

철골조 아파트의 구조설계 현황 및 연구 방향



김 상 모*



이 창 남**

1. 서 론

우리나라 집합주택의 구조형식은 초기에 연립주택의 조적조 건물에서 출발하여 점차 고층화됨에 따라 기둥-보로 이루어진 라멘조 형태를 따르다가 현재는 기둥-보의 돌출부를 삭제하고 벽체를 구조체로 사용하는 방법인 내력벽식 구조로 변화하였다.

RC 내력벽식 구조는 보가 없기 때문에 층고의 절감과 기둥의 삭제로 인한 공간 활용을 극대화할 수 있어 지금까지 널리 보급되고 있다. 그러나 이 구조 형식은 1층에서 최상층까지 평면 구조가 동일하여야 하고 벽체의 대부분이 내력벽이므로 개조가 어렵다는 단점이 있다.

최근에는 거주자가 삶의 질에 대한 다양한 욕구와 개성 추구에 부합하는 주거 공간의 가변성을 요구하기 때문에 입주 후 개조가 손쉬운 아파트의

구조 형식을 선호하고 있다.

이러한 요구와 함께 도심지의 아파트가 허다층(초고층)화 됨에 따라 철골 아파트가 들어서기 시작하고 있다. 그러나 아직까지는 값싼 철근콘크리트를 철골로 변경함에 따른 재료비의 상승과 층고가 높아짐으로 인한 분양 가구 수의 감소, 분양 단가 상승이라는 해결과제가 남아 있다.

이러한 문제에도 불구하고 최근 국내 주요 건설사 대부분이 철골 아파트 사업에 참여하고 있고 계속적으로 새로운 프로젝트를 계획중이다. 또한 이들은 독자 브랜드를 내세워 철골조 아파트의 고급화 및 차별화 전략에 나서고 있는 추세이다. 따라서 본고에서는 국내 철골조 아파트의 건설 현황 및 구조설계 사례를 소개하고 향후 철골아파트의 문제점에 대한 연구과제 및 방향성을 제시하고자 한다.

2. 국내 철골 아파트의 건설 현황

도심지의 주상복합 형태로 타워형 철골아파트

* 원구조 연구소 차장, 구조기술사

** 원구조 연구소 사장, 구조기술사

(나산스위트, 잠실 시그마타워, 보라매 환타시아, 분당 트리폴리스 등)가 건립되기 시작하였으며, 90년대 들어 주거전용 건물로 상록타워, 대림 아크로빌, 삼성물산의 타워팰리스 등이 건립되었으며, 삼성중공업의 서초동 웨르빌 등이 설계 중에 있다.

한편 1997년 6월 철골조 아파트 분양가 자율화 이후 신도시 주거 전용의 형태로 건립되기 시작한 판상형 철골조 아파트의 경우 동아 솔레시티, 현대산업개발 수지아파트, 삼성중공업 상현리 웨르빌 등이 준공 또는 건립되고 있다.

이 같은 판상형 아파트는 거주자들이 전통적으로 남향을 선호하기 때문에 많이 건설되고 있으나 지진하중이나 풍하중 같은 횡력에 대해 변위 제어가 어려워 20~25층 정도의 중저층 아파트에 적용되고 있다.

3. 철골 아파트 설계 사례

3.1 목동 S-철골 아파트

가. 건물규모 : 지하 5층, 지상 39층

나. 설계 근거 기준

- 1) 건설부 제정 극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조계산 기준
- 2) 건설부 제정 강 구조계산 기준
- 3) 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙

다. 구조 재료의 성질 및 특성

1) 콘크리트

(1) 1층 기둥이상 : $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$

(2) 1층 바닥이하 : $f'_c = 270 \text{ kg/cm}^2$

2) 철근 : SD40 ($F_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$)
HD32 이상 이음시 Gas 압접 시공 or 기계 이음

3) 철골부재

(1) SM 490 TMC ($F_y = 3,300 \text{ kg/cm}^2$) : 두께 40mm 초과 기둥

(2) SM 490 ($F_y = 3,300 \text{ kg/cm}^2$) : 두께 40mm 이하 보, 기둥

(3) SS 400 ($F_y = 2,400 \text{ kg/cm}^2$) : 두께 20mm 이하 보

(4) 용접 : Arc. Weld

(5) 볼트 : F10T ($f_t = 3.1 \text{ t/cm}^2$, $f_s = 1.5 \text{ t/cm}^2$)

라. 제반 하중 조건에 대한 분석 적용

1) 고정 하중 및 적재 하중

2) 풍 하중

$$P = C \cdot q \cdot A$$

$$C \text{ (풍력계수)} : 0.8(\text{Windward}) + 0.6(\text{Leeward}) = 1.4$$

$$A \text{ (풍상면적)} : m^2$$

$$q \text{ (설계 속도압)} : \text{kg} / m^2$$

설계기본풍속 : 35m/sec

노풍도 : B

3) 지진하중 : 동가정적해석 (Equivalent Static Analysis)에 의한 지진하중 산정

$$V = \frac{A \cdot I \cdot C \cdot S}{R} \times W : \text{밀면 전단력}$$

$$A \text{ (지역계수, 서울)} = 0.12 \text{ (지진구역2)}$$

$$I \text{ (중요도계수, 도시계획구역)} = 1.2$$

$$C \text{ (동적계수)} = \frac{1}{1.2\sqrt{T}}$$

(T : 건물의 기본 진동 주기)

$$S \text{ (지반계수)} = 1.2 \text{ (지반 2)}$$

$$R \text{ (반응수정계수)} = 6.0 \text{ (구조 방식 : 이중 골조 방식)}$$

$$W \text{ (건물 중량)}$$

기본적으로 고정하중과 적재하중을 적용하며, 횡력에 대해서는 지진하중과 바람하중에 안전하도록 설계하였다. 또한 지진하중에 대하여 건물의 형상이 비대칭이고 다층(고층)이기 때문에 3차원 동적해석을 적용한다.

내횡력 구조방식은 Rigid Frame과 Shear

그림 1 목동 S-철골아파트 조감도

Wall 및 Brace 골조로 협력 지지케하는 Dual System을 채택하였다.

마. 구조의 형식 선정 계획

- 1) 지상층은 기둥배열이 7.5m×9.4m 로 용이한 구조해결과 설계상의 제약·공사의 편이를 위해 아파트의 기둥은 철골조로 하고 상가 부분은 철골·철근 콘크리트구조(이하 SRC구조)로, 보는 철골구조로 계획한다. 지하층 기둥은 SRC조, 보는 RC조로 설계한다.
- 2) 지하층의 작은 보는 생략하고 기둥열에 한 쪽 방향으로만 규격화된 Wide 보를 보내 가급적이면 층고를 최소화한다.
- 3) 지상 1층 바닥은 Top Down 공사시 주된 작업 공간이 되므로 작업 하중을 고려하여 Beam & Girder System을 적용한다.
- 4) 지상층의 슬래브는 공사의 편이와 경제성을 고려하여 Deck 슬래브로 계획하고 지하층

은 횡력 및 주차장의 진동 하중을 고려하여 철근 콘크리트 슬래브로 설계한다.

- 5) 공법은 Top Down 공법이며, 지하 외벽은 Slurry Wall로 이루어진다.

3.2 서초동 S-철골아파트(설계 진행중)

가. 건물 규모 : 지하 6층, 지상 45층

나. 설계 근거 기준

본 건물의 구조설계에는 기본적으로 한국 기준 및 국내 재료들을 사용하고 일부 외국 기준들로 보완하여 적용한다.

- 1) 풍하중 : 국내 기준 + ANSI Code(비교용)
- 2) 지진하중 : 국내 기준 + UBC 94
- 3) 철골 부재설계 : 국내 기준 + AISC(9TH Edition, ASD) + SSRC(합성기둥)
- 4) 철근콘크리트 부재설계 : 국내 기준 (극한강도설계법 적용), ACI-318-95

그림 2 서초동 S · 철골아파트

5) 중력하중(적재하중) : 국내 기준 적용을 원칙으로 한다.

다. 구조 재료의 종류 및 강도

1) 콘크리트

① RC Core + SRC Col.

: $f'c = 400, 300, 240 \text{ kg/cm}^2$

② 슬래브 : $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$

③ 기초부, 지하 외벽 : $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$

2) 철근 : SD40 ($F_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$)

3) 철골 부재

① SM 490 TMC ($F_y = 3,300 \text{ kg/cm}^2$)

: 두께 40mm 초과 기둥

② SM 490 ($F_y = 3,300 \text{ kg/cm}^2$)

: 두께 40mm 이하 보, 기둥

③ SS 400 ($F_y = 2,400 \text{ kg/cm}^2$)

: 두께 20mm 이하 보

④ 용접 : Arc. Weld

⑤ 볼트 : F10T 고장력 볼트 (Torque Shear Control Bolt)

라. 제반 하중 조건에 대한 분석 적용

1) 풍하중

풍하중은 국내 기준의 적용을 원칙으로 하였으나 국내 기준의 경우 풍하중 산정시 Flexible한 건물(다층건물)에 대한 별도의 규정이 없으며 Gust Factor를 건물과는 상관없이 지상의 노풍도에 따라 일괄적으로 적용하게 되어 있다. 또한 기준의 풍하중 산정식이 적용 가능한 높이가 명확치 않다.

따라서 위와 같은 사항을 고려하여, 풍동시험을 거쳐 이 결과와 국내 기준을 비교 검토하여 풍하중을 산정한다.

$$P = C \cdot q \cdot A$$

설계 기본 풍속 : 35m/sec

노풍도 : B

2) 지진하중 : 등가 정적해석 (Equivalent Static Analysis)에 의한 지진하중 산정

$$V = \frac{A \cdot I \cdot C \cdot S}{R} \times W \quad \text{: 밑면 전단력}$$

$$A = 0.12, I = 1.2$$

$$C = \frac{1}{1.2\sqrt{T}} \quad (T : \text{건물의 기본 진동 주기})$$

$$S = 1.0$$

R = 기둥의 방향에 따라 4.0 또는 6.0 (구조

방식 : 이중 골조 방식)

마. 구조의 형식 선정 계획

1) 기초 시스템

① 고층부 기둥 : 독립기초

② 고층부 코어 : 온통기초

(Mat Foundation)

③ 저층부 기둥 : 독립기초

2) 지하수에 대한 부력 저항 시스템

최하층 슬래브 하부에는 영구 배수 시스템 (Permanent De-watering System)을 설치하여 슬래브에 작용하는 부력(Buoyancy)을 적절하게 조절하여 설계에 적용한다.

3) 기둥 (Main Column)

기둥의 형태는 공간 활용성을 고려하여 사각형의 합성기둥(SRC)으로 설계한다. 합성기둥의 설계는 SSRC (Structural Stability Research Council)에 준하며, 단면 크기는 800×800 + H-500×500의 크기를 유지하며 층수에 따라서 철골 두께를 조정한다. 합성기둥의 콘크리트 강도는 240~400 kg/cm²까지 사용하였으며 철골은 두께 40mm 초과시 SM490 TMC (Fy=3,300 kg/cm²)을 사용하여 중력하중 및 횡하중에 저항하도록 설계한다.

4) 보와 슬래브

바닥 슬래브는 두께 135mm의 합성 Deck Slab를 사용하여 시공성을 높였으며, 바닥 슬래브가 다이아프램 역할을 충분히 하여 Core부로 횡력을 전달시킬 수 있도록 Core부와 만나는 슬래브에는 철근을 보강설계 한다.

모든 내부 단순보는 합성보 (Composite Beam)로 설계하여 물량 절감 및 층고를 최소화 한다. 보 및 슬래브에 대해서는 진동 등 사용성에 관한 검토를 수행하여 설계에 반영한다.

5) 중력 하중 저항 시스템

각 층에 작용하는 중력 하중은 합성 Deck Slab와 합성보에 의해서 큰보(Girder)로 전달되도록 하였으며, 이 큰보는 기둥과 함께 중력 하중에 저항하는 역할을 한다. 중력 저항 시스템에 대해서는 물량을 최소화 하면서도, 시공성을 고려한

가장 효율적인 시스템이 될 수 있도록 설계한다.

6) 횡 하중 저항 시스템

횡하중 저항 시스템 특히 지진하중에 대해서는 Core Wall과 모멘트 연성 골조를 효율적으로 사용한 이중 골조 방식 (Dual System)을 채택한다. 본 건물에 이 방식을 적용함에 있어 Core Wall과 주 기둥의 설치 방향에 따라 횡 하중에 저항하는 기둥과 Core Wall의 기여도가 다르므로 이에 대한 고려를 반영하여 설계를 진행한다.

풍하중은 국내규준을 기준으로 산정하는 것을 원칙으로 하며, 풍동 시험을 통한 풍압력 결과와 비교 검토 보완하여 산정한다.

횡변위는 바람에 대해서는 H/450을 기준으로 하며 지진에 대해서는 최대 층간변위를 0.015h로 제어한다.

또한, NBC 85에 따라 서울 지역의 10년 주기 1시간 최대 평균풍속을 고려하여 바람에 의한 진동을 검토하며, 풍방향 및 풍직각방향의 가속도는 예민한 사람이 감지할 수 있는 상한치인 1.0%g ~ 1.5%g 보다 적게 설계에 반영한다.

7) Core Wall 계획

Core Wall은 두께 300mm ~ 두께 600mm로 층에 따라 두께를 효율적으로 변화시켰으며 콘크리트 강도는 400 kg/cm² ~ 240 kg/cm²로 변화시켰다. Core Wall의 Open 부분에는 Lintel Beam (연결보)을 설치하여 Core의 횡력 저항 능력을 극대화한다. 작업의 반복성 등을 고려하여 Core Wall은 Climbing Form을 사용하여 시공성을 높인다.

8) 지하층 골조계획

본 건물의 지하층 보와 슬래브는 RC로 설계하며, 큰 보와 기둥은 라멘 구조를 형성하여 중력 하중에 저항한다. 지하 외벽 또한 수압 및 토압에 적절히 저항하도록 RC로 설계한다.

9) Column Shortening 관련

허다층 구조물의 해석 및 설계에 있어서 수직 부재의 축소 값을 예측하고 적절한 보정 방법을 제시하는 것이 무엇보다 중요하다.

수직 부재의 기둥 축소 현상은 커튼 월, 엘리베이터의 사용성에 영향을 미칠 수 있으며 인접 부재간의 부등 축소(Differential Shortening)는 바닥 부재, 간막이 벽 등의 비틀림에 의한 사용성의 문제 및 수평 구조부재에 대한 추가응력을 유발하게 되어 구조적 문제까지 야기하게 된다.

철골 기둥의 경우 탄성 변형을 하므로 그 축소량이 쉽게 결정되지만 철근콘크리트 기둥 또는 철골·철근콘크리트 기둥의 경우는 탄성변형 외에 콘크리트의 Creep 및 건조수축에 의한 비탄성변형을 고려해야 하기 때문에 이를 위한 해석 과정이 추가로 요구된다.

본 건물은 실시 설계시 실제 현장에서 이루어지는 작업 공정 및 콘크리트 배합강도, Creep, 건조수축 등을 조사하여 기둥의 길이를 보정하여 시공한다.

10) 풍동 실험에 의한 사용성 평가

건물이 다층화 될수록 경량화와 강성의 감소 등으로 인해 건물의 감쇠비가 저하되면서 풍하중에 민감하게 반응하게 된다.

본 건물의 경우 4개 동의 고층 주상복합 건물이 균을 이루고 있기 때문에 건물 각 부분에 작용하는 국부적인 풍압변동 (평균 풍압과 변동풍압)의 크기는 풍동실험에 의해서만 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 건물의 경우, 풍력 측정 실험 (Force Balance Test)을 기본적으로 하고 최종 설계 단계에서는 고차 모드의 영향까지 고려할 수 있는 공기력 진동실험 (Acrostatic Test)을 통해 구조물의 사용성에 대해서 재평가 한다.

4. 철골조 아파트의 구조형식과 사용성 검토

현재 우리 나라의 철골조 아파트는 크게 타워형과 판상형으로 구분할 수 있으며 철골조 아파트의 구조형식 선정과 사용성 검토시 고려해야 할 문제는 다음과 같다.

4.1 구조 형식

1) 타워형 철골 아파트

일반적으로 허다층 타워형 철골조 아파트의 구조형식은 다음과 같다.

① 철골 Brace + Rahmen 구조

건식 구조로 시공성이 우수하다.

② RC 내진벽 + Rahmen 구조

수직 동선 부분 및 세대 간벽을 습식으로 한 구조로 횡변위에 대한 강성이 크며, 진동/소음 등에 대한 사용성이 우수하다.

③ 튜브구조 :

내진성이 탁월하다.

또한 허다층화 됨에 따라 세장비가 커져 횡변위 제어문제가 발생할 경우 위의 구조 형식에 Outtrigger나 Belt Truss를 최상층 및 기계실이 위치하는 중간층에 추가하기도 한다.

2) 판상형 철골조 아파트

전통적인 남향 선호 경향으로 인해 아파트 평면이 동서로 긴 판상형으로 되는 경우가 많다.

이러한 구조 형식은 중앙부의 Core를 양방향 내진벽으로 활용하기 어렵고, 추후 가변성 평면을 추구하기 위해서 단변 방향의 세대 간벽 외에는 Brace나 내진벽을 적용하기 어렵게 된다. 따라서 장변 방향의 횡력 저항 시스템은 모멘트 연성골조 형식에 의존하여야만 하는 경우가 대부분이다. 이 때문에 타워형에 비해 판상형 건물은 바람이나 지진 등의 횡하중에 대한 변위제어가 어렵다.

4.2 사용성 검토

(1) 풍진동 검토

다층건물에서 철골조 건물은 철근콘크리트 구조나 SRC 구조에 비하여 자중이 가볍고 감쇠비 (Damping Ratio)가 적어 풍하중에 의한 진동문제가 크다.

수평 변위는 안전성 측면에서 허용 범위내에

있다고 해도 건물의 수평 방향 응답 가속도가 일정수준 이상이면 거주자가 불쾌감을 느끼는 사용성 문제가 발생한다.

NBC-85 규준에서는 10년 주기로 재현 가능한 1시간 최대 평균 풍속을 기준으로 최상층의 최대 가속도를 주거용 건물의 경우 0.01g이하로, 사무용 건물에서는 0.03g이하로 검토하도록 규정하고 있다.

외국에서는 철골조 다층 아파트(Aspect비 : $\frac{H}{\sqrt{WD}}$ 가 3이상인 건물)의 풍진동으로 인한 거주성을 확보하기 위하여 설계 단계에서 진동해석 및 풍동 실험을 수행하고 있다.

(2) 바닥 System의 사용성 평가

건물의 층고를 줄이기 위해 층이 작은 보를 사용함에 따라 바닥 시스템의 진동에 대한 사용성 평가가 요구된다.

바닥 슬래브의 처짐이 과도하게 커지면, 거주자에게 심리적인 불안감을 주고 천장, 바닥 슬래브 또는 칸막이 벽체 등에 균열을 일으키며, 접합부를 변형시켜 2차 응력을 유발시키거나 동하중에 의해서 진동과 과도응력을 일으키는 등 기능과 시각적인 면에서 여러가지 부작용이 생기게 된다.

5. 향후 연구 개발의 과제

철골조 아파트에 대한 향후 연구 개발의 중점 사항은 크게 두 가지 관점에서 접근할 수 있다.

첫째는 구조물의 안전성과 사용성이다.

도심지 개발의 경우 아파트의 허다층화가 필연적임을 볼 때 풍하중에 대한 취약성을 보완하고 내구성과 안전성에 대한 일반 거주자들의 요구를 만족시킬 수 있는 구조 시스템 개발이 필요하다.

건물의 안전성을 확보하기 위해 횡변위를 줄이고자 보의 층을 증가시킬 수 있으나 층고에 영향을 주기 때문에 한계가 있다. 이를 극복하기 위해서는 기둥과 보 부재가 보다 큰 강성을 갖는 구

조를 선택하여야 한다.

예를 들어 순수 철골보에 강성을 키운 합성기둥과 합성보를 사용하는 것도 한 방법이 될 수 있다. 근래에는 축방향의 내력과 연성이 우수하여 내진구조로 효과적인 CFT(콘크리트 충전 강관) 구조에 관한 관심이 고조되고 있다.

또한 철골조 아파트에서 설계자들이 느끼는 가장 큰 문제점은 소음과 진동 그리고 단열 등 주거 성능이 취약하다는 것이므로 사용성을 만족하는 구조형식의 연구가 필요하다.

소음에 대한 차음 성능이 필요한 부분은 상하 층간의 바닥 충격음, 세대간 벽체 및 평면계획의 가변성을 위해 사용된 건식 벽체의 소음 전달 등이 있으며 슬래브 형상이 벽체와 밀폐될 수 있는 평 Deck Plate를 사용하는 등의 대책이 필요하다. 진동 문제 또한 철골아파트의 장점인 가변성과 대공간에서 발생하는 문제로 설계단계에서 제어할 수 있는 해석 기술과 평가 기술이 확보되어야 한다.

둘째는 기존의 아파트 형식이 내력벽식 구조로

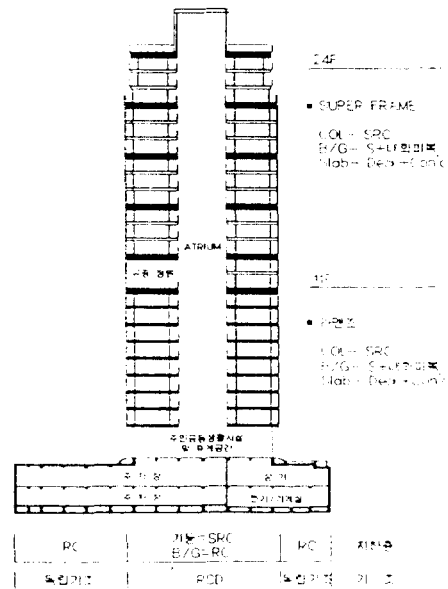


그림 3 정감 바닥 구조

층고를 최대한 활용해온 만큼 분양면적 및 용적을 감소 등의 문제를 최소화 할 수 있는 방법으로 골조의 보가 차지하는 층고를 최소화하는 구조 형식의 개발이 필요하다.

구조 형식의 변경없이 보 부재의 크기만을 최소화하는 방법은 상기에 서술한 진동 문제 등을 극복하기 어렵다.

현재 이러한 문제를 감안한 층고 저감형 골조 시스템으로 징검바닥 구조(Super Frame)(그림 3 참조)와 강콘크리트 구조 등 보를 집약 또는 합성화 하여 접근하는 방식과 바닥구조 시스템을 슬림화하는 공법이 개발되고 있다.

징검바닥 구조는 그림 3에서처럼 1차 기본골조내의 3개 층마다 최소 치수의 셋기둥을 설치하여 그 기둥이 부담하는 하중만큼 보의 단면을 축소시키는 방법을 적용하였다.

이 방식은 구조의 안전성을 높임과 동시에 본래의 구조 단면치수를 현저히 줄임으로써 층고를 낮출 수가 있다.

또한 층이 작은 보를 사용하더라도 좁은 간격의 셋기둥을 설치함으로써 SPAN을 줄여 보의 처짐과 바닥의 진동을 제어하여 사용성을 만족하고 있다.

6. 결 론

기존의 RC 벽식구조 아파트는 그동안 대규모 시공 실적을 바탕으로 최고의 경제성을 가지고 발달해왔다. 그러나 다층화와 더불어 벽체 두께 및 벽량의 증가, 평면의 획일성이라는 문제점을 나타내었다. 또한 재개발에 따른 철거시 건설 재료의 재활용이 거의 불가능하기 때문에 환경보호 측면에서도 문제점을 나타내고 있다.

이러한 한계로부터 거주자의 삶의 질 향상으로 인한 다양한 요구 및 개성추구 등이 강조되면서 건축평면의 융통성과 건설재료의 재활용성이 뛰어난 철골 아파트의 개발이 요구되고 있다.

그러나 앞에서 언급한 바와 같이 철골 아파트의 성공 여부는 구조적인 안전성의 확보와 거주자들에게 진동, 소음 등의 사용성에 대한 만족을 줄 수 있는지? 여부에 달려있다.

따라서 이에 대한 정확한 평가 및 설계 지침의 확립이 필요하며 경제성과 사업성 측면에서 최대한의 분양 면적을 확보하기 위해 층고 저감의 문제를 해소할 수 있는 구조 시스템의 개발이 필요하다.

원고를 기다립니다

저희 학회 회지의 지면은 여러분께 열려있습니다.

강구조에 관련된 내용이나 회원여러분께 도움이 된다고 생각하시는 내용등 여러분의 자유로운 글을 기다립니다.

여러분의 많은 참여를 부탁드립니다.

문의처는 ▶ 한국강구조학회

(135-280)서울 강남구 대치동 910-15 울전빌딩 4층

TEL : 02) 568-7636, FAX : 02) 568-1224