

말뚝항타시 발생하는 응력파의 전파특성에 관한 수치해석적 연구
A Numerical Study on Stress Wave Propagation
from Pile Driving

이종세*
Lee, Jong Seh

임정진**
Lim, Jung Jin

ABSTRACT

The ground-borne vibration from pile driving is causing many public discontents. However, because of the fact that the characteristics of wave propagation and attenuation are not well understood, systematic and effective vibration reduction measures can not be taken. This paper attempts to study the propagation of stress waves induced by the pile driving. To simulate the wave propagation in a semi-infinite domain, the so-called absorbing boundaries are incorporated in the finite element method and a series of numerical simulations is performed. Numerical results show that the surface displacement and velocity increase first and then decrease as the pile penetration depth becomes larges.

1. 서 론

최근 부지확보의 어려움 등으로 인하여 도심지나 연약지반과 같은 열악한 환경에서의 건설활동이 증가하고 있는 추세이다. 또한 이로 인해 발생하는 소음·진동 공해의 심각성도 점차 증대되어 도심에서 발생하는 생활환경 오염원 중 정온한 주거환경을 해치는 주된 민원의 대상이 되고 있다.

그림 1에 나타난 바와 같이 소음·진동으로 인한 민원은 타 환경오염원에 비하여 월등히 많으며 그 수치 또한 매년 증가하고 있고, 그 중 50%이상이 건설공사로 인해 발생하고 있다. 특히, 도심에서 발생하는 건설진동 중에서 기초 공사에 사용되고 있는 항타기계류로부터 발생하는 진동은 가장 빈번한 민원의 대상이 되어 대안으로 다양한 저진동·저소음 공법이 개발되어 도심지나 측사 인근지역 등 저소음·저진동을 필요로 하는 지역에서는 저진동 공법에 의해 작업이 이루어지고 있으나 최근에 강화되는 진동 기준에는 미치지 못하고 있는 실정으로 항타작업시 진동·소음 저감대책의 필요성이 커지고 있다. 특히 진동저감대책은 진동원에 대한 대책뿐 아니라 전파경로상

* 정회원 · 한양대학교 토목·환경공학과, 교수

** 학생회원 · (주)삼안건설기술공사, 사원

에서의 저감대책의 필요성이 커지고 있다. 그러나, 향타진동의 감쇠 및 산란특성이 파악되지 않아 진동민원 발생시 효과적이고 체계적인 저감대책 수립이 제도적, 기술적으로 미흡한 실정이다.

말뚝 향타시 발생하는 응력과 전달에 관한 연구는 주로 현장실험을 통해 이루어지고 있으며, 해석적인 방법이나 수치적인 방법을 통한 연구는 미흡한 실정이다. Bjerrum와 Johannessen(1960)에 의한 초기의 현장실험들은 주로 말뚝향타에 의한 파인간극 수압 발생에 초점을 두고 이루어졌으며, 지반진동을 측정하는 현장실험은 Chen(1982)과 Hwang 등(1994)에 의해 이루어졌으나 건설현장에서의 공기 등의 문제로 인해 말뚝향타에 의한 지반응답의 포괄적인 측정은 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 또한 해석적 방법은 말뚝 내부의 문제를 파전달방정식을 수치적분하여 수학적 으로 풀어낸 것으로 지반으로 전달되는 응력파에 의한 전달특성에 대해서는 다루어지지 않은 상태이다. 수치적 방법으로는 말뚝기초와 지반과의 관계를 다룰 뿐 향타에 따른 관입깊이 등이 고려되지 않은 상태로 향타에 의한 응력파의 전달특성을 규명하기에는 미흡한 점이 많이 있다. 이처럼 향타진동에 관한 연구에 대해 본질적인 접근이 이루어지지 않은 상태로 그 필요성이 크다고 할 수 있다.

향타에 의한 말뚝 시공은 경제성 및 지지력 측면에서 우수한 공법이기 때문에 진동 및 소음을 저감시킬 수 있다면 그 파급효과는 매우 클 것이다. 그러나 아직까지는 향타시 발생하는 응력파의 메카니즘에 대해 명확한 규명이 이루어지지 않은 상태이므로 본 논문에서는 수치해석 방법을 이용하여 향타시 말뚝이 관입되면서 발생하는 응력파의 전파특성을 파악해 보고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 흡수경계요소를 사용하여 반무한영역에서의 파의 방사조건을 고려하도록 모형화하였으며, 이를 바탕으로 말뚝 향타시 발생하는 응력파의 전파특성을 관입깊이와 진동원으로부터의 거리에 초점을 두고 살펴보았다. 본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS(FEA Ltd, 1996)를 사용하였으며, 효과적인 수치해석을 위해 해석지반은 선형탄성거동을 한다고 가정하였고, 해석대상은 2차원 평면 변형률 상태로 제한하였다.

2. 흡수경계의 수치해석적 검증

본 연구에서 사용한 흡수경계의 타당성 검증을 위해 사용한 대상구조는 다음의 그림 2와 같다. 그림 2의 모형A는 흡수경계를 사용하지 않고 지반영역을 두배로 확장하여 경계를 고정시킨 경우이고 모형B는 흡수경계를 사용한 것으로 Joint요소를 사용한 점성감쇠기를 설치한 경우와 경계를 고정시킨 경우에 대하여 고려하였다. Lysmer와 Kuhlemeyer(1969)가 제안한 흡수경계의 경우 경계면에 수직으로 입사하는 파에 대해서는 우수한 성능을 보이므로 반원형을 사용하는 것이 유리(이종세, 김희석, 2000)하나 본 연구에서는 향타에 의한 말뚝관입을 용이하게 묘사하기 위해 대상 구조를 사각형으로 모형화하였으며, 지지점을 단순 고정시킨 모형과 흡수경계가 적용된 모형에 대하여 파도달 시간을 고려한 비교를 통해 흡수경계 효과를 검증하였다.

2.1 수치 모형

일반적으로 진동은 진동원으로부터 멀어질수록 감소하는 것으로 알려져 있으며, 이를 고려하여 본 연구에서 사용할 지반모형의 크기를 결정하였다. 서울-부산간 경부 고속전철 제3공구 구간에서 얻은 실험자료(그림 3, 한국건설기술연구원, 1995)와 대만의 Chiayi- Taipo의 고속전철 공사현장에

서 얻은 결과(그림 4, Hwang 등, 2001)를 비교해 본 결과 지질조건이나 항타에 사용된 장비에는 차이가 있지만 두 개의 실험결과 모두 진동원으로부터 50m이후에는 그 영향이 기준치(5mm/sec) 안에 포함되므로 항타지점으로부터 50m까지의 지반모형을 선정하였다.

그림 5는 대상구조를 모형화한 것으로 2차원 평면변형을 상태로 제한하였으며, 해석지반은 선형 탄성거동을 한다고 가정하였다. 여기서, Z로 표시된 부분은 Joint 요소로 점성댐퍼를 나타내는 것이다. 또한 지점조건으로 Joint 요소와 접촉하는 절점에는 자유단조건을 그 다음 절점에는 고정단 조건을 사용하여 강결시켰다.

본 수치해석에 이용된 지반물성은 다음의 표 1과 같고 위의 물성치를 이용하여 구한 지반의 P 파 속도와 S 파 속도는 각각 다음과 같다.

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = 461.110\text{m/sec} \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = 246.473\text{m/sec}$$

2.2 사용하중 및 동적해석 시간간격

Joint 요소를 사용하여 흡수경계를 처리하였을 경우와 단순 고정단을 사용하였을 경우에 대해 변위와 응력전파 그리고 각 수신점에서의 변위를 알아보기 위해 그림 5에서처럼 모형화한 지반의 지표면 중앙 절점에 주기하중을 재하시켜 동적해석을 실시하였으며, 이 때의 사용하중은 그림 6과 같다. 본 수치해석에서 사용한 하중의 주기는 항타시 발생하는 주파수(Frequency)를 고려하여 0.04초로 하였으며, 주기와 파속도를 고려한 P파와 S파의 파장은 각각 다음과 같다.

$$\lambda_p = V_p \cdot T = 17.08\text{m} \quad \lambda_s = V_s \cdot T = 9.87\text{m}$$

요소(mesh)의 크기는 파전달문제에서의 정확성 확보를 위해 최소파장의 약 1/10~1/12범위 내에서 결정(Kuhemeyer와 Lysmer, 1973)하므로 본 수치해석에서도 최소파장인 전단(S)파 파장의 약 1/10 인 1m로 하여 대상을 모형화 하였다. 동적해석을 위한 시간간격은 명시적(Explicit)방법인 중앙차분법(Central Difference Method)의 안정조건($\Delta t \leq T_n / \pi$)에 만족하고, 응력파의 전달과정을 명확히 나타내기 위해 주기를 10등분 한 0.004초를 사용하였다.

2.3 수치해석 검증

2차원 평면요소를 이용하여 모형화한 지반에 주기하중을 가하여 시간에 따른 변위 및 응력전파를 알아보았다. 다음의 그림 7(a)는 그림2의 모형B에 대하여 경계를 고정시킨 경우에 대해, 그림 7(b)는 Joint 요소를 사용하여 댐퍼를 설치한 경우에 대해 반사파가 발생한 0.28초에서의 응력의 전파형상을 나타낸 것으로 고정단을 사용하여 경계를 강결시킨 경우는 반사효과로 인해 파의 산란이 발생하였다. 흡수경계를 사용한 경우에도 반사파가 일어나지만 상당 부분의 에너지를 흡수됨을 알 수 있었다.

앞에서 본 시간별 변위분포와 응력분포를 통해 Joint 요소로 점성댐퍼를 설치한 경우에도 어느 정도 반사파가 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 흡수경계효과에 대해 좀 더 자세히 알아보기 위하여 그림 2에서 언급한 수신점에서의 변위를 측정하여 비교해 보았다. 그림 8은 파 발생지점에서 수평으로 50m지점(수신점 R1)에서의 X방향과 Y방향의 변위를 시간별로 측정된 결과를 나타

낸 것이다. 여기서 모형A는 확대된 모형에 대해 반사파가 일어나기 전까지 수치해석을 수행하여 얻은 결과로써, 본 연구에서 흡수효과를 알아보기 위한 기준값으로 사용하였다. 그림 9는 수신점 R2에서의 각방향에 따른 변위를 시간별로 측정된 결과를 각각 나타낸 것이며, 그림 10은 수신점 R3에서의 Y방향의 변위를 시간별로 측정된 결과이다.

흡수효과는 수신점 위치에 상관없이 비교적 Y방향에서의 흡수효과가 좋은 것으로 나타났으며, X방향의 경우 60~69%의 흡수율을 보이는 반면 Y방향의 경우는 70~82%의 흡수율을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 흡수경계가 반무한 지반에서의 반사조건을 어느 정도 고려할 수 있는 것으로 판단된다.

3. 향타에 의한 파전달에 관한 수치해석 및 결과분석

향타에 의해 말뚝이 관입되면서 지반으로 전달되는 응력파의 특성을 파악하기 위해 흡수경계를 사용하여 반무한영역을 유한영역으로 모형화한 대상지반에 대한 수치해석을 수행하였다. 사용한 하중은 향타시 실제로 발생하는 하중을 근사적으로 형상화하여 적용하였으며, 타격횟수는 한번으로 가정하였다. 향타시 발생하는 말뚝과 지반사이의 마찰에 대해서는 고려하지 않았으며 지반과 말뚝의 물성 차에 의해 발생할 응력만을 고려하였다. 또한, 여기서 얻은 결과를 가지고 서울-부산 간 고속전철 진동실험에서 얻은 관입깊이에 따른 진동속도와 비교 검토하였으며, 관입깊이에 따른 파의 전달과 산란효과에 대하여 검토하였다.

3.1 해석모형

실제 향타에서는 시간과 타격횟수 등에 따라 말뚝의 관입깊이가 달라지는데 이것을 표현하기 위하여 그림 11을 기본대상 구조로 말뚝을 3m씩 관입시킨 후 하중을 가하였으며, 이때 최종 관입 깊이는 18m로 가정하였다. 그림 11에서 지표면 위에 10m 간격으로 표시된 R1, R2, R3 그리고 R4는 향타에 의해 발생하는 응력파의 영향으로 인한 지반의 속도와 변위를 알아보기 위한 수신점을 나타낸 것이다. 흡수경계를 검증할 때와 마찬가지로 향타지점으로부터 50m까지를 모형화하였으며, 해석대상 지반과 말뚝을 2차원 평면변형을 상태로 제한하고 선형 탄성거동을 한다고 가정하였다. 또한, 반무한영역을 고려하기 위해 2장에서 검증한 흡수경계를 사용하였다. 본 수치해석에서는 강 말뚝과 콘크리트말뚝을 사용하였으며, 모든 말뚝은 직경이 0.5m이고, 길이는 18m로 가정하였다. 지반과 말뚝의 물성은 다음의 표 2와 같다.

3.2 사용하중

향타시 발생하는 응력파의 전파와 각 수신점에서의 변위를 알아보기 위하여 그림 13과 같이 모형화한 말뚝에 임의의 하중을 적용하였다. 여기서 사용된 하중은 향타에 의한 진동형태를 근사적으로 표현한 것이며, 이때 향타에 따른 관입을 직접적으로 표현하기가 어려워 임의로 3m씩을 관입시킨 후 한번의 타격을 주는 것으로 가정하였다. 또한, 향타시 발생하는 파의 주파수(frequency)는 일반적으로 1~90Hz이나 진동원으로 멀어질수록 고주파수 성분이 급격한 감쇠현상을 보여 20m부근에서는 25Hz가, 30m이상 멀어지면 20Hz가 탁월 주파수 성분(건설소음·진동, 도서출판 서우, 2001)을 보이므로 본 수치해석에는 이를 고려하여 주파수는 25Hz, 주기는 0.04초로 가정하였

다. 이러한 가정들이 고려된 하중 형태는 그림 12와 같다. 요소망(mesh)의 크기는 1m 간격으로 하였으며, 동적해석을 위한 시간간격은 0.004초를 사용하였다.

3.3 수치해석 결과 및 분석

(1) 응력전파

그림 13은 말뚝이 지반에 관입되기 직전에 항타를 한 경우이고, 그림 14는 말뚝이 15m 관입된 후 항타를 하였을 경우의 응력전파형상을 시간별로 나타낸 것으로 강말뚝을 사용한 경우의 결과이다. 그림 13과 그림 14에서 보는 바와 같이 말뚝이 관입되기 전에 항타를 한 경우가 대체적으로 파의 전달이 느리게 일어나고 산란이 많이 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한, 관입의 진행에 따라 대체로 변위는 감소하고 응력은 증가하는 것을 알 수 있다. 이처럼 관입 전이 더 큰 영향을 준 이유는 관입에 따른 말뚝내부의 응력전달에서 알 수 있듯이 파 전달이 말뚝 선단부에서만 이루어졌기 때문으로 사료되어진다. 즉, 말뚝이 지반과 접하는 면이 커질수록 내부의 반사파가 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

(2) 관입깊이에 따른 속도변화

그림 15는 강말뚝과 콘크리트말뚝을 사용한 경우에 대해 수신점 R1, R2, R3 그리고 R4에서 관입깊이별 최대속도를 나타낸 것이다. 수신점 R1에서의 결과를 제외하고는 일반적으로 항타지점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 최대속도가 작아지는 것을 알 수 있었다. 여기서 수신점 R1에서의 결과가 상대적으로 작게 나온 이유는 하중 산정시 주파수 성분을 25Hz로 가정한 것이 가장 큰 영향을 준 것으로 보이며, 정확한 원인 분석을 위하여 수신위치를 세밀하게 하고, 주파수 성분에 대한 변수연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 강말뚝과 콘크리트말뚝 모두 일정깊이 이상의 관입이 이루어지면 속도가 감소함을 알 수 있었다.

(3) 변위

관입 깊이에 따른 시간별 변위분포를 알아보기 위하여 강말뚝을 사용한 경우에 대하여 각 수신점에서 시간에 따른 변위를 알아보았다. 다음의 그림 16 ~ 그림 19는 말뚝관입깊이 중 0m, 6m, 12m 그리고 18m 관입된 후 항타를 한 경우에 대해 수신점별로 X방향과 Y방향의 변위를 나타낸 것이다. 수신점별 변위를 볼 때 관입깊이에 따라 변위가 감소하는 것을 알 수 있었다. 단, 관입 전 항타를 하는 경우에는 다른 거동을 보였는데, 이는 말뚝이 지반과 접하는 면이 적어 내부의 반사파가 관입된 경우보다 지속적인 영향을 주는 것으로 판단되어진다. 또한 관입깊이별로 볼 때 항타지점으로부터 멀어질수록 역시 변위가 감소하는 것을 알 수 있었다.

그림 20은 콘크리트말뚝을 이용한 경우로 수신점 R2, 즉 항타지점으로부터 20m 떨어진 곳에서의 X방향과 Y방향으로의 변위이다. 콘크리트말뚝의 경우도 강말뚝의 경우와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 17과 그림 20을 비교해 볼 때 속도와 마찬가지로 변위가 약 2배정도 크게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 말뚝 내부에서의 반사파가 강말뚝에 비해 크게 일어나는 것을 알 수 있었다.

또한 그림 16 ~ 그림 19에서 각각의 최대변위를 비교해보면, 항타지점으로부터 멀어짐에 따라 최대 변위가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 콘크리트말뚝을 사용한 경우도 동일한 결과를 보인다. 이를 통해 말뚝재질에 상관없이 Y방향 변위는 진동원으로부터 멀어지면서 변위가 점점 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 최대변위들의 백터합을 관입깊이에 따라 나타내면 최대속

도들의 벡터합으로 나타난 경우처럼 강말뚝의 경우 6m 관입 후, 콘크리트말뚝의 경우 12m 관입 후 최대변위가 발생함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 흡수경계를 사용하여 반무한지반에 대해 항타시 말뚝 관입에 따라 지반으로 전달되는 응력파의 특성을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 흡수경계를 사용하므로써 반무한영역의 응력파 전파현상을 수치해석적으로 고찰할 수 있었다.
- 2) 관입깊이에 따른 응력거동을 통해 관입되기 전 항타가 관입된 후 항타에 비해 상대적으로 파의 산란이 크게 일어남을 알 수 있었다.
- 3) 관입깊이에 따른 수신점에서의 최대속도와 변위는 일정깊이까지 커지다가 그 이상의 깊이에서는 점차 감소한다. 강말뚝의 경우는 약 6m관입 후, 콘크리트말뚝의 경우는 약 12m관입 후 최대값이 발생한 다음부터 감소함을 알 수 있었다.
- 4) 진동원으로 멀어질수록 최대변위는 말뚝의 종류에 상관없이 점점 작아짐을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김재수, 광광수, 이병운, 박재영, 이한진, 정갑철 (2001), 건설소음·진동. 도서출판 서우.
2. 이종세, 김희석 (2000), 반무한 영역에서의 탄성과 진행문제를 위한 흡수경계에 관한 연구. 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제4권, 1호, pp. 451-457.
3. 한국건설기술연구원 (1995), 경부고속철도 제3공구 교량 기초 말뚝 항타시의 소음 및 진동영향 평가 연구.
4. 환경부 (2000), 환경통계연감, 제13호.
5. Bjerrum, L. and Johnnessen, I.J. (1960), "Pore Pressure Resulting from Driving Piles in Soft Clay," *Proc. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, Sydney, pp. 108-111.
6. Chen, H.T. (1982), "Monitoring on vibration during pile driving at TaiChung thermal power plant site," *Rep.*, Dept. of Civ. Engrg., National Central University, Chung-Li, Taiwan.
7. FEA Ltd. (1996), *LUSAS Theory Manual*
8. Hwang, J.H., Liang, N. and Chen, C.H. (2001), "Ground response during pile driving," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 11, pp. 939-949.
9. Hwang, J.H., Lee, C.C., Hang, J.S. and Chang, J.Z. (1994), "Behavior of frictional driven pile in underconsolidated clay," *1st Int. Symp. on Struct. and Found.*, Hangchow.
10. Kim, D.S. and Lee, J.S. (2000), "Propagation and Attenuation Characteristics of Various Ground Vibrations," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 19, pp. 115-126.
11. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 99, No. SM5, pp. 421-427.
12. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969), "Finite Dynamic Model for Infinite Media," *Journal of The Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877.

표 1. 지반 물성

흙의 종류	탄성계수	포아송비	밀도
사질토	$3.0484 \times 10^8 \text{ Pa}$	0.3	$1,930 \text{ kg/m}^3$

표 2. 지반 및 말뚝 물성

종류	탄성계수	포아송비	밀도	전단파 속도
지반(사질토)	$3.0484 \times 10^8 \text{ Pa}$	0.3	$1,930 \text{ kg/m}^3$	247 m/sec
강말뚝	$2.0000 \times 10^{10} \text{ Pa}$	0.3	$3,500 \text{ kg/m}^3$	1,483 m/sec
콘크리트말뚝	$2.2000 \times 10^9 \text{ Pa}$	0.2	$2,400 \text{ kg/m}^3$	618 m/sec

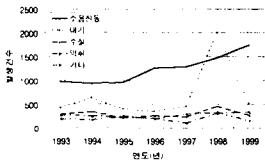


그림 1. 연도별 민원발생현황 (환경부, 2000)

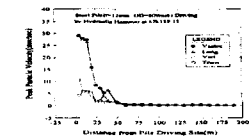


그림 3. 서울-부산간 고속전철 진동실험 결과

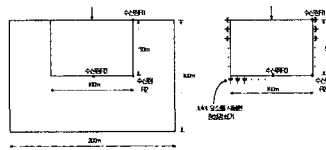


그림 2. 흡수경계 검증용 위한 대상구조

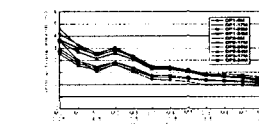


그림 4. 대만의 Chiayi-Taipo 고속전철 진동실험 결과

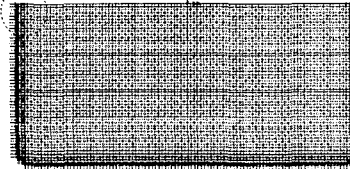
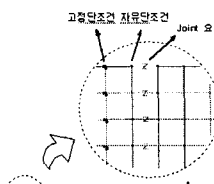


그림 5. 대상구조 모델링

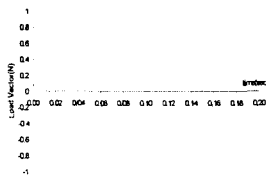
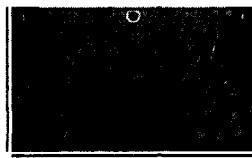


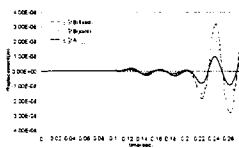
그림 6. 사용하중(주기하중)



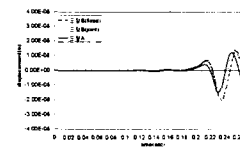
(a) 경계고정시



(b) 점성댐퍼 사용시

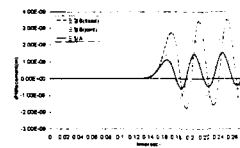


(a) X방향 변위

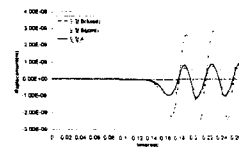


(b) Y방향 변위

그림 8. 수신점 R1에서의 변위



(a) X방향 변위



(b) Y방향 변위

그림 9. 수신점 R2에서의 변위

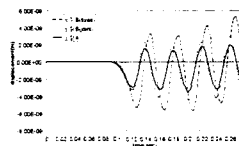


그림 10. 수신점 R3에서의 Y방향 변위

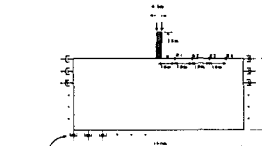


그림 11. 말뚝 묘사를 위한 대상구조



그림 12. 사용하중(충격하중)

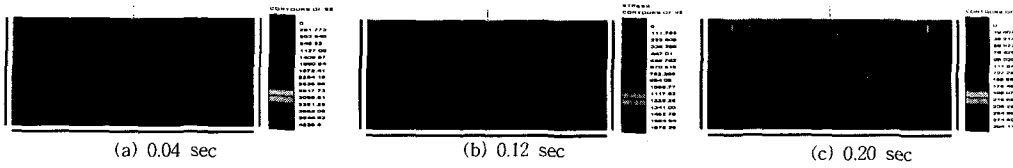


그림 13. 지반에 말뚝 관입전 향타시 시간에 따른 응력분포

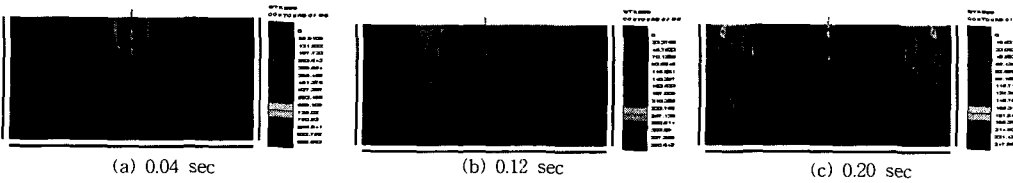


그림 14. 지반에 말뚝 15m 관입후 향타시 시간에 따른 응력분포

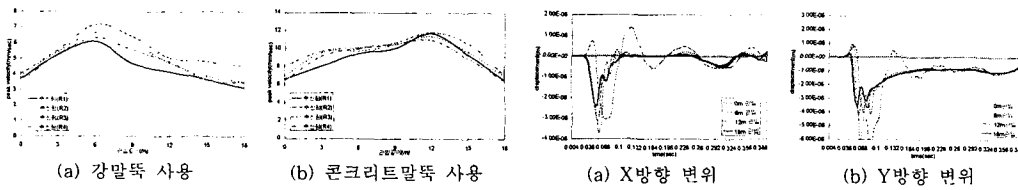


그림 15. 수신편 관입깊이에 따른 최대속도 비교

그림 16. 수신편 R1에서의 방향별 변위(강말뚝)

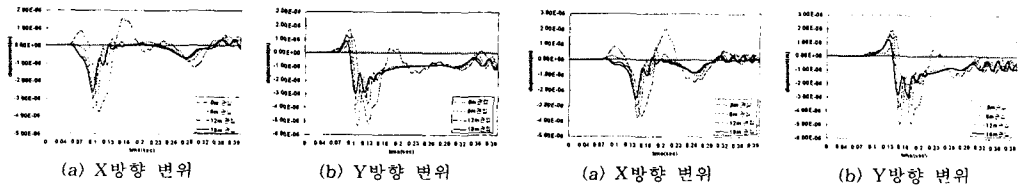


그림 17. 수신편 R2에서의 방향별 변위(강말뚝)

그림 18. 수신편 R3에서의 방향별 변위(강말뚝)

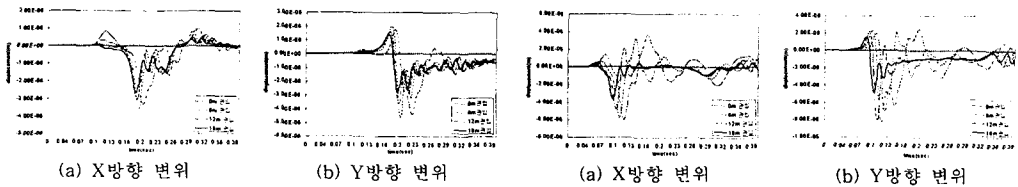


그림 19. 수신편 R4에서의 방향별 변위(강말뚝)

그림 20. 수신편 R2에서의 방향별 변위(콘크리트말뚝)

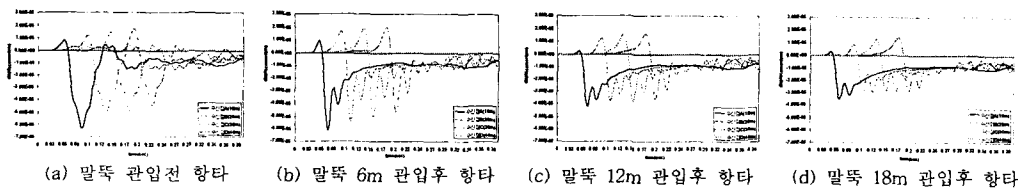


그림 21. 관입에 따른 수신편 Y방향 변위