

Damage of Industrial Facilities by the 2011 Great East Japan Earthquake

○正 中村いずみ (防災科研)

正 皆川佳祐 (埼玉工大)

正 藤田 聡 (東電大)

Izumi Nakamura, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Address
Keisuke Minagawa, Saitama Institute of Technology
Satoshi Fujita, Tokyo Denki University

Abstract

A huge earthquake of Mw 9.0 hit the Tohoku district of Japan on March 11, 2011. The earthquake, which was named as "the 2011 Great East Japan Earthquake", caused serious damage to industrial facilities. Based on the damage investigations conducted by the JSME, the damage to the mechanical structures were due to the strong ground motion, soil deformation and tsunami. Many kinds of damage caused by strong motion, such as the damage at the base of machines, the failure of pipe supports, buckling of tanks and the failure of hook bolts were commonly observed. Soil deformation caused break of buried pipes and misalignment of gantry crane rails. The tsunami also caused various kinds of damage, such as broken equipment due to collisions with floating objects and damage of tanks due to water pressure. Power system damage caused by electrical short circuiting also occurred. Although the earthquake caused a great deal of damage, seismic measures taken before the earthquake could mitigate damage of some facilities. This paper provides an overview of the damage of industrial facilities caused by the 2011 Great East Japan Earthquake, their typical damage cases, and the effects of the earthquake resisting methods.

Key Words: Damage investigation, Industrial facilities, 2011 Great East Japan Earthquake

1. 緒言

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では日本の観測史上最大となる Mw9.0 を記録し、地震動とその後発生した巨大津波により多くの犠牲者、行方不明者を出した。また、経済被害は福島第一原子力発電所の事故の影響を除いて約16兆9,000億円と推定されており⁽¹⁾、これらの東北地方太平洋沖地震により発生した被害は東日本大震災と命名された。東日本大震災では建築構造物や土木構造物での被害が多く報告されているが、工場や発電施設、研究機関など産業に関わる施設や機械設備にも多数の被害が発生しており、震災後の生産活動の停滞をもたらした。

日本機械学会では、今回の震災を受け被害データの保存や災害に伴って発生した諸問題、顕在化した課題の分析、それらの解決に向けた方策の提言などを目的として東日本大震災調査・提言分科会（主査：白鳥正樹・横浜国立大学教授）を立ち上げた。当該分科会には7つのワーキンググループ（WG）が設置され、機械設備類の被害調査や津波メカニズムの評価、地震や原発事故等に対する危機管理問題の検討などが進められている。この中で、機械設備類の被害調査は主にWG1：機械設備等の被害状況と耐震対策技術の有効性（主査：藤田聡・東京電機大学教授）により実施されている。

東日本大震災調査・提言分科会では、活動の一環として日本機械学会の特別会員企業にアンケート調査を行った。アンケート調査は地震から約2ヶ月後に実施し、約1,000社に送付し約230件の回答を得た。また、アンケート調査に回答いただいた機関の中で、現地調査に同意いただいた機関にはWG1メンバにより現地調査と聞き取りを行った。本稿では自由記載を含めたアンケートの回答および現地調査での聞き取り、WG1メンバの個別調査などから得られた東日本大震災における一般産業施設の被害の特徴や知見について述べる。

2. 産業施設の被害

2-1 東日本大震災における被害の特徴

東日本大震災の特徴の一つとして、被災地域が広域であっ

たことが挙げられる。被災地には茨城県太平洋沿岸の常磐工業地域・鹿島臨海工業地域、東京湾の京浜工業地域・京葉工業地域、群馬県、栃木県などの関東内陸工業地域等、日本有数の工業地域が含まれており、生産活動の継続、復旧活動に広く影響を及ぼした。アンケートの回答やその後実施した聞き取り調査からは、復旧要員や器具等の不足、地震直後から発生した電気や工業用水、燃料等の不足も事業の早期復旧の障害となっていた。アンケートでは、物理的な機械設備等の被害がない場合でもサプライチェーンの被害により生産活動に影響を受けたという回答が多くあった。

東日本大震災のもう一つの特徴は、大きな余震が長く続いたことである。2011年3月11日14時46分の本震後、度重なる余震により本震で損傷していた機器の被害が進行したり、進められていた復旧活動が振り出しに戻ったりするという事例が発生した。例えば、千葉県市原市で発生した製油所の火災爆発事故は、本震で液化石油ガス（LPG）タンクの支柱筋かいが損傷したことに加え、本震から30分後に茨城県沖で発生したM7.4の余震により支柱が座屈し、LPGタンクが倒壊したことが原因としてあげられている⁽²⁾。WG1で聞き取り調査を行った中でも本震直後には発生していなかった天井クレーンの落下がこの余震後に確認されたという事例があった。また、本震から約1ヶ月後の4月7日、4月11日に発生した余震（いずれもM7級、震源はそれぞれ宮城県沖と福島県浜通り）では、地域によっては本震以上の被害をもたらし、再開した生産活動が再び停止するなどの被害を生じた。

以下では、東日本大震災における機械設備類の物理的な被害、復旧作業や地震後の生産活動に影響した事項、事前対策の奏功事例に大別して述べる。

2-2 機械設備類の物理的被害

2-2-1 地震動による被害

機械設備類の物理的被害は、大別して地震動、地盤変状、津波のいずれか、もしくはその複数の要因により発生していた。

地震動による被害は、機器の設置された基礎部、支持構造物、配管、クレーン、シャッター、昇降機等で多く発生していた。什器類の転倒、スロッシングによる貯水プールや液体溶融はんだの溢流もいくつかの機関で確認された。また、一般に工場建屋は鉄骨造が多いため、建屋の被害、特に壁や天井材の落下被害は多く報告されており、業務再開の障害となった例が見られた。図1に、機器基礎部の損傷事例を示す。大きな加速度が機器に作用し、基礎ボルト部分が損傷したものと考えられる。また、図2には建屋の屋上に設置された水槽の損傷を示す。建屋の上部では加速度が増幅され機器への入力が大きくなること、また、この写真の例ではタンクの架台となるH形鋼部分で変形が発生したことから転倒に至ったものと考えられる。このほか、機械類そのものには目立った損傷が確認できない場合でも、通常設置位置からのずれや落下、機器の傾きなどは多く発生しており、地震後に定位置への復旧や精度確認が必要となっていた。

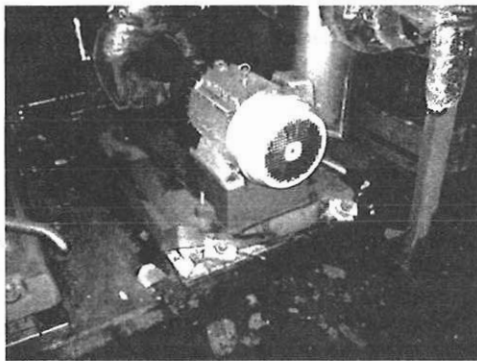


Figure 1. Damage at the base of a pump



Figure 3. Failure at pipe support

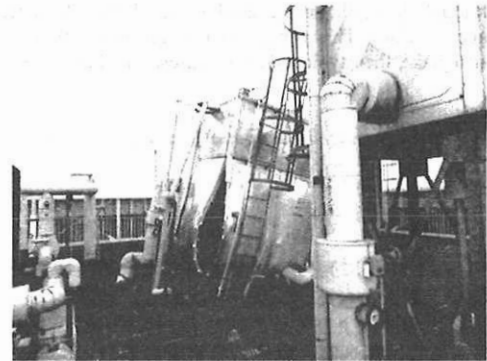


Figure 2. Failure of a water tank installed on the roof

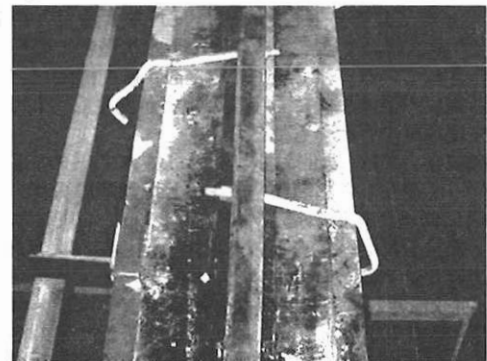


Figure 4. Failure mode of overhead crane
(Damage of hook bolts, provided by JAXA)

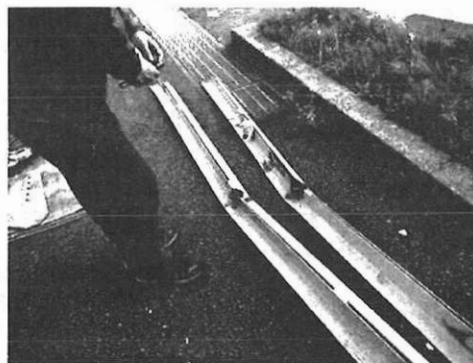


Figure 5. Damage of braces of steel building

工場等の産業施設内にはさまざまな配管類が設置されていることが多いが、配管関係の被害は配管サポート部、他の機器との接続部、あるいは、2-2-2で述べるように、地盤変状などで大きな相対変形が発生する部分に多く生じていた。図3に配管サポート部での損傷事例を示す。天井吊り下げ配管の中には、配管そのものには損傷がないものの、大きく振動した配管が周辺のダクトに衝突し、ダクトが変形しているような事例もあった。

産業施設に設置されているクレーン類の被害については、日本クレーン協会により調査されており、それによると地震動による被害は天井クレーンに多く発生していた⁽⁴⁾。損傷形態としては走行レールの押さえボルトの伸び、破断が多いと報告されている。図4に、変形した走行レール押さえボルトの事例を示す。

工場建屋の被害の一例として、図5に鉄骨造建物のブレースの変形を示す。図5より、ブレースが中間部で塑性変形し

ていることがわかる。現地調査ではボルト締結穴の伸長やブレースが変形したことによる外壁の損傷などの被害も確認できた。工場建屋に関連する被害としては、天井材、天井吊り下げ機器の落下や損傷が多く発生した。天井の落下は人的被害に加え、地震後の避難や業務復旧への障害となった。また、天井吊り下げ機器については、機器の吊り下げボルト類の変形、破断が多く発生していた。工場や研究施設では、さまざまな電気計装関係を必要とするため、多くのケーブルラックが設置されているが、ケーブルの重量が大きく、ケーブルラックの落下被害も多く発生した。天井材や壁材、天井吊り下げ機器などは非構造部材であることから明確な耐震性能の規定がないが、今後これらの耐震性能を明確にし、被害軽減を図る必要がある。

2-2-2 地盤変状による被害

東日本大震災では多くの地域で液状化や造成地の崩落等の地盤変状が生じ、機械設備等もそれに伴う被害を受けた。地盤変状による被害では、液状化による基礎部の沈下、埋設配管の被害が非常に多く、建屋内部から屋外エリアに伸びるような配管では、建屋の基礎と沈下した周辺地盤との相対変形で配管が損傷していた。図6に地盤変状により損傷した埋設配管の事例を示す。全般に、これらの被害は基礎の頑丈な建屋や重要機器の周りに設置された、本体機器とは異なる基礎にある（あるいは基礎のない）設備・機器類に多く発生していた。この種の被害は過去の地震でも繰り返し発生しており、被害を軽減するためには、本体機器と同じ基礎上に設置する、別途十分な基礎を設ける、フレキシブル配管の使用により相対変形を吸収するなどの対策が必要である。

港湾周辺では液状化による側方流動により、ガントリークレーンの走行レールにずれが発生し、クレーン自体には被害

がなかったにもかかわらず走行不能となるような影響が生じていた（図7）。その他、機械設備に対する直接的な被害ではないが、施設の構内道路が大きく陥没したため重機類が走行できず、早期復旧に支障をきたしたという事例があり、施設全体の防災対策を考える上ではそのような点も留意する必要がある。

2-2-3 津波による被害

工場や産業プラントは材料や製品の輸送、冷却水の問題などから沿岸部に立地されることが多い。そのため、東日本大震災においても津波により多くの施設が打撃を受けた。津波による被害としては、機器の流失、漂流物の衝突、冠水、水圧、浮力等による被害、潮水の冠水による電気系統の短絡被害が多く発生した。電動機などの冠水は、外傷がなくても汚泥による汚染やさび付きが懸念されるため、分解、洗浄、点検が必要になった。また、津波により運ばれてきた大量のがれきが施設内に残され、施設の復旧活動に大きな障害となったことが報告されている⁽⁴⁾。図8にFRP水槽の津波被害事例を示す。水槽外側の構造躯体に大きな損傷がないことから漂流物の衝突ではなく、津波により外側から大きな水圧が働き、内側へ損傷したものと考えられる。また、図9に浮力によるタンクの浮き上がり事例を示す。津波の浮力によりタンクが浮き上がり、アンカーボルトが伸長している。

津波被災地以外における、地震動による被害は、主に耐震的に脆弱な機器や箇所が部分的に損傷するような事例が多いが、津波被災地では機器の種類にかかわらず全ての機器類が何らかの被害を受けている。また、標高の高い位置の機器類が全滅であるのに対し、標高の高い位置の機器類はほぼ被害がないなど、高さによる被害の差が顕著であった。



Figure 6. Pipes fractured at the connection point of the building and soil

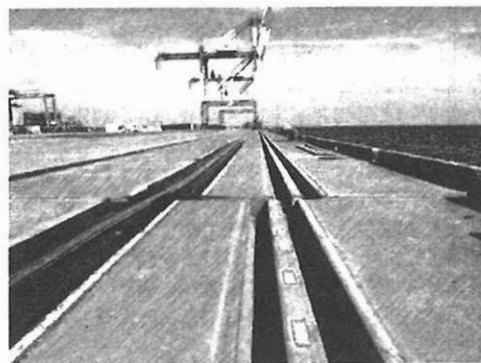


Figure 7. Quay wall deformation and misalignment of the gantry crane rail

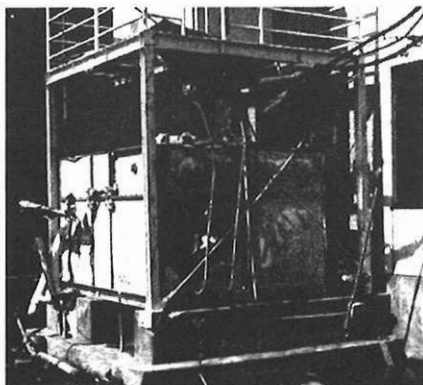


Figure 8. Failure of a FRP tank by tsunami

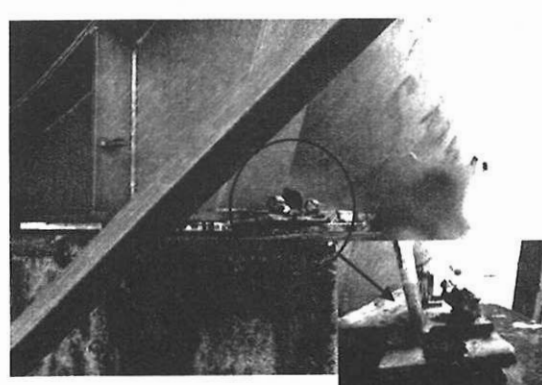


Figure 9. Lifting damage of LPG tank by tsunami

2-3 復旧作業や地震後の生産活動に影響した事項

アンケート調査および聞き取り調査では、機械設備類の物理的な被害ではないが、復旧作業や地震後の生産活動に影響した事項や今後の教訓も多く挙げられていた。以下にそれらの項目を述べる。

(1) 地震時の連絡手段

地震直後の電話の輻輳、停電のため、多くの機関が従業員同士、あるいは工場と本社との間の通信に支障が生じたと回答しており、通信手段の確保を今後の課題に挙げていた。アンケートの回答からは、携帯電話および携帯メールが従業員への連絡手段として比較的使用された傾向があった。工場と本社との間の通信に専用回線を有している場合、おおむね有効に機能しているようであったが、地震直後の停電中には使えなかったと回答した機関もいくつかあった。

(2) 従業員対応

多くの機関で地震後に生じた支障として、従業員の通勤を挙げていた。これは、車通勤の多い地域では地震直後から1〜2週間程度続いたガソリン不足の影響であり、電車通勤の多い地域では計画停電の影響で交通機関が混乱したためである。また、帰宅困難者を想定した食料品の備蓄を課題に挙げているところもあった。大人数の従業員を有する工場などでは、トイレ対策が問題点として挙げられた。また、(1)に挙げた通信手段の途絶のため、出張中の職員も含め、従業員の安否確認に課題が生じたと回答した機関も多くあった。

(3) 災害対応マニュアル

アンケートに回答した機関のうち、約60%で事前に災害対応マニュアルを準備しており、そのうち80%が多少なりともそのマニュアルが役に立ったと回答していた。また、事前に準備していなかったと回答した機関の多くは今後整備の必要性があると回答している。災害対応マニュアルの課題として挙げられていた点は、想定被害の規模、食料・水・燃料の備蓄、長時間の電源喪失、防災訓練であった。災害対応マニュアルを整備していた機関でも、多くの場合、東日本大震災における商業用電源の停止は想定以上に長時間となり、非常用電源の燃料不足への対応、周辺インフラの長期途絶の対策を講じる必要があると回答している。また、マニュアルの整備と併せ、防災訓練の実施も地震後の対応には効果を発揮したようだった。

2-4 事前対策が奏功した事例

東日本大震災では多くの産業関連施設や機械設備類が被害を受けたものの、過去の地震経験などに基づいた事前対策が功を奏した事例も確認された。多くの施設で事前に機械類や施設内什器を床や壁等に固定していたが、おおむねこれらの対策は有効であった。ただし、固定ボルトが機器の通常荷重に対するとめつけのみを目的とし、耐震的に十分な強度のない場合はボルトの伸び、折損、およびそれらに伴う機器の移動などが生じており、機器設置の際には通常稼働状態における荷重だけでなく、地震荷重を考慮した施工を行うことが必要であると考えられる。このほか免制振の導入も地震対策には有効であるが、容易に導入可能な対策例としては、脚部設置版の取り付けによる転倒防止などの事例があった。

実地調査を行った中で、ある企業では地震時に可燃ガスは遮断、窒素ガスは通気となるように設計しており、かつ、可

燃ガスの遮断については、震度計を設置し通電がなくても機械的に遮断するような弁で対策していた。この対策は東日本大震災で有効に働いたとのことである。実際、アンケート調査では多くの機関が地震直後の停電や地震後に継続した電力不足に関連した問題を経験している。アンケートにおいて地震直後の停電の影響としてあげられているものの多くは連絡手段への支障、情報の収集および発信への影響であったが、今後考慮すべき課題として、冷却水の停止対応や毒劇物コントロールへの配慮の必要性を挙げている機関もあり、電気が遮断された際に安全側に移行するような施設設計は今後検討されるべきであろう。また2-2-1項で述べたように、大地震時には地震動によって防火シャッターが落下し、通常想定している防火機能が地震後には担保できない事態が発生しうることと施設設計時には配慮すべきであると考えられる。その他、施設の設計思想が地震対策として有効だった事例としては、工場建屋にベランダを設置するように設計していたという例がある。適切に設計されたベランダは、建屋外壁の落下による人や機械設備類への被害を防止するとともに、廊下とあわせた二方向避難や復旧活動でのルート確保に有効であった。

機械設備類の中には昇降機やタンク類など耐震設計基準が定められているものがある。過去の地震を受けてこれらの基準類が改訂されている場合、新しい基準に則った設備類は旧基準のものに比べて被害が少ない傾向があった⁽⁵⁾。建築分野では現行基準の性能を満たさない建物を既存不適格として耐震補強を行うよう促しているが、機械設備の分野においても、旧基準で製作された機械設備類に対する耐震改修、耐震補強の手法を開発、普及していくことが望まれる。

3 結語

2011年3月11日に発生した東日本大震災による、一般産業施設や機械設備類の被害について報告した。日本機械学会の東日本大震災調査・提言分科会で実施したアンケート調査や実地調査から、機械設備類の被害は地震動、地盤変状、津波のいずれかもしくはそれらの複合要因で生じていることがわかった。地震動による被害は適切な対策を取ることで軽減することが可能であり、今後、今回の震災の経験をもとに、耐震に関する知見と具体的な対策方法の普及を行っていく必要がある。復旧活動や生産活動に関する課題としては、多くの企業が通信手段の確保と災害対応マニュアルの整備、電力途絶に伴う問題への対策を挙げていた。災害対応マニュアルは、防災訓練をあわせて実施することでより効果を期待できると考えられる。

<参考文献>

- (1) 内閣府緊急対策本部，“平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について”，平成24年4月3日発表（2012）。
- (2) コスモ石油，“千葉製油所の火災・爆発事故について”，<http://www.cosmo-oil.co.jp/csr/highlights/11/01.html>（2012年6月15日参照）。
- (3) 渡邊鉄也，小林信行，河田政憲，原田武重，“東日本大震災におけるクレーン設備の被害状況”，D&D2012 USB 論文集，#654。
- (4) 火力原子力発電，“特集 震災からの復興（第二弾）被災状況報告 東北電力（株）仙台火力発電所，新仙台火力発電所と常磐共同火力（株）勿来発電所”，火力原子力発電，Vol.62，No.6（2011），pp.1-7。
- (5) 藤田聡，下秋元雄，宮田毅，“東日本大震災における昇降機の被害と提言”，D&D2012 USB 論文集，#653