

屋外での風による機械的固定工法防水層の挙動の実測

加藤 信男* 市川 裕一** 佐々木孝基*

要約：2004年秋に最大瞬間風速 50m/s を越える暴風雨が連続してわが国に襲来し、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前報で報告したように実大の防水層試験体を作製し、大型風洞実験により強風下での防水層の挙動解明の作業に着手した。しかし、風洞実験は一定環境下の一定風速下でしか実験ができないという制約のため、成果は限定的なものに留まった。そこで、本報は実際の機械的固定工法防水層の挙動を調べるため、実際の10階建の建物屋上に防水層を設置しその挙動を観測した。

実測の結果、防水層は、中心部より風上側のシートが左右および風向とは反対方向に揺らぐ動きをしていた。防水シートの揺らぎが生じている方向では大きなひずみが発生しており、ファスナーには軸力に加えて大きな水平力(せん断力)が作用しているものと推察される。風速と防水シートのひずみとの関係はほぼ直線的であり、今後防水層の耐風設計を行うにあたってこれらの関係を活用しうる可能性があると考えられた。

キーワード：防水層、機械的固定工法、風、実測、防水シート、ひずみ、周波数

- 目次**：1. はじめに
2. 実測概要
3. 実測結果
4. まとめ
5. おわりに

1. はじめに

機械的固定による防水層施工は、ファスナー等により防水層を下地に直接固定するため、従来の接着剤やアスファルト等を用いて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という特徴を持っている。そのため、既存防水層の種類や状態をそれほど考慮する必要がなく、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。既存建築物の膨大なストックを適切に維持・管理することに関心が高まりつつある時代の中で、この工法のもつ利点はますます重要となると思われる。しかしこの工法では防水シートと下地との固定を、数十 cm 間隔に設置したファスナーにだけ依存しているため、防水シートのバタツキによる強度低下など、強風時の安全性にかねてより懸念されるものであった。

この懸念が現実化したのは、2004年秋、台風18号、22号の時であった。最大瞬間風速 50m/s を越える暴風雨が連続してわが国に襲来した。そしてこの工法による防水層の一部にも被害が発生した。被害発生原因は、通常屋根材とは異なり、比較的柔らかくしかも粘弾性的性質をもつ屋根被覆材、強風下での挙動について十分に明らかにされていなかったことも理由の一つである。

筆者等はこれらに対して前報¹⁻²⁾で、実大の防水層試験体を作製し、大型風洞実験により強風下での防水層の挙動解明の作業に着手した。しかし、一定環境下の一定風速下でしか実験ができないという制約のため、成果は限定的な

ものに留まった。例えば、防水層は図1に示すように、強風下で上方に持ち上げられ円弧状に変形し、防水シートには引張り力(図2)、ファスナーには軸力とせん断力(図3)が作用するが、風洞試験中はその形状が持続しているだけであり、実際の屋上で見られるような防水層変形の伝播のような情報は得られない。あるいは突然風が吹き始めた時、どの程度の速度で防水層は変形するのかといった変形速度の情報は得られない。さらには防水層が高分子材料であるため、温度によりその力学的特性は変化するが、それに対応する形でデータが得られない等、強風に対して安

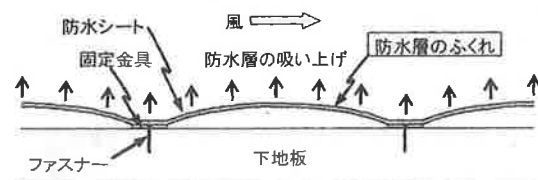


図1 風の吸い上げ力による防水層のふくれ状態

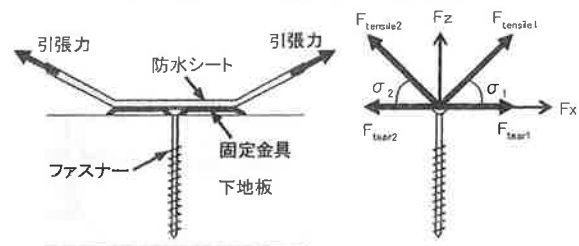


図2 防水層に生じる力

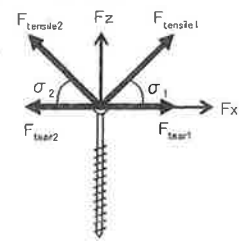


図3 ファスナーに生じる力

全な防水層を作り上げてゆくための基礎データ取得という観点からは不満足な点も多く残った。

これらを背景に現状を踏まえ、屋外環境下での実測が不可欠と考えられ、本研究では実際の建物の屋上を用いて、実際の風を利用して防水層の挙動を調べた。特にダイナミックな風の動きに対して、どのように防水層やファスナーが応答するのかを明らかにすることを目的とした。

なお、風に対する実防水層の挙動に関する既往の研究について、Baskaran 等^{3,7)}は風洞試験により検討しているが、屋外試験環境下での防水層の挙動の実測は全く行われていないのが現状である。

2. 実測概要

2.1 屋外環境の概要

実測場所は、横浜市緑区長津田町の東京工業大学すずかけ台キャンパス 10 階建て屋上（地上高さ 44m）である。周辺は、写真 1 に示すように 2 階建て程度の民家が密集する中に 5~10 階の建物が点在する地域で建築物荷重指針 2004 年版⁸⁾（以後、荷重指針と称す）に示された粗度区分Ⅲの地域に相当する。また、実測場所の近傍は図 4 に示す通り、南南東方向の建物（地上高さ 78m、測定場所からの距離約 100m）以外は、風の流れを妨げる建物のない立地条件である。

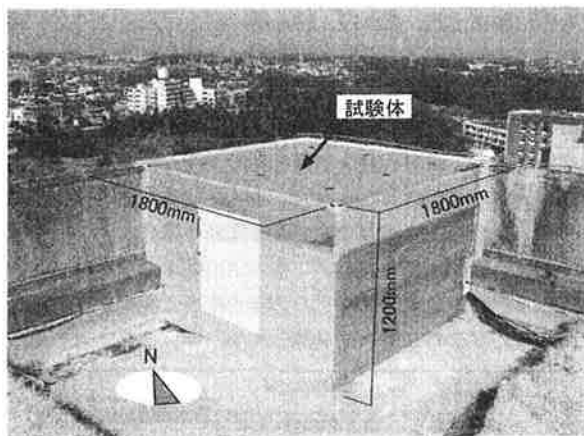


写真 2 試験体概要

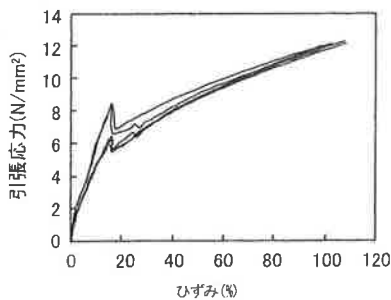


図 5 塩化ビニルシートの応力-ひずみ曲線（長手方向）

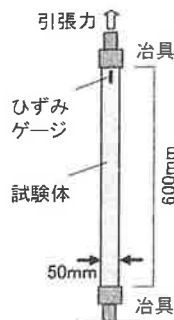


図 6 試験体

2.2 試験体概要

(1) 概要

試験体の設置場所は、冬季測定における風向の特徴と周囲の測定環境を勘案し、写真 2 に示すとおり縦 4600mm×横 5900mm の屋根入隅部（北方向）に設置した。なお、防水層の設置面はフラットで、高さはパラペットの腰壁高さと同じとした。

試験体は、写真 2 に示すパラペットの無い屋根平面部を想定した縦 1800mm×横 1800mm、高さ 1200mm の屋根面に、実防水シートを施工したものである。なお、本試験体は 90mm 角の木材を骨組みとし、上面及び側面は厚さ 12mm の合板で覆ったものである。試験体について、内部に風が流入しないこと、また風の影響で変形しない剛性があることを事前に確認している。

(2) 使用した防水材料

防水材料には、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、塩ビシートとする。）を用いた。シート厚さは 1.5mm である。ポリエステル繊維の補強布については、太さ 556dtex のポリエステル糸が 1.5 本/10mm の密度で、長手・幅方向共に混入されている。図 5 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



写真 1 実測地周辺の状況（北方向を望む）

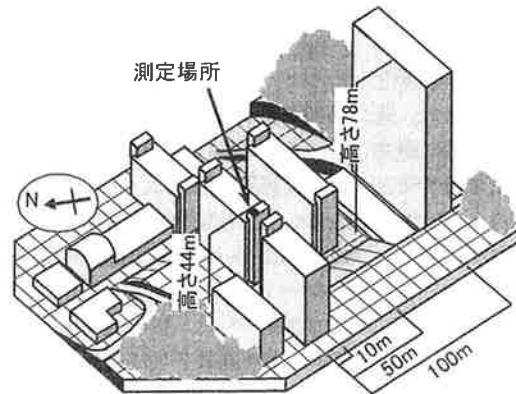


図 4 測定の周辺環境

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。

また、防水層は風により揺さぶられ防水層の固有振動数付近で共振現象を起こして揺れが大きくなることも考えられる。そこで、塩ビシートの固有振動数を事前に調べた。試験方法は、図6に示すとおり、幅50mm×厚さ1.5mm×長さ600mmの帯状試験体を両端固定し、固定端から25mmの位置にひずみゲージを貼り付け、塩ビシートの中央部に人工的に振動を与えることで防水層の固有振動数を調べた。なお、実際に防水シートが固定されている条件下では、引張応力は変化すると予想されるため、引張応力を0 N/mm²~1.0 N/mm²の範囲で変化させた。試験温度条件は20±2℃とした。図7に、防水シートに振動を与えた場合の自由振動波形の例を示した。防水シートは一定の振動数(固有振動数)で振動し、時間とともに減衰した。

図8に自由振動波形から読み取った固有振動数と引張応力との関係を示した。引張応力がゼロの時の固有振動数は約12Hzで、塩ビシートに引張応力を加えていくと徐々に固有振動数は高くなり、引張応力1.0N/mm²では、固有振動数は約40Hzを示した。

(3) ファスナー部の固定方法

ファスナーの固定間隔は、図9に示す通り一般的に多く施工されている600mmを採用し、取付け位置は試験体の中心を基軸として計9点固定した。ファスナー部について、ステンレス製のボルトとナットを用い、ディスクには外径75mmφ、板厚1.7mmの円盤状の金物を使用した。防水シートの固定方法については、ディスクを防水シートの上に設置し、事前にディスクに開けられた穴からボルトを通し、ナットで締め付ける方法を採用した。

2.3 実測項目

屋外環境下において、防水シートのひずみ及びファスナーに生じる力は風外力以外に温度変化による影響も考えられるため、実測では防水シートの裏面に貼り付けた熱電対により、1分間隔で材料温度の計測を行った。ただし、本研究では試験時間10分間における防水層の挙動を取り扱うため、この時間内での温度変化は小さく、結果の解析では温度変化による影響を考慮しなかった。

(1) 風向・風速および風圧

風向・風速の測定には超音波風向・風速計を用い、試験体の上面高さより2m高い位置に設置した。風圧の測定には差圧型風圧計(定格容量5kPa)を用い、図9に示す通りファスナーの固定位置から10cm離れた位置の風圧を測定した。測定方法は、図10に示す通り測定位置に外圧測定用と内圧測定用の6mmφの測定孔を設け、そこに取り付け付けたビニールチューブ(長さ90cm)を介して外圧・内圧を風圧計に導き、試験体内の圧力との差圧を計測した。なお、ビニールチューブ管は、防水シートに追従して自由に動くようになっている。

(2) 防水シートに生じるひずみ

防水シートに生じるひずみについては、防水シート裏面に張り付けたひずみゲージ(ひずみ測定限界値15%)P

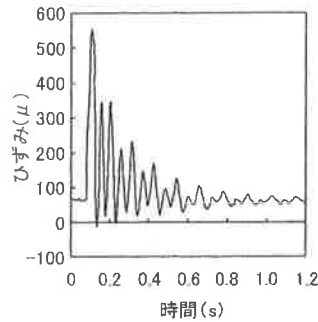


図7 防水シートの振動数測定結果 (引張応力:0.13N/mm²の場合)

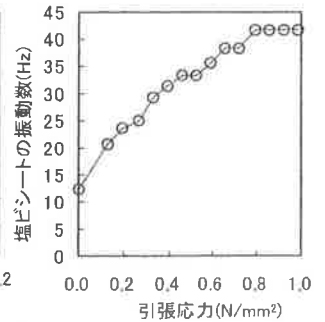


図8 塩ビシートの固有振動数 (温度20℃の場合)

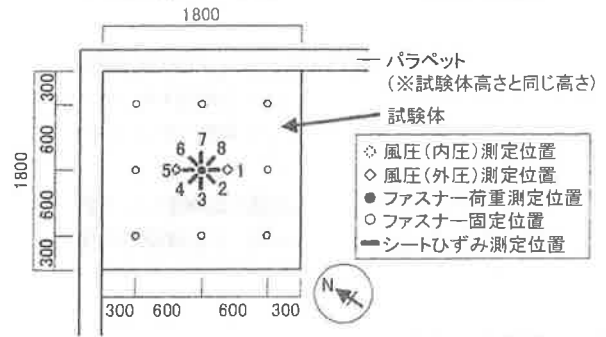


図9 実大試験体の平面図(単位:mm)

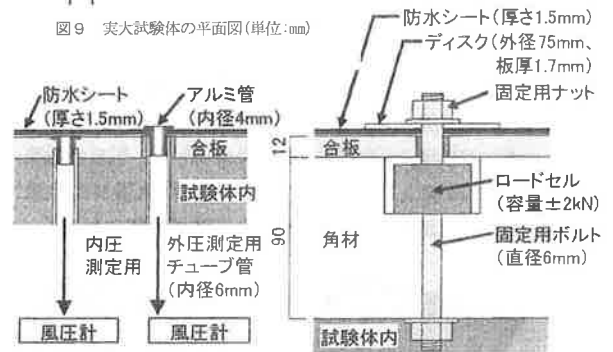


図10 風圧チューブ設置断面図

図11 ファスナー部における荷重測定部断面図

表1 使用した測定器

風向・風速	FT社製FT702(測定範囲0.001~70m/s)
風圧	KYOWA PDS-50GA(定格容量5kPa)
ひずみゲージ	KYOWA KFEL-5-120-C1(ひずみ限界15%)
ロードセル	KYOWA LUX-A-2kN(定格容量±2kN)
熱電対	T熱電対(テフロン被覆、径0.32φmm)

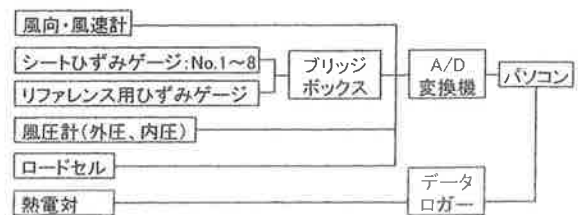


図12 測定部計測概要

により測定した。ひずみゲージの測定位置については図 9 に示すとおり、ファスナー固定端から約 5cm 離れた箇所に、ファスナー間の最短距離方向と最長距離方向の計 8 点取り付けた。

(3) ファスナーに作用する軸力

防水シートが風により変動した際にファスナーに生じる軸力を、ロードセル（定格容量±2kN）を用いて測定した。荷重測定位置は、試験体端部の固定の影響を受けない中心部の 1 箇所とした。荷重測定部における防水シートの固定方法については、図 11 に示す通り、角材に固定されたロードセルにボルトを取り付け、そのボルトをディスクの穴を通して、ナットにより防水シートを固定する方法とした。なお、その他の 8 箇所の固定点については直接下地に固定することとした。

2.4 測定条件

使用した測定器を表 1 に、測定部計測の概要を図 12 に示す。風向(1ch)・風速(1ch)、風圧(2ch)、シートひずみ(9ch)、およびロードセル(1ch)の合計 14ch からの信号はサンプリング周波数 100Hz で行い、14ch 同時に A/D 変換 (16 ビット) レパソコンに収録した。

実測では、無風時の各測定結果の値を基準値として計測する必要があり、風速が十分に低下したことを確認した後計測を終了した。

3. 実測結果

今回報告する結果は、2006 年 4 月 3 日の実測結果である。

3.1 2006 年 4 月 3 日 13:03~18:03 の風向・風速

図 13 に、2006 年 4 月 3 日 13:03~18:03 の 5 時間における各 10 分間の平均風向・平均風速の変化を示した。当日の横浜地方気象台の風速は、13:00 に 10 分間平均風速が北の風 11.2m/s である。実測地における風向も北寄りの風で北北西

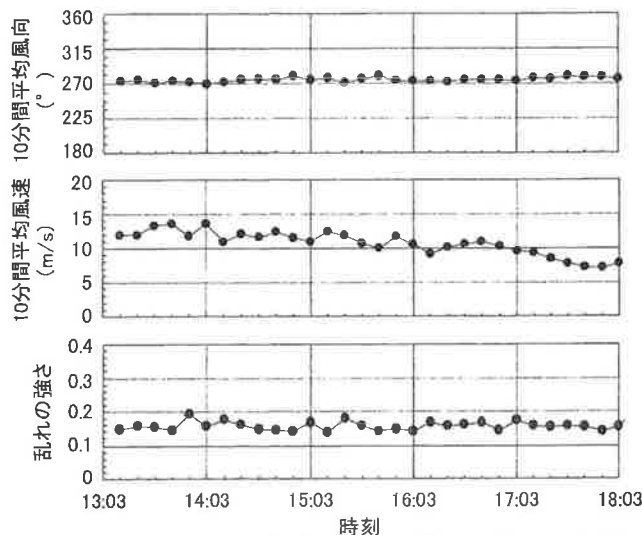


図 13 2006 年 4 月 3 日の風向・風速

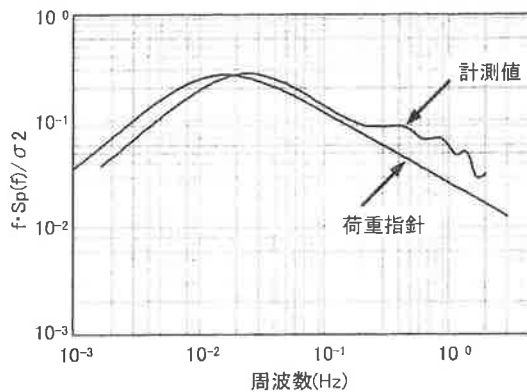
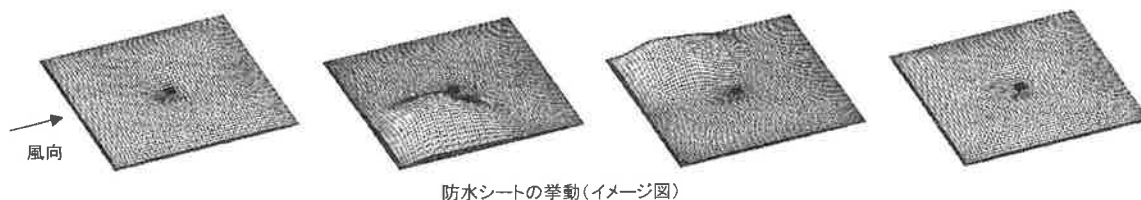


図 14 風速変動のパワースペクトル密度



防水シートの挙動(イメージ図)

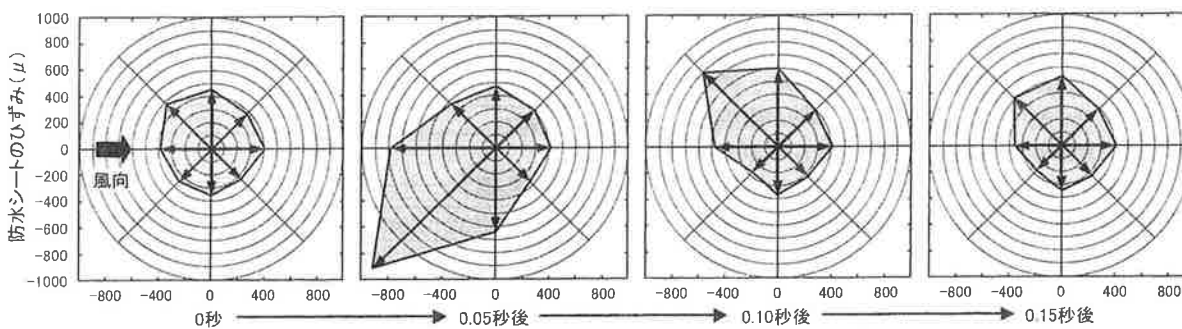


図 15 防水シートのひずみの変化

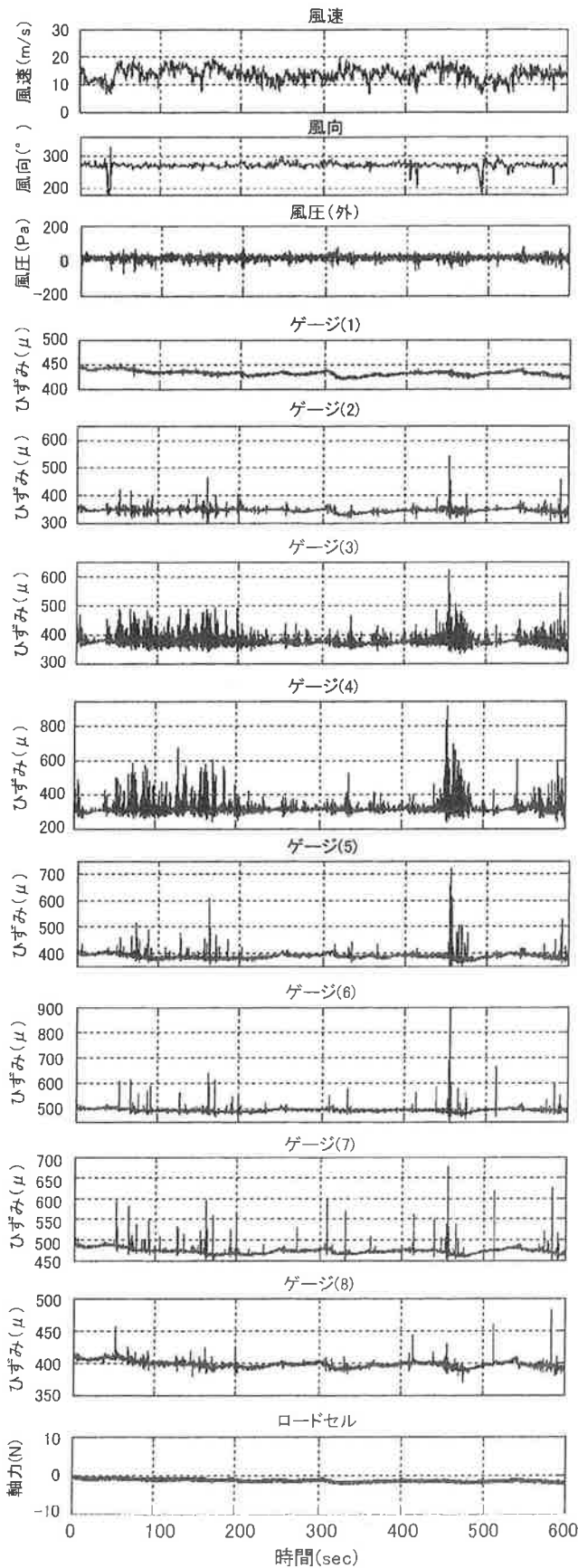


図16 計測データの時刻歴波形(2006年4月3日 13:54~14:03)

の風向であり、実測建物には長辺にほぼ直角に風が当たる270°~275°の方向であった。

10分間平均風速は13:23頃から約50分間が強く、10分間の最大平均風速は13.6m/sであった。風速の乱れの強さは約0.14~0.20で、当該地を荷重指針に示された相区分Ⅲと仮定した場合の値0.18にはほぼ一致する。

図14に、13:53分における風速変動のパワースペクトル密度を示した。風速変動のパワースペクトル密度は、乱れのスケールがやや小さいためピーク周波数はやや高いが、荷重指針に示されたカルマン型のスペクトルにほぼ一致する。なお、周波数0.3Hz以上の高周波側で荷重指針よりエネルギーが大きいが、これは風速計を設置した避雷針が強風により揺らされたことによる影響である。

3.2 2006年4月3日 13:54~14:03の結果

図15に、防水シートひずみが短時間(0秒~1.5秒)に変化する様子を示し、図16に、風が最も強かった13:54~14:03の10分間における風向、風速、風圧、防水シートのひずみ、およびロードセルの時刻歴波形を示した。なお、13:54~14:03の10分間の温度変化は、28.9℃~30.6℃であった。

3.2.1 風向・風速および風圧

図16に示す通り、10分間の風向変動は少なくほぼ270°と一定であった。風速の最大値は20.0m/s、平均風速は13.6m/sであった。風圧は全体的に正圧(防水シートを押し出す力)で、風圧変動は風速変動にほぼ追従し、風速が高くなると負圧が大きくなっていった。

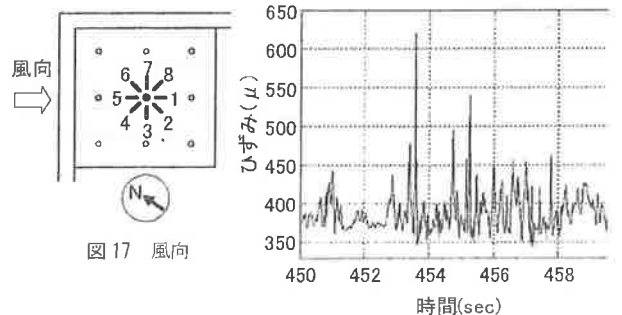


図17 風向

図18 防水シートひずみの時刻歴波形

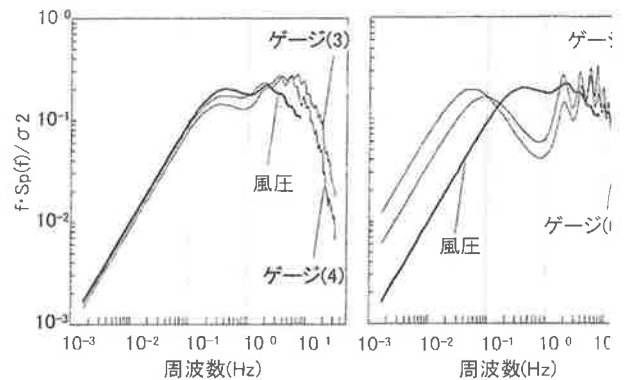


図19 防水シートひずみのパワースペクトル密度

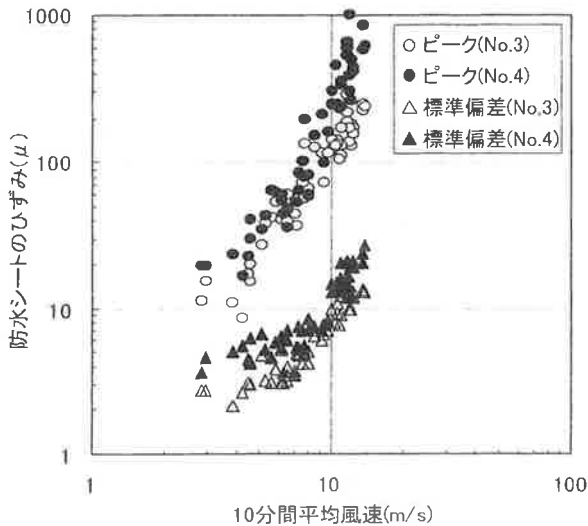


図20 風速とシートひずみとの関係

3.2.2 ファスナーに生じる軸力

図16に示す通り、ロードセルの軸力の変動は防水シートひずみの変動に追従しておらず、ほぼ一定の値であった。

3.2.3 防水シートひずみ

(1) 目視観察およびシートひずみ測定による防水層の挙動

強風時に防水層を目視観察した結果、防水層がふくれる様子と揺らぐ様子が確認できた。防水層のふくれは、ふくれ高さ5mm以下ではあるが、風が強くなると全体的にふくれ、風が弱くなると元の状態に戻る様子が確認できた。また、それと同時に防水層は風が強い時には左右、あるいは風向と反対方向に揺らぐ様子が確認できた。

図15に、各方向に発生する防水シートひずみの同時刻における変化(0秒~0.15秒)を示す。最初の段階はどの方向もほぼ同じひずみであったものが、0.05秒後には風向と反対の45°方向(左下方向)に大きなひずみが発生する。この大きなひずみは、0.1秒後には0.05秒後とは90°ずれた風向と反対の45°方向(左上方向)に移り、0.15秒後にはどの方向も初期値とほぼ同じひずみに戻っていた。

以上の目視観察およびシートひずみの測定結果から、防水シートは短時間に左右に揺さぶられ、揺さぶられた方向に大きな引張力が発生していた。したがって、防水層を支持しているファスナーには防水シートのふくれによる軸力に加えて、大きな水平力(せん断力)も生じていることが推定される。

(2) 防水シートひずみの時間変化

防水シートのひずみの変動は、図16に示すようにゲージ(3)、(4)が最も大きく、風速が高くなると防水シートのひずみも急激に大きくなっていった。この急激なひずみの変化は、大きくなったり小さくなったりを繰り返す間欠的な

ものであった。この間欠的なひずみ変化は図18に示すように、0.1秒程度の短時間において発生しており、防水層のひずみ変化はかなり早いものであることがわかる。

図19に、防水シートのひずみ、及び風圧変動のパワースペクトル密度を示す。防水シートひずみに大きな変化が観測されたゲージ(3)、(4)のパワースペクトル密度は防水シートの固有振動数と考えられる5Hz~8Hz付近のエネルギーが大きい。しかし、ゲージ(5)、(6)は固有振動数付近と0.1Hz付近にもエネルギーが大きくなっており、防水シートは固有振動数付近だけでなくゆっくりうねっている様子も窺える。

(3) 風速とシートひずみとの関係

図20に10分間の平均風速と防水シートのひずみとの関係を示す。両者の関係を両対数軸として表した場合に、ピーク値と標準偏差値はほぼ直線関係を示している。したがって、今後これらの関係を防水種ごとに詳細に検討することにより、耐風設計に活用しうる可能性があると考えられる。

4. まとめ

防水シートに塩ビシートを用いた機械的固定工法による実大防水層試験体を作成し、屋外環境下における強風時の防水層の挙動を観察と実測により調べた。得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 防水層の挙動は、中心部より風上側のシートが左右および風向とは反対方向に揺らぐ動きをしていた。
- (2) 防水シートの揺らぎが生じている方向では、間欠的に大きなひずみが発生しており、ファスナーには軸力に加えて大きな水平力(せん断力)が作用しているものと推察される。
- (3) 防水シートの大きなひずみが発生する周波数は、防水シートの固有振動数付近の5Hz~8Hzであり、防水層の耐風性評価を行う際には防水層の固有振動数も考慮する必要があると考えられる。
- (4) ファスナーに作用する力は、シートに引張力(水平力)が発生しているのにもかかわらず軸力にはほとんど変化がなかった。これは、本測定時の環境が大きな上向きの力を生じさせる程の強風ではなかったものと思われる。したがって、今回の実測においては、ファスナーに作用する力は水平力(せん断力)が支配的であったものと推察される。
- (5) 風速と防水シートのひずみとの関係は、ほぼ直線的な関係が得られた。今後防水層の耐風設計を行うにあたって、これらの関係を活用しうる可能性があると考えられた。

5. おわりに

機械的固定工法防水層の耐風設計のための基礎資料を得るため、10階建の建物屋上で、強風時に防水層の挙動を実測し、風と防水層との関係の一端を明らかに出来たと考える。しかし、今回の実測は平均風速約14m/s時の結果であり、防水層

の耐風設計に当たってはより高い風速での実測結果が必要である。また、下地への固定工法や防水種の違い等により、防水システムの耐風性が異なることが予想されるため、今後も実測を継続し、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実際に建物屋上での実測、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、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：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) 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) Gerhart H.J., Gerbatsch R.W.: Wind resistance of mechanically attached single-ply systems fastener load- safely considerations and optimal fastener patterns; Third International Symposium on Roofing Technology, Rosemont, pp.276-283, 1991
- 4) 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
- 5) Malpezzi J.A., Gillenwater R.J.: Static vs. dynamic: a wind uplift testing study, 10th Conference on Roofing Technology, Maryland, pp.123-129, 1993
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) Baskaran, B. A. : "Newsbrief - SIGDERS project, Phase IV," *Construction Innovation*, 10, (4), December, pp. 5, 2005.12
- 10) 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
- 11) Baskaran, B.A., Chen, Y. and Vilaipornsawai, U. : A New Dynamic Wind Load Cycle to Evaluate Flexible Membrane Roofs" , *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, 27 (4), pp.249-265, 1999
- 12) Baskaran, B. A. : "Newsbrief - SIGDERS project, Phase IV," *Construction Innovation*, 10, (4), December, pp. 5, 2005.12
- 13) Baskaran, B.A. "News update - standard test method for the dynamic wind uplift resistance of mechanically attached membrane roofing systems," *Journal of the Roof Consultants Institute, RCI Interface*, 22, (2), pp. 1, February 01, 2004
- 14) Baskaran, B.A.; Savage, M.G. "Wind pressure measurement on full scale flat roofs," *Interface (Journal of the Roof Consultants Institute)*, 21, (4), April, pp. 17-21, April 01, 2003
- 15) 宮内博之、加藤信男、市川裕一、佐々木孝基、田中享二：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
- 16) 建築物荷重指針・同解説、日本建築学会、2004.9

BEHAVIOR OF MECHANICALLY ANCHORED WATERPROOFING MEMBRANE EXPOSED IN HIGH WIND SPEED OF ACTUAL WIND

N KATO, H ICHIKAWA, T SASAKI

The response of a mechanically anchored waterproofing membrane system located atop a building when subjected to local wind conditions was measured and the results analyzed to predict the strain in the membrane as a function of the average velocity profile at the site. A waterproofing membrane section having dimensions of 1.8m by 1.8m size was constructed atop the roof at an elevation of 44m of a 10story building located in Yokohama, Japan. The observed response of the membrane system was measured in terms of the strain generated in the membrane and the forces induced in the fasteners when subjected to local wind conditions. The test period took place early in the spring when typically at this location, higher average wind speeds occur. Results showed a corresponding relation between large strains in the membrane at higher wind velocities. The peak energy of the membrane was evident at two frequencies – an intermittent frequency of 5 to 8Hz caused by the natural frequency of the sheet and 0.1Hz which is representative of the wavy movement of a flag in the wind. However, the force occurring in the fastener was almost unchanged over this time.