

卵形消化槽の設計・施工

堅田 茂昌*

1. はじめに

わが国における下水道の普及にともない、年々増加する処理場での発生汚泥の効率的な処理処分が重要となってきた。

汚泥処理方式のなかで重要な位置を占めている嫌気性消化方式は、汚泥の減量化はもちろんのこと汚泥の安定化および安全化、さらにはその汚泥からのエネルギーを回収して汚泥の加温やガス発電に利用できるという点で、省エネルギー型汚泥処理法といえ、その効率化の研究が進められている。

従来の汚泥消化槽は直径と側深の比を2:1とした平たい円筒形で液面が広いので、スカムの処理が容易でなく、また汚泥混合のための攪拌による対流にはムラを生じやすく、汚泥は不均質になり良好な消化作用は妨げられ、さらには砂等の固形物が沈着堆積するのでタンク内の定期的な清掃が必要となるなど効率的な運転が困難であった。

卵形の形状は、汚泥の混合性がよく、保温性に優れ、維持管理が容易である。そして、ドイツで数多く採用されて良好な実績をあげてきたプレストレストコンクリート(PC)

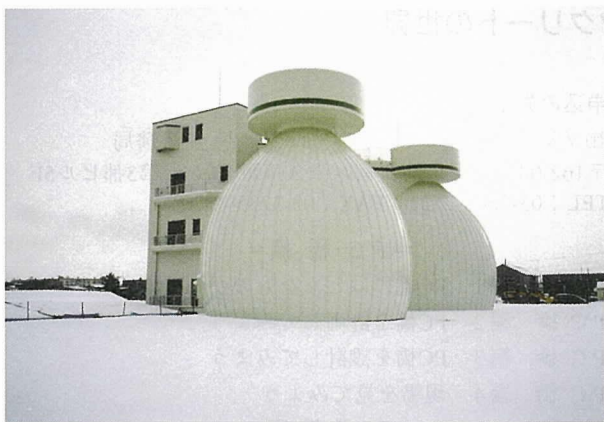


写真 - 1 全景 (事例)



* Shigemasa KATADA
 (株)安部工業所 技術開発部
 技術課長

卵形消化槽が注目され、国内では横浜市において1983年に、はじめて採用された¹⁾²⁾。その後現在までに全国二十数ヶ所の処理場で採用され、100基以上のPC卵形消化槽施工実績がある。

本文では、PC卵形消化槽の特徴とともに最近建設された卵形消化槽(図-1、写真-1)の設計・施工事例について報告する。

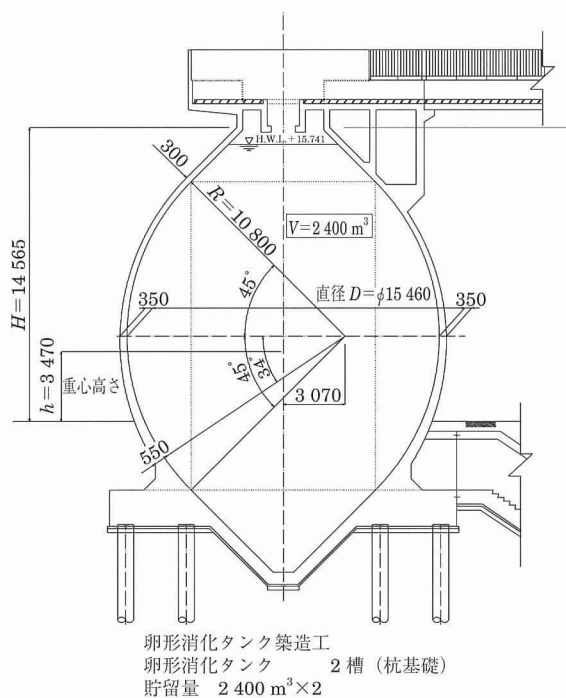


図 - 1 卵形消化槽設計・施工事例

2. 消化槽の特徴

2.1 機能

下水処理の基本は、「水の浄化」と「下水から分離した汚濁物質の処理」に分けられる。水の浄化は、下水を機械的かつ生物学的に汚濁物質を沈殿させ上澄み水を分離し、滅菌処理して放流することである。

下水から分離した汚濁物質の処理は、濃縮・消化・脱水・最終処理を経て最終処分に行うことである。そのうちの消化に関しては、酸素を供給して行う好気性消化と酸素を遮断して行う嫌気性消化の2種類の方法がある。

一般の消化槽は嫌気性消化である。汚濁物質(汚泥)を、嫌気性微生物の働きにより、汚泥中の有機物の一部をメタンガス、炭酸ガス、水などの無機物に分解し、汚泥を安定

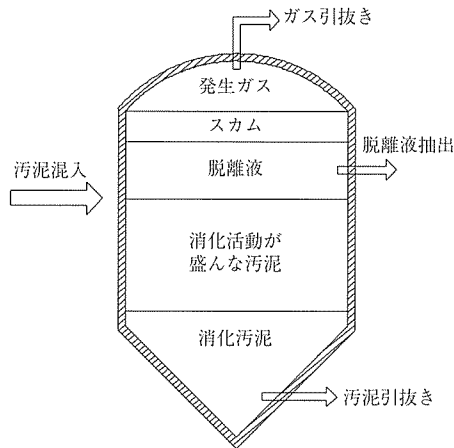


図-2 汚泥消化槽の内部構造

化する処理の役目を果たす微生物反応器である。消化槽内部の構造は、図-2に示すとおりである。消化槽の最終発酵期に入った汚泥に新鮮な汚泥を混入すると、汚泥の消化が促進され、連続的に炭酸ガスおよびメタンガスを発生し、消化汚泥は沈殿して底部から引抜かれる。

嫌気性消化は、汚泥を安定化させるとともに、汚泥量を減少させ、病原菌を死滅させ衛生的に安全化させることができる。そして、消化過程で発生する消化ガスは、発電や熱エネルギーに有効利用できるなどの利点も有している⁴⁾。

2.2 消化タンクの形状と特徴

消化槽は、図-3に示す4形式がある。従来の一般的な消化槽は、ソロバン型、亀甲型、クラシック型であり、円筒形で、内径25m以下、側深は内径の1/2程度で、底部に25/100以上の勾配を有する形状である。これらの形状には以下に示す共通した短所がある。

- ① タンク内の液面が大きくなり、そこに生じる膜（スカム）を除去するのに手間がかかる。
 - ② 容量に対する表面積が大きくなり放熱量が大きい。
 - ③ 屋根直下の空間が消化作業に有効に活かされていない。
- 卵形は、上記に対して以下に示す特長を有している。
- ① 砂が堆積しないので内空容量を100%利用でき、危険な作業である堆砂の浚渫の必要がない。

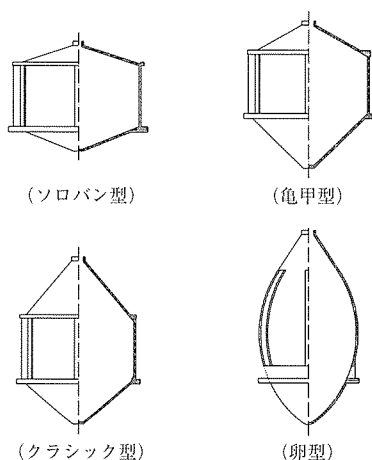


図-3 消化槽の形状種別⁴⁾

- ② 背が高く径が小さいので敷地面積が小さくなる。
- ③ 運転機能と運転コストに優れている。

さらに、卵形消化槽をPC構造とすることで、大型化が可能となり、プレストレスの効果により、液密性、気密性を高めることができ、上記の特徴を一層活かせることとなる。

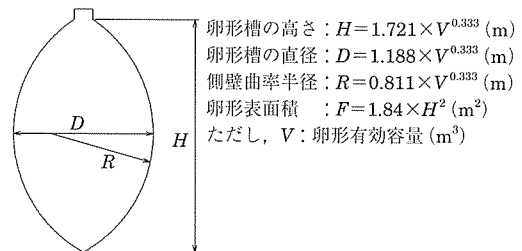
3. PC 卵形消化槽の設計

3.1 形状の選定

卵形消化槽の設計にあたっては、汚泥の混合性が良く、保温性に優れ、維持管理が容易となる形状の選定を行う。

卵形消化槽の頂部は、汚泥を攪拌させる渦の発生点になるので、渦の発生速度を高めるために曲率半径が小さいパラボラ形状が理想的となる。卵形消化槽の底部は堆積物が一箇所に集まりやすく、除去しやすい急傾斜を有するパラボラ形状が理想的となる。

一般には、図-4に示すPopelの提案式を参考に、容積に対する表面積の比をできるだけ小さくするように、形状が決定されている。



卵形槽の高さ： $H=1.721 \times V^{0.333}$ (m)
 卵形槽の直径： $D=1.188 \times V^{0.333}$ (m)
 側壁曲率半径： $R=0.811 \times V^{0.333}$ (m)
 卵形表面積： $F=1.84 \times H^2$ (m²)
 ただし、V：卵形有効容量 (m³)

図-4 Popelによる卵形の形状⁵⁾

実際の消化槽においては、パラボラ形状が理想の頂部および底部の形状は施工性を考慮して、球形部と連続する傾斜角45°以上の円錐形状とされている。全体のプロポーシオンを示す高さ最大内径の比H/Dは、実際の卵に近い1.45~1.6程度が多く採用されている。

本設計PC卵形消化槽では、H/D=1.45のプロポーシオンとなっている。

3.2 基礎の形式

卵形消化槽の主な基礎形式は、図-5に示すように直接基礎形式、ケーソン形式、リングビーム形式、フーチング形式、支え壁形式があり、消化槽の規模や地盤条件に応じ

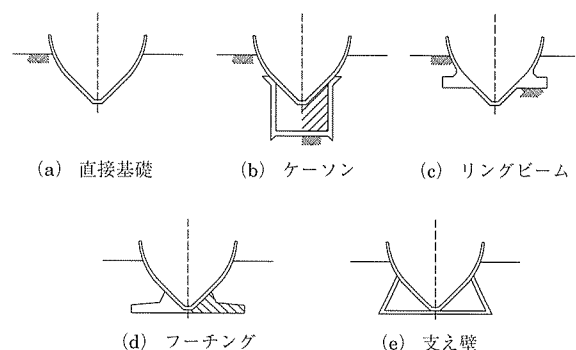


図-5 卵形消化槽の基礎構造³⁾

て地震時の安定を考慮して選定される。

これら形式は、すべて直接基礎で適用可能である。杭基礎とする場合には、リングビーム形式、支え壁形式が適すると考えられる。

西ドイツでは良好な地盤条件での建設が多く、a)、b) の実績が多い。日本国内ではタンクの設置される地盤が軟弱であることと、耐震性を考慮してc)、d)、e) の実績が多い。今回の設計では、杭基礎であることより、国内で実績の豊富なリングビーム形式が採用された。

3.3 PC 鋼材の配置

PC 卵形消化槽は縦長の形状であり、側壁には液圧などの荷重によって、主に円周方向の軸方向力が、経線方向には曲げモーメントがそれぞれ生じる。円周方向軸引張力に対しては円周方向プレストレス、経線方向曲げモーメントに対しては経線方向プレストレス、下部円錐に生じる軸引張力や曲げモーメントに対しては下部円錐プレストレスを導入する必要がある。本 PC 卵形消化槽の PC 鋼材配置を図 - 6 に示す。各部位における PC 鋼材配置の考え方について以下に説明する。

1) 円周方向

液圧、消化ガス圧などによる円周方向引張力に抵抗させるために、側壁円周方向に PC 鋼材を配置し、それを緊張定着することによって円周方向プレストレス力を与える。

2) 経線方向

側壁経線方向には、PC 鋼材を配置し、それを緊張定着することによってプレストレス力を与え、曲げに抵抗させる。経線方向の PC 鋼材は、施工性を考慮して PC 鋼棒を採用している。

3) 下部円錐

下部円錐の円周方向および経線方向には軸方向力および曲げモーメントが発生することより、両方向ともにプレス

トレスを導入するのが理想である。しかし、今回の設計では、施工性等を考慮し、実績の多い経線方向のみにプレストレスを導入し、円周方向を RC 部材とする設計を採用している。

4) リングビーム円周方向

リングビーム外側に配置する円周方向 PC 鋼材は、リングビームに作用する液圧によって発生する円周方向引張力に抵抗させている。

3.4 耐震設計

3.4.1 設計震度について

卵形消化槽の耐震設計は(社)日本下水道協会「下水道施設の耐震対策指針と解説」(1997年版)に拠っている。下水道構造物の耐震設計において想定する地震動および耐震性能目標は以下の表 - 1 および表 - 2 のとおりに定められている。また、レベル 1 地震動、レベル 2 地震動の各地震動における設計震度は表 - 3 に示すように定められている。

下水道施設における土木構造物の分類は、Ⅰ類〔水槽構造物〕、Ⅱ類〔地中埋設線状構造物〕、Ⅲ類〔版状構造物〕に分けられ、卵形消化槽はⅠ類水槽構造物のⅠ-2円筒形水槽に該当する。

耐震設計において、Ⅰ-2円筒形水槽で、図 - 7 に該当する「特殊構造物」は、震度法の標準設計水平震度を $Kh0 = 0.3$ に上げて設計すべきと定義し、これに該当しない構造物

表 - 1 土木構造物耐震設計上の想定地震動

地震動区分	地震動区分別の地震動の内容
レベル 1 地震動	施設の供用期間内に 1~2 度発生する確率を有する地震動
レベル 2 地震動	施設の供用期間内に発生する確率は低いが大強度を有する地震動

表 - 2 土木構造物に適用する耐震性能目標

地震動区分	耐震性能目標
レベル 1 地震動	地震動が作用しても、構造物が損傷を受けないものとする耐震性能
レベル 2 地震動	構造物が損傷を受けたり塑性変形が残留しても比較的早期の復旧を可能とする耐震性能

表 - 3 レベル 1, レベル 2 地震動における設計震度

レベル 1 地震動における設計震度	
地上部	$Khf = Cz \cdot CG \cdot CI \cdot Kh0$ ここに、 $Kh0 = 0.2$ (一般構造物) $Kh0 = 0.3$ (特殊構造物) Cz : 地域別補正係数 (A 地域 1.0, B 地域 0.85, C 地域 0.7) CG : 地盤別補正係数 (Ⅰ種 0.8, Ⅱ種 1.0, Ⅲ種 1.2) CI : 重要度別補正係数 (1.1)
地下部	$Khb = (1 - 0.015 Z) \cdot Khf$
レベル 2 地震動における設計震度	
地上部	[一般構造物] 第Ⅰ種地盤 $Khf - 2 = 0.8 \times Cs$ 第ⅡおよびⅢ種地盤 (但し、 $Khf - 2 \geq 0.3$) [特殊構造物] 第Ⅰ種地盤 $Khf - 2 = 1.2 \times Cs$ 第ⅡおよびⅢ種地盤 (ただし、 $Khf - 2 \geq 0.3$) Cs : 構造物特性係数
地下部	$Khb - 2 = (1 - 0.015 Z) \cdot Khf - 2$

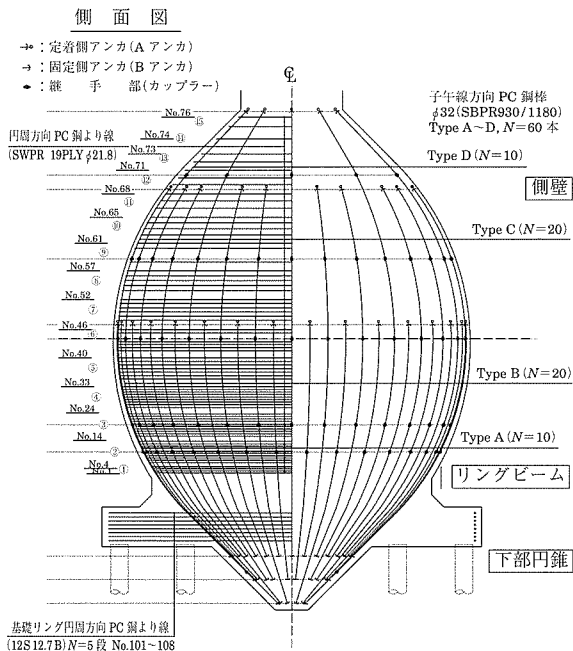


図 - 6 PC 鋼材配置 (事例)

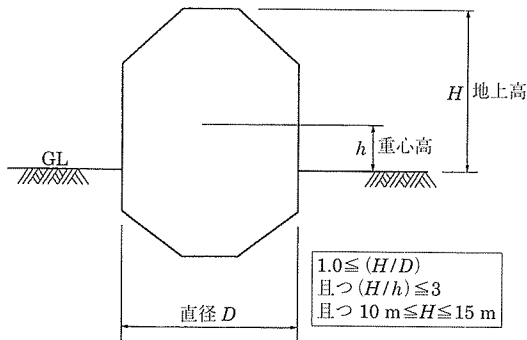


図-7 「特殊構造物」の定義

については「一般構造物」と定めている。また，“地上高15 mを超える構造物では，動的解析等による設計も考慮する。”としている。

本PC卵形消化槽の形状は，表-4のとおりであり「特殊構造物」の適用範囲外の「一般構造物」と判定された。

地盤種別は，Ⅲ種地盤に該当し，表-3の規定に従い，設計水平震度を定めて震度法により耐震設計がされている。

表-4 構造物の判定

条件	設計形状	判定
$1.0 \leq (H/D)$	$H/D = 0.94$	該当せず
$(H/h) \leq 3$	$H/h = 4.20$	該当せず
$10 \text{ m} \leq H \leq 15 \text{ m}$	$H = 14.465 \text{ m}$	該当

3.4.2 耐震設計照査

レベル1地震動に対しては許容応力度法により照査された。そして，レベル2地震動に対して限界状態設計法を適用し，構造物のじん性を考慮した構造物特性係数 $C_s = 0.45$ を考慮した断面力によって，終局耐力の照査がされている。

因みに，構造物特性係数については，2002年に発行された(社)日本下水道協会「下水道施設耐震計算例」—処理場・ポンプ場編—に判りやすく整理されており，その一部を表-5に示す。

表-5 構造物分類別構造物特性係数の取り扱い⁶⁾

構造物分類	構造物			
	躯体	杭体	杭基礎	
一般構造物	Cs 考慮	Cs = 1.0	Cs = 0.45	Cs = 0.45
特殊構造物			Cs = 1.0	Cs = 1.0

4. PC 卵形消化槽の施工

4.1 施工方法の選定

PC卵形消化槽の施工方法は，ドイツのディビダーク社において開発された。当初は，タンクを縦に分割して施工する方法であったが，その後の改良により，タンクを水平分割してリングセグメントとして施工する，経済的なディビダークジャンピングフォーム（図-8参照）を用いて施工

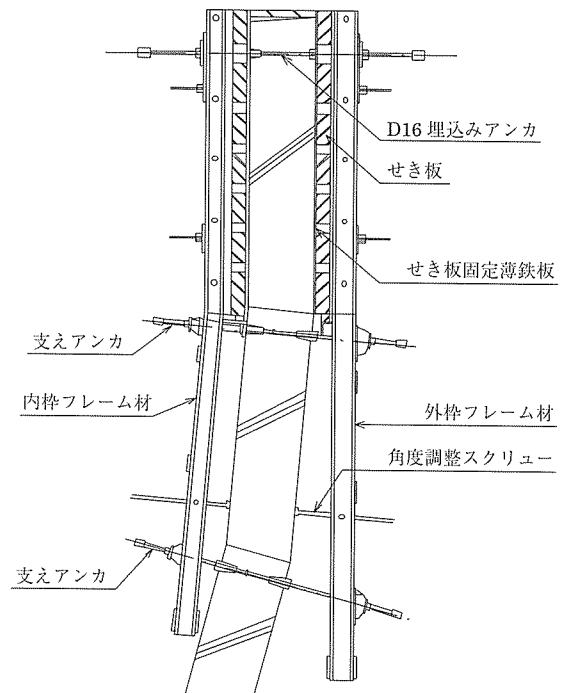


図-8 ジャンピングフォームの型枠組立て図

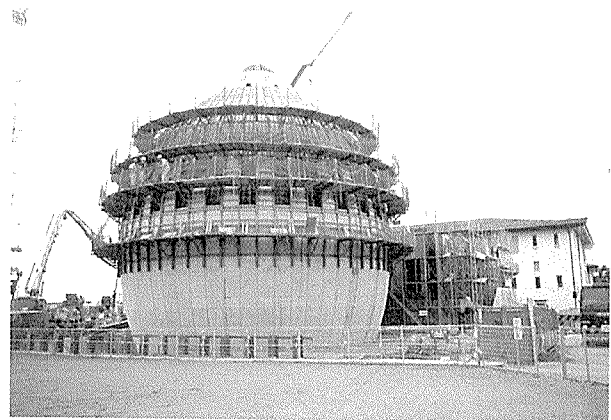


写真-2 大型型枠による側壁工

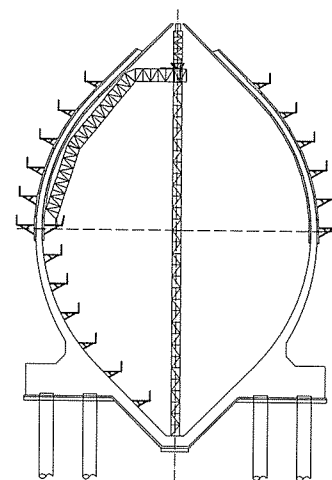


図-9 大型型枠施工概要図

する方法が開発された。本施工法は，繰返し作業を最大限に利用できるメリットを有している。

その後、工期短縮と作業効率を考えた図 - 9 に示す大型型枠がオーストリアで開発され、近年、国内にも導入され 16 基ほどの施工実績が報告されている。

本工事においては、以下のことより、ディビダークジャンピングフォームを用いた施工方法を採用した。

- 1) 外部足場を用いた冬期の養生性
- 2) サイクル施工による効率性
- 3) 保有機材の活用

4.2 冬期施工の対策

紹介事例の建設現場は、海岸地帯にあり、12月～3月の月別降雪日数が25日前後ある豪雪地域である。この降雪時期に、下部円錐部から側壁の地中埋設部の施工を行う必要があり、降雪対策が必要であった。

降雪対策として、図 - 10 および写真 - 3 に示す冬期仮設養生設備を設置した。この設備を構成する部材は、外部枠組み足場に併設した四角支柱を柱材として H 型鋼の梁とデッキプレートで製作した屋根材からなる。この屋根材は、資材の搬出入を考えクレーンにより着脱可能とした。また、外部足場全面をシート（防災シート使用）で養生することで、コンクリートの冬季施工養生効果と作業環境の改善を計った。

本冬期仮設養生設備は、仮設備の増加（屋根材の着脱に大型クレーン 50 t が必要）などの課題があるものの、冬季施工対策としては有効であった。今回施工の経験を踏まえ、改善を行い、今後も活用できる手法としたいと考えている。

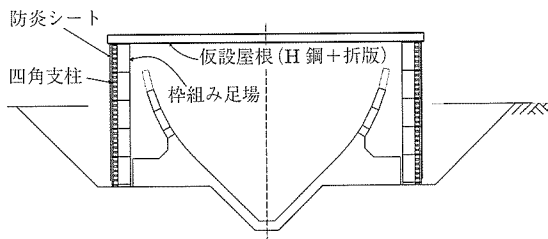


図 - 10 冬期仮設養生設備

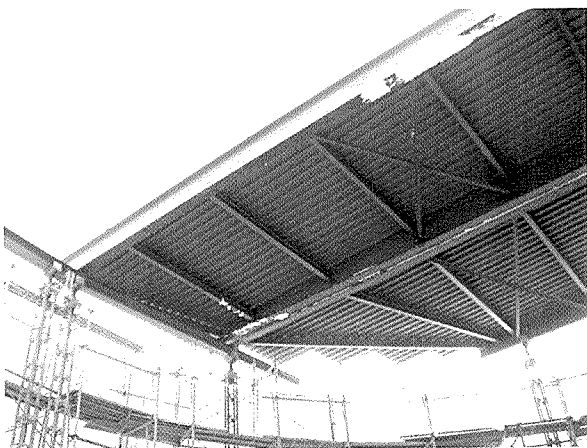


写真 - 3 冬期仮設屋根材

4.3 施工手順

本現場における PC 卵形消化槽の施工工程を表 - 6 に示す。

本工程に従い主な躯体施工順序を、写真を交えて以下にまとめて示す。

(1) 基礎工～下部円錐部の施工

基礎工は、杭を打設した後、掘削を行い、掘削終了後に杭頭処理を行なった。杭は SC 杭を用いた。その後、捨てコンクリート打設後、下部円錐部の施工を行なった。

基礎杭：プレボーリング先端拡大根固め 24 本 / 基
 PHC φ 800 × 32.0 m
 (上杭 SC 7.0 m + 中杭 C 種 10.0 m + 下杭 A 種 15.0 m)

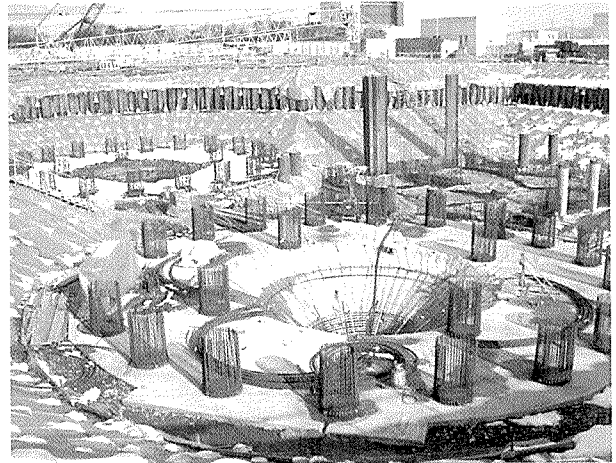


写真 - 4 基礎捨てコンクリート打設後の下部円錐部配筋状況

(2) リング基礎部の施工

下部円錐部施工後に、ディビダーク型枠を用いて、リング基礎部内型枠を組立て、リング基礎の施工を行なった。

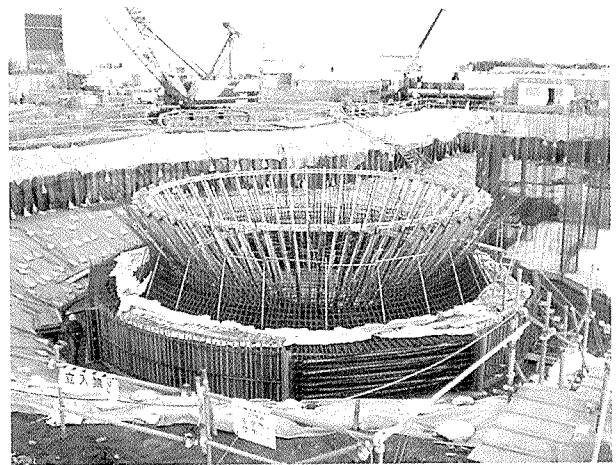


写真 - 5 下部円錐内側型枠ガーター取付け状況

(3) 冬期養生施工

4.2 で述べたように、下部円錐部から側壁下部の施工時期が冬期であることより、特別な冬期仮設養生設備を採用し実施した。

(4) 側壁のサイクル施工

側壁ブロックは、型枠パネルとガーターを転用するサイ



写真-6 冬期養生設備状況

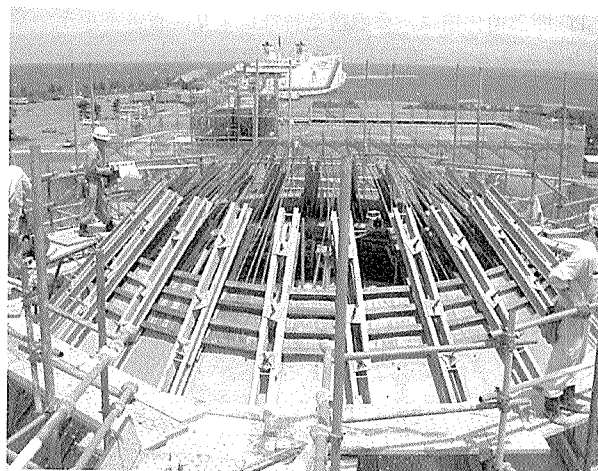


写真-8 側壁最終段施工状況

クル施工を採用した。側壁ブロックの施工は、1サイクル7日であり、工程は以下に示すとおりである。

1日	外枠フレーム、型枠パネル組立て・調整
2日	外側鉄筋、PC鋼材組立て
3日	内側鉄筋、内枠フレーム組立て
4日	型枠パネル組立て・調整、 コンクリート打設足場組立て
5日	コンクリート打設・養生
6～7日	養生期間

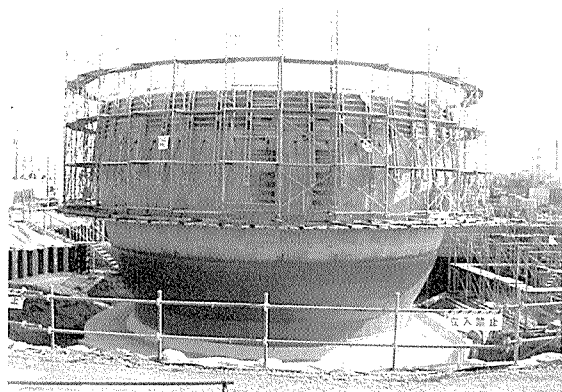


写真-7 側壁施工足場組み換え状況

5. おわりに

PC 卵形消化槽は、嫌気性消化方式の汚泥の安定化処理および汚泥から発生するガスを有効利用できる形状であり構造である。PC 卵形消化槽は、ドイツで開発され 1982 年に国内に導入されて以来、すでに 100 基以上の施工実績がある。本報告は、PC 卵形消化槽の最近の施工実績に基づいて、基本特性を含む設計および施工についてまとめたものである。

設計においては、消化槽の特性を考えた有効な基本形状の選定が重要となる。しかし、耐震性能の要求が開発国のドイツと異なり厳しい条件であることより、耐震設計が基礎を含めとくに重要になる。また、耐震設計はコストにも大きく影響する。

PC 卵形消化槽の耐震設計は、「下水道施設の耐震対策指針と解説」（1997 年版）によって行なわれているが、基礎に関する事項が明確ではなかった。しかし、2002 年に設計計算例⁶⁾が示され、基礎の耐震設計の考えが明らかになった。本計算例の活用により、PC 卵形消化槽の合理的な設計が行なわれるものと期待する。

施工においては、従来のディビダーク・ジャンピングフォームを用いて施工された。建設場所が豪雪地帯で冬期施工が必要であることより、仮設屋根を用いた冬期養生対策を実施し、有効であったと考えられる。

表-6 PC 卵形消化槽施工事例工程表

項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
下部円錐基礎リング工事	円錐部、リング基礎部													
側壁工事				1～6ブロック			7～15ブロック							足場解体
PC工事	子午線、基礎リング、側壁円周						子午線、側壁円周							
頂部工事								スラッジポケット、高欄						
管廊部取付け工事														
防食塗装工事											内面防食工			
保温・外装工事						地下部保温工					地上部保温、外装工			
雑工事														
連絡橋工事														

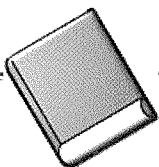
PC 卵形消化槽は、その構造特性により、省エネルギーであり、エネルギー有効利用型の構造物であり、今後もその特性に注目されて、実績が増加していくものと考えられる。本文が、今後の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴木素彦：下水道用プレストレストコンクリート消化タンク，プレストレストコンクリート，Vol.24，No.3，p.68，1982
- 2) 近藤富男，井手口哲朗：西ドイツにおける PC 卵形消化槽の設計・

- 施工，プレストレストコンクリート，Vol.26，No.5，p.21，1984
- 3) 岡田和男：下水汚泥の処理・処分，環境公害新聞社
- 4) 竹田哲夫，百合山哲三，吉岡民夫：PC タンクの設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.31，No.4，1989
- 5) デイビダーク協会：デイビダーク式 PC 卵形消化槽設計施工マニュアル，平成 7 年 5 月
- 6) 日本下水道協会：下水道施設耐震計算例-処理場・ポンプ場編 - 2002 年版

【2004 年 9 月 13 日受付】



●関連書籍のご案内

●初期応力を考慮した
RC 構造物の非線形解析法とプログラム

平成16年 3 月発行

田辺忠顕編著／技報堂出版刊

B 5 判・358 頁（本体価格 6,000 円＋税 5 %）

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町 8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233