

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	
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	http://hdl.handle.net/2115/39946	
Туре	proceedings (author version)	
Note	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.	
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り返し載荷試験を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



(b) 応力-ひずみ線図

図1 繰り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(のは原位置応力)

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。次に繰り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り返し載荷試験を 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



図 2 気乾状態の各岩種における繰り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



図3 含水飽和状態の来待砂岩の三軸繰り返し載荷試験時の 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, 気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時間真空脱気をする 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り返し載 荷試験を行うことで検討した(図 2)。白浜砂岩は繰り返し載荷 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,来待砂岩では繰り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,三軸繰り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 応力下で繰り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示唆している。

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り返し載荷した際に,先行載荷時の間隙水圧が屈曲点応力に与える影響,(2)繰り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ビュ 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,ダイアモンド 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

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

表2 先行載荷時の軸圧・封圧・間隙水圧



(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

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)とプラテン変位を供試 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,

$$\sigma_{\rm B} = A\sigma + BP_{\rm C} - CP_{\rm P}$$

= $A\Delta\sigma + (A+B)P_{\rm C} - CP_{\rm P}$
 $\sigma_{\rm B}$: 屈曲点応力
 σ : 先行載荷時の軸応力
 $P_{\rm C}$: 先行載荷時の封圧
 $P_{\rm P}$: 先行載荷時の間隙水圧
 $\Delta\sigma$: 先行載荷時の軸差応力



(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)

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,

$$\sigma_{\rm B} = 0.85\sigma - 0.96P_{\rm C} + 0.13P_{\rm P}$$

$$= 0.85\Delta\sigma - 0.11P_{\rm C} + 0.13P_{\rm P}$$
(2)

プラテン変位による結果では,

$$\sigma_{\rm B} = 0.86\sigma - 1.04P_{\rm C} + 0.12P_{\rm P}$$
(3)
= 0.86\Delta\sigma - 0.18P_{\rm C} + 0.12P_{\rm P}

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,

 $\sigma_{\rm B} = 0.86\sigma - 0.15P_{\rm C} = 0.86\Delta\sigma + 0.71P_{\rm C}$ (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±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±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 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かと思われる。

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,あまり気にしなく



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.