



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	接線ヤング率法を用いた岩盤初期応力測定における諸条件の影響
Author(s)	近藤, 香生里; Makasi, Masline; 藤井, 義明
Description	資源・素材2009（札幌）—平成21年度資源・素材関係学協会合同秋季大会—, 平成21年9月8日～平成21年9月10日, 北海道大学高等教育機能開発総合センター、北海道札幌市.
Citation	資源・素材2009（札幌）企画発表一般発表(A)(S)講演資料, 279-282
Issue Date	2009-09-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/39946
Type	conference paper
File Information	kondo.pdf



接線ヤング率法を用いた岩盤初期応力測定における諸条件の影響

北大・院 近藤 香生里, Masline Makasi, 藤井 義明

1. 緒言

岩盤応力は、岩盤構造物の安全性・利用方法・寿命などに影響する。また、地震などの地球科学的現象にも深く関係し、古くから岩盤応力の測定に関する研究が活発に行われている。

接線ヤング率法は、岩盤応力測定法の内、定方位コア法に分類される手法の一つであり、以下のように原位置岩盤応力を推定しようとする。すなわち、原位置岩盤のコアから作製した円柱型供試体に一軸繰返し載荷試験を2サイクル施し、各サイクルの応力-接線ヤング率線図をプロットする(図1(a))。1サイクル目の応力-接線ヤング率線図の屈曲点、または、1サイクル目と2サイクル目で差異の見え始める点(以降便宜的に屈曲点と呼ぶ)の応力を原位置で作用していた供試体軸方向の初期応力成分とみなす。接線ヤング率法には特殊な測定機器が必要なく、解析も他の手法に比べ簡易である。

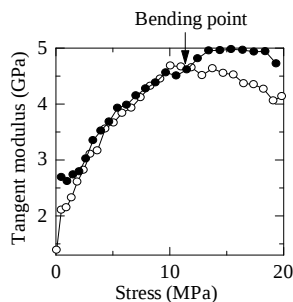
接線ヤング率法の原理は以下のようである。ボーリングを行い、原位置岩盤よりコアを取り出した時(図1(b) A-B)、原位置

で閉じていた亀裂やポアの大部分は原位置と同様に閉じたままであると考えられる。次に繰返し載荷試験を行い、岩盤初期応力以上の応力が載荷されることで(図1(b) C-D)、開口していた亀裂やポアも閉じ始める。これにより、応力の増加に対するひずみの増加率が大きくなり、結果、岩盤初期応力を境に接線ヤング率が低下する。2サイクル目(図1(b) E-F)は岩盤初期応力を超えた応力が載荷されても新たな閉口が生じないため、接線ヤング率は低下しない。非常に非線形的な岩石であれば応力-ひずみ線図からC点(図1(b))を見出すことができるが、通常の岩石の場合は接線ヤング率を算出する必要がある。以上は、藤井ら(2008)によって力学モデルを用いた説明がなされている。

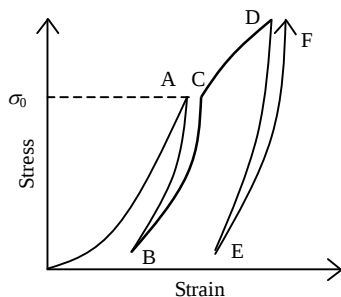
接線ヤング率法の実用化に向け、円柱型供試体に原位置を模した先行載荷を施し、ある時間静置して繰返し載荷試験を行い、応力-接線ヤング率線図から読み取った屈曲点を先行載荷時の応力値と比較検討するという方法で、諸条件の影響が検討されている。現在までにいくつかの岩種に対する適用性と記憶時間、乾燥状態による影響、封圧の影響、封圧と間隙水圧の変化による影響が検討されている。

まず、接線ヤング率法は気乾状態の白浜砂岩・支笏溶結凝灰岩・稲田花崗岩・来待砂岩の円柱型供試体について、適用可能であることがわかっている(藤井ら, 2008)。上記の前3種については、先行載荷時間と静置時間との間に正の相関がみられた。また、各岩種の最大静置時間は、白浜砂岩・支笏溶結凝灰岩で1000分の先行載荷に対し6週間、稲田花崗岩で1000分の先行載荷に対し3週間、来待砂岩で60分の先行載荷に対し4週間であった。

乾燥状態の影響として、純水中で先行載荷し純水中で静置

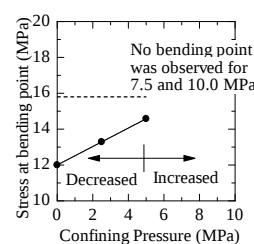


(a) 応力-接線ヤング率線図

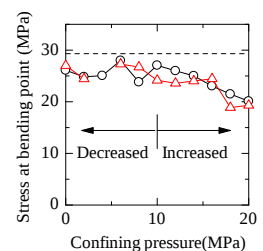


(b) 応力-ひずみ線図

図1 繰返し載荷試験における応力-接線ヤング率線図の例と応力-ひずみ線図の模式図 (σ_0 は原位置応力)

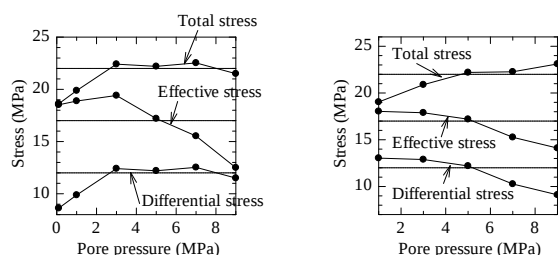


(a) 白浜砂岩



(b) 来待砂岩

図2 気乾状態の各岩種における繰返し載荷試験時の封圧と屈曲点(藤井ら, 2008)



(a) 先行載荷後、間隙水圧のみ増減させた場合
(b) 先行載荷後、有効封圧が一定となるよう間隙水圧と封圧を増減させた場合

図 3 含水飽和状態の来待砂岩の三軸繰返し載荷試験時の間隙水圧と屈曲点応力(近藤・藤井, 2008)

した来待砂岩の最大記憶時間が 1 週間以上であったのに対し、空气中に静置し乾燥の影響を受けた場合、1 日未満であった。また、気乾状態で 1 時間先行載荷した後 1 時間真空脱気を行うと、屈曲点がみられなくなった(藤井ら, 2008)。以上から、自然の含水状態を保つことが重要であると結論づけられている。

封圧の影響については、気乾状態の白浜砂岩・来待砂岩に三軸先行載荷を実施し、増減させた封圧下で三軸繰返し載荷試験を行うことで検討した(図 2)。白浜砂岩は繰返し載荷時の封圧が先行載荷時より小さい場合には先行載荷時より小さい応力が得られ、逆の場合には明瞭な屈曲点が見られなかった。これに対し、来待砂岩では繰返し載荷試験時の封圧が先行載荷時より小さい場合はほぼ正確に先行載荷が得られ、逆の場合には先行載荷応力より小さい応力が得られた。

間隙水圧の影響については、ある間隙水圧下で三軸先行載荷し、その後封圧一定のまま若しくは有効封圧一定として増減させた間隙水圧下で、三軸繰返し載荷試験を行い、検討された。封圧一定の場合(図 3(a))は、間隙水圧の増減が先行載荷時の 40% 以内の時、ほぼ正確に先行載荷時の全応力・差応力が求められたが、それ以上の増減がある場合は屈曲点の応力値は小さく求められた。間隙水圧が先行載荷時よりも大きい時、屈曲点の有効応力は小さく求められた。

有効封圧が一定の場合(図 3(b))の屈曲点の全応力は先行載荷時よりも間隙水圧が小さい時に、有効応力・差応力は先行載荷時よりも間隙水圧が大きい時に、小さく推定された。

藤井ら(2008)は、以上 2 つの実験結果について、いくつかの応力下で繰返し載荷試験を行うことで、封圧・間隙水圧・岩盤応力を決定することができる可能性があるとし唆している。

ここでは、(1)ある封圧と間隙水圧の下で先行載荷した供試体を用い一軸状態で繰返し載荷した際に、先行載荷時の間隙水圧が屈曲点応力に与える影響、(2)繰返し載荷時の載荷速度の影響、(3)先行載荷時の温度の影響、について検討し

表 1 含水飽和状態の来待砂岩の一軸圧縮強さ

供試体 No.	圧縮強さ (MPa)
KSS-1	25.31
KSS-2	22.34
KSS-3	22.87
平均	23.51

た結果を示す。

2. 先行載荷時の間隙水圧が屈曲点応力に与える影響

1 辺 25 cm の立方体形の来待砂岩ブロックの対向する面間の P 波速度を、応用地質社製の超音波速度測定器ソニックピュア SX(共振周波数 160 Hz)を使用して測定した。P 波速度の一番速い方向に直径 30 mm のボーリングを行い、ダイヤモンドカッターで切断、平面研削盤で端面が平行になるよう長さ 60 mm の供試体を整形した。供試体は乾燥させずにそのまま純水中で保存した。含水飽和状態の供試体の一軸圧縮強さ(載荷速度 0.036 mm/min)を表 1 に示す。

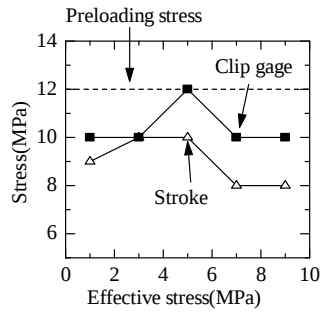
試験に用いる 48 時間前に軸方向に孔の開いたエンドピースを供試体上下に取り付け、熱収縮チューブで全体を被覆した。被覆後にデシケーター中の純水に供試体全体を沈め、真空ポンプで 24 時間脱気、復圧し更に 24 時間静置した。

被覆した供試体を超小型三軸ベッセルに挿入し、間隙水圧載荷用のアタッチメントを供試体両端に取り付けた。封圧は水圧にて載荷、間隙水圧は ISCO 社のシリンジポンプ 500D 型を使用して載荷した。その後、0 でない間隙水圧下で 60 分の三軸先行載荷を実施した(表 2)。封圧・間隙水圧を増加させる場合は、軸圧・封圧・間隙水圧の順に 1 MPa ずつ増加させた。減少させる場合は、逆の手順によった。

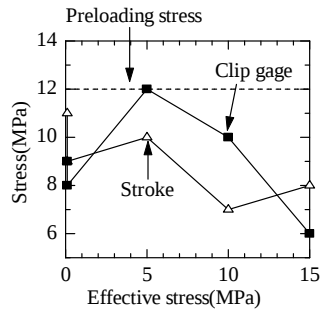
先行載荷の後間隙水圧・封圧・軸圧を除荷し、超小型三軸ベッセルから取り出した供試体の被覆とエンドピースを取り外した。むき出しの供試体に軸ひずみ計と両端にエンドピースを速

表 2 先行載荷時の軸圧・封圧・間隙水圧

供試体 No.	軸圧 (MPa)	封圧 (MPa)	間隙水圧 (MPa)
a1	22	10	1
a2	22	10	3
a3	22	10	5
a4	22	10	7
a5	22	10	9
b1	13	1	0.9
b2	17	5	4.9
b3	27	15	5
b4	32	20	5

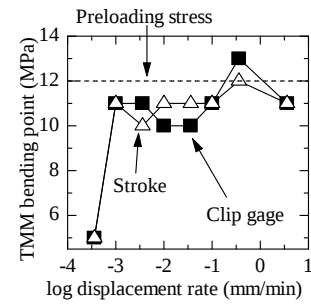


(a) 封圧 10 MPa 一定 (左から a5・a4・a3・a2・a1)

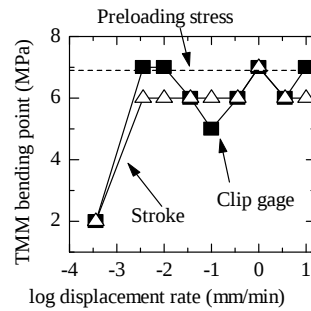


(b) 間隙水圧 5 MPa 一定 (左から b1・b2・a3・b3・b4)

図 4 先行載荷時の有効封圧と屈曲点応力の関係



(a) 気乾状態



(b) 含水飽和状態

図 5 繰り返し載荷時の載荷速度と屈曲点応力の関係
(Makasi & Fujii, 2008)

やかに取り付け、乾燥しないように載荷速度 0.36 mm/min にて繰り返し載荷試験を実施して応力-接線ヤング率線図をプロットし屈曲点を読み取った。被覆を取り外してから繰り返し載荷試験が終わるまでの時間は、長くて 4 分、平均して 3 分半であった。繰り返し載荷試験の最大圧縮応力は 17 MPa、最小圧縮応力は 0.1 MPa とした。

軸ひずみ計によるひずみ (Clip gage) とブラテン変位を供試体長さで除したひずみ (Stroke) を測定し、それぞれ接線ヤング率を算出した。

屈曲点応力は先行載荷時の軸差応力とほぼ同じまたは小さく読み取れているようである (図 4)。封圧 10 MPa 一定の場合 (図 4(a)) は、先行載荷時の軸差応力の 83 ~ 100 % (Clip gage) または 67 ~ 83 % (Stroke)、間隙水圧 5 MPa 一定の場合 (図 4(b)) は、先行載荷時の軸差応力の 50 ~ 100 % (Clip gage) または 58 ~ 83 % (Stroke) であった。ここで、

$$\begin{aligned}\sigma_B &= A\sigma + BP_C - CP_p \\ &= A\Delta\sigma + (A+B)P_C - CP_p \\ \sigma_B &: \text{屈曲点応力} \\ \sigma &: \text{先行載荷時の軸応力} \\ P_C &: \text{先行載荷時の封圧} \\ P_p &: \text{先行載荷時の間隙水圧} \\ \Delta\sigma &: \text{先行載荷時の軸差応力}\end{aligned}\quad (1)$$

と仮定し重みなし最小二乗法により係数 A, B, C を求めると、軸ひずみ計による結果では、

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 0.85\sigma - 0.96P_C + 0.13P_p \\ &= 0.85\Delta\sigma - 0.11P_C + 0.13P_p\end{aligned}\quad (2)$$

ブラテン変位による結果では、

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 0.86\sigma - 1.04P_C + 0.12P_p \\ &= 0.86\Delta\sigma - 0.18P_C + 0.12P_p\end{aligned}\quad (3)$$

となった。

気乾状態の来待砂岩に三軸先行載荷を行い、一軸繰り返し載荷によって屈曲点を求めた場合、

$$\sigma_B = 0.86\sigma - 0.15P_C = 0.86\Delta\sigma + 0.71P_C \quad (4)$$

となっており (藤井ら, 2008), A はほぼ同じ値であるが, B は大分違う。差異の原因は不明であり、更なる検討が必要である。

3. 繰り返し載荷時の載荷速度の影響

80 度の恒温槽で 1 日乾燥させ 1 日以上気中で冷却した気乾状態の来待砂岩の供試体を用い、軸圧 12 MPa (気乾状態での 30% UCS, 表 3) で 60 分先行載荷した。その後軸ひずみ計を取り付け、載荷速度 0.00036 mm/min ~ 36 mm/min にて繰り返し載荷を行い、屈曲点応力を読み取った。また、含水飽和状態の供試体には、軸圧 6.9 MPa (含水飽和状態での 30% UCS) にて 60 分の先行載荷を行い、気中で同様の繰り返し載荷試験を行った。

表 3 気乾状態の来待砂岩の一軸圧縮強さ

供試体 No.	圧縮強さ (MPa)
KSS-4	40.1
KSS-5	42.9
KSS-6	39.3
平均	40.8

他の実験結果と同様, 2 通りのひずみ測定による結果から, 各々接線ヤング率を算出し, 屈曲点応力を読み取った。

気乾状態・含水飽和状態のどちらも, 載荷速度 0.00036 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(図 5), 36 mm/min では, 気乾状態・含水飽和状態どちらも試験機の制御が間に合わず, 供試体が破壊した(図 5)。それ以外は一つの例外を除いて先行応力の $\pm 20\%$ 以内の屈曲点応力が得られた。

4. 先行載荷時の温度の影響について

含水飽和状態の供試体を用い, 上下にエンドピースを取り付けて, 日本ヒーター株式会社製の THC-15 ヒーターを用い温度を一定に保った純水中で 60 分の先行載荷を行った。温度計測は供試体に取り付けた K 型熱電対によった(図 6)。先行載荷後, 室温の水中で 1 時間冷却し, 室温の気中にて軸ひずみ計を取り付けて載荷速度 0.36 mm/min で繰り返し載荷試験を行った。

1 つの例外を除いて, 屈曲点応力は先行載荷応力の $\pm 20\%$ 以内であった(図 7)。

5. 結言

接線ヤング率法に関する今までの研究成果をレビューした後, 一軸状態での繰り返し載荷における屈曲点応力に対する先行載荷時の間隙水圧の影響, 繰り返し載荷時の載荷速度の影響, 先行載荷時の水温の影響について述べた。本研究で得られた主な知見は以下のようである。

含水飽和状態の来待砂岩を, ある間隙水圧・封圧・軸応力下で 60 分先行載荷した後, 一軸繰り返し載荷試験を行い, 接線ヤング率法により屈曲点を推定したところ, 読み取れた屈曲点応力は, 軸差応力とほぼ同じまたは小さい数値であり, 屈曲点応力は, 先行載荷時の間隙水圧・封圧に強く依存していた。一般的に 0 でない供試体軸方向以外の直応力と間隙水圧の作用を受けた岩盤から採取した供試体を, むき出しの状態で見れば接線ヤング率法に供し, 屈曲点の応力値をそのまま原位置における供試体軸方向の原位置応力とすることは, 明らかに不適当である。これは, 接線ヤング率法に類似した他のコア法にもいえるのではないと思われる。

次に, 繰り返し載荷試験による載荷速度の影響については, 非常に速いまたは遅い載荷速度でない限り, あまり気にしな

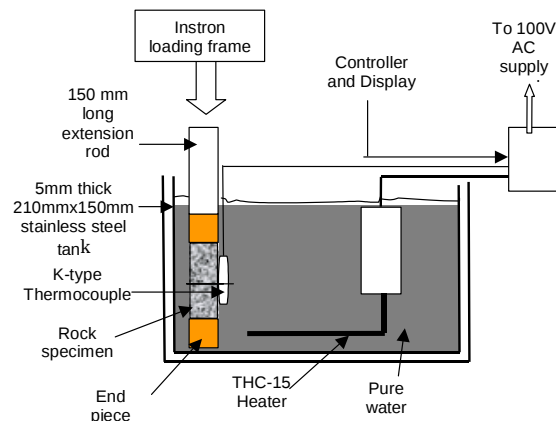


図 6 先行載荷時における温度制御水槽中の模式図 (Makasi & Fujii, 2008)

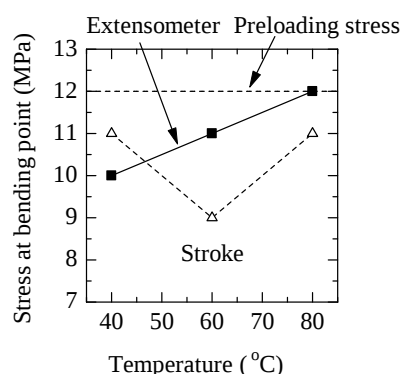


図 7 先行載荷時の水温と屈曲点応力の関係 (Makasi & Fujii, 2008)

て良いことがわかった。

最後に, 温度の影響に関する試験では, 実験時とは異なる 80 度程度までの原位置での岩盤温度はあまり気にしなくてよいことがわかった。

6. 参考文献

- 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
- 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
- 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.