報告 LNG 地下タンクのレベル2 耐震性能に関する検討

佐藤 吉孝^{*1}·小林 且典^{*2}·高木 宏彰^{*3}·深田 敦宏^{*4}

要旨:本稿は,LNG地下タンク躯体のレベル2耐震性能評価として,平成14年に改訂された,性能照査型設計手法が取り入れられた「LNG地下式貯槽指針」¹⁾に基づき,材料非線形性を考慮した構成則を用いて構造解析を実施し,躯体の安全性を確認した結果を報告するものである。また,地震荷重による地下タンク躯体の破壊モードについて検討することを目的として,レベル2地震を超える地震荷重を作用させる解析を行ない,破壊モードについて考察を行った結果を示すものである。

キーワード:LNG 地下タンク、レベル2 耐震性能評価,材料非線形 FEM 解析

1. はじめに

平成14年に「LNG地下式貯槽指針」¹⁾が改訂と なり,LNG地下タンクの設計は従来の仕様規定 型から性能規定型へと移行した。レベル2 耐震 性能の評価では,部材の局所的損傷状況や構造 物全体の挙動を把握することとなり,評価に用 いる解析手法としては,材料非線形を考慮した 準動的解析手法を基本とするとされている。

東邦ガス(株)知多緑浜工場で計画された地下 タンクは,貯槽容量 200,000kl と世界最大級で, また改訂指針が初めて適用されるものであった。

同指針によりレベル 2 の大規模地震を設計に 考慮する必要性があり,合理的で精度の高い設 計手法が望まれた。そこで,当タンクのレベル 2 耐震設計では,タンクの経済性及び解析手法の 信頼性を考慮し,地震荷重の評価方法は従来よ り用いられてきた応答変位法を,躯体応答値の 算定方法は鉄筋コンクリート部材の材料非線形 を考慮した解析を採用し,評価を行った。

また別途に、地震荷重による地下タンク躯体 の破壊モードについて検討することを目的とし て、レベル 2 地震を超える地震荷重についても 検討を行なった。

2. 設計条件

2.1 一般構造及び土質条件

一般構造及び土質条件を図-1に示す。また構造の諸元を下記に示す。

貯槽容量: 200,000 kl

躯体底版:部材厚 t=8,000mm

コンクリート $f'_{ck}=33$ N/mm²

鉄筋比 p=0.3%(端部), 0.5%(中央部) 躯体側壁:部材厚 t=2,300mm

コンクリート $f'_{ck}=30\sim35$ N/mm²

連壁 : 部材厚 t=1,200mm コンクリート f'_{ck}=40~50N/mm² 鉄筋比 p=0.2~0.4%



*1 大成建設(株) 九州支店作業所 工修 (正会員)

- *2 東邦ガス(株) 技術部知多緑浜工場第二期建設グループ (正会員)
- *3 大成建設(株) 土木本部土木設計部
- *4 鹿島建設(株) 名古屋支店作業所

当サイトの土質は、耐震基盤面となる N 値 50 を超える第三紀常滑層 Tml が地表面下約 12m と 非常に浅い位置にある。また、躯体完成後に 7m の盛土をタンク外周に造成する計画である。

2.2 耐震設計条件

地震荷重の検討方法は,準動的解析手法とし て,応答変位法(片押し・片引き)を採用した。

レベル 2 地震荷重に用いる応答変位は,地盤 応答解析より算出した連壁下端と各位置の相対 変位の時刻歴最大値を用いた。また,応答加速 度は各位置の時刻歴最大値を用いた。なお,入 力地震動は、「LNG地下式貯槽指針」¹⁾に規定され た兵庫県南部地震の4波を耐震基盤面における 図-2 に示す特 A 地区の加速度応答スペクトル に適合するように振幅調整したものを用いた。

最大応答加速度及び応答変位分布を図-3 に 示す。一般的な埋立地の地盤における最大応答 変位はレベル1地震動に対し15cm程度,レベル 2地震動に対し50cm程度であることを考えると, 当該地盤の最大応答変位は,耐震基盤面が浅い ため非常に小さくなっていることが分かる。







3. 構造解析

3.1 解析モデル

解析モデルは, 躯体・連壁はそれぞれ3次元 積層シェル要素,周辺地盤及び側壁-連壁結合は, 面分布バネ要素でモデル化した。また,部材中 の面内方向鉄筋は埋込み鉄筋要素でモデル化し た。解析モデルを図-4に示す。以下に解析モデ ルの諸元を示す。

- モデル
 :180°モデル円周15°ピッチ
- ・ 節点数 :約 4000 節点
- ・ 躯体・連壁 :3次元積層シェル2次要素
- 鉄筋 : 埋込み鉄筋要素
- ・ 周辺地盤 :2次元面分布バネ要素
- ・ 側壁・連壁結合:2次元面分布バネ要素



3.2 非線形材料構成則

(1) コンクリートのモデル化

ひびわれ発生前のコンクリートの応力-ひず み関係は、「LNG 地下式貯槽指針」¹⁾に準拠した。 また、二軸応力状態での降伏曲面は Drucker-Prager 式を使用し、引張側は引張主応力 がコンクリートの引張強度に達したときにひび われが発生するモデルとした(図-5)。ひびわ れは多方向固定ひびわれモデルを用いた。

ひびわれ発生後のテンションスティフィニン グ特性は前川らの研究²⁾による平均応力-平均 ひずみ関係を用いた。また、コンクリートの付 着特性の影響が及ぶ RC ゾーンと無筋ゾーン³⁾ を設定し、そのテンションスティフィニング特 性を引張強度比-クラックひずみ関係として設 定した(図-6)。ここで、クラックひずみは、 ひびわれ発生後に生じるひずみとして定義する。

また,ひびわれ発生後のコンクリートのひび われ方向の面内せん断剛性は,ひびわれ直交方 向ひずみに反比例して低下すると仮定した。



(2) 鉄筋のモデル化

鉄筋は埋込鉄筋要素としてモデル化し,鉄筋 の応カーひずみ関係は,部材内の鉄筋の平均応 カー平均ひずみ関係⁴として設定した。

(3) 地盤バネの設定

周辺地盤は地盤バネとしてモデル化した。常時の地盤バネ値は,「道路橋示方書・同解説IV下部構編」⁵⁾より算出し,レベル2地震時の地盤バネ値は,一次元地盤応答解析より得られる収束せん断剛性から変形係数を求め,FEM解析により算出した。せん断バネ定数は,面直バネ値の1/3の値とした。また,水平方向の面直地盤バネは受働土圧を最大値,主働土圧を最小値として設定し,鉛直方向の地盤バネは引張カットのバイリニア型の弾塑性バネとしてモデル化した。

(4) 側壁·連壁結合

側壁・連壁の結合は,圧縮力のみ伝達する重 ね壁構造としてモデル化した。側壁下部のせん 断キーは,躯体が浮上るときにのみ,躯体から 連壁にせん断力が伝達するバネモデルとした。

4. 荷重の種類及び組合せ

荷重は,実際の運転状況を想定して表-3に示 す4ケースの組合せを設定した。本稿では部材 に生じるひずみが最も大きくなった高水位-空 液時の結果を示す。

なお、「LNG 地下式貯槽指針」¹⁾によると、レ ベル2 地震時ではひびわれ発生により LNG の冷 熱による熱応力は解放されるため、LNG による 温度荷重は原則考慮しなくてよいとされている。

表-3 荷重組合せケース

荷重の 種類 状態	白雪	ガス圧	液圧	土水圧	揚圧力	屋根荷重	温度荷重	躯体慣性力	動液圧	応答変位
低水位-空液	0	0		0		0	I	0	I	0
高水位一空液	0	0	—	0	0	0	—	0	—	0
低水位-満液	0	0	0	0	-	0	-	0	0	0
高水位-満液	0	0	0	0	0	0	_	0	0	0

5. 解析ステップ

レベル 2 地震動に対する検討では、材料非線 形解析を行なうため、ひびわれの進展を逐次解 析していく必要がある。よって、構造系及び荷 重の変化を逐次考慮した解析が必要となる。解 析ステップを図-7に示す。



6. 解析結果及び考察

地震荷重載荷後の地下タンク躯体の変形図を 図-7に、クラックひずみを図-8、9に示す。





図-9 クラックひずみ図-タンク躯体外側

面内せん断力による斜めひびわれはほとんど 見られず,最大のひびわれ幅は,側壁下端の鉛 直方向外側引張に対して発生した。このひびわ れ発生の要因は,地震荷重よりも常時荷重の底 版下に作用する揚圧力の影響が大きい。

これは、当該地盤は基盤面が深度の浅い位置 にあり、地震時の応答変位が小さく、地震荷重 が地下タンクに及ぼす影響が小さいためと推察 される。

7. 耐震性能評価

「LNG 地下式貯槽指針」¹⁾によるタンク躯体の レベル2耐震性能評価では,材料非線形 FEMの 解析結果に対して,圧縮ひずみ,引張ひずみ及 び面外せん断力に対する照査を行なうこととな っている。

圧縮ひずみに対する照査は、最大圧縮主ひず みが圧縮限界ひずみを下回ること、引張ひずみ に対する照査は、鉄筋の最大引張ひずみが引張 限界ひずみを下回ることを確認した。

一方,本解析においては、3次元シェル要素を 用いているため、シェルの面外方向のせん断力 による斜めひび割れの発生、つまりせん断力に よる損傷は解析上表現することができない。そ こで、面外せん断力に対する照査は、従来と同 様の手法により、面外せん断力が、「LNG 地下式 貯槽指針」によるせん断耐力を下回ることによ り確認した。

上記の照査を行なうことで、当該地下タンク のレベル 2 耐震性能が満足されることを確認し た。下表に最も厳しい位置の照査結果を示す。 表より、タンク躯体の損傷レベルは、コンクリ ート・鉄筋共に非常に小さいことが分かる。

表-5 耐震性能照查

昭木	位墨	応答値	限界值	yi•	
	业區	S_d	R_d	S_d/R_d	
圧縮ひずみ(コンクリート)	側壁下端	411μ	3333 µ	0.124	
引張ひずみ(鉄筋)	側壁下端	200μ	2281 μ	0.088	

面外せん断力に対しては、S_d/R_d=0.851であり、 大きな余裕は無い結果となった。これは、発生 する面外せん断力の内支配的な荷重は揚圧力で あり、このせん断力に見合うせん断補強筋を配 置しているためである。別途に行なったケース スタディから、各荷重の面外せん断力の寄与率 は、躯体自重を考慮した揚圧力:86%、地震荷重: 14%の結果が得られている。このことから、地震 力によるせん断力は、揚圧力によるものと比較 して大きくなく、躯体の剛性が低下することも あり、L2 地震を考えた場合でもせん断に対する 安全性が大きく低下することは無い。

8. 地下タンクの破壊モードに対する検討

これまでに示した「LNG 地下式貯槽指針」¹⁾ に基づくレベル 2 耐震性能評価とは別に,地下 タンクの破壊モードを検証することを目的とし て,レベル 2 地震を超える地震荷重を作用させ る解析を行なった。また本検討では,より安全 側の検討となるように,LNG による温度荷重を 考慮することとした。

8.1 検討方法

解析モデル及び解析ステップは、上記に示し たレベル 2 耐震性能評価と同様とし、荷重ケー スはレベル 2 地震荷重作用時において部材に生 じるひずみが最も大きくなった高水位空液運転 時とした。ただし、常時荷重に LNG の温度荷重 を追加し、地震荷重である地盤応答変位は 3δ (δ: レベル 2 地震時応答変位)とした。

また本検討では、面外せん断力に対する検討 は対象外とした。これは、前述のように、せん 断力による損傷は解析上表現できないこと、仮 にせん断耐力が不足する場合には、それに見合 うせん断補強鉄筋を配置することでせん断破壊 を防止できることによる。つまり、本検討はせ ん断力に対する十分な安全性が確保された場合 に、躯体にどのような損傷が生じるかについて 解析を行ったものである。

8.2 解析結果及び考察

3δの地震荷重載荷後の地下タンク躯体及び 連壁の変形図及びクラックひずみ図を図-9~ 図-11 に, 躯体の変形図及びクラックひずみ図 を図-12~図-14 に示す。

連壁のクラックひずみ図から,連壁の応答変 位押込側の根入れ部分が全断面引張となってい ることがわかる。これは応答変位による連壁の ロッキング変形による引抜き力によるものであ る。この位置のクラックひずみは最大で 8700 μ (約5ε_ν)であり,損傷の程度はかなり大きい。

一方,タンク躯体をみると,側壁内側において,温度荷重によりほとんどの領域でクラック

が発生している。また,底版中央内側では最大 3810µのクラックひずみが発生しているが,こ のクラックひずみは,LNGの温度荷重および底 版下に作用する揚圧力による影響が大きく,地 震荷重によるひびわれの進展はほとんど見られ なかった。この理由として,(a)連壁の面内剛性 が大きく,地盤の変形に対する抵抗力が大きい ため,タンク躯体にはほとんど荷重が伝達しな いこと,また,(b)連壁頭部の地盤応答変位3δ =58.0cmに対して連壁頭部の変位量は25.5cmで あることから,地盤の応答変位が大きくても地 盤の塑性が先行し,それ以上の地震力が作用し なくなることが考えられる。

以上より,地下タンク躯体の耐震性能は非常 に大きいと考えられる。この結果は,実機のタ ンクを対象としたプッシュオーバー解析の結果, 主鉄筋比を1%程度以下(当該タンクでは0.2~ 0.9%程度)に抑えておけば,十分な変形性能を 有するという知見³⁾と合致している。







 $\begin{array}{c}
- & 800 \,\mu \\
- & 600 \,\mu \\
- & 400 \,\mu \\
- & 200 \,\mu \\
0 \,\mu
\end{array}$

図-13 クラックひずみ図-タンク躯体内側

3810 µ



図-14 クラックひずみ図-タンク躯体外側

9. 結論

上記の主な結果をまとめて結論とする。

- (1) 20 万 kl の LNG 地下タンクに対して, H14 改訂の「LNG 地下式貯槽指針」に基づくレ ベル 2 耐震性能照査として材料非線形性を 考慮した構造解析を実施した。圧縮ひずみ, 引張ひずみについてレベル 2 耐震性能を確 認し,損傷レベルは非常に小さいことが分 かった。
- (2) レベル 2 地震を超える地震荷重を作用させる解析を行なった結果,連壁の根入れ部分の損傷は大きくなったが、タンク躯体については、地震荷重によるひびわれの進展はほとんど見られなかった。この理由として、(a)連壁の面内剛性が大きいため、タンク躯体にはほとんど荷重が伝達しないこと、また、(b)地盤の応答変位が大きくても地盤の塑性が先行し、地震力が頭打ちになることが考えられる。
- (3) これらの結果から、当該タンクは非常に大きな耐震性能を有しているものと考えられる。この結果は、当該タンクの鉄筋比は 0.2~0.9%程度であり、十分な変形性能を有するという過去の知見と合致している。

参考文献

- (社)日本ガス協会: LNG 地下式貯槽指針,平 成14年8月
- 2) 岡村 甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非 線形解析と構成則,技報堂出版,1991.5
- (社)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, 平成11年12月
- 4) 福浦尚之,前川宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰り返し履歴モデル,土木学会論文集,No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5
- 5) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅳ 下部構造編,平成14年3月