

PCLNG貯槽の耐震設計

— LNG 地上式貯槽指針の改訂内容 —

西崎 丈能*

1. はじめに

PC 容器構造を液化天然ガス (LNG) の貯蔵容器に適用した PCLNG 貯槽は、1960 年代から欧米で建設され始め、1980 年代以降は欧米では主流の貯槽型式となっている。一方で、わが国の PCLNG 貯槽の歴史は浅く、1993 年に大阪ガス(株)で初めて容量 14 万 m³ の貯槽が建設され、それ以降、大阪ガス(株)に 3 基 (14 万 m³ × 2 基, 18 万 m³ × 1 基)、日本ガス(株)に 1 基 (3.6 万 m³)、西部ガス(株)に 1 基 (0.1 万 m³) が完成しており (写真 - 1)、現在、数基の PCLNG 貯槽が建設中あるいは計画中である。今後、PCLNG 貯槽は、その安全性・信頼性、土地の有効活用、経済性からわが国においても地上式の LNG 貯槽の主流になっていくものと考えられる。また、本年 8 月には、(社)日本ガス協会から PCLNG 貯槽を新たに取り込んだ「LNG 地上式貯槽指針」が発行された。

本稿では、新しい「LNG 地上式貯槽指針」¹⁾の規定内容に関して概説する。

2. LNG 貯槽

天然ガスは、インドネシア、マレーシア、オーストラリアなどの原産地で容積 1/600 に液化され、LNG としてわが国に運搬される。受け入れ基地の LNG 貯槽で貯蔵された後、気化されて都市ガス用あるいは発電燃料用として市中に送出される。LNG はメタン (CH₄) が主成分のため、燃焼の際の CO₂ 発生量が他の炭化水素に比べて少ないほか、液化される際に不純物が取り除かれ、環境にやさしく、クリーンなエネルギーとして需要が増加している。

LNG は -160 °C の極低温の可燃性の液体であり、それを貯蔵するには低温特性を考慮した低温貯槽が使用される。

地上式の LNG 貯槽の型式は、従来は金属二重殻貯槽が主流であった。この貯槽型式は LNG を保持する 9% Ni 鋼製の自立式の内槽と保冷材を保持する炭素鋼製の外槽からなる貯槽本体と万一の漏液の際に LNG を溜めるコンクリ



写真 - 1 PCLNG 貯槽 (容量 18 万 m³)
(大阪ガス(株)泉北製造所第二工場)

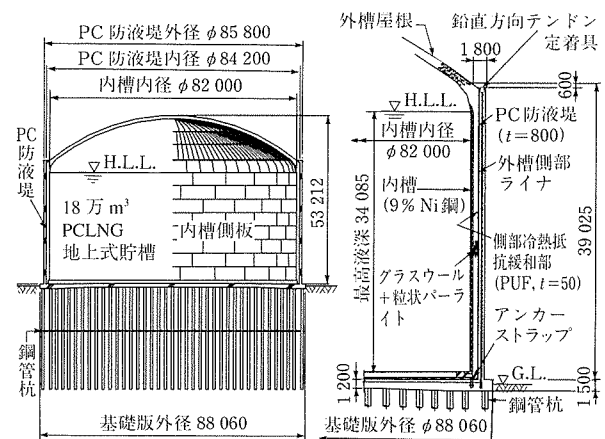


図 - 1 PCLNG 貯槽の構造例

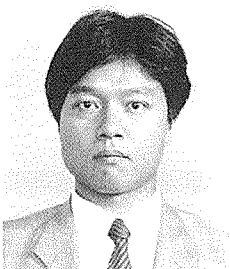
ート製の防液堤から構成されている。

PCLNG 貯槽は金属二重殻貯槽の外槽と PC 製の防液堤を一体化した貯槽型式である (図 - 1)。

3. LNG 地上式貯槽指針の規定

(社)日本ガス協会では、1981 年に金属二重殻貯槽の計画、建設から維持管理にわたる技術指針として「LNG 地上式貯槽指針」²⁾を発行している。PCLNG 貯槽の設計・施工に関しては、通商産業省 (現経済産業省) の委託を受けた(財)天然ガス導入促進センターが 1990 年に「PCLNG 地上式貯槽指針 (素案)」³⁾を作成している。

「LNG 地上式貯槽指針」は、発行後約 20 年を経過し、兵庫県南部地震以降の高レベル地震動への対応や性能設計手法などの新たな技術を貯槽の設計・施工に対応させるために本年 9 月に改訂された。改訂では、最新の技術の取込み



* Takeyoshi NISHIZAKI

大阪ガス(株) 技術部土木建築技術
チーム 課長

や高レベル地震動に対応した規定の追加のほかに、将来の技術進展に対応し、幅広く合理的な設計方法が導入できるように性能設計体系を導入している。同指針では、今後の建設が増加すると予測される PCLNG 貯槽も対象として、その設計・施工に関して規定が盛り込まれた。また、同時に「LNG 地下式貯槽指針」も改訂されている。

以下に改訂された「LNG 地上式貯槽指針」¹⁾の内容に関して PCLNG 貯槽を中心に説明する。

3.1 設計地震動

設計地震動の算定方法は、2001年に発行された(社)日本ガス協会の「製造設備等耐震設計指針」⁴⁾に拠っている。対象とする地震動はレベル1およびレベル2の2段階で、レベル1地震動は「貯槽の供用期間中に発生する確率の高い地震動」、レベル2地震動は「貯槽の供用期間中に発生する確率の低い高レベルの地震動」と定義される。

(1) 地表面における震度

地表面における水平震度 (K_H) および鉛直震度 (K_V) は次式による。

$$K_H = 0.150 \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$$

$$K_V = 0.075 \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$$

ここに、

α_0 : 地震動のレベルに基づく係数で、レベル1地震動では1.0、レベル2地震動では原則2.0

α_1 : 重要度に基づく係数で原則1.0

α_2 : 地域に基づく係数で、レベル1地震動では0.4~1.0、レベル2地震動では0.7~1.0

α_3 : 表層地盤増幅係数で1.4または2.0(設置位置近傍に大きな地震動を生じさせる可能性のある活断層がない場合は1.8)

(2) 地表面における加速度

地表面における水平加速度 (α_H) および鉛直加速度 (α_V) は次式による。

$$\alpha_H = 150 \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \text{ (Gal)}$$

$$\alpha_V = 75 \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \text{ (Gal)}$$

したがって、地表面の水平加速度では、レベル1地震動では84~300 Gal、レベル2地震動では294~600 Galとなる。

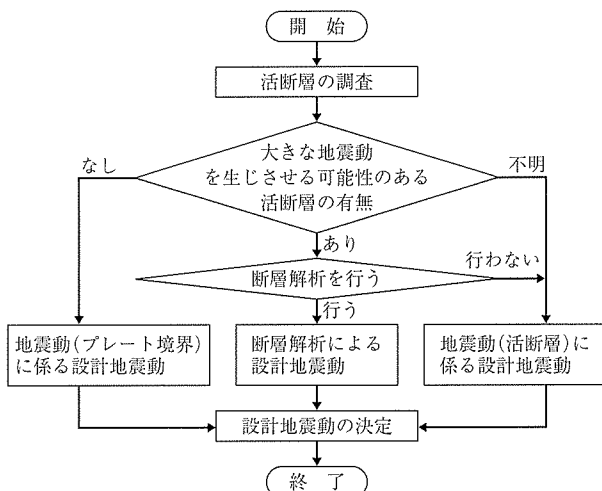


図-2 レベル2設計地震動の算定フロー¹⁾

(3) 設計地震動の算定

レベル2設計地震動は、文献等による活断層調査結果に基づき図-2に示すフローに従って算定される。設置位置近傍に大きな地震動を生じさせる可能性のある活断層がある場合は、断層解析に基づいて設計地震動を算定しても良いが、下限値としてマグニチュード6.5程度の直下地震による地震動の大きさを下回らないこととしている。

(4) PC 防液堤および基礎の設計地震荷重

PC 防液堤および基礎に作用する地震荷重は、修正震度法を用いる場合は、自重に以降に示す式により算出される修正震度を乗じて慣性力を求め、貯槽下部およびPC 防液堤端部に発生する断面力、モーメント等を加算して地震荷重を算定する。

$$K_{MH} = \alpha_5 K_H$$

$$K_{MV} = \alpha_5 K_V$$

ここに、

α_5 : 水平および鉛直方向の固有周期を考慮して求めた応答倍率(レベル2地震動の場合は、図-3とするが、部材の塑性変形による長周期化に伴い水平方向の応答倍率が増加する可能性がある場合は、その影響を適切に評価して求めるか、または地盤種別ごとの基準応答倍率の最大値を用いる)。ただし、基礎版は1.0

時刻歴応答解析による場合は、適切な入力地震波と適切な減衰を用いて、地盤と基礎-貯槽構造系の動的相互作用を考慮した解析モデルにて応答解析を行い、地震荷重を算定する。この場合、地震基盤面に入力する水平加速度は、

$$\alpha_H = 150 \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \text{ (Gal)}$$

地表面に入力する場合は

$$\alpha_H = 150 \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \text{ (Gal)}$$

である。

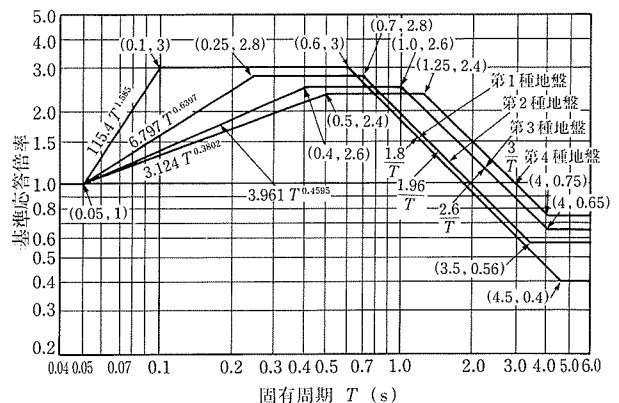


図-3 レベル2地震動の基準応答倍率¹⁾

3.2 LNG 地上式貯槽の要求性能

要求性能は、「貯槽の用途、設置される周辺環境および運転条件から、貯槽全体に対して使用者が求める性能」である。

常時(通常運転時、強風時、耐圧試験時、水張り試験時)、

表 - 1 LNG 地上式貯槽の要求性能¹⁾

常時における要求性能	レベル1地震動に対する要求性能	レベル2地震動に対する要求性能
・基地内部・外部の人身と設備の安全を損なわない ・ガス製造機能に支障をきたさない	・基地外部の人身と設備の安全を損なわない ・ガス製造機能に支障をきたさない	・基地外部の人身と設備の安全を損なわない

表 - 2 PCLNG 貯槽の各部位の目標性能¹⁾

部 位	性能分類	常時性能	レベル1耐震性能	レベル2耐震性能
内 槽	耐荷性能 液密・気密性能	・所定の強度を有する ・液密性および気密性が保持される	・有害な変形が残留しない ・液密性および気密性が保持される	・変形が残留しても、液密性および気密性が保持される
外 槽	耐荷性能 気密性能	・所定の強度を有する ・気密性が保持される	・有害な変形が残留しない ・気密性が保持される	・変形が残留しても、気密性が保持される
基 礎	耐荷性能	・所定の強度を有する	・有害な変形が残留しない	・変形が残留しても、内槽、外槽、保冷、PC防液堤の目標性能を損なわない
防液堤	耐荷性能 液密性能	・所定の強度を有する ・漏液後の液密性を損なわない	・有害な変形が残留しない ・漏液後の液密性を損なわない	・変形が残留しても、漏液後の液密性および外槽の目標性能を損なわない

レベル1地震時、レベル2地震時における LNG 地上式貯槽に対する要求性能を表-1に示す。

3.3 目標性能

目標性能は、「貯槽の要求性能を満足するために、貯槽の構成部材が保持しなければならない性能」である。

PCLNG 貯槽の各部位の要求性能を表-2に示す。ここで、所定の強度とは「常時の荷重に加え、経年変化も考慮した強度」である。

PCLNG 貯槽の防液堤は防災施設であるため、常時性能、レベル1耐震性能、レベル2耐震性能に加えて、漏液後の目標性能として「所定の強度を有する」および「液密性が保持される」を設定している。また、上下水道施設のPC壁と異なり、常時および地震時には液圧を受けていないが、常時、レベル1地震時、レベル2地震時にかかわらず、万一の漏液時に機能を発揮する必要があるため、常時、レベル1耐震性能、レベル2耐震性能評価における目標性能として、「漏液後の液密性を損なわない」としている。

3.4 設計における評価項目

基礎（杭も含む）およびPC防液堤の設計照査は、限界状態設計法の考え方に基づいている規定されている。荷重の組合せおよび荷重係数に関しては、建設実績も踏まえて表-3に示すように設定している。

評価項目および限界値の設定、安全係数の設定、評価方法に関しては、コンクリート構造部については、「PCLNG 地上式貯槽指針(素案)」³⁾、「コンクリート標準示方書」⁵⁾等を参考に設定している。また、基礎については、「鉄道構造物等設計標準・同解説・基礎構造物」⁶⁾等を参考に設定している。設定した安全係数を表-4に示す。

(1) 基礎版および防液堤(コンクリート構造)の評価方法
基礎とPC防液堤の設計上の評価項目を表-5に示す。

1) 常時性能の評価

常時性能評価では、目標性能である「所定の強度を有する」を評価するために、耐荷性を確保させる観点から評価項目として断面破壊を設定している。ただし、鉄筋の応力は降伏強度以下としている。また、設計耐用期間の耐久性を確保させる観点から、基礎版においては、ひび割れ（ひび割れ幅、鉄筋応力の制限）を、PC防液堤については、ひび割れ発生を評価項目としている。

2) レベル1耐震性能の評価

目標性能である「有害な変形を残留しない」を評価するために、常時性能と同じく断面破壊を評価項目とし、鉄筋の応力は降伏強度以下としている。

3) レベル2耐震性能評価

基礎版に関しては、塑性変形、不等沈下等によって、基

表 - 3 PC 防液堤の荷重の組合せと荷重係数¹⁾

荷重の種類	評価項目	常 時				レベル1 地震時	レベル2 地震時	漏液後	
		通常運転時		強風時	耐圧試験 水張試験			液密性	断面破壊
		ひび割れ	断面破壊	断面破壊	断面破壊	断面破壊	断面破壊		
通常 荷 重	自重	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	ガス圧力	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0		
	保冷材圧力	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0		
	温度荷重	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0		
	プレストレス力	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	拘束荷重(収縮・クリープ)	1.0						1.0	
	外槽屋根荷重	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	地震荷重					1.0	1.0		
	風荷重			1.0					
	液圧(漏液後)							1.0	1.0
	温度荷重(漏液後)							1.0	1.05
	試験荷重				1.0				

表 - 4 安全係数¹⁾

安全係数		常時性能		レベル1耐震性能	レベル2耐震性能	漏液後性能		
		ひび割れ	断面破壊	断面破壊	断面破壊	液密性	断面破壊	
材料係数	コンクリート	1.0	1.3	1.0	1.0	1.0	1.3	
	鉄筋	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
部材係数	曲げと軸力	軸力	1.0	1.3	1.0	1.0	1.3	
		曲げ, 軸力	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	
	せん断	面外せん断	コンクリート	1.0	1.3	1.3	1.0	1.3
			鉄筋	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
		面内せん断	コンクリート	1.0	1.3	1.3	1.3	1.0
			鉄筋	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0
構造解析係数		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
構造物係数		1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	

表 - 5 基礎版および防液堤の評価項目¹⁾

区分	評価項目
常時性能評価	通常運転時 ひび割れ(基礎版) ひび割れ発生(防液堤) 断面破壊
	強風時, 耐圧試験時, 水張試験時 断面破壊
レベル1耐震性能評価	断面破壊
レベル2耐震性能評価	変形(基礎版) 断面破壊(防液堤)
漏液後性能評価	液密性 断面破壊

表 - 6 杭基礎および直接基礎の評価項目¹⁾

区分	評価項目
常時性能評価	通常運転時 安定の保持 杭のひび割れ発生 杭の断面破壊
	強風時, 耐圧試験時, 水張試験時 安定の保持 杭の断面破壊
レベル1耐震性能評価	安定の保持 杭の断面破壊
レベル2耐震性能評価	変形

礎が耐荷力を失わないことを確認するため、評価項目として変形を制限することとしている。塑性率の制限値は「製造設備等耐震設計指針⁴⁾」に基づき1.5としている。

PC防液堤に関しては、目標性能の「変形が残留しても、漏液後の液密性および外槽の目標性能を損なわない」を評価するために、評価項目としてレベル1耐震性能評価と同様の断面破壊を設定している。

目標性能である「漏液後の液密性を損なわない」を満足するためには、ひび割れ幅や塑性率の制限値などを規定することも考えられる。「PCLNG地上式貯槽指針素案³⁾」策定時に、岡村らが行った液体窒素を用いたコンクリートの貯液性実験結果⁷⁾によれば「部材厚さが25cmで作用圧力が1.0kgf/cm²の条件下において、ひび割れ幅が0.1mm以下であればひび割れが貫通しても液体の漏出がない。また、接液側のひび割れ幅が0.2mm以下であり、流出側のひび割れ幅がほぼ0mmの場合は液体の漏出はない」とされているが、現状の技術レベルでは液密性とひび割れ幅などの損傷モードの関係が定量的に評価することが困難で、設計に取り込むには時期尚早と判断されたため、安全側の評価としてレベル1耐震性能評価と同じ断面破壊の評価としている。ただし、将来的に技術の進歩によって、液密性と損傷モードの関係が定量的に評価できる適切な方法が確立された場合は、それを評価に取り込んでよいとしている。

4)漏液後性能評価

防液堤は、本来機能として、漏液後にLNGを貯液する性能が要求されるため、液密性を評価する必要がある。液密性の評価は、「PCLNG地上式貯槽指針(素案)³⁾」に従い、残留圧縮領域を10cm以上確保することを基本とし、引張鉄筋応力を100N/mm²以内にする場合には、残留圧縮領域

を部材厚の1/10以上にすることができるとしている。また、基礎版に貯液機能をもたせることで、PC防液堤下部地盤から堤外へのLNGの浸透に対処する場合も、同様の評価を行うこととしている。

5)照査荷重時評価

1)~4)の評価は実際に起こりうる状態を想定しているため指針の「本文」に規定されているが、予期せぬ状態におけるPC防液堤の安全性を担保するために「解説」に照査荷重について評価を行うことを規定している。規定内容は「PCLNG地上式貯槽指針(素案)³⁾」に基づき、PC防液堤に静液圧の2倍を載荷する照査荷重時を設定し、断面破壊について評価を行うこととしている。この時の荷重の組合せは、照査荷重、自重、ガス圧力、漏液後に基礎版に作用する内容液の質量、プレストレス力、温度荷重(通常運転時)、外槽屋根荷重および基礎版から伝達される荷重を組み合わせで行う。照査荷重の荷重係数は1.0、その他の荷重係数は表-3の通常運転時の断面破壊の値を用い、構造物係数は1.0としている。

(2)杭基礎および直接基礎の評価方法

杭基礎と直接基礎の設計上の評価項目を表-6に示す。

1)常時性能の評価

基礎は、作用する荷重に対して上載構造物を支持し、安定であることが求められるため、評価項目として安定(支持力)の保持を設定している。杭基礎については、それに加え評価項目として杭体の断面破壊を設定した。また、コンクリート杭を使用する場合は、設計耐用期間の耐久性を確保させる観点から、ひび割れ(ひび割れ幅、鉄筋応力の制限)を評価することとしている。

2)レベル1耐震性能の評価

表 - 7 耐震解析方法の区分¹⁾

手 法		レベル 1 地震動		レベル 2 地震動		
		修正震度法 加速度応答 スペクトル	等価線形 解析法 加速度 時刻歴波形	エネルギー法 (修正震度法) 加速度応答 スペクトル	等価線形解析法	非線形解析法
解析 モデル	地盤特性	ばね有り (線形) 又は無し	等価線形 (弾塑性モデル)	ばね有り (非線形) 又は無し	等価線形 (弾塑性モデル)	非線形 (履歴依存モデル)
	構造特性	線形 (等価線形)			等価線形 (剛性低下)	非線形
解析される応答値		断面力		塑性率, 断面力		

レベル 1 耐震性能の評価では、作用する荷重に対して上載構造物を支持し、安定であることが求められるため、評価項目として安定（支持力）の保持を設定している。

3) レベル 2 耐震性能評価

レベル 2 耐震性能評価は、塑性変形、不等沈下等によって、基礎が耐荷力を失わないことを確認するため、変形を制限している。塑性率の制限値は杭基礎の場合は「製造設備等耐震設計指針」に基づき 1.5、直接基礎の場合は、基礎の降伏支持力と変形性能および地震後の残存支持力を勘案して適切に定めることとしている。

3.5 PCLNG 貯槽の設計

(1) 設計一般

PC 防液堤と基礎版の接合方法には、剛結、ヒンジ、スライドの 3 種類が考えられるが、接合部の液密性、荷重に対する安全性、外槽ライナおよび保冷の機能保持を考慮して、剛結合とすることを原則としている。

また、レベル 1 地震動およびレベル 2 地震動に対する応答解析では、地盤の液状化に伴う土質定数の低下を考慮した適切な計算方法により行い、応答値が限界値を超えないことを評価することとしている。

基礎のレベル 2 耐震性能評価は、許容塑性率を構造特性係数に換算した値が 0.5 以下であることが確認されている場合は、設計地震動を 3.1 に示した地震動に 0.5 を乗じた値として、レベル 1 耐震性能評価を行うことにより替えることができる（代替評価法）としている。

レベル 2 地震動に対する応答解析では地盤変状のうち地盤の移動を考慮した適切な計算方法を用いて行い、応答値が限界値を超えないことを評価する。この場合、地震慣性力は考慮しなくてもよいとしている。

(2) 構造解析

断面力の算定には、評価項目を適切に評価できる有限要素法、シェル理論または質点の線材モデルなどの解析手法を選定することとしている。ただし、基礎版と PC 防液堤の相互作用を適切に評価できるように、解析は原則として基礎版と PC 防液堤を一体化したモデルにより行うこととしている。

温度荷重による断面力の算定においては、ひび割れを発

生する部材では、実験結果または根拠ある理論解に基づいてひび割れによる断面剛性の低下を考慮することができる。ただし、ひび割れの発生による断面剛性の低減は、鋼材を無視したコンクリート全断面について求めた剛性の 1/2 以下とする。また、ひび割れの分散をはかり、ひび割れによる鉄筋への応力集中を防ぐために、部材の引張側には、鉄筋比 0.2 % 以上の鉄筋を配置することとしている。

地盤と基礎構造との動的相互作用を考慮した解析は、多質点または 1 質点の線材モデル、あるいは、三次元または二次元有限要素モデルにより行ってよいとしている。

基礎および防液堤の耐震解析手法の例を表 - 7 に示す。

4. あとがき

本稿は、本年 8 月に改訂された「LNG 地上式貯槽指針」¹⁾ の PCLNG 貯槽の基礎および PC 防液堤の設計に関する規定を概説したものである。詳細な内容に関しては、同指針を参照していただければ幸いである。

「LNG 地上式貯槽指針」¹⁾ の改訂は、日本ガス協会内に設置された LNG 地上式貯槽指針改訂専門委員会（中桐滋委員長）およびガス工作物等技術基準調査委員会（秋田一雄委員長）による約 2 年間にわたる審議を経て実現したものである。

基礎および防液堤の規定にあたっては、LNG 地上式貯槽指針改訂専門委員会の委員である東京大学の前川宏一教授に有意義なご指導、ご助言を頂いた。

参考文献

- 1) 日本ガス協会：LNG 地上式貯槽指針，2002
- 2) 日本ガス協会：LNG 地上式貯槽指針，1981
- 3) 天然ガス導入促進センター：平成元年度プレストレストコンクリート LNG 貯槽技術開発調査報告書，1990
- 4) 日本ガス協会：製造設備等耐震設計指針，2001
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），2002
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，基礎構造物・抗土圧構造物，2000
- 7) 岡村，前川，北村，芳賀，黒坂：低温液化ガス用コンクリート部材の貯液性能に関する研究－その 1，土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集，1990.9

【2002 年 8 月 22 受付】