

## 말뚝 기초(Ⅱ)

박 용 원\*

### 2. 말뚝 기초 계획과 조사

#### 2.1 머리말

구조물 기초로서 말뚝 기초를 채택하기로 했다는 것은 여러가지 요인에 의하여 얇은 기초가 부적당하다는 평가를 받은 후일 것이다. 말뚝기초는 얇은 기초의 대안으로서 사용되는 기초이기 때문이다. 말뚝기초의 타당성을 검토하는데는 얇은기초보다 검토해야할 요인이 많다. 말뚝기초는 그 구성재료와 시공법에 따라서 매우 다양한 종류가 있을 뿐만 아니라 같은 크기 같은 재료라하더라도 시공법에 따라 그 거동이 다르고 얇은 기초보다 훨씬 복잡하여 기초의 지지력을 결정하고 시공법을 선정하기가 쉽지 않기 때문이다. 말뚝 기초를 계획 설계하기 위해서는 말뚝 종류와 시공법에 따른 말뚝거동의 특징과 시공법에 대한 지식이 필요하고 지반과 부지 조건 그리고 진동 소음과 같은 환경적인 사항까지 고려하여야 한다. 이번 강좌에서는 말뚝 기초의 계획과 설계에 고려해야할 중요 사항과 설계에 필요한 정보를 얻기 위한 조사법에 대하여 다루기로 한다.

#### 2.2 말뚝 기초 계획과 설계의 고려 사항

##### 2.2.1 개요

말뚝 기초는 구조물의 하중을 말뚝을 통하여 깊은 지지층에 전달하여 구조물의 일생동안 안전하게 제 기능을 발휘할 수 있게 하는 기능을 수행해야 한다. 성공적인 말뚝기초는 기초지반의 전단파괴에대한 충분한 안전율을 지니고 연직 및 수평 방향의 이동량이 허용 범위 이내를 유지하며 재료에 발생하는 응력이 허용치를 초과하지 않으면서 내구성이 구조물의 수명을 보장할 수 있도록 충분히 커야하는 조건을 만족시켜야한다. 이러한 조건을 만족하는 기초를 계획 설계하기 위하여 기본적으로 고려해야할 사항을 정리하면 다음과 같다.

1) 구조물 조건 : 구조물의 종류, 규모, 형태, 용도, 강성, 사용년수, 하중 조건 등 말뚝에 작용할 하중과 기초의 허용 변위량 그리고 내구성에 관련된 사항

2) 부지 조건 : 구조물 건설 위치의 지형, 면적, 표면 상태, 기후 조건, 교통 및 수송 조건, 지상 장애물, 지하 매설물, 주변의 다른 공사에 관한 사항, 공사 기간 등 시공과 경제성에 관련된 사항

3) 지반 조건 : 지층 구성, 지층의 토질 및 암반 역학적 성질, 지지층 깊이와 특성 그리고 분포, 지하수위와 수질, 지하 장애물, 지하 공동, 지진 자료 등 시공법과 설계를 위한 계수

\*정회원 명지대학교 공과대학 토목공학과 교수

특성 결정에 관련된 사항

4) 환경 조건 : 부지 주변의 사회 문화적 환경(주택가, 학교, 병원, 종교 또는 문화시설, 문화재, 기념물, 보호림 등), 그 지역의 소음 진동 등 환경 관련 기준과 법규 생태학적 조건 등 기초 설계와 시공법 선정에 관련된 사항

이상과 같은 사항을 고려하여 얻은 정보를 이용하여 말뚝기초를 계획할 때에는 다음 사항을 결정해야 한다.

1) 말뚝 종류 및 지지층 : 주어진 조건에 적합한 말뚝 종류와 크기 그리고 지지층의 깊이와 말뚝 길이를 결정한다.

2) 시공법과 장비 : 지반 조건과 부지 조건 그리고 환경 조건을 감안하여 가장 적합한 시공법을 선정한다.

3) 공기와 경제성 검토 : 적정 설계에 대한 공기와 공사비를 산출하고 타공법과 비교하여 경제적인 공법을 선택한다.

## 2.2.2 말뚝 기초 하중

말뚝에 작용하는 하중은 방향에 따라 연직 하중, 수평 하중 그리고 회전 모멘트가 있다. 연직 하중은 압축 하중과 인발 하중으로 나뉘며 연직 하중과 수평 하중은 경사하중의 연직 및 수평 성분 일 수 있다. 회전 모멘트는 말뚝 머리를 구속하고 있는 기초판에 작용하는 모멘트와 말뚝의 편심 또는 경사 시공에 의하여 발생한다.

하중은 그 재하 시간에 따라 永久(長期) 하중, 一時(短期) 하중으로 나뉘며 死荷重은 영구 하중에, 動荷重이나 地震 하중은 일시 하중에 속한다. 일시 하중에는 週期 하중과 反復 하중도 포함된다. 영구 하중이 크고 일시 하중이 작은 구조물은 침하를 줄이기 위해 완전 지지 말뚝으로, 단기 하중이 큰 구조물은 단기 하중이 지반의 압밀 침하를 크게 일으키지 않으므로 마찰 말뚝이나 불완전 지지 말뚝으로 지지하는 것이 유리하다. 하중 재하 형태에 따라 그에 합당한 말뚝 재료의 응력 변형 특성을 고려하여 유리한 말뚝을 선택해야 한다.

### 1) 연직 하중

말뚝에 작용하는 연직 압축 하중은 주로 구조물의 사하중과 연직 방향 동하중이며 말뚝의 선단 지지력과 주변 마찰력에 의하여 지반 깊숙히 전달 되므로써 지지된다. 말뚝 한개가 지지 할 수 있는 하중을 말뚝 허용 하중이라고 하며 ①선단 지지력과 주변 마찰력의 합을 안전률로 나누어 구한 하중 ②말뚝 재료의 허용 압축 응력에 말뚝 단면적을 곱하여 구한 하중 ③허용 최대 침하량을 일으키는 하중 중에서 제일 작은 값을 취하여 쓴다. 적당한 깊이에 완전한 지지층이나 마찰층이 없을 때는 ①번, 적당한 깊이에 좋은 지지층이나 사질토층과 같은 마찰층이 있는 경우에는 주로 ②번, 마찰말뚝으로 지지 되거나 구조물이 침하에 민감한 것일 때는 ③번이 결정적 요인이 된다. 말뚝 연직 하중에는 말뚝 주변 지반의 침하로 발생하는 부마찰력이 포함 된다. 연약지반에 말뚝을 시공하고 그 위에 성토를 하여, 점성토 층이 말뚝 관입에 따라 교란 되고 말뚝 주변에 과잉 간극 수압이 발생하거나 말뚝 시공 후에 지하수위가 내려가서 말뚝 주변 지반이 압밀 침하를 일으키게 될 때 말뚝에 부마찰력이 발생하게 된다. 이 부마찰력은 말뚝 길이 방향으로 깊이에 따라 커지게 되므로 말뚝 단면에 발생하는 응력도 깊이에 따라 커지게 된다. 따라서 말뚝 재료가 견딜 수 있는 응력 검토에서는 응력의 최대치를 대상으로 해야 한다.

말뚝에 작용하는 연직 인장 하중은 상부 구조물에 작용하는 상향력(양력이나 앵커하중 등)과 수평 하중이나 모멘트에 기인하는 기초판 하중의 편심에 의하여 발생할 수 있다. 인장 하중은 말뚝 재료의 인장 강도에 의하여 지지 되는데 강 말뚝은 압축과 인장 강도가 거의 같으나 콘크리트 말뚝은 철근의 인장 강도에 의존해야 한다.

### 2) 수평 하중

말뚝은 근본적으로 축방향 하중 전달에는 효과적이나 축직각(수평) 방향의 하중에는 취약한 구조를 갖고 있기 때문에 말뚝 기초에는 될

수 있는대로 수평 하중이 발생하지 않도록 하는 것이 좋다. 그러나 제동 하중, 수압, 토압 등이 작용하는 교각이나 교대, 옹벽과 같은 구조물, 선박의 충격 하중을 받는 항만 구조물 등에서는 불가피하게 수평하중을 말뚝으로 지지해야 한다. 각개의 말뚝에 작용하는 수평 하중을 경감시키는 방법으로는 기초판의 매설 깊이를 될수록 깊게하여 기초판 측면의 수동 토압을 이용하여 수평력을 지지하든가 말뚝 수를 늘려서 말뚝 한개가 분담할 하중을 줄이는 법, 그리고 경사 말뚝을 시공하여 수평 하중의 일부를 말뚝 축하중으로 바꾸는 방법이 있다. 그러나 연약 지반을 관통하여 시공된 말뚝은 지반 침하에 따라 매우 큰 휨 응력이 말뚝에 작용하게 되므로 경사 말뚝 사용에는 특별한 주의가 필요하다.

말뚝의 허용 수평 하중을 결정하는 방법은 ①말뚝 주변 지반의 극한 수평 저항력을 적절한 안전율로 나눈 하중 ②말뚝에 허용 전단 응력이나 허용 휨 응력 이상을 유발하지 않는 최대 하중 ③말뚝 머리에 허용 최대 수평 변위를 일으키는 하중 중에서 최소치를 취하는 것이다. 이러한 허용 수평 하중의 결정에는 말뚝 머리의 구속 조건이 매우 중요한 요소가 된다.

### 3) 회전 모멘트

말뚝 머리에 시공되는 기초판의 설계가 적절치 못할 때 말뚝에는 회전 모멘트가 발생할 수 있다. 상부 구조물의 하중 조건을 말뚝에 균등하게 분포시키도록 말뚝을 배치해야 한다. 기초판에 발생하는 모멘트는 말뚝에 축방향력으로 분담이 되도록 최소한 2열 이상의 말뚝 배열과 적절한 말뚝 간격이 필요하다.

### 2.2.3 재료의 허용 응력과 유효 단면

말뚝의 하중 전달 능력은 말뚝 재료의 허용 응력에 유효 단면적을 곱한 값으로 간주된다. 건설부 제정 구조물 기초 설계 기준 해설(1)과 콘크리트 표준 시방서(2)에서는 콘크리트와 강 말뚝의 장기 허용 압축 응력에 대하여 다음과 같은 값을 제시하고 있다.

기성 콘크리트(RC)말뚝

$$: \sigma_c'/4 \leq 75 \text{ kg/cm}^2$$

수중 타설 콘크리트 말뚝

$$: \sigma_c'/5 \leq 50 \text{ kg/cm}^2$$

공기중 타설 콘크리트 말뚝

$$: \sigma_c'/5 \leq 60 \text{ kg/cm}^2$$

강 말뚝 : SWS 41강 : 1400 kg/cm<sup>2</sup>

SWS 50강 : 1900 kg/cm<sup>2</sup>

요즘에는 RC 말뚝보다는 PC 말뚝이 더 많이 사용되고 있으며 이웃 일본에서는 타입 콘크리트 말뚝의 95% 정도가 고강도 콘크리트 말뚝인 PHC 말뚝을 사용하고 있으며 우리나라에서도 1992년 부터 PHC 말뚝이 생산 판매되기 시작하였다.

PC 말뚝의 허용 압축 응력

$$: \sigma_c'/4 \leq 125 \text{ kg/cm}^2$$

PHC 말뚝의 허용 압축 응력

$$: \sigma_c'/4 \leq 200 \text{ kg/cm}^2$$

을 일반적으로 사용할 수 있으며 단기 응력에 대해서는 장기 응력의 2배의 값을 사용한다. 그리고 항타응력에 대해서는  $\sigma_c'$ 의 60%를 보는 것이 보통이므로 PC 말뚝은 300 kg/cm<sup>2</sup>, PHC 말뚝은 480 kg/cm<sup>2</sup>을 볼 수 있다.

강재 및 철근의 탄성 계수 E =

$$2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

PC 강의 탄성 계수 E =

$$2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

말뚝의 탄성 계수 : RC - E =

$$3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

PC - E =

$$4.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

현장말뚝 - E =

$$2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$$

말뚝 재료에 발생하는 응력이나 말뚝의 지지력 또는 말뚝의 강성 결정에 사용되는 말뚝의 유효 단면적 결정은 다음과 같이 한다.

지지력이나 지반 반력 결정시 :

기성 말뚝 : 말뚝 외경(H형강은 나비와 높이)

현장 타설 말뚝 : 공칭 직경\*

말뚝 강성이나 응력 계산시 :  
 기성 콘크리트 말뚝 : 콘크리트로 이루어진  
 고리형 단면  
 강말뚝 : 부식 두께를 제한 고리 또는 H형  
 단면  
 현장 타설 말뚝 : 공칭 직경, 다만 리버스 서  
 클레이션이나 오거 드릴  
 공법에서 벤토나이트 이수  
 를 사용하는 경우에는 (공  
 칭 직경 - 5cm)를 지름으  
 로 하는 원단면

\* 공칭 직경:  
 베노토 말뚝 - 케이싱 튜브 커팅 슈의 외경  
 리버스 서클레이션 드릴 말뚝 - 회전 비트  
 의 외경  
 오거 드릴 말뚝 - 회전 버킷의 사이드 커터  
 또는 리머 칼의 외경

## 2. 3 말뚝 선정을 위한 말뚝별 장단점

### 2.3.1 말뚝의 종류와 특징

말뚝 종류를 분류하는 방법이 여러가지가 있  
 겠으나 기초 공법 선정에 관한 기초 특성에 따  
 라 분류하자면 대략 재료와 시공법에 의한 분  
 류가 유용할 것이다. 표 2.1에는 재료와 시공법  
 에 따라 말뚝을 분류한 것을 보였다. 말뚝은 시  
 공시의 배토량에 따라 배토, 소배토, 무배토 말

뚝으로 분류되는데 이는 재료와 시공법에 따라  
 자동적으로 결정되며 말뚝 선정에 고려되어야  
 할 주요소의 하나이다.

기초로서 말뚝을 사용할 때에는 앞 절에서  
 기술한 바와 같이 부지 조건, 지반 조건, 상부  
 구조물 조건을 고려하여 가장 경제적이고 현장  
 에 적절한 말뚝 종류와 시공법을 선정해야 한  
 다. 말뚝 선정에 관한 기초 자료로서 말뚝 종류  
 별 장단점을 Tomlinson<sup>(5)</sup>은 다음과 같이 요약  
 하였다.

#### 1) 타입 배토 말뚝(driven displacement piles)

- 장점: ① 말뚝 재료의 품질을 향타전에 조사  
 할 수 있다.  
 ② 말뚝 단면과 재질이 확실하다.  
 ③ 지하수위에 제약받지 않고 시공할  
 수 있다.  
 ④ 공중이나 수중에 지표면 위로 뺀처  
 서 시공하기 쉽다.  
 ⑤ 깊은 지지층 까지 말뚝 관입이 가  
 능하다.  
 ⑥ 인장과 휨 응력에 대한 저항이 크  
 다.

- 단점: ① 지지층 깊이가 불규칙한 지반에서  
 말뚝 길이 결정이 어렵다.  
 ② 향타중에 말뚝이 파손될 수 있으  
 며, 이러한 경우에는 말뚝을 교체

표 2.1 말뚝의 분류

기 성 말 뚝	재 료 별	시 공 별	
		배 토 형	타입, 진동관입, 압입
말 뚝	목재말뚝 콘크리트 말뚝 : RC, PC, PHC	배 토 형	타입, 진동관입, 압입
		무 배 토 형	선착공공법
	강관콘크리트(SC)말뚝 강말뚝 : 강관, H 형강, 상자형강	소 배 토 식	타입, 진공관법
		무 배 토 식	속파기공법
현 장 말 뚝	철근콘크리트말뚝	배 토 형 (타 입)	알파말뚝, 델타말뚝, 프랭키말뚝 웨스턴 페데스탈 말뚝
		무 배 토 형 (착 공)	베노토공법, 오거드릴공법 리버스서클레이션 공법

해야 한다.

- ③ 결합있는 말뚝을 시공했을 때 지지력이 감소한다.
- ④ 말뚝 단면이 구조물 하중이 아니라 항타 응력이나 취급시 응력에 따라 결정될 경우에는 비경제적이다.
- ⑤ 항타 진동과 소음이 허용치 이상이 될 때 시공이 불가능할 수 있다.
- ⑥ 말뚝 관입에 의한 배토량이 커서 인접한 말뚝에 변위를 일으키거나 인접 구조물에 피해를 줄 수 있다.
- ⑦ 항타 장비의 키가 커서 장애물이 있는 좁은 곳에서는 시공을 할 수 없다.
- ⑧ 확대선단을 가진 말뚝을 사용할 경우에는 측면 지지력이 없어진다.

## 2) 타입형 현장 배토 말뚝(driven and cast-in-situ displacement piles)

- 장점: ① 변화 심한 지지층 깊이에 맞춰서 말뚝 길이의 조정이 쉽다.
- ② 끝막힌 강관을 사용하면 지하수를 배제하고 콘크리트를 칠 수 있다.
  - ③ 말뚝 선단을 확대 시공할 수 있다.
  - ④ 확대선단이 측면 마찰력을 감소시키지 않는다.
  - ⑤ 말뚝 취급이나 운반 문제가 없다.
  - ⑥ 낙추식 해머를 이용한 강관 내부 타격법으로 시공하면 소음과 진동을 감소시킬 수 있다.

- 단점: ① 연약 지층에서는 공벽이 안으로 밀려들어 말뚝 단면이 축소 되거나 끊어지는 수가 있다.
- ② 피압지하수가 있는 지층에서는 케이싱을 제거할 때 콘크리트 말뚝 단면이 제대로 형성 되지 않는다.
  - ③ 시공 후에 말뚝 콘크리트 재질 검사를 할 수 없다.
  - ④ 말뚝 길이가 항타 장비와 케이싱 인발 능력의 제한을 받아 긴 말뚝 시공이 어렵다.

- ⑤ 케이싱 타격시의 배토가 인접한 말뚝을 깨거나 들뜨게하고 인접 구조물에 피해를 줄 수 있다.
- ⑥ 항타 진동과 소음이 허용치를 초과할 수 있다.
- ⑦ 특수한 장비를 사용하지 않고는 수중 시공을 할 수 없다.
- ⑧ 대구경 말뚝 시공이 불가능 하다.
- ⑨ 굳은 점토나 조밀한 사질토 지층에서는 선단 확대 크기가 제한 받는다.
- ⑩ 유각 말뚝으로 시공할 경우 주변마찰력이 없거나 극히 작다.

## 3) 착공형 무배토 현장 말뚝(bored-and-cast-in-situ non-displacement piles)

- 장점: ① 지지층 깊이의 변화에 맞춰 말뚝 길이를 변화 시킬 수 있다.
- ② 착공시 지층의 토질과 암석을 확인할 수 있다.
  - ③ 착공된 구멍 바닥에서 재하시험이나 관입시험을 할 수 있다.
  - ④ 선단을 매우 크게(직경 6m 정도까지) 확대할 수 있다.
  - ⑤ 호박돌이나 굵은 자갈과 같이 타격 관입이 어려운 지층을 뚫을 수 있다.
  - ⑥ 말뚝 재료가 타격 응력이나 취급 응력의 규제를 받지 않는다.
  - ⑦ 매우 긴 말뚝 시공이 가능하다.
  - ⑧ 시공 소음이나 진동 문제가 없다.
  - ⑨ 지반 융기를 일으키지 않는다.
  - ⑩ 지상 공간이 좁은 곳에서 시공이 가능하다.

- 단점: ① 재래식 공법에서는 공벽이 밀려들어오거나 병목 현상이 발생할 수 있다.
- ② 지하수 아래에서는 콘크리트 타설에 특수공법이 필요하다.
  - ③ 시공후에 콘크리트 재질 확인이 안

된다.

- ④ 사질토에서는 선단 확대를 할 수 없다.
- ⑤ 지상으로 말뚝을 연장 시공하려면 특수 공법이 필요하다.
- ⑥ 재래식에서는 착공작업으로 구멍 바닥 지층이 교란되어 선단지지력을 감소시킨다.
- ⑦ 여러개의 말뚝을 시공하면 착공으로 주변 지반을 느슨하게 지반 침하를 일으킨다.

#### 4) 말뚝 재료별 장단점 :

##### •나무 말뚝 :

- ① 가볍고 취급이 쉬우며 절단이 쉽다.
- ② 지하수위 아래에서는 내구성이 좋다.
- ③ 지하수위 위에서는 부식이 잘되고 곤충과 새들의 공격을 받아 파손된다.
- ④ 허용 응력이 작다.

##### •콘크리트 말뚝 :

- ① 허용 응력이 크다.
- ② 내부식성이 크다.
- ③ 말뚝 운반과 취급에 주의가 필요하다.
- ④ 절단과 이음이 어렵다.

##### •강 말뚝 :

- ① 허용 응력이 크고 인장과 휨에 대한 저항력이 크다.
- ② 큰 타격응력을 견디므로 굳은 지층에 관입시킬 수 있다.
- ③ 취급과 운반, 절단과 이음이 쉽다.
- ④ 매우 긴 말뚝 시공이 가능하다.
- ⑤ 배토량이 작게 시공할 수 있다.
- ⑥ 값이 비싸다.
- ⑦ 지상이나 교란된 지반 중에서는 부식이 잘 된다.
- ⑧ 해상 구조물에 시공 될 경우에는 방식 처리를 해야 한다.

### 2.3.2 말뚝 기초 선정

말뚝 기초 계획과 설계에서 제일 중요한 단계가 말뚝 기초 종류를 선정하는 일이다. 구조물의 형태와 크기, 하중 조건, 사용기간, 공기, 시공법 등과 잘 조화를 이룰 수 있고 기초 자체의 시공성, 안전성 그리고 경제성 등 여러가지 조건을 종합적으로 검토하여 최적의 기초 공법을 선정한다. 이에 여러가지 말뚝의 특징과 시공법, 시공 장비에 대한 지식이 필요하다. 특별히 지반 조건이 나쁠 때에는 상부 구조물 설계에 앞서 그 장소에 가장 적합한 지지 방식과 기초 형식을 결정하고 이것과 잘 조화되는 구조물을 설계하는 방식을 채택하는 것이 바람직하다. 여기서는 말뚝 기초 선택에서 문제되는 몇가지 중요한 사항에 대하여 말뚝별 특징을 비교하였다.

#### 1) 말뚝의 지지력

말뚝은 재료와 시공법 그리고 지반 조건에 따라 지지력이 달라진다. 그러나 각 종류의 말뚝이 지지할 수 있는 하중의 범위가 있으므로 구조물 하중 조건에 따라 우선적으로 채택할 수 있는 말뚝의 종류를 결정하는데 이러한 말뚝이 하중 지지 능력이 고려된다. 표 2.2에는 말뚝 재료와 시공법에 따른 하중 지지력의 개략적인 범위를 예시하였다.

#### 2) 지지층 깊이

기성 말뚝 중에서는 강관 말뚝이 가장 깊은 깊이까지 도달할 수 있으며 PHC, PC 말뚝 순으로 관입 깊이가 알아지고 RC 말뚝은 깊은 관입에 가장 부적당한 말뚝이다. 특별히 속파기 공법을 이용하면 강관 말뚝의 시공 깊이가 매우 깊어질 수 있다. 다만 기성 말뚝은 그 직경이 제한되어 있어서 말뚝 세장비가 너무 크면 좌굴을 일으키므로 말뚝 길이가 제한 받게 된다. 현장 말뚝은 기성 말뚝 보다 깊은 지지층에 도달하는데 유리하다. 그것은 직경이 크고 향타에 의한 말뚝 손상의 염려가 없기 때문인데 그 중에서도 리버스 서클레이션 말뚝이 제일 깊은 곳 까지 시공이 가능하며 오거 드릴 말뚝과 베노토 말뚝의 순으로 시공 가능 깊이

표 2.2 일반적인 말뚝의 허용 지지력(4)

말뚝의 종류		단위 (ton)									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
타입 말뚝	R C 말뚝	—									
	P C 말뚝	—	—								
	P H C 말뚝	—	—								
	H 형강말뚝			—							
현장 말뚝	강관말뚝			—	—						
	어스드릴 말뚝			—	—						
	베노토 말뚝				—	—					
	RCD 말뚝						—	—			
매설 말뚝	선착공	—	—								
	속파기		—	—	—						

가 작다.

### 3) 지지층의 경사

지지층과 중간층의 강성이 큰 차이가 날 때에는 중간층이 깊이에 따라 점점 강성이 커져서 지지층과 확실히 구분이 안 될 때보다 지지층 경사가 작아야 한다. 콘크리트 타입 말뚝, 속파기 말뚝, 현장타설 말뚝은 지지층 경사가 30° 이하, 강 말뚝은  $N < 40$  에서는 지지층 경사 50° 이하여야 한다.<sup>(3)</sup>

### 4) 지지층 깊이가 불규칙한 경우

지지층의 깊이가 불규칙한 지반은 말뚝 기초 설계와 시공에 어려움이 많다. 타입식 콘크리트 말뚝은 절단과 이음이 어려우므로 이러한 지반 부적당 하며 절단과 이음이 쉬운 강 말뚝이나 착공식 현장 말뚝을 선택하는 것이 좋다. 다만 현장 말뚝은 선단 지지 말뚝이므로 시공시에 지지층 확인을 확실히 해야 한다.

### 5) 중간층

입경이 5~10cm 이하이고 느슨한 지층에서는 PC 말뚝 관입이 가능하다. 그 이상에서는 타입 시공은 불가능하며 강 말뚝도 자갈 입경

이 크면 타입이 곤란하다. 속파기 말뚝도 자갈이 5~10cm 이상이면 배토가 어려워지며, 베노토 말뚝은 호박돌이 말뚝직경의 1/2 이상인 것이 있으면 시공이 어렵다. 리버스 서클레이션 말뚝은 입경 15cm 이상인 돌이 있으면 곤란하고, 오거드릴 말뚝은 10cm 이상의 입경이 있으면 시공이 어렵다. 중간에 느슨한 모래층이 있을 경우에는 착공 말뚝에서는 공벽이 무너지지 않도록 특별한 주의가 필요하다.

### 6) 지하수

강 말뚝은 지하수질에 따라 부식 속도를 검토해야 한다. 지하수위가 굴착면 보다 낮을 때에는 이수를 쓰는 공법에서는 이수의 유출 손실에 대하여 검토해야 한다.

피압지하수가 있는 경우 :

(1) 선단 개방형 강관 말뚝 : 피압 지하수두가 지표면 보다 2m 이상 높은 경우, 지하수와 흙이 분출하는 수가 있다. 속파기 말뚝에서는 피압수두가 지표면 보다 높으면 시공이 어렵다.

(2) 베노토, 오거드릴 말뚝 : 피압수두가 지

표 2.3 일반 구조물에 대한 기초 형식 선정 표(4)

기 초 형 식			직 말 뚝 기 초							정 통 기 초					
			타입 말뚝		속파기 말뚝	현장 말뚝		심초 말뚝	케이슨	강널뚝	연벽강채기초				
설 계 조 건			RC 말뚝	PC 말뚝	강 말뚝	리버스	울케이싱	어스드릴	오	공	강널뚝	정통			
			하 중 크 기	기초 당	200 ton 이하	○	○	○	○	△	△	△	△	×	×
하중 크기 (상시 + 일시)	200 - 500 500 - 1,500 1,500 - 3,000 3,000 - 5,000 5,000 이상	○		○	○	○	△	△	△	△	×	×	×	×	
지 지 방 식	완전지지 D <sub>r</sub> : 지지층의 깊이	D <sub>r</sub> = 0 - 5m	○	△	△	△	△	×	×	×	○	×	×	×	×
		5 - 10 10 - 20 20 - 30 30 - 45 45 이상	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	불완전 지지 주 면 지지		○	○	○	△	△	○	○	○	△	○	△	○	△
지 지 층	경사 (30도 이상) 요철이 심함 경사 또는 요철 상태 미확인		○	△	△	○	△	△	○	△	○	△	○	△	×
중 간 층 의 상 태	점성토: N 치	2 이하 2 - 10 10 - 20	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	△	△
	사질토: N 치	15 이하 15 - 30 30 이상	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	점착력이 없는 느슨한 모래 (N ≤ 10의 모래층 두께 5m 이상) 자갈, 전석 크기	10cm 이하 10 - 30 cm 30 cm 이상	△	△	○	○	○	△	△	○	○	○	△	○	△
지 하 수 등	지하수위: 기초 푸딩 바닥 이상 기초 푸딩 바닥 이하 말뚝 선단 이하 피압 지하수: 지표하 0 - 2 m 2m 이상 유동지하수 유속 3m/min 이상 유독 가스가 있을 때		△	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○
환 경	수상 시공 소음 진동 대책 인접 구조물에 대한 영향방지 작업 공간이 좁은 경우		△	○	○	○	○	○	△	△	×	○	○	○	△

주) 1. 지지층의 강도 표준은 사질토의 경우 N 치 30 이상  
점성토의 경우 N 치 20 이상  
2. ○ 표시는 원칙적으로 조건에 적합한 경우  
× 표시는 원칙적으로 조건에 부적합한 경우  
△ 표시는 조건에 부적합하다고 말할 수 없으나 검토를 요하는 경우



표면보다 높으면 시공이 어렵다.

(3) 리버스 서클레이션 말뚝 : 피압수두보다 공내수위를 높여 시공한다. 그러나 공내 수위가 지표면보다 2m 이상 높아지면 스탠드 파이프 주위로 누수가 생겨서 시공이 어렵다.

지하수가 흐르는 경우 :

지하유속이 3m/min. 이상 이면 수증 콘크리트 시공이 어렵게 되므로 현상 타설 말뚝 시공이 어렵다.

7) 지하 매설물이나 인접 구조물이 있을 경우

타입 콘크리트 말뚝과 같은 배토 말뚝은 타입시에 주변 지반을 밀어내므로 지하 매설물을 손상시킬 염려가 있다. 속파기나 착공 말뚝은 기존 구조물이나 매설물에 영향을 적게 준다.

8) 작업 공간

(1) 타입 말뚝 : 지상 작업고로 말뚝 길이에 3m(낙추식 해머) 또는 3~5m(디젤 또는 유압 해머)를 더한 높이가 필요하다.

(2) 속파기 말뚝 : 디젤 해머로 타입할 때와 같다.

(3) 현장 타설 말뚝 : 작업 면적으로는 200~300m<sup>2</sup> 가 필요하나 최소폭 10m, 최소면적 80m<sup>2</sup> 의 작업 면적과 별도의 기자재 저장면적이 있으면 작업 가능하다. 지상 공간은 일반적으로 13~16m가 필요하나 리버스 공법의 경우에는 순공간 4.5m, 지하수위 6.5m이면 가능하다.

9) 소음과 진동

디젤 해머는 소음과 진동이 크다. 방음 덮개나 유압 해머를 사용하면 소음은 줄일 수 있으나 진동을 줄이지는 못한다. 속파기 말뚝이나 선 착공 공법, 현장타설 말뚝을 시공하면 소음과 진동을 줄일 수 있다. 다만 베노토 공법의 해머 그랩의 충격 소음은 큰 편이다.

이상과 같이 여러가지 측면에서 검토하여 기초를 선정하며 이러한 선정에 참고로 이용할 수 있도록 표 2.3에는 일본에서 사용되고 있는 기초 선정표의 한 예를 수록하였다.

## 2.4 말뚝 기초를 위한 지반 조사

### 2.4.1 개요

말뚝 기초를 위한 지반 조사의 목적은 지층의 구성과 그 특성 각지층의 토질 또는 암석의 역학적 특성 지하수위와 수질등을 조사하여 말뚝 기초의 지지층 깊이 연직 지지력 및 침하, 수평 지지력 및 횡변위 등을 계산하고 적절한 시공법을 선정하는데 필요한 정보를 얻는 것이다. 그 외에도 말뚝과 지반의 동역학적 거동, 지반 액상화, 부마찰력, 지반 이동, 동해, 피압수위 및 지하수의 흐름, 지반 침식등, 말뚝 기초의 설계와 시공에 필요한 모든 자료를 수집하는 것이 지반 조사의 목적이다. 지반 조사에 이용되는 시추나 현장 시험, 그리고 실험에서 시행되는 여러가지 시험에 대해서는 다른 기초공학 서적을 참조할 수 있으므로 여기서는 조사 및 시험법에 대한 자세한 기술을 피하고 말뚝 기초 설계와 시공에 필요한 지반 조건 및 토질 특성과 그에 관련된 조사법 명칭만 기술하도록 한다. 일반적으로 기초 지반 조사는 4 단계로 구성된다.

(1) 예비(개략) 조사 :

사업 타당성 조사, 개략 설계 및 정밀(본) 조사 계획을 위한 조사. 기존의 자료와 지도류등 문헌 조사와 개략적인 현장 시추와 시료 채취 토질 및 암석 시험으로 이루어진다.

(2) 정밀(본) 조사 : 개략적인 조사를 기본으로 하여 구체적인 기초 설계를 위한 지반정보를 얻기 위한 조사로서 충분한 현장 시추와 시료 채취 토질 및 암석 시험으로 이루어진다.

(3) 확인(보충) 조사 : 시공중에 현장에서 발견되는 변화에 대처하기 위해 수시로 실시하는 조사.

(4) 계측 : 시공중 또는 완공후 설계와 실제가 부합되는가와 예측 못한 현상의 발생여부를 관측한다.

### 2.4.2 조사 대상

말뚝 기초를 설계하고 시공하는데 필요한 정보의 내용은 크게 지반 조건, 부지 조건, 환경 조건 그리고 구조물 조건이라는 것은 2.1 절에서 기술한 것과 같다. 따라서 말뚝 기초를 계획하는 데는 부지의 지표 및 지하 상태에 대한 지형, 지질 및 지반공학적 특성에 대한 조사 뿐만 아니라 2.1 절에 기술된 사항이 모두 조사 대상이 된다. 특히 도시 지역이나 공장 등 산업 시설이 인접한 곳에서는 지반 조건에 못지않게 부지주변의 여러가지 환경 및 사회적 조건에 대한 사전 조사가 중요하다. 그러나 이 강좌에서는 지반에 관련된 조사에 대해서만 기술하기로 한다.

조사의 대상이 되는 지반에 대한 정보는 크게 나누어 말뚝 시공성과 시공된 후의 지지력 그리고 말뚝의 내구성에 관련된 것으로서 다음과 같은 것들이 포함 되어야 한다.

- ① 지층 구성과 지지층 깊이
- ② 토층 및 암층의 공학적 특성(분류, 밀도, 전단강도, 변형계수, 수평지반반력계수 압밀 특성, 투수성)
- ③ 지하수위, 수압(피압수), 水脈(湧水) 그리고 수질(유해 성분 유무 및 농도)
- ④ 말뚝 관입 장애물(자갈층, 호박돌, 경고한 점토층, 지하 매설물이나 구조물) 상태
- ⑤ 지하 공동 유무
- ⑥ 지반 이동, 토압
- ⑦ 말뚝의 내구성, 내부식성 조사

### 2.4.3 조사 방법

지반 조사에 이용되는 조사법은 일반적인 지반 조사법과 다르게 별로 없다. 시추 조사와 사운딩 및 원위치 시험, 시료채취 그리고 실내시험이 주된 조사법이다. 지반 조사의 내용에 따르는 조사 방법을 정리하면 다음과 같다.

- ① 지층 구성과 지지층 깊이 조사 : 답사(지형도, 지질도, 기존의 지반 조사 자료, 지표조사), 물리 탐사(굴절법 탄성파 탐사), 시추(표준 관입 시험 병행)

- ② 선단 지지력 조사 : 정적 콘 관입 시험, 동적 콘 관입 시험, 스웨덴식 관입 시험, 표준 관입 시험, 프레스미터 시험, 나사판 재하 시험, 말뚝 재하 시험
- ③ 주면 마찰력 조사 : 정적 콘 관입 시험, 스웨덴식 관입 시험, 표준 관입 시험, 프레스미터 시험, 나사판 인발 시험, 말뚝 인발 시험, 베인 시험, 실내 토질 시험 (일축 및 삼축 압축 시험)
- ④ 지반 변형계수 조사 : 정적 콘 관입 시험, 표준 관입 시험, 프레스미터 시험, 평판 재하 시험, 공내 탄성파 시험, 나사판 재하 시험, 말뚝 수평 재하 시험
- ⑤ 지하수위, 투수성 조사 : 실내 및 현장 투수 시험
- ⑥ 말뚝 시공조건 조사 : 시험 향타

말뚝 기초 지반 조사에서 다른 지반 조사와 다른 점으로는 말뚝의 관입 특성을 측정하기 위하여 시험 향타를 하는 것과 지반의 말뚝 지지력 특성을 측정하기 위하여 말뚝 재하시험이 사용되는 것이라 할 수 있다. 말뚝 재하시험에 대하여는 이후에 독립된 장으로 기술할 예정이다.

### 2.4.4 조사 깊이와 밀도

말뚝 기초의 조사 깊이는 지지층의 깊이에 따라 결정되기 마련이다. 구조물의 하중수준과 사용하는 말뚝의 종류에 따라 지지층도 달라지겠지만 보통은 N 값이 50 이상인 사질토나 N 값이 30 이상인 점토층이 두께 5m 이상 계속 되면 지지층으로 볼 수 있다. 또한 동일 구조물은 될 수 있는대로 같은 지층에 지지해야 한다는 점을 고려하여 지지층을 결정한다. 이러한 지지층이 적절한 깊이에 나타나지 않을 때는 마찰 말뚝으로 설계해야 되는데 이러한 경우에는 예상되는 말뚝 무리를 하나의 가상 케이스으로 보고 그 케이스 기초의 바닥면이 말뚝 길이의 1/3 되는 깊이에 있다고 보고 그로부터 1.5B(B는 기초폭) 깊이까지 조사하는

것이 보통이다. 조사 밀도에 대해서도 특별한 기준이 있는 것은 아니며 구조물의 용도, 규모와 모양, 지형지질의 복잡성 등에 따라 결정된다. 지지층 깊이의 변화가 심한 곳은 조사 간격을 좁힘으로써 필요한 말뚝 길이별 수량을 잘 예측하여 말뚝의 낭비와 과도한 말뚝머리 절단 공비를 줄일 수 있다.

지반 조사는 시험구덩이와 시추를 통하여 이루어진다. 시추법에는 오거 시추, 속빈관 오거 시추, 회전식 시추, 충격식 시추, 암석 코어링 등이 있다. 시료는 시험 구덩이와 시추공에서 채취된다. 시료는 채취된 상태에 따라 완전 교란시료, 부분교란 시료, 불교란 시료로 분류된다. 불교란 시료라 하더라도 실제로는 완전불교란 시료로 채취하기는 불가능하므로 교란이 비교적 적도록 채취한 시료를 말하며 시료의 면적비와 시료 회수비를 이용하여 교란도를 표시하고 있다.

$$\text{시료회수비} = \frac{\text{불교란 시료길이}}{\text{시료기 추진 길이}} \times 100\%$$

(95% 이상이 불교란 시료)

$$\text{시료기 면적비} = \frac{(\text{시료기 외경})^2 - (\text{시료 직경})^2}{(\text{시료기 외경})^2} \times 100\%$$

(15% 이하가 불교란 시료)

토질 분류 시험은 교란 시료를 사용한다. 교란 시료는 오거 시추나 표준 관입 시험중에 채취되며 점성토의 전단강도와 압축성 시험을 하기 위해서는 불교란 시료가 필요하다. 점성토의 불교란 시료는 얇은관 시료기로 채취하며 굳은 지층에서는 데니스어나 피취와 같은 피스톤 시료기를 쓴다. 연약하거나 예민한 점토에서는 스웨덴식 포일 시료기가 적당하다.

암반은 그 구성 암석과 풍화도 그리고 단층, 층리, 절리와 같은 불연속면의 밀도와 분포 상태에 따라 그 성질이 변한다. 암반에 대한 조사는 노두 조사와 암석 코어 조사로 이루어진다. 기초 지반으로서 암반을 조사할 때에는 암반의

깊이, 암석 종류, 풍화 깊이 및 양상, 지하 공동이나 수맥, 절리나 층리와 같은 불연속면을 조사한다. 암석 시료의 일축 압축 강도, 탄성 계수, RQD(암질 지수), 불연속면 밀도 등을 써서 암반의 등급을 구분하는데 풍화암, 연암, 경암, 극경암 등으로 분류하는 것이 보통이다.

지하수에는 자유 지하수, 피압 지하수, 편(perched, 畝水) 지하수 그리고 지하수류가 있다. 지하수 관측은 피조 미터를 써서 하는데 피조 미터도 그 원리에 따라 여러가지 종류가 있다. 각 종류마다 측정 원리와 기능이 다르므로 기구 사용법을 잘 이해하고 써야 한다.

현장 시험은 말뚝 기초 조사에 매우 중요한 조사 수단이다. 사질토 지반에서는 시료채취가 어려우므로 전적으로 현장 시험 결과에 의존할 수밖에 없다. 점성토 지반에서도 시료 채취는 항상 시료 교란을 수반하므로 적절한 현장 시험을 이용하는 것이 유리할 때가 많다. 말뚝 기초에 특별하게 많이 이용 되는 현장 시험으로서 표준 관입 시험, 동적 관입 시험, 정적 관입 시험, 베인 시험, 프레스 미터 시험이 있다. 표준 관입 시험은 말뚝 지지층 판별, 항타시공성, 지지력, 지반반력계수 추정 등 사질토 지반에서는 거의 모든 정보를 표준관입 시험의 N 값에 의존한다 싶을 정도이다. 표준관입 시험은 시험법의 정밀도가 낮아서 시험 방법과 시험자에 따라 그 타격 에너지가 이론치의 30%에서 80%까지 다양하게 분포한다(Kovacs et al., 1981)<sup>(6)</sup>는 보고도 있다. 그럼에도 불구하고 미국에서는 기초 설계의 80~90%가 SPT-N에 의존하고 있다고 하며 (Rovertson, 1986)<sup>(7)</sup> 우리나라는 그 비중이 더 클 것이다. 정적 관입 시험은 원추체를 땅속에 눌러 박을 때에 원추선단의 저항력과 그 측면의 마찰 저항을 분리 측정할 수 있는 시험으로서 말뚝과 매우 유사한 하중 지지 기구를 가지고 있어서 말뚝 지지력 산출에는 매우 적합한 시험법이라 할 수 있다. 이 시험 기구는 기계식과 전자식이 있는데 원추 관입이 기계식은 이중관 식, 전자식은 단관 식으로 되어 있다. 이 시험의 또 하나의 장

표 2.4 현장 시험과 그 용도(Robertson, 1986)

시 험 법	토 질 특 성												지 반 조 건								
	흙 분류	지 층 구 성	간 극 수 압	마 찰 각	비 배 수 점 착 력	단 위 중 량	압 축 성	압 밀 속 도	투 수 계 수	탄 성 계 수	지 중 응 력	응 력 이 력	응 력 변 형 곡 선	경 암	연 암 빙 하 퇴 적 자 갈	자 갈	모 래	실 트	점 토	이 토 유 기 질	
동적콘(DCPT)	C	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	-	C	-	C	B	A	B	B	B	B
정적콘 :																					
기계식	B	A	-	B	C	B	C	-	-	C	C	C	-	-	C	-	A	A	A	A	A
전자식마찰(CPT)	B	A	-	B	C	B	C	-	-	C	C	C	-	-	C	-	A	A	A	A	A
전자식피조	B	A	A	B	B	B	C	A	B	B	C	B	B	-	C	-	A	A	A	A	A
전자식 피조/마찰(CPTU)	A	A	A	B	B	B	C	A	B	B	C	B	B	-	C	-	A	A	A	A	A
전자식 탄성파/피조/마찰(SCPTU)	A	A	A	B	B	B	C	A	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A	A
음향탐사	B	B	-	C	C	C	C	-	-	C	-	C	-	-	C	-	A	A	A	A	A
평판 팽창기(DMT)	B	A	C	B	B	C	B	-	-	B	B	B	B	-	C	-	A	A	A	A	A
현장 배인 전단(VST)	C	C	-	-	A	-	-	-	-	-	C	B	-	-	-	-	-	B	A	B	B
표준 관입 시험(SPT)	A	B	-	B	C	B	-	-	-	B	-	C	-	-	C	B	A	B	C	C	C
전기저항 탐사	B	B	-	B	C	A	C	-	-	C	-	-	-	-	C	-	A	A	A	A	A
전자식 전도율 탐사	A	B	-	C	C	A	B	-	-	B	C	C	C	-	-	-	A	A	A	A	B
전용력 셀	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B	B	-	-	-	-	-	C	A	A	A
Ko 단계식 날(steppped blade)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B	B	-	-	-	-	B	A	A	B	B
나사 관	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	-	-	-	A	A	A	A	A
시추공 투수 시험	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A
수리붕괴(hydraulic fracture)	-	-	A	-	-	-	-	C	C	-	B	B	-	B	B	C	C	B	A	C	C
시추 공 전단	C	C	-	B	C	-	-	-	-	C	-	C	-	B	B	C	C	B	A	C	C
공내 프레스미터(PMT)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A	C	C	C	A	A	B	B	B	A	B	B
밀어넣기 프레스미터(PPMT)	A	B	B	C	B	C	C	A	B	A	C	C	C	-	-	-	B	A	A	B	B
완전치환 프레스미터(FDPM)	C	B	B	C	B	C	C	A	B	A	C	C	C	-	-	-	A	A	A	A	A
셀프보링 프레스미터(SBPMT)	B	B	A	A	B	B	B	A	B	A	A	A	A	-	C	-	B	A	A	A	A
셀프보링 장비 :																					
Ko 미터	B	B	-	-	-	-	-	-	-	-	A	A	-	-	-	-	B	A	A	A	A
횡관입 시험기	B	B	-	B	B	B	-	-	-	B	C	C	C	-	-	-	B	A	A	A	A
전단 배인	B	B	-	-	A	-	-	-	-	-	C	B	-	-	-	-	B	A	A	A	A
평판 시험	B	B	-	C	B	B	B	C	C	A	B	A	C	-	-	-	B	A	A	B	B
탄성파 크로스/다운홀/표면	C	C	-	-	-	-	-	-	-	A	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A
원자력탐사	-	-	-	B	-	A	-	-	-	-	C	-	C	-	-	-	A	A	B	A	A
평판 재하 시험	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A	A	A

A : 적용성 좋음    B : 적용성 보통    C : 적용성 나쁨    - : 적용불가

점은 깊이에 따라 연속 측정을 하므로 토성치 변화를 세밀하게 측정한다는 것이다. 표준 관입 시험과 정적 관입 시험에 의한 말뚝의 정역학적 지지력 추정 방법은 다음에 연재될 말뚝의 지지력에 관한 강좌에서 다루어 질 것이다. 프레스미터는 프랑스인 Menard(1956)가 처음으로 만들어 사용한 이래 지금은 여러 개량품이 제작 판매되고 있는데 시추공 용과 자체 관입식(self-boring)이 있다. 이 시험은 땅속에 관입된 원주형 고무 튜브에 압력을 가하여 지반을 횡압축 하면서 튜브가 팽창하도록 되어 있는데 압력과 튜브 팽창량의 관계 곡선으로부터 지반의 비배수 강도, 탄성 계수, 지반 반력 계수, 지중 응력 등을 간접 측정할 수 있으며 다른 시험법이 사용되기 어려운 자갈층, 연암층, 동토 등에도 시험이 가능하다는게 큰 장점이다.

그 외에도 매우 다양한 종류의 시험법이 있으나 지반 조사에 대한 다른 서적이나 문헌<sup>(6)</sup>이 많으므로 참조 바람이며 다만 표 2.2에 얻으려는 정보 내용과 지반 조건에 따라 적용할 수 있는 현장 시험법에 대하여 Robertson(1986)이 정리한 표를 실어 독자들의 이용을 권한다.

## 참 고 문 헌

1. 대한토질공학회(1986). 건설부제정 구조물기초 설계기준 해설
2. 대한토목학회(1989). 건설부제정 콘크리트 표준 시방서
3. 일본 토목학회(1986). 國鐵構造物設計標準解説, 基礎構造物編
4. 일본 토질공학회(1985). 抗基礎の設計法とその解説
5. Tomlinson, M. J. (1977), Pile Design and Construction Practice., A View Point Publication.
6. Kovacs, W. D., Salomone, L.A. and Yokel, F. Y. (1981), "Energy Measurement in the Saturated Penetration Test", Building Science Seriges, National Bureau of Standards (U.S.), No 135
7. Robertson, P.K., "In Situ Testing and its Application to Foundation Engineering", Soil Mechanics Series No. 91 University of British Columbia, Department of Civil Engineering, Vancouver, B.C. Canada.
8. Prakash, S. and Sharma, H.D.(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc. New York.