

# 양방향 재하시험을 이용한 말뚝의 하중-변위곡선 추정방법

## Method of Estimating Pile Load-displacement Curve Using Bi-directional Load Test

권 오 성<sup>1</sup> Kwon, Oh-Sung

최 용 규<sup>2</sup> Choi, Yong-Kyu

권 오 균<sup>3</sup> Kwon, Oh-Kyun

김 명 모<sup>4</sup> Kim, Myoung-Mo

### Abstract

For the last decade, the bi-directional testing method has been advantageous over the conventional pile load testing method in many aspects. However, because the bi-directional test uses a loading mechanism entirely different from that of the conventional pile load testing method, many investigators and practicing engineers have been concerned that the bi-directional test would give inaccurate results, especially about the pile head settlement behavior. Therefore, a bi-directional load test and the conventional top-down load test were executed on 1.5 m diameter cast-in-situ concrete piles at the same time and site. Strain gauges were placed on the piles. The two tests gave similar load transfer curves at various depth of piles. However, the top-down equivalent curve constructed from the bi-directional load test results predicted the pile head settlement under the pile design load to be about one half of that predicted by the conventional top-down load test. To improve the prediction accuracy of the top-down equivalent curve, a simple method that accounts for the pile compression is proposed. It was also shown that the strain gauge measurement data from the bi-directional load test could reproduce almost the same top-down curve.

### 요 지

1990년대 이후로 양방향 재하시험(Bi-directional pile load test)은 기존 재하시험 방법에 대한 장점으로 인해 최근 여러 나라에서 그 사용이 증가하고 있다. 그러나 양방향재하시험은 두부재하시험과 상이한 재하기구를 따르므로 실제 구조물의 거동, 특히 말뚝 두부에서의 하중-변위 거동에 있어 실제와 다른 결과를 줄 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 동일한 형상과 지반조건을 갖는 두 본의 말뚝에 대해 한 본은 두부재하 방식으로, 한 본은 선단부 양방향 재하방식으로 정재하시험을 수행하였으며, 이 때 말뚝 깊이별로 변형률계를 부착하여 말뚝의 하중-전이 기구를 분석하였다. 변형률계 분석으로 구한 말뚝의 깊이별 하중 전이 함수의 모양은 시험방법에 따른 큰 차이를 보이지 않았으나, 양방향 재하시험을 이용하여 기존의 방법으로 추정된 말뚝두부 변위는 두부재하시험으로 구한 변위에 비해 사용하중하에서 1/2 미만인 것으로 나타났다. 양방향 재하시험 결과를 이용하여 보다 정확한 하중-변위곡선을 예측하기 위해 말뚝의 탄성압축량을 고려하는 간단한 방법을 제안하였다. 또한 양방향 재하시험시 변형률계 계측자료를 이용하여 두부재하 시험 곡선과 거의 동일한 하중-변위 곡선을 예측할 수 있었다.

**Keywords :** Bi-directional load test, Equivalent top-down curve, Load-transfer mechanism, Top-down load test

1 정희원, 대림산업(주) 기술연구소 대리 (Member, Ph.D., Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd., kwonos1@daelim.co.kr)

2 정희원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kyung Sung Univ.)

3 정희원, 계명대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Keimyung Univ.)

4 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

양방향 재하시험(Bi-directional pile load test, BD PLT)은 일반적인 두부재하방식의 정재하시험에 비해 경제성, 큰 재하능력, 간소한 재하 장비, 선단과 주변지 지력을 분리추정할 수 있는 등의 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인해 최근 미국에서는 현장타설말뚝에 대한 재하시험의 90% 이상이 이 방법으로 이루어지고 있으며 10여개국 이상에서 이 방법의 사용이 증가하는 추세이다(Osterberg, 1998). 한편, 국내에서도 최근 몇 년 동안 양방향 재하시험의 현장적용성 연구 및 시험장비의 국산화 연구가 진행되고 있다(정창규, 2004).

그러나 양방향 재하시험은 일반적인 두부재하시험과는 전혀 다른 재하방식에 의해 시험을 수행하기 때문에 두부재하시험과 상이한 결과, 특히 말뚝 두부에서의 하중-변위곡선을 예측함에 있어서의 오차가 있을 수 있다는 우려가 있는 것도 사실이다. 말뚝이 동일한 조건에서 시공되었을 경우 양방향 재하시험과 일반 두부재하시험 결과가 유사하다는 몇몇 연구(Ogura et al., 1996; Kishida et al., 1992)가 있으나, 이는 단순히 특정한 지반 조건하에서 두부/선단 하중-변위 곡선의 비교에 한정된다. 실제로 양방향 재하시험은 말뚝 주변부에 가해지는 하중의 방향이 기존의 재하시험과 반대이며, 기존에 제안되어 있는 등가하중침하곡선 작도방법 적용시 말뚝의 탄성압축량을 무시하는 등 기존 두부재하시험과는 다른 특성을 가지므로, 두부재하시험의 대안으로써의 양방향 재하시험의 적용성에 관한 연구가 필요하다.

본 연구는 부산 N현장의 교각 기초로 시공중인 현장타설 콘크리트 말뚝의 해상부 재하시험시 기존 두부재하시험 장치의 설치 및 적용의 난이성에 따른 대안으로 양방향 재하시험의 적용성 검토를 위해 시작되었다. 연구대상 현장은 교각 기초로 직경 1.5m, 총 길이 33.5m, 암반근입깊이 5.0m인 현장타설 콘크리트말뚝 8본이 군말뚝 형태로 설계되었으며 이 중 한 본의 말뚝에 대해 두부재하방법으로 재하시험을 수행하였다. 또한 이 기초와 5m 정도 떨어진 위치에 동일한 직경과 길이로 시험말뚝을 한 본 더 시공한 후 양방향 재하시험을 수행하였으며, 각 재하시험말뚝의 하중-전이거동 분석을 위해 각 말뚝에 깊이별로 변형률계를 설치하여 말뚝의 하중 전이기구를 측정하고자 하였다. 그림 1에 시험말뚝 및 지반조사 위치 평면도를 도시하였다.

## 2. 말뚝재하시험

### 2.1 지반조건

재하시험 대상부지의 기반암은 심한 풍화(Highly weathered, HW)에서 완전 풍화(Completely weathered, CW)로 분류되는 화산 각력암이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 재하시험 말뚝 중 한 본(P1)은 양방향 재하시험을 위한 시험말뚝으로 시공되었으며, 다른 한 본(P2)의 말뚝은 교각기초로 이용될 사용말뚝으로 두부재하 방식에 의해 재하시험을 수행하였다.

그림 1에 표시된 위치에서 수행된 총 4곳의 시추조사 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 때, BH1~BH3 시추공에 대하여 수행된 표준관입시험 결과도 함께 도시하였다. 그러나 BH-4 위치에서는 공내재하시험과 전길이의 시료채취를 위해 표준관입시험을 수행하지 않았다. 보링조사 및 채취된 비교란시료에 대한 물성시험 결과, 대상지반은 상부 매립층(Silty sand, SM), 상부 퇴적토층(Low plasticity clay, CL), 하부 퇴적토층(Clayey gravel, GC), 풍화암(CW), 연암(HW~MW) 순으로 분포하며, 지하수위는 지표면에서 1.8m 하부에 위치하였다. 시추조사 및 표준관입시험 결과 각 지층의 두께와 지반조건은 공변에 따라 큰 차이가 없으나, 하부 퇴적토층의 경우 두부재하시험 말뚝에 가장 가까운 BH-3에서 수행한 표준관입시험 N 값이 다른 시추공에서의 값보다 상당히 크게 나타났다. 시추 깊이는 기반암선 하부 최소 5m 이상(최대 7m)까지 조사하는 것으로 하였으며, 채취된 암반시료에 대한 육안조사 결과 RQD 값은 완전히 풍화된 암반(Completely weathered)의 경우 0, 심하게 풍화된 암반(Highly weathered)의 경우 30% 내외였다. 암반 상태 및 깊이에 따른 암반 물성의 변화를 알아보기 위해 그림 2에 표시된 위치에서 공내재하시험을 실시하였으

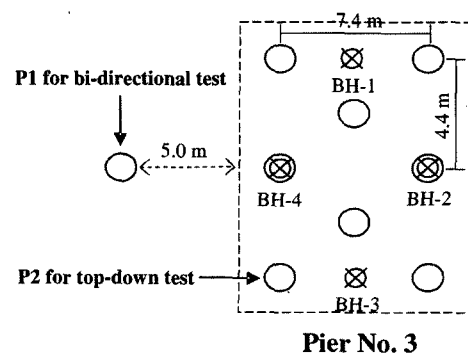


그림 1. 시험말뚝 및 지반조사 위치

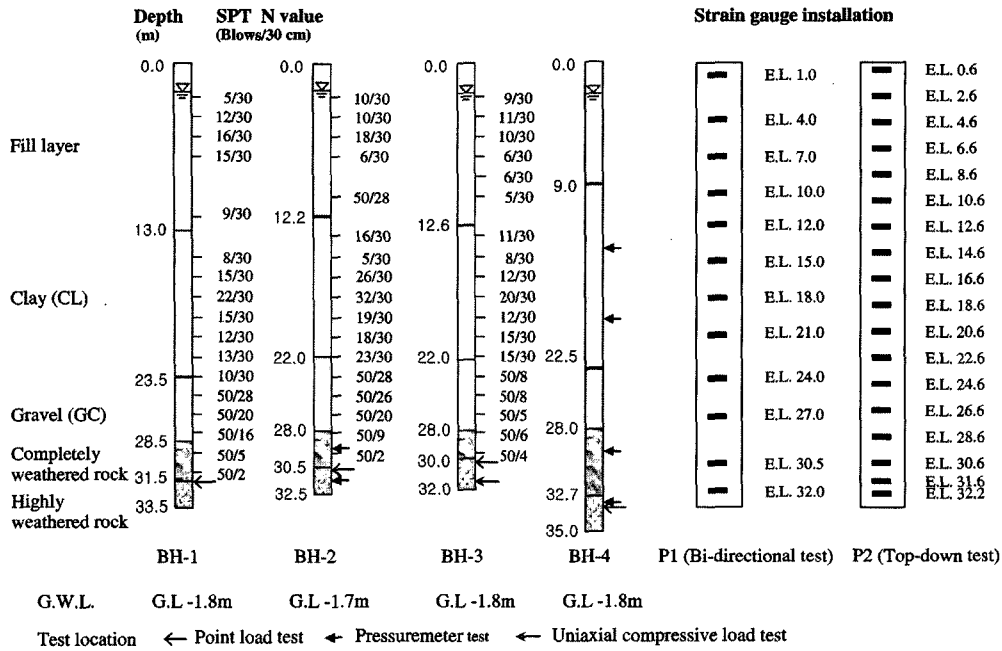


그림 2. 지반조사 결과 및 변형률계 설치 위치

표 1. 대상암반에 대한 현장/실내시험 결과

공 번	깊 이 (m)	$q_u$ (MPa)	$E_i$ (MPa)	$E_{ur}$ (MPa)	비 고
BH-1	31.5	71.4	-	-	점하중시험
BH-2	30.6	80.0	-	-	점하중시험
BH-3	30.2	82.8	-	-	점하중시험
BH-3	31.5	87.2	-	-	일축압축시험
BH-4	33.1	72.3	-	-	점하중시험
BH-2	29.2	-	105.6	252.7	공내재하시험
BH-2	31.7	-	147.0	283.0	공내재하시험
BH-4	33.3	-	154.3	388.9	공내재하시험

※  $E_i$ ,  $E_{ur}$ 은 각각 공내재하시험 변형률계수(Initial loading modulus) 및 탄성계수(Unloading-reloading modulus)

며, 채취된 암석시료에 대한 일축압축시험과 점하중 시험을 수행하였다. 암반근입부의 현장/실내시험 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1에서 보는 바와 같이, 암석 시료의 일축압축시험과 점하중 시험 결과 암석의 일축압축강도는 71.4~87.2MPa 정도였으며, 공내재하시험으로부터 구한 암반의 변형률계수는 105.6~154.3MPa 사이에 분포하였다. 그러나 시험 위치 및 심도에 따른 암반 물성의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

## 2.2 시험말뚝 시공 및 계측기 설치

말뚝 시공을 위한 굴착방법은 토사층의 경우에는 요동식 올케이싱 공법을, 암반층의 경우에는 RCD(Reverse circulation drilling) 공법을 적용하였다. 토사층에서는

케이싱을 회전압입한 후 케이싱 내부의 흙을 해머그랩으로 굴착하였으며, 암반층은 케이싱 선단에서 암반을 RCD에 의해 갈아낸 후 굴착하였다. 암반근입 깊이는 5m로 설계되었다. 굴착 완료 후 선단부 굴착 슬라임은 RCD 장비 중앙에 위치한 파이프를 통해 제거하였으며, 파이프에서 깨끗한 물이 나올 때까지 흡입하여 굴착 슬라임의 제거를 확인하였다. 굴착 및 선단 슬라임 처리 완료 후 보강철근망을 삽입하고 콘크리트를 타설하였으며, 콘크리트 양생 후 공대공 초음파 탐상(Crosshole Sonic Logging)을 통하여 말뚝의 건전도를 확인하였다.

양방향 재하시험용 말뚝(P1)에는 말뚝 선단부에 위치한 유압잭의 상판과 하판에 각각 한 쌍씩의 변위봉을 부착하여 하중에 따른 상·하단 변위를 측정하였으며, 말뚝 두부에 총 4개의 변위계를 설치하여 두부 변위를 측정하였다. 또한 그림 2에 보인 바와 같이 재하하중에

표 2. 재하장치 및 시험하중

재하시험 방법	양방향 재하시험(P1)	두부재하시험(P2)
계획 재하단계	8 cycle 20,000kN	8 cycle 35,000kN
최대 시험하중	19,500kN	35,000kN
재하 장치	복수 유압잭 600 tons × 4EA	반력 앵커 Earth anchor × 32 EA

다른 말뚝의 하중 전이 기구를 예측하기 위해 각각의 시험말뚝에 깊이별로 전기저항식 철근 변형률계 한 쌍 (180° 방향)과 전기저항식 콘크리트 변형률계 한쌍(180° 방향)을 부착하여 말뚝의 깊이별 변형률을 측정하였다.

재하시험 방식은 양방향 재하시험 및 두부재하시험 모두 ASTM D1143-81에서 규정하고 있는 완속 표준재하방식과 반복재하방식에 따라 수행하였으며, 각각의 시험을 위한 재하 장치 및 시험하중을 표 2에 정리하였다.

전절에서 언급한 바와 같이 양방향 재하시험용 말뚝 (P1)은 시험말뚝으로 시공되었으며, 두부재하시험 말뚝 (P2)은 실제 교각 3의 기초로 사용될 군말뚝 중 하나로 시공되었다. 그러나 재하시험은 교각 3의 다른 말뚝이 시공되기 전에 수행하였으므로 군말뚝 효과는 고려할 필요가 없었다.

### 2.3 재하시험 결과

그림 3과 그림 4에 각 시험말뚝의 재하시험 결과에서 얻어진 하중-변위 곡선을 도시하였다. 표 2와 그림 3에서 나타난 바와 같이 양방향 재하시험말뚝(P1)의 경우 계획 최대하중에 못미치는 재하하중 19,500kN에서 시험을 종료하였는데, 그 이유는 최대 재하하중에서의 유압잭의 상향 변위(19mm)와 하향 변위(214mm)의 합이 최대 스트로크인 250mm에 근접하였기 때문이다. 말뚝 선단부에서 발생한 과도한 침하의 원인은 말뚝 선단부 콘크리트 타설 방법에서 찾을 수 있다. 즉, 선단부 유압잭과 말뚝 선단 사이의 공동은 유압잭 상판과 하판에 뚫린 구멍을 통해 중력식으로 타설되는 콘크리트에 의해 채워지게 되는데, 이러한 타설방법은 선단부 콘크리트의 강성을 저하시킬 가능성(예를 들어 재료분리, 말뚝선단과 지반 사이의 공동 등)이 있다. 상기의 문제를 극복하기 위해 차후에는 트레미관을 하판 아래까지 삽입하여 굴착 바닥면부터 압력식 타설이 가능하도록 상부판과 하부판의 구멍을 확대시키거나, 트레미관을 하판 하부까지 유도하는 장치 등을 설치하는 등의 보강방

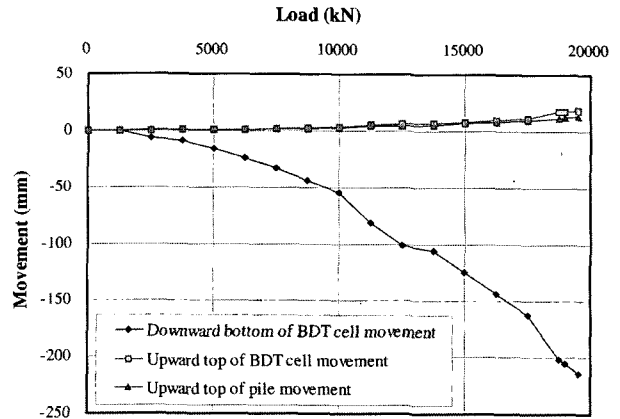


그림 3. 양방향 재하시험(P1) 결과

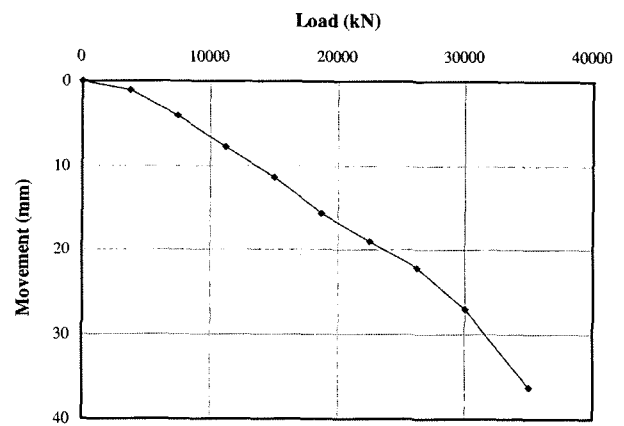


그림 4. 두부재하시험(P2) 결과

안이 필요할 것으로 생각된다. 말뚝 선단부에서부터 압력식 콘크리트 타설에 의해 시공한 두부재하시험말뚝 (P2)의 경우, 그림 4에서 보는 바와 같이 설계하중의 약 3배인 최대 재하하중 35,000kN에서 말뚝의 항복은 일어나지 않았으며, 이 때의 두부변위는 36mm 이었다.

그림 5와 그림 6은 각각 재하시험중 말뚝에 설치된 변형률계의 결과를 이용하여 구한 하중 단계별 깊이별 다른 말뚝의 축하중 분포곡선을 보여준다.

### 3. 재하시험 결과 비교분석

양방향 재하시험과 두부재하시험의 재하방식의 차이 점은 다음과 같이 요약할 수 있다. 1) 각각의 시험에서 말뚝과 주변지반 사이에 발현되는 주면마찰력의 방향은 반대가 된다. 2) 그림 5와 그림 6에서 알 수 있듯이, 양방향 재하시험의 경우 유압잭에 근접한 하부지반으로 하중이 먼저 전달되는데 반해 두부재하시험은 상부지반에 하중이 먼저 전달된다.

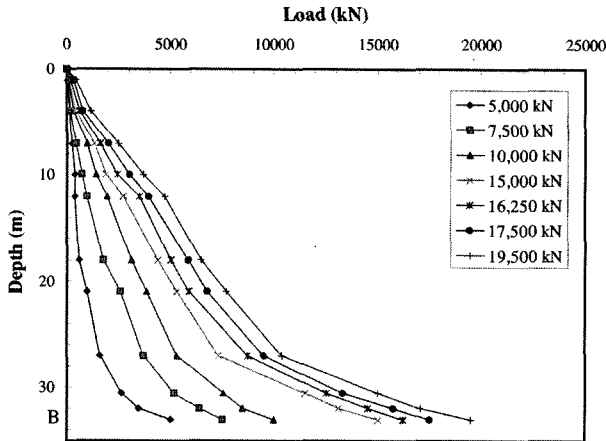


그림 5. 양방향 재하시험말뚝의 축하중 분포곡선

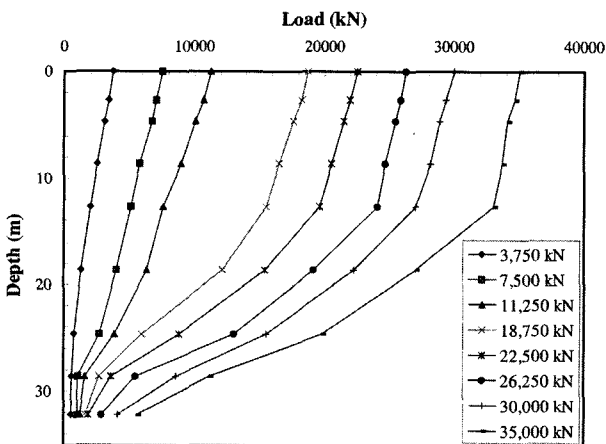


그림 6. 두부재하시험말뚝의 축하중 분포곡선

### 3.1 하중전이 기구

양방향 재하시험과 두부재하시험에서 하중재하 방식의 차이가 말뚝의 축방향 지지거동에 미치는 영향을 분석하기 위해, 각 말뚝의 변형률계 계측결과로부터 구한 깊이별 주면하중전이 곡선(f-w 곡선)과 선단하중전이 곡선(q-w 곡선)을 비교하였다. f-w 곡선은 임의의 깊이에서의 말뚝 변위에 따른 주면마찰력의 발현 정도를 나타내는 곡선이며, 변형률계 계측값으로부터 다음과 같은 방법으로 쉽게 얻을 수 있다.

1. 말뚝을 변형률계 설치 위치를 기준으로 몇 개의 분절로 나눈다.
2. 임의의 분절에서 발휘되는 평균주면마찰력(f)은 변형률계 측정값으로부터 구한 분절 상하부 축하중의 증분을 분절의 주면면적으로 나누어 구한다.
3. 임의의 분절 중앙에서의 변위(w)는 탄성이론을 이용해 구한 말뚝의 탄성압축량을 기준점(두부, 선단 등

말뚝의 변위를 알고 있는 점)의 변위에서 더하거나 빼서 구할 수 있다.

4. 위와 같이 구한 주면마찰력과 말뚝 변위를 하중단계 별로 도시하여 분절 중앙에서의 변위(w)에 따른 주면마찰력(f) 관계를 얻는다.

f-w 곡선의 모양은 일반적으로 지반조건에 따라 달라 지므로 각 시험으로부터 구한 하중전이 곡선은 지층별로 나누어 각각 그림 7(a)~(d)에 함께 도시하였으며, 선단지지력-선단변위 곡선(q-w curve)은 그림 8에 나타내었다.

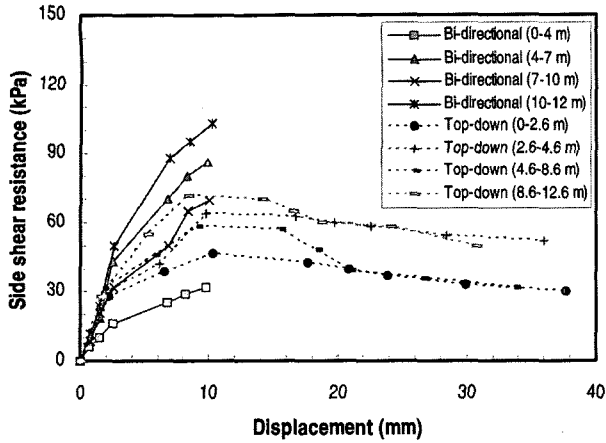
그림 7(a)는 지표면에서 -13.0m까지 분포하는 매립토층(SM)의 f-w 곡선이다. 두부재하 시험으로 구한 f-w 곡선은 극한강도를 지나 잔류상태에 도달하였으며, 양방향 재하시험으로 구한 f-w 곡선은 주면항복시의 일반적인 변위 기준으로 미루어 거의 극한값에 도달한 것으로 추정된다. 그러나 양방향재하 시험시 극한주면마찰력의 평균은 60.9kPa, 두부재하 시험시 극한주면마찰력의 평균은 64.8kPa로 그 값의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

그림 7(b)는 상부 퇴적토층(CL)에서의 f-w 곡선을 나타낸다. 양방향 재하시험의 극한주면마찰력이 대체적으로 두부재하 시험에서의 극한주면마찰력보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 두 말뚝이 설치된 위치에서의 지반조건이 국부적으로 다르기 때문으로 추정된다. 특히 두부재하시험 말뚝에서 심도 18.6m~24.6m 위치의 f-w 곡선으로부터 추정된 극한주면마찰력은 양방향 재하시험말뚝의 지지력에 비해 2배 이상 크다. 이러한 차이의 원인은 두부재하시험말뚝에 가장 가까운 BH-3 공의 시추조사 결과로 미루어 볼 때 깊이 22.0m 이하 N값 50 이상인 지층의 상대적으로 큰 지지력 때문인 것으로 판단된다.

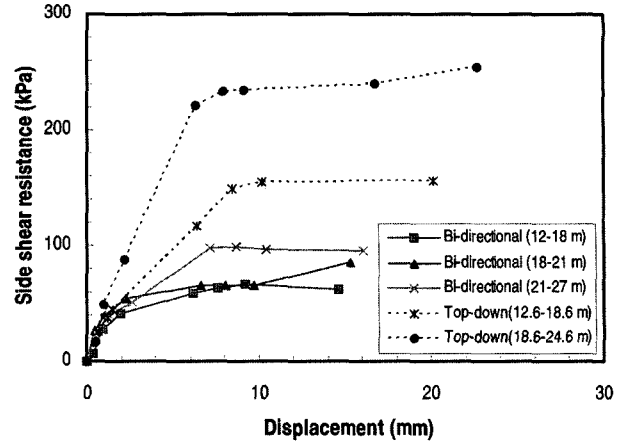
그림 7(c)는 하부퇴적토층(GC)에서의 f-w 곡선을 나타내는데, 각 시험으로부터 얻은 곡선의 모양은 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 7(d)는 기반암층에서의 f-w 곡선이며, 두부재하 시험 곡선이 양방향재하시험 곡선에 비해 적은 양의 주면마찰력이 유발된 것을 제외하고는 두 곡선이 거의 일치함을 알 수 있다.

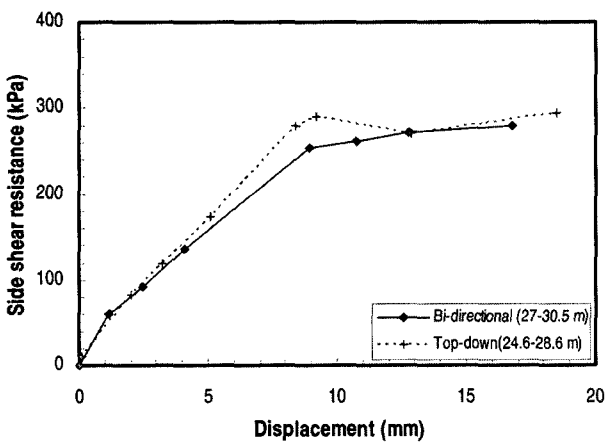
그림 8은 말뚝 선단부의 q-w 곡선을 도시한 것이다. 두부재하시험이 양방향재하시험과는 달리 매우 적은 양의 선단저항력을 유발하였다. 그러나, 동일 침하량에



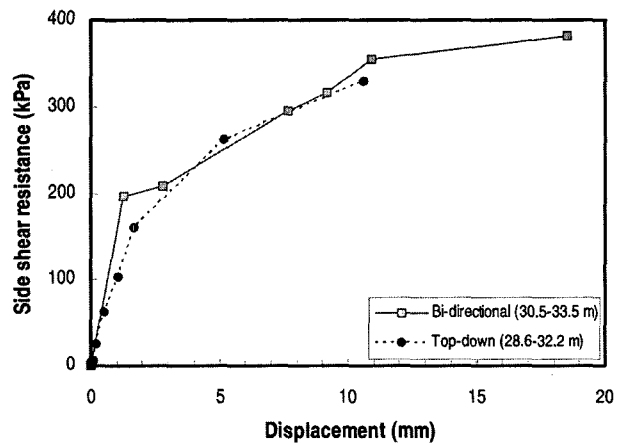
(a) 매립층(SM, 0-13.0m)



(b) 상부퇴적토층(CL, 13.0-25.2m)



(c) 하부퇴적토층(GC, 25.2-28.5m)



(d) 기반암층(HW/CW, 28.5-33.5m)

그림 7. 재하방식에 따른 주변하중전이곡선(f-w curve)의 비교

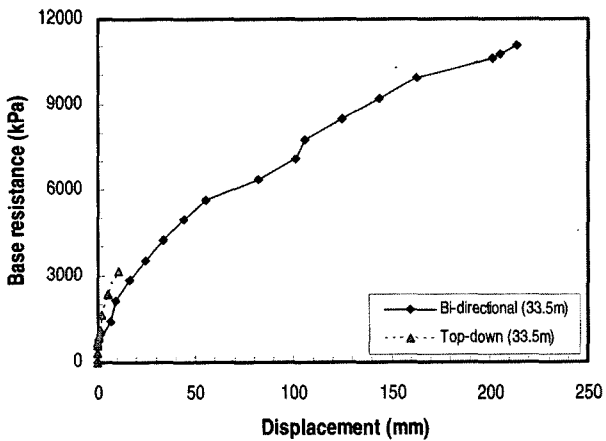


그림 8. 재하방식에 따른 선단하중전이곡선(q-w curve)의 비교

서 두부재하시험의 선단저항력이 양방향 재하시험말뚝의 선단저항력에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 말뚝 선단 부근에서 적용한 콘크리트 타설 방법의 차이에 기인한다. 즉, 양방향 재하시험 말뚝(P1) 선단은 중력식 타설에 의해 시공한 반면, 두부재하시험 말뚝

(P2) 선단은 가압식 타설에 의해 시공되었다.

### 3.2 말뚝두부 하중-변위 곡선

대구경 현장타설말뚝의 설계시에는 사용하중 하에서 말뚝 두부의 하중-침하량 관계를 아는 것이 매우 중요하며, 말뚝의 극한지지력보다 더 중요한 설계변수가 될 수 있다. 그러나 두부재하시험과는 달리 양방향재하시험은 두부에서의 하중-변위 곡선을 직접적으로 구할 수 없다. Osterberg(1998)는 말뚝이 비압축성이라는 가정 하에 양방향재하시험의 결과를 이용하여 두부하중-변위 곡선을 예측하는 방법을 설명한 바 있으며, 이 방법의 가정 조건과 해석절차는 다음과 같다.

#### 1) 가정조건

- ① 상향하중을 받는 양방향재하시험 말뚝의 주변하중-변위 곡선은 하향하중을 받는 두부재하시험말

뚝의 주변하중-변위 곡선과 동일하다.

- ② 양방향재하시험말뚝의 선단하중-변위 곡선은 두부재하시험말뚝의 선단하중-변위 곡선과 동일하다.
- ③ 말뚝은 비압축성이다.

2) 작도 절차

- ① 계측된 주변하중-상판변위 곡선상의 임의의 한 점을 잡는다.
- ② ①에서 결정한 점과 동일 변위를 가지는 선단하중-하판변위 곡선의 한 점을 찾는다.
- ③ 말뚝이 비압축성이므로 말뚝 두부와 선단에서의 변위는 같다.
- ④ 위와 동일한 변위 하에서의 두부재하시험의 재하하중은 ①, ②에서 구한 주변지지하중과 선단지지하중의 합과 같다.
- ⑤ 임의의 여러 점에 대해 ① - ④ 절차를 반복하여 등가하중변위 곡선을 얻는다.

위의 방법을 이용하여 작도한 말뚝 두부의 등가하중-변위 곡선(Top-down equivalent curve)을 두부재하시험 곡선과 함께 그림 9에 도시하였다.

그림 9에서 보는 바와 같이 설계하중인 12,000kN에서 두부재하시험으로 구한 말뚝두부의 침하량은 10mm 정도인 반면, 양방향재하시험으로 구한 두부침하량은 이의 절반에도 못 미치는 약 4mm 정도인 것으로 나타났다. 양방향재하시험 결과가 두부재하시험 결과에 비해 작은 두부침하량을 보이는 이유는 첫째로, 양방향 재하시험 말뚝의 경우 강성이 큰 암반층으로 먼저 하중을 전달하는데 반해 두부재하시험 말뚝의 경우 강성이 암반층에 비해 상대적으로 작은 토사부로 먼저 하중을 전

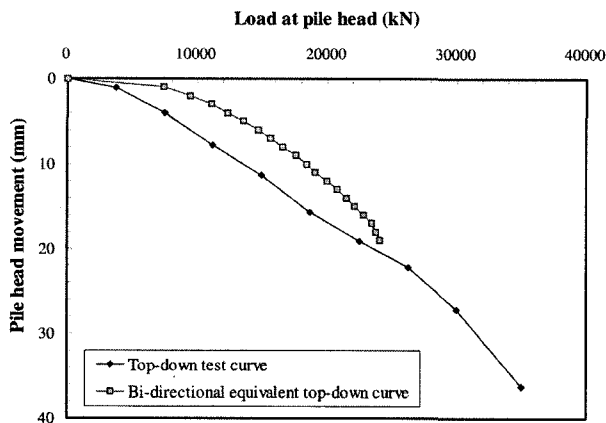


그림 9. 말뚝두부 하중-변위 곡선

달하기 때문이며, 둘째로 양방향 재하시험 결과를 이용하여 등가하중-변위 곡선을 작도할 때 말뚝의 압축량을 무시했기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 말뚝의 압축량을 고려한 간단한 등가하중-변위곡선 작도법을 새로이 제안해 보고자 하였다. 등가하중-변위곡선 작도시 말뚝의 압축성을 고려하기 위해서는 먼저 양방향 재하에 따른 말뚝의 압축량을 알아야 한다. 양방향 하중 하에서의 말뚝의 압축량( $\Delta w$ )은 시험중 선단 유압재 상판의 변위 계측값에서 말뚝 두부의 변위 계측값을 뺀으로써 얻을 수 있으며, 이로부터 두부재하 하중하에서의 말뚝 압축량을 합리적으로 예측하기 위해서는 말뚝의 축하중 분포를 면밀히 고찰해야 한다. 그림 10은 재하 방식의 차이에 따른 말뚝의 축하중 분포의 예를 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 시험에서 유발되는 총 주변하중  $Q_s$ 가 같다면, 단위주변마찰력이 깊이에 따라 선형적으로 증가할 경우(그림 10(a))  $B = 2C$ 가 되고, 깊이에 관계없이 일정할 경우(그림 10(b))에는  $B = C$ , 깊이에 따라 선형

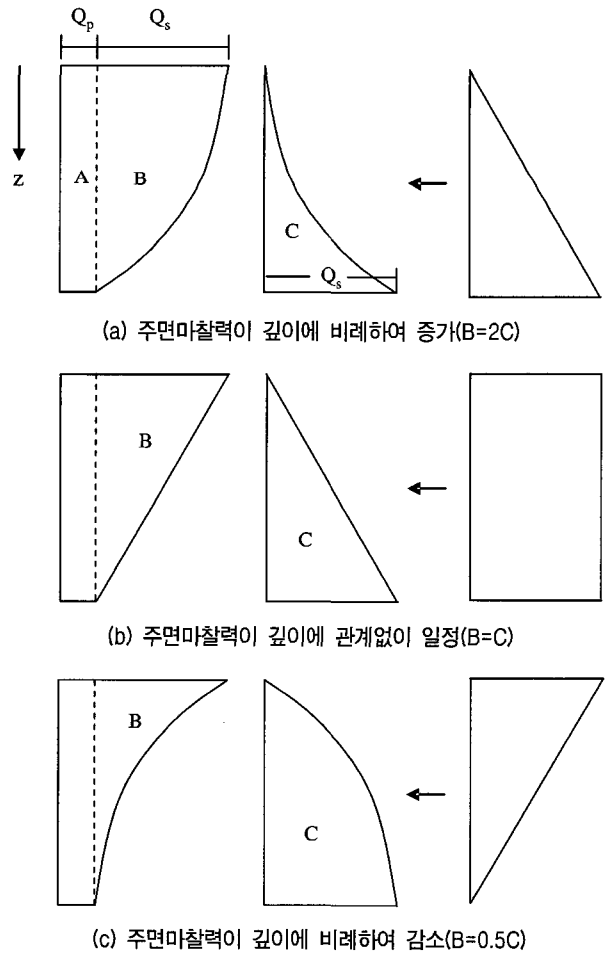


그림 10. 재하 방식에 따른 말뚝 축하중 분포

적으로 감소할 경우(그림 10(c))에는  $B = 0.5C$ 가 된다. 보편적으로 지반 강성 및 강도는 깊이에 따라 증가하게 되므로 그림 10(a)가 가장 일반적인 경우가 될 것이며, 본 연구에서 얻은 말뚝 축하중 분포 역시 이러한 경우에 속한다(그림 5와 6). 즉, 말뚝 선단지지력에 의해 유발되는 말뚝의 압축량(A)을 제외하더라도, 동일한 주변하중 하에서 O-cell 하중에 의한 말뚝의 탄성압축량이 두부재 하 시험에 의한 말뚝의 탄성압축량보다 작다.

이와 같이 재하방식에 따른 말뚝의 압축량은 지반조건에 따라 다르므로 본 논문의 재하시험에서 이러한 압축량 차이를 정량적으로 산정하기 위해 그림 11의 □ ABCDA와 □ ABCEA의 면적비를 계산하였다. 이 때 AE는 CD와 평행하고, EC는 AD와 평행하도록 하여 두부재하시 가상 말뚝 축하중 분포 형태를 가정하였다. 이러한 방법으로 구한 면적비(= □ ABCEA/□ ABCDA)는 2 정도이며, 이는 두부하중 재하시 말뚝 선단변위가 w 만큼 유발되기 위한 말뚝 두부의 변위가  $w + 2\Delta w$ 임을 의미한다.

다음으로, 선단하중  $Q_p$ 에 의한 말뚝 압축량( $\Delta w_p$ )은 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta w_p = \frac{Q_p L}{E_p A} \quad (1)$$

여기서,  $Q_p$ 는 O-cell 선단 변위가 w 일 때의 선단하중이고, A는 말뚝 단면의 면적, L은 말뚝 길이, 그리고  $E_p$ 는 말뚝몸체의 탄성계수이다.

말뚝의 압축량을 고려하여 양방향재하시험을 통해 두부하중-변위 곡선을 예측하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

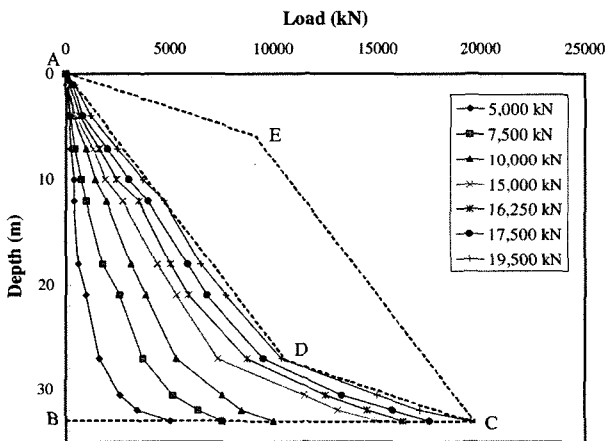


그림 11. 양방향 재하시 축하중분포로부터 두부재하시 축하중 분포 예측

- ① 주변하중-두부변위 곡선상의 한 점( $Q_s, w$ )를 잡는다.
- ② 주변하중이  $Q_s$ 일 때의 O-cell 상판 변위 측정값에서 두부변위 측정값을 뺀 말뚝압축량  $\Delta w$ 를 구한 후, 다음 식을 이용하여 두부하중재하로 변환시의 주변하중  $Q_s$ 에 의한 말뚝 압축량을 계산한다.

$$\Delta w_s = A \times \Delta w \quad (2)$$

여기서, A는 주변마찰력 분포가 역삼각형일 때 0.5, 일정할 때 1, 삼각형일 때 2 이다.

- ③ 선단하중-변위 곡선에서 변위가 w 일 때 선단하중 ( $Q_p$ )을 구하고, 이때의 말뚝의 압축량  $\Delta w_p$ 를 구한다.
- ④ 두부하중-변위 곡선상의 한 점의 좌표는 ( $Q_s + Q_p, \Delta w_s + \Delta w_p$ )이 된다. ①~④의 과정을 여러 w값에 대해 반복하여 하중-변위 곡선을 얻는다.

이상의 방법을 이용하여 예측한 말뚝 두부의 하중-변위곡선을 기존 방법으로 구한 등가하중-변위곡선, 그리고 두부재하시험 곡선과 함께 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 보는 바와 같이, 수정된 방법으로 구한 곡선이 기존의 방법으로 구한 곡선 보다 두부재하시험 곡선에 더 근접하여 예측하고 있는 것을 알 수 있다.

위의 방법은 계산의 간편성을 위해 양방향재하방식과 두부재하방식에 의한 탄성압축량비 A가 일정하다고 가정하였는데, 실제로 이 값은 작용하중의 크기에 따라 변화하는 값으로 재하 하중에 따른 탄성압축량을 엄밀히 고려한 것은 아니다. 말뚝의 압축량과 더불어 말뚝의 하중 전이 기구를 엄밀히 고려하여 보다 실제에 가까운 등가하중-변위 곡선을 얻기 위해 하중전이함수법(Coyle and Reese, 1966)을 이용하여 말뚝 두부의 하중-변위 곡

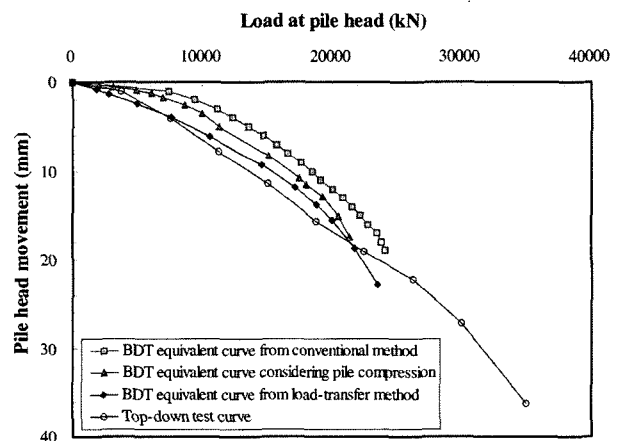


그림 12. 해석방법에 따른 말뚝두부 등가하중-변위곡선



선을 예측해 보고자 하였다. 하중전이함수법에서 두부 하중-변위곡선을 예측하는 절차를 간단히 소개하면 다음과 같다.

- ① 말뚝을 몇 개의 분절로 나눈다.
- ② 임의의 선단 변위( $w_p$ )를 가정한 후 q-w곡선을 이용하여 선단저항력( $Q_p$ )을 계산한다.
- ③ n번째 분절 중앙에서의 변위( $w_n$ ) 가정(초기 가정값으로  $w_p$ 이 일반적임) 후 f-w 곡선을 이용하여 분절의 주변하중( $Q_n$ )을 구한다.
- ④ n번째 분절에서의 탄성압축량은 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta w_n = \left\{ \frac{(Q_n + Q_p) + Q_p}{2} \right\} \left\{ \frac{L_n}{2 A_n E_p} \right\} \quad (3)$$

- ⑤ 새로운 분절 중앙 변위  $w_n' = w_n + \Delta w_n$ 이 되며, 변위 값이 수렴할 때까지 앞의 절차를 반복.
- ⑥ n-1 분절에 대해 같은 과정을 수행하면 말뚝 두부에서의 하중-변위 곡선을 구할 수 있다.

상기 방법의 적용을 위해서 필요한 각 지층별 하중전이곡선은 양방향 재하시험중 변형률계 측정을 통해 얻은 자료(그림 7, 그림 8)를 사용하였으며, 말뚝 두부에서 하중이 가해진다고 가정하고 하중전이함수법을 이용하여 추정된 말뚝두부 하중-변위 곡선을 그림 12에 추가로 도시하였다.

그림 12에서 알 수 있듯이 말뚝의 하중전이함수법으로 예측한 등가하중-변위 곡선이 두부재하시험 곡선과 가장 잘 일치한다. 따라서 말뚝 두부에서의 변위에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서 양방향 재하시험 중 변형률계 계측을 수행할 것을 추천한다.

#### 4. 결론

동일한 지반조건과 형상을 갖는 두 본의 대구경( $\phi 1,500$ ) 현장타설 콘크리트 말뚝에 대해 각각 양방향 재

하시험과 두부재하시험을 수행하였으며 결과의 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재하방식의 확연한 차이점에도 불구하고, 재하시험 및 변형률계 계측으로 구한 깊이별 f-w 곡선의 모양은 시험방법에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구의 양방향 재하시험으로 예측한 등가하중-변위 곡선의 모양은 두부재하시험곡선과 비교적 큰 차이를 보이며, 그 차이는 특히 곡선의 초기 부분에서 더 심하게 나타났다. 이러한 두 곡선의 차이는 말뚝의 깊이에 따른 지반 강성의 급격한 변화에 기인하는 것으로 판단되었다.
- (3) 말뚝 두부의 하중-변위 관계를 보다 합리적으로 예측하기 위해, 양방향 재하시험의 해석시 말뚝의 압축량을 고려하여 수정한 등가하중-변위 곡선 작도법을 제안하였다.
- (4) 양방향 재하시험을 통해 보다 정밀한 등가하중-변위 곡선을 얻기 위해서는 말뚝의 축방향 변형률 측정이 필수적이다.

#### 참 고 문 헌

1. 정창규 (2004), 선단유압재하시험법의 현장적용성에 관한 연구, 경성대학교 박사학위 논문.
2. Coyle, H. M., and Reese (1966), L. C. Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay, *J. Soil Mech. And Found. Div.*, ASCE, Vol. 92, No.2, pp.1-26.
3. Kishida, H., Tsubakihara, Y., and Ogura, T. (1992), Pile Loading Tests at Osaka Amenity Park Project, preprint by Mitsubishi Co..
4. Ogura, T., Sumi, M., Kishida, H., and Yoshifuka, T. (1996), Application of the Pile Toe Test to Cast-in-place and Precast Piles., translated by MandanB. Karkee, *Foundation Drilling Magazine*, ADSC, December1996/January 1997, pp.23-28.
5. Osterberg, J. O. (1998), The Osterberg Load Test method for Drilled Shafts and Driven Piles-the First Ten Years. *Proceedings 7th International Conference on Deep Foundations*, Vienna, Austria., June 15-17, Deep Foundation Institute, Englewood Cliffs, N.J., 1.28.1-1.28.11.

(접수일자 2005. 6. 22, 심사완료일 2006. 2. 20)