

PHC 말뚝의 하중전이실험을 통한 참 지지력의 산정

Determination of True Resistance from Load Transfer Test Performed on a PHC Pile

김 성 렬¹ Kim, Sung-Ryul
정 성 교² Chung, Sung-Gyo
N. T. Dzung³

Abstract

Although a number of static pile load tests have been performed in this country, re-consideration on the interpretation and loading method is needed, because of their less usefulness in practice. For this study, a static loading testing was performed for a long instrumented PHC pile, which was installed in sand layer overlying thick soft clay. The shaft resistance of the pile had been monitored for a long time after installation, and then the static load testing was performed by the quick load test, unlike the recent Korean practice. Using the measured data, the elastic modulus of pile, residual stress and true resistance on the pile were determined. In the event, it was found that the residual stress on the pile, which remained prior to the static loading, significantly affects the shaft and toe resistances. Also, it was realized that the setup effect for the long pile is significant.

요 지

국내에서 말뚝 정재하 실험이 수많이 수행되고 있지만, 그 결과의 활용도가 낮아서 재하실험 방법과 분석방법 등에 대하여 재고할 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 두터운 연약지반 하부의 모래층에 PHC 말뚝 선단을 지지시킨 후 하중전이 정재하 실험을 수행하였다. 말뚝의 설치 이후에 장기간에 걸쳐 주변 마찰력을 측정하였으며, 국내에서 보편적으로 적용되고 있는 재하법과는 다른 급속재하법에 의하여 정재하실험을 실시하였다. 그 실험결과를 이용하여 말뚝의 탄성계수, 잔류응력 및 참 지지력을 산정하였다. 결과적으로, 재하실험 전에 말뚝에 존재하는 잔류하중이 주변 마찰력과 선단지지력에 크게 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 점성토 지반에서의 장대말뚝에 대해서는 지반의 강도회복(setup) 효과가 매우 크다는 사실을 알 수 있었다.

Keywords : PHC pile, Soft clay, Static load test, True resistance, Load transfer, Residual stress

1. 서 론

최근 국내에서는 강재가격의 상승으로 인하여 건물기초에 PHC 말뚝(Pretensioned spun High strength Concrete

pile)의 적용이 증가하고 있는 실정이다. PHC 말뚝은 고강도 콘크리트를 이용하여 기존 콘크리트 말뚝의 품질을 개선한 말뚝이다. PHC 말뚝은 강도가 기존 콘크리트 말뚝에 비해 증가되었지만, 대심도 연약지반에 설

1 정회원, 동아대학교 토목공학부 전임강사 (Member, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.)

2 정회원, 동아대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ., sgchung@dau.ac.kr, 교신저자)

3 동아대학교 토목공학부, 박사후 연구원 (Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

치되는 장대 말뚝의 경우에는 부마찰력을 고려해야 하는 설계상의 어려움은 물론 시공과정에서도 수직도, 항타 관입성을 관리해야 하는 어려움이 역시 존재하고 있다.

말뚝의 지지력을 추정하는 방법은 여러가지 있지만, 그 중 가장 신뢰할 수 있는 방법은 하중전이를 포함한 정재하실험이다. 항타말뚝에 대하여 하중전이 정재하실험을 실시한 국내의 사례를 살펴보면, 강관말뚝에 대해서는 실험사례가 일부 있으나 PHC 말뚝은 변형률계의 부착이 용이하지 않아서 하중전이 실험을 수행한 사례가 아주 희귀한 실정이다. 재하실험 및 결과의 분석방법에 대해서도 국내에서는 대부분 완속재하법을 채택하고 있으며, 지지력을 위한 결과분석 시에 잔류하중을 고려하지 않고 있는 실정이라서 다양하고 올바른 분석이 요구되고 있다. 그러나 잔류하중의 영향에 대해서는 Hanna 등(1973)에 의하여 처음으로 소개된 이래로 해외의 사례(Holloway 등, 1978; Briaud 등, 1985; Fellenius, 2002a)에서와 같이 국내에서도 부분적으로 접근(최용규 등, 1998; 박영호 등, 2000)이 시도되고 있다. 따라서 PHC말뚝의 적용을 확대하기 위해서는 진보된 방법에 의한 실험과 분석이 가급적 많이 수행되어서 자료가 풍부히 확보되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 연약 점성토가 대심도로 분포하고 있는 낙동강 하구지역에서 PHC 말뚝을 대상으로 하중전이 실험을 수행하였다. 말뚝은 공장제작단계에서 변형

률계를 PHC 말뚝 내부에 설치하였으며, 국내에서 적용되고 있는 방법과는 달리 급속재하법에 의하여 재하실험을 수행하였다. 실험에서 얻어진 자료를 이용하여 국내에서 적용하지 않는 여러 가지 분석법들을 도입하여 콘크리트 탄성계수, 잔류하중, 참지지력을 평가하였다. 그리고 동재하실험 결과와의 비교를 통하여 대심도 연약지반에서 강도회복(setup)효과의 중요성에 대하여 논의하였다.

2. 지반조건

그림 1은 부산 낙동강 하구지역에 위치한 실험현장을 보여준다. 실험이 수행된 곳의 지층구조는 상부에서부터 매립층 및 실트질 모래층(0~14m), 연약점토층(14~33m), 조밀한 중간모래층(33~41m), 점토층(41~43m), 모래층(43~57m) 그리고 모래자갈층(57m 이하)으로 구성되어 있다. 기반암은 약 100m 아래에 존재하고 있는 것으로 알려지고 있다. 상부 매립층은 약 5m 두께로 존재하고 있으며, 1990년대 중반에 매립이 실시된 것으로 보고되고 있다. 특히 33~41m에 존재하는 중간모래층은 표준관입시험 N값이 27~50으로 매우 단단하지만, 그 층의 사이에 약 2m 두께의 점토질 실트가 협재되어 있다.

본 지역에서는 약 10년 전에 매립되었음에도 불구하고 점성토층 내에는 현재까지 최대 20kPa 정도의 과잉

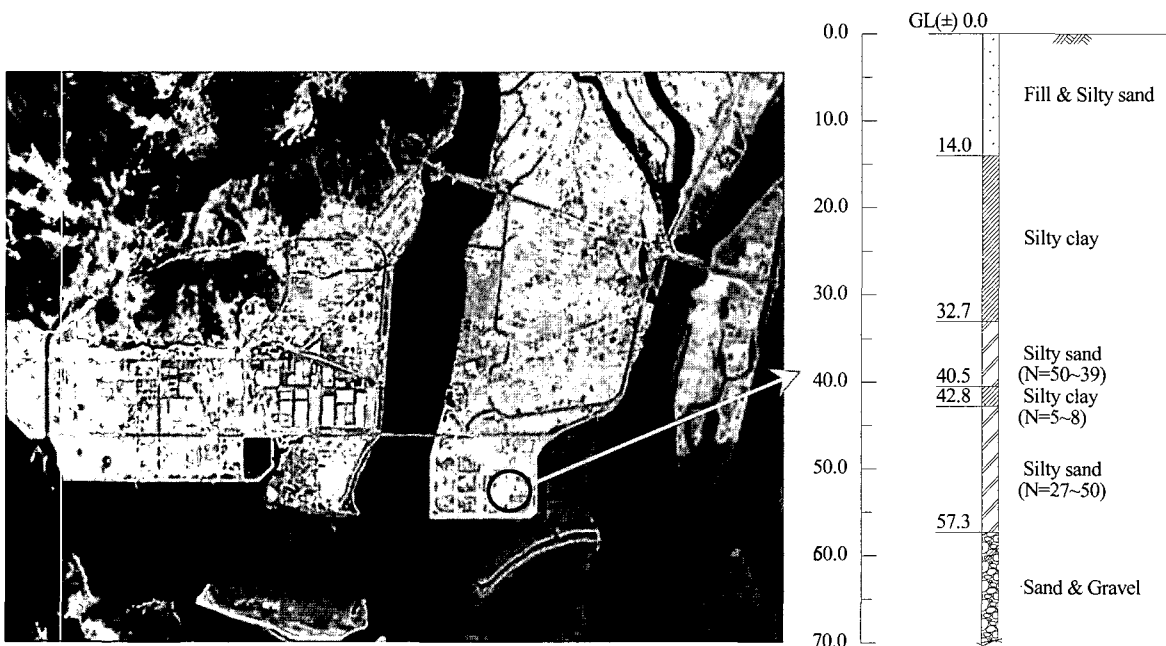


그림 1. 연구대상 현장의 위치와 지층구성

간극수압이 여전히 존재하고 있는 것으로 조사되었다.

3. 계측말뚝의 제작 및 항타

실험 대상말뚝은 외경 600mm, 내경 360mm으로서 단면적이 1810cm²이며, B타입의 PHC 말뚝이다. 말뚝 근입깊이는 35m로서, 말뚝선단이 중간 조밀한 모래층에 위치하게 된다.

그림 2는 말뚝 변형률계(strain gauge) 설치위치를 보여준다. 변형률계는 지표면 위치에 4개(1m 지점), 지표면 아래로는 3m 간격으로 양방향 2개씩 13곳의 단면에 총 28개를 설치하였다. 철근변형률계는 직경 6mm, 길이 80cm의 이형철근의 가운데 부분을 매끈하게 갈아낸 후 전기저항식 변형률계를 부착하여 제작하였다. 공장 제작 단계에서 말뚝의 철근망에 철근 변형률계를 부착한 이후에 말뚝체를 제작하였다.

말뚝의 항타는 16톤 유압 햄머에 의하여 실시되었으며, 항타 중에 연속적으로 동재하 실험을 실시하였다. 그 결과, 말뚝체에 발생한 인장 및 압축응력이 허용값보다 작았고, 말뚝의 건전도는 양호한 것으로 나타났다. 동재하실험은 초기 항타시험과 56일 경과 후 재항타시험을 실시하였다. 그리고 CAPWAP분석을 실시하여 지반의 지지력을 산정하였다. 이 결과는 정재하실험으로 얻어진 지반지지력과 비교하여 분석하였다.

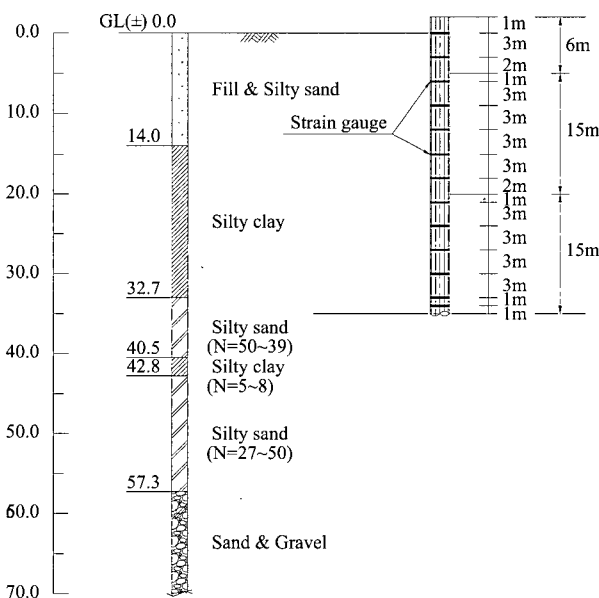


그림 2. 변형률계의 설치위치

4. 재하실험 방법

4.1 정재하실험의 시점

본 말뚝의 정재하 실험은 설치 후 166일이 경과한 시점에 수행되었다. 말뚝설치 후에 약 5개월의 경과시간은 지반이 안정화되고 말뚝체내의 부마찰력이 가급적 최대로 발휘된 상태를 기대하여 장기적인 지지력을 평가하기 위해서이다. 따라서 말뚝설치시점부터 주기적으로 말뚝체 내에서 발생하는 변형률을 측정하여 재하실험의 시점을 결정하였다.

4.2 재하실험 준비

재하실험은 ASTM 기준(1981) 등을 참고하여 다음과 같이 준비하였다.

- ① 재하실험 중에 말뚝두부의 파손을 방지하기 위하여 말뚝 두부를 고강도 몰타르 및 탄소섬유를 이용하여 보강하였다.
- ② 반력시스템은 지반앵커를 이용하였다. 반력앵커와 시험말뚝간의 순간격은 3m로서 말뚝직경의 5배가 되도록 하였다. 실험 최대 재하하중은 10,000kN으로 계획하였다.
- ③ 로드셀을 이용하여 말뚝에 가해지는 재하하중을 정확히 측정하였다.
- ④ 말뚝상부와 반력보 아래에 놓이는 철판은 재하 중에 휨변형이 발생하지 않도록 100mm 두께의 철판을 이용하였다.
- ⑤ 말뚝두부에 4개의 변위계를 설치하여 두부 침하량을 측정하였다. 변위측정 오차가 발생하지 않도록 침하봉이 닿은 면에 매끈한 유리판을 부착하였다. 변위계를 고정하도록 2개의 레퍼런스 빔을 설치하고 각각 독립적으로 거동하도록 하였다. 또한 빔의 한쪽 끝에 롤러를 설치하여 자유롭게 움직이게 함으로써 온도변화에 의한 길이변화 영향을 제거하였다. 이러한 변위계 설치방법은 ASTM 기준(1981)에 자세히 언급되어 있다.

4.3 재하실험 방법의 결정

재하실험방법은 완속재하법(slow test)과 급속재하법(quick test)이 주로 이용된다. 두 방법의 가장 큰 차이점

은 각 하중단계의 지속시간이다. 국내에서 주로 적용하고 있는 완속재하법은 말뚝두부 침하속도가 0.25mm/hr 이내가 되거나 재하 후 최대 2시간이 경과한 시점에 다음 단계의 하중을 재하한다. 반면에 급속재하법에서는 하중 지속시간이 모든 하중단계에서 일정하다.

완속재하법의 가장 큰 단점은 하중단계의 지속시간이 제 각각이므로, 재하실험 결과 및 분석의 신뢰성이 떨어지는 것이다(Fellenius, 1990). 그리고 최대하중까지의 총 하중단계수가 8단계 정도이므로 말뚝 두부의 하중-침하량 곡선 등의 형태가 부드럽지 않아 결과분석이 용이하지 않을 수 있다는 것이다. 이에 반하여 급속재하법은 최대하중까지의 하중단계수가 최소 20단계 이상이므로 그러한 문제점을 극복할 수 있다. 또한, 순침하량 항복기준을 적용하기 위해 반복재하법(cyclic loading)을 적용하는 경우가 있다. 반복하중은 말뚝주변 지반의 교란 등을 발생시켜 실험결과에 나쁜 영향을 미친다고 보고되고 있다(Fellenius, 1990).

그러므로 본 실험에서는 급속재하법을 적용하였으며, 반복재하는 수행하지 않았다. 이러한 방법에 근거하여 본 실험을 위하여 계획된 하중지속시간 및 하중증분은 아래에서와 같다. 즉, 아래의 방법으로 최대하중까지 일정한 속도로 재하(loading)를 한 후 최대 극한지지력에 도달하면 제하(unloading)를 실시하는 것으로 계획하였다.

① 재하(loading)

각 단계의 하중 지속시간 : 15min

각 단계의 하중 증분 : 200kN

② 제하(unloading)

각 단계의 하중 지속시간 : 5min

각 단계의 하중 증분 : 극한하중의 10%씩 감소

시킴

5. 재하실험 결과

재하실험의 결과는 콘크리트 탄성계수, 축하중 분포곡선, 참 주면마찰력(true shaft resistance), 잔류하중(residual load) 및 참 선단지지력 산정(true toe resistance) 등을 산정하기 위하여 국내에서는 처음으로 다음의 방법들을 적용하여 분석하였다.

5.1 잔류하중의 측정

말뚝설치 이후부터 정재하실험 직전까지 말뚝의 축

하중이 시간에 따라 변화하는 추이를 그림 3에서 보여주고 있다. 이 그림에서 보면, 말뚝 설치 후 상부에는 지표면 근처에서 상당한 크기의 인장 축하중이 계측되었는데, 이것은 수분흡수 및 장기계측 등에 따른 전기저항식 변형률계의 오차로 판단된다. 이론적으로 지표면에서의 인장 축하중은 0이 되어야 하므로, 지표면 근처의 인장 축하중을 0이 되도록 축하중 곡선을 평행이동시켰다. 그림을 보면 말뚝설치 직후부터 시험 직전까지 계속하여 압축하중이 증가하는 것을 볼 수 있다. 최대하중은 약 30m 깊이에서 3000kN 정도 발생하였다.

그림 4는 깊이 21m, 30m 및 34m 의 축하중 시간이력

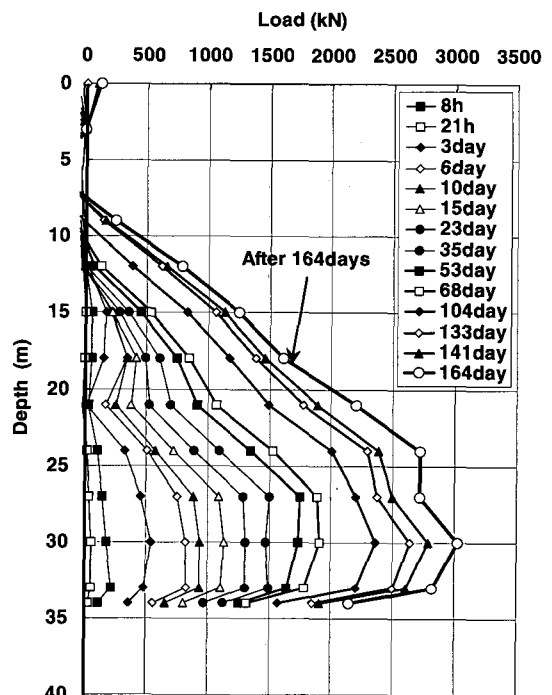


그림 3. 말뚝 설치 이후 발생한 말뚝체 축하중 계측결과

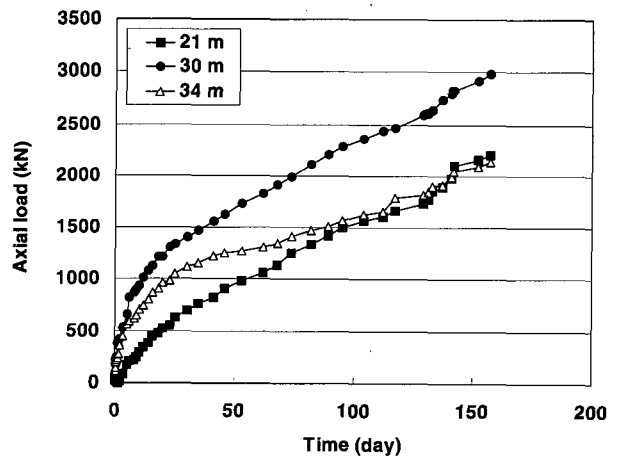


그림 4. 말뚝 축하중 시간이력

측정결과를 보여주고 있다. 말뚝 설치직후 약 2주간 말뚝의 압축하중이 급격히 증가하였다. 이것은 지반의 setup 영향이 항타 직후에 크기 때문이다. 약 2주가 지난 이후 압축하중의 증가속도는 감소되었지만 압축하중이 일정하게 계속 증가하였다. 이러한 잔류응력의 증가추이는 계속될 것으로 예상되었지만 이 시점에서 정재하실험을 실시하기로 하였다. 왜냐하면, 본 시험말뚝을 위하여 매설된 전기저항식 변형률계가 철근과의 접합점에서 Creep발생이 예상되므로 장기거동을 대하여 크게 신뢰를 가지지 못한다고 판단하였기 때문이었다.

5.2 하중-침하량 곡선

그림 5에서는 정재하실험에서 얻어진 말뚝 두부의 하중-침하량 곡선을 나타내었다. 재하하중이 최대 6850kN에 달할 때에 말뚝 두부가 파손되어 실험이 종료되었다. 최대 하중까지의 하중재하 단계는 총 36단계였다. 이 결과에 근거하면, 말뚝두부의 침하량이 Davisson의 항복 침하량 기준보다 작으므로 지반의 극한지지력은 6850kN보다 큰 것으로 판단된다.

5.3 로드셀을 이용한 재하하중 측정

일반적으로 유압잭으로부터 얻은 재하 하중값은 로드셀로 정확히 측정된 값에 비하여 약 10%~20% 정도 큰 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 말뚝두부에 로드

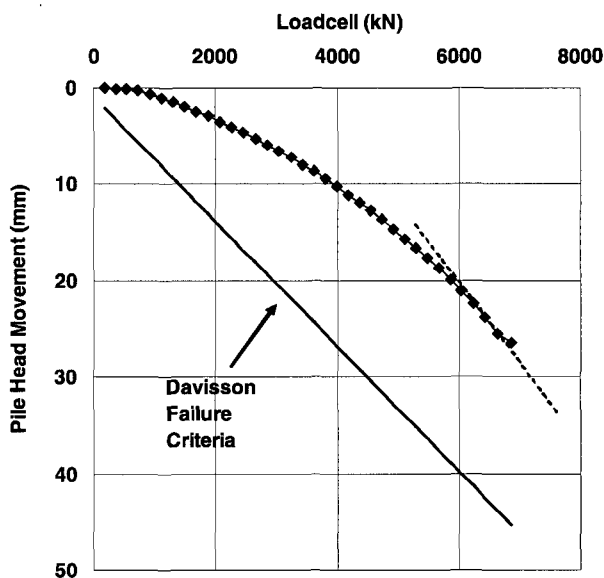


그림 5. 말뚝 두부 하중-침하량 곡선

셀을 설치하여 재하하중을 정확히 측정하였다. 그림 6은 로드셀에 의한 측정하중과 로드셀과 유압잭의 측정오차의 관계를 보여준다. 본 실험에서는 유압잭 측정하중이 로드셀 하중보다 약 5% 큰 것으로 나타났으며, 최종적으로 약 350kN 정도의 오차가 발생하였다. 그러므로 안전측의 설계를 위해서는 재하하중은 로드셀을 이용하여 측정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

5.4 말뚝재료 탄성계수의 추정 및 극한 주면마찰력 발현여부 판정

측정된 변형률에서 응력으로 환산하려면 재료의 탄성계수를 정확히 추정하는 것이 중요하다. 일반적으로 콘크리트의 탄성계수는 변형률 크기에 따라 비선형적으로 변화한다. 본 분석에서는 Fellenius(2006)의 방법을 적용하여 변형률 측정결과로부터 콘크리트 탄성계수 변화를 추정하였다. 그리고 이 결과를 이용하여 해당깊이에서 극한 주면마찰력의 발현여부를 판정하였다.

그림 7은 재하실험에서 얻어진 콘크리트 접선탄성계수(E_{tan} =재하응력 증분/변형률 증분)를 변형률에 대하여 나타낸 것으로, 변형률이 증가함에 따라 접선탄성계수는 일정한 기울기로 수렴하게 된다. 지표면에서 12m까지의 접선탄성계수는 일정한 직선(=콘크리트 접선 탄성계수값)으로 수렴하지만 그 아래 깊이에서는 여전히 수렴하지 않는다는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 수렴을 보이지 않은 말뚝하부에서는 주면마찰력이 최대(극한)로 발현되지 않은 영향 때문인 것으로 판단된다.

접선탄성계수는 지표면에 설치된 2쌍의 변형률계와

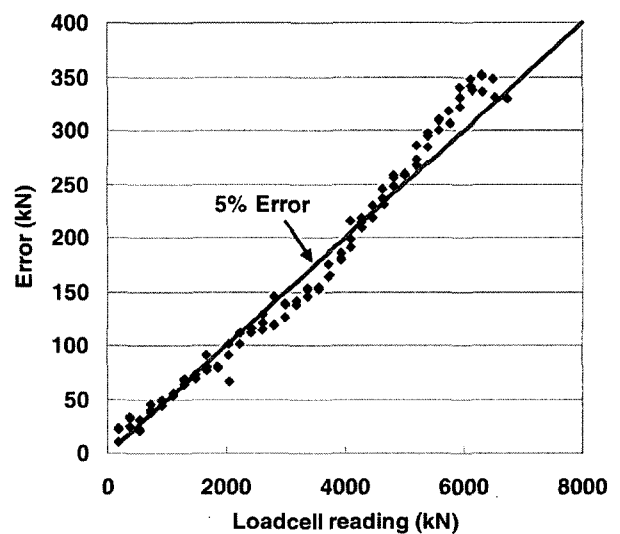


그림 6. 유압잭-로드셀 재하하중 측정결과 비교

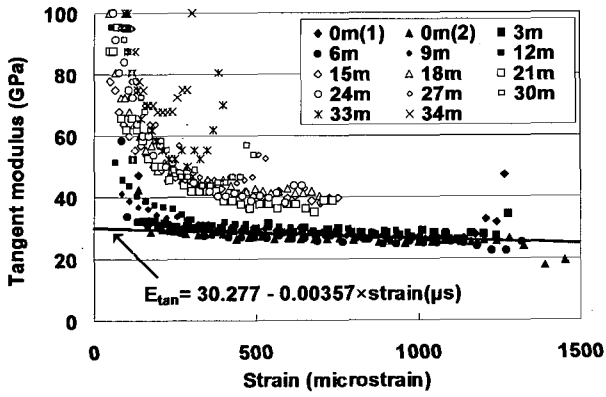


그림 7. 말뚝 콘크리트 탄성계수의 결정

3m 깊이에 설치된 1쌍의 변형률계에서 측정된 변형률의 평균값을 이용하여 산정하였다. 응력증분은 로드셀에서 측정된 하중증분을 실제단면적으로 나누어 산정하였다. 점선탄성계수의 값은 변형률이 증가함에 따라 30GPa에서 26GPa로 감소하였다. 이 탄성계수값은 PHC 말뚝의 일반적인 탄성계수값으로 사용되는 35GPa에 비하여 작은 것으로 나타났다. 이것은 실험말뚝의 콘크리트 단면내부에 계측선들이 삽입되어 단면의 강성이 감소하였기 때문으로 판단된다. 그림 7에서 나타낸 점선탄성계수 식을 변형률에 대하여 적분하면 식 (1)과 같이 응력과 변형률의 관계가 얻어진다. 이 관계식을 모든 변형률의 계측값에 적용하여 응력으로 환산하였다.

$$\sigma = \int_0^{\varepsilon} E_{tan} d\varepsilon = 30.277\varepsilon - 0.00357 \frac{\varepsilon^2}{2} \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

여기서, ε = 변형률(microstrain).

5.5 축방향 하중전이곡선

축하중은 식 (1)에 의하여 구해진 응력에 말뚝의 단면적을 곱하여 얻어진다. 그림 8은 깊이에 따른 축방향 하중전이 곡선을 보여준다. 그림에서 점선은 마지막 하중단계의 하중분포곡선을 부드럽게 나타낸 것으로 S자형 분포형태이다. 이러한 형태의 분포는 재하실험 전 말뚝체내에 존재하는 잔류하중을 고려하지 않을 때의 전형적인 결과로 알려져 있다. 잔류하중을 고려하지 않으면 주변마찰력은 실제보다 크게 평가되며 선단지지력은 작게 평가되는 잘못된 결과를 얻게 된다.

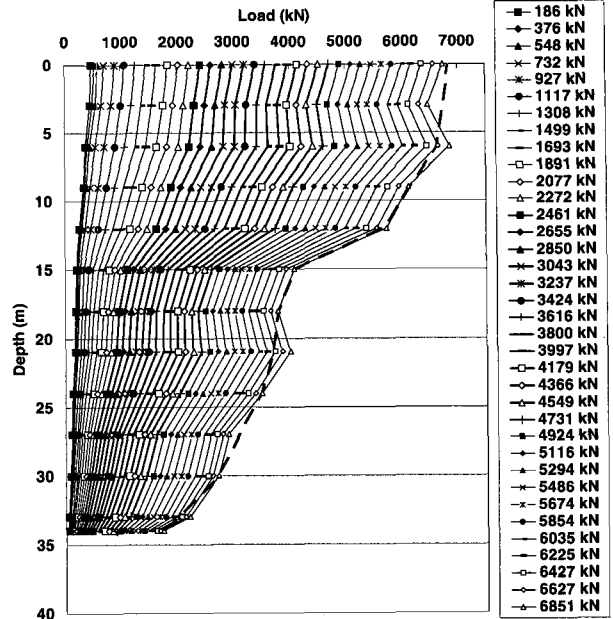


그림 8. 각 하중단계에서의 축방향 하중전이곡선

5.6 참 지지력 곡선의 주변마찰력 산정

Fellenius(2002b)는 재하실험에서 얻어진 축하중 분포곡선으로부터 잔류하중과 참 지지력(true resistance)을 산정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 말뚝의 잔류하중과 재하실험에 의한 주변마찰력이 최대에 도달한다는 가정 하에 만족스럽게 적용할 수 있다. 그림 9는 다음과 같이 이 방법을 적용하여 참 지지력 곡선을 산정하는 과정을 보여준다.

- ① 그림 8에서와 같이 마지막 하중단계에서 부드럽게 이은 축하중 분포곡선을 'FALSE(smooth)'로 정의하였다.
- ② '1/2×Shaft' 곡선은 각 깊이에서 주변마찰력의 1/2값을 'FALSE' 곡선에 더하여 구한다. 이 때 '1/2×Shaft' 곡선은 중립면의 깊이까지 참 주변마찰력(true shaft resistance)이 된다. 왜냐하면, 재하실험 중에 말뚝체 하중이 부주면 마찰력(잔류하중)을 이겨내고 정주면 마찰력으로 전이되려면 말뚝체의 변형률이 잔류하중이 없을 때보다 2배가 되어야 하기 때문이다.
- ③ 중립면이 말뚝선단에 위치한다고 가정하여 전체 말뚝체 깊이에서의 '1/2×Shaft' 곡선을 참주면 마찰력 곡선으로 가정하였다. 이 경우 재하실험 전 말뚝체내에 존재하는 잔류하중 'Residual' 곡선은 '1/2×Shaft' 곡선에서 'FALSE' 곡선을 빼주면 얻어진다.

그림 10은 그림 9에서 구한 이론적 잔류하중과 실제 계측된 잔류하중을 비교한 것으로 대체적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 측정된 잔류하중이 18m~33m에서 이론적 잔류하중보다 더 큰 것은 앞서 5.4절에서 지적한 바와 같이 재하실험 중 말뚝주면 마찰력이 최대로 발현되지 않았기 때문으로 판단된다. 35m 깊이에 위치하는 말뚝선단의 이론 잔류하중은 그림 9의 '1/2×Shaft' 곡선의 선단부분을 연장하여 얻어진 3800kN에서 'FALSE (smooth)' 곡선의 선단부분을 연장하여 얻어진 1500kN

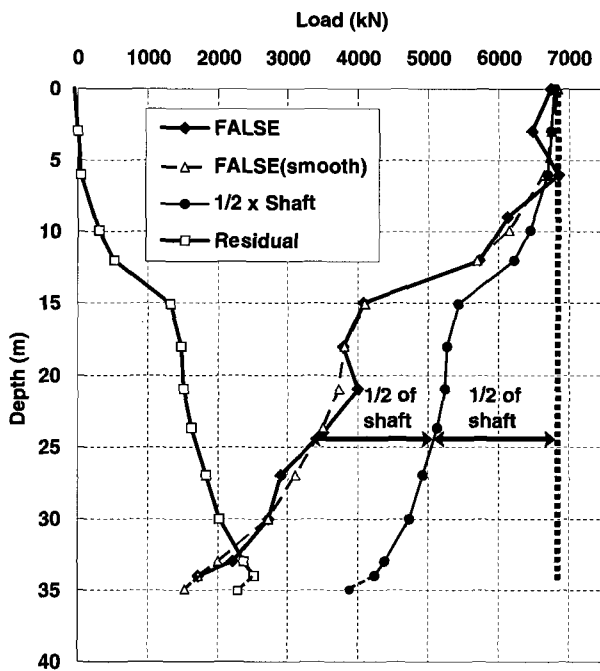


그림 9. 참 주면 마찰력 및 잔류하중의 산정

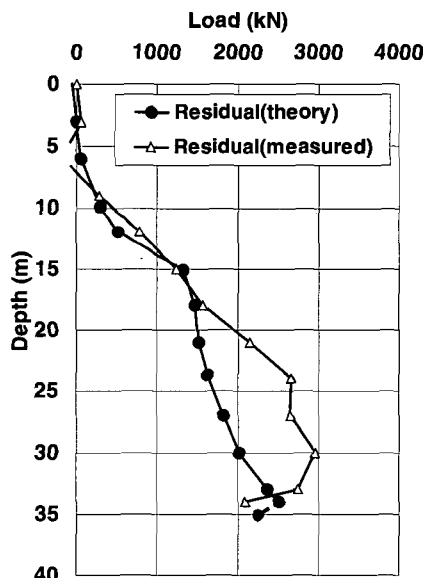


그림 10. 잔류하중 측정값과 추정값의 비교

을 빼주어 2300kN이 된다. 본 논문에서는 이론 잔류하중을 참 지지력 곡선산정에 이용하였다. 참 주면마찰력은 '1/2×Shaft' 곡선으로부터 얻어지며, 이 값은 재하 최대하중 6800kN에서 선단하중 3800kN을 빼주면 약 3000kN이 된다.

5.7 참 지지력 곡선의 선단지지력 산정

선단에서의 q-z 곡선(선단지지력-선단변위)은 말뚝선단에 재하계를 설치하여 직접 얻을 수 있다. 그러나 이러한 실험법이 불가피하게 수행되지 못하였을 경우에 아래와 같은 간이법에 의하여 참 지지력 곡선의 선단지지력(true toe resistance)을 산정할 수 있다. 즉, 말뚝 선단변위는 말뚝두부의 변위량에서 변형률계 측정결과로부터 계산되는 말뚝 압축량을 빼주면 얻어진다. 그러나 본 실험의 경우, 변형률계의 측정오차 등에 의하여 계산된 말뚝 선단변위가 실제로 발생할 수 없는 (-)의 값을 나타내었다.

말뚝압축량은 말뚝두부의 측정변위보다 커질 수 없으므로, 그림 11에서 볼 수 있는 바와 같이 말뚝 변형률계측값을 보정하였다. 즉, 가운데 직선은 말뚝압축량과 말뚝두부 변위가 같아질 때이므로, 말뚝두부변위-말뚝 압축량 곡선이 초기에 그 직선과 일치하며, 그 이후 이 직선 아래에 놓이도록 조정하였다. 그 결과, 변형률 측정값에 80%의 보정계수를 곱하였을 때 그림에서와 같이 말뚝의 압축곡선과 선단 변위의 관계를 얻을 수 있었다.

그림 12는 그림 11에서 얻어진 선단 변위와 그에 해

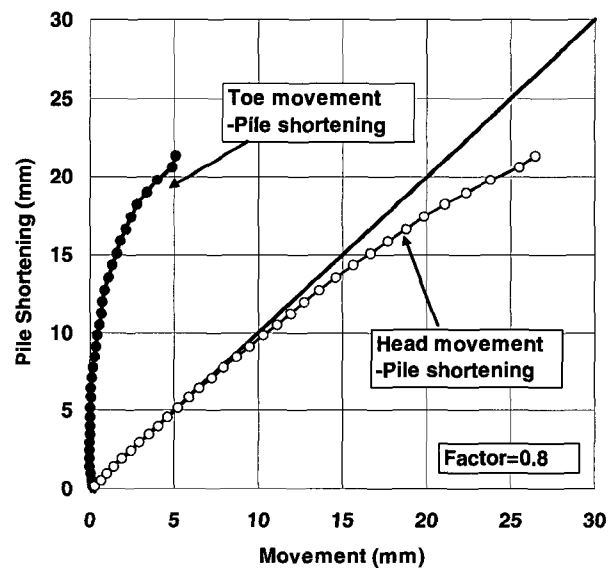


그림 11. 변형률 측정결과와의 보정(보정계수=80%)

당하는 말뚝의 선단하중을 이용하여 얻어진 말뚝 선단 하중-선단변위 곡선이다. 이 곡선에서 초반부의 기울기가 급한 것은 말뚝선단의 잔류하중만큼 말뚝체내에 선행압력(prestress)이 작용하고 있기 때문이다. 그림에서 선단변위가 0일 때의 점은 그림 10에서 얻어진 선단 잔류하중 2300kN을 나타낸다.

본 연구에서는 식 (2)를 이용하여 말뚝 선단하중-선단 변위 곡선($R_{mob}-\delta_{mob}$ 곡선)을 모사하였다. 이 식에서 얻어진 곡선은 그림 12의 말뚝 선단하중-선단변위 곡선의 후반부와 만나고, 잔류하중 2300kN을 지나야 한다. 그림 12의 선단하중-선단변위 곡선과 잔류하중 점을 평행 이동시키고, 식 (2)의 입력값 R_{ult} , δ_{ult} , e 값을 수정하면서 식 (2)의 곡선이 잔류하중 점과 선단하중-선단변위 곡선의 후반부를 지나도록 하였다.

그 결과, $R_{ult}=3420kN$, $\delta_{ult}=4mm$, $e=0.25$ 를 입력시키고 그림 12의 곡선과 잔류하중 점을 0.7m만큼 평행이동 시킬 경우 그림 13과 같은 최적의 곡선을 얻을 수 있었다. 결과적으로, 참 선단지지력(true toe resistance)은 10mm

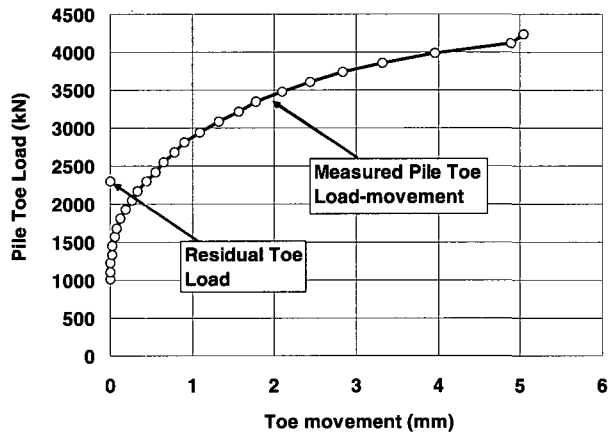


그림 12. 말뚝 선단하중-선단변위 곡선

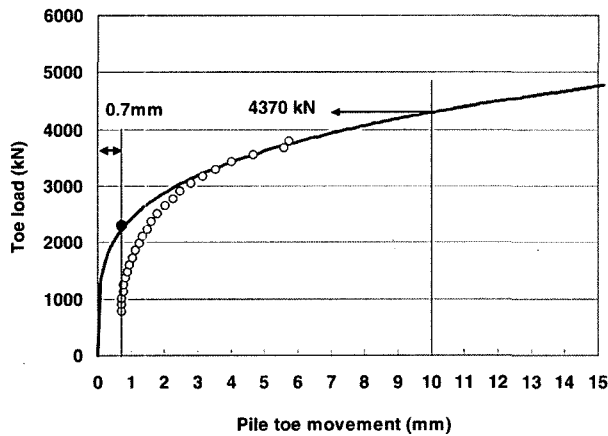


그림 13. 극한 선단지지력의 결정

의 선단변위에 해당하는 4370kN으로 결정할 수 있다.

$$\frac{R_{mob}}{R_{ult}} = \left(\frac{\delta_{mob}}{\delta_{ult}} \right)^e \quad (2)$$

여기서, R_{mob} : 선단지지력

R_{ult} : 선단 극한지지력(=3420kN)

δ_{mob} : 선단변위

δ_{ult} : 선단 극한지지력에서의 선단변위(=4mm)

e : 상수(=0.25)

5.8 극한 지지력 곡선 산정

그림 14는 최종적으로 결정된 참 지지력 곡선(TRUE)과 재하실험의 하중분포곡선(FALSE)을 비교하여 보여 준다. 재하실험의 하중분포 곡선에서 얻어진 주변마찰력과 선단지지력은 각각 5130kN과 1720kN이며, 총 지지력은 6850kN이다. 그러나 참 지지력 곡선의 주변마찰력과 선단지지력은 각각 3000kN과 4370kN이며, 총 지지력은 7370kN으로 나타났다. 잔류하중을 고려하지 않고 q-z 곡선을 이용하여 극한선단지지력을 추정하지 않을 경우 참 지지력과 비교하여 선단지지력은 무려 약 60%(약 2600kN) 과소평가되고, 주변마찰력은 약 70%(약 2100kN) 정도 과대평가됨을 알 수 있다. 이 분석결과는 잔류하중을 고려한 재하실험 결과의 분석이 매우 중요하다는 것을 보여준다.

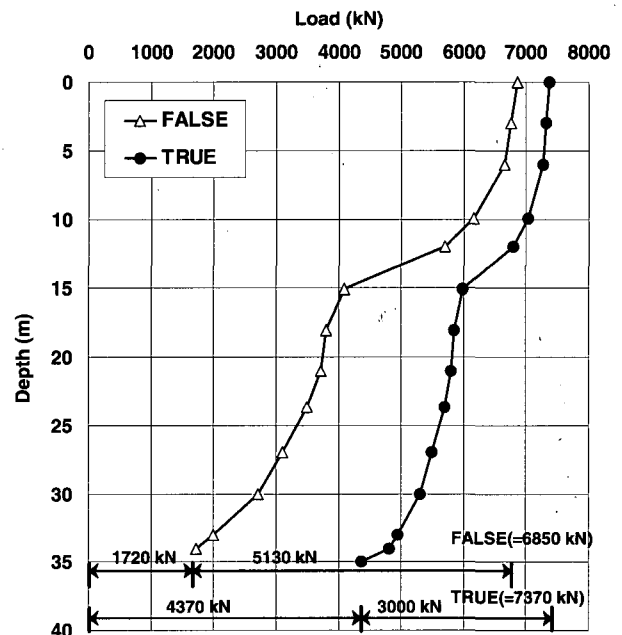


그림 14. 참 지지력 곡선과 재하실험 곡선의 비교

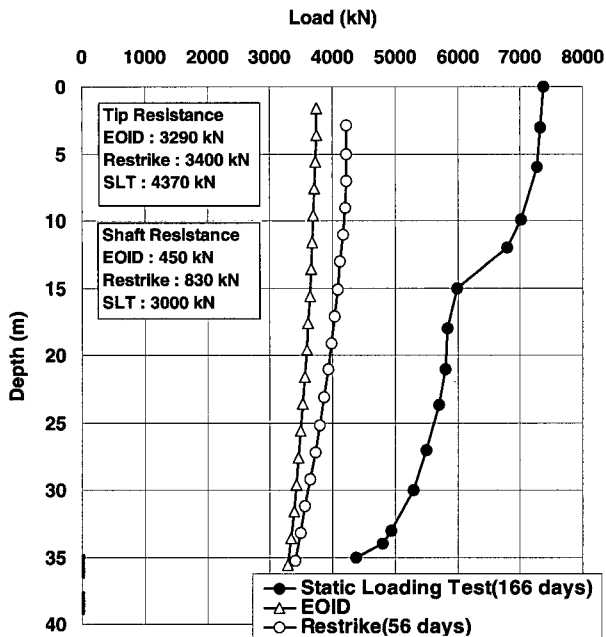


그림 15. 참 지지력 곡선과 동재하 실험결과와의 비교

5.9 동재하 실험 결과와의 비교

그림 15는 동재하실험에서 얻어진 지지력과 참 지지력을 비교한 것이다. 동재하실험의 지지력 곡선은 초기 항타(EOID)와 항타 후 56일 경과시점에서의 재항타(Restrike)결과에 대해 CAPWAP 분석을 수행하여 산정하였다. 동재하실험의 지지력 곡선 역시 Fellenius의 방법을 적용하여 얻어진 참지지력 곡선이다. 선단저항력의 경우, 정재하실험에 의한 참지지력 곡선의 값이 동재하실험보다 크게 얻어졌는데, 그 이유는 동재하실험 시에 선단변위가 작아서 저항력이 완전히 발현되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 주변마찰력의 경우 동재하실험의 초기 항타시의 450kN에 비하여 재항타시(56일 경과) 830kN으로 약 2배 증가하였으며 정재하실험시(166일 경과) 약 3000kN으로 약 7배 정도 증가하였다. 이 결과는 주변지반의 setup 효과가 대단히 크다는 것을 보여준다. 일반적으로, 말뚝의 근입길이에 관계없이 말뚝설치 후 약 2주 경과 후에 재하실험을 수행하지만, 이것은 지반 setup 효과를 고려하지 않아 지반 지지력을 매우 과소평가하게 된다는 사실을 알 수 있다.

6. 결론

낙동강 하구지역의 대심도 연약지반에 설치된 PHC 말뚝에 대하여 하중전이 실험을 수행하여 다음의 결론

을 얻었다.

- (1) 국내에서 일반적으로 수행되는 완속재하시험법 대신에 급속재하시험법을 적용하여 실험을 수행하였다. 이 결과 최대하중까지의 하중단계수가 많아 부드러운 하중침하곡선을 얻을 수 있었으며, 각 하중단계의 지속시간이 일정하여 별도의 보정 없이 각 하중단계의 결과를 비교할 수 있다는 장점이 있는 것으로 나타났다.
- (2) 콘크리트 탄성계수, 잔류하중, 참 지지력 곡선의 산정은 이제까지 국내에서 적용되지 않았던 분석법들을 이용하여 재하실험 결과를 분석하였다. 그 결과 정밀분석 없이 재하실험만으로 얻어진 지지력은 참 지지력(true resistance)과 비교하여 선단지지력을 약 60% 과소평가하고, 주변마찰력을 약 70% 정도 과대평가하였다. 따라서 잔류응력을 무시한 재하실험만의 결과분석은 그릇된 결과를 주는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 동재하실험에 의한 지지력과 비교해본 결과, 대심도 연약지반에 설치된 말뚝은 주변지반의 setup 효과가 대단히 큰 것으로 나타났다. 지반 setup 효과를 고려하여 정확한 지반 지지력을 산정하려면 말뚝 설치 후 지속적인 계측을 수행하여 말뚝 변형이 안정화된 시점에 재하실험을 수행할 필요가 있다는 것을 알았다.

감사의 글

본 논문은 (주)영조주택의 지원 하에서 수행된 것임을 밝히며, 이에 감사를 표한다.

참고 문헌

1. 박영호, 정경자, 김성환 (2000), "일체식 교량에 사용된 H 말뚝의 축방향 지지거동", *대한토목학회논문집*, 제20권 제3호, pp.281-290.
2. 최용규, 정성기, 권오균 (1998), "개단 강관말뚝의 하중전이실험에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제18권, 제3호, pp.241-250.
3. ASTM D 1143-81 (1981), "Standard test method for piles under static axial compressive load", *American Society for Testing and Materials*.
4. Briaud, J.L. and Tucker, L.T. (1984), "Piles in sand : a method including residual stresses", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.11, pp.1666-1680.
5. Fellenius B.H (1990), *Guidelines for the Interpretation and Analysis of the Static Loading Test*, Deep Foundations Institute,

- pp.4-7.
6. Fellenius B.H. (2002a), "Determining the resistance distribution in piles, Part 1: Notes on shift of no-load reading and residual load", *Geotechnical news magazine*, Vol.20, No.2, pp.35-38.
 7. Fellenius B.H. (2002b), "Determining the resistance distribution in piles, Part 2: Method for determining the residual load", *Geotechnical news magazine*, Vol.20, No.3, pp.25-29.
 8. Fellenius B.H. (2006), *Basics of foundation engineering*, Electronic Edition, pp.8-25 ~ 8-32.
 9. Hanna, T.H. and Tan, R.H.S. (1973), "The behavior of long piles under compressive loads in sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.10, No.3, pp.311-340.
 10. Holloway, M., Clough, G.W., and Vesic, A.S. (1978), "A rational procedure for evaluating the behavior of impact-driven piles", *ASTM Symposium on Behavior of Deep Foundations*, ed. R. Lundgren, Special Technical Publication STP 670, pp.335-357.

(접수일자 2006. 7. 10, 심사완료일 2006. 9. 13)