

しもきた克雪ドーム(仮称)の風荷重検討

相原知子・細澤治*¹・浅見豊・水谷太郎*¹・寺崎浩・吉川優

Keywords : Dome, Wind Load, Averaging Time, Internal Pressure Coefficient, Openings, Response Analysis

ドーム, 風荷重, 平均化時間, 内圧係数, 開口, 応答解析

1. はじめに

しもきた克雪ドーム(仮称)は、ドーム棟とセンターハウス棟からなる多目的ドームである。ドーム棟の屋根形状は、1辺が 108.3m の正方形平面を持つ平均曲率一定曲面(石鹸膜形状)であり、最高高さは 45.0m である。本報では、ドーム棟の風荷重を検討するため風洞実験を行い、開口条件を考慮した外装用風荷重および構造骨組用風荷重を評価した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用風洞および実験模型

本実験で使用した風洞は大成建設(株)技術センター所有のエッフェル型境界層風洞(測定部寸法: 幅 2.0m、高さ 1.5m、長さ 11.0m)である。模型の縮尺率は 1/300 とし、風洞閉塞率は 2%以下となっている。実験模型の風圧測定孔は、ドーム棟に 304 点(屋根面は 189 点)、センターハウス棟に 34 点、合計 338 点とした。写真-1 に実験模型の写真を示す。

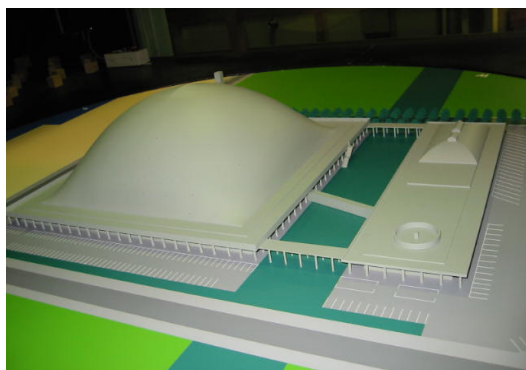


写真-1 実験模型 (表面粗度なし)
Test Model (Smooth Surface)

2.2 風洞気流

本実験では建設省告示第 1454 号に従い、地表面粗度区分 II の気流を目標として風洞気流を作成した。乱れの性状については、「建築物荷重指針・同解説」¹⁾(以下「荷重指針」と呼ぶ)の地表面粗度区分 II の気流を目標とした。実験気流の平均風速と乱れの強さの鉛直分布を図-1 に示す。平均風速の鉛直分布を表わすべき指数は目標値の 0.15 に近似している。また風速のスペクトルは、図-2 に示すように荷重指針の乱れのスケール L_u (高さ 45.0m で 122.4m)を 1/300 (本実験の模型縮尺率)としたパワースペクトルとよく対応している。

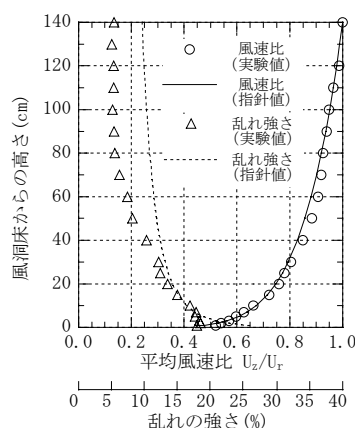


図-1 風洞気流の鉛直分布
Vertical Profiles of Wind

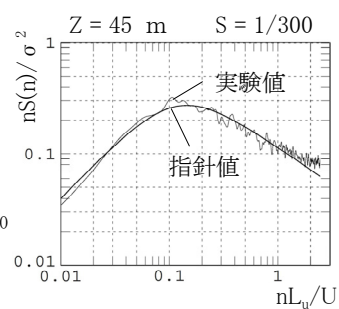


図-2 風洞気流のパワースペクトル
Power Spectra of Wind

2.3 実験条件

2.3.1 実験風向

実験風向は 10° ピッチ 36 風向に加え 45° ピッチ 4 風向の合計 40 風向とし、構造軸を基準に定義した (図-3 参照)。

2.3.2 模型表面粗度および実験風速

ドーム棟は曲面形状であり、レイノルズ数の影響を考慮する必要がある。そこで、適切な実験風速を求めるために予備実験を行った。予備実験では、ドーム棟屋根面に表面

* 1 設計本部構造グループ

粗度を設けていない実験模型（写真-1）と設けてある実験模型（写真-2）を用いて、風速を 6 段階に変化させ、ピーク外圧係数の変化を比較した。

予備実験における実験風速は 4.4m/s, 5.9m/s, 8.6m/s, 11.5m/s, 14.6m/s, 17.8m/s の 6 種類とした。ドーム部分の幅（模型：0.361m、実大：108.3m）を代表幅としてレイノルズ数を算定すると $1.1 \times 10^5 \sim 4.3 \times 10^5$ であり、実大建物におけるレイノルズ数は 3.1×10^8 である。なお、ドーム棟屋根面の表面粗度は、幅 1.0mm、厚さ 0.5mm のゴム製粘着シートにより設けた。

図-4 に風向 0 度の表面粗度なし(a)と表面粗度あり(b)の中心軸上の測定点（写真-2 の白線部分）における負側のピーク外圧係数分布を示す。横軸は模型頂部から測定点までの

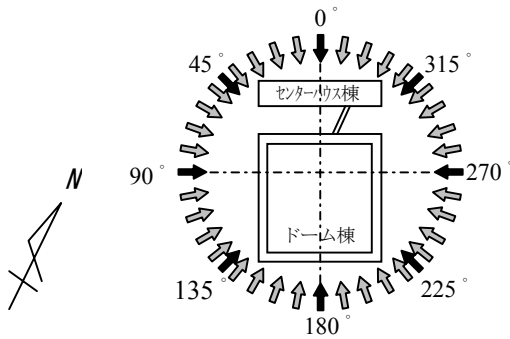


図-3 実験風向
Test Wind Athimath

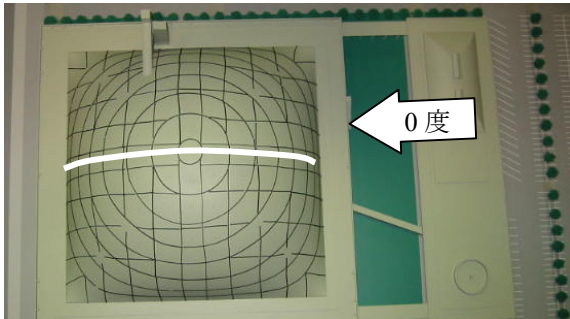


写真-2 実験模型（表面粗度あり）
Test Model (Rough Surface)

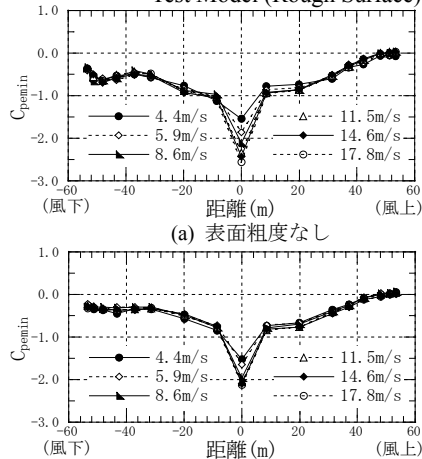


図-4 負側のピーク外圧係数（風向 0 度）
Negative Peak External Pressure Coefficient (0deg)

距離であり、-は風下側、+は風上側である。図-4(a)の表面粗度なしでは頂部に配置された測定点において、風速が速くなるにつれ負圧が大きくなる傾向が見られるが、(b)表面粗度ありでは風速が 8.6m/s 以上になるとほぼ一定値となる。

従って、本実験では表面粗度ありの模型を用い、実験風速を 12.0m/s とした。

3. 外装材用風荷重評価

3. 1 瞬間風圧の平均化時間

外装材用風荷重の算定に必要であるピーク風力係数の評価をする際の平均化時間は荷重指針の解説によれば、外圧のコ・コヒーレンスが次式で表わされる場合に、

$$r = \exp(-kfl'/U) \quad (1)$$

風圧の平均化時間は次式で表わされる。

$$T = kl'/U \quad (2)$$

ここに、 T : 平均化時間、 r : 外圧のコ・コヒーレンス、 k : decay ファクター、 f : 振動数、 l' : 2 点間の距離、 U : 平均風速。

本検討では屋根面の外圧のコ・コヒーレンスから decay ファクター k を求め、2 点間の距離 l' に外装材の寸法を代入して平均化時間を求める。図-5 にドーム屋根の X,Y 方向中心軸に沿った測定点相互間のコ・コヒーレンスを示す。プロットは実験値に、 $k=5$ 、 $k=8$ として(1)式で計算した結果を重ね書きしたものである。実験値は大きくばらつくが、 $k=5$ の計算結果の方が妥当な値となっている。従って、本検討では指針値の $k=8$ よりも安全側の $k=5$ を採用した。(2)式において、 $k=5$ 、 $l'=5.7\text{m}$ (膜材の短辺長さ)、 $U=42.5\text{m/s}$ (ドーム頂部の設計風速) とした時に平均化時間 T は 0.67 秒となる。

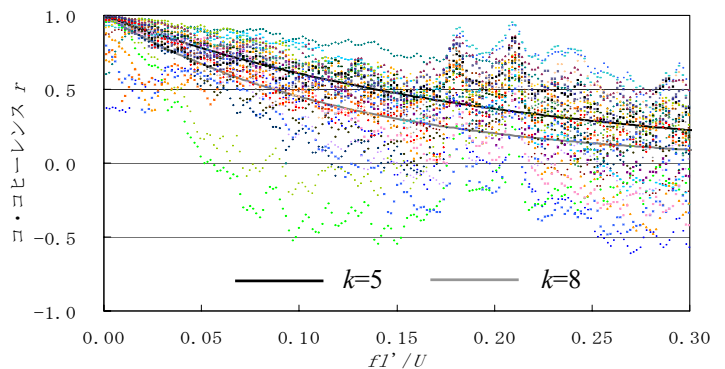


図-5 屋根の外圧のコ・コヒーレンス
Co-coherence of External Pressure

3. 2 ピーク外圧係数

前節の検討結果に従って、外装材用のピーク風力係数は、瞬間値の平均化時間を 0.67 秒、評価時間を 600 秒として計算した。一例として図-6 に風向 0 度の負側のピーク外圧係数分布を示す。

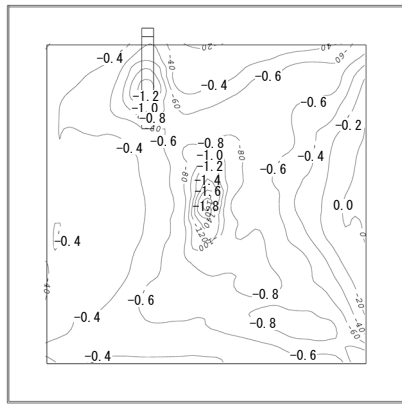


図-6 負側のピーク外圧係数分布 (風向0度)
Negative Peak External Pressure Coefficient (0deg)

円形開口の場合 $l_{ej} = (\pi a_j / 4)^{0.5}$

α : 流量係数 (=0.8)

γ : 空気の定積比熱と定圧比熱の比 (=1.403)

P_a : 大気圧 ($=1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)

$\{x(t)\}$: 各測定点における開口流速ベクトルの積分

$\{\dot{x}(t)\}$: 各測定点における開口流速ベクトル

$\{\ddot{x}(t)\}$: 各測定点における開口流速ベクトルの微分

$\{p_e(t)\}$: 風圧実験で得た開口部における外圧

$p_i(t)$: 内圧

pn : 圧力と風速の関係を表す指数 (=2)

V : 室内体積 ($=300,000 \text{ m}^3$)

ここに、 A_{ij} は $[A]$ の要素、 a_j は $\{a\}$ の要素並びに開口 j の面積である。また、 $\text{sgn}\{\dot{x}(t)\}$ は $\dot{x}(t)$ の符号を表す。

3. 3. 2 計算条件

計算条件は、データ数 32,768 個、実時間刻み 0.082sec、検討速度圧 $1,083 \text{ N/m}^2$ (検討風速: 42.5 m/s) とした。

表-1 に開口条件を示す。表中 case a は閉鎖型建物を想定した条件であり、ドーム屋根面全開口部および 1 階壁面全体に小開口 (隙間) を設けたケースである。小開口面積は、ドーム屋根面開口部については開口面積の 10^{-3} とし、1 階壁面については壁面積の 10^{-4} と仮定した。なお、対象とする開口部の面積は、参照する外圧測定点数に応じて合計面積が合うように分配する。

3. 3. 3 計算結果

各ケースの内圧計算結果について、平均値、標準偏差、最大値および最小値の風向による変化を図-8 に示す。評価時間は実時間で 10 分間とした。閉鎖型建物を想定した case a ではピーク内圧係数は $-0.11 \sim -0.03$ と変化が小さい。風向による内圧の変化が顕著であったのは case b および case c であり、ともに開口が風上側になる風向で正圧側に大きくシフトしている。case b の開口が風上側となる風向でピーク内圧係数が最大となり 0.84 であった。case c の開口が風直角方向となる風向でピーク内圧係数が最小となり -0.68 であった。以上の値はともに基準法の値を越えている。

3. 4 ピーク風力係数

3. 4. 1 ピーク風力係数の算定

外装材用風荷重算定用のピーク風力係数は、外圧係数と内圧係数の差を時刻歴として求め、その最大値および最小値を評価した。

3. 3 開口条件を考慮した内圧評価

ドーム屋根面には高さ 26.5m および 32.2m の位置に 2.0 m^2 の矩形開口が計 72 ヶ所設けられており、1 階壁面には各壁面中央に位置する扉の上部にルーバー窓 (36.0 m^2) が計画されている (図-7)。これらの開口の開閉状況に応じて変化する内圧を応答解析によって求める。

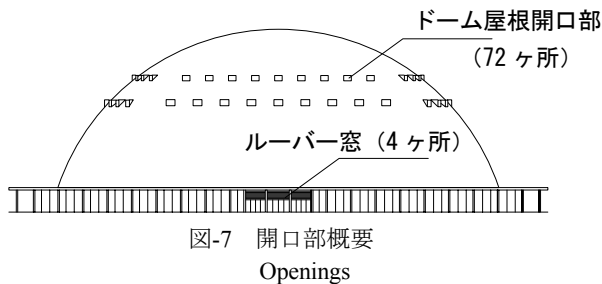


図-7 開口部概要
Openings

3. 3. 1 計算手法

開口部における空気の流れをオリフィス流れと仮定する。開口部における空気の動きを式(3)により求め、さらに式(4)で内圧を計算する^{2),3)}。外圧は対象とする開口部位置の風圧測定点における外圧係数から求めるものとする。なお、ここではドームの体積変化および温度変化はないものとする。

$$\rho \{ \ddot{x}(t) \} \{ l_e \}^4 + \rho (2 \alpha^m) \{ \text{sgn} \{ \dot{x}(t) \} | \dot{x}(t) |^m \} + \gamma p_a [A] / V \{ x(t) \} = \{ p_e(t) \} \quad (3)$$

$$p_i(t) = \gamma p_a \{ a \}^4 \{ x(t) \} / V \quad (4)$$

ただし、 ρ : 空気密度 ($=1.25 \text{ kg/m}^3$)

$[A]$: 開口面積マトリクス ($A_{ij} = a_j$)

$\{a\}$: 各測定点における開口面積ベクトル

$\{l_e\}$: 面積に対する有効長さベクトル

表-1 開口条件

Opening conditions

	case a	case b	case c	case d	case e
対象開口	壁面および屋根開口部	ルーバー窓 (北側)	ドーム屋根 (北側)	ルーバー窓 (全周)	ドーム屋根 (全周)
参照外圧測定点数	89点	3点	11点	12点	44点
外圧測定点1点 に対する開口面積 (m^2)	0.0063 (ルーバー窓・ガラス壁面) 0.0033 (ドーム屋根開口部)	12	3.2727	12	3.2727
合計開口面積 (m^2)	0.4287	36	36	144	144

3. 4. 2 外圧係数と内圧係数の関係

ピーク風力係数発生時の内圧係数 C_{pi} (実効ピーク内圧係数と呼ぶ) とピーク外圧係数 $\hat{C}_{pe}$ との関係を正側・負側それぞれについて図-9 および図-10 に示す。同図は風向 0° における実効ピーク内圧係数をドーム屋根面の全測定点についてプロットしたものである。図中には同風向における平均内圧係数および最小内圧係数 (正側ピーク風力係数発生時) または最大内圧係数 (負側ピーク風力係数発生時) も併せて示す。case a、case e では正側・負側ともに実効ピーク内圧係数は平均内圧近傍に分布しており、外圧変動と内圧変動の関連性は小さいとみられる。case b では正側の実効ピーク内圧係数はピーク外圧係数が大きいほど大きく、負側の実効ピーク内圧係数はピーク外圧係数が小さいほど大きい。これは風上面の外圧変動と内圧変動の相関が高い

ためであると考えられる。

3. 5 外装材用風荷重評価のまとめ

風圧実験で得た外圧の値を用いてドームの時刻歴内圧係数を求めた結果、開口が集中しているケースにおいて内圧の風向による変化が顕著であった。更に、ピーク外圧係数と実効ピーク内圧係数との関係を調べ、開口が風上面に集中している場合に外圧変動と内圧変動との相関が高い事が明らかとなった。

実験で得られた外圧と解析によって求めた内圧を用い、瞬間風圧の平均化時間を 0.67 秒、評価時間を 600 秒として外装材用風荷重を算定した。外装材用風荷重は、ドーム棟屋根面の頭頂部で最大値を示し、内圧を建築基準法に従った閉鎖型の建物とした場合 $-2,349\text{N/m}^2$ 、開口部やガラスの破損を考慮した場合 $-2,913\text{N/m}^2$ (閉鎖型の 1.2 倍) であった。

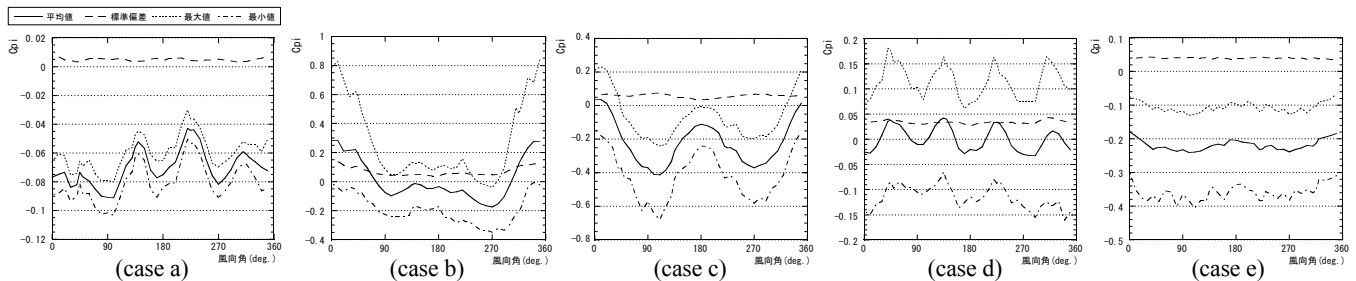


図-8 内圧係数の風向による変化

Variation of Internal Pressure Coefficient with athimath

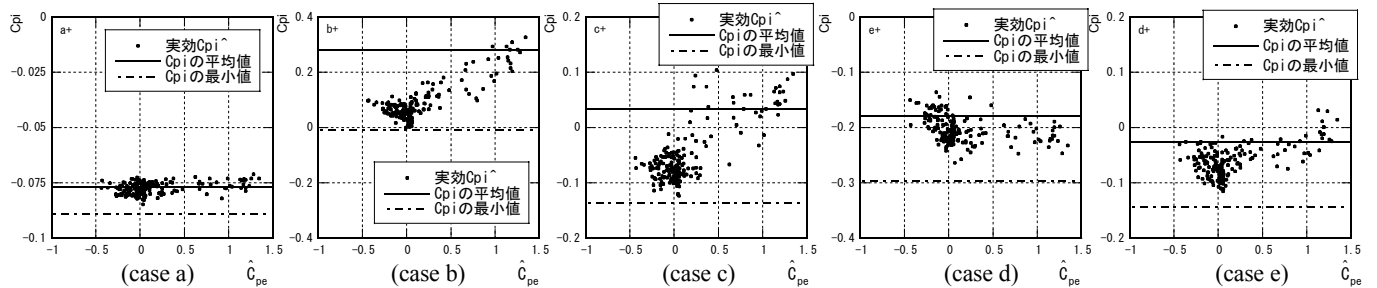


図-9 実効ピーク内圧係数 (正側ピーク風力係数発生時)

Effective Peak Internal Pressure Coefficient

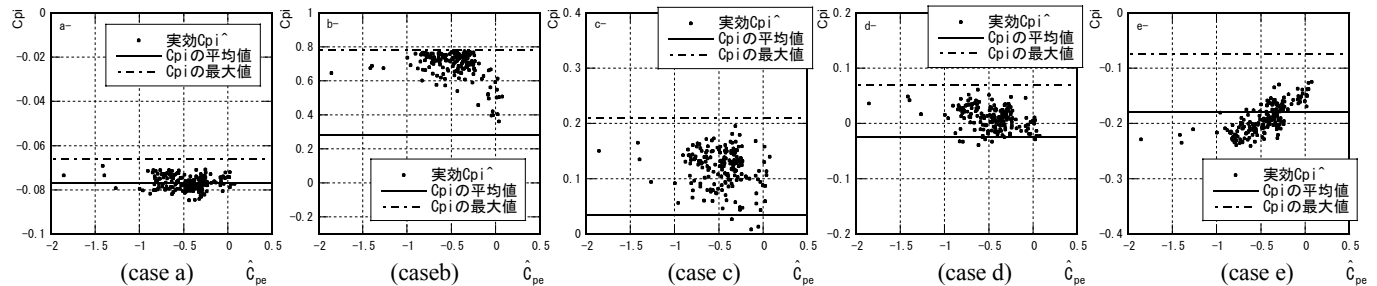


図-10 実効ピーク内圧係数 (負側ピーク風力係数発生時)

Effective Peak Internal Pressure Coefficient

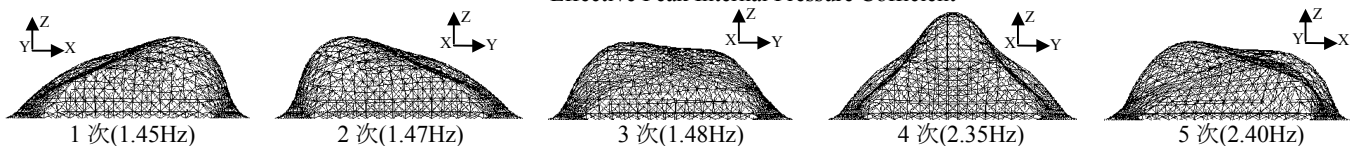


図-11 応答計算対象とした1~5次のモード

Lowest Five Mode Shapes

4. 構造骨組用風荷重評価

構造骨組用応力解析はガスト影響係数法を用いた等価静的荷重¹⁾を用いて行い、外圧と内圧の時刻歴を外力としたスペクトルモーダル法による応答解析に基づいてガスト影響係数を検討する。膜屋根もガラス壁面もレベル2風荷重に対して許容応力度設計されており、3章では建物の使用上想定される開口状態5ケースについて内圧を算定したが、本章のレベル2応答では一階壁の硝子の一部が飛散物により破損した状態を想定したケースを追加して検討した。

4. 1 スペクトルモーダル法による応答計算

本検討では等価静的荷重の採用を前提としたガスト影響係数の検討に主眼を置いていることより、スペクトルモーダル法による応答計算は、図-11 に示す1～5次のモードについて実施した。

周波数領域で計算した一般化変位を逆フーリエ変換して時刻歴を得た。各次の応答解析に用いた減衰定数は各次とも2%とし、一般化変位時刻歴は実時間の10分間評価とした。

4. 2 レベル1 応答解析結果

レベル1の風速($U_H=42.5\text{m/s}$)に対する応答解析は、4章で検討した開口状況(case a～case e)に開口無しの場合(以下、case o)を加えた6ケースの全実験風向について実施した。応答解析に用いた各変形モードの最大値が同一値で基準化されているため、各モード間の応答変位の大小関係は、一般化変位を直接比較することとした。

図-12 に各次の最大変位の絶対値が最大となった場合の一般化変位の最大値 $X_g(\text{max})$ 、ガスト影響係数 G_f 、発生したモード次数と風向の関係を示す。case o と4面に開口のあるcase a, case d では $X_g(\text{max})$ の風向による変化は小さく、 G_f の値も1.7～2.0程度で変化が小さい。一方、case b(北壁面に開口が存在する)では開口が風上となる風向 0° 近傍で $X_g(\text{max})$ は他の風向の2倍以上となる。この様に、 $X_g(\text{max})$ が大きい時は G_f は2.0程度の値となっている。また、最大の応答変位を示すモードは1次～3次がほとんどであり、低次のモードが励起されている。

表-2 に各ケースの $X_g(\text{max})$ のうち最大の値となった発生風向、 $X_g(\text{max})$ 、 G_f 、モード次数を示す。case o は $X_g(\text{max})$ が 1.8×10^{-2} 、 G_f が1.9であり、case b では $X_g(\text{max})$ は 3.7×10^{-2} とcase oの約2倍、 G_f は2.2とcase oより若干大きめの値となった。case c～e では $X_g(\text{max})$ は $1.8 \times 10^{-2} \sim 2.1 \times 10^{-2}$ 、 G_f は1.9～2.0といずれもcase oに近い値であった。

4. 3 レベル2 応答解析結果

レベル1と同様にレベル2風速($U_H=53.1\text{m/s}$)に対する応答解析結果を表-2に示す。最大変位となるモードはレベル1と同一で1次～3次がほとんどであり、最大変位もレベル1の1.6倍程度(レベル1とレベル2の基準圧比)となっているが、最大応答変位が発生する風向はレベル1と多少異なっている。レベル2応答の最大変位は、レベル1と同様に1階北面に大開口がある場合(case b)の変形が大きく $X_g(\text{max})$ で 5.7×10^{-2} 、 G_f は2.1となった。

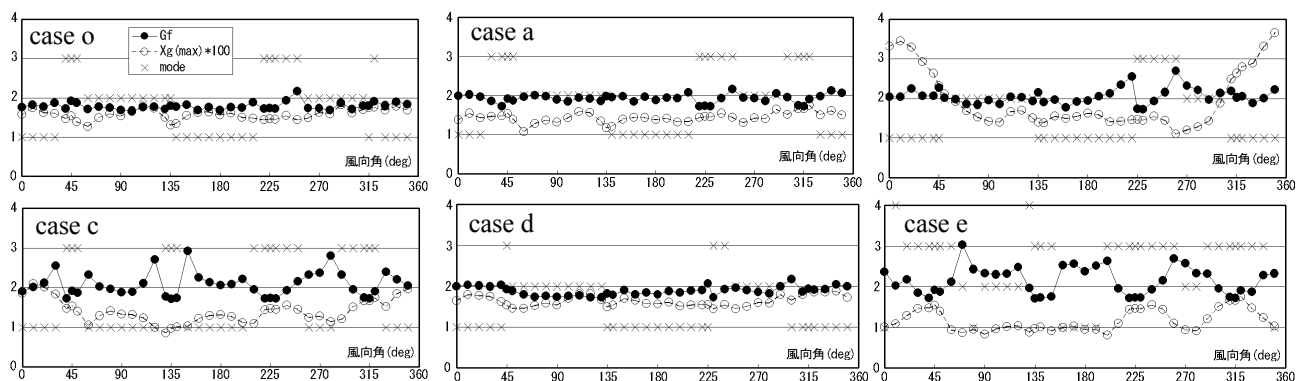


図-12 最大の応答変位となる一般化変位、ガスト影響係数、モード次数(case o,a-e)

Generalized Displacement Gust Loading Factor and Order of Mode at Maximum Displacement

表-2 開口を考慮した風応答解析結果(最大の変位となる一般化変位、ガスト影響係数、モード次数)

Results of Response Analyses

case	レベル1 応答解析				レベル2 応答解析				内圧係数Cpi				備考(開口状況)
	風向(deg)	mode	$X_g(\text{max})$ ($\times 100$)	G_f	風向(deg)	mode	$X_g(\text{max})$ ($\times 100$)	G_f	ave	s. d.	max	min	
o	290	2	1.821	1.866	290	2	2.938	1.931	0.000	0.000	0.000	0.000	内圧0
a	320	3	1.754	1.909	320	3	2.786	1.930	-0.063	0.004	-0.054	-0.071	1階壁面と屋根開口に隙間
b	350	1	3.658	2.225	10	1	5.662	2.147	0.275	0.128	0.837	-0.023	1階北面に大開口
c	10	1	2.104	2.008	10	1	3.382	2.073	0.037	0.065	0.239	-0.177	屋根北側に大開口
d	315	1	1.943	1.934	340	1	3.168	2.190	0.013	0.043	0.157	-0.131	1階4面に大開口
e	320	3	1.750	1.910	320	3	2.779	1.931	-0.200	0.037	-0.090	-0.322	屋根4方に大開口

4. 4 1階の硝子破損を想定したレベル2解析結果

本ドーム棟の様な大スパン構造物は、構造骨組用風荷重におよぼす室内圧の影響が大きく、外装材の損傷と構造骨組用風荷重の安全性を同時に考える必要がある。レベル2の風荷重検討では、一階周囲の硝子が飛来物の衝突等により破損した場合を想定し、その破損位置及び破損により生じた開口面積をパラメータとした応答解析により、硝子の破損状況が構造骨組風荷重に与える影響を検討した。検討ケースは、図-13 に示す1階北側壁面の風圧測定点 11 箇所(測定点番号 246～256)の各位置で硝子が損傷し、表-3 に示す開口面積の開口が発生する case f～case i を想定した。検討は、想定以外の開口はないものとして全発生位置及び全実験風向について応答解析を実施した。case f～case i で、最大の変位となったのは、風向 310～30° の北側壁面にほぼ正対した風向で、発生モードは一次モードであった。図-14 に想定した硝子破損位置と一般化変位およびガスト影響係数の関係を示すが、破壊位置が平面中央(250～252)に近いと $Xg(max)$ は大きくなる傾向がある。硝子4枚が破損して開口面積が大きい case h, case i の $Xg(max)$ が他のケースより大きく、一箇所でも4枚集中破壊した case h の方が多少離れた2箇所でそれぞれ2枚破壊した case i よりも $Xg(max)$ は大きく 5.4×10^{-2} (破壊場所 252) となっていた。Gf が最大となるのも case h で Gf の最大値は 2.1 (破壊場所 251) であった。

4. 5 構造骨組用風荷重評価のまとめ

レベル2応答解析で、硝子が飛来物等により破損したケースも追加して検討した結果、一階壁に大開口を有する

case b において一般化変位が最大の 5.7×10^{-2} となり、同時に正側の平均内圧係数およびガスト影響係数も最大の 0.28 および 2.1 となった。本検討に基づいたガスト影響係数を用い、応答が最大となるケースの内圧の平均値と図-15 に例を示す設計用外圧分布により、構造骨組用風荷重を等価静的荷重として評価した。

なお、本報告では北側開口のみに着目した検討ケースについて報告したが、実際の設計に際しては硝子の破損ケースを含め、全方向(東西南北)の開口条件を考慮した。

5. おわりに

外装材用風荷重の最大値は内圧を建築基準法に従った閉鎖型の建物とした場合に較べて、開口部やガラスの破損を考慮した場合には 1.2 倍となった。屋根面が負圧なので内圧が正圧の時に構造骨組用風荷重が大きくなる。風上に開口がある場合がもっとも厳しい条件であり、平均内圧係数が +0.28、この時のガスト影響係数はレベル1 応答解析で 2.2 であった。これらの検討結果を設計用風荷重としてため、ドーム棟では開口の偏在、ガラスの破損時にも耐える設計となる。

参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 1993
- 2) J.D.Holmes : Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, 5th Int. Conf. on Wind Engineering, July 1979
- 3) 茅野, 岩佐他 : 外装二重壁の外壁面に作用する風圧力, 日本建築学会構造系論文報告集第 448 号, 1993. 6

表-3 1階硝子の損傷を考慮した追加検討ケース
Additional Cases (Considering Glass Wall Break)

case	損傷位置(開口位置)	開口面積
f	任意の測定点位置に1箇所	3.6m ² (硝子1枚分)
g	任意の測定点位置に1箇所	7.2m ² (硝子2枚分)
h	任意の測定点位置に1箇所	14.4m ² (硝子4枚分)
i	任意の測定点位置と一つ隔てた測定点位置の2箇所	2箇所×7.2m ² (計硝子4枚分)

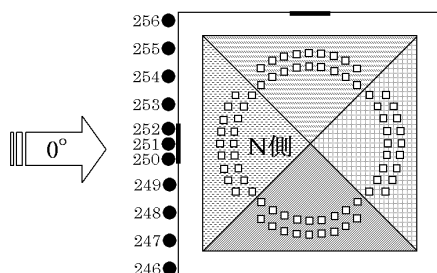


図-13 硝子の破損を想定する1階壁の計測点位置
Breaking Position of Glass Wall

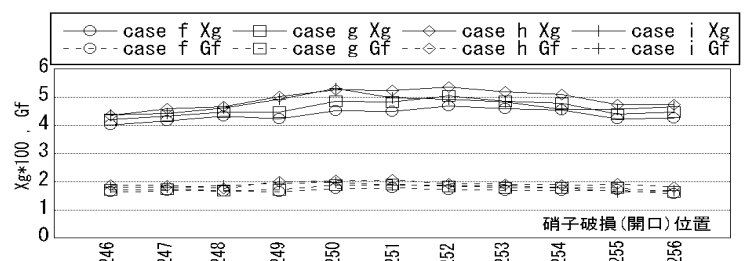


図-14 硝子の破損位置と一般化変位、ガスト影響係数の関係
Generalized Displacement and Gast Loading Factors

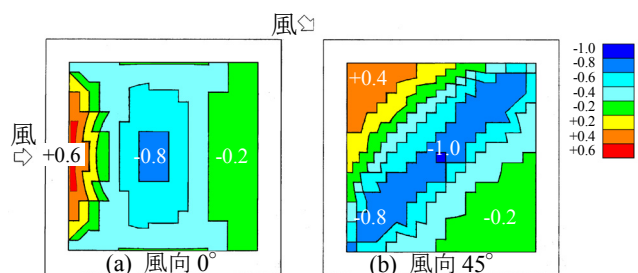


図-15 構造骨組用外圧係数
External Pressure coefficient for main Frame Design