

잔교식 항만구조물의 내진설계기준에 관한 연구

A Study of the Seismic Design Guidelines for Marginal Wharf Structures

김문겸* 김민규** 박성우**
Kim, Moon Kyum Kim, Min Kyu Park, Sung Woo

ABSTRACT

The seismic design guidelines for the pile-supported marginal wharf structures are studied. Various design codes such as AASHTO code or UBC code, which are focused on general structures, may be referred for the design of the wharf structures. However, in developing domestic design code, special consideration should be made concerning the size of the earthquake and the type of the structure. This study aims at the comparison among the various design codes for a specific wharf structure in the process of developing a domestic design code.

1. 서 론

우리나라는 일본과 미국에 비하여 지진의 발생빈도가 작고 그 크기도 상대적으로 작은 규모이다. 그러나 최근 들어 지진발생의 빈도가 증가하고 있는 실정이며, 지진에 의한 피해는 예측하기 어렵고, 일회의 발생으로 큰 피해가 발생할 수 있으므로 내진설계의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 필요성에 의해서 1997년 12월에 건설교통부 제정의 내진설계기준이 발간되었다. 그러나 상기의 기준은 세부적인 사항을 다루는 것이 아니므로 항만과 같은 실제 구조물의 내진설계를 할 경우에는 추가적인 연구가 필요하다.

특히 항만구조물의 경우, 내진설계를 위한 상위개념은 마련되었지만 이에 대한 연구실적이 국내 외적으로 미비한 실정이다. 이러한 이유로 다른 구조물의 내진설계기준을 항만구조물에 적용하는 방법을 사용하고 있다. 예를 들면 제방, 중력식 안벽, 그리고 널말뚝식 안벽 등은 일반적인 토류 구조물과 유사하게 거동하므로, 그에 대한 이론식과 간략식들이 많이 제시되어 있다.^[1,2] 그러나 잔교식 부두의 경우는 그 거동이 타 구조물에 비하여 복잡하므로 특별한 주의가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 잔교식 부두구조물에 대한 내진설계기준을 마련하기 위하여 외국의 기준을 검토하고 그 기준의 국내 적용성 여부를 검토하고자 한다.

2. 잔교식 부두에 대한 내진설계 기준

2.1 지진에 의한 잔교식 부두의 피해

잔교식 부두를 포함한 대부분의 항만구조물은 지진시에 타 구조물에 비하여 상대적으로 많은 피해를 입었다. 그것은 매립과 건설과정에서 사용하는 느슨한 포화사질토에 의한 액상화현상 및

* 연세대학교 교수, 정회원

** 연세대학교 박사과정, 학생회원

연약지반에 의해서 지진의 장주기 성분이 증폭되는 현상 때문인 것으로 알려져 있다.^[3]

1989년 Loma Prieta 지진시 오클랜드항의 잔교식 부두는 액상화와 지반진동의 영향으로 30cm의 수평변위가 발생하였고 사용된 경사말뚝의 경우 전체의 95%에 균열이 발생하거나 파괴되었다. 수직말뚝으로 지지한 경우에는 상대적으로 적은 피해가 발생하였는데, 이것은 수직말뚝이 경사말뚝에 비하여 지진에 대비한 구조물로서 적합함을 알 수 있다.^[4]

2.2 외국기준

2.2.1 미국기준

미국 ASCE에서는 항만시설의 내진설계를 위한 지침을 제시하고 있다. 먼저 지진에 의한 구조물의 성능수준을 재현주기를 근거로 하여 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 나누고 있다. LA 항만에 대하여 재현주기 및 설계가속도를 각 성능수준별로 다음의 표 1과 같이 적용하고 있다.^[5]

표 1. 재현주기에 따른 성능수준의 분류

성능수준	정의	평균재현주기	설계가속도
기능수행수준	50년 동안에 넘어설 확률이 50%에 해당하는 지진	72년	0.24g
붕괴방지수준	50년 동안에 넘어설 확률이 10%에 해당하는 지진	475년	0.43g

기능수행수준에서는 구조물이 지진에 의한 손상을 입더라도 빠른 시간에 보수가 될 수 있어야 하며 구조물 자체의 기능을 유지하는데 방해를 받아서는 않된다. 붕괴방지수준에서는 인명의 피해가 발생되지 않는 범위에서 손상이 발생하는 것을 허용하고 있다. 또한 붕괴방지수준은 기능수행수준과는 달리 구조물을 구성하고 있는 부재의 소성거동을 허용하고 있다.^[6]

구조해석방법으로는 탄성범위내에서는 의사정적해석방법 또는 응답스펙트럼해석을 사용하도록 하고 있고, 소성범위에서는 구조물과 지반을 동시에 비선형으로 모형할 수 있는 유한요소해석을 수행하도록 하고 있다. 내진설계기준으로는 붕괴방지수준에 대하여 연성계수를 제안하고 있다. 연성계수는 설계하중을 감소시키고 구조물의 소성변형이 지진에 의한 에너지를 흡수하도록 한다. 소성영역에서 수행하는 여러 가지 구조적 요소들의 능력은 연결부 및 다른 소성 힌지 위치에서의 재료적 성질에 의존한다. 연성계수가 증가함에 따라, 구조물의 지진 수행 요구 사항들을 만족시키는 항복 후 거동의 의존도 역시 증가한다.

연성계수는 말뚝의 최대곡률과 항복용력상태의 곡률의 비로서 나타내거나, 말뚝의 최대 변위와 항복용력상태의 변위의 비를 이용하여 나타낸다. 이를 각각 곡률연성계수와 변위연성계수로 정의할 수 있다. 곡률연성계수의 정의는 다음의 식과 같다.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_{\max}}{\phi_y}$$

여기서 ϕ_{\max} 는 최대소성변형에 대한 곡률이고 ϕ_y 는 항복상태의 곡률이다. 또한 변위연성계수는 다음의 식과 같고, 곡률연성계수와 변위연성계수를 그림으로 표현하면 그림 1과 같다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y}$$

여기서 Δ_{\max} 는 소성변형과 탄성변형에 의한 전체변형을 의미하고 Δ_y 는 탄성변형을 의미한다. 곡률연성계수와 변위연성계수중에 후자가 구조적인 접근에 더 용이하기 때문에 연성계수를 결정하는데 변위연성계수를 사용하는 것이 일반적이다. 변위연성계수를 이용하여 잔교식 부두의 설계

를 할 때는 동적해석에 의한 탄성부재력을 연성계수로 나누어서 설계부재력을 결정하게 되며 이러한 부재력은 다른 하중에 의한 부재력과 조합하여 부재의 안전성을 검토하게 된다. ASCE에서는 이와 같은 변위연성계수를 Ferrito^[7]의 연구를 근거로 하여 다음의 표 2와 같이 제안하고 있다.

표 2. 붕괴방지수준에서 미국해군의 허용변위연성계수^[7]

항만 구조물	말뚝의 종류	허용변위 연성계수				
		콘크리트 말뚝			강말뚝	
		지반에서의 말뚝모멘트	말뚝두부	경사말뚝 두부	수직말뚝	수직말뚝과 경사말뚝
잔교	PS콘크리트	1.5	3.0	1.5	-	-
	강재 또는 강재와 콘크리트 합성	-	-	-	5.0	3.0
부두	PS콘크리트	2.0	5.0	2.5	-	-
	강재 또는 강재와 콘크리트 합성	-	-	-	5.0	3.0

지반 내에서 말뚝의 소성변형이 크게 일어나게 되면 보수가 어려워지므로 작은 값의 연성계수를 적용하여 설계하여야 하고 말뚝두부에서의 소성변형은 보수가 용이하므로 큰 값의 연성계수를 사용할 수 있다. 또한 잔교말뚝의 길이가 부두 말뚝의 길이보다 길기 때문에 연성계수의 값을 작게 제한하게 되며, 경사말뚝은 말뚝의 연장을 감소시키는 경향이 있기 때문에 경사말뚝을 사용한 경우에는 작은 값의 연성계수를 사용한다. 이와 같이 연성계수를 사용하여 지진시에 안전성을 확보할 경우에는 말뚝의 재료, 위치, 그리고 말뚝의 길이 등에 따라 다른 값을 적용하여 보다 합리적으로 안전성을 확보할 수 있다.

2.2.2 일본기준

일본에서 사용하는 내진설계 방법은 수정진도법이다. 수정진도법은 의사정적해석방법의 하나로서 지역별 특성, 구조물의 중요도, 잔교의 동적응답을 고려하여 다음과 같이 설계진도를 결정하도록 하고 있다.

$$\text{설계진도} = \text{지역별진도} \times \text{중요도계수} \times \text{잔교의 응답계수}$$

여기서, 지역별진도 및 중요도계수는 항만 시설의 기술상의 기준에 따라 정한다. 미국에서 설계가속도를 결정할때는 지진의 재현주기에 따라 결정하는 반면 일본에서 설계진도를 결정할 때에는 재현주기를 고려하지 않는다. 따라서 미국에서 재현주기에 따라서 결정하는 성능수준의 개념을 사용하지 않는다. 다만 보다 상세한 내진성의 검사를 행할 경우에 대해서는 지진응답을 고려한 동적해석을 하는 것으로 규정하고 있다.^[8]

잔교의 응답계수는 지역별진도와 지반의 고유주기에 따라 설정된다. 지반의 고유주기는 잔교저부의 위치에서 기초면부터 피복층 윗면까지의 토층에 대하여, 각 토층의 두께에 대한 전단파속도를 사용하여 다음 식으로 구한다.

$$T = 4 \sum (H_i / V_{si})$$

여기서, 각 변수는 다음과 같다.

T : 지반의고유주기(s)

H_i : 층두께(m)

V_{si} : 전단파속도(m/s)

위와 같은 방법으로 구한 설계진도를 이용하여 의사정적해석을 수행하여 구조물 각 부분에서의 부재력을 구한다. 다만 일본에서는 지진과 같은 단기하중이 가해지는 경우에 대하여 허용응력할 증계수를 적용하여 재료의 허용응력을 평상시에 비하여 1.5 배 큰 값을 사용하도록 하고 있다. 이것은 지진과 같이 단기간에 가해지는 하중의 경우에는 구조재료의 부재력이 일시적으로 허용응력을 초과하더라도 구조물의 안전에 크게 영향을 미치지 않기 때문이다.

2.2.3 국내기준

1997년 건설교통부 제정의 「내진설계기준연구(Ⅱ)」 편에서는 모든 구조물에 대하여 공통적으로 적용할 수 있는 설계응답스펙트럼을 규정하고 있다. 상기의 연구에서는 전국을 두 개의 지진구역으로 구분하여 지진구역계수를 설정하고, 지진의 재현주기에 의하여 위험도계수를 설정하며, 지반의 종류에 따라서 5종류로 분류하여 지반지수를 정하도록 함으로서 구조물을 건설하고자 하는 곳의 설계가속도와 표준 설계 응답스펙트럼을 형성할 수 있도록 하였다. 따라서 항만의 설계시에도 위의 기준에 의거하여 표준설계응답스펙트럼을 구성하고 그에 따른 해석을 수행 할 수 있게 되었다.¹⁹⁾ 「내진설계기준연구(Ⅱ)」에서는 설계지반운동수준을 평균재현주기에 따라 분류하고 있다. 재현주기만을 미국기준과 비교하여 보면 다음의 표 3 과 같다.

표 3. 재현주기별 설계지반운동수준

성능수준 재현주기	국내기준		미국기준
	내진등급	재현주기	재현주기
기능수행수준	내진 II 등급	50 년	72 년
	내진 I 등급	100 년	
	내진 특 등급	200 년	
붕괴방지수준	내진 II 등급	500 년	475 년
	내진 I 등급	1000 년	
	내진 특 등급	2400 년	

표 4 에서 보는 바와 같이 국내의 기준은 재현주기만을 비교하여 볼 때 기능수행수준의 내진 I 등급, 내진 II 등급은 미국의 기능수행수준의 재현주기와 유사한 값을 갖고, 미국의 붕괴방지수준의 재현주기는 국내 내진 II 등급의 붕괴방지수준에 해당하는 것을 알 수 있다.

3. 잔교의 내진해석

본 절에서는 전술한 수정진도법과 동적해석법을 사용하여 대표적인 잔교식 부두 단면에 대하여 해석을 수행함으로써 우리나라 기준에서 각 내진등급별, 성능수준별로 적절한 내진설계방법을 제시하고자 한다. 해석에 사용한 잔교식 부두의 단면은 그림 2 와 같다. 말뚝사이의 간격은 6m이고 안벽은 케이슨으로 지지되어 있다. 말뚝은 직경 1m 에 두께 1.2cm 의 강관말뚝이며 기반암까지 근입되어 있다. 해석에 사용한 물성은 지표면을 기준으로 표 4 와 같다. 지진해석을 위한 설계가속도를 결정하기 위하여 본 연구에서는 대상지역을 「내진설계기준연구(Ⅱ)」에서 제시하고 있는 지역구분에서 I 지역으로 선정하여 결정된 지역계수에 위험도 계수를 곱하여 각 성능수준별 내진등급별 설계가속도를 표 5 와 같이 결정하였다.

표 4. 해석에 사용한 지반물성치

지층명	심도	지층 물성					
		지층	깊도 (V/m)	전단탄성계수 (kPa)	체적탄성계수 (kPa)	점착력 (kPa)	내부마찰각
매립	-1.5m	매립-1.5m	1.85	5900	14047	50	35
매립	-13m	매립-13m	2.00	10331	24599	50	35
Fill	-18m	Fill -18m	2.00	5922	14099	50	35
SCP1	-18m	S.C.P. Method 1	1.65	9080	203140	100	15
SCP2	-18m	S.C.P. Method 2	1.65	6415	143529	100	15
CH	-30m	CH -60m	1.65	3655	81767	50	15
기반암	-48m	기반암	2.75	350000	350000	300	35
	-48m	Rubble	2.1	23430	244700	50	35
	-60m	Caisson	2.1	87×105	95*e5	100	35
	-60m	Back Fill Stone	2.00	5922	14099	100	35

표 5. 성능수준 및 내진등급별 기본가속도

	설계가속도(g)	
	내진 I 등급	내진 II 등급
기능수행수준	0.06g	0.04g
붕괴방지수준	0.15g	0.11g

3.1 수정진도법

수정진도법을 사용하여 내진해석을 실시할 경우에는 전술한 바와 같이 지역별 진도, 중요도 계수, 그리고 잔교의 응답계수를 선정하여 설계진도를 구하여 의사정적해석을 수행하여야 하지만 그것은 일본의 지역특성을 반영한 것이므로 본 연구에서는 국내 기준에 맞추어 결정된 설계가속도를 설계진도로 간주하여 의사정적해석을 수행하였다. 의사정적해석을 위해서 잔교식 부두의 단면을 그림 3 과 같은 프레임 구조로 모형화 하였다. 말뚝의 의사정적해석시는 지반내에서 말뚝의 고정점을 결정하는 것이 중요한 문제이나 본 연구에서는 Chang의 이론을 사용한 항만시설물 설계기준에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다.^[10]

3.2 동적해석법

구조물의 동적해석을 위하여 실지진기록보유가 우리나라보다 풍부한 일본의 지진기록을 이용하였다. 본 연구에 이용된 지진기록은 1978년 Miyagi현의 앞바다에서 발생한 지진으로 Ofunato항에서 조사된 가속도 시간이력이다. 이 지진의 진도는 7.4이고 최대가속도는 0.161g 이다. 가속도 시간이력은 다음의 그림 4 에 나타난 바와 같고 국내 설계응답스펙트럼과의 비교는 그림 5 에 나타난 바와 같다. 그림 5 에서 보는 바와 같이 Ofunato 지진기록은 단주기 성분이 국내의 스펙트럼과 유사한 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 실제의 지진기록은 국내의 설계응답스펙트럼에 부합되는 기록이 아니므로 국내의 설계응답스펙트럼에 부합하는 지진기록을 인공적으로 합성하였다. 인공지진의 합성에는 Gasparini 와 Vanmarcke 가 제안한 정현파 중첩에 의한 인공시간이력작성법을 이용한 프로그램인 SIMQKE^[11]를 이용하였으며, 포락함수로는 진앙지와 관측지가 먼 경우에 사용하는 복합형을 사용하였다. 가속도가 0.15g 인 경우에 인공적으로 합성한 지진의 가속도 시간이력은 그림 6과 같고, 시간이력을 설계응답스펙트럼과 비교한 것은 그림 7과 같다.

동적해석에는 지반구조물의 해석에 널리 사용하는 상용프로그램인 FLAC을 사용하였다. 수치해석시 말뚝과 캡펑콘크리트는 각각 보 요소로서 모형화 하여 해석을 수행하였다. FLAC을 이용하여 동적해석을 하기 위한 수치모형은 그림 8a 와 같고 구조물 주변을 확대한 것은 그림 8b 와 같다.

3.3 해석결과

본 연구에서 선정된 해석대상 구조물은 여러 개의 수직말뚝으로 지지되는 잔교식부두이다. 수정진도법을 이용한 해석에서는 설계진도에 따라 3.7 cm ~ 13.9 cm의 변위가 발생하였다. 동적해석의 결과 부두에서 발생한 변위는 기능수행수준의 경우 2.70 ~ 6.24cm이고, 붕괴방지수준의 경우는 8.59 ~ 14.3cm이다. 부두아래부분 제방에서 발생한 변위는 기능수행수준의 경우 2.57 ~ 5.83cm이고, 붕괴방지수준의 경우 8.45 ~ 13.7cm이다. 말뚝지지구조물의 경우 지진과 같은 동적하중에 대하여 상부에서 가장 큰 변위가 발생하므로 그림 8b에서 표시한 바와 같은 위치에서의 변위를 비교하였다. 해석의 결과 구조물 각 지점에서 발생한 변위는 다음의 표 6 과 같다.

표 6. 수정진도법과 동적해석에 의해 잔교식 부두에서 발생하는 변위 (cm)

성능수준	내진등급	설계 가속도	위치	수정진도법	동적해석법	
					Ofunato	인공지진
붕괴방지수준	내진1등급	0.15g	부두	13.9	14.3	11.8
			제방	-	13.7	11.6
	내진2등급	0.11g	부두	11.8	10.6	8.59
			제방	-	10.1	8.45
기능수행수준	내진1등급	0.06g	부두	5.6	6.24	4.38
			제방	-	5.83	4.28
	내진2등급	0.04g	부두	3.7	4.51	2.70
			제방	-	4.12	2.57

표 6에서 보는 바와 같이 수정진도법과 동적해석에 의해 부두에서 발생한 변위를 각각 해석한 결과 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 부분적으로 본 연구에서 사용한 동적해석방법 자체가 구조물의 비선형거동은 고려하지 못하고 지반의 비선형거동만을 반영하는 특성을 갖고 있기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 두가지 방법에서 구조물은 모두 탄성적으로 거동하고 있으므로 해석결과의 차이가 많이 발생하지 않는 것이다. 이러한 점에서 미루어 볼 때, 구조물 자체의 거동을 탄성거동으로 제한하고 있는 기능수행수준의 설계의 경우는 비교적 간단한 방법인 의사정적해석법을 사용하여도 무방할 것으로 사료된다. 그러나, 붕괴방지수준의 경우에는 소성변형을 허용하는 설계가 요구되므로 표 6의 해석결과를 이용하여 의사정적해석만을 수행하기에는 무리가 따른다고 판단된다. 그러므로 붕괴방지수준의 설계는 연성계수를 사용한 탄성해석을 수행하되, 붕괴방지수준의 내진 I 등급 구조물에 대하여는 구조물의 중요도가 매우 높은 경우이므로 필요에 따라 비선형 동적해석을 수행하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 잔교식 부두구조물에 적용할 수 있는 미국과 일본의 내진설계방법에 대하여 검토하였다. 검토한 결과 재현주기에 따라 설계가속도를 결정하는 방법인 미국의 기준이 국내의 기준과 부합하는 점이 많으므로 미국의 기준을 적용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 따라서 구조물과 지반의 비선형 거동을 고려할 수 있는 비선형해석을 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 비선형해석은 매우 많은 시간과 노력을 필요로 하므로 구조물의 비선형거동을 고려할 수 있도록 결정된 연성계수를 이용하는 것이 적절할 것으로 사료된다. 단, 구조물의 중요도가 높은 1 등급 붕괴방지 수준의 구조물에 대하여는 동적 비선형해석의 수행이 필요하다고 사료된다.
- (2) 수정진도법과 동적해석법을 사용하여 동일한 잔교식 부두구조물에 대하여 탄성범위에서 해석을 수행하였다. 해석결과 해석방법에 따라 커다란 차이가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따

라서 기능수행수준의 경우에는 의사정적해석법을 이용하여 해석 및 설계를 하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 그러나 일본에서 사용하는 수정진도법의 경우 일본의 지역적 특성과 지반특성을 고려하여 설계진도를 정하도록 하고 있으므로 국내의 설계진도로 사용하기에는 적절하지 못하다. 따라서 국내에서는 「내진설계기준연구(II)」에서 제시하고 있는 방법으로 설계가속도를 결정하여 의사정적해석을 수행하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Kramer, S.T., Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall International Series in Civil engineering and Engineering Mechanics, 1996.
2. Das, B.M., Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, 1992.
3. Werner, S.D., Dickenson, S.E., and Taylor, C.E., "Seismic Risk reduction at Ports: Case Studies and Aceptable Risk Evaluation," Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 123, No. 6, pp. 337-346, 1997.
4. Tsinker, G.P., "Handbook of Port and Harbor Engineering," Chapman & Hall, 1997.
5. CH2M HILL, "Seismic Hazard Assessment and Design Recommendations," 1992.
6. American Society of Civil Engineers, Seismic Guidelines for Ports, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 12, 1998.
7. Ferritto, J.M., Design Criteria for Earthquake Hazard Mitigation of Navy Piers and Wharves, Technical Report TR-2069-SHR, U.S. Naval Facilities Engineering Services Center, Port Hueneme CA, 1997.
8. 일본토목학회, Earthquake Resistant Design for Civil Engineering Structures in Japan, 1984.
9. 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
10. 해운항만청, 항만시설물설계기준서, 1993.
11. SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation, Dept. of Civil Engineering, Messachusetts Institute of Technology, 1976.

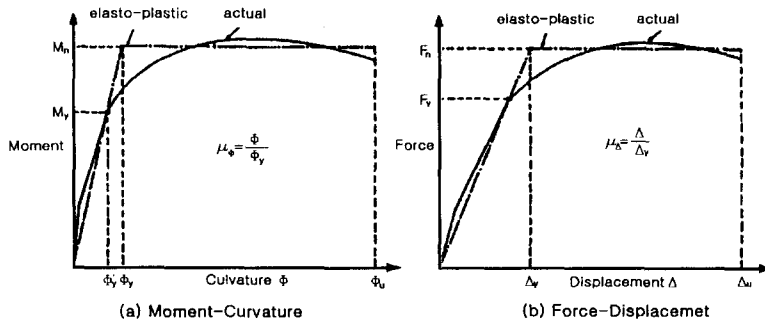


그림 1. 곡률연성계수와 변위연성계수

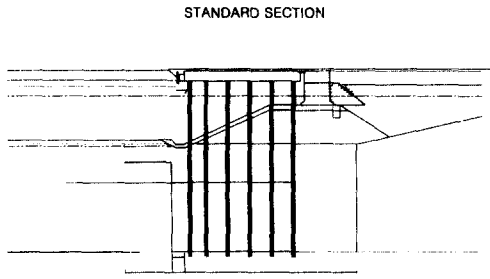


그림 2. 잔교식 부두의 단면에

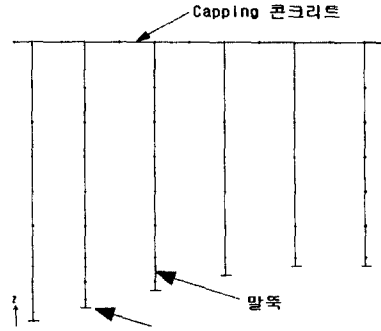


그림 3. 수정진도법에 의한 해석을 위한 모형

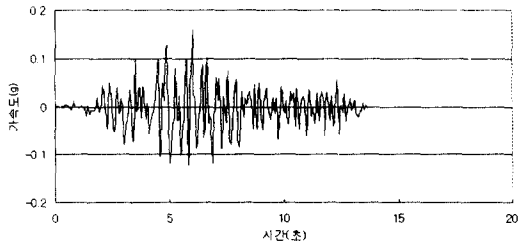


그림 4. Ofunato Type 지진기록

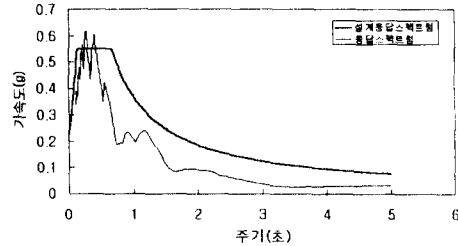


그림 5. Ofunato 기록과 설계스펙트럼과의 비교

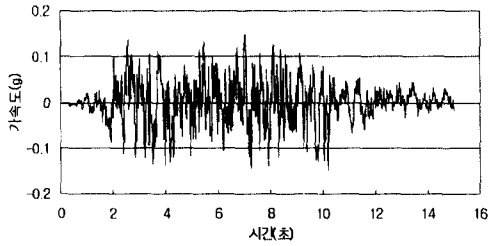


그림 6. 인공지진의 가속도 시간이력(0.15g)

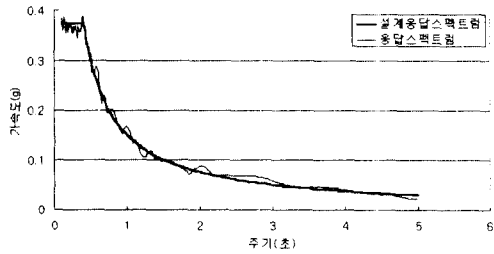


그림 7. 인공지진의 응답스펙트럼(0.15g)

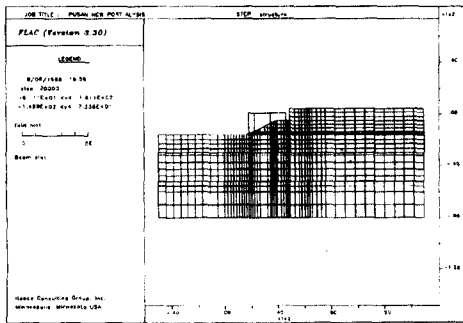


그림 8a. 잔교식 부두의 수치모형

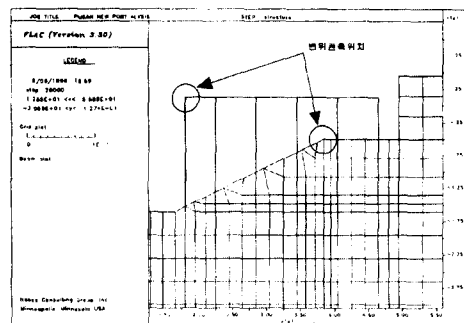


그림 8b. 잔교식 부두의 수치모형(확대)