

石油タンク等の地震被害と地盤の関係及び 対策工法の考察

那須 誠

フェロー会員 博士(工学) 前橋工科大学 工学部建設工学科(〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

2003年十勝沖地震で苫小牧地区にある石油タンクに火災や内部液体のスロッシング(揺動現象)等が発生した。1964年新潟地震や1983年日本海中部地震等でも石油タンクに火災や内部液体の揺動現象、座屈等が発生した。今回、いくつかの石油タンクや給水タンク等の地震被害例を地盤に着目して調べた。その結果、揺動現象が常時からの不同沈下方向に発生し、座屈発生タンクの周囲地盤に亀裂や隆起、沈下等の変形がみられ、盛土厚さの変化方向に座屈等が生じていることが分かった。また、2003年十勝沖地震で火災等が発生した石油タンクは埋没砂丘の縁に存在していること等から、石油等のタンクの地震被害は地盤条件の不連続点で発生しやすいこと等が考えられる。その被害機構を考察するとともに、地盤に着目して対策工法も推定した。

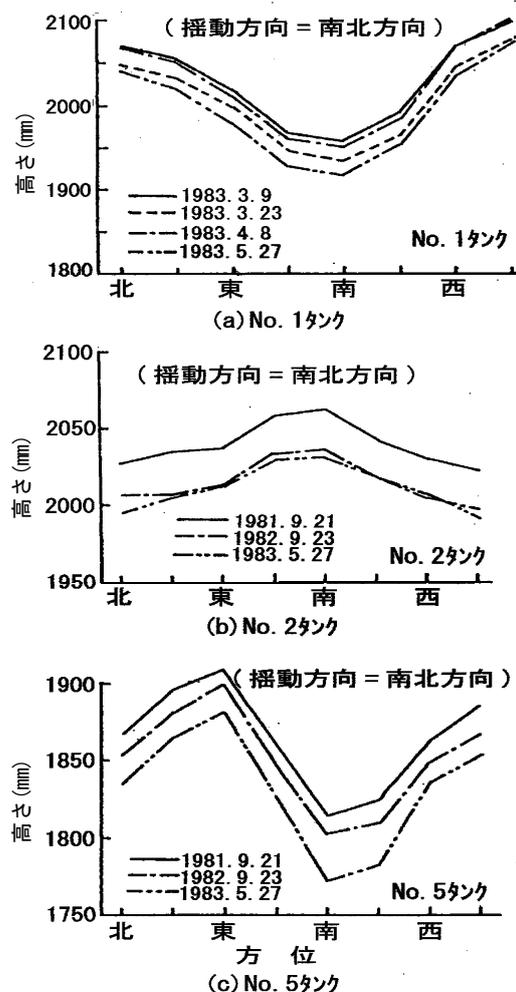
キーワード: 石油タンク, 給水タンク, 2003年十勝沖地震, 地震被害, 火災, 液体のスロッシング, 地盤条件の不連続点, 対策工法

1. まえがき

2003年十勝沖地震で苫小牧地区にある石油タンクに火災やスロッシング(揺動現象)等が発生した。1964年新潟地震等でも石油タンクが同様の被害を受けている。今回、タンクのいくつかの地震被害例を地盤に着目して調べた。その結果、石油タンクや給水タンクの地震被害は地盤条件の不連続点で発生しやすいこと等が推察されたので、地盤に着目して推定した対策工法とあわせて以下に報告する。

2. 石油タンクの地震被害状態と地盤状態の関係

(1)1983年の日本海中部地震(M=7.7)のときに、新潟地区の石油タンクでスロッシング(揺動現象)が発生し最大液面上昇量は4.5mに達した¹⁾。それらのタンクの中には図-1(文献2)を集成²⁾³⁾に示すように、スロッシング方向が常時からのタンクの不同沈下方向(タンクの傾斜方向)とほぼ一致するタンクがみられる。しかも、その不同沈下は地震発生以前から生じていて地震のときにさらに大きく生じているし、常時と地震時で同じ沈下傾向を示すことが分かる。



(日本海中部地震は1983年5月26日に発生)

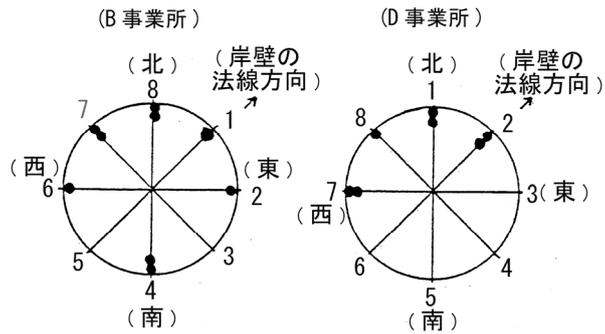
図-1 新潟地区の石油タンクの不同沈下と液面の揺動方向(1983年日本海中部地震)²⁾³⁾

(2)1964 年の新潟地震(M=7.5)のときに新潟地区で、1983 年の日本海中部地震(M=7.7)のときに青森地区で、スロッシングで部分座屈が生じた石油タンクがある。その被害タンクの周囲地盤に亀裂や隆起、沈下等の変形がみられるものもある³⁾⁴⁾。後者の青森地区のタンクの中にはその地震時に発生した不同沈下の方向やスロッシング方向が、図-2(a)⁵⁾に示すように海岸線にほぼ直角な方向に生じたものが多く、海底地形の沖合への傾斜方向(図-2(a)ではほぼ北西方向)とほぼ同じものもある。即ち、地震時にそれらは盛土や建物⁶⁾⁷⁾と同様に土層の傾斜方向に生じたことが推察される⁵⁾。また、図-2(b)からもタンクの地震前後の沈下傾向が前述の新潟地区の沈下傾向と同じであることが分かる。

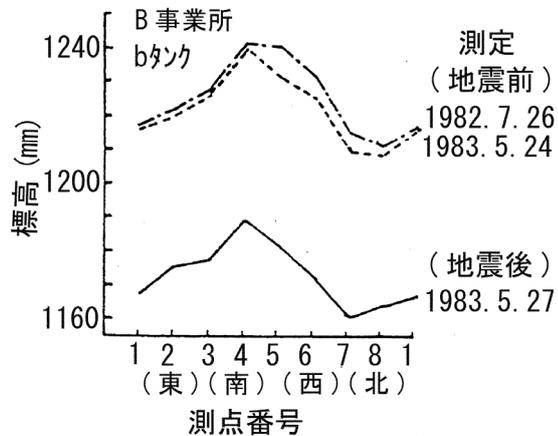
(3)1983 年の日本海中部地震のときの秋田地区の石油タンクの被害状況⁸⁾をみると、地盤の良い地区(地山など)では生ぜず、地盤の悪い地区(埋立地盤など)で被害が生じている。後者の地盤では概して強度が一樣でないことが多く、このような地盤の不均質性が被害に大きく影響したことが推察される。1964 年の新潟地震のときに数 10cm の沈下を起した石油タンクの地盤⁹⁾をみると、砂質土地盤中にシルト等の粘性土からなる N 値 12~15 程度の弱層が存在する上下逆転型地盤であり、地震のときにその粘性土層を境にして滑り等が発生したことが考えられる。

(4)苫小牧地区の多くの石油タンク等で 1983 年日本海中部地震のときにスロッシングが発生し、その方向は北東-南西方向が多く、最大液面上昇量は約 2.0m に達した¹⁾。

2003 年十勝沖地震のときには苫小牧地区でスロッシングが高さが 3m を超えたタンクもあったといわれている¹⁰⁾。



(a) 最大沈下方向の分布(●はタンク毎の最大沈下方位)

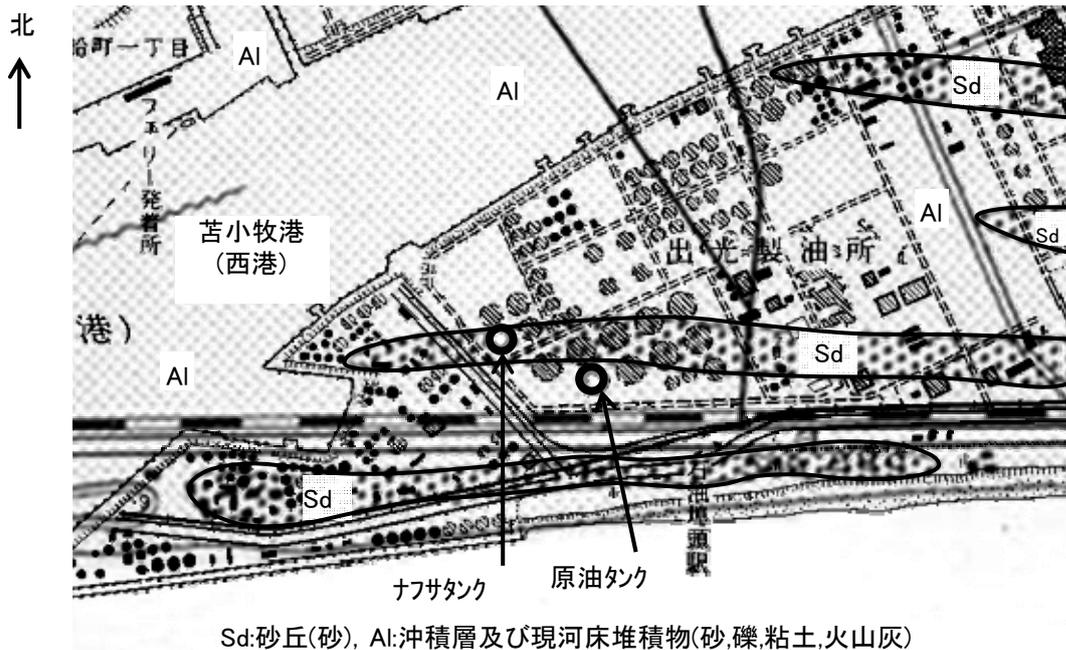


(b) 石油タンクの沈下量の分布

図-2 青森地区の石油コンビナート基地のタンクの沈下(青森港第1船入場北西側, 1983年日本海中部地震)⁵⁾

この地震で原油タンクとナフタンクで火災が発生した¹⁰⁾。その位置を地質図¹¹⁾と地形図¹²⁾を集成して作った図-3に示す。両タンクの火災発生位置はともに砂丘(Sd)の縁に当たり、前述のタンクと同様に今回のタンクの火災も一樣な地盤でなく、傾斜のある地盤で発生したことが推察される。

なお、この付近では細長い砂丘が幾つか存在し、タンクの火災発生箇所では東西方向に長い、北東方向に離れるにつれて回転するように北西-南東方向に長く存在している。また、苫小牧のタンクの存在箇所付近の街路の区画割は北東-南西方向とそれに直角な方向の北西-南東方向であるが、この区画割りは従来の方法と同じように地形に対応しているものと考えら



Sd:砂丘(砂), Al:沖積層及び現河床堆積物(砂,礫,粘土,火山灰)

図-3 苫小牧地区の火災を起こした石油タンクの位置¹⁰⁾¹²⁾と地質図¹¹⁾の関係(2003年十勝沖地震)

れる. 従って, このような砂丘配列や街路の区画割即ち地盤の成立ちが影響して, 1983年日本海中部地震のときのスロッシングの主な発生方向が北東-南西方向(砂丘列に直角な方向)になったことが推察される.

3. 給水タンクの被害状態と地盤状態の関係

1971年のサンフェルナド地震(M=6.6)のときに, アメリカの Limekiln Canyon Horse Flats で, 比高 100~150m の断層崖下の斜面上にある盛土上の給水タンク(溶接高張力鋼板で 1969年製)が, 図-4 に示すように被害を受けた¹³⁾. タンクはほぼ南北方向に振動するとともに反時計廻りに回転して, 側壁の南北面に部分的な提灯座屈や, 木造ルーフの南北縁の破損, タンク底と基礎の南北縁の隙空き等が生じた. この振動方向の南北方向は図-4 から分かるように, 緩斜面の原地盤

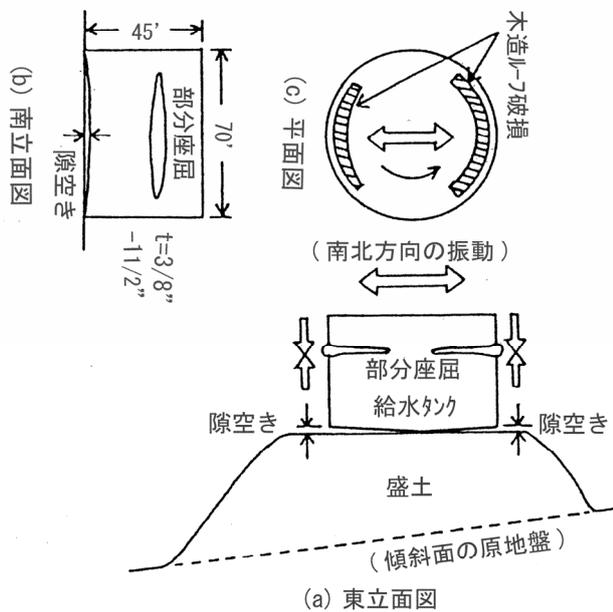


図-4 Limekiln Canyon Horse Flats における盛土上の給水タンク被害(1971年サンフェルナド地震)¹³⁾

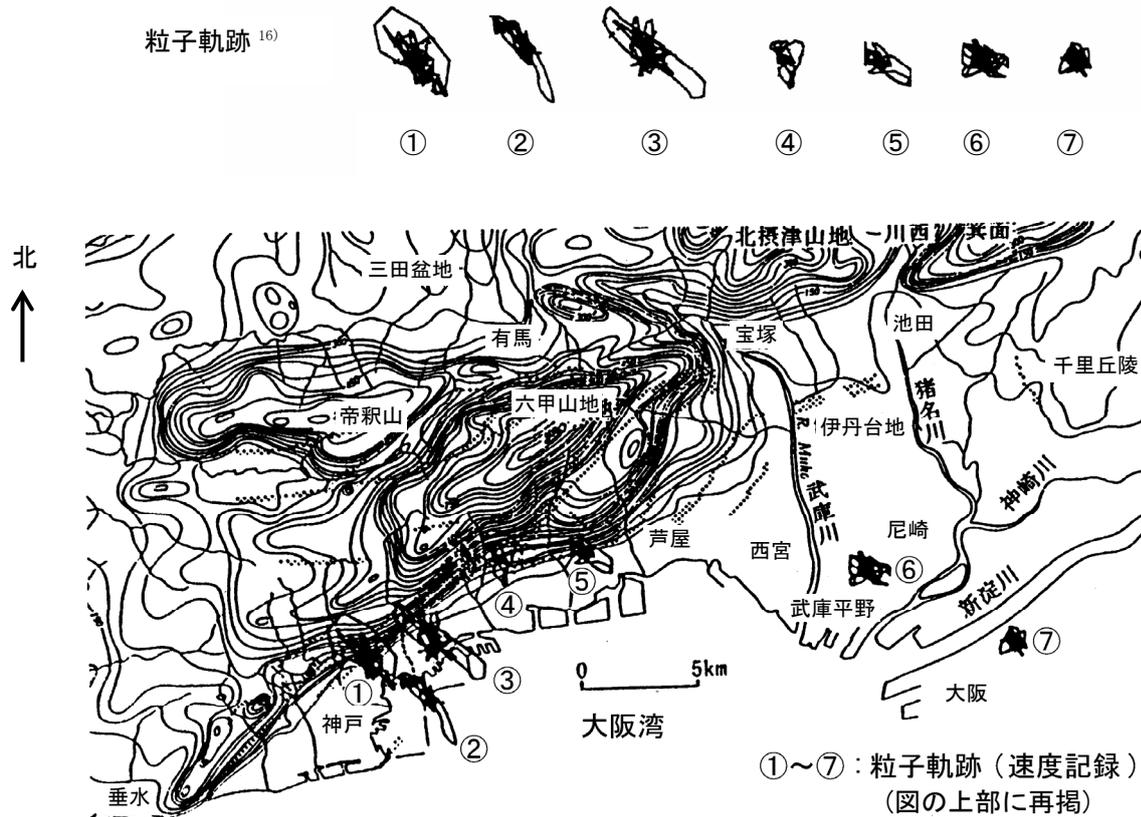


図-5 六甲山周辺の接峰面図と地震動による粒子軌跡の関係(文献 15)に同 16)を追加¹⁷⁾

面の傾斜方向で盛土厚さの変化方向に等しい²⁾. これからも地盤の傾斜方向にタンクが振動しやすいことが推察される.

4. 考察

以上に、タンクとその内部の液体は普段からのタンクの不同沈下の方向や地盤の傾斜方向に地震時に揺れやすいことと損傷したことが示されたので、ここではタンクの振動や損傷、内部液体の挙動と地震動の関係を考察する。但し、検討対象のタンク付近の地震動が得られていないので、他所の地震動記録を元に考察する。

(1) 地震動と地盤の傾斜方向の関係

図-5 は 1995 年兵庫県南部地震の際の速度記録の粒子軌跡¹⁶⁾と六甲山地周辺の接峰面図¹⁵⁾の関係を示している。図-5 をみると、神戸から芦屋にかけて地盤が傾斜しているところでは粒子軌跡は長円形を示す

とともに、その軌跡の長軸方向(主軸)が地表面の最大傾斜方向にほぼ一致し、尼崎や大阪の平野内のほぼ水平なところでは粒子軌跡の南北方向と東西方向の振幅がほぼ等しい大きさである¹⁷⁾. ポートアイランド付近は軟弱粘性土層が北西から南東方向に比較的緩く傾斜して厚くなっており、それらも考慮すると地震時の地盤は地盤の傾斜方向や土層厚さの変化方向に大きく動きやすい性質を持つことが推察される¹⁷⁾¹⁸⁾.

また、1978年宮城県沖地震(M=7.4)のときに丘陵の谷間の盛土上につくられていた東北大学建設系(現人間環境系)の建物は、埋没谷斜面方向(谷筋方向とほぼ直角方向)に強い地震力を受けて被害が発生している。さらに、この建物は1998年仙台市近郊地震(M=7.4)のときは谷筋方向(この方向は埋没谷軸方向で西側から東側に傾斜)の強い地震力を受けて被害が発生している。両地震による地震力作用方向はいずれも埋立盛土厚さの変化方向でもある¹⁹⁾. その外に、1923年関東大地震(M=7.9)のときに東京駅前丸の

内付近の建物は東西方向の地震力を受けて被害が発生しているが、ここの沖積層底面(丸の内埋没谷斜面)が西側に傾斜していて、その傾斜方向にその地震動が卓越した例¹⁹⁾や、傾斜地盤の傾斜方向に盛土振動が卓越することを常時微動測定で明らかにしている文献²²⁾もある。

以上のように、地盤は地震時にその傾斜方向、厚さの変化方向に揺れやすい性質を持っていることが分かる。従って、上記のタンク等が卓越的に揺れた方向は地盤の揺れの卓越方向に等しく、地盤に強制的に振動させられたことが推察される。

(2) タンク等の損傷と内部液体の振動方向と地震動の関係

図-3 のタンク等の損傷と内部液体の振動方向を見ると、反時計回りに液体が回転もしているが、タンク側壁の南北面に部分的な提灯座屈や木造ルーフ南北縁の破損、タンク底と基礎の南北縁の隙空きなどが発生している。この反時計回りの回転は地球の北半球で台風が左回りに回転し、洗面台の排水も排水口から左回りに流れてゆくのと類似であり、両者に関係があることが推察される。また、タンク等の破損や隙空き等は南北方向の振動で、即ち南北方向のほぼ一直線の振動で、しかも地盤の傾斜方向へ大きく卓越した振動によって発生している。

ここで再び図-5 の粒子軌跡をみると粒子軌跡は卓越波のとき(主要動のとき)大きく主軸をもつ長円形を示しているが、それ以外の小さな振幅のときは円形に近い形状を示している。従って、前述のタンク等に

ほぼ直線的な損傷が大きく出た振動は、地震動の振幅が大きく卓越したとき(主要動のとき)で地盤の傾斜方向、厚さの変化方向に振動したときに発生したことが推察される。

また、タンクやタンク内部の液体、ルーフの回転だけではそれほど大きな損傷が発生しないと考えられるので、この回転は地震動のなかの主要動(卓越波)の前あるいは後の比較的小さな振幅の地震波のときに生じたことが考えられる。

(3) 被害機構の推定

以上の(1)、(2)から、傾斜地盤上のタンクで液体の揺動や損傷が発生する機構は次のように考えられる。

地震が発生したとき、まず主要動以前の比較的小さな振幅の地震波の部分では四方八方にほぼ同じ大きさの地震動が発生して液面が回転するように動く。次に、主要動部分では地盤の傾斜方向に卓越する地震動で、その軌跡は地盤の傾斜方向に主軸を持つ長円形となり、タンクと液体もその方向に強制的に動かされて損傷や液体の揺動がその主軸方向に大きく発生する。

また、地層に傾斜のない水平層構造の地盤では四方八方にほぼ似た大きさの地震動が生じて(粒子軌跡の包絡線がほぼ円形で長円形を示さず)、卓越方向が生じないためタンクと液体もそれに強制的に動かされるが、地震動の振幅が小さいので、損傷や液体の揺動が生じて損傷となるほど大きく発生しない。

このようにタンクは地震時に地盤の傾斜方向や厚さの変化方向に大きく揺れやすいが、代表例としてタンク

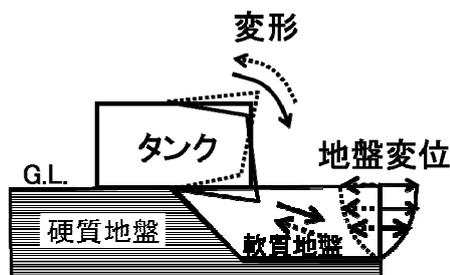


図-6 タンクの地震時挙動の推定図

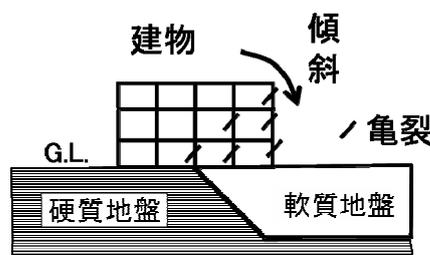


図-7 建物の地震時挙動の推定図

が異種支持地盤状態になっている場合の模式図を
 図-6 に示す. この図ではタンクが硬質地盤と軟質地盤に
 跨って作られており, 地震のとき硬質地盤より軟質
 地盤の方の動きが大きいため, タンクの軟質地盤側は相
 対的に大きく図のように変形する. その結果, 内部液
 体も大きく左右に揺動する.

このようなタンクの変形は図-7 に示す異種支持地盤
 状態にある建物等の地震時の挙動²⁰⁾と類似であり,
 異種支持地盤状態にある建物等は地震被害を受けや
 すいことが既に調べられている²¹⁾.

なお, 2. (3) で述べたように新潟地震で沈下を起
 した石油タンクの地盤の砂質土層間に粘性土が存在し
 ているが, その地盤強度の深度分布は図-8 のよう
 になり, このような地盤強度分布を示す地盤でも各種
 の構造物で地震被害が多く発生しやすいことが調べ
 られている²¹⁾.

5. 対策工法の検討

以上に, タンクは傾斜地盤や厚さの変化する地盤につ
 けられていると地震被害を受けやすいことを述べて
 きたので, ここでは代表例としていわゆる異種支持
 地盤状態で作られているタンクを取り上げて, 地盤に
 着目して対策工法を考えることにする.

タンクが異種支持地盤状態になっていることは地盤
 条件変化点につけられていることを意味するので, タ

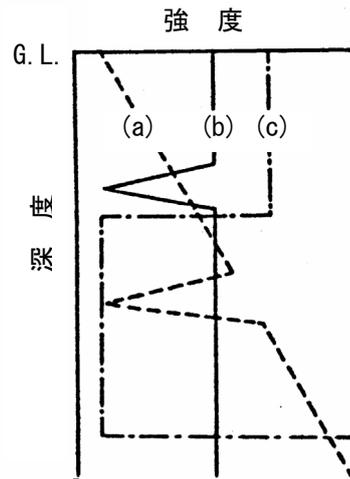


図-8 地震被害の発生しやすい地盤強度の深度分布²⁰⁾

ンク直下の地盤を一様地盤に改良して同種支持地盤状
 態にすれば地震被害を防止あるいは軽減できると考
 えられる. そのために地盤を一様に改良すること
 を取り上げる. その工法を図-9 に示す. 図-9(a)は硬質
 地盤と軟質地盤に跨ってつくられたタンク, 即ち異支持
 地盤状態にあるタンクを示す. 地盤改良工法としては
 図-9(b)~(d)の3つの工法が考えられる. そのうち,
 同図(b)はタンク直下の地盤を硬質地盤と軟質地盤の中
 間の強度に改良し, 同図(c)はタンク直下の地盤を硬質
 地盤と同じ強度に改良し, 同図(d)はタンク直下の地盤
 を軟質地盤と同じ強度に改良する工法である. 同図

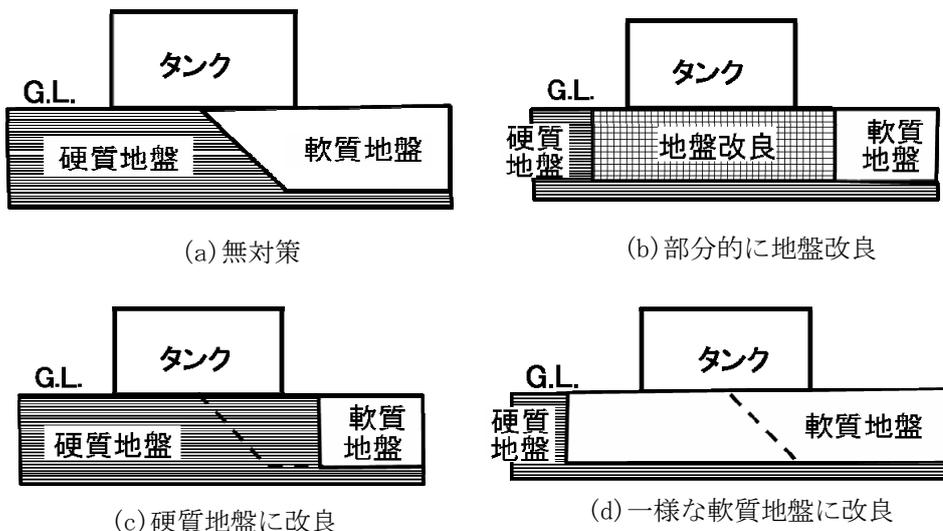


図-9 地盤に着目した対策工法の例

(b)はタンク直下の地盤強度を軟質地盤より大きくし、同図(d)は同地盤強度を軟質地盤と同じにする工法であり、両者は違う工法と考えられる。この同図(d)は軟弱地盤でも浮き基礎や摩擦基礎等の建物や橋梁に地震被害がみられないこと²¹⁾から考えた工法である。また、2.(3)でタンクの地震被害が地盤の良い地区で生ぜず、地盤の悪い地区で被害が生じたことを述べたが、それには地盤が軟弱で(平面的に)強度差があつて不均質であるとその上の構造物に不等沈下等が比較的大きく現れるが、地盤強度がある程度大きくなると、強度差が存在しても構造物の不等沈下への影響が小さいこと等が関係しているものと考えられる。そのため、軟弱地盤でも強度を一様にすればタンクの地震対策になることから同図(d)の工法が考えられた。

6. あとがき

いくつかのスロッシング(揺動現象)や座屈等を起こした石油タンクや給水タンクの地震被害例を地盤に着目して調べた結果を次にまとめる。

(1)地盤の良い地区(地山など)では生ぜず、地盤の悪い地区(埋立地盤など)で被害が生じているタンク基地がある。後者の地盤は一様でないことが多く、このことが被害に大きく影響したことが考えられる。

(2)スロッシング方向が常時からの不同沈下方向とほぼ一致するタンクがあり、しかもその不同沈下は地震のときにさらに大きく生じ、常時と地震時で同じ傾向を示す。

(3)スロッシングによって部分座屈が生じた石油タンクの周囲地盤に亀裂や隆起、沈下等の変形がみられるものがある。

(4)傾斜地盤上の盛土上の給水タンクで盛土厚さの大きくなる方向に液体が振動しタンク側面に部分的座屈が生じているものがある。

(5)地震のときに沈下を起こした石油タンクの砂質土地盤中にシルト等の軟弱層がみられる。

(6)2003年十勝沖地震で苫小牧地区で火災等が発生した石油タンクは砂丘の縁に存在していること等から、石油等のタンクの地震被害に地盤状態が大きく関係していることが推察される。

(7)以上の被害機構も考察するとともに、地盤条件の不連続点でタンク被害が発生していることから、対策工法として地盤に着目して一様地盤にする地盤改良工法を考えた。

このように、タンクの地震被害に地盤が大きく関係していることが推察されたが、今後ともさらに調査を進めて深度化する予定である。

終わりに、以上の調査に当たって御世話になった方々と、参考や引用させて頂いた文献の著者に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1)座間新作:1983年の日本海中部地震による苫小牧での石油タンクの液面揺動について、消防研究所報告,第60号,pp.1-9,1985.9.
- 2)1983年日本海中部地震震害調査報告,(社)土木学会,pp.891-896,1986.
- 3)那須誠,羽矢洋,上沢弘:地震被害と地盤条件(その5),土木学会第17回関東支部技術研究発表会講演概要集,III-28,pp.226-227,1990.3.
- 4)土木学会新潟震災調査委員会編:昭和39年新潟地震震害調査報告,(社)土木学会,pp.629-633,pp.835-839,1966.6.
- 5)那須誠,藤沢一:日本海中部地震による青森駅構内の液状化現象と地盤条件との関係,鉄道技術研究所速報,No.A-87-153,1987.3.
- 6)那須誠:盛土の地震被害と地盤構造,鉄道総研報告,Vol.3,No.8,pp.50-57,1989.8.
- 7)那須誠,羽矢洋:建物の地震被害と地盤構造,鉄道総研報告,Vol.4,No.4,pp.35-44,1990.4.
- 8)日本海中部地震被害調査報告,KHKだより,危険物保安技術協会,第2号,pp.21-58,1984.9.
- 9)渡辺隆:新潟地震におけるバグプロローションの効果,土と基礎,Vol.13,No.4,pp.27-33,1965.4.
- 10)平成15年十勝沖地震による弊社北海道製油所地震被害及び火災事故の原因と再発防止への取り組みについて,タンク火災調査委員会報告別紙,出光石油,2004.6.24.
- 11)1:50,000地質図,苫小牧,北海道開発庁,1959.
- 12)1:25,000地形図,勇払(北西),国土地理院,2003.9.
- 13)藤田健次郎:ロシアンセル地震の被害,スチールテザイ

- ン, No. 98, 新日本製鉄株式会社, pp. 34-37, 1971. 7.
- 14) 那須誠: 地震被害への地盤の影響と被害機構の推定(その 6, 各種構造物の被害と特異地盤), 前橋工科大学研究紀要, 第 5 号, pp. 47-54, 2002. 3.
- 15) 藤田和夫, 笠間太郎: 大阪西北部地域の地質, 地域地質研究報告, 地質調査所, 1982.
- 16) 瀬藤一起, 吉田真吾, 植竹富士: 震源過程モデルによる兵庫県南部地震の強震記録の再生, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会, pp. 97-102, 1996. 1.
- 17) 那須誠: 兵庫県南部地震による震度 VII の領域と地盤, 第 26 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要, I-68, pp. 128-129, 1999. 3.
- 18) 那須誠: 兵庫県南部地震による被害集中領域発生と地盤の関係, 第 7 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシポジウム講演論文集, B3-5, pp. 359-366, 2004. 1.
- 19) 那須誠: 地震被害への地盤の影響と被害機構の推定(その 5, 地震動と地形の関係), 前橋工科大学研究紀要, 第 5 号, pp. 39-46, 2002. 3.
- 20) 那須誠, 久保嘉章: 加速度スペクトルの比較による建物の地震被害に地盤構造が与える影響の考察, 第 10 回日本地震工学シンポジウム(1998)論文集, E2-11, pp. 1753-1756, 1998. 11.
- 21) 那須誠: 地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い, 土木建設技術シンポジウム 2003 講演論文集, pp. 299-306, 2003. 7.
- 22) Takumi TOSHINAWA, Yoshiaki Hisada, Katsuaki KONNO, Akihiro SHIBAYAMA, Yuya HONKAWA and Hiromichi ONO : TOPOGRAPHIC SITE RESPONSE AT A QUATERNARY TERRACE, IN HACHIOJI, JAPAN, OBSERVED IN STRONG MOTIONS, AND MICROTREMORS, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 3453.