

서울화강암의 암석강도 측정치의 비교 평가 연구

윤지선¹⁾ · 김두영²⁾ · 정홍모³⁾

A Study on Comparison and Evaluation of various Strength in Seoul Granite

Ji-Son Yoon, Do-young Kim, hŭng-mo Jung,

ABSTRACT In this paper, we make a study on comparison and evaluation of the seoul granite properties, which are unit weight, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength and, point load strength

The typical result are as follow -

1. From the measured value of point load strength anisotropy index, the seoul granite is considered to be homogeneous.
2. There is a linear relationship between uniaxial compressive strength and size corrected point load strength index.
3. Brazilian tensile strength and size corrected point load strength index are closely tied together.

1. 서 론

본 연구에서는 서울지역에 널리 분포하고 있는 신선하고 단단한 화강암류의 시추코어를 이용해서 대표적인 Index test인 점재하 강도지수, 초음파 전파속도 등과 일축압축강도, 인장강도 등 사이의 상호관계에 대해서 알아보았다.

점재하시험은 2점 사이에 암석시료를 끼우고 재하하므로써 암석시료를 파단시켜 최대하중으로부터 점재하 강도지수를 산출하는 것이다. 이러한 점재하강도지수의 취급에는 크게 나누어서 두 가지 방법이 있다. 하나는 점재하시험에서 암석시료 대부분의 파괴양상이 양재하점 사이를 연결하는 직선을 포함한 면에서 파단되기 때문에 인장강도(압열인장강도)에 관련된 양으로 취급, 점재하시험을 인장시험의 신속시험이라고 생각하여 얻어진 점재하강도지수를 인장강도에 가장 가까운 값으로 채택하자는 것이다(平松良雄, 1965)⁶⁾. 다른 사고방식은 점재하강도지수 자체의 물리적인 의미는 그렇게 추구하지 않고 지표적인 생각으로 취급하여 암반 분류에 이용하거나 압축강도를 추정하는 지표(ISRM,

1985)¹⁴⁾로 사용하고자 하는 것이다.

이 연구에서는 그와 같은 점재하시험 결과를 고찰함과 동시에 서울지역에 널리 분포하는 화강암의 기본적인 물성, 즉, 단위중량, P파전파속도, 일축압축강도, 압열인장강도와와의 상호관계에 대해서 평가를 시도해 보았다.

2. 시험편 제작 및 시험 방법

2.1 암석시료

본 연구의 실험을 위한 암석시료는 대부분 서울 은평구 부근에서 얻은 화강암류 시추코아이다. 현장에서 채취한 화강암류 시추코아의 암석시료로 국제암반역학회(Brown, 1981)²⁴⁾에서 제안한 방법 및 ASTM C135-47⁷⁾에 의거, 암석시험편들을 실험실에서 제작하였다.

점재하시험용 암석시험편은 일차적으로 직경방향의 점재하시험을 실시하기 위하여 직경 대 높이의 비

* 1995년 5월 15일 접수

- 1) 정회원, 인하대학교 자원공학과 교수
- 2) 정회원, 인하대학교 자원공학과 교수
- 3) 정회원, (주)지암엔지니어링

를 1 : 2 이상의 크기로 제작하였고, 축방향의 점재하시험용 암석시험편은 직경방향의 점재하시험을 실시한 후 파괴되어 양분된 암석시험편을 이용, 직경 대 높이의 비를 대개 1 이하의 원주형으로 절단하여 제작하였다.

2.2 실험방법

암석의 물리적 성질 중 기본물성으로서 단위중량과 P파 전파속도등을 측정하였고, 역학적 성질로서 일축압축시험, 압열인장시험 및 점재하시험에 의한 강도등을 구하였다.

2.2.1 기본물성 (Index Properties)

기본물성의 측정방법은 국제암반역학회 [International Society Rock Mechanics (ISRM)] 의 표준시험법 (ISRM, 1979)¹³⁾에 의하였다. 모든 암석시험편의 크기는 버어니어 캘리퍼스로 0.05 mm 까지 측정했으며, 암석시험편의 중량은 0.01 g까지 측정 가능한 디지털식 중량계측기를 사용하여 측정하였다.

• 단위중량 측정 및 P파 전파속도 측정

단위중량은 Nonius 법에 의거해서 실시하였다.

매질내를 전파하는 탄성과 전파속도의 측정방법 (Brown, 1981)²⁴⁾에는 초음파 Pulse가 암석시료의 내부로 전파하는 속도를 직접 측정하는 투과법과 경계면에서의 반사 Pulse를 이용하는 반사법이 있다. 또한, 암석의 탄성정수를 구하기 위해 종진동이나 횡진동 등의 공진주파수를 구하는 것을 기본으로 한 공진법이 있다. 세 가지 방법 중에서 직접투과법이 흔히 사용되고 있으며, 이 연구에서도 직접투과법에 의해 P파전파속도를 측정했다.

2.2.2 강도시험

화강암류 시추코아의 암석시료를 이용, 재하방향을 고정하여야만 하는 일축압축시험과 압열인장시험을 실시하였고, 병행하여 재하방향의 변경이 가능한 점재하시험으로써 축방향의 점재하시험과 직경방향의 점재하시험을 실시하였다.

• 일축압축시험 및 압열인장시험

직경 54 mm 의 화강암류 시추코아를 이용해서 일반적인 일축압축시험 및 압열인장시험을 실시했다. 단, 탄성계수는 50%의 응력수준에서 계산된 접선 탄성계수를 채용하였다.

• 점재하시험

점재하시험은 재하점 사이를 직경으로 하는 구의 응력상태로 인장파괴면이 생성되기 때문에 일축압축강도

의 예측도 가능하게 한다.(ISRM, 1985)¹⁴⁾ 본 시험에서는 일축압축강도와 연관시킬 수 있을 뿐만 아니라 현장에서 신속하게 이용할 수 있는 점재하시험법 (ISRM, 1985)¹⁴⁾을 이용하였다. 점재하시험은 시험기술의 진보에 따라 일축강도의 예측 시 상당한 분산을 나타내는 결점을 보완할 수 있고, 또한 점재하강도지수의 산출시 신뢰성 있는 암석강도를 얻을 수 있는 시험방법에 의하였다. (ISRM, 1985)¹⁴⁾ 점재하강도지수는 재하방향에서 압축응력에 수반하여 발생하므로 공시체의 중앙에서 발생하는 최대인장응력이 재하하중(P)과 재하점간의 거리(d)에 따라 변한다.(ISRM, 1985)¹⁴⁾ 강도는 가압점사이의 거리의 제곱(d²)에 대한 재하하중(P)으로써 표시되며 공시체의 형태(Shape) 및 크기(Size)에 따라 시험방법이 다르다(Fig. 1).

코아 형태의 암석시험편에서 반경방향으로 재하하는 경우, 코아직경을 D로 표시할 때, 점재하강도지수(I_s)는 아래의 식으로 산정된다(ISRM, 1985)¹⁴⁾.

$$I_s = \frac{P}{De^2} (\text{kgf/cm}^2)$$

여기서, I_s : 점재하강도지수 (kgf/cm²)

P : 최대하중 (kef)

De: 등가코아직경 (cm)

여기서, 직경방향으로 재하하는 점재하시험의 경우

$$De^2 = D^2$$

여기서, De: 등가코아직경 (cm)

D : 공시체의 직경 (cm)

또한, 축방향시험, 블럭시험 및 불규칙 압괴시험의 경우

$$De^2 = \frac{4A}{\pi}$$

여기서, De: 등가코아직경 (cm)

A = W × D

A : 재하점 사이에서 공시체의 최소단면적 (cm²)

W : 공시체의 넓이 또는 횡방향의 크기 (cm)

D : 공시체의 직경 또는 종방향의 크기 (cm)

에 의하여 등가코아직경을 산출한다. 그러나 점재하강도지수(I_s)는 등가코아직경 (De)의 함수로 되어 동일한 특성을 가진 암석시료에서도 등가코아직경이 다르면 얻어지는 점재하강도지수(I_s)도 다르게 된다. 따라서 직

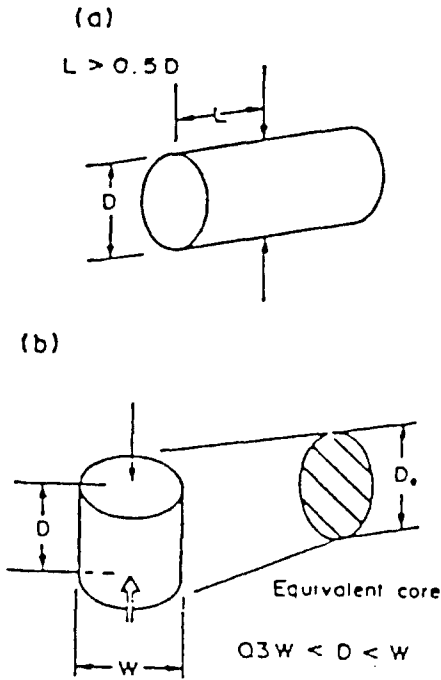


Fig. 1. Specimen shape requirements for (a) the diametral test and (b) the axial test.

경 50 mm 의 원주형 코아를 사용하여 직경방향의 점재하시험을 했을 때의 점재하강도지수를 기준으로 선택, 다른 등가코아직경을 갖는 암석시료에 대해서는 직경 50 mm의 원주형 코아가 갖는 등가코아직경으로 환산하여 수정 점재하강도지수 $[I_s(50)]$ 에 의하여 점재하강도지수 (I_s)를 규준화 한다.

$$I_s(50) = F \times I_s$$

여기서, $F = (De/50)^{0.46}$

F : 크기보정인자

De: 등가코아직경 (mm)

본 연구에서는 일차적으로 화강암류 시추코아의 암석시료를 다이아몬드 톱으로 절단하여 직경 대 가로의 비가 약 1 : 2 로 되도록 암석시험편을 제작, 직경방향의 점재하시험을 실시하였고, 직경방향의 점재하시험에 의하여 양분된 암석시험편을 가지고 직경 대 높이의 비가 대부분 1이하가 되도록 원주형으로 절단, 축방향의 점재하시험용 암석시험편을 제작하여 축방향의 점재하시험을 실시하였다(첫째 시험에 의한 영향은 없다고 가정해서 두번째 시험편을 제작함). 점재하시험에

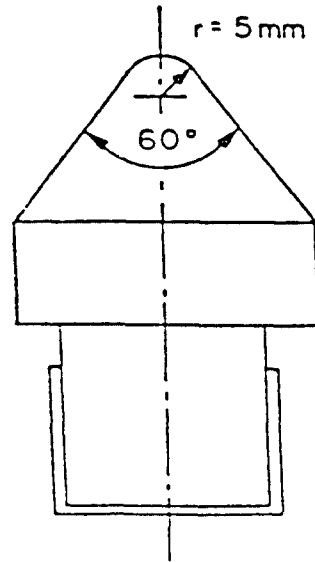


Fig. 2. Platen shape and tip radius.

사용된 압축시험기는 30톤 용량의 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM., Dong Ah Testing Machine, Co.)를 사용하였고 원추형의 재하장치는 아래와 같이 제작하여 사용하였다. (Fig. 2)

3. 실험결과

자연 함수 상태의 조건에서 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 제작된 46개의 일축압축시험용 암석시험편의 단위중량을 측정된 결과, 단위중량의 분포범위는 2.491~2.653 g/cm³ 이며 평균 2.574 g/cm³ 이었다.

P파 전파속도 측정에 이용된 암석시험편은 일축압축 시험용으로 제작된 46 개의 암석시험편이며 P파 전파속도를 측정된 결과, P파 전파속도의 분포범위는 3,250~5,310 m/sec 이며 평균 4.384 m/sec 이었다.

일축압축강도(S_{c1})의 분포범위는 820~2,030 kgf/cm²이며, 평균 1,266 kgf/cm²이었다. 또한, 50%의 응력수준에서 계산된 점선탄성계수의 분포범위는 3.34~5.85 kgf/cm²이며 평균 4.30×10^5 kgf/cm² 이었다.

압열인장시험에 의해 얻어진 압열인장강도의 분포범위는 54~106 kgf/cm² 이며 평균 80 kgf/cm²이었다.

본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료를 이용, 직경방향의 점재하시험에서 얻은 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 과 축방향의 점재하시험에서 얻은 수정 점재하

Table 1. Average, range and standard deviation values each of the test results.

Test	RAG ⁸⁾	AVG ⁹⁾	STD ¹⁰⁾
$\gamma^{1)}$	2,491~2,653	2,574	0.032
$V_p^{2)}$	3,250~5,310	4,384	463
$S_{c1}^{3)}$	820~2,030	1,266	277
$S_t^{4)}$	54~106	80	11
$E_{50}^{5)}$	3.34~5.85	4.30	0.61
$I_{sa}(50)^{6)}$	22~97	60	14
$I_{sd}(50)^{7)}$	28~77	56	14

- ¹⁾ Unit weight (g/cm^3), ²⁾ P-wave velocity (m/sec),
³⁾ Computed uniaxial compressive strength with L/D of 1 (kgf/cm^2),
⁴⁾ Observed brazilian tensile strength (kgf/cm^2),
⁵⁾ Tangent Young's modulus ($\times 10^5 kgf/cm^2$),
⁶⁾ Size corrected point-load strength index in the axial test with D=50 mm(kgf/cm^2),
⁷⁾ Size corrected point-load strength index in the diametral test with D=50 mm(kgf/cm^2),
⁸⁾ Range, ⁹⁾ Average, ¹⁰⁾ Standard deviation

강도지수 [$I_{sd}(50)$]를 정리하였다. 계산된 $I_{sd}(50)$ 의 분포 범위는 28~77 kgf/cm^2 이며 평균 56 kgf/cm^2 이었다. 또한, $I_{sa}(50)$ 의 분포범위는 28~97 kgf/cm^2 이며 평균 60 kgf/cm^2 이었다.

이상의 시험결과를 정리하면 Table 1과 같다.

4. 고 찰

암석의 기본 물성으로 단위중량, P파 전파속도 등을 측정하였고 역학적 성질로서 일축압축강도, 압열인장강도 및 점재하강도지수 등을 구하였다. 얻어진 각 기본물성 및 역학적성질사이에는 다음과 같은 상호관계가 있다고 생각된다.

4.1 점재하강도지수들의 상호관계

Bieniawski(1975)⁸⁾는 직경방향, 축방향 및 불규칙 압괴 등의 점재하시험을 실시하여 각각의 시험에서 얻어진 점재하강도지수들을 비교, 직경방향의 점재하시험이 다른 점재하시험들보다 간편할 뿐만 아니라 직경방향의 점재하시험에서 얻어진 점재하강도지수가 암석 시험편의 형태 및 크기효과의 영향을 덜 받는다고 발표하였다.

따라서, 본 연구에서도 직경방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]와 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]의 비교 및

평가를 실시하였다. 본 연구에서는 거의 균질, 등방성의 암석으로 간주할 수 있는 화강암류 시추코아의 암석시료에서 점재하시험을 수행하였으며 얻어진 직경방향의 수정 점재하강도 [$I_{sd}(50)$]와 축방향의 수정 점재하강도 지수 [$I_{sa}(50)$]를 비교하여 볼 때(Table 1). 직경방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]의 분포범위는 28~77 kgf/cm^2 이고, 축방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]의 분포 범위는 22~97 kgf/cm^2 으로 직경방향 및 축방향의 수정 점재하강도지수는 서로 다른 강도의 분포범위를 나타내며 축방향의 수정 점재하강도지수가 보다 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 것이 관찰되었다(Table 1). 따라서 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수에 의하여 일축압축강도를 추정, 암반의 강도분류를 실시할 때는 등방성이라고 간주되어지는 암종에서도 재하의 방향 즉, 직경방향 및 축방향에 따라 서로 다른 수정 점재하강도지수의 분포를 보이므로 강도의 분포특성을 고려하여 암반의 강도분류를 실시해야 할 것으로 사료된다.

모든 암석내에는 어느 정도의 이방성이 존재하며 이러한 이방성의 역학적성질은 강도시험에서 취약면의 방향과 재하방향에 따라 얻어지는 강도가 달라지므로 암석의 강도분류에 차이를 가져온다(Broch, 1983)¹⁰⁾. 또한, 점재하시험에서 취약면의 영향에 따라 나타나는 점재하강도 이방성지수(Point-load strength anisotropy index, $I_a(50)$)는 암석시험편에 존재하는 절리 및 엇리 등의 취약면에 평행방향으로 측정된 수정 점재하강도지수와 직각방향으로 측정된 수정 점재하강도지수의 비, 즉 최대 수정 점재하강도지수에 대한 최소수정 점재하강도지수의 비 [$I_a(50)=I_{sa}(50) \text{ Max.} / I_{sd}(50) \text{ Min.}$]로 표시하며, 일반적으로 암석의 점재하강도 이방성지수 [$I_a(50)$]는 1.005~5.7의 분포범위를 보인다(Greminger, 1982)²⁷⁾.

본 연구에 사용한 시추코아에 제한성이 있었기 때문에 정확한 뜻에서의 점재하강도 이방성지수는 아니었지만, 시추코아 축방향과 그에 직각되는 방향의 값을 가지고 점재하강도 이방성지수로 간주하였다.

따라서 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 점재하시험에 의한 점재하강도 이방성지수 [$I_a(50)$]를 계산하여 보았다(Table 2). Table 2는 직경방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]와 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]에서 계산된 [$I_a(50)=I_{sa}(50)/I_{sd}(50)$] 점재하강도 이방성지수 [$I_a(50)$]를 정리한 것이다. 그리고 직

Table 2. Size corrected point-load strength index each of the tests.

S.N ¹⁾	$I_{sa}(50)^{2)}$	$I_{sd}(50)^{3)}$	$I_a(50)^{4)}$
1	69	65	1.06
2	65	69	0.94
3	85	70	1.21
4	72	74	0.97
5	71	68	1.04
6	76	57	1.33
7	86	73	1.18
8	65	70	0.93
9	86	75	1.15
10	76	77	0.99
11	67	62	1.08
12	58	58	1.00
13	69	66	1.05
14	56	54	1.04
15	67	59	1.14
16	63	67	0.94
17	53	51	1.04
18	76	72	1.06
19	55	62	0.89
20	72	69	1.04
21	59	61	0.97
22	45	39	1.15
23	59	59	1.00
24	53	53	1.00
25	63	64	0.98
26	54	62	0.87
27	63	66	0.95
28	62	65	0.95
29	53	55	0.96
30	48	39	1.23
31	45	29	1.55
32	69	63	1.10
33	54	56	0.96
34	47	30	1.57
35	69	65	1.06
36	35	28	1.25
37	54	51	1.06
38	40	37	1.08
39	50	28	1.79
40	66	69	0.96
41	51	35	1.46
42	46	42	1.10
43	44	36	1.22
44	64	69	0.93
45	40	37	1.08
46	56	42	1.33
RAG ⁵⁾	35~86	28~77	0.87~1.79
AVG ⁶⁾	60	56	1.10
STD ⁷⁾	12	14	0.19

¹⁾ Sample number
²⁾ Size corrected point-load strength in the strength in the axial test with D=50 mm(kgf/cm²),
³⁾ Size corrected point-load strength in the diametral test with D=50 mm(kgf/cm²),
⁴⁾ Point-load strength anisotropy index [$I_{sa}(50)/I_{sd}(50)$],
⁵⁾ Range, ⁶⁾ Average, ⁷⁾ Standard deviation

경방향의 점재하시험에서 파괴된 두 개의 암석시험편을 이용, 축방향의 점재하시험을 실시하여 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]를 얻었으므로(Table 2) $I_{sa}(50)$ 은 두 개의 축방향의 점재하시험용 암석시험편에서 얻은 축방향의 점재하강도지수(I_s)의 산술평균으로써 계산하였다(Table 2). Table 2에서 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 점재하강도 이방성지수 [$I_a(50)$]의 분포범위는 0.87~1.79로 넓은 분포범위를 보이지만 평균 1.10으로 거의 이방성을 나타내지 않는다. 직경방향과 축방향의 수정 점재하강도지수 상호 간에 나타나는 관계는 Fig. 3과 같고, 직경방향과 축방향의 수정 점재하강도지수의 상호 상관관계에 있어서 상관도는 $r=0.86$ 으로 등방성을 나타내는 $I_a(50)=1$ 의 직선에 거의 비례관계로 배열된다. 이들의 비교로부터 $I_{sa}(50)=0.74I_{sd}(50)+18.55$ 의 관계식을 산출하였다.

일반적으로 시추코아의 암석시료에서 강도특성에 대한 이방성의 정도는 취약면의 법선방향과 코아시료의 축과 이루는 각 즉, 염리 및 절리면의 경사각(β)의 크기에 영향을 받으며 축과 취약면이 이루는 각이 30°~60°범위에서 가장 크게 영향을 받는다고 하였다(Greminger, 1982 and Broch, 1983)²⁷⁾. 또한, 시추방향은 취약면과 직각을 이룰 때 가장 좋은 실험 결과를 얻을 수 있으므로 가능하면 취약면과 직각을 이루는 방향으로 실시되어야 한다.

따라서 시추방향과 취약면의 법선방향이 30°를 초과

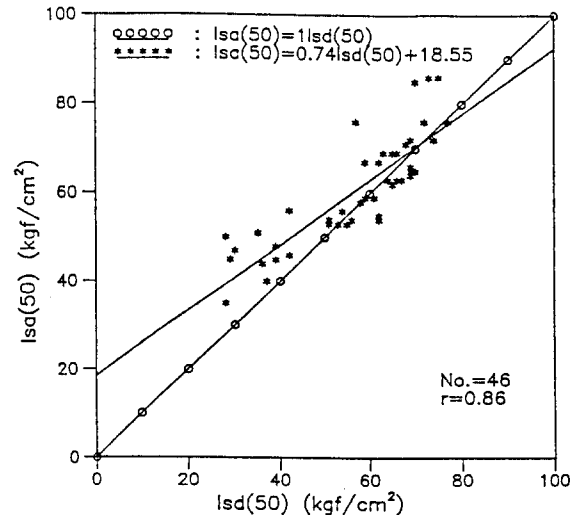


Fig. 3. The variation of point-load strength anisotropy index in granitic rock samples.

하지 않아야 한다(ISRM, 1985)¹⁴⁾. 그러나, 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서는 시추방향에 따른 절리면의 각(β)을 별도로 측정하지 못하여 층리 및 절리 등과 같은 취약면이 점재하강도지수에 끼치는 영향을 연구하지 못하였다.

4.2 P파 전파속도와 단위중량과의 비교

물성 사이에 나타나는 일반적인 상관관계는 직선관계, 곡선관계 및 Zone의 형태로 분류될 수 있다. 그러나 이론적으로 양호한 상관관계가 기대되는 몇 개의 특정 물성 간의 관계를 제외한 대부분의 경우는 Zone의 형태를 보인다(Juss and Huber, 1961)¹⁷⁾. 또한, 선택되는 물리적 특성치는 물리적 특성치의 종류에 의해서 상호관계를 나타내는 상관도가 크게 달라지며 암석의 종류에 따라서도 큰 차이를 보인다. 따라서, 일반적으로 양호한 상관관계가 나타나는 P파 전파속도와 단위중량과의 비교를 실시하였다(Fig. 4). Fig. 4에서 자료의 흩어짐이 있으나 P파 전파속도와 단위중량과의 상호관계에 있어서 상관도 $r=0.81$ 로 비교적 양호하게 나타나고 있다. 대체로 단위중량의 증가에 따라 P파 전파속도도 다소 증가하는 경향을 나타내며 P파 전파속도와 단위중량과의 비교로부터 $UW = 5.70 \times 10^{-5} V_p + 2.32$ 의 관계식을 산출하였다.

4.3 P파 전파속도와 수정 점재하강도지수와와의 비교

일반적으로 탄성과 전파속도는 암석의 종류, 조직,

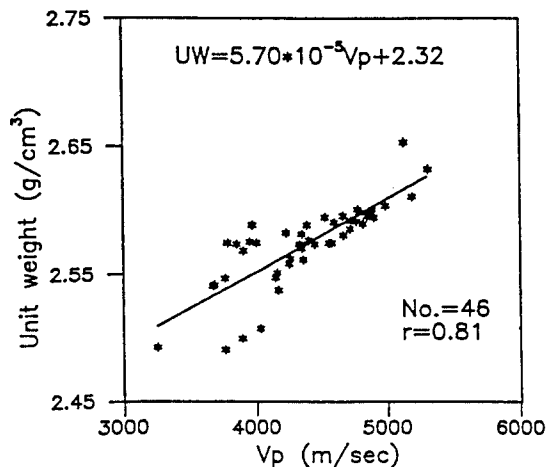
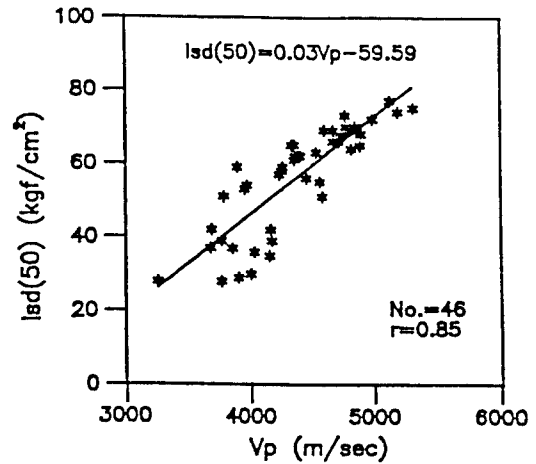


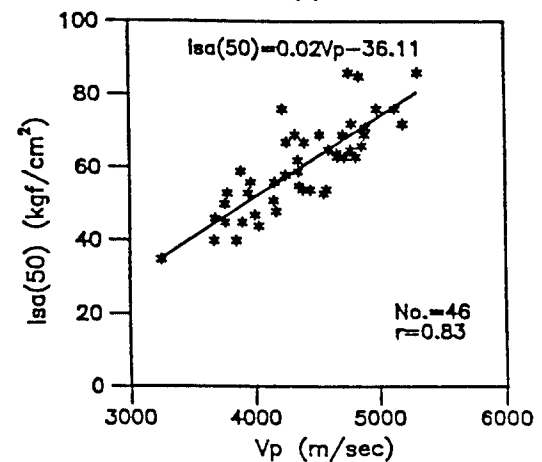
Fig. 4. The relationship between P-wave velocity and unit weight in granitic rock samples.

밀도, 공극률, 이방성, 함수 그리고 온도 등에 의하여 크게 영향을 받는다(Lama and Vutukuri, 1978)¹⁹⁾. Lama and Vutukuri (1978) 등에 의하면 이방성 암석은 절리의 수평방향에 대한 속도와 수직방향에 대한 탄성과 전파속도가 다르다고 하였다.

따라서 본 연구에서도 P파 전파속도와 직경방향 및 축방향의 점재하시험에서 구한 각각의 수정 점재하강도지수의 비교를 실시하여 보았다(Fig. 5). Fig. 5의 (A)는 P파 전파속도와 직경방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도[$I_{sd}(50)$]와의 관계이고, (B)이고 P파 전파속도와 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지



(A)



(B)

Fig. 5. The relationship between P-wave velocity and size corrected point-load strength index, (A) in the diametral test and (B) in the axial test.

수 $[I_{sa}(50)]$ 와의 관계이다. Fig. 5의 (A)와 (B)에서 P파 전파속도에 대하여 직경방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도 $[I_{sd}(50)]$ 의 자료가 흩어짐이 심하며 P파 전파속도와 축방향의 점재하시험에서 얻어진 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 의 자료에서 양호한 분포를 보이고 있다. 이는 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 직경방향으로 발달된 절리들이 것이 다수 관찰되었으며, 이처럼 P파 전파속도 측정방향에 수직으로 발달된 절리들이 P파 전파속도의 진행에 불리한 영향을 끼쳐 P파 전파속도와 직경방향의 점재하시험에서 얻어진 수정 점재하강도 $[I_{sd}(50)]$ 의 비교에서 자료의 흩어짐이 나타나고 있는 것으로 사료된다. Fig. 5의 (A)와 (B)의 상호관계에 있어서 상관도는 직경방향의 수정 점재하강도 $[I_{sd}(50)]$ 에서 $r=0.85$ 이고, 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에서는 $r=0.83$ 으로 비교적 높게 나타났다. 이들의 비교로부터 $I_{sd}(50)=0.03V_p - 59.59$, $I_{sa}(50)=0.02V_p - 36.11$ 의 관계식을 산출하였다. 대체적으로 P파 전파속도의 증가와 더불어 각각의 수정 점재하강도 지수가 증가하는 경향을 보인다.

4.4 수정 점재하강도지수와 일축압축강도와의 비교

일축압축시험은 암석의 강도분류를 위해 널리 이용되고 있으나 암석시험편의 성형에 대한 어려움과 실내 시험에만 국한되는 제약성을 갖고 있다. 이러한 점을 고려하여 실험실에서 정형된 암석시험편 뿐만 아니라 현장에서 비정형 암피 상태로 신속하고 경제적으로 점재하시험을 수행, 원위치 암반의 공학적 강도분류를 실시하는 데 필요한 일축압축강도를 추정하는 지표로 이용할 수 있도록 점재하시험법을 발전시켰다[International Society for Rock Mechanics(ISRM), 1985]. 이와 같은 견지에서 점재하강도지수에 의한 일축압축강도를 추정하는 실험적 관계식은 Broch and Franklin (1972)⁹⁾ 등에 의해 확인된 바 있다 (Table 3). Table 3에서 Broch and Franklin 등이 발표한 관계식은 이방성 암석에서 일축압축강도와 50 mm 크기의 코아가 갖는 수정 점재하강도지수에서 구한 관계식이고, Bieniawski는 직경 54 mm 코아를 이용해서 점재하 시험과 Broch and Franklin 등의 관계식을 검토하면서 일축압축강도는 수정 점재하강도지수의 23배에 해당된다고 수정하였다. 또한, Hassani 등은 50 mm 크기의 코아부터 서로 다른 크기를 갖는 여러 종류의 코아까지 많은 수의 암석 시료에서 점재하시험을 수행, 크기보정차트(size corre-

lation chart)를 개발하였으며 이 크기보정차트에 의하여 수정 점재하강도지수를 구하고 일축압축강도는 수정 점재하강도지수의 29배에 달한다고 발표하였다. 그리고 D'Andrea 등은 25 mm 크기의 코아를 이용하여 크기보정을 실시, 일축압축강도는 수정 점재하강도지수의 약 15배라는 관계식을 발표하였다.

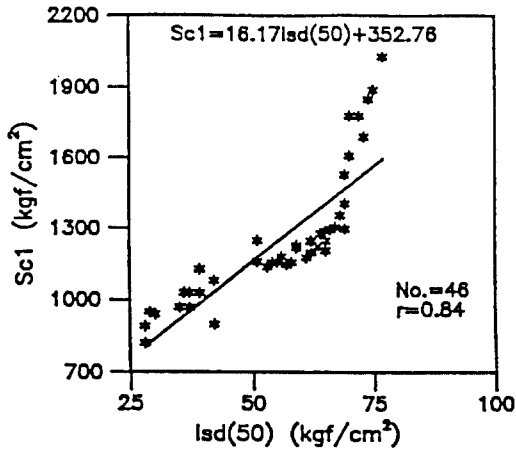
따라서 본 연구 대상 화강암류 시추 코아의 암석시료를 이용, 직경방향 및 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수와 일축압축강도(S_{c1})와의 비교를 실시하였다. 직경방향 및 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수와 일축압축강도(S_{c1})와의 관계는 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 (A)는 직경방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 와 일축압축강도(S_{c1})와의 관계이고, Fig. 6의 (B)는 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 와 일축압축강도(S_{c1})와의 관계이다. 직경방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 와 일축압축강도(S_{c1}) 및 축방향의 점재하시험에서 구한 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 와 일축압축강도(S_{c1})와의 관계에서, 일축압축강도(S_{c1})는 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에서 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, Fig. 6의 (A)에서 일축압축강도(S_{c1})와 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 는 bilinear의 관계를 나타낸다. 이런 현상의원인으로는 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 직경방향의 절리들이 발달하고 있는 것이 다수 관찰되었는데, 이러한 취약면의 특성이 직경방향 및 축방향의 수정 점재하강도지수에 영향을 끼쳐 나타나는 현상으로 사료된다.

그리고 P파 전파속도와 직경방향 및 축방향의 수정

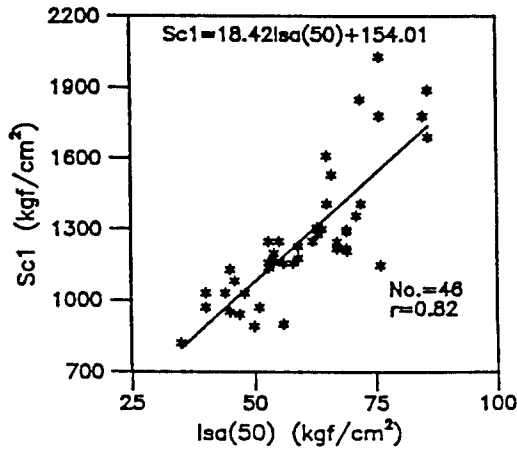
Table 3. Correlations for uniaxial compressive and tensile strength.

Reference	Predictive equation
Broch and Franklin (1972) ⁹⁾	$S_c=24I_{sa}(50)$
Bieniawski (1975) ⁶⁾	$S_c=23I_{sa}(50)$
Hassani <i>et al.</i> (1980) ²⁹⁾	$S_c=29I_{sa}(50)$
D'Andrea <i>et al.</i> (1964) ²⁵⁾	$S_c=15.3I_{sa}(50)+16.3$
Hassani <i>et al.</i> (1979) ²⁶⁾	$S_c=10.5S_1+1.2$
Szlavin (1974) ¹³⁾	$S_c=3.6S_1+15.2$
Hobbs (1964) ¹⁴⁾	$S_c=2.84S_1-3.34$
This work	$S_c=18.42I_{sa}(50)+154.01$
This work	$S_c=16.17I_{sd}(50)+352.76$
This work	$S_c=20.29S_1-349.37$

* In this work, stress unit is kgf/cm^2 , but other works adopted MPa



(A)



(B)

Fig. 6. The relationship between uniaxial compressive strength with L/D of 1 and size corrected point-load strength index, (A) in the diametral test and (B) in the axial test.

점재하강도지수와와의 비교에서, 동일한 현상으로 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 의 분포가 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 의 분포보다 다소 흩어짐이 심하게 나타나고 있는 것이 관찰된다(Fig. 4). Fig. 6의 (A) 및 (B)에서 일축압축강도(S_{c1})와 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 및 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 와의 상호 상관관계에 있어서 상관도는 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 에서 $r=0.84$, 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에서 $r=0.82$ 로 양호하게 나타나고 있다. 이들의 비교로부터 일축압축강도(S_{c1})와 직경방향의 수정 점재하강도지수

$[I_{sd}(50)]$ 에서 $S_{c1}=16.17I_{sd}+352.76$, 일축압축강도(S_{c1})와 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에서 $S_{c1}=18.42I_{sa}+154.01$ 의 관계식을 얻었다.

4.5 일축압축강도와 압열인장강도와의 비교

직접인장시험은 암석시험편의 제작이 까다로울 뿐만 아니라 제작된 직접인장용 암석시험편에 균등한 하중을 가하기 어려워 응력집중점이 발생하는 등의 이유로 간접인장시험에 의하여 인장강도를 평가하는 시험방법들이 개발되었다. 또한, Hassani *et al* (1979)²⁸⁾, Szlavín (1974)²¹⁾ 및 Hobbs (1964)³⁰⁾ 등은 일축압축강도와 간접인장강도 사이의 실험적 관계식을 발표하였다 (Table 3). Table 3에서 일축압축강도와 압열인장강도 사이의 선형관계식은 간접인장시험방법에 크게 의존하고 있다. Hassani 등의 관계식은 압열인장시험에 의하여 구한 선형관계식이고, Szlavín 및 Hobbs 등의 관계식은 링인장시험에 의하여 일축압축강도와 간접인장강도사이의 관계식을 구한 것이다.

따라서, 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료를 이용, 일축압축강도와 압열인장강도와의 비교를 실시하였다. 일축압축강도(S_{c1})와 압열인장강도와의 관계는 Fig. 7과 같다. 일축압축강도(S_{c1})와 압열인장강도의 상호 상관관계에서 상관도는 $r=0.84$ 이며 압열인장강도의 증가와 더불어 일축압축강도(S_{c1})도 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 이들의 비교로부터 일축압축강도(S_{c1})와 압열인장강도에서 $S_{c1}=20.29 St - 349.37$ 의 관계식을 얻었다.

Table 3의 일축압축강도와 압열인장강도 사이의 선형회귀식과 본 연구의 압열인장용 암석시험편을 이용하여 구한 선형회귀식의 비교에서 양호한 결과를 얻지 못하였다. 따라서 일축압축강도와 인장강도의 비교 연구에서는 인장시험의 종류에 의하여 추정되는 일축압축강도의 강도특성이 달라질 수 있으므로 인장시험의 종류에 따른 강도특성도 고려하여야만 할 것이 사료된다.

4.6 수정 점재하강도지수와 압열인장강도와의 비교

점재하시험에서 암석시료 대부분의 파괴양상이 양재하점 사이를 연결하는 직선을 포함하는 면에서 파단되기 때문에 점재하강도지수는 인장강도(압열인장강도)와 밀접하게 관련된 양으로 간주할 수 있다 (平松良雄, 1965)⁶⁾.

따라서 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료

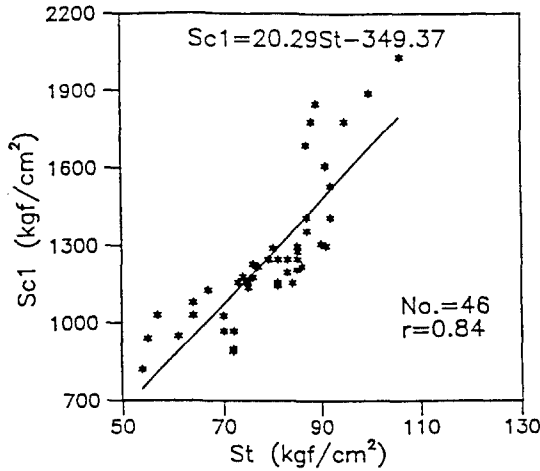
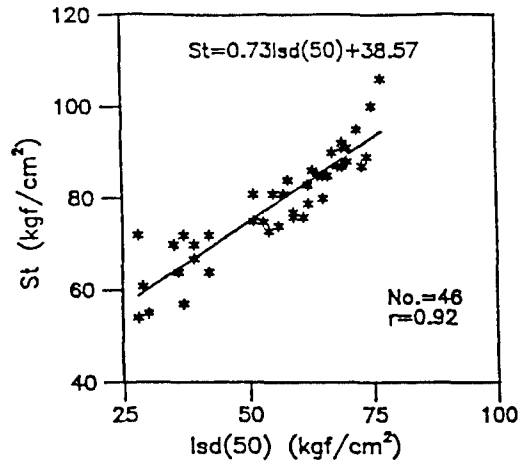


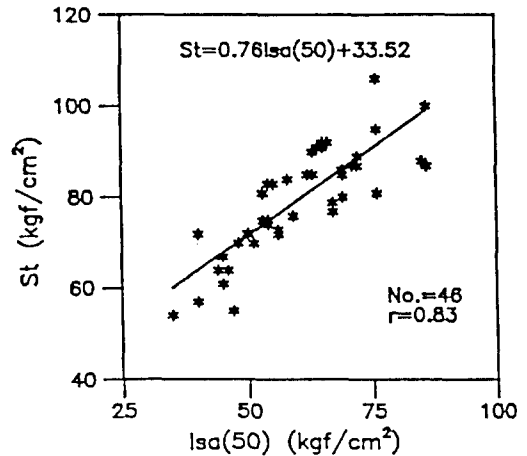
Fig. 7. The relationship between brazilian tensile strength and uniaxial compressive strength with L/D of 1.

를 이용, 압열인장강도와 직경방향 및 축방향의 점재하 시험에서 구한 수정 점재하강도지수와와의 비교를 실시하였다. 직경방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$] 및 축방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]와 압열인장강도와의 관계는 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 (A)는 직경방향의 점재하 시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]와 압열인장강도와의 관계이고, Fig. 8의 (B)는 축방향의 점재하 시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]와 압열인장강도와의 관계이다. 직경방향의 점재하 시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]와 압열인장강도 및 축방향의 점재하 시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]와 압열인장강도와의 관계에서, 압열인장강도는 직경방향의 점재하 시험에서 구한 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]에서 양호한 자료의 분포를 보인다.

이는 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 직경방향으로 발달된 절리들이 다수 관찰되었는데, 이러한 취약면의 분포특성이 동일한 재하방향에서 얻어진 압열인장강도와 직경방향의 수정 점재하강도지수에 영향을 끼쳐 나타나는 현상으로 사료된다. Fig. 8(A) 및 (B)의 수정 점재하강도지수와 압열인장강도 사이의 상호 상관관계에 있어서 상관도는 직경방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]에서 $r=0.83$ 으로 상당히 높게 나타났다. 이들의 비교로부터 직경방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sd}(50)$]와 압열인장강도에서 $S_t = 0.73I_{sd} + 38.57$, 축방향의 수정 점재하강도지수 [$I_{sa}(50)$]와 압열인장강도



(A)



(B)

Fig. 8. The relationship between brazilian tensile strength and size corrected point-load strength index, (A) in the diametral test and (B) in the axial test.

는 $S_t = 0.76I_{sa} + 33.52$ 의 관계식을 얻었다.

5. 결 론

화강암류 시추코아의 암석시료에서 기본물성으로 단위중량과 P와 전파속도 등을 구하였고, 역학적 성질로는 일축압축강도, 압열인장강도 및 점재하강도지수 등을 구하였다. 이들 각각의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 의 분포 범위는 $28 \sim 77 \text{ kgf/cm}^2$ 이고 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 의 분포범위는 $22 \sim 97 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 가 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있다. 이러한 원인으로는 본 연구 대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 직경방향으로 발달된 취약면의 분포방향이 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에 영향을 끼쳐 나타난 현상으로 사료된다. 또한, 점재하강도 이방성지수 $[I_a(50)]$ 의 분포범위는 0.87~1.79로 넓은 범위에 걸쳐 분포하지만 평균 1.10으로 거의 등방성을 나타내며 $I_a(50)=1$ 의 선형회귀식에 거의 비례관계로 배열된다.

2. P파 전파속도와 단위중량과의 비교에서 상관도는 $r=0.81$ 이며 $\gamma=5.70 \times 10^{-5}D+2.32$ 의 관계식을 얻었다. 또한, 단위중량과의 증가와 더불어 P파 전파속도가 다소 증가하는 경향을 보인다.

3. P파 전파속도와 직경방향 및 축방향의 수정 점재하강도지수의 비교에서 P파 전파속도는 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에서 양호한 자료의 분포를 보인다. 이런 원인으로는 본 연구대상 화강암류 시추코아의 암석시료에서 직경방향으로 발달된 취약면이 P파 전파속도의 진행에 불리한 영향을 끼쳐 나타난 현상으로 사료된다. 이들의 비교로부터 $I_{sd}(50)=0.03 V_p - 59.59$, $I_{sa}(50)=0.02 V_p - 36.11$ 의 관계식을 얻었다.

4. 축방향 및 직경방향의 수정 점재하강도지수에서 일축압축강도를 추정하여 볼 때, 축방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sa}(50)]$ 에서 일축압축강도 (S_{c1})가 다소 증가하는 경향을 보이고 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 는 bilinear의 특성을 보인다. 이런 원인으로는 본 연구 대상의 화강암류 시추코아의 암석시료에서 직경방향으로 발달하고 있는 취약면의 분포방향이 직경방향 및 축방향의 수정 점재하강도지수에 영향을 끼쳐 나타나는 현상으로 추정된다. 이들의 비교로부터 $S_{c1}=16.17I_{sd}(50)+352.76$, $S_{c1}=18.427I_{sa}(50)+154.01$ 의 관계식을 얻었다.

5. 일축압축강도(S_{c1})와 압열인장강도와와의 비교에서 상관도는 $r=0.84$ 로 높게 나타나며, $S_{c1}=20.29 S_t-349.37$ 의 관계식을 얻었다.

6. 압열인장강도와 직경방향 및 축방향의 수정 점재하강도지수의 비교에서 압열인장강도는 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 에서 양호한 자료의 분포를 보인다. 이런 원인으로는 본 연구 대상 화강암류 시추

코아의 암석시료에서 직경방향으로 발달된 취약면의 분포특성이 동일한 재하방향에서 얻어진 압열인장강도와 직경방향의 수정 점재하강도지수 $[I_{sd}(50)]$ 에 영향을 끼쳐 나타나는 현상으로 사료된다. 이들의 비교로부터 $S_t=0.731I_{sd}(50)+38.57$, $S_t=0.76I_{sa}(50)+33.52$ 의 관계식을 얻었다.

사 사

본 연구는 1993년도 인하학원 연구비로 실시되었다.

참 고 문 헌

- 1) 西松裕一, 山口梅太郎, 1992, 岩石力學入門, p.126-136.
- 2) 尹志善, 1990, 岩盤力學, 歐美書館, p.83-90.
- 3) 日本土質工學會, 1991, 岩の調査と試験, p.483-499.
- 4) 地田和彦, 1967, 彈性波探査と土木地質, 物理探査20(1), p.22-34.
- 5) 齊藤德美, 阿部 司, 九里尙一, 1974, 火山岩の風化に關する研究(2) — 彈性波速度, 見捧密度, 有效間隙率, 一軸壓軸強度さ相互の關について —, 物理探査 第27卷 第1號 p.16-26.
- 6) 平松良雄 他, 1965, 非整形試驗片による岩石の引張り強さの迅速試驗, 日本鑛業會誌, Vol. 81, No. 932
- 7) ASTM, 1983, Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, ASTM standard D 2845-83.
- 8) Bieniawski, Z.T., 1975, Point-load test in geotechnical practice, Eng. Geol. Vol 9, No. 1, p.1-11.
- 9) Broch, E. & Franklin, J.A., 1972, Point-load strength test, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 9, No. 6, p.669-697.
- 10) Brock, E., 1983, Estimation of strength anisotropy using the point-load test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No 4, p.181-187.
- 11) Broek, B., 1982, Elementary engineering fracture mechanics, 3rd. Ed., Martinus Nijhoff Pub.
- 12) Hoek, E, 1977, Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organization, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 14, p.93-101
- 13) ISRM, 1979, Suggested methods for det-

- ermining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and Slake-durability index properties, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, No. 2, p.141-156
- 14) ISRM, 1985, Suggested methods for determining point-load strength, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 22, No. 2, p.53-59
 - 15) Jager, J.C., Cook, N.G.W., 1976, *Fundamentals of rock mechanics* Chapman, & Hall, p.73-196
 - 16) John, A.F., Maurice, B.D., 1989, *Rock engineering*, McGraw-Hill International edition civil engineering series, p.600
 - 17) Judd, W. and Huber, C., 1961, Correlation of rock properties by statistical method, *Int. Symp. Mining Res.*, Missouri Sch. Mines, Rolla Mo
 - 18) King, M.S., 1966k, Wave velocities in rock as a function of changes in overburden pressure and pore fluid saturations, *Geophysics*, Vol. 31, No. 1, p.50-73.
 - 19) Lama, R.D., vutukuri, V.S., 1978, *Handbook on mechanical properties of rocks*, Trans Tech. Publications, Vol. 2, p.236-307.
 - 20) Smorodinov, M.I., Motovilov, E.A. and Volkov, VoA., 1970, Determination of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks, *Proc. 2nd Congr. ISRM*, Vol. 2, p.35-37.
 - 21) Szlavín, J., 1974, Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory tests, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 11, No. 2, p 53-59.
 - 22) Brook, N., 1980, Technical Note : Size correction of point-load testing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, p.231-235.
 - 23) Brook, N., 1985, The equivalent core diameter method of size and shape correction in point-load testing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanic Abstr.*, Vol 22, No. 2, p.61-70.
 - 24) Brown, E.T., 1981, Rock characterization testing & monitoring, *ISRM suggested methods*, p. 71-121.
 - 25) D'Andrea, D.V., Fisher, R.L. & Fogelson, D.E., 1964, Prediction of compression strength from other rock properties, *Colo. Sch. Mines Q.* 59 (4B), p.623-640.
 - 26) Fujinaga, Y., Katoh, Y., 1988, A Study on physical properties of anisotropic rocks, *Proceedings of the 78th SEGJ Conference*, p.269-271.
 - 27) Greminger, M., 1982, Technical Note : Experimental studies of the influence of rock anisotropy on size and shape effects in point-load testing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, No. 2, p.241-246.
 - 28) Hassani, F.P., Scoble, M.J. & Whittaker, M.J., 1979, Strength characteristics of rocks associated with opencast coal mining in U.K., *Proc. 20th U.S. Symp.on rock mechanics*, p.347-356.
 - 29) Hassani, F.P., Scoble, M.J. & Whittaker, M.J., 1980, Application of point-load index test to strength determination of rock and proposals for new size correction chart, *Proc. 21st U.S. Symp.on rock mechanics*, p.543-564.
 - 30) Hobbs, D.W., 1964, Simple method for assessing uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 1, No. 1, p. 53-59.
 - 31) Hoek, E, Bieniawski, Z.T., 1965, Brittle fracture propagation in rock under compression, *Journal of fracture Mech.*, Vol. 1, p.137-155