

4. 機械配管関係の被害、原因とその対策

機械耐震設計グループ

4.1 はしがき われわれ数名の機械工学研究者は日本機械学会の耐震設計法研究分科会などをよりどころとして、ここ数年来原子力発電所内の機器・压力容器・配管などの耐震に関する研究を行ってきた。この分野における機器その他の耐震設計は建築物土木構造物などのそれと異なり、原子力発電所の安全性に関連してはじめて大きく取り上げられるようになった事がらである。重工業、化学工業と地震について考えてみると、1923 年の関東大震災のころは東京周辺にあるものも、現在の見方からすれば、まだごく幼く、その後 1944、5 年の東海地区の震害については、戦争末期であり、具体的な状況を知ることにはなだ困難である。戦後全国的に見れば、いくつかの大地震に襲われたわけであるが、重工業地帯の被害例はほとんどなく、わずかに 1961 年日向灘地震で若干の工場が被災し、化学系の工場ではどのような箇所が損傷するかをはじめて実地に知ることができたのみである。しかも、このときは地震も比較的弱く、構造物の設計の不備によるのではないかと推定されるものもなかった（以上写真、図面よりの判定）。この前後数年にわたり大きい地震があまりないと思わせる日々が続く、一方経済の高度成長ということに伴い、各地に続々と工業地帯が生まれ、各種工業の工場が日本全国にちらばる傾向がでてきた。このことは工場が地震に遭う確率が増してきたことを意味していたのであろうか。最近になり世界的に大きな地震が頻発するかのよう見え、わが国も 5 月の秋田に引続き、6 月には新潟県北部を震源とするこの地震に新潟周辺の工業地帯が襲われるに至ったのである。

前述のようにわれわれグループの研究は原子力発電所の安全問題に端を発しており、その過程で火力発電所を例として取りあげ実験解析を行ってきたわけである。

今回の調査も、この線にしたがい第 1 回は火力発電所の損傷状況を知り、在来の研究結果と照合しようとするのがその第 1 目的であった。その結果、火力発電所の問題もさることながら、一般生産施設の損傷がすくなくないことを知り、本所で地震直後から検討されていた本調査班に改めて参加し、機械グループとしては、第 2 回の調査を行なうこととなったものである。

4.2 地震災害と公衆 工業施設関係の地震災害の研究を行なう立場は大きく分けると二つある。一つは施設の破壊により、周辺地区にいる施設に直接無関係の人々つまり公衆が災害を受けることをいかに防ぐかを考えるものであり、他の一つは、その施設を所有する企業の損害をいかに防ぐかという点に立つものである。施設の損傷

によって、公衆が被害を受けたとき、その被害は、それを所有する企業により補償されるのが平時では常識的なことであると、一般に考えられている。しかし戦争あるいは天災による直接、間接の結果として生じたものについては補償が行なわれないのがふつうである。その結果公衆災害は企業の損害として計上されず、したがって耐震設計を施設にほどこして、その安全性を増しても、利益となって還元されるとは考えられない。この点が第 2 の問題点と異なっている。第 2 の点については大地震が 100 年に 1 回であるか、1,000 年に 1 回であるかといったことと、企業が受ける直接間接の損害額、さらにはそれが保険で補償されているか否かなどで、企業の利益という立場から考えればよいことなのである。機械関係の耐震の研究が永年放置されてきたことも、地震では小型の機械は壊れ難いということもあったが、なによりも“壊れてもそれだけで、他へ被害を及ぼさない”という点にあったのではないだろうか。しかし最近のように機械的なものの範囲が広がり、その影響するところが大になった今日、もはや今までのように地震の問題に無関心でいるわけにはゆかなくなった。その 1 例が原子力工業であって、前にも触れた機械学会の研究だけでなく、日本に動力用原子炉の導入が決まった 1958 年以来土木建築関係の耐震研究と平行して、この分野でもいろいろな研究が実施されてきている。一方化学工業で扱うもののうちには、原子炉の暴走に伴う放射線障害ほど強力ではないにせよ、かなりの毒性を有する物質もあり、それが多量に貯蔵されたり輸送されたりすることもある。その他可燃性物、爆発物なども同様である。このような種類の工業によってもたらせられる可能性のある地震時の災害についてもまた、公的な研究機関で徹底的に研究し、各企業内での研究不足の点は補うようにしなければならないと考える。

第 2 の観点からみた企業自体の防衛ということは、これに反し比較的解決が容易であり、われわれは、ある程度の範囲内で問題点とその対策を指摘すればよいわけである。

以下本報告は新潟における諸施設の受けた被害とその原因、そして復旧の対策などについて順を追って気のついたことを述べてゆきたい。

4.3 機械関係施設の被害の特色と概要 土木の解説でも若干触れられてあるように、今度の地震の被害、とくに新潟市周辺のものは震害というよりは泥害、水害ともいうべきものである。泥害というのは一つは水を含んだ砂もしくはシルトの層が流動化して、その中にあるも

のは、あたかも水中にある物体のように浮力を有し、その全重量との関係に応じあるものは浮上しあるものは沈下した。しかもその形状や支持の状況により必ずしも垂直に上下するとは限らない。その結果が不同沈下とよばれる現象となり、駅周辺のビルあるいは機械工場の惨状となったわけである。泥害の他の一つは動土圧（土木などで使っている言葉の定義からはずれるかもしれない）によるものである。水田、低湿地にいた人の話によると地表面がメートル程度で表わされる波高で、波打ち進んでくるのを目撃したということである。これが横波であるのか、あるいは縦波が境界でこのように現われているのかなど議論はあるだろうが、いずれにせよ地表もしくは地表近くに埋設されている物体は土からかなり大きな力を受けているであろうと想像される。

水害は地震中の含水層が加振されたために生ずる噴泥に、水道水・重油などが加わったものが第一に襲い、それに引き続いて津浪によるものが浸入してきた。塩分の濃度はあまりよくわかっていない。山の地下地区などの一部を除いて重油などによる汚染が目立った。浸水水位についての干満の影響がどうであったかははっきりしなかった。

一般には地震による被害は通常の場合は大地が揺れ、したがって大地の上に固定されている諸施設が加速度を受け、ある場合にはその衝撃により、また他の場合には共振によって振動エネルギーが系の中に蓄積されて破壊に至るわけである。この種の被害は構築物では皆無に近かったといえよう。古い木造建築物でも、その倒壊の原因は主として不同沈下によるもののようである（木造のような軽い構築物でも土に著しい影響を与えているのは見逃せない）。振動学的現象による破壊は槽内の液体の共振によるタンク、湿式ガスホルダにみられる。その他一部のパイプ、山間部の発電所で同一形式の高圧送電線の避雷器数箇が切損したのも、共振現象によるものであろうと推定される。このように今回の地震による生産施設の破壊が、いわゆる動力学的現象によらず、主としてそれを支持している構築物の不同沈下、あるいは動土圧ともいべき力により起こったとみられることは特筆すべきことである。このような現象は、東京湾周辺その他にある軟弱な沖積層上の地帯の多くにも起こることが予想される。その一方上部構築物ないしは上部構築物内にある諸施設の損傷がすくなかったということは、地震加速度が新潟においてはあまり大きくなかったことにプラスし、これら構築物があたかも変位計のように流動化する地層上で揺れたため、その上に生じた加速度が大きくなかったことによるのであろう。これらのことは木造家屋の倒壊が数少なく、また倒壊したものも主として基礎の変形によるものと判断されることと考え合わせればわかることである。したがって、これら上部構築物あるいは

構築物内の機器・配管が無損傷であるからといっても、このような軟弱地盤以外の土質性状を有する土地においても十分な耐震強度を有しているかどうか断定できないことに留意しなければならない。

つぎにこれらの原因を（A）不同沈下（B）動土圧（C）地震加速度（D）水害（E）他の施設の破損による（X）被害の比較的すくなかったもの、として施設の分類とを突き合わせてみると

| | |
|--------------------------|--------------|
| 1. 工作機械などを含む大型機械 | A |
| 2. 中小機械で荷重分布が一様でないもの | A |
| 3. 長大機械およびクレーン・レールとしての建屋 | A |
| 4. 鉄塔煙突類 | X, C |
| 5. 大型塔槽類、大型圧縮機 | X, A |
| 6. 中型塔槽類、密圧器 | A |
| 7. 小型ポンプ類、弁類 | A, E |
| 8. ボイラ類 | A, (C) |
| 9. パイプ類 | A, (B, C), E |
| 10. 地下埋設物 | A, B |
| 11. タンク、湿式ガスホルダ | A, C |

となる。

4. 4 被害状況 以下各施設の被害状況を大きく区分けて挙げ、その後それらについて説明を加え、最後これらに対してどのような対策注意が考えられるかを、ごく一般的にのべることにする。

被害

1. 工作機械の不同沈下
2. クレーンの走行不能
3. ラジアル・ボール盤の腕の回転
4. 煙突の折損、落下による施設の破損
5. 床面のクラック・レールの持上がり
6. 煉瓦構造ボイラの亀裂
7. 長大機械の破損
8. 冠水による被害
9. 工場内における重い製品、半製品の崩壊・傾斜
10. パイプの破断
11. タンク・ガスホルダの液体共振による損傷
12. 同上の不同沈下による損傷

地震直後は冠水のために地震による直接の被害が判然としない点があったが、排水後の調査の結果その状況が明らかとなった。被害をうけた工場の分布は、民家など一般の被害の多かった地域と一致しているといえる。したがって被害は直接間接に地盤の悪さに起因しているとみられるものが多い。たとえば工作機械では重量 100t 前後の大型機械から小型精密旋盤にいたるまで、大半が不同沈下によって最大 10° 程度まで傾斜しているところがあった。精度を高く要求する工作機械の機能を考えるならば、たとえ浸水がなかったとしても、作業を停止せざるを得ない状況であったと思われる。

沈下・傾斜したものの多くは基礎ごと沈下しているから、軽微なものはライナをはさみ必要に応じモルタルで固定し、はなはだしいものは基礎から打ちなおして使用

するということであった。しかし精密縦中ぐり盤・平削り盤など、精度を要するもの、ベッドの長大なものは、一見機械自体の変形がなく傾いた様相を呈してはいるが、修復してそのまま使用に耐えるかどうか、浸水による錆の点を別にしても難しい点があるように思えた。しかし現在のところ大きな問題はないようである。

機械重量・基礎形状・基礎工法などについてはまだ細かい資料がないが、機械によっては杭打ちをしてあるものもかなりあった。しかしこの場合でも、支持杭というよりは摩擦杭であったとみられるから、市内の一般構造物と同様な過程で被害をうけたとみられる。

工作機械がこのような被害を受けているところでも工場建屋は外から見ては無被害であったところも多い。このような場合に限って考えると、地盤に対しては機械が基礎を含めて集中荷重になっているといえよう。またラジアル・ボール盤のように荷重分布が極端に偏しているものもこの意味から基礎に注意をはらう必要があると思われる。また一方小型の工作機械のうちには建屋、あるいは重量の大きな機械が沈下したことによりひきずられて傾斜してしまったものも見受けられたので、工場内の配置上のこと、いくつかの機械基礎を結合すべきかどうかなど考えねばならぬことが多い。

地盤条件が非常に悪いとみられるところでは、工作機械の被害とともに建屋も破損している例があった。その場合にはクレーンの使用が不可能になり、復旧作業の能率が低下しているよう見受けられた。また建物自体の損傷はひどくないにもかかわらず、増設工場と旧工場のつなぎ目が破損し、クレーンの走行が不可能になっている事例がみられた。なお走行が可能であってもトロリが横に流される程度の変形をうけている建物もあって、搬送重量も公称の半分くらいはおとして使っている例が多かったようである。しかし天井クレーンそのものが地震の際に落下するなど直接の被害をうけた例はみられなかった。造船所の塔状クレーンが傾いているのは望見された。

ラジアル・ボール盤が、支柱側に沈下し傾斜とともに腕が回転して積み上げてあった半製品にあたって機械の一部が破損するという事例がみられた。この場合腕が回転した結果荷重分布が尋常でなくなり、沈下の傾向をますます強めたかもしれない。

今次の地震では、塔状構造物の破壊の例は比較的少なかった。新潟市内の高圧送電線鉄塔は完全に倒壊しているものはなく、傾いているものが数本程度であったが、いずれも地盤条件の悪いとみられるところにあった。煙突については折損が 1、途中に亀裂が入っているものが 1 本みられた。折損していた例では、折れた部分が工場の屋根を打ち抜いて突きささり、施設に破損を与えていた。

工場内の床面でスラブとなっていないコンクリートの箇所は、地震動、工作機械の沈下などによって至るとこ

ろ亀裂を生じ、地震後 2 週間目には復興のため古い床面を除去しつつあるところもあった。コンクリートとともに埋めこまれている荷物運搬用トロコの線路は、拘束の少ない一般鉄道用線路が横に鉛のように変形するのに比べ、盛り上がったりにしているものもあった。

機械類の中には、それを取り付けた構造物の破壊によって被害をうけたものも見られた。たとえば小型タービンを支持している床のスラブがタービンのところから割れ約 40 cm の高低差を生ずるとともに開孔部を生じ、そのためタービンが半分は浮き上がったかたちとなり、一部付属機器が損傷してしまったという例もあった。

ボイラは本体が煉瓦積みのもので、本体は鋼板その他であるが耐火煉瓦の内張を有するもの、煉瓦に無関係なものの 3 種に分けられる。被害は第 1 のものに多くあった。とくに建物と独立した基礎を有するものは建物に比して沈下し、地震時の事故とか復旧の両面から問題をもたらした。また煉瓦壁体の主として目地部に亀裂が入り、張り出してしまったものが、ある社では 5 缶中 3 缶あった。この 3 缶は合理化などのため最近休止状態に入ったもので、被害が、冷状態による目地のゆるみによるか、あるいは老齢（概算 30～40 年）のためかははっきりしない。

長大機械（この系列に入るものとしては抄紙機・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）の被害もみうけられた。地盤上に設置された機械では長手方向の不同沈下、モータ等の動力部とローラ等機械本体の重量分布が不均一かつ同一基礎にのせていないということ、やはり不同沈下を起こしていた。構造物上にのせたものもあったが、構造物自体の損傷がはなはだしかったこととともに、上部荷重の不均等にわざわざされて、モータ側が沈みフレームが平行四辺形状に変形し、動力伝達部の歯車の中央面がくいちがっていて、直ちに起動は不可能な状態であった。この機械は長手方向には一見変形がないようであったが、工場側の測定によると全長 80 m にたいし約 600 mm 一端が沈下し、杵金の一部は切れているとのことで、やはり起動までには細かい点検が必要であると思われる。地震直後に電源がきれたため機械は停止し、中の製品はそのままの状態に残っている機械もあるということであった。

化学工場には高圧用大型圧縮機の外、ポンプ、小型圧縮機等の補機類があるが、後者では比較的重量があるのに基礎はこれをのせられればよい程度のもが多く、いずれの工場でもこれらのほとんどが被害をうけているようであった。大型圧縮機については防振不同沈下と久しく取り組んできただけであって今次は被害が少なかったようである。

パイプといわれるもののうちには径数百 mm、長さ数十 m で固有振動数も非常に低いものから、壁に取り付け

られた水道管のようなものまで含まれる。したがって、広い意味でいうパイプは不同沈下・動土圧・地震加速度の3種類の地震破壊作用を受けた点において典型的である。動力学的な振動による破壊は、ほとんど見られなかったと考えてよい。写真第4・3図に示すようにボイラなどととも大きく振動し建物の床貫通部による打こんなどを残している。写真例は降水母管であるが上下方向の振動もみられ、水平90mm程度に対し、50~60mmはあったと推定される。しかし保温材外套に擦り傷を残しただけでパイプ本体に損傷はなかったものと思われる。B地点付近の2階屋上よりT型をして地上2.5mくらいのところへ降り、独立した支持台で支えられている径200~300mm(詳細不明)の蒸気パイプは支持点間中央付近曲部より水平直部に移行する点で切断し、両者の端部は約1m以上離れている。切り口は管に垂直な断面であって、確認してはいるが溶接箇所から折れたものではないかと推定される(写真第3・4図、4・11図)。外力として軸方向の引張り力によるものは考え難いので、あるいは共振による切断かとも思える。建物間などをまたぐパイプで不安定な吊り方をしたものは他にも見られたが、このようなこわれ方をしたのはこれだけであった。

この外のパイプの破壊は支持している建物タンクなどの不同沈下、支持体の転倒、他物体の落下によるもの、および地表もしくは地中にあって土圧による変形力を受けたものがある。また材料では铸铁・鋼・塩化ビニール・エタニット・ゴム、箇所としてはフランジ付根・溶接部・弁匣体・エクспанションジョイントであり、力の加わり方としては曲げが圧倒的に多く、ねじりも見られた。軸方向の引張り力も多くの場合、曲げモーメントとして作用しており、またせん断でないかといわれている箇所もあったが、はっきりしなかった。鋼管の一部には曲げて潰れたのも見られた。破壊箇所としてやや意外なのは弁匣体のノズル状部から離れた部分での破損、コード入りゴム・ペロの取付部からの切断(地上に敷設された天然ガス管、剛性の高い金属ペロを使用した区間はパイプが動いて無事だった)などであった。塩化ビニール・パイプの脆さは非常に印象的であり、あるものはフランジ付根から、他のものは溶接部から、またあるものは中間から刃物で切ったようにきれいに切れていた。ねじりによる線上の破断部もまた見られた。全般的に見て塩化ビニール・パイプの破断率はきわめて高いようであった。

タンク、湿式ガスホルダについていうと、新潟における震害でもっとも大きく公衆に被害を与えたものは石油タンク関係のものであろう。タンクより流出した油は発火原因はともあれ、長時間の油火災を惹起し、また水に乗ってあるときは延焼の橋わたしをし、あるときはいたる

ところ重油びたしにしてしまった。発火を防止できた施設も軽油・ガソリンが流出しなかったわけではないので今後とももっともよく考えなければならない点である。このようなことに至った過程には液面の共振によるものと、タンクの不同沈下によるものがある。地震時のタンク中の油量などによって破壊の起き方が異なっている。浮き屋根式のものについては観察する機会がなかった。観察したものはいずれも天井鏡板のあるものであるが、縁近くの鏡板が破れたもの、鏡板と側板の間が切れたもの、側板が長円形に変形して鏡板が座屈を起こし落ち込んだものなどがあり、さらにタンク全体が傾斜したのも見られた。一方沈下の害も著しく、沈下にともないノズル部より主管が抜け出し全量が流出しているのも数多く見られた。この原因は管周ねじりが引抜き力に弱いことにあるのではないと思われる。雄ねじをたいして損傷することなしに抜けてしまっているものがいくつか見られた。沈下量の多いものは約700mmにも達しているので、特別の配慮がなされていないかぎり主管取出口が損傷を受けざるを得ない状況にあったといえよう。このような場合の対策としては、横U字管・可撓管などを主管に、また補助管にはエルボを組み合わせたものなども大きな相対変位を引き受けるのに役立っている。主弁は弁自体が弱点となり、管の破断の原因となったりしており、パイプが損傷した際に内容物の流出を阻止する役には立っていない。またタンクの工法から見ると新しいものでパイプロ工法によったものなどは外見上は異常がないようであった。またタンク群に近接して設置された精製プラントは杭打ちをした一体基礎上に据えられていたが、この方は外見上の被害はなかった。このようにしてみるとタンクについても基礎工事が重要であると思われる。

なお一部古いタンクには鉄締めのものであったが、船目より漏洩しているのが散見された。湿式ガスホルダの大型のもので全体が傾斜したものもあったが、液封用の水の共振による事故は2段式のものに見られ、案内筒はガイドのレールより脱して、上部浮動部が全体として傾斜している例があった。目撃者によると溢流するには1m~1.50m余裕のあるはずの水が動揺であふれ出たということなので動的な力によるものと思われる。

石油タンクからの溢流の結果、油火災を生じたのは新聞などに報ぜられたとおりであるが、タンク間に設けられている防油壁は両側とも油に浸されて、その役を果たさなかった箇所が多かったようで、発火しなかったプラントのものについても同様な状況にあるのが見られた。つまり地震の際に有効なためには防油壁を二重にして各タンクの領域間に空白な地帯を設けなければ延焼を防止するにはあまり有効ではないと思える。またブロック積み防油壁は地震時には無力に近いのではなからうか。

濃硫酸の溢流によって負傷者が出ている。また水と混

合して周辺の蒸気系統の保温材をおおいを腐蝕してしまった例がある。なお濃硫酸と水が混合する際ある程度の反応があったと思われるが、取り立ていうほどの害は起きなかった。濃硝酸の流出も見られたが、それによる被害はなかった。このほか、パイプのところで触れるべきであったかと思われるが、塩素酸水のタンク取り付けのエルボからの流出、メタノールの洩れ、液体アンモニア・パイプの丁字形接合部よりの破断噴出などが報告されている。メタノールの洩れの割合は、ドラム缶などで処理できる程度のものであったようであるが、タンクが大容量であることおよび引火性液体であることで、その処置に腐心したようであった。アンモニアの事故では現場に居合わせた工事会社作業員の棒心の方が多量にガスを吸ったため不幸にして亡くなられた。

塔槽類・冷却管棚・その他、大型の精留塔反応塔はその重量や、また機能の点からいっても傾斜を嫌うので基礎の施工も入念なため、一般には被害はすくないようである。しかし平常傾斜が問題にならない性質のもので古いもののうちにはかなり傾斜したのものもある。また他の重量の大きなものの例では高さ 30 m のものが 2 本並列していたのが頂部で 100 mm ほど離れた例がある。これらが比較的よかったのは、大型圧縮機などとともに化学装置として基礎のことがつねに念頭にあったからであろう。散水型の冷却棚とか、熱交換器・蓄圧器その他中型のものは、基礎の配座が不十分なせいか、傾斜したり倒壊寸前になったりしているものも散見した。

地下埋設物については現在においても機能は喪失していることがわかっている程度で、細部の様子はわかっていない。大型の送水管などは接合部を杭で支えることは有効だったようである。しかしいづれにせよ直接埋めたものの被害は大きいので、重要なものはピットを使うべきであろう。ただし今次の例はピット類の浮き上がりが意外にひどいものであることを示している。

最近の化学プラントのほとんどは自動制御装置により制御される。自動制御装置の損傷はプラントの運転に対して致命的である。新潟地震は、地震の加速度はそれほど大きくなかったためか、制御室の制御機器類の損害はあまり多くない模様であった。もっとも機械式リレー要素・変圧器油面警報器の振動による誤動作などではあったように聞いた。これに対して地震の変位振幅が大きく、また地震に伴う地盤の不同沈下が大きいため、地盤の悪い工場では制御パネルが倒れたり、制御用空気配管・配線等は伸張され、ときには切断したりして、その機能を果たし得ないものとなってしまっている例もある。この外大型トランスで傾斜したものがあったが、それ自体の損傷はわずかであった。

以上は地震による直接の被害とみなせるが、地震後の浸水が大きな被害を与えているのも今次地震の特徴であ

ったと思われる。地震後地下水が噴出するという状態に加えて、今回被害をうけた地区は地盤沈下によって地震前から海面下にあったところも多く、地震直後から海水まじりの浸水を受け、はなはだしい工場では津浪の来襲とともに浸水の深さが 1.5~1.7 m に達し旋盤全体が水没するくらいにまでなっている。この結果工作機械はすべり面・歯車・ベアリング等の防錆、電動機・制御系統の修復が当面復旧の問題となっていた。錆の点では工場内におかれてあった仕掛品の被害も大きいと思われる。噴出・流入した多量の土砂によって埋まっていた部分では数日後に堀りおこしたときも、まったく錆びていなかったが、いったん堀りおこし曝気した後は、一挙に錆びてしまったという例もきかれた。反面水が引くまでの時間が比較的長く、6月という気温も手伝ってか、水につかっていない部分でも錆びかかっていたようである。近來臨海工場では台風の襲来に備えるときなど、いち早くモータ類は高所にあげることも行なわれているようであるが、今回はそのような処置をとることは不可能だったようである。また信濃川岸の工場では、津浪と流木の影響によって制御器箱・工具整理箱が転倒したなどの被害をうけているところがあった。

生産施設とは趣きが異なるが、次工程待ちに工場内に積まれている半製品が地震時に倒壊した事例があったようである。また特に基礎をうっていないところに重い製品半製品がおいてあったところでは沈下傾斜している例があった。

4.5 一般的対策と注意事項 新聞紙上等で新潟地震の災害は、一口にいて地盤の悪さによるものであることがいわれているが、工場関係の被害についてもその通りである。とくに工作機械については、水が被害をさらに大きくしているわけである。しかし地盤の悪さはともかくとしても、建設時は海面より上であったものが近來の激しい地盤沈下で海面下になったところも多いとみられる。いづれにしても新設工場の立地条件を地震工学の点から考えるならば、地盤のよいところを選ぶべきであろう。しかしわが国の場合不幸にして工場立地は経済的条件から地盤の悪いところが選ばれがちである。したがって、個々の機械類あるいは工場施設について、耐震の考慮を払った設計を心がけることが望ましい。工作機械基礎についても、精度保持・振動遮断のような機械工学的要求と、接地面圧を下げる、重心と形状中心を一致させるようにするなどの土木工学的要求を調和させる設計要件は検討されてしかるべきであろう。

同一工場敷地内でも、地盤条件のよい範囲と悪い地域がみられたが、使用される工作機械の特性、製品重量、製品の流れなどを十分考慮して、重要な機械類、作業はできるだけ地盤条件のよい部分におくよう全体の配置をすべきであろう。

工作機械に被害をうけた工場では、これまでも精度を要する機械類については不同沈下や基礎の下の中に空洞ができていたりして、その保持に苦勞を重ねていたということである。逆にいえば、平時の状態でこのような現象がみられる機械は、地震時に被害をうける可能性が大きいといえよう。

ラジアル・ボール盤の腕の回転にみられる事故について考えると、もし腕を固定しておけば沈下の程度も軽微にすんだし、機械破損もなかったであろう。また腕が回転したことにより、予想外の動的な力がかかって機械に変形を生ぜしめたかもしれないことも考えられる。現場作業員が退避にあたって適切な処置を施したなら、このような二次的損傷は防止できたかもしれない。

二次的損傷ということからすれば、煙突の切損についても施設上の点で注意が必要と思われる。すなわち、煙突自体折れないように配慮された設計・施工・補修が第一要件であるが、万一折れたとしてもそれによって破壊される施設からさらに重大事故が惹起されないよう施設の配置等は考慮しておく必要がある。折れた煙突のすぐそばには、ほとんど同程度の高さの煙突が無事に立っていること、煙突が酸性の煙道ガスによってアルカリ性のコンクリートや鉄筋が腐蝕され脆くなることから、補修は意味のあることであり、時には造りかえることも必要であろうと思われる。

工作機械の沈下・傾斜から類推すれば、今次調査では確認できなかったが、非常用動力源の内燃機関について同様な現象も考えられないことではない。これを防ぐためには、やはり基礎設計に相応の検討が望まれる。蓄電池についても同様な配慮が必要である。とくに鉛電池は倒壊した場合、火災源となる可能性を有している。

ボイラの外側部分の煉瓦の張り出した点については、運転中のものは熱膨張で目地がつまり安全であった一方、休止中のものは目地に隙間を生じていたため損傷したといわれているがはっきりしない。ボイラその他耐火煉瓦を使用しているものでは、煉瓦の消耗により耐火煉瓦としての機能はもちろん、地震時における強度部材としての本体の機能保持をむずかしくすることも考えられる。そして施設自体は構造的欠陥等が生ずれば、はなはだ危険なものである。近代的な大型ボイラの被害はなかったわけであるが、しかしドラムなどとともに、あたかも変位計のように大振幅で揺れ、建物に取り付けられたストッパに激突している。ここでストッパの間隙の設定、衝撃のとり方など理論的にも検討する必要がある。ボイラ内のパイプ・バンクの取付けはかなり柔なものが多く、ガス流による振動で切損した例もあるので地震に対する配慮も必要かと思われる。

ボイラの沈下のためバーナが外れた例がある。バーナの取付け、それへ至る配管、消焰の際の燃料の自動遮断

など検討を要する点である。

このような地盤条件のところでは長大機械類は、機械全体として同一基礎上にのせるとともに、動力源も同一基礎におくことが望ましい。地盤上にそれだけ長大基礎を設けるのがむずかしいとすれば、構築物上に設置するのが一つの方策であろう。このとき構築物強度等が十分検討されていなければならないことはいうをまたない。今回の被害にみられた動力伝達歯車の軸方向のくいちがいは、本体フレームの構造設計に一因があるとみられるから、その面での設計上の注意も必要である。

工作機械の冠水の被害を少なくするためには、電動機や制御系統を比較的高い部分に持ってゆくように構造上配慮することが考えられよう。しかしそこまでふみぎらないにしても、いざというときに簡単に電動機を外しうるような構造もとれよう。

パイプ類の地震時の応答についてわれわれは研究してきた。今度の場合この種のことが問題になるような配管は保温材外套の損傷などにとどまり、大きな被害がなかったようである。これは地震の性質にもよっているが、それと同時にボイラのところでも述べたストッパの役割をさらに検討する必要があることを示している。

一般のパイプの損傷は構造物の破壊によるものが圧倒的で、地震に対するこの構造物の設計態度と機械のそれとに差があることを示すと同時に、パイプ系の設計者としても考えるべきである。とくに構造物の場合、ある部分は、それが破壊することにより他の部分を救うということを前提として設計されることもあるという点、パイプの配置を定めるのに知って置く必要がある。架空配管は支持柱がかなり強固に設計されていても相互の関連がないものは変位転倒していた。一方非常にきゃしゃなものであっても、トラス状に相互をスパン線などで連結してあったものは被害がすくなかった。これは配管橋で橋体がよく設計されたものは津浪にも残ったことと考え合わせ、パイプを強度材とすべきでないことを意味している。しかしパイプは大なり小なり強度をもたせられることが多いので、その面からいうと、中間に入る弁類の応力、モーメントの流れの処理は大切である。またエキスパンション・ジョイントや支持装置も限度まで変形した後のことも留意しないと弱点になってしまう。塩化ビニール管は現場での施工もかんたんで防蝕性にも富みよい材料であるが、金属管にくらべれば、まったく強度がないということを忘れてはならない。極言すればガラス管を使っているのと似ているので、力の加わる可能性のあるところは避けるべきである。また火に弱いこともある場合には問題であろう。

タンク類は施工法によっては不同沈下は生じていないので、土木的にその点は解決可能である。しかし、タンクからのパイプ・ノズルの破損防止には留意し、可撓的

に接続すること、および自動流出防止弁の採用もよく検討しなければならない。大口径管用ねじの軸方向の引抜き強度についても再検討を要する。液面の共振は従来から検討されていて固有振動数の式も与えられている。しかし 20,000 kl 入りタンク（径を 50 m として）で周期 8.2 sec となり従来地震工学で論議されていた卓越周期とは著しく離れていたため重視されなかったのであろう。これは加速度の卓越周期の外に変位の卓越周期が長いことを忘れてはならないことを意味している（川岸町県営アパートの加速度記録に出てくる長周期動揺とは別に、このような特別のところでなくとも長周期の波が含まれている。今回も砂丘上の硫酸タンクにも被害があった）。共振を防止するには揺れ止め区画板が一般には考えられるが大型のものは設計困難ではないかと思われ、むしろ消波装置を考えるべきと思う。球型に近い形状もある場合には有効であろう。

大型塔槽類のあるものは傾斜に敏感であるが、一度傾斜したものについては土木関係者の手にゆだねるよりほかない。新しく建設する場合は基礎に十分な配慮をする外、煙突などと同様高次振動まで考えて動的設計を行ない、相互の衝突、構造物との衝突の可能性を検討すること、および頂部に入るパイプ、ダクト類の処理に留意しなければならない。中型の塔槽類・蓄圧器・ガスホルダ・冷却棚などは不同沈下などによる被害を防止しようとするなら基礎工事について、一段と考える必要がある。とくに単独にこのようなそれぞれの基礎を設けるのは経済的に不利であるなら、中小型機器を載せる広いマットを作ることも考えるに値する。化学工学プラントの寿命は経済面からいって短いものもすくなくない。その場合上に載せるものに無関係にある程度基礎工事のしっかりしたマットを作り、その上にプラントを積み上げるのも一案であろう。

小型機器たとえばポンプ、弁などはパイプの損傷の巻添えを喰うことがすくなくない。したがってこれらの団体はパイプその他の部分と同じように応力、曲げモーメントを流れるよう設計すべきである。定力支持装置などについても同様で、変位が大きくなってストッパにあたった場合にも耐え、また動的にふらふらすることのないような設計をする必要がある。

自動制御系については、今回は操作部に損傷がなければフェイル・セーフの原則により配置されていたものは、制御部がその機能を失っても無事動作している。操作部についての問題点は小型機器のところで述べたとおりである。制御部関係では制御架の取付けが弱すぎるものが多い。油圧空気系・電気系が、他の構造物、パイプなどの破壊により損傷することに無関心な設計が多いこと。非常電源とくに 2 次電池の据付けが地震を考慮しない例が地区によってあること（調査した発電所では無傷

であったが国鉄の調査によると変電所での電池の被害が報告されている）。

とくに最近では化学工程が複雑になるにしたがい、その起動停止は、あらかじめ定められたプログラムによる逐次自動制御法が採られるようになってきた。装置と制御系との信号伝達が遮断されたり、制御用エネルギーが途絶すれば、この機能は失われ各操作部が独立に動作してしまう。したがって、誤動作などによって重大な事故が生ずる可能性のある箇所は、制御系の耐震性にとくに留意するか、あるいは外部依存性のすくない装置とし、できる限り機器相互の協調が保たれるようにしなければならない。

以上新潟における被害と原因、その当面の対策と将来の問題について概観した。あと残った二三の問題点に個別に触れてみよう。

4. 6 人間関係 新潟地震はかなりの規模で起こったにもかかわらず人身事故は少なかったといわれる。工場内での人身事故も地震による 2 次の事故による死亡例を 1 件耳にしたが、直接原因による死傷はほとんどない模様であった。地震の起こったときが 13 時をわずかに過ぎたときで、従業員は昼の休憩時間が終わり作業にかかる前であったために敏速な退避が可能であったようである。またいわゆる“ゆれ”があり急でなく、不同沈下などによる破壊は数分間の間に徐々に起こったことも幸いしたようである。新聞にも報道されていたが、前述のようにアンモニアのパイプの丁字接続部が切れ、洩れ出したガスを現場の責任者が逃げ遅れて吸い、肺の機能を失ったためということであった。毒性ガス・プラントでは幸い地盤が良いため被害がなかったが、嚴重な出入制御と、防毒マスクによる保護を行なっているというものの、毒物の漏洩の場合には非常に大きな不安が感じられた。

プラントの大部分は非常用電源などはもたないにせよ、フェイル・セーフ機能により安全に保護されているが、一部では作業員が地震中、あるいは終息後適切な措置をとって事故を防止した例もある。つまり安全装置だけでは不十分で人間の適確な操作を必要としたわけである。たとえばボイラからガス・バーナが抜けて外で火を吹き出した油に引火しようとしたのを辛うじて止めた。地震で直立歩行が困難なため床上をはいまわりながら、ソーダ回収ボイラの停止準備作業を行ない、爆発を防いだなどの報告があった。また液体塩素関係の洩出防止のための措置についても似たことがあった。

したがって危急時に対する訓練は重要である。調査した範囲でも安全設備は必ずしも十分といえないものが多いが、どんなにフェイル・セーフに設計をなされた設備でも、いざとなると予想し得なかった事態が生ずることがあるものである。そうなることは人間に頼るしかない

い、ところが危急時の冷静さを失った人間の判断は高度の判断になるほど信頼性は低下するといわれる。つまり人間には反射的に行ないうる作業以外に多くを望むことはできない。また、それにもましておそろしいのは、パニック状態になって常識外のことをすることである。いざというときに反射的に適切な処置をとりうるためには、ふだんの訓練によるしかない。新潟地震の場合の“ゆれ”は、それほど急激に襲ったものではなく比較的に徐々に来たといわれる。この点従業員の適確な判断を助けたといえることができるかも知れない。

なお地震による災害は、一工場の被害に止まらず、大部分の従業員の家庭も被災すると考えねばならない。復旧のための臨時作業員の手配はもちろん重要であるが、被災した従業員の生活を安定し出勤を確保なものとするため、かれらの住居や生活必需物資の確保もまた重要なこととなり事務関係職員の苦勞する点も多い。

4.7 防災施設に対する考え方と耐震性 多少反復する点もあるが、防災施設を設計するにあたっては、(i)なるべく外部からエネルギー、物質を受けることなく局所で処理できるものであること。(ii)一つの事故に対処するだけでなく平行して起きる可能性のある事故を考えて設置すること。(iii)地震時は複数の事故がもっとも発生しやすい瞬間であることに留意し、安全施設の耐震性を重くみる。また地震時は人が不在となる率が非常に高いので、その点も考慮すること、などが重要と考える。またこれと同時に保安、安全対策をどこに重点を置くかも考えねばならない。たとえば石油タンクの火災に対しては、タンクに消火設備がありながら外部からの送電停止と自家発電設備の損傷により効果を発揮できなかったともいわれる。しかしタンクや配管から漏洩した石油が、こわれた防油壁を越えてあたり一面に拡がってしまった状態での出火を、備えられていた消火設備が消し得たとは考えられない。その後の消火活動からみると、むしろあのような大火の消火設備を一工場が持つことは不可能と考えるべきだろう。とすればまず油の漏洩防止、出火防止に最大の努力を払ったうえで消火設備を考えるべきである。もっともこのことは消火装置が、いい加減のものであってよいことではない。消火装置は上記のようなことに無関係に発火と同時に自動的に働くものを考えるべきである。

新潟という立地条件から地震を考えていなかったのかもしれないが、各種プラントの保安、安全設備が、かかる地震までも予想して設計されたという話は調査した範囲では聞かれなかった。

なおこのようなことに関連して検討されねばならないのが地震中の送電である。木造家屋が多い日本では地震時には送電を止めることも考えられているが、しかし停電による被害も予想される。保安のためには個別に非常用電源を持てばよいが、冷却系動力源とか操作中の大型施設では補助エネルギー源でまかない切れず事故となる可

能性もあるのではないだろうか。配電系統は、その工場内のフェール・セーフをいかにするかと、ともに考えねばならぬ問題であろう。

また発電所の耐震設計は一応行なわれているので、現場の判断で発電を停止することは、単位の発電所容量が大きくなってきている現在、広い範囲に影響し電力の供給が著しく不安定になることはないであろうか。地震時のボイラ水循環の安定性、気水共発の問題など操作員が判断に迷うこともあるので、地震の状況を客観的に知ることができるよう加速度計その他の表示装置を操作室におくことも考慮されてよいと思われる。

水・ガスが多くは地下埋設管にたよっているため、その被害を確認し、復旧するのが著しくおくれていることは一般に知られている通りである。多くの施設の操業再開の時点を支配するのは水の供給で、そのため配水管を仮設しているところもある。

安全施設と直接の関係はないが、防災上重要なのは低地帯のための防潮堤である。地盤沈下は知っていても、地震を切実に考えなかったとともに出水に対する見通しにも甘い点があったのではなかろうか。地震直後 300 mm くらいの水が翌日、翌々日と増し、ついには 2 m くらいにもなったので、工場内の装置、書類の水没被害がかえって大きくなってしまったのではないと思われる点がある。

4.8 仕掛品 工程途上にある製品の損害、あるいは製品が装置におよぼした害については十分調査できなかった。機械半製品の発錆の問題をのぞくと、パルプ系半製品の水が抜けることによる固結の外は、流出した原・重油と泥の混合物の再精製があった程度である。一方焙焼炉など耐火煉瓦内張りを持つもの、ソーダ回収ボイラなどのように直ちに運転停止できないものは、平常から具体的に処置を決めておくべきで、焙焼炉が薪焚きによる保温として設計されていたのは適切であったといえる。半製品の工程中で止まる問題は補助動力の停止とも関連し、大型高炉(保温)、熱間圧延機(ローラの焼損)、写真フィルム製造機(仕掛品が高価)その他数多くの施設において考える必要がある。この処理の問題はいったん工場が被災したらその拡大をどうやって防ぐかの立場で、考えておいて悪くないと思う。これに類したことで、書類・図面を災害時に汚損滅失しないこと、非常用・復旧用車両の通路を工場内に常に確保することなども重要である。これらの配慮についてはアメリカの軍需産業内で非常事態にそなえよく研究されており雑誌などにも散見する。

4.9 むすび 以上新潟地震の被害調査を中心に、その対策および問題点を記した。数値的なものがすくないのが気がかりであるが地震後の混乱した時期であるので、調査できなかった。記述が機械関係をややみ出した点もあるが、ご了承いただきたい。調査にご協力いただいた関係各社の方々に厚くお礼申し上げる。

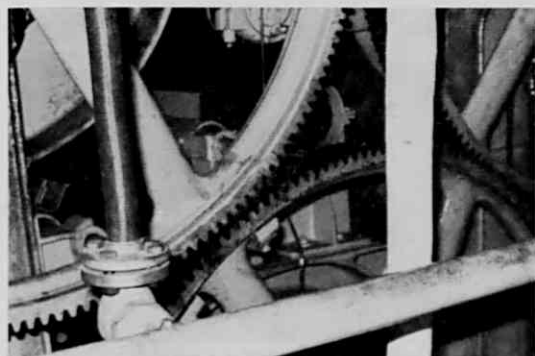
なお機械グループは工学部産業機械工学科藤井澄二教授、井口雅一助教授、当所第2部柴田碧助教授、佐藤壽芳助教授から構成されている。(1964年8月4日受理)



第 4・1 図 軽い物体の浮き上がった例,
マンホール (川岸町)



第 4・5 図 工作機械の沈下と土砂の侵入例
クレーン・レールがうねっている



第 4・2 図 大型機のフレームの変形による
駆動歯車中央面のくいちがい



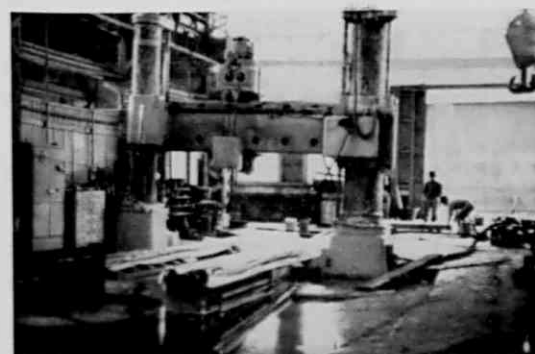
第 4・6 図 重油タンクの液面共振による溢流の例



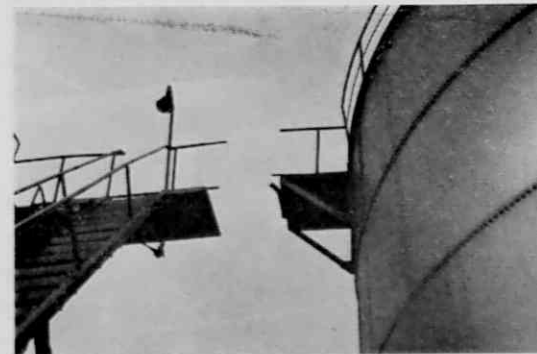
第 4・3 図 火力発電所ボイラ・ドラムの
振動によるストッパの変形



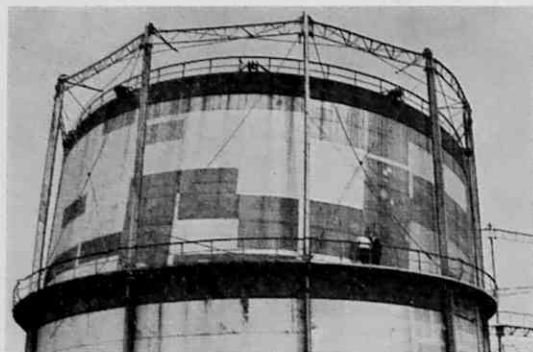
第 4・7 図 液面共振によるタンク鏡板の破壊



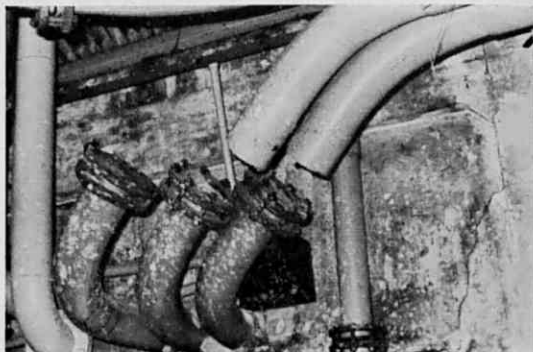
第 4・4 図 大型工作機械の傾斜した例



第 4・8 図 隣接タンクの不同沈下により切断した橋



第4・9図 ガス・ホルダの損傷、ガイドの位置が回転している



第4・13図 塩化ビニール・パイプの破損の例

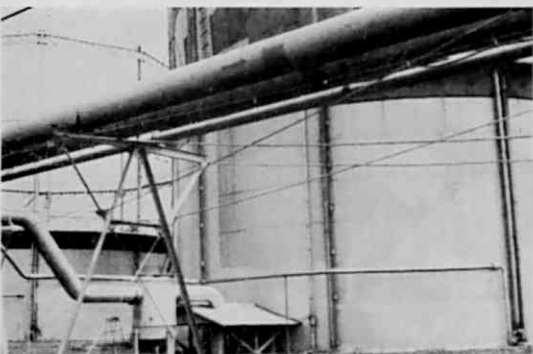


第4・10図 送水管の損傷例

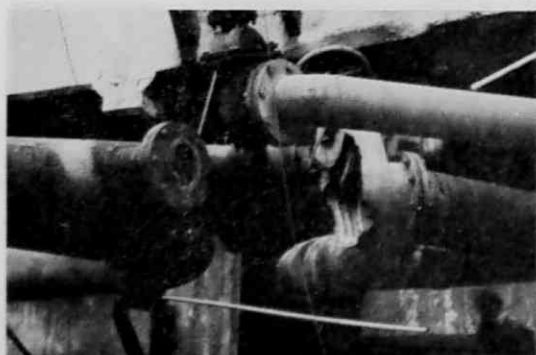


第4・14図 管用ねじの引抜きによる損傷例、石油タンク・ノズルに直結していた

第4・11図 ピットの浮上、パイプの切断の例 (4.3節参照)



第4・15図 架空パイプ支持の適切に設計された例、(背後のガスホルダは第4・10図のもの)



第4・12図 弁部の破損の例



第4・16図 中小型塔槽類の傾斜、手前はガス井の頭