

技術トピック

建設分野における日鉄テクノロジー(株)の試験分析技術の紹介

Introduction of the Analysis and Evaluation Technology from Nippon Steel Technology Co., Ltd. to the Building and Infrastructure Market

浜谷 秀樹*
Hideki HAMATANI
佐々木 雅之
Masayuki SASAKI

半谷 公司
Koji HANYA
西出 知史
Satoshi NISHIDE

金田 尚志
Hisashi KANADA
源 平 歩
Ayumu GENPEI

松本 雅充
Masamitsu MATSUMOTO

抄 録

維持管理ニーズに対応するための現場での劣化診断技術と、新設工事ニーズに対応するための性能評価技術に関し、日鉄テクノロジー(株)が提案可能な先進技術を紹介する。

Abstract

This paper introduces the advanced technology, proposed by Nippon Steel Technology Co., Ltd., which relates to not only the on-site diagnosis technique to support maintenance needs, but also the performance evaluation technology to meet new construction requirements.

1. 緒 言

道路・鉄道・建築構造物・エネルギー関連インフラなどの既設構造物の老朽化が進む中、それらの維持管理ニーズは高まりつつあり、脱炭素政策によりいっそう加速するとされている。一方、新設構造物に対しては性能偽装問題等により、新材料や新技術の許認可取得や性能評定のための手続きに時間を要する状況になっており、いっそう合理的かつ迅速な性能実証が求められるようになってきている。これら社会動向変化をふまえ、日鉄テクノロジー(株)(以下 NSTEC と略す)は、既設構造物向けの維持管理技術と、新設構造物向けの性能評価技術を強化している。本報では両技術において、NSTEC から提案・提供可能な先進技術を紹介する。

2. 維持管理ニーズと新設工事ニーズに対応する試験分析技術

社会ニーズに対する NSTEC の試験分析技術の対応を図 1 に、また具体的な技術を表 1 に示す。維持管理ニーズに対しては、メンテナンスサイクルの中の点検と診断の工程を担い、主に腐食と疲労による劣化状況を現場で計測し、必要に応じて試験室でより詳細に評価する。腐食ではドローンを活用した板厚減少、機械の故障、板厚減少等によ

り相対的に温度が異常となる部位の遠隔診断の他、腐食マップ作成、塗膜劣化診断など、また、疲労では主に溶接部の探傷試験、残留応力の評価、古い構造物の材料強度の予測などが可能である。新設工事ニーズに対しては、許認可取得のために規定されている性能評価試験や一般社団法人 AW 検定協会と同様の試験などに対応できる。また、上述の現場での腐食・疲労に関する劣化診断に加え、構造内部の割れや欠陥の探索、自然海水を循環させた腐食試験、高温/低温での疲労試験などができる。構造実験では、日本製鉄グループの大型試験装置を活用した評価が可能であり、表面ひずみ分布の可視化や、数値シミュレーション(CAE)と連動させたパラメトリックな評価ができることを強みとする。この他、摩耗性や破損原因調査など特殊試験にも対応している。以上のように NSTEC は計測から分析、構造試験、そして数値解析まで一貫して実行可能な体制を構築しており、総合的なソリューションを顧客に提供できることが大きな特徴である。

3. 現場での劣化診断技術

3.1 錆など腐食による板厚減少、割れの検出

3.1.1 ドローンに計測器を搭載した板厚減少などの調査
既設構造物の残存耐力を予測するためには、錆による板厚

* 日鉄テクノロジー(株) 材料特性評価部長 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-0011

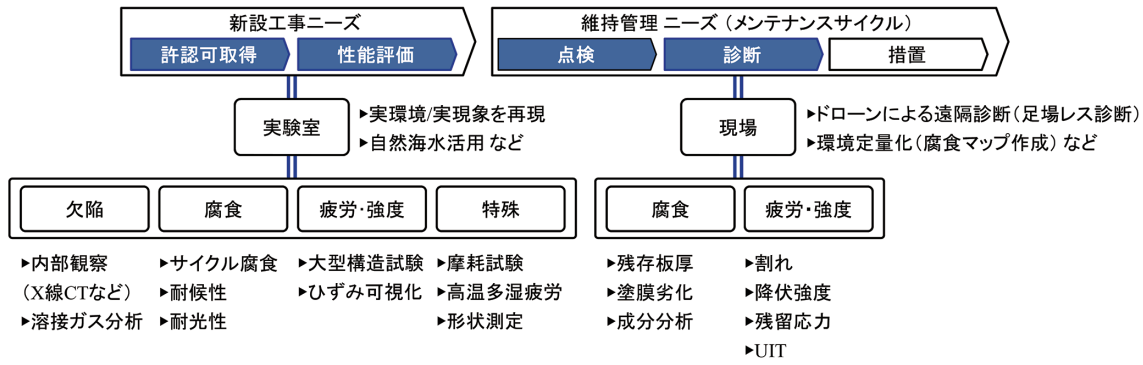


図1 社会ニーズとそれに対応するNSTECの試験分析技術
Analysis and evaluation technology that meets the needs of society

表1 日鉄テクノロジーで対応可能な建設技術への評価技術
Analysis and evaluation technology related to the building and infrastructure at Nippon Steel Technology

	目的	評価方法	現場測定	
維持管理 ↓ 診断	腐食	錆等による板厚	超音波板厚計(図2), ドローンに搭載した板厚計(図3)	○
		(異常)温度	サーモカメラ	○
		腐食マップ作成	ワッペン試験	○
		腐食速度	ワッペン試験(図6), ACM センサー	○
		塗膜劣化診断	電気化学インピーダンス法を用いた塗膜抵抗測定(図7)	○
	疲労	(腐食生成物)成分分析	X線蛍光分析	○
		疲労等による割れ・欠陥	超音波探傷(UT), X線透過探傷(RT), 浸透探傷(PT), フェイズドアレイ UT, TOFD(図4)	○
		残留応力	X線残留応力測定装置	○
		ボルトの緩み	超音波軸力測定装置	○
		強度(降伏応力)劣化	硬さ試験, 計装化押し込み試験技術(図5, IIT)	○
新設工事 ↓ 認定・性能評価	欠陥	内部割れ・欠陥	UT, RT, PT, フェイズドアレイ UT, TOFD, マイクロフォーカス X線 CT(図8), プローホール中のガス分析	
		耐食性	塩水噴霧試験(SST), 複合サイクル試験(CCT), 塩分付着サイクル腐食試験(表2), 自然海水を循環させた試験水槽内での腐食試験, DNA分析を用いた微生物腐食解析	
	疲労・強度	耐候(光)性	人工光源を利用した耐候性試験	
		材料認定(強度)	AW溶接技量検定試験, 溶接施工要領評価(AW準拠など), JIS規格に準じた引張試験, 疲労試験, シャルピー衝撃試験, CTOD, DWTT, JIC試験	
		大型構造体の強度特性	(試験装置・方案を駆使した試験 ⁴⁾)	
		試験中の面内歪分布可視化	ひずみゲージ法, 画像相関法(図9, DIC)	
		(特殊環境下での)疲労特性と改善	引張・圧縮, ねじり, 軸力, ねじり軸力複合, 腐食疲労試験, UIT(図12), 恒温恒湿槽内での疲労試験(図10)	
	特殊試験	数値シミュレーション	(図11), MARC, ABAQUS, LS-DYNA, Fluent	
		溶接時の割れ感受性	バレストレイン試験, y形溶接割れ試験(恒温恒湿下でも可)	
		摩耗性	往復摺動摩耗試験, ピンオンディスク, ブロックオンリング, スラリー摩耗試験, エロージョン摩耗試験, アブレッシブ摩耗試験	
	形状測定	光切断法(三次元測定), レーザ顕微鏡, 白色干渉型顕微鏡		
	破損原因調査と再現試験	各種高精度分析技術を活用した破面・断面・表面観察(図13, 14)		

減少量を把握する必要がある。図2は超音波を利用した鋼橋の板厚の測定状況である。表面の錆や塗膜を取り除いた後、超音波を用いて厚さを測定し、規定値と比較することで補修、交換の要否を判断できる。特に耐候性鋼構造の場合は、採取した錆からその安定性評価をできるのもNSTECの強みである。従来の測定技術では足場設置が障害となっていたが、最近ではドローンを活用した、足場レスの遠隔作業が可能になっている。NSTECでは、空中からの画像撮影だけでなく、ドローンに超音波板厚計を組み込むことで(図3)、板厚減少量の遠隔測定も可能にしており、プラント設備の点検など実績を重ねている。このように様々な測定技術とドローンを組み合わせ、また製鉄プラント設

備を対象にした試行を通して、維持管理技術を強化できることがNSTECの強みである。

3.1.2 フェイズドアレイ UT や TOFD による割れの診断

既設構造の残存耐力は、疲労や応力腐食割れによるき裂や欠陥にも左右される。これらを現場で評価する技術として、超音波探傷(UT: Ultrasonic Testing), X線透過探傷(RT: Radiographic Testing), 浸透探傷(PT: Liquid Penetrant Testing)などが一般的である。NSTECの強みはフェイズドアレイ UT や TOFD(Time of Flight Diffraction)を有している点にある。TOFDを用いて溶接部に発生した応力腐食割れを検出した例を図4に示す。板厚30mmの板の当該部



図2 現場での超音波による板厚測定写真
On-site thickness measurement of steel plate by ultrasonic equipment



図3 超音波板厚計搭載ドローンの写真
Drone equipped with ultrasonic thickness gauge

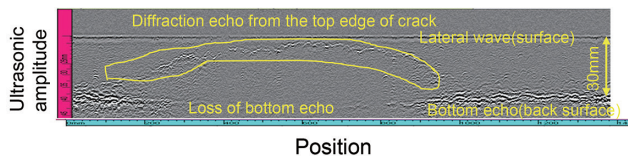


図4 TOFDによる溶接部内部のき裂高さ検出断面図
Cross-sectional image of crack height detection in weld by TOFD

において、黄色線で囲われた割れ上端からの回折波が表面近くで検出されており、また割れ部の底面反射波が消失していることから裏面側から表面近傍まで割れが進展していることが分かる。TOFDはきずの端部からの回折波を利用しているので、一般的なUTよりも、割れの高さを正確に測定することができることが特徴である。

3.2 非破壊による強度診断

老朽化した鉄骨や、火災後の鉄骨の材料強度(降伏強度、引張強さ)を非破壊で調査することへの要望も多い。NSTECは、計装化押し込み試験技術(IIT: Instrumented Indentation Technique)の一つであるFRONTICS社製の商品名AIS(Advanced Indentation System)を活用した現場計測を行うことができる。IITの一つであるナノインデントでは、鉄骨表面の硬さを測るのに対し、AISでは先端R径が約0.25mmの球状圧子による負荷除荷を繰返し行うことにより、材料の応力-ひずみ曲線(ss曲線)を算出できる。一般的な建設用鋼材を対象とした降伏強度の測定精度は±10%である(図5)。ここで通常の降伏強度とは、引張試験にて測定した値である。また、AISの装置は軽量小型(φ90mm×L320mm、重量約5kg)であり現場測定が可能である。NSTECには、被評価物の形状に合わせた治具製作にノウ

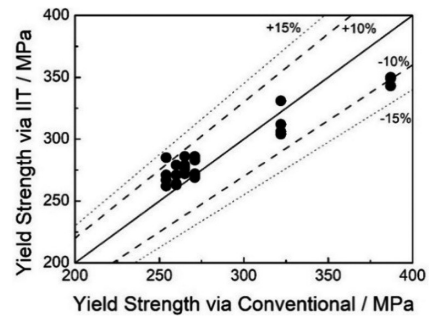


図5 IITによる鋼材の降伏強度と従来手法との比較
Comparison of yield strength using IIT with conventional strength test

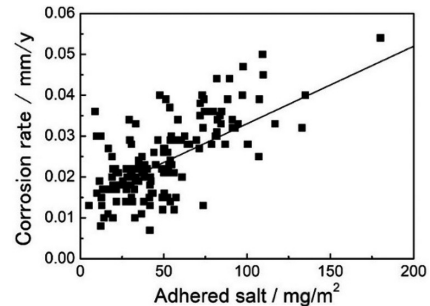


図6 ワッペン試験による塩分付着量の腐食速度への影響
Relationship between the corrosion rate and the amount of adhered salt on the test coupons

ハウがあり、関西電力(株)と共同で推進中の水力発電用鋼構造物の健全性評価の研究を通じて実績を作ったり。なお、本法を用いた材料強度の評価ができるのは、現在、国内ではNSTECのみである。

3.3 腐食進行およびその環境の評価

3.3.1 腐食マップ作成、腐食速度の測定

新設工事においては、建築の敷地内で、どこが腐食しやすいかの指標となる腐食マップの作成、腐食による経年変化、そして腐食速度の把握が、腐食の進行を見極めるために重要となる。これらの評価には、ワッペン試験片、ACM(Atmospheric Corrosion Monitoring)型腐食センサーなどを用いる。この時、飛来塩分や融雪剤などの付着量を併せて測定することにより、腐食の要因を明確にすることが可能となる。

図6は、ある工場における腐食速度への塩分付着量の影響をワッペン試験で測定した結果²⁾であり、腐食速度が塩分付着量とともに増加する傾向を検証している。ただしばらつきがあり、腐食速度には塩分付着量以外の要因も影響していると考えられる。

3.3.2 塗膜劣化および塗膜剥離率の測定

耐食性には、素材だけでなく、表面に施されている塗膜の劣化や、塗膜剥離後の耐食性も鍵となり、これらの定量化は寿命診断に有益である。この評価には電気化学イン

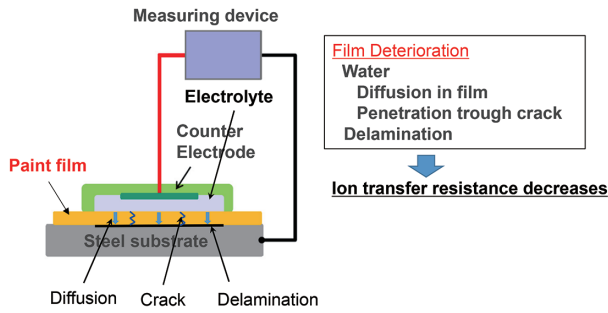


図7 電気化学インピーダンス法を活用したオンサイトでの塗膜劣化診断方法の概要図
Experimental setup of the coating deterioration diagnosis via electrochemical impedance spectroscopy measurement

ピーダンス法を応用した塗膜抵抗測定を用いることができる。図7はこの手法の原理を示している。塗膜剥離は、塗膜への水の拡散・膨潤、塗膜欠陥やクラックからの水の侵入により、塗膜界面へ水が侵入することにより生じる。水の侵入により塗膜のイオン透過抵抗が変化することを利用するもので、予め塗膜剥離率とイオン透過抵抗との関係を検量線として準備しておくことで、塗膜劣化を評価することができる。塗装の塗り替え時期検討の一助として活用できる。

4. 実験室での評価

4.1 内部欠陥評価(マイクロフォーカスX線CTによる内部欠陥評価)

溶接構造や鉄筋コンクリート構造の内部欠陥や骨材・ボイドの状況を精度よく把握する要望も高まっている。UTなどで検出できる欠陥サイズ(数100 μ mレベル)より高い分解能での内部欠陥の検出法として、マイクロフォーカスX線CTがある。試験体にX線を照射して透過像を撮影し、CT画像として、内部の空隙や異物などの位置や大きさを三次元的に解析するものである。NSTECが保有する設備では、X線の透過能は鉄で30mm、Alで150mm、検出できる欠陥の最小サイズは、約40 μ m(試験片サイズの影響あり)の分解能で大きなサンプルに対応でき、幅広い分野に活用されている。例えば、図8は直径約45mm、高さ約70mmのコンクリート中のボイドの抽出結果であり、ボイドの位置、体積、個数などを定量的に評価した事例である。

4.2 耐食性試験

4.2.1 実環境により近い塩分付着サイクル腐食試験

鋼材の腐食促進試験には、従来から塩水噴霧試験(SST)、複合サイクル試験(CCT)が幅広く用いられている。NSTECの特徴は、評価可能な試験片サイズが10mmオーダーから最大2mまで、温度が-20 $^{\circ}$ Cから70 $^{\circ}$ Cまで、一部のサイズでは100 $^{\circ}$ Cまでと広い点である。ただし、最近ではこれら促進試験による腐食状況が実構造物の状況と乖離している

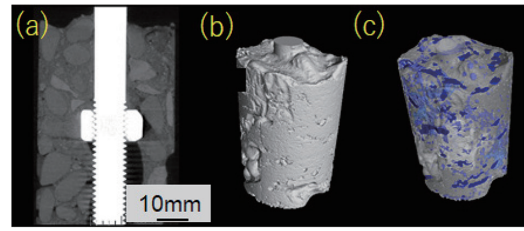


図8 マイクロフォーカスX線CTによるコンクリート中の欠陥観察像
(a) CT撮影像, (b) 3D像, (c) 250mm³未満のボイド抽出結果
Micro-focused X-Ray CT images of voids in concrete
(a) CT image, (b) 3D image, (c) image of voids less than 250mm³ in volume

表2 塩分付着サイクル腐食試験と他試験との耐食性比較
Comparisons of the salt adhesion cyclic corrosion test with other tests

	Exposure Test (Okinawa, 1 year)	Salt adhesion cyclic corrosion	SST (7days)
Steel Plate	(a)	(b)	(c)
Zinc Plate	(d)	(e)	(f)
Rust	Dense and homogeneous	Dense and homogeneous	Porous and inhomogeneous

と思われる事例もあり、実環境により近い塩分付着サイクル腐食試験がJIS化(JIS G 0594 D)されている。この試験法では、飛来海塩が付着し、露点一定で乾湿を繰り返す実腐食環境³⁾を模擬している。表2において、SSTでは粗く不均一な錆(c)が形成されるのに対し、実際の暴露試験(a)と同様の緻密で均一な錆(b)が形成されていることが確認できる。この傾向は亜鉛板(d)(e)(f)の結果でも確認できる。建設地の環境に即した耐食性評価に有効な試験法といえる。NSTECでは、3.3.1で紹介した環境因子の調査とこれら腐食試験の結果から得られる腐食速度を総合することで、構造物の寿命予測を判断する一助となるデータを提供することができる。

4.2.2 自然海水を循環させた試験水槽

上述した腐食促進試験よりも、実環境での暴露試験の方が信頼性は高いといえるが、その実行が難しい。NSTECの強みとして、簡易かつより実態に近い環境での暴露試験として、東京湾から引き込んだ自然海水を循環させた試験水槽内での試験装置を備えている点がある。更に、微生物付着の影響をも考慮した試験や電気化学測定による耐食性

の評価も可能である。

4.3 強度系試験

4.3.1 材料承認試験, 溶接試験

JIS に準じた引張試験, 疲労試験, シャルピー衝撃試験, CTOD (Crack Tip Opening Displacement) 試験, DWTT (Drop Weight Tear Test) 試験, JIC 試験などの破壊靱性試験がある。特に建設関係では, AW 検定協会の溶接技量検定試験や溶接施工要領評価に準じて, 柱 - 梁継手などを評価している。更にカーボンニュートラルに関連した高圧水素ガスや液体水素環境下での強度・靱性試験も可能である。

4.3.2 大型構造体の強度試験

明確な試験規格・基準がない, 非定型かつ大型な構造実験を行うことができる。NSTEC は, 自社保有の試験機の他, 日本製鉄グループ保有の試験装置⁴⁾, 外部の試験機関の装置を適切に選定し, 必要に応じて治具を設計試作し, 計測方法を決め, 試験方案を策定した後, 構造特性を評価する。これまでの実績を文献⁴⁾の一部に示す。この大型実験では, 強度試験とシミュレーションとを組み合わせることができることが強みである(後述)。

4.3.3 ひずみ分布の可視化(DIC)

構造特性を詳細に分析するために, ひずみ分布は不可欠な情報となるが, 広範な領域の中で破断の起点になるようなひずみ集中の状況をひずみゲージで測定することは難しい。そこで NSTEC では, 画像相関法(DIC: Digital Image Correlation)を用いたひずみ分布の可視化技術を強化している。载荷中の試験体を適切に撮影することで, 試験後に任意の箇所のひずみ分布を確認できるという特徴がある。DIC の活用事例として落錘試験における計測状況を図9に示す。動的荷重によりハット部材が折れ曲がり変形する画像の中で部材側面のひずみ分布が確認できていることが分かる。ひずみが集中する箇所は赤色で可視化されている。このように高速度カメラと組み合わせることで, 動的試験時のひずみ分布の変化も連続的に確認することができる。鋼材以外の材料に対しても測定ノウハウも積み重ね適用

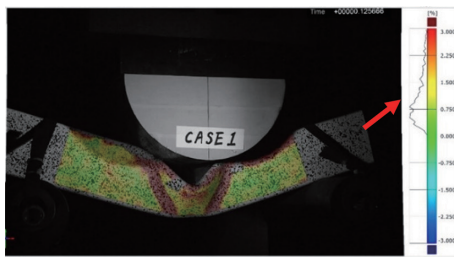


図9 DICによるハット部材の落錘試験時の相当ひずみ分布測定例

Results of equivalent strain distribution in a drop weight impact test using DIC

範囲の拡大に努めている。

4.3.4 特殊環境下での疲労試験

疲労試験では作用力や使用環境を再現して評価することが重要である。NSTEC は, ねじりと軸力の複合, 熱疲労, 腐食環境(海水, 油など), 恒温恒湿環境などの, 多様な試験環境に対応できる。温度, 湿度はそれぞれ, $-100^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$, 30% ~ 85%で制御できる装置を備えている。図10は湿度と温度を変数にしてCFRPの疲労特性を評価したものである。一般に接着体やCFRP等の樹脂は温度や湿度の影響を受けて疲労特性が大きく変化するとされるが, この試験結果からも, 高温多湿の条件では疲労限が約200MPa低下することが確認できる。

4.3.5 溶接部の高温, 低温割れ性の評価

鋼材の高強度化に伴い, 溶接部の高温, 低温割れの評価が必要になる場合もある。それぞれに評価として, バレストレイン試験, y形溶接割れ試験があり, 特に後者は恒温恒湿環境でも評価可能である。鋼材種類, 溶材種類, 溶接条件と割れとの相互関係や改善策を明らかにできる。

4.3.6 摩耗試験(白色干渉型顕微鏡による表面形状測定)

摩耗試験では対象物の摩耗・摺動形態に合わせた評価が重要である。NSTEC では, 摺動形態が点や面接触型である回転・往復摺動に加え, 線接触型であり潤滑評価にも使われるブロックオンリング, 土砂摩耗評価のアプレッシブやスラリーなど, 様々な摩耗・摺動形態や試験条件に対応できる体制を整えている。特に摺動速度(回転0.1rpm ~ 5000rpm, 往復0.1Hz ~ 80Hz)や試験温度(最低 -40°C , 最高 1000°C), 試験荷重(0.1N ~ 5000N)の観点で, 広い条件範囲で試験ができることがNSTECの強みである。

また, 摩耗判定の最近のトレンドは, 一般的な重量減少に加え, 三次元の表面形状変化で行うことである。特に白色干渉型顕微鏡は, 共焦点顕微鏡(レーザー顕微鏡)では不

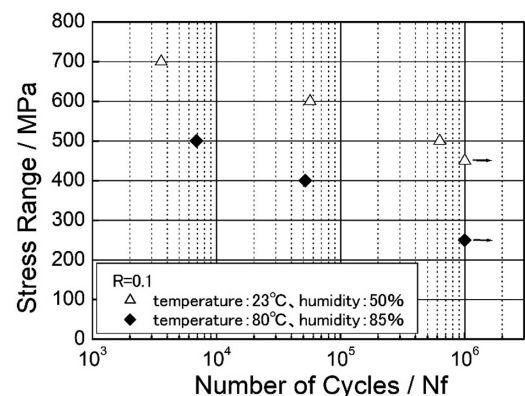


図10 試験温度のCFRP疲労強度への影響
Effect of testing temperature on the fatigue strength of a CFRP

可能な、高い垂直方向の分解能 (0.1nm~1nm) を維持したまま、試験片のうねりなどの高低差 (~7mm) や広範囲 (~150mm 角) での計測が可能という特徴がある。この技術は摩耗量だけでなく、部材や素材の表面形状の把握にも活用できる。

4.4 数値シミュレーション (大変形弾塑性繰返し载荷の再現)

NSTEC では、MARC などの汎用数値解析ソフトウェアを用いた振動固有値解析、座屈固有値解析などの弾性解析から、鋼材の応力 - ひずみ特性を様々に変化させた弾塑性大変形解析を行うことができる。また流体解析・熱伝導解析の解析実績も有しており、広く土木・建築分野への適用が可能である。

低層住宅向け耐力壁に設置する耐震要素として、鋼板を U 形に加工した耐震デバイスを対象に、エネルギー吸収性能導出の繰返し载荷試験を再現した事例を図 11 に示す⁹⁾。実験結果とエネルギー吸収量を比較すると、計算 (Hashiguchi モデル) 結果は、累積変形量 $\Delta=40\text{mm}$ 前後で多少乖離があるものの、 $\Delta=80\text{mm}$ 時には良好な一致を示している。このように複雑な繰返し累積変形を伴う弾塑性大変形挙動においても、日本製鉄グループに蓄積されている解析ノウハウを活用することで、精緻に再現できる。

4.5 疲労改善や破損・材質調査からのソリューション提案

4.5.1 溶接部疲労特性の改善ソリューション (UIT 処理)

NSTEC の強みに溶接部疲労特性に有効とされる UIT (Ultrasonic Impact Treatment) 施工の独占使用権を有している点がある。鋼材の高強度化が進んでも構造体の疲労寿命が溶接部に支配されることは広く知られている。疲労寿命向上策として超音波振動を用いたピーニング処理技術の一つとしてこの UIT が提案されている。性能向上する機構は、ビード止端部の曲率を大きくすることによる応力集中の軽減、圧縮応力の付与による溶接残留応力の軽減、組織の微細化による部位の疲労特性改善などによる⁹⁾。また、UIT

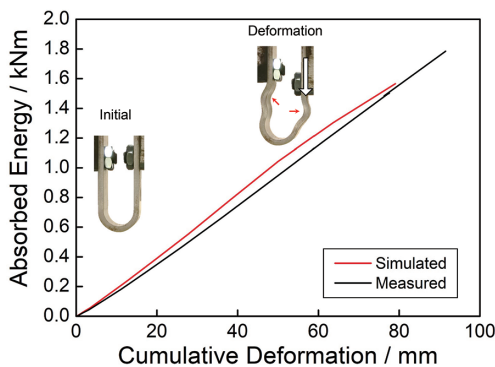


図 11 実験と計算でのエネルギー吸収量の比較
Comparison of measured energy absorption with simulations

による実績はあるが、圧縮残留応力付与量の正確な定量化はできなかった。表面に限られているが、この残留応力を X 線で測定できることも NSTEC の強みである。

加えて、NSTEC では、日本製鉄、首都高速道路(株)との共同研究により、この処理を既にき裂が発生した溶接止端部に施工することでき裂箇所の余寿命延長に効果を発揮することを検証すると共に、き裂未発生箇所においても溶接部の余寿命の延長 (予防保全) に活用できることを発表している。この効果が発現した理由として、き裂が閉口したことによる応力集中の低減や圧縮残留応力の付与と考えられている (図 12)⁷⁾。

4.5.2 損傷原因調査および現象再現実験

損傷した構造体の対策を立てるには、原因調査が不可欠である。素材や溶接方法、使用環境 (温度、pH などの腐食環境、応力場など) をベースにし、非破壊検査、破壊原因を示唆することが多い破面や断面観察、場合によっては再現試験などをあわせ、原因のみならず解決策の提案要望も多い。図 13 は 1400MPa 級の高力ボルトの破面写真で、起点には腐食ピットや粒界割れが認められ、破壊原因は腐食による水素の侵入により粒界が水素脆化したと判断された。この課題を解決するために水素侵入経路を検討し、経路は製造工程のめっき前の酸洗であることを突き止め、割れ抑制の糸口に繋がった。

腐食生成物の調査には、EPMA (Electron Probe Micro

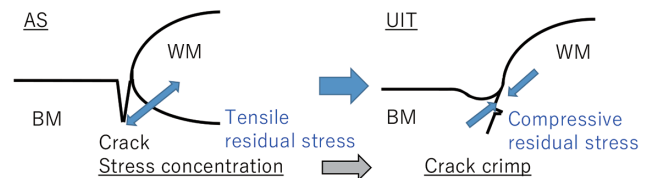


図 12 UIT による溶接止端部き裂の余寿命延長効果の模式図
Schematic diagram of enhancement of UIT for the remaining fatigue life of weld bead with crack

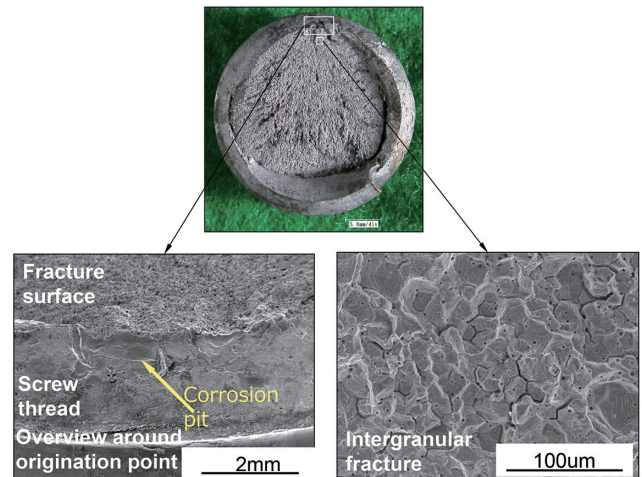


図 13 高力ボルトの破断面の SE 写真
SE photos of fractured high strength bolt

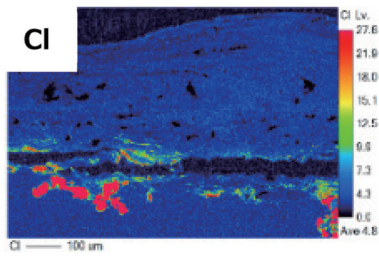


図 14 EPMA による腐食生成物の Cl 元素マッピング
Cl mapping of the corrosion product by EPMA

Analyzer, 特性 X 線の波長と強度から元素を分析, 図 14), ラマン分光法, XRD (X-Ray Diffraction) など様々な分析技術を活用し, 腐食生成物の同定や発生機構を解明している。

5. 結 言

本報では, 構造体の現場での劣化診断と, 実験室での機械的・化学的な評価, 数値解析技術等の概要を紹介した。

日鉄テクノロジーには, 本報で紹介した多彩な分野の専門家がおり, 調査・研究開発・施工適用など様々な場面で要望に合わせた連携を取りながら検討し, 顧客の発展に貢献してゆく所存である。

本報を契機に皆様から今まで以上のご指導を賜わることができれば幸いに存じます。

参考文献

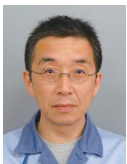
- 1) Matsuoka, Y. et al.: Electric Power Civil Engineering. (416), 51 (2021)
- 2) Inoue, H. et al.: Zairyo-to-Kankyo. 69, 175 (2020)
- 3) Mutou, I. et al.: Zairyo-to-Kankyo. 47, 519 (1998)
- 4) Hanya, K. et al.: Nippon Seitetsu Giho. (420), 117 (2023)
- 5) Itou, I. et al.: Proc. Architectural Institute of Japan, Kinki Branch (2019)
- 6) Nose, T.: Shinnittetsu Giho. (391), 156 (2011)
- 7) Uesaka, K.: J. JSCE. 77 (1), 121 (2021)



浜谷秀樹 Hideki HAMATANI
日鉄テクノロジー(株)
材料特性評価部長 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-0011



佐々木雅之 Masayuki SASAKI
日鉄テクノロジー(株)
物理解析部 主幹



半谷公司 Koji HANYA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長
博士(工学)



西出知史 Satoshi NISHIDE
日鉄テクノロジー(株)
材料特性評価部 主査



金田尚志 Hisashi KANADA
日鉄テクノロジー(株)
名古屋事業所 NDI技術室長
博士(工学)



源平 歩 Ayumu GENPEI
日鉄テクノロジー(株)
プロセス・CAEソリューション部 主査



松本雅充 Masamitsu MATSUMOTO
日鉄テクノロジー(株)
材料環境評価部 首席主幹
博士(工学)