

氏名	たかだて ゆうき 高 舘 祐 貴
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成31年3月27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)都市・建築学 専攻
学位論文題目	非定常空気力特性に基づく軽量大スパン屋根の空力安定性評価
指導教員	東北大学教授 植松 康
論文審査委員	主査 東北大学教授 植松 康 東北大学教授 持田 灯 東北大学教授 五十子 幸樹

論文内容要旨

第1章 序論

本研究の目的は、軽量大スパン屋根を有する大空間構造物に作用する非定常空気力や屋根面の振動を数値流体解析(CFD)および風洞実験を用いて評価し、その空力安定性や安定条件を明らかにすることである。

近年、新たな構造材料や工法の開発、解析技術の発展によって従来の大空間構造物より軽量かつ大スパン屋根を有する構造物の設計・建設が可能となっている。このような大空間構造物では、屋根面に膜材が使用されることが多く、軽量かつ剛性が低くなることから設計時には風荷重が支配的となる。さらに、風による屋根面の変形や振動が生じやすくなるため、屋根面の空力安定性がしばしば問題となる。特に、変形が生じやすい屋根面には接近流の乱れによる変動空気力だけでなく、構造物自身の運動に伴う付加的な空気力(非定常空気力)が作用するため、屋根面に作用する風荷重は非常に複雑なものとなる。このような大スパン屋根の動的な応答を評価する手法は自由振動法と強制加振法に代表される。しかし、風洞実験において、自由振動法では相似則を満たすことが困難であること、強制加振法では装置の作製が困難であることより、研究例が少なく、空力不安定振動の発生機構や空力安定条件に関しては不明な点も多い。本研究では、数値流体解析を利用して、陸屋根、円弧屋根、吊屋根の3種類の形状を対象とし、風洞実験で再現することが困難な広範囲の加振振動数に対する強制加振解析と相似則を適切に考慮した自由振動解析を行うことで、大スパン屋根の空力安定性や安定条件を明らかにする。

第2章 数値流体解析の概要とメッシュ分割

数値流体解析の乱流モデルはLES(Large Eddy Simulation)のWALEモデルである。解析には汎用流体解析ソフトANSYS Fluent(Ver. 19.0)を用いた。数値流体解析は風洞実験と同様に縮小スケールでの解析とし、その幾何学的縮尺率は1/400とする。数値流体解析では少ないメッシュ数で精度の高い流れ場を再現することが重要となる。そこで、主流方向と主流直交方向のメッシュ分割と主流直交方向の解析領域を変化させることで一方向屋根の解析に必要なメッシュ分割と解析領域を明らかにした。図1に解析領域とモデル近傍のメッシュ分割を示す。メッシュ分割は、2次元的な流れ場に着眼した場合、主流方向よりも主流直交方向のメッシュ分割の方が全体の

分布に及ぼす影響が大きい。主流直交方向のメッシュ幅を dy 、代表長さ(軒高)を H とすると、必要とされるメッシュ幅の必要条件は $dy/H \leq 0.08$ 、主流直交方向の解析領域の長さを B とすると、解析領域の必要条件は $B/H \geq 4.0$ となる。解析においてはこれらの条件を満たすメッシュ分割を用いた。表 1 に本研究で用いた解析条件を示す。

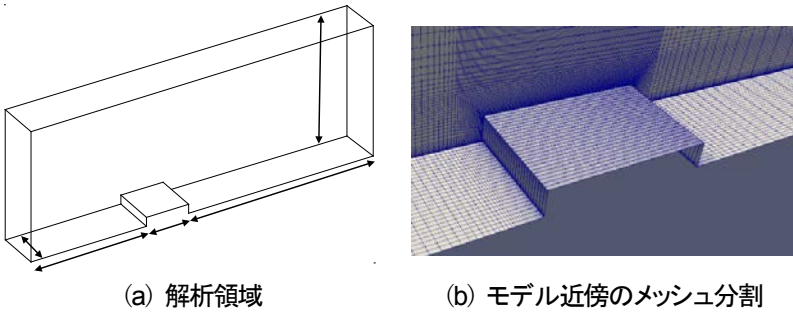


図 1 解析領域

表 1 数値流体解析の解析条件

計算領域	9.5L(x)×0.7L(x)×2.5L(z)
流入境界	一様流, 境界層乱流
上面・左右境界	Slip 条件
床面・モデル表面	no-slip 条件
総メッシュ数	620,000
空間項の離散化	2次精度中心差分
時間項の離散化	2次精度陰解法
数値解法	PISO 法
時間ステップ	4.0×10 ⁻³
解析時間	実スケール 10 分相当

第 3 章 非振動屋根に作用する風圧特性とその流れ場

まず、非振動屋根に対して数値流体解析を行う。解析には乱れのない一様流と自然風を模擬した境界層乱流を用いる。境界層乱流は、平均風速、乱流エネルギー、消散率を与えることで統計的に生成した。図 2 にモデル位置における風速プロファイルと境界層乱流での変動風速のパワースペクトル密度を示す。境界層乱流における風速プロファイルは建築物荷重指針・同解説の地表面粗度区分Ⅲの値(AIJ)とほぼ一致している。変動風速のパワースペクトル密度はフィルタ効果によって高周波成分は減少しているものの、全体的には Karman 型とよく一致して

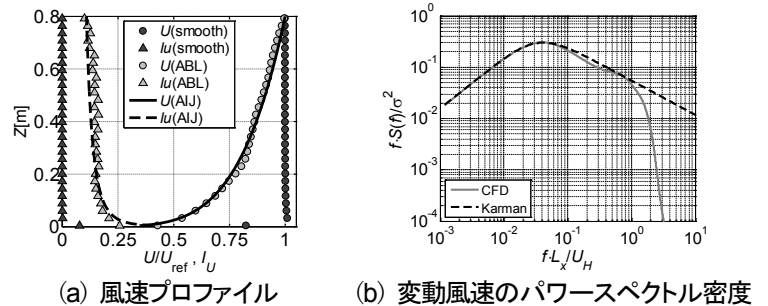


図 2 モデル位置における流入風特性

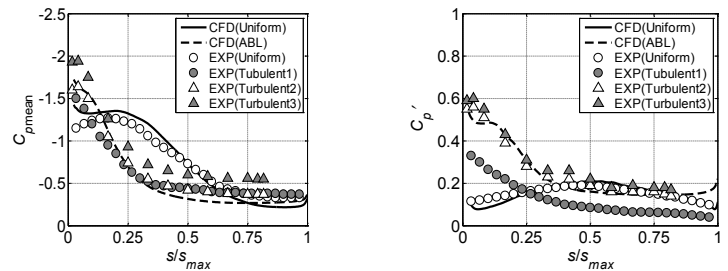


図 3 陸屋根に作用する風圧係数分布

いる。図 3 に陸屋根に一様流と境界層乱流が作用した時の風洞実験と数値流体解析による平均風圧係数 $C_{p,mean}$ と RMS 変動風圧係数 $C_{p,rms}$ をそれぞれ示す。一様流については、解析結果(CFD)が風洞実験(EXP)の結果とよく一致しており、境界層乱流については、類似した気流を用いた実験の結果に近い分布となっている。

第 4 章 振動屋根に作用する風圧特性と流れ場

振動屋根面に作用する風圧特性と流れ場を明らかにするために、各屋根に対して、無次元加振振幅 $z_0^*(=z_0/L)$ は 3.3×10^{-3} 、 1.0×10^{-2} 、 2.0×10^{-2} の 3 種類、無次元加振振動数 $f_m^*(=f_m H/U_H)$ は 0~1.33 の範囲で加振した。図 4 に一様流及び境界層乱流中において無次元振幅 $z_0^*=1.0 \times 10^{-2}$ の逆対称一次モードで振動している陸屋根の平均風圧係数と RMS 変動風圧係数分布を示す。平均風圧係数は屋根の振動の影響をほとんど受けないが、RMS 変動風圧係数は振動の腹と節の位置で極値を示している。また、加振振幅や加振振動数が大きくなるほど、振動の腹の位置で

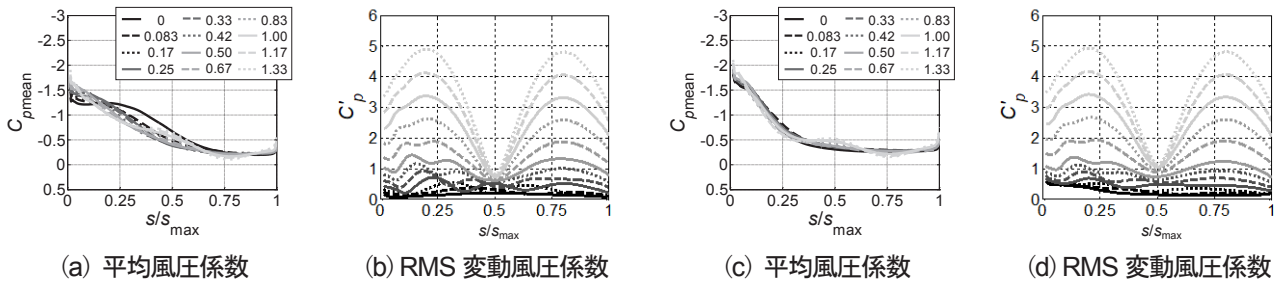


図4 風圧係数分布(陸屋根, $z_0/L=1.0 \times 10^{-2}$, (a), (b) 一樣流, (c), (d) 境界層乱流)

のRMS変動風圧係数が大きくなり、全体的に屋根の振動が変動風圧係数に及ぼす影響が大きくなる。

第5章 空力剛性と空力減衰に基づく非定常空気力特性の把握

対称一次モードと逆対称一次モードを対象とし、強制加振解析で得られる変動風圧を速度比例成分 F_R と変位比例成分 F_I を用いて屋根面の非定常空気力の特性を明らかにする。図5は、モーダル風力を用いて得られる空力剛性係数 a_k と空力減衰係数 a_c を無次元風速 $U_H^*(=U_H/f_m L)$ に対してプロットしたものである。

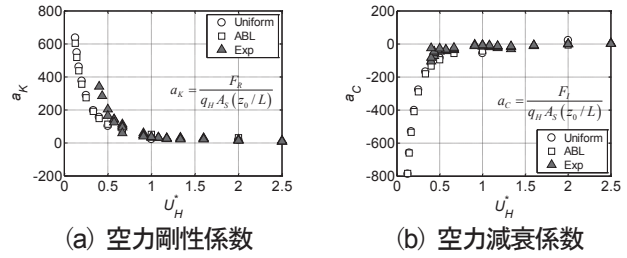


図5 モーダル風力による非定常空気力特性

図中には既往の風洞実験と本研究で行った数値流体解析の結果を示しているが、全体的な傾向としては、 U_H^* が大きくなるにつれて、 a_k は減少、 a_c は増加しており、実験値と解析値は U_H^* が大きくなるほどよく一致している。また、気流が結果に及ぼす影響は比較的小さい。各屋根形状に対してこれらの非定常空気力を求めることで、屋根形状の違いによる空力安定性や空力安定条件を評価した。

第6章 エネルギー収支と非定常空気力特性に基づく空力安定性評価

強制加振解析の結果を利用し、屋根の振動に伴うエネルギー収支並びに構造減衰と空力減衰の関係から空力不安定振動の発生条件を明らかにする。図6に無次元風速 U_H^* に対する無次元エネルギー収支 E_T^* の変化を示す。ここでは、強制加振1サイクルにおける E_T^* をアンサンブル平均し、 $E_T^* < 0$ となる自励的な振動の発生条件を求めることで空力不安定振動の発生領域を求める。表2はこのようにして求められた空力不安定振動の発生条件である。

次に、構造減衰よりも空力負減衰が大きくなる条件に基づいて空力不安定振動の発生条件を評価する。図7に質量減衰パラメータ δ_R と無次元風速 U_H^* の関係を示す。グラフの曲線よりも小さい範囲が空力不安定振動の発生領域である。つまり、 δ_R が増加するほど空力不安定振動が発生する風速が高くなるため、屋根は空力的に安定化すると考えられる。表3に本研究で対象とする建築物に対して得られる空力不安定振動の発生条件を示す。いずれの評価方法においても、一樣流の方が境界層乱流よりも空力不安定振動が発生しやすいといえる。

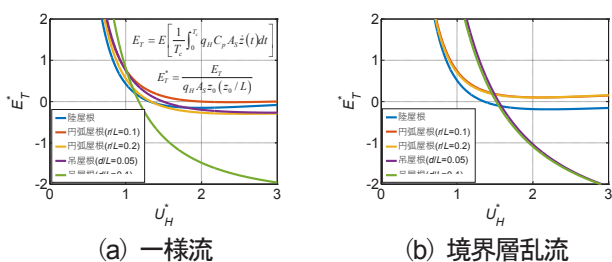


図6 エネルギー収支と無次元風速

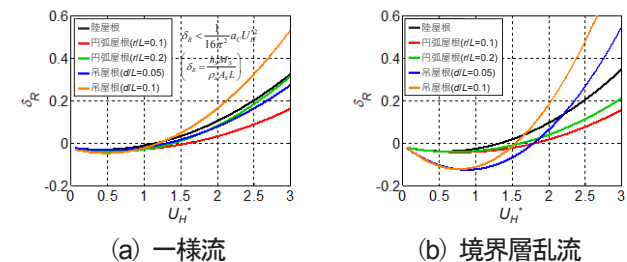


図7 空力減衰パラメータと無次元風速

表2 エネルギー収支による空力不安定振動の発生風速

屋根形状	U_H^* (一様流)	U_H^* (境界層乱流)
陸屋根	1.32	1.36
円弧屋根($r/L=0.1$)	1.34	発生しない
円弧屋根($r/L=0.2$)	2.00	発生しない
吊屋根($d/L=0.05$)	1.50	1.55
吊屋根($d/L=0.1$)	1.18	1.52

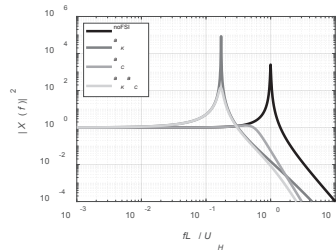
表3 空力不安定領域による空力不安定振動の発生風速

屋根形状	U_H^* (一様流)	U_H^* (境界層乱流)
陸屋根	1.16	1.34
円弧屋根($r/L=0.1$)	1.61	1.82
円弧屋根($r/L=0.2$)	1.40	1.63
吊屋根($d/L=0.05$)	1.32	1.80
吊屋根($d/L=0.1$)	1.20	1.55

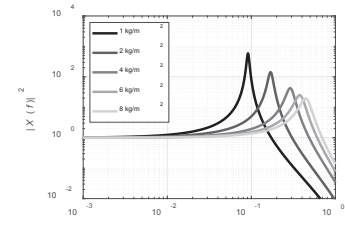
第7章 スペクトルモーダル解析による動的応答予測

強制加振解析によって得られる空力剛性係数 a_K ならびに空力減衰係数 a_C を考慮した周波数応答関数 $|X(f)|^2$ を求め、スペクトルモーダル解析によって屋根の動的応答の評価を行う。

図 8(a)に非定常空気を考慮した場合($a_K a_C$, a_K , a_C)としない場合(noFSI)における動的応答



(a) 非定常空気力の有無



(b) 質量変化に伴う応答倍率

図8 動的応答倍率

倍率の変化を示す。非定常空気を考慮した場合の屋根の動的応答倍率は空力剛性の影響によってピーク値が低周波側に移動するが、そのピーク値は空力減衰の影響によって小さくなる。図 8(b)に屋根の質量を変化させた場合の動的応答倍率を示す。屋根の質量を大きくすると空力減衰によって動的応答倍率のピークが小さくなることから、屋根を空力安定化させるためには屋根の質量が重要なパラメータになる。

第8章 自由振動模型を用いた風洞実験による応答評価

屋根の応答性状並びに空力安定性を把握するために、自由振動模型を用いた風洞実験によって逆対称一次モードの腹と節の位置の変位をレーザー変位計で測定した。流入気流には一様流と境界層乱流を用いることで接近流が構造物の応答性状に及ぼす影響を把握した。風洞実験によると、軒高風速 U_H が増加するにつれて屋根の平均変位や変位の標準偏差が増加する。しかし、実験によって得られた屋根の振動は構造物の固有振動数や非定常空気力による応答ではなく、接近流の乱れと流れの剥離に伴う変動風力によるものが支配的であった。

第9章 流体-構造連成解析による屋根の空力安定性の評価

流体解析と構造解析を各時間ステップで連成することで流れが構造物に及ぼす影響と構造物の変形が流れ場や風圧場に与える影響を把握した。表2や表3における空力不安定振動の発生条件に対する解析では、空力不安定振動のような顕著な振動応答は発生せず、振動モードは対称一次モードが支配的となる。これは、屋根形状が時々刻々と変化するため、それに伴って屋根まわりの風圧場や流れ場が変化するためと考えられる。

第10章 結論

本研究で得られた主な結論をまとめた。数値流体解析を用いた強制加振解析によって空力不安定振動が発生する条件を導き、流体-構造連成解析でその結果を検証した。強制加振解析では、空力不安定振動を考慮すべき無次元風速や動的応答を低減する方法を示した。流体-構造連成解析では、屋根の変形が風圧分布に影響を及ぼすため、大スパン屋根の空力不安定振動が発生しにくいことを示した。

論文審査結果の要旨

本研究は、軽量大スパン屋根を対象とし、これに作用する非定常空気力(屋根の運動に伴う付加的な空気力)の特性や屋根の振動を数値流体解析並びに風洞実験を用いて評価することで、屋根の空力安定性や安定条件を明らかにしたものであり、全10章で構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、数値流体解析の概要を述べ、中でも重要となるメッシュ分割の検討を行っている。数値流体解析においては、少ないメッシュ数で高精度の解析を行うことが重要である。ここでは一方向屋根を対象とし、風方向および風直交方向のメッシュ分割を変化させた一連の解析結果に基づき、適切なメッシュ分割と解析条件を明らかにした。

第3章では、非振動屋根に作用する風圧と屋根まわりの流れ場の特性を明らかにしている。対象とする形状は「陸屋根」、ライズ・スパン比0.1と0.2の「円弧屋根」、サグ・スパン比0.05と0.1の「吊屋根」の3種類、流入気流は乱れのない「一様流」と自然風を模擬した「境界層乱流」の2種類である。

第4章では、振動屋根に作用する風圧と屋根まわりの流れ場の特性を明らかにするため、一様流と境界層乱流中で振幅や振動数を変化させた強制加振解析を行っている。対象とする振動モードは対称および逆対称一次モードである。加振に伴う平均風圧係数並びにRMS変動風圧係数分布、変動風圧のパワースペクトル密度や位相差の変化を示すことで振動屋根に作用する風圧の基本的な特性を明らかにした。

第5章では、強制加振解析で得られる変動風圧の「変位比例成分」と「速度比例成分」をそれぞれ「空力剛性」と「空力減衰」として評価し、振動屋根に作用する非定常空気力の特性を明らかにしている。逆対称一次モードでは、無次元風速が増加すると空力負減衰(空力的に不安定)となる場合があるが、対称一次モードでは常に空力正減衰となるため空力的に安定な振動であることを示した。

第6章では、逆対称一次モードに対する強制加振解析の結果を用いて、エネルギー収支並びに空力減衰に基づく評価方法により空力不安定振動の発生条件を明らかにしている。いずれの評価方法においても、一様流より境界層乱流の方が、また、陸屋根や吊屋根より円弧屋根の方が空力不安定振動は発生しにくいことを示した。

第7章では、スペクトルモーダル解析を用いて非定常空気力の影響を考慮した屋根の動的応答予測を行っている。非定常空気力の影響を考慮すると応答が大きくなること、屋根の動的応答を抑制するためには屋根質量を大きくすることが効果的であることを示した。

第8章では、空力弾性模型を用いた風洞実験によって屋根の動的応答性状並びに空力安定性を把握している。接近流によらず、風速増大に伴い屋根の平均変位や振動振幅が増大すること、屋根の振動には接近流の乱れと流れの剥離に伴う変動風力の影響が支配的であることを示した。

第9章では、陸屋根を対象とし、流体-構造連成解析を行うことで、流れが屋根の応答に及ぼす影響、並びに、屋根の変形が流れ場や風圧場に与える影響を明らかにしている。

第10章は結論である。

以上、要するに本論文は、軽量大スパン屋根を対象に屋根に作用する非定常空気力の特性を明らかにし、屋根の空力安定性や空力安定条件を評価した研究であり、大スパン屋根の耐風設計に寄与するものである。

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。