

課題目標・目的及び研究成果

<p>1. 当初の目的・目標</p>	<p>大規模地震発生時の原子力プラントの耐震性を評価し健全性のレベルを示すことは非常に重要かつ迅速な対応が望まれる課題である。本事業では、不具合の生じ易い部品と部品の接合部に着目し、接合部の接合効果を考慮できる物理モデルを提案することにより、大規模複雑構造物である原子力プラントの全体的挙動・局所的挙動双方を把握できる解析システムを構築し、これにより次世代炉設計における耐震性評価に貢献することを目的とする。</p> <p>事業の全体計画は以下の通りである。</p> <p>(1)接合部連成モデリングに関する研究開発</p> <p>原子力プラントの全体的挙動・局所的挙動双方を把握できる解析システムを構築するために、設備－建屋間の接合部の連成モデリングに関し、接合部連成モデルの試作、改良、調整を行う。</p> <p>(2)ハイブリッド実験システムに関する研究開発</p> <p>設備－建屋間の接合部に対して提案した接合部連成モデルの妥当性の検証を目的とし、シミュレーションの一部を実験に置き換えるハイブリッド実験手法を導入し、ハイブリッド実験及びハイブリッド仮想実験を実施する。ハイブリッド実験では、接合部試験体を製作し、ハイブリッド実験を実施することにより、接合部連成モデルの妥当性検証のためのデータを取得し接合部の特性を把握する。ハイブリッド仮想実験では、接合部連成モデルをハイブリッド実験の実験部分と置き換えることで、全体シミュレーション（ハイブリッド仮想実験）を実施し、ハイブリッド実験で得られた応答とハイブリッド仮想実験で得られた応答を比較することにより、接合部連成モデルの妥当性を検証する。</p> <p>(3)実プラントシミュレーションに関する研究開発</p> <p>提案した接合部連成モデルの検証のための解析用として実プラントである原子力機構の試験研究炉を対象とし、データ作成を行い、主要冷却設備と建屋間の接合部に本モデルを組み込み組立構造解析を実施し、接合部連成モデルの有効性を評価する。</p>
<p>2. 研究成果</p>	<p>【事業項目1】 接合部連成モデリングに関する研究開発</p> <p>平成18年度は、接合部連成モデルの現状と課題を調査するため、文献調査を行った。その結果、1、コンクリート構造である建屋を3次元モデルで解析する重要性が増していること、2、従来は設備－建屋間の動的相互作用が十分に考慮されていないこと、3、特大地震時には埋め込み金物の履歴特性を考慮する必要があることが明らかとなった。そこで、</p>

近年3次元でのモデル化が検討されている建屋と、ダンパー等の機構特性を考慮するために1次元でモデル化されることの多い支持構造物との接合部のモデル化において、埋め込み金物の履歴特性を考慮可能とすることが重要であると考え、マルチスプリングからなる接合部連成モデルを試作した。本接合部連成モデルを用いたベンチマーク解析の結果、マルチスプリングの履歴特性を改良することにより、設備—建屋間の接合部の弾塑性挙動を再現できる見通しが得られた。

平成19年度は、同じく平成19年度に実施したハイブリッド実験の実験結果より得られた荷重と変位の関係等をもとに、平成18年度試作した接合部連成モデルの改良を実施した。従来のモデルで考慮されていなかったすべりの効果を導入するために、せん断バネ、ねじり回転バネに非線形特性をもたせた。ベンチマーク解析を実施し、改良の効果を確認した。平成20年度は、接合部連成モデルの実プラントシミュレーションへの適用性を向上させるため、接合部連成モデルを市販構造解析コードのユーザサブルーチンとして組み込み、調整を行った。本コードは実プラントシミュレーションを実施するためのツールとして提供した。また、提案した接合部連成モデルの接合部連成効果の模擬性についてまとめた。

【事業項目2】ハイブリッド実験システムに関する研究開発

i) ハイブリッド実験

平成18年度は、設備—建屋間の接合部について、試験条件を設定してモデル化の検討を行い、試験体および載荷治具の仕様をまとめ、ハイブリッド実験に用いる試験体を製作した。製作した試験体の基本ケースについて、機能確認載荷試験を実施し、その結果、製作した試験体および載荷治具の機能に問題がないことが確認できた。また、機能確認試験より得られた配管支持構造物試験体の剛性評価結果を用いて、接合部を含む実験系全体解析モデルを作成し、ハイブリッド実験の事前シミュレーションを行った。この結果、ハイブリッド実験を実施する上で、加振機の載荷容量・ストロークなどの試験システムの機能が十分であることを確認できた。

平成19年度は、平成18年度に製作した試験体を用いて、設定した試験条件の基にハイブリッド実験を実施した。実験においては、接合部の荷重と変位の関係等を整理し、製作した試験体毎に特性を把握した。本研究で実施したハイブリッド実験は、中央差分法を用いた全体系の地震応答解析により変位指令値を算出し、この目標値に対して動的な載荷制御を行うハイブリッド試験システムを用いた。数値モデルは、着目部位を含む実機プラントの配管系および機器系の卓越振動モードと等価な1自由度モデルを設定し、加振機油圧サーボ系の制御上の安定性を満足す

るように加振条件を定め、試験を実施した。当該ハイブリッド実験からは、地震荷重下での接合部の動的な応答挙動が評価でき、既往検討などで行われてきた静的繰り返し条件の荷重変位関係とは異なる貴重なデータが得られた。また、最終的な損傷モードは、鋼部材の応力集中箇所における低サイクル疲労に起因するき裂の発生であることが明らかとなった。また、従来剛接合として扱われてきた支持構造物と建屋の境界部については、アンカーの浮き上がり挙動が生じる詳細データを得た。平成20年後は、平成19年度に実施したハイブリッド実験で使用した試験体に対して有限要素解析を実施することにより、実験対象部位の応答特性に関する考察の妥当性を確認した。また、ハイブリッド実験結果および及び有限要素解析の結果を踏まえ、実験対象部位の応答特性をまとめ、その耐震安全性について評価した。

ii) ハイブリッド仮想実験

平成19年度は、ハイブリッド実験の実験系全体を対象とし、接合部連成モデルを実験部分と置き換えた全体シミュレーション(ハイブリッド仮想実験)を実施するため、実験系全体解析モデルを検討し、解析に必要な入力データを作成した。この実験系全体解析モデルに平成18年度試作した接合部連成モデルを組み込み、全体シミュレーションが実施できることを確認した。また、改良された接合部連成モデルが実験結果を良好に再現できることを確認した。

平成20年度は、接合部連成モデルの調整の影響を確認するために、平成19年度実施したハイブリッド仮想実験と同様の解析モデルに調整した接合部連成モデルを導入し、全体シミュレーションを実施した。その結果、調整された接合部連成モデルを用いることで実験結果の再現性が高まり、モデル調整の妥当性を確認できた。

【事業項目3】実プラントシミュレーションに関する研究開発

平成18年度は、提案した接合部連成モデルの実プラントデータへの適用性検証のための解析用として、実プラントである原子力機構高温工学試験研究炉HTTRの主要冷却設備の支持構造部、および該当する建屋部分のモデルデータを作成した。

平成19年度は、平成18年度に作成したHTTRのモデルデータを元にメッシュデータを作成した。メッシュデータの作成に当たって、ダンパー等の機構部はバネでモデル化し、その他の支持構造部および建屋部分は3次元要素とするとともに、提案する接合部連成モデルの適用を考慮し接合部中央に節点を配置するなどの方針を定めて実施した。作成したメッシュデータに関しては、静的応力解析等へ適用し、解析に使用可能であることを確認した。

平成20年度は、平成19年度に作成したメッシュデータの規模が大きく長時間の計算時間を要することが予測されたため、解析用モデルの規模を抑えるために平成19年度作成したデータ以外は梁要素を用いることで対応した。その後、地震応答解析として、実観測データそのものを入力加速度として用いたケース1と、接合部連成モデルの効果を確認するため同入力加速度を最大10000ガルとなるよう約200倍したケース2の2ケースを実施した。ケース1では、実観測データと解析結果を比較し基本となる固有振動数がほぼ一致することを確認できたことで、接合部連成モデルが接合部の線形挙動範囲において物理的に妥当なモデル化がなされていることを検証した。また、ケース2では、解析結果が仮定した履歴特性を模擬できていることを確認した。以上より、提案した接合部連成モデルの実プラントシミュレーションへの適用性を確認できた。

【事業全体】

大規模複雑構造物である原子力プラントの全体的挙動・局所的挙動双方を把握するための要素技術として、部品と部品の接合部の接合効果を考慮できる物理モデルの提案を目標とし、3次元でのモデル化が検討されている建屋と、バネやダンパー等1次元でモデル化されることの多い支持構造物との接合部の相互作用を簡易に考慮できる、接合部連成モデルを提案した。本モデルを用いることで、大規模な3次元弾性（線形）モデルへの部分的な弾塑性（非線形）モデルの組み込みが可能となり、従来よりも効率的な解析を行うことが可能となる。また、ハイブリッド実験では、従来実験データの少なかった機器や配管構造が破壊に至る最終的な損傷モード（今回は低サイクル疲労損傷）にかかわる貴重なデータが得られた。これらデータを用いて接合部連成モデルの履歴特性に関するパラメータを調整することで接合部連成モデルの精度を高めるとともに、実プラントデータを用いた数値シミュレーションにも適用可能であることを実証した。

従来剛接合として扱われていた建屋側接合部の履歴特性を考慮した3次元解析を効率よく行える接合部連成モデルを開発したことで、大規模地震時における実プラントの真の耐力予測に資するモデルとなることが期待できる。また、本事業で取得した接合部の動的荷重による破損に至るまでのデータは、数少ない貴重なデータとして解析手法の高度化等へ貢献できるものと期待する。

【得られた成果の外部発表】

(1) 酒井 理哉、塩竈 裕三、西田 明美、新谷 文将、櫛田 慶幸、近藤

	<p>誠、機器配管系の支持構造部に着目したハイブリッド地震応答試験、日本原子力学会「2008年秋の大会」予稿集、p. 15、2008. 9</p> <p>(2) 西田明美 新谷文将 櫛田慶幸 近藤誠、酒井 理哉、塩竈 裕三、機器配管系の支持構造部に着目した接合部連成モデリング、日本原子力学会「2009年秋の大会」予稿集、2009. 9</p> <p>(3) 酒井 理哉、塩竈 裕三、西田 明美、新谷 文将、櫛田 慶幸、近藤 誠、機器配管系の支持構造部の地震挙動評価、日本原子力学会「2009年秋の大会」予稿集、2009. 9</p>
--	---