

사석 방파제에서 내부사석의 적정규격에 관한 실험적 연구

민석진* · 배종철* · 김성득*
*울산대학교 건설환경공학부

An Experimental Study on Optimal Size of Core Material in Rubble Mound Breakwater

SECK-JIN MIN*, JONG-CHUL BAE* AND SEONG-DEUK KIM*
*Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS : Rubble Mound Breakwater 사석 방파제, Safety Rate 안전율, Porosity 공극률, Friction Angles 내부마찰각

ABSTRACT : In general, core materials of rubble mound breakwater are used at a restricted range of $0.015m^3 \sim 0.03m^3$. However, it is not satisfied with the standard design in over fifty percent of the cases. In this study, model tests and numerical analysis are employed to examine the range of core material that has no problem with capacity maintenance and stability of rubble mound breakwater. Model tests measure the porosities that are mixed in various ratios, to classify core materials by three parameters. The slope stability of rubble mound breakwater is investigated, using numerical analysis, with a friction angle and a unit weight. The change of unit weight, which is followed by the mixed rate of size core material, has no large affect on slope stability, and there is no problem with ensuring slope stability of the rubble mound breakwater.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

항만 공사는 국민생활과 국가경제에 가장 밀접하고 중요한 사회간접자본 시설로서, 이의 건설에 막대한 예산이 소요되므로, 항만의 기능성, 경제성, 안정성 등에 대한 충분한 검토를 통하여 건설해야 한다.

항만 및 어항의 외곽시설인 방파제는 항내정온도의 확보차원에서 계류선박의 안전 및 하역과 적화를 용이하게 하는 중요한 구조물이며, 파랑조건과 지반조건에 따라 여러 종류의 방파제가 연구·개발되어 있다. 이 중에 경사식 사석 방파제는 주피복재와 중간피복재 및 속채움 내부사석 등으로 구성 되어 있으며, 이는 방파제의 안정성과 직접적인 관련이 있다.

현재 파가 큰 지역의 방파제 및 호안에 사용되고 있는 주 피복재는 주로 이형블럭, T.T.P(Tetrapod)등이 사용되고 있으며, 중간피복재로는 석재나 콘크리트 블록 그리고 속채움 재료로는 사석이 사용되고 있다. 일반적으로 T.T.P 및 중간피복석인 경우는 설계조건에 맞게 제작되어 사용되어지고 있으나, 속채움 사석인 경우 석산에서 설계 기준에 맞게 분류되어져 사용되어야하나, 실제 석산에서 설계규격에 맞추어 생산한다는 것은 시간적, 경제적으로 많은 어려움이 있다.

Table 1 Comparison of standard design in rubble mound breakwater(해양수산부, 1999 ; BSI, 1991 ; Burcharth and Hughes, 2003 ; CERC, 1984)

Classification	Weight armor unit	Middle armor unit	Core material	
			Surf zone	Out-of-surf zone
Korea	W	W/10	W/200 ~ W/4,000	W/200 ~ W/6,000
U.S.A*	W	W/10	W/200 ~ W/4,000	W/200 ~ W/6,000
England**	W	W/10~W/20	1kg~1,000kg	

* : 제시된 사석규격의 입도분포는 제체사석의 경우 중량기준 170~30%까지 허용하며, 피복석의 경우 125~75%까지 범위를 허용

** : 1kg~10kg 규격의 사석은 제체사석의 5~10%가 넘지 않도록 제한, 최대사석은 파랑이 노출되는 곳에서는 3,000kg의 사석 사용도 허용

국내에서 건설되고 있는 사석 방파제의 경우 국내·외 설계 기준과 관계없이 내부사석의 크기에 대하여 $0.015 \sim 0.03m^3$ 급의 일률적인 규격으로 제시하고 있으나, Table 1에서 제시된 국내·외의 피복재 중량별 속채움 사석 소요규격 설계기준에서 제시된 바를 감안한다면 사석 인력선발을 기준으로 관례적으로 적용되어 왔던 것으로 사료되는 사석 시방규정은 다소간 조정이 되어야 할 것으로 생각되어진다.

제1저자 민석진 연락처: 울산광역시 남구 무거동 산 29

052-259-1676 seckjin@ulsan.ac.kr

1.2 연구방법

국내에서 설계되어지고 있는 사석 방파제의 제체 내부사석은 Table 1에서 제시된 국내·외 설계기준의 범위보다 훨씬 제한적인 규격, 즉 0.015~0.03m³로 적용하여 설계되고 있는 것이 현실이다.

이에 본 연구에서는 대상으로 설정한 사석 방파제 건설현장을 직접 방문하여 실제로 투입되고 있는 내부사석에 대하여 0.015~0.03m³급의 규격을 만족하는지의 여부를 조사하여 보았다. 또한 이러한 현장조사 결과를 바탕으로 Table 1의 조건 및 설계조건 등을 감안하여 세 가지 규격의 사석으로 분류한 뒤 이를 다양한 비율로 혼합하여 공극률 및 내부마찰각의 변화를 측정하였다. 이때 실시한 축소모형실험에서 공극률 측정은 1/10, 내부마찰각 측정은 1/90의 상사를 적용시켜 모형실험을 실시하였다. 이러한 결과를 이용하여 사석방파제의 제체에서 구조적으로 안전하면서 경제적인 내부사석의 범위를 제시하였다.

2. 석산의 현장관리 현황

국내 신항만 건설현장중 S건설에서 시공 중인 경사식 방파제 내부사석의 규격이 설계서의 기준을 만족하지 못하여 감사원의 지적을 받아 시정조치 등의 명령을 받은 적이 있다. 이에 본 연구에서는 현재 석산에서 공사현장으로 반입되고 있는 내부 사석들이 설계기준을 얼마나 만족하고 있는지를 조사하여 보았다. 현재 당 현장은 인근 세 군데의 석산에서 사석이 반입되고 있었으며 그중 A, B 두 곳의 석산을 직접 방문하여 현장으로 반입되기 전의 사석의 샘플을 채취하여 규격을 조사하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 실제 설계기준을 만족하는 사석의 규격은 A, B석산 모두 50%도 미치지 못하고 있었으며, 특히 A석산의 경우는 0.015~0.03m³의 규격을 만족하는 비율이 21.73%로 거의 대부분이 설계기준을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 설계기준을 벗어나는 사석규격의 허용오차의 범위를 10%로 본다면 0.03m³급 이상 되는 사석의 규격은 어느 정도 A, B석산 모두 만족하고 있음을 알 수 있었으나, 0.015m³급 이하 되는 규격의 사석은 약 50%이상 혼입되어져 사석 방파제의 내부사석에 사용되어지고 있음을 알 수 있었다. 이렇게 설계 기준을 벗어나는 사석 규격이 방파제 건설에 투입되고 있는 이유는 실제로 0.015~0.03m³라는 제한된 범위의 규격으로 많은 양의 내부사석을 석산에서 생산한다는 것은 상당히 비효율적이며, 경제적으로도 너무 많은 비용의 손실을 초래하기 때문에 설계기준을 위반하면서까지 어쩔 수 없이 현장으로 반입되고 있는 것으로 사료된다. 이때 이렇게 설계기준에서 제시한 0.015 ~ 0.03m³급의 사석규격이 100%를 만족하지 못할 경우 방파제 제체의 안전율에 미치는 영향이 어느 정도인가를 검토하여야 할 것이다. 이에 본 연구는 석산에서의 현장관리 실태를 참고로 설계기준의 내부사석 규격을 벗어나는 사석들이 혼입되었을 경우 방파제 제체의 안전에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 설계규격을

기준으로 세 가지로 분류된 사석을 여러 가지의 비율로 혼합하면서 축소모형실험을 실시하였다.

Table 2 Core material size at site A and B(1m³)

Size of core material	A(%)	B(%)
Bigger than 0.03m ³	10.07	11.08
0.015~0.03m ³	21.73	42.42
Under 0.015m ³	68.20	46.50
Total	100(%)	100(%)

3. 축소모형실험

제2장에서 살펴본 바와 같이 경사식 방파제의 내부사석의 범위(0.015~0.03m³)에 대하여 석산에서의 현장관리 실태를 조사하여본 결과 설계기준을 상당히 벗어남을 알 수 있었다. 이렇게 항만공사를 위하여 석산을 개발할 경우 내부사석의 범위가 너무 제한적이다 보면 비경제적인 시공이 될 뿐만 아니라, 결국 시공사는 설계기준을 위반하게 되는 위법한 행동을 하게 되는 것이다. 이에 본 연구는 경사식 방파제의 내부사석 규격이 구조물의 안전율에 저해가 되지 않는 범위 내에서 확대되어야 할 것으로 사료되어 여러 가지의 사석에 대하여 혼합비율을 달리하면서 공극률 및 내부마찰각의 변화를 측정하였다. 사석 경사식 방파제에서 체제사석의 안전율에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있겠지만, 공극률은 사석의 단위 중량산정을 결정할 때, 그리고 내부마찰각은 안전율 산정시 가장 커다란 영향을 미치는 요소라 할 수 있을 것이며, 따라서 본 연구에서도 공극률 및 내부마찰각에 대하여 축소모형 실험을 실시하여 변화율을 조사하였다.

3.1 공극률 실험

내부사석의 입경의 범위를 세 가지로 분류한 뒤, 사석의 혼합비율을 다양하게 변화하면서 공극률을 측정하는 모형실험을 실시하였다. 이때 실제 현장에서 사용하는 내부사석은 규격이 너무 커서 공극률 측정에 많은 제약이 따르므로 축소모형실험을 실시하였으며, 이때 적용한 축척상사비는 1/10로 결정하였다.

모형실험에 적용될 사석 규격의 범위는 0.015~0.03m³를 기준으로 30~170%의 범위를 설정하였으며, 이 규격은 국내·외 설계기준(Table 1)을 참고하여 결정하였다. 이때 모형실험에 적용되는 사석의 규격을 분류하기 위하여 골재 체가름 시험(KSF2502)을 실시하였으며, 이때 사용된 분석용 체는 50.8mm, 31.7mm, 25.4mm, 9.52mm의 체를 사용하였다. 체가름에 사용되는 체의 크기와 Table 4에서 제시한 것처럼(1/10 적용) 실험에 사용되는 사석규격의 크기가 약간의 차이가 있어서 체가름 시험에서 사용되는 분석용 체의 유통현황 등을 고려하여 사석규격을 체의 크기에 맞게 약간 수정하였다. 이

렇게 분류된 골재에서 0.015~0.03m³보다 작은 Size를 A, 0.015~0.03m³의 Size를 B, 그리고 보다 큰 Size를 C로 하여 다음 Table 3과 같이 세 가지 범위로 분류하였으며, 표에서 제시한 범위는 사석 한 변의 길이를 나타내었다.

Table 3 Range of core material size

Type	Range(cm)
A	7.5 ~ 25.0
B	25.0 ~ 31.0
C	31.0 ~ 52.7

Table 4 Core material size used in model tests

Size(m ³)	Length (cm)	Model length(mm)	
		1/10	1/90
0.146	52.7	52.7	5.86
0.03	31.0	31.0	3.44
0.015	25.0	25.0	2.78
0.0004	7.5	7.5	0.83

이렇게 세 가지 범위로 나눈 골재를 Table 5와 같이 총 14 가지 Case로 분류하여 혼합비율을 달리하면서 각각 공극률을 측정하였으며, 실험의 정확도를 높이기 위하여 각 Case당 10 회 이상 실험을 실시하여 평균한 값을 사용하였다.

공극률 측정은 메스실린더에 세 가지 사석을 무게비로 개량하여 혼합을 하였으며, 공극률 측정을 위하여 혼합되어진 사석에 물을 집어넣어 그때 물이 들어간 부피로서 공극률을 측정하였다. 이때 골재의 상태는 표면건조 포화상태를 유지하여 실험의 정확성을 기하였으며, 물과 골재 및 메스실린더 상호간에 작용하는 표면장력의 영향은 미미할 것으로 사료되어 무시하였다.

Table 5에는 총 14 Case에 대하여 공극률 측정된 결과를 함께 나타내었다. 사면안정 계산시 적용될 단위중량을 결정하기 위하여, 실제 사석의 비중이 2.6~2.8t/m³ 정도이므로 비중이 2.7일 때 공극률을 감안한 사석의 단위중량을 함께 나타내었다.

세 가지로 분류된 사석에 대하여 각 Case별로 공극률을 측정하여본 결과 최저 45.14%에서 최고 48.30%로서 약 3.15%의 범위 내에서 변화를 보였으며 평균은 46.42%를 나타내었다. 또한 A와 B급 사석만을 혼합하였을 경우 A의 비율이 증가할수록 공극률이 감소하였으며, 이는 A급 사석의 비율이 많아지면 공극률은 저하되지만 내부마찰각의 증가를 유도할 수 있어 체체의 안전에 오히려 좋은 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 B와 C급 사석만 혼합하였을 경우 C급

사석의 비율이 증가할 때 공극률의 변화는 뚜렷하게 변화가 없다가 Case 14의 경우처럼 B : C의 비율이 50 : 50일 경우 공극률의 저하가 뚜렷하게 발생하였다. 이러한 공극률 값은 Case 11일 때의 공극률 값과 거의 비슷한데 이는 B급 사석이 50%이고 나머지 50%는 A나 C급으로 채워질 경우 공극률은 저하되면서 내부마찰각은 증가하여 체체의 안전율이 향상될 수 있음을 의미하는 결과라 할 수 있을 것이다.

Table 5 Value of mean porosity according to mixing rate

Case	Mixing rate(%) (A : B : C)	Porosity (%)	Unit weight(t/m ³)
			Specific gravity (2.7)
1	0 : 0 : 100	46.80	1.4364
2	0 : 100 : 0	47.30	1.4121
3	100 : 0 : 0	46.00	1.4580
4	20 : 80 : 0	46.70	1.4388
5	0 : 80 : 20	46.50	1.4437
6	20 : 70 : 10	45.49	1.4718
7	10 : 70 : 20	48.30	1.3599
8	40 : 60 : 0	46.47	1.4445
9	0 : 60 : 40	46.90	1.4337
10	25 : 50 : 25	45.82	1.4629
11	50 : 50 : 0	45.81	1.4631
12	40 : 50 : 10	46.12	1.4548
13	10 : 50 : 40	46.47	1.4453
14	0 : 50 : 50	45.14	1.4812
Mean		46.42	1.4467

3.2 내부마찰각 측정

우리나라 항만 및 어항설계기준(해양수산부, 1999)에서는 항만구조물의 사석마운드의 편심경사 하중에 대한 지지력 계산시 원호활동 절편법인 Bishop법을 이용하는 것을 표준으로 규정하고 있다. 이때 사석의 강도정수는 대형 삼축압축 시험을 이용하여 정하는 것이 가장 합리적이나, 여러 가지 여건상 시험이 불가능할 경우에는 일본 항만기술연구소의 "항만기연 자료 No. 699"에 따르면 암석의 일축압축강도가 300kg/cm² 이상이면 점착력 0.2kg/cm², 내부마찰각 35°는 기대할 수 있다고 제시하고 있다(정철민 등, 2002). 그러나 이 자료는 어디까지나 일본에서 생산된 사석제에 대한 실험결과만을 바탕으로 한 것이므로 국내에서 생산되는 사석제의 강도정수와의 차이가 있을 수 있다. 한편 이러한 실험을 수행함에 있어서 굵은 입자의 영향(실제 구조물에서 혼한 1m 정도)은 실험실

에서 실제 입자크기의 실험을 수행할 수가 없으므로 방과제를 비롯한 해양구조물의 공학적인 설계를 어렵게 하는 원인이 된다. 따라서 상사입도법을 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, 입경의 크기가 증가할수록 내부마찰각은 약간 감소하는 것으로 알려져 있으나 연구자에 따라 일관성을 나타내는 것은 아니다. 따라서 입경분포에 따른 영향을 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

Table 6 Result and summary of research according to from friction angles of material size's effect (정철민 등, 2002)

Source	Conclusion
Zeller and Wulliman(1957)	Decrease of D → Increase of τ
Kirkpatrick(1965)	Decrease of D → Increase of ϕ
Marachi, et al(1972)	Decrease of D → Increase of ϕ
Charles(1973)	Increase of D → A little increase of ϕ
Valstad and Strom(1976)	Increase of D_{max} → Little change of ϕ
Donaghe and Cohen(1978)	Increase of D_{max} → Little change of ϕ

* Particle's size : D, Shear strength : τ , Friction angles : ϕ

본 연구에서는 실내실험 장비의 규모 및 골재 체분석에 사용되는 분석용체의 유통현황 등을 고려하여 내부마찰각 측정의 축소범위를 1/90으로 설정하였으며, 이때 사용한 분석용체의 규격은 5.6mm, No.6, No.7, No.20을 이용하였다. 실험에 사용된 직접전단시험 장비규격은 시료의 크기가 6.0cm×6.0cm, 높이는 2cm이며 변형제어속도는 1 mm/min, 구속압력은 1.0, 2.0, 3.0 kg/cm² 이다. 시료는 현장에서 사용하고 남은 석분을 채취하여 먼저 깨끗이 물로 씻은 후 완전 건조하여 사용하였으며, 실험의 정확성을 위하여 각각 2회씩 측정하였다.

내부마찰각의 측정을 위하여 분류한 실험의 Case를 Table 7 에 나타내었으며 총 21가지의 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 사석규격의 분류는 Table 3, 4에서 제시한 값과 같으며, 이렇게 구분된 세 가지 사석에 대하여 Table 7에서 제시한 비율로 혼합하면서 내부마찰각을 측정하였으며, 현장에 반입되고 있는 사석의 비율을 참고하여 B급 사석의 혼합비율을 최소 50%이상으로 설정하였다. 이렇게 분류한 사석에 대하여 내부마찰각을 측정한 결과를 Table 7 및 Fig. 1~Fig. 3 에 나타내었다.

Table 7 Measurement of friction angle for the mixing rates and its result

Case	Mixed rates(%)			Friction angles(°)
	A	B	C	
1	0	100	0	45.413
2	0	90	10	45.159
3	10	90	0	45.630
4	10	80	10	44.416
5	0	80	20	45.040
6	20	80	0	47.181
7	0	70	30	43.405
8	30	70	0	46.773
9	20	70	10	47.726
10	10	70	20	49.567
11	0	60	40	41.500
12	40	60	0	46.321
13	10	60	30	46.131
14	30	60	10	43.405
15	20	60	20	44.920
16	0	50	50	45.823
17	50	50	0	46.397
18	40	50	10	47.437
19	30	50	20	41.767
20	20	50	30	40.960
21	10	50	40	47.033
Mean				45.334

Table 7에서 내부마찰각의 변화를 살펴보면 최대 49.6°에서 최소 41.0°, 평균은 45.3° 정도의 범위에서 변화를 나타내고 있으며 이는 항만 및 어항설계기준에서 제시하고 있는 내부마찰각 35°보다 훨씬 큰 값이며, 설계기준을 충분히 만족하는 결과라 할 수 있다. 이러한 결과는 실제 현장에 반입되고 있는 내부사석의 규격이 0.015~0.03m³가 50% 정도만 혼입이 되더라도 내부마찰각이 저하하여 사석방과제 제체 안전율의 저하로 연결되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 1은 B와 C의 사석만을 혼합하였을 경우의 결과를 모아 내부마찰각의 변화를 정리한 결과이다. Case 1의 B급이 100%일 때보다 C급 사석의 비율이 증가할수록 내부마찰각이 저하되다가 B : C의 혼합비율이 50 : 50일 때 다시 증가하는 모습을 보이고 있다. 이는 Table 5에서 제시한 B와 C급 사석으로만 혼합하였을 경우 공극률의 변화와 같은 의미의

결과로서 공극률은 C급 사석의 비율이 많아질수록 약간 증가하다가 50 : 50일 때 공극률이 최소가 되었다. 즉 B와 C급으로만 혼합된 제체 사석은 C급의 비율이 늘어날수록 공극률이 약간 증가하면서 내부마찰각이 작아지다가 50 : 50 정도의 비율로 혼합될 경우 내부마찰각이 다시 증가되어 제체의 안전율이 증가함을 의미한다. 즉 B와 C급으로만 사석 방파제의 내부사석을 형성할 경우 50 : 50의 비율일 때 내부마찰각이 증가하여 제체의 안전율이 향상됨을 알 수 있었다.

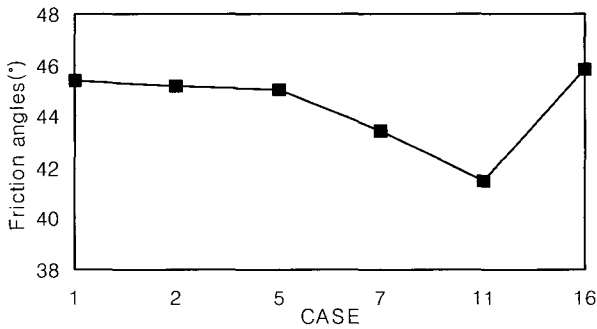


Fig. 1 Variation of friction angle in accordance with the mixing rates B : C

Fig. 2는 A와 B급 사석만을 혼합하였을 때의 내부마찰각의 변화를 살펴본 결과로서 최대는 Case 6일 경우 47.1°, 최소는 B급 사석으로만 이루어진 Case 1로서 45.4°이지만 그 범위는 1.7°정도로서 매우 작은 범위에서 입자의 크기가 감소하면서 내부마찰각은 증가하는 변화를 보였으며 Fig. 1의 결과보다는 대체적으로 상당히 양호하다고 할 수 있다. 이러한 결과는 방파제 안전에 저해되지 않는 범위 내에서 사석규격의 범위를 확대할 경우 0.015~0.03m³보다 큰 사석의 규격보다는 0.015~0.03m³의 규격보다 작은 사석을 혼합하였을 경우 공극률의 변화는 미미하면서 내부마찰각은 증가하여 구조적으로 안전하면서 경제적인 시공이 될 수 있음을 의미하는 결과이다. 이러한 결과는 Table 6에서 제시한 기왕의 연구자들이 입경의 변화에 따른 내부마찰각의 변화를 조사한 결과와 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 3은 B급 사석을 50%로 고정하고 A, C급의 사석을 각각 다른 비율로 혼합하면서 내부마찰각의 변화를 측정한 결과이다. 내부마찰각이 가장 작은 값은 Case 19, 20으로서 이 경우는 A, C급의 사석이 약 25%정도씩 혼합된 경우이며, 오히려 A, C급의 혼합비율이 한쪽으로 치우친 결과보다 작은 값을 나타내고 있다.

Table 7의 전체적인 결과를 살펴보면 내부마찰각이 최대일 때의 값이 49.6° 정도로서 이때는 B급이 70%정도이면서 A, C급이 적당한 비율로 혼합된 경우의 값이다. 즉 제체의 안전율 향상을 기대할 수 있는 조건은 A, B, C 세 가지의 분류된 사석이 다양한 비율로 혼합되어져 방파제 제체를 구성할 경우 B급이 약 70% 정도이면서 상하 15%정도의 사석이 포함되어 질 때가 이상적인 조건임을 나타내는 결과라 할 수 있다.

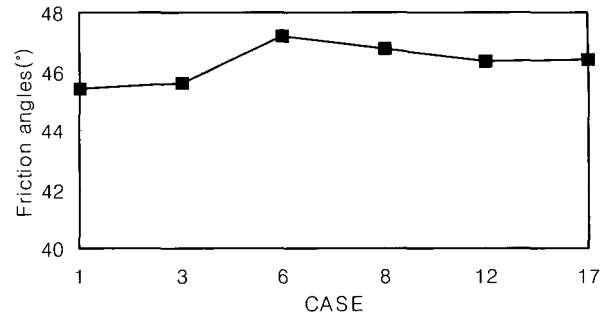


Fig. 2 Variation of friction angle in accordance with the mixing rates A : B

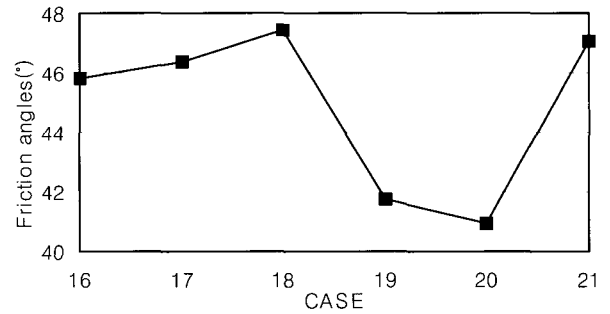


Fig. 3 Variation of friction angle with the fifty percent of B

4. 결론

사석 방파제 제체 내부사석의 규격 산정에 관하여 시공성 및 안전성에 문제가 없으면서 경제적인 설계 및 시공법에 관하여 연구하여 보았다. 국내·외 문헌들을 조사하여본 결과 제체의 안전에 문제가 없다면 1~3000kg의 광범위한 사석규격의 사용을 허용하고 있으나, 국내에서 실제 설계시 적용되고 있는 규격은 0.015~0.03m³로서 비중이 2.7일 때 40~80kg 정도의 제한된 범위 내에서 일률적으로 적용하고 있는 실정이다. 하지만 실제 현장에 반입되고 있는 내부 사석의 규격을 조사하여본 결과 설계규격을 만족하는 사석의 범위가 50%에도 미치지 못하고 있었으며, 이러한 결과는 제한된 범위 내에서 사석규격의 기준을 결정함에 따른 하나의 단적인 예라 할 수 있을 것이다.

축소모형실험을 통한 공극율의 변화를 살펴본 결과, A와 B급 사석만 혼합하였을 경우 A급 사석의 비율이 많아질수록 공극률이 감소하였으며, B와 C급 사석만을 혼합하면 C급 사석의 비율이 증가할수록 공극률도 증가하였다.

내부 마찰각의 변화를 살펴본 결과 공극률 변화에서의 결과와 같은 의미를 나타내고 있음을 알 수 있었다. A와 B급 사석으로만 이루어진 재료는 내부마찰각이 A급 사석 비율의 증가와 더불어 같이 증가하였으며, B와 C급으로만 이루어진 경우보다 훨씬 양호한 결과를 나타내고 있었다. 또한 A, B, C 세 종류의 사석을 혼합하였을 경우 A, B, C의 비율이 약 15 : 70

: 15 일 때 내부마찰각이 가장 높았다. 또한 B급 사석이 50% 이상 혼합되어진 모든 Case에 대해서 항만 및 어항설계기준에서 제시한 내부마찰각의 기준인 35° 보다 훨씬 양호한 결과를 나타내고 있었다. 이는 현재 설계에서 제시하고 있는 $0.015 \sim 0.03\text{m}^3$ 의 제한된 범위를 확대 가능함을 의미한다. 하지만 현재 검토되어진 자료는 공극률 및 내부마찰각의 변화만을 살펴본 결과이므로 선불리 내부사석 규격의 확대는 성급한 결정이라고 할 수 있다. 그러나 A, B, C의 사석이 15 : 70 : 30의 비율로 혼합되어진 경우의 내부마찰각이 약 50° 에 가까운 값으로서 이 정도의 내부마찰각을 가진 사석이라면 $0.015 \sim 0.03\text{m}^3$ 의 사석을 70%, 그리고 나머지 30%를 A와 C급 정도의 사석이 채워진다면 방파제의 안전율이 저하되지는 않을 것으로 사료된다.

이상에서 살펴본바와 같이 사석 방파제 설계시 내부사석의 규격을 $0.015 \sim 0.03\text{m}^3$ 의 일률적으로 결정하는 비경제적 설계보다는, 시공 현장에서의 시공성과 경제성을 고려하여 안전율의 저하가 없는 범위에서 사석규격의 확대가 점진적으로 필요할 것이며, 우선적으로 설계에서 제시한 값의 상하 15%정도 범위를 확대하면, 내부마찰각은 증가하고 구조적으로도 안전하면서 경제성도 향상되는 결과를 가져올 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었으며 본 연구를 가능케 한 학교당국에 감사드립니다.

참고 문헌

정철민, 김종수, 채영수 (2002). "대형삼축 압축시험을 이용한 북제주 현무암 사석재의 강도정수 및 전단거동", 한국지반 공학회 논문집, 제 18권, 제2호, pp 147-160.
 해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준 상권, pp 378-380.
 BSI (1991). Part 7. Guide to the Design and Construction of

Breakwaters, Maritime Structures, BS 6349.
 Burcharth, H.F. and Hughes, S.A. (2003). Fundamental of Design, Coastal Engineering Manual (CEM), pp VI.5.1-130.
 C.E.R.C (1984). Structural Design, Coastal Engineering Manual, pp 7.202-260.
 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.
 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.
 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.
 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 SMI.
 Valstad, T. and Storm, E. (1976). "Investigation of the Mechanical Properties of Rockfill for the Svartevann Dam(Norway) using Triaxial, Oedemeter and Palte Bearing Tests", N.G.I. Pub. No 110. Oslo, Norway.
 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.

2003년 10월 27일 원고 접수

2003년 12월 15일 최종 수정본 채택