

容器構造物の解析技術

大村 一馬*

1. はじめに

容器構造物には多種多様なものがあり、内容物（上水、下水、危険物、粒状物、廃棄物など）、機能（貯蔵、配水、消化、遮蔽など）、設置場所（地上、地下、高架など）などにより分類することができる。主なものとしては、上水道、農業用水などの貯蔵や配水機能を有する貯水槽、穀物やセメントなどの粉体を貯蔵するサイロ、下水道施設の消化槽・処理槽、燃料や工業用原料としての液化ガスを貯蔵する低温タンク、原子炉格納容器などが挙げられる。

プレストレストコンクリート（以下、PCと略記）製の容器構造物は、円筒形の軸対称シェル構造が多い。これは、内容物による荷重作用とプレストレス力をバランスさせやすい構造であり、力学的に簡明で合理的な構造とも言える。

容器構造物の解析技術は、他の構造物同様、コンピュータの発達・普及により進歩してきている。また、1995年の兵庫県南部地震以降、各種耐震基準が見直され、PC容器としては1998年に（社）日本水道協会から発行された「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」（以下、PCタンク指針と略記）にそれらの知見等が取り入れられている。

容器構造物に限らず、複雑な構造物の断面力等を求める場合、近似解が明確なモデルへ部分的に置き換えて、簡易的に解く手法が従来から行われている。これに対し、近年はコンピュータの発達により複雑な構造物でも、有限要素法（FEM）などにより構造物あるいは地盤等を含めた全体系として解析することで、より実際に近い挙動を把握できるようになってきている。とくに、地震動のような非常に短い時間スケールの中で時々刻々と変化する動的な荷重を簡易的なモデルにいかに対応して置き換えるかが、これまでの解析技術に求められていたことである。兵庫県南部地震以降に耐震設計法がさまざまな分野で見直されてきているが、全般的な特徴としては、予測する地震動に対して構造物に求められている性能（安全性、機能性など）を満足する

かを照査する手法が取り入れられていることである。このような性能照査型の設計法は、今後耐震設計に限らず、設計全般に適用されることはほぼ確実であると考えられる。このような要求性能に対する照査方法は、既往の解析技術で対応可能な場合、研究レベルであるが近い将来可能となる場合など、さまざまであると考えられる。これまでの解析技術の歩みと同様に、設計法の変化とともに解析技術が進歩していくという過程が、今後も必要であることを示している。

容器構造物についても、解析技術の変遷は上記と同様であると考えられる。とくに、容器の特徴として内容物の評価が解析において重要となる。

本文では、PC製の容器構造物として最も実績が多い円筒形PC構造物について、過去から現在まで行われてきている解析手法と今後の展望について、容器構造物の特徴を踏まえて以下に述べる。

2. 円筒形シェル構造物の解析手法

2.1 軸対称荷重が作用する円筒シェル理論

直立円筒シェル構造の場合、常時荷重として静液圧、自重、プレストレス力などの軸対称荷重が作用する。このような荷重に対しては、理論式により解析解を求めることが古くから行われており、簡易的な解析手法として現在でも有用なものである。直立円筒シェルに任意の軸対称荷重が作用する場合のシェルの変形および断面力は、次のように求めることができる。図-1に示した断面力の釣合い方程式から、変位とひずみ成分の関係、対称性、フックの法則等を用いて整理すると、面に垂直な荷重についての基礎方程

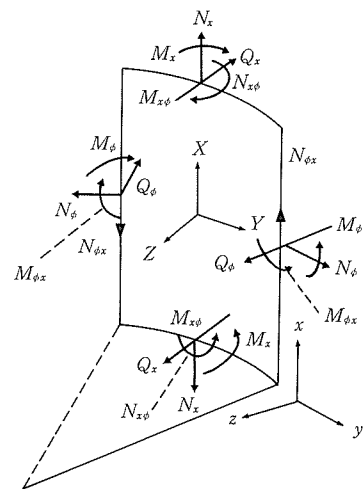


図-1 円筒シェルの断面力



* Kazuma OMURA

(株)安部工業所 技術本部技術部
水道技術設計課

式は次式で表される¹⁾。

$$\frac{d^4 w_x}{dx^4} + 4\beta^4 w_x = \frac{Z}{K} \dots\dots\dots(1)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E \cdot t}{4R^2 \cdot K}} \quad K = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 w_x ：半径方向変位
 x ：壁下端からの距離
 β ：タンク側壁の特性値
 K ：曲げ剛性

その他の記号については「PCタンク指針」、参考文献²⁾などを参照願いたい。また、断面力は次式で求められる。

$$M_x = -k \frac{d^2 w_x}{dx^2}, \quad Q_x = -k \frac{d^3 w_x}{dx^3}, \quad N_\phi = -\frac{E \cdot t}{R} w_x \dots\dots\dots(3)$$

式(1)の一般解は下式により示される。

$$w_x = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f(x) \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $C_1 \sim C_4$ は円筒端部の境界条件から求まる積分定数である。タンク側壁下端部の支持条件は、固定、ヒンジ、自由があり、上端部は一般的に自由として計算を行う。このように、各支持条件における4つの境界条件を考慮することで、タンク側壁の任意断面における断面力ならびに変位を求めることができる。

上記の計算手法により、軸対称荷重が作用する場合の変位および断面力が算定できるが、不均一な厚さを有するシェル、図心軸が変化する場合、非軸対称荷重が作用する場合は、非常に煩雑な計算式となる。

2.2 非軸対称荷重が作用する場合の簡易的計算法

PCタンクに地震動が加わると、躯体慣性力や動液圧といった非軸対称荷重が側壁に作用する。この荷重作用に対して円筒シェルの理論解を求めることは、前述のとおり容易ではない。

非軸対称荷重を受ける円筒シェルの断面力を、いくつかの仮定と新たな釣合い式を導入して微分方程式を導き、非軸対称荷重問題を近似的に軸対称問題に置換できることが提案されている³⁾。また、円筒シェルの基礎方程式の一つを、水平面上の側壁断面において外荷重と断面力によって生ずるモーメントが釣り合うという、大域的な釣合い式を導入することで近似的に等価な力学的性質を有する等価梁モデルに置換し、断面力を算出する近似解法が提案されている⁴⁾。

しかし、有限要素法(FEM)解析が一般化しつつある現在、これら非軸対称荷重に対しては荷重や変位をフーリエ級数展開し、軸対称シェル要素を用いたFEM解析を用いることにより、非軸対称荷重の取扱いが容易になってきている。

3. 容器構造物の特徴

3.1 構造

PC製容器構造物としては、水道用PCタンク、サイロ、原

子炉格納容器などがあり、いずれも軸対称円筒シェル構造が一般的となっている。この理由は、面部材で構成された剛性の高い構造であり耐荷力が大きいこと、プレストレス力を主たる荷重に対し有効に与えやすいこと、などに起因すると考えられる。

水道用PCタンクの一般的な形状としては、高さ/内径比が1/2～1/4程度のもが多く、壁厚に対し内径が十分大きい薄肉シェル構造である。側壁に作用する荷重に対し、円周方向については軸力が、鉛直方向については曲げモーメントが支配的な断面力となる。一般的な形状のPCタンクであれば、躯体と内容水の連成を考慮した固有周期は0.1秒以下と非常に短く、実地震波に対してはほぼ剛体として挙動することが確認されている⁵⁾。

サイロは、比較的大断面の単独サイロと小断面のサイロが複数連結した群サイロに分けられる。群サイロの場合は、全サイロが一体となって挙動するため、壁が多い耐震性に富む構造と言える。単独サイロは高さ/内径比が1～2程度と小さい場合が多く、内容物は比較的自由に運動でき、この挙動を適切に評価することが重要である。

3.2 作用荷重

容器構造物に作用する支配的な荷重は、内容物に起因したものが多。通常の使用状態で支配的になる荷重は、水道用PCタンクなどの液体貯槽では、液深に比例して壁面に対し垂直な圧力であり、サイロなどの粉体貯蔵容器では、静置粉体による水平方向の内圧と鉛直方向の壁面摩擦力である。また、サイロにおいては、投入時や排出時に無視できない大きな圧力が作用する。低温液化ガス貯槽や原子炉格納容器では、温度が支配的な荷重の一つと言える。

地震時に作用する荷重においても、躯体慣性力が支配的となる一般土木構造物や建築構造物と異なり、内容物の影響が大きい。したがって、地震時の動的な挙動を把握するためには、躯体と内容物との連成を適切に評価することが必要である。

液体貯槽では動液圧が作用するが、簡易的な荷重評価としては古くからHousner法や速度ポテンシャル理論が用いられている。Housner法は、内容液を等価な2質点系の集中質量とばね振動系でモデル化したものであり、速度ポテンシャル理論は、内容液がポテンシャル流れに従うとして境界面での運動を表し、これを解くことで動液圧を計算することができる。

3.3 要求性能

兵庫県南部地震以降、各種耐震基準類が見直される一方、予想される地震動に対して、地震後に構造物がいかなる状態にあるかを設定し、その設定を満足しているかを確認するという、性能照査型設計法が一部取り入れられてきている。上記は要求性能の一つとしての耐震性能であるが、解析技術を論ずるうえで、要求性能を明確に設定することは重要である。言い換えれば、要求性能を満足することは確認できる解析技術が必要であると言える。極端な例として、水槽の要求性能を極めて大きな地震に対してひび割れが発生しない構造とした場合であれば、弾性論に立脚した解析を行うだけでよく、ひび割れ後の動的挙動や構造物

表-1 各種容器構造物の耐震性能

	耐震性能	
	レベル1地震動	レベル2地震動
水道用PCタンク	無被害	軽微な損傷 液密性保持
LNG地下タンク	地震後の耐力低下なし	耐震性能2 地震後の耐力低下なし 耐震性能3 地震後の変位変形条件を満たす
原子炉格納容器	S1地震動 弾性範囲	S2地震動 機能性保持 終局耐力に対する裕度

の損傷状態まで確認できる高度な解析技術は、裕度を確保しない限り必要ではない。これに対して、想定した極めて大きな地震により、水槽としての機能は消失してもよいが、内容水の漏出が緩やかであることを要求性能とした場合、現状の解析技術では照査が不可能に近い。

上記の要求性能は極端な例として示したが、現状の容器構造物の設計に設定している要求性能(耐震性能)を表-1に示す。

水道用PCタンクを例にとれば、レベル2地震動に対しても地震後の機能性保持という水密性を確保することを求めている。PCタンク側壁円周方向には、極めて大きな地震動が作用すると動水圧等により軸引張力が生じることとなるが、これは貫通ひび割れとして漏水に繋がる可能性がある。したがって、上記のレベル2地震動に対しても水密性を保持するという要求性能に対しては、地震作用時間には漏水を伴う過大なひび割れを許すが、地震後には残留ひび割れが軽微(具体的には0.1mm程度)であることが構造性能となる。PC部材の復元力特性に着目した構造性能であるが、軸引張力が作用するPC部材における残留ひび割れ幅は、鉄筋の応答ひずみと関連づけられた実験結果が報告されている⁶⁾。この報告では、プレストレスの導入量が多いほど残留ひび割れ幅が小さく、鉄筋の増加ひずみが降伏ひずみ以下であれば残留ひび割れ幅が0.1mm以下になることが示されている。これらの関係とPCタンクの振動特性にエネルギー一定則を適用して、レベル2地震動に対する照査を行うことが「PCタンク指針」に明記されている。

一方、レベル1地震動に対しての耐震性能は、無被害であることが示されているため、部材は弾性範囲内の挙動であり、線形解析が有用である。

4. 解析技術の動向

4.1 構造の評価

容器構造物は、一般的に水平剛性が高く固有周期が短いことから、ほぼ剛体として挙動することを示したが、地震時の損傷レベルが大きくなれば、剛性低下により長周期化して、入力地震波に対する応答の増幅や、内容物と共振しやすくなることが考えられる。また、水平耐力が高いことから、地盤や基礎の振動特性や耐荷力により構造物の挙動が支配される場合もある。地震動による構造物の損傷程度、破壊形態、残留変形量などを解析上把握するためには、躯体～内容物の連成系あるいは、地盤～躯体～内容物の連成系による3次元の非線形解析技術が必要となる。骨組部材など2次元における非線形構成則の研究は進んでお

り、解析ツールも実用レベルにきていると考えられる。しかしながら、3次元についてはまだ研究途上である。

容器構造物の解析において、振動特性や構造特性の評価とともに内容物の評価が重要である。水道用PCタンクなどの液体を扱う場合は、先に述べた Housner 理論や速度ポテンシャル理論を用いて地震時の動液圧を評価することが一般的に行われている。これによれば動的な液体圧力を静的な荷重に置き換えて地震時の応力状態を把握することが可能である。ただし、上記の理論は壁が完全な剛体であることを前提にしたものであり、壁体の変形に関するバルジングは考慮されていない。一般的なコンクリート製の液体貯槽にレベル1地震動程度が作用しても、部材はほぼ弾性域であり大きな変形状態にはならないことから、剛壁理論の適用は妥当と考えられる。一方、極めて強い地震により塑性化し大きな変形を起こす場合では、バルジングの影響を考慮する必要がある。これらを評価するためには躯体～内容物の連成系で解析することが必要となる。

4.2 解析手法の分類

コンピュータの進歩により有限要素法(FEM)が構造物の解析手法として一般化してきている。しかし、容器構造物のような3次元に対しての地震応答解析や部材の弾塑性挙動を考慮した非線形解析は、現状では特殊な解析技術と考えられる。

容器構造物の耐震設計における解析手法は表-2のように分類することができる^{7), 8)}。

表-2 解析手法の分類

解析手法	荷重評価	構造評価
方法1 動的線形解析	付加質量, 連成系	動的線形
方法2 静的非線形解析	動的解析(連成系)	静的非線形
方法3 動的等価線形解析	静的非線形解析(剛性評価)	動的等価線形
方法4 動的非線形解析	連成系	動的非線形(材料非線形)

上記には示していないが、修正震度法等により内容物や自重慣性力を等価外力として静的線形解析を行う方法もある。従来から用いられている手法であるが、ほぼ弾性範囲内の挙動であること、振動特性や内容物の評価が適切であることなどが確認されていれば、有用な解析手法であり、実用上十分な場合が多い。

方法1は、動的解析として実績ある方法であり、振動特性を比較的容易に確認する方法として適している。非線形挙動が顕著な構造では、実際の応答値と大きく異なることも考えられるが、性能照査という面では、安全側の設計方法として適用できる。

方法2は、動的線形解析により振動特性や内容物による荷重作用の評価を行い、適切な荷重分布を設定し静的非線形解析を行う方法である。動的な荷重の評価と部材レベルの非線形性を考慮した解析手法であり、ひび割れ性状や部材降伏以降の変形を確認できるため、エネルギー吸収能力を考慮した設計が可能となる。ただし、地震応答履歴が考慮されないため、減衰等を別途評価することが必要であると考える。

方法3は、静的非線形解析等により荷重作用による部材の剛性低下を評価し、これを等価剛性として考慮した動的線形解析を行う方法であり、全体系の応答履歴が確認できる。ただし、PCタンク等の地震時における損傷は局所的であるため、一様な等価剛性では実際の挙動を適切に把握しているとは言い難い。

方法4は、材料非線形性を直接的に考慮し動的解析を行う方法である。局所的な損傷に対しても評価が可能であること、終局状態を直接評価できることなどから、合理的な設計が可能となる。しかしながら、このような解析ツールは研究レベルであり、仮に実用化されていたとしても、多大な時間を要するとともに、確実に解が得られる保証がないことが現状である。解析技術としては動的線形解析が理想形であるが、今後の研究成果が待たれるところである。

なお、PCタンクやサイロの非線形解析、動的解析の例は、文献^{5), 7)}などに示されているので、参考になるものとする。

5. 今後の展望

容器構造物の解析においては、内容物の評価や構造系の評価などが重要であり、これらを適切に評価したうえで適切な解析手法を用いることが必要である。

静的線形解析、動的線形解析により、ある程度の挙動(部材レベルの降伏まで)は推測可能であるが、構造体としての終局(破壊)までは明らかにならない。これらは安全側の評価を与える手法としては有用な方法であるが、より合理的な設計を行うためには、動的線形解析に頼らざるを

得ない。しかしながら、実務設計において静的非線形解析が用いられることが少なく、動的線形解析ツールに至っては非常に専門的な知識が必要であり、一般的には用いられていないのが実情であると考えられる。

容器構造物のような円筒シェル構造物で実物大の振動実験がほとんど行われていないことより、動的線形解析の検証がなされていないと考えられる。棒部材などのように実験により破壊性状が確認されていれば、解析結果の検証が比較的容易であると想像されるが、実際の破壊形態、損傷状態が明確ではない場合、高度な解析技術を使用して得られるアウトプットをいかに検証するかが鍵となる。解析手法の発展には、それを検証する実験データなどが必要であり、今後の研究に期待するところである。

また、高度な解析技術は、近い将来、全面的な移行が予想される性能照査型設計において必要不可欠であるとも言え、要求性能を直接的に評価できる解析技術が理想的であると考えられる。

このように、今後の解析技術においては、解析結果の検証がなされていくことが望まれるとともに、性能照査型設計法に対応した解析技術も必要となると考える。

以上、容器構造物の解析技術の現状と今後の展望というテーマで述べてきたが、著者の浅学のためPCタンクに偏った内容であったこと、既存の研究や資料のまとめになってしまったことはご容赦いただきたい。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説，1998
- 2) チモシェンコ，ヴォアノフスキー・リナー：板とシェルの理論〈下〉，pp.439～503，1973
- 3) 吉岡，大谷，高西：PCタンクの地震時応力の近似的計算法，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1297～1307，1992.3
- 4) 吉岡，大谷，高西：逆対称荷重が作用するPCタンク側壁の新断面力計算法，土木学会論文集，No.502，V-25，pp.113～122，1994.11
- 5) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997
- 6) 土木学会：コンクリート技術シリーズ34，コンクリート構造物の耐震性能照査，pp.110～132，2000.4
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー98，LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針，1999.10

【2001年3月9日受付】