

地盤変状で生じる基礎の変位と配管設計

株式会社 プラント耐震設計システムズ
池 田 雅 俊

1. まえがき

第 7 講で述べたように配管系の被害はいくつかの類型（損傷モード）に分類される。図 1-1（再掲）に示すように、地震時の配管及び配管支持構造物又は周辺設備の地震時の挙動により、配管に付加される慣性力（同図中 A）強制変位（同図中 B 又 C）により配管に過大な応力が生じ損傷にいたるものである。

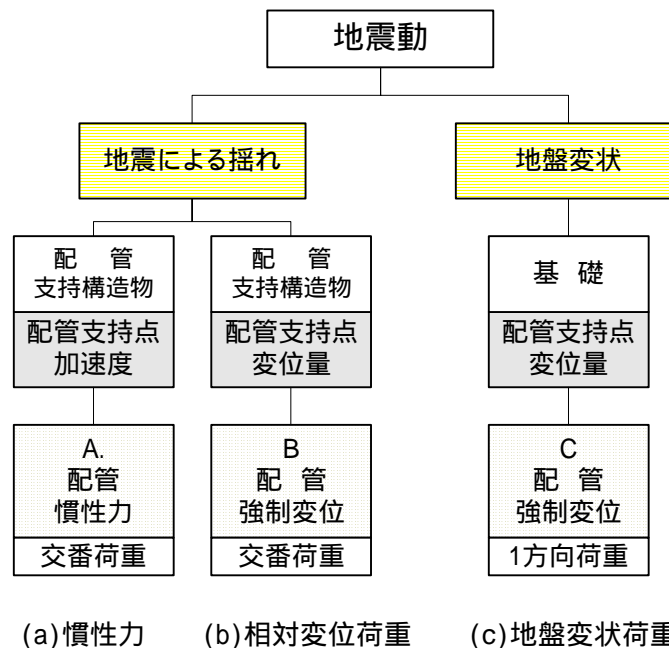


図 1-1 配管の地震時の挙動図

配管に付加される慣性力は、配管及びその他部材（バルブ、フランジなど）に生じる加速度に当該質量を乗じて算出する。

配管に作用する強制変位は、図 1-1 の B 又は C に分類される。B に関する強制変位は、配管を支持するサポート又はノズルが地震時に移動することにより生じる変位である。サポート又はノズルは、配管支持構造物（架構、パイラックなど）又は塔槽類に固定されており、これらの構造物の地震応答による揺れにともない変位（交番荷重として作用）する。簡易計算法は、第 6 講の第 3 節で解説した。

C に関する強制変位は、地盤の液状化による地盤の沈下及び側方流動（以下まとめて「地

盤変状」という。)により、上記の配管支持構造物又は塔槽類基礎の移動にともなう変位である。当該変位は一般に大きな1方向の変位であり、A又はBによる荷重にたいする評価基準とは異なる。

今回は、地盤変状にともなう配管の強制荷重を評価するために必要な基礎の変位量の計算方法を示す。

2. 地盤変状に係る配管設計

2.1. 考慮する基礎の移動と配管設計

一例として地盤が側方流動で基礎が移動する場合について図 2-1 にしめす。

地盤が液状化し、護岸が図のように海側へはらみだすと地盤は流動(以下「側方流動」という。)し、配管は大きく変形を受ける。兵庫県南部地震の例では、護岸のはらみだしは、3 mにも及び多くの配管損傷が発生した。

この場合、地盤変状に関する変位量は一般に1方向であるので、

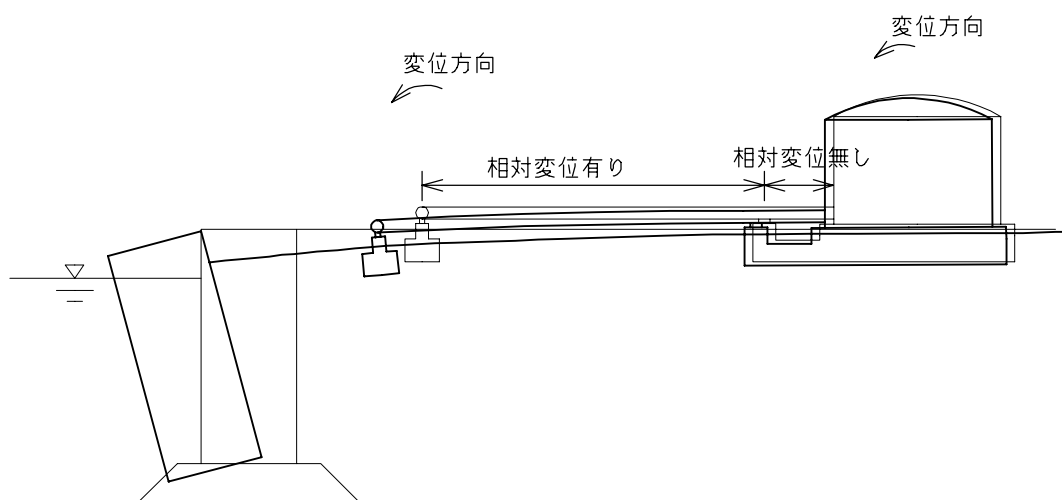


図 2-1 側方流動による配管の変位モード

相対変位を算定する配管スパン両端のサポート2点はいずれも水平方向には陸側から海側へ移動、鉛直方向はいずれも沈下方向(ただし杭基礎の場合は沈下小)に移動すること(一方向変位)が明らかのため、算定は2点の絶対変位の差として取ることができる。また、基礎の傾斜も陸側が高く、海側が低い変形モードとなるので1方向の傾斜のみを対象として良い。

また、配管の支持スパンは長くとも10m以下となると思われ、同じタイプの基礎間では、問題となるような相対変位が生じる場合は少ない。以下の場合のように基礎タイプが異な

る場合についてのみ検討が必要となる。

- ・ 一方の基礎が杭基礎、もう一方が直接基礎の場合
- ・ 両方とも直接基礎だが、一方は配管のみを支持する小規模な基礎、一方は機器・大きな架構で基礎寸法が大きな場合

また、上記の場合でも配管側で大きな相対変位に対して支持点を解放するなどの相対変位対策が施される場合、実質上基礎変位は問題とならなくなる。

液状化・流動時の基礎変位の算定は、複雑な内容を有するが、機器・配管等と総合して最適な対策を取ることが必要である。

一般に地盤が液状化する場合、基礎の移動は下記のように沈下及び水平移動を考慮する必要がある。

- ・ 地盤の液状化に伴って生じる基礎の沈下
- ・ 地盤の液状化に伴って生じる基礎の不同沈下
- ・ 地盤の流動に伴って生じる基礎の沈下
- ・ 地盤の流動に伴って生じる基礎の同沈下
- ・ 地盤の流動に伴って生じる基礎の水平移動

基礎が沈降・水平移動して配管の強制変形を考える場合、

- ・ 基礎の変位を算定し、配管・配管支持構造にて変位を吸収できることを確認する。
- ・ 配管を共通基礎上に設置し、共通基礎上の配管は強制変形を防止する。
- ・ 基礎の変位を防止することにより配管の強制変形を防止する。地盤の液状化対策等がこれに当たる。

の3つの対策が考えられ、場所・支持距離・支持方法等を考慮して最適な対策を実施する必要がある。

2.2. 地盤変状に係る基礎の移動

地盤の液状化並びにその後の地盤の沈下及び水平移動により配管支持構造物の基礎に水平、鉛直及び回転（傾斜）が生じる。

地盤変状に係る基礎の移動量は次により算出することができる。

地盤の液状化及び流動に伴う基礎の沈下

地盤の液状化及び流動に伴う直接基礎の沈下量は、3.2節及び4節により算出する。

地盤の液状化及び流動に伴う杭基礎の沈下量は、当該杭の支持力が確保できる場合にあっては、基礎の沈下はないとしている。

地盤の液状化及び流動に伴う基礎の不同沈下

地盤の液状化及び流動に伴う直接基礎の不同沈下量は、4節より算出する。

地盤の液状化及び流動に伴う杭基礎の不同沈下量は、当該杭の支持力が確保できる場合にあっては、基礎の不同沈下はないとしている。

地盤の流動に伴う基礎の水平移動

地盤の流動に伴う直接基礎の水平移動量は、3.1 節により算出する。

地盤の流動に伴う杭基礎の水平移動量は、杭基礎に流動力が作用した時の杭の水平変位量より算出する。

2.3. 地盤変状に係る配管強制変位量の計算

地盤変状に係る基礎の移動量に基づき異なる配管支持構造物の基礎間の相対移動量を算出して、当該相対移動量が配管へ強制変位として作用する時の、配管の健全性の評価を行う。

この場合基礎間の水平方向強制変位 $\Delta_{12}(x)$ 及び強制鉛直方向変位 $\Delta_{12}(y)$ は次式により算出する。

$$\text{水平方向強制変位： } \Delta_{12}(x) = (x_2 - \theta_2 H_2) - (x_1 - \theta_1 H_1) \quad (\text{式 } 2-1)$$

$$\text{鉛直方向強制変位： } \Delta_{12}(y) = y_2 - y_1 \quad (\text{式 } 2-2)$$

ただし、 x_1 、 x_2 、 y_1 、 y_2 、 θ_1 、 θ_2 、 H_1 及び H_2 は図 2-2 及び表 2-1 によるものとする。角度は反時計回りを正とする。

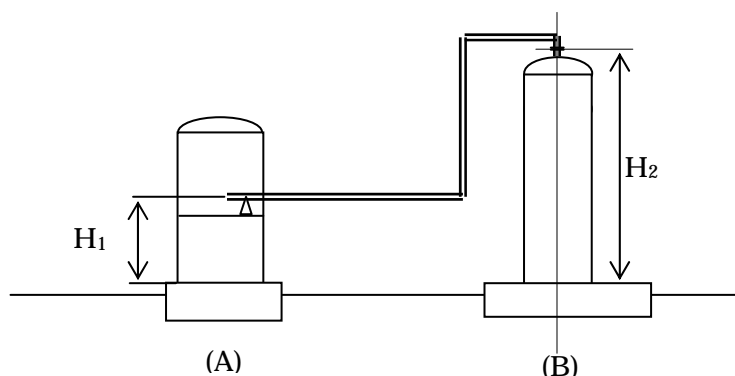


図 2-2 配管支持構造物

表 2-1 配管支持構造物基礎の変位

配管支持構造物	(A)	(B)
水平変位(mm)	x_1	x_2
鉛直変位(mm)	y_1	y_2
回転角度(度/イソ)	θ_1	θ_2

3. 地盤変状における地盤の移動

3.1. 地盤の水平移動

流動するおそれがある地盤では、流動に伴う地盤の水平移動量を適切な方法により算定する。ただし、異なる配管支持構造物間に生じる相対変位が、両者の基礎を共通基礎とする等の方法で防止されている場合には検討を省略することができる。

地盤変状に伴う地盤の移動量の算定方法に関する研究は、盛んに行われているが、現時点では確立するには至っていない。ここでは参考として、過去の震害事例に基づく地盤変状量の算定方法（簡便法）について示しておく。

以下の手順に従い、護岸背後地盤の水平移動量を簡易に推定することができる。

[手順1：護岸変位量の推定]

レベル2地震動に対して、護岸背後及び基礎地盤の液状化の検討を行い、(式) 3-1 及び表 3-1 を用いて、護岸の水平移動量 を求める。

$$\Delta = \frac{F_d}{100} \cdot H_w \quad \text{(式) 3-1}$$

ここに、 Δ : 護岸の水平移動量 (単位 m)

F_d : 護岸の変形率 (護岸の水平移動量 / 護岸の高さ) (単位 %)

H_w : 護岸の高さ (単位 m)

表 3-1 護岸・岸壁の変形率

重力式		矢板式		
液状化の範囲	変形率 (%)	液状化の範囲	変形率 (%)	
護岸背後のみ液状化	15.0	護岸背後のみ 液状化	控工周辺は非液状化 控工周辺も液状化	20.0
				40.0
護岸背後及び基礎 地盤が液状化	30.0	護岸背後及び基礎地盤、控工周辺 すべてが液状化	75.0	

ただし、表 3-1 は以下の条件の範囲内における事例をまとめたものから設定しており、他の条件の護岸の場合は表中の変形率と異なる可能性があることに注意する必要がある⁶⁾。なお、同表は文献 5)の研究結果に、矢板護岸のレベル2での変形率を加筆作成したものである。

- a) 水深-8.0 ~ -14.0m程度の大型ケーソンまたは矢板式護岸
- b) 設計震度 0.2 以下で耐震設計がなされている護岸
- c) 基礎地盤の緩い砂質土の層厚は 25m程度以下

[手順2：流動範囲の推定]

液状化が生じると推定される層のN値と、(式) 3-1 から求めた護岸の水平移動量から、

(式) 3-2 を用いて、流動範囲（流動が生じる範囲）を推定する。

$$L = 250 \cdot \frac{\Delta}{(N_1)_{av}} \quad (\text{式}) \ 3-2$$

ここに、L：地盤の流動範囲（単位 m）

：護岸の水平移動量（単位 m）

$(N_1)_{av}$ ：流動範囲内の液状化層における基準化N値の平均値。

なお、基準化N値とは有効上載圧 98kN/m^2 相当に換算したN値であり、(式) 3-3 より得られる値とする。

$$N_1 = \frac{1.7N}{\frac{\sigma'_v}{98} + 0.7} \quad (\text{式}) \ 3-3$$

ただし、 σ'_v ：有効上載圧（単位 kN/m^2 ）

[手順 3 : 水平移動量分布の推定]

図 3-1 に示す関係を用い、対象地点の地盤の水平移動量を推定する。なお、図 3-1 は兵庫県南部地震における地盤の変位量を調査してまとめたものである⁴⁾。

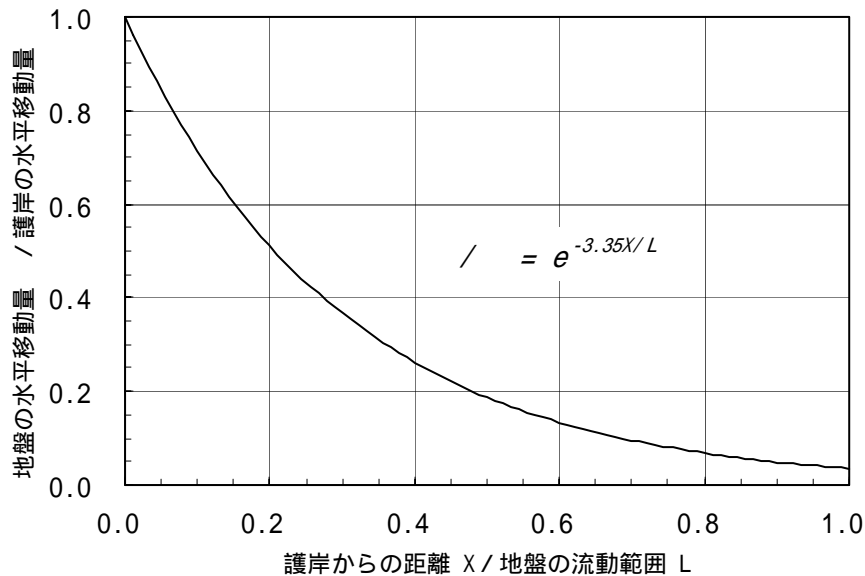


図 3-1 護岸背後地盤の水平移動量分布⁴⁾

なお、詳細な地盤モデルを用いた応答解析による方法（詳細解析法）による液状化に伴う流動現象を数値解析で追跡する試みは最近数多く行われるようになってきた。現在のところ、これらの解析手法は大きく分けて次の 2 種類の仮定の基に行われている。

液状化土層を非常に小さい剛性の土と仮定するもの

液状化土層を粘性流体と仮定するもの

は、従来の液状化の考え方を踏襲したもので、過剰間隙水圧の上昇に伴う有効応力の減少によって、土の剛性・強度が低下し、その極限状態を流動とする解釈であり、具体的には次の 2 方法がある。

- 液状化前の地盤の変位量と液状化後の地盤剛性の低下を考慮した状態における変位量を各々弾性 F E M 解析による自重解析により求め、その差を流動量とする便宜的方法〔例えば文献 1)〕。
- 適切な応力 - ひずみ関係及び過剰間隙水圧モデルを用いて、過剰間隙水圧の発生に伴う有効応力の変化を考慮した時刻歴応答計算を行う有効応力解析により流動量を算定する方法〔例えば文献 2)〕。

一方、の方法は液状化した土を粘性流体と考えるもので、したがって運動方程式も固体の方程式ではなく、流体の方程式となる。この方法はの方法に比べて歴史が浅いが、現在、解析が進められ、実験や被害事例との対比が行われているところである。

3.2. 地盤の沈下

液状化又は流動するおそれがある地盤では、液状化に伴う地盤の沈下量を適切な方法により算定する。ただし、杭基礎や共通基礎の採用で隣接する配管支持構造物の基礎間に生じる相対沈下が防止されており、かつ構造物全体の安定性の検討が不要な場合には検討を省略してもよい。

過去の震害事例に基づいて提案された簡便法の一例を以下に示す。

液状化に伴う地盤沈下の原因には次の二つのものが考えられる。

a) 液状化により発生した過剰間隙水圧が消散する過程で生じる土の圧縮に伴う地盤沈下

b) 護岸のはらみだし、傾斜等により発生する液状化地盤の流動に伴う背後地盤の地盤沈下

したがって、護岸背後地盤ではこの2つの原因による地盤の沈下を考慮する必要がある。

a)の沈下量に関しては、室内要素試験をもとにいくつか研究が行われてきている。これらの研究の内、 F_L 値と相対密度 D_r から求められる体積ひずみ v_v との関係がクリーンサンドについて図 3-2 のように提案されている³⁾。細粒分が含まれる実地盤における液状化時の体積ひずみに関しては今後の研究を待たねばならないが、現時点では適切な相対密度を推定して同図を用いている。

b)の沈下に関しては、兵庫県南部地震の後、研究が始められたところであり、その例は少ないが、兵庫県南部地震の現地調査結果より図 3-3 に示すような関係が得られている^{10. 2-6)}。

そこで、これらの研究成果を利用し、(式) 3-4 により護岸背後地盤の液状化に伴う地盤沈下を推定することができる。

$$w = v_v Z + S \quad \text{(式) 3-4}$$

ただし、 w ：護岸から距離 x (m)の地点における地盤の沈下量(m)

v_v ：過剰間隙水圧の消散に伴って生じる体積ひずみで、図 3-2 から求める。

Z ：距離 x (m)の地点における液状化層厚(m)

S ：距離 x (m)の地点において、地盤の流動に伴って発生する地盤の沈下量(m)で、図 3-3 に示す関係図を用いて求める。

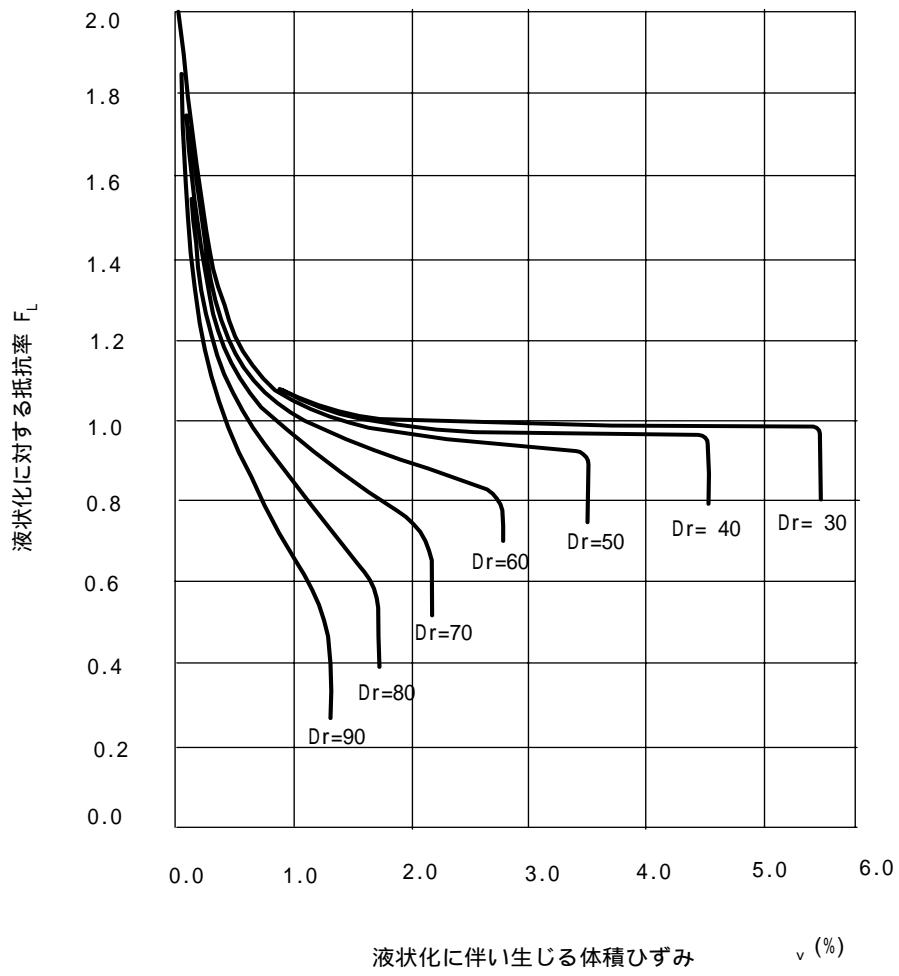


図 3-2 F_L 値、相対密度 D_r と体積ひずみ v の関係³⁾

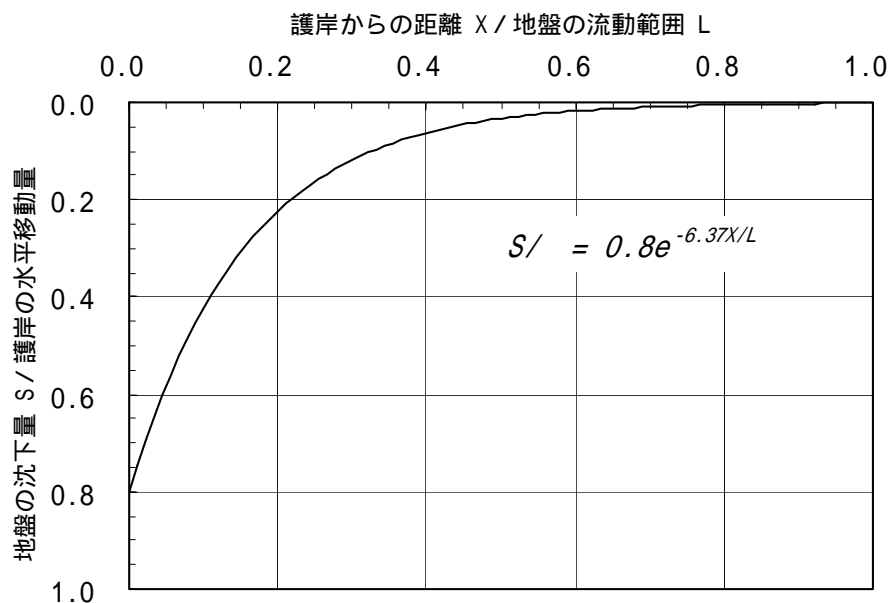


図 3-3 地盤の流動に伴う地盤の沈下量⁶⁾

4. 地盤変状に伴う直接基礎のめり込み沈下

液状化・流動の恐れのある地盤上に設置された配管支持構造物の直接基礎については、変位（沈下・傾斜および水平移動）を算定して基礎 - 基礎間の相対変位を配管系レベル 2 耐震性能評価に反映する。ただし、共通基礎とする等の方法により、地盤変状時において相対変位の発生が防止されている区間は除く。

基礎の変位を算定、特に基礎の地盤内への沈降を考慮する場合は、過去の事例から変位を予測する例をしめす。

図 4-1 には直接基礎における兵庫県南部地震の高圧ガス施設の事例及び建築物の事例⁷⁾の周辺地盤と基礎間のめり込み沈下 基礎幅の関係を示した。

また、吉見・時松⁸⁾は新潟地震の際に液状化により沈下した鉄筋コンクリート建物 3 5 棟についての全体沈下量と建物幅 / 液状化深さの関係を図 4-2 にまとめている。

また、日本海中部地震によるタンクの被害⁹⁾については全体沈下量とタンク直径及びタンク直径 / 液状化深さの関係につき図 4-3 の報告がなされている。

また、地盤改良を実施した場合は、地盤沈下量 / 周辺地盤と基礎間のめり込み沈下量のいずれも減少すると考えられる。ただし、いずれの場合も建物幅・タンク径は 6 m 以上の事例が主体であり、これより小規模の基礎についての沈下量は増加すると予想されるもののデータは少ない。

液状化 - 直接基礎の沈下メカニズムの考察と要因分析による簡易推定式が提案され、上記

の事例を含めた実測例とを比較した研究が報告されているが推定値と実測値を一致させるには更に検討が必要とされている。¹⁰⁾

なお、**図 4-1(b)**において、その傾斜と沈下を整理すると傾斜(不等沈下量/基礎幅)は $0.0004 \times$ 平均沈下量 (cm) に整理できる。ただし、事例の基礎幅は 6 m 以上であり、それ以下の幅の小さく、相対的にアスペクト比が大きな基礎については更に傾斜が大きくなると思われる。**図 4-1** の直接基礎における兵庫県南部地震の高圧ガス施設の事例及び建築物の事例⁷⁾の傾斜 ー り込み沈下の関係で検証も加えた結果、幅の小さな基礎では最大値として 4 倍の $0.0016 \times$ 平均沈下量 (cm) が適当と判断した。

8 m 幅程度の基礎：傾斜(不等沈下量/基礎幅) = $0.0004 \times$ 平均沈下量 (cm)

3 - 4 m 幅の基礎：傾斜(不等沈下量/基礎幅) = $0.0016 \times$ 平均沈下量 (cm)

ただし、上式は偏心の小さな事例であり、基礎の常時の偏心が大きい場合、傾斜は急激に増加すると思われる。従って偏心の大きな基礎の場合は、基礎スラブ形状を工夫して極力偏心をなくす配慮が必要である。

以下に、簡易的な自重解析による推定方法を示す。

液状化層の剛性低下を考慮して地中応力による沈下を下記により計算する。この場合、水平変位は地盤の変位と同じと考え、傾斜は過去事例で示した平均沈下量との関係を用いる。

有限厚さの地盤上の荷重面の沈下量については、Steinbrenner の近似解が使われる。成層地盤については、

$$SE = \left\{ \frac{\mu_h(H1, \nu1)}{E1} + \frac{\mu_h(H2, \nu2) - \mu_h(H1, \nu1)}{E2} \right\} q\sqrt{A} \quad (\text{式}) \quad 4-1$$

ここに、

SE ; 基礎の沈下量

μ_h ; 地盤ポアソン比・厚さ・基礎底面形状から決まる係数

H1, $\nu1, E1$; 第 1 層 (上層 / 地下水位上の非液状化層) の厚さ、ポアソン比、縦弾性係数

H2, $\nu2, E2$; 第 2 層 (下層 / 地下水位下の液状化層) の厚さ、ポアソン比 (= 0.5)、縦弾性係数

q ; 基礎の平均荷重

A ; 基礎底面積

液状化後の剛性低下率として以下の値を用いて、地盤の縦弾性係数を調整して良い。

表 4-1 液状化後の剛性低下率

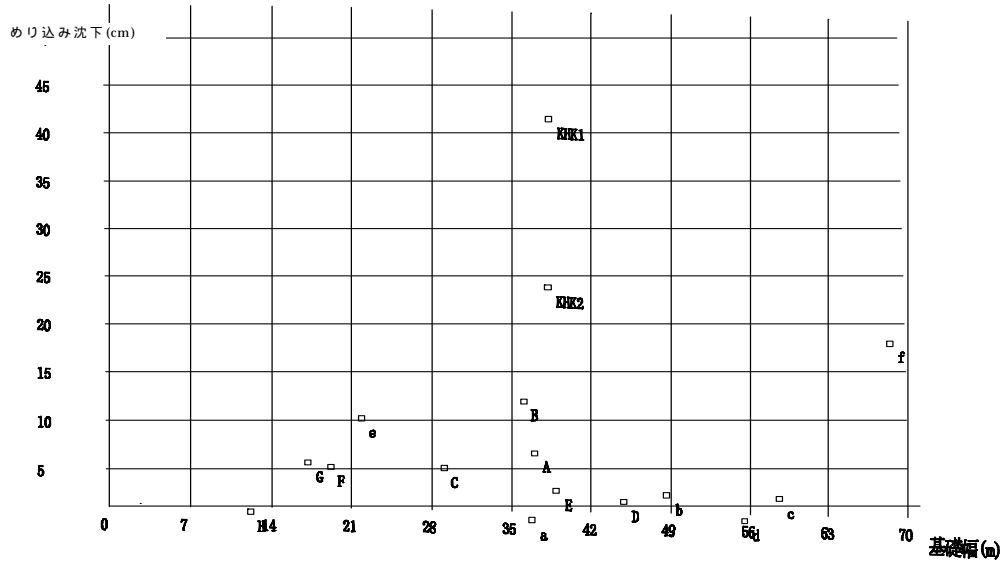
液状化地盤の N 値	4	6	8	12	16	24
剛性低下率	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/33

なお、詳細な解析法による推定法としては下記の方法が提案されている。

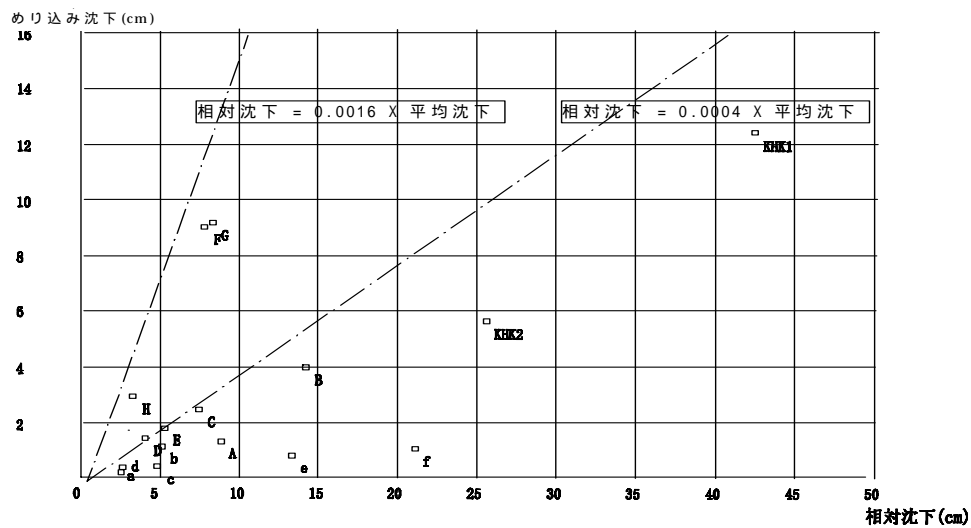
有効応力解析：応力 - ひずみ関係及び過剰間隙水圧モデルを用いて、過剰間隙水圧発生に伴う有効応力の変化を考慮して地盤の変形・流動を算定する方法

残留変形解析：液状化に伴う地盤の剛性低下を考慮して、弾性 F E M により自重効果を含め変形・流動を算定する方法（例えば文献 11）等）

ただし、上記 ① では、流動する範囲全体をモデル化した解析が必要となる。



(a) めり込み沈下 - 基礎幅



(b) めり込み沈下 - 基礎傾斜

図 4-1 直接基礎における兵庫県南部地震時の
高圧ガス施設の事例及び建築物の事例⁷⁾

記号 KHK1, KHK2: 高圧ガス施設の事例, H, a-f: 建築物の事例

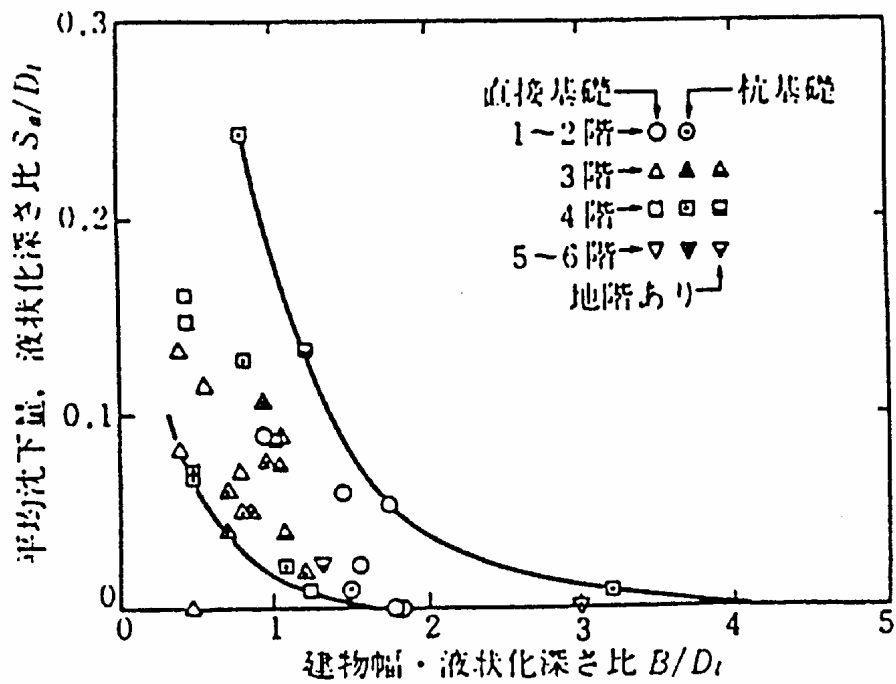


図 4-2 液状化深さによって無次元化した建物の沈下量と幅比の関係⁸⁾

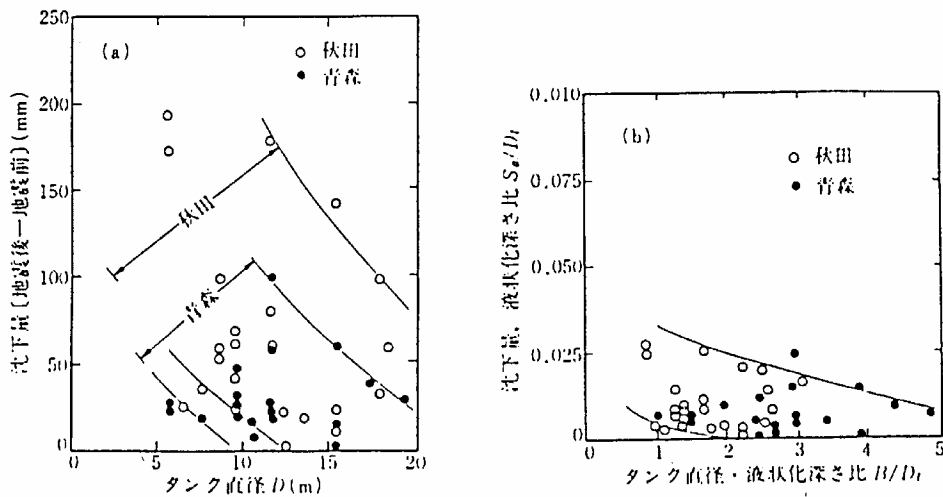


図 4-3 日本海中部地震によるタンクの沈下量と直径、液状化層の深さの関係⁹⁾

5. あとがき

今回は地盤変状による基礎の変位に基づく配管強制変位の計算方法について解説した。地盤変状（地盤の液状化及び液状化に伴う側方流動）による配管の被害は兵庫県南部地震で顕著に現れ、高圧ガス設備では地盤変状の影響により LPG 大型平底円筒形貯槽の受払い配管から大量の LPG が漏洩してその安全性の検討が義務付けられた。本稿では基礎の移動量の算定方法にかんして過去の震害事例に基づいて提案された簡便法を中心に解説した。

文献

- 1) 小笠原政文・角田浩・牧田篤弘他：地盤の側方流動を受ける基礎構造物の設計手法，構造工学論文集，Vol.44A, pp1623-1628, 1998
- 2) 井合進：FLIP による解析，地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集，pp94-103, 1989
- 3) Ishihara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquake, 土質工学会論文報告集, Vol.31, No.2, pp173-188, 1992.
- 4) Ishihara, K., Yoshida, K. and Kato, M. : Lateral Spreading of Liquefied Deposits during the 1995 Kobe Earthquake, KIG Forum'97, Geotechnical Engineering in Recovery from Urban Earthquake Disaster, pp.31-50, 1997.
- 5) 井合進・一井康二・森田年一・佐藤幸博：既往の地震事例に見られる液状化時の護岸変形量について，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp259-264, 1997
- 6) 石原研而・安田進・井合進：液状化にともなう岸壁・護岸背後地盤の流動の簡易予測方法，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp541-544, 1997
- 7) 加倉井正昭・青木雅路・平井芳雄・俣野博：埋立て人工島における直接基礎の挙動、土と基礎 Vol.44No.2Ser.No.457, 1996
- 8) 吉見吉昭・時松孝次：Settlement of Buildings on Saturated Sand During Earthquakes, 土質学会論文報告集、Vol.17, No.1, pp23-38, 1977
- 9) 土木学会：1983年日本海中部地震震害調査報告書、1986
- 10) 安田進・酒井達史・佐藤正行・吉田望：液状化にともなう鉄塔基礎の沈下量の簡易推定方法，土木学会第52回年次学術講演会，1997
- 11) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義：液状化に伴う地盤の大変形の簡易予測方法、土と基礎 Vol47, No.6, 1999