大阪公立大学
Osaka Metropolitan University
学術情報リポジトリ

地盤上の隣接する2基の模型タンクに関する動的実験

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮脇, 幸治郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00008069

地盤上の隣接する2基の模型タンクに関する動的実験

Study of Dynamic Behaviors agairst Two-Tanks on Ground

宮　脇　幸治郎*

Kohjiro MIYAWAKI**

(昭和55年9月1日受理)

Synopsis

This paper dealt with experiment on dynamic couppling bebaviors of two liquid storage tanks on ground.

An experimental set-up made two same circular cylindrical tanks on the ground made from chemical grout. The studies carried out two cases as follows, 1) in order to examine distance effects of double tanks, the distance was changed such as $d/D=1/3, 2/3$ and $3/3$ (d; distance of two tanks, D; diameter of tank) keeping at constant the depth containing liquid, 2) in order to investigate liquid storage influences, the rate of two liquid heights was varied such as h_1/h_2 is equal to $1/3, 2/3$ and $3/3$ (suffix 1,2 are tank numbers) maintaining the distance of tanks constant. In addition to the examinations about the properties of ground materials, dynamic behaviors of model tanks and of a single tank on ground are carried out.

From results of tests, dynamic horizontal motions of surface ground in between double tanks and of tank top indicate that the responses in which d/D is equal to 1/3 have smaller than those in which d/D is equal to 2/3. At the time the depth of liquid storage decreases, the responses of horizontal motion have a tendency to increase.

1. まえがき

臨海工業地域においては，大型化した原油等の液体貯蔵タンクが数多く建造されており，これらの基地への地震襲来は，大災害を引起す可能性が大である．そして，普通の自立式円筒形タンクに関する耐震的検討が種々の方法で行われている。

いま，自立式タンクの動的挙動について考えてみると，つぎのような現象が一般に見られ，研究がなされている．1）貯蔵液体については，スロッシング現象がある．この現象によって液面の上下動を生じ，タンク全体に作用する転倒モーメントが生じ，側板直下部における基礎地盤からのリフティングが生じる．また，タンク全体が並進することによるスライディングを生じる．2）円筒形シェルについては，バルジィング現象がある．この現象によって，シェルのブリージングが生じ，円周方向の過剰な応力が生じる．また，この現象によって同心円の表面波が生じる．3）基礎地盤については，表層間の重複反射波現象等がある．これらの現象による地表層の卓越振動の増幅あるいは盛土破壊が生じる．4）円形底面スラブについては，タンク全体の転倒モーメントによるスラブの浮き上り（はく離）を呈し，地盤反力の再配分現象がある．また側板との側板との接続部分（アニュラープレート部）での半径方向の急激な曲げ

*土木工学科　**Depratment of Civil Engineering

応力の変動を生じる。5）浮屋根については，液面動揺による座屈現象ならびに側板への乗り上げが生じる．

一方，タンクは1基だけでなく群をなして建造されているのが普通であるため，個々の現象とタンク間での相互作用が加わった複雑な現象を呈する可能性が生じる．タンク間の距離ならびに防油提などの判定は「消防法」第10条に基づいて，「危険物の規制に関する政令」第15条1号に規定されているが，十分耐震的な見地から解明されていない．

本研究は，タンク群として最も基本的な形である2基のタンクについて実験的に調べたのでここに示す．なお，タンクの単体の現象についても合わせて実験を行い，結果を示した．

2．実　験　の　概　要

図2—1 は(c)は，実験装置の概要図である．模型タンクとその設置方法は，まず振動台（動電型，明石製作所製，ASE-91T型）に鋼製の振動箱（長さ2.2m×幅1.2m×高さ1.0m）を固定し，これにアクリルアマイド系グラウト剤（日東化学，NITTO-SS 30R，15%濃度）で製作された層厚30cmの弾性地盤を設け，地盤中央付近に2基の同型円筒形模型タンク（銅製，側板：ϕ150mm×300mm×0.2mm，底板：ϕ170mm×0.2mm）を設置した．なお，模型に対する相似律は，全体系として満足させることはできないが，大体**表2—1** に示すような諸元で幾何学比をほぼ1/100，振動数比を10程度を目標に製作した．

本装置による実験は，2基加振方向に設置して，加振を行い，1）タンク間距離の影響を検討するためにタンク内水位を一定に保ち，タンク間距離を直径の⅓，⅔，⅓のように変化させたもの（WTD），2）貯蔵液高の影響を検討するためにタンク距離を一定に保ち，一方のタンク内液位を一定にし，他方の液位を変化させたもの（WTH）の2ケースを行った．また，これに付随する模型地盤の材料特性，模型タンクのみの動特性，および地盤上の模型タンクの動特性の実験も行った（表2—2）．

実験における測定量は，振動台の水平加速度 H_0，地盤地表中央部の水平・鉛直加速度 H_1，V_1，タンクⅠの水平・鉛直加速度 H_2～H_3，H_1'～H_2'，V_2～V_3，タンクⅡの水平加速度 H_4，底面

Liquid (Water)			H_l(cm)	R_l(cm)	$\rho_l g$(g/cm³)		
			15	15	1.0		
Container	Cylindrical Shell		L_s(cm)	R_s(cm)	t_s(cm)	$\rho_s g$(g/cm³)	
			30	15	0.02	8.9	
	Plate	Circular	R_b(cm)	t_b(cm)	$\rho_b g$(g/cm³)	E_b(kg/cm²)	ν
		Ⅰ Rigid (Steel)	17	0.5	7.9	2.1×10^6	0.30
		Ⅱ Flexible (Copper)	17	0.02	8.9	1.2×10^6	0.34
	Circular Rib Ring (Steel)		R_r(cm)	b(cm)	$\rho_r g$(g/cm³)	E_r(kg/cm²)	ν_r
			29.75	0.5	7.9	2.1×10^6	0.30
Floating Roof	Deck Plate (Copper)		R_d(cm)	t_d(cm)	$\rho_d g$(g/cm³)	E_d(kg/cm²)	ν_d
			13.5	0.01	8.9	1.2×10^6	0.34
	Pontoon		R_p(cm)	b_p(cm)	$\rho_p g$(g/cm³)	E_p(kg/cm²)	ν_p
			28.25	1.5	—	—	—
Ground (Chemical Grout)			D_g(cm)	V_s(m/sec)	ν_g		
			30	3.33	0.49		

表2—1　模型の諸元

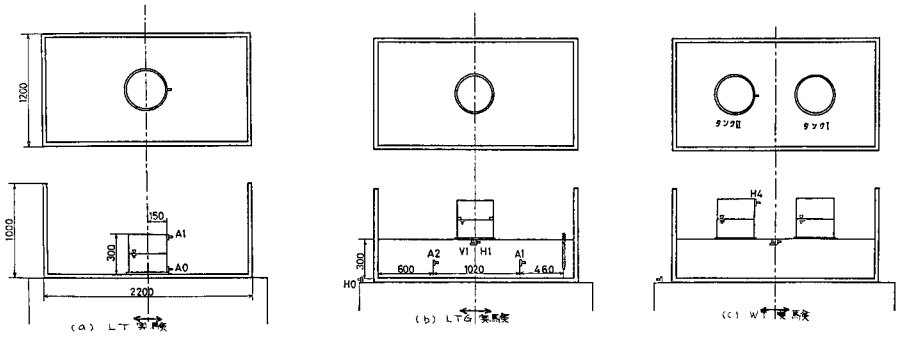

図２―１　実験概要図

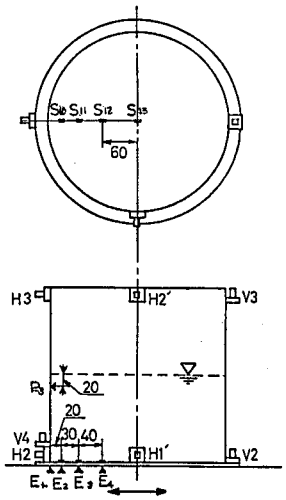

図２―２　ピックアップ設置図

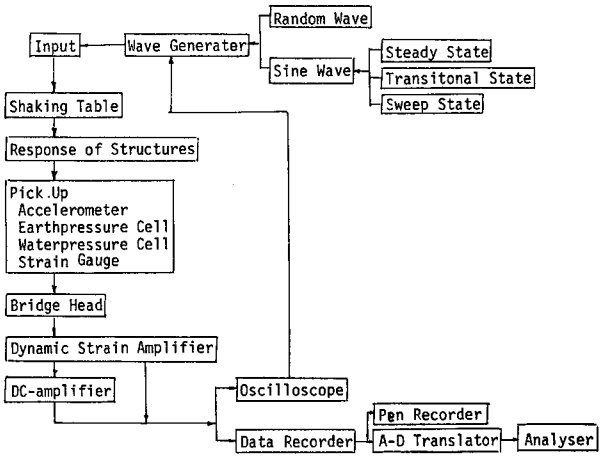

図２―３　測定流れ図

表―２　実験の種類

	呼称		目的	実験概要
I	シリーズ タンク	T 実験	タンク本体の動特性	中空模型タンクのみに対する加振
		L T 実験	液体―タンクの動的相互作用	液体貯蔵模型タンクに対する加振
II	シリーズ グランドタンク	G 実験	模型地盤の動特性	模型地盤のみに対する加振
		T G 実験	タンク―地盤の動的相互作用	模型地盤上に中空模型タンクを設置し、基盤加振
		L T G 実験	液体―タンク―地盤の動的相互作用	ＴＧ実験でタンクに液体を貯蔵した状態での加振
		F L TG実験	浮屋根―液体―タンク―地盤の動的相互作用	ＬＴＧ実験で浮屋根を設置した状態での加振
III	シリーズ ダブルタンク	W T D 実験	タンク相互間の動特性（距離の影響）	模型地盤上に２基のタンクを設置し、貯蔵水位一定条件下でタンク間距離が変化する時の加振
		W T H 実験	タンク相互の動特性（貯蔵液高の影響）	模型地盤上に２基のタンクを設置し、タンク間距離を一定で、貯蔵水位が変化する時の加振

スラブのひずみ S_{10}～S_{13}，底面反力 E_1～E_4，および動流体圧 P_3 である（図２―２）．実験値の処理は**図２―３**の流れにしたがって処理した．すなわち実験データは，すべてデータレコーダ（TEAC 社製 R-280 型，14ch）に記録した．また，データレコーダからの再生には，ペン書きレコーダ（渡辺測器，WTR211-6ch型）ならびにＡＤ変換器（TEAC 社製，DR-1000）によりディジタル磁気テープに記録し，これを電子計算機により処理を行った。

３．実　験　結　果

３．１　模型地盤の材料特性に対する結果

模型地盤の材料特性は，板たたき法によって求めた（表３―１）．結果は，ポアソン比に対してほぼ妥当な値を得ているが，弾性定数は静的載荷試験の結果の値より小さな値となっている．だが，静的載荷による結果には，サンプル等の成形にかなり問題を残しているので，以後の実験の検討に対しては，板たたき法による弾性定数を用いることとした．

３．２　振動箱内の模型地盤の動特性に関する結果

振動箱内に打設された模型地盤の動特性は，模型地盤のみを水平定常正弦波加振し，中央部の加速度計 H_1，V_1 の応答量で検討した．**図３―１**は，水平（○印）および鉛直（●印）の加速度応答倍率 H_1/H_0，V_1/H_0 を図示したものである．図の結果より，水平および鉛直成分によってそれぞれ振動特性が異っており，水平成分で４，６，11Hz に顕著なピークを示し，鉛直成分は７，13，24Hz の付近にピークを示していた。

図３―１の振動特性を検討するため，**表３―１**の材料定数を用いて，３次元にＦＥＭ（要素数128，節点数198）の固有値解析を行った．その結果，表面中央の水平成分が卓越する固有モードと鉛直成分が卓越する固有モードを**図３―２**(a)(b)に図示した．また**表３―２**には，それぞれの成分の１～５次までの固有振動数を示した．３次元ＦＥＭの結果と実験結果とは，ほぼよい対応を示していたが，ＦＥＭの結果では６Hz付近は水平より鉛直の成分の方が卓越する結果を示している．

３．３　貯蔵液体の動特性に関する結果

模型タンク内の貯蔵液体の動挙動は，タンク底面スラブが固定された状態で加振し，動流体圧で検討した．**図３―３**は，貯蔵液体のスロッシング共振（1.7Hz）を中心にその応答倍率を図示したものである．なお，図は５Hz までの結果しか示されていないが，30Hz まで加振した結果でも 5～30Hz でほぼ一定の応答を示していた．図の結果は，スロッシング振動数付近で大きなピークを示しているが，少しばらつきがみられる．さらに，タンクシェルとの相互作用による振動圧の影響は，本実験では顕著な応答として認められなかった．

図３―４は，入力加速度を 100gal と設定し，1.7Hz と5Hz の加振による分布図である．図中には破線で静液圧も図示してある．図の結果よりスロッシング共振時には底面での静液圧にも動液圧が達しており，液面はタンク側面より溢れ出しているのがわかる．実際の地動は，定常正弦波のような持続した加振でなく，近似的は２～３波共振程度であるが，スロッシング共

		Static Test	Dynamic Test
Young Modulus E (g/cm²)		400	333
Poisson's Ratio ν		0.41	0.49
Velocity	P-Wave Vp (m/sec)	9.65	21.8
	S-Wave Vs (m/sec)	3.77	3.31

表３―１　模型地盤の材料定数

Storage Liquid	Ground Model		Empty Tank			Liquid-filled Tank	
	Horizontal	Vertical	Methods		Frequency	Methods	Frequency
1.7022	4.0125	5.8092	Veletsos Yang		1106	Veletsos Yang	168.4
	5.5403	6.9247					
	8.5462	9.3616	Iijima Hagiwara		1181	Iijima Hagiwara	199.5
	9.4735	9.5718					
	9.6106	10.2610	Dym	f_1	1461	Sakai Sakoda Ogawa	211.9
				f_A	1797		
				f_B	3857		

表３―２　固有振動数（Hz）

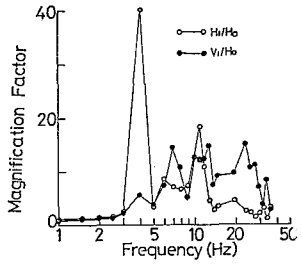

図3—1　G実験の加速度応答倍率

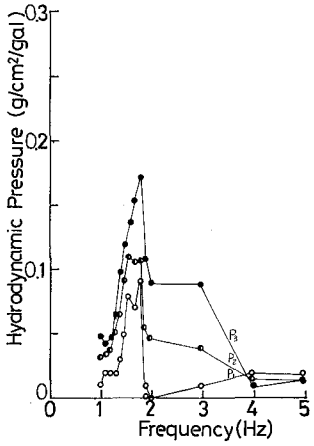

図3—3　動流体圧応答倍率

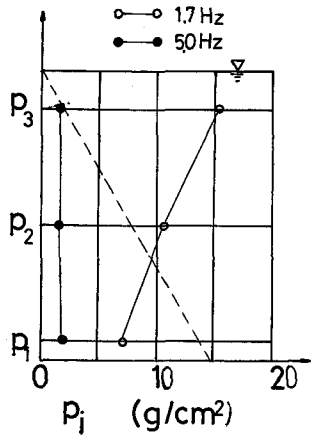

図3—4　動流体圧分布

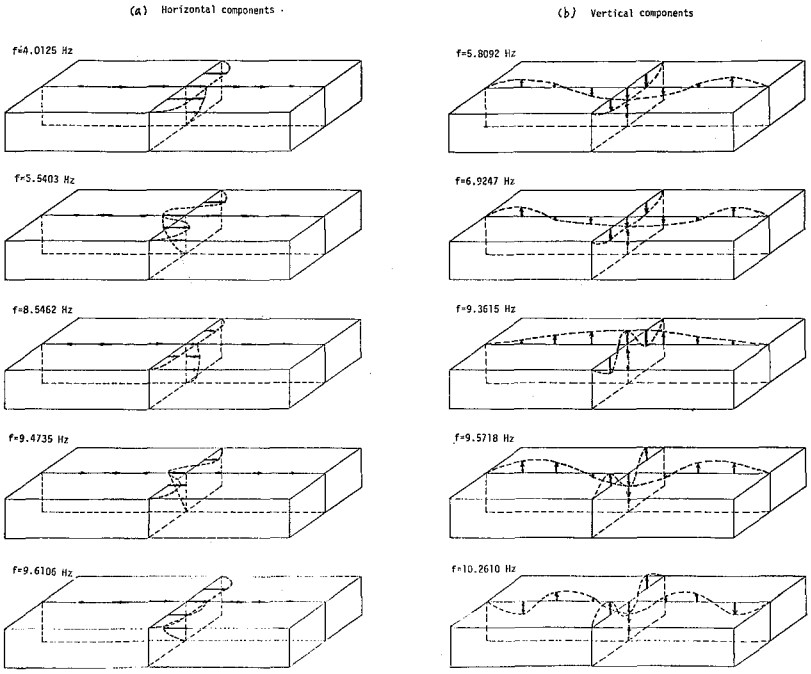

図3—2　模型地盤の固有値解析

振時には相当の液面動揺が生じ，これらによるタンク全体の安定に大きな影響を占めるのがわかる．

3．4　模型タンクの動特性に関する結果

タンク全体の動挙動を把握するために，タンク側板下部と頂部との加速度計を設け，その応答倍率を図示したのが**図3—5**である．結果は，液体がタンクにある場合も無い場合も振動数に対してもほぼ一定の応答を示しているのがわかる．このことは，表3—2に示しているように空タンクに対する固有振動数は約1100Hz以上にあり，液体貯蔵タンクに対しては約160Hz以上にあり，タンク全体としての応答はほぼ剛体的な挙動を示している．

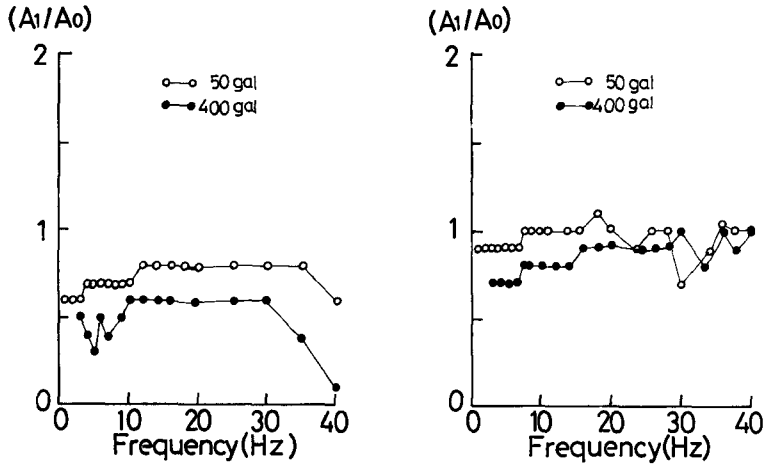

図3—5　タンクシリーズの加速度応答倍率

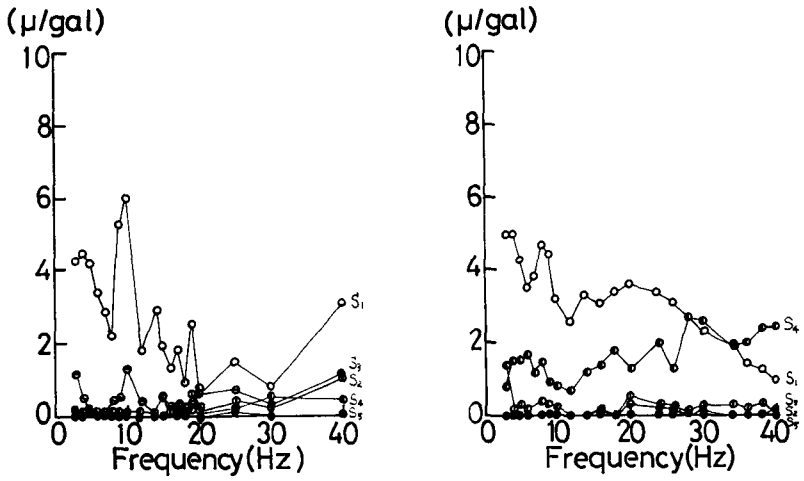

図3—6　タンクシェルの動ひずみ応答

つぎに，タンクシェルのひずみの動的挙動を検討してみる．**図3—6**(a)，(b)は，T，LT実験に対する単位入力加速度あたりのひずみの応答倍率であるが，この結果は，**図3—5**の加速度応答倍率の場合と異っており，S_1 は特に 2Hz 付近から順次高次振動数にピークをもつ応答を示している．このことは，本実験でひずみは生じているが，加速度成分として，その影響は認められない測定量となっていたことを示す．したがって本模型では，加速度成分でタンク挙動を把握する場合，タンクシェルの振動特性を考慮せず取扱ってもよいと考えられる．

3．5　液体—タンク—地盤系の動特性に関する結果

地盤上の液体貯蔵タンクの動挙動は，加速度成分，動液圧，ひずみ，地盤反力等によって検討されたが，ここでは加速度成分のみを取上げる．地盤上のタンク挙動を示す加速度分布は，**図3—7**のような応答倍率の形で示した．(a)図は，貯蔵液体のスロッシング振動数付近の結果であり，図(b)～(d)は地盤の卓越振動数での加振結果である．いま，H_3/H_2 の比の大きさよりタンク全体に作用する転倒モーメントの大きさを推定すれば，表3—3のようにいずれも相当大きな値となっており，また V_3/V_2 の比の値がほぼ0.9に近い値をとっていることは，タンクの回転中心が，底面スラブ近くで中心軸を中心から少し偏心していることを示していると考え

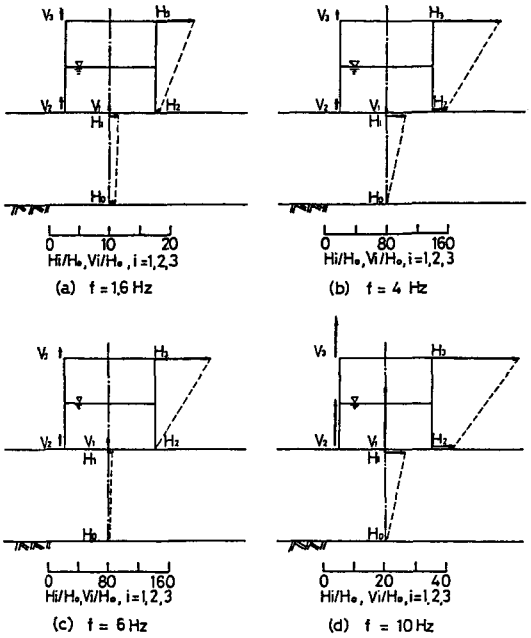

図３－７　ＬＴＧ実験の加速度分布

Freq. (Hz)	H_3/H_2	$(H_2-H_1)/H_1$	V_3/V_2
10	3.56	0.097	0.895
6	26.57	-0.321	0.901
4	4.38	-0.192	0.849
1.6	6.22	-0.231	0.948

表３－３　ＬＴＧ実験の応答倍率

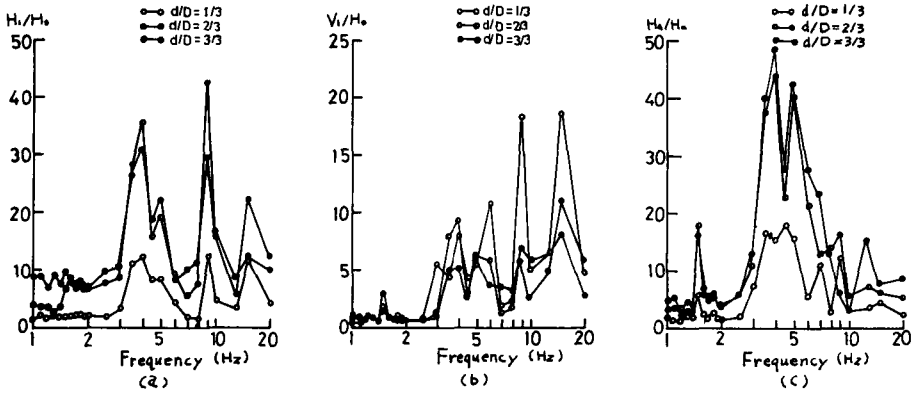

図３－８　ＷＴＤ実験の加速度応答倍率

られる．このことは，側板下部付近では浮き上りの生じる可能性が大きく非線形挙動となる．一方，タンクと地盤との並進によるずれの度合が $(H_2-H_1)/H_1$ によって評価すると表３－３のようになり，地面と底面スラブとのすべりは大きくないが，少し生じていると考えられる．

３．６　ダブルタンクの動的挙動に対する結果

まず，タンク間距離による動的挙動について調べる．図３－８(a)，(b)は，２基のタンクにはさまれた中央地表面での水平鉛直加速度の応答倍率 H_1/H_0, V_1/H_0 への影響について示したものである．図から，タンク間の距離の影響は，タンク径の⅓と⅔で大きく異なる．水平成分の場合，タンク間距離が短い（⅓）方が応答は小さくなる傾向をもち，鉛直成分の場合は逆に大きくなる傾向をもっている．図３－８(c)は，タンク頂部の水平方向の応答倍率 H_4/H_0 の結果

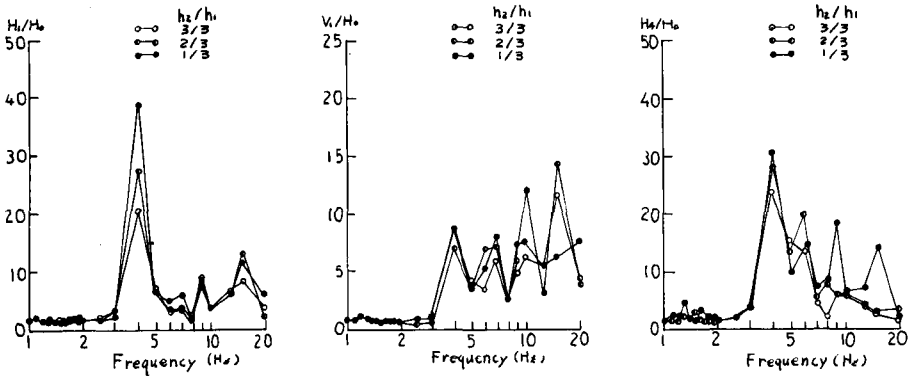

図3－9　ＷＴＨ実験の加速度応答倍率

である．応答の傾向は，地盤上の水平成分と似た動特性を示しており，タンク間距離が短かくなると水平応答はお互いに押えようとする傾向を示している．

つぎにタンクⅡ内の液位の変化による動的挙動の影響について地動水平・鉛直加速度の応答を図示したのが，**図3－10**(a)，(b)のような結果となった．地動水平の卓越振動数における応答は，タンクⅠとⅡの液高比 h_2/h_1 が⅓から⅔に上がると下がる傾向にあるが，鉛直動については明確な傾向は認められなかった．

4．あ　と　が　き

本研究では，液体貯蔵円筒形タンクの基礎的な動的現象について実験的に取扱った．その結果，つぎのようなことがわかった．

(1)タンク側板に作用する動液圧は，スロッシング現象による変動が最も大きい．

(2)模型製作上の制約にもよるが，タンクシェルの挙動は，振動特性をもつが，タンク全体の挙動は，剛体的な動きとして把握できる．

(3)模型地盤上にあるタンクの動挙動は，地盤の挙動に大きく支配され，地盤の卓越振動数時には転倒モーメントのためスラブとのはく離の生じる可能があり，またベースシャーによるすべりも少し見られる．

(4)２基のタンクにはさまれた地表面での動的応答は，タンク間距離がタンク径の⅓と⅔以上とで大きく異なり，水平成分では，タンク間距離が前者の場合応答を小さくし，鉛直成分では，逆に後者の場合が応答を小さくする．一方，タンクの液位を下げていくと，水平成分の応答は大きくなる傾向を示す．

(5)ダブルタンクのタンク頂部の応答でタンク間距離および液位の変化に対する影響は，地表中央の水平動の傾向に似ている．すなわち，２基のタンク間距離がタンク径の⅓程度になるとそれより離れたのと比べて水平応答を押えこむ傾向があり，一方液位が下がると水平動の応答を増す傾向にある．

以上の実験結果は，模型に対する相似律が満されていないため実際の耐震設計にそのまま適用できない．しかし，得られた結果に対する動的挙動は，耐震設計にある程度の参考資料となるものと思われる．

最後に，本実験は著者が昭和54年度内地留学先の京都大学防災研究所において行ったものである．ここに同研究所土岐憲三教授ならびに土岐研究室の諸兄に感謝する次第である．