

(124) 岩盤力学におけるキンキング現象について

名古屋大学大学院	(学生)	○ 清木隆文
名古屋大学大学院	(学生)	鄭 教澈
東海大学海洋学部	(正)	アイダン・オメル
名古屋大学工学部	(正)	市川康明

AN EXPERIMENTAL CONSIDERATION ON KINKING PHENOMENON IN ROCK MECHANICS

Takafumi SEIKI	Nagoya University
Gyo-Cheol JEONG	Nagoya University
Ömer AYDAN	Tokai University
Yasuaki ICHIKAWA	Nagoya University

ABSTRACT

Kinking in rocks is a well-known phenomenon particularly among structural geologists. It is commonly observed in thinly layered sedimentary rocks subjected to folding and metamorphic rocks with well pronounced schistosity such as schists, phyllite, slate etc. The authors got involved with this phenomenon when they tested cylindrical wooden specimens, which were used as material in model tests, to obtain their mechanical characteristics. The failure of these wooden specimens always was associated with kinking when they are compressed in the direction parallel or sub-parallel to the fiber orientation. The authors report their experimental results and observations in this article and discuss their implications in rock mechanics. Our conclusions are similar to those of other researchers who already studied this problem experimentally (i.e. Paterson and Weiss 1968, Gay and Weiss 1974, Dewey 1965, Anderson 1974, etc.):

- 1-) Kinking always initiates from either a material or imposed mechanical singularity and grows into a band in which the strain is localised.
- 2-) The visible kinking develops after the peak strength is exceeded. The orientation of fibers within the band decreases as the straining continues. Furthermore, the length of kinked fibers in the band grows as the strain increases.
- 3-) However, the global orientation of the kink band with respect to the loading direction remains almost constant throughout the deformation process, provided that the confining pressures is kept constant. The inclination of kink bands is different from that of shear fractures which is predicted from Mohr-Coulomb yield criterion under compression.

1. はじめに

岩盤の力学挙動は、材料の幾何学的な性質、拘束応力、温度そしてひずみ速度に依存している。特に工学においては、自然岩盤の挙動は材料の幾何学的な性質が異なると、その力学挙動の違いは顕著に現われる。またその力学挙動に影響を与える幾何学的構造は、対象とする視野の違いによってその現われ方が異なる。

まず岩の中の微視的構造として、岩石を構成する鉱物に注目すると、雲母、方解石、石膏などに発達しているへき開が挙げられる。また巨視的な構造として岩盤を構成する岩に注目すると、堆積岩では層理や剥離が、変成岩では片理や片麻状構造が挙げられる。

ここに挙げられた層状あるいは薄片構造中にはそれらの構造の折れ曲がり現象がよく観られる。構造地質学の分野でその“折れ曲がり”はキンキング (Kinking) と呼ばれる。そして、この局所的な折れ曲がりとは、自然界ではキンクバンド (Kink band) として現われる。

具体的に、堆積岩としては薄層砂岩や薄層泥岩、変成岩としては千枚岩、粘板岩、片岩などの薄層構造を有する岩の圧縮試験を行なうと、微視的にはその岩を構成する鉱物中に現われ、巨視的にはその岩の破壊形態として現われる。

このキンキング現象は、岩盤工学の分野において、上記の様な性質を持つ岩盤の掘削に伴って発生した例がしばしば報告されている。

今回の報告ではその現状に注目し、キンクの発生する原因を追及することを目的とする。そのために、一軸状態でキンキング現象の起こりやすい材料として木材を利用して実験を行なった。この実験の結果を報告し、キンキン

グ現象とキンクバンドの形成について考察する。

2. キンキング現象

キンキング現象については千枚岩や片麻岩を用いて三軸圧縮試験を行い、その変形に対する報告が多くされている。その中でPatersonら（1966）は10 mm 長と20 mm 長の拘束応力を 1000 kgf/cm^2 から 10000 kgf/cm^2 まで変化させて三軸圧縮試験を行っている。この結果から片麻岩における載荷軸と片理面のなす角とキンキングの関係を調べているが載荷軸と片理面のなす角が 10° 以下の場合にのみキンクが起こることを報告している。Gayら（1974）はキンキングの発生と成長の過程を研究するためにパンチングカードを用いて層状構造を持つ岩石をモデル化した供試体を作り、一軸圧縮試験を行っている。その結果として載荷軸と片理のなす角が 15° 以下でキンクが発生することが報告されている。

また、キンキングの成長するメカニズムは地質学的にWeiss（1980）によって明かにされている。キンキングの成長するステップは以下の三つに分けられる。

（1） キンキングの発生

弾性的に変形する非均質な材料において、応力、構造の局所的な不規則の一方あるいは両方が存在しているとき、それらが小さな楕円もしくはレンズ型のキンクが発達するための核として働く。変形が進むに従って、それらのキンクの境界が周囲の弾性的な部分に移動することによってキンクの幅が広がる。

（2） キンク長さの成長

核の幅の増加は材料自身の弾性限界を越えるまで続く。この段階で今まで成長した核の長さ方向に、キンクが進展する。この現象はPatersonら（1966）が千枚岩、またGayら（1974）が粘板岩を用いて行なった実験結果に見られる。

（3） キンク幅の成長

一端、幅の狭いキンクが進展し始めると、その両端は実験供試体の境界まで達する。この時点でキンクはキンクバンドとなる。キンクバンドの幅は境界面がその供試体内のまだ変形していない部分に移動して広がる。そして力学的な安定、すなわちキンクバンド内でその変形が吸収されてその他の部分がほとんど変形しない状態に達すると、キンクバンドの幅の成長が止まる。ここで、Fig. 1 は片岩に起こったキンクバンドを表している。

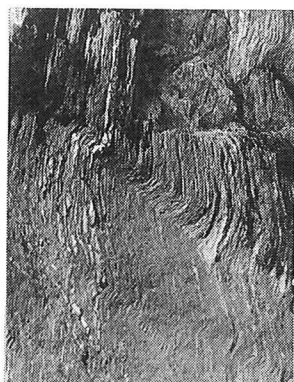


Fig. 1. Natural kink bands in a layered schist.



Fig. 2. Failure caused by kinking in tunnel.

つぎに岩盤工学において報告されている事例について説明すると、Fig. 2 の写真は泥岩地山中のトンネル周辺に起こったキンク現象を示している。これは、トンネル掘削によって側壁周辺が一軸圧縮状態となり、層理の方向に圧縮されることによってキンクが発生している。また斜面として、層理が水平面に対しかなり立っていて、キンクバンドが発生し、これが破壊面となって、複合的な破壊が発生することが考えられる。

3. 室内実験

3.1 実験の概要

我々は、もともと材料的に脆性的な挙動を示す層構造をなす岩石が、ある条件の拘束応力下で延性的挙動をするという前節の報告から、層状の材料として一軸圧縮状態でも延性材料である木材について一軸圧縮試験を行った。

その実験および供試体の保管は恒温室で行った。実験に用いた材料は檜、桜そして栓の三種類である。それぞれの材料について直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱供試体と幅と奥行きが 3 cm で高さ 10 cm の直方体供試体を作成した。このとき繊維方向に平行な圧縮力かけることを前提とした。一軸圧縮試験の载荷条件は、ひずみ制御で、ひずみ速度が 0.1 %/min. である。まず材料の特性を調べるために、円柱供試体を用いて実験を行なった。そしてキंकをより観察しやすくするために、直方体供試体を用いて実験した。まず、キंक現象とひずみの関係を調べるために降伏ひずみを測定した。そしてそのひずみを指標として、降伏前と降伏後で数段階のチェックポイントを設定した。そのチェックポイント毎に一つの供試体を用いて実験を行ない、それぞれのチェックポイントで設定したひずみ値に達したことを確認して除荷した。実験を行なう前に供試体表面にグリッドを描き、その面を写真撮影した。実験後にその表面のグリッドを再び写真撮影して、その供試体の内部を観察するために载荷軸に平行な面で切断して実体顕微鏡で観察し、さらに必要な部分を写真撮影した。

3.2 実験結果および考察

木を用いた実験は、岩盤に見られるキンキング現象の発生から成長までを連続的に再現できる点で重要である。まず木材におけるキंकの発生する過程を Fig. 3 に示す。檜の木の直方体供試体の降伏ひずみは、0.8 % から 0.9 % であった。これ以前においてキंकは肉眼で全く見られなかった。実際にキंकが供試体表面に現われるの

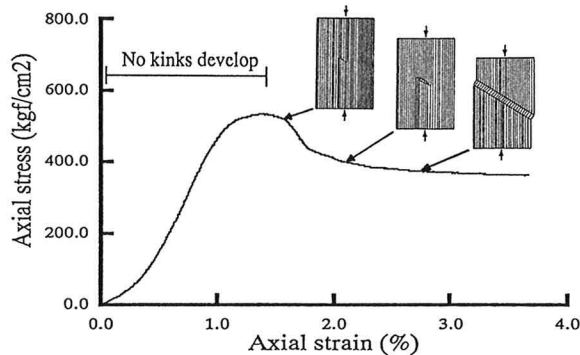


Fig. 3. Typical axial stress-strain curve of Kashi (Oak). The different steps in the development of kink are shown. Axial stress direction is indicated by arrow.



Fig. 4. Nucleation of kink showing folding into a very gentle monoclinal buckle. Axial stress direction is indicated by arrow.



Fig. 5. Kink band in wood specimen. Axial stress direction is indicated by arrow.

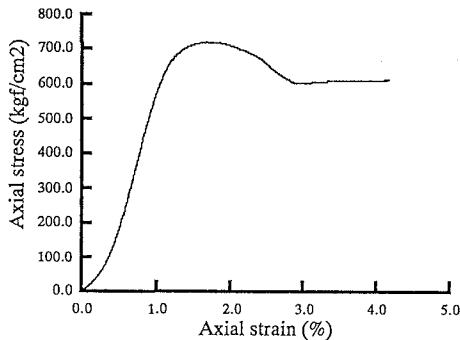


Fig. 6. Typical axial stress-strain curve of Sakura.

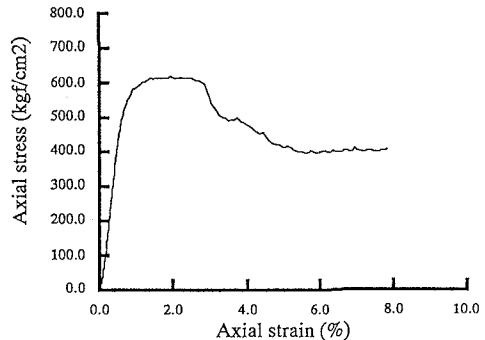


Fig. 7. Typical axial stress-strain curve of Hinoki.

は 1.5 % から 2.0 % であった。キンキングの現われ方は、まず第一ステップとして供試体表面の数本の繊維の一部が緩やかな単斜で傾いた微小褶曲が現われた (Fig. 4)。第二ステップではその褶曲が折れ曲がり (キंक) へと変化した。このときほとんどの供試体の表面でキंकは一方の自由境界から細い線としてあらわれた。第三ステップではその線状のキंकがその周辺の無傷な繊維へと広がった。その線状キंकが伸びることによってキंकは成長し、供試体の他方の境界にその先端が達した。その結果キंकバンドが形成される (Fig. 5)。さらに载荷を続けると第四ステップとしてその幅が広がり始め、キंकバンドの幅が成長するに従って供試体全体がそのキंकバンドを境 (せん断面) にしてずれ始めた。特に応力-ひずみ関係に注目してキंकの発生を観察すると、応力がピーク強度を過ぎると低下してひずみ軟化するに従って、キंकが発達することがわかった。その他の例として Fig. 6 と Fig. 7 に桜の円柱供試体および桧の直方体供試体の一軸圧縮試験による応力-ひずみ関係を示す。これらの図から木の種類が異なると降伏ひずみが異なることがわかる。

今回は檜について実験を行った。その結果を整理するにあたり、キンキングを特長づけるためのパラメータを Fig. 8 に表す。 α はキंकバンドの境界線とキंकしている繊維のなす角、 β は载荷軸とキंकしている繊維のなす角、 γ は载荷軸と繊維のなす角、 θ は载荷軸とキंकバンドの境界線のなす角そして s はキंकしている繊維を基準にしたキंकバンドの幅である。

これらの諸量を実験供試体から測定してキंक現象とひずみの関係を定量的に明かにすることを試みる。まずキंक角 (α) とひずみ値の関係を Fig. 9 に整理した。この図からキंक角 (α) はひずみ値が増えるに従って小さくなる傾向が現われている。この際、キंक角 (α) は 45° 以下にならないことがわかった。

そしてひずみ値とキंकバンドの幅 (s) の関係も整理した (Fig. 10 参照)。この図からキंकバンドの幅はひずみ値が増えるに従って広がることをわかる。

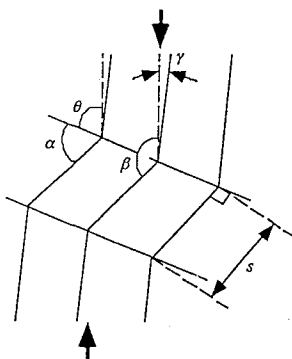


Fig. 8. Diagrammatic profile of a kinkband illustrating the angle α , β , γ and θ , and the lineation segment length s .

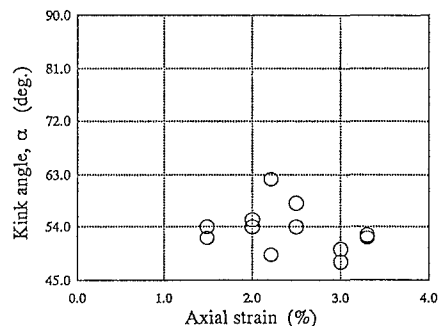


Fig. 9. Kink angle α plotted against axial strain.

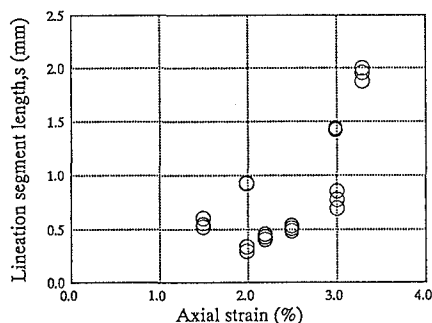


Fig. 10. Lination segment length s plotted against axial strain.

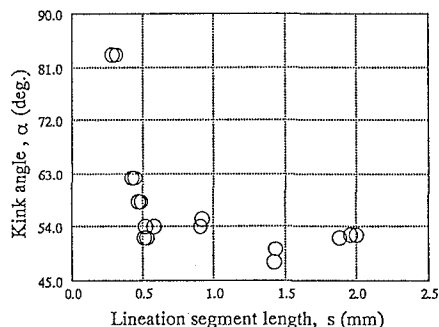


Fig. 11. Kink angle α plotted against Lination segment length s .

これら二つの結果を利用してキンク角 (α) とキンクバンドの幅の関係を整理した結果を Fig. 11 に示す。この図からキンクバンドの幅が増加するに従ってキンク角が減少する傾向であることがわかる。今回は成層角度と载荷軸の関係がほぼ平行な ($\gamma \approx 2^\circ$ 程度) 供試体について実験を行った。载荷方向に対するキンクバンドの傾き (θ) は 52.8° であった。これは Anderson (1974) が千枚岩に対して行った三軸圧縮試験の結果 ($\theta = 55.4^\circ$) に非常に近いことがわかった。これは三軸応力下の岩石の変形の幾何学的性質が木材に近いことを示していると思われる。

4. 結論

今回は载荷軸にほぼ平行な成層構造を成している材料として木材を特に選んで実験を行ってキンキングが発生するメカニズムを明らかにすることを試みた。その結果、木材のキンキング現象は三軸圧縮応力下の成層あるいは薄片構造をもつ岩石のそれに近いことがわかった。実際の岩盤における力学的環境と木材実験のそれと異なるが、キンクができる状態を観察した結果から成層構造を持つ岩盤の破壊はキンクバンドの成長によって発生するせん断面から起こりえると考えられる。このことをもっと詳しく調べるために、载荷軸と成層角度が角度を持つ場合について実験を行なうことを試みる。さらに成層構造を持つ岩盤中のトンネルなどの構造物とキンクの詳しい関係を調べることも試みる。

参考文献

- Paterson, M. S., and Weiss, L. E. : Experimental deformation and folding in phyllite, Geological Society of America Bulletin, 77, pp. 343-374, 1966.
- Dewey, J. F. : Nature and origin of kink-bands, Tectonophysics, 1, pp. 459-494, 1965.
- Borg, I., and Handin, J. : Experimental deformation of crystalline rocks, Tectonophysics, 3, pp. 249-368, 1966.
- Gay, N. C. and Weiss, L. E. : The relationship between principal stress directions and the geometry of kinks in foliated rocks, Tectonophysics, 21, pp. 287-300, 1974.
- Johanson, A. M., and Ellen, S. D. : A theory of concentric, kink, and sinusoidal folding and of monoclinical flexuring of compressible, elastic multilayers, Tectonophysics, 21, pp. 301-339, 1974.
- Anderson, T. B. : The relationship between kink-bands and shear fractures in the experimental deformation of slate, J. geol. Soc. Lond. vol. 130, pp 367-382, 1974.
- Weiss, L. E. : Nucleation and growth of kink bands, Tectonophysics, 65, pp 1-38, 1980.
- 荻野正二, 水田義明, 佐野修 : 実験岩石力学, 古今書院, 東京, 1988.