

유사화된 지진 진동에 의한 개단 말뚝의 지지력 저감

Degradation in Ultimate Bearing Capacity of Open-ended Pile
During Simulated Horizontal Earthquake Shaking

최 용 규*
Choi, Yong-Kyu

Abstract

After open-ended model pipe pile, which was composed of inner tube and outer tube was driven by different installation methods, degradation in open-ended pipe pile capacity was studied during simulated horizontal seismic shaking, which was modeled by records of actual earthquake.

Degradation in ultimate capacity of open-ended pipe pile during simulated earthquake was about 20% in impact pile and was approached up to about 40% in vibratal pile. Most of degradation in ultimate pile capacity was occurred in the outer shaft surface and degradations in outer skin friction, toe resistance of steel, and plugging force were about 80%, 10%, 10%, respectively, out of ultimate pile capacity. It appeared that this trend did not depend upon the different installation methods of pile.

요 지

내관과 외관으로 구성된 모형 개단 말뚝을 압력 토조속에 상이한 설치방법으로 관입한 후, 실제 지진 기록을 이용하여 모델링시킨 유사 지진을 작용시켜 개단 말뚝에서의 지지력 저감 특성을 고찰하였다. 유사 지진 진동에 의한 극한 지지력 감소율은, 타격 관입 말뚝에서 약 20%였으며, 진동 관입 말뚝의 경우 약 40%에 달하였다. 또한, 외주변 마찰력의 감소는 극한 지지력 감소의 대부분을 차지하여 약 80%였으며, 선단 강재부 지지력과 관내토 폐색력은 각각 약 10%였으며, 이러한 경향은 말뚝의 설치방법에 따라 크게 달라지지 않았다.

1. 서 론

최근 발생된 L.A. 지진, 고베 지진등의 사례에서 볼 수 있듯이 지진시 말뚝 기초에 지지된

구조물 붕괴는 구조물을 지지하고 있는 말뚝 기초의 지지력 감소에 의해 발생하는 경우가 많다. 지진에 의한 영향은 불규칙하게 여러 방향으로 작용하게되나, 이중 수평 성분 하중이

*정회원, 경성대학교 공과대학 토목공학과 조교수

구조물의 안정성에 크게 영향을 미치는 경우가 많은데, 특히 고베 지진의 경우 지진하중의 수평 성분 에 의한 구조물 손상이 많았던 것 같다.

(4)

개단 말뚝의 지지력은 외주변 마찰력, 관내 토 폐색력, 선단 강재부의 지지력의 합으로 나타낼 수 있으며, 특히, 관내 토 폐색력은 말뚝선단으로부터 말뚝 안지름의 2~3배 이내에 있는 관내토와 말뚝 내주변면과의 마찰력에 의해 발휘되어진다.^(2, 5) 따라서, 폐단 말뚝의 지지 메카니즘과는 상이한 특성을 갖는 개단 말뚝의 지진 진동에 의한 지지력 저감에 관한 연구는 큰 의미를 갖는다.

개단 말뚝의 거동에 관한 연구는 현장에 설치된 개단강관말뚝에 실시된 재하실험, 실물 크기 말뚝내에 채운 관내토에 대한 재하실험, 그리고 대형 및 소형 압력토조(calibration chamber) 내에 설치된 모형 말뚝에 대한 재하실험등을 통하여 수행되어졌으며, 이들 연구는 대부분 타격관입된 말뚝에 대하여 이루어진 것들이었다. 또한, 진동주기하중 작용시⁽¹¹⁾의 폐단말뚝의 지지력 저감에 관한 연구는 H.G. Poulos등⁽¹⁰⁾에 의하여 다수 이루어졌으나, 지진 진동중 개단말뚝에 관한 연구는 찾아볼 수가 없는 실정이며, 말뚝 설치 방법의 상이에 따른 개단말뚝의 지지력 저감에 관한 연구가 수행되어진 예를 찾기가 쉽지 않다.

본 연구에서는, 특별하게 고안·제작된 모형 말뚝을 구속압력을 달리하는 압력토조속에 타격 또는 진동 관입하여 극한 압축 하중을 가한 상태에서 유사화된 지진 진동을 작용시켜 주었다. 여기서, 모형 말뚝은 내관과 외관으로 구성되어 있어 말뚝 내부로 밀려들어온 관내토에 의해 내관에 작용되는 하중을 따로 측정할 수 있었다. 실제 지진 기록을 인스트론 동적 시험 장치(instron dynamic testing machine)에 적용가능하도록 하기 위해 scaling기법에 의해 유사화된 지진 진동을 발생시켜 주었다.^(3, 6, 8, 9)

본 실험의 목적은 설치 방법과 압력 토조에 작용된 구속 압력의 크기의 변화에 따른 지진

진동시의 개단 말뚝의 극한 지지력 감소특성을 알아보고, 지진진동중에 관내토 폐색이 파괴되는지를 알아보기 위한 것이었다.

2. 실험

실험장치의 전체적인 모습은 사진1에 나타내었으며, 높이 564mm, 직경610mm의 제원을 갖는 원통형 압력토조, 내관과 외관으로 구성되어 있는 개단강관말뚝(그림1 참조), 2개의 활성과 2개의 비활성 스트레인 게이지로 구성시킨 4게이지 결선법에 관한 자세한 것은 참고 문헌 2를 참고할 수 있을 것이다. 본 실험에서는 유사화된 지진진동을 모형 압력토조에 적용시켜 주기위해 인스트론(Instron)사의 동적재하시험 장치(Instron series 1330, dynamic testing systems)를 개조하여 사용하였다.

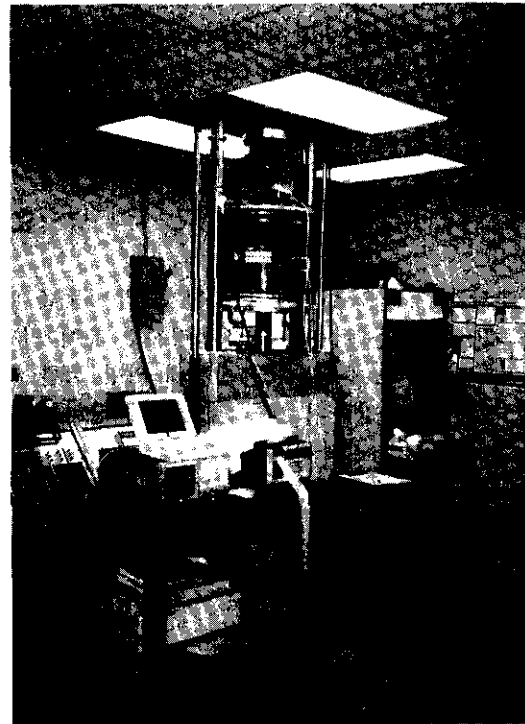


Photo. 1 Photograph of overall test system

관내토의 폐색력을 측정하기 위하여 외부튜브(42.86mm외경, 1.58mm강재 두께)와 내부튜브(34.93mm 내경, 1.58mm 강재두께)로 구성된 모형말뚝을 특별한 방법으로 제작하였으며(그림1), 조립된 말뚝은 42.86mm 외경, 34.93mm 내경, 6.35mm의 선단 두께부를 가진다. 외부 튜브와 내부 튜브는 탄소강 1020으로 제작 되었으며, 외부 튜브에는 3개의 조각으로 분리된 튜브들의 안쪽면 6높이 위치에 대칭되게 동일한 간격으로 스트레인 게이지 12개를 부착하였으며, 그 위치는 선단부근, 선단으로부터 $2.0 D_o$ (D_o : 말뚝의 바깥 지름), $4.0 D_o$, $6.0 D_o$, $8.0 D_o$ 지표면 근처였다. 내부튜브에는 그 바깥쪽 면에 선단으로부터 $3 D_i$ 이내의 거리에 10개의 스트레인 게이지를 대칭으로 촘촘하게 부착시켰는데, 그 부착위치는 선단 부근 $0.5 D_i$: 말뚝의 안지름), $1.0 D_i$, $2.0 D_i$, $3.0 D_i$ 의 위치였으며, 모형지반 지표면 근처 위치에도 2개의 스트레인 게이지를 대칭으로 부착시켰다. 스트레인게이지 부착후, 3개의 조각으로 구성된 외부튜브는 정밀 기계가공된 부분을 조립한 다음 머리가 없는 작은 볼트로써 고정하였다. 외부 튜브와 내부튜브는 말뚝 머리 부근에서 말뚝 캡과 볼트로써 확실하게 고정시켰으며 말뚝선단부근에서는 외부튜브와 내부 튜브가 따로 움직이게 하였다. 외부튜브의 바깥쪽으로부터 내부 튜브의 안쪽면까지의 면적을 덮을 수 있는 원환을 외부튜브 선단부에 작은 볼트로써 고정시켜 같이 움직일 수 있게 하였으며, 이들은 내부튜브와 따로 변위될 수 있게 하였다. 그리고, 선단부에서의 바닥 원환과 내부튜브의 틈새에는 실리콘으로 밀봉하여 물이 튜브 사이의 공간에 들어가지 못하도록 하였다. 또한, 이 원환의 단면적은 선단 강재부의 단면적과 같게 되었다.

실험에는 초 세립질 모래(micro-fine sand)를 사용하였으며 $D_{10}=0.06\text{mm}$, $C_u=1.66$ 으로 통일 분류법상의 분류기호는 SM이었다. 소요 밀도로 형성된 지반의 투수 계수는 $1.21 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 였으며 모형 말뚝과 모래와의 벽면

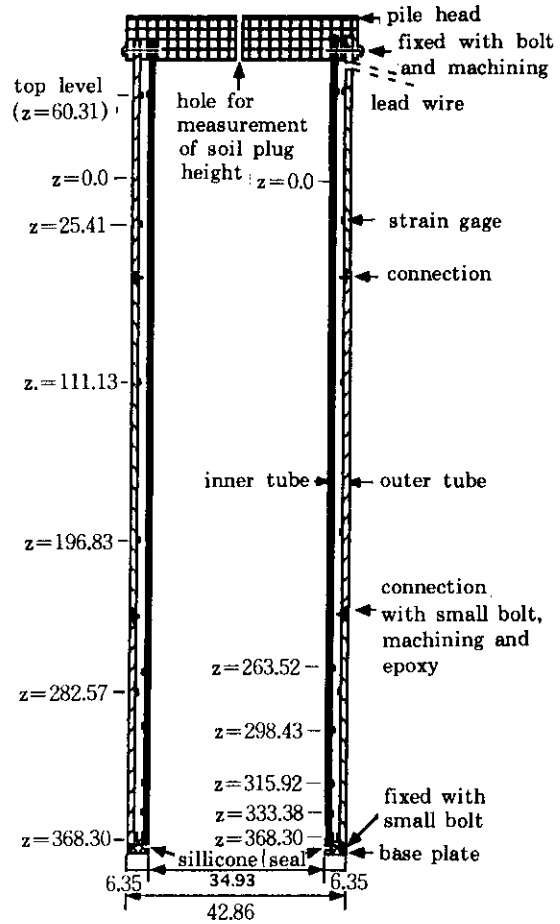


Fig. 1 Schematic diagram of model pile

마찰각은 22° 이었다. 모형지반은 동일한 낙하 높이를 유지한 채 모래를 낙하하는 방법에 의해 형성되었으며, 각 층의 상대밀도는 모형 토조 내부에 놓여진 3개의 알루미늄 용기들을 이용하여 측정하였다. 각 층의 상대밀도를 균질하게 유지시켜주기 위해 소요의 시료 낙하 높이를 유지시켜 줄 수 있도록 시료통의 하부에 연결되어 있는 노즐의 높이를 조절하였으며, 시료 낙하용 노즐을 연속적으로 동심 방향으로 돌리면서 압력토조의 내부에 시료를 낙하시켜 주었다. 각 층에서 측정된 상대밀도는 3% 내외의 오차 범위를 갖고 있으나 압력토조 내부에 형성된 모형지반 전체의 상대밀도는 49%

로 일정하게 됨을 알 수 있었으며, 이 때의 건조밀도는 $1.663t/m^3$ 이었다. 또한, 반복 제작된 시료의 상대밀도에 대한 통계분석에서 신뢰도가 99.6%이었다. 또한, 반복 제작된 시료의 상대밀도에 대한 통계분석에서 신뢰도가 99.6%이었으므로, 반복제작된 시료에 대한 균질성은 문제가 없을 것으로 보인다. 지반을 완전 포화시키기 위하여 압력토조 내부의 흙을 동일한 두개의 층으로 나누어서 형성시켰는데, 먼저 하부층을 동일한 낙하높이를 유지하면서 모래를 낙하시켜 형성하고 포화시킨후, 상부층을 동일한 방법으로 형성하고 포화시켰다.

모형 말뚝은 구속 압력의 크기를 달리하는 압력 토조속에 49.8N의 래머(rammer)를 380mm낙하고에서 자유낙하시켜 타격 관입되거나 또는 30Hz의 주파수를 갖는 진동식 모래 다짐기에 의해 진동 관입되었다. 여기서, 타격 관입과 진동관입에 의한 에너지를 상사화시켜⁽⁷⁾ 주어야 하지만, 제품화된 진동식 모래 다짐기를 구입하여 사용하였으므로, 두 설치 방법을 관입에너지에 의해 상사화하는 것은 극히 곤란하였다. 관입후 약 1시간이 경과하면 말뚝머리 최대 침하량이 말뚝 직경의 10% 이내가 되도록 일정한 속도로 변위를 증가시키면서 정적 압축 재하시험을 실시하였다. 침하량의 증가에 따른 하중의 증가 비율이 현저히 감소하게 되면 압축 재하 실험을 중단하고 재하시켰다. 재하후 약 2시간 경과후 압축재하 실험에서 결정된 극한 지지력만큼을 말뚝 머리에 다시 재하시킨 상태에서 유사화된 지진강도(MMI) 8.0의 지진 진동을 작용시켜 지진 진동에 의한 각 스트레인 게이지의 하중 감소량을 측정하였다. 이때, 유사지진진동은 수평방향의 지진 가속도 성분들만을 합성하여^(3,9) 발생시켰으며, 모형 실험에서는 인스트론사의 동적재하시험장치를 이용하여 원주방향의 회전진동으로 유사지진진동을 모델링하였다. 지진 진동 시험이 끝난 후 압력 토조에서 모형 말뚝을 뽑아내어 개단 말뚝안에 들어 있는 관내토에 대한 재하시험을 실시하였다. 새로 형성된 모형 지반에 토조의

구속 압력을 20 또는 35kPa로 변화시키면서 위에 설명된 과정에 따라 다시 실험을 실시하였다. 구체적인 실험 계획은 표1에 나타내었다.

Table 1. Test plan

test no.		I-35	I-20	V-35	V-20
confining pressure(kpa)	35	○		○	
	20		○		○
installation method	impact	○	○		
	vibratory			○	○
loading type	static	○	○	○	○
	earthquake	○	○	○	○
load test for soil plug		○	○	○	○

Remark :

1. This test was performed after static load test was completed.
2. This test was done after pile was pulled out from the pressure chamber.

동적인 모델링에서 시간에 대한 크기 계수는, 유사화된 지진 진동중의 간극수압 발생을 모델링하기 위해 선택되어진 초세립토의 투수계수와 실제 흙의 투수계수와와의 비로 정의되어야 하지만, 본 연구에서는 지진 발생지역의 실제 흙의 투수계수 값을 구하는 것이 곤란하였으므로, 인스트론 동적 시험기의 최소 하중 작용 가능 시간과 실제 지진 기록의 최소 측정 시간의 비로써 구하였는데⁽⁶⁾ 그 값은 약 4.8이었다. 실제 지진 기록의 scaling기법과 시간에 대한 크기 계수를 이용하여 유사화된 지진강도 8.0인 지진 진동의 접선 방향 변위와 시간과의 이력을 그림2에 나타내었다.

외주변 마찰력, 선단 강재부 지지력, 그리고 관내토 폐색력은 외부 튜브와 내부 튜브에 부착된 스트레인 게이지들로부터 측정된 하중과 깊이의 관계로부터 결정하였으며, 말뚝의 지지력은 외부 튜브에 작용된 하중의 합으로써 결정하였다. 유사화된 지진 진동중 감소된 지지력 성분들로 외부와 내부 튜브에 부착된 스트레인게이지들에서 측정된 하중 감소량으로부

터 결정하였다.

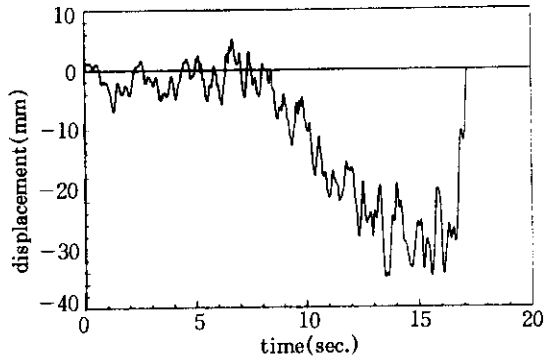


Fig. 2 Scaled tangential displacement time history of the extended record of the upland earthquake (Mag. 8.0)

3. 실험 결과 및 분석

내관과 외관에 부착된 스트레인 게이지들로부터 유사화된 지진하중이 토조에 작용될 동안 지진에 의해 감소되어진 하중의 크기를 측정하였으며 그림3은 유사 지진진동 중 말뚝 머리의

변위, 외관의 선단부근, 2D, 6D에 위치에 부착된 스트레인 게이지들로부터 측정된 하중 감소량들을 보여주고 있다. 본 실험에 사용된 O-Scope는 4 channel의 장비이므로 1회의 실험에 4개의 동적 신호만 측정할 수 있으며, 그 외의 신호는 정적 변형 측정 장치를 이용하여 지진 진동중의 변화만을 측정하였다.

내관과 외관에서 각각 측정된 하중의 감소량을 합하여 말뚝 지지력의 감소량을 구할 수 있으며(그림4), 말뚝의 정적 압축 재하 실험에서 산정된 극한 지지력에서 유사 지진 진동중 측정된 말뚝 지지력의 감소량을 빼면 지진 진동 후의 말뚝의 지지력이 된다. 그림4는 구속압력 35kPa가 작용된 압력 토조내에 타격관입된 모형 개단 말뚝에 대한 결과이며 다른 조건의 말뚝에 대해서도 동일한 방법으로 처리하였는데, 여기서, 유사 지진 진동에 의한 관내토 폐색력의 감소량, 외주변 마찰력의 감소량, 선단 강재부의 지지력 감소량, 그리고 말뚝의 극한 지지력의 감소량들을 살펴볼 수 있다.

이와 동일한 방법으로 하여 유사 지진 진동

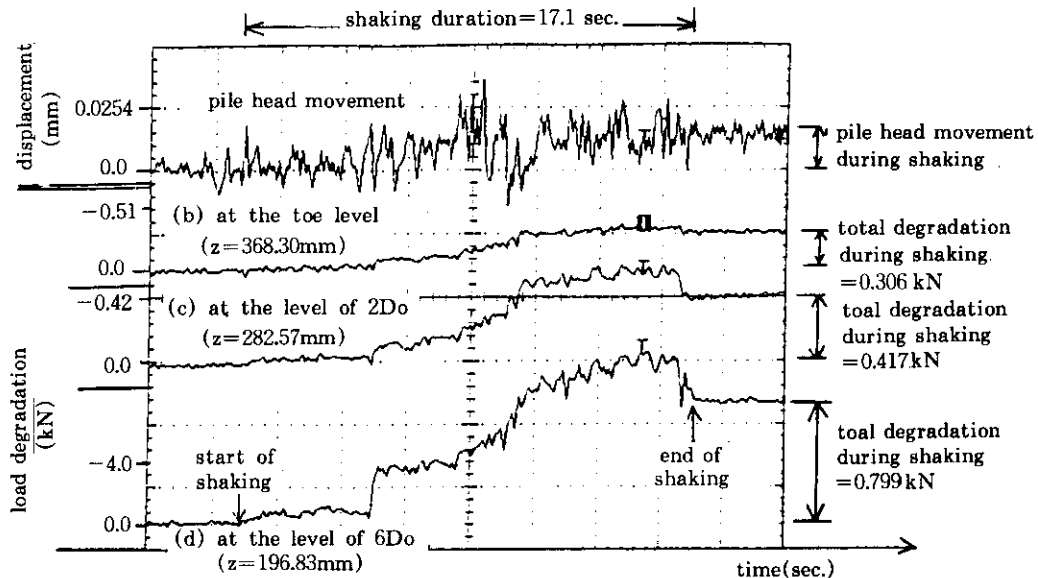


Fig. 3 Measurements of load degradations at various levels, pile head settlement for vibratory pile with confining pressure 35kPa during simulated earthquake shaking

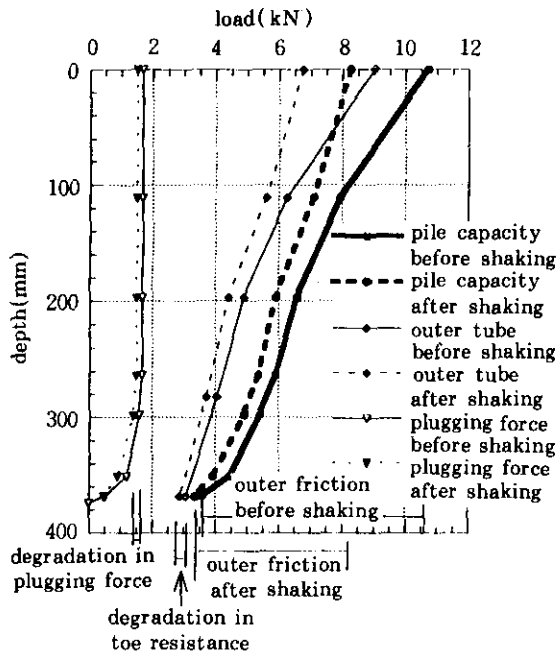


Fig. 4 Degradation of bearing force in each bearing component of open-ended pipe pile(impact, 35kPa)

전후에 발휘된 각 지지부에서의 지지력의 크기 및 유사지진 동작중 감소된 각 지지부의 지지력의 감소량들을 그림5에 나타내었다. 또한, 극한 지지력의 감소율과 극한 지지력 감소량에 대한 각 지지부에서의 지지력 감소율을 표2(a)에 나타내었는데, 여기서, 타격관입 말뚝의 극한 지지력은 20%정도 감소되어지며, 진동관입말뚝의 그것은 최대 40%까지 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한, 선단 지지력과 관내토 폐색력은 각각 극한 지지력감소의 10% 정도씩 차지하고 있으며, 외주변 마찰력은 극한 지지력 감소의 대부분을 차지하게 되어 감소량의 약 80%를 차지하였다. 구속 압력의 크기가 큰 경우, 말뚝의 설치 방법에 상관없이 관내토 폐색력의 감소 비율이 작은 것을 볼 수 있는데, 이것은 구속 압력의 크기가 커지면 관내토를 지지하고 있는 말뚝 선단부 흙의 단위 선단 지지력이 커지게 되어 관내토를 상대적으로 강하게 지지해 주게 되므로 관내토의 마찰에 의해 발휘되는 폐색력의 감소비율이 작아지는 것으로

보인다. 또한, 표2(b)에는 각 지지부의 지지력에 대한 각 지지부의 지지력 감소비율을 나타내고 있는데, 여기서, 진동관입 말뚝의 경우 대체적으로 감소비율이 큰 것을 알 수 있다. 즉, 외주변 마찰력의 감소 비율은 말뚝의 설치 방법에 따라 크게 변화하지 않으나, 강재부 지지력과 관내토 지지력의 감소 비율은 말뚝의 설치방법에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 동일한 구속압력일때 진동말뚝의 외주변 마찰력의 감소비율은 타격말뚝의 그것에 비해 약 0.3~0.4 배 증가하였으나 진동말뚝의 선단 지지력의 감소비율은 타격말뚝의 그것에 비해 3~4배였으며, 진동말뚝의 관내토 지지력의 감소비율은 타격말뚝의 그것에 비해 2배이상이었다. 이와 같이, 진동관입 말뚝의 선단 지지력과 관내토 지지력의 감소비율이 타격말뚝에 비해 크게 높아지는 것은 진동 관입시 선단 주변에 있는 지반이 극심하게 교란되어 매우 작은 단위 선단 지지력을 갖게 되어 유사 지진 진동중 말뚝 선단 아래에 있는 흙이 말뚝을 지지해 줄 수 있는 능력이 크게 저하되었기 때문으로 보인다.

그림 6은 4가지 실험조건으로 수행된 실험들에 대하여 유사지진진동중 감소된 말뚝의 극한

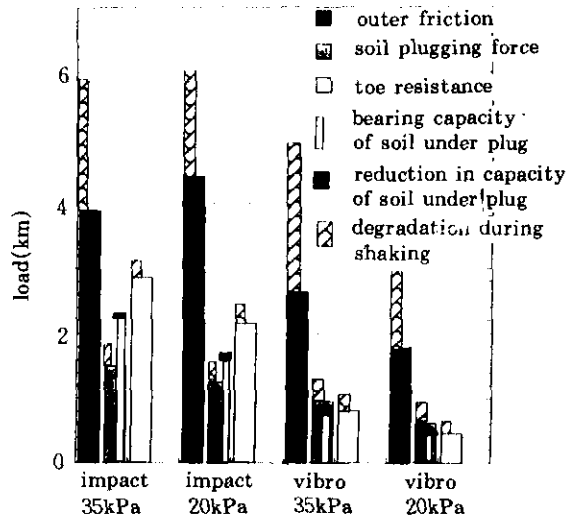


Fig. 5 Degradations in separated each bearing force for 4 test piles

Table 2. Degradation rate of pile capacity

(a) Degradation rate of capacities in seperated resisting components to ultimate pile capacity

	impact 35kPa	impact 20kPa	vibro 35kPa	vobro 20kPa
$\Delta Q_{so}/Q_{ult}(\%)$	85	76	80	73
$\Delta Q_p/Q_{ult}(\%)$	8	8	11	10
$\Delta Q_{si}/Q_{si}(\%)$	7	16	12	17
$\Delta Q_{ult}/Q_{ult}(\%)$	23	21	39	36

(b) Degradation rate of capacity in seperated resisting components

	impact 35kPa	impact 20kPa	vibro 35kPa	vobro 20kPa
$\Delta Q_{so}/Q_{so}(\%)$	35	27	46	39
$\Delta Q_p/Q_p(\%)$	7	8	27	26
$\Delta Q_{si}/Q_{si}(\%)$	11	21	22	31
$\Delta Q_{ult}/Q_{ult}(\%)$	23	21	39	36

지지력을 보여주고 있다. 외주변 마찰력의 감소는 말뚝의 상부와 하부 부분에서 주로 발생되고 있으며, 특히 말뚝 상부부분에서 그 대부분이 이루어지고 있다. 그림7은 타격 관입말뚝과 진동관입 말뚝에 대한 유사 지진 진동전후의 외주변면과 내주변면에서의 마찰응력들을 보여주고 있는데, 여기서, 외주변면 마찰응력은 말뚝상부와 하부에서 크게 감소하고 있으며, 특히, 말뚝 상부부분에서 현저하다. 관내토 폐색 응력은 말뚝 선단으로부터 2-3D 이내에는 관내토에서 대부분이 발휘되고 있으며, 특히, 말뚝 내경의 2.2배 이내의 관내토 부분에서 현저하게 발생하고 있고, 또한, 감소량도 여기서 현저하다. 진동관입말뚝의 관내토 폐색 응력의 최대크기는 타격 관입 말뚝의 폐색 응력의 약 70%이며, 유사지진 전후의 관내토 폐색 응력의 분포 양상은 약간 감소되지만 거의 유사한 형태를 가진다. 진동관입 말뚝의 경우 선단 강재부 지지력이 약하게 발휘되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 말뚝 관입시 지반이 크게 교란되어져 선단 강재부 하단에 있는 흙의 지지

력이 크게 감소되었기 때문으로 보이며, 관내토 하단을 지지해 주는 흙의 지지력도 크게 감소되었던 것으로 볼 수 있다. 따라서, 관입직후 관내토의 폐색이 이루어지지 않으며, 유사 지진 진동중 관내토 폐색력의 저감률도 큰 것으로 보여진다.

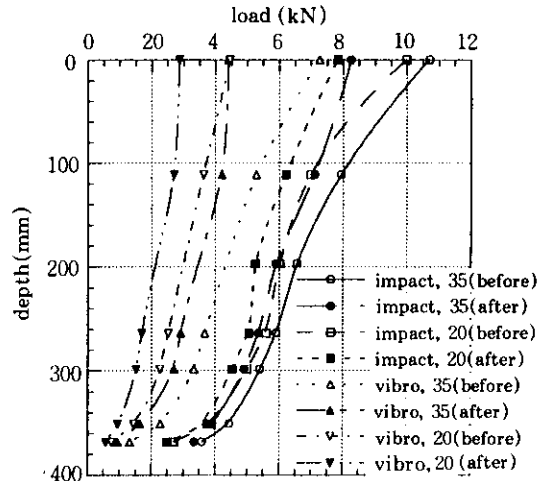


Fig. 6 Degradation in pile capacity during simulated horizontal seismic shaking at ultimate condition

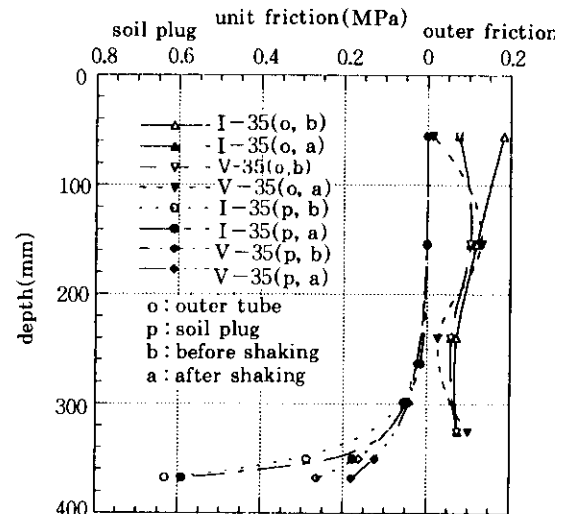


Fig. 7 Degradation pattern in unit skin friction of soil plug and outer tube for impact and vibratory piles

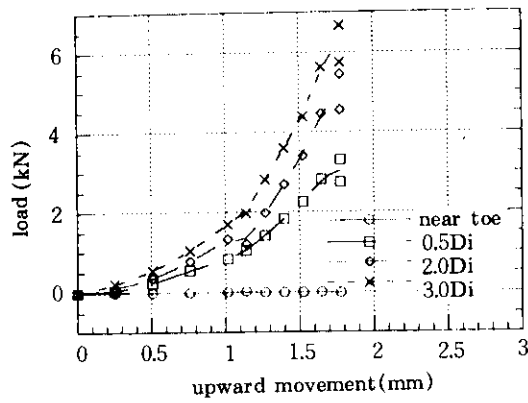
4. 관내토 재하 실험을 통한 하중지지 특성

유사 지진 진동중 관내토가 파괴상태에 도달하여 관내토 폐색력이 크게 저감되는지를 알아보기 위하여, 유사 지진 실험이 완료된 후 구속 응력이 작용되고 있는 압력 토조로부터 모형 개단 말뚝을 뽑아내어 관내토 하단에 재하 피스톤을 설치하고 하중을 재하하여 관내토를 위로 밀어 올리는 관내토 재하 실험을 실시하였다.

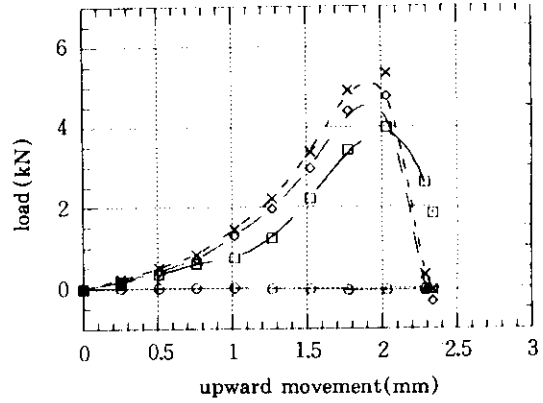
그림8(a)~(d)는 4가지 실험 조건에 대한 관내토 시험결과를 보여주고 있다. 여기서, 타격 관입 말뚝에서는 약 1.0mm의 관내토 선단 변위에서, 진동 관입 말뚝에서는 약 1.5mm의 관내토 선단 변위에서, 압력토조에 설치된 모형말뚝에 실시된 정적 압축 재하실험으로부터 측정되어진 극한 관내토 폐색력과 동일한 크기의 관내토 하중이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 관내토 재하 실험에서의 극한 상태 변위는 압력 토조에서 실시된 정적 압축 재하 실험으로부터 채택된 극한 상태의 말뚝 머리 침하량보다 약간 큰 값인데, 이러한 결과로부터 압축 재하 실험동안 발생될 관내토의 실제 변위는 관내토의 arching작용과 관내토와 말뚝 내면과의 마찰 작용으로 인해 말뚝 머리 침하량보다 작을 것으로 예측할 수 있다. 관내토 재하 실험의 초기단계에는 하중에 대한 변위의 증분이 상당히 크게 나타나고 있는데, 이것은 말뚝을 압력 토조로부터 뽑아내는 동안 관내토 선단부에서 상당한 교란이 수반되었기 때문으로 보인다. 관내토 폐색력의 극한값을 지난 하중 단계에서는 하중에 대한 변위의 증가율이 급속하게 증가하고 있는데, 이것은 극한 상태에서 관내토가 파괴상태에 도달하지 못하고 있음을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 압력 토조에 설치된 개단 말뚝의 압축 재하 시험에서 측정된 관내토의 마찰응력은 극한 상태에서 파괴상태에 도달하지 못하고 극한 상태를 지나서도 계속 증가하고 있는 것⁽²⁾을 볼 수 있었는데, 이

러한 사실도 관내토 재하시험 결과와 일치한다. 따라서, 관내토 재하 시험에서는 관내토의 파괴 상태를 정의하는 것이 극히 곤란하므로 본 실험에서 작용시켜준 최대 관내토 하중과 유사지진 동작 전후의 관내토의 극한 상태 하중들을 관내토 변위에 대하여 도시하여 그림9에 나타내었다. 그림9(a)~(b)는 각각 구속 압력 35kPa가 작용된 압력 토조에 설치된 타격 관입 말뚝과 진동 관입 말뚝에 대한 실험 결과이며, 여기서, 극한 상태에서는 관내토가 지나고 있는 마찰 능력이 충분하게 발휘되지 못하고 관내토의 최대 능력의 극히 일부만 이용되어지는 것을 알 수 있다. 그림 9는 극한상태에서 발휘되는 관내토 폐색력이 관내토가 지지할 수 있는 하중의 1/3~1/4 정도되는 것을 보여주고 있다. 개단말뚝의 선단 지지력 만큼이 관내토 하단에도 동일한 크기로 작용한다고 가정하여 관내토 부분의 가상 선단 지지력을 계산하였다. 관내토 하단에 있는 흙의 계산된 지지력은 원래 지반의 지지력보다는 약간 감소되었을 것으로 보이나, 이 값을 기준으로 다른 조건의 말뚝들에 대한 관내토 폐색 정도 또는 교란 정도를 판단할 수 있을 것이다. 예를들면, 구속압력 35kPa가 작용된 압력토조에 타격관입된 모형 말뚝의 경우, 관내토 부분에 해당하는 극한 가상 선단 지지력, 즉 관내토 하단에 있는 흙의 지지력은 2.2kN이며 극한 상태의 관내토 폐색력은 1.7kN이고(그림5), 관내토 실험에서 작용된 최대하중은 약 6.7kN(그림 9(a))이다. 즉, 관내토 재하시험 결과를 토대로, 타격관입 말뚝의 경우, 관입에 의한 관내토와 관내토 아래 지반의 교란이 크지 않아 관내토 폐색이 크게 발휘되며, 토조에 작용된 구속압력이 클수록 관내토 폐색은 커진다. 또한, 타격관입 말뚝의 경우, 그리고 구속압력이 클수록 유사지진 진동중의 관내토 폐색력의 감소율은 작을 것으로 보인다.

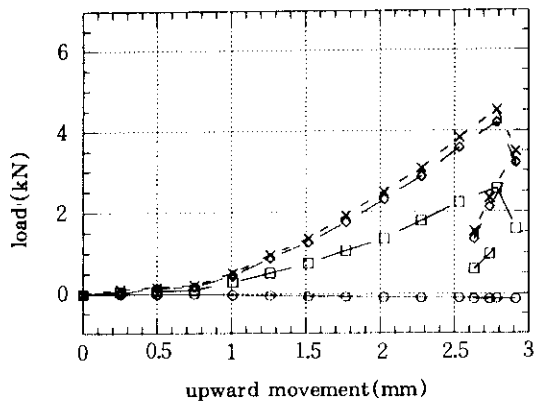
그림10(a)~(c)는 이용가능한 여러 학자들^(1, 5)의 실험자료와 본인의 실험 실험자료들을 이용하여 재하하중 단계별로 재구성한 것이다. 그



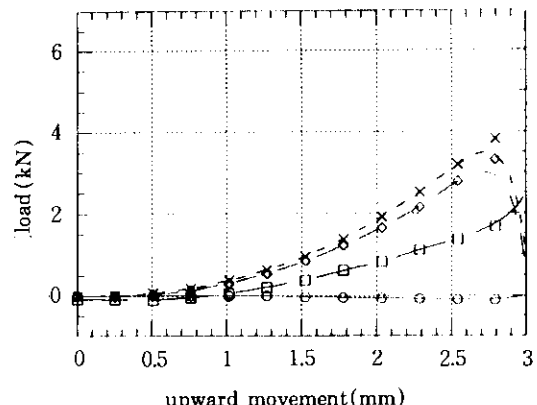
(a) impact, 35kPa



(b) impact, 20kPa

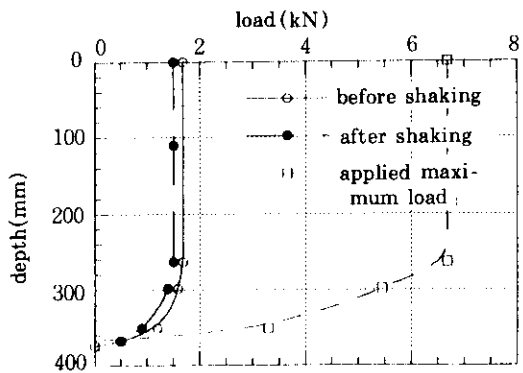


(c) vibro, 35kPa

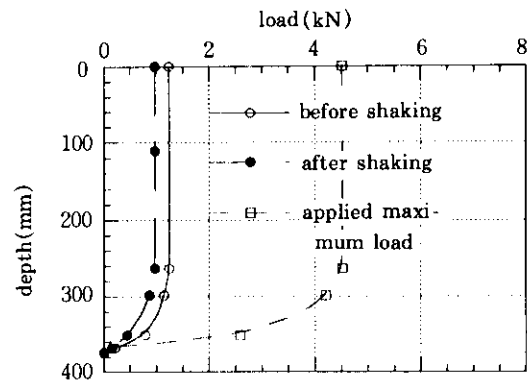


(d) vibro, 20kPa

Fig. 8 Load-displacement curves of upward load test for soil plug



(a) impact, 35kPa



(b) vibro, 35kPa

Fig. 9 Soil plugging forces before and after seismic shaking, and applied maximum load in upward load test for soil plug

림 9(a)는 극한 하중재하 상태에서 압력 토조에 설치된 모형 개단 말뚝들에 대해 실시된 정적 압축 재하시험시 또는 유사지진 진동전후의 관내토에 발생된 수직 응력과 정규화된 관내토 높이와의 관계를 보여주고 있다. 여기서, 관내토 폐색력은 말뚝 직경의 3배 이내의 관내토에서 발휘되는 것을 볼 수 있으며, 특히, 2.2 배 이내의 관내토에서 대부분이 발휘되는 것을 볼 수 있다. 그리고, 그림 10(a)에서는 유사지진 진동 전후에 관내토에 발생된 수직응력의 크기를 보여주고 있는데, 여기서, 유사 지진 진동에 의하여 관내토 폐색력의 감소는 크지 않으며, 타격관입 말뚝의 경우 10~20%, 진동관입 말뚝의 경우 최대 20~30%까지로 나타나서 유사 지진 진동에 의하여 관내토는 파괴상태에 도달되지 않는 것으로 볼 수 있다. 그림 10(b)는 주요 실험이 완료된 후 압력 토조에서 뽑아낸 모형 말뚝속에 들어있는 관내토에 대해 실시된 압축 재하 실험에서 파괴시 또는 작용된 최대 하중 상태에서 관내토에 발생된 수직 응력과 말뚝 내경에 대해 정규화된 관내토 높이와의 관계를 보여주고 있는데, 파괴하중 또는 최대하중 작용시에는 관내토 폐색력이 발휘될 수 있는 영역이 말뚝 직경의 3배이상의 관내토에 까지 확대되는 것을 볼 수 있다. 그림 10(c)는 본 모형실험에서 측정된 결과이며, 타격관입말뚝과 진동관입말뚝에서 유사 지지진동 전

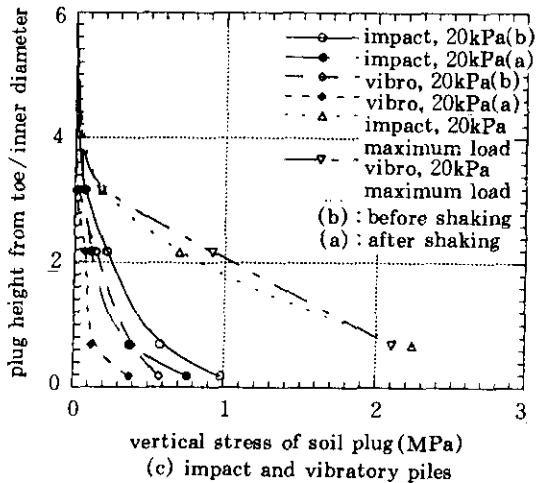
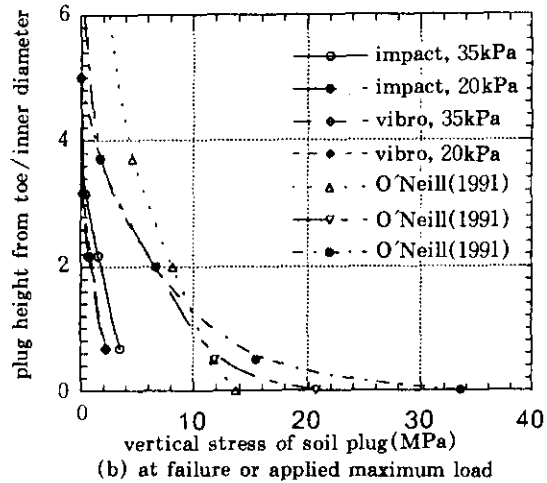
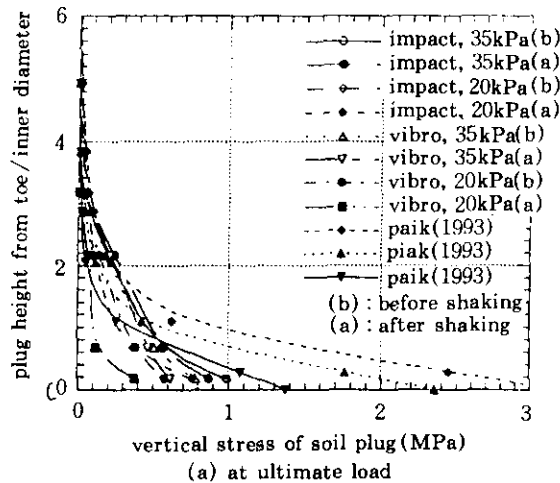


Fig. 10 Distributions of vertical stress in soil plug for opened piles penetrated into pressure chamber and, after shaking test, removed from pressure chamber

후에 발휘된 극한 상태의 관내토 수직응력의 크기와 관내토 재하시험에서 측정된 최대 작용 하중시의 관내토 수직응력의 크기를 보여 주고 있다. 여기서, 극한 상태의 관내토 수직응력의 크기는 최대하중 작용시의 약 1/3~1/4배이며, 극한 상태의 경우 말뚝 직경의 약 3.0배 이내의 관내토 부분에서 관내토 폐색응력이 발휘되어지나, 최대하중 작용시에는 마찰응력의 발휘영역이 약간 증가하여 말뚝 직경의 약 3.6배까지의 관내토 부분에서 관내토 폐색응력이 발휘되어졌다.

Table 3. Calculated average K_0 value for soil plug within $3.5D_i$ from the toe

	impact 35 kPa	impact 20 kPa	vibro 35 kPa	vibro 20 kPa
before shaking	1.45	1.36	1.00	0.91
after shaking	1.31	1.30	0.69	0.46
at applied maximum load	1.52	1.52	1.25	0.89

O'Neill등은 단위 관내토 폐색력(q_{mbp})을 계산할 수 있는 공식을 다음과 같이 제안하였다.⁽⁵⁾

$$\frac{q_{mbp}}{\gamma L_{wp}} = \left(\frac{L_{up}}{L_{wp}} + \frac{D_i}{L_{wp}} \cdot \frac{1}{4\beta} \right) \cdot e^{-4(L_{up}/D_i) \cdot \beta} - \left(\frac{D_i}{L_{wp}} \cdot \frac{1}{4\beta} \right)$$

여기서, L_{wp} = 폐색된 관내토 길이

L_{up} = 폐색되지 않은 관내토 길이

$\beta = K_v \cdot \tan\delta$

K_v = 정지토압 계수

$\tan\delta$ = 관내토와 말뚝내면의 마찰계수

γ = 관내토의 단위 중량

D_i = 말뚝 내경

여기서, O'Neill등은 압력 토조에서 뽑아낸 모형 개단 말뚝속에 들어있는 관내토에 대해 실시된 관내토 재하 실험에서 L_{wp} , L_{up} , K_v 등의 값을 제시하였는데, 이들 값은 여러 실험자료들을 통하여 보완되어져야 할 것이라고 설명하였다.⁽⁵⁾ 그림10(a)~(c)를 통하여 L_{wp} , L_{up} , K_v 값들을 구하였다. L_{wp} 는 재하 하중의 크기에 따라 변화하게 되며 재하 하중의 크기가 클수록 L_{wp} 는 증가하는 경향이 있었다. 즉, 극한 하중 상태에서는 $3.0D_i$, 파괴 하중 또는 작용된 최대 하중 상태에서는 $3.6D_i$ 정도였다. 유사 지진 진동후의 L_{wp} 는 약간 감소되어져 극한 하중 상태에서 $2.5D_i$ 정도인 것을 볼 수 있는데, 이

와 같은 L_{wp} 의 감소는 진동 관입 말뚝의 경우에 특히 커져 $1.5 \sim 2.0D_i$ 정도였다. L_{wp} 는 $2.8 \sim 7.5D_i$ 로 큰 범위에서 변화하여 대표값을 정하는 것이 곤란하였다. 따라서, 관내토 폐색은 말뚝의 설치방법, 토조의 구속응력의 크기, 지반의 상대밀도와 같은 실험 조건이나 관내토의 길이등에 상관없이 관내토 선단으로부터 $3.0D_i$ 이내의 관내토 부분에서 대부분 발휘되며, 특히, $2.2D_i$ 이내의 관내토 부분에서 크게 발휘된다고 볼 수 있었다. 또한, 유사 지진진동후에는 폐색 길이가 약간 감소하여 타격관입말뚝의 경우 $2.5D_i$ 이내에서, 진동 관입말뚝의 경우 $1.5 \sim 2.0D_i$ 이내에서 관내토 폐색력이 발휘되었다. $3.0D_i$ 이내의 관내토에서 발생된 수평응력과 수직응력의 비로써 K_0 값을 계산하여 표3에 나타내었다. 극한하중 상태에서, K_0 값은 유사지진 진동에 의해 대체로 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 타격관입 말뚝의 경우, K_0 값은 1.0보다 큰 값을 갖게 되며, 지진 진동에 의한 K_0 값의 감소는 매우 작아서 유사지진 진동에 의한 관내토 폐색력의 감소는 약 10~20%였다. 그러나, 진동 관입된 말뚝의 K_0 값은 대체로 1.0보다 작으며 유사지진 진동에 의한 K_0 값의 감소는 매우 크게되어 관내토 폐색력의 감소가 30%정도까지 증가하였다. 파괴 하중 상태 또는 작용된 최대 하중 상태의 K_0 값은 극한 하중 상태의 그것보다 훨씬 증가하여 극한 하중 상태에서는 관내토가 파괴상태에 도달되지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서, 극한 하중 상태에서의 관내토는 어느 정도 수동 상태에 도달해 있는 것을 알 수 있었으며, 하중의 크기가 증가할 수록 관내토는 더욱 더 수동 상태에 접근해 가는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

내관과 외관으로 구성된 모형 개단 말뚝을 압력 토조속에 상이한 설치 방법으로 관입한 후 실제 지진 기록을 이용하여 모델링시킨 유

사지진 진동을 작용시켜 개단 말뚝에서의 지지력 저감 특성을 고찰하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 유사지진 진동시의 극한 지지력 감소율은, 타격 관입 말뚝의 경우, 약 20%였으며, 진동 관입 말뚝의 경우에는 타격 관입 말뚝의 그것보다 2배정도로 되어 약 40%에 달하였다.

2. 외주변 마찰력의 감소는 극한 지지력 감소의 대부분을 차지하여 약 80%였으며, 선단 지지력과 관내토 폐색력은 각각 극한 지지력 감소량의 약 10%였다.

3. 타격관입 말뚝의 관내토 폐색력은 말뚝 선단으로부터 2.5D_i이내의 관내토 부분에서 대부분이 감소되며, 진동관입 말뚝의 그것은 1.5~2.0D_i 이내에서 감소되어진다. 진동 관입 말뚝의 관내토 폐색력은 약 20~30%정도 감소되는 것을 볼 수 있으며, 타격 관입 말뚝의 그것은 약 10~20%정도 감소되었다. 진동관입 말뚝의 경우, 이것은 관입시 진동에 의하여 관내토 및 말뚝 선단부에 있는 지반이 극심하게 교란되어 관내토 폐색이 약하게 형성되어지며, 따라서 지진진동에 의한 관내토 폐색력의 감소도 더욱 커졌다.

4. 압력 토조에 설치된 말뚝에 대해 실시된 정적 재하시험동안, 극한 상태에서 관내토 폐색력은 최대값에 도달되지 않으며, 유사지진 진동에 의하여 관내토 폐색은 크게 손상되지 않았다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 후원으로 휴스턴 대학에서 수행된 연구의 일부이며, 본인의 연구를 위해 학문적인 조언을 아끼지 않으신 휴스턴대학교의 토목공학과에 재직중이며 현재 미국 토목학회 지반공학분과(ASCE Geotechnical Engineering Division) 회장으로 있는 M.W. O'Neill 교수와 본인의 연구를 위해 귀

중한 실험 장치의 사용을 허락해 준 C. Vipulanandan 교수에게 심심한 사의를 표한다.

참고 문헌

1. 백규호, 이종섭, 이승래(1993), "지반조건의 변화가 개단 강관 말뚝의 거동에 미치는 영향", 한국지반공학회지, 제9권, 제3호, pp.23~34.
2. 최용규(1995), "말뚝의 설치 방법에 따른 관내토 폐색 거동 특성", 한국지반공학회지, 제11권 제4호 pp. 50~60.
3. 최용규(1995), "지진기록의 scaling 기법과 압력 토조 모형말뚝시험에의 적용", 한국지반공학회 '95년도 가을 학술발표회.
4. 日本阪神大震災 - 被害状況報告書, 현대건설주식회사 기술연구소, 1995. 2.
5. O'Neill, M. W. and Raines, R.D.(1991), "Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand", J. of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 8, pp. 1208-1206.
6. O'Neill, M.W. Vipulanandan, C. and Ochoa, M., "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand", UHCEE, 90~09.
7. O'Neill, M.W. and Vipulanandan, C., "Laboratory Evaluation of Piles installed with Vibratory Drivers", UHCEE, 88~12.
8. O'Neill, M.W. and Vipulanandan, C., Ochoa, M., "Laboratory Scale Modelling of Pullout Behavior of Bias-loaded Tension Piles During Earthquakes", Proc., 24th Offshore Conference, Houston, Texas, USA, pp. 55~62.
9. Penzien, J. and Watabe, M., "Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3.
10. Poulos, H.G.(1988), "Cyclic Stability Diagram for Axially Loaded Piles", Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, 114, No. GT8, pp. 877~895.
11. Prakash, S. and Sharma, H.D.(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley and Sons, Inc.

(접수일자 1995. 6. 12)