

## 대형기초의 품질관리

### Quality Assurance of a Large Foundation

정경자<sup>1)</sup>, Gyungja Jung, 김홍중<sup>2)</sup>, Hong-Jong Kim, 정종홍<sup>2)</sup>, Jong-Hong Jung

<sup>1)</sup> 한국도로공사 도로교통기술원 전임연구원, Senior Researcher, Expressway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation

<sup>2)</sup> 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, Chief Researcher, Expressway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation

**개요(SYNOPSIS) :** 설계 하중이 큰 대형 구조물의 기초로 많이 사용되는 현장타설말뚝은 현장에서 지반을 굴착하여 조립된 철근망을 삽입한 후, 콘크리트를 타설하여 제작되므로 복잡한 시공 과정과 현장의 특수한 지하수 및 지반 조건으로 인하여 현장타설말뚝의 내부에는 결함이 포함될 수 있다. 발생 가능한 대표적인 결함으로 연약한 말뚝 선단, 말뚝체 콘크리트의 품질 저하, 말뚝과 지반의 접촉 불량, 주철근의 부식 등이 있으며, 이들 결함을 감지하기 위한 건전도 시험법으로 공대공초음파 검층, 충격반향 시험, 충격응답시험, 감마-감마 검층법 등이 있다. 결함은 말뚝의 수평지지력을 감소시키며, 일반적으로 발생하는 비대칭단면 결함에 의한 응력 집중현상과 수평 하중에 의한 휨모멘트는 연직지지거동에 영향을 준다. 따라서 결함을 감지하고 평가하는 것이 현장타설말뚝의 품질관리에 있어 매우 중요하다.

**주요어(Key words) :** 현장타설말뚝, 건전도 시험, 결함, 연직지지력, 수평지지력

## 1. 개요

설계 하중이 큰 대형 구조물의 기초는 일반적으로 현장타설말뚝으로 시공된다. 현장타설말뚝은 현장에서 지반을 굴착하여 조립된 철근망을 삽입한 후, 콘크리트를 타설하여 제작된다. 이러한 복잡한 시공 과정과 현장의 특수한 지하수 및 지반 조건으로 인하여 현장타설말뚝은 공장에서 제작되어 검사를 완료한 기성 말뚝과는 다르게 말뚝 몸체의 품질이 균질하지 않을 수 있다. 시공과정에서 굴착공에 비하여 지나치게 많거나 적은 양의 콘크리트가 투입되었거나, 콘크리트 타설 도중 오랜 시간동안 작업이 중단되었거나, 임시 케이싱의 인발이 어려워 지나친 요동을 가하였거나 철근망이 떨어져 올라오는 경우와 같이 현장타설말뚝의 시공 경험이 많은 경우에 이미 그 품질에 대하여 의심을 가질 수밖에 없는 경우도 존재한다. 따라서 현장타설말뚝의 품질을 확인하는 것은 매우 중요하다.

Tuner(1997)는 현장타설말뚝의 품질 검증을 위한 방법을 크게 직접적인 시험법과 간접적인 시험법으로 구분하였다. 말뚝의 시공 중 육안 관찰, 재하시험, 그리고 말뚝 내부 및 말뚝 주변 굴착을 통한 확인법 등을 직접적인 시험법으로, 말뚝 내부에 기 설치된 시험관 또는 시추공을 통한 검사법인 공대공초음파 검층(cross-hole sonic logging), 밀도 검층(gamma-gamma logging)을 비롯하여 말뚝 두부를 타격하는 방법인 충격반향기법(sonic-echo test)와 충격응답기법(impuse response test), 그리고 말뚝 길이 방향으로 주변 지반을 굴착하여 수행하는 병렬탄성파시험(parallel seismic method) 등을 간접시험법으로 제시하였다. 이 경우 말뚝의 시공이 완료된 상태에서 말뚝과 주변 지반을 파괴하지 않는 상태에서 말뚝의 품질을 검증할 수 있는 방법은 간접적인 시험법에 의한 것으로 이를 넓은 의미로 건전도 시험법(integrity test)이라 한다.

건전도 시험 결과, 균질한 말뚝에서의 결과와 다른 값을 보이는 경우 이를 이상값(anomaly)라고 하며, 말뚝 내부에 균질하지 않은 문제가 있으나, 그것이 경미하여 말뚝의 성능과는 무관할 때 흠( flaw)라고 하며, 말뚝의 장, 단기적인 성능에 영향을 줄 수 있는 경우 결함(defect)라고 한다(since Amir, 2002). 여기서는 현장타설말뚝에서 발생하기 쉬운 결함과 이들 결함을 감지하기 위한 건전도 시험법 및 결함에 의한 말뚝의 성능을 연직 및 수평지지력의 감소 차원에서 간략하게 소개하고자 한다.

## 2. 현장타설말뚝에 존재하는 결함

### 2.1 결함의 종류

현장타설말뚝에서 발생할 수 있는 결함과 그 원인에 대해서 Baker et al. (1993)은 표 1과 같이 정리하고 있으며, 이 후 O'Neill (1991) 및 O'Neill과 Reese(1999)는 현장타설말뚝의 성능에 영향을 미치는 대표적인 결함과 일반적인 보강 방법을 다음과 같이 제시한 바 있다.

표 1. 현장타설말뚝에서 발생 가능한 결함의 종류 (Baker et al., 1993)

Item	Type of Defects	Possible Causes
1	Shaft off location and out of plumb	Poor location and improper shaft alignment
2	Crack in shaft	Construction equipment accidentally hitting top of shafts
3	Bulge or necking	Due to soft ground zones
4	Cavern	Due to drilling thru sand under water without casing or the use of slurry
5	Soft shaft bottom	Due to side sloughing and incomplete bottom cleaning
6	Horizontal sand Lense	Due to tremie pipe being pulled out of concrete
7	Voids behind cage	Due to low concrete slump or rebar too close together
8	Honeycombing or fines washout or channelization in concrete	Due to unbalanced waterhead or placing concrete directly into water
9	Folded in debris	Due to insufficient cleaning

#### 2.1.1 말뚝의 선단에서의 결함

말뚝의 선단지층이 불량하거나, 선단 청소가 제대로 이루어지지 않아 슬러리에 의한 부유물이 퇴적되어 있는 경우가 대표적이며, 트레미관의 위치 및 슬러리 등에 의한 최초 타설되는 콘크리트의 품질이 저하 등으로 발생할 수 있다. 이 경우 그라우팅으로 보강하거나, 마이크로 파일 또는 추가 말뚝의 시공 등으로 보완할 수 있다.

#### 2.1.2 콘크리트의 품질 저하

콘크리트 타설시의 압력을 견디지 못할 정도로 주변 지반이 연약하여 발생하는 단면 확대, 이 경우 부마찰력이 발생하는 연약지반에서는 문제가 될 수 있다. 콘크리트의 압력이 주변 지반의 수평 응력보다 작은 경우 단면 축소가 발생할 수 있으며, 토사 혼입에 의한 단면 축소가 발생할 수 있다. 콘크리트 타설 중 굴착공 내부로 떨어지는 흙덩이나 콘크리트의 재료 분리로 인하여 전단면 결함이 발생할 수 있다. 특히 콘크리트의 조달 시간의 지연으로 인한 콜드 조인트가 발생할 수 있으며, 이 경우 콘크리트 타설을 재개할 때 슬러리나 물이 포함되지 않도록 주의하여야 한다. 또한 주변부 지층의 균열부로 콘크리트가 누출되는 문제도 있다. 이러한 결함이 심각한 경우 말뚝은 사용할 수 없으며, 교체 시공하여야 하

며, 일부 그라우팅으로 보강하고자 하는 시도도 있다.

### 2.1.3 말뚝 주면과 지반과의 접촉 불량

임시 케이싱의 인발이 어려워 이를 제거하지 못한 경우 또는, 슬럼프가 낮은 콘크리트를 사용하여 주철근 외곽으로의 콘크리트 채움이 원활하지 못한 경우 그리고, 굴착공의 주면이 점토 등으로 smear 된 경우 등이다.

### 2.1.4 부식

횡하중을 받는 말뚝에 결함이 의심되는 경우, 공용기간 동안 주철근의 부식 정도를 반드시 점검하여야 한다. 지하수위 근처의 결함부가 부분적으로 포화된 경우 산화 작용에 의하여 부식이 발생할 수 있고, 결함부가 지하수위 아래에 존재하는 경우에도 배터리 효과에 의하여 전기적 부식(galvanic corrosion)이 발생할 수 있다. 따라서 결함이 지하수위 위에 있거나 혹은 전기적인 상황을 예측할 수 없는 상황에서 결함이 지하수위 아래에 있을 경우 결함 내부의 주철근은 토사층에 노출되어 완전히 부식될 수 있으므로 부식 방지 처리를 하는 것이 바람직할 것이다.

## 2.2 국내 지반조건 및 시공방법에서 발생하기 쉬운 결함

국내의 경우는 지하수위가 높고, 낮은 심도에서 암층이 나타나기 때문에 상부 토사층은 임시 케이싱에 의하여 공벽을 유지한 상태에서 하부 암반층을 굴착하는 2중 굴착방법을 사용하며, 수중콘크리트타설 공법을 사용하고 있다. 또한 상부에 두꺼운 연약지반이 존재하는 경우에도 현장타설말뚝이 많이 적용되고 있으며, 이 경우 임시 케이싱의 길이가 매우 길어지게 된다. 이와 같이 임시케이싱의 길이가 긴 경우, 또는 상부 토사층이 지나치게 양호한 경우에는 임시케이싱의 인발시 몇 가지 문제점을 유발할 가능성이 존재한다.

우선 케이싱에 작용하는 주면마찰력이 지나치게 커서 요동 인발시 말뚝 콘크리트 및 주변 지반을 교란시킬 수 있다. 다음으로는 임시 케이싱의 인발이 어려워 이를 영구 케이싱으로 사용하게 되는 경우에 O'Neill과 Reese가 지적한 대로 주면저항력이 감소할 수 있다는 것이다. 그러나 국내에서는 임시 케이싱이 설치되는 토사층의 주면저항력은 일반적으로 설계에 고려하지 않으므로, 이 영향은 무시되고 있다.

또 다른 문제는 지하수의 영향으로 임시케이싱 배면에 피압수가 존재하는 경우 임시 케이싱의 인발에 의하여 단면 축소나 콘크리트의 품질이 저하될 수 있다.

마지막으로 임시 케이싱의 선단이 위치하는 토층과 암반층의 경계가 경사진 경우에 최대 주면저항력이 발휘되는 임시케이싱의 최초 인발을 위한 과도한 요동으로 인하여 임시 케이싱의 선단이 닿지 않는 지점을 통하여 토사가 밀려들어올 수 있다는 것이다. 이 경우, 말뚝 내부 콘크리트의 압력과 주변 토사층 및 지하수 흐름의 상태에 따라서 때로는 심각한 문제를 유발할 수도 있다.

## 3. 결함의 감지

비파괴 방법인 건전도 시험에 의한 현장타설 말뚝의 품질 검증은 국내에서도 일반적으로 사용되고 있다. 미국의 깊은 기초 위원회(2000)에서는 미국내에서 대표적으로 사용되고 있는 건전도 시험을 검토하여 보고서를 작성하였으며, 표 2에서와 같은 요약 결과를 제시하였다.

표 2. 현장타설말뚝에서 사용되는 건전도 시험법 요약 (Geo-Institute of ASCE, 2000)

Method	Description	Advantages	Disadvantages	Comments
Sonic echo	Instrumented or noninstrumented hammer strikes pile top adjacent to an accelerometer (receiver) Generate low strain wave Reflected wave analyze Analysis done in time domain	Faster, cheaper test No preparation required Can verify "good" shaft No need to preselect prior to installation of shaft	Interpretation of results necessary to deal with such issues as external damping Long slender shafts damp reflected wave (L/D ratio limited to 30/1) Accurate depth to defect difficult 5-20% May identify shape changes (bulges, casing steps) as defects Rapid load transfer may be interpreted as a defect Few technicians available	Should never be sole basis for rejection of shaft
Impulse response	Similar to sonic echo Instrumented hammer (load cell) and receiver (geophone) Reflected wave is analyzed not only in velocity domain but also frequency domain	Same as sonic echo Can derive comparative information on dynamic stiffness of shaft head	Same as sonic echo Hard to detect toe defects Better at differentiating neck-ins from bulges	Should never be sole basis for rejection of shaft
CSL	Water-filled steel (preferably) tubes placed in drilled shafts at regular intervals Sonic pulse generator lowered in one tube Receiver lowered in another tube Analysis of velocity of wave transmission	Noninvasive Reasonably economic Can spot multiple defects Defects in the range of 2.5in. can be detected No depth limitation No soil stiffness effect Easy interpretation Accurate depth to defect determination	Hard to check concrete quality outside reinforcing Difficult to place tubes within tolerances Must preselect shafts to be inspected Cannot find fine cracks. Slow test speed Debonding/coupler problems interfere with readings Few technicians available	Test results should be reviewed in conjunction with results of visual inspection
Gamma-gamma	Dry plastic or steel tubes placed in drilled shafts at regular intervals Gamma radiation source and receiver probe lowered into tubes Density plot of concrete surrounding tubes Range of examination 2 in. to 10 in.	Noninvasive Reasonably economic Can locate defects outside the reinforcing steel Can spot multiple defects No soil stiffness effect Accurate depth to defect determination Better quantification of concrete density No depth limitation	Slow test speed Difficult to transport equipment due to nuclear precautions Must preselect shafts to tested Difficult to place tubes within tolerances Test limited to a few inches around tube Coupler problems interfere with readings Cannot determine extent of defect Few technicians available May see soil concrete interface and predict defect	Test results should be reviewed in conjunction with results of visual inspection

이 보고서는 당시 기술적 수준으로 공대공 초음파 검층 또는 밀도 검층으로 15% 보다 작은 단면 축소 결함을 찾아내는 것은 어렵다고 밝히고 있다. 현장타설말뚝의 품질 평가와 관련하여 이 보고서에서 강조하는 것은 건전도 시험 결과 자체만으로 평가할 것이 아니라 경험이 풍부한 기술자를 통한 현장타설말뚝의 시공 과정을 검토한 평가와 더불어 이루어져야 한다는 것이다. 지반의 굴착 단계에서부터 선단침소, 콘크리트의 타설 및 양생 등의 전체 시공 과정에서 예기치 않게 발생한 문제가 잘 기록되어 있는 경우, 건전도 시험 결과의 '이상값'이 어떤 '결함'에 의한 것인지 정확하게 평가할 수 있다.

## 4. 결함 말뚝의 성능

### 4.1 결함 말뚝의 연직지지력

결함이 대구경 현장타설말뚝의 지지거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모형을 이용한 실내 시험과 수치해석을 비롯하여 실물 크기의 모형말뚝을 실제 지반에 설치하고 현장시험을 수행한 많은 연구가 있다. 현장 시험은 미국에서는 단단한 점성토와 사질토의 Cupertino site(Baker et al., 1993), 실트질과 사질 점토의 San Jose site(Baker et al., 1993), 중간 정도의 단단한 사질토 및 강성이 큰 점성토의 Texas A&M site(Briaud et al., 2000, 2002; Likins et al., 1993), 모래다짐층과 점성토의 Northwestern Univ. site(Finno et al., 1998, 1999, 2000), Varved clay층의 Univ. of Massachusetts site(Iskander, 2001; Finno et al., 2002) 등 에서 이루어졌으며, 국내에서는 풍화암과 연암층의 도로교통기술원(Jung et al., 2006)에서 이루어졌다. 결함을 포함한 말뚝이 시공 과정에서 선단이 불량하게 된 말뚝과 비교해서 5-10%의 지지력이 감소하였다는 현장 실험 결과(Iskander et al., 2001)가 제시되기도 하였으나, 대부분의 연구 결과에서는 결함 말뚝과 건전한 말뚝의 정재하시험에 의한 연직지지력은 크게 차이가 나지 않음을 밝히고 있다. Jung 등(2006)은 암반에 근입된 말뚝에 있어서는 현장에서 발생하기 쉬운 정도의 결함의 포함 여부보다는 근입된 암반의 상태가 연직 지지력에 미치는 영향이 크다고 제시하고 있다.

표 3. 말뚝 두부로부터 2m 지점 결함에 의한 연직지지력 수치해석 결과(Petek et al., 2002)

Soil Type	Neck-in Size	Failure Load (kN)	Capacity Reduction
Soft	Perfect	840	-
	50 %	877	-4 %
	75 %	860	-2 %
	85 %	875	-4 %
	90 %	880	-5 %
	95 %	830	1 %
	97 %	820	2 %
	98 %	560	33 %
Medium Stiff	Perfect	3250	-
	50 %	3300	-2 %
	75 %	3300	-2 %
	85 %	3200	2 %
	90 %	2700	17 %
	92 %	2230	31 %
Very Stiff	Perfect	6460	-
	50 %	6290	3 %
	75 %	6390	1 %
	80 %	6030	7 %
	83 %	5223	19 %
	85 %	4640	28 %

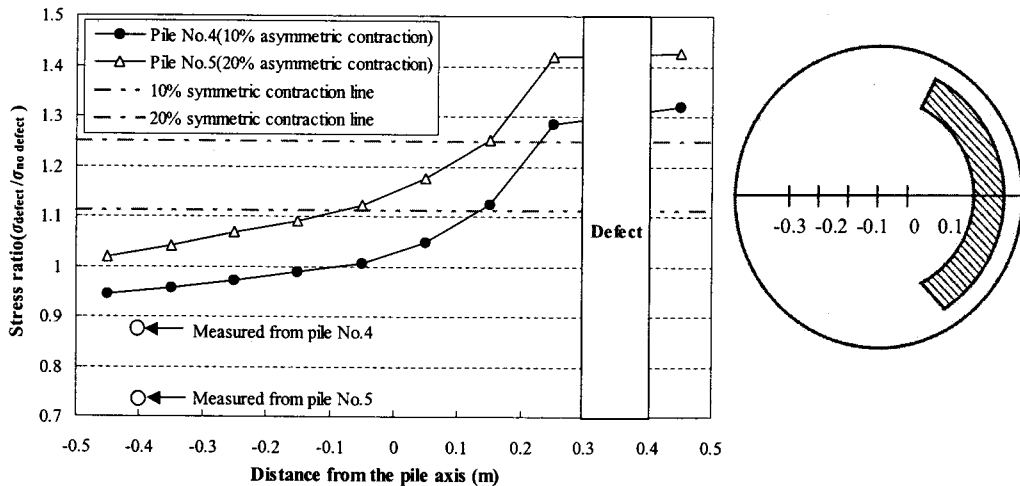


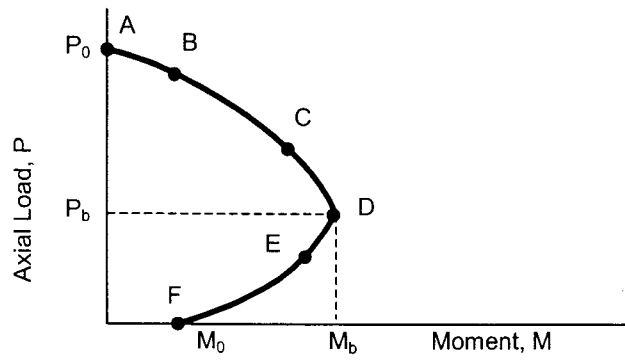
그림 1. 비대칭 단면 축소 결함부(토사흡입)에서의 응력 집중 수치해석 결과 (Jung et al., 2006)

Petek 등(2002)이 다양한 지반조건에 대하여 말뚝 두부로부터 2m, 7.5m, 13m 지점에 단면축소 결함을 모사한 말뚝의 연직지지력을 2차원 축대칭 모델을 사용하여 수치해석한 결과를 보면 연직지지력은 결함의 위치, 지반조건 등에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 표 3에서 보여지듯이 단단한 지반일수록 파괴하중이 크기 때문에 상대적으로 작은 결함에서도 연직지지력의 감소가 나타났다. 그러나 수치해석의 결과에서도 연직지지력의 감소를 확인할 수 있는 결함의 크기는 현장에서 발생 가능한 결함의 크기에 비하여 지나치게 크다는 것을 확인할 수 있다.

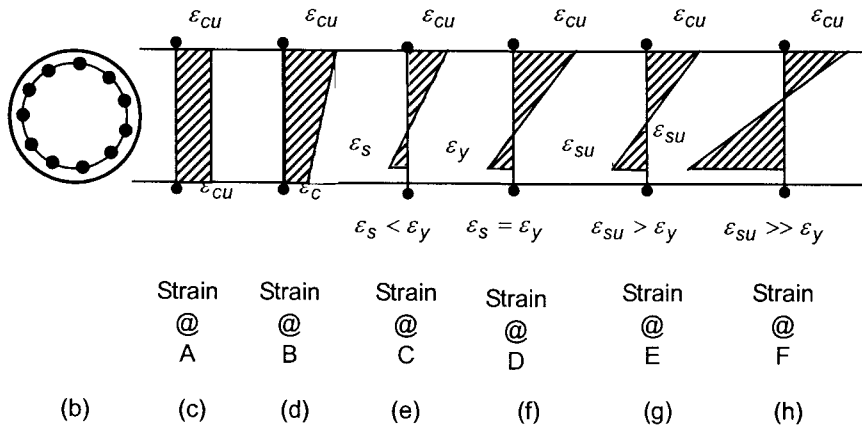
이와 같이 결함에 의한 연직지지력의 감소는 뚜렷하지 않다. 그러나 말뚝 내부에 존재하는 결함은 응력집중을 유발하기 때문에 결함부에서는 말뚝 두부로부터 전이되는 하중보다 몇 배 큰 하중을 부담하게 된다. Baker 등 (1993)은 2차원 수치해석 결과로부터 50%의 단면 축소 결함부에서 4배 정도 집중되는 것으로 제시하면서 말뚝의 설계 응력을  $0.25f_c'$  로 제안하였다. Jung 등(2006)은 시공 중 발생하는 결함은 대부분 비대칭이기 때문에 비대칭 결함부에서의 응력 집중을 예측하고 수치해석을 실시하고 그림 1에서와 같이 10%와 20% 단면 축소 결함에 대하여 결함부로 응력이 집중함을 보여주었다. 또한 연직정재하시험 전·후에 실시한 공대공초음파 검층 결과는 결함부에서의 응력 집중이 말뚝의 건전성을 악화시키는 것을 검증하였으며, 이 경우 결함이 위치한 지점부로 전이된 연직하중이  $0.29f_c'$  이상인 경우에 영향을 받음을 제시하였다.

#### 4.2 결함 말뚝의 수평지지력

연직 하중을 지지하는 현장타설말뚝이 수평력에 의하여 휨 모멘트를 받게 되면 그림 2에서 설명하고 있는 것과 같이 연직지지력도 감소하게 된다(O'Neill and Reese, 1999). O'Neill과 Sarhan(2004) 그리고 Sarhan and O'Neill(2002), 그리고 O'Neill 등(2002a, 2002b, 2004)은 현장타설말뚝에 결함이 존재하는 경우의 수평지지 거동에 대하여 많은 연구를 수행하였다. 그림 3에서와 같이 말뚝 단면적의 15%에 해당하는 결함을 주철근 외부에만 존재하는 Type A와 주철근 내부까지 포함하는 Type B의 두 가지 유형으로 나누어 실내 시험과 수치해석을 실시하였다. 그 결과 결함이 주철근 내부까지 포함한 Type B의 경우가 말뚝의 성능에 더욱 악영향을 미치는 것으로 나타났으며, 최대 27%까지 수평지지력이 감소하는 것으로 제시하였다(Sarhan and O'Neill, 2002). Type B 결함은 주철근의 부식을 유발할 가능성이 높기 때문에 더욱 치명적이 된다. 수평지지력과 관련하여 '치명적인 구간(Critical Zone)'이라는 개념을 도입하여 이 구간에 결함이 존재하는 경우에 설계시 말뚝의 저항 휨 모멘트를 감소시켜야 함을 제시하였으며, 그 구간을 말뚝 두부로부터 직경의 12.1배까지의 구간으로 제안하였다(Sarhan et al., 2004).



(a)



- $\epsilon_{cu}$  = ultimate concrete strain in compression
- $\epsilon_c$  = concrete strain in compression
- $\epsilon_s$  = steel strain in tension
- $\epsilon_y$  = yield strain of steel
- $\epsilon_{su}$  = steel strain when concrete strain reaches  $\epsilon_{cu}$

그림 2. 현장타설말뚝에서 발생하는 휨 모멘트와 연직지지력의 상관도(O'Neill & Rees)

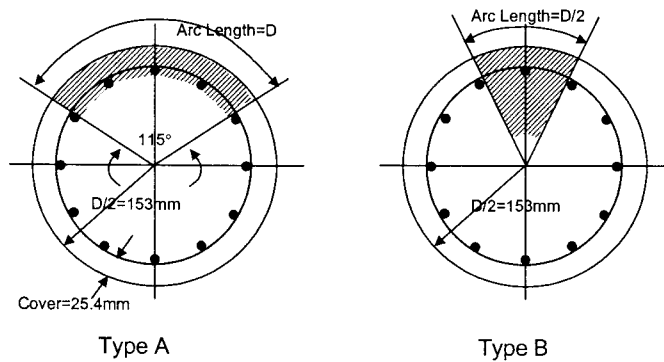


그림 3. Sarhan과 O'Neill(2002)이 사용한 결함의 유형

## 5. 품질 관리를 위한 제언

대형 구조물의 기초로 사용되는 현장타설말뚝은 굴착이 이루어지는 지반 상태와 시공 여건에 따라서 예기치 않은 문제가 발생할 확률이 크며, 이로 인하여 말뚝 내부에 결함이 포함될 수 있다. 따라서 이러한 결함을 감지하고 그 결함이 말뚝의 성능에 미치는 영향을 평가하는 것이 대형 기초의 품질 관리에 있어 매우 중요하다. 여기서는 현장타설말뚝에서 발생하기 쉬운 대표적인 결함 유형과 그 결함을 감지하기 위한 건전도 시험방법, 그리고 결함이 말뚝의 연직거동과 수평거동에 미치는 영향을 간략하게 검토하였다. 이러한 결과를 바탕으로 대형기초의 품질관리를 제안하면 다음과 같다.

1. 현장타설말뚝의 설계시 최대 하중은 말뚝 강도의 30%를 초과하지 않도록 하는 것이 바람직하다고 판단된다. 주철근의 경우에는 부식 처리를 검토하여야 한다.
2. 건전도 시험은 말뚝 내에서의 여러 결함을 정확하게 감지할 수 있고 깊이를 정확하게 알 수 있는 공대공초음파 검층을 실시하는 것이 바람직하며, 공대공초음파 검층을 위한 시험관을 전체 말뚝에 매설한 후 시공 과정에서 결함이 의심되는 말뚝에 대하여 시험을 실시하는 방법을 제안한다. 공대공 초음파 검층은 주철근 외부에 존재하는 결함을 감지하지 못하는 단점이 있으나, 말뚝의 수평거동에 치명적인 영향을 주는 주철근 내부의 결함을 정확하게 감지할 수 있다.
3. 현장타설말뚝의 시공 과정에 대한 꼼꼼한 점검과 기록이 요구된다. 결함 감지를 위하여 실시하는 건전도 시험 결과에서 이상값이 나타났을 때 반드시, 현장 시공 기록을 바탕으로 말뚝의 결함 여부를 결정하여야 한다.
4. 건전도 시험 결과, 결함 지점으로 전이되는 하중이 크고, 휨 모멘트가 크게 작용하는 말뚝 두부 근처(최소 12D)와 말뚝 상부 주변 지반이 약하여 상부에서의 하중이 그대로 전이되는 심도에서 이상값이 발견된 경우에는 주의 깊게 검토하여야 하며, 결함으로 의심되는 경우 연직지지력과 수평지지력을 포함하여 장기 하중에 의한 안정성을 반드시 검토하여야 한다.

## 참고문헌

1. 정경자 (2007). *인위적인 결함이 있는 현장타설말뚝의 건전도 평가와 연직지지거동 분석*, 공학박사 학위논문, 서울대학교, 서울, 대한민국.
2. 정경자, 조성민, 김홍중, 정중홍 (2005). "현장시험에 의한 충격반향기법의 말뚝 건전도 검사 적용성 평가", *한국지반공학회논문집*, 12(5): 1-8
3. 조성민, 정경자, 김홍중, 정중홍, 안태송, 전경수 (2004). *현장타설 콘크리트 말뚝의 건전도 시험방법*, 도로교통 GE-03-06, 한국도로공사 도로교통기술원, 경기도, 대한민국.
4. Amir, J.M. (2002). "Single-tube ultrasonic testing of pile integrity", *Geotechnical Special Publication n116*, ASCE, pp. 837-850.
5. ASTM (1996). "Standard test method for low strain integrity testing of piles", designation D5882-96.
6. Baker, C.N., Jr., Parikh, G., Briaud, J-L, Drumright, F.E., and Mensah, F. (1993), *Drilled Shafts for Bridge Foundations*, Report No. FHWA-RD-92-004, Federal Highway Administration, McLean, VA, August.
7. G-I Deep Foundations Committee (2000). "Nondestructive Evaluation of Drilled Shafts", Report of a Task Force Sponsored by the G-I Deep Foundations Committee, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(1): 92-95.
8. Iskander, M., Roy, D., Ealy, C., and Kelly, S. (2001), "Class-A Prediction of Construction Defects in Drilled Shafts", *Transportation Research Record 1772*, Transportation Research Board, Washington, DC:



9. Jung, G., Kwon, O.S., Jung, S.J., and Kim, M.M., (2006), "Evaluation of Full-Sized Cast-in-Place Pile Capacity with Artificial Defects". *Transportation Research Record 1975*, Transportation Research Board, Washington, DC: 10-20.
10. Jung, G., Cho, S.M., and Kim, M.M. (2007). "Defects of Drilled Shaft and Effects of Surrounding Geo-materials Predicted by Sonic-echo Tests", *The Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, July 1-6, CD-ROM, Vol.2: 1382-1387.
11. O'Neill, M.W., and Reese, L.C. (1999). *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*, Report No. FHWA-IF-00-025, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
12. O'Neill, M.W., and Sarhan, H.A. (2004). "Structural Resistance Factors for Drilled Shafts Considering Construction Flaws", *Geotechnical Special Publication n125*, ASCE: 166-185.
13. Petek, K., Felice, C.W., and Holtz, R.D. (2002). "Capacity Analysis of Drilled Shafts with Defects", *Geotechnical Special Publication n116*, ASCE: 1120-1135.
14. Sarhan, H.A., O'Neill, M.W., and Hassan, K. (2002a), "Flexural performance of drilled shafts with Minor Flaws in Stiff Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(12): 974-985.
15. Sarhan, H.A., O'Neill, M.W. (2002). "Aspects of Structural Design of Drilled Shafts for Flexure", *Geotechnical Special Publication n116*, ASCE: 1151-1165.
16. Sarhan, H.A., Tabsh, S.W., O'Neill, M.W., Ata, A. and Ealy, C. (2002b). "Flexural Behavior of Drilled Shafts with Minor Flaws", *Geotechnical Special Publication n116*, ASCE: 1136-1165.
17. Sarhan, H.A., O'Neill, M.W., and Tabsh, S.W.(2004). "Structural Capacity Reduction for Drilled Shafts with Minor Flaws", *ACI Structural Journal*, 101(3): 291-297.