

繰返し荷重を受ける機器配管系基部アンカーの履歴特性に対する有限要素解析

(一財) 電力中央研究所 正会員 ○永田 聖二 松尾 豊史
JIP テクノサイエンス (株) 正会員 川口 和広
関西電力 (株) 正会員 横田 克哉

1. はじめに

火力・原子力発電所の取放水施設等のように、鉄筋コンクリート（以下、RC と呼ぶ）製構造物が機器配管系を支持する場合、基部の固定には頭付きアンカーボルト等（以下、アンカーと呼ぶ）がよく用いられる¹⁾。著者らは、アンカーの地震時履歴特性を把握するために、繰返し載荷実験ならびに耐力式による検討を行ってきた²⁾。本研究では、これらの実験を対象として三次元有限要素解析を行い、実験による履歴特性の再現性および実験上の損傷状況と解析上の応力状態の対応関係について、アンカーの破壊モード（アンカー降伏先行型、コンクリート破壊先行型）をパラメータとして検討する。

2. 解析対象実験の条件

解析対象は、図-1 に示す機器配管系基部におけるアンカー一定着部を模擬した RC 試験体 2 体である。ここでは、ボルト長を 250mm, 100mm と変えることで、アンカーの破壊モードをアンカー降伏先行型、コンクリート破壊先行型とした。RC 試験体の寸法は、1.2m×0.9m×0.6m であり、250mm×250mm×60mm のベースプレート（SS400）に溶接した 4 本の頭付きアンカーボルト（JIS B 1198、ボルト径 22mm、ヘッド径 35mm）を埋め込んだ。試験体内には、D19（SD345）の主筋を 5 本ずつ（鉄筋比 0.38%）配置した。試験体表面から主筋中心までのかぶり厚は 100 mm である。材料試験によるアンカーの降伏強度は 330.2N/mm²、主筋の降伏強度は 401.9N/mm²、コンクリートの圧縮強度、引張強度（割裂強度）はそれぞれ 40.9N/mm²、3.2N/mm² である。

繰返し載荷実験では、図-2 に示すように試験体上に鋼製サポートと錘（質量 20kN）を設置し、アクチュエータで水平荷重を錘重心位置に静的に作用させた。その際には、水平変位をサポートの基部からの高さで除した変形角を 0.5%刻みで 3%まで漸増させて、その後 1%刻みで漸増させた。同一振幅の繰返し回数は 2 回とした。

3. 有限要素解析の条件

汎用解析プログラム DIANA（ver.10.3）を用いて非線形有限要素解析を行う。図-3 に示すように、対称性を考慮して試験体の半分をモデル化する。コンクリートおよびアンカーは非線形ソリッド要素でモデル化し、主筋やせん断補強筋は埋込み鉄筋要素（非線形トラス要素）で離散的にモデル化する。鋼製サポートは線形シェル要素でモデル化する。

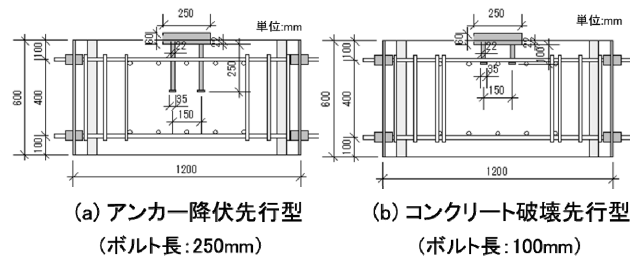
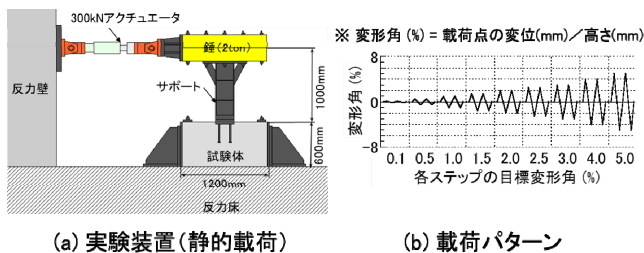
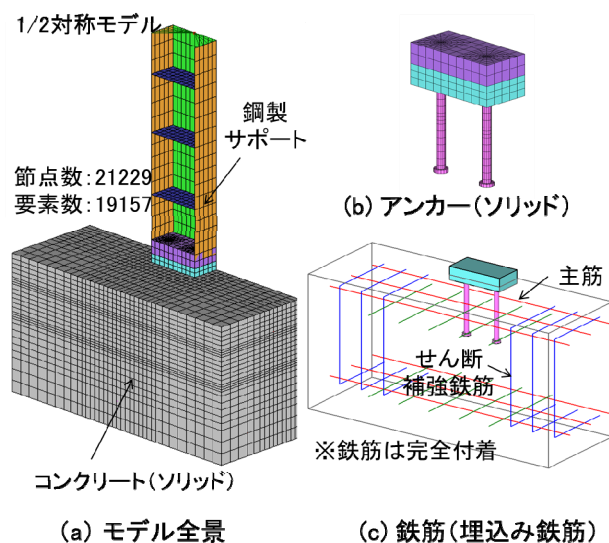
図-1 解析対象試験体²⁾図-2 荷条件²⁾

図-3 試験体のモデル化

キーワード 有限要素解析, 材料非線形, RC 構造物, 機器配管系, アンカー, 繰返し載荷実験

連絡先 〒270-0021 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 070-6568-9775

コンクリートのひび割れには直交固定ひび割れモデルを採用する。圧縮側と引張側の応力-ひずみ関係にはコンクリート標準示方書モデルを、ひび割れ面でのせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデルを用いる。圧縮特性では、横拘束による圧縮強度の増加、要素寸法と圧縮破壊エネルギーを考慮する。アンカーと鉄筋には、弾塑性モデル (Von Mises の降伏基準) を適用する。コンクリートとアンカーの界面にはインターフェース要素を設置し、法線方向とせん断方向の応力が連成したクーロン摩擦モデル (摩擦係数は 0.4) を使用する。また、鉄筋とコンクリートの界面については、完全付着とする。

4. アンカー降伏先行型の場合の再現性

アンカー降伏型における荷重-変位関係を解析と実験で比較すると、図-4 のようになる。図-5 は、変位 20mm の時の解析上のアンカーの応力状態である。これらによると、解析によって、アンカーの降伏状況も含めて実験による履歴特性がうまく再現されている。図-6 は、解析によるコンクリートの応力状態 (最小主ひずみ) を実験による損傷状態と比較している。これらによると、ベースプレート周辺のコンクリートの剥離やヘッド周辺損傷に概ね対応するような圧縮応力が、解析モデルでも確認できる。

5. コンクリート破壊先行型の場合の再現性

図-7、図-8 は、コンクリート破壊先行型における解析と実験の荷重-変位の関係、変位 20mm における解析上のアンカーの応力状態をそれぞれ示している。これらによると、最大耐力 (アンカーが降伏するかしないか程度で発生) は概ね一致しているが、その後の耐力低下についてはうまく再現できていない。図-9 は、解析によるコンクリートの応力状態 (最大主ひずみ) と実験による損傷状態との対応関係を図示している。これらによると、ヘッドから水平方向に進展するコンクリートのひび割れに概ね対応するような引張ひずみが、解析でも発生していることが確認できる。

6. まとめ

材料非線形性を適切に考慮した有限要素解析に基づいて、繰返し荷重を受けるアンカーの履歴特性や内部状態を概ね再現しうることを、アンカー降伏先行型、コンクリート破壊先行型の破壊モードで確認した。今後は、地震による RC 部材の曲げひび割れの影響を考慮したアンカーの履歴特性に対する再現解析を行う予定である。

謝辞：本研究における解析対象実験は、電力 9 社、日本原子力発電、電源開発、日本原燃による原子力リスク研究センター共通研究として実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2018
- 2) 永田聖二，松尾豊史，審浩年，重光信宏：機器配管系基部におけるアンカーの定着性能に関する一検討，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，pp. 141-142，2017. 9

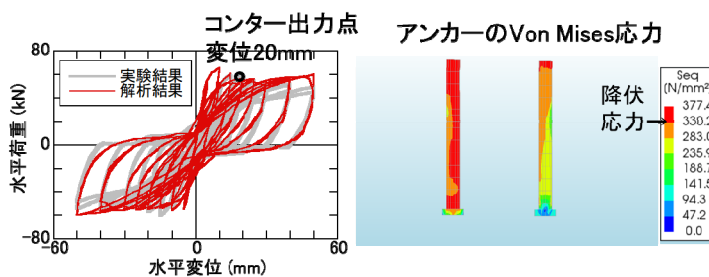
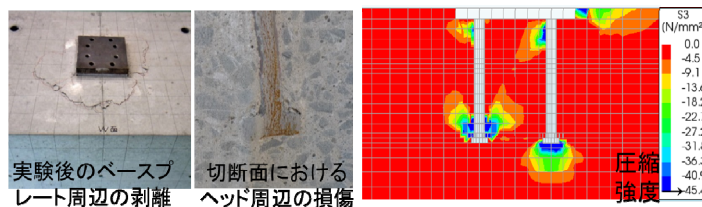


図-4 荷重-変位関係 図-5 アンカーの応力状態



(a) コンクリートの損傷状況 (b) コンクリートの最小主応力

図-6 コンクリートの損傷状態と応力状態

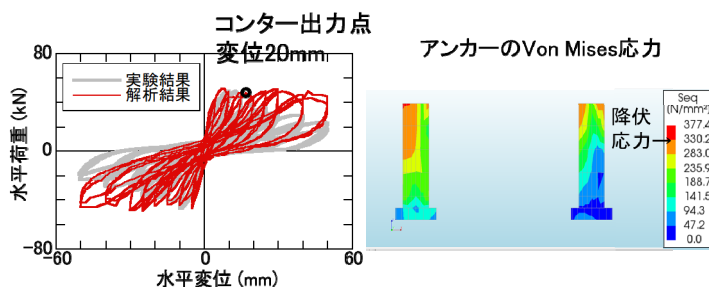
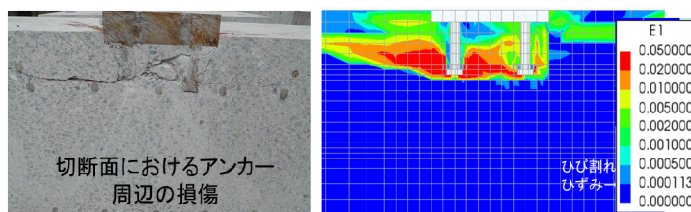


図-7 荷重-変位関係 図-8 アンカーの応力状態



(a) コンクリートの損傷状況 (b) コンクリートの最大主ひずみ

図-9 コンクリートの損傷状態とひずみ状態