

点載荷試験の実用性に関する一考察

A Consideration on the Utility of the Point Load Test

疋田 貞良* 菊地 昌博*

Sadayosi HIKITA and Masahiro KIKUCHI

建設現場において、試料採取直後の岩石試料に対して迅速、かつ簡便に多数実施できるなどの利点を持つ点載荷試験に注目し、点載荷強度の計算方法、寸法効果、統計的性質および一軸圧縮強度との関係などについて、実験に基づき考察を行った。

強度の計算方法については、1985年に Brook や ISRM によって提案されている方法の妥当性が認められた。そこで、今回この方法を用いて試験結果を処理した結果、点載荷強度の寸法効果、分布形態、一軸圧縮強度との良好な相関関係などが明らかになり、点載荷試験が実用的な面できわめて有用であることが確認された。

《点載荷試験；点載荷強度；寸法効果；一軸圧縮強度》

The Point load test can be performed with portable equipment, and so be conducted promptly and easily in the construction site using the fresh rock sample. Therefore this test is noticed practically.

The calculation method, size effect, statistic property and the relation with the uniaxial compressive strength of the point load strength is experimentally considered.

In the matter of the calculation method of the point load strength, the method which has been described by Book, ISRM (1985) is deemed proper. Analysis have been made using this method for the results for the tests. As a result, size effect and the figure of distribution function are recognized. The point load strength plotted against the uniaxial compressive strength indicates a linear relationship.

Keywords : point load test, point load strength, size effect, uniaxial compressive strength.

1. はじめに

土木工事現場において、岩石・岩盤の評価を迅速、かつ簡便に行うことができれば便利である。一般に岩石・岩盤の評価を行う際には、インタクトロックの強度は最も重要な指標の1つである。その代表的なものとして、一軸圧縮強度があるが、一軸圧縮試験には多くの供試体を準備するのが困難なこと、さらに、試料の保存状態によっては、スレーキングが生じるなどの問題があり、ほかにもこれを補足あるいはクロスチェックできるような

強度の指標があれば有益である。そこで、現場において試料採取直後の新鮮な岩石に対して簡便に多数行え、かつコアの損傷も最小限に留めることができる点載荷試験について報告する。本報では以下の項目をふまえ、点載荷試験の実用性について考察した。

1. 点載荷強度の計算方法
2. 形状効果および寸法効果
3. 強度の統計的性質
4. 一軸圧縮強度と点載荷強度の関係

*地質研究室員

2. 岩石試験

表-1に示す試料を用いて、一軸圧縮試験と点載荷試験を行った。

(1) 一軸圧縮試験

直径50mm, 高さ100mmの自然乾燥状態の円筒形供試体を用いて試験を行った(なお, IKSの試料については

表-1 岩石試験に用いた試料

試料の略号	試料
I G	道内各地の火成岩類
S E	道内各地の堆積岩類
S C	神居古潭帯の片岩
H f s	白亜紀函淵層群の細粒砂岩
H c s	白亜紀函淵層群の礫質砂岩
H m 1	白亜紀函淵層群の泥岩(硬質部)
H m 2	白亜紀函淵層群の泥岩(軟質部)
I K s	始新世石狩層群の中粒砂岩
M S s	中新世メシクニ層の中粒砂岩
J m	中新世17線川層の泥岩
MD s 1	中新世前田の沢層の礫質砂岩(硬質部)
MD s 2	中新世前田の沢層の礫質砂岩(軟質部)
B s 1	中新世盤の沢層の細粒砂岩(硬質部)
B s 2	中新世盤の沢層の細粒砂岩(軟質部)
F a 1	鮮新世フレベシ噴出物の安山岩(弱変質部)
F a 2	鮮新世フレベシ噴出物の安山岩(強変質部)

試験は実施していない)。

(2) 点載荷試験

点載荷試験は, 供試体の形状および載荷方法によって, 整形ディスク試験(図-1(a)), 整形コア試験(図-1(b)), 整形ブロック試験(図-1(c))および非整形コア試験(図-1(d), (e))に分類される。なお, 試験に用いた供試体はすべて自然乾燥状態のものである。

3. 点載荷強度の計算方法

従来点載荷強度の計算方法としては, 平松ほか³⁾, D' Andrea, McWilliamsらによって1960年代に示された次のような形の式が多く用いられていた。

$$I_s = kP/d^2 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

I_s : 点載荷強度, k : 定数, P : 破壊時の荷重
 d : 載荷点間の距離

平松ほかは非整形供試体について, k の値として形状に関係なく0.9を用いている。

これに対し, 1970年代の後半からは点載荷強度は載荷点間の距離ではなく, 2つの載荷点をとる供試体の最小断面積に影響されるという考え方が多くみられる。²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾このような研究経過から, 1985年にはISRM (International Society for Rock Mechanics)の試験法に関する委員会から推奨案⁶⁾がだされている。ISRM案では, 直径50mmのコアに対するコア試験(図-1(b), (d))から得られる強度を標準とし, 点載荷強度は次式によって算出される。

$$I_s = P/De^2 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

②式中の De は, 2つの載荷点をとる供試体の最小断面積と等しい断面積をもつコアの直径(equivalent core diameter⁵⁾)であり, 次のように簡単に計算できる。なお, 次式中の A は2つの載荷点をとる供試体の最小断面積である。

$$\text{欠損のないコアに対するコア試験: } De^2 = d^2$$

$$\text{それ以外の試験: } De^2 = 4A/\pi$$

①式の根底にある考え方は, 載荷点間の距離が等しい供試体は同じ荷重で破壊するというものである。それに対し Brook⁵⁾は, 最小断面積が等しいとき ($De^2 \propto A$ であるので De も等しい), 同じ荷重で破壊するという考えをとっている。この2つの考え方の違いは, 結局供試体の寸法の尺度の違いの問題であり, ①式では供試体の寸法の尺度を載荷点間の距離 d としており, ②式ではそれを最小断面積 A (あるいは De)としているのである。この2つの考え方の相違点を探るため, 次に示す2つの実験(実験I, II)を行った。

(I) $d_1 = d_2$, $De_1 \neq De_2$ の場合, すなわち載荷点間の距

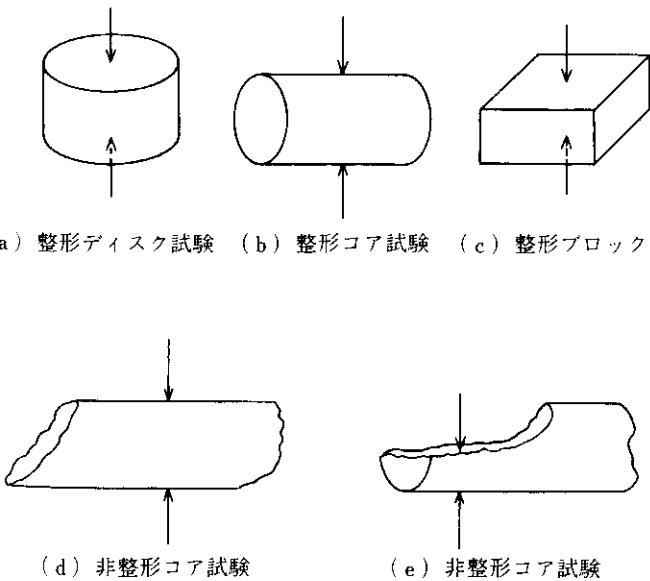


図-1 点載荷試験

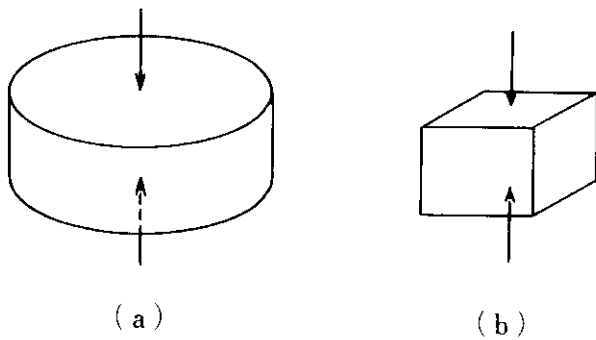


図-2 実験 (I)

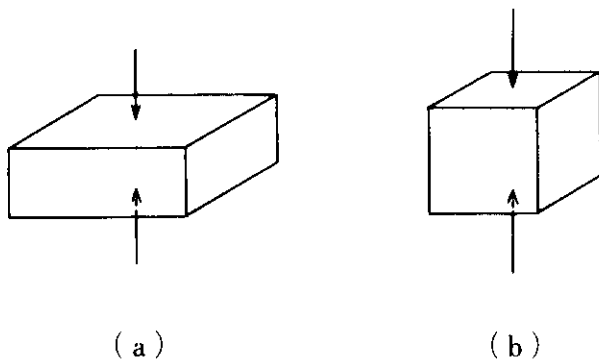


図-3 実験 (II)

離は等しく、最小断面積が異なる場合

MSsの試料を用いて直径約60mm、高さ約20mmの短円柱形供試体 (I-a: 図-2(a)) と約25×25×20mmの長方形形供試体 (I-b: 図-2(b)) をそれぞれ10個ずつ作成し、点載荷試験を行った。その結果、破壊時の荷重Pの平均値はI-a, I-bでそれぞれ578kgf, 294kgfと明らかに異なる値を得た。さらに、これらから①式, ②式を用いて、それぞれIsを計算すると表-2のようになる。この結果は、これら2つの供試体の寸法を同一とみなす①式の考え方とは矛盾し、②式の考え方に後述する寸法効果を加味してはじめて説明できるものである。

(II) $d_1 = d_2$, $De_1 \neq De_2$ の場合、すなわち載荷点間の距離は異なり、最小断面積が等しい場合

IKSの試料を用いて、約40×35×15mmの扁平な直方体形供試体 (II-a: 図-3(a)) 16個と約24×24×23mmの立方体に近い直方体形供試体 (II-b: 図-3(b)) 22個を作成し、それぞれについて点載荷試験を行った。その結果から①式, ②式を用いてそれぞれIsを計算すると表-3のようになる。

後述するように、強度の分布はほぼ正規分布で近似できると考えて、②式で求めた2つのIsの平均値に差があるといえるかどうか、統計的検定を行ったところ、有意

水準5%でこの2つのIsの平均値の間には有意な差は認められなかった。つまり、最小断面積Aの等しい2つの供試体は同じ荷重で破壊し、同一の強度値を示すと考えられる。この結果も実験(I)と同様、②式の考え方の妥当性を支持するものである。

以上2つの実験結果から、今回は点載荷強度の算定に際して②式を用いることとした。

表-2 実験(I)の結果

供試体名	P (kgf)	d^2 (mm^2)	A (mm^2)	De^2 (mm^2)	①式を用いて 計算したIs (kgf/ cm^2)	②式を用いて 計算したIs (kgf/ cm^2)
I-a	578	408	1250	1592	141.7	36.3
I-b	294	412	570	645	71.4	45.6

表-3 実験(II)の結果

供試体名	P (kgf)	d^2 (mm^2)	A (mm^2)	De^2 (mm^2)	①式を用いて 計算したIs (kgf/ cm^2)	②式を用いて 計算したIs (kgf/ cm^2)
II-a	596	222	531	676	268.5	88.2
II-b	606	538	552	692	112.6	87.6

4. 形状効果および寸法効果

岩石の強度には、供試体の形状の違いによる影響(形状効果)と大きさの違いによる影響(寸法効果)が現われることは、古くから認められていることである。たとえば、Weibull^(7,9)は強度(St)と体積(V)の関係として次式を導いている。

$$St \propto V^{-1/m} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

ここで m はWeibullのいう均一性係数であり、材料によって異なる値をとると考えられている。

一軸圧縮強度やその他の物性値と点載荷強度とを比較したり、点載荷強度自身によって岩石の強度区分を行い岩盤分類を行うなどの目的のためには、形状や寸法の影響を排除したその岩石固有の唯一の値を求めることが必要である。1960年代には、強度の計算に際して形状効果を加味するため、多くの異なる算定式が提案された。しかし、寸法補正については具体的な方法はほとんど示されておらず、その後1980年前後からBrook^{(2), (3), (5)}, Greminger⁽⁴⁾らによってその方法が検討、明示され、その研究成果が1985年のISRM案に導入されている。

(1) 形状効果

従来問題とされていた形状効果とは、載荷点間の距離 d が等しいにもかかわらず、形状によって強度が異なることをさす。つまり前述の(1)の実験(2つの供試体の d が等しく De が異なる)において、①式で算定したときに現われる強度の違いである。これに対して、Brook,

Greminger, ISRM などの考え方では、最小断面積を寸法の尺度と考えていることから、実験(I)において②式で算定したときに強度の違いとして現われるのは、形状効果ではなく寸法効果である。つまり、強度の計算式として②式を用いた場合には、強度の計算に際して載荷点間の距離 d ではなく、最小断面積 A を用いるため、断面形が円形であるか矩形であるかなどの形状の違いの影響は、ここですでに最小断面積 A の違いとして考慮されており、従来いわれている形状効果は、強度計算時にすでに免れている。そのため、後から特に形状補正を行う必要はないと考えられる。

(2) 寸法効果

寸法効果とは、前述の③式に示されるような供試体の寸法が、その供試体の強度に及ぼす影響のことであり、一般に供試体の体積が大きくなると強度が小さくなると考えられており、このことは次のように説明されている。いろいろな大きさのクラックは、単位体積当たり一定の密度をもってランダムに分布していると考えられ、その中の最も弱いクラックによって供試体の強度が決まる。このとき体積が大きくなるほど、より多くのクラックを含み、したがってまた、より弱いクラックを含んでいる確率も高くなることから、供試体の強度は小さくなる。ここで問題とする体積は、試験の影響を受ける部分の体積 V_e であり、供試体全体の体積 V_a ではない。²⁾ このことは、今回行った試験結果からも確かめられ、たとえば、直径50mmのコアに対してコア試験を行った場合、そのコアの長さが300mm ($V_a = 5.9 \times 10^5 \text{mm}^3$) でも50mm ($V_e = 1.0 \times 10^5 \text{mm}^3$) でも強度に有意な差は認められなかった。また、②式の計算に用いるのは、体積ではなく最小断面積 A であるが、これは A を V_e の目安として用いているのであり、Brook は V_e を $A^{3/2}$ 程度と考えている。²⁾

上述のように、岩石の強度には寸法効果が現われるため、同じ岩石について行った試験でも、供試体の体積(あるいは最小断面積)によって異なる強度の値を得ることになる。しかし、各岩石の唯一の標準となる強度値を得る必要性から、標準となる供試体の寸法を定め、それ以外の寸法のものから求めた強度値に対しては補正(寸法補正)を行う必要がある。Brook⁵⁾ や1985年の ISRM 案⁶⁾ では、直径50mmのコアに対するコア試験 ($A = 1963 \text{mm}^2$, $De^2 = 2500 \text{mm}^2$) から求められる点載荷強度を代表値 ($IS_{(50)}$) として点載荷強度指数と呼んでおり、それ以外の寸法のものに対しては、次のような方法 (i, ii) で寸法補正を行っている。

(i) 両対数グラフ用紙を用いて、横軸に De^2 、縦軸に P をとって試験結果をプロットすると、それらは1本の回帰直線で近似でき、その直線の式から $De^2 = 2500$ に対応する P の値 ($P_{(50)}$) を求め、次式によって点載荷強度指数を算定する。

$$IS_{(50)} = P_{(50)} / 25 \dots\dots\dots ④$$

(ii) 同寸法の供試体しか用意できないときなど、(i)の方法が使えないときは次式を用いる。

$$IS_{(50)} = FI_s \dots\dots\dots ⑤$$

⑤式中の F は寸法補正係数であり、次式から求められる。

$$F = (De/50)^{0.45} \dots\dots\dots ⑥$$

なお、⑥式中の0.45というのは、回帰直線の傾きを0.775としたときに計算で求められる値である。

ISRM 案に従って、今回行った試験の結果を両対数グラフ用紙上に表したのが図-4および図-5である。図-4は整形ディスク試験から求められたものであり、図-5は非整形コア試験から求められたものである。なお、各グラフの左肩には試料の略号を記した。また、表-4にこれらの試験結果をまとめて示す。この表を見ると、

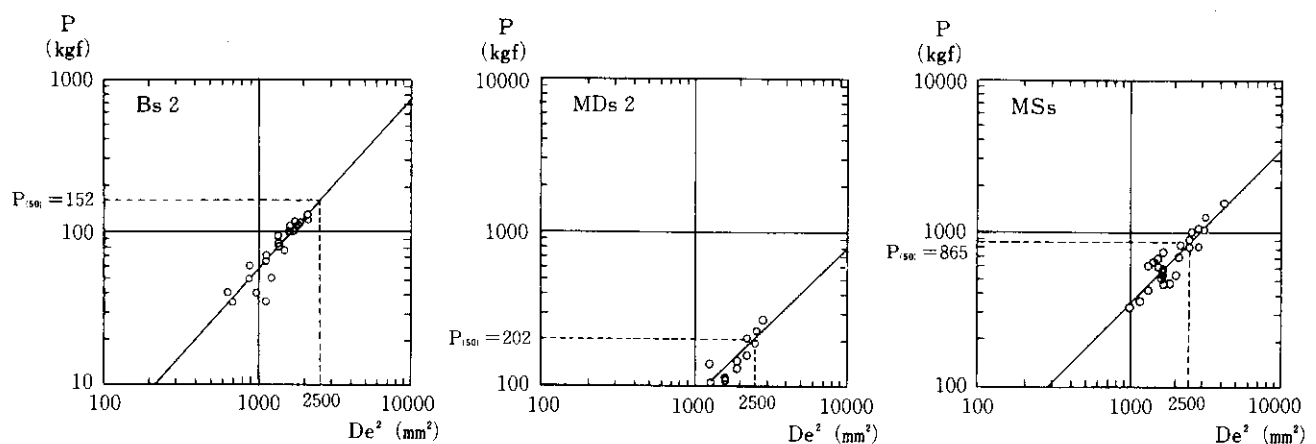


図-4 De^2 と P の関係 (整形ディスク試験)

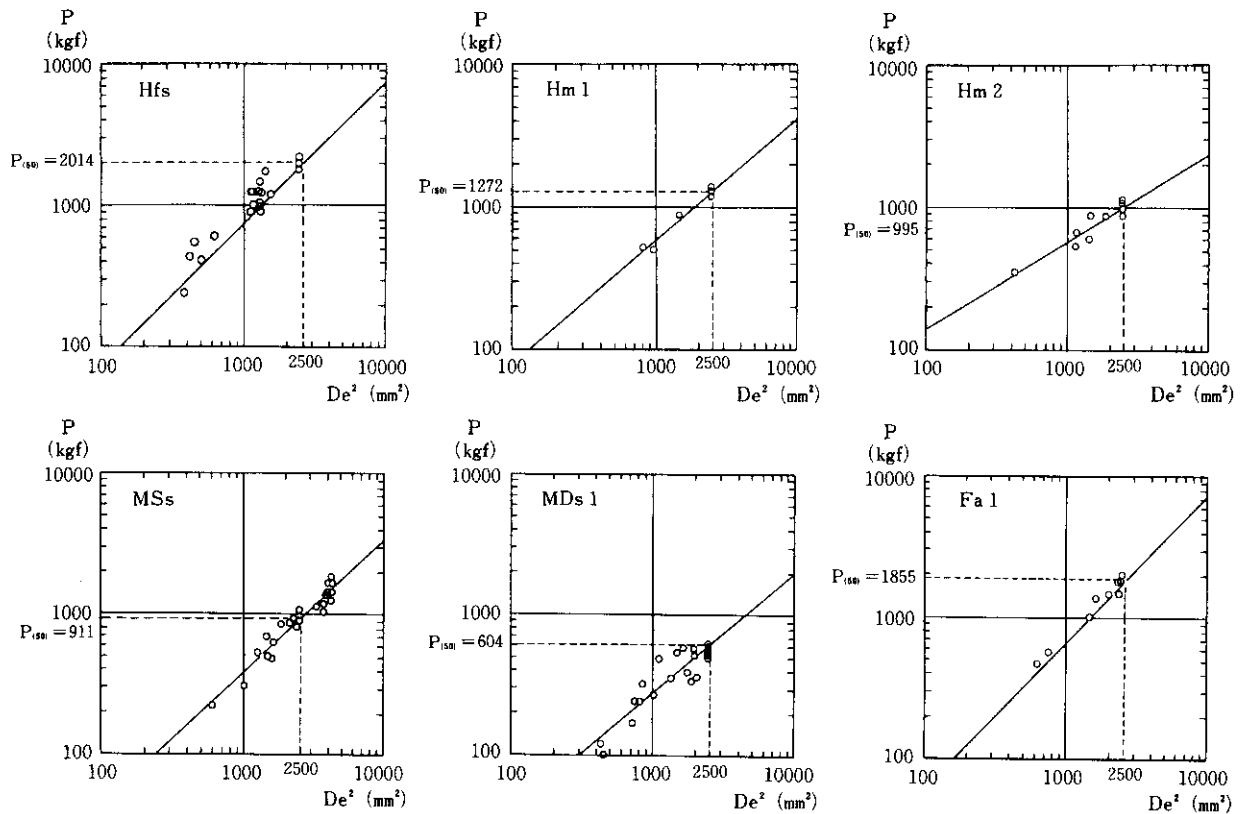


図-5 De^2 と P の関係 (非整形コア試験)

表-4 寸法補正表

	試料名	De^2 と P の関係式	回帰直線の傾き	相関係数	回帰直線から求めた $Is_{(50)}$ (kgf/cm ²)	欠損のないコアのコア試験から求めた $Is_{(50)}$ (kgf/cm ²) * 1
整形状コア試験	B s 2	$P = 0.021 \times (De^2)^{1.135}$	1.135	0.90	6.0	—
	MD s 2	$P = 0.089 \times (De^2)^{0.987}$	0.987	0.87	8.0	—
	M S s	$P = 0.355 \times (De^2)^{0.997}$	0.997	0.91	34.7	—
非整形コア試験	H f s	$P = 1.500 \times (De^2)^{0.921}$	0.921	0.96	80.8	78.7(13)
	H m 1	$P = 1.594 \times (De^2)^{0.854}$	0.854	0.98	50.9	50.9(8)
	H m 2	$P = 8.509 \times (De^2)^{0.609}$	0.609	0.94	39.9	40.3(5)
	M S s	$P = 0.519 \times (De^2)^{0.955}$	0.955	0.97	35.6 * 2	36.2(11) * 2
	MD s 1	$P = 0.721 \times (De^2)^{0.860}$	0.860	0.92	24.1	23.4(9)
	F a 1	$P = 0.940 \times (De^2)^{0.970}$	0.970	0.99	74.3	73.2(5)

* 1. カッコ内の数字は試験個数を表わす。

* 2. この試料の欠損のないコアの直径は6.5cmであるので、この試料に限り $Is_{(65)}$ を示す。

両対数グラフ上での De^2 と P の関係を直線で近似した場合の相関係数はいずれも0.9前後となっており、よい相関を示している。また、標準値である直径5cmのコアに対するコア試験から得られた $Is_{(50)}$ と回帰直線を用いた寸法補正 (iの方法) を行って求めた $Is_{(50)}$ とはよく一致しており、この寸法補正方法の妥当性を裏づけている。

回帰直線の傾き s については、Hm2の0.609から Bs2

の1.135まで、かなり大きなばらつきを示している。Bs2の試験結果にみられる直線の傾きが1より大きくなるという現象は、寸法が大きくなるほど強度が大きくなることを示している。これは従来の知見にまったく反するものであるが、その他の試料から求めた回帰直線の傾きはすべて1以下であり、かつBs2の試料は今回用いた試料の中で最も脆弱で、小さい荷重で破壊するものである。

これらを考えあわせると、1より大きい傾きを示した理由としては、この岩石の本質的な性質のためというよりも、むしろ、荷重計の精度などにかかわる測定誤差によるものである可能性が強い。しかし、Bs2以外の試料の結果についても、回帰直線の傾きが0.775前後であるという前提にたつ(ii)の補正方法では、大きな誤差を生じる場合がある。たとえば、傾き $s=0.95$ のとき、 $De^2=1000$ の小さい供試体を用いた試験結果から(ii)の方法で $Is_{(50)}$ を推定する場合、約15%の誤差を生じ、さらに $De^2=500$ の大きさの供試体を用いた場合には約25%の誤差を生じることになる。また、 $s=0.6$ のときには、 $De^2=1000$ 、 $De^2=500$ の場合、それぞれ約17%、33%の誤差を生じる。つまり、(ii)の方法のように、岩種によらず一定の寸法補正係数を用いる場合には大きな誤差を生じる危険性があり、(i)の方法を採用するのが最良であると考えられる。

次に、寸法効果を表す前述の③式中の Weibull の均一性係数 m と今回求めた回帰直線の傾き s の関係から、今回の試験で現れた点載荷強度の寸法効果の程度について考察する。③式中の V を前述の Ve (試験の影響を受ける部分の体積) と考え、 $V \propto A^{3/2}$ の関係²⁾ を代入すると次式を得る。

$$Is \propto A^{-3/2m} \dots\dots\dots ⑦$$

また、今回採用した②式では $A \propto De^2$ であることから次式が導かれる。

$$Is \propto (De^2)^{-3/2m} \dots\dots\dots ⑧$$

さらに、 $Is = P/De^2$ の関係から、

$$P \propto (De^2)^{1-3/2m} \dots\dots\dots ⑨$$

となり、均一性係数 m と寸法補正方法(i)の両対数グラフ上での回帰直線の傾き s との間には、次の関係があることがわかる。

$$s = 1 - 3/2m \dots\dots\dots ⑩$$

過去の多くの研究により、各種の岩石の一軸圧縮強度または一軸引張強度の寸法効果から、均一性係数 m の値が求められているが、その値は岩種によって5.5~33と大きくばらついている。⁷⁾これを⑩式によって今回寸法補正に用いた回帰直線の傾き s に換算すると、0.73~0.95となり、今回の試験結果とよく一致する。このことから、点載荷強度に現われる寸法効果の大きさは、一軸圧縮強度や一軸引張強度に現われる寸法効果とほぼ同程度であり、かつ岩種によってさまざまな値をとるものと考えられる。

5. 岩石の強度の統計的性質

同一の岩石試料から得られた多くの供試体について、一軸圧縮試験や点載荷試験などを行って強度を測定した

場合、その測定値はある範囲内ではばらつくのが普通である。ここでは、前述までのような寸法の影響によるばらつき以外の強度の最も本質的ともいえるばらつきについて、その大きさおよび分布について考察する。

(1) 岩石の強度のばらつきの大きさ

今回行った一軸圧縮試験および点載荷試験の結果をまとめて表-5に示す。寸法効果を避けるために、この表には同じ大きさの供試体で5個以上の試験個数が確保できたもののみを掲載した。Hfs, Hm1, Hm2, MSs, Bs1, Fa2の各試料について、一軸圧縮強度と点載荷強度の変動係数を比較すると、点載荷強度のばらつきの方がやや大きいものの、両者の間に顕著な差は認められない。また、Bs1, Fa2のように点載荷強度のばらつきが他に比べ大きな試料では、一軸圧縮強度のばらつきもやはり大きくなっており、強度のばらつきが大きいことがこれらの試料の特徴であると考えられる。その他の試料については、点載荷強度の変動係数はいずれの試験法でも10%前後であり、岩石の強度のばらつきとしてはそれほど大きいものとはいえない。一般に強度は比重、弾性波速度など、他の物性値に比べて大ききばらつきを示すとされている。その理由は、比重や弾性波速度などがその物体の組織の性質が累積的に寄与して、微小な異常に大きく左右されることはないのに対し、強度は物体内のごくわずかな異常によって大きく左右されることによる。⁷⁾ちなみに、一軸圧縮試験に用いた試料についてP波速度を測定したところ、その変動係数はいずれも2~5%の小さい値を示した。

強度試験の実用的な面において、変動係数の大きさに強く影響されるものとして、試験個数の決定の問題がある。強度の分布が正規分布で近似できると考えて、信頼度95%での片側信頼区間が平均値の15%以内になるようにするために必要な試験個数 n は、統計的推定の問題として t 分布を用いて求められる。変動係数が10%前後の場合 $n = 3 \sim 4$ 個であるが、変動係数が20%前後となると10個程度、さらに30%前後になると20個程度の試験個数が要求される。しかし、一般に行われている試験個数はせいぜい4~5個程度であり、強度が大ききばらつきのような岩石では、その程度の試験個数では平均値の信頼区間はかなり広くなる。このように、変動係数が大きいわりに試験個数が少ない場合、その岩石の強度の特徴を正確に捕らえることはできない。

(2) 岩石の分布モデル

前述のように、岩石内にはさまざまな大きさのクラックが単位体積当たり一定の密度をもってランダムに分布しており、破壊はその中の最も成長しやすいクラックを

表-5 強度試験結果一覧表

	試料名	試験個数	平均値 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
一軸圧縮試験	H f s	11	1134.	89.8	7.9
	H m 1	5	733.	23.3	3.2
	H m 2	5	564	18.7	3.3
	M S s	5	339	20.7	6.1
	B s 1	38	177	35.8	20.2
	F a 2	5	207	52.3	25.3
整形および非整形コア試験	H f s	13	78.7	5.17	6.6
	H m 1	8	50.9	3.04	6.0
	H m 2	5	40.3	3.43	8.5
	M S s	11	36.2	3.62	10.0
	MDs1(整形)	8	21.3	2.48	11.6
	MDs1(非整形)	9	23.4	1.88	8.0
	F a 1	5	73.2	6.13	8.4
	F a 2	14	24.3	7.81	32.1
整形フェイス試験	M S s	10	36.3	3.13	8.6
	MD s 1	9	21.6	2.26	10.4
	B s 1	64	11.2	2.59	23.2
整形ブロック試験	IKs (a) *1	16	88.2	11.4	12.9
	IKs (b) *2	16	88.5	11.2	12.7
	IKs (c) *3	22	87.6	9.48	10.8
	M S s	10	45.6	4.90	10.7

※1. 図9(a)の供試体, 載荷方法
 ※2. 図9(b)の供試体, 載荷方法
 ※3. 図3(b)の供試体, 載荷方法

含む部分から始まり, その部分の強度によって供試体の強度が決まる。結局, 岩石の強度の分布は, “クラックの強度” という母集団から n 個の標本を取りだしたときの最小値の分布に等しくなると考えられる。これは, 極値統計の問題であり, 岩石のようなぜい性材料の強度の分布モデルとしては, 最小値の第三漸近分布とも呼ばれるワイブル分布がよい近似を与えると考えられている。^{7),8),9)}ワイブル分布の確率密度関数は次のように書ける。

$$f(x) = \frac{p}{\theta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{p-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\theta}\right)^p\right) \dots\dots\dots ⑪$$

⑪式は確率変数 x のほかに, 2つの定数 p と θ を含んでおり, これらによって分布の形が決まる。この2つの定数と平均値 μ, 分散 σ²との関係は次のとおりである。

$$\mu = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{p}\right) \dots\dots\dots ⑫$$

$$\sigma^2 = \theta^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{p} + 1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{p} + 1\right)\right)^2 \right\} \dots\dots\dots ⑬$$

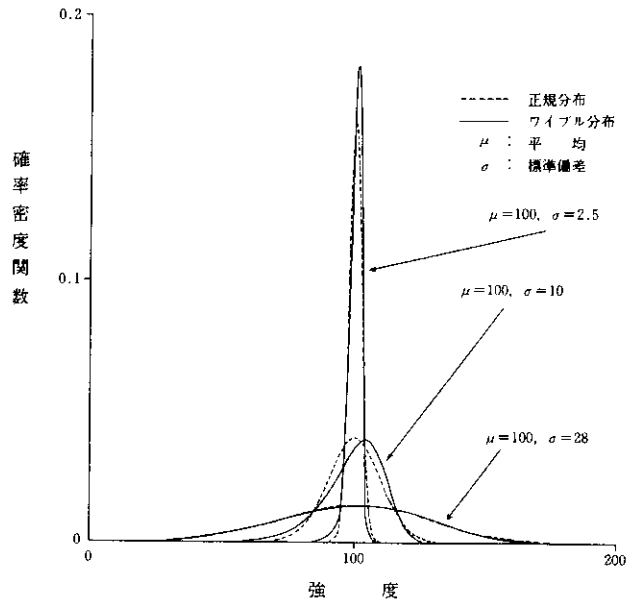
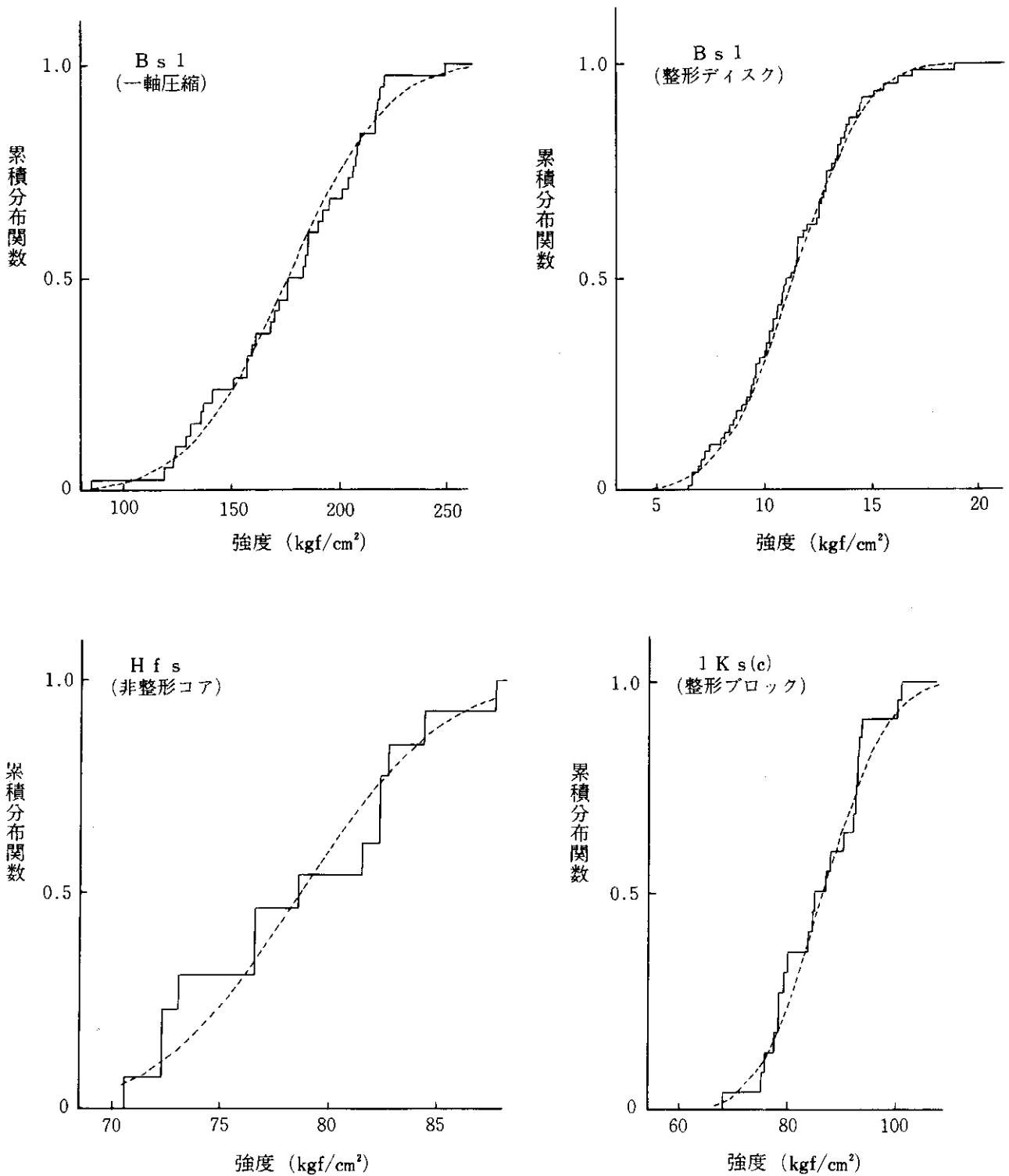


図-6 正規分布およびワイブル分布の確率密度関係

ここでは, 統計的推定あるいは検定の際の取扱いの容易さや便利さに対する要求から, 実用上, 最も広く用いられている正規分布で強度の分布が近似できないかどうかについて検討する。まず, 正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ と同じ平均値と分散をもつワイブル分布の p, θ を⑫式および⑬式から求め, 同一の変動係数をもつワイブル分布と正規分布の確率密度関数のグラフを描くと, 図-6のようになる。ここで用いた変動係数 2.5, 10, 28 は, それぞれ強度のばらつきの小さい岩石, 平均的なばらつきを示す岩石, 強度が大きくばらつく岩石のモデルとして採用した値である。それぞれの変動係数のグラフについて正規分布とワイブル分布の両者を比較すると, モードがややずれるものの大きな差異は認められず, ばらつきが大きな場合にはこの両者はほとんど一致する。次に, 今回実施した一軸圧縮試験および点載荷試験の結果に, 実際に正規分布をあてはめて, その適合度の検定を行った。表-5に示す試験結果のうち, 試験個数が多いものについて, コルモゴロフ-スミルノフ検定 (K-S 検定) を行い, その数例を図-7に示す。図中の階段状の実線は, 試験値を小さい方から順に並べて作った累積相対度数関数であり, 破線は正規分布の分布関数であるが, いずれの場合もこの両者はよい一致を示している。さらに, 試験個数が20個以上のものについてはカイ二乗検定を行った。その結果をまとめて, 表-6および表-7に示す。これらの表を見ると, いずれの場合も正規分布は有意水準5%で妥当なモデルであると認められ, 強度の分布は実用上, 正規分布で近似してさしつかえないであろうと考えられ



図一七 累積相対度数と理論分布関数 (K-S検定)

る (このような結果をふまえて、本文中の統計的推定および検定の議論はすべて正規分布を仮定して行っている)。

6. 点載荷強度の実用性に関するその他の事項

(1) 点載荷試験によって生じた破断面上で再び載荷試験を行う場合について

MSsの試料について、コア採取時に生じた破断面(既存の破断面)上で載荷した試験結果と点載荷試験によって生じた破断面上で再び載荷した場合(図一八)の試験

表-6 K-S検定結果

試料名 *1	測定値 D *2	限界値 D ^{0.05} *2
H f s (一軸圧縮)	0.26	0.40
B s l (一軸圧縮)	0.08	0.22
H f s (非整形コア)	0.18	0.37
B s l (整形ディスク)	0.05	0.17
IKs(a) (整形ブロック)	0.19	0.33
IKs(b) (整形ブロック)	0.18	0.33
IKs(c) (整形ブロック)	0.14	0.28

*1. コッコ内は試験名を表わす
 *2. $D < D^{0.05}$ のとき有意水準5%であてはめは妥当

表-7 カイ二乗検定結果

試料名 *1	計算値 $\sum \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$ *2	棄却域の下限 $C_{0.95, f}$ *2
B s l (一軸圧縮)	3.11	5.99
B s l (整形ディスク)	0.51	7.81
IKs(c) (整形ブロック)	2.49	3.84

*1. カッコ内は試験名を表わす
 *2. $\sum \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} < C_{0.95, f}$ のとき有意水準5%であてはめは妥当

結果とを比較すると、前者については、11個の供試体の $I_{S(50)}$ (各供試体についての試験値を回帰直線の式によって $De^2=2500$ のときの強度に換算した値) の平均値が 33.6 kgf/cm^2 であり、後者については、10個の供試体の $I_{S(50)}$ の平均値が 36.2 kgf/cm^2 となっている。この2つの平均値の間には、有意水準5%で差は認められず、これら2つの場合の試験結果はおそらく同等に取扱えるものと考えられる。このことから点載荷試験においては、破断面以外の部分への影響はほとんどないと考えられ、少

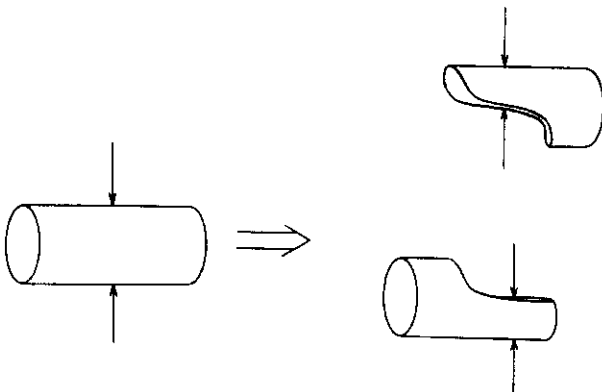


図-8 点載荷試験によって生じた破断面上で再び載荷する場合の載荷方法

ない試料で多くの試験を行うことが可能である。

(2) 供試体の中に載荷点間の距離 d を直径とする球がふくまれないような載荷様式について

従来、供試体の中に載荷点間の距離 d を直径とする球が含まれないような載荷様式 (図-9(b), 図-10(b)のような載荷様式) は適当ではないとされており、ISRM 案でもこのような載荷様式を避けるために、試料の形状について制約を加えている。しかし、球が含まれないような載荷様式での実験結果は過去に報告されておらず、球

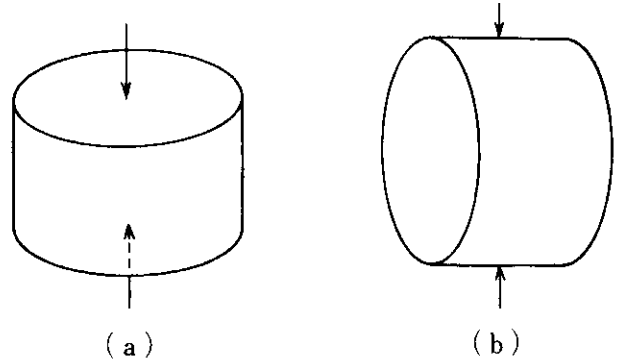


図-9 実験(III)

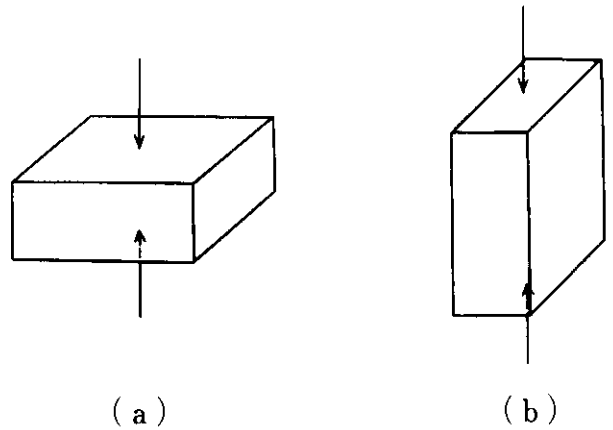


図-10 実験(IV)

が含まれる場合と含まれない場合とで強度の平均値やばらつきにどの程度の差異が生じるかは明らかではなかった。そこで、今回この2つの条件での試験値を比較するため、次のような2つの実験(III, IV)を行った。

(III) MDsl の試料を用いて直径約50mm, 高さ約28mmの短円柱形供試体を作成し、これらに対して図-9(a), (b)2つの載荷様式で点載荷試験を行った。(a)は球が含まれる場合であり、(b)は球が含まれない場合である。この試験結果を表-8に示す。これらの結果について統計的

表-8 実験(III)の結果

載荷様式	試験個数	強度の平均値 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
(a)	9	21.6	2.26	10.4
(b)	8	21.3	2.48	11.6

表-9 実験(IV)の結果

載荷様式	試験個数	強度の平均値 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)	変動係数 (%)
(a)	16	88.2	11.4	12.9
(b)	16	88.5	11.2	12.7

検定を行ったところ、有意水準5%でこれら2つの載荷様式で求められた強度の分散および平均値の間に差は認められなかった。

(IV) IGsの試料を用いて約40×35×15mmの直方体形供試体を作成し、これらに対して図-10(a), (b)2つの載荷様式で試験を行った。その結果を表-9に示すが、これらについても(III)と同じく検定を行ったところ、同様の結果を得た。

今回行った2つの実験からは、従来いわれている載荷様式の違いによる影響はみられなかつた。つまり、供試体中に載荷点間の距離dを直径とする球を含む空間がなくても、強度およびそのばらつきに大きな誤差は生じなかつた。このことについては、今後岩種、形状、寸法の異なるさまざまな供試体について、さらに検討すべきであると考えられる。

7. 一軸圧縮強度と点載荷強度の関係

(1) 一軸圧縮強度と整形ディスク試験から求めた点載荷強度の関係

現在、岩石強度の指標として最も広く用いられている一軸圧縮強度と整形ディスク試験から求めた点載荷強度の関係を示したのが図-11である。図-11には、寸法効果の影響を受けない $2500 < De^2 < 2600$ の標準的な大きさの供試体から得られた値(=Is₍₅₀₎:点載荷強度指数)だけをプロットしたものであり、図中の直線はIGとSEを一括して扱った場合の回帰区線である。これらの結果から得られる一軸圧縮強度と点載荷強度の比 $qu/Is_{(50)}$ および相関係数を表-10に示す。これを見ると、IG、SEいずれの試料についても高い相関が認められた。さらに、今回行った試験では、IGとSEそれぞれの試料から求めた $qu/Is_{(50)}$ が互いに近い値であったことから、火成岩(IG)と堆積岩(SE)を一括して扱った場合にも高い相関が認められた。

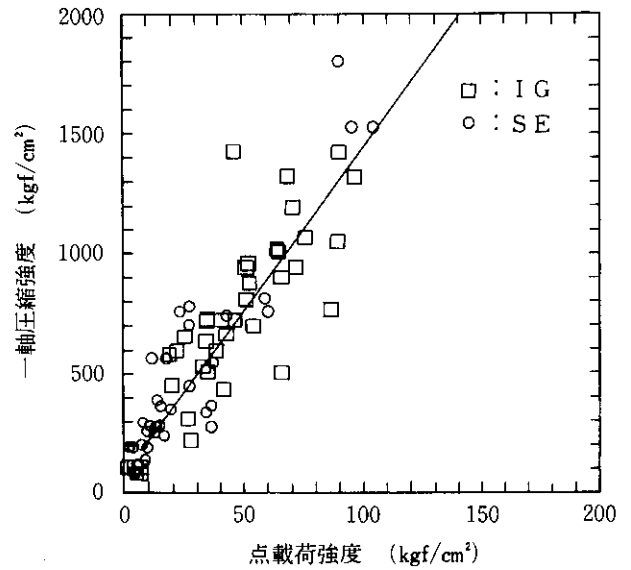


図-11 一軸圧縮強度と整形試料の点載荷強度の関係

表-10 一軸圧縮強度と整形試料の点載荷強度の関係

試料名	一軸圧縮強度 / 点載荷強度	相関係数
IG	12.3	0.85
SE	15.0	0.93
IG+SE	13.6	0.90

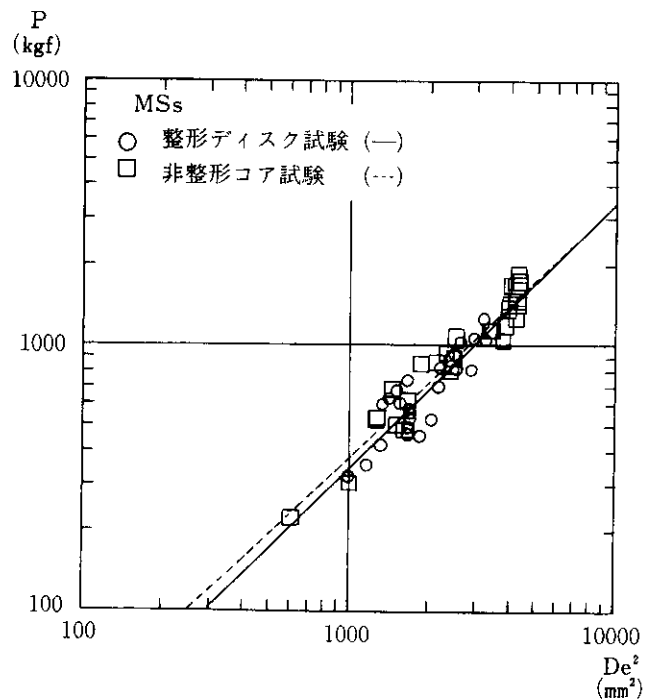


図-12 De^2 とPの関係 (MSs)

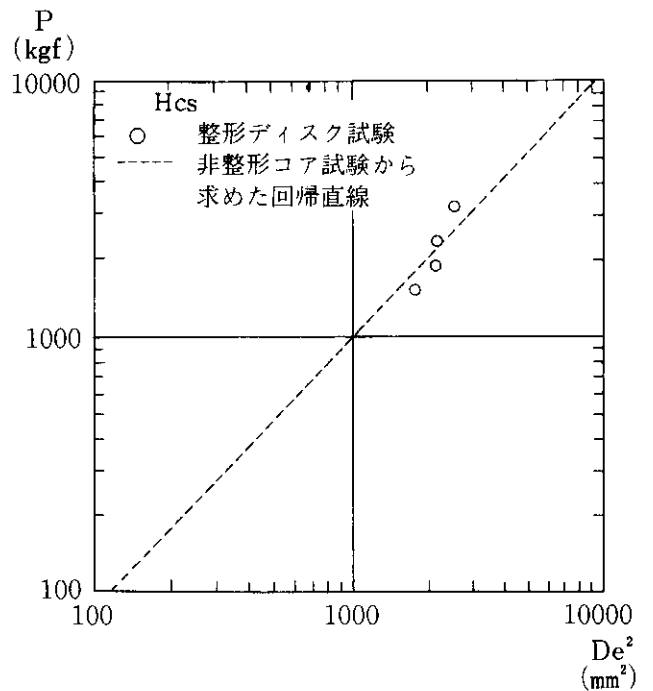
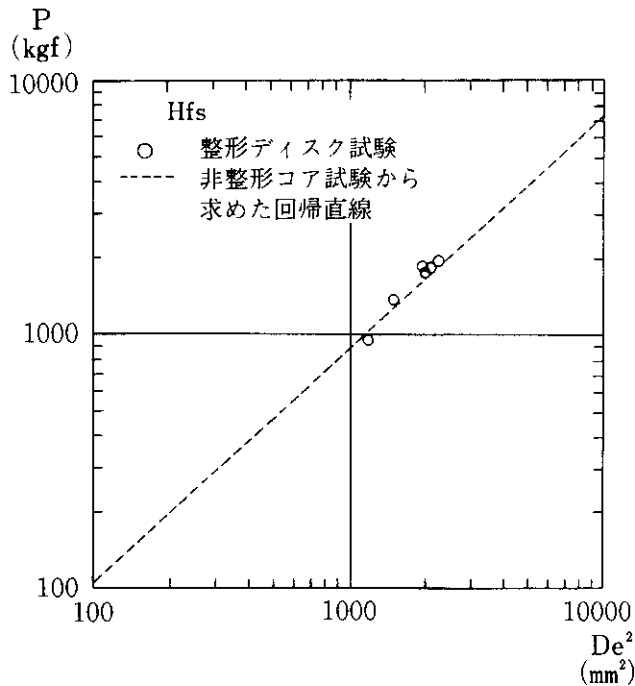


図-13 De^2 とPの関係 (HfsおよびHcs)

(2) 整形ディスク試験から求めた点載荷強度と非整形コア試験から求めた点載荷強度の関係

MSsの試料を用いて行った整形ディスク試験と非整形コア試験の結果を比較するために、各々の試験の結果得られた De^2 とPの関係を両対数グラフ上に表したのが図-12である。図からもわかるように、この2つの試験結果はかなりよく一致している。ちなみに、整形ディスク試験から得られた回帰直線の傾きは0.997、 $Is_{(50)}$ は34.7 kgf/cm²であり、非整形コア試験では、それぞれ0.955、36.5kgf/cm²である。これらの結果から、整形ディスク試験と非整形コア試験の結果は、おそらく同等に取扱えるのではないかと考える。

図-13にはHfsとHcsの試料を用いて行った整形ディスク試験結果と非整形コア試験から得られた回帰直線を示す。図を見ると、整形ディスク試験の結果は、非整形コア試験から求めた回帰直線の近傍に分布しており、これも上述と同じ結果を示している。

(3) 一軸圧縮強度と非整形コア試験から求めた点載荷強度の関係

一軸圧縮強度と整形ディスク試験から求めた点載荷強度とが良好な相関関係を示し、かつ整形ディスク試験結果と非整形コア試験結果とがよく一致することから、一軸圧縮強度と非整形コア試験から求めた $Is_{(50)}$ の間にも高い相関があるのではないかとということが、当然予想される。

図-14は、10試料(堆積岩8試料、火成岩2試料)に

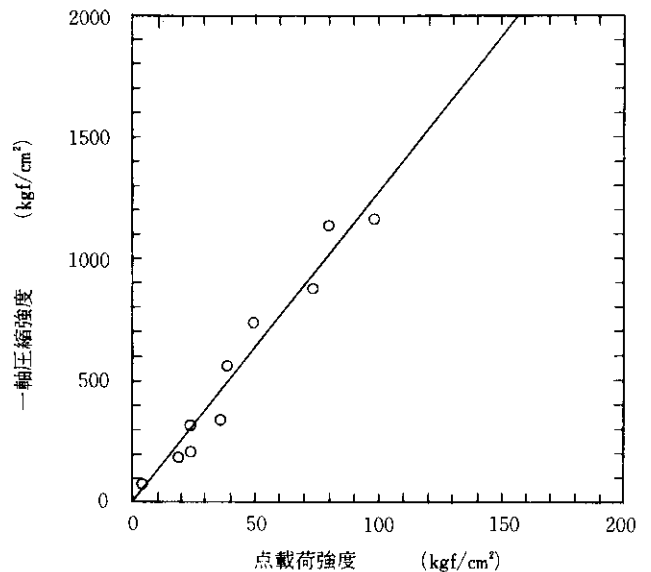


図-14 一軸圧縮強度と非整形試料の点載荷強度の関係

ついての一軸圧縮強度と非整形コア試験から求めた $Is_{(50)}$ の関係を示したものである。この図を見ると試料数は少ないものの、高い相関(相関係数 $R=0.98$)を示しており、 $qu/Is_{(50)}$ の値も整形ディスク試験から求めた値に近い値(12.7)となっている。

8. おわりに

点載荷強度の計算方法としては、1960年代に提案された方法(①式)とBrookやISRMによって1980年代に提

案されている方法とを比較するための実験を行い、後者の方法を支持する結果を得たことから、今回は ISRM 案に従って強度計算、寸法補正を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 寸法効果については、両対数グラフ上での De^2 (equivalent core diameter の 2 乗) と P (破壊時の荷重) の関係は、ほぼ直線で近似できる。今回の試験では、寸法効果を表わすその傾き s は試料によってばらつき、一定の寸法補正係数を用いる寸法補正方法は最も簡便ではあるが、大きな誤差を生じる危険性があることがわかった。また、点載荷強度の寸法効果は、過去の研究により求められている一軸圧縮強度や一軸引張強度の寸法効果とほぼ同程度であると考えられる。
- ② 点載荷強度のばらつきの大きさは、一軸圧縮強度のそれよりやや大きいようであるが、その差は顕著ではない。また、点載荷強度の変動係数は、多くのものでは 10%前後であるが、それらに比べてかなり大きい変動係数 (約 20~30%) を示す試料もあり、それらについては一軸圧縮強度も大きくばらついている。
- ③ 強度の分布モデルとしては、一般にワイブル分布が最も適当であると考えられているが、今回実施した試験結果に正規分布をあてはめて、その適合度を検定したところ、試料や試験の種類を問わず、強度の分布に対する正規分布のあてはめはよく、実用上、正規分布を強度の分布モデルとして用いてもさしつかえないと考えられる。
- ④ 点載荷試験によって生じた破断面上で、再び載荷試験を行った場合の試験結果と、既存の破断面上での試験結果とは同等に取扱えると考えられる。また、今回行った実験では、従来否定されていた供試体の中に載荷点間の距離を直径とする球を含まないような載荷様式で試験を行っても、球を含むような様式の場合と比較して、有意な差は生じない。これらのことについて、さらに多くの試料について実験的検討を行えば、限られた少ない試料で多くの試験を行えるようになる可能性がある。
- ⑤ 整形ディスク試験結果と非整形コア試験結果とはよ

い一致を示し、これら 2 つの試験の結果は同等に取扱えるものと考えられる。

- ⑥ 整形ディスク試験のみならず、非整形コア試験結果を用いた場合でも、点載荷強度と一軸圧縮強度の間には高い相関が認められる。

点載荷試験は、現場において即座に岩石強度の概略値を把握しようとする場合などにはきわめて有用であり、今後不定形の試料やボーリングコアを用いた点載荷試験が、現場で迅速に岩盤評価を行う 1 つの有効な手段となるのではないかと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 平松良雄, 岡 行俊, 木山英郎: 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, vol. 81 (1965).
- 2) Brook N.: The use of irregular specimens for rock strength test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. vol. 14(1977).
- 3) Brook N.: Size correction for point load testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. vol. 17(1980).
- 4) Greminger M.: Experimental studies of the influence of rock anisotropy on size and shape effects in point load strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. vol. 19(1982).
- 5) Brook N.: The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. vol. 22(1985).
- 6) ISRM Commission on Testing Methods: Suggested method for determining Point Load Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. vol. 22(1985).
- 7) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, 東京大学出版会 (1977).
- 8) 岡村浩之・板垣 浩: 強度の統計的取扱い, 培風館 (1979).
- 9) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂出版(1955).