

機械的固定工法による各種防水層の風洞実験

加藤 信男* 市川 裕一** 本田 宏武***

要 約： 2004 年秋の台風襲来時に、機械的固定工法防水層の一部にも被害が発生した。筆者等はこれらに対して実大の防水層試験体を作製し、大型風洞実験および実際の 9 階建の建物に塩化ビニール防水樹脂シートを設置し強風下での防水層の挙動解明を実施した。本報は力学的性質の異なる 3 種類の防水材料を選定し、それらを用いた防水層機械的固定工法の風洞実験を行い、強風時の防水層の挙動がどのように異なるかについて考察したものである。

実験の結果、防水層のふくれ高さはモジュラスの大小に依存し、モジュラスが大きいアスファルトに比べて、モジュラスが小さい加硫ゴムおよび塩化ビニールの方が大きかった。また、防水シートがふくれ始める風速は単位面積質量に依存し、単位面積質量の大きいアスファルトに比べて単位面積質量の小さい加硫ゴムおよび塩化ビニールは低い風速でも防水層がふくれた。今後防水層の耐風設計を行うにあたって防水シートの力学的性質を十分把握することが重要であることが解かった。

キーワード： 防水層、機械的固定工法、風洞実験、防水シート、ひずみ、周波数

| | | |
|-------------|-----------------|---------|
| 目 次： | 1. はじめに | 4. 実験結果 |
| | 2. 既往の研究 | 5. まとめ |
| | 3. 実大試験体による風洞実験 | 6. おわりに |

1. はじめに

2004 年秋にわが国に襲来した台風は、防水層にかつてないほど多くの被害をもたらした。特に防水層機械的固定工法は、従来の接着や密着による固定工法とは異なり、防水層は数十センチメートル間隔に設置されたファスナーで、下地に固定されているだけのため、強風に耐え切れなくなったものも散見された(写真 1)。

その原因の一つとして、強風下での防水層の挙動が明らかでないまま、静的風荷重を参考として耐風設計を実施していたことも考えられ、筆者等は前報^{1,2)}において、現在わが国で最も多く施工されている塩化ビニール樹脂シートを用いた工法について検討した。しかし、機械的防水層固定工法には種々の防水層が使用されているため、防水層の動的挙動は防水材料の力学的性質の影響を大きく受けると想定される。

本研究ではその観点から、力学的性質の異なる防水材料を選定し、それらを用いた防水層機械的固定工法の風洞実験を行い、強風時の防水層の挙動がどのように異なるかについて考察したものである。

2. 既往の研究

各種防水層に対する耐風性については、ほとんどが吸引箱方式の強風状態を模擬した試験により評価がなされており、研究例³⁻⁶⁾も多い。しかし、この方式は簡便ではあるが、風が吹いている状態での挙動を再現してい

るものではないため、風洞を用いた強風時での研究が求められている。この観点から Baskaran 等⁷⁾により、いくつかの防水層の風洞実験による研究事例がある。しかしこの研究では、防水層面に作用する風荷重の大きさ、変動、周期、荷重分布など風外力は検討されているが、防水層の変形やファスナーに作用する力は不明なままであり、特に耐風設計に不可欠な防水層の性質との関係は明らかにされていない。実寸法の防水層を用いた風洞実験は、非常に大掛かりであり、これに関する他の研究事例は筆者等の知る範囲ではほとんどない。



写真 1 機械的固定工法による防水層の台風被害例

3. 実大試験体による風洞実験

3.1 防水層の種類と基本物性

試験体には、力学的性質の異なる3種類の防水層を選定し、積層アスファルト防水層（補強タイプブルーフィング2層張り、絶縁工法）、EPDM加硫ゴムシート（補強複合タイプ）防水層、塩化ビニル樹脂シート（一般複合タイプ）防水層を用いた。これら防水層から、長さ200mm、幅50mmの引張試験用試験片を、長手方向、幅方向、斜め45°方向について、各々3本ずつ切り出した。試験体形状を図1に、また引張試験状況を写真2に示す。これら試験片の両端には、引張り試験時のチャック切れ防止のため、50mm角の木製添え板を取り付けた。従って有効試験体長さは100mmとなる。これら試験片を20℃の温度環境下で、100mm/分の速度で引張り、引張強さと伸び率を測定した。

防水層の引張試験結果を図2に示す。防水層の引張強さは、試験体が防水シートの積層、もしくは補強材等の挿入という構成のものであるため、単位幅あたりの引張強さで示してある。その挙動の特徴は、まず補強材等が破断し、その後防水材料部分が伸び、最終的に破断するという過程を経た。ただし、斜め45°方向で採取した試験片では、補強材は織りの形状だけが変形するため、初期の伸びの段階で顕著な引張力のピークは見られなかった。

防水層の強風時の伸び率は、前報¹⁾での実測によると1%以下であった。すなわち、強風時の挙動に直接関与するのは、これら引張試験結果の伸び率のうち、初期領域での力学的性質であると思われる。そのため、引張り試験結果より1%モジュラス（1%変形時の引張強さ）を求め、表1に示した。また強風時の防水層の挙動には、その質量も関係すると思われるため、参考として単位面積あたりの質量も示してある。

1%モジュラスについては、基本的には長手、幅方向とも、積層アスファルト防水層がもっとも高く、EPDM加

硫ゴム、塩化ビニル樹脂シートの順であった。但し、斜め45°方向についてはEPDM加硫ゴムシートの強度が極端に低下し、シートはこの方向に非常に変形しやすい特性を示した。

また単位面積質量については、積層アスファルト防水層が、平均厚さ5.3mmと厚く、そのため質量は最も大きかった。EPDM加硫ゴムシートと塩化ビニル樹脂シートは平均厚さが1.5mmであり、両者ともアスファルト防水層の質量の3分の1以下であった。

3.2 測定項目および測定条件

試験体の設置方法、風洞実験の方法については、前報¹⁾に詳述しているため、ここではその概要のみを記述する。

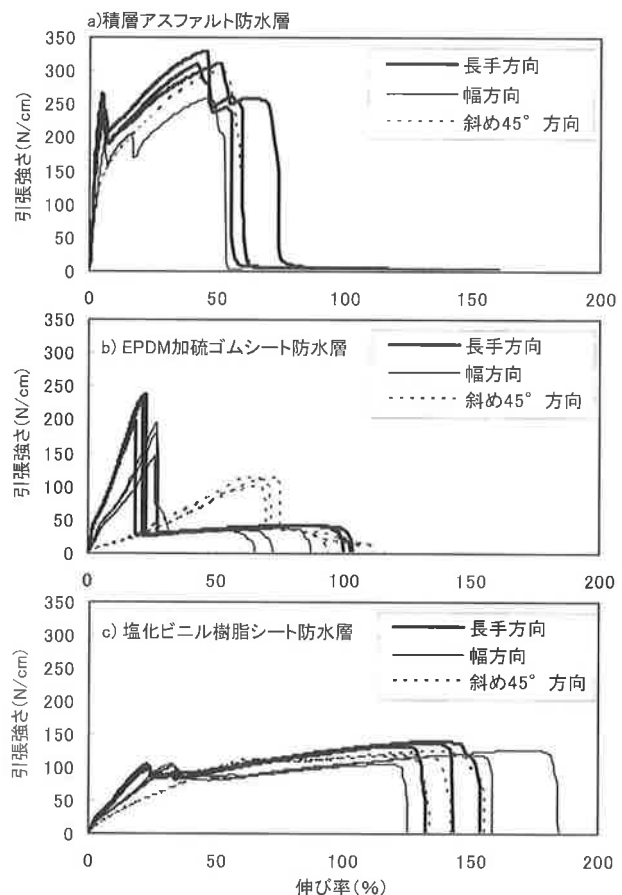


図2 防水層の引張試験結果

表1 防水層の種類と基本物性

| 防水層の種類 | 厚さ (mm) | 単位面積質量 (g/m ²) | 1%モジュラス(N/cm) | | |
|------------------------------|------------|-------------------------------|---------------|------|-------|
| | | | 長手 | 幅 | 斜め45° |
| 積層アスファルト (補強タイプブルーフィング2層) | 5.3 | 6113 | 73.7 | 37.6 | 39.3 |
| EPDM加硫ゴムシート (補強複合タイプ) | 1.5 | 1661 | 19.0 | 7.7 | 2.5 |
| 塩化ビニル樹脂シート (一般複合タイプ) | 1.5 | 1921 | 7.3 | 6.6 | 3.6 |

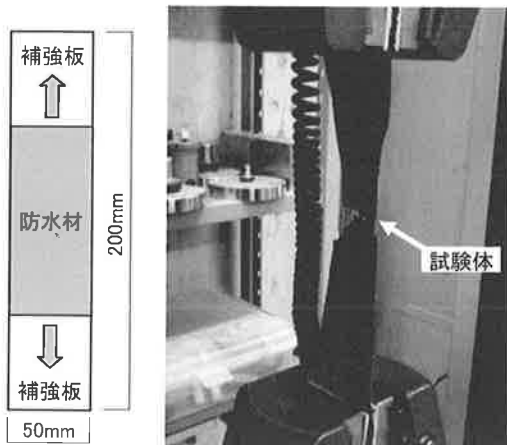


図1 引張試験片 写真2 引張試験状況

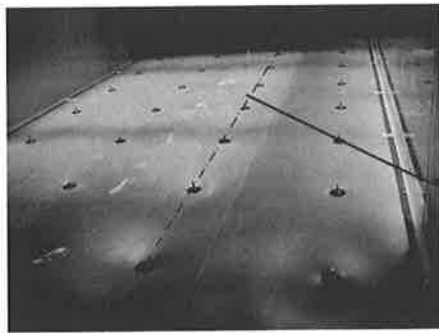


写真3 防水シートのふくれの状況

3.2.1 実験気流および試験体

実験気流は試験体の風上に障害物を全く置かない状態（一様流）で実施した。試験体は陸屋根建築物の屋根面を想定し（幅 2,380mm、長さ 5,500mm、高さ 500mm）前述した物性の異なる実防水層を外径 75φmm、板厚 1.7mm の円盤状の金物（ディスク）を介し、32組（ファスナー間隔 600mm：ただし、風上端のみ風方向間隔 500mm）のM12のボルトとナットで下地に固定した。

3.2.2 防水層に作用する風圧力および変形

防水シートに加わる風圧力は、シート表面と裏面（シートと下地との隙間）の差圧を測定した。風圧力の測定点は、風上から風下に向かって直線上に14点に設けた。

防水層の変形は、各防水シート裏面に貼り付けたひずみゲージ（室温におけるひずみ限界値：5%）により測定した。実験前後の風洞内の温度は15℃前後であったが、実験中の風洞内の温度測定は行っていない。

3.2.3 ファスナーに作用する荷重

防水層を固定するファスナーに生じる力を、ロードセル（定格容量：9.8kN、非直線性：0.025%以内）を用いて測定した。ファスナーの設置位置については、試験体側面の拘束の影響を受けない中央部付近に設置した。

3.2.4 データ収録

各計測点からのデータについて、サンプリング周波数は200Hz、データ個数は12000個（8192個）、測定時間は60秒（40.96秒）とした。なお、カッコ内はチェーピング補正を実施した後の値である。

4. 実験結果

4.1 風による防水層の挙動の観測結果

写真3に防水シートのふくれの状況を示し、図6に風速30m/s前後における試験体中央部のファスナー線上のふくれ形状を示す。なお、図6ではふくれ高さを長さ方向に対して5倍に誇張して示している。

いずれの防水層も、風に吸い上げられ見かけ上ふくらんだ形態をとるが、下地に一定間隔で固定されているため、写真3のように分節されたふくれとなる。ふくれ始める風速は、アスファルト>塩化ビニル樹脂>加硫ゴムの

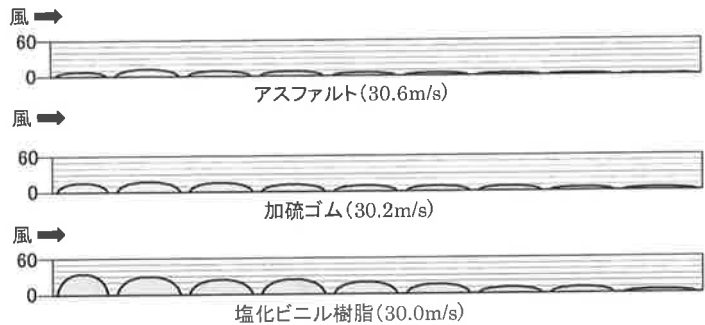


図3 各防水シートの風速30m/s前後でのふくれ状況

順に高くなった。塩化ビニルと加硫ゴムについては、最も風圧力を受ける風上側で風速10m/sを超える付近から、また最も重いアスファルトでも、風速20m/s程度になるとそのふくれが肉眼でも認識できた。ふくれの高さは各防水シートとも風上のふくれが大きくなる傾向を示し、塩化ビニル樹脂>加硫ゴム>アスファルトの順となり、モジュラスの小さい材料ほどふくれやすい。また、ファスナー線上でのふくれの形状は風速が高くなると円弧状から徐々にかまぼこ形にその形状を変えていった。各防水層のバタツキは、いずれも風上側で早く、風下ほど遅くなる傾向が見られた。

4.2 各防水層に作用する風圧分布

風洞内気流33m/sの条件下における各種防水層に作用する平均風圧力の分布を図4に示し、変動風圧力の分布を図

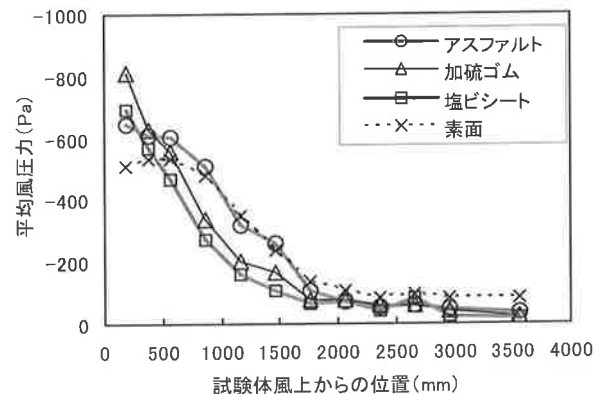


図4 防水層に作用する平均風圧力の分布(風速33m/s)

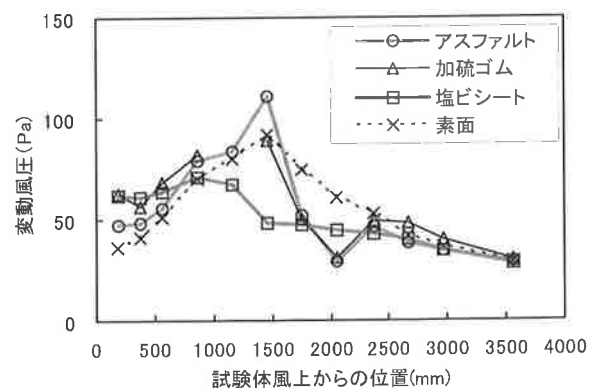


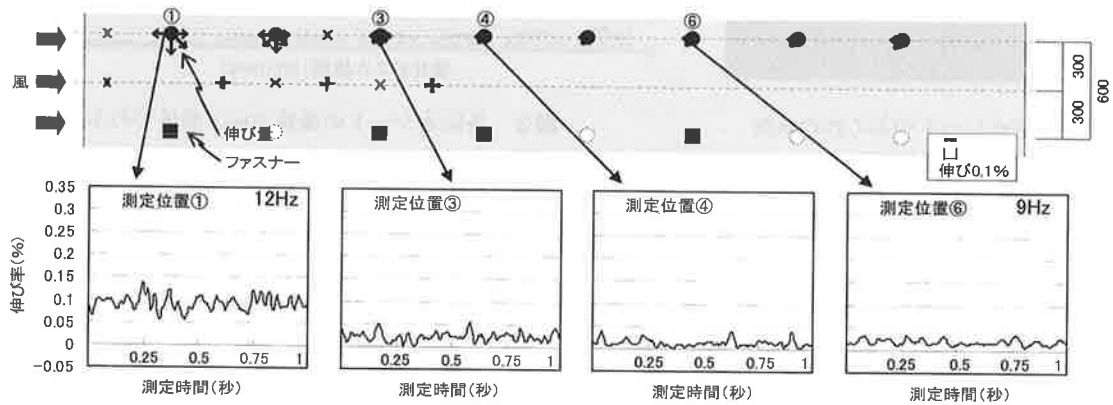
図5 防水層に作用する変動風圧力の分布(風速33m/s)

5に示す。なお、図中には防水層を設置しない場合（素面）も合わせて示した。

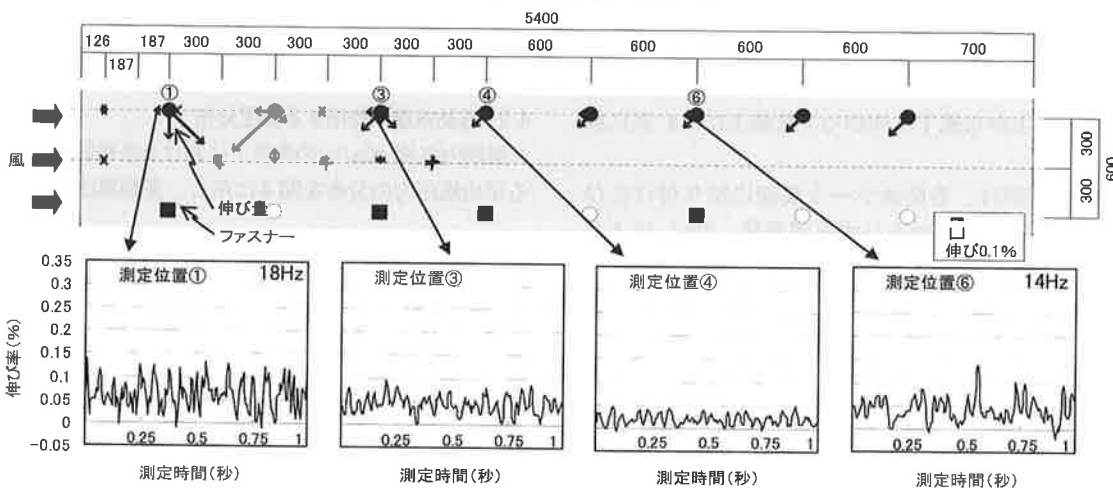
アスファルトはふくれが小さくほぼ平らな面であるため、素面に似た風圧分布となった。一方、加硫ゴム、塩化ビニルは防水層のふくれやバタツキにより屋根面の形状が凹凸に変化するため、風上端部で素面より大きな負圧を生じた

のち、風下で急激に小さくなった。

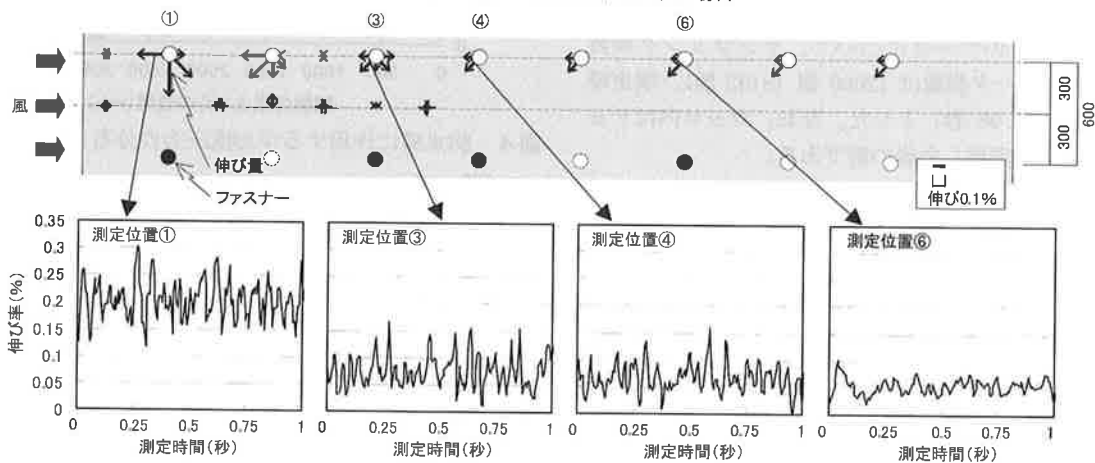
また、風圧力の変動は、屋根面の形状変化により風上から 1500mm 前後の位置で防水層のない場合（素面）と異なる分布を示した。特に、塩化ビニルの変動風圧は風上より 1500mm 付近で素面よりかなり小さい値を示した。



(a) アスファルト防水(風速33m/s)の場合



(b) 加硫ゴム(風速33.0m/s)の場合



(c) 塩化ビニル樹脂(風速33m/s)の場合

図6 風速 33m/s 前後での各防水シートのふくれ状況

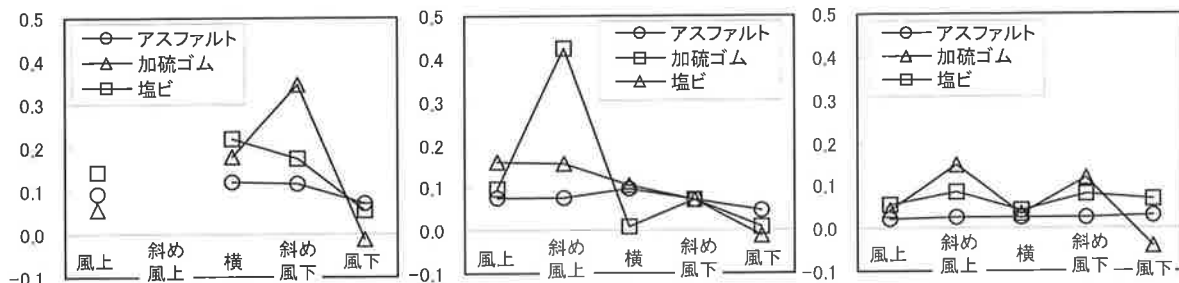


図7 各防水シートファスナーからの方向によるひずみの変化

4.3 各防水層の変形と挙動

風速 33m/s 前後における各防水層表面の平均ひずみの分布とひずみの変化を図6に示す。図中の矢印は、ひずみゲージを貼り付けた方向の平均伸び量を、矢印の長さで示したものである。また、図中にはひずみ量の時間変化を見るため、風上方向に貼付した1秒間のひずみ量変化を示した。

4.3.1 全体的な傾向

各防水シートひずみの測定結果は、平均風圧の分布と同じ傾向を示し、風上端部で大きく風下に向かってしだいに小さくなっている。これらは、目視観察によるシートふくれと同様の結果である。また、いずれの防水層もファスナーのディスク板近傍付近のひずみに比べて、4点のファスナーで囲まれたシート中央部付近のひずみが小さい。

4.3.2 モジュラスによる膨れの変化

風速 33m/s の条件下では、平均最大伸びは加硫ゴムが 0.43%、アスファルトが 0.12%を示し、瞬間的には加硫ゴムで 0.74%、アスファルトが 0.23%、の最大伸びが、いずれも風上から 1m 程度風下に位置する 2 列目のファスナー近傍において斜め 45° 方向で測定された。この方向の防水層のひずみが大きくなる理由は、表1に示すようにいずれの防水層も斜め 45° 方向のモジュラスが小さいため伸びやすいことによる。図7に示すように、各方向のモジュラスの差が大きい加硫ゴムでは、ひずみの大きさがパイアス>幅>長手の順となり、モジュラスと反比例の傾向を示すのに対し、各方向によるモジュラスがほぼ均等な塩化ビニル樹脂では、ひずみの変化はほとんどないことから明らかである。

また防水層の伸び、変動、及び周期は防水層の材料によって異なり、アスファルトはゆっくり小さく揺らぎ、一方加硫ゴムと塩化ビニル樹脂は早い周期で大きく上下動を繰り返す。

4.4 風速および風圧力とファスナー軸力との関係

各防水シートにおける風速とファスナーの軸力との関係を図8に示す。防水シートを固定するファスナーに作用する引張力は、風速が高くなるとともに大きくなり、風速 30m/s (速度圧=551Pa) における引張力は塩化ビニル樹脂とアスファルトが約 130N でほぼ同じ値を示したが、加硫ゴ

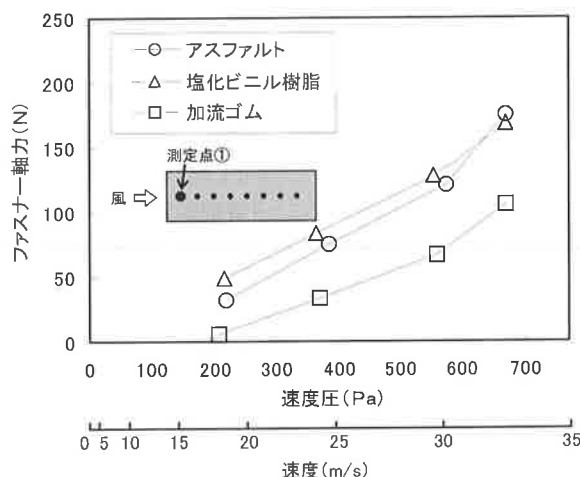


図8 各防水シートの風速とファスナー軸力との関係

る引張力は異なる。

5. まとめ

力学特性の異なる3種類の防水層を対象に、強風時における防水層の挙動を風洞実験により検討した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 各防水シートとも、強風下においては防水層が負圧により吸い上げられ、ふくれた状態となる。この負圧により防水層には引張伸びが生じ、それを支持するファスナーには引張力が生じる。
- (2) 各防水シートとも、ふくれの高さは風上が大きく風下に行くほど小さくなる。
- (3) ふくれの高さはモジュラスが大きいアスファルトに比べて、モジュラスが小さい加硫ゴムおよび塩化ビニルの方が大きい。
- (4) 防水シートがふくれ始める風速は単位面積質量に依存し、単位面積質量の大きいアスファルトに比べて単位面積質量の小さい加硫ゴムおよび塩化ビニルは低い風速でも防水層がふくれる。
- (5) 防水シートのふくれの形状は均一ではなく、モジュラスが小さい方向での伸びが大きい。本実験に用いた防水材料では加硫ゴムの斜め 45° のパイアス方向のひずみが大きかった。

(6) 防水シートのバタツキは、いずれの防水層も風上の測定位置で 10 数 Hz~20Hz 弱程度であったものが、風下では 10 数 Hz と周期が長くなっていく。また、その周期は防水層の材料によって異なり、アスファルトはゆっくり小さく揺らぎ、加硫ゴムと塩化ビニ

ル樹脂は早い周期で大きく上下動を繰り返す。

(7) ファスナーに作用する軸力は、防水シートに伸びが発生するため全風圧力がファスナーに伝達していない。特に、柔らかい材質の加硫ゴムは、アスファルトや塩化ビニルよりファスナーの軸力が小さかった。

6. おわりに

力学特性の異なる防水材料を用いて風洞実験を実施し、防水材料の違いによる防水シートのひずみあるいはファスナーに加わる引張力の定性的な性状の一端を明らかにできたと考える。今後も風洞実験あるいは実測を継続しその挙動について定量的な検討を行い、機械的固定工法防水層の耐風安全設計のための資料を蓄積して行きたいと考える。

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 ALC 機械固定工法 WG の研究活動の一部であり、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、東京工業大学・応用セラミック研究所の田中享二教授には本実測の全体の指導・結果のまとめなど、また宮内博之助手には風洞実験の実施、さらにデータ解析から論文作成までご指導頂きましたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 市川裕一、パルトコ 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、17-24、2005.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) Baskaran, B. A. : "Newsbrief - SIGDERS project, Phase IV," Construction Innovation, 10, (4), December, pp. 5, 2005.12
- 5) Lei. W and 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
- 6) Baskaran, B. A. : "Newsbrief - SIGDERS project, Phase IV," Construction Innovation, 10, (4), December, pp. 5, 2005.12
- 7) 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報告集、第 610 号、pp. 29-34、2006.12
- 8) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2004.9

WIND TUNNEL TESTS OF VARIOUS MECHANICALLY ANCHORED WATERPROOFING MEMBRANES

N. Kato, H. Ichikawa and H. Honda

For designing a safer mechanically anchored waterproofing membrane system against typhoons, the type and mechanical property of waterproofing membranes are the critical factors of the system. In this study, the wind tunnel test with various mechanically anchored waterproofing membranes was carried out to gain an understanding of the behavior of waterproofing membranes and its relation to wind parameters against high wind speed. Four types of full-scale size waterproofing membranes were exposed to high wind speed. All membranes were lifted up by negative pressure of wind and tensile force induced in a fastener. The billowing condition of waterproofing membranes depended on their modulus and the strain was greater at the bias direction of fastener. The modulus of waterproofing membrane exerted an influence upon the frequency and fluttering patterns.