

円筒地下タンクの非線形動的相互作用に関する実験的研究

MODEL VIBRATION TEST FOR NONLINEAR INTERACTION OF GROUND-TANK-LIQUID SYSTEM

吉川正昭*・家村浩和**

By Masaaki YOSHIKAWA and Hirokazu IEMURA

This paper describes model vibration tests to find effects of softening characteristics of ground on an underground tank with water 60 % or without water during severe earthquakes. For this study, a new model material—a polyethylene and salad oil mixture was developed which has superior reproductiveness of softening characteristics of ground.

Using this material and a shaking table, this dynamic interaction of ground-tank-liquid combined system was investigated. By comparing underground tank embedded in soft reclaimed lands and in rather rigid grounds of two layers, the dynamic behaviors of the tank were clarified. As the results, the underground tank during severe earthquakes are influenced greatly due to the softening of the surrounding ground, and the strains of the tank do not increase in direct proportion to the input intensity since the damping constant of the ground including viscoelastic hysteretic and radiation dampings increases.

1. 緒 言

構造物の耐震性には、構造物の置かれた地盤の影響が大きいことはよく知られたところである。耐震設計に必要な耐震解析においても構造物、地盤の相互作用について十分な検討がなされなければならない。

大型LNG地下タンクの歴史は、他形式タンクに比べて浅く、大事故の例は見当たらない。しかし、埋立地や軟弱地盤に建設される場合が多いので、地震時においては地盤との複雑な動的相互作用が予想され、地下タンクに対する耐震工学上の配慮が不可欠となる。

地下タンクの動的相互作用を解析によって検討する場合、地盤を半無限に広がる連続な媒質と考えた波動論による方法や、有限領域を考えた離散系モデルに置換する集中質量法、有限要素法などの方法が用いられている。しかし、いずれの方法を用いても、地盤強度の非線形性と振動数依存性を同時に考慮することや、内容液の有限変形振動を加味することはきわめて困難である。

地下タンクの地震観測結果より、円筒タンク特有のovallingモードが観測され¹⁾、円環としての剛性が比較

的小さいことがわかる。しかし、現在までの地震観測では、応答加速度振幅50ガル程度のものが多く求められ、強震時の地震観測結果は得られていない。

以上のような背景を踏まえ、実験的方法として起振機や振動台を用い、次に示すような目的に合うように工夫された模型振動実験が数多く行われている。

起振機による振動実験では、模型タンク側壁の円筒形肉厚を薄くして、周辺地盤の影響を受けやすくし、表面波を模擬した入力を与え、ovalling振動を求めた研究²⁾や、模型内容液として水を用い、全体系の挙動からタンクに対する動水圧の影響を求め、解析モデルに対する精度検証を行った研究³⁾などがある。いずれも相似則には固執せず、実地盤中に存在する小型円筒タンク特有の動特性を求めている。

一方、振動台による模型実験時は、起振機実験時よりも縮小され、小型化される場合が多く、実物と模型とで相似則を適用することが重要になる。人工模型材料を用いた模型振動実験では、地盤物性値がひずみに依存しない弾性体を用いた空液タンクの研究が報告^{5)~7)}されている。しかし、地下タンクは地中に埋設されているため、周辺地盤の影響を受けやすく、また、内容液は非線形挙動を行うにもかかわらず、内容液の減衰効果は期待できないので、地盤が軟化特性を示す強震時に、内容液、タ

* 正会員 (株)奥村組技術研究所主任研究員
(〒559 大阪市住之江区浜口西3-5-8)

** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科

ンク、地盤からなる全体系がどのような動的相互作用を引き起こすかを、解明していく必要がある。

そこで、本研究では、既報^{8)~10)}の「軟化ばね特性」を表現できる模型地盤材料と内容液に水を用いて、強震時に内容液を含む地下タンクの動的挙動が地盤の軟化現象（入力増加に対し、共振振動数が低下し、軟化ばね型を示す）によって、どのように変化するかを調べる。しかるに、地下タンクは周辺を地盤で囲まれ、地震時に地盤と動的相互作用を生ずる構造物である^{1),2)}ため、著者らが地上構造物と地盤の連成振動の実験的研究⁸⁾において試みたように、地盤と構造物を分離して取り扱うことが難しい。そのため、単一系地盤とタンク（ピン支持）の予備実験を行い、単一系の特性を求め、続いて、地盤-タンク全体系の実験を4種類（1層、2層地盤系と空液、有液の組合せ）を行う。こうして求めた単一系と全体系の応答特性（共振振動数 f_n 、減衰定数 h_e 、応答倍率 M ）と変位モードとにより、地盤-タンク-内容液の非線形動的相互作用を解明することにより、地下タンクの耐震安全性を把握し、耐震設計指針の資料に供しようとしたものである。

2. 実験の方法

本研究では対象構造物として大型円筒地下タンク（RC 構造、容量 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、液深 23 m、円筒側壁外径 60 m、高さ 30 m、厚さ 2.5 m、円形重力底版厚さ 5 m）を想定する。周辺地盤は支持層の明確でない1層地盤（層厚 60 m）と2層地盤（上、下層厚を 30 m とし、上層は1層地盤に等しく、下層地盤は支持層とし、せん断剛性を上層の 2.6 倍の大きさにした）の2種類とし、タンク底版を地下 30 m の位置に埋設する。対象地盤-地下タンクの実物想定値を Table 1 に示し、実物全体系に物理法則確認より導いた^{8),9)}相似比（Table 2）を適用し、模

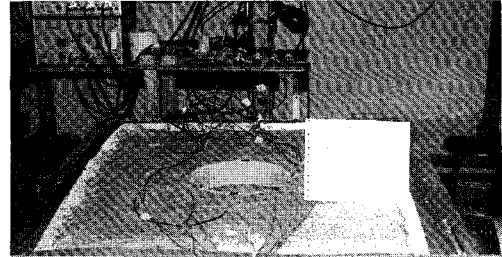


Photo1 Ground-tank-liquid model.

Table 1 Design details of prototype and model.

SOIL PART	Unit	Prototype	Model Aim	
Comp-mixed(Surface)			Poly-Ethy:Oil (Execution) 100 g : 95cm ³	
Soil Layer Depth	m	60.0	0.2	
Density	g/cm ³	1.7	0.88	
Poisson's Ratio		0.45	0.45	
S-Wave Velocity	m/s	(553.6)	32.0	
Shear Modulus	MPa	442.8	0.9	
Young's Modulus	MPa	1279.2	2.6	
Natural Frequency	Hz	2.31	40.0	
Damping Constant	%	2 ~ 5	2 ~ 5	
Bearing Soil Layer			Poly-Ethy:Oil (Execution) 100 g : 35cm ³	
Comp-mixed(Base)				
Soil Layer Depth	m	30.0	0.1	
Density	g/cm ³	1.8	0.93	
Poisson's Ratio		0.4	0.4	
S-Wave Velocity	m/s	(865.0)	50.0	
Damping Constant	%	2 ~ 3	2 ~ 3	
TANK PART			Aim	Execution
Volume	m ³	6×10^4	2.2×10^3	
Height	m	30.0	0.1	
Diameter	m	60.0	0.2	
Side Wall Thickness	m	2.5	8.3×10^3	
Bottom Slab	m	5.0	0.0167	
Density	g/cm ³	2.4	1.46	
Poisson's Ratio		0.17	0.17	
Young's Modulus	MPa	2.06×10^4	41.8	
Damping Constant	%	3 ~ 5	3 ~ 5	4.5 ~ 7.0
Natural Frequency	Hz			
Fix Base		7.75	134.0	
Hinge Support		3.10	56.3	33.5
Spring Support		1.20	20.8	
1 MPa = 10.2 kgf/cm ²				

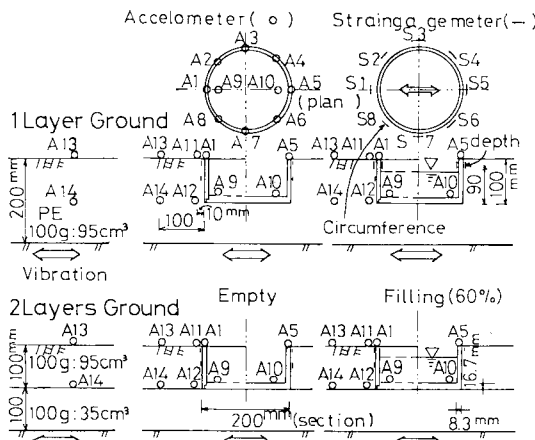


Fig.1 Ground-tank-liquid model.

Table 2 Similarity and scale factor.

Function	Similar Systems	Scale Factor
Length	l_m/l_p	1/300
Deflection	l_m/l_p	1/300
Volume	$(l_m/l_p)^3$	3.7×10^8
Density	ρ_m/ρ_p	1/193 or 1/164
Unit Weight	$(\rho_m/\rho_p)(g_m/g_p)$	1/193 or 1/164
Mass	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)^3$	$(194 \text{ or } 226) \times 10^8$
Time	$(l_m/l_p)^{3/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	1/17.3
Period	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	1/17.3
Frequency	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	17.3
Velocity	$(l_m/l_p)^{1/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	1/17.3
Elastic Modulus	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	$(1.73 \text{ or } 2.03) \times 10^3$
Stress	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)(\alpha_m/\alpha_p)$	$(1.73 \text{ or } 2.03) \times 10^3$
Spring Constant	$(\rho_m/\rho_p)(l_m/l_p)^2(\alpha_m/\alpha_p)$	$(5.76 \text{ or } 6.78) \times 10^6$
Kinetic Viscosity	$(l_m/l_p)^{3/2}(\alpha_m/\alpha_p)^{1/2}$	1.9×10^6
Strain	ϵ_m/ϵ_p	1
Poisson's Ratio	ν_m/ν_p	1
Damping Constant	h_m/h_p	1
Acceleration	α_m/α_p	1 [Soil or Tank]

模型目標値を求めた。縮尺を 1/300 とした模型を Fig. 1 と Photo 1 に示す。

模型材料および模型と実物との相似側について述べる。と次のようである。

地盤模型材料（以下 PE と略称）は Table 1 に示したように原料ポリエチレンとサラダ油とを練り混ぜて、地盤収納箱（Photo 1 に示したように側壁に厚さ 5 cm の発泡スチロール製チップの層が設けてある）の中に造る。

模型地盤と実地盤において、剛性率 G_e と減衰定数 h_e のせん断ひずみ γ 依存性、横波速度 V_s および密度 ρ を近似させる。1 層地盤の G_e , h_e と γ の結果は、さきに報告^{8)~10)}したので省略し、2 層地盤の表層における G_e , h_e と γ の関係について、Fig. 2（黒丸は後述の入力強度 $A \sim F$ に対応）に示す。 h_e については、4 種類の方法^{8),10)} で求め、 γ との関係を表 Table 3 に示す。これらのうち、 h_e の値は微小ひずみ域では衝撃的入力波動のエネルギー消費により、中ひずみ域以上では復元力履歴ループより求めることにした。同一重力場で実験するので Table 2 に示したように γ , h_e , ポアソン比 ν および加速度の相似比を 1 とした。

模型タンクにおいて、タンクの模型材料は天然ゴム・硬度 40 を用い、側壁と底版の取付部は剛結合とした。

タンク側壁と底版の剛性について、実物と模型の固有振動数の相似比を満足させようとした。タンクの模型目標固有振動数は、タンク底版の固定条件により相違するため、底版の固定方法を完全固定、ピン支持と地盤を等

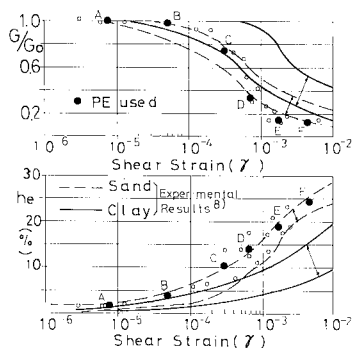


Fig. 2 Nonlinear properties of model ground (G/G_0 , h_e versus γ).

Table 3 Damping constants h_e versus strain γ level.

Damping Constant(%)	STRAIN REGION		
	Microscopic	Midale	Large
	$10^5 \sim 10^6$	$10^3 \sim 10^4$	$10^2 \sim 10^3$
(1) Free Vibration	2 ~ 3	3 ~ 5	8 ~ 16
(2) Wave Propagation	1 ~ 2	3 ~ 5	
(3) Restoring Force Curve	4 ~ 6	15 ~ 21	22 ~ 24
(4) or (4) Resonance Curve		11 ~ 13	13 ~ 15, 16 ~ 20

(4) See Reference 8)

価ばねに置換するばね支持の 3 ケースについて、3 次元 FEM 解析より固有振動数を求め、Table 1 に示した。

実験の目的と 1 層地盤の微小ひずみ時の共振振動数 40 Hz などを考慮して底版ピン支持の模型タンクの固有振動数を 1, 2 次で 34 Hz, 44 Hz とした。タンクの減衰定数 h_e は地盤と同様の方法を用いて求めた。

内容液に LNG 燃料を用いる場合、密度 0.49 g/cm^3 , 動粘度 $2.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, 沸点 -160°C の液体であるため、模型液体は軽くて粘性の小さい性質を選出する必要がある。しかし、最適な液体が見つからないので水^{4),11),12)}を用いた。そのため、液体とタンク-地盤の連成振動時に、水の質量効果が現われやすくなっている。液体の減衰定数 h_s は自由表面波の対数減衰率より求め、0.2 ~ 0.4% の結果を得た。したがって、内容液は相似側を満足しないが、液体-タンク-地盤の非線形動的相互作用を求めるには大きな問題とならず逆に特徴を把握しやすいと考える。

次に実験条件について述べる。実験設備は既報告^{8),10)}と同じ機器を用いたので省略する。特に、超小型加速度計（形状 $5 \times 5 \times 11 \text{ mm}$, 密度 3.5 g/cm^3 ）の慣性力による影響を少なくするため、加速度計の周囲にバルサ材（密度 0.2 g/cm^3 ）を貼り加速度計と模型の密度を近似させた。

測定位置は Fig. 1 に示すように、タンク側壁頂部に 45° ピッチで 8 点 $A_1 \sim A_8$, 底版上の中心に対して向かい合った 2 点 $A_9 \sim A_{10}$ とする。地盤部は全体系タンク側面から 10 cm 離れた 2 点地表面 A_{13} , 地中 A_{14} とタンク側面から 1 cm 離れた 2 点地表面 A_{11} , 地中 A_{12} とし、加速度計を配置した。円筒側壁外側の頂部と底部の位置に土圧計を配置し、加速度計で求めた共振振動数と対比した。円筒側壁頂部 $S_1 \sim S_8$ に 45° ピッチで円周方向と深さ方向に箔ひずみゲージ（KFC-5-C₁）を貼布し、断面力を求めた。

入力波形は地盤が軟化しやすいため、周期的スイープ波動（1 ~ 80 Hz, 17 秒, 入力振幅一定, run up 方式）を使用した。振動台を用いて、加速度振幅のスイープ波動を水平方向に 6 ケース（A 10 ガル, B 48 ガル, C 80 ガル, D 117 ガル, E 147 ガル, F 193 ガル）に分けて与え、各測点での共振曲線と共振時の変位モードを求めた。

実験はまず単一系地盤（1 層地盤と 2 層地盤）と単一系タンク（空液と有液, 有液時液深 6 cm）の 4 種類について行う。単一系地盤より自然地盤の振動特性と単一系タンク（底版ピン支持）より円筒タンク特有の振動モードとを求める。次に、地盤-タンク全体系において、タンクを支持層がない 1 層地盤中と、底版を支持層に根入れする 2 層地盤中に埋設し、空液時と有液時の 4 種類の

実験を実施した。

なお、模型地盤はオイルの混入量の多少により、硬軟の程度を自由に調節できる。しかし、4回模型地盤を製作する必要があるため、模型地盤の特性を明確に把握している配合^{9)~10)}を用いた。そのため、相似比から逆算によって求めた原地盤の V_s は大きな値となったため Table 1 にカッコで示した。また、4回作製した模型地盤に対しては、特に同一ひずみレベルの V_s が同じようになるようにした。供試体(直径5 cm, 高さ10 cm)に対して超音波パルス法、ねじり自由試験から求めた V_s と振動台上で板たたき法により求めた V_s とは相違するため、板たたき法で求めた V_s を用いた。表層と支持層の目標 V_s に対して、 ± 2 m/sの範囲に収まるようにした。したがって、4種類の全体系の実験とも Table 1 に示した地盤の目標値をほぼ満足している。

3. 実験結果

(1) 単一系

a) 地盤

水平加振によって生じる地表中央付近 A_{13} の水平加速度応答から求めた1, 2層地盤の共振曲線を Fig. 3 に示

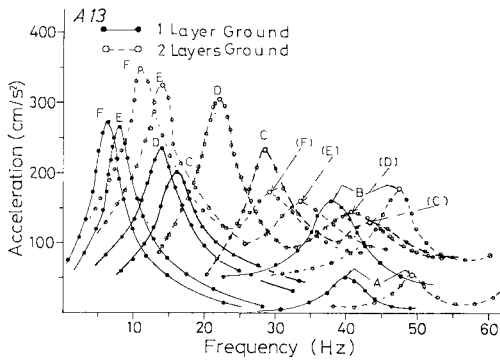


Fig. 3 Frequency-response curve of ground (horizontal).

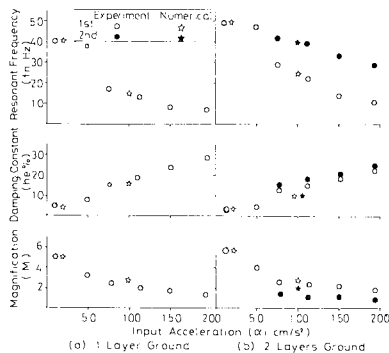


Fig. 4 Relation of input acceleration (α_i) to response (f_n, h_e, M) (ground).

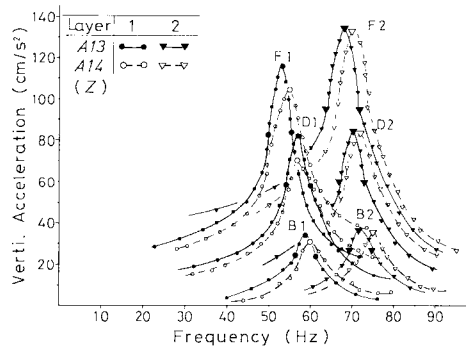


Fig. 5 Frequency-response curve of ground (vertical).

し、共振振動数 f_n 、減衰定数 h_e 、応答倍率 M と入力加速度振幅 α_i の関係を Fig. 4 に示す。水平入力(B 48, D 117, F 193 ガル)による上下加速度応答の共振曲線を Fig. 5 に示す。同図より1層地盤の共振曲線は単峰型を示す。水平応答の軟化現象は50 ガルから80 ガル入力時に大きい。上下応答の共振現象(Fig. 5)は水平応答に比べ、高振動数域に生じ、最大応答加速度はきわめて小さく、上下方向変位は水平変位に比べて無視できる⁹⁾。2層地盤の共振曲線(Fig. 3)は連峰型で、1次のほかに2次ピークを生じる。なお、模型地盤の平面と断面の応力分布についての一様性については文献13)の図-8に示したようにほぼ一様にせん断振動の分布を呈する。

1, 2層地盤表層と地中の平均ひずみとせん断応力に関する1次共振時の復元力特性^{9)~10)}を Fig. 6 に示す。入力加速度が大きくなると、1層地盤の表層部分(A_{13} と A_{14} の平均値)の履歴形状は、逆S字形となる。2層地盤の表層部では、紡錘型から崩壊型に移行する過渡的な特性を示し、液状化時にみられるのと類似した逆S字形が1層地盤ほど明確に現われない。

b) 円周タンク(底版ピン支持)

空液時と有液時のタンク側壁頂部 A_1 における水平応答時の共振曲線を Fig. 7 に示す。空液時、有液時とも、

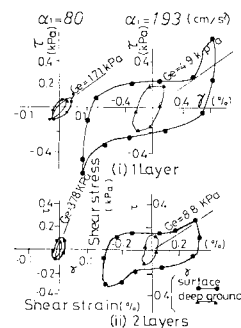


Fig. 6 Restoring force characteristic of ground.

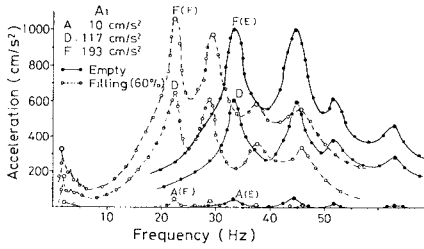


Fig. 7 Frequency-response curve of tank (horizontal).

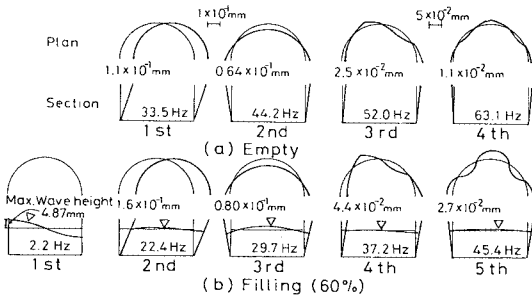


Fig. 8 Displacement mode of tank ($\alpha_t=117 \text{ cm/s}^2$).

共振振動数が入力強度に依存しないことがわかり、代表例として入力加速度 117 ガル時の変位モードを Fig. 8 に示す。

同図より空液時における 1, 2 次の共振振動数は 33.5 Hz, 44.2 Hz, 応答倍率は 5.2 倍, 減衰定数は 4.5 ~ 7.0% となり, 3, 4 次共振時 (52.0 Hz, 63.1 Hz) の応答倍率は, 1, 2 次比べて約半分となる。有液時, 液面動揺振動による 1 次共振振動数が 2.2 Hz に現われ, 3.8 Hz ~ 5.6 Hz の範囲に 2, 3, 4 次の液面動揺振動が現われる。しかし, 2~4 次の液面動揺振動は 1 次比べて波高が小さく, タンクに与える影響が無視できるので省略する。有液時 2, 3 次の側壁頂部加速度応答のピーク値は自由液面が静止に近い状態で生じ, 共振振動数は 22.4 Hz, 29.7 Hz となる。応答倍率は, 液面動揺時 1 次が 1.7 倍, 2, 3 次は, 5.5 倍となり, 空液時に比べて少し大きくなる。

(2) 全体系

1 層地盤中のタンク側壁頂部 A_1 , 近傍地盤地表 A_{11} の空液と有液時の水平応答の共振曲線を Fig. 9 (a), (b) に示し, 底版 A_9 の水平入力による上下加速度応答を Fig. 10 に示す。同様に 2 層地盤中の側壁と地表の結果を A_1 , A_{11} (空液), A_1 (有液) と A_{11} (有液) に分けて, Fig. 11 (a), (b) と (c) に示し, A_9 の上下加速度応答を Fig. 12 に示す。タンク側壁頂部 A_1 (空液, 有液) の f_n , h_{e1} , M と α_t の関係を Fig. 13 (1 層地盤), Fig. 14 (2 層地盤) に示す。

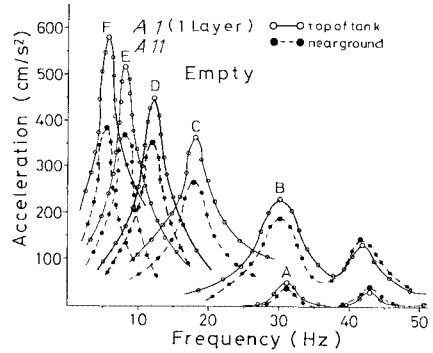


Fig. 9 (a) Frequency-response curve of combined system (A_1 and A_{11} , without water in one layer).

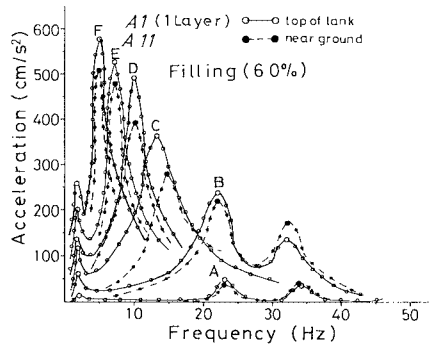


Fig. 9 (b) Frequency-response curve of combined system (A_1 and A_{11} , with water 60% in one layer).

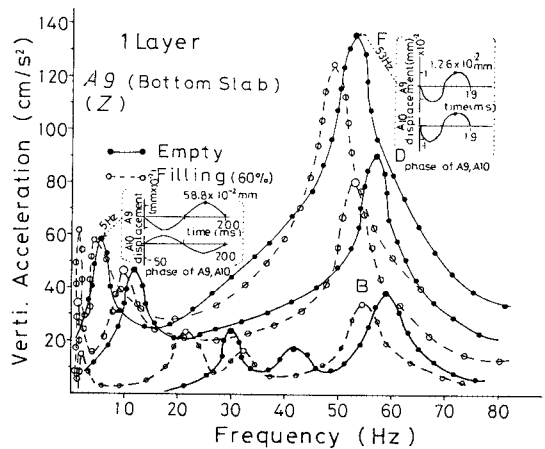


Fig. 10 Frequency-response curve of combined system (A_9 , vertical response in one layer).

水平方向の応答特性について, 近傍地盤 A_{11} とタンク A_1 を比較すると, 有液時に液面動揺振動による影響がタンク A_1 から近傍地盤 A_{11} (実物で A_1 から 3 m 離れる) に伝わらない点を除いて (Fig. 9 (b), 11 (b), (c)),

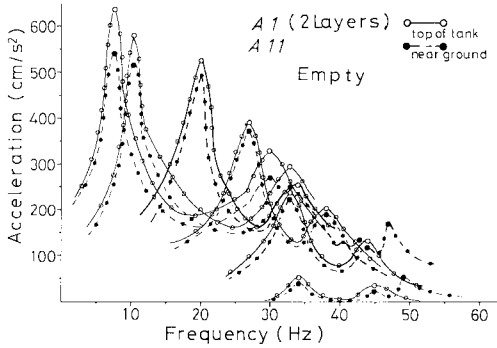


Fig. 11 (a) Frequency-response curve of combined system (A_1 and A_{11} , without water in two layers).

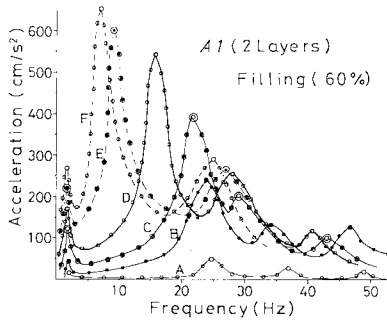


Fig. 11 (b) Frequency-response curve of combined system (A_1 , with water 60% in two layers).

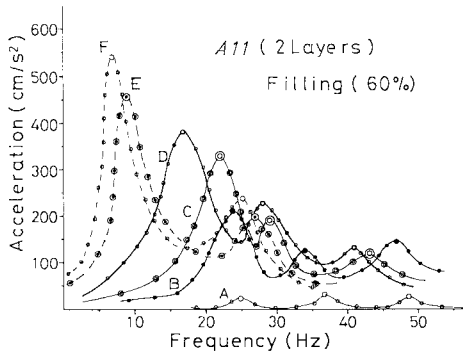


Fig. 11 (c) Frequency-response curve of combined system (A_{11} , with water 60% in two layers).

1, 2層地盤における空液と有液時の A_1 , A_{11} の共振曲線の形状は類似する。

タンク側壁から 10 cm (実物で 30 m) 離れた地表 A_{13} は単一系地盤の同じ位置で測定した結果と一致するので、全体系遠隔地盤の応答特性として Fig. 3 ~ 5 の値を用いる。

上下方向応答特性 (Fig. 10, 12) について、空液と有液時の上下方向加速度ピーク値の共振振動数を比較する

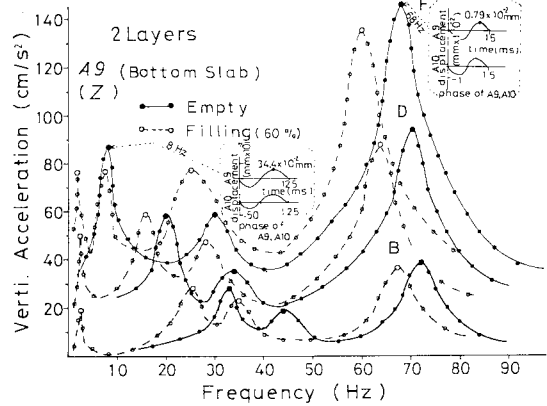


Fig. 12 Frequency-response curve of combined system (A_2 , vertical response in two layers).

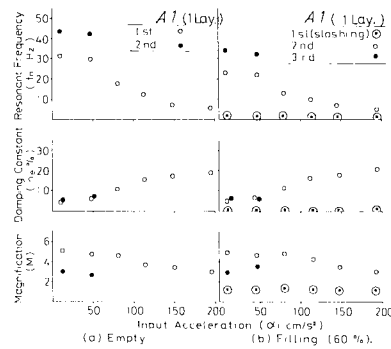


Fig. 13 Relation of input acceleration (α_i) to response (f_n , h_e , M) (A_1 , combined system in one layer).

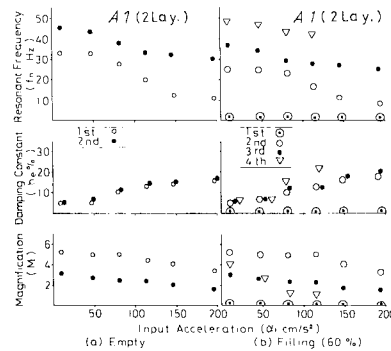


Fig. 14 Relation of input acceleration (α_i) to response (f_n , h_e , M) (A_1 , combined system in two layer).

と、有液時の方が 1, 2 層地盤中のタンクとも低くなる。これは内容液 (水) の重力効果が現われたものと考えられる。

入力加速度が 48, 117, 193 ガル時の遠隔, 近傍地盤とタンクの共振時の応答変位モードについて, Fig. 15

(a), (b) (1層地盤), Fig. 16 (a), (b) (2層地盤)に示す。各位置の共振振動数はそれぞれ $f_{d1,2}$ が遠隔地盤の1, 2次, f_g が近傍地盤, $f_{t1,2}$ がタンクの1, 2次, f_s が液面動揺振動数を表わし, 応答変位量は地表 A_{13} , A_{11} とタンク A_1 の水平変位量を表わす。タンク底版が rocking 振動を行うとき, $\{\uparrow\}$ と注記した。液面動揺振動(有液時の1次, 1.9~2.2 Hz)の波高はタンクの変位に比べて大きいので, 静水面から上昇する高さを求めた。同図より, 入力の大きさと地層構成の相違により, 地盤とタンクの共振状態の変遷がわかる。

有液時の応答ひずみについて, 側壁頂部 A_1 , 近傍の測点 S_1 の円周と深さ方向の共振曲線を1, 2層地盤に分けて, Fig. 17, 18 に示す。空液時のひずみは有液時の約半分になる点を除いて, 有液時に類似するので省略する。円周と深さ方向の有液時ひずみを比較すると, 特に2層地盤中のタンクでは, ピーク値を与える共振振動数が2, 3次で逆になっている。すなわち, 円周方向ひ

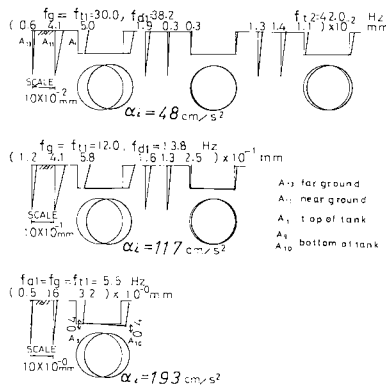


Fig. 15 (a) Displacement mode (combined system, without water in one layer).

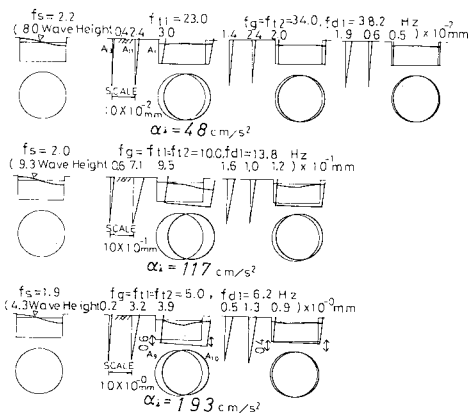


Fig. 15 (b) Displacement mode (combined system, with water 60% in one layer).

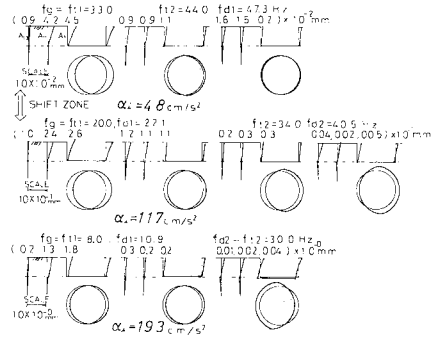


Fig. 16 (a) Displacement mode (combined system, without water in two layers).

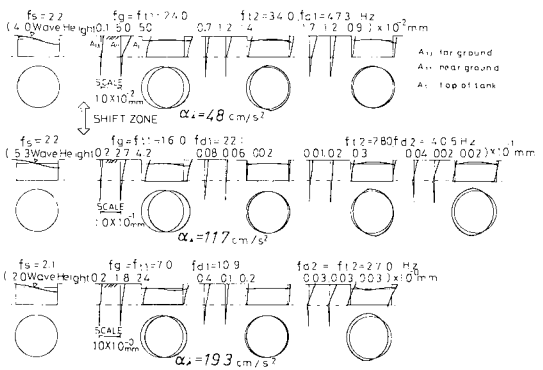


Fig. 16 (b) Displacement mode (combined system, with water 60% in two layers).

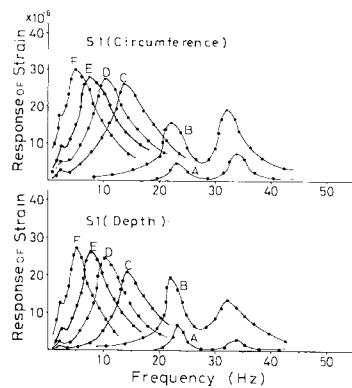


Fig. 17 Frequency response curve of strain (combined system, with water 60% in one layer).

ずみは2次より3次の方が大きく, 深さ方向では2次の方が3次より大きい。2次共振時のタンクモードは円輪 (Fig. 16 (b)) で, 片持ばりの曲げ変形に類似した振動をするため, 深さ方向のひずみが大きくなり, 3次共振時は卵型モードが現われ, 円周方向ひずみが増えるものと考えられる。

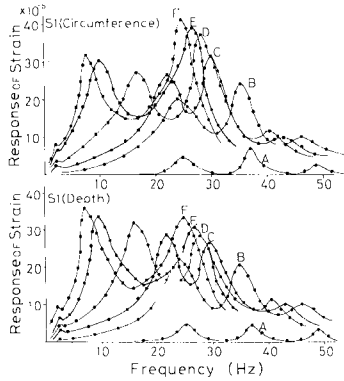


Fig. 18 Frequency response curve of strain (combined system, with water 60% in two layers).

4. 考 察

(1) 地盤単一系およびタンク単一系

模型1, 2層地盤において, 10ガル時に比べ200ガル近傍では f_n は40 Hzが6.2 Hz (50 Hzが11 Hz), M は5倍が1.4倍 (5.5倍が1.8倍) に低下し, h_e は4%が30% (3.8%が22%) に増加する。カッコ内は2層地盤を示す。2層地盤の表層部分は, 下層部が支持層であるため, 1層地盤に比べ, 1次の共振振動数, 応答倍率は大きく, 減衰定数は小さく, 軟化現象を生じる割合が小さい。

地盤あるいは土構造物の実験結果や実測値^{8), 10)}にも, 本研究結果と同様に, f_n, h_e, M の入力加速度依存性が認められる。模型地盤は既報告⁹⁾により砂質土に対応するものと考えられる。

空液時の模型タンクにおいて, 円筒側壁は軸対称条件を満足し, 円周方向の断面で卵型, 深さ方向の断面で片持ばり型の振動モードを再現する。

有液時の模型タンクにおいて, 振動モードは空液時に比べ, 1次共振時に現われる自由液面動揺振動 (2.2 Hz, sloshing¹²⁾) と2, 3次の円筒壁-液体の連成振動 (22.4 Hz, 29.7 Hz) とに分けられる。Sloshingと円筒壁-液体の連成振動とは共振振動数が完全に分離し, これらの間の連成振動は生じない。模型タンク-液体の振動挙動は地上に建設されたタンクの実験値や実測値^{9), 11)}と類似した傾向を示している。

(2) 全 体 系

1, 2層地盤の空液と有液時のタンク全体系について, f_n, h_e と α_i の関係 (Fig. 4, 7, 13, 14) をまとめ, Fig. 19に示す。同図を相互作用特性図と称し, 点線, 1点鎖線は単一系地盤とタンクの共振振動数 (G_1, G_2) と (T_1, T_2, T_3) または地盤とタンクの減衰定数 h_g と h_t を表す。全体系の空液時1, 2次を白丸, 黒丸, 有液時1,

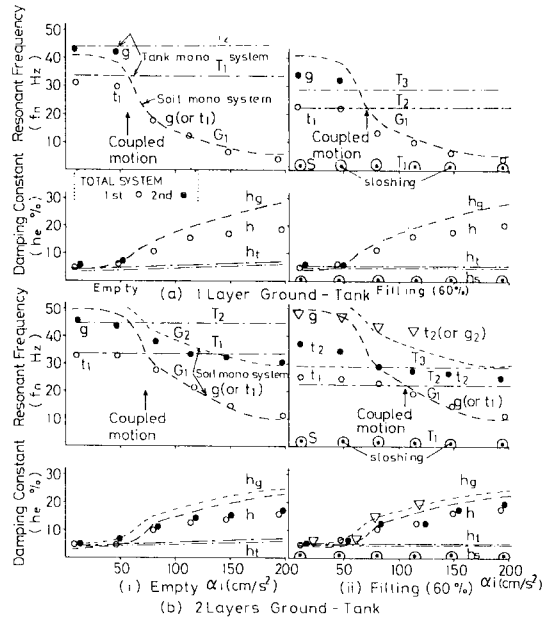


Fig. 19 Coupled vibration characteristic.

2, 3, 4次を二重丸, 白丸, 黒丸, 三角形で表す。液体, 地盤, タンクのいずれが主働振動かを区別するため, それぞれ $s, g, t_1, 2$ を注記し, 地盤とタンクの区別が難しい場合は g (or t_1) と注記した。入力増加による sloshing の共振振動数の低下は小さいので, 全体系の sloshing は単一系タンクの記号 (二重丸) を併用した。全体系の減衰定数に h (sloshing の減衰定数に h_s) と注記した。

$f_n-\alpha_i$ の関係において, 単一系地盤 (点線, 遠隔地盤) の共振振動数は入力加速度によって変化するので, 単一系タンク (1点鎖線) の共振振動数 (空液時 T_1 と T_2 は有液時 T_2 と T_3 に対応) と交わる。一方, 全体系の共振振動数 (白, 黒丸など) は単一系地盤 (点線) とタンク T_1 (有液時 T_2) の交点近傍以下の領域では, 単一系地盤の共振振動数と相違する。しかし, 全体系の白丸 (空液時1次, 有液時2次) に注目すると, 白丸は単一系の交点近傍を境に急激に低下し, 交点以上の入力加速度に対して, 白丸は単一系地盤に接近 (全体系のタンクは地盤の軟化現象に従う) することがわかる。

$h_e-\alpha_i$ の関係 (Fig. 19) より, 交点近傍の入力加速度を境に急激に減衰定数 h が増加する。同様の特徴は, 交点近傍の入力加速度に対する応答倍率 (Fig. 13, 14) が, 微小入力加速度時に比べて低下せず, 交点近傍を境に低下していくことからもうかがえる。この交点付近を全体系の連成振動が大きくなる点として, $f_n-\alpha_i$ の関係において Coupled motion として注記した。したがって, 交点付近の入力加速度に対して, 既報告^{8), 10)}と同様にタンク

ク-地盤系の相互作用特性の遷移領域が生じていると考えられる。地下タンクの場合、地上構造物に比べて地盤の減衰効果が大いため、塔-杭-地盤系ほど鋭い遷移点を求められない。そのため、単一系の交点付近の加速度を全体系の遷移点とし、それ以下と以上の領域について、同図 (Fig. 19) をモード図 (Fig. 15, 16) と対比することにより、非線形動的相互作用の特徴について考察を進める。

a) 1層地盤-タンク全体系 (空液時)

入力加速度 65 ガル付近以下の領域では、地盤が軟化現象を生じにくく、タンク全体系の減衰定数は5~6%と小さい。1, 2次モードはタンク主働による円輪型 sway と地盤主働による1次せん断型を示す。地盤の強度が大きいため、タンクに対する拘束効果がみられる。

入力加速度 65 ガル付近以上の領域では、地盤の軟化が大きく、地盤の減衰定数が15%から30%に急増するため、全体系の減衰定数は11%から20%に増加する。地盤の軟化に従って、タンクの共振振動数が低下するため、共振曲線は連峰型から単峰型に移り、タンクは地盤の挙動に大きく支配される。底版の支持状態が良好でないため、rocking (Fig. 10, 15(a)) が発生する。

b) 1層地盤-タンク全体系 (有液時)

有液時は空液時と相違し、低振動数域で1次に sloshing が生じる。入力加速度 70 ガル付近以下の領域で1, 2, 3次のモード (Fig. 15 (b)) はそれぞれ sloshing, タンク主働の円輪型 sway, 地盤主働の1次せん断型振動を示す。

入力加速度 70 ガル付近以上の領域で、最大入力加速度 193 ガル時、地盤の軟化現象にもかかわらず、1, 2次の共振振動数は1.9 Hz, 5.0 Hz 近傍を示し、sloshing と地盤-タンク系は連成振動を生じない。2次モード近傍に高次の sloshing が生じるが、地盤-タンクに影響しない。2次モードは空液時と同様に、地盤せん断1次主働の円輪型 sway と rocking となる。Sloshing による動水偏圧が左右側壁に交互にかかるため、run-down 方式に比べ、run-up 方式でスイープ入力を行うと、続いて起こる円輪型 sway 時に rocking を生じやすくなる。有液時の方が空液時より rocking 量が少し大きい。

c) 2層地盤-タンク全体系 (空液時)

入力加速度 80 ガル付近以下の領域で表層地盤の軟化現象は、1層地盤のそれより小さく (Fig. 13, 14, 19), タンク底版下が堅固であれば、系の応答に及ぼす表層地盤の影響は、底版下の状態が堅固でない1層地盤に比べて低下することがわかる。1次モード (Fig. 16 (a)) は、単一系タンクの円輪型モード (Fig. 8) に類似し、2次モードはいびつな円形 (ovalling) を示す。

入力加速度 80 ガル付近以上の領域で、表層地盤が急

激に軟化するため、円周方向のタンクモードは単一系タンクのモード (Fig. 8) に類似する。2次モードは卵型 (ovalling) が現われる。

d) 2層地盤-タンク全体系 (有液時)

入力加速度 90 ガル付近以下の領域で、1, 2, 3, 4次のモード (Fig. 16 (b)) はそれぞれ液面動揺、タンク主働の円輪型 sway, 卵型, 地盤主働の1次せん断型を示す。

入力加速度 90 ガル付近以上の領域で、1次の sloshing は変わらないが、2, 3次のモードが入れ替わり、それぞれ地盤主働の円輪型 sway, タンク主働の卵型を示し、4次は3次に共振振動数が接近し、分離できなくなる。Sloshing と地盤-タンク系とは、連成振動を生じない。Rocking も c) と同様に誘発しない。

5. まとめ

本研究で得られた非線形動的相互作用に関する成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 1, 2層地盤中のタンクは強震時、埋設地盤の振動特性に大きく支配される。

(2) 周辺地盤は軟化現象により減衰効果が急増するため、タンクのひずみは地震力に比例して増加しない。

(3) 1, 2層地盤中のタンク-地盤と sloshing とは、強震時、地盤の軟化により振動数が近接する。しかし、本研究の入力強度以内で、両者は連成振動を生じない。

(4) 地盤とタンクの非線形動的相互作用に関して、入力加速度振幅 70 ガル付近 (60 ガル~90 ガル) で、地盤が急激に軟化し、減衰定数が増加する遷移領域が存在し、この領域以上の非線形領域において、2層地盤中のタンクは底版下が1層地盤に比べて堅固であるため、1層地盤中のタンクに生じる rocking 振動が生じない。また、2層地盤中のタンクは表層地盤の軟化現象による影響が、1層地盤中のタンクに比べて少ない。

(5) タンクの耐震設計上、次のことを明らかにした。

i) 有液時のタンクひずみは空液時に比べ、約2倍大きくなるので、有液時におけるタンクの耐震設計を検討する必要がある。なお、模型液体として質量効果の大きな水を用いたため、大きな値を示したが、実際の倍率はもう少し小さくなるものと予想される。

ii) タンク底版下の支持条件がよい2層地盤の方が1層地盤より、耐震上有利である。しかし、2次モードに卵型が現われ、円周方向にひずみを生じるため、高振動数が卓越する場合は注意する必要がある。

iii) タンク円筒壁から半径だけ離れた地表、地中の応答特性は、単一系地盤の応答特性とほぼ一致し、地下タンクの影響が半径以遠に及ばないことがわかる。

6. あとがき

地下タンクの挙動は周辺地盤の動きに支配されるため、模型地盤は自然地盤を十分に再現している必要がある。すでに、1層地盤についての再現性については報告^{9)~10)}した。今回用いた水平2層構造の地盤についても、微小ひずみ時において、実地盤と模型地盤のせん断波速度の相似比を満足させるため、単一系支持層地盤で板たたき法によって、せん断波速度を求め、さらに、表層地盤を作製した地表において、走時曲線から屈折法によって、支持層のせん断波速度の確認を行った。一方、剛性率と減衰定数がひずみの大きさに依存する性質について、2層地盤 (Fig. 2, 6) と1層地盤の結果⁹⁾を比較すると、2層地盤の方が1層地盤に比べて、剛性率、減衰定数ともひずみの大きさに依存しにくいことを確認した。したがって、強震時に表層地盤の軟化現象によって生じる液体-タンク系の相互作用の特徴を求めた本研究により、1, 2層地盤中におけるタンクの応答特性が把握でき、耐震解析ならびに設計上基本的な考え方を提示し得たものと考えられる。

Sloshing に関して、入力加速度が増加すると、地盤が軟化し、タンク系の共振振動数は液体の sloshing 振動数に接近していく。しかし、本研究の加速度の大きさでは、両者の共振現象が生じない。そこで、定常正弦波加振を行い、sloshing の共振振動数 2.2 Hz の波動を繰り返して与えた。その結果、自由面が中央で左右に上下するとき側壁 A_1 と向かい合う A_2 とで碎波の波頭衝撃値が生じる。続いて、波頭の形状が崩れ上下動が小さくなり、地上タンクにおいて池田ら¹²⁾が求めたのと同様、地下タンクにおいても、水が側壁に沿って回転運動を始める。大きな衝撃値がタンクに作用するのは、水を用いたため、液体の重力効果が作用したことや、sloshing の共振振動数で加振したためと考えられる。しかし、長周期成分を有する遠方地震動が、最近実測されている。これらの地震動により、sloshing が生じ、さらに、周辺地盤が液状化現象を生じた場合、すなわち、内容液とタンク系が共振現象を生じた場合を想定すると、当然、地下タンクは周辺地盤の安定を前提として設計されるもので、液状化は生じないように地盤改良を行うべきだから、この想定は最悪の事態を考えたものであるが、sloshing に対する安全対策として、液面動揺と回転防止さらには漏液防止が必要であると考えられる。

本研究は、地震波 (SH 波) が鉛直下方から入射する場合を対象としたものであり、表面波が入射する場合については扱っていない。また入力波形はスweep波を使

用したので、応答倍率は実地震波に比べ、スweep波では2~5倍となる^{9)~10)}。さらに、模型タンク材料に天然ゴム、内容液に水を用い、本研究の目的を追求しやすくした。したがって、実際の現象は本研究結果より小さな応答値になるものと予想される。

謝 辞：本実験のまとめにあたり、ご助言をいただいた京都大学工学部、山田善一教授と、実験に協力いただいた萩森健治主任に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 浜田政則：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回，pp. 1~14，1978年4月。
- 2) 岩瀬敏広・堤 一ほか：起振実験による模型 L. N. G. 地下タンクの動特性および解析モデル化手法の考察，電力中央研究所報告，研究報告 377026，1978年6月。
- 3) 長岡弘明・榊 信昭ほか：LNG 地下式貯槽の地震応答解析，日本鋼管技報，No. 84，pp. 72~84，1980。
- 4) 坂井藤一・迫田治行ほか：石油タンクの耐震設計法—API 改訂案に関連して—，川崎重工技報，No. 71，pp. 52~59，1979年7月。
- 5) 後藤洋三・白砂 健：回転体有限要素法による地下タンク模型振動実験の解析，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第1部，pp. 418~419，1979。
- 6) 中村正博・齊藤悦郎ほか：円筒地ドタンクの動的挙動 (No. 3) —正弦波加振模型実験におけるタンクのひずみについて—，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，第1部，pp. 336~337，1978。
- 7) 鈴木英世・江川顕一郎ほか：海岸埋立地に設けられる地下タンクの模型振動実験，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，第1部，pp. 326~329，1978。
- 8) 吉川正昭・山田善一ほか：模型地盤を用いた鉄塔-杭基礎-地盤の非線形連成振動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第334号，pp. 53~61，1983年6月。
- 9) 吉川正昭・黒岩真彦：軟弱，地盤模型，材料の動特性，第16回土質工学研究発表会，pp. 1257~1260，1981年6月。
- 10) 吉川正昭・山田善一ほか：杭基礎-地盤の非線形動的相互作用に関する実験的研究，土質学会論文報告集，Vol. 23，No. 3，pp. 178~188，1983年9月。
- 11) 白木万博・藤田勝久：液体を含む自立形薄肉円筒タンクの地震応答解析，三菱重工技報，Vol. 12，No. 3，pp. 6~18，1975。
- 12) 池田駿介・秋山成興ほか：円筒タンク内の液体動揺に関する研究，土木学会論文報告集，第290号，pp. 53~65，1979年10月。
- 13) 吉川正昭・安倍 勇：模型地盤を用いた鉄塔-杭基礎-地盤の非線形連成振動に関する実験的研究，第6回日本地震工学シンポジウム，p. 1707，1982年12月。

(1983. 12. 14・受付)