

AE法を用いた地圧評価法 ～国際標準化と今後の活用に向けて～



Suggested Methods
*In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique*

岩の力学連合会 (JCRM)

- | | | |
|-------------|------------------------|---------|
| 10:50-11:00 | AE法の標準化と今後の活用に向けて | (瀬戸 政宏) |
| 11:00-11:15 | カイザー効果とAE測定の急所 | (金川 忠) |
| 11:15-11:30 | “いつ”の地圧が分かるのか | (畑 浩二) |
| 11:30-11:45 | 試料採取後“いつ”まで初期地圧を憶えているか | (瀬戸 政宏) |
| 11:45-12:00 | 三次元の地圧が測定できるのか | (横山 幸也) |
| 12:00-12:20 | 総合討論 | |
-



Suggested Methods
*In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique*

AE法の標準化と今後の活用に向けて

独立行政法人産業技術総合研究所

地圏資源環境研究部門

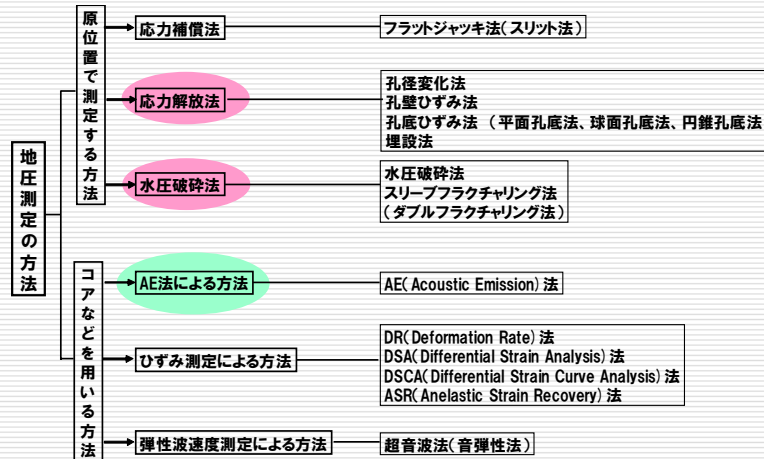
瀬戸 政宏

平成18年9月20日



主な地圧測定法の種類

● これまで一部を除いて、長い間ほとんどの技術が研究フェーズであった。



地圧測定法の標準化を取り巻く状況

● 地圧測定の重要性、標準化への認識が高まってきた

1 ニーズ

- 地下深部の長期安定性の評価において基本データとしての重要性が増してきた。
～地圧測定へのニーズの高まり～

2 成熟度

- 応力解放法、水圧破砕法などを中心に、地圧測定技術の成熟度、精度が向上。
～研究フェーズから実用フェーズへ～

3 公共性

- 地圧測定データの信頼性への裏付けに対する要求。
～地圧データの公共的意味づけ～



地圧測定標準化における最近の動き

● 将来のISO化を視野に入れて、応力解放法、水圧破砕法の標準化

1. ISRM (International Society for Rock Mechanics) Suggested Method

- Suggested Method for Rock Stress Determination (1987)
- Suggested Methods for Rock stress Estimation • Part1:Strategy for Rock Stress Estimation (2003)
- Suggested Methods for Rock stress Estimation • Part2:Overcoring Methods (2003)
- Suggested Methods for Rock stress Estimation • Part3:Hydraulic Fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) (2003)

2. 地盤工学会 (ISO国内審議団体)における標準化

- 初期地圧の測定方法標準化検討委員会 (石田毅委員長) : 埋設法WGと円錐孔底法WG

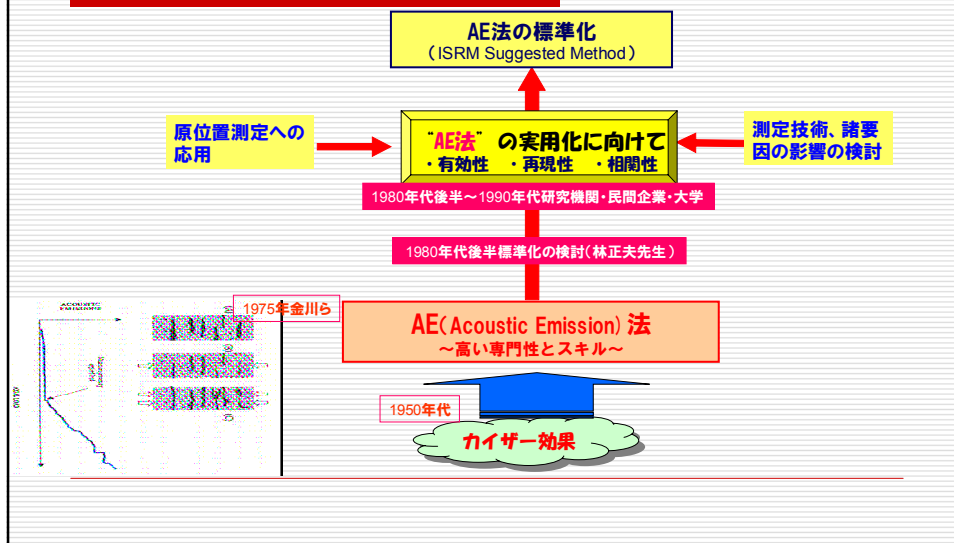
● 今回のAE法の標準化 : ISRM Suggested Method

Suggested Method for *in-situ* Rock Stress Estimation From A Rock Core Using The Acoustic Emission Technique

(参考) TR-A0013: 岩石コアのAE測定方法-地圧測定技術(タイプII)

AE法の標準化への流れ

～専門技術を共通技術に～





AE法による地圧測定の標準化

Suggested Method for in-situ Rock stress Estimation From A Rock Core Using The Acoustic Emission Technique

1 試験全体のシステム構成

- ・ 載荷システム
- ・ AE計測システム

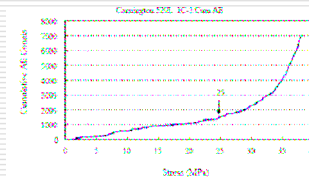


2 試験手順

- ・ 試験片の準備
- ・ AEセンサー、AE測定システムの調整
- ・ 載荷方法の設定
- など

3 データ分析と報告

- ・ データの分析と整理
- ・ 報告事項

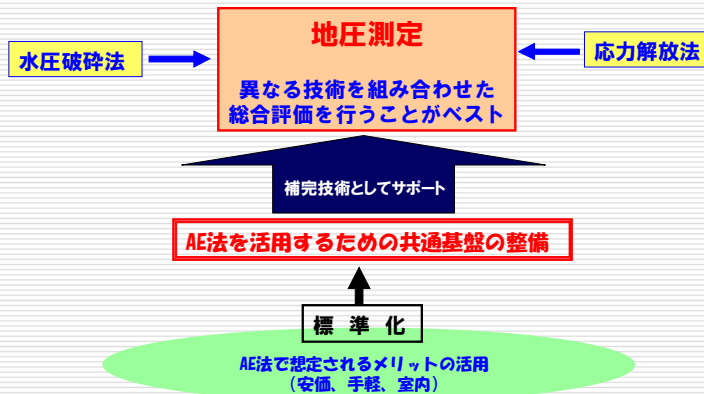


<http://www.rocknet-japan.org/> に公開



標準化されたAE法の今後の位置づけ

- 地圧測定の信頼性 (Confidence) を向上させるための公共的ツール



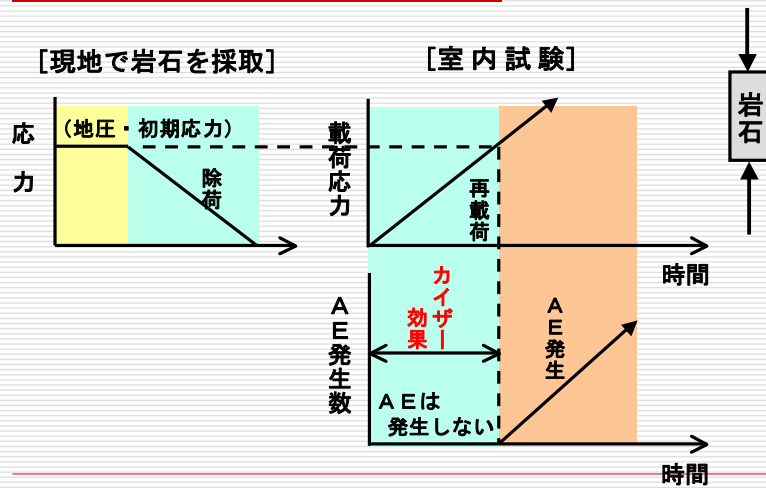


AE法を活用していくための話題提供

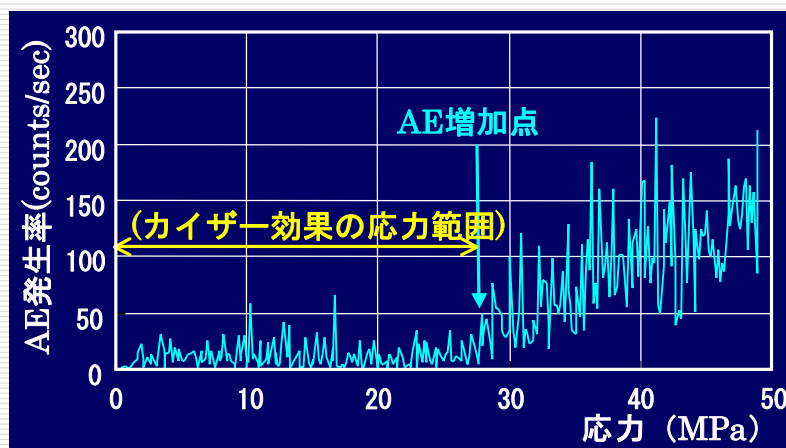
- AE測定の留意点:
 - ??? (金川)
 - “いつ”の地圧が分かるのか:
 - ??? (畑)
 - 試料採取後“いつ”まで初期地圧を憶えているか:
 - ??? (瀬戸)
 - 三次元の地圧を測定できるのか:
 - ??? (横山)
-



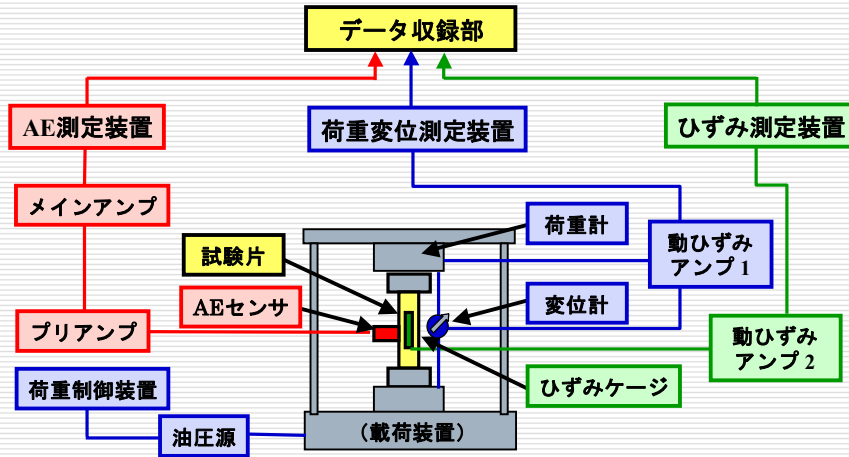
地圧測定への適用



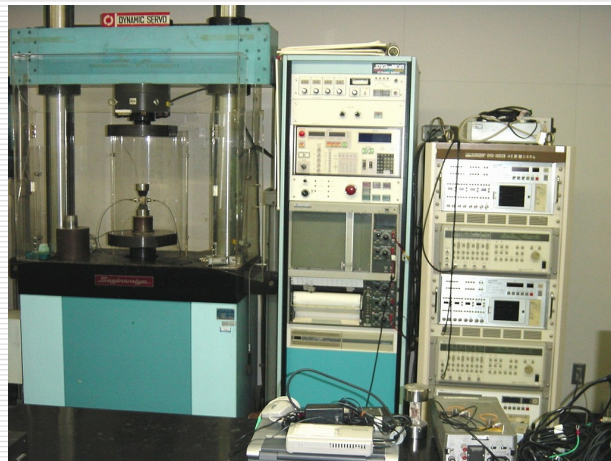
AE測定データの例



室内AE測定装置の例

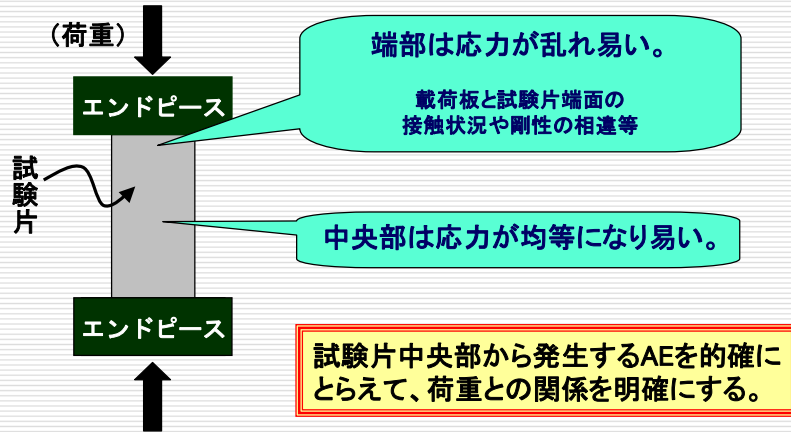


室内AE測定装置(例)の写真

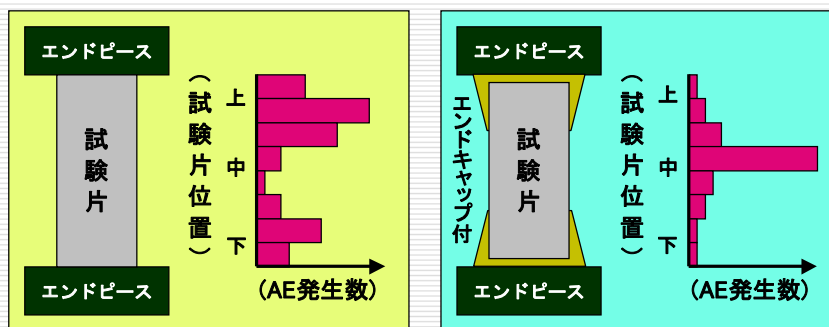




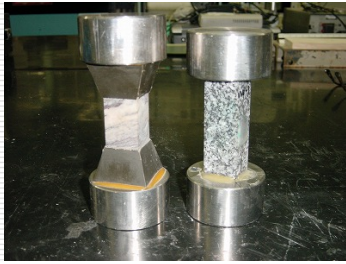
カイザー効果を評価する上での AE測定の急所



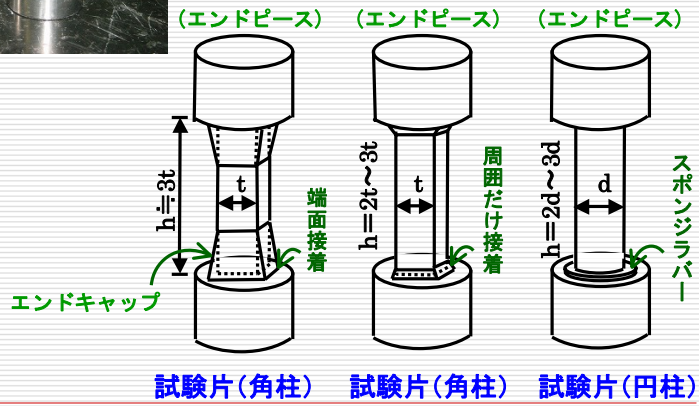
AEの発生位置と発生数の測定例



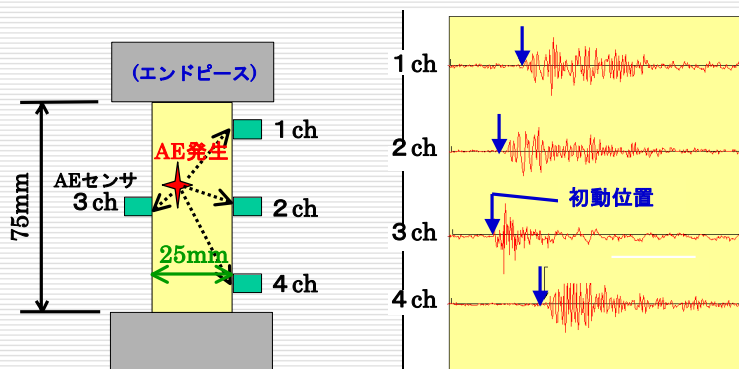
土木学会論文報告集 第258号・1977年2月（金川・他）より抜粋



岩石試験片の形状(例)



AE発生位置の測定例(ロケーション)





ま と め

AEのカイザー効果を利用した地圧測定法（AE法）
におけるAE測定の急所は、

「**载荷による応力の乱れ等の影響がない試験片中央部
から発生するAEを的確に捉え、载荷応力との関係を
明確にすること**」

であり、そのための測定上の工夫（供試体形状、
AE発生位置の標定）について例示した。



Suggested Methods

In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique

“いつ”の地圧が分かるのか？

— 応力履歴とカイザー効果の関係 —



(株)大林組 技術研究所

地盤岩盤研究室

畑 浩二



Suggested Methods

In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique

初期地圧とは？ → 岩盤に作用している応力状態



- 主に岩盤の自重によって生じる。
- 地質構造、地殻変動、地熱などの影響により、地域性のある複雑な3次元状態にある。
- 地質学的な時間スケールで変化する。



カイザー効果から推定される初期地圧

“いつ”の地圧？

最大応力



地球物理学的観点から、地殻・地質構造の成り立ちを明らかにできる可能性がある。

現在応力

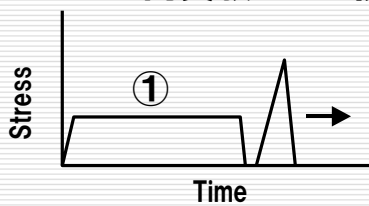


工学的観点から、設計外力として利用可能である。

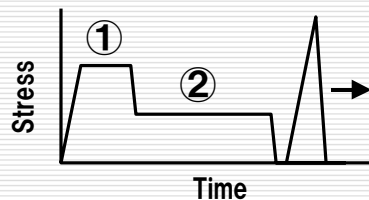


“いつ”の地圧？

室内実験による検証：《地圧の変化をモデル化》



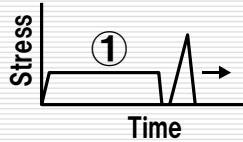
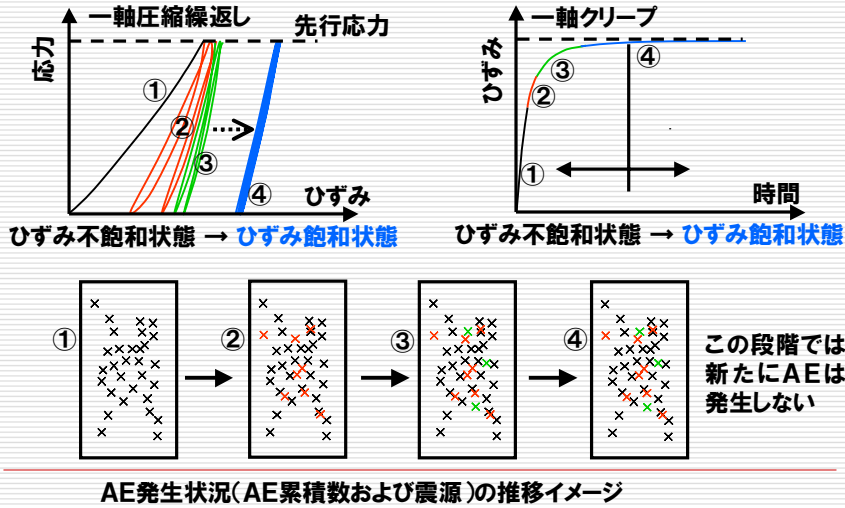
地山が一定地圧①の下に安定している。



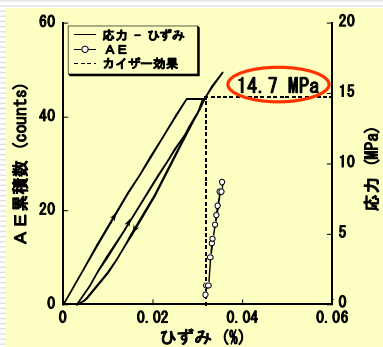
地圧が① → ②に変化するものの、一定地圧②の下に安定している。



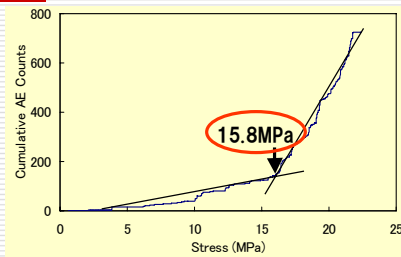
先行応力を記憶させるために
「ひずみ飽和」、「き裂飽和」概念を考える。



実験結果 1

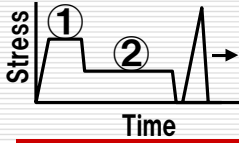


稲田花崗岩他
一軸クリープ(軸圧: 14.7MPa)
→ 除荷 → 一軸載荷



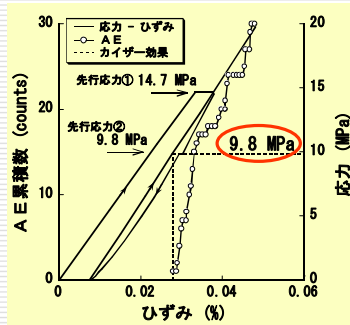
来待砂岩
三軸クリープ(軸圧: 14.8MPa, 側圧5MPa)
→ 除荷 → 一軸載荷

結果: 一定地圧①がカイザー効果から推定された。

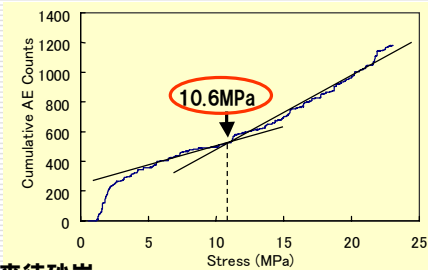


Suggested Methods
In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique

実験結果 2



稲田花崗岩他
一軸クリープ(軸圧: 14.7MPa)
→ 除荷(軸圧: 9.8MPa)
→ 除荷 → 一軸載荷



来待砂岩
三軸クリープ(軸圧: 19.0MPa, 側圧5MPa)
→ 除荷(軸圧: 9.8MPa, 側圧5MPa)
→ 除荷 → 一軸載荷

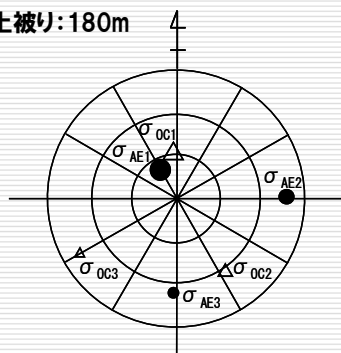
結果:一定地圧②がカイザー効果から推定された。



Suggested Methods
In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique

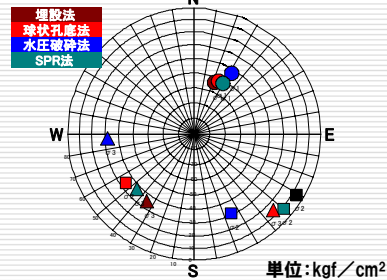
初期地圧測定事例(神岡鉱山): 応力解放法と比較

土被り: 180m



$\sigma_{AE1} = 5.53\text{MPa}$ $\sigma_{OC1} = 5.0\text{MPa}$
 $\sigma_{AE2} = 3.74\text{MPa}$ $\sigma_{OC2} = 1.9\text{MPa}$
 $\sigma_{AE3} = 2.97\text{MPa}$ $\sigma_{OC3} = 1.2\text{MPa}$

土被り: 1000m



単位: kgf/cm²

測定手法	埋設法	球状孔底法	水圧破砕法	SPR法	AE法
σ_1	291	367	196	183	290
σ_2	139	99	96	133	
σ_3	43	24	48	112	



Suggested Methods

In-situ Rock Stress Measurement
from Rock Core using AE Technique

まとめ

室内実験による結果、ならびに原位置測定結果（応力解放法）との結果比較に基づき、カイザー効果から推定される応力値は、除荷直前に作用していた応力に近くなる傾向にあった。

《 “いつ” の地圧？ 》



現在の応力

《 地下構造物の設計外力として利用可能 》



試料採取後“いつ”まで初期地圧を憶えているか ～経過時間の影響について～

独立行政法人産業技術総合研究所

地圏資源環境研究部門

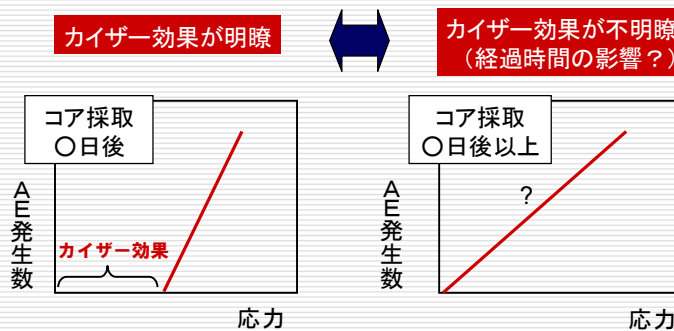
瀬戸 政宏

2006年9月20日



経過時間の影響

- ・ 岩石コア採取後、室内実験を行うまでに発生する経過時間の影響により、カイザー効果(AE急増点)が不明瞭になることがある。

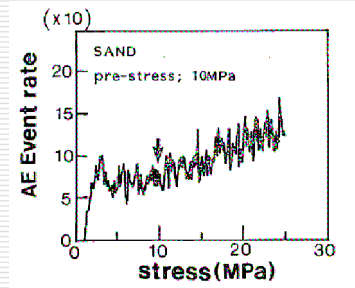




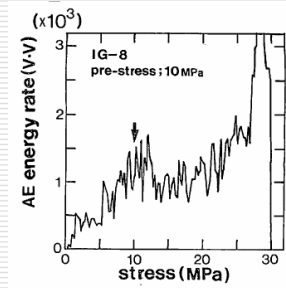
カイザー効果が不明瞭な例

◆経過時間の影響なのか？

人為的に先行応力(10MPa)を与えた岩石試験片について、カイザー効果を確認するために実施した一軸圧縮載荷実験でのAE発生挙動



先行応力除荷後7日後に試験
(白浜砂岩)

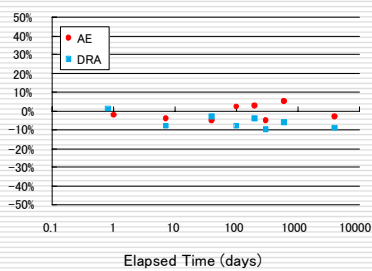


先行応力除荷後38日後に試験
(稲田花崗岩)



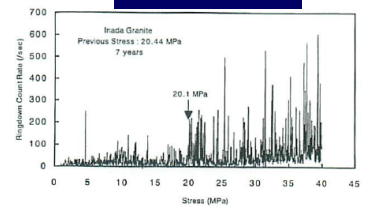
先行応力除荷後7年後の試験結果

～長期の経過時間後でもカイザー効果が確認できた～

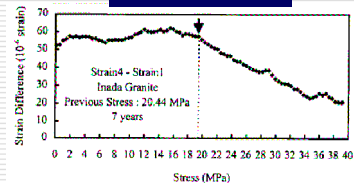


◆ 実験的には推定誤差は発生するが大きくはない。

AE法による推定



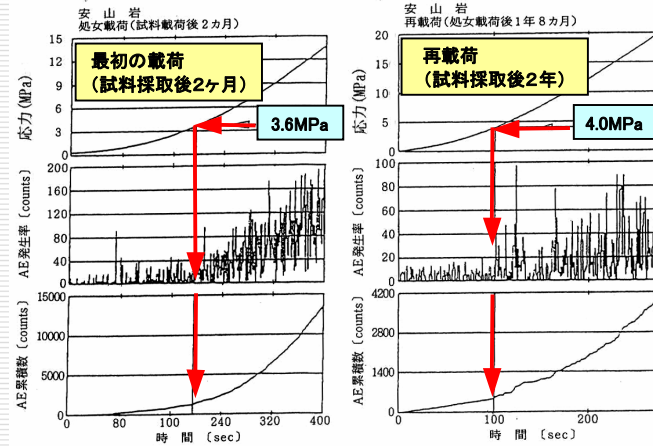
DRAIによる推定





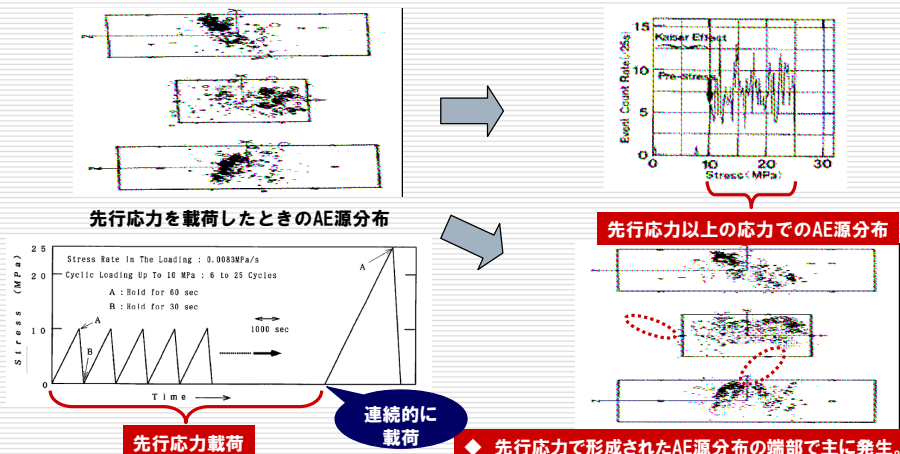
初期地圧は長い間保持される

◆地下現場から採取したコアの例



カイザー効果と微小き裂との関係

◆先行応力によって試験片内部に形成される微小き裂群の進展

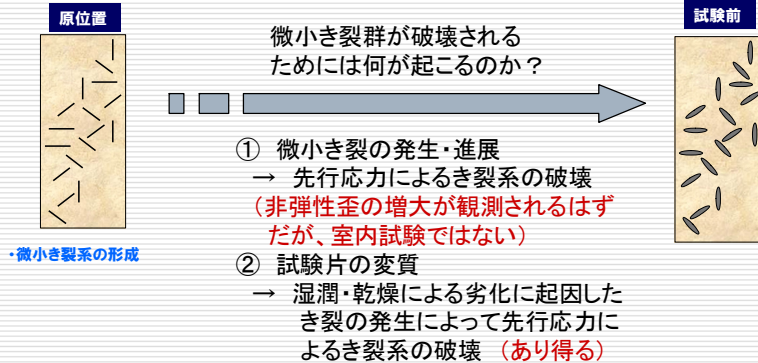


経過時間の影響が発生するには？

仮説：先行応力は岩石コア内部の微小き裂群の形成という形で記憶される。



経過時間の影響：微小き裂群が破壊されることに起因する。



経過時間の影響はあり得る

● コア採取後早めにAE法の載荷実験を行うことが望ましい

● コアが外部環境影響を受けにくいよう、保存に注意する
(例:ラップに包んで冷暗所に保管するなど)

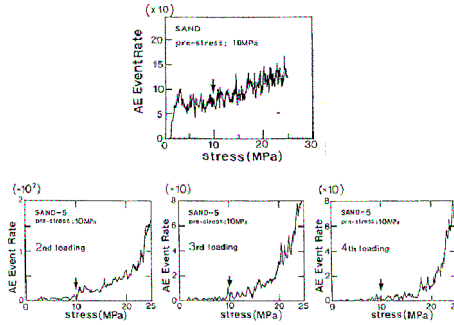
● 但し、経過時間が長いと初期地圧を測れないとは言えない。



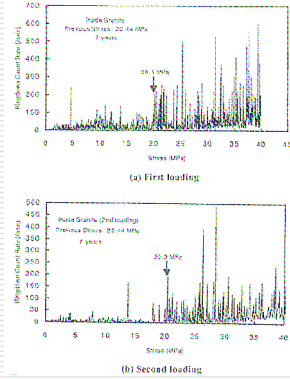
繰り返し载荷時のAEの挙動 (1)

繰り返し载荷のAE挙動から先行応力が推定できる

先行応力除荷7日後の試験結果

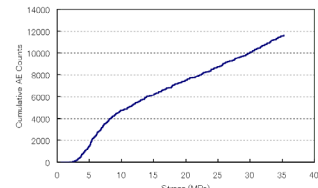


先行応力除荷7年後の試験結果

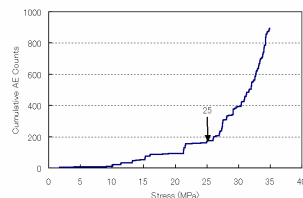


繰り返し载荷時のAEの挙動 (2)

BHP Billiton (Cannington Mine<-520L>での測定例



コア採取後 1回目の载荷



コア採取後 2回目の载荷

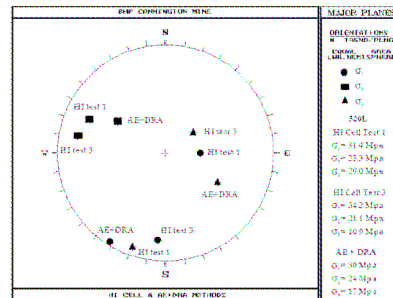
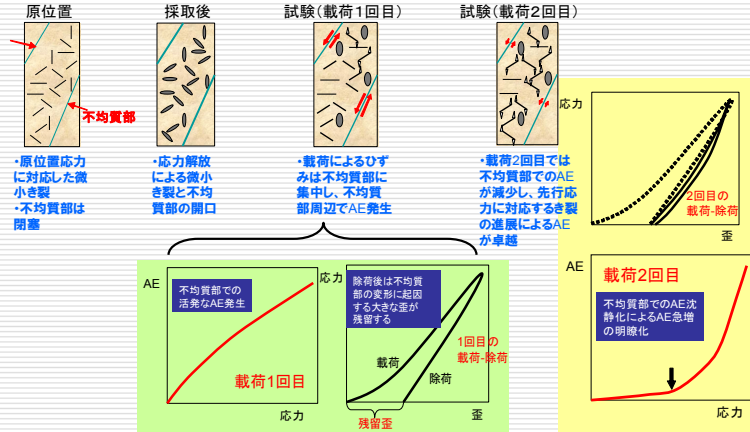


Fig. 12. Principal stress magnitudes and directions - 520L, Cannington Mine

岩石の不均質性、载荷の不均一の影響

2回目の载荷時のAE挙動から先行応力が推定できる一つの説明

・経過時間の影響より大きく、これまで経過時間の影響と解釈されたものがある



まとめ

1. 岩石試料採取後、初期地圧の情報は長い時間試料内部に保持される可能性が高い。

●ただし、経過時間の影響も大きくはないがあり得る。したがって、コア採取後できるだけ早くAE法の载荷実験を行うのが望ましい。

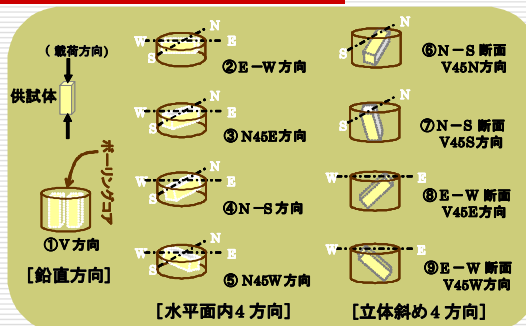
2. 繰り返し载荷のAE挙動を調べる必要がある。

●これまで経過時間の影響とされていたものも別の原因による可能性も高い。例えば、岩石の不均質性。

三次元の地圧が測定できるのか — 載荷方向の独立性 —

応用地質株式会社
横山幸也
平成18年9月20日

三軸状態での地圧を一軸載荷で再現できるのか？

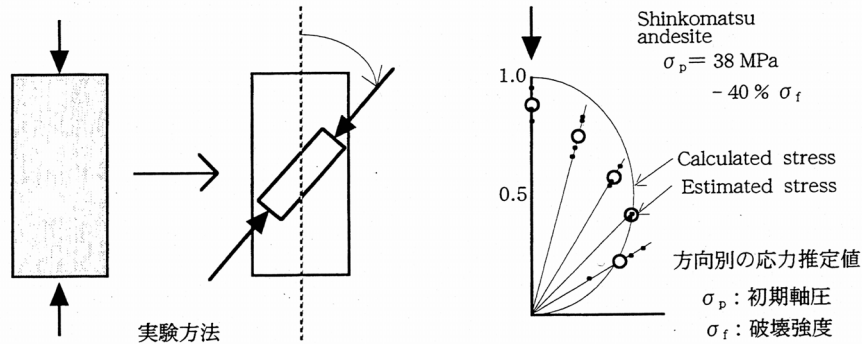


1. 実験的検証例は多数ある
 - ・一軸、二軸(同時、逐次載荷)、三軸(逐次載荷)で確認
2. 原位置の測定事例も多数ある
 - ・他の地圧測定結果とよく合っている



実験的検証例 1

一軸圧縮応力場における各方向の応力測定例



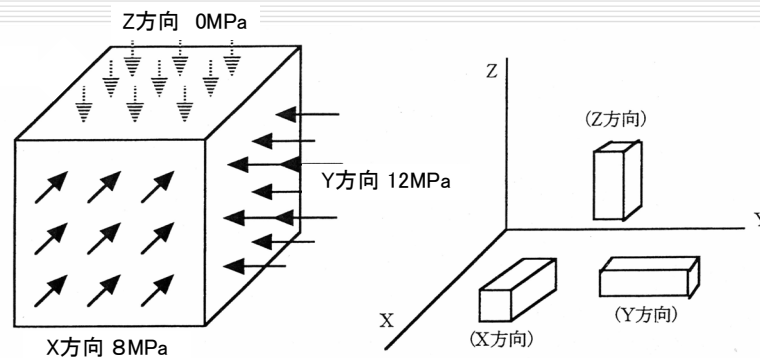
新小松安山岩の一軸圧縮試験片を用いた方向別試験(吉川・茂木、1983)
・圧荷方向からのずれ角に応じた先行応力を確認

3



実験的検証例 2

二軸同時圧荷の方向と試験片の作製方法



(1) 20 cm角のモルタル供試体を4日間荷重し、その後、X、Y方向の荷重を同時に除荷する。(wet状態)

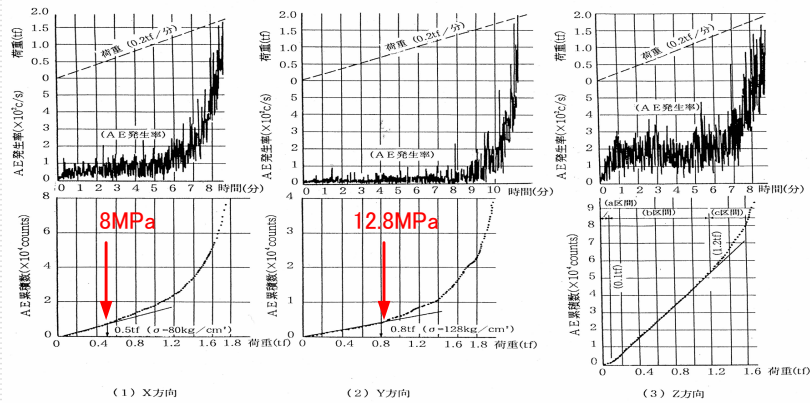
(2) X、Y、Zの3方向について25×25×75 (cm)のAE用供試体を作製し、ハンチをつけてAE実験を行なう。(dry状態)

金川ほか(1981) 4



実験的検証例 2

二軸同時載荷を行ったモルタルの各方向のAE測定例



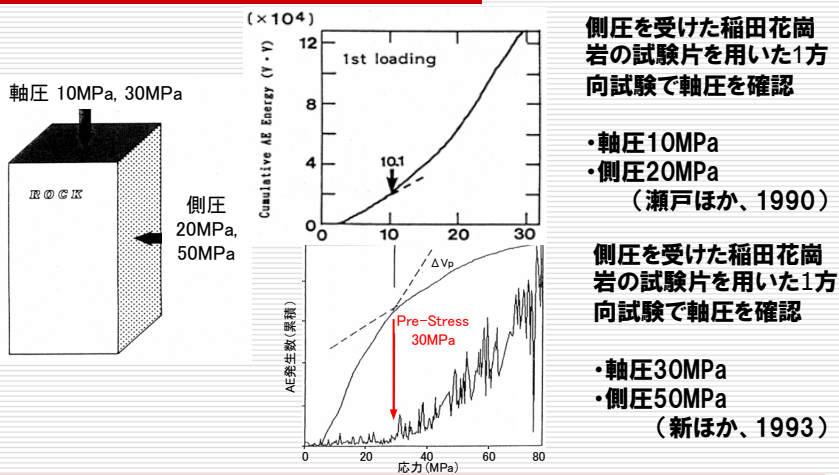
モルタルの二軸同時載荷試験片を用いた3方向試験(金川ほか、1981)

・3つの載荷方向に応じた先行応力を確認



実験的検証例 3

二軸逐次載荷を行った花崗岩の1方向のAE測定例



側圧を受けた稲田花崗岩の試験片を用いた1方向試験で軸圧を確認

- ・軸圧10MPa
 - ・側圧20MPa
- (瀬戸ほか、1990)

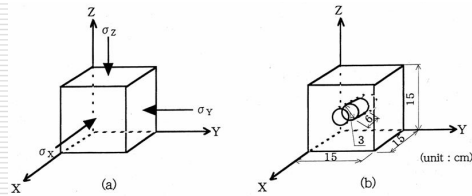
側圧を受けた稲田花崗岩の試験片を用いた1方向試験で軸圧を確認

- ・軸圧30MPa
 - ・側圧50MPa
- (新ほか、1993)



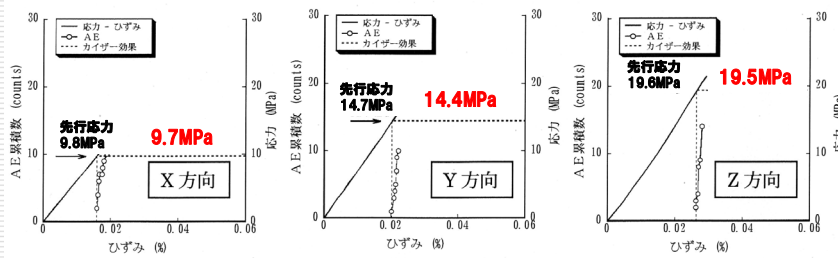
実験的検証例 4

三軸逐次载荷を行った花崗岩の各方向のAE測定例



花崗岩の三軸逐次载荷試験片を用いた3方向試験(村山ほか、1985)

・3つの载荷方向に応じた先行応力を確認

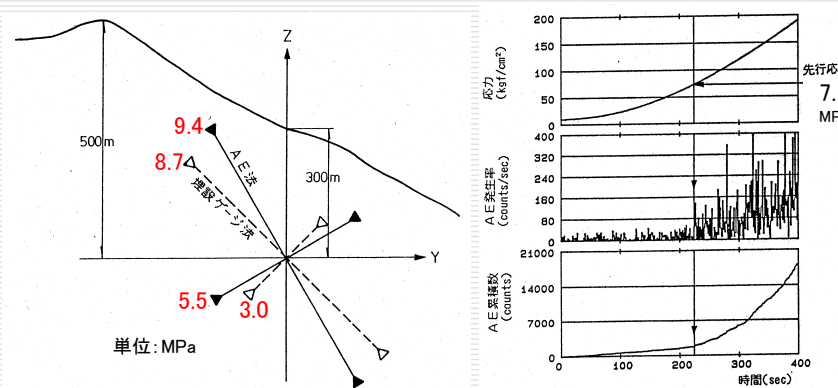


7



原位置の測定事例 1

国内での他の地圧測定法との比較

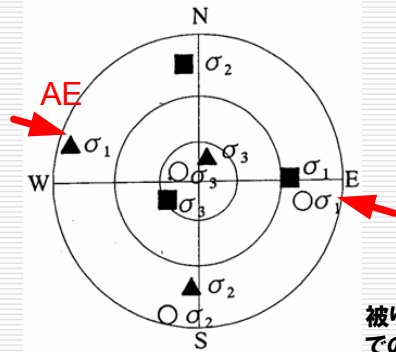


被り深さ500mにおける地下発サイトで、同一地点での埋設ひずみ法とAE法測定結果。主応力の方向と値については双方で近い値を得た。

(金川ほか、1987) 8



原位置の測定事例 2 国内での他の地圧測定法との比較



- : Borehole deformation method (BDM)
- : Conical - ended borehole technique (CBT)
- ▲ : Hydraulic fracturing method (HFM)

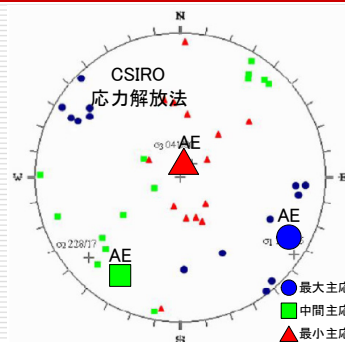
Table 3. Initial rock stresses observed at Site II.

Stress	BDM	CBT	HFM
σ_1 (MPa)	21.9	28.1	26.9
σ_1 azimuth	N102° E	N89° E	N286° E
σ_1 dip	17°	25°	5°
σ_2 (MPa)	11.2	11.4	14.2
σ_2 azimuth	N193° E	N353° E	N184° E
σ_2 dip	3°	13°	18°
σ_3 (MPa)	6.1	7.5	8.5
σ_3 azimuth	N293° E	N239° E	N21° E
σ_3 dip	73°	62°	71°
σ_{0E} (MPa)	13.1	15.7	16.5
σ_{0V} (MPa)	7.4	11.3	9.2

被り深さ550mの地下発サイトにおける、同一地点での原位置応力測定法と同一地点でのAE法測定結果。水平二次元で測定したAE法では、他の測定結果と主応力の方向と値ともに近い値を得た。
Ishiguro et al. (1997)

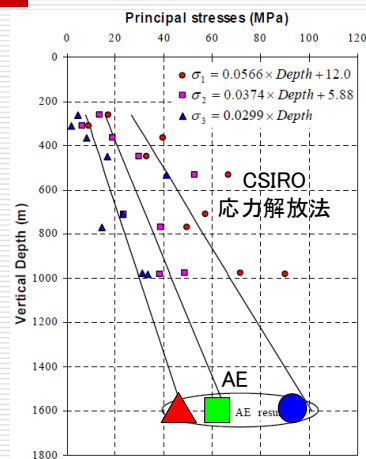


原位置の測定事例 3 海外での他の地圧測定法との比較

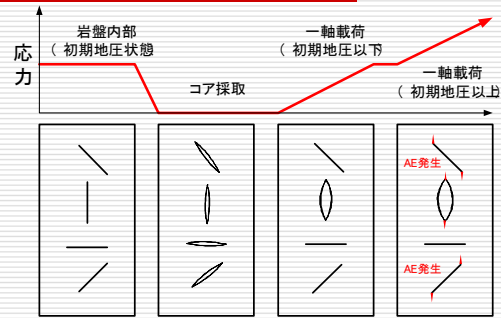


被り深さ200m~1600mのオーストラリアの金鉱山 (Kanowna Belle) におけるAE法と応力解放法で測定された事例。主応力の方向、大きさともによく一致している。

(Villaescusa et al., 2003)



まとめ カイザー効果の原理を考える



1. 三軸状態での地圧を一軸載荷で再現できるのか？
 - ・理論的には未解明であるが多くの測定事例で検証されている。
2. 一軸圧縮状態でのカイザー効果の原理を考えると
 - ・マイクロクラックが地圧以上の載荷応力で独立に進展するのではないか？



AE法を活用するための論点

- AE測定の留意点：
 - 試験片中央部で発生するAEを捉えることが重要

 - “いつ”の地圧がわかるのか：
 - AE法で推定できる地圧は応力解放法等と同様に“今”の地圧

 - 試料採取後“いつ”まで初期地圧を憶えているか：
 - 岩石コアを採取してからの時間経過の影響はあるが大きい

 - 三次元の地圧が測定できるのか：
 - 異なる方位の岩石コアから三次元地圧状態まで求められる
-