

相互作用および脚の浮き上がり(写真-2)を考慮した設計体系の構築を行っている。

液状化対策：既往の地震被害を分析すると液状化がキーワードとして第一位を占めている。新設の施設では液状化対策を行っているが、問題は供用中の施設の液状化対策である。特に利用率の高い施設に対して液状化対策のために供用を停止することが難しいため、機能停止を伴わない効果的な液状化対策<sup>5)</sup>(写真-3)が必要とされる。また、既存構造物直下など施工面での難しさを伴う。

#### 参考文献

- 1) 運輸省第三港湾建設局震災復興建設部：阪神・淡路大震災 復興にむけて、No.3, 1995
- 2) 高橋宏直・中本 隆・吉村藤謙：兵庫県南部地震時の震災直後における海上輸送モードの対応状況に関する分析，港湾技研資料，No.861, 1997
- 3) 三浦均也・大塚夏彦・笹島隆彦・小濱英司：ケーソンと背後地盤の震動特性を考慮した重力式岸壁の耐震設計，土と基礎，No.47-6, pp.25-28, 1999
- 4) 山本俊介・江頭隆喜・菅野高弘・田辺俊郎・宮田正史：地震時における桟橋式岸壁とコンテナクレーンの動的相互作用，第25回地震工学研究発表会講演論文集，第2分冊，pp.989-992, 1999
- 5) 山崎浩之・前田健一・高橋邦夫・善功企・林健太郎：溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発，港湾技研資料，No.905, 1998

### 3. われわれは何を生み出したのか (5)液状化地盤の側方流動と対策

濱田政則 Masanori HAMADA

フェロー会員 工博 早稲田大学教授 工学部土木工学科

#### 側方流動の教訓

兵庫県南部地震は、阪神地区の埋立地を中心に広範囲な地盤で液状化と側方流動を引き起こし、建物、橋梁および各種産業施設に極めて甚大な被害を発生させた。さらに、上下水道、ガスなどのライフラインシステムの埋設管路に膨大な数の被害が生じて、長期間にわたって都市機能が麻痺状態に陥った。

液状化地盤の側方流動が研究者の間ではじめて注目されるようになったのは、1983年の日本海中部地震を契機としている。能代市の緩やかな傾斜地盤において5mもの水平変位が生じていたことが地震後の航空写真測量によって明らかにされた。その後、1964年新潟地震など既往地震による側方流動事例の分析が進められるとともに、日米両国の研究者によって側方流動のメカニズムの解明と地盤変位の予想手法の開発および対策工法の開発が共同で進められてきた。しかしながら残念なことに、十分な研究成果が挙がる前に兵庫県南部地震が発生し、再び同様な被害が発生した。

兵庫県南部地震後、側方流動による被害の深刻さが強く認識され、この5年間の間に精力的な研究が進められてきた。研究者間の全面的なコンセンサスは得られていないものの、側方流動のメカニズムや側方流動の基礎構造に及ぼす外力特性などについて議論が深められてきた。これらの研究成果はこの5年間に改訂された各種土木構造物の耐震規準の中に取り入れられている。

#### 研究の現状

側方流動に関する研究課題は、i) 側方流動のメカニズムを解明し、合理的な地盤変位の予測手法を開発する。ii) 側方流動が基礎など地中構造物に与える外力特性を解明し、設計法と対策法を確立することである。側方流動のメカニズムに関しては、液状化土の流動を著しく剛性の低下した固体として取り扱う考え方と、流体として取り扱う考え方があり、研究者間で意見が分かれているのが現状である。2番目の研究課題の側方流動が及ぼす外力特性についても研究が進められている。液状化地盤が流動した場合、構造物基礎に2種類の外力が作用することが、既往地震による杭被害の分析および模型実験などにより明らかにされている。液状化層の上部に非液状化層が存在する場合には非液状化層より変位が入力されることになる。これは、従来から地中構造物の耐震設計で用いられてきた応答変位法と同じ考え方である。流動する液状化層から基礎に作用する外力の評価については二つの考え方があるが、まだ研究者の合意が得られていない。一つは、液状化層から構造物に作用する外力を流体による抗力によって評価しようとするもので、この場合は液状化土の流動速度が外力評価の重要な要素となる。他の考え方は液状化層からの外力も非液状化層と同様、変位によって評価しようとするもので、この場合は地盤ばねの低下の度合を推定することが課題となっている。

以上述べたように、側方流動に関する研究は兵庫県南

部地震の後かなりの進展は見せたものの、未解決の課題が残されているのも事実である。今後、さらに精度の良い模型実験や既往地震による側方流動のより詳細な分析を行うとともに、本課題に携わる研究者による十分な討論を行って、これらの課題の解決に当たらなければならない。

### 耐震規準改訂の動向

兵庫県南部地震の側方流動による構造物被害が深刻であったことから、地震後の耐震設計規準の改訂では側方流動の影響が全面的に考慮されることになった。道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編（1996年、日本道路協会）、鉄道構造物等設計標準・同解説、耐震設計（1998年、鉄道総合技術研究所）、水道施設耐震工法指針・解説（1997年、日本水道協会）では、構造物基礎の設計において側方流動による外力を考慮することが規定された。しかしながら、前述したように、側方流動地盤が基礎など地中構造物に及ぼす外力の特性が十分に解明されていないこともあって、それぞれの規準における外力の評価方法に若干の相違がある。特に流動する液状化層からの外力に関しては、流体による抗力を土圧に換算して評価しようとする方法、（道路橋および水道施設）と地盤の流動変位を地盤ばねを介して基礎に入力する方法、（鉄道構造物）などに分かれており、統一がとれていない。将来、側方流動地盤からの外力の特性が解明された段階で規準の内容を改訂すべきである。

ライフラインの埋設管路の耐震設計についても側方流動による地震変位やひずみが考慮されるようになった。改訂された水道施設の指針においては、護岸より100mの範囲で最大2%、その他の地域で最大1.5%の地盤の引張ひずみを想定して管路の耐震設計を行うことになった。さらに、傾斜地盤では最大1.3%の圧縮と引張ひずみを想定することが規定された。下水道施設の耐震対策指針と解説（1997年、日本下水道協会）においても同様な設計用の地盤ひずみが規定されている。これらの地盤ひずみの値は、兵庫県南部地震における阪神地区の埋立地盤の水平変位量をもとにして計算されたひずみを統計的に処理し、一定の非超過確率を定めて設定されたものである。

上下水道の埋設管路の他にもガス導管の耐震性に関する国の研究プロジェクトが進行中であり、近い将来ガス導管の耐震設計にも側方流動による地盤変位とひずみの

影響が考慮されることになると思われる。

### 側方流動対策の現状

地震後、道路や鉄道などコンクリート橋脚の補強が進められてきたが、基礎構造の側方流動対策は一部の機関で試験的な補強工事が行われているものの本格的には進められていないのが現状である。改訂された耐震規準において側方流動の影響が考慮されたことにより、新設される構造物の側方流動対策は一応採られたことになるが、すでに社会基盤整備が相当程度進んでいるわが国においては、既存構造物の対策の遅れは地震防災対策上深刻な問題となっている。

護岸の移動を起因とした護岸背後地盤の側方流動対策には、次の二つの対策方法が考えられる。一つの方法は、側方流動の原因である護岸の移動そのものを防止すること、すなわち護岸を補強し地震による移動量を抑制することである。二番目の方法は構造物の基礎を補強する方法で、既存の基礎の周囲に新たに杭を打設する方法や地中連続壁で防護する方法などが提案されている。

側方流動に対する構造物基礎の補強は橋脚などの補強に比較して工事費が著しく大きいこと、工用のスペースや工事時間に大きな制限があることなど解決すべき課題が多い。

兵庫県南部地震では埋立地が広範囲にわたって液状化し、危険物や高圧ガス施設が被害を受けた。多くのタンクが移動・傾斜したが、幸いなことに倒壊して内容物が漏洩する被害には至らなかった。倒壊に至らなかった理由の一つは、地震動の継続時間が比較的短かったことが挙げられるが、地震動の継続時間が長かった場合には、さらに大きな災害の要因になったと考えられる。

東京湾や大阪湾では地盤改良がなされていない埋立地に多くの危険物や高圧ガス施設が建設されている。中には、護岸の老朽化が進んでいるところもある。しかしながら、一向にこれらの耐震補強が進んでいないのが現状である。これらのコンビナート地区の耐震対策で護岸の改修は極めて重要であるが、それが遅れている理由の一つに経済的負担の大きさが挙げられる。危険物および高圧ガス施設の事業者の中には中小の事業者も数多く存在する。コンビナートが立地している埋立地の地震防災を個々の企業にのみ負わせるのではなく、自治体や国による対策の推進が必要である。