

말뚝박기에 대한 小考(I)

(Pile Drivability)

趙 瑞 一*
朴 秉 燦**

1. 序 論

말뚝基礎는 上部荷重을 基礎地盤에 確實히 전달한다는 특성으로 지금까지 많은 土木 및 건축 기술자에 의해 建物 및 土木 구조물의 基礎型式으로 오래전부터 즐겨 사용되어 왔다. 그러나 말뚝設計는 上部의 荷重條件과 基礎地盤의 條件 등을 고려해야 함은 물론 말뚝抗打시 設計深度까지 말뚝에 손상을 입히지 않고 이를 貫入시킬 수 있는 말뚝의 強度, 抗打장비의 選定과 말뚝의 設計支持力을 확보할 수 있는 最終抗打貫入量을 示方書에 規定하는데 이르기까지 여러면에서의 세심한 검토가 必要하다.

이런 검토 結果에 따라 設計된 말뚝을 規定된 示方書에 의거 적정한 抗打장비로 도면에 나타난 設計深度까지 말뚝을 抗打하는 作業은 設計시 예상한대로 순탄하게 施工되는 것만은 아니다. 복잡하고 불규칙한 下部地層을 단날 경우 말뚝의 파손은 물론 設計深度까지의 말뚝抗打가 불가능하고 어느 경우는 設計深度를 훨씬 지나서도 refusal이 걸리지 않는 수도 있다. 물론 設計시 地盤調査에 의해서 下部地層의 분포상태를 分析하여 말뚝의 예상貫入深度를 決定하겠지만 넓은 지역에 대한 限定된 試錐로서는 돌발되

는 사태는 불가피한 것으로 판단된다.

이와같이 현장에서 發生되는 상황에 대처하는 것은 물론 보다 효율적인 말뚝設計를 위해서는 精確한 말뚝設計指針(design procedure)을 확립하고 이를 分析하는 効果적인 해석 方法의 整理에 있다고 본다.

本稿에서는 pile-soil interaction에 의해서 구한 말뚝의 靜的支持力(static pile capacity)을 현장의 말뚝抗打記錄(pile driving record)등과 관련하여 이를 유기적으로 비교 分析하고 말뚝設計단계에서 抗打到 의한 말뚝의 거동을 事前에 예측하는 方法 등에 대해서 理論 및 實例를 들어 考察해 보기로 한다.

앞에서 언급했듯이 일반적으로 말뚝의 支持力은 pile-soil interaction에 의한 靜力學的 支持力을 바탕으로한 현장에서의 말뚝 載荷試驗(pile load test) 등의 結果에 의해서 決定하는 것으로 통상되어 있다. 물론 Hilley 나 ENR 등과 같은 動力學的 支持力公式 등이 있지만 그 安全率에 있어서 분포폭이 너무 커 載荷試驗에 의한 最終 확인이 없이 使用함은 安全上 위험이 따른다.

이와같은 短點을 보완하고 抗打시 말뚝의 極限支持力(ultimate soil resistance)을 靜力學的 支持力(ultimate bearing capacity)과 연관시켜보는 方法이 파동方程式(wave equation)에

* 正會員, 現代 엔지니어링 理事

** 現代 엔지니어링

의한 方法이다. 앞으로 本稿의 進행은 wave equation에 대한 理論을 說明하고 실제 수행된 project의 말뚝 抗打기록 및 말뚝 載荷試驗 기록 등을 이와 연관시켜 말뚝박기에 대한 유용성을 검토한다.

2. Wave Equation

wave equation은 1955年 Raymond Concrete Pile 부서 기술자인 Smith에 의해 理論이 일반화되어 현재는 많은 發展을 했고 특히 전자계산기(computer)의 급속한 보급으로 실용성이 증대되었다. wave equation에 의한 computer program 개발은 특히 미국 Texas A & M 大學을 中心으로 발달되었는데 그 이유는 石油試錐를 위한 海洋構造物(offshore structure)의 jacket에 사용되는 大口徑 鋼말뚝을 設計深度까지 抗打하는데 대한 分析이 요구되었기 때문이다.

Smith에 의해 發表된 wave equation의 基本 model은 그림-1과 같으며 현재까지 이 基本 model은 變함이 없고, 抗打장비에 따라 ram이나 pile cap 등에 대한 model이 약간씩 다를 따름이다.

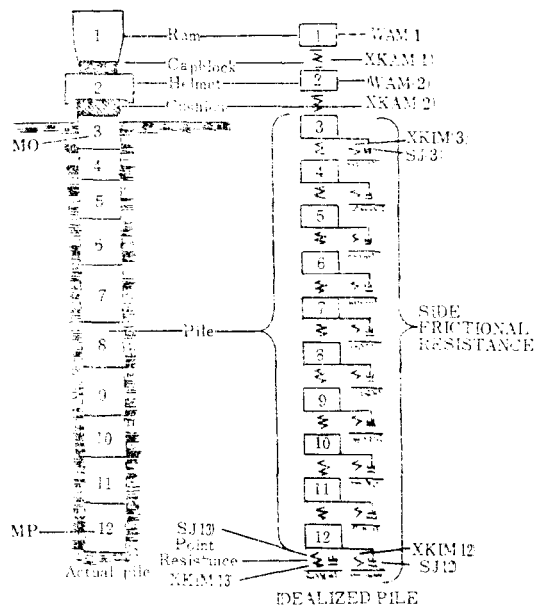


그림-1 Wave equation 기본 모델

파동方程式은 그림-1에서 보는 것처럼 실제의 말뚝을 有限한 요소(segment)로 나누어서 抗打에 의한 충격파(shock wave)의 전달과정을 각 요소마다 시간별로 表示하는 方法이다. 각 요소의 변위와 force 등을 계산하는 시간간격은 0.00025초 정도로 아주 짧은 순간이다. 그림-1에 나타난 model에 대해서 살펴보면 요소는 1번부터 12번까지 요소번호가 부여되어 있고 각 요소는 요소의 탄성(elasticity)을 나타내는 spring으로 연결되어 있다. 地表面 이하의 요소에는 基礎地盤의 효과를 나타내는 soil spring과 動的상태의 荷重에 대한 흙의 damping 효과를 나타내는 dash-pot가 표시되었다. 말뚝 先端에는 soil spring과 dash-pot가 하나씩 더 부여되어 있는데 이는 抗打시 말뚝 先端에서 흙이 밀려나가면서 말뚝이 밀어넣어지는 現象을 나타내기 위한 것이다.

여기서 요소(segment)의 번호를 m , 시간간격(time interval)을 Δt 라고 하면 임의의 시간 t ($DT=t$)에서의 요소 m 의 변위, force는 그림-2에서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D(m, t) = D(m, t-1) + V(m, t-1)\Delta t \quad (1)$$

$$C(m, t) = D(m, t) - D(m-1, t) \quad (2)$$

$$F(m, t) = C(m, t) \cdot K(m) \quad (3)$$

$$R(m, t) = [D(m, t) - D'(m, t)] K'(m) [1 + J(m) \cdot V(m, t-1)] \quad (4)$$

$$V(m, t) = V(m, t-1) + [F(m-1, t) - F(m, t) - R(m, t)]g\Delta t / W(m) \quad (5)$$

上記式에 나타난 변수들은 일반 computer program 등에 사용되는 변수와 같으며 단일첨자로 된 변수는 시간에 따라 변하지 않는 값이다. 각변수와 첨자에 대하여 설명하면 아래와 같다.

m ; 요소번호

t ; 시간 간격번호 ($DT=t$)

Δt ; 시간 간격(초)

D ; 요소의 변위

C ; 요소 spring의 변위

F ; 요소 spring이 받는 힘

R ; soil spring이 받는 힘

V ; 요소의 속도

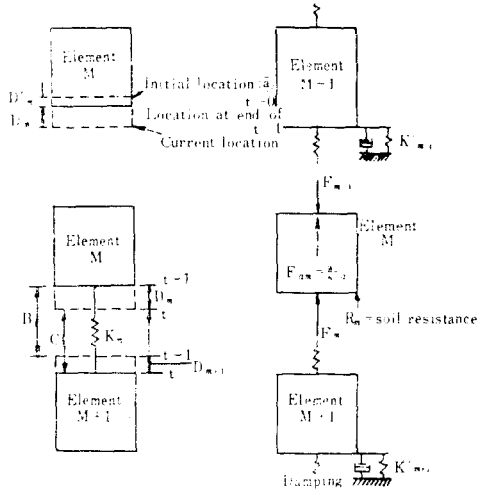


그림-2 Element 에서 힘의 평형

- K ; 요소 spring 의 K 값
- K' ; soil spring 의 K 값
- J ; soil 의 damping 값
- D' ; soil 의 소성변위

최초에 ram 이 cap block 에 떨어지는 순간에는 ram 의 速度를 제외한 다른 요소의 변위와 속도 등은 영이며, 앞의 식 (1)에 의해서 요소 1 의 변위가 생기고 (2), (3), (4), (5)식에 의해 각요소의 새로운 速度가 계산되어 다시 (1)式으로 돌아간다. 시간 간격을 DT 라고 할 때 $DT=1$ 에서는 요소 1 에서만 변위가 생기고 $DT=2$ 에서는 요소 1,2 에 2개의 변위가 생긴다. $DT=m$ 인 경우 m 개의 요소에 대한 변위가 계산된다. 이와같은 반복계산은 computer 에 의해서 계산될 때 효과적이다.

계산은 모든 요소의 속도가 영이거나 마이너스(negative)이고 말뚝 先端의 변위가 앞의 시간에서 구한 값보다 적은 경우 끝나게 된다. wave equation 에 의한 말뚝 先端의 변위를 시간에 따라 구하면 그림-3 과 같게 된다.

이상의 계산순서를 flow chart 로 表示하면 다음 표-1 과 같다.

이와같은 wave equation 에 必要한 入力(input) 자료들을 抗打장비(pile driver), 말뚝, soil 별로 區分하여 기술하면 다음과 같다.

—Pile Driver

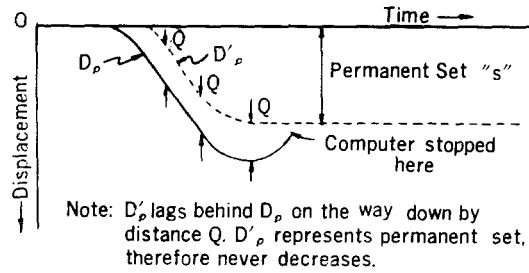
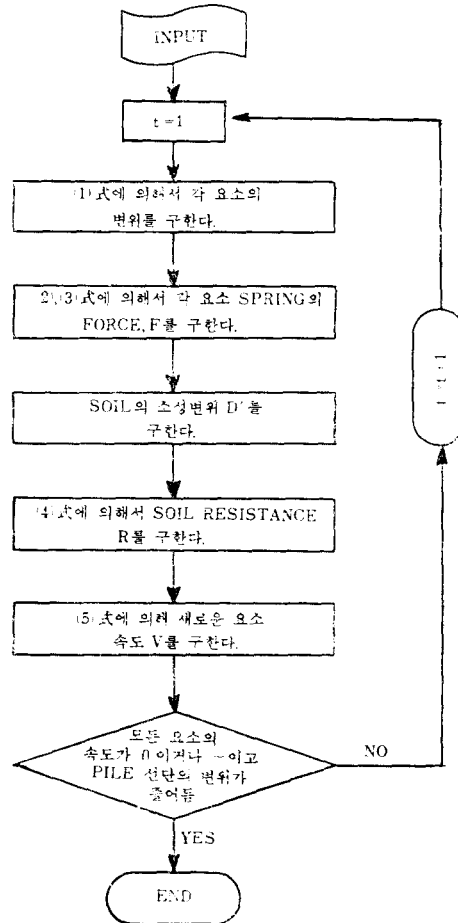


그림-3 Pile 先端 시간-변위곡선

〈표 1〉 Wave equation flow chart



- ram 의 초기속도 및 중량
- anvil 의 중량
- disel 인 경우 explosive force
- cap block 의 spring 값
- cap 의 중량
- cushion 의 spring 값

—Pile

- 총길이 및 단위면적
- 말뚝의 단위중량
- 말뚝의 탄성계수(E)

—Soil

- soil에 묻힌 말뚝 길이
- soil profile
- 말뚝주변 마찰력(skin friction)의 분포형태 및 값
- soil의 탄성변위량(quake)
- soil의 damping 값(J)

上記 input 값 중 특히 soil 항에 표시된 값들에 대해서는 그 의미를 정확히 파악하여야지만 解析에 있어서 정확성을 기할수 있다.

soil에 묻힌 말뚝길이와 soil profile은 解析이 요구되는 말뚝 深度에서 決定하면 되므로 별문제점이 없다. 다만 통상 解析이 최종말뚝 深度에서 이루어지지만 말뚝의 抗打에 의한 應力은 중간深度에서 critical한 경우가 發生할 수 있으므로 기술자 판단으로 신중히 決定하여야 할 것이다.

주변마찰력(skin friction)의 분포형태는 값이 一定한 직사각형분포, 深度(pile penetration depth)에 따라 값이 증가하는 삼각형분포 등이 있지만 실제 soil profile에 따라 계산된 마찰력을 적용하는 것이 바람직하다. 말뚝의 極限支持力을 말뚝의 주변마찰 支持力과 말뚝 先端에서의 支持力으로 나누는 비율도 soil profile에 의한 실제 계산된 값으로 하는 것이 좋다. 다만 抗打시 말뚝 주변의 흙이 교란되어 말뚝의 極限支持力이 실제 계산된 값보다 적어짐으로서 抗打가 예상보다 쉽게 이루어져, 設設深度에 도달해도 refusal이 걸리지 않아 현장에서는 refusal이 걸릴 때까지 抗打를 繼續하게 되어 말뚝이 원 設計보다 훨씬 깊게 貫入되는 사태가 종종 일어나므로 이에 대한 주의가 필요하다. 抗打에 의한 말뚝의 貫入(driving)은 처음에는 말뚝과 soil의 마찰력에 의해서 저항이 되다가 force가 점점 커지게 되면 말뚝 先端에서 주변의 흙이 옆으로 밀려 나가면서 말뚝이 밀므로 貫入되는 現象이다. 이때 말뚝주변의 흙도 말뚝과의 사이에서 slip이 일어나지만 그 영향은 말뚝 先端에서

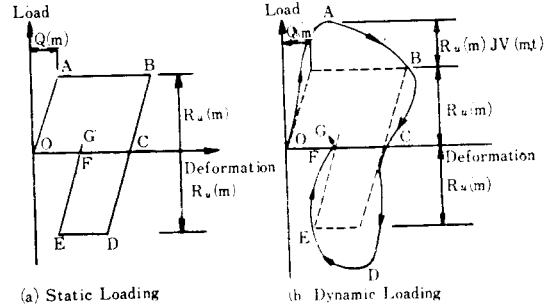


그림-4 Soil의 荷重—변위곡선

보다 적다. 말뚝 先端에서 soil의 荷重—변위(load-deformation) 관계는 그림-4와 같다.

\overline{OA} 선상에서는 soil은 탄성체로서 作用하고 이때 soil spring 계수 $K'(m)$ 은

$$K'(m) = R(m)/Q(m)$$

이다. soil의 quake 값은 soil에 따라 다르지만 보통 0.1 inch(2.54 m/m)를 사용한다. 요소의 변위가 Q 이상이 되면 soil의 resistance는 $R_u(m)$ 이 된다. 그리고 soil의 소성변위 $D'(m)$ 은

$$D'(m) = D(m) - Q$$

가 된다. 이와같은 관계는 靜의상태인 경우이며 짧은순간(0.00025 초)에 作用하는 荷重에 대해서는 일반적으로 動的 해석에서 使用하는 viscous damping 개념이 도입된다. 파동方程式에서는 Smith damping 값 J 를 使用한다. Smith에 의하면 動的의효과는 damping 값 J 에다 요소속도 v 를 곱한 $J \cdot v$ 만큼 force가 靜의상태보다 증가한다고 하였고 J 값으로 0.15를 제안하였다. J 값의 개념을 위해서 한가지 예를 들어본다. J.L. Reese(1965)는 Seed와 Lundgren가 조밀한 세사토에서 실험한 결과 짧은순간에 荷重을 거는 경우 흙의 압축강도가 靜의상태의 荷重조건에서보다 40% 정도 크게 나오는 것을 이용하여 動的의상태에서의 soil resistance가 靜의상태의 soil resistance의 1.4배가 된다는 가정아래 역으로 J 값을 구하였는데 이를 式으로 나타내면,

$$R_D = 1.4R_s \quad (6)$$

$$R_D = R_s(1 + J \cdot v) \quad (7)$$

(6), (7)式에서

$$J = (R_D - R_s)/v$$

v 는 실험에서 35 in/sec로 기록되어 있으므로 J 는 0.14이다. $J=0.14$ 는 Smith가 제안한 0.15와 거의 같다는 결론을 Reese는 내렸다.

J 값은 wave equation의 결과에 상당한 영향을 미치므로 신중한 선택이 필요하다. 앞에서도 언급했듯이 말뚝주변에서 soil의 damping은 말뚝先端에서의 damping보다 그 영향이 적으므로 J 값도 통상先端 J 값의 1/3을 취한다. 토질시험이나 기타 정확한 자료가 없을 때는 다음 표-2의 Q 및 J 값을 사용하여 분석을 한 다음 시험타와 말뚝 載荷試驗에 의해 이 값들을 재조정 분석을 하여야 할 것이다.

〈표-2〉 Quake, Damping의 대표값

Soil	Quake		Damping (s/ft)	constant (J_p) (s/m)
	(in)	(mm)		
Sand	0.05—0.2	1.0—5.0	0.1—0.2	0.33—0.66
Clay	0.05—0.3	1.0—8.0	0.4—1.0	1.30—3.30
Rock	>0.2	>5.0		

이 이외에도 wave equation에 영향을 주는 말뚝의 항타장비나 cushion 재료에 대해서는 각 특성들이 여러 문헌에 비교적 상세히 나와 있으므로 이를 참조하면 될 것이다.

최종적으로 wave equation에 의한 해석 결과를 실제 말뚝 설계에 어떻게 적용하느냐하는 문제는 이론만 가지고는 어렵고 많은 설계경험과 현장경험 등이 요구된다. wave equation의 결과는 적절한 항타장비에 의해서 항타시打擊應력이 허용치를 넘지않는 限度內에서 말뚝이 靜的支持力(ultimate bearing capacity)으로 구한 設計深度(pile penetration depth)까지 貫入이 가능한지의 여부를 검토하는데 利用된다.

wave equation에 의한 결과는 보통 그림-5와 같은 graph로 나타내는데 그림-5의 graph로 wave equation의 해석결과에 대해 일반적인 사항을 기술해 보면

- (1) 현재의 항타장비로는 $R_u=200$ ton 이상의 深度까지 말뚝 抗打가 불가능하므로 이 이상에서는 말뚝의 두께를 증가시키거나 에너지가 큰 항타기를 사용하는 것이 필요하다.

- (2) 말뚝의 抗打應力(driving stress)은 20 ksi를 조금 넘으므로 $F_v=36$ ksi 재질인 경우 별 문제점이 없다.

- (3) 시험타 말뚝이 최종 10 타/in로 refusal이 됐을 경우 이에 대한 말뚝 載荷試驗 결과 파괴荷重(failure load)을 graph상에 表示하면 말뚝의 抗打後 pile-soil interaction의 거동에 대한 추정이 가능하다. 말뚝 載荷試驗의 파괴荷重이 graph의 curve 상단에 表示되면 이는 말뚝 抗打後 “FREEZE”現象이 일어난 것이며 curve 하단에 결과가 表示되면 “RELAXATION”現象이 發生한 것으로 추정할 수 있다.

wave equation에 대한 解析를 각 말뚝 深度別로 실시하여 이를 그림-6과 같이 나타내어 실제 말뚝의 抗打기록과 비교 분석하는 方法도 실제

Dynamics of Pile Driving

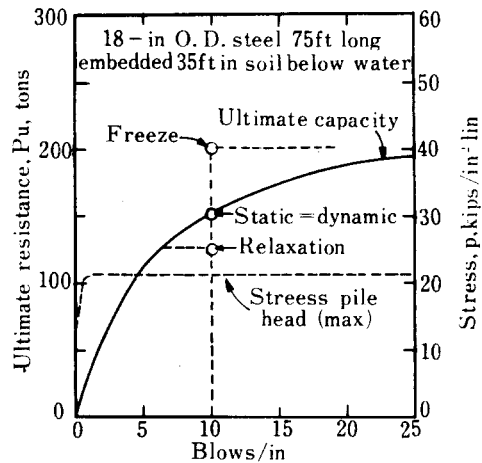


그림-5 R_u -抗打數 곡선

Soil Resistance, R_{st} and R_u (Tons)

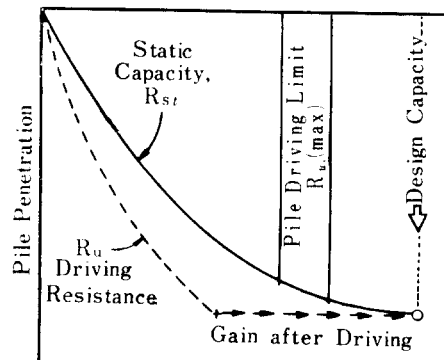


그림-6 Pile 深度- R_u 곡선

무에서 많이 使用된다. 특히 여기서 주목할 점은 앞서도 언급한 것처럼 말뚝 抗打시 말뚝 주변의 흙들이 교란이 되 말뚝의 저항력(ultimate soil resistance)이 불교란 soil strength로 계산된 말뚝의 支持力(ultimate bearing capacity)보다 적어져 設計深度에서 抗打數가 wave equation에 의해 예상된 최종抗打數에 못미치는 경

우가 있다. 이때는 시간이 경과하면 교란된 흙의 強度(strength)가 회복되는 사례가 있으므로, 현장에서 refusal이 걸릴 때까지 抗打를 해 말뚝을 길게 박는 경우가 없도록 주의해야 한다. 이와같은 경우는 전문가의 정확한 원인규명에 따라 抗打여부를 決定하는 것이 바람직하다.