



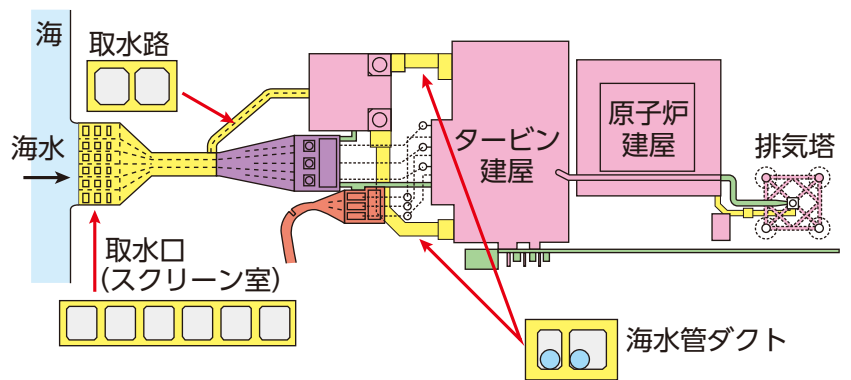
## 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性評価手法を高度化

—耐震性能照査指針の改訂に向けた取り組み—



原子力発電所では、大地震発生時などの非常時でも、原子炉冷却用の海水の取水などの機能を維持することが求められます。そのため、取水口や取水路、海水管ダクトなどの鉄筋コンクリート製(RC)地中構造物(屋外重要土木構造物)は、施設全体に大きな影響を与える恐れがある地震に対しても、耐震安全上重要な機器・配管を支持する機能や取水・通水する機能を維持し、構造物の内部空間を確保することが要求されます。2011年の東北地方太平洋沖地震以降、国の安全規制は全面的に改正されてきており、その中で基準地震動も見直され、増大していく趨勢にあります。このため、屋外重要土木構造物の耐震性の評価に対しても、より精度が高く、標準的な性能照査※手法の構築が求められています。当所は、これらの高度化に向けた各種研究を推進し、得られた成果を「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針」(公益社団法人土木学会)に反映してきました。

※ 指標などと照らして要求する性能が得られるか確認すること



原子力発電所における代表的な屋外重要土木構造物(黄色)



海水管ダクト



取水路(取水時)

## より高度な三次元非線形地震応答解析手法を導入

### シミュレーション解析に基づく検証

近年、数値解析技術や計算機性能の向上により、地震に対する構造物の応答解析は、三次元解析が一般的になりつつあります。しかし、取水口などのように地中に埋設された構造物に対して、水平二方向からの力を同時に受ける状況では十分に検討されていませんでした。

そこで、地盤と構造物の相互作用を考慮する地盤・構造物連成系において、三次元での非線形地震応答解析の適用性を検証するために、せん断土槽振動実験に対するシミュレーション解析を行い、実験結果と比較しました(図-1)。この実験では、正方形中空断面のRC試験体をせん断土槽に設置し、乾燥砂で埋設後、試験体の対角方向に加振しました。シミュレーション解析では、地盤には全応力モデル、構造物には材料非線形モデルを用い、地盤・構造物間の境界部は剥離と滑りを考慮しました。

その結果、本解析手法によって、実験結果の地盤および構造物の変形やコンクリートのひび割れ、鉄筋の降伏などの損傷状況を、概ね良好に再現できることを確認しました。

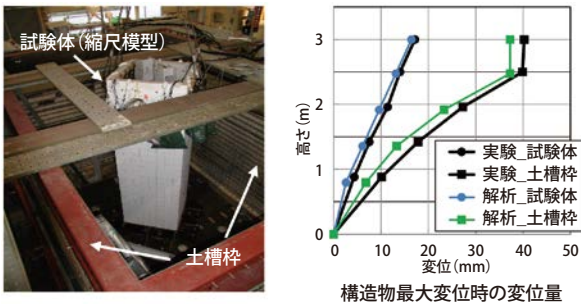


図-1 せん断土槽振動実験に対するシミュレーション解析

### 三次元解析の有効性を確認

屋外重要土木構造物は、トンネル状あるいは箱型の構造物であることが多く、長手方向・奥行方向の力には剛性が大きくなります。そのため、通常は剛性の小さい構造物の横断面方向に対して二次元の地震応答解析が行われます。しかし、構造物が地震に対して水平二方向や鉛直方向に応答する場合や応答挙動を厳密に評価する場合などでは、三次元解析が有効となります。

そこで、実規模構造物の三次元形状と地震動の入力方向に着目し、地中に埋設された取水ピットに対する地盤・構造物連成系の三次元非線形地震応答解析を実施しました(図-2)。

三次元解析では、屋外重要土木構造物の横断面方向の壁など、三次元形状を考慮することで、二次元解析よりも現実的な変形角やずれなどの相対変位の評価が可能となりました。さらに、詳細な損傷状況を評価できることや地震応答が支配的となる横断面方向に地震動を入力することで構造物の損傷を安全側に評価できることも確認できました。

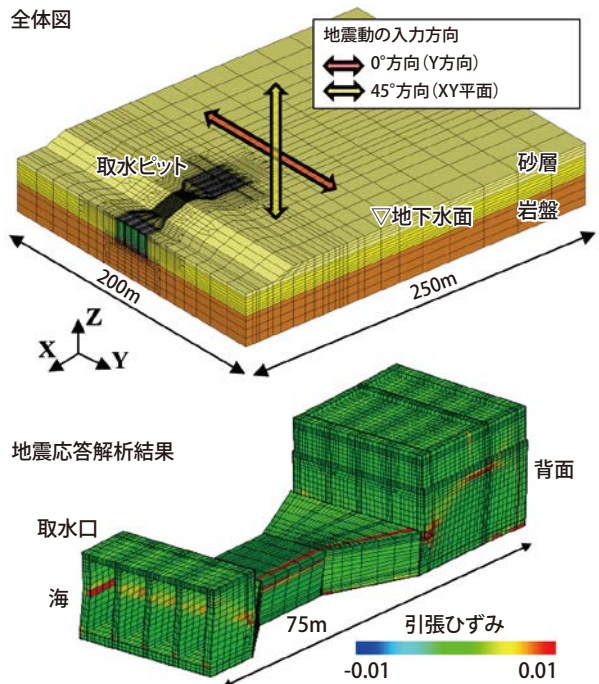


図-2 取水ピットの三次元非線形地震応答解析事例



## 合理的な性能照査が可能となる変形指標を提案

### 損傷過程の変位分布データを取得

従来の耐震設計や性能照査では、屋外重要土木構造物の地震応答解析は、部材を梁(線材)要素の組合せによって二次元にモデル化して行ってきました。近年、解析モデルの精緻化や計算機環境の高度化に伴い、ソリッド(多面体)要素でモデル化した構造物の三次元材料非線形解析も可能になってきています(図-3)。

しかし、解析結果を用いて性能照査を行うための指標や限界値が、二次元の梁要素に向けて作成された内容を踏襲したままでした。そのため、損傷が進む過程において構造物全体の詳細な変位分布を再現できる材料非線形解析の利点を活かすことができませんでした。これは、検証できる実験データが十分ではないことも一因でした。

そこで、レーザースキャンと画像で構造物の変位分布を計測できる環境を整え、屋外重要土木構造物を構成する典型的な3種類の形状(直線部、屈曲部、突当たり部)の試験体に対して、水平方向に静的な荷重をかけ繰り返し変位を大きくしながら、損傷が進む過程をデータ化しました(図-4)。

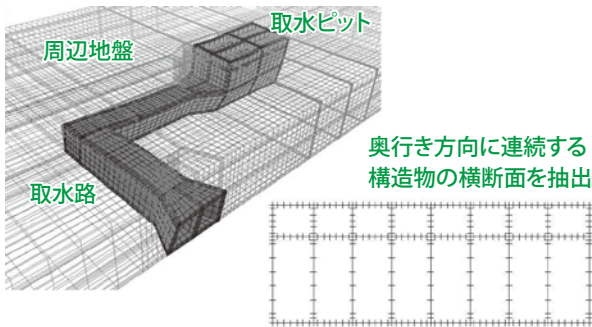


図-3 地盤・構造物連成系のソリッド要素による三次元モデル(左上)と従来の梁要素による二次元モデル(右下)

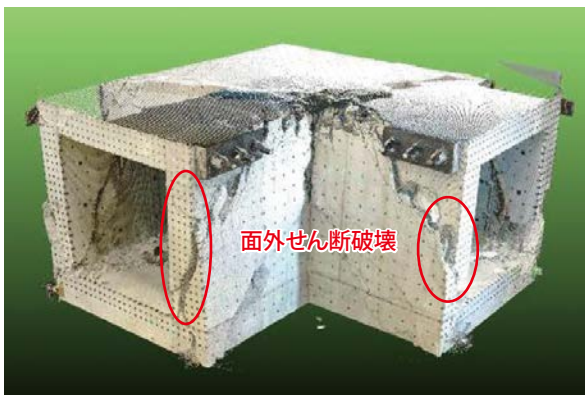


図-4 レーザースキャンによる屈曲部試験体の点群

### 変形指標に対する限界値の設定と適用性の検証

屋外重要土木構造物では、特にせん断破壊に対する耐震性能の精度向上が困難になっていたため、合理的な変形指標が望まれていました。

当所は、損傷過程における部材レベルの変位分布の計測や分析を以前から進めていましたが、今回加わった構造物のデータも踏まえ、材料非線形解析を用いた性能照査に適用可能な指標と限界値を提案しました。具体的には、曲げ破壊に対しては「層間変形角」、せん断破壊に対しては「部材厚増分」などを変形指標としました。これらの指標の適用性は、突当たり部の試験体による実験と三次元材料非線形のシミュレーション解析結果を通して確認しました(図-5)。本変形指標を用いることにより、局所的な損傷や解析の要素寸法・形状の影響を受けにくい、合理的な性能照査が可能になります。また、変形量は計測が可能であるため、実際に損傷した構造物の評価にも適用可能です。

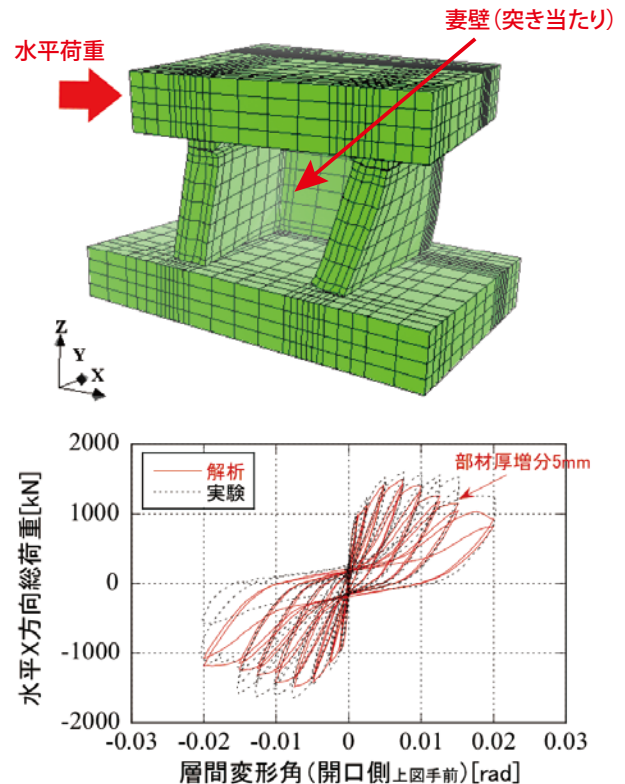


図-5 材料非線形解析による実験結果のシミュレーション解析(上) 水平載荷時の変形状態実験とシミュレーションの適合度合の確認(下)

# 3

## 標準化に向けた取り組み

### 耐震性評価手法の高度化に向けた研究構成

当所では、電力各社の要望を踏まえ、原子力リスク研究センターを中心に、屋外重要土木構造物の耐震性評価手法の高度化を推進してきました。

主な研究項目は、前述した①地盤・構造物連成系の三次元地震応答解析、②変形指標を用いた性能評価に加え、③補修効果に関する検討、④構造物と機器の境界部に関する検討です。③④では、構造物が地震で損傷した際の機器・配管の支持性能への影響や耐久性能評価時のひび割れ補修部や断面修復部の考慮方法などの研究を行っています。これらの研究成果を盛り込み、地震作用に対する性能照査の手法を標準化しました(図-6)。

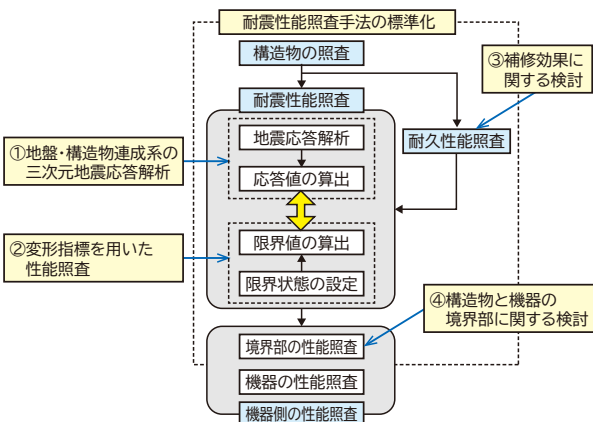


図-6 研究の全体構成と各研究項目との関係

### 耐震性能照査指針への反映

土木学会原子力土木委員会では、屋外重要土木構造物の地震時の性能照査を体系化し、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針」を2018年10月に改訂しました(図-7)。当所は、有識者・電力会社の協力を得ながら、改訂案を作成するなど積極的に協力しました。本指針には、近年得られた新しい知見と、当所の研究成果が数多く反映されています。

本指針は、屋外重要土木構造物ばかりでなく、一般のRC地中構造物の耐震安全性評価にも広く適用可能です。また、日本電気協会発行の原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC4601)などにも活用される見込みです。



図-7 耐震性能照査指針(2018年度版)の表紙

## ひとこと

本研究は、RC地中構造物の耐震性評価手法の高度化に向け、東北地方太平洋沖地震以降の原子力発電所設備に対する安全性に関心が高まっている中、緊急度・重要度の高い研究テーマとして、当所および電力各社・有識者が協力して研究に取り組んできました。研究成果は論文(公知化)して学協会の基準の改訂に協力し、原子力発電所の新規基準適合性審査を円滑に進められるようにしました。今後は、その他電力施設や社会インフラ全般の耐震安全性向上にも寄与したいと考えております。

地球工学研究所 上席研究員 松尾 豊史



### | 関連する研究報告書・論文等 |

- [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<技術資料>,2018年10月
- [2] Tsuguhiro Shimabata, Toyofumi Matsuo, Keizo Ohtomo, Hironori Morozumi, Takaaki Fuse: Three-Dimensional Seismic Analysis of Underground Reinforced Concrete Box Culvert with L-Junction / Yoshinori Miyagawa, Atsushi Shibayama, Hironori Morozumi, Nobuhiro Shigemitsu:Entire Displacement Distribution of Reinforced Concrete Box Culvert in the Damaging Process Subjected to Horizontal Load, FIB Congress 2018