

모래地盤에서 말뚝의 모양과 設置方法이 模型말뚝의 極限上揚支持力에 미치는 영향

A Study on the Influences of Shape and Installion Method on the Ultimate Uplift Capacity of Model Piles in Sand

宋 永 祐*
Song, Young- Woo

Abstract

This paper performs a study on the influences of shape and installation method on the ultimate uplift capacity of model piles in sand. Several model piles of different shape, such as straight-sided, single-underreamed, multi-underreamed and anchor plate are used. The effects of installation method are studied with buried, driven and vibro-driven piles. Based on model test results, it has been found that when the foundation is subjected to axial uplift and compressive load as well, a single-underreamed pile is most effective. When the loading is axial uplipt only, it is likely that anchor plate would be most efficient. Installation method and tip configuration of pile have significant influnce on uplift resistance.

요 지

본 논문은 모래地盤에 박힌, 幾何學의 特性和 設置方法이 서로 다른 模型말뚝의 極限上揚支持力에 대한 연구이다. 幾何學의 特性의 측면으로는 均一直徑말뚝, 先端擴大말뚝, 多層擴大말뚝과 앵커플레이트가 시험되고 均一直徑말뚝에 대한 말뚝設置方法이 極限支持力에 미치는 影響을 調査하기 위해 埋設, 打入, 振動貫入方法이 연구되었다. 實驗結果에 의하면 基礎가 上揚力과 壓縮力을 받는 경우에는 先端擴大말뚝이, 오직 上揚力에 대해서는 앵커플레이트가 가장 效果的이며, 또한 말뚝設置方法 및 打入 말뚝의 先端 모양은 上揚支持力에 큰 影響을 준다는 것이 밝혀졌다.

1. 序 論

말뚝은 때때로 上揚力(uplift force)을 받는 구조물의 기초로서 사용되기도 한다. 이때 追加的인

支持力을 얻기위해 말뚝 단부 또는 본체가 확대되는 경우가 있다.^(1, 4) 이러한 확대부는 擴張機(belling tool, under-reaming tool)와 같은 시공장비 및 시공보조재료인 벤토나이트 슬러리를 이용함으로써 점토는 물론 사질토 지반에서도 시

*正會員, 韓南大學校 工科大學 土木工學科 助教授

공이 가능하다고 한다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 모래지반에서 模型實驗을 통하여 말뚝의 幾何學的 形態別 上揚擧動을 살펴보기 위해 말뚝의 직경이 길이에 따라 일정한 均一直徑 말뚝(uniform diameter pile, straight-sided pile), 선단부가 확대된 先端擴大 말뚝(single-underreamed pile), 말뚝 본체(shaft)에 여러곳이 확대된 多層擴大 말뚝(multi-underreamed pile)과 앵커플레이트(anchor plate)에 대해 上揚試驗(uplift test)이 수행되었다.

또한 말뚝의 設置方法別 上揚支持力을 비교하기 위해 埋設 말뚝(buried pile)⁽⁹⁾, 打入 말뚝(dri-ven pile), 振動貫入 말뚝(vibro-driven pile)이 實驗되고 아울러 打入 말뚝의 先端모양이 支持力에 미치는 영향이 검토되었다.

2. 模型實驗

實驗裝置, 實驗課程, 實驗方法 등은 宋⁽¹⁰⁾에 이미 기술되었으므로 여기서 다시 기술하지 않는다. 다만 지반조성법으로는 응력수준이 다른 지반조성을 위해 강사법⁽¹⁰⁾과 다짐법이 적용되었다. 말뚝의 幾何學的 特性別 연구에 사용된 말뚝은 砂布가 부착된 鐵製圓形管으로서 그림 2-1, 2-2에 표시되었다. 이 말뚝은 확대부 때문에 모래지반 다짐이 곤란하여 降砂法에 의해 조성된 지반에서 시험되었다. 설치방법별 연구의 경우를 제외하고, 모든

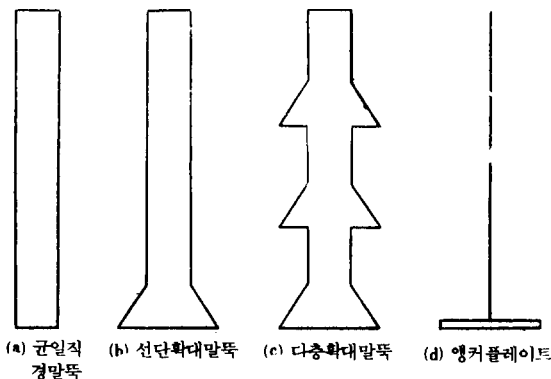


그림 2-1 시험에 사용된 말뚝의 모양

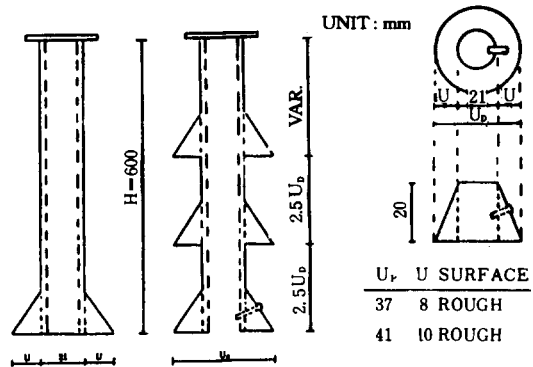


그림 2-2 확대 말뚝 상세도

말뚝은 계획된 위치에 고정시켜 놓은 후 지반을 조성하는 방법으로 설치되었다.

말뚝의 設置方法別 시험에서 打入 말뚝은 추의 무게 6.5kg, 낙하고 14.7cm인 드롭해머가, 振動 打入 말뚝은 주파수 53Hz, 중량 9kg, 전장 43cm의 振動해머가 사용되었다. 이것은 당초 콘크리트 破壞用 裝備이나, 研究用으로 기계의 一部가 改造되었다.

3. 實驗結果

3.1 말뚝의 幾何學的 特性에 따른 極限 上揚 支持力

그림 3-1은 均一直徑 말뚝(D=21mm)과, 단부가 확대된 말뚝(U₀=37mm, 41mm)에 대한 지반 상대밀도 변화에 따른 極限 上揚 支持力을 보여주고 있다. 상대밀도 20% 전후의 느슨한 지반에서 先端擴大 말뚝의 支持力은 均一直徑 말뚝에서 보다 약간 큰 傾向을 보이고 있으나, 상대밀도 약 60-80%의 지반에서 약 30-40% 큰 값을 나타낸다. 또한 U₀=41mm인 말뚝의 極限 支持力이 U₀=37mm 말뚝에서 보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 확대부의 직경이 클수록 추가 지지력의 발현이 期待되지만 적정한 확대부의 크기는 實際 現場條件에 의해 經驗的으로 決定되어야 할 問題로 생각된다. 그림 3-2에서 多層擴大 말뚝과 先端擴大 말뚝

뚝의 支持力이 비교되었다. 多層擴大말뚝의 支持力은 先端擴大말뚝에 비해 조금 클 뿐 두드러지게 크지 않다. 이러한 결과는 擴大部 때문에 降砂法에 의한 地盤 조성시 擴大部 근처 地盤 밀도가 均질하지 못하게 되는 避할 수 없는 缺點과 관련이 있을 것이다. 그림 3-3에서 同一 直徑의 均一直徑말뚝, 先端擴大말뚝, 앵커플레이트의 支持力이 표시되었다. 이들 세 기초는 先端部의 직경은 같으나 본체는 相異하다. 동일 상대밀도에서 先端擴大말뚝과 擴大部 직경과 동일한 均一直徑말뚝의 支持力은 거의 같음이 注目된다. 한편 앵커 플레이트는 이들 말뚝보다 10%정도 더 큰 支持力을 發揮한다. 여기서 기초의 上揚支持力에 결정적인 역할을 하는 것은 本體(shaft)부분이라기 보다 先端部(base)라고 생각할 수 있다.

지반내 앵커의 지지력 해석을 위해 지난 25년동안 제안된 파괴유형은 콘모형 (cone model), 전단형 (shear model), 곡면형 (curved surface model), 지지력형 (bearing capacity model) 등이 있으나 이 모든 방법은 일반적 적용에 문제가 있고⁽²⁾, 또한 인장력을 받는 말뚝과 앵커의 파괴기구 (failure mechanism)의 차이가 명확히 밝혀지지 않은 것이 현 실정이다. 일반적으로 물체와 모

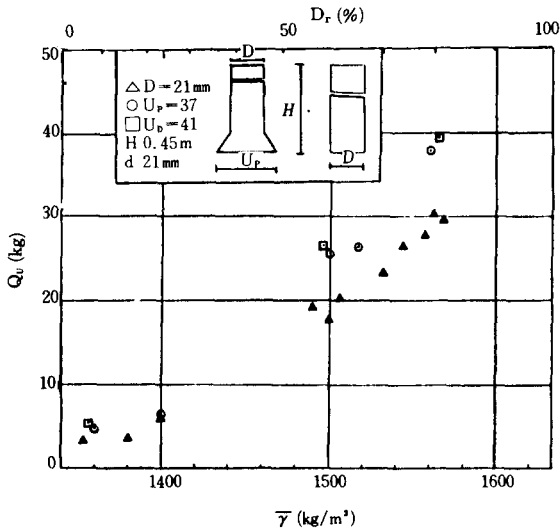


그림 3-1 균일직경말뚝과 선단확대말뚝의 Q_u

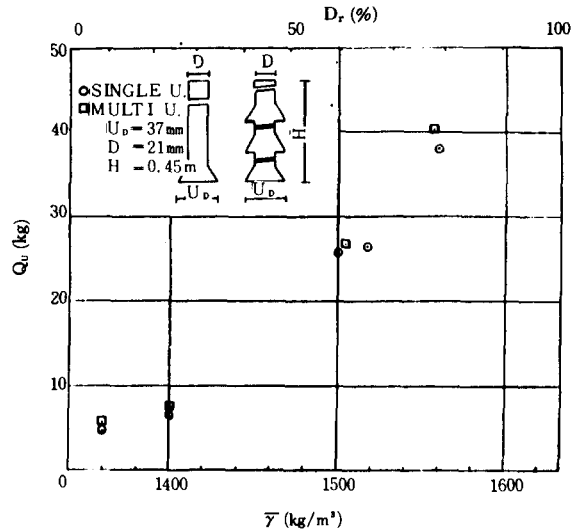


그림 3-2 선단확대말뚝과 다층확대말뚝의 Q_u

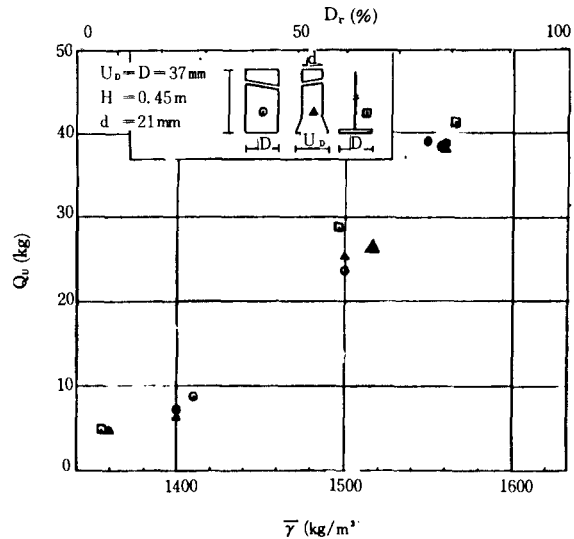


그림 3-3 균일직경말뚝, 선단확대말뚝, 앵커 플레이트의 Q_u

래사이의 마찰각이 모래의 내부마찰각 보다는 크지 않다는 가정과, 본체와 흙사이에서 전단이 유도되는 말뚝에서와는 달리 앵커는 흙과 흙사이의 전단을 유도한다고 생각할 때 앵커가 보다큰 지지력을 발휘할 수 있다고 생각할 수 있다. 그렇지만

본 실험결과에 대한 엄밀한 해석적 연구와 이번 연구에서 다루어지지 않은 모형과 실제말뚝 사이에 거동상의 차이에 대한 연구는 앞으로의 과제라고 할 수 있다. 이 실험결과로부터, 말뚝 부피는 均一直徑말뚝의 약 삼분의 일 정도이나 支持力의 크기가 거의 같은 先端擴大말뚝은 시공을 위한 지반 천공량이 적고, 말뚝 재료가 적게 소요되므로 經濟的이라 생각된다. 이런 觀點에서 기초에 오직 上揚力만이 작용될 때는 간단한 構造體로 이루어진 앵커플레이트가 上揚力을 지탱하는데 가장 效果的인 것으로 생각된다. 均一直徑말뚝($D=21\text{mm}$)에 대한 先端擴大말뚝, 多層擴大말뚝의 상대 부피 및 支持力比를 각각 R_v , R_q 라 할 때 이들 사이의 관계가 그림 3-4에 표시되었다. 말뚝의 부피는 지반 천공량, 콘크리트 所要量과 直接 관련되므로 經濟性的의 尺度로 看做될 수 있을 것이다. 이 그림에서 先端擴大말뚝은 기준 말뚝에 대해 부피가 약 3% 增加하나 支持力은 약 30%정도 增加하고, 多層擴大말뚝은 부피가 약 6% 增加하나 支持力은 약 40%정도 增加함을 알 수 있다.

확대부와 동일직경의 均一直徑말뚝은 기준 말뚝에 비해 부피가 약 200%정도 增加하나 支持力은 약 33%정도 增加에 그치는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 확대말뚝은 확대부 굴착에 추가경비가 소요되므로 이 그림은 말뚝 상대부피와 지지력과의 단순비교일 뿐 경제성의 직접적 척도로 활용될 수 없다.

기초의 端部 직경이 모두 같은 세 말뚝의 荷重-變位 特性이 그림 3-5에 표시되었다. 均일직경 말뚝에서 極限上揚支持力은 變位 $\Delta p=2.3\text{mm}$ 에서 얻어지고 그 이상 變位가 增加되면 上揚荷重이 급격히 減少된다. 한편 先端擴大말뚝에서의 極限 變位는 $\Delta p=3.2\text{mm}$, 多層擴大말뚝에서는 $\Delta p=3.5\text{mm}$ 정도로 관찰된다. 확대말뚝은 極限荷重에 달한 후 變位가 增加함에 따라 점진적으로 荷重이 減少하는 경향을 보이는데 이것은 확대부가 極限 變位를 지나서도 계속적으로 抵抗하기 때문에 均一直徑말뚝 보다 殘留荷重의 값이 큰 것으로 생각되며 이런 傾向은 多層擴大 말뚝에서 더욱 두드러진다.

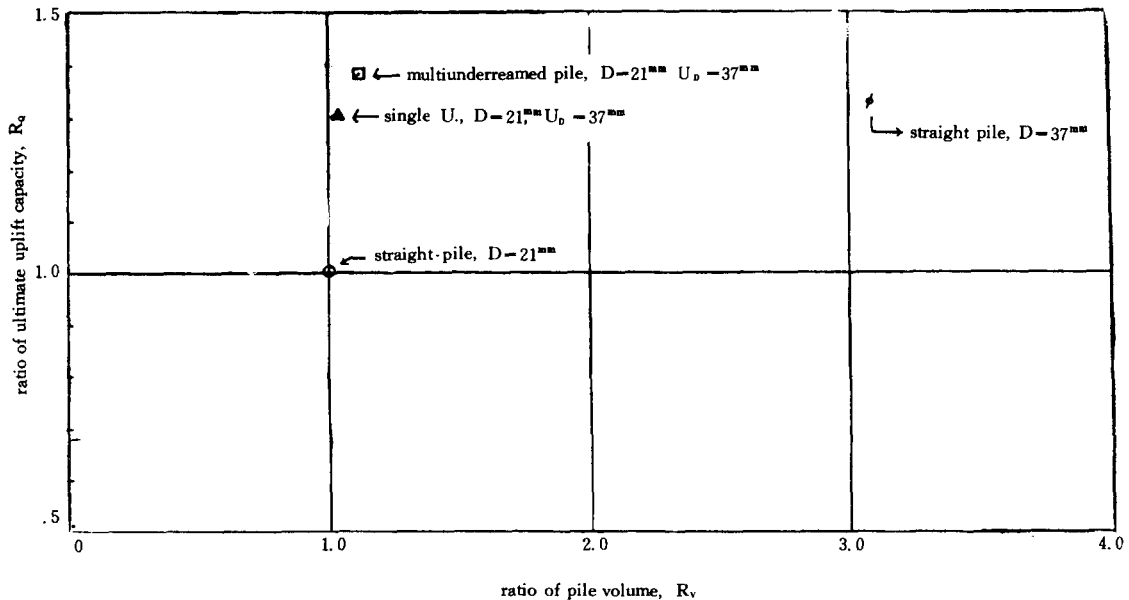


그림 3-4 R_q - R_v 관계

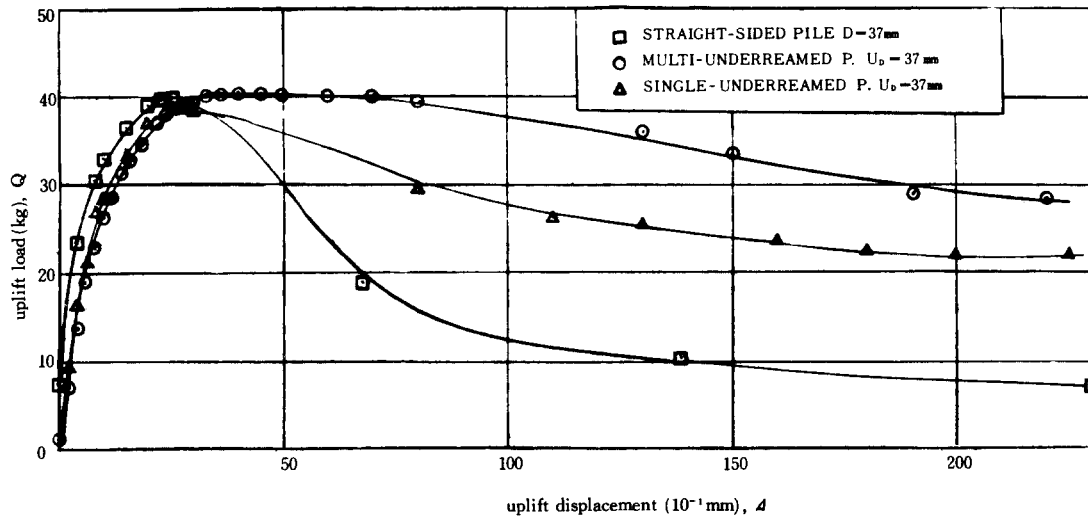


그림 3-5 말뚝형태별 하중-변위 거동 ($D_r=80\%$)

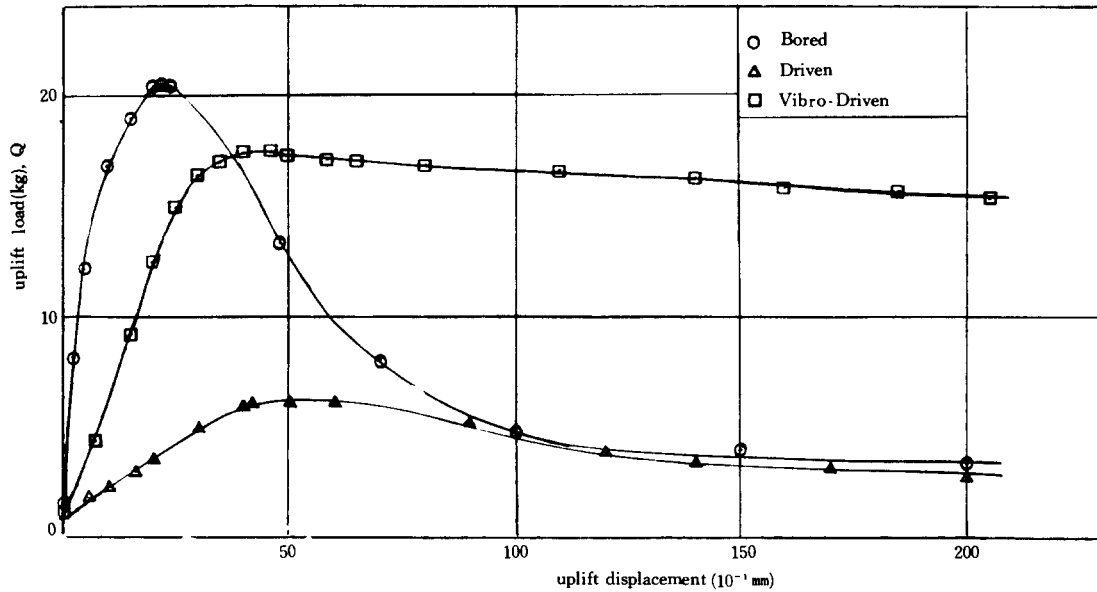


그림 3-6 설치방법에 따른 전형적 하중-변위거동 ($D_r=59\%$)

3. 2 말뚝 設置方法에 따른 極限上揚支持力

말뚝의 設置方法은 地盤의 條件보다 더욱 重要할 수 있다. 이 節에는 模型말뚝의 設置方法에 따

른 極限上揚支持力에 관한 實驗結果가 기술된다. 직경 21mm의 거친 말뚝이 모래 지반에 0.45m 깊이로 設置된 후 實驗되었다. 말뚝의 設置方法은 2장에서 이미 說明되었다.

중간밀도모래(*medium dense sand*)지반에서 말뚝 設置方法에 따른 上揚荷重과 變位사이의 典型的 關係를 나타내고 있는 그림 3-6에서 말뚝의 荷重-變位特性은 設置方法에 따라 相異하다. 埋設말뚝에서 極限上揚荷重은 變位 약 2.5mm에서 나타난 후 上揚荷重이 急激히 減少되며 振動貫入 말뚝은 變位 약 4.0mm에서 極限荷重에 달한 후 漸進的으로 減少하는 傾向을 보인다. 打入말뚝은 약 4.5mm의 變位에서 極限荷重에 달한 후 振動 打入말뚝에서와 같이 점진적인 減少傾向을 보인다. 따라서 동일 상대밀도지반에 設置된 말뚝의 荷重-變位舉動은 말뚝의 設置方法에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. 한편 變位 10mm부근에서 부터 打入말뚝과 埋設말뚝의 殘留抵抗이 거의 비슷함을 觀察할 수 있다. 이것은 흙과 말뚝사이에서 전단파괴가 일어난 후 흙의 限界空隙比와 관련이 있는 것으로 생각된다. 이 그림에서 極限上揚支持力의 크기는 埋設말뚝에 대해 打入말뚝에서 약 10%, 振動打入말뚝에서 약 90%정도이다. 한편 密한지반에서 振動打入말뚝은 振動해머의 용량 부족으로 시험하지 못하였다.

粘性이 없는 흙에서 말뚝의 항타효과는 일반적으로 다짐효과라고 알려져 왔다. Meyerhof & Adams⁽²⁾와 Nordlund⁽⁴⁾는 말뚝이 항타될 때 모래는 연직방향 變位없이 수평방향으로 變位된다고 가정하고 이 變位는 주변 흙을 다짐하여 말뚝과 흙 접촉면에서 최대가 되어 橫土壓係數의 크기는 수동토압계수 만큼 커질 수 있다고 한다. 만약 말뚝의 항타가 주변지반을 수동상태로 한다면 打入말뚝의 上揚支持力은 埋設말뚝의 그것보다 相當히 커야 하나 본 實驗結果는 이러한 가정과는 다른 樣相을 보여주고 있다. 이러한 實驗結果는 말뚝 設置전 당초지반의 상대밀도와 관련이 있을 것으로 생각되며 또한 다른 研究者들의 研究結果를 살펴보면, 말뚝의 항타가 말뚝 주변 모래의 公극에 미치는 效果에 대해 연구한 Szechy⁽⁷⁾는 말뚝의 항타 效果는 주변 지반의 전반적 다짐이 아니고 국부적으로 지반내 稠密化와 이완의 영역을 동시에 존재하게 한다고 主張한바 있으며 Robinsky & Morrison⁽⁶⁾은 實驗室에서 느슨한, 중간모래

밀도 지반에 대해 좀더 精巧한 측정을 한 결과 말뚝의 항타는 지반내 고밀도 및 저밀도 영역의 산만한 分布를 가져오며 느슨한 모래의 公극이 말뚝 주변에 형성되고 이것은 다시 원통형의 밀한모래에 의해 둘러 싸인다고 주장하였다. 본 실험에서 말뚝 항타로 인한 주변지반의 밀도변화는 말뚝의 上揚支持力을 增加시키지 못하였다. 다만 Vesic⁽⁹⁾에 의하면 말뚝의 周面摩擦力은 埋設말뚝에서보다 打入말뚝에서 더욱 크다고 한다. 본 實驗결과와 相反된 이 주장은 그 原因이 본 實驗은 오직 말뚝 上揚實驗結果이나 다른 研究者들의 實驗植가 말뚝 壓縮實驗으로부터 解析된 結果이거나 말뚝 自重對, 항타에너지의 크기, 항타 후 말뚝내 殘留應力의 消滅與否 또는 所要時間 말뚝의 치수효과, 實驗地盤의 규모가 관련 되는지의 與否는 追後 研究 課題라 할 수 있다.

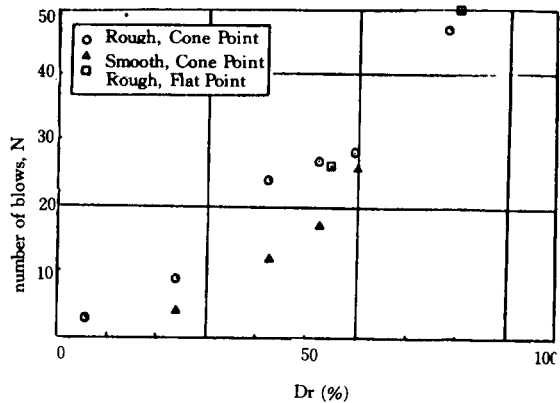


그림 3-7 타입말뚝 관입시의 타격회수

한편 振動貫入말뚝이 打入말뚝에 비해 상당히 큰 上揚支持力을 發揮하고, 말뚝의 變位가 상당히 增加하는 境遇에도 繼續的으로 準極限荷重狀態를 보이는 것은 말뚝 打入時의 振動이 말뚝주변 상당 영역까지 稠密化된 밀도의 영역을 제공하는 것으로 생각된다. 密한 모래지반에서 振動貫入말뚝은 施工이 불가능하였다. 그림 3-7은 打入말뚝에서 말뚝을 0.45m 貫入시키는데 필요한 해머의 낙하 횡수와 지반 상대밀도와 의 關係를 보여준다. 상대 밀도의 增加에 따라 항타횡수는 예측된 바와 같이

增加하는 趨勢를 보인다. 한편 표면이 거친 말뚝의 관입에 소요되는 항타에너지는 매끈한 말뚝에 비해 중간모래에서 약 2배정도 소요된다. 또한 先端이 평탄한 것과 원추모양의 말뚝 관입에 소요되는 에너지는 큰 차이가 없었다.

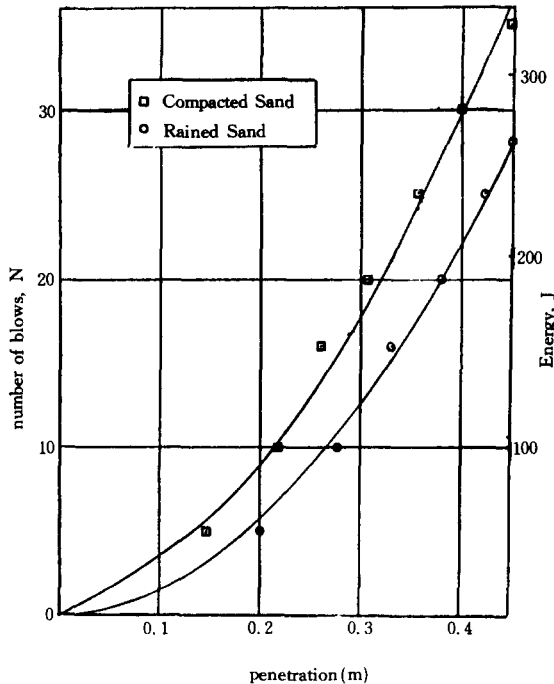


그림 3-8 강사 및 다짐지반에서 말뚝항타곡선

그림 3-8은 지반의 造成方法이 다른 두 지반에서 관입깊이에 따라 소요되는 항타에너지를 보여준다. 말뚝항타곡선은 다짐지반에서의 항타에너지가 降砂地盤에서보다 약 20-40%정도 추가 소요됨을 나타내고 있다. 이렇게 동일 밀도의 지반에서도 소요 항타에너지가 차이가 나는 것은 다짐지반에는 다짐에너지로 인한 잔류응력이 존재하여 강사지반에서 보다 응력수준이 높기 때문이다. 그러므로 말뚝주면마찰력 산정시, 室內 剪斷實驗에 의하지 아니하고 現位置應力水準이 반영되는 貫入

實驗結果에 의함은 이러한 觀點에서 매우 賢明한 接近으로 생각된다. 그림 3-9는 중간밀도와 밀한 모래지반에서 打入말뚝 선단의 모양이 다른 경우의 荷重-變位關係를 나타내고 있다. 이 그림에서 원뿔모양의 선단을 가진 말뚝은 평평한 선단말뚝에 비해 약 50%정도 極限上揚支持力이 큼을 보인다. 그러나 Szechy⁽⁷⁾는 말뚝이 壓縮荷重을 받을 경우 先端支持力은 평평한 선단의 말뚝이 원뿔선단을 가지는 말뚝에서보다 약 10%정도 크다고 보고한 바 있다. 따라서 오직 上揚荷重을 지탱케 할 목적으로 打入 말뚝이 시공되는 경우는 원뿔모양의 선단을 가지는 말뚝을 使用하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

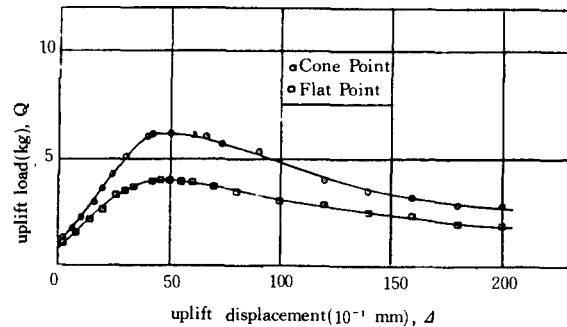


그림 3-9 타입말뚝의 하중-변위 곡선 (Dr=59%)

4. 結 論

모래의 지반에서 幾何學的 形態, 設置方法을 달리하는 模型말뚝에 대한 上揚實驗結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 先端擴大말뚝의 極限上揚支持力은 均一直徑말뚝에 비해 30-40%정도 크고, 확대부 크기와 同一한 均一直徑말뚝의 支持力과는 거의 같다. 多層擴大말뚝의 支持力은 先端擴大말뚝의 支持力보다 약간 크다. 앵커플레이트의 支持力은 동일 직경의 다른 말뚝에서 보다 약간 크다. 따라서 上揚力과 壓縮力을 번갈아 받는 構造物의

基礎로서는 先端擴大말뚝이, 恒久的으로 上揚力만을 받는 경우에는 앵커플레이트의 使用이 바람직하다.

- 말뚝의 設置方法별 極限上揚支持力은 埋設말뚝을 基準할 때 振動貫入말뚝에서 90%, 打入말뚝에서 15%정도이다. 본 실험에서 말뚝打入

로 인한 주변흙의 密度變化는 支持力 增加에 寄與하지 못한 것으로 사료된다.

- 打入말뚝에서 極限上揚支持力은 원뿔모양 先端말뚝이 卽平한 先端말뚝에서 보다 약 50%정도 크다.

기호(Notation)

- D : 말뚝의 直徑(diameter of pile)
 Dr : 相對密度(relative density of sand)
 H : 말뚝의 埋設깊이(embedment depth of pile)
 Q : 上揚荷重(uplift load)
 Qu : 極限上揚支持力(net ultimate uplift capacity)
 Rv : 말뚝의 상대부피(ratio of pile volume)
 Rq : 極限上揚支持力比(ratio of pile ultimate uplift capacity)
 γ : 흙의 有效單位重量(effective unit weight of soil)
 Ud : 擴大部 直徑(under-reamed diameter of pile)
 Δ : 上揚變位(uplift displacement)
 Δ_p : 極限上揚變位(displacement at ultimate uplift capacity)

참 고 문 헌

- Kulhawy, F.H.(1985), "Drined Uplift Capacity of Drilled Shafts", Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol.3 San Francisco, pp.1549-1552.
- Kulhawy, F.H.(1985), "UpLift Behavior of Shallow Soil Anchors-An Overview", Proceedings of Geot, Eng. Div. of ASCE, Detroit, Michigan. pp.1-25.
- Meyerhof, G.G., and Adams, J.I.(1968), "The Ultimate Uplift Capacity of Foundation", Can. Geotech. Jour, 5(4), pp.225-244.
- Nohan, D., Murthy, V.N.S. and Jain, G.S. (1969), "Design and Construction of Multi-Under-reamed Piles", Proc. 5th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng., pp.183-185.
- Nordlund, R.L.(1963), "Bearing Capacity of Piles in Cohesionless Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol.89, No. SM3, pp.1-35.
- Robinsky, E.I. and Morrison, C.E.(1964), "Sand Displacement and Compaction Around Model Friction Piles", Can. Geotech. J., 1(2), pp.81-93.
- Szechy, C.(1961), "The Effects of Vibration and Driving upon Voids in Granular Soil Surrounding a Pile", Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol.2, pp.189-204.
- Tomlinson, M.J.(1977), Pile Design and Construction Practice, A Viwpoint Publications, London.
- Vesic, A.S.(1977), Design of Pile Foundation, Synthesis of Highway Practice No.42, Transportation Research Board, Washington, DC, 68p.
- 宋永祐(1991), "모래지반에서 모형인장말뚝의 거동", 대한토질공학회지, 제7권, 제2호, pp.5-25 (접수일자 1991. 9. 18)