

液状化による地盤変状と構造物基礎に及ぼす影響

Ground Disruption due to Liquefaction and its Effects on Foundations

石 原 研 而 (いしはら けんじ)

東京理科大学教授 理工学部土木工学科

社会基盤の諸施設が今回の地震で大きな被害を受けたが、以下石油タンク等の貯蔵施設を例にとって、地震変状の及ぼす影響について考えてみることにする。これらの施設は沿岸部の埋立地に位置しており、その被害はまさ土から成る埋立土の液状化に起因するものがほとんどである。敷地の周囲は護岸で囲まれているが、これらは昭和30年代に作られた時液状化に対する配慮がなされていなかったために、今回の地震で2~3m程度海側にせり出した。この動きが5~10mくらい伝わった所で停止すれば問題は少なかったが、100m以上も敷地の内部に向かって伝播していったために、タンクや付属機器が地盤変状にまき込まれて少なからぬ損傷を受けた。

このような工場敷地の被災例の一つが図-1に示されているが、ほぼ敷地内全域で地盤の液状化が発生している。図-1に示した場所で行った地震以前のボーリングデータの一つが図-2に示されている。深さ15mくらいまでまさ土による埋立土があり、標準貫入試験によるN値はすべて10以下である。敷地全体が同様な土質柱

状を持っており、全域にわたってこの土層内で液状化が発生したと考えられる。このために南側の護岸が3m程度南側に移動し、この水平変位が敷地内に伝播して行った。工場内の地割れの模様が図-1に示されているが、護岸に平行なクラックと貯槽の周辺に集中したクラックが目立っている。敷地内の大型貯槽は杭や改良地盤上のべた基礎に載っていて、ほとんど動いていないことが確かめられている。ところがポンプやコンプレッサーや熱交換器等の付属施設は、短い杭や未改良地盤上のべた基礎に設置されていたので、地盤の動きに伴って20~50cm程度水平に移動した。互いに連結されている各機器がこのように相対的に動くと、可撓性のジョイントやパイプの追従能力を越えてしまつて連結部分が破損されるので全体の機能麻痺が生ずることになる。同時に、機器そのものが衝突したり、引き裂かれたりして使用不能に陥ってしまう。

以上は、液状化に伴う地盤の水平変位に関する問題であるが、間隙水圧の逸散と共に土は体積収縮を起こすの

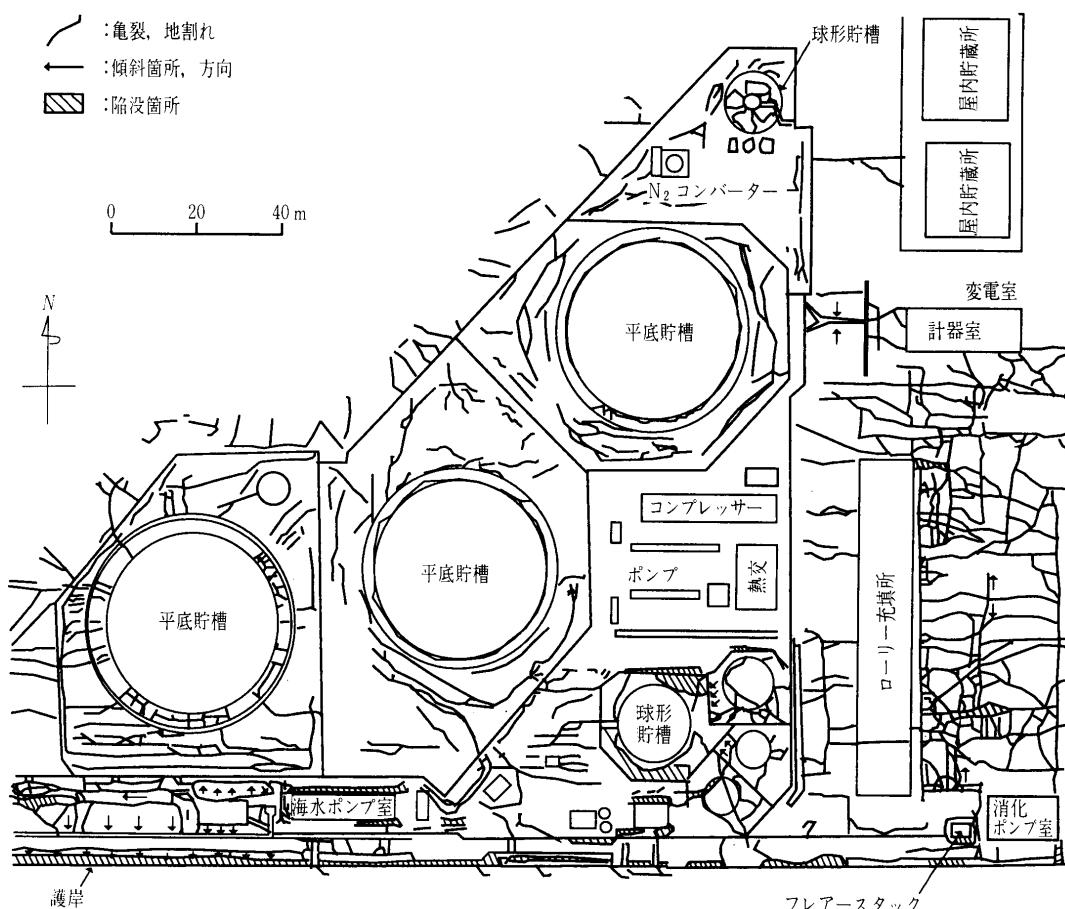


図-1 敷地内の地盤状況

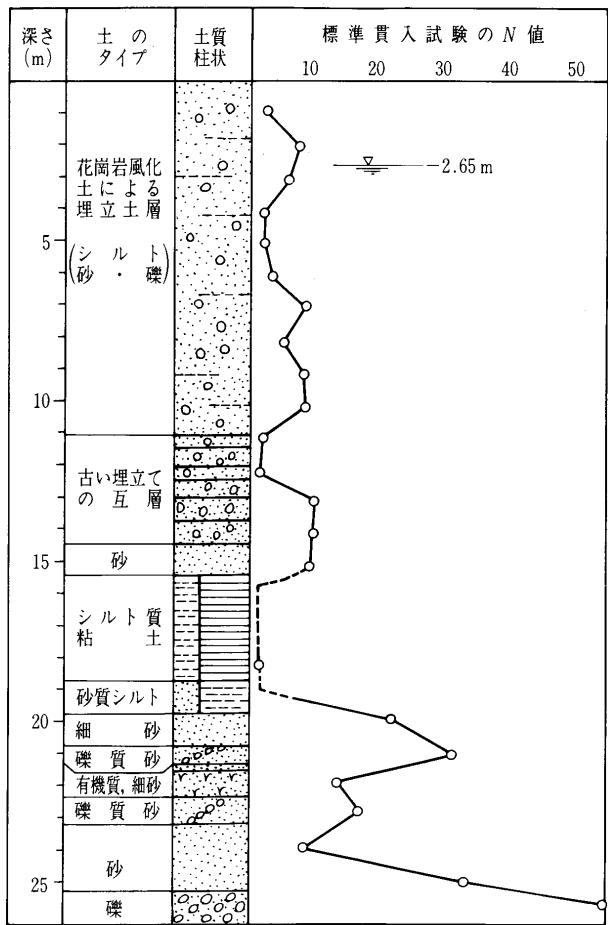


図-2 平底貯槽地点の土質柱状図

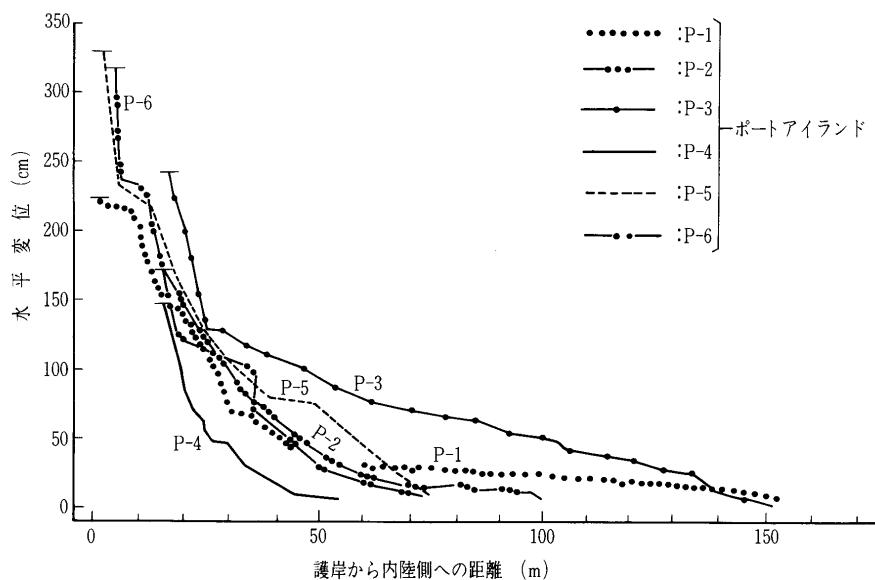


図-3 水平変位の分布

で、液状化と共に地盤沈下が発生する。図-1に示した敷地内でも護岸の影響の少ない内部で30~50cm程度の沈下が発生した。工場内の各施設は異なった種類の基礎で支持されているが、この基礎の沈下も一様ではないので不同沈下が発生した。この量がジョイントやパイプの追従能力を越えて大きなトラブルの原因となった。

以上、水平変位と地盤沈下に伴う問題を考察したが、

地盤沈下の方は液状化層の厚さの5%くらいが限度だと考えられるので、この厚さを15mとすると75cm程度が上限となる。しかし水平変位の方は、前衛線である護岸の動きの大きさに依存している。更に考えている地点より護岸側の地盤性状や構造物の有無によってこの場所での水平変位量は大きく変わってくるので推定が難しい。今回の阪神大地震によって被災したポートアイランドにおいて実施した水平変位測定の結果を示すと図-3のようになる。横軸は護岸法線から内陸側へ測った距離を示しているが、この図から護岸が3m程度動いた時、水平変位が50cm以下になるのは護岸から50~70mくらい以上内陸側であることが知れる。

このような地盤の破壊に起因する石油コンビナートの被害の典型例が図-1に示す神戸港の御影浜にあるLPガス貯蔵施設で見られた。前述のごとく、この埋立地では護岸が2~3m海側に移動し、その動きが100m以上も敷地の内部に伝播して行ったためにタンクや配管等の付属機器が地盤変状に巻き込まれて大きな被害の元凶となつた。

しかし、被害の程度はそれぞれの構造物を支持している基礎の設置深度に大きく関係していることがわかつた。このLPG基地では杭を用いた基礎が多かったが、その設置深さは、図-4に示すように、構造物によって異なっていた。LPGタンクは深さ27mに及ぶ杭基礎で支えられていた。今、液状化した深さ16mとその下にある3m厚さのシルト質粘土層を含めて19m深さまでの土が軟化したと仮定すると、LPGタンクの基礎杭は

それよりもはるかに深い所まで達していたことになる。このため、このタンクは護岸から70m ぐらいの位置にあったが、大きな被害を受けなかった。この敷地内で中小タンクは20m 長さの杭で支えられていた。**図一4**に示すように、これらの杭は非液状化層内への貫入深さが少なかったために、多少傾斜したタンクもあったが無傷のものもあった。更に、タンクへ液体を送るためのポンプ施設は12m 長さの杭で支えられていたが、液状化の影響を受け、傾いたり不同沈下したりした。そのほか 5m 長さの杭で支えられていた壁体等も大きな被害を被った。

LPG タンクから液体ガスを取り出すためのパイプ（受払い配管と呼ぶ）は、簡単なコンクリートブロック上の架台

で支えられていた。このブロックは2mくらいの深さまで埋められていて、杭は用いていなかった。よって図-4に示すように液状化の影響を受けて約75cm沈下し、護岸方向に約60cm水平移動してしまった。一方、LPGタンクは上述のように不動であったために、受払い配管は大きな相対変位を受けその変位追従限界を越えてしまった。このため受払い配管とタンクからの取出し口の接

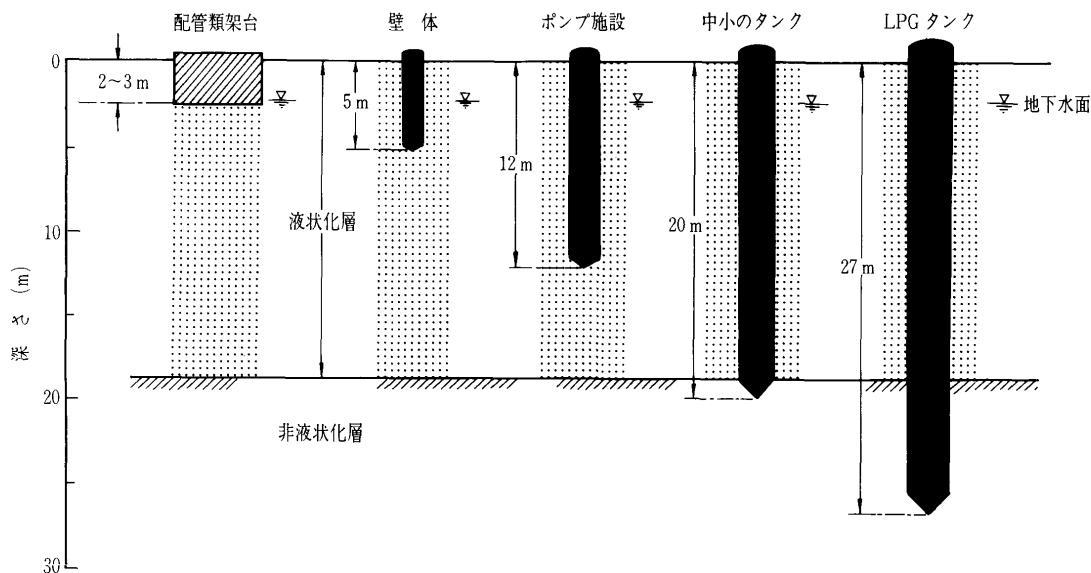


図-4 液状化層と各種構造物杭基礎の設置深さとの関係

合部にわずかな隙間が生じ液化ガスが漏洩したわけである。幸い、この漏洩は大事には至らなかったが、LPGタンクの安全性、ひいては化学プラント全般にわたる保安の確保に関する貴重な教訓を残してくれたと言える。以上を地盤変状による被害という立場から総括すると次のようになろう。

- (1) 沿岸地域の工場や貯蔵施設は護岸で周囲を囲まれた敷地内に建設されるが、地震時の液状化により護岸が倒壊移動する時それらにつられていわゆる側方流動が起こり、地盤の変位が内陸部まで広く伝播していく。そのため種々の施設を支えている基礎が異なった動きを起こし、不同沈下および不等水平変位を生ずる。これが諸々の機器を連結するパイプやジョイントの許容変位量を越えて全体システムの機能麻痺を発生させる。同時に、基礎自体も傾斜、沈下、浮上がり等の損傷を受ける。
- (2) これらの被害を防ぐには、(i)護岸または岸壁を強化して水平移動量を最小限にとどめるようする、(ii)敷地内の地盤の締固めを行い、沈下や水平移動を軽減または防止する、そして、(iii)重要機器を設置する基礎をできるだけ一体化し、これら相互の不等変位や不同沈下が生じないようにする、ことが重

要である。

地盤沈下や水平移動を防止するためには地盤の液状化を阻止すればよいわけだから、土を締め固めて地盤改良を行えばよいことになる。最近の地震で実証された事例が多くあるので、水平地盤における液状化とそれに伴う地盤沈下の方は地盤改良によって防御できよう。しかし、水平変位に対して地盤改良がどの程度効果的であるのかについては立証例がほとんど無く未知の点が多く残されている。これは地盤改良の深さとか施工範囲に依存するであろうが、同時に護岸の移動量にも関係していると思われる。この移動量は、護岸の耐震性を強化することにより相当量減少させることができるので、既存の岸壁や護岸の耐震性診断を行って補強することや、新設の場合には護岸の耐震性を強化することが必要となる。

また、工場の機能停止を防ぎ、早期に操業を回復するためには諸機器の間の連結を健全にしておくことが必要である。そのためには、各機器が設置されている基礎の一体化をはかり、たとえ変位を生じてもそれが一緒に動き、不等変位が生じないような機器系統の配置を考えておく必要がある。

(原稿受理 1995.10.20)