強風下における機械的固定工法による防水層の挙動の風洞実験による観察

BEHAVIOR OF MECHANICALLY ANCHORED WATERPROOFING MEMBRANE
EXPOSED TO HIGH WIND SPEED OF WIND TUNNEL

市川 裕一*, バルトコ ミハエル**, 加藤 信男*, 宮内 博之***

佐々木 孝基*, 田中 享二****

*Hirokazu ICHIKAWA, Michal BARTKO, Nobuo KATOU,
Hiroyuki MIYAUCHI, Takanori SASAKI and Kyoji TANAKA*

A waterproofing membrane is partially fixed to a substrate by fasteners in mechanically anchored systems. For designing a safer anchored waterproofing system against typhoons, it is needed to make clear the behavior of it under strong wind. Two kinds of full size specimens with a parapet and without one were exposed to high wind speed of a wind tunnel. The behavior of the system was investigated from the three aspects such as wind forces to a membrane, deformation of a membrane and tensile forces of fasteners induced by high wind. Strong wind force was observed in the area close to the windward edge for the roof without a parapet and about 1m on the leeward from a parapet for the roof with a parapet. The membrane was lifted up by wind to about 60mm in maximum height and was extended to about 0.6% in maximum elongation and it oscillated about 5-20Hz in periodic time. The tensile force of more than 160N was observed in some fasteners, depending on the location in the roof.

Keywords: Mechanically anchored waterproofing system, Wind resistance, Wind tunnel test, Fastener, Parapet

防水層機械固定工法、耐風性、風洞試験、固定金物、パラペット

1. はじめに

従来の防水層は原則として下地に全面的に密着させているため、下地のひび割れや、ムーブメント、水分等による影響を受け不具合が生じることがあった。その解決法の一つとして、防水層をファスナー類で点状に機械的に固定させる工法が開発され、乾式工法による施工速度の早さ、ALC板や金属板などの不安定な下地へも施工可能なこと、既存防水層を撤去することなくその上に新規防水層を施工できるという補修作業利便性などにより、近年急速にその利用が拡大している。

しかし、機械的固定工法では一定間隔に設置されたファスナー等の局所的な支持点だけで、強風に耐えなければならない。現在、建築基準法などにに基づき屋根面での風圧力を求め、充分安全となるようにファスナー等の種類や数等が決定されているが、まだ経験の浅い工法のため、すべての技術的課題が解決されているとは言い難い状況にある。

このような状況の中、2004年秋に台風18号、22号と、最大瞬間風速50m/sを越える暴風雨がわが国を連続して襲来し、強風のために防水層も被害を受けた。その中に機械的固定工法による防水層も数多く含まれており(写真1)、ファスナーの抜けや破損以外にも、機械的固定部分からの防水層の引き裂きや、固定のためのディスク

からの防水層剥離等、防水層側にも原因のある損傷も被害事例として多く見られた。

これらは、強風時の風圧力に対して安全なファスナーの数を計算により求め、それに従って施工すれば良いといった単純なプロセスだけでは、安全な防水層を作り上げるためには不十分であり、ファスナーおよび防水層を全体としてとらえた機械的固定工法による防水システムとしての耐風性の評価、それを踏まえての設計、施工が必要であることを示唆するものであった。

写真1 台風によって防水シートが吸い上げられ
ファスナー周辺部が破損した例

* 東急建設技術本部

** 東京工業大学 大学院生・理修

*** 東京工業大学建築物理研究センター 助手・博士(工学)

**** 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Engineering Div., Tokyu Construction Co., Ltd.

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Sc.

Res. Assoc., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

既往の防水層の耐風性評価研究のほとんどは、防水層の上に箱をかぶせ、内部を陰圧にすることにより模擬的に風による防水層吸い上げ状態を再現し、それにより評価をしようとする吸引箱方式によるものであり、その研究例は多い¹⁻⁴⁾。この方式で大まかな防水層の耐風性能の評価はできるが、実際の風による防水層の動的挙動を基とした評価はできず、現実には即した検討のためには、風の流れている状態での防水層の挙動の観測が必要である。

実断面をもつ防水層試験体を用いての風洞による研究は、Baskaran 等⁵⁻⁷⁾によって、防水層面に作用する風荷重の大きさ、変動、周期、分布など外力としての風は明らかにされたが、防水層の変形やファスナーに作用する力など防水システム全体としての挙動は不明である。

本研究の最終目標は、風に対して安全な防水層システム設計法の構築にあるが、本報では第一段階として、実断面をもつ試験体での機械的固定工法による防水システムの強風時の挙動、特にここでは、強風時に防水層の受ける風荷重、防水層の変形やひずみ、ファスナーに生じる力を風洞試験により明らかにしようとするものである。

2. 実大試験体による風洞実験

2.1 試験体

(1) 概要

試験体は、図1に示す陸屋根建築物を想定した幅2,380mm、長さ5,500mm、高さ500mmの屋根面に実防水層を施工したものをを用いた。

機械的固定工法では、図2に示すように下地にファスナーで固定したディスクを防水層と接着し、一体化させる方法が一般的であるが、本研究では防水層の着脱を可能とするため接着せずに、防水層をファスナーの代わりに32組(ファスナー間隔600mm:ただし、風上端のみ風方向間隔500mm)のボルトとナットで下地に固定した。

また、パラペットの有無による防水層の影響を検討するため、高さ150mmのパラペットを風上端部に設置した。

なお、実際の防水層下地は、本工法のような露出防水では水はけをよくするため1/20～1/50の勾配が設けられているが、本実験では便宜上水平とした。

図1 試験体・パラペット高さ150mmの場合
(※パラペットなしの場合については、前面合板を撤去)

(2) 使用材料

下地には厚さ100mmのALC板を用い、防水層には図3の特性を示す厚さ1.5mmの塩化ビニル樹脂シート複合タイプを使用した。ファスナーにはM12のボルトおよびナットを用い、ディスクは外径75mmφ、板厚1.7mmの円盤状の金物の中心にM12のボルトを貫通させるため15mmφに孔を広げ使用した。なお、風上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ている。

(3) 下地の通気条件

防水下地であるALC板の間は、実施工では短辺方向は突きつけであるが、長辺方向の隙間にはモルタルが充填されている。本試験体ではALC板間の隙間、および試験体周辺の防水層固定用の鋼材とALC板との隙間にウレタン系シーリング材を充填し、粘着テープを張った。またALC板の固定は、実施工と同様にALC板表面に座掘り穴を施し、固定ボルト頭部を板表面より下げ専用補修材で埋めた。試験体と風洞内の壁面・床面との隙間、パラペット用パネルの接合部についてもバックアップ材、粘着テープを用い隙間を塞いでいる。下地の通気条件(下地となるALC板を貫通する隙間)となる、測定のため下地を貫通させた部分を表1に示す。

表1 下地の通気条件

下地貫通材		孔径 (mm)	数量 (箇所)
ファスナー用ボルト (ロードセル含む)	M12	19φ	36
風圧チューブ管	外径 8mmφ	12φ	14
ひずみゲージ用配線	3mmφ 3本	8φ	12

図2 ファスナーによる防水層の機械固定工法の例
(断熱材なし、ファスナー先付け工法の例)

図3 塩化ビニルシートの応力-歪曲線
(各々5本の平均値)

図4 風洞実験方法

2.2 測定項目および測定条件

(1) 風洞装置

試験に用いた風洞は、断面が高さ 2.3m、幅 2.4m の回流式境界層風洞であり、試験体の風上には障害物を全く置かない状態で（一様流）試験を実施した。今回の風洞試験の閉塞率（＝試験体の風上見付面積/風洞断面積×100）は、パラペットなしが 21.7%、パラペット高さ 150mm が 28.3%である。

(2) 防水層に作用する力

防水シートに作用する風圧力は、図 4 に示すとおり、防水シートの表面と裏面（シートと下地との隙間）の圧力をビニールチューブ管を用いてそれぞれ風圧計（ZOC/23）に導き、その差圧を測定したものである。

シート表面圧は、図 5 に示すシート表面に接着したアルミ管（内径 4mmφ）にビニールチューブ管（内径 6mmφ：長さ 6～10m）をつないで測定したものである。

なお、アルミ管およびビニールチューブ管はシートとともに自由に動くようになっている。風圧力の測定点は、風上から風下に向かって 14 点、直線上に設けた。その測定位置を図 6 に示す。基本的には荷重測定用ファスナー近傍での測定を行った。

風洞内風速の計測は、試験体中央の上部（屋根面から高さ 900mm の位置）に設置したピトー管により測定したものである。

表 2 に示すように、風速を段階的に上げていき、風洞試験装置の最大風速まで測定した。風洞内の試験状況を写真 2 に示す。

写真2 試験体状況（パラペット高さ150mmの場合）

表 2 試験体に与えた風速

パラペット	風速 (m/s)
なし	18.7 → 24.4 → 30.0 → 35.3
あり (高さ 150mm)	21.5 → 28.6 → 35.2

図6 各種測定位置詳細図（番号は風上からのファスナー位置を示す。）

図7 ファスナー部荷重測定用ロードセルの詳細図(断面図)

(3) 防水層の変形

防水層の変形は、塩化ビニル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。

ひずみゲージの配置を同様に図6に示す、ファスナーの近傍およびそれらの中間点に貼り付けた。

なお、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。

(4) 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。これを図7に示すように、下地板に取り付けられたL型アングルにロードセルを取り付け、下地に15mmの孔を開け、固定用ボルト(12φmm)を通して防水層を固定した。これら荷重状態測定用ファスナーの設置位置については、図6に示す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。

(5) 測定条件

各項目の測定条件を以下に示す。

- ・サンプリング周波数 : 200Hz
- ・データ個数 : 12000 個
- ・測定時間 : 60 秒

ただし、測定風圧のチュービング補正を行うと、データ個数は

図11 試験体中心線上に設置したリボンの流れ状況(パラペットありの場合)

8192(測定時間にして40.96秒)となる。

3. 試験結果及び考察

今回の風洞実験における試験結果について、最大風速であった35m/sの場合を例に述べる。

3.1 風による防水層の挙動の目視及びビデオによる観測結果

防水層の挙動は、目視による観察とビデオ撮影により把握した。風の作用により防水層は吸い上げられ、見かけ上ふくらんだような形態をとる。ただし防水層は600mmピッチで下地に固定されているため、写真3に見られるように分節されたふくれが生じる。

また、風速が大きくなるに従いふくれ高さも大きくなっていく。図8、図9に風速35m/sにおける中央部のファスナー線上部、及び試験体の中心線(ファスナー線の中間)に沿って大まかなふくれ形状を示す。なお、この図ではふくれ高さを長さ方向の5倍に誇張して示している。

(1) パラペットなしの場合

風上の防水層のふくれ高さが最も高く、風下にゆくに従って低くなる。またふくれは拡大・縮小を繰り返すが、風上では早い周期で小さくバタツキが生じるが、下流になるにゆっくり揺らぐ現象が見られた。

また、風向きを観察するために、防水シート中央部にリボンを貼り

写真3 防水シートのふくれ状況

図 12 風圧力 (パラペットなし)

図 13 風圧力 (パラペットあり)

付けた。図 10 にパラペットなしの場合のリボンの流れの結果を示す。風上先端では風向と同じ向きにリボンが向いたが、風上先端から 500mm に位置するファスナー部では前後にリボンが流されていた。それ以降の下流側では風向きと同じ方向にリボンが流れた。

(2) パラペットありの場合

風上から 3 番目のふくれ高さが最も高く、一番風上の部分のふくれはそれほど高くない。またこの場合も風下になるほどふくれ高さは低くなる傾向は、パラペットなしと同じである。また、ふくれのバタツキについては、風上ではバタツキはあまり生じずふくれたままであるが、中央付近より揺れが生じ、下流になるに従い徐々に防水シートのバタツキが大きくなる傾向が見られた。

図 11 にパラペット有りの場合に観察されたリボンの流れを示す。パラペット上部では風向きと同じ方向にリボンが流れた。防水シート上部では、風上から 5 番目のファスナー（先端から 2900mm に位置）を境にリボンの流れる方向が変化した。これより前方では、風向きと反対方向にリボンが流れ、後方では風向きと同じ方向にリ

ボンが流れた。

3.2 屋根面での風圧分布

パラペットありなしによる風洞内気流 35m/s 時の防水層に作用する各計測点毎に測定した風圧力（シート表面と裏面との差圧）の平均値を図 12、図 13 に示す。

(1) パラペットなしの場合

風上端部の計測点で風圧力・811Pa の大きな吸い上げ力が発生し、端部から 1400mm の計測点まで急勾配で小さくなり、1400mm 以降の計測点では・50Pa 近傍の小さな値を示すという風圧力分布が観察された。

(2) パラペットありの場合

パラペットがあると風圧力分布は大きく変わる。パラペットの存在の影響で風上端より 900mm の位置で最大値となり、パラペット際から風下側 1400mm の計測点までは約・500Pa とほぼ一定の吸い上げ力を発生するが、そこから 3500mm の計測点まで緩やかな勾配で減少し、3500mm の計測点では約・100Pa となった。

図 14 防水シートの平均伸びの分布と伸びの変化 (パラペットなし)

図 15 防水シートの平均伸びの分布と伸びの変化 (パラペットあり、高さ 150mm)

3.3 防水層の変形

パラペットありなしによる風速 35m/s 時の防水層表面の伸びの状態を、それぞれ図 14、図 15 に示す。伸びはひずみゲージの添付した方向で測定されるため、その方向の伸びの測定時間 60 秒間での平均値を矢印の長さで示している。またファスナー傍に添付したひずみゲージについては、風上から風下に向って位置による違いを調べるため、図 14、図 15 に 4 点における 1 秒間の挙動の測定例を示した。

(1) パラペットなしの場合

防水層はどの部分も引張伸びが観測されており、それは風上端部で大きく、それが風下に向かうに従って小さくなる傾向が見られる。伸びの大きくなる部分は、ふくれの頂部に向って風向きと直角方向のファスナー側であり、平均最大伸びは 0.28%、なお瞬間的には最大 0.47% の伸びが観測された。

伸びはかなり変動しており、風速 35m/s の場合で周期は風上の測定位置では 20Hz 程度、風下では 10Hz 以下に減少する傾向が見ら

れている。これはふくれのバタツキが風下になるほどゆっくりとなっているという観察結果を裏付けるものである。

(2) パラペットありの場合

防水層の大きく伸ばされる部分は、パラペットから 1m 程度風下の 2,3 列目のファスナー近傍であり、その平均最大伸びは 0.38% であり、瞬間的には 0.55% の伸びが観測された。また防水層の大きく伸ばされている領域は風上から 2m 程度までにおよび、かなり広範囲にわたりふくれの生じていることが示されている。

従来、建物の端部の外周屋根面を風圧力の高くなる範囲として、防水層の耐風設計が行われてきたが、パラペットの存在により風圧力の高くなる領域がさらに中央部まで拡大する傾向が認められることから、今後はパラペットの高さによる影響と、より広範囲にわたる領域での耐風性に対する研究や配慮が必要である。

バタツキは、パラペットなしに比べてゆっくりとしており、周波数も測定位置③までは 20Hz 弱であった。ただそれより風下のパラペットから 3500mm の位置ではさらに低下した。

図 16 ファスナーに加わる引張力 (パラペットなしの場合)

図 17 ファスナーに加わる引張力 (パラペット高さ 150mm の場合)

図18 速度圧と風圧力、シート伸び、ファスナー作用力との関係
(パラペットなし、測定点①および③)

3.4 ファスナーに作用する力

ファスナーに作用する力を、その下側に配置したロードセルにより測定した。60秒間測定した結果の平均値を図16、図17に示す。

(1) パラペットなしの場合

ファスナーには引張力が生じており、それは風上のファスナーで大きく、風下に向かって減少する。これは風上で大きな負圧の風圧力が生じるためであり、風下では負圧が小さいため、ファスナーに生じる引張力は低下する。

(2) パラペットありの場合

この場合は、引張力の大きくなるファスナーが、最も風上の位置ではなく1700mmの位置に設置したものであった。これは負圧力がパラペットから1m近傍で高くなっていることと符号する。図12の風圧力の分布から判断して、1100mm位置のファスナーの引張力が最も高いものと推定されるが、ここではその位置での測定はなされていない。

3.5 風速による影響

これまで、今回計測した最大風速35m/sの場合の測定結果を中心に述べてきたが、ここでは今回実施した他の風速での測定結果との比較により、風速による影響について報告する。

パラペットありなしそれぞれにおいて、風速を変えてもリボンの流れる向き、つまりシート面上を流れる風向きは変わらず、シート面上を流れる風の方向が反転する位置は一定であった。

図18、図19は、それぞれパラペットありなしの場合について、風圧力の大きかった測定点①および③における各風速毎の測定結果を、横軸に速度圧、縦軸に風圧力、シート伸び、ファスナーに作用する力(引張力)を本実験での最大風速である35m/sの結果を1とした場合の比で示した一例である。この図から、各測定点において、速度圧と、風圧力、シート伸び、ファスナー作用力が比例関係にあることがわかる。

今回の風洞実験の結果、風速35m/sまでの一様な風が流れる条件において、速度圧と、風圧力、シートの引張り伸び、ファスナーに作用する力はおおの比例関係にある。

図19 速度圧と風圧力、シート伸び、ファスナー作用力との関係
(パラペットあり:高さ150mm、測定点①および③)

4. 結論

強風時の防水層の挙動に関して行われた、本報の結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 強風のもとでは、防水層が負圧により吸い上げられふくれ状態となる。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) パラペットのない場合、風圧力は風上端部で大きく、風下に向い漸減する。そのためふくれの大きさ、防水層の伸び、ファスナーに生じる引張力も風上端部で大きく、風下で低下する。
- (3) パラペットの存在の影響は大きく、パラペットがある場合は、その際より風下に離れた領域で風圧力が高くなり、それに伴いふくれの大きさ、防水層の伸び、ファスナーの引張力も風上端部より屋根中央部に寄った風下位置で大きくなる。
従来、屋根外周部を風圧力が高くなる範囲として、防水層は耐風設計されていたが、パラペットの存在により影響範囲がより広範囲に及ぶ。
- (4) 防水層に生じる伸びはファスナー近傍で大きい、ふくれのサイズと関連しており、大きなふくれでは大きく伸張している。またそのバタツキの周期は数Hzから20Hz程度であり、風上に比べ風下が遅くなる。防水層のバタツキについては、かなりの変動が見られる。
- (5) パラペットある場合もない場合も、それぞれ防水シート面上を流れる風の方向は一定で、風速によってシート面上の風の向きは変わらない。また、風速35m/sまでの一様な風が流れる条件において、速度圧と、風圧力、シート引張り伸び、ファスナーへ作用する力はおおの比例関係にある。

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、日本ヒルティ(株)、JPF ワークス(株)、サンコーテクノ(株)、峰岸(株)

からは研究費の一部をご援助をいただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) Gerhardt, H. J., Gerbatsch, R. W.: Wind resistance of mechanically attached, single-ply systems fastener load, safety considerations and optimal fastener patterns, Third international symposium on roofing technology, Rosemont, pp. 276-283, 1991
- 2) E. M. Paulsen: Dynamic Loading Test for Mechanically Attached Roofing Systems, Proceedings of the 8th congress of the International Impermeability Association, pp.: 431-443, May 1992
- 3) Malpezzi, J. A., Gillenwater, R. J.: Static vs. dynamic: a wind uplift testing study, 10th conference on roofing technology, Maryland, pp. 123-129, 1993
- 4) F. Granne, F. Bjork: Wind Load Resistance Test of Heat-welded Joints Between

Roofing Felt and Sheet Metal Flashings, Proceedings of the 11th International Waterproofing Association Congress, Florence, pp.: 13-22, 2000

- 5) Baskaran, A., Chen, Y.: Wind Load Cycle Development for Evaluating Mechanically attached Single-ply Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp.: 83-96, 1998
- 6) Baskaran, A., Chen, Y., Lei, W.: Wind Load Resistance of Modified Bituminous Roofing Systems, Construction and Building Materials, pp.: 471-480, 1998
- 7) Baskaran, A., Chen, Y., Vilaipornasawai, U.: A New Dynamic Wind Load Cycle to Evaluate Mechanically Attached Flexible Membrane Roofs, Journal of Testing and Evaluation, pp.249-265, 1999
- 8) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2004

(2004年12月10日原稿受理, 2005年4月14日採用決定)