

IAEG Bulletin 紹介(6)

地表地震断層の長さや地震源のパラメータについての新たな経験的關係式に関する研究紹介

前国際委員 伝法谷 宣洋

1. はじめに

地震防災はもちろん、個別に耐震設計のための地震動を設定するような場合、どこでどのような大きさの地震が発生するのかを知る必要がある。

規模の大きな地震が発生すると、出現した地表地震断層の長さや変位量が大きくなることは経験的に知られていた。地震の規模と地表地震断層の長さとの関係は、多く研究されており、関係式はスケーリング則と呼ばれる。例えば、我が国では古く、松田(1980)¹⁾が活断層長と地震マグニチュードの経験的な関係式を求めている。 $\log L = 0.6M - 2.9$ という単純な形の式は基にした地震数の少なさやばらつきはあるものの、関係を良く表しており、「松田式」と呼ばれて現在でも使用されている。それ以外にも、Wells and Coppersmith(1994)²⁾、入倉・三宅(2001)³⁾など多くのスケーリング則が提案されている。

地表地震断層の繰り返しで、活断層が形成されるということに基づけば、調査により知ることができる活断層の長さから、スケーリング則により、将来発生する地震の規模を知ることができる。

しかし、地震のマグニチュードに影響する要因は、単純に長さだけではなく、それ以外の要因もあるはずであろうことは想像に難くない。それは、これらのスケーリング則がかなりのばらつきを伴うことから明らかである。規模の大きい地震の発生数が少ないこともあり、現実に発生した地震からのみの検討の限界でもあろう。

今回紹介する論文は、地震発生に伴う地表地震断層の発生を模擬した室内試験を行い、地震マグニチュードと地表地震断層長のみでなく、被覆層厚との関係式を求めたものである。室内試験を使用した地震規模のスケーリング則を検討したもの、特に被覆層厚を考慮したものは非常に少ないと思われ、本論文を紹介する。

2. 紹介論文の概要

紹介する論文は Bulletin の第 76 巻第 1 号 383～392 ページに掲載された「A new empirical equation proposed for the relationship between surface rupture length and the earthquake source parameters」⁴⁾である。本論文の執筆者のうち、A. Turgut と K. Ercin Kasapoglu は、トルコの Hacettepe 大学の所属、N. S. Isik はトルコの Gazi 大学の所属である。

以下、論文の構成に沿って概要を述べる。

Introduction

- ✓ 規模の大きい地震が発生すると、地表地震断層が出現することが知られている。地震の規模が大きくなるほど、地表地震断層が出現する長さは長くなり、特に規模の大きい横ずれメカニズムの地震の場合は、長大な地表地震断層が出現する。
- ✓ 地表地震断層に関しては多くの研究がなされており、例えば Wells and Coppersmith(1994)²⁾ は、世界中の歴史地震のデータを集め、地表地震断層長、震源断層長、震源断層面積、最大及び平均変位量との間の関係を求めた。
- ✓ しかし、これらの研究は、震源の深さや、被覆層の厚さを考慮したものはない。
- ✓ 本研究では、地震のマグニチュードのみでなく、震源の深さ、被覆層の厚さと地表地震断層長との間の関係を把握するために、横ずれ断層のメカニズムを模した室内試験を実施し、世界中で発生した地震のデータを整理して、室内試験のデータと結びつけることにより、それらの間の関係を求めた。

Establishment of database

- ✓ 最初に、横ずれ断層のメカニズムを模した室内試験を行い、地表地震断層を発生させて多くのデータを取得した。

Laboratory tests model for simulation of strike-slip fault mechanisms

- ✓ 試験装置は、2つの鉄製フレームからなる。一方は床に固定し、他方は、油圧ジャッキによりフレームの境界面に平行に水平方向に移動できるようにした。
- ✓ 横ずれ断層を模擬するために、安山岩のブロックを用意した。2つのフレーム内にそれぞれ収納し、この鉛直の境界面が断層面を模擬することになる。境界面を挟んで境界面に垂直に、安山岩ブロックを削孔し、その孔中に安山岩コアを収納した。この安山岩コアはアスペリティを模擬することになる。安山岩コアの設置深さは安山岩ブロック内の上端、中央、下端の3通り設定した。これは、震源深さの違いを模擬することになる。装置の概要を図-1に示す。

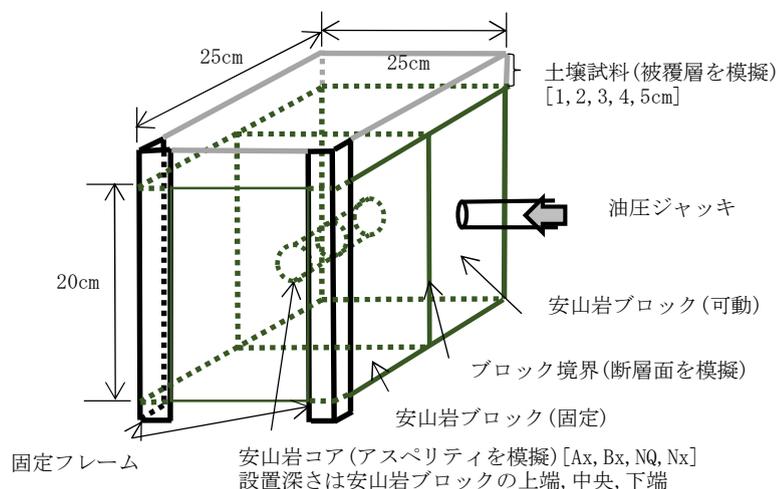


図-1 地表地震断層発生室内試験装置の概要 原著論文を基に作成

- ✓ 安山岩コアの直径は、3.01cm(AX)、4.24cm(BX)、4.76cm(NQ)、5.47cm(NX)の4種用意し、これらの大きさの違いは地震マグニチュードの違いを模擬することとした。
- ✓ 被覆層として、安山岩ブロックの上に、土壌試料を設置した。試料はいくつか試みた結果、砂分 45%、シルト分 50%、粘土分 5%で、含水率 18%のものとした。被覆層の厚さは、1～5cm まで、1cm 刻みで 5 種設定した。これが震源断層よりも上位の被覆層を模擬することになる。
- ✓ 油圧ジャッキにより、可動側のブロックを境界面に平行に水平方向に加圧し、安山岩コアが破壊するまで変位させた。被覆層の上面を観察し、現れた亀裂の長さの変位量を計測した。これが、地表地震断層を模擬することになる。

Data collected from the earthquakes

- ✓ 全世界で実際に発生した地震について、地表地震断層長やマグニチュード、震源深さなどのデータを収集し、整理した。マグニチュードについては、表面波マグニチュードなどは飽和するという研究もあるので、飽和しないモーメントマグニチュードで整理した。

Conversion of the data obtained from model tests to the field-size earthquakes

- ✓ 室内試験で地表地震断層を模擬した長さや、震源深さを模擬したコアの設置深さ等のデータを整理し、現実の地震によるものと比較し、スケールの違いによる換算係数を決定して両者の関係を求めた。
- ✓ 室内試験においてアスペリティを模した 4 種の大きさのコアのうち、最も大きい NX サイズのものを用いた場合の試験を地震マグニチュード 7 を模擬したものとした。
- ✓ 現実の地震のうち、Hector Mine 地震(1999 年)は、震源断層の特性等が最も良く研究されている地震の一つであり、マグニチュードは、7.1、地表地震断層長さと震源深さの比(L/D)は、2.93 とされている。
- ✓ 以上のことから、室内試験のうち、NX サイズのコアを用い、L/D を 3.02 と設定したケースの試験をマグニチュード 7.1 の地震を模擬したものとして解析を行った。
- ✓ 異なる大きさのコアを用いて行った試験のコアの断面積の違いは地震のマグニチュードの違いに相当するものとした。

Statistical evaluation of the relationship between surface rupture, earthquake magnitude and focal depth

- ✓ 地表地震断層長とモーメントマグニチュードとの関係式で最も良く知られているものに、Wells and Coppersmith(1994)による $M_w = a + b \times \log L$ があり、 $a=5.08$ 、 $b=1.16$ とされている。
- ✓ Wells and Coppersmith(1994)のみでなく、Wesnousky (2008)⁵⁾と Biasi et al. (2013)⁶⁾に示された地震のデータを使用して、最小二乗法により同じ形の式を求めると $a=5.0653$ 、 $b=1.1177$

となる。この場合 γ^2 は 0.763 である。これらの係数は Wells and Coppersmith(1994)によるものと近い。

- ✓ 本研究で実施した室内試験のデータと、現実の地震のデータとを合わせて、最小二乗法により地表地震断層長と地震マグニチュードの関係式を求めた。その結果、 $a=5.8045$, $b=0.7935$ となり、 γ^2 は 0.638 に低下した。室内試験では、被覆層を設置して試験しているので、その影響により、関係式の相関係数は低下したものと考えられる。
- ✓ そこで、室内試験のうち、被覆層厚さ 1cm のもののみと現実の地震のデータとにより関係式を求めた。この場合、 $a=5.2862$, $b=1.0339$ となり、 γ^2 は 0.755 となった。
- ✓ この結果、被覆層厚は、地表地震断層長に大きく影響することがわかった。しかしながら、現実に発生した地震に関しては被覆層厚を求める信頼できる方法はないので、被覆層厚の影響は、室内試験による結果のみで評価することとし、以下の地表地震断層長、震源深さ、被覆層厚との関係式を求めた。
- ✓ $L=-1.895 \times H-0.206 \times (D-H)+(1.809^{Mw})-16.204$
- ✓ ここに、D は震源深さ(km), H は被覆層厚(km), L は地表地震断層長(km), Mw はモーメントマグニチュードである。
- ✓ この関係式による相関性は、ばらつきも大きく、現実的には決して高いとは言えない。これは、室内試験と現実の地震との間のスケールの違い、さらに、被覆層物質の違いによるものと考えられる。被覆層物質は、歪破壊の吸収に大きな影響を及ぼすことが考えられるからである。
- ✓ しかし、今回の関係式は、将来の研究に対して益するものであると考えられる。

Conclusions

- ✓ 横ずれ断層メカニズムを模した地表地震断層発生の室内試験を行い、以下の結論を得た。
- ✓ 地表地震断層の形成及びその長さは、地震マグニチュード、震源深さ、被覆層厚さ、被覆物質の種類に影響される。
- ✓ 地表地震断層の長さは、地震のマグニチュードが大きくなると長くなる。
- ✓ 震源深さが深くなると、地表地震断層は短くなる。
- ✓ 被覆層が厚くなると、地表地震断層は短くなる。

3. 終わりに

地震のマグニチュードが大きいと地表地震断層は長く、震源が深い、あるいは、被覆層が厚いと地表地震断層は短いという本論文の Conclusion での定性的な記述は、introduction で述べられたことの繰り返しであるかのように見え、本研究の意味はなかったかのようにも受け取られかねない。

しかし、はじめにでも述べたように、これまで、地震規模と地表地震断層長との間のスケールリング則は、実際に発生した地震からの経験的關係則に限られ、近年では、理論的な検討としても、

数値シミュレーションに限られていた。本研究で試みられたような室内試験を行ってスケールリング則を検討した例は、寡聞にして筆者もほとんど知らない。

もちろん、本論文でも述べられたように、実際の地震、断層と室内試験との間には非常に大きなスケールの差がある。前者がキロメートルオーダーなのに比較して後者はセンチメートルオーダーであり、通常の構造物設置地盤・岩盤や斜面等と室内試験のスケールの差に比較し、桁違いに差が大きい。これまで、室内試験が試みられてこなかった所以であろう。

スケールの差はその間に分布する物質の不均質性、不連続面の存在等の反映にも非常に大きい影響を及ぼす。例えば、被覆層についていえば、深さ数キロメートルにあるであろう先新第三系や深成岩類から地表付近の第四系にまで及ぶのである。それを本研究では、安山岩コアとブロック、土壌試料のみで模している。

このように、本論文における室内試験での実現象を模擬する条件は非常に単純なものであるのは確かであるが、それは本研究の価値を貶めるものではない。今まで誰も踏み出すことをしなかった第一歩ではないだろうか。目標は遥か彼方かもしれないが、今後このような研究が進展することを期待したい。

なお、本論文中においては、アスペリティを模したとする安山岩コアの深さを「focal depth」と表現しており、厳密に言えば、アスペリティ深さとなろうが、紹介文中では「震源深さ」としている。

参考文献

- 1) 松田時彦(1975) : 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第 2 輯, 28(3), pp.269-283.
- 2) Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994) : New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin Seismological Society of America, 84(4), pp.974-1002.
- 3) 入倉孝次郎, 三宅弘恵(2001) : シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110(6), pp.849-875.
- 4) Turgut, A., Isik, N. S. and Kasapoglu, K. E. (2017) : A new empirical equation proposed for the relationship between surface rupture length and the earthquake source parameters, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 76 (1), pp.383-392.
- 5) Wesnousky, S. G.(2008) : Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures : issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture, Bulletin of Seismological Society of America, 98(4), pp.1609-1632.
- 6) Biasi, G. P., Weldon, R. J., II and Dawson, T. E. (2013) : Distribution of slip in ruptures. The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 (UCERF3) – The Time-Independent Model. Appendix F, U.S. Geological Survey.