

# 강관말뚝 기초 두부 연결부의 압축거동에 관한 연구 The Study on Compressive Behavior of Connection Member between Steel Pipe Pile and Concrete Footing

윤일로\*, 홍기남\*\*  
IL-Ro Youn\*, Ki-Nam Hong\*\*

## <Abstract>

Generally, application of steel pile as deep foundation member needs special requirement for the connection method between steel pipe and concrete footing. To investigate real compressive behavior of connection member between steel pipe pile and concrete footing, three specimens were tested with carefully designed experimental system. Main test variable is the connection method between steel pipe pile and concrete footing. The bolted bonding method and hook bonding method was considered as the connection method in this study. From the test results gained from experiment, it was confirmed that two types of connection method have the almost same compressive resistance capacity. Therefore, we can conclude that these two connection methods can be used as the strengthening method to verify the compressive composite action of concrete and steel pipe pile.

**Keywords :** Connection method, Bolted bonding method, Hook bonding method, Composite action

## 1. 서 론

말뚝과 확대기초의 결합부는 상부구조물에 작용하는 하중을 말뚝을 통하여 지반으로 전달하는 중요한 부분으로서 단면적이 급변하여 응력이 집중하기 때문에 구조상 취약한 부분이다<sup>(1-4)</sup>. 그러나 결합부는 상부구조와 하부구조와의 경계영역에 있기 때문에 설계·시공·연구 등 모든 면에서 소홀히 한 부분이 많았고, 특히 국내에서는 지진 등에 의한 피해 사례가 없었다

는 것 등으로 종래부터 안이하게 설계된 경우가 적지 않았다<sup>(5,6)</sup>.

말뚝 결합부에 대한 '96 도로교 표준시방서의 설계기준 규정에 의하면 “말뚝과 확대기초의 결합부는 원칙적으로 말뚝머리 고정으로 설계하고 결합부에 생기는 응력에 대해 안전하게 설계하여야 한다.”로 명시되어 있으나<sup>(1)</sup> 이에 대한 설계 검토 사항 등에 대한 상세규정이 존재하지 않아 설계 및 실무 기술자들에게 많은 의문점을 제공하였으며 실제 교량 및 실무 기술

\* 정회원, 상주대학교 토목공학과 교수, 공학박사  
E-mail : youn@sangju.ac.kr  
742-711 경북 상주시 가장동 386번지  
\*\* 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\* Professor, School of Mechanical Engineering  
Sangju National University, Kyungbuk, 742-711, Korea  
E-mail : youn@sangju.ac.kr  
\*\* Professor, Department of Civil Engineering  
Chungbuk National University

자들에게 많은 의문점을 제공하거나 혹은 누락되는 경우가 대부분이었다. 90년대 말부터 실시된 기초적 연구결과를 토대로 결합부의 중요성에 대한 인식을 하게 되었고, 그 결과 최근 개정된 도로교 설계기준(2000)의 경우에는 기존 '96년 도로교 표준시방서와 동일하나 동 해설편에서 연결부의 설계응력 검토사항 및 방법에 대하여 자세히 기술하여 보다 정확한 설계 기준을 제시하였다<sup>(4)</sup>. 최근 건설기술 및 장비의 발달로 강관 말뚝의 경우 대구경화, 고강도화를 통하여 강관말뚝 한본이 부담하는 하중이 증대되는 것이 일반적인 경향이고 지진과 같은 특수하중에 대한 설계가 강조되어 강관 말뚝기초 연결부의 안전성 및 설계 기준에 대한 적합성을 새롭게 검토할 필요가 있다.

그러나 일반적으로 제시된 강관말뚝의 두부보강 방법은 일본의 시방서 규정에 대한 실험적 검증 없이 채택하여 사용하고 있으며 이를 검증하기 위한 단편적인 실험이 수행되었으나 그 내용이 실제적이지 못하고 동시에 수행된 실험부재의 크기, 재하조건과 지지조건 등이 달라서 실험결과의 객관적인 비교가 어려우며, 경우에 따라서는 구조적인 메커니즘을 무시한 실험결과를 제시하는 경우가 있다<sup>(6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 2가지 종류의 두부보강 방법에 의해서 보강된 말뚝기초 두부에 대한 연직하중 재하실험을 실시하여 보강방법에 따른 보강성능을 평가하고자 한다.

## 2. 실험장치

본 실험은 파일의 내력 중에서 가장 중요한 성능이라고 할 수 있는 압축성능에 대한 두부보강공법의 영향을 평가할 수 있도록 계획되었다. 실험변수로는 두부보강공법에 따른 거동특성을 분석하기 위해서 기존의 볼트타입(이하, Type-A)와 신공법인 혹타입(이하, Type-B)을 고려하였으며, 총 3개(Type-A 1개, Type-B 2개)의 압축실험용 실험체를 제작하였다. 실험체의 단면은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 실험체의 후팅부는 1.2m의 정방향 단면을 가지며, 높이는 0.8m로 하였다. 일반적으로 콘크리트의 편칭전단균열은 45도 이하의 각도로 발생하기 때문에 본 실험에서는 편칭 전단 균열이 실험체의 측면으로 진전되지 않도록 단면의 크기를

설정하였다. 또한, 강관파일은 모든 실험체에서 동일하게  $\phi 406\text{mm}$ 를 사용하였다. 볼트타입 실험체는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 십자보강관에 붙어있는 보강블럭과 원형덮개관에 볼트공

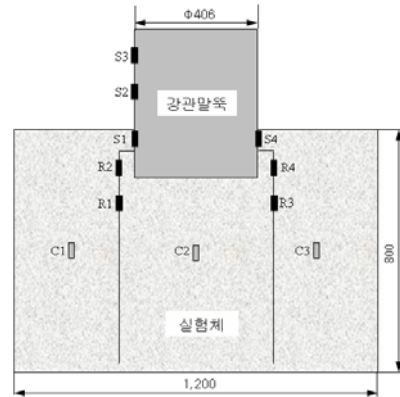


Fig. 1. Details and strain gauge location of test specimen



Fig. 2. Details of reinforcement for Type-A



Fig. 3. Details of reinforcement for Type-B

을 천공하고, 8개의 고장력 볼트를 이용하여 보강블럭과 강관을 체결하여 고정하였다. 또한, 원형덮개관의 볼트공에는 보강철근에 나사선을 만들어 직접 체결하였다. 혹타입 실험체는 강관말뚝의 측면에 구멍을 내고, 8개의 절곡철근을 Fig. 3에 나타난 것과 같이 강관말뚝의 구멍에 넣고 원형 철근으로 고정시키는 방법으로 시공

되었으며, 속채움 콘크리트를 타설할 수 있도록 원형판을 설치하였다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 목표강도를  $300\text{kgf/cm}^2$ 로 설정하였으나  $\phi 100 \times 200$  크기의 공시체에 대한 압축실험 결과 평균  $152\text{kgf/cm}^2$ 의 압축강도를 나타내었다. 또한, 실험체 제작에 사용된 철근은 모두 SD30를 사용하였다.

각 하중단계에서의 강관, 철근 그리고 콘크리트에 발생하는 변형률을 측정하기 위해서 그림 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 변형률게이지를 부착하였다. 강관에는 높이에 따른 거동과 대칭성을 평가할 수 있도록 총 4개의 철근게이지를 부착하였고, 철근에는 2개의 보강철근에 절곡부와 압축부에 2개씩 총 4개의 철근게이지를 부착하였다. 콘크리트에는 단면의 중앙과 중앙으로부터 40cm 떨어진 위치에 3개의 콘크리트 게이지를 부착하였다.

### 3. 실험방법



Fig. 4. Overall view of test set-up

실험은 700Ton 용량의 UTM을 사용하여 실시되었다. 하중은 예상최대하중 80%까지는 하중조절방법으로, 그 이후부터는 변위제어방법으로 재하하였다. Fig. 4에 본 실험의 실험장치를 나타내었다. 실험 중에는 실험체에 가해진 하중과 변위를 UTM으로부터 전송받아 데이터로그에 저장하였으며, 변형률게이지를 이용하여 구성 재료에 발생한 변형률을 실시간으로 데이터로그에 저장하였다. 또한, 각 하중단계에서 발생한 균열 및 파일의 변형 상태를 눈으로 확인하여 기록하였다.

### 4. 결과 및 고찰



Fig. 5. Specimen after testing (A)



Fig. 6. Specimen after testing (B1)

#### 4.1 파괴 모드

모든 실험체의 파괴모드는 Fig. 5과 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 파일의 좌굴로 인한 파괴 거동을 나타내었다. 즉, 실험체의 압축성능은 강관의 좌굴하중에 의해서 결정되는 결과를 나타내었다. 특히, Type-A 실험체의 경우 최대하중까지는 다른 실험체들과 거의 동일한 거동을 나타내었으나 최대하중 이후의 거동에 있어서 속채움 콘크리트가 없기 때문에 강관의 좌굴이 제어되지 못하고 급작스럽게 매우 큰 양의 변위가 발행하였다. 한편, Type-B 실험체의 경우 최대하중이후 강관에 좌굴이 발생하기 시작하였으나 속채움 콘크리트에 의해 좌굴이 제어되면서 볼트타입 실험체에 비해 작은 양의 변위가 발생하였다. 후팅 콘크리트에는 모든 실험체에서 동일하게 최대하중까지 균열이 전혀 발생하지 않고 있다가 강관의 좌굴이 시작되면서 강관과 콘크리트의 접합면에서 발생한 1-2개의 균열이 점점 진전하여 실험체의 하면까지 성장하였다. 이 균열의 폭은 대략 1-2mm 정도인 것으로 확인되었다.

Table 1. Test results

실험체명	최대하중 (tonf)		최대하중시 처짐(mm)		비고
A	513.8		9.93		Type-A
B1	564.4	522.8	12.47	12.18	Type-B
B2	481.3		11.90		

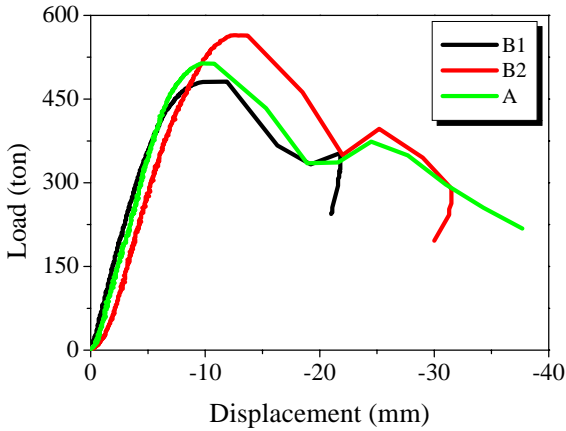
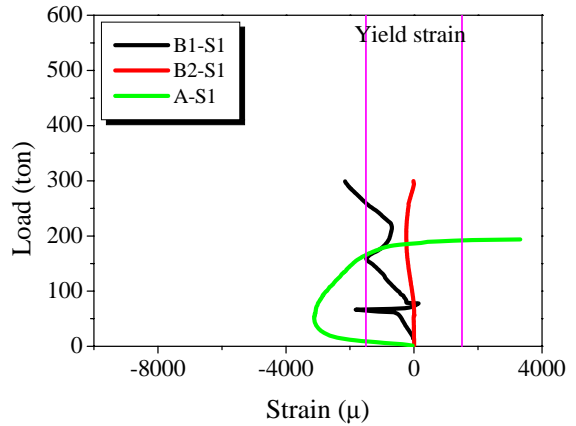


Fig. 7. Load-displacement curves

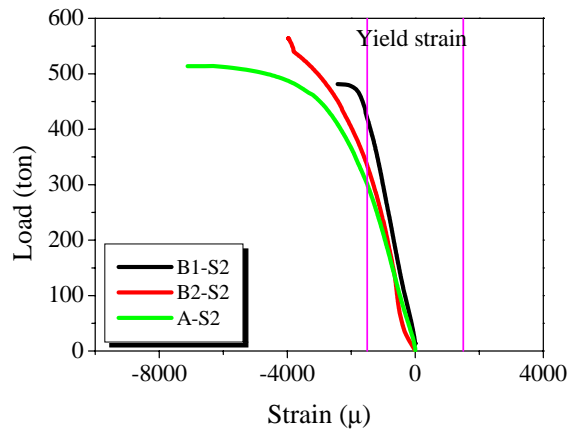
#### 4.2 하중-처짐관계

Table 1과 Fig. 7에 본 실험을 통해서 얻어진 각 실험체의 실험결과 및 하중-변위곡선을 나타내었다. 최대하중 및 최대하중 시의 변위는 흑타입 B1과 B2 실험체의 평균이 볼트타입 A 실험체에 비해 크게 나타내고 있으나 그 양은 매우 미소하여 거의 동일한 성능을 발휘하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 하중-변위곡선을 나타낸 Fig. 7을 통해서 알 수 있듯이 각 실험체의 하중-변위 거동은 최대하중 크기에 있어서 약간의 차이를 보이나 전체적인 거동은 거의 유사한 거동을 나타내고 있다. 즉, 본 실험에서 고려한 Type-A와 Type-B 두부보강 방법이 파일두부의 압축거동에 미치는 영향은 매우 미비하다는 것을 실험결과를 통해서 확인할 수 있다. 또한, Type-A와 Type-B로 두부가 보강된 모든 실험체의 압축내력이 항복내력 270Ton보다 190%이상 상회하는 것으로 나타나 볼트타입 및 흑타입 두부보강방법은 압축력에 대해 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

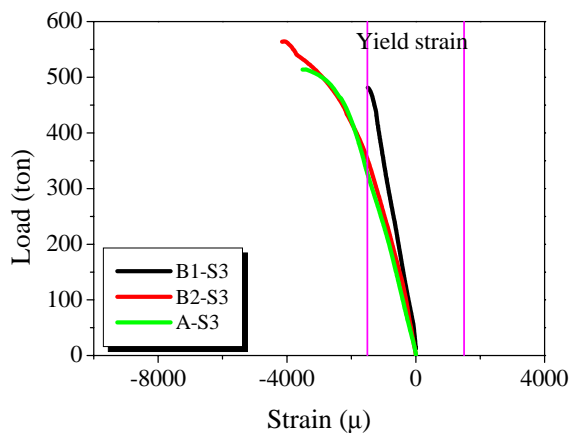
#### 4.3 하중-강관변형률 관계



(a) Strain gauge S1



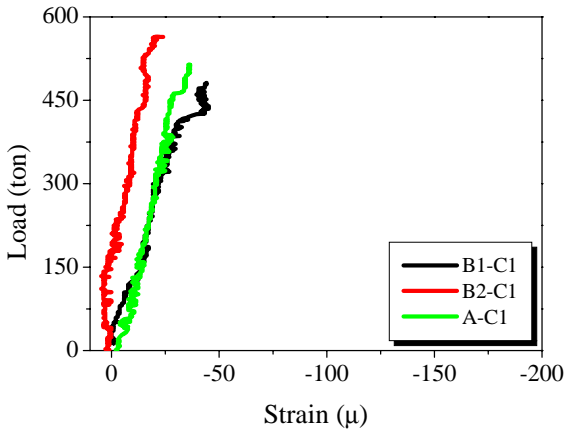
(b) Strain gauge S2



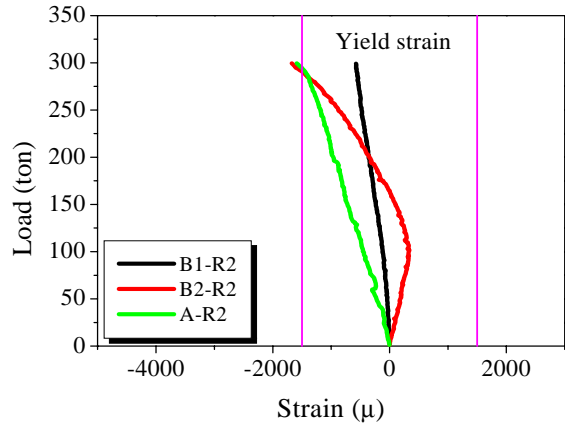
(c) Strain gauge S3

Fig. 8. Load-strain curves of steel pipe pile

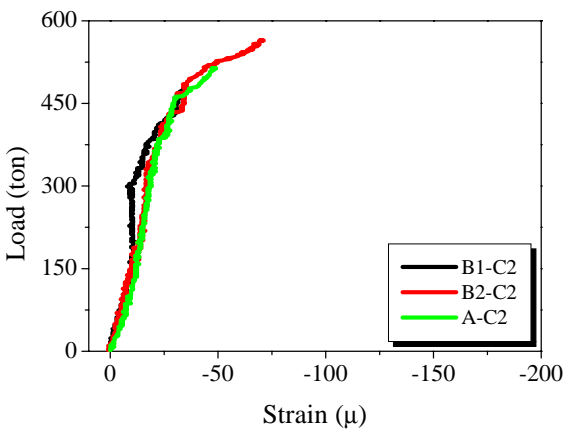
Fig. 8에 강관파일에 부착한 철근게이지 위치에서의 하중-변형률관계를 나타내었다. 그림으로부터 확인할 수 있듯이 최대하중 이전에 강관파일에는 항복변형률 이상의 변형률이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한, 강관파일이 항



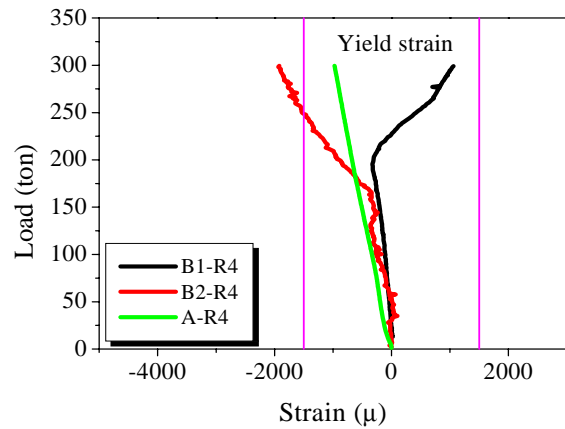
(a) Strain gauge C1



(a) Strain gauge R2



(a) Strain gauge C1



(b) Strain gauge R4

Fig. 9. Load-strain curves of footing

Fig. 10. Load-strain curves of Reinforcement

복하는 순서는 콘크리트와 접하는 부분이 가장 먼저 항복강도에 도달되며 그 이후 차츰 재하점 방향으로 항복범위가 확대되는 것을 알 수 있다. 그리고 재하점 부근의 변형률이 항복변형률 이상으로 증가하면서 강관에 좌굴이 시작되어 최대하중에 도달하는 파괴 메커니즘을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 두부보강형식에 따른 강관의 압축거동의 차이는 명확하게 나타나지 않고 거의 유사한 거동을 보이고 있다. 즉, 이는 Type-A와 Type-B 보강공법 모두 적절하게 축방향 하중을 전달할 수 있다는 것을 의미한다.

### 4.3 하중-콘크리트변형률 관계

후텅부 콘크리트에 부착한 콘크리트 변형률 게이지로부터 얻은 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림은 모든 실험체에서 후텅부 콘크리트에 발생한 최대변형률이  $100\mu\epsilon$ 이하로 매우 작은

변위가 발생하고 있음을 보이고 있다. 실험 중에 관찰된 콘크리트의 표면의 균열도 최대하중 이전에는 전혀 발생하지 않고 있다가 재하점 부근의 강관이 좌굴을 시작하면서 콘크리트에 균열이 발생하기 시작하여 실험체 하부까지 성장하는 양상을 보였다. 즉, 본 실험에서 고려한 Type-A와 Type-B 두부보강 방법은 지압하중이 콘크리트의 일부분에 집중되는 것이 아니라 콘크리트와 두부보강철근의 합성거동을 통해 후텅부에 적절하게 전달된다는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 앞에서 설명한 것과 같이 실험체의 콘크리트 압축강도가  $152\text{kgf/cm}^2$ 로 목표강도보다 매우 작은 값을 나타내었지만 콘크리트의 균열양상 및 압축변형거동으로부터 콘크리트의 강도가 강관파일의 두부 거동에 미치는 영향은 매우 미비하다는 것을 알 수 있었다.

### 4.4 하중-보강철근변형률 관계



구분	270 TON	접합면 응력분포
콘크리트		
응력(kg/cm <sup>2</sup> )	96.6	72.2

Fig. 11. Load-strain curves of Reinforcement

구분	150 TON	270 TON
강관말뚝		
응력(kg/cm <sup>2</sup> )	663.0	799.0

Fig. 12. Load-strain curves of Reinforcement

Fig. 10에 두부보강철근의 변형률과 압축하중과의 관계를 나타내었다. 그림에는 철근의 항복 변형률도 함께 나타내었다. 일반적으로 콘크리트 속에 매립한 철근게이지는 콘크리트에 균열이 발생하게 되면 게이지의 정확도가 떨어져 신뢰성 있는 데이터를 획득할 수 없다. 본 실험에서도 이러한 문제가 발생하여 균열이 발생하기 이전인 300Ton까지만 Fig. 10에 나타내었다. 대부분의 보강철근이 최대하중 이전에 항복한다는 것을 그림을 통해서 알 수 있다. 보강공법에 따른 거동특성을 살펴보면 볼트식보강공법의 경우 모든 보강철근이 압축력을 받는 것으로 나타났다. 또한 300Ton 정도의 압축하중을 전후에서 보강철근에 항복변형률이상의 변형률이 발생하여 이 이후부터 콘크리트의 하중부담이 크게 증가하는 것으로 나타났다

한편, Type-B의 경우 보강철근이 절곡된 부분에 강관으로부터의 지압이 작용하여 위치에 따라 압축력과 인장력이 동시에 작용하는 거동을 나타내었다. 철근에 발생된 변형률은 Type-A 보강공법의 경우 Type-B 보강공법으로 시공된 실험체와 거의 유사한 값을 나타내었으며, 300Ton 정도의 압축하중을 전후해서 철근이 항복하는 변형특성을 나타내었다.

### 5. 수치해석

강관말뚝의 두부보강 유한요소해석은 Fig. 11에 나타낸 것과 같이 Pantagon3D를 이용하여 수행되었다. 유한요소 모델링은 강관말뚝과 지지철근, 그리고 속채움 콘크리트로 나누어서 모델화하였다. 강관말뚝의 경우 8절점 shell 요소

구분	150 TON	200 TON
지지철근		
응력(kg/cm <sup>2</sup> )	509.0	621.0

Fig. 13. Load-strain curves of Reinforcement

를 적용하였고 지지철근은 truss 요소를 사용하였으며, 콘크리트의 경우 8절점 solid 요소를 사용하였다. 하중의 재하는 쉘 요소(shell element)를 이용한 절점재하방식(point load)을 채택하여 소정의 하중을 작용시켰다.

본 실험에서 사용한 실험체의 제원과 동일한 치수를 적용하였으며, 말뚝의 최상단면을 xy 평면으로 지정하고 z방향으로 투영하여 3차원으로 모델링하였다. 콘크리트 후딩부 하면의 경계조건을 고정으로 하여 파일의 상부에서 연직하중을 재하하였다.

연직하중의 작용으로 인한 말뚝두부와 콘크리트 기초의 거동 및 응력분포를 분석하기 위하여 콘크리트로 채워진 말뚝의 상부에 등분포하중을 가할 수 있는 강성이 매우 큰 판을 모델링하여 강관파일의 항복내력 270Ton의 연직하중을 재하하였다.

또한 강관말뚝과 콘크리트, 지지철근이 분담하는 응력을 비교하고 강관과 콘크리트 기초 접합면의 응력을 분석하기 위하여 구조물을 1/4로 절단하여 내부 응력분포를 나타내었다.

5.1 해석결과

재하하중이 270Ton인 경우 콘크리트가 분담하는 최대응력은 96.6(kg/cm<sup>2</sup>), 콘크리트 내부 응력은 약 72.2kg/cm<sup>2</sup>로 응력분포가 속채움 콘크리트 상부에 집중되고 있으며 하중재하면 하단에서 최대 응력이 분포한다는 것을 Fig. 12로부터 확인할 수 있다.

구조해석으로부터 연직하중에 대한 콘크리트의 거동을 살펴본 결과 270Ton까지의 하중이 재하되었을 경우 콘크리트에 발생하는 압축응력은 콘크리트의 압축강도보다 매우 작은 값으로 구조적으로 매우 안전측으로 평가되었다.

Fig. 12는 연직하중 재하 시 강관말뚝의 응력분포를 보여주는 것으로 속채움 콘크리트의 경우와 유사한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. 270Ton 재하시 강관말뚝이 분담하는 응력은 799kg/cm<sup>2</sup>로 매우 작은 응력을 나타내었다. 또한, 압축실험결과와 동일하게 콘크리트와 강관이 접하는 부분에서 가장 큰 응력을 나타내어 강관이 항복이 콘크리트와의 접합면에서 시작된다는 것을 해석적으로도 확인할 수 있었다.

Fig. 13은 연직하중 재하시 지지철근의 응력분포를 보여주는 것으로 강관의 응력분포와 거의 동일한 응력분포를 보이고 있다. 270Ton 재하시 지지철근이 분담하는 응력은 621kg/cm<sup>2</sup>로 나타나 파일이 부담하게 되는 일반적인 하중이 재하된 경우에도 지지철근은 큰 안전율을 확보하고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 실험을 통해서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 볼트타입 실험체의 경우 최대하중까지는 속채움 콘크리트가 없기 때문에 강관의 좌굴이

제어되지 못하고 급작스럽게 큰 양의 변위가 발행하였다. 한편, 혹타입 실험체의 경우 최대하중이후 강관에 좌굴이 발생하기 시작하였으나 속채움 콘크리트에 의해 좌굴이 제어되면서 볼트타입 실험체에 비해 작은 양의 변위가 발생하였다.

- 2) 볼트타입과 혹타입으로 두부보강된 실험체들 모두의 압축내력이 강관말뚝 재료의 항복내력 270Ton보다 190%이상 상회하는 것으로 나타나 볼트타입 및 혹타입 두부보강방법은 압축력에 대해 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 3) 두부보강형식에 따른 강관의 압축거동의 차이는 명확하게 나타나지 않고 거의 유사한 거동을 나타내고 있다.
- 4) 콘크리트의 균열양상 및 압축변형거동으로부터 콘크리트의 강도가 강관파일의 두부 거동에 미치는 영향은 매우 미비하다는 것을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 1) 건설교통부, 도로교 표준시방서, 1996.
- 2) 건설교통부, 콘크리트 표준시방서, 1996.
- 3) 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 1999.
- 4) 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000.
- 5) 서울대학교 지진공학 연구센터, “강관말뚝 합성형 두부보강방법의 구조안전성 검증”, 2001.
- 6) 유성근, 박종면, 박대용, 김영호, 강원호, “강관 말뚝 기초 두부 연결부의 합성거동에 대한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.2, pp. 288~296, 2003.

---

(2006년 2월 16일 접수, 2006년 8월 20일 채택)