

## 미끌림 방지턱을 이용한 강관말뚝 머리 결합부의 구조특성에 관한 실험적 연구

### The Structural Characteristics of Non-slip Device in Connecting Method Between Steel Pipe Pile and Footing

박 영 호\*<sup>1</sup> Park, Young-Ho

김 낙 영\*<sup>2</sup> Kim, Nag-Young

#### Abstract

To find the structural characteristics of non-slip device in connecting method B between steel pipe pile and concrete footing, compression and uplift test was performed for full sized specimens not having non-slip device, those having non-slip device with two curved steel plate bars welded inside the steel pipe pile(standard method), and those having non-slip device with several curved steel plate bars bolted inside the steel pipe pile(new method). As a result, specimens not having non-slip device had chemical debonding failure at 15.6tonf of peak uplift load and 27.57tonf of peak compression load. And the standard method and the new method showed about 8.9 times of peak uplift load and 6.2 times of peak compression load higher than specimens not having non-slip device. The load transfers of lower non-slip devices of the standard method and the new method were similar in behavior, while the higher non-slip device of the new method showed higher ratio of load transfer than that of the standard method. And these two methods had nearly the same composite action and structural capacity caused by non-slip devices.

#### 요 지

강관말뚝의 속채움 콘크리트 B방법에서 미끌림방지턱의 구조적인 특성을 알아보기 위하여, 강관말뚝머리의 내부에 미끌림방지턱을 설치하지 않은 시험체와 2단의 곡률 강편 미끌림방지턱을 강관말뚝내부에 용접한 시험체(시방서 방법), 그리고 미끌림방지턱을 다수의 곡률 강편과 고장력볼트로 체결한 시험체(개발형 방법)에 대하여 실물크기 인발 및 압발 실험을 수행하였다. 그 결과, 미끌림방지턱이 없는 시험체는 최대인발하중 15.6tonf에서, 최대압발하중 27.57tonf에서 콘크리트의 화학적 부착파괴가 발생하였다. 그리고 미끌림방지턱이 있는 시방서 방법과 개발형 방법의 시험체는 없는 시험체보다 최대인발하중의 약 8.9배와 최대압발하중의 6.2배 크게 나타났다. 또한 시방서 방법과 개발형 방법의 하단 미끌림방지턱에 대한 하중분담비율은 거의 동일한 거동을 보인 반면에, 상단 미끌림방지턱은 시방서방법보다 개발형 방법의 하중분담비율이 크게 기여하였다. 그리고 시방서 방법과 개발형 방법의 미끌림방지턱 형상에 의한 합성작용과 구조성능은 거의 동일하였다.

**Keywords :** Composite action, Connecting method B, New method, Non-slip device

\*1 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 수석연구원 (Member, Research Director, HTTI, KHC, 1026@freeway.co.kr)

\*2 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 지반연구그룹 책임연구원 (Member, Chief Researcher, HTTI, KHC)

## 1. 서론

상부구조물에서 작용하는 하중은 변위법으로 각 말뚝 옆에 하중을 분배한다(대한토목학회, 2001). 큰 단면적을 가진 확대기초에서 작은 단면적을 지닌 말뚝머리부로 하중이 전이될 때 확대기초 콘크리트와 말뚝머리부에 응력이 집중된다. 이 응력을 원활히 전달할 수 있도록 확대기초와 말뚝이 접하는 부분을 보강하여야 한다.

도로교표준시방서(1983, 1996)와 도로교설계기준해설(2001)에 제시된 확대기초와 말뚝머리부의 결합방법 즉, 말뚝머리보강 방법은 방법 A와 방법 B가 있다. 방법 A는 확대기초 내에 말뚝지름 이상의 길이를 매입하여 말뚝머리부에 작용하는 하중을 매입된 말뚝길이 저항하는 방법이고, 방법 B는 확대기초 내에 말뚝길이 10cm만 매입하고 말뚝머리부에 작용하는 하중을 이형철근이 저항하는 방법이다. 도로교표준시방서(1983, 1996)와 도로교설계기준해설(2001)의 결합 형태는 각각 '용접식 원형뿔개관 방법'(건설부, 1983)과 '용접식 속채움 콘크리트 방법'(건설교통부, 1996; 대한토목학회, 2001)이 있다. 용접식 원형뿔개관 방법은 말뚝머리부의 절단면 내와 위에 각각 십자보강판과 원형뿔개관을, 말뚝측면에 이형철근을 용접하여 보강한다. 그리고 용접식 속채움 콘크리트 방법은 말뚝내부에 타설하는 콘크리트와 강관말뚝의 합성효과를 위하여 미끌림방지턱을 강관말뚝 내부에 2단으로 현장용접하고, 말뚝내부에 이형철근 바구니를 삽입한 뒤, 말뚝내부에 일정한 깊이 만큼을 콘크리트로 타설하여 보강한다. 또한 용접식 속채움 콘크리트 방법처럼, 미끌림방지턱을 강관말뚝내부에 현장용접을 실시하지 않고, 상단에 곡률로 가공한 평강 절편과 하단에 L자형 강재절편의 미끌림방지턱을 강관말뚝과 고장력 볼트(F10T)로 체결하고, 말뚝내부에 이형철근 바구니를 설치하는 방법을 '볼트식 속채움 콘크리트 방법'이라 한다(박영호 등, 2002).

용접식 속채움 콘크리트 방법에서 사용하는 미끌림방지턱과 속채움 콘크리트는 이들의 합성작용으로 용접식 원형뿔개관 방법에서 사용하는 원형뿔개관의 역할을 하게 된다(大志万 등, 1985).

따라서 강관말뚝 머리보강 B방법에 대하여 강관말뚝 머리보강 설계에서 가장 기본이 되는 축방향 인발하중과 압발하중에 대하여, 용접식과 볼트식 속채움 콘크리

트 말뚝머리 결합부의 구조거동 특성을 평가하고, 강관내부에 설치한 미끌림방지턱의 하중전달 특성을 실험적 방법으로 평가하고자 한다.

## 2. 말뚝머리 결합방법의 종류와 특징

### 2.1 결합방법의 종류

기초와 말뚝기초간의 결합조건은 표 1과 같이, 설계기준 및 관련 시방서에서 상세설계와 시공방법 등을 제시하고 있다(若命善雄 등, 1989). 이러한 말뚝머리결합방법은 표 2와 같이, 크게 강결합과 힌지결합으로 구분한다(和田克哉, 1994). 그러나 구조물기초설계기준(건설교통부, 1997)에서 말뚝과 기초 푸팅의 연결, 말뚝 이음부 등이 확실히 시공되어야 한다고 명시하고 있으며, 도로교설계기준해설 하부기초편(대한토목학회, 2001)에서는 말뚝과 확대기초의 결합부는 말뚝머리 고정으로 설계하고, 결합부에 생기는 모든 응력에 대해 안전하도록 설계하여야 한다고 명시하고 있다.

일반적으로 토목구조물은 그림 1과 표 3과 같이, 구조물의 안전성과 변위에 대한 문제를 고려하여 강결합 방법(방법 A과 방법 B)으로 설계한다. 그리고 확대기초 하부철근의 시공성을 고려하여 방법 B를 일반적으로 많이 사용하고 있다(福井次郎, 1992). 간혹 건축구조물 관계 기준에서는 말뚝기초와 확대기초간의 결합조건이나 이에 따른 결합방법이 제시되어 있지 않아 토목관계 기준들을 따르고 있는 실정이다.

표 1. 강관말뚝 관련 설계기준의 목록

국가, 기관, 협회	기 준 명	
일 본	일본도로협회	道路橋示方書・同解説(IV.下部構造編) 杭基礎設計便覧
	토질공학회	杭基礎の設計法とその解説
	일본건축학회	建築基礎構造設計指針
		建築鋼ぐい基礎設計施工規準・同解説
	토목학회	遠心力大徑プレストレストコンクリート 杭設計施工指針(案)
	일본도로공단	設計要領 第二集 第六編
	일본항만협회	港灣の施設の技術上の規準・同解説
일본 철도시설협회	建造物設計標準解説	
한 국	건설교통부	구조물기초설계기준(1997)
	대한토목학회	도로교설계기준(하부구조편)(2001)
	한국도로공사	설계시공표준도(시방서)(1998)

표 2. 강결합과 힌지결합의 특징

구분	강결합	힌지결합
수평하중에 의한 말뚝의 지표면 수평변위량	수평변위량이 작고, 확대기초가 회전하지 않는 경우에는 힌지결합의 1/2이다.	수평변위량은 강결합의 경우보다 크다.
수평하중에 의한 말뚝 본체에 발생하는 휨모멘트	말뚝본체의 최대휨모멘트가 크고, 말뚝머리부에서 발생한다. 지중에 매입된 말뚝에서 확대기초가 회전하지 않는 경우에는 힌지결합의 1.55배이다.	말뚝본체의 최대휨모멘트는 강결합의 경우보다 작고, 비교적 얇은 지중부에서 발생한다.
말뚝기초의 구조특성	힌지결합에 비해서 부정정 차수가 크다.	강결합에 비해서 부정정 차수가 작다.
결합방법의 실적	많은 실험·연구에 의해 설계법이 제안되고, 시공실적이 많다.	주로 경험에 의해 설계되고, 교량기초에서의 시공실적이 작다.

표 3. 강관말뚝의 속채움 콘크리트 머리 결합방법의 구조상세

구분	방법 A	방법 B
도로교설계 기준해설 하부구조편 (2001)		

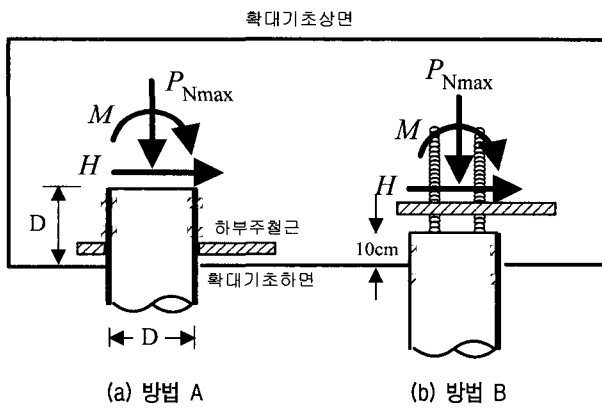


그림 1. 말뚝머리 결합방법

2.2 결합방법의 특징

강결합 방법은 그림 1과 같이, 방법 A와 방법 B로 구

분하고 있는데, 방법 A는 확대기초내의 말뚝 근입깊이가 강관말뚝 직경 이상이며, 방법 B는 근입깊이가 10cm 정도로 매우 얇다. 표 4는 이들 결합방법의 특징을 정리한 것이다(和田克哉, 1994). 그러나 일본과 한국에서 몇 차례의 설계기준의 변경을 거치며 방법 B의 연결방법을 보편적으로 적용하고 있는데, 이는 표 4의 내용과 같이 현장시공성에 의한 작업성 문제, 경제성, 공사기간 등의 측면에서 유리하기 때문이다.

국내 설계기준·시방서에서 제시하는 강결합 방법은 1983년부터 그림 2와 같은 강관말뚝 용접식 원형뿔개관 방법, 1997년부터 그림 3과 같은 볼트식 원형뿔개관 방법(박영호 등, 1998), 1996년부터 표 3과 같은 용접식 속채움 콘크리트 방법, 그리고 2001년부터 그림 4와 같은 강관내부에 다수의 곡률 강재절편의 미끌림방지력을

표 4. 강결합방법 중 방법A와 방법B의 특징

구분	방법 A	방법 B
휨모멘트에 대한 강결도	강결도는 방법B에 비해서 높고, 인발력이든 압발력이든 차이가 없음	강결도는 방법A에 비해서 낮고, 인발력의 경우가 압발력의 경우보다도 낮음
확대기초 하부 주철근	확대기초 하부 주철근이 절단되기 때문에 보강철근이 많이 필요하게 되며, 배근이 복잡함	확대기초 하부 주철근이 절단되지 않기 때문에 배근이 단순하게 됨
확대기초 두께	확대기초의 두께는 말뚝머리부의 편칭전단에 대응하는 두께가 필요하게 되어 방법B보다 크게 됨	확대기초의 두께는 말뚝머리부의 편칭전단 및 보강철근의 정착 등에 의해 요구되는 두께로, 방법A보다 작게 됨

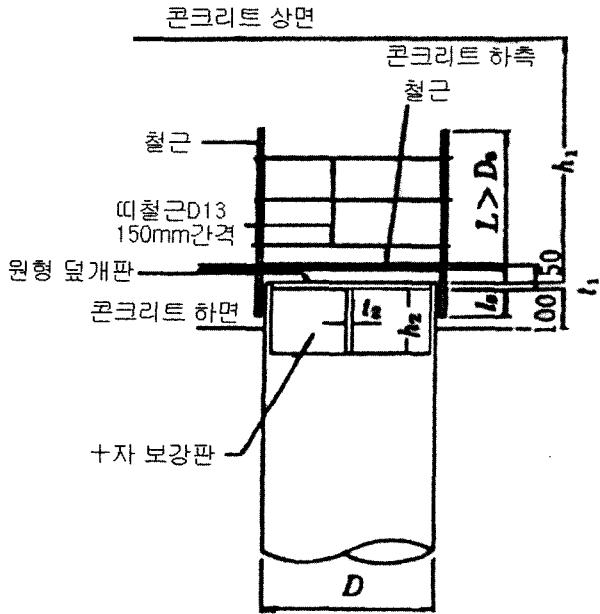


그림 2. 용접식 원형덮개판 방법

용접하지 않고 고장력볼트로 체결하여 콘크리트를 충전하는 볼트식 속채움 콘크리트 방법으로 구분된다. 이러한 결합방법의 변화 즉, 덮개판 방법에서 속채움방법으로 시방서 변경은 시공성, 경제성, 구조 안정성 등을 고려하여 이루어 졌다.

그림 2의 용접식 원형덮개판 방법은 표준적인 강결합 방식으로 오랜세월 이용되어 왔지만, 말뚝 시공기술 향상에 의해 말뚝의 대경화(大徑化) 등에 따라 다음과 같

은 기술적인 문제점이 지적되었다(福井次郎, 1992).

- ① 말뚝머리부에 설치된 원형덮개판은 말뚝머리부의 지압응력을 균등화를 하기 위해 설치한 것이지만 그 효과는 명확하지 않다. 특히 큰 지름의 말뚝에서 문제가 되었다.
- ② 방법 B에서, 말뚝머리부에 보강철근은 말뚝 외측면에 용접해서 설치하지만, 철근은 본래 용접용이 아닌 일반강이다. 또한 시공현장은 흙, 물 등이 말뚝에 부착되기도해 용접조건이 나쁘고, 게다가 용접위치가 낮아 작업조건이 나쁜 문제가 있다.
- ③ 위의 ①과 ② 모두 관련되지만, 원형덮개판과 보강철근의 설치작업이 번잡하고 시공성도 좋지 않기 때문에 좀더 간단한 결합 방법이 없는가? 하는 점이다.

이러한 문제점을 극복한 것이 표 3과 같은 현장 용접식 미끌림방지턱 속채움 콘크리트 방법이다. 이 방법 또한 말뚝머리 내부에 2단의 미끌림방지턱을 현장 용접하는 번잡한 문제가 있다. 본 논문에서는 이 부분을 개선하기 위하여 2단의 미끌림방지턱을 현장용접하는 대신에 다수의 곡률 강제절편을 강관말뚝에 고장력볼트로 체결하는 방법을 연구하게 되었다.

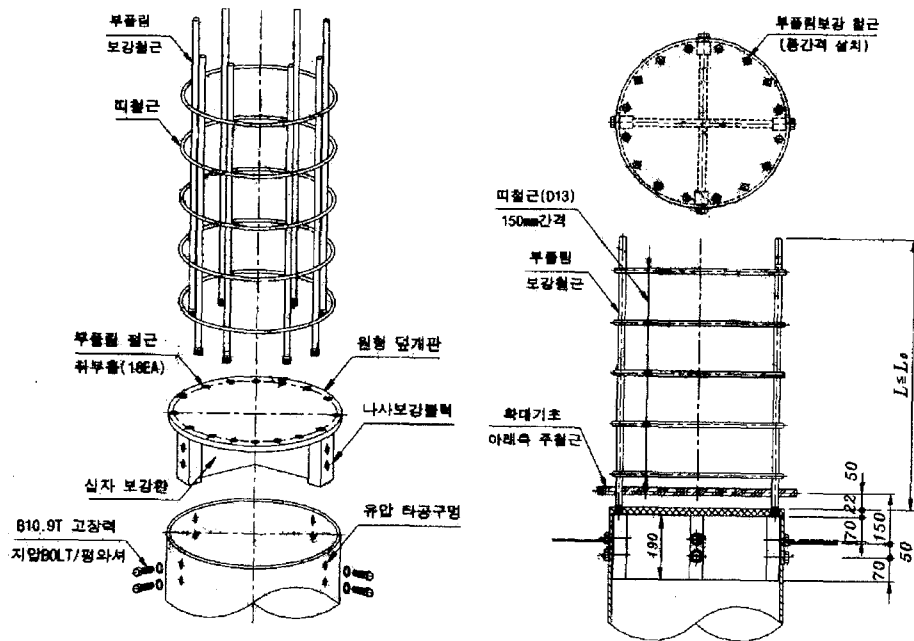


그림 3. 볼트식 원형덮개판 방법

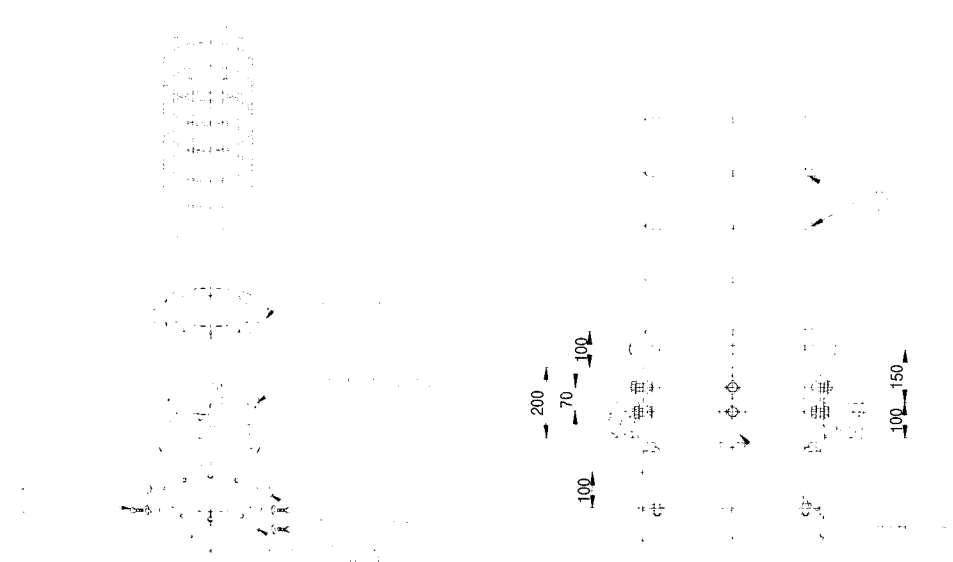


그림 4. 볼트식 속채움 콘크리트 방법

### 3. 미끌림방지턱

#### 3.1 필요성

福井次郎(1992)과 大志万 등(1985)은 미끌림방지턱의 필요성과 중요성을 알아보기 위하여, 말뚝머리 보강 방법 A에 대하여 연직재하시험을 실시하였다. 그 결과는 그림 5와 같다. 이 그림에 의하면, 말뚝머리 결합부

모형에 100tonf의 연직재하시에 말뚝머리부 바로 아래에 있는 확대기초 콘크리트 10cm 위치에서 발생하는 연직지압응력 분포를 나타내고 있다. 이 그림에서 강관말뚝 머리부에 원형덮개판이 있는 시험체 A-1과 원형덮개판이 없고 속채움 콘크리트를 타설한 시험체 A-3(강관 두께 6.4mm)와 A-5(강관두께 14.3mm)의 결과를 나타내고 있다.

원형덮개판이 있는 시험체 A-1의 지압응력분포는 강관 순두께 부분 바로 아래에서 최대값이 발생하였고, 원형덮개판 중부심 바로 아래에서는 가장 작게 나타났다. 이를 통해 원형덮개판의 효과가 없음을 제시하였다. 이 거동과 달리, 원형덮개판이 없는 시험체 A-3, A-5의 연직지압응력분포는 비교적 균등하게 발생하였고, 최대값도 원형덮개판이 있는 경우에 비해 작게 나타났다. 이는 원형덮개판이 있는 시험체는 강관 외면과 콘크리트와의 부착만이 발휘되기 때문에 강관 순두께 부분의 지압응력이 크게 나타났고, 원형덮개판이 없는 시험체는 강관 내·외면에서 충분한 부착이 발휘되기 때문에 강관 순두께 부분의 지압응력이 작게 나타났다.

이상의 결과로부터, 원형덮개판은 말뚝머리부의 인발력에 저항하지 못하지만, 용접식 속채움 콘크리트 방법은 강관과 콘크리트와의 부착에 의한 인발력에 효과적으로 저항할 수 있다고 판단하였다. 그러나 강관과 콘크리트와의 부착은 콘크리트의 건조수축과 진동 등에 의해 쉽게 떨어지고, 한번 떨어지면 그 후의 하중전달은 기대할 수 없기 때문에 미끌림방지턱을 통해 연직하중 또는 수직력을 전달시키는 것이 필요하다고 강조하였

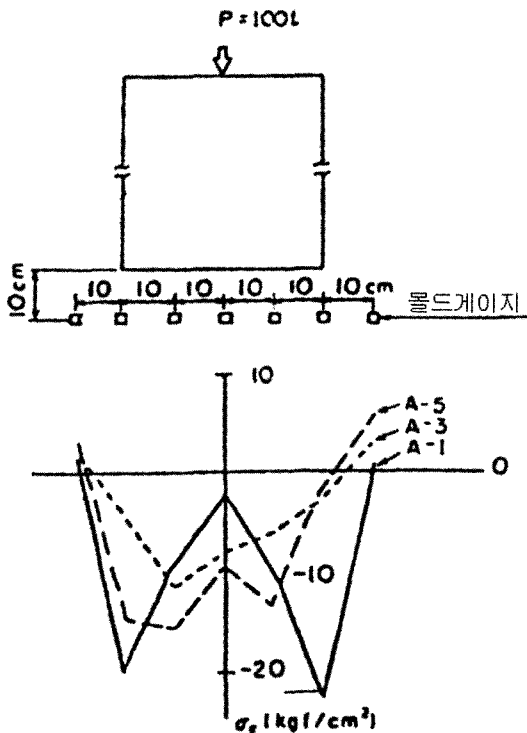


그림 5. 확대기초콘크리트 연직지압응력분포(방법 A)

다. 그래서 원형덮개판 대신에 미끌림방지턱 등을 작업성을 고려하여 말뚝본체 상부측에 설치해 말뚝내부로 전달되는 연직하중 또는 수직력을 말뚝본체로 전달시키는 방법을 생각해 되었다(福井次郎, 1992; 大志万 등, 1985).

### 3.2 말뚝머리 결합부의 인발내력 평가

岡原美知夫 등(1991)은 미끌림방지턱의 효과를 알아보기 위하여, 강관말뚝 머리보강 방법A에 대하여 그림 6과 같이 실험을 실시하였다. 실험방법은 직경 400mm에 설치한 미끌림방지턱의 두께, 단수, 위치를 변화시키면서 7가지 경우에 대하여 실시하였으며 그 결과는 그림 7과 표 5와 같다.

표 5에 언급한 미끌림 발생하중은 강관과 확대기초 콘크리트와의 상대변위가 인지되기 시작한 하중을, 균열발생하중은 확대기초 콘크리트 표면에 부착한 게이지 값이 급증한 하중을, 파괴하중은 최대하중을 나타내고 있다.

Case2, Case3, Case6과 같이 1단의 미끌림방지턱을 설치한 경우, 확대기초 표면에서 미끌림방지턱의 위치가 깊으면 깊을수록 파괴하중이 더 크게 나타났다. 그리고 Case1~Case7에 의하면, 미끌림방지턱을 설치하지 않는 경우의 파괴하중은 설치한 것 보다 현저히 작은 값을 보였다. 또한 미끌림방지턱의 1단과 3단의 미끌림 발생하중은 거의 동일하지만, 2단은 1단과 3단의 미끌림 발생하중보다 더 큰 하중크기를 보였다.

그리고 1단의 파괴하중은 미끌림방지턱의 위치가 깊으면 깊을수록 큰 저항력이 발생하지만 설치 및 시공에 문제점이 발생할 수 있다. 2단에서는 미끌림방지턱의 사이가 넓어질수록 더 큰 힘이 발생함을 보였다. 따라서 방법A의 미끌림방지턱은 말뚝 내·외면에 2단을, 방법B는 말뚝내부에 2단을 각각 설치하는 것을 표준으로 하였다. 또한 하중전이는 확대기초의 콘크리트가 강관 내·외로 둘러싸고 있는 부착력이 발휘된 후에, 미끌림방지턱의 효과가 발휘되고, 그 다음에 콘크리트내의 균열이 진전되면서 강관과 확대기초 콘크리트간의 상대변위가 커진다고 하였다.

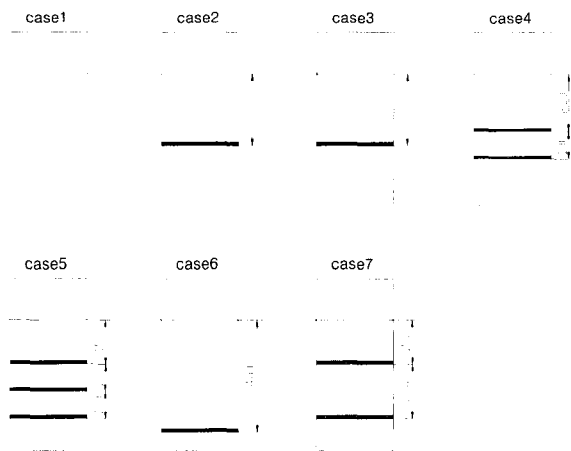


그림 6. 시험체의 종류

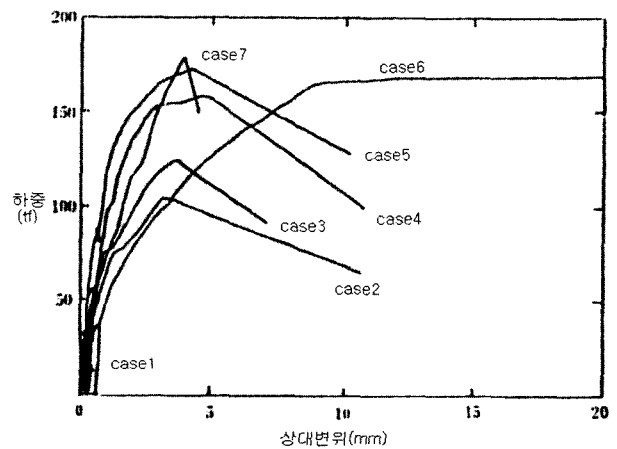


그림 7. 하중-상대변위 관계

표 5. 시험의 제원과 결과

구분	미끌림 방지턱의 두께 (mm)	미끌림 방지턱의 단수	미끌림 방지턱의 위치 (확대기초 표면에서 깊이) (mm)	콘크리트 일축압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	미끌림 발생하중 (tonf)	균열 발생하중 (tonf)	파괴하중 (tonf)
Case 1	-	0	-	275	22.4	-	22.4
Case 2	6	1	250	279	25.0	75.0	107.5
Case 3	12	1	250	278	30.0	75.0	126.5
Case 4	6	2	200/300	240	32.6	100.0	161.7
Case 5	6	3	150/250/350	252	27.5	90.0	175.3
Case 6	6	1	400	270	27.5	130.0	179.9
Case 7	6	2	150/350	318	33.5	55.0	180.0

### 3.3 설치 위치

岡原美知夫 등(1991)의 실험결과에 의하면, 1단과 3단 보다는 2단으로 미끌림방지턱을 설치하는 것이 좋으며, 미끌림방지턱의 사이가 넓어질수록 더 큰 힘이 발생한다고 하였다. 福井次郎(1992)는 용접식 속채움 콘크리트 결합방법에 사용하는 미끌림방지턱의 현장용접에 대한 시공성을 알아보기 위하여, 그림 8과 같이 실험크기 실험을 하였다. 그 결과는 그림 9와 같이 나타났다.

상기 그림에 의하면, 용접식 속채움 콘크리트 방법의 상부 미끌림방지턱은 말뚝머리부에서 D/4 위치에, 하부 미끌림방지턱은 D/2 위치에 설치하면, 시공성이 확보됨을 나타내고 있다. 여기서 D는 말뚝의 외경이다. 또한 미끌림방지턱을 설치한 말뚝머리 결합부 모형에 대한 인발시험과 압발시험을 실시하여 표 6과 같이 얻었다.

표 6과 같이 말뚝머리 내면에 미끌림방지턱을 설치하면, 미끌림방지턱 부분의 저항성능 평가가 필요 없고, 단지 말뚝머리부의 보강철근에 대한 압발과 지압에 대

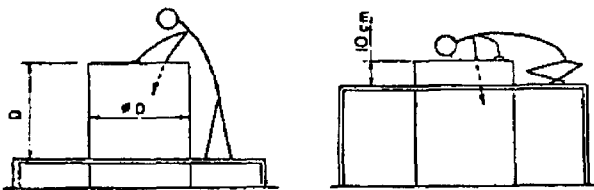


그림 8. 말뚝머리 결합방법과 작업자세

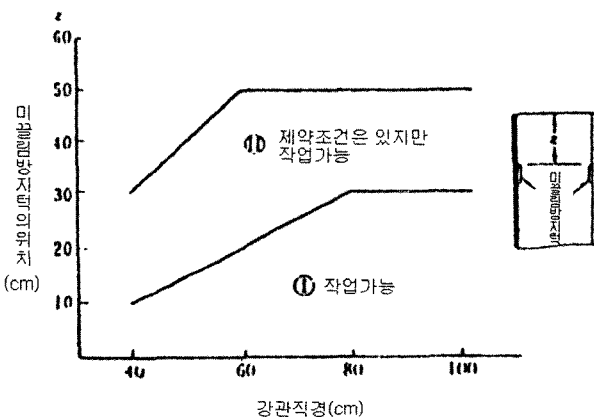


그림 9. 미끌림방지턱의 현장설치 범위

표 6. 말뚝 내외면의 미끌림방지턱 두께

말뚝직경(mm)	미끌림방지턱의 두께(mm)	미끌림방지턱의 폭(mm)
800 미만	9	25
800 이상~1,200 미만	12	25
1,200 이상~1,500 미만	16	32

한 판단만 조사하면 충분하다고 하였다.

### 3.4 형상과 현장용접

大志万 등(1985)에 의하면, 미끌림방지턱을 이용한 속채움 머리보강 방법은 용접식 원형뿔개판 방법에서 원형뿔개판을 배제하고, 그 대신에 말뚝머리부의 내면에 미끌림방지턱을 용접으로 설치하여 그 속에 콘크리트를 채운다.

미끌림방지턱의 형상은 평강, 스파트 등 여러 가지 방법으로 설치할 수 있지만 일반적으로 곡률로 가공한 평강이 많이 사용한다. 이 미끌림방지턱은 확대기초의 하중을 말뚝본체로 하중전달시키는 중요한 구성요소이다. 이러한 미끌림방지턱 요소는 방법에 따라, 방법A는 곡률로 가공한 평강을 말뚝 내·외면에, 방법B는 확대기초에 매입하는 말뚝길이 가 얇아서 말뚝내부만 미끌림방지턱을 현장 전둘레 필렛용접을 한다(岡原美知夫 등, 1991).

### 3.5 압발시험

말뚝머리 내부로 전달되는 힘은 미끌림방지턱을 통해 말뚝본체로 전이된다. 이때 말뚝내부에 채운 콘크리트의 응력은 일축응력상태가 아닌 3축응력상태로 존재하게 된다. 이 상태의 지압응력은 콘크리트의 일축압축강도의 2배 이상 즉,  $0.5 f_{ck}$ 가 된다(大志万 등, 1985). 여기서  $f_{ck}$ 는 콘크리트 설계기준강도를 나타내고 있다.

## 4. 인발 및 압발 실험계획

### 4.1 실험계획

콘크리트 속채움 방법B의 하중전달 메커니즘은 작용 축방향력(인장력, 압축력)을 강관과 강관내부에 설치되는 미끌림방지턱에 의해 합성저항단면으로 강관본체와 하부지반에 전달되도록 하고, 축방향력+휨모멘트의 조합하중은 보강철근을 이용한 가상의 철근콘크리트 기둥단면을 이용하여 저항 메커니즘을 채택하고 있다.

이 미끌림방지턱은 확대기초의 하중을 말뚝본체로 확실하게 전달시키는 중요한 역할을 하기 때문에 도로 교설계기준해설 하부구조편(2001)에 제시된 강관말뚝 머리보강 방법은 곡률로 가공한 평강을 말뚝 내면에 현장 전둘레 필렛용접을 하도록 규정하고 있다. 하지만 말

뚝기초를 설치하는 지반은 대부분 지하수위가 존재하고 연약하거나 느슨한 지반이 많다. 이러한 지반조건에서 미끌림방지턱을 강관말뚝 내면에 전돌레 필렛 현장용접하는 것은 현장작업성 뿐만아니라 현장품질관리에도 어려운 점이 많다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 도로교설계기준(2001)에 제시된 강관말뚝의 용접식 속채움 콘크리트 방법의 구조특성을 파악한 후, 현장 시공성과 적용성이 우수한 새로운 머리보강방법을 도출하였으며, 이에 대한 인발실험과 압발실험을 실시하여 말뚝머리부의 하중전달 메카니즘을 규명하도록 시험체를 다음과 같이 계획하였다.

본 논문에서는 2단의 곡률 평강을 강관 내부에 현장용접하는 속채움 콘크리트 방법을 '시방서 방법'이라고 하고, 현장 적용성과 시공성을 확보하기 위하여 미끌림방지턱과 말뚝을 서로 고장력 볼트로 체결하는 방법을 '개발형 방법'이라고 한다. 개발형 방법의 미끌림방지턱은 2단을 사용하며 상부에는 다수의 곡률 강재평강을, 하부는 L자 형강을 사용한다.

#### 4.2 개발형 방법의 미끌림방지턱 제원

그림 4에 나타나 있는 바와 같이, 강관말뚝 외경 406mm와 508mm의 시험체에 사용한 말뚝 상부 내·외면의 미끌림방지턱은 각각 4개의 곡률 평강을 사용한다. 이 평강의 두께와 길이는 강관말뚝 외경 406mm에 대해서는 각각 9mm와 65mm, 강관말뚝 외경 508mm에 대해서는 각각 12mm와 65mm이다.

2.2절에서 용접식 속채움 콘크리트 방법에서 사용하는 상부 미끌림방지턱의 위치는 3.2절에서 언급한 바와 같이

표 7. 하부 미끌림방지턱의 제원

구 분	∅406.4	∅508.0	∅609.6	∅812.8
L(mm)	109 ± 2	160 ± 2	210 ± 2	312 ± 2
A(mm)	9 또는 12	12	12	12

표 8. 인발 실험용 시험체 일람

구분 시험체	강관 직경 (두께:9mm)	사용 철근 (SD30)	콘크리트 평균 일축압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	미끌림방지턱 설치 유무와 방법
인발 1 (TJX)	∅508mm	D19-12ea	230	• 無 : 시방서 방법
인발 2 (TJO)	∅508mm		246	• 有 : 시방서 방법 • 모살용접, s=9mm
인발 3 (TN)	∅508mm		230	• 有 : 개발형 방법 • 곡률 평강+고장력볼트

시공성만을 고려하여 결정하였다. 그러나 개발형 시험체의 상부 미끌림방지턱은 그림 5와 같이, 강관말뚝의 두께를 증가시켜 확대기초의 콘크리트 연직지압응력을 줄이면서, 말뚝내부의 합성효과를 발휘할 뿐만아니라 말뚝머리부의 휨모멘트에 저항력을 극대화하기 위하여 말뚝머리 절단면에서 24mm 위치에 설치하였다. 그리고 하부 L자형 미끌림방지턱은 속채움 콘크리트의 합성효과를 극대화하기 위하여 설치 가능한 최대 깊은 곳에 볼트체결 위치를 선정하였다. 그 위치는 용접식 속채움 콘크리트 방법과 동일하게 말뚝머리 절단면에서 말뚝 외경의 반 길이에 설치하였으며, 그 제원은 그림 10과 표 7과 같다.

#### 4.3 인발 시험체

표 8은 인발 시험체 일람표로서, 강관내부에 미끌림방지턱을 설치하지 않고 단지, 콘크리트만 충전한 시험체(TJX), 용접식 미끌림방지턱을 설치한 시방서 방법의 시험체(TJO), 고장력볼트와 다수의 강재절편을 이용한 개발형 방법의 시험체(TN)를 그림 11과 같이, 3개를 제작하여 실험을 실시하였다.

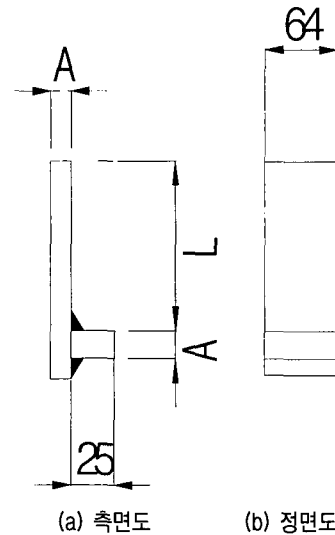
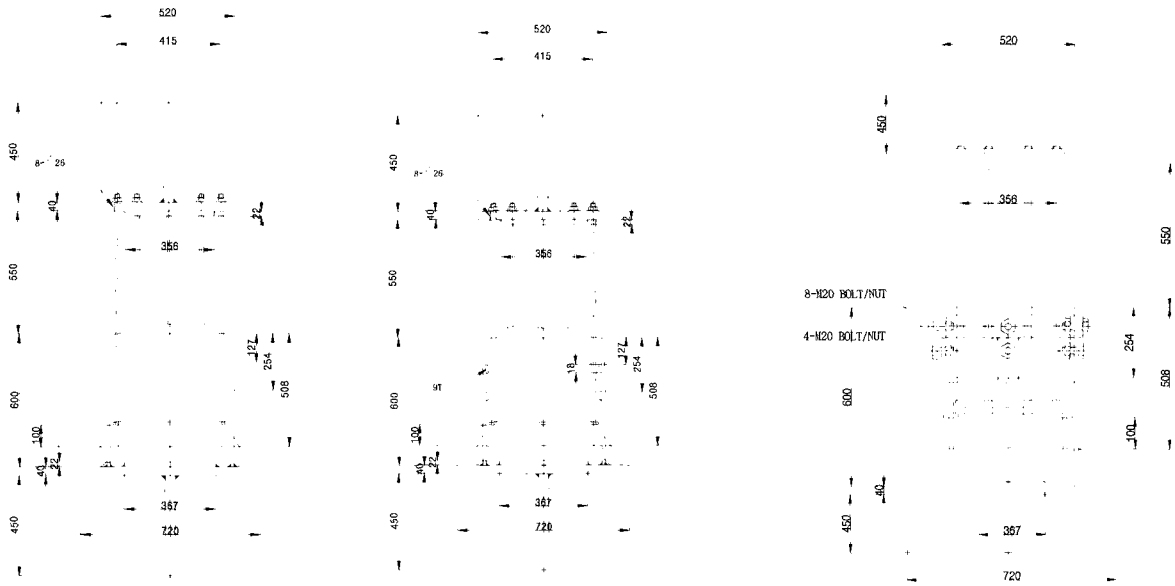


그림 10. 하부 미끌림방지턱의 제원





(a) 시방서방법(TJX, 미끌림방지턱×)    (b) 시방서방법(TJO, 미끌림방지턱○)    (c) 개발형방법(TN, 미끌림방지턱:고장력볼트+강재절편)  
 그림 11. 인발 시험체 제작도

표 9. 압발시험용 시험체 일람

구분 시험체	강관 직경 (두께:9mm)	Chemical Bonding	말뚝내부 속채움 콘크리트의 평균일축 압축강도, (kgf/cm <sup>2</sup> )	미끌림방지턱 설치 유무와 방법
압발 1 (PJO)	φ406mm	고려	151	• 有 : 시방서 방법 • 모살용접 s=9mm
압발 2 (PJX)	φ406mm		152	• 無 : 시방서 방법
압발 3 (PNO)	φ406mm		148	• 有 : 개발형 방법 • 강판+고장력볼트
압발 4 (PNX)	φ406mm	미고려 (윤활처리)	143	• 有 : 개발형 방법 • 강판+고장력볼트

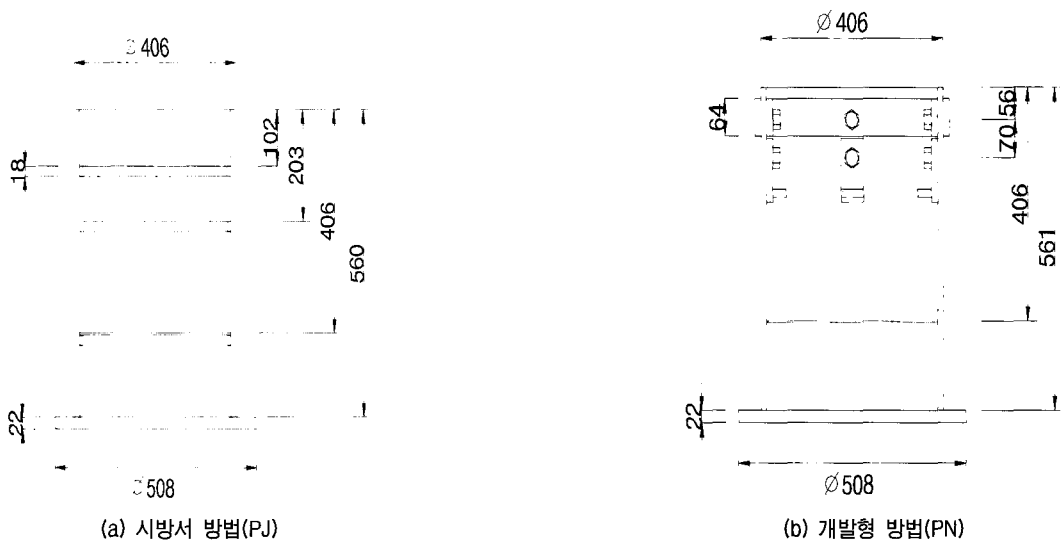


그림 12. 압발용 시험체의 단면형상

#### 4.4 압발(押拔) 시험체

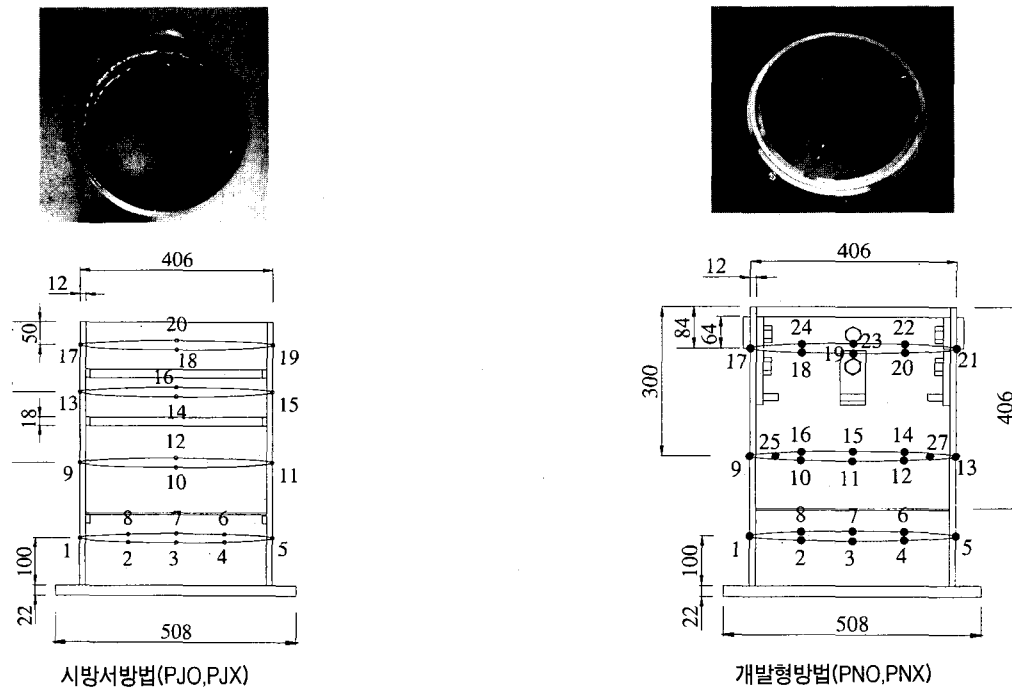
표 9는 압발 시험체 일람표로서, 강관내부에 미끌림 방지턱을 설치하지 않고, 단지 콘크리트만 충전한 시험체(PJX), 용접식 미끌림방지턱을 설치한 시방서 방법의 시험체(PJO), 고장력볼트와 다수의 강재절편을 이용한 개발형 방법의 시험체(PNO; 케미칼본딩 고려, PNX; 케미칼본딩 미고려 목적으로 강관내부에 윤활제 도포)를 그림 12와 같이, 4개를 제작하여 실험하였다.

#### 4.5 사용 재료

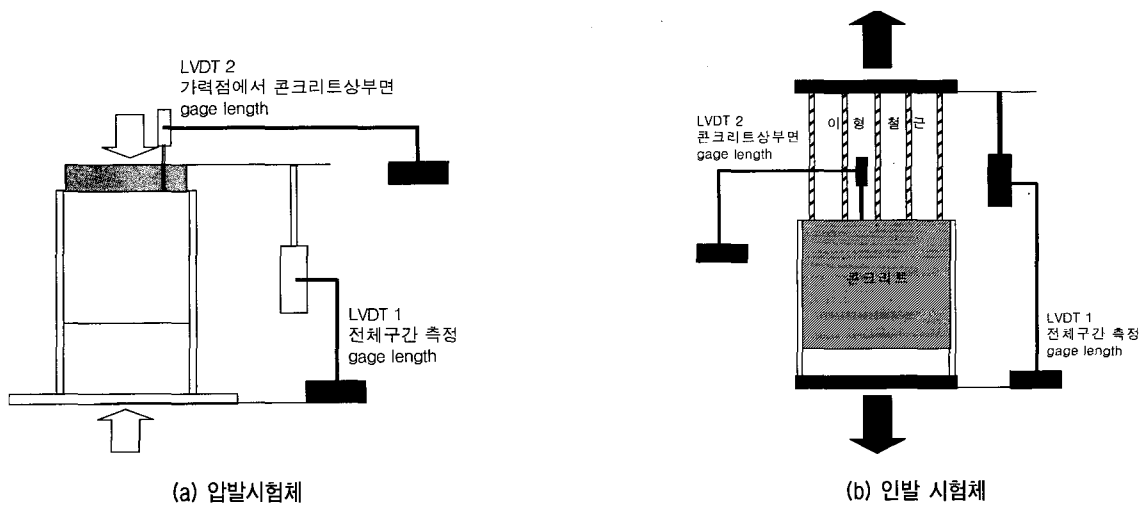
사용 강관은 강종 SPS400이고, 강관 직경은 압발 시험체용으로 406mm(두께 9mm), 인발 실험체용으로 508mm(두께 9mm)를 사용하였다. 보강용 이형철근은 SD30을 사용하였다.

#### 4.6 가력 및 측정방법

200tonf 용량의 만능시험기(UTM-200A, Shimazu사)



(a) 변형률계 부착도



(b) 변위계 위치도

그림 13. 변형률계와 변위계 부착 위치도



사진 1. 인발시험체의 가력전경

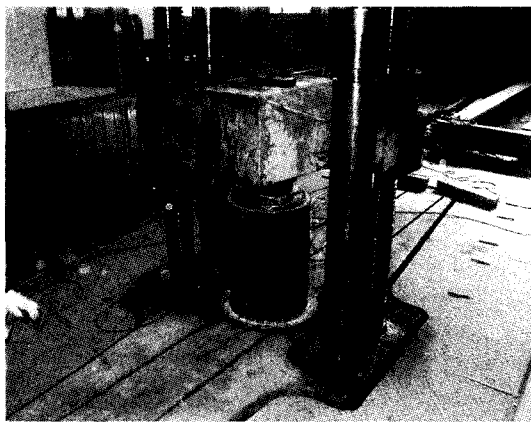


사진 2. 압발시험체의 가력전경

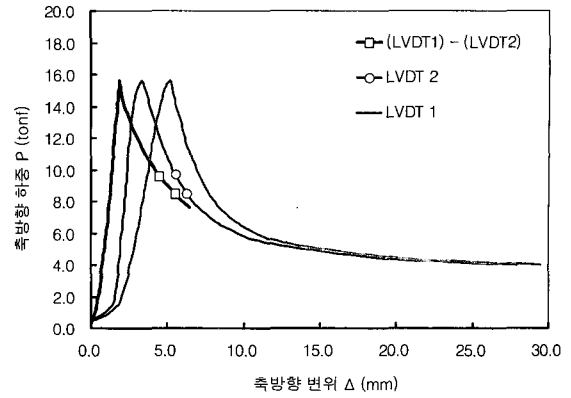


그림 14. TJX 인발시험체의 인발하중-변위 관계 곡선

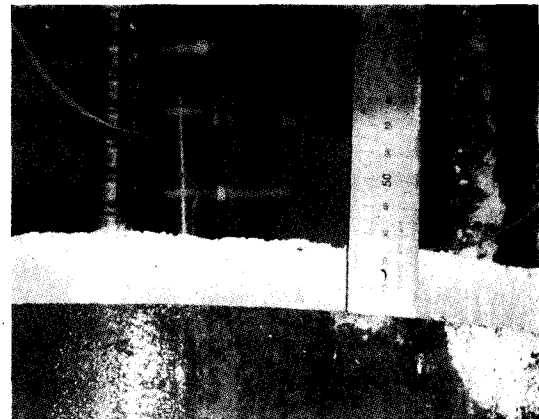


사진 3. 콘크리트 뿔힘

를 사용하여 축방향 하중(인장, 압축)을 이론적 탄성내력까지 응력제어방법(stress control method)로, 탄성이 후에는 변위제어방법(displacement control method)으로 단조 가력하였다. 또한 강관내부에 설치한 미끌림방지턱에 의해 하중전달 메카니즘을 알아보기 위하여, 압발 시험체인 강관 내·외면에 강재 선형탄성용 변형률계(straingage, FLA-11-5)를 설치하였다. 그리고 시험체의 전체변위(LVDT 1)와 콘크리트의 국부변위(LVDT 2)를 측정하기 위하여, 변위계를 그림 13과 같이 설치하였다. 사진 1과 사진 2는 인발실험 및 압발실험의 가력 전경을 보여주고 있다.

## 5. 실험결과

### 5.1 인발실험

그림 14와 같이, 미끌림방지턱이 없는 시험체(TJX)는 콘크리트의 화학적 부착이 파괴(chemical debonding

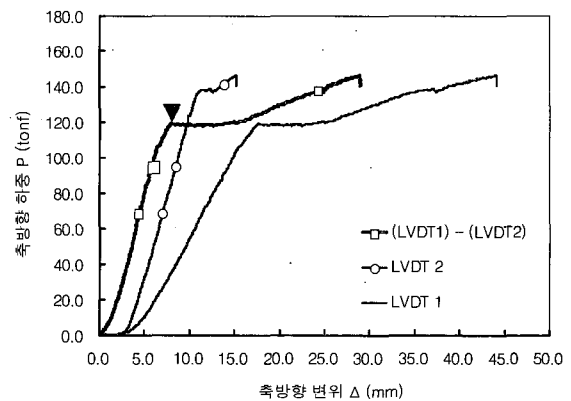


그림 15. TJO 인발시험체의 인발하중-변위 관계 곡선

failure)된 이후 급격한 내력 감소와 함께 변위가 증가하는 경향을 나타냈다. 이때 화학적 부착력의 파괴하중은 15.6tonf이었다. 또한 사진 3은 화학적 부착력이 파괴된 이후의 강관과 콘크리트와의 순수 마찰 특성 및 골재의 맞물림작용을 나타내고 있다.

그림 15는 시방서 방법의 시험체(TJO)에 대한 인발하중-변위 관계 곡선을 보여 주며, 작용하중 118.4tonf(▼)에서 철근 1개당 작용응력이 3.43tonf/cm<sup>2</sup>로 항복상태에 도

달하였다. 이때 순수 철근변위(LVDT1-LVDT2)는 8.4mm가 발생하였다. 그리고 시험체의 항복거동은 작용하중 138.4tonf에서 콘크리트의 국부지압파괴를 보이며 급격한 변위의 증가를 나타냈다.

그림 16은 개발형 방법의 시험체(TN)에 대한 인발하중 변위 관계곡선을 보여 주며, 작용하중 118tonf(▼)에서 TJO 시험체와 거의 동일한 위치에서 철근이 항복상태에 도달하였다(그림 17 참조). 그리고 철근 항복이후에도 TJO 시험체와 달리 TN 시험체는 탄성거동을 나타냈으나, 철근의 과대한 변형으로 최대내력까지 도달하지 못하고 실험을 중단하였다.

이와 같이, 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 구성요소를 갖는 TJO나 TN 실험체의 경우 부착관계가 깨어진(chemical debonding) 이후에도 골재의 맞물림 작용이나 마찰력에 의해 선형탄성거동을 유지하다가, 미끌림방지턱에 의한 콘크리트의 국부지압파괴를 보이며 완만한 거동을 보인 것으로 판단된다. 따라서 미끌림방지턱이 없이 속채움 방법 즉, 강관말뚝과 콘크리트 부착력만으로 말뚝머리부에 작용하는 인발하중을 지탱하는 것은

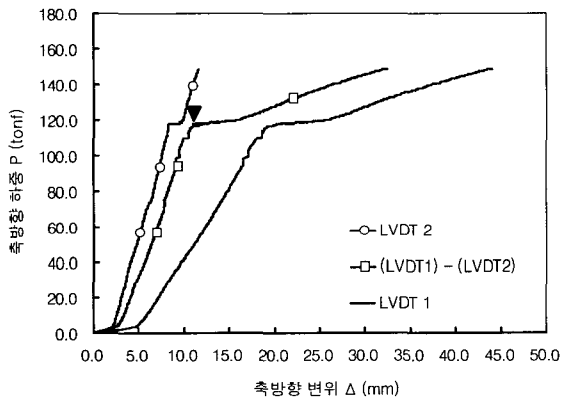


그림 16. TN 인발시험체의 인발하중-변위 관계 곡선

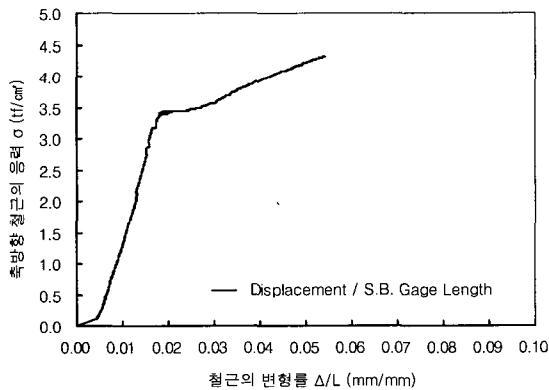


그림 17. TN 시험체의 철근 응력-변형도 관계 곡선

구조 안전성 측면에서 매우 불리한 조건임을 알 수 있다.

또한 탄성범위내에서 미끌림방지턱의 구성요소를 갖는 시험체(TJO, TN)에 대한 인발거동은 미끌림방지턱과 콘크리트의 합성작용에 의해 구조적으로 거의 동등한 성능을 보였다.

## 5.2 인발실험

### 5.2.1 압발하중-변위거동

그림 18과 같이 미끌림방지턱이 없는 시방서 방법의 시험체(PJX형)는 최대내력 27.57tonf에서 강관내부의 속채움 콘크리트가 사진 4(a)와 같이 강관내부로 빠지는 현상이 발생하였다. 이것은 강관과 속채움 콘크리트를 서로 연결해 주는 장치가 없이 단순히 콘크리트와 강관과의 부착(bonding) 효과 즉, 부착만으로 이루어진 하중전달 메카니즘이므로, 이러한 부착관계가 깨어지는 순간 급격한 변위 증가와 함께 파괴에 도달하였다. 그러므로 미끌림방지턱을 갖지 않은 경우, 강관과 속채움 콘크리트의 합성작용에 의한 하중전달 특성을 기대하기 어렵음을 알 수 있다.

그림 19~21은 시방서 방법의 미끌림방지턱이 있는 부재(PJO형)와 개발형 방법의 볼트식 속채움 부재(PNO, PNX형)는 모두 압발하중 증가와 함께 변위가 매우 적게 발생하였으며, 전체적인 거동은 선형적 특성을 나타내고 있다.

그리고 시방서 방법(PJO형)과 개발형 방법의 시험체(PNO, PNX형)는 미끌림 방지턱이 없는 시방서 방법의 시험체(PJX형)의 최대하중인 27.57tonf의 약 6.2배인 최대하중 170tonf 이상을 가력한 후에도 강관내부 속채움 콘크리트가 빠지는 현상이 발생하지 않았다. 이는 두 방법의 시험체와 같은 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 구

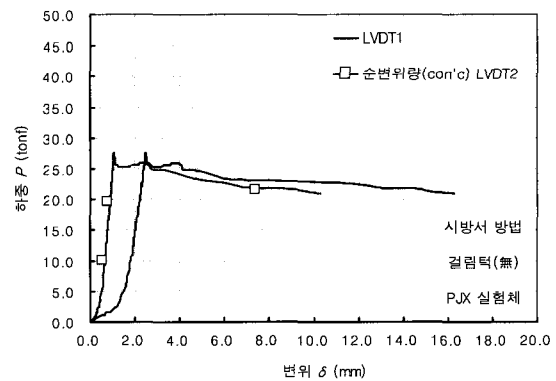
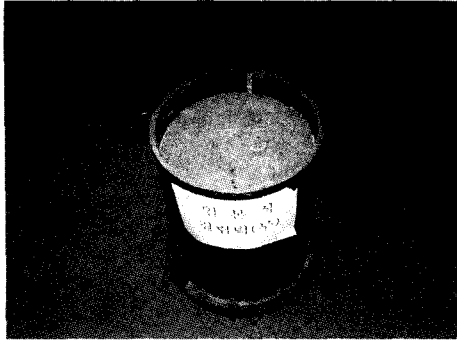
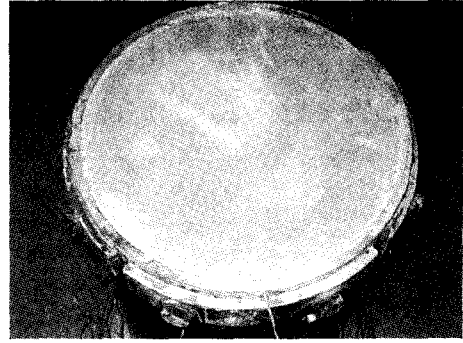


그림 18. PJX 시험체의 압발하중-변위 관계 곡선



(a) PJX 시험체



(b) PNO 시험체

사진 4. 실험 종료 후 콘크리트 상태

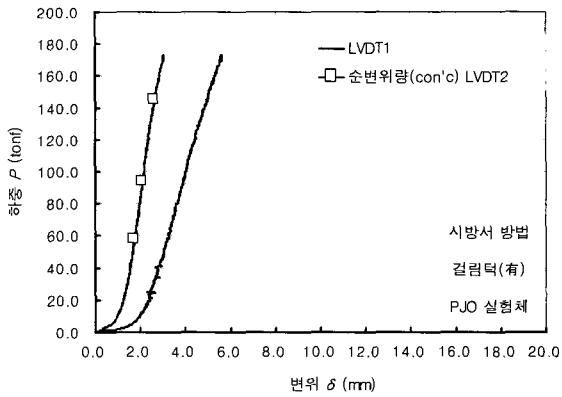


그림 19. PJX 시험체의 압발하중-변위 관계 곡선

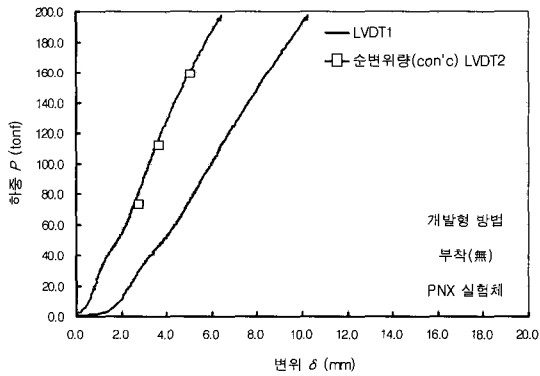


그림 20. PNX 시험체의 압발하중-변위 관계 곡선

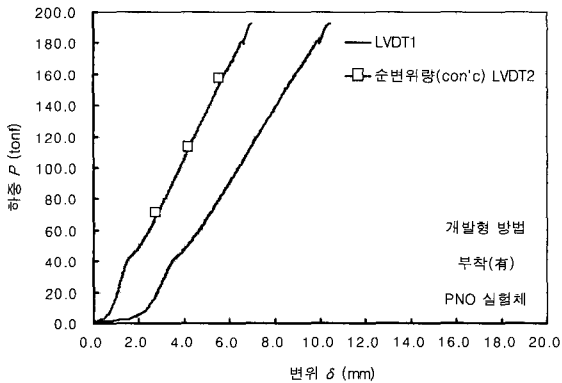


그림 21. PNO 시험체의 압발하중-변위 관계 곡선

성요소를 갖는 경우, 강관의 횡구속 효과(hoop tension)에 의한 강관말뚝 내부 콘크리트의 3차원 구속저항상태로 합성거동이 완벽하게 이루어기 때문에 판단된다.

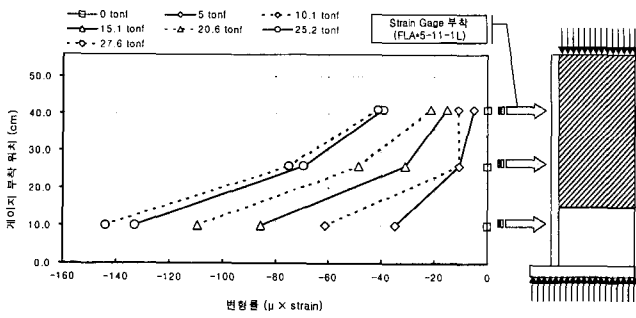
또한 그림 20과 그림 21은 개발형 방법의 미끌림방지턱의 순수한 효과를 알아보기 위하여, 강관내부의 부착력을 무시하기 위하여 윤활 처리한 시험체(PNX형)와 부착효과를 고려한 시험체(PNO형)에 대한 압발시험한 결과를 나타내고 있다.

이 그림에 의하면, 두 방법에 대한 거동 뿐만아니라 내력에도 차이가 나타나지 않고 있다. 이는 개발형 방법과 같이 강관말뚝내부에 미끌림방지턱이 설치된 경우, 강관내부와 콘크리트와의 부착효과에 의한 영향은 없음을 알 수 있다. 따라서 개발형과 같이, 말뚝내부에 적절한 미끌림방지턱의 구성요소를 갖는다면 강관내부의 횡구속 효과에 의한 콘크리트 합성효과로 하중전이 거동의 변화가 없음을 알 수 있다.

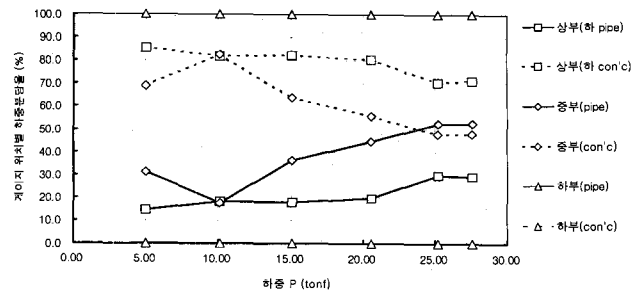
### 5.2.2 강관말뚝머리부의 하중전이 거동

그림 22와 그림 23은 강관내부의 부착효과를 고려한 상태에서 미끌림방지턱의 유무에 따른 시방서 시험체와 그림 24와 그림 25는 미끌림방지턱이 있는 상태에서 강관내부의 부착효과 유무에 따른 개발형 방법의 하중전이거동을 알아보기 위하여, 강관 내·외부면에 변형률계를 부착하여 시험한 결과이다.

상기 결과에 의하면, 말뚝머리부의 속채움 콘크리트 상단 부분에 압발하중이 증가함에 따라 강관말뚝 머리부의 하중전이는 단조증가하는 거동을 나타내고 있다. 그리고 미끌림방지턱을 지나면서 강관말뚝에서 발생한 하중분담비율은 그림 22, 그림 23과 같이, 미끌림방지턱이 없는 것보다 더 큰 하중분담비율을 나타내었다. 또한 시방서 방법이나 개발형 방법의 미끌림방지턱이 있는 시험

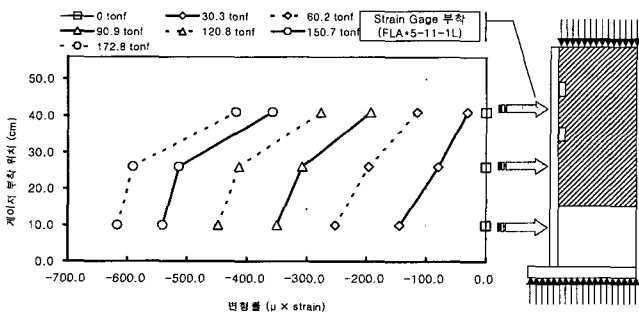


(a) 하중전이 거동

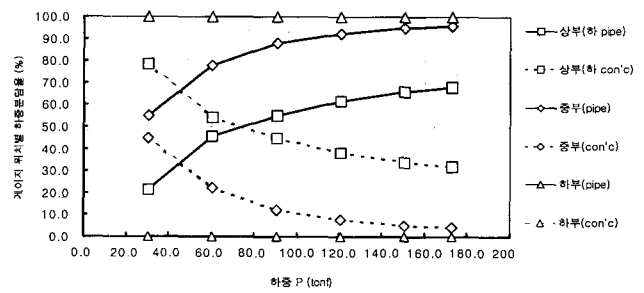


(b) 하중분담율

그림 22. PJX 시험체의 위치별 하중분담 비율 관계

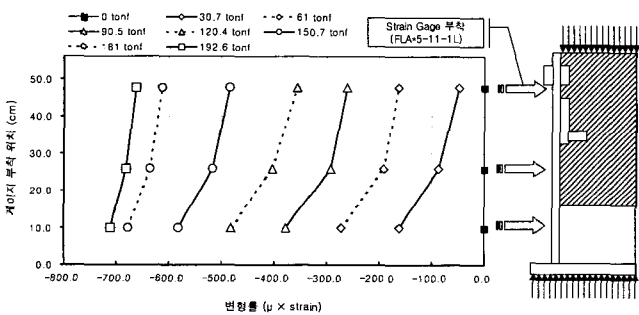


(a) 하중전이 거동

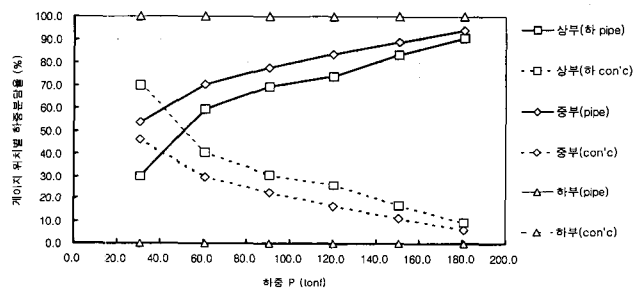


(b) 하중분담율

그림 23. PJO 시험체의 위치별 하중분담 비율관계

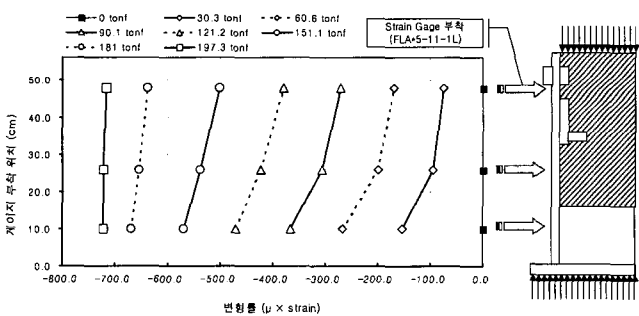


(a) 하중전이 거동

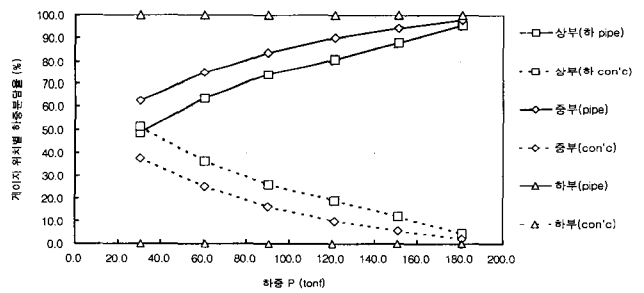


(b) 하중분담율

그림 24. PNO 시험체의 위치별 하중분담 비율 관계



(a) 하중전이 거동



(b) 하중분담율

그림 25. PNX 시험체의 위치별 하중분담 비율 관계

체는 없는 시험체보다 큰 압발하중에 저항하고 있다.

그림 23과 그림 24는 강관내부에 부착효과는 동일하면서 미끌림방지턱의 형상이 다른 경우의 하중분담비율을 나타내고 있다. 그림 23은 말뚝머리부의 속채움 콘크리트 부분에 압발하중을 증가함에 따라 상단(상부 하 pipe)과 하단(중부 pipe)의 미끌림방지턱을 통한 하중분담비율이 각각 단조증가로 약 70%와 95%까지, 그림 23은 각각 90%와 95%까지 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 시방서 방법과 개발형 방법의 하단 미끌림방지턱에 대한 하중분담비율은 거의 동일한 거동을 보인 반면에, 상단 미끌림방지턱은 시방서 방법보다 개발형 방법의 하중분담비율이 크게 기여하였다. 이는 개발형 시험체의 상단 미끌림방지턱 위치(24mm)가 시방서 시험체(101.5mm)보다 위에 위치하고 있기 때문에 강관에 전달되는 하중분담율이 높아지고, 콘크리트에는 낮아지는 경향을 보였다.

그림 24와 그림 25는 미끌림방지턱의 형상은 동일하면서 강관내부의 부착효과 유무에 따른 하중분담율을 나타내고 있다. 이들의 그림에 의하면, 강관내부의 부착효과가 있는 시험체와 없는 시험체의 하중분담율은 거의 동일하게 나타났다. 하지만, 미끌림방지턱과 콘크리트의 지지거동을 살펴보면, 부착효과가 없는 경우에는

미끌림방지턱에 하중분담이 크게 작용하였고, 속채움 콘크리트에는 작게 작용하였다.

### 5.3 미끌림방지턱이 확대기초 콘크리트의 수직지압응력에 미치는 영향

3.1절에 미끌림방지턱의 중요성과 필요성을 설명하였듯이, 현장조건에서 강관말뚝 내·외주면 마찰거동이 발휘하기 위해서는 미끌림방지턱이 이들면에 설치되어야 한다. 방법 A는 강관말뚝의 내·외주면에, 방법 B는 내주면에 미끌림방지턱이 필히 설치되어야 한다.

머리보강 방법 B로 확대기초 콘크리트 속에 매입된 강관말뚝의 머리부에 작용하는 인발하중은 미끌림방지턱에 의해 말뚝내부에 속채움한 콘크리트가 횡방향 구속(hoop tension)되어 뽑힘 현상이 발생하지 않는다. 그러나 5.1절의 결과와 같이, 말뚝내부에 미끌림방지턱이 없이 단지 강관말뚝 내주면과 속채움 콘크리트의 화학적인 부착강도만으로 견딜 수 있는 인장강도는 15.6tonf 이지만, 현장조건에서는 콘크리트의 건조수축과 진동 등에 의해 이 부착강도를 기대할 수 없을 뿐만 아니라 횡방향 구속효과도 발생하지 않기 때문에 이 값 또한 기대하기 어렵다.

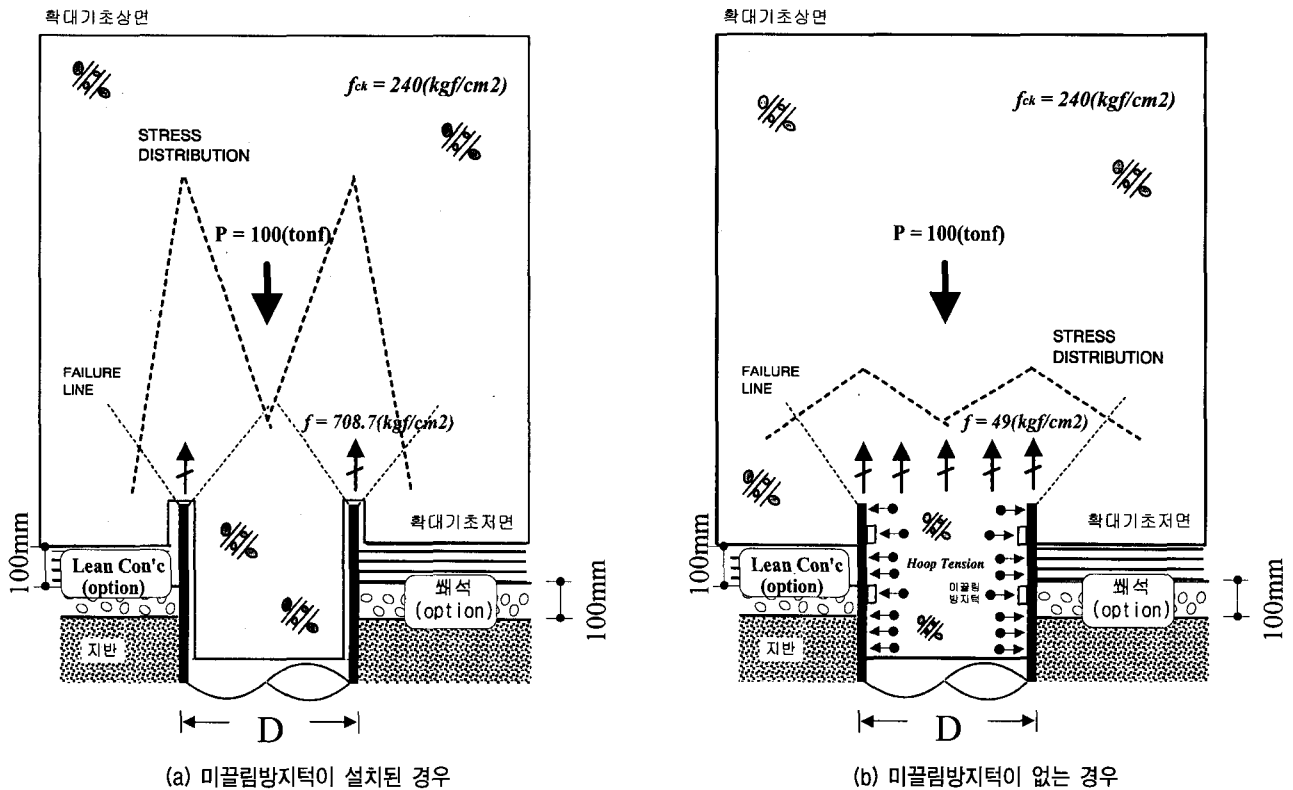


그림 26. 확대기초 콘크리트의 연직지압응력 분포

그리고 그림 26(a)와 같이, 말뚝머리 내부에 미끌림방지턱이 부착된 말뚝머리부에 압축하중이 작용하는 경우, 인발하중의 거동과 같이 강관말뚝 내부에 횡방향 구속현상이 발생한다. 이 구속에 의해 말뚝머리부는 말뚝내부에 속채움한 콘크리트와 강관말뚝이 하나의 합성 단면이 되어 전단면적으로 압축하중을 저항한다. 그러나 그림 26(b)와 같이, 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱이 부착되어 있지 않는 경우, 콘크리트의 건조수축과 진동 등에 의해 콘크리트의 화학적 부착력을 고려할 수 없다. 이로 인해 말뚝순두께의 단면적이 말뚝머리 압축하중을 지탱하게 되어, 확대기초 콘크리트에 큰 지압응력이 발생한다. 만약 압축하중이 크게 작용하면, 확대기초 콘크리트 내부로 관입전단(punching shear)이 발생하여 큰 변위가 발생한다.

따라서 말뚝내부에 콘크리트로 속채움한 강관말뚝머리보강 설계법은 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 단수가 충분히 설치되어 강관말뚝과 속채움 콘크리트와의 완전한 합성단면을 형성하여야 한다는 조건을 내포하고 있다(대한토목학회, 2001).

그리고 그림 26과 같이, 말뚝 직경이 508mm이고, 두께가 9mm인 강관말뚝 머리부에 100tonf의 수직력이 작용할 경우, 확대기초 콘크리트에 발생하는 이론적인 연직지압응력을 계산한 예이다. 그림 26(a)와 같이, 강관말뚝 내부에 횡방향 구속효과가 발휘하는 강관말뚝 머리부의 확대기초 콘크리트에 걸리는 연직지압응력은  $49(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이다. 그러나 그림 26(b)와 같이 말뚝내부에 횡방향 구속이 발휘되지 않는 경우, 확대기초 콘크리트에 걸리는 연직지압응력은  $708.7(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이다. 이때 콘크리트의 설계기준강도,  $f_{ck}=240(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 을 사용하였고, 상시에 확대기초의 콘크리트 허용지압응력,  $f_{ba}=0.25f_{ck}=60(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이다(대한토목학회, 2001).

따라서 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 유무에 따라 확대기초 콘크리트에 발생하는 연직지압응력은 무려 15배 정도 차이가 나며, 구조물의 안전에 큰 영향을 준다.

## 6. 결론

강관말뚝의 속채움 콘크리트 B방법에서 미끌림방지턱의 효과를 알아보기 위하여, 강관말뚝머리의 내부에 미끌림방지턱을 설치하지 않은 방법과 2단의 곡률 강편 미끌림방지턱을 강관말뚝내부에 용접한 ‘시방서 방법’, 그리고 미끌림방지턱을 다수의 곡률 강편과 고장력볼

트로 체결한 ‘개발형 방법’에 대하여 실물크기 인발 및 압발실험을 수행하여 구한 결과는 다음과 같다.

- (1) 인발실험 결과, 미끌림방지턱이 없는 시험체(TJX형)는 작용하중 15.6tonf에서 콘크리트의 화학적 부착이 파괴되었다. 그리고 미끌림방지턱이 있는 시방서 방법(TJO형)과 개발형 방법의 시험체(TN형)는 작용하중 118tonf에서 거의 동일한 위치에서 철근이 항복하였다. 철근 항복이후에도 TJO 시험체의 항복거동은 138.4tonf에서 콘크리트의 국부지압파괴를 보이며 급격한 변위증가를 나타내었지만, TN 시험체는 작용하중내에서 항복거동을 보이지 않고 탄성거동을 보였다.
- (2) 탄성범위내에서 미끌림방지턱의 구성요소를 갖는 시험체(TJO, TN형)에 대한 인발거동은 미끌림방지턱과 콘크리트의 합성작용에 의해 구조적으로 동등한 성능을 보였다.
- (3) 압발실험 결과, 미끌림방지턱이 없는 시험체(PJX형)는 최대내력 27.57tonf에서 강관내부의 속채움 콘크리트와 강관내부의 조도와외의 부착력이 파괴되면서 강관내부로 빠지는 현상이 발생하였으며, 시방서 방법의 시험체(PJO형)와 개발형 방법의 시험체(PNO, PNX형)는 미끌림방지턱이 없는 시험체(PJX형)의 최대내력보다 약 6.2배(최대하중 170tonf) 이상을 가력한 후에도 강관내부 속채움 콘크리트가 빠지는 현상은 발생하지 않았다. 이는 두 방법의 시험체와 같은 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 구성요소를 갖는 경우, 강관의 hoop tension 효과에 의한 강관말뚝 내부 콘크리트의 3차원 구속저항상태로 합성거동이 완벽하게 이루어기 때문으로 판단된다.
- (4) 개발형 방법의 미끌림방지턱의 순수한 효과를 알아보기 위하여 강관내부의 조도를 무시하기 위하여 윤활 처리한 시험체(PNX형)와 부착효과를 고려한 시험체(PNO형)에 대한 압발실험한 결과, 강관내부와 콘크리트와의 조도에 영향이 없이 동일한 거동을 보였다.
- (5) 시방서 방법과 개발형 방법의 하단 미끌림방지턱에 대한 하중분담율은 동일한 거동을 보인 반면에, 상단 미끌림방지턱은 시방서방법보다 개발형방법의 하중분담비율이 크게 기여하였다. 이는 상단 미끌림방지턱의 위치가 시방서 방법보다 개발형 방법이 말뚝상면에 존재하기 때문으로 판단된다.



## 참 고 문 헌

1. 건설부(1983), 도로교표준시방서, 서울, pp.1155-1165.
2. 건설교통부(1996), 도로교표준시방서, 서울, pp.720-724.
3. 건설교통부(1997), 구조물기초설계기준, 한국지반공학회, 서울, p.199.
4. 대한토목학회(2001), 도로교설계기준해설 하부구조편, 서울, pp. 268-278, pp.287-300.
5. 박영호, 김성환, 장용채(1998), “볼트식 강관말뚝 머리보강 방법”, 한국지반공학회지, 제14권 제6호, pp.57-71.
6. 박영호, 김낙영, 박종면, 유성근, 김영호(2002), “새로운 강관말뚝 머리보강 공법 개발”, 한국지반공학회지 2002년 봄학술발표회 논문집, pp.413-420.
7. 大志万, 和也, 福井次郎(1985), 新くい鋼管杭の杭頭結合方法, 土木技術資料, Vol.27-1, pp.33-39.
8. 若命善雄, 長尾俊昌(1989), 基礎ステップと抗との接合法, 基礎工, pp.21-26.
9. 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.
10. 福井次郎(1992), 鋼管杭の抗頭結合と現場接合, 基礎工, pp.29-34.
11. 大志万, 和也, 福井次郎(1985), 新くい鋼管杭の杭頭結合方法, 土木技術資料, Vol.27-1, pp.33-39.
12. 大志万, 和也, 佐藤辛男(1985), “杭基礎とアーチング結合部の設計”, 基礎工, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 11月, pp.106-112.
13. 岡原美知夫, 中谷昌一, 田口敬二(1991), 抗頭部とア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.
14. 岡原美知夫, 高木, 章次(1991), 抗頭の處理, 基礎工事施工管理のチェックリスト, 基礎工, pp.105-107.

(접수일자 2003. 7. 23, 심사완료일 2003. 11. 26)