

振動における屋根雪滑動時の動摩擦係数および粘性減衰係数に関する研究

Study on Coefficients of Friction and Damping on Sliding Snow during Seismic Ground Motion

工藤 純也* 千葉 隆弘** 高橋 徹*** 苫米地 司†

Junya Kudo, Takahiro Chiba,
Toru Takahashi and Tsukasa Tomabechi

Abstract

The purpose of this study is to clarify interaction between roof snow sliding and response characteristics of structure during earthquake. In the previous study, the dynamic behavior of roof snow was reproduced analytically using equation of motion including friction coefficient between roof snow and roofing material. In this study, equation of motion including both the friction coefficient and the damping factor was examined experimentally and analytically. We performed shaking table test in cold room, and measured time history of acceleration at roof snow and structural model. Then the friction coefficient and the damping factor were analyzed repeatedly until tracing the results of the experiment.

As the results, accuracy of the analysis was improved dramatically by considering both the friction coefficient and the damping factor. These factor depended on water content within snow, and decreased with water content increase. These results suggested that it is possible to accurately evaluate response characteristics of structure during snowy season earthquake, and to estimate sliding snow velocity on sloped roofs take into consideration damping factor.

1. はじめに

木造住宅の耐震補強は、今後の大地震による災害に対する備えとして推進させる必要がある。特に、積雪地域における冬期の大地震に対しては、屋根の雪荷重が作用した状態での揺れになることから、大きな地震力が住宅の構造体に作用することになり、それに応じた耐震性を確保する必要がある。また、東北地方太平洋沖地震の翌日である2011年3月12日に発生した長野県北部地震では、揺れによって屋根雪が崩落する事例が確認されており⁽¹⁾、こうした揺れによる屋根雪の動的挙動が構造体の応答性状に及ぼす影響を把握する必要がある。

筆者らはこれまでに、地震時における屋根雪の動的挙動を考慮した構造体の応答性状を実験的に検討

し、その実験を再現する解析モデルの検証を行ってきた^{(2), (3)}。振動時の屋根雪には、地震動による慣性力に加えて、屋根雪と屋根葺材との界面に諸抵抗力が生じるが、これまでの研究では、図1に示すように、摩擦抵抗力のみを考慮した解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行った。その結果、振動による屋根雪の滑動と構造体の応答性状との関係を概ね再現することができ、その妥当性を明らかにした。しかし、屋根雪と屋根葺材との界面に介在する融雪水の影響は考慮しておらず、その影響は不明な点が多い。

このような背景から本研究では、屋根雪と屋根葺材との界面に作用する抵抗力に摩擦抵抗力と粘性抵抗力の両方を考慮した場合の解析モデルを実験的および解析的に検討した。

* 北海道科学大学大学院建築工学専攻

** 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所

*** 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻

† 北海道科学大学

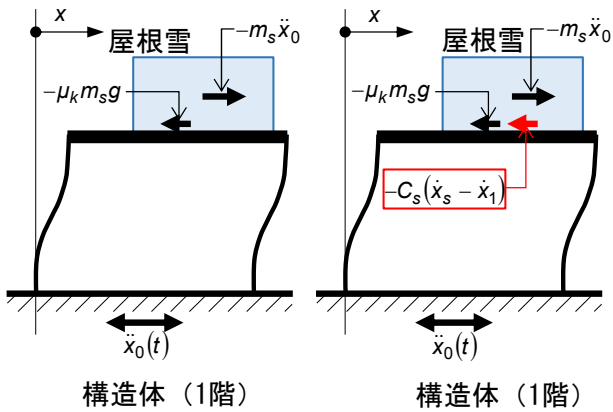


図 1 屋根雪滑動時の諸抵抗力

2. 研究方法

本研究では、試験体を用いた振動実験を行うとともに、動摩擦係数 μ_k と粘性減衰係数 C_s を考慮した運動方程式を用いて時刻歴応答解析を行い、実験結果に近似する μ_k と C_s を導いた。また、振動実験と同時に融雪実験を行い、 μ_k および C_s の含水率依存性について検討した。

振動実験の状況を写真 1 に示す。写真のように、試験体は、陸屋根平屋建てを想定したものであり、屋根の大きさは $350 \times 550 \text{mm}$ である。このような試験体を $450 \times 450 \text{mm}$ の振動台に据え付けて振動実験を行った。屋根雪には自然雪（雪質：しまり雪、雪密度： $\rho = 313 \text{kg/m}^3$ ）を用い、屋根上に重さ 3.0kg の雪を載せて実験を行った。実験に使用した屋根葺材は、塗装鋼板（SG 材）、つや消し塗装鋼板（SM 材）、およびフロート板ガラス（GL 材）の 3 種類とした。なお、試験体重量は、 $3 \sim 4 \text{kg}$ である。加振方法は、始めに、屋根雪が積載された状態で試験体の固有振動数を測定し、次に、試験体の応答倍率が約 2.0 となるように調和振動加振した。また、振動実験は低温実験室内で行った。屋根雪は、 -5°C に保たれた環境で試験体に堆積させ、その後、屋根雪の物性を大きく変化させずに融雪させるため、 5°C まで室温を上昇させてから一定に保ち、 $0.5 \sim 1 \text{ hours}$ ごとに加振した。なお、振動台、試験体、および屋根雪の挙動は、加速度計を用いて測定し、サンプリング周波数は 200Hz とした。

このような振動実験と同時に行った融雪実験は、写真 2 に示すように、振動実験で使用した同じ屋根を約 5° の傾斜をつけて重量計の上に乗せるとともに、その屋根上に振動実験と同じ重さの自然雪を載せ、屋根雪における質量減少量の時刻歴を測定した。屋根雪と同じ重さの氷についても同様の実験を行い、

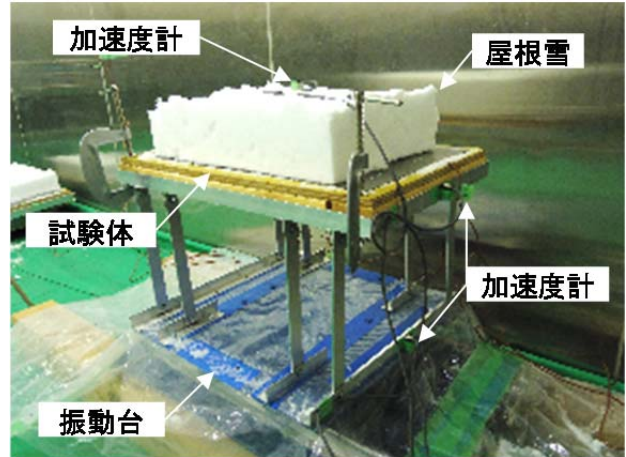


写真 1 振動実験の状況

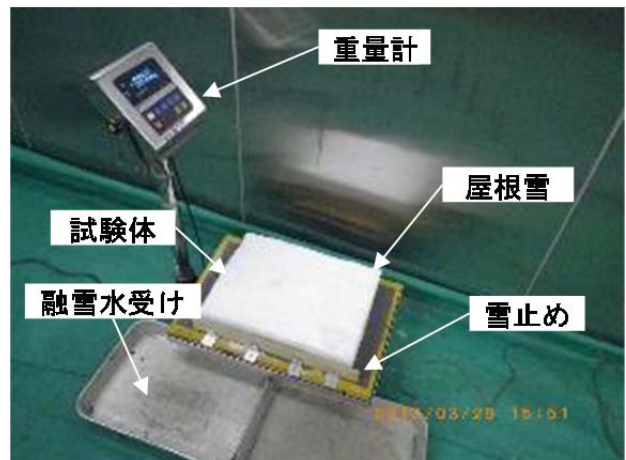


写真 2 融雪実験の状況

これらの実験結果を用いて屋根雪の質量含水率を求めた。

振動実験を再現する解析については、Newmark- β 法（平均加速度法： $\beta = 0.25$ ）に基づいて行った。ここで、試験体および屋根雪の質量を m_1 、 m_s 、試験体および屋根雪の粘性減衰係数を C_1 、 C_s 、試験体の剛性を K_1 、屋根雪および試験体の変位を x_1 、 x_s とした場合における解析に用いた運動方程式を 1) 式におよび 2) 式に示す。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_s + \ddot{x}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_s \end{Bmatrix} + \mu_k m_s g \begin{Bmatrix} -\text{sgn} \\ \text{sgn} \end{Bmatrix} = 0 \quad 1)$$

$$\text{sgn} = \frac{\dot{x}_s - \dot{x}_1}{|\dot{x}_s - \dot{x}_1|} \quad 2)$$

このように、試験体と屋根雪の 2 質点とした質点系せん断型モデルであり、屋根雪に作用する粘性抵

抗力および摩擦抵抗力と反対向きの力が試験体へ伝達するものとした。本解析では、 μ_k と C_s を様々に変化させて実験結果と近似するそれぞれの値を求めた。

3. 研究結果

3.1 各屋根葺材の実験・解析結果

図2に、SG材の場合における加速度時刻歴を振動実験と応答解析で比較した結果を示す。なお、実験室内が5°Cに達した時点をも0 hoursとし、その時点から経過した融雪時間ごとに示している。図のように、解析では、実験で得られた屋根雪の加速度時刻歴と近似するときの μ_k と C_s を求めたが、それらの係数で解析された試験体の時刻歴においても実験で得られた結果と近似した。ここで、融雪時間ごとにみると、0 hoursの場合は、屋根雪および試験体の応答が小さく、融雪時間の増加に伴い一旦増加して減少する履歴をたどっており、融雪時間ごとの μ_k と C_s を用いた解析により実験で得られた屋根雪と試験体の加速度時刻歴を再現することができた。こ

のような解析で得られた μ_k と C_s を融雪時間ごとに見ると、0 hoursでは、 μ_k が0.07、 C_s が2.94N・s/mといずれの係数においても小さな値となった。これに対し、3 hoursの場合をみると、 μ_k が0.25、 C_s が24.50N・s/mであり、いずれの係数においても0 hoursに比べて増加した。一方、9 hoursをみると、 μ_k が0.22、 C_s が10.78N・s/mであり、粘性減衰係数の減少傾向が顕著であった。このように、屋根雪および構造体の応答に応じて μ_k と C_s が変化した。

次に、SM材の場合における加速度時刻歴を振動実験と応答解析で比較した結果を図3に示す。図のように、屋根雪および試験体の応答は、融雪時間の増加に伴い一旦増加し、その後減少する履歴はSG材と同様の傾向を示し、融雪時間ごとの係数をみると、 μ_k は0 hoursが0.17であり、それ以降においては、3 hoursが0.43、7 hoursが0.18となっている。 C_s は0 hoursが17.6N・s/m、3 hoursが14.70 N・s/m、7 hoursが3.92 N・s/mであり、屋根雪と試験体における応答の増減に応じてそれぞれの係数も増減して

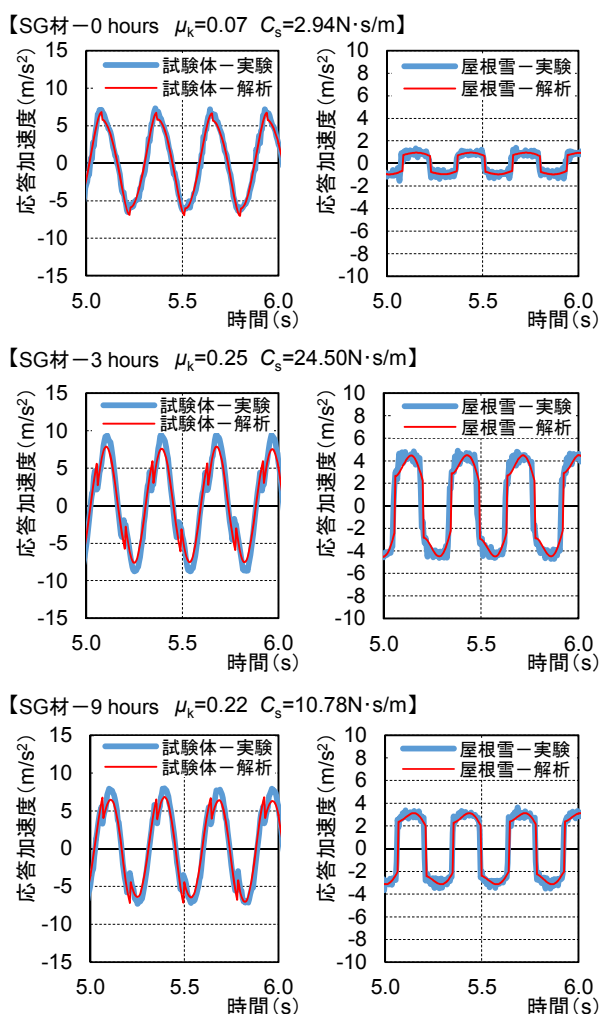


図2 実験と解析の比較 (SG材の場合)

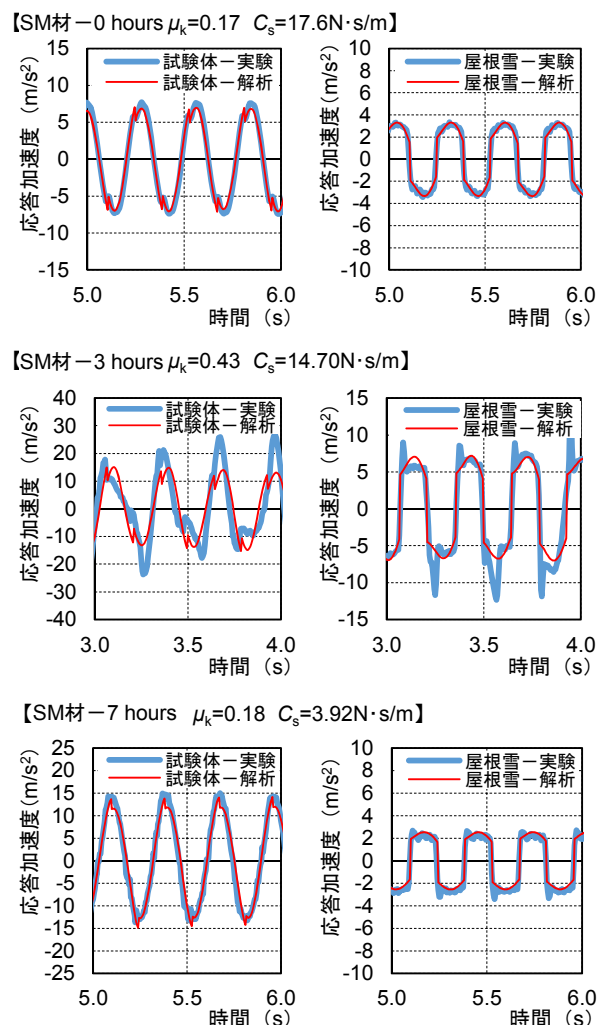


図3 実験と解析の比較 (SM材の場合)

いる。しかし、3 hours の場合をみると、実験と解析が適合しない箇所が存在している。実験で得られた屋根雪の挙動をみると、滑動と停止を繰り返す場面がみられ、そのような挙動は解析で捉えられていないのが振動実験と適合しない要因の一つであると考えられる。

次に、GL 材の場合における加速度時刻歴を振動

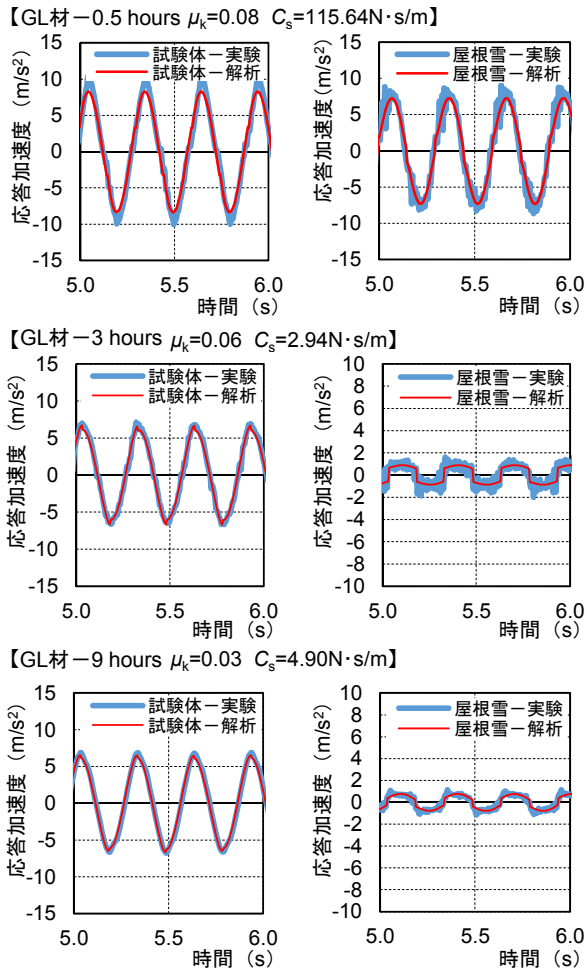


図4 実験と解析の比較 (GL 材の場合)

実験と応答解析で比較した結果を図4に示す。図のように、0.5 hours の場合をみると、試験体および屋根雪の応答が大きくなり、解析で得られた μ_k は 0.08 と小さいものの、 C_s については $115.64\text{N}\cdot\text{s/m}$ と極めて大きな値となった。一方、3 hours の場合をみると、屋根雪の応答が急激に減少し、 μ_k は 0.06、 C_s は $2.94\text{N}\cdot\text{s/m}$ にまで減少した。フロート板ガラスの表面は親水性が高く、屋根雪とガラスとの界面には水膜が形成される。その影響により μ_k と C_s が小さくなったものと考えられる。9 hours の応答をみると、3 hours の場合から大きな変化はみられず、 μ_k は 0.03、 C_s は $4.90\text{N}\cdot\text{s/m}$ であった。

以上の結果をみると、実験で得られた屋根雪および試験体の加速度時刻歴は、屋根葺材の表面性状に加えて融雪時間の影響を受けており、屋根雪および試験体の挙動は様々な状態となる。このような様々な状態に応じた μ_k と C_s を設定することにより、屋根雪と試験体の挙動を解析で再現できることが明らかとなった。

3.2 屋根雪の含水率と諸抵抗係数との関係

本研究では、解析で得られた実験結果と近似する μ_k および C_s の含水率依存性を検討した。まず、融雪実験で得られた質量減少量の時刻歴を図5に示す。図のように、氷の減少量をみると、一定の割合で減少している。これに対し、屋根雪の場合をみると、始めは減少する割合が小さく、15~18時間経過した後から減少する傾向が顕著となっている。これは、屋根雪の場合、始めは、融雪水が雪の中で蓄えられて外側に流出せず、その飽和含水量に達してから融雪水が流出したことを表している。従って、屋根雪における始めの減少は蒸発によるものである。従って、蒸発量を差し引いた氷の質量減少量が屋根雪に

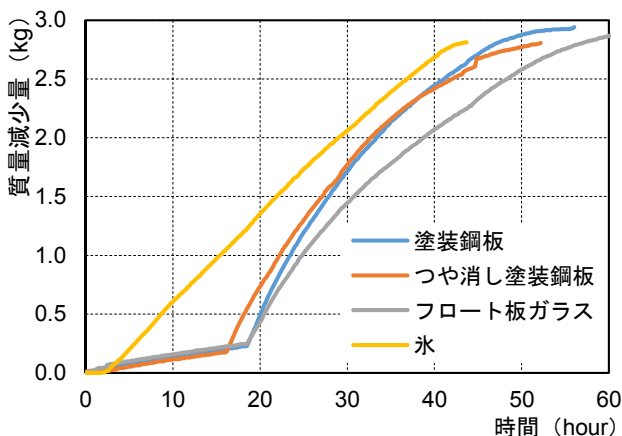


図5 融雪実験による質量減少量の時刻歴

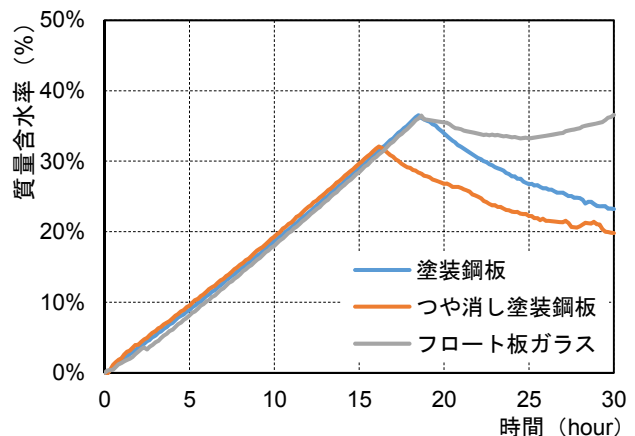


図6 質量含水率の時刻歴

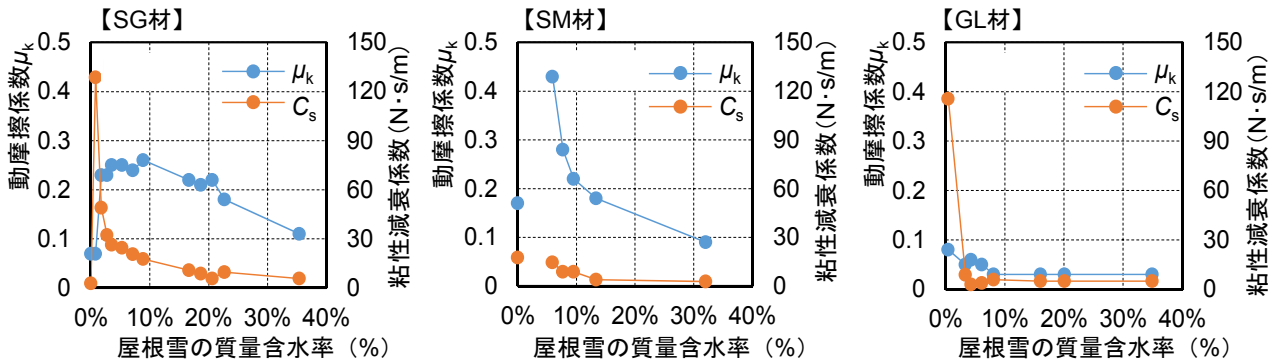


図7 屋根雪の質量含水率と諸係数との関係

蓄えられた融雪水であるとし、その値を融雪水と雪の重量を合計した全重量で除することによって質量含水率を算定した。その結果を図6に示す。図のように、質量含水率は、時間の経過に伴い一定の割合で増加し、質量含水率が30~35%に達した時点から融雪水の流出が始まったことがわかる。

推定した屋根雪の質量含水率と各屋根葺材の μ_k および C_s との関係を図7に示す。図のように、SG材の場合をみると、屋根雪が融雪した直後では、 μ_k が小さく C_s が極めて大きくなり、その後 μ_k は一旦大きくなるものの、質量含水率の増加に伴い μ_k および C_s が徐々に減少している。 μ_k が一旦増加する要因としては、屋根雪の重量による垂直抗力に加えて毛管現象で生じる負圧による垂直抗力が作用したためであると考えられる。このような傾向はSM材でも同様であり、 μ_k の増加・減少傾向がSG材に比べて顕著である。これに対し、GL材の場合をみると、融雪直後に C_s が急増する傾向はSGと同様であるものの、含水率が5%と小さい段階においても μ_k と C_s が急激に減少している。これは、フロート板ガラスの高い親水性により融雪水による水膜が形成されたことを意味していると考えられる。

以上の結果をみると、屋根雪の融雪過程においてその飽和含水率に達する以前においては、屋根雪の滑雪抵抗力が大きく変化し、 μ_k では約3.5倍、 C_s では約35倍の開きがあり、試験体の応答加速度においては約1.6倍の違いが生じている。従って、飽和含水率以前における屋根雪の融雪状態に応じた μ_k と C_s は、構造体における応答の推定精度に大きく影響を及ぼすことになり、屋根雪の質量含水率からこれらの係数を設定する必要がある。

4. まとめ

本研究では、屋根雪と屋根葺材との界面に介在する融雪水の影響を考慮し、既往の研究に加えて粘性減衰係数を考慮した場合の解析モデルを検証した。その結果、粘性減衰係数を考慮することによって解析の精度が格段に向上することが明らかとなった。

また、動摩擦係数と粘性減衰係数の含水率依存性を検討した結果、質量含水率の増加に伴いこれらの係数は減少し、飽和含水率に達する以前においては、その含水率に応じた諸係数が構造体における応答の推定精度に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

【参考文献】

- (1) 日本建築学会北陸支部災害連絡部会：平成23年3月12日03時59分頃の長野県北部の地震被害調査速報，入手先 < <http://news-sv.ajj.or.jp/hokuriku/1info/2011/20110330report1.pdf> >，参照2015.1.27
- (2) Chiba, T., Tomabechi, T., Takahashi, T. and Uematsu, T. : Study on seismic damage conditions of wood-frame houses in snowy region considering dynamic behavior of roof snow, Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.-1782, 2012.9
- (3) 千葉隆弘, 高橋徹, 植松武是, 苫米地司：屋根雪の動的挙動を考慮した構造体の地震応答解析と積雪期の地震による木造住宅の被害状況について. 日本雪工学会誌, Val.29, No.1, pp.3-12, 2013.1.