

液体貯槽の自然地震に対する応答観測結果

On Some Results On Response Observation of Liquid Storage Tanks to Natural Earthquakes

柴 田 碧*・重 田 達 也*

Heki SHIBATA and Tathuya SHIGATA

1. ま え が き

千葉実験所において昭和 47 年以来化学プラントモデルの自然地震応答観測を行ってきた。1) 本プラントを使用しての研究目的は、

- i) 従来の建築構造物などとはかなり異なった化学プラントの地震応答の性状を把握すること。
- ii) 応答倍率のゆらぎ, 加速度その他に対する応答倍率

の傾向をみること。

iii) 石油など液体貯槽の一般的な応答特性, とくにスロッシングの入力, 応答倍率特性を求めること。

iv) 配管などのモード計測法などを実際の地震データを得ながら開発することなどであった。これらについては第 6 回世界地震工学会議に発表した応答のゆらぎの問題²⁾など, それまであまり問題にされなかったことを大きく提起することができた。

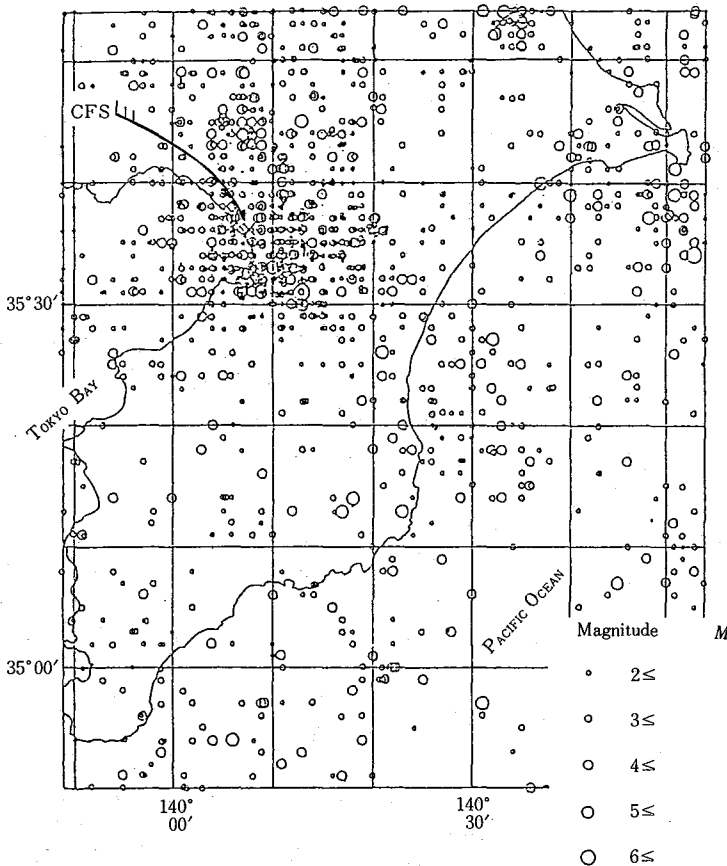


図 1 千葉実験所付近における地震活動分布図 (1960~1980年)

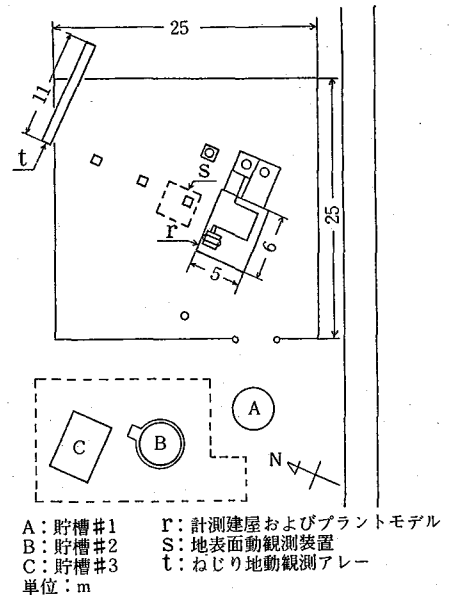


図 2 プラントモデルの配置図

* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

一方昭和39年の新潟地震では石油貯槽の被害が大きくクローズアップ³⁾された。

そのような状況をふまえて、とくに液体貯槽の耐震設計のための基礎データを得ることを目的として、昭和48年以來、逐次3基の液体貯槽を設置し観測を行ってきた。ここでは貯槽類の応答観測結果について、および一昨年に発見された薄肉貯槽の座屈について、その大要を記すものである。

2. 貯槽モデルとその設置条件・地震状況

千葉実験所は埋立以前の海岸線(昭和40年以前)から約1kmの所で、関東ローム層の台地上にある(図4)。この地帯は、日本でも最も地震頻度の高い所の一つであり、とくに茨城県南西部の震源群からは最短約30kmぐらいである。1960年から1980年までの房総半島の震源地の分布⁴⁾を図1に示す。矢印の先端が本観測地点である。いままで約10年間の地表面加速度は1Galから30Gal程度のものが多く、最大加速度記録は1980年9月25日に千葉実験所の南東13.3kmで深さ70kmの地点で起きたものであり、その規模は $M=6.1$ で加速度(NS)は90.2Gal, 80.2Gal(EW), 25.8Gal(UD)(SMAC-Q, 他の加速度計ピックアップなどとともに1m×1m×1mの地表に埋めたコンクリートブロック上で計測)であった。

第1に昭和48年に20m³の厚肉円筒貯槽を設置し、スロッシング応答を観測することからスタートし、以後研究目的に応じ増設し、現在は3基である。そのモデルの概要は次のとおりである。

- # 1: 20m³, 直径4m 鋼製円筒厚肉 ($t=4.5$ mm) ベタ基礎上設置。(図2中のA)
- # 2: 54m³, 直径3.8m 鋼製円筒薄肉 ($t=1.6$ mm, 図4参照) 杭基礎スラブ上設置。(図2中のB)
- # 3: 60m³, 6m×4m×3mH FRP製組立式パネル・鉄骨架台上設置。(図2中のC)

3基の貯槽の写真を図3に示す。なお貯槽#2の詳細図を図4に示すが、その下部溶接部を除いて板厚は1.6mmとこの容量の貯槽としては非常に薄くてきており、いわゆるオーバル振動が生じやすく設計されている。貯槽#3はたがいにボルトで止められた1m×1mのFRPパネルにより構成されている。

3. 貯槽上部(屋根)の加速度応答

側壁は高次のオーバル振動モードとか、側壁の曲げ振動モードなどの応答を示すが、強制加振の応答は多くの場合屋根部の応答として評価される。応答倍率は一般的には最大入力加速度の関数で、ここでは、応答倍率を、屋根における最大応答加速度(α_s)と最大入力加速度(α_g)との比、 α_s/α_g とする。貯槽#1については容器は十

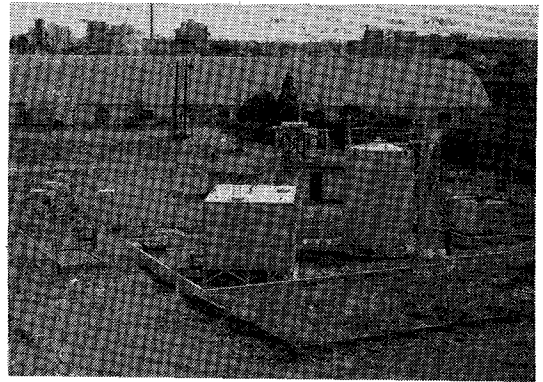


図3 プラントモデル全景

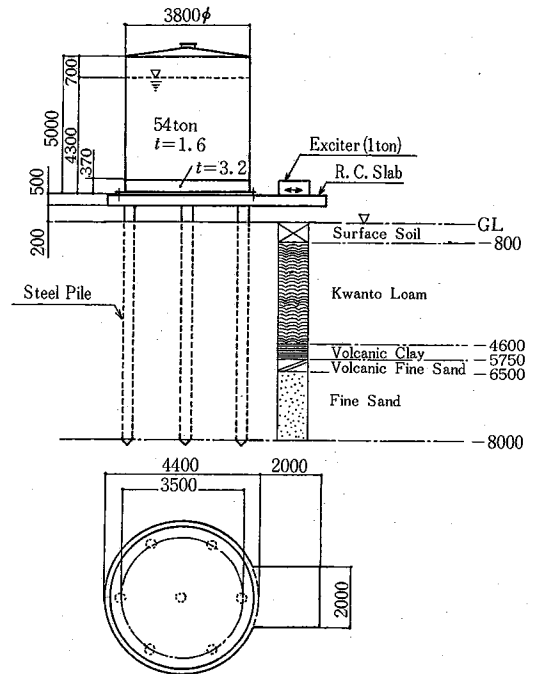


図4 薄肉円筒貯槽#2

分剛でその増幅は考えていないのである。貯槽#2の場合の応答は図5にみるように多くの鋼構造物と同様、入力に対してはほぼ一定である。ただし、 α_g の大きいところにある少数の低倍率の点の理由は不明確であるが、これについては後述する。

次にいくつかの図に示すように、地震の震源地範囲が、点描ボタンによって区別されている。×, +, △は近地地震であり、△, ○, □などは遠地地震である。#3のFRP角型パネル貯槽の測定結果を図6に示すように、その応答倍率は貯槽#2のそれに比べて、入力加速度の増加に伴い、鋭く減少している。また平均応答倍率も貯槽#3の方が貯槽#2に比べて低い。これらのことが構造上に起因しているのは明らかである。すなわち、パネルはたがいに

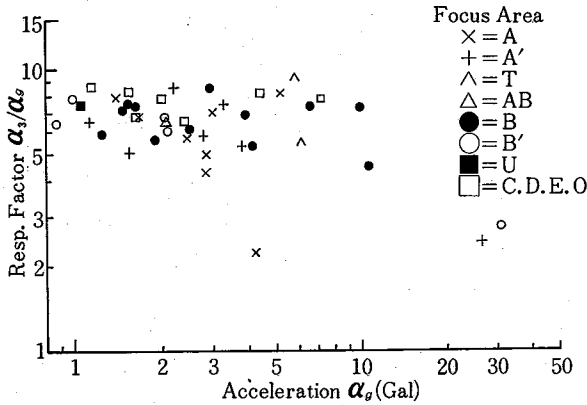


図5 貯槽 #2: 頂部加速度応答倍率と地表面加速度

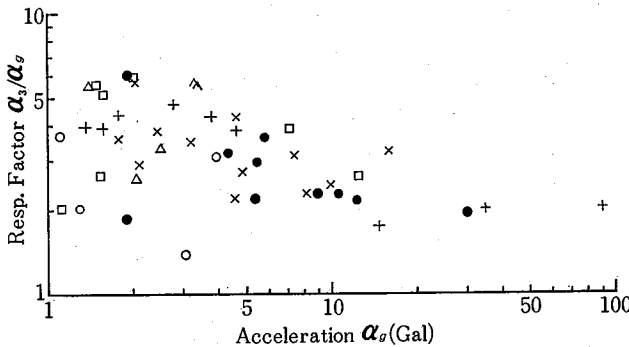


図6 貯槽 #3: 頂部加速度応答倍率と地表面加速度

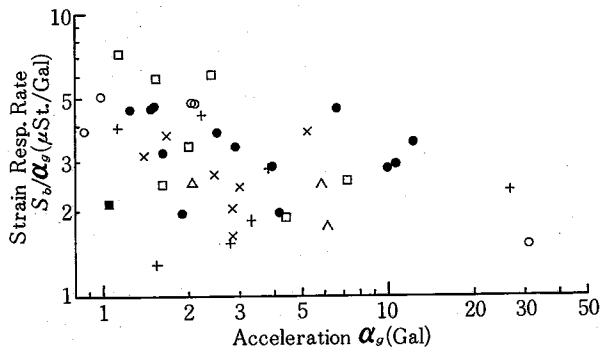


図7 貯槽 #2: 下部E面の剪ひずみ加速度応答倍率と地表面加速度

ボルトで止められており、いろいろな非線形性が高次の構造ダンピング同様、結合部に含まれているからである。

貯槽 #2(図5)の近地地震に対する応答の結果をみると、図6の貯槽 #3の傾向にやや似ているが、これには二つの理由が考えられる。一つは脚上げによる構造上の非線形性であり、もう一つは近地地震の振動波形は、他の地震に比べて、多くの場合、衝撃性の強い単純な波形であるということである。著者らの観測によれば、第2の理由はほとんど否定できる。その理由は前報⁹⁾で報告した他の構造物の応答倍率が異常に高い場合のほとんどは、そのような近地地震で起こったものであるからであ

る。貯槽 #2の下部の剪断ひずみの応答を図7に示す。ひずみ応答は低入力では非常にばらついているが、高入力になるにつれ、低い側に寄ってくる。しかし、貯槽 #2の剪断ひずみと地表面加速度(α_g)の関係は貯槽 #3に近い。これは貯槽底部の底板と基礎との密着の度合などが関係し、非線形な因子が関係しているものと思われる。1次および2次モードの節や、側壁の下部の溶接線をはさんだ部分、底板のようないくつかの位置におけるタンクの局所的たわみを観測したり、再計算したりすることによって、そのメカニズムは明らかになるであろうと考えられる。これについては近い将来、大加速度の加振実験を試みたいと考えている。

また、この観測を通じて、とくにパネル型貯槽 (#3)では設計応答倍率として、得られた値の下限値が使えることが明らかとなった。その理由は、確かにこの値は設計の対象となるより強い地震条件の下では下限値に集中すると考えられるからである。

4. 薄肉貯槽の側壁応答

オーバル振動応答は側壁の応力解析にとって重要である。また、応答はシェルの座屈の問題においては瞬間的な不整として作用する。図8から解るように、25 Hzよりも低い振動数範囲で少なくとも36のモードがあるので、自然地震に対する振動モードの観測はなかなか困難な問題である。モードの形状自体を観測することによって、これらのモードを確認しようとする、半径方向の変形の分布を計測するためには多数の加速度計かひずみゲージが必要である。ここでは、側壁中段に半径方向NSとEWの二つの加速度計を用いた。なお自由表面付近の変動水圧応答も、参考のため記録した。記録された応答の時刻歴は図9の例に示すように分析された。この図には、半径方向EW加速度応答と変動水圧応答のパワ・スペクトルを示す。この例は最も単純な例の一つである。各応答のパワ・スペクトルにおいて四つだけ卓越したピークが見られるのみである。この図の1点鎖線は、強制振動試験によって観測されたオーバル型モード(側壁の約3/5下の位置で円周方向16点のひずみゲージを用いて)の固有振動数である。なお、強制振動試験によって得られたモード図の一部を図10(a)~(c)に示す。四つのピークの内、三つは観測されたモードのいくつかに一致しているが、パワ・スペクトルの7.8 Hzのピークは、図8で示した2点“A”のように計算値より著しく離れている。しかし実地震でも表れ、図9(b)の2点鎖線によって示されたピークに一致している。5.8 Hzの最低の振動モードは、加速度応答のパワ・スペクトルにおいて、はっきりと観測された。そして、一つの節円を持つ最低の振動数モード $m=2$, 12.7 Hz は、また変動水圧応答の最も顕著なピークでもある。2番目に卓越したピークは12.5

Hz で肩を持っており、ピーク自体は 12.5 Hz にあるが、無節円モード $m=1$ の固有振動数の一つは 12.4 Hz にある。この両者の関連についてはまだ明らかになっていない。しかし、そのような大きなスケールのモデルや自然地震応答に対してさえ、わずか 2 点の加速度と 1 点の水圧の観測で 0.1 Hz の精度をもって、このような問題を

を議論できるのだと述べたい。

他のいくつかの低いピークは、オーバル・モードの固有振動数に一致するものではないが、スロッシングモードの応答に関連するものである。なお、0.50 Hz のピーク (図 9 (b)) は明らかにスロッシングの基本モードである。FFT 技術を使うことによって、多くのモードはわずか二つか三つのピックアップの時刻歴から識別される。これには、もちろん事前の強制振動実験などで固有モードの分布に関する知識を我々が持っていることが必要である。そうであれば時刻歴は単純なモード計測データよりも多くの情報を含んでいるからである。

5. スロッシング 応答

スロッシング (別称、対流形) の応答に関して、いろいろな場合^{6),7)}について議論してきた。図 11 に、これら三つの貯槽で観測された応答を示す。これらの応答はすべて NS 方向で観測されたものであり、この方向の貯槽の寸法は #1, #3 が 4 m, #2 は 3.8 m である。この寸法は、敷地内での地盤で卓越したピークの一つに合うように設計されている。応答倍率がマグニチュード M の関数であるような傾向はない。それらの上限値は、共振条件の三波連続した正弦波入力に対する応答倍率の値よりもわ

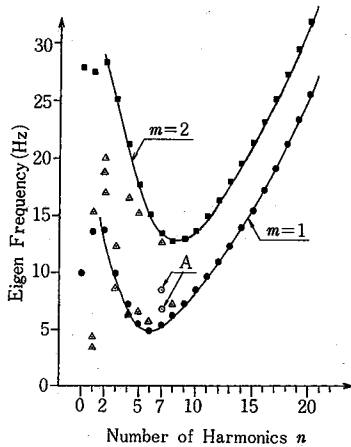
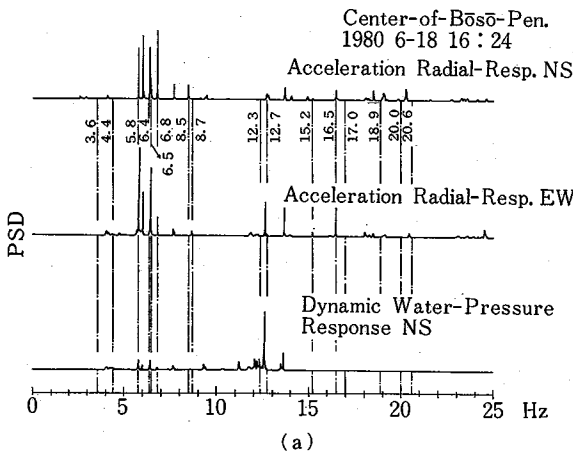
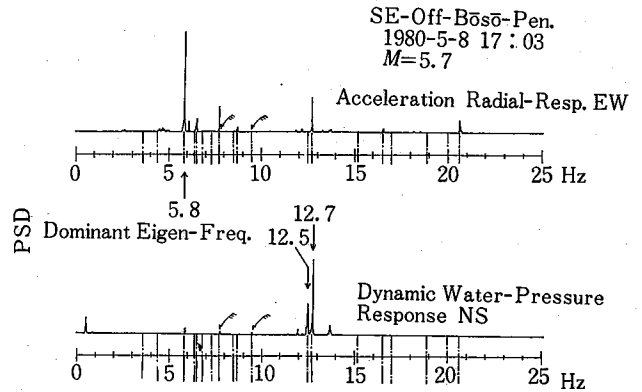


図 8 貯槽 #2 の固有振動数とモード (計算値と実験値)

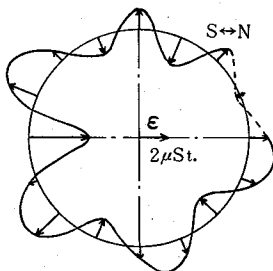


(a)

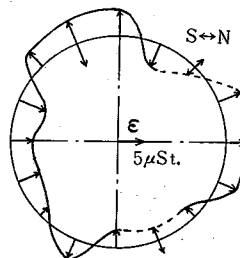


(b)

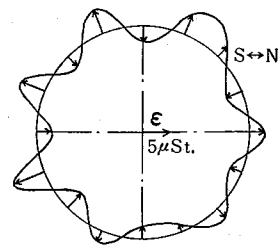
図 9 (a) (b) 貯槽 #2 : 側壁加速度と変動液圧のパワ・スペクトル



(a) $n=6, 5.8\text{Hz}$



(b) $n=3, 12.3\text{Hz}$



(c) $n=7, 12.7\text{Hz}$
 $m=2$

図 10 貯槽 #2 : オーバル・モードの実験例

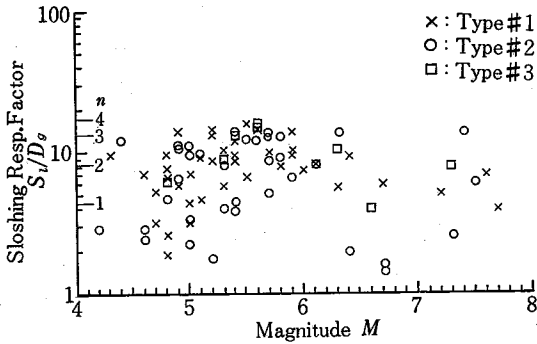


図11 全貯槽スロッシング応答倍率とマグニチュード

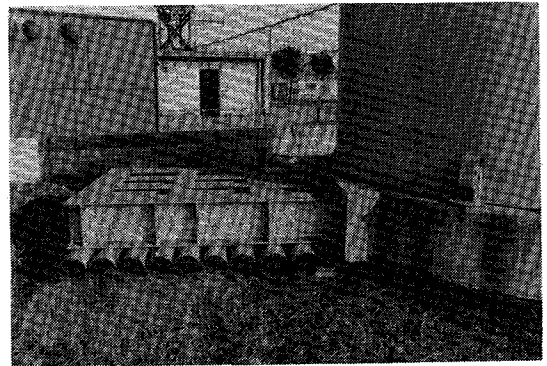


図13(a) 貯槽 #2: 側壁の座屈部分と底板-N 方向

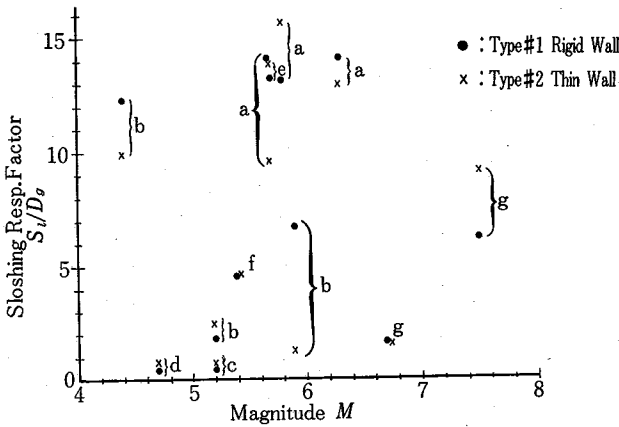


図12 同一地震における貯槽 #1 と貯槽 2 のスロッシング応答倍率の比較

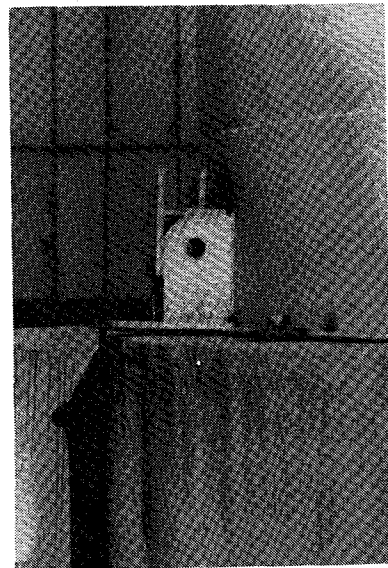


図13(b) 貯槽 #2: 側壁の座屈部分と底板-N 方向

ずかに大きい。これは図 11 に印をつけた n が過渡正弦波の波数である。これは先の文献⁶⁾で実際の設計値について具体的な応答倍率を定める手法として述べているものである。応答値が低くなる傾向は厚肉円筒貯槽 #1 よりも薄肉円筒貯槽 #2 の方に大きくみられた。しかし、これらの値を応答のそれぞれの組について比較すると、図中ではあまり明確ではない(図 12)が、一般にこの傾向は事実である。いくつかの場合では、同じ震源地範囲で起こった地震に対してさえ、反対の傾向が見られる。確かに、震源地が遠くて深い地震のように、地盤で低い振動数成分が卓越するならば、応答倍率はたがいにほとんど等しい状況になっている。

6. 薄肉円筒貯槽で観測された座屈現象⁷⁾

昭和 57 年 (1982) 年 6 月薄肉円筒貯槽 #2 で、NS 方向より若干ずれた軸上にほぼ対称に、最下段の厚肉部と上部薄肉部との溶接線直上に非常にはっきりとした座屈が見つかった。この座屈の状況を図 13(a), 13(b), 図 14, 図 16 に示す。その後 2 か月後、剪断座屈のようなパターンがいくつか座屈方向の軸から 90° の側壁に見つかった。それはほとんど NS 方向である。

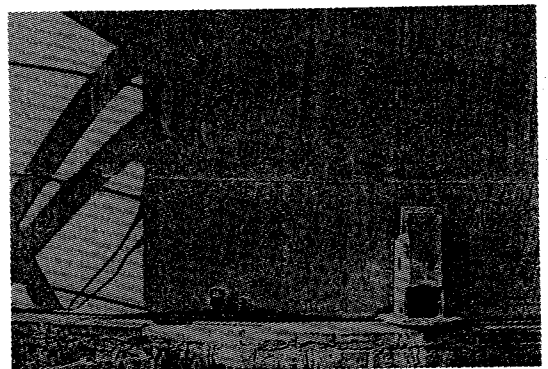


図14 貯槽 #2: 側壁の座屈部分-S 方向

去る 1980 年 9 月 25 日に大きな地震があり、座屈が生じた方向の NS の最大加速度は 90.2 Gal で、最大地盤変位は 7.92 mm であった。この際ほとんどの応答記録はオーバスケールになったが、スロッシングの振幅は壁面で約 65.3 mm であった。地震後貯槽を調べてみたが、そ

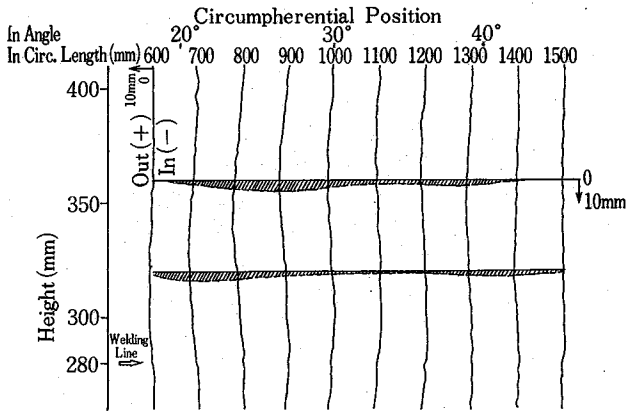


図15(a) 貯槽 #2: 側壁の座屈部分の変形-北側(180°)壁

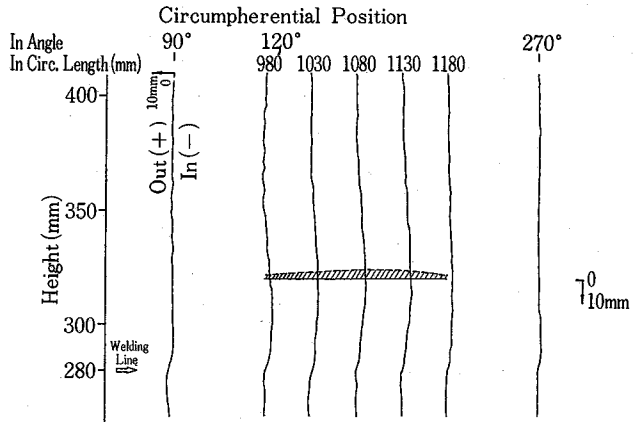


図15(b) 貯槽 #2: 側壁の座屈部分の変形-南側(0°)壁



図16 貯槽 #2: E方向側壁の剪断座屈

のときは外観になんらの変化も認められなかった。1982年6月のある日、図15(a), 15(b)と図13(a), 13(b), 図14の写真などに示すように、NS軸における貯槽の部分的座屈と、いくつかの脚上げ跡を発見した。その後、側壁の剪断座屈の跡も発見されたが、これは1978年の宮城県沖地震の際に塩釜で観測されたものと同じパターンである。1982年3月に2回の地震があり、これらによって水面部で150 kgf/m²に達する側壁動水圧の動的応答が生じた。これはかなり大きい値で、これによってシェルの塑性変形を増加したものと考えられる。このように、座屈で発生した変形(場合によると発見できない)が、逐次成長する現象は著者の一人柴田ほかによって確認⁷⁾されている。しかし単純な座屈解析の結果では、1980年9月の地震の条件下での座屈の可能性は否定された。ただ、12.7 Hz ($m=2, n=7$)でよく観測されるオーバル・モードの一つによって、瞬間的に不整が生じ、それにより座屈が発生する可能性があると思われる。図8に示すような数値解析結果によると、円周上の変形パターンは、そのモード形に酷似しているからである。

7. 結論および謝辞

このような目的の研究は、多くの条件を必要とするも

のであるが、最も有意義な結果は自然地震によってのみもたらされるのかも知れない。仮想入力によってなされた各種の実験では、そのような未知で予期されない結果を得ることは決してできないといっても過言ではない。

研究は国防防災センタおよび川崎市の援助によって始められた。その後、石川島播磨重工(株)およびブリヂストン(株)の委託研究によった。図8の数値計算をISTRAN/SRでしてくださった石川島播磨重工の久保田氏、ブリヂストンの森川氏、その他関係各社の諸者、防災センタ高橋部長(現、所長)、実験・データ整理の一部を担当した前技官曾根氏らに感謝し、厚くお礼申し上げる。なお、本報の大部分は文献⁷⁾に英文ですでに発表してある。
(1984年8月15日受理)

参考文献

- 1) 重田・柴田: 生産研究, Vol. 24, No. 3 (昭47-3) p. 120
- 2) Shibata, H. and others: On Fluctuation of Responses of a structure, *Proc. of 5th WCEE*, #367 (June 1973).
- 3) 生産研究: 新潟震害特集, Vol. 16, No. 10 (昭39-10).
- 4) 気象庁: 房総半島南東沿岸部の地震 (1982-3-27), 地震予知連絡委員会報告, No. 28 (昭57-8) p. 113.
- 5) Shibata, H. and others: Abnormally High-Response and Damage Accumulation of a Piping System, *Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan*, ASME, PVP-45 (Aug. 1980) p. 77.
- 6) Shibata, H. and Sogabe, K.: Design Criteria for Oil and Liquefied Gas Storages, *Proc. of 6-European Conf. On Earthq. Eng'g.*, Vol. 2 (Sept. 1978) p. 2.
- 7) Shibata, H. and Others: On Some Results On Response Observation of Liquid Storage Tanks to Natural Earthquakes, *Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77 ASME (June 1983)
- 8) Sogabe, K. and others: On the Aseismic Design of Liquid Storages, *Bull. of JSME*, 19-138 (Dec. 1976) p. 1467.