

産業施設の地震被害と耐震技術

—兵庫県南部地震の教訓から—

1. はじめに
2. 耐震構造の変遷
3. 産業施設の構造物被害の特徴
4. 災害リカバリ設備の被害と免震の効果
5. むすび —今後の課題—

鈴木浩平*

要 約

1995年1月17日に生じた兵庫県南部地震は、建築物や橋梁、鉄道など土木構造物に甚大な被害をもたらしたが、神戸港の周辺にある産業施設、機械構造物も多数損傷した。生産活動、エネルギー供給に直結する産業施設の地震対策は、石油タンク、高圧ガス施設、電力機器、クレーンなど主要な設備に対しては個別になされていたが、例えば神戸製鋼所などの大規模工場が壊滅的な被害を受けることは、従来の予想をはるかに上回るものであった。

筆者は、地震後に主として産業施設の被害調査に関わってきたが、本稿ではその中から得られた構造物の被害の特徴について概観する。また、今後の機械構造物の耐震設計や耐震技術のあり方について展望してみたい。

1. はじめに

「20年ほど前に、故河角廣先生（元東京大学地震研究所所長）が唱えられた“関東大震災69年周期説”が多くのマスコミを賑わしたことを記憶している人も多いと思う。先生の死後、いろいろな経緯から、この説はあまり議論されなくなったが、“1923+69=1992”であり、プレートテクトニクスの教えるところによれば、いつ首都圏をはじめ日本の中央部のどこに巨大な地震が起こっても不思議ではない状況にある。」

これはちょうど6年前の1990年12月に開催され

た日本機械学会の講習会「機械技術者のためのやさしい耐震設計」の中で著者が担当した稿の冒頭部の引用である。この6年間、特に最近の2～3年、日本は大きな地震被害を被った。特に1994年10月の北海道東方沖地震と、記憶に新しい1995年1月の兵庫県南部地震は、釧路および神戸という都市を襲い、多くの施設や構造物に甚大な被害を与えた。表1は1923年の関東大震災以降の日本における代表的な地震とその被害を、特に都市や産業施設を対象にしてまとめている。

本稿では、生産施設構造物、機械系構造物の地震被害を、特に今回の兵庫県南部地震の被害に焦点をあてて、われわれが今後何をなすべきかにつ

表1 わが国の都市・産業施設に被害をもたらした地震

地震名	発生日月	マグニチュード	地域	備考
関東大地震	1923. 9. 1	7. 8	関東南部	都市
東南海大地震	1944. 12. 7	8. 0	愛知県西部	都市, 工場発電所施設
南海道大地震	1946. 12. 21	8. 1	四国・中国・紀伊	都市
福井地震	1948. 6. 23	7. 3	福井市周辺	都市
日向灘地震	1961. 2. 27	7. 0	宮城県西部	工場施設
新潟地震	1964. 6. 16	7. 5	新潟県	都市, 貯油施設, 工場施設
十勝沖地震	1968. 5. 16	7. 9	北海道南部・青森県	工場施設, 製鉄所
宮城県沖地震	1978. 6. 12	7. 4	宮城県	都市, 工場施設
日本海沖地震	1983. 5. 26	7. 7	秋田県・青森県	工場施設
千葉県東方沖地震	1987. 12. 17	6. 7	千葉県・関東南部	
北海道東方沖地震	1994. 10. 4	8. 1	北海道・東北の太平洋沿岸	港湾施設, 道路
兵庫県南部地震	1995. 1. 17	7. 8	兵庫県・大阪府 京都府・関西全域	都市, 工場施設, 製鉄所, 貯油施設, 港湾, 道路, 鉄道

いて考察してみたい。

2. 耐震構造の変遷

地震そのものの発生頻度が厳密な定式化が可能か否かは別としても、ある確率法則に従う事象であるとする、地震被害の構造や形態には必然的にその時代時代の生活体系や産業構造が反映しているはずであり、その意味からも、表1の被害事例も1960年代の日本の技術立国化のプロセスが厳密に関連していることはいうを待たない。具体的には、例えば工場施設の被害も重厚長大型の装置から、軽薄短小型の装置（システム）に移って来ていることなどが指摘される。

図1は、主として機械工学的立場からみた耐震工学、耐震化技術の発展経緯をまとめたものである。産業施設の耐震設計についての研究は、土木や建築構造に対するものと異なり、その歴史は浅く、1960年代以降に本格的な発展をみたといつてよい。高度経済成長期に発生した、新潟地震（1964）および十勝沖地震（1968）の産業施設の被害体験が、その後の産業施設の耐震設計技術の発展の大きな契機となった。特に、大型石油タンクなどの貯槽類や配管系の耐震研究は、精力的に産・官・学の連携のもとで進められていた。1970年代になると、産業施設やライフライン系の施設に大きな被害を出したサンフェルナンド地震

（1971）の教訓をも踏まえて、産業業種別に、耐震設計や地震防災に関する技術的規制、基準、指針が制定されて行った。具体的には、石油パイプライン、危険物・高圧ガス施設、火力発電プラントなどが対象となった。また、原子力発電施設については、1970年の本格稼働・施設開業以降、重要度分類という新しい設計思想を軸に国家的規模で耐震化技術が進められ、巨大地震の経験のない状況のもとで、例えば1982年四国の多度津に設置された、積載最大重量1,000トンの大型振動台によって耐震強度を測定するという方法で、重要施設の耐震性を実証している。

一方、1981年に建築物の耐震設計に対して弾塑性変形時に伴う保有耐力の概念を導入した「新耐震設計法」が施行されたこと、さらにアメリカにおいて原子力プラントの配管サポートなどにエネルギー吸収効果を期待する新しいダンパが開発されたことなどの影響もあり、1980年以降の機械構造物の耐震技術にも大きな変化があらわれてきた。

免震床によるコンピュータ機器などの支持技術、塔状構造物への能動・準能動制振法の適用、粘弾性材、制振材などを導入した新しいダンパの開発などが精力的になされてきた。さらに今回の神戸地区における多くの生産施設の被害経験から、今後は耐震設計が経済性を考慮した生産活動の軸の中でとらえられる必要性が増してきたといえよう。

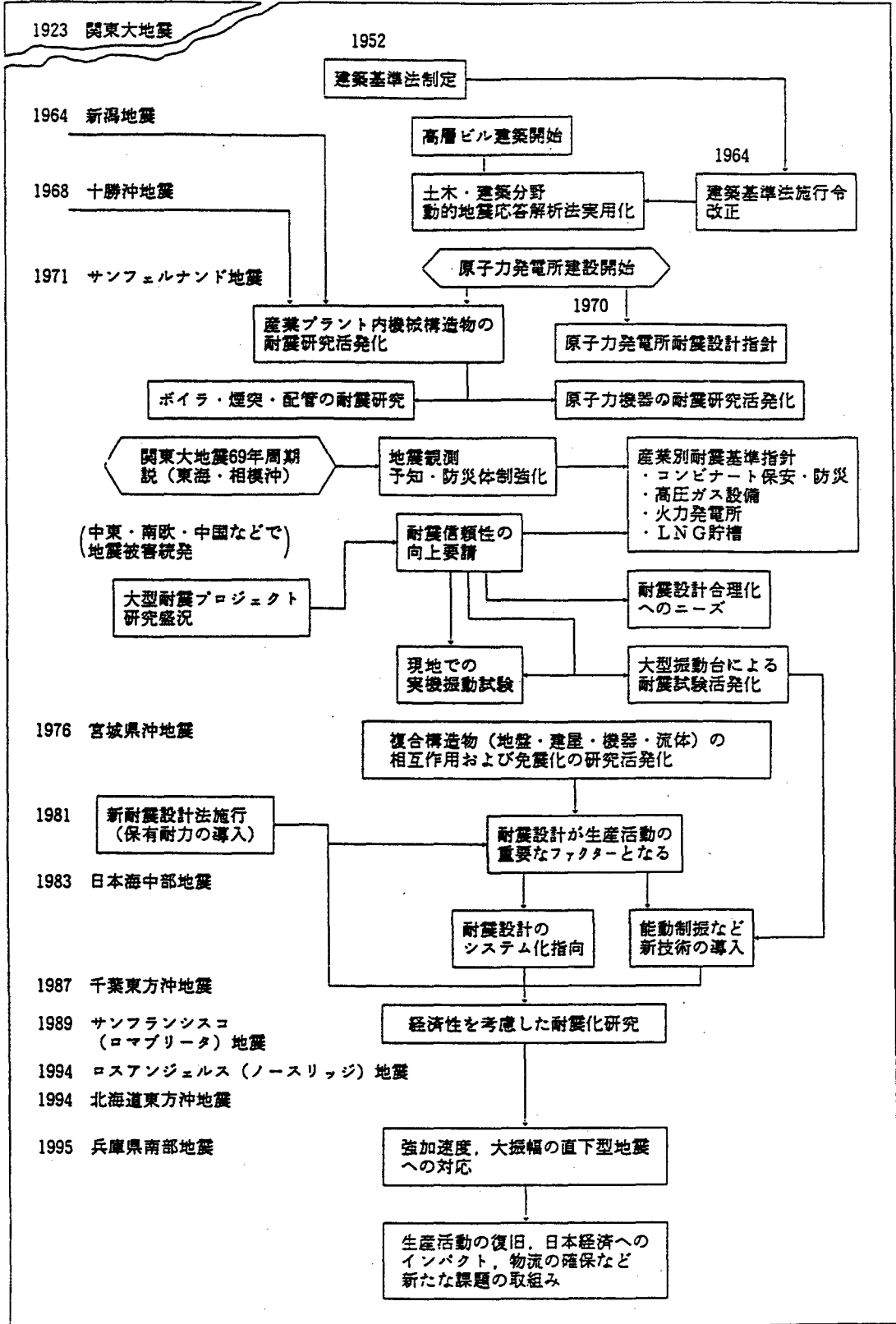


図1 機械工学的視点からの耐震技術の流れ

3. 産業施設の構造物被害の特徴

1995年1月の兵庫県南部地震は土木、建築構造物をはじめ、多くの施設に多大な破壊・損傷を与えたが、ここでは主として機械構造物の地震被害の特徴について、その代表的なものを紹介する。

3.1 クレーンの被害

クレーンには、港湾で荷揚げ荷下しを行うジブクレーンや、建設現場でのクライミングクレーン、工場内に設置されている天井クレーンなど各種あるが、各地で大きな被害が生じた。写真1はポートアイランドにおける橋型アンローダの被害である。液状化および側方流動により岸壁のケーソンが移動し、この例ではレール側が約1.5m相対的に開いたため、アンローダの車輪が脱線した。このほかに、橋脚部のブレース等に塑性変形を受けたものもあった。加古川市の重工プラントでは、側方流動が10数mも生じ、岸壁そのものが陥没したため、操業中のアンローダが大変形により倒壊し、2名の操作員がクレーンと船の間にはさまれ死亡する事故が起こった。

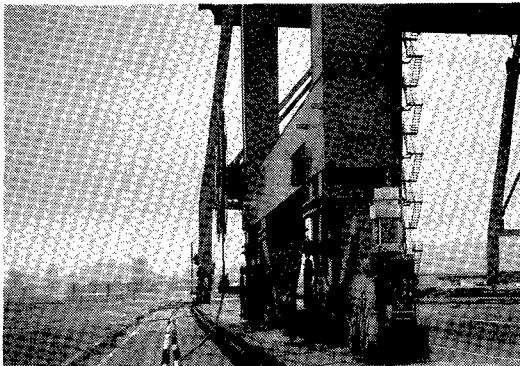


写真1 液状化による橋型アンローダの脱線

写真2は、多くの損傷がみられた塔形ジブクレーンの被害例である。この例は、造船所に設置されたもので上部の旋回フレームが倒壊したものである。これは、構造物がトップヘヴィであるため大振幅の共振振動により破壊したと考えられる。倒壊までに至らなくてもジブ自体の破損したものの、センターポストや斜材に亀裂や座屈が発生し

たものもあった。天井クレーンの被害は、各事業所の工場内に設置されているためその被害状況の詳細については明らかにされていないところも多いが、総じてクレーン単独としての損傷は少なかったようである。しかし、設置されている建屋が地震により損傷、変形したためにクレーンガーダが落下した例があった。また、ランウェイガーダの変形損傷もみられ、海側に近い工場のクレーンほど顕著であった。建設中の現場に設置されているクライミング式の多段ジブクレーンについても、マストの損壊落下、ジブの変形などがみられた。



写真2 塔形ジブクレーンの落壊

3.2 高圧ガス施設、石油タンク、配管等の被害

今回の地震により、神戸市内及び近郊の石油コンビナート施設も甚大な被害を受けた。特に、海岸部にある屋外タンク等は液状化により地盤不等沈下が生じ傾斜するなどした。神戸市消防局の調査によると、容量50Kl~10,000Klの屋外タンク415基のうち107基が傾斜し、最も傾きが大きいものでは許容基準値（容量10,000Kl以上では0.6度、それ以上では1.2度）の約10倍の11度（5,000Klタンク）傾斜したものがあつた。激震地から離れた全国第4の堺泉北臨海コンビナート地区でも約1,000基の石油タンクのうち16基が傾き、傾斜の大きい7基については油漏れの危険がありとして、石油類の抜き取り、点検が行われた。

一方、高圧ガス施設では、神戸市東灘区の事業所にあるLPガス貯蔵タンク（冷凍タンク、容量20,000Kl）からのガス漏れ事故が生じた。この事

故については、1月18日早朝に付近の住民に一時避難勧告が出されたため、マスコミでも大きく取上げられた。(勧告は22日に完全解除された。)この事故については著者も委員として加わった通産省の調査委員会が設置され、すでに中間(4月)、最終(6月)の報告書が公表されており、その全貌が明らかになっているが、その概要を記す。同事業所にある同規模の3基のLPGタンクのうち、漏洩が生じたタンクについては、深さ27mのベント杭によりタンク自体が支持されていたため液状化による大きな沈下は認められなかったが、タンクに接続している配管系を支えていた架台、緊急遮断弁の重量を支えていた架台などはこのタンク基礎部とは縁切りされ、液状化対策が施されていなかった。この結果、タンクと接続配管に相対的に大きな変位が加わることとなり、両者を結合していたノズルとフランジの結合部からガスの漏洩が生じてしまった。図2は、その概要を示す。この事故でも明らかなように、タンクあるいは配管自体の耐震強度は確保されていても、その接続部(いわゆる“取合い”部)に大きな損害が見られたというのが今回の各種構造物地震被害の大きな特徴である。

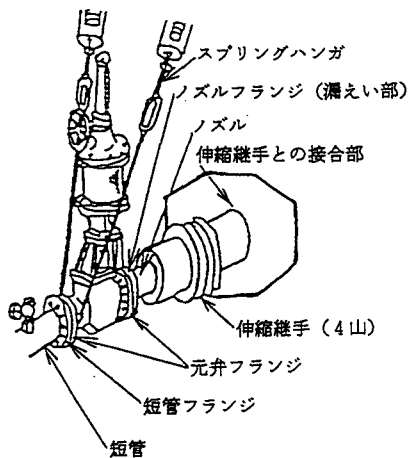


図2 LPガス漏えい部概略

配管系の被害については十分に調査している訳ではないが、プラント配管系に関する限り、配管自体が破断したり折損した事例はほとんどなかったと思われる。一般にプラント施設内の配管は相

当大きな可撓性を有していることが実証された。しかし、配管のサポートやフランジにはかなりの被害が生じている。配管系の最適なサポート配置計画及びサポートの強度(強すぎない方がよい)設計は今後の重要な課題となろう。

原子力発電所は、近いものでも100Km以上離れていたこともあり、何の被害もなかったが、尾崎にある火力発電所の諸設備には被害が生じた。写真3は、火力発電所における配管が支持構造建屋の床面との取り合い部における衝突により断熱材が破損した例である。また、写真4は、火力発電用ボイラと支持建屋を結合するサイズミックタイといわれる支持部材の変形を示す。この変形によって、振動エネルギーが吸収され、大きな破損を免れたという見方もでき、これらの例は、今後の機器・配管系と支持構造物の耐震設計のあり方に示唆を与えるといえよう。

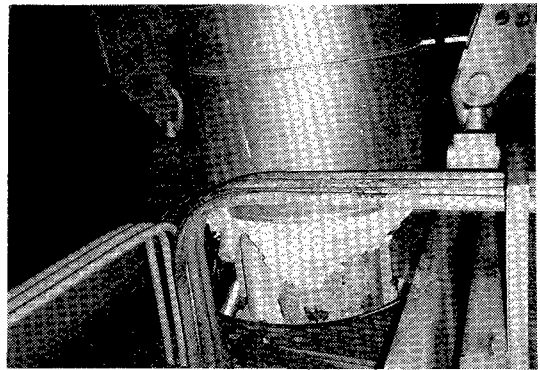


写真3 ボイラープラント配管系の破損

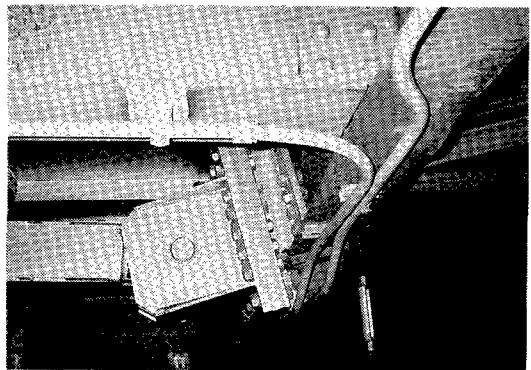


写真4 ボイラー支持装置の変形

3. 3 鉄道関連設備の被害

鉄道構造物のうち最も顕著な被害を受けた鉄筋コンクリート製のラーメン高架橋の倒壊等については、新聞、雑誌を含む多くの報告書で述べられているので省くが、鉄道橋の損壊により関連する設備も大打撃を受けた。

JR新幹線の高架橋が破壊し路面が変形・沈下した個所が多く、この結果レール側方に備えられている通信線を収めている側溝が引き裂かれてしまった。また、写真5は新幹線の架線を引張り支持する目的で設置されている滑車型のバランス及びヨークと呼ばれる吊り具の破断例である。あまり報じられてはいないが、新幹線をはじめとする鉄道のこのような架線支持・吊下装置関連の被害は非常に広範にみられ、今後の対策の必要性を感じる。

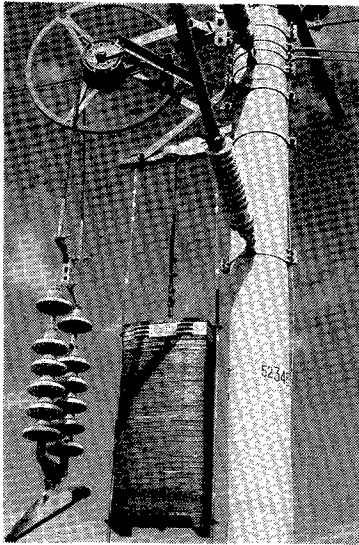


写真5 新幹線用架線吊具（ヨーク）の破断

3. 4 工作機械など

機械工場などにおける生産加工機械の被害について調べると、規模の大小にかかわらず、工作機械自体が損壊、破損した例は非常に少ない。大規模工場においては、付加価値の高い数値制御型のフライス盤などは一般に堅固な支持床面に固定支持されており、転倒はもとより床面に対する相対

変位も拘束されているものが多い。支持ボルト等の止め具も十分な強度を持っており、引きちぎられたケースは非常に少なかった。しかし、海岸に設置された多くの生産工場は液状化により工場建屋が傾斜したり、部分沈下したところがあり、その結果、工作機械類の精度が大幅に低下してしまい、床面を補修し精度修復をする迄、実際には使用不可能になった工作機械も多かった。

一方、小規模工場、例えば神戸市長田地区のケミカルシューズ製造等に関連する工場は企業センターなどのように同一ビル内に同居している場合が多く、必ずしも堅固な支持床を有していない。ビルそのものが倒壊・破損した例を除くと、狭い設置床面に多数の比較的小型の機械を固定せずに設置していた。従って、床面との取り合いで横すべりをしたり芯合わせのために挿入していた支持具が離脱してしまう被害はあったものの、逆に支持床との滑り、あるいは多数個の機械の移動干渉により多少の衝突はあっても工作機械の加工機能に影響を与える損傷レベルには達しなかったものが多かった。しかし、その中でも高重心のボール盤などの中には転倒し軸が変形してしまい、そのままでは再使用が不可能なものもあった。写真6は、小規模工場での工作機械の破損例を、また写真7は、長田地区のケミカルシューズ製造関連工場のうち、靴の型を作成するアルミ注入ロボットの破損を示す。高温のアルミ溶液が溢流しており、日中であれば惨事になる所であった。

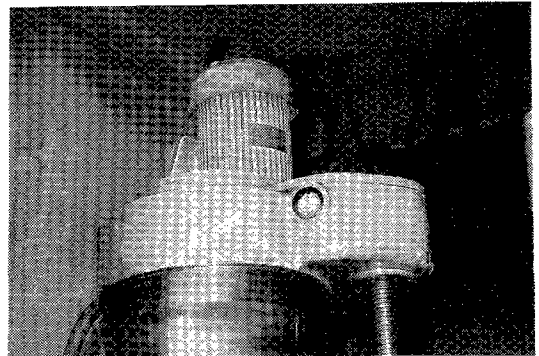


写真6 転倒したボール盤

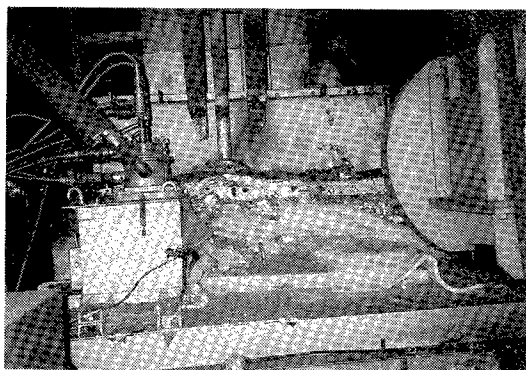


写真7 アルミ注入口ボットの破損

4. 災害リカバリ設備の被害と免震の効果

最後に災害時に機能を発揮すべきリカバリ設備の被害と効果について代表的例を挙げてみる。写真8は、先に述べたLPガスタンクの漏れ事故があった貯蔵ヤードの中央制御室の被害である。この制御室は建屋の2階にあったが地震時に多くの制御機器パネルが転倒して災害復旧などの緊急時対応が不可能になった（停電になったが非常用発電は機能した）。また、写真9は、漏れが生じたタンクからの接続配管のフランジを架台から吊っているスプリングハンガが、架構沈下のため逆に押しつぶされてしまったものである。このため、災害時に機能すべき緊急遮断弁も架構に引っかかった

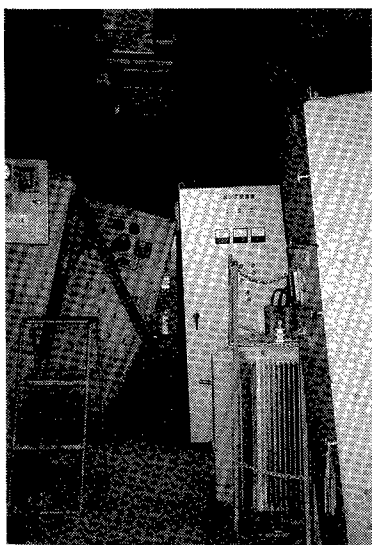


写真8 高圧ガス施設の制御室の被害

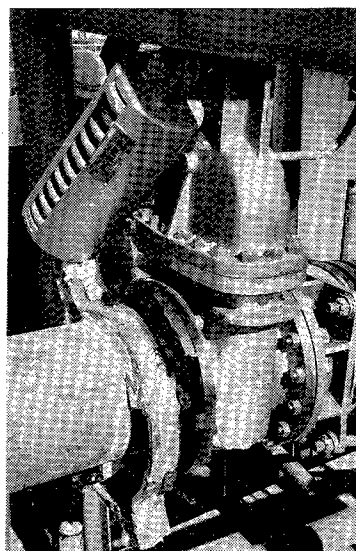


写真9 スプリングハンガの圧壊

形となり作動しなかった。

一方、今回の地震では多くの免震設備は顕著な効力を発揮した。免震建物の応答軽減効果についてはおそらく詳しい報告がされると思うが、著者の研究室も共同開発に加わった免震床装置の効果について述べる。この免震床は図3のようなボールベアリング支承構造のものであるが、ベアリングが凹型の受け皿上を滑動することによって水平面内の変位を軽減し、主としてコンピュータなどの免震効果を狙っている。大阪市の西本町にある11階造りのビル6階に設置されたCPUのために設けられたこの免震装置により、この床面の変位は十分軽減されCPU機能には何の支障もなかった。写真10は、ボールベアリングの滑動軌跡を示す最大変位は約10cm（北西—南東方向）であった。この受け皿の許容変位は23cmであり、十分免震機能が発揮されたといえよう。

産業施設は、生産系、非生産系の別を問わず、自主的な地震防災のシステムをもっている。機械設備の耐震設計、制御系などのいわゆる機能ラインの耐震化も、多くの場合、国や自治体からの規制を受けつつ、上記の防災システムの枠組の中で実行されていると考えられる。通常、地震に限らず産業施設はハードとしての防災システムとソフトとしての防災システムを保有している。

ハードとしての耐震防災設備については、適切

な“免震”技術と“制振（震？）”技術の開発・発展が挙げられよう。既存の構造物を地震災害から守ろうとするための、耐震性の診断と補強は従来から重視されてきた技術であったが、多くの場合、脆弱部を補強（剛性をあげる）することが目標であった。

免震技術は早くから注目され、建物への応用例は多いが、最近では能動制振（風や中小規模の地震対策）の発展の陰に隠れていた感があった。しかし、今回の地震で免震工法の効果は大変顕著であったとの報告が多い。機械構造物に対する受動制振の新たな展開が期待されているように思われる。

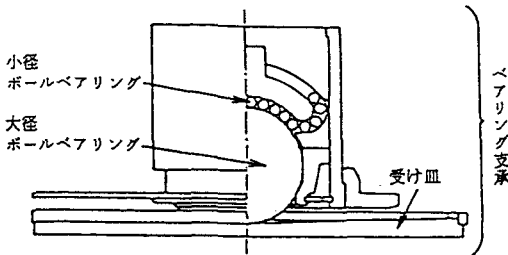


図3 ボールベアリング型免震装置

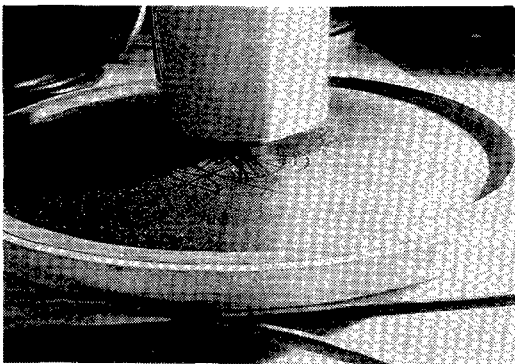


写真10 床免震装置の移動軌跡

5. むすび ー今後の課題ー

生産施設に関連する代表的構造物や設備の地震被害の特徴について概観し、個々の問題点を指摘した。実際にLPガスの漏洩がみられた高圧ガス施設や火力発電所、ガスタービン発電所などの被害の調査を通して、明らかになった特徴を著者な

りにまとめてみると以下のようなになる。

- (1) 液状化による支持構造物などの大変形が誘因となった被害が多かった。
- (2) 個々の構造物（例えばタンク、機器など）は相当に耐震強度をもっており、それ自体が破壊・損傷することは少なかった。
- (3) 被害が集中したのは、タンクと配管の結合部（弁、継手など）、ボイラと支持構造物の連結材、コンクリート支持基礎と機械を締結するアンカーボルトなど結合（ジョイント）部であった。
- (4) 構造物や設備が健全であっても、それらを運転制御する通信系や電力供給ラインが途絶してしまったものが多かった。

これらの教訓は、生産施設の今後の耐震技術のあり方に重要な示唆を与えているように思われる。詳細な検討はすでに各分野で進められ、例えば高圧ガス施設など一部は配管系の耐震基準の新設など具体的に設計に反映されつつある。

最後に、上にあげた被害の特徴を踏まえて、今後の産業施設の地震対策にとって重要視すべき課題を3点あげてみたい。

- (1) 本来頑丈に設計されていた筈の重量構造物や機械構造物が、“液状化” いういわば“柔軟な” 現象に弱かったことを重視し、設置地盤や基礎の耐震設計のあり方を再検討する。この際、地震入力を震度のみで評価し、それに対抗するための耐震強度を上げるという従来の“剛な” 考え方のみでは不十分であり、エネルギー吸収技術、免震・制振手法や最適手法などを使った“柔軟な” 考え方による設計法を導入するようにする。
- (2) 工場やプラントなどの広域な施設内での個々の重要設備や危険物貯蔵設備の適切配置、設備間の連結・結合ラインや、制御・通信システム・ラインのロバスト性（頑丈さ）を保障できるような視野の広い耐震技術を開発する。
- (3) 「耐震設計」という概念は本来新設の機械や設備の設計を対象としている。しかし、深刻な地震被害を受けるのは、多くの場合、

長年使われてきた既存の機械であり、設備である。“経年劣化”を適切に評価し、かつ、生産性や経営効率をも視野においた新しい耐震設計思想の確立が必要であろう。

都市防災工学や液状化問題に詳しい早稲田大学の濱田教授は、“本当の意味での神戸地震の教訓

の検討は、これから始められる”といわれている。各分野での被害報告、あるいはその裏にあるデータの中にまだまだ未解決の問題がありそうである。

関連研究者は、この問題で世の中が静かになりつつある今こそ手綱を引締めて頑張らなくてはならないと思える。

Key Words (キー・ワード)

Industrial Facilities (産業施設), Hyogo-ken Nanbu Earthquake (兵庫県南部地震), Cranes (クレーン), Liquid Tank (液体貯槽), Railway Facility (鉄道施設), Disaster Recovery System (災害リカバリ設備)

Earthquake Damages on Industrial Facilities and Anti-Earthquake Technology: From the Experiences of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

Kohei Suzuki*

*Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.61, 1996, pp.101-110

In this paper, investigation on the damages to the machineries, gas facilities and other mechanical structures caused by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake was carried out. First, the development of anti-earthquake technologies in the field of the industrial structures in Japan was briefly surveyed based on the historical experiences of earthquake damages and the progress of countermeasure technologies.

The structural damage mode has been correspondingly influenced by the progressive change of the industrial production system. For example, it must be noticed that joint or connecting devices and elements among the complex industrial facilities such as the chemical plants and the widespread production lines became easier to be suffered from the seismic damages than earlier.

Throughout the summary of the investigation, future problems to be taken up for the seismic countermeasure program for these structures were provided. Among these, the following issues have to be particularly investigated. (1) a "flexibilized" design technology by use of seismic isolations and energy absorbers, (2) optimum design and location program to the basic facilities, the dangerous objects and the widespread lines, and (3) anti-earthquake strategy to the existing structures which might be damaged by earthquakes expected to occur in the near future.