

말뚝의 설치 방법에 따른 관내토의 폐색 거동

Soil Plugging Behavior of Open-ended Pile for Different Installation Methods

최 용 규*

Choi, Yong-Kyu

Abstract

A specially designed model open-ended pile, which was composed of inner tube and outer tube, was driven in the pressure chamber by two different installation methods, that is, impact-driving and vibratory driving, and static compression loading test was done for that pile. Through the measurement of bearing capacities in the separated resisting parts of open-ended pile, bearing mechanism of open-ended pile and soil plugging behaviors for different installation methods were studied. It appears that 20% out of soil plugging force of impact-driven pile was developed during driving, while the rest was developed during static compression loading and the magnitude of confining pressure applied to the chamber did not affect soil plugging behavior. Also, it appears that, soil plugging force of vibratory pile was not developed during driving, while it was developed weakly as about 0.5~0.7 times as that of impact pile during static compression loading, and the confining pressure of pressure chamber had an effect on the soil plugging. In the ultimate loading condition, unit soil plugging force did not approach to the failure condition.

요 지

내관과 외관이 분리된, 특별하게 제작된 모형 개단 말뚝을 상이한 방법으로 압력토조내에 설치하여 정적 압축 재하 실험을 실시하였다. 개단 말뚝 각 지지부에서의 지지력을 분리·측정하여 개단 말뚝의 지지 메카니즘과 관내토의 폐색 거동 특성을 고찰하였다. 상대밀도 49%의 모형 지반에 타격 관입된 말뚝의 관내토폐색력은 관입도중 20%정도 발휘되고 압축재하시에 대부분이 발휘되며, 토조에 작용된 구속 압력은 관내토 폐색에 크게 영향을 미치지 않았다. 그러나, 진동 관입된 말뚝의 관내토 폐색력은 관입도중에는 전혀 발생하지 않으며, 압축재하시에 약하게 형성되고, 타격 관입말뚝의 그것의 0.5~0.7배 정도가 발휘되는데 토조에 작용된 구속 압력은 관내토 폐색에 크게 영향을 미쳤다. 단위 관내토 폐색력은 극한 상태에서 최대값에 도달하지 않았다. 즉, 극한 상태에서 관내토는 파괴상태에 도달되지 않았다.

*정회원, 경성대학교 공과대학 토목공학과 조교수

1. 서론

금속 공업과 철강 산업의 발달과 더불어 건설 재료에도 많은 변화가 수반되어져 왔는데, 이에 따라 구조물의 하중 지지 목적으로 사용되어지고 있는 말뚝 기초에 강관 파이프가 널리 쓰이고 있으며, 이 강관 말뚝은 지중 관입의 난이성으로 인해 선단이 개방된 채로 지중에 관입되어지는 경우가 많다. 이와 같은 개단 강관 말뚝의 지지력은 외주변 마찰력, 관내토와 말뚝 내면의 마찰에 의한 관내토 폐색력, 그리고 선단 강재부의 선단 지지력등의 합으로 나타낼 수 있으며, 특히, 관내토 폐색력은 말뚝 선단으로부터 3~4D(여기서, D=말뚝의 안지름)이내의 관내토와 말뚝 내면의 마찰력에 의해 발휘되어 진다.⁽⁷⁾

타격 관입된 개단 말뚝의 관내토 거동에 관한 연구는 O'Neill⁽⁷⁾, Klos & Tejchman^(5, 6), Kishida & Isemoto⁽⁴⁾, Paik⁽¹⁾ 등의 학자들에 의해 많은 연구가 이루어졌으며, 특히, 이들 연구는 현장에 설치된 개단 말뚝, 실물 말뚝의 직경과 유사한 파이프내에 채운 관내토 실험, 압력 토조에 설치된 모형 말뚝등을 이용하여 수행되어졌다. 그러나, 이들 연구의 대부분은 타격 관입된 말뚝에 대한 것이었으며, 상이한 말뚝의 설치 방법에 따른 관내토 폐색 거동에 관한 연구는 현재까지 찾아보기가 쉽지않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는, 정밀하게 고안·제작된 소형 모형 말뚝을 구속 압력을 변화시킬 수 있는 압력 토조에 상이한 설치방법으로 관입한 후 정적인 압축재하 실험을 실시하여 관내토 폐색 거동 특성을 알아보고자 하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 실험 장치의 전반적인 모습은 사진1에 보여진다. 조립된 압력 토조는 높이 564mm, 직경 610mm크기이며, 수평방향과 수직방향의 구속압력을 따로 작용시킬 수 있도

록 고무판 멤브레인을 압력토조 내부 측면과 상부 뚜껑 아래에 각각 따로 설치하였다.^(8, 9) 본 실험은 지진하중이나 주기하중 등과 같은 동하중에 의한 개단말뚝의 지지력 저감 특성을 규명하기 위한 연구의 일환으로 실시된 것이었다. 따라서, 유사화된 지진하중을 압력토조에 작용시켜 줄 때 모형말뚝에 접선방향으로 지진하중이 작용될 수 있도록 하기 위하여 압력토조의 중심을 벗어난 바깥 위치에 모형말뚝을 설치하였으므로, 모형 말뚝의 주변에 동일한 변형장(strain field)을 형성해 줄 수 있도록 압력토조 내부 중앙부분에 직경 100mm의 속이 빈 강재 실린더를 두었으며, 강재 실린더 내부에도 동일한 밀도의 모래를 채웠다. 고무 멤브레인과 시료와의 마찰을 줄이기 위해 Teflon sheet를 측면 멤브레인의 안쪽과, 상부 멤브레인의 아



Photo 1. Photograph of overall test system

래쪽, 그리고 중앙의 강재 실린더의 바깥쪽에 각각 설치하였다. 따라서, 압력토조의 측면과 상부 경계면은 유연성 경계이며, 압력토조의 바닥면과 중앙부 실린더의 바깥쪽 경계는 강성 경계이다. 토조의 수평 방향의 경계는 말뚝 중심선으로부터 말뚝 반경의 4.2배이며, 수직 방향의 경계는 말뚝 선단 아래 말뚝의 반경의 6.3배이므로, 이들 경계거리는 경계의 영향을 완전하게 배제할 만큼 충분히 크지는 않지만, 촘촘한 모래에서 발생되어졌던 공동확장에 의한 소성적인 흠 변형의 이론적 영역 바깥쪽에 위치해 있다.⁽¹²⁾ 토조내에 있는 흠의 유연경계에서의 수평 및 수직 방향의 유효 압력은 등방적으로 작용되어졌으므로 토조내의 흠의 정지 토압계수는 1.0으로 추정할 수 있다. 또한, 압력 토조의 바닥면에는 실험에 사용된 초세립 모래를 포화시켜줄 수 있도록 토조의 바닥면에 물 공급용 장치를 두었다.

관내토의 폐색력을 측정하기 위하여 외부튜브(42.86mm 외경, 1.58mm 강재두께)와 내부튜브(34.93mm 내경, 1.58mm 강재두께)로 구성된 모형말뚝을 특별한 방법으로 제작하였으며, 조립된 말뚝은 42.86mm 외경, 34.93mm 내경, 6.35mm의 선단 두께부를 가지며, 사진2는 조립되어 완성된 모습, 스트레인 게이지부착전의 내·외부 튜브의 분할된 모습, 선단부에서의 외부튜브와 내부튜브의 정밀기계 가공된 모습, 그리고 완성된 모형말뚝의 모식도 등을 보여주고 있다. 외부 튜브와 내부 튜브는 탄소강 1020으로 제작되었으며, 외부 튜브에는 3개의 조각으로 분리된 튜브들의 안쪽면 6높이 위치에 대칭되게 동일한 간격으로 스트레인 게이지 12개를 부착하였으며, 그 위치는 선단부근, 선단으로부터 2.0D., 4.0D., 6.0D., 8.0D., 지표면 근처였다. 내부튜브에는 그 바깥쪽 면에 선단으로부터 3D, 이내의 거리에 10개의 스트레인 게이지를 대칭으로 촘촘하게 부착시켰는데, 그 부착위치는 선단 부근 0.5D., 1.0D., 2.0D., 3.0D.의 위치였으며, 모형지반 지표면 근처 위치에도 2개의 스트레인 게이지를 대칭으로 부착

시켰다. 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 내부 튜브의 틈새에는 실리콘으로 밀봉하여 물이 튜브사이의 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 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 동심원 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%이었으므로, 반복제작된 시료에 대한 균질성은 문제가 없을 것으로 보인다. 지반을 완전 포화시키기 위하여 압력토조 내부의 흠을

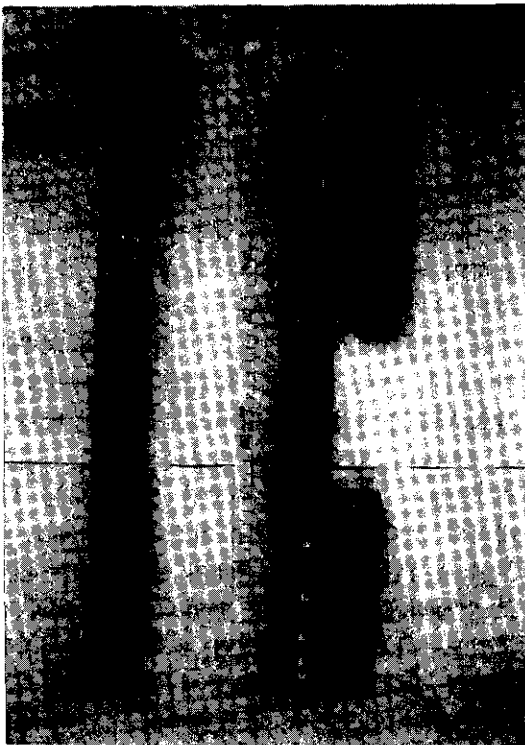
동일한 두개의 층으로 나누어서 형성시켰는데, 먼저 하부층을 동일한 낙하높이를 유지하면서 모래를 낙하시켜 형성하고 포화시킨후, 상부층을 동일한 방법으로 형성하고 포화시켰다.

스트레인 게이지들은 4게이지 결선법(2개 활성 게이지, 2개 비활성 게이지)에 의해 연결되어졌으며, 연결용 전선(lead wire)들은 외부 튜브와 내부 튜브의 사이의 빈 공간을 통하여 말뚝 머리 부근까지 끌어올려 외부 튜브에 만들어진 3개의 구멍들을 통해 밖으로 뽑아내어 변형 측정기에 연결시켰다. 모든 변형 측정자료들이 말뚝 관입중에 발생된 잔류응력의 영향을 포함할 수 있도록 하기 위해 모든 게이지 회로의 영점을 말뚝이 압력토조에 관입되기 직전에 조정하였다.

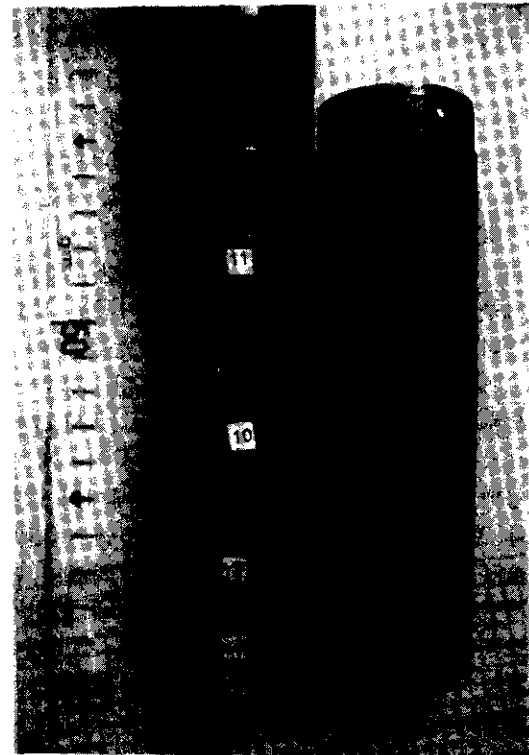
모형 말뚝은 구속 압력의 크기를 달리하는 압력 토조속에 49.8N의 래머(rammer)를 380

mm 높이에서 자유낙하시켜 타격 관입되거나, 30Hz의 주파수를 갖는 진동식 모래 다짐기에 의해 진동관입되었다. 여기서, 타격관입과 지동관입에 의한 에너지를 상사화시켜주지는 못하였다. 관입후 약 1시간 경과하면, 최대 침하량이 말뚝 직경의 10%이내가 되도록 일정한 속도로 변위를 증가시키면서 정적 압축 재하실험을 실시하였다. 침하량의 증가에 대한 하중의 증가 비율이 현저히 감소하게 되면 압축 재하 실험을 멈추고 제하시켰다. 새로 형성한 지반에 구속 압력을 20 또는 35kpa로 변화시켜 주어 실험을 반복하였다.

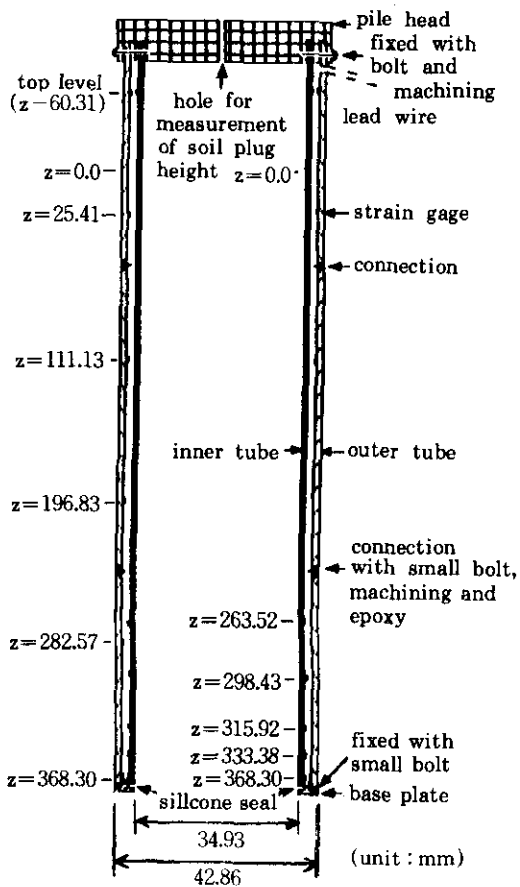
압력토조 실험에서는 크기 효과를 알아볼 수 있는데, 본 실험에서는 수평 토압에 의해 발생될 전단 응력만을 고려하여 정적인 모형과 실물크기 말뚝의 상사성을 구하였다.⁽⁹⁾ 토조의



(a) Assembled model pile



(b) Unassembled model pile segments



(c) Schematic drawing

photo 2. Photographes and schematic drawing of specially designed model pile

구속 압력이 20, 35kPa일 경우의 크기 계수는 각각 21, 33이므로 본 연구에 사용된 외경 42.86mm, 내경 34.93mm이고 380mm 관입된 모형 말뚝이 20, 35kPa의 구속 압력이 작용된 압력토조내에 설치된 경우 각각 직경 0.9m, 관입길이 약 8m, 또는 직경 1.4m, 관입길이 약 12m의 실제 말뚝에 해당하는 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있으며, 관내토의 경우에는 직경 0.7m 또는 직경 1.2m의 관내토의 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 압력 토조실험에서 크기계수를 구하는 과정에 관한 자세한 설명은

참고문헌 2와 9에 나타나 있다.

3. 실험 결과 및 분석

본 연구에 사용된 모형 말뚝은 내관과 외관이 분리되어 있으므로, 내관과 외관에 부착된 스트레인 게이지들로 부터 내관과 외관에 대한 말뚝 하중을 따로 측정할 수 있다. 따라서, 말뚝에 작용된 하중은 내관과 외관에서 각각 측정된 값을 합하여 구할 수 있다. 내관에는 말뚝 선단으로 부터 말뚝 내경의 3배이내만 스트레인 게이지들을 촘촘하게 부착하였으며, 그 부착 위치는 선단부근, 0.5D, 1.0D, 2.0D, 3.0D, 지표면 근처였는데 실험도중 1.0D의 위치와 지표면 근처에 부착된 스트레인 게이지는 손상되어 측정값을 구할 수가 없었으므로 이들을 제외한 말뚝 축하중 측정치들을 이용하여 관내토의 폐색력 분포 특성을 고찰하였다. 관내토의 폐색력 분포 특성을 결정하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 외관의 외경으로 부터 내관의 내경까지 부분을 덮을 수 있는 가운데를 도려낸 원환을 외관과 선단부에 고정시켰으므로 내관의 선단에는 마찰력만 작용할 뿐 말뚝 강재부의 선단력은 작용되지 않는다.

- 말뚝의 선단으로부터 말뚝 내경의 3배 이내에서만 관내토의 마찰력이 작용한다. 따라서, 그 이상의 관내토 부분에서 생길 수도 있는 극히 작은 마찰력은 무시한다.

- 말뚝의 내관과 외관의 상부가 말뚝캡에 고정되었고, 내관과 외관의 선단 부분은 자유단으로 제작되었으므로 내관의 상단에는 말뚝 축하중만이 작용한다.

그림1은 위의 가정들을 이용하여 결정된 극한 상태의 관내토 폐색력 뿐만 아니라 외관에서 발생된 외주변 마찰력과 선단 강재부의 선단 지지력들을 보여주고 있다. 또한, 내관과 외관에서 측정된 값들을 합하여 산정된 말뚝의 극한 지지력 분포도 그림 1에 나타나 있는데,

여기서, 관내토 폐색력은 마찰력 성분이므로 빗금친 부분과 같이 나타낼 수 있다. 개단 말뚝의 극한 지지력을 각 지지 부위별로 분리·측정하여 외주변 마찰력(Q_{so}), 선단 지지력(Q_p), 관내토 폐색력(Q_{si})으로 구분할 수 있는데, 본 실험에서 선단 강재부의 선단 지지력이 매우 크게 나타난 것은 선단 강재부의 두께가 커서 선단 강재 단면적이 관내토 부분과 선단 강재부의 면적을 합한 말뚝 전 선단 단면적의 약 60%를 차지하고 있기 때문으로 보이는 데, 실제 개단 말뚝의 경우에는 선단 강재부 단면적이 말뚝 선단 전 단면적에 대하여 무시할 수 있을 정도로 극히 작으므로 선단 강재부 저항력은 현저하게 감소될 것으로 추정할 수 있으며, 따라서 관내토 폐색력이 말뚝 극한 지지력에서 차지하는 비율은 크게 증가되어질 것으로 볼 수 있다.

정적 말뚝 재하 실험에서 관찰된 말뚝 머리 하중과 말뚝 머리 침하량과의 관계를 그림2에 나타내었으며, De Beer가 제안한 기준을 사용하여 말뚝의 극한 상태 지지력을 결정하였다.⁽³⁾ 극한상태에서의 각 실험 모형 말뚝들에 대한 지지력 크기, 극한 지지력에 대한 각 성분별 지

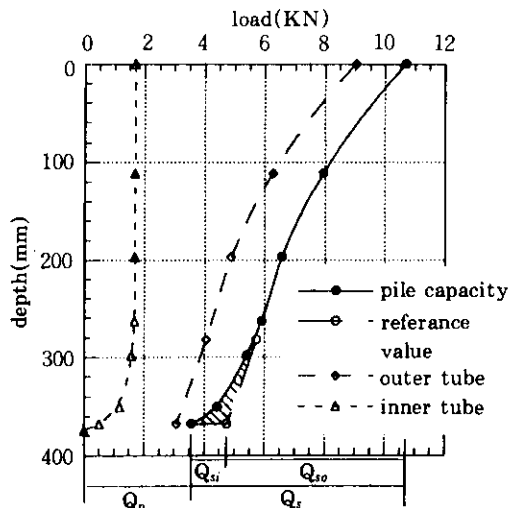


Fig. 1 Distribution of pile axial force at ultimate condition(impact pile, chamber pressure =34kpa)

지력의 비, 말뚝 머리 침하량, 그리고 말뚝 직경에 대하여 정규화시킨 말뚝 머리 침하량등을 표1에 나타내었다. 여기서, 극한 지지력은 말뚝 직경의 약 1.7~3.0%의 극히 작은 침하량에서 발생하고 있는 것을 볼 수 있는데, Vesic이 제시한 말뚝 직경의 10% 침하량 기준보다는 훨씬 작은 말뚝 머리 침하량에서 극한 상태가 나타나고 있다.

De Beer의 기준을 사용하여 결정된 극한 상태에서의 말뚝 축하중의 분포를 그림3에 나타내었다. 본 실험에서는 설치 방법과 모형 토조의 구속 압력을 변화시켜 설치된 4조건의 실험이 실시되었는데, 그 구체적인 조건은 그림3에 설명되어 있다. 여기서, 타격관입된 말뚝들의

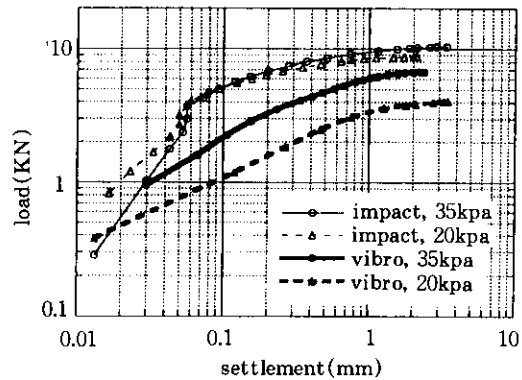


Fig. 2 Load-pile head settlement curves due to De Beer's criteria

Table 1. Bearing capacity criteria at ultimate condition

	impact 35kpa	impact 20kpa	vibro 35kpa	vibro 20kpa
Q_{ult} (KN)	10.72	9.99	7.24	4.47
Q_{so}/Q_{ult} (%)	56	61	68	66
Q_p/Q_{ult} (%)	29	23	15	14
Q_{si}/Q_{ult} (%)	16	16	17	20
s(mm)	0.74	0.91	1.02	1.27
s/Di (%)	1.7	2.1	2.4	3.0

극한 지지력은 진동 관입된 말뚝들의 지지력보다 훨씬 크게 나타남을 알 수 있으며, 진동관입 말뚝들의 선단 강재부의 지지력은 매우 작음을 알 수 있다. 이는 진동 관입시 말뚝 주변부 흙이 매우 크게 교란되어지고, 특히, 관내토의 경우 원 지반의 높이보다 높게 나타날 정도로 교란이 심각하게 발생되었기 때문으로 볼 수 있다(그림6). 일반적으로, 느슨한 모래 지반에 관입된 폐단 말뚝의 경우 말뚝 주변부와 선단아래에 있는 흙은 말뚝의 관입에 의해 약하게나마 다져지게되며, 이러한 다짐효과는 진동관입 말뚝보다 타격관입 말뚝의 경우에 훨씬 크다. 그러나, 타격관입된 폐단말뚝일지라도 말뚝 선단 아래 지반은 아래방향으로의 상당한 변위를 수반하게되며, 이에 따라 말뚝 주변부에 극히 인접해 있는 흙은 아래로 흘러내려 밀도의 감소를 수반하게 된다. 말뚝 선단보다 위에 있는 말뚝과 극히 인접해 있는 지반에서의 이와 같은 밀도의 감소는 선단아래 지반에서 발생하는 최대 압축 변위의 약1/2까지의 인장 변위를 말뚝과 극히 인접해 있는 지반에 유발시킨다. 따라서, 지반이 느슨한 경우 이와 같은 말뚝 주변부 지반의 변위는 말뚝 관입시의 다짐효과에 의한 외주변 마찰력의 증가를 상쇄시킬 수도 있을 것이다.⁽¹⁰⁾ 본 실험에서는 상대밀도 49%의 지반에 개단 말뚝을 관입시켰으며, 개단말뚝의 경우 말뚝 내부로 밀려들어오는 관내토로 인하여 말뚝 주변부와 선단 아래 지반에 폐단 말뚝보다 훨씬 작은 변위를 수반하게되어 말뚝 관입에 의한 다짐효과는 훨씬 작을 것으로 판단된다. 또한, 진동관입 말뚝의 경우 관입시 말뚝 관입을 위한 출입구와 말뚝 사이의 틈새를 통하여 상당히 많은 양의 흙이 밀려나오는 것을 관찰할 수 있었는데, 이러한 관찰은 관입시 진동에 의해 말뚝 주변 지반과 선단아래 지반이 교란되어 약화되어지는 것을 보여주는 것으로 볼 수 있을 것이다.

그림4에는 극한 상태에서의 말뚝 지지력을 각 지지성분별로 분리하여 나타내었는데, 여기서, 진동관입된 말뚝의 경우 진동 관입시 말뚝

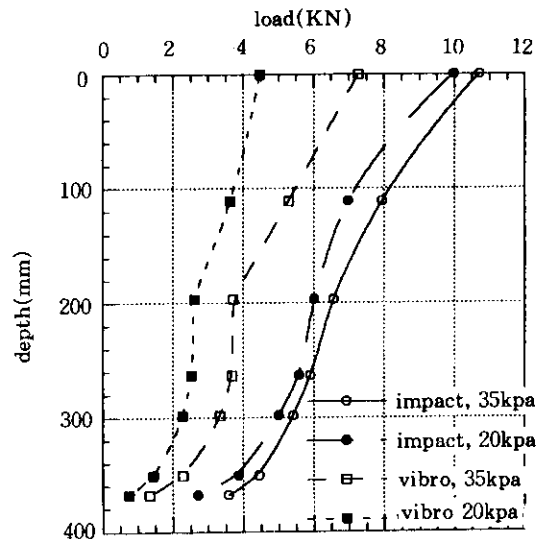


Fig. 3 Distribution of pile axial load at ultimate condition for 4 pile tests

주변부와 관내토 흙이 크게 교란되어져 말뚝 선단 강재부 지지력은 매우 작아지며, 따라서, 선단부 주변 흙의 단위 선단 지지력의 감소로 인하여 관내토 폐색력도 매우 작아져서 타격 관입된 말뚝의 관내토 폐색력의 0.5~0.7배 정도로 되었다. 선단 강재부에 발생된 선단 지지력의 크기가 관내토 하단에 있는 흙에도 동일하게 발휘된다고 보아 관내토 부분의 가상 선단 지지력의 크기를 산정하였다. 여기서, 타격 관입 말뚝의 경우, 관입에 의한 관내토의 교란 크지 않아 관내토 부분의 가상 선단 지지력이 관내토 지지력보다 큰 것을 알 수 있다. 그러나, 진동관입말뚝의 경우, 관입에 의한 말뚝선단부 지반과 관내토의 교란이 심각하게 발생되어 선단 강재부의 지지력이 크게 감소하고 관내토 하단의 가상 선단지지력도 크게 감소하게 되지만, 이와 같이 크게 교란된 관내토에서도 정적 재하시험중 관내토 폐색이 상당히 발휘되어 관내토 폐색력이 오히려 가상 선단 지지력보다 커진다. 그림5는 극한 상태에서의 말뚝의 단위 주변 마찰력과 단위 관내토 폐색력의 크

기를 보여주고 있다. 여기서, 관내토 폐색력은 2-3D_i(D_i:말뚝내경) 이내의 말뚝 선단부에서 발휘되고 있으며, 특히, 2.2D_i이내에서 크게 발휘되었다.

그림6은 말뚝의 내경에 대하여 정규화시킨 말뚝관입깊이에 따른 관내토의 상승 높이를 보여주고 있다. 여기서, 타격관입된 말뚝의 관내토 상승 높이는 말뚝 관입깊이가 말뚝 직경의 약 5배 이상일 때 크게 감소되는 것을 볼 수 있으며 토조의 구속응력의 크기는 관내토의 상승 높이에 크게 영향을 미치지 않았다. 그러나, 진동관입 말뚝의 경우, 진동으로 인한 지반의 교란으로 인하여 관내토 높이는 원지반의 위치보다도 높아질 수도 있으며, 토조에 작용된 구속응력의 크기에 대해서도 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

결론적으로, 상대밀도 49%의 지반에 관입된 타격 말뚝의 단위 관내토 폐색력은 타격 관입 직후 약 20%정도 발생되며, 정적 압축 재하실험에서 대부분이 발휘되어짐을 알 수 있다. 진동 관입된 말뚝의 관내토 폐색력은 관입 도중에는 전혀 발생하지 않으며 압축 재하시에 약하게 형성되어져 타격 관입 말뚝의 관내토 지지력의 0.5~0.7배 정도였다. 타격관입된 말뚝의 폐색력은 토조에 작용된 구속응력의 크기에 크게 영향을 받지 않았으나, 진동관입된 말뚝

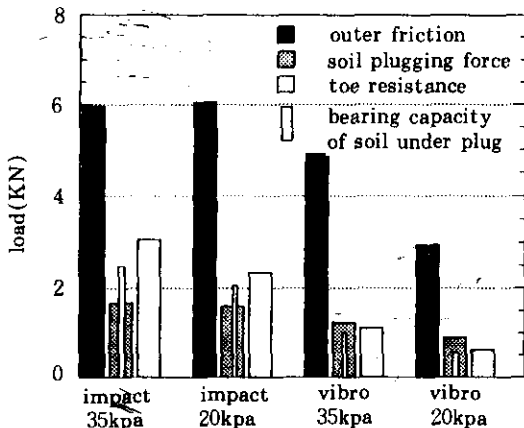


Fig. 4 Separated bearing components at each bearing part of open-ended pile

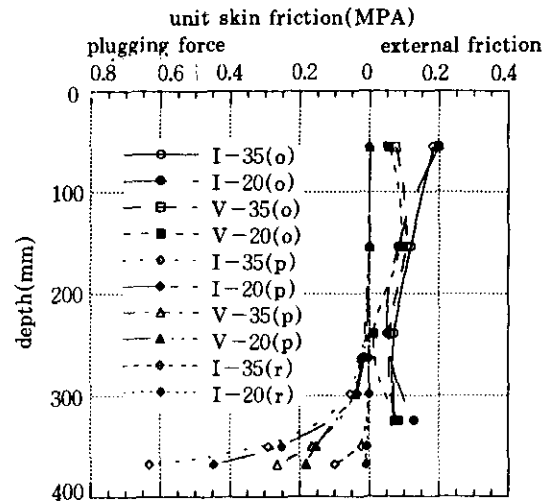


Fig. 5 Unit skin friction in outer skin and soil plug at ultimate condition for 4 test piles (o: unit external friction, p: unit plugging force, r: unit residual stress)

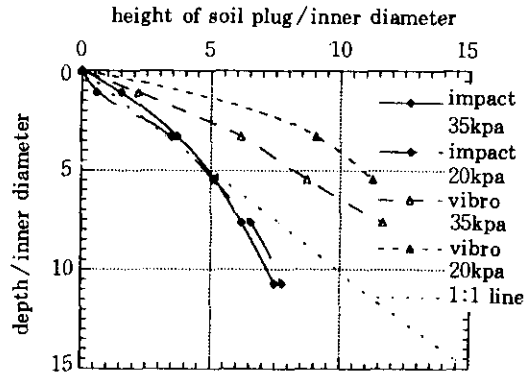


Fig. 6 Height of soil plug during pile driving

의 그것은 구속응력의 크기에 크게 영향을 받았다.

그림7은 말뚝 직경에 대하여 정규화시킨 말뚝 머리 침하량과 극한 지지력에 대하여 정규화시킨 말뚝 머리 하중을 보여주고 있다. 여기서, 말뚝의 극한 지지력은 말뚝 직경의 1.7~3.0% 정도의 말뚝머리 침하에서 발생함을 알 수 있으며, 타격 말뚝의 극한 지지력은 진동관입말뚝의 경우보다 작은 범위에서 발생하고 있

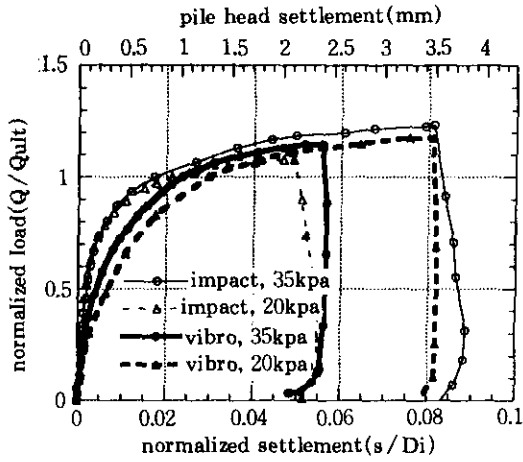
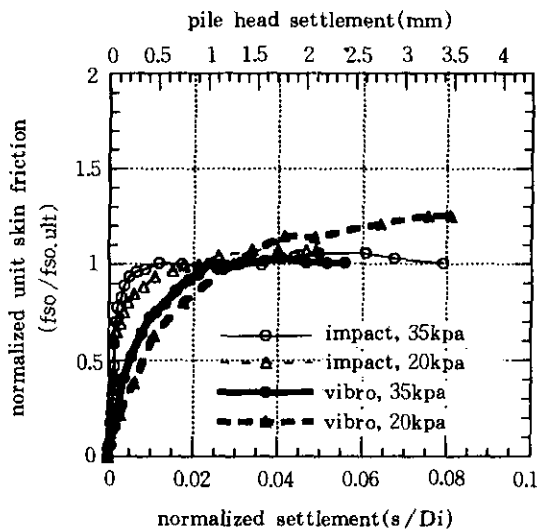


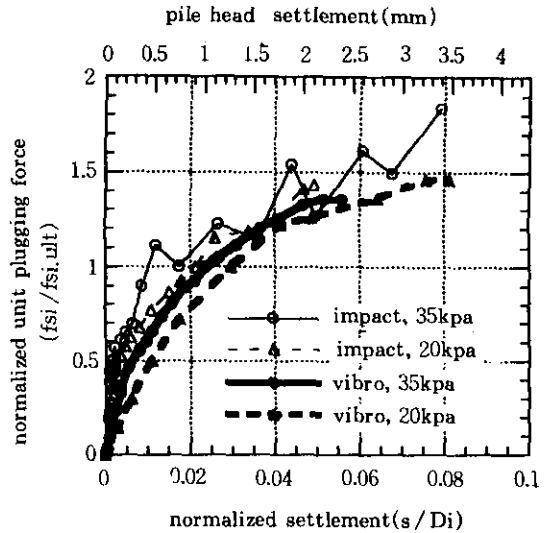
Fig. 7 Normalized load - pile head settlement for 4 test piles

으며 초기 재하단계에서 하중이 크게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 반면, 진동 관입된 말뚝은 관입시의 진동으로 인해 말뚝 주변부의 흙이 극심하게 교란되어 말뚝 선단 지지력이 크게 감소되어졌으므로, 말뚝머리에 재하된 하중이 말뚝 주변에 있는 흙의 마찰력으로 전이되기 위해서는 큰 변위를 수반하게 되는 것을 볼 수 있다.

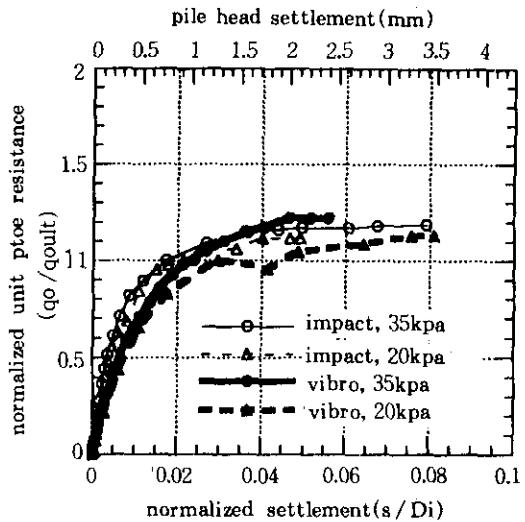
그림 8(a)~(c)는 말뚝 직경에 대하여 정규



(a) Normalized unit skin friction - settlement



(b) Normalized unit plugging force - settlement



(c) Normalized unit toe resistance - settlement

Fig. 8 Normalized unit outer skin friction, soil plugging force, toe resistance vs. normalized settlement

화시킨 말뚝머리 침하량과 주변 단위 극한 외 주변 마찰력에 대하여 정규화시킨 단위 외주변 마찰력, 단위 극한 관내토 폐색력에 대하여 정

규화 시킨 단위 관내토 폐색력, 그리고 단위 극한 선단 지지력에 대하여 정규화시킨 단위 선단 지지력을 각각 보여준다. 여기서, 타격말뚝의 단위 외주변 마찰력은 매우 초기재하 단계에서 발휘되어 최대값이 이르게 되어 일정하게 되는 것을 볼 수 있다. 그러나, 진동 관입된 말뚝의 단위 외주변 마찰력은 서서히 증가하여 좀더 큰 변위에서 최대값에 도달하게 되며, 구속압력이 작은 경우에는 계속적으로 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 재하를 계속하는 동안 진동으로 인해 교란된 지반이 약간 안정되면서 생기는 현상으로 보인다. 단위 관내토 폐색력은 단위 외주변 마찰력보다 늦은 속도로 발휘되며, 극한 상태에서 최대값에 도달되지 않고 계속적으로 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 관내토가 극한 상태에서 파괴에 도달하지 않으며, 더 큰 변위에서 파괴되어 질 것으로 볼 수 있다. 재하 시험이 끝난 후 압력 토조로부터 뽑아낸 말뚝내에 들어있는 관내토에 대해 실시된 관내토 밀어올리기 재하시험으로부터 극한 상태 관내토 폐색력보다 4~5배 이상의 하중을 관내토가 지지할 수 있음을 알 수 있었는데, 이러한 현상으로부터도 관내토가 극한 상태에서 파괴에 도달되지 않음을 알 수 있다. 단위 선단 지지력은 단위 외주변 마찰력보다 늦은 속도로 발휘되며 타격 관입된 말뚝의 경우 진동관입된 말뚝보다 더 빠르게 발휘되어졌다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 특별하게 고안하여 제작된 모형 말뚝을 이용하여 개단 말뚝 각 지지부의 지지력을 분리·추정하였으며 본 연구의 결론들은 다음과 같다.

1. 개단 말뚝의 지지력은 외주변 마찰력, 관내토 폐색력, 선단 강재부의 선단 지지력의 합으로 이루어지며, 관내토 폐색력은 말뚝 선단으로부터 2-3D_i(D_i: 말뚝 내경) 이내의 관내토 마찰력에 의해 발휘되

는데, 특히 말뚝 선단으로부터 2.2D_i이내의 관내토에서 대부분이 발휘된다.

2. 상대밀도 49%의 모형지반에 관입된 타입 말뚝의 관내토 폐색력은 관입도중에 20% 정도 발휘되며, 압축 재하시에 대부분이 발휘되는데, 토조에 작용된 구속 압력은 관내토 폐색에 어느정도 영향을 미칠 수도 있으나, 이 실험에서는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
3. 상대밀도 49%의 모형지반에 관입된 진동 말뚝의 관내토 폐색력은 관입도중에는 전혀 발생하지 않으며 압축 재하시에 약하게 형성되어 타격관입 말뚝의 0.5~0.7배 정도가 발휘되는데 토조에 작용된 구속 압력은 관내토 폐색에 크게 영향을 미친다.
4. 단위 관내토 폐색력은 극한 상태에서 최대값에 도달되지 않는다. 즉 극한 상태에서 관내토는 파괴상태에 도달되지 않는다.
5. 본 연구에서 제시된 크기계수는 수평도압에 의해 발생될 전단응력만을 고려하여 구하였으며, 실제 말뚝의 추정치를 구하는 것이 용이하지 않아 검증하지 못하였다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학 재단의 '학위 취득후 해외 연수 프로그램'의 지원을 받아 휴스턴 대학교 토목·환경공학과에서 수행된 것이며, 본인의 연구를 지도해 준 M.W.O'Neill교수와 실험장비의 사용을 허락해 준 C. Vipulanandan 교수께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 백규호, 이종섭, 이승래, (1993) "지반조건의 변화가 개단 강관 말뚝의 거동에 미치는 영향", 한국지반공학회지, 제9권, 제3호, pp23~34.
2. 최용규, (1995) "소형압력토조내에 타입된 말뚝의 인발거동과 극한 인발지지력 결정에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제11권 2호,

3. 日本土質工學會,(1986) 杭基礎の設計法とその解説, 1986, p253.
4. Kishida, H., Isemoto, N.,(1977) "Behavior of Sand Plugs in Open-ended Steel Pipe Piles", Proc. of 9th ICSMFE, Vol.1, Tokyo, Japan, pp601~604.
5. Klos, J., Tejchman, A.,(1977) "Analysis of Behavior of Tubular Piles in Subsoil"., Proc. of 9th ICSMFE, Vol.1, Tokyo, Japan, pp 605~608.
6. Klos, J., Tejchman, A.,(1981) "Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles", Proc. of 10th ICSMFE, Vol.2, Stockholm, pp 151~153.
7. O'Neill, M.W., Raines, R.D.,(1991) "Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand", J. of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 8, pp 1208~1226.
8. O'Neill, M.W., Vipulanandan, C., Ochoa, M., "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand", UHCEE 90~09
9. O'Neill, M.W., Vipulanandan, C., Ochoa, M., (1992) "Laboratory Scale Modelling of Pullout Behavior of Bias-loaded Tension Piles During Earthquakes", 24th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 4~7, pp55~62.
10. Poulos, H.G., Davis, E.H.,(1980) Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley and Sons, Inc. pp 13~15,
11. Vesic, A.S.,(1977) Design of Pile Foundations, N. CHRP Synthesis of Highway Practice 42,
12. Wong, D., "Design and Analysis of an Apparatus to Simulate Density and Stresses in Deep Deposits", thesis presented to the Univ. of Houston, Texas, in partial fulfillment of the requirements for degree of master of science

(접수일자 1995. 4. 15)