

GFRP角パイプ引抜成形材の 力学物性に関する研究

櫻庭 浩樹¹・西崎 到²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:hiro-sakura@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:nisizaki@pwri.go.jp

GFRP角パイプ引抜成形材は、これまでも主要なFRP橋梁に使用されている重要な構造用FRP部材の一つである。しかし、成形法上の特徴から、比較的4つある各面の物性差が生じやすい形状と考えられる。このようなFRP部材の性能評価は多くの場合、部材から切り出したクーボン試験から得られる力学物性に基づくため、その信頼性を検討することは重要である。本研究では、2種類のGFRP角パイプ（正方形断面）引抜成形材の4面からそれぞれクーボン試験片を切り出し、引張特性および圧縮特性について材料試験を行った。試験結果から、各切り出し面の引張および圧縮特性の相違やばらつきの程度を分析する。また、クーボン試験のばらつきに関する基礎データ構築のため、各切り出し面の引張特性および圧縮特性のばらつきが、それぞれ、部材の引張耐力および圧縮耐力の算定に及ぼす影響を示す。

Key Words : Pultrusion, square pipe, material property, evaluation, variation

1. はじめに

GFRP角パイプ引抜成形材は、これまでも主要なFRP橋梁に使用されている重要な構造用FRP部材の一つである。GFRP角パイプ引抜成形材は、板状のGFRP引抜成形材と異なり、4つの面を有していることから、各面の繊維の量のばらつきや繊維配向のずれ等が、成形時に比較的生じ易いと思われる¹⁾。GFRP角パイプ引抜成形材の部材性能を評価するためには、GFRP角パイプ引抜成形材を構成するGFRPの力学物性の信頼性が重要であることから、部材を構成する各面の力学物性のばらつきの程度を確認することは不可欠である。

既往の研究²⁾では、GFRPのC形チャンネル引抜成形材の各面（フランジ・ウェブ）からクーボン試験片を切り出し、各切り出し面の引張特性および圧縮特性のばらつきを確認している。しかしながら、GFRP角パイプ引抜成形材の各切り出し面の引張特性および圧縮特性のばらつきについては検討されていなかった。

そこで、本研究では、2種類のGFRP角パイプ（正方形断面）引抜成形材の4つの面からクーボン試験片を切り出し、引張特性および圧縮特性について材料試験を行った。試験結果から、各切り出し面の引張特性および圧縮特性の相違やばらつきの程度を分析する。また、クーボン試験

による引張および圧縮特性のばらつきに関する基礎データの構築を目的として、各切り出し面の引張特性および圧縮特性のばらつきを考慮したGFRP角パイプ引抜成形材の引張耐力および圧縮耐力の算定例を示す。

2. 材料試験方法

(1) 試験片の概要

材料試験に用いるクーボン試験片は、2種類のGFRP角パイプ引抜成形材から切り出した。2種類のGFRP角パイプ引抜成形材の寸法の公称値は次の通りである：1) 外寸75×75mm，内寸65×65mm，板厚5mm，2) 外寸100×100mm，内寸90×90mm，板厚5mm。以下では、上記の1)および2)をそれぞれ、SP75およびSP100と称す。

SP75とSP100を構成するGFRPは、最外層がマット層であり、内部の繊維の多くは一方向層で構成されている。母材は、ビニルエステル樹脂である。

試験片の表記方法は、「角パイプ種類」-「試験の種類」-「試験片の切出し面No.」-「試験片No.」とする。

「試験の種類」の表記は、1) 引張試験：T，2) 圧縮試験Cとする。従って、試験片の表記は、例えば、SP75-T-1-1，SP100-C-2-3となる。

(2) 引張試験

引張試験は、JIS K 7164 に従って行った。荷重は変位制御で行い、荷重速度は 1mm/min とした。試験片は、図-1 に示すタイプ 3 とし、全長 250mm、幅 25mm となるように試験片を作製した。タブは、材質をアルミニウムとし、長さ 50mm、板厚 2mm のものを、試験片の両端部にエポキシ系接着剤を用いて貼り付けた。引張試験片の板厚は、タブを貼付ける前に図-2 に示す 3 点で測定し、それらの平均値を板厚とした。試験片中央の一面には、2 軸ひずみゲージを貼り付けた。測定項目は、引張強度および引張弾性係数とした。

引張強度 σ_x^T は、式(1)から算定した。

$$\sigma_x^T = \frac{P_u^T}{bt} \quad (1)$$

ここに、 P_u^T ：最大引張荷重、 b ：試験片の幅、 t ：試験片の板厚

直応力 σ_x は、式(2)から算定した。

$$\sigma_x = \frac{P}{bt} \quad (2)$$

ここに、 P ：荷重

引張弾性係数 E_x は、式(3)より算定した。

$$E_{xt} = \frac{\sigma_{ta} - \sigma_{tb}}{\varepsilon_{ta} - \varepsilon_{tb}} \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_{ta} : \varepsilon_x = 2500 \times 10^{-6}$ 時の σ_x 、 $\sigma_{tb} : \varepsilon_x = 500 \times 10^{-6}$ 時の σ_x 、 $\varepsilon_{ta} : 2500 \times 10^{-6}$ 、 $\varepsilon_{tb} : 500 \times 10^{-6}$

(3) 圧縮試験

圧縮試験は、JIS K 7018 に従って行った。荷重は変位制御で行い、荷重速度は 1mm/min とした。試験片は、図-3 に示す C2 形試験片とし、全長 125mm、幅 25mm となるように試験片を作製した。タブは、材質をアルミニウムとし、長さ 50mm、板厚 2mm のものを、試験片の両端部にエポキシ系接着剤を用いて貼り付けた。圧縮試験片の板厚についても、タブを貼付ける前に図-2 に示す 3 点で測定し、それらの平均値を板厚とした。負荷方式は文献 2) を参考に方法 3 とし、図-4 に示す圧縮治具を用いた。試験片中央の表裏面には、1 軸ひずみゲージを貼り付けた。測定項目は、圧縮強度、圧縮弾性係数とした。

圧縮強度 σ_x^C は、式(4)から算定した。

$$\sigma_x^C = \frac{P_u^C}{bt} \quad (4)$$

ここに、 P_u^C ：最大圧縮荷重

E_{xc} は式(5)より算定した。

$$E_{xc} = \frac{\sigma_{ca} - \sigma_{cb}}{\varepsilon_{ca} - \varepsilon_{cb}} \quad (5)$$

ここに、 $\sigma_{ca} : \varepsilon_x = -2500 \times 10^{-6}$ 時の σ_x 、 $\sigma_{cb} : \varepsilon_x = -500 \times 10^{-6}$ 時の σ_x 、 $\varepsilon_{ca} : -2500 \times 10^{-6}$ 、 $\varepsilon_{cb} : -500 \times 10^{-6}$

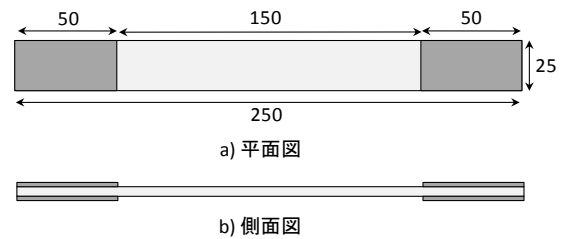


図-1 引張試験片の寸法 (単位：mm)

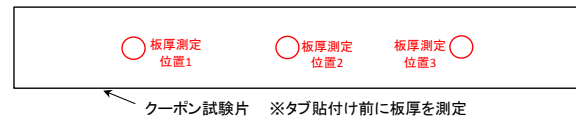


図-2 板厚の測定位置

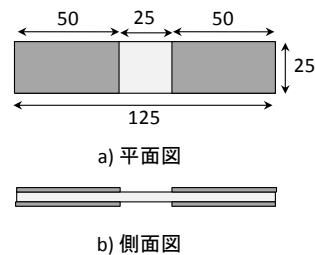


図-3 圧縮試験片の寸法 (単位：mm)

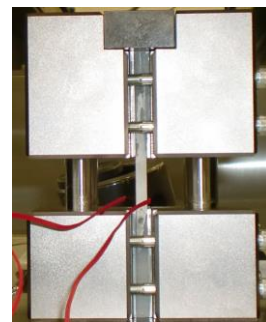


図-4 圧縮試験治具

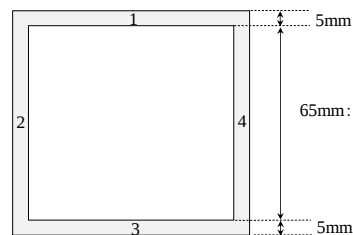


図-5 SP75 の切出し面 No. と切出し高さ

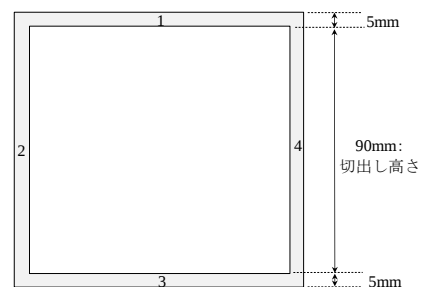


図-6 SP100 の切出し面 No. と切出し高さ

65mm	SP75-T-1-1	SP75-T-1-3	SP75-C-1-1	SP75-C-1-3
	SP75-T-1-2	SP75-T-1-4	SP75-C-1-2	SP75-C-1-4

図-7 SP75 の試験片の切出し位置

90mm	SP100-T-1-1	SP100-T-1-4	SP100-C-1-1	SP100-C-1-3
	SP100-T-1-2	SP100-T-1-5	SP100-C-1-2	SP100-C-1-4
	SP100-T-1-3			SP100-C-1-5

図-8 SP100 の試験の切出し位置

(4) 試験片の切出し位置

図-5 および図-6 にそれぞれ、SP75 および SP100 の試験片を切り出す際の切出し面 No.および切出し高さを示す。切出し面 No.は、反時計回りに番号を付けている。

図-7 および図-8 は、それぞれ、SP75 および SP100 の切出し面 1 における各試験片の位置を示す。他の切出し面においても、各試験片の切出し位置は切出し面 1 の場合と同様である。なお、図-7 および図-8 に示す切出し面には試験片を切り出す余地が残っているが、それらの部分は、他の材料試験に使用した。

表-1 引張特性についてのデータ数

試験片名	試験データ数	
	強度	弾性係数
SP75-T-1	4	4
SP75-T-2	4	4
SP75-T-3	4	4
SP75-T-4	4	4
SP75-T の合計	16	16
SP100-T-1	5	5
SP100-T-2	5	5
SP100-T-3	5	5
SP100-T-4	5	5
SP100-T の合計	20	20

3. 材料試験結果および考察

本章では、各切出し面の引張および圧縮試験結果の平均値を比較し、各切出し面の強度および弾性係数のばらつきについて述べる。また、成形時に生じる板厚のばらつきが材料特性に及ぼす影響を検討するため、弾性係数と板厚の関係について考察する。

(1) 引張特性

表-1に引張試験から得られたSP75およびSP100の引張特性についてのデータ数を示す。

図-9 a)および図-9 b)は、それぞれ、SP75およびSP100の引張強度の平均値とその変動係数を示す。SP75 および SP100 の各切出し面の引張強度の差は、それぞれ、最大で 48MPa および 65MPa であり、それらを各々の全切出し面の平均値で正規化すれば 11.4%および 16.4%である。SP75 および SP100 の引張強度についての変動係数は、それぞれ、0.028 から 0.059 の範囲および 0.021 から 0.098 の範囲である。

図-9 c)および図-9 d)は、それぞれ、SP75 および SP100 の引張弾性係数の平均値とその変動係数を示す。SP75 および SP100 の各切出し面の引張弾性係数の差は、それぞれ、最大で 2.6GPa および 2.1GPa であり、それらを各々の全切出し面の平均値で正規化すれば 8.2%および 6.5%である。SP75 および SP100 の引張弾性係数についての変動係数は、それぞれ、0.011 から 0.026 の範囲および

0.024から0.051の範囲である。

以上より、引張弾性係数および引張強度について、切出し面の違いによる差が、各々の全切出し面の平均値に対してそれぞれ、11.4%から16.4%および6.2%から8.5%あることが確認されたことから、各切出し面の引張特性の違いが部材の引張挙動に及ぼす影響について検討する必要があると思われる。

(2) 圧縮特性

表-2に圧縮試験から得られたSP75およびSP100の引張特性についてのデータ数を示す。なお、圧縮試験については、タブ部の破壊や計測不良等により、切出した試験片数とデータ数が一致していない。

図-10 a)および図-10 b)は、それぞれ、SP75 および SP100 の圧縮強度の平均値とその変動係数を示す。SP75 および SP100 の各切出し面の圧縮強度の差は、それぞれ、最大で 70MPa および 98MPa であり、それらを各々の全切出し面の平均値で正規化すれば 12.3%および 16.2%である。SP75 および SP100 の圧縮強度についての変動係数は、それぞれ、0.010 から 0.038 の範囲および 0.027 から 0.134 の範囲であり、SP100 の方が広い範囲を示している。

図-10 c)および図-10 d)は、それぞれ、SP75 および SP100 の圧縮弾性係数の平均値とその変動係数を示す。SP75 および SP100 の各切出し面の圧縮弾性係数の差は、

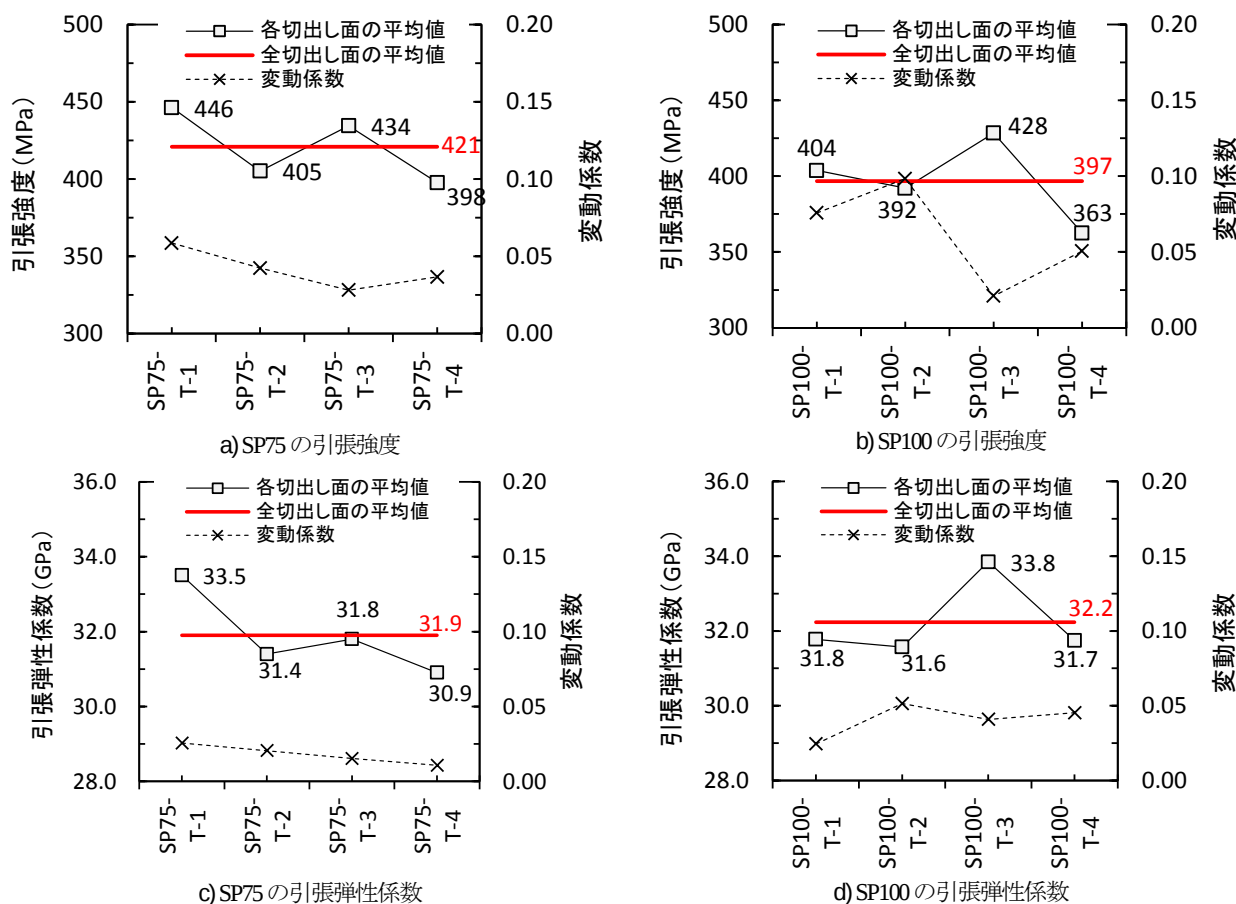


図-9 引張強度、引張弾性係数および変動係数の比較

表-2 圧縮試験のデータ数

試験片名	試験データ数	
	強度	弾性係数
SP75-C-1	2	4
SP75-C-2	3	4
SP75-C-3	4	4
SP75-C-4	2	4
SP75-Cの合計	11	16
SP100-C-1	3	4
SP100-C-2	5	5
SP100-C-3	5	5
SP100-C-4	4	5
SP100-Cの合計	17	19

それぞれ、最大で 2.7GPa および 2.2GPa であり、それらを各々の全切出し面の平均値で正規化すれば 8.6%および 6.9%である。SP75 および SP100 の圧縮弾性係数についての変動係数は、それぞれ、0.016 から 0.023 の範囲および 0.022 から 0.053 の範囲である。

以上より、圧縮弾性係数および圧縮強度について、切出し面の違いによる差が、各々の全切出し面の平均値に対してそれぞれ、12.3%から16.2%および6.9%から8.6%あることが確認されたことから、各切出し面の圧縮特性の違いが部材の圧縮挙動に及ぼす影響について検討する必

要があると思われる。

(3) 材料特性と板厚の関係

引抜成形時に金型の位置がずれた場合、板厚が薄い面と厚い面が生じる可能性がある。板厚の変化を樹脂体積の変化と見なせば、繊維体積含有率が変化することになる。複合則³⁾によれば、弾性係数（および強度）は、繊維体積含有率に依存することから、板厚の変化を検討することは重要であると考えられる。ここでは、引張および圧縮弾性係数と板厚の関係に着目し、その関係性を考察する。板厚の測定位置は、図-2に示した通りである。

図-11 a) および図-11 b)は、それぞれ、SP75とSP100の引張弾性係数および圧縮弾性係数と板厚の関係を示す。引張および圧縮弾性係数の総データ数は、それぞれ、36 および35である。その結果、本検討の範囲では、引張および圧縮弾性係数と板厚の関係には相関性が認められず、引張弾性係数と板厚および圧縮弾性係数と板厚の相関係数は、それぞれ、-0.018および-0.087であった。従って、板厚の変化は引張および圧縮弾性係数の変化に関係しないことが示唆されるが、今後データ数を増やし、検討を続けてゆく必要があると思われる。また、既往の研究²⁾を参考に、繊維体積含有率（焼成法とピクノメーター法による）のばらつきを求める必要もあると考える。

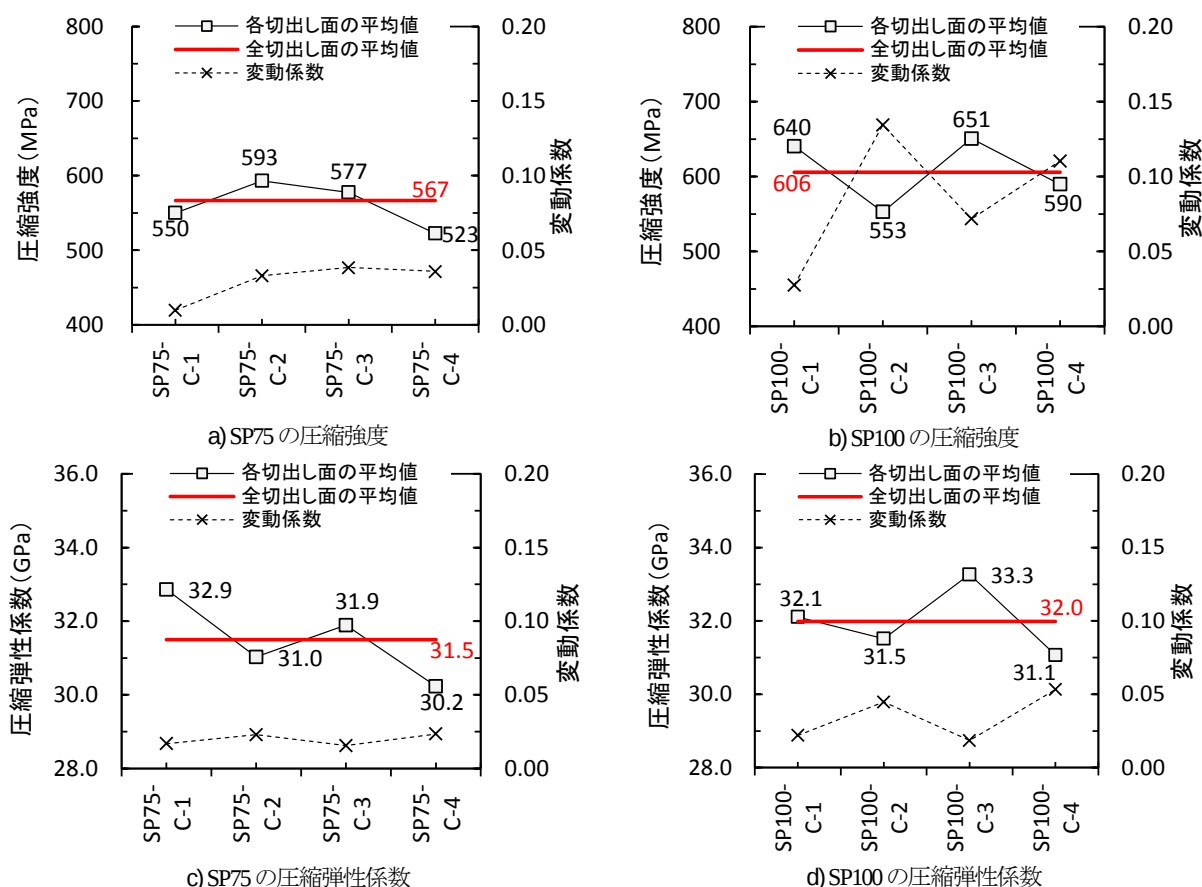


図-10 圧縮強度、圧縮弾性係数および変動係数の比較

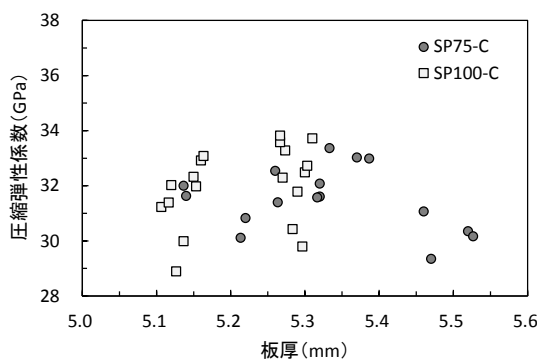
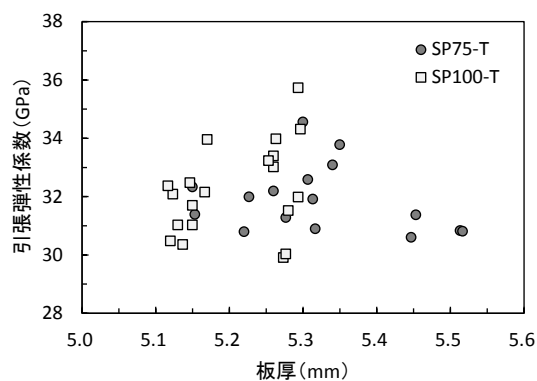


図-11 弾性係数と板厚の関係

4. 各切出し面の材料特性の違いが部材耐力の算定に及ぼす影響

3章では、切出し面の違いにより引張特性および圧縮特性が異なることが確認された。本章では、3章で確認された結果を踏まえ、各切出し面の引張特性および圧縮特性の違いが、それぞれ、部材の引張耐力および圧縮耐力の算定に及ぼす影響を示す。

(1) 検討方法

SP75 および SP100 に、それぞれ、引張荷重および圧縮荷重が作用する場合を想定し、全切出し面の平均値を用いて算定される部材耐力と各切出し面の弾性係数および強度の違いを考慮して算定される部材耐力を比較する。なお、圧縮耐力の算定には、十分に補剛されている短柱を考える。

全切出し面の引張強度の平均値を用いて算定される引張耐力 T_0 は式(6)より求める。

$$T_0 = \sigma_x^{Tm} A \quad (6)$$

ここに、 σ_x^{Tm} ：全切出し面の引張強度の平均値、 A ：断面積

各切出し面の引張強度および引張弾性係数の違いを考

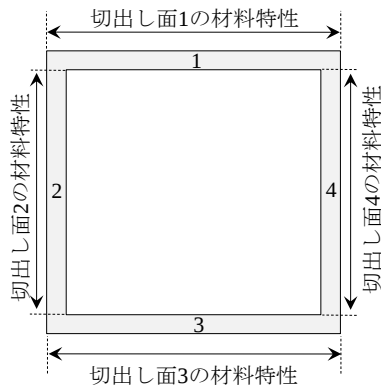


図-12 隅角部の材料特性の定義

表-3 引張耐力および圧縮耐力の算定結果

	SP75	SP100
T_0 (kN)	589	754
T_e (kN)	576 (4)	701 (4)
$(T_0 - T_e)/T_0$	0.022	0.070
C_0 (kN)	794	1151
C_e (kN)	728 (1)	1067 (2)
$(C_0 - C_e)/C_e$	0.083	0.073

() の数字は、最小の耐力を示した切出し面である。

慮して算定される引張耐力 T_e は式(7)より求める。

$$T_e = \min \left(\frac{1}{n_i^T} \sigma_x^T A_e \right) \quad (7)$$

ここに、 n_i^T ：各切出し面における引張弾性係数の比、 i ：切出し面 No.、 σ_x^T ：各切出し面の引張強度、 A_e ：換算断面積、ただし、換算断面積を算定する際には、切り出し面1の弾性係数を基準とする。

全切出し面の圧縮強度の平均値を用いて算定される圧縮耐力 C_0 は式(8)より求める。

$$C_0 = \sigma_x^{Cm} A \quad (8)$$

σ_x^{Cm} ：全切出し面の圧縮強度の平均値

各切出し面の圧縮強度および圧縮弾性係数の違いを考慮して算定される圧縮耐力 C_e は式(9)より求める。

$$C_e = \min \left(\frac{1}{n_i^C} \sigma_x^{Ci} A_e \right) \quad (9)$$

ここに、 σ_x^{Ci} ：各切出し面の圧縮強度、 n_i^C ：各切出し面における圧縮弾性係数の比

なお、簡便のため、隅角部の弾性係数および強度は、図-12に示すように切出し面1もしくは切出し面3の値を設定する。断面寸法は、公称値を用いる。

(2) 引張耐力および圧縮耐力の算定結果および考察

表-3に引張耐力および圧縮耐力の算定結果をまとめる。

引張耐力については、SP75とSP100の場合でそれぞれ、2.2%および7.0%の差がある。また、最小の引張耐力を示した切出し面は、両方の場合で切出し面No.4である。

圧縮耐力については、SP75とSP100の場合でそれぞれ、8.3%および7.3%の差がある。また、最小の引張耐力を示した切出し面は、SP75およびSP100の場合でそれぞれ、切出し面No.4およびNo.2である。

以上より、本検討の範囲において、切出し面の強度および弾性係数の違いを考慮して算定される引張耐力および圧縮耐力は、全切出し面の平均値を用いて算定される引張耐力および圧縮耐力よりも、2%から8%程度小さくなることが確認された。従って、部材の一部の面から切り出されたクーポン試験片から得られる材料特性を部材を構成する材料の特性として代表させ、引張もしくは圧縮耐力を算定する際には、各面の材料特性にある程度ばらつきがあることに注意する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、2種類のGFRP角パイプ引抜成形材（SP75およびSP100）の4面からクーポン試験片を切出し、引張特性および圧縮特性について材料試験を行った。引張および圧縮試験結果から、各切出し面の引張特性および圧縮特性のばらつきの程度を分析した。また、各切り出し面の引張特性および圧縮特性のばらつきが、それぞれ、部材の引張耐力および圧縮耐力の算定に及ぼす影響を検討をした。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

SP75およびSP100の引張強度、引張弾性係数、圧縮強度および圧縮弾性係数について、切出し面の違いによる差が確認された。また、本研究の範囲では、引張弾性係数と板厚の関係および圧縮弾性係数と板厚の関係には、相関性が認められなかった。

切出し面の強度および弾性係数の違いを考慮して算定される引張耐力および圧縮耐力は、全切出し面の平均値を用いて算定される引張耐力および圧縮耐力よりも小さくなることが確認された。

本研究により、GFRP角パイプから切り出されるクーポン試験片の切出し面が異なる場合、引張特性および圧縮特性にばらつきがあることが確認された。今後は、各切り出し面の引張特性および圧縮特性に差が生じた原因を、各切り出し面の繊維体積含有率の測定等により明らかにし、クーポン試験の信頼性向上のための基礎データ構築を図ってゆきたい。

参考文献

- 1) 西崎到，富山禎仁：土木構造用 FRP の物性のばらつきと信頼性，土木技術資料 55-2，pp.18-21，2013。

- 2) 杉浦邦征他：土木構造用 FRP 部材の部分安全係数の策定にむけて，第 4 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.1-18，2012.
- 3) 邊 吾一，石川隆司：先進複合材料工学，pp.1-23，2005.

STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PULTRUDED GFRP SQUARE PIPES

Hiroki SAKUARA and Itaru NISHIZAKI

Pultruded GFRP square pipes have been used as a structural FRP member in FRP bridges. However, due to molding process, each plane in pultruded GFRP square pipes can have the difference of material properties among them. Since material properties of pultruded GFRP square pipes are normally evaluated by coupon tests, it is important to study the reliability of coupon tests. This paper presents tensile and compressive properties of GFRP coupon test specimens which are cut out from each plane in two kinds of pultruded GFRP square pipes. Test results show the difference and variation of material properties in each plane of the two pultruded GFRP square pipes, and the influence of the difference of material properties to load capacities of a member subjected to tensile or compressive axial load is discussed.