

地中構造物の液状化時浮き上がり判定方法

濱野雅裕¹・磯山龍二²

¹正会員 工修 日本技術開発(株) (〒164 東京都中野区本町5-33-11)

²正会員 工博 日本技術開発(株) (〒164 東京都中野区本町5-33-11)

液状化の構造物へ与える影響としては、支持力の減少、地盤沈下による影響、水平方向永久変位による土圧等の影響があるが、浮力の発生も大きな影響を持つ。特に地中の見かけの比重が小さい埋設管や、地下タンク、マンホール等の地中構造物は、液状化時の浮力により、浮き上がりはじめ、顕著な場合には地表に突出することもある。本報告は、過去の事例の整理を行い、どのような状態で地中構造物の浮上が発生していたかを概観し、浮上のメカニズムを考察、これに基づき主に線状地中構造物を対象とした浮き上がり判定手法を提案したものである。

Key Words : liquefaction, uplift, buried structure, excess pore water pressure

1. はじめに

地中構造物の設計において液状化時の浮上安定の判定はきわめて重要である。たとえば、下水道管路においては浮上をはじめることが、すなわち機能的に重大な被害となる。また、水道管にとっても継手が開くなど、浮上の開始が直接被害に結びつく場合もある。一方、縦断方向に変形性能の大きい溶接鋼管のガス導管などでは、浮上を開始しても管は変形するが、機能的な被害には至らない場合もある。ただし、管が地表を突き破って露出したり、道路面を盛り上げたりすれば、ガス管としての機能上の問題はなくとも、道路へ被害を与えることになり、これを防ぐような設計のクライテリアが必要になる。

本研究は、地中構造物の液状化時浮き上がり判定方法についての基礎資料を作成することを目的に、地中埋設管等の被害事例より浮き上がりのメカニズムを推定・整理し、浮き上がり判定手法を提案し、試算による事例検証等を行ったものである。

2. 浮き上がり被害の実体

過去の地震における液状化による浮上例としては、1964年新潟地震における下水道管路(ヒューム管φ700mm)の浮上りや、1968年十勝沖地震における下水道雨水幹線(2250×1350mm)および工業用水道管(遠心力鉄筋コンクリート管φ900~1650mm)の浮上例²⁾などが報告されており、これらの管はいずれも未舗装路直下に埋設されたものであった。

逆に浮上しなかった例としては、1983年日本海中部

地震の際、能代市において液状化した地域のほぼ全てで下水道管の目地ずれ、開き、管体亀裂等の被害が発生したが、管が地表に突出するようなことは無かった。管内に土砂が流入・堆積していたことが要因の一つと考えられるが、管の埋設されていた道路は全て舗装されていた。

最近の事例では、1993年釧路沖地震において下水道管渠とマンホールの浮上例が報告されている³⁾。図-1に示すように、マンホールの突出が認められたのは、国道44号に沿った桂木一丁目および木場二丁目の歩道部に設置されたものである。最大突出量は、ニチイ側ルート¹⁾のNo.65で地表から146cmの高さまで浮上した。

管渠については、後の掘削調査で明らかになったものであるが、図-2に示すように管渠がマンホール以上に浮上していた部分があることから、浮上したことはほぼ

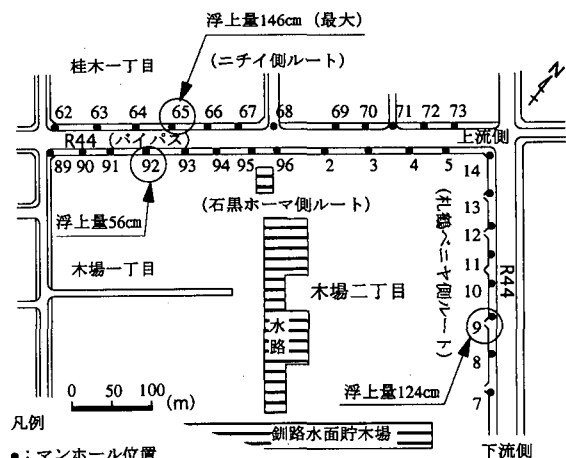


図-1 1993年釧路沖地震によるマンホールの浮上 (文献3)に加筆

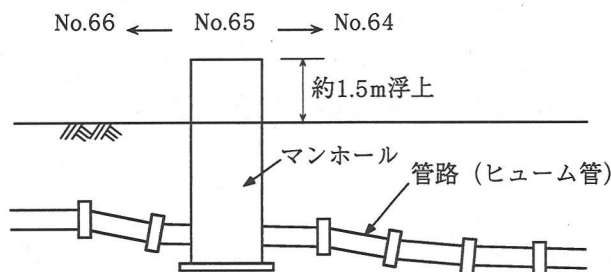


図-2 ニチイ側ルートのマノホール掘削状況のスケッチ⁴⁾

間違いないと考えられる。管渠は口径 250~300mm のヒューム管であり、継ぎ手部はこの状況でも破損していないため、管内には土砂は流入していない。また、管渠はマンホールのように地上部に突出するような状況とはなっておらず、地中部で留まっていた。このように、管が浮上したが地表には至らなかった例が、新潟地震の水道管についても報告されている。

3. 浮き上がり判定手法の提案

(1) 浮き上がりメカニズムの推定

2. に示した被害事例を踏まえて、地中埋設管の浮き上がりメカニズムについて推定し、整理したものを図-3 に示すとともに、以下にその内容を示す。

- ①地中構造物(管)は、地震前には静水圧による一定の浮力を受けており、自重あるいは上方の土の強度により、つり合った状態で静止している。
- ②地震動を受け、管周辺の地盤が液状化しはじめると、過剰間隙水圧の上昇に伴って管の全周面で積分した水圧は上向きに増大していく(すなわち、浮力)。管の自重(内容物を含む)および土の強度のバランスによっては、この状態でも浮上を始める。
- ③周辺の土が完全に液状化した状態では、土の強度は無くなり、この時には自重と浮力(②で述べた力)とのバランスになり、浮力が勝れば管は浮上をはじめ。この状態を「浮き上がりの起動」と呼ぶことにする。この完全に地盤が液状化した状態では、土砂は液体と考えられるため、地中構造物の挙動はアルキメデスの原理に従うと考えることができる。すなわち、地震前後の浮力は、次のように変化する。

$$F_w = V \cdot \gamma_w \rightarrow F_l = V \cdot \gamma \quad (1)$$

- ここに、 F_w : 地震前の浮力
 F_l : 完全液状化時の浮力
 V : 地中構造物(管)の体積
 γ_w : 水の単位体積重量
 γ : 液状化した土の単位体積重量

- ④浮力により管は押し上げられ、管上面の土砂は圧縮されつつ、順次管の底面にまわりこむ、この時、管上面を含む液状化した土砂の抵抗(粘性抵抗的なもの)お

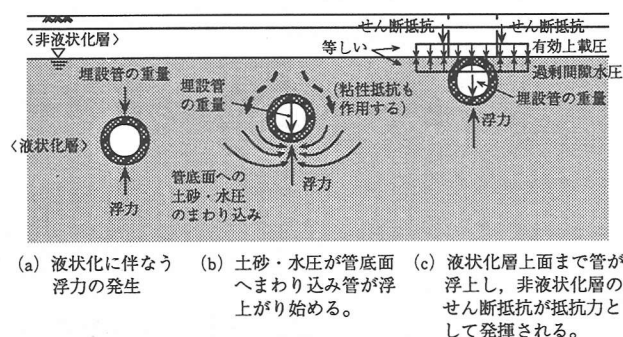


図-3 浮き上がりメカニズムの概念図

よび管下面において負圧が浮き上がりに対して抵抗力として働く。これらの力については現状ではよくわからないが、安田他の実験⁵⁾によれば、これらの力が管の浮上を止め、引き続き加振することにより、再度浮上をはじめ、地表面に達するまで、この過程を何度かくり返すことが確かめられている。

- ⑤液状化が十分に継続し、管の上面が非液状化層に達すると新たな力のつり合いの状態に達する。すなわち、管は舗装を含む非液状化層の抵抗を受けることになる(円形管の場合、管上面の土の重量は、過剰間隙水圧とバランスする)。浮力がこの抵抗、管の重量に勝れば、管は地盤面を押し上げて、突出あるいは地盤面が盛り上がるような状況が想定される。

(2) 浮き上がり判定手法の提案

地中埋設管の浮き上がりメカニズムを踏まえて、2段階の浮き上がり判定手法を以下のとおり提案するとともに、以下に判定手法をまとめる。

- ①管が浮力を受けて浮き上がるか否かの判定を行う(浮き上がり起動安全率の計算)
- ②起動した管が液状化層上面に達した状態を想定し、管が舗装等非液状化層を突き破るかどうかの判定(浮き上がり安全率の算出)

起動安全率の計算については、従来の浮き上がり判定手法には無かった考え方である。しかし、下水道管のような継手の変形性能の小さい管路では土砂流入が問題になること、変位吸収継手を持たない水道においても継手の開き、離脱につながることで、また、共同溝のように收容物件を有するものも、目地のずれ等は土砂流入も含めて問題となることなどにより、考慮することとした。

a) 起動安全率の算出・判定

図-4 (a) の状況において管の起動安全率を算出する。

$$F_{ul} = W_B / (V_0 \cdot \gamma_s) \quad (2)$$

- ここに、 F_{ul} : 浮き上がり起動安全率
 W_B : 埋設管の単位長さ当たりの重量(tf/m)

V_0 : 埋設管の単位長さ当たりの体積(m^3/m)
 γ_s : 液状化層の飽和単位体積重量(tf/m^3)

式(2)で $F_{u1} < 1$ の場合、この管は「浮き上がり起動」を受けると判定する。

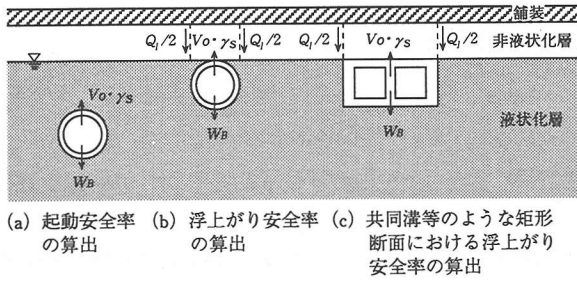


図-4 浮き上がり判定の概念図

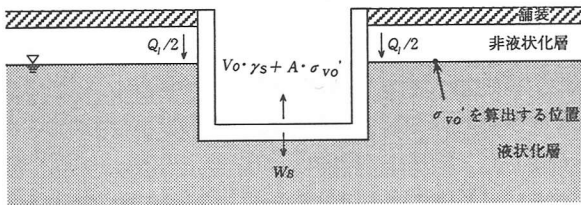


図-5 半地下構造物等の浮き上がり判定の概念図

b) 浮き上がり安全率の算出・判定

管上面が非液状化層下面まで浮上してきた状況を考え(図-4(b))、次式で管の浮き上がり安全率を算出する。

$$F_{u2} = (W_B + Q_i) / (V_0 \cdot \gamma_s) \quad (3)$$

ここに、

F_{u2} : 浮き上がり安全率 W_B : 前出 V_0 : 前出
 γ_s : 前出 Q_i : 非液状化層のせん断抵抗値(tf/m)

非液状化層のせん断抵抗値 Q_i は、下式のせん断応力を求め、これの非液状化層での総和を求めて算出する。

$$\tau_s = c + K \sigma_v' \tan \phi \quad (4)$$

上式において c 、 ϕ は非液状化層の粘着力および内部摩擦角、 K は静止土圧係数で 0.5 としてよい。また σ_v' は、せん断力を考える位置での有効上載圧である。 Q_i を算出する際、舗装(路盤含む)の部分はその層厚が相対的に薄いことを考え、無視するのが良いと考えられる。

共同溝のように躯体形状が矩形で、かつ断面寸法が大きいものでは、液状化層上面まで浮上した際、躯体は非液状化層に密着し、過剰間隙水圧がその隙間に入りにくくなるため、躯体上面に作用していた鉛直下向きの力が減少する。しかし、その分だけ上載土砂重量が作用するため、結果的に式(3)を適用することでよい(図-4(c))。また、図-5に示すように半地下構造物やマンホール、立坑といった上載土砂を有しない構造物の場合の判定式は下式のとおりとなる。

$$F_{u2} = (W_B + Q_i) / (V_0 \cdot \gamma_s + A \cdot \sigma_{v0}') \quad (5)$$

ここに、

F_{u2} : 半地下構造物等の場合の浮き上がり安全率
 W_B : 躯体の単位長さ当たりの重量(tf/m)
 Q_i : 躯体と非液状化層との間に生じるせん断抵抗値(tf/m)
 V_0 : 液状化層中の躯体の単位長さ当たりの体積(m^3/m)
 γ_s : 液状化層の飽和単位体積重量(tf/m^3)
 A : 躯体の単位長さ当たりの底面積(m^2/m)
 σ_{v0}' : 液状化層上面における有効上載圧(tf/m^2)

上記はいずれも構造物の横断方向に対する浮き上がり判定手法を述べたものである。溶接鋼管等の一体管構造の場合、あるいは変位吸収継手を有する水道管等では、起動安全率が1以下となった場合、縦断方向の変形状態によっては管体応力が許容値を超過することもありうるため、浮上に対して縦断方向の浮力分布を考慮して、縦断方向の検討を実施する。

4. 提案手法にもとづく試算

(1) 溶接鋼管に対する試算

横断方向に対する浮き上がり安定検討として、溶接鋼管(ϕ 300~900)を対象とし、浮き上がり起動安全率および地下水位の変化に対する浮き上がり安全率を試算した。

a) 検討条件

図-6に検討条件を示す。管の埋設位置は、市街地以外のやや舗装の悪い道路を想定して土被り 1.5 mとし、地下水位は路盤下から管上面まで変動するものとした。なお、管内は気体とし、その重量は考えない。

b) 検討結果

浮き上がり起動安全率は、管径が小口径でも大口径でも 1.0 を下回り、浮上を始めることが明らかとなった。また、図-7に浮き上がり安全率を示すが、小口径の ϕ 300 では地下水位が GL-50cm より深くなれば F_{u2} は 1.0 を上回るものの、それより口径の大きい管では水位が GL-1~1.5m 程度になってようやく 1.0 を上回り、相対的に浮き上がりに対する安定性は低くなる。また、いずれの管においても地下水位の変化による浮き上がり安

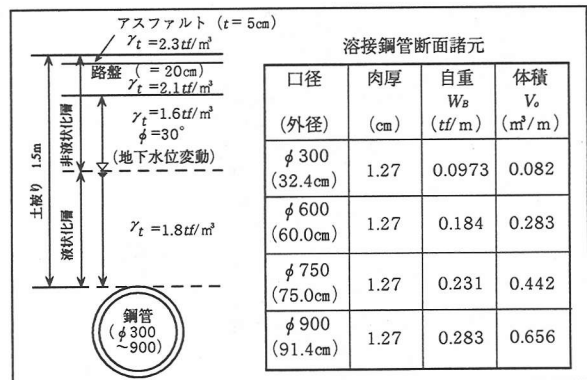


図-6 検討条件

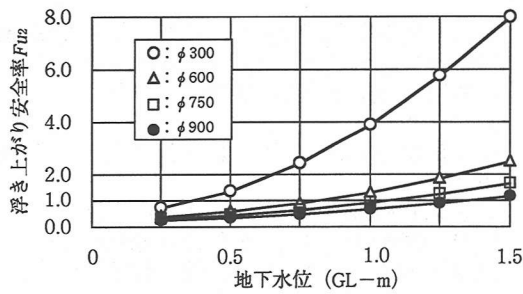


図-7 浮き上がり安全率算出結果

全率の変化は著しく、水位が1 m程度下がると、浮き上がり安全率は3倍程度に増加することがわかる。

(2) 釧路沖地震による下水道マンホールに対する試算

2. に示した釧路沖地震で浮上した下水道マンホールについて、浮き上がり判定およびその際の浮上量について試算した。

a) 検討条件

対象としたマンホールは、突出量が最大(1.46 m)であったニチイ側ルート No.65 とした。マンホールの構造および地盤条件を図-8 に示す。同図に示すように、マンホールの構造はヒューム管を加工したもので、釧路市、釧路町では標準的なタイプのものである。また地盤条件は、埋め戻し土の液状化が浮き上がりに大きく寄与しているという報告³⁾から、液状化層に埋め戻し土の定数を用いた。また地下水位は、対象マンホールのすぐ脇で実施されたボーリングデータにおける値を用いた。

浮き上がり判定は、対象がマンホールであり、上載土砂が存在しないことから式(5)を用いて行った。

b) 検討結果

浮き上がり判定結果を図-9 に示す。同図に示すように、浮き上がり安全率は0.72 と1を下回り、浮き上がった事実と一致する事が確認された。また、浮き上がり力と浮き上がり抵抗力がつりあう状態(すなわち安全率1となる場合)の浮き上がり量を算出すると、浮き上がり量は1.24 mとなった。さらに、試算結果は、地震前

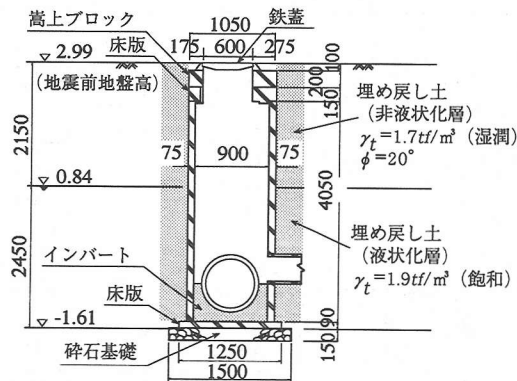


図-8 マンホール構造および地盤条件

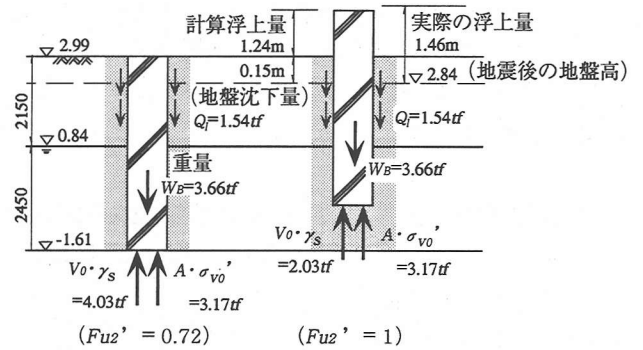


図-9 浮き上がり判定結果およびマンホールの浮上量

の地表面に対する浮き上がり量であるため、地震後の地盤沈下量(15cm)を考慮すると浮き上がり量は1.39 mとなり、実測値とほぼ一致するものと評価できる。

5. おわりに

地中構造物の液状化時の浮き上がり被害にもとづき、浮き上がりのメカニズムを推定し、浮き上がり判定手法を提案した。線状地中構造物の浮き上がりについて考える場合、浮き上がるか否かについては本手法を用いて評価可能である。しかし、浮き上がると判定された場合、対策工をどの範囲まで考えるかという問題については、液状化層の連続性、構造物の特性(継手構造あるいは一体構造)および目標とする機能確保水準などを総合的に評価しなければならない。特に既設構造物については施工上の制約が多く、対策は一般に困難となる場合が多い。今後はこういった浮き上がり対策工について各構造物に応じた合理的な設計法を開発することが望まれる。

謝辞: 本研究は、(財)地震予知総合研究振興会における研究の一環として実施したものである。本研究を実施するにあたり、多大なるご指導を頂いた早稲田大学、濱田政則教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 安田 進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 昭和63年12月。
- 2) 1968年十勝沖地震調査委員会: 1968年十勝沖地震調査報告, 1968年5月16日。
- 3) 建設省土木研究所: 釧路沖地震により浮上した下水道マンホールの調査, 土木研究所資料第3275号, 平成6年4月。
- 4) 磯山, 濱野, 大栗: 1993年釧路沖地震と被害-調査記録, 日本技術開発(株), 地震防災論文集, Vol.2, No.1, 平成6年10月。
- 5) 地震予知総合研究振興会: 液状化を考慮した埋設ガス導管の耐震設計法と対策工法に関する調査研究, 研究報告書, 平成6年3月。