

# 현장타설 말뚝의 결함이 말뚝의 지지거동에 미치는 영향

## Effect of Defects on Axial Resistant Behavior of Drilled Shaft

정성준\* · 정경자\*\* · 권오성\*\*\* · 김명모\*\*\*\*

Jung, Sung Jun · Jung, Gyung Ja · Kwon, Oh Sung · Kim, Myoung Mo

### 1. 서 론

최근 구조물의 대형화에 따라 말뚝본당 지지하중이 큰 대구경 현장타설 콘크리트 말뚝의 사용이 증가하고 있다. 말뚝 자체의 일정한 품질확보가 가능한 기성말뚝과 달리 현장타설 콘크리트 말뚝은 지반 및 시공여건에 따라 말뚝 자체 품질의 편차가 있으며, 특히 말뚝의 시공중 발생하는 결함은 말뚝의 지지력 및 침하에 악영향을 미칠 수 있다.

현장타설 콘크리트 말뚝에서 발생 가능한 결함의 일반적인 유형은 그림 1과 같이 매우 다양하며, 일반적으로 다음과 같은 원인에 의해 발생하게 된다: 현장타설 말뚝의 시공장비와 굴착방법, 콘크리트 타설방법, 시공관리의 엄격한 정도, 작업자의 숙련도, 관리감독의 소홀 등. 대부분의 결함은 시공 중에 어느 정도 발생가능 여부를 판단할 수 있으며, 시공 완료 후에는 공대공 초음파 탐상, 충격 반향시험 등의 건전도시험을 통해 결함의 유무를 파악하게 된다. 최근까지 결함의 탐지 방법에 대한 연구 (Briaud, 2002; Chernauskas, 2000), 결함 말뚝의 수치해석적 연구 (Holtz, 2002)는 활발히 진행되어 왔으나, 결함이 말뚝의 지지력 및 침하거동에 미치는 영향에 대한 실규모 시험 또는 계측 사례는 없으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 직경 1m, 길이 14m, 암반근입깊이 2~2.5m 인 총 5본의 현장타설 콘크리트 말뚝을 시공하였으며 그 중 4본의 시험말뚝에 대해서는 말뚝 시공중 발생 가능한 대표적인 결함 유형인 선단불량, 재료분리, 비대칭 단면감소(단면 감소율 10%, 20%)를 모사하는 다양한 인공결함을 삽입하였다. 무결함 말뚝을 포함한 총 5본의 말뚝에 대한 정재하시험, 그리고 변형률계와 선단침하봉 계측을 통한 축방향 하중전이 분석을 통해 말뚝 내에 설치된 결함이 말뚝의 축방향 지지거동에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

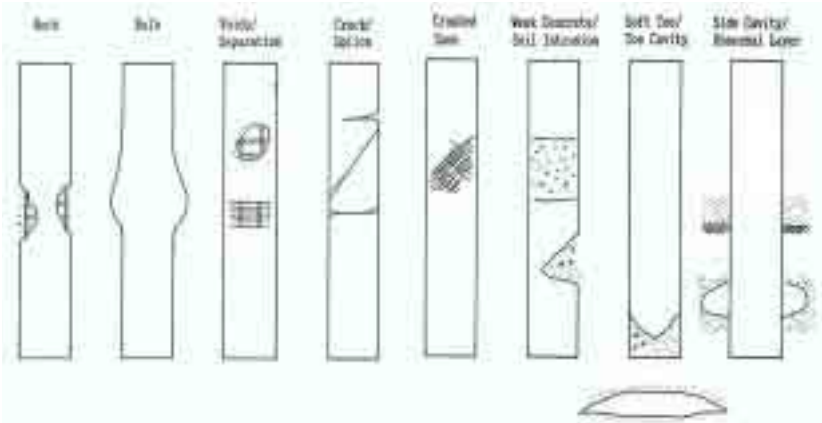


그림 1. 현장타설 말뚝에서의 결함 유형 (우제윤, 1993)

\* 학생회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정 · E-mail:brian76@snu.ac.kr  
 \*\* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원 · E-mail:gijung@freeway.co.kr  
 \*\*\* 정회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료 · E-mail:kwonos1@snu.ac.kr  
 \*\*\*\* 정회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · E-mail:geotech@snu.ac.kr

2. 말뚝 재하시험

2.1 지반조사

말뚝이 설치될 부지의 지반조건을 알아보기 위하여 그림 2 에 표시한 위치에 총 6공의 NX 보링을 실시 하였으며, 말뚝의 강성 및 강도 확인을 위한 말뚝체 보링 (2공)을 추가로 수행하였다.

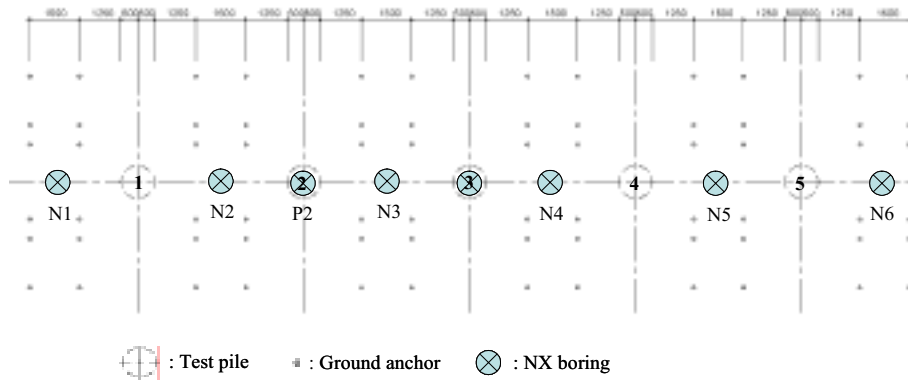
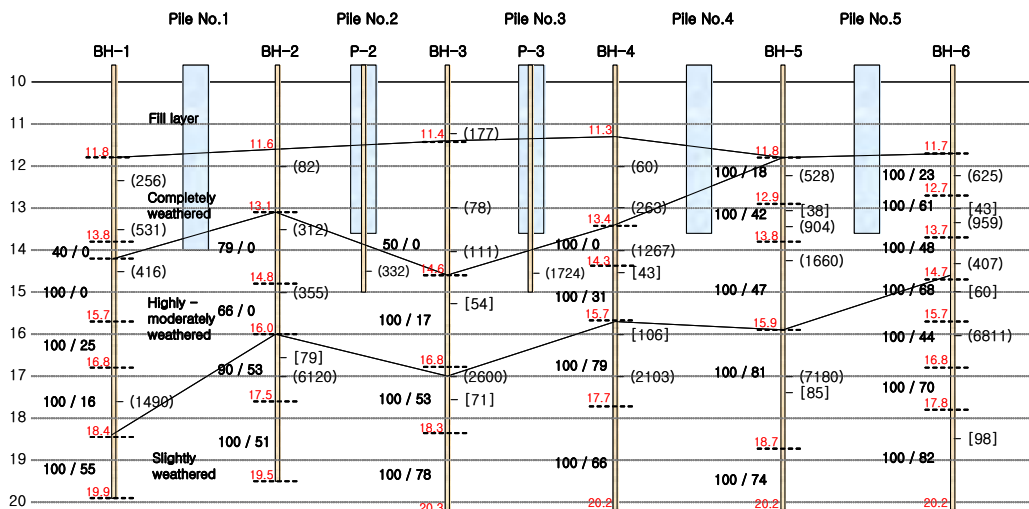


그림 2. 현장말뚝 시공부지 평면도

보링조사 결과 현장의 지층은 11-12m 두께의 상부 매립층(실트질 모래 또는 자갈), 0-1m 두께의 풍화토 층, 그리고 기반암층으로 이루어져 있으며, 지하수위는 지표면 하부 약 9m에 위치하였다. 보링중 표준관입시험을 병행하였으며, 그 결과 상부매립층의 N 값은 6~18 정도이나 시험 위치나 심도에 따라 큰 편차는 보이지 않았다. 암반의 풍화상태는 깊이가 깊어짐에 따라 완전풍화, 심한풍화, 보통풍화의 순으로 좋아지는 것으로 나타났다.

시험말뚝 지지력의 대부분을 부담하는 암반근입부의 상태를 정량적으로 파악하기 위해 암반근입부 공내 재하시험, 그리고 채취된 암석 및 콘크리트 시료에 대한 일축압축시험을 수행하였으며, 일축압축시험을 위한 시편을 얻기가 곤란한 심하게 풍화된 암반의 경우 추가로 점하중 시험을 수행하였다. 그림 3에 재하시험 부지의 지반조사 결과 지층구분, RQD/TCR, 공내재하시험 변형계수, 그리고 암석 일축압축강도를 함께 나타내었다.



( / ) : TCR / RQD, ( ) : Deformation modulus obtained from pressuremeter test (MPa), [ ] : Uniaxial compressive strength (MPa)

그림 3. 지반조사 결과

2.2 결합말뚝의 시공 및 계측기 설치

시험말뚝은 직경 1m, 말뚝간 간격 5m로 총 5본을 암반에 2.0 m~ 2.5 m 근입하여 시공하는 것으로 계획하였다. 시험말뚝 시공을 위한 굴착은 토사부 Allcasing 후 Hammer grab로, 암반근입부는 Benoto method를 적용하여 2.5ton의 chisel 해머를 자유낙하하여 굴착하였다. 굴착 완료 후 선단부 슬라임은 굴착공 속으로 직접 인부가 들어가 제거하였고, 콘크리트 타설 후 토사부 케이싱을 인발하였다. 시험말뚝 중 1, 2, 4, 5번 말뚝에 각각 선단불량, 재료분리, 비대칭 단면감소 10%, 20%를 모사하는 인공결함을 삽입하였으며, 3번말뚝은 결합말뚝과의 비교를 위한 무결함 말뚝이다. 또한 말뚝의 축방향 하중전이 계측을 위해 진동현식 변형률계와 선단침하봉을 각 말뚝에 설치하였다.

그림 4에 각 말뚝에 설치된 인공결함과 계측기의 설치 위치를 나타내었으며, 표 1 에 결합 유형 및 설치 방법, 그리고 변형률계의 개수와 위치에 대해 정리하였다.

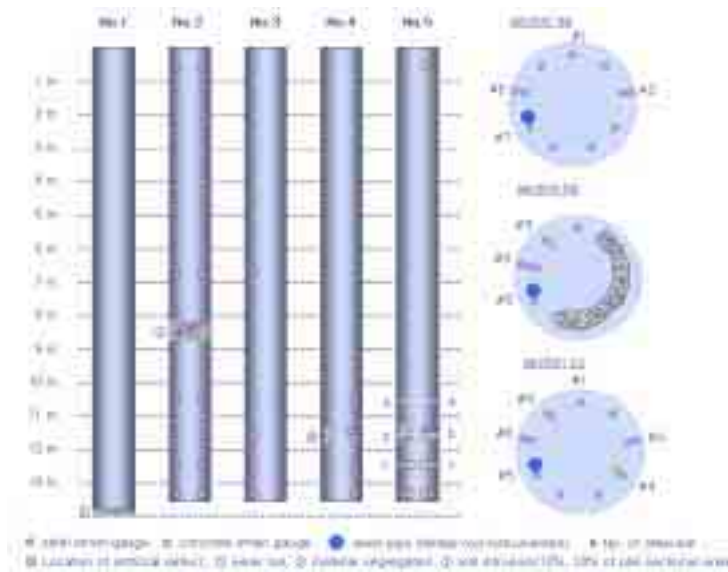


그림 4. 결합의 설치 위치 및 게이지 위치

표 1. 각 말뚝의 결합의 종류와 위치, 게이지 설치개수와 위치

구 분	No.1 pile	No.2 pile	No.3 pile	No.4 pile	No.5 pile
결합의 위치	선단불량	재료분리	무결함	단면축소10%	단면축소20%
결합의 위치	선단	굴착 바닥면으로부터 5m	-	말뚝 선단에서 2-2.5m 상부	말뚝 선단에서 2-2.5m 상부
결합 설치 방법	말뚝 선단부에 20cm 두께의 점토 삽입	콘크리트 타설 도중 트레미관 관 일시 상승	-	토사를 넣은 자루를 철사로 단단히 고정시켜 부착. 결합의 높이 : 약 30 cm	
철근 변형률계 개수 및 위치 (철근망 선단 기준, m)	0	12	12	9	9 (6)*
		0.25, 1.05, 3.1, 5.25, 6.7, 12.8	0.26, 0.91, 1.92, 2.94, 6.8, 13.0	0.28, 0.90, 1.93, 2.08, 2.93, 13.0	0.25, 1.10, 2.12, 2.95, 13.1

\* 콘크리트 변형률계

1번말뚝의 경우 콘크리트 타설 전 선단부에 약 20cm 두께의 점토를 삽입하여 선단 불량을 모사하였고, 2번말뚝은 콘크리트 타설 중 트레미관을 공기중으로 일시 상승시키고 타설을 중단하였다가 시간 경과 후 재타설하여 재료분리를 모사하였다. 4번과 5번 말뚝은 그림 4에 보는 바와 같이 토사 마대자루를 각각 중심각 120° 와 240° 의 원형 띠 형태로 철근망에 고정하여 비대칭 10% 단면감소와 20% 단면감소를 모사하였다.

그림 4에 표시된 위치에 진동현식 철근변형률계 (SM-3 type, Roctest 사) 각 한쌍씩과 선단 침하봉을 설치하여 재하하중에 따른 말뚝의 하중전이 기구를 분석하였다. 또한 철근의 변형률 계측값이 말뚝 전체의 변형률을 대표할 수 있는지의 확인을 위해 진동현식 콘크리트 변형률계(SM-2 type, Roctest 사)를 5번 말뚝에 함께 설치하였으며 계측결과 동일 위치에 설치된 철근과 콘크리트의 변형률값이 일치하는 것을 확인하였다.

### 3. 말뚝 정재하시험 및 하중전이 계측 결과

정재하시험 방법은 3회의 제하-재제하 단계로 계획 최대하중인 18,000 kN까지 재하한 후, 말뚝 또는 지반에 파괴가 발생하지 않을 경우 추가로 하중을 재하 하는 것으로 하였다. 그러나 재하시험을 먼저 수행한 1번과 2번 말뚝의 경우 하중이 18,000 kN에 이르기 전에 말뚝 두부가 파손되어, 나머지 말뚝은 강재 링과 무수축 모르타르를 이용하여 말뚝의 두부를 보강후 시험하였으며 그 결과 계획 최대하중 이상으로 재하할 수 있었다. 재하시험을 위한 반력 시스템은 그림 2에 나타난 바와 같이 말뚝 한본당 24개의 지중앵커를 사용하였으며, 앵커는 말뚝과의 최소간격 2.5D를 유지하도록 시공되었다. 재하시험은 ASTM D1143-81에서 규정하고 있는 완속재하방법에 의해 수행하였다.

재하시험 결과 말뚝 두부에서의 하중-변위 곡선은 그림 5와 같다.

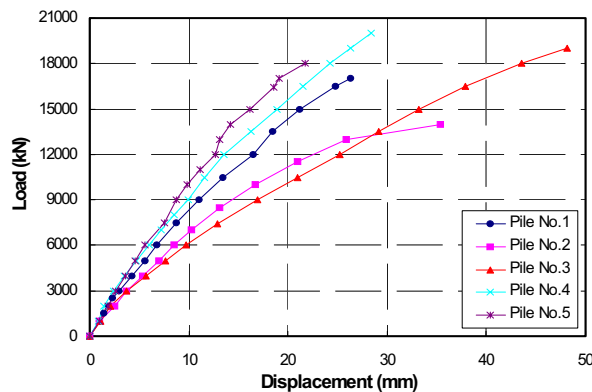


그림 5. 재하시험 결과 하중-변위 곡선

그림 5에서 보는 바와 같이 인공결함이 삽입되지 않은 말뚝인 3번말뚝의 하중-변위 곡선과 다양한 형태의 인공결함이 삽입된 1, 2, 4, 5번 말뚝의 하중-변위 곡선의 비교를 통해서는 결함이 말뚝의 지지력 또는 침하 거동에 미치는 영향을 알 수 없으며, 오히려 3번 말뚝에 비하여 결함말뚝들이 동일 변위에서 큰 하중을 지지하고 있는 것을 알 수 있다. 그 이유는 첫째, 재하하중에 비해 결함의 크기가 상대적으로 작거나 결함의 강성이 크기 때문이며, 둘째, 그림 3에 보인 바와 같이 각 말뚝이 근입된 암반 상태가 서로 다르기 때문으로 생각된다(예를 들어, 2, 3번 말뚝은 풍화암에 근입된 반면 4, 5번 말뚝은 연암에 근입됨).

변형률계 계측결과 말뚝의 깊이별 축하중 분포 곡선을 그림 6에 도시하였다. 말뚝의 깊이별 변형률로부터 축하중을 산정하기 위해 필요한 말뚝의 탄성계수는 말뚝체 보링을 통한 총 10개의 원주형 콘크리트 시편에 대한 일축압축시험으로부터 추정하였으며, 재하응력에 따른 말뚝의 접선탄성계수는 다음 식과 같다.

$$E_p = E_i - 0.402 q_c = 9.1 q_{cu}^{0.33} - 0.402 q_c \quad (1)$$

여기서,  $E_p$  : 응력 수준에 따른 말뚝의 활선탄성계수 (GPa),  $E_i$  : 말뚝의 초기 접선탄성계수 (GPa),  $q_{cu}$  : 말뚝의 일축압축강도 (MPa),  $q_c$  : 축방향 작용응력 (MPa).

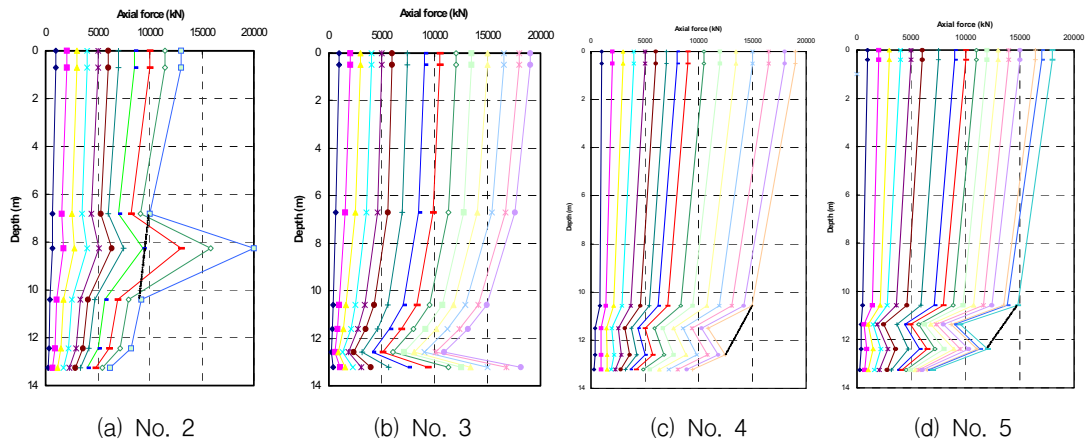


그림 6. 현장 말뚝 변형률 계측결과 축하중 분포 곡선

1번 말뚝은 처음 시공된 말뚝으로 변형률계는 부착하지 않았다. 재료분리를 모사한 2번 말뚝 (그림 6(a))의 경우 결함부에 부착된 변형률계로부터 추정된 말뚝 축하중 값은 약 20,000 kN 으로 결함 상하부의 무결함 부분의 변형률계 계측 평균값에 비해 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 재료분리 구간의 축하중이 크게 산정되는 이유는 결함부 구간의 콘크리트 변형계수가 무결함부에 비해 작아 변형률 값이 상대적으로 크게 측정되었기 때문으로 판단된다. 재료분리 구간의 상·하부 1m에 설치된 무결함 부분의 변형률계 값으로 추정 (그림 6(a)의 점선)한 결함 위치에서의 축하중 값은 최대 재하하중 하에서 약 9,600 kN이며, 이로 미루어 결함부의 변형계수값은 무결함부분의 변형계수값보다 약 52% 작을 것으로 추정된다. 즉, 재료분리를 모사하기 위한 트래미 관의 부적절한 인발 및 시간 경과가 말뚝 재료의 안정성에 문제를 야기할 수 있다고 판단된다.

인공결함을 삽입하지 않은 3번 말뚝의 경우 그림 6(b)의 축하중 분포 곡선에서 알 수 있듯이 선단부에서 계측된 값이 다른 말뚝에 비해 상당히 큰 값을 보이는데, 이는 선단부의 예기치 않은 결함(선단부 재료분리, 또는 선단 슬라임 처리의 미숙 등) 때문인 것으로 추정된다.

비대칭 단면감소를 모사한 4번, 5번 말뚝 (그림 6(c, d))의 경우 결함부의 맞은편에 부착된 변형률계의 계측값이 무결함 부분의 값에 비해 상대적으로 작게 측정되었다. 이는 말뚝 축에 대해 비대칭으로 설치된 인공결함이 결함 맞은편에 휨 인장응력을 발생시켰기 때문이며, 반대로 결함측에서는 휨 압축응력이 작용할 것으로 생각된다. 이러한 비대칭 응력으로 인해 결함부근의 압축응력이 증가하는 경향은, 단면 감소에 따른 평균적인 압축응력의 증가와 더불어 말뚝 부재의 안정성에 심각한 문제를 야기할 수 있다고 생각된다. 그림 7은 4번, 5번 말뚝 비대칭결함 단면의 축방향 응력분포를 모식적으로 나타낸 것이다.

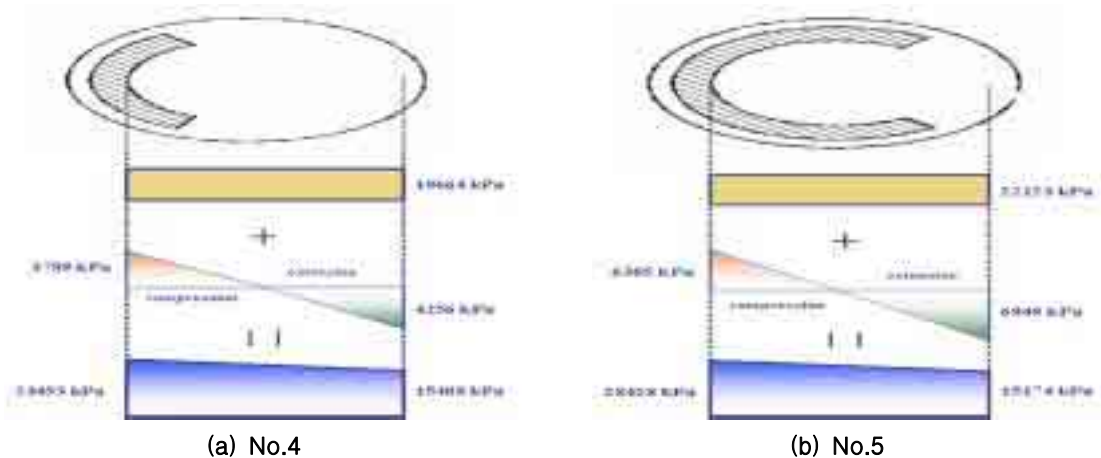


그림 7. 비대칭 감소 단면의 축방향 응력분포

결함 단면의 휨응력 분포를 알기 위해서는 먼저 휨모멘트가 0이 되는 중립점을 알아야 한다. 10% 단면축소 결함 말뚝인 4번 말뚝의 결함부 단면 형상으로부터 계산된 중립점은 말뚝 축에서 결함 반대편으로 약 3cm 떨어진 지점이며, 말뚝을 탄성체로 가정하면 단면에 작용하는 휨응력은 중립점으로부터의 거리에 비례하게 된다. 최대 재하하중하에서 결함으로부터 상·하부로 각 1m 떨어진 변형률계 계측값으로 추정할, 결함이 없다고 가정했을 경우의 축응력은 약 17,700kPa 이며, 그림 7(a)에 나타낸 바와 같이 단면감소 10%를 고려한 결함부의 평균 축응력은 약 19,664 kPa 로 계산된다. 결함 반대편에 설치된 변형률계로부터 얻은 계측 축응력은 15,408 kPa 이므로 휨 인장응력은 4,256 kPa 이 된다. 따라서 결함 내측의 최대 압축응력은 23,453 kPa 으로 결함이 없다고 가정했을 경우에 비해 결함단면의 압축응력이 약 24.5 % 증가하는 것으로 나타났다. 20% 단면축소 결함을 모사한 5번 말뚝의 경우에도 같은 방법으로 계산하면(그림 7(b)) 결함단면의 최대 압축응력은 무결함 말뚝에 비해 약 37.7 % 증가할 것으로 추정된다. 따라서 실제 현장에서 비대칭 단면축소 결함이 발생하면 단면 축소로 인한 평균 축응력 증가, 그리고 결함의 비대칭성으로 인한 휨응력 발생으로 인해 말뚝 재료의 안정성에 심각한 문제를 야기할 가능성이 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 제언

다양한 유형의 인공결함을 삽입한 총 5본의 현장타설 콘크리트 말뚝에 대한 축방향 정재하시험, 그리고 축방향 하중전이 계측을 수행하였으며, 시험 결과의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트 타설시 트레미관을 일시 상승시키고, 시간 경과 후에 재타설한 구간의 변형계수값은 무결함 부분의 값보다 약 52% 작은 값을 나타내었다. 따라서 부적절한 콘크리트 타설로 인한 재료분리 결함은 말뚝의 지지력과 침하에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다.
2. 현장타설말뚝 내에 비대칭 단면감소 결함이 존재하는 경우 단면의 감소로 인한 결함단면의 평균 축응력 증가, 휨응력 발생에 의한 비대칭 응력 분포 등으로 인해 말뚝 부재의 안정성에 문제를 야기할 수 있다. 비대칭 단면감소 10%, 그리고 20% 결함이 삽입된 말뚝에 대한 재하시험 결과, 결함단면부의 최대 축응력은 무결함 말뚝에 비해 각각 24.5%, 37.7% 증가하는 것으로 나타났다.
3. 본 연구 결과는 결함 위치 및 결함형상, 그리고 지반조건이 한정된 시험으로부터 얻어진 것으로 추가적인 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

1. Holtz, R.D. (2002) Capacity Analysis of Drilled Shafts with Defects, Geotechnical Special Publication, n116 II, 2002, pp.1120-1135
2. 권오성 (2004) 암반의 풍화상태가 암반근입말뚝의 지지거동에 미치는 영향, 서울대, 박사학위 논문
3. 우제윤 (1993) 현장타설 말뚝의 비파괴 검사, 한국지반공학회 대한건축학회 공동주최, 1993년도 봄 학술 발표회
4. O'Neill, M.W. (1991) Construction Practices and Defects in Drilled Shafts' Transportation Research Record No.1331, TRB, Washington D.C, pp.6-14
5. Chernauskas, Les R. (2002) Defect Detection and Examination of Large Drilled Shafts Using a New Cross-Hole Sonic Logging System, Geotechnical Special Publication, n94, 2000, pp.66-83
6. Briaud, Jean-Louis (2002) Defect and Length Predictions by NDT Methods for Nine Bored Piles, Geotechnical Special Publication, n116 I, 2002, pp.173-192