

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

- レベル 2 耐震性能照査試設計及び実務設計における問題点と課題 -

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 常見昌朗^{*3} 山本 平^{*3}

1. はじめに

現状の LNG 地下式貯槽の設計は、1981 年（昭和 56 年）に発行された LNG 地下式貯槽指針を基に行われているが、各種の示方書や指針が大規模地震を考慮した性能規定化の方向へと向かう趨勢から、今後は性能規定型の設計法へと変わってゆくと考えられる。本稿は、LNG 地下式貯槽の RC 躯体の設計法に関して、レベル 2 地震時の耐震性能照査に関する試設計を行った結果について示すと共に、試設計を通じて考察される今後の実務設計における問題点と課題について論じるものである。

2. レベル 2 耐震性能照査方法

レベル 2 地震時の耐震性能照査に用いる解析手法として、材料非線形応答変位法を用いることとし、その際の評価項目と限界値を表 1 の様に設定した。非線形解析を用いることから、解析を行う際にはあらかじめ照査に用いる配筋を設定しておく必要がある。これは、実務設計においては常時及びレベル 1 地震時耐震性能照査から定まる配筋を用いることとなる。本検討においても、常時・レベル 1 地震時対して行った試設計により決定した。また、非線形解析では断面力や変位の重ね合わせが成り立たないことから、荷重履歴（建設過程を含む）を考慮した解析（以下、「ステップ解析」と呼ぶ）を行う必要がある。

3. レベル 2 耐震性能照査試設計

試設計の対象構造は、側壁 - 底版剛結合同型 20 万 kl LNG 地下タンクとした。構造モデルを図 1 に示す。解析は運転水位と内容液位をパラメータにした 4 ケースについて行った。解析ケースと考慮した荷重を表 2 に示す。また、解析手順は図 2 に示す様にステップ解析を行った。解析モデルには連壁もモデル化し、連壁 - 側壁間に存在するスリップバーのモデル化はせん断方向をバネとし、半径方向は接触要素を用いて開く方向にはフリーとした。

本検討に用いた RC 構成則¹⁾については、コンクリートの圧縮側のモデル化はコンクリート標準示方書に示される一軸の応力 - 歪関係を用い、コンクリートの圧縮強度は $0.85f'_{ck}$ とした。コンクリートの引張挙動のモデル化は、前川・島らのモデルを用い、軟化係数 $C=0.4$ とした。鉄筋のモデル化は、コンクリート中での平均応力 - 平均歪関係とした。ひび割れのモデル化は、固定ひび割れモデルを基本としたが、以前に発生したひび割れから 40° 以上傾いた方向には新たなひび割れが発生する多方向固定ひび割れモデルとした。ひび割れ発生後のせん断剛性は、Shear Retention モデルとし、ひび割れ直交方向の歪みの増加に従い、せん断剛性の残存率が低下するモデルとした。

解析結果の一例を図 3 に、側壁に対する照査結果を表 3 に示す。

表 1 評価項目と限界値

評価項目	限界値
コンクリートの圧縮ひずみ	コンクリートの圧縮強度に対するひずみの 2 倍
鉄筋の引張ひずみ	鉄筋の平均降伏ひずみの 2 倍
面外せん断力	面外せん断耐力

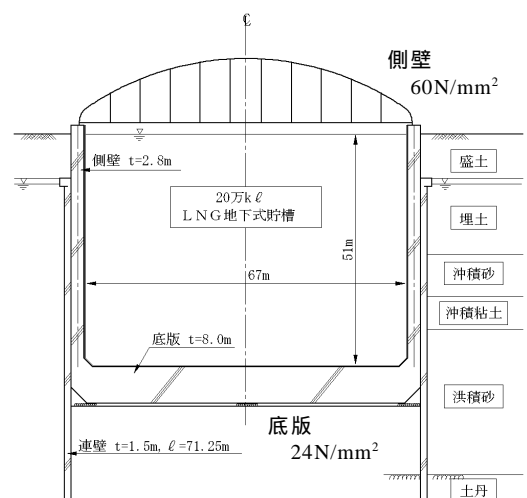


図 1 構造モデル

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

* 2 〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20

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

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

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

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

解析結果の一例を図3に、側壁の照査結果を表3に示す。

照査の結果、コンクリートの圧縮に対しては十分に余裕があるものの、鉄筋の引張ひずみ及び面外せん断力に対しては限界値に対して応答値はそれぞれ74%,96%となった。ここで、構造解析係数は1.2としている。

4. 実務設計において予想される問題点と今後の課題

レベル2地震時で部材仕様（配筋）が決まるとすれば、非線形解析を実行するケース数が増大し、実務設計上非常に煩雑となる。従って、常時・レベル1地震時で決まる部材仕様でレベル2耐震性能を照査し、その応答値が限界値を満足するという手順が、実務設計上望ましい。

しかし、レベル2照査の結果に余裕がある場合には、常時・レベル1に対し、より合理的な配筋を追求する事が望まれ、非線形解析を用いる等により非常に煩雑な設計作業となる。今回の結果は、レベル2耐震性能照査での最大応答値がほぼ限界値に近い値となった事から、常時・レベル1に対する配筋はほぼ合理的なレベルにあると判断される。

今回の検討では、連壁の影響を常に考慮するモデル化とした。ここで、連壁の物性値には設計値を用いているが、連壁は仮設構造物であり、長期的な耐久性については何ら保証されるものではない。従って、実務設計において連壁の影響を考慮する場合には、長期的な耐力の低下やクリップの影響等を適切に考慮する必要がある。

また、今回の検討ケースは運転水位と内容液位をパラメータにした4ケースとした。実務設計上、非線形解析のケース数は極力減らすことが望ましいが、目標性能を満足するように適切な検討ケースを設定する事が必要である。

この様に、非線形解析を用いた設計では、構造の合理化の追求と併せて設計作業の合理化も図る必要がある。今後、実務設計においては、常時・レベル1の検討にて決まる配筋が確実にレベル2照査を満足し、かつ合理的な配筋である様な設計を目指して、設計実績を積んでいくことが肝要である。

（参考文献） 1）鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991年5月

表2 解析ケースと考慮した荷重

No.	解析ケース	自重	土水圧	PC	液圧・ガス圧	温度荷重	凍土圧	揚圧力	地震荷重
1	高水位・満液								
2	高水位・空液								
3	低水位・満液								
4	低水位・空液								

STEP	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
構造モデル	連壁構築・内部掘削	底板・側壁第1ロット構築	側壁第2ロット構築	側壁第3ロット構築
荷重	自重（連壁）・常時土圧・水圧	自重（底板・側壁第1ロット）・側壁下部PC（第1ロット）	自重（側壁第2ロット）・側壁下部PC（第2ロット）	自重（側壁第3ロット）・側壁下部PC（第3ロット）
STEP	STEP 5	STEP6~STEP8	STEP9	STEP10
構造モデル	側壁第4ロット・最終ロット・屋根構築・盛土	盛土・地盤ハネ	地盤ハネの交換	（応答変位）
荷重	自重（側壁第4ロット～最終ロット・屋根）盛土土圧	STEP6 液圧・ガス圧 STEP7 温度荷重 STEP8 凍結土圧・揚圧力	ハネ値の変更は、躯体の変位とハネ反力が変更前後で変わらない様に行う。	STEP10 (地震時荷重) 躯体慣性力 動液圧・応答変位

（解析ケース：高水位・満液、温度あり、凍結土圧ありの場合）

図2 ステップ解析図

表3 照査結果

照査項目	コンクリートの圧縮ひずみ	RC部材の引張ひずみ	面外せん断力
限界値 R_d	3,333 μ	1,438 μ	9,155kN/m
応答値 S_d	504 μ	1,066 μ	8,772kN/m
S_d/R_d	0.15	0.74	0.96
決定ケース	2	1	2

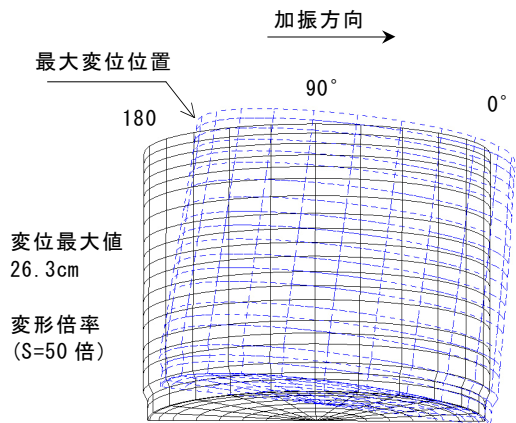


図3 解析結果（変形図）