

## 대형삼축압축시험을 이용한 북제주현무암 사석재의 강도정수 및 전단거동

### Strength Parameters and Shear Behaviors of North-Cheju Basalt Rubble Using Large-scale Triaxial Test

정 철 민\*<sup>1</sup> Jung, Chul-Min  
김 종 수\*<sup>2</sup> Kim, Jong-Soo  
채 영 수\*<sup>3</sup> Chae, Young-Su

#### Abstract

According to the Korean Design Code for port and harbor facilities, bearing capacity of rubble mound under eccentric and inclined load is calculated by the simplified Bishop method, and strength parameters are recommended to be  $c=0.2\text{kg/cm}^2$  and  $\phi=35^\circ$  for standard rubble if the compressive strength of parent rock is greater than  $300\text{kg/cm}^2$ , according to research results by Junichi Mizukami(1991). But this facts have never been verified in Korea because there was no large-scale triaxial test apparatus until 2000 in Korea. For the first time in Korea, the large-scale triaxial test(sample diameter 30cm ; height 60cm) on the rubble originated from porous basalt rock in North-Cheju was accomplished. Then strength parameters for basalt rubble produced in North-Cheju are recommended to be  $c=0.3\text{kg/cm}^2$  and  $\phi=36^\circ$  if the compressive strength of parent rock is greater than  $400\text{kg/cm}^2$ . And the shear behavior characteristics of rubble, represented as particle breakage and dilatancy, are investigated.

#### 요 지

우리나라 해양수산부(1999) 「항만 및 어항설계기준」에서는 중력식 방파제 또는 중력식 안벽의 기초의 지지력 검토시 Bishop방법을 이용하여 기초의 지지력을 계산하는 것을 표준으로 규정하고, 이 때 사석의 강도정수는 대형삼축압축시험을 이용하여 정하는 것이 가장 합리적이거나 여러가지 여건상 시험이 불가능할 경우에는 일본 항만기술연구소의 「항만기연자료 No. 699(水上, 1991)」를 인용하여 암석의 일축압축강도가  $300\text{kg/cm}^2$  이상이면 점착력  $0.2\text{kg/cm}^2$ , 내부마찰각  $35^\circ$ 는 기대할 수 있다는 결과를 인용·제시하고 있다. 그러나 이에 대한 국내의 어떠한 검증도 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 비교적 일축압축강도가 작은 북제주 다공질 현무암 사석재를 대상으로 국내최초로 대형삼축압축시험(공시체직경: 30cm, 공시체높이: 60cm)을 실시하였다. 시험결과 북제주 현무암 사석재의 일축압축강도가  $400\text{kg/cm}^2$ 보다 클 경우  $c=0.3\text{kg/cm}^2$ ,  $\phi=36^\circ$ 의 강도정수를 사용할 수 있음을 제안하고, 입자파쇄와 다이러턴시로 대표되는 사석재의 전단 특성에 대해서도 고찰하였다.

**Keywords :** Dilatancy, Large-scale compression triaxial test, North-Cheju basalt rubble, Particle breakage, Strength parameters

\*1 정희원, 현대산업개발 토목설계팀 대리 (Member, Assist. Manager, Civil Engrg. Team, Hyundai Development Company, ddang@hyundai-dvp.com)

\*2 정희원, 현대산업개발 토목설계팀 팀장 (Member, General Manager, Civil Engrg. Team, Hyundai Development Company)

\*3 정희원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Suwon)

## 1. 서론

항만구조물 중 중력식 방파제 또는 중력식 안벽에는 자중, 토압, 파력 및 지지력 등의 외력이 작용하고, 편심 또한 경사로 작용되어진다. 이 때문에 기초 지지력의 검토에 있어서는 편심경사 하중에 대한 지지력을 검토하지 않으면 안된다. 이 경우 일반적으로, 중력식 구조물은 기초지반 위에 사석(捨石)마운드가 있는 이층구조로 되어 있다. 이에 대해 「항만 및 어항설계기준(해양수산부, 1999)」에서는 절편법에 의한 원호활동계산의 한 예인 Bishop방법을 이용하여 기초의 지지력을 계산하는 것을 표준으로 규정하고, 이 때 사석의 강도정수는 대형삼축압축시험을 이용하여 정하는 것이 가장 합리적이거나 여러가지 여건상 시험이 불가능할 경우에는 일본 항만기술연구소의 「항만기연자료 No. 699(水上, 1991)」를 인용하여 암석의 일축압축강도가  $300 \text{ kg/cm}^2$  이상이면 점착력  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ , 내부마찰각  $35^\circ$ 는 기대할 수 있다는 결과를 인용·제시하고 있다.

지난 40여년간 세계 각처의 대학교와 용역회사의 연구소에 시료의 직경이 20~130cm의 대형삼축압축시험기가 개발되어 사석(rubble), 석괴(rockfill), 자갈, 모래 등 조립자 건설재료의 전단강도와 변형특성을 연구하는데 크게 기여하게 되었다. 그러나 국내에는 2001년이 되어서야 비로소 대형삼축압축시험기를 보유하게 되었다.

본 연구에서는 일본 항만기술연구소의 제안에 대한 국내의 어떠한 검증도 없고, 북제주지역은 대부분 다공질의 현무암으로 이루어져 있으므로, 국내최초로 중력식 항만구조물설계시 북제주지역의 사석재에 대한 대형삼축압축시험(공시체직경: 30cm, 공시체높이: 60cm)을 실시하여 일본항만기술연구소의 제안과 비교하였고, 북제주 현무암사석재에 대한 강도정수를 제안하였

으며 또한 북제주 현무암사석재의 전단거동을 알아보았다.

## 2. 사석재료의 전단강도 특성

사석이란 막 깬돌 중에서 유수에 견딜 수 있는 중량을 가진 돌로써, 대단히 빈입도이고, 입자가 파쇄되기 쉬운 특성이 있을 뿐만 아니라 밀도, 입자간의 마찰, 다이러턴시, 재배열 및 구속압 등 여러 요인 등에 의하여 영향을 받는다.

### 2.1 전단과정에서의 거동

항만구조물의 시공에 주로 사용되는 사석재에 대해 대형삼축압축시험을 실시하여 얻은 축변형률( $\epsilon_a$ )-축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )-체적변형률( $\epsilon_v$ ) 관계의 일례를 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 축변형률 증가에 따른 축차응력의 증가가 단조롭고 피크가 나타나지 않는다. 이는 입도가 나쁜 사석재료에서 일반적으로 볼 수 있는 시험결과이다. 또한 체적변형률과 축변형률의 관계도 체적은 단조롭게 감소하고 부(負)의 다이러턴시 성향을 나타내고 그 성향은 전단중 변화하지 않는다. 이런 결과는 록필담재료와 같이 입도가 좋고 품질도 양호하고 다짐도 용이한 재료와는 상당히 다른데 그 원인은 사석재의 경우에는 균등계수가 작고 매우 빈배합이라는 것에 기인한다. 입도분포가 나쁘기 때문에 입자간의 접촉점이 적고 입자간의 응력집중이 발생하여 입자파쇄와 재배열이 일어나기 때문이라고 생각된다.

### 2.2 전단강도정수와 구속압의존성

흙의 강도정수는 통상 점착력  $c$ , 내부마찰각  $\phi$ 로써

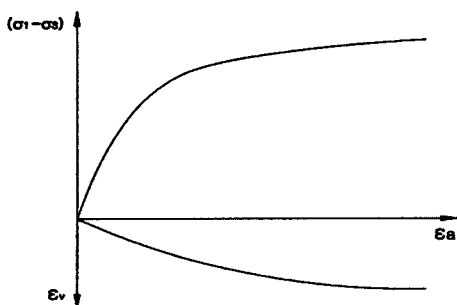


그림 1. 사석재의 축변형률-축차응력-체적변형률 관계곡선

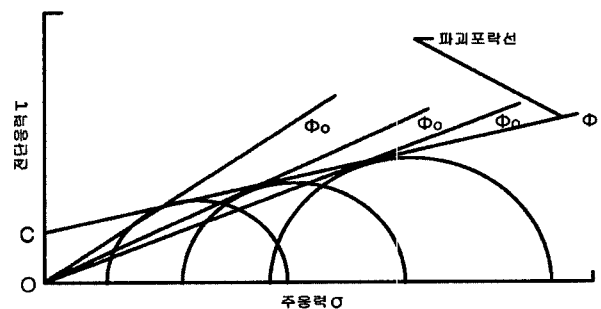


그림 2. 강도정수  $c$ ,  $\phi$ ,  $\phi_0$ 를 구하는 방법

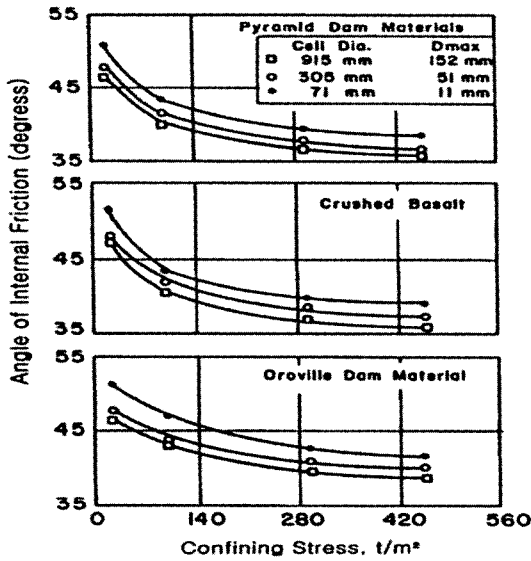


그림 3. 석괴재료의 내부마찰각,  $\phi_0$ 와 구속압의 관계(Marachi et al, 1972)

설계에 이용된다. 일반적으로 항만구조물 설계시 점토는 점착력  $c$ 만, 모래는 내부마찰각  $\phi$ 만의 강도정수를 이용한다. 그러나 편심경사하중을 받고 있는 기초마운드와 같은 경우에는  $c, \phi$  모두를 이용하여 평가하는 것이 일반적이다.

1회의 시험결과에 대한 Mohr응력원에서  $c$ 를 0으로 했을 때의 내부마찰각을  $\phi_0$ 로 정의하여  $c, \phi, \phi_0$ 를 구하는 방법을 그림 2에 제시하였다.

그림 2와 같이 구속압력을 바꾼 수 개의 Mohr응력원에 대해서 포락선을 긋고 그 절편을  $c$ , 경사를  $\tan \phi$ 로 하여  $c, \phi$ 를 구할 수 있다. 이러한  $c, \phi$ 는 같은 시료를 이용하더라도 시험조건에 따라 변하기 때문에 설계조건에 맞는 적절한 시험조건을 선택하여야 한다. 사석재의 경우는 압밀배수시험이 적합하며, 이 때 강도정수는  $c_d, \phi_d$ 로 표기한다.

조립재료에 대한 Mohr의 파괴포락선이 뚜렷한 곡선으로 나타난다는 사실이 많은 연구자들에 의해 발표되었다(Marachi, et al.(1972); Marsal(1967, 1973); Fumagalli, et al.(1970); Leps(1970)). Fumagalli등(1970)은 구속응력이 증가할수록 내부마찰각이 감소한다고 발표하였다. 그들은 자갈질 재료의 거친면과 입자상호간의 맞물림이 파쇄 과정에서 등글게 되고 높은 구속응력하에서 파쇄 과정이 증대된다는 것을 주요 원인으로 설명하였다. Marachi등(1972)은 그림 3을 통해 여러 개의 시료에 대해 입자크기 별로  $\phi_0$ 를 구한 결과, 구속응력의 증가에 따라  $\phi_0$ 값이 감소하는 전형적인 상관관계를 보고하였

다. 이와 같은 구속압의 증가에 대한  $\phi_0$ 의 저하를 구속압의존성이라 말한다. 구속압의존성은 입자파쇄에 의해 발생하는 것으로 해석되고 있다. 이와 같은 문제는 점토의 경우에는 발생하지 않는다. 또한 자갈질 재료의 응력 크기에 따른 전단강도의 영향이 Lee and Seed(1967)에 의해 연구되었으며, 그들은 측정된 내부마찰각이 모식적으로 물리적 마찰, 다이러턴시, 입자파쇄와 재배열의 각성분의 합으로 나타내어진다고 하였다.

### 2.3 전단강도정수와 다이러턴시의 특성

다이러턴시는 입상체가 전단을 받았을 때 체적을 변화시키려고 하는 성질이다. 전단시의 체적이 팽창하는 경우 정(+)으로, 수축하는 경우는 부(-)로 표현한다. 정량적으로는 파괴시의 체적변형성분  $d\epsilon_v$ 와 축변형성분  $d\epsilon_a$ 의 비 ( $-\frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a}$ )로 나타낸다. 이 비를 다이러턴시비라 부르는데, 정(+)이라면 체적팽창경향, 부(-)라면 체적수축경향을 나타낸다. 여기서 경향을 붙인 것은 파괴시의 체적이 전단 개시 시점보다 수축하더라도 그 시점에서 체적이 팽창하려고 한다면 다이러턴시비는 정(+)이 되기 때문이다.

그림 4는 水上등(1991)이 실시한 대형삼축압축시험의 모든 석괴재료에 대해  $\phi_0$ 와 파괴시의 다이러턴시비의 관계를 도시한 것으로  $\phi_0$ 와 다이러턴시비 사이에는 모암의 재료특성에 상관없이 직선적 관계가 있고 다이러턴시가 정(+) 즉 체적팽창경향에 있을수록  $\phi_0$ 가 크게 됨을 알 수 있다. 따라서 파괴시의 다이러턴시비를 알면  $\phi_0$ 를 추정할 수 있다.

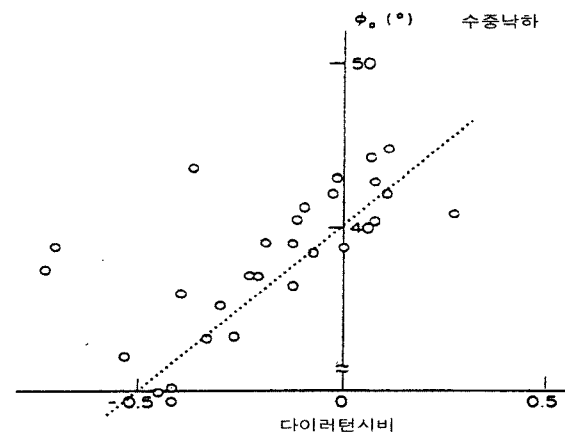


그림 4.  $\phi_0$ 와 파괴시의 다이러턴시비의 관계

## 2.4 전단강도정수와 입자파쇄율

입자파쇄를 정량적으로 나타내기 위해 파쇄전후에서의 입도분포의 변화에 착안한 간편법으로써 Marsal의 파쇄율을 사용한다.

임의체는  $D_k$ 의 시험전의 잔류율과 시험후의 잔류율의 차를  $\Delta W_k$ 로 한다. 입자의 파쇄의 형태에 따라서는  $\Delta W_k$ 는 (+) 또는 (-)의 어느 값이 되지만 (+)의 것만을 더한 양을 Marsal의 입자파쇄율  $B_M$ 으로 하며 식(1)과 같다.

$$B_M = \sum \Delta W_k \quad (1)$$

여기서,  $\Delta W_k > 0$  이다.

그림 5와 그림 6은 水上등(1991)이 실시한 대형삼축 압축시험의 모든 시료에 대해 입자파쇄율  $B_M$ 과 다이러턴시비의 관계 및  $\phi_0$ 와  $B_M$ 의 관계를 각각 도시한 것이다. 편차는 크지만 파괴시의 다이러턴시비가 클수록 입자파쇄율은 작고,  $B_M$ 의 증가에 따라  $\phi_0$ 는 감소한다는 것을 알 수 있다. 이상의 관계에서  $\phi_0$ ,  $B_M$ , 다이러턴시비의 관계를 합하여 생각하면  $\phi_0$ ,  $B_M$ , 다이러턴시비의 사이에는 밀접한 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다. 즉 강도평가에 있어서  $B_M$  또는 다이러턴시비를 비교적 정확히 예측할 수 있다면  $\phi_0$  추정이 가능하여 반

드시 대형삼축시험의 실시를 필요로 하지 않다는 것을 의미한다. 그러나 지금상태에서는  $B_M$ 도 다이러턴시비도 삼축시험을 실시하지 않으면 구할 수 없다.  $B_M$ 에 대해서 모암의 재료특성과 입도분포와의 상관관계가 밀접하다고 판단되기 때문에 여러 가지의 재료시험과의 비교를 더 실시할 필요가 있다고 생각된다.

## 2.5 재료의 특성치에 의한 영향

### (1) 상대밀도

상대밀도(relative density)는 사석 재료의 밀도 차에 의해서 비교를 할 수 있는 물리적인 특성으로 이용된다. 일반적으로 상대밀도가 커짐에 따라 내부마찰각이 증가되는데, Holtz and Gibbs(1956)는 다른 상대밀도를 가진 자갈질토에 대한 시험을 수행하여, 밀도가 더 큰 시료의 포락선이 밀도가 낮은 시료에 대한 포락선보다 더 높다는 것을 제시하였다. Zeller and Wulliman(1957)은 간극률 변화에 따른 뎀의 shell 재료의 전단강도를 비교한 결과 평행한 입경을 사용하여 주어진 입경에 대한 전단강도는 조밀한 상태에서 밀도가 증가할수록 증가하고 더 큰 간극률의 범위하에서는 밀도가 강도에 미치는 영향이 거의 없음을 주장하였다. 다른 논문들 역시 유사한 경향을 나타내었다(Tombs, 1969; Leslie, 1963; Kirkpatrick, 1965).

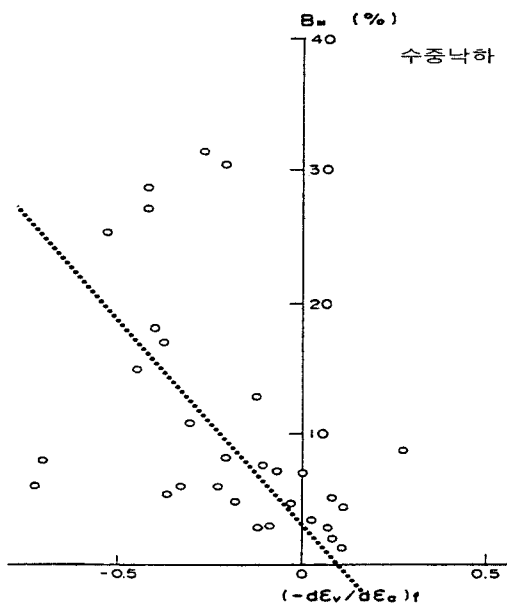


그림 5.  $B_M$ 과  $\left(-\frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_a}\right) f$  관계

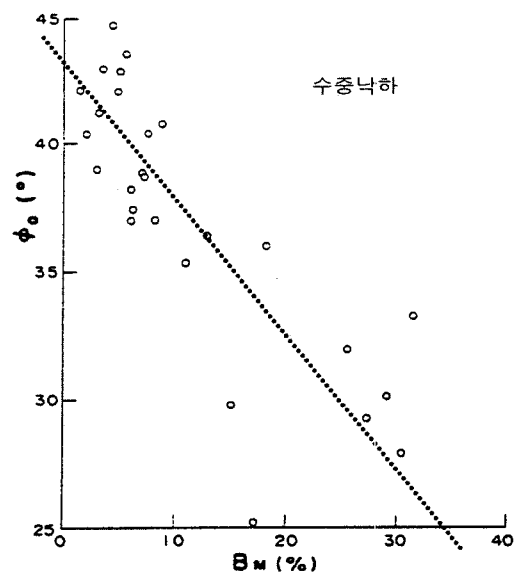


그림 6.  $\phi_0$ 와  $B_M$ 의 관계

표 1. 내부마찰각에 미치는 입자크기 효과에 대한 연구결과 요약

출 처	최대입경/시험방법	결 론
Holtz & Gibbs(1956)	76 mm 자갈질/삼축전단	최대 자갈질 입자는 전단 저항의 영향을 덜 받음.
Zeller & Wulliman(1957)	100 mm /삼축전단	입자의 크기가 감소함에 따라 전단강도는 증가.
Leslie(1963)	76 mm /삼축전단	마찰각에 대한 최대 입경의 영향을 덜 받음.
Kirkpatrick(1965)	2 mm / 삼축전단	입자의 크기가 감소함에 따라 내부마찰각은 증가.
Fumagalli(1969)	20 mm / 삼축전단	입자의 크기가 증가함에 따라 내부마찰각은 증가.
Marachi, et al.(1972)	152 mm /삼축전단	입자의 크기가 감소함에 따라 내부마찰각은 증가.
Charles(1973)	76 mm /삼축전단	입자의 크기가 증가할수록 내부마찰각은 조금 증가.
Valstad & Strom(1976)	76 mm /삼축전단	최대 입경이 증가함에 따라 내부마찰각은 두드러지게 변하지 않음.
Donaghe & Cohen(1978)	51 mm /삼축전단	최대 입경이 증가함에 따라 내부마찰각은 두드러지게 변하지 않음.

(2) 입경

굵은 입자의 영향(실제 구조물에서 흔한 1m 정도)은 실험실에서 실제 입자크기의 실험을 수행할 수가 없으므로 방과제를 비롯한 해양구조물의 공학적인 설계를 어렵게 하는 원인이 된다. 따라서 상사입도법(scaling-down technique)을 사용한 실험결과를 이용하여 실제 크기의 재료에 대한 강도를 추정하는 것이 일반적이다. 많은 연구자들이 전단강도에 입경이 미치는 영향에 관한 연구를 수행해 왔다. 일반적으로 시료를 준비함에 있어 동일한 방법을 사용할 경우, 입경이 증가할수록 내부마찰각은 약간 감소하는 것으로 알려져 있으나 연구자에 따라 일관성을 나타내는 것은 아니다(표 1 참조). 따라서 최대 입경의 영향을 확인하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

(3) 입도분포

Casagrande는 석괴재료의 입도분포(gradation)가 양호하고 각이 질수록(angular) 전단강도가 커서 대형 댐에 사용하는 것이 적합하다고 제안하였다. 내부마찰각에서의 입도의 영향은 몇 명의 연구자들에 의해 보고되었다. Leslie(1963)는 균등계수가 높은 재료일수록 내부마찰각이 크다는 것을 발견했다.

Marsal(1967)은 초기에 간극률이 낮고 입도분포가 좋은 재료에 대하여 전단강도가 커진다고 주장하였다. Leps(1970)는 다양한 종류의 시험 결과의 고찰을 통해, 강도가 높은 재료를 쓰는 것 보다 석괴재료의 입도를 개량하는 것이 주어진 임의의 연직응력하에서 내부마찰각을 증대시킨다는 결론을 주장하였다.

(4) 입자의 형상

입자의 형상은 각기 다른 용어로 표현될 수 있다. 각각의 입자에 대하여 길이, 폭, 깊이의 세 개의 상호 수직

인 방향으로 측정되어진다. 둥근 정도와 구형도(球形度)는 입자의 형상을 묘사하는데 사용할 수 있다. Marsal은 평균 치수와 동일한 지름을 지닌 구체의 체적에 대한 입자의 체적의 비로 정의되는 형상계수의 다른 방법을 제안하였다. Powers(1964)는 균일한 입자의 최대 간극률(porosity)과 윤곽 계수(angularity factor) 사이의 관계를 공식화하였다. Holtz and Gibbs(1956)는 입자의 형상이 내부마찰각에 상당한 영향을 미친다는 것을 발견하였다. Leps(1970)는 다른 모든 요소는 일정하고 입자각이 많이 질수록 내부마찰각이 더 커진다는 것을 밝혀내 동일한 결론을 내렸다.

3. 일본 항만기술연구소의 마운드용 사석재의 강도정수 제안에 대한 고찰

우리나라 「항만 및 어항설계기준(1999, 해양수산부)」에서는 중력식 항만구조물의 사석마운드의 편심경사하중에 대한 지지력계산시 원호활동 절편법인 Bishop법을 이용하는 것을 표준으로 규정하고 있다. 이 때 사석의 강도정수는 대형삼축압축시험을 이용하여 정하는 것이 가장 합리적이거나 여러가지 여건상 시험이 불가능할 경우에는 일본 항만기술연구소의 「항만기연자료 No. 699(1991, 水上)」를 인용하여 암석의 일축압축강도가 300 kg/cm<sup>2</sup> 이상이면 점착력 0.2 kg/cm<sup>2</sup>, 내부마찰각 35°는 기대할 수 있다고 제시하고 있다. 그러나 이 자료는 어디까지나 일본에서 생산된 사석재에 대한 실험결과만을 바탕으로 한 것이므로, 국내에서도 많은 시험을 통한 자료축적으로부터 사석재의 강도정수가 제안되어야 할 것으로 판단된다. 3장에서는 일본 항만기술연구소의 「항만기연자료 No. 699(1991, 水上)」의 시험결과 및 결론을 간단히 언급하고자 한다.

표 2. 시험조건 및 시험결과(水上(1991), 향연자료 No.699)

암종	시료명	초기 상태					압밀과정	축압축과정					강도정수		입자파쇄율 %	일축압축강도 kg/cm <sup>2</sup>
		구속압 kg/cm <sup>2</sup>	습윤 밀도 g/cm <sup>3</sup>	함수비 %	건조밀도 g/cm <sup>3</sup>	간극비		압밀후 간극비	최대주응력차 kg/cm <sup>2</sup>	압축 변형률 %	체적 변형률 %	변형계수 kg/cm <sup>2</sup>	$\phi_0^\circ$	$C_d$ kg/cm <sup>2</sup> $\phi_d^\circ$		
석회암	석회암 I	1.0	1.593	0.09	1.592	0.694	0.646	4.78	10.2	1.74	199	44.8	0.358 38.5	4.3	700	
		2.0	1.626	0.03	1.626	0.659	0.591	8.12	14.6	5.21	153	42.1		4.7		
		4.0	1.631	0.10	1.629	0.655	0.541	14.7	15.0	6.57	206	40.8		8.7		
	석회암 II	1.0	1.354	1.15	1.338	0.956	0.917	4.64	15.1	4.15	94.6	44.3	0.526 33.9	2.8	600	
		2.0	1.340	0.97	1.327	0.973	0.886	6.78	15.5	5.02	102	39.0		4.8		
		4.0	1.342	0.66	1.333	0.964	0.736	12.1	14.8	8.79	149	37.0		8.2		
	석회암 III	1.0	1.484	0.18	1.481	0.821	0.778	4.06	14.0	1.63	106	42.1	0.321 35.6	1.3	700	
		2.0	1.454	0.16	1.452	0.859	0.836	6.78	14.8	5.19	127	39.0		2.8		
		4.0	1.473	0.10	1.472	0.833	0.718	12.4	15.2	15.2	153	37.4		6.2		
화강암	화강암 I	1.0	1.566	1.60	1.541	0.805	0.749	3.87	15.0	5.58	61	41.2	0.60 29.4	3.0	800	
		2.0	1.531	1.27	1.512	0.840	0.741	6.05	15.0	7.63	76	37.0		6.0		
		4.0	1.522	0.92	1.508	0.845	0.737	9.70	15.1	9.88	103	33.2		6.0		
	화강암 II	1.0	1.458	0.43	1.452	0.818	0.794	3.69	14.5	1.16	174	40.4	0.43 32.8	2.0	1130	
		2.0	1.504	0.48	1.497	0.763	0.714	6.72	13.2	3.17	273	38.8		7.0		
		4.0	1.646	0.34	1.460	0.807	0.735	10.9	15.1	8.66	222	35.2		11.0		
사암	사암 I	1.0	1.259	9.75	1.147	1.039	0.951	2.80	15.1	6.82	50.7	35.7	0.260 29.0	14.3	153	
		2.0	1.235	8.83	1.135	1.060	0.924	4.61	14.7	9.17	62.1	32.4		16.7		
		4.0	1.250	8.81	1.149	1.035	0.773	8.44	15.1	11.0	86.6	30.9		22.8		
	사암 II	1.0	1.328	7.81	1.232	0.919	0.832	2.50	15.0	7.81	34.2	33.7	0.359 25.8	12.3	98.3	
		2.0	1.328	8.38	1.225	0.928	0.774	4.54	15.0	8.85	53.7	32.1		14.3		
		4.0	1.246	6.33	1.172	1.016	0.726	7.21	15.0	11.9	64.9	28.3		26.4		
	사암 III	1.0	1.278	6.07	1.205	0.965	0.874	2.16	15.0	8.70	27.7	31.3	0.046 29.5	12.9	180	
		2.0	1.226	6.24	1.154	1.051	0.846	3.93	15.0	11.0	38.1	29.7		18.7		
		4.0	1.275	7.57	1.185	0.997	0.685	7.93	15.0	13.9	63.4	29.9		25.0		

3.1 일본 향만기술연구소 시험결과

일본 향만기술연구소에서 여러 시료에 대한 강도정수를 검토하기 위해 시험조건(암종, 구속압, 습윤밀도, 함수비, 건조밀도, 간극비, 일축압축강도) 및 시험결과를 표 2에  $\phi_0$ 와 구속압의 결과를 그림 7에 나타내었다. 표 2로부터  $c_d$ 는 0.046~0.60 kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi_d$ 는 25.8~38.5°

의 범위이다.

한편 그림 7 특히 사암II 시료와 사암III 시료의 시험결과에 주목해 보면,  $\phi_0$ 의 결과에서는 사암II가 사암III보다도 양질의 석재라는 것을 알 수 있다. 그러나 Mohr원의 파괴포락선에서 구한  $\phi_d$ 는 사암II에서 25.8°, 사암III에서 29.5°이다. 이와 같은  $\phi_d$ 가 얻어진 것은 구속압 4 kg/cm<sup>2</sup>의 결과가 작은 구속압에서의 결과와 반대의

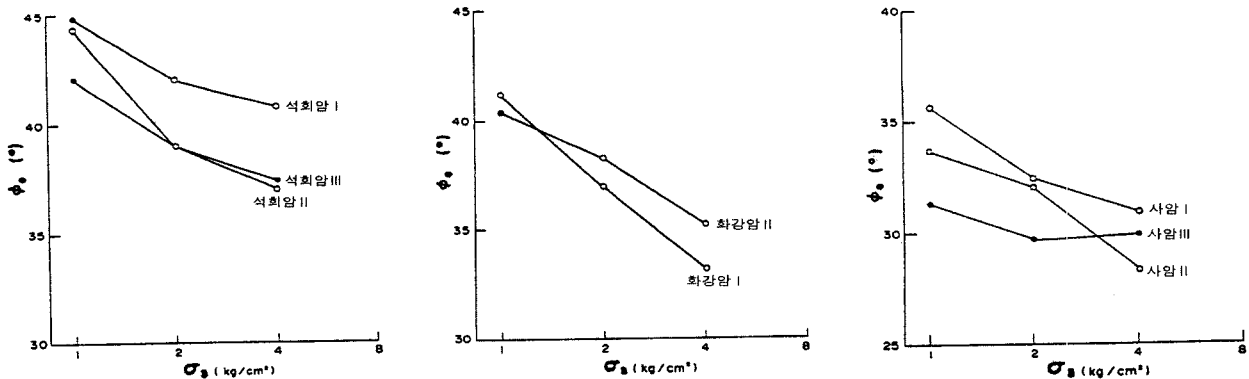


그림 7.  $\phi_0$ 와 구속압의 관계(석회암, 화강암, 사암)

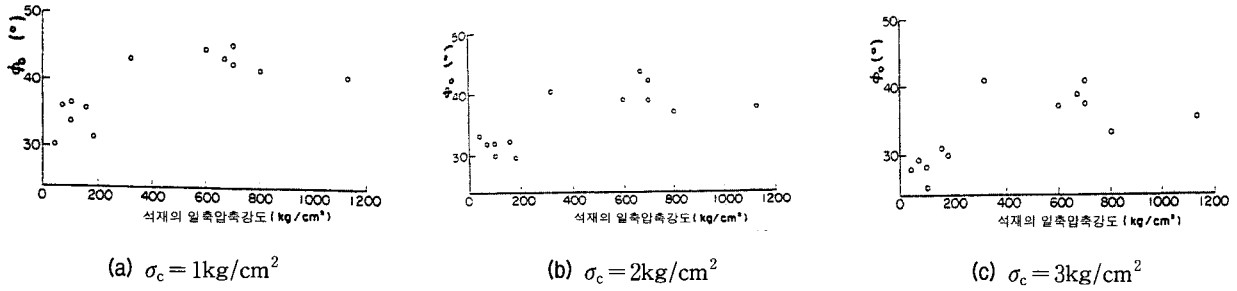


그림 8.  $\phi_0$ 와 석재의 일축압축강도의 관계

경향으로 되어 있어  $c_d$ 를 사암Ⅱ에서  $0.259 \text{ kg/cm}^2$ , 사암Ⅲ에서  $0.046 \text{ kg/cm}^2$ 로 평가하고 있기 때문이다. 이것으로부터 강도정수를 결정하기 위해서는  $c_d$ 를 적절하게 평가하지 않으면  $\phi_d$ 를 정확하게 구할 수 없다는 것을 알 수 있다.  $c_d$ 를 작게 보면  $\phi_d$ 를 과대하게 평가하고, 크게 보면 낮은 구속압에서의 전단저항을 과대하게 평가할 염려가 있다. 표 2의 결과를 바탕으로  $\phi_0$ 와 구속압을 함께 도시한 그래프에 식 (2)를 이용하여 점착력,  $c$ 를 여러 가지 변화시켜 검토해 본 결과 기준치인  $c_d = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 을 이용하면 구속압의존성을 재현할 수 있다는 사실을 확인하였다(그림 9 참조).

이상에서와 같이 강도정수를 결정하기 위해서는  $c_d$ 를  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ 로 설정하고  $\phi_d$ 를 변화시켜 평가하는 방법이 유효하다는 것이 확인되었다.

$c_d$ ,  $\phi_d$ 와  $c=0$ 일 때의 내부마찰각  $\phi_0$ 의 상관관계는 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_0 = \sin^{-1} \left( \frac{c_d \cos \phi_d + \sigma_3 \sin \phi_d}{\sigma_3 + c_d \cos \phi_d} \right) \quad (2)$$

설계에서 이용하는 경우는 단 1회의 대형삼축압축시험 결과의  $\phi_0$ 와 구속압의 관계를 규명하고 식 (2)에서  $c_d$ 를  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ 으로 하면  $\phi_d$ 를 구할 수 있다.

유효구속압이 각각 1, 2, 3  $\text{kg/cm}^2$  조건일 경우 석재의 일축압축강도에 대해  $\phi_0$ 를 도시한 것이 그림 8이고, 일축압축강도 200~300  $\text{kg/cm}^2$ 의 범위를 경계로  $\phi_0$ 가 크게 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

$\phi_0$ 와 구속압의 관계에  $c_d$ 를  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d$ 를  $35^\circ$ 로 한 경우의 곡선을 함께 나타낸 것이 그림 9이다.

### 3.2 일본항만연구소 자료의 결론

석재의 일축압축강도와  $\phi_0$ 의 사이에는 상관관계는 보여지지 않으나 일축압축강도가 300  $\text{kg/cm}^2$  전후 사이에서  $\phi_0$ 는 두 그룹으로 나뉘어 지는 것을 알았다. 따라서 석재의 일축압축강도가 300  $\text{kg/cm}^2$  이상이면 기준치인  $c_d = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d = 35^\circ$ 를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이것은 대형삼축시험을 하지 않고 강도정수를 결정하는 경우 일축압축강도 300  $\text{kg/cm}^2$ 가 하나의 목표라는 것을 나타내고 있다.

## 4. 대형삼축압축시험

본 연구에 사용된 대형삼축압축시험장치, 사석재료, 시험계획 및 시험과정은 다음과 같다.

### 4.1 대형 삼축압축시험장치

대형삼축시험기의 전경은 그림 10과 같으며 전체적인 장치의 기본적인 개요도는 그림 11과 같다. 재하대는

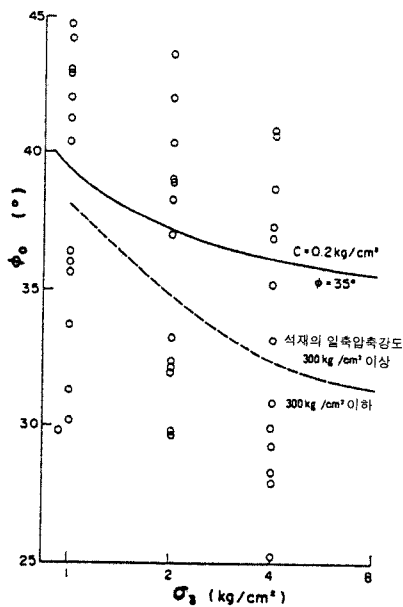


그림 9.  $\phi_0$ 와 구속압의 관계

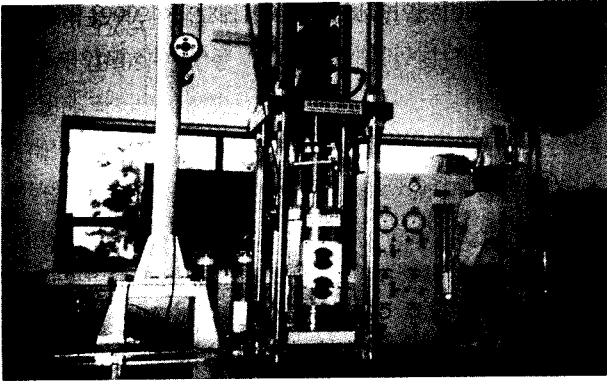


그림 10. 대형삼축시험기 전경

4분지주식으로 작업에 어려움은 있지만 하중에 대해 유리하다. 공시체의 크기는 직경 30cm×높이 60cm이고 시료의 입경이 2.0mm~50.2mm로 제한되기는 하지만 대형삼축압축시험기의 크기로는 비교적 경제적이고, 결과도 신뢰성이 있다고 알려져 있다.

#### (1) 축하중 재하 장치

축하중의 재하방향은 재하축(rod)을 하향으로 관입시키는 하향재하와 재하축을 고정시키고 공시체를 상향으로 당겨 올려 상향재하하는 방법이 있는데 본 시험기는 하향재하방식으로 큰 하중을 작용시키는데 유리하다.

#### (2) 삼축실

어떤 형식의 삼축실을 채택하느냐는 것은 시험장치로 할 수 있는 시험종류를 결정하게 되고, 적절한 삼축실의 선정을 위하여 필요한 결정사항으로는 공시체의 크기, 축하중, 구속압력, 재하 Stroke, 재질 등이 있다. 본 시험기에서는 내압원통과 상반은 분리가 되며, 내압원통이 지주의 외측에 있다.

#### (3) 로드셀의 설치위치

로드셀이 삼축실 외부에 있는 형식은 캡 실린더 부분과 축수부의 마찰의 영향을 받을 수 있으므로 최근에는 삼축실 내부에 설치하는 것이 일반적인 경향인데, 본 시험기도 삼축실 내부에 설치하는 방식이다.

#### (4) 계측 및 제어장치

계측 및 제어장치(electric measuring & controlling unit)는 크게 트랜스듀서(transducer), 증폭기(amplifier), 제어기(controller)의 세 부분으로 나뉘어진다.

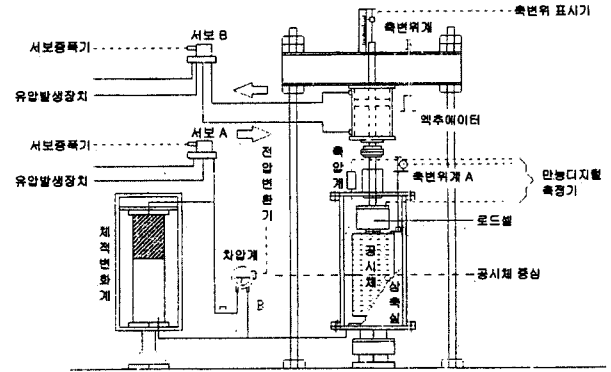


그림 11. 대형삼축압축시험기의 전체도

#### (5) 축압 조절장치

본 시험기의 축압 조절장치는 공기압식이다.

#### (6) 축변위 측정 장치

상부 캡과 하부 받침대의 연직상대변위를 직접 측정하여 정확한 축변위를 측정할 필요가 있다. 하부받침대에서 변위계를 거쳐 캡에 도달하는 경과시간 동안 외부의 요인이 포함되면 축변위의 측정은 부정확하게 된다. 삼축실의 축압변화에 의한 변형, 축방향변화에 의한 재하부의 변형등의 요인을 감안하여 축변위를 측정한다.

#### (7) 데이터기록 시스템

데이터기록 시스템은 7~10개의 측정채널을 가지며, 미소변형을 측정을 위해 약 20채널도 확보가능하다.

#### (8) 미소변위측정

$10^{-6}$ cm이하의 감도가 뛰어난 프록시메타를 사용한다.

### 4.2 사석재 기반암의 물리적 특성

#### (1) 암석의 지질학적 특성

제주도 북제주군의 3곳의 채석장(S, B, H)의 기반암을 크러싱한 사석을 대상 시료로 사용하였다. 암석은 3개소 공히 제주도 화산활동의 2단계(K/Ar연대 측정; 0.6 Ma)에 속하는 장석감람석현무암류(FOB)로 구성된다. 3개소 채석장들의 기반암은 육안관찰에 의하면 공히 비현정질이며 부분적으로 변질작용이 상당히 진행되어진 기공이 풍부한 다공질 조직을 나타내는 것이 보편적이다. 즉 변질의 정도, 기공의 크기와 형태가 다른 것을 제외하고는 광물의 조성 및 조직이 유사하며, 감람석 사장석의 반정이 소량 관찰되는 암회색 내지 담회색의 현



표 3. 암석의 기본물성 시험 결과

시료	비중		흡수율 (%)	압축강도( kg/cm <sup>2</sup> )
	절대건조	표면건조		
S 채석장 시료	2.45	2.51	2.31	430~596
B 채석장 시료	2.50	2.55	2.00	415~573
H 채석장 시료	2.50	2.55	2.12	470~621

무암질암으로 대표될 수 있다. 대표시료에 대하여 편광 현미경 관찰 결과, 광물은 대부분 사장석, 감람석, 불투명광물(주로 자철석 종류), 유리질로 구성되어 있고, 인터써탈(intersertal)조직을 나타낸다. 반정은 사장석, 감람석으로 대별되며, 감람석 반정 대부분은 심하게 용식되어져 있다. 화학성분 파악을 위한 XRF분석 결과, 암석계열은 B채석장은 알칼리(alkaline), S채석장과 H채석장은 비알칼리(subalkaline) 계열에 속하며, 정확한 암석명은 B채석장은 현무암(basalt), S와 H채석장은 현무암질안산암(basaltic andesite)에 속한다.

(2) 암석의 기본물성시험결과

표 3에서와 같이 암석의 절대건조상태의 비중은 2.45~2.50, 표면건조상태의 비중은 2.51~2.55, 흡수율은 2.00~2.31%이며 암석의 일축압축강도는 415 kg/cm<sup>2</sup>~621 kg/cm<sup>2</sup>의 범위로 비교적 낮은 일축압축강도의 시료를 사용하였다.

4.3 대형삼축압축시험 계획

(1) 그림 12에서 보는 바와 같이 3개 시료는 대부분이 균등계수  $U_c=1.6\sim1.9$ 의 거의 균등한 입도이며, 시료의 최대입경은 50.8mm이며 평행입자분포법(상사 입도)을 사용하였다

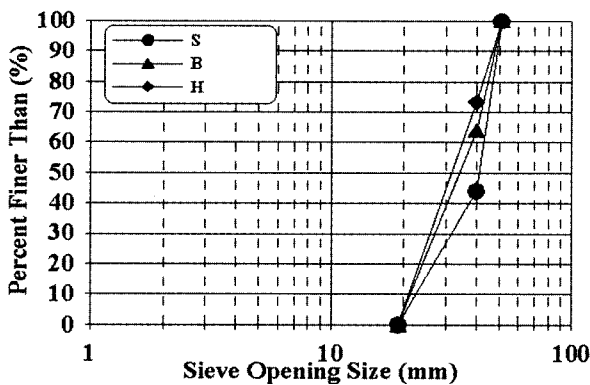


그림 12. 시험재료의 입도분포곡선

공시체 제작방법으로는 평행입자분포법(parallel grading method, Marachi, et al., 1969), 절단치환법(scalping and replacement method, Donaghe and Townsend, 1976) 입자 모형법(matrix modeling method, Fragaszy, et al., 1992)등이 있으며 본 연구에서는 평행입자분포법을 사용하였다. 대형삼축압축시험시 시료의 직경과 최대입경의 비는 주로 4~8을 사용하고 있으며 가장 많이 사용되고 있는 비는 약 1:6이므로 시료의 최대입경은 50.8mm를 사용하였다. 항만공사에서 사용하는 일반적인 사석의 규격은 0.015m<sup>3</sup>~0.03m<sup>3</sup>이며 한 개의 사석을 구로 가정할 경우 입경은 30.6cm~38.5cm이다. 이것을 상사 입도를 사용하면 40.4mm~50.8mm가 되는데 이는 매우 균등한 입도를 나타낸다.

(2) 모두 9개의 대형 원주형 공시체(직경 300mm × 높이 600mm)를 1.0, 2.0 및 3.0kg/cm<sup>2</sup> 등 세 종류의 구속압 하에서 3mm/min의 속도로 배수전단(CD)시험으로 실시하였다.

(3) 다짐은 실시하지 않았다.

4.4 대형삼축압축시험 과정.

시험과정은 그림 13과 같으며 이를 순서대로 나열하면 다음과 같다.

(1) 시료 입도조정

평행입자분포법에 의한 시료 조정을 실시한다.

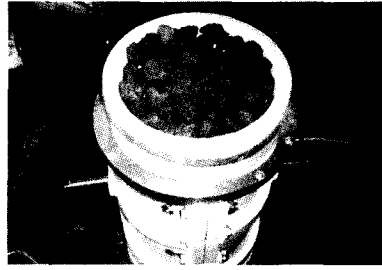
(2) 공시체 성형

본 시료의 경우 축조재료를 바닷물 속에 투기하여 방파제를 축조하는 것과 유사한 조건을 재현하기 위하여 다음과 같은 방법으로 공시체를 성형하였다.

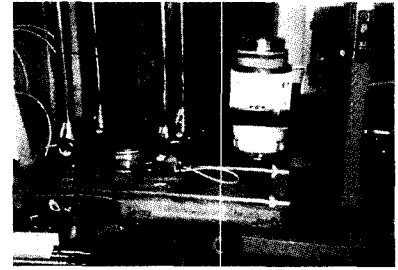
1) 시험시료는 공시체 제작 전에 약 72시간(3일) 동안 수침시켜 현장조건에 부합되도록 하였다.



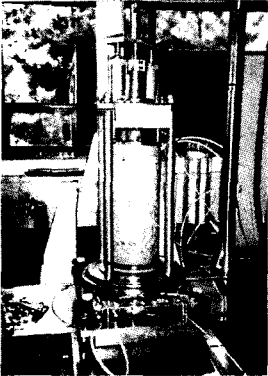
(a) 공시체 제작용 몰드의 조립



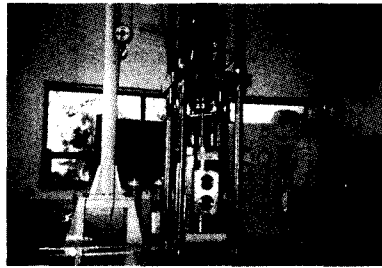
(b) 공시체의 제작



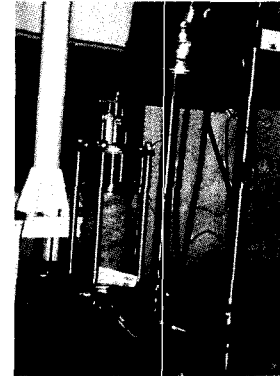
(c) 공시체의 세팅



(d) 공시체 세팅후 전경



(e) 공시체의 포화 및 압밀과정



(f) 시험후 삼축실의 해체

그림 13. 대형삼축압축시험 과정

- 2) 받침대에 라텍스 멤브레인(두께 1mm) 2장을 끼운 후 철재밴드를 체결하여 긴결시킨다.
- 3) 시료의 중량을 정확히 측정하여 기록한 후 시료를 손으로 조용히 투입한다.
- 4) 시료를 몰드의 상단부까지 채운 후 여과지를 깔고 아크릴판을 올려놓는다.
- 5) 아크릴판 위에 상부궤를 올려놓고 몰드에 걸쳐있는 멤브레인을 풀어 상부궤를 씌운 후 철재밴드를 사용하여 연결한다.

### (3) 공시체 세팅

- 1) 성형이 완료된 몰드를 지게차로 운반하여 이동대차 위에 정확히 올려 놓는다.
- 2) 상부궤에 배수관을 연결한다.
- 3) 내부 지주와 삼축실(triaxial chamber)의 덮개판을 조립한 후 삼축실을 씌운다.
- 4) 삼축실의 내부에 공시체 상부궤가 잠길 때까지 수돗물을 공급한 후 삼축실을 완전히 밀폐시킨다.

### (4) 포화

본 시료의 경우 축조재료를 바닷물 속에 투기하여 방

파제를 축조하는 것과 유사한 조건을 재현하기 위하여 공시체 세팅 완료 후 24시간 동안 자연수두치를 이용하여 공시체의 하부로부터 상부측으로 물을 통수시켜 완전히 포화시킨 후 압밀한다.

### (5) 압밀 및 전단

각 시료마다 구속압력을 1.0, 2.0 및 3.0 kg/cm<sup>2</sup>으로 변화시켜가면서 포화된 총 9개의 원주형 공시체에 대하여 압밀배수전단(CD)시험을 수행하였다. 등방압밀압력은 삼축실 상부의 공간에 소정의 공기압을 가하여 삼축실 내의 물에 압력이 전달되어 공시체에 가해지며, 압밀압력의 크기는 고정밀 간극수압계를 통해 측정된다. 시료의 체적변화는 내체적 측정용 이중관부렛(측정한계 : 4000cc)과 차압계로 측정된다. 축하중은 3mm/min의 속도로 가하였다. Holtz와 Gibbs(1956)에 따르면 0.086% ~ 1.81%의 축변형률 속도는 자유배수 모래-자갈질 시료의 응력-변형률 관계에 중대한 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다.

### (6) 시험 후 체분석

조립토의 전단시 입자파쇄현상을 확인하기 위해 체

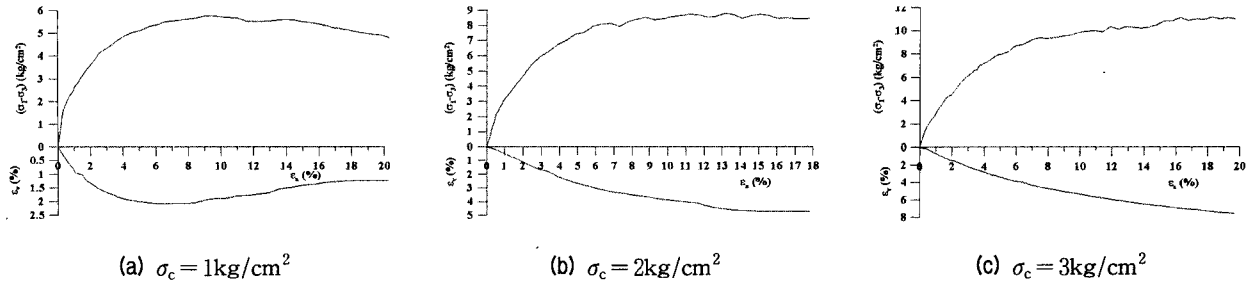


그림 14. S채석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률-체적변형률 거동

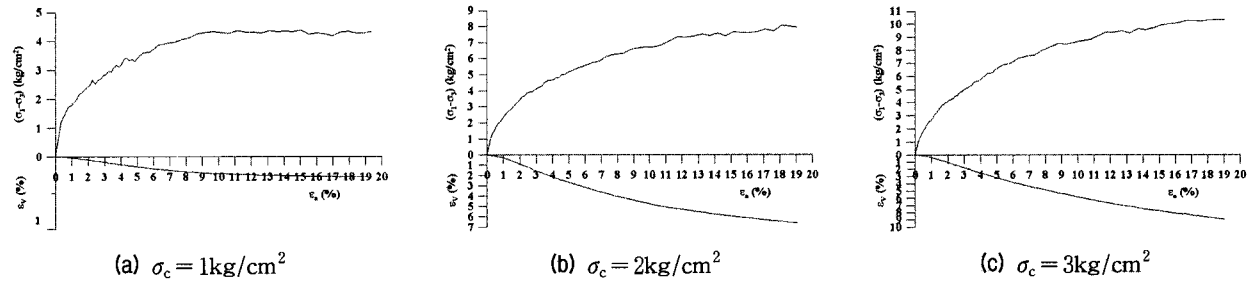


그림 15. B채석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률-체적변형률 거동

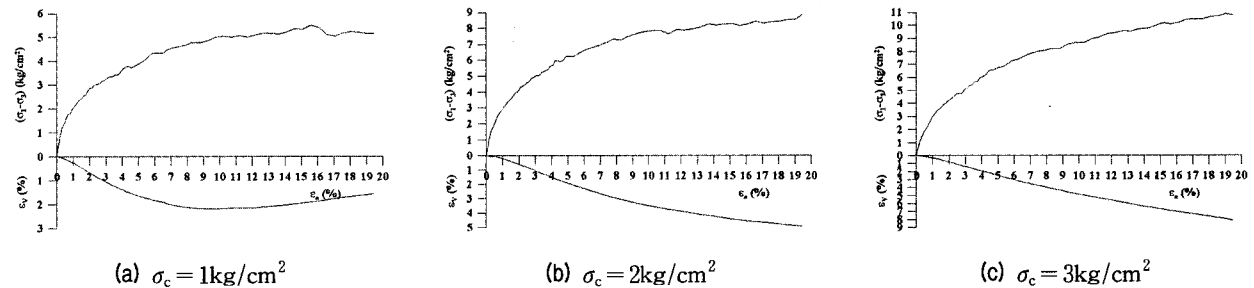


그림 16. H채석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률-체적변형률 거동

분석시험을 실시한다.

(7) 데이터 정리 및 해석

시험결과를 정리, 분석한다.

5. 시험결과 및 분석

3곳의 채석장 시료의 축차응력( $\sigma_1 - \sigma_3$ )-축방향변형률( $\epsilon_a$ )-체적변형률( $\epsilon_v$ ) 관계를 나타내는 시험결과는 그림 14~그림 16과 같으며, 파괴시의 최대주응력,  $\sigma_1$  과 구속응력,  $\sigma_3$  즉 최소주응력을 법선응력  $\sigma$  와 전단응력  $\tau$ 와의 평면상에 나타내면 그림 17과 같고 이에 따른 Mohr-Coulomb의 전단강도 정수는 표 4와 같다. 그림 14~16에서 알 수 있는 것처럼 응력-변형률관계가 단조롭게 증가하고 뚜렷한 피크가 나타나지 않았다. 이는 입도가 나쁜 사석재료에서 일반적으로 볼 수 있는 시험결

과라고 생각된다. 응력-변형곡선에서 피크를 볼 수 없는 경우에는 축변형 15%때를 파괴시점으로 정의하였다. 체적변형과 축변형의 관계에서도 역시 체적은 단조롭게 감소하고 부의 다이러턴시성향을 나타내고 그 성향은 전단 중 거의 변화하지 않는다. 일부의 시험결과에서 전단초기에 어느 정도 체적수축한 다음 체적팽창하는 거동을 나타낸다. 그 원인은 사석재의 경우에는 균등계수가 작고 매우 빈입도라는 것에 기인하고 있다고 생각된다. 입도분포가 나쁘기 때문에 입자간의 접촉점이 적고 입자간의 응력집중이 발생하기 쉽게 되어 정(+)의 다이러턴시 성향에 의해 전단응력이 증가하는 대신 그림 18과 같은 입자파쇄와 재배열이 일어나 그림 19와 같이 강도가 감소하기 때문이라고 생각된다. S채석장 사석의 구속압 1.0kg/cm<sup>2</sup>일 경우의 시험을 제외하고는 응력-변형률 거동이 모두 변형률경화현상(strain hardening)을 보였고, 채석장에 관계없이 구속압이 증가할수록 체적

표 4. 대형삼축시험 결과 지반 정수

시료	구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )	건조밀도 (t/m <sup>3</sup> )	함수비 (%)	압축강도 kg/cm <sup>2</sup>	간극비		파괴시 다이러턴시 $-\left(\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_a}\right)_f$	$\phi_0$ (°)	$c_d$ (kg/cm <sup>2</sup> )/ $\phi_a$ (Deg.)
					압밀전	압밀후			
S 채석장시료	1.0	1.358	3.01	430~596	0.804	0.772	0.060	47.9	0.94/33.4
	2.0	1.389	2.90		0.764	0.722	-0.052	42.9	
	3.0	1.399	2.58		0.751	0.694	-0.409	39.8	
B 채석장시료	1.0	1.405	2.44	415~573	0.779	0.758	-0.098	43.4	0.46/35.3
	2.0	1.405	3.16		0.779	0.737	-0.600	40.3	
	3.0	1.436	2.40		0.741	0.684	-0.456	38.4	
H 채석장시료	1.0	1.391	2.05	470~621	0.805	0.778	0.035	46.0	0.85/33.1
	2.0	1.391	2.40		0.797	0.759	-0.225	42.4	
	3.0	1.403	1.81		0.782	0.729	-0.497	39.0	

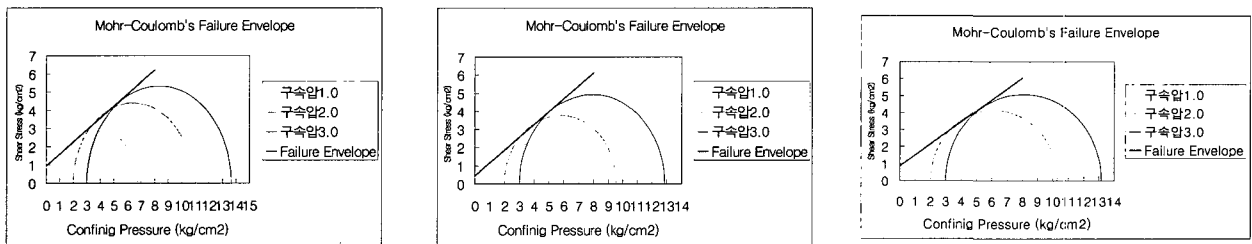
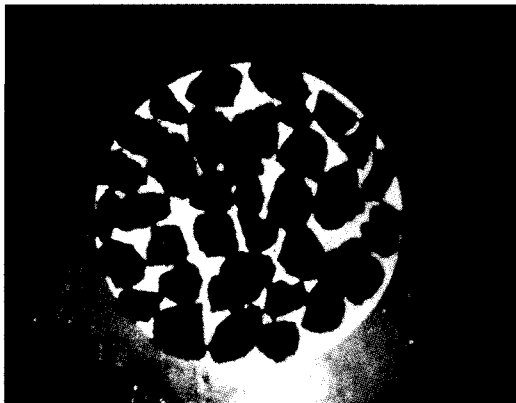
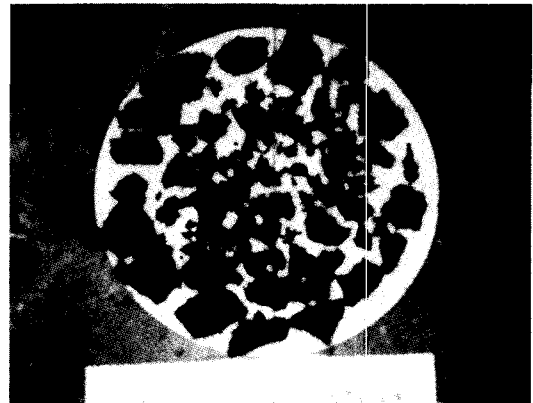


그림 17. S, B, H채석장 사석의 Mohr-Coulomb 파괴포락선



(a) 전단시험 전 입자의 상태



(b) 전단시험 후 입자의 상태

그림 18. 전단시험 전·후 입자의 상태

변형률이 증가하는 경향을 보였다.

그림 19는 구속압에 대한 내부마찰각 관계를 도시한 것으로 구속압이 증가할수록 내부마찰각은 뚜렷이 감소하였는데, 앞서 언급하였듯이 불량한 입도의 조립질 재료에 있어서의 전형적인 특성인 구속압의 증가에 대한  $\phi_0$ 의 저하, 즉 구속압 의존성을 나타낸다. 이는 불량한 입도의 조립질 재료에 대한 전단시 재료의 거친면과 입자 상호간의 맞물림이 파쇄과정에서 등극게 되고 높은 구속응력하에서 파쇄과정이 증대되기 때문이다. 낮은 구속응력하에서는 내부마찰각이 뚜렷하게 증가하였는데 이는 입자의 맞물림효과가 증대하기 때문이다.

그림 20은  $\phi_0$ 와 파괴시의 다이러턴시비의 관계를 도시한 것으로  $\phi_0$ 와 다이러턴시비 사이에는 거의 직선적 관계가 성립하고 다이러턴시가 정(+) 즉 체적팽창경향에 있을수록  $\phi_0$ 가 크게 됨을 알 수 있다. 이 또한 앞서 언급한 바와 같이 조립질 재료의 전형적인 특성으로 파괴시의 다이러턴시비를 알면 내부마찰각을 추정할 수 있다는 것을 의미한다.

표 4에서 보는 바와 같이 본 연구대상 시료의  $c_d$ 는 0.46~0.94 kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi_a$ 는 33.1~35.3 kg/cm<sup>2</sup>의 범위를 갖는다. 여기서 그림 19를 보면 S채석장 사석재가 B채석장 사석재보다 양질의 사석재라는 것을 알 수 있다.

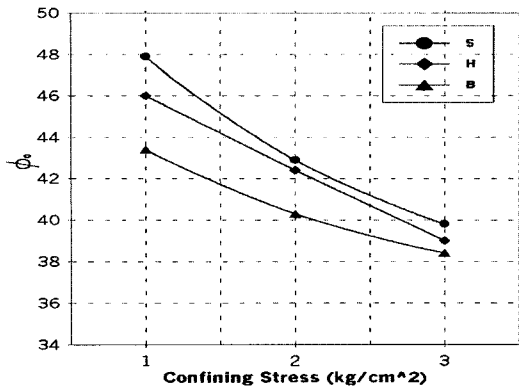


그림 19.  $\phi_0$ 와 구속압의 관계

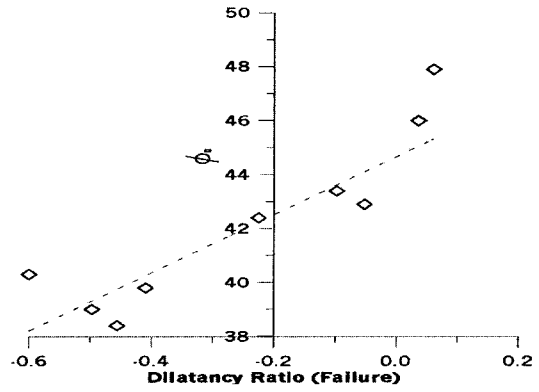


그림 20.  $\phi_0$ 와 파괴시의 다이러턴시비의 관계

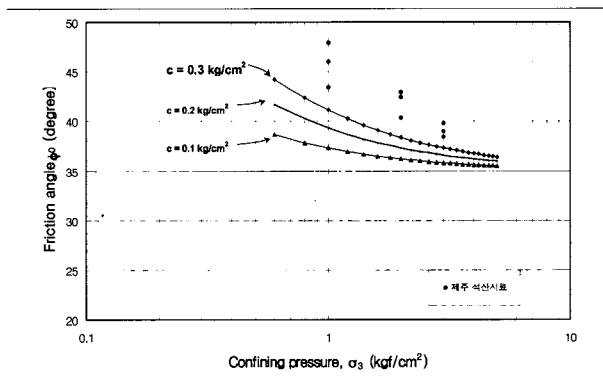


그림 21.  $\phi_d = 35^\circ$  일 경우,  $\phi_0$ 와 구속압의 관계 곡선

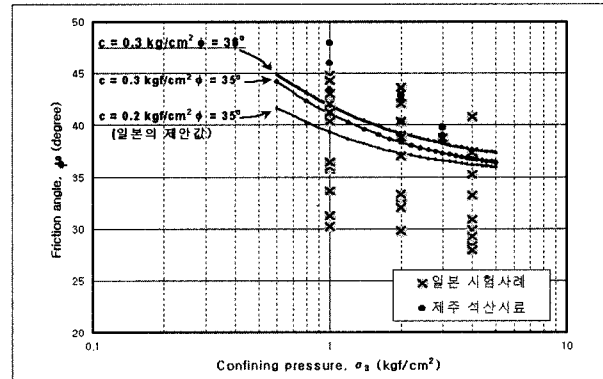


그림 22.  $\phi_0$ 와 구속압의 관계

그러나 단순히 Mohr 원의 파괴포락선에서 구한  $\phi_d$ 는 S채석장 사석재에서  $33.4^\circ$ , B채석장 사석재에서  $35.3^\circ$ 로 정반대의 결과가 얻어진다. 즉  $c_d$ 를 작게 보면  $\phi_d$ 를 과대평가하고  $c_d$ 를 크게 보면 낮은 구속압에서의 전단저항을 과대평가할 염려가 있으므로, 겉보기 점착력을 적절하게 평가하지 않으면 내부마찰각을 정확히 구할 수 없다. 따라서, 그림 19에서  $c_d$ 를 0.1, 0.2, 0.3  $\text{kg/cm}^2$ 로 가정한 후 식 (2)를 이용하여 구속압과  $\phi_0$ 의 관계를 나타내는 곡선을 함께 도시하면 그림 21과 같다. 그림 21에서와 같이 水上(1991)이 제안한  $c_d$ 가 0.2  $\text{kg/cm}^2$ 인 경우 보다 겉보기 점착력,  $c_d$ 가 0.3  $\text{kg/cm}^2$ 인 경우 본 연구 시험결과에 있어 내부마찰각의 구속압 의존성을 잘 반영함을 알 수 있으므로 북제주현무암 사석재의 겉보기 점착력,  $c_d$ 로 0.3  $\text{kg/cm}^2$ 을 사용할 수 있다고 판단된다.

또한 금회의 시험결과인 그림 19와 水上(1991)의 시험결과인 그림 9를 함께 도시하고, 식 (2)를 이용하여 구속압과  $\phi_0$ 의 관계를 나타내는 곡선을 함께 도시하면 그림 22와 같다. 본 연구 시험결과가 그림 21의  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=35^\circ$  일 경우 구속압과  $\phi_0$ 의 관계를 나타내

는 곡선보다  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=36^\circ$  일 경우 구속압과  $\phi_0$ 의 관계를 나타내는 곡선과 상당히 밀접한 상관관계를 가지면서 그 곡선위에 위치하므로 북제주지역의 사석재의 강도정수로  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=36^\circ$ 를 사용할 수 있다고 판단된다. 따라서 다공질의 현무암으로 이루어진 북제주지역에서 생산된 마운드용 사석재의 강도정수로 암석의 일축압축강도가  $400 \text{ kg/cm}^2$  이상이면  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=36^\circ$ 를 사용할 수 있다고 판단된다.

## 6. 결론

국내 항만구조물 기초사석의 강도정수 결정시 일반적으로 일본항만기술연구소의 자료를 인용하여 적용하는 사례가 빈번한데 본 연구에서는 북제주 현무암 사석재를 대상으로 국내 최초로 대형삼축압축시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축차응력-변형률관계가 단조롭게 증가하고 피크가 나타나지 않는데 이는 입도가 나쁜 사석재료에서 일반적으로 볼 수 있는 시험결과이다. 체적변형과 축

변형의 관계에서도 역시 체적은 단조롭게 감소하고 부의 다이러턴시성향을 나타내며 그 성향은 전단중 변화하지 않는다. 그 원인은 사석재의 경우에는 균 등계수가 작고 입도분포가 나쁘기 때문에 입자간의 접촉점이 적고 입자간의 응력집중이 발생하기 쉽게 되어 입자파쇄와 재배열이 일어나 강도가 감소하기 때문이라고 생각된다.

- (2) 구속압과 접착력을 0으로 한 내부마찰각,  $\phi_0$ 의 관계에서 구속압이 증가할수록 내부마찰각은 뚜렷이 감소하였는데, 이는 불량한 입도의 조립질 재료에 대한 전단시 재료의 거친면과 입자 상호간의 맞물림이 파쇄과정에서 등글게 되고 높은 구속응력하에서 파쇄과정이 증대되기 때문이다. 또한 낮은 구속응력하에서는 내부마찰각이 뚜렷하게 증가하였는데 이는 입자의 맞물림효과가 증대하기 때문이다.
- (3) 파괴시의 다이러턴시비와  $\phi_0$ 의 관계에서  $\phi_0$ 와 다이러턴시비 사이에 직선적 관계가 성립하고 다이러턴시가 정(+) 즉 체적팽창경향에 있을수록  $\phi_0$ 가 크게 됨을 알 수 있다. 이는 파괴시의 다이러턴시비를 알면 내부마찰각을 추정할 수 있다는 것을 의미한다.
- (4) 본 연구의 실험결과가, 일본 항만기술연구소의 水上(1991)이 제안한  $c_d=0.2 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=35^\circ$ 일 경우 구속압과  $\phi_0$ 의 관계를 나타내는 곡선보다  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=36^\circ$ 일 경우 구속압과  $\phi_0$ 의 관계를 나타내는 곡선과 상당히 밀접한 상관관계를 가지면서 그 곡선 위에 위치(그림 22참조)하므로 복제주지역의 사석재의 강도정수로  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=36^\circ$ 를 사용할 수 있다고 판단된다. 따라서 다공질의 현무암으로 이루어진 복제주지역에서 생산된 마운드용 사석재의 강도정수로 암석의 일축압축강도가  $400 \text{ kg/cm}^2$  이상이면  $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi_d=36^\circ$ 를 사용할 수 있다고 판단된다.

본 논문은 복제주지역의 현무암에 한정하여 대형삼축압축시험을 실시하였는데, 차후에는 지역, 암종, 일축압축강도 등 여러 가지 조건별로 사석재의 대형삼축시험을 실시하여 시험결과를 축적함으로써 국내에 적합한 사석재의 강도정수를 제안하고자 한다. 그리하여 중소규모의 항만구조물 설계시 경제적이고도 합리적인 구조물 설계가 가능할 것으로 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. 해양수산부(1999), 항만 및 어항 설계기준.
2. 水上純一, 小林正樹(1991), 마운드용 사석재의 대형삼축압축시험에 의한 강도특성, 일본항만기술연구소, 항연자료 No.699.
3. Charles, J. A.(1973), "Correlation between Laboratory Behavior of Rockfill and Field Performance with Particular Reference to Scammonden Dam", Ph. D. Thesis, Univ. of London, U. K.
4. Donaghe, R. T. and Cohen, M. W.(1978), "Strength and Deformation Properties of Rockfill", U.S. Army Waterway Exper. Station, Technical Report No. S-78-1, Vicksburg, U.S.A.
5. Donah, R. T. and Townsend, F. C.(1976), "Scalping and replacement effects on the compaction characteristics of earth-rock mixtures", ASTM STP 5999.
6. Fragaszy, R. J., Su, J., Siddiqi, F. H. and Ho, C. L.(1992), "Modeling strength of sandy gravel", Proc. ASCE, GE6.
7. Fumagalli, E.(1969), "Tests on cohesionless materials for rockfill dams", Proc. ASCE, SM1.
8. Fumagalli, E., Mosconi, B. and Rossi, P. P.(1970), "Laboratory Tests on Materials and Static Models for Rockfill Dams", Trans. 10th Int. Cong. on Large Dams, Montreal, Vol.1.
9. Holtz, W. G. and Gibbs, H. J.(1956), "Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils", Jr. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.82, SM1.
10. Kirkpatrick, W. M.(1965), "Effect of Grain Size and Grading on the Shearing Behavior of Granular Materials", Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, Montreal, Canada.
11. Lee, K. L. and Seed, H. B.(1967), "Drained Strength Characteristics of Sands", ASCE, Vol.96, SM3.
12. Leps, T. M.(1970), "Review of Shearing Strength of Rockfill", ASCE, Vol.36, SM4.
13. Leslie, D. D.(1963), "Large Scale Triaxial Tests on Gravelly soils", Proc. 2nd Pan-American Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol.1, Sao Paulo.
14. Marachi, N. D., Chan C. K., Seed H. B. and Duncan J. N.(1969), "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials", Report No.TE-69-5. University of California.
15. Marachi, N. D., Seed, H. B., and Chan, C. K.(1972), "Evaluation of Properties of Rockfill Materials", Jr. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.98, No.SM1.
16. Marsal, R. J.(1967), "Large-Scale Testing of Rockfill Materials", Proc., ASCE, SM2.
17. Marsal, R. J.(1973), "Mechanical Properties of Rockfill", Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, John Willey and Sons, Inc., Newyork.
18. Powers, T. C.(1964), "Topic in Concrete Technology, Part I: Geometric Properties of Particles and Aggregates", Jr. PCA Research and Development.
19. Tombs, J. A.(1969), "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill", Ph. D. Thesis, Univ. of London, London, U. K.
20. Valstad, T. and Strom, E.(1976), "Investigation of the Mechanical Properties of Rockfill for the Svartevann Dam (Norway) using Triaxial, Oedometer and Plate Bearing Tests", N. G. I. Pub. No.110, Oslo, Norway.
21. Zeller, J. and Wulliman, R.(1957), "The Shear Strength of the Shell Materials for The Goschenenalp Dam (Switzerland)", Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Vol.2, London, England.

(접수일자 2002. 3. 6, 심사완료일 2002. 4. 18)