

LNG地下タンク鉄筋コンクリート構造 設計合理化の研究

宮本 幸始¹

¹フェロー 博士(工学) 東京電力(株)建設部 (〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)

本論文は、既に一定の設計照査システムが確立しているLNG地下タンクの構造を具体的対象事例として、地中鉄筋コンクリート構造物の設計合理化を論理的に実現する方法について研究したものである。

限界状態設計法を活用することにより、最新の技術知見と対象設備に固有の条件を反映して所要機能水準に応じた最適化を可能にする、新しい照査システムを構築した。また、新システムによる試設計を行って合理化効果を評価した。その結果、新しい考え方により、信頼性向上と経済性向上とを同時に実現できること、さらに限界状態設計法が設計合理化実現に具体的にも有用であること、を示した。

Key Words : *limit state design method, multilevel seismic design, safety assurance, cost reduction, inground reinforced concrete structure, LNG, storage tank*

1. まえがき

本論文は、LNG地下タンクの構造を具体的対象として、鉄筋コンクリート構造の設計合理化の実現方法について研究したものである。設計合理化実現のための設計法として限界状態設計法を活用し、研究成果として、設備安全の信頼性向上と経済性の向上を同時に実現させる設計方法を具体的に提案した。

土木技術者は、これまで、工学者あるいは技術者の本分として経済性の追求にも相当の力を注いできた。しかし、近年までの技術開発は、未経験の形式あるいは規模の構造物を、安全確実に実現することを主眼としたものが多かったといえる。そのような研究の重要性は減少するものではないが、社会の成熟とともに技術のフロンティアが縮小し、より経済的な設備投資が求められる時代に変質してきた。これからは、設計合理化を追求する研究の必要性が相対的に高まってくると認識しなければならない。

本論文は、所要機能を保持して経済性を徹底追求するという、この社会要請に積極的に応える設計方法について、すでに一定の設計法が確立している構造物を対象にして研究したものである。

研究の具体的対象とした構造は、LNG(液化天然ガス)を貯蔵する地下タンクの躯体であり、円筒形の鉄筋コンクリート構造物である。大規模な地中3次元

構造物でもある。

LNG地下タンク躯体の構造設計は、従来、1978年時点の技術を基礎として許容応力度法の体系により行われている^{11)・21)・31)}。一方、1986年には土木学会コンクリート標準示方書(以下、RC示方書と記す)に限界状態設計法が採用されるに至っている。また、1970年代以降、1995年までに国内で51基と多数の地下タンクが建設され、運用実績、計測実績も蓄積できてきた。さらに解析手法も進歩してきた。設計合理化検討の機が熟してきたことになる。

本研究では、このような現状認識のもとに、合理化検討を論理的かつ効率的に進めるため、限界状態設計法により設計体系を再構築した。すなわち、限界状態設計法の①対象構造物の所要機能に応じた最適な設計を合理的に行いやすい、②構造物の特性に応じて、また最新の知見を反映して設計合理化を実現しやすい、という特徴を具体的に活かす方策について追究した。

本論文にいう「限界状態設計法」は、「いくつかの限界状態を設定し、設計条件における各種の不確実性をその要因別に部分安全係数として評価して設計することにより、構造物あるいは部材が限界状態に達する可能性の程度を設計者が意図する水準以下のものとするための設計体系」であり、RC示方書⁴⁾に示された考え方に準拠するものである(図-1参照)。

なお、本論文は、東京大学に提出した学位請求論文の要約である。

	許容応力度設計法	限界状態設計法〔土木学会 R C 示方書〕	記号
耐 荷 力 の 照 査	荷重特性値	荷重修正係数 f 荷重特性値 $F_k = \rho f F_k$ 荷重係数 γ_f	F_n F_k F_d
	構造解析	設計荷重 $F_d = \gamma_f F_k$	
	断面力特性値	断面力特性値 S_k 構造解析係数 γ_a	S_k
	弾性計算	設計用断面力 $S_d = \gamma_a S_k$	S_d
	応力度	【照査】 $\gamma_i S_d / R_d \leq 1.0$ 構造物係数 γ_i	σ_k
	【照査】 $\sigma_k \leq \sigma_a$	設計用耐力 $R_d = R_k / \gamma_b$	R_d
		部材係数 γ_b 耐力特性値 R_k	R_k
		材料非線形考慮 材料強度設計用値 $f_d = f_k / \gamma_m$	f_d
		材料係数 γ_m 材料強度特性値 $f_k = \rho_m f_n$ 修正係数 ρ_m 材料強度規格値	σ_a f_k f_n
		【部分安全係数法】	
耐 久 性 の 照 査	荷重特性値	荷重特性値	F_k
	断面力特性値	断面力特性値	S_k
	鉄筋応力度	鉄筋応力度	σ_s
	ひびわれ幅	ひびわれ幅の計算 (鉄筋の径、かぶり、ピッチ、応力度より)	w
	【照査】 $w \leq w_a$	許容ひびわれ幅	w_a
		鉄筋かぶり	c

太線の部分で安全係数を使用、文献5)の表を一部修正および加筆

図-1 設計法の比較

2. 地下タンクの概要

(1) LNGとは

LNGとは液化天然ガスのことで、Liquefied Natural Gas の頭文字をとったものである。

LNGは、天然に産出するメタンを主成分とする可燃性ガスを、大気圧のもとで約-162℃に冷却して液化したものである。再度気化して火力発電の燃料や都市ガスの原料として用いられる。

(2) LNG地下タンクの構造と設計の概要

本研究で対象とするLNG地下タンクは、関東南部F地点に建設を予定する容量12.5万klのタンクであり、その形状・寸法、地質条件は図-2に示すとおりである。

地下の貯液空間を構造的に保持するのが、合理化対象とする鉄筋コンクリート躯体であり、その内側に保冷の断熱材と貯液のためのメンブレン(薄肉の金属膜)が取り付けられる。鉄筋コンクリート躯体は円筒型の側壁と円形スラブの底版とからなり、周辺の土圧、地

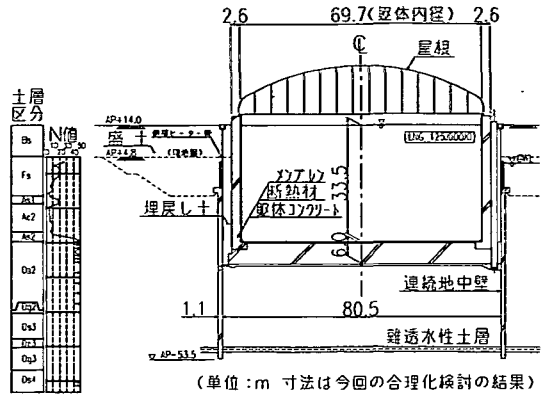


図-2 検討対象としたLNG地下タンク

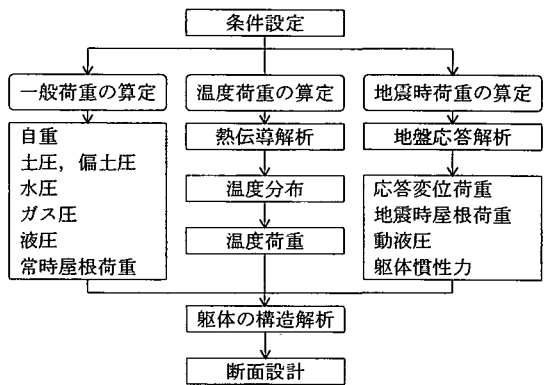


図-3 構造設計のフロー

下水圧に抵抗し、LNGの液とガスの圧力も支持する。

側壁と底版の接合部は、LNG冷熱による躯体の温度変化に伴う温度応力等の応力集中を緩和するため、ヒンジ構造としている。地下構造物の建設に必要な止水土留構造体としては、所定の難透水性土層の深さまで鉄筋コンクリートの連続地中壁を構築する。

LNG地下タンク構造設計の基本的手順は図-3に示すとおりである。

(3) 鉄筋コンクリート躯体に求められる機能

鉄筋コンクリート躯体に必要とされる機能をまとめると次のとおりである。

① 諸荷重作用に対して耐久的に安全性を保持すること。荷重としては内側から作用するものとして液圧、ガス圧が、外側からの作用として土圧、水圧が、その他、温度変化に伴う作用、地震動に伴う作用がある。

② 地下水に対して一定の止水性を有すること。具体的には、躯体の冷却後は「凍結止水」の機能が期待できること、冷却以前の時期には躯体周辺の地下水頭は

底版上面より高くないように地下水位をコントロールすることから、土中の被圧されない自然水が躯体内面まで浸透しない程度の止水性が求められる。

(4) LNG地下タンクの設計合理化の要件

LNGは気化すると膨張し可燃物ガスとなるので、それを大量に貯蔵する地下タンクには安全の信頼性が強く求められる。本研究では、単に経済性を追求するのではなく、LNG貯蔵という重要性をふまえて、上述の所要機能の確保を保証しつつ、最も経済的な構造設計を合理的に実現する方策を検討する。

3. 限界状態設定における設計の合理化

照査する限界状態は、タンクの所要機能と構造特性を踏まえて表-1に示すとおり設定した。設定の論拠を要約して以下に述べる。

(1) 限界状態設定の意義

照査する限界状態を設定するという事は、いいかえれば、対象構造物に求められる機能を整理して、その機能を合理的に達成するために設計上行わねばならない検討事項を明確にする、ということである。したがって、設計目的と対象物固有の条件を改めて認識することが必要となる。

従来の許容応力度設計法においては、作用応力度が許容応力度を下回ることによって、耐久性、耐荷性等の複数の所要機能を同時に満足させようとする。限界状態を改めて意識しないで設計することは、実務上は簡便であるが、対象構造に固有の条件を容易に反映できないので設計の合理化には結びつきにくい。

本研究では合理化の目的から、対象構造物の所要機能水準や設置環境を原点に戻って分析し、分析結果に対応して照査の必要な最小限の限界状態を設定した。

(2) 照査する限界状態

終局限界状態と使用限界状態について、対象となる種々の限界状態から、LNG地下タンクに必要な限界状態を抽出設定した。

耐荷性については、断面破壊について荷重組み合わせに応じた裕度を有するとともに、通常時と基準地震時(後述)には鉄筋降伏も生じないこと、を保証水準とすることにより、破壊、変位、変形の限界状態を代表することとした。実際に照査を行う終局限界状態は、表-1に示すようになる。

使用性については、次節に述べる検討により、外面の曲げひびわれと、せん断ひびわれに関する使用限界状態を設定した。

表-1 LNG地下タンクの限界状態

照査する限界状態			照査内容
限界状態区分	荷重状態区分		
終局限界状態	断面破壊	通常時	終局耐力 (曲げ、せん断)
		大地震時** 最大地震時**	
使用限界状態	断面降伏** (鉄筋の降伏)	基準地震時**	降伏耐力 (曲げ、せん断)
	せん断ひびわれ 曲げひびわれ** (躯体外面のみ)	通常時	せん断補強 鉄筋応力 ひびわれ幅

* a 通常時の断面降伏裕度は断面破壊照査で同時に確保する
* b 躯体内面は鉄筋の腐食性環境にないのでひびわれ照査不要
* c 地震時の3区分については表-4参照

表-2 使用限界状態の検討

限界状態	照査目的	照査の必要性評価	
使用限界状態	耐久性	内面	鋼材腐食環境にないので検討不要
		外面	一般腐食性環境として検討が必要
		せん断	外面に立地可能性ありで検討必要
	水密性・気密性	曲げ	貫通性低くないので検討不用
		せん断	貫通の可能性があるので検討が必要
美観	地中構造物であり、美観の問題なし		
変位変形	ハブレンへの影響	終局限界に至らなければメンブレンへの影響なし、支承部については別途検討	
	美観	地中構造物であり、美観の問題なし	
振動	使用性	振動源がないので検討不要	

(3) ひびわれ照査の解除による断面合理化

使用限界状態について、一般に考えられる限界状態とその照査目的およびLNG地下タンクの設計に用いるべき限界状態について検討した内容は概略表-2に示すとおりである。この結果、LNG地下タンク鉄筋コンクリートの環境条件と所要機能から、変位・変形、ならびに内面側の曲げひびわれは限界状態とならず使用限界状態の照査は不要であることを明確にした。すなわち、底版上面と側壁内面は、水分、酸素の供給がなく鋼材の腐食性環境が形成されないこと等から、ひびわれ幅の照査は不要と評価できる。

一方、底版では、地震作用が支配的とならないので耐久性に関する照査条件によって断面が支配される。このため、底版上面では耐久性に関してひびわれ制限が必要ないことから、従来設計より鉄筋断面積を削減できることになる。今回の合理化設計による底版の鉄筋応力度を、従来設計の許容応力度、および鋼材腐蝕に関する一般の環境の場合の応力度制限値と比較すると表-3のとおりであり、ひびわれ照査解除の効果がわかる。また、従来設計ではひびわれ規制から常時の許容応力度を定めたことに相当することも分かる。

表-3 鉄筋応力度の比較

区分	鉄筋応力度 (kgf/cm ²) (0.1N/cm ²)	概要
合理化設計(今回)の 作用応力度	2290	底板厚 t = 6.0m D51@200×5段
従来設計の許容応力度	1800	D51, S0345 *)
ひびわれ照査の制約を受ける時の 応力度制限値(一般設備)	1830	かぶり(C)10cm 鉄筋間隔 18cm

*)従来設計の断面は、底板厚 t=7.0m, D51鉄筋@190×6段

(4) 多段階耐震照査による合理化

a) 所要耐震水準の明確化

側壁の断面決定において支配的となるのは地震作用である。LNG地下タンクは、危険物貯蔵の設備であることから、耐震性についても一般設備より高いレベルが要求される。しかし、非常に大きい地震動はごくまれにしか生じない偶発荷重であることから、いかなる規模の地震に対しても構造物に通常の健全性を保持させることは過大設計と考えられる。

今回の検討では、供用期間を30~50年として、①1回程度は発生する可能性の高い地震(「基準地震」)に対しては、健全性を保証、②まれに生じ得る大地震(関東大地震の平均的再現、「大地震」)に対しては、軽微な損傷は許容するが補強なしで継続使用が可能、③生じる可能性は非常に小さい当該地点に予想される最大級の地震(「最大地震」)に対しては、相当の損傷は許容するが当面の貯液機能を保持して人命への危険を防止と、3段階に照査地震を設定するとともに、それぞれの起こりやすさに対応して機能の保証水準を区別した(表-4)。なお、③の地震レベル、「最大地震」は従来設計では直接の照査対象にしていないものである。

従来の設計法では、①、②の地震レベルの設計地震動に対して弾性設計を行うことにより、それを超える規模の地震動(例えば③)に対する安全裕度も保証されると考えている。LNGタンクでは重要設備のため、一般設備より設計地震動を大きくする(②の地震も用いる)ことになるが、そのようなまれにしか生じない地震に対しても作用応力度が弾性範囲内となるように設計すると、所要の設計断面が単純に増大するものの、それにより①から③までの地震に対して所要機能を過不足なく満たしているかは必ずしも明確ではない。

今回の検討では、地震の発生頻度も考慮して、地震動のレベルに応じて必要な機能確保水準の差を明確にした。すなわち、遭遇する可能性の低い高レベル地震動に対しては一定の損傷は許容して所要機能は確保するものとし、設計の合理化を進めた。具体的には、②の大地震に対しては、応答塑性率を1~2程度とし、部分的に鉄筋が降伏しているレベルでの残存剛性を用いて求める断面力が終局耐力を越えないこと、③の最大地震に対しては、応答塑性率を3~4程度とし、部分的

表-4 LNG地下タンクが多段階耐震照査

設計地震		基準地震	大地震	最大地震
設計地震	超過の可能性	供用期間中に1回程度	供用期間中に生じる事は稀	供用期間中にほとんど生じない
の意味	地震規模	大きい	かなり大きい	最大級
設計地震	再現期間	約70年	約300年	約1000年
規模	追加速度(基礎2E)相対変位	230 cm/s ² 7 cm	430 cm/s ² 19 cm	690 cm/s ² 32 cm
機能確保水準	人命影響	防止	防止	防止
	設備被害	健全(損傷なし)	軽微な損傷受忍	かなりの損傷疑
	貯液機能	全く支障なし	貯液の継続可能	当面保持
照査する限界状態	補修補強の要否	原則として補修不要	原則として補修不要	補修・補強により再使用可
	断面降伏の終局限界状態	断面降伏の終局限界状態	断面破壊の終局限界状態	断面破壊の終局限界状態
照査の方法	断面降伏の終局限界状態	ひび割れを考慮した残存剛性を用いて求める断面力が降伏耐力以下であること	鉄筋降伏付近での残存剛性を用いて求める断面力が終局耐力以下であること	鉄筋降伏を過ぎた残存剛性を用いて求める断面力が終局耐力以下であること

* 地中壁下端レベルと地表面レベルとの相対水平変位量最大値(一次元地盤応答解析による)=応答変位法における入力変位

に鉄筋が塑性変形しているレベルでの残存剛性を用いて求める断面力が終局耐力を越えないこと、として断面破壊の終局限界状態照査を行う。対応する応答塑性率レベルは、せん断補強が十分でない場合を含む実験から求められた最大応答変位と被災程度の目安⁴⁾を準用して設定したものである。また、①の基準地震に対しては、ひびわれを考慮した断面剛性を用いる解析により断面のどの鉄筋も降伏しないこと、として断面降伏の終局限界状態照査を行う。

b) 照査地震

関東南部のF地点に大きい影響を及ぼす地震として、地震学的検討から、①首都圏直下のマントル最上部での中規模地震(A)、②首都圏直下のプレート境界での中規模地震(B:安政江戸地震型)、③相模トラフ沿いの巨大地震(C:南関東地震型)、④首都圏直下のプレート境界より上部の地殻内での地震(K:活断層地震)の4つを想定地震として選定した。

各地震の規模と再現期間の推定から、対象タンクの供用期間に生じる可能性の大きいものとして、B地震の平均的再現(供用期間を30年として生起確率35%程度)、小さいものとして、C地震の平均的再現(同10%程度)、また非常に小さいものとして、C地震の1σ上限の再現(同3%程度)、の3段階の地震動を、それぞれ「基準地震」、「大地震」、「最大地震」として設定した。設定地震動の規模は、表-4に示したとおりになる。

c) 非線形性を考慮した構造解析の高度化

従来設計では、断面力を全断面剛性を用いた線形解析によって求めている。これは、計算が簡便で通常時の作用応力度レベルに対して比較的適合性の高い解析方法ではあるが、断面の終局状態を評価するためには、

表-5 側壁解析に用いた等価剛性

数値は全断面有効剛性に対する比				
	側壁		地中壁	
	周方向	鉛直方向	周方向	鉛直方向
基準地震時	2/3	載荷側半円 2/3 除荷側半円 1	1/10 ~ 1/2	1/10 ~ 1/2
大地震時	1/2	載荷側半円 1/2 除荷側半円 1	1/10 ~ 1/2	1/10 ~ 1/2
最大地震時	1/3 下端部 1/5	載荷側半円 1/3 除荷側半円 1	1/10 ~ 1/3	1/10 ~ 1/3
摘要	予備解析（一部の鉄筋降伏時に残存剛性1/2程度）をふまえて安全側に（断面力が大きく算出されるように）大きめの値を設定		予備解析により残存剛性を要素ごとに設定、1/2あるいは1/3以上になる部分は1/2あるいは1/3を上限とする	

* 曲げ、軸力、せん断の各剛性を一様に扱った。

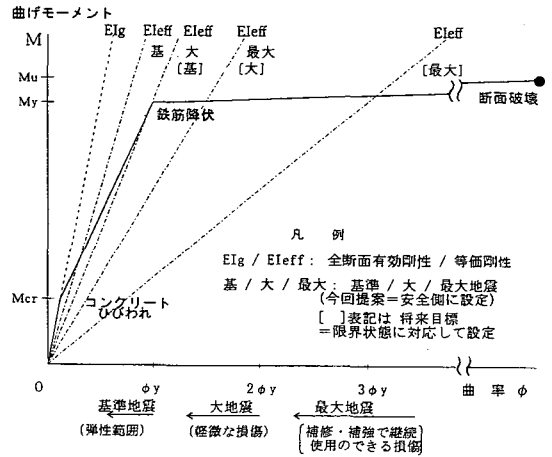


図-4 等価剛性設定の考え方概念

安全側とはいえ実態との乖離が大きすぎる。

今回の合理化検討の主旨に沿うと、断面力の評価方法、すなわち構造解析の方法についても精度向上の可能なところは改善を図った上で、その不確実性を評価することが必要である。とりわけ、地震時の照査では、弾性範囲を超えた終局限界状態における断面力の評価が、設計合理化のために特に重要となるわけである。

今回の検討では、より合理的な解析方法として、部材の残存剛性を用いる等価線形解析の方法を実用化した。まず、予備解析として、ひびわれの影響を考慮した断面力と残存剛性の関係の実験式を用いて断面力と残存剛性の反復計算を行い、部材の一部で鉄筋降伏を生じるレベルの残存剛性を求めた。その結果、側壁では円周方向と地震作用載荷側半円部の鉛直方向については、概ね全断面剛性の1/2以下に低下している。また、地震作用除荷側半円部の鉛直方向断面では、概ね全断面剛性が残存している。この状態を応答塑性率1のレベルに相当するものとして、各照査地震のレベルに応じて残存剛性を評価し、等価剛性とした。表-5にその値を示す。鉄筋降伏後を想定する場合の等価剛性は、代表断面におけるマクロモデル、図-4、をもとに、許容する応答塑性率に応じて推定的に定めたものである。今回の評価は厳密に非線形性を解析して求めるものではなく、実用上の仮定を含むことから、安全側に、すなわち側壁の断面力が大きめに算定されるよう側壁の残存剛性は大きめの値に設定している。

d)今後の課題

地中構造物では、地震作用として地盤の変位作用が支配的であるので、終局限界は断面破壊で規定するより変位で規定する方が合理的と考えられる。今回の合理化検討では、鉄筋降伏後の状態を評価できる3次元の非線形構造解析手法が実用化されていないことから、限界変位に代えて許容する応答塑性率を想定し、これから推定的に限界変位状態に対応する等価剛性を設定

して断面力解析を行い、変位の照査を断面破壊の照査に置き換えている。そのことにより既存の線形解析手法が使えるからである。将来、非線形構造解析を実用化して、終局限界状態を応答塑性率、あるいは応答変位量によって直接規定できれば、断面をより合理化できると考えられる。

また、今回、側壁の地震時構造解析は、周辺地盤を応答ひずみレベルに応じた等価線形バネにモデル化して、片方で載荷、他方で除荷の方向に地盤変位を入力する「応答変位法」を用い、その解析モデルは近似解析に配慮して安全側に設定している。したがって、高レベル地震動に対応して、地盤および鉄筋コンクリートの非線形特性をより厳密に評価した地盤と地下タンクの連成解析が実用化できると、一層の合理化が進むと考えられる。

4. 安全係数設定における設計合理化

RC示方書に準拠した5種類の部分安全係数（図-1参照）を用いて、設計の各段階での不確実性を要因別に分離して個々に評価した。LNG地下タンクについて設定する部分安全係数とその値は、各限界状態、荷重組合せに対応させて総括すると、側壁の場合、表-6に示すとおりとなる。設定の論拠を以下に概説する。

(1) 安全係数設定の基本的考え方

設計合理化の目的に整合するためには、部分安全係数は所要の機能保持水準を確保して最小限の値とすることが肝要である。そのため以下の点に配慮した。

- ① 既存の標準値を単純に採用するのではなくLNG地下タンクに固有の条件を係数に反映する。
- ② 既設タンクの運用実績とりわけ計測結果を可能な

表-6 部分安全係数(側壁)

部分安全係数	限界状態		終局限界状態				
	荷重組合せ		断面破損		断面降伏		
	通常時	地震時	通常時	地震時	大地震時	最大地震時	
材料係数 γ_0	コンクリート γ_c	1.3	1.3	1.3	1.3	(1.0)	
	鉄筋 γ_s	1.0	1.0	1.0	1.0	(1.0)	
部材係数 γ_b	曲げ軸力	1.1	1.1	1.1	1.05	(1.0)	
	せん断耐力	コンクリート	1.3	(1.55)	1.55	1.5	(1.0)
		鉄筋	1.15	(1.4)	1.4	1.35	(1.0)
荷重係数 γ_f	自重	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	土圧 *a	0.8/1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	
	水圧	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	ガス・液圧	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	温度変化	1.05	1.0	1.0	1.0	1.0	
	躯体慣性力	—	1.0	1.0	1.0	—	
	動液圧	—	1.0	1.0	1.0	—	
構造解析係数 γ_a	一般荷重 *b	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	温度荷重 *c	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	
	地震荷重 *c	—	1.1	1.1	1.0	—	
構造物係数 γ_i		1.2	1.1	1.05	1.0	1.0	

*a 小さい方が不利な場合:0.8, 大きい方が不利な場合:1.2, 地震時:1.0
 *b 全断面有効剛性を用いた線形解析 *c 残存剛性を用いた等価線形解析

らば統計的に分析し、係数設定の参考にする。

③ 設計過程における不確実性は、可能な限り対応する各係数に直接的に反映させることにより明確化する。その結果として将来の合理化検討の着眼点を明示する。

④ 従来設計とのキャリブレーションやデータ分析結果の機械的適用ではなく、照査の原点から検討を行い、安全性と経済性の調和を考え、責任技術者として総合的な評価・判断により現段階での最適値を設定する。

⑤ 設計結果を従来設計の結果とも比較してその差異要因を分析し、安全係数の設定に安全上問題ないことについて総合的に評価する。

(2) 特性値と安全係数の設定

a) 材料の特性値と材料係数

品質管理が良好な類似工事での材料試験データの統計分析によると⁶⁾、材料強度の95%保証値は、コンクリート、鉄筋ともに、規格値よりも5~10%程度大きい値となる。本来この95%保証値を強度特性値としてよいことになるが、今回は試験特性再現の保証が十分でないので、発生が非常にまれな「最大地震時」について、鉄筋の材料特性値を規格値 3500kgf/cm² (350N/mm²)より 5%大きく3700kgf/cm² (370N/mm²)に設定した以外は、安全側にRC示方書の標準値である規

表-7 部材係数間のバランス

部材係数の値	部材係数の値			部材係数の比	
	曲げ M	せん断		の比	
		コンクリート Qc	鉄筋 Qs	Qc/M	Qs/M
通常時	1.1	1.3	1.15	1.18	1.05
基礎地震時	1.1	1.55	1.4	1.41	1.27
大地震時		(=1.3x1.2)	(=1.15x1.2)		
最大地震時	1.05	1.5	1.35	1.43	1.29
		(=1.25x1.2)	(=1.1x1.2)		
RC示方書標準 []:地震時	1.15	1.3	1.15	1.13	1.0
		[1.3x1.2]	[1.15x1.2]	[1.36]	[1.2]

格値をそのまま用いた。実工事の過程で既往の統計特性の再現性が確認できれば、値の合理化が可能である。

b) 部材係数

地下タンクの構造部材は、部材厚が2~6mと非常に大型であることから、寸法誤差の断面耐力への影響は事実上無視できる(一般部材では5~10%の影響)。このことを考慮し、部材係数の値をRC示方書の標準値より一部低減して合理化を図った。低減の割合は、限界状態毎に、機能保証水準に対応して差を設けた(表-7参照)。これは、発生頻度の大きい状態に対しては、安全側に、余裕排除を保留したものである。

また、部材のじん性を高めるため、RC示方書に準じて、せん断耐力に対しては曲げモーメント・軸力耐力よりも大きい値を設定した。

なお、断面耐力の算定方法はRC示方書に準拠している。

c) 荷重係数

LNG地下タンクの荷重の大半については、人為的に管理される荷重であることから、あるいは既存タンクの計測実績から特性値を上回る可能性が非常に小さいと判断されることから、荷重係数を1.0と評価する。温度荷重と土圧については、荷重と部材耐力の計測データの分析等により、超過確率 1~5%程度を目安に定めた。温度荷重の荷重係数は1.05、土圧の荷重係数は値の小さい方が構造に不利な場合には0.8、値の大きい方が不利な場合には1.2と設定できる。温度応力を与える温度勾配を指標として温度荷重の計算値と計測値を比較した例を図-5に示す。

地震時については、地震荷重の特性値設定において不確実性に対する配慮を含んでいること、各荷重の同時生起確率が小さいことを考慮して荷重の組合せに対応した荷重係数の修正が必要なこと等を総合して、全ての荷重係数を1.0とする。

d) 構造解析係数

構造解析係数は、構造解析のもつ不確実性によって望ましくない方に生じる解析誤差を補償するための係数である。鉄筋コンクリート構造物の解析において、

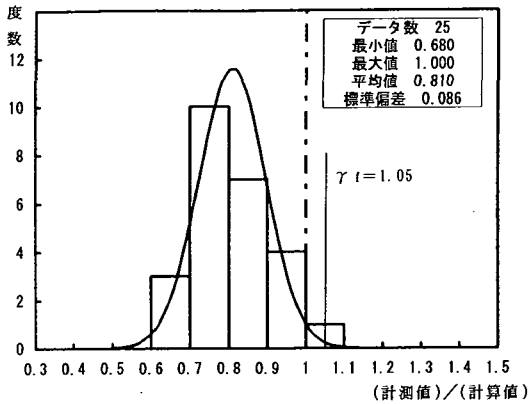


図-5 温度勾配 計算値と計測値の比較

解析条件に不確実性がなく、線形解析によって断面力を算定する場合は、一般に安全側の仮定に立脚しているので、構造解析係数は 1.0 とできる。

しかし今回の構造解析の方法には、部材の非線形特性の近似として等価線形解析を行うこと、地盤からの作用をバネモデルで評価すること、等に不確実性が残っている。この解析の不確実性に対応する構造解析係数の値は、解析の感度分析と既設タンクの計測実績の分析等を総合して、解析方法に応じて実際の断面力が解析値から望ましくない方向へ変動する程度を推定して、値を設定した。また、照査する限界状態ごとに解析誤差が結果に及ぼす影響度も評価した。例えば、底版の常時で温度荷重のある場合は、解析の不確実性が小さくなく限界状態に達したときの影響は重大であるので、1.25 と大きい値とした。側壁の地震荷重に対しては限界状態に達した時の影響が特に大きくはないことから 1.1 とした。これらの値は、今後の技術蓄積により 1.0 に近づけることを目指すべきものである。

なお、構造解析の誤差要因に対して安全性を保証する方法としては、解析条件である物性値（地盤バネ値、断面の等価剛性値等）に安全裕度を与える方法も考えられるが、次の理由により構造解析係数として扱う方が望ましいと考えた。

- ① 構造解析の不確実性の明確化：構造解析誤差は構造解析係数によって評価するのが本来的である。物性値条件による誤差は、単にその値固有の誤差というより、解析においてその物性値を用いるモデル化したことによる誤差を含んでいる。
- ② 安全性の確保の確実性：構造解析に誤差を生じる要因は複雑であり、特定の解析条件値（物性値）を一定方向に変化させても、解析結果が全ての部位について安全側に変動するとは限らない。
- ③ 適切な安全裕度の設定：個々の物性値に裕度を確

表-8 構造解析係数設定例(底版)

区分	断面力変動幅の検討		構造解析係数		
	解析条件変動に伴う変動幅	計測との比較による変動幅			
底版	常時	温度 あり	曲げ：～1.25 軸力：～1.27	応力度 0.65～1.25	1.25
	地震時	温度 なし	曲げ：～0.95 軸力：～0.92		

注) 解析条件として断面剛性と地盤反力係数を代表に選定
 数値解析の基本誤差 5%程度も包含
 今回は安全側に断面力の変動幅の概ね上限値を採用して構造解析係数を設定

表-9 構造物係数の比較(終局限界状態)

	常時	地震時		
コンクリート標準示方書5)	1.2	～ 1.0		
原子力マニュアル6)	1.15	—	—	1.0
LNG 地下タンク (今回検討)	1.2	1.1	1.05	1.0
		基準地震	大地震	最大地震

保しようとする、安全裕度が重複して過大設計となる懸念がある。構造解析係数を用いると、構造解析の結果としての誤差を総合的に評価できる。

④ 限界状態に応じた的確な安全率の設定：構造解析係数によると、照査する限界状態に応じて安全率に差を設けることが容易であり、安全裕度の割りつけが陽な形で示される。限界状態ごとに物性値条件を変化させる方法は根拠が明確でなく、恣意的になりやすい。

⑤ 今後の設計合理化の方向性の明確化：解析手法の精度についての新しい知見の追加により、構造解析係数を 1.0 に近づけてより合理化できることが示される。

e) 構造物係数

限界状態設計法（部分安全係数法）では、設計内容の不確実性については、対象構造物の重要性とは原則的に無関係に、一定のレベル以下であることを保証するのが理想である。したがって、構造物係数の値の設定においては、設計内容の不確実性の大小については、考慮しなくてすむようにして、純粋に構造物の重要度等に対する配慮のみを反映することとした。

F 地点(火力発電所)における LNG 地下タンクのもつ重要性について、それぞれの限界状態に到達した場合の社会への影響、設備の本来機能への影響、補修・復旧の難易度、異常予知の可否、荷重作用等の起こりやすさ等の観点から評価することにより、表-9 に示すように通常時 1.2 から最大地震時 1.0 まで、限界状態に応じた値を設定した。

LNG 地下タンクは、タンク構造体損傷などの異常時に対しても、地下構造であり保安設備を備えているので、公衆や社会活動への直接的影響はなく、職員の生命に影響する可能性も非常に低い。しかし、万一の LNG 火災は社会不安を惹起する懸念があり、何より

表-10 設計数量の比較

区 分		従来設計 A	新設計 L	比 較 L-A	
底 版	コンクリート (m ³) [厚さ □]	29,800 [7.0]	25,400 [6.0]	△4,400	
	鉄 筋	上段軸方向筋	3,180	2,460	△ 720
		下段軸方向筋	420	400	△ 20
		せん断補強筋	910	1,020	+ 110
(tf) 計	4,510	3,880	△ 630		
側 壁	コンクリート (m ³) [厚さ □]	23,700 [2.6]	23,700 [2.6]	± 0	
	鉄 筋	鉛直方向軸筋	1,650	1,620	△ 30
		周方向 軸筋	2,810	2,580	△ 230
		せん断補強筋	190	220	+ 30
(tf) 計	4,650	4,420	△ 230		

(注) * 部位によっては新設計の方が従来設計より鉄筋量大

も貯液機能の停止は発電機能に支障を与え社会機能に影響する。また、補修・復旧は非常に困難である。

このような評価に基づき、対象構造物の重要性は非常に高いものと位置づけた。より具体的には、タンクの重要性は、補修の困難性から通常時については原子力の重要土木設備にも劣らないものとし、生じることが非常にまれな最大地震時に対しては、原子力重要設備に準じるものとした。

5. 合理化設計の試算と評価

設定した新しい安全照査システムにより、図-2に示した地下タンクを具体例として断面設計を行った。その結果を従来設計法による場合と比較して評価する。

(1) 新設計法による数量合理化効果(経済性の向上)

新設計法による設計数量を、従来設計と比較すると、表-10に示すとおりである。軸方向鉄筋の総量と底板コンクリート量は減少し、せん断補強鉄筋は増加している。せん断補強筋は全般的な増強であり、軸方向鉄筋についても側壁では一部の部位で増強されている。数量差の結果、建設費用としては底板で約15%、側壁で約5%の縮減が実現する。なお、側壁のコンクリート量は浮力対策の自重確保のため変化させていない。

底板の設計において経済性が向上した合理化の主要因としては、まず、前述の内面曲げひびわれ照査の解除があげられる。断面の終局耐力評価により、多段配筋(D51×5段)の全鉄筋を有効に評価できたことも合理化要因である。従来設計では最外縁鉄筋の応力度だけが支配的で内側鉄筋の耐荷能力は十分評価されていない。また、底板厚の減少による温度荷重など荷重作用の低減も鉄筋削減に寄与している。

側壁の場合は底板ほどの数量縮減はないが、従来照査していない「最大地震」を導入したにも拘わらず経済

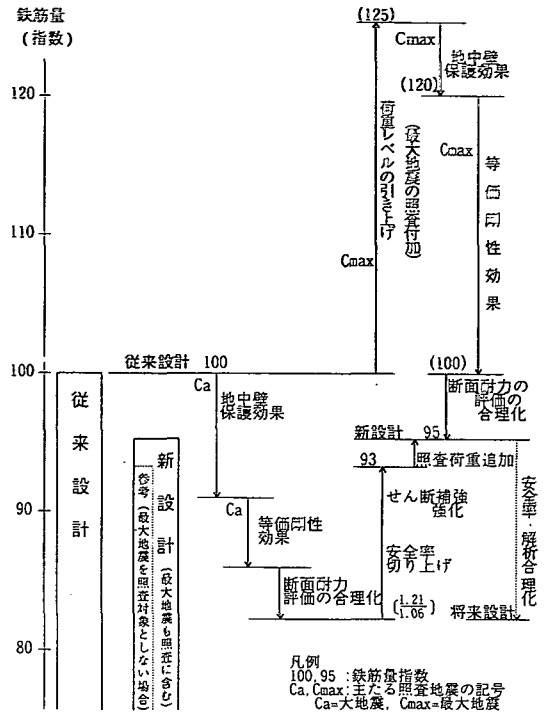


図-6 要因別合理化効果の概念図(側壁)

性が向上している。この主要因は、前述の残存剛性を用いた等価線形解析による断面力評価の合理化、および側壁外周にある連続地中壁の側壁保護効果を評価する二重円筒シェルモデル解析による荷重作用の低減である。構造解析手法の高度化と同調して、地震動の規模と発生頻度に応じて機能保証水準を変化させた「多段階耐震設計」を導入したことも経済性向上につながっている。さらに、終局耐力評価により断面耐力評価が合理化されたこともあげられる。側壁について要因別効果の割合を模式的に示すと図-6のようになる。

なお、新・旧設計の照査内容を比較して示すと表-11のとおりである。形式上の安全率については、総合すると新設計の方が従来設計より大きくなっており、安全率の見直しは断面縮減につながったわけではないことがわかる。

(2) 新設計の安全性の評価(機能確保の確実性の向上)

今回の合理化検討では、構造物の所要機能、重要性について原点から考察して、照査する限界状態と安全係数を設定した。

また、建設地点およびLNGタンク構造に固有の環境条件を個別に反映して、特性値と安全係数および解析方法を設定している。

その結果、所要機能を確保できる確実性が従来設計

表-11 設計方法の比較

項目	区分	従来設計		新設計(今回)	
		大地震時	大地震時	大地震時	最大地震時
設計体系		許容応力度設計法		限界状態設計法	
使用材料	コンクリート 鉄筋	呼び強度 240kgf/cm ² (91日強度) S D345			
許容応力度 (kgf/cm ²)	コンクリート σ_{ca} 鉄筋 σ_{sa}	90	2000	—	—
許容応力度の割増し		地震・温度 $\times 1.65$			
材料特性	強度特性値 (kgf/cm ²)	コンクリート f'_{ck} 鉄筋 f_{yk}	—	240	240
	ヤング係数 (kgf/cm ²)	コンクリート E_c 鉄筋 E_s	1.4×10^6 (2.5×10^6) 2.1×10^6	2.5×10^6 2.1×10^6	—
安全	材料係数 γ_m	コンクリート γ_c 鉄筋 γ_s	—	1.3	1.0
	部材係数 γ_b	曲げ・軸力 せん断 コンクリート 鉄筋	—	1.1 1.55 1.4	1.05 1.5 1.35
全	荷重係数 γ_f	一般/地震	—	1.0/1.0	
	構造解析係数 γ_a	一般/地震	—	1.0/1.1	1.0/1.0
散	構造物係数 γ_i	地震時	—	1.05	1.0
	形式上の 総合安全率 F_s (鉄筋)	曲げ・軸力 せん断力	3500 $2000 \times 1.65 = 1.06$	($\gamma_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_a \cdot \gamma_i$) 1.21 1.05 1.54 1.35 (1.28*)	
断面剛性	一般荷重 温度荷重 地震荷重	E I 1/2 E I E I	E I** 1/2 E I 1/2 E I	E I** 1/3 E I 1/3 E I	—
	構造解析モデル	単円筒シェル (地中壁考慮せず) 応答変位法	二重円筒シェル (地中壁を考慮) 応答変位法		
摘要		大地震まで照査 弾性設計		最大地震も照査 等価線形解析	

注) 通常時, 基準地震時は, 断面を支配しないため記載を省略
 * 材料強度特性値 $f_{yk}=3500\text{kgf/cm}^2$ を基準とした場合の値
 ** 一般荷重についても地震荷重同様に剛性低下を考慮できるが, その合理化効果は小さいことから, 計算簡素化のため今回は低減していない
 *** $1\text{kgf/cm}^2=0.1\text{N/mm}^2$

以上に明確になったといえる。

具体的には次の2点が大きい。① 新設計では, 脆性的な破壊モードが先行することがないように, 各種破壊モードに対して差を設けた安全裕度配分を行い, 構造のじん性確保に十分配慮した。具体的には 材料係数は, コンクリート(係数値: 1.3)を鉄筋(同1.0)より大きくした。また, 部材係数は, 曲げ軸力(同1.1)よりせん断力(コンクリート=同1.3)を大きくした。さらに, 地震時は, せん断について常時の1.2倍とした(コンクリート=同1.55)。これにより, 地震時のせん断力に対する安全率は従来設計より大きく増加している(表-11, F_s の項参照)。② 新設計では, 予想し得る最大級地震動として「最大地震」を新たに設定して耐震設計の荷重レベルを引き上げ安全照査を行ない, その場合でも重大な損傷を生じないことを明確にした。このことから, 耐震性の信頼水準が従来より高まっている。

すなわち, 今回の合理化は, せん断補強を強化して高いじん性を確保することにより, 偶発荷重に対しては塑性変形を許容し軸方向鉄筋量の削減を図る等, 所要機能を確保しつつ全体として設計数量を縮減できる方法を実用化したものである。言い換えれば, 設計体

系を基本から再構築することにより, 所要機能確保の確実性の向上と同時に経済性を向上させるという合理化を実現したものである。

(3) 新設計による設計内容の透明性の向上

新設計体系では, 合理化検討を通して, 設計内容あるいは設計の考え方を最大限明確化できている。すなわち, 設計者の意図が設計プロセスとして限界状態, 部分安全係数等に直接的に表現され, 設計上の種々の不確実性に対する現段階での判断の内容が明確になっている。このため, 関係する責任者間で, 設計の内容について具体的に議論しやすくなった。設計計算の実務者に対しても, 設計の全体像と大きい目標・意図が把握しやすくなり, 合目的で効率的な作業の組み立てを容易にしたといえる。

さらに, 合理化設計体系では現段階における不確実性の内容と, その不確実性を低減させることによる将来の合理化要因が示されるので, 今後の関係データの収集, 研究に効率化が期待できる。

6. 合理化における限界状態設計法の有効性

前章に示した合理化の成果は, 限界状態設計法の設計照査体系を活用することにより, 論理的に具体化できたものといえる。今回の検討考察をふまえて, 限界状態設計法の体系を改めて評価してみる。

(1) 設計合理化検討に適した特徴

今回の合理化項目(合理化着想)毎に限界状態設計法を活用した内容について示すと, 表-12 のようになる。

今回の合理化事例に則して, 設計合理化実現に有効と評価できる限界状態設計法の特徴を, 従来の許容応力度法と比較してまとめると次のとおりである。

① 許容応力度法では容易に分離できない耐荷性と耐久性とを, 別個に照査できるので, 固有の環境条件を反映して適宜ひびわれ規制を解除することも可能になり, 所要鉄筋を削減できる。

② 曲げ耐力とせん断耐力との間で, 個別に安全裕度を割りつけることが自由にできるので, 設計の意図により脆性的なせん断破壊を回避してじん性を確保することが容易になる。これを背景に, 所用機能水準に応じて塑性変形を許容する経済設計の追求が可能になる。

③ 従来設計では, 鉄筋降伏を限界状態としていることになるが, 新設計では, 断面破壊を限界状態として, 降伏以降の断面耐力の裕度を有効に評価できる。例えば, 大型部材の多段配筋において全鉄筋の耐力が有効活用できる。

表-12 設計合理化と限界状態設計法の関連

合理化項目	限界状態設計法活用の内容	具体的効果
ひびわれ規制の解除 〔鉄筋腐食の環境に ないことの反映〕	・ 当げひびわれの使用限界 状態照査の省略 ・ 終局限界状態により断面 破損に対する十分な安全 を確保	・ 底版鉄筋量の削減 (1)
地震の起こりやすさに 応じた耐震設計 最大規模の地震動 に対しても安全照査	・ 多段階耐震設計の限界 状態を設定 ・ かなりの損傷を受忍す る限界状態の設定	・ 経済的な耐震設計 (2) ・ 耐震性の信頼性向上
せん断破壊に対する安全 性の強化 (じん性の確保)	・ せん断の部材係数を曲げ よりも大きく設定 地震時はさらに2割増し ・ 部材寸法、軸鉄筋量、 曲げ・軸力の影響を考慮 した、せん断耐力算定式	・ 脆性的破壊 モードに対し 安全性の向上 構造体のじん 性向上 ・ 耐震性向上
構造物の重要性に対応 した安全水準の設定	・ 構造物係数を限界状態 ごとに設定	・ 設計水準の 明確化
材料品質管理が良好で あることの反映	・ 試験データにもとづい て材料特性値を設定	・ 鉄筋量削減 (7)
部材寸法が大きいため 寸法誤差の影響が小さい ことの反映	・ 部材係数を標準値より も小さく設定	・ 鉄筋量削減 (6)
個々の荷重の不確実性 の程度を個別に評価 (計測実績活用等)	・ 各荷重の特性に応じて 荷重の特性値と荷重係数 を個別に設定	・ 安全の信頼 性向上 ・ 断面合理化
多段配筋の全段を有効 利用	・ 終局耐力を評価 (断面破壊の終局限界)	・ 軸方向鉄筋 量削減 (4)
連続地中壁の保護効果 の活用	・ 二重シェル構造解析 ・ 構造解析の不確実性は 構造解析係数で評価	・ 側壁鉄筋量 の削減 (5)
鉄筋コンクリート部材 の断面力-変形関係の 非線形性の設計への反 映	・ 残存剛性を用いた等価 線形解析 ・ 構造解析の不確実性は 構造解析係数で評価	・ 側壁鉄筋量 の削減 (3)

()内の数値は経済的合理化効果の大きさの順位の目安を示す

④ 材料、荷重、解析法の不確実性に応じて個々に安全係数を設定できるので、対象構造物の固有条件を反映して必要最小限の安全率を設定できる。従来設計法では、条件に応じて許容応力度の増減により対応するとしても根拠が曖昧であるので自ずと限度がある。

⑤ 構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的影響に応じた安全裕度についての設計者の意図を明確に照査に反映できる。従来設計法では、主として、荷重の値の設定において重要度に配慮し、許容応力度の割り増し操作で限界状態に応じた社会的影響の差について考慮するが、対象構造物の個別条件を細かく反映することは容易でない。そのため、多段階耐震設計の考え方も組み込みにくい。

⑥ 照査の各部分における不確実性について設計者の判断内容を明示できることにより、客観的な議論が容易になる。従来設計では、個々の不確実性の内容は明確になりにくい。

⑦ 限界状態と部分安全係数の設定を通じて、各分野の最新の研究成果やデータ・知見を個別に設計に反映

できる。また、そのような設計体系が構築されたことから、今後も継続して迅速に設計合理化が図れることになる。従来の体系では許容応力度の再設定が必要となり速やかな合理化は容易でない。

(2) 限界状態設計法適用における留意点

1986年にRC示方書に限界状態設計法が導入されてから10年が経過するが、これまで、限界状態設計法の本来の特徴が十分に活用されてきたであろうか。個々の機関における限界状態設計法への移行については、解析方法を従来の踏襲とし、安全係数について、確率変量の機械的解析処理で求めることができない現状から、従来設計とのキャリブレーションによって定めようとした例が多い様である。その場合、照査手順が複雑になるにもかかわらず、実際の設計結果は従来と大差ないことになり、新設計法活用のインセンティブが働かないことになる。

しかし、まえがきで述べたように、今後、所期の安全性を有するものをより経済的に作るこれがこれまで以上に強く求められる時代になると認識するならば、技術者としては、自己責任を認識した上で設計の合理化に積極的に取り組むべきであろう。その目的に対して限界状態設計法は非常に有効な体系と言える。

一般に責任ある技術者は、その経験を通して現行の設計に何らかの合理化の必要性、いかにいえば、何らかの課題・問題点を認識しているはずである。そのような場合、今回の検討のように、その課題を限界状態設計法の体系の中で明確にすることにより、より合理的な設計を実現できることになる。直ちに合理化が実現されなくても、合理化の方向性が明確にできれば、その後の諸検討の効率化が図られることになる。

本論文の検討では、コードキャリブレーションではなく、実務経験にもとづく合理化着想を論理的に実現させる手段として、限界状態設計法の体系を組み立てている。本研究は、限界状態設計法をその本来の目的、すなわち設計合理化達成の目的のためにどのように活用できるか、事例を示したものである。

7. あとがき

LNG地下タンクの鉄筋コンクリート構造について、限界状態設計法を活用した新設計法を設定し、その適用により、耐震性等の安全信頼性を向上させ、同時に経済性も向上させる合理化を達成した。この合理化は、対象構造物に固有の条件を従来設計よりも細かく設計に反映できたことによるものである。

なお、このような合理化の一部は従来設計の体系の

中でも工夫によって実現できないわけではないが、その場合は一般に設計体系が一貫しなかったり、許容値の設定に設計者としての判断を下しにくいことが多い。今回の検討では限界状態設計法の体系を活用することにより、効率的にまた、より客観的に合理化が達成できたわけである。

限界状態設計法は合理化の着想を実現するための、あるいは合理化要因を抽出するための有効な手段であるが、機械的・型的に手法を適用することによって合理化の実現が保証されるものではないことに留意しておきたい。

今回の研究は、これまでの技術成果を集大成するとともに、今後の合理化研究の方向性を示したのものとなっている。例えば、安全係数設定の根拠を明確化したことにより、今後の技術知見の蓄積を反映して継続的に合理化を進めることが容易になったといえる。また、LNG地下タンクについて一層の合理化を進めるためには、土との相互作用のもとでの荷重作用と鉄筋コンクリート円筒構造体の終局状態を精度よく評価できる実用的な解析手法の開発が引き続き課題であることが明示できた。

なお、今回の新設計では従来設計との大きい乖離は避けるものとして、いくつかの条件設定を安全側にした。構造解析係数、構造物係数等の安全係数は今後低減を検討していきたい。また、大地震、最大地震に対する機能保証水準はさらに緩和してよいものと考えている。

今回の合理化検討の過程と成果が、一般のコンクリ

ート構造の設計合理化、とりわけ高レベルの大地震を視野に入れた地中構造物設計の合理化に参考になれば幸いである。

謝辞：限界状態設計法の本質についてご教示いただき、本研究の全般にわたって的確なご指導をいただいた東京大学 岡村 甫 教授に深甚の謝意を表します。

等価剛性の考え方にご助言をいただいた 東京大学の前川宏一 助教授、電力中央研究所の金津 努 氏にも感謝いたします。また、構造解析の実施に多大のご努力をいただいた東京電力と東電設計火力土木部の関係諸氏に、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) 電気事業連合会；LNG地下式貯槽(土木設備)設計指針, 1978.
- 2) 日本瓦斯協会；LNG地下式貯槽指針, 1979.
- 3) 電力土木技術協会；電力施設地下構造物の設計と施工, III-2 燃料地下貯槽, pp557-632, 1986.
- 4) 土木学会；コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編, 1991.
- 5) 土木学会；原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, 1992.
- 6) 池田尚治, 宮本幸始；土圧を受ける構造物の設計, 新示方書によるコンクリート構造物の設計例シリーズ第2巻, 技報堂出版, pp68-69, 1987.

(1996.3.22 受付)

STUDY ON STREAMLINING THE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES FOR INGROUND LNG STORAGE TANKS

Koji MIYAMOTO

This dissertation specifically refers to inground LNG storage tanks and studies methods to achieve a more efficient and streamlined design for the reinforced concrete structures required for these storage facilities. Studies have been carried out with the limit state design method used for this purpose. The results of these investigations have led to the development of specific design methods which are capable of achieving the two goals of improving the reliability of equipment safety and of improving the economic efficiency of construction at the same time. The limit state design method has been proved very effective system for streamlining in design on the basis of the leadership of the engineering staff in control.