研究報告

複数配置されたP C卵形消化槽に作用する風圧 —外装材設計を目的として—

Wind Pressure on Prestressed Concrete Egg-shaped Digestion Tank in Various Arrangement

新原雄二*¹ 林田宏二*¹ 榎本恵太*²

Yuji NIIHARA, Koji HAYASHIDA, Keita MASUMOTO

SUMMARY

This report describes wind pressures acting on prestressed concrete egg-shaped digestion tanks in various arrangement. Egg-shaped digestion tanks are the sludge digestion facilities in sewage treatment plants and have been widely constructed in Japan since 1980's. After the passing of the typhoon T9719, the cladding of the tank in Miyazaki City was damaged. Therefore, the wind tunnel tests were conducted to clarify the reasons of the damage and to evaluate the design load of the cladding for the future construction. The results of the wind tunnel tests are reported in this paper.

1. はじめに

P C卵形消化槽（以下、卵形タンクという）は、下水処理施設において、汚物を分解する過程で生じる活性汚泥を分解する施設で、効率的な分解を促すために攪拌しやすい卵形をしたP C構造物である。卵形タンクは、初めドイツで開発され、1980年代に日本に導入された。1998年現在、国内には35下水処理場、82基の卵形タンクが建設されており、今後とも普及するものと考えられている。

卵形タンクはマッシブなP C構造物であるため、設計的には地震荷重が大きく、風荷重が構造躯体そのものの設計に及ぼす影響は小さい。卵形タンクのコンクリート躯体の表面には断熱材としてウレタンフォームが吹き付けられているが、その表面には耐

候性、耐久性の観点から、外装材が設置されていることが多い。

卵形タンクの外装材の設計には、建築学会の建築物荷重指針¹⁾や容器構造設計指針²⁾などを参照することになるが、これらには円筒構造物やドームに関する記述はあるものの、このような卵形の構造物に直接使えるような荷重、風圧係数は与えられていない。そのため、これまでの卵形タンクの外装材設計では、卵形タンクに直接適用できる設計荷重（風圧係数）がないまま建設されてきた。

1997年台風19号の通過後に、宮崎市にある下水処理場において、卵形タンクの外装材の損傷が見つかった。そこで、今後の同種工事の設計用資料として、卵形タンク外装材に作用する風荷重を評価する

*1 鹿島建設(株)技術研究所 研究員
Kajima Technical Research Institute

*2 鹿島建設(株)土木設計本部 設計主査
Kajima Corporation, Civil Engineering Design Division
(原稿受理：平成11年5月15日)

必要があると考えられた。

以上のような背景から、卵形タンクの外装材設計用風荷重を得ることを目的とした風洞実験を実施した。土木構造物で外装材設計のための風圧が問題となる例は希であること、また、いくつか耐風工学的にも興味深い内容を含んでいると思われることから、本報告は、卵形タンクの外装材設計荷重評価のために実施した風圧測定実験結果について述べるものである。初めに卵形タンクの特徴を耐風工学に関連づけて述べた後、一連の風洞実験結果について報告する。風洞実験は大きく3つに分けられる。

実験1：単体のタンクを対象に、表面粗度の影響について検討するもの

実験2：宮崎市にある処理場を対象として、台風による損傷原因について考察するもの

実験3：一般的な卵形タンクを対象に、スラッジポケットの影響、複数配置された場合の相互作用などについて調査するもの

なお、風圧測定実験は外圧の測定を目的としたものである。また、実験結果は紙面の都合上、代表的なもののみを示す。

2. PC卵形消化槽の特徴

宮崎市にある処理場の卵形タンクの構造図をFig.1に示す。ちょうど卵を立てて、下側1/3程度を地面に埋めたような形状をしている。頂部には円形の部材、また側面上部には花瓶の取っ手のようなブラフな突起（スラッジポケット）が付いている。躯体一般部には外装材がつけられているが、頂部の円形部材やスラッジポケット部には外装材はない。各下水処理場において、卵形タンクの大きさは若干異なるものの、その形状はほぼ規格化されており、概ね、地上高さ、赤道直径とも20m程度のものが多く、また、形状としては相似形である。このことは、ある代表的なタンクにおいて風圧特性を評価すれば、その結果を他のタンクの設計にも使用することが可能であることを意味している。

また、卵形タンクは1基のみで建設されることは少なく、要求される下水処理容量に応じて、通常、複数基（2～3基程度）が併設されることが多い。

Fig.1 PC卵形消化槽の断面図（宮崎市にある処理場）
Cross section of a prestressed concrete egg-shape digestion tank

Photo.1 PC卵形消化槽の例（横浜市下水処理場）
PC egg-shape digestion tank (Yokohama)

Photo.1 は横浜市にある我が国最大規模の卵形タンク施設（6基×2）の写真であるが、これを見てもわかるように、複数の卵形タンクが近接して並んでいる。したがって、外装材の設計風荷重を評価する上で、近接する卵形タンクの影響を考慮する必要があるといえる。複数基建設されることが多いサイロについては、これまでに複数基の相互作用について検討された例があり³⁾⁴⁾、サイロのギャップ付近で風圧が低下することが示されている。

さらに、下水処理施設であることから、通常、卵形タンクは河川下流域に建設されることが多く、山間部や市街地に建設されることは希である。したがって、卵形タンクの風洞実験では、地表粗度の小さい気流を対象に行えばよいと考えられる。さらには、卵形タンクは曲面を有するため、その風圧分布はレイノルズ数の影響を受け、外装材自体が表面粗度を付加する効果を有している。

3. 実験概要

3.1 使用風洞および実験模型

実験に用いた風洞は、鹿島建設(株)技術研究所所有のゲッチング型回流式汎用境界層風洞である。風洞の測定部断面は、高さ 2.0m×幅 2.5m×測定部長 19m である。

実験に用いた模型を Fig.2 に示す。模型は、宮崎市にある下水処理場卵形タンクを 1/100 で模擬したもので、高さ 223mm、赤道直径 198mm である。スラッジポケットの部分は取り外し可能となっている。圧力孔は内径 1mm のステンレス管を用いたもので、円周方向に 10° ピッチで 36 列、高さ方向に 12 点の計 432 点である。圧力測定レベルは一番下の段から順に、1, 2, 3...と番号を付けている。

Fig.2 実験に使用した卵形タンク模型
Testing model of egg-shaped tank

Photo.2 ラフネスブロック、スパイヤー
Roughness block and spire

3.2 実験気流

本実験に用いた気流は、建築物荷重指針に規定される地表面粗度区分Ⅱを参考にして、スパイヤーとラフネスブロック、およびソウ（鋸型のバリア）を用いて作成した (Photo.2)。作成した気流の風速、乱れ強さ、乱れのスケールの分布を Fig.3 に示す。鉛直風速分布は、べき指数分布

$$U_z = U_{z_0} (Z/Z_{z_0})^\alpha$$

ここで U_z : 高さ Z での風速

U_{z_0} : 基準高さ Z_0 での風速

において、 $\alpha=0.15$ (図中実線①) にほぼ一致しており、実験風速は風洞床面から高さ 100mm の位置 (実機では 10m に相当) において 10m/s とした。

建築物荷重指針では乱れ強さの鉛直分布として

$$I_z = I_G (Z/Z_G)^{-\alpha-0.05}$$

ここで、 I_z : 高さ Z での乱れ強さ

I_G : 上空風高度 Z_G での乱れ強さ=0.1

を与えており、地表粗度区分Ⅱでは $Z_G=350m$ とされているが、本実験気流は風洞内高さ 450mm (実機では 45m に相当) での乱れ強さ 0.1 から建築物荷重指針での指数 ($-\alpha-0.05=-0.2$) に従って減少しており、勾配はほぼ一致しているものの、乱れ強さそのものは建築物荷重指針に比べれば小さめとなっている。なお、図中の実線②は乱れ強さの勾配を示し

Fig.3 実験に用いた気流
Wind Profile

たものである。

乱れのスケールは、建築物荷重指針では、

$$L_x = 100 (Z/30)^{0.5}$$

と与えられているが、本実験気流の乱れスケールは模型高さである 200mm 以下では上式に近いものの (図中に、1/100 スケールで実線③で表示)、上空では指針よりも小さくなっている。

3.3 測定方法

風圧測定は、当技術研究所で開発した多点風圧測定システムで行った。本システムは制御・データ処理部、データ収録部、多点風圧計から構成されている。模型の圧力孔から風圧計までは内径 1mm φ、長さ 800mm のビニールチューブで結ばれている。

模型縮尺 1/100、対象風速 50m/s、外装材の応答の評価時間を 1 秒とすると、実験における評価時間は 0.05 秒となる。そこで、データのサンプリング周波数を 200Hz として 30000 個のデータを収録し、10 個の移動平均をかけた。また、風圧係数、ピークファクターの評価時間を、実時間で 600 秒とすると、模型時間は 30 秒であり、上記のデータ数は実験を 5 回繰り返したことになる。測定したデータは、ビニールチューブによる変動成分のひずみをデジタルフィルターで補正している。

3.4 風圧係数

風圧係数 C_p は、外面に作用する風圧力 P を基準速度圧 q に対する比として次式で表す。

$$C_p = \frac{P_n - P_s}{q} = \frac{P}{q}$$

P_n ; 測定点 n に加わる全圧

P_s ; 風洞内静圧

q ; 基準高さでの速度圧

速度圧 q に用いる風速は、風洞床面から高さ 100mm における風速 (=10m/s) である。以降、風圧係数の平均値を平均風圧係数、標準偏差を変動風圧係数、最大値を最大ピーク風圧係数、最小値を最小ピーク風圧係数とする。

4. 表面粗度が風圧分布に与える影響 (実験 1)

4.1 表面粗度の与え方

実験時のレイノルズ数を模型赤道直径 D を代表長さとして求めると、 1.37×10^5 であるのに対して、実タンクでは風速 20m/s～50m/s を対象とすると、 $2.74 \times 10^7 \sim 6.85 \times 10^7$ となる。円柱であれば、実験が亜臨界領域、実タンクは極超臨界領域ということ

Table1 表面粗度の与え方 (実験 1)
Test case for the surface roughness of the singular tank (Exp-1)

ケース名	表面形状
1-1	滑面
1-2	0.6φのワイヤーを 5° ピッチ
1-3	0.6φのワイヤーを 10° ピッチ
1-4	k/d=0.0075, 10° ピッチ
1-5	k/d=0.01, 10° ピッチ

になる。また、実タンクの外装材には縦方向に突起があり、表面粗度を付加したような効果をもたらしていると考えられる。実験レイノルズ数を実物に合わせることはできないため、一連の風洞実験を行うにあたって、まずはスラッジポケットのない単体タンクを対象として、模型表面の粗度が風圧分布に及ぼす影響について検討することとした。

表面粗度の与え方としては、サンドペーパーや粒状のものを貼り付ける方法などがあるが、本実験では縦方向にワイヤーを一定間隔で貼り付ける方法を採用した。ワイヤーは数種類の径のものを用意し、Table1 に示すケースの実験を行った。ケース 1-1 は滑面、ケース 1-2、ケース 1-3 は 0.6mm φ のワイヤーをそれぞれ 5°、10° ピッチで貼り付けたものである。宮崎市にある処理場の卵形タンクの外装材には、高さ 30mm×幅 90mm の突起が約 5° ピッチで縦方向に入っており、0.6mm φ のワイヤーはこれを 1/100 で模擬したものに近いものである。表面粗度のパラメータを、タンクの断面直径 d とワイヤーの直径 k の比 k/d で表すと、タンクの断面直径 d が高さ方向に変化することから、ケース 1-2、1-3 では k/d の値が高さ方向に変化し、赤道付近に比べてタンク上部ではワイヤーが相対的に密に配置されることになる。そこで、タンクを高さ方向に 3 つの領域に分割し、それぞれ k/d がほぼ一定となるように、ワイヤーの径を変えながら貼り付けたのがケース 1-4、1-5 である。既製のワイヤーを使用したため、 k/d を完全に一定値に合わせることはできなかったが、ケース 1-4 では $k/d=0.0075$ 、ケース 1-5 では $k/d=0.01$ となっている。ケース 1-4、1-5 ではいずれもワイヤーの間隔は 10° ピッチで貼り付けている。

4.2 実験結果

各ケースにおける圧力孔 4（赤道面）および圧力孔 8 における平均風圧係数，変動風圧係数を円周方向にプロットしたものを Fig.4 に示す。圧力孔 4 の平均風圧係数（Fig.4(a)）は，滑面の場合， 40° で負圧に転じ， 80° で最小値-1.2 となった後， 120° 以降はほぼ一定値となっている。これに対して，粗度をつけた場合には，いずれのケースも 80° 付近で最小値-0.7 から-0.8 となり，ワイヤーの付け方による各ケースの違いは少ない。一方，圧力孔 8 についても（Fig.4(c)），滑面の場合， 80° から 90° 付近

で最小値-1.4 をとるが，粗度をつけた場合には， 70° から 80° 付近で最小値-0.8 から-0.9 となっている。また，滑面の圧力孔 8 の変動風圧係数は（Fig.4(d)）， 80° から 90° で最大値をとった後， 150° 付近で再び大きくなっており，流れが剥離一再付着一再剥離しているものと考えられる。一方，粗度を付けた場合には，変動風圧係数の明確なピークは見られない。以上の結果から，粗度をつけることにより，平均風圧係数は大きく，変動風圧係数は小さくなる効果が確認できたが，今回実験に用いた表面粗度の与え方による顕著な違いは見られなかつ

(a) 圧力孔 4（赤道面）の平均風圧係数

(b) 圧力孔 4（赤道面）の変動風圧係数

(c) 圧力孔 8 の平均風圧係数

(d) 圧力孔 8 の変動風圧係数

Fig.4 表面粗度の違いによる単体タンクの風圧係数の円周方向の変化
Pressure coefficient on circumference of a singular tank with surface roughness

(a) ケース 1-1

(b) ケース 1-2

Fig.5 単体タンクの平均風圧係数分布（ケース 1-1 と 1-2，▽は風上を表している）
Mean pressure coefficient distributions of a singular tank

た。これは、実験に用いた粗度がいずれもかなり粗かったためと考えられる。

ケース 1-1 (滑面) およびケース 1-2 の平均風圧係数分布を Fig.5 に示す。ここで、Fig.5 は模型表面を風上面で切って展開して表したもので、世界地図というメルカトル図法のような表現となっている。したがって、模型上部 (図の上方) では実際の面積以上に拡大されていることに留意していただきたい。また、次章以降で出てくる圧力分布図も全てこのような表現になっている。風圧係数の大きい領域を見やすくするため、平均風圧係数については-0.8 以下の部分に色を付けている。

ケース 1-1 では、広い範囲で平均風圧係数が-0.8 以下となっており、特に風上から 80° 付近の赤道面より上で-1.2 以下となる領域が広がっており、風速増加に起因しているものと考えられる。一方、ケース 1-2 では最小値が-1.0~-0.8 程度の値となっている。ここでは図を示していないが、ケース 1-3~1-5 でもほぼ同様の圧力分布となっていた。これらの結果から、単体タンクの場合、風上から 80° 付近の赤道面より上の部分において、風速の増加により風圧が大きくなることがわかった。

外装材の設計にあたっては、安全側の評価をするという意味から、最も風圧の大きい滑面 (ケース 1-1) で実験を行うことも考えられるが、実タンクの外装材には突起が付いていることから、粗度を付けた実験ケースの方がより実タンクに近いと考えられること、さらには過度に安全側の評価をすることは合理的な設計とはならないことなどの理由から、本実験では粗度を付けたケースを採用することとした。粗度を付けたケース 1-2~1-5 では、いずれも粗度が粗かったことからそれらの違いによる風圧分布の差は少なかったため、実際の卵形タンクの外装材の突起に形状に近いケース 1-2 を、これ以降の全ての実験に採用することとした。

5. 下水処理場卵形タンクの台風による外装材被害と風圧実験 (実験 2)

5.1 対象となる処理場の概要

本実験の対象となる処理場の建設地点を Fig.6 に

示す。当処理場は、東が日向灘、西は保安林と湖沼、南西には宮崎空港、北は大淀川河口に囲まれており、周辺に障害となる地形、住宅地等はない。

卵形タンクの配置を Fig.7 に示す。卵形タンクは Fig.1 に示したように、赤道直径 19.8m、高さ 22.5m で、最終的には3基の卵形タンクが三角形に配置される予定である。これとは別に、ガスタンク (鋼製の円筒形のタンク、直径 15.5m、高さ 17m) が2基併設されている。また、卵形タンク 1 の西には管理塔 (5.6m×6.4m、高さ 24m) がある。通常、このような円筒形のガスタンクと管理塔は、配置は様々であるが、どの下水処理場でも卵形タンクの近傍に配置されることが多い。まず、1991 年に北側の卵形タンク 1 とその隣のガスタンク 1、管理塔が建設された。この状態で、1997 年に台風 19 号を経験

Fig.6 下水処理場建設地
Location of the sewage plant

Fig.7 下水処理場の卵形タンクの配置 (単位:m)
Tank arrangement in the sewage plant

した。その後、1999年に南側の卵形タンク2とガスタンク2が完成し、将来的には3基目の中央の卵形タンク3も建設される予定である。

卵形タンクの外装材の構造は、縦に長い1枚物の薄いステンレス板 ($t=0.4\text{mm}$) をビスとハゼ折りで止めたものである。1枚のステンレス板の幅は中心角にして約 5° で、タンク表面に70分割のステンレス板が貼り付けてある。

5.2 1997年台風19号による損傷

台風9719号通過時における宮崎気象台の観測記録をFig.8に示す。9719号は、1997年9月16日に鹿児島県枕崎市付近に上陸し、九州を縦断する形で北上した。宮崎市は台風進路の東側に位置しているため、気象台の観測データは初め東風だったのが、台風の接近とともに南風になり、台風通過後は西風へと変化している。宮崎気象台は当処理場の北西約5kmの市街地にあるため、日向灘に直接面したこの下水処理場では宮崎気象台以上の風が吹いたと推測される。

台風9719号による卵形タンク1の外装材の被害状況をFig.9に示す。スラッジポケットの西側で、ステンレス板のつなぎ目が部分的に剥がれ、すき間が生じた。また、卵形タンク1の北東側の広い範囲で、ステンレス板が凹凸状に波をうったような変形をしたり、はがれたりしているものも見られた。そこで、台風9719号通過時を対象に風洞実験を行い、これらの損傷原因について検討を加えた。

5.3 風洞実験結果

台風9719号通過時の配置状況、すなわち、北側の卵形タンク1とその隣のガスタンク1、管理塔という状態で風圧測定実験を行った。ガスタンクと管理棟は、それぞれFig.7に示した寸法の円筒形柱、矩形柱である。実験気流は、先に述べたように建築物荷重指針の地表粗度区分Ⅱを用いている。本処理場の場合、東からの風に対しては海から直接吹き付けるため、粗度区分Ⅰの方が妥当と考えられるが、本実験では全ての風向に対して粗度区分Ⅱを用いた。実験は16方位で行ったが、台風時の風向変化にし

Fig.8 宮崎気象台におけるT9717号の観測記録
Time variation of wind velocity and direction in Miyazaki

タンク西側の化粧板のハズレ

Fig.9 台風9719号による外装材の被害状況
Damage to cladding due to T9719

たがって、E方向→S方向→W方向までの最小ピーク風圧係数の分布図をFig.10に示す。図上の▽印は風向(すなわち風上面)を表し、コンター図中

①E 風向

②ESE 風向

③SE 風向

④SSE 風向

⑤S 風向

⑥SSW 風向

⑦SW 風向

⑧WSW 風向

⑨W 風向

Fig. 10 下水処理場卵形タンクの台風 9719 号通過時の最小ピーク風圧係数分布
Minimum peak pressure coefficient distribution during T9719

の台形の部分はスラッジポケットの位置を示している。また、最小ピーク風圧係数が-1.4以下の部分は色をつけている。圧力分布は北を0°として表しており、90°付近がガスタンク1とのギャップ、260°付近が管理塔とのギャップ、190°付近にスラッジポケットが付いている。

E方向の場合、卵形タンクはガスタンクの風下に隠れるため、顕著な風圧の低下域はなく、スラッジポケットの下で-1.4程度となるのみである。ESEになるとスラッジポケット付近で風圧が低下し、最小-2.2に達している。SE方向になると、スラッジポケット背面だけでなく、反対側の70°から80°付近でも-2.0に達しており、これは卵形タンクとガスタンクのギャップで風速が増加したためと考えられる。SSE方向になるとスラッジポケット背面の風圧領域の面積が大きくなり、270°付近で最小-2.0に達している。これはスラッジポケットの影響ならびに、隣接する管理塔とのギャップの影響と考えられる。S方向、SSW方向では、全体的には若干圧力が回復し、スラッジポケット近傍よりもむしろ管理塔付近で低下し、その値は-1.6～-1.8である。SW方向になると再び風圧が低下し、スラッジポケットの東側背面および管理塔付近で-2.0に達する。WSW方向、W方向になると、顕著な風圧低下域はなくなる。ここでは図を示していないが、北よりのWNW方向からENE方向の間では、N、NNE、NE方向において90°付近、すなわちガスタンク1との間で風圧が-1.8程度になる以外は、特に顕著な風圧低下域は見られなかった。

以上の結果から、風圧が低下するのは、ESE～SSEにおけるスラッジポケットの下流側、SE～SSEにおけるガスタンク1とのギャップ付近、SSE～WSWにおける管理塔とのギャップ付近などであり、タンク表面の風速増加によって風圧が低下する位置と隣接構造物のギャップの位置が一致する風向において、風圧が顕著に低下することがわかった。1997年台風19号では、スラッジポケット西側の管理塔とのギャップ付近でステンレス板の剥がれが発生したが、これは、ESE～WSWの風向のときにスラッジポケット背面および管理塔とのギャップ付近の風

圧が低下したためと考えられる。一方、タンク北側のステンレス板がはらみ出したり、波を打ったような変形をした原因は、ガスタンク1とのギャップからの風の吹き出しによる風圧変動や、台風通過時にはタンク北側が常に風下に位置することにより-0.8～-1.2の風圧が作用し続けていたことなどが原因と推測される。

この実験以外にも、南側の卵形タンク完成時（卵形タンク2基）、あるいは最終完成時（卵形タンク3基）の実験も行ったが、風圧の最小値は、やはりスラッジポケット近傍や隣接構造物との間で発生し、その値は-1.8から-2.0であった。

6. 複数配置された卵形タンクに作用する風圧（実験3）

宮崎市の下水処理場を対象とした実験からも明らかなように、複数配置された卵形タンクに作用する風圧は、スラッジポケットの近傍および隣接構造物とのギャップでも低下する。したがって外装材の設計にあたってはこれらの影響を考慮する必要があると考えられる。ここでは、一般的な卵形タンクの外装材を対象とした設計風荷重を調べる目的で、様々な配置状態で実施した風洞実験の結果について述べる。実験ケースをTable2に示す。各ケースで風向を22.5°ピッチで変化させた。実験では、スラッジポケットの位置とタンク間の距離がパラメータ

Table2 実験ケース（実験3）

Test case(Exp-3)		
ケース名	タンク数	配置
3-1	1基	スラッジポケットあり
3-2	2基	L/D=1.1
3-3		L/D=1.25
3-4		L/D=1.5
3-5		L/D=1.75
3-6		L/D=2.0
3-7		L/D=2.5
3-8	3基	直列配置 L/D=1.25
3-9		直列配置 L/D=1.5
3-10		直列配置 L/D=1.75
3-11		正三角形配置 L/D=1.25
3-12		正三角形配置 L/D=1.5
3-13		正三角形配置 L/D=1.75

（タンク2基、3基の実験はスラッジポケットなし）

になるが、スラッジポケットの影響については単体タンクの実験（ケース 3-1）で調べ、複数タンクの相互作用についてはスラッジポケットなしの状態で行った（ケース 3-2～3-12）を行った。これは、各処理場ごとにタンクの相対位置とスラッジポケットの向きに一般性がなく、これら2つのパラメータを同時に変えると、実験ケースが膨大になるためである。卵形タンクの位置関係は、タンク中心間隔を L として、タンク赤道直径 D との比 L/D で表している。なお、実験は全て4章で述べたケース 1-2 の表面粗度を付けたもので行っている。紙面の都合上、全ての実験結果を示すことはできないため、平均風圧係数分布については、代表的なタンク配置についてのみ示す。

6.1 スラッジポケットの影響

スラッジポケットを有する単体タンクの風向 22.5° 、 45° 、 90° における平均風圧係数の分布図を Fig.11 に示す（ケース 3-1）。ここで、風向はスラッジポケットが風上を向いている時を 0° としている。

スラッジポケットがない場合、円周方向 80° 付近

Fig.11 スラッジポケットを有する単体タンクの平均風圧係数分布（ケース 3-1）

Mean pressure coefficient distributions on a singular tank with sludge-pocket (case 3-1)

の赤道面より上で風圧が最も低下し、その値は $-0.8 \sim -1.0$ 程度であった（Fig.4, Fig.5）。スラッジポケットがある場合、風向 22.5° ではスラッジポケットの下流側で風圧が低下し、最小値は -1.2 に達するところがある。風向 45° ではスラッジポケット背面の負圧は 22.5° に比べて若干回復しているが、風向 90° の場合になると、再び負圧の範囲が広がり、最小値はスラッジポケットの下で -1.0 、スラッジポケットの反対側で -1.1 に達する。このように、スラッジポケットの下流側で風圧係数が低下するのは、スラッジポケットでの流れの剥離が原因であると考えられる。風圧が低下するのは、風向が $22.5^\circ \sim 135^\circ$ の範囲であり、風向 0° （スラッジポケットが風上）や 180° （スラッジポケットが風下）の場合には、スラッジポケット付近の風圧の低下は見られなかった。

6.2 2基配置における近接卵形タンクの影響

卵形タンク 2 基の配置状態については、 $L/D = 1.1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5$ の 6 ケースについて実験した。風向 $67.5^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ における圧力孔 4（赤道面）の平均風圧係数及び変動風圧係数

を円周方向にプロットしたものを Fig.12 に示す。図の上に風上と書いてある位置が風の吹いてくる方向を、ギャップと書いてあるのが隣接する卵形タンクとのギャップの位置を表している。

平均風圧係数は、風がタンクに対して斜めから吹く 67.5° , 135° の場合 (Fig.12(a), (e)), 特にタンク間距離が短い $L/D=1.1$, 1.25 において、ギャップ付近で風圧が低下することを示している。 $L/D=1.5$ 以上離れると平均風圧分布はほぼ同程度になり、タンク間の相互作用の影響が薄れることがわかる。風が直角方向から吹く場合 (風向 90° ,

Fig.12(c)) には、タンク間距離によらずギャップ付近での平均風圧係数はほぼ同程度となっている。

次に変動風圧係数であるが、風向 67.5° , 135° では (Fig.12(b), (f)), タンク間距離が短い $L/D=1.1$, 1.25 において、ギャップの前方で変動圧力が一旦小さくなった後、ギャップ位置で逆に変動圧力が大きくなっていることがわかる。

次に、平均風圧分布の一例として、 $L/D=1.1$ (ケース 3-2), $L/D=1.5$ (ケース 3-4) の風向 67.5° , 90° , 135° における平均風圧係数分布を Fig.13~ Fig.14 に示す。いずれも 180° の位置がタンク間の

(a) 平均風圧係数 (風向 67.5°)

(b) 変動風圧係数 (風向 67.5°)

(c) 平均風圧係数 (風向 90°)

(d) 変動風圧係数 (風向 90°)

(e) 平均風圧係数 (風向 135°)

(f) 変動風圧係数 (風向 135°)

Fig.12 卵形タンク 2 基配置における平均風圧係数と変動風圧係数の円周方向の変化
Pressure coefficient on circumference of a tank in tandem arrangement

Fig.13 平均風圧係数分布 (2基配置 $L/D=1.1$, ケース 3-2)

Mean pressure coefficient distributions in tandem arrangement ($L/D=1.1$, case 3-2)

Fig.14 平均風圧係数分布 (2基配置 $L/D=1.5$, ケース 3-4)

Mean pressure coefficient distributions in tandem arrangement ($L/D=1.5$, case 3-4)

Fig.15 平均風圧係数分布 (3基直列配置 $L/D=1.5$, ケース 3-9)

Mean pressure coefficient distributions in 3-tank-in-line arrangement($L/D=1.5$)

Fig.16 平均風圧係数分布 (3基正三角形配置 $L/D=1.5$, ケース 3-12)

Mean pressure coefficient distributions in equilateral arrangement($L/D=1.5$)

ギャップにあたる。 $L/D=1.1$ (Fig.13) では、風向 67.5° において、ギャップ付近で平均風圧係数が -1.2 程度にまで低下しており、ギャップ間を流れる風速が増加していることがわかる。風向 90° になると、ギャップ付近の負圧は 67.5° の場合に比べて小さくなるが、対象タンクが風下側に位置する 135° になると、風圧が再び低下し、平均風圧係数が -1.2 以下になる領域が広がっている。 $L/D=1.5$ (Fig.14) の場合、風向 67.5° では、 150° 付近で風圧が低下している。これは風上から 80° の位置であることから、ギャップ付近というよりはむしろ単体タンクで平均風圧が低下する領域に近く、 $L/D=1.1D$ の場合に比べて、タンク間の相互作用の影響が少なくなってきたことを表している。

紙面の都合上、全てのケースの圧力分布図を示すことはできないが、 $L/D=1.5$ よりタンク距離が大きくなると、タンク相互の影響が薄れ、平均風圧係数が小さくなる位置及びその値は単体タンクのものに近くなった。

5.3 3基配置における近接卵形タンクの影響

タンク間隔 $1.5D$ 直列配置 (ケース 3-9)、風向 45° , 67.5° , 90° における平均風圧係数の分布図を Fig.15 に示す。この場合、配置が対称形であるため、風向 45° , 67.5° は、見方を変えれば 135° , 112.5° と同じである。ギャップ付近の平均風圧係数は -1.0 程度となっており、これは、Fig.14 の2基配置 ($L/D=1.5$) の対応する風向の場合とほぼ同じである。次に、タンク間隔 $1.5D$ 正三角形配置 (ケース 3-12) における風向 45° , 67.5° , 90° の場合の平均風圧係数の分布図を Fig.16 に示す。ここでは、対象タンクが他の2基のタンクよりも前にくる場合を 0° としている。この場合も、平均風圧係数の最小値はギャップ付近で $-1.0 \sim -1.1$ 程度となっている。

3基直列配置、正三角形配置のいずれにおいても、圧力分布の形状そのものは2基配置の場合と異なるところもあるが、平均風圧係数の最小値の値はほぼ同程度ある。したがって、卵形タンクが3基以上配置される場合の外装材設計では、基本的には近接

する2基のタンクの間隔に応じて、2基配置の風荷重を参考にしてよいと考えられる。

7. おわりに

本研究では、PC卵形消化槽の外装材の風荷重評価を目的とした風洞実験の結果、卵形タンクに作用する風圧は、タンク表面の風速増加による圧力低下のみならず、スラッジポケットの近傍、および隣接タンクとのギャップ付近で低下することが明らかとなった。これは、台風 9719 号による下水処理場卵形タンクの損傷位置とほぼ対応していた。

今後も、PC卵形消化槽は数多く建設されると予想され、その外装材の設計にあたっては、今回の実験結果を反映させることができると考えられる。しかしながら、今回の実験はスラッジポケットや卵形タンク同士の影響について検討したものであり、実際の下水処理場では、管理塔やガスタンク、あるいは建屋などが近接し、これらの形状や配置はケースバイケースであることから、これらの影響についてはその都度、設計者の判断が必要になるであろう。

本研究を行うにあたり、貴重な情報を提供して下さった宮崎市下水道部の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会;建築物荷重指針・同解説, 1993 年.
- 2) 日本建築学会;容器構造設計指針・同解説, 1990 年.
- 3) P. A. MacDonald, J. D. Holmes, K. C. S. Kwok; Wind Load on Circular Storage Bins, Silos and Tanks, II, Effect of Grouping, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., No. 34, 1990, pp. 77~95.
- 4) P. A. MacDonald, J. D. Holmes, K. C. S. Kwok; Wind Load on Circular Storage Bins, Silos and Tanks, III, Fluctuating and Peak Pressure Distributions, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., No. 34, 1990, pp. 319~337.