

(24) 水中管群の衝突振動現象の解析

—CANDU炉炉心の耐震解析(その2)—

武藤 清^{*1} 黒田 孝^{*2} 村上 元^{*2} 長田正至^{*1}
堀越清視^{*1} 福沢栄治^{*1} 水越 薫^{*1} 〇源栄正人^{*1}

1. 概要

原子力発電所の炉心とその周辺の機器配管系の耐震安全性の検討は最重要課題の一つである。筆者らは、CANDU炉の炉心部の耐震性に関する検討の一つとして、図1に示すような水中にある制御棒案内管が大地震時にその両側の多数の圧力管集合体と複雑に衝突しながら振動する時の挙動を解析するための解析コード

“PICOL”を開発した。

前報¹⁾では、この解析コード“PICOL”について述べるとともに、これを1/5縮尺模型実験²⁾³⁾に適用した結果について示した。

本報は、これに引き続きその適用例として、設計地震を越える大入力加振下での案内管と圧力管集合体の衝突現象を把握するために行われた実機部分模型による衝突振動試験⁴⁾のシミュレーション解析および実機CANDU炉炉心の地震応答解析の結果を報告するものである。

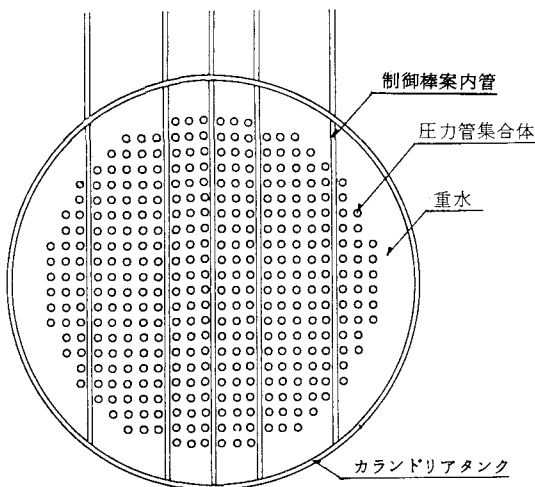


図1 カランドリアタンクの断面

2. 実機部分模型による衝突振動試験

2.1 試験体および試験方法

試験体は図2に示すように、水を満たした鋼製箱型のタンク内に水平に置かれた圧力管集合体1本および鉛直に置かれた短尺案内管1本から構成されている。圧力管集合体は、実物のカランドリア管と内部に模擬の燃料体を含む実物の圧力管からなる二重管構造である。一方、短尺案内管は短尺に切った実物案内管を板ばねでタンクに支持し、抵抗羽根とおもりを取付けることにより実機案内管の中央部の水中振動特性を模擬したものである。

試験には、20t電気油圧式振動台を使用し、振動台上に設置した試験体を圧力管管軸と直交方向に正弦波および地震波により強制加振した。主な測定項目は図3に示すように各管の応答加速度、短尺案内管板ばねの曲げ歪、衝突に伴う案内管の断面変形量(εゲージによる)および衝突力(小型ロードセルによる)である。

2.2 試験結果

正弦波のスweep試験より得られた案内管と圧力管集合体の共振曲線をそれぞれ図4(a)、図4(b)に示す。両者の衝突は圧力管集合体の共振振動数5.3 Hz近傍で入力加速度が250 gal以上で生じ、共振曲線に新たなピークが現われることがわかった。

図5は正弦波(5.3 Hz, 300 gal)加振時の測定波形を示したものである。この図より、圧力管集合体と案内管の衝突現象は案内管の変位が中立位置に達する直前で圧力管集合体に追いつかれることにより起っていることがわかった。

さらに板ばねの歪波形から案内管の応答変位

*1 榊武藤構造力学研究所 *2 電源開発株式会社

量を、また衝撃力波形から衝撃力積と接触時間を評価することができる。

図6は表2に示した模擬地震波（直下波）を

S₂地震動の1.2倍のレベルで入力した時の測定波形である。この場合は加振開始後2 sec付近で1回衝突が起こっていることがわかる。

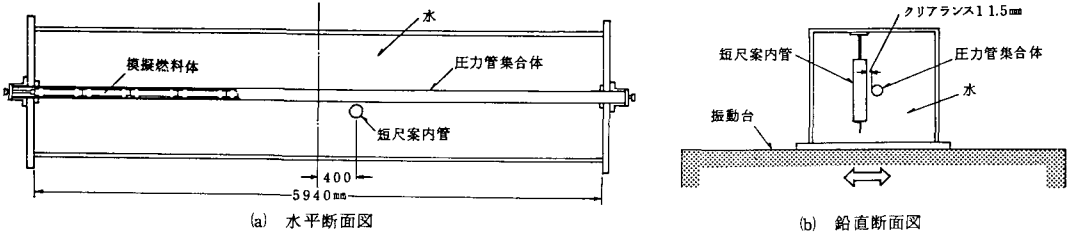


図2 実機部分模型による衝突振動試験の試験体

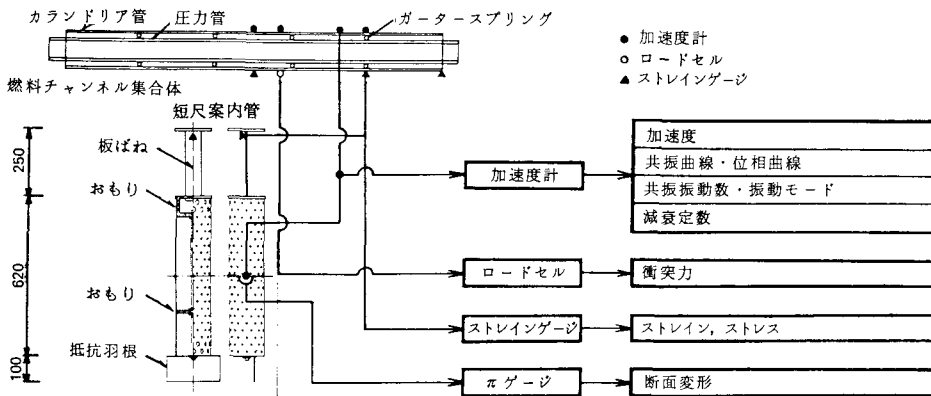
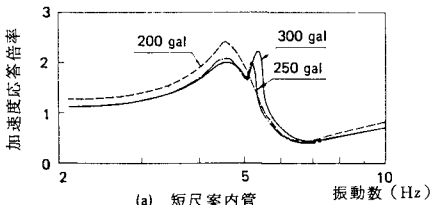
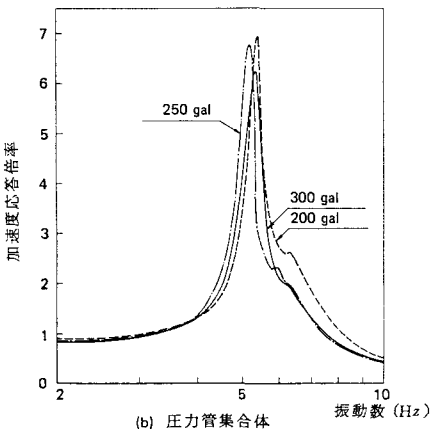


図3 衝突振動試験の計測システム



(a) 短尺案内管



(b) 圧力管集合体

図4 衝突下における案内管と圧力管集合体の共振曲線

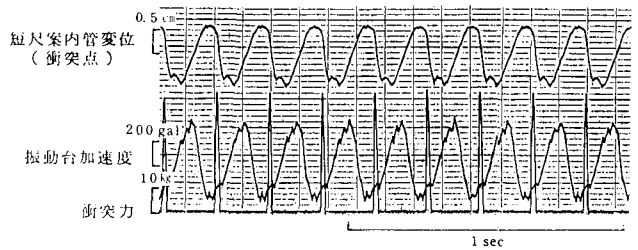


図5 測定波形（正弦波 5.3Hz, 300gal加振）

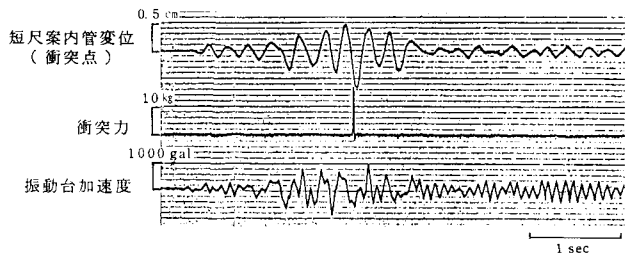


図6 測定波形（模擬直下地震波 S₂ × 1.2加振）

3. 実機部分模型試験のシミュレーション解析

3.1 P I C O Lによる解析方法

(1) 水中配管の運動方程式

P I C O Lによる解析では水中配管を曲げせん断棒に置換し、それぞれの配管の運動方程式は(1)式で表わされるものとする。

$$([M]+[M_e])\{\ddot{x}\}+([C_a]+[C_w])\{\dot{x}\}+[K]\{x\} = -[M]\ddot{y}_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$; 配管の水に対する相対加速度, 相対速度, 相対変位ベクトル

\ddot{y}_0 ; 入力加速度

$[M]$, $[M_e]$; 配管の質量行列, 水の付加質量行列

$[C_a]$, $[C_w]$; 配管自身の持つ減衰行列, 水による外部減衰行列

$[K]$; 配管の剛性行列

(2) 衝突の基本式

配管 r の質点 k と配管 s の質点 l が衝突する場合の衝突前後の速度は反発係数を用いて下式により表現する (図 7 参照)。

$${}_s\tilde{v}_l = {}_s v_l - \frac{{}_r m_k}{{}_s m_l + {}_r m_k} (1+e)({}_s v_l - {}_r v_k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$${}_r\tilde{v}_k = {}_r v_k + \frac{{}_s m_l}{{}_s m_l + {}_r m_k} (1+e)({}_s v_l - {}_r v_k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで ${}_r m_k, {}_s m_l$; 衝突点の重量

${}_r v_k, {}_s v_l$; 衝突直前の絶対速度

${}_r\tilde{v}_k, {}_s\tilde{v}_l$; 衝突直後の絶対速度

e ; 反発係数

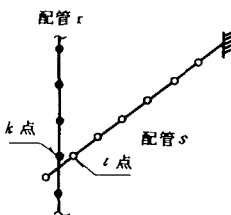


図 7 配管の衝突点

(3) 衝突の判定式

衝突する質点の速度 (${}_r v_k, {}_s v_l$) と変位 (${}_r x_k, {}_s x_l$) が下式を同時に満足したとき衝突と判定する。

$${}_s v_l - {}_r v_k < 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$${}_s x_l - {}_r x_k \leq -\delta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 δ ; 衝突する質点間のクリアランス

3.2 解析モデルおよび解析条件

図 8 に示すように、短尺案内管は抵抗羽根も含めた 4 質点, 圧力管集合体は 13 質点の曲げせん断棒に置換した。水中での両管の減衰定数は共振曲線が実験値を近似するように定めた。

また、演算時間刻みは 0.002sec とした。

3.3 解析ケース

表 1 に示すように、正弦波加振の場合は入力振動数, 入力加速度レベルおよび反発係数を, また、地震波加振の場合は短尺案内管の減衰定数をパラメータとした。

表 1 解析ケースとパラメータ

ケース	入力波	入力振動数 (Hz)	入力加速度 (gal)	反発係数 e	減衰定数 (g)	
					圧力管	案内管
1~4	正弦波	5.3	300	1.0, 0.86 0.5, 0.	8	20
5~7		5.3	220, 250, 270, (300)	0.5	6.5~8**	16~20**
8~10		5.1, 5.2 (5.3), 5.4	300	0.5	8	20
11, 12	地震波	-	$S_g \times 1.2$	0.5	8	20, 25

* () はケース 3 と重複する

** 入力加速度レベルにより減衰定数を変化させた

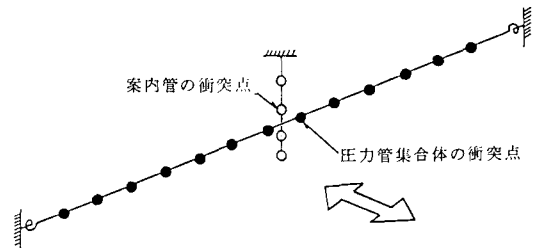


図 8 解析モデル

3.4 解析結果

図9は300gal正弦波スイープ試験による案内管の共振曲線と解析結果を示したものである。この図より、試験において観察された現象、すなわち、5.1Hz～5.5Hzでの衝突の発生および圧力管集合体の共振振動数5.3Hzにおけるピークの存在が解析により十分な精度でシミュレートされている。

図10は入力加速度と案内管の応答変位（両振幅）の関係について、試験ならびに解析の結果を比較して示したものである。案内管の応答変位は、板ばね（図3）に取り付けた歪ゲージの計測値から評価したものである。解析結果は試験結果とよく一致している。

図11および図12はそれぞれ正弦波加振（5.3Hz, 300gal）および地震波加振（模擬直下波, $S_2 \times 1.2$ レベル）に対する解析波形を試験

結果と比較したものである。これらの結果を要約すると以下のとおりである。

(i) 反発係数 e に関するパラメータ解析の結果 $e = 0.5$ のときに最も試験結果を近似することがわかった。

(ii) 正弦波加振の場合には、短尺案内管が圧力管集合体と衝突しながら定常的に振動している時の管相互および管と振動台との位相関係、さらに、測定波形の特徴を解析的によく表現できた。

(iii) 地震波加振の場合についても、試験でみられた衝突回数および衝突を含む応答波形の特徴を再現できた。

(iv) $S_2 \times 1.2$ レベルの地震波加振の場合、短尺案内管の減衰定数として25%をとれば、試験結果をよく近似できた。

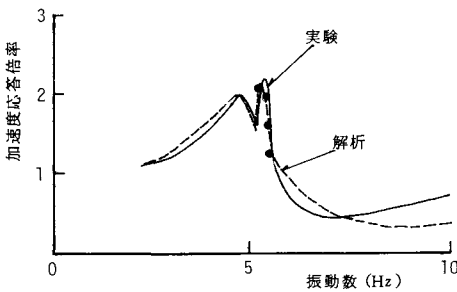


図9 衝突下における案内管の共振曲線 (cm) (入力波; 正弦波, 5.3 Hz 300gal加振)

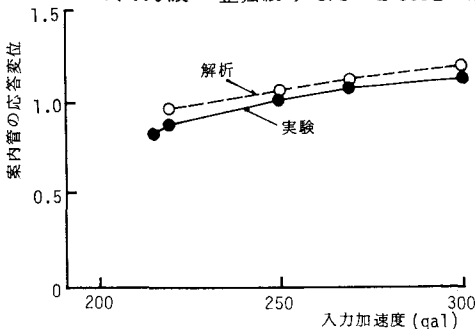
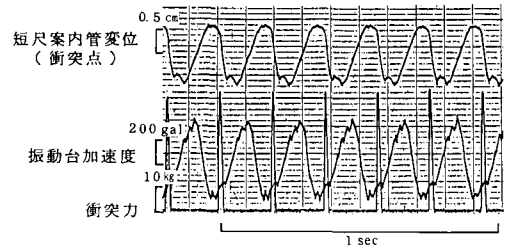
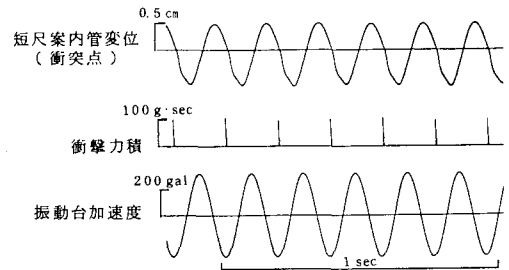


図10 入力加速度と案内管の応答変位振幅の関係 (入力波; 正弦波, 5.3 Hz)



(a) 測定波形



(b) 解析波形 ($e = 0.5$)

図11 測定波形と解析波形の比較 (正弦波 5.3Hz, 300gal加振)

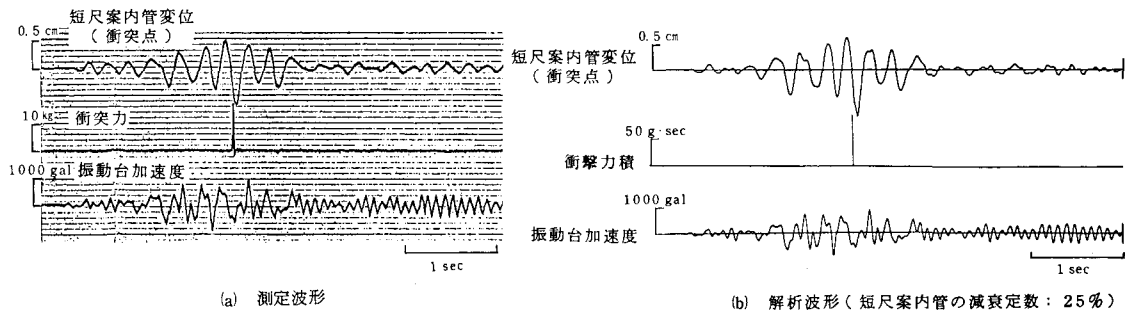


図 12 測定波形と解析波形の比較 (模擬直下地震波 $S_2 \times 1.2$ 加振)

4. 実機炉心の地震応答解析

4.1 解析条件

(1) 解析モデルおよび解析条件

図13に示す実機炉心の最長案内管および最短案内管とこれらの両側に隣接する多数の圧力管集合体を解析の対象とした。モデル化に当っては各々の圧力管集合体はその対称性を考慮して、 $1/2$ の長さを7質点の曲げせん断棒に、また最長案内管は26質点、最短案内管は21質点の曲げせん断棒にそれぞれ置換した。各管の端部の支持条件は、別途実施された実機部分模型による振動試験の結果に基づき、圧力管集合体は両端を回転ばね支持、案内管は上端を固定、下端を回転ばねによる支持とした。

案内管と圧力管集合体の減衰定数は、それぞれ

れ25%、6%とし、反発係数は0.5、演算時間刻みは0.002 secとした。

(2) 入力波

表2に示す6種類の S_2 地震波を建屋地盤連成系モデルに入力して得られた、カランドリアタンク位置における水平加速度の床応答時刻歴を上記解析モデルへの入力波とした。このうち、模擬地震波は現行の審査指針⁵⁾に基づき、かつ軽水炉改良標準化耐震設計小委員会⁶⁾における検討結果に準拠して作成したものである。

なお、地盤条件としては軟質、硬質(ヤング率 $E = 50 \text{ t/cm}^2, 100 \text{ t/cm}^2$)の2種類を想定し、後者の場合は加速度振幅を0.75倍に低減して入力した。

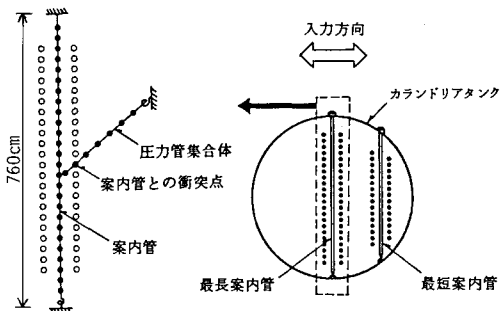


図 13 解析モデル

表-2 入力地震波(S_2)と最大加速度

地盤条件	波 形		最大加速度 (gal)	
			設計基準地震動	タンク位置応答波
軟質 ($E=50 \text{ t/cm}^2$)	実地震	EL CENTRO	450	752
		遠距離	405	713
	模擬地震	近距離	450	840
		直下	390	763
硬質 ($E=100 \text{ t/cm}^2$)	模擬地震	近距離	338	829
		直下	294	1154

4.2 解析結果

解析結果の代表例として、模擬近距離波 (S_2 , 軟質地盤) に対する応答変位および衝撃力積の時刻歴を図14に、衝撃力積の最大値分布を図15に示す。さらに、衝突に伴う各管の動きを20倍に拡大してCOM (Computer Output Microfilming) によるアニメーションで表現したが、そのハードコピーを図16に示す。この図中において圧力管集合体が●印で示されているのは、案内管と衝突していることを表わしている。これらの解析結果を要約すると以下のとおりである。

入力地震波による違い；エルセントロ波の場合は S_2 レベルにおいても衝突は全く起こらない。これに対して、模擬地震波の場合は3波とも衝突が起こる。衝突の程度を最大衝撃力積の大きさで比較すると、近距離波（硬質地盤）で最も

激しく（約 $890g \cdot sec$ ）、衝突によって増大する最長案内管のたわみ量も最大となった（中央部で約 $2.4 cm$ ）。

最長案内管と最短案内管の比較；案内管のたわみ量は、最長案内管の方が絶対量 δ はもちろん、これを案内管の長さ l で除した変形角 δ/l でも大きい。また、衝撃力積も最長案内管の方が同程度か幾分大きい。

衝突現象の位置による違い；衝撃力積の最大値は、案内管の中央部と端部付近で腹、その中間部で節となるような特有の分布パターンを示す（図15）。衝突を伴う各管の変位応答性状をみると、衝突によって案内管の変位は増大するのに対し、案内管に比べて質量の大きい圧力管集合体の変位はほとんど影響を受けないことがわかった。

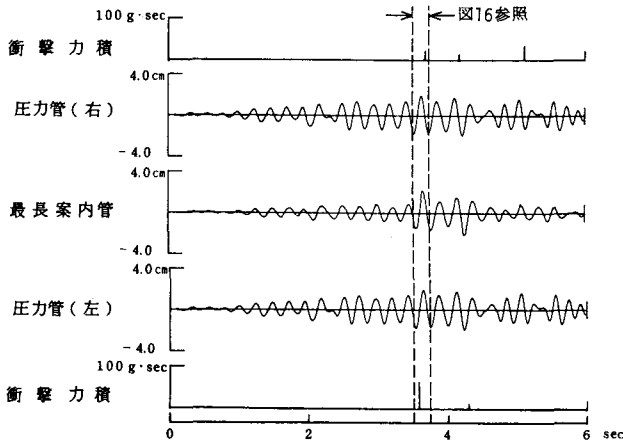


図14 カランドリアタンクに対する相対変位及び衝撃力積の時刻歴（近距離波 S_2 ，軟質地盤の場合）

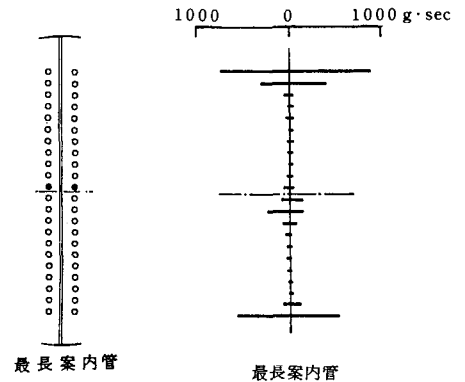


図15 衝撃力積の最大値分布（同左）

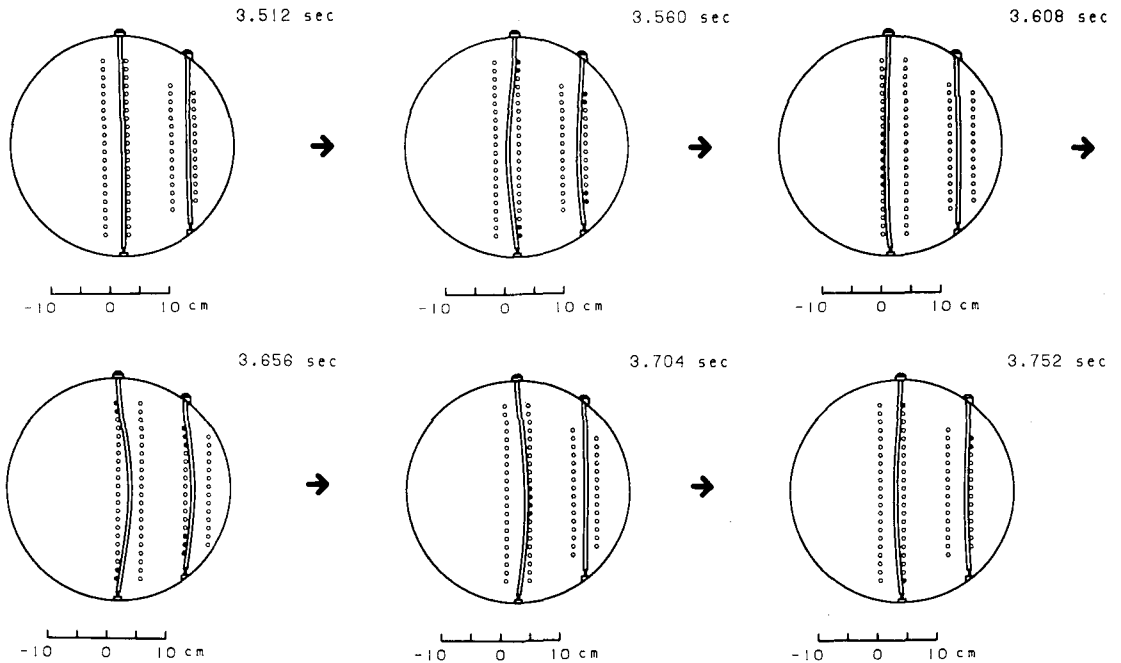


図16 衝突を伴う案内管と圧力管集合体の応答変位

●:衝突を示す

(近距離波 S_2 , 軟質地盤の場合)

5. 結論

実機部分模型による衝突振動試験で観測された短尺案内管と圧力管集合体相互の衝突を含む応答性状は、解析コード“PICOL”を用いた解析により、十分な精度で表現できることがわかった。その結果、本コードがCANDU炉炉心管群の衝突を含む地震応答解析コードとして十分妥当なものであることが確認された。

そこで解析コード“PICOL”を用いて、実機CANDU炉炉心内の案内管と圧力管集合体の衝突を伴う地震時挙動を追跡した。その結果、特に案内管の変位量、衝突パターン、衝撃力積等を把握することができた。

これらの結果は、地震時における制御棒の挿入性ならびに各コンポーネントの構造健全性等に関する耐震性確認のための貴重な資料となるものである。

参考文献

- 1) 武藤清, 黒田孝他「水中管群の衝突振動現象の解析—CANDU炉炉心の耐震解析—」第27回構造工学シンポジウム 1981年2月
- 2) K.Muto, et al "Forced Vibration Test of 1/5 Scale Model of CANDU Core" K 12/3, 5th SMiRt, Berlin, August 1979
- 3) T.Kuroda, et al "EXPERIMENTAL SEISMIC STUDY ON 600 MWe CANDU CORE USING FULL-SCALE PARTIAL MODELS" B4 CNS 1st Annual Conference Montreal, June 1980
- 4) 黒田孝他「CANDU炉炉心の耐震性に関する実験解析研究」(第1報, 確認試験) 日本機械学会, 第58通常総会論文講演 1981年4月
- 5) 原子力委員会「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」昭和53年9月
- 6) 軽水炉改良標準化耐震建屋分科会「標準設計用地震動 S_1 の作成に関する資料(案)」昭和53年5月
- 7) 武藤清, 黒田孝他「CANDU炉炉心管群の衝突振動現象の解析, その1~その3」日本建築学会大会講概集 1981年9月

VIBRATION AND COLLISION ANALYSIS OF TUBE ASSEMBLIES IMMERSSED IN WATER

- AN EARTHQUAKE-RESISTANT ANALYSIS OF CANDU CORE (PART 2) -

K. Muto* T. Kuroda** H. Murakami** M. Nagata*
K. Horikoshi* E. Fukuzawa* K. Mizukoshi* *M. Motosaka*

The CANDU (Canada Deuterium and Uranium) reactor core consists primarily of a total of 380 horizontal pressure tube assemblies and a number of transversely oriented guide tubes for reactivity control systems, which are housed in a heavy water-filled cylindrical calandria vessel.

Authors have developed a computer code "PICOL" which is capable of simulating the seismic response behavior of the tube assemblies being accompanied with the collisions between the shut-off rod guide tubes and their adjoining a number of pressure tube assemblies in water. An outline of the code and the results of the simulation analysis by this code for the 1/5 scale model test of the CANDU core were reported last year.

In this paper, in succession, the code PICOL is applied to the collision test using a full-scale partial model of the core conducted to clarify the tube-to-tube interaction behavior between guide tube and pressure tube assembly in water. As a result of the simulation analysis, the code was shown to provide good correlation with test results and was confirmed to be usefull for the collision response analysis of tubes in water.

Next, the code is applied to the longest and shortest guide tubes and their adjoining pressure tube assemblies in an actual CANDU core to predict the response behavior of the tubes involving the collisions during an extremely severe seismic event. From the analysis, the dynamic collision behavior such as collision pattern, distribution of impulse, influense of collisions to the response deflection mode of tubes, etc. were clarified. These findings are very efficient as basic data for the seismic verification of the CANDU core.

* Muto Institute of Structural Mechanics, Inc.

** Electric Power Development Company, Ltd.