

(19) 液状化対策工法としての地盤の変形抑止工の効果について

鹿島技術研究所 山田岳峰 林 寛 大保 直人

1. まえがき

液状化対策工法は工法の原理により各種工法（例えば地盤改良工法、地下水位低下工法、排水工法など）に分類される。その中で地盤のせん断変形を抑止あるいは抑制する工法（以下、変形抑止工と称す）は対策に伴う地盤沈下、地下水位低下による障害などの懸念を必要とせずに既設構造物への対策が可能ことから、特に既設構造物の液状化対策工法として有力と考えられる。しかしながら、地震時の変形抑止工の効果を定量的に評価する方法が確立されていないため、現在までの実施例は他工法に比し少ないのが現状といえる。そこで、今回、変形抑止工を用いた地盤～構造物系の耐液状化評価手法の確立を目指し、変形抑止工の効果を組み込んだ地震応答解析を実施した。解析は地盤～構造物系を系のせん断振動（応答）を対象としたバネ・質点系モデルに離散化して実施し、実測地震記録と対比することにより、変形抑止工の効果とバネ・質点系モデルによる評価手法の可能性について検討した。なお、今回検討の対象とした構造物は平底円筒形石油タンク（以下、タンクと称す）であり、基礎地盤のせん断変形抑止による液状化対策工法として鋼矢板リング工法（以下リング工法と称す）を採用している。

2. リング工法を用いたタンクの地震観測¹⁾

地震観測の概要を表-1に示す。表-1に示されるように地震観測は、自由地盤、基礎地盤に鋼矢板リング工法を施工したタンク（以下タンクAと称す）およびパイロ・フローテーションで周辺地盤が改良されたタンク（以下タンクBと称す）の3地点で行われ、それぞれ加速度および間隙水圧が計測されている。また、観測地点の地盤はGL-18m程度以下の下部有楽町層のシルト、砂質シルト層上に上部有楽町層および浚渫土層の細砂層から構成される。今回解析の対象とした観測データは東京湾南部を震源とし1992年2月2日に発生した地震（東京で震度V）で、自由地盤の表層付近（GL-1m）で最大水平加速度159galが得られている。

表-1 地震観測の概要

	計測項目	
自由地盤	・ GL-1m: 水平加速度 (直角2方向)	間隙水圧
	・ GL-3m: 水平加速度 (直角2方向)	
	・ GL-6m: 水平加速度 (直角2方向)	間隙水圧
	・ GL-20m: 水平加速度 (直角2方向)	
	鉛直加速度	
タンクA	・ GL-1m: 水平加速度 (1方向)	間隙水圧
	・ GL-3m: 水平加速度 (1方向)	
	・ GL-6m: 水平加速度 (直角2方向)	間隙水圧
タンクB	・ GL-1m: 水平加速度 (1方向)	間隙水圧
	・ GL-3m: 水平加速度 (1方向)	

3. 解析手法

3.1 解析手法

解析手法の概要を以下に示す。なお、今回は、変形抑止工の効果についてその基本特性を把握することを目的としているため、効果を解釈する指標としてせん断ひずみを用いることとした。

3.1.1 地盤～構造物系のモデル化

図-1に示すように地盤～構造物系をばね・質点系モデルにモデル化した。地盤の質点間を連結するばねは、鉛直方向については著者らが提案する繰返し単線せん断時の砂の繰返し応力～ひずみ関係²⁾から決定される非線形ばね（以下、せん断ばねと称す）を用い、水平方向については(1)式に示す上載圧に依存する線形ばね（以下、水平ばねと称す）を仮定した。タンクの基礎地盤はタンク基礎底面から作用する載荷荷重（ここでは{タンク本体重量+内容液重量} / {タンク底面積}で評価する、以下タンク荷重と称す）により、有効上載圧が増加し、地盤のばね剛性が増加する。タンク荷重による地盤内の増分上載圧の地盤深度方向の分布は(2)式で評価し、有効上載圧

$$E_h = E_{h0} (\sigma_v')^n \quad (1)$$

ここで、 σ_v' : 有効上載圧 (kgf/cm²)
 E_h : σ_v' における水平方向ばね係数 (kgf/cm²)
 E_{h0} : $\sigma_v' = 1$ kgf/cm²のときの水平方向ばね係数 (kgf/cm²)
 n : 有効上載圧依存性を表す指数 (ここでは、 $n = 0.5$ とした)

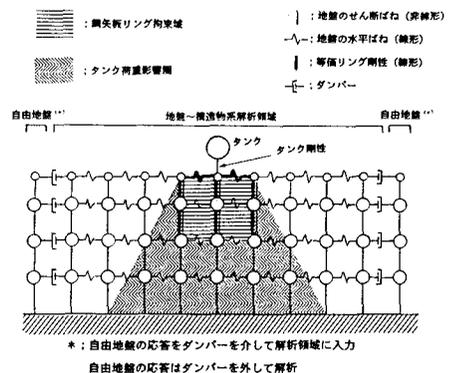


図-1 ばね・質点系へのモデル化の概要

$$\Delta \sigma_v' = \frac{q}{\left(1 + \frac{2}{D} z \tan \theta\right)^2} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta \sigma_v'$: 載荷荷重 q に基づく地盤内の深さ z (cm) における有効土載圧の増分
 q : 載荷荷重 (kgf/cm²)
 D : タンク直径 (cm)
 θ : 分散角度 (ここでは、 $\theta = 30^\circ$ とした)

$$T_b = \frac{2}{\lambda} j \sqrt{\frac{W}{\pi g E t_{1/3}}} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda = 0.067 \left(\frac{H}{D}\right)^2 - 0.30 \frac{H}{D} + 0.46$

T_b : 平底円筒形タンクの固有周期 (s)
 H : 最高液面高さ (cm)
 D : タンクの直径 (cm)
 W : 内容液重量 (kgf)
 g : 重力加速度 (cm/s²)
 E : 側板の材料の弾性係数 (kgf/cm²)
 $t_{1/3}$: タンク底部から最高液面高さの 1/3 の高さにおける側板の板厚 (cm)
 j : 基礎地盤とタンク本体との連成の影響に基づく補正係数 (ここでは、 $j = 1$ とした)

(有効土被り圧+タンク荷重による増加土載圧) の増加に伴う地盤のばね剛性の増加を、せん断ばねのパラメーターである単純せん断時の砂のせん断強度および初期せん断剛性の上載圧依存性、および (1) 式から評価した。タンクは 1 質点のばね・質点モデルにモデル化し、地盤モデルと連結した。ここで、質点質量はタンク総質量とし、質点質量と (3) 式に示される短周期地震動に対するタンクの 1 次固有周期³⁾ から算定した剛性からばねを評価した。

3.1.2 リングのモデル化

リングは図-2 に示すように下端固定のティモシェンコ梁とみなし、等分布水平力が作用したときの変位を一边がリング径の正方形断面部材がせん断されたときの変位と適合するように正方形断面部材のせん断剛性 (以下、等価リング剛性と称す) を決定し、リングに囲まれた領域の地盤のせん断ばねに等価リング剛性を付加してリングによる地盤の変形抑止効果を組み込んだ (図-1 参照)。

各節点で変位が一致するように等価リング剛性を決定

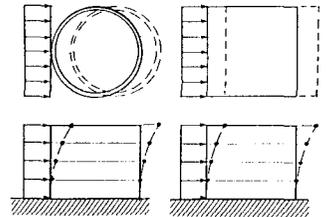


図-2 鋼矢板リングのモデル化

3.1.3 境界条件と地震波の入力方法

解析領域側端は地盤の密度および水平バネの剛性に応じたダンパーを介して自由地盤と連結し、下端は固定境界とした。地震波の入力は自由地盤の GL-20m で計測された地震波 (水平方向加速度記録) を解析領域下端および自由地盤の下端に直接入力した。

3.1.4 解析方法

解析は解析領域の地盤~構造物系および自由地盤の応答を一体で解析し、逐次解析を Newmark- β 法 ($\beta = 1/6$) を用いて実施した。用いた時間ステップは解析精度に影響しないことを確認した上で 0.0005sec とした。

3.2 解析モデル

今回用いた解析モデルを図-3 に示す。ここで、解析領域の水平方向の長さは解析領域の側端の地盤の応答が自由地盤の応答とほぼ等しく、また、領域を広げても応答にほとんど影響しないことを確認した上で決定している。なお、タンク B は基礎地盤にパイロ・フローテーションを行っているが、その効果を地盤調査結果から定量的に評価することが困難であったため、今回はパイロ・フローテーションの影響を考慮していない。

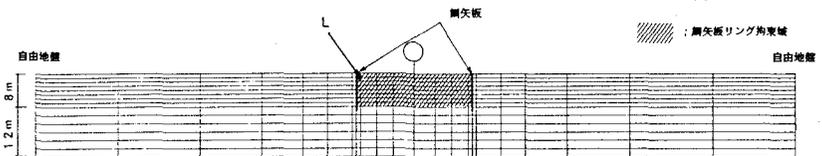


図-3 観測記録シミュレーションのための地盤~石油タンクのモデル化

4. 解析結果

自由地盤、タンクAおよびタンクBの地震応答解析を行った。用いた入力波（GL-20mで観測された自由地盤の水平方向加速度記録）を図-4に示す。また、図-5に表層（GL-1m、図-3中Lで示される地点）の加速度応答波形の解析値を観測記録とともに示す。図-5から、自由地盤の解析値は若干応答のピークが小さくなる傾向にあるが、せん断変形に伴う剛性の低下に起因すると考えられる主要動以降の応答の位相おくれを含め応答値、位相ともよく表現できている。タンクAの応答については、若干地盤剛性の過大評価と思われる位相の差がみられるが、応答値については比較的良好に表現できているといえる。しかしながら、タンクBについては解析値の位相がかなり観測値と異なる結果となった。これはタンクAについても同様にいえることであるが、(3)式による増分上載圧の評価が特に増分上載圧の影響圏周辺部において過大評価され、地盤の剛性が過大に評価されている可能性が考えられる。今後、上載圧増分の評価は(2)式に替わり、より適した評価法（例えばSteinbrenner解など）の適用が必要と考えられる。次に、図-6に最大水平加速度を自由地盤、タンクAおよびBについてまとめて示す。実測記録では最大水平加速度はリング工法を用いたタンクAが最も小さくなった。これは解析値についても同様の結果となる。また、解析値が最大加速度値および自由地盤、タンクA、タンクBの最大加速度の大小関係の傾向とも実測記録をおおむね表現できていることが分かる。最後に、得られた最大せん断ひずみの深度方向の分布（タンクA、Bについてはタンク中心位置直下の地盤）を図-7に示す。図から、鋼矢板リングの効果を組み込んだGL-8m以浅の表層部において、最大せん断ひずみが自由地盤、タンクB、タンクAの順に小さくなり、鋼矢板リングの拘束効果を表現できているものと思われる。なお、今回の解析では、リング工法を用いたタンクAは用いないタンクBに比し変形抑止効果により4割程度最大せん断ひずみが小さくなる結果となった。

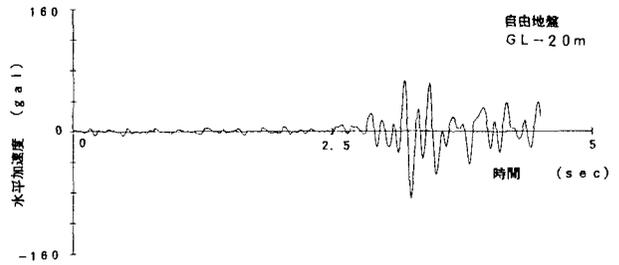


図-4 入力波形

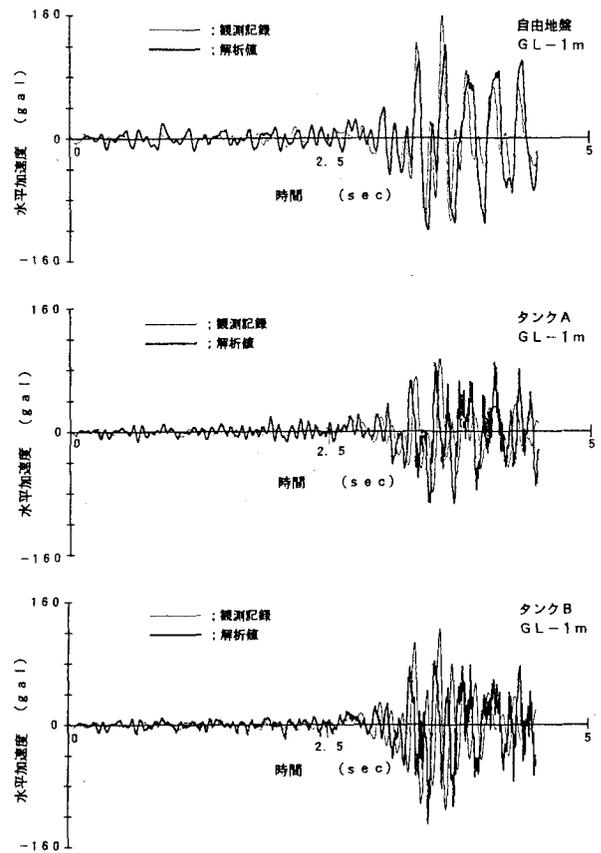


図-5 表層における加速度応答波形（観測値、解析値）

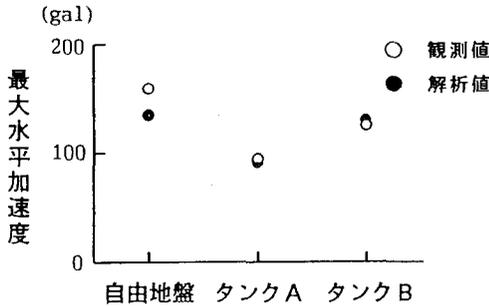


図-6 表層における最大水平加速度（観測値，解析値）

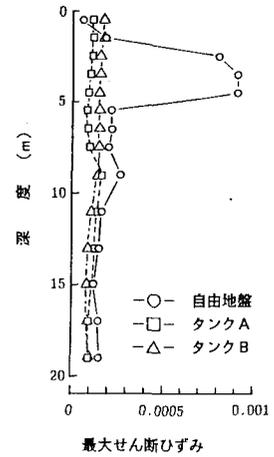


図-7 最大せん断ひずみの深度分布（解析値）

5. まとめ

以上、せん断振動を対象とした二次元ばね・質点系モデルにより、せん断変形抑止工法（ここでは鋼矢板リング工法）で改良された地盤～構造物系の地震応答解析を実施し、観測記録と比較した。その結果、表層の最大水平加速度は観測記録、解析値とも鋼矢板リング工法を用いた場合、用いない場合に比し小さくなる傾向となることが分かった。

また、今回実施したせん断振動を対象とした二次元ばね・質点系モデルによる解析は、鋼矢板リング工法が実施されたタンク基礎地盤の加速度応答記録をおおむね表現できる結果となり、せん断振動が卓越する場合のせん断変形抑止工法による改良基礎地盤～構造物系への当解析手法の適用可能性が示された。今後、引き続き地震観測記録との比較を行うとともにモデル実験との比較・検証を通して、せん断変形抑止工法の効果をより適切に組み込んだ簡易な耐液化評価手法への展開を図っていく予定である。

（参考文献）

- 1) 大保，澤内，林；鋼矢板リング工法による液化化対策に関する研究（その1 鋼矢板リングで施工された地上式タンクでの地震観測），第48回土木学会年次学術講演会講演概要集に現在投稿中
- 2) 山田，林；繰返し単純せん断時における砂の構成モデルの提案（その2），第28回土質工学研究発表会
- 3) 土木学会編；動的解析と耐震設計 [第3巻] エネルギー施設，技術堂出版