



BACKYOUNG Geotechnical & Construction CO., LTD

말뚝 재하 시험(Pile Load Test)

도약하는 기술 2팀 (현타팀)



1. 기초의 종류

1.1 얕은 기초 (Shallow foundation)

- 상부 구조물의 하중을 직접 지반에 전달시켜주는 기초로서 압축성이 큰 지층이 없을 때 지반에 직접 설치하므로 직접기초라고도 하며 하중전달기둥의 하부를 넓인 형식으로 확대 기초라고도 한다.

- 개념적 정의

$$D_f/B \leq 1.0$$

D_f : 근입깊이,

B : 기초의 최소폭

- 종류

- footing foundation
 - 1. 독립 푸팅 기초 (한 개의 기둥만 지지)
 - 2. 복합 푸팅 기초 (2개 이상의 기둥을 지지)
 - 3. 연속 푸팅 기초 (1연의 기둥수가 많거나 하중이 벽면을 통해 전달되는 구조)

- Mat foundation (상부구조 전단면 아래의 지지토층 위에 있는 단일 슬래브 형식)

1.2 깊은 기초 (Deep foundation)

- 개념적 정의

$$D_f/B > 4.0$$

기초의 근입깊이 3m 이상 (BS)

- 말뚝 기초, 피어기초, 케이슨 기초



1. 기초의 종류

1.3 시공법에 의한 분류(깊은 기초)

1. 타입공법 - 타격공법, 진동공법
2. 매입공법 - 압입공법, 프리보링공법, 내부굴착공법, 켓트공법
3. 현장타설공법 - 기계굴착공법 - 올케이싱 공법, RCD(reversed circulation drill)
Earthdrill, Micropile, Earthauger 공법
- 인력굴착공법 - 심초공법

1.4 하중전달 메카니즘에 의한 분류(깊은 기초)

1. 선단 지지 말뚝
2. 하부지반 지지 말뚝
3. 마찰말뚝
4. 다짐말뚝



1. 기초의 종류

1.4 깊은 기초에 작용하는 하중 및 적용 재하시험

1. 연직 압축 하중 – 정재하시험, 동재하시험, 양방향 재하시험
2. 연직 인장 하중 – 인발/인장시험
3. 수평 하중 – 수평재하시험
4. 회전 모멘트 – 기초판의 강성이 부족할 경우 발생

말뚝의 배열을 2열 이상, 최소 간격 확보 (2.5D), 기초의 강성 확보

1.5 재하시험에 적용하는 하중

1. 상시 최대 반력 – 교축방향 최대 압축력
– 교축 직각방향 최대 압축력
2. 허용 지지력



2. 재하시험의 종류(깊은 기초)

2.1 기초에 작용하는 하중 형태에 따라

1. 연직 압축 하중 – 정재하시험, 동재하시험, 양방향 재하시험
2. 연직 인장 하중 – 인발/인장시험
3. 수평 하중 – 수평재하시험
4. 회전 모멘트 – 기초판의 강성이 부족할 경우 발생

말뚝의 배열을 2열 이상, 최소 간격 확보 (2.5D), 기초의 강성 확보

2.2 동재하시험과 정재하시험의 개념적 구분

1. 동재하시험 (EOID; End Of Initial Driving) : 말뚝 기초의 시공관리 기준을 제시하기 위한 시험
2. 동재하시험 (Restrike) , 정재하시험 : 말뚝 기초의 시공성(지지력)을 확인하기 위한 시험
지반의 Set-up Effect or Relaxation effect 확인시험



2. 재하시험의 종류(깊은 기초)

2.3 지지력 산정에 적용되는 현장시험법

1. SPT(표준관입시험)
2. CPT(콘 관입시험)
3. PMT(프레셔 미터시험)
4. Osterberg Cell
5. SPLT



3. 동적 재하시험 (Dynamic Pile Testing)

- 원리
 - 1차원 파동 전달 이론 (1-D Wave Propagation Theory)
- 현황
 - 1960년대 미국에서 처음실용화 (Case Western대학의 Goble교수)
 - PDA(PDI), FPDS(TNO), DPAS(일본 건설성 토목연구소), 현대건설기술연구소
 - 전세계에 400여대, 국내 97년 5월 31대
 - 국내 1994년 최초도입, 한해 수천본 시험
- 장점
 - 간편하고 비용저렴, 표준시험 : ASTM D-4945
 - 사하중이 필요없고 항타기 또는 낙하추만 있으면 시험 가능
 - 항타관리(말뚝손상여부, 항타시스템의 적절성, 항타에너지)
 - 지지력 확인(CASE, CAPWAP), 선단 및 주면마찰력 분리 가능
- 단점
 - 지지력 예측의 신뢰도가 정재하시험에 비해 떨어짐
 - PDA, FPDS, DPAS의 결과가 동일하지 않음
 - 특이한 지반조건에서 정재하시험 결과와 상이 가능성



4. 동재하시험 종류

4.1 동재하시험 시기에 따른 구분

시향타시 수행하는 동재하시험

- ①. EOID (End Of Initail Driving)
- ②. EOD (End of Driving)

양생이나 Set-up 후(시간이 경과한 후 수행하는 동재하시험)

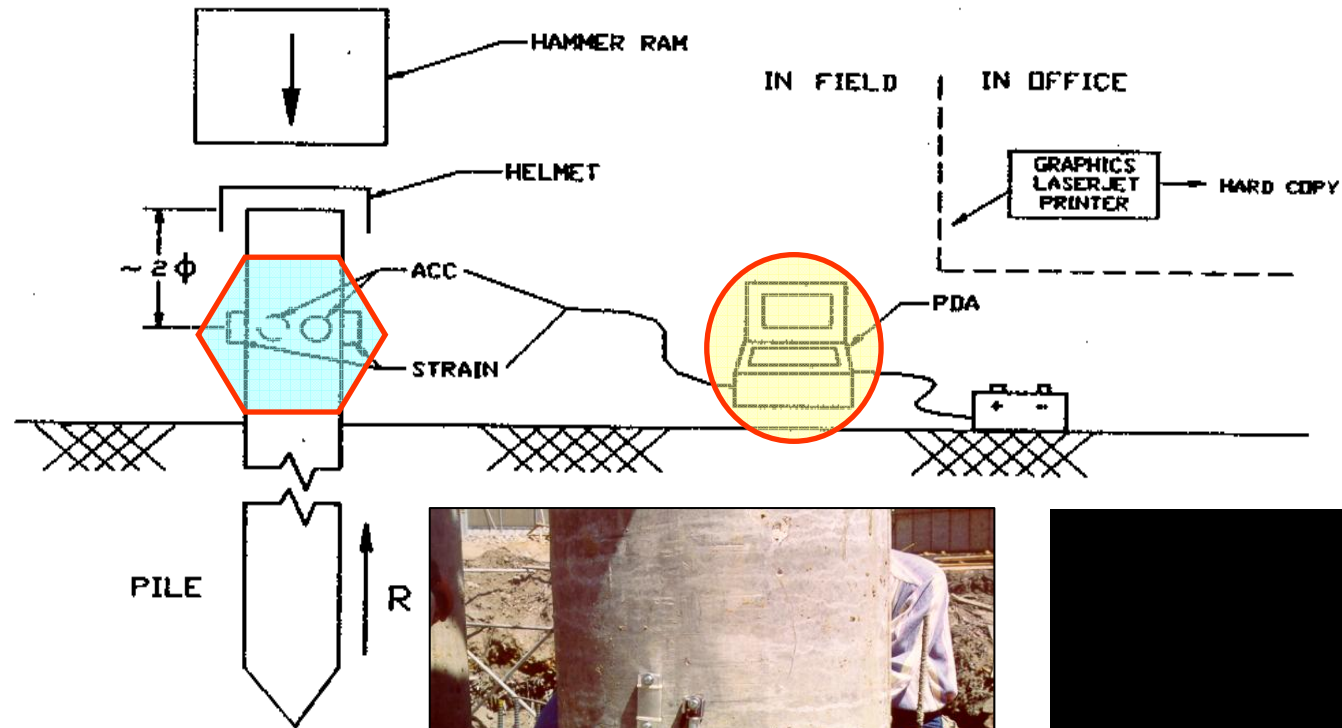
- ③. Restrike시험

4.2 대표적인 말뚝 시공법

- ①. Driven (직향타)
- ②. DRA (Dauble Rotary Auger)
- ③. SIP (Soil cement injected Precast Pile Method)
- ④. SAIP (Special Auger & Soil cement injected Precast Pile Method)
- ⑤. PRD (Perocussion Rotary method)

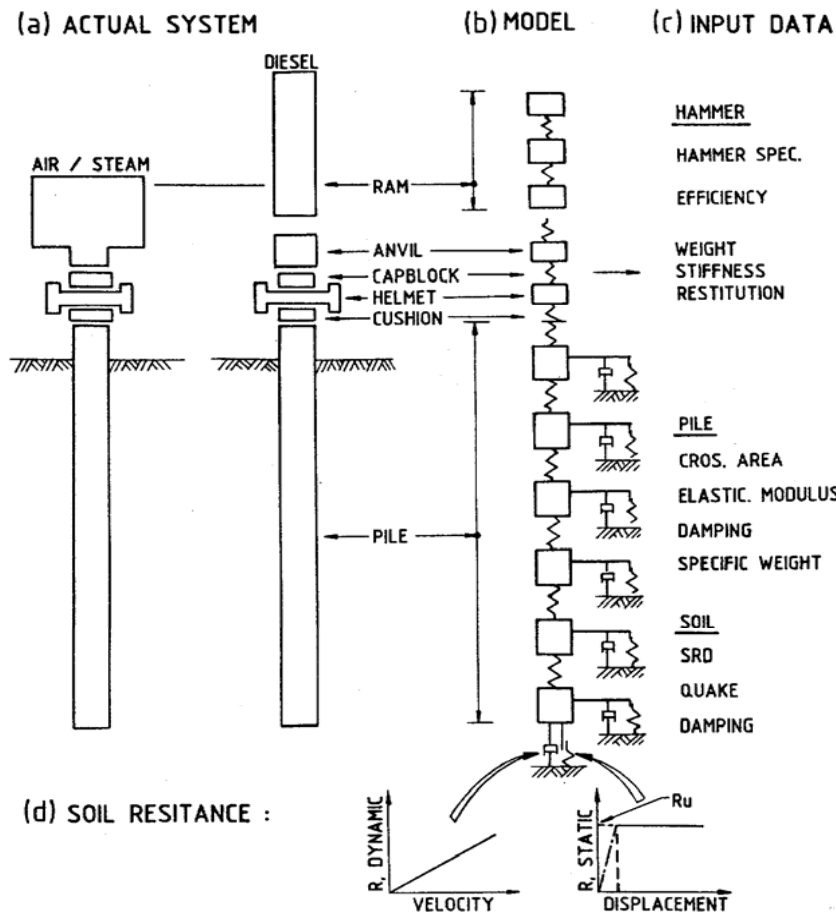


5. 동적 재하시험 (모식도)





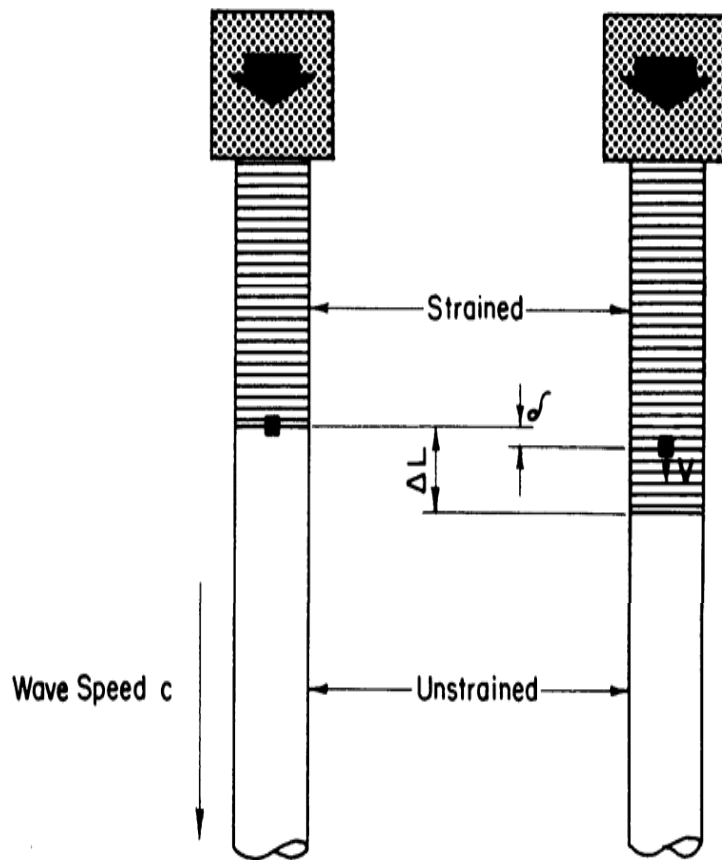
5. 동적 재하시험 (기본 이론)



- Smith Model (1960)
 - Pile : lumped mass spring
 - Soil : viscoelastic-plastic
- 1D wave Equation



5. 동적 재하시험 (기본 이론)



- Wave speed $c = \frac{\Delta L}{\Delta t} \left(= \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right)$

- Strain $\varepsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{\Delta t \cdot c}$

- Particle Velocity $V = \frac{\delta}{\Delta t}$

- Rearrangement $\varepsilon = \frac{V}{c}$

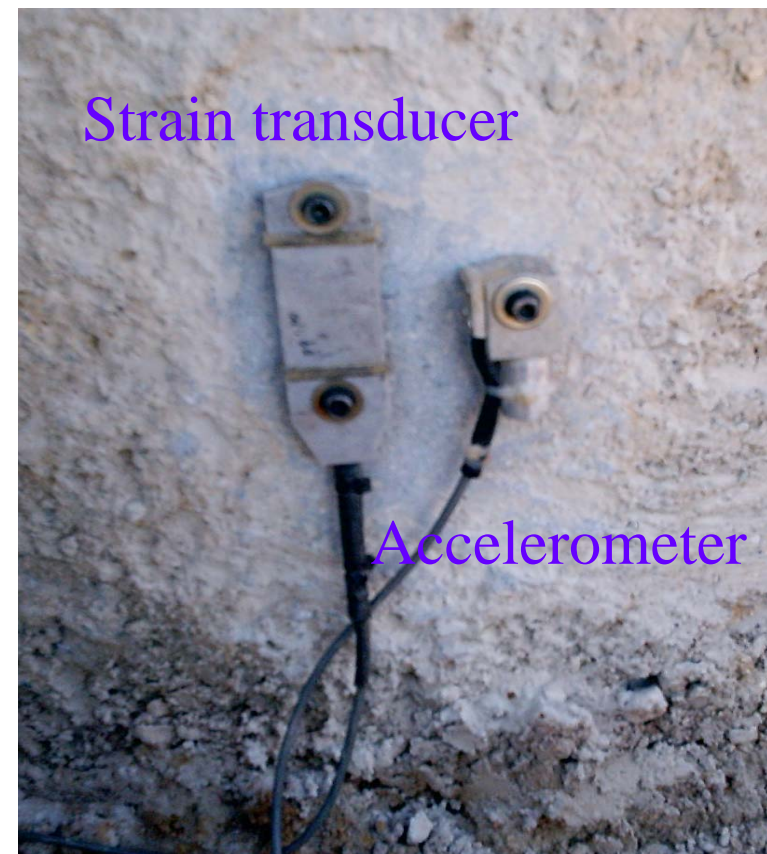
- $EA \rightarrow F = \frac{EA}{c} V = ZV$



6. 동재하시험 장비

6.1 동재하시험 용 센서

구분	수량	제조회사
Pile driving Analyer	1 set	PDI 社
Accelerometer	2 조	PDI 社
Strain Transducer	2조	PDI 社
Connection Cable	2조	PDI 社
기타부대장비	1식	





6. 동재하시험 장비

- ① 해머 : 진동해머를 제외하고는 항타 시공에 사용되는 어떠한 종류의 해머도 사용 가능하며 보통 최대시험하중의 1 ~ 1.5%의 Ram중량을 가져야 한다.
- ② 변형율계(Strain Transducers) : 변형율계는 타격으로 인하여 말뚝에 발생하는 변형율을 측정하며 이 변형율계의 임피던스 (Impidence)는 말뚝 임피던스의 0.5 ~ 2배가 되어야 한다.
- ③ 가속도계(Accelerometer) : 가속도계로 부터 측정되어진 가속도는 항타분석기에 의해 적분되어 속도로 변환된다.
- ④ 변형율계와 가속도계는 말뚝두부로 부터 대략 최소 1.5 D(D:말뚝직경)이하 되는 지점에 대칭으로(180°방향) 각각 1쌍씩 부착하며, 부착방법은 고장력 볼트를 사용한다.
- ⑤ 항타분석기(PDA) : 항타시 변형율계 및 가속도계로 부터 측정된 Analogue 신호에 대해 Signal Conditioning을 실시하며 A/D변형기를 통해 시간에 대한 힘과 속도를 Digital Data로 변환하여 저장하고, 힘과 속도의 파형을 Case방법으로 추정된 각종 계산치와 함께 화면에 나타낸다.

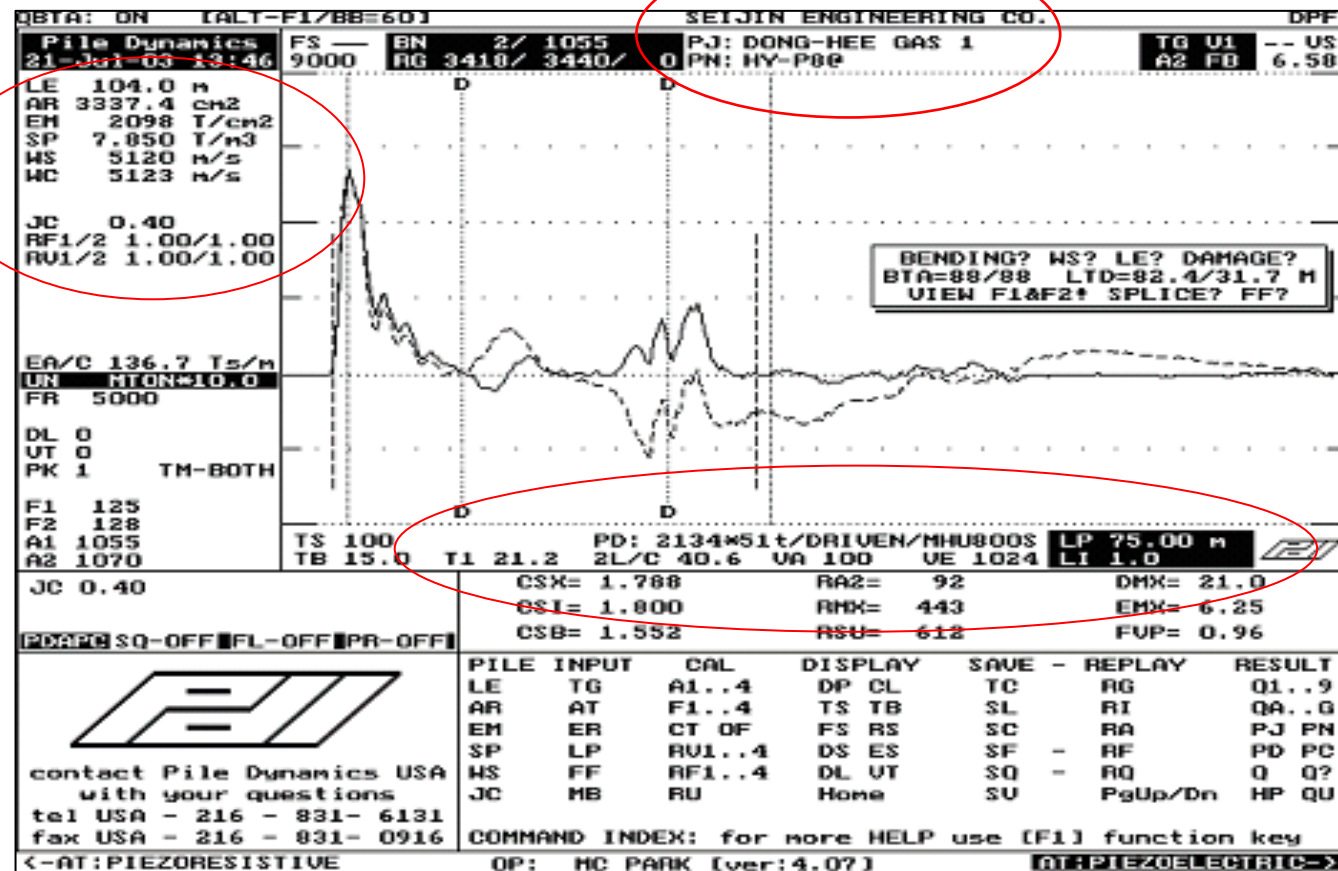


7. 동재하시험 방법

- ① 시험말뚝 두부를 고강도 레미콘을 이용하여 보강한다.
- ② 거치된 말뚝 항두로부터 1.0D(D:말뚝직경)이하의 말뚝사방에 90°방향으로 콘크리트용 앵커를 설치하여 4쌍의 가속도계(Accelerometer)와 변형율계(Strain Transducer)를 볼트로 고정한다.
- ③ Connection Cable과 Main Cable을 PDA와 연결한다.
- ④ 초기 변형률 offset check 및 Calibration Test를 시행한다.
- ⑤ 기본 입력자료를 입력하여 시험준비를 마친다.
- ⑥ 항타를 시작하면서 PDA를 통하여 속도파와 응력파를 입력 받는다.
- ⑦ 필요시 타격에너지를 변화시키면서 2 ~ 3회 정도 측정한다.



8. 동재하시험 출력화면



Case 화면



9. 항타분석기 중요 출력치

출력치	내 용
CSX	Gauge 위치에서의 최대압축응력(최대압축력)
CSB	말뚝 선단부에서의 최대압축응력(최대압축력)
TSX	말뚝에 작용하는 최대인장응력(최대인장력)
EMX	Gauge위치에서의 최대 항타 에너지
RMX	Case 방법에 의한 최대 정적 극한 지지력
BTA	말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수
DMX	Gauge위치에서의 최대 변위



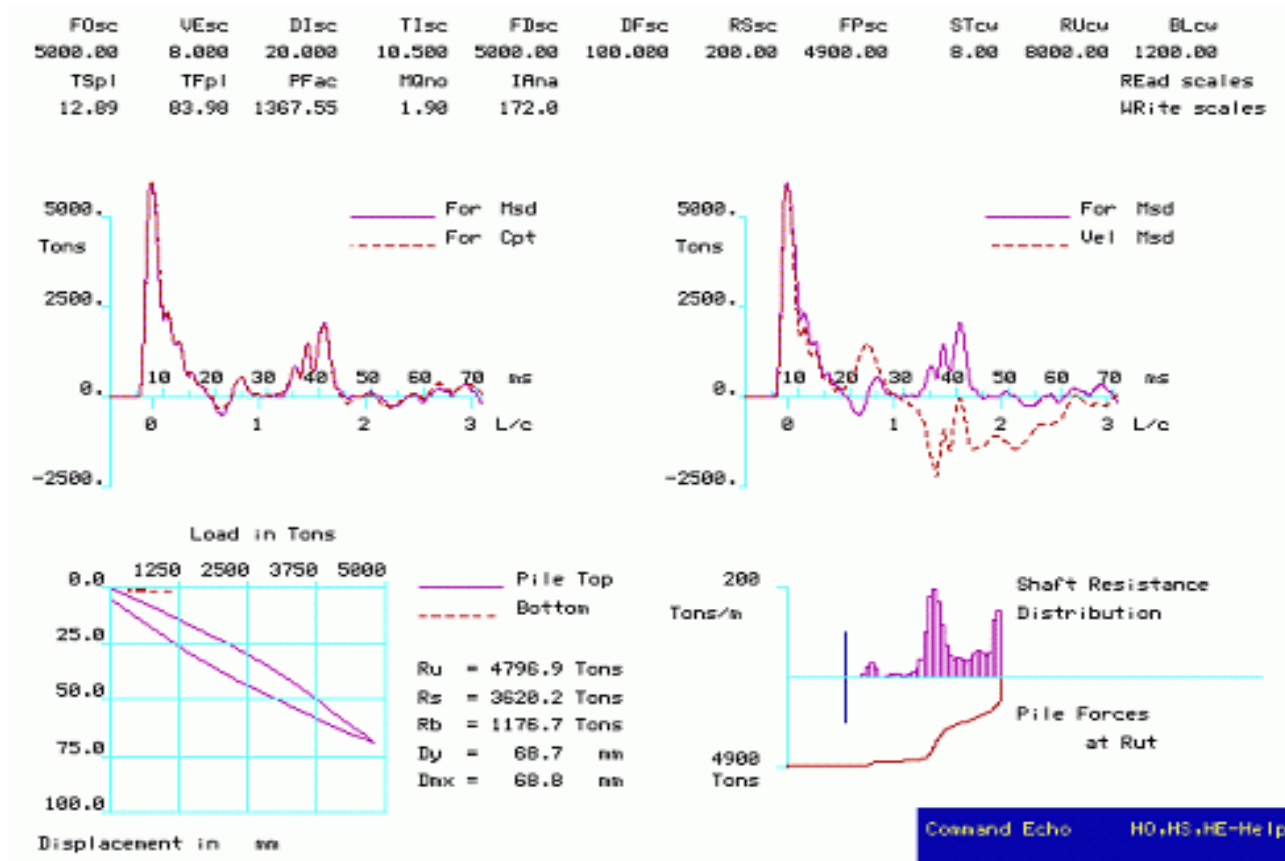
10. 동재하시험 분석법

1. Case Method – 현장에서 출력화면을 가지고 간략 분석
RMX, CSB, CSX, EMX, BTA 사용
2. CAPWAP Method – Capwap Program을 사용하여 Signal Mething 분석
전체 지지력 및 주면마찰력과 선단 지지력의 분리
응력 재분배에 의한 심도별 하중전이 양상 분석
사용 안전율 ($FS=2.5$, $R_u/2.5 = R_a$)
3. Davisson Method – Capwap 분석결과치중 모사 적적곡선을 이용하여 말뚝의
탄성 압축량 (PL/AE)과 지반 탄성거동 (D/30)을 고려하
여 Davisson Offset Line과 만나는 교점을 항복하중으로 분석
사용 안전율 ($FS=2.0$, 항복하중/2.0 = R_a)



11. 동재하시험 분석예

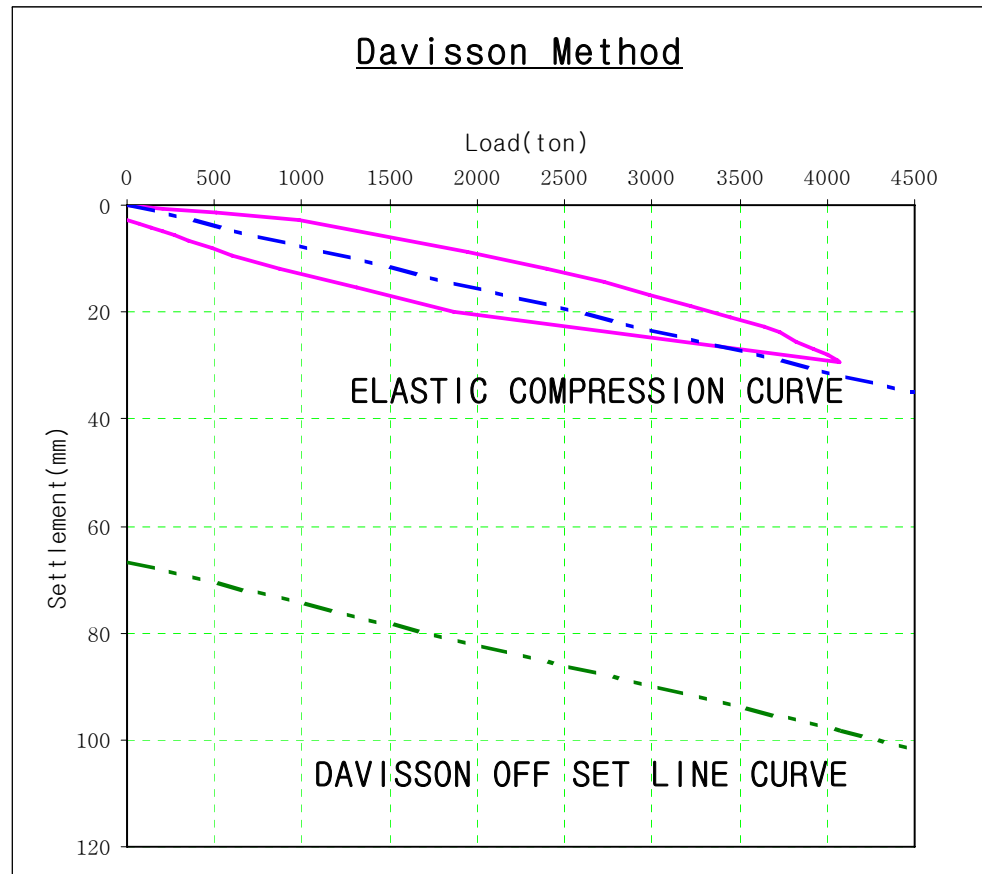
11.1 Capwap Method 분석결과





11. 동재하시험 분석예

11.2 Davisson Method 분석결과



Elastic compression curve

$$= PL/AE$$

지반 탄성거동

직경 600mm 이하 소구경

$$D_s = 3.81 + D/120(\text{mm})$$

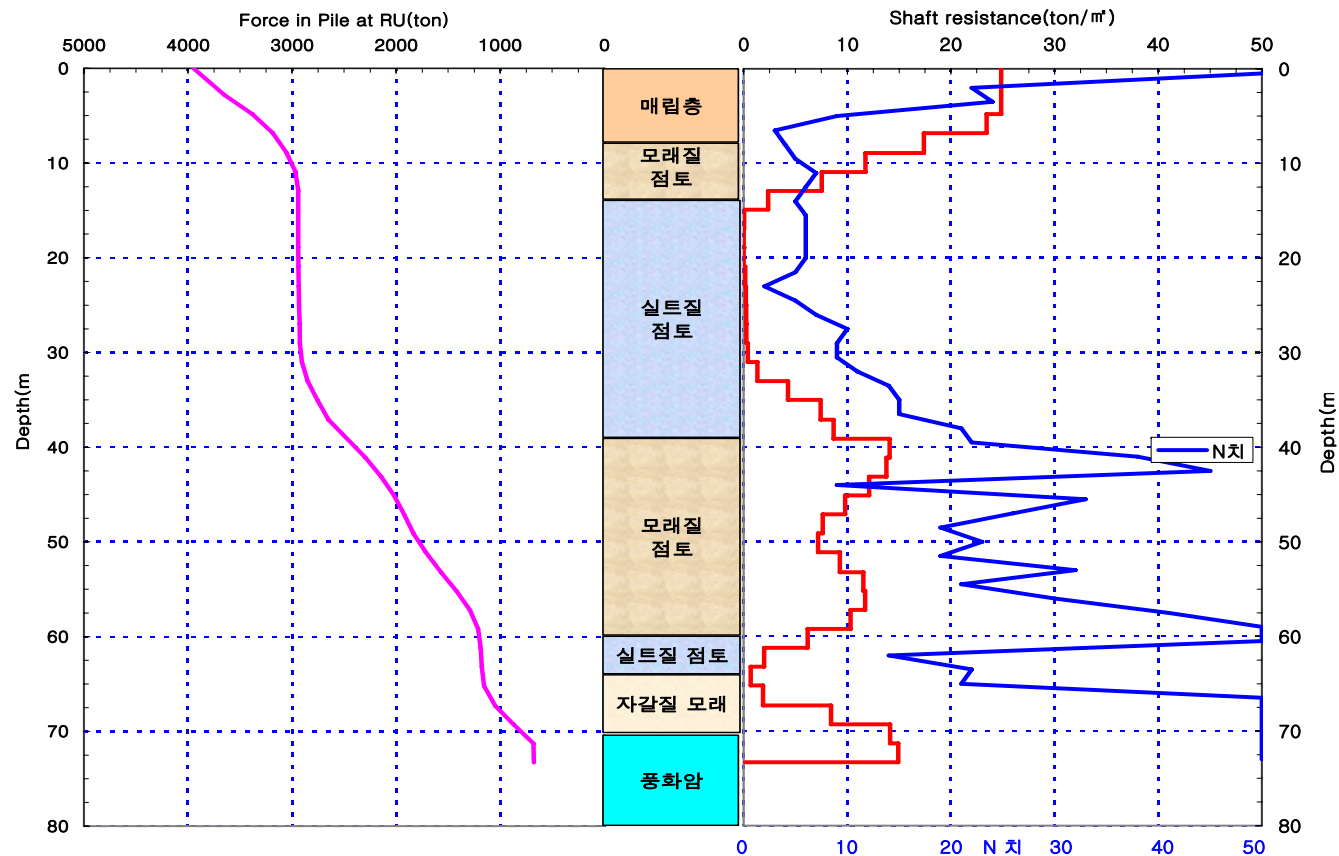
직경 600mm 이상 대구경

$$D_s = D/30(\text{mm})$$



11. 동재하시험 분석예

11.3 심도별 하중전이 분석결과





12. 동재하시험 자료

12.1 동재하시험 수량에 대한 제안

구분	시험 횟수
구조물 별 말뚝 수 1~80본	2
구조물 별 말뚝 수 1~160 본	3
구조물 별 말뚝 수 160본 이상	4

註)구조물 기초 설계 기준 5장 깊은 기초



12. 동재하시험 자료

12.2 현장 관리에 사용되는 지지력 공식

● HILEY공식에 의한 허용지지력 계산

$$R_u = \left\{ \frac{e W_r H}{s + \frac{C_c + c}{2}} \times \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right\} / FS$$

where R_u = 극한지지력(ton)

s = 최종관입량(cm)

$C_c + c$ = 리바운드량(cm)

e = 해머효율($E/H \times W_r H$)

W_r = 해머중량(ton)

H = 낙하고(cm)

W_p = 말뚝중량(ton): 609*12t)단위중량=177Kg/■

말뚝중량(ton): PHC Φ600)단위중량=375Kg/■

n = 해머 복원계수

● 5S 공식에 의한 허용지지력 계산

$$R_a = \frac{2WH}{5S+100} \quad R_a = \text{허용지지력 (ton)}$$

W = 해머중량(ton)

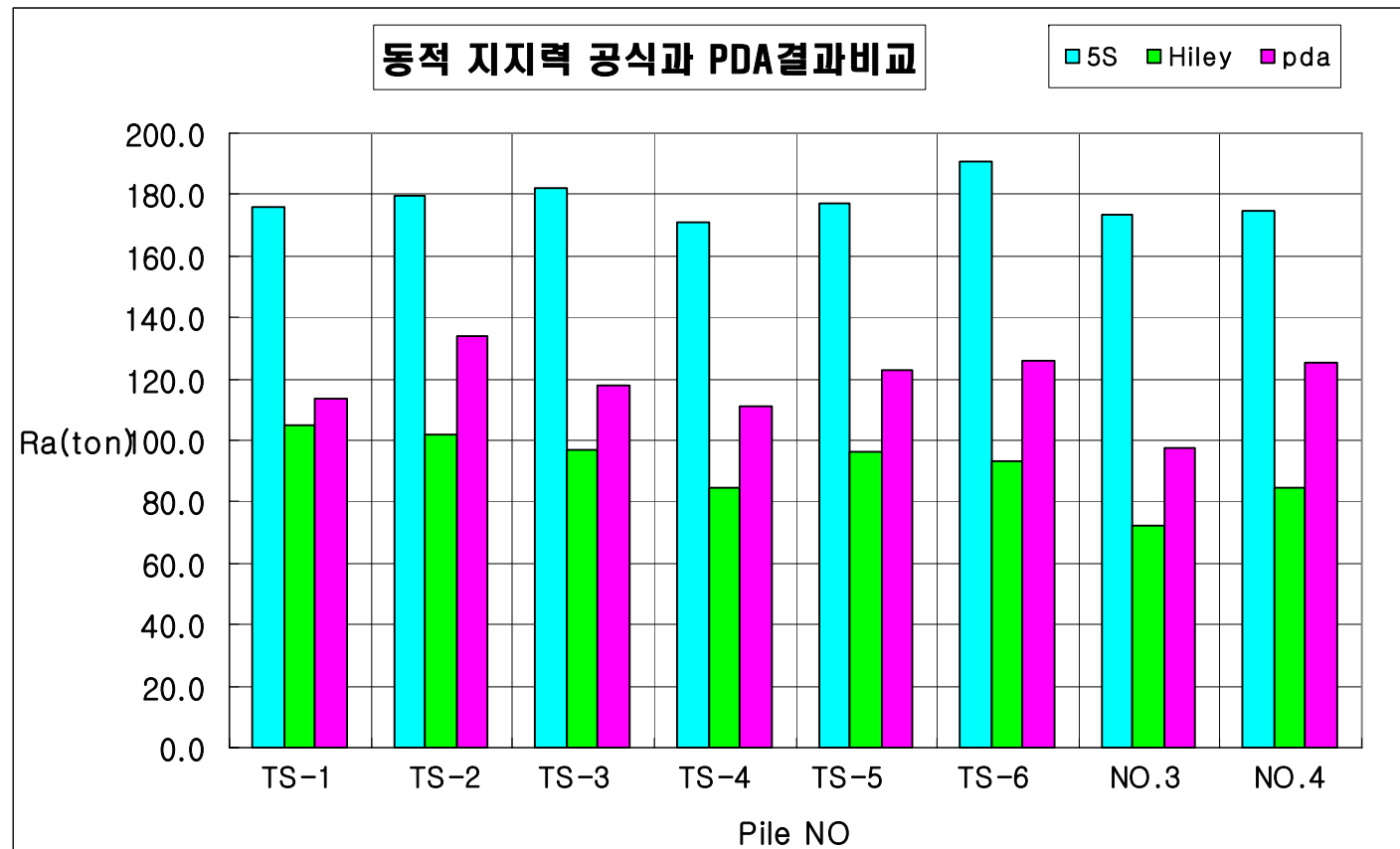
H = 낙하고 (mm)

S = 최종관입량 (mm)



12. 동재하시험 자료

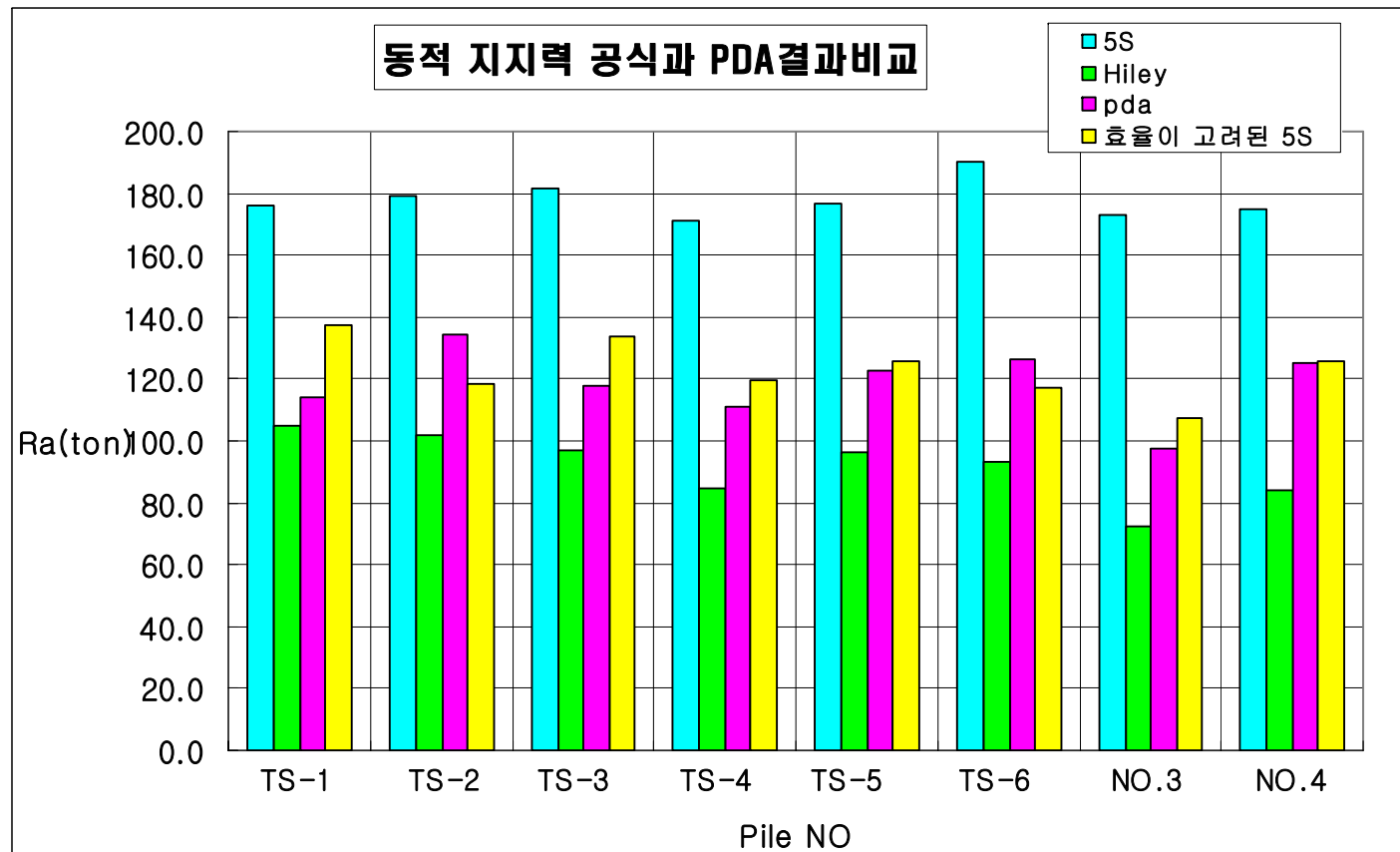
12.3 지지력 공식과 동재하시험 결과의 비교





12. 동재하시험 자료

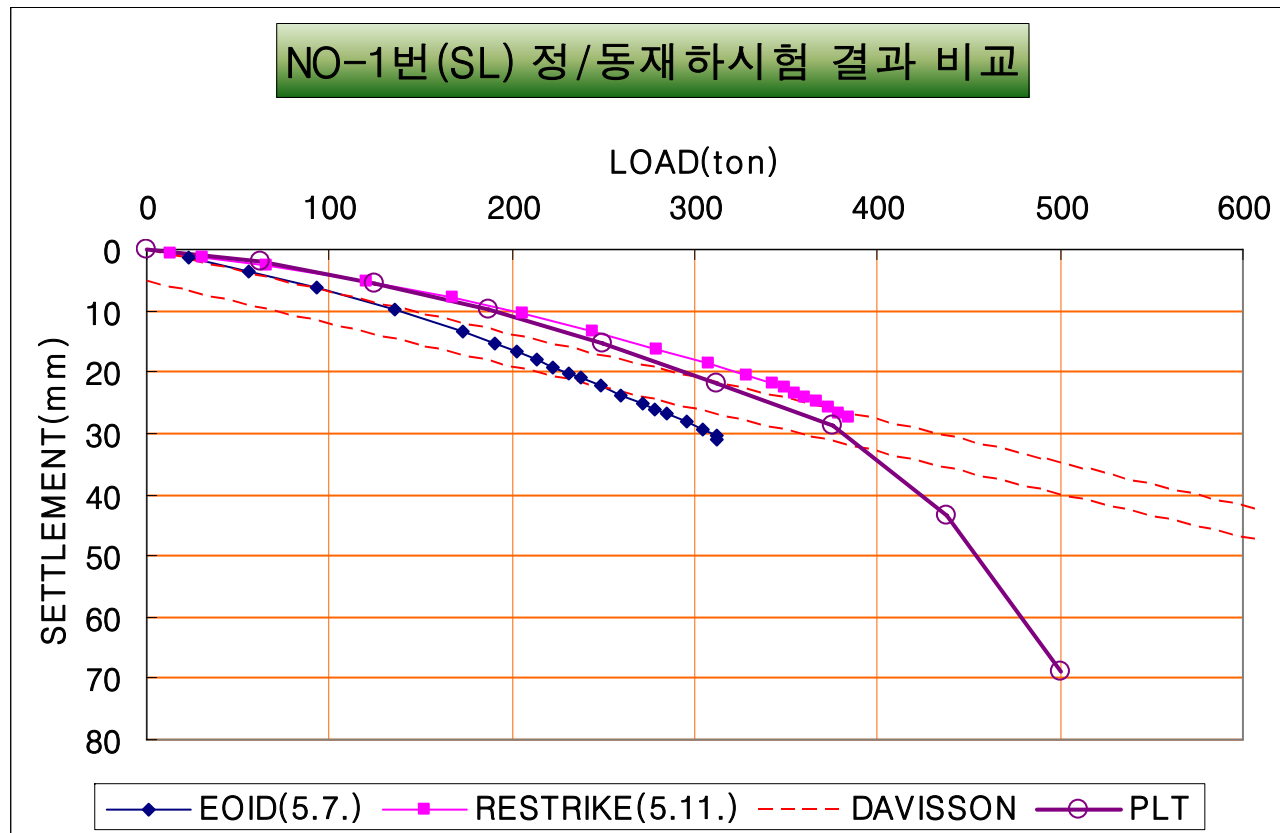
12.3 지지력 공식과 동재하시험 결과의 비교(효율 고려)





12. 동재하시험 자료

12.4 동재하시험 결과의 신뢰도





13. 동재하시험에 사용되는 용어 정리

1. Quake (지반의 탄성변형량)

구분	Soil type	Pile type & size	Quake(mm)
Shaft Quake	all	all	2.5
Toe Quake	All sile type, soft Rock	Open end pipe	2.5
	Hard rock	all	1.0

2. Damping (지반의 감소계수)

구분	Soil type	Damping factpr (S/m)
Shaft Damping	Non-cohesive soils	0.16
	cohesive soils	0.65
Toe Damping	all	0.50



14. 대한주택공사 제안

시험방법 세대수	동재하시험			정재하시험
	시험타 말뚝		본 항타 말뚝	
	초기항타	재항타		
500 호 미만	1	1	2	1
500 ~ 1000	2	2	4	1
1000 호 이상	4	4	6	1