

(128) 断熱パネルを型枠に使用したコンクリート製消化槽の試設計

(株) 銭高組 土木本部 正会員 ○上田 高博  
同 上 非会員 青柳 計太郎

§ 1. はじめに

一般的に建設されているコンクリート製消化槽には、その形状として卵形、亀甲形、円筒形の3種類のものがある。構造的には、卵形はPC構造、その他はRC構造が基本となっているが、プレストレスが導入されるケースもある。消化槽の一般的な仕様としては、コンクリート製容器の外面に保温材と外装材が施工され、内面には下水汚泥による化学的侵食に対してエポキシ樹脂が塗装されるものが多い。

現在、我々は消化槽の建設費を縮減するために、新しい構造形式のコンクリート製消化槽の開発を進めている。本研究では、保温材として消化槽の内側にガラス繊維で補強した発泡ポリウレタンパネル（以降、断熱パネルと呼ぶ）を配置した構造モデルの試設計をおこなった。この断熱パネルは断熱性のほかに水密性、防食性に優れ、木材（檜）と同程度の強度を有する材料であり、コンクリート打設時には内型枠として利用できる。構造的には、プレストレスの導入によりパネルの水密性を確保し、コンクリートのひび割れを許容したPRC構造としている。

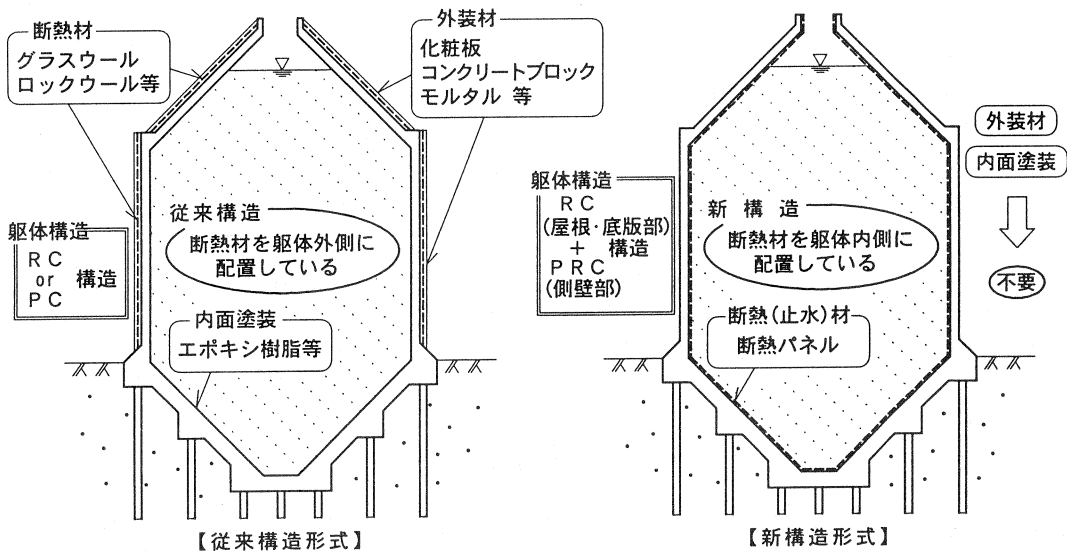


図-1 従来形式と新形式の構造比較

新構造形式の消化槽の主な特徴として次の4点があげられる。

- ①断熱パネルの強度を活かして、コンクリート打設時にはこれを内型枠として利用することができる。
- ②消化槽の水密性は、断熱パネルにより確保される。
- ③断熱パネルの止水機能が確保されることにより、コンクリートに水密性は期待しなくてよいので、RCとPRC構造を組み合わせた経済的な構造とすることができる。
- ④従来工法のような外装材・内面塗装が不要となり、材料・構造の合理化とともに施工全体の省力化と工期の短縮を図ることが可能である。

## § 2. 断熱パネルの性質

消化槽の内面に配置する断熱パネルは、製品名をFFU (Fiber reinforced Foamed Urethane) と称する合成木材として開発された材料である。比重別に数種類の製品があるが、この新構造形式の消化槽においては、断熱性と強度のバランスを考え、比重0.5のもの (FFU-50) を使用することとした。

断熱パネルに要求される事項は主に以下の4点である。

- (1) 内型枠として使用する場合の強度
- (2) 消化処理を効率的におこなうための保温(断熱)性
- (3) 汚泥に対する水密性、止水性
- (4) 汚泥に対する耐薬品(酸・アルカリ)性

以上の事項に対する基本性能を示し、FFUの主な特徴を紹介する。

### 2.1 構造

1方向配置のガラス繊維で補強された異方性を有する硬質発泡ポリウレタンパネルである(図-2参照)。

### 2.2 強度性能

野外暴露試験による強度の経年変化は1年で-5%程度であり、著しい強度減少は生じない(図-3参照)。

### 2.3 断熱性能

これまで一般的に使用されてきた消化槽の外断熱材であるグラスウール、ロックウールは熱伝導率が $0.04\sim 0.05\text{W/m}\cdot\text{C}$ である。FFU-50(比重:0.5)の熱伝導率は $0.057\text{W/m}\cdot\text{C}$ と従来の断熱材よりも若干劣るが、断熱材としては十分な性能を有している。

### 2.4 止水性能

水中浸漬による重量増加は1年で5%程度であり、吸水性が非常に小さいことから止水(水密)性においても十分確保できるといえる(図-4参照)。また、消化槽内の水深30m下での水圧を想定し、現在0.3Pa水圧下での吸水試験をおこなっている。

### 2.5 耐薬品性能

酸(硫酸10%)、アルカリ(苛性ソーダ10%)による強度の減少はともに1年で10%以下である(図-5,6参照)。実際の消化槽備用時には、断熱パネルは強度よりも断熱性と止水性が重要となり、薬品(特に酸:硫化水素)にもっとも腐食されやすい汚泥水面付近には表面をエポキシ樹脂でコーティングしたパネルを使用することも検討している。

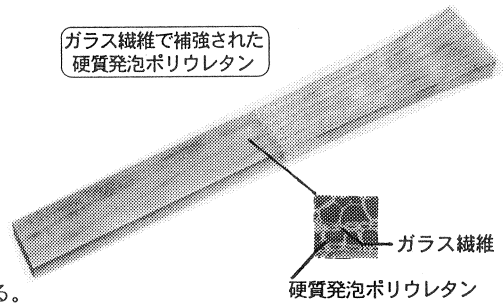


図-2 断熱パネル (FFU)

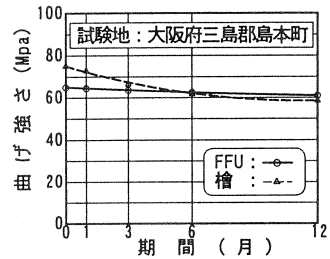


図-3 野外暴露試験による強度経年変化

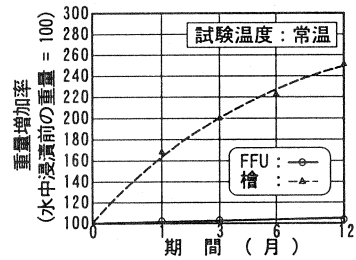


図-4 吸水性(水密性)経年変化

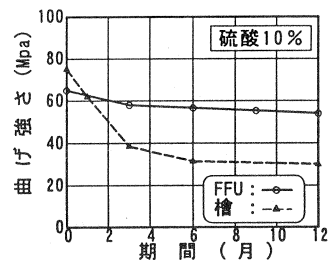


図-5 酸による強度経年変化

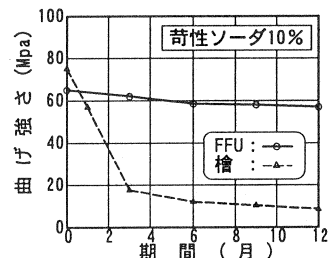


図-6 アルカリによる強度経年変化

§ 3. 試設計における条件

消化槽の保温性を確保するために、外部の温度変化が大きい地上部（屋根部および側壁部）は、伝熱係数を考慮して断熱パネルとコンクリートの断面寸法を決定する。地上部と比較して放熱量が小さく、比較的  
外部温度変化の小さい地中部（底版部）は、水圧・土圧によって発生する断面力より断面寸法を決定する。主な設計条件値を表-1、使用材料の物性値を表-2に示す。

§ 4. 試設計

4.1 部材寸法の決定

汚泥消化槽の運転コストを削減するためには、槽の保温性を高めて外部への放散熱を少なくして汚泥加温コストを抑えることが重要である。現状の消化槽の総括伝熱係数（地上部）は2~3 W/m<sup>2</sup>・℃となっている場合が多く、これを1.0 W/m<sup>2</sup>・℃ 近傍まで下げて保温効果を高めることが望ましいとされている。試設計モデルは、満水時の地上部の総括伝熱係数が1.0 W/m<sup>2</sup>・℃ 近傍の値となるように各部材寸法を決定することとした。

各部材厚を決定する際に算出する伝熱係数は、表-3の熱伝導物性値を用いて次式で算出される。

$$\alpha_i = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \sum \frac{d_{Fi}}{\lambda_{Fi}}}$$

ここで、  
 $\alpha$  : 伝熱係数  
 $\beta$  : 気体と触れる面の熱伝達率  
 $d_{Fi}$  : 部材の厚さ  
 $\lambda_{Fi}$  : 部材の熱伝導率

地上部および全体の総括伝熱係数は次式で算出される。

$$\alpha_{ug,all} = \frac{\sum (A_i \cdot \alpha_i)}{\sum A_i}$$

ここで、  
 $A_i$  : 各  $\alpha_i$  の対象となる部材内面積  
 $A1$  : 屋根部の汚泥非接触部表面積  
 $A2'$  : 屋根部の汚泥接触部表面積  
 $A2''$  : 側壁部の汚泥接触部表面積  
 $A3$  : 底版部の汚泥接触部表面積

各部材の寸法と伝熱係数は表-4、図-7のようになる。

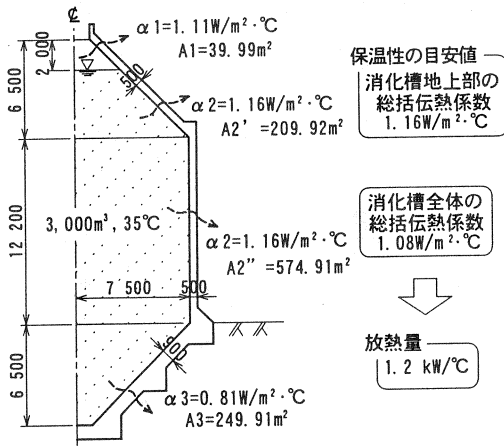


図-7 伝熱係数参照図

表-1 設計条件

構造形式	RC(屋根・底版部 側壁部鉛直方向) +PRC(側壁部円周方向)構造
消化槽容量	3,000 m <sup>3</sup>
消化槽内温度	35°C (一定)
外気温(寒冷地冬期~夏期)	-10~30°C
保温性能目標値・総括伝熱係数	1.0 W/m <sup>2</sup> ・℃

表-2 材料の物性値

コンクリート	設計基準強度	24 MPa	
	ヤング係数	2.45×10 <sup>4</sup>	
	線膨張係数	1.0×10 <sup>-5</sup>	
断熱パネル	比重	0.50	
	吸水量	6.00 mg/cm <sup>2</sup>	
	縦	曲げ強度	70.60 MPa
		曲げヤング係数	6.37×10 <sup>3</sup>
		圧縮強度	29.42 MPa
		線膨張係数	1.0×10 <sup>-5</sup>
横	曲げ強度	6.37 MPa	
	支圧強度	2.45 MPa	
鉄筋	SD295		

※断熱パネル：縦…ガラス繊維方向  
横…ガラス繊維直角方向

表-3 熱伝導物性値

熱伝導率 $\lambda_{Fi}$ (W/m・℃)	
コンクリート	1.628
断熱パネル	0.057

部材面の熱伝達率  $\beta$  (W/m<sup>2</sup>・℃)

空気 ⇄ コンクリート面	23.256
土 ⇄ コンクリート面	5.814
汚泥 ⇄ 断熱パネル	348.840

表-4 各部の伝熱係数

類別番号	部材	位置	断熱パネル厚 (mm)	コンクリート厚 (mm)	伝熱係数 $\alpha_i$ (W/m <sup>2</sup> ・℃)
1					
2, 2''	地上部	汚泥水面上	30	470	1.11
		汚泥水面下	30	470	1.16
3	地下部	汚泥水面下	30	870	0.81

地上部： $\alpha_{ug} = 1.16$  W/m<sup>2</sup>・℃ (目標値：1.0 W/m<sup>2</sup>・℃)  
 全体： $\alpha_{all} = 1.08$  W/m<sup>2</sup>・℃

4.2 断面力の算出

断面力の算出はFEM解析を用いておこなった。解析の概要は表-5に示したとおりである。

解析結果については、屋根部、側壁部、底版部の消化汚泥空液時、満液時、躯体外面温度：-10℃時、同：30℃時の合成断面力を図-10に示す。

表-5 FEM解析概要

解析ソフト	MARC ver.6.2
要素タイプ	8 節点ソリッド要素
作成モデル	円周方向 1/20 モデル ( 図-8 斜線部：中心角 18° )
解析 step-1 《温度解析》	汚泥温度：35℃一定とし、 寒冷地の冬期気温：-10℃、 夏期の外気温：30℃ とした時の定常状態部材温度を求める
解析 step-2 《応力解析》	温度解析で求めた温度データを入力データとして温度応力を求め、自重・水圧温度応力と合成して断面力に変換する

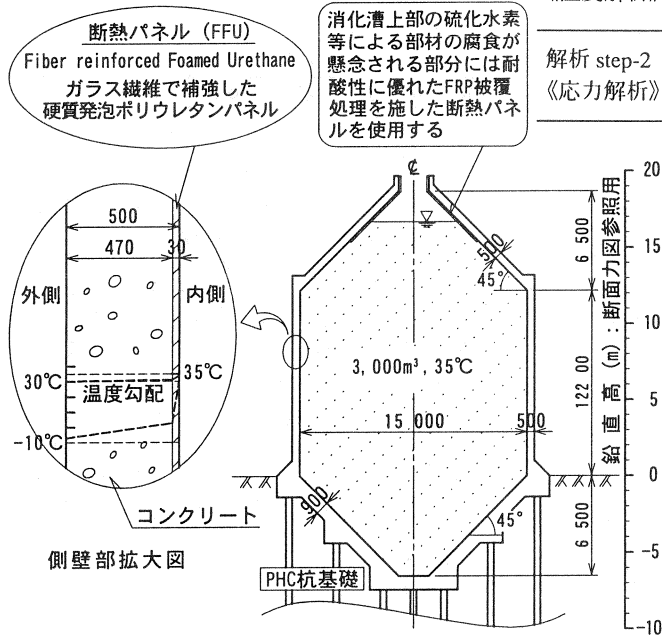


図-8 消化槽モデル概略図

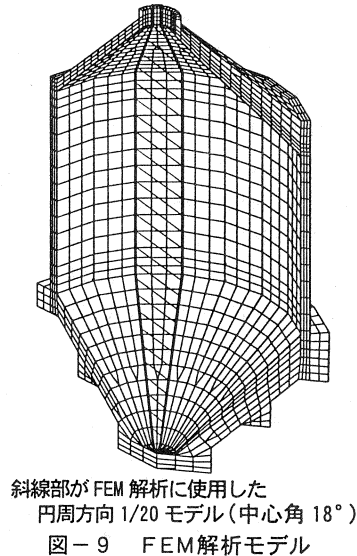


図-9 FEM解析モデル

[ 周方向断面力 ]

[ 鉛直(放射)方向断面力 ]

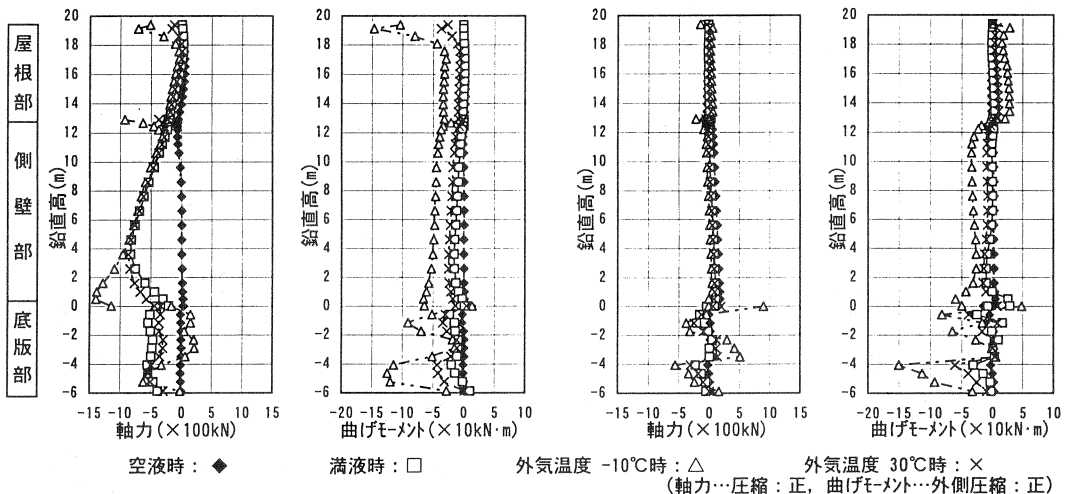


図-10 断面力図

4.3 鉄筋、PC鋼材の配置

一般に従来形式のRC製消化槽では、ひび割れ幅を小さくしてコンクリートに水密性を持たせると同時に、鉄筋腐食を抑制することが重要であるため、鉄筋の許容応力度は118MPa程度に抑えられている。

これに対し、本消化槽はコンクリートに与えられたプレストレスにより断熱パネルは圧縮状態に保たれるため、確実に止水機能を有する構造となっている。このため、コンクリートに水密性を持たせる必要性がなく、鉄筋の許容応力度を一般構造物と同等の176MPa程度とすることができ、従来構造に比べ鉄筋使用量を削減することができる。

PC鋼材、鉄筋は、FEM解析をもとに次の3条件を満足するように配置した。

- 1) 満水時の汚泥水圧により軸引張状態とならないように側壁部の円周方向にプレストレスを導入する。
- 2) 温度変化(内外の温度差)および地震時に生じる曲げ、引張、せん断に対しては鉄筋で抵抗させるPRC構造とする。
- 3) 一般的な環境下での鋼材腐食条件を満足するようにひび割れ幅を制御する。

PRC構造とした場合の鉄筋、PC鋼材配置等は図-11のようになる。また、表-6に示したように、断熱パネルは常に圧縮状態であり、止水機能が確実に発揮される構造となっている。もっとも厳しい状態(外気温:-10℃時)における鉄筋応力、コンクリートの曲げひび割れ幅を表-7、8に示す(比較参考値としてRC構造とした場合の側壁部円周方向鉄筋の配置、曲げひび割れ幅も示す)。許容値に対し鉄筋応力に余裕を持たせているのは、地上部部材の曲げひび割れ幅を0.3mm以下に制御しているためである。

表-8 曲げひび割れ幅  
- 外気温:-10℃ - 単位(mm)

部材	方向	ひび割れ幅	許容値	かぶり
屋根部	円周	0.28	0.35	70
	放射	0.27	0.45	90
側壁部	円周	0.25	0.35	70
	(RC)	(0.28)	(0.35)	(70)
底版部	鉛直	0.27	0.45	90
	円周	0.30	0.50	100
	放射	0.36	0.50	120

鋼材の腐食に対する環境条件: 一般の環境  
ひび割れ幅許容値:  $0.005c$  (mm),  $c$ : かぶり  
( )内の値は側壁部円周方向をRC構造とした場合

表-6 満水供用時の断熱パネル応力度

単位(MPa)

部材	方向	-10℃	20℃	30℃
屋根部	円周	2.8	2.3	1.2
	放射	1.1	0.4	0.1
側壁部	円周	3.0	2.1	1.7
	(°)無	(-1.2)	(-1.0)	(-0.9)
底版部	鉛直	1.2	0.8	0.7
	円周	3.7	2.4	1.5
	放射	0.8	0.6	0.5

円周方向圧縮強さ: 29.42(MPa) (圧縮: 正)  
鉛直(放射)方向支圧強度: 2.45(MPa)  
曲げ引張強さ: 6.37(MPa)  
断熱パネルのガラス繊維は円周方向に配置している

表-7 鉄筋応力度、配置

- 外気温:-10℃ -

部材	方向	鉄筋配置	応力度(MPa)	かぶり(mm)
屋根部	円周	D13 ctc 100	139	70
	放射	D13 ctc 150	92	90
側壁部	円周	D19 ctc 150	110	70
	(RC)	(D25 ctc 100)	(145)	(70)
底版部	鉛直	D16 ctc 150	89	90
	円周	D19 ctc 150	96	100
	放射	D19 ctc 150	99	120

鉄筋の許容応力度: 176(MPa)  
( )内の値は側壁部円周方向をRC構造とした場合

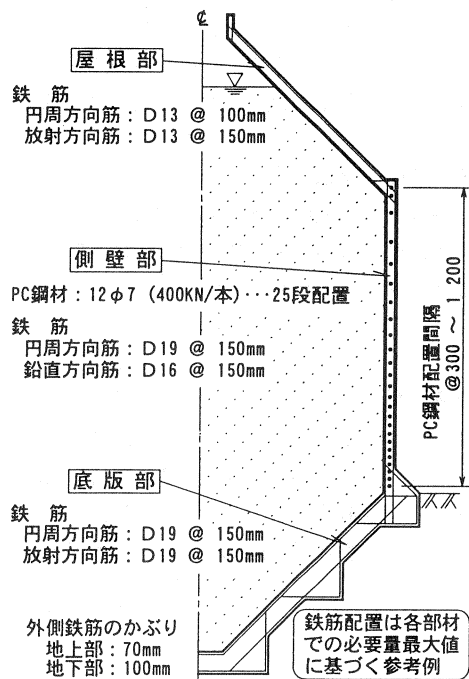


図-11 鉄筋、PC鋼材の配置

側壁円周方向をRC構造とした場合は側壁部円周方向にかなりの鉄筋量が必要とされ、断熱パネルには若干の引張が生じている。これに対し、側壁部円周方向をPRC構造とした場合には、大幅な鉄筋の削減が可能である。また、今回の試設計では躯体外面温度を-10℃(寒冷地冬期)~30℃(夏期)と通常的设计条件に比べ冬期温度条件を厳しく設定したが、躯体内外の温度差により部材に曲げが生じた場合においても、断熱パネルを常に圧縮状態に保持することができ、断熱パネルの止水機能を確実なものにしている。

#### 4.4 断熱パネル内型枠

断熱パネルは木材と同等の強度を有し強度的品質が確保されるため、コンクリート打設時に内型枠として使用できる。パネルは、コンクリート打設時において、より強度が要求される(側壁円周、屋根・底板放射)方向にガラス繊維方向を統一して使用する。

断熱パネルを型枠材として使用することにより、躯体完成後に断熱材を張り付け施工する場合に比べ、工種削減・工期短縮・コストダウンが期待できる。

現場作業の削減と品質(パネル接合部の止水性)、寸法の精度を確保するために、断熱パネルは工場で運搬可能な限り大きなサイズにユニット化する計画である。

#### §5. まとめ

従来形式の消化槽施工に比べ、消化槽内面に水密性に優れ、ある程度の強度を持つ断熱パネルを使用した本構造の利点として、主に以下の事項をあげることができる。

- 1) 円周方向にプレストレスを与えることにより、断熱パネル自体が十分な水密性を確保するので、構造物の機能、耐久性、美観に問題のない範囲内でコンクリートにある程度のひび割れを許容でき、PRC構造とすることができる。
- 2) 断熱パネルをコンクリート打設時の内型枠として使用することができる。これより、コンクリート打設後の内型枠脱型作業がなくなり、型枠・支保工・足場設備の簡素化、工期短縮が図れる。
- 3) 従来、躯体完成後におこなっていた内面塗装工・保温工・外装工が不要になり、工種削減が図れる。
- 4) 断熱材(断熱パネル)に複数の機能(断熱機能、止水機能、内型枠)を兼用させる合理性の高い構造によって、消化槽の施工に対する大幅な工期短縮、コストダウンが期待できる。

#### §6. 今後の課題

- 1) 各種施工試験の実施により、実施工における問題点の抽出および対策を検討する。
- 2) 消化槽の規模に応じた工期および人員配置、より詳細な施工方法を明らかにし、従来形式の消化槽施工とトータルコストを比較検討する。

#### 参考文献

- 1) 「コンクリート標準示方書 設計編」 土木学会
- 2) 「容器構造設計指針・同解説」 日本建築学会
- 3) 「下水道施設省エネルギー化対策」 日本下水道協会
- 4) 「土木設計 設計基準(案)」 日本下水道事業団