

氏 名	ほんごう 本郷	たけし 剛
授与学位	博士（工学）	
学位授与年月日	平成7年3月24日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 建築学専攻	
学位論文題目	球形屋根に作用する風圧力に関する実験的研究	
指導教官	東北大学教授 山田 大彦	
論文審査委員	東北大学教授 山田 大彦	東北大学教授 杉村 義広 東北大学教授 柴田 明德 東北大学助教授 植松 康

論 文 内 容 要 旨

近年、東京ドームを初めとし、秋田スカイドーム、福岡ドーム、出雲ドーム、シーガイアなどの大空間構造物が次々と実現している。それらの大部分の平面形状は円形を基本としている。円形構造物の場合、従来は煙突や高層建物など軒高比（壁面の高さ／構造物の直径）が1を大幅に超えるものが大部分で、壁面に対する風荷重が対象となり、屋根についてはほとんど問題とされていない。一方軒高比が小さく球形屋根を持つ大空間構造物については、屋根に作用する風荷重が対象となるが、ほとんど研究されていない状況にある。

大空間構造物では、これまでの構造物と異なり、屋根の剛性によって屋根の共振効果を見逃すことが生じ得る。そのため風の動的荷重効果を検証するにあたり、屋根に加わる風力変動の時刻歴データから時々刻々の変位や加速度を計算し強風時の状態を評価する時刻歴応答解析、あるいは変動風力による屋根面の最大変位の分布と等価な変位を生じさせるように平均風力を割り増しするスペクトルモーダル法（ガスト影響係数法）による解析などが必要となる。但し屋根面に作用する風圧の変動は自然風の乱れの他、屋根面上の剥離せん断層の挙動に大きく左右されるため、スペクトルモーダル法は適用できないとの考え方もある。時刻歴応答解析を行うためには、時間的・空間的な風圧の変化を同時に計測できる風洞実験を行う必要がある。しかし、設計段階で未確定の屋根形状についてこのような風洞実験を行なうことは膨大な時間と費用の無駄になる。またスペクトルモーダル法で設計する場合でも、屋根面に作用する平均風圧および変動風圧を精度よく評価する必要がある。

このような状況をふまえ、本論文では円形平面を持つ軒高比の小さい構造物の屋根に作用する風圧性状を風洞実験により系統的に調査する。平屋根および球形屋根を対象とし、ライズ比（球形屋根部分の最高高さ／直径）と軒高比を系統的に変化させ、風圧性状への影響を明らかにする。さらにその成果を基に、変動風圧を考慮した屋根の合理的な耐風設計法を提案する。本論文は全編6章より構成される。以下にその概要を述べる。

第1章 序 論

第1章は序論であり、既往の研究の分析を通して本研究の背景と目的を明らかにし、論文の構成について述べている。

第2章 乱れの小さい一様流中におかれた平屋根および球形屋根に作用する平均風圧力

本研究で対象とする構造物は、接近流の性質が大きく影響する円形壁面と従来の研究成果が少ない球形屋根面とから構成される三次元構造物である。ここで円形壁面は、従来研究対象とされていた軒高比が1を超える細長いものではなく、1未満の扁平なものである。このような状況にあって、現在では一般的となった境界層風洞による実験法あるいは乱流中での実験法を最初から適用することには、本質を見失う危険が伴う。それ故に本論文では、先ず乱れの小さい一様流中での風洞実験を行い、基本となる性質を明らかにした。本章では、その結果を示し、考察している。

先ず実験に採用した乱れの小さな一様流（乱れの強さ0.6~0.8%）の特性を明らかにした上で、平屋根を持つ円形構造物の壁面および屋根面について、軒高比を8通りに変化させ、風圧力を測定した。この結果を既往の研究成果と比較検討して本実験手法の妥当性を検討すると共に、軒高比が風圧分布に及ぼす影響について考察した。次に球形屋根を持つ円形構造物について、ライズ比による影響を検討した。先の8通りの軒高比に対し、更にライズ比を3通りに変化させ、屋根の平均風圧分布の変化を調べた。屋根の風圧分布は屋根上の気流状態に大きく左右される。このことから、軒高比およびライズ比による平均風圧分布の変化が屋根上の気流の状態とどのような関係にあるかを明らかにするため、表面流れの風速分布の測定並びに砂の飛散による流れの可視化を行い、考察している。

第3章 乱れの小さい勾配流中におかれた平屋根および球形屋根に作用する平均風圧力

接近流が速度勾配を持つ場合、構造物周りの上方の気流は下方に引き込まれるその結果、風圧係数の大きさのみならず風圧分布のパターンも一様流中とはかなり異なってくる。本章では、実験気流が自然風のように高さ方向に速度勾配を持つ場合について、速度勾配の影響がどのように球形屋根の風圧分布性状に現れるかを、風洞実験により調べている。試験体とその軒高比およびライズ比に関する幾何学的条件は、第2章と同様である。

先ず自然風を代表する気流として選定したべき指数 $\alpha=0.25$ の境界層流の作成方法を示した。

速度勾配の純粋な影響を調べるために、できる限り乱れの小さな勾配流が作成された。次にこの気流を用いて測定した平均風圧の特性を示した。また平均風圧分布と表面流れとの関係について、気流糸による可視化を行い、考察している。

実際の構造物は速度勾配のある気流中に建設されるので、速度勾配の影響を正しく評価する必要がある。その意味で本章の成果は、静的風荷重を評価するための基本的な資料となる。

第4章 乱れの大きい勾配流中におかれた平屋根および球形屋根に作用する平均および変動風圧力

自然風と構造物の相互作用に関する研究の発展に伴い、風荷重に対する考え方に変化が見られる。自然風は大小さまざまな渦から構成されている。自然風が構造物に作用する場合、構造物あるいはその部分の大きさや形状により、渦の効果が異なる。どのような大きさの渦が作用しようとするか、もしない構造物あるいはその要素もあれば、小さな渦でも揺れる構造物あるいはその要素もあろう。つまり、構造物の耐風設計にあたっては、自然風の乱れの影響を精度よく捕らえる必要があるとする考え方が普及しつつある。しかし、そのためには先ず自然風そのものの性質を精度よく把握する必要がある。更に風洞実験により構造物に作用する風圧力の性状を調査するためには、その自然風を再現できなければならない。また、自然風の乱れは非定常であるために、構造物に作用する風圧力の空間的・時間的変動特性を把握する必要がある。以上の観点から、本章では、自然風に関する最新の情報に基づいた円形構造物の合理的な耐風設計資料を提供することを目的とし、自然風を代表する2種類の気流を模擬した勾配流中で実験を行い、平屋根および球形屋根に作用する平均風圧および変動風圧の大きさと分布性状を系統的に調べた結果を示し、考察している。

先ず最新の自然風に関する情報を基に選んだ代表的な2種類の気流を境界層風洞で模擬する方法と、得られた変動風の特性を示した。試験体は、前章までに用いた平屋根を含む4種類のライズ比のものに半球屋根(ライズ比0.5)を加えた5種類とした。軒高比は17通りに変化させた。風洞実験の結果に基づき、屋根に作用する平均風圧の特性に加え、変動風圧およびピークファクターの特性を示した。また気流の速度勾配の違いが平均風圧、変動風圧およびピークファクターに及ぼす影響について検討した。更に気流の乱れの強さが風圧に及ぼす影響について調べ、準定常理論を球形屋根の変動風圧予測に用いる場合の適用限界について明らかにした。

第5章 実験結果の耐風設計への適用

構造物は自然の脅威(外力)に対して安全であるように設計される。どの程度安全であるかは、構造物の目的・重要性による。また、どのような外力を対象とするかも構造物により異なる。柔な構造物もあれば、剛な構造物もある。従って全ての構造物に単一の設計法あるいは設計思想を適用するには、基本的に無理がある。本研究で対象とする球形屋根の設計法にも、当然、模擬や構法に応じた適切な設計法があろう。またそれには、時代と共に主流となる設計法が変わってきていることも影響するであろう。本論文の第2章及び第3章で得られた成果は、準静的な設計用風荷重として既に利用されている。即ち、本研究で得られた成果および既往の研究成果を基に、球形屋根の代

表点における平均風圧係数がライズ比及び軒高比に応じて提案されている。また、これを用いて求めた平均風圧係数に瞬間風速に基づく設計速度圧を乗じれば、設計用風圧係数が求められる仕組みになっている。この方法は提案時に想定された小規模あるいは比較的剛な球形屋根には適用できるが、大規模あるいは比較的柔な球形屋根に適用するには不十分であると考えられる。以上の観点から、本章では、第4章までに明らかとなった成果を用いて、球形屋根面に作用する変動風圧を評価する手法について述べている。

球形屋根の場合、ライズ比および軒高比により屋根に作用する風圧分布性状が大きく変化する。また、同じ屋根面でも場所により風圧変動が激しいことから、球形屋根形状に応じた風荷重を精度よく評価することが必要となる。そこで本研究では、風圧変動が激しく、かつそれを自然風の乱れや気流勾配によって直接もたらされる効果と屋根の形状自体によって引き起こされる剥離や再付着に起因する荷重効果とに分離できない球形屋根の耐風設計に相応しい方法として、ピークファクターを用いた方法（ピークファクター法）を提案した。平均風圧係数、変動風圧係数およびピークファクターの設定は、軒高比およびライズ比をパラメータとして行われる。また風圧力の空間的・時間的変動を適切に考慮した規模効果を導入するために、圧力変動が同時に作用する範囲を仮定し、圧力変動の同時性をもたらす評価時間を規模効果に置き換える TVL 法を採用した。TVL 法の採用にあたっては、圧力変動のルートコヒーレンスをモデル化するために必要なディケイファクターの設定値を提案している。また、評価時間と変動風圧係数の関係及び評価時間とピークファクターの関係を明確にし、基準となるピーク風圧から任意の評価時間のピーク風圧に換算する換算係数を提案した。最後にこれらの提案に基づいて算定した結果と実験値とを比較し、提案の妥当性を検証している。

第6章 結 論

本研究を通じて得られた結果を総括し、要約している。

審査結果の要旨

円形平面を基本とする大空間構造物の普及に伴い、球形屋根面に作用する風圧性状の解明が求められているが、合理的な耐風設計に足る成果は殆ど見られない状況にある。本論文は、このような現状に着目し、円形平面を持つ球形屋根面に作用する風圧性状について、形状パラメータとして軒高比とライズ比、また気流パラメータとして平均風速のプロフィールと乱れの強さに注目し、系統的な風洞実験を行い、更にその結果に基づいて球形屋根の耐風設計法を提案するものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を明らかにし、論文の構成について述べている。

第2章では、一様流中における風圧性状に及ぼす軒高比とライズ比の影響を明らかにしている。

第3章では、自然風が持つ平均風速のプロフィールを模擬した風洞気流による実験について述べている。第2章の結果との比較により、平均風速のプロフィールが屋根面の風圧性状に大きな影響を及ぼすことを明らかにしている。

第4章では、更に乱れを考慮した自然風を模擬し、自然風に関する最新の情報に基づいた風洞実験について述べている。屋根面に作用する平均風圧、変動風圧及びピークファクターの特性について系統的に明らかにしている。

第5章では、前章までに得られた知見に基づき、屋根面に作用する変動風圧の評価法について検討している。自然風のプロフィールと乱れとによってもたらされる風圧の変動と、構造物の形態自体により引き起こされる気流の剥離あるいは付着に起因する風圧の変動とを分離することは困難であることから、ピークファクター法に基づく耐風設計法を提案し、その妥当性を検証している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、円形平面を持つ球形屋根面に作用する風圧性状に関する系統的な風洞実験を行い、自然風の特性と並びに構造・形状の特性に応じた風圧力の特性を明らかにすると共に、球形屋根の合理的な耐風設計法を提案したものであり、建築構造学及び風工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。