

**비선형 지반특성이 수평방향운동을 받는 기초지반체계의
동적강성에 미치는 영향**
**Effects of Nonlinear Soil Characteristics
on the Dynamic Stiffnesses of a Foundation-Soil System
Excited with the Horizontal Motion**

김 용 석*
KIM, YONG-SEOK

Abstract

As structure-soil interaction analysis for the seismic analysis of structures requires a nonlinear analysis of a structure-soil system considering the inelastic characteristics of soil layers, nonlinear analyses of the foundation-soil system with the horizontal excitation were performed considering the nonlinear soil conditions for the nonlinear seismic analysis of structures. Stiff soil profile of SD and soft soil profile of SE specified in UBC were considered for the soil layers of a foundation, and Ramberg-Osgood model was assumed for the nonlinear characteristics of soil layers. Studies on the changes of dynamic stiffnesses and damping ratios of surface and embedded foundations depending on foundation size, soil layer depth and piles were performed to investigate the effects of the nonlinear soil layer on the horizontal and rotational dynamic stiffnesses and damping ratios of the foundation-soil system. According to the study results, nonlinear properties of a soil layer decreased horizontal and rotational linear stiffnesses and increased damping ratios largely. Effects of foundation size, soil layer depth and piles were also significant, suggesting the necessity of nonlinear seismic analyses of structures.

1. 서론

최근 구조물-지반 상호작용 지진해석 분야에서도 비선형 해석에 대한 필요성이 요구되고 있고, 고성능 전산기의 출현으로 복잡한 지반-구조물에 대한 비선형 해석이 더욱 용이하게 되어 구조물의 지진해석도 보다 합리적으로 이루어 질 수 있게 되었다. 특히 지반에 대한 비선형 해석은 복잡하고 다양한 지반의 특성상 많은 문제점이 있어 활발하게 이루어지지 못하였으나 앞으로 극복되어야 할 난제라는 측면에서 계속 꾸준히 추진되어야 할 과제이다. 또 대부분의 내진설계 기준에서 지반의 비선형 특성을 아직 반영하지 않고 있어 구조물의 내진안전에 대한 신뢰성이 확보되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 구조물의 비선형 내진해석을 위한 기본으로 기초-지반체계에 대한 수평방향 비선형 해석을 비선형 토질조건을 고려하여 수행하고 기초지반의 동적강성에 미치는 영향을 파악하였다. 연구는 비선형 토질조건이 기초지반의 수평 및 회전 방향 비선형 강성에 미치는 영향을 분석하기 위해 선형 강성과 비교하였는데, 기초는 얕은기초와 문힌기초를 고려하였으며 기초크기, 기초지반 깊이, 말뚝에 따른 영향을 조사하였다.

* 정회원·목포대학교 건축공학과 부교수

2. 기초지반 모델링

기초지반의 수평방향 비선형 동적강성 특성을 파악하기 위하여 무한 강성의 무질량 기초와 지반에 대한 유사3차원 유한요소해석을 주파수영역에서 수행하였는데, 주파수 영역은 구조물 지진 해석에서 가장 중요한 0-5Hz에서 실시하였다. ⁽¹⁾⁽²⁾

지반은 암반이나 상대적으로 매우 단단한 지반 위에 놓인 균질한 토질로 이루어진 것으로 가정하였으며, 지반의 역학적 특성은 비선형 등방성 탄성체로써 점성을 띤 것으로 가정하였고, 비선형 토질은 다음과 같은 Ramberg-Osgood 모델로 가정하였다.

$$\frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{\tau}{\tau_y} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^{r-1} \right) \quad (1)$$

위 식에서 r 을 2로 가정하여 정리하면, ⁽³⁾

$$G = \frac{2 \cdot G_0}{1 + \sqrt{1 + 4\alpha \frac{\gamma}{\gamma_y}}} \quad (2)$$

$$D = \frac{2}{3\pi} \frac{\sqrt{1 + 4\alpha \frac{\gamma}{\gamma_y}} - 1}{\sqrt{1 + 4\alpha \frac{\gamma}{\gamma_y}} + 1} \quad (3)$$

인데, 여기서 G : 전단변형계수 D : 감쇠비
 γ : 전단변형 γ_y : 항복전단변형
 τ : 전단응력 τ_y : 항복전단응력

이고, 본 연구에서 α 는 0.025, γ_y 는 5×10^{-5} 로 가정하였다.

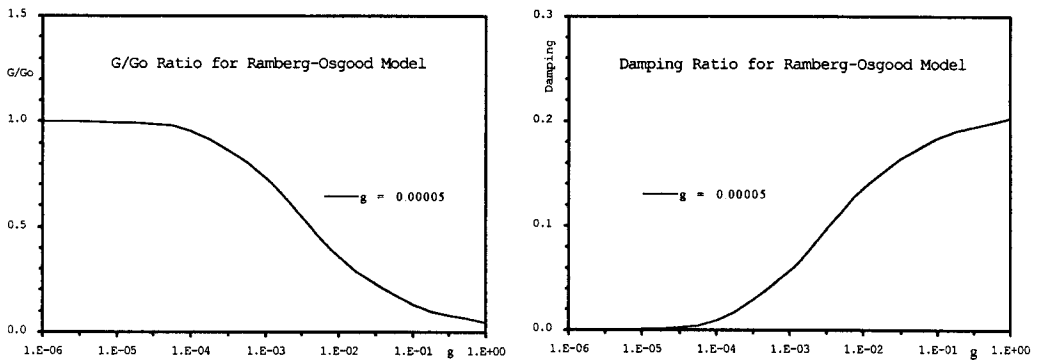


Fig. 1 Ramberg-Osgood Soil Model

지반은 UBC분류에 따른 Soil Profile SD와 SE인 지반(전단파속도 180 및 120 m/sec)을 고려하였으며, ⁽⁴⁾ 각 지반의 단위중량은 1.9 및 1.6 t/m³로, Poisson비와 감쇠비는 각각 0.3, 0.05로 가정하였는데, 각 지반의 개략적인 N치는 15 및 5로 보통지반 및 연약지반으로 분류할 수 있다.

또 말뚝기초의 경우, 말뚝은 선단지반 말뚝으로 말뚝의 직경은 35cm이고, 탄성계수, 단위중량,

Poisson비 및 감쇠비는 각각 $210t/cm^2$, $2.4t/cm^3$, 0.25 및 0.05로 가정하였으며, 말뚝기초는 SE지반에 고려하였는데, 무리말뚝 갯수는 대형기초($R=25m$)의 경우는 1089(33x33)개를 사용하였다.

기초지반 깊이(H)는 15m와 30m인 경우를 고려하였으며, 기초근입깊이(E)는 0m와 10m에 대하여 연구를 수행하였다.

기초지반의 비선형 강성에 대한 특성연구는 무한강성 무질량기초에 1kN 수평력과 25kN-m 모멘트를 가하여 선형 강성을, $2.0 \times 10^5 kN$ 수평력과 $5.0 \times 10^6 kN-m$ 모멘트를 가하여 비선형 강성을 구하고, 그 결과를 비교 분석하여 수행하였다. ⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

3. 기초크기 영향

기초크기가 얇은기초와 물힌기초의 수평 및 회전 방향 비선형 강성에 미치는 영향을 연구하기 위해 지반은 보통지반(Soil Profile SD)으로 깊이가 30m정도인 것을 고려하였고, 물힌기초는 10m정도 물힌 것으로 가정하였으며, 기초크기는 반경 15m와 25m인 중형 및 대형 기초를 고려하였다.

Fig. 2와 3에 나타난 연구결과를 살펴보면, 얇은기초의 수평 및 회전 방향 비선형 강성(Real)의 주파수에 따른 변화는 선형 강성과 유사하였지만 크기는 상당히 작아졌는데, 중형기초 강성이 대형기초 강성보다 지반의 비선형 영향을 더 받았다. 얇은기초의 비선형 감쇠(Imag)도 선형 감쇠특성과 유사한 변화를 보여 저주파 영역에서는 비선형 재료감쇠가 약간 증가하고 고주파 영역에서 방사감쇠는 거의 변화가 없었는데, 대형기초보다 중형기초의 경우에 비선형 재료감쇠가 더 크게 증가하고 비선형 방사감쇠의 변화도 크게 나타났다. 물힌기초의 비선형 강성도 얇은기초의 비선형 강성과 주파수 특성 및 크기에서 매우 유사하게 나타났다.

기초크기에 따른 기초지반의 비선형 강성 분석결과에 의하면, 기초근입 깊이가 기초지반 비선형 강성에 미치는 영향이 무시할 정도여서 얇은기초나 물힌기초 모두 기초크기가 작은 경우에 기초지반의 수평 및 회전 방향 강성에 지반의 비선형 특성이 더 크게 나타났으나, 감쇠비는 기초크기를 클 때 비선형 재료감쇠가 더 크게 증가하였고 비선형 방사감쇠 변화도 더 크게 나타났다.

4. 지반깊이 영향

기초지반 깊이가 얇은기초와 물힌기초의 수평 및 회전 비선형 강성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 크기의 영향이 큰 중형기초($R=15m$)의 지반에 대해 비선형 해석을 수행하였다. 기초지반은 보통지반(Soil Profile SD)을 고려하였고, 물힌기초의 근입깊이는 10m를 가정하였으며, 지반깊이는 15m와 30m를 고려하였다.

Fig. 4에 나타난 조사결과에 의하면, 얇은기초의 경우 지반깊이가 얇을때($H=15m$) 기초지반의 비선형 특성때문에 수평 및 회전 방향 강성은 더 크게 감소하고 감쇠비는 더 크게 증가하였다. 또 Fig. 5에 나타난 물힌기초의 수평강성은 지반깊이가 얇을 때 회전강성은 지반깊이가 깊을 때 약간 더 감소하였고, 수평 및 회전 방향 감쇠비는 모두 지반깊이가 얇을 때 더 크게 증가하였다.

기초지반 비선형 강성에 지반깊이가 미치는 영향에 대한 연구결과, 지반깊이가 얇을 때 물힌기초 회전강성을 제외한 강성은 더 감소하고 수평 및 회전 감쇠비는 더 증가하는 것으로 나타났다.

5. 말뚝기초 영향

기초지반 수평 및 회전 비선형 강성에 말뚝기초가 미치는 영향을 연구하기 위해 깊이 30m 지반 위에 놓인 반경 25m의 대형 얇은기초와 물힌기초에 대한 강성 비선형 해석을 수행하였다. 기초지반은 말뚝기초가 필요한 연약지반(Soil Profile SE)을 고려하였으며, 물힌기초는 10m정도 근입된 것으로 가정하였다.

대형 얇은기초의 수평 방향 강성 및 감쇠비 비선형 특성은 선형 수평 강성 및 감쇠비와 유사하게 말뚝의 영향이 고주파영역에서는 약간 있지만 무시할 수 있는 것으로 판단되었고, 회전강성 비선형 특성도 선형강성 특성과 유사하였는데 말뚝 위에 세워진 얇은기초의 회전강성은 지반강성 영향이 미미하여 대부분 강성이 말뚝강성이어서 비선형 특성은 무시할 정도였으며, 회전 감쇠비

에서 지반의 비선형 특성이 저주파영역에서 조금 나타났지만 감쇠비 증가는 대부분 말뚝의 재료 감쇠 영향인 것으로 판단되었다.

대형 문힌기초의 수평방향 비선형 강성은 기초지반의 비선형성 때문에 선형 강성보다 30%정도 작아졌으나 말뚝의 영향은 미미한 것으로 나타났고, 수평방향 비선형 감쇠비도 말뚝의 영향은 무시할 정도였다. 한편 회전방향 비선형 강성은 말뚝 유무와 상관없이 지반의 비선형성 때문에 선형 강성보다 30%정도 감소하였으나 말뚝기초의 회전방향 선형 및 비선형 강성의 경우 모두 말뚝 강성으로 인한 단순한 강성증가가 나타났고, 회전방향 비선형 감쇠비는 저주파영역에서 지반의 비선형 감쇠로 약간 증가하였으나 고주파영역에서는 비선형 특성이 거의 나타나지 않았는데 말뚝의 영향은 무시할 정도였다.

기초지반 수평 및 회전 방향 비선형 강성 및 감쇠비에 말뚝기초의 영향에 관한 연구결과, 수평 방향 강성 및 감쇠비의 경우 기초의 문힘과 무관하게 모두 말뚝의 영향이 미미한 것으로 나타났으나, 회전 강성의 경우 말뚝의 영향이 크고 지반 비선형 특성이 문힌기초의 경우에만 나타나는데, 말뚝이 없는 문힌기초일 때 비선형 지반 영향이 상대적으로 크게 나타났고, 회전 감쇠비는 얇은기초일 때 말뚝의 영향을 문힌기초일 때 비선형 지반 영향을 받았다.

6. 결론

비선형 특성을 갖는 지반이 수평방향 운동을 받는 얇은기초와 문힌기초의 수평 및 회전 방향 강성에 미치는 영향을 연구하기 위해 기초크기, 지반깊이 및 말뚝기초가 기초지반의 강성에 미치는 영향을 조사하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

기초크기가 기초지반의 수평 및 회전 방향 비선형 강성에 미치는 영향에 관한 연구에서 기초의 문힘과 거의 무관하게 수평 및 회전 방향 강성은 기초가 작을 때, 감쇠비는 기초가 클 때 지반의 비선형 특성이 크게 나타났다.

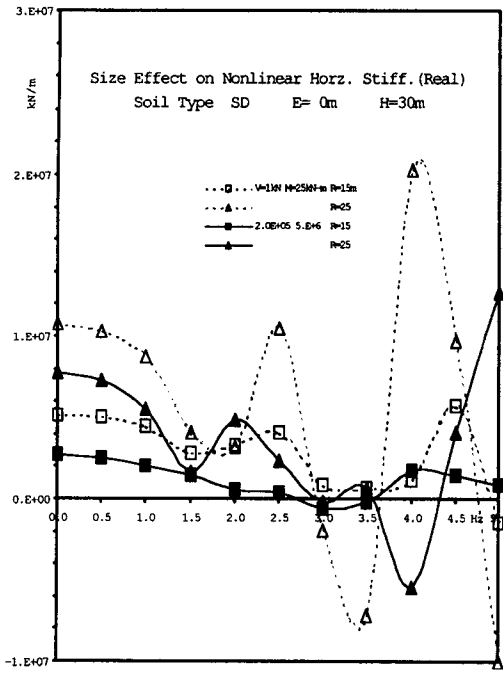
지반깊이와 지반의 비선형 특성에 관한 연구에서는 문힌기초의 회전강성이 지반이 깊을 때 더 크게 감소한 것을 제외하고 지반이 얇을 때 강성과 감쇠비는 더 크게 감소하거나 증가하였다.

말뚝이 기초지반의 수평 강성과 감쇠비에 미치는 영향은 미미하였으나, 회전강성에 미치는 영향은 상당한 것으로 나타났는데, 말뚝없는 문힌기초일 때 지반의 비선형 특성 영향을 상대적으로 더 크게 받았고, 회전감쇠비는 얇은기초일 때만 말뚝 영향이 있는 것으로 판단되었다.

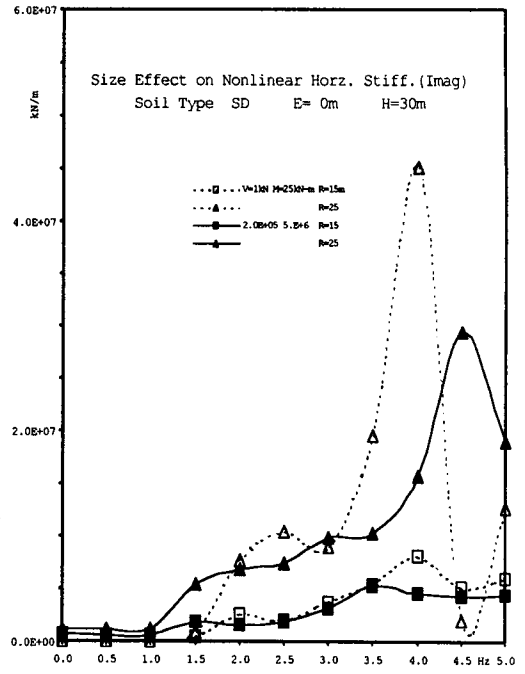
지반의 비선형 특성이 기초지반의 수평 및 회전 강성과 감쇠비에 미치는 영향을 종합하면, 비선형 강성과 감쇠비는 선형과 비교하여 강성은 크게 감소하고 감쇠비는 증가하였는데, 기초크기, 지반깊이, 말뚝유무에 따라서도 큰 영향을 받았다. 따라서 구조물 내진해석에 지반의 비선형 특성을 고려하는 것이 필수적이고 구조물의 비선형 거동에 대한 연구도 필요한 것으로 판단되었다.

참고문헌

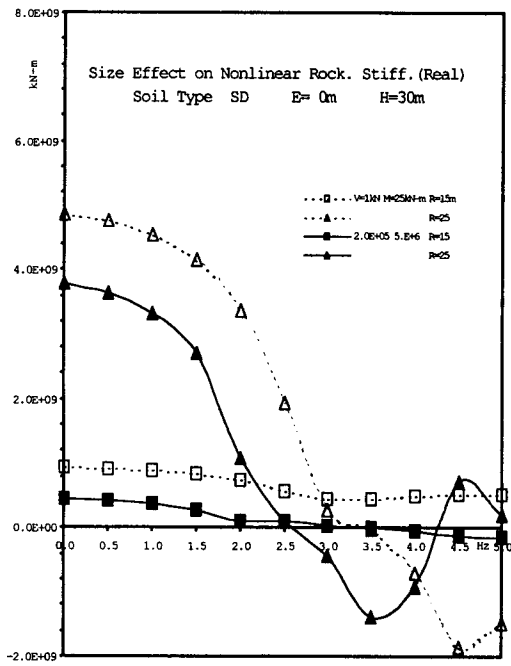
1. Kim Yong-Seok, "Dynamic Response of Structures on Pile Foundations", *Ph.D. Dissertation*, The University of Texas at Austin, 1987, pp.272.
2. 김용석, "반지하구조물 내진설계를 위한 지반거동," 전산구조공학회지 제1권 제2호, 1988, pp91-100.
3. Roesset, J. M., "A Review of Soil-Structure Interaction," Lawrence Livermore Laboratory, June 1980, 125pp.
4. International Conference of Building Officials, *Uniform Building Code*, California, USA, 1997, pp.2-9 - 2-38.
5. 김용석, "구조물 내진설계를 위한 기초지반체계 동특성에 관한 연구," 한국지진공학회논문집, 제1권, 제3호, Sept. 1997, pp1-10
6. Kim Yong-Seok, "Study on the Effects of the Characteristics of a Soil Layer on the Seismic Response of a High-rise Building", Reference T108-3, *Proceedings of Structural Engineers World Congress*, San Francisco, California, USA, July 19-23, 1998, pp.783.



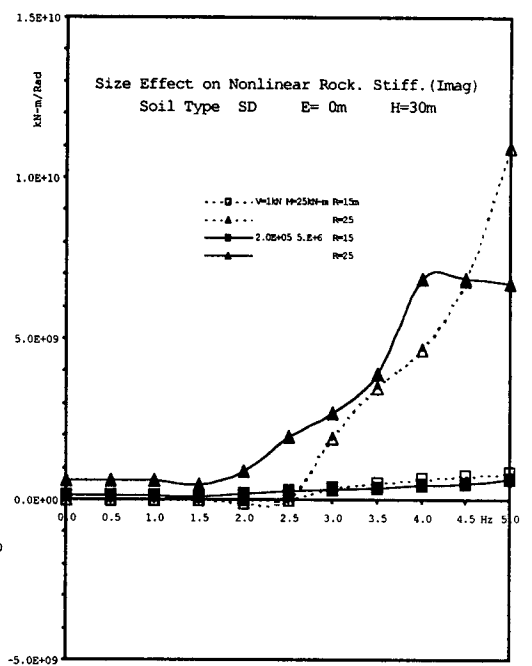
(a)



(b)

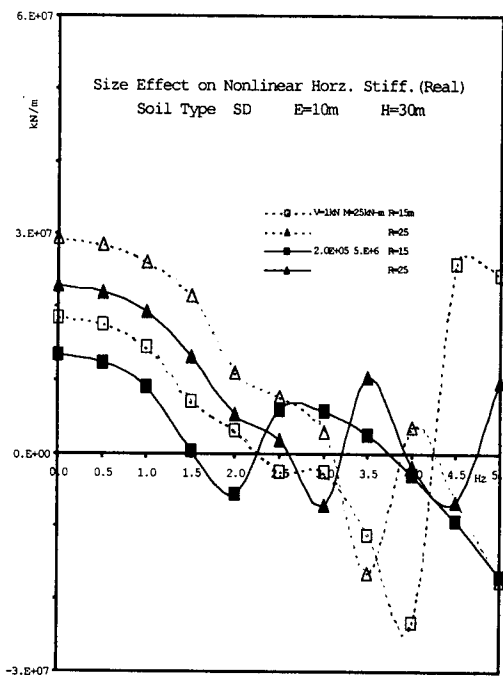


(c)

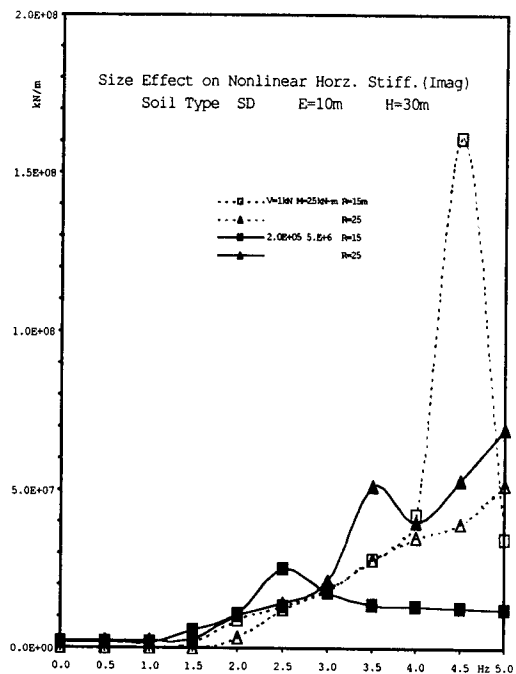


(d)

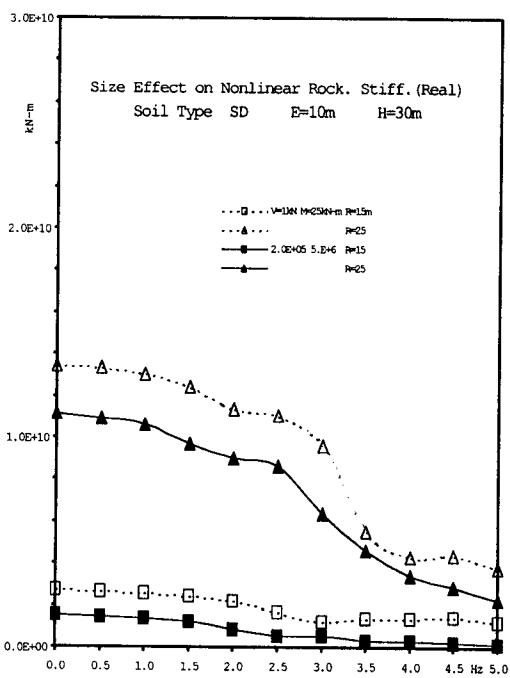
Fig. 2 FDN. Size Effect on Nonlinear Horiz. and Rock. Stiff. of Surface FDN.



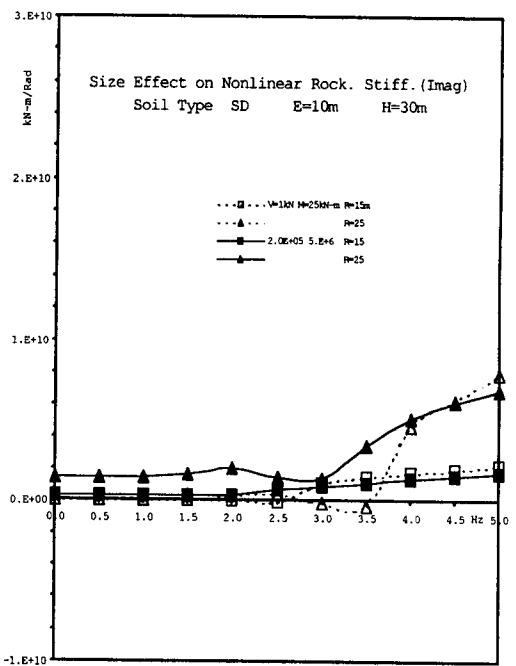
(a)



(b)

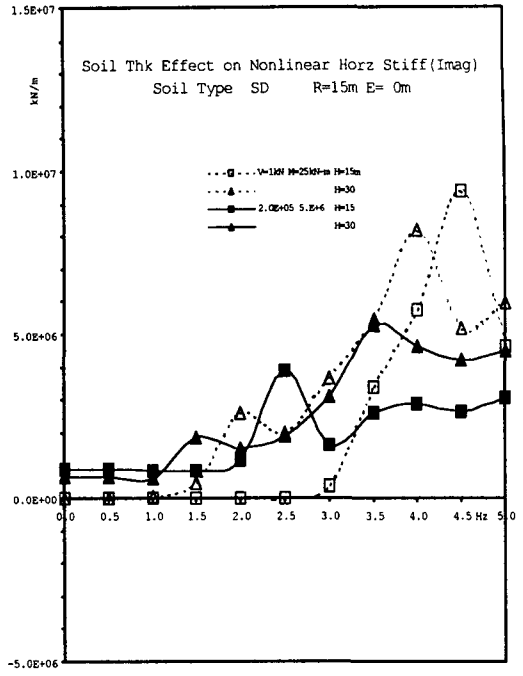
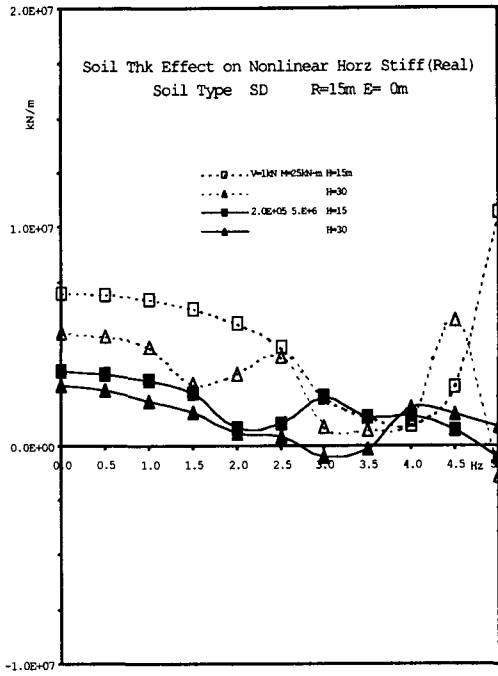


(c)



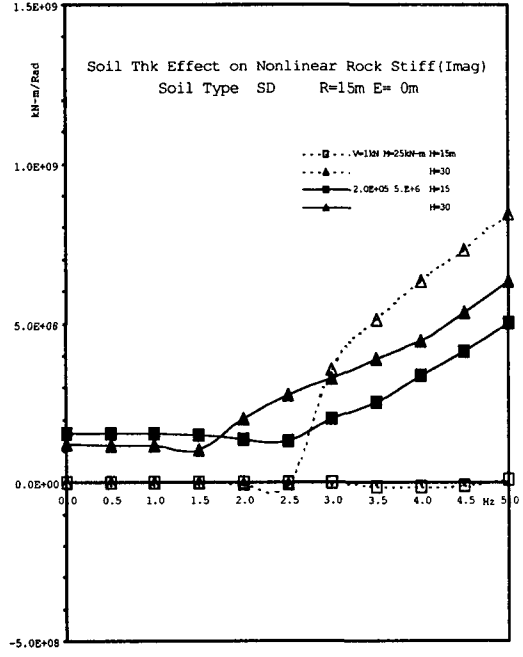
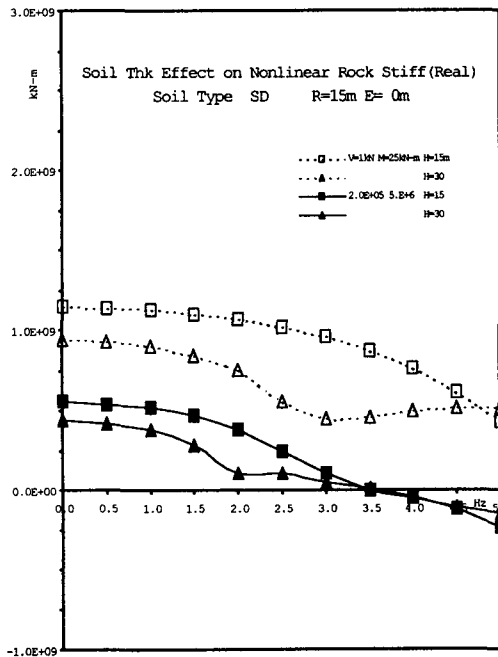
(d)

Fig. 3 FDN. Size Effect on Nonlinear Horiz. and Rock. Stiff. of Embedded FDN.



(a)

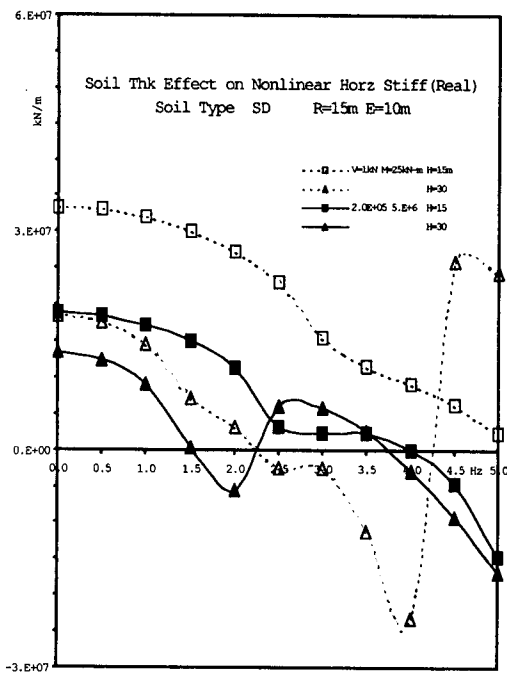
(b)



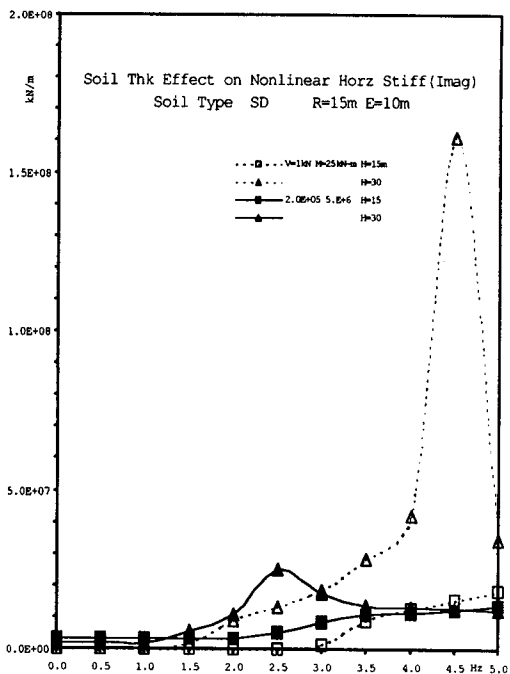
(c)

(d)

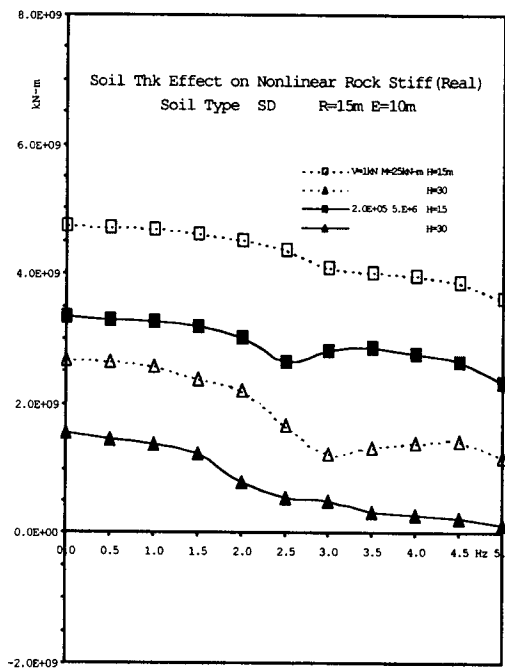
Fig. 4 Soil Thk. Effect on Nonlinear Horz. & Rock. Stiff. of Med. Surface FDN.



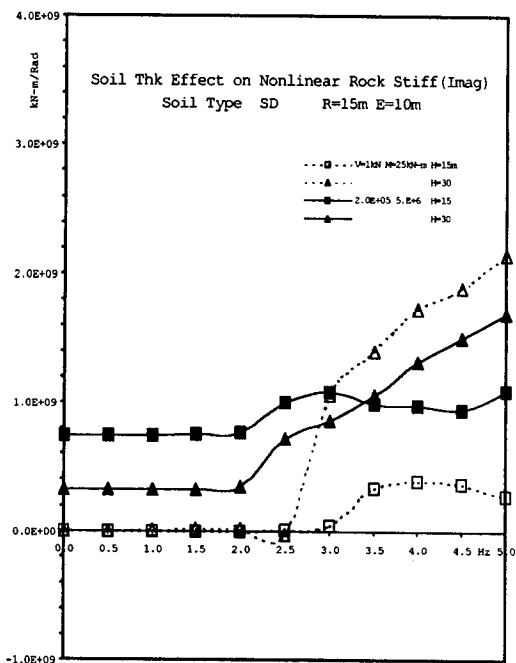
(a)



(b)

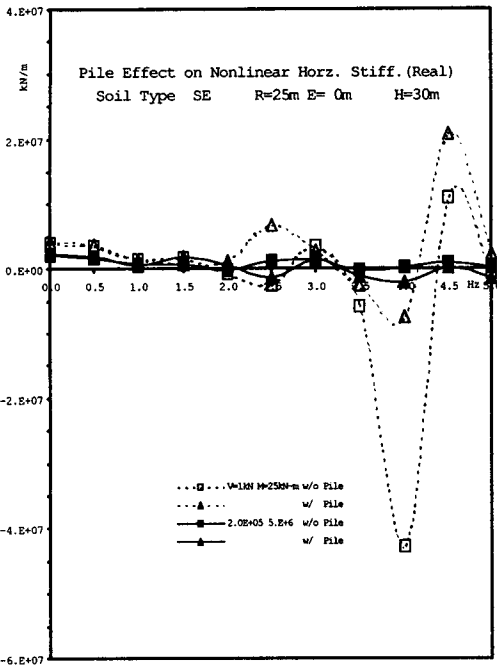


(c)

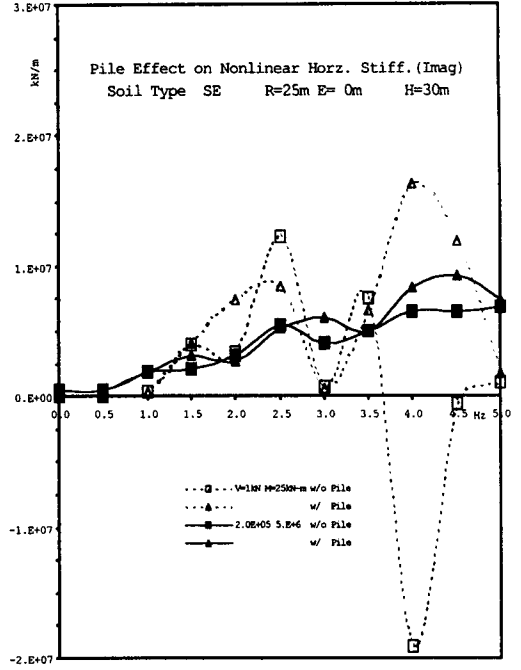


(d)

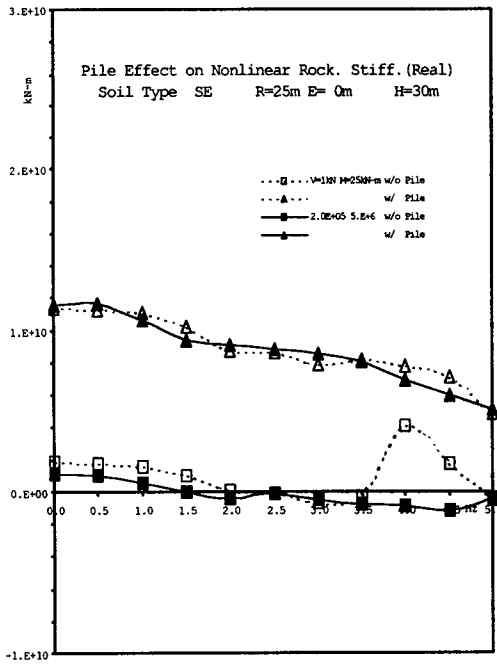
Fig. 5 Soil Thk. Effect on Nonlinear Horz. & Rock. Stiff. of Med. Embedded FDN.



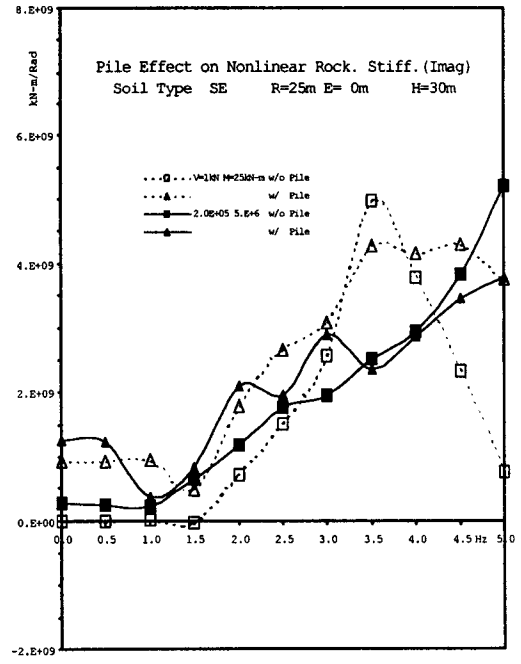
(a)



(b)

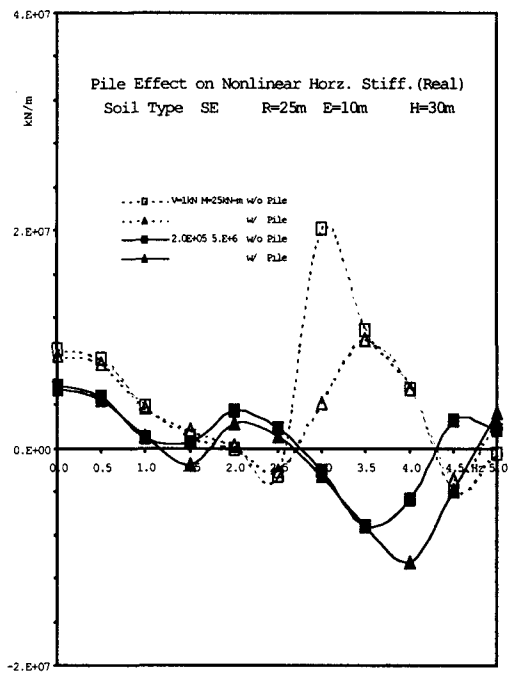


(c)

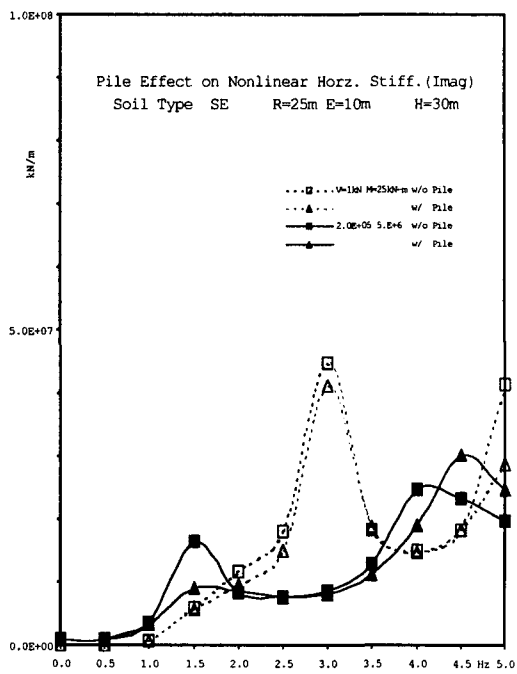


(d)

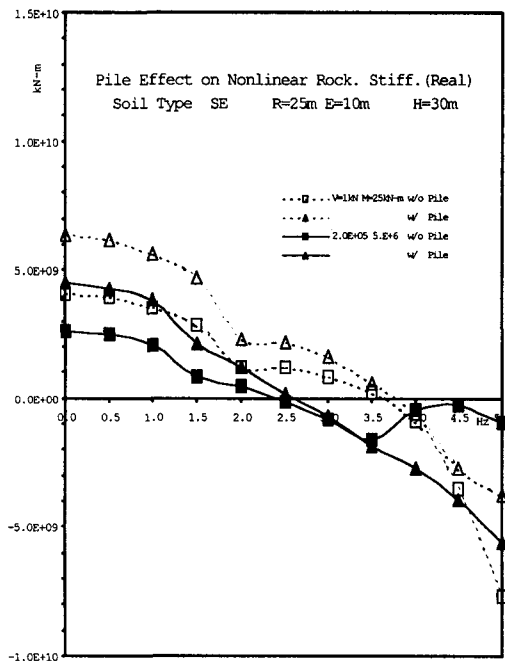
Fig. 6 Pile Effect on Nonlinear Horz. and Rock. Stiff. of Large Surface FDN.



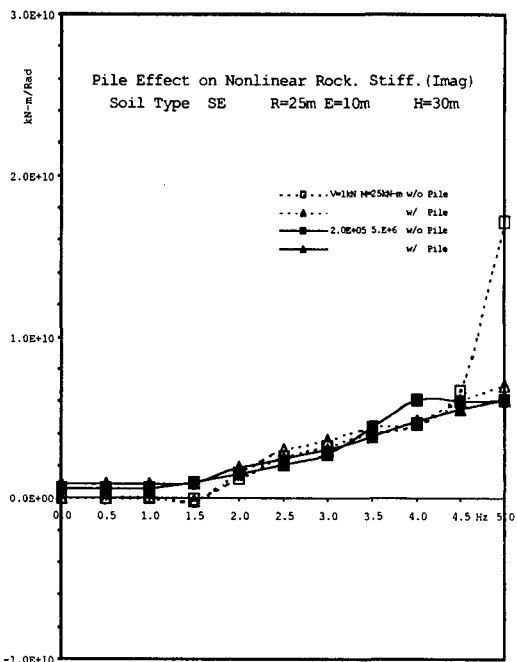
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7 Pile Effect on Nonlinear Horz. and Rock. Stiff. of Large Embedded FDN.