

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360272

研究課題名（和文）建築物全体挙動と局部風圧の相互作用を考慮したモノコック構造体や外装材等の耐風設計

研究課題名（英文）Wind resistant design of monocoque-type structures and cladding considering contributions of overall behavior and local pressure effects

研究代表者

田村 幸雄 (TAMURA YUKIO)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：70163699

研究成果の概要（和文）：

外装仕上材からそれらを支える 2 次部材に変動風圧力が伝達され、最終的に構造骨組を通じて地盤へ伝達されるプロセスを詳細に追い、従来の耐風設計で行われている構造骨組用風荷重と外装材用風荷重の妥当性を検討した。特に、外装材と構造骨組の区別が付かないモノコック構造体や、大スパン屋根の外装材を支持する部材と構造フレームなどにおける構造物全体の挙動と局所的な風圧力が荷重効果に与える影響について検討し、両者を別々に評価する手法を提案し、耐風設計への応用を示した。

研究成果の概要（英文）：

Wind load effects on structural main frames due to overall behavior and those on cladding/ components due to local pressures are studied based on detailed examination of wind load pass from the building surface to the ground. The contributions of the overall building behavior and local pressures are investigated, especially for monocoque-type structures and long-span roof systems, for which separation of the main frames and secondary members is difficult. Finally, the results are applied for wind resistant design of these types of buildings and structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2010 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学， 建築構造・材料

キーワード：耐風設計，モノコック構造

1. 研究開始当初の背景

従来から Davenport (1961) のガスト影響係数 (Gust Loading Factor) 法による等価静的風荷重分布が規基準類で用いられているが、荷重分布は平均風力分布に相似となり、平均風力係数がゼロに近い場合は、適切に等価静的風荷重を与えることができない。Kasperski

(1992) は LRC (Load Response Correlation) 法を提案し、準静的成分のみではあるが、現実に起こりうる等価静的風荷重分布を与えることに成功した。Zhou & Kareem (2001), Holmes (2002), Solari ら (2002) はガスト影響係数法の改良型を提案し、Kwon & Kareem (2007) はこれらの概念を包含するガストフロ

ント係数を提案しているが、いずれも着目する1つの最大荷重効果(最大応力や最大変位)を再現するもので、建築物全体の全ての部材の最大荷重効果は保証できない。申請者ら(Katsumura, Tamura et al., 2004)は、全ての部材に生じる最大応力を1つの風荷重分布で再現するユニバーサルな等価静的風荷重分布の提案を行うとともに、ウェブ上に公開してきた空力データベース(http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html)に基づく合理的な耐風設計手法の提案を行ってきた。これらは建築物の全体的風応答挙動で決まる「構造骨組」のための風荷重、「構造骨組用風荷重」を算定するためのものである。風方向荷重は、主として風の乱れによって生じる風方向の振動に支配され、風直交方向荷重は、主として建築物から後流に放出されるカルマン渦による風直交方向振動に支配され、振り風荷重は両者の影響を受けた複雑な挙動に支配される。いずれにせよ、構造骨組用風荷重は建築物の全体的な挙動によって決まる。

一方で、窓ガラス、外壁パネル、屋根仕上材、あるいはそれらを支持して構造骨組に伝える部材、いわゆる「外装材等」は、局所的な風圧変動とそれによって生じる外装材等の挙動に支配される。一般に外装材等の固有振動数は高く、減衰定数も大きいので、共振成分の寄与は小さく、風圧変動の静的成分および準静的成分が重要で、建築物全体の挙動ではなく、局所的な風圧変動の特性が「外装材用風荷重」を決定づける。しかし、モノコック型の容器構造物、煙突、シェル構造の屋根などでは、外装仕上材と構造骨組の区別がなく、外皮自体が全体挙動によって生じる応力も負担する構造体であり、かつ局部的に作用する外装材用風荷重で生じる局所的な応力も負担する。サッカースタジアムなどの大スパン屋根やドーム屋根の外装材支持部材、あるいは大規模壁面を支える耐風梁や胴縁なども、外装仕上材を支持する部材や外装材そのものが、構造骨組の全体挙動の影響と、外装材に作用する局所的風圧変動の影響の両方を同時に受ける場合もある。これらを考慮しないと応力を過小評価することが明らかであるにもかかわらず、従来のISO4354はじめASCE7、AS/NZS1170.2など海外の規基準類にしても、現行の建築基準法や建築物荷重指針・同解説にしても、この点を無視してきた。本研究は、局部風圧による局所的な挙動と全体風力による全体的な挙動の相互効果を検討するものである。

2. 研究の目的

本研究では、外装仕上材からそれらを支える2次部材に変動風圧力が伝達され、最終的に構造骨組を通じて地盤へ伝達されるプロ

セスを詳細に追い、従来の耐風設計で行われている構造骨組用風荷重と外装材用風荷重の妥当性を検討し、外装材と構造骨組の区別が付かないモノコック構造や外装材を支持する2次部材と構造骨組の区別が曖昧な部位の合理的な耐風設計法を提案することを目的としている。

3. 研究の方法

以下に示す13ステップに亘って研究を進めてきた。

- (1) モノコック構造体2体に作用する変動風圧力の特性を把握するための風洞実験模型の製作と、境界層風洞を用いたモノコック構造体2体の変動風圧同時計測の実施(図1:使用風洞図, 図2:実験風景, 図3:実験模型。)
- (2) モノコックタイプの構造をモデル化した3次元FEMモデルの構築; 有限要素モデルにおいて、シェル要素については、せん断、曲げ、膜剛性を有するSHELL93という要素を、輪剛性を確保するための三次元梁要素としては、BEAM188要素を用いた。図4に有限要素モデルを、図5に用いた要素の説明を示す。
- (3) 風洞実験で得られた変動風圧を用いた、モノコック構造体に発生する最大応力の詳細な解析



図1 使用風洞

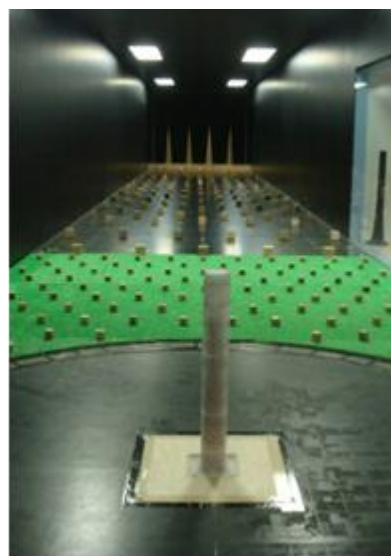


図2 実験風景

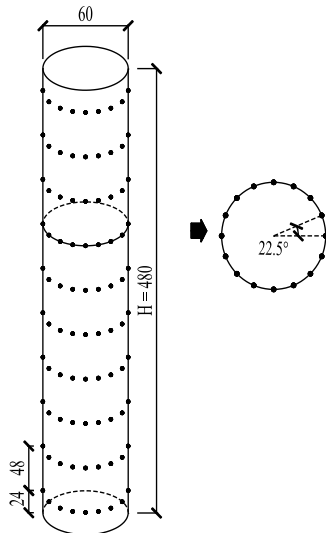


図3 実験模型（圧力測定孔位置も記載）

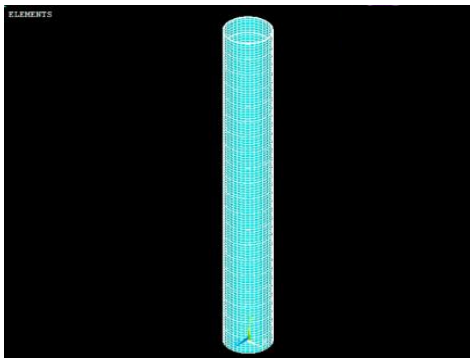


図4 有限要素モデル

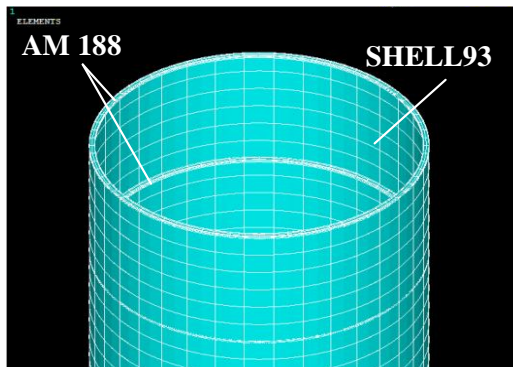


図5 用いた有限要素モデル

- (4) モノコックタイプの円筒状構造物（2体）に生じる最大応力に対する全体挙動の貢献分と，局部風圧による貢献分の分離，抽出と，それぞれの貢献比率の検出。
- (5) 大スパン屋根2体（ドーム型，円弧型）に作用する変動風圧力の特性を把握するための風洞実験模型の製作と境界層風洞を用いた変動風圧の多点同時計測の実施（図6に円弧型の風洞実験模型を示す。）

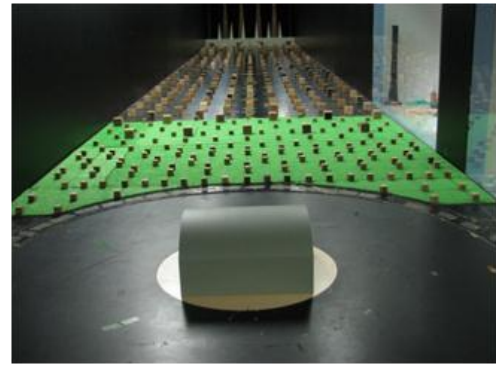


図6 風洞実験風景（円弧型模型）

- (6) ドーム型と円弧型の2体の大スパン屋根構造の3次元 FEM モデルの構築（図7）
- (7) 風洞実験結果を用いた，2体の大スパン屋根構造の最大応力の詳細な解析
- (8) 大スパン屋根を有する構造物（2体）に生じる最大応力に対する全体挙動の貢献分と，局部風圧による貢献分の分離，抽出と，それぞれの貢献比率の検出

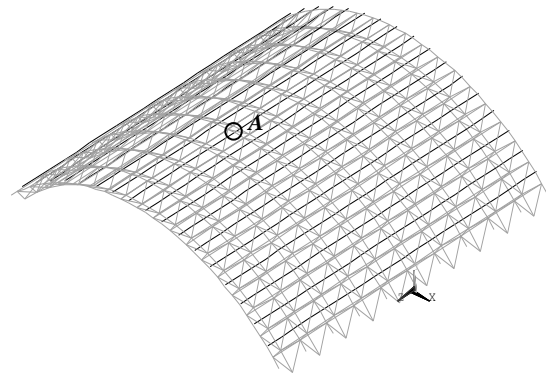


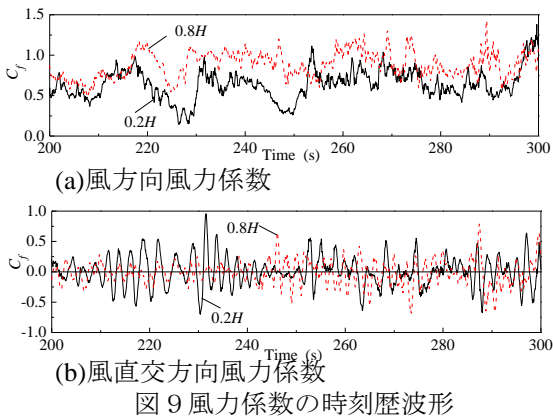
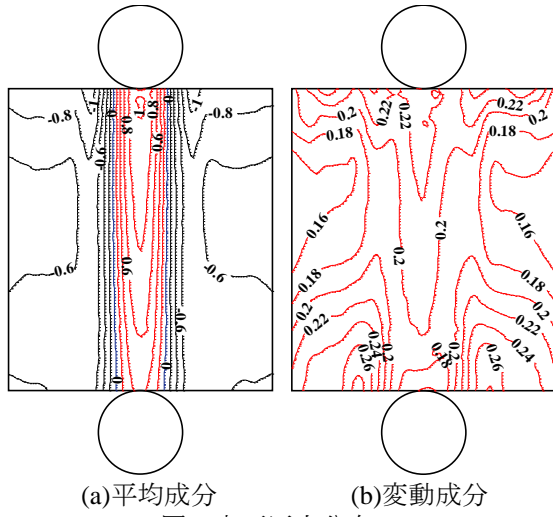
図7 大スパン構造の有限要素モデル

- (9) 大規模壁面を有する2体の建築物の風洞実験模型の製作と境界層風洞を用いた風圧実験の実施
- (10) 大規模壁面を有する2体の中低層建築物の3次元 FEM モデルの構築
- (11) 風洞実験で得られた変動風圧を用いた，2体の大規模壁面を有する建築物の構造部材に発生する最大応力の詳細な解析
- (12) 大規模壁面を有する建築物（2体）に生じる最大応力に対する全体挙動の貢献分と，局部風圧による貢献分の分離，抽出と，それぞれの貢献比率の検出
- (13) 耐風設計での構造骨組用風荷重と外装材用風荷重の考え方のまとめ

4. 研究成果

以下にそれぞれのステップで得られた知見について，ここでは構造部材が外装材を兼ねているモノコック構造を対象とした風洞実験，数値解析結果を中心として示していく。

モノコックタイプの構造物の荷重評価を行うに当たり、構造物表面に作用する圧力分布を得る風洞実験を行った。実験で測定されたモノコック構造体の表面圧力分布の1例を図8に、また表面圧力分布を積分して求めた、モノコック構造全体にかかる力の時刻歴の例を図9に示す。得られた風圧力のデータはのちに述べる有限要素法解析において、外力として与えることとなる。



次に、風洞実験で得られた変動風圧を用いた、モノコック構造体に発生する最大応力を詳細に検討する。

図10、図11に、全体挙動により生じる応力と全体挙動のほかに局所的な風圧力によるシェルの変形によって生じる力も考慮したときの、最大、最小軸方向応力度の比較を示す。図10は要素ごとに最大値と最小値を並べたものであり、図11は最大値と最小値に分けて最大値については局所的な変形を考慮したときの応力が小さい順に、最小値については絶対値が大きい順に示してある。

検討した範囲では、モノコックタイプの構造体全体の挙動のみを考慮して応力度を評価した場合には、過小評価となり、危険側になる結果を得た。

これらの解析にあたっては、種々の条件下で、局所的な風圧力によるローカルな荷重効果と全体的な挙動による荷重効果の分離に主眼を置いて詳細な解析を行っている。全ての要素に対する結果を示すスペースはないので、ここでは、設計上応力状態が最も厳しくなる風上側淀み点近傍、プラスマイナス50度の範囲の基部付近の140要素を取り出して結果を示す(図12参照)。

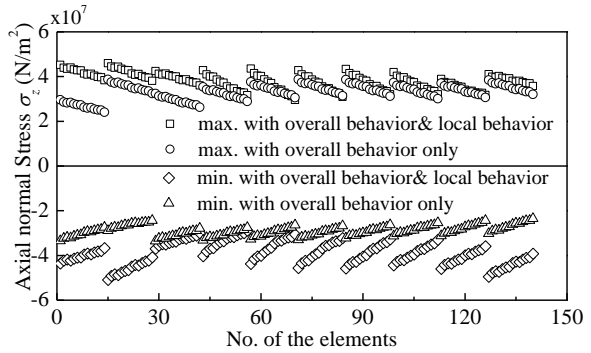
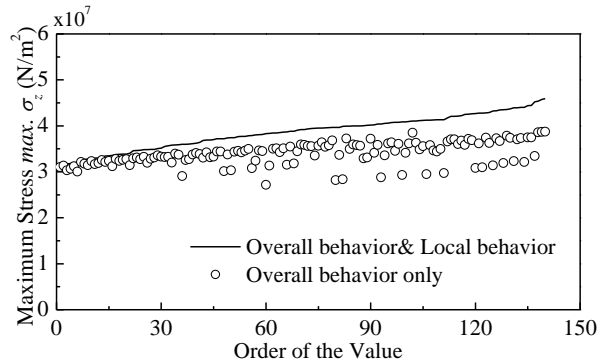
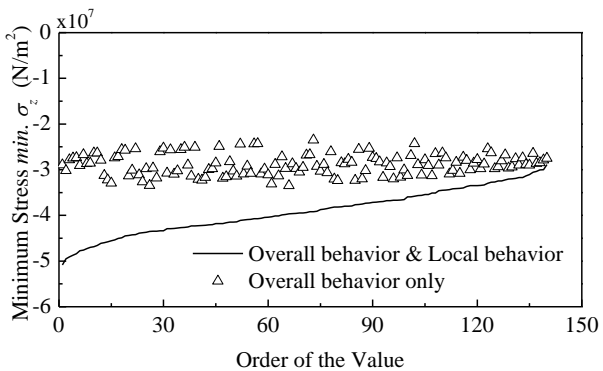


図10 最大、最小軸方向応力度における局所的挙動と全体挙動の影響

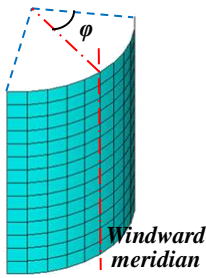


(a) 最大軸応力度における全体挙動と局所的挙動の影響の比較 (応力が小さい順に整序)



(b) 最小軸応力における対比 (応力が小さい順に整序)

図11 局所挙動が軸応力に与える影響

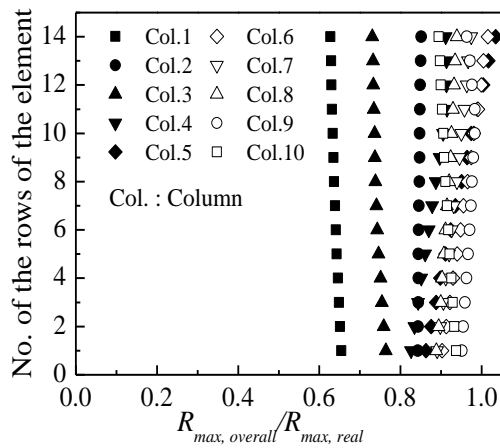


140	126	112	98	84	70	56	42	28	14
139	125	111	97	83	69	55	41	27	13
138	124	110	96	82	68	54	40	26	12
137	123	109	95	81	67	53	39	25	11
136	122	108	94	80	66	52	38	24	10
135	121	107	93	79	65	51	37	23	9
134	120	106	92	78	64	50	36	22	8
133	119	105	91	77	63	49	35	21	7
132	118	104	90	76	62	48	34	20	6
131	117	103	89	75	61	47	33	19	5
130	116	102	88	74	60	46	32	18	4
129	115	101	87	73	59	45	31	17	3
128	114	100	86	72	58	44	30	16	2
127	113	99	85	71	57	43	29	15	1

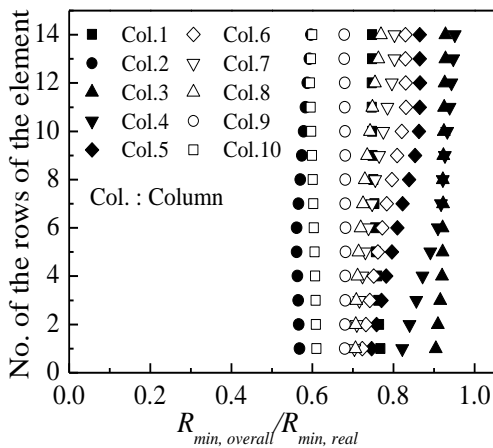
図 1 2 分析対象要素

次に、荷重効果に及ぼす全体挙動の寄与分と局所的な風圧力の寄与分を検討しており、モノコックタイプの円筒状構造物（2 体）に生じる最大応力に対する全体挙動の貢献分と、局部風圧による貢献分の分離、抽出と、それぞれの貢献比率の検出を行った。

図 1 2 に示したように、今回対象とした 140 要素は 14 行 10 列の行列状に並んでいる。Fig. 1 3 に対象とした表面の全体挙動のみを考慮した時の荷重効果の、局所挙動をも考慮した時の荷重効果に対する比率を示す。



(a)最大軸直交方向応力



(b)最小軸直交方向応力

図 1 3 全体挙動のみを考慮した場合の最大荷重効果の局所的風圧力の影響も考慮した総荷重効果に対する比率

最大応力は全体挙動の影響が約 65% ~ 100%の間に入っており、最小応力は 60% ~ 90%の間に入っている。

図 1 3 に示す Col. 5 と Col. 6 が対象面のほぼ中央（風上側）に位置しており、全体を通して、風上側での値は風上側から遠い点よりも全体挙動の影響比率が高くなっている。一方、例えば図 1 3 (a)に示す Col. 1, 図 1 3 (b)に示す Col. 2 と 10 のように、荷重効果の大きい要素では、全体挙動の占める割合が比較的小さい (Fig. 1 0 参照)。全体挙動のみを考慮し、ローカルな風圧力による局所的挙動の影響を無視すると、構造部材の荷重効果をかなり過小評価することとなり、その誤差は設計上不利な箇所に近い要素ほど大きくなる傾向がある。

ここではスペースの都合から、モノコックタイプの構造物の結果のみを示したが、耐スパン屋根のような構造物においても、本報告書で示してきたように、全体挙動だけを対象とし、局所的な変形の影響を加味しないで分析を行った場合、荷重効果を過小評価することとなり、危険側となることが明らかになった。このような構造物に対しては、慎重に局所的風圧力の貢献を評価し、これらを取り込んだ応力によって耐風設計を行うことが必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Zhibin Ding, Yukio Tamura, Akihito Yoshida, Contributions to member stresses due to overall wind-induced behaviors of thin-walled cylindrical shell, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 査読有,

[DOI : 10.1016/j.jweia.2012.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.04.015)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Zhibin Ding, Akihito Yoshida, Yukio Tamura, Wind-induced dynamic behavior of a Monocoque steel chimney with ring stiffeners, 13th International Conference on Wind Engineering, 2011.7.10-15, Amsterdam
- ② 益山由佳, 勝村章, 吉田智哉, Gou Lu, 田村幸雄, ユニバーサルな等価静的風荷重分布のデータベース化に関する研究 その 1 データベース化に関する検討, 日本建築学会 2009 年度大会 (東北), 2009.8.28, 東北大学

- ③ 吉田智哉, 勝村章, 益山由佳, Gou Lu,
田村幸雄, ユニバーサルな等価静的風荷
重分布のデータベース化に関する研究
その 2 構造特性の検討, 日本建築学会
2009 年度大会 (東北), 2009.8.28, 東北
大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

田村 幸雄 (TAMURA YUKIO)
東京工芸大学・工学部・教授
研究者番号 : 70163699

(2)研究分担者

松井 正宏 (MATSUI MASAHIRO)
東京工芸大学・工学部・教授
研究者番号 : 60350576

吉田 昭仁 (YOSHIDA AKIHITO)
東京工芸大学・工学部・准教授
研究者番号 : 90329219

(3)連携研究者

なし