

대형삼축압축시험을 이용한 북제주현무암 사석재의 강도정수 산정

Evaluation of Strength Parameters of North-Cheju Basalt Rubble Using Large-Scale Triaxial Test

정철민¹⁾, Chul-Min Jung, 김종수²⁾, Jong-Soo Kim, 채영수³⁾, Young-Su Chae

¹⁾현대산업개발 토목설계팀 대리, Civil Eng. Team, Hyundai Development Company.

²⁾현대산업개발 토목설계팀 팀장, Civil Eng. Team, Hyundai Development Company.

³⁾수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Suwon

SYNOPSIS : 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 300kg/cm^2 , quoting from research results by Jun-ichi Mizukami(1991). But this facts have never been certified in Korea because there was not large-scale triaxial test apparatus until 2000 in Korea.

Firstly in Korea, the large-scale triaxial test (sample diameter, 30cm and 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 400kg/cm^2 .

Key words : North-Cheju Basalt Rubble, Large-Scale Triaxial Test, Stength Parameters

1. 서론

항만구조물 중 중력식 방파제 또는 중력식 안벽에는 자중, 토압, 파력 및 지진력 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(1999, 해양수산부)」에서는 절편법에 의한 원호활동계산의 한 예인 Bishop방법을 이용하여 기초의 지지력을 계산하는 것을 표준으로 규정하고, 이 때 사석의 강도정수는 대형삼축압축시험을 이용하여 정하는 것이 가장 합리적이나 여러가지 여건상 시험이 불가능할 경우에는 일본 항만기술연구소의 「항만기연자료 No. 699 (1991, 水上)」를 인용하여 암석의 일축압축강도가 300kg/cm^2 이상이면 점착력 0.2kg/cm^2 , 내부마찰각 35° 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 제안하였다.

2. 사석재료의 전단강도 특성

사석이란 막 갯돌 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(ϵ_a)-축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)-체적변형률(ϵ_v) 관계의 일례를 그림 1.에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 축변형률증가에 따른 축차응력의 증가가 단조롭고 피크가 나타나지 않는다. 이는 입도가 나쁜 사석재료에서 일반적으로 볼 수 있는 시험결과이다. 또한 체적변형과 축변형의 관계도 체적은 단조롭게 감소하고 부(負)의 다이러턴시성향을 나타내고 그 성향은 전단중 변화하지 않는다. 이런 결과는 록필댐재료와 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.

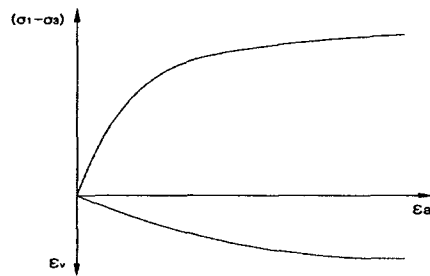


그림 1. 사석재의 축변형률-축차응력-체적변형률 관계곡선

2.2 전단강도정수와 구속압의존성

흙의 강도정수는 통상 겉보기의 점착력 c , 겉보기의 내부마찰각 ϕ 로써 설계에 이용된다. 일반적으로 항만구조물 설계시 점토는 점착력 c 만, 모래는 내부마찰각 ϕ 만의 강도정수를 이용한다. 그러나 편심경사하중을 받고 있는 기초 마운드와 같은 경우에는 c , ϕ 모두를 이용하여 평가하는 것이 일반적이다.

1회의 시험결과에 대한 Mohr응력원에서 c 를 0으로 했을 때의 내부마찰각 ϕ_0 로 정의하여 c , ϕ , ϕ_0 를 구하는 방법을 그림 2.에 제시하였다.

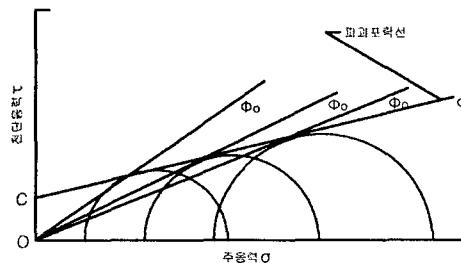


그림 2. 강도정수 c , ϕ , ϕ_0 를 구하는 방법

그림 2.와 같이 구속압력을 바꾼 수 개의 Mohr응력원에 대해서 포락선을 긋고 그 절편을 c , 경사를 $\tan \phi$ 로 하

여 c , ϕ 를 구할 수 있다. 이러한 c , ϕ 는 같은 시료를 이용하더라도 시험조건에 따라 변하기 때문에 설계조건에 맞는 적절한 시험조건을 선택하여야 한다. 사석재의 경우는 압밀배수시험이 적합하며, 이 때 강도정수는 c_d , ϕ_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)).

Fumagalli(1970) 등은 구속응력이 증가할수록 내부마찰각이 감소한다고 발표하였다. 그들은 자갈질 재료의 거친면과 입자상호간의 맞물림이 파쇄 과정에서 등갈게 되고 높은 구속응력하에서 파쇄 과정이 증대된다는 것을 주요 원인으로 설명하였다.

이와 같은 구속압의 증가에 대한 ϕ_0 의 저하를 구속압의존성이라 말한다. 구속압의존성은 입자파쇄에 의해 발생하는 것으로 해석되고 있다. 이와같은 문제는 점토의 경우에는 발생하지 않는다.

c_d , ϕ_d 와 $c=0$ 일 때의 내부마찰각 ϕ_0 의 상관관계는 다음 식(1)와 같이 표현할 수 있다.

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

3. 대형삼축압축시험

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

3.1 대형 삼축압축시험장치

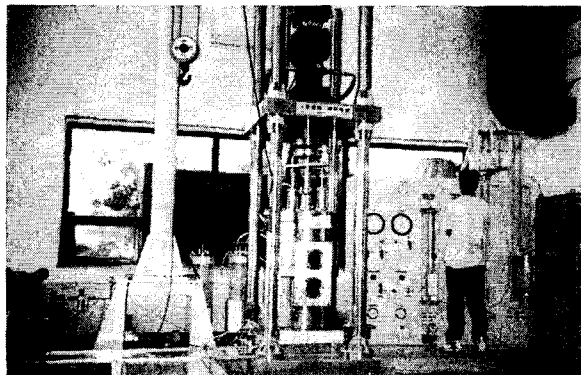


그림 3. 대형삼축시험기 전경

대형삼축시험기의 전경은 그림 3과 같다. 재하대는 4본지주식으로 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.

3.2 사석재 기반암의 물리적 특성

3.2.1 암석의 지질학적 특성

제주도 북제주군의 3곳의 채석장(S, B, H)의 기반암을 크리싱한 사석을 대상 시료로 사용하였다. 암석은 3개소 공히 제주도 화산활동의 2단계(K/Ar연대 측정; 0.6 Ma)에 속하는 장석감람석현무암류(FOB)로 구성된다. 3개소 채

석장들의 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, 감람석과 사장석의 반정이 소량 관찰되는 암회색 내지 담회색의 현무암질암으로 대표될 수 있다. 대표시료에 대하여 편광현미경 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.

3.2.2 암석의 기본물성시험결과

표 1.에서와 같이 암석의 절대건조상태의 비중은 2.45~2.50, 표면건조상태의 비중은 2.51, 흡수율은 2.00~2.31%이며 암석의 일축압축강도는 415 kg/cm²~621 kg/cm²의 범위로 비교적 낮은 일축압축강도의 시료를 사용하였다.

표 1. 암석의 기본물성 시험 결과

시 료	비 중		흡수율 (%)	압축강도 (kg/cm ²)
	절건	표건		
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

3.3 대형삼축압축시험 계획

(1) 그림 4.에서 보는 바와 같이 3개 시료는 대부분인 균등계수 $U_c=1.6\sim1.9$ 의 거의 균등한 입도이며, 시료의 최대입경은 50.8mm이며 평행입자분포법(상사 입도)을 사용하였다. 전 세계에서 사용되고 있는 공시체제작방법은 평행입자분포법(Parallel grading method), 절단치환법(Scalping and replacement method), 입자모형법(Matrix modeling method)이며 주로 평행입자분포법이 사용된다. 전 세계에서 대형삼축압축시험시 시료의 직경과 최대입경의 비는 4~8을 사용하고 있으며 전 세계에서 가장 많이 사용되고 있는 비는 약 1:6이므로 시료의 최대입경은 50.8mm를 사용하였다. 항만공사에서 사용하는 일반적인 사석의 규격은 0.015m³~0.03m³이며 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.

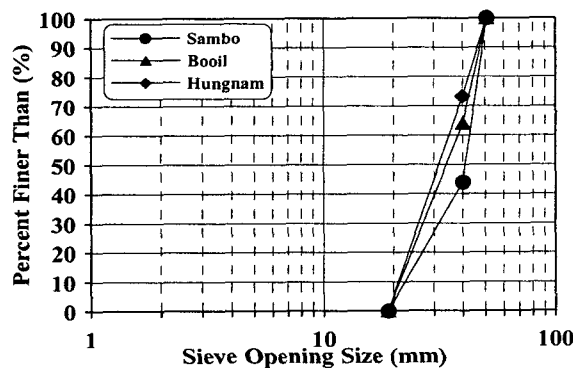


그림 4. 시험재료의 입도분포곡선

(2) 모두 9개의 대형 원주형 공시체(직경 300mm × 높이 600mm)를 1.0, 2.0 및 3.0 kg/cm² 등 세 종류의 구속압

하에서 3mm/min의 속도로 배수전단(CD)시험으로 실시하였다.

(3) 다짐은 실시하지 아니 하였다.

3.4 대형삼축압축시험 과정.

(1) 시료 입도조정

평행입자분포법에 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) 받침대에 라텍스 멤브레인(두께 1mm)을 2장을 끼운 후 철제밴드를 체결하여 긴결시킨다.

3) 2분할형 몰드를 조립하고, 멤브레인을 들어올려 몰드의 바깥쪽으로 접어 걸어둔다. 이 때 최대한 멤브레인이 몰드의 내면에 밀착되도록 하고 더욱 확실하게 밀착시키기 위하여 공기구멍을 통해 약 -0.2 kg/cm^2 의 진공압을 가한다.

4) 몰드의 바닥(받침대 상부)에 여과지를 깎는다.

5) 시료의 중량을 정확히 측정하여 기록한 후 시료를 손으로 조용히 투입한다. 이 때 멤브레인이 손상되지 않도록 하여야 한다.

6) 투입하고 남은 시료의 함수비를 측정하여 기록한다.

7) 시료를 몰드의 상단부까지 채운 후 여과지를 깔고 아크릴판을 올려놓는다.

8) 아크릴판 위에 상부 췌를 올려놓고 몰드에 걸쳐있는 멤브레인을 풀어 상부췌를 씌운 후 철제밴드를 사용하여 긴결한다.

(3) 공시체 세팅

1) 성형이 완료된 몰드를 지게차로 운반하여 이동대차 위에 정확히 올려 놓는다.

2) 상부췌에 배수관을 연결한다.

3) 이동대차 전면의 밸브 패널부에 진공관을 연결한 후 공시체 내부에 약 -0.2kg/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 상부췌가 잠길 때 까지 수돗물을 공급한 후 삼축실을 완전히 밀폐시킨다. (이 때 상부췌와 덮개판 바닥면 사이의 공간은 공기가 채워져 있게됨)

7) 시료 내부의 진공압을 제거하기 전에 시료의 부적당한 변형을 방지하기 위하여 0.2 kg/cm^2 의 축압을 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 kg/cm^2 으로 변화시켜가면서 포화된 총 9개의 원주형 공시체에 대하여 압밀배수전단(CD)시험을 수행하였다.

(6) 시험 후 체분석

조립토의 전단시 입자파쇄현상을 확인하기 위해 체분석시험을 실시한다.

(7) 데이터 정리 및 해석

시험결과를 정리, 분석한다.

4. 시험결과 및 분석

사석재의 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)-축방향변형률(ϵ_a)-체적변형률(ϵ_v) 관계를 나타내는 시험결과의 일례를 그림 5.에 나타내었다. 파괴시의 최대주응력, σ_1 과 구속응력, σ_3 즉 최소주응력을 범선응력 σ 와 전단응력 τ 와의 평면상에 나타내면 그림 6.과 같고 이에 따른 Mohr-Coulomb의 전단강도 정수는 표 2.와 같다.

그림 5.에서 같이 응력-변형률관계가 단조롭게 증가하고 뚜렷한 피크가 나타나지 않았는데 다른 채석장의 사석재에서도 이와 같은 관계를 얻었다. 이는 입도가 나쁜 사석재료에서 일반적으로 볼 수 있는 시험결과라고 생각된다. 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 빈배합이라는 것에 기인하고 있다고 생각된다. 입도분포가 나쁘기 때문에 입자간의 접촉점이 적고 입자간의 응력집중이 발생하기 쉽게 되어 정(+)의 다이러턴시 성향에 의해 전단응력이 증가하는 대신 입자파쇄와 재배열이 일어나 강도가 감소하기 때문이라고 생각된다. 또한 채석장에 관계없이 구속압이 증가할수록 체적변형률이 증가하는 경향을 보였다.

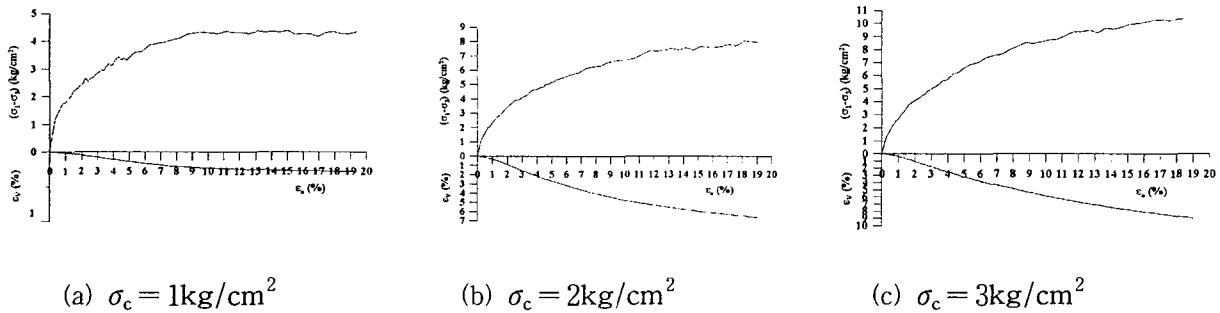


그림 5. B채석장에서 생산된 사석재의 축차응력-축방향변형률 거동

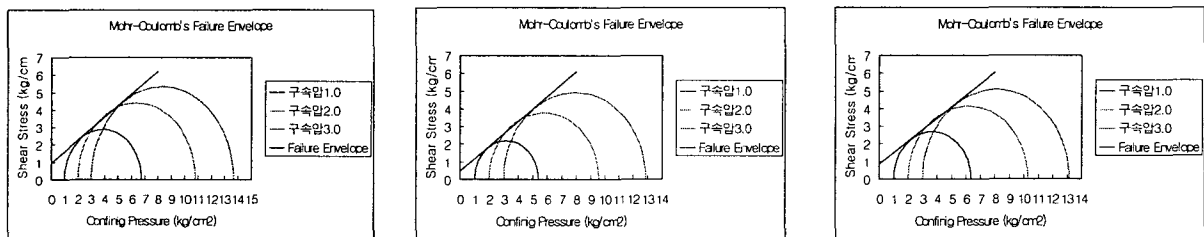


그림 6. S, B, H채석장 사석의 Mohr-Coulomb 파괴포락선

표 2. 대형삼축시험 결과 지반 정수

시료	구속압 (kg/cm ²)	건조밀도 (t/m ³)	함수비 (%)	압축강도 kg/cm ²	간극비		ϕ_0 (°)	C_d (kg/cm ²)/ ϕ_d (Deg.)
					압밀전	압밀후		
S 채석장 시료	1.0	1.358	3.01	430~ 596	0.804	0.772	47.9	0.94/33.4
	2.0	1.389	2.90		0.764	0.722	42.9	
	3.0	1.399	2.58		0.751	0.694	39.8	
B 채석장 시료	1.0	1.405	2.44	415~ 573	0.779	0.758	43.4	0.46/35.3
	2.0	1.405	3.16		0.779	0.737	40.3	
	3.0	1.436	2.40		0.741	0.684	38.4	
H 채석장 시료	1.0	1.391	2.05	470~ 621	0.805	0.778	46.0	0.85/33.1
	2.0	1.391	2.40		0.797	0.759	42.4	
	3.0	1.403	1.81		0.782	0.729	39.0	

표 2.에서 보는 바와 같이 본 연구대상 시료의 c_d 는 0.46~0.94 kg/cm², ϕ_d 는 33.4~35.3 kg/cm²의 범위를 갖는

다. 여기서 표 2.의 각각의 구속압에 따른 ϕ_0 값을 보면 S채석장 사석재가 B채석장 사석재보다 양질의 사석재라는 것을 알 수 있다. 그러나 단순히 Mohr원의 파괴포락선에서 구한 ϕ_d 는 S채석장 사석재에서 33.4° , B채석장 사석재에서 35.3° 로 정반대의 결과가 얻어진다. 즉 c_d 를 작게 보면 ϕ_d 를 과대평가하고 c_d 를 크게 보면 ϕ_d 를 과소평가할 염려가 있다. 따라서 겉보기 점착력을 적절하게 평가하지 않으면 내부마찰각을 정확히 구할 수 없다.

금회의 시험결과와 水上(1991)의 시험결과를 함께 도시하고 c_d, ϕ_d 를 가정한 후 식(1)을 이용하여 구속압과 ϕ_0 의 관계를 나타내는 곡선을 함께 도시하면 그림 7.과 같다. 그림 7.에서 식(1)을 이용하여 c_d 를 여러 가지로 변화시켜 검토한 결과, 水上(1991)이 제안한 c_d 가 0.2 kg/cm^2 인 경우 보다 겉보기점착력 c_d 가 0.3 kg/cm^2 인 경우 본 연구 시험결과에 있어 내부마찰각의 구속압의존성을 잘 반영함을 알 수 있다. 또한 본 연구 시험결과가 水上(1991)이 제안한 $c_d=0.2 \text{ kg/cm}^2, \phi_d=35^\circ$ 일 경우 구속압과 ϕ_0 의 관계를 나타내는 곡선보다 $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2, \phi_d=36^\circ$ 일 경우 구속압과 ϕ_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 다공질의 현무암으로 이루어진 북제주지역에서 생산된 마운드용 사석재의 강도정수로 암석의 일축압축강도가 400 kg/cm^2 이상이면 $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2, \phi_d=36^\circ$ 를 사용할 수 있다고 판단된다.

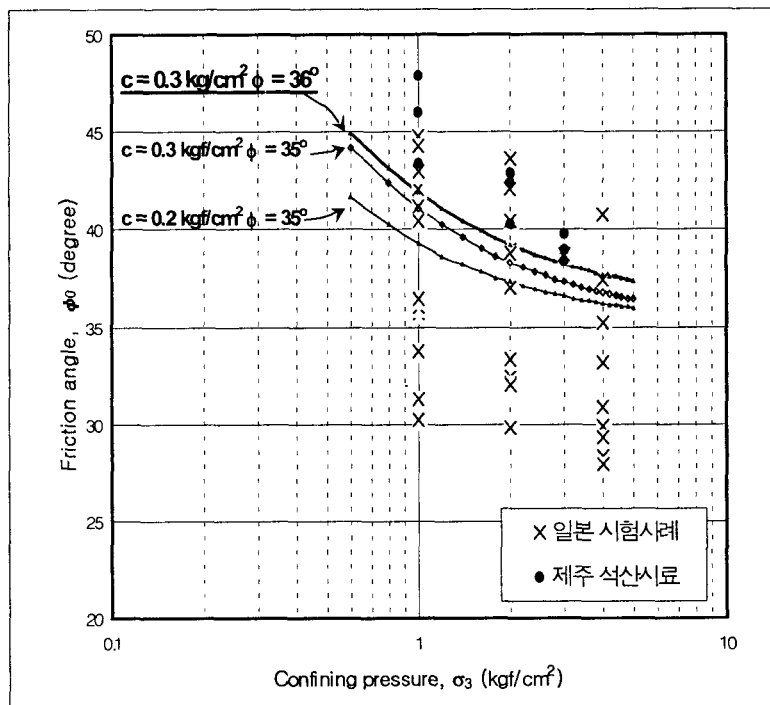


그림 7. ϕ_0 와 구속압의 관계

5. 결론

국내 항만구조물 기초사석의 강도정수 결정시 일반적으로 일본항만기술연구소의 자료를 인용하는 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 축변형의 관계에서도 역시 체적은 단조롭게 감소하고 부의 다이러턴시정향을 나타내며 그 성향은 전단중 변화하지 않는다. 그 원인은 사석재의 경우에는 균등계수가 작고 입도분포가 나쁘기 때문에 입자간의 접촉점이 적고 입자간의 응력집중이 발생하기 쉽게 되어 입자파쇄와 재배열이 일어나 강도가 감소하기 때문이라고 생각된다.

(2) 일본 항만기술연구소의 水上(1991)이 제안한 $c_d=0.2 \text{ kg/cm}^2$, $\phi_d=35^\circ$ 일 경우 구속압과 ϕ_0 의 관계를 나타내는 곡선보다 $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$, $\phi_d=36^\circ$ 일 경우 구속압과 ϕ_0 의 관계를 나타내는 곡선과 상당히 밀접한 상관관계를 가지면서 그 곡선위에 위치(그림 7.참조)하므로 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 kg/cm^2 이상이면 $c_d=0.3 \text{ kg/cm}^2$, $\phi_d=36^\circ$ 를 사용할 수 있다고 판단된다.

본 논문은 북제주지역의 현무암에 한정하여 대형삼축압축시험을 실시하였는데, 차후에는 지역, 암종, 일축압축강도등 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.

참고문헌

1. Bishop, A. W. and Henkel, D. J.(1957), "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Edward Arnold, London.
2. Fumagalli, E.(1969), "Tests on cohesionless materials for rockfill dams", Proc. ASCE, SM1
3. 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.
4. Holtz, W. G. and Gibbs, H. J.(1956), "Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 82, SM1.
5. Marsal, R. J.(1967), "Large-Scale Testing of Rockfill Materials", Proc., ASCE, SM2.
6. Marsal, R. J.(1973), "Mechanical Properties of Rockfill, Embankment Dam Engineering", Casagrande Volume, John Willey and Sons, Inc., Newyork.
7. Lee, K. L. and Seed, H. B.(1967), "Drained Strength Characteristics of Sands", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, SM3.
8. Leps, T. M.(1970), "Review of Shearing Strength of Rockfill", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 36, SM4.
9. Marachi, N. D., Seed, H. B. and Chan, C. K.(1972), "Evaluation of Properties of Rockfill Materials", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM1.
10. 莊司喜博(1983), "대형삼축압축시험에 의한 사석재의 전단특성에 관한 고찰", 일본항만기술연구소, 항연보고서, vol.22 No. 4.
11. 水上純一, 小林正樹(1991), "마운드용 사석재의 대형삼축압축시험에 의한 강도특성", 일본항만기술연구소, 항연자료 No. 699.
12. 해양수산부(1999), "항만 및 어항 설계기준".