

## 항타 개단 강관 말뚝의 하중 전이 실험 수행 사례 연구

### Case Study on Load Transfer Test for the Driven Open-ended Steel Pipe Pile

최용규<sup>1)</sup>, Yongkyu Choi, 김명학<sup>2)</sup>, Myung-Hak Kim, 남문석<sup>3)</sup>, Moon-Seok Nam, 정태만<sup>4)</sup>, Tae-Man Jung

- 1) 경성대학교 공과대학 건설·환경공학부 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ.
- 2) 인제대학교 공과대학 토목공학과 전임강사, Full Time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Inje University
- 3) 경성대학교 공과대학 건설·환경공학부 조교, Research Assistant, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ.
- 4) 부산광역시 건설안전관리본부, Senior Engineer, Construction Safety Management Headquarters, Pusan Metropolitan City.

**SYNOPSIS** : While case studies on load transfer test for driven open-ended pipe pile have been performed in the foreign countries, they have not be done in domestic area. In load transfer test done by author, there was the case that the electric wires soldering to strain gage were torn off by the tension wave of test pile induced by pile driving, but no evidence for water proof problem and damage of strain gage due to pile driving can be found. Based on the results of load transfer test, the steel toe bearing resistance and the shaft resistance (sum of the outer skin friction and soil plugging force) were measured separately, but soil plugging force could not be separated. Steel toe bearing resistance was about 8% of ultimate pile capacity.

**KEYWORDS** : Load transfer test, Driven open-ended pipe pile, Pile axial load instrumentation, Pile driving, Soil plugging force.

## 1. 서 론

항타 강관 말뚝의 하중 전이 실험의 수행 사례는 여러 연구자들의 연구 결과들 (Matsumoto et al., 1994; Michi et al., 1994; Bozozuk et al., 1979; Mansur et al., 1970; Vesic, 1970; O'Neill, 1980, 1982; Matsumoto et al., 1995; 최용규, 1997b; Choi & O'Neill, 1997)에서 찾아볼 수 있으며 이들 연구들은 대부분 현장 말뚝에 대해 수행되었다. 국내의 경우 모형 개단 말뚝에 대한 하중 전이 실험은 몇몇 연구자들에 의해 수행되어진 사례가 있으나 현장에서 실물크기의 말뚝에 대해 수행되어진 사례는 찾아볼 수가 없는 실정이다. 항타 강관 말뚝에 대한 하중 전이 실험은 방수 문제와 항타 진동으로 인한 게이지의 손상 문제 등으로 인하여 실험 자체가 불가능한 것으로까지 국내 기술자들에게 인식되어져 오고 있는 실정이다.

## 항타 개단 강관 말뚝의 하중 전이 실험 수행 사례

### Case Study on Load Transfer Test for the Driven Open-ended Steel Pipe Pile

최용규<sup>1)</sup>, Yongkyu Choi, 김명학<sup>2)</sup>, Myung-Hak Kim, 남문석<sup>3)</sup>, Moon-Seok Nam,  
정태만<sup>4)</sup>, Tae-Man Jung

- 1) 경성대학교 공과대학 건설·환경공학부 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ.
- 2) 인제대학교 공과대학 토목공학과 전임강사, Full Time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Inje University
- 3) 경성대학교 공과대학 건설·환경공학부 조교, Research Assistant, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ.
- 4) 부산광역시 건설안전관리본부, Senior Engineer, Construction Safety Management Headquarters, Pusan Metropolitan City.

**개요(SYNOPSIS)** : While case studies on load transfer test for driven open-ended pipe pile have been performed in the foreign countries, they have not be done in domestic area. In load transfer test done by author, there was the case that the electric wires soldering to strain gage were torn off by the tension wave of test pile induced by pile driving, but no evidence for water proof problem and damage of strain gage due to pile driving can be found. Based on the results of load transfer test, the steel toe bearing resistance and the shaft resistance (sum of the outer skin friction and soil plugging force) were measured separately, but soil plugging force could not be separated. Steel toe bearing resistance was about 8% of ultimate pile capacity.

**주요어(Keyword)** : Load transfer test, driven open-ended pipe pile, pile axial load instrumentation, pile driving, soil plugging force.

#### 1. 서 론

항타 강관 말뚝의 하중 전이 실험의 수행 사례는 여러 연구자들의 연구 결과들 (Matsumoto et al., 1994; Michi et al., 1994; Bozozuk et al., 1979; Mansur et al., 1970; Vesic, 1970; O'Neill, 1980, 1982; Matsumoto et al., 1995; 최용규, 1997b; Choi & O'Neill, 1997)에서 찾아볼 수 있으며 이들 연구들은 대부분 현장 말뚝에 대해 수행되었다. 국내의 경우 모형 개단 말뚝에 대한 하중 전이 실험은 몇몇 연구자들에 의해 수행되었던 사례가 있으나 현장에서 실물크기의 말뚝에 대해 수행되었던 사례는 찾아볼 수가 없는 실정이다. 항타 강관 말뚝에 대한 하중 전이 실험은 방수 문제와 항타 진동으로 인한 게이지의 손상 문제 등으로 인하여 실험 자체가 불가능한 것으로까지 국내 기술자들에게 인식되어져 오고 있는 실정이다.

저자는 국내 특정 현장에서 설계 완료 이전 단계에 설계 목적의 말뚝 정재하 시험을 수행하였으며 (최용규, 1997a), 여기서 항타 개단 강관 말뚝에 대한 하중 전이 실험을 수행하여 성공을 거두었다. 저자가 수행한 하중 전이 실험에서 항타로 인해 말뚝에 발생된 인장 진동으로 연결용 전선이 절단되어 일부 실패한 사례는 있었으나 일반적으로 인식되어 오고 있는 방수 문제와 항타 진동으로 인한 스트레인 게이지의 손상을 찾아볼 수가 없었다. 따라서, 실패사례에서 발생된 항타 진동으로 인한 연결용 전선의 절단 문제를 보완하여 항타 개단 강관 말뚝의 하중 전이 실험을 성공적으로 수행하였다.

## 2. 하중 전이 실험의 수행 및 실패 사례 원인 분석

### 2.1 실험 계획

하중 전이 실험은 국내 특정 현장에서 설계목적의 말뚝 재하 시험 (최용규, 1997a)의 일환으로 수행되어졌으며, 수행된 각종 시험들의 종류와 수행위치를 그림 1에 나타내었다. 실험에서는 개단 강관 말뚝 (직경 : 508mm, 두께 : 12mm, 관입깊이 : 49m)이 사용되었으며, 길이 15m의 강관 파이프를 용접하여 소요의 길이까지 제작하였다. 4개의 시험 말뚝이 유압항타기에 의해 타격관입되었으며, 각 시험 말뚝의 재원 및 사용목적은 표 1에 나타내었다. 모든 시험 말뚝에는 축하중 계측장치 (전기 저항식 스트레인 게이지)를 부착하였는데, 시험 말뚝 P3와 P4에서는 항타시 말뚝에 발생된 인장과의 영향으로 연결용 전선이 절단되어 말뚝의 축방향 스트레인을 측정하는데 실패하였다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하여 시험 말뚝 P1과 P2를 시공하였으며, 이들 말뚝 (P1과 P2)에는 변형봉 (telltale)을 추가로 설치하였다. 시험 말뚝의 상세한 시공 과정은 참고문헌 (최용규, 1997b)을 참고할 수 있을 것이다.

시험 말뚝들에 부착시킨 스트레인 게이지와 변형봉들의 상세한 부착 위치는 그림 2에 나타내었다. 스트레인 게이지는 동일 깊이에 180° 방향으로 쌍으로 부착되었는데 부착 위치는 말뚝 선단 부근 (2쌍), 말뚝 선단으로부터 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40m 위치와 지표면 근처였다 (총 16쌍). 변형봉은 말뚝 선단으로부터 5m간격으로 10개소에 180° 방향으로 쌍으로 용접하였다.

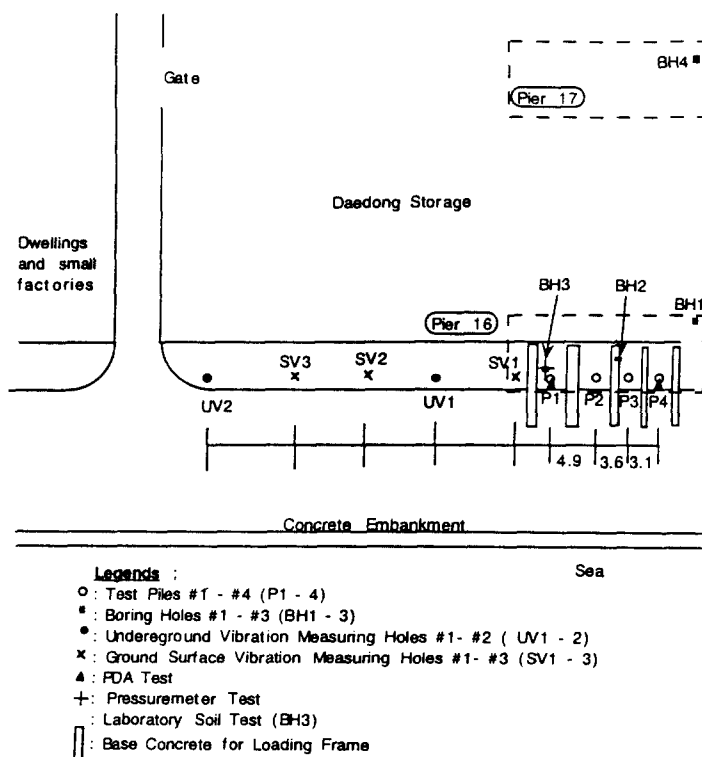


Fig. 1. Test site and various tests performed in the field

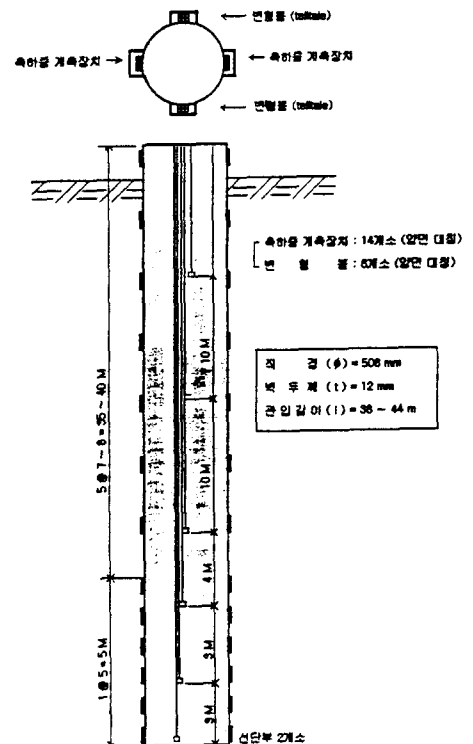


Fig. 2 Positions of strain gages attached on the test pile

각 위치의 스트레인 게이지들은 온도에 의한 오차를 최소화할 수 있도록 4게이지 결선법 (2개의 활성 게이지와 2개의 비활성 게이지)에 의해 한 개의 측정 채널에 연결되었다 (Choi & O'Neill, 1997). 스트레인은 정적 변형 측정기 (Static data logger)에 의해 측정되었다.

## 2.2 측하중 계측 장치의 부착 및 보호 방법

스트레인 게이지 부착 위치를 선정 후 사포 그라인드로 갈아내고 디그리스 등으로 불순물을 제거하였다. 부착될 스트레인 게이지의 수직성을 보장해 줄 수 있도록 부착위치에 연직선을 표시하였다. #200, #400 사포, 컨디셔너, 중화제 등으로 스트레인 게이지의 부착 부위를 깨끗하게 마무리한 다음 혼합해 둔 접착제로써 스트레인 게이지를 부착하였다. 충분한 경화 시간이 경과한 후 스트레인 게이지의 터미널부에 연결용 전선을 납땜으로 연결시켰다. 연결된 전선은 스트레인 게이지의 터미널 부위로부터 약 50mm 만큼 떨어진 위치에 클램프로써 단단하게 고정되었다 (사진 1).

부착된 스트레인 게이지와 연결된 전선 부위에 방수제를 2~3차례 도포하였는데, 이때 연결용 전선을 따라 물이 스며들 가능성이 있으므로 주의를 기울여야 한다. 방수제가 굳은 다음 항타 충격 방지용 방충재를 접착시켰다. 말뚝 항타 설치시 부착된 스트레인 게이지를 말뚝 주변의 흙으로부터 보호하기 위하여 U형강을 말뚝에 용접하였다. 이때, 말뚝 선단부에는 슈 (shoe)를 제작하여 용접하였다. U형강은 스트레인 게이지 부착 부위와 변형용 용접 부위를 충분히 덮을 수 있도록 용접되었다 (사진 2).

스트레인 게이지 부착 과정, 방수처리 과정, 항타 충격에 대한 보호과정에 대한 자세한 것은 슬라이드를 통하여 설명할 것이다.

## 2.3. 실패사례 및 원인 분석

시험 말뚝 P3와 P4에서는 스트레인 게이지 연결용 전선을 팽팽하게 당겨 클램프로써 약 1m 간격으로 강관 말뚝표면에 튼튼하게 고정시켰다. 이들 말뚝을 항타시공할 때 스트레인을 계측 측정하였는데, 대부분의 게이지에서 스트레인이 측정되지 않았다. 여기서, 실패의 원인을 일반적으로 알고 있는 여러측면

Table 1. Details of test piles

시험말뚝	관입깊이 (m)	유압항타기 용량 (KN)	시공방법	하중 전이 실험	정재하 시험
P1	39.0	100	매립층 상부 2.5m 까지 굴착하여 큰 암석 덩어리 제거 후 다시 메움 항타시공	수행	설치후 14일 경과시 420톤 재하
P1-1					P1시험후 15일 경과시 극한 상태까지 재하
P2				38.5	100
P3	44.0	70	매립층 천공후 말뚝 삽입 항타시공	실패	×
P4	42.0	70	매립층 천공후 말뚝 삽입 항타시공	실패	×

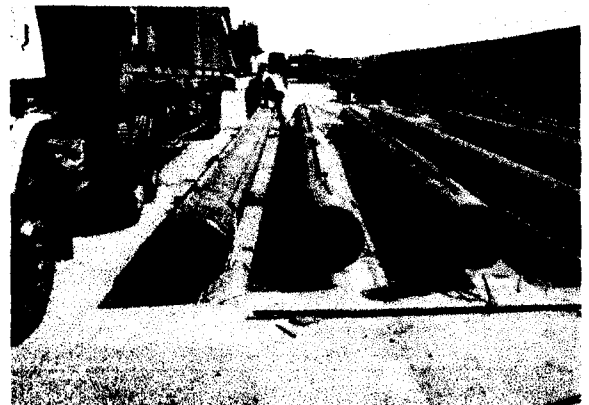


Photo. 2. View of protection channel welded on the surface of pipe pile

(방수문제, 항타충격으로 인한 게이지 파손 문제 등)에서 검토하였으나 원인을 찾아내지 못하였다. 신호가 감지되지 않았던 스트레인 게이지 부착 부위를 절개하여 확인해 본 결과 연결용 전선의 단선 (사진 3)이 원인인 것을 알 수 있었으며, 이것은 항타시 말뚝에 발생하는 인장파 (tension wave)가 직접적인 원인임을 알 수 있었다. 즉, 방수문제나 항타로 인한 게이지의 파손 등이 하중 전이 실험의 직접적인 실패 원인이라고 생각하는 것은 곤란할 것으로 판단되었다.

이와 같은 실패 원인을 보완하기 위하여 시험 말뚝 P1과 P2에서는 앞절에서 설명한 것과 같이 스트레인 게이지 부착 위치로부터 50mm 떨어진 위치에서 연결용 전선을 단단하게 고정시킨 후 나머지 부분은 매우 느슨하게 될 수 있도록 하였다 (사진 1).



Photo. 1. View of strain gages attached on the pipe pile

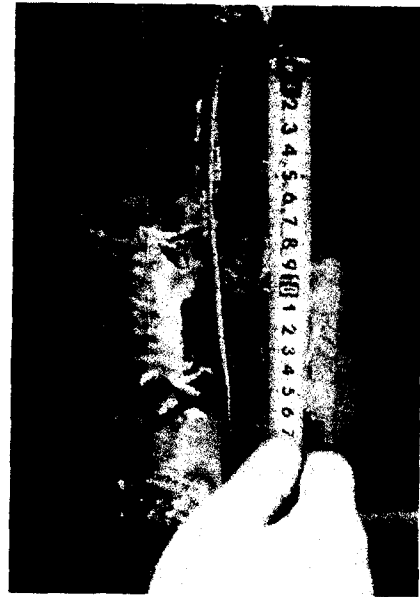


Photo. 3. The electric wires torn off during pile driving

### 3. 실험결과와 분석

측정된 스트레인으로부터 하중을 계산할 때에는 두가지 방법을 사용할 수 있다. 첫째, 탄성론에 의한 공식을 이용하여 하중을 계산할 수 있는데, 이 경우에는 재질의 특성 (탄성 계수  $E$ , 포아슨비  $\mu$  등)을 정확하게 알아야 하고 스트레인을 정확하게 측정할 수 있어야 한다. 둘째, 구축된 임의의 측정 시스템으로 작용된 하중과 스트레인의 관계를 측정할 수 있다면 하중 계수를 구할 수 있을 것이며, 이 경우에는 구축된 측정 시스템이 바뀌지 않는다면, 스트레인 측정에 있어 약간의 오차가 있더라도 해석에는 크게 영향을 미치지 않을 수도 있다. 따라서, 저자가 수행해 온 여러 하중 전이 실험에서는 후자의 방법을 주로 사용해 오고 있다. 본 연구에서는 말뚝이 길어서 재하 장치에 거치하여 하중과 스트레인의 관계를 직접 구하는 것이 곤란하였으므로 지표면 근처에 부착된 스트레인 게이지의 스트레인과 작용된 하중의 크기와 관계를 이용하여 하중 계수를 구하였으며, 이를 지중의 임의 깊이에 있는 스트레인 게이지들에도 적용시켰다.

시험 말뚝 P1에 수행된 2회의 말뚝 정재하 시험과 시험 말뚝 P2에 수행된 1회의 말뚝 정재하 시험을 수행하였는데, 여기에는 시험말뚝 P1에서 수행된 하중 전이 실험 결과를 그림 3과 4에 수록하였다. 그림 3은 시험말뚝 P1에 대한 하중 전이 결과인데, 극한 상태까지 재하하지 못하였다. 여기서, 그림 3(a)에는

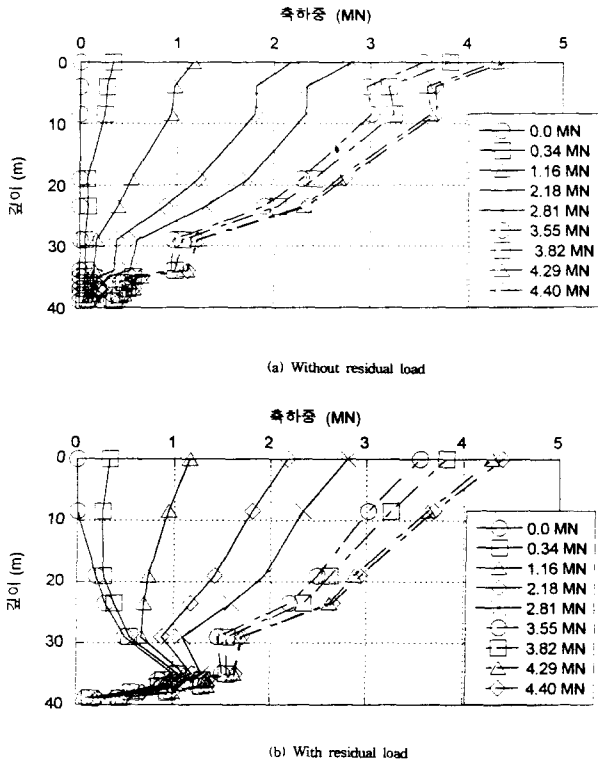


Fig. 3 Distributions of pile axial load for test pile P1

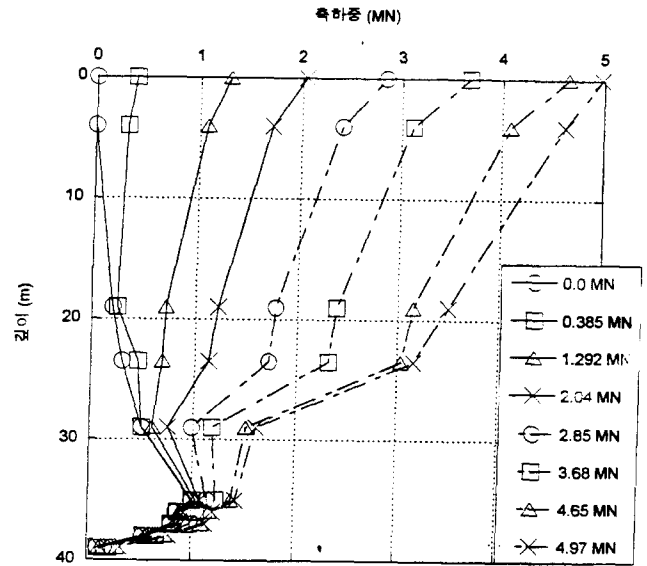


Fig. 4 Distributions of pile axial load for test pile P1-1

항타 잔류 하중을 고려하지 않고 말뚝 정재하 시험시 측정된 말뚝 축하중의 분포만을 나타내었으며, 그림 3(b)에는 항타 잔류 하중을 고려한 하중 전이 분포도를 나타내었다. 그림 4에는 시험 말뚝 P1-1에 대한 하중 전이 결과이며 시험말뚝 P1에 대한 1회의 정재하 시험후 약 16일이 경과된 후 극한 상태까지 재하하였다. 시험 말뚝 P1-1의 잔류 하중은 P1에 대한 정재하 시험 후 제하 (Unload)한 상태의 잔류 하중을 측정하여 적용시켜야 하나 측정하지 못하여 항타 설치 후 14일 경과시의 항타 잔류 하중을 그대로 적용하였다.

그림 3과 4에서 개단 강관 말뚝의 극한 지지력은 4.85 MN이었으며, 강재 선단부의 지지력은 극한 지지력의 약 8%정도임을 알 수 있고 이의 대부분은 항타시 말뚝에 잔류된 지지능력임을 알 수 있었다. 또한, 개단 강관 말뚝에서는 극한 하중 상태에 도달하더라도 강재 선단부의 지지능력은 거의 증가하지 않는 것을 알 수 있었다.

개단 강관 말뚝에서 수행된 하중 전이 실험을 통하여 말뚝 선단 강재부의 지지력과 (외주면 마찰력 + 관내토 폐색력)의 합으로 분리할 수 있었으며, 개단 강관 말뚝의 특별한 지지 성분인 관내토 폐색력은 분리하는 것이 곤란하였는 데, 관내토를 제거한 후 재하시험을 수행하여 관내토 폐색력의 크기를 직접 측정하거나 말뚝 인발 시험을 수행하여 관내토 폐색력의 크기를 측정할 수도 있을 것이다.

## 6. 결론 및 제언

국내 특정 현장에서 설계 목적의 말뚝 재하 시험과 함께 수행된 하중 전이 실험에서 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- 1) 개단 강관 말뚝에 대한 하중 전이 실험에서 방수문제, 항타에 의한 스트레인 게이지의 손상 등은 찾아볼 수가 없었으며, 항타시 말뚝에 발생된 인장파에 의해 연결용 전선이 절단되는 사례는 발견할 수 있었다.
- 2) 개단 강관 말뚝의 극한 지지력은 외주면 마찰력, 관내토 폐색력 그리고 선단 강재부 지지력의 합으로 나타낼 수 있으며, 하중 전이 실험에서 측정된 선단 강재부 지지력은 극한 지지력의 약 8%였고, 그 대부분은 말뚝 설치로 인한 잔류 하중이었다.
- 3) 하중전이 실험에서 강재 선단부 지지력과 (관내토 폐색력 + 외주면 마찰력)으로 분리할 수 있었는데, 관내토 폐색력만을 분리하여 측정하는 것은 곤란하였다. 따라서, 관내토 폐색력의 분리 측정을 위하여 관내토 제거 후 말뚝 재하 시험이나 인발 재하 시험을 수행해야 할 것이며, 이는 차후 계속 수행되어야 할 과제이다.

## 참고문헌

1. 최용규 (1997a), "설계 목적의 말뚝 재하 시험을 이용한 말뚝 기초 건설 비용 절감에 관한 연구," 대한 토목학회 논문집 심사중.
2. 최용규 (1997b), "제2 부산대교 건설 실시 설계, 설계 목적의 말뚝 재하 시험 보고서," 부산광역시 건설 안전관리 본부, 1997. 6.
3. Bozozuk, M., Keenan, G.H., & Pheeney, P.E. (1979), "Analysis of Load Tests on Instrumented Steel Test Piles in Compressible Silty Soil," *Behavior of Deep Foundation, ASTM STP 670*, Raymond Lundgren, Ed., ASTM, 1979, pp. 153-180.
4. Choi, Y., & O'Neill, M.W. (1997), "Soil Plugging and Relaxation in Pipe Pile During Earthquake Motion," *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, Vol. 123, No. 10, Oct., 1997.
5. Mansur, C.I & Hunter, A.H. (1970), "Pile Tests - Arkansas River Project," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM 5, Sept., 1970, pp. 1545-1582.
6. Matsumoto, T., Michi, Y., & Hirano, T. (1995), "Performance of Axially Loaded Steel Pipe Piles Driven in Soft Rock," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 4, April, 1995, pp. 305-315.
7. Matsumoto, T. & Tsuzuki, M. (1994), "Static Tests on Steel Pipe Piles Driven in a Soft Rock," *Proceedings, International Conference on Design and Construction of Deep Foundations*, Dec., 1994, pp. 586-600.
8. Michi, Y. Tsuzuki, M. & Matsumoto, T. (1994), "Design Parameters for Steel Pipe Piles Driven in a Soft Rock," *Proceedings, International Conference on Design and Construction of Deep Foundations*, Dec., 1994, pp. 774-788.
9. O'Neill, M.W., Hawkins, R.A., & Mahar, L.J. (1980), "Field Study of Pile Group Action ; Final Report," *Report FHWA RD - 81 - 002*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Oct., 1980.
10. O'Neill, M.W., Hawkins, R.A., & Mahar, L.J. (1982), "Load Transfer Mechanisms in Piles and Pile Groups," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 108, No. GT 12, Dec., 1982, pp. 1605-1623.
11. Vesic, A.S. (1970), "Tests on Instrumented Piles, Ogeechee River Site," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM 2, March, 1970, pp. 561-584.