

진동대시험을 이용한 DCM공법에 따른 방파제의 동적거동 분석

Analysis on the Dynamic Behavior of Breakwater with the DCM Method Using the Shaking Table Test

김 영 준¹⁾ · 박 인 준[†]

Youngjun Kim · Innjoon Park

Received: January 28th, 2022; Revised: February 8th, 2022; Accepted: April 1st, 2022

ABSTRACT : As recently, there have been two earthquakes with a magnitude of 5.0 or greater in Korea and the number of smaller earthquakes has increased, a lot of research and interest in earthquake-resistant design are increasing. Especially, the Pohang earthquake has also raised interest in earthquake-resistant design of port facilities. In this study, experiments and analysis were conducted on the dynamic behavior of upright and inclined breakwaters during earthquakes among port structures through the 1g shaking table test. To this end, three seismic waves were applied to the model to which the similarity law (scale effect) was applied: long period (Hachinohe), short period (Ofunato) and artificial seismic waves. The acceleration and displacement of the upright and inclined breakwaters were analyzed according to whether the DCM method was reinforced during earthquakes based on the results of shaking table test. As the result, the dynamic behavior of the upright and inclined breakwater shows a tendency to suppress the amplification of acceleration as bearing capacity and rigidity increase when DCM method is reinforced.

Keywords : Shaking table test, Breakwater, Dynamic behavior, DCM reinforcement method

요 지 : 최근 우리나라에 리히터 규모 5.0 이상의 지진발생 2건과 규모가 낮은 지진발생이 많아짐에 따라 지진피해가 늘어나면서 내진설계에 대한 많은 연구와 관심이 높아지고 있으며, 그 중 최근 발생한 포항지진으로 인해 항만시설물에 대한 내진설계에도 관심이 높아졌다. 본 연구에서는 1g 진동대시험을 통하여 항만구조물 중 직립식, 경사식 방파제에 대한 지진 시 발생하는 동적거동에 대해서 실험 및 분석을 하였다. 이를 위해 사상법칙을 적용한 모델에 장주기(Hachinohe), 단주기(Ofunato), 인공지진파 총 세가지 지진파를 적용하고, 연약지반의 DCM 공법 보강 여부를 고려하여 실험하였다. 진동대시험결과를 기초로 지진 시 DCM 공법 보강 여부에 따라 직립식과 경사식 방파제의 동적거동에 대하여 가속도 및 수평·수직 변위를 분석하였다. 검토 결과 직립식 및 경사식 방파제 동적거동은 DCM 공법 보강을 한 경우에 지지력 및 강성이 높아짐에 따라 가속도의 증폭이 억제되는 경향을 나타내었다.

주요어 : 진동대시험, 방파제, 동적거동, DCM 보강공법

1. 서 론

최근 우리나라에 리히터 규모 5.0 이상의 지진발생이 2건 발생하였고 규모가 작은 지진발생이 늘어남에 따라 지진으로 인한 피해가 발생하고 지진으로부터 안전하다는 인식에서 내진안정성에 대한 인식이 높아져서 관련 연구와 관심이 높아져 가고 있다. 지진의 피해는 단순 구조물의 피해뿐만 아니라 인명피해, 경제적 손실 등 2차적 피해를 일으키고 있다. 따라서 구조물에 대한 국내 내진설계기준에 입각한 내진 설계 기법을 적용시켜 안정성을 확보해야 한다.

2017년 11월에 발생했던 포항 지진의 경우 리히터 규모 5.4로써 우리나라에서 계속된 지진 중 가장 많은 피해를 일으킨 지진으로 기록되었다(Lee et al., 2020).

본 연구에서는 실내 진동대시험을 통하여 직립식 방파제, 경사식 방파제의 지진으로 인한 동적 거동을 분석하고자 한다. 실내 진동대시험은 상사비(Scaling factor)를 적용하여 제작한 직립식 방파제와 경사식 방파제 모형에 세 가지 지진파와 DCM 공법으로 보강된 연약지반과 그렇지 않은 연약지반에서의 지진 시 동적 거동을 분석하였다. 해당 실험에서 사용한 지진파는 Hachinohe, Ofunato와 붕괴방지 1등급 수준(0.154g)의 국내 표준스펙트럼매칭을 적용한 인공지진파를 사용하였고, 지반 조건은 DCM 공법을 적용한 연약지반과 그렇지 않은 연약지반 두 가지 조건에서 진행하였다. 방파제 모형에 가진 시 가속도, 수평·수직 변위 계측을 통하여 지진 시의 동적 거동을 분석하였다.

1) Graduate Student, Department of Construction Engineering, Hanseo University

† Professor, Department of Infra System, Hanseo University (Corresponding Author : geotech@hanseo.ac.kr)

2. 진동대시험(Shaking Table Test)

2.1 진동대시험기

방파제와 같이 실대형 크기의 실험을 할 수 없는 구조물에 대한 연구수행을 위해 실험모형으로 선정된 직립식 방파제와 경사식 방파제에 상사율(1:40)을 고려한 1g 진동대 모형시험(1g Shaking Table Test)을 수행하였다.

진동대시험기의 모식도 및 제원은 Fig. 1, Table 1과 같다 (Kim, D.H., 2012).

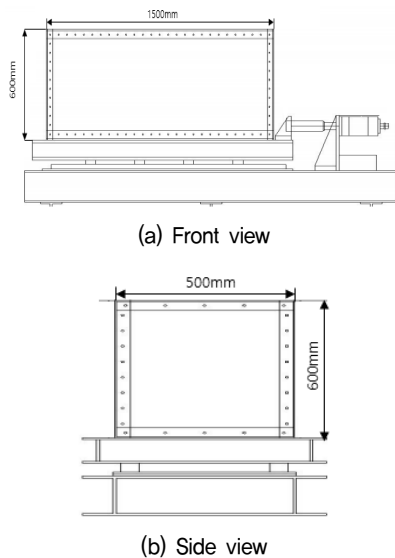


Fig. 1. Shaking table

Table 1. Specifications of shaking table

Sortation	Maximum test load (tonf)	Maximum acceleration (g)	Maximum frequency (Hz)	Shaking box (mm)		
				Length	Height	Width
Shaking table	5	1	10	1,500	600	500

2.2 모형시험에 대한 상사법칙

본 연구에서는 실제의 구조물에 대한 축소모형을 제작하여 동적거동을 분석하므로 모형과 원형사이의 상사법칙을 적용시켜야 한다. Iai(1989)가 제안한 상사법칙을 적용한 진동대실험을 진행하여 구조물의 지반-구조물-유체 상호작용을 파악하였다.

상사법칙은 3가지 Type의 상사비로 구분된다. 모형지반의 전단파 속도를 아는 경우의 Type I과 모형지반의 전단파 속도를 모를 경우 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다고 가정하는 Type II의 상사비는 지반의 변형이 진동하중이 가해지는 동안에만 발생하는 반복 유동성 거동(cyclic

mobility)인 경우 적용할 수 있으며, Type III의 상사비는 진동이 멈춘 후에도 흙의 변형이 계속 발생하는 변형률 연화(strain softening)거동에 적용할 수 있다.

본 진동대 실험에서는 진동대의 제원 및 제반 실험조건을 고려하여 구조물 원형의 1/40 크기로 모델링 하였으며, 상사법칙은 실험대상의 지반의 동적 거동특성상 Cyclic Mobility의 특성을 띠고, 모형의 전단파 속도를 판단할 수 없기 때문에 Type II를 사용하였다. 실제구조물-진동대 모형실험에 적용한 상사법칙(similarity law)은 Type II이고 적용한 값은 Table 2와 같다.

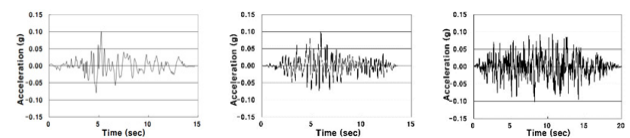
Table 2. Similarity law applied to actual structure-model experiments

Physical quantity	Similarity law		
	Type I ($\lambda_p = 1$)	Type II ($\lambda_c = \lambda^{0.5}, \lambda_p = 1$)	1/40 similarity law ($\lambda = 40$)
Length	λ	λ	40
Time	$(\lambda\lambda_c)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	15.91
Acceleration	1	1	1
Displacement	$\lambda\lambda_c$	$\lambda^{1.5}$	252.98
Pore water pressure	λ	λ	40

2.3 실험조건

2.3.1 입력지진파

입력지진파는 Fig. 2와 같이 장주기파(Hachinohe), 단주기파(Ofunato), 국내 표준스펙트럼매칭을 적용한 붕괴방지 1등급 수준(재현주기 1000년)의 인공지진파를 사용하였다 (Kim et al., 2021).



(a) Long period wave (Hachinohe) (b) Short period wave (Ofunato) (c) Artificial seismic wave

Fig. 2. Input seismic wave

2.3.2 DCM 공법

DCM 공법은 심층혼합처리공법(Deep Cement Mixing 공법)으로 그 원리는 석회, 시멘트 등을 혼합한 안정재(고화재)를 원위치에서 심층의 연약층까지 공급하여 균일하게 혼합하여 지반을 개량하는 공법이다(Joo, M.H., 2011).

DCM 공법의 특징으로 공기단축, 소요강도를 확보할 수 있고, 변형(침하)량이 적으며 신뢰성 높은 시공관리와 품질을 가지고 있다.

2.3.3 지반조건

본 실험은 연약지반에서의 지진 시 방파제의 동적거동을 파악하기 위한 실험으로써 연약지반을 모사하기 위해서 카올리나이트를 이용하여 연약지반을 조성하였다(Table 3). 그리고 연약지반의 DCM 보강의 유무에 따른 비교·분석을 위하여 방파제 형식에 따른 지반조건을 동일하고 DCM 유무를 달리하여 진행하였다. Fig. 3과 같이 각 구조물 상부에 수평·수직 변위를 측정하기 위해 LVDT를 설치하였고, 최대 가속도를 측정하기 위해 구조물의 도심(A001)과 지표면(A002)에 가속도계를 설치하였다.

Table 4와 같이 방파제 유형과 DCM 공법 보강 유무에 따른 네 가지 Case에 대해서 실험을 진행하였다.

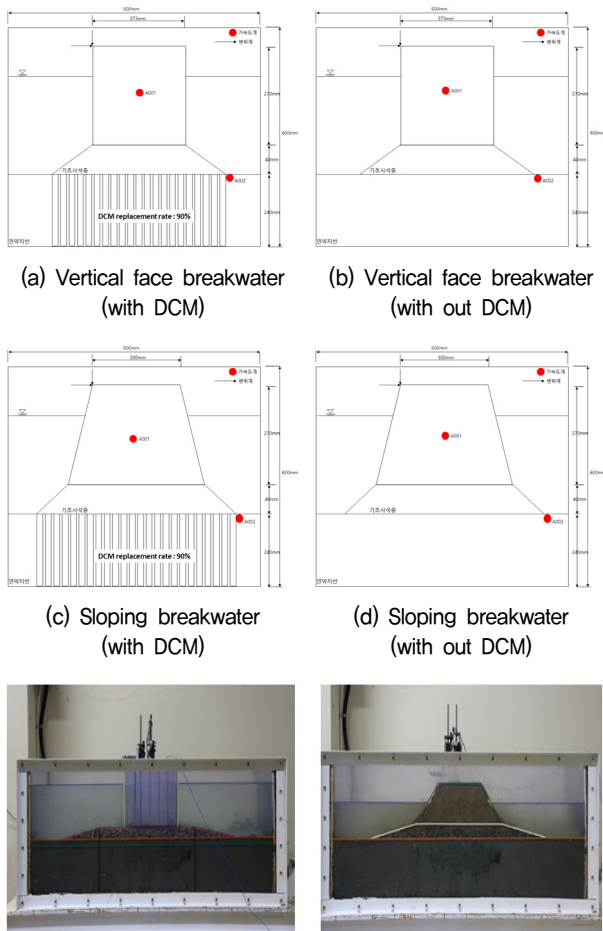


Fig. 3. Locations of measurements

Table 3. Kaolinite basic properties

Material name	Specific gravity	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index (%)	Pass through No. 200 (%)	Unified soil classification
Kaolinite	2.54	65.62	34.71	30.91	95.39	CH

Table 4. Cases of shaking table test

Case No.	with DCM	Breakwater type	Input wave
1	O	Vertical face breakwater	Hachinohe, Ofunato, artificial seismic wave
	X		
2	O		
	X		
3	O		
	X		
4	O	Sloping breakwater	Hachinohe, Ofunato, artificial seismic wave
	X		
5	O		
	X		
6	O		
	X		

3. 진동대 실험 결과 및 분석

3.1 직립식 방파제

3.1.1 장주기파(Hachinohe)

직립식 방파제 모델에 장주기파를 가진했을 때 DCM 보강 공법을 적용시킨 경우(case 1) 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 4, Fig. 5와 같은 결과를 얻었다.

DCM 보강 공법 미적용 모델(case 2)에 대해서 장주기파를 가진했을 때 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 6, Fig. 7과 같은 결과를 얻었다.

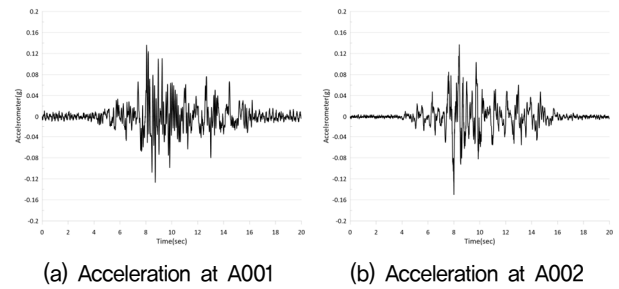


Fig. 4. The acceleration measurement value of Case 1

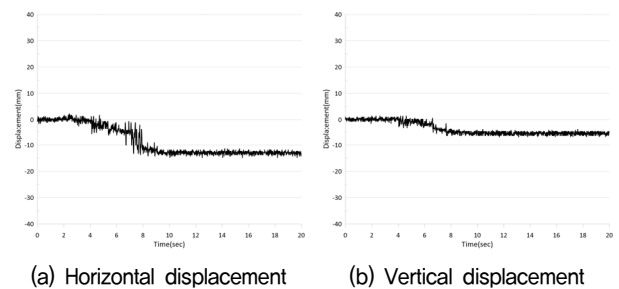
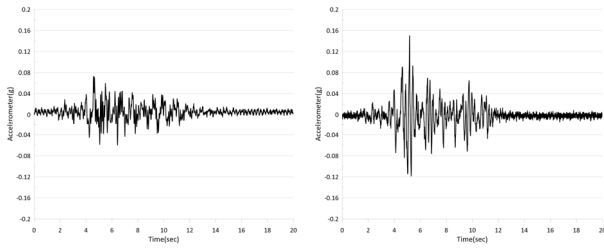
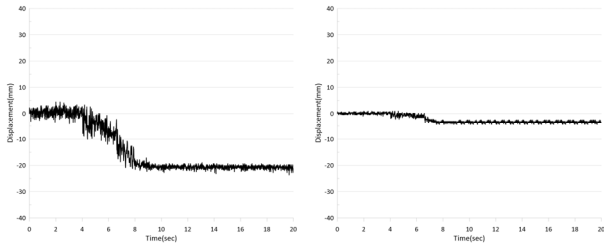


Fig. 5. Measurement value of displacement in Case 1



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 6. The acceleration measurement value of case 2

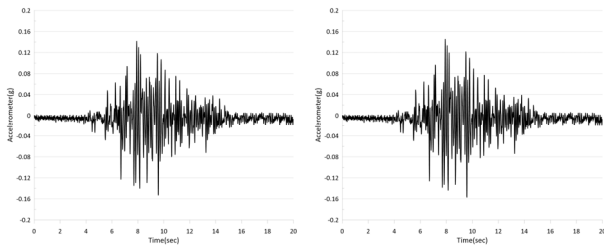


(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 7. Measurement value of displacement in Case 2

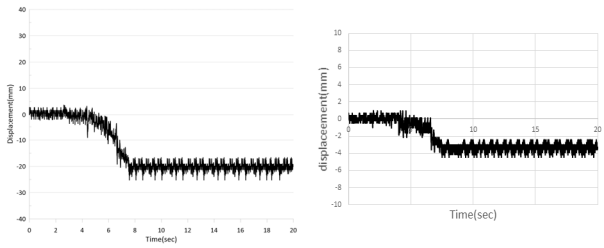
3.1.2 단주기파(Ofunato)

직립식 방파제 모델에 단주기파를 가진했을 때 DCM 보강 공법을 적용시킨 경우(case 1) 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 8에서 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

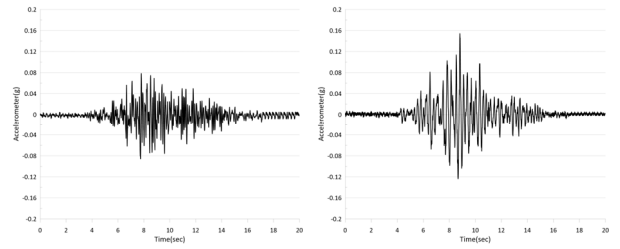
Fig. 8. The acceleration measurement value of Case 1



(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

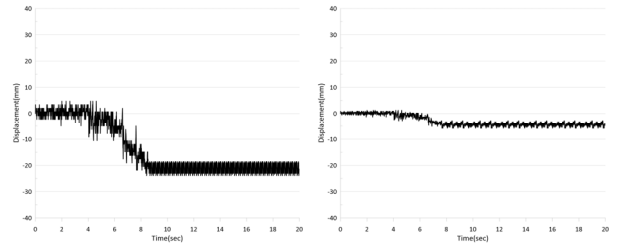
Fig. 9. Measurement value of displacement in Case 1

DCM 보강 공법 미적용 모델(case 2)에 대해서 단주기파를 가진했을 때 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 10, Fig. 11과 같은 결과를 얻었다.



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 10. The acceleration measurement value of Case 2



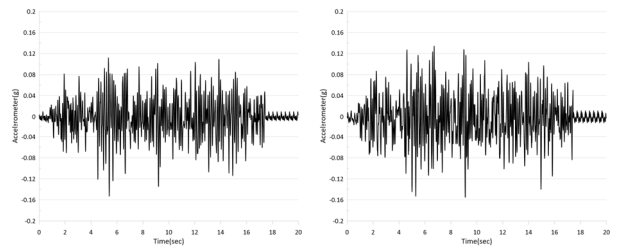
(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 11. Measurement value of displacement in Case 2

3.1.3 인공지진파(artificial seismic wave)

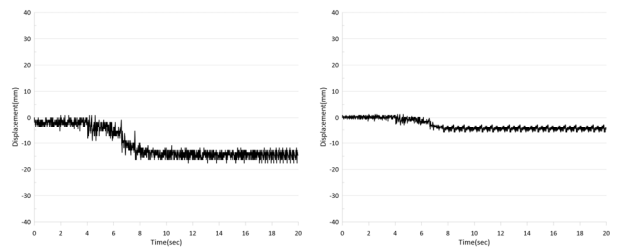
직립식 방파제 모델에 인공지진파를 가진했을 때 DCM 보강 공법을 적용시킨 경우(case 1) 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 12에서 Fig. 13과 같은 결과를 얻었다.

DCM 보강 공법 미적용 모델(case 2)에 대해서 인공지진파를 가진했을 때 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 14, Fig. 15와 같은 결과를 얻었다.



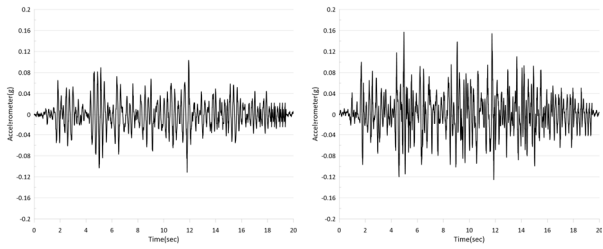
(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 12. The acceleration measurement value of Case 1



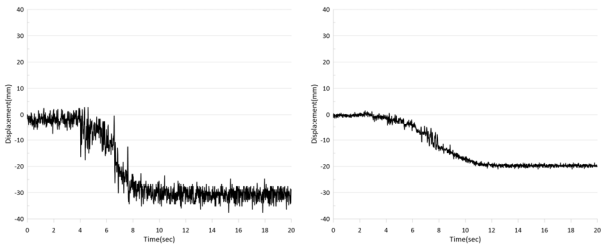
(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 13. Measurement value of displacement in Case 1



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 14. The acceleration measurement value of Case 2



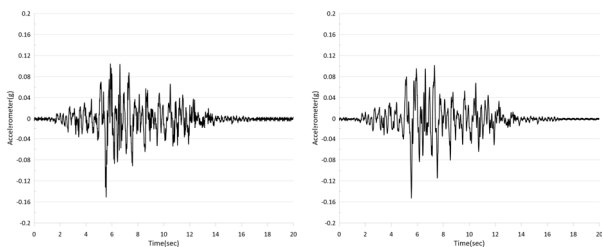
(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 15. Measurement value of displacement in Case 2

3.2 경사식 방파제

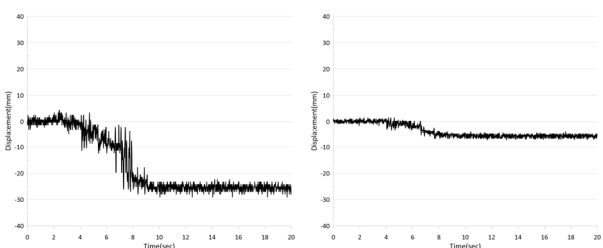
3.2.1 장주기파(Hachinohe)

경사식 방파제 모델에 장주기파를 가진했을 때 DCM 보강 공법을 적용시킨 경우(case 3) 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 16에서 Fig. 17과 같은 결과를 얻었다.



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

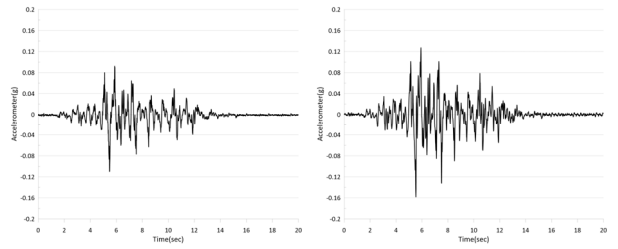
Fig. 16. The acceleration measurement value of Case 3



(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

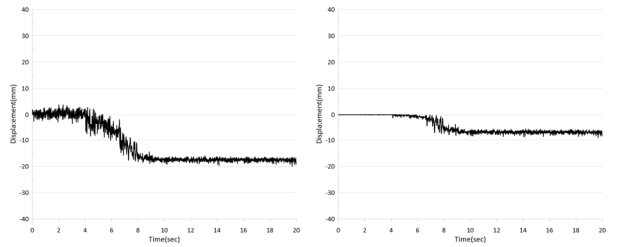
Fig. 17. Measurement value of displacement in Case 3

DCM 보강 공법 미적용 모델(case 4)에 대해서 장주기파를 가진했을 때 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 18, Fig. 19와 같은 결과를 얻었다.



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 18. The acceleration measurement value of Case 4

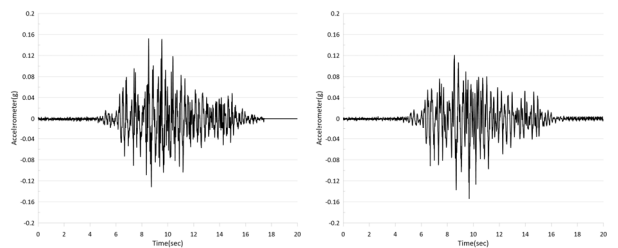


(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 19. Measurement value of displacement in Case 4

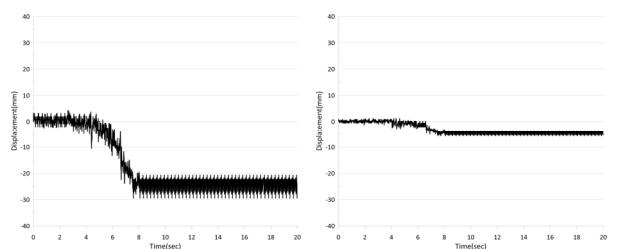
3.2.2 단주기파(Ofunato)

경사식 방파제 모델에 단주기파를 가진했을 때 DCM 보강 공법을 적용시킨 경우(case 3) 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 20에서 Fig. 21과 같은 결과를 얻었다.



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

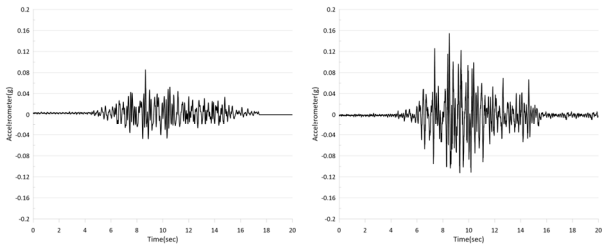
Fig. 20. The acceleration measurement value of Case 3



(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

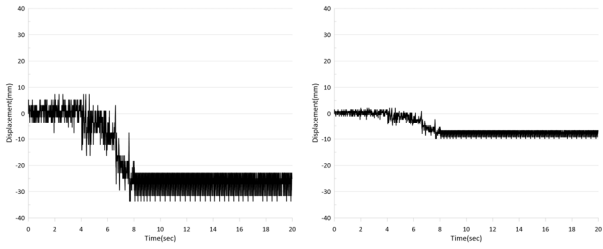
Fig. 21. Measurement value of displacement in Case 3

DCM 보강 공법 미적용 모델(case 4)에 대해서 단주기파를 가진했을 때 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 22, Fig. 23과 같은 결과를 얻었다.



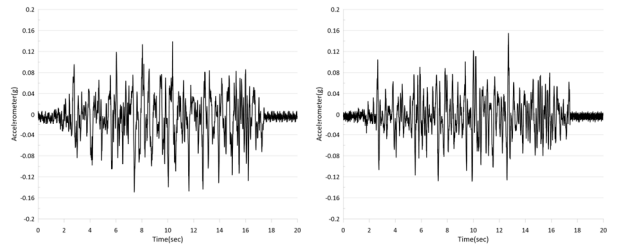
(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 22. The acceleration measurement value of Case 4



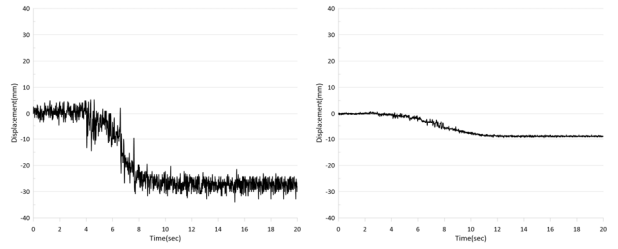
(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 23. Measurement value of displacement in Case 4



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 26. The acceleration measurement value of Case 4

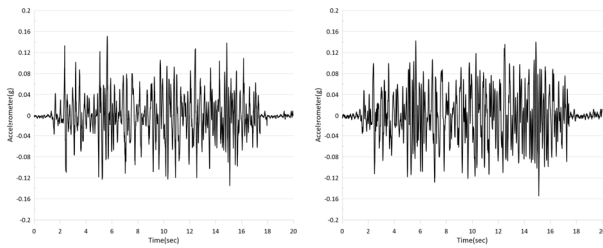


(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 27. Measurement value of displacement in Case 4

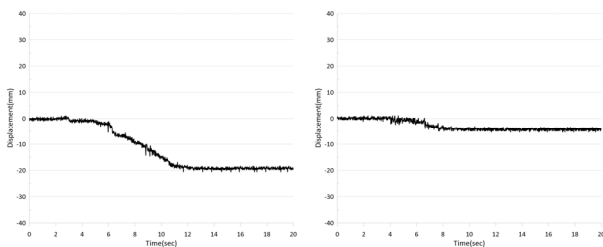
3.2.3 인공지진파(artificial seismic wave)

경사식 방파제 모델에 인공지진파를 가진했을 때 DCM 보강 공법을 적용시킨 경우(case 3) 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 24에서 Fig. 25와 같은 결과를 얻었다.



(a) Acceleration at A001 (b) Acceleration at A002

Fig. 24. The acceleration measurement value of Case 3



(a) Horizontal displacement (b) Vertical displacement

Fig. 25. Measurement value of displacement in Case 3

DCM 보강 공법 미적용 모델(case 4)에 대해서 인공지진파를 가진했을 때 가속도, 수평·수직 변위에 대해서 Fig. 26, Fig. 27과 같은 결과를 얻었다.

3.3 진동대 시험 결과 분석

실험 Case별 입력지진파에 따른 최대 가속도값 및 최대 수평·수직 변위값은 Table 5와 같다.

Table 5. Maximum measured value for each cases

		Maximum acceleration (g)		Maximum displacement (mm)	
No.	Reinforcement	A001	A002	Horizontal	Vertical
Case1	with DCM	0.151	0.152	14.799	6.957
	without DCM	0.082	0.151	23.679	6.926
Case2	with DCM	0.150	0.154	25.237	4.404
	without DCM	0.086	0.153	37.577	9.112
Case3	with DCM	0.153	0.155	15.429	9.139
	without DCM	0.112	0.152	34.899	20.762
Case4	with DCM	0.151	0.153	29.060	7.283
	without DCM	0.109	0.152	33.505	10.970
Case5	with DCM	0.152	0.154	29.457	5.737
	without DCM	0.083	0.154	34.671	9.872
Case6	with DCM	0.151	0.154	20.592	5.419
	without DCM	0.116	0.155	33.981	9.512

DCM 공법 보강을 한 경우에 가속도를 측정된 결과(Fig. 28) A001과 A002의 값이 비슷하게 측정이 되었다. 이는 연약지반을 보강하여 가진 시 지반이 일체거동을 했기 때문에 판단된다. 반면 DCM 공법을 미 보강한 경우에는 방파제의 도심에서 가속도값이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 지진 시 원지반과 구조물의 접촉면에서 상대적인 변위가 발생하여 지진 에너지가 구조물에 전달되지 못하고 소산됨에

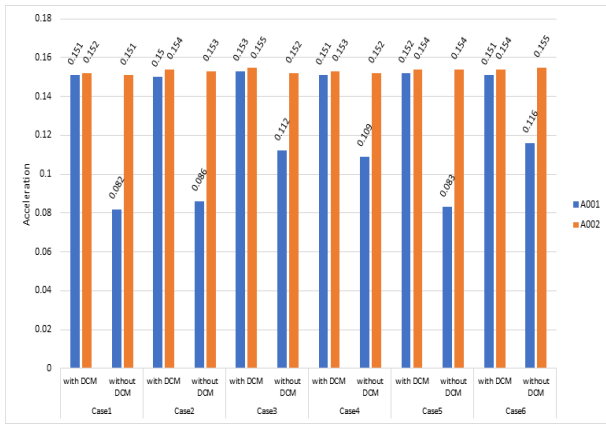


Fig. 28. Comparison of maximum acceleration value

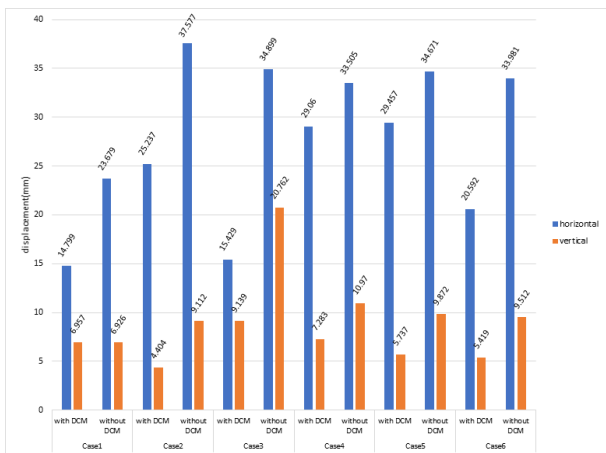


Fig. 29. Comparison of maximum vertical and horizontal displacement by case

따라 발생한 응답특성으로 판단된다. 이를 통해서 방파제 설계 시 연약한 원지반의 수평지진계수(k_h)는 지표면 최대가속도 값의 50% 정도 사용하는 것이 보수적인 설계가 될 수 있다.

방파제의 최상단에서 Case별 최대 수직 및 수평변위를 측정하여 비교한 결과 DCM 공법 보강을 적용한 조건이 DCM 공법을 미 보강한 조건보다 지진 시 수직 및 수평변위값이 작게 측정되었다. 이는 보강을 한 연약지반보다 보강을 안한 연약지반의 경우 상대적으로 수직 및 수평방향으로 거동이 크게 발생하였다. 이를 통해 연약지반은 DCM 보강의 경우 최대가속도는 DCM 보강을 하지 않았을 경우보다 커지므로 변위에 대한 내진성능이 향상된다는 실험결과를 얻었다.

4. 결 론

연약지반에서의 DCM 보강 공법 적용 및 입력지진파에 따른 방파제의 동적거동에 대해서 진동대시험을 통해서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) DCM 보강 공법을 적용한 경우 지진 시 원지반과 방파제에 측정된 지진가속도값이 비슷하게 측정되었고, DCM 보강 공법을 미 적용한 경우 지진 시 원지반에 측정된 지진가속도 값보다 방파제에서 측정된 지진 가속도 값이 적게 측정되었다. 이는 지진 시 원지반과 방파제의 접촉면에서 상대적인 변위가 발생하여 지진 에너지가 구조물에 전달되지 못하고 소산됨에 따라 발생한 응답 특성으로 판단된다.
- (2) 1g 진동대시험을 통하여 가진 시 방파제 모형의 최상단에서 발생하는 수직 및 수평변위를 조건별로 계속하였다. 가진 시 최대 수직 및 수평변위값은 직립식, 경사식 방파제 모두 DCM 공법 보강 적용과 DCM 공법 보강 미 적용 단주기파(Ofunato)인 경우에 가장 크게 측정되었다. 결과적으로 DCM 보강 공법을 적용한 경우에 수직 및 수평변위가 크게 감소하는 것으로 확인되었다. 따라서 방파제의 허용변위측면으로 검토할 경우 DCM 적용이 내진성능향상에 도움이 될 것으로 판단된다.
- (3) 최대가속도 측정결과 직립식 방파제의 경우 DCM 보강 공법을 적용한 인공지진파를 가진하였을 때 0.153g으로 가장 높게 측정되었고, 경사식 방파제의 경우 DCM 보강 공법을 적용한 단주기파(Ofunato)를 가진하였을 때 0.152g으로 가장 높게 측정되었다. 직립식, 경사식 방파제 모델 모두 DCM 공법 미 보강의 경우 가속도값이 감소하는 경향을 보였다. 이는 지진 시 원지반과 구조물이 접촉면에서 상대적인 변위가 발생하여 지진 에너지가 전달되지 못하고 소산됨에 따라 감소한 것으로 판단된다.
- (4) DCM 적용여부에 따른 주기별 반응에서 단 혹은 장주기에 영역에서 DCM 공법 적용 시 주기가 증폭되는걸 확인하였다. 이를 통해 방파제에 전달되는 진동특성을 고려하여 방파제에 대한 보강이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(항만 및 어항설계기준 고도화를 위한 성능기반 내진설계기술 개발).

References

1. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soils and Foundations, JGs, Vol. 29, No. 1, pp. 105~118 (In Japanese).

2. Joo, M. H. (2011), A CASE STUDY OF DCM METHOD ON CONSTRUCTION WORKS OF COASTAL, Mater's thesis at Ulsan University Graduate School of Engineering, pp. 3~9 (In Korean).
3. Kim, D. H. (2012), The seismic stability of breakwater armor blocks by shaking table test, Mater's thesis at Suwon University Graduate School of Engineering pp. 33~38 (In Korean).
4. Kim, Y. J., Jang, D. I., Kawk, C. W. and Park, I. J. (2021), Seismic stability evaluation of the breakwater using dynamic centrifugal model test, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 37, pp. 39~50 (In Korean).
5. Lee, S. H., Choo, Y. W. and Kim, D. S. (2013), Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) mode container for dynamic geotechnical centrifuge tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 44, pp. 102~114 (In Korean).