

## 臨海コンビナートの液状化・流動化対策

### 1. はじめに

地盤の液状化現象が、はじめて工学的観点より認識されたのは1964年新潟地震である<sup>1)</sup>。地震の揺れによって砂質地盤の強度と剛性が著しく低下し、液体のような挙動をすること、および、i)地盤支持力の減少による構築物の沈下・傾斜、ii)液状化土の浮力による地中構築物の浮上、iii)土圧の増大による護岸の傾斜・倒壊、iv)盛土など土構造物の崩壊やすべり、などの液状化による被害が発生することが新潟地震によって知られるようになった。新潟地震以前の多くの既往地震でも、噴砂・噴水・地割れの記録は数多く残されており、液状化がしばしば発生していたことが窺える。

しかし、新潟地震による液状化被害の調査には一つの重大な見落としがあった。それは液状化した地盤が水平方向に数mのオーダーで移動する、いわゆる側方流動と、これに起因した構築物の被害である。側方流動による地盤変位が定量的に測定され、構築物に及ぼす被害が注目されたのは、新潟地震より19年後の1983年日本海中部地震である<sup>2), 3)</sup>。

この側方流動現象が液状化とともに、臨海部コンビナートの安全性を脅かしている。本文では、はじめに側方流動研究の経緯を紹介し、次に液状化と側方流動に対する臨海部コンビナートのリスクと、現在進められている国による強靱化の現状と課題を述べる。

### 2. 側方流動研究のはじまりと経緯

液状化地盤の側方流動に関する研究の契機となったのが、図-1に示すガス管の被害である。能代市ガス水道局の報告によれば、日本海中部地震でガス漏れが発生した地点を堀削したところ、ガス管の45°の曲がり部が破断し、2つの破断面が70cmも離れていたということである<sup>4)</sup>。筆者は当時この地震によるライフラインの埋設管路の被害原因の調査を行っていたが、能代市の職員から、「どうしてこのような被害が発生するのか」という質問を逆に受けて、明確に答えられなかったことを記憶している。地震動による動的な地盤変位の大きさは数cmから大きくても10数cmと考えていたので、破断面の70cmの離れの原因がよく分からなかったのである。

その後、地震予知総合研究振興会に組織された研究委員会による調査の一環として、液状化によるガス管の被害の実体と被害原因の調査が本格的に行われることになった。液状化による噴砂・噴水・地割れ・道路の曲がり・地盤の陥没などが住民の協力も得て調査された。これらの調査の結果、液状化した地盤全体が、広範囲にわたって数mのオーダーで水平変位したのではないかということが推測された。

地盤の水平変位を定量的に明らかにするため、三角測量や平板測量を行い、この結果を地震前の市街地図と比較して地盤の水平移動を求めようと試みた。いずれの測量も精度が十分でなく、数mに及ぶ地盤変位を説明しうる結果は得られなかった。ところが、ある測量会社の技術者より航空写真測量であれば測量が可能かもしれないというアドバイスももらった。地震の発生前後の一組の航空写真を用いて、それぞれ航空写真測量を行い、その差をとることによって、地震によって発生した永久変位(当時は地震による振動変位と区別する意味でこのような呼び方をしていた)を求めようとするものである。

早速、地震の2年前に能代市を撮影した航空写真と地震直後に撮影された航空写真を用いて地表面の変位を測定した結果、緩やかな砂丘斜面の住宅地で最大5mもの水平変位が発生していることが分かった。前述のガス管の破断点付近の地盤変位も詳細に測量され、地盤変位によってガス管の破断と破断面の70cmの離れが説明されることが示された。

新潟地震発生の2年前に撮影された航空写真と地震直後の航空写真による同様な測量の結果、信濃川と阿賀野川の河口沿岸の広い領域で、地盤の側方流動が発生していることが判明した。中でも信濃側沿岸の川岸町では護岸が完全に崩壊したことにより、護岸背後の地盤が10m以上も信濃川に向かって水平移動していることが示された<sup>5)</sup>。

「まえがき」で述べたように、新潟地震では4種類の液状化による被害が注目され、地震後これらの液状化被害に対する対策の調査・研究が行われてきていたが、側方流動については現象そのものへの認識が無かったことから、研究課題として取り上げられることはなかった。

しかしながら、新潟地震後の市民座談会の記録や小中学校の作文集の中には、「自宅の敷地が信濃川の方へ移動し、敷地面積が増えた」、「地震前真っ直ぐであった道路が曲がり、見通しが悪くなった」という証言が数多く残されている<sup>6)</sup>。これらの住民による証言を専門家が見逃したことで、側方流動に関する研究の開始が約20年後の1983年日本海中部地震まで遅れることになった。

筆者の研究グループが、能代市や新潟市の測量結果を学会で報告した時も、地盤工学分野の研究者の多くは半信半疑であった。地盤が水平方向に数mのオーダー動くはずがないという先入観があり、「測量の誤りでないか」という指摘も出るほどだった。その後、徐々に側方流動現象に対する理解も広がり、側方流動の発生メカニズムと変位量の予測方法、対策工法に関する研究がはじめられた。また、地震予知総合研究振興会が日本側の主催者となって、この課題に関する日米共同研究が実施され、国際シンポジウムも何回かにわたって開催された。日米共同研究の目標は、地盤変位の予測手法や効果的な側方流動対策工法の開発にあったが、これらの目標が十分に達せられないうちに1995年兵庫県南部地震が発生した。阪神地区の埋立地で7mを超える地盤変位が発生し、臨海部

の構造物やライフライン施設に甚大な被害を発生させた。図 - 2 は神戸市の埋立地のタンクヤードの地盤の水平変位と鉛直変位を示している。護岸が 3 m から 4 m 移動し、その背後の埋立地が約 400m 四方にわたって海方向に変位している。これらの地盤変位によって LPG 配管が損傷し、大量の LPG が流出した。付近の住民を一昼夜避難させる事態となったが、幸いにも大爆発には至らなかった。

2011 年東北地方太平洋沖地震によっても、東京湾沿岸の住宅地および産業施設敷地で液状化が発生し、多くの被害が発生したことは記憶に新しい。一部地域において護岸の移動が発生したが、数 m に及ぶ地盤変位は報告されていない。東北地方太平洋沖地震による地震動の継続時間が長かったものの、地震動加速度そのものは東京湾の沿岸部で 100~150 cm/s<sup>2</sup> で、地盤の液状化の度合も兵庫県南部地震に比較して小さかったことが大規模な側方流動が発生しなかった要因と考えられる。東北地方太平洋沖地震により、東北地方の沿岸部で津波襲来前に液状化が発生していたとの報告もあるが、側方流動の発生の有無は津波による影響によって明らかでない。

### 3. 臨海部埋立地の液状化・側方流動リスク

臨海部埋立地に建設されているコンビナート施設の地震・津波リスクの要因として、i) 液状化と側方流動による危険物施設、高圧ガス施設の被害、ii) 長周期地震動によるタンク内容物の溢出と火災、iii) 津波の波力と浮力によるタンクの浮上流出および海上火災、などが考えられる。

図 - 3 は東京湾の埋立の歴史を示している<sup>7)</sup>。東京湾の埋立ては江戸年間より始められたとされているが、その多くは戦後の復興期から現在にかけて造成されている。液状化の危険性が最も危惧されるのは、1964 (昭和 39) 年以前に造成された埋立地である。前述したように液状化現象とそれによる被害がはじめて工学的な観点より認識されたのは 1964 年の新潟地震である。新潟地震後、数年経って、ようやく埋立地と護岸および重要構造物の液状化対策が行われるようになった。このような経緯から、昭和 30 年代までに造成された埋立地とそこに建設されてきた構造物やコンビナート施設の多くは液状化対策がされていない。さらに、液状化地盤の側方流動が認識されたのは 1983 年の日本海中部地震である。側方流動の影響を考慮しないで設計・施工された護岸や構造物が数多く存在し、現在でも補強されないまま残されている。

大都市圏臨海部の埋立地盤に、数多くの重油・原油等の危険物施設、LNG、LPG 等の高圧ガス施設さらには劇物タンク等が建設されている。東京湾臨海部の埋立地にあるこれらのタンクの総数は 5000 基以上になると言われている。これらのタンクや危険物、高圧ガスの製造施設および輸送用の配管などの液状化および側方流動対策を急がなければならない。

#### 4. 臨海部コンビナートの強靱化

2013年12月に成立した国土強靱化基本法には強靱化の基本方針として、i)人命の保護が最大限に図られること、ii)国家および社会の重要な機能が致命的な障害を受けないこと、iii)国民の財産および公共施設の被害を最小化すること、iv)迅速な復旧・復興を図ること、の4点が掲げられている。臨海部コンビナートの強靱化は、まさに上法のこれの2番目の基本方針に直接的に関わる問題である。地震による臨海部コンビナート施設の被災はわが国の経済活動や国民生活にも重大な影響を与える。

わが国の経済力に臨海部施設の地震被害が影響を及ぼした事例として、1995年兵庫県南部地震による神戸港の被災が挙げられる。神戸港の荷役施設(クレーン)61基のすべてが、地震動、液状化および側方流動によって破壊された。護岸と荷役施設などの被害が原因となって、地震前世界5位であった神戸港のコンテナ取扱量は地震後23位に、さらに地震後の復旧事業、整備事業に10年以上を要したこともあって、2011年時点で49位にまで落ち込んだ。神戸港での荷役は釜山や香港などアジアの主要港湾に移っている。

国土交通省が2009年に組織した「臨海部の地震被災影響検討委員会」は、地震動や液状化・側方流動および長周期地震動によって重油が東京湾に流出した場合の海上拡散のシミュレーション結果を公表している<sup>8)</sup>。重油12,000klが京浜臨海地区から海上に流出し、風速5m/sの風により海上に拡散する場合を想定している。これによれば、図-4に示したように、夏季は南西の風によって3日間で対岸の京葉地区にまで拡散するとしている。また冬季の場合は北西の風によって横須賀市沖にまで到達するとしている。図中の細線は船舶の航跡を示している。東京湾では平均的に1日約200隻の中型・大型船舶が航行しているが、図示したように航路に重油が拡散すれば、すべて船舶の航行を止めざるを得なくなるというのが委員会の報告である。

全国に12隻の油回収船があるとされているが、これを東京湾に集結して油の回収を行っても、作業が終わるまでに約2ヶ月を要するだろうというのも委員会の見解である。

このような状況になれば、わが国の経済、社会に与える影響は極めて深刻となる。東京湾の臨海部には石油、化学、鉄鋼、ガス、電力、自動車などわが国の主要産業施設が建設されている。そのうち多くの産業は原材料や燃料を海外から輸入している。東京湾の海上交通機能が失われれば、原材料と燃料の供給停止により操業が不能になる。特に深刻なのは東京湾臨海部の火力発電所である。燃料であるLNG、重油、石炭等の供給が止まれば発電能力が大幅に低下し、首都圏の電力供給は危機的状況に陥ると予想される。また原油の輸入が長期間にわたって止まれば、石油製品の供給が停止し、他産業に大きな影響を与える。さらにガソリン等の不足と電力の供給停止による国民生活へ

の影響は深刻である。

以上述べたような事態は、東京湾のみならず伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海および大分県臨海部などにおいても共通して予測されることである。

経済産業省は、2013年度(平成25年度)に「産業・エネルギー基盤強靱性確保調査事業」を実施した。この事業では、南海トラフ沿いの巨大海溝型地震および首都圏直下地震の影響を受けると考えられる地域のコンビナート25ヶ所が選定され、強靱性確保のための調査が行われた。石油精製工業、石油・化学工業、鉄鋼業が主な対象である。調査費用を全額国庫負担として事業が行われた。図-5に示す東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海、九州北部地区および沖縄地区が対象である。調査項目は、i) 液状化・側方流動の推定のための地盤調査、ii) 事業所全域にわたる液状化度合の判定、iii) 地震動と液状化に対する護岸の安定性の検討および護岸移動量の算定、iv) 事業所の護岸近傍地盤の側方流動変位の推定、およびv) コンビナート施設の被害推定、である。

経済産業省資源エネルギー庁は平成25年度の調査事業の結果にもとづき、平成26年度より「石油供給インフラ強化事業」を開始している。この事業では、護岸、栈橋、配管系およびタンク基礎等の耐震補強工事が行われており、総工事費に対して2/3の国庫補助がなされている。本事業は今後6~7年間継続される予定であり、経済産業省は、この間毎年150億円程度の補助金を用意する考えだが、補強を必要とする施設と構造物が膨大な数になることから、決して十分な資金とは言えない。

## 5. 臨海部強靱化の課題

以上述べたように、臨海部の石油精製事業所をはじめとして国土強靱化事業が進められているが、国土強靱化をより効果的に推進するためには以下の課題を解決することが必要である。

### (1) 民有施設への公的資金の投入と国・自治体のリーダーシップの強化

国や自治体が保有する護岸などは、これまでも既に公的資金が投入されて、強靱化事業が進められている。しかしながら民有であるコンビナート施設の強靱化は、前述した経済産業省資源エネルギー庁の例はあるものの十分には進められていない。民有護岸の補強を含めて強靱化を進めなければ航路の安全性は確保されない。図-6に示す京浜運河は東京湾の重要航路の一つで、災害発生時に海上輸送のための重要な航路としての役割を果す。しかしながらこの航路には国・県・市が管理する公有護岸と石油事業者等が所有する民有護岸が混在する。地震時に公有護岸が無被害であっても民有護岸が被害を受けて、原油等の危険物が海上に流出すれば航路は使用不能となる。公有護岸と併せて民有護岸の被害を防ぐことが重要となる。このために、民有護岸の強靱化に公的資金を投入することが必要である。前述したように、経済産業省は石油会社等の護岸の補強を補助する制度

を整備し、強靱化を進めている。また国土交通省も民有護岸の立ち入り検査と、検査の結果強靱化が必要と認められれば国として支援する制度を整備している。しかしながらこの制度が十分に活用されている状況にはない。

東北地方太平洋沖地震における東京湾での隣接コンビナート事業所への火災の延焼でも明らかのように、臨海部コンビナート地区の強靱化は一つの事業所のみが進めてもその効果は小さい。一事業所の被災が隣接する事業所に次々と波及し、埋立地全体に広がる。さらには湾全体に拡大することになる。臨海部コンビナートの強靱化対策は地域全体として推進することが必要である。このためには、国、自治体のリーダーシップの強化と地域住民も含めた情報の共有化が不可欠であるが、現状はそのための社会的枠組の構築がなされていない。

## (2) コンビナートを含めた周辺地域の防災対策

コンビナートが立地する地域の住宅地・商業地域を含めた防災対策を推進するためにはコンビナート事業者の積極的参画が欠かせない。東北地方太平洋沖地震では、東京湾のLPGタンクが爆発し、その爆発の破片が数km離れた住宅地にまで飛散した。臨海部のコンビナート近隣の住宅・商業地域の防災計画立案のためには、コンビナートが抱える災害リスクの評価と公開が必要であり、これらの情報を地域と共有することが求められている。しかし、多くの場合、情報の公開は企業側に不利益をもたらすことがあるとの判断から進んでいない。このため、コンビナートが立地する地域の自治体もリスクに関する十分な情報なしに地域防災計画を作成することになる。危険物施設や高圧ガス施設を保有する産業が地域住民の多くと対立関係になっている場合もある。しかしながら、コンビナートの従業員が発災時に地域住民の避難行動を助けるとともに、コンビナートに貯蔵されている資機材を救急活動、応急復旧活動に活用することも考えられる。一部の事業所では積極的に地域との連携のために協定を結び、地域の防災活動に参画している例も見られる。

産・官・地域住民の連携を進めるためにはそのための社会的枠組を創ることが必要である。早稲田大学東京安全研究所ではコンビナート地域の防災対策を推進する調査・研究の一環として、産・官・学・地域住民による「臨海部の地震・津波防災性向上に関する懇談会」を組織して活動を行ってきた。この懇談会には経済産業省や国土交通省、東京湾に面する東京都、神奈川県、千葉県、石油等の事業者、建設業、コンサルタンツ、大学等の研究機関に加え、地域住民が参加し、お互いに立場を離れ自由な立場に立って、臨海部コンビナートの防災性向上に向けての話し合いを行っている。批難し合うばかりでなく、互いの立場を理解し、信頼感を高めることにより、連携を図ることが目標である。現在までに14回を超える会合を開いている。参加は自由で職業・身分は関係なしに参加者を募っている<sup>9)</sup>。

## 6. あとがき

液化化地盤の側方流動の研究は公益財団法人地震予知総合研究振興会が組織した研究委員会(委員長：故 久保慶三郎東京大学名誉教授)によって行われた。大学の研究者のみならず、建設業・コ

ンサルタンツ，測量会社より多くの技術者が参画した。これら参加者の努力によって数mに達する液状化地盤の変位と被害が調査された。さらにコーネル大学のトーマス・オルーク教授を中心とした米国研究グループとの共同研究が行われ，流動発生メカニズム，流動量の予測手法および流動を防止するための対策工法の開発が進められた。

早稲田大学東京安全研究所は，臨海部産業施設の強靱化促進を技術面より支援するため，「一般財団法人産業施設防災技術調査会」および「特定非営利活動法人国境なき技師団」の協力のもとに，「臨海部コンビナート施設の地震リスクマネジメントガイドライン」および「臨海部コンビナート施設の強靱化工法ガイドライン」を発行している<sup>9)</sup>。これらのガイドラインは経済産業省による「石油供給インフラ強靱化事業」に活用されている。

側方流動の研究をはじめて30年以上が経過しているが，ようやくコンビナート施設の強靱化の実践にまで到達したという感がある。東京湾北部地震や南海トラフ沿いの巨大地震の発生が逼迫しているとされている現在，臨海部コンビナートの強靱化を図ることは，国民の生命と生活を護り，安全・安心社会を構築するために極めて重要かつ緊急を要する課題である。今後とも産・官・学と地域住民が情報を共有化し，連携してこの課題に取り組むことを期待している。

#### 参考文献

- 1) 土木学会新潟地震調査委員会編，昭和39年新潟地震震害調査報告，1966
- 2) 濱田政則，大地は動く，地震ジャーナル No.47，2009
- 3) 濱田政則，安田進，磯山龍二，恵本克利，液状化による地盤の永久変位と地盤被害に関する研究，土木学会論文集第376号/III-6，pp.221-229，1986
- 4) 能代市：昭和58年(1983年)5月28日日本海中部地震，能代市の災害記録，1985
- 5) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R., Emoto, K., Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacement, Association for the Development of Earthquake Prediction(ADEP), Tokyo, 1986
- 6) 新潟郷土史研究会「新潟地震を語る住民座談会要旨」『郷土新潟 代5号新潟地震特集』，1964
- 7) 貝塚爽平編，東京湾の地形・地質と水，築地書館，1993
- 8) 臨海部の地震被災影響度検討委員会，臨海部の被災影響度検討委員会報告書，2009
- 9) 一般財団法人 産業施設防災技術調査会のホームページ， <http://idmc.or.jp/>