

(114) 連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に関する研究

ピーシー橋梁(株) 大阪支店 技術部 正会員 ○城代和行
 (株)日本ピーエス 大阪支店 工事部 設計課 正会員 寺口秀明
 (株)ピーエス 大阪支店 土木技術部 開発課 正会員 酒井博士
 ドービー建設工業(株) 技術センター 正会員 濱田 譲

1. はじめに

連続繊維を外ケーブル工法の緊張材として用いることは、耐久性の観点から工法の有効性を高める方法であると考えられる。また、外ケーブル工法の緊張材は配置本数に制約を受ける場合が多く大容量であることが条件となる。しかし、現在、連続繊維緊張材を用いた大容量マルチシステムが開発されているとは言い難い状況である。一般的に、連続繊維緊張材は塑性域のない脆性破壊を生じる。このため、連続繊維緊張材を用いた大容量マルチシステムはほとんどの場合、連鎖破壊を生じるため、その引張強度はn本の単線の中の最小強度によって支配される最弱リンクモデルに従う可能性が高いと考えられ、同じ強度を有する延性材料を用いたマルチ定着システムより破壊確率が大きくなる[1]。また、大容量システムの引張試験を行うには、膨大な労力、費用が必要となり、各種要因を考慮した理論解を求めることも困難である場合が多い。

本研究では、連続繊維緊張材の引張試験方法(試案)[2]に基づいて試験体本数を5本として静的引張試験を実施した。試験は、定着システムが保証すべき荷重を130tfに設定し、連続繊維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、各々CFRP、AFRPと略称する。)を対象として行った。また、静的引張試験結果と、単線の引張強度特性を元にした最弱リンクモデルおよび、数値実験手法の一つであるモンテカルロ法を用いて解析した破壊荷重の平均値と標準偏差とを比較して解析の妥当性を検証するとともにシステムの安全性を評価した。

2. マルチ定着システムの静的引張試験

実験対象となるCFRP、AFRPの主要諸元を表-1に示す。また、実験に用いたマルチの諸元を表-2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する付着型とした。試験方法は、前出[2]および土木学会基準「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(案)」[3]を準用し、一雰囲気中で行った。

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)	メカ保証荷重(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

表-2 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	SUS321J3L	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

3. 引張強度の解析

(1) 単線の引張強度

システムを構成する単線の破壊強度および破壊ひずみ分布の統計をとりこれをまとめたものを表-3に示す[4]。ここで、表中の統計値の母数は、それぞれ破壊荷重が100個、破壊ひずみが30個であり、相関係数は30個のデータを用い算出した。また、単線のそれぞれの分布は正規分布従うものとして解析を行う。

(2) 最弱リンクモデルによる解析

システムの破壊荷重を求める場合、1本の単線の破断により破壊が生じると考えれば、n本の単線の最小破壊荷重Fsに単線本数を乗じることにより荷重を算出できる。また、システムの破壊確率密度関数はn本の単線のうち少なくとも1本の破壊荷重がFsである確率と残りの単線が全てFsを越える確率との積で与えられ、確率分布関数はこの確率密度関数を積分することにより次式にて与えられる。

$$P_m = 1 - (1 - P_s)^n \quad (1)$$

P_m : システムの破壊確率, n : 単線本数

P_s : 単線の最小破壊荷重Fsでの破壊確率

ここでは、(1)式に任意の破壊確率 P_m を与えて P_s を逆算し、 P_s に対応する単線の破壊荷重Fsをn倍して、確率関数 P_m に対応するマルチの破壊荷重 F_m を算出した。

(3) モンテカルロ法による解析

マルチを以下に示す条件にもとづいてモデル化し、破壊荷重を算出した。

- ①緊張材の定着体からの抜け出しは発生せず、単線の破断によりシステムは破壊する。
- ②単線の破断は統計的に独立に生じる。
- ③単線の破壊荷重と破壊ひずみに相関がある場合は、相関係数 ρ で表される相関を考慮する。
- ④各単線の破壊~ひずみ関係は、破壊荷重とひずみの交点と原点を結ぶ直線とし、図-1に示す2ケースについて破壊荷重を算出する。ケース1は単線の剛性を一定としたモデルで、ケース2は荷重とひずみの相関により引張剛性がそれぞれ変化するモデルである。

解析では、まず、区間[0, 1]の一樣乱数を発生させて各確率分布関数値を定義し、上記の仮定に従ってシステムを構成するn本の単線の破断荷重、破断ひずみ、単線長さを抽出して破断伸び量を算出する。次に図-2に示すように各単線の長さの差と破断伸び量の関係から、最初に破断する単線を特定し破壊時のシステムの全長を定義するとともに各

表-3 単線の統計諸数値

		CFRP	AFRP
破壊荷重 (tf)	平均値	17.120	27.206
	標準偏差	0.805	0.887
破壊ひずみ (%)	平均値	1.561	2.171
	標準偏差	0.112	0.147
相関係数 (ρ)		0.055	0.247

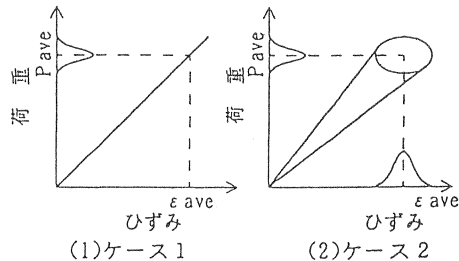


図-1 単線の荷重~ひずみ関係

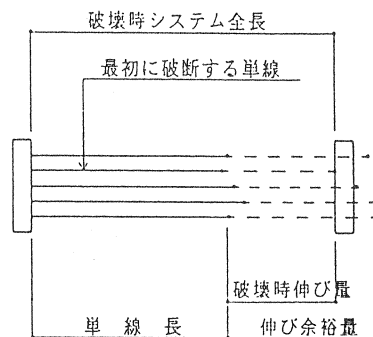


図-2 システムの破壊状態

単線の破壊時伸び量を算出する。また、システムの破壊荷重は各単線に作用している荷重の和として求めることができ、1本の単線の破断により定義できるシステムの破壊荷重が(n-1)本の単線の破断により定義できる破壊荷重より小さい場合は、システムは連鎖破壊を起こさなかったことになる。

4. 実験結果および考察

(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結果を表-4に示す。すべての供試体において、いずれも目標とした保証破断荷重130tf以上で破壊している。また、破壊はいずれの場合も緊張材の破断によってのみ起こり、定着部の異常や緊張材の抜け出し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確認された。

(2) 試験結果と解析結果の比較

試験結果との比較は、5万本の試験体の中から任意に抽出した5本の供試体について平均破壊荷重と標準偏差を1万組算出し、各々の平均値を算出した。その結果を表-5に示す。ここで、各解析方法において、別途1万体の供試体について破壊荷重を算出した結果のうち、CFRPでの値を正規確率紙上にプロットしたものを図-3に示す。図より、最弱リンクモデルの解析結果と、モンテカルロ法のケース1での解析結果は、ほぼ同じ位置にプロットでき、回帰直線もほぼ同じ直線になる。この傾向はAFRPの場合でも同じであった。以上より、最弱リンクモデルの解析結果とモンテカルロ法のケース1の解析結果は、ほぼ同じになると予測されるため、比較はモンテカルロ法のケース1、ケース2についてのみ行った。まず、平均荷重に着目すればCFRPはケース1が、AFRPはケース2が精度良

表-4 破壊荷重および破断状況

供試体	CFRP		AFRP	
	平均値	破断状況	平均値	破断状況
No. 1	179.0	単線全数破断	160.0	単線2本破断
2	170.0	"	166.0	単線全数破断
3	165.0	単線1本破断	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		169.5	

表-5 平均破壊荷重と標準偏差の平均値

	試験結果	平均破壊荷重(tf)		標準偏差(tf)	
		計算結果	誤差(%)	計算結果	誤差(%)
		CFRP	172.6		6.580
	ケース1	174.3	-1.0	4.721	28.3
	ケース2	167.9	2.8	6.121	7.0
	AFRP	169.5		7.071	
	ケース1	182.1	-7.4	3.616	48.9
	ケース2	173.5	-2.4	6.213	12.1

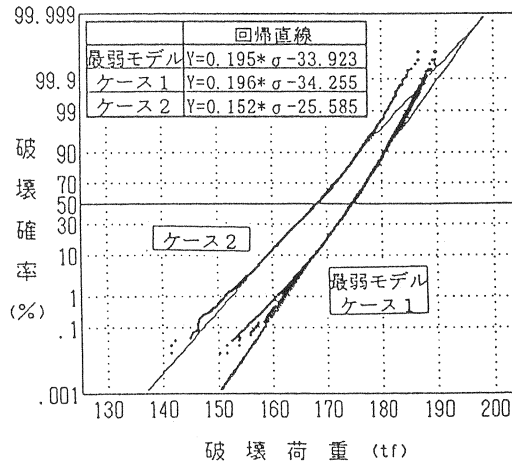


図-3 正規確率紙上の破壊荷重

表-6 解析による標準偏差の平均値の最大値と変動係数

	試験結果	標準偏差の解析結果(tf)			変動係数 (%)
		平均値	標準偏差	最大値	
		CFRP	4.721	1.771	
	ケース2	6.121	2.149	14.225	35.1
	AFRP	3.616	1.367	10.371	37.8
	ケース2	6.213	2.340	15.428	37.7

く平均値を算出しているが、ケース2の結果において両者とも誤差は3%以内に収まっており、AFRPのケース1では7.4%の誤差が生じていることから、ケース2の方が比較適精度良く破壊荷重の平均値を予測していると考えられる。また、ケース2の方がケース1よりも安全側の平均値を算出している。次に標準偏差について比較すると、誤差は10%前後と比較的大きいが、ケース2の方が解析精度が良いことがわかる。以上のことから、モンテカルロ法のケース1とケース2を比較した場合、ケース2の方がシステムの破壊荷重特性を精度良く再現でき、安全側の結果を算出するといえる。

ここで、表-6に標準偏差の最大値と変動係数を示す。ここで、平均値の変動係数は35%を上回っており、5体の供試体の破壊荷重の標準偏差のばらつきが大きくなると予想される。

したがって、引張試験を実施してシステムの保証破断荷重を検証する場合は、供試体数を5体以上に増やすか、統計的に平均値や標準偏差の区間推定を行った上で安全性の照査を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 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、連鎖破壊を起こす可能性が高い。
- (2) 最弱リンクモデルを用いると比較的簡単にマルチ緊張材システムの破壊荷重を算出できるが、単線の荷重～ひずみを適切にモデル化してモンテカルロ法を用いることにより、より精度良く、かつ安全に保証荷重などを予測することができる。
- (3) 供試体の数が少ないと破壊荷重の標準偏差のばらつきはかなり大きくなることが予想されるので、試験により保証破断荷重などを検討する場合は、供試体数を十分に確保するか、統計的区間推定などの手法を用いて保証破断荷重の推定を行う必要がある。

なお、本研究は、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」の研究業務の一環で行われたものであり、同委員会各委員には多大なご指導を頂いた。また、本研究を遂行するにあたり、東京製綱(株)並びに神鋼鋼線工業(株)には多大な協力を頂いた。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- [1] 構造物の安全性・信頼性, 土木学会, pp. 22-25, 1976
- [2] 連続繊維緊張材のコンクリート構造物への摘要, コンクリートライブラリ-72, 土木学会, pp. 15-21, 1992
- [3] プレストレストコンクリート工法設計施工指針, コンクリートライブラリ-66, 土木学会, pp. 24-25, 1991
- [4] 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