－5，6の結果を得ている。表中メーカー提案の保証荷重とは，緊張材製造メーカー独自の実験から，引張強度分布を正規分布とした場合の平均値(μ)と標準偏差(σ)を用いて3σ法で決定されたものである。



図－1　引張強度分布の確率紙による検定

表－4 引張強度の分布モデルの検定結果

検定方法		正規分布	ワイブル分布	判定基準（限界値）
確率紙（相関係数γ）	CFRP	0.967	0.974	$\gamma>0.9$
	AFRP	0.980	0.956	
カイ二乗検定（$C_{1-\alpha,f}$）	CFRP	3.73	3.04	$<6.25(\alpha=10\%)$
	AFRP	7.86	14.60	正規$<9.21(\alpha=1\%)<$ﾜｲﾌﾞﾙ
K－S検定（D_n^{α}）	CFRP	0.128	0.122	$<0.22(\alpha=10\%)$
	AFRP	0.126	0.166	$<0.24(\alpha=10\%)$

表－5はメーカー提案の保証荷重に対応する破壊確率を，引張強度の分布形状で比較したものである。これによると，破壊確率は引張強度の分布形状を正規分布よりワイブル分布と仮定した方が大きくなる。ここで，図－1の破壊確率と比較すれば，本実験のように供試体数が少ないと標準偏差のばらつきが大きくなり，破壊確率がかなり異なった結果を与える場合があるので注意を要する。

表－5 メーカー提案保証荷重での破壊確率

		CFRP	AFRP
メーカー提案保証荷重(tf)		14.500	24.000
保証荷重破壊確率	正規分布	0.000577	0.000153
	ワイブル分布	0.009062	0.006005
正規分布3σ法の破壊確率		F(X)=0.001350	

表－6 メーカー提案保証荷重での安全性　(tf)

			CFRP	AFRP
標本数 : N			100	98
平均値 : μ			17.120	27.206
標準偏差 : σ			0.805	0.887
平均値の下側限界値 : μmin			16.959	27.027
標準偏差上側限界値 : σmax			0.953	1.052
破壊荷重の下限値			14.102	23.871
メーカー値	保証荷重		14.500	24.000
	正規分布	安全性指数:β	2.58	2.88
	確率変数	生存確率 :%	99.51	99.80

表－6は，引張強度分布を正規分布として平均値の下側限界値(μmin)と標準偏差の上側限界値(σmax)を信頼度95%で算出し，3σ法により破壊荷重の下限値やメーカー提案の保証荷重に対する生存確率について検討［6］したものである。その結果，メーカー提案の保証荷重は破壊荷重の下限値を若干上回っているが，十分な生存確率を有していることが判明した。

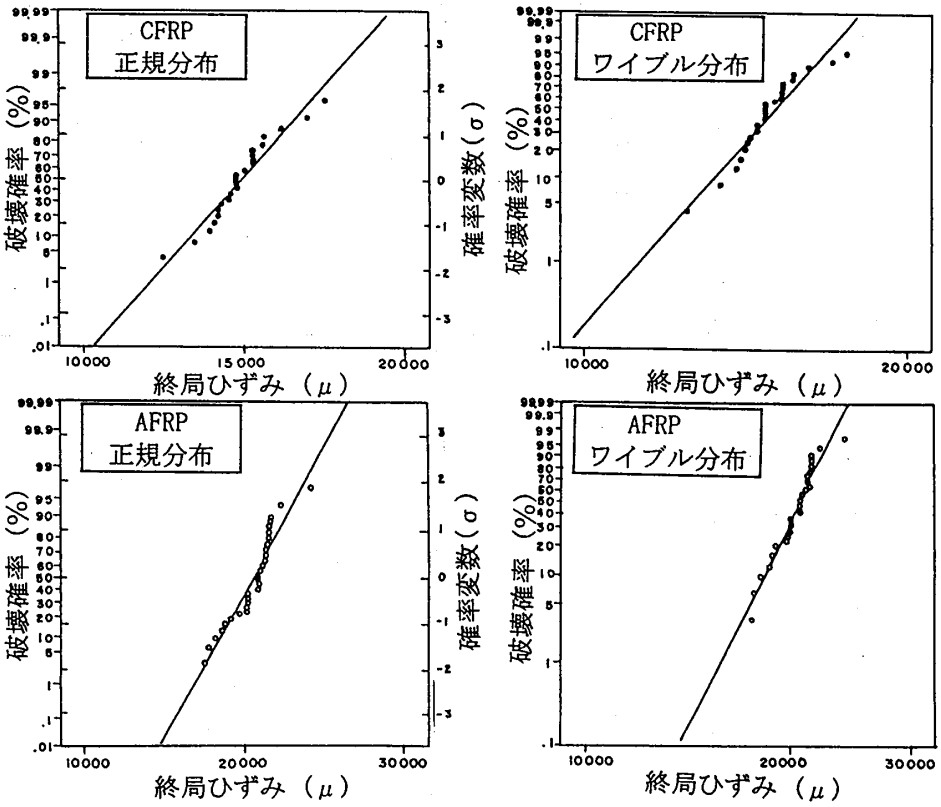
NII-Electronic Library Service

（2）終局ひずみ

本実験で得られた終局ひずみについて，破壊荷重と同様にその分布を比較したものを図－2に，検定結果を表－7に示す。いずれの検定結果でも破壊荷重と同様に正規分布，ワイブル分布ともに適合度がよいと判断される。

（3）引張強度と終局ひずみの関係

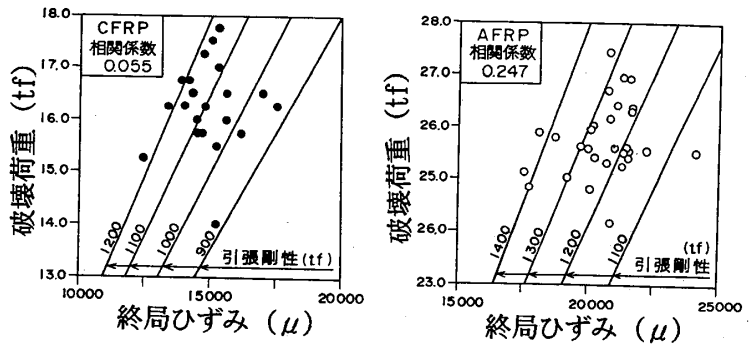
図－3に実験で得られた各単線の破壊荷重と終局ひずみの関係をプロットで，また引張剛性の目盛を実線で示す。荷重とひずみの関係は破壊までほぼ直線で近似可能であるが，引張剛性は表－8に示すとおりばらつく結果となった。また，破壊荷重と終局ひずみには相関関係がみられず，変動係数は破壊荷重よりも終局ひずみの方が大きい，など本実験に用いた連続繊維緊張材の引張強度特性が確認された。



図－2　終局ひずみ分布の確率紙による検定

表－7 ひずみの分布モデルの検定結果

検定方法		正規分布	ワイブル分布	判定基準(限界値)
確率紙（相関係数γ）	CFRP	0.970	0.959	γ>0.9
	AFRP	0.964	0.975	
カイ二乗検定 ($C_{1-\alpha,f}$)	CFRP	2.24	4.81	<6.25(α=10%)
	AFRP	4.45	5.05	<6.25(α=10%)
K－S検定 (D_n^{α})	CFRP	0.100	0.149	<0.22(α=10%)
	AFRP	0.157	0.139	<0.24(α=10%)



図－3　破壊荷重～終局ひずみ

表－8 単線の引張剛性　(tf)

No	CFRP	AFRP	No	CFRP	AFRP
1	918	1057	16	1162	1255
2	928	1149	17	1169	1256
3	972	1159	18	1170	1263
4	975	1179	19	1179	1280
5	1016	1183	20	1186	1286
6	1027	1184	21	1206	1288
7	1056	1193	22	1212	1291
8	1069	1196	23	1223	1300
9	1084	1214	24		1304
10	1099	1215	25		1320
11	1106	1217	26		1375
12	1112	1223	27		1377
13	1154	1236	28		1400
14	1160	1247	29		1431
15	1160	1251	30		1433
平均値				1102	1259
標準偏差				92.2	86.1
変動係数(%)				8.4	6.8

3．2 マルチ定着システムの静的引張試験および引張疲労試験結果

（1）破壊荷重および破断状況

マルチ定着システムの静的引張試験および疲労試験後の引張試験結果を表－9にまとめて示す。

NII-Electronic Library Service

全供試体とも目標とした保証荷重130ｔf以上で破壊している。破壊はいずれも緊張材の破断によるもので，定着部の異常や緊張材の抜け出し等は確認されなかった。またCFRP・AFRP共に，マルチを構成する全ての単線が破断する連鎖破壊が半数以上の供試体でみられた。

表－９　破壊荷重および破断状況　(tf)

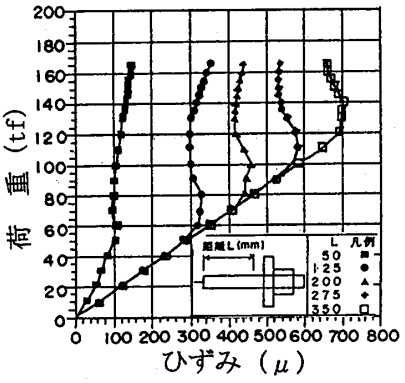
供試体	CFRP				AFRP	
	静的引張試験		疲労試験後引張試験		静的引張試験	
Ｎｏ．１	179.0	単線全数破断	178.5	単線全数破断	160.0	単線２本破断
2	170.0	〃	157.0	単線１本破断	166.0	単線全数破断
3	165.0	単線１本破断	163.2	単線全数破断	169.0	単線３本破断
4	180.0	単線全数破断			178.0	単線全数破断
5	169.0	単線２本破断			174.5	〃
平均値	172.6		166.2		169.5	

（２）定着体ひずみ

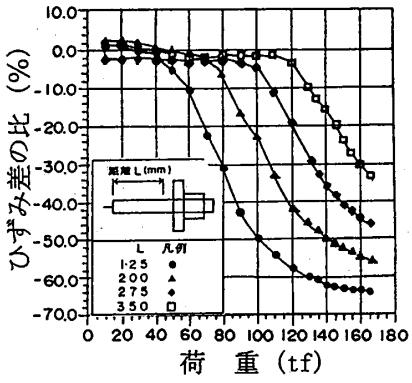
AFRPに適用した定着体を例に，静的引張試験で得られた鋼材部表面の荷重とひずみの関係を図－４に示す。両者の関係は，荷重の増加とともに線形から非線形に移行している。線形域は，緊張材と定着体鋼材部が一体で挙動する状態と推定される。実験で得られた引張剛性と緊張材と定着体鋼材部を合成した引張剛性の計算値を表－10に比較して示すが，両者はほぼ一致している。非線形域では，鋼材部に伝達されるひずみはほぼ一定値を示しており，その大きさは定着体口元からの距離(L)に応じて大きくなっている。図－５は横軸に荷重，縦軸に各荷重レベルに応じた非線形ひずみと線形ひずみの差を線形ひずみに対する比率で表したものである。図より，線形域から非線形域へ移行し始める点は，ひずみ差の比率で約5%とみることができる。この点に対応した荷重と定着体口元からの距離(L)の関係を図－６に示す。これによると，実験結果の最大破断荷重180tfに相当する必要定着長は500mm程度であり，実験に用いた定着体は十分な定着長を有していると思われる。これらのことからも定着体の付着性能は十分確保されており，緊張材の抜け出しは生じていないと考えられる。

表－１０　定着体引張剛性(EA)比較　(tf)

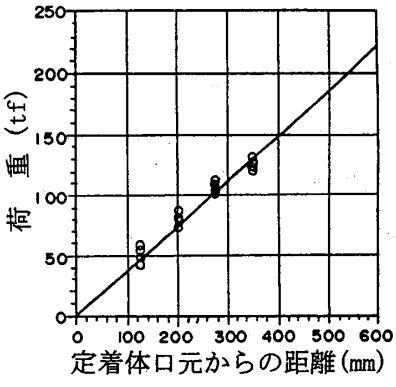
ｱﾝｶｰNO	実験値(EA)	計算値(EA)
NO.1	170.8	ｽﾃﾝﾚｽ鋼断面積 AS=8100mm2 同上弾性係数 Es=19.7 tf/mm2 緊張材1本引張剛性 Ap･Ep=1259 tf 緊張材本数 N=7 本 EA=As･Es+Ap･Ep･N
2	169.9	
3	167.9	
4	168.6	
5	167.4	
6	167.3	
平均値	168.7	168.4



図－４ 荷重～鋼材部ひずみ



図－５ ひずみ差の比～荷重



図－６ 荷重～必要定着長

（３）緊張材のひずみ

静的引張試験で得られた荷重と緊張材のひずみの関係の一例を図－７に示す。各緊張材のひずみは，単線の結果と同様に原点からほぼ直線的に増加して破断に至っている。保証荷重時と終局時におけるそれぞれのひずみについて，単線とマルチを比較して表－11に示す。CFRPの場合，両

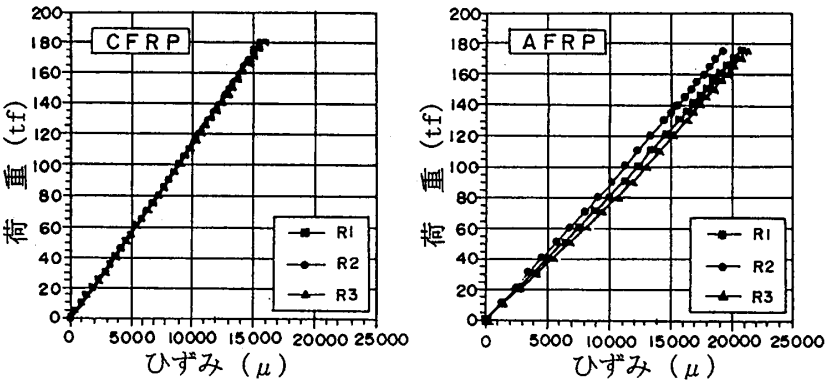
NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

者の変動係数はほとんど差がなく，マルチの定着能力は単線のそれと同程度の性能を有していると考えられる。一方AFRPの場合，両者の変動係数の差はCFRPよりも大きい。

（4）安全性の評価

本実験では，マルチの破壊形態は，単線の引張試験同様すべて緊張材の破断であった。したがって，単線と同様に実験で得られた平均値の下側限界荷重により，設定した保証荷重に対して，正規分布に対する確率変数である安全性指数を用いて定着システムの安全性の評価ができる。平均値の下側限界荷重を信頼度95%で算出し，検討した結果を表－12に示すが，本実験で用いたマルチは，保証荷重に対して安全であると判断できる。また疲労試験後の残存強度は，静的強度の平均値よりも小さいものの，ほぼ平均値の下側限界荷重と同一であり，引張強度低下はあまり生じなかったと考えられる。



図－7　荷重～ひずみ関係

表－11 ひずみの比較 （μ）

			CFRP	AFRP
保証荷重	単線	平均値	11152	14929
		変動係数（%）	7.5	5.3
	マルチ	平均値	10613	15457
		変動係数（%）	5.4	9.1
終局荷重	単線	平均値	14888	20541
		変動係数（%）	7.2	6.8
	マルチ	平均値	13729	19200
		変動係数（%）	8.2	11.4

表－12 引張強度の安全性指数 （tf）

	CFRP	AFRP
引張強度平均値 ：μ	172.6	169.5
標本偏差 ：σ	6.580	7.071
平均値下側限界荷重：μmin	166.3	162.7
安全性指数 ：β	5.520	4.633
判　　定	安 全	安 全

4．まとめ

1)炭素繊維緊張材およびアラミド繊維緊張材の引張強度や終局ひずみは，それぞれ単独には正規分布またはワイブル分布への適合性が良いが，両者の相関関係は認められなかった。

2)マルチ定着システムの破壊モードは，破壊形態が緊張材の場合，連鎖破壊を示す可能性が高い。

3)付着型定着体の場合，定着体表面のひずみから付着性状が推定可能である。

4)マルチ定着システムの破壊形態が緊張材の場合，その安全性は単線の場合と同様に安全性指数で評価できる。

以上の研究は，阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」の研究業務の一貫で行われたものであり，同委員会委員各位には多大な御指導をいただいた。また，東京製綱（株）ならびに神鋼鋼線工業（株）にも既往実験データの提供や実験に多大な協力をいただいた。ここに記して謹んで謝意を表します。

【参考文献】

［1］連続繊維補強材のｺﾝｸﾘｰﾄ構造物への適用，ｺﾝｸﾘｰﾄﾗｲﾌﾞﾗﾘｰ72，土木学会，pp.15-21，1992

［2］ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽﾄｺﾝｸﾘｰﾄ工法設計施工指針，ｺﾝｸﾘｰﾄﾗｲﾌﾞﾗﾘｰ66，土木学会，pp.24-25，1991

［3］(社)日本材料学会編，材料学の最近の進歩，ｵｰﾑ社，pp.160-163，1982.12

［4］伊藤學，亀田弘行 訳：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善(株)，pp.258-281，1977.12

［5］ＰＣ構造物の補修・補強に関する検討業務報告書，阪神高速道路公団，1995.3

［6］構造物の安全性・信頼性，土木学会，pp.15-26，1976

NII-Electronic Library Service