

# 강재스트럿을 이용한 철근콘크리트 기초보강재의 구조성능평가

## Evaluation of the Structural Behavior of RC Foundations Reinforced with Steel Struts

윤 상 문<sup>\*</sup>      박 현 미<sup>\*\*</sup>  
Yoon, Sang-Moon      Park, Hyun-Mi  
박 종 욱<sup>\*\*\*</sup>      이 정 윤<sup>\*\*\*\*</sup>  
Park, Jong-Wook      Lee, Jung-Yoon

### Abstract

This paper presents a method to increase the strength of reinforced concrete foundations. In the proposed method, a steel plate was placed in the foundation to increase the strength of concrete strut. Eight foundations were tested in order to verify the proposed method. Three main parameters were considered in the experimental investigation: the strengthening of steel plate (without or with plate), depth of foundation (430 mm, 500 mm, and 700 mm), and loading ways(one- or two-way loading). The test results indicated that the steel plate in the diagonal concrete strut increased the strength of foundations. In addition, the strength of foundation calculated by a strut-and-tie model predicted more accuracy with the test results than that calculated by KCI-07 design code.

키워드 : 철근콘크리트 기초, 철골 플레이트, 전단보강, 스트럿-타이 모델  
Keywords : RC Foundations, Steel Plates, Shear Reinforcement, Strut and Tie Model

### 1. 서      론

산업화와 국토의 효율적인 활용을 위하여 초고층 및 장스팬 구조물의 건설이 증가하고 있다. 1990년대와 2000 년대에 다수의 40층, 50층 이상의 상업 및 주거용 건물이 건설되었으며, 현재에는 100층 이상 규모의 건물이 계획 되고 있다.

건축물이 고층화됨에 따라서 상부의 하중이 커지게 되 며 이러한 하중을 안전하게 지면에 전달하기 위하여 기 초구조물의 규모도 커지고 있다. 40층 이상의 고층건물의 기초의 두께는 1.0-1.5m 규모의 기초에서부터 현재는 2m, 3m를 넘어 5m의 규모로 까지 기초의 두께가 점점 증가되고 있다. 이와 같이 기초의 면적 및 두께가 증대될 경우에 발생할 수 있는 몇 가지 문제를 요약하면 아래와 같다.

① 분리 타설에 의한 문제 : 하루에 타설되는 콘크리트 물량의 한계로 인하여 기초를 여러 구획으로 나누어 타

설하여야 한다. 콘크리트의 분리 타설은 시공조인트 사이 의 수밀성 확보를 어렵게 하며 공기지연을 유발시킬 수 있다.

② 철근물량의 증대 : 철근콘크리트 구조물의 설계 기준 에서 요구되는 최소 온도철근량이 증가한다.

③ 수화열 : 대량 콘크리트 타설로 인한 수화열 문제가 발생할 수 있다.

④ 터파기의 어려움 및 공사비 증가 : 암반 지반에서의 기초공사일 경우에는 기초의 면적이 증가함에 따라서 암 반터파기로 인한 공기 지연, 공사비 증가 및 소음으로 인 한 민원을 유발할 수 있다.

이와 같이 기초부의 크기는 구조, 시공 및 경제적인 측면에서 여러 문제를 유발 할 수 있다. 이 연구에서는 기존의 철근콘크리트 기초부의 크기를 줄일 수 있는 새로운 기초보강공법을 개발하고 개발된 공법에 대한 구조 해석을 실시하였다. 또한 1차 실험 (3개 실험체) 및 2차 실험 (5개 실험체)을 통하여 제안된 공법의 구조성능을 평가하였다.

### 2. 기초보강재의 개발

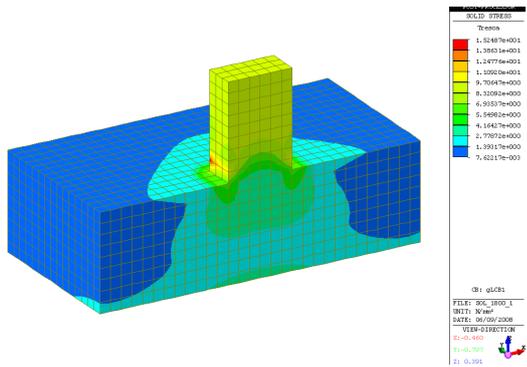
#### 2.1 기초부의 응력 흐름

\* 바로건설기술(주) 소장  
\*\* 바로건설기술(주) 실장  
\*\*\* 성균관대학교 건축공학과 대학원생  
\*\*\*\* 성균관대학교 건축공학과 교수, 공학박사,  
(교신저자 : jylee@skku.ac.kr)

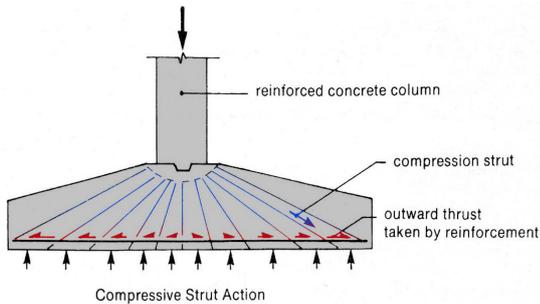
현재 40층 이상인 고층 철근콘크리트 기초부재의 두께는 2m 이상인 경우가 많다. 이와 같이 기초 부재의 두께가 큰 경우에는 서론에서 언급한 기초판의 크기(특히, 높이)와 관련된 여러 문제가 발생할 수 있다.

이 연구에서는 현재 일반적으로 사용되고 있는 철근콘크리트 기초의 크기를 작게 할 수 있는 부재 개발에 연구의 중점을 두었다. 효율적으로 외력을 전달할 수 있는 기초 부재 보강공법을 개발하기 위하여 두께 1.8m, 크기 5.0m×5.0m인 철근콘크리트 기초 부재에 대한 탄성해석을 실시하여 응력의 분포를 검토하였다. 탄성 해석의 결과를 다음과 같이 3가지로 요약할 수 있다.

- ① 그림 1은 기초의 탄성 해석 결과를 나타낸다. 그림 1에서 기둥에 작용하는 상부 하중이 기초를 통하여 지면에 전달됨으로써 압축응력이 기둥과 지면 사이에 직접적으로 작용한다.
- ② 기둥을 중심으로 2방향전단응력이 작용하여 2방향전단에 의한 파괴 발생 가능성이 높다.
- ③ 휨에 의한 인장력은 기둥에서 떨어진 기초판의 길이가 상대적으로 작기 때문에 크지 않다.



(a) 탄성해석에 의한 응력의 흐름



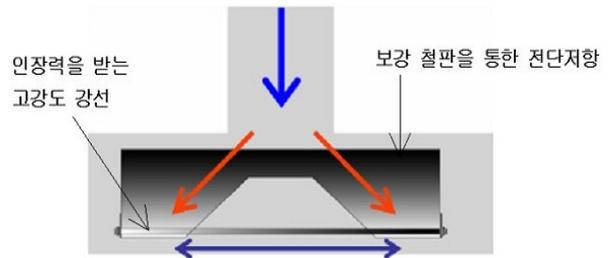
(b) 기초부분의 하중 저항 메카니즘

그림1. 기초의 탄성해석 결과

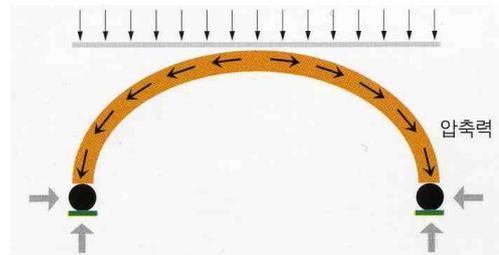
## 2.2 강관과 타이를 이용한 기초보강재

탄성해석 결과에 나타난 기둥에서 작용하는 거대한 압축력을 지면으로 전달하기 위해서는 압축력에 대한 보강이 필요하다. 강재는 일반적으로 인장력을 보강하기 위하여 사용되지만 경우에 따라서는 압축재도 사용되는 경우가 많다. Nagisa 등<sup>1, 2)</sup>이 제시한 기둥보강공법에서는 기둥의 중심부에 작은 직경의 강관을 삽입하여 강관과 콘크리트 구속압에 의하여 기둥 단면의 폭을 대폭 감소시

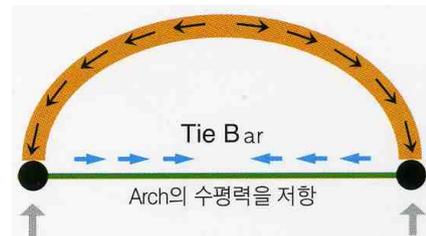
켰다. 또한 Usui 등<sup>3)</sup>도 나선형 강재 튜브를 사용한 철근콘크리트 기둥의 내력 향상법을 제시하였다. 이 연구에서도 이와 유사하게 강재를 기초 보강재의 압축대에 배근함으로써 콘크리트가 받는 압축력을 저감할 수 있는 공법을 제시하였다.



(a) 개발 공법의 철판 보강



(b) 기초부분의 하중 저항 메카니즘



(c) 타이에 의한 인장 저항

그림2. 인장 타이와 압축 스트럿의 저항메카니즘

이 연구에서는 그림 2와 같이 기초판 내부에 아치형의 강재 및 타이를 넣어서 기초판의 크기를 줄일 수 있는 공법을 제안하였다. 제안된 공법에서는 강재 철판을 기둥과 기초판의 압축대 사이에 배근하고, 인장재를 기초판 하부에 배근하여 강재 철판과 연결하였다(그림 2(a) 참조). 기둥과 기초판의 압축대 사이에 배근된 철판은 그림 2(b)와 같이 기둥으로부터 전달되는 압축하중을 압축 스트럿에 통하여 직접 지면에 효과적으로 전달하여 2방향전단 내력을 향상시킬 수 있다. 또한 수평방향에 배근된 인장재(Tie)는 강재철판이 받는 인장분력을 효율적으로 저항할 수 있다.

## 3. 실험 계획

제안된 기초보강재의 구조거동을 8개의 실험체를 통하

여 평가하였다. 실험에서는 일방향 실험체(3개) 및 양방향 실험체(5개)를 제작하여 기초판의 구조거동을 비교·평가하였다.

### 3.1 일방향 실험체

#### 3.1.1 실험체 형상, 재료 조건

일방향 실험에서는 기초보강재의 유무에 따른 기초판 내력의 차이를 파악하기 위하여 철판보강재의 유·무와 기초의 두께를 변수로 하였다. 실험체의 크기는 매트깊이 2,100mm에 대하여 1/3 축소 모델로 제작하였다. 실험체 R500과 T500의 기초 두께는 500mm이며 실험체 T700의 기초두께는 700mm이다. 실험체 R500에는 기초판의 두께가 4mm인 2장의 강판을 그림 3(a)와 같이 배근하였고, 4-Ø16 타이를 배근하여 강재철판이 받는 인장력을 저항하도록 하였다.

실험체 T500은 R500과 동일한 기초 두께지만 강재철판 보강이 없는 경우이며, 실험체 T700도 기초판의 크기가 700mm이며 강재 철판 보강이 없는 경우이다. 실험체 R500과 T500의 배근 상세는 그림 3과 같다. 실험체에 사용한 콘크리트의 압축강도는 20 MPa이었고, 주인장철근(HD16) 및 전단보강철근(HD10)의 항복강도는 각각 490 MPa 및 525 MPa 이었다. 기초보강용 철판의 항복강도는 240 MPa이었으며 인장타이로 사용한 봉강의 항복강도는 530 MPa이었다. 일방향 실험체의 특징 및 재료에 대한

표1. 일방향 실험체 특성 및 재료 조건

실험체	H	B	d	a	$f_{ck}$	$f_y$	$f_{pl}$	$f_{tie}$	$A_s$	$A_{tie}$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )
R500	500	550	439	675	20	490	240	530	1,986	804
T500	500	550	457	675	20	490	-	-	1,986	-
T700	700	550	657	675	20	490	-	-	1,986	-

H : 실험체의 높이, B : 실험체의 폭, d : 실험체 유효깊이, a : 실험체의 전단경간길이,  $A_s$  : 인장철근(하부철근)총단면적,  $f_{ck}$  : 콘크리트 압축강도,  $f_y$  : 인장철근의 항복강도,  $f_{pl}$  : 강재 철판의 항복강도,  $f_{tie}$  : 인장타이의 항복강도,  $A_{tie}$  : 인장타이 총 단면적

상세를 표 1에 나타내었다.

#### 3.1.2 실험방법 및 계측

실험은 일방향 중앙부 집중가력 형태로 수행하였으며, 실험기기는 2000 kN UTM을 사용하여 5.0 kN/sec의 속도로 가력하였다. 실험체의 상하부 주근에 그림 3과 같이 변형률 측정게이지를 설치하여 휨과괴 여부를 검토하였으며, 실험체 하부에는 LVDT를 설치하여 처짐을 측정하였다.

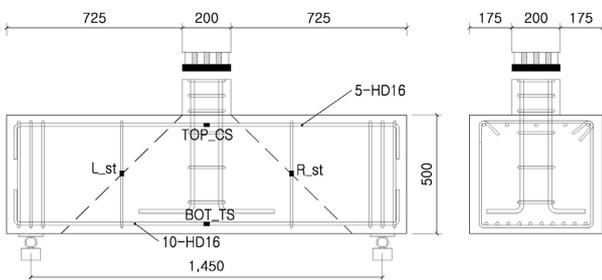
기초보강재의 강재 철판에는 중앙상부의 압축응력을 받는 부분과 압축대 부분에 변형률 측정 게이지를 설치하였으며(그림 3 참조), 전단변형을 검토하기 위하여 전단 위험단면 부분의 전단보강철판에 변형률 측정 게이지를 부착하였다.

### 3.2 양방향 실험체

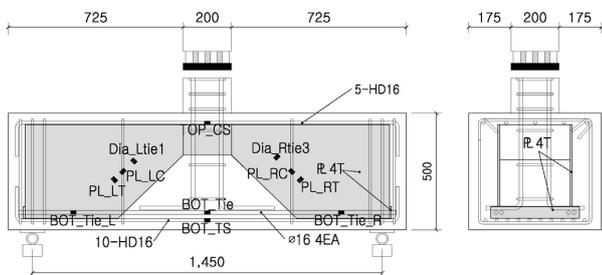
#### 3.2.1 실험체 형상, 재료 조건

실제 기둥 하부에 설치되는 대부분의 기초보강재는 양방향이므로, 이 연구에서는 일방향 실험결과에 근거하여 실제 기초판과 동일한 형상의 양방향 실험체를 제작하였다. 실험에서는 보강재의 유무 및 종류를 변수로 하여 양방향 기초판의 거동을 평가하였다. 특히 양방향실험체는 이방향전단에 의하여 파괴되는 경우가 많으므로 실험에서는 이방향전단 내력을 비교·평가하였다.

실험체 T430은 기초보강재용 강재 철판이 배근되지 않은 실험체이다. 기초보강재용 강재 철판의 내력을 비교 평가하기 위하여 T430J는 그림 4(b)와 같이 J 형 전단보강철판을 배근하였다. 실험체 R430T, R430C 및 R430S는 이 연구에서 제안하고 있는 강판을 이용한 기초보강재를 가력점과 지점사이에 배근한 실험체이다. 실험체 R430T와 R430C는 강재 철판의 두께를 6mm로 하고 인장타이를 2-Ø19를 적용하여 인장타이의 강성을 상대적으로 적게하여 파괴 형태가 인장파괴가 되도록 한 실험체이고, R430S는 강재 철판의 두께를 4mm로 하고 인장타이를 2-Ø30을 적용하여 압축 스트럿의 강성을 상대적으로 적



(a) R500 (단위:mm)

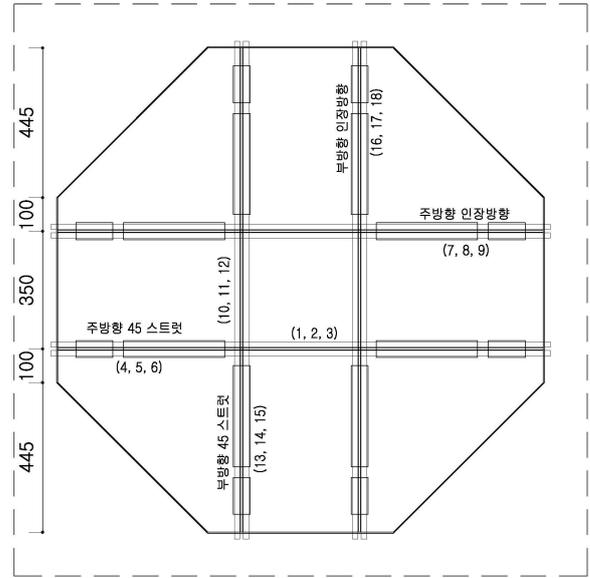


(b) T500 (단위:mm)

그림3. 일방향 기초판의 크기 및 배근도

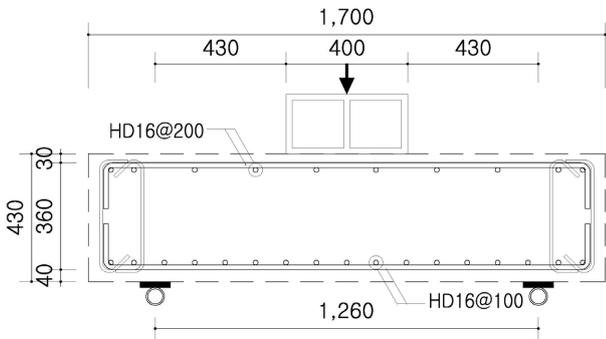
게하여 파괴 형태가 압축파괴가 되도록 한 실험체이다. R430T와 R430C의 재료조건은 동일하지만 R430C의 경우는 집중하중에 의한 이방향 전단을 효율적으로 지지하게 하기 위하여 중간부분에 인장철근을 집중배근한 실험체이다. 실험체의 크기 및 보강재의 배근을 그림 4에 표시하였다. 모든 실험체의 기초판 두께는 430mm 이며 기초판의 넓이는 1,400 mm × 1,700 mm이다.

실험이 수행되는 시점에 측정된 실험체의 콘크리트 압축강도는 26 MPa이었다. 사용한 주인장철근(D16)의 항복강도는 505 MPa 이었고, J형 전단보강철근(D10)의 항복강도는 547 MPa 이었다. 4mm 및 6mm 두께의 기초보강용 강재 철관의 항복강도는 310 MPa이었으며, 인장타이로 사용된 강봉의 항복강도는  $\varnothing 19$  와  $\varnothing 30$ 이 각각 733 MPa과 655 MPa 이다. 양방향 실험체의 특징 및 재료에 대한 상세를 표 2에 나타내었다.

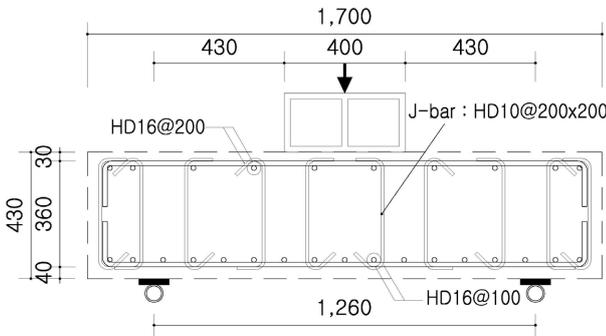


(d) 실험체 평면도 및 게이지 위치 (단위:mm)

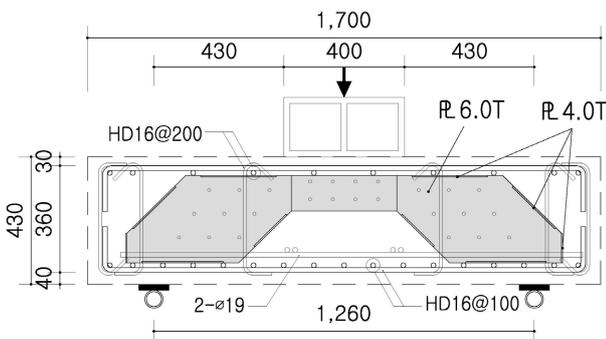
그림4. 양방향 실험체의 크기 및 배근도



(a) T430 (단위:mm)



(b) T430J (단위:mm)



(c) R430T (단위:mm)

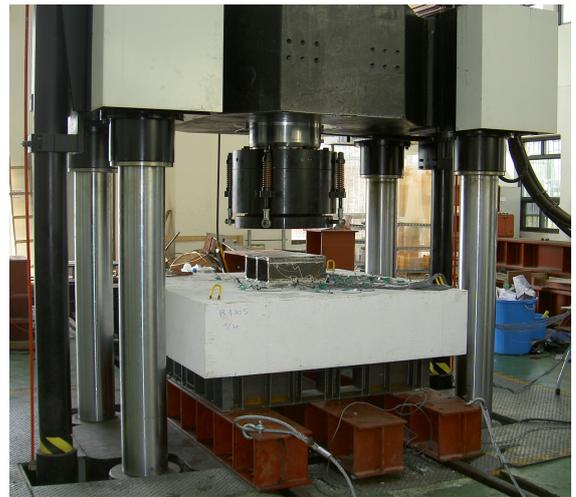


그림5. 실험체 셋팅

### 3.2.2 실험방법 및 계측

양방향 실험체의 전단 성능을 비교평가하기 위하여 10,000kN UTM을 사용하여 그림 5와 같이 실험체의 중앙부에 집중하중을 가력하였다. 실험체의 상하부 주근과 보강재 타이에 각각 변형률게이지를 설치하여, 파괴시 강재의 변형률을 측정하였다. 보강재가 설치된 실험체에서는 보강용 강재 철관에 압축대가 발생하는 지를 검증하기 위하여, 가력점과 지점을 연결한 방향 및 이 방향과 직각되는 방향에 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. (그림 4참조).

## 4. 실험 결과

### 4.1 일방향 실험체

기초보강재가 설치된 R500실험체는 주인장철근이 항복하기 이전에 사인장균열의 폭이 확대되면서 파괴 하였지만 기초보강재가 배근되지 않고 두께가 낮은 실험체 T500와 부재의 높이가 두꺼운 T700실험체는 휨철근이 항복한 이후에 파괴하였다. 기초보강재가 설치된 R500실험체는 그림 6과 같이 중앙하부에 휨균열이 먼저 발생한 이후에, 하중이 증가됨에 따라 휨-전단균열이 발전하였다. 최종적으로 파괴는 휨-전단균열의 균열 폭이 넓어지면서 복부콘크리트의 콘크리트의 압축에 의한 전단파괴를 나타내었다. 인장철근과 인장타이의 변형률은 각각 0.002정도를 나타내었으며, 실험계획과 동일하게 인장부재의 항복은 발생하지 않았다. 압축철근의 변형률은 0.001정도를 나타내었다.

기초보강재가 설치되어있지 않은 T500 실험체의 초기 거동은 R500 실험체와 동일하게 휨균열이 발전하여 휨-전단균열이 발생하였다. T500 실험체는 균열의 수가 R500에 비하여 적게 발생하였으며 균열의 폭이 컸다. 최종적으로 파괴는 휨-전단균열의 균열 폭이 넓어지면서 주인장철근이 항복한 후에 발생하였다. 인장철근의 변형 0.0002정도로 작게 나타났다. 전단변형 측정을 위한 스트

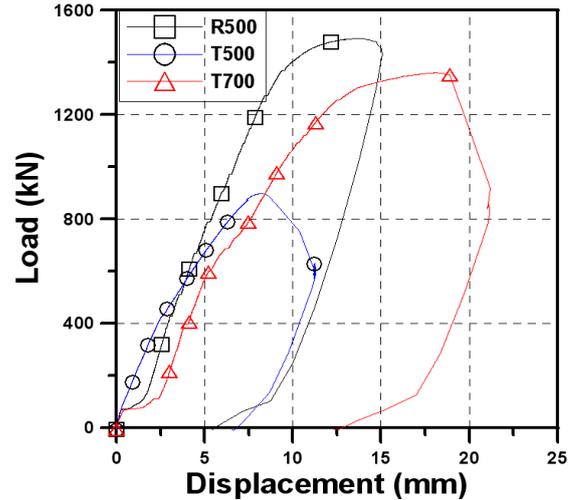


그림7. 일방향 실험체의 하중-변위 관계

럿의 최대 변형률은 0.0008이었다.

T700실험체도 다른 실험체와 동일하게 최초 중앙하부에서 휨균열이 먼저 발생하였다. 하중이 증가됨에 따라

표2. 양방향 실험체 특성 및 재료 조건

실험체	H	d	a	$f_{ck}$	$f_{yJ}$	$f_y$	$f_{pl}$	$f_{tie}$	인장철근 ( $A_s$ )	타이 철근 ( $A_{tie}$ )	철판두께 (mm)	J-형 전단보강철근
	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)				
T430	430	390	430	26	-	505	-	-	17-D16@100	-	-	-
T430J	430	390	430	26	547	505	-	-	17-D16@100	-	-	D10@200
R430T	430	390	430	26	-	505	310	733	17-D16@100	2- $\varnothing$ 19	6.0	-
R430C	430	390	430	26	-	505	310	733	17-D16@100	2- $\varnothing$ 19	6.0	-
R430S	430	390	430	26	-	505	310	655	17-D16@100	2- $\varnothing$ 30	4.0	-

H : 실험체의 높이, d : 실험체 유효깊이, a : 실험체의 전단경간길이,  $A_s$  : 인장철근(하부철근)총단면적,  $f_{ck}$  : 콘크리트 압축강도,  $f_{yJ}$  : J-형 철근의 항복강도,  $f_y$  : 인장철근의 항복강도,  $f_{pl}$  : 강재 철판의 항복강도,  $f_{tie}$  : 인장타이의 항복강도,  $A_{tie}$  : 인장타이 총 단면적

표3. 일방향 실험체의 최대 하중 및 처짐

실험체	$P_n$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)	$P_n / P_{n-T500}$	
			$P_n - T500$	$P_n - T700$
R500	1492.9	13.780	166.4%	109.7%
T500	897.4	8.263	100.0%	66.0%
T700	1360.6	18.107	151.6%	100.0%

$P_n$  : 최대 하중,  $\Delta_{max}$  : 최대 하중에 상응하는 처짐,  $P_{n-T500}$  : T500의  $P_n$ ,  $P_{n-T700}$  : T700의  $P_n$



그림6. R500 실험체 파괴형상

전단 위험단면 부근에서도 균열이 발생하였으며, 점차적으로 가력점 방향으로 기울어지는 휨-전단균열로 변화하였다. 실험체가 거의 파괴하중에 이르렀을 때 지점 부분의 하부 인장철근이 배근되어있는 곳에서 부착파괴

형태의 균열이 일부 발생하였으며, 최종적으로 사인장균열 폭이 넓어지면서 파괴되었다. 인장철근의 변형률은 0.0025로 항복변형률보다 작았다.

실험체의 하중-중앙부 처짐의 관계를 그림 7에 나타내었다. 기초보강재가 설치되지 않은 R500실험체의 최대 하중은 1,492.9 kN으로 기초보강재가 설치되지 않은 실험체 T500의 최대 하중 897.4 kN의 1.66배였다. 부재의 깊이가 700mm이며 기초보강재가 설치되지 않은 실험체 T700의 최대 하중 1,360.6 kN으로 R500실험체 최대 하중의 0.91배였다. R500의 휨강성은 실험체 T700 보다 컸다. 각 실험체의 최대 하중 및 처짐을 표 3에 정리하여 표시하였다.

#### 4.2 양방향 실험체

전단보강철근 및 기초보강 강재 철판이 배근되지 않은 T430 실험체는 가력부 부분의 압괴 및 이방향 전단에 의하여 파괴되었으며, 실험체 측면에서는 미세한 균열이 발생하였다. T430의 인장철근의 변형율의 최대값은 0.0017로 인장철근이 항복하지 않았다. 상부의 압축철근의 변형률은 기초보강재가 적용된 실험체보다 낮은 -0.00035 이었다. 기초보강 강재 철판대신에 J-bar형태의 전단보강철근을 설치한 T430J 실험체도 가력부 부분의 압괴에 의하여 파괴되었다. T430J의 인장철근 변형율의 최대값은 0.0017로 인장철근이 항복하지 않았다. 전단 미끄러짐이 발

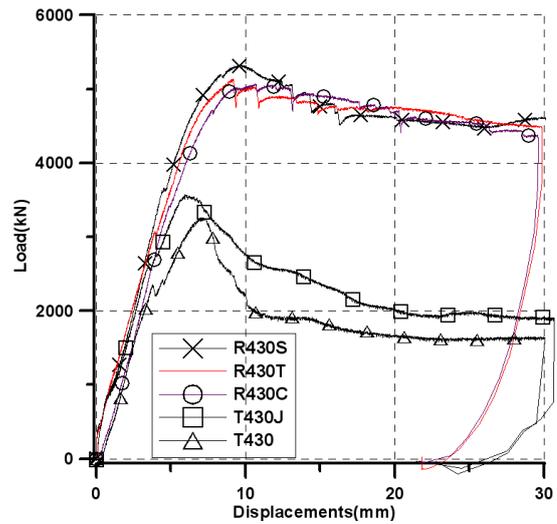
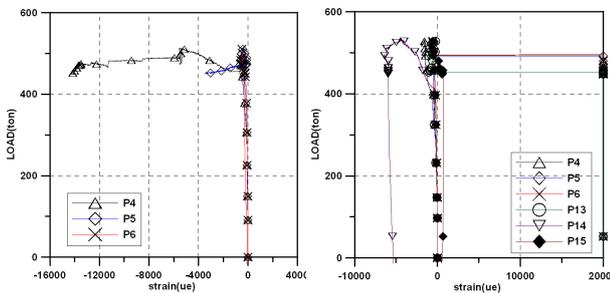


그림9. 양방향 기초보강재 실험체 실험결과

생하는 면을 관통하도록 설치한 수직 철근(J-bar)의 변형률의 최대값은 0.00236로 전단면을 따라 하중이 균등히 전달되었다.

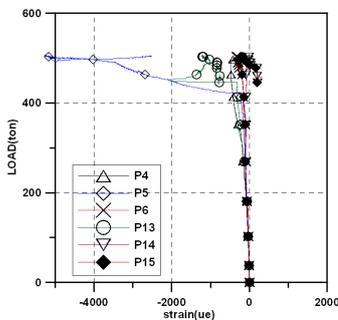
기초보강 강재 철판이 배근된 R430T 실험체는 실험계획과 동일하게 인장철근이 항복한 이후에 양방향 전단 파괴하였다. 실험체 측면에서는 미세한 균열이 발생하였으나, 유의할 만한 균열은 관찰되지 않았다. 압축 스트럿에 배근된 강재보강 철판의 압축변형률도 항복변형률을 초과하였다. 강재보강 철판에서 측정된 압축변형률은 고르게 분포되지 않았으며 일부에서는 항복 변형률을 크게 초과하였다. 그림 8은 R430C 실험체의 강재 철판에 부착된 변형률 게이지로부터 측정된 하중-압축변형률 관계를 나타낸다. R430T 실험체와 동일한 6mm 두께의 기초보강재가 설치되었지만 가력점 부근에 주인장철근이 집중적으로 배근된 R430C 실험체도 R430T 실험체와 유사하게 인장철근이 항복한 이후에 이방향 전단파괴하여 주인장철근의 배열이 기초판 전체 거동에 큰 영향을 미치지 않음을 나타내었다. R430C 실험체의 강재 철판 변형률도 그림 8(b)와 같이 항복 변형률에 도달하였다.

기초보강 강재 철판 두께 4mm, 인장타이 2-Ø30으로 한 R430S 실험체도 실험계획과는 다르게 인장철근이 항복한 이후에 이방향 전단파괴하였다. R430S 실험체의 강재 철판 변형률도 그림 8(c)와 같이 항복 변형률에 도달하였다. 이는 철판을 보강한 콘크리트의 압축대의 내력이 현행구조설계기준식에 의하여 예상하여 계획한 압축대의 내력을 초과하였기 때문으로 판단된다. 실험체의 하중-중앙부 처짐의 관계를 그림 9에 나타내었다. 기초보강재가 설치되지 않은 실험체 T430 및 T430-J의 최대 하중은 각각 3,262.3 kN 및 3,571.7 kN이었다.



(a) R430T

(b) R430S



(c) R430C

그림8. 보강재 철판의 하중-압축변형률 관계

표4. 양방향 실험체의 최대 하중 및 처짐

실험체	$P_n$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)	$P_n/P_{n,T430}$	$P_n/P_{n,T430J}$
T430	3262.3	7.21	100.0%	91.3%
T430J	3571.7	5.94	109.5%	100.0%
R430T	5138.8	9.19	157.5%	143.9%
R430C	5069.7	10.65	155.4%	141.9%
R430S	5324.3	9.53	163.2%	149.1%

$P_n$  : 최대 하중,  $\Delta_{max}$  : 최대 하중에 상응하는 처짐,  $P_{n,T430}$  : T430의  $P_n$ ,  $P_{n,T430J}$  : T430J의  $P_n$

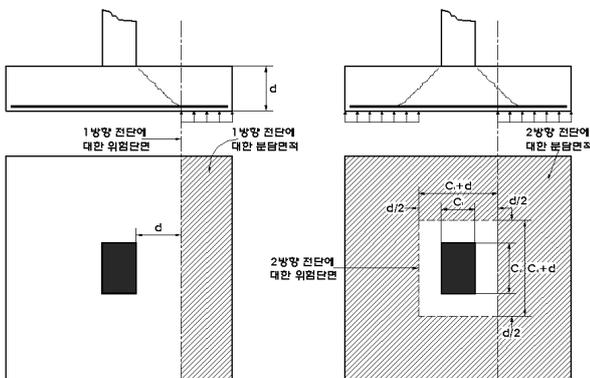
5. 실험 내력 평가

5.1 구조설계기준에 의한 평가

일방향 및 양방향 기초의 내력은 콘크리트 구조설계 기준 2007<sup>4)</sup>에 근거하여 휨내력과 전단내력을 계산하였다. 1방향 전단강도에 대해 기준에서는 그림 10(a)과 같이 기둥 단면에서 기초의 유효깊이 (d)만큼 떨어진 위치의 전단강도로 규정하며, 전단내력  $V_{n,kci}$ 는 다음과 같이 계산한다. 이 연구에서는 콘크리트 구조설계 기준 2007에 철판에 의한 내력을 추가하여 계산하였다.

$$V_{n,kci} \leq (V_c + V_s + V_{pl}) \quad (1)$$

여기서,  $V_c$ 는 콘크리트에 의한 전단강도,  $V_s$ 는 전단보강 철근에 의한 전단강도,  $V_{pl}$ 은 보강철판에 의한 전단강도이다. 기초판의 이방향 전단강도는 그림 10(b)와 같이 기둥 주변으로부터 기초판 유효깊이(d)의 1/2위치에서 위험단면의 둘레길이를 이용하여 식(2 a, b, c)에 의하여 계산하였다.



(a) 일방향 기초판 (b) 이방향 기초판  
그림 10. 기초판의 전단 내력

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \sqrt{f_{ck}} b_0 d \quad (2a)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{\alpha_s d}{2b_0}\right) \sqrt{f_{ck}} b_0 d \quad (2b)$$

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f_{ck}} b_0 d \quad (2c)$$

여기서,  $\beta_c$ 는 기둥의 긴 변 길이 / 짧은 변 길이,  $b_0$ 는 위험단면의 둘레 길이,  $\alpha_s$ 는 40(내부기둥, 위험단면의 수가 4인 경우), 30(외부기둥, 위험단면의 수가 3인 경우), 20(모서리 기둥, 위험단면의 수가 2인 경우),  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도,  $d$ 는 단면의 유효높이 이다.

양방향 기초의 전단내력도 식(2a, b, c)에 의하여 계산한 콘크리트의 전단 내력에 보강용 철판의 내력을 더하여 계산하였다. 보강용 철판에 의한 전단강도는 식(3)에 의하여 계산하였다.

$$V_{pl} \leq \rho_{pl} f_{pl} b_w d \quad (3)$$

여기서  $\rho_{pl}$ 은 철판의 철근비이며 식(4)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\rho_{pl} = \frac{n t}{b_w} \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 철판의 수이며  $t$ 는 철판의 두께이다.

5.2 스트럿-타이 모델에 의한 평가

이 연구에서는 기초의 내력을 콘크리트 구조설계 기준에 의한 평가와 함께 스트럿-타이 모델에 의하여 계산하

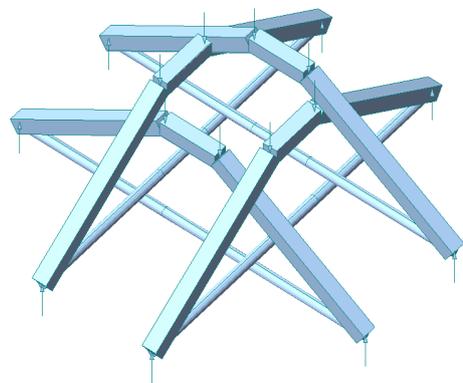
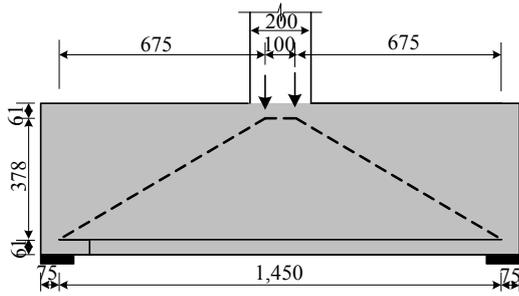
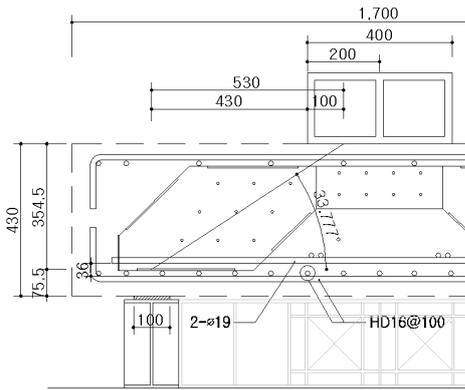


그림 11. 3차원 스트럿-타이 모델



(a) 일방향 실험체 R500의 STM

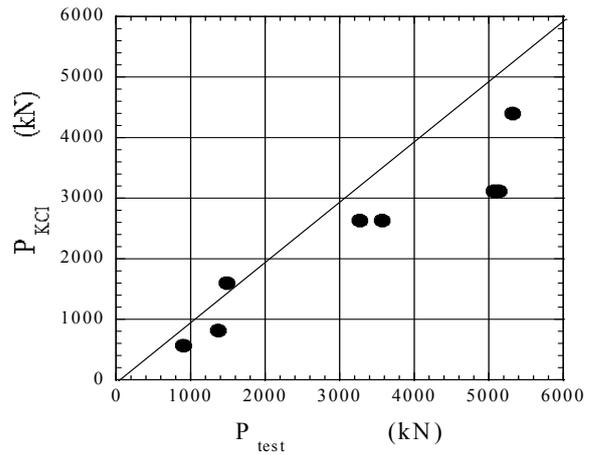


(b) 이방향 실험체 R430T의 STM

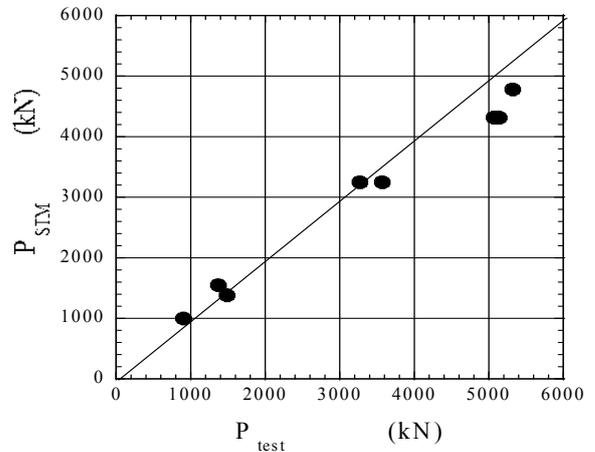
그림 12. STM 기하학 형상 (단위:mm) 참고문헌

었다. 기초판은 부재의 기하학적 형태와 하중이 급격하게 변화하는 D구역에 속하는 부재로써 평면유지의 법칙이 적용되지 않는 응력교란구역이다. 스트럿-타이 모델은 선정된 모델에 의하여 계산 결과에 많은 차이를 나타낸다.

이 연구에서는 실제 하중 조건과 가장 유사한 형태인 그림 11과 같은 3차원 스트럿-타이 모델을 우선 선정하였다. 그러나 3차원 스트럿-타이 모델을 계산하기에는 다소 계산과정이 복잡하므로 이를 그림 12와 같이 2차원 스트럿-타이 모델로 단순화 하였다. 가력점의 하중이 8개의 지점으로 전달되는 3차원 스트럿-타이 모델을 2차원



(a) KCI 기준과 비교 (식(1))



(b) STM해석 결과와 비교

그림 13. 실험과 해석결과의 비교

스트럿-타이 모델로 전환하기 위하여 2차원 모델을 단변 방향과 장변방향을 각각 계산한 후에 이들 값을 중첩하

표 5. 해석결과 및 실험결과 비교

실험체명	$P_{TEST}$ (kN)	$P_{KCI}$ (kN)	$P_{STM}$ (kN)	$P_{TEST} / P_{KCI}$	$P_{TEST} / P_{STM}$	파괴모드		
						실험	KCI	STM
R500	1492.9	1592.6	1382.6	0.94	1.08	스트럿	휨항복	스트럿
T500	897.4	570.2	1001.9	1.57	0.90	휨항복	스트럿	휨항복
T700	1360.6	819.7	1546.5	1.66	0.88	휨항복	스트럿	휨항복
T430	3262.3	2626.8	3246.3	1.24	1.00	스트럿	휨항복	휨항복
T430J	3571.7	2625.8	3246.3	1.36	1.10	스트럿	휨항복	휨항복
R430T	5138.8	3123.8	4314.0	1.65	1.19	휨항복	휨항복	휨항복
R430C	5069.7	3123.8	4314.0	1.62	1.17	휨항복	휨항복	휨항복
R430S	5324.3	4397.5	4782.0	1.21	1.11	휨항복	휨항복	스트럿

$P_{TEST}$  : 실험하중,  $P_{KCI}$  : 콘크리트구조설계기준에 의한 계산 하중,  $P_{STM}$  : 3차원STM에 의하여 계산한 하중

여 내력을 계산하였다. 스트럿-타이 모델을 선정한 이후에 기준에서 정하는 설계법에 의하여 부재의 내력을 다음과 같이 계산하였다.

- ① STM의 기하학적인 형태 (부재의 D영역을 결정하고, 영역 내에서 힘의 흐름에 기초하여 압축재, 인장재 및 절점을 배치)
- ② 작용하는 하중에 근거하여 각 압축재, 인장재에 작용하는 축력 계산
- ③ 콘크리트의 유효압축강도와 하중계수를 계산하고 스트럿의 형태와 강도계산
- ④ 절점영역의 분포와 강도 계산

이 연구에서는 부재의 공칭 내력을 평가하는 것이 목적이므로 강도저감계수( $\phi$ )를 사용하지 않았으며 철근의 정착 및 배근에 대해서는 고려하지 않았다. 콘크리트 구조설계 기준 및 스트럿-타이 모델에 의하여 계산한 결과를 표 5에 표시하였다. 부록에서는 실험체 R430-1에 대하여 계산한 스트럿-타이 모델 계산 과정을 상세하게 기술하였다. 표 5의 파괴모드 구분에서 “스트럿”이란 휨인장철근이 항복하기 이전에 전단파괴함을 말하며, “휨항복”이란 휨인장철근이 항복하고 부재가 파괴됨을 의미한다.

그림 13에는 실험에서 관찰된 내력과 해석 결과를 비교하였다. 표 5 및 그림 13에서 콘크리트 구조설계 기준 2007 (식(1))에 근거하여 계산된 내력은 실제 내력을 최대 66%까지 과소평가함을 알 수 있다. 스트럿-타이 모델에 의하여 계산한 결과는 그림 13에서 보여지는 것과 같이 비교적 정확하게 기초판의 내력을 평가하였다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 기존의 철근콘크리트 기초부의 크기를 줄일 수 있는 신 기초보강공법을 개발하고 개발된 기초보강재에 대한 구조 실험 및 스트럿-타이 모델에 의한 구조 해석을 실시하였다. 개발된 공법은 강재 철판을 기둥과 기초판의 압축대 사이에 배근하고, 인장재를 기초판 하부에 배근하여 기둥으로부터 전달되는 압축하중을 압축 스트럿을 통하여 직접 지반에 효과적으로 전달할 수 있게 하였다.

개발된 공법을 검증하기 위하여 총 8개의 일방향 및 이방향 기초판 실험을 실시하였다. 이 연구에서 수행한 실험 및 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기초판의 압축대에 배근된 강재 철판은 큰 미끄러짐이 발생함이 없이 콘크리트와 일체화 되어 상부 하중을 기초판에 직접 전달하였다.
- (2) 강재 보강 철판을 기초판의 압축대에 배근함으로써 기초판의 내력은 동일 형상의 무보강 실험체에 비하여 약 60%이상 증가하였다. 이는 강재 철판을

사용할 경우 기초판의 깊이를 60%까지 감소시킬 수 있음을 의미한다.

- (3) 콘크리트 구조설계 기준 2007 (식(1))에 근거하여 계산된 기초판 내력은 실제 내력을 최대 66%까지 과소평가하였다.
- (4) 3차원 스트럿-타이 모델을 단변방향과 장변방향으로 전환한 2차원 스트럿-타이 모델에 의하여 강재 보강 기초판의 내력을 비교적 정확하게 평가하였다.

## 참고문헌

1. T. Nagisa, T. Sato, B. Wada, and K. Minami, "Compressive Properties of RC Column with Core Concrete," Architectural Institute of Japan, Journal of Structural Engineering, Vol. 47B 2001, pp.469-475.
2. T. Nagisa, Y. Nishimaru, T. Sato, B. Wada, and K. Minami, "Ductility of RC Column with Core Concrete," Architectural Institute of Japan, Journal of Structural Engineering, Vol. 53B 2007, pp.451-457.
3. A. Usui, T. Sato, K. Minami, and B. Wada, "The Remaining Axial Strength of RC Columns, Reinforced by Thin Steel Spiral Tube, after Alternative Horizontal Load," Proceeding of the Japan Concrete Institute, Vol. 21. No.3, 1999, pp.625-630.
4. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 한국콘크리트학회, 2007.

## 부록.1 스트럿 타이 모델에 의한 내력 평가

[대상 실험체 R430T]

Step-1) 기하학적 모델 설정

Step 2) 경사 Strut의 각도와 유효 폭 계산

① 부재의 유효 깊이( $d_v$ )를 계산한다.

$$d = \text{부재 높이} - \text{철근과 타이의 중심까지의 거리} \\ = 430 - \{40 + (16 + 36 + 19) / 2\} = 354.5 \text{mm}$$

$$d_v = \text{부재 높이} - \text{철근과 타이의 중심까지의 거리} * 2 \\ = 430 - \{40 + (16 + 36 + 19) / 2\} * 2 = 279.0 \text{mm}$$

② 인장재의 폭( $w_t$ )를 계산한다.

$$w_t = \{40 + 16 / 2 + (16 / 2 + 36 + 19) / 2\} * 2 = 149.5 \text{mm}$$

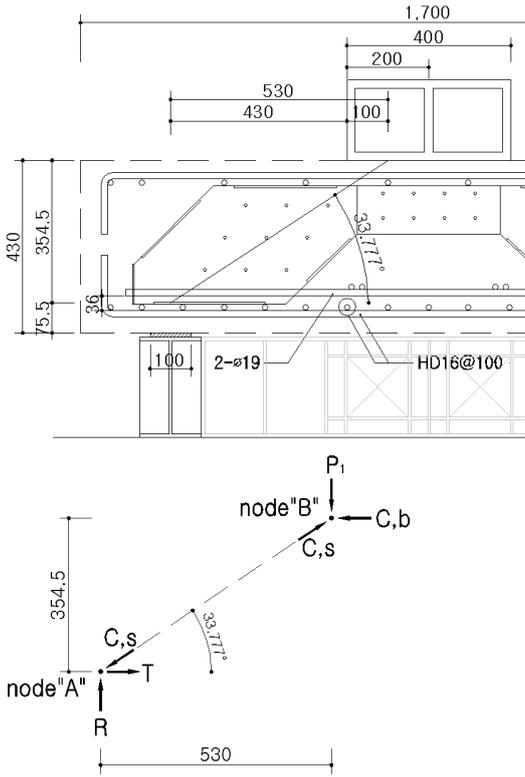
③ 경사 스트럿과 부재축이 이루는 각도를 계산한다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}(279.0 / 530) = 32.7^\circ$$

④ 경사 스트럿의 폭을 계산한다.

$$w_{sb1} = l_b \sin \theta_1 + w_t \cos \theta_1 \\ = 100 \sin 32.7^\circ + 149.5 \cos 32.7^\circ \\ = 179.83 \text{mm}$$

Step 3) 경사 Strut과 타이의 내력 계산



부록그림 1. R430T의 STM (단위:mm)

① 경사 스트럿의 내력을 계산한다.

- 스트럿의 유효폭(bs)

$$bs = \text{지점간의 거리} / 2\text{legs} \\ = 1260 / 2\text{legs} = 630.0\text{mm}$$

$$- F_{ns,1} = (0.85 f_{ck} \beta_s b_s w_{sbl}) + (f_{pl} \beta_s t_{pl} w_{sbl}) \\ = \{(0.85 \times 26.0 \times (0.75 \times 630.0) \times 179.83) \\ + (310 \times 0.75 \times 6.0 \times 179.83)\} \times 10^{-3} \\ = 2379.6 \text{ kN}$$

② 타이의 내력을 계산한다.

- 유효철근량

$$A_s = 198.6\text{mm}^2/\text{m} \times (630) \times 2/100 \\ = 2502.36 \text{ mm}^2/\text{leg}$$

$$A_{tie} = 567.06\text{mm}^2/\text{leg} \quad (2-\phi 19)$$

$$- f_{nt} = (A_s f_y + A_{tie} f_{tie}) \times 10^{-3} \\ = (2502.36 \times 505 + 567.06 \times 733) \times 10^{-3} \\ = 1679.3 \text{ kN}$$

Step 4) 지점 절점 내력 계산

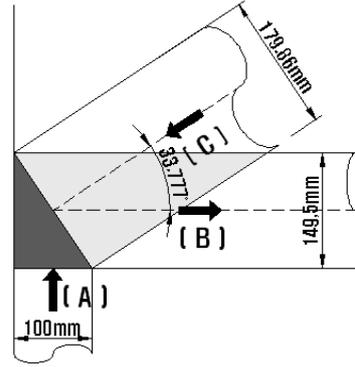
① 반력 (A)에 의한 절점 내력

$$F_{n1,A} = 0.85 \cdot \beta \cdot f_{ck} \cdot b_{wA} \cdot w_A$$

$$F_{n1,A} = 0.85 \cdot 0.8 \cdot 26 \cdot 630.0 \cdot 100 = 1,113.8\text{kN}$$

② 타이 (B)에 의한 절점 내력

$$F_{n1,B} = 0.85 \cdot \beta \cdot f_{ck} \cdot b_{wA} \cdot w_A$$



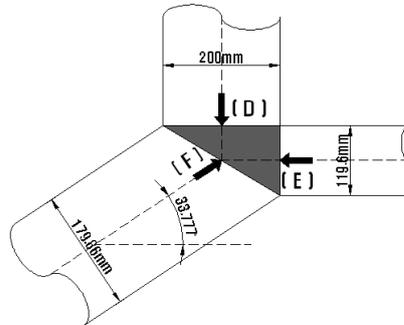
$$F_{n1,B} = 0.85 \cdot 0.8 \cdot 26 \cdot 149.50 \cdot 630 = 1,665.2\text{kN}$$

③ 경사 스트럿 (C)에 의한 절점 내력

$$F_{n1,C} = 0.85 \cdot \beta \cdot f_{ck} \cdot b_{wA} \cdot w_A$$

$$F_{n1,C} = 0.85 \cdot 0.8 \cdot 26 \cdot 630.0 \cdot 179.86 = 2,003.4\text{kN}$$

Step 5) 가력점 절점 내력 계산



① 하중 (D)에 의한 절점 내력

$$F_{n1,D} = 0.85 \cdot \beta \cdot f_{ck} \cdot b_{wA} \cdot w_A$$

$$F_{n1,D} = 0.85 \cdot 1.0 \cdot 26 \cdot 630.0 \cdot 200 = 2,784.6\text{kN}$$

② 수평스트럿 (E)에 의한 절점 내력

$$F_{n1,E} = 0.85 \cdot \beta \cdot f_{ck} \cdot b_{wA} \cdot w_A$$

$$F_{n1,E} = 0.85 \cdot 1.0 \cdot 26 \cdot 630.0 \cdot 119.6 = 1,656.8\text{kN}$$

③ 경사 스트럿 (F)에 의한 절점 내력

$$F_{n1,F} = 0.85 \cdot \beta \cdot f_{ck} \cdot b_{wA} \cdot w_A$$

$$F_{n1,F} = 0.85 \cdot 1.0 \cdot 26 \cdot 630.0 \cdot 179.86 = 2,503.8\text{kN}$$

Step 6) 개개의 내력으로부터 최대하중 산정

① 경사 스트럿 내력과 관련된 최대 수직하중

$$P_{strut} = (F_{ns,1} \sin \theta_1) \times 2\text{legs} \times 2\text{면} \\ = 2379.6 \times \sin 32.7 \times 2\text{legs} \times 2\text{면} = 5143.5 \text{ kN}$$

② 타이 내력과 관련된 최대 수직하중

$$f_{tie} = (f_{tie,1} \tan \theta_1) \times 2\text{legs} \times 2\text{면} \\ = 1,679.3 \times \tan 32.7 \times 2\text{legs} \times 2\text{면} = 4312.7\text{kN}$$

③ 지점 절점 내력과 스트럿과 타이에 대한 내력의 비교 검토

(接受: 2009. 2. 26)