

論文内容の要旨

論文題目 楕円柱状構造物に作用する変動風圧力に関する研究

氏名 野口 満美

近年、構造物の大型化に伴い、我が国でも超高層建物が数多く建設されている。このような柱状構造物では、上空の速い風の流れの影響を強く受けるため、地震荷重よりも風荷重が設計上支配的な外力となることが多い。特に、円形断面を有する柱状構造物は鋭い角部をもたないため、流れの剥離点の位置が固定されにくく、建物まわりの風の流れのパターンが大きく変化することが数多く報告されている。

しかし、煙突のようにアスペクト比の大きな円形断面を有する柱状構造物に関する研究は多いが、超高層建物を対象とした円形断面を有する柱状構造物に関する研究は少なく、特に、楕円形断面を有する柱状構造物（以下、楕円柱状構造物）に関しては、明らかにされていない点も多い。また、我が国の基規準や指針にも、楕円柱状構造物を対象とした風圧係数の規定はない。

そのため、一般に、楕円柱状構造物を設計する際には、その都度、建物ごとに風洞実験を行って、その結果から設計用風荷重を算定しているのが現状である。しかし、個別に風洞実験を行うことは、多くの時間と経費がかかるため、設計時の大きな負担となっている。したがって、簡便で合理的な風荷重算定法の確立が求められている。

そこで、本研究では、都市での気流を模擬した乱流境界層中における数種類の断面形状を有する三次元楕円柱を対象とした一連の風洞実験結果に基づき、楕円柱状構造物に作用する風力および風圧力の特性を定量的に把握することにより、楕円柱状構造物の設計用風荷重を提案する。新しい風荷重算定法のためのデータベースを構築することを目的とする。

本研究では、断面形状や風向および風速の違いによる影響に着目し、まず、系統的な楕円柱に作用する風力の測定や、楕円柱表面に作用する外圧力の測定により、楕円柱まわりの全体的な風力特性および局所的な風圧特性を明らかにする。次に、実験結果に基づき、断面形状や風向をパラメータとした楕円柱表面の風圧分布のモデル化を行う。また、風圧係数モデルの四階積分値と風力係数とを比較検討し、モデルの妥当性を確認する。これらにより、簡便かつ合理的な楕円柱状構造物の設計用風荷重の提案を目指す。

第1章では、本研究の背景と目的について考察し、三次元楕円柱に関する既往の文献について概観している。

第2章では、まず、風力実験の概要について述べる。

本実験は、東京大学工学部所有の風環境シミュレーター（室内回流式エッフェル型）にて行った。本風洞の測定部断面は、幅 1.8m×高さ 1.8m、境界層長さは、12.5m である。

実験模型は、三次元楕円柱の剛模型とし、模型の基本形状は、高さ $H = 0.4\text{m}$ かつ断面積 $A = 0.01\text{m}^2$ で一定とする。楕円柱の場合、見つけ幅の長さは風向によって変化してしまうので、ここでは断面積 A から求まる \sqrt{A} を代表長さとする、アスペクト比 $H/\sqrt{A} = 4.0$ である。これは、代表的な楕円柱状構造物である「品川インターシティーA棟」のアスペクト比 $H/\sqrt{A} =$ 約 3.2 に近く、超高層建物を想定するうえで妥当な値といえる。

模型の軸長比 B/D は、実建築物の軸長比を範囲に含むよう $B/D = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ の5種類とする。模型の側面形状は、曲面が滑らかな仕上げのもの（以下、滑面）と、それに粗度要素として、長さ 400mm のひのき材の角棒 2種類（幅 1mm×高さ 1mm（以下、粗面 1mm）、または、幅 1mm×高さ 2mm（以下、粗面 2mm））を、それぞれ周方向は等間隔となるよう曲面に対して鉛直に並べて貼り付けたもの、すなわち、滑面および2種類の粗面の計3種類とする。したがって、全模型形状は $5 \times 3 = 15$ 種類である。ここで、表面を粗くするのは、高レイノルズ数領域

を模擬する手法として、表面粗さをもうけて流れの層流から乱流への遷移を促進させるためである。風力実験には、これら計 $5 \times 3 = 15$ 形状の剛模型を用いる。また、風向角 θ_d は、風が短軸方向に平行な向きから吹いているときを $\theta_d = 0^\circ$ 、風が短軸方向に直角な向きから吹いているときを $\theta_d = 90^\circ$ と定義する。

実験気流は、地表面粗度区分IV相当の乱流境界層（べき指数 $\alpha = 0.29$ ）で、実験風速を低風速域から高風速域まで段階的に変化させた6種類とする。基準風速 U_H は、模型頂部高さ H の位置に設置したピトー管および熱線風速計により測定しており、この高さでの風速 U_H は $U_H = 2.6\text{m/sec}, 3.8\text{m/sec}, 5.0\text{m/sec}, 6.2\text{m/sec}, 7.4\text{m/sec}, 8.6\text{m/sec}$ 、この高さでの乱れの強さ I_{U_H} はおよそ $I_{U_H} = 19\%$ である。したがって、実験時のレイノルズ数 Re は、代表風速 U_H と代表長さ \sqrt{A} を用いると、およそ $Re = 2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ である。

風力実験では、五分力検出器を用いて、風力模型に作用する風力の測定を行うものとする。各測定時のデータのサンプリング周波数は 1000Hz とし、データ数は 120000 個とした。なお、このとき風向角 θ_d は、 0° から 90° まで 15° 間隔で変化させている。

得られた時刻歴データは、実風換算 1 秒間相当のデータ個数で移動平均を行ったうえで、基準風速 U_H から求まる実風換算 10 分間相当 T の平均速度圧 q_{U_H} を用いて基準化し、風力係数 C_f, C_m として表した。また、各係数の基本統計量は、14 個のアンサンブル平均として求めた。

次に、風力実験より得られた風力（X 軸方向および Y 軸方向の風力 F_x, F_y 、転倒モーメント M_x, M_y および振りモーメント M_z ）の時刻歴データに基づき、平均風力係数 $C_{f\ mean}$ 、RMS 変動風力係数 $C_{f\ rms}$ 、平均モーメント係数 $C_{m\ mean}$ 、RMS 変動モーメント係数 $C_{m\ rms}$ を求め、全体的な空気力特性を把握する。

第3章では、まず、風圧実験の概要について述べる。風圧実験は、風力実験と同様に東京大学工学部所有の風環境シミュレーター（室内回流式エッフェル型）にて行った。

実験模型には、風力実験と同様の形状の剛模型の外周側面上に、内径 1.3mm の風圧測定孔を、周方向 15° 間隔で 24 点、軸方向 4cm 間隔で 10 段となる位置に、 $24 \times 10 =$ 計 240 点設けた風圧模型を用いる。ここで、風圧測定孔の位置は、短軸端部からの角度 θ_p および床面からの高さ h で表すものとする。

また、実験気流は、風力実験と同様の乱流境界層（べき指数 $\alpha = 0.29$ ）を用いた。風圧実験では、微風圧測定装置を用いて、各風圧模型一体につき 60 点ずつ作用する風圧の同時測定を行うものとする。測定条件は、風力実験と同様とし、得られた時刻歴データは、実風換算 1 秒間相当のデータ個数で移動平均を行ったうえで、基準風速 U_H から求まる実風換算 10 分間相当 T の平均速度圧 q_{U_H} を用いて基準化し、風圧係数 C_p として表した。また、各係数の基本統計量は、14 個のアンサンブル平均として求めた。

次に、風圧実験より得られた風圧 P の時刻歴データに基づき、詳細な平均風圧係数 $C_{p\ mean}$ 、RMS 変動風圧係数 $C_{p\ rms}$ 、正側および負側の最大ピーク風圧係数 $C_{p\ max}, C_{p\ min}$ を求め、局所的な風圧の分布特性を明らかにする。

第4章では、これらの実験結果に基づき、設計時に必要となる正側および負側の平均風圧係数 $C_{p\ mean\ plus}, C_{p\ mean\ minus}$ および最大風圧係数 $C_{p\ max}, C_{p\ min}$ のモデル化を行う。この際、周波数領域を考慮したより詳細なモデル化を行うために、 $C_{p\ mean}$ と $C_{p\ rms}$ だけでなく、正側および負側の最大ピークファクター $g_{p\ max}, g_{p\ min}$ や変動風圧のパワースペクトル $S_p(f)$ も考慮する。変動風圧のパワースペクトル $S_p(f)$ については、風速変動に起因する成分 $S_{p1}(f)$ と剥離渦に起因する成分 $S_{p2}(f)$ との和で表されると考え、各成分への寄与率を用いて合成することで、 $S_p(f)$ のモデル化を行う。また、負側の最大ピークファクター $g_{p\ min}$ については、歪度 $C_{p\ skewness}$ および尖度 $C_{p\ kurtosis}$ との関係を検討し、 $g_{p\ min}$ を $C_{p\ skewness}$ および $C_{p\ kurtosis}$ を用いて表すことで、非正規性を反映させたモデル化を行う。以上より、形状変化および風速変化による風圧分布の違いを示し、これらの統計的性質を反映させ、形状をパラメータとした楕円柱に作用する風圧力モデルの提案を行う。

第5章では、設計用風荷重への応用として、第4章でモデル化した変動風圧のパワースペクトル $S_p(f)$ について、変動風圧のコヒーレンス C_{12} を用いて四階積分を行い、一般化風力のパワースペクトル $S_{rs}(f)$ を算出する。また、変動風圧のコヒーレンス C_{12} に対して指数近似を行い、その近似式に含まれる減衰定数 k から限界無次元周波数を求めることで、受圧面積の違いによる規模効果について検討し、適切な平均化時間について考察する。

第6章では、各章で得られた結論を総括的にまとめ、さらに、今後の展望を述べる。