

# 長尺基礎ボルトの超音波による非破壊検査技術の実機検証

Verification experiments on nondestructive inspection technology of long embedded bolts using ultrasonic waves.

## 超音波シミュレーションと実物大基礎ボルトを用いたモックアップによる検討

本研究では、浜岡3号機で特別点検の対象となる長尺基礎ボルトを対象に、超音波伝播シミュレーションによる予備検討と、実物大試験体を用いた検出試験を行い、超音波探傷試験による欠陥の検出限界サイズを明らかにした。

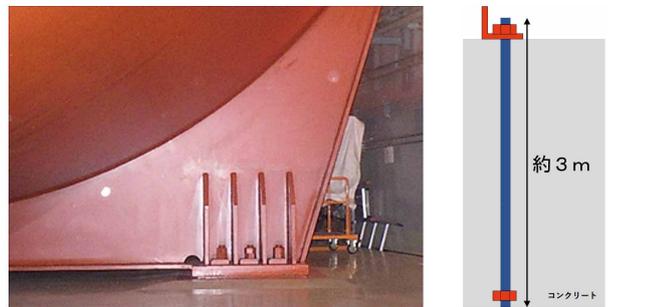


執筆者  
原子力安全技術研究所  
プラントグループ  
吉川 美奈子・熊野 秀樹

### 1 背景および目的

浜岡原子力発電所では、3号機の運転期間延長認可申請に向けて「特別点検」の実施方針が検討されている。原子力規制委員会の定めたガイド<sup>[1]</sup>では、特別点検の中で原子炉圧力容器およびサブプレッションチェンバ（S/C：Suppression Chamber）の基礎ボルトに対して非破壊検査手法の一つである超音波探傷試験（UT：Ultrasonic Testing）によってボルト内部の欠陥の有無を確認することが求められている。しかし、浜岡3号機の点検対象ボルトの中には、全長約3 mの長尺ボルト（第1図（a）、（b））が含まれており、先行して特別点検を実施した他電力の点検対象と比較すると数割以上長尺であるため、従来のUT方法では内部欠陥の検出が困難ではないかという懸念があった。

そこで本研究では、浜岡3号機の特別点検対象である長尺基礎ボルトのUTによる欠陥の検出限界を明らかにすることを目的に、超音波伝播シミュレーションによる探傷条件の予備検討および実物大の試験体を用いた検出試験を行った。



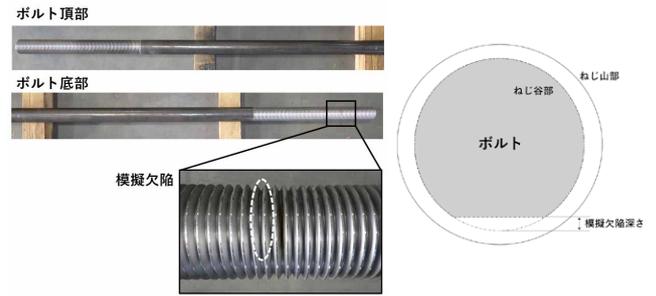
(a) 基礎ボルト外観 (b) 埋込状態の基礎ボルト模式図  
第1図 浜岡3号機のS/Cサドルサポート用基礎ボルト

### 2 探傷条件の予備検討方法

#### (1) 検出試験

検出試験では、点検対象となる基礎ボルトと同寸法のボルトに第2図（a）、（b）に示すようなスリット形状の模擬

欠陥を加えて探傷することで、模擬欠陥の半径方向の深さに対する検出性を確認した。模擬欠陥の位置は、ボルトが埋め込まれたときに下部のナットと構造物との境界にあたるボルト底部側のねじ谷部に設定した。UTの試験条件は、説明性を確保するため先行して特別点検を実施した他電力の方法にならない、JEAC4207-2008および原子力安全推進協会の前身である日本原子力技術協会（JANTI：Japan Nuclear Technology Institute）のガイドライン<sup>[2]</sup>に従った。



(a) ボルト底部の模擬欠陥 (b) ボルト断面模式図  
第2図 実物大の試験体と模擬欠陥

第1表 JANTIのガイドラインに定められている試験条件

項目	条件	
超音波探傷器	パルス反射式	
探触子	形	垂直探触子
	周波数	0.4~15 MHz
	寸法	試験部の形状及び寸法に対して適合しており、超音波が十分透過するもの
基準感度	試験体ボルトの底面エコーを表示器上80%±5%の範囲にあわせ、その4倍の感度	
欠陥とみなす判定基準	基準感度による表示機目盛において、5%以上のエコーを有する指示部	

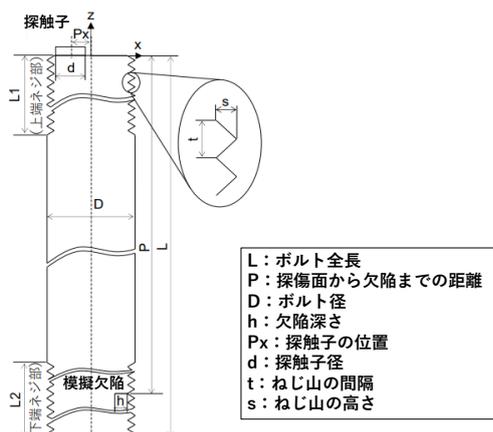
模擬欠陥の半径方向の深さを決定する際には、まず先行他社で検出限界とされた欠陥サイズを参考にした。先行他社のボルトと比べて、浜岡3号機の点検対象ボルトは全長が長いことから、ボルト内部での超音波の減衰が大きくなると考え、先行他社で検出限界とされた深さ1.6 mmに対して試験し、検出性を確認した。その結果、欠陥由来エコーの高さは最大4%であった。試験にあたっては、複数の探触子径で探傷を試みたが、いずれにおいても欠陥由来

エコーの高さは第1表に示す判定基準の5%と比較して小さく、ノイズエコーとの判別も困難であると判断した。

## (2) 超音波伝播シミュレーション

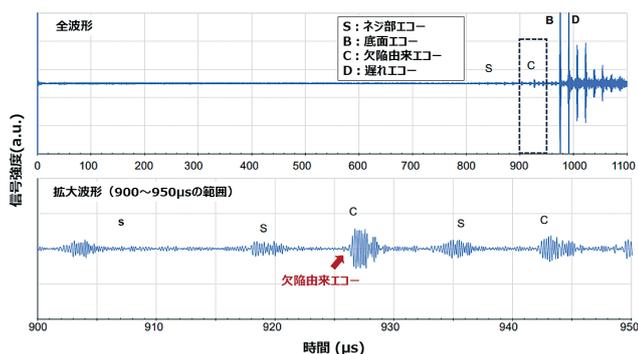
欠陥の深さを変えて再試験を行う前に、試験条件を事前検討する目的で超音波伝播シミュレーションを実施した。これは、一度、試験体に模擬欠陥を入れるとその後は欠陥を深くする方向にしか加工が出来ないことから、模擬欠陥の深さの検討は慎重に行う必要があったためである。

シミュレーションでは、試験体を第3図のように二次元でモデル化し、有限要素法を用いてボルト中の超音波伝搬を再現した。このとき、模擬欠陥深さは、最初の検出試験で確認した1.6 mmに加え、3.2 mmと4.8 mmを試した。超音波伝播シミュレーションにあたっては、これまで厚さ数10 cmのものに対する実施しか報告されておらず、今回のような伝搬距離が数mにも及ぶシミュレーションの実施においては、リンキングという波形が尾を引く現象や解の発散が懸念されることから、要素サイズおよび時間刻みを複数パターン試して適正化した。



第3図 有限要素法計算に用いた試験体の二次元モデル

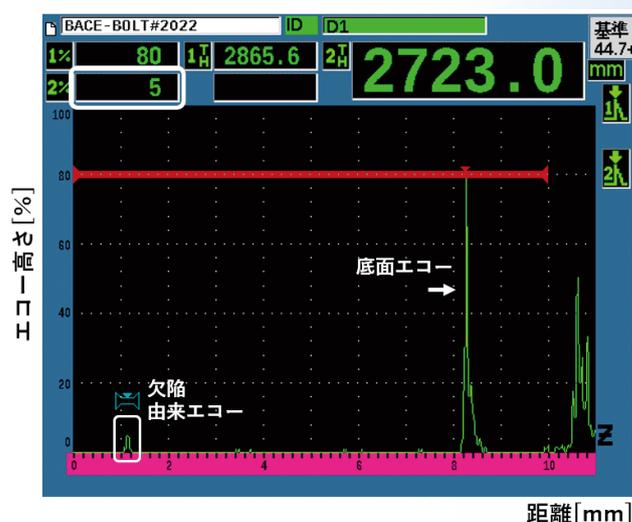
深さ3.2 mmの模擬欠陥に対するシミュレーションの結果を第4図に示す。ここでは、ネジ部エコーと欠陥由来エコーの高さの比が2以上あり、周囲のノイズとの判別は充分可能と考えたことから、深さ3.2 mm以上の模擬欠陥は検出されうると判断した。また、探触子の直径や模擬欠陥に対する探触子の配置位置によってエコー高さに変化が現れることも確認できた。



第4図 深さ3.2 mmの模擬欠陥に対する受信波形

## 3 予備検討を踏まえた検出試験の結果

シミュレーションの結果を受けて、試験体の模擬欠陥を深さ3.2 mmに加工し、再度検出試験を行った。その結果、シミュレーションと同一条件での検出試験においては、5%未満の欠陥由来エコーしかみられなかったが、第1表に示す試験条件を満足する範囲の中で再度試験を実施したところ、第5図に示すとおり、判定基準の5%を満たす高さの欠陥由来エコーが得られ、ノイズエコーとの判別も容易であり、検出可能と判断した。



第5図 10C10N(10 MHz,  $\Phi$  10, 縦波)の探触子での探傷波形

## 4 まとめ

本研究において、浜岡3号機の全長約3 mのS/Cのサドルサポート用基礎ボルトにおけるスリット形状欠陥の検出限界は深さ3.2 mmであると結論付けた。また、この結果は、浜岡3号機の特別点検実施方針に反映された。

最後に、本研究で紹介した各種検討は、一般財団法人電力中央研究所および株式会社中部プラントサービスの皆さまにご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

### 参考資料

- [1] 実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド 2013年6月15日 制定
- [2] 日本原子力技術協会 JANTI-SANE-G2地震後の機器健全性評価ガイドライン [検査手法・配管・基礎ボルト等] 2012年3月