

液体を満たした薄肉円筒タンクの動的座屈試験

DYNAMIC BUCKLING TESTS OF LIQUID-FILLED THIN CYLINDRICAL TANKS

豊田幸宏*、増子芳夫*

Yukihiro TOYODA and Yoshio MASUKO

*工修 (財) 電力中央研究所 我孫子研究所 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

This paper describes an experimental study on the dynamic buckling of partially liquid-filled cylindrical tanks under horizontal excitations. The test cylinders with a height-to-diameter ratio of about 4 were made of polyester film by lap-joining along a longitudinal seam and bonding an aluminum end plate along one edge. Shaking table tests and static tilt tests were conducted in order to investigate the difference between static and dynamic buckling behaviour of the tanks. All of shaking table tests were carried out under both harmonic excitation and earthquake loading. In the both tests, the typical elastic buckling deformation, that is, diamond-shaped buckling pattern was observed. It was also found that the static liquid pressure and fluid-coupled vibration had influenced on the threshold of the relative displacement when the buckling occurs. The results of the dynamic buckling tests showed that the critical buckling stress of the tall tanks subjected to earthquake loadings could be reasonably predicted by using a static criterion of buckling based on the axial membrane stress component.

keywords: Dynamic buckling, Thin cylindrical tank, Diamond-shaped buckling, Fluid-coupled vibration

1. はじめに

内部に液体を含む薄肉円筒タンクは、内部液体と円筒殻との動的連成系を形成する。このような系は、ロケット燃料タンクに関連する宇宙開発、原子炉容器などの原子力エネルギー分野、石油コンビナートにおける原油タンクなどが見られる化学工業等、幅広い分野で見ることができる。これらプラントで使用される円筒タンクは、近年、大型化、薄肉化の傾向にあり、先の阪神大震災においても、いくつかの液体貯槽タンクが被害を受け、側板下部に座屈が生じたものや座屈変形箇所に通き裂が発生し、内容液の漏洩を招いたものがあつた¹⁾。従って、液体-円筒タンク系の地震時の動的座屈挙動を解明することは、非常に重要な工学的課題の一つである。

このようなタンク類の地震時振動挙動に関して、これまでに数多くの実験的、数値解析的研究^{2)~11)}がなされている。特に液体-円筒シェル連成系の流力弾性振動現象については、精力的な検討が数多くなされ、底部完全固定の貯槽に関する挙動は、かなり明らかになりつつある。しかしながら、これらの大半は、円筒シェルに関し線形振動範囲のみを取り扱ったもので、破壊に至るような大変形下での地震時挙動に着目したものではない。

流体連成効果を考慮した円筒タンクの動的座屈に関する実験的あるいは解析的研究は数少ない^{12)~20)}。実験的研究として代表的なものに、Cloughらの一連の実験¹²⁾ならびに高圧ガス保安協会において実施された薄肉円筒タンクの動的座屈試験¹³⁾が挙げられる。Cloughらの実施した振動実験では、地震被害を受けた実機と同様な座屈変形パターンを模型に発生させた。これら一連の研究からタ

ンクの周方向高次モード・浮き上がり・座屈などの現象を実験的に検討しているが、用いた模型寸法の限界から、大型タンクに対する相似性は、必ずしも完全ではなく、解析との照合を含めて定量化にまでは至っていない。一方、高圧ガス保安協会の下で実施された振動実験では、直径10m、側板高さ6.9mの鋼製タンクモデルが使用され、エレファント・フット・バルジなどの破損モードが現出し、非常に興味深いデータを提供している。しかしながら、これらは、ごく限られた円筒殻構造諸元や実験条件下で実施されたものであるため、一般的、本質的な現象解明までには至っていない。

円筒殻の座屈発生メカニズムや変形モードは、その形状に依存し、また、地震動による座屈現象は、時間の関数であるだけでなく、入力される地震動のスペクトル特性にも依存し複雑であるため、地震時座屈については、基本的な現象の把握から適切な解析手法の開発に至るまで十分な検討がなされていないのが現状である。このため、従来の座屈設計は、静的座屈試験及び解析によって得られた静的座屈評価式をそのまま適用して行われてきた²¹⁾。しかしながら、動的効果、流体連成効果などにより、座屈に至らせしめる限界入力加速度、変位や座屈モードは静的座屈に対するものと異なったものになることが予想される。

以上のことから、本研究は、液体を満たした円筒タンクの地震時動的座屈現象に関し、適切な解析手法を開発し、合理的な耐力評価法を確立することを最終的な目的としている。そこで、まず本報では、曲げ荷重が卓越する場合の弾性座屈の基本的な現象を把握することをねら

表-1 円筒試験体構造緒元

試験体 No.	TC005R	TC010R
R (mm)	63.5	80.0
L (mm)	271	320
t (mm)	0.050	0.010
E (GPa) {kgf/mm ² }	5.58 { 569 }	5.30 { 541 }
$\sigma_{y0.2}$ (MPa) {kgf/mm ² }	71.6 { 7.31 }	77.2 { 7.88 }
R/t	1270	800
L/R	4.27	4.00
ν	0.3	0.3
Z	22066	12210

$$Z = \sqrt{1 - \nu^2} L^2 / (R t)$$

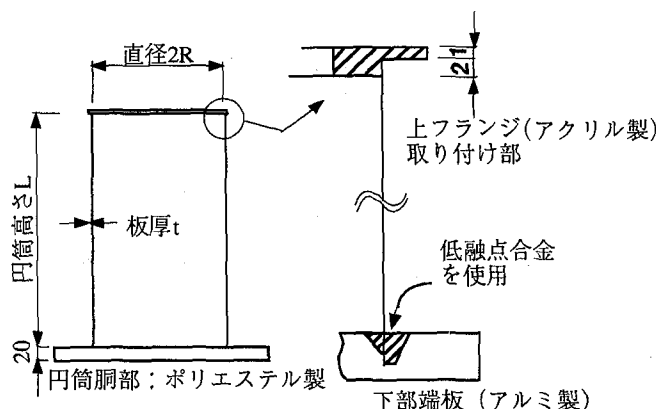
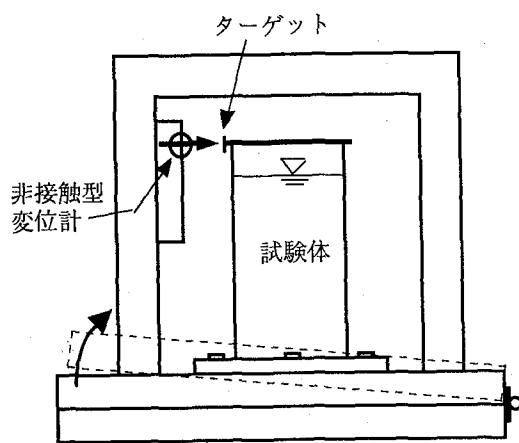
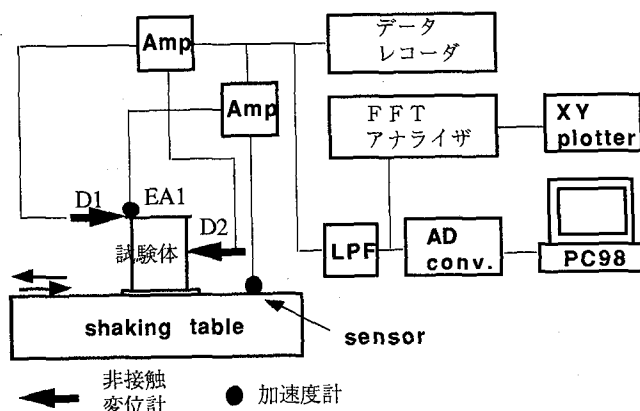


図-1 円筒模型構造



(a)傾斜試験装置



(b)動的座屈試験装置

図-2 実験装置の概略

いとした実験を行い、地震時の流体連成動的座屈挙動や上述の各種効果について、静的座屈挙動との相違点について検討を加えた結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 概要

円筒殻の座屈挙動は、その寸法諸元のうち主にR/tおよびL/R（但し、R:円筒殻半径、t:板厚、L:長さ）によって支配される。本実験では、曲げの卓越する弾性座屈に着目することとし、R/t=1000前後、L/R=4前後の諸元を有する模型を2体製作した。これらの模型は、1980年1月に発生したGreenville-Mt.Dablo地震の際に座屈崩壊した鋼製円筒形ワインタンク¹²⁾の内、ダイヤモンド型座屈変形を引き起こした、L/Rが4に近い形状を有するタンクを想定したものである。

これらの模型により、流体連成効果が動的座屈時の挙動および座屈限界に与える影響について検討するため、振動台による動的座屈試験の他に、地震力を静的荷重に置き換えた傾斜座屈試験を実施し、座屈に至る入力加速度や変位、座屈モードなどが明らかにされた。さらに、

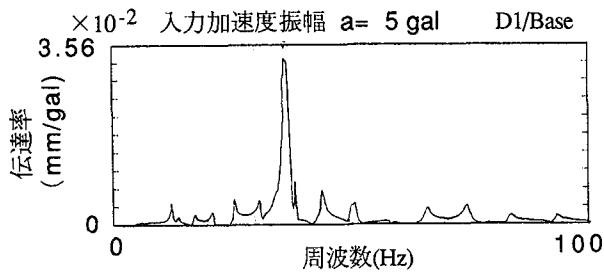
両試験から静的座屈挙動と動的座屈挙動の違いが比較検討された。

2.2 模型構造および諸元

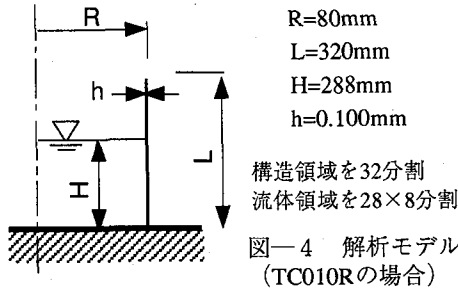
製作した模型体数は2体であり（以下、それらをTC005R、TC010Rと記す。）、形状概略ならびに構造諸元を図-1、表-1に示す。

これらの模型は、ポリエステルフィルムを所定の半径になるように軸線に沿って重ね合わせて接着し、下端を低融点合金によりアルミニウム製底板に固定したものである。円筒上端部には、実際の貯槽タンクにおける屋根構造による側板補強効果を想定したアクリル製フランジが接着されている。

表-1に示された弾性係数および降伏応力（0.2%耐力）は、常温下で実施した単軸引張試験より得られたものである。これら材料の機械的性質は、矩形状に切り出したポリエステルフィルム小片（幅40mm、長さ160mm）を用い、荷重と伸び量の関係を計測することにより算定されたものである。これら実測値の平均値は、後述する、模型を対象とした振動固有値解析および周波数応答解析における解析用物性値として用いられた。



図—3 共振曲線の一例 (TC010Rの場合)



図—4 解析モデル (TC010Rの場合)

表—2 解析用物性値 (TC010Rの場合)

ヤング率	E (kgf/mm ²)	5.41×10^2
ポアソン比	ν	0.3
構造系密度	ρ_s (kg/mm ³)	1.41×10^{-6}
流体密度	ρ_L (kg/mm ³)	1.00×10^{-6}

2.3 実験装置および方法

(1) 傾斜座屈試験

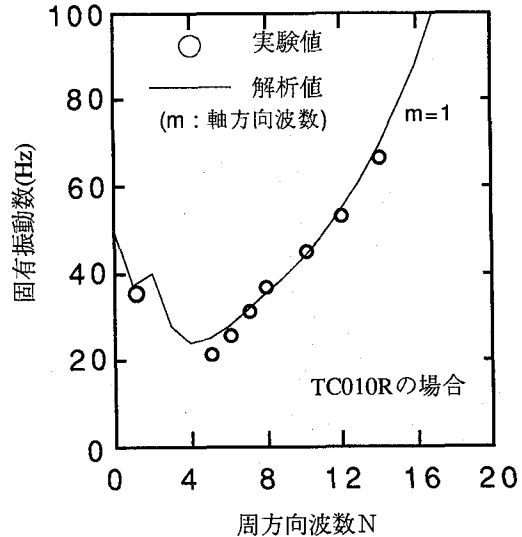
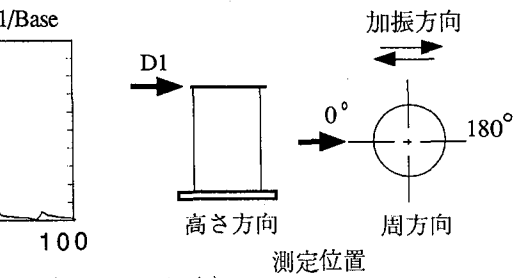
実験装置ならびに計装の概略を図—2(a)に示す。計測項目は、傾斜方向に沿った、円筒頂部フランジ部分の水平相対変位（以下、円筒頂部変位と記す。）ならびに模型を設置した台の傾斜角度とした。円筒頂部変位は、非接触型変位計を用い計測された。試験では、円筒下端部に座屈変形が目視により確認されるまで模型を設置した台を徐々に傾けてゆき、その都度、傾斜角度と円筒頂部変位を計測した。水位については、円筒高さ L と水位 H （円筒容器底面上表面より自由液面までの高さ）の比 H/L を0.55～0.9の範囲にわたり6ケース設定した。

(2) 動的座屈試験

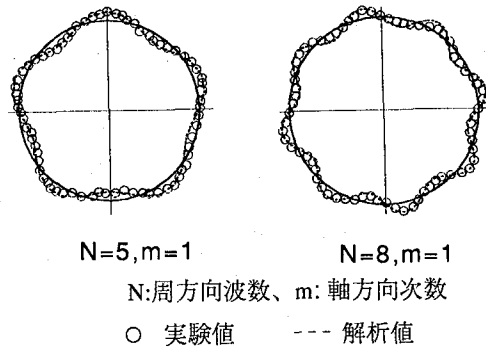
実験装置ならびに計装の概略を図—2(b)に示す。計測項目は、振動台入力加速度(Base)、円筒頂部フランジ部の加振軸方向変位(D1)ならびに円筒胴部の面外変位(D2)とし、変位計測には、非接触型変位計を使用した。変位計は、円筒模型に対して軸方向、周方向に移動可能な計装治具に装着され、固有モード形状等を測定できるようになっている。

加振装置には、(財)電力中央研究所が所有する水平・上下2軸小型電磁式振動台（振動台寸法、1m×1m、最大積載重量、300kgf）を用い、加速度制御による正弦波加振ならびに地震波加振を行った。

実験実施にあたっては、まず初めに、正弦波掃引加振により模型の固有振動数、固有モード形状が調べられた。加振振動数の掃引速度は、0.05Hz/secとした。次に正弦波の振動数を固定し、入力加速度振幅を座屈が発生するま



図—5 固有振動数FEM解と実験値の比較

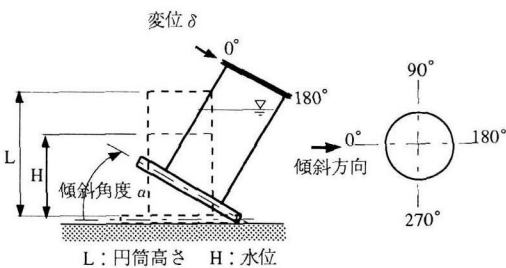
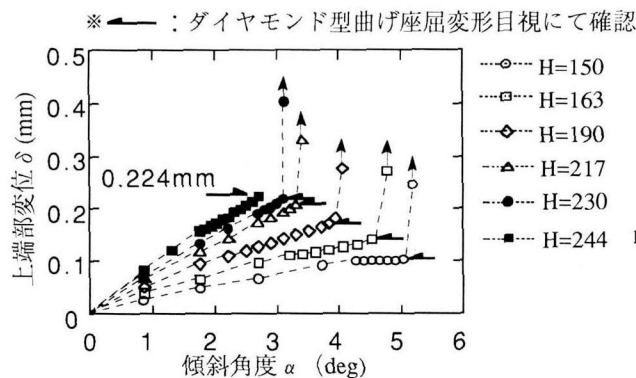


図—6 振動モードの一例 (TC010Rの場合)

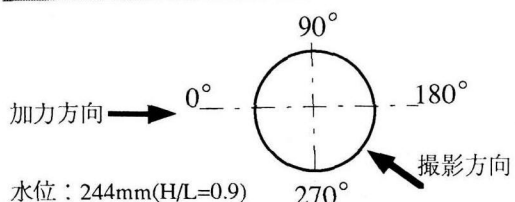
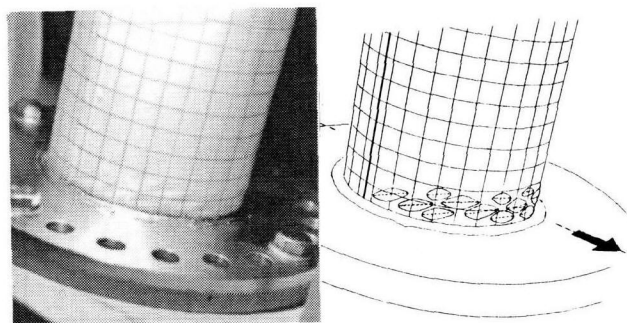
で段階的に増加させ、座屈が生ずる加速度レベル（以下座屈加速度と記す。）を調べ、これを異なる加振振動数で同様な計測を行い、座屈加速度と加振振動数の関係を求めた。

地震波加振では、入力波としてEL Centro NS波を用い、加振する毎に、入力加速度の最大値を段階的に増していき、その都度応答値を計測した。なお、地震波の時間軸については、先の掃引加振で明らかにされた模型の1次ビームモード振動数（円周方向次数 $N=1$ 、軸方向次数 $K=1$ ）に地震波の卓越振動数が近づくよう、約6倍に圧縮した。加振にあたっては、振動台加速度のフィードバック信号を計測・収録し、その都度、振幅補正を行っており、波の再現性は完全に確保されている。

すべての試験において加振方向は、水平方向のみとし、



図一七 傾斜角度と頂部変位の関係 (TC005Rの場合)



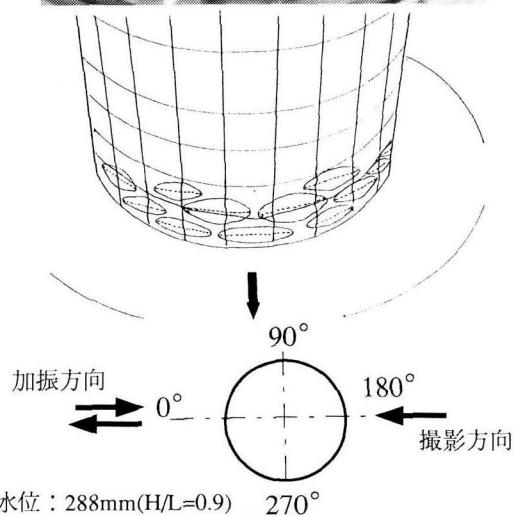
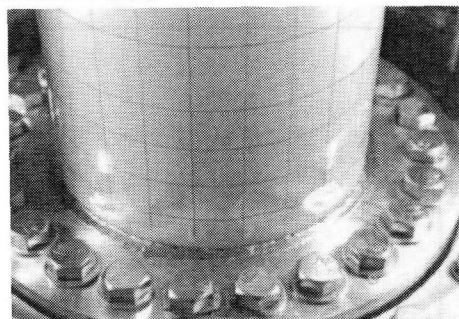
図一八 座屈変形 (試験体TC005Rの場合)

座屈発生の確認は、目視ならび発生する音によって行った。また、すべての実験において、内部液体には、水道水が用いられ、20～23℃の室温下で実施された。なお、動的試験では、円筒高さ水位比H/Lは0.9のケースのみとした。

2.4 模型の線形応答特性

周波数応答曲線の一例としてTC010Rから計測されたものを図一三に示す。同図における、50Hz以下の主たる共振点に関し、振動モード形状を測定し、FEMによる振動固有値計算の結果と併せ示したものが図一五、図一六である。ここで、計算の実施にあたっては、電力中央研究所が開発した有限要素法に基づく流体連成振動解析コードLISA (LISA:Liquid Inertia and Sloshing Analyzer、以下当所FEMコードと記す。)を用いた。有限要素モデルについては、図一四、表一二に示す構造諸元ならびに物性値を有するものを作成し、固有値計算を実施するにあたっては、静液圧による初期軸対称変形を考慮した。要素分割については、円筒殻部を、軸対称シェル要素により32分割し、流体部は、軸対称流体要素により224分割した。なお、自由液面での動水圧は、零とした。

図一五～六によれば、固有振動数については、FEM解と実験値は全域にわたり非常によく一致しており、円筒



図一九 座屈変形 (試験体TC010Rの場合)

殻の振動モードも両者よく一致していることがわかる。TC005Rについてもほぼ同様な結果が得られており、今回製作した模型については、内容液を満たした状態における模型形状初期不整は、比較的小さいものと考えられる。

3. 実験結果および考察

3.1 傾斜座屈試験

図一七にTC005Rにより得られた傾斜角度と円筒頂部変位の関係を示す。同図によれば、水位の増加に伴い、座屈発生時の変位 (以下座屈変位と記す。)も徐々に増加している。これは、水位が増すにつれ、円筒下端部における初期フープ応力も増し、座屈の発生を拘束する効果²²⁾が現れていることが考えられる。図一八に観察された

座屈変形を示す。同図に示すごとく、円筒殻の圧縮側で固定端近傍にダイヤモンド型座屈変形が観察された。座屈変形は、円周方向に関し $90^{\circ} \sim 270^{\circ}$ の範囲にわたり2～3層になって発生していた。ここで、発生した座屈のしわの1つに対して周方向長さを実測し、その値で円筒円周全長を除して算定した周方向波数 n_{exp} を求め、それを古典理論値として知られている軸圧縮力による弾性座屈の周方向座屈波数 $n_{cl}^{(23)}$ の比 μ をとると、

$$\mu = \frac{n_{exp}}{n_{cl}} = \frac{19 \sim 22}{32.4} = 0.59 \sim 0.68$$

となった。液体を部分的に満たした円筒殻の軸圧縮座屈に関する八巻らの詳細な検討結果²⁴⁾によれば、形状係数 $Z=1000$ を有する円筒殻に関し、座屈波数比 β （座屈波数と空液時の座屈波数との比）は、液位比 $H/L=1.0$ 近傍では0.55前後になる場合があるとしている。従って、本実験においては、模型の形状係数 Z や荷重の载荷条件等が八巻らの検討条件と完全に一致はしていないものの、上記結果は、概ね妥当であると考えられる。

なお、すべてのケースにおいて、円筒胴部にはせん断座屈波は観察されなかった。

3.2 動的座屈試験

(1) 正弦波による加振試験

図-9にTC010Rに発生したダイヤモンド型座屈変形を示す。また、この変形以外に、自由液面近傍の円筒胴部に、全周にわたり振動モードと見分け難い変形も観察された。Shihら¹⁸⁾によれば、これは、負圧による外圧座屈変形モードであると報告しているが、ビーム振動モードとオーバル振動モードが連成していることも考えられる。座屈変形ならびに自由液面近傍に発生した変形は、TC005Rに関しても同様に観察された。

図-10に加振振動数と座屈発生時の入力加速度レベル（以下座屈限界加速度と記す。）の関係を示す。ビームモード振動数以下の領域では、ダイヤモンド型座屈変

形は明瞭に確認されたが、ビームモード振動数以上の領域では、振動モードと見分け難い変形が卓越し、ダイヤモンド型座屈変形は認められなかった。

同図中の実線は、円筒下端の軸方向圧縮膜応力が次式で計算される空液の円筒殻の軸圧縮座屈古典理論値に等しくなるために必要な加振加速度を当所FEMコードによる周波数応答計算から求めたものである。

$$\sigma_{cr} = \frac{I}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{E t}{R} \quad (1)$$

なお、応答計算を実施するにあたり、減衰値には、実験値を使用した。図によれば今回用いた2つの模型に関し、いずれも解析値は、実験値の傾向を概ねあらわしていることがわかる。

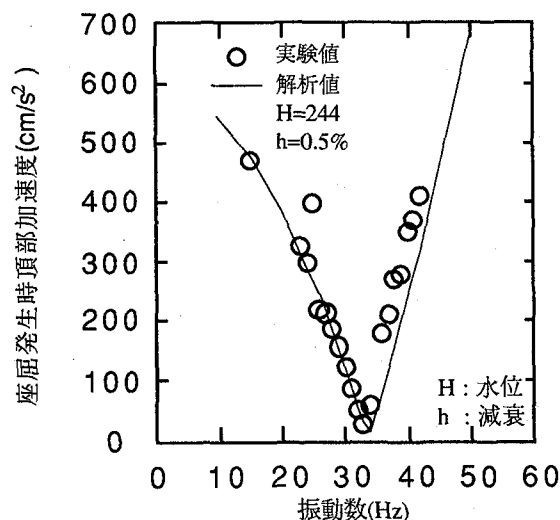
図-11に、加振振動数を円筒模型の1次ビームモード固有振動数で正規化した無次元化振動数と座屈限界加速度の関係を、本実験結果ならびに既往の実験データ^{20), 25)}と併せて示す。それら既往の実験と本実験では、模型の水位条件、形状初期不整、材料物性値や端部境界条件が完全に一致しているわけではないものの、式(1)を用いた座屈限界加速度の推定値は、実験値の傾向をよくあらわしていると言ってよい。

以上のことより、今回の検討の範囲においては、式(1)に示される静的座屈評価式を動的座屈強度の評価に用いることが可能であることがわかった。

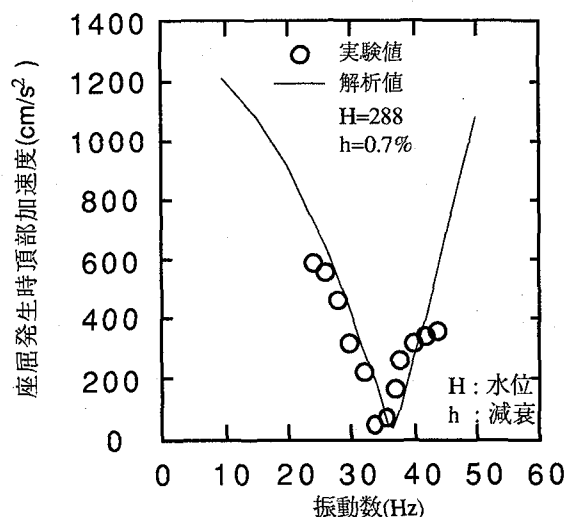
(2) 地震波による加振試験

a) 座屈挙動

図-12にTC010Rで計測された円筒頂部の応答変位波形、胴部の応答変位波形を示す。同模型において、座屈の発生が確認されたのは、入力最大加速度が280galの時（座屈限界加速度:280gal）であった。図-12(b)に示すごとく、座屈限界加速度をはるかに上回る場合には、応答波形にパルス状の波形がいくつか認められるが、これは円筒胴部に瞬間的に生じ、すぐに回復する座屈変形によるものと考えられる。一方、同図(a)に示すごとく、座

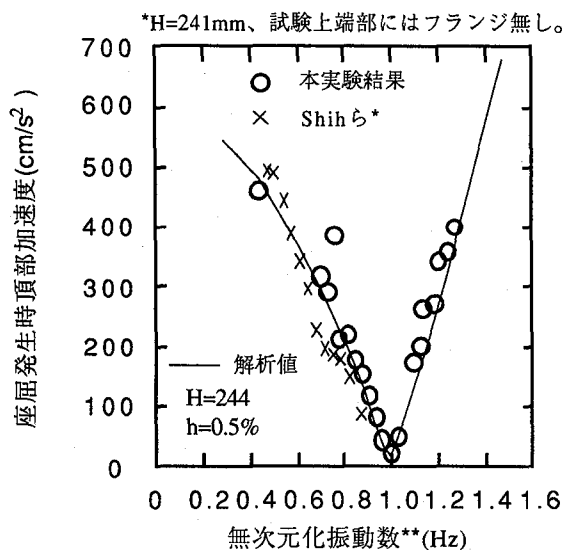


(a) TC005Rの場合

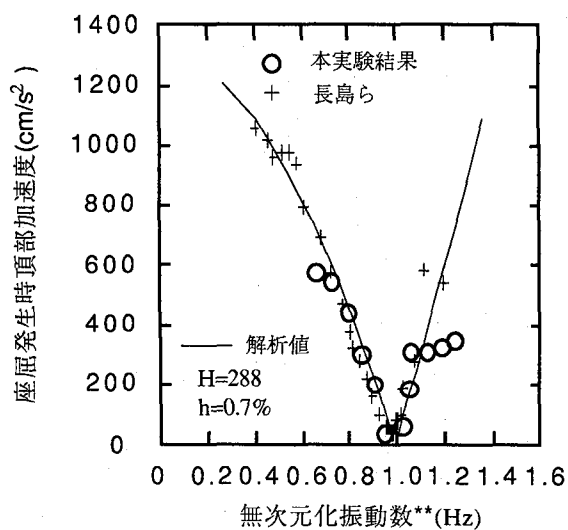


(b) TC010Rの場合

図-10 加振振動数と座屈発生時頂部加速度の関係



(a) TC005Rの場合

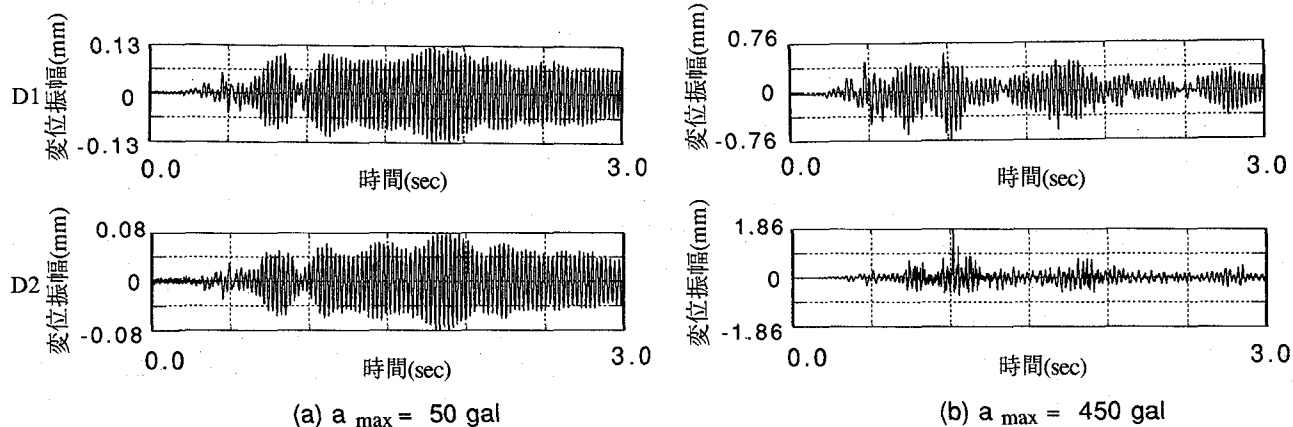


(b) TC010Rの場合

**無次元化振動数：加振振動数を1次ビームモード固有振動数にてノーマライズしたもの。

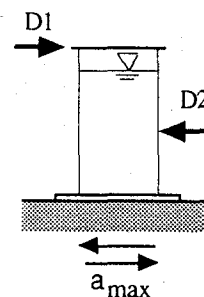
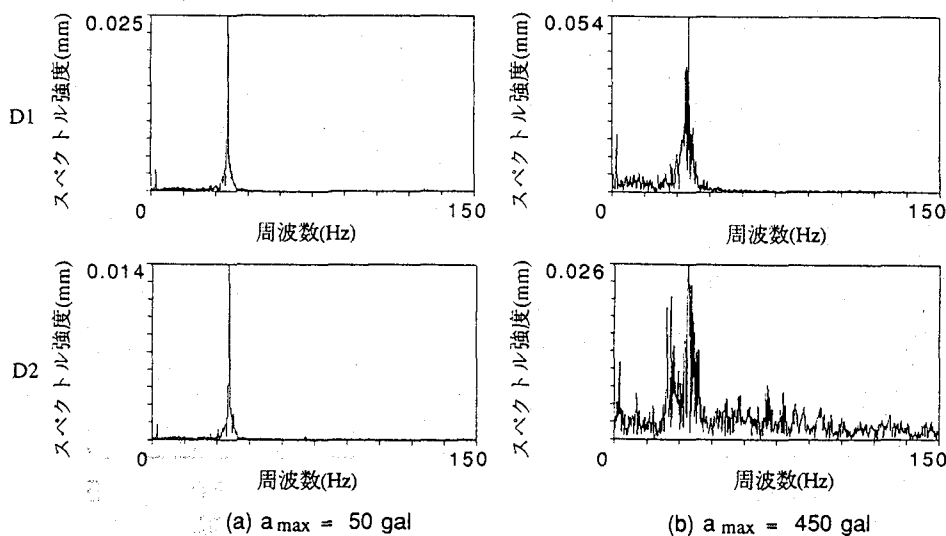
H：水位 h：減衰

図一11 無次元化振動数と座屈発生時頂部加速度の関係
(既往実験データとの比較)



図一12 応答変位の時刻歴波形(TC010Rの場合)

D1：円筒頂部変位 D2：円筒胴部変位



図一13 応答変位の周波数分析結果(TC010Rの場合)

D1：円筒頂部変位 D2：円筒胴部変位 $a_{\max}$ ：入力最大加速度

屈限界加速度を下回っている場合には、先に見られたパルス状の波形はなく、模型全体が線形挙動を呈していることがわかる。

図一13に上記応答変位波形を周波数分析した結果を示す。座屈限界加速度を下回っている場合には、1次ビームモード固有振動数である35Hzの周波数成分が卓越していることがわかる。一方、座屈限界加速度を上回る場合には、ビームモード振動数成分以外の振動数成分が多数発生していることがわかる。これは、座屈の発生によって円筒胴部の局部振動（高次振動）が励起されたためと考えられる。このことは、先の正弦波による加振試験において観察された現象と整合するものである。

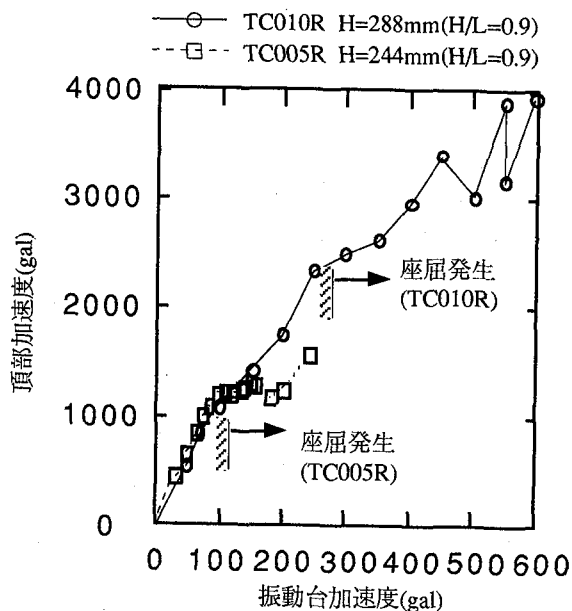
一般的に理想的な円筒殻に近づくほど、オーバル振動の刺激係数は零に近づき地震入力に対しては励起されにくくなるが、わずかながら初期不整を有する現実の構造物では、今回の試験のようにビーム振動数がオーバル振動数と連成する領域にある場合にはオーバル振動モードが強く励起されることを示している。

b)入力加速度と頂部加速度の関係

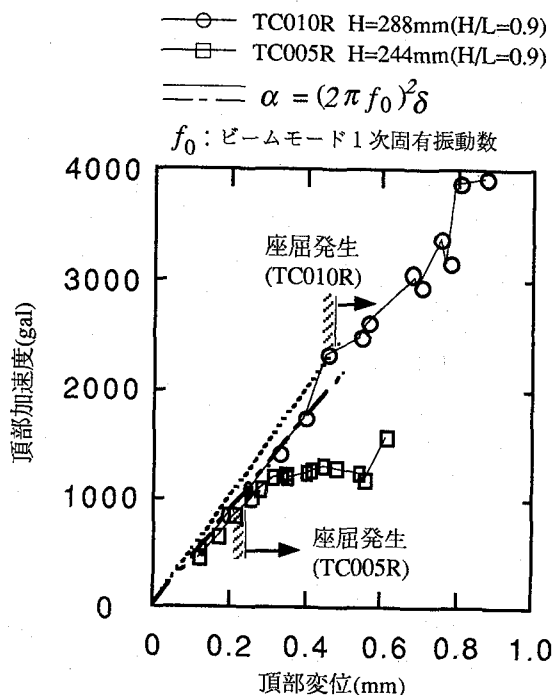
図一14に入力加速度と頂部加速度の関係を示す。同ずによれば、座屈限界加速度に近づくにつれ、線形関係がくずれ頂部加速度と振動台加速度の比すなわち応答倍率が低下し、その伸びがほぼ横ばい状態となる傾向にあることがわかる。さらに入力最大加速度が増加すると、応答も増加し発散する傾向が見られる。ただし、座屈後挙動については、模型により異なっている。これは、模型が座屈したことによりビームモード固有振動数が変化し、今回使用した入力波のスペクトル特性に座屈後挙動が依存したためと考えられる。

c)頂部変位と頂部加速度の関係

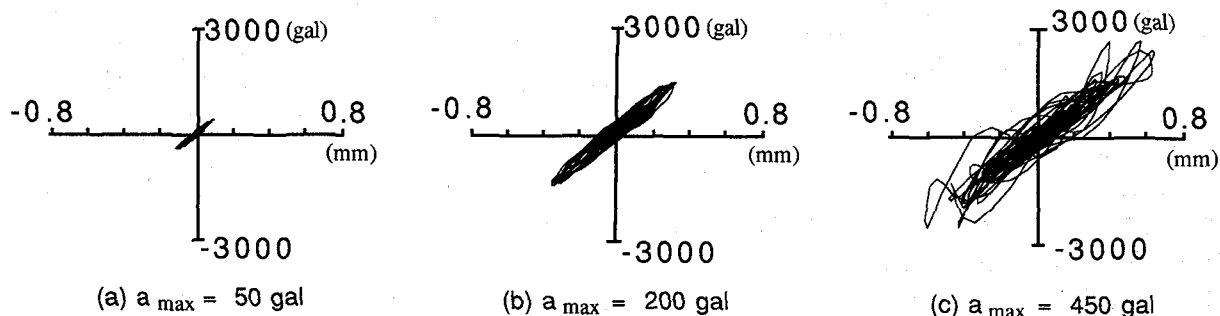
図一15に頂部加速度と頂部変位の最大値の関係を示す。いずれの模型においても、頂部加速度すなわち慣性力が座屈発生時の頂部変位に近づくにつれ線形関係はくずれてくることが認められる。さらに座屈限界加速度を越えて入力加速度を増すと、TC005Rについては、応答変位は増加するが慣性力は低減する傾向にある。一方、TC010Rについては、頂部加速度が増減を繰り返しながら、全体的な傾向としては、増加していく傾向にあることが認められる。図一16にTC010Rから得られた頂部加速度と頂部変位による履歴ループの一例を示す。線形応答



図一14 入力最大加速度と頂部加速度の関係

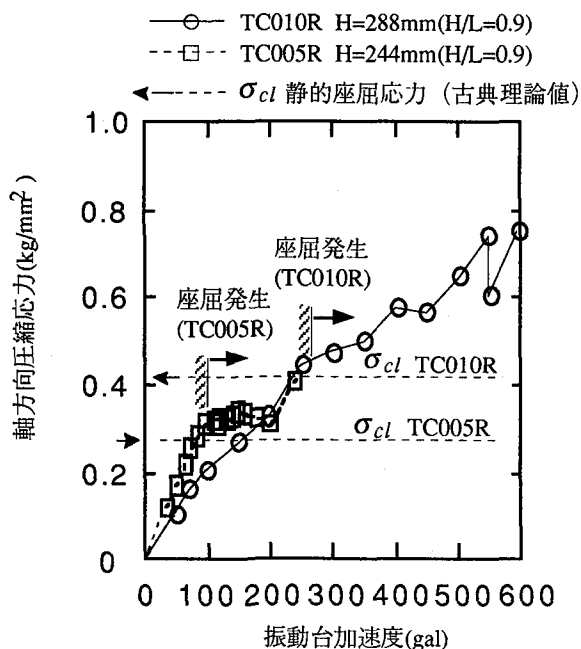


図一15 頂部変位と頂部加速度の関係



図一16 頂部変位と頂部加速度の履歴ループ(TC010Rの場合)

X軸：円筒頂部変位
Y軸：円筒頂部加速度
a_{max}：入力最大加速度



図一 17 入力最大加速度と軸方向圧縮応力の関係

から座屈発生直前さらに座屈後に至るにつれてヒステリシスの面積が増加し、エネルギー吸収量が増加していることがわかる。

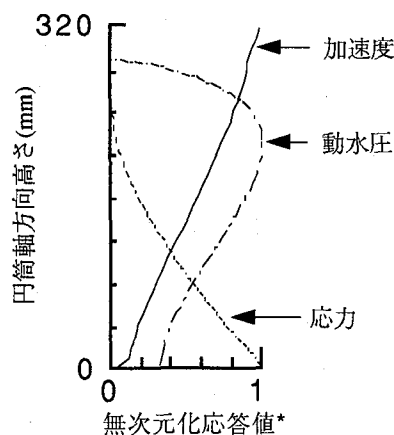
d)座屈変形モード

地震波加振試験においても、傾斜座屈試験ならびに正弦波加振試験で観察された、円筒固定端近傍にダイヤモンド型座屈変形が、TC005RならびにTC010Rに観察された。座屈変形波長の大きさや発生箇所については、前述の傾斜試験で観察されたものとはほぼ同様であった。また、ダイヤモンド型座屈変形だけでなく、自由液面近傍に正弦波加振試験で観察されたものと同様な変形モードが加振軸方向と一致する周方向位置 0° ならびに 180° 近傍に観察された。円筒胴部にビームモード以外に、局所的な変形が発生していることは、先に示した図一 13 の周波数分析結果と整合するものである。

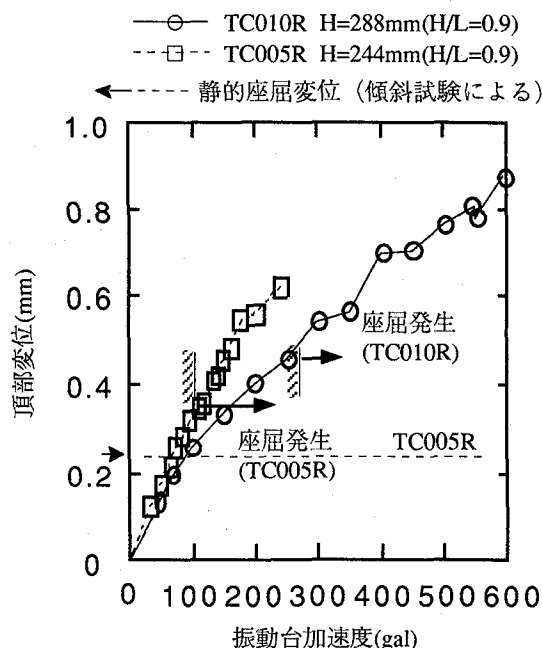
e)軸圧縮応力と入力加速度の関係

図一 17 に円筒下端部軸圧縮応力と入力加速度の関係を示す。同図の縦軸は、当所FEMコードによる地震応答解析から得られた図一 18 に示すごとく加速度分布、応力分布等から、頂部加速度と軸方向圧縮応力の関係を求め換算したものである。また、図一 17 中には、静的座屈応力理論値として、前掲の式(1)から求まる軸圧縮古典理論値を点線で示している。同図によれば、静的座屈応力にくらべ動的座屈限界応力は、1.2倍程度高めとなっていることがわかる。

これは、応力分布の不均一により、座屈応力が見かけ上高くなったことが考えられる。円筒の純曲げによる座屈強度を軸圧縮力による古典座屈理論値の観点から検討した研究として、例えば、Gerardら²⁶⁾のものがある。彼らは長い円筒の純曲げによる座屈応力 $\sigma_{\alpha,b}$ を次式で表している。



図一 18 加速度、動水圧、軸方向膜応力の軸方向分布 (TC010R,H=288mm(H/L=0.9)の場合)



図一 19 入力最大加速度と頂部変位の関係

$$\sigma_{cr} = \frac{1.3}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{E t}{R}$$

これは、軸圧縮力による古典座屈理論値の1.3倍であり、係数1.3は、応力分布の不均一による座屈応力の増加を示しているものである。Shih²⁵⁾も本実験で用いた模型と同様な構造諸元を有する試験体による動的座屈試験を実施し、応力分布の不均一による座屈応力の増加を指摘している。

従って、本実験結果は、目視による座屈変形の確認をもって円筒殻の座屈発生と判定しているため、やや座屈限界加速度に関する計測精度に厳密さは欠くものの、概ね既往の理論検討結果と整合するものである。

一方、本実験では、円筒殻は、液体を満たしているため、初期フープ応力による座屈の発生を拘束する効果²²⁾

が作用していると考えられる。秋山ら²²⁾によれば、円筒殻に初期応力として内圧が作用している場合、発生したフープ応力 σ_h と素材の降伏応力 σ_y の比 $\sigma_h/\sigma_y < 0.3$ では、円筒殻の曲げ座屈耐力は増加すると述べている。今回の実験で用いたTC005RおよびTC010Rに関し、座屈前変形が膜理論²⁸⁾に従うとすると、

$$\sigma_h/\sigma_y = 0.03(\text{TC010R}), 0.04(\text{TC005R})$$

(但し、 σ_y は、表一に示した0.2%耐力を用いた。)となり、いずれも座屈の発生を拘束させる効果が若干作用していると考えられる。

以上のことから、今回の実験の範囲では、液体を満たした円筒殻の動的座屈限界応力は、空液の円筒殻の軸圧縮座屈古典理論値に比べ見かけ上ほぼ同程度か若干高めであるといつてよい。

f) 入力最大加速度と頂部加速度の関係

図一19に入力最大加速度と頂部変位の関係を示す。模型TC005Rについては、傾斜座屈試験から得られた座屈変位を図中に点線で示す。図によれば、静的座屈変位実測値より動的座屈変位は、1.4倍程度高めとなっていることがわかる。座屈変位に関しては、前項の検討結果に比べ静的座屈に対する動的座屈の限界値の比が若干大きくなっているが、これは、動的試験に比べ静的試験の方がはるかに座屈発生の判定が容易かつ正確であることが影響しているものと考えられる。

今回の試験では、振動台加振能力の限界から、模型が完全に構造物としての機能を失う、いわゆる崩壊まで到達し得なかったが、座屈発生から崩壊までの余裕度は、 $R/t=1000$ 前後の弾性座屈についても、ある程度見込めるものと考えられる。

4. まとめ

本報告では、曲げ支配型の弾性座屈に着目し、 $R/t=1000$ 前後、 $L/R=4$ 前後の内部流体を有する単純円筒殻を用いて動的座屈試験、傾斜座屈試験を行い、静的座屈挙動と動的座屈挙動の相違等について検討を行った。今回の実験の範囲において得られた結果を要約すると次のようになる。

- 1) 動的座屈試験において、円筒下端部近傍に軸方向圧縮膜応力によるダイヤモンド型座屈と円筒上部の全周に振動モードと見分け難い変形が観察された。傾斜座屈試験ではダイヤモンド型座屈のみが観察された。
- 2) ダイヤモンド型座屈変形に関し、座屈波長、発生数ならびに発生箇所については、静的試験と動的試験でほとんど相違がなかった。
- 3) 静的座屈限界と動的座屈限界とを比較した場合、内容液によるフープ応力ならびに応力分布の不均一による座屈耐力の見かけ上の増加によって、座屈限界値は1.2倍程度増加した。
- 4) 長い円筒の軸圧縮による静的座屈耐力評価式が曲げ支

配型の弾性動的座屈耐力評価に適用できることがわかった。

5) $R/t=1000$ 前後の薄肉円筒殻の場合にも、座屈発生から崩壊までの余裕度はある程度見込めることがわかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会容器構造小委員会: 容器構造の設計の現状と展望、1995年日本建築学会大会パネルディスカッション資料、平成7年8月
- 2) G.W.Housner: Dynamic pressures on accelerated fluid containers, Bull.Seim.Soc.Am., Vol.47,1957
- 3) 曾我部潔、重田達也、柴田碧: 液体貯層の耐震設計に関する基礎的研究、東京大学生産技術研究所報告、第26巻、第1号、1977
- 4) M.A. Haroun, G.W.Housner: Dynamic characteristics of liquid storage tanks, Proc. of ASCE J. of the Engineering Mechanics Division, Vol.108, No.EM-5, 1982
- 5) 千葉正克、八巻昇、谷順二: 部分的に液体を満たした片持ち円筒殻の自由曲げ振動、日本機械学会論文集C編、50巻453号、昭和59年
- 6) A. Sakurai, et al: Fluid-coupled vibration analysis of reduced models of a large pool type LMFBR in Japan, 8th SMiRT, Vol. EK1/8, 1985
- 7) 奥村敏恵、秋山成興、小川浩: たわみ性を有する円筒貯槽タンクの振動性状について、埼玉大学工学部建設基礎工学科研究報告、第7巻、1977
- 8) 坂井藤一、迫田治行: 円筒形液体タンクの簡易な振動解析法について、マトリックス構造解析法シンポジウム論文集、日本鋼構造協会、1979-6
- 9) 清水信行、山本鎮男、河野和間: 円筒タンクの耐震設計法に関する研究(その1、その2)、日本機械学会論文集、第425、第426、1982-2、3
- 10) D.P.Clough,: Experimental evaluation of seismic design methods for broad cylindrical tanks, Univ. of California, EERC Rep., No.UCB/EERC-77/10,1977
- 11) A. Niwa: Seismic behaviour of tall liquid storage tanks, Univ.of.California,EERC Rep., No.UCB/EERC-78/04,1978
- 12) A. Niwa, R.W.Clough: Buckling of cylindrical liquid-storage tanks under earthquake loading, Journal of Earthq. Engrg. & Str. Dyn., Vol.10,1982
- 13) 高圧ガス保安協会: 鋼製平底円筒形貯槽の耐震実験報告(第1回~第3回)、高圧ガス、Vol.21, No.7~9,1984
- 14) M.Chiba, J. Tani et al: Dynamic stability of liquid-filled cylindrical shells under horizontal excitation, Part I: Experiment, J. of Sound and vibration, Vol.104(2),1986
- 15) W.K.Liu and R.A. Uras: Transient failure analysis of liquid-filled shells Part I: Theory, Nuclear Engineering and Design, Vol.177,1987
- 16) R.A. Uras and W.K.Liu: Dynamic buckling of liquid-filled shells under horizontal excitation, J. of Sound and Vibration, Vol 141,1990
- 17) A.Combescure, J.C.Queval: Dynamic behaviour of liquid storage tanks, 9th SMiRT, Vol.K14/1, 1987
- 18) C.F.Shih, C.D.Babcock: Buckling of Oil Storage Tanks in

- SPPL Tank Farm During the 1979 Imperial Valley Earthquake, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.109, 1987
- 19) 藤田勝久、伊藤智博、和田宏：地震動を受ける円筒殻の座屈に関する実験的考察(第1報、第2報), 日本機械学会論文集C偏, 55巻515号, 56巻525号平成元年, 平成2年
- 20) 長島英明、小久保邦雄、高柳政明他：円筒容器の動的座屈に関する実験的研究(第1～3報), 日本機械学会論文集A偏, 52巻479号, 55巻517号, 昭和61年, 平成元年
- 21) 自治省：危険物の規則に関する技術上の基準の細目を定める告示、自治省告示119号、昭和58年12月
- 22) 秋山宏、高橋誠、野村聡：内圧と曲げせん断荷重を受ける鋼製円筒殻の座屈実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第400号, 1989年6月
- 23) 土木学会鋼構造委員会、座屈設計ガイドライン、社団法人土木学会、昭和62年10月
- 24) 土岐仁、八巻昇、谷順二：液体を部分的に満たした円筒かくの軸圧縮座屈, 日本機械学会論文集A偏, 48巻434号, 昭和57年10月
- 25) C.F. Shih : Failure of Liquid Storage Tanks due to Earthquake Excitation, PhD Dissertation, California Institute of Technology, May 1981
- 26) Gerard, G. and Becker, H. : NACA Technical Note, No.3783, 1957
- 27) 津島一英：薄肉円筒殻の座屈に関する一考察（曲げ及び偏心圧縮力を受ける場合）, 日本建築学会論文報告集, 第117号, 昭和40年11月
- 28) W. Flugge : Stresses in Shells, second Edition, Springer-Verlag, 1973

(1995年9月18日受付)