耐震診断における線形解析と非線形解析の適用についての考察

㈱東京設計事務所　　苗村信弘

本稿は、既存円筒形サージタンクを対象に、線形解析と非線形解析を行い、解析結果、耐震性の判定項目等の比較を行い、両手法の適用について検討したので報告する。

本耐震診断による、線形解析と非線形解析の結果の差はわずかであった。このため、本耐震診断において対象とした安定した構造形状の施設では、線形解析を採用し効率的に解析を行うことも有効であると考える。一方、より詳細な耐震性能を把握する場合等では非線形解を採用する必要がある。これらのことから、耐震診断の解析手法は、診断の目的や対象施設の形状等を考慮し、選定することが肝要であると考える。

Key Words　：　耐震診断、線形解析、非線形解析

１．はじめに

阪神淡路大震災等の被害状況等を踏まえ、水道施設の耐震基準が大きく改訂された。このため、これ以前に建設された水道施設は、施設が必要な耐震性能を保持できているか否か判定を行う耐震診断が多く実施されている。この耐震診断は、用いる解析手法、材料モデル、構造解析モデルによって判定結果が異なることがある。本稿は、既存円筒形サージタンクのＰＣ造とＲＣ造を対象に、線形解析と非線形解析を行い、解析結果、耐震性の判定項目、解析作業量、解析方法等について比較を行い、線形解析と非線形解析の適用について報告するものである。

２．解析方法の特徴

耐震診断における耐震計算手法としては線形解析と非線形解析がある。鉄筋コンクリート部材の線形、非線形の範囲の荷重～変位の関係は図１のとおりである。線形解析は部材に働く荷重と発生する応力が線形の関係にあるのに対して、非線形解析は部材や材料の非線形特性を評価できるため、対象施設の地震による影響がより正確に解るメリットがある。しかし、非線形解析は線形解析に比べてモデル作成等の作業量が多く、解析費用が高価となる。

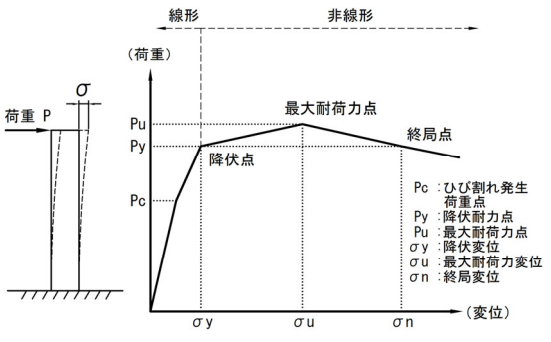

図１ 鉄筋コンクリートの荷重-変位曲線

３．施設概要および解析内容

耐震診断を行った対象施設はＰＣ造、ＲＣ造の円筒形サージタンクである。耐震計算手法は、静的解析であり、解析モデルは３次元ＦＥＭ（有限要素法）よる線形解析と非線形解析である。計算は、震度法による耐震計算を行い、許容応力度法、限界状態設計法による照査にて耐震性能を確認した。また、非線形解析（プッシュオーバー解析）による降伏点、最大耐荷力点の確認を行った。施設概要および解析内容は表１、図２、図３のとおりである。

表１ 施設概要および解析内容

項目		内容	
施設概要	対象施設	サージタンク	
	形状	円筒形	
	材質構造	ＰＣ造	ＲＣ造
	有効容量	300m^3	40m^3
解析内容	耐震計算法	静的線形解析および 静的非線形解析 （プッシュオーバー解析）	
	構造モデル	３次元ＦＥＭ（有限要素法）	

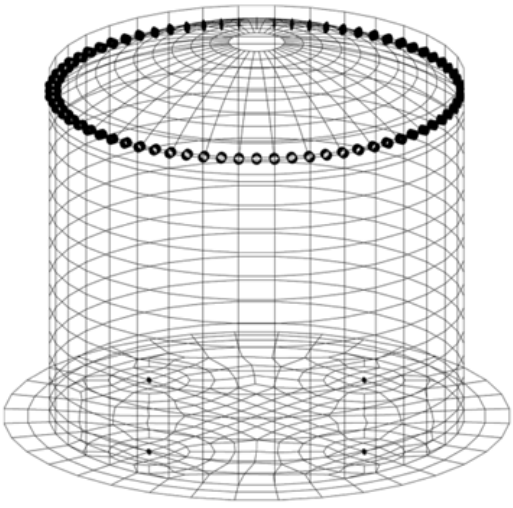

図２ ｻｰｼﾞﾀﾝｸ PC 造 3 次元 FEM モデル

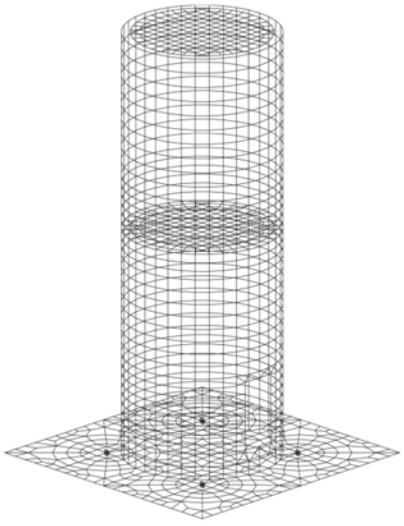

図３ ｻｰｼﾞﾀﾝｸ RC 造 3 次元 FEM モデル

４．解析結果の比較

（１）ＰＣ造

ＰＣ造のサージタンクの解析結果を図４、図５に示す。図４は線形解析と非線形解析の水平震度と相対変位量（底版芯と頂版芯）の関係を示し、点線は線形解析、実線は非線形解析の結果を表す。耐震照査の結果は、レベル 1、2 地震動に対して許容応力度法、限界状態設計法による照査を行い、耐震性能を有していることを確認した。図４のグラフにある降伏点以降の線形解析と非線形解析の変位量の差は 10%未満であり、解析手法による結果の差はわずかであることが解った。また、プッシュオーバー解析によりＰＣ造の降伏点となる水平震度は 0.7、最大耐荷力点の水平震度は 1.7 であることが確認された（水平震度 0.7 程度でコンクリートのひび割れが生じ、1.7 で漏水を伴うひび割れが生じる）。

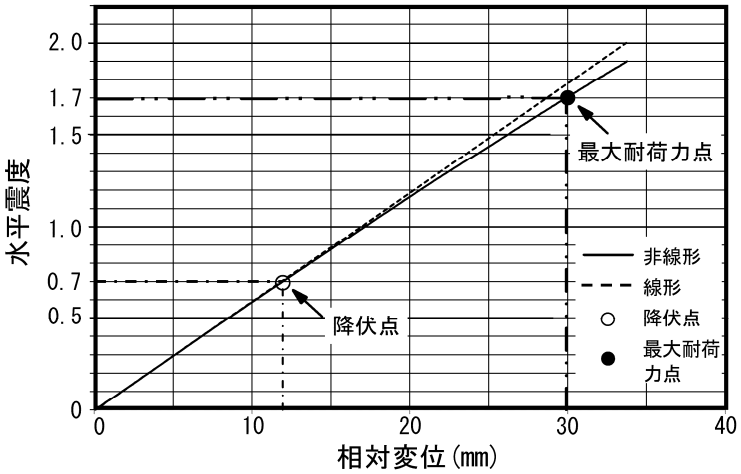

図４　ＰＣ造 設計水平震度-相対変位関係図

図５は、非線形解析による層間傾斜角 1/200 の状態のひび割れひずみの解析結果であり、その度合いを色別で示す。タンク床版付近にわずかであるが、ひび割れひずみが発生しているのが判る。

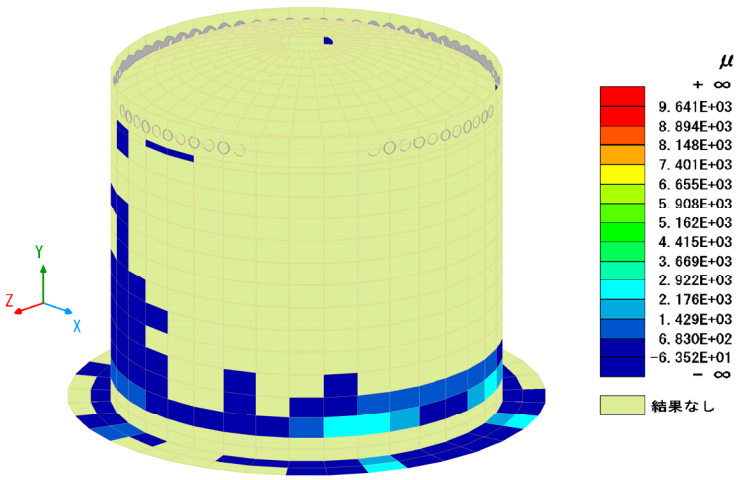

図５　ＰＣ造 ひび割れひずみ概要図

（2）ＲＣ造

ＲＣ造のサージタンクの解析結果を図６、図７に示す。耐震照査の結果はレベル 1、2 地震動に対して許容応力度法、限界状態設計法による照査を行い、耐震性能を有していることを確認した。図６のグラフにある降伏点以降の線形解析と非線形解析の変位量の差は５％未満であり、解析手法による結果の差はわずかであることが解った。また、プッシュオーバー解析によりＰＣ造の降伏点となる水平震度は 0.5、最大耐荷力点の水平震度は 1.1 であることが確認された。

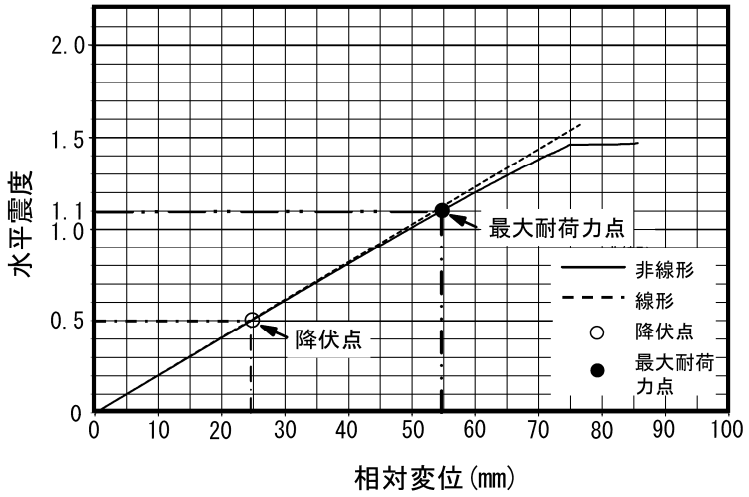

図６　ＲＣ造 設計水平震度-相対変位関係図

図７のＲＣ造のひび割れひずみ解析結果は、側壁下部は手前の下端に開口部があり、上部は貯水槽、中間に床版がある構造で、側面下部と上部の間の床版付近にひび割れひずみが大きく発生しているのが判る。

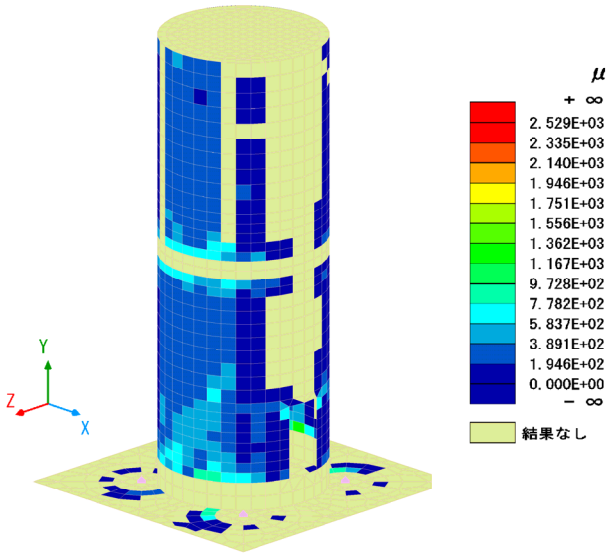

図７　ＲＣ造 ひび割れひずみ概要図

５．耐震性の判定項目の比較

線形解析と非線形解析の耐震性の判定項目を表 2 に示す。表 2 より、非線形解析は、線形解析に対し部材の応力歪み曲線の特性を考慮することにより、変位量やひび割れ量は、現実に近い値を求めることができる。また、地震後に残留するひび割れ量は、残留歪み、残留変位量が解ることにより求めることができ、これにより構造物の水密性の判定を行うことができる。さらに、円周方向応答歪み、塑性率も現実に近い値を得ることができる。これらの項目は線形解析では算出ができない、あるいは判定するための十分な結果が得られないことから、非線形解析は線形解析に比べ耐震性をより詳細に判定することができる。

表２ 耐震性の判定項目の比較

判定項目	判定内容	線形解析	非線形解析
発生断面力（応力）	部材性能	○	○
断面耐力	部材性能	○	○
変位量	水密性能	△	○
ひび割れ量	水密性能	△	○
地震後に残留する ひび割れ量	水密性能	×	○
円周方向応答歪み	部材性能	△	○
塑性率（Cs）	構造性能	×	○

○：解析可能　×：解析不可　△：別の算定式等で解析可能

６．解析作業量等の比較

本耐震診断における線形解析と非線形解析の解析作業量等についてまとめたものを表 3 に示す。

表３　線形解析と非線形解析の解析作業量等の比較

項目	作業内容 （非線形解析の追加作業項目を表示）	作業量の比率 （線形解析の作業量を１とする）
FEM 解析モデル作成	・非線形特性等の入力	1：2～3
解析計算	・解析値の収束誤差判定の計算	1：2～4
解析結果の分析	・損傷レベル,変位量,歪み量の抽出	1：2～3

表３より、非線形解析は線形解析に比べてＦＥM解析モデル作成、解析計算、解析結果の分析すべてで作業量が多くなる。これは、ＦＥM解析モデル作成について、非線形解析では部材や材料の非線形特性等の入力が必要であり、さらに構造モデルが３次元ＦＥＭ（有限要素法）では、２次元解析モデルに比べ立体モデルへの各要素の入力データがより多くなる。解析計算については、非線形解析では解析値の収束誤差判定の繰り返し計算（繰り

返し計算は 1 ケース 600 回程度 6 ケース実施）が必要である。解析結果の分析については、非線形解析ではプッシュオーバー解析による降伏点、最大耐荷力点の損傷レベルの確認、照査のための変位量、歪み算出などの作業が増えるためである。これらは、本診断施設に限らず他の種類の構造物の診断においても、非線形解析における作業量の増加は同様であると考える。

７．解析方法の比較

本耐震診断の非線形解析では、荷重（設計水平震度）から変位の関係は、降伏点以降も荷重に対する変位の比率が増大することはなく、線形解析との差はわずかであった。これは今回の対象施設の形状が小型円筒形であり、荷重を構造形状全体で分担できる構造であることが解析結果に反映されたと考える。このため、サージタンクのような小型円筒形構造物を対象とした耐震診断の解析手法は、線形解析を採用し効率的に行うことも有効であると考える。一方、非線形解析は、降伏点以降の荷重に対する変位の比率が増大することが想定される大型構造や矩形構造の場合、多くの判定結果が得られるため、より詳細に耐震性能を把握したい場合は、非線形解析を採用ことが適切である。

８．おわりに

耐震計算にあたって「水道施設耐震工法指針・解説 2009 （公社）日本水道協会」では、池状構造物（ＲＣ構造）の耐震性能２、３は、部材が降伏点を超過し変形量の大きな非線形領域に達することがあるため、これらの限界状態における耐震性能を照査する場合には、材料や部材の非線形特性を適切に評価できる解析モデル・手法を用いることを原則としている。また、静的解析により詳細に検討する場合は、プッシュオーバー解析等の静的非線形解析を行うことを原則としている。これらのことより、耐震性能２、３の照査は非線形解析によることが原則となる。非線形解析は、線形解析に比べ作業量が多い解析手法であるが、ひび割れや漏水が発生する震度が解り、より詳細な耐震性能が把握できる。また、耐震診断による耐震補強等の要否判定においても、実際に耐震補強が必要とされる部位や部材が適切に解り、耐震補強工事の費用を適正化できる利点がある。

これらのことから、線形解析と非線形解析の適用について、線形解析は、小型円筒形等の安定した構造形状の施設で、施設数が多く、効率的に作業を行いたい場合に有効であると考える。これに対し、非線形解析は、より詳細な耐震性能を把握したい場合や、耐震補強等の要否判定の精度を上げたい場合、また耐震補強量の最適化を図りたい場合に有効であると考える。今後、比較事例を増やして小型円筒構造物の適用範囲を検討していきたい。

【参考文献】

1)水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版、（公社）日本水道協会
2)水道施設の耐震設計入門～合理的な耐震設計を目指して～、（公社）日本水道協会