

(113) 連続繊維緊張材の引張強度に関する研究

オリエンタル建設(株)	大阪支店		○齊藤秀夫
昭和コンクリート工業(株)	本社	正会員	伊藤良二
ドーピー建設工業(株)	技術センター	正会員	濱田 謙
(株)ピー・エス	大阪支店	正会員	酒井博士

1. はじめに

連続繊維緊張材は高い引張強度を有しているがそのばらつきは通常のPC鋼材より比較的大きいこと、また荷重とひずみの関係は荷重初期からほぼ完全弾性的に最大荷重点に達すること、PC鋼材とは異なり脆性的な破壊を生じること、などが一般に知られている。このように、連続繊維緊張材は通常のPC鋼材とは異なった特性を有するため、PC鋼材の代替材料として利用するためには最も基本的な特性の一つである引張強度を明らかにしておく必要がある。

通常、破壊荷重のばらつきに対して3σ法により算出された荷重の下限値を引張強度の特性値として用いることが多い。また、緊張材製造メーカーでも同様の手法で算出された特性値を保証荷重と称しているようである。しかし、これらは破壊荷重が正規分布に従うことが前提とされていることから、これらの分布形状や保証荷重に対する安全性を明確にする必要がある。

本研究では連続繊維緊張材の代表である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、「破壊荷重に関する調査結果」からその分布形状を明らかにし、それをもとにして緊張材製造メーカー提案の保証荷重に対する、生存(破壊)確率を明確にすることで引張強度に対する安全性能について検討した。また、単線を数本束ねたマルチ定着システムについても、システムとしての破壊確率と破壊荷重の関係について検討を行ったものである。

2. 対象とした連続繊維緊張材

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各一種類づつを対象とし、その主要諸元を表-1に示す。

表-1 連続繊維緊張材の主要諸元

緊張材	繊維材	繊維結合材	形状	直径(mm)	製造メーカー保証荷重(tf)
CFRP	PAN系	変形エポキシ樹脂	より線状	φ12.5	14.5
AFRP	パラ系	ビスフェノール型エポキシ樹脂	組み紐状	φ14.7	24.0

破壊荷重に関する調査は、連続繊維緊張材の引張試験方法(試案)[1]に従って緊張材製造メーカー独自に行われた引張試験で、供試体の破壊形態はすべて緊張材破断であった材料を検討の対象とした。

3. 調査結果および考察

3.1 破壊荷重

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[2]もされている。そこで、破壊荷重について両者の分布形状の検討を行った。

調査で得られた破壊荷重を正規分布とワイブル分布へ適用して、ヒストグラムを図-1に、確率紙へのプロット状況を図-2に示す。

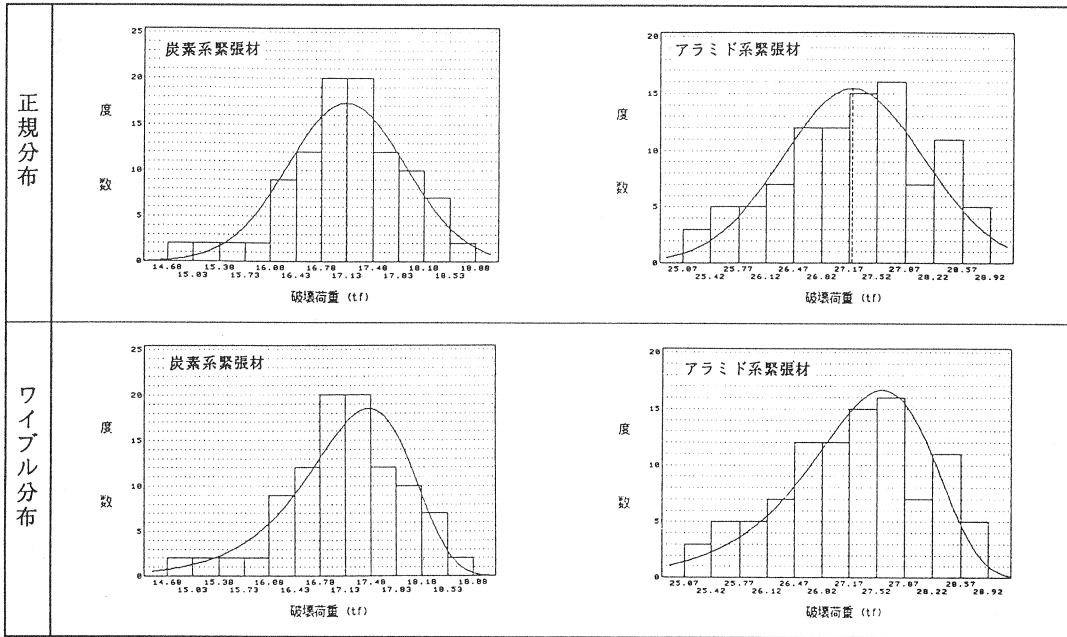


図-1 破壊荷重のヒストグラム

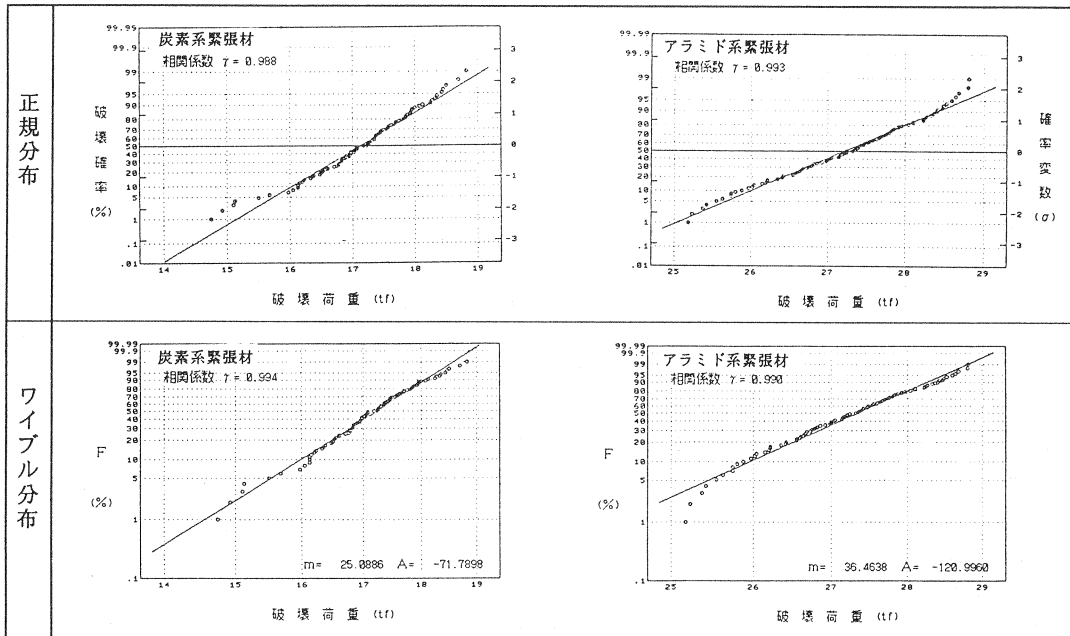


図-2 確率紙へのプロット状況

破壊荷重の分布形状について検討したものを表-2に示す。これによれば、確率紙での高い直線性やカイ二乗検定、K-S検定の有意水準 [3] などより CFRP, AFRP共に正規分布やワイブル分布への適合が良いことが判明した。

表-2 引張強度分布の検定結果

		正規分布	ワイブル分布	判定結果
確率紙へのプロット (相関係数)	CFRP	0.988	0.994	$\gamma > 0.9$
	AFRP	0.993	0.990	
カイ二乗検定 ($C_{1-\alpha}$)	CFRP	13.49	8.23	$< 14.7 (\alpha=10\%)$
	AFRP	9.94	9.61	$< 13.4 (\alpha=10\%)$
K-S検定 ($D_{n\alpha}$)	CFRP	0.077	0.062	$< 0.12 (\alpha=10\%)$
	AFRP	0.059	0.065	

3. 2 破壊荷重の各種統計量

破壊荷重について、統計的推定により各種統計量を算出し、破壊荷重の予想最小値と緊張材メーカー保証荷重と比較したものを表-3に示す。

ここで、メーカー保証荷重とは緊張材製造メーカー独自の実験結果より、破壊荷重を正規分布と仮定し、最小値を3 σ 法により定めた数値を小さく丸めたものである。

これによれば、信頼度95%で平均値の下側限界と標準偏差の上側限界を用いて、3 σ 法で推定した

荷重の予想値 (Pmin) は、緊張材メーカー保証荷重 (P) を1~3%程度下回る。

表-3 破壊荷重の各種統計量の比較 (単位: tf)

		CFRP	AFRP
供試体数	N	100	98
破壊荷重平均値	μ	17.120	27.206
標本偏差	s	0.809	0.892
平均値の下側限界	μ_{min}	16.959	27.027
標準偏差の上側限界	σ_{max}	0.953	1.052
破壊荷重の予想最小値	Pmin	14.102	23.871
緊張材メーカー保証荷重	P	14.5	24.0
Pmin / P		0.97	0.99

3.3 破壊確率

緊張材製造メーカー保証荷重に対する破壊確率を、正規分布とワイブル分布を適用して算出した計算結果を表-4に示す。製造メーカー保証荷重に対する正規分布を適用した場合の破壊確率は、3σ法による破壊確率(F(X)=0.001350)よりはるかに小さくなる。一方ワイブル分布を適用した場合には、CFRPとAFRPの破壊確率は3σ法の破壊確率より大きくなる。しかし、破壊確率の大きいCFRPでの場合でも、その生存確率は99%以上あるので材料の強度の特性値として保証荷重を用いても、概ね安全であると思われる。

表-4 保証荷重に対する破壊確率

		CFRP	AFRP
製造メーカー提案 保証荷重に対する 破壊確率	製造メーカー保証荷重	14.5 tf	24.0 tf
	正規分布	0.000577	0.000153
	ワイブル分布	0.009062	0.006005
	正規分布3σ法	F(X)=0.001350	F(X)=0.001350
中央値	製造メーカー設定値	17.3 tf	27.2 tf
	正規分布	17.120	27.206
	ワイブル分布	17.233	27.336

同一荷重に対する破壊確率を分布形状で比較すれば、正規分布よりワイブル分布の方が大きく評価される。したがって、破壊確率より引張強度の下限値を設定する際は、ワイブル分布を適用した方が保証荷重を小さく評価できる。

また中央値を同様に比較した場合、正規分布およびワイブル分布ともに製造メーカーの設定値と大差ないことがわかる。

図-3に一例としてCFRPの場合の確率分布関数を示す。

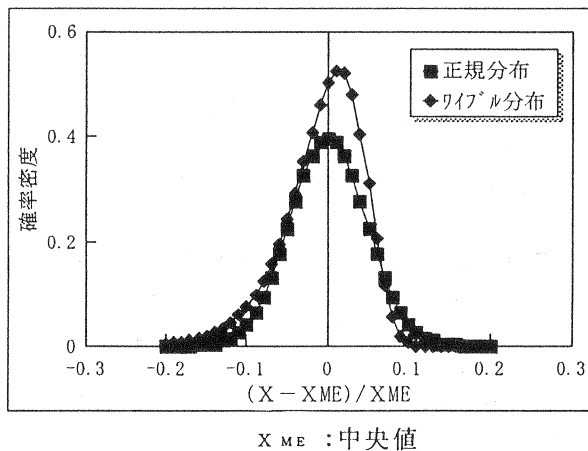


図-3 CFRPの確率分布関数

3.4 マルチ定着システムの破壊荷重と破壊確率の検討

単線を数本束ねたいわゆるマルチ定着システムの破壊荷重について検討を行う。マルチ定着システムの破壊荷重は、マルチを構成する単線の破壊によって生じるものと仮定すれば、単線の破壊荷重は正規分布では式(1),(2)で表すことができる。すなわち、マルチ定着システムの破壊確率 ($F_m(x)=P$) を与えることにより、単線の最小破壊確率 ($F(X)=p$) から単線の最小破壊荷重を算出することができる。一方、ワイブル分布では $F_m(x)$ が既知の関数で与えられているため、式(3)で直接単線の最小破壊荷重を算出することができる。マルチ定着システムの破壊を最弱リンクモデルと仮定すると、システムの破壊荷重は式(4)で表すことができる。

$$F(X) = 1 - \{1 - F_m(x)\}^{1/n} \quad (1)$$

$$X_p = F^{-1}(p) \quad (2)$$

$$X_p = \alpha [-\ln \{1 - F_m(x)\} / n]^{1/m} \quad (3)$$

$$R_m = X_p \times n \quad (4)$$

ここに、 $F_m(x)$: マルチ定着システムの破壊確率($F_m(x)=P$)

$F(X)$: 単線の最小破壊確率 ($F(X)=p$)

X_p : 単線の最小破壊確率Pに対応する最小破壊荷重

n : マルチを構成する単線本数

R_m : マルチ定着システムの破壊荷重

α, m : ワイブル分布パラメータ

上記の式より算出したマルチ定着システムの破壊荷重を、表-5にCFRP、表-6にAFRPの場合を示す。

中央値および保証荷重での計算結果は、単線の検討結果と同様の傾向を示している。すなわち、中央値(システムの破壊確率が0.500)での計算結果は、分布形状によらずほぼ同一の値を与えるが、保証荷重(システムの破壊確率が0.00135)では分布形状によって大きく変化し、ワイブル分布と仮定した方が正規分布に比べて1割程度小さくなる。

表-5 マルチ定着システムの破壊荷重の推定 (CFRP)

マルチ定着本数 $n = 11$ ($11 - \phi 12.5$)							
システム 破壊確率	正規 分布	$F(X)=p$	0.06106	システム 破壊確率	正規 分布	$F(X)=p$	0.000123
		$\sigma(p)$	-1.55			$\sigma(p)$	-3.67
		X_p	15.872			X_p	14.166
		R_m	174.6			R_m	155.8
中央値 $F_m(x) = P$ $= 0.500$	ワイ ブル 分布	m	25.0886	$F_m(x) = P$ $= 0.00135$	ワイ ブル 分布	m	25.0886
		α	17.4869			α	17.4869
		X_p	15.662			X_p	12.213
		R_m	172.3			R_m	134.3

表-6 マルチ定着システムの破壊荷重の推定 (AFRP)

マルチ定着本数 n = 7 (7-φ14.7)							
システム 破壊確率	正規 分布	F(X)=p	0.094276	システム 破壊確率	正規 分布	F(X)=p	0.000193
		$\sigma(p)$	-1.31			$\sigma(p)$	-3.55
		Xp	26.044			Xp	24.057
		Rm	182.3			Rm	168.4
中央値				保証荷重			
Fm(x) = P =0.500	ワイ ブル 分布	m	36.4638	Fm(x) = P =0.00135	ワイ ブル 分布	m	36.4638
		α	27.6120			α	27.6120
		Xp	25.915			Xp	21.839
		Rm	181.4			Rm	152.9

4. おわりに

本論文では、連続繊維緊張材の代表であるCFRPとAFRPを対象にして、「破壊荷重に関する調査結果」から緊張材製造メーカーの保証荷重に対する生存(破壊)確率を明確にすることで、引張強度に対する安全性能について下記のことが明らかになった。

- 1) 連続繊維緊張材の破壊確率分布は、正規分布やワイブル分布への適合性がよい。
- 2) 3 σ 法で推定した破壊荷重の最小予想値は、緊張材メーカー保証値を1~3%程度下回ったが、保証荷重生存確率は、99%を越えるので概ね安全であると思われる。
- 3) 製造メーカー保証荷重にたいする破壊確率は、正規分布よりワイブル分布を適用したほうが大きい。
- 4) マルチ定着システムの破壊を最弱リンクモデルと仮定してシステムの破壊荷重を算出すると、ワイブル分布と仮定した方が正規分布に比べて1割程度小さくなる。

以上の研究は、阪神公団「コンクリートの耐久性に関する調査研究委員会」の業務の一環で行われ、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)には既往実験データの提供や実験に多大な御協力をいただいた。ここに記して謹んで謝意を表します。

参考文献

- [1] 連続繊維緊張材のコンクリート構造物への適用, コンクリートイテラ-72, 土木学会, PP15-PP21, 1992
- [2] (社)日本材料学会編: 材料学の最近の進歩 2.2 破壊強度の研究の進歩, 丸善社, 1982, 12
- [3] 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), 1977, 6