
回転円筒付き円形沈砂池の開発

Sand Separating Chamber with Rotary Cylinder

福田 一美(Kazuyoshi Fukuda) 渡辺 重世(Shigeyo Watanabe) 村上 みさを(Misao Murakami)

要旨：

回転円筒付き円形沈砂池は、流入下水のエネルギーと円筒の回転エネルギーの組合せにより下水中の砂を分離除去するもので、除砂率、作業環境、保守費等の点で従来の矩形沈砂池より優れている。今回、円形沈砂池の水理学上のスケールアップの限界をコンピュータシミュレーションと模型実験で検討した結果、半径 12m までは集砂が可能であることがわかった。また、新しいモデルによる基礎関係式を求め、合理的な設計手法を提案した。

Synopsis：

Circle-shaped sand separating chamber with a rotary cylinder has a desirable function of sand sedimentation and separation from sewerage raw water. This technology is superior to the conventional rectangular-shaped sand sedimentation basin in points of a sand separation ratio, operation condition and maintenance work volume. The authors have clarified by the hydraulic mechanism that the scale-up limit is 12m in radius, and proposed a rational design method introducing a new theory of sand separation.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Sand Separating Chamber with Rotary Cylinder



福田 一美
Kazuyoshi Fukuda
エンジニアリング事業
本部 環境エンジニア
リング部 主任部員
(掛長)



渡辺 重世
Shigeyo Watanabe
エンジニアリング事業
本部 環境エンジニア
リング部



村上 みさを
Misao Murakami
エンジニアリング事業
本部 環境エンジニア
リング部

要旨

回転円筒付き円形沈砂池は、流入下水のエネルギーと円筒の回転エネルギーの組合せにより下水中の砂を分離除去するもので、除砂率、作業環境、保守費等の点で従来の矩形沈砂池より優れている。今回、円形沈砂池の水理学的なスケールアップの限界をコンピュータシミュレーションと模型実験で検討した結果、半径12mまでは集砂が可能であることがわかった。また、新しいモデルによる基礎関係式を求め、合理的な設計手法を提案した。

Synopsis:

Circle-shaped sand separating chamber with a rotary cylinder has a desirable function of sand sedimentation and separation from sewerage raw water. This technology is superior to the conventional rectangular-shaped sand sedimentation basin in points of a sand separation ratio, operation condition and maintenance work volume. The authors have clarified by the hydraulic mechanism that the scale-up limit is 12 m in radius, and proposed a rational design method introducing a new theory of sand separation.

1 はじめに

下水処理分野では、施設の維持管理性の向上が重要な技術開発テーマである。特に、下水処理場まで汚水を送るための中継ポンプ場や、雨水を公共用水域に放流するための排水ポンプ場には、沈砂かき揚げ機などの複雑な機械設備が多く、その維持管理性の向上が急務となってきた。

また、閉鎖性水域の水質汚濁対策として、面源負荷の削減のための雨水の簡易処理も重要である。特に、これまで都市部を中心に多く採用されている合流式下水道では、雨天時に雨により希釈された汚水や管内堆積物が大量に放流されるため、その負荷削減施設の整備が緊急課題とされている。したがって、簡易な水質浄化機能を持った沈砂池設備の開発も望まれていた。

当社が取り組んできた回転円筒付き円形沈砂池¹⁾は、施設の維持管理性の向上や、雨水放流水質の向上に優れた効果を発揮するものとして注目を集めている。特に、その除砂性能や維持管理性が評価された結果、1993年4月に日本下水道事業団民間開発技術審査証明を取得した。また、当社は、1990年に高松市東部ポンプ場に合流式下水道雨水吐水質改善施設として、1993年に八戸市館鼻汚水中継ポンプ場に汚水沈砂池として納入し、その除砂機能、水質改善効果について評価を得るに至っている。

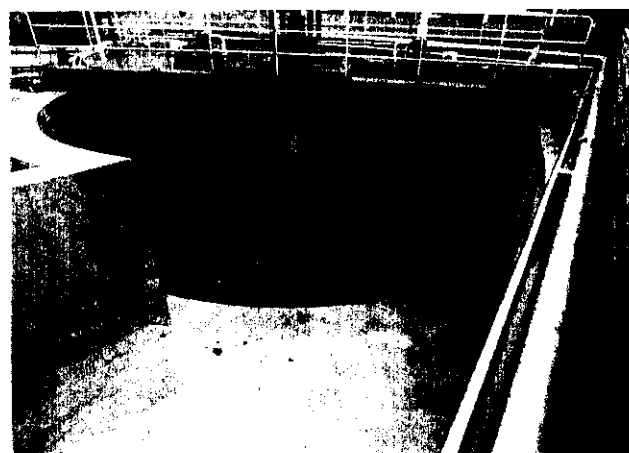


Photo 1 Tobu pumping station in Takamatsu

Photo 1に高松市東部ポンプ場の水質改善施設の全景を示す。また、Fig. 1に円形沈砂池の概念図を示す。

本報告では、この円形沈砂池の原理と特徴、設計手法および適用限界について述べる。

* 平成7年3月7日原稿受付

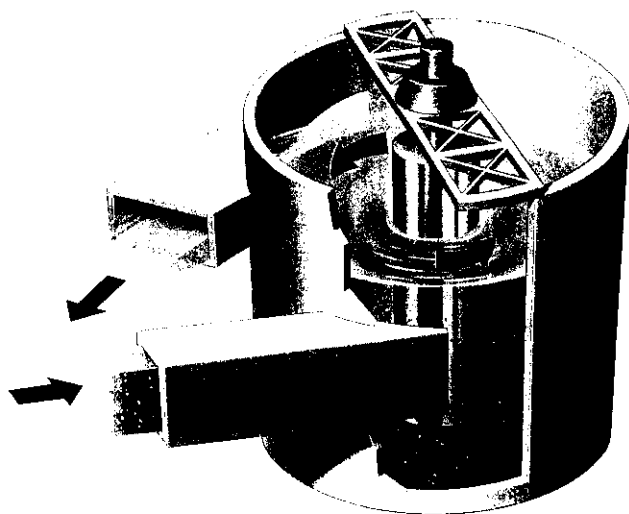


Fig. 1 General sketch of the circle-shaped sand separating chamber with rotary cylinder

2 円形沈砂池の概要²⁾

従来から用いられてきた横流式の矩形沈砂池には以下のような問題点があった。

(1) 除砂率が不十分

砂粒子に付着する有機物量が多いため、砂の見かけ比重が軽くなり底面沿いの短絡流により沈砂が再浮上し除砂率の低下を招きやすい。

(2) 維持管理性が悪い

有機物を多く含む砂が排出されるため、沈砂の搬出などの維持管理作業環境が悪化しやすい。また、矩形沈砂池に設けられる沈砂かき揚げ機には水中に機械部分が多いため、砂粒子による摩耗・損傷や腐食が激しく、保守作業量が多い。

こうした問題を軽減するために、円形槽の接線方向から水を流入させ、その際に発生する二次流によって沈砂や集砂を行うスワール分水槽を採用する例が見られた。

本技術はこのスワール分水槽に改良を加え、水理学上最も効率的な旋回流および二次流を形成できるようにしたものである。

2.1 スワールの原理

円形槽に接線方向から汚水を流入させると槽内には円周方向の旋回流が発生する。その時、水中には遠心力が発生し、その結果として下に凸の水面勾配が形成される。

旋回流速 V_x と水面勾配 I の関係は(1)式で表される。ここで、 g は重力加速度、 r は円形槽中心軸からの水平方向距離である。

$$I = \frac{1}{g} \times \frac{V_x^2}{r} \quad (1)$$

この式からわかるように、水面勾配は旋回流速の2乗に比例する。

旋回流速には Fig. 2 に示すように深さ方向の分布が見られる。これは水面においては水と底面との摩擦により流速が極端に小さくなるためである。水面付近においても空気との摩擦があり、旋回流速が小さくなる領域が存在する。しかし、摩擦係数が非常に小さいためにその減少量および範囲はごくわずかである。

水面勾配によって生ずる水位差のため、任意の水柱には中心方向への力 F_h が生ずる。この F_h は、中心からの距離が同じ水柱であれ

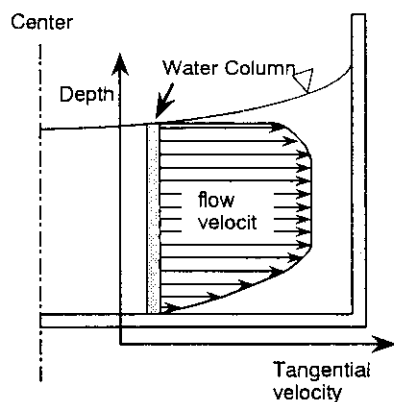


Fig. 2 Distribution of tangential flow velocity

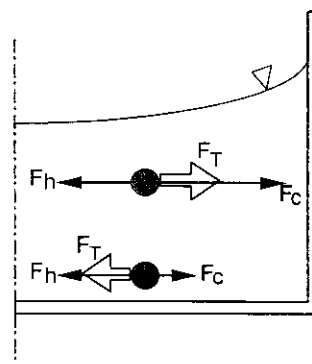


Fig. 3 Force to sand particles in water

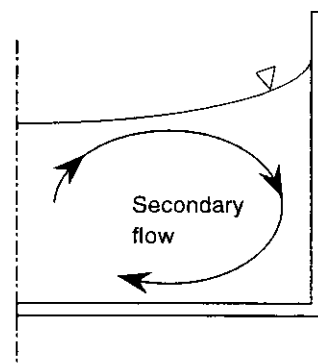


Fig. 4 Secondary flow in water

ば水深によらず一定である。

一方、旋回流速は水深によって異なるため、遠心力 F_c も水深方向で違った値をとる。したがって、 F_c と F_h の合力を F_T とすると、底面付近と中央付近の水塊が受ける力 F_T の向きは Fig. 3 のようになり、槽内に Fig. 4 のような二次流が発生する。この二次流により砂が中央付近まで集まるのがスワールの原理である。

ところが、流入水のエネルギーのみにより発生する旋回流は中央付近では弱く、水面勾配、二次流ともに中央付近では小さいために、底に沈んだ砂を中央まで完全に集めきることはできないという問題点があった。

2.2 円筒の役割

そこで、円形槽の中心に、流入水と同じ方向に回転する円筒を設

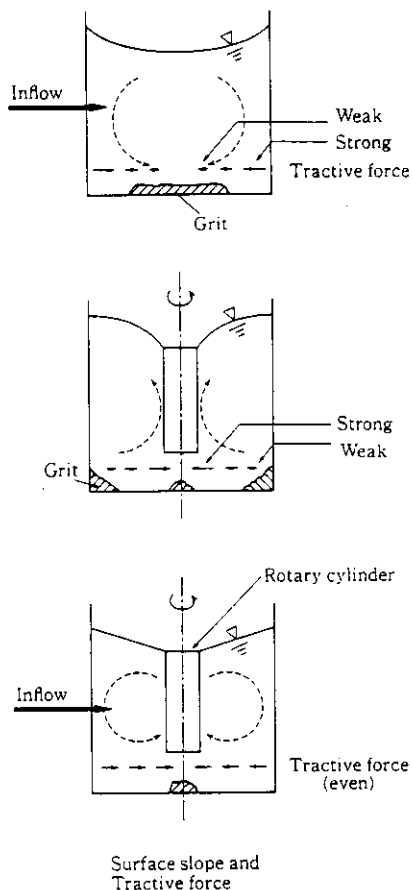


Fig. 5 Role of rotary cylinder

置し、流入水と回転円筒のエネルギーを組み合わせると旋回流速が均一分布となる結果、水面勾配が一定となり、底面全体に中心方向の大きな掃流力が発生する。そのために沈砂を中央部まで効率よく集めることができる。これを模式的に示すと Fig. 5 のとおりとなる。

2.3 システム構成

円形沈砂池のシステム構成を汚水中継ポンプ場を例として Fig. 6 に示す。ポンプ場に流入して除塵機を通過した汚水は、円形沈砂池

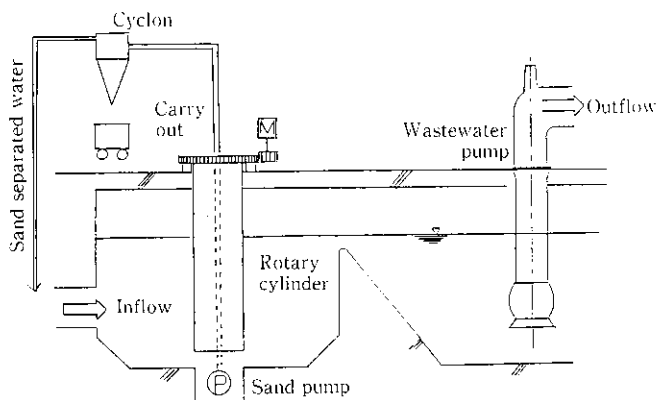


Fig. 6 Example of system (wastewater pumping station)

に導かれ、前述のような機構で除砂されたのちポンプピットへ越流し、ポンプアップされて処理場まで送られる。沈砂池で分離された砂は池中央の円筒下まで二次流により集砂され、揚砂ポンプにて池外まで排出されたのち、サイクロンによって固液分離され搬出される。

2.4 円形沈砂池の特徴

- (1) 敷地面積が従来の矩形沈砂池の $2/3 \sim 4/5$ になる。
- (2) 短絡流や沈砂の再浮上が軽減し、従来以上の除砂機能を有する。
- (3) 沈砂かき揚げ機が不要で水中機械設備は揚砂ポンプだけとなるため従来よりも保守点検が容易であり、補修コストが安い。
- (4) 底面を転動しながら集砂されるため、砂への有機物付着が少なく悪臭発生が減少し、作業環境が改善される。
- (5) 水面付近でも中心方向流速が発生するため、油分などの浮上性物質の除去効果もある。

上述の(1)～(2)については日本下水道事業団の民間開発技術審査証明でその効果が認められている。

その後の課題として、適用限界(スケールアップ限界)を明らかにすること、除砂理論を定式化し設計手法を合理化、簡素化することがあげられた。

3 適用限界の検討

コンピュータシミュレーションにより適用上限を検討した。その際、あらかじめ模型実験との整合性について確認した。

3.1 シミュレーション

円形沈砂池槽内水流のコンピュータシミュレーションは汎用熱流体解析ソフトである Phoenix (ver.1.6) を用いて行った。

ここでは、円形沈砂池の形状を Fig. 7 に示したような円筒座標系を用いてモデル化した。この座標系は Y 軸、Z 軸、角度 X の 3 変数で構成される。原点は円形沈砂池の底面における中心にとり、原点から外側方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とした。実際の設備では、

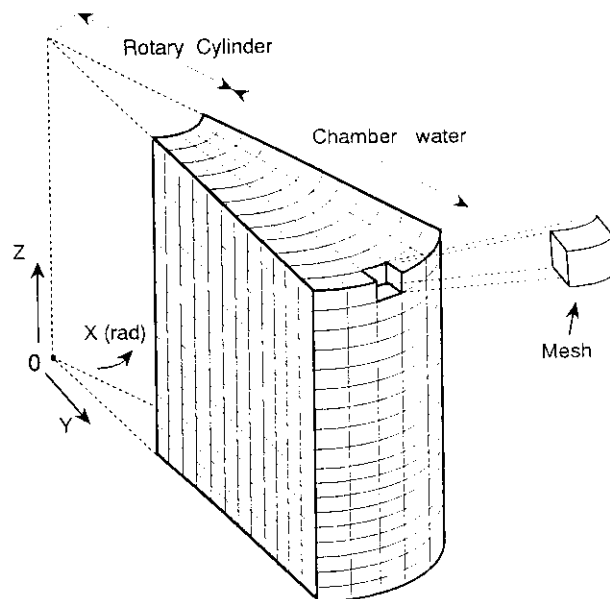


Fig. 7 Calculation model and mesh

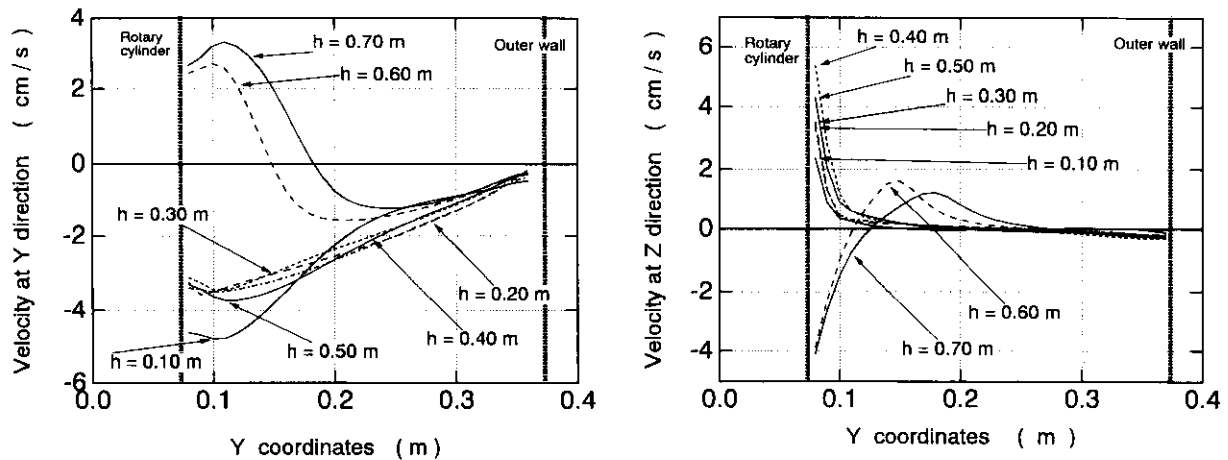


Fig. 8 Velocity distribution at the base

円筒下辺と池底面との距離は10~20 cm 離れており、底面の円筒近傍まで集められた砂が円筒真下に転がり込めるようになっているが、ここでは、簡略化のために円筒下辺は池底面に接しているものとした。また、今回のシミュレーションにおいては流入、流出はないものとしたため、計算モデルはZ軸に対して回転対象は中空円筒となるため、円筒のうち0.1 radの部分のみを抽出し、各外側YZ平面をエネルギー的に対象としたものを計算モデルとした。

このシミュレーションによって、各メッシュでの流速ベクトルが得られる。

Fig. 8に、水深を0.1~0.7 mと変化させた場合の、底面での円周方向流速(Y方向流速)と半径方向流速(Z方向流速)を示す。計算条件は後述の模型実験とあわせて、槽直径750 mm、円筒直径150 mm、円筒回転速度1.0 m/sとした。

3.2 模型実験

Fig. 9に示した模型を使用した。この模型は上部の円形沈砂池、下部の貯水槽に分けられ、その他に循環ポンプ、重量測定装置を具備している。

実験方法は以下のとおりである。円筒回転開始後に流れが定常状態に到達してから、模型の水面上から全底面に均一になるようにト

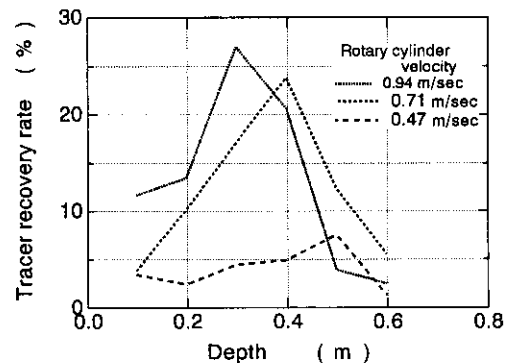


Fig. 10 Relation between the depth and tracer recovery rate at 200 sec

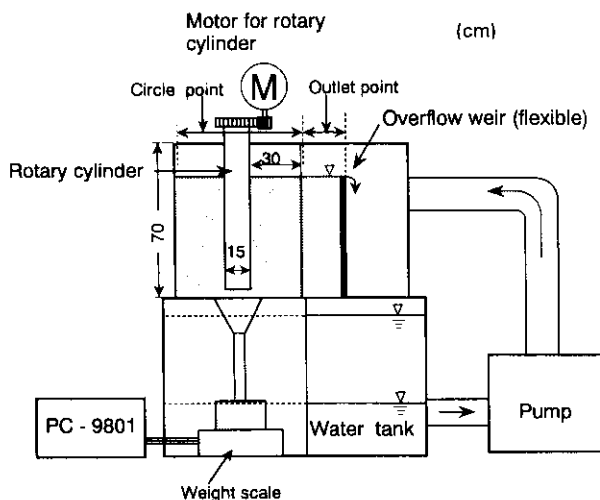


Fig. 9 Outline of a model for experiment

レーサー粒子(比重1.1、平均径4 mmのプラスチック粒子)を撒く。円筒真下に設置した重量計により収集したトレーサー粒子の水中重量を測定する。この実験ではシミュレーションの条件に合わせて流入水をゼロとした。ここでは、投入した全てのトレーサー粒子の水中重量と、円筒回転開始からある時間経過後に円形槽中央に集められたトレーサー粒子の水中重量の比をその時間までの集砂効率とした。なお、経過時間としては、長いほど理論的な集砂効率に近づくが、あまり長くすると粒子の水中重量自動計測装置の誤差が大きくなること、および実験の効率化を考慮して、粒子投入の200秒後までの粒子回収率を見ることとした。

Fig. 10に水深を0.1~0.6 mまで変化させた場合の、各種円筒回転速度におけるトレーサー粒子回収率を示す。これから、水深は小さすぎても大きすぎても回収率が悪化することがわかるとともに、円筒回転速度が大きくなると最適水深が小さくなる傾向が読み取れる。水深が大きい場合、円筒回転速度が大きい場合は、後述の逆転流が発生し、トレーサー粒子が円筒から離れた場所にドーナツ状に堆積することが確認された。

3.3 逆転流について

シミュレーションおよび模型実験結果から、水深が大きい場合、あるいは円筒回転速度が大きい場合には、底面の円筒近傍において、健全な集砂流れとは逆の流れが生じていることがわかる。これ

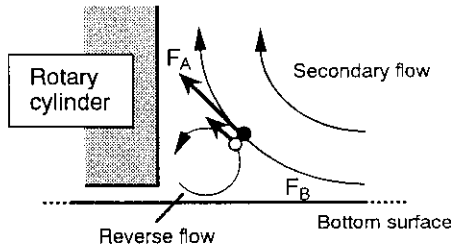


Fig. 11 Mechanism of reverse flow

をここでは便宜上「逆転流」と呼ぶことにする。これを模式的に示すと Fig. 11 のとおりとなる。水深が大きい場合や円筒回転速度の大きい場合に逆転流が生ずることがわかる。

逆転流の発生機構は以下のとおりと考えられる。円筒と底面との角部には、曲線に沿って流れようとする水の等方性のため、二次流が及ばないよみが生じる。その中でも二次流に近い部分が二次流の方向に引っ張られることによって、角部には二次流とは逆向きに回転する流れが生ずる。

逆転流が生ずると、砂が円筒の真下にまで集められずに、円筒からある距離だけ離れた位置にドーナツ状に堆積してしまうという障害を引き起こす。したがって、水深および円筒回転速度を、逆転流が生じない範囲で設計することが重要になる。現在までは、水深や円筒回転が大きいと発生しやすいという傾向のみが明らかになっているが、その詳細な発生条件を究明していくことが今後の大きな課題である。

3.4 シミュレーションと模型実験の整合

シミュレーションで集砂効率自体を計算することは不可能である。そのため、実験でトレーサー粒子が移動する最大半径を求め、この半径をシミュレーション結果と照らし合わせてトレーサーが移動する最小の速度（限界摩擦速度）の平均値を求めた。次に各水深でこの限界摩擦速度を超える合成流速が見れる面積を求め、これを理論的に回収可能な面積とした。これを全底面面積で除することでトレーサー回収率を推定することができる。なお、ここでの合成流速は円周方向（Y方向）流速と半径方向（Z方向）流速の合成流速である。これは、トレーサー粒子が中央まで集められるかどうか

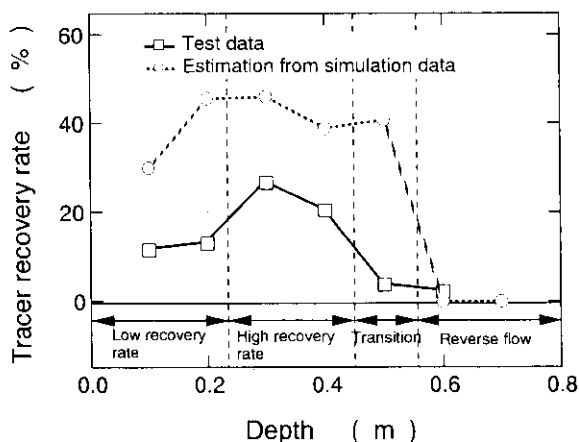


Fig. 12 Comparison of recovery rate between test data and simulation data

は、Z方向流速が中心向きであり、なおかつ合成流速が限界摩擦速度以上であればよいと考えられるからである。したがって、Z方向流速が逆向きである逆転流が生じる場合は回収率はゼロとする。

Fig. 12 にまとめた円筒回転数 1.0 m/s（実験では 0.94 m/s）の場合の水深とトレーサー粒子回収率の関係から、以下の理由で整合がとれていると判断される。

- (1) 逆転流という現象が、シミュレーションでも模型実験でも確認された。
- (2) 水深とトレーサー粒子回収率の関係が、シミュレーションと模型実験で類似している。

シミュレーションから推定されるトレーサー粒子回収率が、模型実験の回収率よりも大きくなったが、模型実験では前述のとおり 200 秒経過までの回収トレーサーの水中重量から求めた回収率である。模型実験での回収効率は時間とともに増大するため、より時間を長くとした場合では回収効率はシミュレーションからの推定値に近づくことが予想される。

以上から、シミュレーション結果は実験とはほぼ同じ傾向を示したため、シミュレーションにより適用限界を検討することとした。

3.5 適用限界の検討

円形沈砂池の適用限界の検討に際しては、安全側として流入水がゼロの場合の底面付近の合成流速が除去対象砂の限界摩擦速度よりも大きくなるという条件を満たす範囲を適用範囲とした。

Fig. 13 に半径 18 m、水深 3 m の円形槽で半径 3.6 m の円筒を 1.0 m/s で回転させた場合の底面での合成流速を示す。また、Table 1 に砂の粒径別の限界摩擦速度を示す。ここでの限界摩擦速度は、次に示す Shields の式の近似式 (2) 式で求めた³⁾。

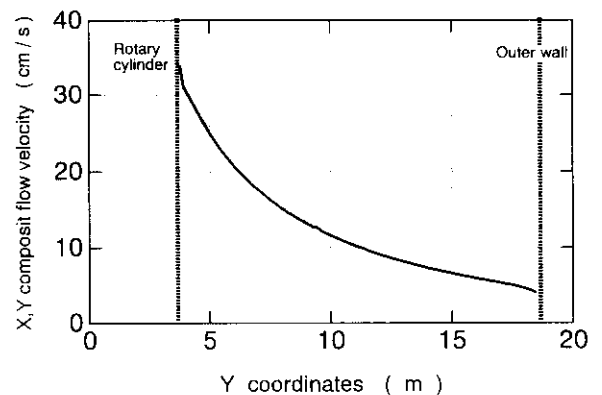


Fig. 13 X, Y composite flow velocity

Table 1 Relationship between sand diameter and critical fractive velocity

Sand diameter (mm)	Critical fractive velocity (cm/s)
0.4	1.77
1.0	2.80
3.0	4.85
5.0	6.26

$$\frac{u_c^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) \cdot g \cdot d} = 0.05 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u_c ：限界摩擦速度

σ/ρ ：砂の比重

d ：粒子の平均粒径

g ：重力加速度

ここで、実際のポンプ場で除去される砂の95%が粒径5mm以下であることを考えて除去対象砂の粒径を5mmとすると、その限界摩擦速度は6.26 cm/sであるので、半径15m以内ではそれ以上の合成流速が得られるので底面の集砂が可能であることがFig. 13よりわかる。余裕を2割見込むと、半径12m程度までの円形沈砂池で集砂が可能であるといえる。

実際には、土木構造物の経済的な設計や必要敷地などから、建設可能な円形沈砂池は直径15m程度であると想定される。したがって、実際に建設可能な円形沈砂池の範囲では、流入水のエネルギーに頼らなくても集砂が可能であることがわかった。

4 除砂理論の定式化

設計の標準化を進めるにあたって、円形沈砂池における除砂理論の定式化を行う必要がある。これまでは底面に沈降した砂の集砂理論のみ議論されてきており、除砂については明確な理論がないために、従来の矩形沈砂池の設計理論である理想沈殿池モデルを代用して設計を行ってきた。しかし、これは重力沈降のみを利用するという考えから処理水量に応じて必要底面積を算出するものである。したがって、円形沈砂池に適用した場合には旋回流による遠心力沈降を考慮できないという理由により、処理水量に対して大きめの底面積が算出され過大設計になるという問題点があった。今回、遠心力分離と重力沈降の組み合わせにより砂が分離されるというモデルを定式化したので紹介する(Fig. 14 参照)。

4.1 円形槽内の水および砂の動き

流入口から流入した水は、旋回流および2次流によるらせんを描きながら槽底面まで達する。その後旋回しながら次第に円筒に接近し、円筒の周辺を旋回しながら上昇したのちに流出口から流出する。

流入した砂粒子は旋回流による遠心力で外壁に向かって動いて固液分離される。壁面に到達した後は、水流とは切り離されて槽底面まで重力沈降する。遠心力で分離されなかった砂は重力沈降で槽底面へ沈降する。

4.2 基本方針

遠心力分離面積と重力沈降に寄与する水面積を別々に算出し、その合計が重力沈降のみによって分離する際に必要な水面積に等しくなることが条件である。ここで遠心力分離面積はそれに寄与する加速度が重力加速度ではないので、それを重力沈降水面積に換算する必要もある。

4.3 基礎関係式

本節の理論展開に用いた記号は以下のとおりである。

D ：円形槽直径

Q ：流入水量

v_0 ：水の流入速度

α ：円筒径/槽直径

H ：流入口の鉛直方向長さ

m ：砂粒子の質量

v' ：砂の最終沈降速度

円形槽中心から流入口の幅の中心までを半径とし、 H を高さとする円筒側面積を A_1' とする。

円形槽中心から流入口中心部までの半径方向距離 L は(3)式で表される。

$$L = \frac{D}{2} - \frac{Q}{2 \cdot v_0 \cdot H} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、砂粒子に働く遠心力 F_c は(4)式で表される。

$$F_c = m \cdot \frac{v_0^2}{L} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、遠心力の式の中での加速度項 g' は(5)式のとおりである。

$$g' = \frac{v_0^2}{L} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これから、遠心力分離面積 A_1' を重力沈降に換算した面積 A_1 は次のように求められる。

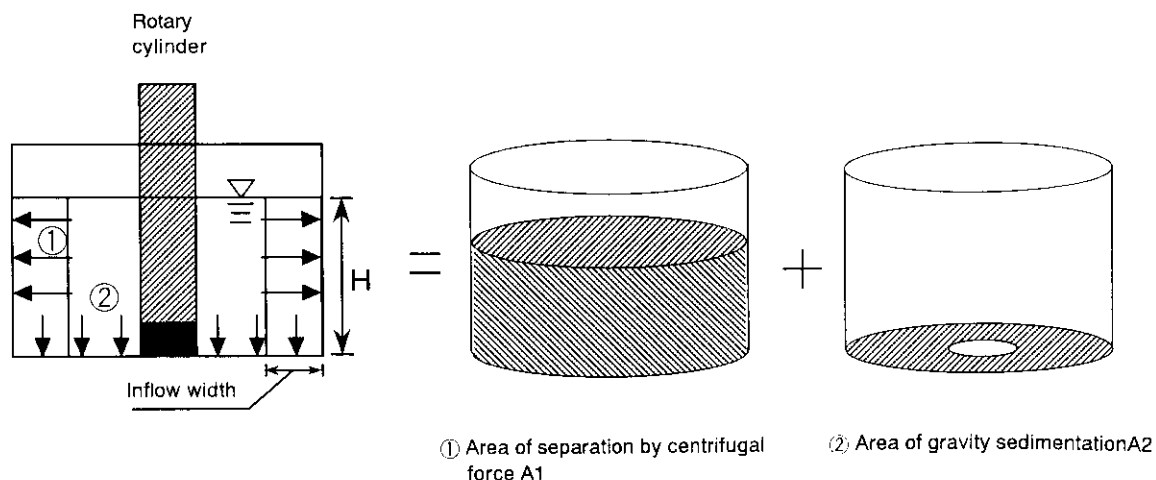


Fig. 14 Concept of effective water area

$$A_1' = 2 \pi L H \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$A_1 = A_1' \times (g'/g) \\ = \frac{2 \pi H v_0^2}{g} \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、重力沈降による面積 A_2 は、円形槽底面から円筒の底面を除いた面積とすると次式となる。

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4} \times (1 - \alpha^2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

さらに、全て重力沈降によってのみ砂を分離する場合に必要な面積は(9)式で求められる。

$$A_3 = \frac{Q}{v'} \quad \dots\dots\dots (9)$$

結局、 $A_1 + A_2 = A_3$ より基礎関係式として(10)式が得られる。

$$\frac{Q}{v'} = \frac{2 \pi H v_0^2}{g} + \frac{\pi D^2}{4} \times (1 - \alpha^2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、流入口の鉛直方向長さ (= 深さ) H が大きいほど底面積は小さくてすむことがわかる。また、流入流速が大きいほど、

すなわち、流入口の幅が狭いほど底面積は小さくてすむ。

ただし、流入流速が大きくなるほど構造物の必要強度が増加すること、損失水頭が大きくなることに注意を要する。例えば、3 m/s であれば約 0.5 m の水頭差が必要となるため、実際には 2~3 m/s 程度の流入流速を上限とするのが合理的である。

5 まとめ

回転円筒付き円形沈砂池については、日本下水道事業団民間開発技術審査証明において、優れた除砂機能、沈砂洗浄効果、維持管理性などが評価されているが、本報告で示したように、その後の開発により以下の成果をあげることができた。

- (1) コンピュータシミュレーションや模型実験により水理学的見地からの適用限界を検討し、上限を 12 m とした。
- (2) 除砂理論を定式化し、基礎関係式として

$$Q/V = 2 \pi H v_0^2 / g + (1 - \alpha^2) \pi D^2 / 4$$

を得た。これにより設計手法の合理化、簡素化を図った。

参 考 文 献

- 1) 福田一美, 加古登志夫, 松添 剛: 「下水道向回転円筒付き円形沈砂池」, 川崎製鉄技報, 25(1993)3, 221
- 2) 日本下水道事業団: 「民間開発技術審査証明報告書 回転円筒付き円形沈砂池」, (1993), 1-11
- 3) 土木学会: 水理公式集 (1985), 221