解 説

「HTTR」炉床部の耐震構造設計
接触連結部を有する黒鉛構造物の耐震強度

(日本原子力研究所) 伊与久 達夫, 二川 正 敏, 石原 正 博

現在, 原研で建設中の高温工学試験研究炉(HTTR)の炉床部は, 脆性材料である各種黒鉛構造物から構成され, キーで相互に連結されたブロックがサポートポストによって支持されるという多くの接触連結部を有する不連続構造体となっている。本稿では, このような不連続構造体の耐震設計にあたって実施してきた研究開発の内容を紹介するとともに, その耐震設計の方法について解説する。

I. はじめに

現在, 原研で建設中の高温工学試験研究炉(HTTR)の炉床部は, 脆性材料である各種黒鉛構造物から構成され, キーで相互に連結されたブロックがサポートポストによって支持されるという多くの接触連結部を有する不連続構造体となっている⁽¹⁾。このような構造物と材料の組合せが炉心の支持構造物として重要部分に採用されるのはこれが初めてである。この炉床部構造は耐震上重要な機器(Asクラス)に分類され, 各構造物の設計にあたっては, 静的および動的荷重による耐震評価が求められる⁽²⁾。静的地震力および連続体に対する動的地震力の算定法は, JEAG 4601⁽²⁾で明確に規定されているが, 多くの接触連結部を有する不連続構造体に対する動的地震力の算定法に関しては適切な方法がない。そこで, HTTR 炉床部の動的評価に関する多くの研究開発を行ってきた。その内容は, 次の2つに大別できる。

- (1) ブロック間の接触連結部に関する振動挙動を把握し, その解析モデルを開発すること。
- (2) 振動解析結果と振動実験結果から見積もられた地震荷重に対する黒鉛構造物の強度評価を行うこと。

本稿では, これらの研究内容の概要を述べるとともに, HTTRにおいて開発されたこのような不連続構造体に対する耐震設計について概説する。

II. 炉床部構造の特徴と耐震設計のためのR & D

第1図(a)に示す炉内構造は, 交換可能な燃料体などの六角柱状ブロックを積み上げたカラムより構成される炉心部と, その炉心部を底部で支持する高温プレナムブロック, サポートポスト(第1図(b))などの永久部材から構成される炉床部に大別できる。高温プレナムブロックは, 地震動や熱膨張による配列の乱れを防ぐためにその側面に設置したキー/キー溝構造により相互に連結される。

サポートポストは, その両端が半球面形状をしており, 地震動や熱膨張による上下ブロック間の水平方向相対変位を, その座である球面構造のシート上でポスト両端がころがることにより吸収する構造となっている。各構造物の素材である黒鉛は, 耐熱性に優れ減速材としての役割とともに強度部材としての機能を有するが, 一般の鋼材に比べ強度の小さな脆性材料であることから, 特に主要な荷重である地震荷重に対し, 十分な構造健全性があるかどうかの評価が求められた。各構造要素の黒鉛材料とその代表的な機械的特性を第1表に示す⁽³⁾。

Aseismic Structural Design in HTTR Core-Bottom Structure; Aseismic integrity of graphite structure with contacting connect elements: Tatsuo IYOKU, Masatoshi FUTAKAWA, Masahiro ISHIHARA.

(1994年 12月26日 受理)

第1図 HTTR 炉内構造物

第1表 黒鉛材料の主な機械的特性

	等方性黒鉛 IG-110	準等方性黒鉛 PGX
かさ密度 (kg/m ³)	1.78×10 ³	1.73×10 ³
平均引張強度 (MPa)	25.3	8.1/ 8.0†
平均圧縮強度 (MPa)	76.8	30.6/32.3†
ヤング率 (GPa)	8.3	6.8/ 5.3†
粒径 (μm)	平均 20	最大 800

† 径方向/軸方向(径方向:成形時の加圧方向に垂直な方向,軸方向:成形時の加圧方向に平行な方向)

一般に機器・配管系等の連続構造体に用いられるモーダル解析等による動的慣用解析法⁽²⁾は、炉内構造物のような多くのガタを有し、非線形性の強い振動挙動を示す不連続構造体に対しては適当でない。このような構造体を扱う解析コードとして、炉心部については幾島⁽⁴⁾、武藤⁽⁵⁾、Ahmed⁽⁶⁾、Lee⁽⁷⁾らにより開発研究が行われているが、炉床部すなわちサポートポストの球面接触構造、プレナムブロック間の大型キー/キー溝構造等の接触連結部を含む不連続構造体の振動挙動の解明およびその解析コードの開発は行われていなかった。そこで、第2表に示す振動特性およびそれに基づき評価した地震荷重に対する構造強度特性に関するR&Dを行なった。

振動特性に関するR&Dでは、キー/キー溝構造、サポートポスト等の要素試験を行いつつ各振

第2表 炉床部耐震評価に関するR&D

動モデルを開発し、さらに炉床部全体試験により解析モデルの検証および地震荷重の評価を行なった。構造強度に関しては、各構造要素に対する破壊試験を実施し、地震荷重が集中する接触連結部の破壊特性を明らかにするとともに、振動実験および解析から見積もられた地震荷重(最大設計荷重)に対する構造健全性の評価を行なった。

III. 振 動 特 性

1. 振動試験内容

キー/キー溝構造試験体⁽⁸⁾、サポートポスト構造試験体⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾および炉心・炉床部連成試験体⁽¹¹⁾による要素振動試験を実施した後に、1/5と1/3スケールの試験体⁽¹²⁾⁽¹³⁾による炉床部全体試験を行なった。本節では、各試験の概要を述べる。

(1) 要素試験

キー/キー溝間には熱膨張による拘束を避けるべく隙間を設けている。このキーとキー溝間の衝突振動挙動を把握しその振動モデルを開発するために、キー/キー溝構造試験体を用いた振動試験を実施した。キー/キー溝間の隙間は原子炉の寿命中想定される最大隙間を基準とした。また、キー結合部の静的剛性データを得るため、油圧式アクチュエータによりキーをキー溝部に静的に負荷した。

サポートポストの振動モデルを確立することを目的として、1/2.5スケール試験体を用いた復元力特性試験および振動試験を実施した。ここでは、サポートポスト軸長、ポスト端曲率半径等の各寸法、およびポスト支持荷重がサポートポスト構造の復元力特性と振動特性に与える影響を調べた。

炉心部の黒鉛ブロック群が炉床部の振動特性に与える影響を調べるために、炉心・炉床部連成試験体による振動試験を実施した。すなわち、試験体は3本のサポートポストに支持される高温プレナムブロック上に炉心部の7カラム分の黒鉛ブロックを搭載している。試験は、この黒鉛ブロック段数を順次上部から減らすごとに加振し、キー溝に作用する衝突荷重を測定した。

(2) 炉床部全体試験

キー/キー溝構造およびサポートポストの振動特性を総合的に検討するために1/5スケール試験体および1/3スケール試験体(写真1)による振動試験を、正弦波および設計用限界地震波 $S_2^{(2)}$ 等の模擬地震波により行なった。また、両試験体についての結果の比較から相似則の妥当性も調べた。また、1/3スケール試験では炉心部の重量がサポートポストの軸荷重に与える影響を調べるため、高温プレナムブロック上に炉心重量を模擬体により荷重した。これらの試験では、特に地震荷重を算定するために高温プレナムブロックの衝突加速度とキー溝部の歪の関係に着目した。

写真 1 炉床部振動試験体(1/3スケール)

2. 振動解析モデルの開発

水平面2方向および回転を考慮している炉床部全体の振動解析モデルを第2図に示す。本モデルにおいて、重要な点はキー/キー溝およびサポートポストにより支配される振動挙動を表現できることにある。前述した要素試験の結果とともに、炉床部全体の振動解析モデルの内容および解析と実験の比較結果を概説する。

(1) 要素解析モデル

キー/キー溝間におけるキー剛性の実験および解析の結果を第3図に示す。キーがキー溝に接触する時に生じる滑りと食込による局部変形を考慮し、有限要素法(FEM)により行なった解析の結果は、低荷重領域で強い非線形性を示し、実験結果をよく表わしている。衝突を伴う振動では、接

(a) 全体構成

(b) 高温プレナムブロックに作用する力

①：ブロックコーナー
□：キー/キー溝構造

第2図 炉床部振動解析モデル

触初期の剛性は衝突加速度に大きく影響する⁽¹⁴⁾。そこで、振動解析モデルにおけるキー剛性は線形表示ではなく、非線形表示(例えば、 n 次の多項式)で表わした⁽⁸⁾。

球面接触構造によって生じるサポートポストの復元力特性の測定および解析例を第4図に示す。AB間ではポストの傾斜に伴い復元力は増加し、B点でポストとシートの接触接線角が最大静止摩

第3図 キー/キー溝構造の接触剛性

第4図 サポートポスト構造の復元力特性

擦角を超えるため、BC間ではポストはシート上で滑る。C点で除荷すると、AB間で示した同じ傾きを持つ復元力が作用する。このような復元力の履歴にしたがって、サポートポストは振動する。振動解析モデルでは、この復元力(F_R)を考慮して、サポートポスト構造の振動特性を表わした⁽⁹⁾。

炉心部の黒鉛ブロックの段数をパラメータに、炉床部の高温プレナムブロックの衝突特性を調べた。その結果、高温プレナムブロックの衝突力および共振振動数は、炉心部黒鉛ブロックの段数にほとんど影響されなかった⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾。したがって、炉床部の耐震構造設計上、キー/キー溝構造に作用する最大地震荷重には炉心部の

影響を考慮しなくてもよい。

(2) 全体解析モデル

炉床部の全体振動挙動は、個々の高温プレナムブロックの水平2方向の移動および重心周りの回転に関する運動方程式により表わされる⁽⁸⁾。すなわち、第2図(b)に示すように、第 n 番目の高温プレナムブロックにはキー溝に作用する衝撃力(F_{Kni})、サポートポストにより生じる復元力(F_R)とブロックコーナー部での衝撃力(F_{Bni})が作用するものとした。これらは、要素試験により明らかになったキー/キー溝構造とサポートポスト構造の挙動を考慮した非線形バネで表わした。

高温プレナムブロックの衝突加速度の振動数応答について、解析結果と炉床部全体試験結果(1/3スケール)を比較して示したのが第5図である。ここでは、最大応答加速度が大きくなる中央に位置する高温プレナムブロックの結果を示す。入力は最大加速度が 1.2 m/s^2 と 3.5 m/s^2 の正弦波掃引である。振動解析結果は、2つの入力加速度に対して比較的良好に実験結果を表わしている。また、これらの傾向は相似則を考慮して求めた1/5スケールの結果とも一致していることから、本試験体に適用した相似則は妥当であるといえる⁽¹³⁾。なお、衝突加速度から評価される荷重とキー溝部に発生する歪の関係については次節で述べる。

第5図 炉床部構造の振動特性

3. 地震荷重の評価

炉床部の構造健全性を評価する上で最も重要な部位は、地震荷重の集中する接触連結部、すなわち高温プレナムブロックのキー溝部とサポートポ

ストである。したがって、これらに作用する地震荷重を以下の方法により評価した。

(1) キー溝部

振動試験で測定された全キー溝部の最大歪は、 S_2 地震時 5.3×10^{-5} であり、その歪速度は 1 s^{-1} 以下であった。歪速度が 1 s^{-1} 以下では、PGX黒鉛の応力歪曲線の歪速度依存性はほとんど認められない⁽¹⁶⁾。また、応力波の伝播特性により、キー溝部の歪分布が静的と動的で異なる場合も考えられる。また、キー/キー溝構造の動的試験および準静的負荷試験時に測定されたキー溝底における歪分布を比較した結果、両者の差異はほとんど見られないことがわかった⁽⁸⁾。この結果は、武石らの動的光弾性実験により得られた、キー溝周りの応力分布は衝撃負荷速度($V_i < 2.5\text{ m/s}$)に依存しないという結論⁽¹⁷⁾と一致する。これらから、衝突振動によりキー溝部に生じる歪(応力)は、静的に評価できるといえる。

各高温プレナムブロックの最大衝突加速度(α_m)とキー溝部に発生した最大歪(ϵ_m)の関係を第6図に示す。ここで、直線 f_i は個々の高温プレナムブロックの慣性力を i 個のキー/キー溝構造(各高温プレナムブロックは6個のキー/キー溝構造により連結される)で分担すると仮定した場合の ϵ_m と α_m との関係を示している。すなわち、直線 f_1 は高温プレナムブロックの慣性力が1個のキー/キー溝構造のみに作用した時の ϵ_m と α_m との関係を示すこ

第6図 高温プレナムブロックの最大衝突加速度とキー溝部に生じる最大歪との関係

となる。第6図より、 α_m が約 40 m/s^2 までは、直線 f_1 を超える測定値が存在する。これは、1個のキー/キー溝構造に慣性力が作用するとともに、キーとキー溝部の接触状態が不均一となり、 ε_m 測定部近傍に荷重が集中したものと考えられる。測定値 α_m が 30 m/s^2 を超えると ε_m の増加率は鈍化し、 α_m が約 60 m/s^2 で ε_m は最大 53×10^{-6} となり、その後慣性力が複数のキー/キー溝構造に分散するため ε_m は減少する。

以上のことより、キー溝部に生じる歪(応力)分布は静的分布と等価であることから、炉床部のキー溝部の動的評価は、種々の地震波に対する全体振動解析結果から求まる α_m と第6図の設計曲線より定まる ε_m に基づいて行えばよい。

(2) サポートポスト

サポートポストに作用する動的鉛直荷重は炉床部全体振動解析モデルで考慮していないため、地震による荷重倍率(C)と支持荷重(W_0)の積で表わせるとし、 C 値の特性を振動試験結果より検討した。すなわち、 C 値はサポートポストが支持している高温プレナムブロックの僅かな上下動およびロッキング運動に依存するため、これらの運動に影響を及ぼす W_0 をパラメータとして加振中にポストの受ける荷重を測定した。これより、 C 値は W_0 の増加に伴い減少し、実機相当の W_0 では1.17以下になる⁽¹³⁾。これは、 W_0 が増加することで高温プレナムブロックの上下動およびロッキング運動が抑制されるためである。また、水平地震動に鉛直地震動が同時に作用しても、 C 値はほとんど変化しなかった。したがって、サポートポストの動的鉛直地震荷重は、1.17の C 値を用いて評価すればよい。

IV. 強度特性

1. 破壊荷重および破壊モード

(1) キー/キー溝構造

実スケールのキー/キー溝構造を有する要素試験体による破壊試験を行なった。まず、地震動を受けるキー/キー溝間の接触状態はさまざまに変化するため、キー溝内のキー位置による応力分布の変化について調べた。その結果、応力の集中す

るキー溝底部付近の応力分布には、キー溝内のキー位置の影響はほとんど見られないことがわかった⁽¹⁸⁾。したがって、FEM応力解析では、負荷荷重として接触部分における等分布荷重を仮定する。応力解析と実験結果との比較例として、第Ⅲ章で明らかになった S_2 地震時に発生する最大歪に対応する地震荷重を負荷したときの応力分布を第7図に示す。ここで、黒鉛材料の破壊が最大主応力破壊である⁽¹⁹⁾ことから、最大主応力値で比較する。解析値は実験値とほぼ一致しており、キー溝縁の応力集中部における最大主応力値は約 1.5 MPa となる。この値はPGX黒鉛の引張強度の約 $1/5$ 程度であり破壊最大主応力値より十分に低い。

□ 内の数値は、3軸ひずみゲージの測定結果より求めた最大主応力値を示す。

第7図 キー溝周囲に生じる応力分布

さらに、荷重を増加して試験体を破壊させたところ、キー溝は地震荷重の約8倍の荷重まで耐えることがわかった⁽¹⁸⁾。試験体の破壊モードと解析結果との比較から、破壊は解析により求まる最大主応力の最大値位置近傍から始まり、その後応力の高いところを伝播したのと考えられる。

キー溝には衝撃的荷重が繰り返し作用する。繰

返し衝撃荷重に対する疲労劣化が準静的に比べ大きくなるとの報告がある^{(20)~(22)}。PGX 黒鉛の衝撃曲げ疲労強度は、繰返し回数が200回(S_2 地震により負荷されると考えられる回数)程度で、準静的な場合と比べ約20%低下した⁽²²⁾。しかし、静的負荷による地震荷重に対し約8 倍の耐力があるため衝撃疲労による劣化の影響は十分無視できる。

(2) サポートポスト構造

地震時には鉛直荷重がサポートポストに繰返し負荷される。また、高温二重配管の破断などによる空気および水侵入事故では、サポートポストの酸化による減肉が生じると考えられる。サポートポストの構造設計に対して、黒鉛構造設計基準⁽¹⁹⁾では1/6 スケールの破壊試験結果⁽²³⁾を基に軸圧縮荷重を制限している。さらに、体積効果⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾(構造物が大きくなるほど破壊強度が減少する効果)が考えられたため、サポートポストの構造健全性を確認すべく、実スケールおよび1/2 スケールのサポートポスト構造の試験体を用いた軸圧縮試験を行い、ポストの傾斜角、繰返し荷重および酸化による破壊荷重への影響を確認した⁽²⁶⁾。繰返し荷重試験では、第三章で評価された地震荷重の3 倍を200回まで負荷した。酸化試験では、HTTRの設計で想定した最大重量減少率(15%)を考慮して、減少率約30%まで酸化させた。

第8 図に傾斜角と繰返しの破壊荷重に対する影響を示す。図中には試験データのバラツキを考慮して黒鉛構造設計基準で用いている評価法(95%の信頼度で99%の非破壊確率)で整理している値も示した。設計で規定される最大傾斜角 0.62° の約1.5 倍までは破壊荷重に変化が見られない。また、サポートポスト周囲の歪にもポストの傾斜による違いはない。さらに、繰返し荷重を負荷した後の破壊荷重の低下は認められない。したがって、傾斜および地震動による繰返し荷重は、サポートポストの構造健全性に影響しない。なお、実スケール試験体の破壊荷重は、黒鉛構造設計基準で参考とした1/6 スケールのものより約30%程度の体積効果による減少が認められたが、サポートポストに加わる最大地震荷重に対して約5 倍の荷重まで破壊しなかった。

第8 図 傾斜および繰返し荷重負荷によるサポートポスト破壊荷重への影響

第9 図に酸化の破断荷重に対する影響を示す。酸化後の破壊荷重は酸化重量減少に伴い低下することが認められた。しかしながら、第三章で検討された最大地震荷重に対して、サポートポスト構造は、想定される最大重量減少率15%でも約4 倍の耐力を有する。

第9 図 酸化によるサポートポスト破壊荷重の変化

2. 構造健全性評価

静的地震荷重および第Ⅲ章で検討した動的地震荷重に対して、要素試験体を用いた破壊試験結果から評価した破壊荷重を基に求めた安全裕度(破壊荷重/地震荷重)を第3表にまとめて示す。ここで、静的地震荷重はJEAG 4601⁽²⁾で規定されている方法に基づいて算定している。すなわち、キー/キー溝構造では、各ブロック重量と $3.6C_I$ (震度 C_I は標準剪断係数0.2を基準に構造物の動的挙動等を考慮して定める値)との積により算定している。また、サポートポスト構造では、 $1.2C_V$ (震度 C_V は0.3を基準とし、構造物の動的挙動等を考慮して定める値)と搭載荷重の積で求まる荷重を保守的に一本のポストが支持するとして静的荷重を算定している。本表より、キー/キー溝構造では動的地震荷重に対して得られた安全裕度が静的な値より小さくなるが、サポートポスト構造では、静的地震荷重に対する裕度が小さくなっている。したがって、安全裕度の小さくなる荷重を構造設計用地震荷重とした。これより、耐震設計における安全裕度として、キー/キー溝構造で約8、サポートポスト構造では酸化による減肉が最も厳しい空気侵入事故を想定しても約4の値となることから、構造健全性を確認した。

第3表 地震荷重に対する安全裕度
(破壊荷重/地震荷重)

連結構造物	安全裕度	
	静的地震荷重	動的地震荷重
キー/キー溝	9	8
サポートポスト	$\frac{5}{4}^\dagger$	$\frac{6}{5}^\dagger$

[†] 空気侵入事故と地震との重ね合せ

V. おわりに

構造物に負荷される荷重の中で地震荷重が最大となる場合が多い。このため、構造健全性を確認するには、適切な手法により地震荷重を評価することが重要である。脆性である黒鉛ブロック群から構成されるHTTR炉床部のような不連続構造体では、不連続境界を十分考慮した要素モデルとその集合体としての全体モデルによる耐震解析、

およびそれより評価された地震荷重に対する構造強度評価が必要とされた。これまで述べたような過程を経て、HTTRの耐震健全性が確認された。また、このような構造体と材料の組合せは、高温ガス炉のみならず核融合、核熱利用プロセス等の特殊環境下における構造物に適用される場合もある。その際、本稿がいささかでも役立つことを願いたい。なお、詳細については各参考文献を参照されたい。

試験全般にわたり(株)東芝 荒木隆夫氏と富士電気(株) 三木俊也氏、および解析ではアンプ・テクノロジー・ジャパン(株) 白井浩史氏と日本原子力研究所 高田昌二氏のご協力を得た。また、同研究所 塩沢周策と武藤 康の両氏には有益な助言を頂いた。

—参考文献—

- (1) 田中利幸,他:原子力誌, **32** (9), 852 (1990).
- (2) 日本電気協会:原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987).
- (3) 石原正博,他:JAERI-M91-154, (1991).
- (4) 幾島 毅:機 論, **48** (426), 229 (1982).
- (5) 武藤 清,他:原子力誌, **19** (12), 853 (1977).
- (6) AHMED, K.M.: Nucl. Eng. Des., **104**, 1 (1987).
- (7) LEE, T.H.: *ibid.*, **32**, 337 (1975).
- (8) FUTAKAWA, M., et al.: *ibid.*, **148**, 83 (1994).
- (9) FUTAKAWA, M., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., **25** (1), 56 (1988).
- (10) 二川正敏,他:原子力誌, **31** (6), 691 (1989).
- (11) IYOKU, T., et al.: SMiRT-12, K17/1, 97 (1993).
- (12) IYOKU, T., et al.: SMiRT-11, K15/2, 409 (1991).
- (13) IYOKU, T., et al.: Nucl. Technol., **99**, 169 (1992).
- (14) DARBY, M. I.: J. Mat. Sci., **19**, 1930 (1984).
- (15) 幾島 毅:JAERI-1279, (1981).
- (16) 宇賀地弘和,他:原子力誌, **36** (2), 138 (1994).
- (17) 武石洋征,他:非破壊検査, **41** (11), 617 (1993).
- (18) ISHIHARA, M., et al.: Submitted to Nucl. Eng. Des.
- (19) IYOKU, T., et al.: *ibid.*, **132**, 23 (1991).
- (20) BIRCH, M., et al.: Carbon, **21** (5), 497 (1983).
- (21) 前川一郎,他:機 論, **56** (525), 1051 (1990).
- (22) FUTAKAWA, M., et al.: J. Eur. Ceram. Soc., **11**, 417 (1993).
- (23) KIKUCHI, K., et al.: Eng. Fract. Mech., **19** (6), 1013 (1984).
- (24) 石原正博,他:炭 素, **118**, 124 (1984).
- (25) BROCKLEHURST, J. E.: TRG Rep. 2302(s), (1973).
- (26) ISHIHARA, M., et al.: Nucl. Eng. Des., **148**, 91 (1994).