

말뚝기초의 동적거동과 무리말뚝 영향에 관한 고찰

Study on Dynamic Behavior of Pile Groups and Pile Group Effects

김 용 석*
Kim Yong-Seok

요 약

최근 유한요소법에 의한 구조해석 기법의 발달로 그 동안 미진했던 말뚝기초에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 무리말뚝에 대한 연구성과는 아직도 무리말뚝의 정확한 거동 파악과 실용적 설계지침 마련에 미치지 못하고 있다. 본 연구에서는 말뚝기초의 동적거동 특성을 이해하고 무리말뚝 영향의 중요성을 알아보기 위하여 말뚝기초의 연구동향을 살펴보고 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 선단지지 무리말뚝에 대한 주파수영역에서의 유한요소 해석을 통하여 무리말뚝의 강성과 감쇄비 변화를 알아 보았다. 연구 결과에 의하면 무리말뚝의 강성과 감쇄비가 말뚝간격, 무리말뚝기초의 규모 및 주파수에 따라 크게 달라지기 때문에 무리말뚝기초 설계시 무리말뚝 영향을 필히 고려해야 할 것으로 판단된다.

1. 서 론

지난 20여년 동안 국내 건설업은 양적인 면에서 놀라운 발전을 가져와 국내 건설시장 규모가 1년 국가예산과 비슷한 수준까지 성장했으며, 해외 건설시장에서도 괄목할 만한 성장을 이루었다. 질적인 면에서도 높은 발전을 가져와 공사범주가 단순건설공사에서 원자력발전소, 해양구조물, 첨단전자시설 및 정밀통신시설과 같은 기술집약적 공사까지 매우 다양해졌는데, 전체적인 기술수준은 아직도 낮은 수준에 머물러 있어 가끔 믿어지지 않는 대형사고들이 발생하고 있다. 기초공학분야에서도 전반적인 기술수준은 급속한 발전을 이루었으나, 전문분야에서의 기술수준은 마찬가지로 미진한 상태에 놓여 있어 말뚝기초 설계분야의 경우 적절한 설계기준이 미비하고, 건축법에 일정 규모이상의 건축물에 대해서 내진설계를 규정하고 있지만 내진설계를 위한 말뚝기초 설계지침이 없어서 말뚝기초설계시 무리말뚝 영향(Pile Group Effect)을 적절히 반영하지 못하고 있다. 본 연구에서는 이러한 말뚝기초 설계상의 어려움을 해결하기 위한 노력의 일환으로 말뚝기초에 대한 연구동향을 알아보고, 선단지지 무리말뚝기초에 대한 유한요소해석 결과로 얻은 무리말뚝계수에 대한 조사를 통하여 무리말뚝 영향의 중요성을 알아보고자 한다.

* 정회원, 목포대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사, 구조기술사

2. 말뚝기초의 연구동향

말뚝기초 해석에 관한 연구는 선진국에서 60년대부터 관심의 대상이 되어 매우 제한적으로 진행되었으나 70년대에는 단일말뚝기초에 대한 연구가 꾸준히 진행 되었으며 80년대에는 무리말뚝기초에 대한 연구가 상당한 수준에까지 진행되어, 요즘은 이론적 연구결과에 대한 현장실험이 실시되고 있다.

초기 말뚝기초에 대한 동적해석은 동역학의 기본이론을 이용하여 단일말뚝기초를 단자유도 모델로 가정하고 시스템의 적절한 질량, 강성 및 감쇄비를 선정함으로써 유용하게 사용할 수 있었으나 단일말뚝기초에 대한 현장공진실험(Field Resonance Test) 결과 정적상태에서 가정한 이 변수들의 특성치가 동적실험에서 구한 수치와 다를 뿐만 아니라 이 값들이 입력주파수에 따라 변한다는 것이 발견되어 새로운 말뚝기초 해석방법을 필요로하게 되었다.(4)

70년대 중반 Novak과 Sheta는 단일말뚝에 대한 새로운 해석모델을 제안했는데, 이 모델은 평면변위(Plane Strain)조건하에서 지반을 얇은 층으로 나누어서 각 지반층의 유사강성(Equivalent Stiffness)을 구한다음 이 지반강성을 가진 Soil 스프링을 말뚝에 연결한 Winkler형 말뚝기초 모델이었다. 이 모델은 단일말뚝기초 해석의 경우 매우 좋은 결과를 보여 주었으며, 후에 무리말뚝(Pile Group)기초 해석에도 이 모델이 적용되어 중첩법을 이용한 상호작용계수(Interaction Factor; Fig.1)법이 개발되었는데 지금도 이 방법은 무리말뚝 강성을 구하기 위한 실용식으로 이용되고 있다. 그러나 상호작용계수법을 이용한 말뚝기초 해석은 말뚝 배치간격이 넓고 무리말뚝기초 규모가 작을 경우에는 해석결과에 큰 오차가 없어 별 문제점이 없지만, 말뚝간격이 좁고 무리말뚝기초의 규모가 클 경우에는 말뚝-지반-말뚝간 상호작용 영향때문에 약간의 오차를 보이는 문제점을 안고 있으며, 특히 비선형 비탄성 지반 특성을 고려할 때는 그 효용성을 상실하게 된다.

80년대에 들어서 유한요소해석법(FEM)의 발달과 컴퓨터 성능 향상으로 이전에는 어려웠던 무리말뚝기초에 대한 보다 정확한 해석이 가능하게 되었지만 그 해석절차의 복잡성과 토질의 다양성때문에 유한요소 해석법이 아직 실용화 되지 못하고 있는데 가까운 장래에 유한요소 해석결과를 이용한 실용적이고 간편한 설계방안이 출현할 것으로 예상된다.(3)

또한 요즘 경계요소법(Boundary Element Method; BEM)에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있고, 경계요소법을 이용한 말뚝기초 해석기법에 관한 연구도 상당한 수준에 도달하고 있어 가까운 장래에 경계요소법을 이용한 말뚝기초 해석법도 개발되리라 믿는다.

말뚝기초 해석을 위한 지금까지의 수 많은 연구에도 불구하고 말뚝기초의 복잡한 동적거동 파악과 무리말뚝 영향 규명을 위한 이론적 연구가 당분간 계속될 것으로 판단되며, 이론적 연구결과에 대한 검증을 위해 현장에 설치한 말뚝에 대한 실험적 연구가 앞으로 활발할 것으로 예측된다.(2,7)

3. 무리말뚝기초의 동적거동

말뚝기초의 동적거동은 수평(Horizontal)운동, 수직(Vertical)운동, 회전(Rocking)운동 및 비틀림(Torsional)운동으로 나눌 수 있는데, 말뚝기초 설계시 대개의 경우 수평운동, 수직운동 및 회전운동만이 고려되고 비틀림운동은 무시되는데 규모가 작은 말뚝기초에서는 이 비틀림운동도 그 영향이 크고 중요하기 때문에 필히 고려되어야 한다. 말뚝기초의 이러한 동적거동은 지진, 바람, 해류, 이동물체, 기기운전 및 각종 충격동에 의한 외부하중에 의해 유발되는데 동적거동의 특성은 작용하는 하중의 형태와 주파수 특성에 따라 달라지게 된다. 수평운동과 회전운동은 수평방향 하중에 의하여 상호 연관관계를 가지고 동시에 일어나는데, 이때 회전운동은 개개 말뚝에 수직운동을 유발한다. 말뚝기초의 수직운동은 말뚝 축방향의 상하운동으로 수직하중에 의해 발생하는 가장 단순한 운동이다. 또한 비틀림운동은 하중의 불균형이나 구조물 및 기초 질량의 비대칭성때문에 발생하는 기초거동으로 개개 말뚝에 수평운동을 유발한다.

4. 무리말뚝 영향

무리말뚝기초의 거동은 매우 복잡해서 정확히 이해하기가 어려운데, 특히 동적거동은 말뚝 주위의 토질이 응력상태에 따라 계속 변하고, 말뚝과 지반 사이에 틈(Gap)의 발생, 지반 교란에 의한 토질의 약화, 말뚝 상호간의 간섭현상 및 각 말뚝에 분포되는 힘의 불균형때문에 더욱 파악하기 어렵다. 무리말뚝기초에서 이러한 말뚝주위 지반의 지지력 상실은 무리말뚝기초의 강성을 개개 단일말뚝 강성의 단순한 합보다 적게 하는데, 이는 무리말뚝 전체가 외곽말뚝들로 구성된 단일말뚝처럼 거동하게 하는 일종의 무리거동 양상을 보이기 때문이다. 따라서 무리말뚝기초 강성은 말뚝의 특성(종류, 크기, 길이, 배치간격) 및 지반의 특성(깊이, 토질)에 따라 달라지기때문에 무리말뚝 영향에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다.

무리말뚝 영향은 무리말뚝계수(Group Factor)로 표현할 수 있는데, 무리말뚝계수는 수평, 수직운동의 경우 무리말뚝기초 강성 및 감쇄비를 각 단일말뚝의 강성 및 감쇄비 합으로 나눈 값이며, 회전운동의 경우는 무리말뚝기초 강성 및 감쇄비를 각 단일말뚝의 수직방향 강성 및 감쇄비에 회전축으로부터 거리를 곱하여 구한 값의 합으로 나눈 값이다.

5. 무리말뚝계수

무리말뚝 영향과 그 중요성을 파악하기 위해 2x2, 3x3, 4x4, 5x5 선단지지 무리말뚝 기초에 대한 유한요소법 해석을 통해 수평, 수직 및 회전운동에 대한 무리말뚝계수를 주파수영역에서 계산하고 그 결과를 검토하였다.

지반층은 15m 깊이로 단단한 암반 위에 놓여 있고, 토질은 보통으로 전단파 속도가 대략 210m/sec, 단위하중이 1.9t/m³, 포이손비 0.4, 감쇄비 5%인 특성을 지닌 것으로

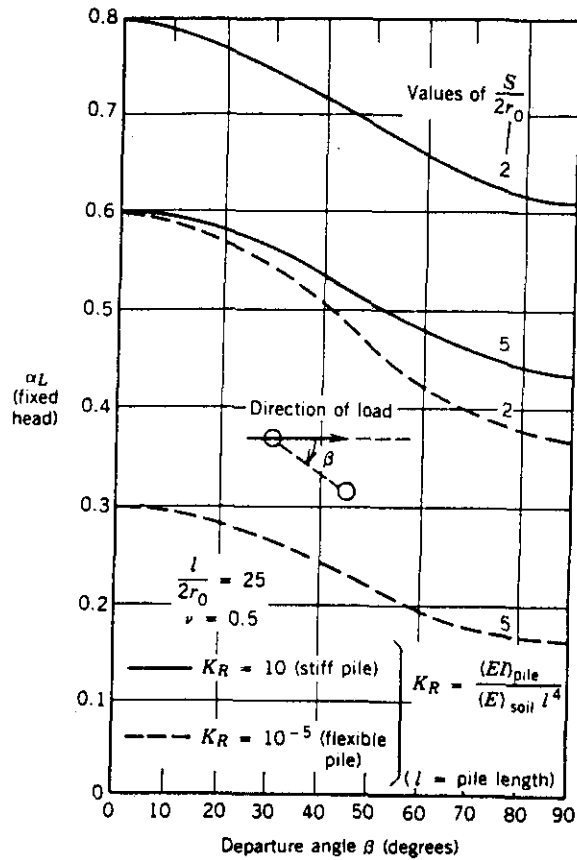
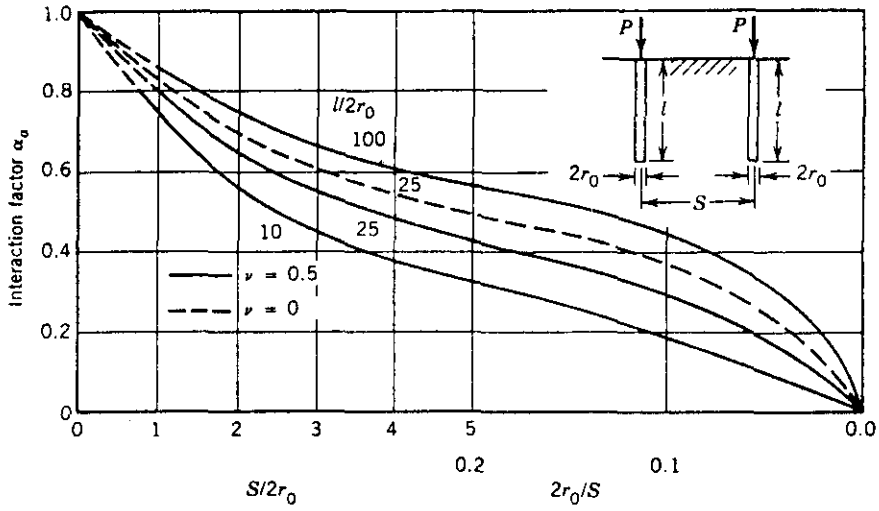


Fig.1 말뚝에 대한 변위 상호작용계수

가정하였는데, 지반층의 고유주파수는 전단파(S-Wave)의 경우 3.5Hz, 압축파(P-Wave)의 경우 8.5Hz 이다.

말뚝은 320mm 직경의 강관말뚝에 콘크리트를 채운 것인데, 유사 Young계수는 720 t/cm²이고, 단위중량은 2.8t/m³으로, 감쇄비는 3%로 가정하였다.

말뚝기초에 대한 유한요소 해석은 말뚝간격이 말뚝직경의 2배와 5배인 경우에 대해 지진해석에서 관심이 많은 0-10Hz 주파수 범위에 대해 주파수영역 해석을 실시하였으며, 말뚝-지반 시스템은 가상(Pseudo) 3-D 유한요소법을 이용하여 Fig.2에서 처럼 반 무한지반을 암반, 등가원형기초 밑의 원통형지반 및 외부지반(Far Field)으로 구분하고, 중심부지반은 환상(Toroidal)의 유한요소로 나누어서 수직, 수평 및 방사상 방향 변위를 모델화 하였으며, (1.5) 외부지반은 Consistent Lateral 경계요소로 대체하여 중심 원통형부분 가장자리에 결합시켰다. 격자형 말뚝배치는 약축에 대한 회전단면 2 차모멘트가 같은 원형배치로 치환하였으며(Fig.3), 지반에 대한 유한요소 크기는 말뚝 위치를 고려하여 결정함으로서 지반강성행렬에 말뚝강성행렬을 추가하여 전체강성행렬을 구성할 수 있게 하였다.(6) 이때 말뚝강성은 탄성한계내에 있는 것으로 가정하였으며, 말뚝기초강성행렬은 기초 중심부에서 가장자리 방향으로 결합하면서 행렬을 줄여 나가, 마지막 단계에서 Lateral 경계행렬을 추가 결합하였다. 말뚝기초 동적강성은 각 주파수에서 말뚝기초 상부에 수평, 수직 및 회전방향으로 단위하중이나 단위회전각을 가하여 구하였다.

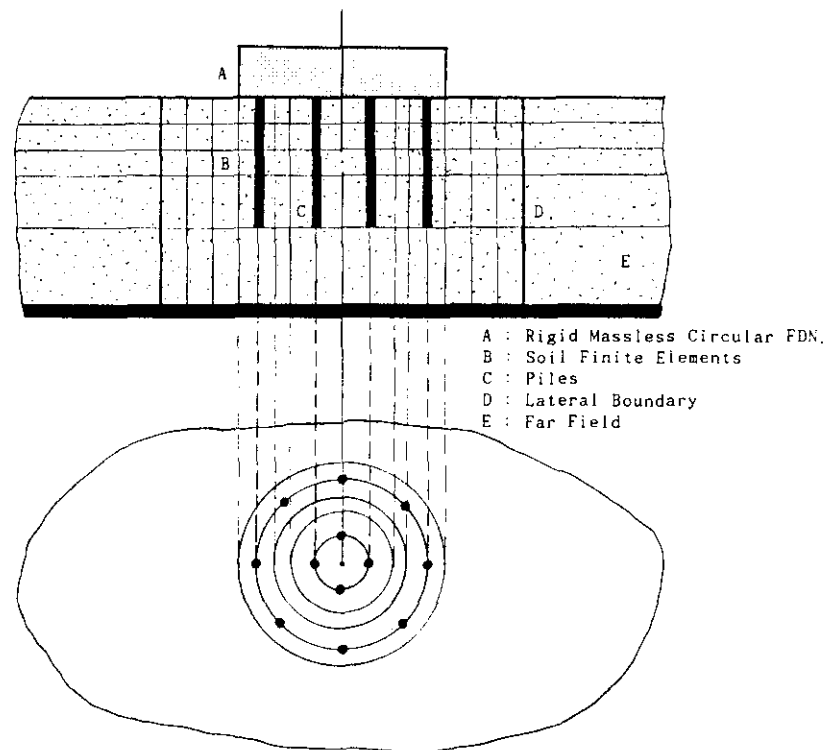


Fig. 2 무리말뚝기초-지반 모델링

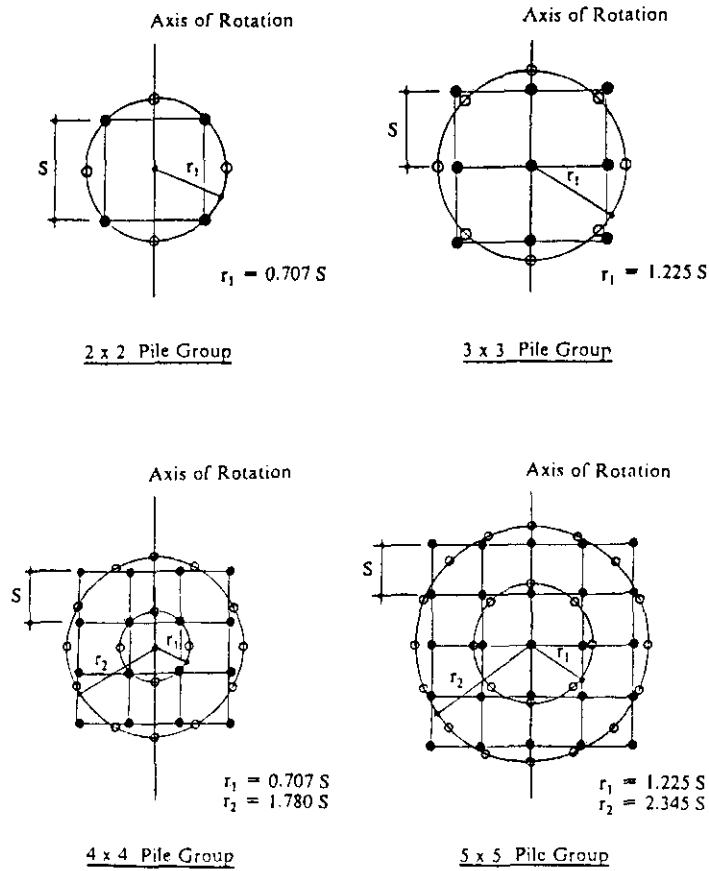


Fig. 3 격자말뚝배열의 원형말뚝배열 치환

5.1 수평운동에 대한 무리말뚝계수

Fig. 4에서는 선단지지 말뚝기초가 수평방향하중을 받을 때 주파수에 따른 무리말뚝계수의 변화를 보여주고 있는데, 강성 무리말뚝계수(Real Part)는 주파수에 거의 무관하게 변화하면서 말뚝간격이 직경의 2배이고 무리말뚝 규모가 2x2일때 0.48에서 5x5일때 0.18까지 변하고, 말뚝간격이 말뚝직경의 5배일때는 0.79에서 0.35까지 변하고 있어 말뚝 배열간격이 좁고 말뚝기초 규모가 클 경우에는 기초강성이 무려 82%까지 감소하는데 이것은 말뚝배치의 중요성과 무리말뚝 영향의 중요성을 보여주는 것이다. 또 감쇄비 무리말뚝계수(Imaginary Part)는 지반 고유주파수 3.5Hz 이하에서는 주파수에 관계없이 거의 일정한데 이는 시스템 내에 Hysteretic 감쇄만이 작용한다는 것을 나타내는 것으로 말뚝간격이 말뚝직경의 5배이고 말뚝규모가 2x2일때 0.95에서 말뚝간격이 말뚝직경의 2배이고 말뚝규모가 5x5일때는 0.22로 말뚝간격이 좁고 말뚝기초 규모가 큰 경우에 감쇄비가 78%까지 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 고유주파수 3.5Hz 이상에서는 복사감쇄(Radiation Damping) 영향으로 유효감쇄비가 증가하여 말뚝간격이 넓은 경우 감쇄비가 50%이상 증가하지만 말뚝간격이 좁은 경우에는 아직도 감소율이 40%나 된다.

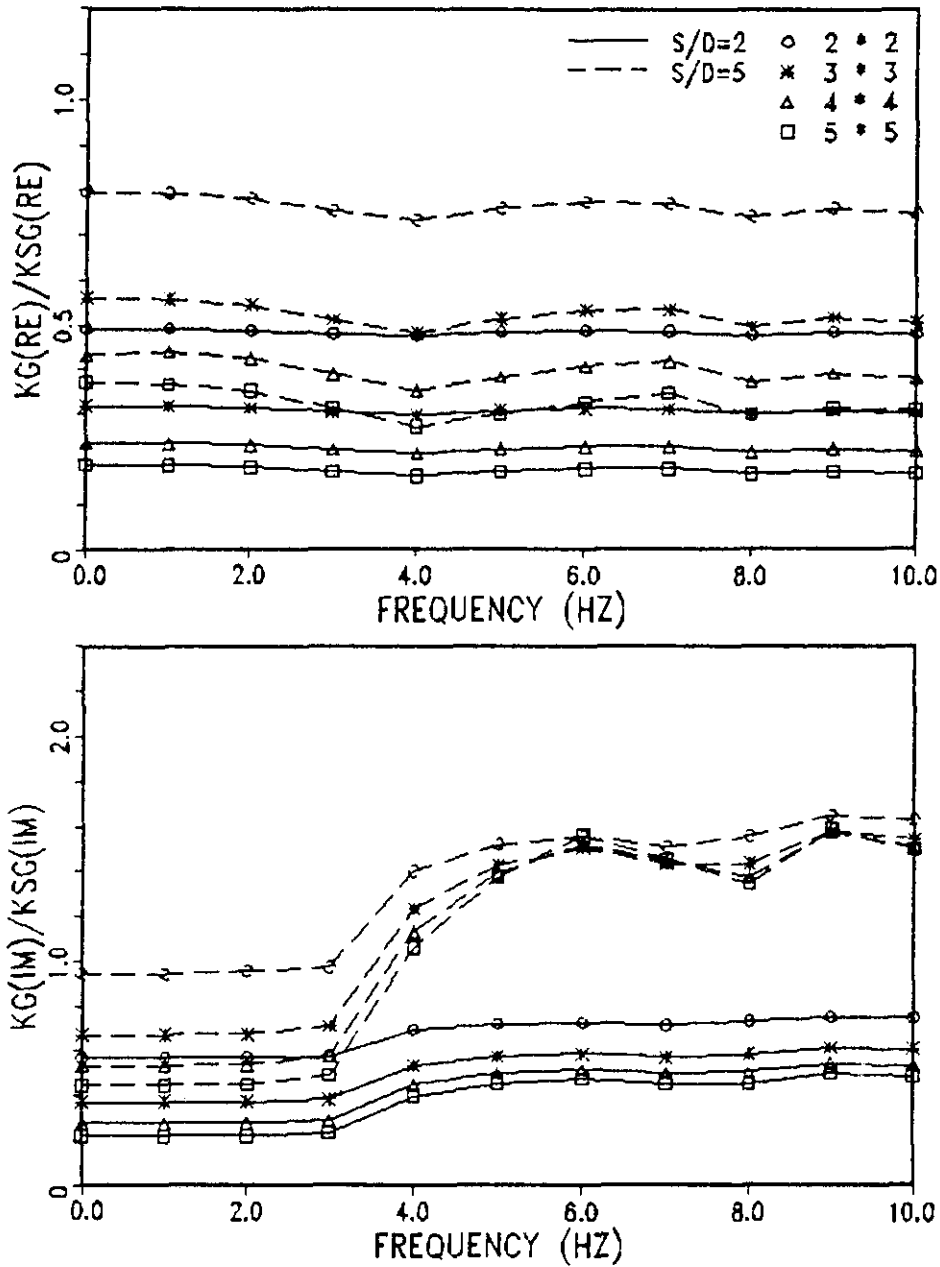


Fig. 4 선단지지말뚝의 수평방향 무리말뚝계수 변화

5.2 수직운동에 대한 무리말뚝계수

선단지지 무리말뚝기초의 수직방향 강성 및 감쇄비에 대한 무리말뚝계수의 주파수에 따른 변화가 Fig. 5에 나타나 있다. 강성 무리말뚝계수는 말뚝 간격이 직경의 2배일 때 지반층의 압축파에 대한 고유주파수 근처인 8Hz 에서 약간의 기복을 보이지만 거의 일정한 양상을 보이고 있으며, 말뚝간격이 직경의 5배일 때는 9Hz 근처에서 약간의 감

소현상을 보이는데 전체적인 강성 감소는 대략 23%에서 50%에 이르고 있다. 여기서 흥미로운 현상은 2x2, 3x3 무리말뚝의 경우 8Hz 이상에서 말뚝간격에 관계없이 무리말뚝계수가 거의 같아졌으며, 4x4, 5x5 무리말뚝의 경우는 말뚝간격이 좁을때보다 넓을 때 무리말뚝계수가 더 작아지는 것이다. 감쇄비 무리말뚝계수의 경우 계수가 5Hz 이하에서는 거의 일정한데 이는 수평운동에서 처럼 Hysteretic 감쇄만이 시스템에 작용하기 때문이며, 8Hz 근처에서 감쇄비가 약간 감소하다 다시 증가하는 현상은 복사감쇄

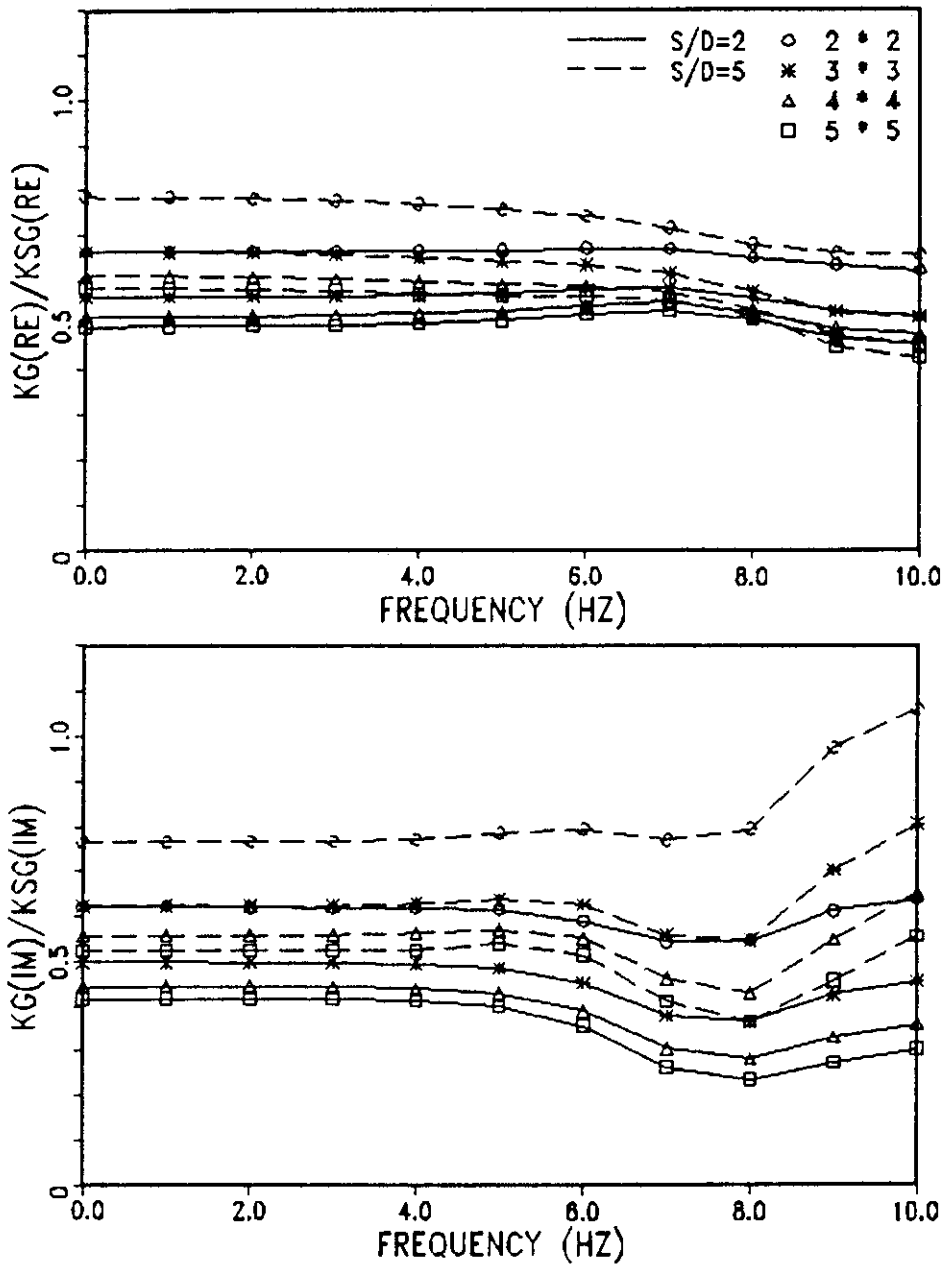


Fig. 5 선단지지말뚝의 수직방향 무리말뚝계수 변화

에 의한 유효감쇄비가 증가하기 때문인데 말뚝간격이 넓고 말뚝기초 규모가 작은 경우 상당한 정도까지 증가하지만, 전체적인 감쇄비 감소는 대략 25%에서 59%이다.

5.3 회전운동에 대한 무리말뚝계수

Fig. 6은 선단지지 무리말뚝의 회전운동시 강성 및 감쇄비 무리말뚝계수에 대한 주파

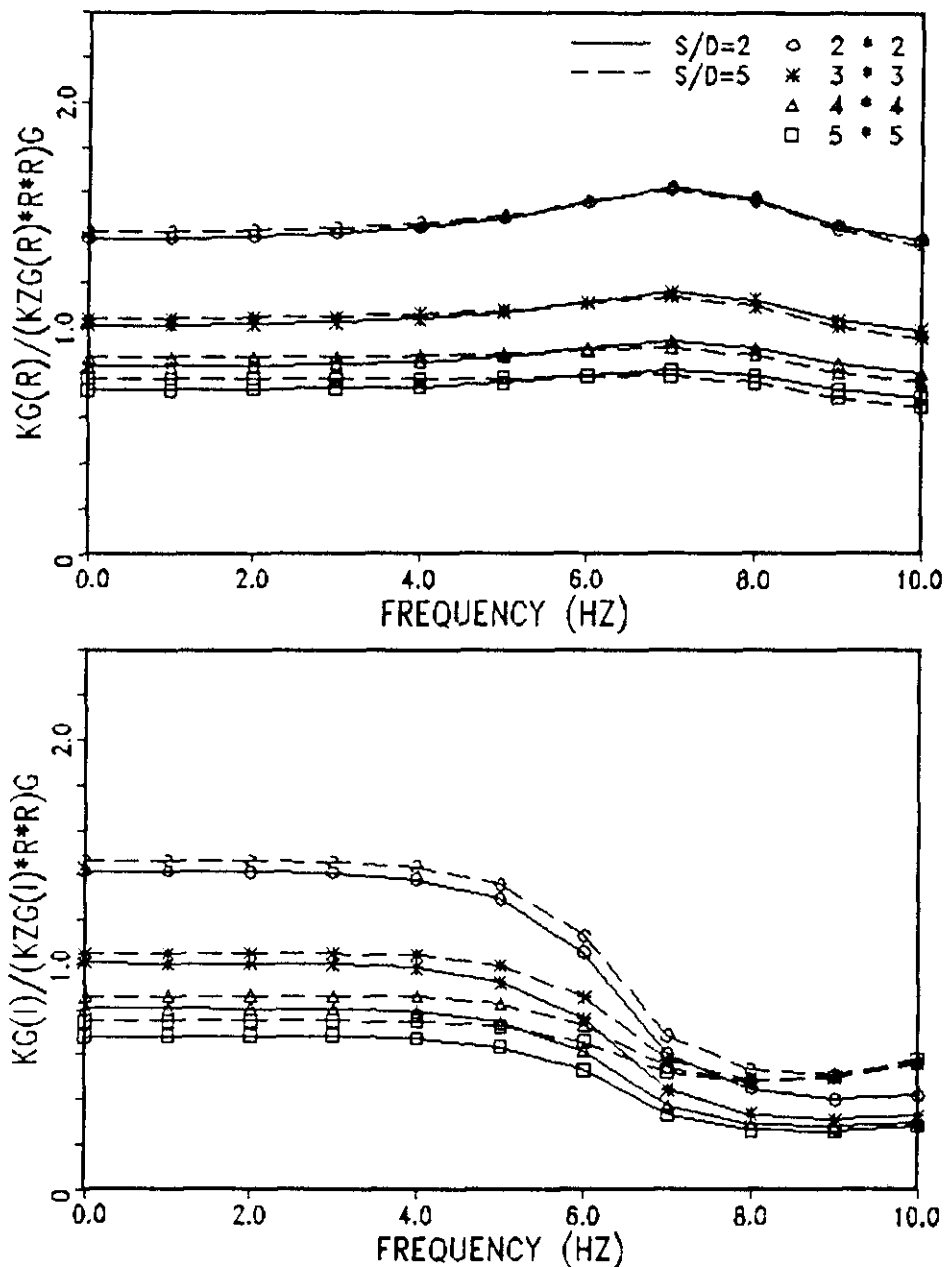


Fig. 6 선단지지말뚝의 회전방향 무리말뚝계수 변화

수영역 변화를 보여주고 있다. 강성 무리말뚝계수는 7Hz 근처에서 약간의 공진현상을 보이지만 대체로 말뚝간격과 주파수에 무관하게 일정한데, 2x2무리말뚝의 경우는 강성이 40%정도 증가하고, 5x5 무리말뚝의 경우는 28%정도 감소하고 있다. 감쇄비 무리말뚝계수도 간격에 따른 차이는 크지 않지만 주파수에 따른 변화는 매우 심하여 6Hz까지는 강성 무리말뚝계수와 비슷한 값을 보이면서 감쇄비 변화가 44%증가에서 32%감소까지 이르고, 6Hz이상에서는 큰 감소현상을 보여 감쇄폭이 48%에서 74%에 이르고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 무리말뚝 영향의 중요성에 대하여 무리말뚝기초의 무리말뚝계수에 대한 조사를 통하여 알아보았다. 연구결과를 보면 말뚝-지반-말뚝 상호작용으로 인한 무리말뚝기초의 강성 및 감쇄비 변화가 매우 커서 수평운동의 경우 강성이 82%까지 감소하는가 하면 감쇄비는 78% 감소에서 50% 증가까지 변화를 보이고 있고, 수직운동의 경우 강성 감소가 50%, 감쇄비 감소가 59%에 이르고 있으며, 회전운동 경우도 강성 감소가 최고 40%, 감쇄비 변화가 44% 증가에서 74% 감소까지 큰 폭을 보이고 있다. 이러한 무리말뚝기초의 강성 및 감쇄비 변화는 말뚝간격과 무리말뚝 규모에 따라 크게 좌우 될 뿐만 아니라 주파수 내용에 따라서도 달라지기 때문에 무리말뚝기초 설계에 그 영향이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Kim Yong-Seok, "Dynamic Response of Structures on Pile Foundations," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987.
2. Kim Yong-Seok, "Interpretation of Vertical Vibration Tests on Small Scale piles," ASCE Geotechnical Special Publication No.11, 1987.
3. Nozoe H. & Fukusumi T., "A Simplified Estimation of Impedances for Pile Groups Under Vertical and Horizontal Vibrations," Kobe Univ., Pro. of the Tenth World Conference on Earthquake Eng., 1992.
4. Prakash S. & Puri V. K., "Foundations for Machines : Analysis and Design," Wiley-Interscience Publication, 1988.
5. Roésset J.M., "Dynamic stiffness of pile groups : Analysis and design of pile foundations," ASCE, 1984.
6. Tyson T.R. & Kausel E., "Dynamic analysis of axisymmetric pile groups," Dept. of civil engineering, M.I.T., 1983.
7. Yahata K. & et al, "Full Scale Vibration Test on Pile-Structure and Analysis," Kajima Corp., Pro. of the Tenth World Conference on Earthquake Eng., 1992