

Experimental Research on Rate- and State- Dependent Friction Constitutive Law Focusing on the Transient Change of Frictional Strength at Intermediate to High Slip Velocities

中-高速度域条件下における摩擦強度の過渡的变化に着目した速度状態依存摩擦構成則に関する実験的研究

中野 龍二

地震は断層での不安定なすべりが原因であると Brace and Byerlee [1966]によって実験的に示されて以来、模擬断層における摩擦特性を解明するために種々の摩擦実験が行われた。それらの結果を説明することを目的として、Dieterich [1979]と Ruina [1983]により速度状態依存摩擦構成則が提唱され、摩擦係数は摩擦表面でのすべり速度とその“状態”によって記述することが可能となった。この速度状態依存摩擦構成則により、断層の摩擦的安定性や固着時の摩擦強度回復の記述が可能であることから、速度状態依存摩擦構成則は地震サイクルのシミュレーション等で使用されている。

速度状態依存摩擦構成則は3種類のパラメータ a , b , L を用いて記述される。これらの値は、低速度域条件下での摩擦実験の結果から、 a , b はともに 10^{-2} - 10^{-3} 、 L は μm のオーダーとなることが明らかになっている。しかし、中-高速度域条件下では、摩擦発熱に起因する摩擦強度の弱化現象(例えば、flash heating, thermal pressurization, 摩擦溶融)が観察されているが、上述のパラメータの値ではこれらの弱化現象を説明することができない。そのため、中-高速度域の条件下において観察されるこれらの弱化現象を記述することが可能な摩擦構成則が必要とされる。そこで、本研究では、速度状態依存摩擦構成則を中-高速度域へと拡張できる可能性を考慮し、実際に中-高速度域条件下での摩擦実験を行い、その実験結果を用いて速度状態依存摩擦構成則のパラメータを推定することにより、中-高速度域にて観察される弱化現象を説明できる摩擦構成則の検討を行った。

まず、回転式摩擦試験機を用いて中-高速度域での速度一定実験、および速度ステップ実験を行った。これらの実験は、外径・内径をそれぞれ 40 mm・26 mm の円筒形に加工したジンバブエ産の斑レイ岩を一对使用し、1.5 MPa の垂直応力条件下で行った。その結果、速度一定実験において、 ~ 200 mm/s のすべり速度まではほぼ一定の定常摩擦係数値が得られたが、そのすべり速度を超えると急激な定常摩擦係数値の減少が観察された。一方、速度ステップ実験の結果に対して Levenberg-Marquardt 法を用いることで推定された速度状態依存摩擦構成則のパラメータ a , b , L の値は、それぞれ以下の傾向を示した。(1) a については、誤差を含めて <0.03 の値をとり、すべり速度に依らずほぼ一定である。(2) b については、誤差を含めて <0.5 の値をとり、すべり速

度に対する依存性はほぼ見られない。(3) Lについては、誤差を含めて $<0.3 \text{ m}$ の値をとり、すべり速度に対してほぼ線型的に増加する。

次に、試料表面温度の摩擦係数の定常値に対する依存性を確認することを目的として、試料表面温度を変化させる実験を行った。その結果、摩擦係数の定常値について、中-高速度域条件下での実験から推定された試料表面温度に達しても、ほぼ摩擦係数の定常値に変化が見られなかった。このことから、中-高速度域条件下での実験で観察された急激な定常摩擦係数値の減少は、試料表面温度に起因するものではないことが示された。

本研究で得られた速度ステップ実験の結果と、先行研究の低速度域条件下にて行われた速度ステップ実験の結果との比較を行うことで、低-高速度域のすべり速度に対する速度状態依存摩擦構成則の各パラメータについて、以下の傾向が得られた。(1) aについては、すべり速度に依らずほぼ一定である。(2) bについては、 $0.1\text{-}1 \text{ mm/s}$ まではすべり速度に依らずほぼ一定であるが、その速度域を超えると急激に増加する。(3) Lについては、すべり速度に対してほぼ線型的に増加する。また、速度一定実験で観察された急激な定常摩擦係数値の減少については、Rice [2006]による flash heating に関する記述式により説明することができたため、 $\sim 200 \text{ mm/s}$ のすべり速度を境に flash heating が起きていた可能性が高い。

速度状態依存摩擦構成則のパラメータb と摩擦係数の定常値は、あるすべり速度を境界としてその挙動が変化するという意味で類似している。しかし、両者の境界となるすべり速度は大きく異なる(パラメータb では $0.1\text{-}1 \text{ mm/s}$ 、摩擦係数の定常値では $\sim 200 \text{ mm/s}$)。このことは、パラメータb の変化は flash heating 以外のものに起因している可能性があることを示唆している。一方、パラメータL については、実際の地震波を用いた解析からその値は m のオーダーになることが報告されているが、室内実験から推定される L の値は μm のオーダーであり、両者の間には数桁のギャップが存在する。このギャップに対して、パラメータL は断層の表面粗さに依存するというスケール則があり、実験室と天然の断層では断層の表面粗さが異なるためであるという説明がなされている。しかし、本研究が示唆したことは、パラメータL はすべり速度に依存するという、スケール則とはまったく異なるものであり、断層挙動の理解に新たな切り口を与えるものであると期待できる。

以上より、本研究は、低-高速度域において、速度状態依存摩擦構成則のパラメータ b と L にはすべり速度依存性があることを示し、特に、パラメータL については、既存のスケール則とはまったく異なった、すべり速度に対する依存性を見出すことで、断層挙動の理解に貢献した。本研究の結論として、低速度域にて提唱された速度状態依存摩擦構成則を、中-高速度域まで拡張することは可能であるが、その際はパラメータ b と L に対するすべり速度依存性を考慮する必要がある。