

応力と弾性波速度の関係に関する一つのモデル：破砕帯の弾性的異方性

A model for the stress-velocity relationship: Elastic anisotropy of damaged zone

山本 清彦[1], 佐藤 凡子[2], 矢部 康男[3]

Kiyohiko Yamamoto[1], Namiko Sato[2], Yasuo Yabe[3]

[1] 東北大・理・観測セ, [2] 東北大・理, [3] 東北大・院理・地震観測センター

[1] RCPEV, Tohoku Univ., [2] Graduate School of Science, Tohoku Univ., [3] RCPEV, Tohoku Univ.

【研究の経緯】 1995年兵庫県南部地震で運動した野島断層近傍ではDRAや水圧破砕法(HF)による地殻応力測定が行われた。これらの測定から、1) 最大水平応力が、ほぼ垂直な野島断層の走向に殆ど直交していること、2) 断層のコア軸から約100m以内の領域(断層破砕帯)で剪断応力がその外側に比べて顕著に低下していること、3) DRAにより測定された剪断応力がHFによるものよりもいくらか大きいこと、が明らかになった。結果(2)は断層破砕帯が破壊強度を失っている結果であると考えられる。また、(1)は(2)からの当然の帰結であるといえる。

破砕帯が断層面にたいする法線応力のもとで post-failure の状態にあると考え、破砕帯内に生成されている張力型割れ目によって、破砕帯は弾性的に異方性を示すこと、また、断層面に働く法線応力に対して大きなヤング率、剪断応力には小さな剛性率を持つことが期待される。我々は、このような破砕帯の性質が断層の巨視的な剪断強度を小さくすることを指摘した。

この考えを検証するには、観測データとの比較が必要である。Yamamoto et al. (2001) は、岩石破壊実験の結果から導かれたモデルを用いて、測定された応力から破砕帯における破砕度 G を深さの関数として推定し、さらに、破砕帯を等方的であると仮定して地震波速度の深さ分布を NSC (Yamamoto et al., 1981) を用いて計算した。このようにして計算された地震波速度と、速度構造として得られている破砕帯のP波速度やトラップ波から得られているS波速度とがよく一致することが確かめられている。

【本研究の目的】 破砕帯の弾性的異方性を陽に明らかにする測定はこれまで行われていない。したがって、その実在も確かめられていない。本研究の目的は、将来の測定に備えて、破砕帯に期待される地震波速度の異方性を明らかにすること、また、破砕帯に弾性的異方性が実在する可能性を、観測データから示すことである。

【計算結果】 張力型割れ目の長軸が最大主応力の方向(断層面に直交する方向)を向き、この主応力軸に関して対称に分布するとして、Yamamoto (1981, 1995) による近似計算法を用いて破砕帯の弾性波速度を計算した。深さ10kmの場合、S1波(P波と相互作用のあるS波)は伝播方向によって母岩の速度の43%から85%の範囲で変化し、P波は99%から75%の範囲で変化する。S1波の速度は最大主応力軸から約50°の方向に伝播する場合が最大で、0°あるいは90°方向で最小である。一方、P波では、最大が0°方向、最小が約60°方向である。

【データとの比較】 Li et al. (1998) と Li and Vidale (2001) は1992 M7.5 Landers 地震後に、破砕帯を伝播する地震波の速度回復を測定し、S波の回復走時に対するP波の回復走時の比が、破砕帯内を伝播する波では0.65から0.75であることを明らかにした。ただし、これらがどの深さのものかを特定していない。破砕帯に割れ目が等方的に配向するとした場合、水飽和の割れ目と乾燥割れ目を混合させない限り、この比を説明できないことが指摘されている。一方、選択配向を仮定した場合、最も早く到達する波が破砕帯内を直進する波とは限らない。破砕帯内を反射しつつ最も早く到達する波の速さを「群速度」と呼ぶことにし、「群速度」の走時回復を計算した。その結果、S波に対するP波の回復走時の比が0.6から0.8の間にあるとすると、深さ $d = 5\text{km}$ を仮定すると、破砕度 $G < 0.55$ 、 $d = 10\text{km}$ では、 $0.55 < G < 0.78$ 、 $d = 15\text{km}$ では、 $G > 0.67$ が得られる。野島断層で測定された応力から、 G はおよそ0.75から0.85と求められている。弾性波速度計算法の近似度や「群速度」に関する仮定の粗さを考慮すれば、本研究で得られた G に関する結果は応力から推定されているものにほぼ一致している。

【結論】 破砕帯内ではS波速度の最大は、最大圧縮軸から約50°の方向にある。破砕帯内を反射しつつ伝播するS波を考えると、Landers 地震後に回復したP波とS波の走時の比が説明できる。このことは、破砕帯の弾性的異方性を強く示すとともに、破砕帯内あるいは周囲の最大圧縮応力の方向が断層面にほぼ直交していると考えて矛盾のないことを示唆している。