

풍화암 소켓 대구경말뚝의 축하중 전이거동

Axial Load Transfer Behavior of a Large Diameter Pile socketed into weathered rock

정창규¹⁾, Chang-Kyu Jung, 임태경²⁾, Tae-Kyung Lim, 황근배³⁾, Geun-Bae Hwang,
최용규⁴⁾, Yong-Kyu Choi,

¹⁾ 부산광역시 건설본부 교량 1과장, Manager, Construction Headquarter, Busan metropolitan City

²⁾ 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungsoong University

³⁾ 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungsoong University

⁴⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsoong University

개요(SYNOPSIS) : In this study, static pile load tests with load transfer measurement for a pile socketed into weathered rocks were performed. Axial load transfers during static pile load test were measured and analyzed. Three large diameter piles socketed into weathered rock were behavior behaved as friction pile.

주요어(Key word) : static pile load test, large diameter piles, load transfer measurement, axial load transfer behavior, friction pile

1. 서론

국내에서 시행되는 말뚝재하시험은 말뚝머리하중 - 침하량 관계만을 측정하는 것이 대부분이고, 말뚝의 축하중 전이거동을 측정하는 사례는 흔치 않다. 또한 재하시험을 실시하더라도 설계지지력만 확인하는 정도일 뿐, 항복지지력이나 극한지지력은 확인하지 않고 시험을 종료하는 경우가 많다.

현재 말뚝기초의 설계는 설계목적의 말뚝재하시험(검증시험)에 의한 극한하중(또는 항복하중)과 축하중 전이 양상 등을 확인하지 않고, 지지력 공식에 의한 개략적인 추정치로써 수행되고 있는 실정이므로 말뚝기초의 과다설계로 인한 시간적 경제적 손실은 막대하다.

본 연구에서는 풍화암에 근입된 3개의 대구경말뚝들에 대하여 정재하시험(하중전이 측정 포함)을 수행하였으며, 이때 하중전이측정에서 얻어진 축하중 분포도를 통해 말뚝의 하중지지 거동을 분석하였다.

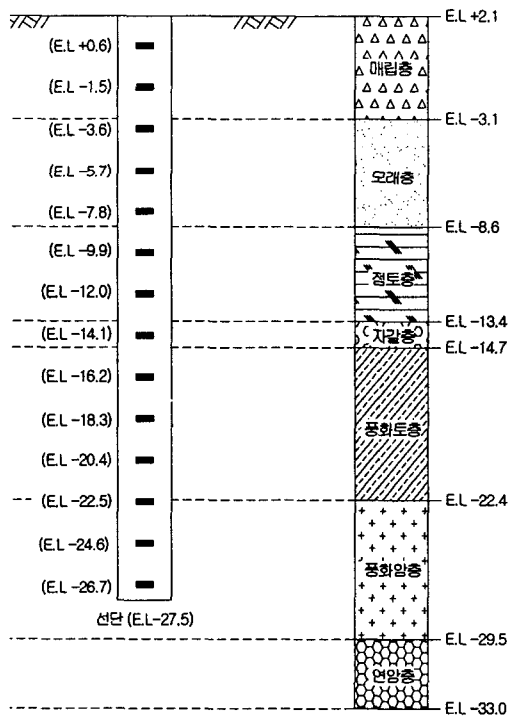
2. 시험말뚝의 제원 및 지층개요

3개의 시험말뚝(표 1)에는 각 지층의 하중 지지 거동을 측정하기 위해 축하중 계측용 센서를 설치하였으며, 각 시험말뚝의 센서위치와 지층구분은 그림 1과 같다. 말뚝부재에 발생하는 축하중을 측정하기 위하여 경성대학교 지반공학연구실에서 개발한 강관표면에 접촉시키는 완전결선형 전기저항식 강관변형

를계(현재 특허출원중, 출원번호 : 10-2000-0035815)와 완전결선형 회로를 가진 전기저항식 변형봉 센서(출원번호 :10- 2000-0035816) 및 진동현식 스트레인게이지를 설치하였으며, 설치 위치와 수량은 시험말뚝의 길이, 시험하중의 크기, 지반조건 등을 고려하여 결정하였다.

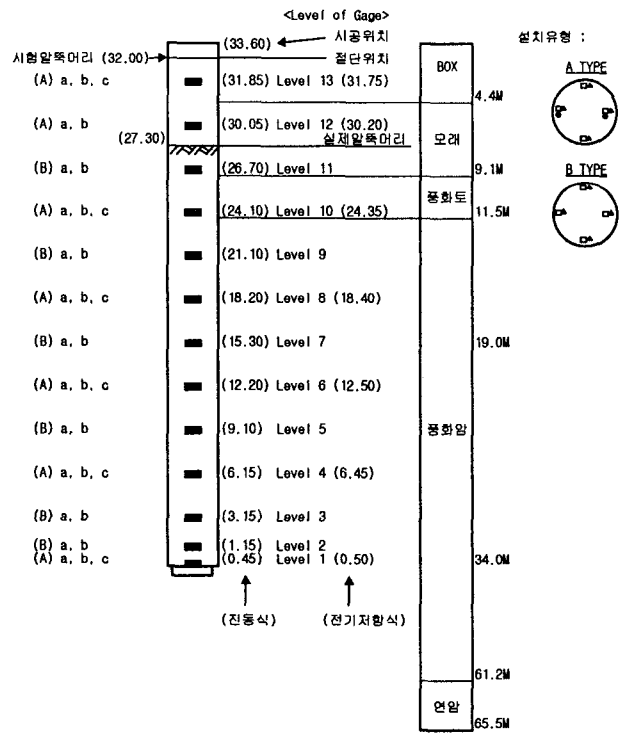
표 1. 시험말뚝의 제원

시험말뚝 기호	TP1	TP2	TP3
현장명	수영 3호교 현장	광안대로 5공구 현장	광안대로 1공구 현장
말뚝 형식	현장타설말뚝		강관내부 속채움된 합성말뚝
말뚝 제원	직경(mm)	1,500	1,000
	두께(mm)	-	-
	길이(m)	33	32
시험하중 (톤)	2,050	1,500	2,000
설계하중 (톤)	320	500	500
하중재하수단	반력앵커의 인발저항력		본말뚝(φ=2,500) 2개의 인발저항력
비고	두께 12mm의 희생강관 사용		두께 18mm의 구조용 강관 사용



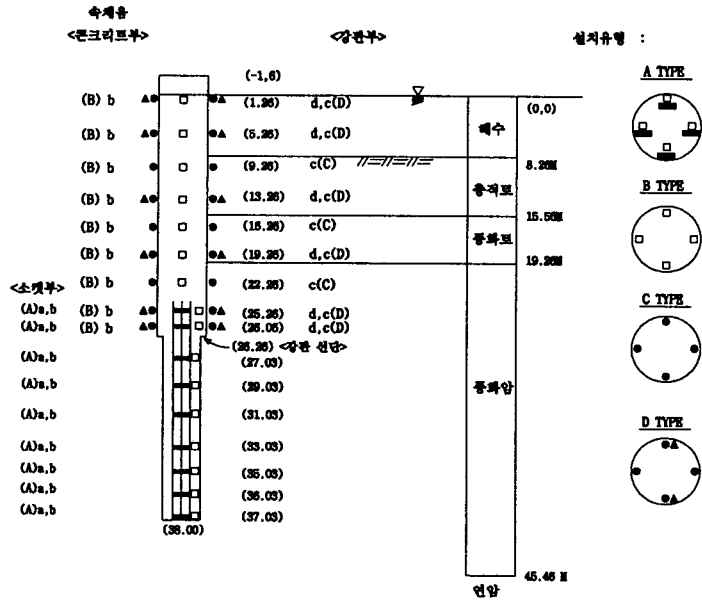
재료표				
품명	기호	산출근거	계	비고
철근용력계(전기저항식)	■	14개소 × 4방향 = 56개	101개	20% 합중
콘크리트용력계(전기저항식)	□	14개소 × 2방향 = 28개		

(a) TP1



재료표				
품명	기호	산출근거	계	비고
철근용력계 (진동현식)	■ a	9개소 × 4개 = 36개	40개	10%
콘크리트용력계 (진동현식)	□ b	16개소 × 4개 = 64개	70개	10%
철근용력계 (전기저항식)	● c	9개소 × 4개 = 36개	40개	10%

(b) TP2



재료표					
설치부위	품명	기호	산출근거	계	비고
소켓부 및 속채움 콘크리트	철근용력계 (전기저항식)	■ a	9개소 × 4개 = 36개	40개	10%
	콘크리트용력계 (전기저항식)	□ b	16개소 × 4개 = 64개	70개	10%
강관	강관 용력계 (전기저항식)	● c	9개소 × 4개 = 36개	40개	10%
	진동현식 스트레인게이지	▲ d	6개소 × 2개 = 12개	13개	10%

(c) TP3

그림 1. 지층구분 및 시험말뚝 센서설치 위치도

3. 말뚝정재하시험 및 하중전이 측정

3.1 말뚝정재하시험 개요

도로교 설계기준 (건설교통부, 2000) 및 도로교 설계기준 해설집(하부구조편)(대한토목학회, 2001)에서는 말뚝기초의 설계는 “예비설계, 검증시험, 예비설계의 보완”의 절차를 거쳐 수행하도록 규정하였다. 또한, 외말뚝의 허용연직지지력은 지반의 허용지지력과 말뚝재료의 허용하중을 비교하여 낮은 값으로 결정하도록 하였다. 여기서, 지반의 허용지지력은 지반의 극한지지력에 소정의 안전율을 적용하여 결정하도록 하였다. 지반조건에 따라 결정되는 말뚝기초의 극한지지력은 대표적인 지반조건에 설치된 실물크기 말뚝이나 축소말뚝에 대한 연직정재하시험을 수행하여 결정하도록 하였다. 이 때 축하중전이를 측정하여 말뚝기초의 하중지지거동을 확인하도록 하였다. 그러나, 이와 같은 시험말뚝에 대한 검증시험이 극히 곤란할 경우에는 시공초기에라도 반드시 수행하도록 하였다.

기초말뚝의 지지력을 추정하는 수단으로는 정역학적 지지력 공식과 동역학적 지지력 공식 등이 제안되어 있으나 이들 방법들은 신뢰도가 낮으며, 정재하시험도 실제와 상이한 조건 하에서 시행되므로 그 방법이나 결과의 해석에 아직 약간의 문제가 남아있기는 하지만 현재의 공학적인 수준으로는 정재하시험을 실시하여 지지력을 확인하는 방법이 신뢰성이 가장 높은 것으로 판단되고 있다 (한국지반공학회, 1997).

실제 구조물의 경우 무리지어 시공되고, 말뚝에 작용하는 하중은 수년 또는 수십 년에 걸친 장기적인 하중이 작용한다. 그러나, 재하시험시에는 1개의 말뚝에 대한 시험일 뿐만 아니라 재하가 단시간에 일시적인 하중으로 작용하므로 실제와는 차이가 있을 수 있다는 점에 유의하여야 한다. 또한, 재하시험은 계획, 실시, 해석과정 등을 제대로 수행해야 필요로 하는 성과를 기대할 수 있다. 그러므로 시험계획이나

재하시험의 실시는 될 수 있는 한 실제에 가까운 상태에서 수행될 수 있도록 해야 하며 시험 중 측정이나 시험결과 해석은 지중에서의 현상을 제대로 반영할 수 있도록 신중하게 검토되어야 한다.(최용규, 2000)

3.2. 말뚝정재하시험 방법

말뚝정재하시험 방법에는 완속재하시험방법, 반복하중재하방법, 표준방법을 초과한 하중상재방법, 등 시간 간격재하법, 급속재하시험방법, 일정침하량시험방법, 하중증가평형시험방법, 스웨덴 반복하중재하방법 등이 있다. 이들 시험 방법 중 일반적으로 사용되는 표준방법은 완속재하시험방법이며, 말뚝의 잔류침하량을 구하기 위해서는 반복재하방법이 사용된다. 본 연구에 사용된 3개 현장 시험말뚝에서는 모두 ASTM에서 규정하고 있는 완속재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 정재하시험을 실시하였다.

완속재하시험방법은 예상되는 말뚝설계하중의 200%를 총하중으로 하여 8단계(25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175% 및 200%)로 나누어 재하하고, 각 하중단계에서 말뚝머리침하율이 시간당 0.25mm 이하가 될 때까지(최대 2시간) 재하하중을 유지한다. 대표적인 하중재하주기표를 표 2에 나타내었다. 설계하중의 200%, 즉 총 시험하중단계에서 하중을 유지하되 시간당 침하량이 0.25mm 이하일 경우 12시간, 그렇지 않을 경우 24시간 동안 유지시키고, 총 시험하중을 설계하중의 25%씩 각 단계별로 1시간씩 간격을 두어 재하한다. 만일 시험도중 말뚝의 파괴가 발생할 경우, 총 침하량이 말뚝머리의 직경 또는 대각선 길이의 15%에 달할때까지 재하를 계속한다.

반복하중재하방법은 재하하중의 하중단계를 표준재하방법에서와 같이 정하고, 재하하중단계가 설계하중의 50%, 100% 및 150%에 도달하였을 때 재하하중을 각각 1시간 동안 유지시킨 후 표준재하방법의 재하와 같은 단계를 거쳐 단계별로 20분 간격을 두면서 재하한다. 하중을 완전히 제하한 후 설계하중의 50%씩 단계적으로 다시 재하하고 표준시험방법에 따라 다음 단계로 재하한다. 재하하중이 총 시험하중에 도달하게 되면 12시간 또는 24시간 동안 하중을 유지시킨 후 제하하되 그 절차는 표준재하방법과 동일하다.

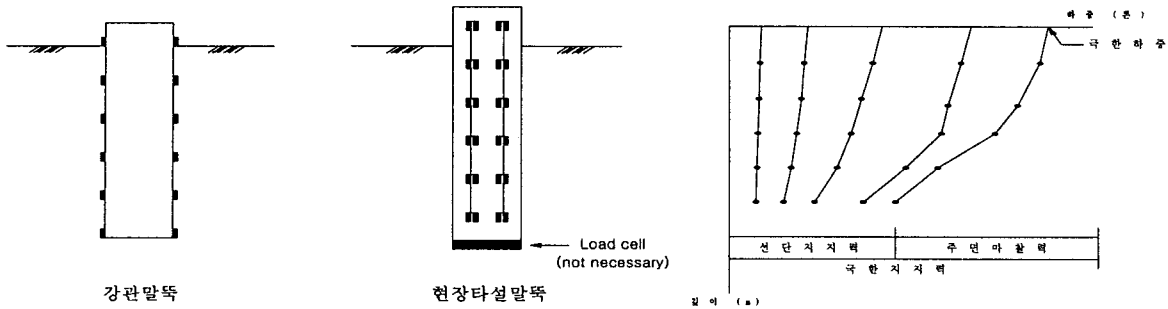
표 2. 대표적인 하중재하 주기표

Cycle	Step
①	0t → 125t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle
②	0t → 250t → 375t → 500t → 375t → 250t → 0t → Next Cycle
③	0t → 250t → 500t → 625t → 750t → 625t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle
④	0t → 250t → 500t → 750t → 875t → 1000t → 875t → 750t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle
⑤	0t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1125t → 1250t → 1125t → 1000t → 750t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle
⑥	0t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1250t → 1375t → 1500t → 1375t → 1250t → 1000t → 750t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle
⑦	0t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1250t → 1500t → 1625t → 1750t → 1625t → 1500t → 1250t → 1000t → 750t → 500t → 250t → 0t → Next Cycle
⑧	0t → 250t → 500t → 750t → 1000t → 1250t → 1500t → 1750t → 1875t → 2000t → 1875t → 1750t → 1500t → 1250t → 1000t → 750t → 500t → 250t → 0t → End

3.3 하중전이 해석

말뚝과 주면 흙 사이에 발생하는 마찰력은 응력 - 변위 - 시간의 특성, 말뚝 - 흙 시스템 내에 있는 모든 요소의 파괴 특성, 그리고 말뚝의 설치 방법 등에 영향을 받는다 (Vesic, 1977). 하중전이 해석방법으로는 다음의 4가지를 들 수 있으며, 여기에서는 가장 확실한 하중전이 해석방법인 실험적인 방법(최용규, 1989)을 사용하였다.

- (1) 실험적인 방법
- (2) 하중 전이 함수를 이용한 방법
- (3) 탄성·고체 방법
- (4) 유한 요소 해석 방법



(a) 축하중 계측장치 설치도 (b) 깊이에 따른 축하중 분포도

그림 2. 하중전이 해석의 개념도

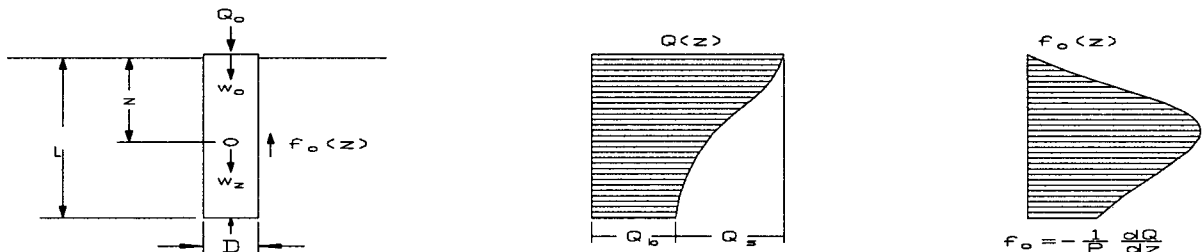
실험적인 해석의 개념도는 그림 2와 같으며 강관말뚝과 현장타설말뚝에 축하중 계측장치를 부착 또는 매설하여 축하중의 분포를 각 재하단계별로 직접 측정하는 것이다. 직경 D 이고, 관입깊이가 L 이며, 중심부에 수직하중 Q 가 재하된 말뚝을 그림 3(a)에 나타내었다. 그림 3(b)의 함수 $Q_s (= Q - Q_b)$ 는 말뚝 축을 따라 전달된 하중을 나타내므로, 말뚝 선단 주변마찰력의 합을 나타낸다. 그리고, 말뚝의 주변장 P 로 나눈 축하중 곡선의 z 방향에 대한 기울기는 말뚝 몸체부를 따라 생기는 단위표면 마찰응력 (f_0)이며, 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$f_0 = -\frac{1}{P} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad (1)$$

$Q(z)$ 가 깊이 z 에 따라 감소하면, 표면 마찰응력 f_0 는 그림 3(c)에 나타난 것처럼 양의 값을 갖는다. 만약, 단면적 (A)과 말뚝축의 변형계수 (E_p)를 알고, 말뚝머리의 수직변위 w_0 를 알면, 실험에서 측정된 말뚝 축하중 분포곡선 $Q(z)$ 를 이용하여 깊이 z 에서의 말뚝 수직변위 $w(z)$ 를 다음 식으로부터 산출할 수 있다.

$$w(z) = w_0 - \frac{1}{A \cdot E_p} \int_0^z Q(z) dz \quad (2)$$

따라서, 하중전이해석은 말뚝의 연직지지력 뿐만 아니라 말뚝의 침하량도 산정하는데 활용될 수 있으므로 그 중요성은 매우 크다고 할 수 있다.



$$w_z = w_0 - \frac{1}{AE} \int_0^z Q(z) dz$$

$$Q(z) = AE_p dw/dz$$

$$Q_s = P \int_0^L f_0(z) dz$$

(a) 말뚝개요

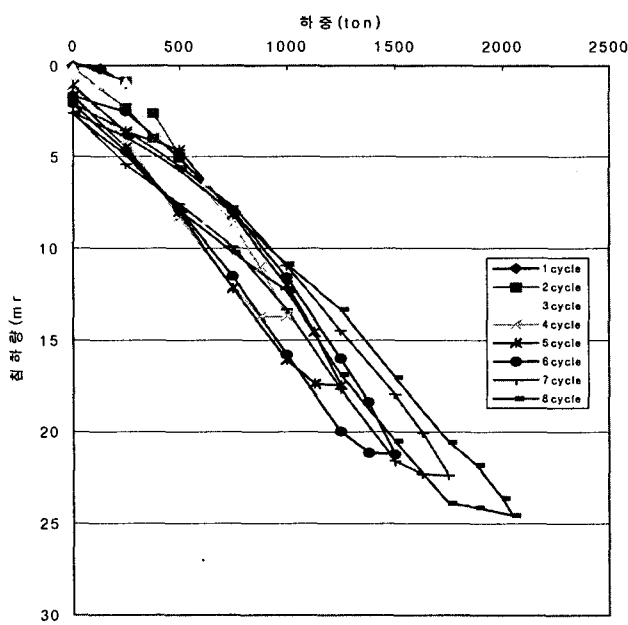
(b) 축하중의 분포도

(c) 마찰응력의 분포도

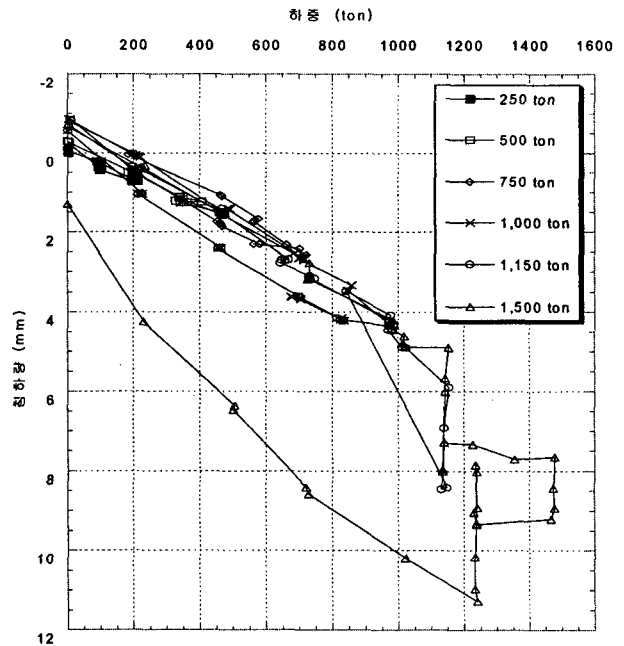
그림 3. 단일말뚝의 하중전이

4. 축하중전이 분석

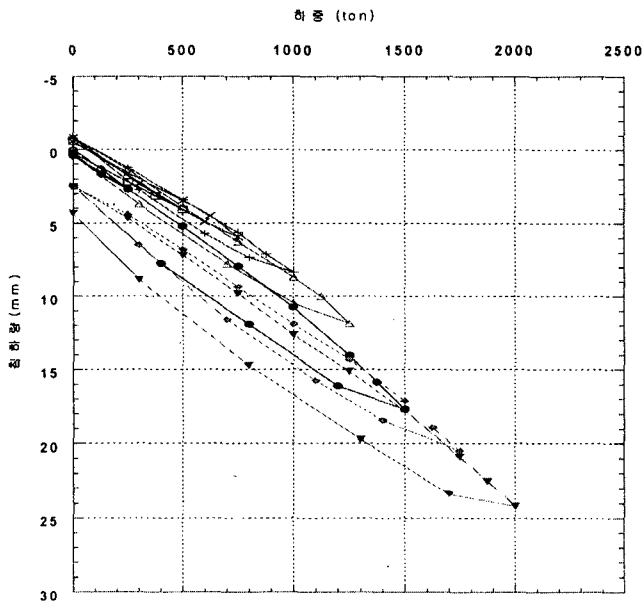
4.1 허용지지력 추정



(a) TP1



(b) TP2



(c) TP3

그림 4. 말뚝머리 하중 - 침하량 관계

TP1의 경우, 시험최하중인 2,050 톤에서도 지반은 항복을 보이지 않았다. 따라서, 안전율 2.0을 적용한 말뚝의 항복지지력은 최소한 1,025 톤 이상인 것으로 확인되었고, 안전율을 고려한 설계하중은 320 톤이므로 말뚝의 허용지지력은 충분히 만족될 수 있는 것으로 판단되었다.

TP2의 경우, 1,500 톤 하중단계에서 지반의 잔류변형은 약 1.5mm 정도밖에 발생하지 않았으나 말뚝의 변형이 크게 발생되었다. 따라서 말뚝재료의 지지능력에 근거한 말뚝기초의 항복지지능력은 1,500 톤

으로 볼 수 있으며, 안전율 2.0을 적용한 허용지지력은 최소한 750 톤 이상인 것으로 나타났다. 이는 설계하중 500 톤을 충분히 만족하는 것으로 판단되었다.

TP3의 경우, 시험최대하중인 2,000 톤에서도 지반의 항복은 보이지 않았다. 따라서, 안전율 2.0을 적용한 말뚝의 항복지지력은 최소한 1,000 톤 이상인 것으로 확인되었고, 안전율을 고려한 설계하중 500 톤을 충분히 만족하는 것으로 판단되었다. 3개의 시험말뚝에 대한 정재하시험 결과를 요약하면 표 3와 같다,

표 3. 정재하시험 결과 요약

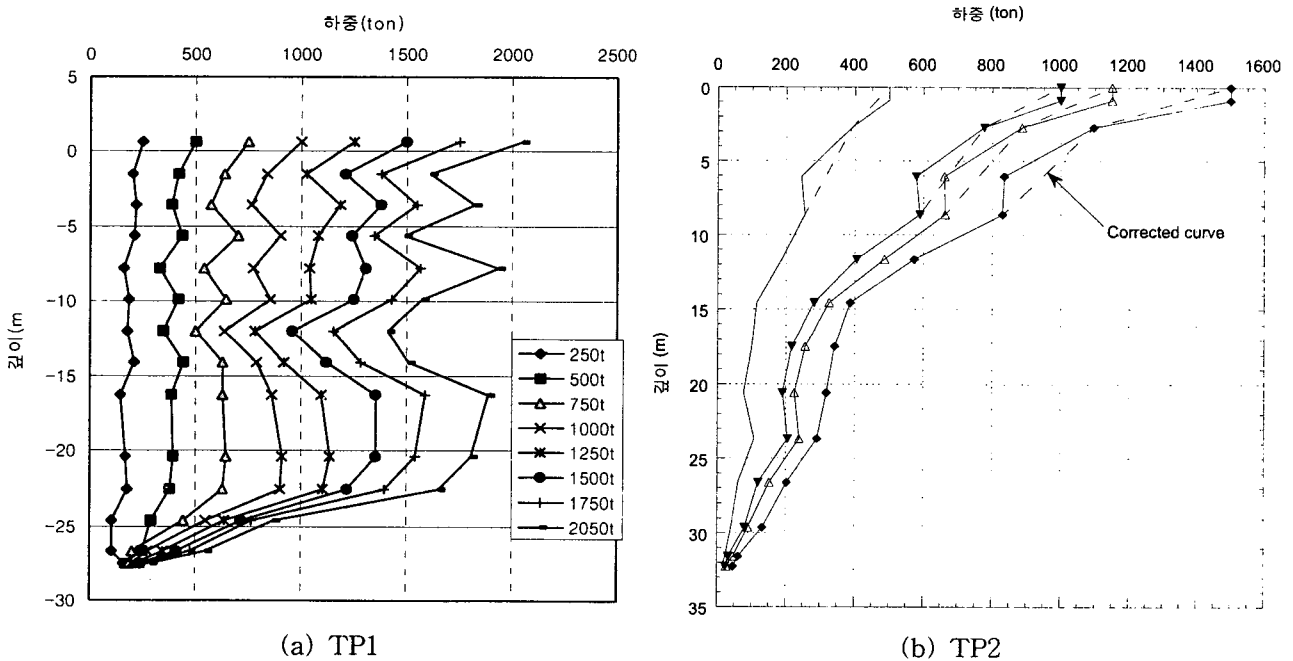
구분	최대시험하중(ton)	허용지지력(ton)	설계하중(ton)	안전율
TP1	2,050	1,025 이상	320	2.0
TP2	1,500	750 이상	500	2.0
TP3	2,000	1,000 이상	500	2.0

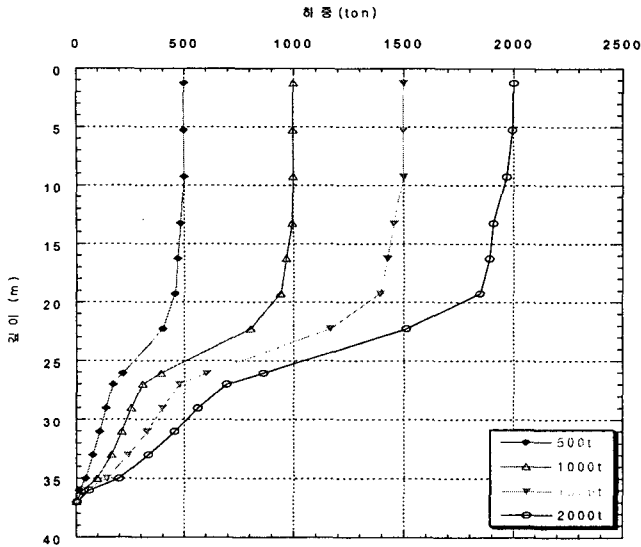
4.2 말뚝깊이에 따른 말뚝축하중 분포도

3개의 시험말뚝에 대한 하중단계별 말뚝축하중 분포도(그림 5)에서 각 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 실험적인 하중전이 해석에 의해 분리하였고, 그 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4. 시험결과 분석 요약

시험말뚝	최대재하하중(ton)	최소허용지지력(ton)	허용지지력시의 침하량(mm)	적용 안전율	선단극한지지력 / 전체극한지지력
	(선단지지력/주변마찰력)	(선단지지력/주변마찰력)			
TP1	2,050	1,025	3	2.0	0.86
	(294 / 1,756)	(147 / 878)			
TP2	1,500	750	1.5	2.0	0.97
	(50 / 1,450)	(25 / 725)			
TP3	2,000	1,000	3.5	2.0	0.99
	(6 / 1,994)	(3 / 997)			





(c) TP3

그림 5. 하중단계별 말뚝축하중 분포

5. 결론

- 1) 3개 현장의 풍화암 근입말뚝에 실시한 하중전이 측정이 수반된 말뚝정재하시험 결과 각 시험말뚝은 설계하중을 충분히 만족하는 허용지지력을 나타내었고, 주변마찰력의 하중분담률이 86~99%인 마찰 지지말뚝으로 거동하였다.
- 2) 견고한 암반층만이 지지층이 될 수 있는 것이 아니라 기초 상부의 하중을 안정하게 지지할 수 있는 지반이라면 풍화암층도 충분히 지지층이 될 수 있다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 설계단계에서 검증시험을 수행하지 못하고 예비설계로 설계를 종료한 경우 검증시험을 시공초기에 실시하더라도 지반의 허용지지력을 검증하고 이를 반영한 재설계가 이루어진다면 건설비용 절감효과 (말뚝 본수의 감소 등)를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2000), “도로교 설계기준”
2. 대한토목학회 (2001), “도로교 설계기준해설집(하부구조편)”
3. 최용규 (1989), “개단 강관말뚝의 폐색효과에 관한 실험적 연구”, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사 학위논문
4. 최용규 (2000), “광안대로 건설공사의 대구경 말뚝정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서”, 경성대학교 공학기술 연구소
5. 최용규(2002), “부산정보단지 진입도로(수영3호교) 건설공사의 강관말뚝과 현장타설말뚝에 대한 정재 하시험 및 하중전이측정 연구용역 보고서”, 경성대학교 공학기술연구소.
6. (사) 한국지반공학회 (1997), “구조물기초 설계기준”
7. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994) (1994), “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”
8. Vesic, A. S. (1977), “Design of pile foundations”, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 42.