

鋼製タンク・プラント等の地震被害

関西大学 坂野昌弘*
神戸製鋼所 大谷 修**
川崎重工業 面谷幸男***
三菱重工業 熊谷洋司****
日立造船 下手英登*****

1995年1月の兵庫県南部地震によって鋼製のタンク・プラント等に生じた被害実態について、土木学会鋼構造委員会鋼構造震災調査特別小委員会タンク・プラント等ワーキンググループで行った調査結果の概要を報告する。

調査対象構造物は (1)LPガス貯蔵設備やガスホルダーなどの高圧ガスタンク (2)石油、アルコールなどの危険物貯蔵施設や工業用水、上水、消化用水などの水タンクを含めた石油タンク類 (3)火力発電所のボイラーや変電所の変圧器などの電力設備 (4)酒蔵や醸造設備、食品工場、配合肥料工場、ゴム工場、製鉄所、造船所、危険物製造所などの工場プラント (5)水槽や配管などの上下水道施設 (6)焼却炉やクレーン、高架タンク、排ガス洗浄設備などの廃棄物処理施設である。

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震によって鋼製のタンク・プラント等に生じた被害の実態について、土木学会鋼構造委員会鋼構造震災調査特別小委員会タンク・プラント等ワーキンググループで行った調査結果の概要を報告する。

調査対象構造物は (1)LPガス貯蔵設備やガスホルダーなどの高圧ガスタンク (2)石油、アルコールなどの危険物貯蔵施設や工業用水、上水、消化用水などの水タンクを含めた石油タンク類 (3)火力発電所のボイラーや変電所の変圧器などの電力設備 (4)酒蔵や醸造設備、食品工場、配合肥料工場、ゴム工場、製鉄所、造船所、危険物製造所などの工場プラント (5)水槽や配管などの上下水道施設 (6)焼却炉

やクレーン、高架タンク、排ガス洗浄設備などの廃棄物処理施設である。

2. タンク・プラント等の被害

(1) 高圧ガスタンクの被害

高圧ガスタンクには適用法規により、高圧ガス取締法適用のもの、ガス事業法適用のもの、電気事業法適用のものがある。兵庫県南部地震で強震を受けた地域に設置されていた大規模な高圧ガスタンクとしては、高圧ガス取締り法適用のLPガス貯蔵設備とガス事業法適用のガスホルダーがある。

a) LPガス貯蔵設備

兵庫県南部地震の発生に伴い、LPガス貯蔵設備のガス受入れ払出し共通の元弁フランジ継手部からLPガスが液状で漏洩した。その後の余震等により漏洩量が増加したことから1月18日には付近住民に対して避難勧告が出された。

高圧ガス保安協会の報告書¹⁾によれば、被災した貯蔵設備は昭和30年代に埋立造成された人工島にある二重殻平底円筒型貯槽とその配管系である。貯槽は昭和42年完成、基礎はベノト杭、高床式鉄筋コン

キーワード：鋼構造、タンク・プラント、震災

* 関西大学工学部, 06-368-0850

** 神戸製鋼所構造強度研究室, 078-922-5641

*** 川崎重工業貯槽配管技術部, 0794-35-8415

**** 三菱重工業鉄構技術部, 045-629-1386

***** 日立造船環境事業本部, 06-465-3124

クリートスラブで支持。受払配管系は昭和42年に完成、その後昭和52年にコンビナート等保安規則の制定に伴って緊急遮断弁が追加設置され、その支持架台が貯槽とは異なる基礎の上に設置。受払配管系はほぼ東に向かって取り付けられている。

LPガスの漏洩位置は貯槽の受払ノズルフランジと受払元弁フランジの継手部である。受払ノズルは一端は貯槽の外槽を貫通して内槽に溶接接合（外槽との間に伸縮継手）、他端のフランジは受払元弁フランジとボルト接合。受払元弁は貯槽外槽からスプリングハンガーで支持、短管を介して受払緊急遮断弁に接続。緊急遮断弁は貯槽本体の基礎とは別の基礎をもつ架台からスプリングハンガーで支持されている。受払緊急遮断弁の下流側には受払フレキシブル配管（可撓継手）が下り勾配で取り付け、以降の配管の管軸直角方向の変位を吸収する構造となっている（管軸方向変位はタイロッドにより拘束）。

貯槽の基礎は地表面からの目視ではスラブ、柱および地中梁に損傷なし。高床部は不同沈下率0.21%で北側に傾斜。貯槽の外槽には異常な変形はなし。受払ノズルの伸縮継手取付け部および隣接のドレンノズル伸縮継手取付け部の間に塗装の剥離。受払緊急遮断弁の架台は付近の地盤の液状化に伴い鉛直75cm、水平（南護岸方向）60cm移動。受払元弁のフランジ部では鉛直45mm、水平（南側）10mmの変位があったが、フランジのガスケット座、ガスケット等には割れ、傷等のLPガス漏洩に結びつく損傷は認められない。LPガス漏洩箇所は受払ノズルフランジと受払元弁フランジとの継手部で上部から角度30°周長30cmの位置であった。

LPガス漏洩の原因は、受払配管系の支持地盤が液状化によって支持機能を失い、受払配管系の重量が貯槽側に固定された受払ノズルとの継手部に集中した結果、受払ノズルフランジと受払元弁フランジが開口したためと推定されている。このような推論は、受払配管系を片持ち梁としてモデル化し、発生変位から配管系の各部に作用する荷重を求めるシミュレーションの結果からも裏付けられている。

b) ガスホルダー

震度7と判断された神戸市内にはLNガスホルダーが設置されていたが、いずれの設備にも被害がなかった。球形タンクの耐震設計、地上ガスホルダー

と地下ガス管の接続部耐震設計がうまくなされていたとの報告²⁾がある。

(2) 石油タンク類

石油タンク類としては、消防法の適用を受ける危険物施設と工業用水や上水等の水タンクがある。

a) 石油タンク

危険物施設、特に屋外タンク貯蔵所に関しては、社会的な影響を及ぼす重大な被害は発生しなかったものの、一部施設においてタンクの傾斜や漏洩等の被害が発生した。消防庁では屋外タンク貯蔵所の被害の実態を把握し、今後のタンクの耐震性・安全性に係わる検討資料を得ることを目的に、神戸市内の6事業所の屋外タンク貯蔵所について現地調査を実施した。調査報告³⁾によると被害状況の概要は以下のとおりである。

調査対象は神戸市内に設置されている屋外タンク貯蔵所のタンク 687基中の 236基（34%）であり、内訳は、新法タンク11基、旧法タンク69基、特定以外のタンク 156基。なお、特定屋外タンク（液体危険物を貯蔵する容量1000kl以上のタンク）の内、昭和52年政令改正後の基準に適合するものを新法タンク、適合しないものを旧法タンク、特定以外のタンクとは容量1000kl未満のものを称する。

新法タンクについてはタンク本体には被害なし。タンク本体の被害は旧法タンクと特定以外のタンクに生じており、特定以外のタンクの方が被害の程度も発生率も大きい傾向にあった。

側板が変形したものは、旧法タンク 2基、特定以外のタンク10基の計12基。特定以外のタンクの内 3基が座屈し、その内の 1基で漏洩。座屈した 3基はいずれも H/D（地震時の液高/タンク内径）が 1.3以上。3基の内 1基は象の脚座屈、2基はダイヤモンド座屈で 2段目の側板に生じていた。残りの 9基については歩廊橋の落下による打撃変形や不等沈下によりバルブ部が押されたことによる変形で、変形量はいずれも小さいものであった。

アニュラ部の変形が認められたものは 7基でいずれも基礎・地盤の沈下やアニュラ部の浮き上がり、アンカーボルトの引き抜けの影響によるものと考えられる。なお、旧法タンクでタンク直下が沈下しているものについては、タンク内側隅角部に変形が生

じている可能性があるが、調査では未確認。

アンカーボルトは特定以外のタンクの多くに設置されており、ボルトが引き抜かれたものや折損したものがあつたが、タンクの浮き上がりに対して効果があつたと推定された。また、アンカーボルトのあるものには滑動した形跡はなく、滑動に対しても効果があつたと推定された。

タンク本体が傾斜している割合は全体で44%。旧法タンクの29%に対し特定以外のタンクでは53%。傾斜角度の最大値は特定以外のタンクの12度。新法タンクでは沈下や傾斜の被害なし。基礎が沈下または傾斜しているものは全体で52%、旧法タンクで45%、特定以外のタンクで59%。不等沈下の相対的大きさを示す δ/D （不等沈下量/タンク内径）と荷重の相対的大きさを示す H/D （地震時の液高/タンク内径）との関係を見ると、特定以外のタンクについて H/D が大きいほど δ/D が大きい傾向があることが確認できた。

配管接続部の漏洩は配管フランジ部からのものがほとんどで、一部に歩廊橋の落下により配管を損傷したものがあつた。タンク本体との接続部には可撓性継手を取り付けられており、タンクの沈下や傾斜に伴って変形し、その機能を発揮していることが確認されたが、かなり大きな変形を生じているものもみられた。

b) 水タンク

神戸市では上水道用の鋼製の配水池があつたが、鋼製タンク本体の損傷はなかつた。消化用水タンクについては、本体側板が座屈し、その結果生じた亀裂部より水が全量流失し、消化機能を損なうものがあつた³⁾。

(3) 電力設備

兵庫県南部地震による電力設備の被害は、火力発電所21箇所のうち10箇所、変電所 861箇所のうち50箇所に大きな損傷を受けたが原子力発電所と水力発電所には被害はない⁴⁾。以下に、資料4を参考に火力発電設備と変電設備の鋼構造関係の被害の概要をまとめる。

a) 火力発電設備

尼崎地区の2つの発電所では、構内地盤が陥没するとともに、ボイラーや主要蒸気配管の振れ止め装

置の損傷・変形やボイラー建屋鉄骨変形などの被害を受けた。また、一方の発電所では尼崎市内の水道配管の損傷により、発電用水の受入れが停止した。

大阪地区の4つの発電所ではボイラークーリングスペース管の損傷・変形やボイラーおよび主要蒸気配管の振れ止め装置変形、節炭器入口管寄ドレン管取付け部の損傷、節炭器管損傷、ボイラー二次加熱器付着金物の損傷などの被害を受けた。

姫路地区の発電所ではタービン軸振動大による自動停止の影響によりボイラー安全弁が動作し安全弁シート漏れを生じたほか、ボイラー主蒸気管の防振器が損傷した程度で大きな被害はなかつた。

高砂地区の発電所では、構内道路に亀裂を生じたほかに被害はなかつた。

b) 変電設備

275kV変電所 3カ所の主要変圧器 5台および77kV変電所13カ所の主要変圧器18台で、基礎アンカーボルトの破断・滑動が生じている。

(4) 工場プラント

阪神湾岸地帯は古くから栄えた商工業エリアであり、多くの工場・施設群がある。特に激震地区にある工場は多大な被害を受けた。それらの中で代表的な工場プラントの被害例^{5) - 8)}について報告する。

神戸の東灘から西宮の海岸沿い一帯には灘五郷があり、大小60数社の酒造会社が日本酒生産量の3割を生産している。歴史のある古い工場が多いこともあり、酒蔵の崩壊および醸造設備の倒壊など大きな被害を受けた。大なり小なりの損傷を受けた酒造タンクの総数は4桁にもなろうといわれている。また大きな被害を免れた工場でも、水道・ガスなどのライフラインの遮断による生産休止の損害も大きなものになった。

東灘区の洋菓子工場は建屋が傾き使用不能となった。同社の深江工場や六甲アイランド工場では、被害は微細であるが、ガス・水道が停止したために生産停止に追い込まれた。また、同じ東灘区の配合肥料工場では、建屋や製品タンクなどの一部に被害を受けた。

神戸のゴム工場では高さ数十mの大煙突が転倒するなど工場が半壊し閉鎖に追い込まれたが、機械設備にはそれほど大きな被害はなく他の工場へ移管し

て生産を開始している。兵庫県ゴム工業共同組合によれば、36企業の中の2/3が工場や倉庫に大きな被害を受け、残り1/3も水やガスが来ないために操業できないといわれている。

加古川の製鉄所では原料岸壁の一部が陥没し、アンローダー3基が倒壊、東灘区の製鉄所では煙突折損、コークスサイロ倒壊、搬送ラインの損傷、製鋼工場のクレーン落下、岸壁建屋の損壊などの被害を受けた。他の製鉄所や造船所でも護岸や岸壁、クレーン等に被害がでている。

神戸市の調査⁸⁾では、危険物製造所がある化学工場23事業所347施設のうち、建物の全壊2施設、その他施設の構造・設備に亀裂、変形、離脱、転倒、落下、沈下などの異常があった施設が54と報告されている。それらの施設には原料などの貯蔵タンクも多く、(2) a)で述べたような被害がみられた。

工場プラントの多くは原料や製品の入出荷などの利便性から海岸線近くの埋立地などの比較的軟弱な地盤上に建設されている。このため、基礎や地盤の不等沈下や過大な変形に起因した建屋、生産設備の傾斜、崩壊、破損が多くみられた。また、生産設備そのものの損傷が軽微であるにもかかわらず、電気・ガス・水道などのライフラインや交通・流通網の寸断が製造プラントとしての機能停止を余儀なくしたことや、今回の地震が早朝であったためそれほど大きな問題とはならなかったが、プラント操業中にシャットダウンがかかった場合の被害想定など、製造プラントの危機管理も考慮すべき重要な課題であると考えられる。

(5) 上下水道施設

a) 浄水・送水施設

上水道施設のなかでタンク・プラントに関連する浄水・送水施設の被害について資料9 および10を参考にまとめる。なお、これら以外にも配水・給水設備については膨大な数の被害が生じている。また、水管橋については二重防護したコンクリートブロックが荷重となりその接合部に被害が集中しており、単独水管橋には被害が少ないが、橋梁添架のものには被害が多い傾向がある¹⁰⁾。

阪神水道企業団関係では、淀川ポンプ場～尼崎浄水場間の第1期導水管が破損、漏水し、補修に1か

月。他、尼崎浄水場では塩素注入機の故障で一時送水停止。西宮市内の送水管および芦屋市への送水管の破損がひどく1月末に修理終了。甲東ポンプ場では天井クレーン損傷、場内配管漏水。3期甲東送水路(φ1500mm)で5箇所、4期西宮送水路(φ1200mm)2箇所の被害。3期芦部谷送水路(鋼管、φ2100mm)の水管橋伸縮継手が破損。

兵庫県水道用水供給事業関係では、神山浄水場から神戸市西神ニュータウンへの送水管(φ700mm)が道路陥没のため破損。浄水送水管(ダクタイル鋳鉄管、φ700mm)に1箇所被害。供給地点が被災地外であるために浄水送水管の被害は少ない。

神戸市では、布引貯水池で管理橋脚部が破損。上が原浄水場内送水管(φ1200mm)、会下山中層送水管(φ500mm)等10数箇所被害発生。また、本山送水管路トンネルの上部が圧潰したために送水管(PC管、φ500mm)の継手部からの漏水と湧水送水管(HP管、φ300mm)の管体亀裂が発生。

西宮市では、鯨池浄水場で傾斜管の落下、濾過池電動弁の破損。丸山浄水場で脱水機破損、次亜亜層注入設備破損の被害。

芦屋市では、浄水送水管に22箇所(φ200mm～φ700mm:道路などの崩壊3箇所と仕切り弁など4箇所を含む)の被害。

尼崎市では、自己水源の淀川からの導水路、浄水場ともに支障なし。

伊丹市では、淀川からの導水管φ1000が損傷し、2月2日に修復完了。汚泥施設の設備機械が全壊。塩素注入機器の配管が破損。武庫川からの導水管(鋳鉄管、φ500mm)が継手部で離脱。淀川から園田配水場経由の導水管(PC管、φ1000mm)が直管部で折損。浄水送水管(φ400mm)で1箇所の被害。

宝塚市では、浄水場では場内配管等軽微な損傷のみ。川西市および西宮市との市境の管路が集中的に断水。浄水送水管で8箇所の被害。

明石市では、浄水場の被害はあまりなし。神戸市との市境付近で管路損傷大。1月31日に仮復旧。

淡路地区では、配水管の損傷が多い。浄水場については特になし。

b) 下水処理施設

兵庫、大阪、京都の一県二府の102箇所の下水処理場のうち、43箇所が被災した¹¹⁾。それらのなか

でタンク・プラント等に関する主な被害は以下のとおりである。

神戸市では、埋立地に建設された東灘処理場で管路や付帯構造物に被害が集中。最初沈殿池の流入水路の継手部 4箇所破断、水処理施設駆体の継手部からの漏水、汚泥濃縮槽・消化槽周り配管折損など、施設や管路の取り合い付近で被害が多くみられた。ポートアイランド処理場では許容変位 2 m のジョイントを採用していたためにはほぼ無被害。他に、ポンプ場 20箇所を被害。魚崎および本庄ポンプ場を除いて被害は軽微。

西宮市では、枝川浄化センターで沈砂掻き上げ機に損傷。10ポンプ場のうち、6ポンプ場に、受電設備の破損、浸水、冷却水システムの故障などの被害による機能障害があった。

芦屋市では、芦屋下水処理場内ポンプ場から水処理施設に至る送水管の破損をはじめ、導水管、放流管に被害が多発。

尼崎市では、東部第一浄化センターで汚泥掻き寄せ機損傷のため簡易処理による放水。東部第二浄化センターでは最終沈殿池への送水管破損のため簡易処理による放水。

兵庫県では、武庫川上流浄化センターで汚泥掻き寄せ機損傷のため処理能力が50%に低下。

豊中市では、庄内処理場で換気ダクトが破損、落下。処理機能には問題なし。

(6) 廃棄物処理施設

廃棄物処理施設についても被害の多い地域は兵庫県と大阪府に集中し、プラントに関する全ての設備に影響している^{12)、13)}。ここでは、被害の中から鋼構造物に関する事例を中心に報告する。

建屋等の鉄骨構造部材関係では、焼却炉室天井の水平面に設けられたトラスのブレース材の座屈、焼却炉鉄骨側面最上部Kトラスの鋼管ブレース材仕口の割り込みフランジの曲げ変形、ガス冷却室出口支持鉄骨水平トラスの山形鋼製ブレースの曲がりおよび仕口部の取付けボルト破断、炉室天井換気ダクトの支持溝型鋼のフランジ損傷あるいはダクト自身の切断落下、投入ステージ鉄骨ブレースの曲がり、渡り廊下の受け梁破損などが報告されている。

焼却炉上部のゴミ移送用の天井クレーンの走行レ

ールは、建屋上部のH型鋼製大梁の上フランジにフックボルトで固定されている。天井クレーン関係では、走行レールの曲がりやレール固定用のフックボルトの損傷が報告されている。

電気集塵機の内部では高さ数mの集塵板や放電板が吊り下げられた状態になっており、地震時には相当横揺れしたことが想像できる。電気集塵機関係では、構造部材の一部である山形鋼製ブレース材の取付けボルト破断、槌打装置取付けシャフトのスリーブ(材質FC10)破損、集塵板の変形などが報告されている。

配管関係の損傷は多く、計装用圧縮空気用の小口径配管のダクトとの接合部での破断、配管サポートと主架構との溶接部の破断、集塵器の外部保温材ケーシング部の破損・変形、蒸気ドレン配管のフランジ接続部の変形、苛性ソーダタンク排水配管の亀裂、放流水配管破断などが報告されている。

また、鉄筋コンクリート製煙突が中央部で破断した事例が2~3報告されており、そのうちの1例は倒壊し、下部のタンク・配管類が破損している。いずれの事例も仮設の鋼製煙突を使用して運転を再開している。また、FRP製高架水槽の水漏れも複数の施設で生じている。そのうちの1例では、タンクと鋼製配管の接続部でも亀裂が生じている。

3. おわりに

以上、1995年1月の兵庫県南部地震によって鋼製のタンク・プラント等に生じた被害実態について、土木学会鋼構造委員会鋼構造震災調査特別小委員会タンク・プラント等ワーキンググループで行った調査結果の概要を報告した。

被害原因、補修・補強等に関する詳細な調査については、小委員会活動のなかで今後検討していく予定である。

最後に、震災復旧・復興業務に多忙を極める中で調査にご協力いただいた関係各位に対し心より感謝する次第である。

【参考文献】

- 1) 高圧ガス保安協会：兵庫県南部地震に伴うLPガス貯蔵設備ガス漏洩調査中間報告書，1995.5.

- 2) 土木学会：阪神大震災震害調査緊急報告会資料，都市施設グループ報告，pp. 85-92, 1995. 2.
- 3) 消防庁危険物規制課・危険物保安技術協会：屋外タンク貯蔵所の被害状況現地調査結果について，KHKだより，特集号，1995. 6.
- 4) 関西電力株式会社：阪神・淡路大震災復旧記録，1995. 6.
- 5) 東洋経済，pp. 48-57, 1995. 6.
- 6) 神戸製鋼所：神鋼タイムス，震災特別号，1995. 4.
- 7) 日本産業新聞，1995. 2. 27.
- 8) 神戸新聞（朝刊），1995. 2. 26.
- 9) 兵庫県企業庁水道課：阪神・淡路大震災による兵庫県下の水道施設の被害と対応状況，1995. 2.
- 10) 神戸大学工学部建設学科土木系教室：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書（第2報），pp. 132-141, 1995. 3.
- 11) 藤原悌三他：平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究，平成6年度文部省科学研究費（総合研究A）研究成果報告書，pp. 286-304, 1995. 3.
- 12) 兵庫県南部地震による廃棄物処理施設被害状況，月刊廃棄物，p. 24, 1995. 3.
- 13) 宮下厳巨・山下清治・徳岡照雄・吉原藤雄：神戸市における大震災による廃棄物処理施設の被害及び廃棄物処理状況について，都市清掃，第48巻，第207号，pp. 20-27, 1995. 8.

Seismic Damage of Steel Tank and Plant Structures

Masahiro Sakano, Osamu Otani, Yukio Mentani, Yoji Kumagai, Hideto Shimote

This paper gives an outline of seismic damage of steel tank and plant structures inflicted by the Hyogoken-Nanbu Earthquake in January 1995, reported by the tank and plant working group in the Special Committee for surveying seismic damage of steel structures. Objects of the survey are gas holders, petroleum or water storage tanks, power plants, industrial plants, water supply plants, sewage treatment plants, and waste disposal plants.