

タンク隅角部の浮き上がり挙動に関する簡便な評価方法の検討

タンク審査部

この度、危険物保安技術協会（以下、「協会」といいます。）では、屋外貯蔵タンクの隅角部（側板と底板の接合部）の浮き上がり挙動を定式化して解析的に評価する方法を検討するとともに、得られた知見を「地震時のタンク底板浮き上がり挙動への弾塑性関節法の適用（第1報～第5報）」^{1)~5)}として論文にまとめました。これらの論文は、日本高圧力技術協会の発行する「圧力技術」に査読付き論文として掲載されています。本稿では、この評価方法の概要について紹介いたします。

1. 背景

令和元年8月27日に危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令が公布され、これまで水張試験が必要とされていたタンク底部の溶接線補修について、一定の要件を満たしていれば、水張試験を省略できることとなりました。水張試験は、消防法第11条の2に基づく完成検査前検査の一環として、工事後のタンクに水を張ることにより、応力を加えて漏れ及び変形の有無を確認するとともに、基礎・地盤の不等沈下を確認するものであり、実際の使用環境を模してタンクの健全性を包括的に評価するものです。

この改正による水張試験省略の要件としては、①タンクの本体及び基礎に構造上の影響を与える有害な変形がないこと、②タンクを危険物で満たした場合の応力の影響により溶接部がぜい性破壊を起こすおそれがないこと、③溶接部の補修工事が適切な方法で行われていることをチェックして、タンク本体及び基礎に漏れ及び変形のおそれがないことを確認することが示されています。この要件②の一環として、隅角部の浮き上がり挙動に対する評価が挙げられています。

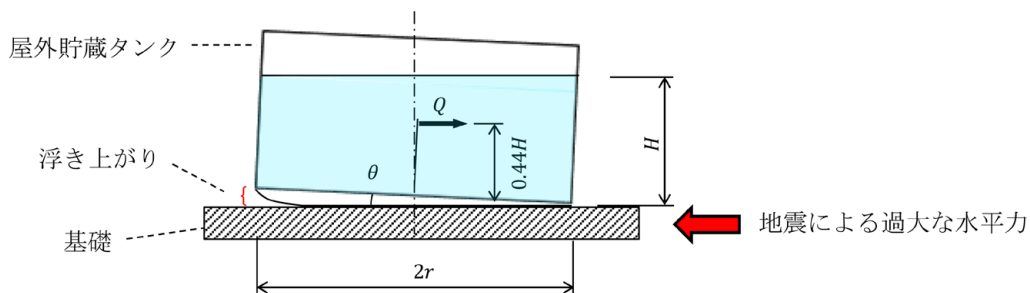


図1 地震時のタンク隅角部の浮き上がり挙動

平底円筒形の屋外貯蔵タンクは、通常、基礎に固定されずに存置されていることから、地震による過大な水平力を受けると、タンクの隅角部が浮き上がることがあり（図1）、破損や漏えいの原因となります。このため、隅角部の浮き上がり挙動に関しては、傾斜実験やFEM解析、梁モデルの提案など、過去に多くの研究がなされてきています。

協会では、上述の省令改正を踏まえ、水張試験の合理化に係る技術援助を行っています。これに当たり、FEM解析による結果をもとに、隅角部の評価を行っているところですが、FEM解析では単純化した軸対称変形モデルを用いたとしても、入力や計算に多くの時間と労力が必要となり、短時間で解析結果が見通せないという課題がありました。

そこで、骨組構造の対象物に用いられている弾塑性関節法^{6)~8)}を地震時のタンク隅角部の浮き上がり挙動に適用し、耐震設計の観点から重要なパラメータであるタンク隅角部底板の歪み履歴を定式化することで、より短時間で解析的に評価する方法を検討いたしました。

2. 検討の概要

本法で採用した弾塑性関節法は、部材自体は弾性挙動を仮定し、塑性化に伴う部材の角変形を部材端の接合点における折れ角に集約するというもので、極限解析における塑性関節法と違い、材料の加工硬化特性を反映した崩壊荷重の決定のみならず、崩壊に至るまでの部材の変形、断面力、更には接合点の応力と歪みを追跡できる利点を有しています。

本検討においては、弾塑性関節法をタンク隅角部に適用する場合の基礎方程式の定式化（第1報）を行った上、補正する項目を順次追加（第2報～第5報）して精度向上を図りました（表1）。

表1 解析条件の比較

	第1報	第2報	第3報	第4報	第5報
解析モデル	○降伏比が80%以上の高張力鋼 (SPV490Q) ○塑性関節1か所		○降伏比が80%未満の中強度鋼 (SM490C) ○第2塑性関節を考慮		○低強度～高張力鋼 ○第2塑性関節を考慮 ○大撓みを考慮
側板	○剛壁	○弾性壁	○剛壁	○弾性壁	
M~φ関係	○関係式II（直線近似）			○関係式I	

(1) 基礎方程式の定式化と検証（第1報）

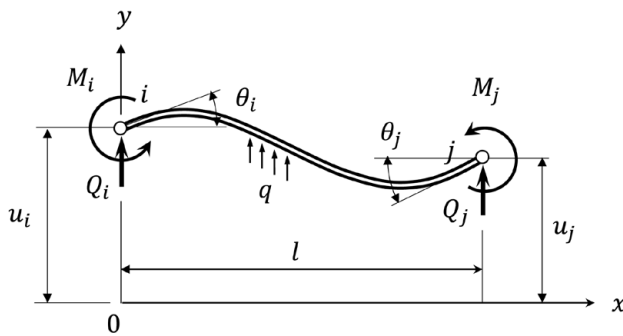


図2 梁にかかる力と座標軸

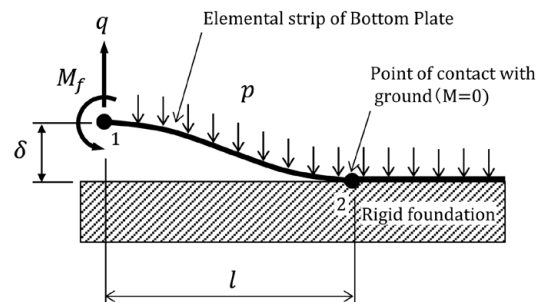


図3 浮き上がり底板

基礎方程式の定式化にあたり（図2、図3）、第1報では、降伏比が80%以上となる高張力鋼（SPV490Q）のタンクを対象として、底板を単位幅の梁、側板は剛で液圧による弾性変形を考慮せず、鉛直を保つものと仮定しました。また、浮き上がりの終局変位は、底板端部のモーメントがアニュラ板の引張強度を用いた全塑性モーメントに達したときに破断が生じるものと仮定しました。

さらに、矩形の断面を有する梁の曲げモーメントと曲率の関係については、加工硬化の影響を考慮して初期降伏時のモーメントと曲率を用いた関係式Iと、関係式Iを二つの直線で近似した全断面降伏時のモーメントと曲率を用いた関係式IIが示されていますが、第1報～第3報では関係式IIを、第4報および第5報では関係式Iを用いました（図4）。

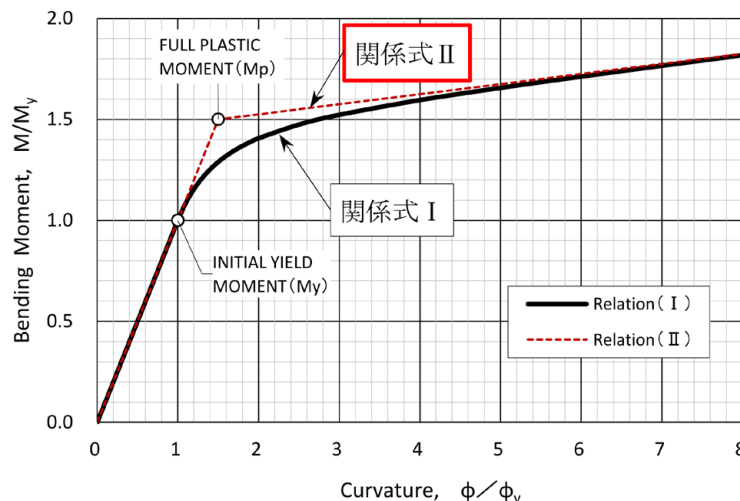


図4 曲げモーメントと曲率の関係

図5に、計算手順のフローを示します。

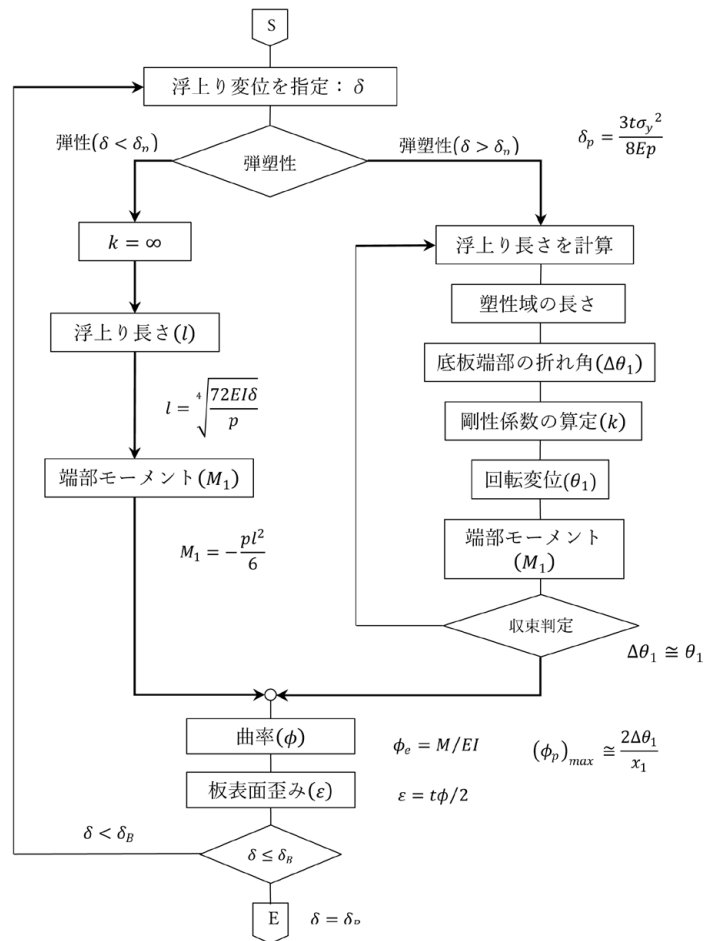


図5 計算手順フロー

検証では、容量32,000klの屋外貯蔵タンクを対象にして、本法とFEM非線形解析（軸対称解析）プログラムを使用して解析した結果を比較・検証しました。解析では、初期荷重として静液圧、側部自重を作用させ、その後、モデルの側板上端を変位制御し、接地状態から終局変位まで数サイクル繰り返しました。その結果、本法による材料の加工硬化特性を考慮した計算結果は、容器構造設計指針⁹⁾の計算結果と良い一致を示しました。また、タンク隅角部底板の曲げ歪みの履歴は、FEM解析結果（図6の止端部から0.5t離れた位置）と概ね良い一致を示しました（図7）。

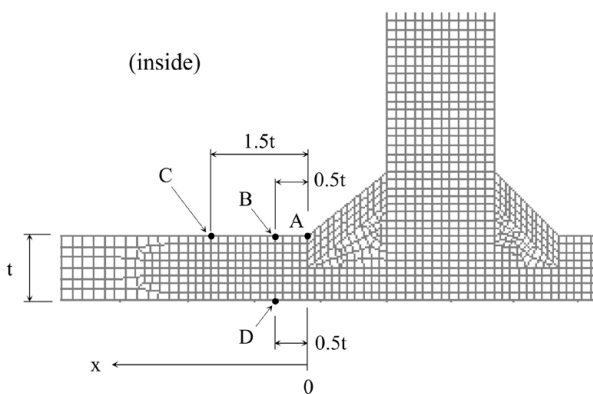


図6 隅角部の歪み評価位置

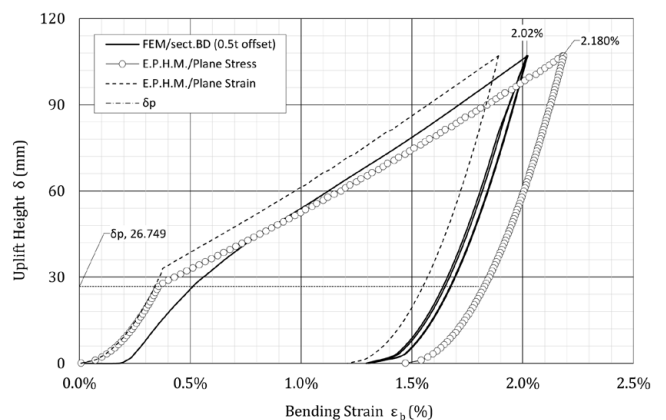


図7 底板の曲げ歪みの履歴の比較

(2) 側板の弾性変形を考慮した平面歪み解析 (第2報)

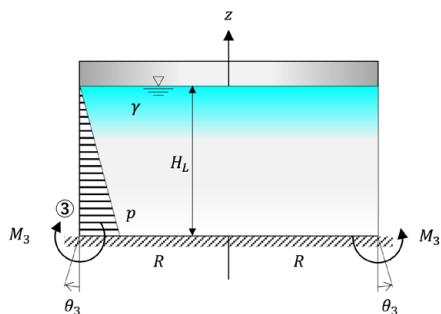


図8 液圧を受ける円筒タンク

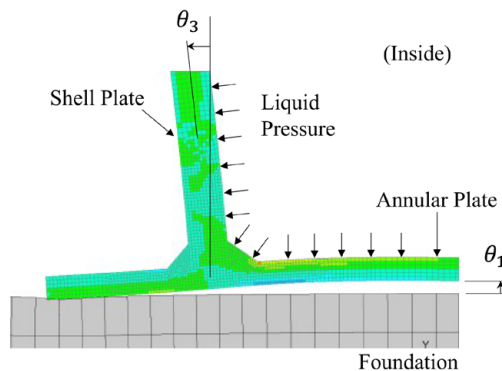


図9 液圧による隅角部の初期変形

第2報では、第1報では考慮していない液圧による側板の弾性変形を考慮し、液圧による初期歪みを評価した基礎方程式の定式化を行いました (図8)。

基礎が比較的剛である場合、液圧によって側板が膨らむと、それに伴って側板近傍のアニュラ板が浮き上がり、隅角部は直角を維持します (図9)。地震時にはアニュラ板が全断面降伏するまで直角を維持したまま浮き上がりを生じ、その後はアニュラ板の角変形が支配的となります。

検証では、第1報で検証した容量32,000klの高張力鋼製の屋外貯蔵タンクを対象にして、本法とFEM解析結果を比較・検証した結果、良い一致を示しました (図10)。

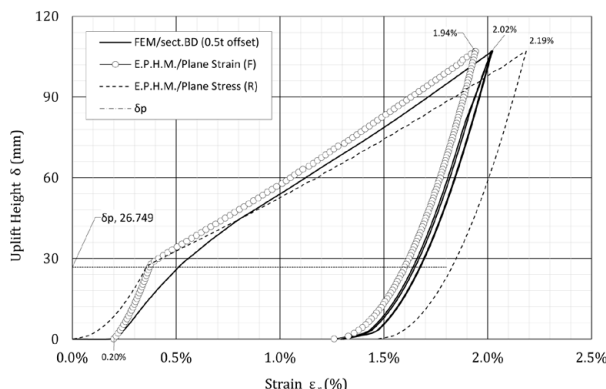


図10 隅角部底板の曲げ歪みの履歴の比較

(3) 第2塑性関節を考慮した平面歪み解析 (第3報)

低/中強度鋼製タンクの場合、底板の浮き上がり高さが大きくなると、浮き上がり部分の中央付近に塑性域が発生する場合があります。第3報では、降伏比が80%未満である中強度の鋼材SM490C製のタンクを対象に、側板は剛として液圧による弾性変形を考慮せず、この浮き上がり部に想定される第2塑性関節を考慮した基礎方程式の定式化を行い、平面歪み解析を行いました (図11)。

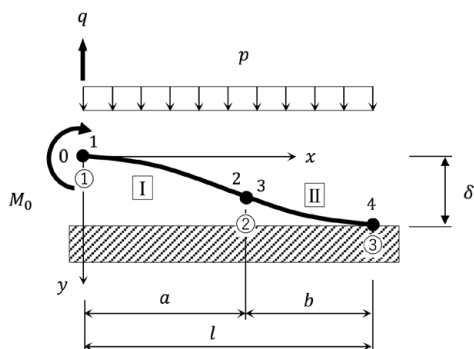


図11 第2塑性関節を有する底板浮き上がりモデル

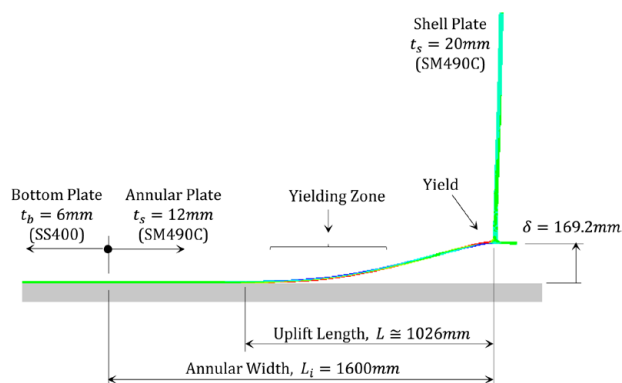


図12 底板浮き上がり時の隅角部の変形 ($\delta = \delta_B$)

容量18,200klタンクを代表例として解析した結果、本法によるタンク隅角部底板の曲げ歪みは、浮き上がり高さが小さい範囲では図12のFEM解析結果と概ね良い一致を示しましたが、浮き上がり高さが大きくなると安全側の評価となるものの解析結果の差は広がりました(図13)。この理由としては、底板の浮き上がり部に生じる降伏帯の拡大と大撓みによる影響が推定されました。

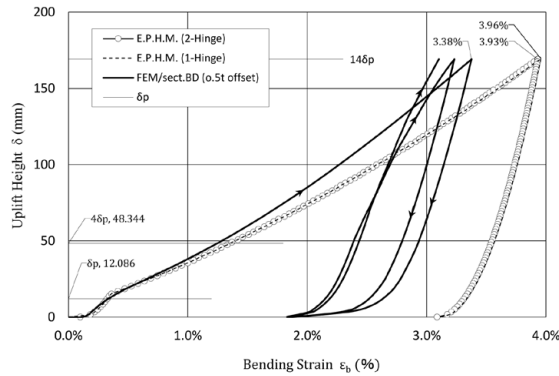


図13 隅角部底板の曲げ歪みの履歴比較

(4) 第2塑性関節を考慮した弾性壁タンクの歪み解析(第4報)

第3報では、中強度の鋼材SM490C製のタンクに剛壁を仮定して定式化を行いました。第4報では、弾性壁を仮定して定式化を行うとともに、曲げモーメントと曲率の関係についても、梁理論に基づく関係式Iを導入して精度の改善を図りました。

その結果、高張力鋼(SPV490Q)製のタンクでは、本法によるタンク隅角部底板の曲げ歪みは、液頭圧による初期曲げ歪みを含め、負荷及び除荷の全過程でFEM解析結果と良い一致を示しました(図14)。

一方、中強度鋼(SM490C)製のタンクでは、浮き上がり高さが小さい範囲ではFEM解析結果と概ね良い一致を示しましたが、浮き上がり高さが大きくなると差が広がり、最終的に、本法による曲げ歪みはFEM解析結果より概ね14%程度大きな値を示し、本法は安全側の評価を与える結果となりました(図15)。また、計22基のタンクを解析した結果、低/中強度鋼製タンクを除き、本法による最大曲げ歪みはFEM解析結果に比べて概ね±7%程度の範囲内に収まる結果となりました(図16)。

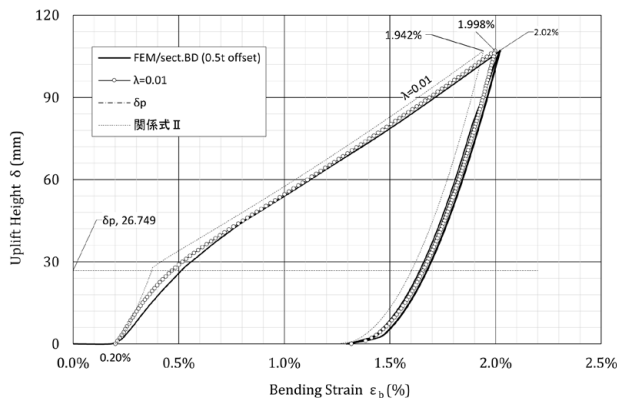


図14 隅角部底板の曲げ歪みの履歴比較
(32,000kl/SPV490Q)

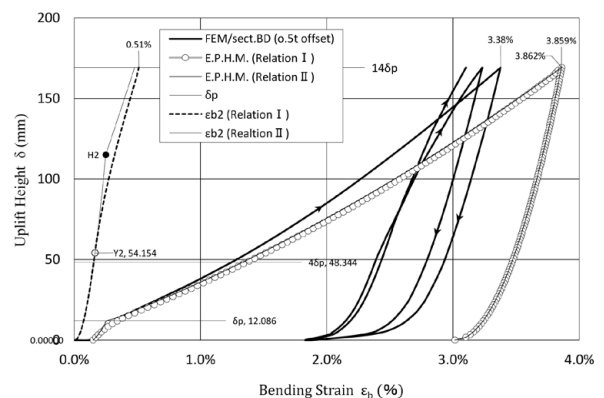


図15 隅角部底板の曲げ歪みの履歴比較
(18,200kl/SM490C)

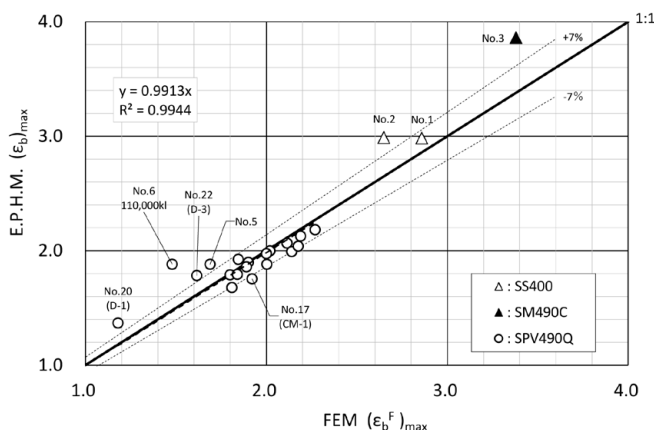


図16 FEMと本法の結果比較

(5) 浮き上がり部底板の大撓みの影響評価 (第5報)

第5報では、浮き上がり部の底板に生じる大撓みについて、帯板の有限変形理論に基づいた膜力の影響を評価し、精度の改善を図りました(表1)。

その結果、低/中強度鋼製タンクを解析した結果、本法による最大曲げ歪みは、FEM解析結果の概ね3%程度まで精度が改善されました(図17)。

一方、高張力鋼製タンクでは、底板浮き上がり高さが比較的小さいことから大撓みの影響による曲げ歪みの低減幅は小さくなりました。また、計22基のタンクを解析した結果、本法による補正後の曲げ歪みは、FEM解析結果と概ね良い一致を示しました(図18)。

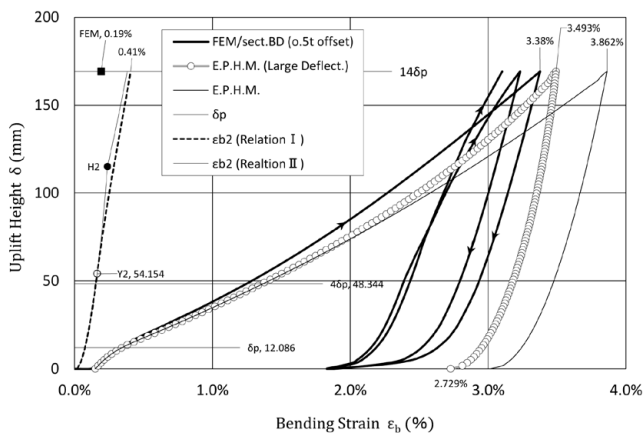


図17 隅角部底板の曲げ歪みの履歴比較
(No.3/SM490C)

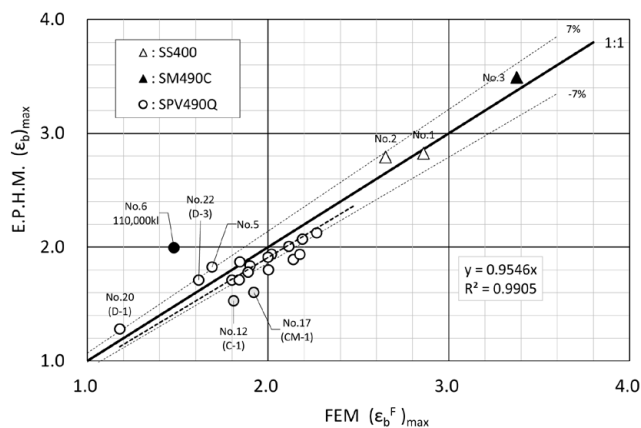


図18 FEMと本法(大撓み考慮)の結果比較

3. おわりに

本検討の成果として、地震時の隅角部の浮き上がり挙動を短時間で効率良く評価することが可能となりました。

協会では、屋外貯蔵タンクの水張試験の合理化の評価に係る技術援助を実施するにあたり、今までFEMによる解析結果を用いていましたが、今後は本法も活用し、より短時間で効率の良い評価を実施したいと考えています。また、皆様方に置かれましても、屋外貯蔵タンクの健全性の確認や保安の確保等に本法をご活用いただければ幸いです。

参考文献

- 1) 山内芳彦,清野昇亨,青木淳,宮内孝:“地震時のタンク底板浮き上がり挙動への弾塑性関節法の適用(第1報)”,圧力技術,Vol.59,No.4,pp.2-14,2021
- 2) 山内芳彦,清野昇亨,青木淳,宮内孝:“地震時のタンク底板浮き上がり挙動への弾塑性関節法の適用(第2報)”,圧力技術,Vol.59,No.4,pp.15-27,2021
- 3) 山内芳彦,清野昇亨,青木淳,宮内孝:“地震時のタンク底板浮き上がり挙動への弾塑性関節法の適用(第3報)”,圧力技術,Vol.60,No.2,2022
- 4) 山内芳彦,清野昇亨,青木淳,宮内孝:“地震時のタンク底板浮き上がり挙動への弾塑性関節法の適用(第4報)”,圧力技術,Vol.60,No.4,2022
- 5) 山内芳彦,清野昇亨,青木淳,宮内孝:“地震時のタンク底板浮き上がり挙動への弾塑性関節法の適用(第5報)”,圧力技術掲載予定
- 6) 栖原二郎,永野裕康:“材料の加工硬化特性を考慮した骨組構造物の弾塑性解析”,西部造船会々報,第40号,昭和45年
- 7) 栖原二郎,永野裕康:“弾塑性関節法による桁骨組構造の強度解析法”,西部造船会々報,第54号,昭和52年
- 8) 栖原二郎,永野裕康:“補足エネルギーによる鋼骨組構造の弾塑性解析法”,西部造船会々報,第62号,昭和56年
- 9) 日本建築学会:“容器構造設計指針・同解説”,2001年