

振動による屋根雪滑動時の動摩擦係数と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 (北海道科学大学大学院), 千葉 隆弘, 苫米地 司 (北海道科学大学)
高橋 徹 (千葉大学)
KUDO Junya, CHIBA Takahiro, TOMABECHI Tsukasa
TAKAHASHI Toru

1. はじめに

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¹⁾。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。

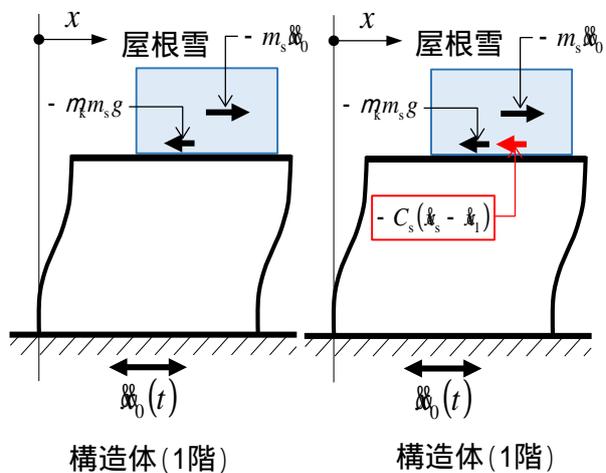


図1 屋根雪滑動時における力の釣り合い

このような背景から本研究では、屋根雪と屋根葺材との摩擦係数のみを考慮した解析モデルに加えて、粘性減衰係数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。

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 の含水率依存性を検討した。

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(しまり雪 $\rho=313\text{kg/m}^3$)を用い、屋根上に 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)、つや消し塗装鋼板(SM)、およびフロート板ガラス(GL)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い、屋根雪は -5 に保たれた環境で試験体に堆積させ、その後 5 まで室温を上昇させてから一定に保ち、 $0.5 \sim 1$ 時間ごとに加振した。なお、振動台、試験体、および屋根雪の挙動は、加速度計で測定し、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



写真1 振動実験の状況

写真2 融雪実験の状況

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載せるとともに、その屋根上に振動実験と同じ重さの自然雪を載せ、融雪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、氷と屋根雪との融雪状況の差異から屋根雪の含水率を求めた。

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:β=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)式に示す。

$$\begin{matrix} \hat{e} \hat{n}_1 & 0 & \hat{u} \hat{\delta}_1 & + & \hat{\delta}_0 \hat{u} & \hat{e} & C_1 + C_s & - & C_s \hat{u} & \hat{\delta}_1 \hat{u} \\ \hat{e} \hat{0} & m_s \hat{u} & \hat{\delta}_s & + & \hat{\delta}_0 \hat{y} & \hat{e} & - & C_s & C_s \hat{u} & \hat{\delta}_s \hat{y} \\ & & & & & & & & & \hat{p} \end{matrix}$$

$$+ \begin{matrix} \hat{e} K_1 & 0 \hat{u} & \hat{x}_1 \hat{u} \\ \hat{e} \hat{0} & \hat{u} & \hat{x}_s \hat{y} \end{matrix} + m_k m_s g \hat{i} - \text{sgn} \hat{u} \hat{y} = 0 \quad \dots 1) \text{式}$$

このように、試験体と屋根雪の2質点としたせん断型モデルであり、屋根雪の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の場合における振動実験で得られた加速度時刻歴と解析結果とを比較したものを示す。なお、実験室内の5に設定してからの経過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に近似させたが、試験体の時刻歴においても解析

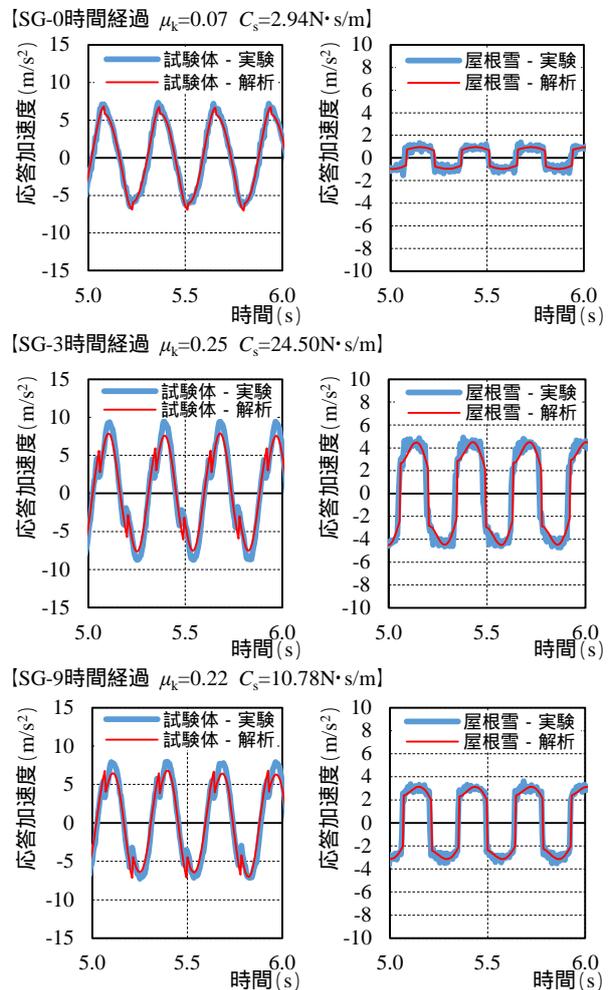


図2 SGにおける経過時間毎の加速度時刻歴

で十分に再現できている．経過時間ごとに試験体および屋根雪の時刻歴をみると，0 時間経過の場合は，屋根雪の応答が小さくなっており，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 時間経過の場合をみると，試験体および屋根雪のいずれにおいても応答が大きくなり，いずれの係数においても前述に比べて増加した．一方，9 時間経過をみると，屋根雪の応答が減少し，粘性減衰係数の減少傾向が顕著であった．このように，SG の場合は，時間の経過に伴い屋根雪の応答が増減した．SM の場合における振動実験で得られた加速度時刻歴と解析結果とを比較したものを図 3 に示す．図のように，SG と同様に，時間の経過に伴い試験体および屋根雪のいずれにおいても応答が増減している．しかし，3 時間経過の場合をみると，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適合しない要因の一つであると考えられる．次に，GL の場合における振動実験で得られた加速度時刻歴と解析結果とを比較したものを図 4 に示す．図のように，0.5 時間経過の場合をみると，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 は小さいものの， C_s については，極めて大きな値となった．一方，3 時間経過の場合をみると，屋根雪の応答が急激に減少し， C_s は $2.94\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 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 時間経過の応答をみると，3 時間経過と同様の傾向を示す．

以上の結果をみると，いずれの屋根葺材においても C_s の影響を無視できないといえる．

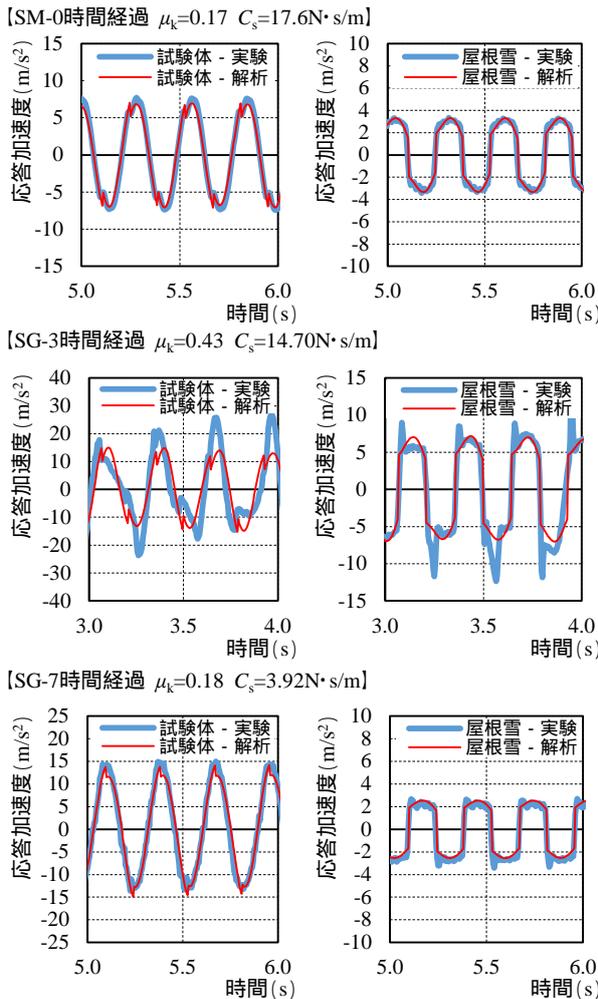


図 3 SM における経過時間毎の加速度時刻歴

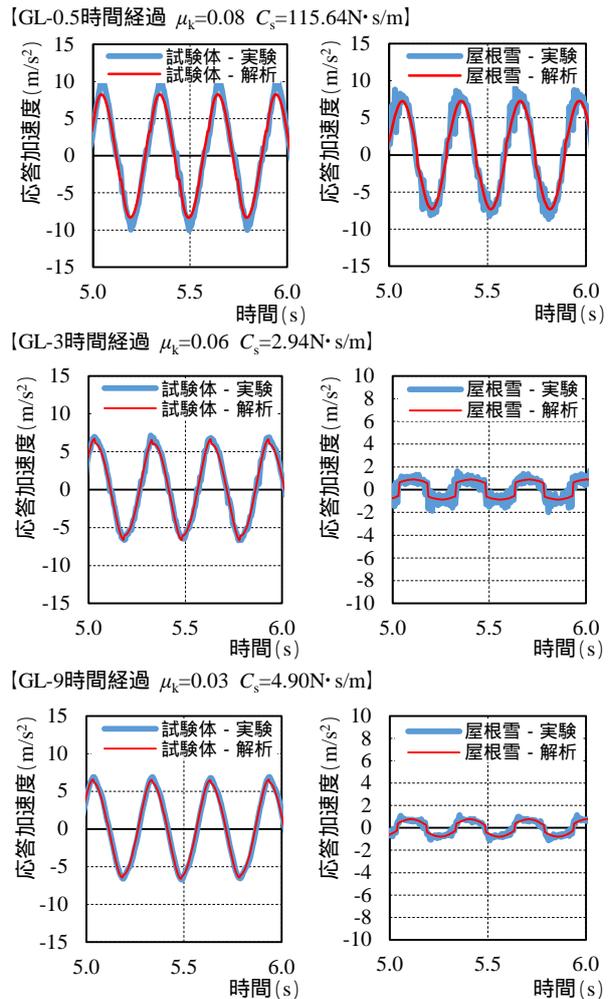


図 4 GL における経過時間毎の加速度時刻歴

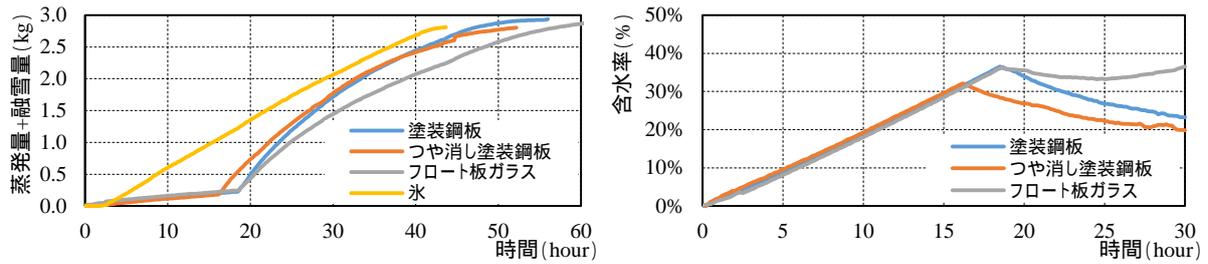


図5 融雪実験で得られた融雪量

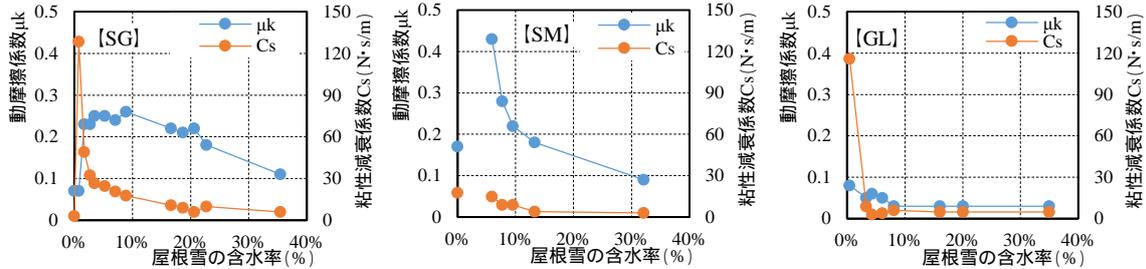


図6 各屋根葺材における屋根雪の含水率と諸係数との関係

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。融雪実験で得られた融雪量と推定した屋根雪の含水率の時刻歴を図5に示す。図のように、氷の融雪量をみると、一定の割合で融雪している。これに対し、屋根雪の場合をみると、始めは融雪する割合が小さく、15～18時間経過した後から融雪する割合が大きくなっている。これは、屋根雪の場合、融雪水が雪の中で蓄えられて融雪水が外側に流出せず、屋根雪における飽和含水量に達してから流出は始まったことを表している。従って、屋根雪重量における始めの減少は蒸発によるものである。このような実験で得られた氷の融雪量から屋根雪が蓄えた融雪水、すなわち、含水率を推定した。その結果をみると、含水率は時間の経過に伴い一定の割合で増加し、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。

推定した屋根雪の含水率と各屋根葺材の μ_k および C_s との関係を図6に示す。図のように、SG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、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でも同様であり、 μ_k の増加・減少傾向がSGに比べて顕著である。これに対し、GL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。

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、含水率の増加に伴いこれらの係数は減少し、飽和含水量に達する以前においては、粘性減衰係数や屋根雪の毛管現象の影響を無視できないことを明らかにした。

【参考文献】

- 1) 千葉隆弘, 高橋徹, 植松武是, 苫米地司, 2013: 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, 29(1), 3-12.