

U.D.C 691.328.4

# 機械的固定工法による防水システムの耐風性に関する研究

## —下面からの加圧試験と風洞実験による防水システムの挙動について—

加藤 信男\* 本田 宏武\* 小見 崇之\*

**要 約：** 2004 年秋の台風襲来時に機械的固定工法による防水システムの一部にも被害が発生した。これに対して筆者等は、風洞実験あるいは宮古島での実測を実施し、強風時における機械的固定工法による防水システムの挙動についてその一部を明らかにしてきた。ここで、これまでの防水シートの破損事例を詳細に検討してみると、防水シートには従来考えられている上方に吸い上げられる力のみでなく、横に引き裂く力(水平力)が大きく作用しているように思われる。そこで本報告は、防水シートに作用する水平力を明らかにするため加圧実験と風洞実験を実施し、防水シートに作用する水平力について明らかにしたものである。実験の結果、屋根面の全体を下面から等圧で加圧した場合、防水シートには水平力が生じないが、風洞実験ではファスナー前後に圧力差が生じることにより水平力が発生し、この水平力は、吸い上げ力の約 70% と大きな力であった。

**キーワード：** 防水システム、機械的固定工法、加圧実験、風洞実験、水平力・軸力、ファスナー

**目 次：** 1. はじめに  
2. 実験方法  
3. 実験結果  
4. まとめ

### 1. はじめに

機械的固定工法による屋根防水工法は、従来の接着剤やアスファルト等を用いて屋根全面的に密着させる工法に比べて、下地の影響を受けにくいなど多くの利点を有しており、これらの利点を生かして補修工事や改修工事を中心に施工面積が急速に拡大している<sup>1)</sup>。しかしこの工法は、屋根面全体を覆う防水シートが数十 cm 間隔に設置したファスナーにより点状に固定されているだけのため、強風時に防水シートがふくれることによるシートの破断、あるいはファスナーの引抜きなど、強風による被害も発生している。このため機械的固定による防水工法の設計・施工に当たっては風に対する安全性の確保が重要な課題<sup>2)</sup>となっている。

現在、我が国における機械的固定工法防水層の耐風安全性は、JASS8 の耐風試験<sup>3)</sup>あるいは動風圧試験により、また北米では Baskaran 等が提案した風荷重を荷重サイクルとして防水システムに載荷する SIGDERS 試験法<sup>4)</sup>により検証されている。しかし、これらの耐風性試験方法はいずれも、吸引箱などによって防水シート全面を一樣な力で上方に吸い上げるか、あるいは下面から加圧して上方に押し上げる方式であり、実際の屋根面などで発生している実現象をどの程度再現しているか不明な点が多い。

また、強風時における機械的固定工法による防水システムの破損事例を見ると、写真 1 に示すように防水シートを持ち上げる力とともに、防水シート全体を横に引張る

ような水平力も働いて、ファスナーに接着固定された防水シートの周辺部が引き裂かれたような破損状態であった。

そこで本報告は、主に機械的固定工法防水層に作用する水平力を明らかにすることを目的として、防水シート下面からコンプレッサーにより加圧する加圧試験および、乱れの少ない気流を供試体に当てる風洞実験を実施し、防水シートおよび、ファスナーに加わる水平力について検討したものである。



写真 1 機械的固定工法防水システムの台風被害事例

\*環境技術開発部

## 2. 実験方法

実験は、防水シートの下面から空気を送り込んで加圧する方法(以後、加圧試験と称す)と乱れの少ない気流下における風洞実験の2種類の実験を実施した。なお、供試体は加圧試験および風洞実験ともに同じものを使用し、計測位置および計測器は加圧試験および風洞実験ともに同じである(図1)。

### 2.1 供試体および測定点

供試体は、図3、図4に示す陸屋根を想定した幅2.4m×長さ3.0m×高さ0.29mの屋根面に防水層としてポリエステル繊維補強による塩化ビニル樹脂系複合シート・一般複合タイプ(以下、塩ビシート)を用いた。シート厚さは1.5mmである。図2にダンベル1号型試験片による塩ビシートの伸び率と引張応力との関係を示す。伸び率16%付近でポリエステル繊維の破断により引張応力に変化が生じているが、伸び率4%~5%までは応力とひずみの関係はほぼ直線的に変化している。

供試体の屋根面の下地は、24mmの構造用合板を用いた。防水層の固定方法は、六分力計を設置したF1, F2では下地に100mmφの貫通孔を開け、厚さ10mmの鉄板を下地に固定し、その上に六分力計を設置した。また、六分力計を設置しない10箇所(P1~P10)では、円盤状固定金具(外径75mmφ、板厚3mm)でシートを上下から挟み込み固定する方法とした。固定金具の間隔は、実際の防水シート施工時に多く見られる縦横寸法600mmとし、供試体屋根面の縦横に合計12箇所固定した。なお、風上・風下の端は実施工と同様に塩ビ被覆した鋼板を下地に固定し、そこに防水層を熱溶着させた。

### 2.2 計測機器

計測に使用した機器を下記に示す。

- ・軸力、水平力 —— 六分力計(共和電業製: LFX-3K-A)
- ・ふくれ —— レーザ変位計(キーエンス社製: LB-300)
- ・ひずみ —— ひずみゲージ(ひずみ限界値5%)
- ・加圧力・風圧 —— 微差圧計(共和電業製: PDV-50GA)

### 2.3 加圧方法

防水シートの加圧は、図3に示すようにシートの下地に100mmφの貫通孔を開け、そこからシート裏面にコンプレッサーにより圧力を加えた。

### 2.4 風洞実験

使用した風洞は幅3m×高さ2.3mの回流式境界層風洞である。風洞実験は図4に示す通り陸屋根建築物を想定した供試体を設置した。供試体の見付面積(0.696m<sup>2</sup>)と風洞断面積(6.9m<sup>2</sup>)との比(閉塞率)は約10%で、建築センター<sup>5)</sup>の推奨する閉塞率5%以下を上回る。これらの影響を検討するため、静圧をシート裏面、大気圧(風洞隣接の大空間部屋)および、風洞内(供試体の上空1.1m)にした場合の供試体屋根上の平均風圧係数(C<sub>p</sub>)の変化を比較した。

図5に、静圧による供試体上の平均風圧係数(C<sub>p</sub>)の変化を示した。静圧を大気圧とした場合とシート裏面とした場

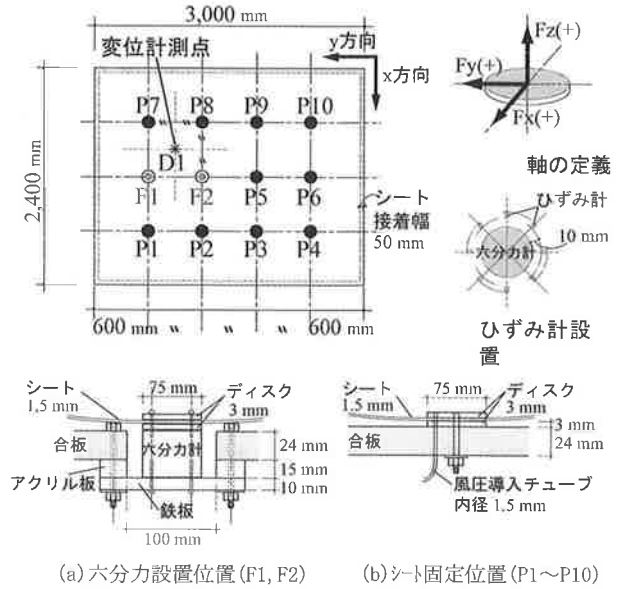


図1 供試体および計測機器の設置位置

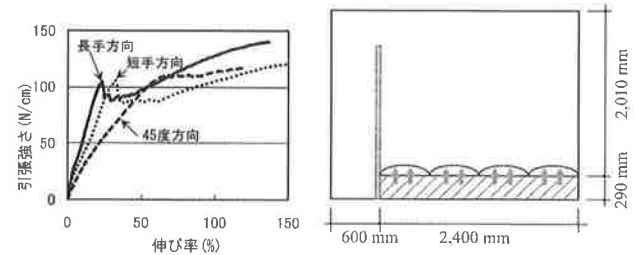


図2 塩ビシートの特性

図3 加圧試験の加圧方向

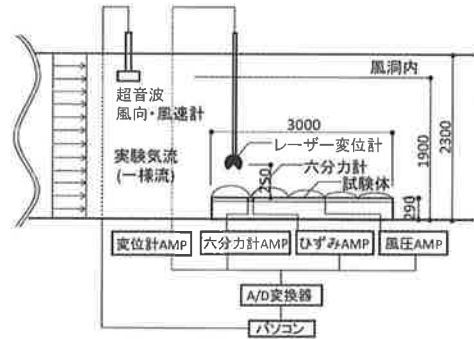


図4 風洞実験概要

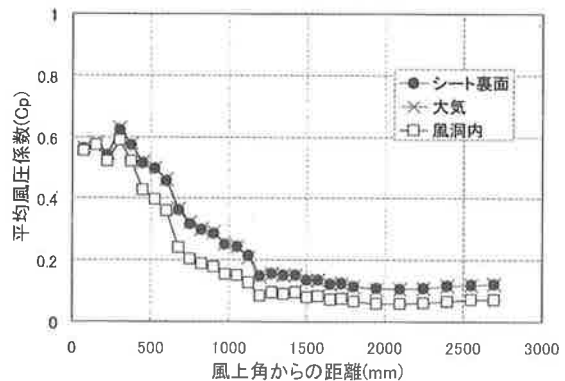


図5 静圧による平均風圧係数の変化

合の  $C_p$  の分布はほぼ同じである。しかし、静圧を風洞内とした場合の  $C_p$  の分布は風圧係数が比較的小さくなる場所(風上から 500mm 程度風下)で  $C_p$  が小さい。静圧の違いによる  $C_p$  の差は最大でも 0.1 程度と小さかった。したがって、本実験の目的はシートに加わる風力の計測であり、シートの表と裏の差圧を計測することによって防水シートに加わる風圧力が把握できるものと考え、静圧はシート裏面圧力とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 加圧実験

##### 3.1.1 ふくれ高さ

写真 2 に下面から 2000Pa の圧力で加圧した場合のシートのふくれ状況を示し、図 6 にレーザー変位計を移動させながら計測したふくれ高さの計測結果を示す。なお、図中には参考として補強繊維がない場合のふくれ高さも併せて示した。2000Pa 加圧時におけるシートのふくれ高さは、補強繊維が無い場合には 152mm、補強繊維が有る場合には約 104mm であり、繊維補強によってふくれ高さが約 66%小さくなっていた。

##### 3.1.2 水平力および軸力

図 7 に、300Pa~2000Pa に加圧した場合の測定点 F1(風上)、F2(風下)における水平力( $F_x, F_y$ )および軸力( $F_z$ )を示した。風下の F2 における  $F_z$  はシート下面からの加圧力と一致しており、ファスナーの軸力はシートへの加圧力の増加と共にほぼ直線的に増加している。しかし、風上の F1 における  $F_z$  は、風上側の固定条件が異なるため(風上側が線状の固定)シートへの加圧力の約 90%と小さかった。一方、風下側の水平力( $F_x, F_y$ )は下面からの加圧力がシート内で一定(等圧)であるため前後左右での力が均等しほぼ 0 である。

##### 3.1.3 ふくれの角度

図 8 にシートを加圧した場合のシートのふくれ角度( $\theta_s$ )を示した。なお、シートのふくれ角度は、ディスクの部分に石膏を流し固めて型をとり、後にこの固まった石膏の写真撮影し、その写真から角度を読みとった。

$\theta_s$  は下地(水平面)からの高さが高くなるほど小さくなり、平らに近づいていく。シートと下地が接する高さ 0mm では加圧力 2000Pa で  $\theta_s \approx 40$  度、4000Pa で  $\theta_s \approx 50$  度であった。

#### 3.2 風洞実験

図 9 に供試体にシートを設置しない場合の測定点(NP8)における風圧変動のパワースペクトル密度を示した。図中には建築物荷重指針(1994 年版)<sup>9)</sup>に示された屋根面における風圧変動の近似曲線も示した。NP8 における風圧変動のピークは 34Hz 付近にあり指針に示された無次元周波数とおおむね一致する。図 10 に六分力計により計測した軸力( $F_z1, F_z2$ )と同位置における風圧力( $P1, P2$ )を示す。軸力と風圧力はほぼ一致し、荷重と応力が一致する。

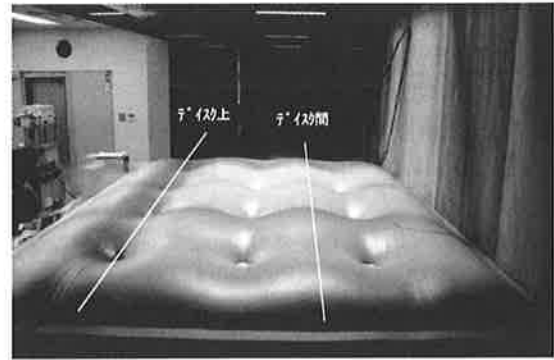


写真 2 防水シートのふくれの状況(加圧力 2000Pa)

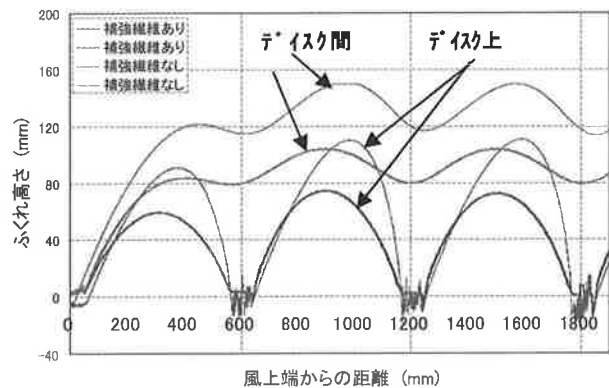


図 6 防水シートのふくれの高さ(加圧力 2000Pa)

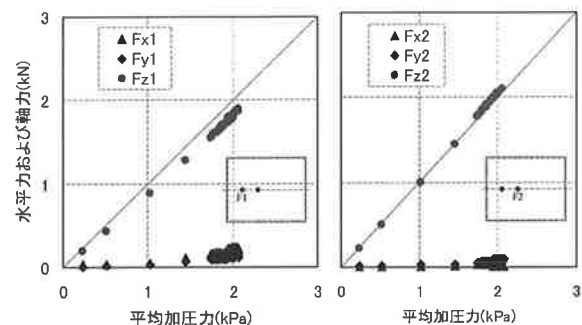


図 7 水平力および軸力の変化(加圧試験)

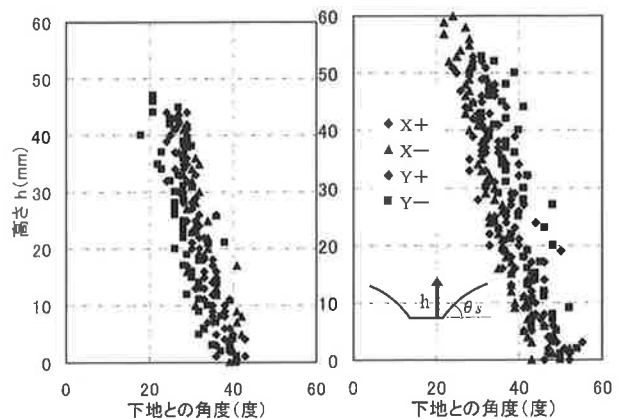


図 8 防水シートと下地との角度(加圧試験)

### 3.2.1 ファスナーの水平力および軸力

図 11 に、六分力計で計測した F1 と F2 における平均水平力( $F_x, F_y$ )と平均軸力( $F_z$ )の変化を示す。

水平力( $F_y$ )と軸力( $F_z$ )は風速とともにほぼ直線的に増加する。風速 38.6m/s における  $F_{z1}$  は 151N、 $F_{y1}$  は 104N であり、水平力は軸力の約 70%である。また、F2 においても同様であるが  $F_{z2} / F_{y2} = 0.43$  と水平力が軸力の約 40%である。図 12 に水平力( $F_x, F_y$ )と軸力( $F_z$ )の標準偏差を示す。いずれの方向においても風速が高くなると標準偏差は大きくなるが、風速 30m/s 以上になると水平力・軸力の増加率が小さくなる。風速 38.6m/s における水平力( $F_y$ )の標準偏差は 15N、軸力( $F_z$ )の標準偏差は 9N であり水平力変動が軸力変動の 1.5 倍である。

### 3.2.2 シートのふくれの状況

写真 3 に風洞内風速 38.6m/s における防水シートのふくれ状況を示す。風上側のふくらみが高く風下に向かってふくれ高さは低くなっていった。ファスナー周辺でのシートの変形角は写真に示す通りあまり大きくなかった。

図 13 に、測定点 D1 における平均ふくれ高さ標準偏差を示した。平均ふくれ高さは風速の増加に比例して高くなる。一方、ふくれ高さの標準偏差は風速が高くなるとシート張力が高くなるため標準偏差は小さくなる。

図 14 に、風速 22.1m/s と 33.1m/s 時における水平力( $F_y$ )のパワースペクトル密度を示す。剥離渦と考えられる周波数とそれ以外にもピークが存在する。これらのピーク

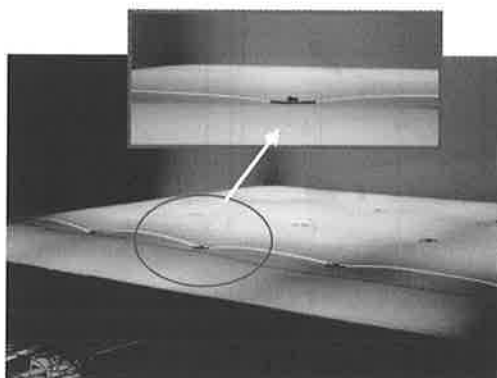


写真 3 防水シートのふくれた状況(38.6m/s)

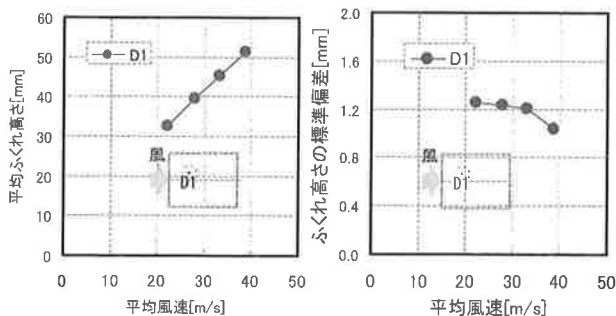


図 13 風速によるふくれ高さの変化

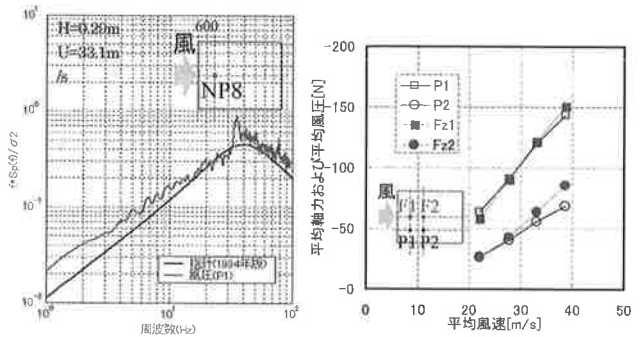


図 9 風圧変動のパワースペクトル密度

図 10 六分力計と風圧計による軸力の比較

(単位:N)								
風速	$F_{x1}$	$F_{y1}$	$F_{z1}$	$F_{x2}$	$F_{y2}$	$F_{z2}$	$F_{y1}/F_{z1}$	$F_{y2}/F_{z2}$
22.1m/s	5	58	58	0	25	26	1.00	0.96
27.8m/s	7	77	90	0	29	43	0.86	0.68
33.1m/s	8	94	122	1	34	64	0.77	0.53
38.6m/s	8	104	151	1	37	85	0.69	0.43

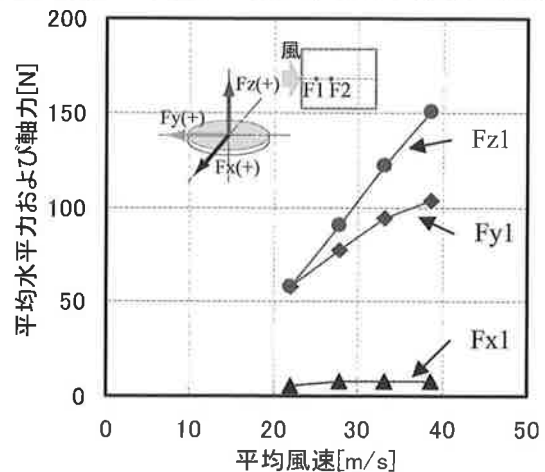


図 11 ファスナーの水平力・軸力の変化(平均)

(単位:N)								
風速	$F_{x1}$	$F_{y1}$	$F_{z1}$	$F_{x2}$	$F_{y2}$	$F_{z2}$	$F_{y1}/F_{z1}$	$F_{y2}/F_{z2}$
22.1m/s	8	10	5	10	10	4	2.09	2.49
27.8m/s	10	13	6	12	12	5	2.08	2.22
33.1m/s	12	14	8	13	12	6	1.85	1.93
38.6m/s	13	15	9	12	11	6	1.67	1.77

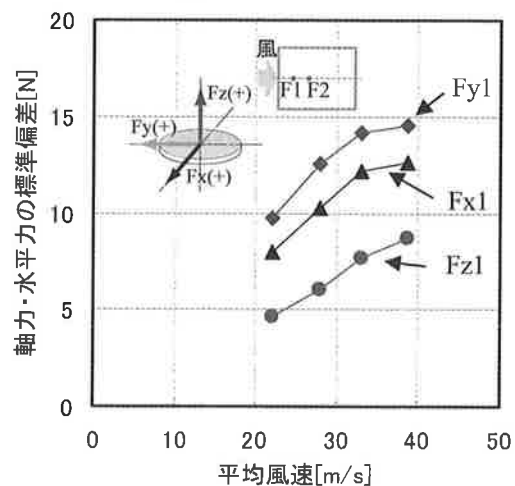


図 12 ファスナーの水平力・軸力の変化(標準偏差)

は、風速を変化させた場合に風速の増加した比率で周波数が高くなる。これらから計測されたピーク周波数は風速の変動に起因するものと考えられ、防水シートの挙動を明らかにするためには、今後詳細な検討が必要である。

#### 4. まとめ

機械的固定工法による防水システムの耐風設計用資料を得るため、実大試験体による下面からの加圧試験および風洞実験を実施した。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 下面からの加圧力 2000Pa~4000Pa で防水シートのふくらみ角度は、最大で40度~50度であった。
- 2) 防水シートの固定部に加わる水平力は、下面からシート全面に加圧した場合はほぼ0であるが、風洞実験の場合は固定部前後の風圧力が異なるため大きな水平力が発生する。その力は鉛直方向軸力の約70%とおおきなものであった。
- 3) 防水シートの固定部に加わる水平力の変動は建物による剥離渦と考えられる周波数とそれ以外にもピークが存在する。

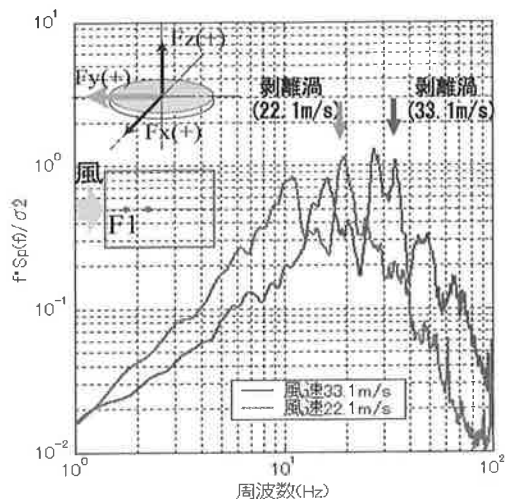


図14 水平力のパワースペクトル密度

- 4) シートの平均ふくれ高さは風速に比例して高くなるが、シートのバタツキは張力が高くなるため風速が高くなると小さくなる。

#### 謝辞

本研究は(社)日本建築学会・防水工事運営委員会・防水層機械固定工法耐風圧性評価WGの研究活動の一部として行われたものであり、委員各位には試験体作成、実験等で多大なご協力をいただきました。また合成高分子ルーフィング工業会、アスファルト防水工業会、トーチ工法ルーフィング工業会、ファスナーメーカーからは研究費の一部をご援助いただきました。心より感謝いたします。

また、実験の指導ならびに解析まで懇切丁寧にご指導いただいた東京工業大学 田中享二教授に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 江藤二男：塩ビシート防水の生産量推移と最新動向；防水ジャーナル, No. 431, pp. 39-41, 2007. 10
- 2) 第3回防水シンポジウム資料集(部分固定式防水工法の実態調査結果と風洞実験結果の報告), 日本建築学会, 2005. 7
- 3) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 8 防水工事：耐風試験
- 4) Baskaran B. A. ・Ko. S. K. P. : A Guide for the Wind Design of Mechanically Attached Flexible Membrane Roofs, Construction Innovation, Volume 10, Number 4, NRC-IRC, 2005. 12
- 5) 日本建築センター：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック 2008年, 2008. 10
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, 1994版
- 7) Baskaran, B. A.: "Which is the weakest link? Wind performance of mechanically attached systems," Proceedings of the RCI 21st International Convention (Phoenix, Arizona, 3/23/2006), pp. 29-39, 2006. 3
- 8) Baskaran, B. A.: "Newsbrief - SIGDERS project, Phase IV" Construction Innovation, 10, (4), December, pp. 5, 2005. 12
- 9) Lei. W ・ Baskaran, B. A. : "SIGDERS Wind Uplift Resistance Data on Mechanically Attached Single Ply Roofing Systems - Effect of vapour/Air Barrier" , Research Report IRC-RR -823 National Research Council, Canada, 2001
- 10) Baskaran, B. A. ・Chen, Y. and Vilaipornasawai, U. : A New Dynamic Wind Load Cycle to Evaluate Flexible Membrane Roofs" , ASTM Journal of Testing and Evaluation, 27 (4), pp. 249-265, 1999
- 11) 古市圭・植松康他2名：機械固定式防水システムの動風圧評価法に関する研究, 風工学シンポジウム, 2006
- 12) 市川裕一・バルトコ ミハエル他4名：機械固定工法による防水層の挙動の風洞試験による観察；日本建築学会構造系論文集, 第593号, pp. 17-24, 2005. 7
- 13) 市川裕一・加藤信男他3名：機械的固定工法による各種防水層の風洞実験；日本建築学会構造系論文集, 第615号, pp. 47-52, 2007. 5
- 14) 宮内博之・加藤信男他3名：屋外環境下での風による機械的固定工法防水層の挙動の実測；日本建築学会構造系論文集, 第610号, pp. 29-34, 2006. 12
- 15) H. Miyauchi ・ N. Kato ・ H. Ichikawa ・ T. Sasaki and K. Tanaka: Behavior of a mechanically anchored waterproofing membrane exposed to elevated in-service wind speeds, International conference on building envelopes systems and technology '07, pp. 133-142 (2007)

- 16) Lacy, R.E. :Climate and Building in Britain, B. R. E. Report, 1977
- 17) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2004. 9
- 18) 宮内博之・加藤信男・田中享二: 機械的に固定された防水層の簡易的耐風性試験の提案; 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp. 7-8, 2008

BEHAVIOR OF THE MECHANICALLY ANCHORED WATERPROOFING MEMBRANE DURING  
A STRONG WIND  
-CHARACTERISTIC DIFFERENCE OF MECHANICALLY ANCHORED WATERPROOFING  
MEMBRANE SYSTEM IN PRESSURE TEST AND WIND TUNNEL TEST-

N. Kato, H. Honda, and T. Komi

The pressure test and the wind tunnel test were carried out to obtain basic data for wind resistance design method of a mechanically anchored waterproofing membrane system. The test specimen was flat roof with dimensions; 2.4m-wide, 3.0m-length and 0.29m-height. The waterproofing material was polyester fiber-reinforced PVC sheet and 1.5 mm in thickness. As results, the higher the wind speed, the higher the billowing height of PVC sheet. However, the fluctuating billowing height of PVC sheet is small. Vertical force at fastener was 151N at mean wind speed of 38.6m/s (913Pa) in wind tunnel test and pressure test. Horizontal force at fastener was approximately 0Pa when PVC sheet was pressed under the sheet in pressure test. However, when the wind pressure was different at windward and leeward side in wind tunnel test, horizontal force at the fastener occurred. Namely, when mean wind speed was 38.6m/s (913Pa), the average horizontal force was 104N and the standard deviation of its force was 15N. Therefore, it was clear that characteristic of mechanically anchored waterproofing membrane system in pressure test and wind tunnel test was different.