

移動機等大型構造物の老朽劣化診断

Degradation Diagnosis of Large Structures (Material Handling Machine etc.)

長野 誠 NAGANO Makoto JFE スチール 東日本製鉄所（千葉地区）設備部 第2製鉄設備室 主任部員（副課長）
柳沢 隆太 YANAGISAWA Ryuta JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区）設備部 設備技術室

要旨

近年、大型構造物の劣化進行により、生産・操業への影響が大きいトラブルや重大事故が発生しているため、“抜きの無い”設備の点検・保守、劣化診断が急務である。ここでは原料移動機を例に、重大事故の未然防止に主眼を置いた、FEM解析を活用した部位毎の劣化度評価、および想定外荷重を考慮した網羅的な劣化診断・判定方法について述べる。

Abstract:

In recent years, due to the progress of deterioration of large structures, troubles and serious accidents with large influence on production and operation are occurring. Therefore, inspection, maintenance, and deterioration diagnosis of equipment without oversight is an urgent task. Taking material handling machine as an example with main focus on prevention of serious accidents, comprehensive deterioration diagnosis and judgment method considering deterioration evaluation for each part utilizing FEM analysis and unexpected load is described.

1. はじめに

日本では鉄鋼業全体として設備が高経年化¹⁾し、各製鉄所において老朽更新の計画が組まれているが、適切な劣化診断ならびに余寿命判定ができず、特にダクトや原料移動機などの大型鋼構造物において、しばしば大トラブルへとつながる重大事故が発生している。これは高経年化に比例して増加するものであり、生産活動の維持ならびに労働者の安全確保の観点から重要な課題といえる。一般的に製鉄所では稼働を開始して20~30年で老朽更新への取り組みを始めるが、現在、日本の製鉄所の多くが稼働後40~50年経過しており、高炉などの重要設備は改修されるものの、建屋やジャンクションといった構造物やダクト、原料搬送設備・移動機などすべての設備を抜本的に更新することは困難であり、現実に更新されていない。これからは、老朽劣化度の判定に加え、更新までの延命処置を適切に実施できるかが設備保全および機能保全を考える上での重要な課題となり、また生産能力の維持・確保へとつながる取り組みとなる。これまで、コンベヤフレームなどのトラス構造体や鉄塔などの架構構造体の診断技術²⁾は開発されてきたが、それらは比較的簡素な構造であり、構造を成すフレームの板厚が直接的に強度評価につながるものであった。本報告は、大型構造物である原料移動機に焦点を当て、これまでの重

大事故防止活動の取り組み内容および設備機能保障レビューと称される、今後起こりうる事故の未然防止を目的とした診断、判定手法について報告する。本取り組みの基本的な考え方やアプローチは他の経年劣化設備およびライン重要設備にも展開、活用可能であり、JFE スチール内において水平展開を図っている。

2. 重大事故防止活動

2.1 原料移動機について

簡単に今回検討した原料移動機の構造について説明する(図1参照)。移動機には、大別してリクレーマ(RE)、スタッカー(ST)、スタックリクレーマ(SR)、ブレンディングリクレーマ(BR)があり、BR以外はヤードへの原料搬送のためのブームを有し、旋回体を支点としてカウンターウエイト

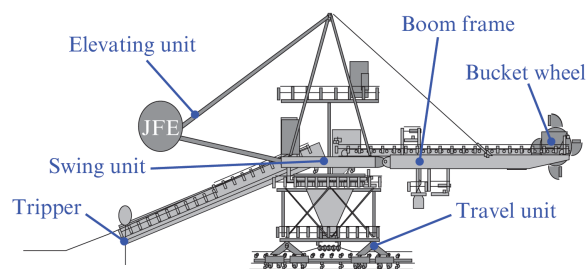


図1 原料移動機模式図

Fig. 1 Material handling machine model

2019年3月19日受付

でヤジロペエのようにバランスを取る構造となっている。原料移動機は原料ヤードの広い範囲で使用するため、走行体の上に、上記バランス体を旋回できるように乗せている。REにはブーム先端にバケットホイール、STにはヤードのコンベヤを機体へ引き込むトリッパーが付帯しており、SRはRE・STの両方の機能を併せ持つ。

原料移動機は基本的にバランス機械であり、一部の部材の破損・欠損によりバランスが取れない状況になると、各部位での部分座屈や、最悪の場合には設備全体の倒壊の危険性がある。

ヤード幅や機体の用途にもよるが、主力設備の総機体重量は400t程度（ウエイトバラスタ除く）のものが多いと推定される。またREとSTの機能を兼用できるSRを配置することで機体数を圧縮するなど、ヤードの運用によってヤード面積に対する機体数の割合には各製鉄所でバラつきがある。原料移動機は、一般的にコンベヤおよびコンベヤ乗り継ぎ部からの落鉱、落炭が堆積し、そこに雨水などが浸潤し、乾湿を繰り返す環境により腐食劣化が進む。なお、クレーンでは負荷・除荷、横行などの繰り返し応力による疲労亀裂が多く見られるが、原料移動機の場合は屋外の原料（鉱石、石炭、石灰ほか）搬送環境であるため、腐食劣化が支配的である。

2.2 管理サイクル

JFE スチールでは、重大事故（＝倒壊事故）防止を目的とした取り組みを2003年の統合直後から進め、全地区の共通基準として定着させてきた。原料移動機の各部位のフレームや機器ごとに、点検方法および異常時の対応等を基準化している。それぞれ管理部位・項目を設定し、目視での年次点検および非破壊検査や板厚測定を用いた定量評価を行う精密点検を行っており、年次点検での状態把握から精密点検での劣化範囲や程度の詳細把握へとつなげている（図2）。JFE スチールの保全部門ではそれらの点検結果に基づいた補修を逐次行い、劣化が顕著であれば建設部門が更

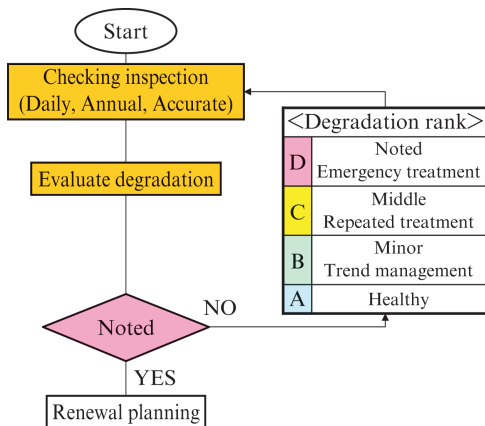


図2 劣化度判定フロー
Fig. 2 Evaluate degradation flow

新の検討を行うことになる。

2.3 更新管理基準

移動機の老朽更新については、更新基準を設定し、点検結果および測定データから全社の更新計画を立案している。移動機の各部位ごとに重要度（＝倒壊危険度、故障発生時の生産停止影響を基に設定）を決め、点検データに基づく劣化度評価と合わせて図3に示す指標で必要性および優先度を判断している。JFE スチールでは旋回装置やブームの劣化が著しくリスクが高い設備、更新による設備停止が長期間となるために生産デメリットが大きくなる設備などは一式更新とし、バケットホイールやトリッパーフレームなど、長期間の停止を必要とせず、単体で機能を復元できるものは部分更新としている。この指標を各製鉄所で用いることで評価を統一でき、横断的な評価ができるようになった（図4）。

3. 劣化度評価および更新

3.1 評価事例1

2章で述べた重大事故防止活動の事例として、稼働から40年以上経過したREの評価を紹介する。本機体については更新の必要性ありと評価し、実際に更新している。

年次点検における、バランス構造の主要部位であるブームフレーム、旋回フレーム、走行フレームの劣化が顕著であるという結果を受け、精密点検で板厚測定を実施した。図5に旋回フレームの測定例を示す。FEM解析を用いての詳細な強度評価へとつなげるために細かくデータを採取し、解析

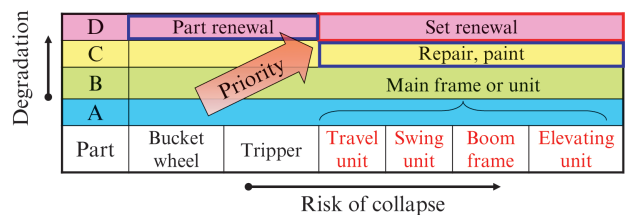


図3 劣化度と倒壊危険度による優先度

Fig. 3 Priority by degradation and risk of collapse

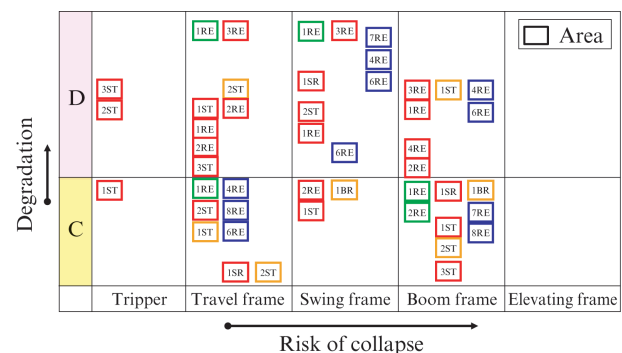


図4 JFE 全地区統一劣化度マップ
Fig. 4 JFE unity degradation map

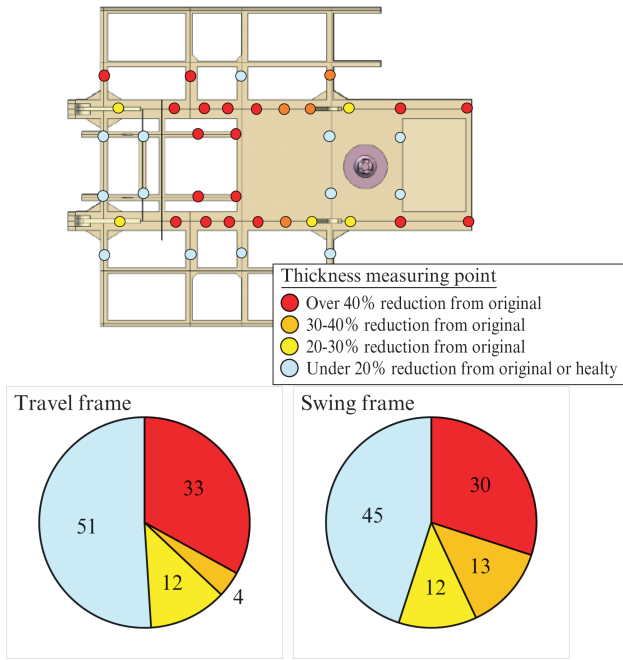


図5 巡回フレーム測定結果
Fig. 5 Measuring result of swing main frame

精度・状態把握レベルの向上を図った。図5下段には、各測定部位の減肉率の分布を示す。腐食劣化により元厚（オリジナル）からの減肉率が40%以上の部位が多く見られ、また減肉率20%以上の部位が全体の約半分を占めており、広範囲で劣化が進行していることが分かる。ブームフレームや走行フレームも同様な傾向であった。

次に各フレームのモデルを再現し板厚の測定結果を入力したFEM解析を行い、各部の強度評価を行った。図6に巡回フレームの解析結果を示す。解析に用いる荷重条件は、搬送物や搬送量などの実際の使用状況および堆積物重量、環境条件などを考慮し、各部位やフレームごとに決定した。基本的にフレームは連結ピンを介するため、荷重はピンへの負荷となる。同様の解析をブームフレーム、走行フレームでも実施した（走行フレームは、上部バランス構造体を巡回車輪、もしくは巡回環を介して伝達する荷重条件となる）。

解析により求められた最大応力値と許容応力³⁾から、安全率により更新の必要性を判断した。表1に評価結果を示す。

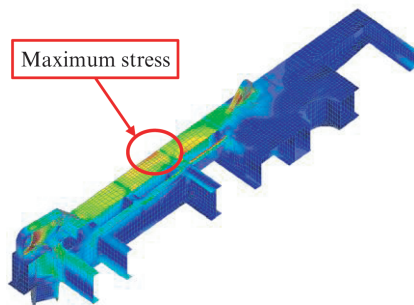


図6 解析結果：巡回フレーム
Fig. 6 Analysis result: Swing main frame

表1 RE解析結果：応力評価
Table.1 RE Analysis result: Stress evaluation

Part		Safety factor (Accrual stress/Allowable)
Travel unit	Main frame	0.93
	Rail frame	1.10
Swing unit	Main frame	1.06
Boom frame	Lower frame	1.06

各フレームとも安全率1を超えるか安全率1に近く、全体的に劣化が顕著であることが分かる。

以上のおり、板厚測定に基づきFEM解析を行うことで劣化度を厳密に判定し、更新判断に至った。

3.2 評価事例2

3.1項と同様に評価を進め、違った結論となったBRの事例を紹介する。BRは、主に焼結鉱を製造するため、粉鉱石や石灰などを層状にした原料山をコンベヤへ搬送する設備である。図7に模式図を示す。原料を掻き取るバケットホイールを据えつけたキャリッジフレームがガーダーフレーム上を横行する構造である。ガーダーフレームは走行体で支持されており、天井クレーンに似た構造といえる。バケットホイールで原料を掻き、ガーダーフレーム上のコンベヤを經由して地上コンベヤへと搬送する。本事例の対象機体はガーダーフレームがパイプレスの三角トラス体になっている。

3.1項と同様に各部の板厚測定を実施した。本構造体で最も重要な部位となるガーダーフレームの測定結果を図8に示す。ほとんど減肉が見られないことから危急の対応は不要で、傾向監視を続ければよいと推定される。しかし、詳細に点検を進めると図9のようにパイプレスに多くの亀裂が発生していることが確認できた。天井クレーンのように、キャリッジフレーム横行による疲労亀裂が発生している状態であり、板厚測定だけでは劣化度を判断できない事例といえる。この事例から、劣化度＝腐食劣化＝減肉だけの視点で見えてしまうと間違った判断に至るリスクがあり、事故に至る前にもう一步踏み込んだ診断を行う必要があることが分かった。

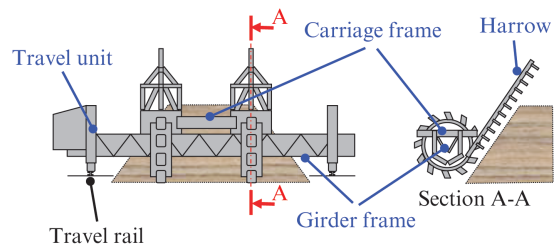


図7 BR模式図
Fig. 7 BR model

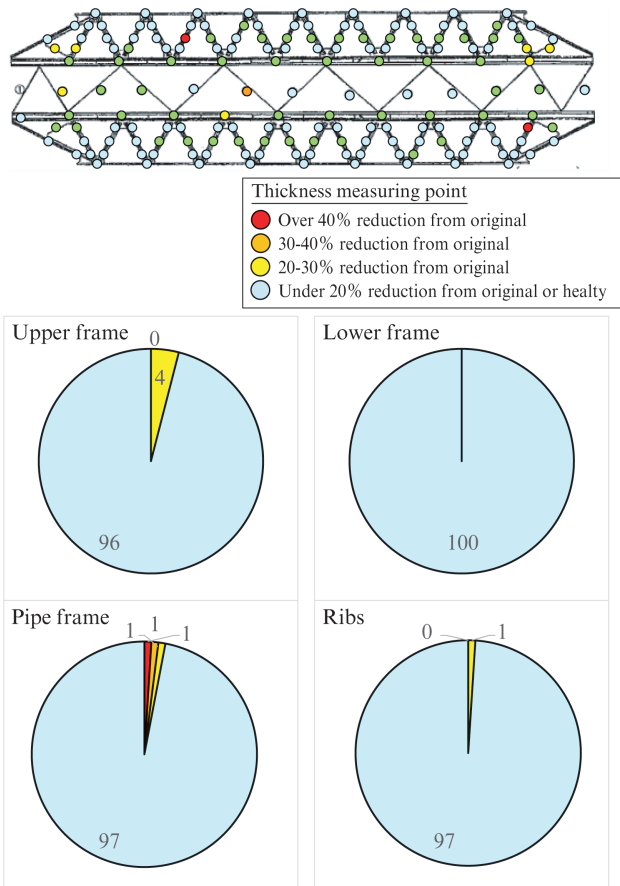


図8 ガーダーフレーム測定結果
Fig. 8 Measuring result of girder frame

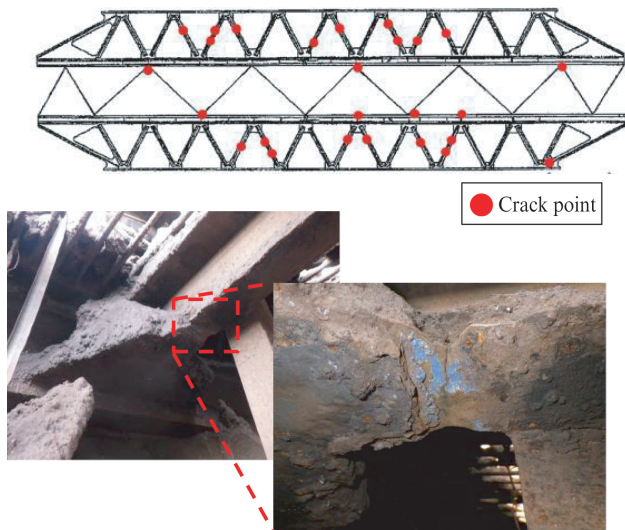


図9 亀裂発生箇所
Fig. 9 Crack point

4. 診断方法の見直し：設備機能保障レビュー

4.1 想定外荷重（事例1見直し）

3.2 項の事例のように、部位によっては板厚測定だけでは状態を完璧には評価できず、亀裂発生により重大事故につながりかねない場合がある。そこで、3.1, 3.2 項の事例についてより深掘りした診断を行うため、設備機能保障レビュー活動と称し、診断方法の見直しを行った。設備診断は“抜きの無い”ことが大事である。これまでの大きなトラブルは、往々にして“見ていなかった”ものが多く、不具合が顕在化したときには設備機能を喪失することもあった。取替・交換で済むものは正常状態の管理で問題無いが、大型構造物、特に構造躯体となる部位や部材は完全な元の状態に戻すことが難しいことから、“見ていなかった”箇所を無くすこと、および“見られない”場所について劣悪状態を想定し設備機能を維持できる限界を把握することをレビューの目的に置いた。ここでいう劣悪状態とは、①設計以上・想定外の外力や環境状況の変化、②設計当初からの使用状況、設備状態の変化もしくは設計思想の変化によって発生する新たな応力などが考えられる。はじめに3.1 項の事例について①のケースを想定して見直しを行い、再評価した例を紹介する。

原料移動機のなかで RE は、ブーム先端にバケットホイールを有し、原料掻き取りによる落鉱・落炭が多く、腐食による劣化（減肉）が進みやすく、またブーム・バケットへの原料付着・堆積が多量になるといったリスクが大きいことから、設計想定外の荷重条件に陥りやすい設備といえる。腐食減肉を測定して判断できるメインフレーム以外の部位にどのような応力が発生しているかを判断するため、旋回部ステーへの想定外の荷重を想定した解析および実際の機体に同様の荷重が発生しているか確認するための応力測定を実施した。

まず、どのように応力がステーに発生しうるのか、過去の事例や実機を確認し、局所的な変形が起こっていないか、歪みが生じていないかなどの視点で、各部位の危険性について検討を行った。ステーは旋回体上部の重要フレームの中で支点部に近く、バランス体の胴体となる旋回フレームとカウンターウェイトをつなぐ部材であり、大きな荷重がかかったり、変動したりすることは設計上考えられていない。しかし、過去に旋回フレームの劣化およびブームフレーム（バケットホイール）の偏荷重により、部材自体の減肉や亀裂などがなかったにも関わらず曲損した事例があることから、極端な偏荷重条件を想定することで弱部を明らかにすることを考えた。そこで、FEM 解析を用いて、旋回フレームを固定とした条件で、ステーに対して設計上考慮されておらず、また実現象では考えにくい偏荷重の条件を与えて検証した。並行して実際にステーに荷重が表れているか応力ひずみ測定も実施した。

図10 に解析に用いたモデルを示す。ステーは旋回フレームに取り付けられたブラケットに支持されており、設計上は

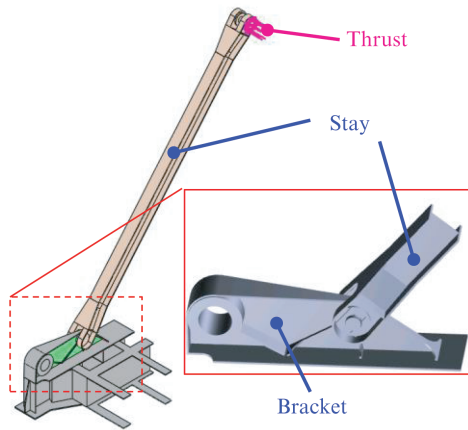


図 10 旋回部ステー解析モデル
Fig. 10 Swing stay simulation model

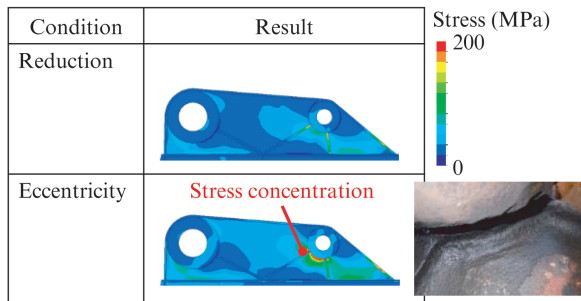


図 11 旋回部ステー解析結果
Fig. 11 Swing stay simulation result

主に軸方向の圧縮荷重がステーにかかっている。しかし、ブーム減肉や着銹、堆積により、原料山掻き取り時にブームに設計以上のねじれが発生することで、カウンターウェイト側の支持フレームであるステーにも偏った荷重が発生することを想定し、ステー上部に軸直荷重を加えて解析を行った。図 11 に解析結果を示す。ステーの支持部であるブラケットに高い応力集中が発生していることが分かる。比較として軸直荷重を加えずブラケットを減肉させた条件での結果を示す。図 11 のとおり減肉だけでは応力集中は発生しなかった。このことから、板厚測定のみに基づいた評価では、破損に至る応力集中を見逃す可能性があると考えられる。ステー自体に実際にかかる軸直荷重の測定結果を図 12 に示す。測定は原料山掻き取り中に実施している。ステーに大きく荷重変動が発生しており、荷重変動の周期は原料山に対してブームを往復して掻いている周期と同期している。これは解析条件に酷似しており、解析結果のようなブラケットへの応力集中の発生が想定できる。この部位は、狭陰部であり、点検、維持管理が困難であったので、ステー側を補強することによって強度を担保するよう対処した。

このように、高経年化に伴い、局部的に見ると軽微な異常であっても、構造全体には大きなひずみとなって影響を及ぼす場合が考えられるので、単純な板厚測定結果に基づい

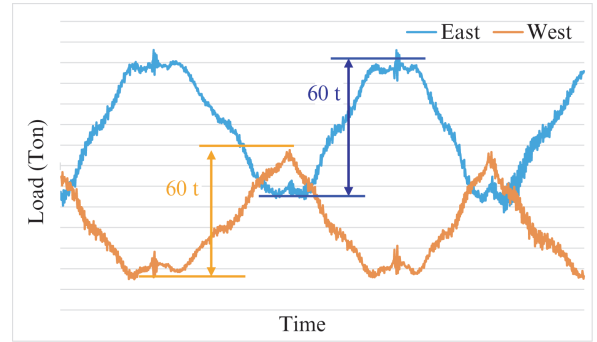


図 12 東西ステー応力測定結果
Fig. 12 Stress measuring result of swing stay

た評価や解析のみならず、もう一步踏み込んで構造部材の耐久性等を評価することが、抜けの無い評価診断へつながっていくと考えられる。

4.2 強度不足 (事例 2 見直し)

次に、設計当初からの状況・状態変化、設計思想の変化による事例を、3.2 項をベースに紹介する。BR は天井クレーンに類似する設備であるのでガーダーフレームが最重要部位であるが、稼働以来、キャリッジフレームの局部座屈によるトラブルが多く発生していた。そこでキャリッジフレームの FEM 解析を行った。結果を図 13 に示す。荷重がかからない状態での解析では応力値に異常は見られないが、キャリッジフレーム横行を想定した解析では原料付着の抵抗による応力変化を確認できた。設計通りの板厚であっても、キャリッジフレーム横行時には疲労亀裂が発生しうるほどの大きな応力が発生していることが分かった (測定した板厚と設計通りの板厚で応力変化を比較したところ、測定値の減肉率が小さかったため大きな差異はない)。

設置当初の規格で問題ないとされていたのは、FEM 解析手法が確立しておらず、大きな応力振幅が発生することを想定できていなかったためと推測できる。当該部位は過去に亀裂が発生し補強されていたため、実際の応力ひずみの測定値は小さいものであったが、その代わりに、設計通りの FEM 解析では応力集中が発生しない他の部位にも亀裂が発

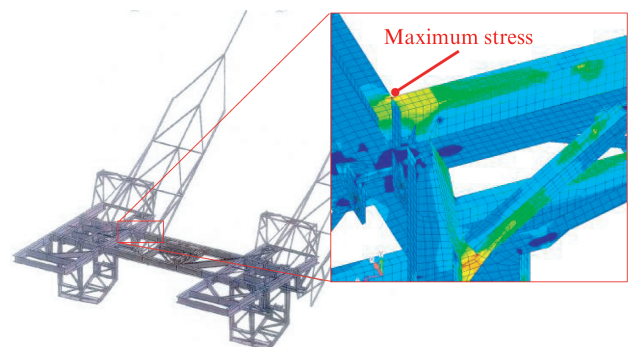


図 13 キャリッジフレーム解析結果
Fig. 13 Carriage frame simulation result

生していた。

本事例は、応力集中や高い応力振幅が発生しないと思われる箇所でも、古い設計思想による抜け、机上の計算による設計で FEM 解析での検証が未実施、設計想定外の使用法や荷重条件等の理由で、設計通りの状態であっても弱部＝急所は存在しうることを示しているといえる。

設備機能を維持・保全することを網羅的に考えるうえで、これまでの保全や設計の経験が少なからず予測の糧となる。この手法に近道はなく、個人個人の検討ではなく、チームで過去の経緯から読み取っていくという地道な作業を積み重ねることによって、大故障を防止するための“見るべき箇所”を抽出できると考える。

4.3 “抜けの無い”診断

4.1, 4.2 項で示したとおり、一定基準による点検だけでは設備の細かいところまで状態を把握できず、リスクを抽出しきれないことが分かった。これからの設備管理・診断にあたっては、より設備を細分化し、部位毎に重要度とリスクを評価する必要がある。トラブルが起きてから検証するのではなく、想定外の事態も織り込んで保全や更新の計画を立てていくには、①当初設計で高い応力が発生する、もしくは現状で当初設計より高い応力が発生する部位、②疲労破壊が発生する可能性がある部位、を把握することが何より肝要である。これまでの診断は今ある状態を把握するのみであったが、これからの診断はトラブルを起ささない予防保全の観点から、見逃しを許容せず網羅的に細部の健全性を担保することが求められている。

現在 JFE スチールでは、本レビュー活動を通し、“見れていない箇所”を洗い出して把握対象とすることにより、網羅的に最悪ケースを想定した判断が出来ることを求められている。“見れない”箇所はフェーズドアレイ UT やファイバースコープを用いることで目視確認が可能となった。また、FEM 解析を用いることで、現状では不具合が出てきていない箇所の予防診断が可能となった。解析と測定（板厚測定、

応力測定 etc）を組み合わせて実現象を再現し、想像・想定によりさらに弱点部位を積極的に炙り出し、高経年化のリスクをゼロへと近づけていくことを目標にしている。また、解析を用いることで改善策の是非を検証する。一般的に弱部を補強すると他の弱部にしわ寄せが出てくるため、そこも含めてフォローすることが大事である。

5. おわりに

今回、JFE スチールにおける至近 10 年ほどの原料移動機の老朽劣化への取り組みを体系的に、また事例を踏まえながらまとめた。製鉄所は大型の鋼構造物によって構築されているため、同様に考えていかなければいけない設備は多数存在する。技術レベルの向上に伴い、新規の設計には過去の反省が活かされている。一方、高経年化が進んだ設備は、操業・稼働の在り方や保全の在り方を踏まえて具体化させた劣化診断が、安定稼働や設備機能維持の基点として重要になりつつある。本事例を参考に、製鉄所全体の設備診断の見直しにつなげていきたい。

参考文献

- 1) 厚生労働省. 鉄鋼業における経年設備に係る自主点検の分析結果. 2016.
- 2) 片岡経明, 明智吉弘, 壁矢和久, 境禎明. 設備の健全性評価技術—鋼構造物の診断—. JFE 技報. 2006, no. 11, p. 19-22.
- 3) 日本機械学会. パラ物用連続荷役機械鋼構造部分の計算基準. 1989.



長野 誠



柳沢 隆太