

(75) PC製円筒形タンクの側壁下端弾性固定の影響を考慮した断面力算定方法

(株)安部工業所 技術部 正会員 ○村井 篤
 (株)安部工業所 福岡支店 正会員 井上 浩之
 (株)安部工業所 技術部 正会員 今尾 勝治
 (株)安部工業所 技術部 正会員 西尾 浩志

1. はじめに

PCタンクに関しては優れた性能すなわち高い液密性、耐久性および耐震性が認められ、社会基盤施設の一部として、水道用施設、農業用施設などに多数建設されている。このうち、水道用PCタンクの設計については昭和55年に(社)日本水道協会より発行された「プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」(以下55年仕様書と略す)に基づき行われるのが一般的である。この55年仕様書では「固定支持のタンクでは、支持部における底版の剛性が側壁の剛性に比べ著しく大きな場合には、完全固定に近い挙動を示し、底版の剛性が側壁の剛性とあまり変わらない場合などは弾性固定の挙動を示す。後者の場合の側壁下端に生じる曲げモーメントは、前者のそれよりも小さいものとなる。」と記述され、側壁下端完全固定モデルによる側壁下端断面力より、弾性固定の場合の側壁下端断面力を算定する手法が述べられている。

本論文では改めてその算出根拠を明確にし、弾性固定の影響を考慮した側壁下端の断面力の算定方法を新たに提案するものである。

2. 検討方法

2.1 概要

水圧やプレストレス等の荷重により側壁下端に発生する曲げモーメントは側壁下端完全固定として各種文献¹⁾²⁾に記述されている弾性円筒シェル理論により容易に求めることができる。しかしながら、実際には側壁との結合部において底版が回転することにより、弾性固定の挙動を示すものと考えられる。よって、ここでは図-2に示すように側壁下端完全固定モデルと側壁と弾性床土上の底版が結合されたモデルの断面力を比較することにより、完全固定の側壁下端断面

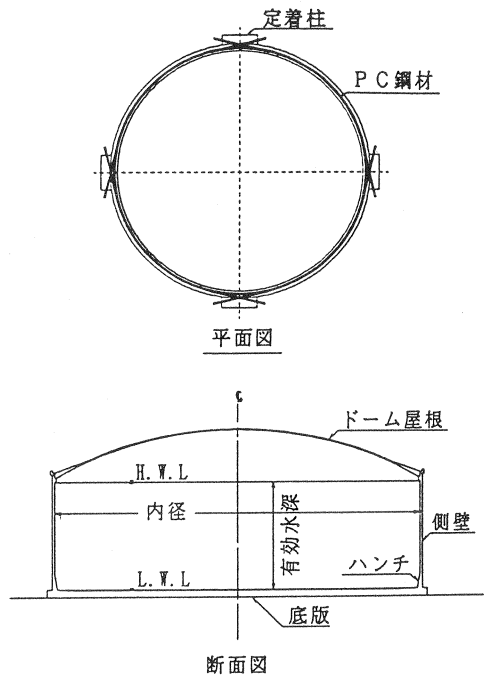


図-1 PC製円筒形タンク一般図

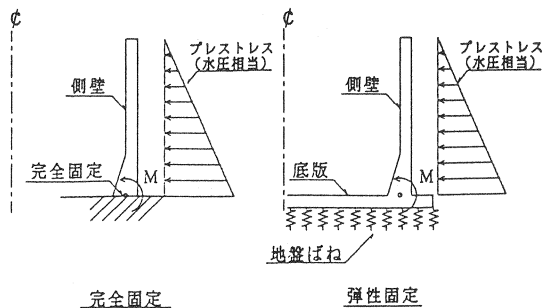


図-2 完全固定と弾性固定概念図

力から弾性固定の影響を考慮した断面力を簡便に算定する係数 $k_\alpha \cdot k_\beta$ を提案する。

2. 2 解析方法

側壁下端完全固定モデル、側壁と弾性床上の底版が結合されたモデルともに軸対称薄肉シェル要素を用いた有限要素法(FEM)により解析を行った。

2. 3 解析モデル

解析モデルは、表-1に示す一般的なPCタンクの形状を想定した容量 $1,000\text{m}^3 \sim 30,000\text{m}^3$ のモデル6ケースとした。各々のタンクについて、パラメータを底版下端部厚、鉛直方向地盤反力係数とした。

表-1 解析モデル

容量 V (m^3)	内径 D (m)	水深 H (m)	壁厚 t (m)	側壁下端厚 t_h (m)	底版が一層の場合		底版が二層の場合	
					底版端部厚 t_{rp} (m)	底版端部厚 t_{rp} (m)	基礎版厚さ t_b (m)	
1,000	16.6	4.7	0.25	2.0 × t	1.0 × t_h 1.5 × t_h 2.0 × t_h	1.0 × t_h 1.5 × t_h	基礎版がある 場合 $t_b = 0.3$ 堅固な地盤 $t_b = 0$	
3,000	23.9	6.8	0.25					
5,000	28.2	8.1	0.25					
10,000	35.5	10.2	0.25					
20,000	44.8	12.8	0.40					
30,000	51.2	14.7	0.45					

2. 4 荷重図

載荷荷重は以下の3種類を考慮した。

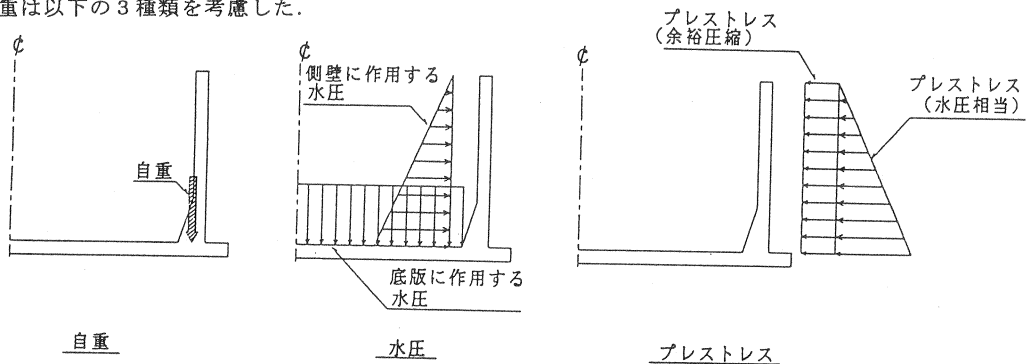


図-3 荷重図

3. 結果

図-2に示した側壁下端固定モデルと側壁と弾性床上の底版が結合されたモデルにより側壁下端の断面力をそれぞれ計算し、その結果を用いて次式により算定係数 $k_\alpha \cdot k_\beta$ を算出した。

$$k_\alpha \cdot k_\beta = \frac{M_{0f}}{M_{0h}} \quad (1)$$

ここに、

k_α : 基礎の特性を考慮した係数

k_β : 底版の剛性を考慮した係数

M_{0f} : 側壁下端弾性固定支持の場合の側壁下端の鉛直方向曲げモーメント

M_{0h} : 側壁下端固定支持の場合の側壁下端の鉛直方向曲げモーメント

容量 $5,000\text{m}^3$ の場合の地盤反力係数 K_v と $k_\alpha \cdot k_\beta$ との関係を図-4に示す。さらに、この関係を底版の状態(一層および二層、二層の場合は基礎版の有無)別に側壁下端厚 t_h と底版厚 t_{rp} の比毎にグラフ化して、

図-5, 6, 7に示す。

これらの図より以下が明らかとなった。

①図-4より, K_v が小さな値ほど, 側壁下端の曲げモーメントは小さくなる。

②図-4より, 水圧相当プレストレスと余裕圧縮プレストレスの荷重の分布形状による $k\alpha \cdot k\beta$ の差はない。

③図-4, 5, 6, 7より, 底板厚さと側壁下端厚さとの比が大きくなるほど $k\alpha \cdot k\beta$ は大きくなる。

④底板と側壁を一体化し, 底板の下にばねを導入してFEM等を用いて解析する場合, 地盤反力係数を実際よりも小さく評価すると得られる側壁下端の断面力が実際よりも極端に小さく評価される場合があり, 地盤反力係数の評価にあたっては十分注意する必要がある。

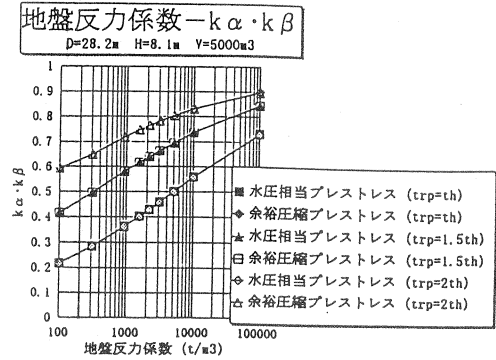


図-4 底板が一層で $V=5,000\text{m}^3$ の場合の地盤反力係数と $k\alpha \cdot k\beta$ の関係

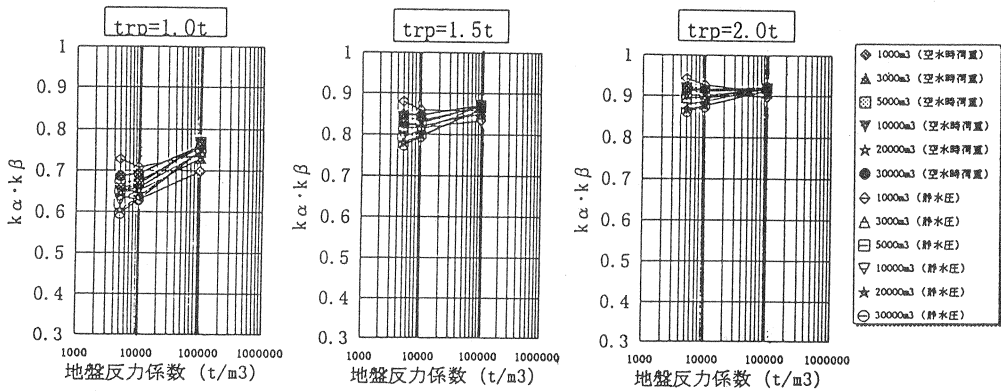


図-5 底板が一層の場合の地盤反力係数と $k\alpha \cdot k\beta$ の関係

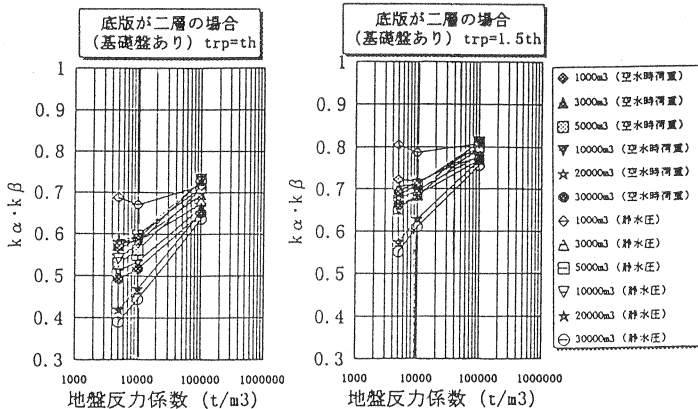


図-6 底板が二層で基礎版がある場合の地盤反力係数と $k\alpha \cdot k\beta$ の関係

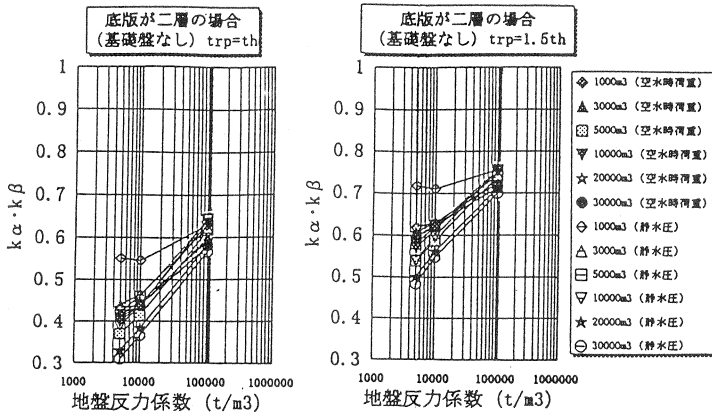


図-7 底版が二層で基礎版がない場合の地盤反力係数と $k_\alpha \cdot k_\beta$ の関係

4. 鉛直方向地盤反力係数の決定

以上より、PCタンク建設地点の地盤反力係数 K_v を適切に定めることが重要であることが分かった。

次に、 K_v を実験等で詳細に定めることができない場合、設計の便宜を考慮し、鉛直方向地盤反力係数を決定する場合の一手法である道路橋示方書³⁾の算定式を下式に示す。

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

ここに、 k_v : 鉛直方向地盤反力係数

k_{v0} : 直径30cmの剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向地盤反力係数(kgf/cm²)で、各種土質試験・調査により求めた変形係数から推定する場合は、下式により求める。

$$k_{v0} = \frac{1}{30} \alpha E_0$$

B_v : 基礎の換算載荷幅(cm)で下式により求める。ただし、底版形状が円盤の場合には直径とする。

$$B_v = \sqrt{A_v}$$

E_0 : 設計の対称とする位置での地盤の変形係数

α : 地盤反力係数の推定に用いる係数

A_v : 鉛直方向載荷面積

(2)式によるN値30の場合の載荷幅と鉛直方向地盤反力係数の関係を図-8に示す。(2)式をPCタンクに適用する場合、以下の点が問題となる。

- ① (2)式はフーチングを剛体として扱っている。
- ② (2)式は橋脚のように基礎の載荷幅の比較的小さいものを対象としている。

すなわち、PCタンクの底版は剛体と考えにくい点および載荷幅が(2)式で考慮している範囲より大きい点でPCタンクの場合(2)式により鉛直方向地盤反力係数を算定するのは適切でない場合があると考えられる。

(2)式の適用範囲が比較的小さい載荷幅の範囲であることは(2)式で載荷幅が無限大になれば K_v が0となるという点でも伺うことができる。

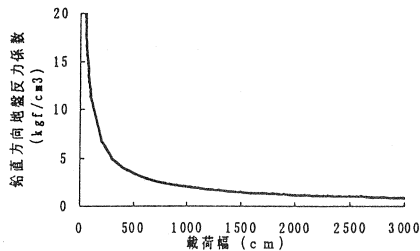


図-8 (2)式による載荷幅と鉛直方向地盤反力係数の関係 (N値30の場合)

以下に実験等により実際の鉛直方向地盤反力係数 K_v が得られない場合に設計の便宜を考慮して、一般的形状のPCタンクで一般的に直接基礎が採用される地盤の場合の K_v 値を提案する。

Theory and Design of Reinforced Concrete Tanks (M. HIKAL)⁴⁾では、コンクリートタンクに適用する鉛直方向地盤反力係数をFoundation Modulus k_0 として表-2のように与えている。

表-2 Foundation Modulus k_0

土の種類	k_0 (kgf/cm ³)
泥炭(ピート)	0.5~1.0
砂および砂利の盛り土	1.0~2.0
水中の粘土(wet)	2.0~3.0
湿潤粘土(moistured)	4.0~5.0
乾いた粘土(dry)	6.0~8.0
完全に乾いた粘土(hard dry)	10.0
粒の粗い砂	8.0~10.0
少量の砂利を粒の粗い砂	
少量の砂を含んだ細かい砂利	
細かい砂を含んだ中位の砂利	10.0~12.0
粒のあらい砂を含んだ中位の砂利	12.0~15.0
粒のあらい砂を含んだ大きな砂利	15.0~20.0

表-2より直接基礎のPCタンクにおいて普通地盤の場合に適用する K_v は約10,000tf/m³程度と考えられる。

また、下式に示すテルツァギーによる算定式によれば普通地盤のN値を30および50とした場合、載荷幅と鉛直地盤反力係数の関係は図-9のようになる。

$$\frac{k_v}{k_{v0}} = \left(\frac{B_v + 30}{2 \cdot B_v} \right)^2 \quad (3)$$

k_v : 鉛直方向地盤反力係数

k_{v0} : 直径30cmの剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向地盤反力係数 (kgf/cm²)

B_v : 基礎の換算載荷幅 (cm)

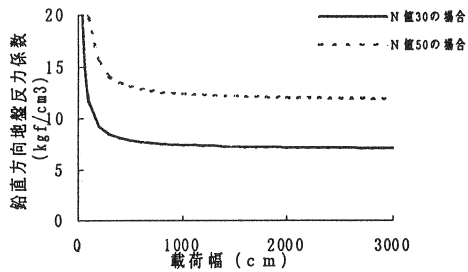


図-9よりテルツァギーの算定式によれば、底板直径(換算載荷幅)が10m~30m程度のPCタンクでは普通地盤の鉛直方向地盤反力係数が約7,000tf/m³~12,000tf/m³程度と考えられる。

図-9 (3)式による載荷幅と鉛直方向地盤反力係数の関係

よって、 K_v を実験等で詳細に定めることができない場合、設計の便宜を考慮して一般的形状のPCタンクで、一般的に直接基礎が採用される地盤の場合の普通地盤の鉛直方向地盤反力係数 K_v は10,000 tf/m³としてよいと考える。

次に、堅固な地盤の鉛直方向地盤反力係数については、岩の静弾性係数は、文献⁵⁾によれば砂岩で5,000~16,500 kgf/cm²である。一方、普通地盤の変形係数 E_s は標準貫入試験のN値より一般的に $E_s = 28 \cdot N$ で求められ、普通地盤のN値30の場合では $E_s = 28 \times 30 = 840$ kgf/cm²となる。よって、両者を比較した場合、堅固な地盤の静弾性係数は普通地盤の約10倍程度と考えられるため、鉛直地盤反力係数についても十分な実験データが無い現状においては、堅固な地盤(岩盤等)の場合、普通地盤の10倍とし、 $k_v = 100,000$ tf/m³としてよいと考える。

表-3 鉛直方向地盤反力係数 K_v

	普通地盤	堅固な地盤
鉛直方向地盤反力係数 K_v (tf/m ³)	10,000	100,000

5. まとめ

今回の検討で明らかとなった点を以下に示す。

- ① 図-4, 5, 6, 7から, $k_\alpha \cdot k_\beta$ は鉛直方向地盤反力係数の変化によりその値が変わり, 鉛直方向地盤反力係数の決定については実際の地盤を正しく評価し, 設計値を定める必要があることが分かった。
- ② 鉛直方向地盤反力係数の決定における一手法である道式をPCタンクに適用する場合, PCタンクの底版は剛体と考えるにくい点および載荷幅が大きい点で適切でないと考えられる。
- ③ 本来は設計時に実験等により鉛直方向地盤反力係数を適切に定める必要があるが, 一般的形状のPCタンクで一般的に直接基礎が採用される地盤の場合で, 実験等による詳細な評価が得られない場合, 設計の便宜を考慮して普通地盤の $K_v=10,000\text{tf/m}^3$, 堅固な地盤(岩盤など)の $K_v=100,000\text{tf/m}^3$ として設計してよいと考えられる。

この K_v 値をもとにして今回新たに提案した $k_\alpha \cdot k_\beta$ を表-5に, 55年仕様書の $k_\alpha \cdot k_\beta$ を表-4に示す。ここで, 表-5の $k_\alpha \cdot k_\beta$ の値を決定する方法としては, 図-5, 6, 7をもとにして, 発生する曲げモーメントを過少評価しないように安全側を考えて容量 $1,000\text{m}^3 \sim 30,000\text{m}^3$ の $k_\alpha \cdot k_\beta$ の最大値以上となるように決定した。

表-4 55年仕様書の $k_\alpha \cdot k_\beta$

底版および基礎の状態		$k_\alpha \cdot k_\beta$	
底版が1層で等厚と見なせる場合	普通地盤	0.8	
	堅固な地盤(岩盤等)	0.9	
底版が2層又はこれに準ずる場合	基礎版のある場合	$t_{r,p}=t_h$	0.75
		$t_{r,p}=1.5t_h$	0.80
	堅固な地盤(岩盤等)	$t_{r,p}=t_h$	0.75
		$t_{r,p}=1.5t_h$	0.80

表-5 新たに提案した $k_\alpha \cdot k_\beta$

底版および基礎の状態		$t_{r,p}=t_h$	$t_{r,p}=1.5t_h$	$t_{r,p}=2.0t_h$
底版が1層で等厚と見なせる場合	普通地盤	0.75	0.90	0.95
	堅固な地盤(岩盤等)	0.80	0.90	0.95
底版が2層又はこれに準ずる場合	基礎版のある場合	0.70	0.80	—
	堅固な地盤(岩盤等)	0.70	0.80	—

本研究は(社)プレストレストコンクリート建設業協会技術部会「PCタンク検討小委員会」の委員会活動の一環として行ったものであり, この研究成果が平成10年に発行された「水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説」((社)日本水道協会)に取り入れられた。

今後, 実際のPCタンクにおいて弾性固定の影響を測定する予定である。

【参考文献】

- 1) (社)日本水道協会: プレストレストコンクリートタンク標準仕様書, 昭和55年3月
- 2) (社)土木学会: 構造力学公式集, 平成5年2月26日
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 平成8年12月
- 4) M. HILAL: Theory and Design of Reinforced Concrete Tanks 1976, J. MARCOU & Co
- 5) 川本眺万・吉中龍之進・日比野敏 共著: 新体系土木工学 20 岩盤力学, 技法堂出版
- 6) 大橋勝弘・矢作枢 編著: 新体系土木工学 45 基礎工(I) - 構造物の基礎 -, 技法堂出版
- 7) 井上浩之・今尾勝治・郭朝光・西尾浩志: PCタンクの側壁下端部ハンチ形状の決定手法, 第5回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp. 261-264, 1995