

資料

CFRP 製消防自動車用ステップ兼用扉の力学的特性に関する研究

中村 仁 八塚直紀 黄木景二^{*1}・堤 三佳^{*1}・二神 智^{*2}

Study on Mechanical Properties of CFRP-Step-Door for Fire Engine

NAKAMURA Hitoshi, YATSUZUKA Naoki, OGI Keiji^{*1}, TSUTSUMI Mitsuyoshi^{*1} and FUTAGAMI Tomo^{*2}

消防自動車に搭載された装備において軽量化ニーズの高いステップ兼用扉に着目し、当該装備への炭素繊維プラスチック（CFRP）の適用に向けて力学的特性評価を行った。有限要素法（FEM）による剛性解析結果に基づき CFRP と金属を組み合わせた供試体を試作し、実際の運用に即した荷重試験と、変位計、ひずみゲージ、デジタル画像相関法（DIC）を用いた荷重に対する変位量及びひずみの計測を行った結果、供試体は当初の設計通りの剛性を有しており、当該製品において FEM による剛性設計が有効であることが示された。

キーワード：高機能素材、炭素繊維強化プラスチック、軽量化、高剛性、シミュレーション

はじめに

小型から中型の消防自動車において、車体上部に積載した資材の取り出し用に、車体側面にステップ兼用扉が取り付けられている。この部材は、緊急時に迅速に開閉する必要があるため、扉自身の軽量化が求められている。

そこで、本研究では、軽量かつ高剛性な材料である炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を用いて消防自動車用ステップ兼用扉を試作し、実際の運用条件に照らし合わせた各種試験及び解析を経て、製品としての性能評価を行った。

実験方法

1. 有限要素法（FEM）による CFRP 製ステップ兼用扉の剛性解析及び荷重時変形挙動シミュレーション

剛性解析及び変位量シミュレーションのモデルはヒンジ部分が金属、パネル部分を CFRP とした（図 1）。金属ヒンジ部分は金属製パイプで構成されており、フォーク状に 4 本の金属パイプが突き出した形状の金属ヒンジに、CFRP パネル及び CFRP パイプから成る部材を差し込んだ形状とした。

モデル全体の寸法は、幅×奥行×高さ＝993 mm×554 mm×34 mm であり、各部の寸法は、ヒンジ部（車体取り付け側）が、幅×高さ×長さ＝60×30 ×993 mm、突き出した 4 本のパイプの形状は、外側 2 本が幅×高さ×長さ＝30×30 ×100 mm、内側 2 本が幅×高さ×長さ＝60×30 ×150 mm、厚さは全て 2.3 mm とし、CFRP 部分の寸法は、CFRP パネル部が、幅×奥行×厚さ 993 mm×554 mm、CFRP パイプ部は、それぞれ内寸で幅×高さ×長さ＝60×30 ×394 mm、60×30 ×540 mm、30×30 ×424 mm、30×30 ×929 mm とした。

CFRP 部分のパネル部とパイプ部は独立、各締結用の穴部は省略した形状とし、CFRP は積層理論で物性値を定めた均質材とした。負荷条件については、差し込んだ金属製骨格部分を固定端とし、自由端側の一方の角部に 3000 N の荷重をかけた場合の変位量が 10 mm 以下となるよう、条件設定を行った。また、実際に荷重負荷試験が可能な範囲は、1000 N 以下であることから、荷重時変形挙動については、500 N 負荷時での荷重点直下の変位量及び供試体上面（引張側）でのひずみについて解析を行った。

*1 国立大学法人 愛媛大学、 *2 小川ポンプ工業株式会社
この研究は、「炭素繊維関連産業創出事業」の予算で実施した。

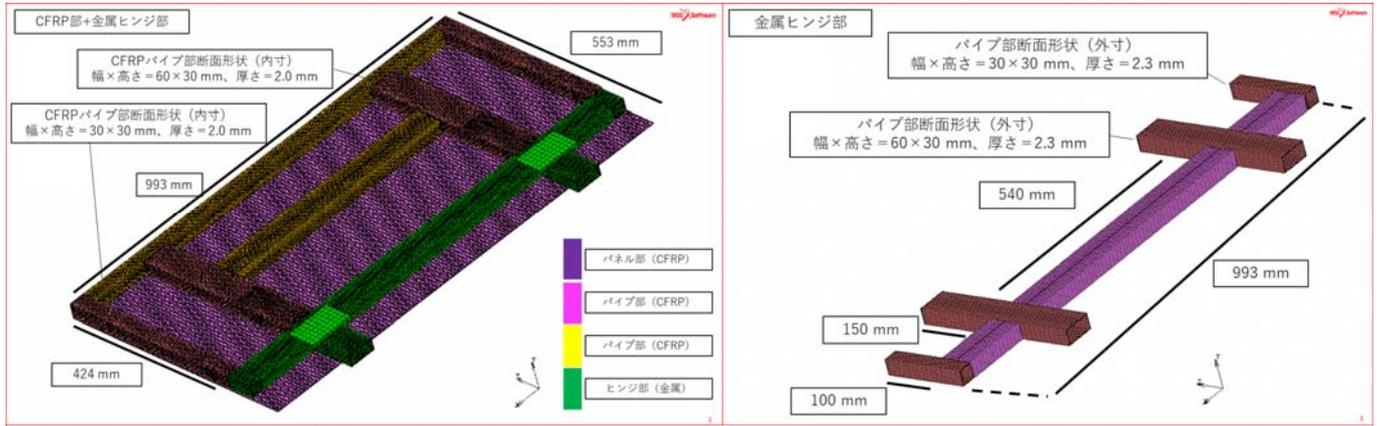


図1 シミュレーションモデル及び各部の寸法

2. 供試体の試作

1のシミュレーション結果を基に、供試体の試作を行った。製作方法は、まず、オートクレーブによりCFRP製の骨格、外枠、小部品を成形後、各部材を接着剤により接着し、その後、金属製ヒンジ部と接着剤及び機械締結により接合した。CFRP部分の成形材料には、東レ(株)製プリプレグFK6241E-05Kを用い、積層構成は(0/45/90/-45)_nの擬似等方積層、CFRP部分の厚さは2.0mmとした。また、金属部分は厚さ2.3mmのSS400を用いて製作した。

3. 荷重時の変位及びひずみの計測

2で試作した供試体について、機械的特性評価の概略図を図2に示す。計測方法は、変位計(株共和電業製DTH-A-50)及びデジタル画像相関法(DIC法)を用いて、100Nずつ荷重を加えた場合の変位計測を行った。また、最も応力集中が起きると考えられるCFRP部へのヒンジ差し込み部分近傍にひずみゲージ(株共和電業製KFRP-2-120-C1-3L5M2R)を取り付け、圧縮側及び引張側のひずみを測定した。

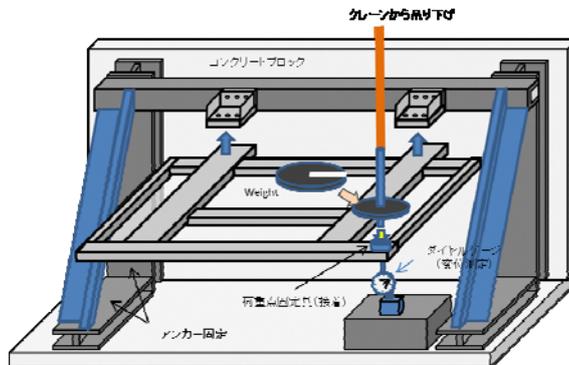


図2 試験方法概略

結果と考察

1. 有限要素法(FEM)によるCFRP製ステップ兼用扉の剛性解析及び荷重時変形挙動シミュレーション

(1) 供試体の剛性解析

FEMを用いて、CFRP製ステップ兼用扉の剛性解析を行った結果を表1に示す。CFRP製ステップ兼用扉は、CFRP部分(CFRPパネル部、CFRP角パイプ部)及び金属部分から成っており、金属部分を含めた変形について解析を行った。解析の結果、パネル部分、パイプ部分共に、擬似等方構成(0/45/90/-45)_nで最も剛性が大きくなることが分かった。45°層を挿入することにより、単なる曲げに対してのみならず、ねじりに対しての剛性が向上したことで、荷重に対する下方変位量が低減したものと考えられた。

表 1 各種積層構成の解析結果

CFRP パネル部 積層構成	CFRP 角パイプ 積層構成	荷重位置 下部変位 (mm)
0/0/0/0	0/0/0/0	7.951
	0/45/90/-45	7.860
	0/0/90/90	9.469
0/45/90/-45	0/0/0/0	7.525
	0/45/90/-45	7.380 (最小)
	0/0/90/90	8.730
0/0/90/90	0/0/0/0	7.661
	0/45/90/-45	7.511
	0/0/90/90	8.944

(2)荷重時変位量及びひずみのシミュレーション

図 3 に示した①～⑥の 6 か所についての変位を図 4 に示す (座標設定は図 3 に従う)。平面方向に x 軸及び z 軸を置き、それぞれに対する y 軸の変位量 Δy について解析した結果、荷重点 (図 3 黄色実線部) に 500 N を負荷した際の下方変位量は最大で約 2.1 mm となった。また、ひずみについては、同じく 500 N 負荷時に引張側で最大約 400~500 $\mu\epsilon$ になることが示された (図 5) 変位量及びひずみの最大値は、両者共に最も値が大きくなると想定された箇所であったことから、実際の計測における変位計やひずみゲージの取り付け位置の参考とした。

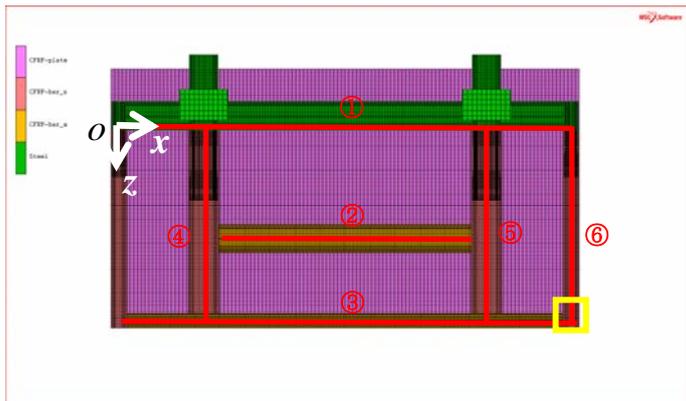


図 3 変位データの位置対応

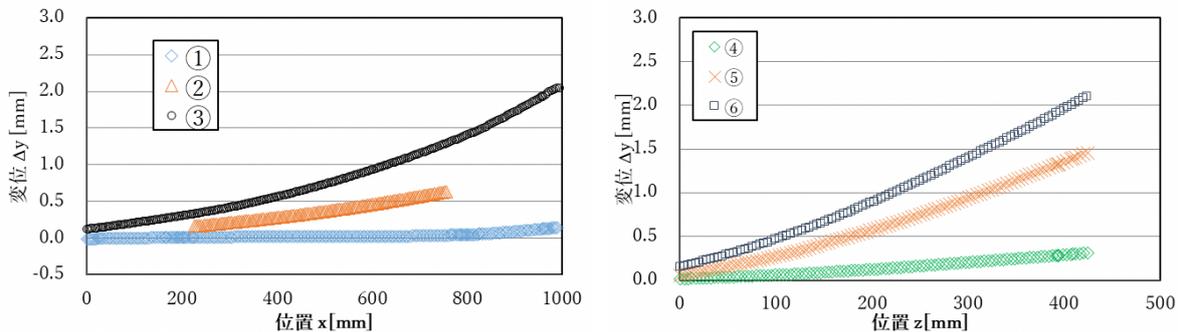


図 4 下方変位量シミュレーション結果 (図 3 ①～⑥の位置に対応)

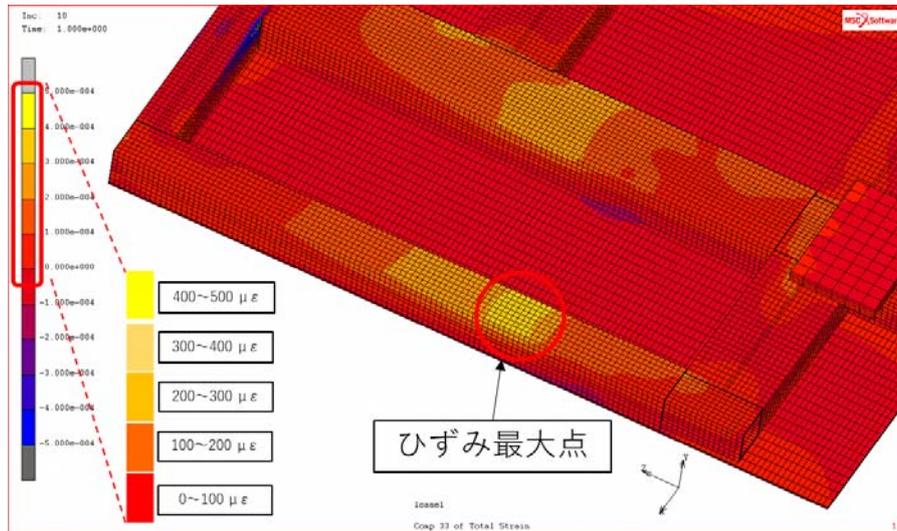


図5 供試体上面（引張側）でのひずみ解析結果

2. 供試体の試作

試作した供試体を図6に示す。黄色線部が金属部分であり、露出している部分を実線、CFRP部分に挿入されている部分を破線で示した。また、青色実線部がCFRP部分であり、平板形状と金属部分を挿入するためのパイプ形状を組み合わせた形状とした。寸法は、幅×奥行×厚さ＝993 mm×554 mm×34 mmであり、金属部分を含めた総重量は、8.5 kgであった。従来の金属製ステップ兼用扉で、同寸法のもは30 kg程度であり、約70%程度の軽量化が実現出来たことから、実際の運用時におけるスムーズな開閉及び車両重量の低減が期待された。

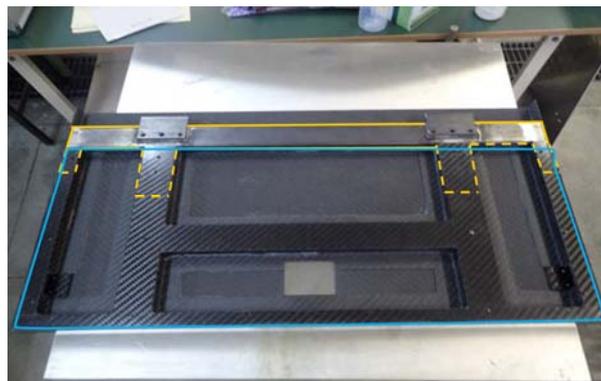


図6 試作した供試体

3. 荷重時の変位及びひずみの計測

(1) 変位計及びひずみゲージによる計測

図7に、ひずみゲージ取り付け箇所及び試験風景を示す。供試体上面（引張側）の外周側を測定箇所1、内部側を測定箇所2、供試体裏面（圧縮側）の外周側を測定箇所3、内部側を測定箇所4とした。荷重負荷点の直上に設置したおもり固定治具に、1個あたり100 Nのおもりを随時追加しながら試験を実施したが900 N負荷時に、供試体の変形量の問題から固定治具が自立出来なくなったことから、安全性を考慮し、最大で800 Nまでの変位量及びひずみを計測した（図8）。



図7 ひずみゲージ取り付け箇所と試験風景

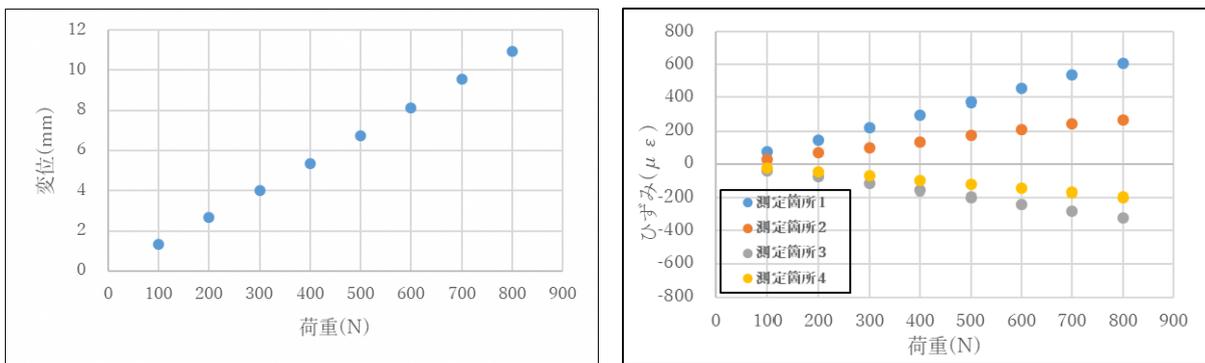


図8 800 N 負荷時の供試体下部変位量及びひずみ

実測の結果、800 N 負荷時の最大変位量は、10.92 mm、最大ひずみは測定箇所 1 で 605 $\mu\epsilon$ であった。500 N 負荷時の測定箇所 1 (引張側) でのひずみの実測値は、およそ 400 $\mu\epsilon$ であり、1-(2)のシミュレーション結果と概ね一致した。

変位量及びひずみは、800 N 時点では、直線的に推移していることから、両測定結果に当初の設定値であった 3000 N まで値を外挿した結果、3000 N 負荷時の変位量とひずみは、それぞれ 41 mm と 2300 $\mu\epsilon$ 程度になると推測された。変位量については、FEM による解析結果の 5~6 倍大きい値となったものの、ひずみについては当初の解析結果とほぼ同等の値となったことから、解析時の条件で固定端として設定していた骨格部分が荷重によって回転変位を生じている可能性が示唆された。

また、ひずみ約 2300 $\mu\epsilon$ (約 0.23%) という値は、一般的に CFRP のマトリックス割れによる破壊が生じるとされているひずみ 5000 $\mu\epsilon$ (0.5%) よりも十分に小さい値であり、この点に関して製品の安全率として 2 倍以上は担保できる可能性が示された。

(2) デジタル画像相関法 (DIC) による計測

FEM での変位解析位置に合わせて、図 9 の①~⑥について DIC による変位の計測を行った。

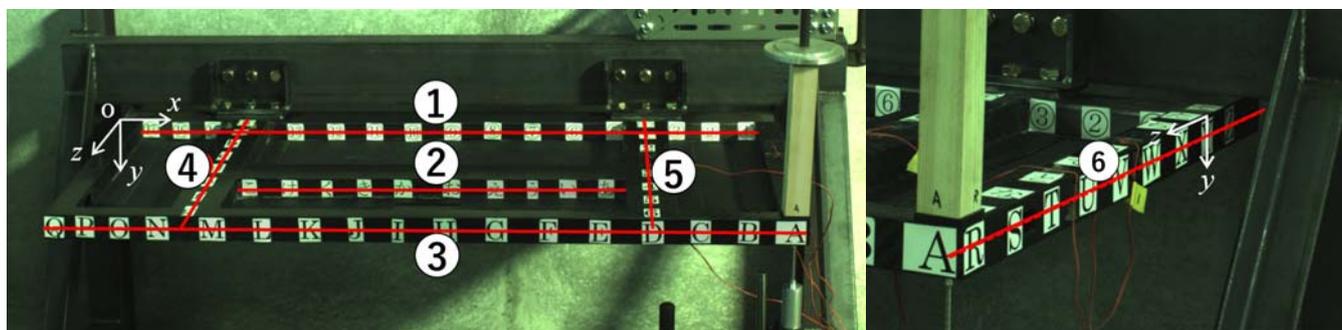


図9 DIC 法での計測箇所

各計測箇所における 100N 負荷毎の位置と変位の関係の一例として、位置③及び⑥での計測結果を図 10 に示す。計測の結果、最も変位が大きい箇所は荷重点直下であり、位置が荷重点に近づく程変位量が増大していた。

また、500 N 負荷時の DIC による荷重点直下付近での変位量は、6.8~7.0 mm であり、3-(1)で述べた変位計による計測結果 (500 N 負荷時に 6.72 mm) とよく一致することが分かった。

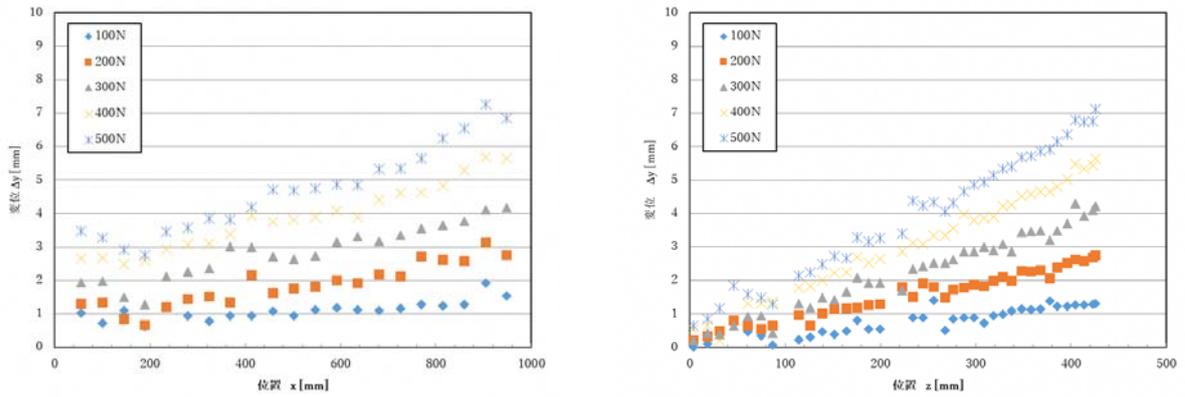


図 10 計測箇所③及び⑥の変位量

(3) DIC による計測結果と FEM 解析結果との比較

3-(2)の結果と FEM 解析結果の比較例として、測定箇所⑥での比較結果を図 11 に示す。今回の供試体については、実測値とシミュレーション結果に 3~4 倍の差があることが分かった。

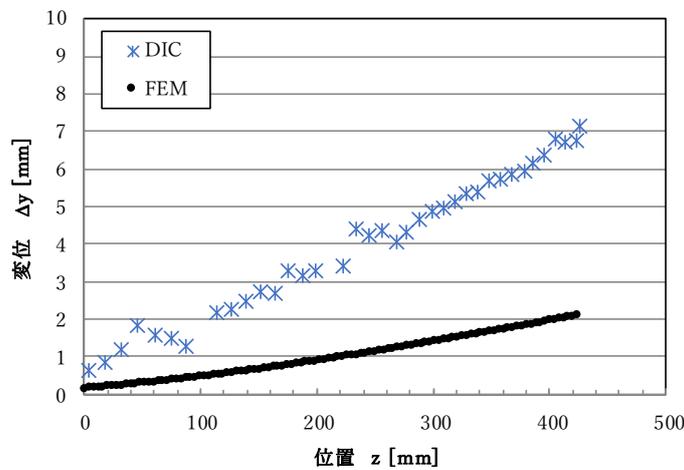


図 11 DIC 法による実測値と FEM によるシミュレーション結果比較例 (測定箇所⑥)

実測値とシミュレーション結果に大きな差が生じる主な要因として、荷重試験時における金属骨格の変形の影響が無視できないことが懸念されたため、図 12 のように $x=16, 303, 494, 638, 958(\text{mm})$ の 5 か所で金属骨格上に設置したマグネットベースの変位を計測し、金属骨格のみの回転角 θ と下方変位 Δy を求めた。

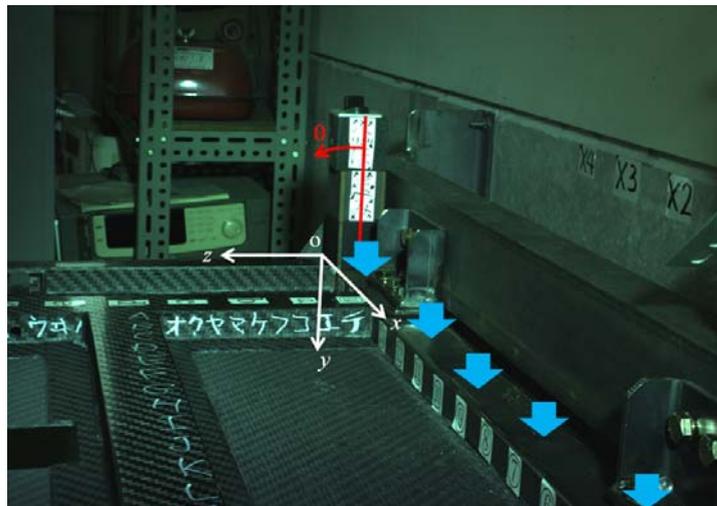


図 12 固定治具の変形量測定

測定の結果、図 13 のように金属骨格のみについても FEM 解析より大きな回転と変位を生じており、固定治具へのねじ取り付け部から変形が生じていると考えられた。

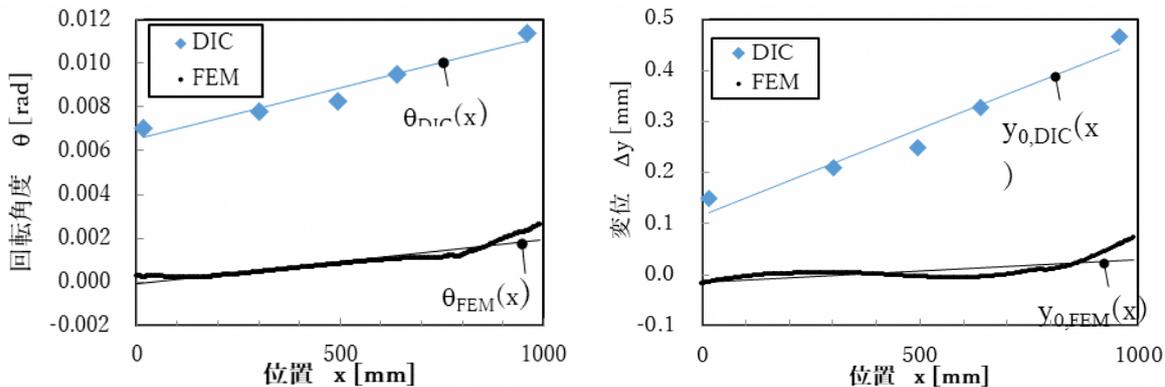


図 13 金属骨格部の回転角及び下方変位量

今回のステップ扉のように回転する軸に取り付けられた平板は図 14 のように図式化される。平板の変形がない場合に固定軸の回転角度 θ と移動 Δy が小さい場合には平板上の任意位置 (x, z) での下方向変位 δ は以下ようになる。

$$\delta(x, z) = \theta z + \Delta y$$

ただし、ここでの θ と Δy は x の関数である。DIC と FEM での鉄製骨格の回転と変位の程度の違いによる CFRP 部分の変位の差を求めるために、図 17 での関係線の近似式 $\theta_{DIC}(x), \theta_{FEM}(x), \Delta y_{0,DIC}(x), \Delta y_{0,FEM}(x)$ を用いると、

$$\delta(x, z) = \{\theta_{DIC}(x) - \theta_{FEM}(x)\}z + \{\Delta y_{0,DIC}(x) - \Delta y_{0,FEM}(x)\}$$

である。

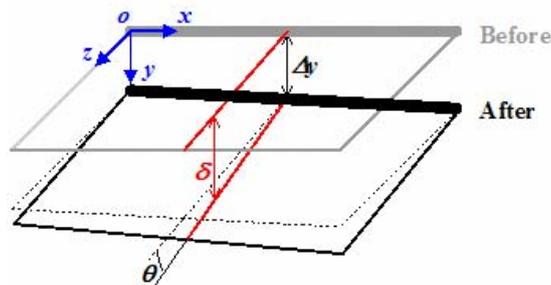


図 14 回転軸に取り付けられた平板

測定箇所⑥について、先の DIC 実測データに上式を適用して影響分を除去した結果を図 15 に示す。

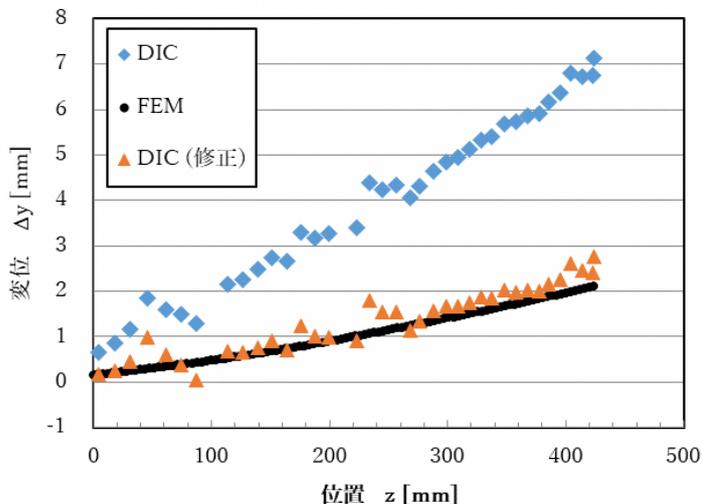


図 15 固定治具変形量を修正した結果との比較

修正の結果、FEM 解析での変位（たわみ）にほぼ一致することから、CFRP 部分では当初の設計通りの剛性を有しているものと推察された。

ま と め

CFRP 製ステップ兼用扉の開発について検討した結果、以下の成果が得られた。

1. ヒンジ部分を金属、パネル部分を CFRP としたモデルについて、①CFRP 部分のパネル部とパイプ部は独立、②各締結用の穴部は省略、③CFRP は積層理論で物性値を定めた均質材、④差し込んだ金属製骨格部分を固定端とし、自由端側の一方の角部に 3000 N の荷重負荷、⑤変位量が 10 mm 以下、以上の境界条件において、様々な CFRP 積層構成をパラメータとした FEM による剛性解析を行った結果、擬似等方構成 (0/45/90/-45)_n の場合に最も剛性が高くなることが分かった。

また、500 N 負荷時の下方変位量及び供試体上面（引張側）でのひずみに関する解析の結果、それぞれの値は 2.1 mm、400～500 $\mu\epsilon$ 程度となることが分かった。

2. FEM 解析結果を基に、供試体の試作を行った。積層構成は (0/45/90/-45)_n の擬似等方積層、CFRP 部分の厚さは 2.0 mm、金属部分は材質が SS400、厚さ 2.3 mm とした。寸法は、幅×奥行×厚さ=993 mm×554 mm×34 mm であり、金属部分を含めた総重量は、8.5 kg であった。従来の金属製ステップ兼用扉で、同寸法のもの 30 kg 程度であることから、約 70% 程度の軽量化が実現出来た。

3. 変位量及びひずみの実測結果から、3000 N 負荷時の変位及びひずみを算出した結果、変位量が 41 mm、ひずみが 2300 $\mu\epsilon$ 程度になると推測された。

ひずみは当初の FEM 解析結果と概ね一致したものの、変位量については大幅なずれを生じていたことから、解析時に固定条件としていた金属骨格部分の変形について DIC 法を用いて計測及び補正した結果、FEM 解析結果との整合性が確認出来た。

以上のことから、CFRP 部分は当初の設計通りの剛性を有しており、FEM 解析による剛性設計が本研究開発において有効であることが示された。

参 考 文 献

- 1) 小林繁夫, 石井康夫, 小山一夫: CFRP 一方向材の圧縮強度についての一考察, 日本複合材料学会誌, 12-5, 214-222(1986).