

岩盤の原位置試験資料の蒐集整理

In-situ Mechanical Properties of Rock Masses

土木学会岩盤力学委員会主査 石 原 研 而 (東大土木)

まえがき

土木学会岩盤力学委員会では、岩盤の原位置試験の資料蒐集を1967年に行ない、当時までの数年間にわたる試験結果を整理した。これについては文献(1)、(2)にその詳細が報告されている。その結果、各種の岩盤につき、変形係数や強度定数がどの程度の値をもつものかが明らかにされた。しかし、変形試験やせん断試験の結果をコア強度とどのように関連づけたりよいのかという点に関しては結論がはっきりと導き出せなかった。そこで同様な調査をもう一度行ない、最近の新しいデータも集めて、このような問題を見直してみようという目的で始まったのが第2回目の調査である。以下、調査の概要とその整理結果について報告することにする。なお、前回の蒐集資料の中で、今回の整理に用いるものはできるだけ利用するように努めた。

資料の蒐集

岩盤力学委員会であらかじめ調査事項を検討し、それに合った記入用データシートを作製した。これに依頼状をそえて各機関に資料の提出をお願いした。その結果、表1のような諸機関から御協力を行うことができた。

資料整理の方針

資料整理の成否の鍵は岩盤の力学的分類の適否に依存する所が大きいと考えられる。そこでまず、岩盤の最も適切な分類方法を見出すことを試みた。現在、各機関で、色々な分類方法が提案されているが、一般に分類項目が多すぎて、実際の適用に際し、戸迷うことが多い。そこで、蒐集した資料を読んで判断した範囲で分類がはっきりできる程度に分類項目を少なくするよう心がけた。一般に岩盤の力学的挙動に影響する因子として挙げられるのは、岩石の強さ、割目の間隔、割目の状態やその方向等である。この中で割目の状態(開口状、粘土をはさむ、密着している、等)、とか割目の方向に

土木学会岩盤力学委員会第3分科会構成 (※印は主な担当者)

主査 ※石原 研而(東京大学)
委員 飯田 隆一(建設省) ※今井 五郎(東京大学) ※今村 正孝(西松建設)
※小田 匡寛(埼玉大学) ※岡 行俊(京都大学) ※川本 脩万(名古屋大学)
※北原 義浩(電力中央研究所) ※小林 茂敏(建設省) ※小林 芳正(国鉄)
※桜井 春輔(神戸大学) 武内 俊昭(応用地質調査事務所) 仲野 良紀(農林省)
林 正夫(電力中央研究所) 松村 義章(電源開発) ※八木 則男(金沢大学)
安江 朝光(建設省) 山本 稔(東京都立大学) 吉田 巖(本州四国連絡橋公団)
※吉中龍之進(埼玉大学)

については資料を読んでも不明なことが多かったので、今回の整理では考慮しないことにした。結局、岩石の強さと割目の間隔をもとにして、岩盤を表2のように9種類に分類し、その各々について変形係数、強度定数を比較してみることにした。

次に岩盤のマスとしての挙動とそれを構成する岩石のコアー強度との関連を見出すことを試みた。変形試験とコアー試験の両方のデータが整っている資料につき、両者の変形係数の比をとり、これを割目の数と関連ずけてみることにした。

表1 “現地岩盤試験資料” 提供先（順不同）

地 点 名	機 関 名	所在県	地 点 名	機 関 名	所在県
1 室生ダム	水資源開発公団	奈 良 県	18 川治ダム	建設省（関東）	栃木県
2 江川ダム	＃	福 岡 県	19 真名川ダム	建設省（近畿）	福井県
3 黒之瀬戸架橋	日本道路公団	鹿児島県	20 石手川ダム	建設省（四国）	愛媛県
4 女川原子力発電所	東北電力K.K	宮 城 県	21 大渡ダム	建設省（＃）	高知県
5 新高瀬川ダム	東京電力K.K	長 野 県	22 緑川ダム	建設省（九州）	熊本県
6 飯詰ダム	青森県	青 森 県	23 松原・下釜ダム	建設省（＃）	大分県
7 樽水ダム	宮城県	宮 城 県	24 高浜原子力発電所	関西電力K.K	福井県
8 添沢ダム	＃	＃	25 子無川ダム	富山県	富山県
9 旭川治水ダム	秋田県	秋 田 県	26 青江治水ダム	大分県	大分県
10 塩原ダム	栃木県	栃 木 県	27 猫山ダム	長崎県	長崎県
11 竜門ダム	佐賀県	佐 賀 県	28 内の倉ダム	農林省（北陸）	新潟県
12 豊平峡ダム	北海道	北 海 道	29 胎内川治水ダム	新潟県	新潟県
13 島根原子力発電所	中国電力K.K	島 根 県	30 紀の川農林利水	農林省（近畿）	奈良県
14 高野ダム・高吉ダム	農林省（九州）	宮 崎 県	31 松川ダム	長野県	長野県
15 下条川ダム	新潟県	新 潟 県	32 新豊根ダム	電源開発K.K	北海道
16 釜房ダム	建設省（東北）	宮 城 県			
17 白川ダム	建設省（東北）	山 形 県			

岩盤の変形特性

岩盤の変形試験は剛体円板を用いて等変位载荷を行なう場合と、等圧力载荷を目的としたフラットジャッキ試験の2方式が現在採用されている。両方式の差異が、測定結果に及ぼす影響を考慮しなければならないが、ここではこれらの結果を一括して取扱った。

また、本試験は繰返し载荷を行

表2 岩 盤 の 分 類

		岩石の強度による分類		
		500kg/cm ² 以上	100～500kg/cm ²	100kg/cm ² 以下
		A 種	B 種	C 種
割目の間隔による分類	30cm以上 Ⅰ群	AⅠ	BⅠ	CⅠ
	10～30cm Ⅱ群	AⅡ	BⅡ	CⅡ
	10cm以下 Ⅲ群	AⅢ	BⅢ	CⅢ

い、荷重に対する変位の進行を観察して変形係数を求めるが、図1に示す3種類の変形係数を求めておくのが普通である。第1は変形係数Dで各ステップ荷重を包絡する曲線の直線とみなされる部分から求める。次は割線係数Esで各ループの最大および最小荷重の点を結んで求める。最後の接線係数Etは各ループの載荷時の曲線の中から直線に近い部分をさがしてその勾配より求める。今回の調査では接線係数Etに着目してデータ整理を行なった。

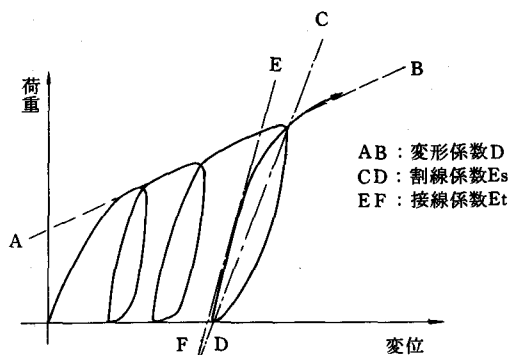


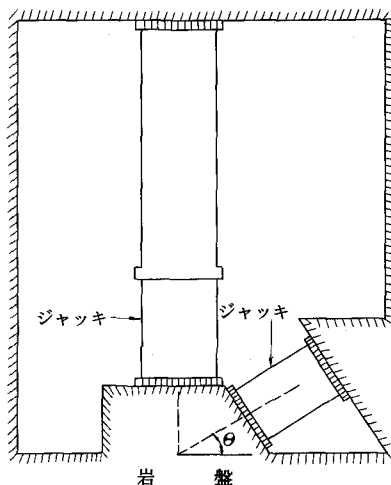
図1. 変形係数の定義

岩盤の強度特性

原位置せん断試験装置の概略を示すと図2-(a)のごとくであり、試験の結果えられる変形-荷重特性は一般に図2-(b)のようになる。以下にとりあげた岩盤の破かい強度は荷重の最大値より求めたものである。

変形係数について

変形試験によって求めた岩盤の接線変形係数を前記の分類にもとづいて取りまとめると図3、4のごとくなる。割目の度合いが一定の時、母岩のコア強度が岩盤全体の変形係数にいかなる影響を及ぼすかについて知るには図3が役立つ。この図より、岩盤の接線変形係数は5,000～150,000 kg/cm²の広い範囲に全体として分布しながらも、その上限値は母岩のコア強度に関係があることが認められる。強度500 kg/cm²のA種岩石では、岩盤の接線変形係数が150,000 kg/cm²以下であるのに対し、強度100～500 kg/cm²のB種岩石では、約70,000 kg/cm²以下となっている。更にC種の岩石（強度100 kg/cm²以下）ではEtの最大が30,000 kg/cm²程度となっていることがわかる。このことより、岩盤の変形係数は割目の間隔やその他の因子によって大きく変化しうるものの、その最大値は母岩のコア強さによって押えられていると考えることができよう。蒐集データの最も多かったⅡ



(a) せん断試験装置

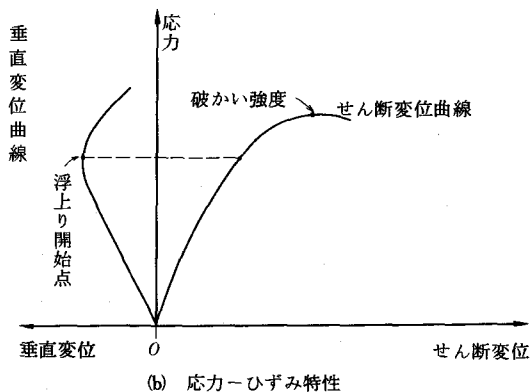


図2. 岩盤せん断試験とその応力-ひずみ特性

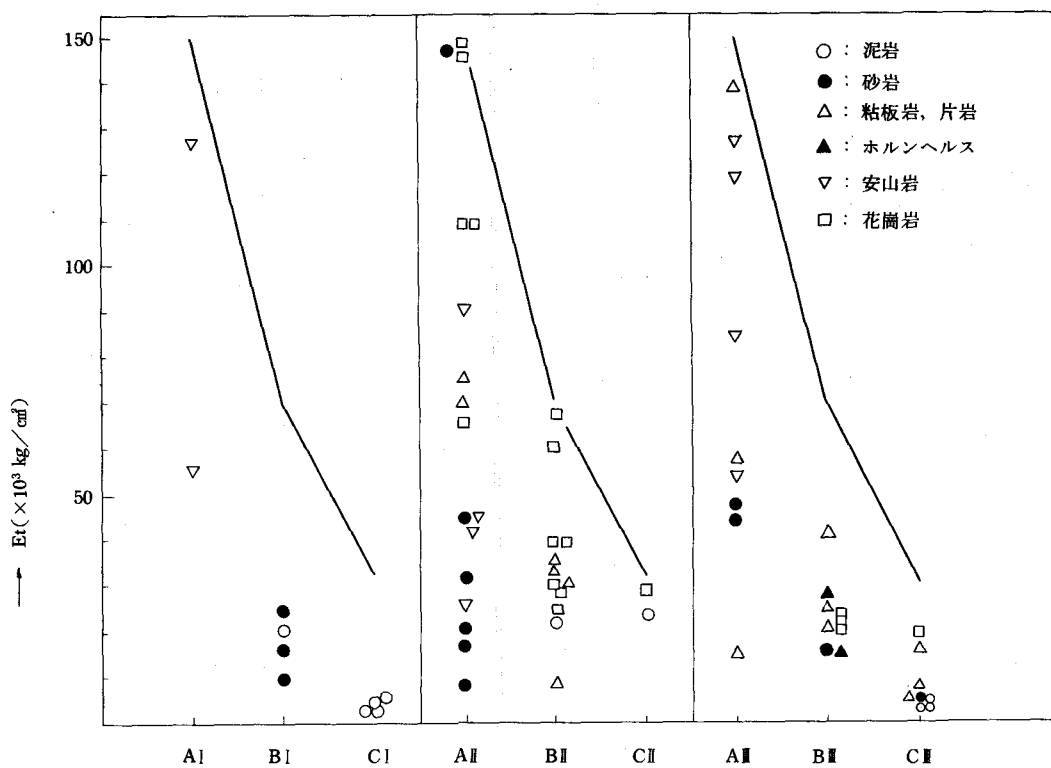


図 3. 岩盤の変形係数

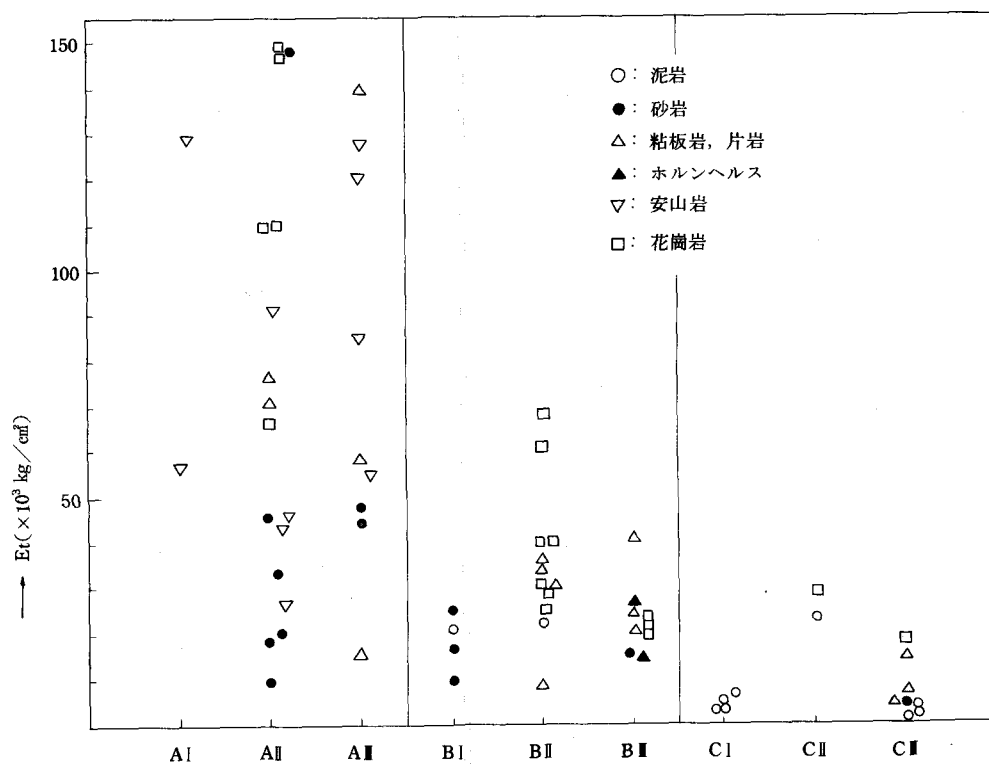


図 4. 岩盤の変形係数

一群についてこの最大値を求め直線で結ぶと図3のごとくなる。

次に母岩のコア強度を一定とした場合に、割目の間隔が変形係数にいかなる影響を及ぼすかを、図4より、調べてみよう。Ⅱ群の方がⅢ群に比して大きなEtの値を示しており、割れ目間隔が小さいほど変形係数が小さくなるようである。しかし、Ⅰ群では全般にEtが小さくなっていて、この傾向と矛盾する。現行の載荷試験ではφ80cm径の載荷板を用いることもあるが大部分φ30cm径のものであるため、30cm以上の間隔をもった割目は1本か2本しか載荷範囲に含まれてこない。このような

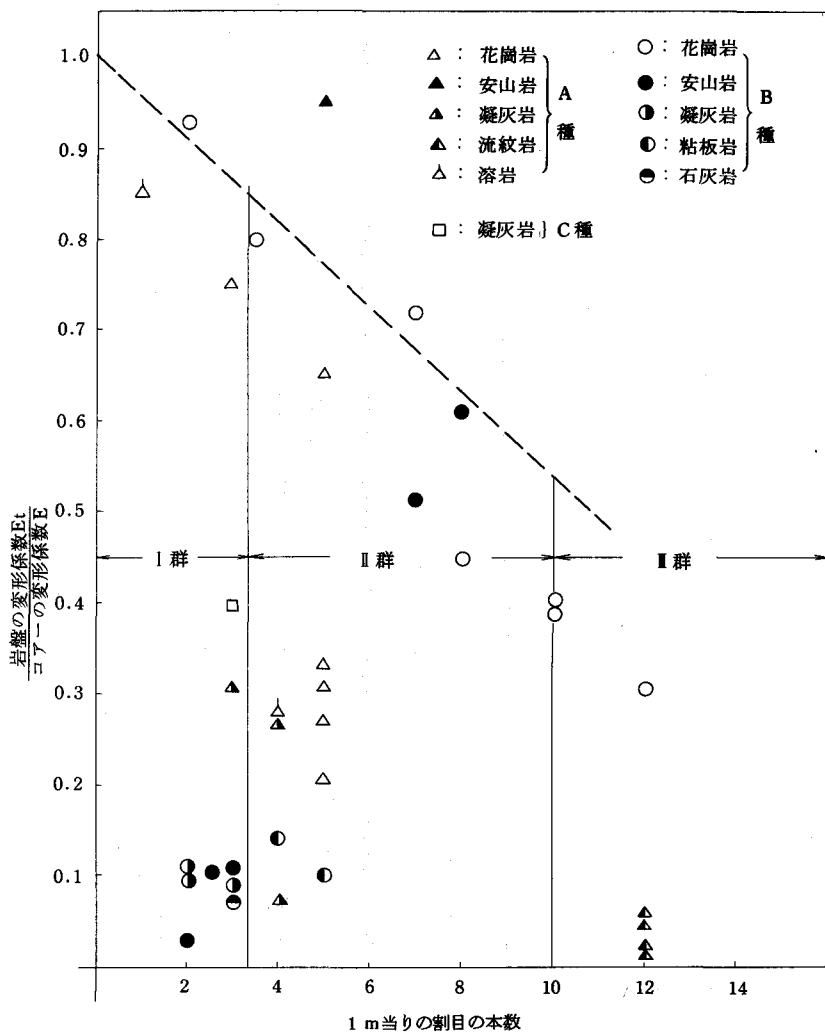


図5. 変形係数と割目の本数の関係

割目は、また多くの場合、大きく深い亀裂を構成していることもあるため、本数は少なくとも変形係数に大きく影響すると考えられる。従って、もっと大きな載荷板による試験データがないとはっきりしたことはわからない。ともあれ、割目間隔の影響に関しては、載荷板の径よりかなり小さい間隔をもつもののみを取上げて考察の対象にしないと公平な議論ができないように思える。この意味でⅠ群のデータを除いてⅡおよびⅢ群につき割目の効果を見るのが妥当であろう。

割目間隔の影響を更に詳しく見るために、縦軸に岩盤とコアの変形係数の比 E_t/E をとり、1 m 当りの割目の数を横軸にとってデータをプロットしたものが図5である。岩種によってばらつきがあるが、割目の数と共に岩盤の変形係数が減少していく傾向がみられる。図には岩石の強度別(A, B, C種)の区分がわかる形でデータがプロットしてあるが、その影響は判然としない。変形係数の低減にはここでも上限が存在することがわかる。

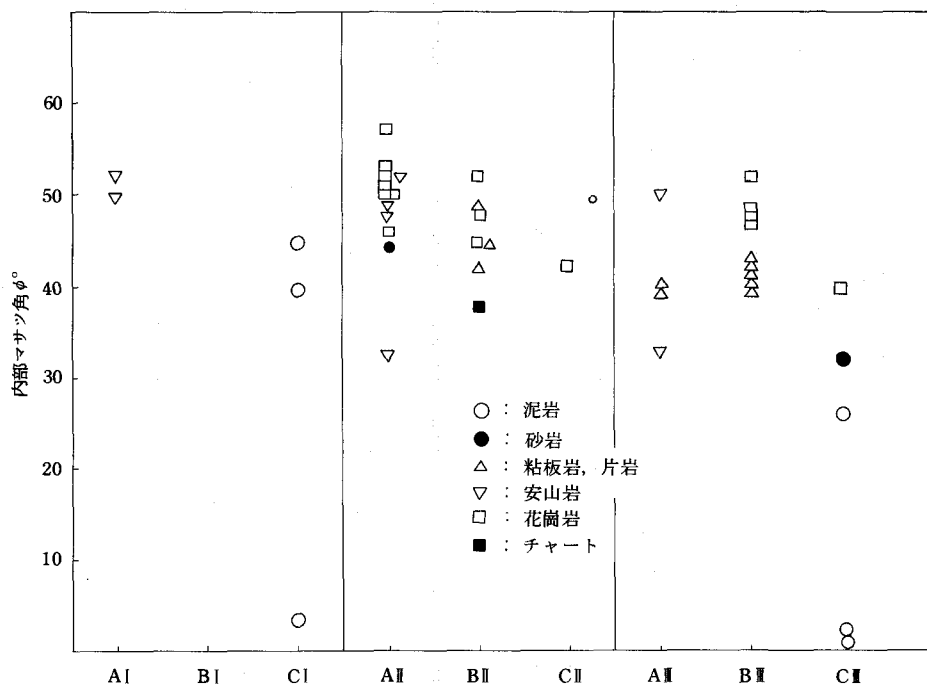


図 6. 岩盤の内部マサツ角

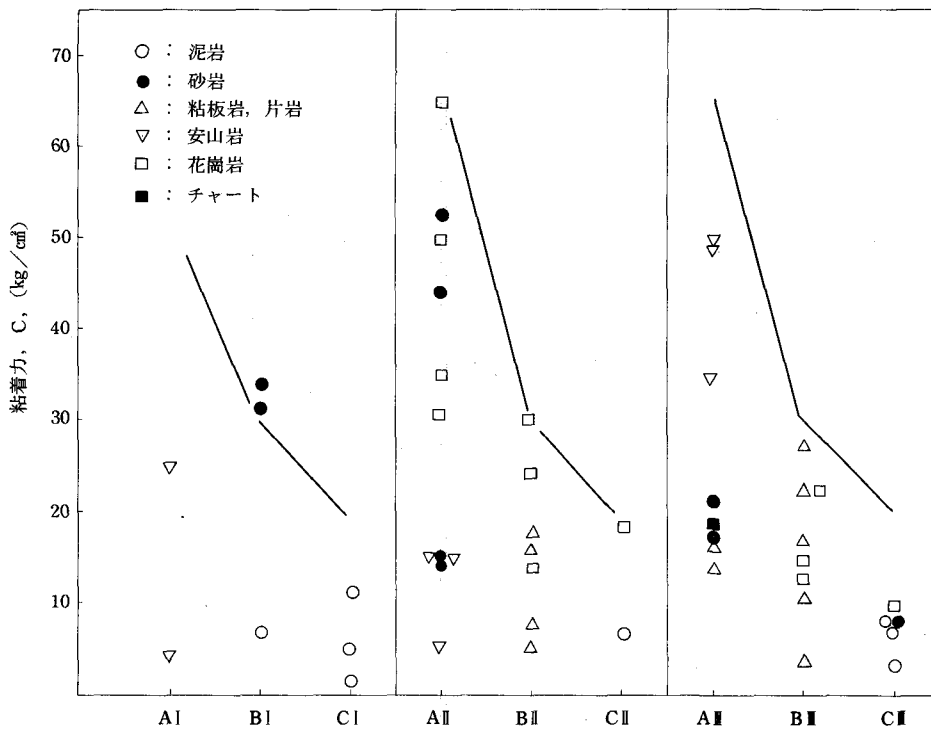


図 7. 岩盤の粘着力

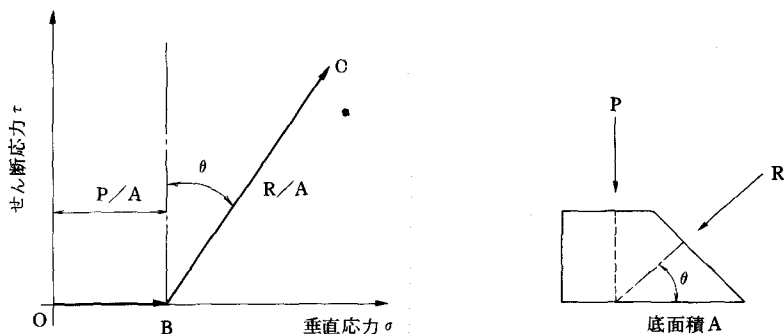


図8. せん断試験時の応力経路

強度について

せん断試験の結果より求めた岩盤の内部マサツ角と粘着力を整理して示すと図6, 7のごとくなる。内部マサツ角については、図6より、母岩のコア強度の増加と共にいくぶんふえているように見えるが、大体 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ のせまい範囲内にあると考えてよからう。変形係数について調べた時と同様に第I群の岩盤に関してはデータが少なく、又その信頼性もうすいと思われるので、これを除いて、考察をした方が賢明であらう。

次に粘着力であるが、第I群を除くと、大体母岩のコア強度に比例して増加していると言って過言ではなからう。

ここでもやはり上限が存在している。

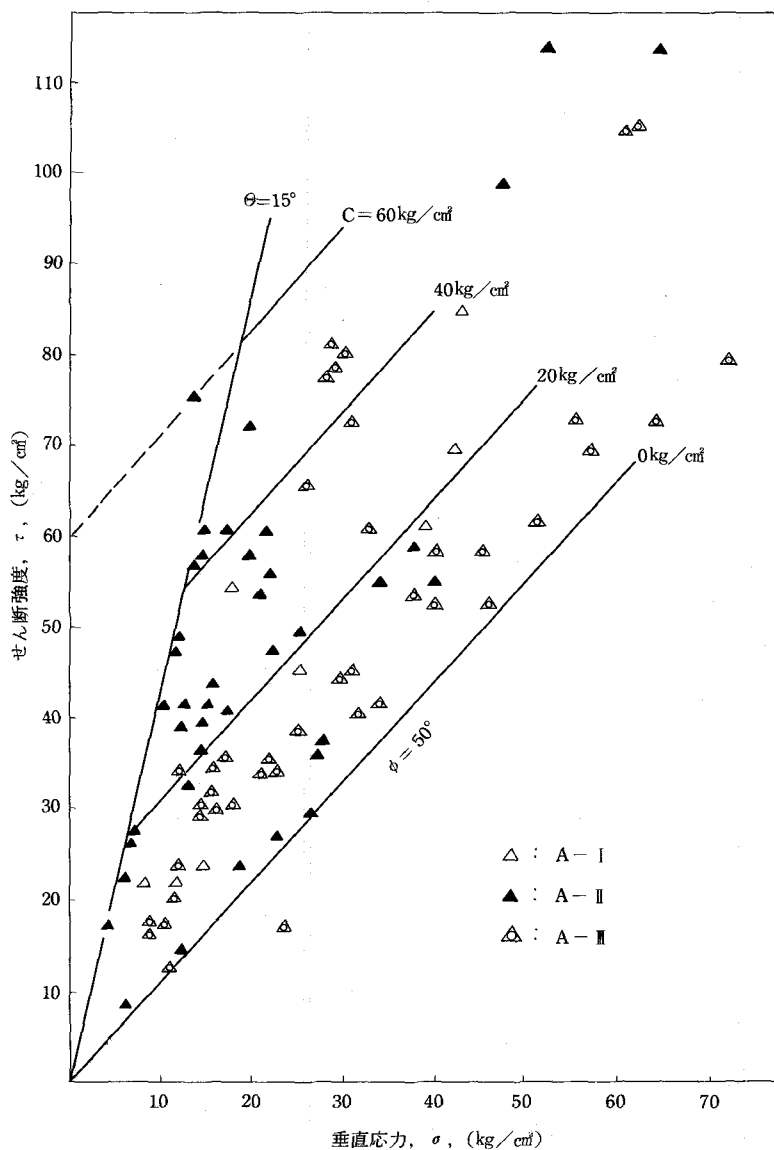


図9. せん断強度と垂直応力の関係

以上、各岩盤のせん断試験でえられた強度を内部マサツ角と粘着力という2つのパラメータを使って表現した場合の結果についてのべた。しかし、実際の試験結果は測定個数が少なかったり、垂直応力とせん断強度の直線性が良好でなかったりして、これら2つのパラメータで表現した結果のみに着目して強度を論ずるのは必ずしも適切ではない。そこで、内部マサツ角や粘着力を求める以前の生データを集めて、これについて、直接、強度に関する特性を調べた方が賢明であろうという考えから、岩種別にせん断強度と垂直力の関係をプロットしてみた。

これが図9、10、11、

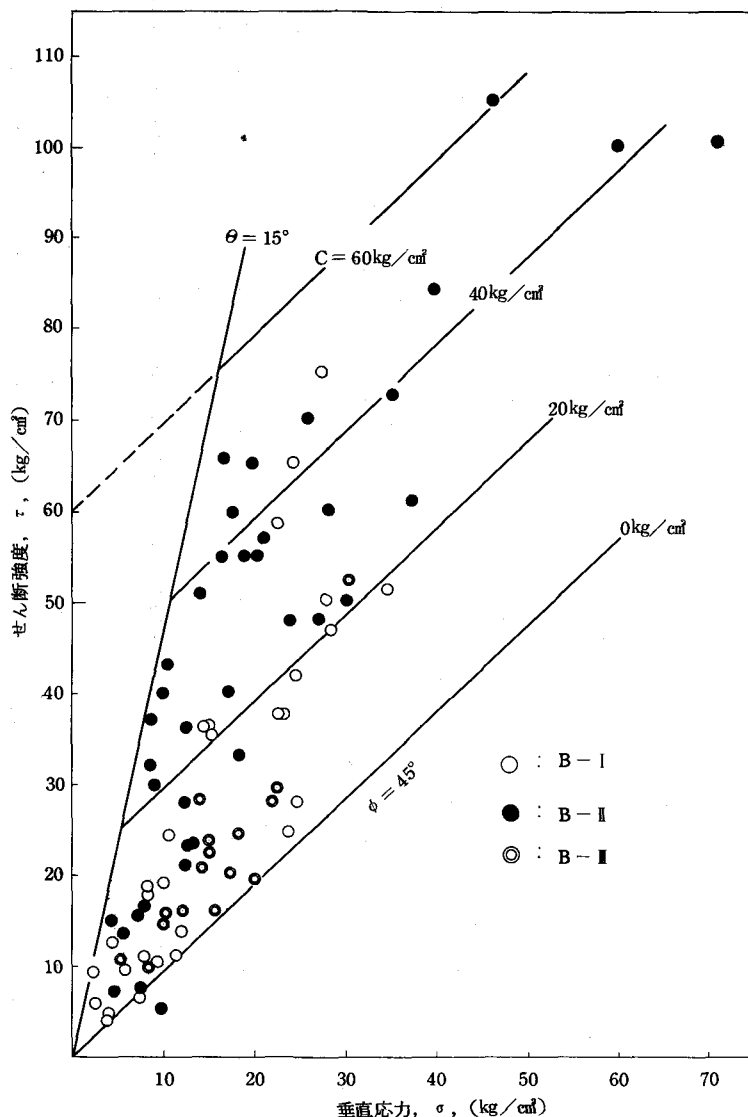


図10. せん断強度と垂直応力の関係

である。通常の岩盤試験はまず鉛直方向の力Pによってブロックを押えておいて、水平面から θ なる傾きでせん断力Rを加える(図8参照)。この時の応力経路は図8に示すごとくO→B→Cと移行する。試験時にはこのような特定の経路をたどって応力が増加して行くために、破かい時のせん断応力と垂直応力の組み合わせも当然この経路上に存在することになる。したがって、図9、10、11、に示した測定点の分布は必ずしも岩盤の強度特性を反映しているとはいいがたく、実際に採用した経路上に群がっている。このことを考慮した上で、これらの図から強度特性を判別するため、次のように考える。まず、蒐集資料にもとずき、実際に用いられている載荷傾角 θ がどの範囲にあるかを調べて見た所、 $14^{\circ} \sim 30^{\circ}$ であり、 15° と 25° が最も多かった。同様なことを初期鉛直力Pについて調べてみた所、その範囲は $0 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ で $0 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ が大部分を占めていた。以上のことより、垂直応力が最も小さくなるような経路は $P = 0$ 、 $\theta = 15^{\circ}$ であることがわかる。この経路が図9、10、11、に示してあ

るが、当然のことながらこの線より左側には測定点が存在しない。つまり、データの存在する範囲の左限は、実際に採用している力の加え方によって決まることになる。次に、データの存在範囲の右側の境界を見定めて原点を通る直線を引いてみる。岩盤には粘着力がないものも、勿論、あるから、この直線はそのような岩盤の内部マサツ角を与えるものと考えてよい。結局、この右限を画す直線は岩盤の内部マサツ角によって決まるのである。以上の考えにもとずき、図 9, 10, 11, より内部マサツ角を求めてみると、母岩のコア強度によって明かに異なり、A 種で 50° , B 種で 45° ,

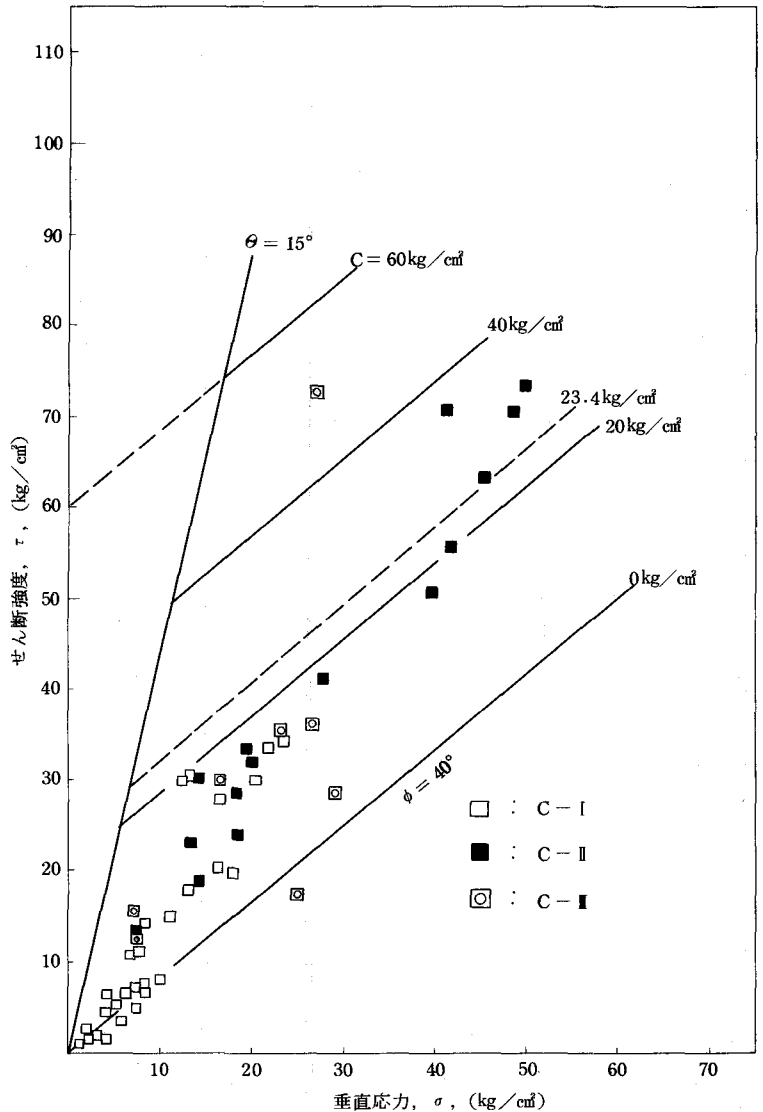


図 11. せん断強度と垂直応力の関係

C 種 40° が求まる。この結果は、別のやり方で整理した図 6 の結果とよく一致していることは、当然とは言いながら、注目に値しよう。粘着力と内部マサツ角の両方を具備する岩盤の特性は図 9, 10, 11 の 2 本の限界線にかこまれた部分のデータから判定せねばならないが、一般にこれは不可能である。そこで、同じ種類に属する岩盤は、すべて同一の内部マサツ角を持つと仮定した場合に、粘着力は果してどの程度なのかを調べてみよう。そのためには、先に引いた右端を画する直線に平行線をひき、これが縦軸と交わる位置を見ればよい。このための規準線を図 9, 10, 11, に適当な間隔で引いておいた。これより、A 種岩盤については粘着力の平均値が約 20 kg/cm^2 , B 種, C 種についてはそれぞれ、 15 kg/cm^2 , 10 kg/cm^2 程度であることがうかがえる。この結論は、又、別の方法で整理した図 7 の結果とほぼ一致していると考えてよからう。なお、表 2 の分類より C 岩盤はコア強度 100 kg/cm^2 以下のもののみを集めていたので、内部マサツ角を 40° とした場合粘着力は 23.4 kg/cm^2 以下ととならなくては

けない。この直線を参考のために図 11 中に書きこんである。

さて、最後に各岩種の中で、割目の数が強度特性にいかなる影響を及ぼすかについて見てみよう。図 9 より A 種岩盤に関しては割目の多いほど一般に粘着力が低いように思える。これは割目が多いほど、マサツ性の粒状体の挙動に似てくるためと考えられる。B 種岩盤でも、A 種とやや似た傾向が見られるが、C 種岩盤では割目の数の影響はほとんど消えている。これは亀裂のいかにかかわらず全体の挙動が母岩のコア強度に支配されていることを物語っていて興味深い。

結 論

今回の調査においては、以下に示すような結論がえられた。

- (1) 現地岩盤変形試験で実測された岩盤の接線変形係数は、 $5,000 \sim 150,000 \text{ kg/cm}^2$ 程度の広い範囲にわたって、変化しているが、母岩のコア強度が 500 kg/cm^2 以上の岩盤では最大 $150,000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $100 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ の岩盤では最大約 $70,000 \text{ kg/cm}^2$ 、 100 kg/cm^2 以下のものについては最大約 $30,000 \text{ kg/cm}^2$ 、であることが判明した。
- (2) 岩盤とコアの変形係数の比は、岩盤の割目の本数の増加と共に減少する傾向にあることがわかった。
- (3) 岩盤の内部マサツ角は、母岩のコア強度が 500 kg/cm^2 以上のもので大体 50° 、 $100 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ の岩盤では約 45° 、 100 kg/cm^2 以下の岩石コア強度をもつ岩盤では約 40° 、ないしそれ以下であることがわかった。又、粘着力も岩石コア強度の低下と共に減少することが明かになった。

謝 辞

本調査に関し、積極的な御協力をいただいた諸機関に対し感謝の意を表明いたします。

参 考 文 献

- (1) 岩盤のせん断強度調査報告，土木学会岩盤力学委員会，土木学会誌，55巻6号（1970）
- (2) 林正夫 “岩盤の現地せん断試験値とボーリングコアの試験値の相関の調査結果”，第3回岩の力学国内シンポジウム講演集，（1970），pp87-92