

## 生産企業の地震被害の特徴と教訓

——1987年千葉県東方沖地震における茂原地域での経験——

1. はじめに
2. 茂原地域の特徴
3. 電子管工場の地震被害
4. 化学工場の地震被害
5. 生産施設・機器の被害の特徴
6. 被災後の対応と今後の課題
7. おわりに

三 森 友 彦\*  
鈴 木 浩 平\*\*

### 要 約

1987年12月17日発生の千葉県東方沖地震によって多くの被害が生じたが、多くの生産企業を抱えているこの県の特異な事情から、企業体内での被害と事後対策の解明は非常に重要であると考えられる。

著者らは、この地震における震度が恐らくは最大であったと推測される茂原地域にある、二種類の代表的企業が被った具体的な被害例について、両企業の絶大な御厚意を受けて調査する機会を得ることができた。

本報告は、これらの施設内被害例の特徴について、可能な限り忠実に記述し、生産企業の今後の地震対策計画に反映させるための課題を探ろうとしてみたものである。

#### 1. はじめに

1987年12月17日午前11時8分頃、千葉県東方沖で発生したマグニチュード6.7の地震は千葉県全域にわたって震度5の強震となり、東京、横浜、水戸などでも地震4を記録し、揺れの範囲は東北地方から山陰地方までの広い地域に及んだ。

地震5の強震が襲った千葉県内では強い上下動のために住宅の屋根瓦の落下、ブロック塀の倒壊などの被害が続出し、電気、ガス、水道などライフラインも大きく破壊されたことがマスコミによって連日報道された。千葉県が公式に発表した

被害内容の詳細は表1のとおりである。今回特に注目されたことは屋根瓦の被害であって、資材と技術者の不足のために半年以上も修理のできない状態が続いた地域もあった。

また、がけくずれの危険のため避難した47世帯のうち一部世帯では8箇月もの長期にわたる避難生活を余儀なくされた。大きな実害はなかったものの液状化現象の発生も多数確認された。特徴的なことは従来の地震で経験しなかった内陸部での液状化の発生が確認されたことである。確認された発生件数は6箇所と少ないが、いずれも造成地の盛り土部分で起きていること、8箇月以上もの

\* 東京都立大学工学部

\*\* 東京都立大学都市研究センター・工学部

表1 千葉県内の被害内容

被害状況		被害件数	
死	者	2人	
重	傷者	26人	
軽	傷者	116人	
住	全	壊	16棟
	半	壊	102棟
	一	部破壊	71,212棟 (かわらの落下など)
宅	一部破壊	71,212棟 (かわらの落下など)	
ブロック塀倒壊		2,791カ所	
断		水	49,752戸
停		電	287,900戸
ガス供給停止		4,967戸	
道路の損壊		1,832カ所	
山崩れ		434カ所	
避難世帯		47世帯, 167人	
液状化現象		277カ所	

長期間にわたり液状化状態が続いていることが注目された。

## 2. 茂原地域の特徴

今回の千葉県東方沖地震では、図1のように房総半島の中央部を東京湾側の千葉、市原市方面から、太平洋側の九十九里町方面へ横断するベルト地帯内の市町村に主な被害が集中した。筆者らは産業施設の地震対策のあり方、地震被害の特徴を研究する立場から、家屋等の被害状況より最大の震度が生じたと予想され、かつ、歴史的に特産の天然ガスを燃料および原材料として発展した生産プラントが所在する茂原市地域に注目して、代表的な二つの施設について震害の状況を特徴を調査した。

茂原市は九十九里沖積平野の南部に位置し、地

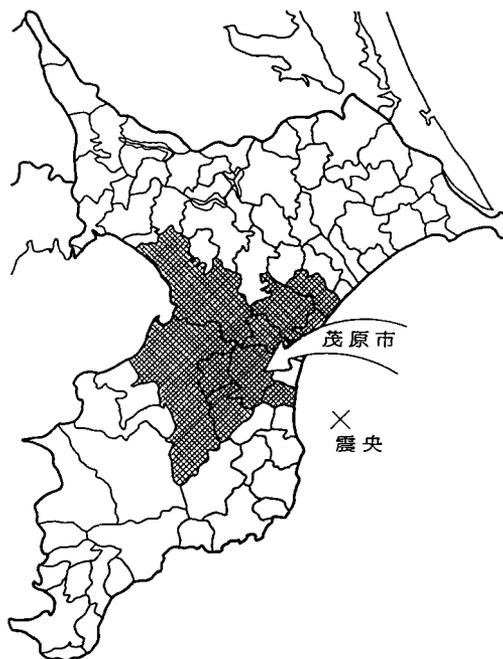


図1 被害の集中した市町村

盤を構成するのは上総層群とよばれる第三紀鮮新世から、第四紀洪積世までに堆積した地層で単斜構造をなおしており、最上部は関東ローム層がほぼ水平に載っている。

この地域の地層の特徴として注目すべきことは、わが国最大の生産量をもつ水溶型ガス鉱床を有することである。本稿で紹介する電子管製造工場と総合化学工場も、歴史的には水溶性天然ガスおよびガス分離後の水から得られるヨードなどを生産工程に活用することを目的で設立されている。

## 3. 電子管工場の地震被害

### 3-1. 工場の概要

この工場は1943年創設されたもので、前述の水溶性天然ガスを利用した送受信用の真空管製作から始まり、X線管、電子管、ディスプレイ管と製品を発展させてきた電子管を中心とした生産では、国際的にもトップクラスの大手エレクトロニクスデバイス工場である。最近では電子管製品のほか半導体、固体撮像素子なども生産している。生産プ

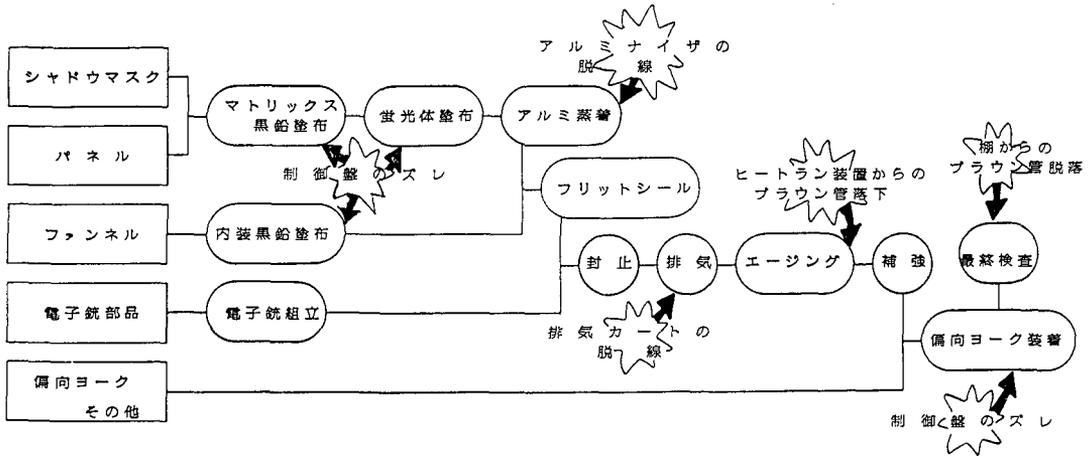


図2 電子管製作プロセスと被害モード

プロセスの新設・拡張に伴い、敷地内の建屋施設を次々に増設していったため、最近の新設工場のような大規模なFA（ファクトリ・オートメーション）化はなされていない。建屋は、ほとんどが1層または2層構造のため建屋自体の耐震性は良好であるが、増設部の接続構造には特別な耐震の配慮はなされていない。また、地盤は全体的に柔軟であるが、地盤改善のための工事や杭打ちなどは施されていない。

3-2. 電子管の生産プロセスと特徴

この工場における主たる生産工程としての電子管製作のプロセスを図2に示す。この図には、後に述べるプロセス内における、今回生じた主な被害モードについても併せて示してある。この生産プロセスにおいて、耐震性の視点から注目される装置とその特徴をまとめると以下ようになる。

(1) 黒鉛や蛍光体の塗布、アルミ蒸着といった化学的工学的工程が多く、そのための非常に多数の塗布機、アルミナイザといった化学処理装置を使う。

(2) 熱ひずみをとるためのスタビライザ、エージングのためのヒートラン装置など、厳格に定められた規定の時間内に各電子管に熱処理を施す装置がある。

(3) 構造的に非常に脆弱な個々の電子管部品が、規定の生産工程プログラムに従って、順次各ラインをコンベアで運搬されており、そのため工場内

の物流は、空間的にもかなり錯綜したレイアウトとなっている。写真1は、テレビブラウン管の生産ラインの例である。先に述べた生産ラインの増設と建屋の接続増築は、この状況をさらに複雑にしている。また、熱処理は効率を考え、多数の製品に対して同時に行われるため、最終段階の品質管理工程などと共に、本質的に地震には弱いプロセス設計となっている。

3-3. 地震に対する予備的措置

本工場は地震観測には注意が払われており、特にプラントの指導部となるオフィスビル本館（鉄骨コンクリート製3階建）には、1階基礎近傍に

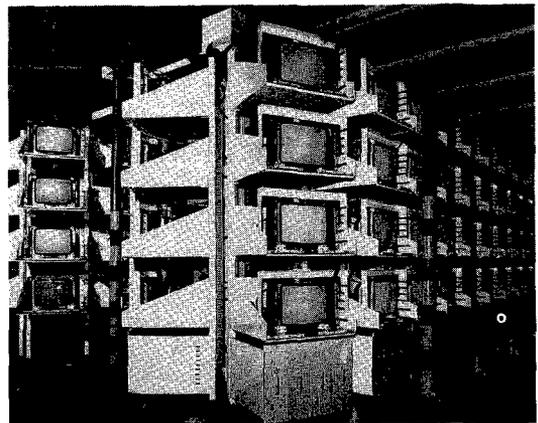


写真1 生産ラインの1例  
(上段から製品が落下した)

2個、外部地表面に1個、計3個のデジタル表示形加速度計(明石製・サーボ型;D A S-400)を設置していた。12月17日当日、これらの計器は完全に作動しており、前者については409Galと398Gal、後者は250Galを示していた。この値は、茂原市で報告されている家屋の被害状況、住民の体感などからはほぼ妥当な値と推定される。

#### 4. 化学工場の地震被害

##### 4-1. 工場の概要

この工場は1956年に建設され、茂原地域で生産される天然ガスなどを燃料および化学成品の基幹原料として使用し、これをもとに各種工業薬品、肥料、医薬品、塗料樹脂、超高機能性樹脂などの化成品分野の製品を生産してきたが、さらにより高度な機能の実現を目指し、電子材料分野にも取り組んでいる全国屈指の総合化学工場であり、その敷地は約50haにも及んでいる。

##### 4-2. 工場の被害概要について

この工場の敷地は、内陸部の沖積平野で震央から北西約30kmという近距離に位置するため、プラント内に設置した落球式の地震計が地表で250Gal以上を記録する震動をうけた。このため構内変電所の遮断器倒壊による全プラントの操業一時停止をはじめとして、総額3億円を超える被害を被った。表2にプラント内諸設備の破損概況を示す。

操業停止の直接原因となった変電所遮断器は、年一回行われるメンテナンス時の放電作業の際に生ずる破裂音の、近隣住居地域への影響を除去する目的で消音器を設置したために、その構造が極端なトップヘビー構造となっており、そのために倒壊したものと推定される。

工場被害のうちプラントへの影響が最も大きかったのは、前述した変電所遮断器の倒壊であったが、建屋・基礎等の土木建築関係の施設にも被害がおよんだ。土木建築関係施設被害例の主要なものは、建屋亀裂・剝離、床コンクリート亀裂・剝離、架台ブレース座屈、ラックブレース切断、柱脚・架台・ラック基礎部分破壊等である。報告されたこれらの被害件数は150件を超えているが、その内訳は図3のようになり架台・ラック等の基礎および建屋に被害の集中したことがわかる。このうち最も報告件数の多かった建屋の被害例は、壁のモルタル亀裂、剝離、スレート落下、ガラス破損、屋上亀裂、柱脚の移動などである。図4に建屋被害の内訳を示す。その他塔槽類のリブ切断などのように経年変化、腐食等のために傷んでいたものが、地震を引き金として破損したと推定される被害も多かった。しかし、工場の根幹をなす、化学反応塔槽類や配管、貯槽などの主要なものには、ほとんど大きな損傷はなく、そのために生産工程が停止する必要性は生じなかった。

表2 プラント内設備破損概況

設備名	破損箇所	代表的被害モード
塔槽類	金属性塔槽	フランジ補強用リブ切断
	F R P 製塔槽	アンカーボルト引き抜き ラグプレート切損
配管	プラスチック製配管	塩化ビニール製配管等破損
電気設備	構内変電所設備	遮断器倒壊
土木建築設備	構内建屋・架台等	壁落ち 基礎破損 ブレース破損

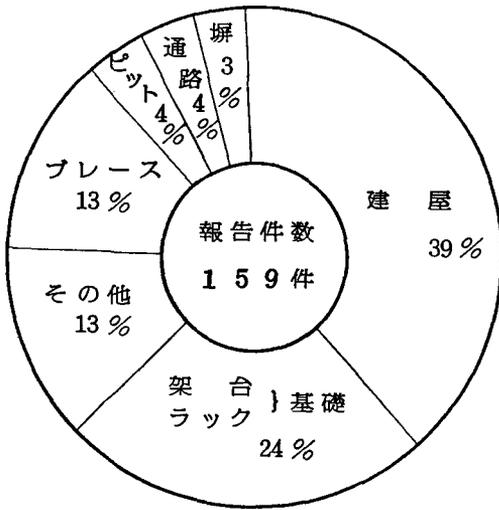


図3 土木建築関係施設被害の内訳

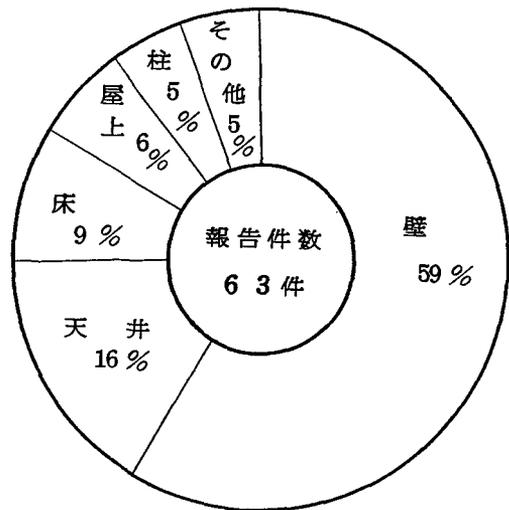


図4 建屋被害の内訳

#### 4-3. 地震に対する予備的措置

この工場では、事務所北側地表面に落球式地震警報器（明石製，ADA-2）が設置されており、ページング放送に連動していた。警報器には正常に作動して、5段階表示の最高値である250Gal以上を示していたが、ページング放送は4段階目の150Galまでが自動にセットされており、震度が最高の5段階だったので自動的には作動せず、手動操作によって約10分後に放送を行った。

### 5. 生産施設・機器の被害の特徴

本章では、二つの工場施設及び機器、装置類などの生産被害について具体的にみることにする。

#### 5-1. 電子管工場の場合

##### 〔1〕建屋及び周辺

(1) 本館1階の鉄筋柱は写真2をみて明らかのように、典型的な“X型”の剪断破壊が生じた。幸いにして、破損した柱はただ1箇所のみであり、本館建屋自体の破損には至らなかったため、該当部をジャッキで持ち上げ改修した。単一の柱に破損が集中した理由としては、この柱に何らかの構造的弱点があったことと、特にこの柱近傍の地盤が軟弱であって増幅率が高かったことが推定される。

(2) 上記の箇所だけに限らず、本館周辺の地盤



写真2 本館1階鉄筋柱  
“X型”剪断破壊

が全体的に軟弱であり、液状化現象も二、三箇所のみみられた。数メートルにわたる電柱の地中陥没や不同沈下のため、工水タンクと接続配管をつな



写真3 工水タンク配管バルブの  
破損による水洩れ

ぐバルブ破損による水洩れ（写真3）などの被害が生じた箇所もあった。

(3) 先に述べたように工場の建屋は、1945年以降設備に拡張に次ぐ拡張をしているため、外見上一つの建屋になっていても、実際には接続構造になっているものが多く、ほとんど例外なしに、その接続箇所に“亀裂”ないしは“段差”ができていた。従って、当該部分の壁面塗布材が相当剝離を起し、壁面付属物の落下などにも多かった。

(4) 建屋のガラス窓の被害は多くはなかったが、パテにより窓枠に固定した箇所には、ほとんど例害なく被害（割れ）が生じた。

#### 〔2〕機械装置の被害

(1) アルミ蒸着を行うアルミナイザは、電子管蛍光面の背面をアルミ蒸着して、光度を増加させる機能をもつ装置だが、個々の装置がカート型構造になって、逆V型のレール上を滑動するようになっている。これらのうち3機が脱線して、蒸着プロセスが停止した（写真4）。

同様な装置として、電子管内部を真空にする機



写真4 アルミナイザー・カートの脱線

能をもつ排気カートの脱線転倒もいくつかみられた。建屋内に設置されたこのようなカート型機器に対する耐震設計は、原子力プラント用やクレーンを除くとほとんど手をつけられていないのが現状であり、今後の検討が必要と見られる。

(2) 工程の最終プロセスに近いラインに設置された、完成品をエージングし、材料からのガス抜きをする“ヒートラン装置”の振動のため、装置の上段、すなわち、4段中の上側2段からパレットが落下し、必然的に製品としての電子管も多数落下破損し、プロセスが完全にストップした。

(4) 電子管表面に蛍光体、黒鉛などを塗布する機械装置については本体への損傷は少なかったが、制御盤のズレなど周辺機器の損傷が若干あった。

(5) 写真5のように、建屋内の小型プレス機など、ややトップヘビー構造の機械が転倒した。

#### 〔3〕電子管製品の被害

地震発生当時、生産工程ライン上にあった各種電子管は、約13,000個であったがそのうち約30%の数千個が破損ないし不良品となった。電子管自体の主な破損被害に関連する事項について整理すると以下のようなになる。

(1) スタビライザとは、ガラスとシャドウマスクの間にある熱ひずみを除くための熱処理装置で

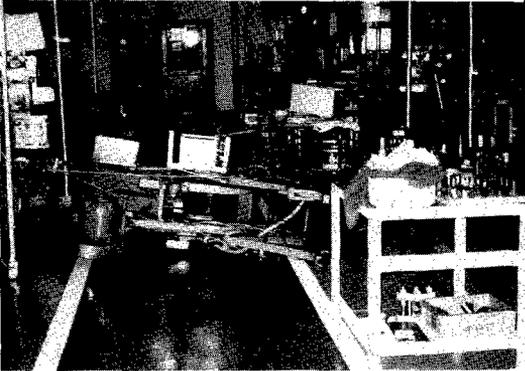


写真5 プレス機転倒

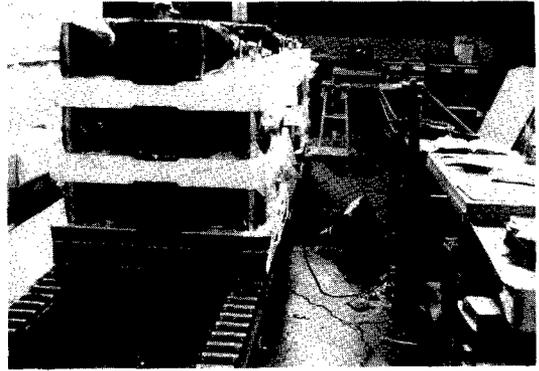


写真7 荷積みプロセスにおける製品落下



写真6 コンベヤ・ハンガーからの電子管落下

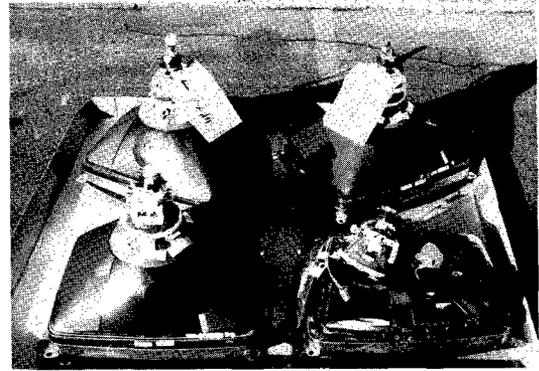


写真8 破損した電子管

あって、通常400℃以上の高温に保たれている。その中で熱処理工程中にあった若干の電子管製品が地震により落下して破損した。これによってスタビライザの制御機構が停止したため、その工程中の全製品が不良品となってしまった。

(2) 工程中の電子管製品を搬送するコンベヤが無数にあり、それら自体の破損落下はほとんどなかったが、コンベヤからの電子管の落下は相当数

みられた(写真6)。しかし、コンベヤ自体の支柱構造の破損が若干生じた。

(3) 最終段階での、完成品の荷積みプロセスでの製品の落下損傷もみられた(写真7)。電子管は周知のように、コネクター部など非常に繊細な要素をもつ構造をしており、従って一見、構造上の損傷がみられなくても、電子管としての機能に欠陥が生じ、製品としては不具合になってしまう(写真8)。

〔4〕その他の被害

以上に述べた以外に、このプラントにみられた被害例を列記してみる。

- (1) 塗布機黒鉛備蓄用予備タンクの転倒。
- (2) ジェネレータ、ITC電源その他各種計器など電機装置の落下。
- (3) 室内のダクト及びダクトフランジの落下多数、ダクトフランジやエルボ部が外れた例もあっ

た。

- (4) 各種装置の転倒, 扉開放
- (i) 図面類保管トレイ転倒,
- (ii) 積上げダンボールの転倒,
- (iii) 電子計算機室のCPU (処理装置) の裏パネルの開放,
- (iv) シリカコート内など, バルブ, 配管バルブの外れなど。

5-2. 化学工場内施設被害の具体例

4章で述べたように, 本工場においては変電機器の倒壊被害が最も顕著であったので, これを中心に紹介し, その他については簡単な記述に止める。

(1) 変電機器

構内変電所機器のうち遮断器5基が被害をうけた。遮断器は図5に示すように基礎の上に架台を組み, その上に圧縮空気タンクを置き, 支持碍子を介して遮断部が据付けられ, 一对の遮断部が機器間リード線で結ばれて1基の遮断器を構成している。遮断部には前述のように環境保全のための消音器が設置されているが, この消音器のために遮断部一对の重量は約400kgにもなり, 典型的なトップヘビーの不安定な構造を余儀無くされている。

遮断器の被害モードは図6に示すように傾斜, 宙吊り, 落下である。第一グループのR相遮断器は, 西側へ約10°傾斜したものの架線に支えられて支持碍子の台座取り付け部分は破断しなかった。

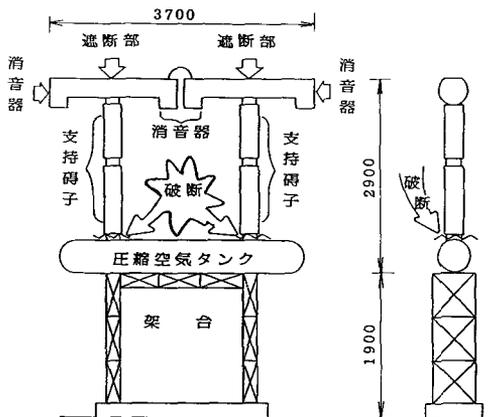


図5 空気遮断器外形略図

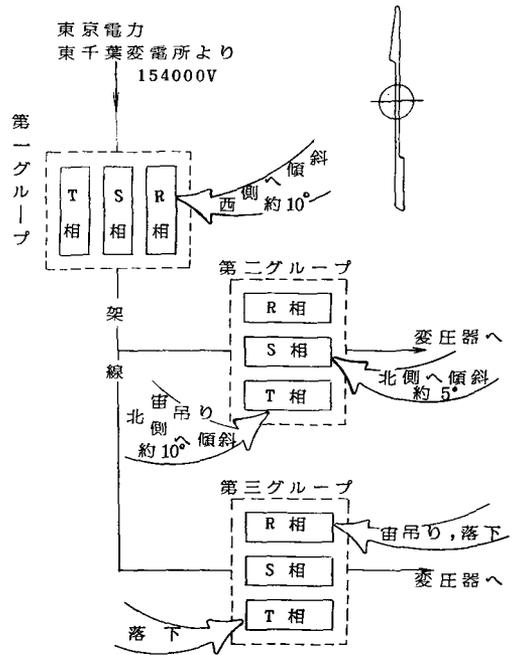


図6 構内変電所遮断器被害モード

第二グループではS相遮断器とT相遮断器が被害を受けた。S相遮断器は北側へ約5°の傾斜をしたが, 第一グループR相遮断器と同様に架線に支えられて支持碍子の取り付け部分は破断しなかった。T相遮断器は西側半分が北側へ約5°傾き, 東側半分は支持碍子取り付け台座からはずれて架線に支えられ, 北側へ約10°傾斜した状態で宙吊りとなった (写真9)。

第三グループの被害が最も大きく, R相遮断器とT相遮断器の支持碍子が台座付近で破壊し, 遮断部が落下大破した。R相遮断器は西側半分が消音器を下側にして架線より宙吊りとなり, 東側半分は支持する架線が切断されたために落下して大破した (写真10)。T相遮断器は一对の遮断部が支持碍子の台座付近で破断し, 架線も切断されたために落下し大破した。

いずれの遮断器においても基礎, 架台には被害がなく, 圧縮空気タンク上部の支持碍子台座付近で破断が起り, 架線に支えられた場合には傾斜したのみであったが, 架線が切断された場合には落下している。

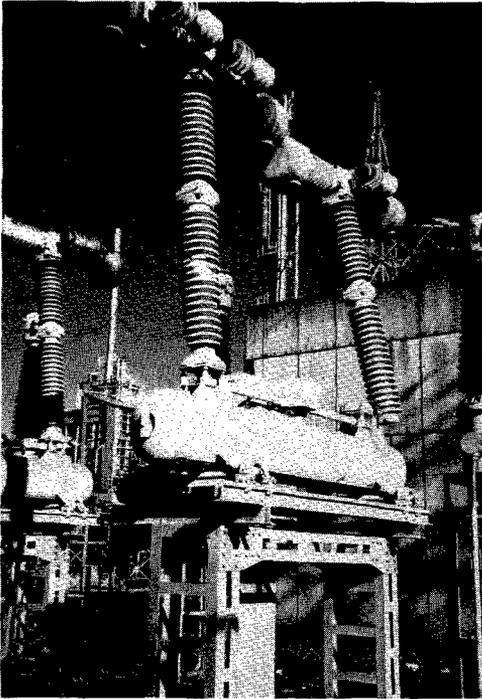


写真9 遮断器の破損例1  
左側：傾斜，右側：宙吊り

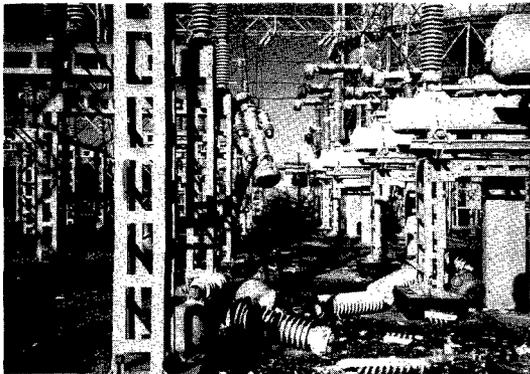


写真10 遮断器の破損例2  
宙吊りと落下大破

これらの事故の原因としては (i) 極端なトップヘビーの構造物が架線及び機器間リード線で複雑に連絡されているために、連成効果による特異な破壊モードが生じた。(ii) ダイナミックダンパ的な効果により上部構造としての遮断部の応答が、非常に増幅されたために破壊に到った。などの解釈ができるが、これらについては応答解析、加振

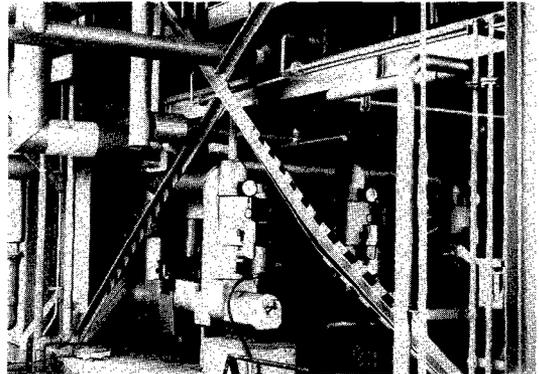


写真11 架台ブレースの座屈

実験などにより、今後解明されるべき課題となろう。なお、この工場では地震後遮断器の形式をガス式遮断器に変更している。

この構内変電所遮断器の破損状態は1978年宮城県沖地震において発生した変電所遮断器等碍子系機器の被災状態に酷似していた。

#### (2) 化学反応装置並び支持構造物

一般に、化学工場内の各種化学反応装置を塔載する支持構造物の架台は反応塔、蒸留塔などが大型重量機器であるため、強固な構造が要求され、補強用としてブレースが使用される場合が多い。このような鉄骨造支持構造物の補強用として用いられていたL型鋼のブレースが地震の横ゆれの影響で座屈したり、引張りによる曲げ変形を受けた(写真11)。しかし、ブレースが変形したことは、地震荷重のエネルギー吸収を意味しており、支持構造自体及び支持機器類には大きな被害はなかった。また、ブレースが接続している柱脚取付部のアンカーボルト及びその根巻きコンクリートにも被害が生じた。

支柱の被害は鉄骨造り支持構造物等のH型鋼を用いたピン柱脚部に多く認められた。被害モードは柱脚部コンクリート剥離、圧壊、アンカーボルト切断等である。写真12は柱脚部コンクリートの圧壊の例であるが、ベースプレート直下のコンクリート層強度が不十分で、柱の移動に伴うアンカーボルトの動きを拘束できずに生じたものと推定される。

次に、塔槽類自体の被害は縦型塔槽に集中し、

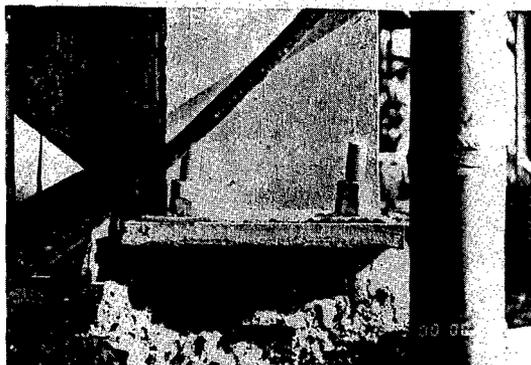


写真12 柱脚部コンクリート圧壊



写真13 鋼製塔セットボルト破損

横置き型のものには被害があらわれていない。一般的には金属製には被害は少なく、FRP製塔槽のサポートラグ、セットボルト等底部の被害が顕著である(写真13)。これは台座とタンク底面の間のすべり、ロッキング、衝突等の現象が単独または組み合わせで発生したためと推定される。また、本工場内の大小口径のプラスチック製配管にも、多くの破断などの損傷が生じた。

### (3) 建屋

プラント全体で建屋の壁に関する被害も非常に多かった。その被害モードは壁面の亀裂、剝離、脱落等である。窓ガラス破損、ドア故障、シャッター破損等壁面付属物の被害例がみられた。写真14に工場外壁のスレート脱落の例を示す。



写真14 工場外壁スレート脱落

## 6. 被災後の対応と今後の課題

今回の地震被害をもとに、各生産企業がどのような教訓を得て、具体的に防災計画にどのように反映させつつあるかは非常に興味深い。その教訓と対策の効果などについては現在研究中の段階の問題でもあるので、ここでは特徴的な点だけを紹介する。

まず、地震観測システムの強化である。化学工場の例では、従来の落球式5段検知装置に加えて、サーボ型デジタル警報加速度計(水平2成分、震度2~7)と倒立振子式緊急遮断用地震感知器(水平2方向、150Gal固定制御用)を新設し、地震計に連動させたページング放送の内容を表3のように充実させた。電子管工場も、観測システムの向上を計画中である。

建物や施設に対する「ハード的」対応としては、電子管工場においては、すでに述べたように建屋構造、壁面、地盤など可及的速やかな復旧工事が要請される箇所が多かったため、改修工事は臨時

表3 ページング放送の1例

震度	Cal	放送内容
4	25	各工場設備等の点検指示
4	50	〃
5	80	〃
5	150	各工場緊急停止（除く動力プラント）
6	250	〃（動力プラント停止）



写真15 FRPタンクアンカーラグ破断

写真16 写真15のFRPタンク修理後の状態  
手前が破断したアンカーラグ  
後方が新しいアンカーラグ

的なものを含めて極めて迅速に進められ、生産工程自体はほぼ1日で正常化したということである。（実際に停止したのは数時間。）

化学工場においては、アンカー部が破損したFRPタンク（写真15）に対して、破断したアンカーラグの近辺に新しいラグを設置した例（写真16）、FRPタンクをステンレス製タンクと交換した例などがあつた。破損したプラスチック製配管は、塩化ビニル製が大部分なので、これをより強固なポリプロピレン製配管及びFRPで強化したプラスチック製配管に交換するなどの対策がなされた。

ここで述べたような、ソフト及びハード両面からの防災計画の見直し・補強は、同種企業を含む広範な企業にとって重要な示唆を与えられ考えられる。

ところで生産企業を始めとする企業組織が講じるべき防災計画は大別して、「耐震信頼性向上計画」と「災害時防災事業計画」とに分けられ、それぞれの中にいくつかの具体的課題がある。すなわち、

(1) 耐震信頼性向上計画

- (a) 災害縮減計画
- (b) 施設復旧・施設冗長構成計画
- (c) 物資等備蓄計画
- (d) 防災教育・訓練計画
- (e) 管理・監視機能向上計画
- (f) 通信設備充実計画
- (g) 災害保険加入計画 など

(2) 災害時防災事業計画

- (a) 災害対策組織運用計画
- (b) 緊急時動員計画
- (c) 重要施設確保計画
- (d) 緊急通信・緊急輸送計画
- (e) 代替生産計画
- (f) データ及びデータ処理復旧計画 など

である。

こうした諸計画の最適な総合化をめざした防災戦略について、産官学一体となった調査研究体制が今後望まれているといえよう。

## 7. おわりに

本年(1988年)8月に20年ぶりで東京で行われた第9回世界地震工学会議において、米国カリフォルニア州立大のグナ・セルバデュレイ教授は、日本とカリフォルニア州の企業、それぞれ百数十社を調査し、日本に比べ米国の企業の地震対策の貧困さを嘆いたことが新聞で大きく報道された。防災計画にかかる予算規模、防災計画の緻密さなど、個々の対策での日本の充実ぶりは確かに評価されてよい。しかし、わが国の企業の立地条件の悪さ、2次的、3次的被害の波及の予測などを考えると、単純な比較は難しい面も多い。幸いにして、今回の地震では大きな被害はなかったが、各企業体が被害の度合いにかかわらず、具体的被災データを可能な限り公表して下さることを切望す

る次第である。

その意味でも、今回の著者らの調査に協力された企業の関連の方々に、厚くお礼申し上げる次第である。

## 文 献 一 覧

- 日本機械学会編  
1985 「耐震設計と構造動力学」日本工業出版
- 日本建築学会編  
1980 「1978年宮城県沖地震災害調査報告」  
前田四郎編  
1987 「千葉県地学のガイド」コロナ社
- 震災予防協会  
1987～1988 「地学工学振興会ニュース：特集 企業の地震対策 その1～その9」

## Key Words (キー・ワード)

Earthquake damage (地震被害), Industrial companies (生産企業), Chemical engineering facilities (化学工学設備), Electronic device industries (電子装置産業), Mechanical equipment (機械装置), Piping system (配管系), Electric machinery (電気機械), Circuit breaker (電流遮断器), Earthquake disaster prevention program (地震防災計画)