

地震観測記録にもとづく大型地下タンクの地震時挙動について

白 砂 健 後 藤 洋 三
齋 藤 二 郎

Response Behavior of a Large-scale Underground Tank According to Earthquake Measurements

Takeshi Shirasuna Yozo Goto
Jiro Saito

Abstract

It is necessary in investigation of earthquake-resistant capacities of underground tanks that their behaviors during earthquake be correctly understood. Accordingly, observations for earthquake response of a large-scale underground tank in use were implemented. The results of examinations show that (1) deformations of the tank are in two modes, oval and ringshift patterns, (2) the ring-shift deformation pattern is generated at the initial stage of the main shock of the earthquake, while the oval pattern becomes prominent somewhat later, (3) tangential normal strain according to the ring-shift pattern is about twice as large as tangential bending strain according to the oval pattern in terms of maximum magnitude of response, and (4) from the standpoint of earthquake-resistant capacity an underground tank possesses some extra strength in excess of design capacity.

概 要

地下タンクの耐震性を検討するためには、地下タンクの地震時挙動を正しく理解することが必要である。このため地下タンクの地震時応答性状の把握を目的として、実在の大型地下タンクを対象とした地震観測を実施した。本報告は1980年6月29日に発生した、伊豆半島東方沖地震の観測記録について解析検討した結果をまとめたものである。まとめた結果の主な特徴点を述べると次の様である。(1) 地下タンクは地震時において円形のリングモード変形と卵形のオーバリング変形を示す。(2) リングモード変形は地震主要動初期に現われていて、地盤の慣性力がタンクに作用したことによると考えられる。オーバリング変形はこれより遅れて目立ってくるが、荷重の作用状態を把握することは難しい。(3) この変形パターンをタンク壁体円周方向の軸ひずみ、曲げひずみによって追跡すると、タンクにきびしい条件となっているのはリングモードの変形である。(4) 一方地下タンクの耐震性を観測結果から推定すると、設計耐力に加えてさらに余裕を持っていると考えられる。

1. 序

地下タンクの安全性を検討する上で耐震性評価の問題は重要である。合理的な耐震設計技術の確立のためには、地下タンクの地震時挙動について正しい理解が必要である。軟弱地盤に建設される円筒型地下タンクの耐震設計に関しては指針等が整備されているが、地下タンクと地盤との相互作用を含めた挙動についてはなお検討すべき課題が残っている。

このために大規模な模型振動実験を実施し、地下タンクの動的応答特性について多くの貴重な知見を既に得て

いる。単一地下タンクの模型振動実験によると、地下タンクは周辺地盤の動きにはほぼ追従する挙動を示し、有限要素法による数値解析手法によって表現可能であることが示された¹⁾。複数基の地下タンクが隣接して建設される群地下

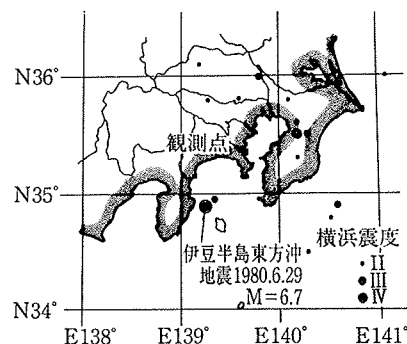


図-1 観測点と震央分布

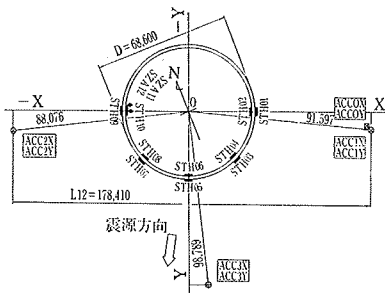


図-2 地下タンク平面図と計器配置

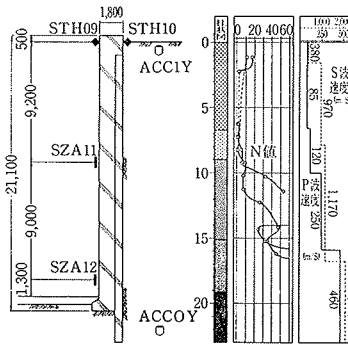


図-3 土質柱状図

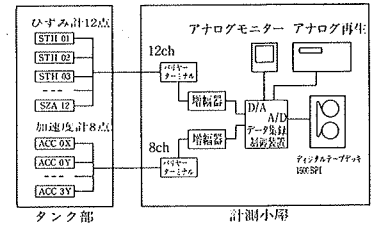


図-4 地震観測システム

タンクの模型振動実験によれば、群設することによって地下タンクの変形パターンが変化し、卵型オーバリング変形にもとづく円周方向の壁体曲げひずみが卓越することが示された²⁾。また、地盤中に地下タンク模型を設置して行なった野外実験では、地下タンク周辺地盤に生ずるひずみとタンク変形との関係を求めることができた³⁾。

このような実験結果をふまえて、実在の大型地下タンクの地震時における実際の挙動を観測する目的で地震観測を実施した。特に地下タンクの円周方向における変形特性に注目して観測を行なった。その結果良好な観測記録が得られたので、本報では地震観測記録から見た地下タンクの応答について報告する。応答解析による検討内容については続報で取り上げることにした。

2. 地下タンクと観測内容

地震観測を実施している地下タンクは、神奈川県横浜市の臨海工業地域にあり、半地下式の石油タンクである。土留壁としての鉄筋コンクリート壁を観測の対象としている。本地下タンクは直径 68.6 m、深さ 21.1 m、壁厚 1.8 m の寸法をもち、大型で

地盤加速度	観測点	最大値(GAL)	発生時刻(SEC)
地中加速度	ACC-0X	16.19	2.38
	ACC-0Y	15.15	3.40
地表面加速度	ACC-1X	82.97	10.26
	ACC-1Y	97.68	3.32
	ACC-2X	48.07	3.78
	ACC-2Y	68.56	3.34
	ACC-3X	45.69	2.56
	ACC-3Y	92.89	3.06

表-1 最大地盤加速度

地盤ひずみ	記号	最大値	発生時刻
深さ方向せん断ひずみ	GSTN(1X-0X)/L01	132×10 ⁻⁶	4.51 ^{sec}
	GSTN(1Y-0Y)/L01	183	3.33
地表面水平方向直ひずみ	GSTN(1X-2X)/L12	15.2	3.76
	GSTN(1X-3X)/L13	23.4	4.56
	GSTN(2X-3X)/L23	19.8	6.24
地表面水平方向せん断ひずみ	GSTN(1Y-2Y)/L12	17.6	9.52
	GSTN(1Y-3Y)/L13	35.6	4.15
	GSTN(2Y-3Y)/L23	19.6	3.23

表-2 最大地盤ひずみ

方向成分のサーボ型加速度計を配置している。

地下タンクは稼動中であり、安全性の面からひずみ計、加速度計とも本質安全防爆構造の計器を用いている。マイコンを搭載した制御装置により、遅延、日付時刻、記録始動、AD変換など、図-4に示す観測システムが制御されている。

図-3に地盤構成を示す。深さ7m位までが埋立て層、9~12mが沖積層とともに砂質シルト層であり、その下は洪積細砂層が続き19mより土丹層となっている。地下タンクはこはこの上丹層に根入れする型で構築されている。図-6に常時微動の振動数成分を示すが、工場機械振動を除いて顕著な振動数卓越性は認められなかった。

3. 地震観測経過

1979年6月に監督官庁である横浜市消防局より誌可を得て地震観測が開始された。以来約2年の間に多くの微

壁体ひずみ	観測点	最大値(×10 ⁻⁶)	発生時刻(SEC)
円周方向の表面ひずみ	STH-01	2.75	2.10
	STH-02	2.24	2.08
	STH-03	4.35	2.80
	STH-04	3.13	3.26
	STH-05	4.32	3.28
	STH-06	5.63	2.82
	STH-07	4.19	2.84
	STH-08	5.34	3.28
	STH-09	3.63	3.02
	STH-10	5.54	4.50
深さ方向の表面ひずみ	SZA-11	1.28	4.54
	SZA-12	0.89	12.04

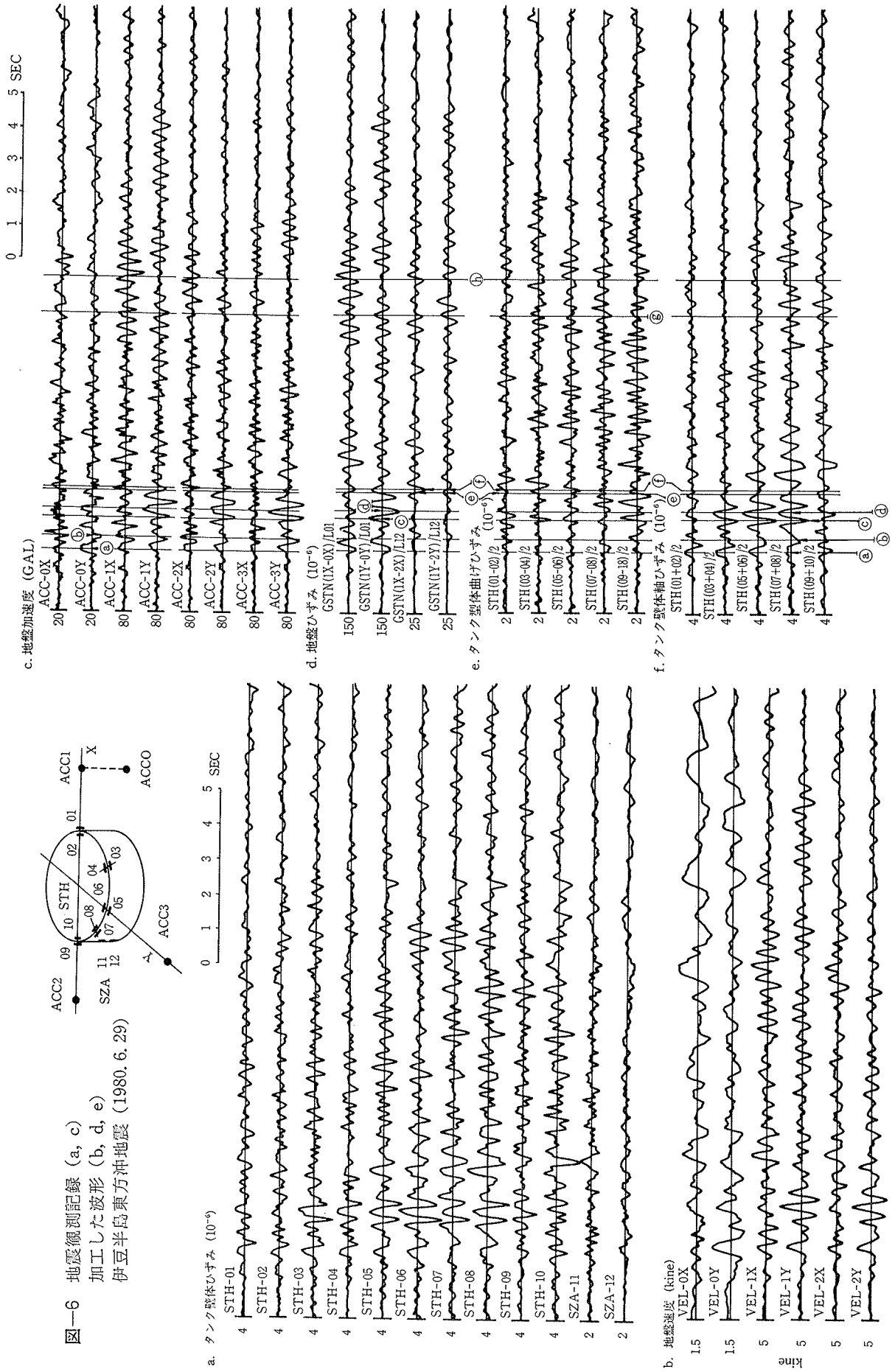
表-3 地下タンク壁体表面の最大ひずみ

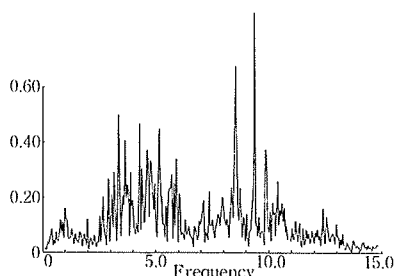
壁体ひずみ	記号	最大値(×10 ⁻⁶)	発生時刻(SEC)
曲げひずみ	STH(01-02)/2	1.38	7.13
	STH(03-04)/2	1.60	4.00
	STH(05-06)/2	1.64	5.69
	STH(07-08)/2	1.60	6.11
	STH(09-10)/2	2.34	4.50
	軸ひずみ	STH(01+02)/2	2.64
STH(03+04)/2		3.12	2.81
STH(05+06)/2		4.60	2.84
STH(07+08)/2		4.48	2.85
STH(09+10)/2		3.28	4.55

表-4 地下タンク壁体の最大曲げひずみ、最大軸ひずみ

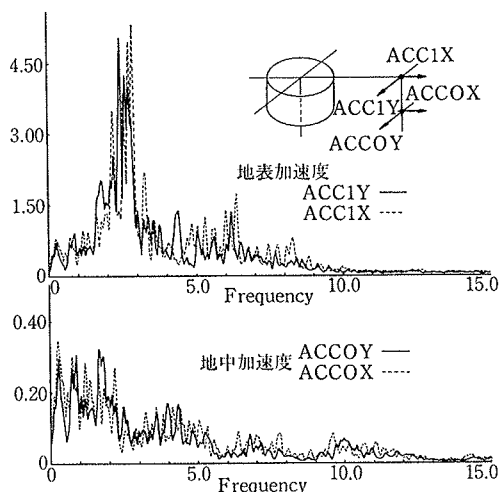
厚 1.8 m の寸法をもち、大型で曲げ剛性の小さい地中構造物であると考えられる。図-2にタンク形状と計器配置を示す。地下タンクの側壁に生ずる動的なひずみと地下タンク周辺地盤における加速度を地震観測の対象としている。タンク壁体のひずみはタンク上部の円周方向に45°の位置で5ヶ所(側壁の外側と内側に計10点)と、上下方向内側に2ヶ所で測定している。コンクリートの壁体に生ずる地震時ひずみが小さいことを考えて、0.01×10⁻⁶の分解能をもつ高感度のひずみ計を用いてい

図一6 地震観測記録 (a, c)
加工した波形 (b, d, e)
伊豆半島東方沖地震 (1980. 6. 29)

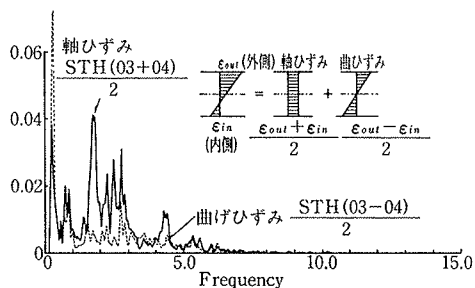




図—5 常時微動の速度フーリエスペクトル (ACC 1 付近)



図—7 地盤加速度のフーリエスペクトル



図—8 タンク壁体ひずみのフーリエスペクトル (0.12 Hz 以下カット)

少地震が観測されているが、横浜地方気象台による震度階がⅡ以上の地震が10ヶ観測された。この震央分布を図—1に示す。これの地震のうち最大なもの、1980年6月29日発生の伊豆半島東方沖地震であり、群発地震の本震である。マグニチュード6.7、震源深さ10 km、震央距離約75 kmである。本報では、この地震記録にもとづいて検討を進める。

4. 地震観測結果

4.1. タンク周辺地盤の応答

図—6cに地盤での加速度記録を示す。この地震は約10秒の間隔で2回の主要動が記録されているが、2回目の方が大きいので12秒以降のデータについて検討の対象とした。表—1に示されるとおり、地表最大加速度 97

gal、土丹層での地中加速度で16 galの最大加速度を記録した。図—6cの加速度波形から、2秒から6秒あたりの主要動でY方向の加速度が目立っている。図—1に震源方向を記入したが、Y方向に近いことが判る。

図—7に地中と地表の加速度記録のフーリエスペクトルを示す。地中記録のフーリエスペクトルは5 Hzまでの範囲で分散しているが、1.7 Hzをはじめ低い振動数領域に振動数の卓越性を見ることができる。一方地表記録によるスペクトルは、2.7 Hzが顕著で、表層地盤の増幅特性が表われたものであろうと考えられる。地中と地表の比をとると、加速度最大値で6倍、スペクトルピーク値で30倍程度と増幅を示している。従って地盤は大きく変形して深さ方向セン断ひずみが発生し、地下タンクに大きな地震荷重が作用したと推定される。

加速度記録を積分して変位を求め、地盤内に生ずるひずみ記録として図—6dに示す。この積分は振動数領域で行ない0.5 Hz以下の長周期成分を削除している。地盤ひずみの最大値を表—2に示す。地表面にそった圧縮引張変形による軸ひずみあるいはセン断変形によるセン断ひずみより、深さ方向のセン断ひずみの方が圧倒的に大きい。

4.2. 地下タンクの応答

地下タンクの壁体に生ずるひずみの地震記録を図—6aに、その最大値を表—3に示す。円周方向の壁体表面ひずみは深さ方向のひずみに比べて大きい値を示している。壁の外側と内側のひずみ記録から図—8の添図に従って曲げひずみと軸ひずみを求めた。図—6e, fにその合成波形が、表—4に最大値が、そして図—8にフーリエスペクトルが示されている。軸ひずみは引張りを正とし、曲げひずみはタンク円周の曲率半径が短くなるような外向に凸の曲げ変形に対し正として選んである。

曲げひずみと軸ひずみを対比すると、地震主要動部において軸ひずみの方が曲げひずみより大きな値を示していること、時間的にみて軸ひずみが先に大きな値を示し続いて曲げひずみが大きな値に成長することが特徴的に示されている。このひずみのフーリエスペクトル図—8によると個々のピークの振動数卓越性をみれば地表よりも地中の加速度記録に近いと考えられる。特に地表の記録にみられる2.7 Hzの卓越振動数成分の影響を、タンクのひずみは受けていない点が注目される。

タンク壁体のひずみは5 Hzを越える振動数成分がほとんど含まれていない。一方地盤加速度記録の中にはこの成分は多分に含まれている。これについては第1点として、入力損失的な効果を考えることができる。即ち地盤地震動が地下タンクに伝わる際に、タンクの壁体の地盤拘束効果によって高い振動数が伝わらない一種のフィ

ルター作用によるものであるとする考え方である。第2点として、地下タンクに生ずるひずみは地盤の加速度によるのではなく速度に関するのではないかとする考え方がある。地盤速度のスペクトルを示していないが、図-8の加速度フーリエスペクトルを円振動数で除すればよく、高い振動数領域の成分が相対的に小さくなることは明らかである。図-6 bに加速度波形を積分して得られた地盤速度波形を示す。地盤速度波形とタンク壁体表面のひずみ波形図-6 aの比較においてその類似性の評価は困難である。円周方向ひずみ STH03~STH09は

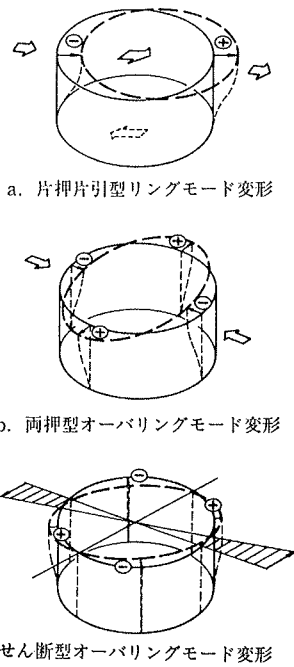


図-9 地下タンクの変形パターン

地盤速度 VELYと波形の形が主要動においてよく一致している。しかしそれは時間的に短い期間であって、地盤速度波形と地下タンクの壁体表面のひずみ波形は、よく類似した傾向を持つ期間と似ていない期間が交互に現われるようである。両者の間には何らかの関係が推定されるが、はっきりとした判断を得るには

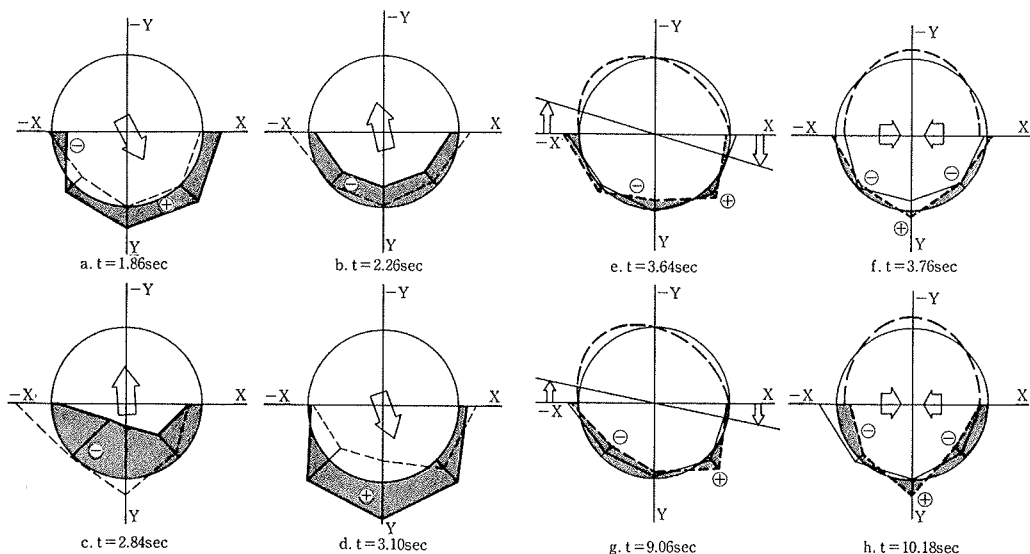
至らなかった。

4.3. 地下タンクの変形パターン

地下タンクが地震時にどのような変形を示すかを検討する。地盤の地震時土圧が作用して円筒型地下タンクに生ずる変形の様子を図-9に模式的に示す。円形を保って移動するリングモード変形図-9, aと卵型につぶれるオーバーリングモード変形図-9 b, cの2種が考えられる。荷重状態に関して、aのリングモード変形では片押し片引きの地震力が作用していると考えられる。タンク周辺地盤に一律な慣性力が作用した場合に相当するであろう。オーバーリングモード変形では両押し型bとセン断型cが存在する。両押し型は地盤の圧縮変形によるか Rayleigh 波の伝搬に伴う地盤の変形によると考えられ、セン断型は地盤のセン断変形によるか Love 波の伝搬に伴う地盤の変形によると考えられる。従って、リングモード変形は深さ方向に関する地盤の変形すなわちひずみの状況に関係し、オーバーリングモード変形では地表面に沿った地盤のひずみ状況に深く関係していると考えられる。

4.4. 地震時における地下タンクの変形

以上の変形パターンをふまえて、地下タンクの地震時における変形状態を検討する。タンク壁体円周方向について軸ひずみと曲げひずみは図-6 e, fに求められているので、これを用いて任意の時刻における地下タンクの変形の様子をみる事ができる。これを図-10に示した。図-10で選んだaからhまでの時刻tは、図-6に記入してある。図-10と図-6とをあわせながめることによって、地盤加速度と地盤ひずみとが地下タンクの変形にどのような影響を持っているかを知ることができる。



a, b, c, d タンク周辺地盤の慣性力によるリングモード変形

タンク周辺地盤の変形によるオーバーリングモード変形
e, g, セン断型, f, h 両押し型

—— 軸ひずみ - - - - 曲げひずみ

図-10 地震時における地下タンクの変形

図一10においてaからdまでは軸ひずみの大きいことが特徴で、地下タンクはリングモードの変形パターンを示していると推定される。aとbはタンク支持基盤の土丹層における地中加速度が地震主要動の第1波ピークを示す時刻に対応して描いたものである。基盤加速度と逆向きの地震荷重を地下タンクは受けるが、この地盤の慣性力の方向を矢印で図中に示した。観測対象の地下タンク側面において、aでは地盤がダンプを引きタンク壁円周方向には引張り軸ひずみが作用している。逆にbでは地盤がタンクを押すことにより圧縮軸ひずみが生じている。cとdはタンク壁体の軸ひずみが最大を示す時刻について描いたもので、このとき深さ方向の地盤ひずみも最大値に近い値を示している。この場合もaおよびbと同様に、矢印の示す地盤地震力に応じてタンク壁円周方向に圧縮引張張の軸ひずみが生じている。

一方、単一10 e～hは円周方向曲げひずみの分布を対象として整理したもので、オーバーリングモードの変形パターンを示すものである。上半に被線によって推定されるオーバーリングモード変形に記入した。eとgとはセン断型のオーバーリングモード変形を示している。この時地盤は地表面にそって図中に示すセン断変形を示した。fとgは圧縮型の変形で、地盤ひずみから求めた地盤の圧縮変形状態が矢印で示されており、タンクの変形とよく対応していることが分かる。

しかしながら、タンク壁体の円周方向曲げひずみ分布によってタンク変形パターンを推定することは難かしい作業である。この理由は、地震時における実際の挙動が図一9に示される様な単純なものではないことによると考えられる。特にオーバーリングモード変形と対応すべき地盤変形の平面的分布は、地盤構成の変化や構造物の影響を受けて極めて複雑であろうと考えられる。

4.5. 地下タンクの耐震性

地震観測を実施している地下タンクは偏土圧法による耐震設計が行なわれている。これは地震時土圧を図一9bのように作用させるものである。地下タンク壁体表面の円周方向ひずみまたは応力について、耐震設計で考慮した値と表一2の最大値を比較してみると、地震観測で測定された値の方が小さいことが判った。地表面加速度を300 galに拡大した場合で21%、基盤加速度を150 galに拡大した場合で52%の測定値と設計値の比率を示した。地震観測結果を拡大するような外挿方法が許されるとすれば、地下タンクの耐震性における余裕耐力が期待できるものと考えられるであろう。

応答変位法による耐震設計手法は、図一9a、bの載荷方法によるものであるが、バネを介して強制変位によって載荷するところに特徴がある。深さ方向地盤セン断ひ

ずみ 183×10^{-6} を表一2より、壁体円周方向の軸ひずみ 4.6×10^{-6} を表一4より求めて、応答変位法⁴⁾における地盤反力係数すなわち逆算K値を算出したところ $0.2 \sim 0.6 \text{ kg/cm}^3$ の値を示した。タンク壁体下端の拘束条件によりK値に差が生ずる。強制変位量が一定であれば地下タンクに作用する力はK値に比例する。今逆算したK値は通常用いられている 1.0 kg/cm^3 の値に比べて小さく、設計時に考慮するよりも小さな作用荷重が観測されていることを示している。

5. まとめ

地下タンクの地震観測結果を検討して来た。その結果地下タンクの地震時挙動について多く理解することができ、かつ地下タンクの耐震性に関する資料を得ることができた。

要点としては、(1) 地盤ひずみは深さ方向セン断ひずみが大きい。(2) タンク壁体ひずみと地盤内地震記録との相関性について今回は明瞭な関係を見い出せなかった。(3) タンク円周方向ひずみは軸ひずみが曲げひずみよりも大きい。又最大を示す時刻に差がある。(4) 地震時のタンクの変形にはリングモード変形とオーバーリング変形がある。リングモード変形は理解しやすいが、オーバーリング変形は複雑な現象が混在して観測されるようである。(5) タンクの耐震性を地震観測結果から推定すると、設計値に対してまだ余力を有していると考えられる、などが上げられる。

地下タンクの応答特性は周辺地盤の挙動によって強く支配されるであろうから、地盤応答をよりの確に把握することが大切である。この観点に立ち、地震観測によるデータの蓄積をはかって、地下タンクの合理的な耐震設計に反映させていきたい。

この地震観測は、技術管理部山岡亮介課長、技術研究所中川恭次所長、木村薫主任研究員をはじめとして多くの人の理解と協力のもとに実現したものである。末尾ながら深い謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 後藤、白砂：回転体有限要素法による地下タンクの地震応答解析，大林組技術研究所報，No. 19，(1979)，pp. 24～28
- 2) 後藤、白砂：群地下タンクの地震応答特性について，大林組技術研究所報，No. 23，(1981)，pp. 37～42
- 3) 白砂、後藤：岩盤内に構築された堅穴式石油タンク模型振動実験，第6回土木学会関東支部講集，(1978)
- 4) 浜田政則：大型地下タンクの地震時挙動に関する基礎研究，東京大学提出博士論文，(1980)