

강관말뚝 두부보강 방법의 휨내력 및 압축내력 특성

The Bending and the Bearing Capacity of Bonding Method of Steel Piles into Pile Caps

오성남¹⁾, Sung-Nam Oh, 유제남²⁾, Je-Nam Yoo, 홍성영³⁾, Seong-Young Hong

¹⁾ (주)스마트엔지니어링 이사, Direct, Smartec Engineering Co., Ltd.

²⁾ (주)삼안건설기술공사 이사, Direct, Saman Engineering Consultants Co., Ltd.

³⁾ (주)스마트엔지니어링 대표이사, President, Smartec Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : Engineers should be careful in the design of bonding piles into pile caps because they are weak points in the pile foundation. Therefore in this study, the mechanism of bonding piles into pile caps was explained, and the design method of the composite bonding method was proposed. And the proposed design method was verified in comparison with the result of the full scale test. Also, the characteristic for the bearing capacity and the mechanism of compressive load of bonding method were analyzed.

Key words : bonding piles into pile caps, the composite bonding method, the bearing capacity

1. 서 론

말뚝을 설계할 때에는 지반 특성, 말뚝의 재료적 특성, 말뚝과 확대기초의 결합부 등을 고려하여야 한다. 특히 말뚝과 확대기초의 결합부는 확대기초와 말뚝을 연결하는 부분이며, 확대기초와 비교하여 단면적이 작아 응력이 집중되어 구조상 약점이 되기 쉬운 부분이다. 따라서 도로교설계기준(2000)에서는 말뚝과 확대기초의 결합부를 말뚝머리 고정으로 설계하고, 결합부에 생기는 모든 응력에 대해 안전하게 설계하도록 하고 있다.

일본의 지진 피해 사례를 조사한 결과에 따르면, 말뚝 기초의 절반 정도가 말뚝과 확대기초의 결합부에서 발생하고 있다고 한다. 따라서 일본에서는 이에 대한 중요성을 인식하고, 1970년부터 건설성 토목연구소를 중심으로 활발한 연구가 진행되어, 도로교설계기준 해설(2001)에서 규정하는 속채움 콘크리트 방법 등이 개발되었다.

국내에서는 1998년 건설 신기술 134호(강관말뚝 볼트식 두부보강 방법)가 개발되고, 관련 논문이 발표되면서 국내 토목 기술자들의 관심을 갖게 하였다. 그 후 스마트엔지니어링 등이 강관말뚝 합성형 두부보강 방법을 개발하여 2001년 건설 신기술 307호로 지정된 바 있고, 현재 여러 회사에서 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

말뚝과 확대기초의 결합부는 말뚝 기초에 있어 매우 중요한 역할을 하기 때문에 그 적용에 있어 주의를 기울여야 하고, 개발을 담당하는 기술진도 이에 대한 메카니즘을 올바르게 파악하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 강관말뚝 두부보강 방법의 하중전달 메카니즘에 대해서 설명하고, 합성형 두부보강 방법의 연결부의 설계방법을 제안하고, 실규모의 내력실험을 통해 그 설계방법의 타당성을 검증하였다. 그리고, 합성형 두부보강 방법의 지압내력 특성과 압축하중 분담 메카니즘을 분석하였다.

2. 강관말뚝 두부보강 방법

2.1 합성형 두부보강 방법

강관말뚝 합성형 두부보강방법은 기존 속채움 콘크리트 방법과 같이 콘크리트 속채움에 따른 부착 효과 및 합성 효과를 활용하기 때문에, 기존 방법의 우수한 역학적 안전성을 기본으로 하면서 그 동안 문제점으로 지적되어 온 시공상의 문제점을 해결하였고, 가격도 기존 기술에 비해 저렴한 특징이 있다. 강관말뚝 합성형 두부보강방법은 표 1과 같은 4가지의 기술적 구성 요소로 이루어져 있다.

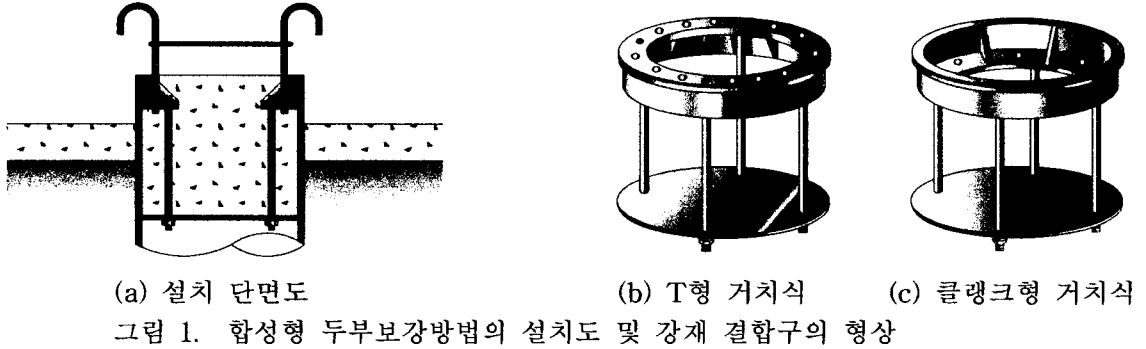


그림 1. 합성형 두부보강방법의 설치도 및 강재 결합구의 형상

표 1. 합성형 두부보강 방법의 기술적 구성 요소

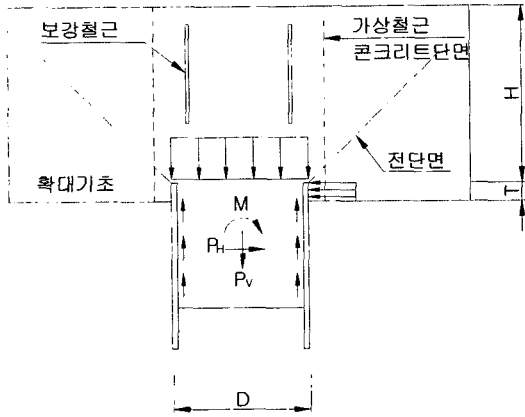
기술적 구성 요소		역 할
보 강 철 근		띠철근과 함께 확대기초 매입부에서 RC 기둥을 형성하여 축력과 휨모멘트에 저항하고, 강재결합구에 하중 전달
강 재 결 합 구		확대기초와 강관말뚝을 상하 결합하고, 확대기초 콘크리트에 작용하는 하중을 강관말뚝으로 전달
연 결	강재결합구와 보강철근	연결 방식 : 나사 또는 너트 결합
구 조	강재결합구와 강관말뚝	연결 방식 : 용접 또는 볼트로 연결
속채움 콘크리트		강관말뚝 두부의 국부 변형 방지, 부착 효과에 따른 보강 효과 발휘

2.2 하중 전달 메카니즘

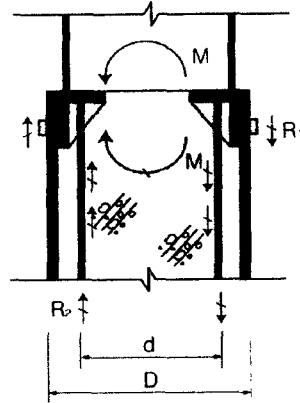
합성형 방법과 속채움 콘크리트 방법 모두 B방법에 속하며, 두 방법의 큰 차이점은 보강철근과 강관말뚝을 연결하는 방법과 속채움 콘크리트로 전달되는 하중의 크기이다. 확대기초에 매입되는 말뚝의 길이와 보강철근량은 두 방법 모두 같다. 확대기초에 정착되는 보강철근량은 철근콘크리트 기둥으로 가정하여 구한다. B방법에 있어서 말뚝머리 결합부의 하중 분담에 관한 메카니즘은 그림 2 및 표 2와 같다.

속채움 콘크리트 방법은 보강철근을 통해 강관말뚝으로 하중을 전달하는 방법이다. 보강철근의 상부는 확대기초 내에 정착되고, 하부는 강관말뚝 내의 콘크리트에 정착된다. 그리고 강관말뚝 내에는 미끄럼 방지턱을 설치하여 속채움 콘크리트가 강관말뚝과 일체로 거동하게 하고, 강관말뚝 두부의 지압면적을 크게 한다.

합성형 두부보강방법은 강재 결합구라는 별도의 연결장치를 마련하여 속채움 콘크리트 방법의 미끄럼 방지턱의 역할을 수행한다. 확대기초에 정착되어 있는 보강철근은 강재결합구에 나사 결합되고, 강관말뚝 내에 충전된 콘크리트에 정착되어 있는 지지철근도 강재결합구에 나사 결합된다. 강재결합구의 상판은 강관말뚝에 걸쳐지며, 강관말뚝과 볼트 또는 용접으로 연결된다.



(a) 속채움 콘크리트 방법



(b) 합성형 방법(강재 결합부만 표시)

그림 2. 말뚝머리보강방법의 하중 분담 메카니즘

표 2. 속채움 콘크리트 방법의 하중 분담 메카니즘

보강방법		속채움 콘크리트 방법
순수 축하중	압축력	말뚝 머리부 확대기초 콘크리트의 지압 및 편칭전단저항
	인장력	보강철근의 인장저항 (정착장 확보)
수평력		말뚝 전면 확대기초 콘크리트의 지압 및 편칭전단저항
휨모멘트		보강철근을 포함한 가상철근 콘크리트 기둥의 휨저항

표 3. 합성형 두부보강방법의 연결 방법 및 하중 분담 메카니즘

구분		합성형 볼트식	합성형 용접식
결합구와 보강철근의 연결 방법		<ul style="list-style-type: none"> • 보강철근과 나사 결합 • 지지철근과 나사 결합 	합성형 볼트식과 동일
강관말뚝과 결합구의 연결 방법		<ul style="list-style-type: none"> • 고장력 볼트로 연결 • 원주 방향으로 배치 	결합구와 강관을 45° 홈용접으로 연결
연결부의 하중전달	압축력	결합구 상판을 통해 대부분을 전달하고, 지지철근으로 나머지 하중을 부담	합성형 볼트식과 동일
	인장력	볼트의 전단력과 지지철근의 인장력으로 저항	용접부의 내력으로 저항

주) 인장력은 순수 축인장력과 휨모멘트의 조합에 의해 발생하는 인장력이다.

3. 강관말뚝 두부보강방법에서 B방법의 유효성

도로교설계기준 해설(2001)에서 규정하고 있는 A방법과 B방법은 강결합방법으로서 1972년 일본에서 최초로 개발된 방법이며, 일본 건설성 토목연구소를 중심으로 여러 실험을 통해서 내력과 설계법 등이 확인된 방법이다.

일본에서 B방법의 유효성을 알아보기 위해, 직경 600mm 강관말뚝과 가상 철근콘크리트 기둥(D32 철근 14개)의 휨내력을 비교하였는데, 그 실험 결과는 그림 4와 같다. 그림 4와 같이 B방법에서 가상 철근콘크리트 기둥의 내력은 말뚝 본체의 내력과 거의 비슷한 추이를 보이고 있다. 그리고 보강철근량을 증가시켜 가상 철근콘크리트 기둥의 내력을 키울 수 있기 때문에, B방법의 경우에도 말뚝머리 결합부가 설계 조건을 제한하지 않고 충분히 A방법과 같은 보편성을 확보할 수 있다.

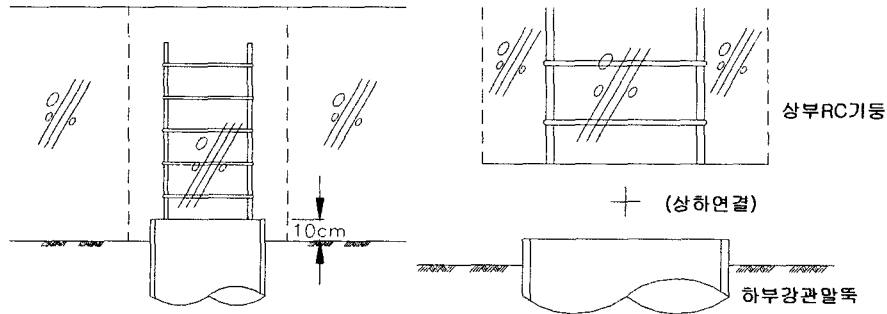


그림 3. B방법의 기본 개념과 상하 연결

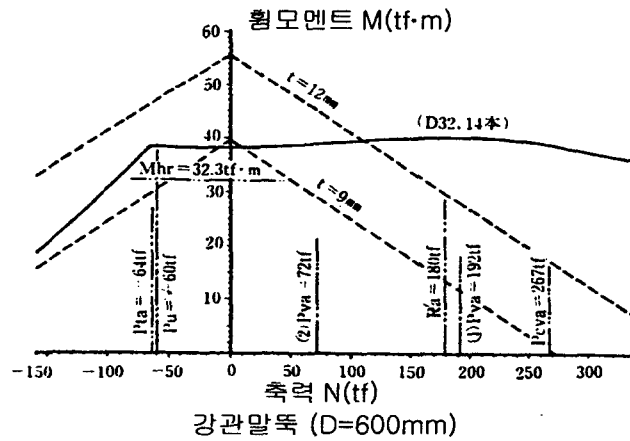


그림 4. 강관말뚝과 RC기둥의 휨내력 결과 비교(岡原美知夫 외 1991)

따라서, B방법은 역학적 메카니즘상 다음과 같은 본질적 특징을 갖게 된다. 즉, (가상의) 원형 철근콘크리트 기둥의 휨내력으로 휨모멘트에 저항하고, 말뚝과 확대기초 상호간에 외력을 확실하게 전달하기 위해서는 (가상의) 원형 철근콘크리트 기둥과 강관말뚝이 일체로 연결되어야 한다. 이를 위해서는 양쪽을 연결해주는 연결 구조가 반드시 필요하고, 이 연결 구조가 말뚝의 설계 조건을 제한하는 요인이 되지 않으려면 가상 철근콘크리트 기둥과 동등 이상의 휨내력을 확보해야 한다. 이를 수학적으로 개념으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{「RC기둥의 허용내력} \leq \text{연결구조의 허용내력} \leq \text{강관말뚝의 허용내력」}$$

이는 B방법이 개발되어 보편적으로 사용될 수 있었던 기본 전제로서 매우 중요한 의미를 갖고 있다. 국내외에서 개발된 각종 B방법에 대한 구조적인 유효성을 이를 통해 평가할 수 있다.

4. 합성형 두부보강방법의 연결부 휨내력

4.1 연결부 설계 방법

합성형 볼트식은 강재 결합구의 상판과 강관말뚝이 볼트로 연결되며, 상판은 속채움 콘크리트에 정착된 지지철근에 연결되어 있어, 볼트와 지지철근이 인장력을 함께 부담하는 구조이다. 단, 지지철근은 '지지철근의 인장력 < 부착력'의 조건을 만족하도록 과소 철근 개념으로 고안되어 있다.

합성형 볼트식의 허용휨모멘트는 볼트와 지지철근의 허용휨모멘트의 합으로서 도로교설계기준(2000)을 기준으로 하여 다음 식과 같이 계산한다. 단, 지지철근의 허용휨모멘트는 일반적으로 지지철근 4개를 사용하므로 이에 대한 것이다.

(1) 볼트의 허용휨모멘트 (M_{1a})

$$M_{1a} = \rho_a \times D \times \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \quad (1)$$

여기서, ρ_a : 볼트 1개의 허용력 (tonf), D : 강관말뚝의 직경 (m)
 $\sum_{i=1}^n$: 중심축 기준으로 한쪽 편에 있는 볼트 개수의 합
 θ_i : 중심축과 직교하는 축으로부터 각각의 볼트까지의 각도

(2) 지지철근의 허용휨모멘트 (M_{2a})

$$M_{2a} = F_{sz} \times L \quad (2)$$

여기서, F_{sz} : 지지철근 1개의 허용인장력(tonf)
 L : 중심축 기준으로 지지철근 상호간의 거리(m)

따라서 축하중과 휨모멘트가 동시에 작용하는 경우에는 P-M 상관도를 이용하여 연결부를 검토한다. P-M 상관도를 이용하여 연결부의 내력을 검토하는 방법은 다음과 같다(그림 5 참고).

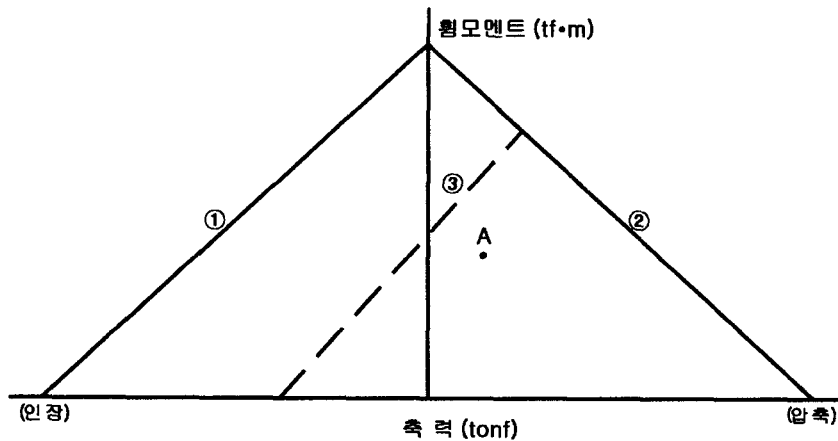


그림 5. P-M 상관도 예시

- 1) 강관말뚝 본체와 볼트 연결부의 허용인장력과 허용휨모멘트를 각각 세로축과 가로축에 표기한다.
- 2) 강관말뚝 본체의 허용내력의 범위를 도시한다(직선 ①, ②).
- 3) 볼트 연결부는 인장축과 압축축이 다르고, 압축축에서 허용내력의 범위가 넓으므로, 1차 함수의 그래프를 연장하여 그린다(직선 ③).
- 4) 말뚝머리에 작용하는 외력의 좌표값(최대 휨모멘트와 최대압축력 또는 최소압축력)이 P-M 상관도에서 직선 ③의 안에 위치하게 한다.

합성형 용접식은 강제 결합구의 상판에 45°의 경사각을 갖는 홈부분과 강관말뚝을 용접하여 강제 결합구와 강관말뚝을 연결시키므로, 용접내력으로 휨모멘트에 저항한다. 45° 홈용접은 강관말뚝 본체 이음시 적용되는 방법이다. 현행 규정상 말뚝 이음의 경우, 용접 강도는 강관 본체 강도의 95%를 적용하고 있다. 강관말뚝 본체는 지반과 접하는 부분인 바깥면에 대하여 부식 단면적(2mm)을 공제하면 강관 본체 강도의 80% 정도이다. 연결부가 확대기초 내에 매입되어 부식의 우려가 없으므로 강관말뚝 본체 강도의 95%를 적용하더라도 부식 단면적을 공제한 강관말뚝 본체의 강도보다 크기 때문에 별도의 검토를 생략할 수 있다.

4.2 연결부 휨내력 실험

강관말뚝 두부보강방법의 연결부에 대한 휨내력을 측정하고, 앞서의 제안된 설계식의 타당성을 검증하기 위하여 포항산업과학연구원의 강구조연구소에서 순수 휨시험을 행하였다. 연결부에 순수 휨모멘트만 작용하도록 하기 위하여, 실험 방법으로 '2점 재하 방식'을 채택하였다. 이 경우, 부재의 중앙부(연결부)에는 전단력이 작용하지 않고 순수 휨모멘트만 작용하기 때문이다. 그리고 이 조건에 부합하도록 2개의 결함구를 서로 대칭으로 맞대어 용접하였다(그림 6 참고). 각 실험 부재의 제원은 표 4와 같으며, 각 시편의 모습은 그림 6에 제시하였다.

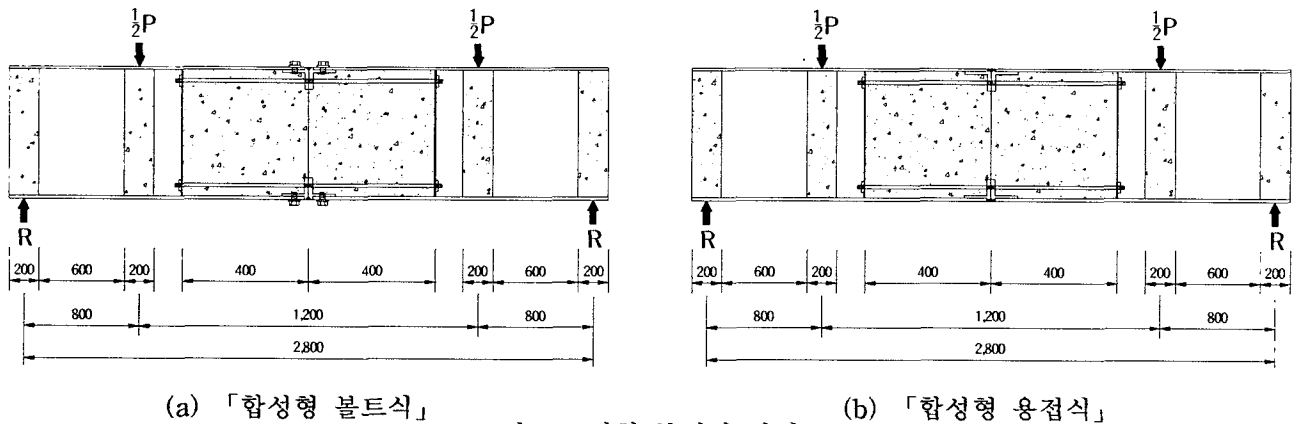


그림 6. 실험 부재의 단면도

표 4. 실험 부재의 제원

부재	구분	강관말뚝(mm)	연결	특징	기타
합성형 용접식		D406.4 (t=9)	용접 연결	45° 홈용접	강재 결함구
합성형 볼트식		D406.4 (t=9)	볼트 연결	M16 볼트, 8개	"

표 5. 재료의 내력(계산치)

구분	극한휨모멘트 (tf·m)	허용휨모멘트 (tf·m)	기준 응력 (kgf/cm ²)
1) 강관말뚝(D=406.4, t=9mm)	44.8	15.3	인장강도 4,100, 허용응력 1,400 기준
2) 고장력 볼트(M16×8개)	10.6	3.1	전단강도 6,500, 허용응력 1,900 기준
3) 지지철근 (D22×4개)	5.5	1.8	인장강도 4,500, 허용응력 1,500 기준
4) 2)+3)	16.1	4.9	

표 6. 실험부재의 휨실험 결과

구분	극한휨모멘트 (tf·m)	허용휨모멘트 (tf·m)	파괴 모드
합성형	용접식(45°홈용접)	55.0	강관말뚝 일부항복
	볼트식(M16×8개)	20.0	볼트 전단파괴

휨에 대한 재료 자체의 내력은 표 5와 같고, 각 보강 방법에 따른 실험 결과는 표 6과 같다. 표 5와 표 6를 비교해 보면, 합성형 용접식의 경우에는 강관말뚝의 허용휨모멘트보다 3tf·m 더 큰 휨모멘트를 받을 수 있으므로 매우 효과적인 보강 방법임을 알 수 있다. 본 효과는 강관말뚝의 머리부를 콘크리트를 충전함으로써 발생하는 합성효과에 의한 것으로 판단된다.

합성형 볼트식의 휨내력은 고장력 볼트만의 휨내력과 비교할 때 약 2배 정도 더 크다. 그리고, 앞서 제안한 허용휨모멘트에 대한 설계식과 비교하면 약 27% 정도 더 큰 내력을 발휘함을 알 수 있다. 이는 지지철근을 과소 철근 개념으로 설계한 때문이다. 따라서 앞서 제안된 설계식이 안전측이면서 유효한 것으로 판단된다.

한편 상기 연결부의 제원으로는 강관말뚝보다 내력(50% 정도)이 작으나, 합성형 볼트식에서는 하중 조건에 따라 볼트의 수량을 증가시킬 수 있으므로 강관말뚝의 내력에 대응하도록 볼트를 배치할 수 있는 유리한 점이 있다.

5. 합성형 두부보강방법의 압축내력

5.2 확대기초 콘크리트의 지압내력

속채움 콘크리트 방법에서 압축력을 강관말뚝으로 전달하는 미끄럼 방지턱 2개의 단면적은 전체 단면적($\pi D^2 \div 4$)의 약 12%~17% 이나, 강관말뚝에 의한 구속효과에 의해 속채움 콘크리트가 3축응력상태이기 때문에 강관말뚝 본체의 내력 정도의 압축력을 지지할 수 있게 된다.

합성형 방법에서는 강재 결합구 상판, 지지철근, 보강철근을 통해 압축력을 말뚝 본체로 전달시키는데, 강재 결합구 상판의 단면적은 기성 콘크리트 말뚝에서와 같이 말뚝의 전체 단면적의 약 50%이다.

충전 콘크리트의 부착력을 무시하고, 강재 결합구 상판의 순단면적만으로 압축력을 지지한다고 할 때, D406.4, t=9mm인 강관말뚝(허용압축력 123톤)의 경우, 상판의 지압력으로 82.8톤, 최소 보강철근량(D19, 8개)으로 34.0톤, 지지철근(D22, 4개)으로 23.2톤을 전달하여 총 140톤을 지지할 수 있다. 이는 최소값으로 지지철근의 수량 및 보강철근의 수량을 증가시키면 더 큰 압축력을 지지할 수 있으며, 부착효과를 고려하면 더욱 안전측이 된다.

합성형 두부보강 방법의 지압내력 특성을 파악하기 위하여 건설기술연구원에서 실규모의 압축시험을 행하였다(그림 7 참고). 확대기초 콘크리트의 지압응력은 표 7과 같이 강관말뚝(D406.4, t=9mm)의 최대 허용하중인 123톤이 작용하더라도 콘크리트의 허용지압응력 내에 존재하며, 지압에 의한 응력집중도 합성작용으로 인해서 상당히 완화된다. 따라서 합성형 방법에서도 속채움 콘크리트 방법에서와 같이 지압면적을 강관말뚝의 전체 단면적으로 할 수 있을 것으로 판단된다.

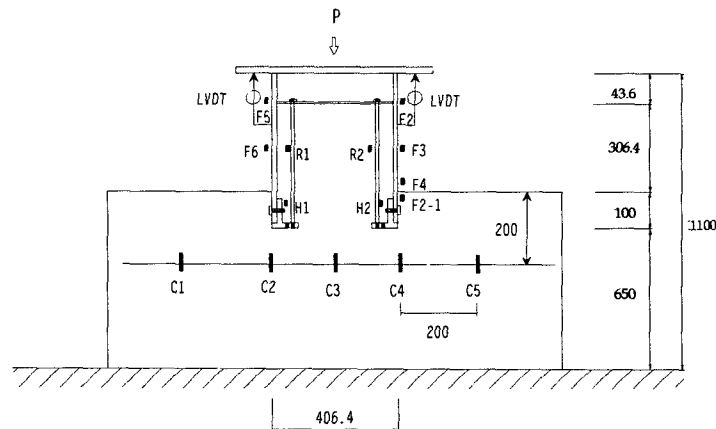


그림 7. 시험 부재의 제원 및 확대 기초 콘크리트의 지압응력 측정 위치

표 7. 확대기초의 지압응력 측정치

하중(톤)	지압응력(kgf/cm ²)				비 고
	C1	C2	C3	C4	
100	2.76	14.26	2.53	16.1	콘크리트의 허용지압응력 120kgf/cm ²
123(강관 허용하중)	4.26	17.37	3.11	20.47	
213(강관 항복하중)	9.66	29.79	4.95	37.26	

5.3 압축하중 분담 메카니즘

합성형 방법의 압축하중 분담 메카니즘을 파악하기 위하여 범용 유한요소 프로그램인 DIANA-7을 이용하여 수치해석을 하였다. 강관말뚝의 상부에 강관말뚝의 최대허용하중인 123톤의 압축력을 가하였을 때, 부착을 무시한 경우 강관말뚝과 콘크리트가 받는 응력 및 단면력을 환산하면 표 8과 같다.

표 8. 합성형 두부보강 방법의 압축 부재의 하중분담(부착력을 무시한 경우)

구 분	응력(kgf/cm ²)	단면력(tonf)	비 고
강관말뚝	852.8	98.0	허용응력 =1,400kgf/cm ²
콘크리트	19.3	25.0	허용압축응력 =60kgf/cm ²

강관말뚝과 충전 콘크리트의 부착력을 완전히 무시하더라도 충전 콘크리트에 작용하는 압축력은 25.0톤 정도이다. 강재 결합구의 지지철근(D22-4개)에 의해 부담할 수 있는 압축하중이 23.2톤이므로 약 1.8톤 정도만을 보강철근으로 전달하면 된다는 것을 알 수 있다. 보강철근에 의해서 결합구 상판으로 전달할 수 있는 압축력이 최소 철근량(D19, 8개)을 기준으로 할 때, 약 34.0톤 정도이므로 합성형 두부보강 방법은 부착력을 고려하지 않더라도 압축력에 대하여 충분히 안전함을 알 수 있다. 따라서 합성형 방법에서는 속채움 콘크리트 방법에서 이용되는 미끄럼 방지턱을 설치할 필요가 없을 것으로 판단된다.

6. 결 론

합성형 두부보강 방법의 연결부에 대한 실규모의 휨내력 실험과 지압내력 실험 및 수치해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 합성형 볼트식의 허용휨모멘트는 볼트와 지지철근의 허용휨모멘트의 합으로서 볼트와 지지철근의 허용휨모멘트를 계산하는 식을 제안하였다. 제안된 계산식과 실규모 휨내력 실험결과를 비교하여 제안된 계산식이 안전측이면서 유효한 것으로 판단되었다.
- (2) 합성형 용접식은 현장용접에 의한 내력의 감소분을 고려하더라도 부식의 우려가 없어 부식을 고려한 강관말뚝 본체의 휨내력보다 크며, 이는 실규모 휨내력 실험 결과로도 검증이 되었다.
- (3) 합성형 두부보강 방법의 연결부를 설계하는 방법으로서 축력과 휨모멘트(P-M) 상관도를 이용하는 방법을 제안하였다.
- (4) 합성형 두부보강 방법에서 확대기초 콘크리트의 지압면적은 강관말뚝의 전단면적으로 할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 합성형 두부보강 방법에서는 속채움 콘크리트 방법에서 이용되는 미끄럼 방지턱의 역할을 강재결합구가 대신하므로 미끄럼 방지턱을 설치할 필요가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한토목학회(2001), 도로교설계기준 해설(하부구조편), pp. 287~300.
2. 오성남, 심창수, 유제남, 홍성영(2001), 강재결합구를 이용한 강관말뚝 합성형 두부결합 방법, 한국지반공학회 2001 봄학술발표회 논문집, pp. 323~330.
3. 한국도로교통협회(2000), 도로교설계기준, pp. 28~29, pp. 96~97.
4. 岡原美知夫, 中谷昌一, 田口敬二(1991), 杭頭部とフーチングの結合部の設計法の合理化, 土木技術資料, Vol. 33-8, pp. 41~48.
5. 大志万, 和也, 佐藤幸男(1985), 杭基礎とフーチング結合部の設計, 基礎工, 11月, pp.106~112.
6. 和田克哉(1994), 土木における杭頭處理の方法について, 基礎工, 7月, pp. 56~65.