

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06640

研究課題名（和文）軽量高強度新素材を用いたハイブリッド構造の強度・靱性能の分析と設計法の構築

研究課題名（英文）Mechanical behavior of hybrid structure using light-weight high-strength materials and its design methodology

研究代表者

松本 幸大（Matsumoto, Yukihiro）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00435447

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：繊維強化樹脂を用いてハイブリッド化した鋼製容器構造物の内圧を考慮した構造性能を分析し、(1)鋼製円筒構造の軸圧縮試験を行い補強によって変形の拘束による耐力上昇が可能なことと最大耐力後の耐力低下が緩和できること、(2)薄肉鋼板の面内剪断試験を行い補強によって剪断耐力の向上が可能なことを明らかとした。また軸圧縮・剪断試験に対して有限要素解析を行い、高精度で実験を再現できることを示した。さらに、(3)縮尺円筒容器構造に対する振動試験を実施し、薄肉円筒容器構造の内容物の内圧による力学挙動と補強効果、補強時の繊維方向の影響について明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した繊維強化樹脂による鋼構造部材のハイブリッド化に関する研究成果は、産業構造に多く存在する鋼製薄肉容器構造や、配管等の設備構造に対して軽量でハンドリングに優れる補強方法を示したものであり、防災・減災技術に応用される可能性がある。更に薄肉鋼材により構成される船舶分野等の異分野における成果の波及にも期待があり、軽量構造・長寿命構造の実現への一助となる成果であると考えられる。学術的には、鋼・繊維強化樹脂のハイブリッド構造要素の力学特性評価や解析法に関する研究成果を論文として公表しており、今後の分析・設計法に応用される期待がある。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the structural performance of thin-walled steel tank structures with FRP considering the internal pressure. An axial compression test of a steel cylindrical structure was carried out and it was clarified that FRP strengthening can increase the yield strength by restraining out-of-plane deformation, and can mitigate the decreasing of loading after reaching the maximum loading. An in-plane shear test was conducted on thin-walled steel plates and it was clarified that the shear strength can be increased by FRP strengthening. Furthermore, FEA was performed for the axial compression and shear test, and it was shown that the experiment can be simulated with high accuracy. Then, a vibration test was conducted on a small-scaled cylindrical tank structure. The mechanical behavior and strengthening effect of the thin-walled cylindrical tank structure considering the internal pressure and the influence of the fiber direction was clarified under dynamic vibration loading.

研究分野：工学

キーワード：複合材料 鋼構造 薄肉構造 補強

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年発生した東北地方太平洋沖地震等の大規模地震時において、図1に示すようなタンクなどの鋼製容器構造の座屈による損傷が多数報告されている<sup>1)</sup>。設備構造物に多く用いられる容器構造の損傷は、構造物の耐震性の観点のみならず、インフラの継続運用に関わる社会的な課題であると言えます。今後も発生が危惧される大規模地震に対する、既存の鋼製容器構造への補強が求められている。この課題に対して、より簡便で合理的に補強できる材料として、軽量かつ高強度で耐久性にも優れる繊維強化樹脂材 (FRP) が挙げられ、中でも特に高強度な炭素繊維を用いた CFRP が注目されている。CFRP を用いた構造材の研究に関しては航空機等への応用を念頭とした複合材料学会や機械学会において、材料性能評価や接合強度に関する研究が行われている<sup>2)</sup>。また、建築分野においては、鋼部材の補強を目的とした性能評価や接着強度に関する研究が行われており、構造維持管理や補強材として近年注目されている<sup>3)</sup>。



図1 鋼製容器構造の損傷事例

### 2. 研究の目的

本研究では、鋼製薄肉容器構造物に外力が作用した際、外側に孕み出す変形モードが生じること、また、その変形が進行することで耐力を喪失することに着目し、周方向の拘束効果を期待した繊維強化樹脂を用いたハイブリッド鋼製容器構造を考案し、耐力と力学挙動分析を行うことを目的とする。

そこで、本研究では、繊維強化樹脂を用いてハイブリッド化した鋼製容器構造物の内圧を考慮した構造性能を分析する目的で、(1) 鋼のみおよびハイブリッド容器構造の軸圧縮試験 (図4, 5) と水平力載荷試験を行い、変形の拘束による耐力上昇効果と塑性変形性能を明らかにする。試験体には、内外に軸方向・周方向の歪ゲージを貼付し多数の歪をモニターすることで、有限要素解析モデルの妥当性判断に応用する。(1) と並行して、図6に示すような(2) 鋼をソリッド要素、繊維強化樹脂を外表面へのシェル要素としてモデル化した対象構造の有限要素解析 (図6, 7) を進め、実験との対応とパラメトリック解析を行う。更に、既往の研究成果5, 6)と文献1)の設計の考え方を援用して、(3) ハイブリッド効果を加味する設計手法の提案と検証を行う。ハイブリッド構造の機械的性質は、直交異方性を有することから、軸方向・周方向の機械的性質を複合則・積層理論により算出し、降伏応力度の上昇を評価する。最大変形能力については、繊維強化樹脂材の破断歪を限界点として設定し、有限要素解析により評価する。

### 3. 研究の方法

繊維強化樹脂を用いてハイブリッド化した鋼製容器構造物の内圧を考慮した構造性能を分析する目的で、

(1) 鋼のみおよびハイブリッド容器構造の軸圧縮試験を行い、変形の拘束による耐力上昇効果と塑性変形性能を明らかにするとともに、有限要素解析による実験との対応とパラメトリック解析による力学性能分析

(2) 剪断力に対するハイブリッド薄肉構造要素の挙動解明のため、剪断試験を行い、繊維強化樹脂による耐力上昇効果と塑性変形性能を明らかにするとともに、有限要素解析による同定

(3) 縮尺円筒容器構造に対する振動試験を実施し、ハイブリッド容器構造の動的挙動と補強効果の解明

を研究手法として実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 軸圧縮に対する研究結果<sup>4)</sup>

図2に軸圧縮試験セットアップ状況を示す。試験体は、外径260mmを固定し、肉厚を1.5, 2.0, 2.6mmとした鋼製縮尺円筒構造体に対して、無補強・高強度型繊維 (UT: 弾性率235GPa, 厚さ0.217mm)・中弾性繊維 (UM: 弾性率440GPa, 厚さ0.222mm) による補強を適用した。また、解析は図3に示すように対称性を考慮した1/4モデルとし、鋼材は材料試験をもとに、繊維強化樹脂は複合則により機械的性質を評価した。図4に実験と解析より得られた荷重変位関係を示す。

結果として、周方向の繊維強化樹脂により耐力上昇が実証でき、最大耐力到達後の耐力低下傾向も緩やかになることが明らかとなった。また、その力学挙動は有限要素解析によって精密にシミュレーションが可能であることを示すことができた。これにより、既設構造の象の足座屈等に対する破壊モードの補強に対しても解析を援用することで精度の良い設計及び耐震性能評価が可能であると言える。

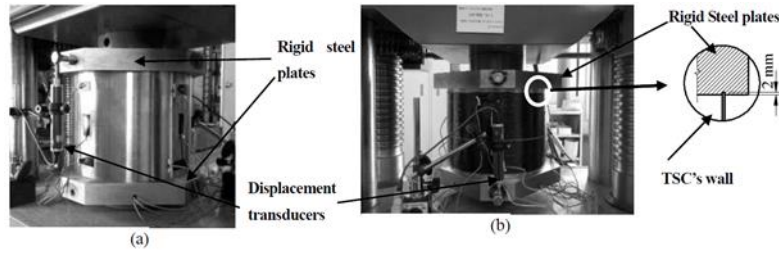


図2 圧縮試験セットアップ

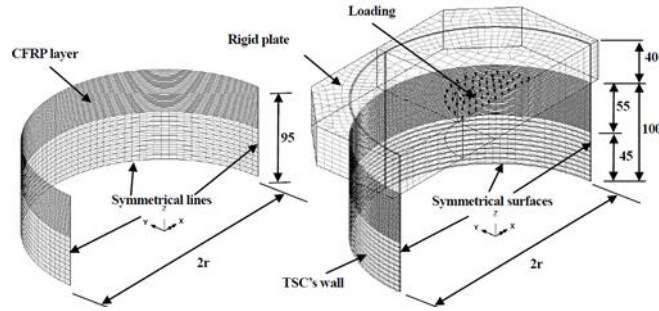
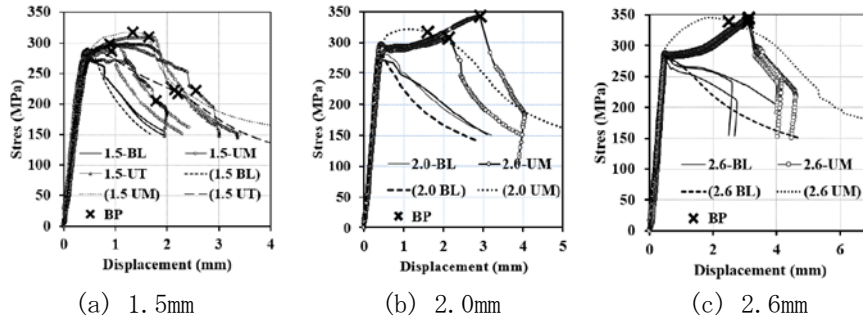


図3 解析モデル



BL: 無補強, UT: 高強度繊維強, UM: 中弾性繊維補強, BT: 繊維の破断点, ( ): 解析結果  
図4 実験及び解析結果

(2) 剪断力に対する研究結果<sup>5)</sup>

図5に剪断試験セットアップ状況を示す。試験体は、厚さ1.6mmの鋼板を左右対称に剪断力が作用するよう試験用フレームにセットして実施した。繊維強化樹脂による補強は、高強度型二方向繊維シート（弾性率230GPa、厚さ0.112mm）を0/90度および±45に配し、繊維方向による力学挙動の違いを分析した。また、解析は図6に示すように試験機への接続部を省略したフルモデルとし、鋼材は材料試験をもとに、繊維強化樹脂は複合則により機械的性質を評価した。図7に実験と解析より得られた荷重変位関係を示す。

結果として、薄肉鋼板に対する純剪断力が作用する場合に対しても有意な耐力上昇が実証でき、その力学挙動は有限要素解析によって精密にシミュレーションが可能であることを示すことができた。これにより、剪断座屈などを生じる鋼製薄肉構造に対しても補強効果が期待できるとともに本研究で用いた解析モデル化手法を援用することで精度の良い設計及び耐震性能評価が可能であると言える。

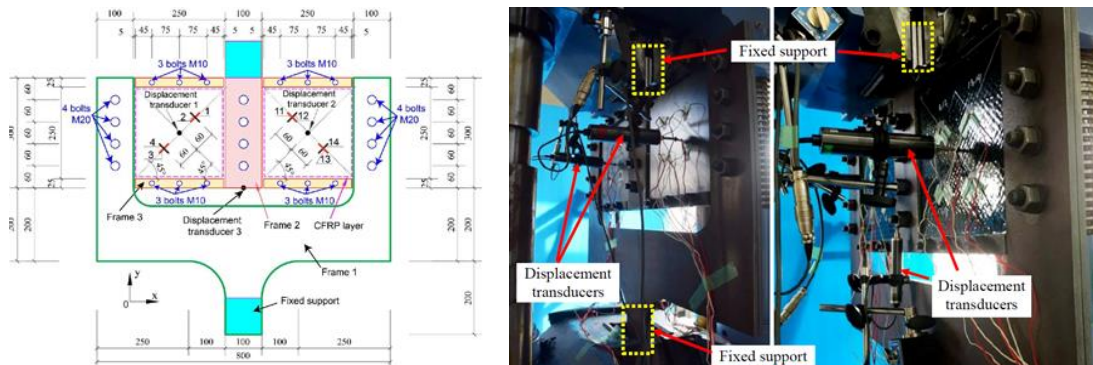


図5 剪断試験セットアップ

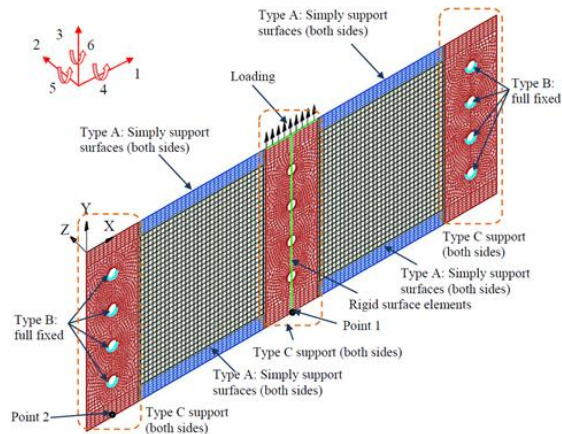
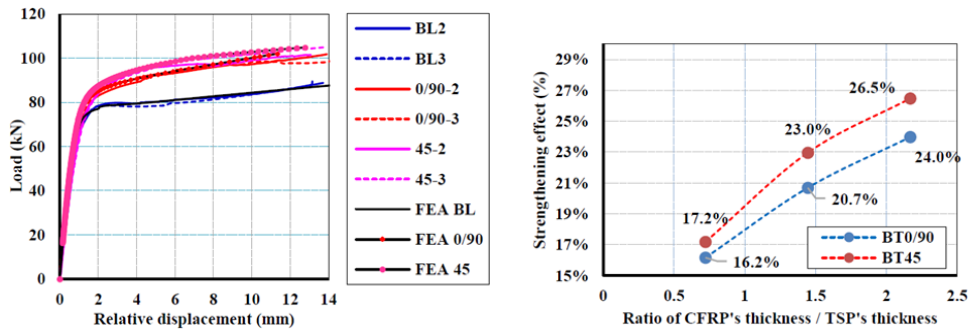


図6 解析モデル



(a) 荷重変位関係

(b) CFRP 厚さと耐力上昇率の関係

BL: 無補強, 0/90: 0/90度の補強方向, 45: 士度の補強方向, FEA: 解析結果

図7 実験及び解析結果

(3) 振動試験による動的挙動の解明<sup>6)</sup>

図8に振動試験セットアップ状況を示す。試験体は、厚さ0.4mmのアルミ板を用いて作成し、外径を559.6mm(径厚比700)、高さを650mmとした。容器構造の内容物として1.2mmの鋼球を用いて再現した。繊維強化樹脂による補強は、周方向のみの補強と上下・周方向に補強した場合を設定した。補強繊維は高強度型繊維シート(弾性率230GPa)を用いており、補強繊維の合計厚さは0.112mmである。

図9に円筒容器試験体に鋼球を充填する前後で得られた周方向歪値の変化を示す。補強によって内容物によって生じる周方向歪は減少していることが確認できるとともに、無補強を含め理論値とも一致している。

図10, 11に振動試験から得られた軸方向歪分布を示す。補強繊維による拘束効果によって、歪の低減効果は最大で50%程度となり有意な効果が確認できた。またその効果は複合則・積層理論を用いた理論式によって推定可能であることを明らかとした。

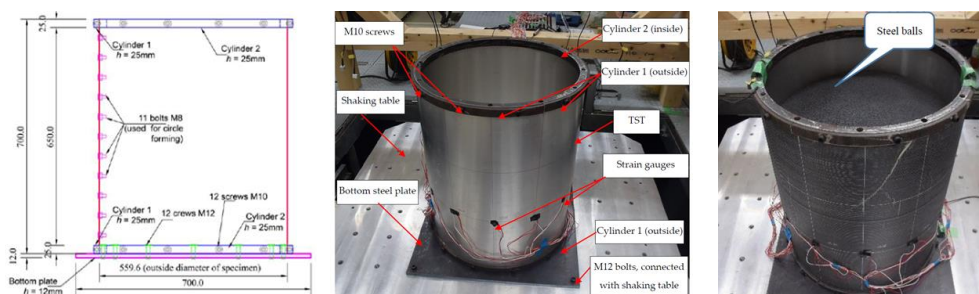
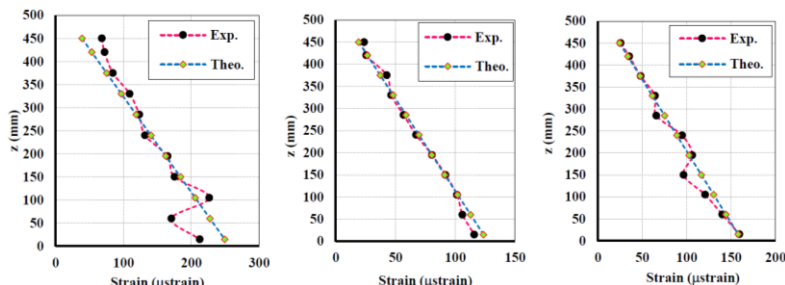


図8 振動試験体セットアップ

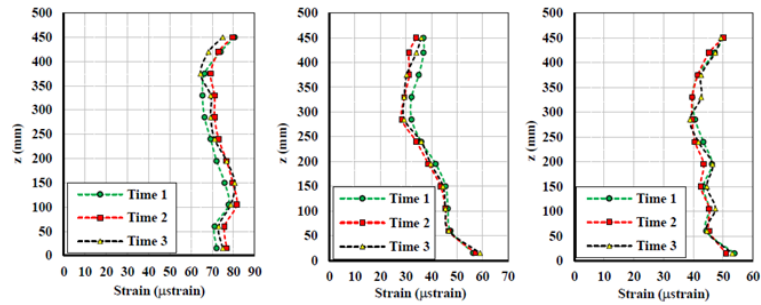


(a) 無補強

(b) 周方向補強

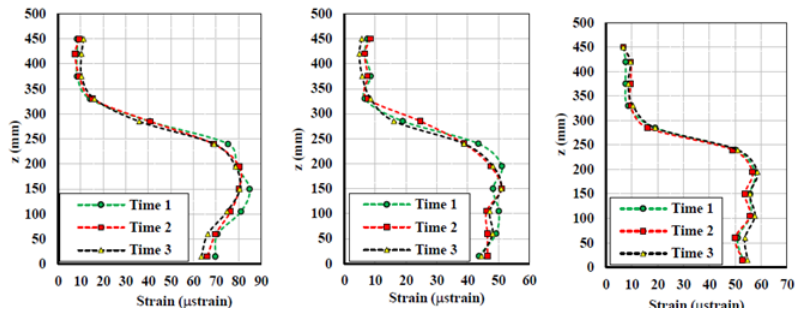
(c) 二方向補強

図9 周方向歪分布(静的試験による結果)



(a) 無補強 (b) 周方向補強 (c) 二方向補強

図 11 周方向歪分布 (鋼球高さ 530mm, 振動試験結果)



(a) 無補強 (b) 周方向補強 (c) 二方向補強

図 12 周方向歪分布 (鋼球高さ 265mm, 振動試験結果)

以上より、軸圧縮・剪断試験による繊維強化樹脂の補強効果の実証と解析による高精度シミュレーション方法の構築を明らかにすることができた。また、動的試験により内容物の動的挙動を含めた容器構造に対する繊維強化樹脂の補強法とその効果を示すことができた。

#### <引用文献>

- 1) 日本建築学会：容器構造設計指針・同解説 第4版，丸善出版，2010
- 2) 日本複合材料学会：新版 複合材料・技術総覧，2011
- 3) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針（案），2002
- 4) Nhut Viet PHAN, Yukihiro MATSUMOTO, Takahiro MATSUI, Hitoshi NAKAMURA: Strengthening effects of circumferential CFRP layers for thin-walled steel cylinders under axial compression, 日本鋼構造協会 鋼構造論文集, 第26巻第103号, pp.15-29, 2019.9.
- 5) Phan Viet Nhut and Yukihiro Matsumoto: Experimental analytical and theoretical investigations of CFRP strengthened thin-walled steel plates under shear loads, Thin-walled structures, 2020 (accepted)
- 6) Nhut Phan Viet, Yukio Kitano, and Yukihiro Matsumoto: Experimental Investigations of Strengthening Effects of CFRP for Thin-walled Storage Tanks under Dynamic Loads, Applied Sciences, Volume 10, issue 7, 22 pages, 2020.4.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nhut Viet PHAN, Yukihiro MATSUMOTO, Takahiro MATSUI, Hitoshi NAKAMURA	4. 巻 26
2. 論文標題 Strengthening effects of circumferential CFRP layers for thin-walled steel cylinders under axial compression	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 15-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Phan Viet Nhut, Kitano Yukio, Matsumoto Yukihiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Experimental Investigations of the Strengthening Effects of CFRP for Thin-Walled Storage Tanks under Dynamic Loads	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2521 ~ 2521
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app10072521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Phan Viet Nhut and Yukihiro MATSUMOTO
2. 発表標題 THE EFFECTS OF THE ANGLE OF CARBON FIBER FOR THE STRENGTHENING OF STEEL STORAGE TANKS UNDER BENDING SHEAR LOAD
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Phan Viet Nhut and Yukihiro Matsumoto
2. 発表標題 Effects of Carbon Fiber Reinforced Polymer Strengthening on Cylindrical Steel Storage Tanks under Bending Shear Load
3. 学会等名 International Conference on Building Materials and Construction（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

松本幸大研究室のホームページ  
<http://sel.ace.tut.ac.jp/y-matsum/ReaD&Researchmap>  
<https://researchmap.jp/read0145091/>  
ORCID  
<https://orcid.org/0000-0002-5935-6576>  
publons  
<https://publons.com/researcher/2972471/yukihiro-matsumoto/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----