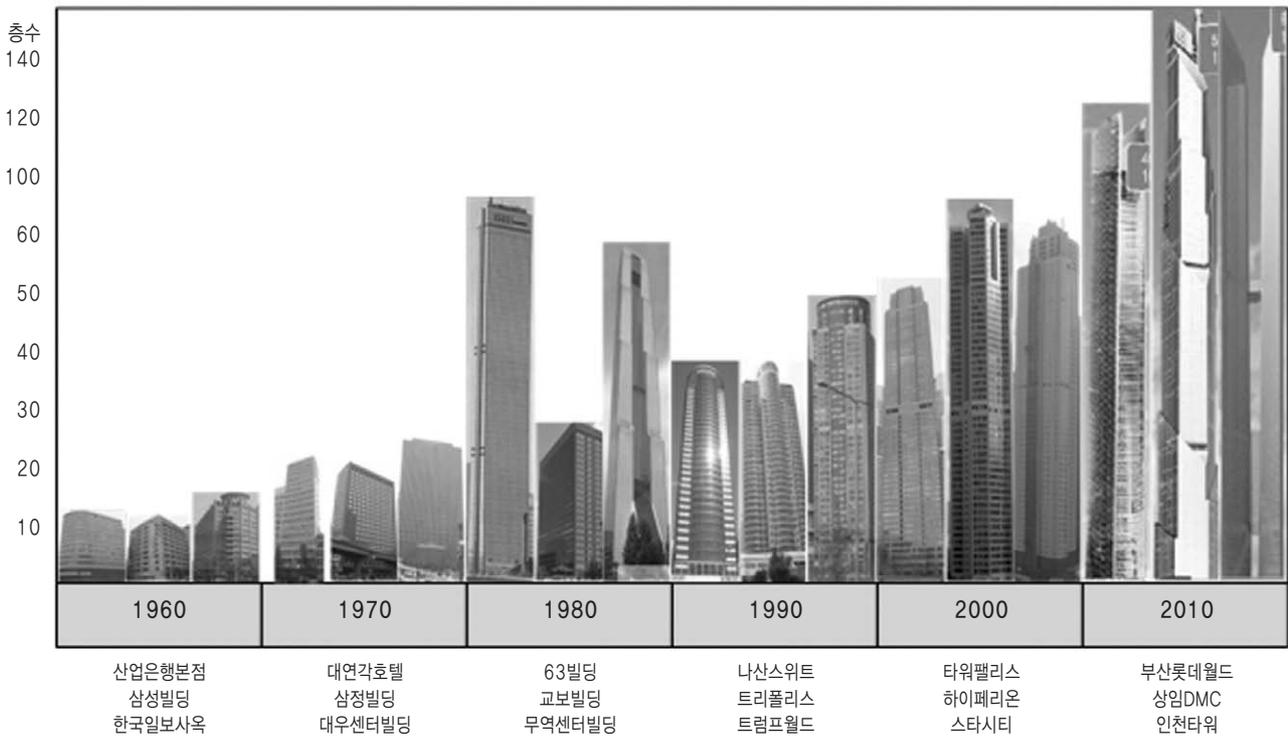


Strut & Tie Model을 이용한 철근콘크리트 기초의 보강 공법



윤상문
(주) 바로건설기술 소장

1. 머리말



〈 그림 1 국내 고층건물 현황 〉

산업화가 시작된 60년대 이후 건축물의 높이는 점점 높아지고 있으며, 90년대와 2000년대를 거치면서 건물의 높이는 40층, 50층 이상이 건설되어가고 있고, 현재에는 100층 규모의 건축물들이 계획되어지고 있는 현실이다.

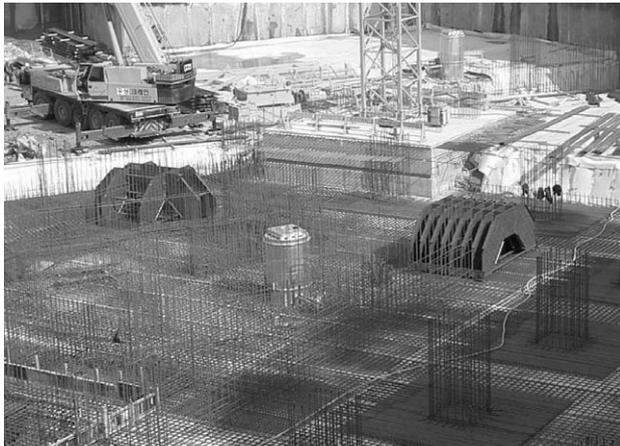
건축물이 높아지게 되면 이를 지탱하기 위한 기초구조물의 규모도 증가하게 되는데, 1~1.5m 규모의 기초에서부터 현재는 2m, 3m를 넘어 5m의 규모로 까지 기초의 두께가 점점 증가되고 있다.

이렇게 기초의 두께가 두꺼워지게 되면, 일일 타설되는 콘크리트물

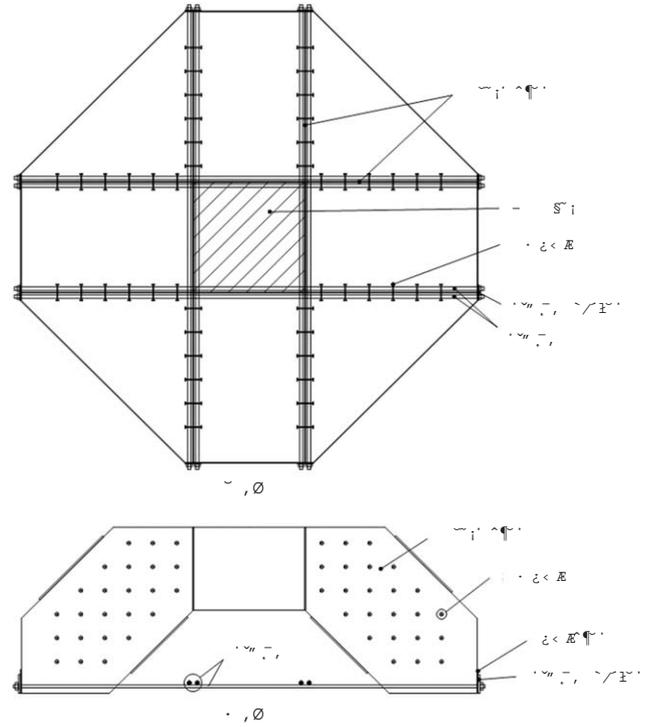
량의 한계로 인하여 기초타설을 여러 구획으로 나누어 타설하여야 하고, 이로 인한 시공조인트 사이의 수밀성 확보의 문제라든가, 공기지연의 문제들이 발생하게 되며, 기준상에 요구되는 최소 온도철근량이 과다해지기도 하며, massive 한 콘크리트 타설로 인한 수화열 문제가 대두되기도 한다. 특히 암반 지반에서의 기초공사일 경우에는 암반타파기로 인한 공기지연 및 민원이 발생하는 등의 문제점이 발생하게 된다.

따라서 기초두께를 줄일 수 있는 기술에 대한 필요성은 근래에 와서 더욱더 절실하게 요구되어 왔고, 많은 연구와 실험이 진행되고 있다. 그 한 사례로서 Strut & Tie Model 이론 및 구법을 적용하여 기초 두께를 줄일 수 있는 공법을 두산건설(주)와 (주)바로건설기술에 의해 5년 여의 연구와 수차례에 걸친 실험적 검증을 거쳐 개발하여 2008년 건설신기술인 제548호로 지정받았다.

건설신기술의 정식 명칭은 Strut & Tie Model을 이용한 아치형 철판과 강봉으로 구성된 철근콘크리트 기초 보강 공법 이다.



〈 그림 2 건설현장에 적용된 기초보강재 사례 〉



〈 그림 3 기초보강재의 형상 〉



〈 그림 4 철판 〉

기초보강재의 구성요소

기초보강재는 스트럿 거동과 인장타이의 거동이 충분히 발휘되도록 〈그림 3〉과 같이 구성되어 있으며, 각 부분의 역할 및 형태는 다음과 같다.

(1) 철판

기초 콘크리트와 같이 상부 기둥에서 전달되는 압축력을 기초 하부로 전달하는 압축스트럿 역할을 하는 부재로 주 재질은 SM400 철판을 사용한다. 철판의 표면에는 콘크리트와의 합성거동을 위하여 전단연결재를 설치하며, 철판 끝단에는 스트럿 방향과 평행하게 정착 및 보강 역할을 하는 보강철판이 설치된다. 철판의 두께는 구조설계에 따라 결정되며 통상 9~16mm 정도를 사용한다.



〈 그림 5 스트럿 볼트 용접 〉

(2) 인장타이

인장 타이는 하부철근과 함께 하부에 발생하는 인장력을 저항하는 스트럿 타이 모델의 타이 역할을 한다. 하부 타이는 철판 양면에 1개 또는 2개씩 설치되며, 인장타이의 확실한 정착을 위하여 철판 하부면과 정착판 모두에 용접하여 정착한다. 하부 타이는 주방향과 부방향에 따라서 그 높이를 달리하여 서로 교차되도록 설치된다. 인장 타이는 기초보강재의 성능에 따라 HD38-HD51의 대구경 철근을 사용한다.



〈 그림 6 인장 타이그림 〉



〈 그림 7 인장타이 정착판 〉

(3) 인장타이 정착판

인장타이에 의하여 발생하는 응력을 분산시키기 위하여 연결철판과 외부에 덧붙이는 철판으로 하부타이는 연결철판과 정착판을 관통 시킨후 전체 둘레를 용접하여 제작한다. 철판 두께와 크기는 하부 타이의 규격에 따라 달라진다.

(4) 전단연결재

철판에 설치하여 철판과 콘크리트가 일체로 거동되도록 하는 전단

연결재(Shear connector)의 역할을 한다. 일반적인 철골보용 스티드 볼트(Stud bolt)를 스티드 건으로 용접하여 제작된다.

(5) 연결철판

철판 끝단 하부에 설치되어 철판을 서로 연결해주는 역할을 한다. 연결철판의 두께는 철판과 동일한 규격으로 하고, 높이는 통상 200mm에서 350mm정도로 한다.

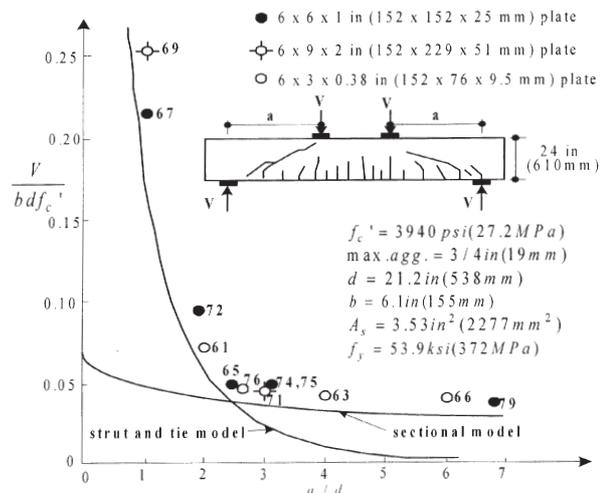
기초보강재에 대한 스트럿-타이 모델 적용

Strut and Tie Model 설계법

Strut and Tie Model(이하, STM)은 소성이론과 힘의 평형조건을 이용한 트러스모델의 일종으로 부재의 응력교란구역의 전단설계에 효율적인 설계법으로, 특히 유효춤이 깊어 전단스팬비가 작은 부재의 전단설계에 효율적이다.

ACI 318-05 기준1)에서는 STM을 이용한 부재의 응력교란구역에 대한 전단설계법을 Appendix A에 기술하였다. STM은 힘의 흐름을 명확히 파악하여 보다 합리적인 방법으로 응력교란구역의 내력을 계산할 수 있지만, STM의 기하학적 형태결정 및 힘의 흐름과 약에 익숙하지 않은 구조기술자에게는 현행의 실험적 결과에 근거한 반경험식보다 STM설계법이 복잡할 수 있다.

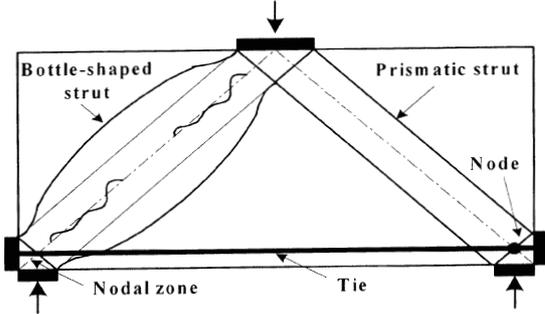
〈그림 8〉은 Kani의 전단스팬비를 변수로 한 철근콘크리트 보의 실험결과를 STM과 Collins 등의 트러스모델로 해석한 결과를 비교하고 있다. 〈그림 8〉에서 트러스모델은 전단스팬비가 2.5이하일 때 보의 전단내력을 과소 평가하지만, STM은 전단스팬비가 2.5이하인 보의 전단내력을 매우 정확하게 예측하여 응력교란구역에서는 STM이 매우 효율적인 설계법임을 알 수 있다.



〈 그림 8 RC 보의 전단실험 결과와 STM 및 트러스모델에 의한 결과의 비교 〉

Strut and Tie Model의 구성요소

STM은 '스트럿'과 '타이' 및 '절점'으로 이루어진 트러스모델로 각 구성요소의 특징은 아래와 같다.



< 그림 9 STM의 구성요소 >

(1) 스트럿(strut)

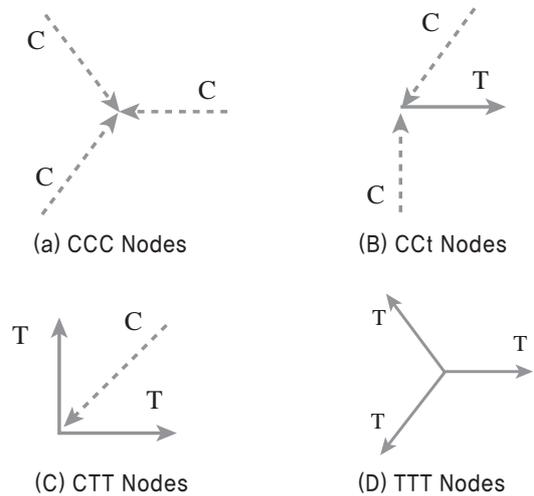
스트럿은 STM의 압축재를 말한다. 스트럿의 형태는 힘의 분포에 의하여 프리즘(prismatic), 아치(arch), 부채모양(fan-shape), 병모양(bottle-shape) 스트럿으로 이상화한다. 병모양 스트럿은 그림 9와 같이 스트럿의 중간부위의 압축력을 받는 콘크리트의 폭이 옆으로 퍼질 수 있는 스트럿이다. 설계의 단순화를 위하여 병모양 스트럿은 프리즘형 또는 단면이 일정하게 감소하는 스트럿(tapered strut)으로 단순화될 수 있다. 병모양 스트럿의 단면적은 스트럿 양쪽 끝 단면적 중에 작은 값을 택한다.

(2) 타이(tie)

타이는 STM의 인장재를 말한다. 타이는 철근, 프리스트레싱 철근, 철근주위의 콘크리트로 구성된다. 철근주변 콘크리트는 스트럿과 타이에 작용하는 힘이 정착되기 위한 영역을 포함한다. 설계에서는 타이 안에 있는 콘크리트는 타이에 작용하는 축력을 저항하지 않는다고 가정하지만, 실제로 주변콘크리트는 사용하중시에 철근의 인장변형을 감소시킨다.

(3) 절점(node)

절점은 STM에서 스트럿과 타이 그리고 집중하중이 작용하는 접합부의 축이 교차하는 한 점을 말한다. STM의 절점에는 평형조건을 만족하기 위하여 적어도 세 개의 힘이 작용하여야 한다. 절점은 힘의 작용방향에 따라 <그림 10>과 같이 C-C-C (세개의 압축력 작용), C-C-T (두개의 압축력과 한 개의 인장력 작용), C-T-T (한개의 압축력과 두 개의 인장력 작용), T-T-T (세개의 인장력 작용)으로 구별된다.



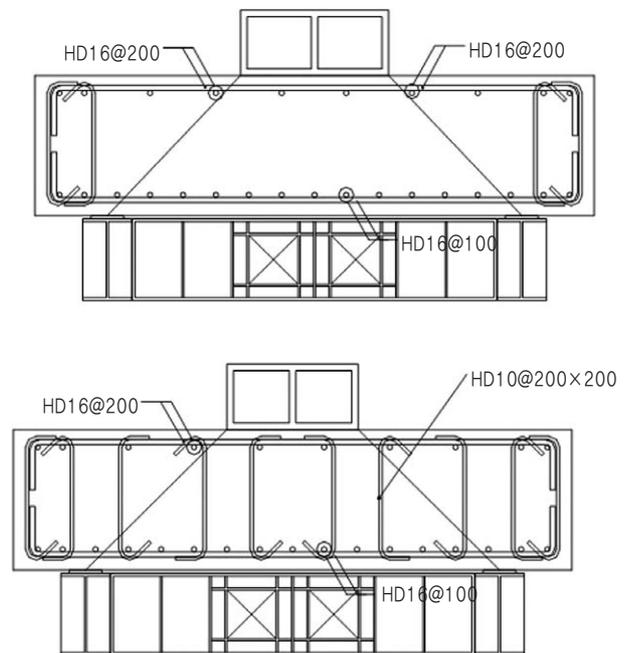
< 그림 10 절점의 종류 >

(4) 절점 영역(nodal zone)

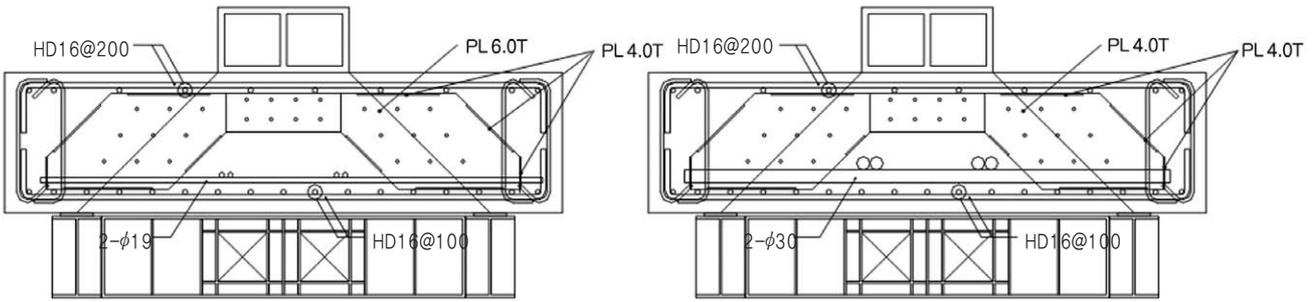
절점영역은 STM에서 하중이 전달될 수 있는 절점주위의 콘크리트의 체적을 말한다. 수압정적응력(hydrostatic stress)을 받는 절점영역의 면은 스트럿과 타이의 축에 수직한다.

기초보강재 실험

실제 기둥 하부에 설치되는 대부분의 기초보강재는 양방향으로 전단에 저항하는 것이 일반적이며, 이러한 기초보강재의 성능을 검증하기 위하여, 양방향으로 보강된 실험체에 대한 뚫림 전단 실험을 수행하였다.



< 그림 11 실험체 상세도 (단위: mm) >



〈 그림 11 실험체 상세도 (단위: mm) 〉

〈 표 1 실험체 상세현황 〉

실험체	H	f_{ck}	상부배근 하부배근	강도 (MPa)	타이		철판		비고
	(mm)	(MPa)			규격	강도(MPa)	규격	강도(MPa)	
T430	430	27	17-HD16@100	490	전단보강 없음				
T430J	430	27	17-HD16@100	490	J-bar : HD10@200×200				철근보강
R430T	430	27	17-HD16@100	490	2-φ19	790	6.0t	260	타이 파괴
R430C	430	27	17-HD16@100	490	2-φ19	790	6.0t	260	균열 보완
R430S	430	27	17-HD16@100	490	2-φ30	790	4.0t	260	스트럿 파괴 절점 파괴

실험체 크기 : 1.7m×1.7m



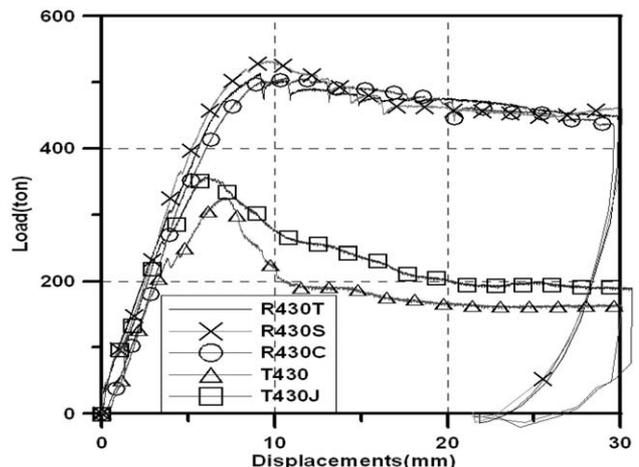
〈 그림 12 실험체 셋팅(1000톤 UTM) 〉



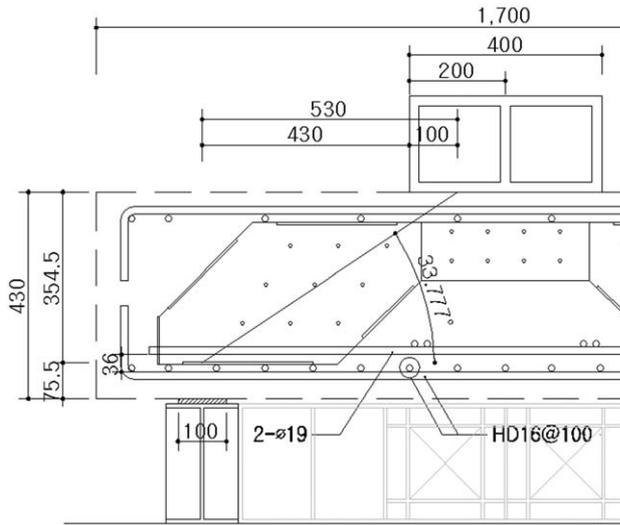
〈 그림 13 R430T 실험체 지지면 균열사진 〉



〈 그림 14 R430S 실험체 가력부 균열사진 〉



〈 그림 15 하중 변위 곡선 〉



〈 그림 16 기하학적 형상과 이상화된 모델 〉

STM을 이용한 일방향실험체의 예상 내력

R430T 실험체의 예상 내력을 STM을 적용하여 최대 내력을 추정한다. 재료의 특성은 재료 실험의 결과를 이용하였고, 기하학적 특성은 STM 방식을 적용하였다.

(1) 단변방향의 Strut의 각도와 유효 폭 계산 : 기하학적 형상 계산

$$\text{유효춤 } d = 430 - \{40 + (16 + 36 + 19)/2\} = 354.5\text{mm}$$

$$q = \tan^{-1}\left(\frac{354.5}{530}\right) = 33.78^\circ > 25^\circ$$

$$\text{타이 춤 } (\omega_t) = \{40 + (16 + 36 + 19)/2\} \times 2 = 151.0\text{mm/leg}$$

(2) Strut(Fn.s) 내력 계산

$$\begin{aligned} \text{스트럿 춤 } (\omega_{s,b}) : \omega_{s,b} &= l_b \cos\theta + \omega_t \sin\theta \\ &= 100 \times \sin 33.78^\circ + 151.0 \times \cos 33.78^\circ \\ &= 181.11\text{mm/leg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{스트럿 폭 } (b_s) : b_s &= (\text{기둥폭} + d) / 2\text{legs} = (400 + 354.5) / 2 \\ &= 377.25\text{mm/leg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{① strut of concrete : } Fn.s,c &= (0.85 \cdot f_{ck}) \times (\beta \cdot \omega_{s,b}) \times b_s \\ &= 1176.02\text{KN/leg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{② strut of plate : } Fn.s,pl &= F_y \times (\beta \cdot f_{ck}) \times t \\ &= 260 \times (0.75 \times 181.11) \times 6 \\ &= 211.90\text{KN/leg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{③ strut force 소계 : } Fn.s &= Fn.s,c + Fn.s,pl \\ &= 1387.91\text{KN/leg} \end{aligned}$$

④ strut force에 의한 수직하중 : $R_{1,c} = Fn.s \times \sin\theta$

$$= 771.63\text{KN/leg}$$

(3) 타이내력 계산(Fn.t)

$$\begin{aligned} \text{① 철근 force } (As_{s1}) &= 1986\text{mm}^2/\text{m} \times (400 + 354.5 \times 2) / \\ &1000 \div 2\text{legs} = 1101.27\text{mm}^2/\text{leg} \end{aligned}$$

$$Fn.t,r = f_y \times As_{s1} = 490 \times 1101.24 = 539.61\text{KN/leg}$$

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

$$Fn.t,t = F_y,t \times A_{tie} = 790 \times 567.06 = 447.98\text{KN/leg}$$

③ tension force 소계 :

$$Fn,t = Fn,t,r + Fn,t,t = 987.58 \text{ KN/leg}$$

④ tension force에 의한 수직하중

$$R_{1,t} = Fn.t \times \tan\theta = 660.56\text{KN/leg} < R_{1,c} \text{ (타이 지배)}$$

따라서 단변방향 수직하중의 크기는 타이내력에 의해 결정되며, 1 leg 당 660.56KN/leg 이다.

동일한 방식으로 장변방향의 내력을 계산하면 수직하중의 크기는 타이내력에 의해 결정되며, 1leg 당 620.80KN/leg 이다.

(4) 최대하중 산정

$$\begin{aligned} P &= 660.56\text{KN} \times 2\text{side} \times 2\text{legs} + 620.82\text{KN} \times 2\text{side} \times 2\text{legs} \\ &= 5125.46\text{KN} \end{aligned}$$

단변방향과 장변방향의 내력을 중첩하는 방식을 동일하게 적용하면, 'R430S', 'T430' 실험체의 내력은 각각 5441.90KN, 3154.30KN이 된다.

〈 표 2 해석결과 및 결과 비교 〉

실험체명	$P_{STM}(KN)$	$P_{ACI}(KN)$	$P_{TEST}(KN)$	P_{STM} / P_{TEST}	P_{ACI} / P_{TEST}	비고
T430	3154.30	2048.45	3262.28	96.7%	62.8%	무보강
T430J	3154.30	3166.90	3571.74	88.3%	88.7%	J-bar
R430T	5125.46	1833.44	5138.77	99.7%	35.7%	기초보강재
R430C	5125.46	1833.44	5067.93	101.1%	36.2%	기초보강재
R430S	5441.90	1791.70	5324.32	102.2%	33.7%	기초보강재

P_{STM} : STM을 이용한 예측값, P_{ACI} : 풀립 전단을 이용한 예측값

실험결과 및 분석

STM을 이용하여 기초의 전단성을 산정한 결과 실험결과 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며, 이를 이용한 설계방식의 정립이 가능하였다.

기초보강재의 제작 및 설치

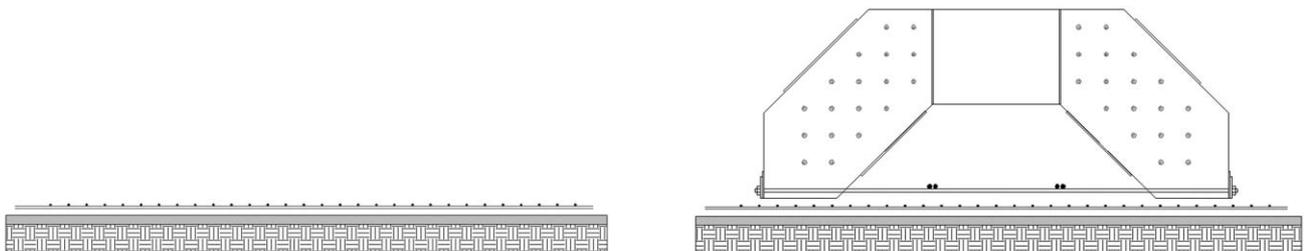
기초보강재의 설치는 그림에서와 같이 먼저 기초의 하부철근을 배근 후 기초보강재를 설치하고 그 후 기둥 철근 및 상부철근을 설치하는 것으로 이루어진다. 기초보강재의 높이는 목표로 하는 기초두께에서 상,하부 피복 및 상,하부 철근의 두께를 제외한 높이로 결정된다.

제작

기초보강재의 제작은 승인된 제작도면을 기본으로 제작용 SHOP도면을 작성한다. 제작도면은 캐드로 구현되어 있으므로 자동절단 프로그램이 내장된 컴퓨터에 직접 입력되어 레이저 절단 장비에 의하여 정밀하게 절단되고, 필요부분은 구멍을 뚫는다.

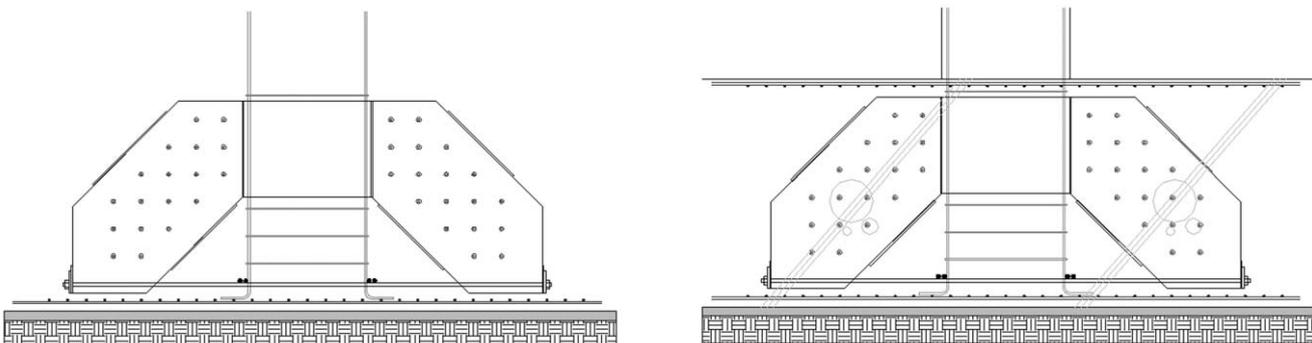
절단된 강판은 변형을 바로 잡은 다음에 용접면을 개선하고, 스티드 볼트를 철판에 용접한다. 스티드 볼트는 부착검사를 마친 후 스티드 볼트가 설치된 철판을 가조립한다. 치수와 변형상태를 확인한 후 용접하며, 철판을 용접한 후 인장응력을 발휘 할 타이틀 조립하여 용접한다.

공장 용접을 마친 후 용접부에 대한 초음파 탐상 검사를 실시하고



1. 버림콘크리트 타설 후 하부철근 설치

2. 기초보강재 설치



3. 기둥 및 벽체 DOWEL BAR 설치

4. 상부철근 설치 후 콘크리트 타설

〈 그림 17 기초보강재 시공순서 개요 〉



레이저에 의한 철판 절단



가조립



타이 및 연결판 조립



용접부 초음파 검사

〈 그림 18 기초보강재 제작 〉

출고 대기한다.

기초보강재의 현장설치를 위해서는 하부철근 작업이 완료되는 시점의 예측이 필요하다. 일부 사전 작업이 필요하므로, 현장에 설치되기 이전인 2~3일전에 현장에 반입되도록 하여야 한다. 이때, 폭이 3m를 초과하는 기초보강재는 운반 차량의 한계 때문에 폭이 3m 이내가 되도록 2개로 나누어 운반한다.

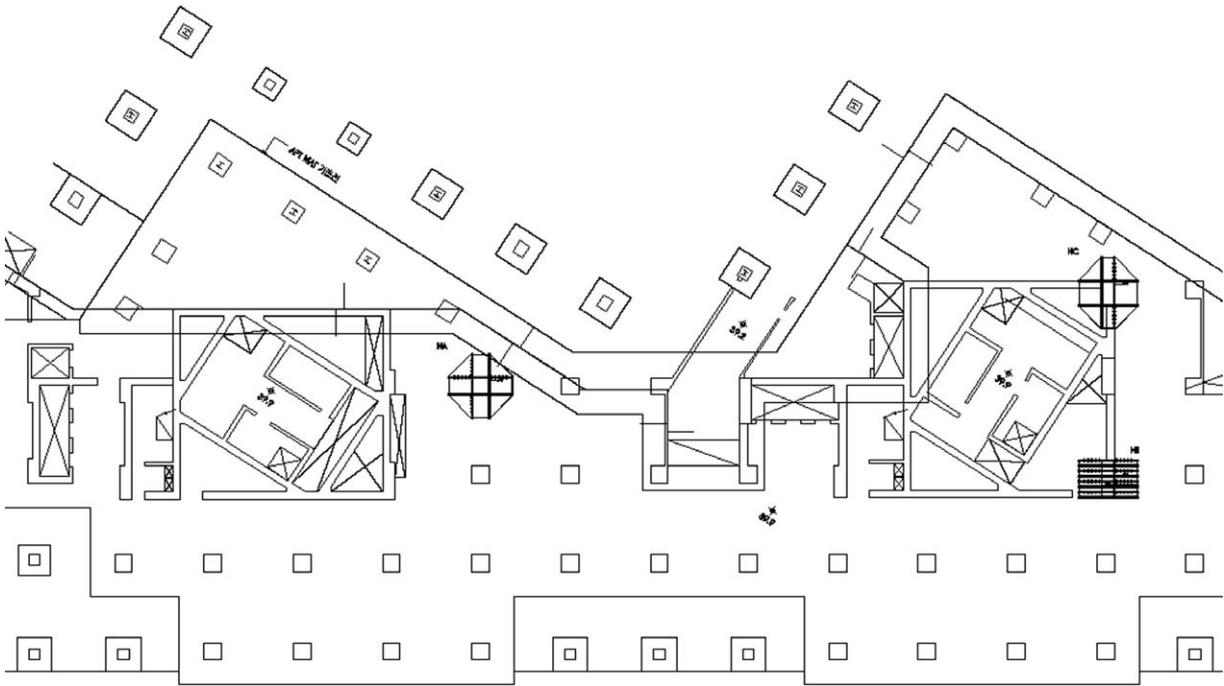
현장 적용

현장에 도착한 기초보강재는 크레인 또는 지게차로 조립 또는 적재 장소로 하역한다. 이때 조립 및 적재 장소는 양중 무게 및 양중 거리를 고려하여 크레인이 양중 가능한 거리에 위치되도록 한다. 가설 스트럿의 간섭이 없는 경우에는 큰 문제가 없으나, 스트럿 등의 간섭이 예상되는 경우에는 스트럿의 간격과 기초보강재의 위치등을 고려하

여, 적재 장소를 선정하여야 한다. 특히 스트럿 간섭으로 기둥 위치에 직접 내려놓지 못하는 경우 가능한 한 기초보강재가 설치되는 기둥 주변으로 하역이 가능하도록 계획되어야 한다.

하부철근 배근이 완료되면 설치 위치를 확인하여 기초보강재의 위치에 줄을 띄우고, 크레인을 이용하여 설치한다. 기초보강재는 중량물(기초보강재는 1~6톤)이므로 크레인의 양중 능력을 사전에 검토하여야 한다. 기초보강재는 타워크레인 또는 별도의 100톤 하이드로 크레인을 사용하여 설치하며, 기초보강재가 2톤 이상의 중량일 경우 하부철근에 영향을 미치지 않도록 별도의 고임장치를 설치하여 철근과 간섭되지 않도록 할 필요가 있다.

기초보강재를 설치한 후 벽체 철근 또는 기둥의 다우얼 철근(Dowel bar)을 배근하고, 매트 상부철근을 배근한 후 콘크리트를 타설함으로써 기초보강재를 적용한 매트 기초를 완성하게 된다.



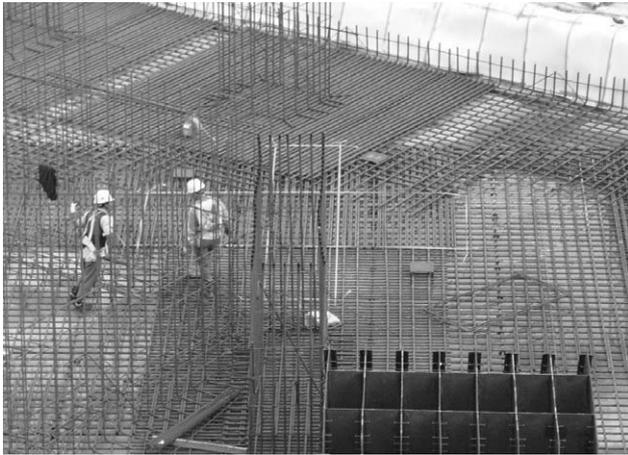
〈 그림 19 기초보강재 적용 평면도 〉



운반



양중



하부철근 조립후 위치설정



크레인에 의한 설치



상부철근 및 기둥철근 배근



콘크리트 타설

〈 그림 20 기초보강재 시공 순서 〉

마치면서

대규모 암반에서의 터파기 사례가 빈번해 지면서 기초 구조에 대한 관심이 높아지고 있는 이때에, 건설신기술로 지정 받은 기초보강 공법의 출현은 너무나 반가운 일이 아닐 수 없다.

전술된 내용에서와 같이 기초보강공법은 시공성 및 경제성에서도 유리할 뿐만 아니라, 지하 암반에서의 공기절감이 가능하여 전체적인 공사 품질을 향상시킬 수 있을 것이라고 기대해 본다.

건설현장에서 어떤 공법이든 공법이 익숙해지면 다른 방법을 찾을 생각을 갖지 못하는 것이 일반적인데, 건설현장에서 늘상 겪는 어려움중의 하나인 기초의 두께를 줄여볼 수 있지는 않을까 하는 작은 생각에서 시작하여 단순한 아이디어로 이어진 것이 벌써 5년여 전의 일이다.

그동안 수차례의 실험과 시행착오를 거쳐 현재의 공법을 개발할 수 있었고, 건설현장의 기술자들이 많은 관심을 보여주고, 현장에 실질적으로 적용되면서 많은 보람을 느끼게 되었다. 또한 건설신기술로 지정되면서 기술력을 인정받는 기회까지 얻고 나니, 새로운 공법의 개발에 더욱 자신감이 생겼다. 공법개발에 안팎으로 도움과 격려를 아낌없이 보내주신 건설기술자들에게 감사의 마음을 드린다.