

資 料

551.251 : 552.16 : 550.83

地震前駆過程の実験的および理論的研究*

V. I. Myachkin, B. V. Kostrov, G. A. Sobolev, O. G. Shamina*

岸本文男**訳

ソ連科学アカデミー地球物理研究所で行われた地震前駆過程の実験的および理論的な研究の主な結果を概説するが、この結果は当該過程の各種野外研究を大きく補うものである。

地震予知に関する研究の計画的な展開は、震源の発達を左右する物理的な過程についてのわれわれの認識が大きく深まることを要求している。当該物理過程の研究にもっとも役立つのは、地震学の成果と物質破壊現象の物理学的研究で得られた結果との総合的な適用である。実際に、大部分の悲惨な地震は深さ数 10km のところで発生し、かつ地殻物質の剪断破壊の結果である。この破壊の準備と発展は、力学と物理学の応用分野で研究が強められている割れ目生成過程と多くの点でよく似ている。地震の研究の場合としては、媒体の不均一性、高圧の影響、長時間耐久性を考えながら、破壊機構を総括することが必要である。

震源の研究、とくに1930年代のノーダル・ライン発見後に進められた震源の研究は長い間、破壊の物理機構とは無関係に行われてきた。震源の「地震学的」モデルの組み立ては、破壊過程についての公式化した物理学的な概念よりも多く観察資料にもとづくものであった。地震学的な観察から震源について得られた情報を根拠として記述されているこの時代の代表的な論文〔1—4〕は、すでに広く知れわたっている (V. I. Keilis-Borok, A. V. Vvedenskaya, P. Byerly, H. 本田ほか)。1950年代には大きな地震学者グループが地震の物理学的な研究によって G. A. Gamburtsev の概念を発展させている。その研究〔5—8〕は地震活動区、立坑、実験室内で行われ、地震エネルギー論、時-空関係、岩石物性についての重要な資料を得ることに成功した (Yu. V. Riznichenko, I. L. Nersesov ほか, M. P. Volarovich ほか)。また、地殻中での断裂の形成に関する地質学的および構造地質学的な概念も発展した (V. V. Belousov [9], M. V. Gzovskii [10])。

ソ連科学アカデミー地球物理研究所における地震物理の新しい研究段階が始まったのは、M. A. Sadovskii が地球物理学的多辺体に対する総合的考察の展開と、岩石の破壊についての物理学的な概念との結合によって、地震予知問題に幅広く取り組む課題を提起した1960年代のことである。そして、上述のソ連の研究者たちが挙げた成果や割れ目形成作用を取り扱った世界の室内研究・理論研究〔11—15〕の総括と分析にもとづく震源の物理学的な室内研究・理論研究計画が立てられた。その計画には次のことが含まれている。

1. 各種熱力学条件下における単一割れ目、各種タイプの割れ目の相互作用、爆発的割れ目形成促進現象、割れ目集中現象、主裂か形成作用の室内研究。
2. 圧縮作用下における単一割れ目の力学・運動力学、割れ目の相互作用、不均一媒体破断機構問題に関する理論研究。

この計画に従って実施された研究第1段階では、岩石の破壊現象前段階の諸過程にとくに研究の重点がおかれ、当該研究は主として地球物理研究所の震源物理・地震予知部で集中的に行われている。本論文はその研究途上で得られた2・3の成果を概括したものである。

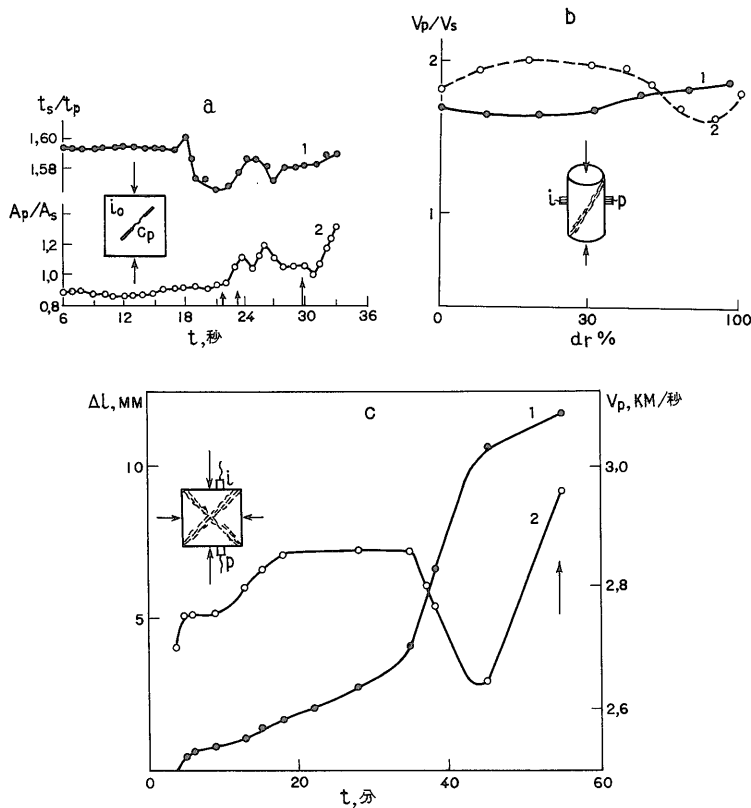
*В.И. Мячкин, Б.В. Костров, Г.А. Соболев, О.Г. Шамина (1974): Лабораторные и Теоретические Исследования процессов подготовки Землетрясений: Физика Земли, No. 10, стр. 107-112.

**鉱床部

1軸方向圧縮条件下 (O. G. Shamina と S. A. Strizhkov の実験—雪花石膏, I. S. Tomashevskaya の実験—岩石) と2軸方向圧縮条件下 (G. A. Sobolev, Z. I. Stakhovskaya, A. V. Kol'tsov の実験—プレキシ=ガラス) で各種の物質に対して行われた一連の実験結果のとくに注目と思われるのは剪断割れ目による破壊に先立って当該物質の多くの物理的性質が一定の変化をすることを発見したことである。雪花石膏試料を一つの軸方向に圧縮した場合には、剪断による破壊が一定方向の亀裂から始まった(亀裂を生じた応力の相互作用が働いた)。作れ目の発生場所は試料の被圧過程で超音波を連続発振し、その際、縦波と横波の振幅と伝播時間の変化が調べられた。第1図aは斜行剪断割れ目の研究例である。縦波と横波の伝播時間の比および振幅の比は野外条件下で認められる地震前兆段階の肉眼的割れ目によく似た割れ目の形成よりもはるか前に変化する。この変化は割れ目形成前段階にある部分の微小割れ目の形成・成長と一致し、その微小割れ目の形成・成長は当該試料に与えた電気伝導場の電導率の変化によって確認できる。実験の結果として生じた肉眼的の割れ目は剪断破壊および張力破壊の要素となった。

速度の比 V_p/V_s が上記の場合とよく似た挙動を示すことは塑性変形をする岩石を用いた実験で確認された。すなわち、I. S. Tomashevskii が提供してくれた第1図bで明らかのように、大理石試料の塑性変形時には V_p/V_s が肉眼的剪断割れ目の形成前に湾曲状に変化する。同時に、断裂割れ目の形成という様式で脆性破壊をする花崗岩試料では湾曲状変化が認められず、 V_p/V_s 値は破壊前にスムーズに増大する。

2軸方向圧縮条件下(第1図c)では、プレキシ=ガラス試料が十字形に剪断破壊された。肉眼的破



a—雪花石膏試料中の剪断割れ目準備域を通る縦波 (P波) と横波 (S波) の振幅比と到達時間比の変化。小さい矢印は微小割れ目生成過程を示し、大きい矢印は肉眼的割れ目形成の瞬間を示す。i—輻射器, P—超音波受信器
 b—花崗岩試料(1)と大理石試料(2)を伝わるP波とS波の速度比の変化。dr—破壊荷重
 c—プレキシ=ガラス試料中を拡がるP波速度変化(2)と試料の縦変形変化(1)。矢印は破壊の瞬間を示す

第1図 室内条件下の物体破壊の前兆

壊に先立つ変形の後期段階はプレキシ = ガラス試料の縦変形速度がまず増大し、次いで遅滞してくるのが特徴である。狭長な断裂形成可能帯に偽塑性流動が集中するために生ずる変形速度の以上のような変化は超音波縦波速度の湾曲状変化が一致している。肉眼的割れ目の生成前には、当該試料の発電現象も認められた。主割れ目の発達は当該実験では試料内部で始まった。

上述の室内実験やその他の関係室内実験の結果は圧縮条件下での剪断による破壊が突然生ずるものではなく、剪断割れ目も張力割れ目も含んだ小規模破砕系が予め準備されることを明確に証明している。肉眼的割れ目の形成準備と結びついた物理的性質の変化が実際上水分を含んでいないものも含めていろいろな試料で認められ、しばしば特徴的な湾曲状の変化を備えていることは重要である。

これらの諸結果は、膨張性多孔質媒体中での水の拡散過程によって地震の前段階が湾曲線状に進行するという現在流行の解釈が少なくとも普遍的なものでないことを示している。なぜならば、肉眼的割れ目の形成準備に結びつく現象がほとんど水分を含んでいない試料を含んださまざまな試料で観察できるからである。

肉眼的割れ目が次の段階で形成・発達する部分にみられる張力割れ目・剪断割れ目形成作用の規則性およびそれと関係する体膨張現象はそれ自体の理論的説明を必要としている。この方向で数歩先鞭をつけたのが B. V. Kostrov と彼の共同研究者たちである。閉鎖割れ目(剪断割れ目)を伴った無限弾性媒体の圧縮被圧作用下での破壊について、彼らはその簡単な問題を検討した。数学的に単純化するために物理的な根拠のない破壊規準を用いた先の諸研究(A. A. Griffith [16], V. V. Pansyuk [17] ほか)と違って、B. V. Kostrov らの場合には割れ目の成長過程の分析に Griffith の動力工学的規準が用いられた。このことは剪断割れ目の端部から張力割れ目が成長する方向を確認できる可能性を与えるだけでなく、その分布を解析できる可能性も与えてくれた。このような条件下での割れ目の成長は一定して進行し、その割れ目の平衡状態への到達は、長期にわたって荷重を加えた時に生ずるように、急激な物体の破壊をもたらさないことが明らかになった。割れ目の成長方向は出発剪断割れ目の両盤間の摩擦値に規制されることが把握され、前述の Griffith および Pansyuk の研究で出された一定方向性(名種方向性)という結論よりも実験結果とよく合っている。このような解答は圧縮荷重による破壊の時間的なダイラタンシーを定量的に記載し得る可能性を与える。

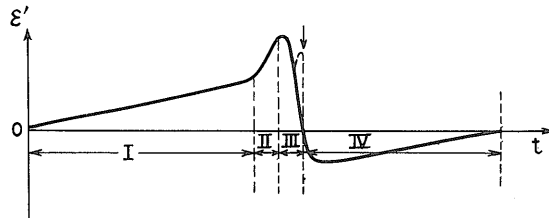
大きな密度で剪断型割れ目を備えた実際の物体は偽静力学的圧縮を受けているとみてよい。ある剪断割れ目が臨界延長値とオリエンテーションを得る荷重値に達すると、当該割れ目の末端から張力割れ目が成長してくる。この一定・進行する過程に新しい割れ目が参加し、そのことが物体のある部分に欠陥を蓄積させ、比容積の増大をもたらすであろう。その際、媒体のそのほかの物理的な特徴も変化する筈で、その変化が肉眼的な破壊の予知指標の把握に利用できる。

破壊の室内実験と理論研究の結果は、次のような破壊機構の基本に立脚する地震発生準備説を立て得るものであった。

1. 長期にわたって荷重を受けたときの統計的に不均一な物体の破壊は割れ目形成欠陥の数と規模の増大の結果である。
2. 欠陥は実際上ある応力によって成長し、その生成速度は応力の上昇によって増大する。
3. 全体の変形は割れ目壁面の相互転位に起因した狭義の弾性歪と有効歪で構成される。
4. 肉眼的破壊(主な破断の形成)は割れ目が臨界密度に達したときに始まる総変形の爆発的成長と不安定性の結果であり、一定の時間を要する。

筆者らは、上に挙げた破壊過程の特徴が地震そのものも含めてある規模水準での破壊準備段階に正確に当てはまる、と推定している。地震そのものの場合、とくに欠陥の役割を果しているのは微弱震源中の割れ目である。

地震成長説の図解例として、ある体積の岩石の総変形速度図(第2図)を検討してみよう。一定方向の構造応力の作用下では、統計的に規則的な分布をした岩石中の欠陥が徐々に成長し、新しい欠陥を形成してくる。そして、割れ目の形成は剪断割れ目も張力割れ目も伴って岩石全体積にわたり統計上均等に行われるものと思われる。第2図では、この段階が記号 I で示してある。この段階では岩石の物理的



第2図 地震輪廻時間内における単位岩石体積量中の総変形速度の変化

性質が変化するであろうが、その変化は本質的には具体的な肉眼的破断（地震）の前兆に入らない。

ある体積量で肉眼的割れ目が臨界密度に達したとき、具体的な破断の爆発的な非可逆準備段階が始まる。割れ目の相互作用によって過程が促進され、その過程に大量の岩石がひき込まれる。それに応じて、非弾性変形速度が急昇し、岩石（媒体）の性質が強く変化する（段階Ⅱ）。

割れ目の増大に伴う応力状態の変化および媒体の性質の不均一性の結果として、促進された変形過程は不安定となり、狭長な帯に集中する。その際、体積量の大部分に荷重減少と割れ目の部分的な癒着現象が生じ、その結果、変形の積分速度が落ち、媒体の一連の性質が旧に復してくる（段階Ⅲ）。この過程の検討から、比較的大きい「出発」割れ目に穿たれた面という概念がひき出される。その割れ目を一つに結合した最大の地震は、以上のように、短期間の準備段階、すなわち「ブリッジ」の発生と破壊の段階を有する。地震直後には荷重減少帯で生じた割れ目の癒着現象が卓越するだろう（段階Ⅳ）。

M. A. Sadovskii は論文集「Physics of seismic focus」の前文で次のように書いている。

「主破壊域における岩石の総変形を分布位置から検討すると、実験で得られた地震輪廻についての概念と調和する変形速度集成図をうまく組み立て得るし、観測した長期・短期の地震前兆の性質を説明し得ることはとくに注目すべきことである。

もちろん、現在、自然の過程との類似性が地球物理研究所で出している地震物理に関する概念の正当性を示すものと断言することはまだ早すぎる。しかし、作業仮説としてその概念を利用することは理論の分野でも室内実験や野外実験の分野でも総合研究の計画立案を助けることになるだろう」。

文 献

- Keilis-Borok V. I. (1950) Investigation of the origin, approximating equivalent focus of earthquakes: Tr. of Geophys. inst. Science Academy of USSR, No. 9 (136): (in Russian).
- Vvedenskaya A. V. (1969) Investigation of tensions and fractures in seismic focus by assistance of dislocation theory: Moscow, "Nauka": (in Russian).
- Byerly P. (1955) Nature of faulting as deduced from seismograms: in "Crust of the Earth".
- Honda H. (1959) The elastic waves generated from a spherical sources: Sci. Rept. Tokyo. Univ. Ser. 5, Geophys. 11.
- Riznichenko Yu. V. (1958) On the study of seismic condition: Izv. A. Sci. USSR. ser. geophys., No. 9 (in Russian).
- et al. (1956) Seismoacoustic methods of tension-state study of the rocks for samples and in massif: Tr. Geophys. inst. A. Sci. USSR, No. 34 (in Russian).
- Nersesov I. L., Riznichenko Yu. V. Frequency of earthquakes and map of seismic activity: in "Seismic and glacio logic investigations in the period of IGY", issue 2, Moscow, Published by A. Sci. USSR, No. 2 (in Russian).
- Volarovich M. P., Balashov D. B. (1957) Investigation of the elastic wave relacity in rock samples under pressure until 5,000 bar: Izv. A. Sci. USSR, ser. geophys., No. 3, 319 (in Russian).
- Belousov V. V. (1954) Fundamental problems of geotectonics: Moscow, Gesgeolizdat (in Russian).

- Gzovskii M. V. (1959) Fundamental problems of tectonophysics and tectonics of Baidzhansai anticlinolium: Moscow, Publish. House of A. Sci. USSR (in Russian).
- Griggs T. (1936) Deformation of rocks under high confining pressures: *J. Geol.*, 49, No. 5.
- Mogi K. (1963) The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena: *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 41, 595-614.
- Brace W. F. (1968) Current laboratory studies pertaining to earthquake prediction: *Tectonophysics*, 6 (1), 75-87.
- Sholz C. H. (1968) Microfracturing and inelastic deformation of rock in compression: *J. Geophys. Res.*, 73, 1417-1432.
- Knopoff Z., King C. (1969) A physical basis for earthquake statistics: *Publ. Domin. Observ. Ottawa*, 37, No. 7.
- Griffith A. A. (1924) The theory of rupture: *Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech.*
- Panasyuk V. V. (1968) Terminal equilibrium of brittle body with fractures: Kiev, "Naukova Dumka".