

풍화암에 근입된 장대 현장타설말뚝의 동재하시험 사례연구

A Case Study on the Dynamic Loading Tests of Large Diameter - Long Drilled Shafts into Weathered Rock

석정우¹⁾, Jeong Woo Seok, 조천환²⁾, Chun-Whan Cho, 지완구³⁾, Wan Goo Ji,
박민철⁴⁾, Mincheul Park, 윤정섭⁶⁾, Jeoung Seob Yoon

- 1) 삼성건설 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction
- 2) 삼성건설 TA팀 전문위원, Geotechnical Expert, TA team, Samsung Engineering & Construction
- 3) 삼성건설 기술연구소 수석연구원, Principal Researcher, Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction
- 4) 백경 지앤씨 차장, Deputy General Manager, Backyoung Geotechnical & Construction
- 5) 삼성건설 부산신항 진입철도 현장소장, Project Manager, Busan Newport Entrance Railroad Construction, Samsung Engineering & Construction

SYNOPSIS : This paper deals with the procedure and the results on the dynamic loading tests of two large diameter - long drilled shafts (diameter=2.0m, length=75m) which were embedded into weathered rocks through thick soft marine clays and sandy gravels. Prior to the real dynamic loading test, the numerical simulation for the test procedure was performed to check the structural stability of the main pile body using equivalent static elastic analysis and the application of the hammer system using WEAP (Wave Equation Analysis of Pile Driving). Through these preliminary analyses the dynamic loading tests on large diameter - long drilled shafts have been successfully achieved.

Key words : Large diameter - long pile, Drilled shaft, Dynamic loading test, Driving energy, WEAP

1. 서 론

최근 국내에서 기성말뚝의 시공관리 기준 설정 및 말뚝 지지력을 확인하기 위한 수단으로써 동재하시험이 널리 이용되고 있다. 이는 동재하시험이 다른 시험방법에 비하여 간편하고 신속하게 비교적 신뢰할만한 결과를 주기 때문이다. 지금까지 장대 현장타설말뚝에서는 동재하시험보다 정재하시험을 통해 말뚝의 안정성을 평가하는 것이 일반적이었으나 최근에는 동재하시험도 자주 이용되고 있다.

그러나 장대 현장타설말뚝의 동재하시험은 기성말뚝의 동재하시험처럼 간단치는 않으며, 신뢰도 있는 결과를 얻기 위해서는 충분한 타격에너지 확보 및 말뚝두부 보강 등에 신중을 기해야 한다(Paikowsky, 2004). 특히 동재하시험 전에 이러한 조건을 충분히 고려하지 못하면 시험을 실패할 수도 있다. 최근 건설 환경문제에 대한 사회적 관심 고조, 시공 장비의 발전, 본당 말뚝하중의 증가 등에 따라서 장대 현장타설말뚝의 시공이 증가하는 추세에 있으며, 이러한 현장타설말뚝이 풍화암에 지지되는 경우도 종종 발생한다. 따라서 다른 시험방법에 비하여 비용 및 시간 측면에서 상대적으로 우위에 있는 동재하시험

을 현장타설말뚝에 신뢰도 있게 적용하는 것은 의미 있는 일이라 하겠다.

이 논문에서는 상부의 두꺼운 연약지반과 하부의 모래자갈층을 관통하여 풍화암에 지지된 2본의 장대 현장타설말뚝(직경 2m, 길이 75m 정도)에 대한 동재하시험의 과정 및 결과에 대해서 고찰하였다. 우선, 실 동재하시험 전에 시험과정을 실내에서 모사(simulation) 하였다. 동재하시험의 모사는 타격시 말뚝 본체에 대한 등가 정적탄성해석(Equivalent static elastic analysis)을 통해 말뚝 본체의 안정성을 검토하고, WEAP(Wave Equation Analysis of Pile Driving)을 통해 타격 시 해머시스템의 적정성을 분석하는 방법으로 이루어졌다. 이러한 과정을 통해 실제 동재하시험에서 풍화암에 지지된 장대 현장타설말뚝의 안정성을 성공적으로 확인할 수 있었다.

2. 현장 개요

2.1 현황

대상 현장은 부산신항만을 동북아 물류 중심지로 조성하여 국가 경쟁력을 향상시킬 목적으로 경부선 삼량진역에서 부산신항까지를 연결하는 철도 노선 중 배후철도 및 남북 컨테이너 임항 철도와 연계되는 녹산~부산신항 구간의 철도공사 구간이다. 부산시 강서구 송정동에서 부산신항 일대를 이어주는 2.9km 연장의 부산신항 진입철도 건설공사는 구간 대부분이 교량으로 건설되며, 공사기간은 2004년 12월 24일부터 2008년 9월 5일까지 총 45개월로 계획되어 있다.

이 현장은 총 72개의 교각으로 이루어져 있으며, 이 중에서 56개 교각은 말뚝기초로 지지되며, 기반암이 지표면으로부터 10m 이내에 나타나는 구간에 위치한 16개 교각은 직접기초로 설계되었다(그림 1 참조). 말뚝기초는 지지층의 심도에 따라서 현장타설말뚝과 강관말뚝이 선별적으로 적용되었다. 하나의 교각을 지지하기 위하여 현장타설말뚝(ϕ 2000mm)은 2×2, 강관말뚝(ϕ 812.8mm, t=16mm)은 4×5 형태로 배치되었다. 현장타설말뚝은 연암 상부로부터 1m, 또는 N치가 50/5 정도인 풍화암까지 근입되도록 설계되었으며, N값이 3보다 작은 연약지반 구간에는 회생주름관을 삽입하여 콘크리트 타설 후 케이싱 인발 시 벌징(bulging) 현상에 의한 단면 손실의 발생을 방지하였다.

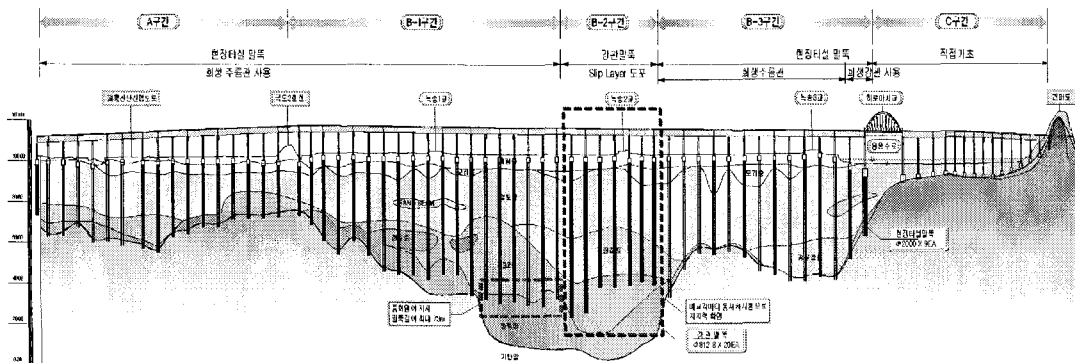
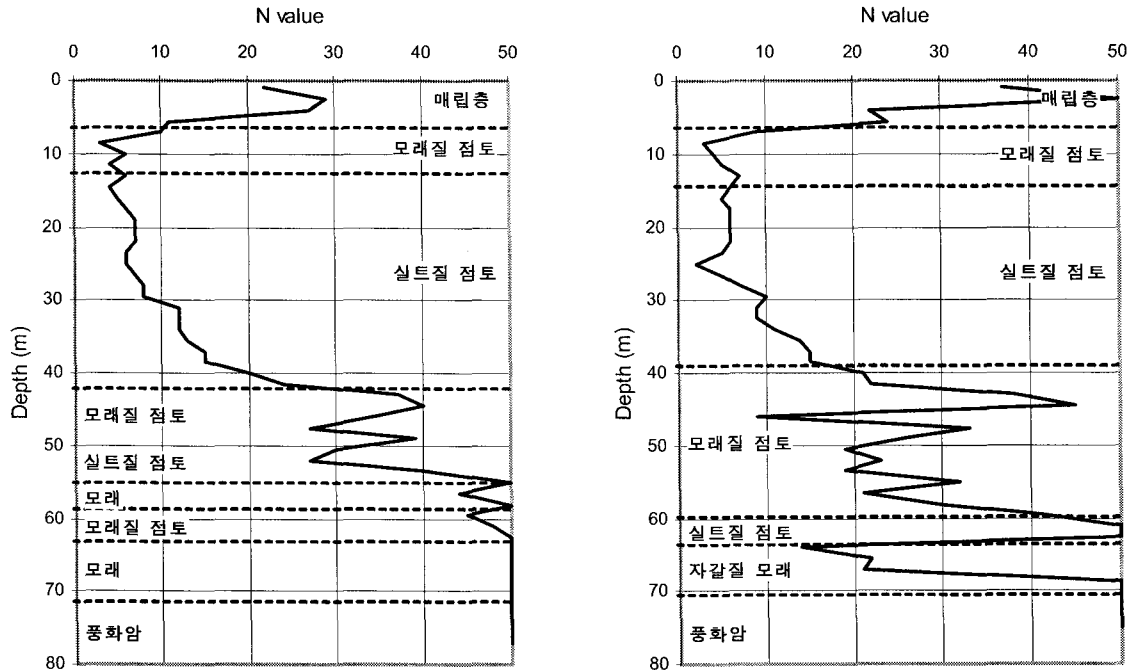


그림 1. 지층 구성에 따른 구간별 말뚝 형식 (부산지방해양수산청, 2004)

2.2 지반조건

대상 현장의 지층 특성은 그림 1에 나타난 바와 같이, 기반암의 심도가 노선 중앙부에서 가장 깊고 시점 및 종점부에서 얕아지는 계곡 형태를 이루고 있다. 모래, 점토 및 자갈로 이루어진 충적층과 풍화암까지의 깊이가 100m 에 달하는 구간도 존재한다. 각 지층의 층서는 구간마다 차이가 있으나 지표면으로부터 배립토층, 실트층, 점토층, 모래층, 모래자갈층, 풍화암, 그리고 기반암의 순으로 이루어져 있으며, 기반암은 화강암 또는 화강섬록암으로 나타난다. 그림 2에는 2본의 시험말뚝 위치에서 각각 실시된 시추조사 및 표준관입시험을 통해 결정된 지층 및 N치 분포를 나타내었다. 각 층의 강도정수를 정리하면 표 1과 같다.



(a) TP-1

(b) TP-2

그림 2. 시험말뚝 위치에서의 지층 구성 및 N치 분포 (부산지방해양수산청, 2004)

표 1. 지층별 지반강도정수 (부산지방해양수산청, 2004)

지층	강도정수	γ_t (tonf/m ³)	C (tonf/m ²)	ϕ (°)	E (tonf/m ²)
매립층		1.7	0	30	5000
상부모래층		1.7	0	24	1000
점토층		1.8	2.5	0	440
모래자갈층		1.8	0	30	1500
풍화암		2.0	3.5	35	14000
기반암		2.3	15	35	100000

3. 사전분석

3.1 시험계획

설계하중이 큰 장대 현장타설말뚝의 동재하시험에서는 충분한 용량의 해머로 말뚝 건전도에 문제가 없도록 타격해야 하기 때문에 시험 준비 시 재하장치의 안정성 및 용량, 타격 시 말뚝 본체의 안정성을 검토하는 것이 중요하다. 이러한 시험에서는 해머용량의 한계로 일반적인 기성 해머의 사용이 곤란하므로 일반적으로 특별히 제작된 수동식 드롭해머를 사용하게 된다. 따라서 이번 시험에서는 특별히 제작된 드롭해머의 용량, 쿠션재료와 두께, 낙하높이, 타격 시 말뚝 본체의 안정성을 시험 전에 확인하였다.

표 2에서 2분의 시험말뚝에 대한 기본 정보를 정리하였다. 각 말뚝의 허용 지지력은 구조물 기초설계

기준 해설의 제안식에 근거하여 계산되었으며(한국지반공학회, 2003), 적용된 안전율은 3.0 이다(부산지방해양수산청, 2004).

표 2. 시험말뚝 제원 (부산지방해양수산청, 2004)

구분	직경 (mm)	근입심도 (m)	콘크리트 설계강도 (kgf/cm ²)	부재 내하력 (tonf)	허용 지지력 (tonf)	설계하중 (tonf)	부마찰력 (tonf)
TP-1	2000	75.5	350	1730.4	1730.4	1224.8	364.2
TP-2	2000	73.3	350	1730.4	2137.4	1109.3	363.4

3.2 파동이론분석

장대 현장타설말뚝의 동재하시험에 앞서 말뚝 충격에 대한 파동이론분석을 실시하였다. 시험에 사용할 램 중량, 쿠션 종류 (폴리에틸렌, 나무합판) 및 두께 (50mm, 30mm) 등에 근거하여 낙하고에 따른 향타응력과 지지력을 추정함으로써 동재하시험을 위해 준비된 재하장치가 말뚝 설계하중을 확인하기 위해 충분한 용량을 확보하고 있는지에 대한 검토가 이루어졌다. 파동이론분석은 미국 PDI사의 GRLWEAP(ver. 2003)을 사용하였다(PDI, 2003).

시험에 사용할 드롭해머의 램 중량은 39.1ton, 향타효율은 50% 로 하여 WEAP 프로그램 내에서 모델링하였으며, 낙하고는 1.0m, 1.5m, 1.8m 그리고 2.0m로 각각 변화시켜가며 WEAP 분석을 수행하였다. 분석 결과에 의하면, TP-1 말뚝은 2.0m, TP-2 말뚝은 1.8m 낙하고에서 설계하중 대비 3.0 이상의 안전율을 갖는 말뚝의 극한 저항력을 확인할 수 있었다(표 3 참조). 또한 말뚝 본체 내에 발생하는 압축 및 인장응력 역시 부재 허용강도 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다.

표 3. 시험말뚝에 대한 파동이론분석 결과

구분	낙하고 (m)	설계하중 (tonf)	극한 저항력 (tonf)	압축응력 (kgf/cm ²)	인장응력 (kgf/cm ²)
TP-1	2.0	1224.8	4381.2	246.5	53.3
TP-2	1.8	1109.3	4381.2	233.2	46.2

3.3 말뚝체의 안정성 분석

타격에너지가 두부에 작용했을 때 말뚝의 구조적인 손상이 없어야만 동재하시험 결과로부터 신뢰할만한 말뚝 저항력의 산정이 가능하다. 향타 중 발생하는 말뚝 두부의 구조적 손상은 대부분 편심하중에 의하여 발생하는 인장응력에 기인하기 때문에, 말뚝 두부 전체 단면에 균일한 충격이 가해지도록 편심량을 최소화하는 것이 말뚝 두부의 구조적인 손상을 방지하는 가장 확실한 방법이라 할 수 있다. 그러나 램을 낙하시킬 때마다 일정 수준 이하로 편심량을 조절하는 것은 현실적으로 거의 불가능하므로, 이 시험에서는 말뚝 두부에 횡방향 철근 배근을 통한 구조적 보강을 실시함으로써 말뚝체의 구조적 손상을 방지하였다.

그림 3은 두부 보강을 위한 구조해석에 사용된 운동계를 나타낸다. 여기서 k는 탄성계수, δ는 향타로 인하여 각 위치에서 발생한 변위를 뜻하며, 각 변수의 아래첨자로 표시한 숫자는 1이 쿠션, 2가 말뚝두부, 그리고 3이 말뚝 본체를 의미한다. 이번 시험을 위해 수행된 구조해석은 완전소성충돌 상태에 근거하여 이루어졌기 때문에, 결과물로 산출되는 말뚝 내 발생응력은 매우 보수적인 결과를 나타낸다.

그림 4는 향타높이에 따라 말뚝 두부에서 발생하는 최대 응력의 변화를 표시한 것이다. 3.2절의 파동이론분석에서 산정된 최대 향타고인 2.0m에 대하여 예상되는 말뚝 두부에서의 최대응력은 477kgf/cm² 이다. 말뚝 본체 콘크리트의 설계강도가 350kgf/cm² 이므로, 말뚝 두부의 과도한 보강은 예상치 못하게 과도한 향타응력 발생 시 말뚝 본체의 손상을 유발시킬 수 있다. 그러므로 그림 5에서와 같이, 횡방향

철근 보강을 통해 약 450kgf/cm² 정도의 강도를 확보하고 연성을 증가시키는 방향으로 보강 설계를 진행하였다. 다만, 해석에 적용된 가정조건을 만족시키기 위해서는 편심하중이 단면 평균응력의 10% 이내로 제어되어야 한다.

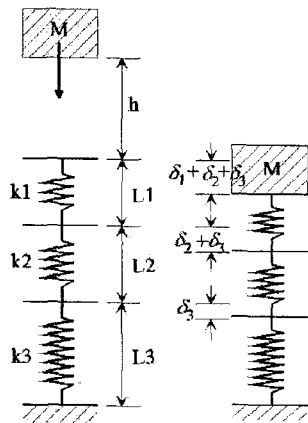


그림 3. 구조해석에 사용된 운동계

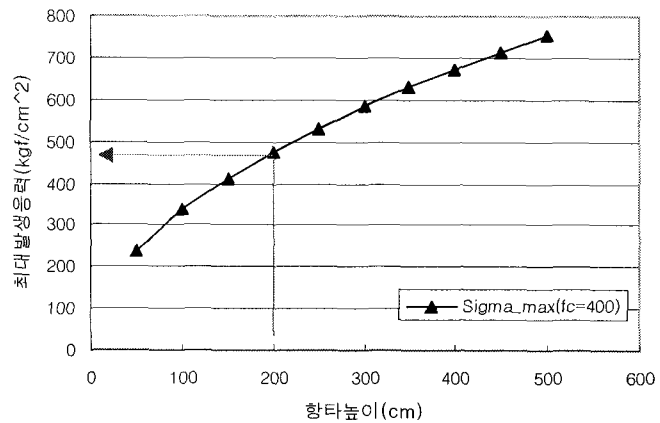


그림 4. 항타 높이에 따라 말뚝 두부에서 발생하는 최대응력

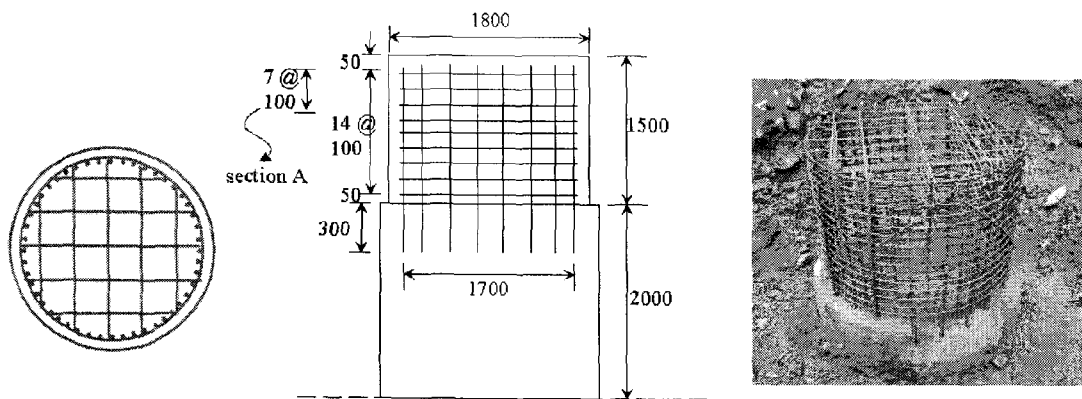


그림 5. 두부보강 상세도면 및 실제 배근 상태

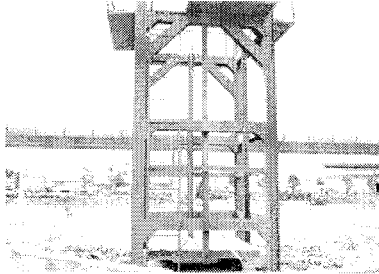
4. 동재하시험

4.1 시험 개요

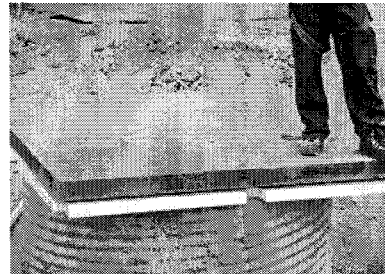
장대 현장타설말뚝의 설계 지지력을 확인하기 위해서는 상당히 큰 타격에너지가 필요하기 때문에, 그림 6과 같이 39.1 ton의 램 용량을 갖춘 2.3m×2.3m×8.0m 규격의 재하장치가 사용되었다. 그림 7에는 동재하시험을 위한 항타분석기 및 말뚝 두부 변위 측정을 위한 디지털 항타관리기의 설치 상황을 나타내었다.

동재하시험의 개략적인 진행순서는 다음과 같다. 먼저 시험말뚝을 설치하고 28일간 양생을 실시한 후 재하대 설치를 위해 주변 지반을 약 2.0m 정도 굴착하였다. 말뚝 두부보강을 위한 추가적인 보강철근 배근 및 콘크리트 타설 후 공시체 강도가 설계강도 수준 이상으로 발현되는 것을 확인한 다음에 초속경 무수축 몰탈을 이용하여 두부 캡핑(capping)을 실시하였다. 재하대 설치 및 램 조립이 완료되면 말뚝 두부에 쿠션 및 스틸 플레이트를 거치시키고 항타분석기 센서를 말뚝 본체에 네 방향으로 설치함으로써 시험 준비를 마무리하였다. 항타분석기 측정결과를 이용하여 편타 보정을 수행한 후 WEAP 분석으로부

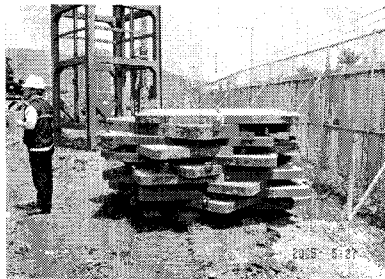
터 결정된 낙하고에 근거하여 동재하시험을 실시하였다. 지지력 시험방법은 ASTM D 4945 (Crowther, 1988)에 따라 향타분석기를 이용한 동재하시험(high strain dynamic load test)을 적용하였으며, 향타 분석기는 미국 PDI사의 MODEL PAK을 사용하였다(PDI, 1995).



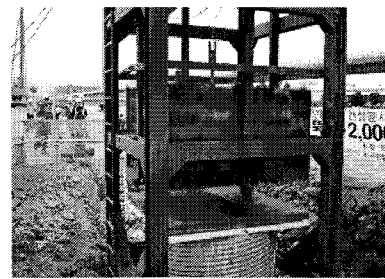
(a) 램 낙하장치 프레임



(b) 말뚝쿠션 및 스틸 플레이트



(c) 램



(d) 장비조립 모습

그림 6. 시험장치 구성



(a) 향타분석기



(b) 디지털 향타관리기

그림 7. 계측장치 설치 전경

4.2 시험결과 분석

동재하시험 중 측정된 향타에너지 효율은 2본의 말뚝에서 각각 48.7%와 51.2%로 측정되었으며, 이는 사전 과도이론분석에서 가정한 50%와 거의 유사한 수준이었다. 말뚝 본체의 건전도에는 별다른 이상이 없는 것으로 나타났으며, 향타로 인하여 말뚝에 발생하는 콘크리트의 압축응력도 저감율을 고려한 허용응력인 253kgf/cm^2 보다 작게 측정되었다. 표 4의 실측 관입량은 비접촉 정밀 변위측장치인 디지털 향타관리기를 이용하여 측정한 값이다(윤희석 등, 2004; 삼성건설 기술연구소, 2005).

동재하시험에서 측정한 응력파를 CAPWAP (CAsE File Wave Analysis Program, GRL Associate

Inc., 1996)에 입력하여 분석함으로써 시험말뚝의 지지력을 산정한 결과를 정리하면 표 4와 같다. 시험말뚝의 허용 지지력은 CAPWAP으로 구한 극한 지지력에서 양의 마찰력과 선단지지력을 산출한 다음 이 두 값의 합에서 부마찰력을 뺀 후 안전율을 적용하여 구했다. 여기서 안전율은 타격시 말뚝의 침하량이 작았기 때문에 구조물 기초설계기준 해설에 따라 2.0을 적용하였다(한국지반공학회, 2003).

표 4에서와 같이 산출된 허용지지력은 설계지지력보다 크게 나타나, 시험말뚝은 상부 하중을 지지하는 데 필요한 지지력을 확보하고 있는 것으로 판정하였다.

표 4. CAPWAP에 의한 지지력 산정결과 (백경 지앤씨, 2005)

구분	CAPWAP Capacity (tonf)			실측된 관입량 (mm)	설계하중		허용 지지력 (tonf/본)	판정
	정주면 마찰력 (R_s)	선단 지지력 (R_u)	전체 지지력 (R_u)		설계지지력 (tonf)	부마찰력 (tonf)		
TP-1	2873.6	650.2	3523.8	2.0	1224.8	364.2	1576.8	만족
TP-2	2251.4	676.8	2928.2	1.2	1109.3	363.4	1282.4	만족

시험말뚝의 전체 지지력과 주면 마찰력의 분포를 N치와 비교하여 도시하면 그림 8과 같다. 그림 8(a)에서는 본 말뚝의 8.9m~35.1m 구간까지 약 26.2m 정도가 마찰 저항이 거의 없는 것으로 나타났으며, 그림 8(b)의 경우에는 본 말뚝의 12.9m~31.0m 사이 구간에서 마찰 저항이 나타나지 않았다. 이는 해당 구간에서 지반의 평균 N치가 작고 현장타설말뚝 시공 시 교란이 컸던 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이 구간 하부에는 마찰 저항력이 나타나고 있으며, 특히 모래 자갈층 및 풍화암층에서 그 크기가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 향후 이러한 시험결과들을 많이 수집하여 토층별로 정리한다면 해당 현장의 단위 주면지지력에 대한 자료로 제시할 수 있을 것이다.

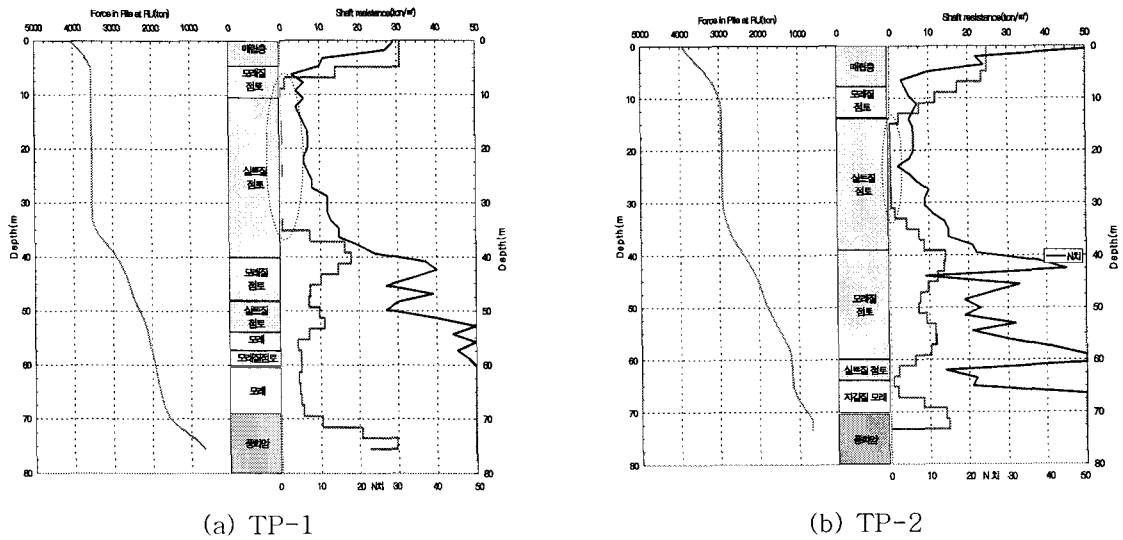


그림 8. 전체 지지력 및 주면 마찰력 분포

5. 결론

장대 현장타설말뚝에 대한 동재하시험으로부터 신뢰할만한 결과를 얻기 위해서는 적절한 장비 선정에 따른 충분한 타격에너지의 확보, 적절한 향타고 선정, 그리고 향타 시 구조적 손상을 방지하기 위한 쿠션 재료의 선정 및 두부보강 등에 대한 면밀한 사전 검토가 이루어져야 한다. 이러한 검토를 위해서는 시험계에 대한 파동이론분석 및 등가 정적탄성해석이 효과적임을 확인할 수 있었다. 이 연구에서는 파동이

론분석 및 등가 정적탄성해석을 통해 사전분석을 실시하였으며, 각각의 분석 결과에 기초하여 말뚝 두부를 보강하고 해머시스템을 보완한 후 실제 시험을 실시하였다. 이러한 절차를 통해 두꺼운 연약지반을 관통하여 풍화암에 근입된 장대 현장타설말뚝의 안정성을 동재하시험으로 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 백경 지엔씨(2005), 부산신항 진입철도 건설공사현장 현장타설말뚝 동재하시험 보고서
2. 부산지방해양수산청(2004), 부산신항 진입철도 건설공사 지반조사보고서
3. 삼성건설 기술연구소(2005), 부산신항 진입철도 현장 시향타 말뚝 변위측정 보고서
4. 윤희석, 석정우, 황대진, 김명모(2004), “DPRMs를 이용한 말뚝 시공관리”, *2004년 대한토목학회 정기 학술발표회*, 평창, pp.1335-1340.
5. 한국지반공학회(2003), 구조물 기초설계기준 해설, 구미서관, 서울, pp.277-312.
6. Crowther,C.L.(1988), Load Testing of Deep Foundations, *The Planning, Design, and Conduct of Pile Load Tests*, John Wiley & Sons, New York
7. GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual
8. Paikowsky,S.G.(2004), “Drop Weight Dynamic Testing of Drilled Deep Foundations”, *The 7th International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles*, Malaysia, pp.13-81.
9. Pile Dynamics, Inc.,(1995), PDA User Manual
10. Pile Dynamics, Inc.,(2003), GRLWEAP User Manual