積雪期の地震に対する木造住宅の耐震性に関する研究

振動による屋根雪の動的挙動と構造体の応答特性との関係について

STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF WOODEN HOUSES DURING STRONG
GROUND MOTION IN SNOW SEASON

Relationship between dynamic behavior of roof snow and seismic response of the structure

千葉隆弘*, 苫米地 司**, 高橋 徹***, 植松武是****

*Takahiro CHIBA, Tsukasa TOMABECHI, Toru TAKAHASHI
and Takeyoshi UEMATSU*

To examine relationship between dynamic behavior of roof snow and seismic response of wooden houses by strong ground motion, the authors carried out shaking table test. The structure of one-story and flat roof with steel sheet roofing was used as the model in the test. Harmonic vibration was used as seismic wave in the test. Adfreezing of roof snow and roof surface projection that restricted roof snow sliding was recreated in the model. Relationship between sliding restriction conditions and breaking form of roof snow was observed. Sliding conditions after roof snow break were recreated in the test that changed roof surface condition and roof snow weight. Relationship between friction resistance of sliding surface and response characteristics of the model was examined by the test.

The roof snow break from weak layer and one section in wet snow might occur in strong ground motion. In the evaluation of seismic performance of wooden houses during snow season, necessity to consider the ground motion scale, sliding surface characteristics of roof snow was clarified.

Keywords : Break of roof snow, Strength of snow, Weak layer of snow, Roof snow sliding, Seismic response

屋根雪の破壊, 積雪の強度, 弱層, 屋根雪の滑動, 地震応答

1. はじめに

2004年10月に発生した新潟県中越地震では、約3,000棟の木造住宅が全壊するとともに、78箇所が発生した土砂崩れにより道路が寸断されるなど、甚大な被害が発生した¹⁾。中越地方は地上の積雪深が平年で2mに達する地域もある豪雪地帯であり、積雪により被害が拡大することを懸念して震災復興が急ピッチで行われた。しかし、復興半ばの2005年1月からの断続的な降雪によって18年ぶりの豪雪となり、269棟の木造住宅が雪荷重に耐え切れず倒壊に至った²⁾。これらのうち77%は先に発生した地震で全壊と判定されており、雪荷重で倒壊した住宅の多くは地震による被害が影響していたことが明らかとなっている。さらに、道路の切土斜面に設置された雪崩予防柵が地震の被害を受けたため機能が低下し、表層雪崩や全層雪崩の発生によって道路交通に対して被害を及ぼした³⁾。このような新潟県中越地方における一連の自然災害をみると、地震と豪雪との複合災害の様相を呈しており、積雪期に地震が発生した場合を想定した災害対策の必要性が指摘されるようになった。特に、雪崩対策に関する研究をみると、阿部ら⁴⁾、松澤ら⁵⁾は、地震の規模と斜面積雪の安定性との関係を検討しており、地震で積雪の破壊が発生することによって雪崩を誘発する可能性を指摘している。

積雪期の地震に対する木造住宅の地震対策についてみると、木造

住宅に作用する地震力は建物重量の増加に伴い大きくなるため、雪荷重の増加に伴う地震力の増加に対応した耐震性を確保する必要がある。建築基準法施行令第46条に示されている在来軸組構法の壁量計算では、屋根重量を指標にして「軽い屋根」と「重い屋根」の2種類に対する壁量が規定されているが、屋根重量に加える雪荷重は考慮されていない。2000年に制定された品確法（住宅の品質確保の促進などに関する法律）や2006年に改定された耐震診断法⁶⁾では、屋根重量に加える雪荷重が考慮されているものの、雪荷重と耐震性との関係を検討した研究は皆無であり、品確法や耐震診断法の考え方が建築基準法に反映されていないのが現状である。

一方、前述の雪崩対策の研究でみられたように、地震により木造住宅の屋根雪が破壊される可能性がある。積雪地域における木造住宅の屋根葺材には屋根雪がすべり易い塗装鋼板が多く使用されていることから⁷⁾、破壊後は屋根雪が屋根葺材上を滑動する可能性がある。このような地震による屋根雪の動的挙動によって木造住宅の地震応答は大きく変化するものと考えられる。従って、地震による屋根雪の動的挙動と木造住宅の地震応答との関係を明らかにし、積雪状態にある木造住宅の実情に即した耐震性を適正に評価する必要がある。しかし、屋根雪の地震との関係を検討した研究は Nakamuraら⁸⁾が行った基礎的な振動実験のみであり、現行の耐震基準では屋

* 北海道工業大学空間創造学部建築学科 講師・修士(工学)

** 北海道工業大学空間創造学部建築学科 教授・工博

*** 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻
教授・工博

**** 北海道立北方建築総合研究所 博士(工学)

Lect., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Mr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Hokkaido Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.

根雪の動的挙動を考慮した耐震性の評価方法を盛り込むまでに至っていない。

このような背景から本研究では、積雪期の地震に対する木造住宅の地震応答を明らかにすることを目的に、基礎的な振動実験で屋根雪の破壊形態を整理するとともに、屋根雪滑動のすべり摩擦特性と構造体の応答性状との関係を検討した。

2. 振動による屋根雪の破壊

2.1 振動実験による屋根雪の破壊形態

本研究では、振動による屋根雪の破壊形態を明らかにすることを目的に、基礎的な振動実験を行った。試験体は、屋根雪の破壊形態や、破壊後の滑動を観察し易くするため、屋根勾配が 0° の塗装鋼板葺き無落雪屋根を想定した。写真 1 に示すように、大きさ $900\text{mm} \times 900\text{mm}$ の屋根に鋼製の柱を取り付けた単質点モデルであり、屋根葺材には積雪地域で一般的に使用されるもののうち、表面粗さの異なる 2 種類の塗装鋼板（フッ素塗装鋼板： $R_{zJIS}=4.2\mu\text{m}$ 、つや消し塗装鋼板： $R_{zJIS}=21.2\mu\text{m}$ ）とした。実験に使用した屋根雪には雪密度 $250 \sim 450\text{kg/m}^3$ の自然雪とし、屋根雪の上層を密度 $250 \sim 350\text{kg/m}^3$ のしまり雪、下層を密度 $350 \sim 450\text{kg/m}^3$ のざらめ雪とすることで積雪の層構造を考慮した。なお、雪密度を測定するとともに雪粒の大きさを目視により確認することでしまり雪とざらめ雪を区分した。屋根雪の深さは、 5cm 、 10cm 、および 15cm の 3 種類とした。

振動による屋根雪の破壊・滑動は、その滑動が拘束される屋根雪の凍着の影響を受け、無落雪屋根における軒の形状と暖房された屋内と屋外との熱貫流により、屋根面における外周部のみが凍着する場合がある⁹⁾。さらに、塗装鋼板の接合に「はぜ」と呼ばれる高さ 30mm 程度の突起があり、屋根全面の滑動を拘束する場合は考えられる。このようなことから本実験では、図 1 に示すように、屋根面外周部の 1 辺、2 辺、および 3 辺が屋根雪の凍着で滑動を拘束する状態を想定するとともに、屋根表面の「はぜ」が全面の滑動を拘束する状態を想定した。この全面拘束の場合、使用した屋根葺材は、つや消し塗装鋼板とした。屋根雪の凍着面は、図中に示すように屋根面に取り付けたワイヤラで滑動を拘束することにより再現した。全面拘束の「はぜ」については、厚さ 4.5mm の平鋼で作製し、高さは 30mm とした。実験室の温度は 5°C 前後を確保し、屋根雪における雪質の急激な変態が発生しない温度条件とした。

試験体の加振は人力で行い、図 2 に示すように、振動台に取り付けた加速度計で確認しながら入力加速度を 3 段階で増幅させた。加振の周期については、自由振動加振で測定した試験体の固有周期から振動台に対する試験体の応答倍率が $2 \sim 3$ となるように調整した。このような調和振動加振により屋根雪を破壊させ、振動による屋根雪の破壊形態を観察した。なお、実験回数は各ケースで 1 回とした。

実験で得られた屋根雪の破壊状況と破壊形態を整理した結果を表 1 に示す。1 辺拘束の場合をみると、フッ素塗装鋼板では、いずれの積雪深においても滑動が拘束された雪ブロックと滑動しようとする雪ブロックとの鉛直面で引張破壊が発生した。つや消し塗装鋼板では積雪深 5cm の場合で前述と同様の破壊が発生し、 10cm および 15cm の場合では、滑動を拘束していたワイヤラ上層の水平面でせん断破壊が発生した。次に、2 辺拘束の場合をみると、両側の鉛直面でせん断破壊した事例はつや消しの 5cm のみである。フッ素の

写真 1 振動実験の状況

図 1 屋根雪の凍着を考慮した実験シリーズ

図 2 加振条件

5cm 、つや消しの 10cm では、片側における鉛直面でのせん断破壊と もう片側のワイヤラ上層における水平面でせん断破壊が同時に発生し、その他は両側におけるワイヤラ上層の水平面でせん断破壊が発生している。3 辺拘束の場合をみると、引張破壊と両側の鉛直面でせん断破壊が発生した事例は無く、片側における鉛直面のせん断破壊とワイヤラ上層の水平面せん断破壊、引張破壊とワイヤラ上層の水平面でせん断破壊、あるいは全拘束辺におけるワイヤラ上層の水平面でせん断破壊が発生している。このように、振動による屋根雪の破壊形態は、滑動が拘束された部分におけるすべての鉛直面から引張・せん断破壊した事例は 1 辺拘束と 2 辺拘束の一部でしか確認されず、一つの鉛直面とワイヤラ上層の水平面から破壊する傾向があり、積雪深が大きい場合は水平面からせん断破壊する傾向が強くなる。全面拘束（はぜ）の場合においても、積雪深が 5cm では一部の屋根雪が、 10cm および 15cm では全面の屋根雪が「はぜ」上層における水平面でせん断破壊が発生している。屋根雪が細かく粉砕されたのは前述のせん断破壊後に「はぜ」間の滑動で上下方向の衝撃が発生したためである。次に、屋根雪破壊時における屋根雪の加速度をみると、全面拘束（はぜ）のように破壊形態が安定している場合は積雪深の増加に伴い加速度が減少する関係を示すものの、1～3 辺拘束の場合は破壊形態に応じて加速度が変化しており、拘束辺数および積雪深と加速度との間に明瞭な相関関係はみられない。なお、屋根葺材の表面性状の違いと屋根雪の破壊形態についても両者の明瞭な相関関係は確認されなかった。

表 1 振動による屋根雪の破壊形態

積雪深	屋根 葺材	1辺拘束	2辺拘束	3辺拘束	全面拘束(はぜ)
5cm	フッ素	破壊加速度: 2.5m/s ² 引張破壊	破壊加速度: 11.5m/s ² 鉛直面のせん断破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 20.2m/s ² 引張破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	—
	つや消し	破壊加速度: 9.9m/s ² 引張破壊	破壊加速度: 20.0m/s ² 鉛直面せん断破壊	破壊加速度: 19.8m/s ² 鉛直面せん断破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 25.0m/s ² 一部の屋根雪がはぜ上層の水平面せん断破壊
10cm	フッ素	破壊加速度: 11.0m/s ² 引張破壊	破壊加速度: 12.7m/s ² ワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 21.3m/s ² 引張破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	—
	つや消し	破壊加速度: 16.3m/s ² ワイヤラス上層のせん断破壊	破壊加速度: 11.2m/s ² 鉛直面せん断破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 21.3m/s ² 引張破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 15.5m/s ² はぜ上層の水平面せん断破壊→粉碎
15cm	フッ素	破壊加速度: 8.0m/s ² 引張破壊	破壊加速度: 11.5m/s ² ワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 12.0m/s ² ワイヤラス上層の水平面せん断破壊	—
	つや消し	破壊加速度: 11.0m/s ² ワイヤラス上層のせん断破壊	破壊加速度: 18.1m/s ² ワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 14.4m/s ² 引張破壊とワイヤラス上層の水平面せん断破壊	破壊加速度: 14.6m/s ² はぜ上層の水平面せん断破壊→粉碎
破壊形態		引張破壊 【フッ素】 5cm 10cm 15cm 【つや消し】 5cm	鉛直面のせん断破壊 【フッ素】 なし 【つや消し】 5cm	鉛直面のせん断破壊 水平面のせん断破壊 【フッ素】 なし 【つや消し】 5cm	5cm
		水平面のせん断破壊 【フッ素】 なし 【つや消し】 10cm 15cm	鉛直面のせん断破壊 水平面のせん断破壊 【フッ素】 5cm 10cm 【つや消し】 10cm	引張破壊 鉛直面のせん断破壊 【フッ素】 5cm 10cm 【つや消し】 10cm 15cm	10cm 15cm

□: 滑動する屋根雪 ■: 拘束された屋根雪 ※表中の「破壊加速度」は、屋根雪の応答加速度の値である。

2.2 屋根雪の強度と破壊する地震力との関係

屋根面の一部、あるいは、全面の滑動が拘束された場合における振動による屋根雪の破壊形態をみると、一つの鉛直面における引張破壊およびせん断破壊と水平面のせん断破壊が同時に発生する傾向があり、積雪深が大きくなると屋根全面で水平面のせん断破壊が発生する傾向がある。本研究では、地震時における屋根雪の破壊状況を明らかにすることを目的に、積雪の引張強度およびせん断強度と屋根雪が破壊する慣性力との関係を検討した。

既往の研究をみると、積雪の引張強度 F_p は Narita¹⁰⁾により、せん

断強度 F_s は遠藤¹¹⁾、山野井ら¹²⁾らによって測定されている。特に、山岳地帯で発生する表層雪崩のすべり面はせん断強度の小さい弱層であるため、 F_s は積雪の弱層に着目する場合が多い¹¹⁾。ここで、2008年3月5日に、札幌市手稲区の北海道工業大学構内における2つの塗装鋼板葺き屋根 A および屋根 B で測定した屋根雪における F_s を図3に示す。なお、屋根 A は通常利用されている建築物の屋根であり、日中は暖房が行われている。屋根 B は利用されておらず暖房も行われていない建築物の屋根である。測定日の気象条件は図中に示す通りであり、 F_s の測定には雪崩調査で使用されるシアフレームを

【測定日（2008年3月5日）の気象条件】
地上積雪深：96cm 日平均気温：-1.0℃ 日最高気温：2.7℃

図3 屋根雪におけるせん断強度の測定結果

図4 雪密度と引張・せん断強度との関係

用い¹³⁾、プッシュプルゲージで引っ張ることにより測定した。測定箇所は各屋根で1ヵ所とし、深さ方向に異なる雪質の境界付近を測定した。図のように、屋根Aの積雪深は55cm、屋根Bの積雪深は100cmであり、いずれの屋根においても積雪の深さの増加に伴い雪密度 ρ が増加している。 ρ の増加に伴い F_s が増加する傾向を示すが、屋根Aでは積雪上面から約15cm、屋根Bでは30cmの深さで ρ が200～300kg/m³であるものの F_s が1.0kN/m²前後となる弱層が確認できた。これらの弱層の雪質は上下層に比べて粒径が大きいざらめ雪であり、急激な気温変化によって形成された積雪層で雪崩調査で測定される弱層と同様の傾向である。さらに、屋根底面から5cmの積雪下層においても直上層より粒径が大きいざらめ雪の弱層が確認され、室内からの熱貫流による温度変化で雪質が変態したものと考えられる。この屋根底面の雪質は建築物の利用状況に関わらず、いずれの屋根においても確認され、塗装鋼板葺きの屋根においては気温の温度変化のみでも屋根底面の雪質が変態することを示している。

これらの屋外実測の F_s および前述の振動実験で得られた F_p 、 F_s を既往の研究^{10), 11), 12)}で測定された F_p および F_s と比較した結果を図4に示す。なお、図中に示す既往の研究で測定された乾き雪の F_p 、

F_s は雪の含水率が0%の場合で、湿り雪の F_s は雪の含水率が0%を超える場合である。また、振動実験で得られた F_p は、1辺拘束で引張破壊した事例を対象とし、屋根雪の加速度に質量を乗じて求めた慣性力を破断面積で除した値である。振動実験で得られた F_s は、各拘束辺において水平面でのみせん断破壊した事例を対象とし、前述と同様の方法で求めた値である。雪密度 ρ については実験時に測定した値である。図のように、既往の研究では、 ρ の増加に伴い F_p および F_s が増加する関係を示し、両者の値に大きな差異はみられない。さらに、 F_s においては乾き雪に比べて湿り雪の値が小さくバラツキも大きくなる。振動実験および屋外実測で得られた $F_p \cdot F_s$ は、既往の研究の測定結果のうち、湿り雪に近似する傾向を示し、振動実験の全面拘束（はぜ）の場合と屋外実測の弱層は1.0kN/m²前後と小さな値を示すものの、既往の測定結果から大きく逸脱していない。このように、屋根雪の F_s は地上の値と近似する傾向を示し、屋根葺材上における屋根雪滑動が拘束された場合は、振動により積雪の弱層でせん断破壊し、滑動する可能性が高いことがわかる。

ここで、図5に示すような屋根雪の破壊形態を想定し、屋根雪破壊時の応答加速度を検討した。図のように、前述の振動実験を考慮し、1辺～3辺で滑動が拘束された屋根雪の鉛直面で引張破壊およびせん断破壊した場合と、屋根全面の滑動が拘束された状態で屋根面近傍の水平面でせん断破壊した場合を想定した。屋根雪の F_p および F_s は、 ρ を建築基準法施行令における多雪区域と指定された特定行政庁が慣例的に定めた値である300kg/m³とし、前述図4の回帰式により、乾き雪を18.0kN/m²、湿り雪を2.0kN/m²とした。さらに、積雪弱層の F_s については屋外実測を考慮して1.0kN/m²とした。屋根面が正方形であると仮定し、面積当たりの雪荷重と引張破壊およびせん断破壊が発生する屋根雪の応答加速度 a_s を算定した。図6に、雪荷重と a_s を重力加速度 g で除した比率 a_s/g との関係を示す。なお、図中には各雪荷重に対応する積雪深（ $\rho=300\text{kg/m}^3$ の場合）を示すとともに、前述の振動実験で得られた屋根雪の加速度のうち、破壊形態が図5に対応した場合のみを図中に示した。また、図中に示すラインは建築基準法における二次設計レベルの加速度を示し、 $a_s/g=1.0$ は保有水平耐力計算による標準せん断力係数 $C_0=1.0$ を表すとともに、 $a_s/g=0.4$ および0.5は、保有水平耐力計算による2階建て木造住宅における2階レベルの加速度および3階建て木造住宅における3階レベルの加速度（標準せん断力係数： $C_0=1.0$ 、構造特性係数： $D_s=0.3$ 、層せん断力係数の高さ方向分布：2階レベルは $A_f=1.4$ で3階レベルは $A_f=1.6$ 、振動特性係数： $R=1.0$ 、偏心率や剛性率による割増係数： $F_{es}=1.0$ ）を表した値である。図のように、湿り雪における1～3辺拘束の場合をみると、雪荷重の増加に伴い屋根雪の深さが増加する、すなわち、鉛直面の面積が増加することからせん断強度も増加するため、 a_s/g は雪荷重に関係なく一定の値を示し、拘束辺数の増加に伴い a_s/g が増加する関係を示す。振動実験の結果と比較すると、1辺拘束の一部に例外があるものの、算定した結果と近似するか、あるいは振動実験のバラツキにより算定した結果に比べて若干大きな値を示す。これらの算定した a_s/g と二次設計レベルの加速度とを比較すると、1辺拘束の場合で $a_s/g \leq 1.0$ となるものの、いずれの場合においても $a_s/g > 0.5$ であり、保有水平耐力計算による設計耐力に近い2階建てあるいは3階建て木造住宅では屋根雪が破壊しないことになる。なお、乾き雪における1～3辺拘束の a_s/g は6～18と非常

図5 想定した屋根雪の破壊形態

図6 図4の回帰式に基づく雪荷重と破壊時の応答加速度との関係

に大きな値となり、屋根雪が破壊する可能性は低い。これらに対し、水平面のせん断破壊についてみると、いずれの雪質においても雪荷重の増加に伴い a_s/g が減少する関係がみられる。振動実験の結果と比較すると、振動実験による加速度は、湿り雪の場合に比べて小さくなるものの、弱層の場合と近似する傾向を示す。算定した a_s/g で湿り雪の場合では、雪荷重 2.5kN/m^2 (積雪深：約 80cm) 以上になると $a_s/g \leq 1.0$ 、雪荷重 4.5kN/m^2 (積雪深：約 150cm) 以上になると $a_s/g \leq 0.5$ 、雪荷重 5.5kN/m^2 (積雪深：約 180cm) 以上になると $a_s/g \leq 0.4$ となる。弱層においては、雪荷重 1.0kN/m^2 (積雪深：約 33cm) 以上になると $a_s/g \leq 1.0$ 、雪荷重 2.0kN/m^2 (積雪深：約 66cm) 以上になると $a_s/g \leq 0.5$ 、雪荷重 2.5kN/m^2 (積雪深：約 85cm) 以上になると $a_s/g \leq 0.4$ となり、いずれの場合も札幌市における建築基準法による設計用垂直積雪量 140cm を下回る条件となる。このように、冬期間に二次設計レベルの地震が発生すると屋根雪は弱層でせん断破壊する可能性が高いことがわかる。なお、乾き雪の場合は、雪荷重 6.0kN/m^2 (積雪深： 200cm) においても $a_s/g=3.0$ と大きな値を示すことから、屋根雪が破壊する可能性は低いと言える。

これらの結果をみると、屋根雪が含水率 0% を超える湿り雪で弱層が存在する場合は、地震により屋根雪が破壊する可能性が高いことがわかる。また、2 辺拘束以上になると屋根雪の破壊加速度が $a_s/g=1.0$ 以上となり鉛直面から破壊する可能性が低くなることは、前述の振動実験で得られた一つの鉛直面とワイヤラス上層の水平面から破壊した結果と対応している。

3. 屋根雪の滑動と構造体の応答性状に関する振動実験

前述における振動による屋根雪の破壊状況をみると、破壊後における滑動のすべり面は屋根雪と塗装鋼板および弱層面となり、これ

表2 実験シリーズ

すべり面	表面粗さ (μm) Rz	屋根雪の重量 W		
		0.3kN/m^2	0.5kN/m^2	0.7kN/m^2
フッ素塗装鋼板	4.2	●	●	●
つや消し塗装鋼板	21.2	●	●	●
積雪の弱層面	—	●	●	—

らのすべり面の摩擦特性を考慮して構造体の応答性状を検討する必要がある。屋根雪と塗装鋼板との摩擦特性については、勾配屋根で発生する屋根雪の滑落に関する研究で数多くの測定事例があり、塗装鋼板の表面性状や屋根雪の雪質の影響を受けることが明らかとなっている^{14), 15), 16)}。一方、建築物のすべり摩擦減衰に関する研究をみると、摩擦係数は速度依存性を有していることが知られている¹⁷⁾。このような状況をみると、振動による屋根雪の滑動における屋根雪と屋根材との摩擦特性は、地震による構造体の振動挙動を考慮する必要がある。また、屋根雪のすべり面が弱層の場合における摩擦特性に関する研究は皆無である。本研究では、振動による屋根雪の滑動を再現した振動実験を行い、振動時におけるすべり摩擦特性および屋根雪の滑動と構造体の応答性状との関係を検討した。

3.1 実験シリーズ

実験シリーズを表2に示す。表のように、屋根雪のすべり面は表面粗さの異なる2種類の塗装鋼板と積雪の弱層面とした。積雪の弱層面は、1度堆積させた屋根雪を上層と下層に2分割し、上層の屋根雪を下層に載せ、下層の滑動を拘束することで上層の屋根雪を滑動させた。屋根雪の重量 W は 0.3kN/m^2 、 0.5kN/m^2 、 0.7kN/m^2 の3種類とし、積雪の弱層面の場合においては上層の重量を対象としたため 0.3kN/m^2 および 0.5kN/m^2 の2種類とした。実験に使用した屋根雪は雪密度 $250\sim 450\text{kg/m}^3$ の自然雪とした。2種類の塗装鋼板におけるすべり面の雪質はしまり雪とざらめ雪とし、積雪の弱層面はざらめ雪とした。なお、しまり雪とざらめ雪の分類は、前章で行った振動実験を同様に、密度と雪粒の大きさに判断した。

3.2 実験方法

実験に使用した試験体は、大きさ $350\text{mm} \times 550\text{mm}$ の屋根にアルミ製の柱を取り付けて作製した平屋建て無落雪屋根を想定したものである。このような試験体を振動台に取り付け、屋根雪を堆積させたのちに振動実験を行った。なお、試験体のみの重量は 29.4N であり、屋根雪の重量との比は $W=0.3\text{kN/m}^2$ で $1:1$ (屋根雪重量： 29.4N)、 $W=0.5\text{kN/m}^2$ で $1:1.67$ (屋根雪重量： 49.0N)、 $W=0.7\text{kN/m}^2$ で $1:2.33$ (屋根雪重量： 68.6N) である。振動台は大きさ $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ の一軸水平加振装置で、振動台の振幅 δ_0 の最大値は $\pm 30\text{mm}$ である。実験室の温度は 5°C 前後を確保し、雪質の急激な変態が発生しない温度条件とした。

加振の流れを図7に示す。図のように、自由振動加振により試験体の固有振動数 f と減衰定数を測定した。この場合、屋根雪が滑動しない程度で加振した。これらの測定した f から加振振動数 p を決定し、正弦波による調和振動加振を行った。1回当たりの加振時間は 10s 前後とし、各回における振動台の振幅 δ_0 は $10\text{mm} \sim 30\text{mm}$ まで 5mm 刻みに増加させた。なお、振動台、試験体、および屋根雪

の挙動は加速度計により測定し、各加速度のサンプリング周波数は200Hzである。

p は滑動せずに屋根雪が屋根の重量として作用しているときを対象とし、試験体の応答加速度 a_m を入力加速度 a_0 で除した加速度応答倍率 a_m/a_0 が2~3となるように共振曲線に基づいて設定した。ここで、屋根雪の重量 W と測定した固有振動数 f との関係を図8に示す。なお、 f は各すべり面の平均値である。図のように、 $W=0.0\text{kN/m}^2$ の f は約6.0Hzであり、耐震性が確保された木造住宅の固有振動数に近似した値を示している¹⁸⁾。 $W>0.0\text{kN/m}^2$ の場合をみると、 W の増加に伴い f が減少する関係を示した。減衰定数はいずれの場合も1~2%であり、これらの f と減衰定数から共振曲線に基づいて p を設定した。共振曲線は減衰定数、振動数比 p/f 、および加速度応答倍率 a_m/a_0 との関係により示され、減衰定数1~2%、 $p/f=0.7$ の場合は $a_m/a_0=2.0$ となる。このことから、 $p/f=0.7$ として p を決定した。

3.3 実験結果

入力加速度 a_0 が 6.0m/s^2 前後の場合における各すべり面の加速度時刻歴の一例を図9に示す。図のように、フッ素塗装鋼板で $W=0.3\text{kN/m}^2$ の場合をみると、試験体の応答は、振動台の周期とほぼ

図7 加振の流れ

図8 試験体の固有振動数 f

同様であるとともに位相差がほとんど無く、振動台と一体的に振動している。試験体の応答加速度は振動台の約2倍となっている。これに対し、屋根雪の応答をみると、屋根雪が滑動すると応答加速度が一定で推移するため、規則的な矩形波となっている。屋根雪と試験体の周期は同様で推移しているものの、約30°の位相差が生じている。すべり面が積雪の弱層面で $W=0.3\text{kN/m}^2$ の場合においても、フッ素塗装鋼板と同様の傾向を示している。このように、屋根雪が滑動した際は、試験体と屋根雪の周期に大きな違いがみられないものの、位相のずれが生じることがわかる。これらに対し、つや消し塗装鋼板で $W=0.3\text{kN/m}^2$ の場合をみると、屋根雪の応答は前述と同様に規則的な矩形波を示すが、試験体の応答は若干不規則に推移し、 $W=0.5\text{kN/m}^2$ の場合をみると試験体応答の不規則性が顕著となり振動台と一体的に振動していない状況となる。このように、屋根雪のすべり面により試験体の応答性状が異なる。

ここで、図10に示すように、試験体と屋根雪の振動挙動の違いを位相差 θ で捉え、試験体の振動挙動や図中の動摩擦抵抗力 F' が θ に及ぼす影響を検討するとともに、 θ が試験体の応答倍率に及ぼす影響を検討した。なお、 θ は試験体および屋根雪における卓越振動数付近の位相角の差から求めた。

図11に、 $W=0.3\text{kN/m}^2$ 、 0.5kN/m^2 、および 0.7kN/m^2 の各重量で同一の入力加速度の場合を平均した試験体応答加速度 a_m および応答速度 v_m と位相差 θ の平均値および標準偏差との関係を示す。図のように、 a_m と θ の平均値との関係をみると、いずれのすべり面・雪質においても a_m の増加に伴い θ の平均値が増加する関係を示すが、つや消し塗装鋼板でしまり雪の a_m が他の事例に比べて大きな値を示しており、 a_m と θ の回帰式から得られる決定係数も $R^2=0.384$ と小さい。これに対し、 v_m と θ の平均値との関係をみると、いずれのすべり面・雪質においても v_m の増加に伴い θ の平均値が増加する関係を示し、 v_m の増加に伴いすべり面や雪質の影響が小さくなる。 v_m と θ の回帰式から得られる決定係数は $R^2=0.622$ であり、前述に比べて両者の相関性が高い。このような結果をみると、位相差 θ は、 v_m が大きいほど v_m に依存することがわかる。次に、 a_m と θ の標準偏差との

図9 各すべり面の加速度時刻歴

図 10 位相差 θ と動摩擦抵抗力 F'

図 11 試験体応答加速度 a_m と応答速度 v_m の平均値・標準偏差との関係

関係、および v_m と θ の標準偏差との関係をみると、 a_m と v_m の両者で同様の関係を示し、フッ素塗装鋼板のしまり雪およびざらめ雪における θ の標準偏差は 10° 以下とバラツキが小さく、 a_m および v_m の増加に伴い θ の標準偏差が減少する関係を示す。このような関係をみると、フッ素塗装鋼板の θ は、 a_m および v_m の増加に伴い屋根雪の重量や動摩擦係数の影響、すなわち、動摩擦抵抗力の影響が小さくなる。弱層面においては両者に明瞭な相関関係はみられないものの、標準偏差の値は 5° 以下であり、フッ素塗装鋼板と同様にバラツキが小さい。これらに対し、つや消し塗装鋼板における θ の標準偏差をみると、ざらめ雪の場合で 15° 前後を示すケースが多く確認でき、バラツキが大きくなる。 θ の標準偏差は各屋根雪の重量で同一の入力加速度の場合を平均した値から求めているため、標準偏差が大きい場合は動摩擦抵抗力に大きなバラツキを有していると考えられるが、特に、動摩擦係数のバラツキが大きくなったと考えられる。つや消し塗装鋼板の表面粗さはフッ素に比べて 5 倍程度大きく、

図 12 動摩擦抵抗力 F' と位相差 θ との関係

図 13 位相差 θ と加速度応答倍率 a_m/a_0 との関係

既往の研究によると、動摩擦係数はフッ素塗装鋼板に比べて最大で 3 倍程度大きい値を示すとともに、雪質や屋根雪と屋根葺材との界面に発生する融雪水の影響を受け、しまり雪とざらめ雪との差、および界面が乾燥している状態と湿潤している状態との差は約 1.0 に達する場合がある¹⁶⁾。このためつや消し塗装鋼板では、動摩擦係数が大きいケースと小さいケースが混在し、動摩擦係数が大きいケースにおいては前述の加速度時刻歴のように試験体応答の不規則性が顕著となったため、 θ のバラツキが大きくなったものと考えられる。

図 12 に、動摩擦抵抗力 F' と位相差 θ との関係を示す。図のように、フッ素塗装鋼板の F' と θ との関係をみると、両者に明瞭な相関関係はみられない。これに対し、つや消し塗装鋼板をみると、 F' がフッ素塗装鋼板に比べて大きくなる傾向を示すとともに雪質の影響も顕著でしまり雪の F' が大きくなる傾向を示す。 F' と θ との関係は、バラツキが大きいものの、概ね F' の増加に伴い θ が減少する関係を示す。一方、積雪の弱層面の場合をみると、フッ素塗装鋼板と同様に F' と θ に明瞭な相関関係はみられない。これらの結果をみると、すべり面がフッ素塗装鋼板および積雪の弱層面の θ は F' の影響が小さく v_m に大きく依存し、つや消し塗装鋼板の場合は v_m と F' の影響を受けると言える。

図 13 に、位相差 θ と試験体の加速度応答倍率 a_m/a_0 との関係を示す。なお、 a_m/a_0 は試験体の最大加速度と振動台の最大加速度との比

率である。図のように、 θ の増加に伴い a_m/a_0 が減少する関係を示し、 θ が 50° 以上になるとすべり面や雪質に関係なく a_m/a_0 が2.0を下回る傾向を示す。 $a_m/a_0=2.0$ は屋根雪が滑動せず屋根重量として作用した場合の加速度応答倍率であり、この数値を下回る場合は屋根雪の滑動により試験体の応答加速度が減少したことになる。すなわち、 θ が大きいほど試験体の応答加速度が減少する。これに対し、 θ が 50° 未満の範囲をみると、 a_m/a_0 が2.0を上回る傾向を示し、つや消し塗装鋼板においては θ が小さくなることで試験体応答の不規則性が顕著となるためバラツキが大きくなり、 a_m/a_0 が3.5前後を示す。

このように、屋根雪が滑動した場合における試験体の応答は試験体と屋根雪との位相差で変化し、動摩擦抵抗力が大きく位相差が小さくなった場合は試験体の応答加速度が増加する傾向を示し、屋根雪が滑動し易いすべり面の場合、あるいは、試験体応答速度の増加により位相差が大きくなった場合は、試験体の応答が減少することが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、積雪期の地震に対する屋根雪の動的挙動と構造体の応答性状との関係を明らかにすることを目的に、振動による屋根雪の破壊形態を整理するとともに、屋根雪滑動時におけるすべり面の摩擦特性と応答性状との関係を振動実験により検討した。その結果、屋根雪の凍着や屋根面の突起により滑動が部分的あるいは全面的に拘束された場合は、積雪層の水平面に形成される屋根雪の弱層面でせん断破壊が発生する可能性が高いことが明らかとなった。屋根雪破壊後に滑動した場合における構造体の応答は、構造体と屋根雪の位相差により変化し、その位相差は、構造体の応答速度やすべり面の動摩擦抵抗力の影響を受けることが明らかとなった。

今後は、これらの振動実験で得られた結果を基に振動による屋根雪の破壊や構造体応答性状のシミュレーションを行い、屋根雪の動的挙動と木造住宅の地震応答との関係を明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告，2006.8
- 2) 新潟県危機管理防災課：雪による家屋等被害（建物減失）状況，入手先<<http://www.pref.niigata.lg.jp/kikitaaisaku/1199812567102.html>>，2005.6
- 3) 上石勲：中越震災地域での防雪施設への影響と雪崩・土砂災害，第22回日本雪工学会大会論文報告集，pp.93-94，2005.9
- 4) 阿部修，中村勉：水平振動方式による積雪の剪断破壊強度について，第22回日本雪工学会大会論文報告集，pp.11-12，2005.9
- 5) 松澤勝，加治屋安彦，伊東靖彦：地震発生時の斜面積雪の安全率評価に関する一考察，北海道の雪氷，第26号，pp.95-98，2007.9
- 6) 日本建築防災協会編：木造住宅の耐震診断と補強方法，2004.7
- 7) 住宅金融公庫編：住宅・建築主要データ調査報告，戸建住宅編
- 8) Tsutomu Nakamura, Yasuaki Nohguchi, Toshiichi Kobayashi, Yutaka Yamada, Keiichi Ohtani, and Seitaro Takada: The reduction of earthquake energies on buildings by snow on their roofs, Snow Engineering, Balkema, pp.193-200, 1997
- 9) 苔米地司，伊東敏幸，高倉政寛，山口英治：屋根雪の滑雪現象に関する基礎的研究，日本雪工学会誌，Vol.11，No.2，pp.2-9，1995.4
- 10) Hideki NARITA: An Experimental Study on Tensile Fracture of Snow, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A32, pp.1-37, 1984.3
- 11) 遠藤八十一：降雪強度による乾雪表層雪崩の発生予測，雪氷，55巻2号，pp.113-120，1993
- 12) 山野井克己，遠藤八十一：積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性，雪氷，64巻4号，pp.443-451，2002.7
- 13) 雪センター編：2005除雪・防雪ハンドブック（防雪編），2004.12
- 14) 前田博司：金属板屋根における積雪の滑落，雪氷，Vol.41，No.3，pp.199-204, 1979.9
- 15) 渡辺正朋，平井和喜：屋根葺材と雪氷の摩擦に関する研究，日本雪工学会誌，第9号，pp.4-15，1988.12
- 16) 伊東敏幸，高倉政寛，苔米地司：屋根上積雪の経時的な雪質変化と摩擦特性，日本雪工学会誌，Vol.15，No.1，pp.3-9，1999.1
- 17) 柴田康弘，奥岳史，坂田利文，他2名：すべり摩擦型免振構造の振動応答解析に関する研究－摩擦係数の分布とディンプルすべり支承上の地震応答解析－，日本建築学会構造系論文集，第545号，pp.63-69，2001.7
- 18) 綿引誠，町田健一，大橋好光，坂本功：実物大建物振動台実験に基づく木造軸組工法住宅の耐震性能に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第599号，pp.103-110，2006.1

(2008年5月30日原稿受理，2008年10月7日採用決定)