

## 面外方向の水圧を受ける鋼製タンクの炭素繊維シート接着補強に関する実験的検討

首都大学東京 正会員○中村一史 首都大学東京大学院\* 学生員 中村俊太  
 東レ 正会員 松井孝洋 豊橋技術科学大学 正会員 松本幸大  
 電力中央研究所 正会員 松浦真一 電源開発 遠藤良裕

### 1. はじめに

燃料や淡水など、多様な液体の貯蔵のために、円筒形の鋼製タンクが利用されている。これらは薄肉の大型鋼構造物であり、東北地方太平洋沖地震や新潟県中越沖地震など、近年、発生した大規模地震において、鋼製タンクの座屈損傷が報告されている。これらの動的な作用の特徴は、タンク内部に貯蔵された液体が地震動によって慣性力を受け、動液圧として円筒容器の側壁に繰返し作用する点にある。地震活動期に入った現在、これらの鋼製タンクの耐震対策が急務となっている<sup>1)</sup>。そこで本研究では、簡便で合理的な鋼製タンクの耐震補強の開発を目的として、炭素繊維シート接着による補強効果を実験的、解析的に検討した。

### 2. 貯水タンクのモデル化と実大部分模型モデルの設計と製作

図-1 に、対象とした貯水用途の薄肉円筒鋼製タンクを示す。この鋼製タンクに関する先行研究によって、基準地震動  $S_g$  に基づく弾塑性時刻歴応答解析が行われ、地震動によって鋼製タンクの側板に生じる動水圧と鉛直荷重が算出されている。本研究では、縮小模型へのモデル化を解析的に検討するとともに、载荷実験のための試験体の設計を行った。図-2 に、実験による部分模型を示す。貯水タンクの側板を部分的に取り出してモデル化した。2枚の側板 (SM400, 750mm×750mm×9mm) を4枚のフランジを取り付けて囲い、密閉構造とした。鋼製タンクの側板では、面外方向の水圧の作用によって周方向の膜応力が支配的となる。

### 3. 検討条件と解析方法

側板に作用する荷重は、地震時の慣性力によって生じる鉛直方向力と水圧 (静水圧を含む) の2種類である。ここでは、炭素繊維シート接着による補強効果を検討するために、動的な繰返しによる作用は考慮せず、水圧を漸増することとした。表-1 に、荷重条件と検討ケースを示す。2種類の荷重と補強の有無を組み合わせ、4ケースを検討した。表-2 に、材料特性を示す。炭素繊維シートは、既往の研究<sup>1)</sup>から中弾性タイプを選定し、実構造への適用を想定して、2層とした。

水圧の载荷には、1ストロークで約1.0Pa 加圧できる水圧ポンプ (最大水圧: 10MPa) を、また、鉛直荷重の载荷には、容量 2,000kN の油圧ジャッキを用いた。Case1 では、水圧のみを漸増させ、Case2 では、試験体に一定の鉛直方向の応力 10MPa を一定に保持した状態で、水圧を漸増させた。载荷は、試験体の過大な変位や炭素繊維シートのはく離・破断が生じるまで行った。図-3 に、セットアップの状況を示す。

解析では、側板についてはソリッド要素を、また、炭素繊維シートについては繊維方向を軸方向としたトラス要素でモデル化した。要素の寸法は、幅 5mm×長さ 5mm×厚さ 4.3mm とし、側板は厚さ方向に2分割とした。数値解析には、汎用有限要素解析プログラム Marc2013 による弧長増分法を適用し、鋼材の構成則は、材料試験に基づいて、トリリニア型でモデル化した。解析では、炭素繊維シートのはく離や破壊を考慮していない。

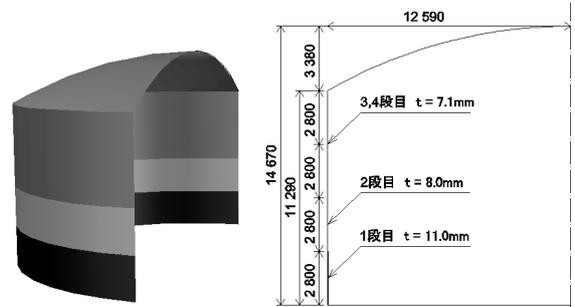


図-1 対象とした貯水タンク (1/2 対称図)

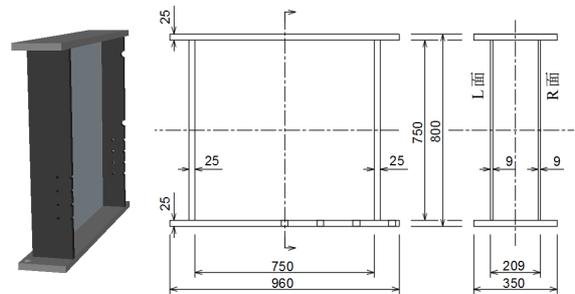


図-2 実験による部分模型 (1/2 対称図)

表-1 荷重条件と検討ケース

荷重ケース	Case1		Case2	
モデル名	N-P	ME-P	N-PF	ME-PF
荷重	水圧	○	○	○
	鉛直		○	○
補強		○		○

表-2 材料特性

材料	鋼材 (SM400)	炭素繊維シート (UM46-30G)
厚さ	(mm) 8.6	0.163
弾性係数	(GPa) 209	452
ポアソン比	0.29	0.34
降伏強度	(MPa) 326	-
引張強度	(MPa) 454	3572

**Key Words** : 鋼製タンク, 耐震補強, 動水圧, 膜応力, 炭素繊維シート

連絡先: 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564) ※研究当時

4. 検討結果と考察

図-4に、水圧と試験体中央部の面外方向変位の関係を示す。補強によって荷重の Case1, 2 ともに、面外変位が低減されるものの、変位の低減効果は小さい。これは、側板の4辺に大きな曲げモーメントによって塑性化し、それによる剛体変位が大きかったためである。

図-5, 図-6, 表-3 に、試験体中央部における周方向の膜ひずみに着目した挙動を示す。荷重の Case1, 2 において有意な差異はみられなかった。これは、鉛直荷重に比べて水圧の影響が大きいことによる。図-6 より、弾性域では、炭素繊維シート接着による膜ひずみの低減がみられ、その効果は水圧の増加とともに小さくなる。図-6 より、降伏後では、補強によって膜ひずみが小さくなり、その低減率は水圧とともに増加する。なお、解析結果を併記しているが、溶接による残留応力や初期たわみが考慮されていないことなどから、実験値と解析値に差異があるものの、補強の有無による挙動はほぼ一致しており、解析による評価は妥当であるといえた。なお、鋼製タンクでは、周方向の応力は一様であり、局所的な曲げモーメントは生じないため、炭素繊維シートははく離することなく、より高い水圧にも耐えられると考えられる。

図-7 に、Case1 における炭素繊維シートのはく離状況を示す。Case1 では、面外変位が最大となる試験体中央の端部からはく離が生じた。Case2 では、Case1 よりも上側に近い位置ではく離が生じた。これは、鉛直荷重による上フランジの変形によるものと考えられた。はく離は、側板端部の曲げモーメントによって生じ、破壊面の状況から接着剤の凝集破壊であった。なお、炭素繊維シートは、はく離する前から繊維を束ねている横糸が段階的に破壊したが、図-6 より、横糸の破壊の影響はなく、はく離後に効果が失われることがわかる。

5. まとめ

実大部分模型の載荷実験では、境界条件の影響が大きく、炭素繊維シート接着によって、有意な面外変位の低減効果は得られなかったが、降伏後に周方向膜ひずみを著しく低減させる効果があることが確かめられた。したがって、薄肉円筒形鋼製タンクの炭素繊維シート接着による補強は、水圧によって生じる周方向の膜ひずみの抑制に効果的であるといえた。

参考文献

- 1) 松井孝洋, 松本幸大, 中村一史, 松浦真一, 遠藤良裕: 薄肉鋼管の圧縮特性に対する CFRP 補強効果について, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, pp.205-206, 2014.9

表-3 炭素繊維シートのはく離直前における周方向膜ひずみの比較

(a) 水圧 2.34MPa における Case1 の結果

実験/解析	実験		解析	
	N-P	ME-P	N-P	ME-P
モデル名				
ひずみ	(×10 <sup>-6</sup> )			
ひずみの差	(×10 <sup>-6</sup> )			
低減効果	(%)			

(b) 水圧 1.48MPa における Case2 の結果

実験/解析	実験		解析	
	N-PF	ME-PF	N-PF	ME-PF
モデル名				
ひずみ	(×10 <sup>-6</sup> )			
ひずみの差	(×10 <sup>-6</sup> )			
低減効果	(%)			

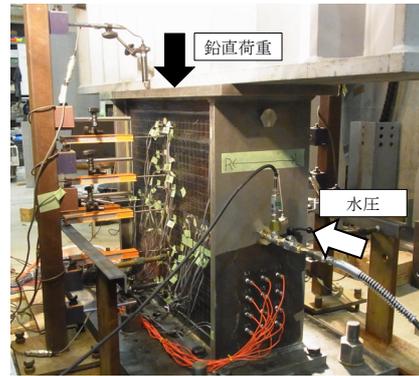


図-3 Case2 におけるセットアップの状況

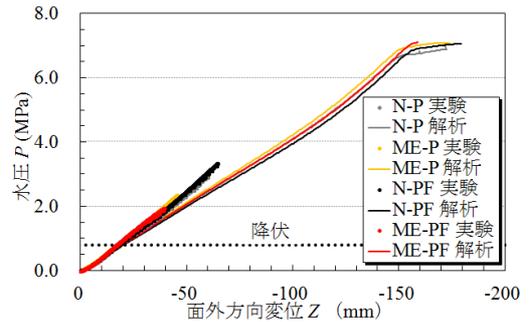


図-4 水圧と面外方向変位の関係

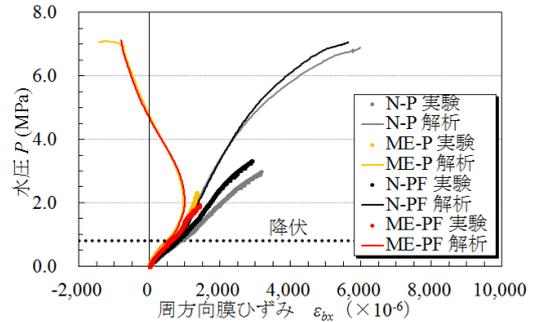


図-5 水圧と周方向膜ひずみの関係

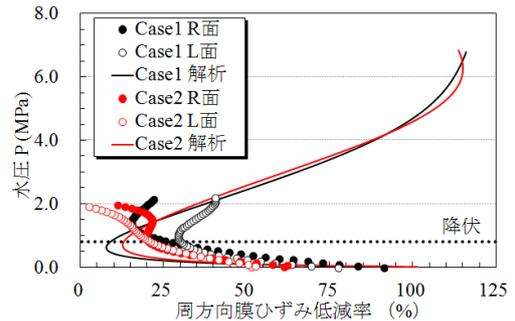
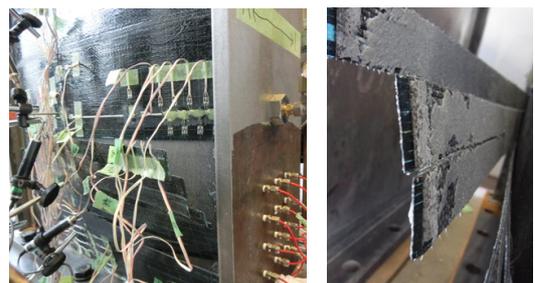


図-6 水圧と周方向膜ひずみの低減率の関係



(a) 全体図 (b) 拡大図

図-7 Case1 における炭素繊維シートのはく離状況