

# (10) 水中管群の衝突振動現象の解析

## —CANDU 炉 炉心の耐震解析—

武藤 清\*1 長田正至\*1 堀越清視\*1 福沢栄治\*1 ○源栄正人\*1  
黒田 孝\*2 村上 元\*2 水越 薫\*2

### I 序

CANDU (CANada Deuterium and Uranium) 炉はカナダで開発された原子炉で、天然ウランを燃料とし、減速材に重水を使用する圧力管型重水炉である。600MWe 原子炉炉心の主要な構成要素は、重水減速材で満たされた横置円筒形のカランドリアタンクの内部に、それと平行に一定の格子間隔をもって配列された合計380本のカランドリア管・圧力管集合体（以下、圧力管という）及びこれらと直交する制御棒案内管（以下、案内管という）等の反応度制御装置からなっている（図1）。

この炉心部の耐震性について種々の面からの検討を重ねてきたが、その1つとして1977～78年には $1/5$ 縮尺炉心2分割模型を用いて、地震時における制御棒の挿入性と水中における圧力管と案内管の衝突を伴う水中振動現象を実験的に追跡した。1) 2)

本論文はこの $1/5$ 縮尺実験の主要な結果を紹介するとともに、このような水中管群の衝突振動挙動を解析するために新たに開発した解析コード“PICOL”について示し、この解析コードを実験模型に適用したときの結果について述べるものである。

### II 1/5 縮尺炉心2分割模型試験

本試験については文献1)に詳述してあるが、その概要を以下に再掲する。

#### 1. 試験および試験体の概要

試験体は $1/5$ 縮尺炉心2分割模型であり、写真1に示すように炉心内部の様子を外から見えるようにするため炉心を半分に切り、その切断面をガラス張りとして主要な振動要素をほぼ実物通りにレイアウトした。すなわち、振動台上に設置した原子炉遮蔽水槽を模擬した支持フレームの中に円筒形のカランドリアタンクを置き、支持フレームの頂部に制御棒駆動装置を取付けた。またカランドリアタンクの中には、重水のかわりに普通の水をいっぱい満たし、

380本の圧力管を片持ちばりとして格子状に並べ、垂直方向に制御棒が中を落下するための案内管13本とその他の制御系配管を実物通りの配列に従って配置した。

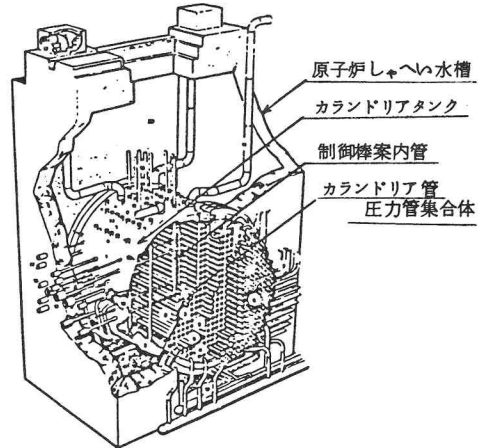


図1 CANDU 炉600 MWeの炉心構造

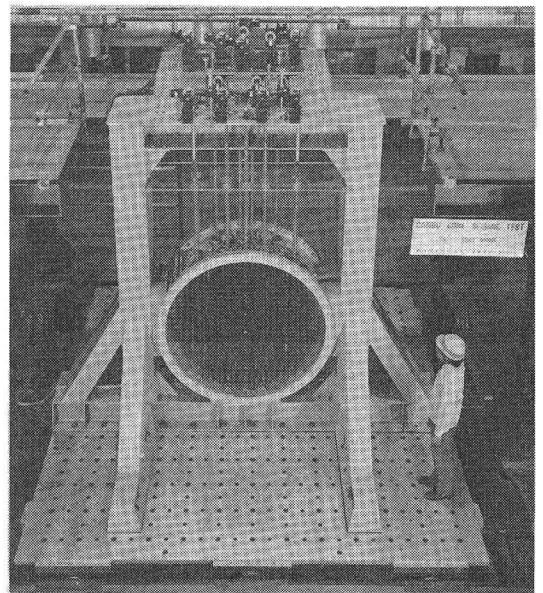


写真1  $1/5$ 縮尺炉心2分割模型

\*1 株式会社武藤構造力学研究所 \*2 電源開発株式会社

この圧力管は実物は両端支持であるが、半長の片持ちばりとして、密度、1次固有振動数、減衰を相似則にあうように調整した。すなわち、心棒はステンレス製の中空の管とし、これに鉛のテープを幾重にも巻きその外側をゴムで所定の外径に仕上げた。

一方、案内管はアクリル製とし、約3000個の円孔を実物通りに設け、固有振動数を相似則に合うようにした。

測定は、特定の圧力管の先端部分及び特定の案内管の中央部分に加速度計を取り付けて行っている。なお、振動台への入力には正弦波入力及びランダム波入力を実施している。

## 2. 試験結果

正弦波入力に対する試験結果の概要を以下に示す。

### (1) 管の振動特性

図2及び図3には圧力管と案内管の水中における共振曲線を空中における共振曲線と比較してそれぞれ示す。

これらによると、圧力管は水中でもさほど減衰は増大せず明瞭な共振現象を示すのに対し、多数の円孔を有する案内管は水中では減衰が著しく増大し、目立った共振現象を示さないことがわかる。

### (2) 水中における管群の衝突現象

正弦波加振に対しスイッチング実験を行うと、衝突は圧力管の共振振動数13.7Hzにおいて最も生じやすいことがわかった。

図4は圧力管の共振振動数13.7Hzにおいて入力加速度レベルを変化させたときの、カランドリアタンク中央部における圧力管先端の変位を加速度観測記録より換算して示したものである。図中には圧力管だけを残し、案内管を取り除いた状態で加振した衝突なしの場合も比較のために示した。これを見ると、案内管との衝突によってタンク中央部の圧力管の変位は衝突なしの場合より押えられることがわかる。

図5は、図4と同様に正弦波13.7Hz加振時のタンク中央における最も長い案内管の中央部の変位を実配列の衝突ありの場合と、タンク内に案内管だけをおいて加振した衝突なしの場合と比較して示したものである。これを見ると案内管の変位は圧力管とは異なり衝突によってかなり増大することがわかる。

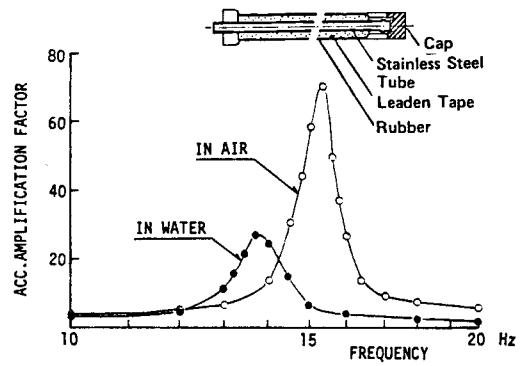


図2 圧力管の共振曲線

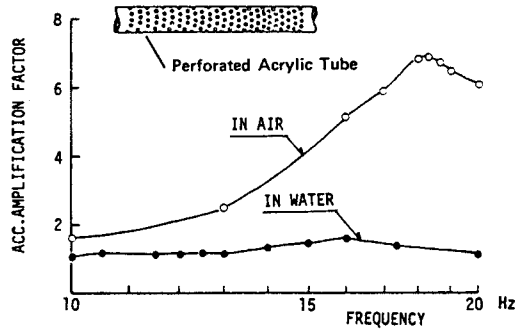


図3 案内管の共振曲線

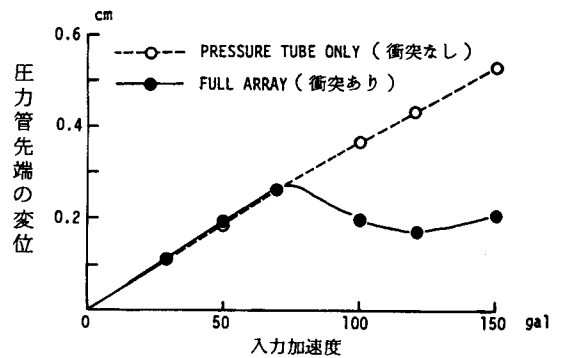


図4 入力加速度と圧力管先端の変位(13.7Hz加振)

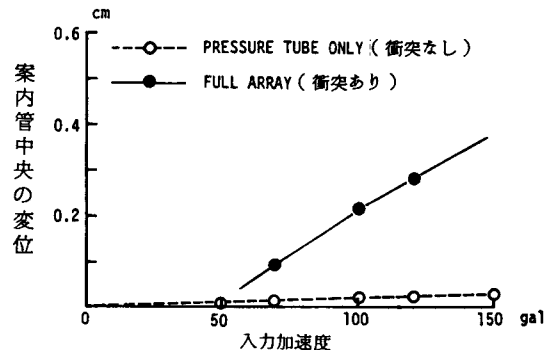


図5 入力加速度と案内管中央の変位(13.7Hz加振)

### III 解析コードPICOL

#### 1. PICOLの特徴

カランドリアタンク内の圧力管と案内管を対象にして、タンク位置強制入力による水中における相互の衝突現象を解析し得るコードを開発した。

この解析コードは配管を多質点曲げせん断棒とし、空中及び水中における固有値解析及び衝突を伴う配管の応答を時刻歴直接積分法によって解析するというものである。この解析コードの最も大きな特徴は、振動中に配管同士が衝突するときには、衝突する質点相互間に衝突理論を適用している点である。

#### 2. 解析上の仮定

**仮定 1.** カランドリアタンクは剛体であると仮定し、タンクのどの位置においても加速度は同一とする。従って案内管と圧力管の支持点には同一の水平加速度を入力するものとする。

**仮定 2.** 密閉されているタンク内の水はタンクと同じ動きをするものとし、案内管と圧力管はタンク内の水をかき分けて振動するものとする。

**仮定 3.** 圧力管と案内管のもつ減衰は歪エネルギー比例型減衰理論によるものとする。

**仮定 4.** 水中における圧力管と案内管の減衰は前記の減衰に加えて水との相対速度に比例する減衰を考慮し、さらにこれらの配管群は水との相対加速度に比例する抵抗力（付加質量による減衰力）を受けるものとする。

**仮定 5.** 水中における圧力管と案内管の衝突は反発係数に基づく衝突理論によるものとする。すなわち、衝突は瞬時に終了するものとし、運動量保存則と反発係数の関係式を用いて、衝突直前の速度と質量より衝突直後の速度を算定するものである。このとき、衝突する2質点の質量としてはそれぞれ管の自重と水の付加質量を加算した合計質量を用いるものとする。

#### 3. 解析式

(1) 水中における圧力管と案内管の運動方程式

仮定1～仮定4に基づき、水中における圧力管と案内管の運動方程式を次のように表わす<sup>3)</sup>。

$$([M]+[Me])\{\ddot{x}\}+([Ca]+[Cw])\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=-[M]\ddot{y}_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ ；管の各点のタンク(水)に対する相対加速度、相対速度、相対変位の各ベクトル

$y_0$ ；タンク位置の入力加速度

$[M]$ ；管の質量マトリックス

$[Me]$ ；水の付加質量マトリックス

$[Ca]$ ；管自体のもつ材料減衰マトリックス（歪エネルギー比例型減衰マトリックス）

$[Cw]$ ；水による管の外部減衰マトリックス

$[K]$ ；管の剛性マトリックス

#### (2) 衝突の基本式

仮定5より、図6に示すような任意の圧力管（曲げせん断棒S）の $l$ 点と案内管（曲げせん断棒 $r$ ）の $k$ 点が衝突するときの衝突前後の $k$ 点及び $l$ 点の速度は(2)および(3)式の関係式を満足する。

$${}_s m_l {}_s v_l + {}_r m_k {}_r v_k = {}_s m_l {}_s \tilde{v}_l + {}_r m_k {}_r \tilde{v}_k \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{{}_s \tilde{v}_l - {}_r \tilde{v}_k}{{}_s v_l - {}_r v_k} = -e \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに

${}_s m_l$ 、 ${}_r m_k$ ；それぞれ $l$ 点および $k$ 点の水の付加質量も含む合計質量

${}_s v_l$ 、 ${}_r v_k$ ；それぞれ曲げせん断棒Sの $l$ 点および曲げせん断棒 $r$ の $k$ 点の衝突直前の絶対速度

${}_s \tilde{v}_l$ 、 ${}_r \tilde{v}_k$ ；それぞれ曲げせん断棒Sの $l$ 点および曲げせん断棒 $r$ の $k$ 点の衝突直後の絶対速度

$e$ ；反発係数

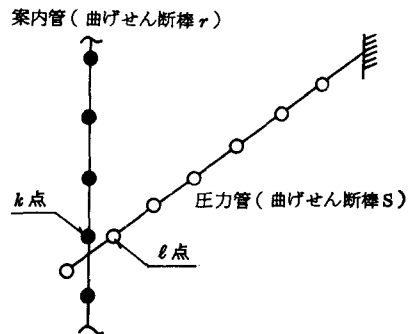


図6 圧力管と案内管の衝突点

(2)式及び(3)式より、圧力管及び案内管の衝突直後の衝突点の速度  $s\tilde{v}_l$ 、 $r\tilde{v}_k$  は、衝突直前の速度を用いて次式で表わされる。

$$s\tilde{v}_l = s v_l - \frac{r m_k}{s m_l + r m_k} (1 + e) (s v_l - r v_k) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$r\tilde{v}_k = r v_k + \frac{s m_l}{s m_l + r m_k} (1 + e) (s v_l - r v_k) \quad \dots\dots\dots(5)$$

(3) 衝突の判定

図7に示す左側の曲げせん断棒  $r$  の  $k$  点と右側の曲げせん断棒  $S$  の  $l$  点は、以下の(6)式と(7)式を同時に満足したとき衝突と判定する。

$$s v_l - r v_k < 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$s x_l - r x_k \leq -\delta \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに  $s v_l$ 、 $r v_k$  ; 衝突点の速度

$s x_l$ 、 $r x_k$  ; 衝突点の変位

$\delta$  ; 衝突する管相互のクリアランス

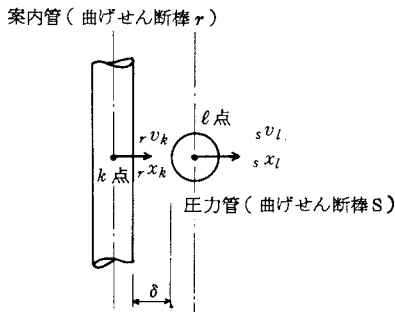


図7 衝突判定のための記号

(4) 解析の実行

本解析コードのフローチャートを図8に示す。すなわち、インプットデータの読みこみ後まず空中の固有値解析を行い、材料減衰マトリックス[Ca]を作成する。次に水中での固有値解析を実施し、水中での減衰マトリックス([Ca]+[Cw])を作成する。

タンク入力に対する各時刻の応答は、(1)式の運動方程式を台形則を用いてステップ・バイ・ステップの計算によって求める。この場合、圧力管および案内管の各点が衝突条件式(6)および(7)式を同時に満足して衝突と判定した場合には、(4)および(5)式を用いて衝突直前の速度より衝突直後の速度を求め、この衝突直後の速度を次のステップの応答を求めるための速度とするものである。この応答解析の終了後、最大応答値および応答時刻歴の打ち出しを行なう。

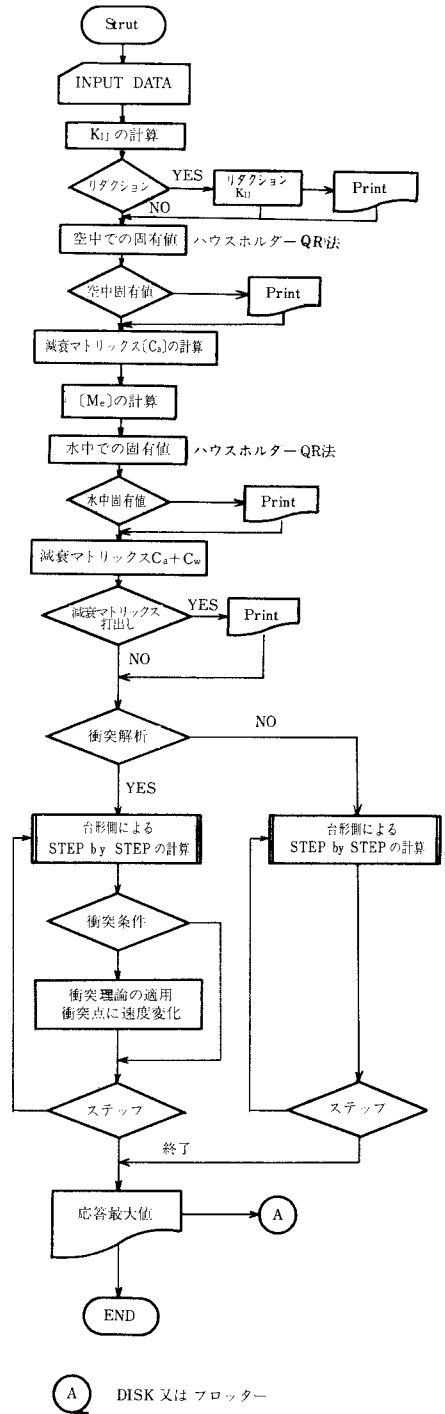


図8 解析のフローチャート

#### N 解析コードの1/5縮尺模型実験への適用

##### 1. 解析モデル

解析コード「PICOL」の1/5縮尺模型実験への適用にあたっては、図9に示すようにカランドリアタンク中央の最も長い案内管とその両側の44本の圧力管を解析対象とし、図10に示すようにモデル化した。すなわち、44本の圧力管をそれぞれ7質点の一端固定の曲げせん断棒に、案内管を26質点の両端固定の曲げせん断棒に置換した。その場合、衝突点は圧力管では先端から2番目の質点とし、案内管では両端の2質点ずつの計4質点を除く22質点がその左右の圧力管と衝突可能な点とした。

圧力管及び案内管のインプットデータを表1に示す。ここで、44本の圧力管はすべて同一の特性を有するものと仮定した。また各管の減衰定数は空中及び水中での共振曲線が実験値に近似するように定めた。この場合、圧力管の水中での減衰定数は、実測では0.02~0.04(平均値はほぼ0.03)の範囲でばらついていること及び、先端に加速度計を設置した図10に示す22番の圧力管の実測値が0.022と得られていることを考慮し、表1に示すように0.022と0.03の2種類を採用した。

圧力管と案内管の反発係数は空中における実測結果に基づき0.7とし、両管の間のクリアランスは、0.265cmとしている。

表1 圧力管と案内管のインプットデータ

諸元		管の種類	
		圧力管	案内管
外径 (cm)		2.44	2.75
長さ (cm)		59.4	154.0
曲げ剛性 ( $g \cdot cm^2$ )		$219.2 \times 10^6$	$18.41 \times 10^6$
単位長さ重量 (g/cm)	空中	22.9	1.2
	水中	28.6	3.65
付加質量係数		1.2	0.41
固有振動数 (Hz)	空中	15.3	18.3
	水中	13.7	10.5
減衰定数	①	空中	0.009
		水中	0.022
	②	空中	0.009
		水中	0.003

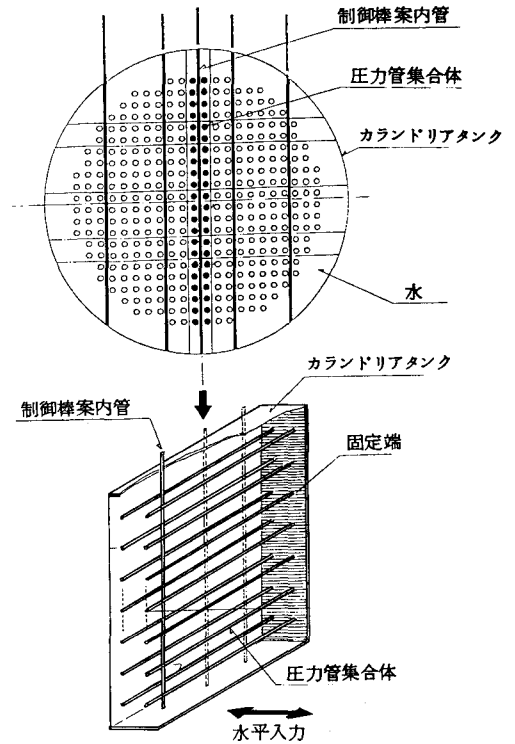


図9 1/5縮尺炉心2分割模型解析対象部分

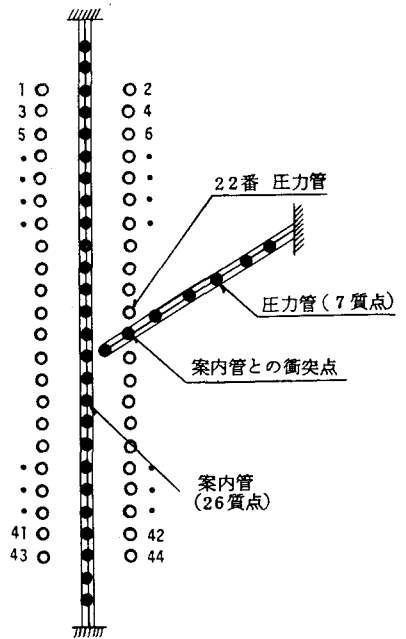


図10 解析モデル

## 2. 解析条件と解析ケース

解析ケースは、カランドリアタンクへの入力波の種類、入力レベル及び圧力管の水中の減衰定数(表1に示した2種類)をパラメータとして、表2に示す5ケースを設定した。入力波は正弦波とランダム波の2種類とした。この場合、正弦波の加振振動数は、IIで述べたように、圧力管と案内管の衝突が圧力管の共振振動数で最も生じやすいことから13.7Hzとした。またランダム波は $1/8$ 縮尺模型試験に用いた人工地震波に対する床応答波形に対応するもので、タンク位置での実測加速度記録をそのまま採用した。なお、この床応答波形は圧力管と案内管の衝突が生じやすくなるように特別厳しい条件での原子炉建屋の地震応答解析により求めたものである。

以上の正弦波およびランダム波入力に対する演算時間刻みは0.001秒、演算継続時間は3秒とした。

表2 解析ケースとパラメータ

ケース番号	入力波	入力振動数(Hz)	入力最大加速度(gal)	圧力管集合体の水中の減衰定数
1	正弦波	13.7	100	0.022
2	"	"	125	"
3	"	"	150	"
4	"	"	200	0.03
5	ランダム波	—	1634	"

## 3. 解析結果

### (1) 圧力管と案内管の衝突現象

圧力管と案内管の衝突現象をみるためにケース3の解析結果、すなわち正弦波13.7Hz、最大加速度150gal加振のときのタンク中央部における案内管とその両側の圧力管の衝突点の変位のタイムヒストリーを衝撃力積のタイムヒストリーとともに図11に示す。図中衝撃力積を表わすヒゲはその時刻において衝突していることを意味している。

これを見ると0.5秒以降で衝突が開始されると、案内管は両側の圧力管に叩かれて変位が大きくなるのに対して、両側の圧力管は図中破線で示した衝突なしのときの最大変位より若干小さくなっていることがわかる。

図12は図11の1秒付近における圧力管の変位及び衝撃力積を拡大して示したものである。

この図より、案内管は両側の圧力管に追いつけられながら交互に叩かれて、両管の間を振動している様子がよくわかる。また衝撃力積のタイムヒストリーにより圧力管と案内管の実際の1回の衝突現象が解析では、連続した複数回の衝突によって表現されていることがわかる。

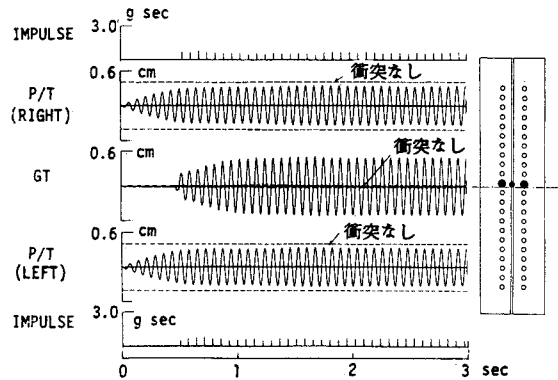


図11 衝突点における圧力管と案内管の変位及び衝撃力積のタイムヒストリー

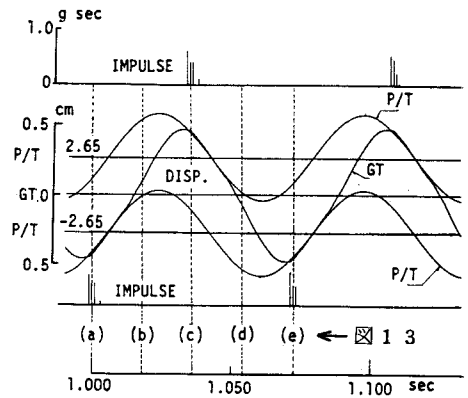


図12 衝突点における圧力管と案内管の変位及び衝撃力積の拡大タイムヒストリー

図13は図12の(a)~(e)の時刻における案内管全体とその両側4本本の圧力管の衝突点の振動形を示したもので、この(a)から(e)までが正弦振動の1周期に相当している。図中において⊕印のついている圧力管は案内管と衝突していることを示している。

この図より、案内管はほぼ1次振動形で両側の圧力管の間を振動し、案内管と圧力管の衝突は主に案内管の中央部分と上下端で起こりやすいことがわかる。

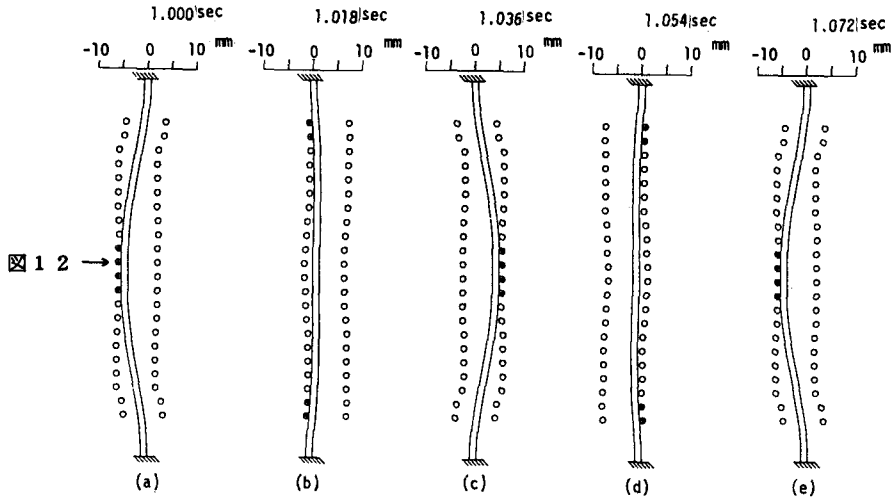


図 1 3 圧力管と案内管の振動変位 ( ケース 3、正弦波 13.7Hz、 $a_{max}=150\text{gal}$  )

(2) 試験結果との比較対応

ケース 1 から 3 までの解析結果より、圧力管の共振振動数 13.7 Hz で加振した場合のタンク中央部の圧力管の先端及び案内管の中央部の変位振幅と入力加速度レベルとの関係を求め、図 4、5 に示した試験結果と比較して図 1 4 及び図 1 5 にそれぞれ示す。これによると、入力加速度 75 gal 程度から衝突が生じ、衝突によって圧力管の変位は衝突なしの場合に比べ押えられるのに対し、案内管はかなり変位が増大するという試験時にみられた振動現象が解析的にはほぼシミュレートされていることがわかる。

(3) 正弦波入力とランダム波入力の場合の衝突現象の比較

ケース 4、5 の解析結果より、図 1 6 及び図 1 7 にそれぞれ正弦波入力とランダム波入力に対する案内管の固定端側、中央部及びその中間の 4 分点における案内管とその両側の圧力管の変位及びそれら相互間の衝撃力積のタイムヒストリーを示す。

これらの図をみると、正弦波入力の場合もランダム波入力の場合も、衝突は案内管の固定端側と中央部で起こりやすく中間の 4 分点では起こりにくいことがわかる。従って圧力管の変位は図中破線に示した衝突なしの場合に比べ、固定端側と中央部で押えられる度合は大きい、4 分点ではほとんど変わらない結果となっている。

図 18 及び 19 は各衝突点での衝撃力積の最大値分

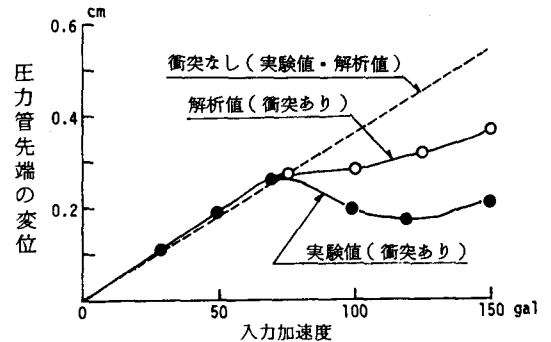


図 1 4 入力加速度と圧力管先端の最大変位 (13.7Hz 加振)

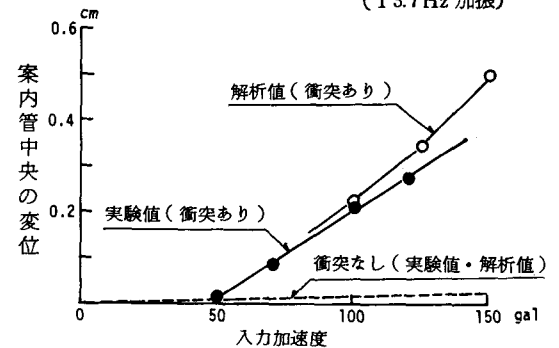
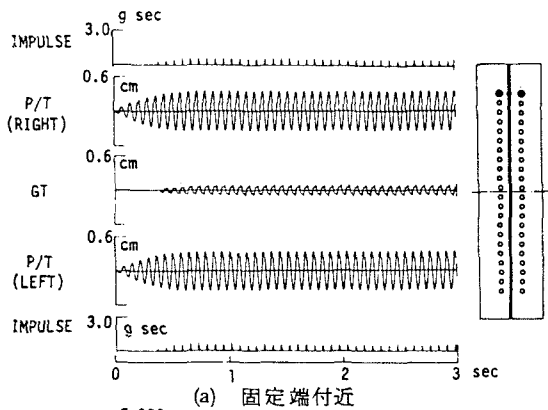
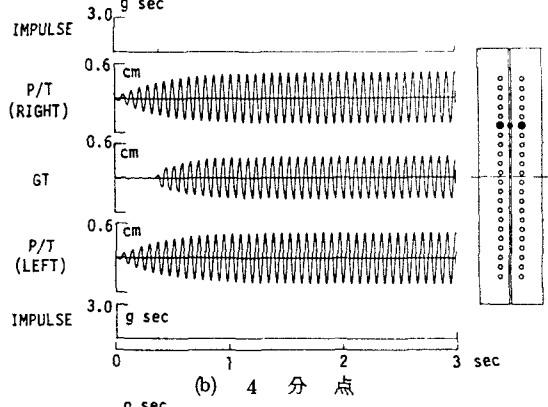


図 1 5 入力加速度と案内管中央の最大変位 (13.7Hz 加振)

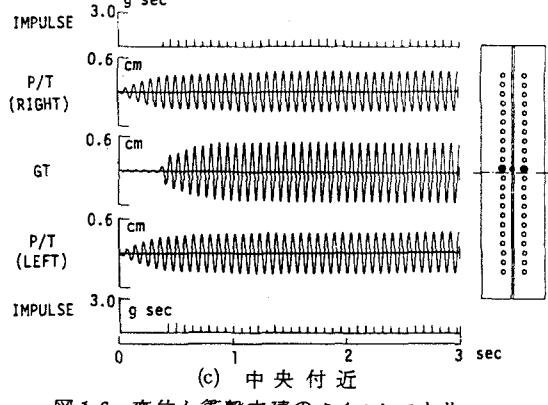
布を正弦波入力とランダム波入力の場合についてそれぞれ示したものである。これらの図より、いずれの場合も衝撃力積の最大値は衝突しやすい案内管中央部と固定端で大きく、ほとんど衝突しない 4 分点では小さいことがわかる。



(a) 固定端付近

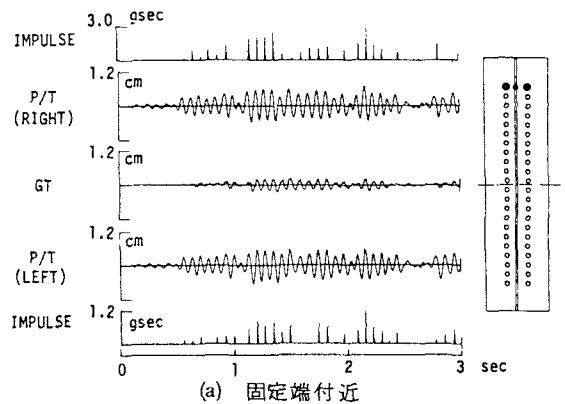


(b) 4 分点

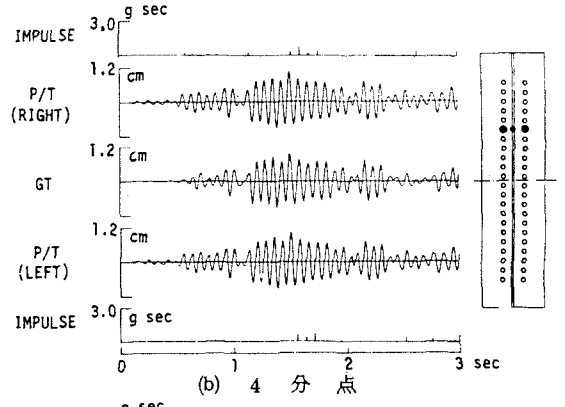


(c) 中央付近

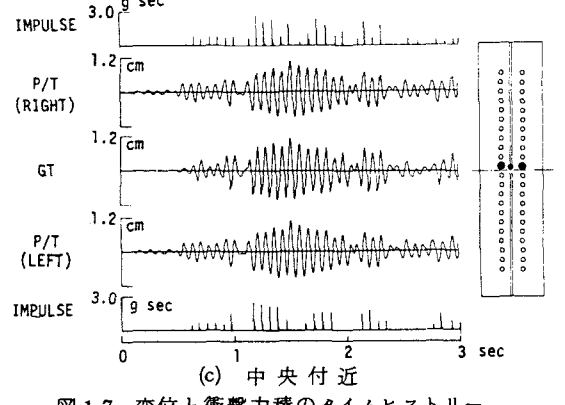
図 16 変位と衝撃力積のタイムヒストリー (正弦波入力)



(a) 固定端付近



(b) 4 分点



(c) 中央付近

図 17 変位と衝撃力積のタイムヒストリー (ランダム波入力)

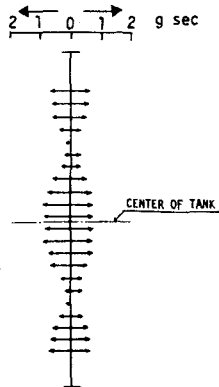


図 18 衝撃力積の最大値分布 (正弦波入力)

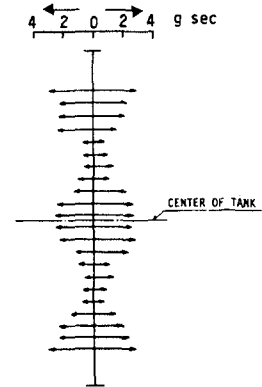


図 19 衝撃力積の最大値分布 (ランダム波入力)



図20はケース5のランダム波を入力したときの案内管中央部の変位のタイムヒストリーを、同じ入力力で衝突を考慮しない場合と比較して示したものである。この図よりランダム波入力に対しても案内管は両側の圧力管に叩かれて変位が著しく増大し、衝突を考慮しない場合に比べて変位は約5倍ほど大きくなっていることがわかる。

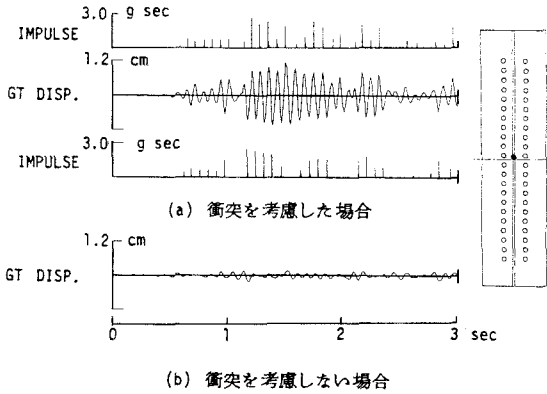


図20 衝突を考慮した場合と考慮しない場合の案内管中央部の変位の比較

## V むすび

CANDU炉炉心を対象に炉心カランドリアタンク内の圧力管と案内管の水中における衝突を伴う振動現象を解明するために、解析コード“PICOL”を開発した。次にこの解析コードを $1/2$ 縮尺炉心2分割模型の中央部分の最も長い案内管とその両側の4本の圧力管に適用して解析を行った結果、以下に示すことが明らかになった。

- (1) 試験で観測された現象、すなわち衝突が最も生じやすい圧力管の共振振動数で正弦波加振した場合、圧力管の変位は衝突なしの場合に比べ押えられるのに対し、案内管の変位は衝突によって著しく増大するという現象を解析によってもトレースすることが出来、本解析コードの妥当性を実証することが出来た。
- (2) 圧力管と案内管との水中における衝突現象は、主に圧力管が両側から交互に案内管を追いかけて叩くというものであり、案内管はほぼ1次振動形で両側の圧力管の間を叩かれながら振動する。
- (3) 圧力管と案内管の衝突は、案内管の両端部と中央部で最も起りやすく、4分点近くでは起りにくい。

(4) 衝撃力積の最大値の分布は、衝突の起りやすい案内管の中央部と固定端付近で大きく、衝突の起りにくい4分点付近で小さくなるような分布を示す。

## 【参考文献】

- 1) K.Muto et al “Forced Vibration Test of  $1/2$  Scale Model of CANDU Core”, 5th SMiRT, Bevlín, August, 1979.
- 2) 黒田孝、村上元「CANDU炉炉心の耐震性に関する実験、解析研究」機械学会論文講演1981.4 (発表予定)
- 3) A.K.Malhotra, J.Penzien, “Stochastic Analysis of Offshore Tower Structures” EERC 69-6 University of California, May, 1969.

VIBRATION AND COLLISION ANALYSIS OF TUBE ASSEMBLIES IMMERSED IN WATER

- AN EARTHQUAKE-RESISTANT ANALYSIS OF CANDU CORE -

K. Muto\* M. Nagata\* K. Horikoshi\* E. Fukuzawa\* OM. Motosaka\*

T. Kuroda\*\* H. Murakami\*\* K. Mizukoshi\*\*

The CANDU (Canada Deuterium and Uranium) reactor core consists primarily of a horizontal cylindrical calandria vessel, a total of 380 axially oriented pressure tube assemblies and a number of transversely oriented guide tubes for the reactivity mechanisms. These tube assemblies structures are always installed in heavy water moderator.

In order to investigate the vibrational characteristics of tube assemblies in water and the insertion capability of control shut-off rod during an earthquake, the test using a 1/5 scale half-cut model of the core was executed in 1978. Since the vibrational behavior of the tube assemblies, which is accompanied with the collisions between the pressure tube assemblies and the guide tubes, was very complex, the computer code "PICOL" is developed to elucidate their vibrational behavior analytically. This computer code is based on the coefficient of virtual mass of water and the impulse-momentum theory used the coefficient of the restitution.

In applying this computer code to the vibration model in the aforementioned test, it is clarified that the vibration and collision behavior in water which was observed in the test can be simulated well. As the result, it is confirmed that this computer code is verified to be pertinent, and it can be clarified analytically the basic characteristics pertinent to the seismic behavior of tube assemblies in water during earthquake.

---

\* Muto Institute of Structural Mechanics, Inc.

\*\* Electric Power Development Company, Ltd.