資 料

コールドホール改良型発電炉の耐震設計, (Ⅲ)

耐 震 設 計 研 究

武 藤 清*

Earthquake Resistant Design of Calder Hall Improved Type Nuclear Power Station in Tokai-mura, (Ⅲ)

Aseismic studies of earthquake resistant problems

By Kiyoshi MUTO

What appears in this paper (Ⅲ) is a report on the studies made of the earthquake resistant design of the Calder Hall Improved Type Nuclear Power Station at Tokai-mura, and is a series of previous papers (Ⅰ) and (Ⅱ) dealing with the conditions of aseismic design and the earthquake resistant design.

In paper (Ⅲ) descriptions are given of the experimental studies and theoretical analysis of the aseismic design, especially concerning the reactor core structure and the reactor pressure vessel and its supporting structure.

In the reactor core structure, the largest stresses applied to the core graphite blocks during earthquake motion were examined by the vibration test for the purpose of studying dynamic behavior of the core structure, and were compared with the destructive stress obtained by the strength test of the blocks.

In the reactor vessel structure, the peak stress figures of the junction between the vessel and its supporting structure were found out theoretically, and moreover, were checked experimentally by photo-elastic test and yielding test.

The studies were undertaken in close cooperation between the Aseismic Design Study Committee formed by the Japan Atomic Power Company and the Design Section of The General Electric Company of the United Kingdom.

ま え が き

前報⁽¹⁾⁽²⁾では耐震設計条件と具体設計について述べてきたが、本報(Ⅲ)ではそれらの基礎になった諸研究を述べる。

前半では原子炉炉心部の耐震実験研究にふれ、後半では原子炉圧力容器および支持機構の耐震性に関する研究をまとめたものである。

炉心部の耐震実験として、(1)炉心の1層内の平面応力分布と(2)炉心の各層間の立面応力分布に分けて行ない、また(3)六角ブリック自体の破壊試験を併わせて行なった。振動実験の結果はつぎのようであった。

- (1) 炉心内の地震力は炉心補強円筒の円周部のどの部分にもほとんど均等に伝達されていく。
- (2) 炉心内部の応答加速度は中心に向って線型的に増大する。
- (3) 応力の最も大きい所は炉心外周部より多少中心側へ寄ったところであった。応力の集中係数は前報(Ⅱ)で述べた静的計算によって得られた値に比較すると数倍になる。
- (4) 隣り合った六角ブリック同士の相対変位は機械

* 東京大学名誉教授、日本原子力発電(株)地震対策委員会委員長。(Univ. of Tokyo; The Japan Atomic Power Co., Ltd)

的製作上の許容誤差の範囲である。炉心周囲のブリックと炉心中央部のブリックとの相対変位はブリック1個の製作上の誤差を炉心半径上のブリックの数だけ加えたものである。

- (5) 炉心の地震力が炉心の上層より下層に直接剪断伝達されることはない(イギリスG.E.社で実験的に確認している)。なおキイとキイウェイをもつ六角プリズム型ブリックの形状の細部寸法の決定に当ってはG.E.社で強度実験的に決定し、日本側でもこれを実験的にチェックした。

1次冷却系関係の耐震研究については、原子炉压力容器およびその支持機構のみに限定した。熱交換機については原子炉压力容器と同様な研究を行ない、またガスダクトは相似模型による振動実験研究を行なったが、これについては別の機会にゆずる。

原子炉压力容器は球殻と円筒殻の接合構造体であり、圧力、自重、付帯荷重、温度差のほか非軸対称荷重の地震力が作用するので、応力解析は相当複雑になるが、電子計算機を使用して日英同時に理論検討を行なうと共に、なかでも最も応力集中の大きい球殻と円筒殻の下部接合部分については、応力分布、降伏強度などの実験を行なってきた。この研究結果はつぎのようであった。

- (1) 非軸対称荷重(地震力)を受ける球殻の曲げ応力状態を、相当な精度で理論的に展開できる。
- (2) 球殻と円筒殻の下部接合部分には比較的大きい局部応力が生ずる。
- (3) 上記接合部の縁面では、数十%の応力集中がみられるが、このような形状の接合部の降伏強度にはあまり寄与しない。

I. 原子炉炉心部の耐震設計研究

1. 原子炉炉心部の平面内の地震力分布に関する実験的研究

前報(Ⅱ)に述べたように炉心部の個々のブリックは地震時にどのような振動をなし、どのような地震力の伝達を行なうかは実に難しい問題であって、実験的方法以外には確かめる方法がないとの結論に達し、大規模な実験を建設省建築研究所において行ない、静的、動的にその特性の検討を行なった。

(1) 供試体と振動台およびその特性

ブリックは第1図に示すような六角型で実物の約70%の大きさを持ち、1個の重量は下に敷いているベアリングレースを含めて約4.04 kgである。

このブリックが半径方向に9個全体で253個(全重量

約1.02t.)を円形状になるように並べてあり、周囲のブリックには支持棒を設けて周囲の剛なシェルと結びつけている。

第1図 実験の供試体ブリックと歪計の位置(単位: mm)

この炉心模型全体を塔載して実験を行なった大型耐震実験装置は、日本原子力発電(株)がこの目的のため日立製作所に発注し建築研究所構内に建設したもので、つぎのような性能を有するものである。

- (1) 静的試験台として使用できるもので、最大傾斜角は45°, 等価横方向震度は0.7で塔載試験体の最大重量は40 t.である。(第2図)
- (2) 振動台として使用できるもので、この場合の試験体最大許容量17 t. (試験台自体の重量は11 t.)であり、台前後のそれぞれ10本のコイルバネの換装により、その固有周期は約0.14~0.95 secに変化できる。

第2図 炉心模型の平面と断面
(各ブリックの名称)

振動試験の方式は、コイルバネに初期に歪力を与えて、それを瞬時に解放させて自由振動を行なわせるもので、最大2gの加速度を与えうる。なお、特殊機構により上下成分を含んだ水平振動をさせることもできるが、本実験では水平振動に限定して使用した。

写真1に示すように、この炉心構造に関しても当初に静的実験を行なったのであるが、その結果は後述の振動実験ですべてつくされているので、本報では省略した。

写真1 静的実験

(2) 振動試験

振動実験はブリックのキイの剪断力と周囲の支持棒に起こる反力とブリック上の加速度の分布を測定し、これを前報(Ⅱ)で示したような静的計算によって求めた値と比較して、動的影響の推定を行なう。周囲のブリックにはめ込まれた支持棒の拘束条件としては、回転のみ自由な場合と回転も拘束する2通りの場合、さらに支持棒の剛度を実物との相似性を考えた剛度にした場合と、それより低くした場合の実験をも続けて行なった。

一般にグラファイトコアの振動性は、遊隙をもった個体で構成された円盤がその周囲でスピゴットにより弾性支持されたものと考えられる。すなわち、コアが強制振動を受ける時のブリックの加速度の性状は第3図に示したようになり、遊隙が存在するために起こる衝撃によって、上述の弾性支持系の固有振動が強制振

第3図 中央ブリックと周囲ブリック
の上で測定した加速度波形

動の半周期ごとに誘発される性質がある。

(3) 周囲支持棒の反力分布

炉心の法線方向および接線方向の分力を支持棒に貼った歪計から測定した。その歪波形(第4図(a))をコアブリックの前記の波形(第3図)と比較すれば、衝撃は緩和されているが、弾性支持系の自由振動のため波形の乱れは認められる。これらの記録から支持棒の合力を求めて図示したものが第4図(b)である。これは最も低い剛度をもっている支持棒で、回転拘束をしない場合のものであるが、剛度の高い棒の場合にはこれより幾分バラツキが大きくなり、標準偏差で20%程度になるのであるが、周囲の支持棒の法線方向および接線方向の分力は、周囲にそってそれぞれsin型、cos型に分布しており、また、その各方向の最大分力が大体同じ大きさである。結局、炉心の荷重が周囲のいずれの部分にもほぼ等分布に伝達することが確認できた。周囲ブリックの回転の拘束の影響はないようである。

(4) コアの加速度分布

コアにおいては前述のようにブリックのクリアランスによる衝撃的な挙動が起こるので、炉心の内部ほど加速度が大きくなる。各ブリック上に加速度計を置いて測定した結果から、そのピークの加速度が第5図に示してある。これを見ると、炉心端部では振動台の1.2~1.5倍であるが、炉心中央では3~4倍になっている。

なお、支持棒が柔かい場合には炉心の加速度は大きくなる。

バネ初期変位: 20 mm 減衰比: $a_m a_{n+1}$ 1.005
台上加速度: 0.33 g 支持棒剛度: 18.4 Kg/mm
台上周期: 0.49 sec

第4図 周囲支持棒の反力分布

第5図 振動台とブリック上の加速度比較図

第1表 各ブリックのキイに作用する剪断力(Kg)

加速度の方向
振動台上の加速度		0.5g			0.4g			0.3g			0.2g			0.5g		
キイの位置		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
ブリックの名称	J-16	18.4	6.6	18.0	6.8	5.8	18.0	0.6	7.6	16.7	0.4	8.7	15.0	1.6	17.3	16.7
	J-14	11.9	8.6	3.0	8.7	6.9	1.9	4.6	7.8	1.7	4.6	6.6	1.7	16.5	7.2	8.1
	J-12	7.3	8.3	1.6	3.5	5.5	6.2	3.6	5.5	0.5	2.0	6.9	0.5	4.7	7.1	1.0
	J-10	2.9	10.7	1.6	0.1	5.6	0.6	0.4	6.2	0.5	0.4	5.2	0.5	1.2	3.6	11.4
	J-9	1.2	2.9	1.7	0.5	1.6	0.9	0.5	1.1	0.7	0.5	2.0	1.1	1.5	2.2	12.8
	G-10	3.4	10.9	32.7	3.0	8.8	13.3	1.6	7.3	10.5	1.4	4.3	8.6	2.4	22.1	31.8
	B-5	9.5	20.8	—	5.8	20.2	—	7.0	19.2	—	5.5	15.5	—	20.2	27.1	5.8
	C-7	5.6	5.2	23.6	4.1	1.1	13.3	3.7	1.1	6.8	3.7	0.9	6.0	8.8	2.2	19.3
	D-7	3.6	18.0	24.6	3.0	15.4	16.1	2.2	9.3	14.9	1.9	7.8	10.0	3.6	3.4	20.8
	E-8	1.5	11.9	49.5	0.9	9.2	13.4	0.7	4.6	19.7	0.7	2.4	17.4	3.4	6.7	53.6
	G-9	9.3	9.6	24.0	2.2	9.2	12.9	2.0	7.3	11.7	1.7	5.5	9.2	4.9	15.7	27.0
	C-10	7.7	16.9	15.9	5.8	1.5	10.0	3.5	1.1	7.9	2.9	8.8	6.3	4.0	7.0	17.2
	D-10	5.7	18.8	14.8	2.7	18.7	8.0	2.4	17.2	7.9	2.4	13.4	4.6	7.8	2.7	13.6
	E-10	5.6	14.1	45.8	1.9	15.3	22.4	1.6	13.5	18.0	—	—	—	—	13.1	43.0

設けた隙間の振動時の相対変位を調査したが、その結果は0.2~0.3 mmであった。これはブリックの機械的製作上の遊隙とほとんど同じである。

炉心内部の周囲に対する相対変位振幅も測定した。これは半径上に並ぶブリックのキイとキイウェイ間のクリアランスの総和にほぼ等しく1.25~1.35 mmであ

(5) ブリックの剪断応力

第2図に示すようにラジアル方向に並んでいるブリックのキイを選んで応力の測定を行なった。各ブリックのキイにはストレインゲージを主応力方向に貼付して、剪断応力を直接読み取れるように予備的な校正試験を行なっている。振動台の加速度を0.5g(周期0.49 sec, 最大振幅30 mm)まで与えて各キイの剪断力を求めた結果を第1表に示してある。ただし、この表は相似性に基づいた支持棒でブリックの回転も拘束している場合の値を示したが、回転の拘束条件は応力の分布や絶対値にほとんど影響がないことと、支持棒の柔かい場合には応力の集中性がより少なくなることを確かめている。この結果を見ると、最外周よりもむしろ幾分中へ入った所の部分に、大きい応力が起こっている。これは内部ほどブリックの加速度が大きくなるためと考えられる。

(6) 相対変位

キイとキイウェイ間に熱変形を考慮してあらかじめ

った。また周囲補強構造物の熱膨脹収縮に伴うコアブリックの挙動を調査するため、支持棒の位置を炉心に対して法線方向に移動させてみたが、個々のブリックがその移動に従ってスムーズに追従できることがわかった。

(7) キイ剪断力の集中性に関する考察

前報(Ⅰ)の応力解析と上記の実験結果とを考慮して炉心内の荷重が加速度方向に平行伝達するものと、直角伝達するものとが同時に同じ割合で起こるものとするれば、キイに働く最大剪断力 Q の計算式をつぎのように定めてよい(第6図)。

$$Q_{\max.} = \frac{(6y+4x-8)_{\max.}}{6} \cdot \frac{zw}{2}$$

これに実験体の諸寸法を入れ、震度を0.5とすると

$$Q_{\max.} = \frac{(6 \times 8 + 4 \times 4.5 - 8)}{6} \cdot \frac{4.04 \text{ Kg} \times 0.5}{2} = 9.8 \text{ Kg}$$

第6図 キイの剪断力

しかし、振動実験で得られた最大剪断力は35~40 Kgである。したがって約4倍の集中係数が起こっているとみなせる。この集中の主な理由には2通り考えられる。①キイとキイウェイ間のクリアランスがあるために起こる衝撃的作用によるもの、②各ブリックのクリアランスのバラツキのために充分接触しているキイと離れているキイがあって、炉心荷重の伝達が局部的に乱されて部分的に集中が起こるものである。

前者の集中性は、全ブリックキイのクリアランスの合計量に関係するので、炉心ブリックの数に比例すると思われるが、後者の集中性は個々のクリアランスの

バラツキと炉心全体のフリキシビリティに関係するので、炉心ブリックの数の多いさには逆比例すると考えられる。

2. 原子炉、炉心部の立体的震力分布に関する実験

この実験はイギリス G.E. 社によって行なわれたもので、詳しくは別の機会にゆずるとして、ここではその結果だけを述べておく。

模型は立体的な震力の分布を測定するのを目的として、炉心を6層に組み上げたものである。各層は約439個の六角型黒鉛ブリックを相似的に組み合わせてある。炉心周囲の補強円筒の模型には、応力測定の便宜と黒鉛炉心構造体と補強円筒の剛性相似率を合わせるためにアルミニウムを用いた円筒型立体トラス構造とした。その他、炉心周囲の支持棒と補強円筒の安定板などもそれぞれ相似率を考えて構成してある。写真2は、振動台の上に固定された炉心模型を示したものである。振動実験によって2.0gの加速度を与えて周囲の支持棒の反力と立体トラスの応力を測定した。層周囲の支持棒の反力分布に関する実験結果は、日本の建築研究所で行なった実験結果(第4図(b))とほとんど同じであって、反力分布の標準偏差も約20%である。

立体トラスの応力の測定結果から、立体トラス各層に作用する層剪断力と層モーメントを図示したものが第7(a),(b)図である。

写真2 イギリス G.E. 社の立体実験装置

これらの結果から、炉心内部では層剪断力の直接下層伝達がなく、各層内の剪断力は直接補強円筒に伝わると仮定して差支えないだろう。

これらの諸実験から、炉心構造体の振動性状は相当明確になってきた。実際の原子炉炉心では、六角ブリックの数は模型に較べて相当大きい、上述の実験結果を定性的に適用することには困難はないであろう。

第7(a)図 層剪断力分布図

第7(b)図 層モーメント分布図

3. 六角グラファイトブリックの強度試験

(1) 概要

前報(Ⅱ)で六角黒鉛ブリックの破壊強度に関する初期の実験について簡単な記述をしたが、1つの六角ブリックでもキイやキイウェイの形状・寸法を変えたり、あるいは加力の方法によっては破壊強度も多少異なってくるので、日本では原子力発電(株)の sponsor の下に建築研究所と、イギリスでは G.E. 社が詳細な実験を行なってきた。ここでは建築研究所によって得られた結果を簡単に述べるが、G.E. 社で行なった試験結果と定性的に異なるものではない。

六角ブリックの形状については9種類(キイやキイウェイの寸法を変えたもの)、材料そのものについて3種類(東海電極(株)製[参考にするため]、イギリス A.G.

L., フランス Pesine 社製)の各種比較実験を行なったが、ここではこのうち現設計に用いられる Pesine 社製黒鉛ブリックについての結果を示すことにする。

(2) 供試体および実験装置

六角ブリックの寸法は第8図に示すように、実物の4/5の平面をもつもので、長さは約1/10の76.20 mm (3 in.)のものである。また、実験装置は第9図に示すように供試体には最も不利な荷重がかけられるようになっている。

第8図 六角ブリック強度試験用供試体(単位: mm)

第9図 六角ブリック強度試験用実験装置

(3) 実験結果

六角ブリックには見掛け上の引張荷重が作用しているとみなして、これを P (Kg) とし、またブリックのキイの剪断応力を τ (Kg/cm²) で表わすと、実験結果は第2表のようになる。なお、表の下半部は G.E. 社がほとんど同様にを行った試験報告であり、参考までに表示しておいた。

第2表 引張破壊荷重 P (Kg) とキの
剪断応力度 τ (Kg/cm²)
 τ (Kg/cm²) = P (Kg) / ($\sqrt{3} a$), a : キの断面積
= 3.56 (cm) × 7.62 (cm) = 27.1 (cm²)

担当	建 研		G.E. 社	
	P (Kg)	τ (Kg/cm ²)	P (Kg)	τ (Kg/cm ²)
1	1,330	28.3	1,220	26.0
2	1,440	30.7	1,670	35.6
3	1,440	30.7	1,590	33.9
4	1,520	32.3	1,620	34.5
5	1,470	31.3	1,600	34.1
6			1,530	32.6
7			1,690	36.0
8			1,450	30.9
9			1,610	34.3
10			1,540	32.8
11			1,750	37.3
12			1,550	33.0
平均	1,440	30.7	1,570	33.4

4. 炉心の実設計への考察

実物炉心に震度 0.7 が作用した時のブリックのキの剪断応力は、前述の計算方法によれば、つぎのようになる。

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{Q_{\max.}}{a} = \frac{(6y+4x-8)_{\max.}}{12} \cdot \frac{w}{a} \\ &= \frac{(6 \times 28 + 4 \times 9 - 8) \times 76.4 \text{ Kg} \times 0.7}{12 \times 84.5 \text{ cm} \times 4.4 \text{ cm}} \\ &= 2.3 \text{ Kg/cm}^2\end{aligned}$$

一方、六角ブリックの破壊試験結果からは、 $\tau_d = 30 \text{ Kg/cm}^2$ くらいが得られているが、一般的にみて黒鉛のような脆性材料ではその許容応力を破壊強度の % にとるのが妥当であろう。いずれにしても地震時の動的拳動による応力の集中とか、その他照射による材料の多少の変化があっても、なお余裕のある設計と思われる。

地震時の炉心内部の相対変位はブリックの製作上のクリアランスの和に近いことは実験的に確かめた。

半径上に並ぶ 27 個のブリックのクリアランス (最大 0.13 mm) の総和は、

$$0.13 \text{ mm/個} \times 27 \text{ 個} \times \sec 30^\circ = 4 \text{ mm}$$

になるが、この程度の相対変位では制御棒の挿入等にも影響することはない。

Ⅱ. 1 次冷却機器系の耐震設計研究

1. 原子炉圧力容器の応力の研究

(1) 理論的研究

地震時における圧力容器の応力が許容応力以下であることと、圧力容器のシールド壁に対する相対変位が原子炉の制御機構に支障がないことを確かめなければならない。しかし、この構造体は球形の圧力容器の上部には、地震時の横振れを防ぐ目的の円筒殻の支持体があり、また下部には、原子炉と圧力容器を直接支持している円筒殻があって、これらの接合部の連続条件を満足させるには相当複雑な計算が必要となる。

特に球殻についていえば、軸対称荷重条件の下では厳密な解が得られているが、地震荷重のような非軸対称荷重条件下の曲げ応力状態の一般解はまだ充分ではない。したがって、この圧力容器の地震時の応力を解決するに当たって、まず、非軸対称荷重条件下の球殻の曲げ応力状態の一般解を、日本側は坪井、横尾両博士が研究し、また G.E. 社では Cambridge 大学 (J. F. Baker 博士) と協同研究を行ない、いずれにおいても相当厳密に求めることができた。計算の結果はいずれもほとんど一致しているので、ここでは G.E. 社提示の計算結果を示すことにする。計算に用いた仮定はつぎに示す。

- (1) 下部支持スカートは基礎に完全固定されている。
- (2) 上部スカートとシールド壁を結びつけているダイヤフラムは水平方向のみ拘束する。ただし、シールド壁自体も地震力を受けてダイヤフラムの位置で水平方向に 3 mm 変形するものとする。
- (3) 各部の寸法および重量は第 9 図に示すとおり。
- (4) 震度は水平方向に 0.63、垂直方向に 0.315 とする。
- (5) 炉心の支持グリッド自体は剛体とみなす。

第10図 圧力容器の寸法と重量
(単位: mm)

(2) 計算結果と考察

応力の最も大きい場所は压力容器と下部支持スカート
の接合部である。ここの各部分の応力分布を示した
ものが第11図と第3表であり、変形を示したものが第

12図である。ただし、以上の計算には実際の接合部の
テーパのついた厚肉フォーシング(板厚90~99.5 mm)
の効果を考えに入れていない。

第11図 压力容器下部接合部応力分布

第12図 压力容器系の地震力による変形

第3表 压力容器下部接合部の応力度 (Kg/cm²)

設計荷重		圧 力 16 Kg/cm ²	炉心重量 2,462 t.	容器重量 1,380 t.	温 度 ~200°C	水平震度 +0.63	上下震度 +0.315	記号
膜 応 力	球殻 上	+ 933	- 1	-47	- 1	- 32	-17	VT
	" 下	+ 894	+ 1	- 7	- 3	- 7	- 2	VB
	円筒 上	0	-99	0	0	-128	-31	ST
	" 下	0	-99	-56	0	-175	-50	SB
曲 げ 応 力	球殻 上 (内)	± 426	±20	± 318	± 45	± 149	± 103	VT
	" 下 "	± 426	±20	± 243	± 113	± 135	± 77	VB
	円筒 上 "	± 736	±34	± 159	± 53	± 151	± 65	ST
	" 下 "	± 736	±34	± 279	± 322	± 171	± 106	SB

板厚

$$t_{VT} = t_{VB} = 8.0 \text{ cm}$$

$$t_{ST} = t_{SB} = 6.35 \text{ cm}$$

応力度は通常の計算法(すなわち $\sigma = N/A + M/Z$)で求めたのであるが、定常時では最大1,600 Kg/cm²となり、また地震力による応力の約400 Kg/cm²を加えても合計2,000 Kg/cm²である。厚肉フォーミングの効果を入れると、定常時では約1,100 Kg/cm²、地震時では約1,300 Kg/cm²となる。これらの値はいずれにしても鋼材の弾性限度内である。

シールド壁との相対変位は最大は下部支持スカートとの接合部で約1.3 mm となり、またスタンドパイプのある上部付近では、上部スカートを設けたため小さくなり約0.5 mm 程度であるので、制御棒等の取扱いにも支障をきたすことはないであろう。

2. 圧力容器とスカートの接合部における

応力集中と降伏強度の検討

前述のようにPV(圧力容器)とS(スカート)との接合部には標準の使用時でも、またこれに地震が作用したときでも、最大の軸応力と曲げモーメントとが起る。一方、この接合部では厚い板が連続的に接合されるので、板厚もテーパがつき丸味も与えられるので、強度上強い関心がもたれるのである。そこでこの部分における局部的の応力集中の状態を、薄切りにした模型を用いて光弾性実験によって平面問題として研究し、また軟鋼板の模型を用いて、弾性破損がどのような場所に起こり、どのように成長するかを研究した。

接合部におけるこれらの現象は応力分布に支配されるのであるが、これらの実験は予備設計の段階で行なわれたので、当時の設計に従ってスカートの直径の小さいものについての応力分布計算値に基づいて実験が行なわれた。また、その形状では地震力による曲げモーメントの影響が支配的であったので、実験は曲げモーメントによる影響のみにその重点がおかれたことを付記する。

(1) 光弾性実験による応力集中の研究

材 料 供試体の材料として Isochromatic line の決定には Epoxy Resin が、Isoclinic line の決定には Acrilite が用いられた。

供試体・荷重 供試体の寸法は第13図に示すものである。原型の接合部における曲げモーメント分布は同図に示す力を加えることによって得られるが、これは球と円筒との接合部で初めて釣り合う力であり、Sliced Plate Model では完全には釣り合いを保つことができないので、近似的な曲げ応力を実現するようにした。なお、この実験は内藤博士の下で行なわれたものである。

応力の集中度 第14図は地震時における応力に対

Test 1A $R_1=4.6$ mm, $R_2=2.50$ mm

Test 1B $R_1=7.0$ mm, $R_2=25.0$ mm

第13図 光弾性試験供試体(1/4模型)

応する場合(Test 1)の縁の応力度を図示したものである。最大の応力は下部スカート(SB)のC点に起っている。この応力を常用式による応力計算値に比べて応力の集中度を計算すると、集中係数は1.4となっている。

$$(\text{Test 1}) \quad \text{最大集中係数} = 1.4 f_c = \frac{6.3}{4.5} = 1.4$$

第14図 (Test 1)地震荷重による接合部の応力分布(単位Kg/cm²)

ここで、6.3 : C点の応力(Kg/cm²)

4.5 : C点で、常用式 M/Z で計算した
応力(Kg/cm²)

また、定常時状態に地震状態を加えた場合(Test 2)の応力に対応する場合を図示すると第15図となる。この場合には最大の応力集中はB点に起こり集中係数はつぎのようである。

(Test 2) 最大集中係数 $=_2f_B=10.40/8.52=1.2$

また、C点でも $_2f_C=5/4.22=1.2$ 程度になる。

第15図 定常時荷重および地震荷重による
接合部の応力分布(単位 Kg/cm²)

以上の結果のうちで強度的に関心がひかれるのは、C点における応力集中が鋼の弾性破損にどのように影響するかということである。すなわち、実用設計後は計算で得られたシェルの曲げモーメント M と軸方向応力 N をもとにして、合計最大応力は、

$$\sigma = N/t \pm 6M/t^2 \quad (t: \text{板厚})$$

として計算するのであるが、実際には実際結果から見るように応力集中があるので、この応力集中によって弾性破損がどのように起こるかを確かめるため、実物大の鋼製模型によって降伏の発生を見ることにした。

(2) 鋼製模型による弾性破損の実験

圧力容器とスカートの接合部はフォーミングによって一体的に形成されるのであるが、この部分の Sliced Model を厚板で作リ、地震時に対応する応力によって、弾性破損がどのように起こるかを、武藤の反射法によって観測することにした。

予備研究の結果、また前述の光弾性実験でも明らか

なように、計算上最も大きいところは下部 PV とスカートとの根元と考えられたので、この部分の模型を作り地震時の曲げモーメントに対応する応力が起こるように加力した。

供試体 Mild 鋼から写真3のように供試体を切りとり、 P の加力で VB, SB 部分に地震時に対応する曲げ応力を加えた。これを厚さ9.5 cm に仕上げて焼鈍した。その時の素材の引張降伏応力度 σ_y は2,150 Kg/cm²であった。接合部部分のE, W両面は鏡仕上げとして降伏が起これば反射性が変わるようにした。

実験 実験に当っては各部に至計を貼って応力度を測定し、またダイヤルゲージによって接合部の中心に対する撓みを測定した。断面に発生する歪模様の発は、上記の方法によって市松模様の反射写真から測定した。

写真3 接合部フォーミング荷重試験

歪模様の発生と進展 歪模様は荷重 $P=12.0$ t. でE面 SB 外側に現われた(第16図)。 $P=13$ t. ではE面外側に1箇所、内側には現われない。 $P=14$ t. ではSBの外側にも内側にも現われた。 $P=15$ t. からどんどん弾性破損が内部にまで広がり、 $P=16$ t. で降伏状態となった。

降伏応力度 歪模様の芽が $P=12$ t. のとき現われたA点の応力を常用式で計算すると、 $\sigma=2,400$ Kg/cm²であった。しかし、この時のSBのrootにおける計算応力度は3,000 Kg/cm²であり、しかも降伏は起こっていない。なお、常用計算では接合部の中心(中心線の交点)で応力度を計算するが、この場合の計算応力度は7,000 Kg/cm²である。

$P=13$ t. で歪模様の現われたB点の応力度を計算す

ると、E面で、B₁点 2,600 Kg/cm²、B₂点 3,000 Kg/cm²、B₃点 3,100 Kg/cm²；W面で、C₁点 2,900 Kg/cm²、C₂点 3,100 Kg/cm²となり、さらにSBの根元では3,300 Kg/cm²で降伏は起こらない。

実験ではP=16t.で完全降伏に入った。その時まで

の各荷重階でのE面、W面の歪模様の範囲は第16図に示すとおりであった。

これから常用設計法(例えば降伏応力度を根元で2,400 Kg/cm²とする)は充分安全側であることがわかる。

第16図 接合部歪模様の発展

(3) 実験の考察

弾性理論では光弾性実験からわかるように、接合部にはかなり大きな応力集中が起こるが、実物大鋼製模型による降伏強度実験では、常用計算式による降伏強度に比較して実際の降伏強度は相当高いことを示したので、応力集中による低荷重降伏の心配はないものと思う。

なお、参考までに重要機器系の定常時および地震時応力の一覧図を第17図に示しておく。

むすび

原子力発電所を日本に初めて設置するに当たって敷地選定の一般概念に加えて、地震の危険度の小さい地域を選ぶことが最重要問題であった。幸いにして東海村がこれらの諸条件にかなった所として決定されたが、さらに耐震的に万全の安全を考えて原子炉を含む1次冷却系、重要機器類を含めて、その設計地震力は日本の建築規準法に定めた値をはるかに上回るものを指定した。日本で目下検討している原子力発電所安全基準案のうちの耐震

第17図 1次系機器の応力

設計の基本方針は、原子炉建物および内部の主要機器類をその重要度に応じて分類し、設計地震力を変えていくが、その重要度の規準はあくまでも放射線に対する公衆損傷の度合に従うのである。

特に最も重要視される原子炉、1次冷却系ならびにそれを囲む原子炉建物内の主要部分は、直接公衆の放射線障害に関係するので、その地方に予想される Strongest Probable Earthquake に耐えるように設計しなければならないと考えたのである。東海村周辺に予想されるこの地震の加速度はその基盤(-21 m)で0.05 gと推定され、また原子炉建物の response ではそれが増幅されて0.2~0.25 g程度になると見られるが、安全をみて0.6 gを指定したのである。さらにまた、ダクトについてはベローをもつ複雑な構造であり、撓みやすいものであることを考えて安全をとり、2.0 gを指定した。

これらの設計地震力および定常時の全荷重を受けた場合に許される最大応力は、鋼材の場合には弾性限度内とし、またグラファイトのような脆性材料では破壊応力の $\frac{1}{2}$ とした。

応力の計算には、一般構造物については日本建築規準法施行令、機器構造物に対しては Boiler Codes などに従って行なうほか、1次系の複雑な構造に対しては相当精密な理論を組み上げ、また実験を行なって安全性を確かめた。

特に原子炉、炉心グラファイト構造は複雑な六角ブリックの集合体であり、静的な計算だけでは推定困難なために充分な静的実験、振動実験を行ない、炉心内部の地震力の伝達機構を調査し、実際設計に対する基礎資料を集めた。

耐震計画、耐震設計、耐震研究の大綱は以上述べたとおりであるが、さらに細部の実施設計にあたっては、詳細な計算や実験を行なって決定している。

建設完了後は各種振動計を設置してその耐震性状を実際に検討したいと思っている。

最後に長期にわたり本耐震委員会のために熱心なご協力とご援助を賜った。内藤多仲(早大)、那須信治(早大)、藤井澄二(東大)、吉沢武男(東大)、坪井善勝(東大)、横尾義貫(京大)、梅村 魁(東大)、久田俊彦(建研)、中川恭次(建研)、柴田 碧(東大)、吉岡俊男(原電)、辻本進(原電)、川畑整理(原電)の各氏ならびに K. J. Mitchell, R. Hicks, R. W. Bailey, J. Baker 各博士はかイギリス General Electric Co. 関係各位に対し厚く謝意を表する次第である。

(1963年 7月16日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) 武藤 清: 'コールドホール改良型発電炉の耐震設計, (I)', 本誌, **1**, No. 7, 447~455 (1959).
- (2) 同 上: '同上, (II)', **2**, No. 1, 24~33 (1960).

「会員名簿」作成にご協力願います。

去る9月21日付にて全会員各位にお願いした来年2月の本会5周年記念「昭和39年版 会員名簿」原稿の照会のご回答は10月10日までに必着にてご協力をお願いします。