

지진 기록의 Scaling 기법과 압력토조 말뚝모형실험에의 적용

Scaling technique of earthquake record and its application to pile load test for model pile driven into pressure chamber

최 용규, Yong Kyu Choi

경성대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungsu University, Pusan

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.

1. 서론

최근 세계 각처에서 큰 크기의 지진들이 빈번하게 발생하여 귀중한 목숨을 빼앗아 가고, 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 지진 기록들을 필요한 크기의 지진으로 유사화시키는 지진 scaling 기법이 그것이다. Trifunac은 지진크기(M), 지진강도(MMI, Modified Mercalli Intensity), 지진기록부지의 조건, 진앙거리, 지진가속도 성분의 방향, 해석의 신뢰도 등에 따라 지진의 강렬한 진동을 주파수 영역(frequency domain)에서의 Fourier 진폭-주파수 이력으로 변화시키는 경험적인 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 그의 모델을 기초로 하여 지진관측소에서 측정된 임의 크기의 지진 기록들을 필요한 크기의 유사지진으로 확대시키는 지진 scaling 기법을 제안하였으며, 지진크기 5.6의 지진 기록을 이용하여 지진크기 8.0의 유사지진을 작성하였다. 작성된 지진 기록을 소형 압력토조 실험이 가능한 동적 재하 시험장치에 적용가능하도록 모델링하였으며, 소형 압력토조내에 모형 인장말뚝과 압축개단말뚝을 각각 타입한 후 압력토조를 진동시켜 동적 말뚝재하시험을 실시하였다.

2. 지진 기록의 Scaling 기법

1990년 미국 캘리포니아주의 Upland 지역에서 발생한 지진으로 SEMS 관측소(See Floor Measurement System Instrument Station)에서 관측된 지진크기(M) 5.6의 지진 기록을 이용하여 임의 지진크기(예를 들면, M=8.0)의 지진 진동으로 유사화시키는 지진 기록의 Scaling 기법을 설명하고, 동적 진동시의 크기효과를 고려하여 이 유사화된 지진 진동을 동적 시험장치에 적용시킬 수 있도록 하였다.

2.1 수평 지진 가속도 성분들(a_x , a_y)의 합성

지진가속도 성분중 수직방향 성분은 말뚝의 거동에 크게 영향을 미치지 못하였으므로(O'Neill, 1990) 최대 주응력의 Variance 방향에서 수평방향의 직교 가속도 성분들인 a_x 와 a_y 를 합성하였다. Penzien and Watabe(Penzien, 1975)가 제안한 해석 절차에 따라 수평가속도 a_x 와 a_y 의 합성과정을 설명하면 다음과 같다.

Covariance들은 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

여기서, $i, j = X, Y$

$t_1, t_2 =$ 임의 시간($t_1 < t < t_2$)

$a_i =$ 전체진동기간동안 $a_i(t)$ 의 평균값

$a_j =$ 전체진동기간동안 $a_j(t)$ 의 평균값

Upland 지진기록중 수평방향 지진가속도 성분들 a_x 와 a_y 를 이용하여 강열한 지진진동지속시간에 대해 계산한 결과는 다음과 같다.

$$\mu_{xx} = 15.6(\text{milli} - g's)$$

$$\mu_{yy} = 18.45(\text{milli} - g's)$$

$$\mu_{xy} = -1.1717(\text{milli} - g's)$$

최대 주응력의 Variance는 다음 식으로 계산할 수 있다.

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

여기서, $I =$ 항등 매트릭스(Identity Matrix)

$n_x =$ 주응력방향에서 단위벡터의 x 방향성분

$n_y =$ 주응력방향에서 단위벡터의 y 방향성분

특성 방정식을 풀면 최대 주응력 방향의 Variance $\mu_I = 18.83$ (milli - g's)이다.

식 (2)와 $n_x^2 + n_y^2 = 1$ 을 이용하여 최대 주응력방향의 단위벡터의 방향 Cosine값들은 다음과 같다.

$$n_x = -0.310$$

$$n_y = 0.9504$$

주응력방향의 합력을 구하기 위해 이들 방향 Cosine값들을 사용하여 수평방향 지진가속도 성분들을 다음에 의해 합성할 수 있다.

$$a_{xy}(t) = [n_x \ n_y] \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)에 의해 합성된 수평지진가속도(a_{xy})는 그림 1에 나타내었다. Upland지진의 경우 최대 지진 가속도의 크기는 약 30milli-g였다.

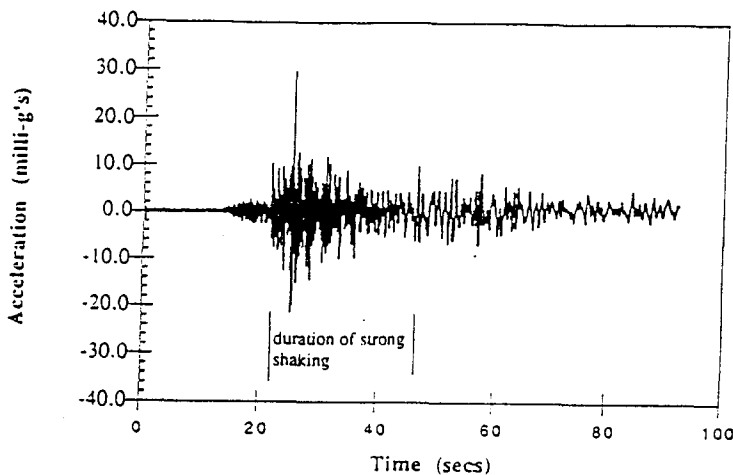


Fig. 1 Combined horizontal acceleration of Upland earthquake(M=5.8)

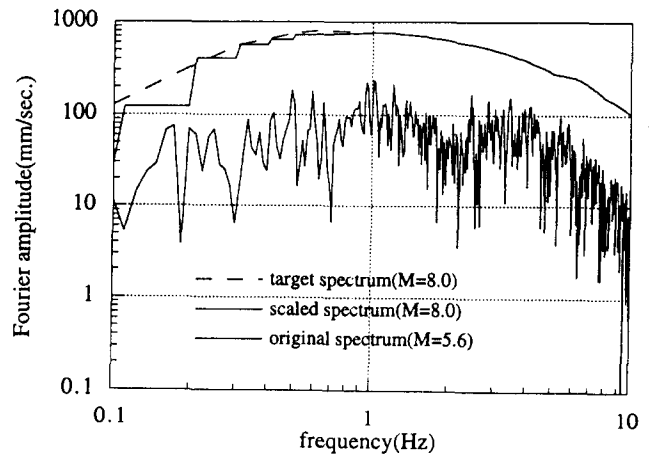


Fig. 2 Fourier amplitude spectra(M=8.0,Upland earthquake)

2.2 주파수 영역으로의 변환

시간 영역에서의 지진가속도와 시간이력은 FFT(Fast Fourier Transform)(Cooley,1965)에 의해 주파수 영역에서 Fourier진폭과 주파수이력으로 변환

시킬 수 있다. 주파수 영역에서의 변환된 지진진동의 이력은 그림 2에 나타내었다. 여기서, Upland 지진은 저주파수지진으로 볼 수 있으며, 우세한(Predominant) 진폭을 나타내는 주파수 영역은 주파수는 0.5 - 2Hz이며, 최대 진폭을 나타내는 주파수는 약 1Hz였다.

$$a_{F,n} = (1-A)a_{xy,n} + a_{1F,n-1} \quad (4)$$

여기서, $a_{F,n}$ = 여과된 가속도값

a_{xy} = 여과되지 않은 원래 가속도

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

n = 시간단계

2.3 임의 지진 크기로의 Scaling 및 확장

Upland 지진은 크기(M) 5.6의 지진이므로 필요한 지진크기로 확대해야 하는데, 여기서는 $M = 8.0$ 의 지진으로 Scaling하였다. 그림 4는 원래의 지진스펙트럼, Trifunac이 제안한 목표스펙트럼 그리고 $M=8.0$ 의 크기로 확대된 스펙트럼등을 보여주고 있다. 여기서, 확대된 스펙트럼과 목표스펙트럼은 잘 일치하였다. 지진 크기 8.0으로 확대된 지진스펙트럼의 시간이력은 그림 3(a)에 함께 도시하였다.

단층의 파쇄가 진행되고 있는 한 지진진동은 계속될려고 하기 때문에 강렬한 지진진동의 지속시간은 지진크기에 의해 크게 영향을 받는다. 강한 진동의 지속시간에 미치는 지진크기의 영향은 여러 연구자들(Donovan,1973, Housner,1965, Page,1972)에 의해 연구가 진행되었는데, Housner(1975)는 크기 8.0인 지진의 경우 강한 진동은 40 - 50초 동안 지속된다고 하였다. Seed등(1969)은 지진크기에 적합한 지속시간을 유지시켜 주기 위하여 기록된 지진의 일부를 중첩시켜 줄 수도 있다고 하였으므로, 본 연구에서는 원래지진기록의 강렬한 진동 지속시간인 25 - 40초 사이의 진동을 중첩시켰으며, 확장된(Extended) 지진의 시간에 대한 이력을 그림 3(b)에 나타내었다.

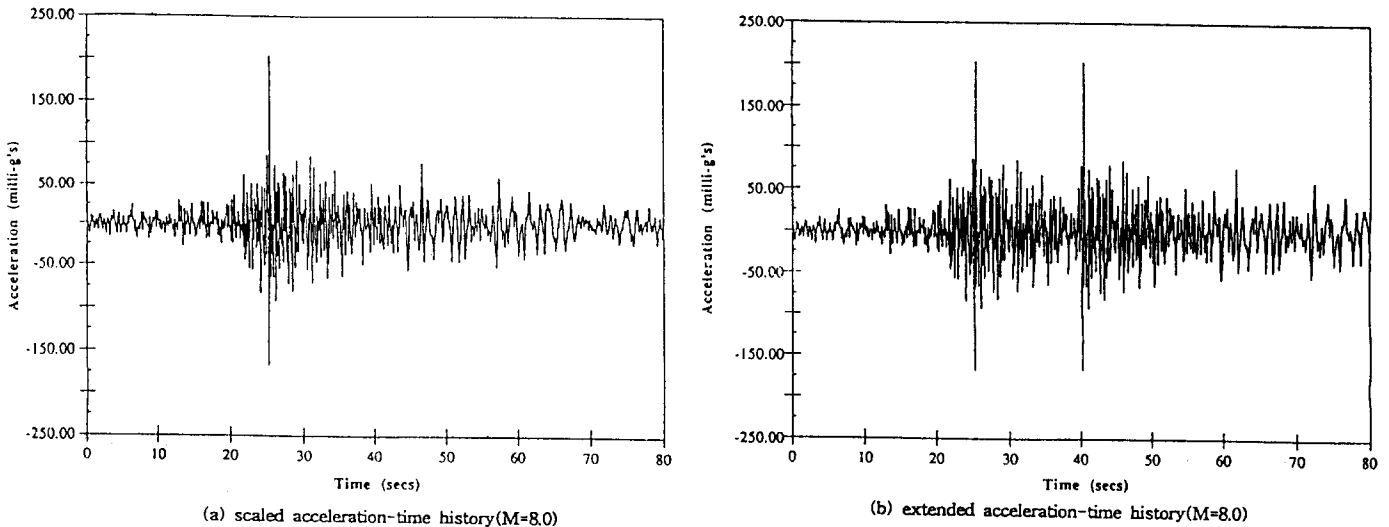


Fig. 3 Scaling and extension of acceleration-time history of Upland earthquake

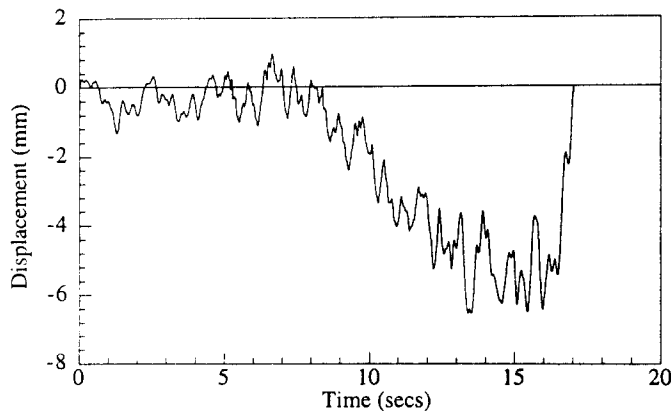


Fig. 4 Tangential Displacement-Time History of extended Upland earthquake(M=8.0) applied to dynamic testing system

2.6 동적시험 장치에의 적용

본 연구에 사용된 동적시험장치는 Instron사에서 제작된 Model 1322로써 0.0021초의 최소 시간간격으로 하중을 재하할 수 있었다. 이와 같은 동적재하장치를 이용한 동적모형실험에서는 유사 지진진동중 발생될 수 있는 흙의 응력변화와 간극수에서의 과잉 간극수압의 발생 및 소산을 모델링하기 위하여 동적 상사법칙(Dynamic model-to-prototype Similitude)을 적용시켜주어야 한다. 본 연구에서 채택된 동적 크기계수(n)은 약 4.8이므로 그림 5와 6에 있는 지진기록의 가속도, 속도 및 변위의 시간에 대한 이력을 각각 n, 1, 1/n배하여 본 연구에서 사용된 동적재하시험장치에 적용시켜줄 유사지진에 대한 가속도, 속도 및 변위의 시간에 대한 이력을 구할 수 있으며, 이중 변위의 시간에 대한 이력만을 그림 4에 나타내었다.

3. 압력도조실험에의 적용

압력도조내에 모형말뚝을 타입한 후 유사지진진동을 작용시켜 폐단인장말뚝(외경 = 25.4mm, 관입 길이 = 381mm)과 개단 압축 말뚝(외경 = 43mm, 내경 = 35mm, 관입 길이 = 375mm)에 대한 거동특성을 고찰하였다.

3.1 유사지진 진동에 의한 동적 인장말뚝시험

그림 5(a)는 정적 인발 재하시험 결과와 임의 수준의 인발 하중을 받는 폐단말뚝의 유사지진진동에 의한 거동특성을 보여주고 있다. 여기서, 정적 재하시험은 각 지진 진동 작용이전에 실시되어졌다. 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 5(a)), 말뚝 머리의 인발 변위(그림 5(b)), 그리고 말뚝 머리에 작용되고 있는 인발 하중의 변화등을 고찰하였다. 유사지진 진동중, 92%의 인발하중을 지지하고 있는 말뚝은 약 2.5mm의 급작스러운 인발변위를 발생시켜 파괴상태에 도달하게 되었고, 70%의 인발하중을 지지하고 있는 말뚝은 약 0.3mm의 인발변위를 발생시켜 가동 영역에 있었고, 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 지지력은 원래의 극한 인발지지력보다 작은 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 유사지진 진동중 발생된 말뚝머리 변위량의 시간에 대한 이력을 보여주고 있다. 말뚝에 작용된 유사 지진 진동의 작용기간은 약17초였는데, 진동 작용 초기에 말뚝의 인발변위가 발생하였으며, 이때 발생된 변위의 크기는 앞에서 설명한 것과 일치하였다.

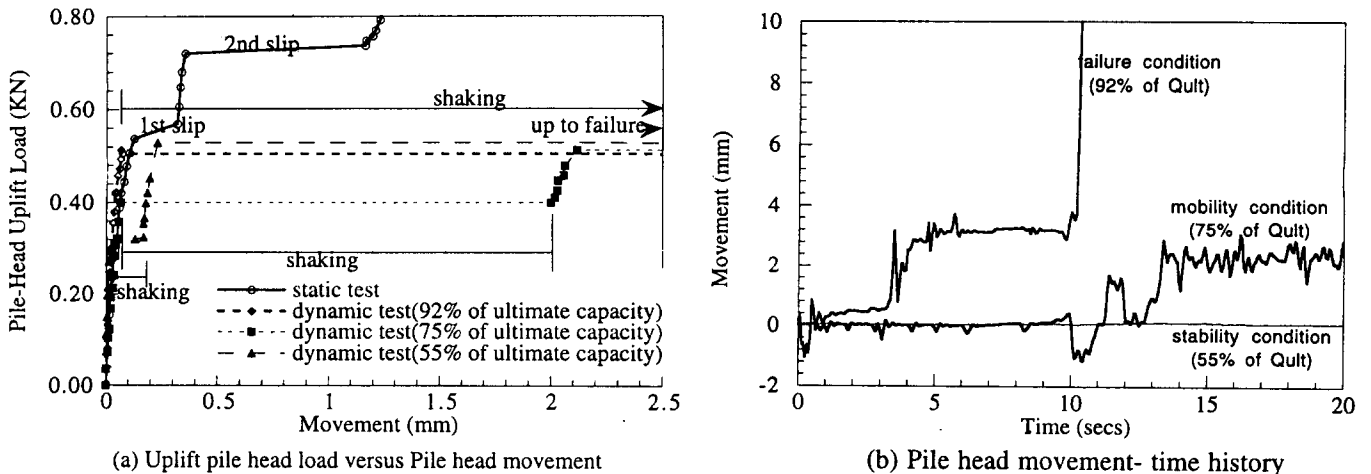


Fig. 5 Behaviors of tension pile during simulated earthquake shaking

3.2 유사지진 진동에 의한 동적모형 개단 압축말뚝 실험

그림 6은 유사 지진진동중 모형 개단 말뚝의 내관과 외관에 부착된 스트레인 게이지들에서 측정된 말뚝 축하중의 감소량(a), 관내토 폐색력의 감소량(b) 그리고 말뚝머리 변위량(c)들의 시간이력을 보여주고 있다.

그림 7에는 외주변면과 관내토에서 발휘된 정적인 극한 마찰 응력과 지진진동후 감소된 극한 마찰응력을 보여준다. 외주변 마찰응력은 말뚝상부에서 주로 감소되었으며, 관내토 마찰응력은 말뚝선단으로부터 약3.0Di 이내의 관내토에서 발휘되었고, 지진 진동후에는 동일한 부분에서 감소되었으며 약 2.5Di(Di:말뚝내경)이내의 관내토에서 발휘되어졌다. 극한 관내토 폐색력의 약 20%가 감소되었다.

그림 8은 폐단 인장 말뚝과 개단 압축 말뚝에 대한 정적인 재하시험에서 측정된 극한지지력에 대해 정규화된 말뚝머리하중과 말뚝직경에 대해 정규

화된 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(최,1995), 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 변위에서 발생되어졌다(최,1995).

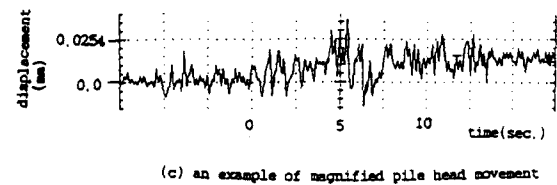
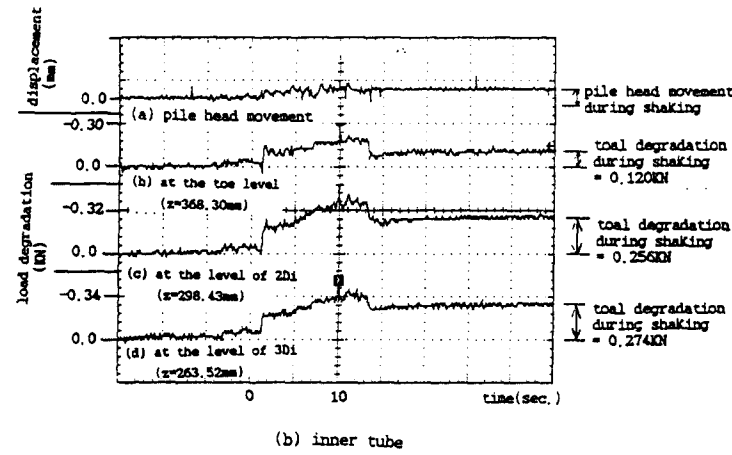
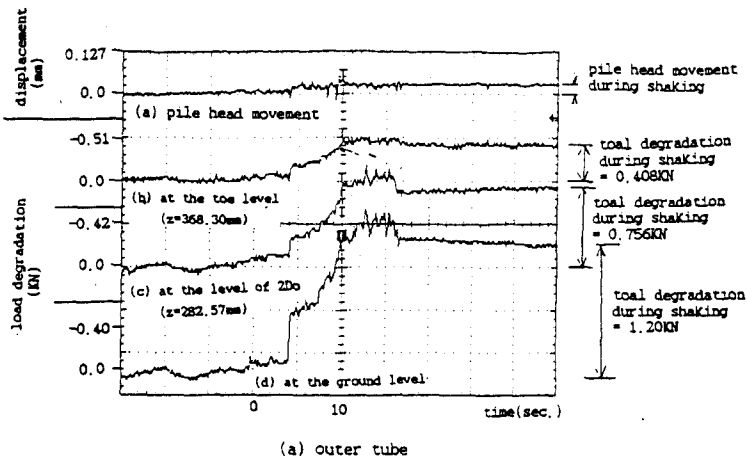


Fig. 6 An example of test data measurement of pile head movement, axial load degradations in the inner tube and the outer tubes during simulated earthquake shaking

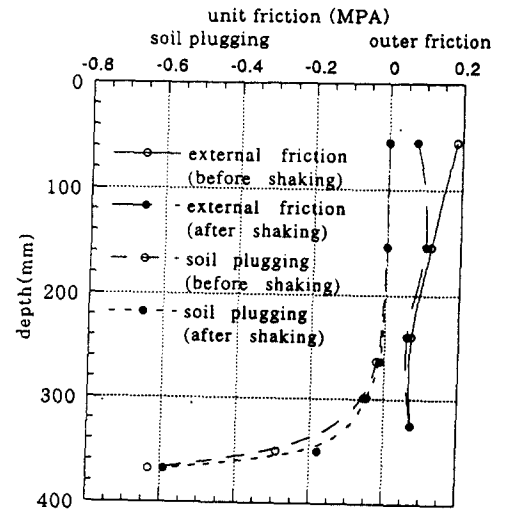


Fig. 7 Distributions of axial force and unit friction before and after simulated earthquake shaking

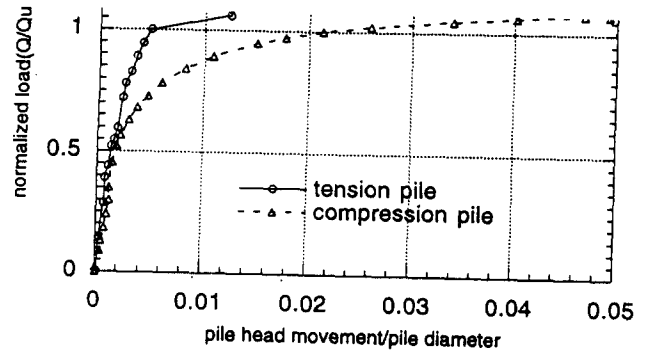


Fig. 8 Normalized pile head load versus normalized pile head movement for tension/compression pile during static test

4. 결론

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

1. 기록된 지진가속도의 3성분중 수직 방향성분은 지진거동에 크게 영향을 미치지 못하므로 수평방향의 두 직교성분들만을 합성하여 유사지진 진동을 생성시켰다.
2. 인장말뚝과 압축말뚝의 하중-변위 거동은 크게 달랐는데, 인장말뚝은 2~3회의 급작스런 미끄러짐 변위를 겪은후 파괴 상태에 도달하였다. 또한, 인장말뚝은 압축말뚝보다 매우 작은 변위에서 극한지지력을 발휘하였다.
3. 크기 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 달라지게 되었다.
4. 크기 8.0으로 유사화된 지진진동을 겪은 후 개단압축 말뚝의 극한지지력은 약 20%감소되었으며, 외주변 마찰력, 관내토 폐쇄력, 그리고 선단지지력의 감소량은 각각 극한 지지력 감소량의 약 80, 10, 그리고 10%를 차지하였다.

Appendix. 참고문헌

1. 최용규(1995). 소형 압력 토조내에 파입된 말뚝의 인발 거동과 극한 인발지지력 결정에 관한 연구. 한국 지반공학회지, vol 11, No.2, PP. 19-28
2. 최용규(1995). 말뚝의 설치방법에 따른 관내토의 폐쇄거동. 한국지반공학회지, vol 11, No.3, 게재 승인
3. Cooley, J.W., and Tukey, J.W.(1965). An Algorithm for Machine Calculation of Complex Fourier Series. Mathematical Computation, Vol. 19, pp.297-301.
4. 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
5. Housner, G.W.(1965). Intensity of Earthquake Ground shaking Near the Causative Fault.proceedings, 3rd. World Conference on Earthquake Engineering, New Zeland, Vol I,
6. 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.
7. 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.
8. Penzien, K., and Watabe, M.(1975). Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3.
9. 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.
10. Trifunac, M.D.(1979). Preliminary Empirical Model for Scaling Fourier Amplitude Apectra of Strong Acceleration in Terms of Modified Mercalli Intensity and Recording Site Conditions. Earthquake Engineering and and Structural Dynamics, Vol. 7, pp. 63-74.