

가로널식 방파제의 구조성능 평가

Evaluation on the Structural Performance of Soldier Pile Type Breakwater

한상훈¹, 박우선¹, 김동현¹
 Sang Hun Han¹, Woo Sun Park¹ and Dong Hyawn Kim¹

1. 서 론

현재 우리나라의 소규모 항만 및 어항에서 필요로 하고 있는 방파제의 대부분이 수심이 비교적 얇고 설계파가 낮은 지역에 위치하기 때문에 소규모로 계획되고 있지만, 방파제가 시공될 지반 조건이 열악하여 지반 개량에 상당한 비용이 예상되기 때문에 실제 예산을 집행하지 못하고 있는 경우가 많다. 따라서 비교적 설계파가 낮고 지반이 연약한 경우에 적합하면서도 저렴하고 안전하게 시공할 수 있는 새로운 방파

제의 일종으로 기존의 H형 파일 사이에 가로널을 설치하여 파랑을 막는 구조형식을 가지는 가로널식 신형 방파제를 Fig. 1과 같이 개발하였는데(해양수산부, 2003), 육상 굴착 작업시 사용하는 토류벽과 상당히 유사한 개념이다. 이 구조형식은 크게 벽체가 일직선으로 되어 있는 일반적인 형태의 일자형 방파제(Fig. 1a)와 벽체가 지그재그로 설치된 톱니형 방파제(Fig. 1b)로 구분된다. 일자형 방파제는 설계파고가 낮고 비교적 지반조건이 양호한 경우에 적용이 가능한 형식으로 연약지반에 대한 적용성이나 수평 파력

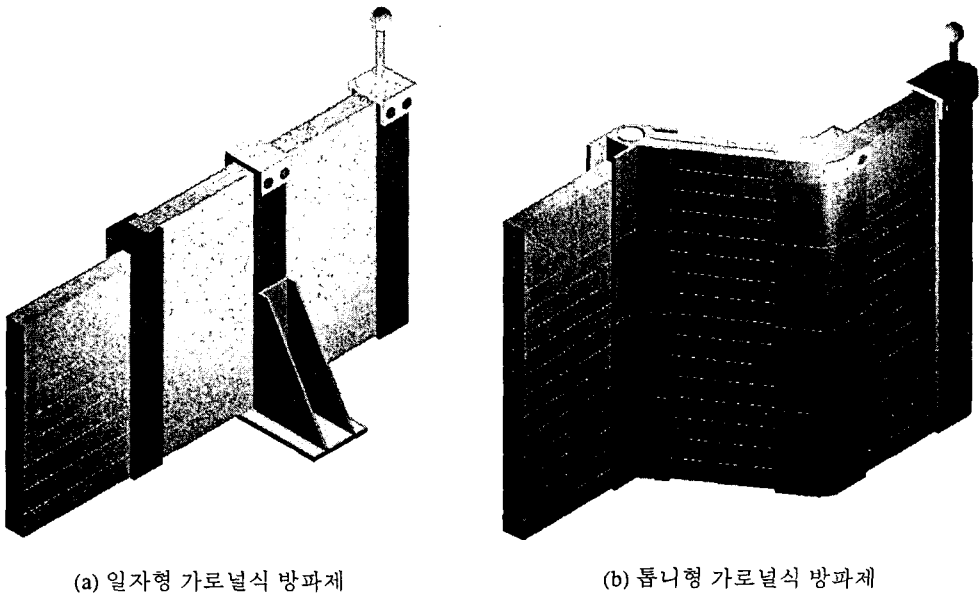


Fig. 1. 가로널식 방파제의 개념도

제 형식의 개발이 필요하다. 이에 본 연구진은 커튼식 방파제에 대한 저항성을 키우기 위해 경사 버팀보(raker)나

¹ 한국해양연구원 연안항만공학연구본부

앵커 케이블, 경사식 말뚝 형태 등으로 보강할 수 있는 구조물이다. 반면, 뚝니형 방파제는 H형 파일이 일정 각도로 꺾여진 형태로 건설되어 수평파력에 따른 휨모멘트에 대한 저항성을 크게 증가시킬 수 있는 구조적인 특징을 가지고 있어 상대적으로 설계 파고가 높고 지반이 연약한 경우에도 적용이 가능한 형태이다.

이러한 새로운 형식의 방파제의 구조거동은 수치해석을 통하여 미리 계산할 수 있지만, 가로널과 말뚝의 연결부의 비선형성과 지점조건의 비선형성 등으로 인하여 실제 현장의 구조거동과 수치해석상의 구조 거동은 차이가 있을 수 있다. 이러한, 수치해석과 현장거동사이의 차이를 알아 보기 위해서 본 논문에서는 수조모형 실험을 수행하여 파고에 따른 구조거동을 살펴보고 그 값을 수치해석 결과와 비교하였다.

2. 실험 방법 및 조건

2.1 실험 방법

본 연구에서는 신형식 방파제 중에서 일자형 방파제에 앵커 케이블이 장착된 것에 대해서 수조모형 실험을 실시하고 그 결과를 구조해석결과와 비교하였다. 모형의 크기는 가로 98 cm, 세로 60 cm(바닥판과 지점장치 제외)로 사진 1과 같다. 방파제 모형은 양끝단을 제외한 부분의 말뚝과 말뚝사이의 거리는 10 cm 이고 양끝단은 9 cm이다. 말뚝은 실제 H형 기둥에 사용되는 재료와 유사한 재료를 사용하여 제작하였다. 방파제 말뚝의 플랜지와 웨브의 두께는 0.06 cm이고 플랜지폭은 1.5cm, 말뚝의 전체 높이(웨브의 높이+2개의 플랜지의 두께)는 1.5 cm이다. 사용된 말뚝의 탄성계수는 $1.75 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이다. 가로널로 사용된 아크릴판은 두께가 1 cm이고 가로와 세로가 각각 10과 5 cm (양끝단은 가로 9 cm)이다. 아크릴판을 설치한 후에는 고무판을 길게 잘라서 아크릴판과 말뚝사이의 빈공간을 메웠다. 웨일은 두께 0.5 cm의 아크릴판을 $98 \times 2 \text{ cm}$ 로 잘라서 사용하였다. 가로널 아크릴판을 설치한 후에 사진 2와 같이 높이 25와 30 cm(지점 고정장치 위에서 측정한 높이)에 웨일을 설치하였다. 장력케이블은 지름 1 mm 정도의 철선을 사용하는데, 말뚝의 30 cm와 60 cm에 거치하였다(사진 3). 모형에 거치되는 쪽은 낚시고리를 이용하여 여러 번 실험이 가능하도록 하였고 바닥판에 고착되는 쪽은 나사로 고정하였다. 말뚝에는 철근 게이지를, 아크릴로 만들어진 가로널에는 아크릴 게이지를 사용하여 변형률을 측정하였다. 사용된 게이지는 모두 Tokyo Sokki사 제품이고 철근 게이지는 FLA-1-11 모델을, 아크릴 게이

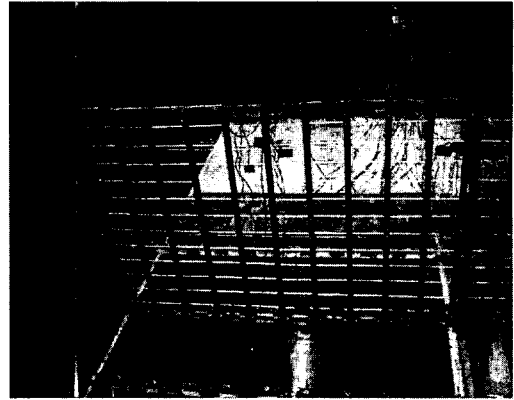


사진 1. 일자형 방파제 모형 형태



사진 2. 설치된 웨일

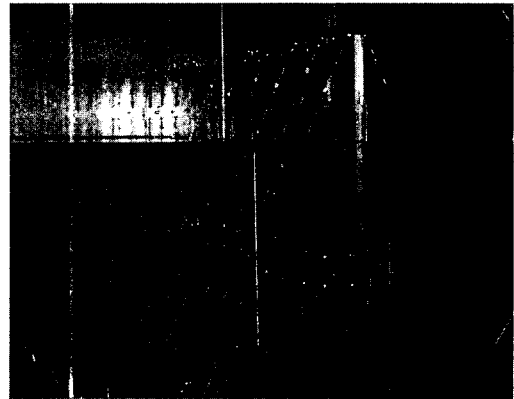


사진 3. 케이블 거치 모형

지는 GFLA-3-70 모델이다. 말뚝에 사용된 철근 게이지는 18개이고, 아크릴 게이지는 14개이다. 각 게이지의 부착위치는 그림 2와 같다. S번호는 각각 철근 게이지의 구분기호를 나타내고 있다. 각 게이지의 부착 높이는 밑에서부터 2, 12.5, 32.5, 47.5, 58 cm이다. 게이

지를 부착한 후에는 HBM사의 MGCplus 데이터 로거로 데이터를 받아들여 노트북에 실험값을 저장하였다.

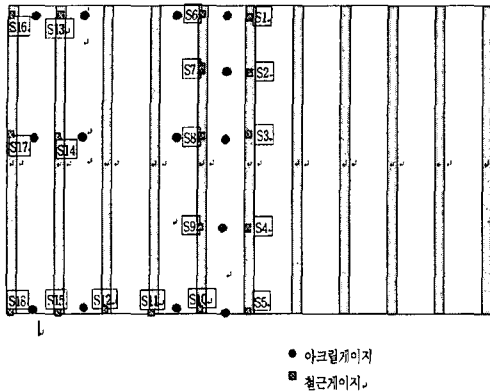


Fig. 2 게이지 부착 위치

모형의 전면에 파고계와 파압계를 설치하여 모형에 가해지는 파압과 파고를 측정하였다. 파압계는 수면과 수면아래 20 cm에 설치하였다. 수위는 50 cm로 하였는데 이것은 바닥판과 지점고정장치의 높이 5 cm를 포함한 것으로 순수 말뚝의 수위는 45 cm이다.

2.2 실험 조건

일차형 방파제는 하나의 케이블만을 사용한 조건과 2개의 케이블을 사용한 조건으로 나눌 수 있다. 하나의 케이블을 사용한 경우에는 지점이 고정인 조건과 지점이 힌지인 조건에 대해서 실험을 수행하였다. 이것은 실제 현장에서 지반에 방파제가 설치되면 지점고정조건과 힌지조건사이에서 방파제가 거동할 것으로 예상하여 지점힌지조건을 추가하였다.

파고는 5, 10, 15 cm로 3가지를 선택하였고 주기는 1.16, 1.42, 1.70, 2.01, 2.59로 다섯 가지를 선택하였다. 하나의 케이블만을 거치한 상태에서 15 cm의 파고를 가했을 때에 모형에 부분적인 손상이 일어나서 케이블을 하나만 거치한 경우에는 15 cm 파고에 대한 실험은 생략하였다.

3. 실험 결과

3.1 앵커 케이블이 하나인 경우

하나의 앵커 케이블을 말뚝의 중앙부에 거치한 경우에 대해서는 파고 5 cm와 10 cm에 대해서 실험을 하였는데 Fig. 3은 파고 5 cm 일때의 시간에 따른 파고결과를 나타내고 있다. 이러한 파고에 따른 파압도

Figs. 4와 5에 나타내었다. 수면에서의 파압은 예측한 것과 같이 5 gf/cm^2 정도이고 수면아래 20 cm에서는 3.6 gf/cm^2 정도이다. 이러한 파압에 따른 지점 S5(말뚝)에서의 변형률은 Fig. 6과 같이 시간의 함수로 나타낼 수 있다(가압파력 주기 1.16초). 본 논문에서는 방파제의 동적 특성보다는 정적 안전성과 사용성에 연구의 초점을 맞추고 있으므로 시간에 따른 변형률보다는 정적 최대 변형률을 측정하는 것이 필요하다. 따라서, 각 지점에서 최대 파압시의 순간 정적 최대 변형률을 구하여 정리한 것이 표 1이다. 앞에서 언급한 바와 같이 5개의 주기에 대해서 실험을 했는데 각 주기에 따른 정적 최대 변형률이 유사함에 따라 주기 1.16초에 대한 정적 최대 변형률만을 제시하였다. 또한, 아크릴 게이지에 의한 변형률은 아크릴 판의 두께가 두꺼워서 높은 파고에서도 변형률이 $15 \mu\text{m/m}$ 이하여서 그 값을 고찰하는 것이 큰 의미가 없을 것으로 사료되어 본 논문에서는 그 결과를 제외하였다.

고정지점인 경우에는 대체로 말뚝 고정부위인 S5, S10, S11, S12 등의 변형률이 큼을 알 수 있다. 5 m의 파고인 경우에는 S11을 제외하고는 비슷한 변형률을 나타낸다. 또한, 10 cm인 경우에는 S5, S10, S11, S12 지점에서 90에서 $120 \mu\text{m/m}$ 변형률을 나타내는 데 이 값들의 평균값과 파고 5 cm인 변형률의 평균값은 약 2배정도 차이가 남을 알 수 있다. 즉, 파고가 2배가 되면 대체로 변형률도 2배가 됨을 알 수 있다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 고정지점인 경우가 힌지지점인 경우보다 변형률의 크기가 큼을 알 수 있다. 이것은 고정지점의 하부 지점부위에 큰 모멘트가 작용되어 나타난 현상으로 사료된다. 힌지지점인 경우에는 케이블이 거치되는 중앙부분에 변형률이 크지만 그 값은 고정지점과 유사하거나 조금 작다. 즉, 전체적으로 힌지지점의 말뚝들의 변형률이 작음을 알 수 있다. 그러나,

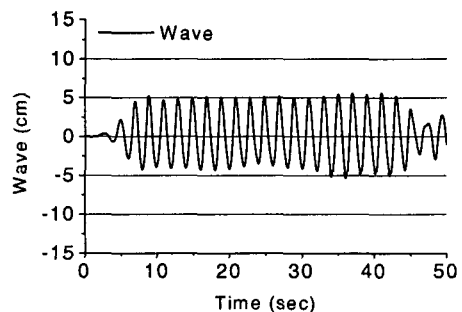


Fig. 3 파고

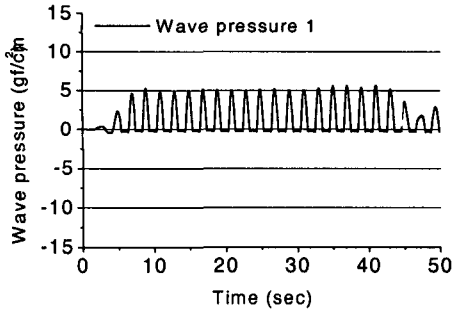


Fig. 4 파압 A

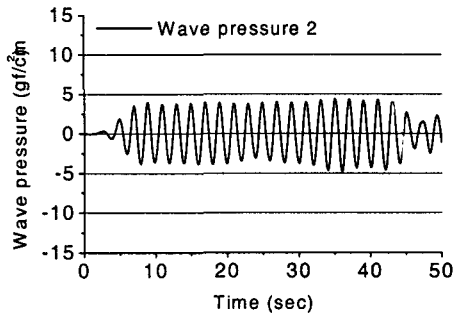


Fig. 5 파압 B

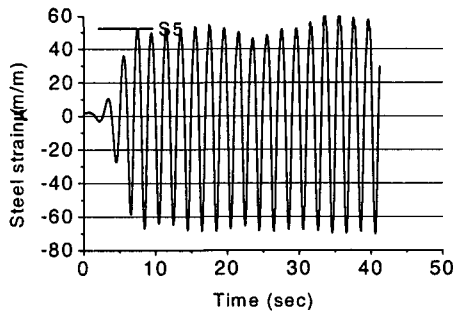


Fig. 6 S5 위치에서의 철근 변형률

힌지지점의 경우에는 케이블과 말뚝의 연결부에 응력이 집중될 가능성이 크다. 따라서, 지반상태가 연약하여 힌지지점과 유사한 형태의 경우에는 말뚝 자체의 변형률보다는 케이블과 말뚝의 연결부의 응력 집중을 충분히 고려하여 설계하여야 할 것이다.

No. 2 말뚝의 위치 S13, S14, S15의 변형률은 중앙 말뚝과 No.5 말뚝의 변형률과 조금 경향이 상이하다. 이것은 양끝단 바깥에서 물이 통과함에 따라 중앙부와는 조금 상이한 구조거동을 보인 것으로 추측된다.

3.2 앵커 케이블이 들인 경우

앵커 케이블이 2개인 경우에는 파고 5, 10, 15 cm에 대해서 실험을 수행하였다. 각 파고의 수면에서의 최대파압은 5.0, 10.0 13.0 gf/cm^2 정도이고 수면아래 20cm에서의 파압은 3.6, 7.5, 9.6 gf/cm^2 정도였다.

고정지점 조건의 경우에는 하나의 케이블을 사용할 때 보다 고정지점 변형률의 크기가 작음을 알 수 있다. S5와 S10의 경우를 보면, 파고가 5 m일 때에 하나의 케이블을 사용하면 각각 변형률이 -60과 -64 $\mu m/m$ 이지만 두 개의 케이블을 사용하면 -43과 -40 $\mu m/m$ 으로 변형률이 30% 정도 줄어듦을 알 수 있다. 그러나, 고정지점을 제외한 지역에서는 대체로 케이블의 숫자를 늘리면 변형률이 증가한다. 이러한 경향은 파고가 10 cm와 15 cm인 경우에도 일치한다. 이것은 앵커 케이블의 증가에 따라 모멘트가 분산되어 고정지점에서는 좀 더 작은 모멘트가 작용하지만 말뚝 전체적으로 고르게 모멘트가 분포되어 생긴 현상으로 사료된다. 구조적으로 특정 지점에 응력이 집중되는 것 보다는 응력과 변형률이 고루 분포되는 것이 유리하므로 두 개의 케이블을 사용하는 것이 구조적으로 유리하다고 볼 수 있다.

힌지지점인 경우에는 고정지점보다 변형률의 크기가 대체로 작는데 이것은 하나의 케이블을 사용한 경우와 유사하다.

4. 실험과 해석 결과의 비교

4.1 앵커 케이블이 하나인 경우

실험결과를 검증하기 위해서 모형에 대한 수치해석을 수행하고 그 값을 실험값과 비교하였다. 상용구조해석 프로그램인 SAP 2000을 사용하여 그림 7과 같이 모형을 모델링하였다. 말뚝은 프레임요소로, 가로널은 플레이트로 모델링하였다. 파압은 그림 8과 같이 분포시켰다. 이것은 고다식의 파압을 기본형태로 하고 수면과 수면아래 20 cm에서 구한 계측파압을 이용하여 파압을 보정하였다.

그림 9는 파고가 5 cm인 경우의 중앙말뚝(No. 6)의 모멘트 분포이다. 이렇게 수치적으로 구한 모멘트를 바탕으로 말뚝단면의 2차 관성모멘트를 이용하여 말뚝의 응력을 계산할 수 있다. 이러한, 말뚝의 응력을 말뚝재료의 탄성계수로 나누어 변형률을 구한다. 그림 10과 11은 이러한 수치해석에 의한 변형률과 실험에 의한 변형률을 비교하고 있다. 그림 10에 나타난 바와 같이 고정지점조건인 경우에 중앙말뚝의 높이에 따른 변형률은 유사한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히, 파고가 5 cm인 조건에서는 수치해석과 실

험에 의한 변형률의 절대값도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 파고가 10 cm로 커지면 수치해석과 실험에 의한 변형률의 말뚝 높이에 따른 변화 경향은 일치하지만 절대값은 조금 차이가 난다. 이것은 파고가 증가함에 따라 모형제작의 치수오차나 고정지점 구현시의 불완전성 등이 증가하여 나타난 현상으로

사료된다. Fig. 11은 힌지지점 조건에서의 실험값과 해석값의 비교이다. 고정지점과 마찬가지로 실험값과 예측값이 대체로 일치하지만 파고가 커짐에 따라 오차가 증가하는 경향을 나타낸다.

Table 1 철근케이블 실험결과($\mu\text{m}/\text{m}$)

	지점 조건	파고	No. 6 말뚝 (중앙말뚝)					No. 5 말뚝 (끝단에서 5번째 말뚝)					No.4	No.3	No. 2		
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
1 케이블	고정	5 cm	1	1	-11	-21	-60	-2	3	-22	-36	-64	-30	-69	1	-12	-27
		10 cm	1	2	-24	-37	-89	-4	5	-57	-76	-123	-90	-118	-1	-42	-42
	힌지	5 cm	0	-1	-8	2	0	-1	2	-9	5	0	-1	-	-1	-19	14
		10 cm	-1	3	-24	3	-1	-3	10	-33	1	-7	-7	-3	-2	-66	-3
2 케이블	고정	5 cm	-4	-2	20	4	-43	23	19	21	1	-40	-17	-	-8	-11	-4
		10 cm	34	29	45	12	-79	58	48	54	-3	-87	-51	-86	30	42	-19
		15 cm	52	43	55	9	-103	92	65	62	-15	-115	-86	-121	32	48	-16
	힌지	5 cm	3	3	15	8	1	5	19	26	23	0	1	-	2	12	13
		10 cm	24	20	24	20	-1	31	42	40	37	-2	2	-	63	50	41
		15 cm	-1	2	32	27	-3	49	58	48	43	-7	0	-	-8	6	4

4.2 앵커 케이블이 들인 경우

Fig. 12와 13은 앵커 케이블이 들인 경우의 실험값과 해석값의 비교이다. Fig. 12는 고정지점의 결과인데, 그림에 나타난 바와 같이 S1위치를 제외한 부분에서는 실험값과 예측값이 잘 일치함을 알 수 있다. 힌지지점의 결과를 나타내는 Fig. 13에서도 S1위치를 제외한 영역에서는 실험값과 예측값의 일치도가 큼을 알 수 있다.

전체적으로 말뚝의 높이 방향 변형률의 변화 경향이 실험과 수치해석에서 유사함을 알 수 있다. 그러나, 몇몇 위치에서는 실험값과 예측값이 조금 차이가 난다. 이러한 오차의 원인은 여러 가지가 있을 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 말뚝 단면의 웨브와 플랜지가 정확히 수직을 이루지 못 하는 문제, 말뚝제작시의 열 발생으로 길이 방향으로의 말뚝의 뒤틀림 등과 같은 모형제작 오차가 있을 수 있다. 또한, 모형에서 고정지점조건을 구현하고자 하더라도 하부지점을 완전히 고정하기는 쉽지 않으며 힌지 지점 조건에서도 힌지에 마찰이 발생하여 일정 부분 모멘트가 걸릴 수 있다. 또한, 수치해석에서도 가해지는 파압이 파압계에 의해 보정되었지만 파압계의 갯수가 작아서 실제 모형에 가해지는 파압과 수치해석에서 적용되는 파압은 일정부분 오차가 있을 수 밖에 없다. 하지만, 이러한 오차에도 불구하고 실험값과 예측값은 경향과 절대값에서 큰 차이가 없다.

5. 결 론

소규모 방파제 중 하나인 일자형 말뚝식 방파제의 구조거동을 파악하기 위해 수조실험과 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지점이 고정된 일자형 방파제의 앵커 케이블의 갯수가 증가함에 따라 고정지점 주위에서 발생하는 변형률은 감소하지만 고정지점 주변을 제외한 영역에서는 변형률이 증가한다.
2. 힌지지점의 말뚝은 고정지점의 말뚝보다 대부분의 영역에서 말뚝 변형률이 작다. 이러한, 경향은 앵커 케이블 갯수의 증가에 관계없이 관찰된다.
3. 실험과 해석에 의한 말뚝 변형률은 일정오차의 범위에서 잘 일치한다. 즉, 수치해석은 실제 실험 방파제의 구조 거동을 모델링하는데 충분히 사용될 수 있고 일정 수준의 정확성을 확보하고 있다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “신형소규모 방파제 개발 (II)”사업의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

해양수산부 (2003) 신형 소규모 방파제 개발(I), 159p.
 해양수산부 (2004) 신형 소규모 방파제 개발(II), 261p.

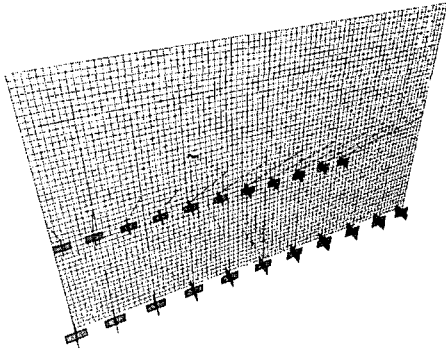


Fig. 7 수치해석 모형

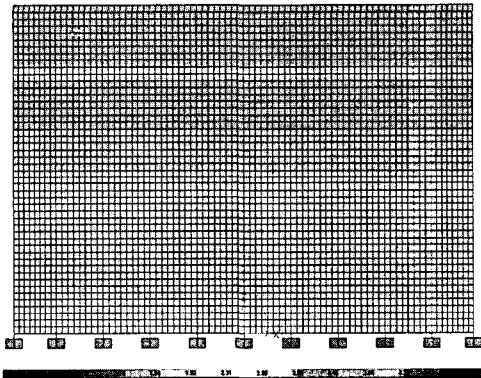


Fig. 8 파압 분포

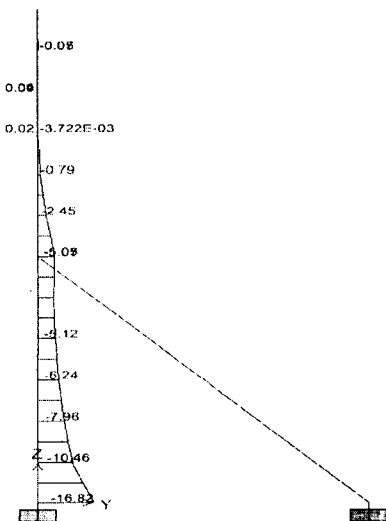


Fig. 9 중앙말뚝 모멘트

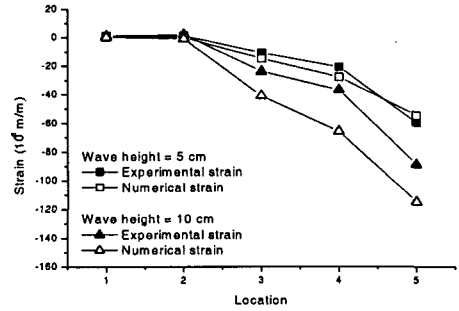


Fig. 10 1-케이블 고정지점 해석결과

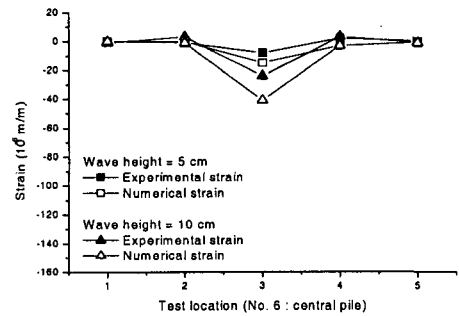


Fig. 11 1-케이블 힌지지점 해석결과

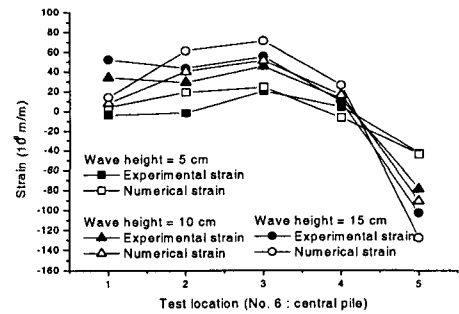


Fig. 12 2-케이블 고정지점 해석결과

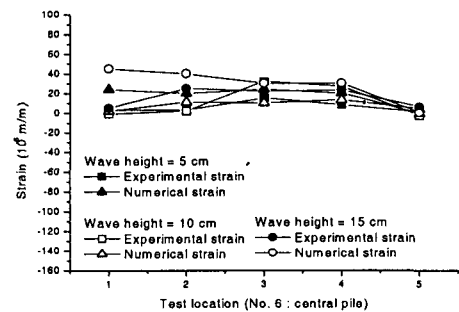


Fig. 13 2-케이블 힌지지점 해석결과