

다양한 지반층을 갖는 Pier-Shafts 시스템의 내진성능평가

Seismic performance evaluation of Pier-Shafts system with multi-layered soil

장승환*
Jang, Sung-Hwan

남상혁**
Nam, Sang-Hyeok

송하원***
Song, Ha-Won

김병철****
Kim, Byung-Chul

ABSTRACT

The so-called Pier-Shafts system which consists of the continuous column and shaft is often used to support the highway bridge structure because of advantages in easy construction and low cost. In the earthquake region, the Pier-Shafts system undergoes large displacements and represents a nonlinear behavior under the lateral seismic loading. The soil-pile interaction should be considered for more accurate analysis of the Pier-Shafts system. In this study, a transverse response of a reinforced concrete Pier-Shafts system inside multi-layered soil medium is predicted using a finite element program which adopts an elasto-plastic interface model for the interface behavior between the shaft and the soil. Then, seismic analysis is performed to evaluate the performance of Pier-Shafts system under strong ground motion and their results are verified with experimental data.

요 약

최근 기술적인 발전과 더불어 경제적이고 신속한 시공성 그리고 내진성능 향상을 위하여 별도의 말뚝캡을 설치하지 않고 말뚝과 기둥을 하나의 부재로 사용하는 이른바 말뚝기초-교각의 일체화구조(Pier-Shafts)가 국·내외에서 많이 적용되고 있다. Pier-Shafts의 경우, 기초부분이 기존의 기초형식과는 달리 고정화되어 있지 않기 때문에 가상고정점 또는 탄성지반상의 보 이론에 기초한 해석법 등 중전의 단순해석법이 적용되지 않으며, 구조물과 지반 사이의 상호작용을 고려하는 것이 매우 중요하다. 또한, 상·하부의 일체화에 따른 연속성 등 구조적인 특성으로 인해 큰 수평 변위가 발생할 수 있기 때문에 횡방향 거동에 관한 정밀한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 구성모델, 지반 구성모델 및 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 이용하여 다양한 지반층을 고려한 Pier-Shafts의 거동을 분석하였으며, 기존의 실험 및 해석결과와 비교·검토하여 해석기법의 타당성을 검증하였다. 또한, 지진하중을 받는 Pier-Shafts의 내진성능을 평가하기 위하여 지반을 고려한 전체 Pier-Shafts 시스템에 대한 내진해석을 실시하였다.

* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정

** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수, 공학박사

*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사

**** 정회원, 대림산업 기술연구소 토목연구지원팀 대리, 공학석사

1. 서론

Pier-Shafts는 상부 교각과 하부 기초가 일체화된 시스템으로써 현재 국내·외의 많은 건설현장에 적용되고 있다. Pier-Shafts는 시공의 간편함과 공기단축으로 인한 비용절감의 효과가 있으며 특히 기존의 말뚝기초와 달리 말뚝 개수가 적으므로 비교적 큰 수평 및 수직하중을 받는 특징이 있다. 이러한 Pier-Shafts는 기초부분이 다양한 지반에 걸쳐 깊이 근입되어 있기 때문에 구조물과 지반의 상호작용을 고려하여야 하며 콘크리트와 지반 사이의 파괴 메카니즘에 대해서도 현실적으로 고려하여야 한다. Pier-Shafts는 지진 등의 수평하중에 대하여 상당한 유연성을 발휘하기 때문에 수평하중 받는 Pier-Shafts의 전반적인 검토가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 구조물과 지반 사이의 경계면 거동을 정확하게 표현하기 위해 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 적용하여 수평하중을 받는 Pier-Shafts의 거동을 예측하였다. 또한, 지진하중을 받는 Pier-Shafts에 대해서 구조물과 지반을 하나의 시스템으로 고려한 내진성능평가를 수행하였다.

2. 재료의 구성모델

본 연구에서는 콘크리트와 철근에 대한 평균화된 구성법칙의 조합으로 구성된 철근콘크리트 구성모델¹⁾과 반복주기하중을 받는 지반층의 비선형 응답을 예측할 수 있는 Ohsaki 지반모델²⁾ 그리고 철근콘크리트와 지반 사이의 상호작용을 보다 사실적으로 나타내기 위해 개발된 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델³⁾을 적용하여 유한요소해석을 실시하였다.

3. Pier-Shafts의 횡방향 거동 분석 및 검증

정적하중 및 반복하중에 따른 Pier-Shafts의 횡방향 거동특성을 분석하고 해석기법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 Kerop D. Janoyan et al.(2007)의 실험 및 해석 결과와 비교하였다⁴⁾. 대상 구조물은 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 지표면 위로 12.2m, 지표면 아래로 14.6m의 길이를 갖는 Pier-Shafts 시스템으로서, 유한요소해석을 위해 주변 지반과 함께 모델링하였으며 지반과 콘크리트 사이에 두께를 갖는 탄소성 경계면 요소를 적용하였다^{5,6)}. 그림 1(b)는 pier-shaft의 제원 및 상세를 나타내고 있으며, 콘크리트 강도 24MPa, 수직철근비 2.00%, 수평철근비 0.84%를 적용하였다. 지반은 서로 다른 특성을 갖는 4개의 층으로 구성되어져 있으며 지반의 물성치는 표 1과 같다⁷⁾.

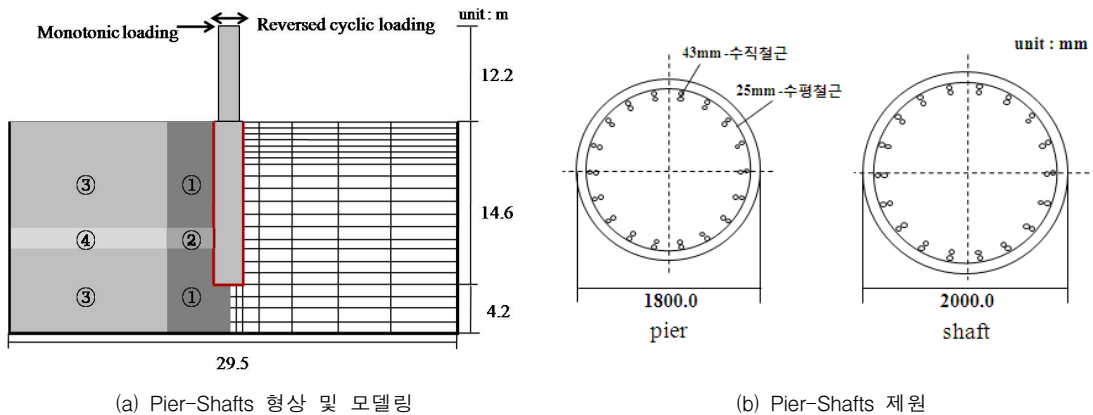
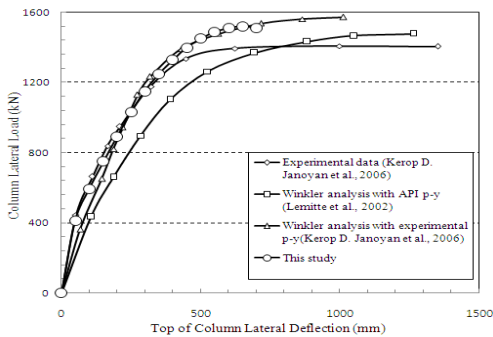


그림 1 Pier-Shafts의 모델링과 제원

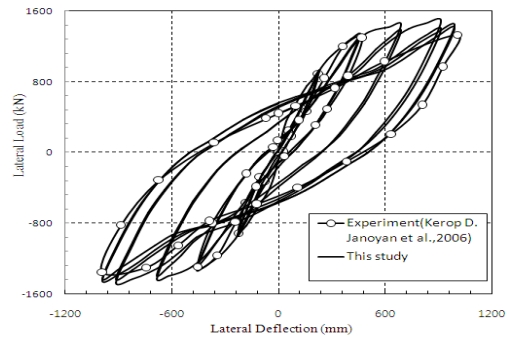
표 1 Pier-Shafts의 지반물성치

	①	②	③	④
Poisson's ratio	0.46	0.30	0.46	0.3
N-value	8	10	17	19
Young's modulus (MPa)	181.24	192.92	331.24	332.39
Initial shear stiffness (MPa)	62.07	74.20	113.44	123.99
Shear velocity (m/sec)	174.39	190.67	235.75	246.49

결과를 비교한 것으로 본 연구의 해석결과가 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 적용한 본 연구의 해석 기법이 타당함을 확인할 수 있었다.



(a) 수평 정적하중 결과



(b) 수평 반복하중 결과

그림 2 수평 정적하중과 반복하중에 따른 하중-변위 곡선

4. Pier-Shaft system의 내진성능평가

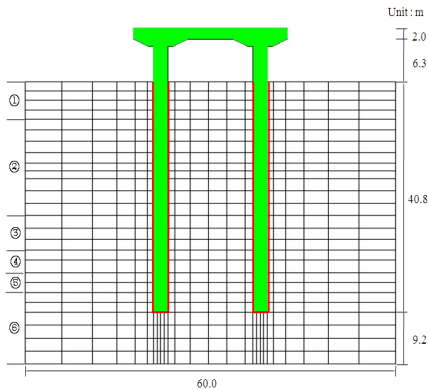


그림 3 대상 pier-shaft의 형상 및 모델링

표 2 인천대교 접속교 지반 물성치

	①	②	③	④	⑤	⑥
Poisson's ratio	0.4	0.4	0.35	0.35	0.3	0.25
Young's modulus (MPa)	207.76	256.28	482.47	679.17	699.13	1161.06
Initial shear stiffness(MPa)	74.20	91.53	178.69	251.54	269.90	464.43
Shear velocity (m/sec)	206.82	223.22	303.59	351.08	354.24	420.11

그림 3은 최근 국내에서 Pier-Shafts 형식으로 시공중인 인천대교 접속교 일부의 체인과 모델링 형상을 나타낸 것으로, 콘크리트의 압축강도는 35MPa, 수직철근비 1.53%이며, 지반과 Pier-Shafts 사이에는 두께를 갖는 탄소성 경계면 모델을 적용하였다. 지반은 총 6개의 층으로 구성되어 있으며, 해석시 사용된 물성치는 표 2와 같다⁸⁾. 본 연구에서는 수평방향 818gal, 수직방향 323gal의 최대 지진가속도를 갖는 고베(Kobe) 지진시에 기록된 지진가속도를 적용하여 내진해석을 실시하였다.

그림 4는 지진이 발생하는 동안의 대상 pier-shaft의 지진거동 특성을 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 시간에 따라 pier-shaft에 발생하는 평균 전단력을 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 평균 전단변형을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 pier-shaft에 유발되는 평균 전단력이나 전단변형이 비교적 크지 않음을 알 수 있다. 그림 4(c)는 평균

비탄성 변형률을 나타낸 것으로 pier-shaft에 발생하는 손상정도를 나타내고 있으며, 손상정도 역시 비교적 크지 않음을 확인할 수 있다. 고베지진과 같은 강진에 대해서도 구조물에 파괴가 발생하지 않은 것은 pier-shaft 시스템의 뛰어난 연성거동 특성 때문인 것으로 판단되며, pier-shaft 시스템은 경제적인 효과와 함께 탁월한 내진 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있다.

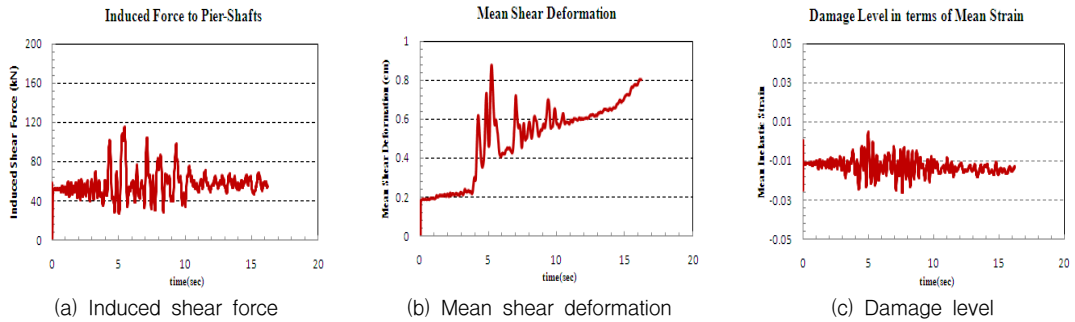


그림 4 Pier-shaft 시스템의 내진 성능평가

4. 결론

1. 지반과 구조물 사이에 두께를 갖는 탄소성 모델을 적용하여 수평 단조하중 및 반복하중을 받는 pier-shaft 시스템에 대한 유한요소해석을 통해 해석기법의 타당성을 검증하였다.
2. Pier-shaft 형식이 적용된 실제 교량에 대한 지진해석을 통해 pier-shaft 시스템의 내진특성을 분석하였으며, 고유의 연성 거동 특성으로 인해 탁월한 내진성능을 보유하고 있음을 확인하였다.
3. Pier-shaft 시스템은 시공성 및 경제성이 탁월하여 앞으로 유용하게 이용될 수 있을 것이라 판단되며, 본 연구에서 제안한 유한요소해석 기법을 통해 보다 합리적인 설계 및 성능평가가 가능하게 될 것이다.

참고문헌

1. Maekawa, K., Pimanmas, P., and Okamura H. (2003), Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press.
2. Ohsaki, Y.(1982), "Dynamic Nonlinear Model and One-Dimensional Nonlinear Response of Soil Deposits". Research Report 82-02, Dept. of Architecture, University of Tokyo.
3. Yin, Z. Z., Zhu, H., and Xu, G. H. (1995), "A Study of Deformation in the Interface between Soil and Concrete", Computers and Geomechanics, Vol. 17, pp.75-92.
4. Kerop D. Janoyan, John W. Wallace, and Jonathan P. Stewart (2006), "Full-Scale Cyclic Lateral Load Test of Reinforced Concrete Pier-Column", ACI Structural Journal, Vol. 103, pp.178-187.
5. 남상혁(2002), 탄소성 경계면 모델을 이용한 지하 철근콘크리트 구조물의 내진 해석, 박사학위논문, 연세대학교
6. Nam, S.-H., Song, H.-W., Byun, K.-J., and Maekawa, K. (2006), "Seismic Analysis of Underground Reinforced Concrete Structures considering Elasto-plastic Interface Element with Thickness", Engineering Structures, Vol. 28, pp.1122-1131.
7. Rha C, Taciroglu E, Wallace JW, Ahlberg E, and Stewart JP (2005), "Response of a Reinforced Concrete Embedded Pile under Lateral loading II: Numerical studies", 2005 Caltrans Bridge Conference, Oct 31-Nov 01, Sacramento, California.