ISSN 2186-5647

4-4

FRP と FRTP の高速引張試験による強度・破断特性評価

日大生産工(院)　○杉本　直　　日大生産工　邉　吾一
日大生産工　　坂田　憲泰　　日大生産工　平山　紀夫

1．緒言

熱硬化性樹脂をマトリックスとしたFRPには，低粘度で含浸性の良いエポキシ樹脂や不飽和ポリエステル樹脂などが使われている．近年では，加熱により再溶融ができ，二次賦型が容易で，リサイクルやリユースが可能なため熱可塑性樹脂をマトリックスとした FRTP が注目されている．しかし，熱可塑性樹脂は融点以上に加熱しても粘度が高く，繊維束内部へ樹脂を充填するためには高温・高圧力・長時間が必要なため，低粘度な樹脂を注入するだけで済むFRPの成形とは異なり，簡易な設備では成形できないといった課題がある．その一方で，Ben ら[1, 2]は現場重合型ポリアミド6をマトリックスとし，FRP のように簡易な設備で，優れた機械的特性を有する FRTP の開発を行っている．

近年，自動車の省エネルギー化，走行抵抗の低減の観点から自動車の車体の軽量化ニーズが高まっており，軽量素材である FRP が注目され，自動車への適用研究が実施されている[3]．自動車は衝突時に高速で大変形をするため，FRP 及び FRTP を自動車構造体へ適用する場合には，静的及び動的の強度と破壊特性を明確にすることが重要となる．

本研究では，綾織炭素繊維及び平織ガラス繊維に速硬化型エポキシ樹脂を用いた CFRP と GFRP，現場重合型ポリアミド6（PA6）を用いた CFRTP と GFRTP を成形し，単軸引張モードにおける0°/90°材及び 45°材の静的と動的の強度を評価した結果について報告する．

2．実験方法

2.1 評価材料の成形

本研究では，マトリックス樹脂が強度と破断特性に与える影響を調査するために，強化繊維は同一とし，熱硬化性樹脂をマトリックスとしたFRPと熱可塑性樹脂をマトリックスとしたFRTPを成形した．熱硬化性樹脂には速硬化型エポキシ樹脂を用い，熱可塑性樹脂にはε－カプロラクタムのアニオン重合を利用した現場重合型PA6を用いた．強化繊維には綾織炭素繊維（織り密度：縦・横12.5本/25mm，厚さ0.27 mm）と平織ガラス繊維（織り密度：縦・横20本/25mm，厚さ:0.24 mm）を用いた．CFRPとCFRTPでは綾織炭素繊維を4 ply，GFRPとGFRTPでは平織ガラス繊維を5 ply とし，Vf（繊維体積含有率）の目標値は40%とした．また，樹脂単体の特性を評価するために，速硬化型エポキシ樹脂（以下，エポキシ樹脂）と現場重合型PA6（以下，PA6）の樹脂板についても成形を行った．試験片を採取するためのFRP板とFRTP板は，金型内を真空にし，樹脂を繊維へ含浸させるVaRTM法（Fig.1）にて成形をおこなった．樹脂板も同様の方法で繊維を入れずに成形した．FRP板の成形では50℃の樹脂を80℃の金型に注入し，FRTP板の成形では，110℃の樹脂を140℃の金型に注入した．成形後のFRPとFRTPの板厚は1 mmで，両樹脂板の板厚は3 mmとなっている．

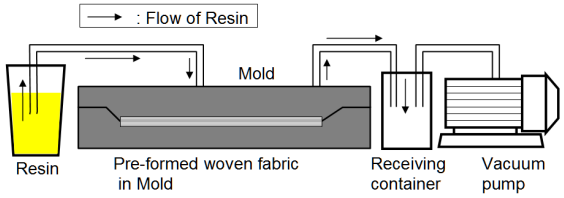


Fig.1 Schematic view of VaRTM

2.2 試験片の作製

静的引張試験と動的引張試験を用いるFRPとFRTPの試験片の形状は，動的引張試験機に設置可能な幅と長さの制約条件より決定した（Fig.2）．試験片は，2.1節で成形したFRP板とFRTP板から繊維の織り方向に切り出した0°/90°材と，繊維方向の織りに対して45°方向に切り出した45°材の2種類とした．なお，0°/90°材では試験片の繊維方向の引張特性の評価，45°材では面内せん断特性の評価をおこなった．試験片のつかみ部には，GFRP製の板厚1mmのタブを2液混合型のエポキシ接着剤を用いて試験片の両面に接着させた．樹脂単体の引張試験片は，JIS K7139を参考にFig.3の形状に切削加工した．

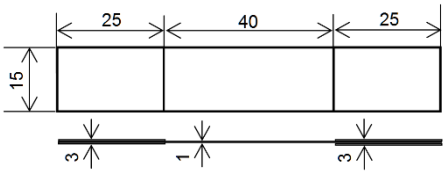


Fig.2 Dimensions of FRP and FRTP Specimen for Tensile Test

Evaluation of Strength and Fracture Properties of FRP and FRTP by High-Speed Tensile Test
Nao SUGIMOTO, Goichi BEN, Kazuhiro SAKATA and Norio HIRAYAMA

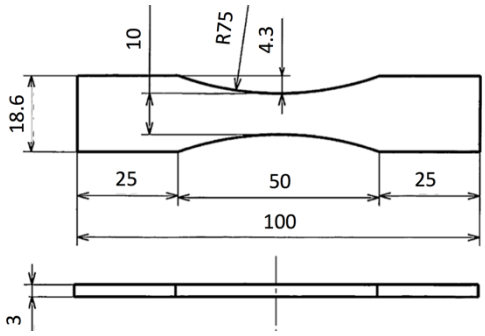


Fig.3 Dimensions of Resin Plate Specimen for Tensile Test

2.3 試験方法

静的引張試験には，万能型引張試験機を用い，引張速度は1 mm/minとした．動的引張試験には，検力ブロック式高速引張試験機を用い，引張速度はひずみ速度を0.1[1/s]，1[1/s]，10[1/s]，100[1/s]にするために，それぞれ5mm/sec，50mm/sec，500mm/sec，5000mm/secに設定した．

試験片本数は各条件に対し3本以上とした．荷重は試験機のロードセルより検出し，ひずみの計測は静的引張試験では伸び計，動的引張試験ではひずみゲージでおこなったが，ひずみゲージでは5%以上のデータは計測できないため，ひずみが5%以上となった試験片については，チャック間変位からひずみを算出した．

3．試験結果と考察

3．1　静的引張試験

Fig.4にエポキシ樹脂とPA6の樹脂板の代表的な応力-ひずみ線図を示す．エポキシ樹脂の強度は110MPa，破断ひずみは5.2%となった．一方，PA6の強度は66MPaで，破断ひずみは23.7%となり，エポキシ樹脂と比べて強度は40%低くなったが，破断ひずみは18.5%大きくなった．

Fig.5にCFRPとCFRTP，GFRPとGFRTPの0°/90°材における代表的な応力-ひずみ線図を示す．CFRPとCFRTPのヤング率は両者共に40GPaとなったが，CFRPとCFRTPの強度は580MPaと570MPaとなった．GFRPとGFRTPにおいても，ヤング率は概ね同じ値（16GPa）となり，GFRPとGFRTPの強度は256MPaと269MPaとなった．また，Fig.6とFig.7にFRP及びFRTPの破断後の代表的な試験片を示すが，全て繊維破断となり，マトリックス樹脂がヤング率，強度，破断ひずみに与える影響は小さいことが確認できた．

Fig.8にGFRPとGFRTP，CFRPとCFRTPの45°材における代表的な応力-ひずみ線図を示す．CFRPとGFRPのヤング率は，両者とも10GPa程度となり，CFRTPとGFRTPのヤング率は両者とも5GPa程度となった．CFRPの45°材の強度は231MPaで，CFRTPの45°材の強度は215MPaとなった．また，GFRP45°材の強度は165MPaで，GFRTP45°材の強度は132MPaとなった．破断ひずみに関しては，CFRPとGFRPは樹脂単体よりも7%から10%向上しているのに対し，CFRTPとGFRTPは樹脂単体よりも破断ひずみが約5%低下した．Fig.9とFig.10にFRP及びFRTPの破断後の代表的な試験片を示すが，全て繊維破断を起こしている．

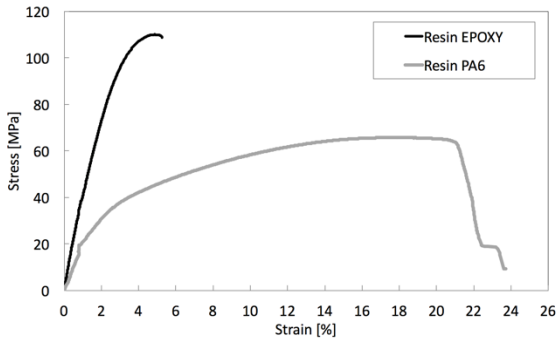


Fig.4 Static S-S Curves of Resin Plates

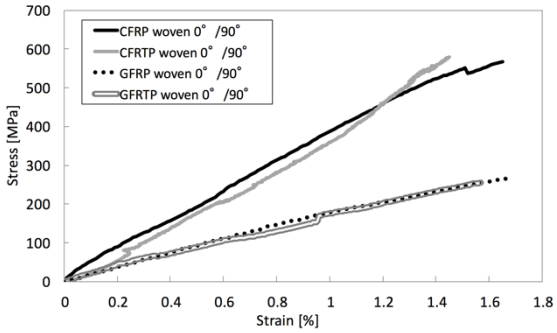
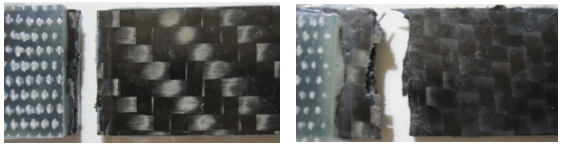
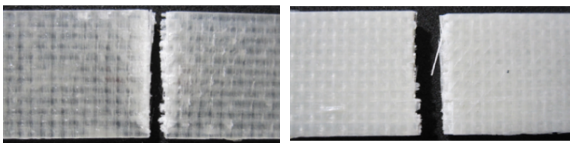


Fig.5　Static S-S Curves of FRP and FRTP (0°/90°)



CFRP　　CFRTP

Fig.6 Specimens of CFRP and CFRTP (0°/90°) after tensile test.



GFRP　　GFRTP

Fig.7 Specimens of GFRP and GFRTP (0°/90°) after tensile test.

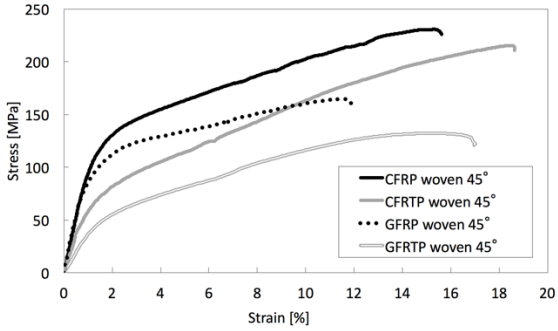


Fig.8 Static S-S Curves of FRP and FRTP (45°)

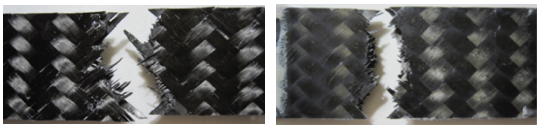

CFRP　　CFRTP

Fig.9 Specimens of CFRP and CFRTP (45°) after tensile test.

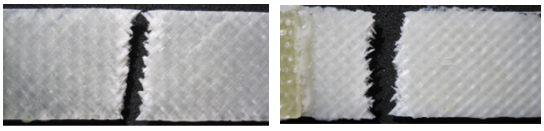

GFRP　　GFRTP

Fig.10 Specimens of GFRP and GFRTP (45°) after tensile test.

3．2　動的引張試験結果

Fig.11にエポキシ樹脂とPA6の樹脂板の強度とひずみ速度の関係, Fig.12 に破断ひずみとひずみ速度の関係を示す．エポキシ樹脂においては，ひずみ速度100[1/s]でばらつきが大きくなっているが, 両者の強度にひずみ速度依存性があることが確認できる．また，エポキシ樹脂，PA6共に，ひずみ速度が上昇するにつれ, 破断ひずみは低下した．

Fig.13にCFRPとCFRTP，GFRPとGFRTPの0°/90°材の強度とひずみ速度の関係を示す．GFRPとGFRTPではひずみ速度の上昇に伴い強度が上昇しており, 強度のひずみ速度依存性が確認できるが，CFRPとCFRTPでは確認できなかった．Fig.14にCFRPとCFRTP，GFRPとGFRTPの0°/90°材の破断ひずみとひずみ速度の関係を示す．Fig.13の結果と同様に，GFRPとGFRTPの結果ではひずみ速度依存性が確認できたが，CFRPとCFRTPでは確認できなかった．Fig.15にCFRPとCFRTP，GFRPとGFRTPの0°/90°材のひずみ速度と吸収エネルギーの関係を示す．GFRPとGFRTPは強度と破断ひずみに速度依存性があるため, ひずみ速度の上昇に伴い吸収エネルギーも同様に上昇した．また，ひずみ速度が0. 1 [1/s]以上になると，GFRPとGFRTPの吸収エネルギーはCFRPとCFRTPの値より大きくなり，ひずみ速度100[1/s]では，その差は約2倍となった．

Fig.16にCFRPとCFRTP，GFRPとGFRTPの45°材のひずみ速度と強度の関係を示す．45°材の強度はマトリックス樹脂と強化繊維の両方に依存し，ひずみ速度上昇に伴いせん断強度はひずみ速度依存性を示す．特にGFRPとGFRTPは樹脂だけでなく，強化繊維自体の強度のひずみ速度依存性も合わさり，ひずみ速度100[1/s]では，CFRP，CFRTPと概ね同じ強度となった．

Fig.17にCFRPとCFRTP, GFRPとGFRTPの45°材の破断ひずみとひずみ速度の関係を示す. ひずみ速度0.001[1/s]においては，CFRPとCFRTPの破断ひずみの平均値は20%と25%付近を示すが, ひずみ速度が10[1/s]になると低下した. 一方, GFRPとGFRTPでは，各ひずみ速度速度において，破断ひずみに大きな変化は確認できなかった．

Fig.18にCFRPとCFRTP, GFRPとGFRTPの45°材のひずみ速度と吸収エネルギーの関係を示す. ひずみ速度0.001[1/s]においては, 吸収エネルギーは強化繊維に依存するが, ひずみ速度の上昇に伴い, 樹脂と強化繊維両方のひずみ速度依存性の影響を受け，GFRPとGFRTPは上昇した．ひずみ速度100[1/s]では，CFRTPとGFRTPはCFRPとGFRPと比較して，約2倍の吸収エネルギーを示した．

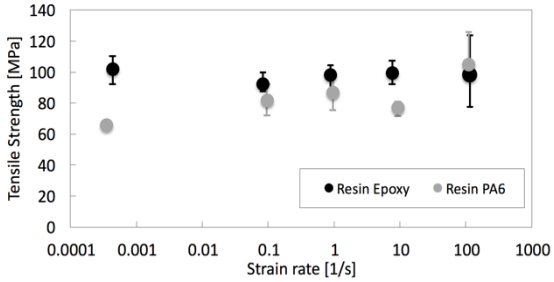


Fig.11 Relationship between Tensile Strength and Strain Rate of Epoxy and PA6

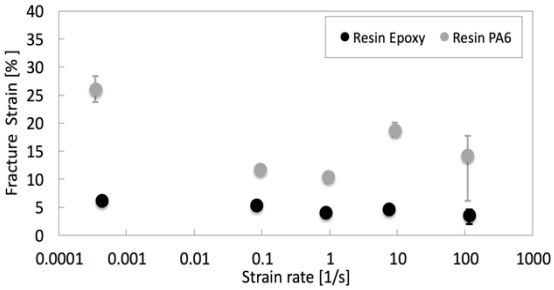


Fig.12 Relationship between Fracture Strain and Strain Rate of Epoxy and PA6

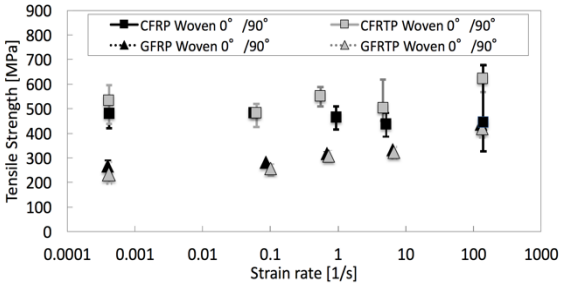


Fig.13 Relationship between Tensile Strength and Strain Rate of FRP and FRTP (0° /90°)

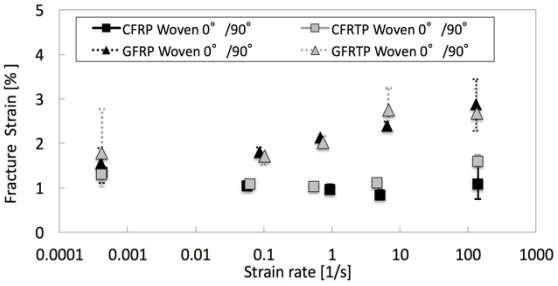


Fig.14 Relationship between Fracture Strain and Strain Rate of FRP and FRTP (0° /90°)

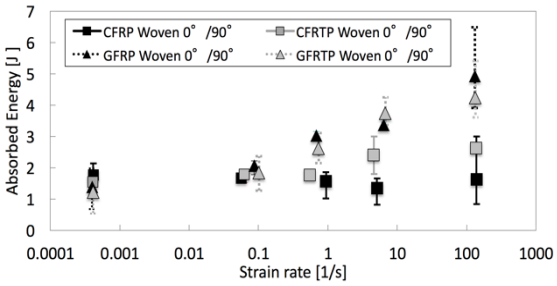


Fig.15 Relationship between Absorbed Energy and Strain Rate of FRP and FRTP (0° /90°)

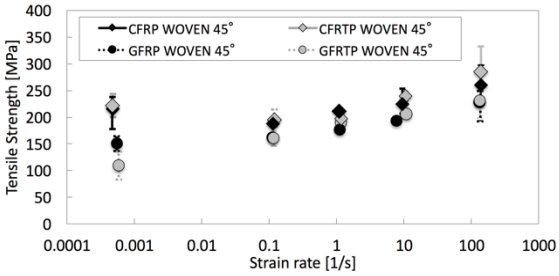


Fig.16 Relationship between Tensile Strength and Strain Rate of FRP and FRTP (45°)

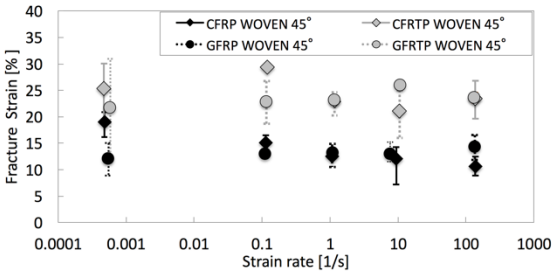


Fig.17 Relationship between Fracture Strain and Strain Rate of FRP and FRTP (45°)

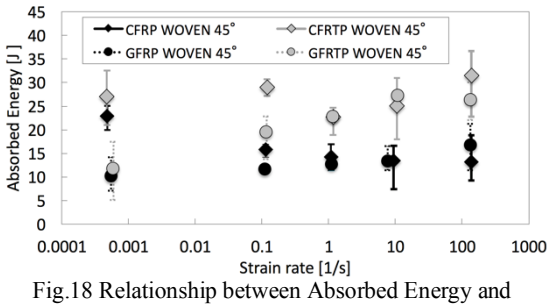


Fig.18 Relationship between Absorbed Energy and Strain Rate of FRP and FRTP (45°)

4. 結言

CFRP，CFRTP，GFRP，GFRTPの0°/90°材及び45°材の静的・動的引張試験を実施し，以下の知見を得た．

1) 0°/90°材の引張強度と破断ひずみの速度依存性はGFRPとGFRTPのみ確認できた．

2) GFRPとGFRTPの0°/90°材の動的な吸収エネルギーは，静的と比較して約2倍の値を示し，ひずみ速度が1[1/s]を超えると，CFRPとCFRTPよりも吸収エネルギーが高くなる．

3) 45°材においては，GFRPとCFRPよりもGFRTPとCFRTPの方が，各ひずみ速度において破断ひずみは約10%高くなる．

4) GFRTPとCFRTPの45° 材の吸収エネルギーは，ひずみ速度100[1/s]において，GFRPとCFRPの約2倍の値を示した．

謝辞

本研究は，平成27年度研究科特別経費（学生分）の補助を受けたものであり，ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) G. BEN，A. HIRABAYASHI，K. SAKATA et al.:Evaluation of new GFRTP and CFRTP using epsilon caprolactam as matrix fabricated with VaRTM, Science and engineering of composite materials, DOI:10.1515/secm-2014-0013.

2) 邉吾一，坂田憲泰，石田亘 :同じ強化繊維を用いたHFRTPの力学的特性評価，日本複合材料学会誌 41,4(2015),112-121

3) 石川隆司:炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の次世代自動車への適用の展望，自動車技術，vol.68 ,No,11, p4-11(2014)