

원형 Cell을 이용한 해상가물막이 설계 사례 Design of Marine Cofferdam by Circular Cell

박중배¹, 이종학², 배기현², 양봉근²

Joong Bai Park¹, Jong Hak Lee², Ki Hyun Bae² and Bong Keun Yang²

1. 서 론

시화호 조력 발전소는 해수순환을 통한 시화호의 수질을 개선, 무공해 해양에너지 개발하고 CO₂ 저감 및 국가 부존자원의 개발을 목적으로 하고 있는 프로젝트이다. 조력발전은 청정에너지로서 유류에너지 의존도가 높은 우리나라로서는 에너지 대체 효과가 매우 높다고 할 수 있다. 조력발전소는 천혜의 해상 자원하에서 건설되어 지는 것으로서 발전소 공사를 위해 해상 가물막이공사가 수반되게 된다. 해상가물막이 공사의 목적은 육상 공사에 의한 공사의 용이성과 경제성 그리고 품질 확보에 있다고 할 수 있다.

2. 공사지 현황

2.1 위치 및 주변 조건

본 공사지의 위치는 Fig. 1과 같이 시화호를 형성하고 있는 방조제선상에 있다. 주변환경은 시화호내에 간척지 조성사업이 이루어지고 있고 시화테크노벨리 및 시화2단계 도시 용지 사업이 예정되어 있으며 시화호내 관리 수위는 이러한 사업과 연계되어 EL(-)1.0m로 조건부여 되어 있다.

2.2 지반조건

조력 발전소 건설예정지의 지반조사 현황은 Fig. 2와 같이 총74공을 수행하였으며 지층단면도 및 지층층후도는 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타낸다.



Fig. 1. 시화호 방조제 전경

그림에 나타내는 바와 같이 지층구조는 매립토, 퇴적토, 풍화암, 기반암으로 분포하고, 풍화대는 GL(-)3~(-)10m로 출현하고 있으며, 사업부지 중심부에 경암이 솟아오른 형태를 이루고 있다.

3. 원형셀의 설계

조력발전소 건설을 위해서는 건조상태의 작업공간을 형성하는 것이 유리하다. 시화호 조력발전소 부지는 기존시화방조제보다 약간 해측으로 암반위에 올라가도록 계획되었다. 따라서 기존 시화방조제에 sheet pile을 타입하여 시화호 내측 가물막이로 활용하도록 설계하였고 외측에 대해서는 원형셀로 가물막이를 설계하였다. 원형셀공법은 1902년 항만공사에 가물막이로 처음 시공된 이후 각국에서 다양한 가물막이 및 안벽구조물로 시공되고 있는 차수성이 뛰어난 구조물이다. 또한 원형셀이 타입되지 않은 상태

¹ (주)대우건설 토목기술2팀, 공학박사

² (주)대우건설 토목기술2팀

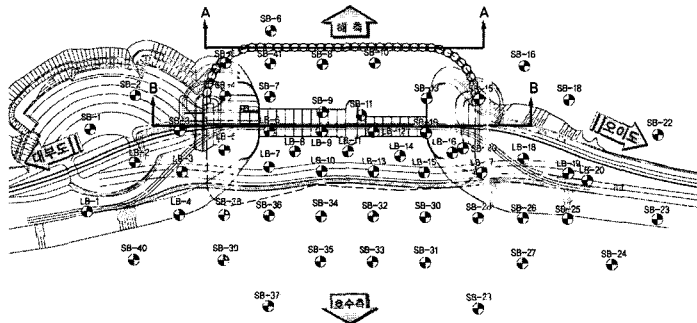


Fig. 2. 시추조사 위치도

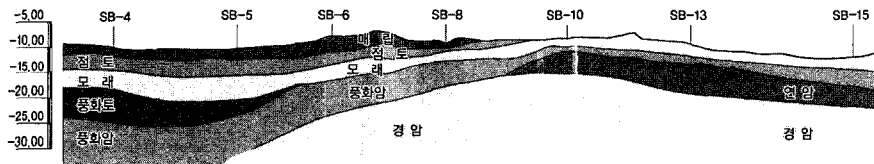


Fig. 3. 지층단면도

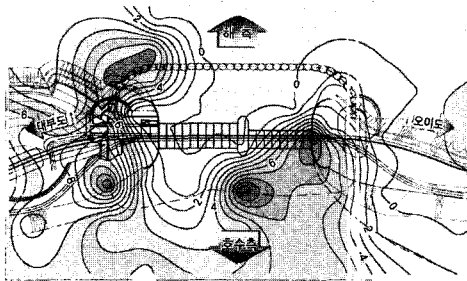


Fig. 4. 퇴적층 충후도

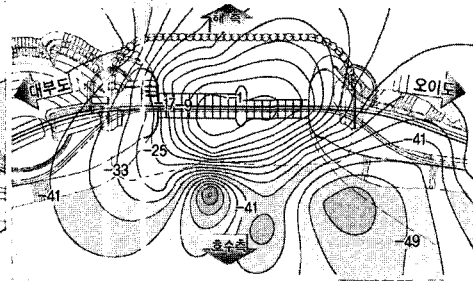


Fig. 5. 경암 출현심도

에서도 자중으로 안정성을 유지할 수 있다. 따라서 서해안처럼 조차가 큰 난공사의 가물막이로써 확실한 안정성을 보장하는 공법이라 할 수 있다. 또 원형셀을 형성하고 모래 혹은 토사 등으로 속채움을 하므로 외부 환경 피해를 주지 않아 환경문제가 대두되었던 시화호에 적절한 공법으로 판단되었다.

원형셀의 설계flow는 다음(Fig. 6)과 같다. 대표지반 단면과 가정된 원형셀 체원은 Fig. 7과 같고 설계지반 물성치는 Table 1과 같다. 설계시 고려한 외적하중은 정수압, 파압, 조류력, 그리고 지진시 동수압으로 Fig. 8과 같다.

원형셀의 외적안정은 지반에 지지된 중력식 벽체로 가정하고 설계검토를 한다. 속채움된 원형셀을 강체로 생각하고 전체자중으로 외력에 저항하는 구조로서 일반적으로 중력식 옹벽과 비슷하다. 하지만 그

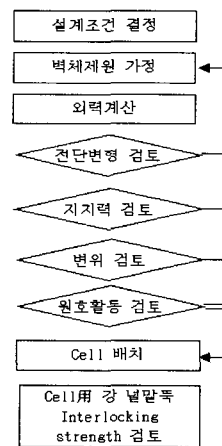


Fig. 6. 원형셀의 설계 flow

Table.1 설계지반 물성치

구분	단위중량 (γ t, tf/m ³)	점착력 (c, tf/m ²)	내부 마찰각 (ϕ , °)	투수계수 (k, cm/sec)	변형계수(tf/m ²)		포아송비	
					E	Ed	ν	νd
매립층	1.90	3.0	30	7.0E-05	1.0E+04	1.4E+04	0.33	0.49
점토층	1.85	6.0	-	1.0E-06	5.0E+02	4.2E+03	0.35	0.49
모래층	1.80	0.0	30	2.0E-03	2.0E+03	5.2E+03	0.33	0.49
풍화토층	1.90	1.0	33	1.8E-04	2.0E+04	2.2E+04	0.33	0.48
풍화암층	2.10	3.0	35	6.0E-05	3.0E+04	1.5E+05	0.33	0.44
연암층	2.20	40.0	35	4.0E-05	6.0E+04	8.4E+05	0.30	0.32
보통암층	2.30	150.0	40	7.0E-06	5.0E+05	1.2E+06	0.25	0.29
경암층	2.50	300.0	45	4.0E-06	1.0E+06	1.9E+06	0.20	0.28

찰력에 의한 전단변형 저항모멘트의 비를가 표준안 전율(1.2) 이상으로 설계하였다.

$$FS = \frac{M_r}{M_0} = \frac{4931}{3879} = 1.27 > 1.2 \quad (1)$$

여기서 M_0 : 외력에 의한 변형모멘트

M_r : 전단변형 저항모멘트(tf-m)

$$M_r = (M_{r0} + M_{rs}) \times (1 + \alpha D_f/H) \quad (2)$$

여기서 M_{r0} : 속채움흙의 저항 모멘트(tf-m)

$$= \frac{1}{6} \times \gamma_0 \times R_0 \times H_0^3 \quad (3)$$

M_{rs} : 널말뚝조인트마찰력에 의한 저항 모멘트(tf-m)

$$= \frac{1}{6} \times \gamma_0 \times R_s \times H_s^3 \quad (4)$$

D_f : 근입장(m)

H: 벽체의 높이(m)

α : 근입비 (D_f/H)에 따른 할증계수

$$R_0: \frac{2}{3} V_0^2 (3 - V_0 \cos \phi) \tan \phi \sin \phi \quad (5)$$

γ_0 : 1.0 tf/m³

$$H_0 = (r_i x h_i) / r_0$$

γ_i : i층 속채움흙의 단위체적중량

h_i : i층 두께

$$V_0 = B/H_0$$

B: 환산벽체폭 (= 18.0m)

$$R_s: \frac{2}{3} V_0 f \tan \phi \quad (6)$$

$$H_s: 2 \frac{\sqrt{\Sigma P_i}}{\gamma_0 \tan \phi} \quad (7)$$

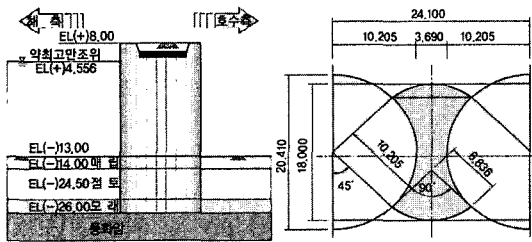


Fig. 7. 설계조건 및 설계단면

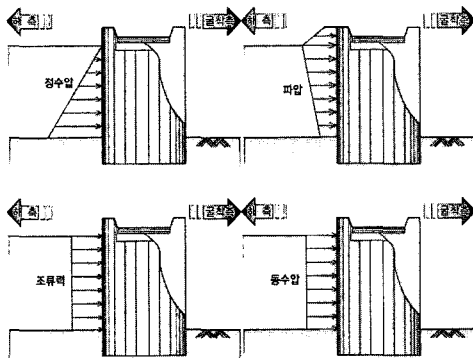


Fig. 8. 하중 조건

규모가 작고 속채움재가 불량한 경우 전단변형에 대한 검토를 실시한다. 본 설계에서는 양질의 속채움재를 사용하지만 안전측에서 전단변형을 고려하여 설계하였다.

3.1 전단변형 검토

Fig. 8의 외적하중에 의한 변형모멘트에 대하여 원형설의 저면에서 속채움재의 토압과 셀이음부의 마

f. 벽체 이음간 마찰계수

3.2 지지력에 대한 안정

Terzaghi식을 통해 극한지지력을 산정하고 식(8)를 통해 안전율을 평가하였다.

$$FS = \frac{q_u}{W/B + 6 \frac{M}{B^2}} = 3.9 > 1.2 \quad (8)$$

여기서

$$q_u = 1.3 CN_c + q N_q + 0.6 \gamma B N_r \quad (9)$$

W : 상부하중

3.3 부재력에 대한 검토

원형셀은 일자형강널말뚝이 맞물려서 원을 형성하고, 내부 속채움재의 토압으로 인장력을 받아 강하게 맞물려 수밀성을 유지하게 된다. 부재에 발생하는 인장력은 부재의 허용인장력(Interlocking strength)내에 있어야 하므로 다음 식(10)으로 검토하였다.

$$T = (r \times H_o) \times K_i \times R \quad (10)$$

여기서, Ta : 강널말뚝의 허용 인장력(= T/Fs)

T : 강널말뚝의 최대 인장력

Fs : 안전율(=2.0)

3.4 한계평형해석

Fig .9은 Slope/W를 이용한 상시 원호활동에 대한 안정성을 평가한 결과로써 안전율 2.226으로 안전하게 평가되었다.

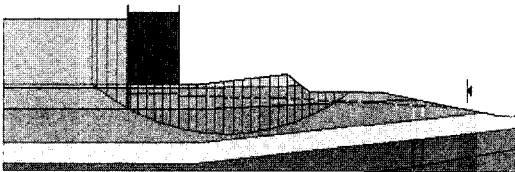
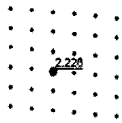


Fig. 9. 상시 원호활동 해석

또한 Fig. 10은 지진시 원호활동에 대한 안정성을 평가한 결과로써 안전율 1.687로 안전하게 평가되었다.

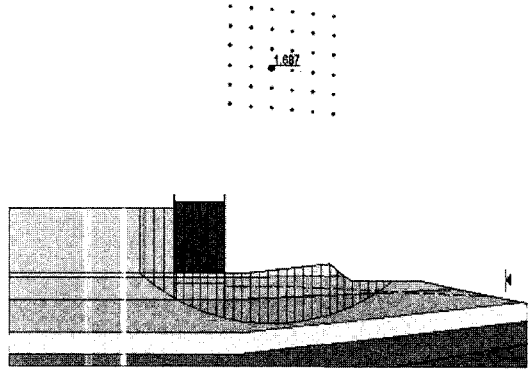


Fig. 10. 지진시 원호활동 해석

3.5 유한요소해석

2차원 유한요소해석(Plaxis)을 위한 해석단면은 아래 그림과 같다. 원형셀을 2차원적으로 모사하기 위하여 이중 강널벽체로 가정을 하고 인장력을 받는 5단 앵커로써 원형셀의 인장강도를 재현하였다.

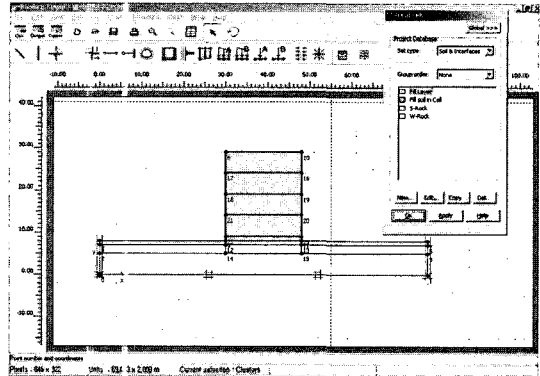


Fig. 11. 2차원유한요소 해석단면

또, 강도감소법에 의한 상시 안전율에 대한 평가결과는 Fig .12과 같고 안전율 1.35로 허용안전율 1.3보다 크게 나왔다.

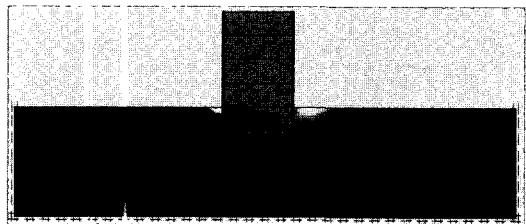


Fig. 12. Plaxis 해석 결과 (상시)

한편 Fig. 13는 지진시 안정검토결과로써 안전율 1.32로 허용안전율 1.1보다 큰 안정적인 결과를 보였다.

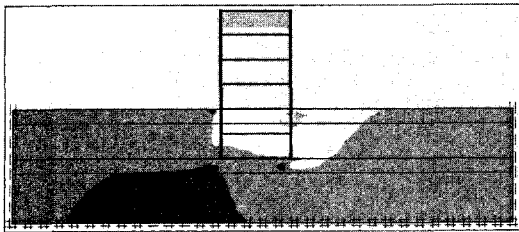


Fig. 13. Plaxis 해석 결과 (지진시)

3.6 침투류 해석

Seep/w를 이용하여 유속, 그리고 동수경사값을 얻어 파이프에 대한 안정검토를 하였고, 침투유량을 Fig. 14와 같이 살펴보았다.

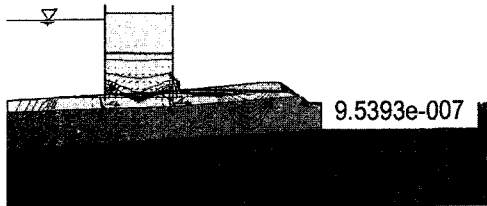


Fig. 14. 침투해석 결과

해석결과 단면에 단위 미터당 침투유량은 0.08 m³/day였고, 침투유속은 3.2×10^{-3} cm/sec 그리고 동수경사는 0.10으로 모두 안정하게 평가되었다.

3.7 동적변형해석

직립형 가물막이인 원형셀의 경우 횡방향력인 지진력에 대한 상세한 검토가 필요하다. 해석을 위한 동적물성치 획득을 위해 실내시험으로 공진주, 진동삼축시험, 충격반향시험을 실시하였고, 현장시험으로 SPS와 밀도검층을 실시하였다.

2차원 유효응력해석 프로그램인 Flac을 이용하여 원형셀식 가물막이 단면의 해석에 사용된 격자망으로 55x 41개의 요소를 구성하고 동적변형해석을 실시하였다. 하부지반 및 가물막이 구조물에는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고, 액상화 발생이 우려되는 채움토 및 매트토에는 Finn 모델을 사용하였으며, Hachinohe지진파, Ofunato지진파, 표준응답스펙트럼에 맞는 인공지진파에 대해서 각각 검토하였다. Fig. 15~Fig. 17은 각각 Ofunato 지진파에 대한 결과로써 최대변위가 21.6cm로 허용변위 30cm이내의 값을 보였다.

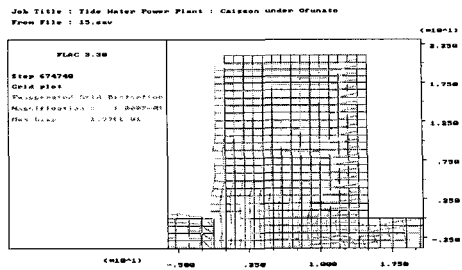


Fig. 15. 동해석단면의 최종변형형상(Ofunato,FLAC)

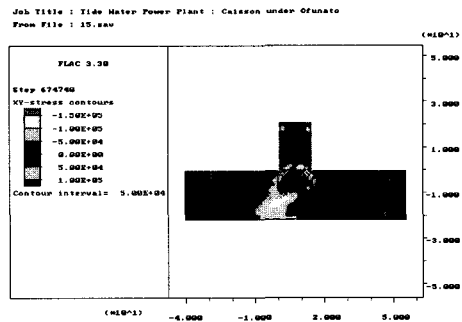


Fig. 16. 동해석단면의 응력분포형상(Ofunato,FLAC)

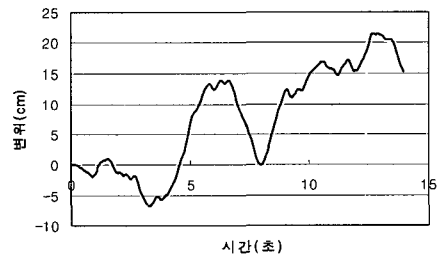


Fig. 17. 동해석단면 상단의 변위(Ofunato,FLAC)

다음으로 ABAQUS를 이용하여 2차원 전응력해석을 실시하였다. 해석 결과 Fig. 18, Fig. 19과 같이 Ofunato 지진시 최대수평변위 22.7cm 발생하여 허용변위 30cm 미만으로 안정하게 나타났다.

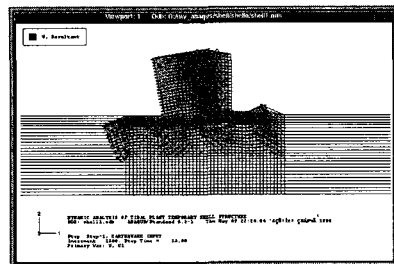


Fig. 18. 지진하중 15초후 단면(Ofunato,ABAQUS)

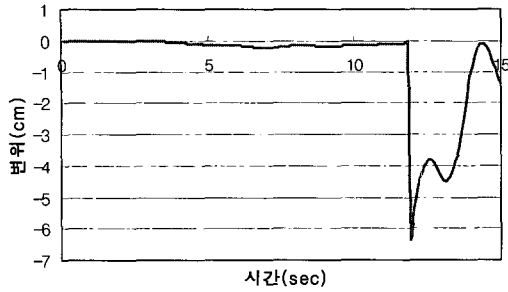


Fig. 19. 동해석단면 상단의 변위(Ofunato, ABAQUS)

Pentagon-3D를 활용하여 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 각 지진파별로 내진해석을 실시하였고 그 중 Fig. 20은 Ofunato파에 대한 수평변위에 대한 결과로서 최대수평변위는 26.3cm로 안정하게 나타났다.

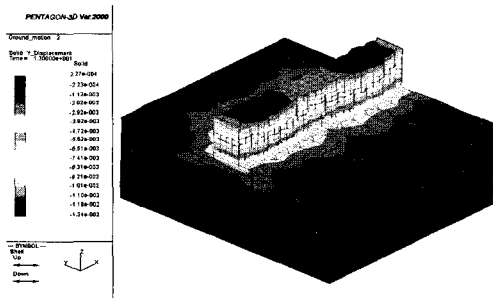


Fig. 20. 3차원 동적변형해석결과(Ofunato, ABAQUS)

3.8 원심모형실험

원형셀 가물막이의 거동을 실험적으로 살펴보기 위하여 실지반의 응력 상태를 소형 모형내에 재현시킬 수 있는 원심모형장치를 이용하여 200g의 가속도장을 설정하여 실험을 실시하였다. 원심모형실험에서는 제체의 변위에 대한 안정성 평가에 주안점을 두었으며, 힘단면은 축척(1/200)에 맞춰 설정하였고 계측기는 Fig. 21과 같이 설치하였다.

실험을 위한 지반형성은 풍화암을 기반암으로 설정하고 강사기를 사용하여 주문진표준사를 포설하여 모래층을 형성하고 현장 점토를 넣은 후 초기하중(압력 6.2kgf/cm^2)을 가하여 압밀시켰다. 지반 작성 후 원형셀을 균입깊이까지 밀어 넣고 셀 내부에 모래를 다져 넣은 후 ($r=1.9\text{t/m}^3$) 셀과 토조의 경계부 모래가 새지 않도록 실리콘 실링 후 실험을 실시한다. 제체 좌우에 동일한 수압이 존재한 상태에서 한 쪽을

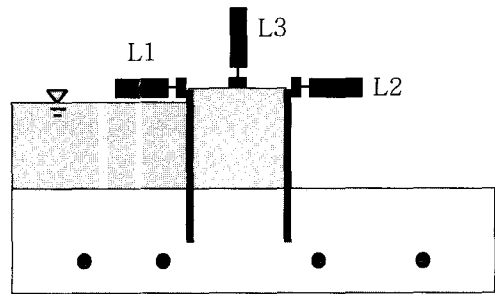


Fig. 21. 원심모형실험 계측기 설치 단면도

배수시켜 안정성을 변위를 통해서 살펴보았다. Fig. 22는 배수전의 변위를 나타내고 Fig. 23은 배수후의 변위를 나타낸다. Table.2를 통해서 수평변위 및 연직 변위가 모두 허용변위 30cm미만으로 안정한 것을 살펴볼 수 있다.

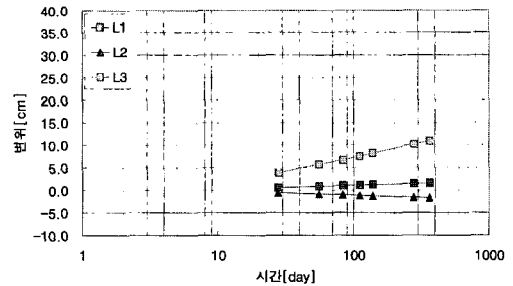


Fig. 22. 원심모형실험 시간별 계측변위(배수후)

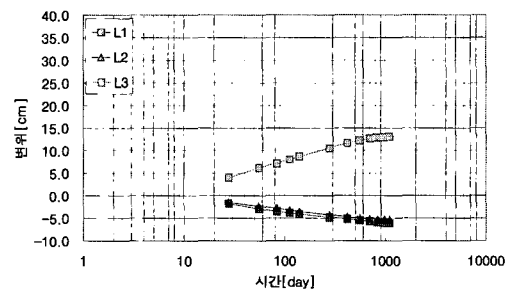


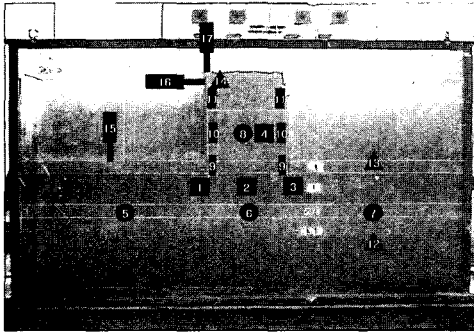
Fig. 23. 원심모형실험 시간별 계측변위(배수후)

Table. 2 원심모형실험 계측 변위량

LVDT	변위량 (cm)		
	배수 전 (①)	배수 후 (②)	최종변위 (①+②)
L1	1.592	-6.096	-4.504
L2	-1.678	-5.391	-7.069
L3	10.932	13.087	24.019

3.9 진동대 실험

내진에 대한 안정성 평가를 위하여 수치해석과 함께 1g 진동대실험을 수행하였다. 상사율(1/50)을 적용하여 수치해석과 동일한 지진파들을 사용하여 실험하였다. 실험 단면은 Fig. 23과 같다.



■: 토압계, ●: 간극수압계, ▮: 변형률계
▲: 가속도계, —: LVDT

Fig. 24. 진동대 실험 단면 및 계측기 위치

각 계측기를 통하여 토압, 간극수압, 부재변형, 가속도, 변위를 살펴보고 그 중에서 Table. 3과 같이 진동대실험을 통해서 얻은 최대수평변위량의 경우 수치해석에서 얻은 결과와 동일하게 Ofunato 지진파에서 크게 나타나는 동일한 양상을 나타냄을 알 수 있었다.

Table. 3 수치해석, 진동대실험 최대수평변위량

구분	수치해석		진동대실험
	ABAQUS	FLAC	
Hachinohe	8.19cm	9.7cm	8.5cm
Ofunato	22.7cm	21.6cm	19.5cm
인공지진파	5.06cm	5.7cm	8.45cm

4. 결 론

본 시화호 조력발전소 건설을 위해 수반되는 원형

셀 가물막이 공법은 국내에서는 약간 생소한 공법이나 선진 외국의 경우 주요 해상 공사에서는 다수 적용한 공법이다. 공학적 측면에서는 안정성, 차수성, 친환경성이 뛰어난 공법이나 경제적 측면에서는 향후 연구해야 할 부분이 남겨져 있는 공법이라 할 수 있다.

Fig. 24는 향후 건설될 시화호 조력발전소의 시공 과정 중 가물막이 공사가 완료되고 발전소 구조물이 시공되어가고 있는 상황을 그래픽으로 표현한 것이다.

(주)대우건설의 본 프로젝트팀은 향후 원형셀 가물막이 공법을 상세 설계 및 시공을 수행해 가면서 설계 및 시공 Know-How를 습득 한 후 공법에 대한 자료를 충실히 축적하여 객관적 평가가 이루어질 수 있도록 노력할 계획이다.

마지막으로 본학회에 발표를 할 수 있도록 조언해주신 최병호 교수님과 학회 관련자 여러분께 심심한 감사의 뜻을 표하는 바입니다.

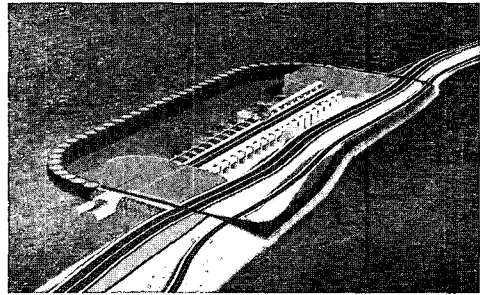


Fig.25. 원형셀 가물막이공 완성 후 공사 진행 모습도

참고문헌

- 건설교통부 (1997). 내진설계기준연구(II).
- 한국항만협회 (2000). 항만 및 어항 설계기준(하권). 851-877.
- 해양수산부 (1999). “항만 및 어항시설의 내진설계표준서.
- 石錦知治 (1994). 프리패브 강널말뚝셀 공법, 원기술.
- US Army Corps of Engineers (1989). Design of Sheet Pile Cellular Structures. EM1110-2-2503, US Army Corps of Engineers.