

# 대형삼축압축시험을 이용한 사석의 전단 특성 분석

Analysis on Shear characteristics of Rubble Stone Using Large-Scale Triaxial Test

정 철 민\*

김 종 수\*\*

Jung Chul-Min

Kim Jong-Soo

## Abstract

In general, the values of shear strength properties of rubble stones have been given quoting from Japanese empirical recommendation when breakwater and offshore structures of port and harbor facilities were designed in Korea. but by large-scale triaxial test(specimen diameter 30cm, specimen height 60cm) carried out in Korean Water Resources Corporation in 2001, for the first time in Korea, shear strength properties of rubble stones are evaluated directly. These are compared with the Japanese empirical recommendation. Therefore, the value of shear strength properties of rubble stones have been usually given quoting from Japanese empirical recommendation without laboratory or in-situ tests, but the results of this study state that shear strength properties of rubble stone can be rationally determined and shear behavior characteristics of rubble stone can be investigated by large-scale triaxial test

## 요 지

국내 항만시설의 방파제 또는 호안구조물 등의 안정성 평가시 사석의 지반물성치는 일본의 경험치를 사용하여 설계하는 것이 관행이었다. 그러나 본 연구에서는 2001년 국내 최초로 한국수자원공사에 도입된 대형삼축압축시험기(공시체 직경 30cm, 공시체 높이 60cm)를 이용하여 사석의 지반물성치(점착력, 내부마찰각 등)를 직접 산정함으로써 관행적으로 적용하던 지반물성치와 비교·검증하고자 한다. 즉 기존의 해양구조물 설계시에는 사석의 물성치 산정시 실내시험이나 현장조사등의 지반조사 없이 일본에서 관행적으로 사용되어오는 경험치를 적용하였으나 본 연구에서는 실내시험을 통해 사석의 물성치를 산정함으로써 관행적으로 적용하던 지반물성치와 비교하여 합리적인 지반물성치를 적용하고 사석의 전단특성을 파악하는데 의의가 있다.

**keywords** : 방파제, 사석, 지반물성치, 대형삼축압축시험, 전단특성

\* 현대산업개발 토목설계팀 대리

\*\* 현대산업개발 토목설계팀 팀장

E-mail : ddang@hyundai-dvp.com 017-399-0213

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

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

사석(捨石)이란 막 깬돌 중에서 유수에 결될 수 있는 중량을 가진 돌로써 국내 항만시설의 방파제 또는 호안구조물 등의 안정성 평가시 사석의 지반물성치는 일본의 경험치(내부마찰각의 경우 40. )를 사용하여 설계하는 것이 관행이었다. 그러나 본 연구에서는 2001년 국내 최초로 한국수자원공사에 도입된 대형삼축압축시험기(직경30cm, 높이60cm)를 이용하여 사석의 지반물성치(점착력, 내부마찰각, 변형계수 등)를 직접 산정함으로써 관행적으로 적용하던 지반물성치와 비교·검증하고 또한 사석재료의 전단 거동을 밝히고자 한다.

## 2. 조립재료의 전단강도 특성(전단강도에 영향을 주는 인자)

댐, 방파제 또는 도로성토 등에 사용되는 조립재료는 본질적으로는 모래와 유사한 역학적 성질을 갖고 있으나 모래와는 달리 입자의 크기가 크고 입자가 파쇄되기 쉬운 특성이 있을 뿐만 아니라 밀도, 입자간의 마찰, 다이러턴시, 재배열 및 구속압 등 여러 요인에 의하여 영향을 받는다.

### 2.1 응력수준과 응력상태의 영향

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; Hansen, 1979). Fig. 1에서 나타난 것처럼, Bishop(1966)은 다양한 형태의 흙과 석괴 재료의 파괴포락선을 조사하였고, 파괴포락선의 곡선경향은 초

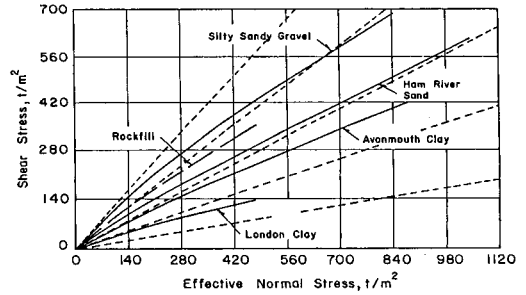


Fig. 1 높은 구속압하의 흙과 자갈질 재료의 Mohr의 파괴포락선

기에 밀하거나 혹은 대단히 밀한 재료, 또는 초기에 입자크기가 비교적 균질한 재료에서 더욱 명확하게 나타났다.

굵은 자갈질(특히 석괴 재료)에서 곡선은 입자들의 파쇄(초기에 입자 상호간의 접촉에 의한 국부적인 파쇄에서 입자의 완전 파쇄까지)에 의한 것으로 보인다. Fumagalli(1970) 등은 내부마찰각이 구속응력이 증가할수록 감소한다고 발표하였다. 그들은 자갈질 재료의 거친면과 입자상호간의 맞물림이 파쇄 과정에서 등글게 되고 높은 구속응력하에서 파쇄 과정이 증대된다는 것을 주요 원인으로 설명하고 있다. 내부마찰각과 구속응력과의 전형적인 상관 관계는 Fig. 2의 Marachi(1972) 등에 의해 보고되었다. 이 그림은 모든 재료의(다양한 시료 크기에서) 내부마찰각이 구속응력의 증가에 따라 감소하는 것을 보여준다. Tombs(1969)는 아주 밀한 석괴 재료의 포락선이 뚜렷하게 곡선으로 나타나는 것을 발견하였다. 그는 결이 많이 발달된 이암에 대해서 그는 구속응력이 7 t/m<sup>2</sup>~352 t/m<sup>2</sup>의 범위에서 내부마찰각의 범위가 50. ~34. 로 변화하는 것을 확인하였다.

자갈질 재료의 전단강도에 대한 응력수준의 영향은 Lee & Seed(1967)에 의해 대략적으로 묘사되었다(Fig. 3). 낮은 응력하에서 내부 마찰각의 뚜렷한 증대는 체적의 팽창에 의한 맞물림 효과의 증대에 의한 것이다. 구속응력이 증가하면 입자의 파쇄는 더 현격해지고 내부마찰각 감소의 원인이 된다. Leps(1970)Fig. 4는 많은 양의 삼축시험 데이터를 수집하고 연직응력의 로그값에 대한 석괴 재료의 내부마찰각을 나타내어 두 관계의 직선적인 관계를 도출했다.

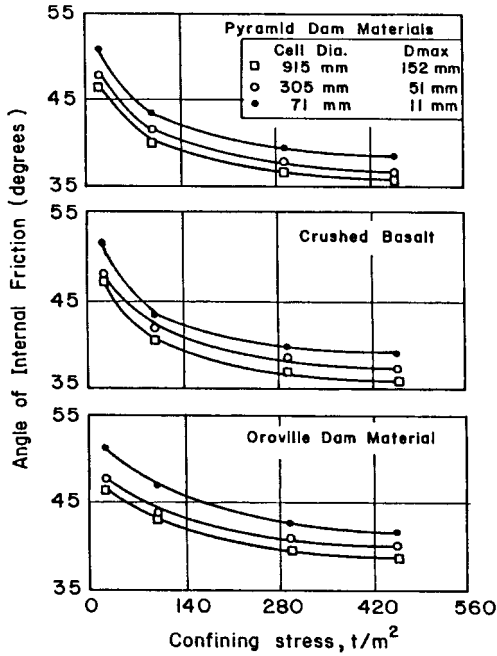


Fig. 2 자갈질 재료의 내부마찰각과 구속압의 관계 (Marachi et al, 1972)

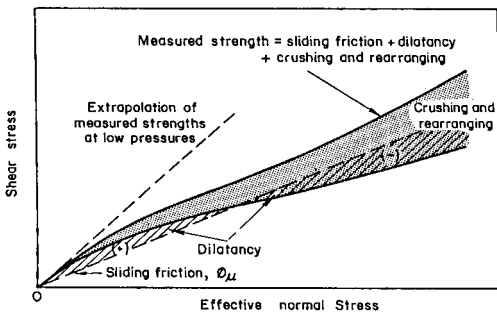


Fig. 3 조립재료의 전단강도에 미치는 영향인자들 (Lee & Seed, 1967)

Valstad & Storm은 다양한 종류의 시료 크기와 간극률을 가진 61개의 삼축시험 데이터로 이와 비슷한 작업을 수행했다. 일반적으로 이와 같은 경향은 대부분의 자갈질 재료에 대하여 실제의 Mohr-Coulomb 파괴포락선이 낮은 구속응력하에서 뚜렷한 곡선을 나타내는 경향을 찾아낼 수 있다. 그러나, 곡률은 구속응력이 증가할수록 현격하게 작아진다.

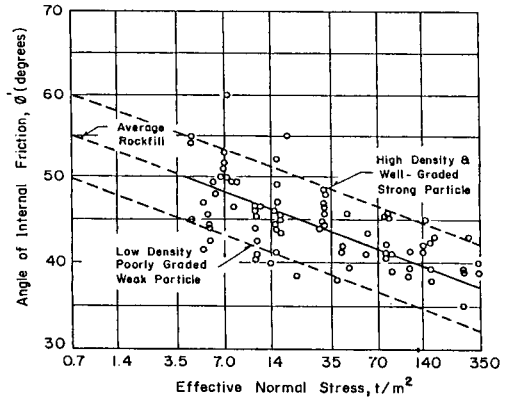


Fig. 4. 내부마찰각과 유효연직응력의 관계 (Leps, 1970)

## 2.2 시료(혹은 재료)의 특성치에 의한 영향

### (1) 상대밀도(Relative Density)

상대밀도는 석괴 재료의 밀도 차에 의해서 비교를 할 수 있는 물리적인 특성으로 사용되어진다. 그러나, 때로는 최대 입경의 크기가 달라서 입경이 평행하게 나타나는 같은 종류의 재료에서는 간극률의 한계치를 구하는데 실제 다른 방법을 불가피하게 사용하기도 한다 (Charles, 1973). 주어진 연직응력하에서 상대밀도가 커짐에 따라 내부마찰각이 증가되고, Marsal (1965)은 7 t/m<sup>2</sup>의 최대 연직응력에서 3~4.의 내부마찰각이 증가되고, 연직응력 345 t/m<sup>2</sup>에서 1.5.로 감소하는 데이터를 보인다는 것을 발견했다. 이런 경향은 Valstad & Storm(1976)이 화강편마암의 석괴 재료에 대해 얻은 결과를 다시 한번 확인하는 것이다. Holtz & Gibbs(1956)는 다른 상대밀도를 가진 자갈질토에 대한 시험을 수행했고, 밀도가 더 큰 시료의 포락선이 밀도가 낮은 시료에 대한 포락선보다 더 높다는 것을 나타내었다. Zeller & Wulliman(1957)은 다양한 간극률에 대해서 댐의 shell 재료의 전단강도를 비교하기 위하여 평행한 입경을 사용하였다. 주어진 입경에 대한 전단강도는 밀한 상태에서 밀도가 증가할수록 증가하고 더 큰 간극률의 범위하에서는 밀도가 강도에 미치는 영향이 거의 없다. 다른 논문들 역시 비슷한 경향을 나타내었다(Tombs, 1969; Leslie, 1963; Kirkpatrick, 1965).

(2) 입경(Grain Size)

굵은 입자의 영향(실제 구조물에서 혼한 1m 정도)은 실험실에서 실제 입자크기의 실험을 수행할 수가 없으므로 방파제를 비롯한 해양구조물의 공학적인 설계를 어렵게 하는 원인이 된다. 따라서 상사입도법(Scaling-down technique)을 사용한 실험결과를 이용하여 실제 크기의 재료에 대한 강도를 측정하는 것이 일반적이다. 많은 연구자들이 전단강도에 입경이 미치는 영향에 관한 연구를 수행해 왔다. 일반적으로 시료를 준비함에 있어 동일한 방법을 사용할 경우, 입경이 증가할수록 내부마찰각은 감소한다. 그러나, 이런 경향은 연구자가 달라짐에 따라 일관성을 나타내는 것은 아니다(Table 1). 따라서 최대 입경의 영향을 확인하기 위한 추가적인 연구가 여전히 필요하다.

(3) 입도분포(Gradation)

Casagrande(1965)는 입도분포가 좋고 각진(angular) 석피 재료는 균질하고 둥근재료보다 전단강도가 커서 대형 댐에 사용하는 것이 적합하다고 제안하였다. 내부마찰각에서의 입도의 영향은 몇 가지의 조사에서 보고되었다. Leslie(1973)는 균등계수가 높은 재료일수록 내부마찰각이 크다는 것을 발견했다.

Marsal(1967)은 초기에 간극률이 낮고 입도분포가 좋은 재료에 대하여 전단강도가 커진다고 주장하였다. 반면에 Kirkpatrick(1965)는 내부마찰각과 다양한 입도의 재료간의 명확한 상관관계가 없다고 주장했다. 그러나 그의 시험에서 입도는 상부와 하부만이 다양하고 대부분은 균등계수가 동일한 상태의 시료를 사용했다. 이런 결과에 대해 고찰해 볼 때, 굵고 가는

입자가 소량일 때는 전단강도에 크게 영향을 미치지 않는다는 결론을 내릴 수 있다. 다양한 종류의 시험 데이터의 고찰을 통해, Leps(1970)는 또한 강도가 높은 재료를 쓰는 것이 아니라 석피재료의 입도를 개량하는 것이 주어진 임의 연직응력하에서 내부마찰각을 증대시킨다는 시험적인 결론을 얻었다. 내부마찰각에서 강도가 높은 재료의 부정적인 효과는 석피재료와 흙의 혼합시험에서 나타났다(Marsal & La Rosa, 1976). 석피재료와 모래의 혼합물의 내부마찰각은 순수 석피재료의 마찰각보다 크다. 그러나, 석피재료와 실트 혹은 석피재료와 점토와의 혼합물의  $\phi'$  값은 혼합하지 않은 석피재료의 값보다 작다. 이것은 전단강도 혹은 마찰각에 미치는 점토와 실트의 불리한 효과를 나타낸다.

(4) 입자의 형상(Grain Shape)

입자의 형상은 각기 다른 용어로 표현될 수 있다. 각각의 입자에 대하여 길이, 폭, 깊이의 세 개의 상호 수직인 방향으로 측정되어진다. 둥근 정도와 구형도(球刑度)는 입자의 형상을 묘사하는데 사용할 수 있다. Marsal(1963)은 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. 입자 형상의 정의는 매우 정성적이고 그것을 나타내는데 아주 많은 횡수의 시험이 요구되어진다. 내부마찰각 차원에서 입자 형상의 영향은 입자의 형상이 마찰각에 상당한 영향을 미친다는 것을 발견해 낸 Holtz & Gibbs(1956)에 의해 조사되었다.

Table 3 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.
Lewis(1956)	6 mm / 직접전단	입자의 크기가 증가할수록 내부마찰각은 증가
Zeller et al.(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 조금씩 증가.
Valstad et al.(1976)	76 mm / 삼축전단	최대 입경이 증가함에 따라 내부마찰각은 두드러지게 변하지 않음.
Donaghi et al.(1978)	51 mm / 삼축전단	최대 입경이 증가함에 따라 내부마찰각은 두드러지게 변하지 않음.

하상재료와 같이 둥근(rouned) 재료에 비하여 석  
 피 재료와 같은 모난 재료가 전단강도가 증가한다. 다  
 른 모든 요소는 일정하고 입자가 각이 지면 질수록 내  
 부마찰각이 더 커진다는 것을 밝혀낸 Leps(1970)에  
 의해 동일한 결론을 나타내었다. 그러나 Donaghe &  
 Cohen(1978)은 (+)로 혹은 (-)로의 내부마찰각의  
 변화의 결과로서 입자의 모난 정도가 증가하고 이들  
 둘 사이의 관계를 만들어 내는 어떠한 결과도 없다고  
 주장하였다. 그러나, 이런 결과는 모난 입자는 입자  
 의 상호 맞물림이 더 크다는 정도의 의심을 제기할  
 수 있다. Bros & Orzeszyan(1979)는 모난 정도  
 와 질감이 다른 모래를 시험해서 입자의 모난 정도  
 의 차에 의해 야기되는 상호 맞물림 정도의 차로부  
 터 주로 내부마찰각이 달라지는 결과가 나타난다는  
 결론을 얻었다.

### 2.3 팽창비의 영향

체적변화비에 대한  $\sigma'$ 의 의존도는 Bishop(1966)  
 에 의해 증명되어졌다. 주어진 응력에서 팽창비는 재  
 료가 위치한 곳의 초기 간극률에 따라 변화하며,  $\sigma'$   
 와 매우 밀접한 상관관계에 있다. 파괴포락선의 곡선  
 경향은 응력의 증가에 따른 팽창비의 감소에 의해 주  
 로 설명되어질 것이다. 석피 재료에 대한 유사한 의견  
 이 Tombs(1969)에 의해 제시되어졌다.

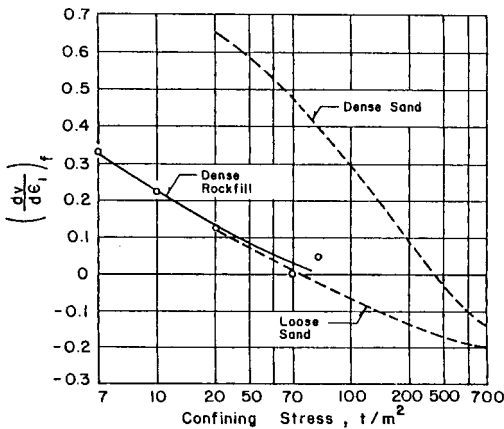


Fig. 5 구속압과 파괴시 다이러턴시비의 관계 (Bishop, 1966)

Fig. 5에 석피재료의 팽창 특성과 모래의 팽창 특  
 성이 비교되어져 있다. 다져진 석피 재료(직경 300  
 mm의 Silurian slate)의 거동은 밀한 모래보다는 오  
 히려 느슨한 모래의 거동에 더 가깝게 접근한다.

### 3. 해양구조물 설계시 사석의 지반정수 산정에 대한 고찰

「항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 1999)」에  
 의하면 방파제, 호안 안벽등의 항만설계시 기초사석  
 의 지반정수에 대하여 다음과 같이 서술되어있다.  
 기초사석으로 쓰이는 석재는 편평, 세장한 것이 아  
 니고 견고, 치밀, 내구적이며 풍화나 동결융해로 파  
 괴될 염려가 없는 것이라야 하며 水上<sup>7)</sup>의 연구자  
 료를 인용하여 대형삼축압축시험을 행하지 않고 강도  
 정수를 결정하는 경우의 기준으로서 일축압축강도가  
 300kg/cm<sup>2</sup>이상이면 점착력 2tf/m<sup>2</sup>, 내부마찰각 35.  
 는 기대할 수 있다는 결과를 제시하고 있다. 또한 항  
 만시설의 뒷채움재로서의 석재의 내부마찰각을 40.  
 로 제시하였다.

다시말하면 「항만 및 어항설계기준」에서는 구체적  
 인 기초사석의 지반정수에 대해 직접적인 언급을 피하  
 고 있다. 이는 이제까지 우리나라에 생산되는 사석에  
 대한 대형삼축시험을 한번도 실시하지 못한데 근본적  
 인 원인이 있고 2장에서 언급하였듯이 조립재에 전단  
 특성에 영향을 미치는 여러 가지 원인이 있기 때문이  
 다. 따라서 대형삼축시험을 실시하지 않을 경우 사석  
 의 지반정수는 일반적으로 다음과 같이 사용되어 왔  
 다. 안벽기초, 방파제 및 호안제체의 안정해석시에는  
 내부마찰각 40. 를 사용하고 강제치환 공법시 치환사  
 석의 내부마찰각은 35. 를 사용하고 있다. 또한  
 Bishop 원호활동에 의한 중력식 구조물의 기초사석마  
 운드의 지지력 계산시에는 점착력 2tf/m<sup>2</sup>, 내부마찰각  
 35. 를 사용하고 있다.

### 4. 대형삼축압축시험

본 연구에 사용된 대형삼축압축시험장치, 시험계획  
 및 시험과정은 다음과 같다.

#### 4.1 대형 삼축압축시험장치

대형삼축시험기의 전경은 Fig. 6과 같으며 전체적인 장치의 기본적인 개요도는 Fig. 7과 같다. 재하대는 4분지주식으로 작업에 어려움은 있지만 하중에 대해 유리하다. 공시체의 크기는 직경30cm×높이60cm이고 시료의 입경이 2.0mm~50.2mm로 제한되기는 하지만 대형삼축압축시험기의 크기로는 가장 경제적이고, 결과도 신뢰성이 있다고 알려져 있다.

##### (1) 축하중 재하 장치

축하중의 재하방향은 재하축(로트)를 하향을 관입시

키는 하향재하와 재하축을 고정시키고 공시체를 상향으로 당겨 올려 상향재하하는 방법인데 본 시험기는 하향재하방식으로 큰 하중을 작용시키는데 유리하다.

##### (2) 삼축실

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



Fig. 6 대형삼축시험기 전경

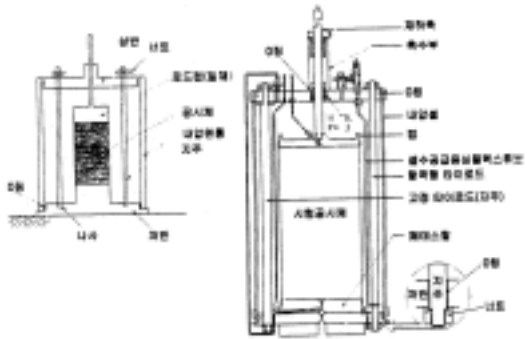


Fig. 8 삼축실

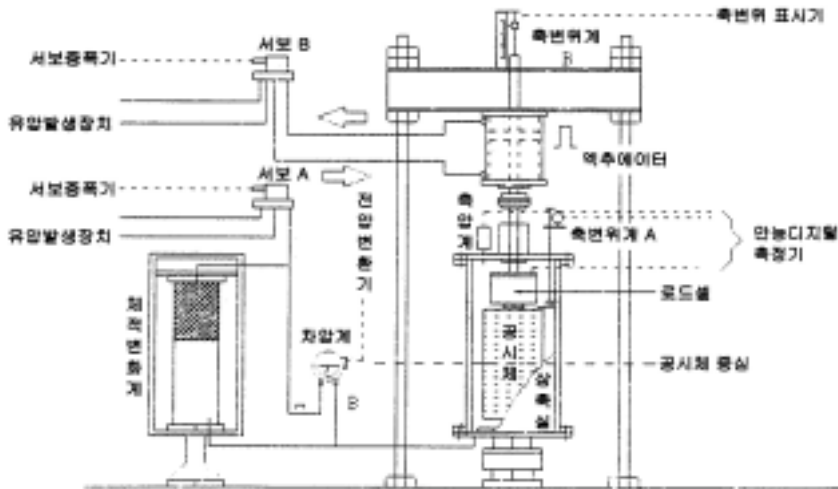


Fig. 7 대형삼축압축시험기의 전체도

### (3) 로드셀의 설치위치

로드셀이 삼축실 내부에 있어도 설치형식에 따라 두가지로 나누어 진다. 공시체와 일체형을 된것과 로드셀이 롯데에 설치되어 있고, 구좌 등을 끼워서 공시체와 접촉하고 있는 형태이다. 로드셀이 공시체와 일체로 되어 있는 형식은 이방압밀과 인장시험 등이 가능하지만, 등방압밀시에는 소정의 축력을 작용되어 저야만 된다. 또, 로드셀이 삼축실 외부에 있는 형식은 캡 실린더 부분과 축수부의 마찰의 영향을 받을 수 있어서 최근에는 삼축실 내부에 설치하는 것이 일반적인 경향으로, 본 시험기도 삼축실 내부에 설치하는 방식이다.

### (4) 계측 및 제어장치

(Electric Measuring&Controlling Unit)

계측 및 제어장치는 크게 트랜스듀서(Transducer), 증폭기(Amplifier), 제어기(Controller)의 세 부분을 나누어지며, 본 시험기는 특히 증폭시의 노이즈 발생 억제에 초점을 두었다.

### (5) 축압 조절장치

본 시험기의 축압 조절장치는 공기압식이며, 공기탱크는 각각 삼축실의 공기압에 대한 다른 곳으로의 기압변동을 감소시키기 위한 것이다.

### (6) 축변위 측정 장치

상부 캡과 하부 페데스탈의 연직상대변위를 직접 측정하여 정확한 축변위를 측정할 필요가 있다. 하부페데스탈에서 변위계를 거쳐 캡에 도달하는 경과 시간 동안 외부의 요인이 포함되면 축변위의 측정은 부정확하게 된다. 아래 Fig. 9의 A변위계는 삼축실의 축압변화에 의한 변형, B는 축방향변화에 의한 재하봉의 변형의 영향을 받는다. 캡이 자유회전하는 경우에 캡의 연직변위를 정확하게 측정하기 위해서는 120°정도 거리의 3점에서 측정하여야 한다. 미소한 축변위를 무시하는 경우에는 롯데와 캡간의 거리가 적다면 C의 변위계로 측정하는 방법이 좋다. 본 시험기에서는 A, B, C 변위계 모두를 이용하여 축변위를 측정할 예정으로 있다.

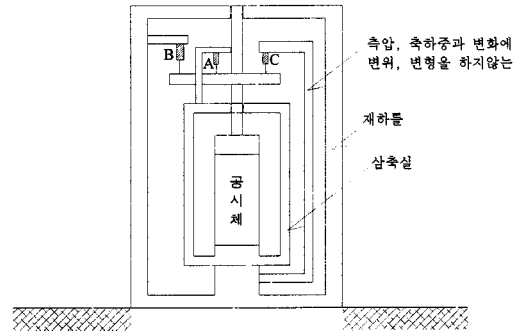


Fig. 9 축변위 측정장치

### (7) 데이터기록 시스템

데이터기록 시스템은 7~10개의 측정채널을 가지며, 앞으로도 미소변형을 측정에 대비하여 약 20채널을 확보할 예정으로 있다.

### (8) 미소변위 측정

10<sup>-6</sup>이하의 범위를 목표로 하며 감도가 뛰어난 프록시메타를 사용하였다.

## 4.2 시험 계획

(1) 3개 채석장(S, B, H)의 시료를 대상으로 하였고, 재료의 일축압축강도는 400kg/cm<sup>2</sup>~800kg/cm<sup>2</sup>의 범위로 비교적 낮은 일축압축강도의 시료를 사용하였다.

(2) 모두 9개의 대형 원주형 공시체(직경 300mm×높이 620mm)를 1.0, 2.0 및 3.0 kg/cm<sup>2</sup> 등 세 종류의 구속압 하에서 3mm/min의 속도로 배수전단 시험(CD)하는 것으로 하였다.

(3) Fig. 10에서 보는 바와 같이 3개 시료는 대부분인 균등계수  $U_c = 1.6 \sim 1.9$ 의 거의 균등한 입도이며, 시료의 최대입径은 50.8mm이며 상사 입도를 사용하였다 전세계에서 주로 사용하고 있는 공시체 제작방법은 평행입자 분포법(Parallel Grading Method<sup>17)</sup>), 절단치환법(Scalping and Replacement Method<sup>18)</sup>), 입자모형법(Matrix modeling Method<sup>19)</sup>)이며 주로 평행입자 분포법과 절단치환법이 주로 사용된다.

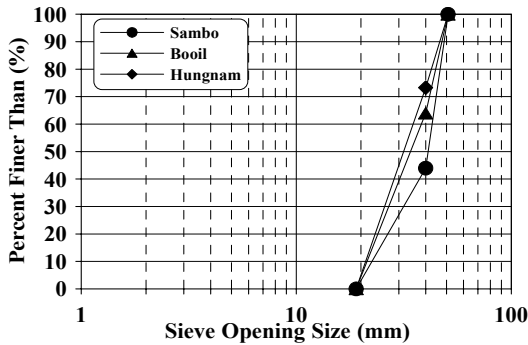


Fig. 10 시험재료의 입도분포곡선

1970년대 말 치코IV댐(높이 160cm)을 설계할 때는 소위 캘리포니아 대학교(UCB)방법이라고 알려진 평행입자 분포법이 사용되었다. 전세계에서 대형 삼축 압축시험시 시료의 직경과 최대입경의 비는 4~8을 사용하고 있으며 전세계에서 가장 많이 사용되고 있는 비는 약 1:6이므로 시료의 최대입경은 50.8mm를 사용하였다. 항만공사에서 사용하는 일반적인 사석의 규격은  $0.015\text{m}^3 \sim 0.03\text{m}^3$ 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.

(4) CD(압밀배수)시험을 표준으로 하며 유효구속압은 1, 2, 3  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 하였다. 해안항만공사시 사석기초지반위에 성토 또는 구조물의 상재하중하에 놓인 지반은 높은 구속압을 받게 되어 적절한 강도정수 평가를 위해서는 높은 현장구속압 조건으로 삼축압축 시험이 행해져야 한다. 따라서 최대구속압은 실험장치와 현장조건을 고려하도록 설정되어야 하는데, 사석재는 대단히 빈입도이고 입자가 매우 날카로워 대형삼축 압축시험시 구속압이  $3\text{kg}/\text{cm}^2$  이상되면 멤브레인이 찢어지게 되어 최대 구속압을  $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 하였다. 또한 구조물의 상재하중이 놓이지 않는 사석체체 상단부는 유효구속압이 상대적으로 작으므로 이를 감안하여 유효구속압을 1, 2, 3  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 하였다.

(5) 다짐은 실시하지 아니 하였다.

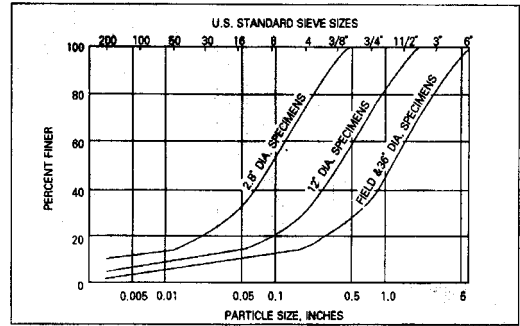


Fig. 11 대형삼축압축시험용 시료를 준비할 때 사용하는 미국 캘리포니아 대학의 평행입자분포법

### 4.3 대형삼축압축시험 과정.

시험과정은 Fig. 12와 같으며 이를 순서대로 나열하면 다음과 같다.

#### (1) 시료 입도조정

여러 가지 방법에 의한 시료 조정을 실시한다.

#### (2) 공시체 성형

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

#### 1) 시험시료는 공시체 제작 전에 약 72시간(3일)

동안 수침시켜 현장조건에 부합되도록 하였다.

#### 2) 페데스탈에 라텍스 멤브레인(두께 1mm)을 2장

을 끼운 후 철제밴드를 체결하여 긴결시킨다.

#### 3) 2분할형 몰드를 조립하고, 멤브레인을 들어올려

몰드의 바깥쪽으로 접어 걸어둔다. 이때 최대한 멤브레인이 몰드의 내면에 밀착되도록 하고 더욱 확실하게 밀착시키기 위하여 공기구멍을 통해 약  $-0.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 진공압을 가한다.

#### 4) 몰드의 바닥(페데스탈 상부)에 아크릴판을 올려

놓고 여과지를 깬다.

#### 5) 시료를 손으로 조용히 투입한 후 투입한 시료의

중량을 정확히 측정하여 기록한다. 이때 멤브레인이 손상되지 않도록 하여야 한다.

#### 6) 투입하고 남은 시료의 함수비를 측정하여 기록

한다.



- 7) 시료를 몰드의 상단부까지 채운 후 여과지를 깔고 아크릴판을 올려놓는다.
- 8) 아크릴판 위에 상부 켈을 올려놓고 몰드에 걸쳐 있는 멤브레인을 풀어 상부켈을 씌운 후 철제벤드를 사요하여 긴결한다.

(3) 공시체 세팅

- 1) 성형이 완료된 몰드를 지게차로 운반하여 이동대차 위에 정확히 올려 놓는다.
- 2) 상부켈에 배수관을 연결한다.
- 3) 이동대차 전면의 밸브 패널부에 진공관을 연결한 후 공시체 내부에 약  $-0.2\text{kg/cm}^2$ 의 진공압을 가하여 몰드 해체시 공시체가 자립할 수 있도록 한다.
- 4) 몰드를 해체한 후 공시체의 둘레길이를 공시체 높이를 4등분하여 측정하고, 공시체의 높이를 대각선 방향으로 4지점에서 측정하여 기록한다.
- 5) 내부 지주와 삼축실(triaxial chamber)의 덮개판을 조립한 후 삼축실을 씌운다.
- 6) 삼축실의 내부에 공시체 상부켈이 잠길 때 까지 수돗물을 공급한 후 삼축실을 완전히 밀폐시킨다. (이때 상부켈과 덮개판 바닥면 사이의 공간은 공기가 채워져 있게됨)
- 7) 시료 내부의 진공압을 제거하기 전에 시료의 부적당한 변형을 방지하기 위하여  $0.2\text{ kg/cm}^2$ 의 측압을 가한다.

(4) 포화

본 시료의 경우 축조재료를 바닷물 속에 투기하여 방과제를 축조하는 것과 유사한 조건을 재현하기 위하여 공시체 세팅 완료 후 24시간 동안 자연수두차를 이용하여 공시체의 하부로부터 상부측으로 물을 통수시켜 완전히 포화시킨 후 압밀한다.

(5) 압밀 및 전단

각 시료 마다 구속압력을 1.0, 2.0 및  $3.0\text{ kg/cm}^2$ 으로 변화시켜가면서 포화된 총 9개의 원주형 공시체에 대하여 압밀배수전단시험(CD)을 수행하였다. 등방압밀압력은 삼축실 상부의 공간에 소정의 공압을 가하

여 삼축실 내의 물에 압력이 전달된 수압력으로 공시체에 가해지며, 압밀압력의 크기는 고정밀 간극수압계를 통해 측정된다. 시료의 체적변화는 내체적 측정용 이중관뷰렛(측정한계 : 4000 cc)과 차압계로 측정된다. 축하중은 유압서보방식으로 제어되며, 3mm/min의 속도로 가하였다. Holtz와 Gibbs(1956)에 따르면 0.086%~1.81%의 축변형률 속도는 자유배수 모래-자갈(sand-gravel)질 시료의 응력-변형률 관계에 중대한 영향을 미치지 않는다고 보고한 바 있다.

(6) 시험 후 채분석

조립토의 전단시 입자과쇄현상을 확인하기 위해 채분석 실시

(7) 데이터 정리 및 해석

시험결과를 정리 및 분석한다.

## 5. 시험결과 및 분석

축차응력-축방향변형률 관계를 나타내는 시험결과는 Fig. 13~Fig. 15와 같으며, 파괴시의 최대주응력,  $\sigma_1$ 과 구속응력,  $\sigma_3$  즉 최소주응력을 법선응력  $\sigma$ 와 전단응력  $\tau$ 와의 평면상에 나타내면 Fig. 16~Fig. 18과 같고 이에 따른 Mohr-coulomb의 전단강도 정수는 Table 2와 같다. 시험결과 사석의 점착력은  $4.6\sim 9.4\text{tf/m}^2$  내부마찰각은  $33.1\sim 35.3$ 의 분포를 보여서, 대형삼축시험을 실시하지 않을 경우 안벽기초, 방과제 및 호안제체의 안정해석시 내부마찰각 40.를 사용하고 Bishop 원호활동에 의한 중력식 구조물의 기초사석마운드의 지지력 계산시 점착력  $2\text{tf/m}^2$ , 내부마찰각 35.를 사용하는 기존의 방법보다 점착력은 크게 나오고 내부마찰각은 작게 나오는 경향을 보였다.

S체석장 사석의 구속압  $1.0\text{kg/cm}^2$ 일 경우의 시험을 제외하고는 응력-변형률 거동이 모두 변형률경화현상(Strain hardening)을 보였고, 구속압이 증가할수록 체적변형률이 증가하는 경향을 보였다.



(a) 공시체 제작용 몰드의 조립



(b) 시료의 중량 측정



(c) 공시체의 제작



(d) 공시체의 세팅



(e) 공시체 세팅이 완료된 상태



(f) 공시체 세팅후 전경

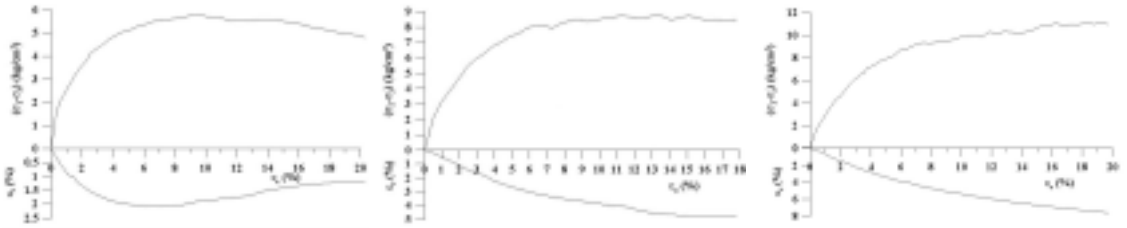


(g) 공시체의 포화 및 압밀과정



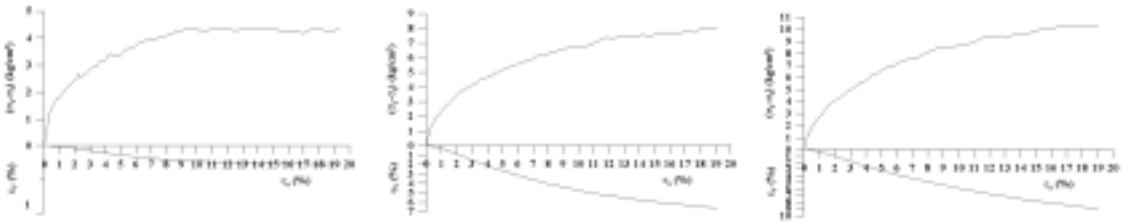
(h) 시험후 삼축실의 해체

Fig. 12 대형삼축압축시험 과정



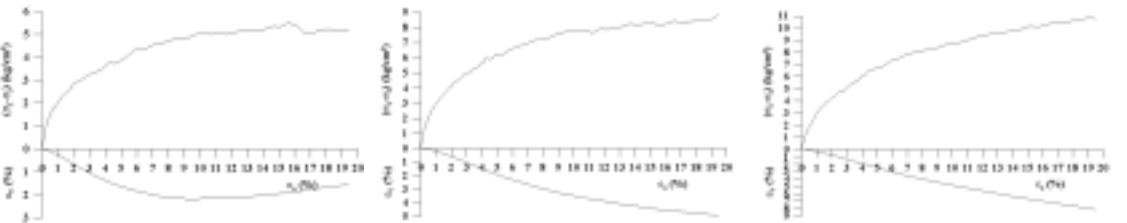
(a)  $\sigma_c = 1\text{kg/cm}^2$                       (b)  $\sigma_c = 2\text{kg/cm}^2$                       (c)  $\sigma_c = 3\text{kg/cm}^2$

Fig. 13 S체석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률-체적변형률 거동



(a)  $\sigma_c = 1\text{kg/cm}^2$                       (b)  $\sigma_c = 2\text{kg/cm}^2$                       (c)  $\sigma_c = 3\text{kg/cm}^2$

Fig. 14 B체석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률-체적변형률 거동



(a)  $\sigma_c = 1\text{kg/cm}^2$                       (b)  $\sigma_c = 2\text{kg/cm}^2$                       (c)  $\sigma_c = 3\text{kg/cm}^2$

Fig. 15 H체석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률-체적변형률 거동

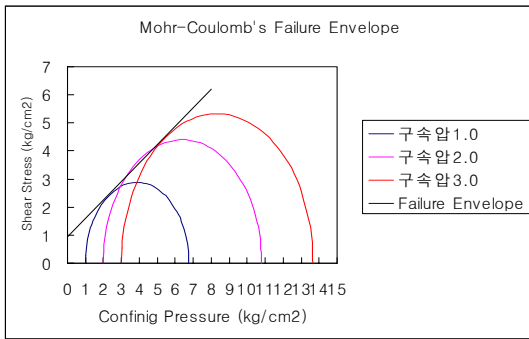


Fig. 16 S체석장 사석의 Mohr-Coulomb 파괴포락선  
(  $c = 0.94\text{kg/cm}^2$ ,  $\phi = 33.4^\circ$  )

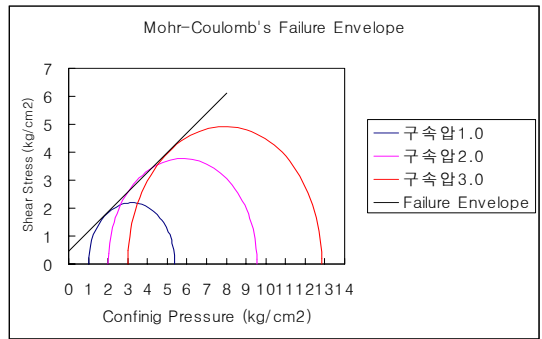


Fig. 17 B체석장 사석의 Mohr-Coulomb 파괴포락선  
(  $c = 0.46\text{kg/cm}^2$ ,  $\phi = 35.3^\circ$  )

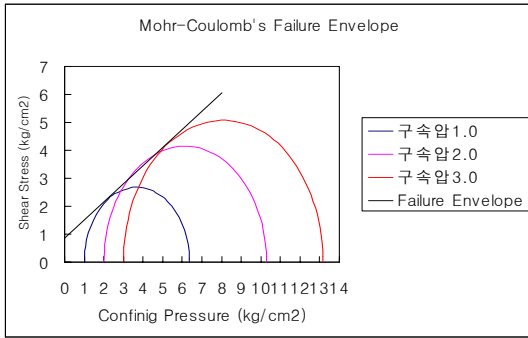


Fig. 18 H채석장 사석의 Mohr-Coulomb 파괴포락선  
 (  $c = 0.85 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\phi = 33.1^\circ$  )

Fig. 19와 Fig. 20에서와 같이 사석의 전단파괴시의 거동은 입자의 마찰저항보다는 재료의 거친면과 입자상호간의 맞물림에 의한 파쇄에 의한 것으로 재료자체의 일축압축강도가 사석재료의 전단강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

(1) 해양구조물 설계시 사석재료는 오랫동안 매우 폭 넓게 사용되에도 불구하고 그 물성치를 산정하는데 있어 대형삼축압축시험기가 없는 관계로 외국의 경험치에만 의존하였다. 그러나 2001년 국내 최초로 대형삼축압축시험기가 도입됨에 따라 우리나라도 실내시험에 근거한 사석의 지반 물성치산정 및 전단거동 분석이 가능하게 되었다.

(2) 사석의 점착력은  $4.6 \sim 9.4 \text{ tf/m}^2$ , 내부마찰각은  $33.1 \sim 35.3$ 의 분포를 보여서, 대형삼축시험을 실시하지 않을 경우 안벽기초, 방파제 및 호안체제의 안정 해석시 내부마찰각 40.를 사용하고 Bishop 원호활동에 의한 중력식 구조물의 기초사석마운드의 지지력 계산시 점착력  $2 \text{ tf/m}^2$ , 내부마찰각 35.를 사용하는 기존의 방법보다 점착력은 크게 나오고 내부마찰각은 작게 나오는 경향을 보였다.

Table 2 대형삼축시험 결과 지반 정수

시료	구속압 ( $\text{kg/cm}^2$ )	습윤밀도 ( $\text{t/m}^3$ )	함수비 (%)	초기 간극비	비중		흡수율 (%)	내부 마찰각( $^\circ$ )	점착력 ( $\text{kg/cm}^2$ )	일축압축강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )
					절건	표건				
S 채석장	1.0	1.358	3.01	0.804	2.45	2.51	2.31	33.4	0.94	430~596
	2.0	1.412	2.90	0.764						
	3.0	1.399	2.58	0.751						
B 채석장	1.0	1.405	2.44	0.779	2.50	2.55	2.00	35.3	0.46	415~573
	2.0	1.405	3.16	0.779						
	3.0	1.436	2.40	0.741						
H 채석장	1.0	1.391	2.05	0.805	2.50	2.55	2.12	33.1	0.85	470~621
	2.0	1.391	2.40	0.797						
	3.0	1.403	1.81	0.782						



Fig. 19 전단전 입자의 상태



Fig. 20 전단후 입자의 상태

S채석장 사석의 구속압 1.0kg/cm<sup>2</sup>일 경우의 시험을 제외하고는 응력-변형률 거동이 모두 변형률경화현상(Strain hardening)을 보였고, 구속압이 증가할수록 체적변형률이 증가하는 경향을 보였다.

(3) 사석의 전단파괴시의 거동은 입자의 마찰저항보다는 재료의 거친면과 입자상호간의 맞물림에 의한 파쇄에 의한 것으로 입자자체의 일축압축강도가 사석 재료의 전단강도에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 재료의 일축압축강도에 상관없이 일괄적으로 동일하게 강도정수를 적용하는 기존의 방법에서 탈피하여 많은 대형삼축시험결과로부터 재료의 일축압축 강도별로 사석의 강도정수가 제안되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 해양수산부(1999), 항만 및 어항 설계기준.
2. 水上純一, 小林正樹(1991), 마운드용 사석재의 대형삼축 압축시험에 의한 강도특성, 일본항만기술연구소, 향연자료 No. 699.
3. 莊司喜博(1983), 대형삼축압축시험에 의한 사석재의 전단 특성에 관한 고찰, 일본항만기술연구소, 향연보고서, vol.22 No.4.
4. 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.
5. Donaghe and Townsend(1976), "Scalping and replacement effects on the compaction characteristics of earth-rock mixtures", ASTM STP 5999,
6. Fragaszy, R. J. et al.(1992), "Modeling strength of sandy gravel" Proc. ASCE, GE6.
7. 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.
8. Holtz, W. G. and Gibbs, H. J.(1956), "Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils", Jr. Soil Mech. Found. Div. , ASCE, Vol. 82, SM1.

9. 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.
10. Lee, K. L. and Seed, H. B.(1967), "Drained Strength Characteristics of Sands", ASCE, Vol. 96, SM3.
11. Leps, T. M.(1970), "Review of Shearing Strength of Rockfill", ASCE, Vol. 36, SM4.
12. Leslie, D. D.(1963), "Large Scale Triaxial Tests on Gravelly soils", Proc. 2nd Pan-American Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 1, Sao Paulo.
13. Marachi et al.(1969), "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials", Report No. TE-69-5. University of California.
14. 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.
15. Marsal, R. J.(1967), "Large-Scale Testing of Rockfill Materials", Proc., ASCE, SM2.
16. Marsal, R. J.(1973), "Mechanical Properties of Rockfill", Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, John Willey and Sons, Inc., Newyork.
17. Powers, T. C.(1964), "Topic in Concrete Technology, Part I: Geometric Properties of Particles and Aggregates", Jr. PCA Research and Development.
18. Tombs, J. A.(1969), "Strength and Deformation Characteristics of Rockfill", Ph. D. Thesis, Univ. of London, London, U. K.
19. 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.
20. 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 : 2001년 10월 8일)