

AE センサを用いた埋込金物検査 その1 モックアップ試験

Embedded hardware inspection using AE sensor Part I Mockup tests

日本原燃(株)	三浦 進	Susumu MIURA	Member
日本原燃(株)	関口 昭司	Shouji SEKIGUCHI	
日本原燃(株)	服部 功三	Kouzou HATTORI	
原子燃料工業(株)	○小川 良太	Ryota OGAWA	Member
原子燃料工業(株)	藤吉 宏彰	Hiroaki FUJIYOSHI	Member
原子燃料工業(株)	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member

Non-destructive testing technique was developed for embedded hardware using acoustic emission sensors. In this technique, AE sensor records the acoustic vibration generated by striking the embedded hardware with a hammer. The fixed state of the embedded hardware is judged from the vibration time of the embedded hardware recorded by the AE sensor and the frequency distribution of the acoustic signal. Mockup tests and FEM analysis were carried out in order to verify the effectiveness of the technique.

Keywords: Non-Destructive Evaluation, Embedded Hardware, Acoustic Emission Sensor, Mockup, FEM

1. はじめに

発電所等施設の多くはコンクリート構造となっており、施設に必要な機器や配管等の支持構造物（耐震サポート等）を取り付ける基礎として埋込金物が利用されている。埋込金物は図 1 に示すように形状が矩形の平板（プレート）にジベル（頭付き丸棒）を溶接あるいはねじ込みにより取り付ける構造であり、用途・荷重により種々の大きさがある。

埋込金物は位置を固定してからコンクリートを打設することによりコンクリート構造物に施工される（図 1 参照）が、近年は耐震性能向上の為、コンクリート内に配置される鉄筋が密となり、埋込金物のジベルが鉄筋と干渉することで位置決めが困難となり、場合によってはジベルが切断され欠損した状態で施工された例¹が確認されている。

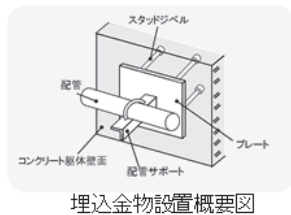
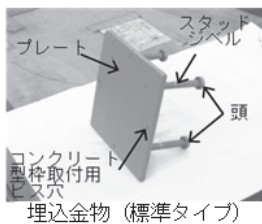


図 1 埋込金物と埋込金物の設置概要図

日本原燃株式会社では超音波探傷試験（UT）による現品点検（スタッドジベル個々の健全性確認）により埋込金物の健全性を確認している¹。UT 検査では埋込金物のジベル直上にセンサを設置し測定する必要があるが、耐震サポート等が設置されていることから、UT 検査用のセンサをジベル直上に配置できず、UT 検査できないジベルが多数存在する問題がある。フェイズドアレイ超音波探傷（PAUT）検査では、UT 検査で確認できる内容に加え、ジベル 1 本毎の角度の測定が可能²であるが、UT 検査同様にジベル直上にセンサを設置できない問題がある。また、電磁誘導法（ET）による検査では、埋込金物に渦電流を流すことにより発生する磁束の変化により健全性が確認でき、UT 検査で検査できないジベルを判断することが出来る。一方で、健全性の評価の為には磁束到達範囲が埋込金物の型式毎に異なる為、型式毎に測定用センサの製作が必要となる問題がある。

そこで、著者らはハンマー打撃により発生する音響振動の持続時間および周波数により埋込金物の固定状態が判断できる AE（Acoustic Emission）センサを用いた打音検査による埋込金物の健全性評価技術を開発した。本報では、AE センサを用いた打音検査を埋込金物に適用するために実施したモックアップ試験および FEM 解析について述べる。

2. モックアップ試験体

2.1 試験体の製作

再処理工場内に設置されている埋込金物の状況を踏まえて、健全な埋込金物ならびに UT 検査が困難な埋込金物の試験体を製作した。再処理工場内の埋込金物は、鋼板サイズ、ジベルサイズおよび本数の組み合わせを見ると約 200 種類あるが、一般共同溝において不良施工が確認された埋込金物を代表サンプルに選定した。選定した試験体種類および数は、R タイプ（鋼板寸法：400×400×25mm、ジベル寸法：φ22×160mm×9本）60体、P タイプ（鋼板寸法：250×250×16mm、ジベル寸法：φ16×120mm×4本）50体とした。代表サンプルにおける測定データの比較により、他のタイプの埋込金物に対する適用性を評価する。試験体の施工パターンおよび施工パターンごとのジベル状態の例を表 1 および表 2 に、製作した試験体の写真を図 2 および図 3 に示す。なお、表 2 中の黒丸は切断ジベルを示し、灰色の丸は曲げジベルを示す。また、打設においては壁施工を模擬し、埋込金物の鋼板が地面に対して垂直となる状態でコンクリートを打設した。

表 1 埋込金物試験体の施工パターン

耐震ポルト		施工パターン							
鋼材	配置	健全	切断				曲げ(基準:30°)		
			1本	1列	2列	全数	1本	1列	全数
□鋼	中央配置	P,R	P,R	P,R	R	P,R	P,R	P,R	P,R
	端部配置	P,R	P	P					
	端部切断		P,R	P,R	R				
	根元切断		P,R	P,R	R				
	15° 曲げ							P,R	P,R
	45° 曲げ							P,R	P,R
L鋼	中央配置	R	R	R	R			R	R
	端部配置	P	P	P				P	P
C鋼	中央配置	R	R	R	R			R	R
	端部配置	P	P	P				P	P
H鋼	中央配置	P,R	P,R	P,R	R			P,R	P,R
鋼板	1/3 覆い	P,R	P,R	P,R	R			P,R	P,R
	2/3 覆い	R	R	R	R			R	R
	全覆い	P,R	P,R	P,R	R			P,R	P,R
	なし	P,R	P,R	P,R	R			P,R	P,R

P:P タイプ(鋼板: 250×250×16mm, ジベル: φ16×120mm×4本)
R:R タイプ(鋼板: 400×400×25mm, ジベル: φ22×160mm×9本)

表 2 試験体の製作パターン例

	9本ジベル		4本ジベル	
健全			健全	
一列欠損			一本欠損	
全数欠損			一列欠損	
曲げ			全数欠損	

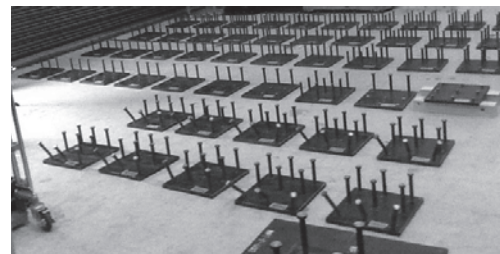


図 2 埋込金物試験体 (製作段階)

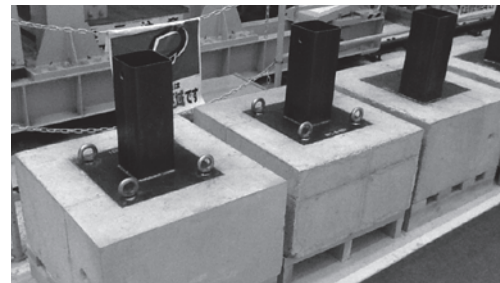


図 3 埋込金物試験体(コンクリート打設後ポルト溶接段階)

2.2 AE 打音検査

試験には、図 4 に示す AE センサ、計測ボックス、波形処理装置 (タブレット PC) などより構成されている AE センサを用いた打音検査システムを用いた。打音検査信号の振動持続時間と周波数分布を用いて埋込金物の健全性の評価方法について検討した。AE 打音検査では、埋込金物をハンマー打撃した際の音響データから、生波形と生波形の減衰から算出した振動持続時間および周波数解析データが得られる。また、周波数解析データは高速フーリエ変換 (FFT) により求める方法とウェーブレット変換により求める方法があり、これらの組み合わせにより健全性判定を実施する。

AE 打音検査は埋込金物（ジベル）に打撃を与えてその時の振動を測定し、振動の周波数分布を確認することで、埋込金物の状態（コンクリート打設前・後、荷重負荷前・後）に依存する「埋込金物/コンクリート間（接触面：プレート側面と底面、スタッド表面）の相互作用の程度³を測定対象とする検査」であり、必ずしもジベル直上を打撃する必要は無い。AE 打音検査での埋込金物の評価方法について表 3 に示す。UT 検査ではジベル直上に架台が存在し検査できないジベル（UT 未測定箇所）に対して、AE 打音検査ではジベル近傍位置の計測点における測定



図 4 AE センサを用いた打音検査装置

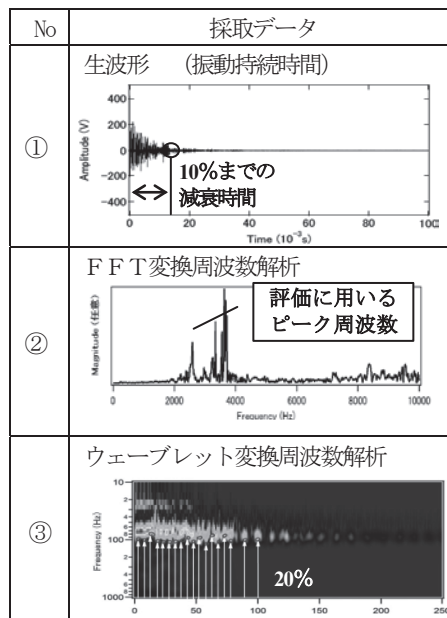
表 3 埋込金物の評価の仕方

(1) UT 未測定箇所の補充評価が可能（近傍位置）	
UT 未測定箇所に対し、AE 打音検査にて近傍位置⑤の測定データにより評価できる	
(2) UT 未測定箇所の補充評価が可能（間接位置）	
UT 未測定箇所に対し、AE 打音検査にて近傍位置⑤は測定できないが、間接位置④⑥の測定データにより評価できる	
(3) UT 未測定箇所の補充評価が不可	
UT 未測定箇所に対し、AE 打音検査にて近傍位置および間接位置の④～⑧が測定できないため、参考データとして①～③の測定を実施する	

データが得られれば評価が可能となる。（表 3 (1) 参照）次に、UT 未測定箇所に対して、AE 打音検査では近傍位置が打撃できない場合でもジベル中間点（間接箇所）の計測点における測定結果が得られれば、間接箇所の測定データを用いて、該当ジベルの評価が可能である。（表 3 (2) 参照）最後に、UT 未測定箇所に対して AE 打音検査においても近傍位置および間接位置が打撃できず測定データが得られない場合は、AE 打音検査による評価はできない。（表 3 (3) 参照）

AE 打音検査で評価に用いる信号解析例を表 4 に示す。表 4 の①は、生波形データであり、打撃開始時点の振幅が 10%に減衰するまでの時間を振動持続時間として算出する。振動持続時間は埋込金物とコンクリートの密着度合いを確認することが可能であり、密着度が高いほど振動持続時間が短い傾向がある。次に②は、生波形を高速フーリエ変換 (FFT) 処理により得られる周波数分布から、最も低周波側の有意な周波数ピークに着目し、ジベルの切断に伴う周波数の低下を評価する。③は生波形をウェーブレット解析（経時変化毎の周波数分布）し、評価値（ピーク強度が 20%を超える下限値の平均値）を算出する。算出した評価値は詳細解析を行う場合のデータとして利用する。

表 4 信号解析例



2.3 測定条件設定のための予備試験

AE 打音検査では、AE センサを設置した後、AE センサ近傍を人手によるハンマー打撃により測定作業を行う。人手によるハンマー打撃では測定データにバラツキが出

る可能性が有る。そこで、過小又は過大な振動データはエラー処理により除去し、適正な範囲の振動データのみ採取するよう制御している。その採取データのバラツキを評価するため、図 5 に示す計測点 8 点を対象に 10 回の繰り返し測定により実施した結果、データのバラツキは非常に小さく、測定に対する人的な影響は小さいことが確認できた。

次に、ジベル近傍の埋込金物端部を打撃して測定を実施する際、耐震サポート等を回避するため、スタッド位置付近の計測位置に差異が生じるため、計測位置の影響について確認した。その結果を図 6 に示す。

測定データを確認すると、端部に近づく程ピーク強度が高くなっていることが確認できるが、主要な周波数ピークに変化は無いため、測定位置の影響は小さいことが確認できた。

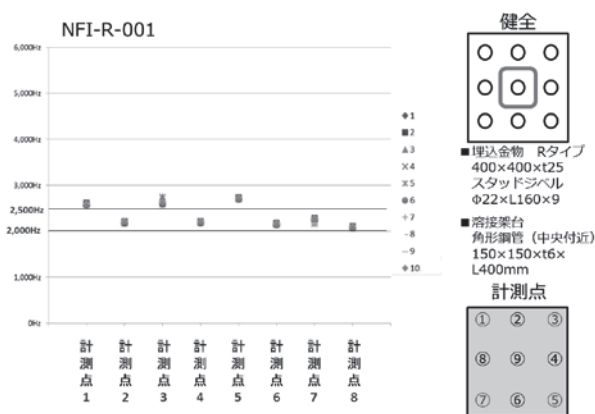


図 5 繰り返し測定結果

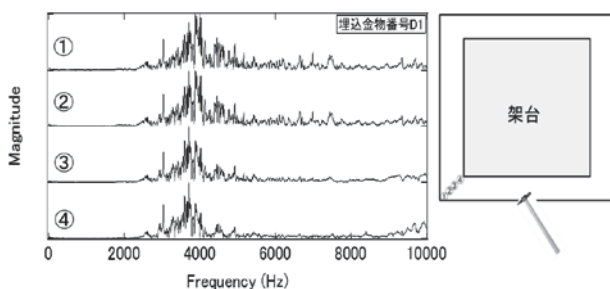


図 6 測定点の位置ずれ影響確認結果

2.4 モックアップ試験体の製作過程の影響

モックアップ試験体において、①埋込金物の製作時（コンクリート打設前）、②コンクリート打設後、③耐震サポート溶接後、そして④荷重負荷後の 4 つの製作過程における AE 打音検査による生波形の振動持続時間および周波数分布の変化を表 5 に示す。

①埋込金物の製作時（コンクリート打設前）においては、埋込金物は拘束が無く自由振動できる状態であるため、振動持続時間が長くなり、周波数分布においてもピーク強度が高いことが確認できる。②コンクリート打設後においてはコンクリートにより埋込金物が強く拘束（密着状態）されているため、振動持続時間が短く打撃直後に減衰している。また周波数分布においてはピーク強度が高い有意な波形は現れないことが確認できる。一方、③耐震サポート溶接後はサポート溶接による熱応力が加わることで、埋込金物/コンクリート間の相互作用が密着から接触に変化することで振動持続時間が長くなり、周波数分布においてもピーク強度が高い有意なピークが現れることが確認できた。さらに④荷重負荷後においては、荷重負荷として引張荷重を加えた結果、③と比べさらに振動持続時間が長くなり、周波数分布においてもより強度の高い周波数ピークが現れるようになることが確認できた。

このことから、埋込金物はコンクリート打設後、何らかのイベント（大きな熱応力や継続的な熱応力、荷重負荷等）が無ければ、埋込金物/コンクリート間の相互作用が密着状態を維持し、振動持続時間により埋込金物の状態確認が可能であることを確認した。また、周波数分布については、振動持続時間が長く埋込金物/コンクリート間の相互作用が接触状態の場合は、有意なピークが現れることから、ピーク周波数によるジベルの状態評価が可能であることを確認した。

表 5 試験体の製作～試験過程で得られる AE 測定データ

試験体の製作過程	AE 生波形	周波数分布
①埋込金物の製作時（コンクリート打設前）	計測点1 振動持続時間: 64.74	
②コンクリート打設後	計測点1 振動持続時間: 1.54	
③耐震サポート溶接後	計測点1 振動持続時間: 27.39	
④荷重付加後	計測点1 振動持続時間: 66.46	

2.5 モックアップ試験体のジベル欠損の影響

全ジベルが健全な埋込金物とジベルを1列切断した埋込金物についてAE打音検査した結果を表6に示す。なお、表6に示すモックアップ試験体は鋼板を溶接したRタイプのモックアップの例である。埋込金物の内、鋼板が表面の2/3を覆っており、ジベル9本中6本がUT未測定箇所となるモックアップであるが、AE打音検査では、AEセンサが設置できる幅が埋込金物に存在していれば測定可能であるため、UT未測定ジベル6本中AE打音検査では4本の測定が可能になる。

AE打音検査の結果、全ジベルが健全な埋込金物では、全計測点の周波数分布において有意な周波数ピークは比較的高い周波数が得られている。一方で、ジベルを1列切断した埋込金物では、切断しているジベル近傍位置である計測点⑤、⑦および隣接位置である計測点④、⑧の周波数分布において有意な周波数ピークの低下により、健全もしくは切断されたジベルの判定が出来ることを確認した。

表6 健全および1列欠損の埋込金物のAE打音検査波形

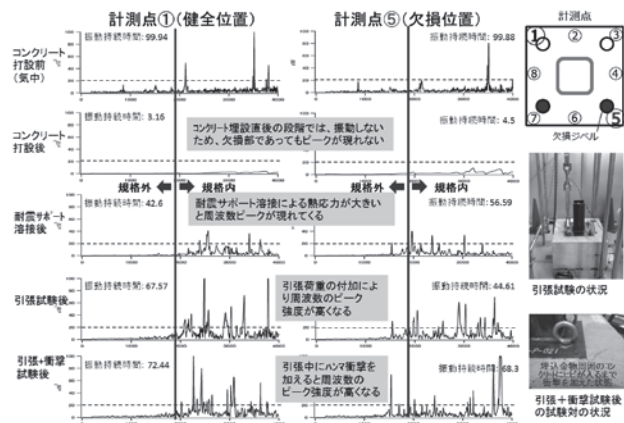
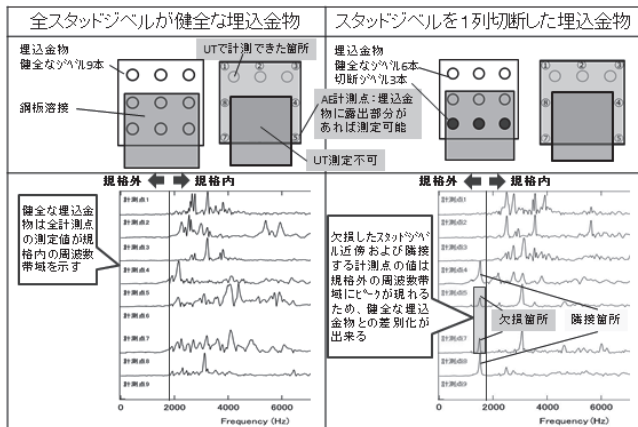


図7 荷重負荷試験による波形の変遷

次に、振動持続時間の変化による、周波数分布の変化を確認するために荷重負荷試験を実施した結果を図7に示す。図7はPタイプの角鋼中央配置のジベル1列切断モックアップにおける例である。左側に健全ジベル部として計測点①の周波数分布を示し、右側に欠損ジベル部として計測点⑤の周波数分布を示している。

各状態における振動持続時間と周波数分布の傾向は表5と同じ傾向が確認でき、耐震サポート溶接後から周波数ピークが現れている。現れた周波数ピークは、表6と同様に健全位置の計測点①では比較的高い周波数に存在し、ジベル切断位置の計測点⑤では計測点①に比べ周波数が低下する傾向を確認した。

2.6 判定基準の設定

AE打音検査による健全性確認方法として、測定により得られた「振動持続時間」と「評価に用いるピーク周波数」に着目し、モックアップ試験結果を詳細に分析して、それらの判定基準値を決定した。

図8はPタイプの埋込金物の各状態(埋込金物製作時、コンクリート打設後、耐震サポート溶接後、荷重負荷後)における振動持続時間の変化を示す。埋込金物製作時であれば、周囲から拘束がなく大半は50ms以上で、100msに至る場合もある。

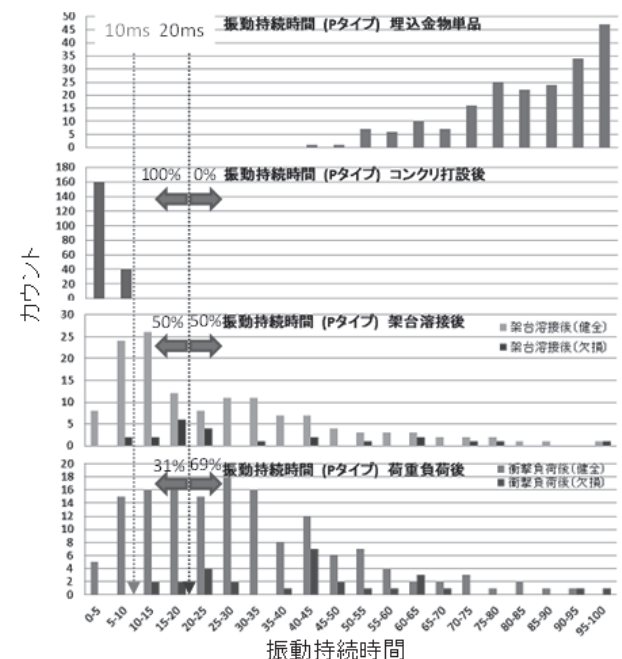


図8 各状態における振動持続時間の変化

一方で、コンクリート打設後では、埋込金物/コンクリート間の相互作用が密着であり強固に固定されていることから、振動持続時間は10ms以下である。その後、耐震サポート溶接、荷重負荷により、振動持続時間は段階的に長くなる。また、耐震サポート溶接後以降の健全と欠損を比較すると、欠損のほうが振動持続時間は長くなる傾向がある。

以上より、振動持続時間が埋込金物製作時の状態より十分に短い20msを判定基準値として、それ未満であれば、埋込金物/コンクリート間の相互作用が密着であり強固に固定されており、埋込金物に浮きが生じる可能性は極めて低いと考えられる。そこで、振動持続時間20ms未満のジベルについては大きな熱応力や継続的な熱応力、荷重負荷等のイベントが無ければ強固に固定された状態が維持されることから「荷重発生無」と評価する。

次に、Pタイプの埋込金物において振動持続時間が20ms以上の埋込金物の評価に用いるピーク周波数の分布と1列欠損の埋込金物モックアップにおけるAE打音検査例を図9に示す。

周波数分布による健全性判定におけるジベルの健全/欠損の境界は図9より欠損したジベルは1900Hz未満を示し、健全なジベルは概ね1900Hz以上となることから1900Hzを判定基準値と設定した。

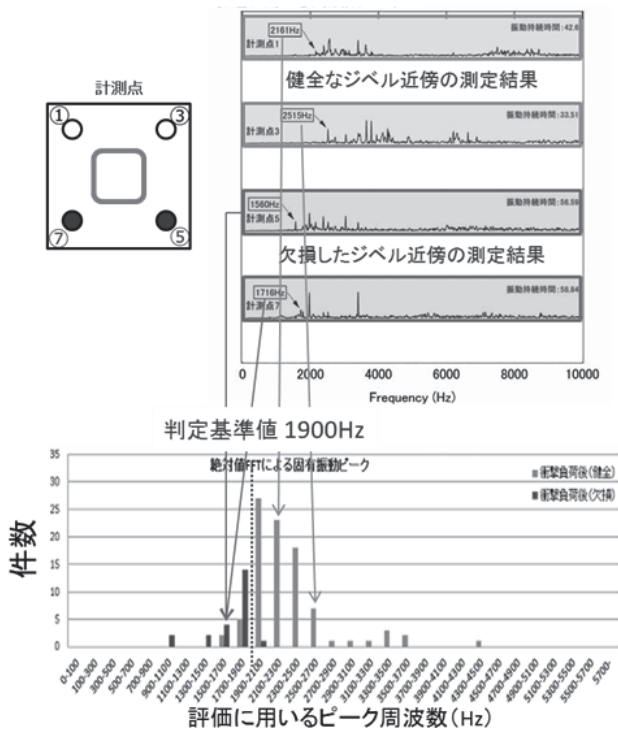


図9 振動持続時間20ms以上のピーク周波数の分布

以上より、振動持続時間が20ms未満のジベルでは「荷重発生無」と評価し、振動持続時間が20ms以上のジベルでは、周波数分布による評価を実施し、ピーク周波数が1900以上の場合「健全」とし、1900Hz未満の場合「NG」と評価する。

2.7 外乱データの除去

AE打音検査による健全性確認方法では、埋込金物に溶接されている耐震サポート等の影響により、得られる周波数分布におけるピーク位置は外乱(耐震サポートの振動に由来するピーク等)の影響が現れることがある。

AE打音検査の評価では単一埋込金物内の複数ジベルのうち健全なジベルの周波数分布には、同じ位置にピークが現れる。(図10参照)

Pタイプにおけるジベル1列欠損の角鋼管溶接モックアップのAE打音検査結果を図11に示す。図中に線を引いた周波数(約2500Hz)において、健全なジベルの計測点ではピークが存在するが、切断したジベルの計測点ではピークが存在しないことが確認できる。これは図10示す波形イメージと合致していることから、単一埋込金物内における、UT検査で健全と判定されたジベル付近の計測点を用いて外乱の影響除去は可能である。

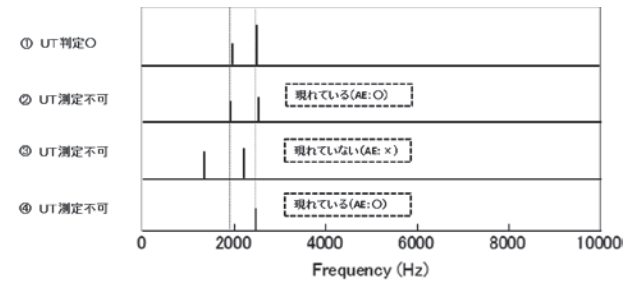


図10 波形イメージ

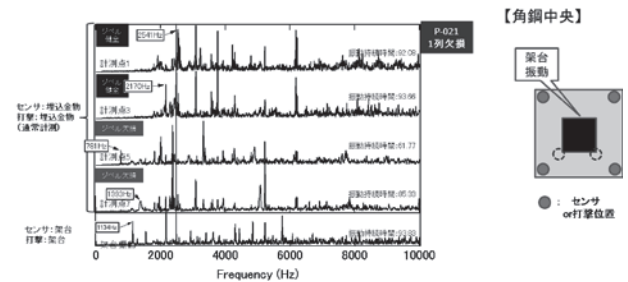


図11 1列欠損の角形鋼モックアップの試験結果

次に、周波数分布における評価ピークでは耐震サポートの振動に由来するピークが現れており、誤判定する可

能性が有る。そこで、埋込金物に溶接されている耐震サポートもしくは鋼板に対する振動計測を用いて耐震サポート由来の影響を除去する。

耐震サポート由来の影響除去には、①センサ位置：埋込金物、打撃位置：埋込金物の信号波形取得に加え、耐震サポート等の振動取得として②センサ位置：埋込金物、打撃位置：耐震サポート等および③センサ位置：耐震サポート等、打撃位置：耐震サポート等の信号波形を取得し、①～③の3条件の周波数分布の比較による判断を行う。①～③の波形イメージを図 12 に示す。

図 12 において、○で示した各ピークでは、その強度が①センサ：埋込金物、打撃：埋込金物の波形に比べ、②センサ：埋込金物、打撃：耐震サポートの波形、③センサ：耐震サポート、打撃：耐震サポートの波形の順番に増加（①<②<③）していることから、耐震サポート由来のピークと判断する。一方、大きく口枠で囲ったピークのように、強度が①>②>③の順番に徐々に低下する場合は埋込金物由来のピークと判断する。

健全なジベルの角形鋼を溶接したモックアップの場合、通常測定では現れない判定基準値以下の低周波側のピーク（ハッチング領域）が、「打撃位置」、「センサ位置」が耐震サポートとなるにつれて現れる。図 13 に健全および一列欠損の角形鋼に対する「センサ位置」/「打撃位置」のモックアップ結果を示す。

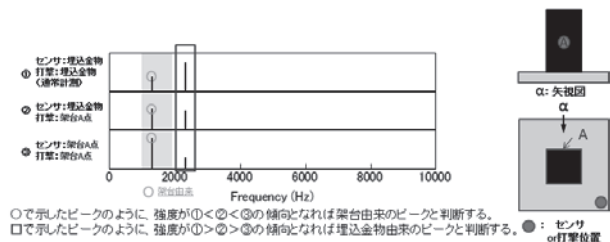


図 12 架台振動の波形イメージ

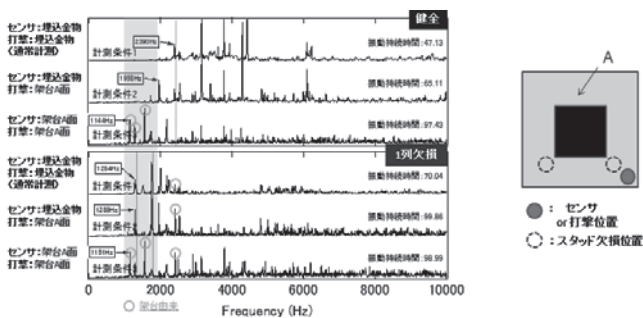


図 13 モックアップ試験結果（健全および一列欠損の角形鋼）

3. FEM 解析

3.1 FEM 解析モデルと条件

FEM を用いた理論解析として、健全およびジベル切断の埋込金物による時刻歴応答解析による周波数分布の変化を調査した。

FEM 解析モデルとしてはモックアップで作製した P タイプおよび R タイプの両方を作製した。作製したモデルの耐震サポートは、R タイプは幅 150×150mm、長さ 400mm の角形鋼管とし、P タイプは幅 100×100mm、長さ 400mm の角形鋼管を中央部に溶接した埋込金物とし、コンクリート部についてはモックアップ試験体を参考に、700×700×400mm (R タイプ) または 500×500×400mm (P タイプ) のコンクリートとした。(図 14 参照)

FEM 解析モデルの境界条件は、モックアップ試験体の試験条件に合わせ、底面 (Y-Z 平面) を変位完全拘束とした。埋込金物/コンクリート間の接触条件は、図 14 でジベル部分のみを摩擦係数 0.4 の滑り接触 (接触面に垂直な方向の成分のみ影響を受け、水平方向には影響を受けない境界条件。なお、接触面に垂直な方向の接触力が負になる場合には拘束条件無効。) を設定することにより、振動持続時間 20ms 以上の場合となる埋込金物/コンクリート間の相互作用が接触状態を模擬した。

ハンマーによる打撃については、AE 打音検査の計測点位置に合わせた位置とし、打撃力は 7.5×10^5 [s]、100N の衝撃荷重を設定した。

上記設定において、動的応答解析により、最大時間 0.005[s]までを時間刻み 2.5×10^{-6} [s]で計算を実施した。

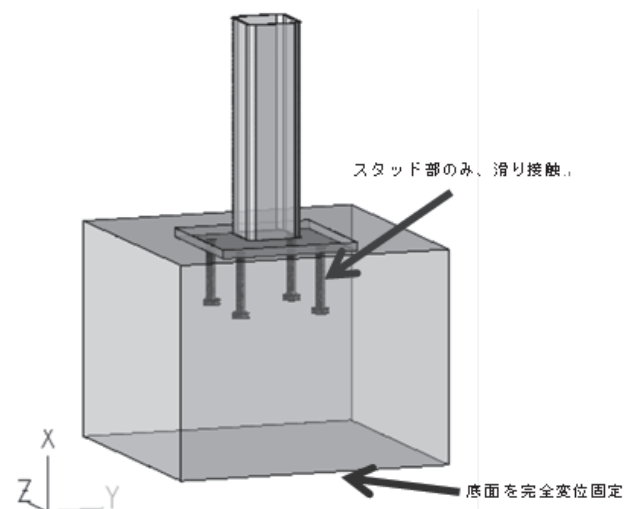


図 14 FEM 解析モデル (P タイプ健全)

3.2 FEM 解析結果

代表例として、Pタイプにおけるジベル1本切断の埋込金物の各計測点の周波数分布を図15に示す。健全なジベル近傍の計測点では、2100Hz程度に固有振動ピークが確認できるのに対し、切断したジベル近傍の計測点では、1300Hz程度に固有振動ピークが確認できた。

図15において確認できた切断したジベル位置の固有振動ピークが健全なジベル位置に比べ低下する傾向は、他のFEMモデルにおける健全なジベルおよび、右下1本切断、1列切断、2列切断、全数切断のジベル位置の計測点すべてで同じ傾向が得られた。

以上より、ジベルが欠損した場合において、固有振動ピークが低下することがFEM解析を用いて理論的に確認することが出来、ジベルが欠損した場合は固有周波数ピークが低下する傾向は実験と同じであるため、本技術の妥当性が確認できた。

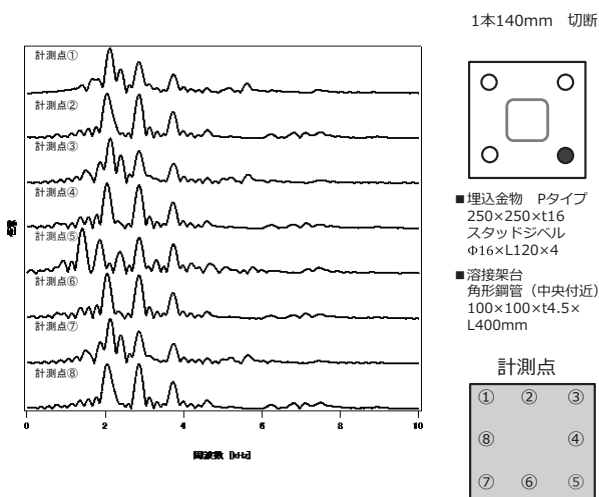


図15 Pタイプ右下1本欠損試験体のFEM解析結果

4. まとめ

従来の UT 検査では確認する事が出来なかった埋込金物の健全性を確認する非破壊検査技術として、ハンマー打撃により発生する音響振動の持続時間および周波数に

より埋込金物の固定状態を確認する AE センサを用いた打音検査技術を開発した。

モックアップ試験体により AE 打音検査時のセンサ設置位置を検討したうえで、埋込金物がコンクリートに打設されてから耐震サポートの溶接や荷重発生を経ることにより、AE 打音検査の測定結果の変化状況を確認し、ジベルの健全性を評価するための判定基準を決定した。決定した判定基準は、振動持続時間で 20ms、周波数分布のピーク周波数では 1900Hz をしきい値として決定した。

また、溶接されている耐震サポート等の影響（外乱）により誤判定する可能性があることから、外乱を除去する方法について検討した。

最後に、FEM 解析により、健全なジベルと切断されたジベルにおいて固有振動ピークの変化傾向を解析し、モックアップ試験結果と同様の傾向が得られたことから、理論的に非破壊検査技術の妥当性について確認することが出来た。

参考文献

- [1] 日本原燃株式会社, “日本原燃(株)六ヶ所再処理施設の一般共同溝における一般蒸気系の埋込金物の浮き上がりに関する面談”, 被規制者等との面談概要・資料, 2015.12.
- [2] 三浦進, 関口昭司, 服部功三, 匂坂充行, 磯部仁博, “フェイズドアレイ超音波を用いた埋込金物検査手法の開発”, 日本保全学会第15回学術講演会要旨集, 2018.
- [3] 公益社団法人 日本コンクリート工学会, “RC 構造物の設計(その8)”, コンクリート工学, 23 巻7号, 1985, pp.116-119.