

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560776

研究課題名（和文） 岩石の载荷履歴と接線ヤング率の変化に対する諸条件の影響

研究課題名（英文） Influences of various conditions on change in tangent modulus due to loading history of rock

研究代表者

藤井 義明 (FUJII YOSHIAKI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70192309

研究成果の概要：岩盤中に作用している応力の値を測定するための一手法である接線ヤング率法における諸条件の影響について来待砂岩を用いて検討し、一軸载荷で推定した屈曲点応力をそのまま原位置応力成分とみなすことはできないことがわかった。一方、原位置との温度の差は考慮しなくてよい、また、岩盤応力推定時のひずみ速度は極端に速く/遅くなければ応力の推定結果に大きく影響しない、ということがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,400,000	0	1,400,000
2007 年度	500,000	150,000	650,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	300,000	2,700,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：岩盤応力、接線ヤング率法、封圧、間隙水圧、水温、ひずみ速度

1. 研究開始当初の背景

研究者は、ある先行応力まで圧縮された履歴を有する岩石コアを、再度、先行応力を超えて圧縮した場合、応力が先行応力に達したときに接線ヤング率が低下する現象を明らかにしていた。この現象は、ひずみゲージを用いて得られたひずみから評価された接線ヤング率で、より明瞭に観察されたが、ストロークから評価した接線ヤング率にも観察された。本現象が岩盤応力測定に応用できるとすれば、繰り返し载荷を行う必要がない、ひずみゲージの貼付が必要ない、AE 測定を必

要としない等、現存する種々のコア法に比較して数々の利点を期待できた。しかしながら、本現象を岩盤応力の測定へ応用するためには以下のような点を明らかにする必要がある。

(1) 岩種の影響 多数の岩種で本現象が認められることを確認する必要がある。

(2) 記憶時間 接線ヤング率の低下が応力解放後どのくらいまで観察されるのか、先行応力にかけた時間と記憶時間の間に相関はあるのか、等を明らかにする必要がある。

(3) 側圧の影響 原位置岩盤において 0 と

は限らない側圧を受けていた供試体を、一軸あるいは、原位置とは異なる側圧下で圧縮した場合に、ヤング率の低下が生じる応力値が先行応力とは異なってくる可能性がある。

(4) 間隙流体圧の影響 原位置岩盤において、間隙流体圧が作用していた試料を、異なった間隙流体や異なった間隙流体圧の下で試験した場合の影響について検討する必要がある。

(5) 温度の影響 原位置岩盤と異なった温度で試験した場合の影響について検討する必要がある。

(6) 乾燥状態の影響 原位置岩盤と異なった乾燥状態で試験した場合の影響について検討する必要がある。

(1)は当然である。(2)は、他のコア法においていくつかの研究例もあるが、いまだ明らかになっていないとはいいがたかった。(3)についても、側圧の影響がないという研究者もいるが、影響があるという研究者もあり、いまだ明らかになっていないといえなかった。しかしながら、筆者の予備試験によれば、ヤング率が低下する応力は、明らかに、側圧に依存していたので、本研究では側圧に依存した挙動を明らかにし、可能であれば、正しい側圧を推定する方法を提案したいと考えた。(4)~(6)はコア法においてはほとんど検討されることがないが非常に重要である。

以上の諸点を明らかにし、接線ヤング率が低下する現象を利用して岩盤応力を測定する手法を提案しよう、また、本研究を通じて、岩石が先行応力を記憶するメカニズムについても検討しよう、というのが本研究の動機である。

2. 研究の目的

1. と重複するが、本研究の目的は、岩石の接線ヤング率が過去に経験した応力を境に変化する現象を岩盤応力の測定へ応用するために、以下の諸点を明らかにすることである。

- (1) 岩種の影響
- (2) 記憶時間
- (3) 側圧の影響
- (4) 間隙流体圧の影響
- (5) 温度の影響
- (6) 乾燥状態の影響

3. 研究の方法

購入した岩石ブロックを水を用いて整形して円柱形供試体とした。供試体の圧縮試験では明瞭な屈曲点がみられることはなかった。これは、採取から試験時まで最低でも

1年程度経過し、また、購入時には乾燥していた岩石ブロックを水を使って整形しているためと考えられる。

供試体には、原位置応力を模した、材料試験機を用いたある時間の先行载荷を行った。ある時間静置した後、2回の繰り返し载荷を行い(図1)1回目の载荷における応力-接線ヤング率線図の屈曲点を先行载荷応力値と比較した(図2)。屈曲点が見られなかった場合は、1回目と2回目の応力-接線ヤング率線図を比較し、両者が離れ始める点を屈曲点とみなした。



図1 試験の様子

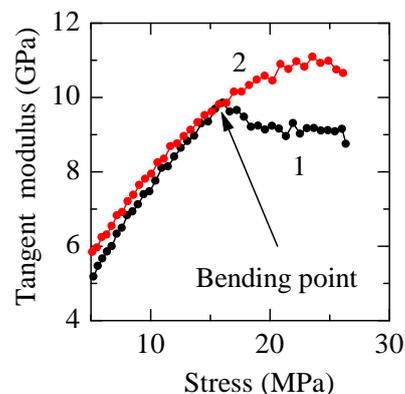


図2 繰り返し载荷における応力-接線ヤング率線図の例(白浜砂岩、先行载荷応力 15.4 MPa、雑誌論文)

岩種の影響と記憶時間を明らかにするために、白浜砂岩・稲田花崗岩・支笏溶結凝灰岩・来待砂岩を用いて試験を行った。

乾燥状態の影響については、白浜砂岩について検討した。水中で先行载荷した供試体を気中または水中である時間静置した後に気中で一軸载荷して屈曲点の検出を試みた。

封圧と間隙水圧の影響については、一部白浜砂岩、主に来待砂岩について検討した。三軸応力と間隙水圧を与えて先行载荷し、封圧や間隙水圧を変化させた三軸(図3)または、

一軸で繰り返し載荷して屈曲点の検出を試みた。



図3 三軸繰り返し載荷の様子

温度の影響については、来待砂岩について検討した。室温～80度の純水中で先行載荷(図4)した岩石を室温の気中で繰り返し載荷し、屈曲点の検出を試みた。

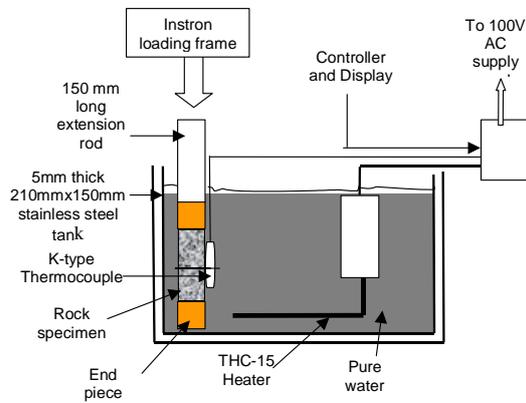


図4 温度制御水槽中での試験の模式図(学会発表)

この他に、繰り返し載荷時のひずみ速度の影響についても来待砂岩について検討した。

4. 研究成果

(1) いくつかの岩種に対する適用性と記憶時間

気乾状態の白浜砂岩・支笏溶結凝灰岩・稲田花崗岩・来待砂岩の円柱形供試体について先行載荷を行い、接線ヤング率法で先行載荷応力を正しく推定できるか実験的に検討した結果、いずれの岩種にも、接線ヤング率法が適用可能なことがわかった。先行載荷応力を実際の値との誤差20%以内で正しく評価できた最大の静置時間は前3種の岩石で先行載

荷時間と正の相関を示した(図5~7)。来待砂岩ではデータが少なくそのような相関は確認できなかった(図8)。各岩種について確認できた最大の静置時間は、白浜砂岩・支笏溶結凝灰岩で6週間、稲田花崗岩で3週間、来待砂岩で4週間であった。ただし、稲田花崗岩では、他の岩種に比べて屈曲点が不明瞭で、プラテン変位に基づいた方法では最大静置時間が60分であった。

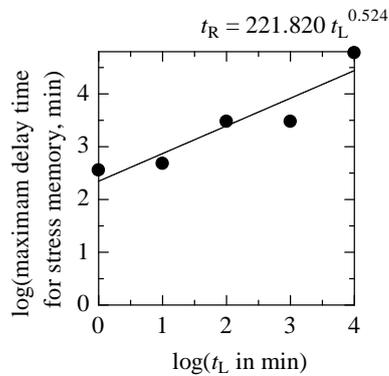


図5 白浜砂岩の先行載荷時間と応力の最大記憶時間(雑誌論文)。図5~10の結果は全てクリップゲージにより得られたもの。

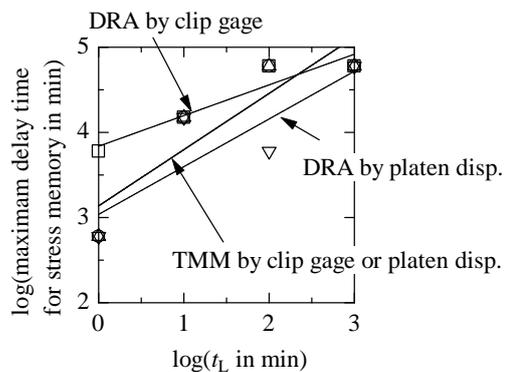


図6 支笏溶結凝灰岩の先行載荷時間と応力の最大記憶時間(雑誌論文)

以上の結果は、地質的長期間一定の岩盤応力下にあった岩石を採取して接線ヤング率法あるいは類似のコア法に供する場合、試験まで3週間程度経過しても、試験結果には大きな影響がない可能性を示すものである。

(2) 乾燥状態の影響

純水中で一時間先行載荷した来待砂岩の最大記憶時間は、気中に静置した場合は1日未満であったが、純水中に静置した場合には1週間以上であった。

また、気乾状態の白浜砂岩を1時間先行載荷した後、1時間真空脱気してから繰り返し載荷した場合には屈曲点がみられなかった。

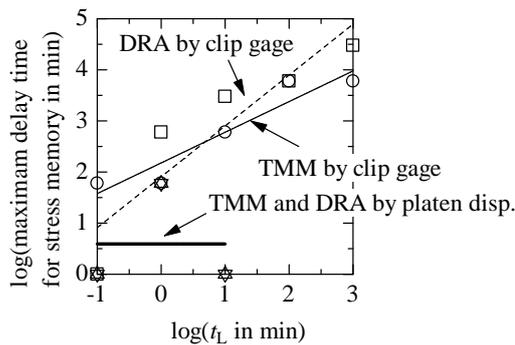


図7 稲田花崗岩の先行載荷時間と応力の最大記憶時間 (雑誌論文)

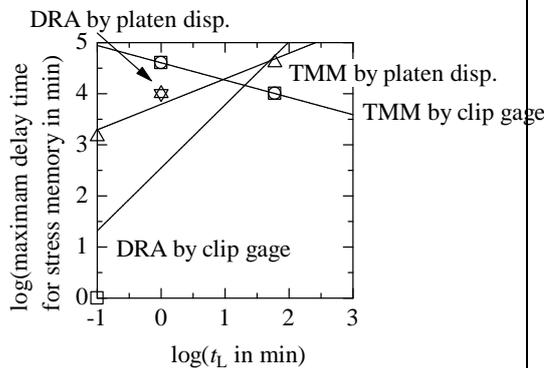


図8 来待砂岩の先行載荷時間と応力の最大記憶時間 (雑誌論文)

これは、通常ある程度の水分を含んでいる岩石を採取した場合、試験まで自然含水状態を保つことが肝要なことを示している。また、乾燥した状態にある岩石の場合は、採取時に含水させると応力の記憶を失う危険性があることも示している。

(3) 封圧と間隙水圧の影響

気乾状態の白浜砂岩について三軸先行載荷し、増減させた封圧下で三軸繰り返し載荷したところ、繰り返し載荷時の封圧が先行載荷時よりも小さい場合には先行載荷応力よりも小さい屈曲点応力が得られ、逆の場合には明瞭な屈曲点が見られなかった(図9)。

気乾状態の来待砂岩について、同様の実験を実施したところ、繰り返し載荷時の封圧が先行載荷時よりも小さい場合にはほぼ正確に先行載荷応力が得られ、逆の場合には先行

載荷応力よりも小さい屈曲点が見られた。

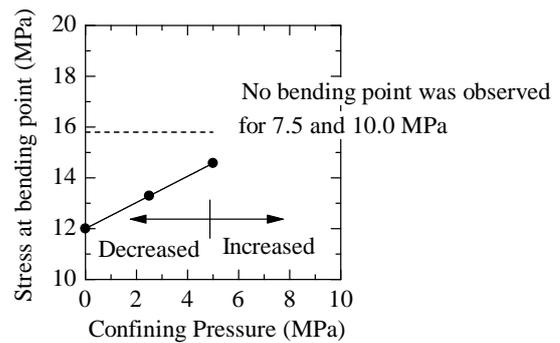


図9 気乾状態の白浜砂岩の繰り返し載荷時の封圧と屈曲点応力 (雑誌論文)

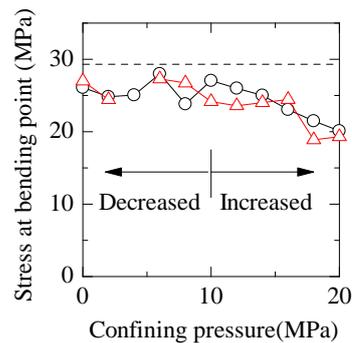


図10 気乾状態の来待砂岩の繰り返し載荷時の封圧と屈曲点応力 (雑誌論文)

以上の結果は、矛盾しているようにもみえるが、いくつかの封圧下で接線ヤング率法を実施し、一番大きな屈曲点応力を、現地で岩石に作用していた供試体軸方向の直応力、それを与えた封圧を平均的な封圧とみなすような、岩盤応力推定の道を開くものである。

含水飽和状態の来待砂岩について、ある間隙水圧下で三軸先行載荷し、間隙水圧のみを増減させて三軸繰り返し載荷し屈曲点応力を求めると、全応力と差応力は間隙水圧が先行載荷時の±40%の場合にはほぼ正確に求められたが、それ以上の差異がある場合には小さく求められた。有効応力は、間隙水圧が先行載荷時よりも大きい場合に小さく求められた(図11)。

一方、封圧と間隙水圧を同じように増減させ、有効封圧を一定に保った場合は、全応力/有効応力・差応力は、先行載荷時よりも間隙水圧が小さい/大きい場合に小さく評価された(図12)。

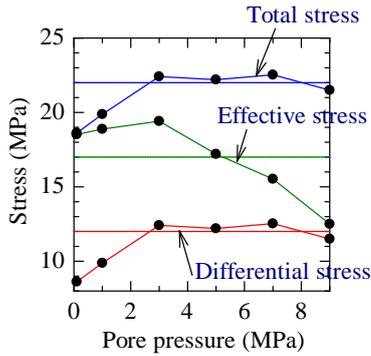


図 11 含水飽和状態の来待砂岩の繰り返し
 載荷時の間隙水圧と屈曲点応力（封圧一定、
 学会発表） 図 11, 12 の結果はストローク
 に基づいて得られたもの。

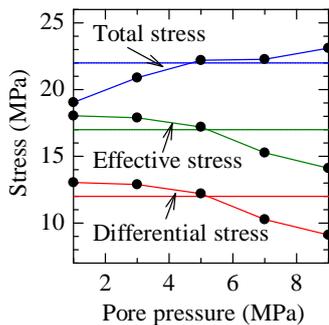


図 12 含水飽和状態の来待砂岩の繰り返し
 載荷時の間隙水圧と屈曲点応力（封圧一定、
 学会発表）

これらは、まず、ある封圧下で、いくつかの間隙水圧下での三軸繰り返しを行い、原位置で作用していた有効封圧を求め、次に、その有効封圧を保っていくつかの間隙水圧で三軸繰り返し載荷を行い、間隙水圧と直応力を決定する方法への道を開くものである。

気乾状態の来待砂岩について、0~1.5 倍の封圧下で軸応力を先行載荷し、一軸繰り返し載荷により屈曲点応力を求めたところ、先行載荷時の封圧が大きいほど屈曲点応力は小さく、

$$\sigma_B = 0.86\sigma - 0.15P_C = 0.86\Delta\sigma + 0.71P_C$$

σ_B : 屈曲点応力

σ : 軸応力

P_C : 封圧

$\Delta\sigma$: 軸差応力

となった。

一方、含水飽和状態の来待砂岩について、ある間隙水圧の下で三軸先行載荷を行い、気中で一軸繰り返ししたところ、

$$\sigma_B = 0.84\sigma - 1.06P_C + 0.21P_p, \text{ または、}$$

$$\sigma_B = 0.84\Delta\sigma - 0.21P_C - 0.00P_p$$

σ_B : 屈曲点応力

σ : 軸応力

P_C : 封圧

P_p : 間隙水圧

$\Delta\sigma$: 軸差応力

なる結果を得た。

これらは、一軸状態での繰り返し載荷から三軸応力状態を推定するための第一歩でもあり、また、間隙水圧や側圧を全く無視して三軸応力を推定している現状のコア法のあり方に強く警鐘を鳴らすものでもある。

(4) ひずみ速度の影響

気乾状態の来待砂岩を室温の気中で 1 時間先行載荷し、0.00036 mm/min~36 mm/min の載荷速度で繰り返し載荷したところ、0.00036 mm/min では、先行載荷応力の 40% と小さい屈曲点応力が得られた。36 mm/min では、試験機の制御が間に合わず、供試体が破壊してしまった。0.001 mm/min~3.6 mm/min では、屈曲点応力は先行載荷応力の±20%以内であり、載荷速度の影響は認められなかった（図 13）。

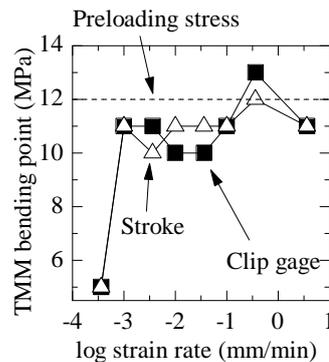


図 13 気乾状態の来待砂岩の繰り返し載荷時のひずみ速度と屈曲点応力の関係（学会発表）

含水飽和状態の来待砂岩を室温の水中で 1 時間先行載荷し、気中で 0.00036 mm/min~36 mm/min の載荷速度で繰り返し載荷したところ、0.00036 mm/min と 0.001 mm/min では、先行載荷応力の 29%~43% と小さい屈曲点応力が得られた。36 mm/min では、試験機の制御が間に合わず、供試体が破壊してしまった。0.0036 mm/min~10 mm/min では、1 つの例外を除いて屈曲点応力は先行載荷応力の±20%以内であり、載荷速度の影響は認められな

った (図 14)。

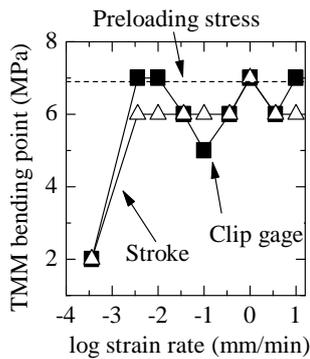


図 14 含水飽和状態で先行载荷した来待砂岩の繰り返し载荷時のひずみ速度と屈曲点応力の関係 (学会発表)

これらの結果は、非常に速い、あるいは、遅いものでない限り、繰り返し载荷時のひずみ速度はあまり気にしないでよいことを示している。

(5) 温度の影響

来待砂岩を室温～80度の水中で1時間先行载荷した後、室温の水中で1時間冷却し、室温の気中で繰り返し载荷したところ、屈曲点応力は1つの例外を除いて先行载荷応力の±20%以内であり、明瞭な先行载荷時の水温の影響は認められなかった (図 5)。

これは、80度程度までの原位置での岩盤温度と試験実施時の気温の差異はあまり気にしないでよいことを示している。

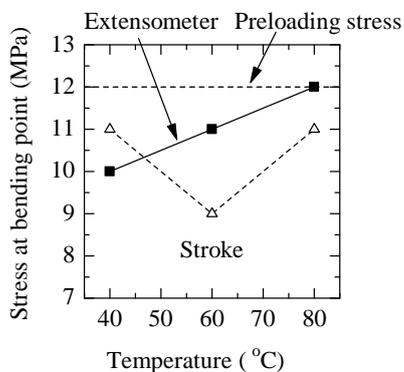


図 15 来待砂岩の先行载荷時の水温と屈曲点応力 (学会発表)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

藤井義明・大高憲道・中川嘉文・児玉淳一 (2008)、接線ヤング率法の三つの岩種に対する適用性と同方法における封圧の影響、J. MMIJ, Vol. 124, No. 2, pp. 120-128 (査読あり)

藤井義明・大高憲道・中川嘉文・児玉淳一 (2006)、接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の推定に関する基礎実験、資源と素材、Vol. 122, Nos. 10/11, pp. 483-488 (査読あり)

[学会発表] (計 4 件)

Makasi M. and Fujii Y. (2009), Investigating the effects of strain rate and temperature on the bending point stress in tangent modulus method, Proc. 3rd Int. Workshop and Conference on Earth Resources Technology, "Stepping Towards Sustainable Geo-resources Utilization and Development", p. 35, 5/13, Hokkaido Univ. Conference Hall, Sapporo.

Makasi M. and Fujii Y. (2008), Effects of strain rate and temperature on Tangent Modulus Method, Proc. Korean Rock Mechanics Symposium 2008 (KRMS 2008), pp. 279-285, Chonnam National University Gwangju, Korea, Oct. 22

近藤香生里・藤井義明 (2008)、接線ヤング率法を用いた岩盤応力測定における間隙水圧の影響、第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 165-170、9/3、山口大学、宇部

藤井義明 (2007)、接線ヤング率法において推定された先行応力値に対する封圧の影響、資源・素材学会平成 19 年度春季大会講演要旨集 (I) 資源編、pp. 97-98、3/31、早稲田大学、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 義明 (FUJII YOSHIAKI)
北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70192309

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし