

## (63) 薄肉円筒タンクの震害及び振動実験

東電設計株式会社    〇正員    丹 羽   顯  
カリフォルニア大学    正員    R.W.Clough

まえがき    地上式大型円筒タンクの地震時挙動の問題点として、側壁と内容液体の動的達成効果、梁型応答よりも側壁断面のゆがみ応答が卓越すること、底板の浮き上がりによる非線形特性、側壁の座屈、支持基礎の変形に伴う底板の過応力状態等が最近の研究成果により明らかとなってきた。

内容液体からタンクに加わる地震力の算定にはタンクを完全剛体とみなして動水圧を求めるHousnerの提案式<sup>(1)</sup>が最近まで使われた。アラスカ地震によるタンク震害<sup>(2)</sup>等に触発されて、地震力を現実的に考慮しようとする目的で側壁と内容液体の動的達成効果を下端固定の曲げ剪断ばりモデルとして考慮する解析手法がVeletsos<sup>(3)</sup>、坂井<sup>(4)</sup>、Haroun<sup>(5)</sup>等によって提案されている。しかしながら、Berkeleyでの1/3スケールモデルの振動台実験<sup>(6)</sup>では、固定支持タンクの場合に心円断面を仮定した解析結果のビーム型応答よりも断面形状のゆがみ応答が卓越して、側壁下部の応力状態がビーム型応答による場合と大きく食い違うことがわかった。さらに、側壁下部が自由支持で足あげが伴う場合には横ゆれ（ロッキング）ならびにフレキシブルな側壁と底板の部分的浮きあがりによる大きな断面形状のゆがみが発生することが明らかになった。また、締め固めた砂質マウンド上タンクでは、1978年の宮城沖地震におけるアニュラープレート部の亀裂等が起り、底板下の基礎の不等変形が底板に過応力状態をもたらす可能性が提起された。タンクと弾性基礎の達成効果の検討のために1/3スケールモデルを使った振動台実験が筆者等によりBerkeleyで現在進行中である。一方、Imperial Valley, カリフォルニア, 地震(1980年10月)によって発生したEl Centro市の石油タンクのエレファント・フット型座屈の震害等で座屈問題の見直しを行ったBabcock等の実験<sup>(7)</sup>では、プラスチック製の小型モデルを対照としており座屈の定性的な検討にとどまっている。

ウェンテ・ワインタンクの震害    1980年1月に発生したGreenville(カリフォルニア)地震によってリバモア市郊外のWente Bros.Winery(以下でウェンテと略称)のステンレス・スチール製ワイン貯蔵円筒タンク百基程が座屈被害を蒙った。ウェンテは当該地震(マグニチュード5.5)の震央域から凡そ13km南東に位置し、被害タンクの殆どは天井板までワインが満ち、側壁下端の足あげ自由の状態であった。地震翌日の調査によると、高さとも直径とも約6mのタンクでは図1に示めすような側壁下部の張り出しが全周に亘って発達したエレファント・フット型座屈を受けたものが多く、図2のタンクは2日後の余震で張り出し部に亀裂が入りワインが漏れた。高さとも直径の比が2倍近いタンクの場合は図3に示すようなダイヤモンド型座屈をうけ、側壁下部のへこみが連鎖状で全周に発達する傾向にあった。

ウェンテでの地震動の計測はないが、1秒前後の地動周期が卓越していたことを裏づけるデータがある。高架水タンク(75キロリットル容量でタンク本体中心高さ20メートル)のトラス構造部材に崩壊寸前の座屈が生じており(図4と5参照)、固有周期0.8秒の高架タンク構造系の応答を十分増幅させる地盤振動があったと推定される。また、地上式タンクの頂部を跨ぐ歩行橋上で作業をしていた者の「ゴーツという大音響と、激しく立ってられない揺れ」の説明など円筒タンク群の予想されたロッキング周期1~2秒程度のデータと合致する。

実物ワインタンクの実験及び方法    ウェンテタンクが地震時に激しく横揺れをした具体的な手掛りとして、タンクの基礎フーチング上での横ずれや、となり合ったタンク側壁頂部に認められる大きな衝突のへコミ等がある。従って、側壁の座屈が地震時の転倒モーメント力によって生じる側壁下部の過大な圧縮応力度に起因していると推測出来るが、座屈発生メカニズムの定量的なデータは震害調査からは得られていない。耐震設計の必要性を認識したタンク製作会社等の要望と、Berkeleyにおける筆者等の円筒タンク振動台実験の実績<sup>(6)</sup>をもとに、実物ワインタンクの座屈振動台実験が地震工学研究所(EERC)で行なわれ

た。出来る限りウェンテでの地震時挙動を再現するため、試験タンクは商業ベースで製作した高さ6.1 m、直径3 m寸法のウェンテ・タンクのレプリカを使った(図6参照)。側壁は1.2 m高さのステンレス・シート板をラップした5層からなり、下2層は2.0 mm、上3層は1.6 mmの板厚で、底板と天井板は2.0 mm厚である。試験条件はウェンテに倣って、満水、足あげ自由の条件で行った。入力地震波にはウェンテから南西に5 km地点のV.A.Hospital 地下で記録された当該地震波形を採用した。なお、この記録波の水平方向2成分の加速度値ピークはそれぞれ0.125 gと0.184 gで、鉛直方向は0.117 gであった。試験タンクの動的座屈挙動の詳細な計測のために、過去のタンク実験<sup>(10)</sup>にくらべて、側壁下部の鉛直応力分布と、浮き上がり時の底板の応力状態を詳細に把握するためのヒズミゲージを追加した。

**試験タンクの動的挙動** 入力加速度レベルが水平方向に0.64 g、鉛直方向に0.37 gのケースで試験タンクに図7のようなウェンテとよく似たダイヤモンド型座屈が発生した。試験時の水平及び鉛直方向入力加速度、側壁下部の動水圧、側壁下端の足あげ応答等の時刻歴を図8に示す。初動部にみられる9ヘルツの動水圧応答は鉛直入加速度波形とよく一致しており、実験中に観測された「ブーン」という激しい唸りを発した側壁の面外振動によるものである。足あげ応答と側壁下部の鉛直方向膜ヒズミは水平入力の主動時に顕著にあらわれ、時刻歴後半の入力波周期の長い時刻帯に横ゆれが最大値に達し、同時に発生した座屈による側壁の突発的なヘコミと鉛直方向膜ヒズミの減少及び曲げヒズミの急増などが図9からわかる。加振軸上底板の側壁近傍で得られた半径方向のヒズミ応答で、曲げヒズミと膜ヒズミ成分を図10と11にそれぞれ示す。図8(d)の足あげ応答と比較すると、足あげ時には約0.1%の曲げヒズミが底板に生じており、図10(a)の記録では降伏点を越えて0.25%の塑性域に達していることがわかる。図11の膜ヒズミ応答から、底板の浮き上がりにもなって持ち上げられた液体を支持するためのカテナリー・テンションとして0.04%のヒズミがあらわれている。足あげ変位が大きくなると、曲げ作用に減少がみられ、カテナリーアクションが底板の浮き上がりのメカニズムに重要な役割を果たすことが明らかである。また、試験中の底板の浮き上がりは側壁部から少なくとも30 cm内部まで侵入しており、微小変形理論にもとづくAPIコードで求められる分の3倍にも達している。

**耐震設計指針との比較** ウェンテ円筒タンクの設計には地震力が考慮されておらず、満液時の液圧による円周方向引張り応力が十分安全となるように側壁厚さを決定しているだけで、API<sup>(8)</sup>やAWWA<sup>(9)</sup>の耐震設計指針に照らし合わせると、高さ6 m、直径3 mの自由支持タンクでは水平震度が5%以上の場合には地震時転倒モーメントによる側壁下部の圧縮応力が許容座屈応力度を越えて基準を満たさない。しかし、この計算は側壁下部の足あげに伴う底板の浮き上がり幅を直径の7%に制限した微小変形理論に基づいており、実地震時にはこの上限値をはるかに上回った浮き上がり例が報告されている。

ダイヤモンド型座屈部近傍の実測最大鉛直膜応力度は、表の1に示すように、古典式による値の約60%であるが、APIとAWWAの鋼製タンク耐震設計指針の限界座屈応力度よりも極めて高い。従ってこれら設計指針の限界座屈応力度として採用されている小型円筒タンクの鉛直応力全周一様な静的圧縮試験では、ロッキングが可能な側壁下部自由支持タンクのもつ座屈限界値を大幅に過大評価することが明らかとなった。

REFERENCES

- 1) Housner, G.W., "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers," Bulletin, Seismological Society of America, Vol. 47, 1957.
- 2) Rinne, J.E., "Oil Storage Tanks," The Prince William Sound, Alaska, Earthquake of 1964, Vol. II-A, US Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Washington D.C., 1969.
- 3) Veletsos, A.S., "Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks," Proceedings, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1973.
- 4) Sakai, F., "Vibration Analysis of Fluid-Solid Systems," US-Japan Seminar on Interdisciplinary Finite Element Analysis, Cornell University, 1978.
- 5) Haroun, M.A., "Dynamic Analyses of Liquid Storage Tanks," Ph. D Dissertation, California Institute of Technology, December 1979.
- 6) Clough, R.W., Niwa, A. and Clough, D.P., "Experimental Seismic Study of Cylindrical Tanks," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST12, December 1979.
- 7) Shih, C.-F. and Babcock, C.D., "Scale Model Buckling Tests of a Fluid Filled Tank Under Harmonic Excitation," Pressure Vessels & Piping Conference, ASME, San Francisco, August 1980.
- 8) "Welded Steel Tanks for Oil Storage," API Standard 650, Sixth ed., Revision 3, American Petroleum Institute, Washington D.C., October 1979.
- 9) "Welded Steel Tanks for Water Storage," AWWA Standard D100-79, American Water Works Association, Denver, Colorado, 1979.
- 10) Niwa, A., "Seismic Behavior of Tall Liquid Storage Tanks," Earthquake Engineering Research Center Report UCB/EERC-78/04, University of Calif. at Berkeley, Calif., February 1978.

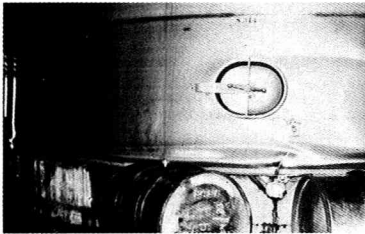


Fig. 1 Elephant-Foot Buckle in Wente "Broad" Tank

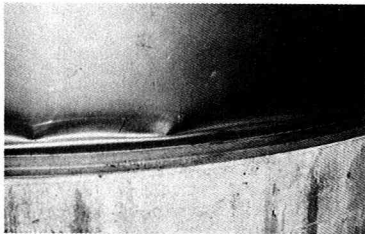


Fig. 2 Stamped Elephant-Foot Buckle in Wente "Broad" Tank

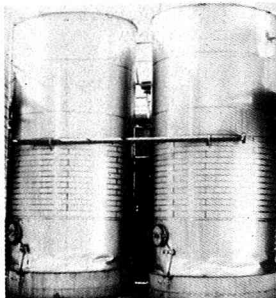


Fig. 3 Diamond-Shaped Buckle in Wente "Tall" Tank



Fig. 4 Wente Elevated Water Tank

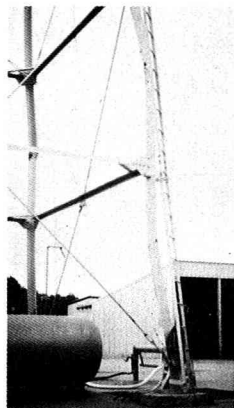


Fig. 5 Buckled Support of Elevated Water Tank

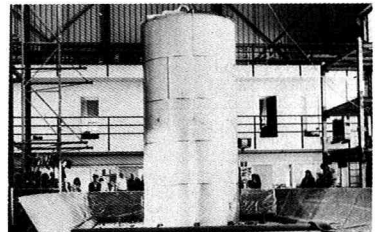


Fig. 6 Test Tank on Shaking Table

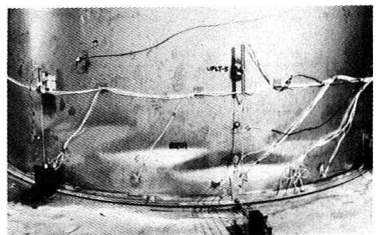
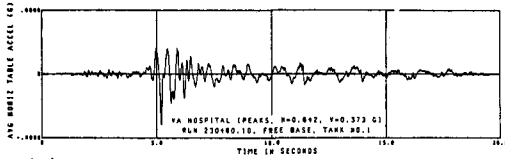
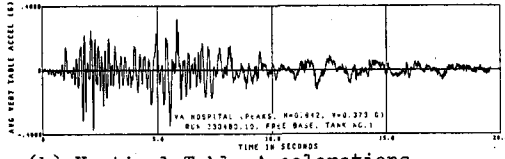


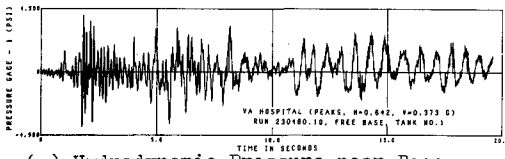
Fig. 7 Buckling Damages to Test Tank



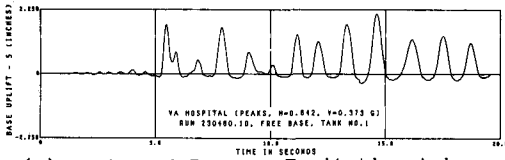
(a) Horizontal Table Accelerations



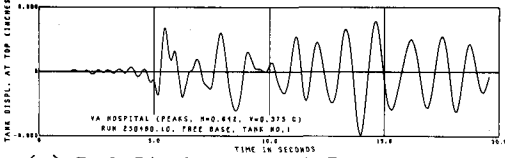
(b) Vertical Table Accelerations



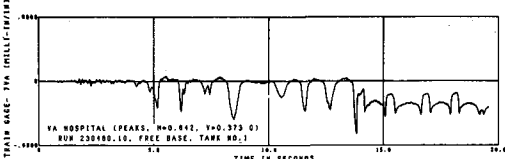
(c) Hydrodynamic Pressure near Base



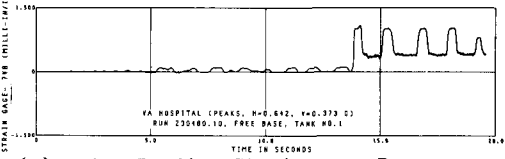
(d) Uplift of Base on Excitation Axis  
Fig. 8 Typical Response Records



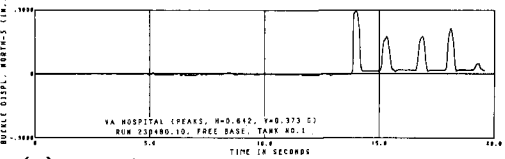
(a) Tank Displacement at Top



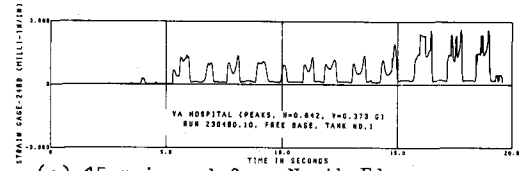
(b) Axial Membrane Strain near Base



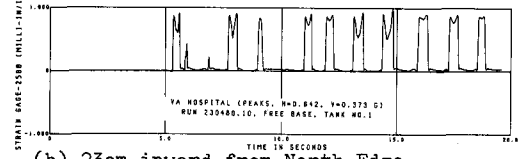
(c) Axial Bending Strain near Base



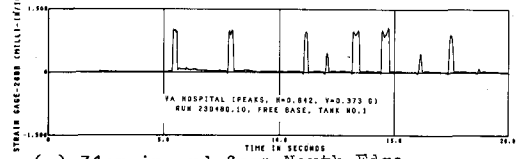
(d) Buckling Deflection near Base  
Fig. 9 Observed Buckling Response



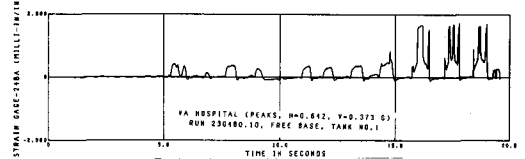
(a) 15cm inward from North Edge



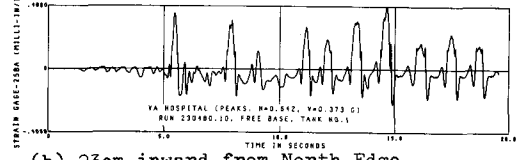
(b) 23cm inward from North Edge



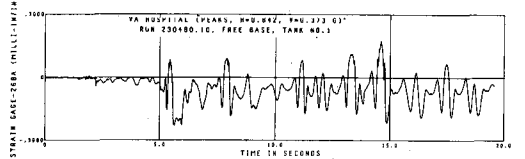
(c) 31cm inward from North Edge  
Fig. 10 Radial Bending Strain of Bottom



(a) 15cm inward from North Edge



(b) 23cm inward from North Edge



(c) 31cm inward from North Edge  
Fig. 11 Radial Membrane Strain of Bottom

Table 1 Correlation of Observed Buckling Stress with Design and Theory

Type	Buckling Stress: $\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Buckling Coeff. $\sigma R/Et$
Classical	1680	0.61
Observed	1040	0.37
API	630	0.23
AWWA	680	0.25