

ニューラルネットワークを用いた CFGFRP 複合材料の弾性係数推定

森 田 千 尋*・田 口 裕 之**・松 田 浩*
崎 山 毅*・黄 美***

An Estimation Method for Elastic Moduli of CFGFRP Composites using Neural Network

by

Chihiro MORITA*・Hiroyuki TAGUCHI**・Hiroshi MATSUDA*・
Takeshi SAKIYAMA* and Huang MEI***

This paper describes an estimation method for elastic moduli of CFGFRP (Carbon Fiber Glass Fiber Reinforced Plastic) composites using neural network system. The elastic moduli of CF, GF and matrix are obtained by the experiment, and neural network system for estimate the elastic moduli of CFGFRP is constructed.

The estimate values are compared with the analytical values using rule of mixture and experimental ones, and the estimate values are in good agreement with the experimental ones.

1. はじめに

炭素繊維 (CF), ガラス繊維 (GF), アラミド繊維 (AF) などの新素材の技術開発にはめざましいものがあり, 構造軽量化が要求される航空・宇宙工学の分野をはじめ多方面の分野へ適用されている. 建設工学分野でも鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上を目的として, これらの新素材からなる高強度連続繊維を用いた繊維強化プラスチック (以下 FRP と略記) による鉄筋代替材の研究・開発が活発に行われている.

また, 近年, 構造物や航空機に自己診断機能や自己修復機能を付与してスマート化 (知能化・インテリジェント化) を図り, 構造物の耐久性能, メンテナンス性能の向上に関する技術開発が積極的に行われている. 例えば, 実際の構造物の健全度を光ファイバーなどのセンサーを用いて常に監視しようとするヘルスマニタリングの研究などは, 新しい非破壊検査技術として注目されている.

このような研究・開発の動向のなかで, 柳田・武藤らは, 炭素繊維 (CF) とガラス繊維 (GF) をエポキシ樹脂などのマトリックスで硬化させたインテリジェントな CFGFRP 複合材料を開発し, 実用化のための研究・開発を進めてきている¹⁾⁻²⁾.

CFGFRP は炭素繊維 (CF) の高弾性の性質とガラス繊維 (GF) のじん性を併せもち, 鉄筋の弾塑性の挙動に類似した挙動特性をもつ. すなわち, 伸び限界の小さい繊維から順次破断し, 伸び限界の大きい繊維の破断で終局となる挙動を示す. これは複合材料特有の特性である. さらに, CFGFRP はそれ自体が構造体であるとともに, 部材の破壊を予知することができる自己診断機能を備えている. これがインテリジェントな材料といわれる理由である. 柳田・武藤らは, 引張り荷重の増大に伴う炭素繊維 (CF) の断面変化, あるいはその破断により, 導電性の炭素繊維 (CF) の電気抵抗値が変化することに注目し, この電気抵抗値

平成12年 4月21日受理

* 構造工学科 (Department of Structural Engineering)

** 日本工営(株) (Nippon Koei Co., Ltd.)

*** 外国人客員研究員 (JSPS Postdoctoral Fellowship, Visiting Researcher)

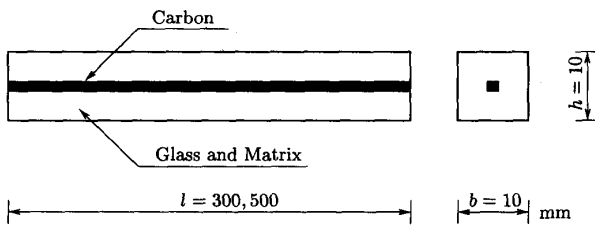


図1：CFGFRP 試験体

の変化率を測定することにより、部材の破壊予知が可能なことを発見した。CFGFRP のこのような特性は電気抵抗値を計測するだけの極めて安価で、かつ簡便な方法で調べることができ、既に、鉄筋コンクリート部材に実用化されている。

上記のような CFGFRP の特長である、構造物の耐久性診断のためのセンサー機能に注目して、鉄筋コンクリートのみならず、鋼構造物などへの適用性を追求することを最終目的としているが、その基礎研究として、本研究では、センサー機能に必要な CFGFRP の材料設計法について実験および理論的な検討を行ったものである。材料設計法に関する検討としては、複合則とニューラルネットワークを用いて CFGFRP の弾性係数を推定した。

本研究では、以下のことに注目して実施した。

- ① CFGFRP における CF, GF の繊維体積含有比を決定する。
- ② CF, GF および母材について様々な組み合わせの試験体を製作する。
- ③ 適切な弾性係数を測定するための引張試験を行う。
- ④ 複合材料力学に基づいた CFGFRP の材料設計を行う。
- ⑤ ニューラルネットワークを用いた CFGFRP の材料設計を行う。

表1：CF および GF の材料特性（公称値）

繊維の種類	σ_t [GPa]	E [GPa]	ϵ [%]	Tow
CF [M40]	2.74	392	0.6	3000
CF [M30]	4.02	294	1.4	3000
GF	2.74	75	4.8	1150

2. 試験体および実験結果

10×10mm²の断面を有する CFGFRP 試験片（図1）を製作した。試験片に用いる CF, GF の公称物性値を表1に示す。ここで、 σ_t は引張り強度、 E は縦弾性係数、 ϵ は伸び能力、 Tow は一束の繊維数である。GF はロービング繊維（ER1150 TM FW67：旭ファイバーグラス社製）を用い、マトリックス材には耐アルカリ性に優れたエポキシ樹脂（ビスフェノール A 型液状エポキシ樹脂、国際ケミカル社製）、およびグラウト（2液型エポキシ樹脂系注入接着材、ショーボンド建設(株)製）の2種類を使用した。また、CF 繊維はその伸び能力が異なる2種（表1）の CF（ポリアクリロニトリルフィラメント系、東レ社製）を使用した。

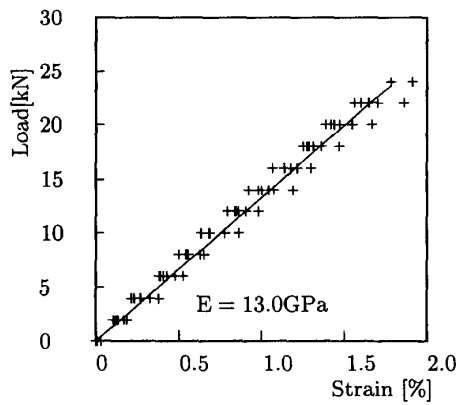
複合材料である CFGFRP の物性値を調べるために、CF, GF および母材の様々な組み合わせの試験体を多数製作し引張り試験を行い、CF, GF および母材の弾性係数を最小二乗法により求めた。CFRP, GFRP および母材の単体引張り試験の結果を図2(a)～図2(h)に示す。ここに、プロットした+点は実験により得られた測定値で、また直線は各試験片の弾性係数を最小二乗法により求めた値である。試験結果より得られた物性値を表2に示す。

3. 複合則による弾性係数の算定

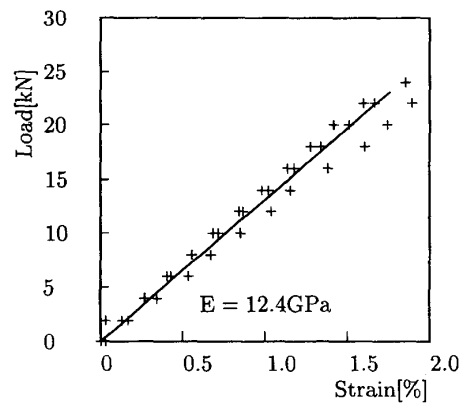
まず、複合材料の力学に基づき、以下の手順により CFRP, GFRP および CFGFRP の弾性係数を算定する。試験体に ϵ のひずみを与えたとき、繊維も母材も同

表2：引張試験結果

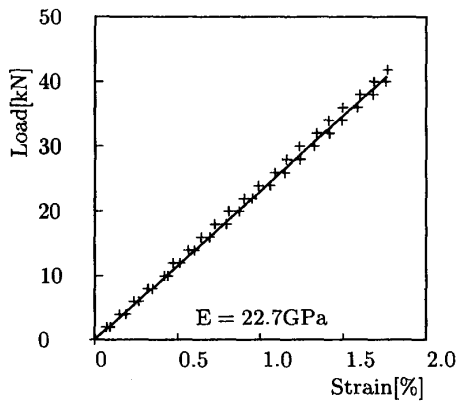
試験体	E [GPa]	ϵ_y [%]	σ_y [GPa]
(a) CFGFRP① (CF [M30] + GF [40Tows] + Matrix)	13.0	1.78	0.230
(b) CFGFRP② (CF [M40] + GF [40Tows] + Matrix)	12.4	2.07	0.255
(c) CFGFRP③ (CF [M40] + GF [80Tows] + Matrix)	22.7	1.76	0.401
(d) Matrix	0.886	1.97	0.0172
(e) CFRP (CF [M30] + Matrix)	1.58	1.03	0.0162
(f) CFRP (CF [M40] + Matrix)	1.17	0.524	0.00617
(g) GFRP (GF [40Tows] + Matrix)	13.0	1.71	0.225
(h) GFRP (GF [80Tows] + Matrix)	24.1	1.51	0.366



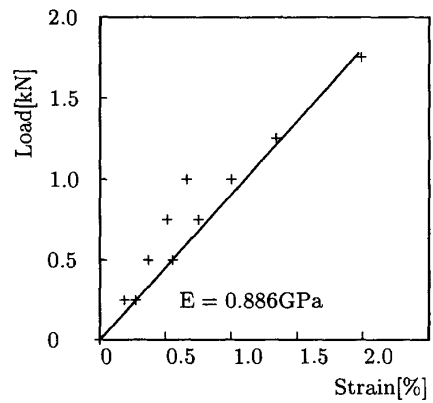
(a) : CF[M30] + GF[40Tows] + Matrix



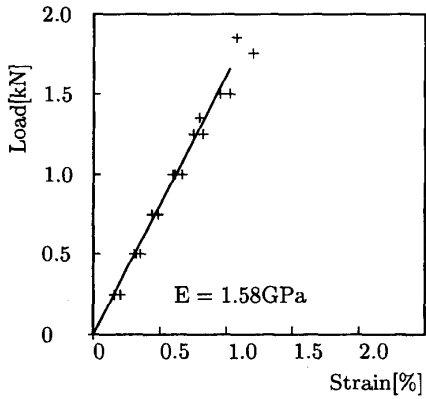
(b) : CF[M40] + GF[40Tows] + Matrix



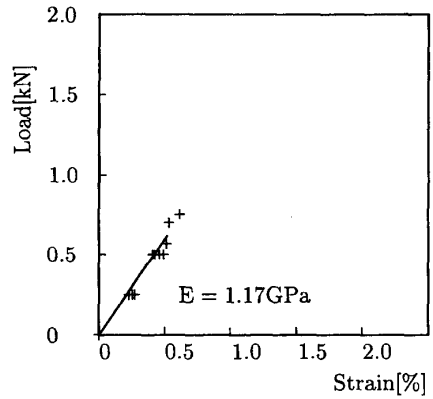
(c) : CF[M40] + GF[80Tows] + Matrix



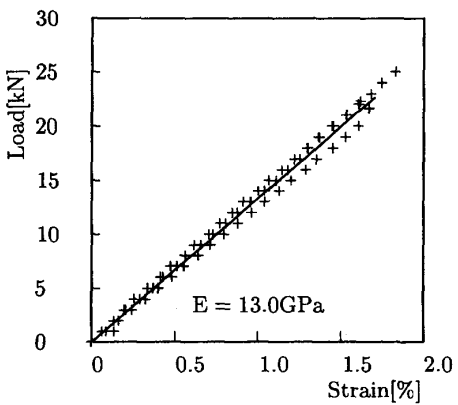
(d) : Matrix



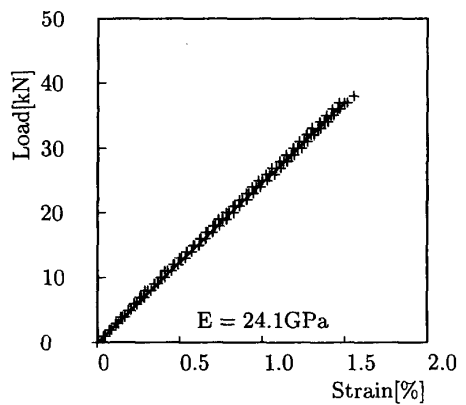
(e) : CF[M30] + Matrix



(f) : CF[M40] + Matrix



(g) : GF[40Tows] + Matrix



(h) : GF[80Tows] + Matrix

図 2 : 荷重-ひずみ曲線

じだけ伸びると考えてよいので、それぞれに作用する応力はフックの法則により、次式を得る。

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f, \quad \sigma_m = E_m \epsilon_m \quad (1)$$

ここに、 E_f, E_m は、それぞれ繊維と母材の弾性係数、また σ_f, σ_m は、それぞれ繊維と母材に生じる応力である。繊維と母材の断面積を A_f, A_m (全断面積： $A = A_f + A_m$)、それらに作用する力を P_f, P_m (複合材料全体に作用する力： $P = P_f + P_m$) とすると次式を得る。

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m = (E_f A_f + E_m A_m) \epsilon$$

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad (2)$$

ここに、 V_f は複合材料に占める繊維の割合 (繊維体積含有率) である。複合材料としての平均応力を計算すると、式(3)となり、[] の中が複合材料の弾性係数 E_c となる。

$$\sigma_c = \frac{P}{A} = [E_f V_f + E_m (1 - V_f)] \epsilon = E_c \epsilon$$

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3)$$

式(3)は弾性係数に関する複合則である。ここで、体積含有率 V_f は、織度を $\text{Tex} [g/cm]$ 、密度を $\rho [g/cm^3]$ とすると、式(4)で表すことができる。体積含有率 V_f の結果を表3に示す。

$$V_f = \frac{A_f}{A} = \frac{\text{Tex}}{\rho} \quad (4)$$

また、CF, GF および母材の3種類の材料からなる複合材の弾性係数は次式で求めることができる。CFGFRP の体積含有率を表4に示す。

表3：複合材料の材料定数

試験片	織度 [g/cm]	密度 [g/cm ³]	体積含有率
CF [M30] (2束)	1.60×10^{-3}	1.70	1.88×10^{-3}
CF [M40]	3.64×10^{-3}	1.81	2.01×10^{-3}
GF [40Tows]	1.15×10^{-2}	2.55	0.180
GF [80Tows]	1.15×10^{-2}	2.55	0.361

表4：CFGFRP の繊維体積含有率

CFGFRP① (CF [M30] + GF [40Tows] + Matrix)		
CF [M30]	GF [40Tows]	Matrix
1.88×10^{-3}	0.18	0.818
CFGFRP② (CF [M40] + GF [40Tows] + Matrix)		
CF [M40]	GF [40Tows]	Matrix
2.01×10^{-3}	0.18	0.818
CFGFRP③ (CF [M40] + GF [80Tows] + Matrix)		
CF [M40]	GF [80Tows]	Matrix
2.01×10^{-3}	0.361	0.637

表5：CF および GF の弾性係数の算定

試験体	算定値 [GPa]	公称値 [GPa]
CF [M30]	369	294
CF [M40]	142	392
GF	65.2~68.2	75

$$E_{CFGFRP} = E_{CF} V_{CF} + E_{GF} V_{GF} + E_m (1 - V_{CF} - V_{GF}) \quad (5)$$

式(3)により、前述の試験結果を用いてCF, GF の弾性係数を算定することができ、それらの値 (算定値) と公称値を表5に示す。なお、GF の弾性係数の算定値ではばらつきがあるのは、GF [40Tows] と GF [80Tows] の両方から算定したためである。

次に、表5に示すCF, GF の弾性係数と引張試験により得られた母材の弾性係数を用いて、式(5)によりCFGFRP の弾性係数を算定する。その算定値、およびCFGFRP の引張試験より得られた弾性係数を表6に示す。なお、同表下段には公称算定値なる、公称弾性係数から算定したCFGFRP の弾性係数を示している。ここでは、母材の公称弾性係数が未知のため実験値を公称値として算定した。同表より、複合則によるCFGFRP の弾性係数は、公称値を用いた場合は実験値と比べてかなり誤差があるものの、算定値の場合は数

表6：CFGFRP の弾性係数

試験体	算定値 [GPa]	実験値 [GPa]	誤差 [%]
CFGFRP① (CFRP [M30] + GFRP [40Tows] + Matrix)	13.2~13.7	13.0	1.54~5.38
CFGFRP② (CFRP [M40] + GFRP [40Tows] + Matrix)	12.7~13.3	12.4	2.42~7.26
CFGFRP③ (CFRP [M40] + GFRP [80Tows] + Matrix)	24.4~25.5	22.7	7.49~12.3
試験体	公称値使用 [GPa]	実験値 [GPa]	誤差 [%]
CFGFRP① (CFRP [M30] + GFRP [40Tows] + Matrix)	14.8	13.0	13.5
CFGFRP② (CFRP [M40] + GFRP [40Tows] + Matrix)	15.0	12.4	21.0
CFGFRP③ (CFRP [M40] + GFRP [80Tows] + Matrix)	28.4	22.7	25.1

%以内の誤差であり、実験値を概ね再現できているものとみなせる。

4. CFGFRP の材料設計へのニューラルネットワークの適用

前述のように、複合則にしたがって CFGFRP 複合材の弾性係数を算定することができる。しかしながら、鉄筋やコンクリートの弾性係数は JIS の試験法で簡単に求めることができるのに対して、CF, GF 単体の弾性係数を実験で簡単に得ることができなかった。複合則による計算で CFGFRP の弾性係数を求める際に、実験値から CF, GF の弾性係数を算定したり、公称弾性係数を用いたのはこのためである。そのために、算定した CFGFRP の弾性係数は必ずしも精度がよいとはいえない。そこで、ここでは、複合則による計算ではなく、引張試験により得られた CFRP, GFRP および母材の弾性係数を用いて、ニューラルネットワークを用いて CFGFRP 複合材の弾性係数を直接的に推論を試みる。

人工知能技術の一つであるニューラルネットワークは、入力値と出力値を学習して微分方程式では表現できないような複雑な非線形関係を内部に組み立てることができる。しかも、いったん学習が終了すれば入力値に対する出力値を瞬時に得ることができ、妥当な値を推論することができる。

ここでは、このような特徴をもつニューラルネットワークを用いて、CFGFRP の材料設計に適用できるような弾性係数推論モデルを構築する。学習データには、前述の引張試験により得られたデータ（表2～表4参

照）を活用し、これらの実験値をニューラルネットワークに学習させる。

以下のことに注目してニューラルネットワークモデルを構築した。

- ① CFGFRP 複合材の弾性係数を適切に推論できる実験データを活用する。
- ② 適切かつ合理的なニューラルネットワークシステムを構築する。
- ③ 学習回数について詳細に検討し、推論精度の向上に努める。
- ④ 構築したニューラルネットワークシステムに CFGFRP 複合材の弾性係数を推論させてその妥当性を確認する。

ニューラルネットワークが入力値と出力値の間の関係を忠実に再現できるように、入力層と出力層、中間

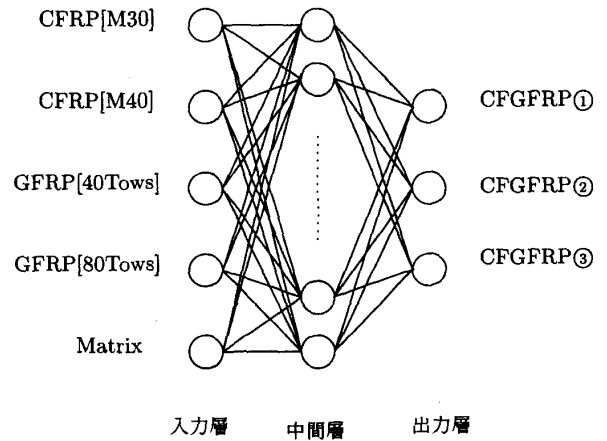


図3：CFGFRP 複合材推定モデル

表7：各学習回数における推論値とその誤差

学習回数	試験体	推論値 [GPa]	実験値 [GPa]	誤差 [%]	二乗和誤差
100回	CFGFRP①	9.65	13.0	25.8	31.3
	CFGFRP②	9.68	12.4	21.9	
	CFGFRP③	20.29	22.7	10.6	
1,000回	CFGFRP①	12.92	13.0	0.62	0.2
	CFGFRP②	12.95	12.4	4.44	
	CFGFRP③	24.09	22.7	6.12	
10,000回	CFGFRP①	12.97	13.0	0.23	0.1
	CFGFRP②	12.95	12.4	4.44	
	CFGFRP③	24.10	22.7	6.17	
100,000回	CFGFRP①	13.11	13.0	0.85	0.03
	CFGFRP②	13.00	12.4	4.84	
	CFGFRP③	24.07	22.7	6.03	

層の計3層の階層型のネットワーク構造とする(図3参照)。入力層のユニットには表2に示した実験値のCFRP、GFRPおよび母材(計5個)を割りあてた。ここからニューラルネットワークによりCFGFRPの弾性係数を推論させ、それら推論値と実験値とを比較する。中間層内のユニット数は80個とした。

各学習段階におけるニューラルネットワークの推論値、実験値との誤差および二乗和誤差を調べると表7が得られた。表7より学習を重ねるにしたがって二乗和誤差や実験値との誤差が減少し、10万回学習した場合は、実験値との誤差は最大でも6%程度である。また、複合則により求めた弾性係数よりも実験値との誤差は少なくなっており、推論値の精度が向上していることがわかる。これより、構築したニューラルネットワークシステムはCFGFRPの弾性係数をうまく推論できることを確認できた。

5. まとめ

本研究は、CFGFRPを対象にして、構造物の耐久性診断を目的とした材料設計法について実験的および理論的な検討を行った。その際、材料設計法に関する検討項目として、複合則とニューラルネットワークの2通りの方法を用いてCFGFRPの弾性係数を推定し、それらの性能について追求したものである。ニューラルネットワークにより得られたCFGFRPの弾性係数は、複合則によるそれと比べると精度よく推論できており、CFGFRPの材料設計法においてニューラルネットワークの有用性を確認した。

6. あとがき

構造部材の力学特性を調べるには、その表面にひずみゲージを貼付して部材の欠陥や耐久性の検査が行われている。精密な計測には、赤外線法、超音波法、AE法などがあるが、これらの装置は高価で、しかも高度な計測技術のノウハウを必要とする³⁾。

しかし、CFGFRPはそれ自体が構造体であるとともに、引張り荷重の増大に伴うCFの断面変化、あるいは破断により、導電性の炭素繊維(CF)の電気抵抗値が変化する。この電気抵抗値の変化により部材の破壊を予知することができる。CFGFRPは構造体自体が自己診断機能を備えたインテリジェントな材料といえるのである。

CFGFRPのこのような特性は電気抵抗値を計測するだけの極めて安価で、かつ簡便な方法で調べることができる。つまり、専門家でなくても誰にでもできる方法である。また、構造体としての特性を併せもつRC

や鋼構造物の複合構造として構造物に付加して、CFGFRPの初期抵抗値を計測しておき、経時変化を計測することによっておけば、定期点検において抵抗値が大きくなった構造物あるいはその部材を、赤外線法、超音波法、AE法などにより専門家が精確に検査すれば、欠陥の調査が迅速にできるはずである。このような技術が開発されれば、鉄筋コンクリート部材の耐久性向上に大きく貢献するものと考えられる。

本研究を遂行するにあたり、総合警備保障(株)武藤範雄氏には実験試験体の材料から製作方法などについて懇切丁寧にご教示戴きました。ここに、記して深謝申し上げます。また、CFをご提供戴きました東レ(株)複合材料研究所京野哲幸氏、エポキシ樹脂をご提供戴きましたショーボンド建設(株)尾尾弘洋氏、実験に協力戴きました大学院1年生(研究当時)の山口浩平氏、大学4年生(同)の横溝耕平氏、野崎充史氏に感謝申し上げます。

なお、本研究は平成11年度科学研究補助金(奨励研究A)による研究成果の一部をまとめたものであり、ここに謝意を表わします。

参考文献

- [1] 例えば、柳田博明：次世代素材 インテリジェントマテリアル「賢い材料」が築く21世紀の技術 -、ブルーバックス、講談社、1993
- [2] 例えば、武藤範雄、柳田博明、杉田稔：炭素・ガラス複合繊維補強コンクリートにおける損傷の自己診断、セメント・コンクリート、No.576, pp.53-59, 1995
- [3] 笠井芳夫編著、田村博・富士岳・笠井哲郎共著：わかりやすいコンクリート構造物の非破壊検査、オーム社、1996