

# 偏土圧を受ける地中円筒構造物の周辺地盤を考慮した大変形解析

—— 2次元非線形有限要素解析による検討 ——

松 田 隆 後 藤 洋 三

## Large Deformation Analysis of Cylindrical Underground Structure with Surrounding Ground Subject to Action of Lateral Pressure

—— Two-dimensional Analysis by Nonlinear FEM ——

Takashi Matsuda Yozo Goto

### Abstract

A large deformation analysis of a cylindrical underground structure was carried out giving consideration to the restraining effect of the ground and the influence of lateral pressure. The object of this study was the estimation of ultimate loading under a condition nearer to the real state of the structure than according to the elastic buckling theory for circumferential pressure only under no restraint. Numerical calculations were executed by geometrical and material FEM. As a result, it was found that (1) without consideration of the ground the ultimate load is reduced to 44% of buckling load according to conventional designing caused by the synergistic effect of circumferential and lateral pressures, (2) with consideration of the surrounding ground, the ultimate load is increased by the restraining effect of the surrounding ground, and it is thought the cylindrical structure will not collapse under lateral pressure in the range normally used in designing.

### 概 要

地中円筒構造物の周辺地盤の拘束効果および地震時に作用する偏土圧の影響を考慮した大変形解析を行なった。当研究の目的は、従来から採用されている無拘束下での等分布周圧による弾性座屈理論に比較し、より実情に近い条件での座屈検討を試みることである。解析は、2次元モデルでの幾何的および材料非線形有限要素法を用いた。その結果、(1) 地盤を考慮しない場合、等分布周圧と偏土圧の相乗効果により、耐荷力は従来法による座屈荷重の44%に低下する。(2) 地盤を考慮した場合、その拘束効果により耐荷力は上昇し、通常の設計で想定している偏土圧範囲内では崩壊しないと思われる、などがわかった。

### 1. はじめに

大型地下タンクにおける円筒状の連続地中壁は本体側壁に比し薄肉であり、特に順巻工法による場合、根入れ部の拘束効果は内部土掘削進行に伴い減少していく。このとき連続地中壁の耐荷力はリングコンプレッション効果に大きく依存する。しかし、リングコンプレッション効果により面外荷重に対する抵抗力は増大する反面、軸圧縮応力による座屈崩壊の危険性が生じ、その検討が重要となる。従来、地下タンクの構造設計のなかで座屈強度計算は、チモシェンコらにより与えられた弾性座屈理論<sup>1)</sup>を基に行なわれている(以下、従来法と称す)。この従

来法を地下構造物に適用する場合、以下に述べる問題点があげられる。

(1) 実構造物に作用する外荷重は、円周方向に等分布な土水圧(以下、周圧と称す)と、地震動や施工方法などに起因する偏土圧に大別され、従来法では前者の周圧に対する座屈荷重を与える。しかし、偏土圧が作用した場合、周圧と偏土圧が相乗的に影響するため、従来法での座屈荷重は危険側になるとと思われる。

(2) 従来法での構造物支持条件は自由=無拘束と仮定しているが、実情は周辺地盤による弾性支承の状態である。弾性支承による変形拘束効果により、従来法での座屈荷重は安全側になるとと思われる。

これら従来法を基準とした場合、危険側となる状態と安全側となる状態が推定されるが、実構造の置かれている諸条件を定量化した理論解析は極めて困難である。

本研究は、以上の観点から地中円筒構造物の受けるより実情に近い条件での耐荷力を、汎用非線形プログラム ADINA を用い解析し、その結果を実設計で想定している偏土圧と比較検討を行なうものである。

## 2. 解析条件

### 2.1. 解析モデル

解析モデルを図一に示す。円筒壁モデルは2次元梁要素で構成される、半径  $R=38.3\text{ m}$ 、肉厚  $t=1.2\text{ m}$  の円環とした。円環はコンクリート材料の物性値を用いたが、降伏条件に関しては Mises 則に従い、応力 $\sim$ ひずみ関係は bi-linear に仮定した。周辺地盤は2次元平面ひずみ要素でモデル化し、領域は円環半径の約4倍の160 m 径で、地盤外周部支持条件はフリーとした。地盤の弾性係数は粘着力  $C=10\text{ t/m}^2$  に対する実験式<sup>3)</sup>より  $E=2,200\text{ t/m}^2$  とし、降伏条件は Drucker-Prager with cap 則に従い、引張りには抵抗しない材料と仮定した。なお、解析は1/4対称条件で実施している。

### 2.2. 荷重条件

荷重は周圧を常時土圧と考え一定にし、偏土圧を漸増させる増分パターン(図一2(a))とした。ただし、3章においては周圧のみを対象に、4章1節においては、周圧と偏土圧の相乗作用における履歴特性をより明確にするため周圧と偏土圧の比  $k$  を一定(図一2(b))にした条件で解析した。

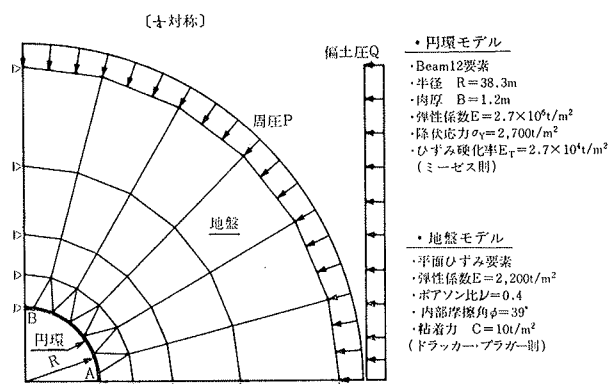
### 2.3. 解析手法

非線形解析手法は、材料非線形性と幾何的非線形性(大変形効果)の両者を考慮した修正増分手法である。

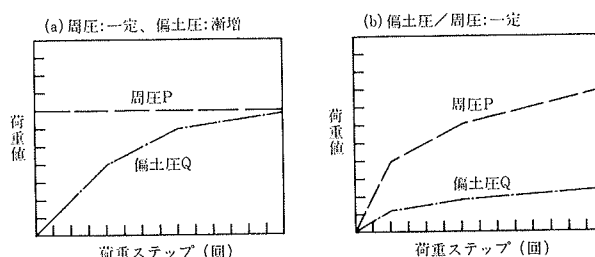
## 3. 円環の弾性座屈解析

有限要素法による幾何的非線形解析の精度を把握するため、初期変形を有する円環の周圧に対する解析を行ない理論座屈解と比較した。初期変形として、円環の1次座屈モードである楕円形状を与え、幾何的非線形解析を行なった結果を図一3の荷重 $\sim$ 変位曲線で示す。クラウン部の初期変形量  $d$  は円環半径  $R$  の  $1/190$  から  $1/38310$  の範囲であるが、いずれも図一4(i)に示す理論座屈解に漸近し、 $d=R/3831$  のときで理論座屈解に対する近似度は98.9%となる。ただし、この漸近度は初期変形量  $d$  が微小であるほど良好な結果を与える。

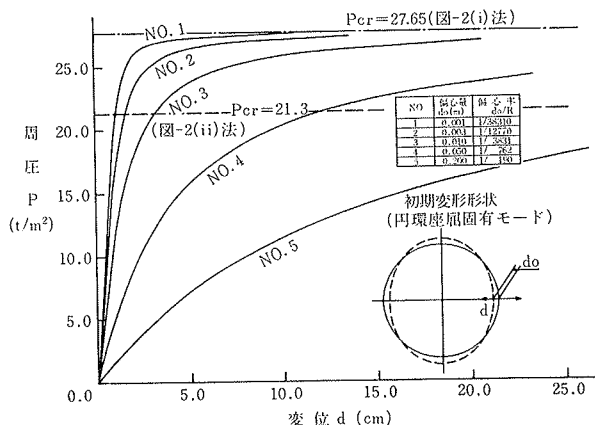
ここで、理論座屈値は図一4に示す圧力荷重状態によって異なり、従来法は(ii)非保存系に対応し、荷重系に関する反復修正過程のない当有限要素解析は(i)保存系



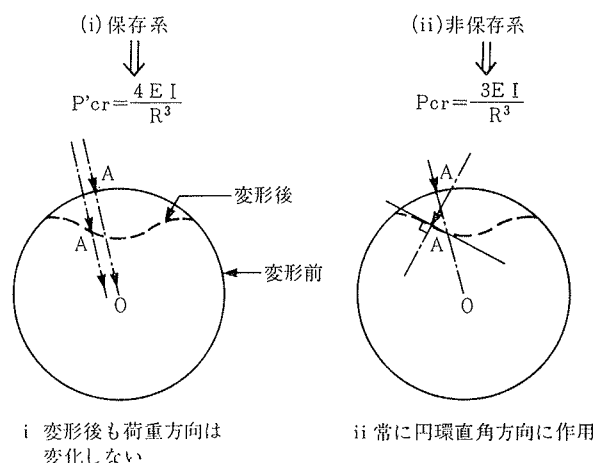
図一1 解析モデル



図一2 荷重増分パターン



図一3 荷重 $\sim$ 変位曲線 (初期変形を有する円環)



図一4 圧力荷重状態<sup>2)</sup>

に対応する。よって、(i)の保存系での値は(ii)非保存系の4/3倍値となる。

#### 4. 周辺地盤を考慮しない場合の円環の耐荷力

##### 4.1. 幾何的非線形関係

周圧による軸圧縮力と偏土圧による曲げモーメントが相乗的に作用し、円環に大たわみが生じる。この大たわみと作用荷重の関係を幾何的非線形解析で求め、周圧と偏土圧の相乗効果を把握する。

周圧と偏土圧の比率  $k$  を一定にし漸増させた(図-2(b))。円環の荷重～変位関係を図-5に示す。この図から、荷重変位関係は双曲線の挙動を呈すること、また、非線形効果  $S$  (幾何的非線形と線形解との比) は、荷重比  $k$  にかかわらず同一周圧値においてほぼ一定の値を示すことがわかる。この幾何的非線形解析解を次の簡易式で近似させることにより、種々の荷重比での荷重～変位関係を求めることができる。

$$d = 11.5k \cdot P / \{25 - P\} \quad (\text{m}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $k=Q/P$ 、 $Q$ : 偏土圧( $t$ )、 $P$ : 周圧( $t$ )  
偏土圧が円環に与える影響として、クラウン部変位  $d=0.9\text{ m}$  を呈す周圧値を上式から算定し、その結果を表-1に示す。ここで変位  $d=0.9\text{ m}$  は、後述する円環の降伏開始荷重に対応する指標の変位であり、式(1)の適用限度ともなる。算定の結果、荷重比  $k=0.1$  のとき、偏土圧が作用しない円環に対し約44%の耐力低下を示すことが確認される。

円環に塑性域が生じ始める降伏開始荷重を算定する。この降伏開始荷重は、式(1)で表わされる幾何的非線形関係の適用範囲を与えると共に、円環の健全度を表わす一指標ともなる。円環の最大応力度  $\sigma_{\max}$  と外荷重の関係は式(2)で近似される。

$$\sigma_{\max} = \frac{P \cdot R}{A} (1 - k) + \frac{3EB}{2} \left\{ \frac{11.5kP}{25 - P} \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $A$ : 円環断面積( $\text{m}^2$ )、 $E$ : ヤング率( $\text{t}/\text{m}^2$ )

$B$ : 円環肉厚( $\text{m}$ )

上式より求めた最大応力度と降伏応力  $\sigma = 2700\text{ t}/\text{m}^2$  と等しくなる荷重値を降伏開始荷重とし、表-2に降伏開始荷重とその荷重値におけるクラウン部変位  $d$  を示す。降伏開始荷重は荷重比  $k$  に大きく影響されるが、降伏時の変位は  $90 \sim 95\text{ cm}$  と荷重比  $k$  に関係しない。このことより、地盤を考慮しない円環の降伏開始は、変形で規定されることがわかる。

##### 4.2. 耐荷力の検討

図-2(a)に示すような荷重履歴を対象に、円環の降伏開始荷重と全断面が降伏となる荷重(以下、当報告では耐荷力と称する)を、材料および幾何的非線形解析によ

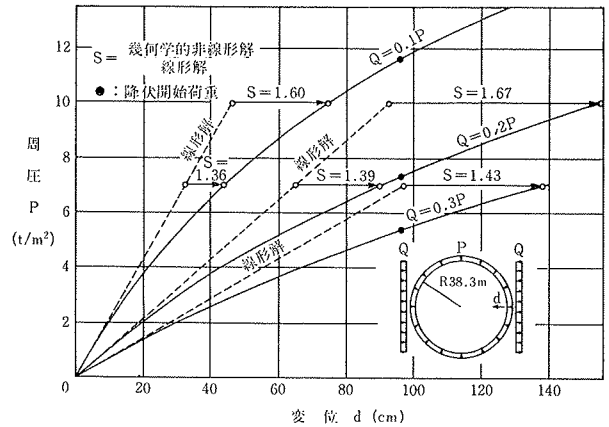


図-5 荷重～変位曲線 (周圧と偏土圧を受ける円環)

荷重比 $k$ ( $Q/P$ )	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
$d=90\text{cm}$ 時周圧 ( $\text{t}/\text{m}^2$ )	15.3	11.0	8.6	7.0	6.0	5.2

表-1 円環の耐力低下に及ぼす偏土圧の影響

荷重比 $k$ ( $Q/P$ )	0.10	0.20	0.30
周 圧 ( $\text{t}/\text{m}^2$ )	11.41	7.38	5.45
偏土圧 ( $\text{t}/\text{m}^2$ )	1.14	1.48	1.64
クラウン部変位 ( $\text{m}$ )	0.96	0.94	0.93

表-2 円環の降伏開始荷重 (式(2)より算定)

非線形性	周圧 ( $\text{t}/\text{m}^2$ )				
	5	10	15	20	
(材料)+(幾何的)	a 降伏開始荷重	1.50	1.00	0.65	0.35
	b 耐 荷 力	2.05	1.40	0.90	0.51
(材 料)	c 降伏開始荷重	1.70	1.65	1.60	1.55
	d 耐 荷 力	2.60	2.55	2.50	2.40

表-3 円環の耐荷力 (地盤を考慮しない円環)

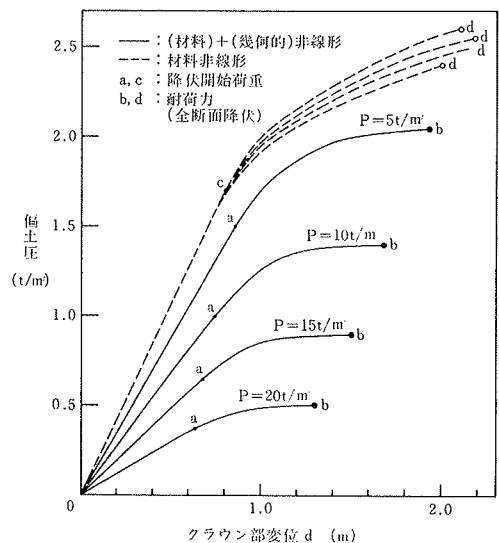


図-6 荷重～変位曲線 (地盤を考慮しない円環)

り求めた。図-6に周圧を5~20 t/m<sup>2</sup>としたときの荷重~変位関係を、表-3に各状態での変位土圧値を示す。周圧の上昇に伴い、降伏開始荷重および耐荷力は低下する。ここで、通常設計レベルで想定している周圧の10%偏土圧の作用を考えれば、その偏土圧に対して健全であるのは周圧が10 t/m<sup>2</sup>以下であり、逆に周圧が10 t/m<sup>2</sup>以上の領域で、想定偏土圧は耐荷力を上まわり崩壊の可能性が生じてくる。

図-6では、幾何的非線形性を含めた解析と含めない解析の比較も行なっている。周圧が高くなるにつれ、両解析結果の差は大きくなり、周圧20 t/m<sup>2</sup>作用時での幾何的非線形性を考慮しない耐荷力は、考慮した同値の約5倍の過大評価となる。このことより、当モデルのような薄肉構造（断面厚 B≒半径 R/40）に対する妥当な耐荷力算定は、幾何的非線形性の考慮を含めるべきと思われる。

### 5. 周辺地盤を考慮した場合の円環の耐荷力

円環周辺地盤外周から周圧および偏土圧を載荷させる。図-7は各周圧下（P=0~60 t/m<sup>2</sup>）での、円環の作用偏土圧~変位関係を示す。図中の太一点鎖線は円環の降伏開始荷重を、太実線は円環の耐荷力点を結ぶものである。図-9に降伏開始荷重および耐荷力と周圧の相関を示した。これらの図から、降伏開始荷重は周圧10 t/m<sup>2</sup>で、耐荷力は20 t/m<sup>2</sup>でそれぞれ極大値を示すことがわかる。この極大値を示す現象は、円環の応力状態と地盤材料の弾塑性特性の両面から、次のように説明される。

①周圧による地盤の等方圧縮応力度が小さい場合、地盤は低いせん断応力で塑性化する。地盤塑性化による剛性低下が、拘束効果を減少させると思われる。

②高周圧下では円環に大きな軸圧縮応力変が生じており、低いレベルの偏土圧の付加によっても、円環は降伏する。この円環自体の塑性化により剛性が低下すると思われる。

周圧20 t/m<sup>2</sup>までは、①の拘束力の増大に伴い耐荷力

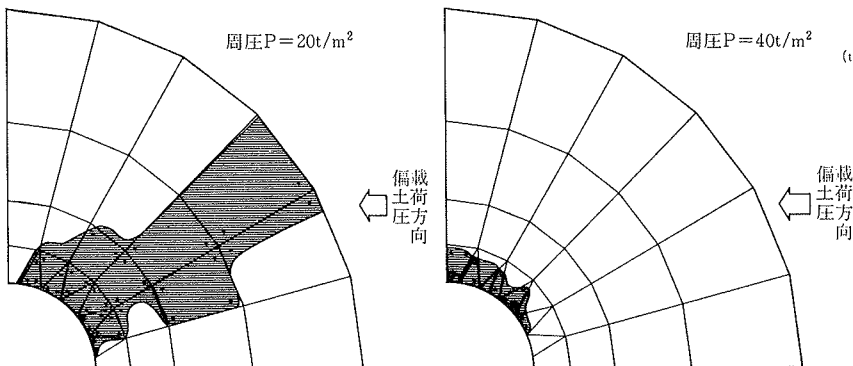


図-8 地盤の塑性領域

が上昇し、周圧20 t/m<sup>2</sup>以後は②に示した理由で逆に耐荷力が減少する。ここで①に記す、周圧の大小の差により塑性域の広がり相異なることを図-8に示す。同図は、周圧20 t/m<sup>2</sup>と40 t/m<sup>2</sup>の比較であるが、作用偏土圧は両者とも16 t/m<sup>2</sup>に統一している。比較の結果、周圧20 t/m<sup>2</sup>では地盤領域の約1/3が塑性化しているのに対し、周圧40 t/m<sup>2</sup>では円環近傍のわずかな領域が塑性化しているにすぎない。以上のことより、地盤の拘束効果は地盤の健全度（弾性状態保持）に支配されることが確認される。

実際の地下タンク設計時に想定している偏土圧を図-9に含めて示すことにより、円環の当偏土圧に対する安全性を評価する。図中の破線は周圧の10%偏土圧を、点

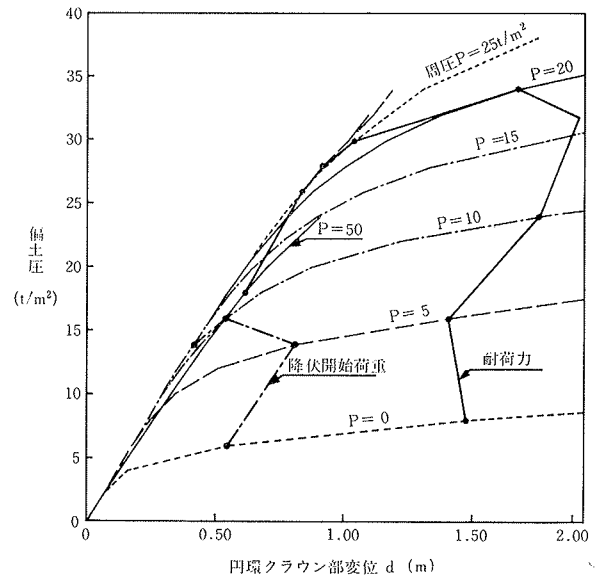


図-7 荷重~変位曲線（地盤を含む円環）

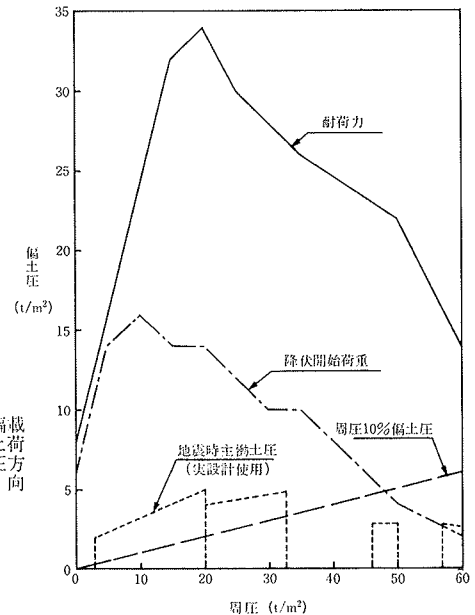


図-9 円環の降伏開始荷重および耐荷力

線は静的震度法による地震時主働土圧値を示すものである。比較の結果、周圧が  $45 \text{ t/m}^2$  以下において想定される偏土圧で円環は塑性化もせず、健全な状態と判断される。地震時主働土圧に対する耐荷力の比は、周圧  $20 \text{ t/m}^2$  のときで6～7となり、円環の安全性が確認される。周圧  $45 \text{ t/m}^2$  以上においては、円環の一部に塑性が生じるものの、耐荷力には余裕がみられる。この余裕は、当検討範囲での最大周圧  $60 \text{ t/m}^2$  時で、周圧10%偏土圧値に対し約2.2倍、地震時主働土圧に対し約4.5倍の値となる。地盤を考慮した円環は、想定される偏土圧に抵抗し、崩壊する危険性は無いと思われる。

## 6. 結論

円環の外周圧に対する耐荷力を非線形有限要素解析で求め、通常的设计レベルで想定している偏土圧に対する円環の安全性を検討した。

その結果、次のことがわかった。

(1) 周圧と偏土圧の相乗効果により円環の耐荷力は低下する。地盤を考慮しない円環では、周圧の10%偏土圧作用のとき、偏土圧が作用しない円環に対し約44%の耐力低下が確認された。

(2) 周辺地盤を考慮した円環は、地盤の拘束効果により耐荷力が上昇する。地盤の拘束効果は、地盤等方圧縮

応力に支配されるせん断抵抗力に比例する。すなわち周圧の増大に伴い、拘束効果による耐荷力の上昇率も増大する。

(3) 通常設計レベルで想定している周圧の10%偏土圧が作用する円環は、地盤を考慮しない場合、 $10 \text{ t/m}^2$  以上の周圧領域で崩壊の可能性が生じる。しかし、地盤を考慮した場合の円環は、 $60 \text{ t/m}^2$  以下の周圧領域で、想定偏土圧値の2.2倍以上の耐荷力を呈し、この偏土圧に対する崩壊の危険性はないと思われる。

本報告は、一円環モデルを対象にした耐荷力の検討であり、形状の異なる構造物に対しては、当検討での定性的傾向を踏まえた具体的な数値解析が必要になると思われる。

最後に、当検討は LNG 地下タンク設計技術開発テーマ(耐震部門)内の『材料非線形を考慮した振動解析手法の開発』の一環として実施したものであることを記す。

## 参考文献

- 1) Timoshenko, Gere: Theory of Elastic Stability, McGRAW-HILL, (1961), pp. 278～305
- 2) 長柱研究委員会編: 弾性安定要覧, コロナ社, (昭和36)
- 3) 赤井浩一: 土質力学, 朝倉書店, (昭和41)