

지반의 비선형 특성이 수평방향 운동을 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

국문요약

구조물 지진해석을 위한 구조물-지반 상호작용 해석에서도 비선형 지반 특성을 고려한 비선형 해석이 요구되고 있어 구조물 비선형 지진해석을 위해 기초지반에 대한 수평방향 비선형 해석을 수행하였다. 기초지반은 UBC분류에서 규정한 보통지반인 S_D 지반과 연약지반인 S_E 지반을 고려하였고, 지반의 비선형 특성은 Ramberg-Osgood 모델을 이용하였다. 비선형 지반이 기초지반 수평 및 회전 동적 강성 및 감쇠비에 미치는 영향을 조사하기 위하여 얇은기초와 묻힌기초에 대해 기초크기, 지반깊이 및 말뚝유무에 따른 동적 강성 및 감쇠비 변화를 조사하였는데, 지반의 비선형 특성이 기초지반의 선형 수평 및 회전 강성과 감쇠비를 크게 감소 또는 증가시키는 것으로 나타났으며, 기초크기, 지반깊이 및 말뚝유무의 영향도 큰 것으로 나타나 구조물 지진해석시 기초크기, 지반깊이 및 말뚝유무와 함께 지반의 비선형성도 고려하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

주요어 : 구조물-지반 상호작용, 비선형 해석, 묻힌기초, 말뚝

ABSTRACT

Structure-soil interaction analysis for the seismic analysis of structures requires a nonlinear analysis of a foundation-soil system considering the inelastic characteristics of soil layers. Nonlinear analyses of a foundation-soil system with the horizontal excitation were performed taking into account nonlinear soil conditions. Stiff and soft soil profiles of S_D and S_E specified in UBC were considered for the soil layers, and Ramberg-Osgood model was utilized for the nonlinear characteristics of soil layers. Changes of dynamic stiffnesses and damping ratios of surface and embedded foundations depending on foundation size, soil layer thickness and pile group were studied to investigate the effects of a nonlinear soil layer on horizontal and rotational dynamic stiffnesses and damping ratios of a foundation system. Study result showed that nonlinear shear modulus and damping ratio of a soil layer decreased linear horizontal and rotational stiffnesses, and increased damping ratios much. Effects of foundation size, soil layer thickness and pile group were also significant on the nonlinear dynamic stiffnesses of a foundation system, suggesting the necessity of nonlinear seismic analysis of structures.

Key words : structure-soil interaction, nonlinear analysis, embedded foundations, piles

1. 서 론

최근 구조물-지반 상호작용 지진해석 분야에

서도 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

* 정회원 목포대학교 건축공학과 부교수
본 논문에 대한 트리를 2000년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다

많은 문제점이 있어 활발하게 이루어지지 못하였으나 앞으로 극복되어야 할 난제라는 측면에서 계속 꾸준히 추진되어야 할 과제이다. 또한, UBC 등 대부분의 내진설계 기준에서 지반의 비선형 특성을 아직 반영하지 않고 있어 구조물의 내진안전에 대한 신뢰성이 확보되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 구조물의 비선형 지진해석을 위한 기본으로 기초-지반체계에 대한 수평방향 비선형 해석을 지반의 비선형 전단탄성계수와 감쇠비를 고려하여 수행하고 기초지반의 동적감성에 미치는 영향을 파악하였다. 연구는 비선형 토질조건이 기초지반의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 영향을 분석하기 위해 선형 강성과 비교하였는데, 기초는 알은기초와 문힌기초를 고려하였으며, 기초크기, 기초지반깊이, 말뚝유무에 따른 영향을 조사하였다.

2. 기초지반 모델링

기초지반의 수평방향 비선형 동적강성 특성을 파악하기 위하여 무한강성의 무질량 기초와 지반에 대한 유사3차원 유한요소해석을 구조물-지반 상호작용해석을 위해 개발한 프로그램(DAOF5)으로 주파수영역에서 수행하였는데, 주파수영역은 구조물 지진해석에서 가장 중요한 0-5Hz에서 실시하였다.^{(1),(2)}

지반은 연구를 위해 암반이나 상대적으로 매우

단단한 지반 위에 놓인 균질한 토질을 고려하였으며, 지반의 역학적 특성은 비선형 등방성 탄성체로써 점성을 띤 것으로 가정하였고, 비선형 토질 구성방정식은 다음과 같은 Ramberg-Osgood 모델을 이용하였다(Fig. 1 참조).

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

위 식의 단순화를 위해 토질시험 결과에 따라 결정되는 계수 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

γ : 전단변형

γ_y : 항복전단변형

τ : 전단응력

τ_y : 항복전단응력

α : 시험 계수

G : 전단탄성계수

G_0 : 초기전단탄성계수

D : 감쇠비

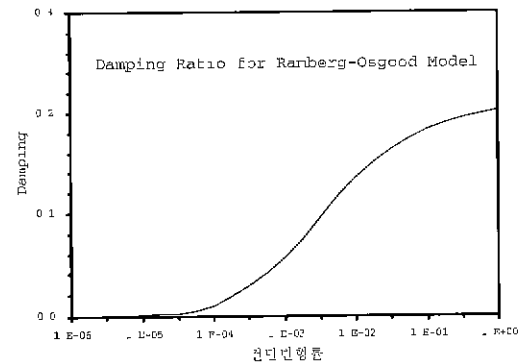
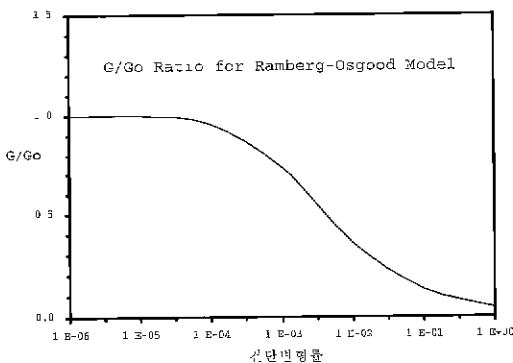


Fig 1 Ramberg-Osgood 모델

이고, 본 연구에서 α 는 식의 단순화를 위해 0.025로, γ_y 는 5×10^5 로 가정하였다.⁽³⁾

지반은 UBC분류에 따른 지반종류 S_D 와 S_E 인 지반(전단파속도 180 및 120m/sec)을 고려하였으며,⁽⁴⁾ 각 지반의 단위중량은 18.62 및 15.68kN/m³로, Poisson비와 초기감쇠비는 각각 0.3, 0.05로 가정하였는데, 각 지반의 개략적인 N치는 15 및 5로 보통지반 및 연약지반으로 분류할 수 있다.

또 말뚝기초의 경우, 말뚝은 건물기초에서 많이 사용하는 선단지지 PC말뚝으로 말뚝의 직경은 35cm이고, 탄성계수, 단위중량, Poisson비 및 감쇠비는 각각 2058kN/cm², 23.52kN/m³, 0.25 및 0.05이다. 말뚝기초는 S_E 지반에 설치하였는데, 말뚝은 15층정도 건물의 대형기초(R=25m)를 고려하여 1089(33×33)개를 사용하였다.

기초지반깊이(H)는 실무적으로 일반적인 값을 때 15m와 깊을 때 30m인 경우를 고려하였으며, 기초근입깊이(E)는 0m와 지하층을 고려한 10m인 경우에 대해 연구를 수행하였다.

기초지반의 비선형 강성에 대한 특성연구는 15층정도 건물기초를 고려한 무한강성 무질량 기초에 1kN 수평력과 25kN-m 모멘트를 가하여 선형 강성을, UBC Zone 3, 4에서 예상되는 2.0×10^5 kN 수평력과 5.0×10^6 kN-m 모멘트를 가하여 비선형 강성을 구하고, 그 결과를 비교, 분석하여 수행하였다.^{(1),(5),(6)}

3. 기초크기 영향

기초크기가 얇은기초와 문헌기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 영향을 연구하기 위해 기초지반은 보통지반(지반종류 S_D)으로 지반깊이가 30m정도 인 것을 고려하였고, 문헌기초 근입깊이는 10m로 하였으며, 기초크기는 반경 15m와 25m인 중형 및 대형 기초를 고려하였다.

Fig. 2와 3에 나타난 연구결과를 살펴보면, 얇은 기초의 비선형 수평 및 회전 강성(real)의 주파수에 따른 변화는 선형 강성과 유사하였지만, 크기는 중형기초의 경우 50%정도, 대형기초

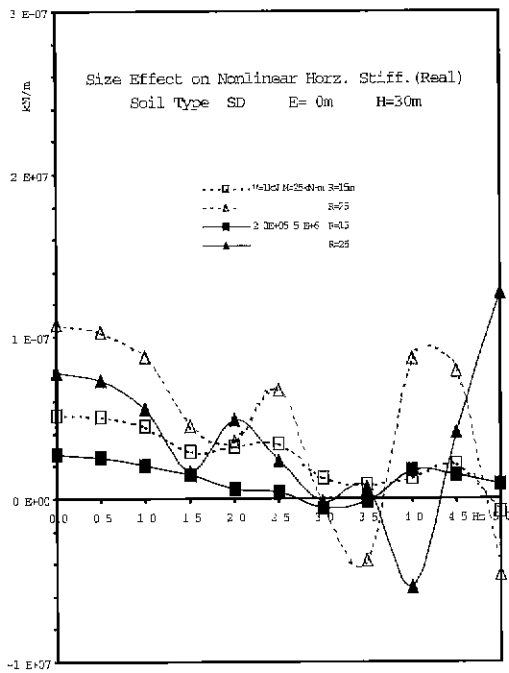
는 30%정도 작아져 중형기초가 대형기초보다 지반의 비선형성 영향을 더 받았다. 얇은기초의 비선형 감쇠비(imag)도 선형 감쇠비 특성과 유사한 변화를 보여 저주파영역에서는 재료감쇠비가 대부분이고 고주파영역에서 방사감쇠비는 약간의 변화를 보였는데, 중형기초보다 대형기초의 경우에 비선형 방사감쇠비 변화가 크게 나타났다. 문헌기초의 비선형 강성과 감쇠비도 얇은기초와 주파수 특성 및 크기에서 매우 유사하게 나타났으나, 문헌기초 수평감쇠비의 경우는 중형기초일 때 고주파영역에서 비선형 감쇠비가 크게 작아졌다.

기초크기에 따른 기초지반의 비선형 강성 및 감쇠비에 대한 분석결과, 수평 및 회전 강성은 기초 근입과는 상관없이 기초 크기가 작은 경우에 지반의 비선형 특성이 더 크게 나타났으나, 감쇠비의 경우 재료감쇠비가 지배적인 저주파영역에서는 지반의 비선형성이 거의 나타나지 않았지만 고주파영역에서 방사감쇠비는 기초크기와 무관하게 큰 비선형 변화를 나타냈다.

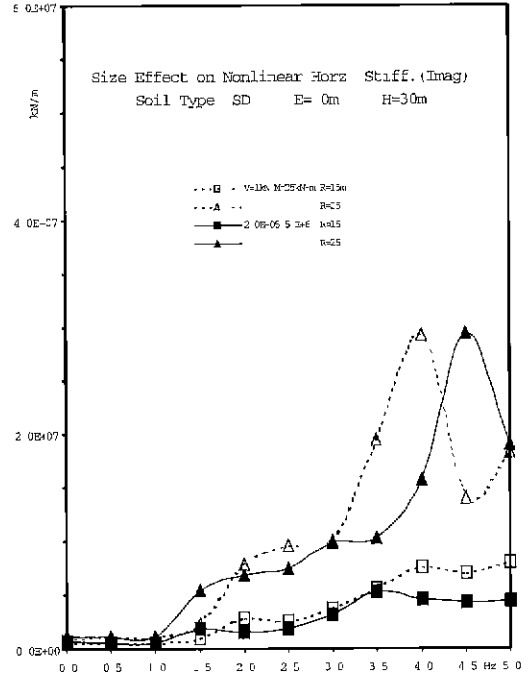
4. 지반깊이 영향

기초지반 깊이가 얇은기초와 문헌기초의 비선형 수평 및 회전 강성과 감쇠비에 미치는 영향을 파악하기 위해 기초크기 영향이 큰 중형기초 지반에 대해 개발한 연구용 프로그램으로 비선형 해석을 수행하였다. 기초지반은 보통지반(지반종류 S_D)을 고려하였고, 문헌기초의 근입깊이는 10m를, 지반깊이는 얇은 경우 15m와 깊은 경우 30m를 고려하였다.

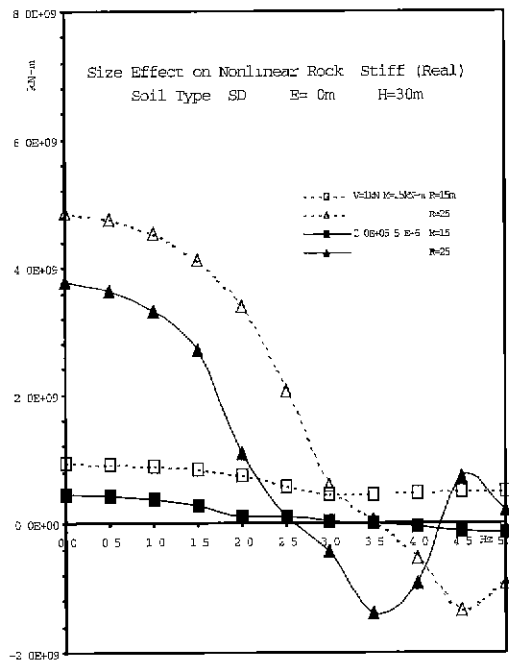
Fig. 4에 나타난 얇은기초에 대한 연구결과에 의하면, 기초지반의 비선형 특성때문에 수평 및 회전 강성이 지반깊이가 얇을 때 55%정도 깊을 때 50%정도 감소하여 지반이 얇을 때 약간 더 감소하고, 감쇠비는 저주파영역에서는 지반깊이에 무관하게 약간 증가하였으나 고주파영역에서는 지반이 얇을 때 더 큰 변화를 보였다. 또한, Fig. 5에 나타난 문헌기초의 수평강성은 지반깊이가 얇을 때 45%정도 감소하여 깊을 때



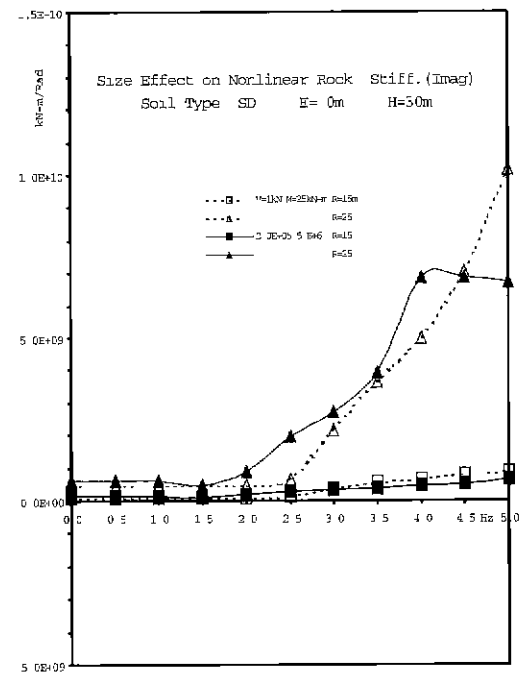
(a)



(b)

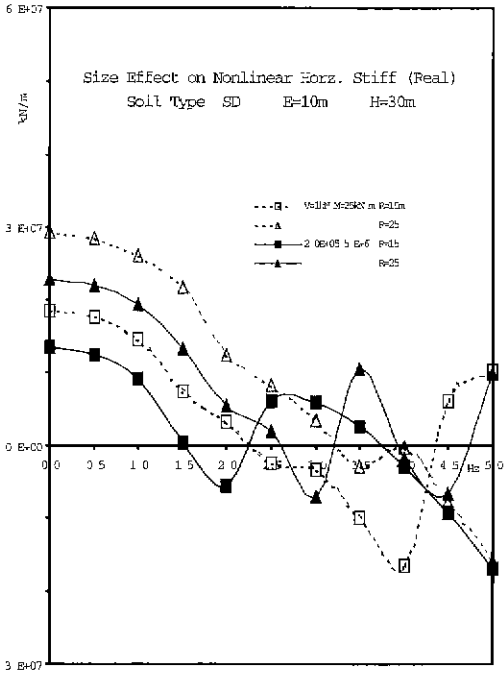


(c)

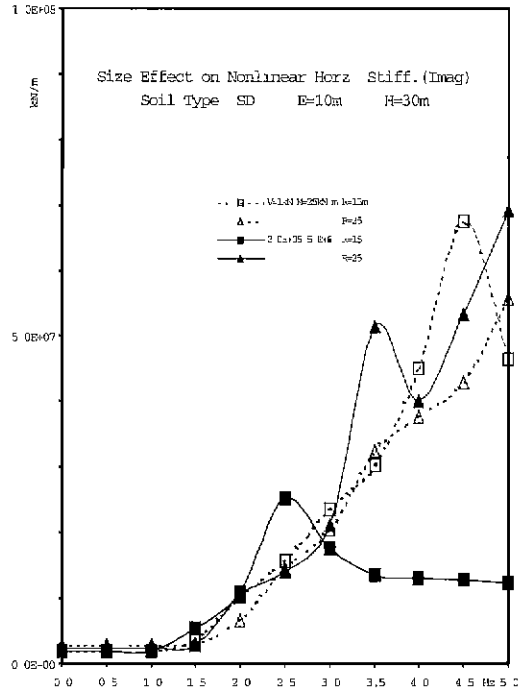


(d)

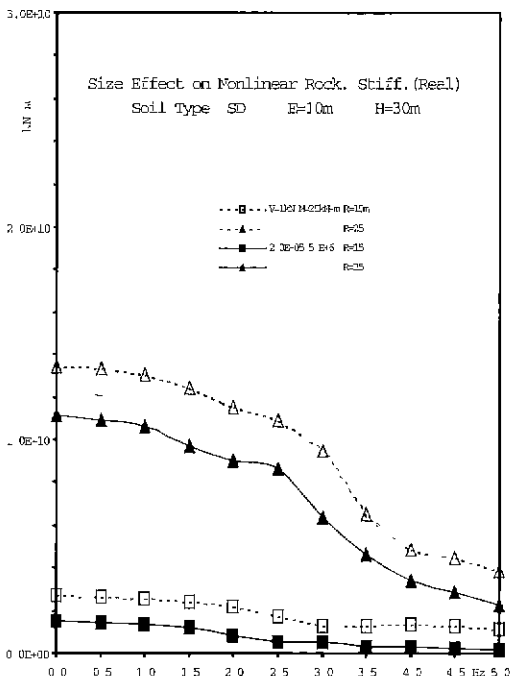
Fig. 2 얇은기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 기초크기 영향



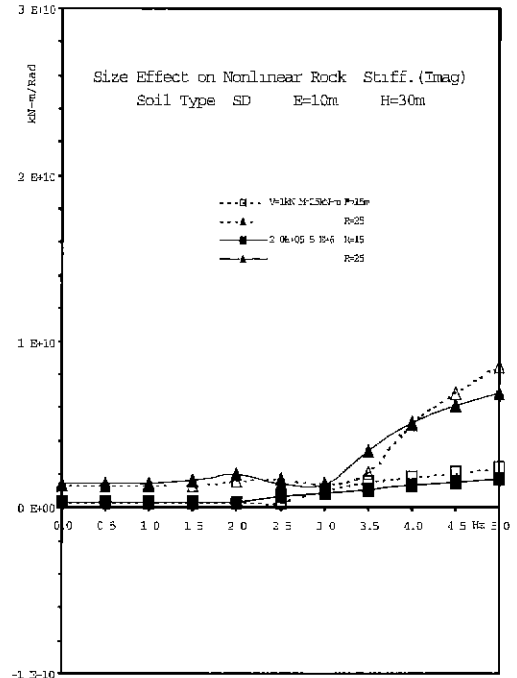
(a)



(b)

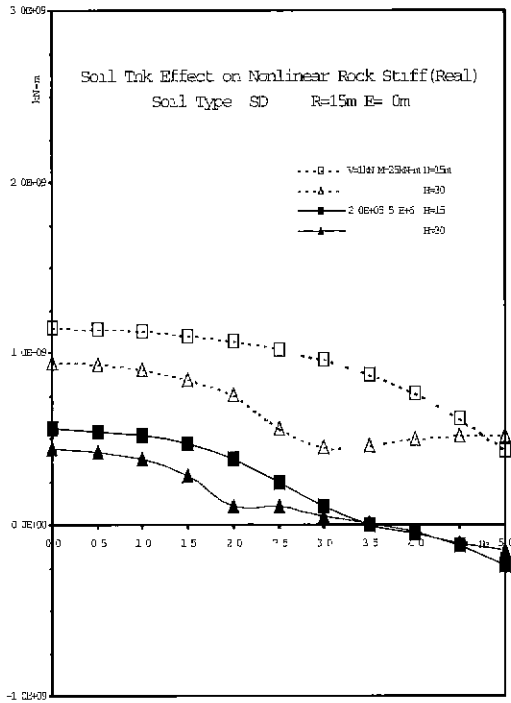


(c)

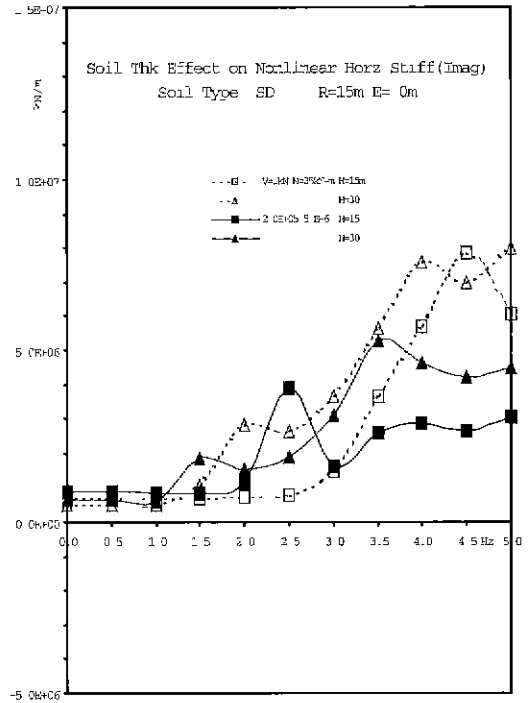


(d)

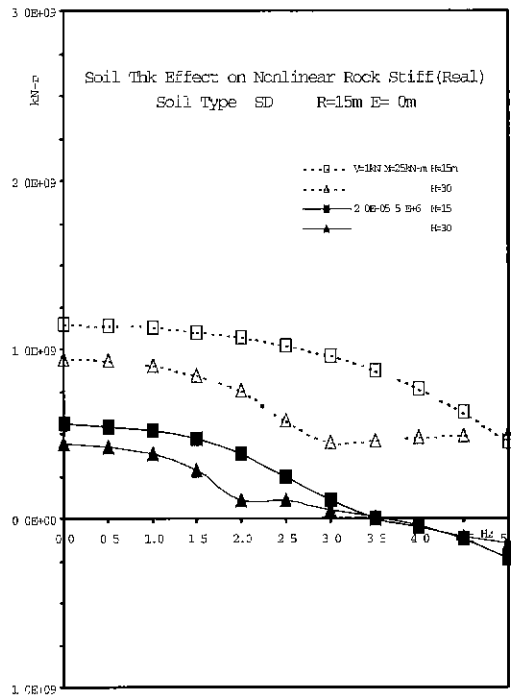
Fig 3 문헌기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 기초크기 영향



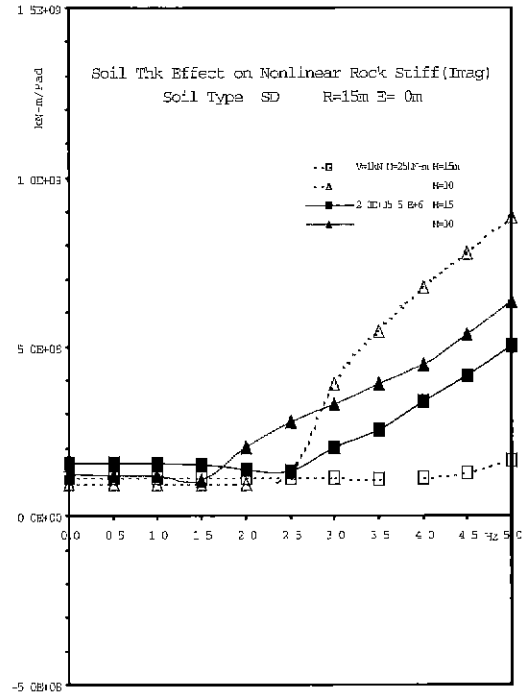
(a)



(b)

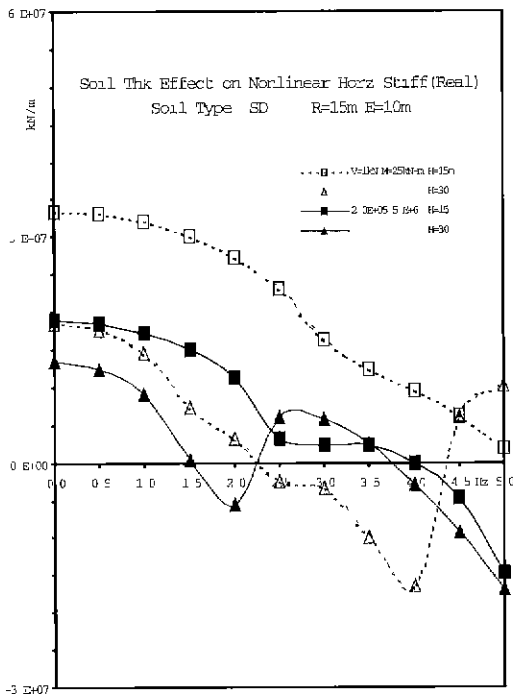


(c)

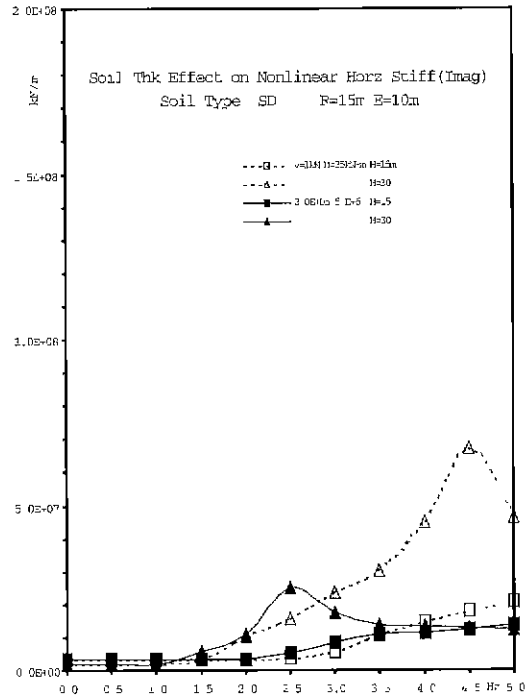


(d)

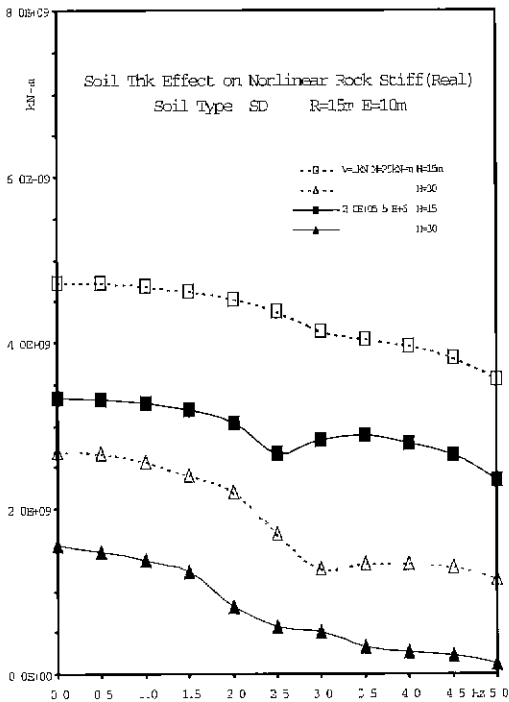
Fig 4 중형 얽은기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 지반깊이 영향



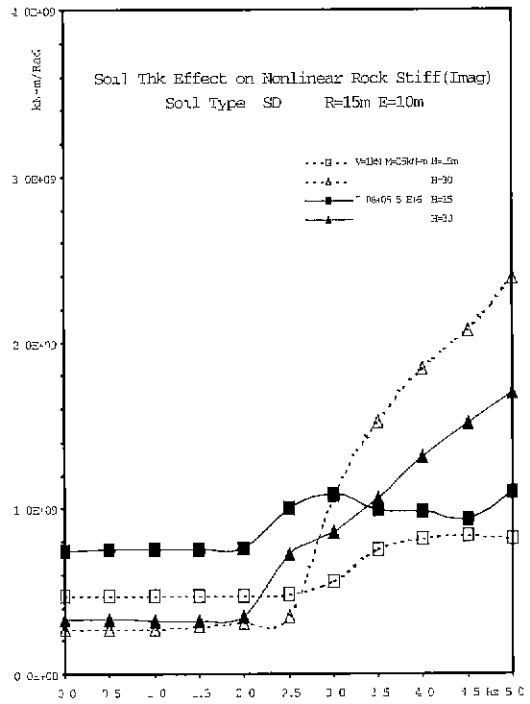
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig 5 중형 물원기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 지반깊이 영향

30%정도 보다 더 크게 감소하였고, 회전강성은 반대로 지반이 깊을 때 45%정도 감소하여 얇을 때 30%정도 보다 더 크게 감소하였으며, 수평 감쇠비는 고주파영역에서 지반이 깊을 때 크게 감소하였고, 회전감쇠비는 지반이 얇을 때 더 큰 변화를 보였다.

기초지반 비선형 강성에 기초지반 깊이가 미치는 영향에 대한 연구결과, 얇은기초의 경우 지반깊이가 얇을 때 비선형 강성과 감쇠비가 더 감소하였고, 문힌기초의 경우 수평강성과 회전감쇠비는 지반이 얇을 때 더 큰 변화를 보였으며, 수평감쇠비와 회전강성은 지반이 깊을 때 더 큰 감소를 보였다.

5. 말뚝기초 영향

기초지반 비선형 수평 및 회전 강성에 말뚝 기초가 미치는 영향을 연구하기 위해 말뚝기초의 영향을 파악하기 용이한 깊이 30m 지반 위에 놓인 반경 25m의 대형 얇은기초와 문힌기초에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 기초지반은 말뚝기초가 필요한 연약지반(지반종류 S_{B1})을 고려하였으며, 문힌기초는 10m정도 근입한 것으로 모델링하였다.

대형 얇은기초의 비선형 수평 강성 및 감쇠비 특성은 선형 수평 강성 및 감쇠비와 유사하게 말뚝의 영향이 고주파영역에서 약간 있지만 무시할 정도인 것으로 판단되었고, 비선형 회전강성도 선형 회전강성과 거의 유사하게 말뚝 위에 세워진 얇은기초의 회전강성은 지반강성 영향은 경미하고 대부분 말뚝강성으로 지반의 비선형 특성은 무시할 정도였으며, 회전감쇠비가 증가한 것은 대부분 말뚝의 재료감쇠비 영향이고 지반의 비선형 영향은 경미한 것으로 판단되었다.(Fig. 6)

대형 문힌기초의 비선형 수평강성은 기초지반의 비선형성 때문에 선형 강성보다 30%정도 작아졌으나 말뚝의 영향은 경미한 것으로 나타났고, 비선형 수평감쇠비도 말뚝의 영향은 경미하였다. 한편, 회전강성은 말뚝이 상당히 영향

을 미쳤는데, 비선형 회전강성은 말뚝 유무와 상관없이 지반의 비선형성 때문에 선형 회전강성보다 30%정도 감소하였다. 비선형 회전감쇠비는 저주파영역에서 말뚝의 재료감쇠비 때문에 약간 증가하였지만 고주파영역에서 말뚝의 영향은 경미한 것으로 판단되었다.(Fig. 7)

기초지반 비선형 수평 및 회전 강성 및 감쇠비에 말뚝기초의 영향에 관한 연구결과, 비선형 수평 강성 및 감쇠비의 경우 기초물침과 무관하게 모두 말뚝 영향이 경미한 것으로 나타났다. 회전강성의 경우 비선형 및 선형 모두 기초물침과 상관없이 말뚝의 영향이 크게 나타났으며, 지반의 비선형 특성은 문힌기초의 경우에만 크게 나타났다. 또한, 회전감쇠비의 경우 기초물침에 상관없이 말뚝의 재료감쇠비 영향이 나타났다으며 비선형 지반 영향은 경미하였다.

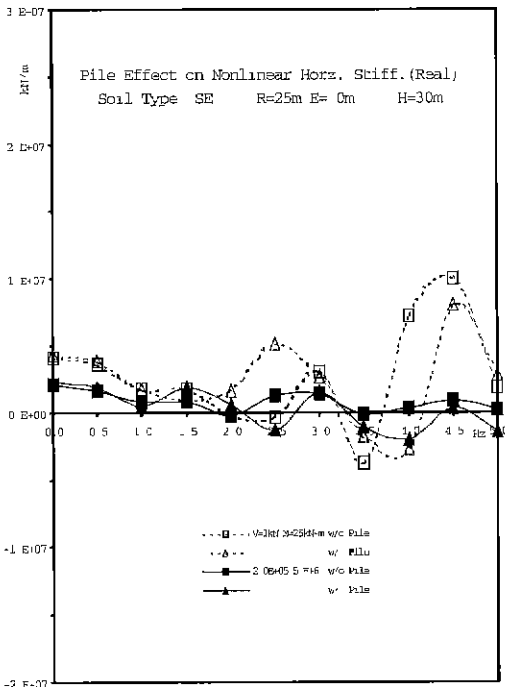
6. 결 론

비선형 특성을 갖는 지반이 수평방향 운동을 받는 얇은기초와 문힌기초의 수평 및 회전 강성에 미치는 영향을 연구하기 위해 기초크기, 기초지반깊이 및 말뚝유무에 따른 기초지반 강성의 변화를 조사하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

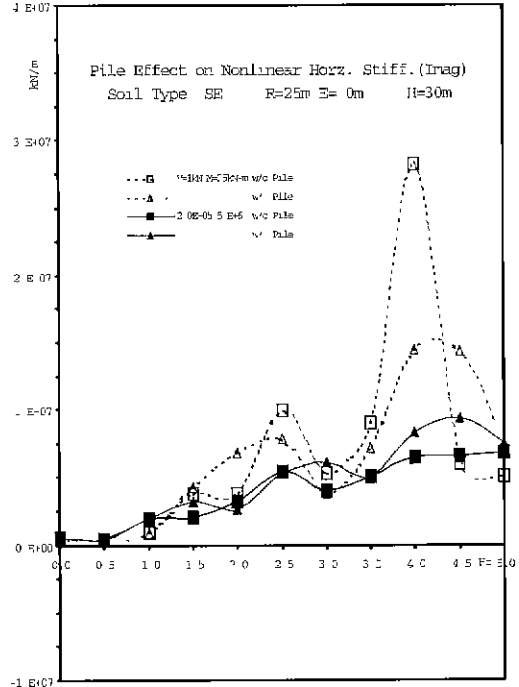
기초크기가 기초지반의 비선형 수평 및 회전 강성과 감쇠비에 미치는 영향에 관한 연구에서 강성의 경우 기초의 물침과 무관하게 기초가 작을 때 지반의 비선형 특성이 크게 나타났고, 감쇠비의 경우 재료감쇠비가 지배적인 저주파영역에서는 지반의 비선형성이 거의 나타나지 않았으나 고주파영역에서 방사감쇠비는 기초크기와 상관없이 큰 비선형 변화를 나타냈다.

지반깊이와 기초지반의 비선형 특성에 관한 연구에서는 문힌기초의 수평감쇠비와 회전강성이 지반이 깊을 때 더 크게 감소한 것을 제외하고는 지반이 얇을 때 강성과 감쇠비가 더 큰 변화를 보였다.

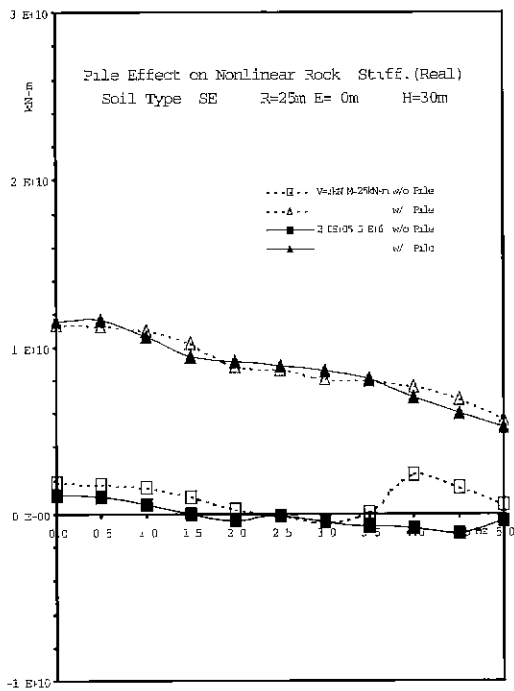
말뚝이 기초지반의 비선형 수평 강성과 감쇠비에 미치는 영향은 미미하였으나, 비선형 회전강성과 감쇠비에 미치는 영향은 상당한 것으로



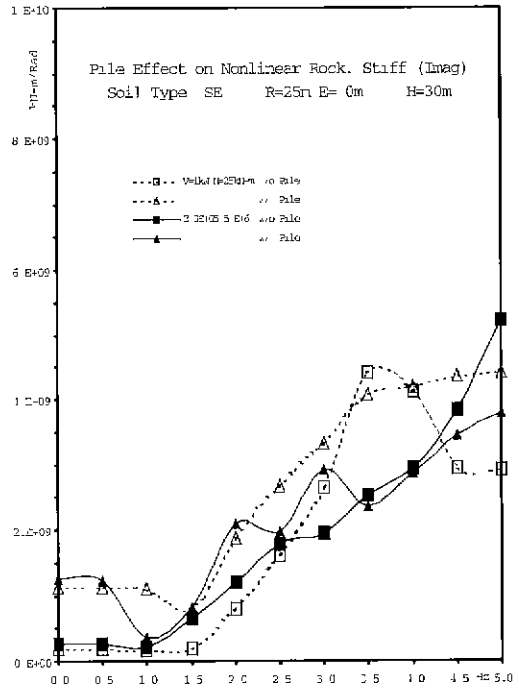
(a)



(b)

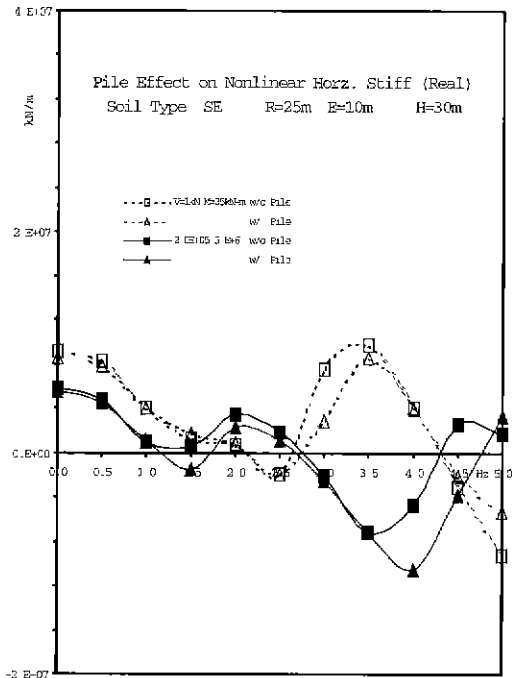


(c)

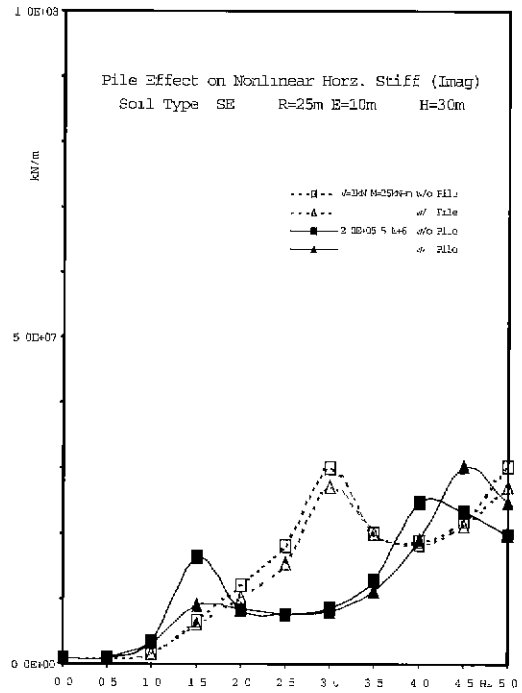


(d)

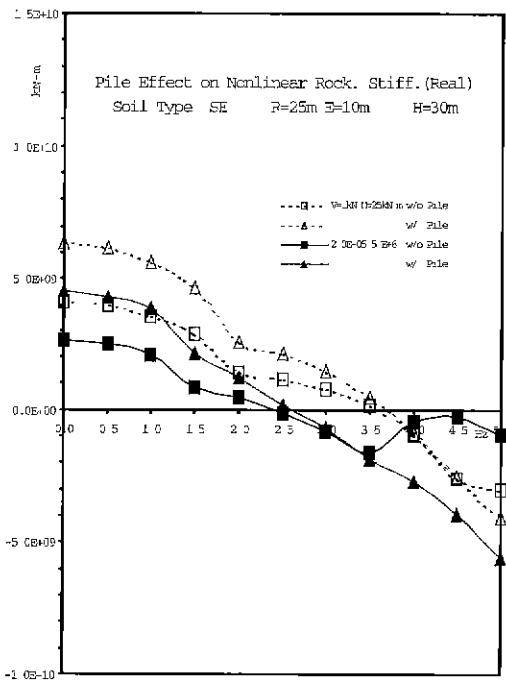
Fig 6 대형 얇은기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 말뚝 영향



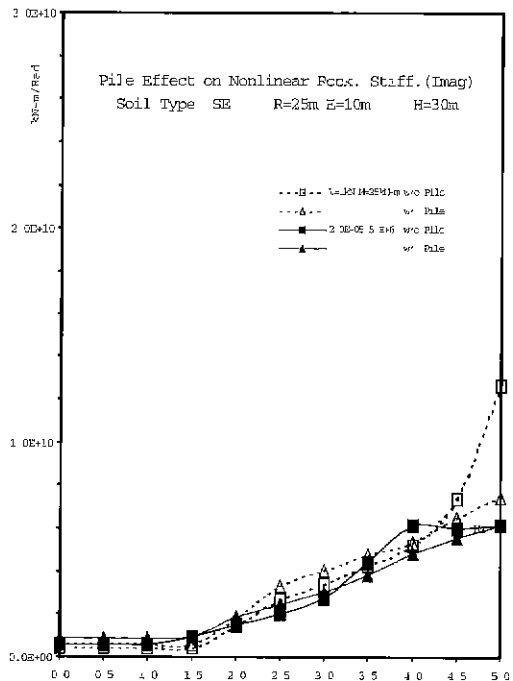
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7 대형 문헌기초의 비선형 수평 및 회전 강성에 미치는 말뚝 영향

나타났으며, 지반의 비선형 특성 영향은 문헌기초의 비선형 회전강성에서만 크게 나타났다.

지반의 비선형 특성이 기초지반의 비선형 수평 및 회전 강성과 감쇠비에 미치는 영향을 종합하면, 비선형 강성은 선형 강성보다 크게 감소하고 저주파영역에서 재료감쇠비는 약간 변화하지만 고주파영역에서 방사감쇠비는 큰 변화를 보였는데, 기초크기, 기초지반깊이, 말뚝유무에 따라서도 큰 영향을 받았다. 따라서 구조물 지진해석시 기초크기, 지반깊이, 말뚝유무뿐만 아니라 기초지반의 비선형 특성을 고려하는 것이 필요하고, 추후 구조물의 비선형 거동과 관련된 연구도 필요한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Kim, Y. S., "Dynamic Response of Structures on Pile Foundations," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 1987, pp. 272.
2. 김용석, "반지하구조물 내진설계를 위한 지반 거동", 전산구조공학회지, 제1권, 제2호, 1988, pp. 91-100.
3. Roesset, J. M., "A review of soil-structure interaction," Lawrence Livermore Laboratory, 1980. 6, pp. 125.
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, 1997. 9, pp. 1-10.
6. Kim, Y. S., "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, 1998. 7, pp. 783.