

# 대구경 현장타설말뚝에 대한 변형봉 센서의 현장적용성에 관한 연구

## A Study on Field Application of a Deformable Rod Sensor to Large Diameter Drilled Shafts

정 성 기\*<sup>1</sup> Jung, Sung-Gi

김 상 일\*<sup>2</sup> Kim, Sang-Il

정 성 교\*<sup>3</sup> Jung, Sung-Ko

최 용 규\*<sup>4</sup> Choi, Yong-Kyu

이 민 희\*<sup>5</sup> Lee, Min-Hee

### Abstract

In the conventional load transfer analysis for a steel pipe drilled shaft, it was assumed that the concrete's strain is the same as the measured steel's strain and the elastic modulus of the steel and the concrete calculated by the formula as prescribed by specification is used in the calculation of pile axial load. But, the pile axial load calculation by conventional method differed to some extent from the actual pile load. So, the behavior of a steel pipe drilled shaft could not be analyzed exactly. Thus, the necessity to measure the strain for each pile component was proposed. In this study, a new approach for load transfer measurement of large diameter drilled shafts was suggested ; the strain of each pile component(i. e., steel and concrete) was measured by DRS(Deformable Rod Sensor), the elastic modulus was determined by the uniaxial compression test for concrete specimens made at test site and a value of elastic modulus was evaluated as average tangential modulus corresponding to the stress level of the  $(0.2 \sim 0.6)f_{ck}$ . Field application was confirmed by the results of load transfer measurement tests for 3 drilled shafts. The errors for calculated pile head load were -11 ~ -16% and 3.4% separately.

### 요 지

강관 내부 속채움한 현장타설말뚝에 대한 기존의 하중전이 측정에서는 강관의 변형률만 측정하고 콘크리트의 변형률은 강관과 동일하다고 가정하였으며, 시방서에 규정한 방법으로 구한 강관과 콘크리트의 탄성계수를 이용하여 말뚝 구성부재의 응력 및 축하중을 산정하였다. 그러나 강관의 변형률만 측정하여 강관과 콘크리트가 완전합성 거동하는 것으로 산정한 축하중은 실제 하중값과 상당한 차이를 보이고 있어 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 거동을 정확히 분석할 수 없었다. 본 연구에서는 현장에서 제작한 콘크리트 공시체의 압축강도 시험을 통하여 탄성계수를 구하고 강재와 콘크리트의 변형률을 각각 측정할 수 있는 변형봉 센서를 이용하여 새로운 말뚝축하중 측정 방법을 제안하였다. 변형봉 센서를 사용하여 말뚝축하중을 산정할 경우 콘크리트의 탄성계수는 현장에서 제작한 콘크리트 공시체의 압축강도 시험에서 구하였으며,  $(0.2 \sim 0.6)f_{ck}$ 의 응력 범위에 해당하는 평균접선기울기를 탄성계수로 사용하였다. 세계의 현장타설말뚝에 대해 수행된 하중전이 측정 실험 결과를 이용하여 현장 적용성을 확인하였다. 변형봉 센서의 적용성은 대구경 현장타설말뚝에 대한 축하중 분포도를 통하여 확인하였는데, 말뚝머리에서 계산된 하중은 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 경우 실제작용하중에 비하여 -11 ~ -16% 오차를 나타내었으며, 현장타설 철근콘크리트말뚝의 경우 3.4% 오차를 나타내었다.

\*1 정회원, 부산광역시 감사관실 (Member, Audit and Inspection Bureau, Busan)

\*2 정회원, (주)상지엔지니어링건축사사무소 (Member, Sangji Engr., Associates, Inc.)

\*3 정회원, 동아대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng. Donga National Univ.)

\*4 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engr., Kyungsoong Univ., ykchoi@ks.ac.kr)

\*5 정회원, 부산대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (Member, Ph.D Candidate Dept. of Civil Engr., Pusan National Univ.)

**Keywords :** Average tangential modulus, DRS(Deformable Rod Sensor), Elastic modulus, Pile axial load distribution, Pile axial load measurement

## 1. 서론

기존의 현장타설말뚝에 대한 하중전이 측정 실험에서는 진동식 센서 또는 전기저항식 센서를 철근에만 부착하여 철근의 변형률만 측정하고, 철근의 변형률과 콘크리트의 변형률이 동일하다고 가정하였다. 그리고 말뚝 구성부재인 철근과 콘크리트의 탄성계수는 시방서에서 제시한 식에 의해 산출하여 말뚝구성부재의 응력 및 축하중을 산정하였다. 그러나 해상교량 기초공법중에서 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 경우 강관 변형률만 측정하여 강관과 콘크리트가 완전합성거동하는 것으로 산정한 축하중은 실제의 값보다 1.7배정도 과대평가되고 있어 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 거동을 정확히 분석할 수 없었다. 따라서, 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝에 대한 축하중을 정확히 측정하기 위한 새로운 말뚝축하중 측정 방법 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이었다. 이를 위해 본 논문에서는, 말뚝의 정재하시험시 각 구성부재(콘크리트, 강관)별로 센서를 설치하여 부재의 정확한 변형률을 측정하고 시방서에서 규정한 강재의 탄성계수와 현장에서 제작된 콘크리트 공시체의 압축강도시험에서 구한 탄성계수를 사용하여 현장타설말뚝의 축하중을 산정하는 새로운 하중전이 측정 실험 방법을 제안하였다.

강관 내부 속채움한 대구경 현장타설말뚝의 경우 말뚝 구성 부재별로 축하중을 측정할 사례는 찾아볼 수가 없었다. 통상적으로 강관의 변형률만을 측정하여 콘크리트 부재에도 동일한 변형률이 발생한다는 가정하에 말뚝 구성 부재의 환산단면적을 고려하여 말뚝의 축하중을 산정해 왔으나 무스트란셀(Mustran Cell)과 같이 콘크리트의 응력을 직접 측정하려는 시도는 있었다(O'Neill 등, 1999).

본 연구에서와 같이 강관과 속 채움 콘크리트, 그리고 하부소켓부의 철근에 센서를 설치하여 부재의 변형률을 측정하고 콘크리트의 탄성계수를 압축강도 시험에서 직접 측정하여 말뚝의 축하중을 산정한 것은 최초의 연구 사례가 될 것이다.

말뚝의 축하중전이 측정용으로 사용되는 센서로는 진동식 센서, 전기저항식 센서, 무스트란셀 센서, 콘크리트 유효응력계 등을 사용해 오고 있으며, 최근에는 광섬유 센서를 활용한 연구(이원제, 2000 ; 장기태, 2000)도 진행되고 있

나 실무 적용사례는 매우 미미한 정도이다. 본 연구에서는 지중에서도 현장 적용성이 우수한 것으로 입증된 전기저항식 접착형 스트레인 게이지를 이용하여 제작된 전기저항식 변형봉센서(이하 변형봉센서로 함)를 사용하였다.

본 연구에서는 현장에서 제작한 콘크리트 공시체의 압축강도 시험을 통하여 탄성계수를 구하고 강재와 콘크리트의 변형률을 각각 측정할 수 있는 변형봉 센서를 이용하여 새로운 하중전이 측정 방법을 제안하였다. 그리고 세계의 현장타설말뚝에 대해 수행된 하중전이 측정 실험 결과를 이용하여 변형봉 센서의 현장 적용성을 확인하였다.

## 2. 전기저항식 변형봉센서

### 2.1 변형봉 센서의 제작 절차 및 설치 방법

변형봉 센서의 구성재료는 그림 1에서 볼 수 있으며,

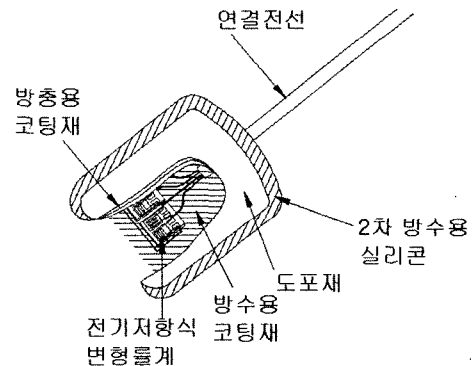


그림 1. 전기저항식 변형봉 센서의 절개도

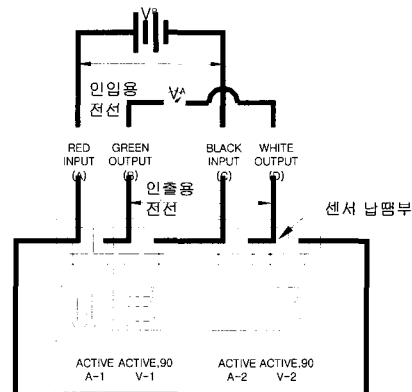


그림 2. 전기저항식 변형봉 센서의 회로도

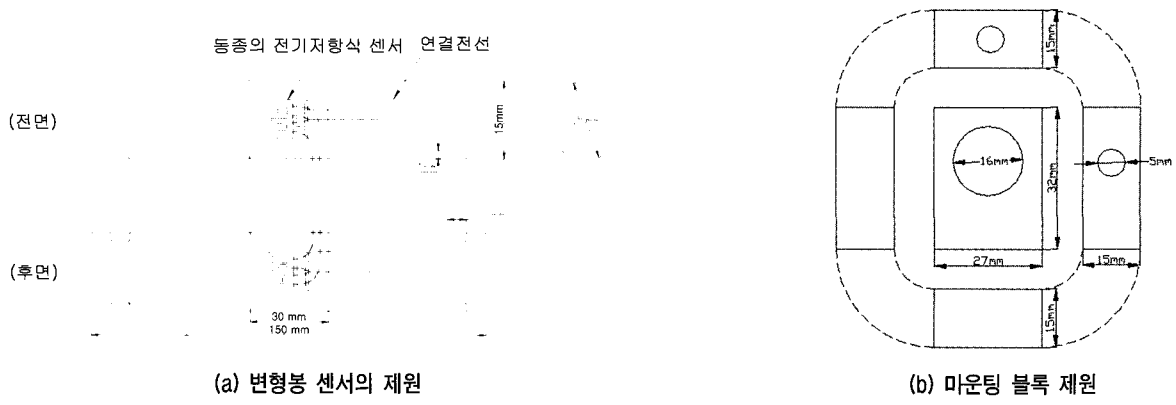


그림 3. 변형봉 센서와 마운팅 블록의 상세 제원



그림 4. 변형봉 센서를 현장타설말뚝의 철근에 설치한 모습



그림 5. 변형봉센서를 강관내부 속 채운한 현장타설말뚝의 콘크리트에 매설하여 설치한 모습

강재 변형봉, 동종의 전기저항식 변형률계 4개, 강재 변형봉 표면청소용품, 느리게 경화되는 강력접착제, 방수용 코팅재, 방충용 코팅재 및 도포재, 2차 방수용 실리콘 등으로 구성되어지며, 반드시 그림 2와 같은 완전결선 회로를 형성하여야 한다. 또한 변형봉 센서의 상세한 제원은 그림 3에 도시하였다.

전기저항식 변형봉 센서의 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, 강재 변형봉의 표면을 연마하여 불순물을 제거하고 준비된 변형률계를 강력접착제로써 강재 변형봉의 표면에 접착시킨다. 경화가 완료되면 4개의 변형률계에 연결된 터미널을 이용하여 완전결선회로를 이루게 한 후 인입용 전선과 인출용 전선을 연결한 후 센서부와 연결전선들이 대기에 노출되지 않도록 방수 처리를 하고 24시간 경과 후 고무패드(또는 아스팔트 패드)를 이용하여 방충처리를 한 다음 절연 테이프로 고무패드 위를 잘 감싸맨다.

변형봉 센서는 구조용 부재의 축방향에 평행하게 설

치되어야 하는데, 콘크리트 센서의 경우 콘크리트에 확실하게 매설되어야 하며 철근용 센서의 경우 구조용 부재와 같이 거동할 수 있도록 구조용 부재에 튼튼하게 고정되어야 한다. 이 때, 구조용 부재에 고정할 경우에는 강재로 된 마운팅 블록을 사용하여야 하는데, 현장타설말뚝의 철근에 설치된 모습은 그림 4와 같으며, 강관 내부 속 채운한 현장타설말뚝의 콘크리트에 매설된 모습은 그림 5와 같다. 이렇게 설치된 변형봉 센서는 철근 콘크리트 부재와 일체로 거동하게 되므로 각 부재에 발생하는 변형률, 응력 및 하중을 측정하는데 사용할 수 있다(최용규 등, 2000).

2.2 변형봉 센서의 특징

변형봉 센서의 장점은 실제 구조물의 축방향 변형률을 직접 계측할 수 있고, 측정 정도가 높다. 그리고, 고진동수의 동적 변형률의 측정이 가능하며, 현장 설치가

간편하고 지중매설시 방수, 방충처리에 대한 안정성이 우수하다. 단점은 센서와 연결전선의 보호용 강재(ㄷ형 강 채널)의 용접시 열에 의한 손상이 있을 수도 있다.

### 2.3 브리지 계수

변형봉 센서는 4개의 활성 전기저항식 변형율계를 이용하여 제작하였으며 완전결선회로를 이루도록 하였다. 그 회로도를 그림 6에 나타내었으며 이 경우 변형봉의 포아슨비를 0.3으로 가정하면 브리지계수 (Bridge factor)는 이론적으로 2.6으로 계산되어야 하지만(Duncliff, 1988), 본 연구에서 개발된 변형봉 센서의 브리지계수는 2.63이었다. 이는 실험적으로 구할 수 있었다.

### 3. 현장 적용성 실험 및 분석

실제 현장에 시공된 현장타설말뚝에 대한 정재하 시험을 수행하여 각 구성부재가 부담하는 하중을 계산하였으며 이를 이용하여 말뚝축하중을 계산하였다. 실물 크기 말뚝의 머리에 작용된 하중( $Q_{actual}$ )과 말뚝두부 부근(0.5~1.0m)에 설치된 변형봉 센서의 측정치에 기초하여 계산된 말뚝두부의 하중( $Q_{m,cal}$ )을 비교하였다.

콘크리트가 부담하는 하중은 측정된 콘크리트 변형률( $\epsilon_c$ )에 측정된 무근공시체의 탄성계수( $E_{c,m}$ )와 콘크리트의 단면적( $A_c$ )을 고려하여 계산하고 측정된 강관의

하중은 측정된 강관의 변형률( $\epsilon_s$ )에 강관의 탄성계수( $E_s$ )와 철근의 단면적( $A_s$ )을 고려하여 계산하였다.

$$Q_{c,m,cal} = \epsilon_c \times E_{c,m} \times A_c$$

$$Q_{s,m,cal} = \epsilon_s \times E_s \times A_s$$

$$Q_{m,cal} = Q_{c,m,cal} + Q_{s,m,cal}$$

여기서,  $\epsilon_c, \epsilon_s$  = 콘크리트와 강관의 측정된 변형률  
 $E_{c,m}$  = 콘크리트의 압축강도 시험에서 구한 탄성변형 구간의 탄성계수  
 $E_s$  = 시방서에 규정한 강재의 탄성계수  
 $A_c, A_s$  = 콘크리트와 강관의 단면적  
 $Q_{c,m}, Q_{s,m}$  = 콘크리트와 강관에서 계산한 하중  
 $Q_{m,cal}$  = 전체 계산한 하중

변형봉 센서의 현장적용성 확인은 2개 현장에 시공된 3개의 말뚝들을 이용하였으며 표 1에는 실험 계획을 요약하였다.

#### 3.1 현장 적용성 실험 결과 및 분석

A현장의 연암과 풍화암에 근입된 대구경 강관내부 속채움 현장타설말뚝(TP3, TP2)(부산광역시 건설본부, 2000)과 B현장의 이암층에 근입된 대구경 현장타설말뚝(YP)(동아건설산업(주), 2000)에 대하여 적용하였다(정성기, 2000).

##### (1) 대구경 강관내부 속채움 현장타설말뚝에 대한 적용 사례 분석

A현장의 지층은 퇴적토층과 풍화토층, 풍화암, 연암으로 구성되어 있었다. 본 현장에서는 실제말뚝의 직경( $\phi = 2,500$  mm)을 1,000 mm로 축소한 시험말뚝을 시공하여 말뚝정재하시험을 실시하였다. 해상부에 시공된 시험말뚝( $\phi = 1,000$  mm)의 상부는 강관과 강관 내부 속 채움 콘크리트로 구성되었으며, 말뚝의 하부는 철근 콘크리트로 구성되었다. 시험말뚝은 기시공된 말뚝( $\phi$

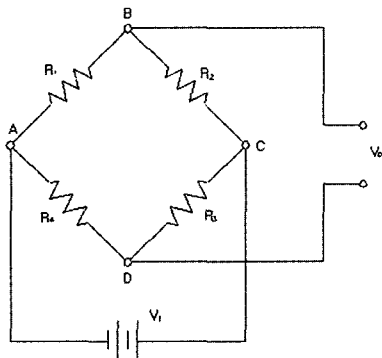


그림 6. 변형봉 센서에서 사용된 완전결선회로

표 1. 현장말뚝에 대한 검증 실험 계획

말뚝기호	하중재하주기	최대하중(MN)	구성부재	비고
A현장 TP3	8	20	강관부(강관, 콘크리트) 소켓부(철근)	연암소켓말뚝
A현장 TP2	8	20	강관부(강관, 콘크리트) 소켓부(철근)	풍화암 소켓말뚝
B현장	7	17.5	철근	풍화암 소켓 현장타설말뚝

= 2,500 mm)의 중간 위치에 시공하였으며, 실제 시공된 말뚝을 반력말뚝으로 사용하여 말뚝정재하시침을 수행하였다(부산광역시 건설본부, 2000).

말뚝을 구성하고 있는 각 구성부재에서 발생하는 하중을 측정하기 위하여 전기저항식 강관접착형 센서, 콘

크리트용 변형봉 센서, 철근용 변형봉 센서를 설치하였다. 즉, 강관 표면에는 전기저항식 강관접착형 센서를, 속 채움 콘크리트 내부에는 콘크리트용 변형봉 센서를 그리고 철근에는 철근용 변형봉 센서를 각각 설치하였다. 철근용 변형봉 센서는 고정용 마운팅 블록을 철근에

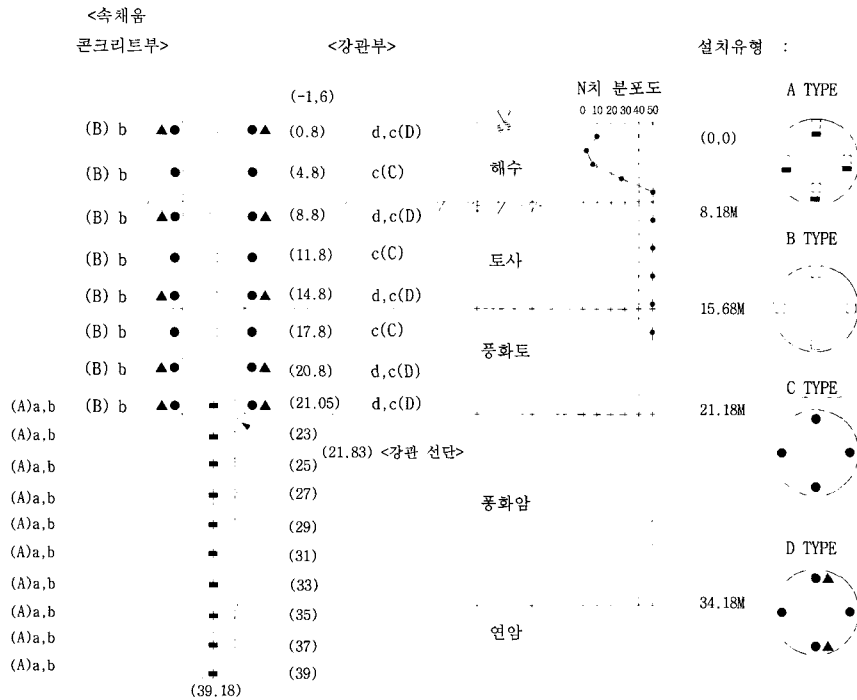


그림 7. 연암 소켓말뚝 (TP3)의 계측센서 설치 위치도

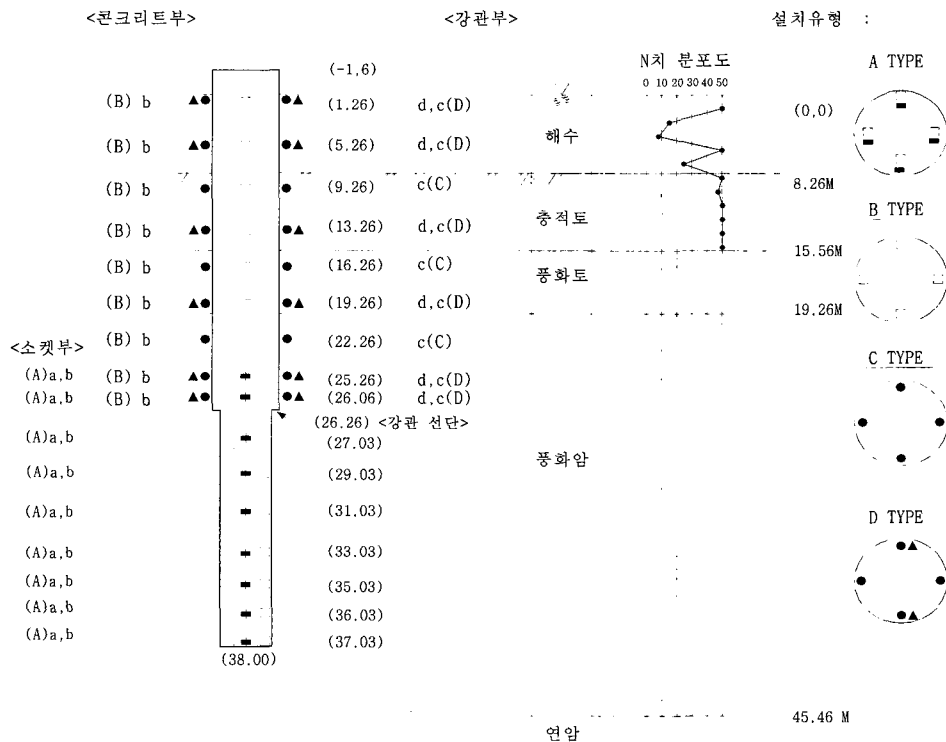


그림 8. 풍화암 소켓말뚝 (TP2)의 계측센서 설치 위치도

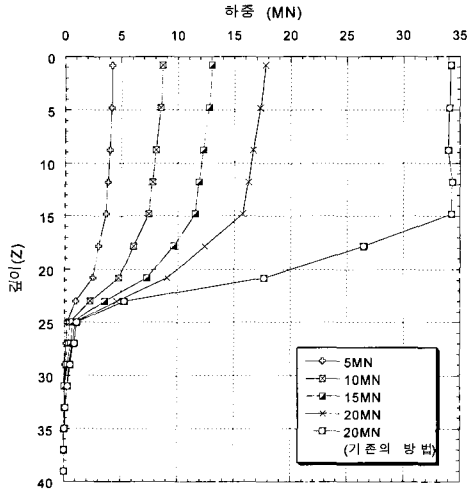


그림 9. 대구경 연암소켓말뚝 (TP3)의 축하중 분포도

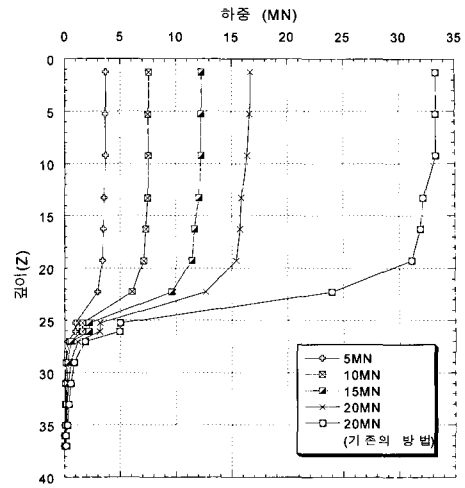


그림 10. 대구경 풍화암소켓말뚝 (TP2)의 축하중 분포도

용접하였으며 센서 양단을 고정하여 철근용 변형봉 센서가 철근과 함께 일체로 거동할 수 있도록 하였다. 속채움 콘크리트용 변형봉 센서의 경우 마운팅 블록을 1개만 철근에 용접하여 변형봉 센서의 한쪽 단만을 철근에 매달 수 있도록 하였다. 그리고 콘크리트 타설시 콘크리트 속에 변형봉 센서가 묻힐 수 있게 하여, 콘크리트와 함께 거동할 수 있도록 하였다. 전기저항식 강관접착형 센서는 강관 표면에 직접 접착하여 완전결선회로를 구성하였으며, 방수 및 방충 처리를 하였다. 또한 그림 7과 8을 연암 및 풍화암 소켓말뚝의 설치위치를 나타내었다.

본 시험에서는 ASTM D1143-81(1994)에 따라 말뚝 정재하시험을 수행하였으며, 반력말뚝이 허용할 수 있는 최대 하중으로 계산된 20 MN 톤을 재하하는 것으로 계획하였다. 완속재하 방법중 탄성침하량과 소성침하량을 측정할 수 있는 다주기(multi cycle) 방식에 의한 하중제어방식을 채택하였다. 해상부 소켓 강관말뚝에서는 20 MN 톤까지 8주기로 재하하도록 계획하였다(부산광역시 건설본부, 2000).

강관부에서는 강관의 변형률( $\epsilon_s$ ), 시방서에서 규정한 강재의 탄성계수( $E_s$ ), 단면적( $A_s$ )으로 하중을 산정하였고, 속채움부에는 속채움 콘크리트의 변형률( $\epsilon_c$ ), 측정된 콘크리트의 탄성계수( $E_{c,m}$ ), 단면적( $A_c$ )으로 하중을 산정하였으며, 이들 하중값을 합하여 강관부의 하중( $Q_{m,cal}$ )으로 결정하였다. 소켓부에서는 철근의 하중과 콘크리트의 하중을 합하여 소켓부의 하중으로 결정하였다. 연암소켓말뚝(TP3)의 말뚝머리에 20 MN의 하중이 작용되었을 때 말뚝두부에 가장 인접하여 설치된 센

서들에서 측정된 하중은 17.8 MN톤으로 나타났다. 풍화암소켓말뚝(TP2)의 경우 최대하중 20 MN의 하중이 작용되었을 때 말뚝머리에 인접한 위치에 설치된 센서들에서 측정된 하중은 16.7 MN이었다. 연암소켓말뚝의 경우 - 11%의 오차를 나타내었고 풍화암소켓말뚝의 경우 약 - 16%의 오차를 나타내었다. 이와 같은 미소한 오차는 콘크리트 탄성계수 결정에서 비롯된 것으로 추정되었다. 강관내부에 속채움된 콘크리트는 강관의 구속효과로 인하여 실제하중 작용시 탄성계수가 다소 증가될 것으로 보인다. 그러나, 제작된 공시체에 대한 일축압축시험에서는 이와 같은 구속효과를 모사할 수 없어, 탄성계수값이 실제말뚝의 경우보다 다소 작게 평가될 수밖에 없었다. 따라서, 이와 같은 오차는 콘크리트의 탄성계수를 제대로 측정해 낼 수 있었다면 제거가능한 정도인 것으로 판단되었다.

그러나 강관의 변형률만 측정하여 콘크리트의 변형률은 강관과 동일하다고 가정하고 시방서에서 규정한 콘크리트의 탄성계수( $E_{c,cal} = 22.7 \text{ GPa}$ )와 강재의 탄성계수( $E_s = 204 \text{ GPa}$ )를 이용하여 기존의 방법으로 구한 말뚝의 축하중 분포도를 그림 9와 10에 함께 도시하였는데, 여기서, 말뚝머리하중 20 MN일 때의 계산된 축하중의 분포도만 나타내었다. 계산된 말뚝머리하중은 작용된 하중의 1.6~1.7배 정도의 값을 나타내어 매우 큰 오차를 가지는 것을 알 수 있었다.

## (2) 대구경 현장타설말뚝에 대한 적용 사례 분석

B현장의 풍화된이암(mudstone) 지층은 점토가 퇴적되어 굳은 연암에 가까운 지층이지만 심도에 따라 풍화

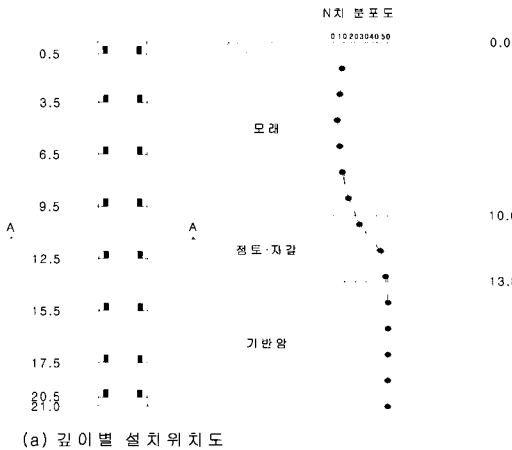


그림 11. B현장 계속센서 설치도그림

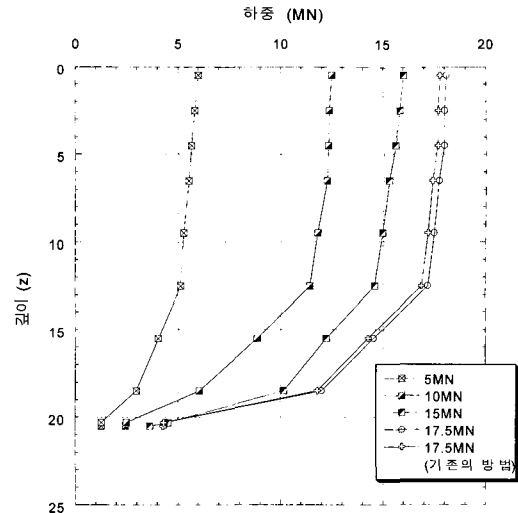


그림 12. 대구경 현장타설말뚝의 축하중 분포도

가 심하게 진전된 층들이 교차하여 나타났다(동아건설 산업주식회사, 2000).

B현장의 시험말뚝 ( $\psi = 1,500 \text{ mm}$ )을 구성하고 있는 구성부재에 발생하는 하중을 측정하기 위하여 철근용 변형봉 센서를 설치하였다. 그림 11은 이암말뚝의 설치도를 나타내었다. 재하하중 및 재하방법은 A현장과 비슷한 방식으로 수행하였으며 17.5 MN까지 재하하였다. 그림 12에는 대구경 현장타설말뚝에 대한 축하중분포도를 나타내었다.

말뚝머리에 작용된 하중이 17.5 MN일 때 말뚝머리에 인접하여 설치된 센서에서 18.1 MN으로 측정되었다. 실제 하중에 대하여 약 3.4%의 오차를 나타내었다. B현장에서는 현장에서 제작된 10개의 콘크리트 공시체를 이용하여 탄성계수를 구하였다.

시방서에서 규정한 콘크리트의 탄성계수( $E_{c,cal} = 22.7 \text{ GPa}$ )와 강재의 탄성계수( $E_s = 204 \text{ GPa}$ )를 이용하여 계산한 말뚝의 축하중 분포도를 그림 12에 함께 도시하였다. 여기서, 말뚝머리하중 17.5 MN 계산된 축하중의 분포도만 나타내었다. 기존의 방법으로 구한 말뚝머리하중이 작용된 하중과 거의 일치하는 것으로 나타내고 있으나 측정된 콘크리트의 탄성계수 값이 재료의 특성 등에 따라 분산도가 큰 점과 무근공시체 실험 결과에서도 계산된 하중이 다소 크게 산정되는 것으로 보아 말뚝의 축하중 산정시 탄성계수 값은 무근공시체 압축강도 시험으로부터 구하는 것이 타당한 것으로 판단되었다. 8 주기에서는 2,000톤까지 재하하지 못하고 1,750톤까지 재하하였다.

#### 4. 결론

강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 각 구성부재(강관 및 콘크리트)별 변형률의 측정에 활용할 수 있는 전기저항식 변형률 센서의 현장 적용성을 검증하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 대구경 현장타설말뚝에 대한 변형률 센서의 적용성을 검토한 결과 말뚝머리에서 계산된 하중은 강관 내부 속 채움한 현장타설말뚝의 경우 실제 작용한 하중에 비하여 -11~-16% 만큼 정도 작게 나타났으며, 현장타설 철근콘크리트말뚝의 경우 3.4% 정도 과대평가되었다.
- (2) 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 경우 강관과 콘크리트의 변형률을 각각 측정하여 말뚝의 축하중을 산정하였다. 그러나, 강관의 변형률만 이용하여 강관과 콘크리트가 완전합성거동하는 것으로 산정한 축하중은 실제 하중보다 대략 1.7 배로 크게 산정되었으므로 매우 부정확한 것으로 판단되었다. 따라서 각 부재별 변형율을 측정하여 축하중을 산정하는 것이 합리적인 방안으로 판단되었다.
- (3) 이와 같은 현장적용성 검증은 단지 3개의 말뚝에 대해 이루어졌는데, 추후 더 많은 검증사례가 추가되어야 할 것이다. 현재 본 연구팀에 의해 현장시험이 다수 진행되고 있으므로 보완적인 결과가 얻어질 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

1. 동아건설산업주식회사(2000). “포항연일대교 개체공사 말뚝정재 하시험 보고서”, 2000. 9.
2. 부산광역시 건설본부(2000). “광안대로 건설공사 대구경 말뚝 정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서”, 2000. 2.
3. 이원제(2000). “광섬유 센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이측정 및 지지력 특성연구”, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 공학 박사학위 논문, pp.10-172.
4. 장기태, 강창국, 홍성진 등(2000). “광섬유격자 센서를 활용한 사면거동 실시간 안전진단시스템”, 2000년 사면안전 학술발표회, 사면안전조사 및 대책, 2000. 11. 17, pp.59-76.
5. 정성기(2001). “변형봉센서를 이용한 대구경 현장타설말뚝의 하중전이 거동에 관한 연구”, 동아대학교 대학원 박사학위 논문, 2001. 8.
6. 최용규, 정창규, 김상일(2000). “완전결선회로를 가진 전기저항식 변형봉센서”, 대한민국 특허출원번호 10-2000-035816.
7. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994)(1994). “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”.
8. Dunicliff, J.(1988). “Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance”, John wiley & Sons, New York.
9. Meyerhof, G. G.(1983). “Scale Effects of Ultimate Pile Capacity”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.6, June, 1983.
10. O'Neill, M. W., Reese, L. C.(1999). “Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods”, Publication No. FHWA-IF-99-025 (ADSC-TL-4).

(접수일자 2002. 12. 30, 심사완료일 2003. 11. 25)