

RC 非線形解析手法を用いた LNG 地下式貯槽躯体の設計に関する一考察

- 安全係数の考慮方法について -

東京ガス（株） 正会員 中野正文^{*1} 川村佳則^{*2}
 大成建設（株） 正会員 山本 平^{*3} 常見昌朗^{*3}

1. はじめに

LNG 地下式貯槽の設計は、ここ 20 余年の間、1981 年に発刊された LNG 地下式貯槽指針を基に設計が行われてきた。しかし、大規模地震の設計への考慮や関連法規の性能規定化等、時代の趨勢に適合すべく、性能規定型の設計手法が望まれている。

躯体の設計に関しては、性能規定化と大規模地震の考慮から、性能を常時性能、レベル 1 地震時耐震性能、レベル 2 地震時耐震性能の 3 段階に分けて照査を行い、各性能を満足するように設計を行うこととなる。一般的な要求性能として、常時・レベル 1 地震時は機能維持、レベル 2 地震時は人身や設備の安全性確保と考えた場合、それらの照査に用いられる解析手法を表 1 に整理した。これは、現状の技術レベルで十分実現可能な方法という観点で整理したものである。

レベル 2 耐震性能評価には鉄筋コンクリート（以下「RC」と呼ぶ）の材料非線形解析手法を用いることとなる。ここで言う材料非線形解析手法とは、M- の様な部材非線形性を用いて間接的に材料の非線形性を表すものではなく、コンクリートや鉄筋の非線形性（応力 - 歪など）を直接的に解析に反映させる方法である。この場合、解析プログラムの精度、すなわち構成則の精度が解析結果に大きく影響するため、その影響を安全係数の中に取り込むことが必要となる。

本稿では、レベル 2 耐震性能評価に関して、RC 非線形解析手法を用いる場合の安全係数の標準的な値の設定方法についての提案を示すと共に、今後の実務設計における問題点や課題について考察する。

表 1 耐震性能評価に用いる構造解析手法

		レベル 1 耐震設計			レベル 2 耐震設計			
手法		静的線形解析手法	準動的解析手法(応答変位法)		準動的解析手法(応答変位法)		動的応答解析	
入力値		静的地震時土圧	地盤の応答変位		地盤の応答変位		加速度時刻歴波形	
動的・静的区分		静的	準動的		準動的		動的	
解析モデル	個別・連成区分	地盤はモル化しない	地盤と躯体は個別解析		地盤と躯体は個別解析		地盤と躯体の連成解析	
	地盤特性	地盤パネ：弾塑性型パネ					非線形履歴依存モデル	
	構造特性	材料特性	線形	線形	等価線形	等価線形	非線形	非線形
		材料モル	温度荷重作用時は、 EI 0.5E ₀ I ₀	温度荷重作用時は、 EI 0.5E ₀ I ₀	剛性低下を考慮	剛性低下を考慮	材料非線形を考慮した構成則	材料非線形を考慮した構成則
応答値		断面力	断面力		断面力	ひずみ断面力	ひずみ断面力	

2. 材料非線形解析手法の特徴、及び躯体の設計に用いる場合の留意点

材料非線形解析手法（以下、「非線形解析」と呼ぶ）を用いて RC 構造物の設計を行うことは、作用荷重に応じて変化する躯体の剛性を適切に評価出来ることであり、合理的に部材を設定し、経済的な構造物を設計する事が可能となる。しかしながら、従来の線形解析を用いた設計手法とは異なり、結果（断面力や変位等）の重ね合わせを行うことが出来ない。従って、建設過程からの荷重履歴を考慮した解析を行う必要がある。

また、解析の入力条件である材料特性については、その値の設定が重要となる。一般には、解析結果が

キーワード：地下タンク、性能照査型設計、RC 非線形解析、耐震

* 1 〒230-0055 神奈川県横浜市鶴見区扇島 4-1

TEL.044-287-5591 FAX.044-287-2180

* 2 〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20

TEL.03-5400-7583 FAX.03-3578-8365

* 3 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1（新宿センタービル）

TEL.03-5381-5417 FAX.03-3342-2084

実際よりも安全側となる様に物性値を設定することで、構造解析係数を 1.0 とすることができる。従来の線形解析を用いた耐力照査では、部材の剛性低下を考慮しない為、解析結果の断面力は実際に発生する断面力よりも確実に大きくなることから、安全側の検討となっている。しかし、非線形解析を用いたレベル2耐震性能照査では、変位やひずみも照査項目となると考えられることから、その場合には実際に生じる剛性低下以下の剛性を設定しなければ、安全側の検討となり得ない（図1参照）。この様に、非線形解析を用いた場合、全ての照査項目について常に安全側となる材料条件の設定は不可能であることから、安全係数、特に構造解析係数にて安全性を担保することが必要となる。

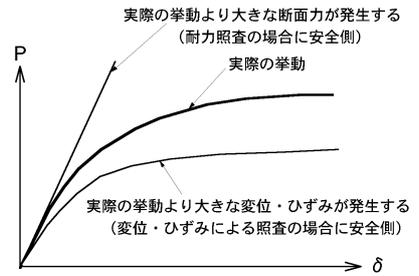


図1 剛性の考え方

《従来》

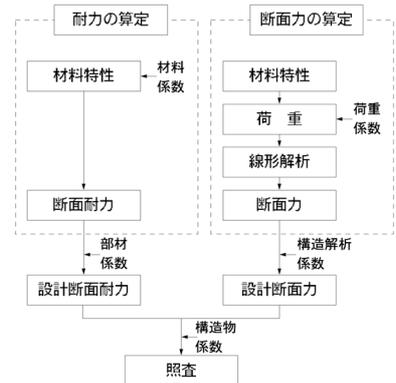


図2 耐力照査による照査フロー

3. 非線形解析手法を用いる場合の安全係数の考え方

安全係数の考え方として、コンクリート標準示方書（以下「コ示」と呼ぶ）に準じ、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数の5種類を考慮することとした。従来の耐力照査方法は、図2に示すように耐力と断面力をそれぞれ算出し、それらを比較する事により照査を行うものである。また、非線形解析を用いて、耐力照査のみならず変位やひずみにて照査する場合には、図3に示す様な限界値と応答値による照査フローとなる。これは、図2のフローの「耐力」を「限界値」に、「断面力」を「応答値」に、「線形解析」を「非線形解析」に変更しただけであり、基本的には照査フローと考慮する安全係数の種類は全く同じ様に考えることができる。

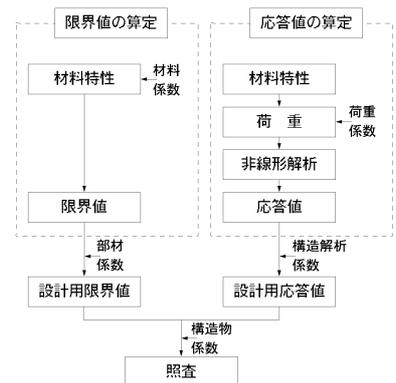


図3 非線形解析を用いた照査フロー

但し、図3においては応答値の算定に用いる材料特性として、応力-ひずみ関係などの強度特性を入力することとなる。その際、先にも述べたように、常に安全側となる条件設定は不可能であることから、実際の挙動に近い条件を入力値として非線形解析を行うことが望ましいと考えられる。すなわち、非線形解析に入力する材料条件には、材料係数を考慮せず材料特性値をそのまま用いる。例えば、コ示に示される応力-ひずみ関係を入力する場合、圧縮強度は $0.85f'_{ck}$ (f'_{ck} : 設計基準強度) となる。

この時、解析に使用するプログラムが実際の挙動を「適切」に表すものであれば、構造解析係数は 1.0 と設定できる。しかし、現状ではプログラムの「適切さ」の客観的判断基準が無く、構造解析係数を 1.0 とすることは不適切であると考えられる。そこで、構造解析係数の設定においては、プログラムの「適切さ」を実験シミュレーション等から定量的に示すことができれば、構造解析係数を 1.0 までの範囲で減じることができ、標準値としては 1.2 程度とすることが望ましいと考えられる。これは常識的な観点から、断面力や変位、ひずみの解析結果に 20%以上の誤差が認められるプログラムを「適切」とは判断しないと考えられることによるものである。

4. 実務設計における問題点と課題

実務設計においては、非線形解析の入力条件として、強度の特性値を用いている点に留意しなければならない。すなわち、実構造物は解析条件よりも剛性が高い可能性があるという点である。ただし、一般に地下タンクの場合には鉄筋比が比較的小さいため、コンクリートの引張側の特性が支配的となることから、コンクリートの圧縮強度として特性値を用いることはあまり問題にはならないと考えられる。

解析の結果、コンクリートの圧縮応力度が限界値に対して十分な余裕が無い場合には、断面力を過小評価している可能性があるため、安全係数にて担保するなどの検討が必要となる。