

地震観測記録に基づく地下式円筒貯槽のひずみ応答特性

RESPONSE CHARACTERISTICS OF STRAIN OF IN-GROUND CYLINDRICAL TANK
OBSERVED DURING EARTHQUAKES

榑 信昭*・鈴木 操**・長岡弘明***・小山和夫****

By Nobuaki SAKAKI, Misao SUZUKI, Hiroaki NAGAOKA and Kazuo KOYAMA

The earthquake observation has been carried out on the large-scale in-ground LNG storage tank made of reinforced concrete. The strains of the side wall and the accelerations were recorded. The strain response characteristics investigated by the records and FEM analyses are as follows: (1) The circumferential component strain caused by the axial force is predominant in all earthquakes. (2) The circumferential distribution modes of the circumferential component strains are predominant in the following two modes, i. e., the axisymmetric mode or the sine mode which is caused by the ring deformation mode. (3) The SH body wave causes the sine mode. One of the earthquake ground motion components which causes the axisymmetric mode is the Rayleigh wave.

Keywords: cylindrical in-ground tank, earthquake observation, characteristics of strain, FEM analyses, SH wave, Rayleigh wave

1. ま え が き

現在、日本国内で LNG (液化天然ガス)・LPG (液化石油ガス)・石油貯蔵用の大型地下式円筒貯槽が、多数建設され稼働している。その耐震設計法には、震度法、修正震度法、応答変位法と動的解析法がある。耐震設計法の妥当性を裏付けるために、かなりの数の実機の地震観測が行われているが、貯槽躯体の変形に着目したひずみの地震観測例は少なく、文献1)と2)が挙げられる。文献1)では軟弱地盤中の貯槽を対象とし、地震観測結果から次の結論を得ている。すなわち、地下貯槽の地震時変形は周辺地盤の変形に支配され、円形断面が楕円形となる曲げ変形が卓越する。文献2)では、上半分が軟弱地盤に、下半分が比較的硬い地盤に埋め込まれた貯槽を対象としており、文献1)で述べられている楕円変形のほか、円形断面の半周で円周方向軸力が圧縮、残りの半周で引張りとなる変形モードも存在することを示して

いる。しかし、両文献ともに、ひずみ計を円筒貯槽の半周にしか設置しておらず、貯槽全周についての変形を議論するためには十分な観測ではない。

本論文では次のことを内容としている。比較的硬い地盤中に建設された地下式円筒貯槽の全周に、ひずみ計を設置して地震観測を行った。最初に観測結果よりひずみ特性の検討を行う。検討結果として、ひずみ成分のうち、円周方向の軸ひずみが卓越することを示す。また、円周方向のひずみでは、円周方向に一樣となるフーリエ級数の0次分布または円周方向に正弦型の分布をする1次分布が卓越しており、いずれが卓越するかは地震波の特性によることを示す。次いで、地盤と貯槽を連成させた有限要素モデルを用い、ひずみ特性の一部は鉛直下方から伝播するSH波により生じ、また他の一部はレーリー波により生じるものとして解析的に評価できることを示す。

2. LNG 地下式貯槽の地震観測

(1) 地下式貯槽と地盤

地震観測を行った LNG 地下式貯槽の概要を Fig. 1 に示す。貯槽は外径が 68.82 m、躯体の高さは 35.5 m、側壁厚 2.2 m の鉄筋コンクリート製である。貯槽の設置地盤は、上から盛土層、軟弱なシルト層、堅固な土丹

* 正会員 工修 日本鋼管(株)鉄鋼研究所主任部員
(〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

** 正会員 工修 日本鋼管(株)鉄鋼研究所(同上)

*** 正会員 工博 日本鋼管(株)鉄鋼研究所構造システム
チーム主査(同上)

**** 正会員 東京ガス(株)工務技術センター課長格
(〒105 港区海岸1-5-20)

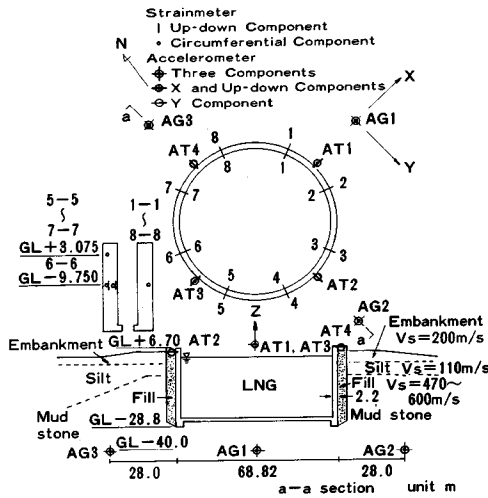


Fig. 1 Schematic view of in-ground tank and arrangements of pickups for earthquake observation.

層から成る。盛土の N 値は 10 で、換算せん断波速度 V_s は約 200 m/s である。PS 検層により測定されたシルト層、土丹層のせん断波速度 V_s は、おのおの 110 m/s, 470~660 m/s である。

(2) 観測計器

地震観測では、Fig. 1 に示される地盤と貯槽の加速度と貯槽鉄筋のひずみを測定した。加速度計は地盤には地表面から 40 m の基盤層に 3 成分測定用のものを 3 台 (AG 1~AG 3) 設置した。貯槽にはその天端に 1~3 成分測定用のものを 4 台 (AT 1~AT 4) 設置した。鉄筋計は貯槽天端より 3.625 m の高さで貯槽外壁面から 25 cm 内部の位置に、円周方向に向かって中心角 45 度間隔で 3 台 (5-5~7-7 の位置) 設置した。また、貯槽天端より 14.65 m の高さで貯槽外壁面から 17 cm 内部の位置に、円周方向に向かって中心角 45 度間隔で 8 台 (1-1~8-8 の位置) 設置した。測定成分は円周方向成分である。その他に、貯槽天端より 14.65 m の高さの 6-6 位置では、外壁面から 20 cm 内部の位置に鉛直成分、

内壁面から 24 cm 内部の位置に円周方向成分、20 cm 内部の位置に鉛直成分測定用のものを設置した。

(3) 観測地震

地震観測が開始された昭和 56 年 10 月から同 59 年 10 月までに観測された地震のうち、ここでは、震源位置、マグニチュード、記録加速度の最大値、周波数特性等を考慮して Table 1 に示す代表的な 6 地震を検討対象とした。そのうち、特に伊豆大島近海沖地震、神奈川県西部地震、長野県西部地震について、詳細に検討を加える。

3. 地震動

(1) 加速度波形とパワースペクトル

伊豆大島近海沖地震、神奈川県西部地震、長野県西部地震の基盤層 (AG 1) の記録加速度波形を Fig. 2 に示す。それらのパワースペクトル比を Fig. 3 に示す。

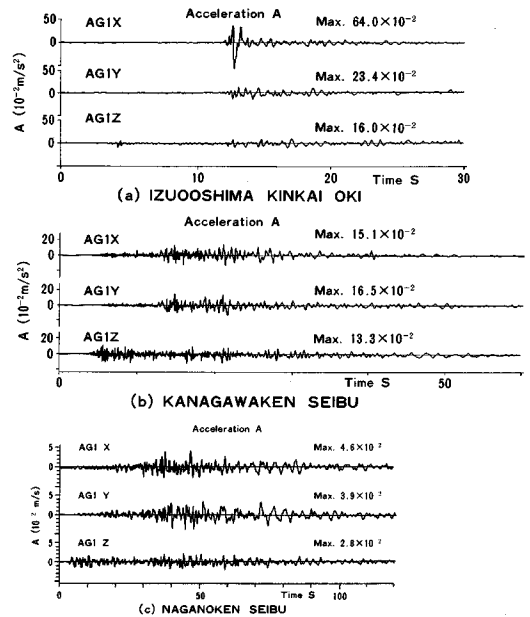


Fig. 2 Observed ground accelerations.

Table 1 Observed earthquakes.

No.	Earthquake	Date	Magnitude	Intensity	Max. Value			
					Acceleration gal		Velocity kine	
A	IBARAKIKEN OKI	57.7.23	7.0	3	6.2	4.0	2.2	1.1
B	IZUOOSHIMA KINKAI OKI	57.8.12	5.7	3	64.0	18.0	6.3	1.5
C	NIHONKAI CHUBU	58.5.26	7.7	1	2.9	0.7	1.4	0.4
D	KANAGAWAKEN SEIBU	58.8.8	6.0	4	16.5	14.5	2.1	1.1
E	TORISHIMA KINKAI	59.3.6	7.9	3	7.8	4.8	2.0	0.9
F	NAGANOKEN SEIBU	59.9.14	6.9	3	4.6	2.8	1.7	0.6

*in Japanese Scale in YOKOHAMA city

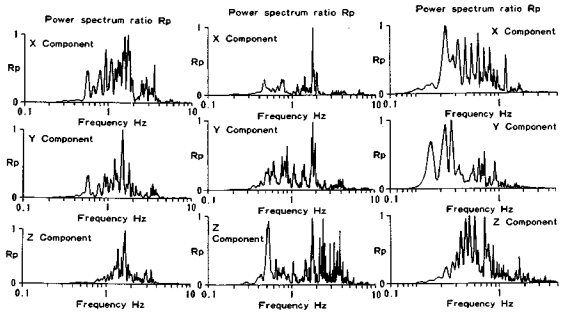


Fig. 3 Power spectrum ratios of ground accelerations shown in Fig. 2.

5., 6. で述べる貯槽躯体ひずみ解析で、伊豆大島近海沖地震の実体波、神奈川県西部地震、長野県西部地震のレーリー波を用いるため、以下これらを検討する。

(2) 伊豆大島近海沖地震

地震動の表面波成分を検討するため、加速度の非定常パワースペクトル³⁾を求める。Fig. 2 (a) に示されるように、伊豆大島近海沖地震では X 成分の 13 秒前後で大きな加速度が生じている。Fig. 4 (a) はこの加速度成分の非定常パワースペクトルであるが、0.3~5 Hz の範囲の加速度成分のピークは時間約 13 秒にほぼ集中し、表面波の分散性⁴⁾は認められない。すなわち、加速度値の大きい 13 秒前後の地震動は実体波と考えられる。図示されていないが同地震の Y 成分と鉛直成分では、13 秒前後で顕著な分散性はみられていない。一方、Fig. 1 の AG 1~3 の 3 点の水平 X 成分の加速度波形のピークの到達する時間の差から求めた地震波の伝播速度は 8.8 km/s 以上である。

以上の分散性と位相速度の考察により、地震動の卓越する 13 秒前後の X 成分は、ほぼ鉛直下方から伝播してきた SH 波と推定される。

(3) 神奈川県西部地震、長野県西部地震

a) 非定常パワースペクトルにおける分散性

神奈川県西部地震の鉛直成分加速度の非定常パワースペクトルを Fig. 4 (b) に示す。時間 40~50 秒、周波数 0.3~0.7 Hz の領域で表面波と推測される分散性が認められる。図示されていないが震央方向成分にも同じ領域に分散性が認められている。また、比較的パワーが小さいため、同図のスケールでは現れないが、同成分の時間 25~45 秒、周波数 0.1~0.3 Hz の領域で分散性が認められる。長野県西部地震の震央方向成分の加速度の非定常パワースペクトルを Fig. 4 (c) に示す。同図から時間 45~60 秒、周波数 0.4~0.6 Hz と時間 70~90 秒、周波数 0.15~0.25 Hz の領域で表面波と推測される分散性が認められる。一方、上で述べた、時間および周波数領域での震央方向を含む鉛直面内の変位軌跡は楕円軌道を示している。以上で推測された地震波が、レーリー波であることを推定するため、次の考察を行う。

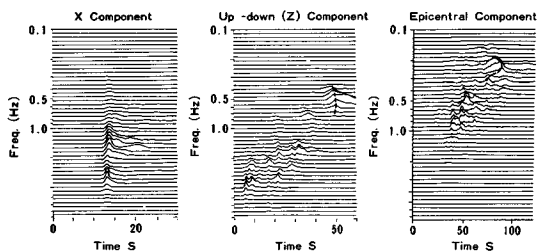


Fig. 4 Evolutionary power spectra of acceleration.

b) レーリー波の有限要素解析

水平な層状地盤のレーリー波の理論分散曲線を有限要素解析⁵⁾で求めた。解析での変位モードを十分な精度で表わせる地盤深さとして、10~400 km をとった。解析に用いた地盤定数は 2. で述べたもののほか、文献 6), 7) で示されたものを用いた。Fig. 5 に 1~3 次モードの位相速度 (理論位相速度と称する) および群速度を示す。さらに、Fig. 1 の AG 1~3 の 3 点の観測加速度の非定常パワースペクトルから、表面波の卓越した振動数についてその位相速度を求め⁶⁾ (観測位相速度と称する)、同図に示した。

神奈川県西部地震での観測位相速度は、0.19 Hz で 1460 m/s, 0.4 Hz で 770 m/s である。振動数 0.19 Hz は 1 次の群速度の極値を示す振動数に近く、かつ観測位相速度は 1 次の理論位相速度とほぼ一致しており、この振動数と観測位相速度は 1 次に対応していると考えられる。0.47 Hz での観測位相速度の値は 1 次と 2 次の理論位相速度の間にあるが、0.47 Hz は 2 次の群速度の極値を示す振動数の近くにあることから、2 次に対応するものと考えられる。

長野県西部地震では 0.17, 0.23, 0.53 Hz で観測位相速度は 1470, 740, 1220 m/s である。0.17, 0.23 Hz に対する観測位相速度は 1 次モードの理論位相速度とほぼ一致していること、両振動数とも 1 次の群速度の極値を示す振動数に近いことから、1 次に対応していると考えられる。また、0.52 Hz での観測位相速度は、2 次と 3 次の理論位相速度の間にあるが、2 次の群速度の極値を示す振動数の近くにあり、2 次に対応すると推定される。

c) レーリー波成分

b) で述べた神奈川県西部地震での 0.19, 0.47 Hz, 長野県西部地震での 0.17, 0.23, 0.53 Hz は、a) で述べた分散性のみられる振動数範囲の中心振動数とほぼ一致し、その発生時間もほぼ一致している。したがって、

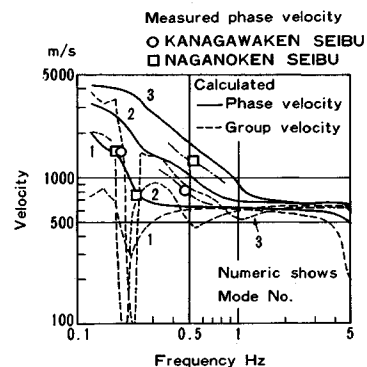


Fig. 5 Phase and group velocities of Rayleigh wave.

神奈川県西部地震の25~45秒、0.1~0.3 Hzの領域の地震波は1次に、40~50秒、0.3~0.7 Hzの領域の地震波は2次のレーリー波に対応すると推定される。長野県西部地震の70~90秒、0.15~0.25 Hzの領域のそれは1次に、45~60秒、0.4~0.6 Hzの領域の地震波は2次のレーリー波に対応すると推定される。

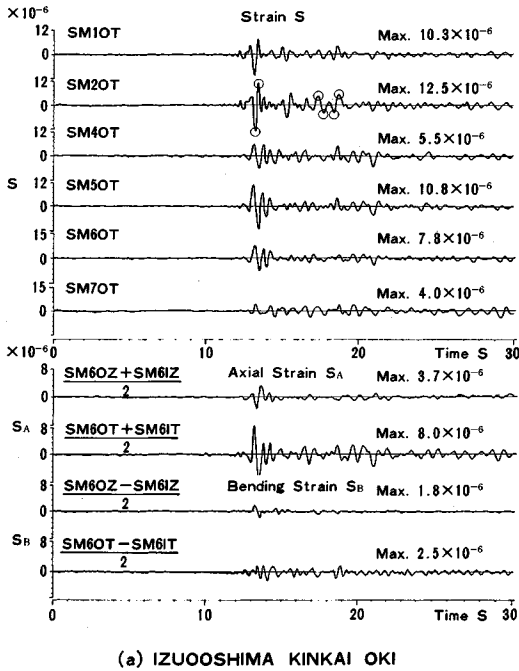
4. 貯槽軀体の観測ひずみ

(1) ひずみ波形

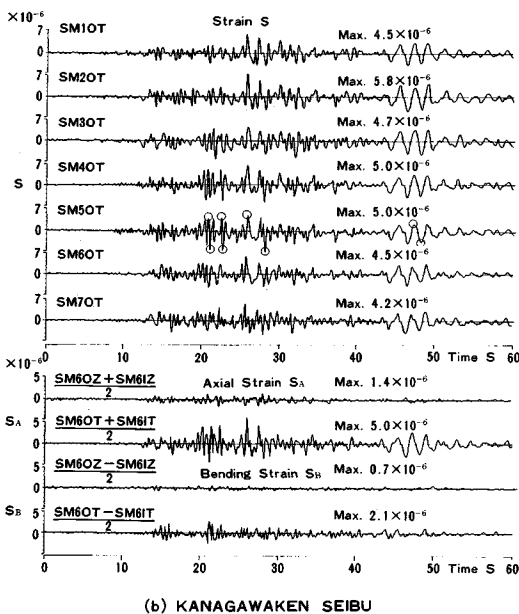
貯槽の観測ひずみ波形を Fig. 6 に示す。同図のひずみ記号のうち、SM は貯槽天端から 14.65 m の位置を、数字は Fig. 1 の円周方向位置を、O は貯槽外側を、I は内側を、Z は鉛直成分を、T は円周方向成分を表わす。計器不良のため、SM 8 OT は全地震で、SM 3 OT は茨城県沖地震と伊豆大島近海沖地震でひずみ測定ができなかった。Fig. 1 の 6-6 位置での、壁体の内外面の、円周方向と鉛直方向のひずみによる壁体中央位置でのひずみ（軸ひずみと称する）と曲げひずみを同図にあわせて示す。Fig. 6 のひずみ波形のうち、代表例のパワースペクトル比を Fig. 7 に示す。

(2) 卓越ひずみ成分

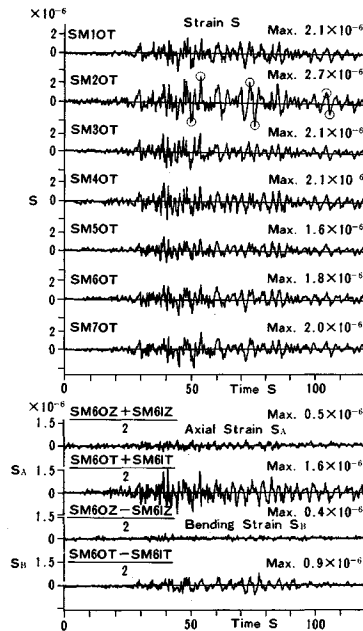
Fig. 6 の円周方向と鉛直方向の軸ひずみおよびこれに対応する曲げひずみ波形より、鉛直下方から伝播する SH 波が主要な成分と考えられる伊豆大島近海沖地震、表面波成分も比較的多く含むと考えられる神奈川県西部地震、長野県西部地震のいずれでも共通して、次の特徴が指摘できる。ひずみ成分のうち、円周方向の軸ひずみ $\{(SM 6 OT + SM 6 IT)/2\}$ が最も卓越している。次いで曲げひずみ $\{(SM 6 OT - SM 6 IT)/2\}$ または鉛直方向の軸ひずみ $\{(SM 6 OZ + SM 6 IZ)/2\}$ が卓越している。曲げひずみ $\{(SM 6 OZ - SM 6 IZ)/2\}$ の値は



(a) IZUOOSHIMA KINKAI OKI



(b) KANAGAWAKEN SEIBU



(c) NAGANOKEN SEIBU

Fig. 6 (1) Observed strains of the tank.

Fig. 6 Continued from left.

最も小さい。Table 1 の他の地震でも同様な結果が得られている。

(3) 円周方向ひずみの円周方向分布

円周方向ひずみが卓越することを前節で示したが、円周方向の分布形を次に検討する。なお、ここでの円周方向ひずみは軸ひずみではなく、壁体外面位置近くでのひずみである。各位置の円周方向ひずみ $\epsilon_m (m=1\sim 8)$ を有限フーリエ級数に展開し、各次数のフーリエ係数の絶対値を求めた。このとき、Fig. 1 の 3-3 または 8-8 位置の測定されていないひずみは、他の位置の観測ひずみから、ラグランジェの補間公式⁹⁾により、近似的に求めたものを用いた。フーリエ係数の絶対値を Fig. 8 に示す。同図では、ひずみ値の小さい初期の時間帯は省略している。各次数のひずみの分布モード（フーリエモードと称

する)を Fig. 9 に示す。0 次は軸対称モードを示す。1 次は円形断面の半周で圧縮、他の半周で引張りとなる逆対称モードを表わし、文献 2) で示されるモードに対応すると考えられる。2 次は文献 1) で示される円形断面が楕円形に変形するモードに対応すると推測される。

伊豆大島近海沖地震の場合、Fig. 8 (a) に示すように、13 秒前後で 1 次モードが卓越している。約 15 秒以降では、ひずみ値はやや小さいが、0 次モードが卓越している。2 次、3 次モードのひずみの値は、全時間帯を通じて 0 次、1 次のモードと比較して小さい。Fig. 6 (a) に記号○で示す代表的な時刻での円周方向分布を Fig. 10 (a) に示す。円より外側は引張りひずみを、内側は圧

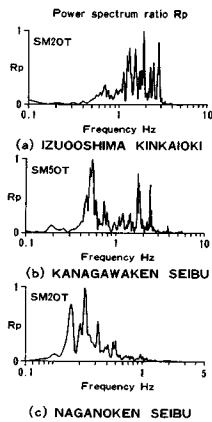


Fig. 7 Examples of power spectrum ratio of strain shown in Fig. 6.

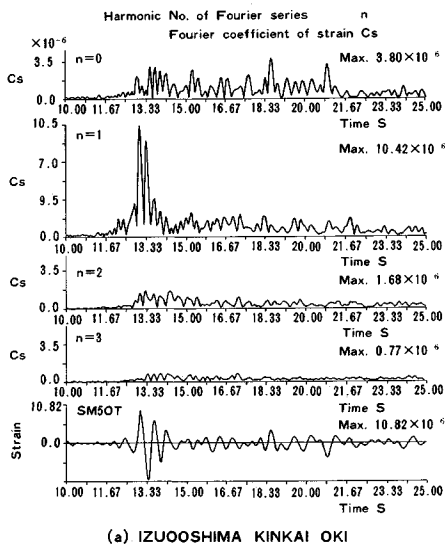
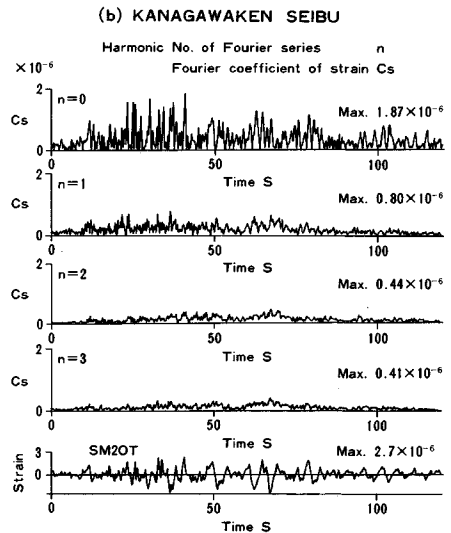
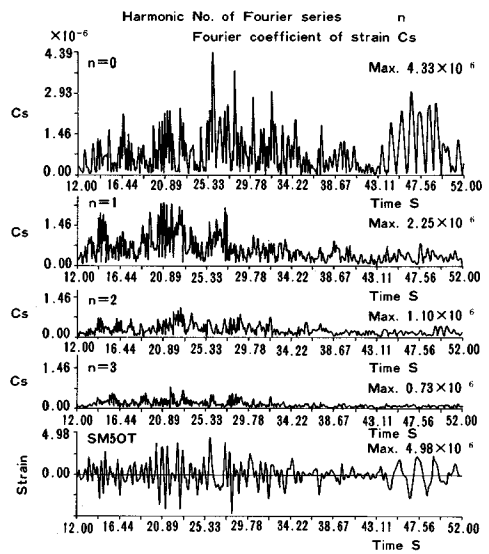


Fig. 8 Time histories of Fourier coefficient of observed strains of the tank.



(c) NAGANOKEN SEIBU
Fig. 8 Continued from left.

縮ひずみを表わす。また、点線は貯槽天端より 3.625 m でのひずみである。ひずみ値の大きい時間 13 秒前後では、半周が引張り状態、他の半周が圧縮状態のひずみ分布を示し、地震後半では軸対称性の強いひずみ分布を示し、上述の 1 次モード、0 次モードの卓越時間帯と対応している。

Fig. 8 (b) に示す神奈川県西部地震では、約 25 秒までは 0 次と 1 次モードが卓越し、それ以降では、0 次モードが卓越している。2 次、3 次モードのひずみの値が小さいことは伊豆大島近海沖地震の場合と同様である。代表的な時刻での円周方向分布を Fig. 10 (b) に示す。ひずみの観測位置と時刻の意味は、伊豆大島近海沖地震の場合と同様である。約 25 秒以前では 0 次と 1 次モードの混在した分布がみられるが、それ以降では軸対称の 0 次モードが卓越している。長野県西部地震の場合を Fig. 8 (c) と Fig. 10 (c) に示す。ほとんどの時間帯で 0 次モード、すなわち全周圧縮または全周引張り状態が卓越していることを示している。

一方、Fig. 10 の点線で示される貯槽天端より 3.625 m でのひずみの円周方向の分布形は、実線で示される貯槽天端から 14.65 m でのひずみの分布形と、ひずみ値に差は認められるもののおおむね一致する。

時間とともに変化する 1 次モードのフーリエ係数の最大値を 1 としたときの他のモードの値を Table 2 に示す。同表には、これまで検討した 3 地震と Table 1 の他の 3 地震の値も示している。同表より 0 次モード、1 次モードの卓越性について、次のように述べるができる。伊豆大島近海沖地震では 1 次モードのひずみが卓越し、0 次モードの値は 1 次モードの 0.36 倍であるが、他の 5 地震では、いずれも 0 次モードのひずみが卓越し、1 次モードの値の 1.32~3.77 倍である。また、2 次と 3

次モードの係数は卓越する 0 次または 1 次モードのひずみに比べて小さく、0 次または 1 次モードの係数のうち、大きいものに対する 2 次モードの係数の比は 0.17~0.27, 3 次モードでは、0.09~0.22 である。2 次モードの係数の小さいことは、文献 1) で示される楕円形の変

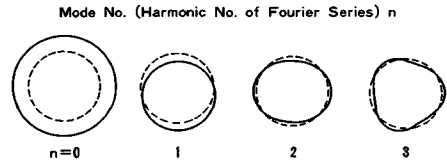
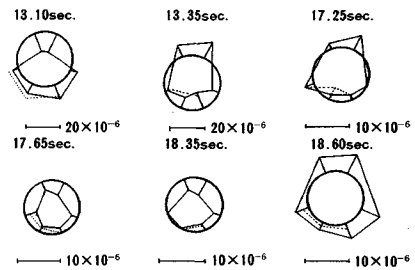
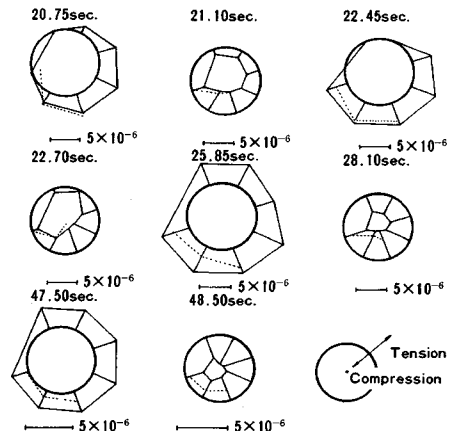


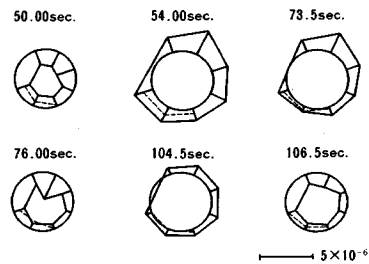
Fig. 9 Strain distribution modes.



(a) IZUOSHIMA KINKAI OKI



(b) KANAGAWAKEN SEIBU



(c) NAGANOKEN SEIBU

Table 2 Observed maximum strains.

Smax : max. strain, Rs : the ratio of strain of each harmonic No. n to n=1

unit $\mu (10^{-6})$

Earthquake	original strain	harmonic No. n				
		n=0	n=1	n=2	n=3	
A IBARAKIKENOKI (57.7.23)	Smax	3.30	2.57	1.21	0.82	0.29
	Rs		2.12	1.09	0.51	0.24
B IZUOSHIMA KINKAIOKI (57.8.12)	Smax	10.80	3.83	10.73	1.80	0.92
	Rs		0.36	1.00	0.17	0.09
C NIHONKAICHUBU (58.5.26)	Smax	1.88	1.92	0.43	0.44	0.32
	Rs		3.77	1.00	1.02	0.74
D KANAGAWAKEN SEIBU (58.8.8)	Smax	5.80	4.31	2.38	1.13	0.70
	Rs		1.81	1.00	0.47	0.28
E TORISHIMAKINKAI (59.3.6)	Smax	3.42	2.39	1.81	0.53	0.36
	Rs		1.32	1.00	0.29	0.20
F NAGANOKENSEIBU (59.9.14)	Smax	2.70	1.87	0.80	0.44	0.41
	Rs		2.34	1.00	0.55	0.51

Fig. 10 Circumferential distribution of observed circumferential component strains of tank.

形が顕著には生じていないことを示している。この理由は今後の検討が必要であるが、その1つとして、文献1)での地盤は軟弱であり、地盤の相違が考えられる。

5. 有限要素モデル

前章では、地震観測結果より貯槽のひずみ特性の検討を行った。6., 7. では、地盤と貯槽を連成させた有限要素モデルを用い、ひずみ特性の一部は鉛直下方から伝播するSH波により生じ、他の一部はレーリー波により生じるものとして解析的に評価できることを示す。

地盤と貯槽を連成させた有限要素モデルの詳細は、類似の地下式円筒貯槽を、有限要素法で地震応答解析を行った文献10)に説明されている。軸対称モデルの軸対象または非軸対称振動を扱い、貯槽と地盤の有限要素分割図を Fig. 11 に示す。解析モデルの側方と下方境界には半無限地盤を表わす粘性境界を用いている。同図には、地盤の弾性せん断係数、ポアソン比と単位体積重量を併せて示す。貯槽躯体と底版の鉄筋コンクリートは、ヤング係数 $E=2.7 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=1/6$ 、単位体積重量 $\gamma=2.4 \text{tf/m}^3$ の材料とした。なお、地盤のせん断係数はせん断ひずみに依存して変化するが、ここで対象とした地震では発生するひずみの値が比較的小さいと推定され、PS 検層の値をそのまま用いた。

6. 実体波入力による地震応答解析

(1) 伊豆大島近海沖地震に対する応答解析

3., 4. で、地震観測結果より伊豆大島近海沖地震では、13秒前後の加速度のX成分が大きな値を示し、この加速度は主として鉛直下方から伝播するSH実体波と推定されること、またこの時刻での外壁面近くでの円周方向ひずみは、フーリエモードの1次の係数が卓越することを示した。本章では、前章で示した地盤と貯槽連成系の有限要素モデルを用い、SH実体波により生じる円周方向ひずみの解析を行い、観測値との対応関係を調べる。

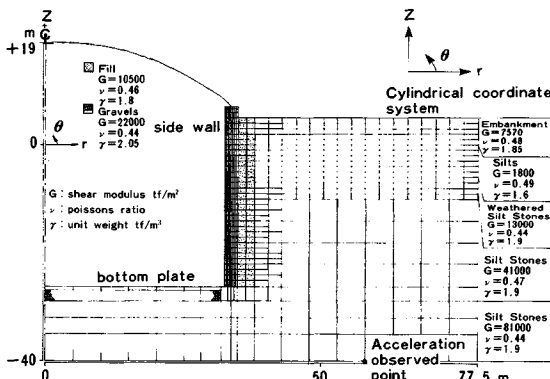


Fig. 11 Finite element model of in-ground tank.

Fig. 1 の AG 1 で測定された時間 13 秒前後の加速度の X 成分は鉛直下方から伝播する、すなわち平面位相差のない SH 波とし、これを入力地震動とする。このとき、地盤と貯槽は逆対称振動し、半径 r と鉛直 z 方向変位は $\cos \theta$ で、円周 θ 方向変位は $\sin \theta$ で円周方向に展開することができる。Y 成分と Z 成分の加速度は時間 13 秒前後では X 成分に比べて小さな値であること、ひずみの観測値との比較をこれらの成分の影響の小さい Fig. 1 の 1-1, 2-2, 5-5, 6-6 での円周方向ひずみで行うことから、応答解析には取り入れていない。応答解析は 0 秒での状態を初期値として行う。

Fig. 1 の貯槽天端の AT 1 での加速度の X 成分の観測値と解析値を比較して 13 秒前後の値を Fig. 12 に示す。同図より両者はよく一致していることが認められる。Fig. 13 に貯槽外壁面の円周方向ひずみの観測値と解析値を示す。観測値と解析値はよく一致している様子を見ることができる。このことより、伊豆大島近海沖地震で卓越する円周方向ひずみのフーリエ 1 次モード成分は、鉛直下方から伝播する SH 波により生じたものと推定される。また、この SH 波により生じる円周方向ひずみは、ここで用いた有限要素モデルにより、良好な精度で評価できる。

(2) 神奈川県西部地震に対する応答解析

検討対象地震のうち、伊豆大島近海沖地震以外では、外壁面近くでの円周方向ひずみはその円周方向分布が軸対称になる 0 次モードが卓越することが観測結果で示さ

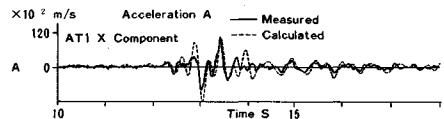


Fig. 12 Tank accelerations cause by SH wave.

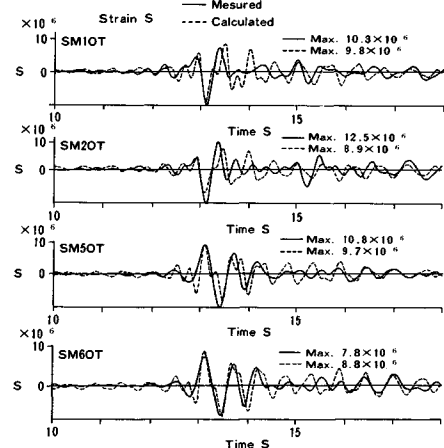


Fig. 13 Circumferential component strains of tank caused by SH wave.

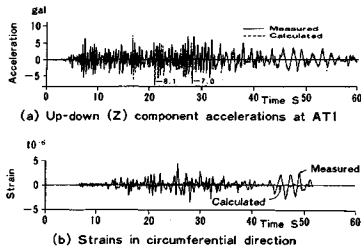


Fig. 14 Acceleration and strain of tank caused by up-down ground motion.

れている。AG 1 の観測鉛直地震動を鉛直下方から伝播する P 波とみなした場合、この地震動により観測された 0 次モードひずみ成分が生じる可能性を以下で検討する。

神奈川県西部地震を例にとり、AG 1 での観測鉛直加速度を入力地震動とする。貯槽天端 AT 1 の鉛直加速度と貯槽天端より 14.65 m 下での円周方向ひずみを観測値と比較して Fig. 14 に示す。観測ひずみは軸対称な 0 次のフーリエモード成分である。貯槽の鉛直加速度は観測値とよく一致するが、ひずみは観測値に比べてきわめて小さい。

Fig. 11 の解析モデルで、軸対称変形に対する固有周波数は 1.1 Hz 以上である。一方、Fig. 7 の円周方向ひずみのパワースペクトル比では、神奈川県西部地震で、1 Hz 以上の振動数でやや大きなひずみ成分をもっているが、長野県西部地震のほか、茨城県沖地震、日本海中部地震、鳥島近海地震では、1.0 Hz 以上のひずみ成分は小さい。すなわち、円周方向ひずみに軸対称な 0 次モード成分が、貯槽と地震動との共振で生じた可能性はないと考えられる。

鉛直地震動を鉛直下方から伝播する P 波とみなしたとき、観測ひずみの軸対称モード成分は解析値よりきわめて大きくなる。軸対称モードを引き起こす他の地震波として、平面位相をもつ地震波が考えられる。次節ではそのうち、レーリー波の影響を検討する。

7. レーリー波入力による地震応答解析

(1) 入力レーリー波

固有値解析⁵⁾で得られた 1 次と 2 次のレーリー波の例として、1 次は振動数 0.19 Hz でのモード、2 次は 0.47 Hz でのモードを Fig. 15 に示す。レーリー波の変位モードは解析対象振動数の範囲から 5 振動数を選び、この振動数のレーリー波の 1 次または 2 次のモードを求め、他の振動数については線形に内挿補間したものを用いる。

AG 1 での観測加速度波形のうち、3. で検討されたレーリー波に対応する時間領域、振動数領域での地震動加速度波形を取り出して Fig. 16 に示す。これらの波形

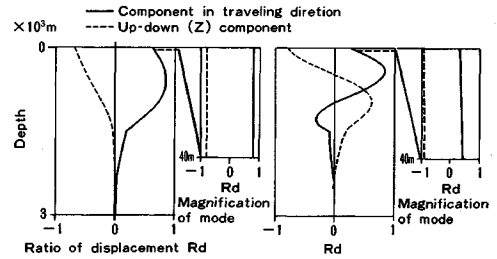


Fig. 15 Examples of 1-st and 2-nd modes of Rayleigh wave.

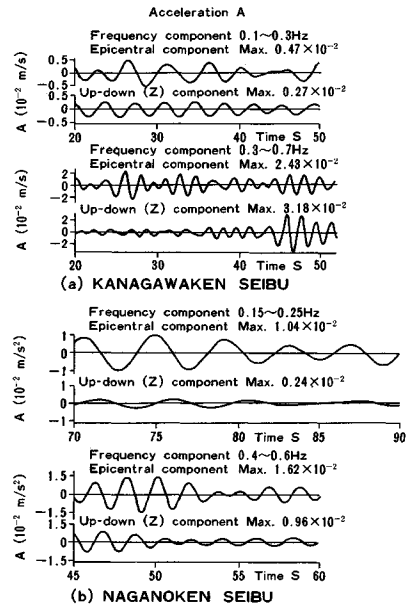


Fig. 16 Observed Rayleigh waves at AG 1.

を入力地震動とする。

レーリー波解析で求めた変位モードの鉛直変位と水平変位の比は、振動数ごとに深さの関数で与えられるが、Fig. 16 の観測波形を振動数ごとの成分に分けてもこの比は満足していない。また、Fig. 5 に示されるように、観測位相速度は必ずしも解析値と一致していない。ここでは、鉛直と水平変位のモード形は解析で得たものを用いるが、鉛直変位と水平変位の比は観測のそれを用いる。位相速度は 1 次モードのそれは解析による値とよく一致しており解析値のそれを用いるが、2 次モードに対しては、観測値を基本とし、Fig. 5 に示す一点鎖線の値を用いる。

(2) レーリー波のフーリエモード成分

地盤と貯槽連成系の有限要素モデルを用いて、レーリー波による各次のフーリエモードの応答解析は、次のように行う。レーリー波の変位を、円筒座標系で円周方向にフーリエ級数で展開し¹¹⁾、 n 次の変位モード成分を

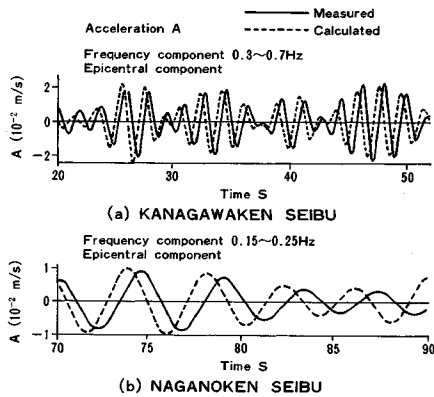


Fig. 17 Accelerations at AT1 of tank caused by Rayleigh waves.

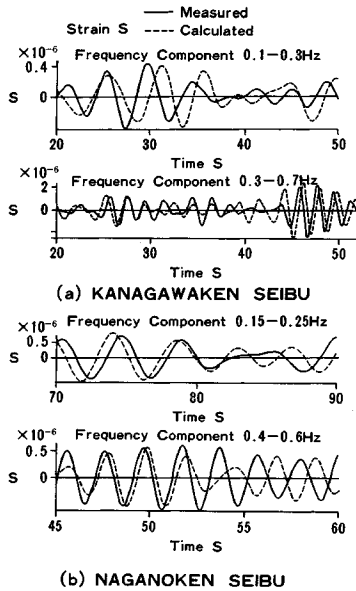


Fig. 18 Tank strains caused by Rayleigh waves.

入力地震動とする。レーリー波の係数 $U_x(z)$, $U_z(z)$ および波数 k を用いて、 n 次の r 方向、 θ 方向、 z 方向の変位成分 U_{rn} , $U_{\theta n}$, U_{zn} は次式で与えられる。

$$U_{rn} = C_n i^{n-1} \{ -j_{n+1}(kr) + j_{n-1}(kr) \} U_x(z) \dots \dots \dots (1.a)$$

$$U_{\theta n} = i^{n-1} \{ j_{n+1}(kr) + j_{n-1}(kr) \} U_x(z) \dots \dots \dots (1.b)$$

$$U_{zn} = 2C_n i^n j_n(kr) U_z(z) \dots \dots \dots (1.c)$$

C_n は $C_n = 1 (n \neq 0)$, $1/2 (n = 0)$, j_n は第一種 n 次の Bessel 関数である。

(3) 応答解析結果

解析はレーリー波が対象となる時間帯の前後に、値0の十分長い時間部分を設け、初期値を0として行い、応答結果より対象となる時間帯だけ取り出して図に示している。貯槽の応答加速度の例として、神奈川県西部地震における時間40~50秒を含む時間帯と振動数0.3~0.7

Hzの領域、長野県西部地震における70~90秒と0.15~0.25 Hzの領域において、解析で求めた水平震央方向の加速度と観測値を比較して、Fig. 17に示すが、両者は良好な一致がみられている。鉛直成分の加速度についても同様な結果が得られている。なお、ここでは、貯槽変形の円周方向へのフーリエ級数展開の次数は0~3次までを考慮した。

神奈川県西部地震における時間25~45秒を含む時間帯と0.15~0.25 Hzの領域および40~50秒を含む時間帯と振動数0.3~0.7 Hzの領域、長野県西部地震における70~90秒と0.15~0.25 Hzの領域および45~60秒と0.4~0.6 Hzの領域において、貯槽の外壁面近くでの、円周方向ひずみの軸対称のフーリエ0次モード成分の解析値と観測値を比較して、Fig. 18に示す。部分的には位相のずれがみられるが、両者に良好な一致がみられる。

8. まとめ

地下式円筒貯槽の躯体のひずみに着目した地震観測結果の検討と地盤・貯槽連成系の有限要素モデルによる解析的検討を行った。地震観測結果の検討より次の結果が得られた。

- (1) 貯槽側壁の円周方向と鉛直方向の曲げひずみおよび軸ひずみのうち、円周方向の軸ひずみが最も卓越する。
- (2) 文献1)で示される、円形断面が楕円形となる曲げ変形は本観測では顕著な形ではみられなかった。本観測での貯槽が比較的硬い地盤中にあるのに対し、文献1)のそれは軟弱地盤中にあり、地盤の相違が1つの理由として考えられる。
- (3) 貯槽外壁面近くの円周方向ひずみの円周方向分布において、軸対称のフーリエ0次モードまたは1次モードが卓越する。フーリエ1次モードが卓越するのは伊豆大島近海沖地震であり、ここで検討対象とした他の5地震では、軸対称な0次モードが卓越する。1次モードが卓越する場合のあることは文献2)で示されているが、0次モードが卓越する場合のあることを本論文で初めて指摘した。
- (4) これらの観測結果をもとに、有限要素解析で得られた結果は次のとおりである。
- (5) 伊豆大島近海沖地震の主要動では、鉛直下方から伝播するSH波が卓越したと推定される。この地震動に対して円周方向ひずみの円周方向分布は逆対称のフーリエ1次モードとなり、解析値と観測値はよく一致している。すなわち、鉛直下方から伝播するSH波に対しては、ここで用いた有限要素モデルでひずみを良好な精度で評価することができる。
- (6) 伊豆大島近海沖地震以外の地震では、円周方向

ひずみの円周方向分布が軸対称のフーリエ0次モードが卓越した。鉛直方向の地震動を鉛直下方から伝播するP波、すなわち、平面位相差のない鉛直動としたときの応答解析ひずみは観測値よりきわめて小さく、0次モードの円周方向ひずみはP波により生じたものではないと推定される。

(6) レーリー波の0次と1次モードが生じる、時間と振動数領域で、円周方向ひずみのフーリエ0次モード成分は、有限要素解析による値と観測値はよく一致した。すなわち、レーリー波により引き起こされる円周方向ひずみのフーリエ0次モード成分は、ここで用いた有限要素モデルで良好な精度で評価できる。

ここで行った実体波、レーリー波に対するひずみ解析は、ひずみ特性の一部を取り扱ったものである。ここで取り扱わなかった地震波としては、斜下方から入力してくる実体波、表面波のうちのラブ波があり、これらの影響も含めて、残りのひずみ特性の検討は今後の課題としたい。

謝 辞：本研究の実施にあたり、北海道大学工学部芳村 仁教授、三上 隆助手に多くのご指導をいただいた。ここに厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 浜田正則：大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析，土木学会論文報告集，第273号，pp.1~14，1978.
- 2) Shirasuna, T. and Goto, Y. : Response Behavior of large-scale Underground Tank during Earthquake, Pro-

ceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, pp.413~420, July, 1984.

- 3) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトル算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，第235号，pp.52~62，1975.
- 4) Masata Sugito, Hisao Goto and Fumihiro Akikawa : Simplified Separation Technique of Body and Surface Waves in Strong Motion Accelerograms, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.1, No.2, 1984.
- 5) John Lysmer and Lawrence A. Drake : A Finite Element Method of Seismology, Ch.6 in Methods in Computational Physics 11, Seismology, pp.181~216, 1972.
- 6) 嶋 悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏尅・湖尾和夫・黒沢公明：東京の基盤構造その3，地震研究所彙報，Vol.53, pp.305~318, 1978.
- 7) 市川政治・望月英志：近地震用走時表について，気象研究所研究報告，第22巻，第3~4号，pp.229~290, 1971.
- 8) 大石 博・鎌田晟雄・関口宏二：三次元アレー地震観測により得られた表面波の位相速度，第18回地震工学研究発表会，pp.89~92, 1985.
- 9) 森 正武：数値解析，共立出版，1973.
- 10) 榑 信昭・長岡弘明・横山幸満・岡本 隆：地下円筒構造物の動的解析と振動実験および地震観測との比較，土質工学会論文報告集，Vol.25, No.3, pp.167~177, 1985.
- 11) Eduardo Kausel : Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media, Department of Civil Engineering of MIT, Research Report R 74-11, pp.88~104, 1974.

(1988.5.13・受付)