

## 현장타설말뚝의 잔류응력 분포에 관한 연구

### A Study on the Distribution of Residual Stress for Drilled Shaft

김원철\* · 황영철\*\* · 안창윤\*\*\*

Kim, Won-Cheul · Hwang, Young-Cheol · Ahn, Chang-Yoon

#### Abstract

The distribution of shaft resistance is measured by the static load test with the strain gauge or stress gauge, so that the long-term load distribution must be considered for the pile design. However, the measurement by strain gauge generally assumes the 'zero reading', which is the reading taken at 'zero time' with 'zero' load and the residual stress, which is the negative skin friction(or the negative shaft resistance) caused by the pile construction, is neglected. Therefore, the measured value by strain gauge is different from the true load-distribution because residual stresses were neglected. In this study, the three drilled shafts were constructed, and the strain measurements were carried out just after shaft construction. As a result of this study, it is shown that the true load-distribution of drilled shaft is quite different with known load distribution and the true load-distribution of drilled shaft changed from the negative skin friction to the positive skin according to the load increment.

**Keywords** : Zero reading, Residual stress, Negative skin friction, Strain gauge, Load-distribution

#### 요 지

말뚝을 설계함에 있어 극한지저력을 산정하는 것만으로는 말뚝의 장기 거동에 있어서의 하중분포를 고려할 수 없으므로 재하 시험시 변형률계나 응력계를 사용하여 말뚝의 하중 재하에 따른 주면저항(the shaft resistance)의 분포를 측정하고 있다. 그러나 대부분의 재하시험시 하중이 '0'일 때를 'zero time'으로 하여 계측기의 값을 읽는 'zero reading'을 가정함으로써 현장타설말뚝이나 항타말뚝의 시공시 발생된 잔류응력(the residual stress 또는 the residual load)을 무시하고 있다. 이러한 'zero reading'의 가정은 말뚝 시공시 발생하는 말뚝 하방향으로의 부주면마찰력인 잔류응력을 고려하지 않으므로 실제 말뚝주면의 하중분포와는 다른 결과를 보이게 된다. 본 연구에서는 현장에 시험시공된 현장타설말뚝에 대하여 정재하시험을 수행하였고, 말뚝 주면의 하중분포 측정시 변형률계를 사용하여 콘크리트 타설 직후부터 계측을 실시함으로써 말뚝 시공에 따른 잔류응력을 측정하였다. 그 결과, 잔류응력이 고려된 경우는 초기에 부의 응력상태를 보이던 하중이 재하됨에 따라 부주면마찰력이 극복되면서 양의 주면마찰력으로 전환됨을 알 수 있었으나, 'zero reading'의 경우는 양의 주면마찰력만을 보였다.

**주요어** : zero reading, 잔류응력, 부주면마찰력, 변형률계, 하중분포

\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 겸임교수

\*\* 정회원 · 상지대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원 · (주)삼보기술단 지반부

## 1. 서론

일반적인 깊은 기초의 경우, 설계하중이 작용을 했을 때의 안전성만 검토하고, 특별한 계측을 하지 않는다. 그러나 말뚝의 길이, 직경의 크기, 부마찰력 등이 산정·고려되어야 할 경우나 잔류응력의 분포를 파악하여야 하는 경우는 말뚝에 계측장치를 부착하여 재하시험을 해야 한다. 이러한 경우 대부분은 변형률계나 응력계를 사용하여 말뚝의 하중 재하시 주면저항(the skin friction 또는 the shaft resistance)의 분포를 측정하고 있다. 그러나 하중 재하시 말뚝의 하중분포에 대한 정확한 연구는 이루어지지 않고 있다. 이것은 대부분의 재하시험시 하중이 '0'일 때를 'zero time'으로 하여 계측기의 값을 읽는 'zero reading'을 가정함으로써 현장타설 말뚝이나 항타말뚝의 시공시 발생된 잔류응력(the residual stress 또는 the residual load)을 무시하고 있기 때문이다 (Fellenius, 2001). 이와같은 'zero reading'의 가정은 현장타설말뚝과 항타말뚝의 시공시 콘크리트 타설 및 항타와 그에 따른 주변 지반의 교란, 재압밀(the reconsolidation), 시간경과에 따른 변화(the time-dependent phenomena) 등에 의한 말뚝 주변의 말뚝 하방향으로의 부주면마찰력(the negative skin friction)인 잔류응력의 영향을 고려하지 않는 것으로, 실제와는 다른 말뚝 주변의 하중분포 결과를 보이게 된다.

본 연구에서는 ○○○○현장에 현장타설말뚝 시험 시공시 변형률계와 응력계를 시공 전에 미리 설치하여 하중 재하시험을 실시함으로써 잔류응력을 고려한 현장타설말뚝에서의 실제 하중분포(the true load-distribution)를 측정하여 'zero reading'했을 때의 분포와 비교하고 그 하중분포 경향을 고찰하였다.

## 2. 현장 지반조건

현장 정재하시험이 이루어진 현장타설말뚝이 시험 시공된 현장에 대하여 지반조사를 실시하였고, 그 결과를 표 1에 나타내었다.

현장 지반은 사질지반으로, 상부 3m까지는 실트질 모래층으로 N치 2/30~3/30 정도의 매우 느슨한 상대밀도를 보이고, 그 밑으로 풍화토와 풍화암층이 존재한다. 풍화토층의 상부는 N치 10/30~20/30 정도의 보통 조밀한 상대밀도를 보이나 하부는 N치 34/30~50/20의 매우 조밀한 상대밀도를 나타낸다.

본 연구의 시험 시공된 현장타설말뚝은 길이 5m로써 이 구간의 N치는 2/30~19/30의 분포를 보인다.

## 3. 현장 정재하시험

### 3.1 현장타설말뚝의 시공

시험 시공된 현장타설말뚝은 ST1, ST2, ST3의 3분으로, ST1은 무근으로 시공되었고 ST2와 ST3는 철근을 배근하였다. 현장타설말뚝의 설치 심도 및 철근 배근 현황을 그림 1에 나타내었다.

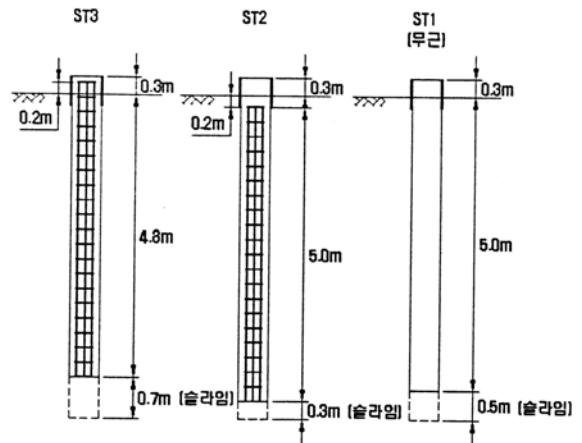


그림 1. 현장타설말뚝 철근 배근도

현장타설말뚝은 직경 500mm, 길이 5m이며, 말뚝 시공시 300 kg/cm<sup>2</sup> 강도의 콘크리트가 사용되었으며, 현장에서 실시한 슬럼프 시험결과 15cm의 값을 보였다.

### 3.2 변형률계와 응력계의 설치

하중재하에 따른 현장타설말뚝의 하중분포를 측정하기 위하여 말뚝 ST1와 ST2는 4개의 변형률계가 설치되었고, ST3는 4개의 변형률계와 2개의 응력계가 설치되었다. 계측기는 소정의 심도에 정확히 설치되도록 봉에 부착하여 콘크리트 타설전 매설하였다. 계측기의 설치위치는 그림 2에 나타내었다.

표 1. 현장 지반조사 결과

심도 (m)	현 장 관 측 기 록			타격수/ 관입량	N치
	토질명	색 조	관 찰		
3.0	실트질 모래	황갈색	실트질 모래 심도 : 0.0~3.0m 실트 섞인 세립~조립의 모래로 구성 젖음(wet) 매우 느슨(very loose)	2/30 3/30	
5.0	풍화토	암갈색   담회색	풍화토 심도 : 3.0~15.5m 화강암의 풍화토 와해시 중립~조립의 모래 모암조직 잔존 습윤(moist) 보통조밀(medium dense) ~매우조밀(very dense)	10/30 19/30 34/30 38/30	
15.5				50/25 50/22 50/21 50/20 50/13	
17.5	풍화암	담회색	풍화암 심도 : 15.5~17.5m 와해시 중립~조립의 모래 모암조직 잔존 매우조밀(very dense)	50/7	

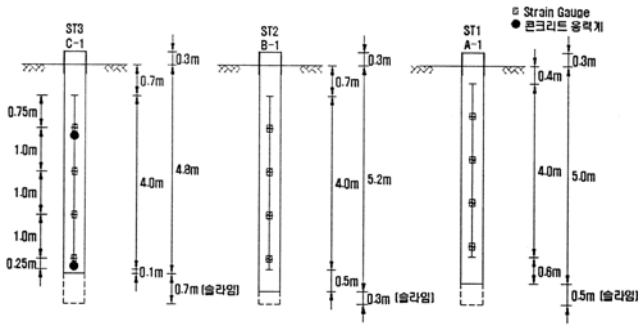


그림 2. 계측기 시공도

### 3.3 현장타설말뚝의 정재하시험

정재하시험을 위하여 말뚝 두부를 지표밖으로 20cm 정도 노출하여 시공하였다.

말뚝에 재하될 하중은 극한하중을 예상하여 총 8단계로 나누어 급속재하방식으로 시험하였으며, 반력말뚝을 이용하여 하중을 재하하였다.

시험말뚝에 하중을 제공하기 위한 반력말뚝으로는 시험말뚝 주변에 기 설치된 아파트 기초로 사용될  $R_{L1} \sim R_{L6}$ ,  $R_{R1} \sim R_{R6}$ 의 말뚝이 사용되었다. 정재하시험을 위하여 길이 7m의 재하대와 500ton 유압잭, 로드셀, 다이얼 게이지가 설치되었다.

시험말뚝과 반력말뚝의 배치는 그림 3에 나타내었다.

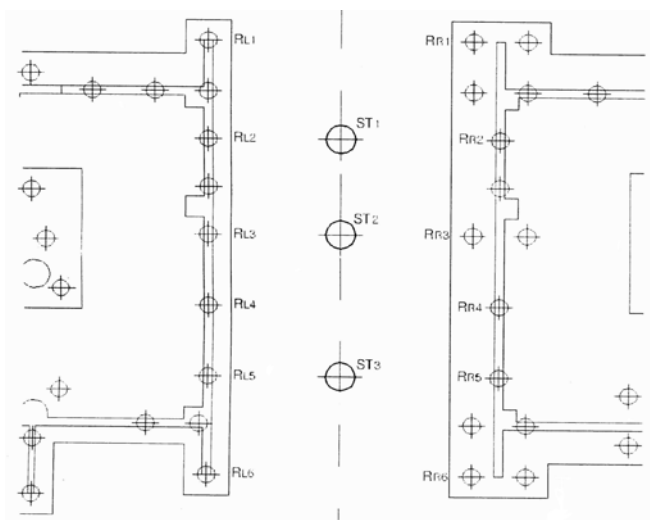


그림 3. 시험말뚝과 반력말뚝 배치도

## 5. 정재하시험 결과 및 분석

현장타설말뚝에 대한 응력 및 변형률 측정은 계측기 설치 및 콘크리트 타설 직후의 값을 측정 하고, 콘크리트 양생이 끝난 후 하중 재하 직전의 값을 측정하였으며, 이후 하중을 10tonf, 20tonf, 30tonf 등으로 증가시키에 따른 값을 각각 측정하였다. 본 논문에서는 콘크리트 타설 직후의 측정값을 ‘타설후’, 하중 재하 직전의 측정값을 ‘재하전’이라고 표현하였다.

이처럼 측정된 변형률계의 측정값을 ‘zero reading’을 가정한 경우와 잔류응력을 고려한 경우의 두 가지로 분석하였다.

우선, ‘zero reading’을 가정한 경우는 변형률계로 측정된 결과중 ‘재하전’ 값을 기준 값으로 하여 하중 재하에 따라 측정된 측정값을 상대적으로 계산하여 말뚝의 하중 분포를 결정하였다.

다음으로, 잔류응력을 고려한 경우는 ‘타설후’ 값을 기준 값으로 하여 상대적으로 계산하였다.

또한, 본 논문에서는 응력계의 값을 제외한 변형률계의 측정값만을 분석에 이용하였으며, 변형률계와 응력계로 측정된 값의 비교 결과는 추가적인 연구 후에 제시할 것이다.

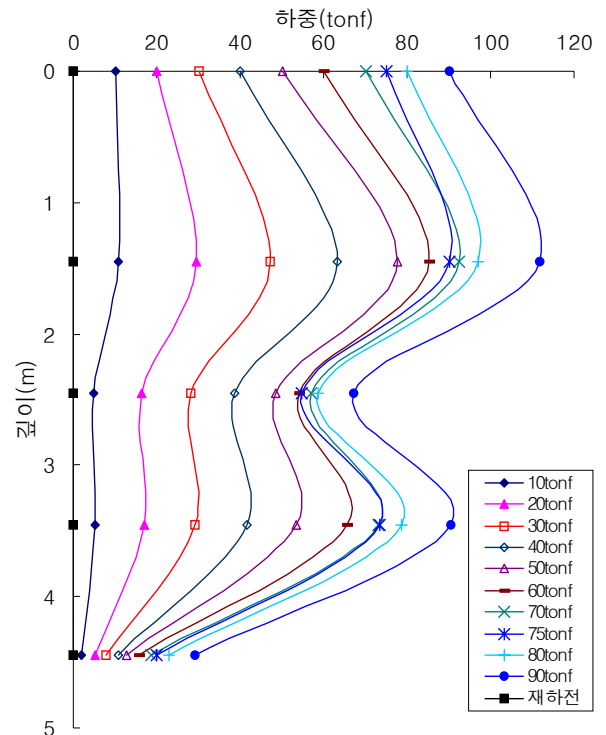


그림 4. ST1의 하중분포(zero reading)

이와 같이 분석한 하중 재하시 현장타설말뚝의 심도에 따른 변형률계로 측정된 하중 분포를 그림 4~9에 나타내었다. 이 그래프들은 'zero reading'을 가정했을 때와 잔류응력을 고려한 경우 사이에 현격한 차이를 보인다.

'zero reading'을 가정한 경우에는 '재하전' 값을 '0'으로 하기 때문에 정재하시험 결과는 양의 주면마찰력으로 나타날 수 밖에 없다. 하지만, 현장타설말뚝 시공에 따른 말뚝 주면의 잔류응력을 고려하기 위해 '타설후' 값을 기준 값으로 하여 재분석한 그래프는 초기에는 부의 주면마찰력이 분포하나 재하 하중이 증가함에 따라 심도가 얕은 곳에서 부터 깊은 곳으로 잔류응력에 의한 부주면마찰력이 극복되면서 양의 주면마찰력으로 점차적으로 바뀌었다.

이러한 결과는 잔류응력이 크게 발생할 수 있는 시공조건 및 지반조건인 경우, 발생한 잔류응력 장기적으로 존재할 경우에 있어 재하시험에 의한 지지력의 평가가 실제 지지력과 다르게 평가될 수 있음을 반증하는 것이다.

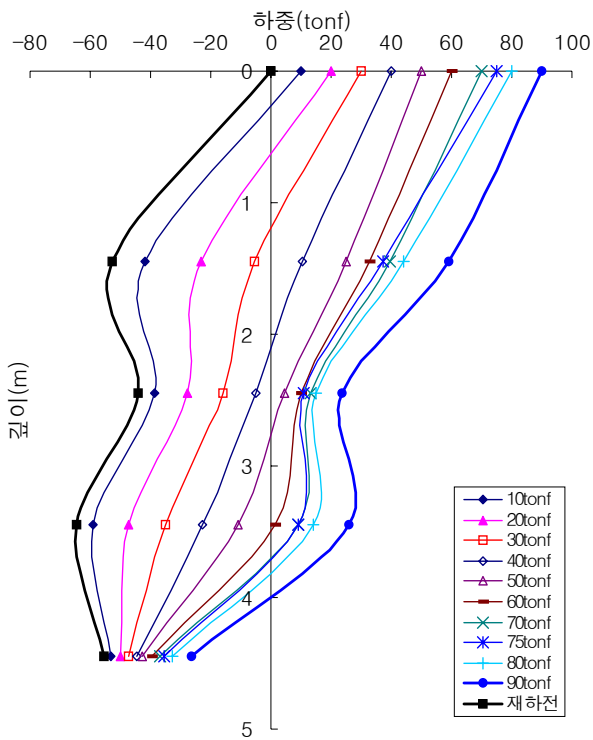


그림 5. ST1의 하중분포(잔류응력 고려)

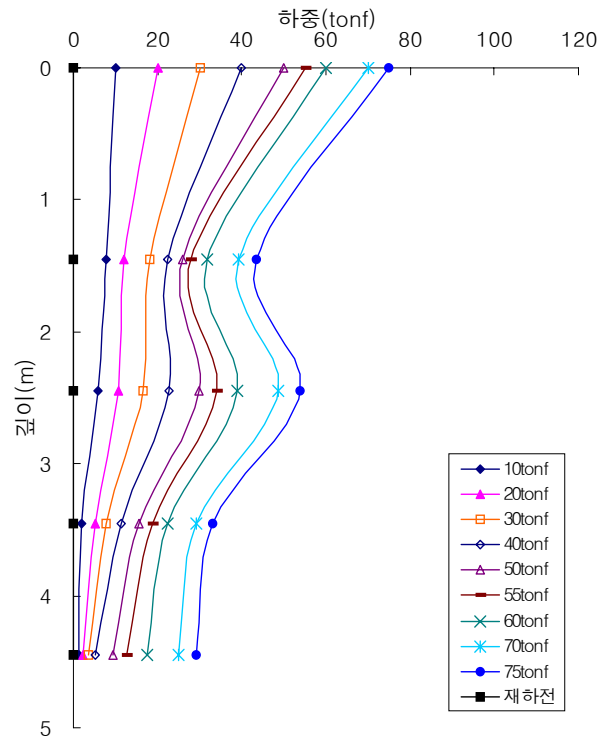


그림 6. ST2의 하중분포(zero reading)

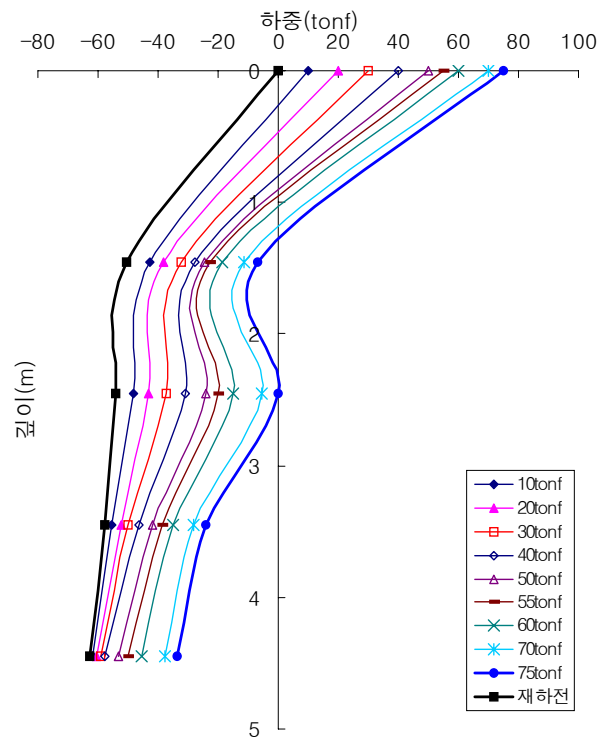


그림 7. ST2의 하중분포(잔류응력 고려)

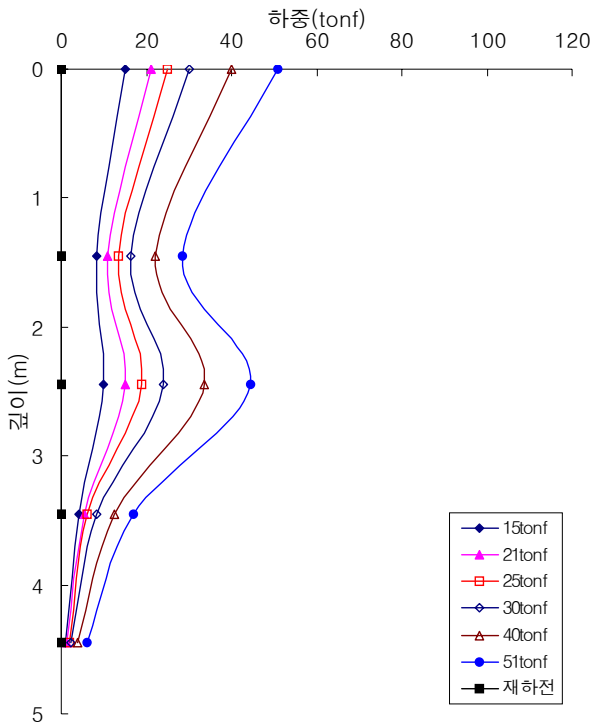


그림 8. ST3의 하중분포(zero reading)

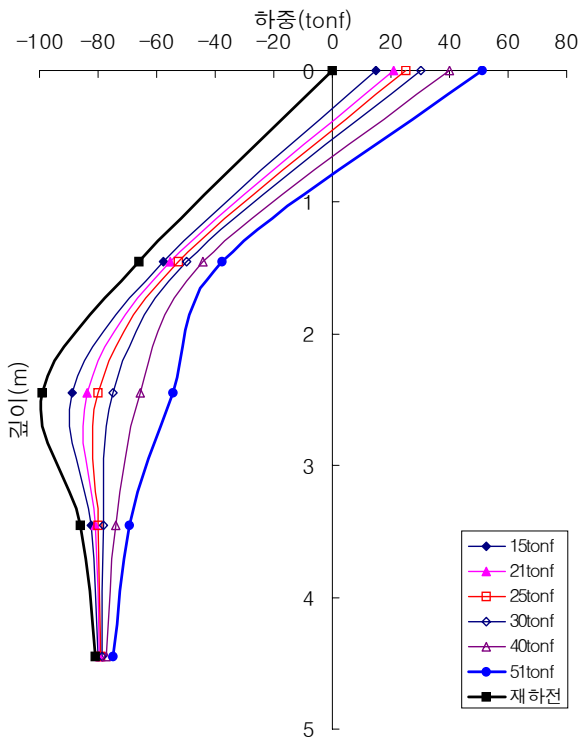


그림 9. ST3의 하중분포(잔류응력 고려)

## 6. 결론

본 연구에서는 현장타설말뚝의 심도에 따른 실제 하중분포를 파악하기 위하여 기존에 이루어져왔던 'zero reading'을 가정한 경우와 말뚝 시공시 발생하는 잔류응력을 고려한 경우를 비교·분석 하였다. 이를 위하여 시험시공된 약 5m 길이의 현장타설말뚝에 변형률계와 응력계를 설치후 정재하시험을 실시함으로써 계측기를 이용하여 실제 현장타설말뚝의 응력분포를 실측할 수 있었다. 또한, 변형률계로 실측된 data를 기존의 'zero reading'을 가정하여 분석함으로써, 기존의 계측방법이 잔류응력이 고려된 실제 하중분포와 어떤 차이가 있는지 분석하였으며 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 콘크리트 타설 직후부터 변형률계로 측정이 이루어지므로, 콘크리트 타설 후부터 재하 직전까지의 현장타설말뚝의 응력변화를 파악할 수 있었고, 이를 말뚝 시공에 따른 잔류응력이라 할 수 있다.
- (2) 잔류응력을 고려한 경우, 초기에는 잔류응력의 영향으로 부의 주면마찰력을 보이나, 하중이 재하됨에 따라 말뚝의 상부부터 부주면마찰력이 극복되면서 양의 주면마찰력으로 전환된다.
- (3) 'zero reading'을 가정한 경우는 '재하전' 값을 기준으로 하여 측정된 data의 상대적인 값을 나타내기 때문에 전 하중재하 단계에서 양의 주면마찰력을 보인다.
- (4) 'zero reading'을 가정하지 않고, 타설 직후부터 계측한 결과 현장타설말뚝의 심도에 따른 실제 하중분포는 잔류응력에 의한 부주면마찰력의 영향이 나타났다. 그러므로, 현장에서 정재하시험 계측시 현장타설말뚝의 시공단계에서 부터의 계측이 요구된다.
- (5) 분석된 결과에 의하면 case에 따라 차이는 있으나 세 경우 모두 콘크리트 타설 직후 말뚝 전장에 걸쳐 인장력이 작용하였으며, 재하 하중이 증가함에 따라 인장에서 압축으로 변환되었으며 최대 하중하에서도 선단 부분은 세 경우 모두 인장을 받고 있는 것으로 나타났다.
- (6) 본 현장 타설 말뚝이 시공이 된 지반이 연약한 지반에 가까운 지반임을 감안하더라도 일반적으로 알려진 응력분포와는 상당히 다른 분포로 보이며 향후의 현장 타설 말뚝은 시공 단계에서부터 계측하여 분석되어야 할 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2004년 11월 22일)

## 참 고 문 헌

1. Baker, C. N., Parikh, G., Briaud, J. L., Drumright, E. E., and Mensah Dwumah, F.(1993), Drilled shafts for bridge foundations. Rep. No. FHWA-RD-92-004, Federal Highway Administration, Washington, D. C., 335p.
2. Bengt H. Fellenius(2001), Determining the true distribution of load in piles, ASCE, International Deep Foundation Congress, An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance, Geotechnical Special Publication No. 116, Edited by M. W. O'Neill, and F. C. Townsend, Orlando, Florida, February 14-16, 2002, Vol. 2, pp. 1455~1470.
3. Bengt H. Fellenius(2001), Static Capacity Prediction by Dynamic Methods for Three Bored Piles(discussion), Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 12, pp. 1078~1081.
4. Jean-Louis Briaud(1984), Piles in sand : A method including residual stresses. American Society of Civil Engineers, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No. 11, pp. 1666~1680.
5. Jean-Louis Briaud, Marc Ballouz, and George Nasr(2000), Static Capacity Prediction by Dynamic Method for Three Bored Piles, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 7, pp. 640~649.