

岩石の工学的性状に関する研究

——室内岩石試験に関する基礎的検討——

木 村 薫 平 間 邦 興
丸 山 誠 吉 岡 尚 也

Study on Engineering Properties of Various Rocks

——Fundamental Study of Laboratory Rock Core Test——

Kaoru Kimura Kunioki Hirama
Makoto Maruyama Hisaya Yoshioka

Abstract

In construction of large-scale civil structures in bedrock, it is often the case that work is done on bedrock making it necessary for analyses to be made of rock movements and stability of the structures beforehand. Various in-situ and laboratory tests were performed in order to analyze bedrock movements, trying to grasp fundamental data on engineering properties of rocks and bedrock. The authors carried out basic studies regarding the engineering properties of rock through various laboratory tests. This report describes many mechanical tests of various rocks performed and the examinations made of testing methods and application of test results. The influence of crosssectional constraint on specimen in compression tests was investigated through statistical analysis, various rock shear tests were performed, and the applicabilities of the test results were examined. As a result, it was possible to clarify the problem and usefulness of rock testing methods to an extent.

概 要

大規模な岩盤内構造物の建設にあたり、その岩盤が工事対象となり、事前に岩盤構造物の安定性の検討が必要となってくることが多い。複雑な岩盤挙動を解析する上で種々の原位置試験や室内試験が行なわれ、基礎資料となる岩石、岩盤の工学的性状の把握が試みられている。筆者らは、主に室内試験を通して岩の工学的性状に関する基礎研究を行なっている。

ここでは、各種岩石の力学試験における変形特性や破壊特性を調べるとともに、岩石試験法やその適用性についての検討を加えた。まず、統計解析を通して、圧縮試験における端面拘束の影響を調べ、また各種のせん断試験を実施し、その試験結果の適用性について比較、検討した。その結果、岩石試験方法の問題点や有効性の一端を明らかにすることができた。

1. まえがき

室内の岩石強度試験には種々の方法があり、実施されているが、試験手法上や試験結果の適用上に問題の残る場合が多い。この報告では、岩石試験結果のばらつき傾向をはじめとし、岩石のせん断試験法についても検討を加えた。試験結果がばらつく原因としては試料の不均質性の他に、試験方法や試験者による相異なるいは試験個数や供試体寸法効果などが挙げられる。ここでは、圧縮試験における供試体の端面拘束効果について、その強度、変形特性への影響を調べるとともに基本的な統計解析を試みた。また、岩石のせん断強度を求める試験法にも

種々の方法が考案されており、せん断試験法の規準化や破壊基準に関する検討も行なわれている。ここでは、各種のせん断試験を実施し、各試験方法によるせん断特性の比較を試みた。

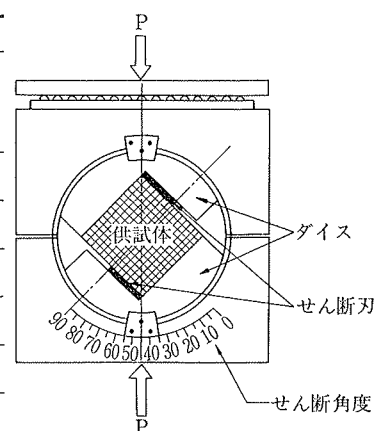
以上のような岩の工学的諸性状に関する基礎研究として、いくつかの試験結果と若干の検討結果の概要について以下に示す。

2. 岩石試料と試験方法について

2.1. 岩石試料と供試体作成

試験に使用した岩石試料の基本的性質を表一1に示す。軟岩では泥岩、凝灰岩を2種類ずつの4試料と、硬

岩種	産地	基本物性値		一軸圧縮試験				圧裂引張試験		
		含水比 ω (%)	単位体積重量 γ_t (t/m ³)	圧縮強度 σ_c (Mpa)	静的弾性係数 E (Mpa)	弾性波速度 Vp (km/sec)	変動係数 ν	圧裂強度 σ (Mpa)	変動係数 ν	せい性度 $B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$
軟岩	泥岩 神奈川県鎌倉市	35.95	1.799	2.80	520	1.81	17.3	0.43	19.7	6.5
	泥岩 神奈川県横浜市	27.68	1.940	3.74	620	1.89	9.7	0.42	16.6	9.0
	凝灰岩 栃木県宇都宮市	38.69	1.470	4.52	770	1.63	26.5	0.70	22.1	6.5
	凝灰岩 福島県南会津郡	26.76	1.843	6.18	990	2.13	31.9	0.57	57.9	10.8
硬岩	閃緑岩 福島県南会津郡	0.19	2.851	118.20	15100	5.39	22.0	14.11	16.2	8.4
	石灰岩 栃木県安蘇郡	0.03	2.695	85.20	14300	6.27	31.4	5.64	19.4	15.1
	砂岩 長崎県諫早市	1.32	2.416	38.70	5800	2.61	—	—	—	—



図一 簡易一面せん断試験装置

表一 試験に使用した試料と基本的な性質一覧

岩では石灰岩、閃緑岩および砂岩の3試料で、合計7試料である。軟岩のうち、泥岩は新第三紀層の三浦層群に属するもので、凝灰岩は浮石質、砂質およびレキ質分を多種多様に含む、きわめて不均質な試料である。いずれも現地より岩塊ブロックを採取し、岩石コア採取機で円柱試料を切り抜き、試験供試体に成形した。供試体寸法はφ50mmですべてJIS規格に準拠した。

2.2. 試験方法の概要

岩石コア試験は、通常の一軸圧縮試験および圧裂引張試験の他に超高压三軸圧縮試験と簡易一面せん断試験など一連の力学試験を実施した。

一軸圧縮試験では、供試体と加圧盤との間に細目のサンドペーパー、あるいはシリコンオイルを挿入して、供試体端面での拘束効果について調べた。それぞれの端面拘束条件で各試料ごとに10個以上の試験を行ない、試験結果について統計解析を試みた。

超高压三軸圧縮試験では、側圧が最大600(kgf/cm²) (=58.8MPa)まで負荷できるもので、高拘束圧時での圧縮特性がわかる。また、側ひずみや間隙水圧の測定機構を装備しており、多仕様の三軸試験が可能である。

簡易一面せん断試験は、図一を示すような試験装置で簡便にせん断強度を求めることができる。供試体寸法はφ50×h50(mm)で、載荷軸に対してせん断角度αをα=0~45°まで任意に変化させることができる。したがって、載荷重をPとすると、せん断面に働くせん断応力τと垂直応力σ_nは次のように表わすことができる。

$$\tau = P/A \cos \alpha \quad \sigma_n = P/A \sin \alpha$$

ここで、Aは強制せん断面の断面積で、各せん断角度ごとの破壊時のせん断応力τと垂直応力σ_nの関係よりいわゆる破壊限界線を求めることができる。今回の試験にあたってのせん断角度は、試験操作上α=10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°の中より適宜選択して、同じせん断角

度で数個の試験を実施した。

3. 圧縮試験における端面拘束効果の検討

3.1. 各相関関係についての検討

圧縮試験結果のうち、一軸圧縮強度と弾性波速度並びに、一軸圧縮強度と変形係数との関係をそれぞれ図一2, 3に示す。

硬岩と軟岩とを合わせて図示しているが、全体的に、ある範囲内で、ほぼ直線関係を認めることができる。端面における拘束効果の影響は岩種によってその傾向が異なるようである。つまり、硬岩の場合には、端面効果の影響がある程度認められ、サンドペーパーを挿入した場合のほうが高い圧縮強度が得られている。端面拘束条件によって、20%前後の圧縮強度に差違が表われていると解釈できる。しかし、圧縮強度と変形係数との関係ではほとんど差がなく、端面拘束の影響は認められなかった。一方軟岩の場合には、供試体のばらつきが大きく、明確な端面効果が認められず、むしろ試料の端面成形時の影響が大きいものと推定される。したがって、従来から指摘されている端面拘束効果は岩種によってその傾向が異なり、特に硬岩において顕著に表われてくるようである。また、軟岩については、端面成形に細心の注意を払っても、試料の不均質性による影響が強く表われるものと判断できる。供試体作成はできる限り綿密に行なう必要はあるが、岩種によっては試験結果についてある程度考慮することが必要となろう。

3.2. 統計解析結果

一軸圧縮試験および圧裂引張試験結果について基礎的な統計解析を試みた。一軸圧縮強度σ_c、圧裂引張強度σ_t並びに試料条件(弾性波速度V_p、単位体積重量γ_t、含水比W:軟岩のみ)に関する頻度分布をヒストグラムに示したのが図一4である。軟岩と硬岩に区分けして示して

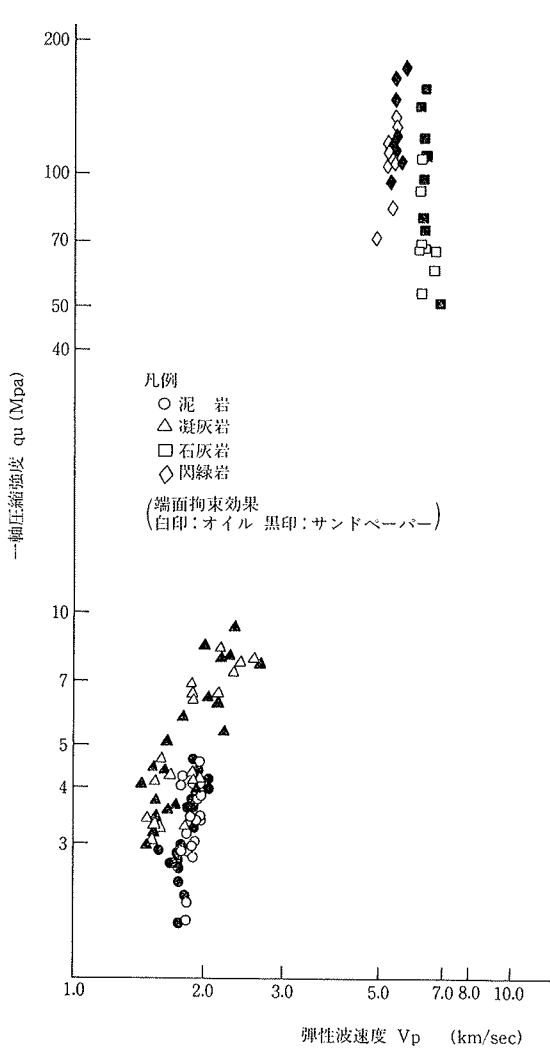


図-2 圧縮強度—弾性波速度の関係 (端面効果)

あり、圧縮強度 σ_c については端面の拘束条件別に示してある。強度分布あるいは試料条件によって、それぞればらつきや分布状況が異なるようである。このように岩石試験においては、同じような岩石試料について数多くの試験を実施しても、その試料結果は幅広く分布することが理解できる。したがって、岩石試験の実施にあたっては、その結果の分散を常に把握しておくことが必要となる。

これらの頻度分布より基本的な統計解析を試みた。以下にその解析内容を簡単に示すと、まず $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ なる n 個の試験結果より平均値 \bar{x} 、標準偏差 S およ

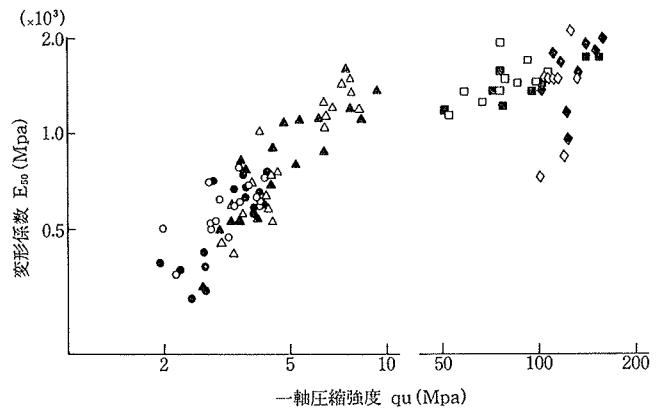


図-3 圧縮強度—変形係数の関係 (端面効果)

び変動係数 v を次式より求めた。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

ついで、95%信頼度に対する信頼区間を自由度 f ($f = n - 1$)と信頼度から t 分布表を用いて求める。このとき、片側信頼区間幅の平均値に対する割合 ϕ を次式より求め、試験結果の妥当性を検討した。

$$\phi = s\lambda / \bar{x} \sqrt{n-1}$$

信頼度95%に対する信頼区間とは、得られた n 個の試験結果から求めた信頼区間にそのすべての平均値が存在するとした場合の確率が95%であることを意味している。圧縮および引張試験結果について統計解析を試みた

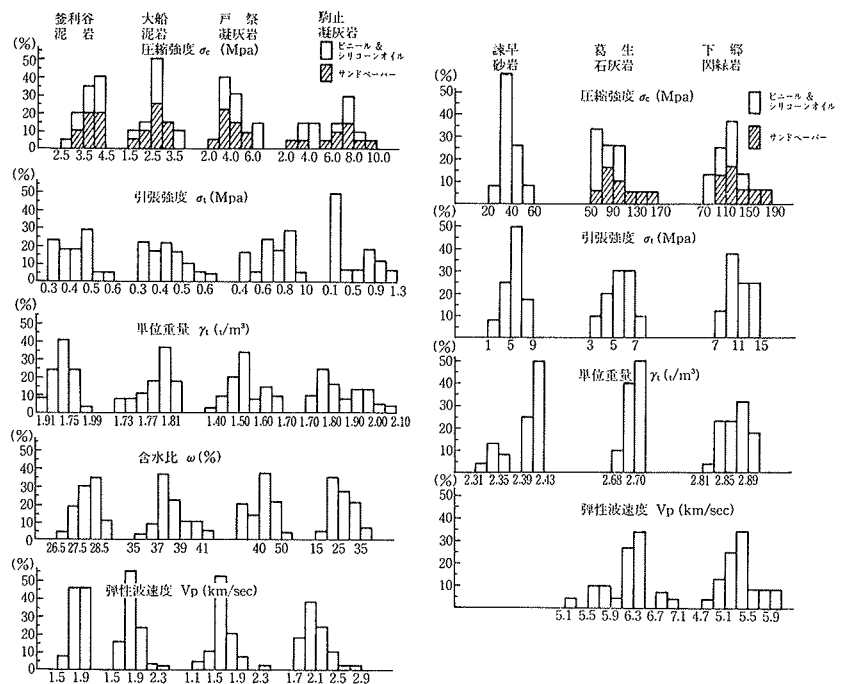


図-4 試験結果の頻度分布 (軟岩・硬岩)

岩種	産地	一軸圧縮試験結果				圧裂引張試験結果				
		端面効果	試験個数	平均値 $\bar{\sigma}$ (Mpa)	変動係数 v (%)	信頼区間幅の平均値に対する百分率 (%) ϕ	試験個数	平均値 $\bar{\sigma}$ (Mpa)	変動係数 v (%)	信頼区間幅の平均値に対する百分率 (%) ϕ
軟岩	横浜市 釜利谷地区	サンドペーパー	10	3.86	7.6	± 5.7	17	0.47	16.6	± 5.8
		ビニールシリコンオイル	10	3.74	11.4	± 11.2				
軟岩	鎌倉市 大船地区	サンドペーパー	10	2.73	18.0	± 13.5	18	0.43	19.7	± 10.0
		ビニールシリコンオイル	10	2.87	16.2	± 12.2				
岩	宇都宮市 戸祭地区	サンドペーパー	11	4.04	20.2	± 14.3	17	0.70	22.1	± 11.7
		ビニールシリコンオイル	11	4.52	29.6	± 21.0				
岩	福島県 南会津郡 駒止地区	サンドペーパー	10	6.58	30.1	± 22.7	16	0.57	57.9	± 31.8
		ビニールシリコンオイル	10	5.77	32.4	± 24.4				
硬岩	栃木県 安野郡 葛生地区	サンドペーパー	10	100.45	32.3	± 26.3	10	5.64	19.4	± 14.6
		ビニールシリコンオイル	10	78.56	23.1	± 17.4				
岩	福島県 南会津郡 下郷地区	サンドペーパー	10	129.82	20.4	± 18.3	10	11.41	16.2	± 14.5
		シリコンオイル	10	106.56	18.4	± 16.4				

表-2 統計解析結果(端面効果の影響)

結果を一括して表-2に示す。これからも、圧縮試験における端面拘束効果の影響が軟岩よりも硬岩において著しく表われている状況がわかる。硬岩では、供試体端面が拘束状態から不拘束状態に移行するにつれて、平均圧縮強度は20~30%低下し、しかも変動係数が小さくなる傾向がある。全体的には、岩種によって20%以上の変動係数を示す場合も見受けられ、特に凝灰岩については著しい。今回の圧縮試験結果では、95%の信頼度に対して得られた平均値の $\pm 20\%$ 以内の範囲にない場合が一部の試料に見受けられた。

圧縮強度の変動係数と、全試料の物性値(単位体積重量、弾性波速度および軟岩の場合には含水比)との変動係数の関係を示したのが図-5である。圧縮強度の変動係数と実施した全試料の物性値のそれとを比較してみると、全般的に物性値の変動係数は小さく、そのばらつきの傾向は岩種によって、異なることがわかる。例えば、弾性波速度と含水比の傾向を調べてみると、同じ軟岩でも圧縮強度の変動係数が大きくなると弾性波速度より含水

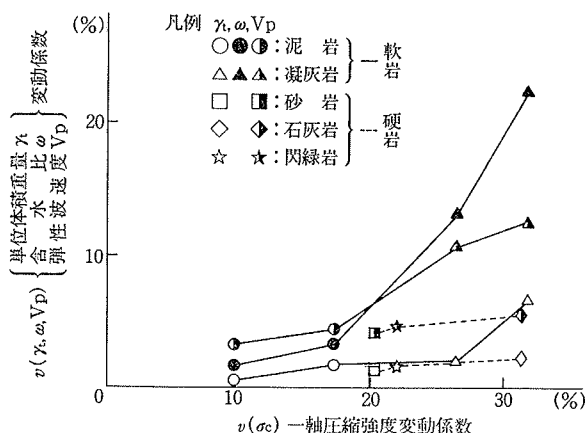


図-5 統計解析結果の比較

比のそれが大きく表われている。特に凝灰岩の場合、圧縮強度のばらつき程度が含水比によって大きく左右される状況がわかる。このように岩石試験結果を検討する上で、その試験結果の他に物性値のばらつき傾向も合わせて考慮することが肝要と思われる。

4. 岩石せん断試験法の検討

4.1. 三軸圧縮試験結果について

三軸圧縮試験結果として、代表的な硬岩及び軟岩の破壊応力円を図-6(a), (b), (c)に示す。側圧は、硬岩で、50~500(kgf/cm²) (=4.9~49.0 MPa), 軟岩では20~150(kgf/cm²) (=2.0~14.7 MPa)の範囲で実施した。岩種によって特徴ある変形、破壊特

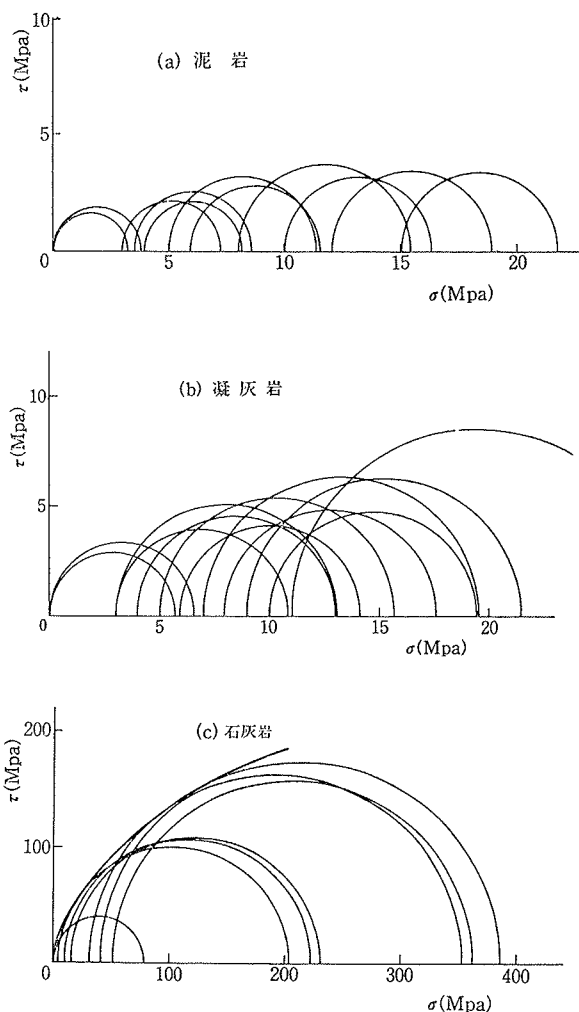


図-6 三軸圧縮試験における破壊応力円

性を示すことがわかる。軟岩の場合、比較的拘束圧による影響が少なく拘束圧が高くなってほぼ一定値を示し、かつ破壊包絡線も比較的直線性を示す傾向が得られている。しかし、今回の試験では排水条件を考慮しておらず、特に軟岩では圧密排水下での変形、破壊特性を検討する必要がある。また硬岩の場合には拘束圧依存性が強く、破壊包絡線も直線ではなく放物線を示す傾向が認められる。以上のように、破壊包絡線は一般的に直線とはならず、放物線や双曲線などに近似できることが判明した。ただし、未だ限られた試験結果では十分な解析が出来ず、今後もデータの集積が必要と考えている。

三軸圧縮下での軸ひずみと側ひずみの関係の一例を示したのが図-7である。ここで、図中の黒印が最大強度付近を表わしている。各側圧段階において、ほぼ同様の傾向が得られており、これらから求めた平均ポアソン比は $\nu=0.09\sim 0.17$ の範囲で変動していることがわかった。硬岩の場合には多少小さめのポアソン比ではあったが、一応妥当な結果が得られたと判断している。側ひずみについては測定機構の改良を考慮中である。

4.2. 各種せん断試験結果の比較

三軸圧縮試験に合わせて実施した一面せん断試験結果について比較したのが図-8(a), (b)である。図中では、三軸圧縮試験から得た破壊応力円と、一面せん断試験における破壊限界線、および参考のために圧裂引張強度から求める Griffith 曲線などを図示してある。ただし、一面せん断試験では試験装置の剛性の制約から比較的低側圧領域での結果しか得られていない。低拘束圧の範囲では両者とも比較的一致する傾向が得られており、いずれも破壊包絡線が曲線形状を示していることがわかる。特に軟岩の場合によく一致している例が多く、一面せん断試験が有効に利用できるようである。また、Griffith 理論とは比較的一致する傾向が軟岩で多く見受けられる。今後は、一面せん断試験の高応力領域での破壊特性や低応力領域での三軸圧縮試験の適用などを考慮する必要があると考えている。

5. あとがき

岩石の工学的性状に関する基礎研究として、各種岩石試験における基本的な問題点についていくつかの試験結果について検討した。得られた検討結果を簡単にまとめると次のようになる。

- (1) 岩石強度試験における端面拘束の影響の程度は岩種によって異なって得られる。
- (2) 岩石試験結果では単に平均値のみではなく、どの程度の確からしきがあるかを常に把握する必要がある。
- (3) 岩石のせん断試験方法の一つとして、簡易一面せん断試験の有効性が確認された。

未だ十分な試験データもなく、十分な解析には至ってはいないが、今後もデータを蓄積するとともに各種試験方法の確立と、試験結果の適用を研究課題としていくことを考えている。

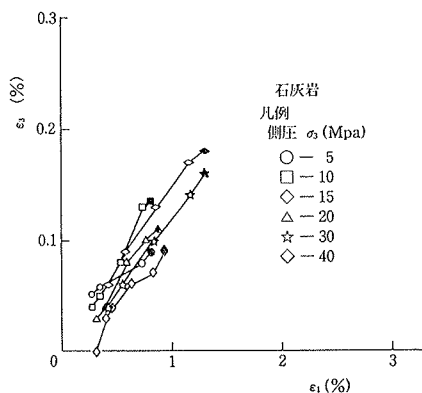


図-7 三軸圧縮下での側ひずみ

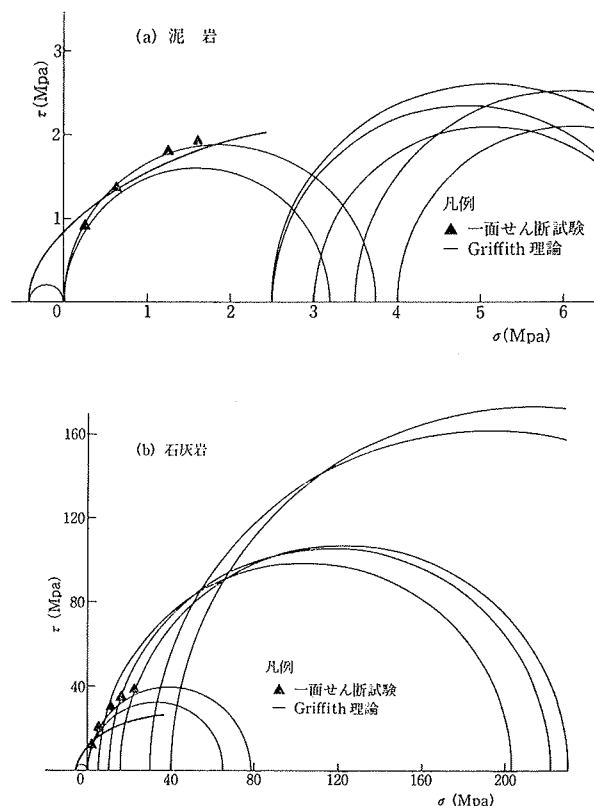


図-8 破壊包絡線の比較

なお、この報文をまとめるにあたって日産基礎工業(株)長田尚氏の尽力に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐々宏一, 他: 岩石の強さ試験結果の処理方法および供試体数の決定方法について, 日本鉱業会誌, Vol. 84, No. 965, (1968)
- 2) 木村 薫, 他: 岩石試験結果における端面拘束効果について, 第35回土木学会年次学術講演会講演概要集, (1980)
- 3) 木村 薫, 他: 岩石のせん断試験方法に関する検討 第35回土木学会年次学術講演会講演概要集, (1980)