

# Mat 기초에서의 Strut & Tie Model을 이용한 기초보강재의 적용성 연구

## A Study on Applicability of Steel Plate for Mat foundations using Strut & Tie Model

○ 김 서 영\*      김 상 대\*\*      주 영 규\*\*\*  
Kim, Seo-Young    Kim, Sang-Dae    Ju, Young-Kyu

### Abstract

A new method of construction was developed by Baro Construction Inc. in 2008. In the proposed method, a steel plate was placed in the foundation to increase the strength of concrete strut. The revision became a domestic concrete structure design criteria at October 2007, the design method about the structure which controled by shear is prescribe that we have to design a plan by a strut-tie model. The Strut-and-Tie model approach evolves as one of the most useful design methods for shear critical structures and for other disturbed regions in concrete structures.

This study presents a applicability of Steel Plate for Mat foundations using Strut & Tie Model to skyscrapers. At first, I designed two type of foundations, RC foudations and STM foundations in mat foundations. Compared to RC foudations and STM foundations, it is possible to indicate about economic feasibility and workability. The strength of foundation calculated by a strut-tie model predicted more accuracy than that caculated by KCI-07 design code.

키워드 : 철근 콘크리트 기초, 온통기초, 철판 플레이트, 전단 보강, 스트럿-타이 모델

Keywords : RC Foundations, Mat foundations, Steel Plate, Shear Reinforcement, Strut & Tie Model

### 1. 서 론

#### 1.1 연구 배경 및 목적

최근 초고층 구조물의 건설이 증가되고 있다. 1990년대 이후 다수의 50층 이상의 주상복합형 건물이 건설되고 있으며, 현재에는 100층 이상 규모의 건물이 건설되고 있다. 이에 따라 고층건물에서의 Mat 기초의 두께 역시 증가하고 있다. 일반적으로 40층 이상의 고층건물에서 Mat 기초의 두께는 1-2m이지만 현재 3-4m를 넘어 5m 이상의 규모까지 계획되고 있다. 이렇게 기초의 두께가 두꺼워지게 되면 다수의 문제점이 발생하게 된다. 일일 타설되는 콘크리트 물량의 한계, 이로 인한 시공조인트 사이의 수밀성 확보의 문제, 공기지연의 문제들이 발생하게 되며, 최소 온도철근이 과다해지기도 하며, 거대한 콘크리트 타설로 인한 수화열 문제가 대두되기도 한다. 특히 암반 지반에서의 기초공사의 경우에는 암반타파기로 인한 비용, 공기지연 및 민원이 발생하는 등의 문제점이 발생하게 된다.

이처럼 거대해지는 Mat 기초에서 수화열 저감 방안을 초지연 콘크리트 타설, 단위 시멘트량 조절, 파이프 쿨링 등의 방법으로 해결하려고 한다. 하지만 스트럿-타이 모델을

이용한 기초보강재를 이용함으로써 Mat 기초의 두께를 상당히 줄여줄 수 있음은 물론 경제적인 설계가 가능할 뿐만 아니라 공기단축, 수화열 저감에도 큰 기여를 할 수 있다.

#### 1.2 연구 방법 및 절차

이 논문의 목적은 기존의 철근 콘크리트 기초부의 크기를 줄일 수 있는 새로운 기초보강방법인 'Strut & Tie Model을 이용한 아치형 철판과 강봉으로 구성된 철근 콘크리트 기초 보강방법'에 따라 구조 설계된 Mat 기초에서의 구조 보강재를 초고층 빌딩에서의 적용성에 대한 검토이다. 이 연구는 ACI 318-05 에서 Strut & Tie Model을 이용한 응력교란구역에 대한 전단 설계법을 Appendix A의 방법에 따라 구조설계를 실시하였다. 일반적인 휨의 부재의 경우 기둥부위에 휨모멘트와 Punching Shear가 지배적이나, 유효깊이가 깊은 Mat 기초와 같은 휨부재는 전단응력으로 인하여 부재의 크기가 결정되기 때문에 전단응력을 검토하는 것이 중요하다. 일방향 및 이방향 기초판의 전단 내력은 콘크리트 구조설계 기준 2007에 근거하여 전단내력을 검토하였다.

이 연구에서는 라멘조의 동일한 형상을 가지는 40, 60, 80, 100층의 해석모델에서 기존의 RC형 Mat 기초를 Strut & Tie형 Mat 기초로 구조설계하여 2방향 전단응력을 검토하여 효용성에 대해 고찰해 보았다. 또한 콘크리트 물량, 철판물량을 비교함으로써 경제성을 살펴보았다.

\* 고려대학교 건축공학과 재학

\*\* 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

\*\*\* 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

## 2. 본 론

### 2.1 기초 보강재

기초의 두께는 전단력과 휨모멘트의 크기에 의해 결정되며, Mat 기초에서는 전단력의 크기에 의해 결정되게 된다. 기초판 내부에 아치형의 강재 및 타이를 넣어서 기초판의 크기를 줄일 수 있는 방법을 제시하였다. 강재 철판을 기둥과 기초판의 압축대 사이에 배근하고, 인장재를 기초판 하부에 배근하여 강재 철판과 연결하였다. 기둥과 기초판의 사이에 배근된 철판은 기둥으로 부터 전달되는 압축하중을 압축 스트럿을 통하여 직접 지반에 효과적으로 전달하여 2방향 전단 내력을 향상시킬 수 있다. 또한 수평방향에 배근된 인장재(Tie)는 강재철판이 받는 인장분력을 효율적으로 저항할 수 있다.

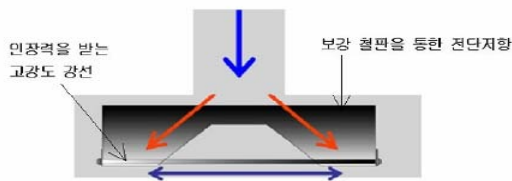


그림 1. 기초보강재의 하중 저항 시스템

① 철판 : 기초 콘크리트와 같이 상부 기둥에서 전달되는 압축력을 기초 하부로 전달하는 압축 스트럿 역할을 하는 부재로 주 재질은 SM400 철판을 사용한다. 철판의 표 면에는 콘크리트와의 합성거동을 위하여 전단연결재를 설치하며, 철판 끝단에는 스트럿 방향과 평행하게 정착 및 보강 역할을 하는 보강철판이 설치된다. 철판의 두께는 구조설계에 딸 결정되며 통상 9-16mm 정도를 사용한다.

② 인장타이 : 인장타이는 하부철판과 함께 하부에 발생 하는 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. 하부타이는 주방향과 부방향에 따라서 그 높이를 달리하여 서로 교차하도록 한다. 인장타이는 기초보강재의 성능에 따라 HD38-HD51의 대구경 철근을 사용한다.

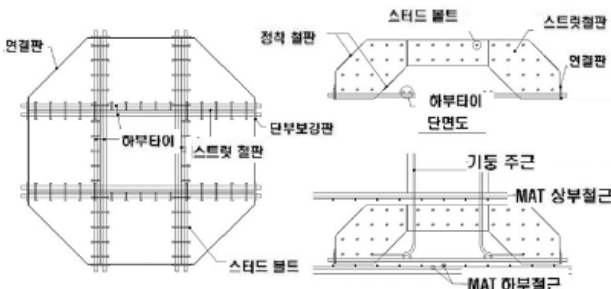


그림 2. 강제 기초보강재의 구성 및 각 부분 명칭

③ 인장타이 정착판 : 인장타이에 의하여 발생하는 응력

을 분산시키기 위하여 연결철판과 외부에 덧붙이는 철판으로 하부타이는 연결철판과 정착판으로 관통 시킨후 전체 둘레를 용접하여 제작한다. 철판 두께와 크기는 하부타이의 규격에 따라 달라진다.

④ 전단연결재 : 철판에 설치하여 철판과 콘크리트가 일체로 거동되도록 하는 전단 연결재 (Shear connector)를 스테드 건으로 용접하여 제작된다.

⑤ 연결철판 : 철판 끝단 하부에 설치되어 철판을 서로 연결해주는 역할을 한다. 연결철판의 두께는 철판과 동일한 규격으로 하고, 높이는 통상 200mm에서 350mm 정도로 한다.

## 3. 해석 모델

### 3.1 해석 대상 모델 소개

Mat 기초는 일반적으로 40층 이상의 고층빌딩에서 사용되고, 건물의 높이와 작용하중에 의해 Mat 기초의 두께는 비례한다. 건물별로 입면과 구조시스템이 각기 다르므로 Mat 두께를 일반화하는 것은 어렵다. 따라서 Case Study를 통해서 각 층 별 Mat 기초 두께를 가정하였다.

표 1. Mat 기초 두께 Case Study

층수	Mat 기초 두께(m)	비고
40	2.7	도곡동 타워 팰리스
52	2.5	부산 센텀스타
59	2.7	도곡동 타워 팰리스
60	3.0	부산 센텀스타
66	3.5	아산 배방 주상복합
70	4.5	해운대 워브 제니스
75	4.5	해운대 워브 제니스
80	4.5	해운대 워브 제니스
109	4.5-5.0	부산 롯데월드

이에, 층수에 따른 Mat 기초의 두께는 40층이 2.5m, 50층이 2.7m, 60층이 3.0m, 80층이 4.5m, 100층이 5.0m로 가정하였다.

위에서 가정한 건물의 규모대로 작용하중을 설정하기 위해 그림 3과 같은 단순한 라멘형태로 층수만 그대로 적용시켜 고정하중과 활하중이 선형적으로 증가하도록 가정했다. 또한 60층이상의 초고층 빌딩은 무엇보다도 지진과 풍하중과 같은 횡력에 영향이 크나 건물에 중심부에 위치한 내부기둥을 선정함으로 축력만 고려하여 그 기둥으로부터 연결되는 기초보강재를 설계하였다. 해석모델에서 설치될 기초보강재의 위치는 그림 3에 명시되어 있다. 층고는 4m, 기둥간의 간격은 6m로 하고 기초에 작용하는 하중은 고정하중, 활하중만 고려하여 계수를 적용해준다.  $U = 1.4D + 1.7L$ 로 한다.

### 3.2 해석 변수 가정

각 해석모델에 따른 구조해석을 실시하기 위한 해석 변수는 표 2에 따른다.

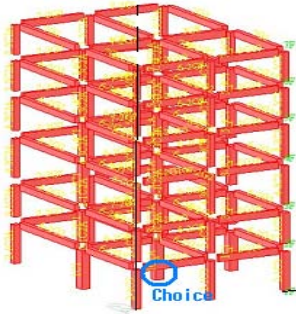


그림 3. 해석모델 위치 선정

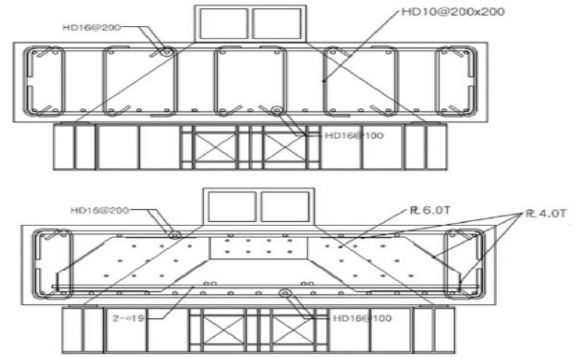


그림 4. RC Mat 기초, STM Mat 기초 형상

표 2. 해석 영역의 기둥 부재 사이즈

층수	Mat 기초의 두께 (mm)	기둥 부재 사이즈 (mm)	작용하중의 설정 (KN)
40 층	2500	500 x 500	17,224
60 층	3000	550 x 550	26,701
80 층	4500	600 x 600	33,563
100 층	5000	650 x 650	48,193

해석모델에 가정한 작용하중은 자중으로 기둥, 슬라브를 고려했고 칸막이벽과 덱트 등을 200kg/m<sup>2</sup>으로 계산하였다. 고정하중과 활하중만을 고려하여 콘크리트 설계 기준에 의해 계수를 고려하였다.

기존의 RC Mat 기초와 STM Mat 기초의 콘크리트, 철근 배근량을 비교함으로써 경제성을 평가하기 위해 해당 모델의 중심부 기둥을 중심으로 6m\*6m의 단위평면의 각 건물의 층수에 해당하는 기초의 두께를 적용하여 비교해보았다. 철근 배근량의 물량은 각 Mat 기초의 두께에 가정한 철근을 사용했고, RC Mat 기초의 경우 J형 철근을 이용해 전단보강을 200mm 마다 실시했고, STM Mat의 경우 양 단부에만 전단보강 J형 바를 사용하였다. 이러한 형태는 그림 4와 같다. 2방향 전단에 대한 위험단면을 고려하여 기둥의 길이와 기초의 유효깊이를 더해준 지점에서 철관이 꺾어주기로 했다.

#### 4. 내력 평가 방법

##### 4.1 KCI 구조설계기준에 의한 평가

일방향 및 양방향의 기초의 내력은 콘크리트 구조설계 기준 2007에 근거하여 휨내력과 전단내력을 계산하였다. 1방향 전단강도에 대해 기준에서는 그림 8과 같이 기둥 단면에서 기초의 유효깊이 d만큼 떨어진 위치의 전단강도로 규정하며, 전단내력  $V_{n,kci}$ 는 다음과 같이 계산한다. 이 연구에서는 콘크리트 구조설계 기준 2007에 철관에 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 전단 강도,  $V_{pl}$ 은 보강철관에 의한 전단강도이다.

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

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

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

Mat 기초	H	d	a	fck	fyj	fy	fpl	ftie	인장철근 (As)	타이철근 (Atie)	철관두께 (mm)	J형 전단 보강철근 (RC Mat 기초)
	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)				
40 층	2500	2407	2500	26	547	505	310	733	61-D19@100	2- Ø19	6	D10@200
60 층	3000	2903	3000	26	547	505	310	733	61-D25@100	2- Ø25	9	D10@200
80 층	4500	4388	4500	26	547	505	310	733	61-D38@100	2- Ø38	12	D10@200
100 층	5000	4870	5000	26	547	505	310	733	61-D51@100	2- Ø51	16	D10@200

표 3. 해석 모델 특성 및 재료 조건

(H:기초의 높이, d: 기초의 유효깊이, a: 기초의 전단경간길이, As: 인장철근 총단면적, fck: 콘크리트 압축강도, fyj: J형 철근의 항복강도, fy: 인장철근의 항복강도, fpl: 강제 철관의 항복강도, ftie: 인장타이의 항복강도, Atie: 인장타이의 총단면적)

#### 4.2 스트럿-타이 모델에 의한 평가

2차원 모델링에 기초하여 단변방향과 장변방향을 각각 계산한 후에 이들 값을 중첩하여 내력을 계산하였다. 스트럿-타이 모델을 선정된 이후에 기준에서 정하는 설계법에 의하여 부재의 내력을 다음과 같이 계산하였다.

- ① STM의 기하하적인 형태 (부재 D영역을 결정하고, 영역 내에서 힘의 흐름에 기초하여 압축재, 인장재 및 절점을 배치)
- ② 작용하는 하중에 근거하여 각 압축재, 인장재에 작용하는 축력 계산
- ③ 콘크리트의 유효 압축강도와 하중계수를 계산하고, 작용하는 축력 계산
- ④ 절점영역의 분포와 강도 계산

#### 5. 해석 결과

Mat 기초를 사용하는 40, 60, 80, 100층의 해석 모델을 선정하여 Mat 기초의 두께를 각각 2500mm, 3000mm, 4500mm, 5000mm로 가정하였다. 각각의 두께에 맞게 STM 이론에 근거, 구조설계를 실시하였으며, 스트럿과 타이에 해당하는 내력을 계산하였다. 기존의 KCI에 근거한 구조설계에서의 부재의 내력과 비교해봄으로써 기초보강재를 이용한 경우의 효율성을 측정할 수 있었다.

모델명	기초두께 (m)	작용하중 (KN)	P <sub>KCI</sub> (KN)	P <sub>STM</sub> (KN)	P <sub>STM</sub> /P <sub>KCI</sub>	파괴모드
40층	2.5	17,224	28,205	29,379	<b>1.04</b>	휨파괴
60층	3.0	26,701	42,638	50,675	<b>1.19</b>	휨파괴
80층	4.5	33,563	92,217	117,075	<b>1.27</b>	휨파괴
100층	5.0	48,193	118,021	210,879	<b>1.79</b>	휨파괴

표4. 구조해석결과 및 비교

층수	콘크리트 물량 (m <sup>3</sup> )			철근, 철골 물량 (m <sup>3</sup> )		
	KCI	STM	비교	KCI	STM	비교
40층	137	90	<b>35%감소</b>	0.684	0.636	<b>7%감소</b>
60층	180	108	<b>40%감소</b>	1.07	1.04	<b>3%감소</b>
80층	236	162	<b>33%감소</b>	2.12	2.10	<b>1%감소</b>
100층	252	180	<b>29%감소</b>	3.45	3.51	<b>2%증가</b>

표 5. 물량 비교 ( 단위평면당)

- (1) STM을 적용한 강재 기초 보강판을 기초의 압축대에 배근함으로써 동일형상의 기존의 RC Mat 기초에 비하여 내력이 평균 33%이상 상승하였다.
- (2) STM을 적용한 Mat 기초가 KCI에 의해 설계된 기초보다 층고가 높아질수록 내력의 증가율이 커졌으며, 이는 층고가 높은 경우일수록 STM을 적용한 Mat 기초의 효율성이 높아진다.

- (3) STM의 설계에서 고강도 콘크리트의 사용, 스트럿의 유효폭의 증가, 지점간의 거리등의 변수로 인해 스트럿이 전단파괴되는 양상보다는 항복응력 733MPa의 철근을 직접 사용하는 타이에 의해 휨인장철근이 먼저 항복하여 파괴되는 양상을 주로 보였다.
- (4) KCI, STM 설계법에 의한 직접적인 공칭강도를 비교하였기에 강도감소계수( $\phi$ )는 사용하지 않았으며, 건물의 높이의 증가에 따른 부재들의 증가를 고려할 때 3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 단변방향과 장변방향으로 전환한 2차원 모델링에 의해 비교적 정확하게 평가되었다.
- (5) 스트럿-타이 모델에 의한 설계를 할 경우 기준의 설계법보다 Mat 기초판의 두께를 평균 34%이상 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이는 곧 콘크리트 물량의 감소로 나타난다.
- (6) 철근 배근량의 경우 과대하게 설계되는 진단보강 철근 대신에 STM 기초보강재를 설계함으로 약 2%의 철근, 철골 물량이 줄게 되는 것을 알 수 있었다.

#### 6. 결론

STM 이론을 이용한 기초보강공법을 적용 시 구조적 안정성, 시공성 및 경제성에서도 유리할 뿐만 아니라, 건물이 높아질수록 효과가 높아짐을 확인할 수 있었다. 또한 지하압반에서 공기절감, 수화열 감소등 이점이 있어 전체적인 공사 품질을 향상시킬 수 있을 것이라고 기대해 본다.

고강도 콘크리트를 적극적으로 사용한다면 기초보강재의 내력과 함께 거동하여 Strut의 내력이 극대화되므로 상대적으로 휨파괴의 양상을 보일 가능성이 높은 것으로 나타났다.

KCI과 STM에 의한 설계 모두 작용하중에 비해 상당히 큰 내력을 가진 것으로 평가되었는데, 이는 횡력을 고려하지 않은 것이므로, 이를 보정해주게 된다면 이 연구의 결과의 신뢰도를 좀 더 높일 수 있을 것이다.

이번 논문과 같이 최근 다양한 이슈가 발생하는 Mat 기초에서 구조적, 시공적문제점을 직접적인 원인인 두께를 줄이는 방법은 상당히 참신하며, 앞으로도 좀 더 이 분야에 대한 연구가 체계적으로 활성화되길 기대해 본다.

#### 참고문헌

1. 윤상문 외 3명, 강제스트럿을 이용한 철근콘크리트 기초보강재의 구조성능평가, 대한건축학회논문집 제25권 제9호, 2009년 9월
2. 윤상문, Strut & Tie Model을 이용한 철근콘크리트 기초의 보강 공법, 대한건축학회논문집, 2008년 3월 제 15권 1호
3. 강희섭외 2명, 아시아 최고 높이의 주거 건축물 부산 해운대 워브더제니스 기초공사 적용기술- 두산건설 (주), 공사기록
4. 홍건호 외 3명, 도곡동 타워팰리스 매트 기초에 적용된 매트 콘크리트 시공 사례, 콘크리트학회지 제 13권 1호, 2001.1
5. 2007 개정, 콘크리트 구조설계기준
6. James G Macgregor · James K Wight, Reinforced Concrete