

機械・配管関係の震害について

On Damages To Machine Structures and Piping Systems

佐 藤 壽 芳*

Hisayoshi SATO

機械工学の立場から耐震問題を研究している者として、新潟地震の際に工場震害の実情を調査する機会をもつことができたが¹⁾、このたびも、当研究所の総合的な震害調査の一環として、比較的震度の大きい地域であった八戸・室蘭・苫小牧の諸都市の数工場を調査する機会を与えられた。地震後日も浅く、復旧工事を急ぐ状態の中で特別な配慮により、構内をくまなく調査する便宜をはかって下さった王子製紙 K.K.、K.K. 日本製鋼所、住友セメント K.K.、日本石油 K.K.、日本石油製精 K.K.、富士製鉄 K.K. の諸社関係各位に深甚の謝意を表するものである。

1. ま え が き

新潟地震のときにおこった石油タンクの火災は、地震による工場施設の被災が一工場内にとどまらず、公衆に災害を及ぼす場合があることを如実に示した。以来すでに4年が経過した。過日の1968年十勝沖地震では、工場の震害がもとになって公衆災害を招くような震害は幸いに免がれ得たが、個々の企業にとっては多少とも生産に支障をきたした面が少なくなかったと考えられる。

新潟地震による被害が警鐘となって工場内の機械・配管系については、積極的に耐震の考え方をとり入れた設計が実施された場合も多く、このような対策が災害を未然に防いでいたのではないかとみられる。一方今後耐震設計を実施するにあたって、あらたに問題を提起した震害例もあったように思う。個々の場合にたいする具体的な耐震設計の手続きについては機会を別にゆずるとし、本稿では機械・配管系の被害概況について簡単にのべ、耐震問題を考える一助としたい。

十勝沖地震の各地での強さ等については、おいおい SMAC の記録波形等が発表されるものと思うが、八戸市内の一測定点では最大 230 gal, 10 gal 程度にまで減衰するのに約4分を経過したということを書いている。この長さは、これまでに記録されている強震記録にくらべてかなり長いということができよう。一方、苫小牧の気象観測所の変位記録では本震のとき 60 mm がふりきれ、同日夕刻の余震では最大約 40 mm の振幅を示している。また地震そのものの規模については、気象庁の発表では $M=7.8$ とされているが、青森県下の被害状況から判断して $M=8.2$ ぐらいではないかということも言われている。さらに加速度記録の解析から、二つの地震が相次いでおこったのではないかということも検討されるときく。震央距離については、青森県下でも 200 km 以上であったことは、地震力の軽減という点で幸いであったと言えよう。これらは、いずれも地震についての断片的な記述であるが、それぞれに一面をとらえていると考えられる。被害の状況をとらえるのにも参考となるう。

2. 被害状況

新潟地震の震害には、軟弱地盤に起因するものが多くみられたこと、長周期成分が卓越し石油タンク内の油面が共振し溢油したこと、一方、今度の十勝沖地震では鉄筋コンクリート造構造物の被害が目立ったことなど、それぞれの地震に特徴的な被害はあるが、個々の被害については、一般的に注意対策が考えられるものも多く、新潟地震のときの調査で明らかにされた事例・対策は今度の震害を考えるにも参考となるものであり、さらに今後の機械・配管系の耐震設計の指針としても生きることはもちろんである。このことを考慮しながら、以下では、このたびの地震でみられた被害状況について簡単にのべることとする。

まず、めだった被害を項目として並べてみると、

- 1) 化学プロセス反応塔の底部締結ボルトの弛緩
- 2) 化学反応容器支持柱の折損
- 3) 防油壁の損壊
- 4) 大型タンクの沈下等
- 5) ガス・ホルダの損傷
- 6) 配管類の損傷
- 7) 給水ポンプの運転不能
- 8) 大型荷役機械の倒壊
- 9) クレーンの走行不能
- 10) 建屋上にたてられた構造物の損傷
- 11) 機械部品の折損
- 12) 耐火煉瓦の落下
- 13) 煙突の折損
- 14) 工作機械の不同沈下

今回の地震でも地盤条件の悪いところで被害が多く生じていたことは、これまでの震害と共通であろう。この意味で、工場設立が古く地盤条件が吟味されていたところ、同一工場内でも建設が古く地盤を選んで作られた部分、地盤の締め固まりが十分とみられる部分等では、被害は少なくすんでいたと考えられる。逆に造成後間もない埠頭などには被害が集中していた。

新潟地震のときの機械・配管関係の被害では、構造物が動的な地震力をうけて損傷したというよりも、軟弱地

* 東京大学生産技術研究所第2部

盤が液化現象で支持力を失ったために生じたという形のものが多かった。十勝沖地震では、この種の被害が少なかった反面、損傷としては小さいものの、地震力を第一に考えなければならぬ場合が比較的多かったように思われる。つぎに先にあげた各項について順次のべることとする。

1) 化学プロセス反応塔の底部締結ボルトの弛緩

外殻が鋼製の筒状の化学プロセス反応塔の基礎部締結ボルトが破断寸前までのびたという例があった。これは塔があたかも片持梁のように振動した結果と推定される。被害のあった反応塔が建設年代が古いのにたいし、同じ区域に最近建設された同様な塔はまったく何の損傷もうけていないことから、設計に問題があったと考えられる。実際新しいものでは、底部の締結ボルト本数は増されていた。また、この反応塔は、リベット構造であったが、一部では継目部分が破断したということである。これも最も簡単には、単純な片持梁として解析がすすめられよう。このような反応塔付近が酸ふんい気の場合には、周囲の配管、梯子、これらを支持する金具等が錆化しやすく、その状態で地震をうけて簡単に破損し、本来の機能を果たし得なくなっている場合もあるようにみうけられた。機能保全・安全管理などの面から、保守にも力が注がれるべきであろう。

同様な被害は、大型高温送風炉の締結ボルト、補強リブなどにもみられた。すなわち、ボルトのび、リブの挫屈が生じていた。この場合周辺全部のボルトがのびたのではなく、中心に対称に両側のボルトが何本か損傷していたことから、方向性をもった振動が生じていたと推論される。

2) 化学反応槽支持柱の折損

下部を鋳鉄製支柱で支えられ、屋内に設置された化学反応槽で、支柱が折損したという被害があった。設置されていた床面から 10m 弱の高さで建屋との間に残された打痕から、数十 cm の相対的な振幅があったことが確かめられた。槽の転倒を免れたのは幸いであったと言えよう。これも建設が古かったものであるが、耐震にたいする考慮が十分でなかったと考えられる。

3) 防油壁の損壊

油タンク間にある防油壁には、コンクリート壁に亀裂が入ったり、くずれたりしているのがみられた。しかし壁全体が倒壊しているものは見あたらなかった。このような被害はあったけれども、タンクからの油もれの事例はほとんどなく、この被害によって、さらに二次的に被害が生じることは免れていた。新潟でみられたブロック積みものは姿を消し、破壊しやすい箇所に鋼板をはさんだうえ、コンクリートを固めているなどの改善をしつつも、なお、かなりの損傷があったことは、今後も検討を要する課題であろう。

4) 大型タンクの沈下等

油タンク類には、新潟地震にみられたような大きな被害はなかった。新潟地震の被害にもとづいた対策が基礎工法などにとり入れられたということであり、被害を僅少にいくいとめていたことは確かであろう。しかし大きくはないけれども、タンクの沈下、パイプの変形など同様な被害がみられたことも事実である。一方油面の共振が惹起する溢油、タンク本体の損傷等の被害はみられなかった。十勝沖地震で新たにあらわれた形の被害として、タンク底部の溶接接目部分が引き裂かれるように亀裂が生じ、漏油した例が報告されている²⁾。どのような力のかかり方で底面に亀裂が入ることになったのか、少ない被害例ではあるが検討を要しよう。

なお、新潟地震の経験を生かした耐震設計は他にもみられる。埋立地に建設された工場で基礎にパイロ・フローテーション工法をもちい、結果的にみて被害を非常に少なくいとめたと考えられる場合もきいている。この例などは、今後の軟弱地盤での工場建設の際の耐震設計により指針を与えると考えられる。

5) ガス・ホルダの損傷

浮屋根式ガス・ホルダの屋根が外れるという被害は、今度の地震でもみられた。この損傷によってさらに大きな被害が誘発されたということは、新潟地震のときを含めてきていないが、かなり外れやすいものであることは考慮しておく必要がある。

6) 配管類の損傷

新潟地震での被害が、地震力が原因となったものがほとんどみられず、支持構造物の変形に原因をもとめられるものが多かったのにたいし、十勝沖地震ではわずかとはいいながら前者に類別されるものがみられた。大型炉の下降配管が溶接部で折損、脱落したものがあった。この管は通常から熱応力によっても損傷しやすいものであったということであるが、地震時の被害は、明らかに地震力を動的にうけたためであると考えられる。この配管は、一端が炉頂に、他端が別の構造物にある形であり、地震時には両端の構造物が別の動きをしたと考えられ、配管に大きな変形が生じた可能性もある⁴⁾⁵⁾。細かな検討をすすめれば、配管の形状・支持法等にも耐震的な考慮を加えたものがありえよう。

大型タンクにとりつけられている配管類は、タンクの沈下、地盤の沈下にともなって変形していたが、今回の調査範囲内では、その量はあまり大きくなく配管側にとってある“にげ”の範囲内であったため、致命的損傷はなかった。

工場内動力用原動所で、被害というほどには至らないまでも、配管が構築物に衝突して傷がついている事例があった。火力発電所でも同様な例が報告されている³⁾。この場合保温材ごと柱につけるように配管したことが、

地震時に被覆を脱落させることになったのは、配管法・支持法に工夫が要求されるところであろう。

7) 給水ポンプの運転不能

冷却水取水口ピットのコンクリート壁が内側に傾斜し、この変形に取水用配管が引張られ、これがポンプを引張り、ポンプの運転が不能になった場合がみられた。この被害は、ピットの内側にリブを入れることにより、内壁が内側に張りだすことを防ぎえたのではないかと考えられる。

8) 大型荷役機械の倒壊

今後の問題を残すと思われる損害に大型荷役機械の倒壊がある。同じ区域に並んでいた2台の同型機のうち、1台は倒壊、1台は倒壊寸前であった。残された1台の状況から、一つの部材に屈曲が生じ不安定な構造となって倒壊にいたったことが推察される。地震力をどの程度に想定したらこのような状態になるかということについては細かい検討を要するが、まず従来もちいられてきている震度法による検討をすることが肝要である。

9) クレーンの走行不能

新潟地震のときには、軟弱地盤のために生じた建屋の変形のためにクレーンが走行不能となり、復旧の障害となるという被害がでていたが、十勝沖地震ではこのような事例はきかなかつた。その反面クレーン自身が地震力をうけ、それが力としてレールに働き、クレーンののっている部分でレールがクレーン長手方向に変形したという被害がいくつか見うけられた。これはレールを固定している金具の個数をふやし間隔をせばめることや、止め方をいま少し剛にすることなどが有効な方法と考えられる。クレーンが建屋内では比較的高い部分におかれていることも、かかる地震力を大きくしていることと推定され、設計地震力の評価に際してこの点にも注意を払う必要があると考えられる。

10) 建屋上にたてられた構造物の損傷

八戸市庁舎屋上のベント・ハウスの倒壊と同種の被害が工場内施設についてもいくつか報告されていた。倒壊にはいたらなかったが、建屋上にたてた煙突を補強した部材が切断していたり、補強材のなかった煙突には亀裂が入ったりしたという事例である。これらの被害は、建屋上に建屋にくらべて小さい質量の構造物を重ねて作る場合、両構造物の周期、減衰定数の関係によっては、建屋に比して非常に大きな地震力が建屋上の構造物にはかかりうるという事実をなおざりにした結果であるといえる。このような形の重要な構造物で地震による被害をできるだけ免れようとする場合には、建築構造物、その上につく構造物の固有周期、減衰定数をそれぞれ推定したう地震力を評価する動的な耐震設計法によることかどうしても必要である⁶⁾⁷⁾。

11) 機械部品の折損

長大機械(抄紙機・圧延機・印刷機・板硝子研磨機・ロータリ・キルン等が考えられる)で、機械上部の機能部品が折損した例が報告されている。クレーンのレール曲がりの場合と同様、この部品の存在位置が建屋内で高位置であったことが一つの原因と考えられる。

工場内変電所の高圧碍子に折損が生じていた。この被害があったところは、同一工場内でも古く建設された地域で、比較的地盤のかたい部分においてであった。

また、荷役機械のバランス重量部が折損脱落した例が報告されている。望むらくは、この部分をふくめて機械が振動系となったときの検討もなされるべきであろう。

12) 耐火煉瓦の落下

古くなった蒸気ボイラや大型炉で内張りされた耐火煉瓦の落下が報告されている。新しいものについては、内部の検査が必ずしも詳細にはなされていないので明らかでない点も多いということであった。損傷したものについては、いずれも修復後運転に差支えるようなものはなかったということである。

煙突に内張された耐火煉瓦の崩壊という事例が報告されている。この場合、煉瓦と外鉄皮との間に断熱用の空間を設け、煉瓦自身は組合わせの効果に期待した自立の構造であったことに問題があったとみられる。

13) 煙突の折損

地震加速度がよく、持続的であったわりには、煙突折損の被害は少なかつたように感じられる。折損していた場合でも、それによって被害が甚だしく拡大しているようなことはみられなかつた。

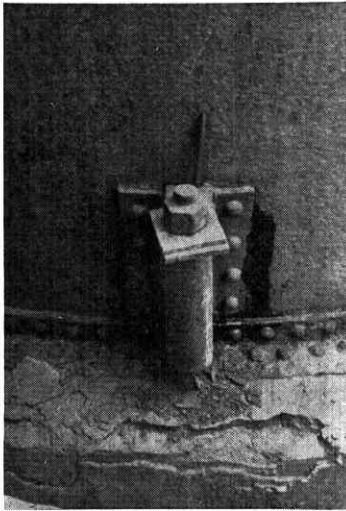
14) 工作機械の不同沈下

新潟地震のときにかなりめだつたこの種の被害も、このたびはほとんどみられなかつた。しかし地盤条件の悪いところでは、やはり生じているということであった。生産の重大な障害にはなっていなかつたとみられる。

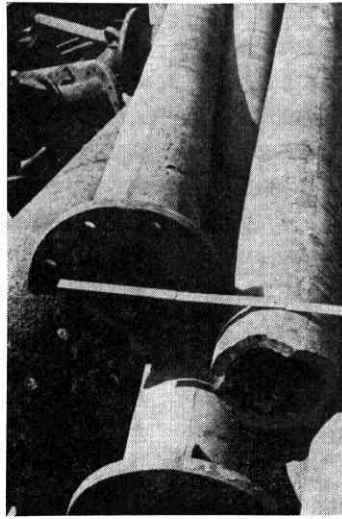
3. いくつかの問題点

これらの被害は、生産施設の震害としては新潟地震以来のものであり、振動性状に彼我の特徴はあるものの、新潟地震の経験が大なり小なり耐震に関する配慮となって生かされていた。特に新潟地震のときに同種の工場が被害をうけていた企業についてその感が深い。一方そのような配慮にもかかわらず、同じような被害を招いていた事例もみられた。小さくみえる被害であっても並行的に他の被害が重なっていれば、重大な損害に至る誘因ともなりうるものもあり、地震の振動的な特性、さらにそのような地震が起こったときに機能を全うする構造という点で、さらに検討をする必要がある。

上にあげた被害例の多くについては、地震後迅速に現場としての対策がとられていたことはいうまでもない。耐震設計の観点からの対策については、新潟地震の調査



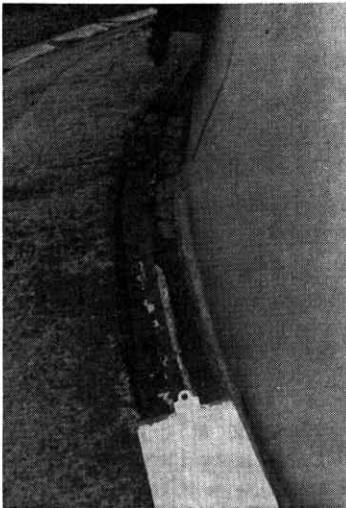
① 反応塔の基礎ボルト部。ボルトののび、コンクリートねじのはく離、内容物の漏出など (柴田助教授写)



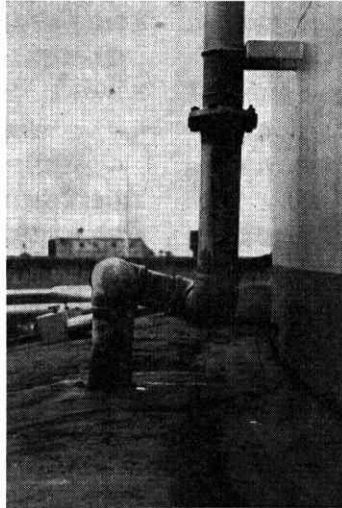
② 反応槽の切損した脚 (柴田助教授写)



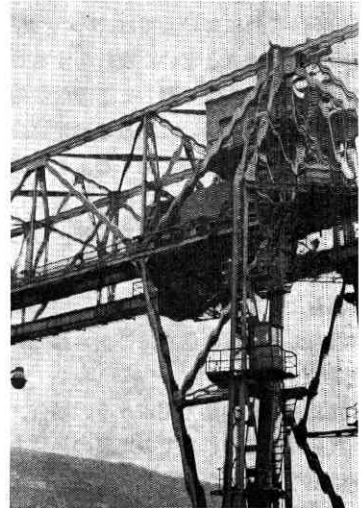
③ 防油堤の損壊



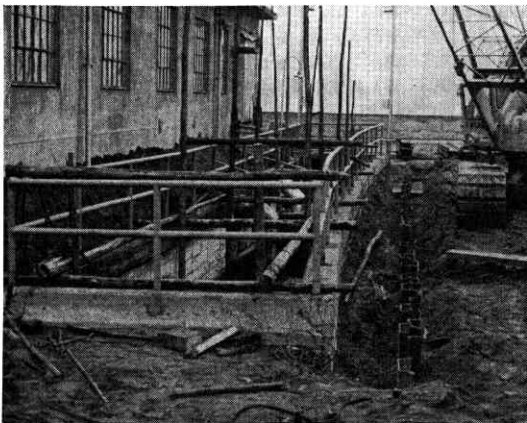
④ 石油タンクが移動したと見られる被害 (柴田助教授写)



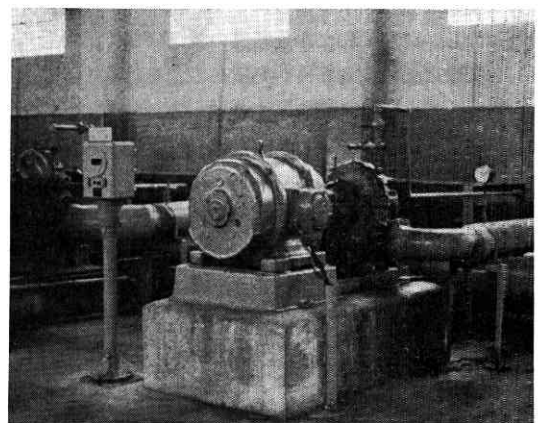
⑤ 大型石油タンクの沈下によるパイプの変形



⑥ 倒壊した大型荷役機械と同形のもの



⑦ 冷却水取水口の被害



⑧ 給水ポンプのパイプが写真7の損傷にともない引張られてポンプは運転不能となった

に際しての考察を適用しうることが少なくない。しかしながら、今回の調査の結果特に感じられたことは、塔槽類あるいは大型荷役機械等の被害にみられるように、これら施設の設計のときには、少なくとも従来の震度法による検討を耐震の見地から試みておく必要があること、さらに可能ならば、動的な耐震設計法によっても検討を加えておくことが望ましいということである。また折損した配管系のように地震動を多点でうけるものについてみると、従来のように加速度のみに重点をおいた設計法のみならず、地動変位・構造物変位を動的にも考えて検討してゆく必要があることが明らかになってきている。この点についてさらに研究をすすめるために、工学的に使用しうる地動や構造物の変位波形が必要であるなど、今後課題が残っている。

ところで、十勝沖地震の直後、北海道の状況に関する TV 放送は、青森県で傍受したものを中継する方式によってであった。これはマイクロ波回線の支障と中継所非常電源用の内燃機関の固定が不完全であったためときいている。これにたいしては、アンテナ用鉄塔・固定法に耐震の配慮がゆきとどいた設計をすることはもちろんのことであるが、非常に際して正確な情報伝達の役割をはたさなければならないこれらの重要施設には、なんらかの形で二重性をもたせておくことも必要かと考えられる。

危急に際して電源を確保しておくことがよいかどうかは議論もあろうが、冷却系統等どうしても受電が必要な箇所を除いて、いったんは停電することが、安全という面からよい結果をもたらしたという報告があった。今度の場合外部からの送電は停止されていなかったときいている。

またある所内動力用ボイラの場合、昭和27年の十勝沖地震をはじめこれまでの地震の経験上、震度4以上のときは電源をとめた方が生産現場の修復によい結果を得ていることから、50 gal に接点をあわせた感震機をタービン室におき、運転員に警報をだし、その後の操作を運転員に委ねてしゃ断するようにしていた。今度の場合、警報はたしかにでていたが運転員の確認はなく、むしろ激しい振動のために運転員が処置をしたということである。危急の際の判断を適確にすることは日頃の訓練でかなり実現できようが、より確実な運転を実施するためには sequence 的な自動操作で処理することも今後は考えるべきであろう。

十勝沖地震では、発震後のつなみ襲来時が干潮にあっていたことは、地震後の水害をさけることができたとい

う点でまったく幸いであった。つなみによって冠水のおそれのある地域では、これを考慮した対策をたてておく必要があることは新潟地震の例からも当然と言えよう。

市街地でおこった被害として、薬品が棚からおち、それに引火して火災を招いた事例があった。工場内でも想定されうる被害であり、高所の危険物・薬品類の保持には、それぞれに応じた配慮が必要である。

強震計加速度記録の報告はまだだされていないが、震源に比較的近いところでは、八戸・宮古・室蘭・広尾・釧路などに設置されているから、すでにのべた被害について地震力の推定、構造物の地震時の挙動の解析などが、これらを参考にすすめられることが望まれる。

4. む す び

以上機械・配管関係について、十勝沖地震の震害事例、問題点等について簡単に記した。細部にわたっての検討が未だ十分でない点が多いことを恐れるものであるが、同様な分野で今後耐震の問題を考えるにあたって何かのご参考となれば幸いである。

稿を終るにあたり、復旧作業にお忙しいところにもかかわらず、調査によせられた関係各社各位のご好意にたいし心からお礼申しあげる。

この調査は、当所第2部柴田助教授、一部については工学部産業機械工学科井口助教授とともにおこなったものであり、調査中の討議を通じて示唆された点も多いことを記し感謝する。また日頃耐震問題に関連してご指導・ご討議を頂いている当所第2部亘理教授、工学部産業機械工学科藤井教授にお礼申しあげる。

(1968年10月15日受理)

参 考 文 献

- 1) 機械耐震設計グループ：機械配管関係の被害、原因とその対策、新潟震害特集、生産研究 16, 10 (1964. 10).
- 2) 十勝沖地震東京都調査団：十勝沖地震東京都調査団報告書 (1968. 6).
- 3) 東北電力(株)：十勝沖地震による八戸火力発電所被害状況 (1968. 6)、日本機械学会原子炉耐震設計法研究分科会資料 G-159.
- 4) 佐藤・鈴木：二入力を受ける多自由度系の地震応答 (1968. 10) 日本機械学会原子炉耐震設計法研究分科会資料 G-185
- 5) 柴田・清水：不規則な多入力にたいする配管系の振動解析について、日本機械学会講演論文集 No. 200. (1968. 9)
- 6) 佐藤：機械構造物の耐震設計に関する研究、東京大学生産技術研究所報告, 15, 1 (1965. 11).
- 7) J. PENZIEN and A. K. CHOPRA: Proc. of III WCEE, II/P/11 (1965. 2).