

# 液体—構造物—地盤連成系の地震応答解析手法について

後藤 洋三 白 砂 健  
河村 秀紀 徳 永 正 博  
(本社 LNG 地下タンク) (本社 電子計算センター)  
プロジェクト・チーム

## On an Earthquake Response Analysis Method of Liquid-Structure-Ground Coupled System

Yozo Goto Takeshi Shirasuna  
Hideki Kawamura Masahiro Tokunaga

### Abstract

A computer program according to the finite element method which analyzes earthquake response of a liquid-structure-ground coupled system concerning the axisymmetric and anti-axisymmetric oscillation of an axisymmetric rotating body was developed. The micro-amplitude wave theory and the potential theory formulate the liquid oscillation, and the transmitting boundary and the viscous boundary are used for side and bottom boundaries of the ground respectively to simulate the infinite extension effects of the ground. This program may be applied in analyzing some kinds of tanks, offshore structures and reactor containers, and is effective in the case of a structure having the interactions of liquid and ground. A case study on an underground LNG tank shows that the existence of liquid has little influence on the sectional forces of the side wall, and it is brought to light that the liquid is adequately modeled by the fixed liquid concept of Housner and others.

### 概 要

軸対称回転体の軸対称と非軸対称振動を対象とした、有限要素法による液体—構造物—地盤連成系の地震応答解析プログラムを開発した。液体は微小振幅波理論とポテンシャル理論により定式化されており、構造物との連成振動が厳密に考慮できる。また、地盤の側方境界にはエネルギー伝達境界 (Transmitting Boundary) が、下方境界には粘性境界が用意されており、地盤は半無限の広がりをもつものとしてモデル化される。このプログラムは各種タンク類、海洋構造物、原子力格納容器などの解析に適用できるが、液体ならびに地盤との相互作用を有する構造物の解析に有効な手段となる。LNG の地下式貯槽について試算を行なったところ、液体の有無が側壁の発生断面力に与える影響は小さく、LNG 地下式貯槽躯体の応答を検討する際には液体を Housner などの固定水の概念でモデル化し、その慣性力の影響のみを考慮すれば十分であることが示された。

## 1. まえがき

原油や LNG などの大規模なエネルギー貯蔵施設はその重要度の大きさから高度な耐震性を保有しなければならず、経済設計のためには精度の高い詳細な耐震計算が必要である。また、油水置換方式や内部隔壁方式などの新形式の貯槽を開発していくためには、それらの動特性を解明し、地震時の挙動を予測していかねばならない。

大規模な貯槽は、動力学的には液体と貯槽躯体及びそれらを支持する地盤の連成系であり、各系間の相互作用が貯槽の地震応答に大きな影響を持つ場合もあると考えられる。そのため、液体—構造物—地盤 3 系の連成振動を解析し、地震応答を忠実にシミュレーションできる計

算手法が必要となる。

このような必要性に答えるべく、著者らは ABLE-1 と名付けた有限要素法による動的解析プログラムを開発してきた。

本報告では最初に ABLE-1 の概要について述べ、次に試算結果を示し、液体の応答とその影響について考察する。

## 2. ABLE-1 の概要

### 2.1. 基本的特徴

ABLE-1 の特徴は次の様に要約される。

(1) 解析モデルは軸対称回転体で、上下動入力を対象とした軸対称振動 (0 次応答) と、水平動入力を対象と

した非軸対称振動（1次応答）が解析できる。

(2) 液体は非圧縮完全流体とし、自由表面は微小振幅波理論、内部はポテンシャル理論により定式化を行ない、有限要素法により離散化している。密度の異なる多層の液体も考慮できる。

(3) 貯槽躯体は回転体シェル要素でモデル化され、二重シェル、隔壁構造が考慮できる。シェル要素以外に曲げせん断梁要素も用意されている。

(4) 地盤は回転体ソリッド要素でモデル化している。地盤の側方と下方への広がりを考慮するために、Lysmerらが提案した粘性境界 (Viscous Boundary) を下方に、Waas, Kausel<sup>2),7),8)</sup> が提案したエネルギー伝達境界 (Energy Transmitting Boundary) を側方に導入している。

(5) 杭基礎がある場合は多重の異方性シェル要素でモデル化できる。

(6) 液体には粘性減衰を、躯体と地盤には粘性減衰と複素剛性を用いた履歴減衰を適用している。

(7) 解析は線形域に限定している。応答計算は振動数領域で行ない、時間領域と振動数領域の橋渡しは FFT と逆 FFT の演算によって行っている。

(8) 振動数領域での計算時間を短縮するため、糸全体の振動数特性を考慮して計算する振動数の範囲を限定し、かつ計算点をスキップする手法を導入している。補間は FLUSH<sup>3)</sup> で用いられている逆数補間法によって行っている。

(9) 大行列の解は Irons<sup>4)</sup> が提案した Wave Front 法を複素数領域まで拡張した手法により求めている。

## 2.2. 特徴的な基礎理論について

### (1) 液体の扱い

液体は非圧縮完全流体とし、微小振幅波理論によるベルヌーイの式と、速度ポテンシャル理論からその応答は次の様に定式化される。座標系は相対座標系である。

$$\begin{aligned} & \text{液体 (I)} \\ & \Delta^2 \phi_1 = 0 \quad \dots \\ & p_1 = \rho_1 \dot{\phi}_1 - \rho_1 \dot{u}_{gx} \chi \\ & \rho_1 g \eta_1 = \rho_1 \dot{\phi}_1 + \mu \phi_1 - p_a - \rho_1 \dot{u}_{gx} \chi \dots (1) \\ & \rho_1 g \eta_2 = \rho_1 \dot{\phi}_1 + \mu \phi_1 - p_1 - \rho_1 \dot{u}_{gx} \chi \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{液体 (II)} \\ & \Delta^2 \phi_2 = 0 \quad \dots \\ & p_2 = \rho_2 \dot{\phi}_2 - \rho_2 \dot{u}_{gx} \chi \\ & \rho_1 g \eta_3 = \rho_2 \dot{\phi}_2 + \mu \phi_2 - p_2 - \rho_2 \dot{u}_{gx} \chi \dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ : 液面変位  
 $\phi_1, \phi_2$ : 速度ポテンシャル  
 $p_a$ : 大気圧 (=0)  
 $p_1, p_2$ : 液体 (I), (II) の液圧  
 $\mu$ : 粘性減衰系数

$\ddot{u}_{gx}$ : 地震加速度  $x$  方向

$\rho_1, \rho_2$ : 液体の密度

液体 (I) と液体 (II) の接触面において、 $\eta_2 = \eta_3, p_1 = p_2$  が成立する。

以上の定式化のもとに変分原理を適用し、有限要素法による離散化を行なっている。液体要素節点の変数は、内部要素で  $\phi$  と  $p$  であり、自由表面では  $\phi$  と  $\eta$  となる。

### (2) 液体と躯体の相互作用の扱い

液体と躯体の間にはシェル面に対して法線方向にのみ釣合条件と連続条件が成立する。これを定式化すると次のようになり、離散化して相互作用要素として導入している。

$$\dot{\bar{w}} = \phi, n \quad \dots (4)$$

$$p n = f \quad \dots (5)$$

ここで、 $\bar{w}$ : シェルに垂直方向への変位

$n$ : シェルから流体内部に向かう単位法線ベクトル

$f$ : 流体からシェルに作用する力のベクトル

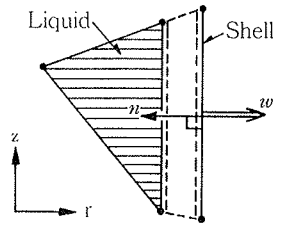


図-1 相互作用要素

### (3) 地盤の側方境界の扱い

有限要素法を適用する限り、本来半無限である地盤に境界を設定することは避けられず、その影響が解析の精度を左右することはよく知られている。そこで ABLE-1 では地盤の下方境界に対して粘性境界を、側方境界に対しては以下に概説するエネルギー伝達境界を適用し、精度の向上を計っている。

図-2 は内部の加振点から波が伝播していく様子を示したものである。側方の半無限地盤には加振方向に Rayleigh 波が、加振直角方向に Love 波が伝播する。水平方向に一樣な地盤を考え、円筒座標で記述した波動方程式を薄層要素法によって離散化し、剛基礎の条件を導入することによってこれらの表面波に対するモード解析が可能となる。内部から側方境界に達した波動はこれらのモードで展開された上で無限遠方まで運搬されることにな

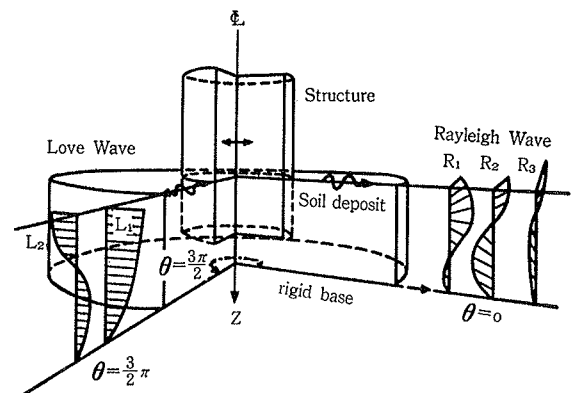


図-2 波動の逸散状況

るが、その際の反力が境界面に作用することになる。境界面で作用する力を模式的に示したものが図-3である。それぞれの作用力は次式で表わせる。

$$\{F\} = [G] \{u_f\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\{T\} = \{[R] + [L]\} \{\{u\} - \{u_f\}\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $\{F\}$ ：遠方地盤を単純せん断（1次応答の場合）あるいは単純引張（0次応答の場合）変形させるために境界面に作用させる力

$\{T\}$ ：エネルギー伝達力

$\{u_f\}$ ：下部から入射する地震波によって生じる遠方地盤の応答変位

$[G]$ ：遠方地盤の複素剛性

$[R]$ ：Rayleigh 波の伝播に対する複素剛性

$[L]$ ：Love 波の伝播に対する複素剛性

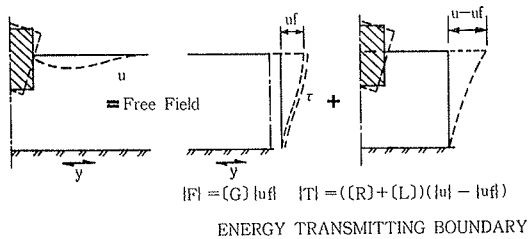


図-3 エネルギー伝達境界模式図

### 3. 数値計算例

以下に地下貯槽を対象とし、内容液の応答と、内容液の有無による躯体への影響について検討した例を示す。

#### 3.1. 解析モデル

15万kl級のLNG地下貯槽を想定した。貯槽内径は70m、液深40m、側壁厚3m、底版厚5mである。図-4がその概念図と相定した地盤の状況を示したものである。地盤は沖積及び洪積の砂層とした。

有限要素法による数値モデル設定においては、側壁とドーム部分にシェル要素を、底版と地盤部分にソリッド要素を適用した。LNGの部分には液体要素を5m×5m

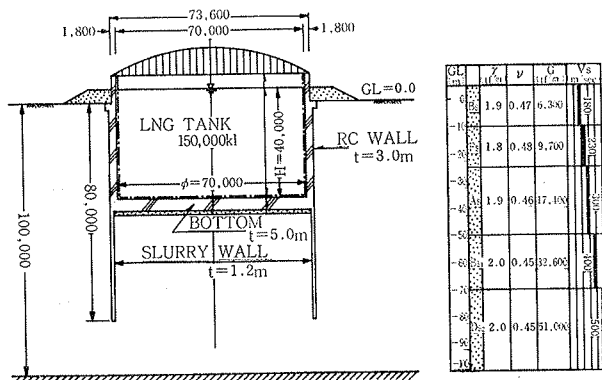


図-4 想定したLNG地下貯槽

メッシュの大きさで適用した。

モデル各部の材料定数を表-1に示す。地盤の定数はSHAKEによる予備解析結果を参考にして定められている。SHAKEにおける地盤定数と歪の関係式は岩崎らの提案カーブ（土研カーブ）を用いた。ABLE-1には等価線形化手法によって求めた定数を各層ごとに平滑化して入力している。液体の減衰は0.03%と仮定した。

#### 3.2. 解析方法

入力地震波としてはEl Centro 1940 NS波とHachinohe 1968 EW波を使用した。いずれも最大150galにスケーリングし、GL-100mを入力基盤面として水平入力を行なった。地震波データは $\Delta t=0.02$ 、 $n=2,048$ とした。振動数領域における計算ポイント数は1Hz以下を10分割、1~5Hzを10分割、5~10Hzを5分割、10~20Hzを5分割した計31ポイントとし、スキップされたポイントについては逆数補間法により求めている。20Hz以上の成分は地震応答に大きく影響しないと判断しゼロ応答とした。後述するスロッシングのみに着目した計算においては、液体の減衰が小さいことを考慮して0.05~0.3Hzの振動数領域については全ポイントについて計算を行なった。

#### 3.3. 解析結果

##### (1) スロッシング波高について

スロッシングの1次固有周期は8.9秒<sup>6)</sup>と概算されるので、その時刻歴波形を求めるには長時間の応答計算が必要となる。そこで時間きざみを0.06秒にとり、 $n=2,048$ とし、123秒間の応答を計算した。図-5は低次のスロッシングに注目するために、0.3Hz以上をゼロ応答として長周期成分のみで合成された波形を示したものである。図-6には計算に用いたHachinohe 1968 EW波を示した。図-5の液面動揺の時系列応答値はシェルに接している液面の昇降を示したもので、周期が約9秒の波形が現われており、1次のスロッシングが卓越して2次（5.1秒）、3次（4.1秒）の影響は小さいことが示される。一方応答値の最大波高は約38cmとなっており、

Material	$r$ (tf/m <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio	$G$ (tf/m <sup>2</sup> )	$h$
Concrete	2.4	0.167	$1.157 \times 10^8$	0.01
Liquid	0.5	—	—	0.0003
Steal	7.8	0.34	$7.830 \times 10^7$	0.02
Soil Bs	1.9	0.47	$1.836 \times 10^3$	0.18
Fs	1.8	0.48	$3.533 \times 10^3$	0.16
As	1.9	0.46	$9.250 \times 10^3$	0.12
Ds <sub>1</sub>	2.0	0.45	$1.960 \times 10^4$	0.10
Ds <sub>2</sub>	2.0	0.45	$3.253 \times 10^4$	0.08

表-1 モデル各部の材料定数

1次のスロッシングに対して三波共振法などから一般に計算される波高より桁違いに小さいことが注目される。この点を分析するために図-7に入力加速度波92秒間のフーリエスペクトルを示した。0.3 Hz以下の長周期成分が極めて小さく、それ故応答波高が小さくなったと考えられる。この入力波はM=7.9の巨大地震によるものであるがSMAC-B2型強震計で記録されており、長周期成分が欠落していると推定される。

より高い振動数域の応答による液面波高は次節に示す20 Hzまでを考慮した計算から約66 cm (Hachinohe波)と求められており、その影響は小さいと考えることができる。

(2) 躯体と地盤の応答について

の最大値を図-11~12に示す。円周方向軸力(Nt)と鉛

図-8は変位、加速度、動液圧の最大応答値分布を示したものである。躯体の変位、加速度応答は遠方地盤表

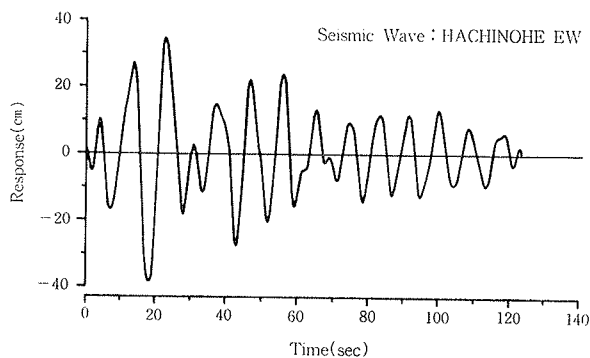


図-5 波面波高の時系列応答

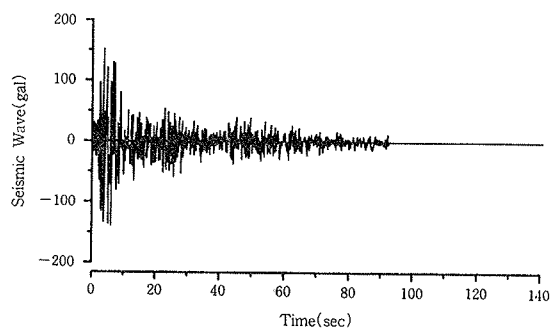


図-6 Hachinohe 地震波形

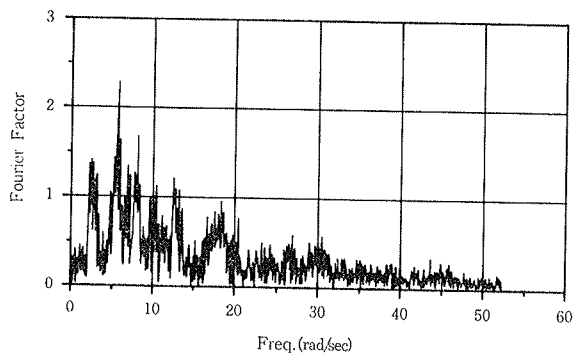


図-7 Hachinohe 波のフーリエスペクトル

層部の応答より小さく、その剛性によって周辺地盤の応答を拘束していることが理解される。

側壁に対する動液圧分布が上部に向って漸減している点が注目されるが、スロッシングの影響が小さく、液体の慣性力による衝撃圧が主となったためと考えられる。図中には Housner<sup>6)</sup> によって与えられた衝撃圧分布も合わせて示した。底板レベルでの加速度を外力として求めたものであり、側壁上部の加速度が大きくなっていることを考慮すれば、ABLE-1の結果とよく合っているとすることができる。このような傾向に加え側壁と周辺地盤の応答加速度がほぼ等しいことから、いわゆるバルジングの発生も認められない。

(3) 液体の有無の影響について

液体の有無により側壁に生じる断面力の比較を行なった。図-9は側壁中央部のシェル要素における伝達関数を示したもので、円周方向軸力成分(VV)、鉛直方向曲げ成分(TH)とも液体の有無による差は微小である。低い振動数領域に着目して伝達関数を求めたものを図-10に示す。満液時に $\omega=0.70$ 付近にピークがみられ空液時との差が生じている。この付近はスロッシングの1次固有振動数に相当する領域であり、スロッシングによって生じた差と考えられる。

Hachinohe 波に対して側壁シェルに発生した断面力直方向曲げモーメント(Mz)において、液体の有無による発生断面力の差は最大値に対してNtで3%, Mzで

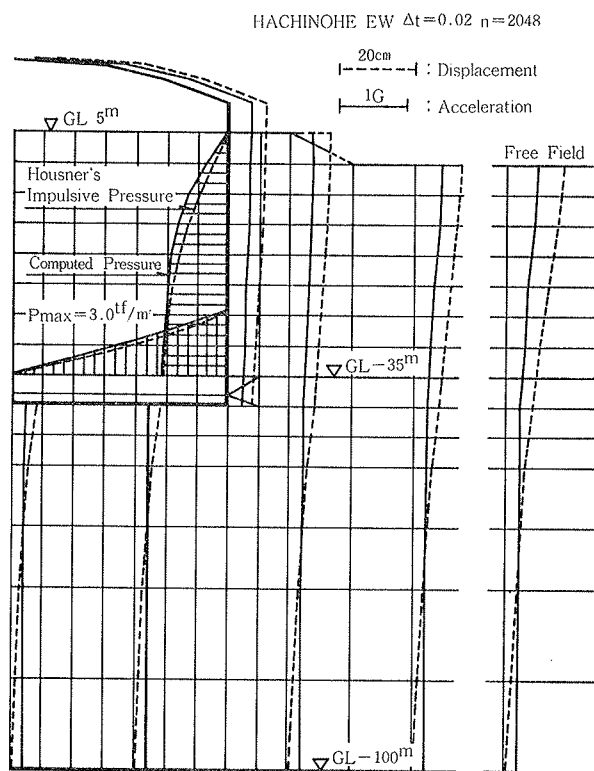


図-8 最大応答値 (Hachinohe)

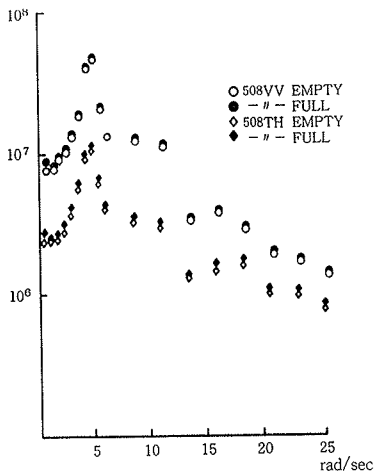


図-9

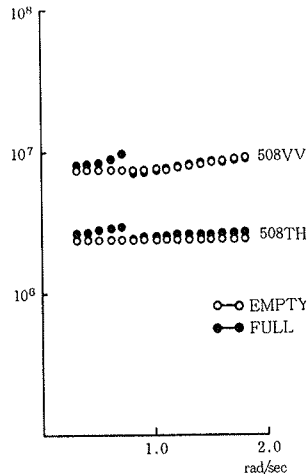


図-10

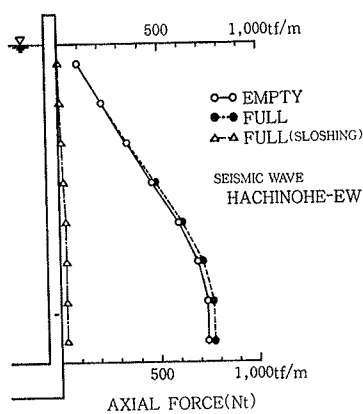


図-11

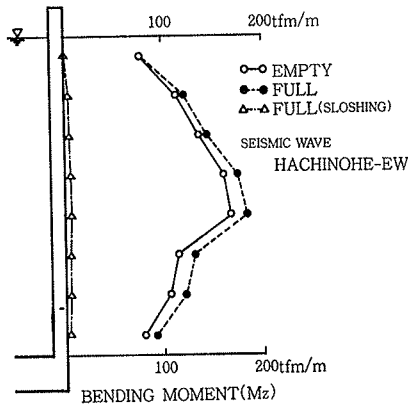


図-12

10%程度で全体からみれば有意な差はないと思われる。鉛直方向軸力は液の有無にかかわらずほぼ一致した。また、低次のスロッシングによる影響は今回の試計算では微少であった。El Centro の波に対しても同様の計算を行なったが液体の有無による差はさらに小さかった。

周波数応答と地震応答結果から、地震時における液体の有無による発生断面力の差は小さいことがわかった。Hachinohe 波が長周期成分を含んでいないため本検討はスロッシングによる影響を過小評価しているとしても、最大値の発生時刻の遅れを考慮すればスロッシングによる応力が側壁において支配的になるとは考え難い。このことから LNG 地下貯槽側壁の耐震設計を進める際は、液体について Housner らによる固定水の慣性力を考慮しておけば十分であると思われる。

#### 4. むすび

本報告は、新たに開発した液体—構造物—地盤連成系動的解析プログラム ABLE-1 の特徴と、基礎理論式について記し、LNG 地下貯槽を解析モデルとした試計算結果について検討した。ABLE-1 は軸対称構造物としてモ

デル化できる構造物であれば、いずれも解析対象となる。たとえば地下、地上の円筒貯槽、海洋構造物、原子力格納容器などに適用される。液体の応答の影響を検討するために行なった今回の試計算によれば、LNG 地下貯槽では地震時において液体の有無がその応答に及ぼす影響は小さいことが確認できた。

ABLE-1 の開発は技術研究所における研究活動<sup>7),8)</sup>と大型タンクに関する当社の設計技術の蓄積を礎としている。また、そのメインルーチンは当社技術開発委員会開発テーマ「LNG 地下タンク設計技術」の一環として製作された。ここに、多大な御指導をうけた LNG 地下タンクプロジェクトチーム、河野 彰部長、中村 靖課長、宇梶賢一課長、太田 順課長、ならびに技術研究所、安井 護副主任研究員に深謝の意を表し結びとした。

#### 参考文献

- 1) J. Lysmer, et al.: Finite Dynamic Model for Intinite Media, ASCE, EM4, (1969), pp. 859~877
- 2) E. Kausel: Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media, NSF Report PB 236~312, (1974)
- 3) J. Lysmer, et al.: FLUSH A Computer Problem for Approximate, 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problemes' EERC 75~30, (1975)
- 4) Irons: A Frontal Solution Problem for Finite Element Analysis' (1970), International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. II 5~32, pp. 5~32
- 5) 坂井, 他: 有限要素法による大型液体タンクの地震応答解析, 川崎技報, 59号, (1975), pp. 69~74
- 6) 柴田, 他: 液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol. 26, No. 7, (1977)
- 7) 中川, 他: 弾性表層上の基礎の上下振動に関する動的ばねについて, 大林組技術研究所報, No.17, (1978), pp. 30~34
- 8) 白砂: 逸散エネルギー算定による構造物—地盤連成系の減衰機構について, 大林組技術研究所報, No. 23, (1981), pp. 31~36