

平成27年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「完全非破壊による、あと施工アンカーボルト定着部の  
健全度評価システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者：国立大学法人大阪大学

## 目 次

### 第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制  
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

- 【1-1】あと施工アンカーボルトに適した装置設計
- 【1-2】現場での操作性に優れた実用機の製作
- 【2-1】評価基準が得られるようなあと施工アンカーボルト試験体の設計・作製の実施
- 【2-2】電磁パルス法を用いた点検装置による測定・解析・評価の確立
- 【3-1】諸団体への新技術登録
- 【3-2】展示会への出展

### 第3章 全体総括

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1-1-1 研究開発の背景及び目的

インフラ構造物の付属物の固定などに使用されている「あと施工アンカーボルト」については、施工時の品質確認やその後の供用中の適切な維持管理が行われていないと、トンネル天井板の落下事故に代表されるような重大事故につながることから、安全・安心に対する要望が大きいことは想像に難くない。しかしながら、一方では維持管理予算や保全員の不足という現状があり、施工時の品質確保を適正に行うことに対する重要性は今後ますます大きくなると予測される。

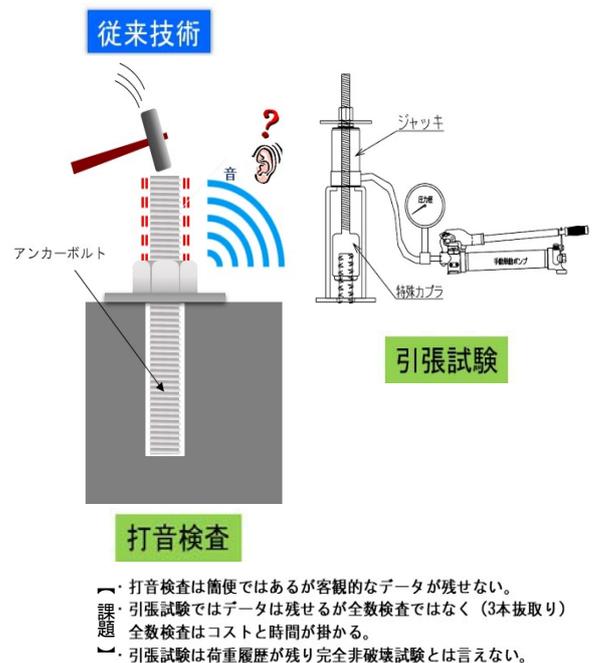
現在、あと施工アンカーボルトの施工時には、『目視・接触・打音検査』で全数を自主検査し、『引張試験』\*1 を抜き取り\*2 で実施することで施工品質を確認している。(図 1) 前者の検査は簡便な検査方法であるものの、検査員の知識・経験や体調によって影響を受け、検査結果に個人差が出てしまう。また、検査データの記録手段もない。一方、後者の検査は客観的なデータが残せる有効な検査方法ではあるものの、荷重履歴が残り完全非破壊な検査ではない。また、コストと時間が掛かるため、全数を検査することは現実的ではない。このように、現行の検査システムでは、十分な品質確認検査ができていない状況である。

- \*1：許容引張荷重または設計荷重あるいは予想破壊荷重の2/3を検査荷重とする
- \*2：例えば、一日に施工されたものの径ごとを1ロットとし、この中から3本を検査

このような背景や現状行われている施工時の検査状況を鑑みると、新たな点検手法を用いた評価システムの開発が急務であることは自明の理である。

近年様々な分野で、人間の五感に頼っていた部分を機器などで客観的に判断することや、点検状況をデータとして保存し後に活用していくことが主流となっているものの、アンカーボルトの点検において実用化された技術は未だない。

そこで本研究開発においては、基盤技術として保有する電磁パルス法を適用して、アンカーボルト専用の評価技術として高度化する。(図 3) アンカーボルトの施工時に、完全非破壊な方法で品質確認検査することにとどまらず、供用開始後の維持管理まで見据えた新たなシステムを確立することで、インフラ構造物全体としての生産性向上を図ることを目的とする。



## 1-1-2 研究開発の目標

本研究開発は、「中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律」及び、「中小企業の特定期間ものづくり基盤技術の高度化に関する指針」において、以下の項目に該当する。

### (十二) 測定計測に係る技術に関する事項

#### 1 測定計測に係る技術において達成すべき高度化目標

### (4) 川下分野特有の事項

#### 3) その他の川下分野に関する事項

##### a. インフラ産業分野に関する事項

##### ①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

##### ア. 構造物の信頼性向上

電磁パルス法とは、励磁コイルに瞬間的に電流を流すことにより発生するパルス磁場の電磁力で再現性良く金属を加振できる技術である。例えば、鉄筋コンクリート構造物内部の鉄筋を非接触で加振すると、鉄筋自身が振動して弾性波が発生する。コンクリート表面に張り付けた AE センサで弾性波を受信した場合には、その信号強度などから鉄筋の腐食や鉄筋周辺の劣化状況を推定したり、その到達時間で算出したコンクリート中の弾性波伝搬速度からコンクリートの強度を推定したりすることが可能な技術である。(図2)

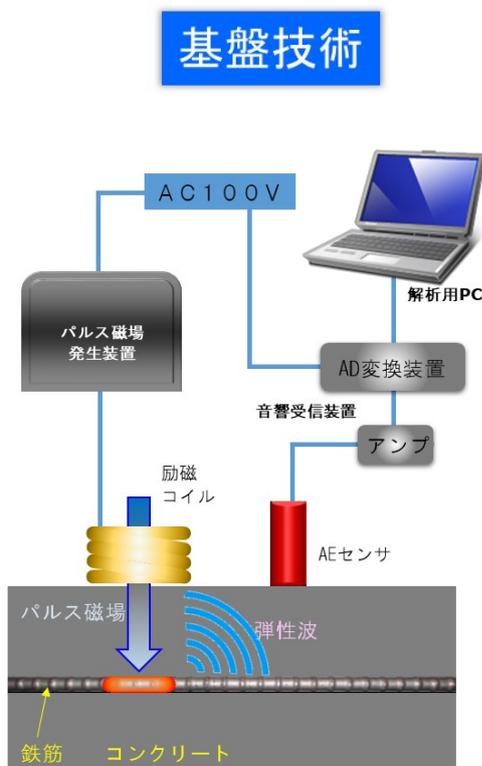


図2 基盤技術のイメージ図

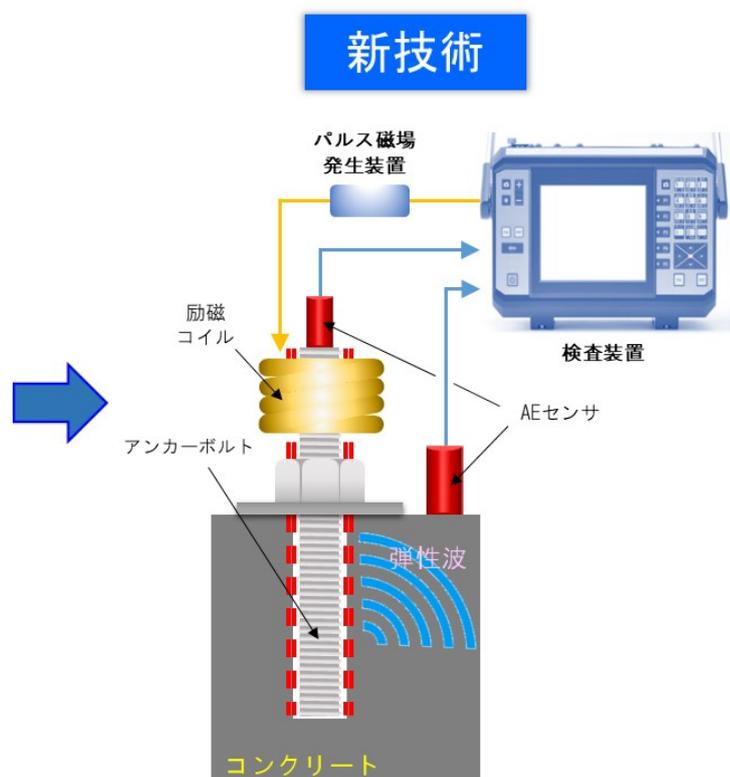


図3 新技術による検査イメージ図

本研究開発の目標は以下の3点で、現状においても未解決であり川下ニーズにマッチしているものである。

【1】電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト点検装置の設計及び製作

国内のみならず海外においても実施されていない、「あと施工アンカーボルト」新設時の全数検査が可能なアンカーボルト点検装置を開発する。点検装置は、アンカーに破壊的な力を加えない『完全非破壊』で実施し、これまでの施工時検査と同等程度の時間で実施でき、今後の維持管理が容易となるようデータ再現性に優れた装置を目標とする。

【2】あと施工アンカーボルト評価システムの確立

重大事故の原因となる可能性が考えられ、あってはならない施工不良を新設時に確実に弁別でき、健全度を評価することが可能な評価システムを、川上から川下企業までを網羅したアドバイザー委員会の指導の下確立する。新設時にイニシャルデータを取得することにより、他のアンカーボルトとの差別化を図る。川上企業は付加価値（一定の品質確保とイニシャルデータ付）の付いたアンカーボルトを供給することで、川下企業の安心・安全への要求を満足し、ライフサイクルコストの低減に寄与する。

【3】施工時の品質保証に特化した事業体制の確立

川上企業が保有するあと施工アンカーボルトの販売ルートを通じて、上記評価システムを用いたイニシャルデータ付きあと施工アンカーボルトを川下企業へ供給する体制の確立を目標とする。

## 1-2 研究体制

【事業管理機関 兼 研究等実施機関】

国立大学法人大阪大学

氏名	所属・役職	備考
磯部 光男	工学研究科 研究協力室 研究支援係 主任	事務管理
鎌田 敏郎	大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授	研究実施者
寺澤 広基	大学院工学研究科 地球総合工学専攻 助教	//
服部 晋一	大学院工学研究科 地球総合工学専攻 特任研究員	//

【法認定事業者 兼 研究等実施機関】

株式会社アミック

氏名	所属・役職	備考
長岡 康之	代表取締役	総括研究代表者（PL）
三輪 秀雄	専務取締役	副総括研究代表者（SL）
松原 良知	常務取締役	研究実施者
高鍋 雅則	研究開発部 部長	//
松浦 康博	土木・インフラ部 上席技師長兼部長	//
加賀 敏明	研究開発部 マネージャー	//
和高 修三	技術顧問	//

【アドバイザー】

氏名	所属・役職	備考
長田 光司	中日本高速道路株式会社 技術・建設本部 環境・技術企画部 構造技術チーム チームリーダー	
竹田 宣典	株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 上席主席技師	H29 年度より学校法人鶴学園 広島工業大学 工学部 環境土木工学科 教授
宮田 弘和	西日本高速道路株式会社 技術本部 構造技術課 主任	H28 年度より中国支社 建設・改築事業部 技術計画課 課長代理
岩波 光保	国立大学法人東京工業大学 土木・環境工学科 土木工学専攻 教授	
内田 慎哉	学校法人立命館 立命館大学 理工学部 環境システム工学科 講師	
中野 克彦	千葉工業大学 工学部 建築都市環境学科 教授	
濱崎 仁	芝浦工業大学 工学部 建築学部建築学科 教授	
渡辺 健	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員	
大垣 正之	一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会 技術センター長	
川嶋 紘一郎	一般社団法人日本非破壊検査工業会 技術部会 開発委員会委員	

1-3 成果概要

研究課題及び研究目標	研究目標達成状況
【1】電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト用点検装置の設計及び製作 【1-1】あと施工アンカーボルトへ適した装置設計	
【1-1-1】CAEソフトを利用したコイルの設計 M12~M24 程度の各種ボルト径への対応が可能で、ボルトより発生した弾性波のセンサ受信強度が 40dB 程度の増幅で取得可能なコイルを設計する。	達成率：100% <ul style="list-style-type: none"> <li>3次元立体モデルを使ったFEM解析（磁場解析、衝撃応答解析）を援用して、施工不良の検出感度が高い励磁コイルを製作した。</li> <li>弾性波強度の低い M24 ステンレスボルトにおいても、AE センサのプリアンプ（40dB）を必要としない受信強度が得られるコイルが完成した。（【2-2】で検証実施）</li> </ul>
【1-1-2】アンカーボルト専用装置用の電源設計 全数検査を従来手法とほぼ同様の時間で実施するため、電磁パルス装置をバッテリーで4時間程度駆動時間が得られるようにするためのトランス、電源回路等を設計する。	達成率：100% <ul style="list-style-type: none"> <li>測定待機状態での放電時間 5時間7分 &gt; 4時間 結果◎</li> <li>連続測定（充放電） 1,538回（3時間54分）、約4時間駆動を確認した。</li> </ul>
【1-1-3】コイル・振動受信センサの保持機構設計 作業員1人が両手で保持し操作・駆動できるコイルとセンサの保持	達成率：100% 受信する信号の安定性を確保する目的で、作業員が直接保持

機構を設計・試作する。	しない機構を採用した。
<b>【1-2】現場での操作性に優れた実用機の製作</b>	
<b>【1-2-1】操作性に優れた軽量の装置組立</b> 装置の総重量を6kg以下にする。	達成率：100% ・総重量5,413gを達成した。 (内訳) 波形表示・解析装置：2,811g バッテリー：511g 電磁パルス発生装置：833g コイル(ケーブル込み)：312g センサ5個(ケーブル込み)：545g トリガ、電源供給ケーブル：200g 電流波形モニターケーブル：201g
<b>【1-2-2】点検員の安全性を確保する防水・防塵設計</b> 点検員の安全性を確保するため、防水・防塵等級をIP55相当とする。	達成率：100% ・波形表示、解析装置：IP66 ・電磁パルス発生装置：IP55相当 ・コイル：IP55 を満足した。
<b>【1-2-3】評価ソフトウェアの開発</b> データ測定後、判定までの時間が5秒以内の装置とする。	達成率：100% 測定後の判定時間は1秒以下を達成した。
<b>【1-2-4】ユーザーインターフェースの開発</b> 特殊な知識がなくとも講習会の実施により操作可能な装置とする。	達成率：100% 装置ユーザーの操作手数を可能な限り少なくして達成した。 ・条件設定画面では、ボルトNo.・現場名・測定者・ボルト固定方式設定(2本目以降は設定不要) ・測定画面では、チャンネルの切り替え(5回)と結果判定表示キーの操作だけ。 ・結果表示画面では、結果保存キーだけの操作とした。
<b>【1-2-5】装置構成や評価基準等のレビュー</b> 装置の処理能力は、5分/本(全数検査を従来手法とほぼ同様の時間で実施できるもの)とする。	達成率：100% コイル及びセンサの設置、装置の操作と結果保存、コイル及びセンサの撤去までの一連の作業が4分程度で終了することを確認した。
<b>【2】あと施工アンカーボルト評価基準の確立</b>	
<b>【2-1】評価基準が得られるようなあと施工アンカーボルト試験体の設計・作製の実施</b>	
川下企業3社以上及び有識者を加えた「試験体設計プレ委員会」の下、作製した試験体に、アンカーボルトを150本以上施工する。	達成率：100% ・「試験体設計プレ委員会」「アドバイザー委員会」合同委員会を3年間で計7回開催した。 ・3年間で合計336本のアンカー施工した。
<b>【2-2】電磁パルス法を用いた点検装置による測定・解析・評価の確立</b>	
川下企業3社以上及び有識者を加えた「アドバイザー委員会」の指導の基で評価基準を作成し、引張支持力が設計基準を下回る重大な損傷状態の検出率をほぼ100%とする。	達成率：100% ・客観的な評価指標を6種類考案した。 ・評価指標として採用した波形エネルギー、ピーク周波数について、質点系モデルを構築して理論解析すると共に、3次元FEM解析でその妥当性を確認した。 ・接着系アンカー及び金属系アンカーともに、3年間に施工した全てのアンカーの内、設計耐力を下回る不良アンカーを100%検出できることを確認した。 ・強度が設計耐力以上ある不良アンカーを含めても (接着系の施工不良アンカーボルト検出率91.35%) (金属系の施工不良アンカーボルト検出率100%) で検出できることを確認した。
<b>【3】施工時の品質保証に特化した事業体制の確立</b>	
<b>【3-1】諸団体への新技術登録</b>	

<p>新技術登録を1件以上実施する。</p>	<p>達成率：50%</p> <p>NETIS等の新技術を登録するには技術の成立性の証明が必要で、概ね1年の期間を要し、現時点で100%に未達。そこで、NETISシステム画面記載の『建設技術審査証明』審査機関に指導・助言を求め、同法人から有用技術であるとの高評価を受けた。</p> <p>今後実現場での実証試験を経て、『建設技術審査証明』の取得またはNETIS登録を行う予定。</p>
<p>【3-2】展示会への出展</p>	
<p>1件以上、展示会へ出展する。</p>	<p>達成率：100%</p> <p>東京ビックサイトで開催された『インフラ検査・維持管理展』に3年連続で出展し、実演を交えながら本技術の有効性についての説明と普及を図った。</p>
<p>【追加】市場展開のためのシナリオ作成・・・アドバイザー委員会からの提案により実施</p>	
<p>本開発技術の導入期待度の高い市場に特化して、市場展開するためのシナリオを検討する。</p>	<p>想定される市場の内、導入期待度が特に高い以下の市場に優先して本開発技術を試験導入することにした。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・トンネルジェットファン固定アンカー</li> <li>・建築リニューアルで長期荷重を受ける部材の固定アンカー</li> </ul> <p>後者については、国土交通省の建築基準整備促進事業「あと施工アンカーを用いた部材の構造性能確認方法検討」(H27～H29年度に実施中)の中で、あと施工アンカーの健全性確認方法の確立が望まれているものである。これに対応する形で、実験協力を行い有用な結果が得られた。同事業報告書中、「あと施工アンカー工事の品質管理指針(案)」の提案において、本開発技術が品質確認検査として記載される結果となった。</p>

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

機 関 名：株式会社アミック

役 職：専務取締役

氏 名：三輪秀雄（ミワヒデオ）

E-Mail：h\_miwa@amic-pro.co.jp

電 話 番 号：045-510-4317

## 第2章 本論

### 【1】電磁パルス法によるあと施工アンカーボルト用点検装置の設計及び製作

#### 【1-1】あと施工アンカーボルトへ適した装置設計

##### 【1-1-1】CAE ソフトを利用したコイルの設計

アンカーボルトへ効率的に衝撃入力を行うコイルの設計条件を明らかにするために、パルス電源回路の過渡現象解析、動磁場解析、衝撃応答解析を併用して検討を行った。また、試作した 2、6、8、10、12、16、20 ターンのコイルの磁場特性の基礎評価を行うとともに、アクリル試験体を用いてアンカーボルトの振動応答を評価した。(図 1-1-1-1、図 1-1-1-2)

パルス電源電圧の増大 (400V→500, 600V)、蓄電容量の増大 (500、750、1000 $\mu$ F) により起磁力を強化するとともに、電流の立ち上がり速度を制御し、受信感度が約 4 倍増大した。

埋設長不良は、磁場の立ち上がりが最大となる巻き数 6 ターンで、評価感度が向上することがわかった。

(図 1-1-1-3、図 1-1-1-4)

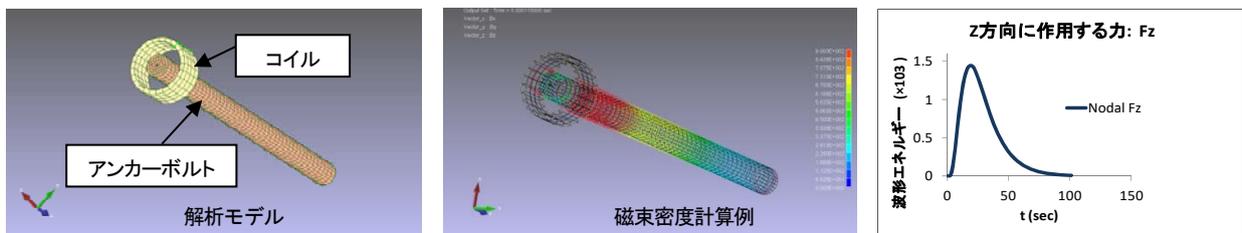


図 1-1-1-1 動磁場解析による評価例 (磁束密度評価、電磁力評価)

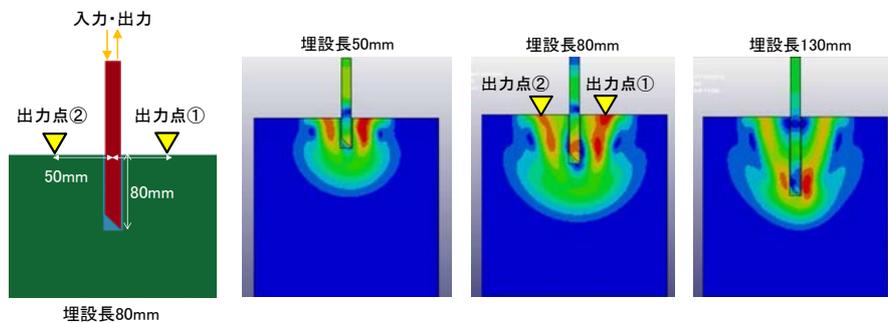


図 1-1-1-2 衝撃応答解析による評価例 (埋設長 50mm、80mm、130mm)

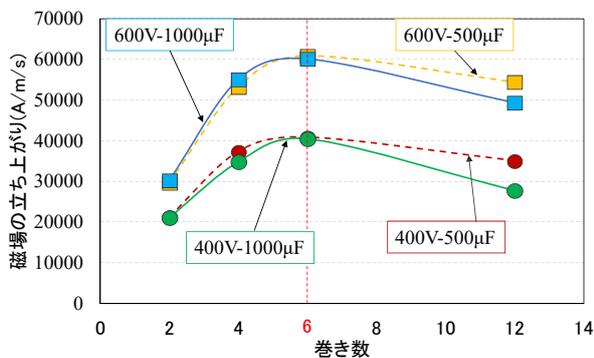


図 1-1-1-3 磁場特性 (磁束密度の立上り)

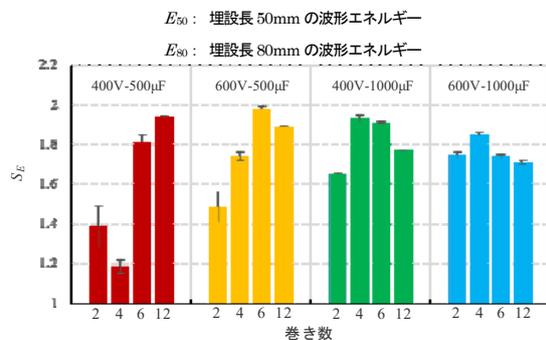


図 1-1-1-4 埋設長不良に対する評価感度 ( $S_E = E_{50}/E_{80}$ )

充填量 130mm (標準施工)、60mm、40mm、20mm を模擬したコンクリート試験体を用いて評価感度の高い条件を確認した。

ボルト頭部では磁束密度が大きい入力条件、コンクリート表面では磁束密度の立ち上り速度が速い入力条件で、充填不良を効率的に評価できる可能性があることがわかった。

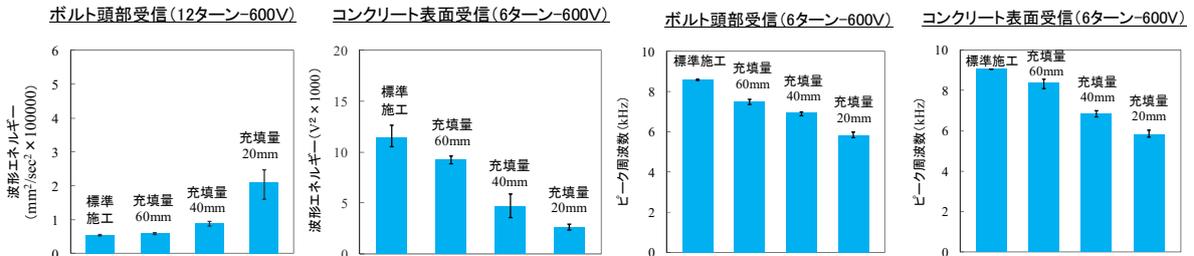


図 1-1-1-5 充填不良に対する評価感度

### 【1-1-2】 アンカーボルト専用装置用の電源設計

AC100Vの電源を必要としないバッテリーで駆動できる可搬性が高い装置の検討を行った。コンデンサの充電電圧・容量やコイルへの電流の流れ方とアンカーボルトに与える振動特性との関係につき、技術調査、及び理論解析、CAE解析を実施し、基礎実験を実施した。アンカーボルトを振動させるために最適な昇圧トランス・コンデンサ・サイリスタの組合せや、作業時間を通して必要な電流が供給できる充電式バッテリーの容量を検討した。

これらの検討結果に基づき、電源回路等の設計・試作を行い(図 1-1-2-1)、バッテリーの駆動時間に係る性能につき評価した。

《開発目標》 バッテリー駆動 4 時間以上

《評価結果》 測定待機状態での放電時間 : 5 時間 7 分 > 4 時間 結果◎

連続測定(充放電) : 1,538 回 (3 時間 54 分) ≒ 4 時間 結果○

連続測定 4 時間の結果、1,538 回の連続放電が可能であった。アンカーボルト 1 本について約 10 回測定したとして、1 回の充電で約 150 本程度の測定をすることが可能であることを確認した。



(a) 波形表示・解析装置



(b) 電磁パルス発生装置

図 1-1-2-1 アンカーボルト専用装置用の電源ユニット

### 【1-1-3】 コイル・振動受信センサの保持機構設計

【2-2】における実験過程で、アンカーボルトの頭部は自由に振動させ、センサは手で保持しない方が施工不良を検知しやすいことが分かった。この結果を踏まえて、コイル及び振動受信センサの保持機構を以下の方法とした。

コイル： クランプ付きのフレキシブルアームを近傍のアンカーボルトに取り付け、先端に付けたコイルを検査対象のボルト先端部に接触させずに保持する。(図 1-1-3-1)

センサ： グリセリンペーストの接触媒質を止め、ホットメルト樹脂（通称グルーガン）でボルトの周囲4方向及びボルトの頭部先端の計5か所に固定する。

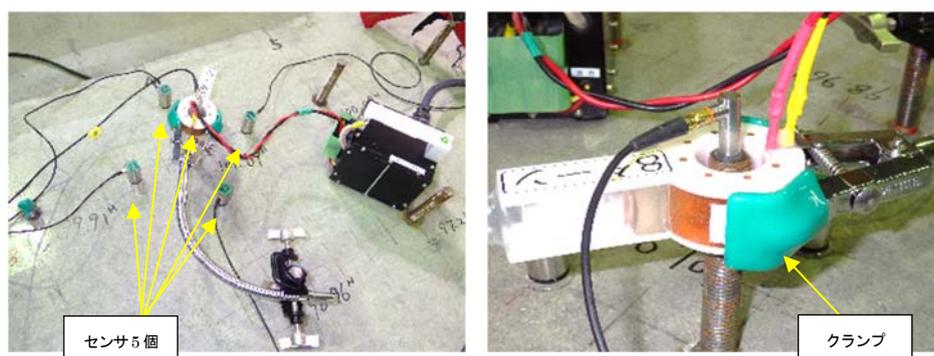


図 1-1-3-1 クランプによるコイル保持状況及びセンサ取り付け状況

### 【1-2】 現場での操作性に優れた実用機の製作

#### 【1-2-1】 操作性に優れた軽量な装置組立

【2-2】における実験過程で判った結果を反映して、【1-1-2】で試作した装置に改造（AE 信号1ch → 5ch）を加え試作機を製作した。(図 1-2-1-1)

装置の総重量は、開発目標（装置重量 6kg 以下）に対し約 5.4kg の装置構成となった。



総重量：5,413g

(内訳)  
波形表示・解析装置：2,811g  
バッテリー：511g  
電磁パルス発生装置：833g  
コイル(ケーブル込み)：312g  
センサ5個(ケーブル込み)：545g  
トリガ、電源供給ケーブル：200g  
電流波形モニタケーブル：201g

図 1-2-1-1 アンカーボルト専用装置用の電源ユニット

#### 【1-2-2】 点検員の安全性を確保する防水・防塵設計

波形表示・解析装置は目標 IP55 相当に対し、IP66 の防塵防水性能を確保して製作した。

電磁パルス発生装置は、絶縁抵抗 $\infty$ で製作し、感電の恐れが最も高いコイル接続部には防水コネクタを使

用した。電源スイッチ部、異常停止スイッチ部、チャージ電圧変更ロータリースイッチ部、トリガ・電源供給ケーブルコネクタ部は、内部よりコーキング実施し、防塵防水コイルを製作した結果、IP55 相当の防塵防水性能を確保した。

### 【1-2-3】評価ソフトウェアの開発

【2-2】の検討結果から施工不良を 6 種類の評価指標で判別することとし、評価ソフトウェアの基本構成を以下のように作成した。(図 1-2-3-1)

- ①測定保存した 2 種類のデータ（時間軸波形、周波数スペクトル）を使って、6 種類の評価指標を算出する。
- ②それぞれの指標に対しては施工不良と判別するための閾値を設定し、算出された値を閾値と比較し施工不良側の値であればポイントを付与する。
- ③それぞれの指標で付与されたポイントを合計し、その大きさの程度によって施工不良をランク分けする。測定終了後の判定時間は開発目標 5 秒程度に対し 1 秒以内に表示されることを確認した。

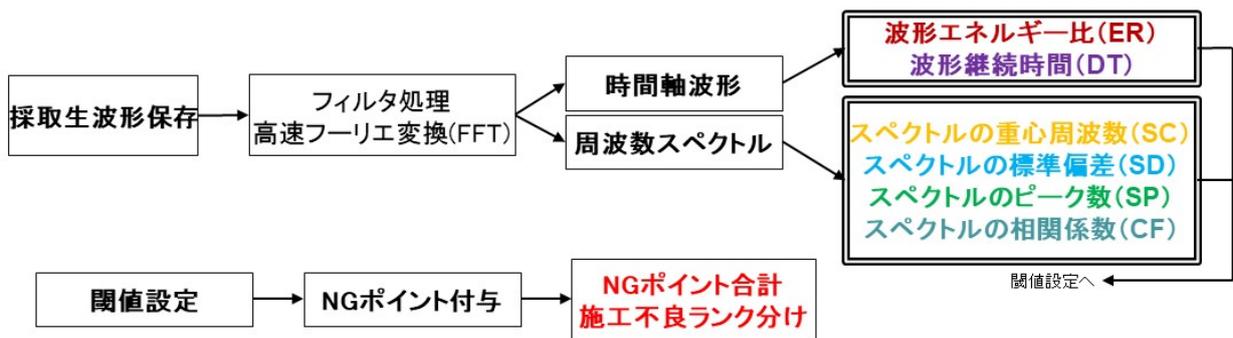


図 1-2-3-1 評価ソフトウェアの構成

### 【1-2-4】ユーザーインターフェイスの開発

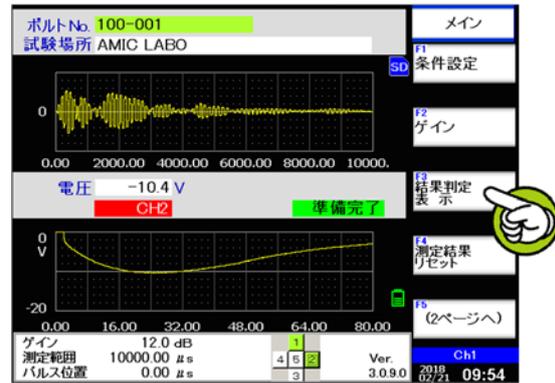
アンカーボルト全数の診断を従来の打音検査等とほぼ同様の時間で実施するために、直感的に操作できるユーザーインターフェイスを開発した。設定が複雑な測定波形のフィルタ処理条件、評価指標を算出するための時間軸波形や周波数スペクトルの加工条件、各評価指標の判定閾値及び施工不良ランク分け条件の設定は装置内部のメモリーカードに予め保存しておくこととし、装置ユーザーの操作手数を可能な限り少なくした。(図 1-2-4-1)

- ①条件設定画面：ボルト No.、現場名、測定者、ボルト固定方式を設定する。(2 本目以降は設定不要)
- ②測定画面：チャンネルの切り替え (5 回)、結果判定表示キーを操作する。
- ③結果表示画面：結果保存キーだけを操作する。

特殊な知識がなくても、講習会の実施により操作可能な装置にする開発目標が達成した。



①条件設定画面



②測定画面



③判定結果表示画面 (不良)



測定済みアンカーボルトの判定結果  
読み出し画面 (健全)

図 1-2-4-1 試作装置の表示画面

### 【1-2-5】装置構成や評価基準等のレビュー

評価ソフトウェアの処理速度が【1-2-3】の成果として 1 秒以下になり、装置の操作手順も【1-2-4】の成果として最大限少なくなったことで、コイル及びセンサの設置→装置の操作と結果保存→コイル及びセンサの撤去までの一連の作業時間が短縮した。開発目標の試験能力 5 分/本に対し、4 分程度で終了することを確認した。

## 【2】. あと施工アンカーボルト評価基準の確立

### 【2-1】 評価基準が得られるようなあと施工アンカーボルト試験体の設計・作製の実施

川上企業、川下企業及び学識者で構成する「試験体設計プレ委員会」及び「アドバイザー委員会」を設立し、これらの合同委員会で試験体作製についての協議を行った。アンカーボルトを施工するためのコンクリート試験体の形状や再現施工すべき施工不良状態等の意見をまとめ、試験体を設計・製作した。

#### ※コンクリートブロックの概要

(寸法, 数量) L : 1800 mm × W : 900 mm × T : 450 mm × 15 体

(設計強度) 24-8-20-N

以下に示すよう、3 年間で施工したアンカー試験体は合計 336 本である。

施工不良の検出性能を確認するために施工した試験体の施工表と施工図を以下に示す。(表 2-1-1、図 2-1-1)

No.1~No.45 それぞれ6本の施工で、計270本を施工した。

表 2-1-1 アンカーボルト施工表(基本施工分)

No.	アンカー筋	定着種類	施工状態	施工姿勢	ボルト長	ボルト突出長	穿孔寸法	備考
1	M16 (SNB7)	有機系カプセル	標準	下向き	230	100	φ19×130	
2			ボルト短い		180	100	φ19×80	標準品定着長8Dに対して5D
3			ボルト短い		150	100	φ19×50	標準品定着長8Dに対して3D
4	M16 (SNB7)	有機系カプセル	穿孔深い	下向き	220	100	φ19×180	
5			過剰攪拌		230	100	φ19×130	攪拌時間延長+15秒
6			穿孔径大		230	100	φ22×130	付着長さ60mm
7	M24 (SUS)	金属系スリーブ拡張 (雄ねじ)	標準	下向き	230	75	φ35×155	
8			穿孔径大		230	75	φ38×155	穴径を大きくして拡張力を低減
9			打込不足		230	60	φ35×170	下穴を深くして拡張力を低減
10	M16 (SNB7)	有機系カプセル	低温	下向き	230	100	φ19×130	カプセルとボルトを冷凍庫で保管
11		無機系紙チューブ	浸漬過多		260	100	φ19×160	規定浸漬時間1~3分に対し4分浸漬
12			浸漬不足		260	100	φ19×160	規定浸漬時間1~3分に対し30秒浸漬
13	M16 (SNB7)	有機系カプセル	標準	下向き	230	100	φ19×130	垂直施工
14	無機系紙チューブ	標準	260		100	φ19×160	垂直施工	
15	M24 (SUS)	金属拡張 スリーブ	標準	下向き	230	75	φ35×155	垂直施工
16	M16 (SNB7)	有機系カプセル	フラン掛無し		230	100	φ19×130	下穴の清掃不良
17			水混入		230	100	φ19×130	水没(下穴を満水状態)
18			ボルト短い 水混入	180	100	φ19×80	標準品定着長8Dに対して5D 水没(下穴を満水状態)	
19	M16 (SNB7)	有機系カプセル	ボルト短い 水混入	下向き	150	100	φ19×50	標準品定着長8Dに対して3D 水没(下穴を満水状態)
20		無機系紙チューブ	空気溜り		260	100	φ19×160	奥側140mm空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 手前側20mm定着
21			空気溜り		260	100	φ19×160	奥側100mm空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 手前側60mm定着
22	M16 (SNB7)	有機注入	標準	横向き	230	100	φ18×130	垂直施工
23			空気溜り		230	100	φ18×130	奥上側(4/5周:≒40mm)×110mm空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 入口20mm+奥下側10mm×110mm定着
24			空気溜り		230	100	φ18×130	奥側100mm空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 手前側30mm定着
25	M16 (SNB7)	有機系カプセル	標準	上向き	230	100	φ19×130	全数クサビ打ち
26			穿孔深い		230	100	φ19×180	先端カプセル残り
27			樹脂減少		230	100	φ19×130	カプセルを切断(ひび割れ想定) 予想定着長40mm 奥側90mm 空気溜り(ポリエチレンスリーブ+発砲ウレタンシート巻き)
28	M16 (SNB7)	有機系カプセル	穿孔径大	上向き	230	100	φ22×130	予想定着長60mm 奥側70mm 空気溜り(ポリエチレンスリーブ+発砲ウレタンシート巻き)
29			過剰攪拌		230	100	φ19×130	攪拌時間延長+15秒
30	M16 (SNB7)	有機注入	空気溜り	下向き	230	100	φ18×130	奥側80mm空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 手前側50mm定着
31			空気溜り		230	100	φ18×130	70mmの空気溜り(発砲ウレタンシート巻き)
32			空気溜り		230	100	φ18×130	90mmの空気溜り(発砲ウレタンシート巻き)
33					230	100	φ18×130	110mmの空気溜り(発砲ウレタンシート巻き)
34	M16 (SNB7)	有機系カプセル	標準	下向き	230	100	φ19×130	
35		有機注入			230	100	φ18×130	
36					230	100	φ18×130	
37	M16 (SNB7)	無機系紙チューブ	標準	下向き	260	100	φ19×160	
38					260	100	φ19×160	
39	M24 (SUS)	金属系スリーブ拡張 (雄ねじ)	標準	下向き	230	75	φ35×155	
40	M24 (SUS)	金属系本体打込み (雌ねじ)	標準		(130)	(75)	φ33×120	*1(測定時にM24(SUS)全ネジボルト130mmLを 40KN/mm <sup>2</sup> で取付)
41					(130)	(75)	φ33×120	*1
42				(130)	(75)	φ33×120	*1	
43	M24 (SUS)	金属系スリーブ拡張 (雄ねじ)	打込不足	下向き	230	75	φ35×170	下穴を深くして支圧力不足
44		金属系本体打込み (雌ねじ)	穿孔径大		(130)	(75)	φ35×120	穴径を大きくして支圧力不足、*1
45			打込不足		(130)	(75)	φ33×130	下穴を深くして支圧力不足、*1

\*ボルトの施工種類(No.)ごとに各6本施工 合計270本



次に、アンカー筋を異形鉄筋に変え、アンカーボルトと同様に施工不良が検出できるか確認するために施工した試験体の施工表と施工図を以下に示す。(表 2-1-2、図 2-1-2)

表 2-1-2 異形鉄筋アンカー施工表(追加施工分)

No.	アンカー筋	定着種類	施工状態	施工姿勢	ボルト長	ボルト突出長	穿孔寸法	備考
46	D16 (SD345)	有機系注入	標準	下向き	230	100	φ20×130	
47			空気溜り		230	100	φ20×130	奥側 70 mm 空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 手前側 60 mm 定着
48			空気溜り		230	100	φ20×130	奥側 110 mm 空気溜り(発砲ウレタンシート巻き) 手前側 20 mm 定着
*ボルトの施工種類(No.)ごとに各 6 本施工 合計 18 本								

No.46~No.47それぞれ6本の施工で、計18本を施工した。

さらに、ボルトの埋設長・突出長・太さのパラメータの変化が振動特性に与える影響を確認するための試験体を17種類51本施工した。(表 2-1-3、図 2-1-3)

No.1~No.17それぞれ3本の施工で、計51本を施工した。

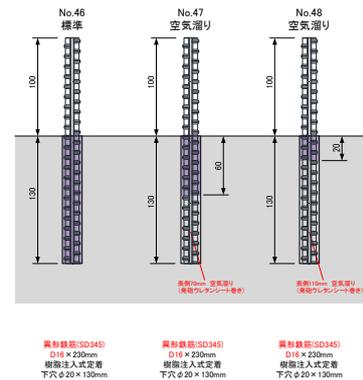


図 2-1-2 異形鉄筋アンカーの施工図

表 2-1-3 パラメータ変化確認用アンカーボルト施工表(追加施工分)

No.	アンカー筋	定着種類	施工不良種類	施工姿勢	ボルト長	ボルト突出長	穿孔径×深さ	備考	
1	M16(SNB7)	有機系注入	標準	下向き	180	50	φ19×130	標準埋設長 突出長が変化した場合	
2					210	80	φ19×130		
3					260	130	φ19×130		
4			ボルト短い		標準	埋設長不足 突出長変更	150	50	φ19×100
5							130	50	φ19×80
6							100	50	φ19×50
7							180	80	φ19×100
8							160	80	φ19×80
9							130	80	φ19×50
10							200	100	φ19×100
11							230	130	φ19×100
12							210	130	φ19×80
13							180	130	φ19×50
14	M12(SNB7)	標準	標準	標準	300	100	φ14×200	標準施工(埋設長200mm)	
15	M16(SNB7)				300	100	φ19×200	ボルト径変更	
16	M12(SNB7)				200	100	φ14×100	標準施工	
17	M20(SNB7)				300	100	φ23×200	ボルト径変更	

M20穿孔径: φ23

※以上の供試体(N0.1~N0.17)に対し、それぞれ3本を施工。合計17種×3本=51本。

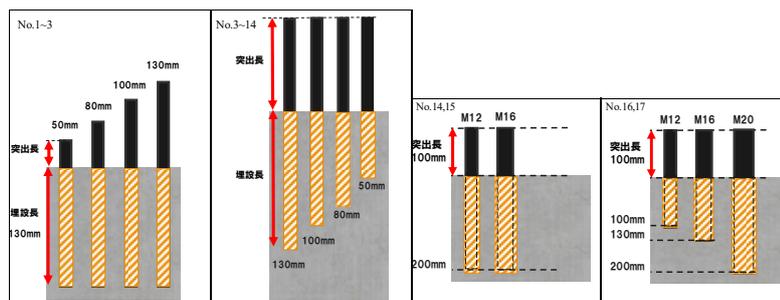


図 2-1-3 パラメータ変化確認用アンカーボルトの施工図(追加施工分)

また、アンカー筋の施工状態と引張耐力との関係を調べ、施工時に確実に検出しなければならない施工不良を確認した。(図 2-1-4) 図中の赤線がアンカー筋の寸法及び材料から求めた短期許容荷重で、これより引張耐力の低いものが施工時に確実に検出しなければならない施工不良である。

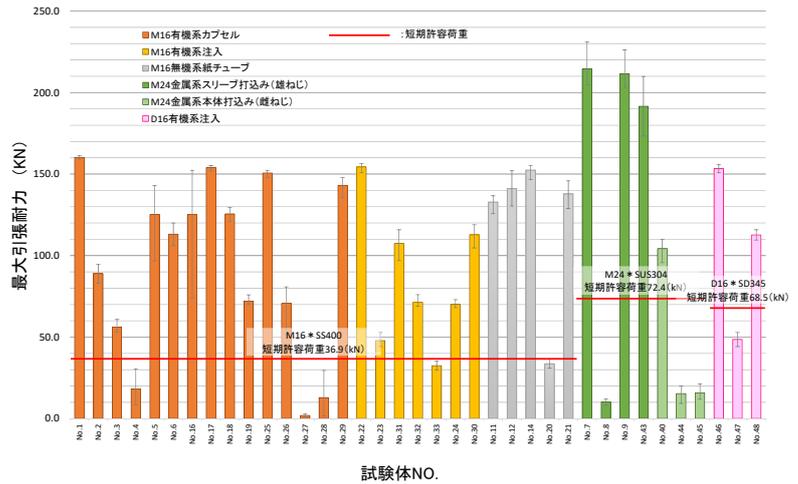


図 2-1-4 引張試験結果

## 【2-2】電磁パルス法を用いた点検装置による測定・解析・評価の確立

【2-1】で製作した試験体を使用して、アンカーボルトから発生した弾性波振動をAEセンサ、レーザドップラ振動計(LDV)等で受信する測定条件と、その受信波形から施工不良を評価するための解析・評価方法について検討し、以下の結果を得た。

### 《 測定条件 》

- ①コイルの形状は、リング型のコイルが優位である。
- ②AEセンサの設置位置(数)は、アンカーボルトの周囲4方向及びボルトの頭部に1個とし、すべてグルーガンで固定する。ただし、材質が非磁性のアンカーボルトについては、ボルト頭部にネオジウム磁石を付けた後にセンサを付ける。(図 2-2-1)

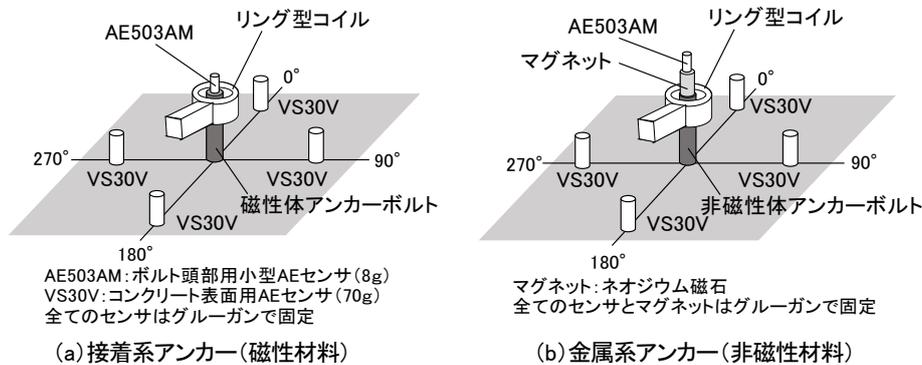


図 2-2-1 コイルおよびセンサの配置

### 《 解析方法 》

施工不良を判別するための評価指標を6種類考案し、その数値化を行った。以下に各種評価指標を示す。

#### 1. 波形エネルギー比 (ER)

コンクリート表面の波形エネルギーとボルト頭部の波形エネルギーとの比を示す。施工不良によってコンクリート表面の波形エネルギーは小さく、ボルト頭部の波形エネルギーは大きくなる。(図 2-2-2)

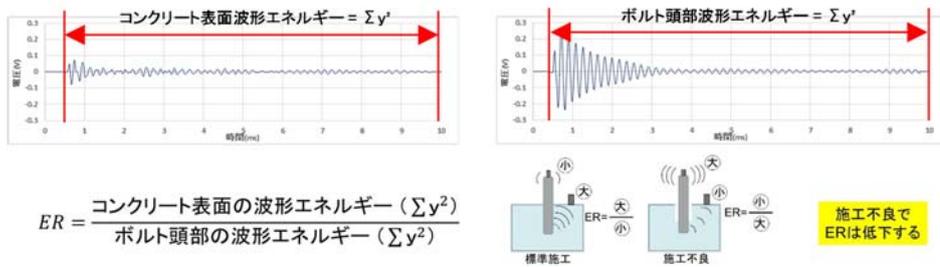


図 2-2-2 波形エネルギー比 (ER)

2. 波形継続時間 (DT)

時間軸波形で、最大振幅(絶対値)に対して 10% 未滿に減衰するまでの時間を示す。施工不良によってボルトの拘束が弱くなると、時間軸波形の収束時間が長くなる。(図 2-2-3)

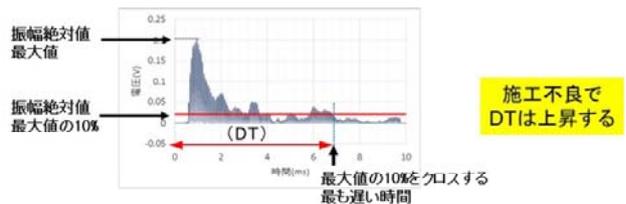
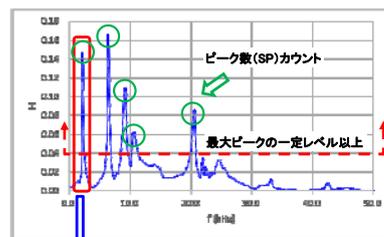


図 2-2-3 波形継続時間 (DT)

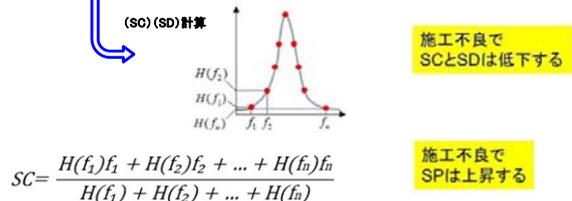
3. スペクトルの重心周波数 (SC)

特定の周波数スペクトルの重心周波数を示す。施工不良によってボルトの拘束が弱くなると、周波数スペクトルは低周波数側へシフトする。(図 2-2-4)



4. スペクトルの標準偏差 (SD)

施工不良によって低周波数側へシフトしたスペクトルの標準偏差で、スペクトルの集中の度合いを示す。(図 2-2-4)



$$SC = \frac{H(f_1)f_1 + H(f_2)f_2 + \dots + H(f_n)f_n}{H(f_1) + H(f_2) + \dots + H(f_n)}$$

施工不良で SPは上昇する

5. スペクトルのピーク数 (SP)

あるレベル以上のスペクトルピークの数を示す。施工不良の種類によっては、複数の周波数スペクトルが出現する。(図 2-2-4)

$$SD = \sqrt{\frac{(f_1 - SC)^2 H(f_1) + (f_2 - SC)^2 H(f_2) + \dots + (f_n - SC)^2 H(f_n)}{H(f_1) + H(f_2) + \dots + H(f_n)}}$$

図 2-2-4 スペクトルの重心周波数、標準偏差、ピーク数 (SC, SD, SP)

6. スペクトルの相関係数 (SF)

標準施工アンカーの周波数スペクトルと施工不良アンカーの周波数スペクトルの相似性をの相関係数で示す。施工不良の程度が大きくなるとスペクトルの形状変化の大きくなり、相関係数が小さくなる。(図 2-2-5)

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

※ 標準品のスペクトル振幅(x)と評価対象のスペクトル振幅(y)の相関係数を算出。(n)は周波数のデータ数。

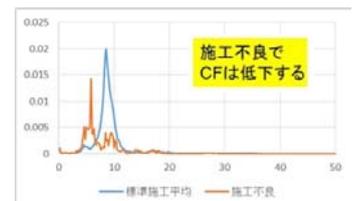


図 2-2-5 スペクトルの相関係数 (SF)

《 評価方法 》

施工不良を判別するため、前項で算出した指標値を基に、以下に示すルールで NG ポイントを算出する。

- ①標準施工アンカーの測定データから各評価指標値を算出する。
- ②各評価指標値別に、そのバラツキ範囲の上下限値を閾値に設定する。
- ③評価対象アンカーの測定値から求めた評価指標値が、閾値を外れた場合に NG ポイントを付与する。

このルールに従えば、標準施工と同等の施工状態のアンカーであれば NG ポイントは付きにくく、標準施工と異なる施工状態（施工不良）のアンカーであれば NG ポイントが付きやすくなる。

各評価指標において、測定点別に設定した NG ポイントの配点を以下に示す。（図 2-2-6、表 2-2-1）

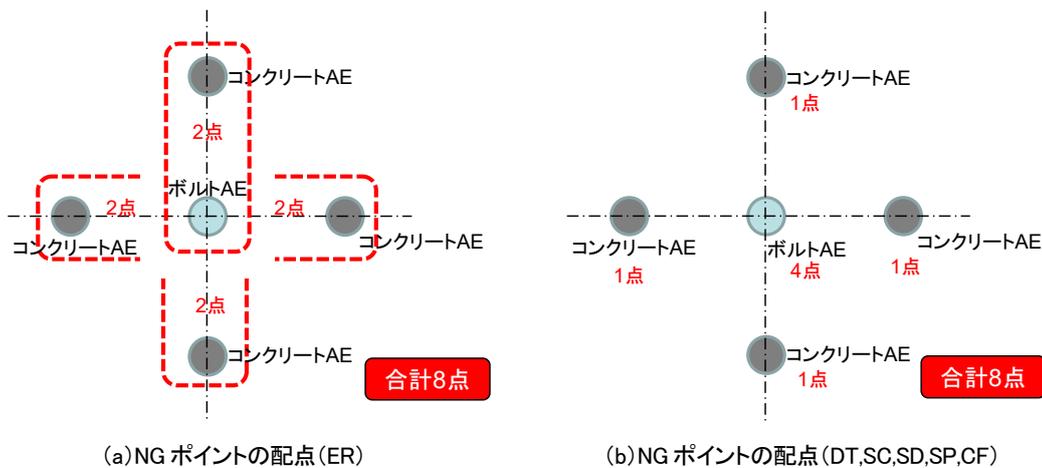


図 2-2-6 評価指標別の NG ポイント配点位置図

表 2-2-1 評価指標別の NG ポイント配点表

評価指標	測定位置	設定する閾値	付与する NG ポイント
波形エネルギー比 (ER)	コンクリート表面受信	標準施工アンカーから算出した値のバラツキ 最小値未滿	各方向 2 点 (計 8 点)
	ボルト頭部受信		
波形継続時間 (DT)	コンクリート表面	標準施工アンカーから算出した値のバラツキ 最大値超え	各方向 1 点 (計 4 点) 4 点
	ボルト頭部		
スペクトルの重心周波数 (SC)	コンクリート表面	標準施工アンカーから算出した値のバラツキ 最小値未滿	各方向 1 点 (計 4 点) 4 点
	ボルト頭部		
スペクトルの標準偏差 (SD)	コンクリート表面	標準施工アンカーから算出した値のバラツキ 最小値未滿	各方向 1 点 (計 4 点) 4 点
	ボルト頭部		
スペクトルのピーク数 (SP)	コンクリート表面	標準施工アンカーから算出した値のバラツキ 最大値超え	各方向 1 点 (計 4 点) 4 点
	ボルト頭部		
スペクトルの相関係数 (CF)	コンクリート表面	標準施工アンカーから算出した値のバラツキ 最小値未滿	各方向 1 点 (計 4 点) 4 点
	ボルト頭部		
			合計 48 点

《 NG ポイントによる評価結果 》

3 年間に施工した全ての試験体を使用して、前述した測定・解析・評価方法の妥当性について検証した結果を図 2-2-7、図 2-2-8 に示す。図中の横軸は試験体番号、左側の縦軸は NG ポイントの合計点で、指標別に色分けした NG ポイントを縦に積み重ねて示している。右側の縦軸は引張耐力で、図 2-1-4 の引張試

験結果を◆印でプロットしている。

計耐力を下回る施工不良アンカーにはすべて NG ポイントが付与されており、開発目標の検出率 100%が実現できた。さらには、施工不良にもかかわらず引張耐力が大きかったアンカーを含めた場合でも、接着系アンカーで91.3%、金属系アンカーで100%と、高い率で検出できていた。これは、現状行われている引張試験では見つけられない施工不良をも検出できていることを示しており、大変有用な成果であると考え

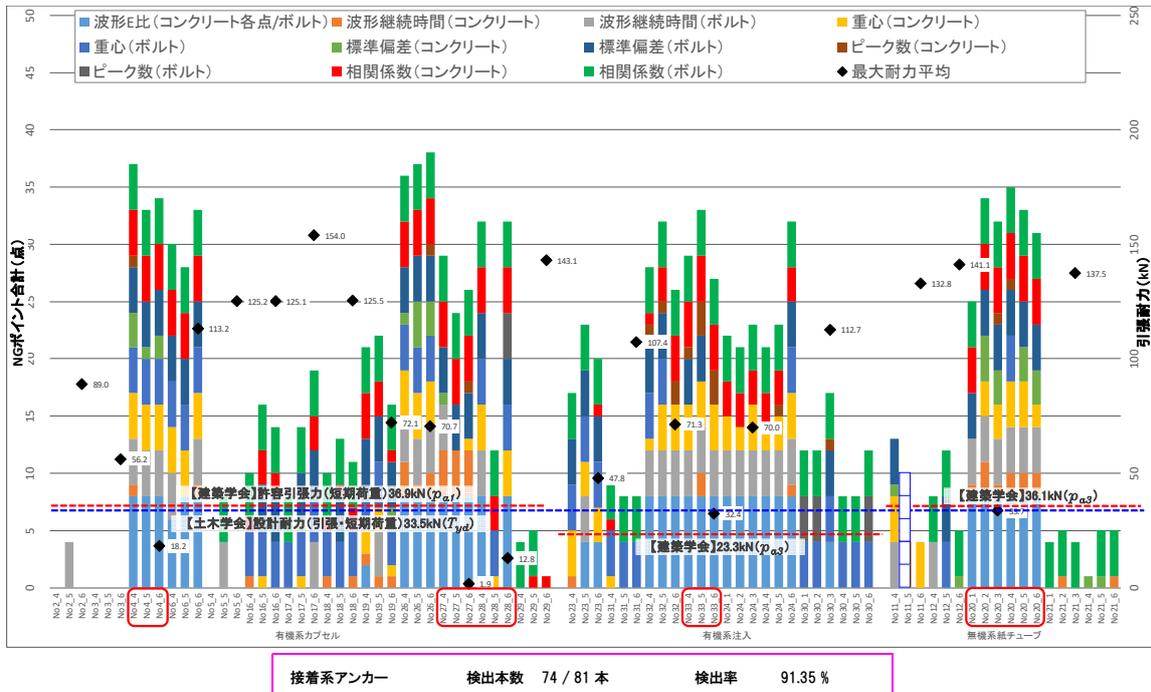


図 2-2-7 接着系施工不良アンカーボルトと NG ポイント・最大引張耐力との関係

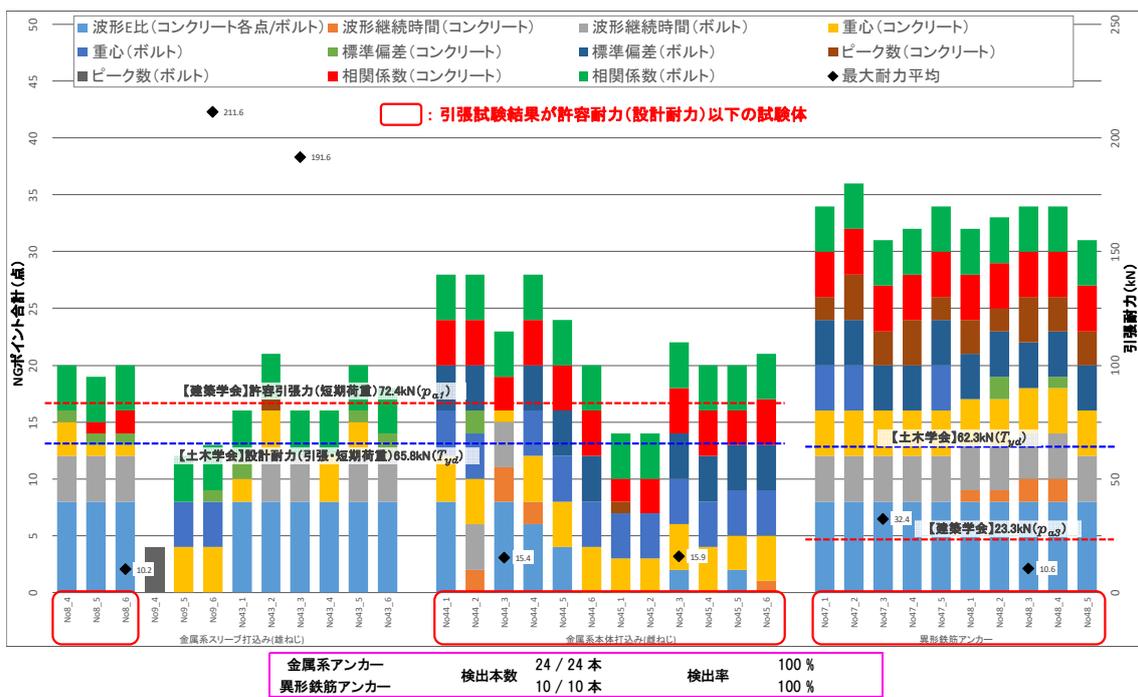


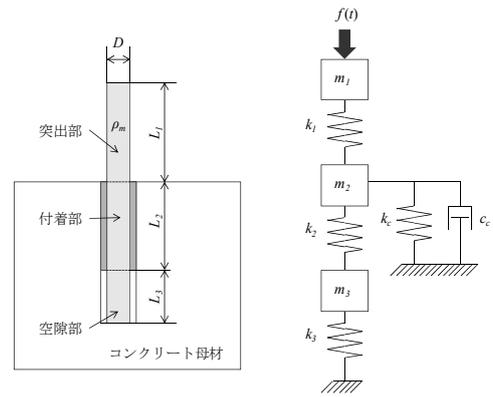
図 2-2-8 金属系および異形鉄筋施工不良アンカーボルトと NG ポイント・最大引張耐力との関係

《 評価の妥当性検討 》

あと施工アンカーの評価指標で使用している波形エネルギーやピーク周波数の妥当性を検討した。

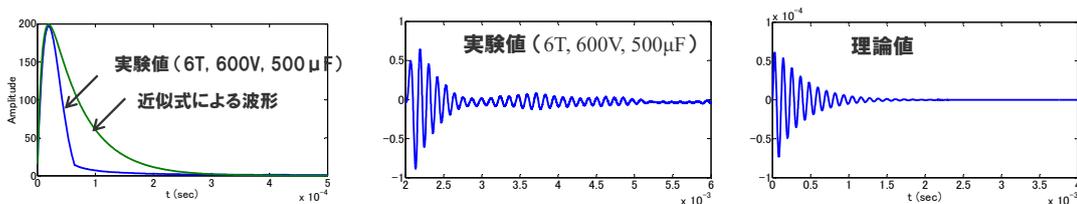
まずは、質点系モデル（図 2-2-9）を構築、基礎方程式を導き出し実験データとの比較評価を理論的に行った。

あと施工アンカーの健全性評価指標として採用した波形エネルギー、ピーク周波数は、質点系力学モデルに基づく理論的な応答と良い一致が見られ（図 2-2-10、図 2-2-11、図 2-2-12）、波形エネルギー及びピーク周波数が、評価指標として妥当性を有していることが確認できた。



表記	項目	設定値
$G_c$	コンクリートせん断弾性係数	$1.05 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
$E_m$	ボルト弾性係数	$3.2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\rho_m$	ボルト密度	$7850 \text{ kg/m}^3$
$\rho_c$	コンクリート密度	$2400 \text{ kg/m}^3$
$\nu_m$	ボルトポアソン比	0.25
$\nu_c$	コンクリートポアソン比	0.2
$c_c$	固着部減衰係数	$15000 \text{ Ns/m}$

図 2-2-9 アンカーボルトの質点系力学モデル



JCAA試験体 試験体No.22

理論化モデル

図 2-2-10 入力波形及び時刻歴応答の比較（実験値、理論値）

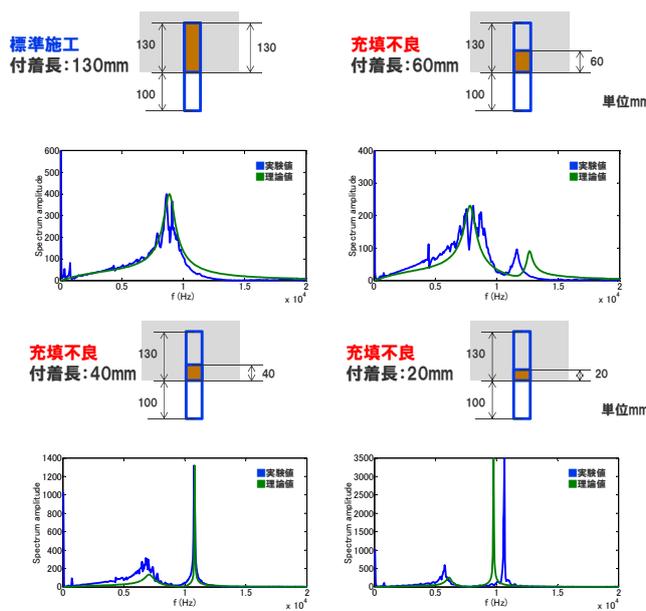


図 2-2-11 周波数応答の比較（実験値、理論値）

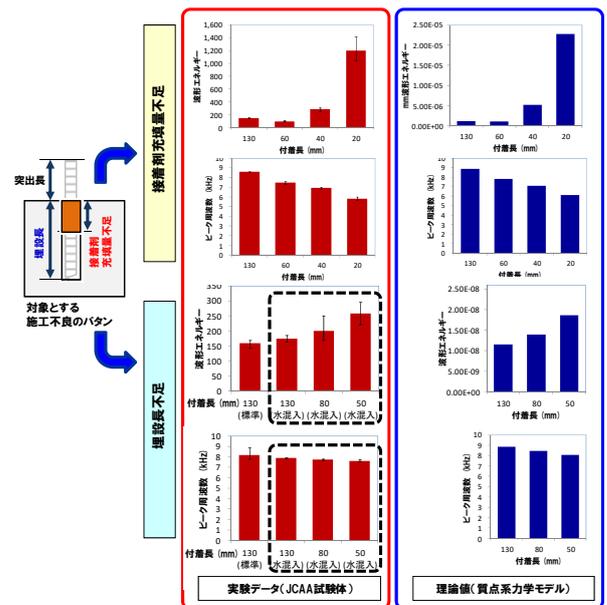


図 2-2-12 波形エネルギー及び周波数応答の比較（実験値、理論値）

次に、埋設アンカーの三次元立体モデルによる FEM 解析（衝撃応答解析）及び追加で施工した試験体（【2-1】表 2-1-3、図 2-1-3）の測定結果に基づき、ボルトの埋込長・突出長・外径のパラメータの変化が振動特性に与える影響について評価した。

埋設アンカーの三次元立体モデル（図 2-2-13）を作成し、FEM 解析を行った。また、これに基づき施工不良のパラメータの変化が評価指標に及ぼす影響について評価した。

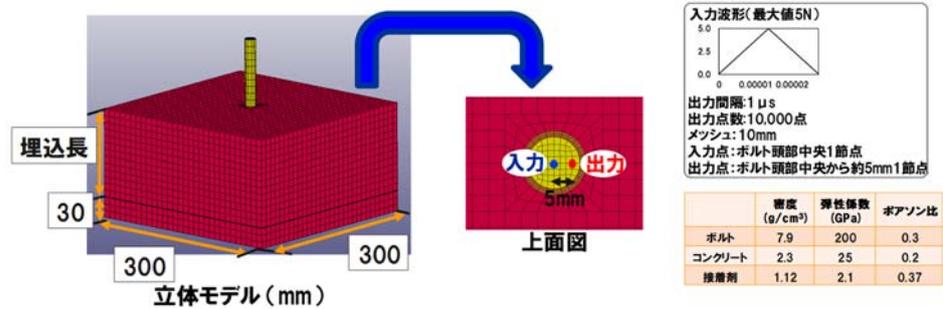
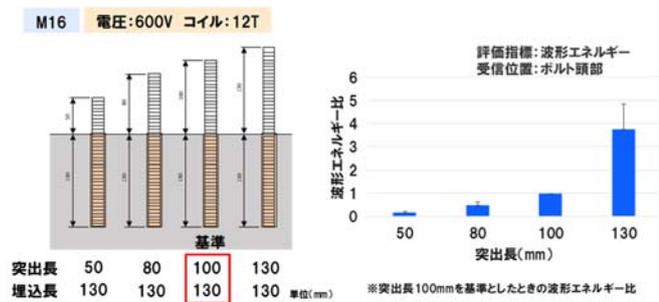
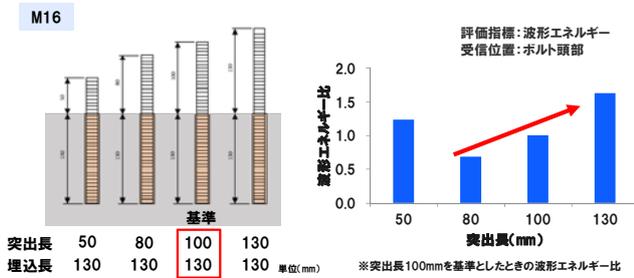


図 2-2-13 アンカーボルトのモデル化（三次元立体モデル）

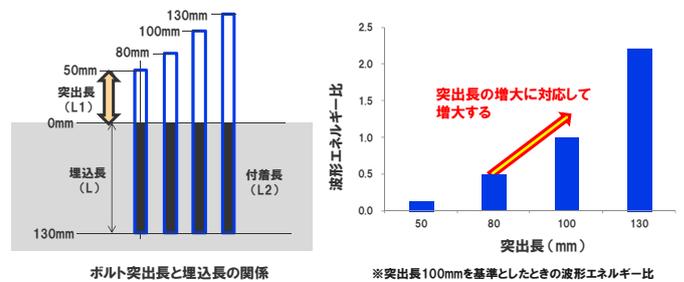
波形エネルギーは、ボルトの突出長が長くなるほど大きくなる。この値は、突出長の影響を非常に受けやすいことが判った。（図 2-2-14）



(a) 波形エネルギー比（実験値）



(b) 波形エネルギー比（解析値）



(c) 波形エネルギー比（理論値）

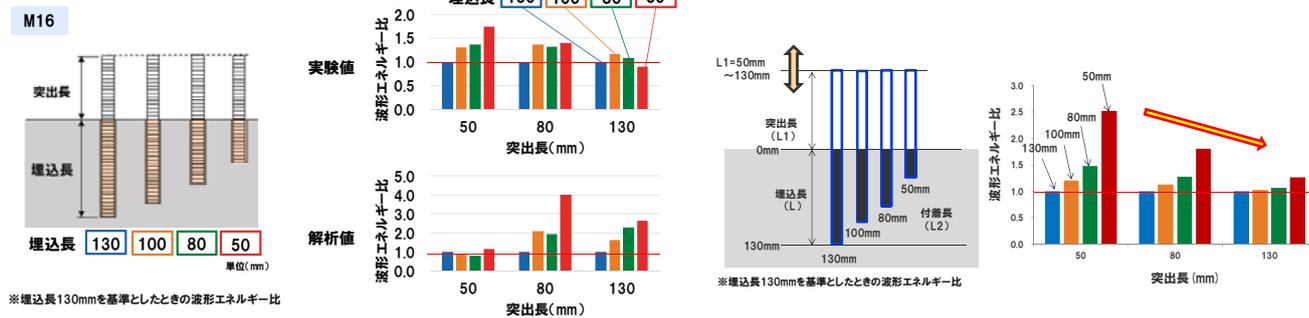
図 2-2-14 突出長の変化による波形エネルギー（実験値、解析値、理論値の比較）

さらに、異なる埋込長における突出長の影響を、実験値、解析値、理論値で評価した。

突出長が大きくなることで、埋込長の変化に対する波形エネルギー比の変化は小さくなることが判った。

（図 2-2-15）

電圧:600V コイル:12T



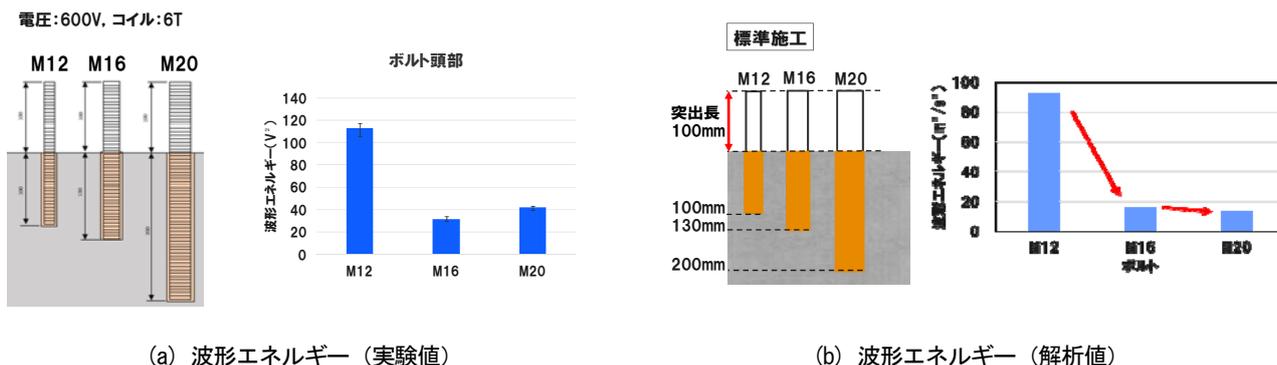
(a) 波形エネルギー（実験値、解析値）

(b) 波形エネルギー（理論値）

図 2-2-15 異なる埋込長における突出長の変化による波形エネルギー（実験値、解析値、理論値の比較）

一方、標準施工アンカーにおけるボルト外径の影響も実験、解析により評価した。

ボルト外径が小さくなると波形エネルギー比は大きくなること判った。(図 2-2-16)



(a) 波形エネルギー（実験値）

(b) 波形エネルギー（解析値）

図 2-2-16 標準施工アンカーにおけるボルト径の影響（実験値、解析値、理論値の比較）

以上のように、ボルトの突出長、埋込長及びボルトの外径による指標値の変化は、実験値、解析値及び理論値で良い一致が認められ(図 2-2-14、図 2-2-15 図 2-2-16)、波形エネルギー、ピーク周波数が評価指標としての妥当性を有していることが確認できた。

### 【3】 施工時の品質保証に特化した事業体制の確立

#### 【3-1】 諸団体への新技術登録

NETIS 等の新技術を登録するには技術の成立性を証明する現場実証試験が必要で、概ね 1 年の期間を要することから、まずは登録審査期間短縮のため、NETIS システム画面記載の『建設技術審査証明』審査機関より指導・助言を得た。

同審査機関からは、『建設技術審査証明』取得可能な有用技術であるとの高評価を受け、本研究開発成果がまとまった時点で NETIS 登録に向けた手続きを実施する予定である。

### 【3-2】 展示会への出展

東京ビックサイトで開催された『インフラ検査・維持管理展』に3年連続で出展し、実演を交えながら本研究開発技術の有効性に関する説明と普及活動を実施した。

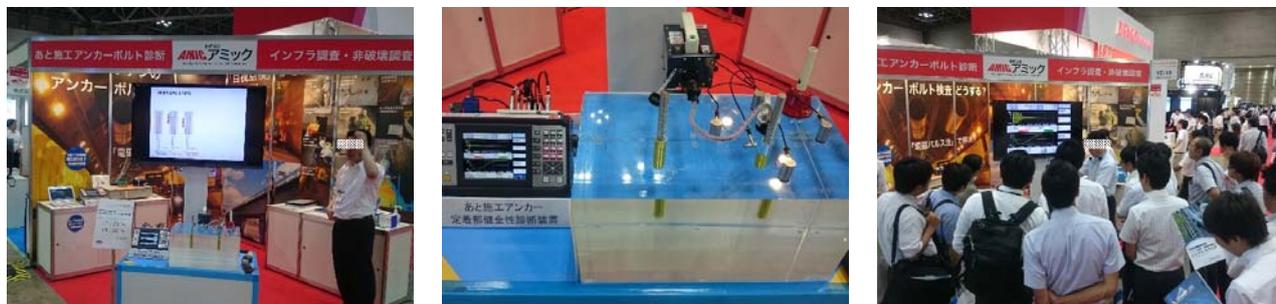


図 3-2-1 展示会出展状況写真

#### 【追加】 市場展開のためのシナリオ作成

アドバイザー委員会からの提案により、本開発技術の導入期待度の高い市場に特化して、市場展開するためのシナリオを検討した。

想定される市場は、大きく以下の4つに分類できる。

- A. 土木構造物における設備の取り付け（トンネルのジェットファン・支承・その他を固定するアンカー）
- B. 建築構造物における設備の取り付け（空調設備・看板・その他を固定するアンカー）
- C. 建物の耐震改修（短期荷重を受ける補強部材・その他を固定するアンカー）
- D. 建物のリニューアル等（長期荷重を受ける部材・その他を固定するアンカー）

検討の結果、市場導入期待度が特に高いA. トンネルジェットファンの固定アンカーとD. 建築リニューアルで長期荷重を受ける部材（床スラブなど）の固定アンカーを対象とし、優先して本開発技術を試験導入することにした。

前者のアンカーは、国立研究開発法人土木研究所のH29年度の調査対象発注入札業務で具体的に記載された喫緊の解決テーマであり、現時点で市場導入された有効な非破壊検査技術はない。

後者の長期荷重を受ける部材の固定アンカーは、国土交通省の建築基準整備促進事業「あと施工アンカーを用いた部材の構造性能確認方法検討」（H27～H29年度に実施中）の中で、その健全性確認方法の確立が望まれているものである。これに対応する形で、H29年度からその事業実施者（芝浦工業大学建築学科濱崎教授）をアドバイザー委員として招聘すると同時に本開発技術を適用した実験協力を行った。コンクリートブロックや実構造物に施工されたアンカーを使った実験において有用な結果が得られ、（株）東京ソイルリサーチ、芝浦工業大学：平成29年度 建築基準整備促進事業 最終成果報告書 あと施工アンカーを用いた部材の構造性能確認方法に関する検討、2018.3 「第4章 あ

と施工アンカー工事の品質管理指針（案）」の中で、本開発技術が品質確認方法として記載される結果となった。

図 追-1 に、同指針案 4-27 ページで示された施工後の検査フロー（案）を示す。アンカー施工後の検査項目 3 種類の内、注入量検査および充填状況検査で電磁パルス法が規定されている。

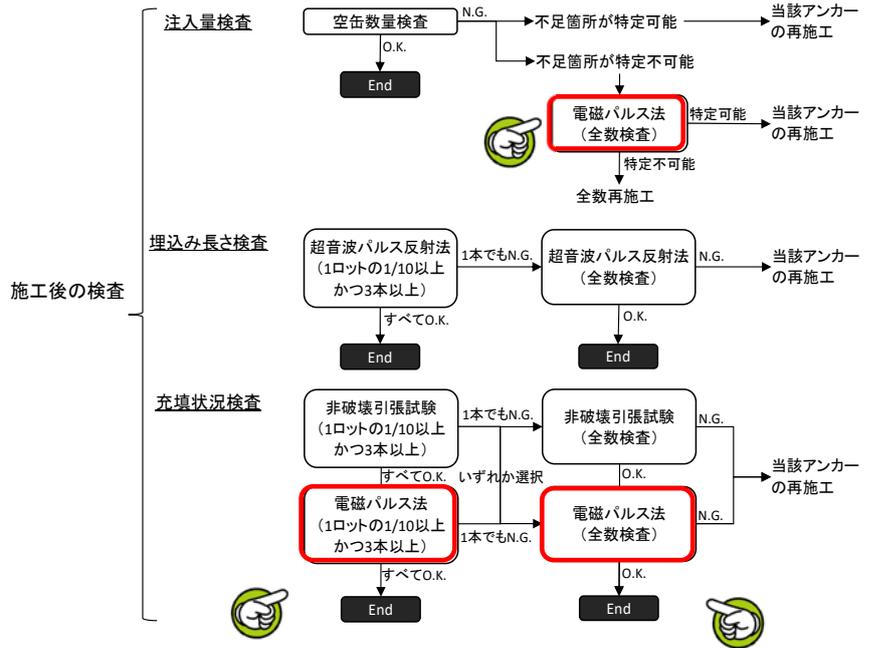


図 追-1 アンカー施工後の検査フロー

### 第3章 全体総括

本事業により、あと施工アンカー新設時にその品質確認を完全非破壊で実施できる検査手法の確立と検査装置の試作ができた。その性能は、実現場で発生する恐れのあるおおよその施工不良を再現した試験体において、設計耐力を下回る施工不良アンカーの検出率 100%を達成し、施工不良にもかかわらず引張耐力が大きかったアンカーを含めた場合でも、接着系アンカーで 91.3%、金属系アンカーで 100%と、高い率で検出できるものである。これは、現状行われている引張試験では見つけられない施工不良をも検出できることを示しており、大変有用な成果であると考える。

また、本事業を進める中、アドバイザー委員から市場展開に関する助言を得ることができ、あと施工アンカーの品質確認が土木分野の市場に限らず建築分野の市場においても喫緊の課題であることが判った。今後、導入期待度の高い市場を優先し、本開発技術の市場展開を進めて行く予定である。

#### 3-1 一般社団法人の設立：H30 年度 1/4 期から活動開始

一般社団法人日本社会基盤安全技術振興協会（以下、あんしん協という）を設立した。（図 3-1）

あんしん協の会員は、川下企業・川上企業・業界団体・大学・研究機関・官で構成し、土木分野や建築分野の構造物に限らず社会資本全般で広く活用できる埋もれた技術シーズと社会資本の管理者が

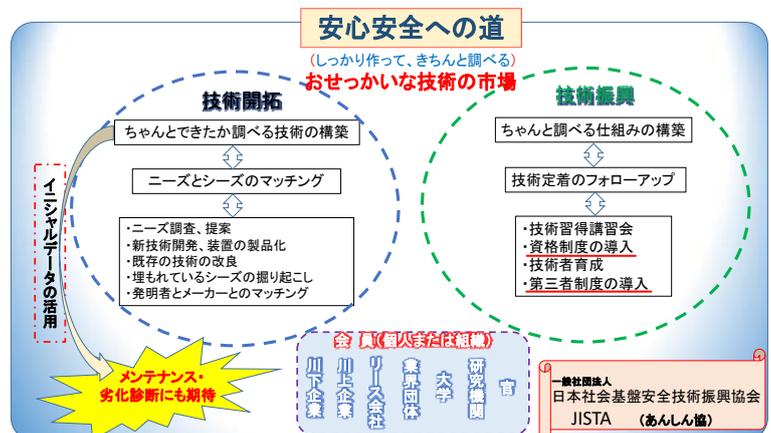


図 3-1 あんしん協の活動イメージ

抱える市場ニーズを開拓し、そのマッチングを図る。更に、マッチングした技術を定着し普及させるために、資格制度や第三者検査制度の導入などをフォローアップする。

本事業の開発技術をあんしん協における初めての技術シーズ導入モデルとして、あと施行アンカー業界に向けた事業展開を開始する。

### 3-2 検査装置の製造および市場への展開：H30 年度 1/4 期から供給開始

建築リニューアルで長期荷重を受ける部材を固定するアンカーの品質確認検査については、平成 30 年度中にも国交省より指針が出される予定である。その後の指針運用開始に対応するため、試験的に使用できる検査装置を 30 台製造した。(図 3-2 アンカーパルステスター)

この装置は、超音波法によってアンカーの長さを測定する機能と、電磁パルス法によってアンカー定着部の健全性を検査する機能を併せ持ったハイブリッド機で、図 追-1 アンカー施工後の検査フローで示された検査項目が 1 台で実施可能なものである。

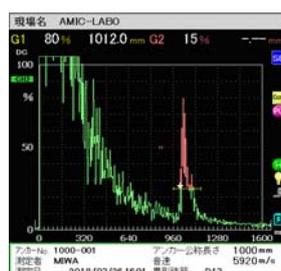
装置は全てあんしん協へ供給し、協会から使用者へレンタルすることとした。



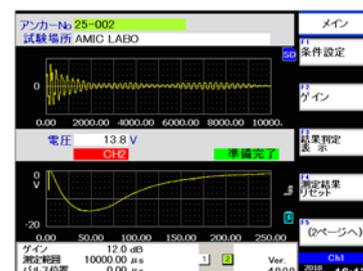
装置収納状況



装置全景



超音波長さ測定画面



電磁パルス法による検査画面

図 3-2 アンカーパルステスター

### 3-3 検査技術者の教育・資格認証制度の確立：H30 年度 2/4 期から開始

本開発技術を適用する技術者教育と資格認証事業を、あんしん協と一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会（以下、JCAA という）とが共同で実施する。JCAA は、既にアンカーを施工する技術者の教育・認証制度を有し、現在「検査資格」の整備に取り組んでいる。その制度中に本開発技術を加える形で事業化する。

現状では、アンカー施工会社 182 社（H29.7.1）施工技術者約 73,000 名のうちの技術管理士 7,606 名（H29.3 末）が資格制度の対象となる。

将来的にはアンカー施工者自身が自主点検できる制度を目指し、73,000 名のうちの相当数の技術者が本開発技術の資格者になるものと予想する。