

지진 기록의 확대(Scaling) 기법과 압력토조 말뚝모형실험에의 적용

Scaling Technique of Earthquake Record and its Application to Pile
Load Test for Model Driven into Pressure Chamber

최 용 규*
Choi, Yong-Kyu

Abstract

Based on Trifunac's empirical model to transform earthquake acceleration-time history in the time domain into Fourier amplitude spectrum in the frequency domain, an earthquake scaling technique for simulating the earthquake record of certain magnitude as the required magnitude earthquake was suggested. Also, using the earthquake record of magnitude(M) 5.8, the simulated earthquake of magnitude(M) 8.0 was established and its application to dynamic testing system was proposed. The earthquake scaling technique could be considered by several terms: earthquake magnitude(M), earthquake intensity(MMI), epicentral distance, recording site conditions, component direction and confidence level required by the analysis. Also, it had an application to the various earthquake records. The simulated earthquake in this study was established by two orthogonal horizontal components of earthquake acceleration-time history. The simulated earthquake shaking could be applied to the dynamic pile load test for the model tension pile and the model compressive open-ended piles driven into the pressure chamber. In the static pile load test, behavior of two piles was very different and after model tension pile experienced 2 or 3 successive slips of the pile relative to the soil, it was failed completely. During the simulated earthquake shaking, dynamic behavior and pile capacity degradation of two piles were very different.

요 지

시간영역의 지진 가속도-시간 이력을 주파수 영역의 Fourier 진폭-주파수 이력으로 변화시키는 Trifunac의 경험적 모델을 기초로 하여 지진 관측소에서 측정된 임의 규모의 실제 지진 기록들을 필요한 규모의 지진기록으로 유사화시키는 지진 확대(scaling) 기법을 제안하였다. 또한, 지진 규모(M) 5.6의 지진기록을 이용하여 지진 규모(M) 8.0의 유사지진을 작성하여 동적 재하 시험장치에 적용가능하도록 하였다. 지진 확대(scaling) 기법은 MMI(modified mercalli intensity), 지진기록 부지의 조건, 진앙거리, 지진 가속도 성분의 방향, 해석의 신뢰도 등을 고려할 수

* 정회원, 경성대학교 토목공학과 조교수

있으며, 다양한 지진 기록들에 적용가능하였다. 유사지진은 수평방향의 성분들만을 고려하여 작성되었다. 압력토조내에 설치된 모형인장말뚝과 개단압축말뚝에 대한 유사지진 진동에 의한 동적 말뚝재하시험이 가능하였다. 정적 말뚝재하시험시 인장말뚝과 압축말뚝의 거동은 매우 상이하였는데, 인장말뚝은 2~3회의 급작스런 미끄러짐 변위를 수반하였다. 또한, 유사 지진 진동중 인장말뚝과 개단압축말뚝의 거동특성은 매우 상이하였으며, 지지력 감소특성도 크게 달랐다.

Keywords : Earthquake Scaling Technique, Simulated Earthquake, Frequency Domain, Dynamic Similitude, Pressure Chamber Test

1. 서론

최근 세계 각처에서 큰 규모의 지진들이 빈번하게 발생하여 귀중한 목숨을 뺏어가고, 재산상 큰 손실을 끼치고 있다. 지진이 도래했을 때 지진 진동에 의한 토목구조물의 영향을 연구하기 위한 하나의 방법으로 지진 관측소에서 관측된 지진 기록을 이용할 수 있다. 즉, 관측된 임의 크기의 지진기록들을 필요한 규모의 지진으로 유사화시키는 지진 확대(scaling) 기법이 그것이다. Trifunac은 지진 규모(M), 지진강도(MMI, modified mercalli intensity), 지진기록부지의 조건, 진앙거리, 지진가속도 성분의 방향, 해석의 신뢰도 등에 따라 지진의 강렬 지진동(strong motion)을 주파수 영역(frequency domain)에서의 Fourier 진폭-주파수 이력으로 변화시키는 경험적인 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 그의 모델을 기초로 하여 지진관측소에서 측정된 임의 규모의 지진 기록들을 필요한 규모의 유사지진으로 확대시키는 지진 확대(scaling) 기법을 제안하였으며, 지진 규모 5.6의 지진 기록을 이용하여 지진 규모 8.0의 유사지진을 작성하였다. 작성된 지진 기록을 소형 압력토조 실험이 가능한 동적 재하 시험장치(Instron Corp., 1979)에 적용가능하도록 모델링하였으며, 소형 압력토조내에 모형 인장말뚝과 압축개단말뚝을 각각 타입한 후 압력토조를 진동시켜 동적 말뚝재하시험을 실시하였다.(최용규, 1995a, 1995b)

2. 지진기록의 확대(scaling) 기법

1990년 미국 캘리포니아주의 Upland지역에서 발생한 지진으로 SEMS관측소(Sea Floor Measurement System Instrument Station)에서 관측된 지진 규모(M) 5.6의 지진기록을 이용하여 임의 지진규모(예를 들면, M=8.0)의 지진진동으로 유사화된 지진 진동을 동적시험장치에 적용시킬 수 있도록 하였다. 또한, Upland지진과 유사한 규모이며 거의 비슷한 지역에서 발생한 Oceanside 지진을 동일한 기법으로 확대하여 비교하였다.

2.1 Upland 지진기록

1990년 2월 28일 23:43:37에 발생한 지진에 관한 상세한 정보는 그림 1에 보이고 있는데, 관측소의 위치, 진앙의 위치, 지진 진동 발생시간, 진앙거리 등을 나타내었다. 지진관측소에 각기 직각 방향으로 설치된 세개의 가속도계들에서 측정된 수평방향 지진가속도 성분들(a_x , a_y)과 수직방향 지진가속도 성분(a_z)에 대한 시간 이력을 그림 2에 나타내었다. 여기서, 지진 진동이 감지된 직후 25~40초 사이에 강렬 지진동(strong motion)이 발생되었다.

2.2 수평지진가속도 성분들(a_x , a_y)의 합성

지진가속도 성분 중 수직방향 성분은 말뚝의 거동에 크게 영향을 미치지 못하였으므로(O'Neill et al., 1990) 최대분산(principal vari-

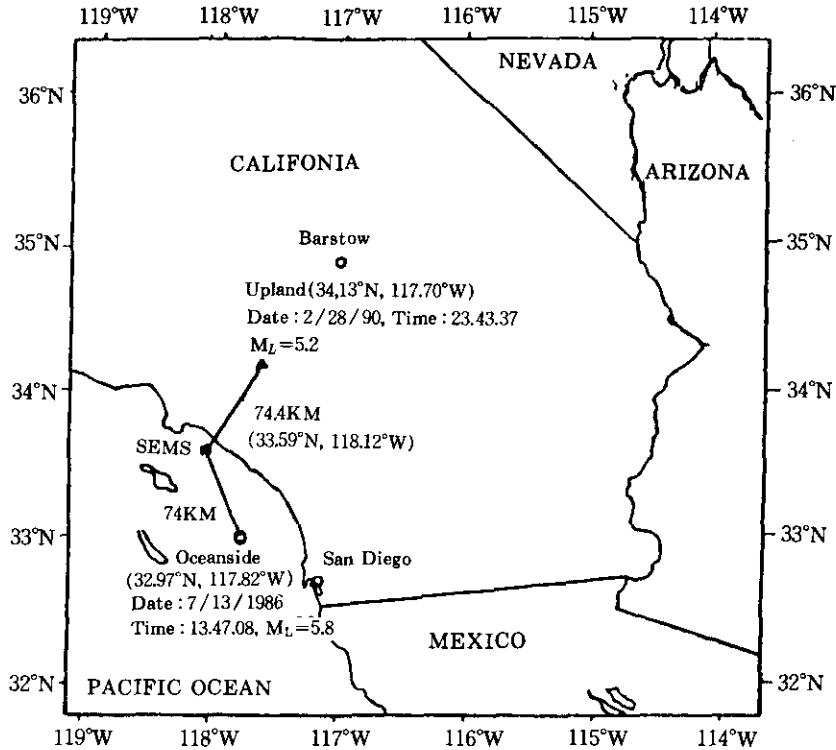


Fig. 1 Map showing the locations of two earthquakes epicenters and the SEMS instrument station

ance) 방향에서의 합성된 하나의 지진 기록을 구하기 위하여 수평방향의 직교 가속도 성분들인 a_x 와 a_y 를 합성하였다. Penzien and Watabe(1975)가 제안한 해석 절차에 따라 수평가속도 a_w 의 합성과정을 설명하면 다음과 같다.

강렬 지진동이 감지된 25초와 40초 사이의 시간에 대하여 수평방향의 지진 가속도들의 분산(variances)과 공분산(covariance)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{ij}(t) = \langle [a_{i(t)} - a_i] [a_j(t) - a_j] \rangle_{t_1}^{t_2} \quad (1)$$

여기서,

$i, j = X, Y$

$\langle \rangle$ = 임의 시간 간격(t_1 에서 t_2 까지)에서의 평균(time average)

t_1, t_2 = 강렬 지진동의 시작과 완료시간(본 논문의 경우, $t_1 = 25$ 초, $t_2 = 40$ 초)

a_i = 전체 진동기간 동안 $a_i(t)$ 의 평균값

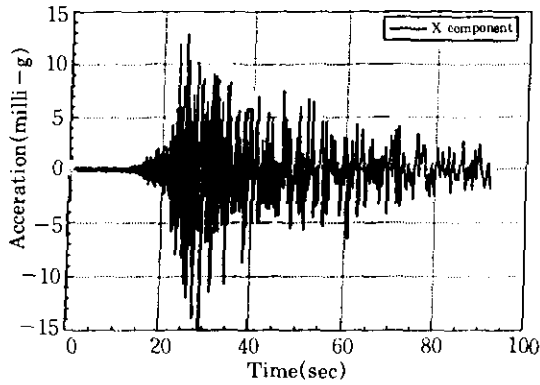
a_j = 전체 진동기간 동안 $a_j(t)$ 의 평균값

그림 2의 a_x 와 a_y 를 이용하여 강렬 지진동 지속시간(25초에서 40초까지)에 대해 계산한 결과는 다음과 같다.

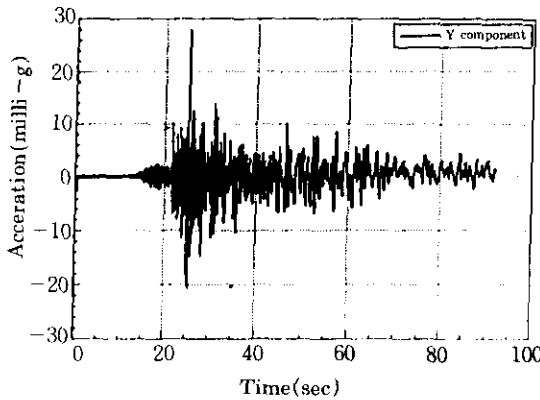
분산 $\mu_{xx} = 15.6(\text{milli-g}^2\text{s})$

분산 $\mu_{yy} = 18.45(\text{milli-g}^2\text{s})$

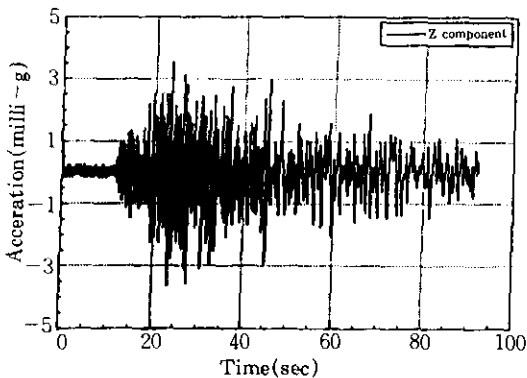
공분산 $\mu_{xy} = -1.1717(\text{milli-g}^2\text{s})$



(a) X-component



(b) Y-component



(c) Z-component

Fig. 2 Recorded acceleration-time history of the Upland earthquake(m=5.8)

최대 분산(principal variance) μ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\mu_{ii} - \mu I] \{n_x \ n_y\} = \{0 \ 0\} \quad (2)$$

여기서,

μ_{ii} = 수평 지진가속도의 분산(variance)과 공분산(covariance)

μ = 합성된 지진가속도의 최대 분산(principal variance)

I = 항등 매트릭스(Identity Matrix)

$$n = n_x i + n_y j, \quad n_x^2 + n_y^2 = 1$$

n_x = 지진가속도의 최대 분산(principal variance) 방향에서 단위벡터의 x방향 성분

n_y = 지진가속도의 최대 분산(principal variance)방향에서 단위벡터의 y방향 성분

식(2)는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 특성방정식을 풀면 μ 를 구할 수 있다.

즉,

$$\begin{bmatrix} \frac{(\mu_{xx} - \mu)}{\mu_{xy}} & \frac{\mu_{xy}}{(\mu_{yy} - \mu)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, 식(2) 또는 식(3)의 해를 구하기 위해 계수 매트릭스(coefficient matrix)의 determinant가 0이 되어야 한다. 즉,

$$\mu^2 - \Phi_1 \mu + \Phi_2 = 0$$

$$\Phi_1 = \mu_{xx} + \mu_{yy} \quad (4)$$

$$\Phi_2 = \mu_{xx} \mu_{yy} - \mu_{xy}^2$$

따라서, 식(4)의 특성 방정식을 풀면 최대 분산 μ 값은 18.83(milli-g's)이 된다. 그리고 μ 값과 식(2)(또는 식(3))과 $n_x^2 + n_y^2 = 1$ 을 이용하여 최대 분산(principal variance) 방향의 단위벡터의 성분들의 값을 구하면 다음과 같다.

$$n_x = -0.310$$

$$n_y = 0.9504$$

주응력방향의 합력을 구하기 위해 이들 방향 cosine값들을 사용하여 수평방향 지진가속도 성분들의 합성은 다음 식에 의해 얻을 수 있다.

$$a_{xy}(t) = [n_x \ n_y] \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)에 의해 합성된 수평지진가속도(a_w)는 그림 3에 나타내었다. Upland 지진의 경우 최대 지진 가속도의 크기는 약 30milli-g였다.

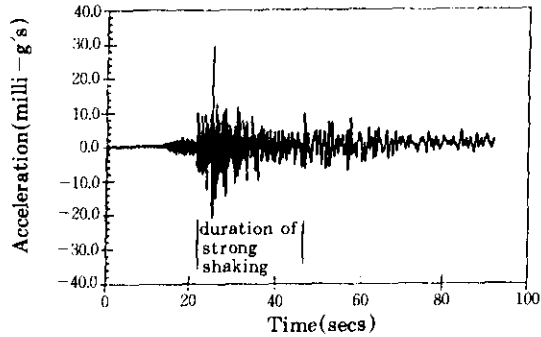


Fig. 3 Combined horizontal acceleration of Upland earthquake(M=5.8)

2.3 주파수 영역으로의 변환

시간 영역에서의 지진가속도와 시간이력은 FFT(Fast Fourier Transform)(Cooley, 1965)에 의해 주파수 영역에서 Fourier진폭과 주파수이력으로 변환시킬 수 있다. 주파수 영역에서의 변환된 지진진동의 이력은 그림 4에 나타내었다. 여기서, Upland 지진은 저주파수지진으로 볼 수 있으며, 탁월한(predominant) 진폭을 나타내는 주파수 영역은 0.5~2Hz이며, 최대 진폭을 나타내는 주파수는 약 1Hz였다. 만약, 원래 지진기록의 가속도가 작음에도 불구하고 변환된 주파수 영역의 지진기록이 높은 주파수를 갖는다면, 기록장치의 잡음(noise)에 의한 것으로 볼 수 있을 것이다. 이러한 경우에는 다음 식(6)을 이용하여 잡음(noise)에 의한 고주파를 여과시킬 수 있다.(Chakrabarti, 1986)

$$a_{F,i} = (1-A)a_{w,i} + a_{F,i-1} \quad (6)$$

여기서,

$a_{F,i}$ = 여과된 가속도값

a_w = 여과되지 않은 원래 가속도

A = 여과의 정도를 나타내는 변수(예, $A=0$: 비여과, $A=1$: 최대여과)

i = 시간단계

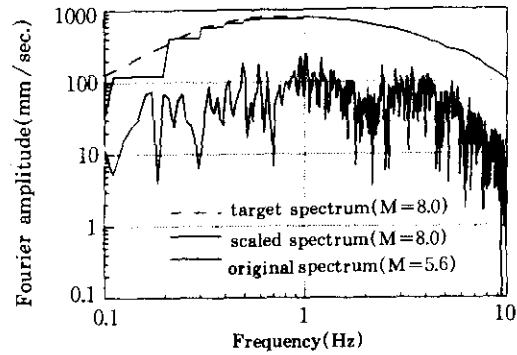
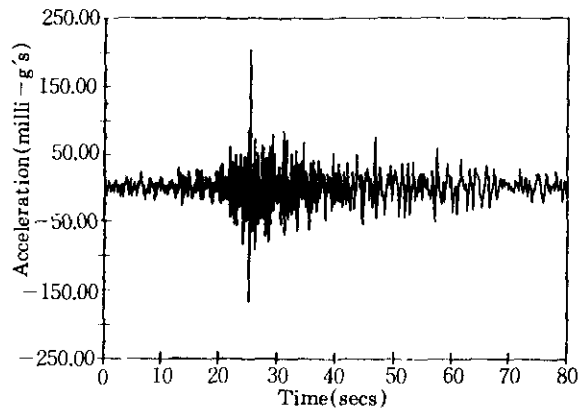


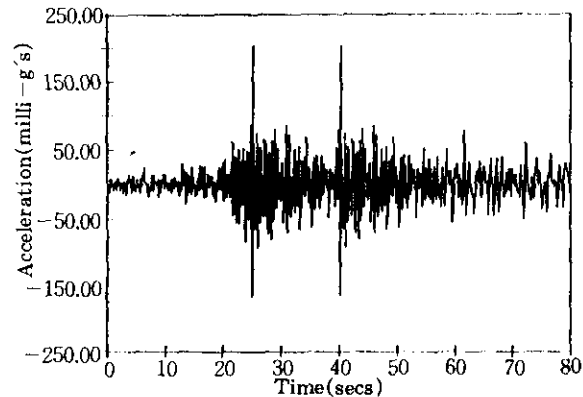
Fig. 4 Fourier amplitude spectra(M=8.0, Upland earthquake)

2.4 임의의 지진 규모로의 확대(scaling)

Trifunac(1979)은 186개의 지진기록으로 부터 지진에 대한 Fourier 스펙트럼 모델을 제안하였는데, 지진 규모, 진앙거리(R), 지진기록



(a) scaled acceleration-time history(M=8.0)



(b) extended acceleration-time history(M=8.0)

Fig. 5 Scaling and extension of acceleration-time history of Upland earthquake

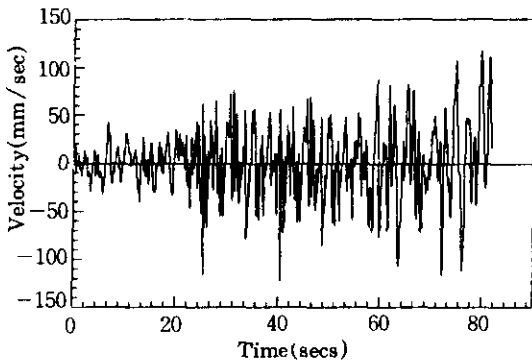
현장의 지반조건, 지진강도(MMI), 지진진동의 방향성, 그리고 해석의 신뢰수준 등에 따른 목표 스펙트럼(target spectrum)을 제시하였으며, 지진 규모와 진앙거리에 의하여 지진강도(MMI)를 결정하는 상관관계 그림도 제시하였다.

Upland 지진은 규모(M) 5.6의 지진이므로 필요한 지진크기로 확대해야 하는데, 여기서는 M=8.0의 지진으로 확대(scaling)하였다. 그림 4는 원래의 지진스펙트럼, Trifunac이 제안한 목표스펙트럼 그리고 M=8.0의 규모로 확대된 스펙트럼등을 보여주고 있다. 여기서, 확대된 스펙트럼과 목표스펙트럼은 잘 일치하였다. 지진 규모 8.0으로 확대된 지진스펙트럼의 시간 이력은 그림 5(a)에 도시하였다.

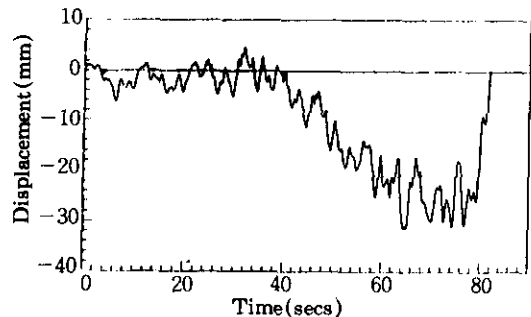
2.5 확대된 스펙트럼의 확장

단층의 파쇄가 진행되고 있는 한 지진진동은 계

속되려고 하기 때문에 강렬 지진동의 지속시간은 지진규모에 의해 크게 영향을 받는다. 강렬 지진동의 지속시간에 미치는 지진 규모의 영향은 여러 연구자들(Donovan, 1973, Housner, 1965, Page et al., 1972)에 의해 연구가 진행되었는데, Housner(1965)는 규모 8.0인 지진의 경우 강렬 지진동은 40~50초 동안 지속된다고 하였다. Seed 등(1969)은 지진규모에 적합한 지속시간을 유지시켜 주기 위하여 기록된 지진의 일부를 중첩시켜 줄 수도 있다고 하였으므로, 본 연구에서는 원래 지진기록의 강렬 지진동 지속시간인 25~40초 사이의 진동을 중첩시켰는데, 그림 5(a)에서 강렬 지진동을 중첩시켜 확장시킨(extended) 유사화된 지진 진동의 시간에 대한 가속도의 이력을 그림 5(b)에 나타내었다. 이것을 적분하면 속도의 이력(그림 6(a))을 구할 수 있다.



(a) Velocity-time history of the extended Upland earthquake (M=8.0)



(b) Tangential displacement-time history of extended Upland earthquake (M=8.0)

Fig. 6 velocity- and tangential displacement-time history of extended Upland earthquake

2.6 동적시험 장치에의 적용

본 연구에 사용된 동적시험장치는 Instron사에서 제작된 Model 1320(Instron Corp., 1979)로써 0.0021초의 최소 시간간격으로 하중을 재하할 수 있었다. 이와 같은 동적재하장치를 이용한 동적 모형실험에서는 유사 지진진동

중 발생될 수 있는 흙의 응력변화와 간극수에서의 과잉 간극수압의 발생 및 소산을 모델링하기 위하여 동적 사상법칙(dynamic model-to-prototype similitude)을 적용시켜야 한다. 본 연구에서는 시간 크기계수(n)가 약 4.8이므로(3절 설명 참조), 그림 5(b)와 그림 6

에 있는 지진기록의 가속도, 속도 및 변위의 시간에 대한 이력을 각각 n , 1 , $1/n$ 배(Fuglsand, 1988)하여 본 연구에서 사용된 동적재하시험 장치에 적용시켜줄 유사지진에 대한 가속도, 속도 및 변위 시간에 대한 이력을 구할 수 있으며, 이중 변위의 시간에 대한 이력만을 그림 7에 나타내었다. 현장 말뚝에 대한 모형 말뚝의 동적유사과정은 제 3절에서 상세히 설명하였다.

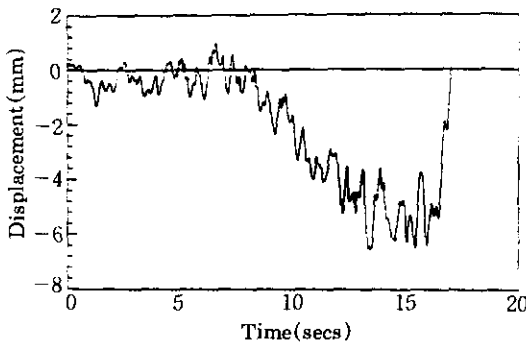
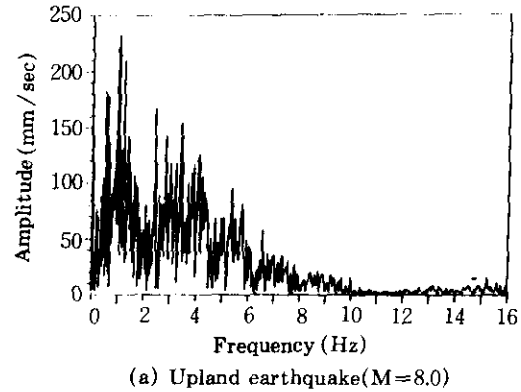


Fig. 7 Tangential displacement-time history of extended Upland earthquake(M=8.0) applied to dynamic testing system

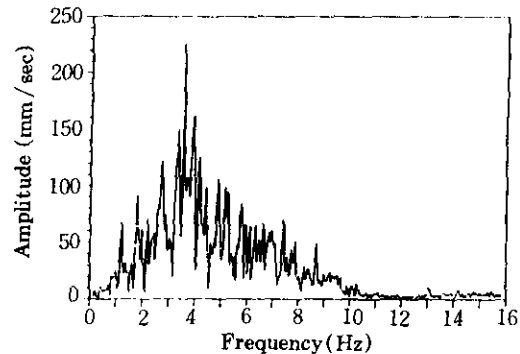
2.7 확대(Scaling) 기법의 다른 지진기록에의 적용

1986년 7월 13일 규모(M) 5.8인 Oceanside 지진이 Upland 인근지역에서 발생하였으며 동일한 지진 관측소(SEMS)에서 측정되었다. 따라서, 규모와 발생지역등이 비슷하지만 각기 다른 시각에 발생된 두 지진에 지진 확대(Scaling) 기법을 적용하여 규모 8.0으로 유사화 시킨 지진 진동의 주파수 영역에서의 Fourier 진폭-주파수 이력을 비교하였다. 그림 8은 이들 두 지진에 대한 주파수 영역에서의 Fourier 진폭-주파수의 이력을 보여주고 있다. Upland 지진은 30milli 1-g의 최대가속도, 0.5-2Hz 범위에서의 강렬 지진동 그리고 1Hz에서 최대 진폭을 나타내었다. 반면, Oceanside 지진은 25milli-g의 최대 가속도, 3-5Hz 범위에서의 강렬 지진동 그리고 4Hz에서 최대 진폭을 나타내었다. Upland

지진이 좀 더 저주파 지진진동이었으며 좀 더 균일한 상태였으나, 그림 4와 같은 대수축척으로 나타낼 경우, 확대(Scaling) 기법에 의해 규모(M) 8.0으로 확대된 유사 지진진동들의 스펙트럼은 그림 4에 도시된 목표 스펙트럼과 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다.



(a) Upland earthquake(M=8.0)



(b) Oceanside earthquake(M=8.0)

Fig. 8 Fourier amplitude spectra of extended scaled for Upland and Oceanside earthquake records

3. 현장 말뚝과 모형실험과의 동적 유사성

유사 지진진동중 압력토조(최용규, 1995b)내에 있는 모형지반에서의 응력변화와 과잉 간극수압의 형성 및 소산을 모델링하기 위하여 현장 말뚝과 모형실험과의 동적 유사성을 알아낼 필요가 있다. 모형실험과 현장의 간극유체와 지진 진동속도가 동일하다고 가정하면, 지진진동에 의한 응력변화와 간극수압의 분산에 대한

시간크기계수(time scaling factor, n)를 각각 알아낼 수 있다.(O'Neill et al., 1990) 동적 상사성에 영향을 미치는 다른 인자도 고려할 수 있을 것이나 응력변화와 간극수압의 분산이 가장 중요한 요소라고 할 수 있을 것이다. 응력변화와 간극수압을 고려한 경우, 모형말뚝의 길이와 시간에 대한 동적 상사성은 현장말뚝에서의 값에 비해 1/n배(Fuglsand et al., 1988)이다. 여기서, 시간에 대한 크기계수 n은 다음과 같은 두가지 고려사항을 감안하여 결정할 수 있다.

$$i) n_1 = \frac{\text{현장 흙의 투수계수}(k_p)}{\text{모형실험에 사용된 흙의 투수계수}(k_m)}$$

$$ii) n_2 = \frac{\text{실제 지진진동의 시간-변위에}}{\text{동적 재하장치에 작용된 진동의 시간-변위이력에 대한 가능 추적시간}(\Delta t_m)}$$

여기서, 문헌등을 통하여 k_p 를 직접 알아내는 것이 쉽지 않았으므로 n_1 을 직접 계산하는 것은 곤란하였다. 그러나, Δt_p 은 0.01초이고 Δt_m 의 최소값은 0.0021초이므로 n_2 의 최대값은 약 4.8이었으므로, 시간에 대한 크기계수는 4.8로 결정하였다.

4. 압력토조 모형말뚝실험에의 적용

압력토조내에 모형말뚝을 타입한 후 유사지진진동을 작용시켜 폐단인장말뚝(외경=25.4mm, 관입 길이=381.0mm)과 개단 압축 말뚝(외경=43.0mm, 내경=35.0mm, 관입 길이=375.0mm)에 대한 거동특성을 고찰하였다.(최용규, 1995a, 1995b)

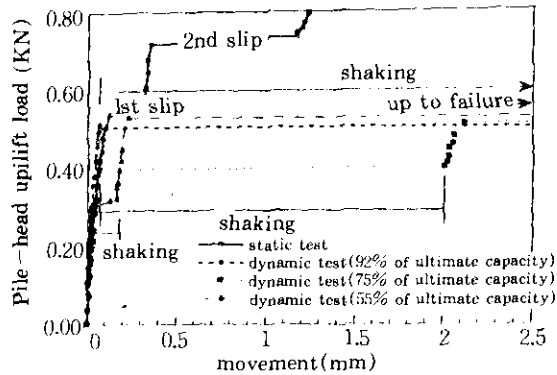
4.1 유사지진 진동에 의한 동적 인장말뚝시험

모형인장말뚝 머리에 연결된 강제 와이어의 끝에 매달린 재하용 버킷에 납구슬을 부어넣어 하중을 서서히 재하하여 정적 인발 재하 시험을 실시하여 극한지지력을 결정하였다. 재하후

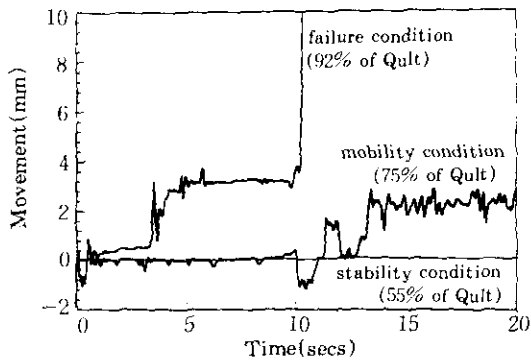
극한인발 지지력의 임의 수준(본 실험에서는 92%, 80%, 50%)의 인발하중을 말뚝머리에 다시 재하하고 유사지진 진동을 압력토조에 작용시켜 주었다. 본 실험은 지진이 도래했을 때 임의 수준의 인발 하중을 지지하고 있는 폐단말뚝의 거동을 연구하기 위한 목적으로 실시되었던 실험이었다. 인장 말뚝은 작용된 인발하중의 크기와 지진 규모에 따라 상이한 거동을 나타내게 되는데, 그 거동특성은 크게 세개의 영역, 즉, 안정영역(stability zone), 가동영역(mobility zone), 파괴영역(failure zone)으로 구분할 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 참고 문헌(O'Neill et al., 1992)을 참고할 수 있을 것이며, 일반적인 적용성을 부여하기 위하여 지진 종류를 달리하여 이 연구는 계속되고 있다.

그림 9(a)는 정적 인발 재하시험 결과와 임의 수준의 인발 하중을 받는 폐단말뚝의 유사지진 진동에 의한 거동특성을 보여주고 있다. 여기서, 정적 재하시험은 각 지진 진동 작용 이전에 실시되었다. 극한 인발 지지력은 첫번째 미끄러짐이 발생하는 변위에 해당하는 지지력으로 결정할 수 있으며, 이 극한 인발 지지력의 92%, 70%, 50%수준의 인발 하중을 지지하고 있는 말뚝에 유사지진 진동을 작용시켜 인발 지지력의 감소(그림 9(a)), 말뚝 머리의 인발변위(그림 9(b)), 그리고 말뚝 머리에 작용되고 있는 인발 하중의 변화(그림 9(c))등을 고찰하였다. 그림 9(a)로부터, 유사지진 진동에 의하여, 92%의 인발하중을 지지하고 있는 말뚝은 약 2.5mm의 급작스러운 인발 변위를 발생시켜 파괴상태에 도달하게 되었고, 70%의 인발하중을 지지하고 있는 말뚝은 약 0.3mm의 인발변위를 발생시켜 가동영역에 있었으며, 50%의 인발하중을 지지하고 있는 말뚝은 매우 미소한 인발변위를 나타내어 안정한 상태에 있었다. 또한, 극한 인발지지력의 70%와 50% 수준의 인발하중을 지지하고 있는 말뚝의 경우, 유사지진 작용후 추가로 인발하중을 작용시켜 재하시험을 실시하였는데, 여기서, 극한 인발 지

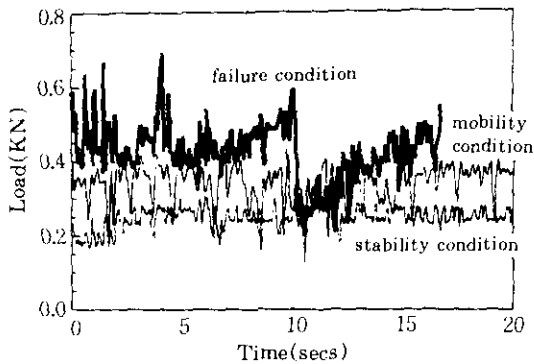
지력은 원래의 극한 인발지지력보다 작은 것을 알 수 있다. 그림 9(b)는 유사지진 진동중 발생된 말뚝머리 변위량의 시간에 대한 이력을 보여주고 있다. 말뚝에 작용된 유사 지진 진동



(a) Uplift pile head load versus Pile head movement



(b) Pile head movement--time history



(c) Pile head load--time history

Fig. 9 Behaviors of tension pile during simulated earthquake shaking

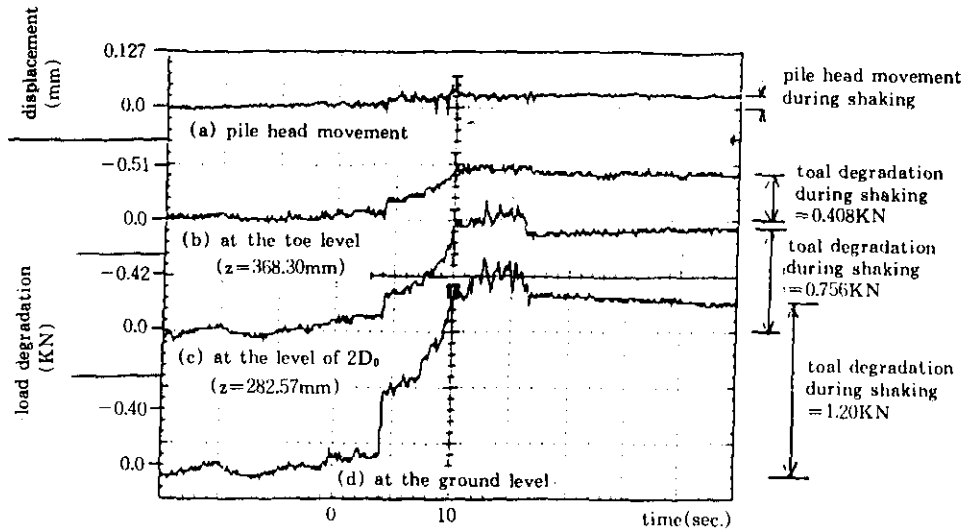
의 작용시간은 약 17초였는데, 진동 작용 초기에 말뚝의 인발변위가 발생하였으며, 이때 발생된 변위의 크기는 그림 9(a)에 나타난 말뚝머리변위와 일치하였다. 그림 9(c)에는 유사지진 진동에 의해 달라지게 되는 말뚝머리 하중의 시간에 대한 이력을 보여준다. 유사지진 진동후 말뚝의 미끄러짐에 의한 인발변위는 크게 수반되었으나 말뚝머리 하중은 크게 감소되지 않았는데, 이것은 모형 말뚝머리에 고정된 강제와이어에 매달린 통에 정하중을 작용시켜 두었으므로 지진진동후에도 이 하중은 변함없이 말뚝머리에 작용되어 있기 때문으로 보인다. 그러나, 유사지진 진동 중에는 말뚝 인발 하중에 크게 진동이 생기는 것을 볼 수 있었다.

4.2 유사지진 진동에 의한 동적 모형 개단 압축말뚝 실험

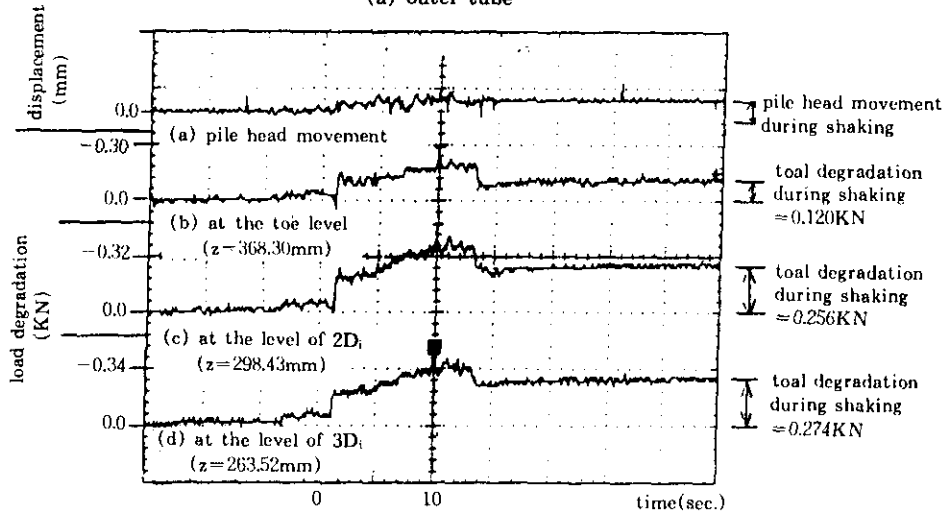
그림 10(a)~(c)는 각각 유사 지진진동중 모형 개단 말뚝의 내관과 외관에 부착된 스트레인 게이지에서 측정된 말뚝 축하중의 감소량, 관내토 폐색력의 감소량 그리고 말뚝머리 변위량들을 보여주고 있다.

그림 11에는 정적인 극한 말뚝 축하중의 전이 상태와 지진 진동후 감소된 극한말뚝 하중의 전이상태를 보여주고 있다. 또한, 지진 진동 전과 후의 관내토 마찰응력의 크기도 보여주고 있는데, 그것은 빗금친 부분으로 나타내었다. 유사지진 진동후에는 극한 지지력이 약 20% 감소되었는데, 외주변 마찰력의 감소량은 극한 지지력 감소량의 대부분을 차지하여 약 80%였다.

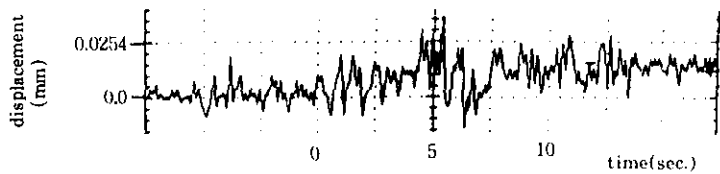
그림 12에는 외주변면과 관내토에서 발휘된 정적인 극한 마찰 응력과 지진진동후 감소된 극한 마찰응력을 보여준다. 외주변 마찰응력은 말뚝상부에서 주로 감소되었으며, 관내토 마찰응력은 말뚝선단으로부터 약 $3.0D_i$ 이내의 관내토에서 발휘되었고, 지진 진동후에는 동일한 부분에서 감소되었으며 약 $2.5D_i$ (D_i : 말뚝내경)이내의 관내토에서 발휘되어졌다. 극한 관



(a) outer tube



(b) inner tube



(c) an example of magnified pile head movement

Fig. 10 An example of test data measurement of pile head movement, axial load degradations in the inner tube and the outer tubes during simulated earthquake shaking

내토 폐쇄력은 약 20% 감소되었다.

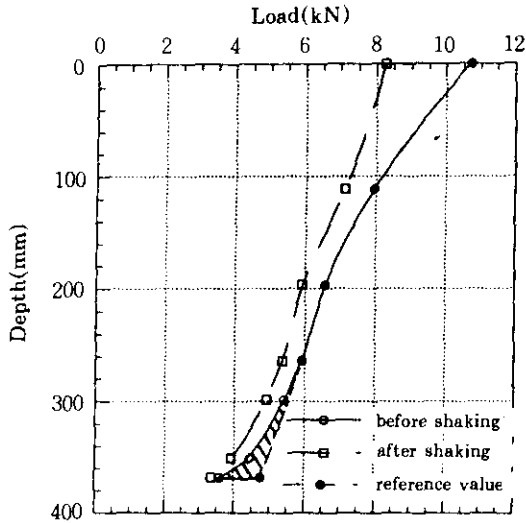


Fig. 11 Degradation in pile capacity at ultimate condition

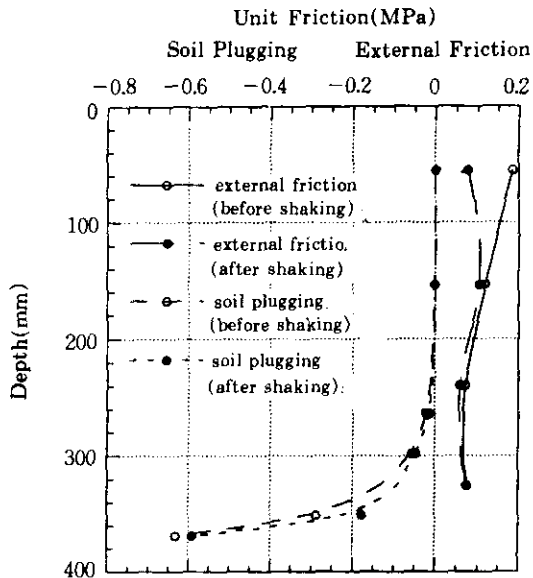


Fig. 12 Distributions of axial force and unit friction before and after simulated earthquake shaking

그림 13은 폐단 인장 말뚝과 개단 압축 말뚝에 대한 정적인 재하시험에서 측정된 극한지지력에 대해 정규화된 말뚝머리하중과 말뚝직경

에 대해 정규화된 말뚝머리 변위량과의 관계를 보여준다. 인장 말뚝은 2~3회의 급작스런 인발변위를 겪은 후 파괴상태에 도달하였는데, 극한 인발 지지력은 첫번째 급작스런 인발변위에 해당하는 말뚝머리 하중으로 결정할 수 있었으며(최용규, 1995a), 이 때의 변위는 말뚝직경의 약 0.004배였다. 반면, 개단 압축말뚝의 하중-변위 거동은 인장 말뚝과는 상이하였으며, 말뚝직경의 약 0.02배에 해당하는 말뚝머리 변위에서 극한 지지력을 결정할 수 있었다. 또한 인장 말뚝은 압축말뚝보다도 매우 작은 변위에서 극한 지지력을 발휘하고 있었으며, 인발말뚝의 경우 2차 및 3차의 급작스런 인발변위도 말뚝직경의 약 10%이내의 변위에서 발생되어졌다.

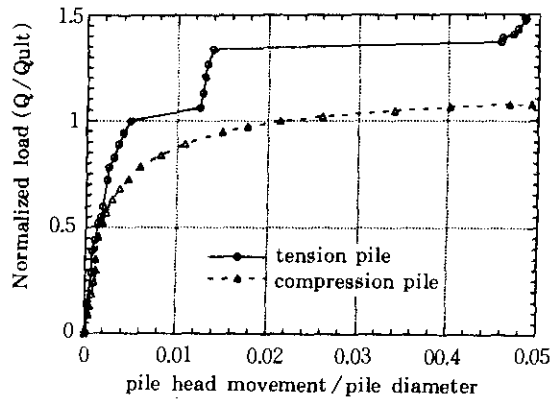


Fig. 13 Normalized pile head load versus normalized pile head movement for tension/compression pile during static test

5. 결론

지진관측소에서 관측된 임의 크기의 지진 기록들을 필요한 크기의 지진으로 유사화시키는 지진 scaling 기법을 통하여 규모(M) 8.0의 유사 지진진동을 작성하였다. 이 유사 지진 진동을 동적 재하 시험 장치에 작용시켜 압력토조 내에 타입된 인장 말뚝 및 개단 압축 말뚝에 대한 동적 말뚝재하시험에의 적용성을 검토하였으며, 본 연구의 결론들은 다음과 같다.

1. 관측된 지진 기록들을 임의 크기의 유사

- 지진으로 확대시키는 지진 확대(scaling) 기법은 발생된 지진들의 특성에 상관없이 적용가능한 것으로 판단되나, 최근 국내에서도 규모 3~4정도의 지진이 수차례 발생되고 있는바, 이에대한 연구의 필요성이 있다.
2. 기록된 지진가속도의 세 성분중 수직 방향 성분은 지진거동에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 알려져 있으므로 수평방향의 두 직교성분들만을 합성하여 유사지진진동을 생성시켰다.
 3. 정하중 상태에서의 인장말뚝과 압축말뚝의 하중-변위 거동은 크게 달랐는데, 인장말뚝은 2~3회의 급작스런 미끄러짐 변위를 겪은 후 파괴 상태에 도달하였다. 또한, 인장말뚝은 압축말뚝보다 매우 작은 변위에서 극한지지력에 도달하였다.
 4. 규모 8.0으로 유사화된 지진 진동을 겪은 후 인장 말뚝은 안정 상태(stability), 가동 상태(mobility), 그리고 파괴 상태(failure)로 거동할 수 있는데, 이것은 말뚝에 지지된 인발하중의 크기에 따라 달라졌다.
 5. 규모 8.0으로 유사화된 지진진동을 겪은 후 개단압축 말뚝의 극한지지력은 약 20%감소되었으며, 개단말뚝의 지지력 성분중 외주변 마찰력의 감소량은 각각 극한 지지력 감소량의 대부분을 차지하여 약 80%였다.

감사의 말

본 연구는 1995년도 경성대학교 연구기초 자료 지원 연구비의 지원을 받아 수행된 것입니다.

참고 문헌

1. 최용규(1995a), "소형 압력 토조내에 타입된 말뚝의 인발 거동과 극한 인발지지력 결정에 관한 연구", 한국지반공학회지, Vol 11, No.2, pp. 19~28
2. 최용규(1995b), "말뚝의 설치방법에 따른 관내 토의 폐색거동", 한국지반공학회지, Vol 11, No. 4, pp.25~35
3. Chakrabarti, S., Shaw, D., Stephenson, D.E., and Wijaya-Kumar, B.V.K(1986), "Digital Signal Processing of Geotechnical Data", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 112, January, pp.70~84
4. Cooley, J.W., and Tukey, J.W.(1965), "An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series", "Mathematical computation, Vol. 19, pp.297~301.
5. Donovan, N.C.(1973), "Earthquake Hazards for Buildings", Building practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Building Services, 46, pp.82~111
6. Fuglsand, L.D., and Ovesen, N.K.(1988), "The Application of the Theory of Modelling to Centrifuge Studies", Centrifuge in Soil Mechanics, Editors W.H Craig, R.G. James and N Schofi, A.A. Balkema publishers, Rotterdam, p.131.
7. Housner, G.W.(1965), "Intensity of Earthquake Ground Shaking Near the Causative Fault", proceedings, 3rd. World Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, Vol 1.
8. Instron Corp.(1979), Instrustion Manual For 1320 Series Dynamic Test Systems & Instruction Manual for Model 1320 Series Load Frames, Manual No. 11-7-1, 11-2-2
9. O'Neill, M.W., Vipulanandan, C., and Ochoa, M.(1990), "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturared Fine Sand", UHCEE 90-09.
10. O'Neill, M.W., Vipulanandan, C., and Ochoa, M.(1992), "Laboratory Scale Modelling of Pullout Behavior of Bias-loaded Tension piles During Earthquakes", 24th Offshore Conference, Houston, Texas, USA, pp55~62
11. Page, R.A, Boore, D.M., Joyner, W.B., and Caulter, H.W.(1972), "Ground Motion Values for Use in the Seismic Design of the Trans-Alaska Pipeline System, USGS Circular 627.
12. Penzien, K., and Watabe, M.(1975), "Char-

- acteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3,
13. Seed, H.B., and Idriss, I.M.(1969), "Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM1, pp.99~137.
 14. Trifunac, M.D.(1979), "Preliminary Empirical Model for Scaling Fourier Amplitude Spectra of Strong Acceleration in Terms of Modified Mercalli Intensity and Recording Site Conditions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, pp. 63~74.
(접수일자 1995. 9. 23)