

## Strut-and-Tie Model의 의미와 사용에 관하여 -Über Sinn und Nutzen von Stabwerkmodellen-



강 원 호\*

### 1. 논문을 소개하면서

1994년 10월의 Beton und Stahlbetonbau(콘크리트와 철근 콘크리트 구조)지와 9월의 Bauingenieur(건설기술)지에는 독일 Stuttgart대학의 교수인 Jörg Schlaich박사의 60세를 기념하는 기사가 실렸다.

Schlaich박사는 Stuttgart대학의 Institut für Tragwerksentwurf- und konstruktion(구조설계와 시공을 위한 연구소)의 장으로 이 연구소는 이전에 Massivbau Institut(대형구조 연구소)로 Fritz Leonhardt교수가 이끌던 것이다. 그러나, Schlaich교수를 유명하게 한 것은 전임자의 후광보다는 그 자신의 설계자로서의 능력때문인데, Cable net구조인 München의 올림픽 경기장을 비롯한 많은 Cabel구조와 교량, 타워등을 설계하였다. Schlaich교수는 그의 독창적인 아이디어로써 유명한 데 무공해 에너지를 생산하기 위한 태양열 집적 장치(그림 1), 태양열을 이용한 발전 타워(그림 2)를 고안하고 그 모델을 제작하여 사람들

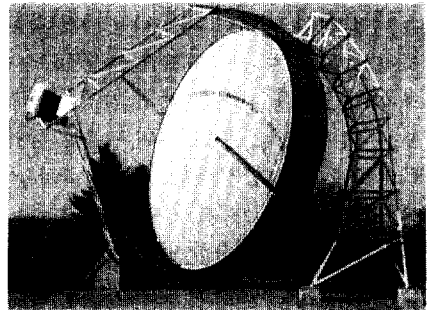


그림 1 J.Schlaich 교수가 제작한 태양열 집적 장치 [역1]

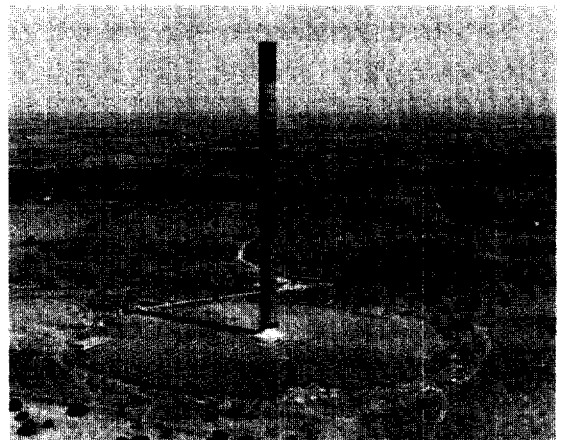


그림 2 Spain에 건설된 태양열 발전을 위한 모델 Tower [역1]

\* 정회원, 동아대학교 토목공학과 부교수

을 놀라게 했다. 특히 발전 타워에 대해서는 1.5km를 넘는 타워를 건설하여 에너지 문제를 해결하자고 주장한 책을 그의 딸과 함께 출간하기도 하였다.[역1]

우리나라에 그가 알려진 것은 Strut-and-Tie Model(이하 STM으로 줄임)의 제안자로서인데, 이것은 실은 Mörsch, Ritter에서 시작되어 유럽의 기술자들에게는 이미 익숙한 배근상재의 기술들을 정리한 것으로 부터 시작한 것이다. 즉, 이 방법의 시작은 그의 동료인 Weischede와 함께 CEB-Bulletine에 게재한 것으로 문헌상에는 알려져 있으나, 그보다 훨씬 이전에 설계기술자들은 힘의 흐름을 따라서 배근한다는 개념을 자유롭게 사용하고 있었다. 어쨌든 Jennewein과 같은 제작자와 K.Schäfer와 같은 동료교수의 도움으로 그는 이 방법을 철근 콘크리트 설계의 일반적인 방법으로 만들기 위해 노력하였는데, 1989년에는 이를 주제로 IABSE의 Colloquium을 개최했으며, 1989년부터는 Beton Kalender에 정식으로 한 Chapter를 할애 받았으며, EC2와 CEB FIP의 시방서에서도 설계방법으로 인정하였다. 필자는 이 방법을 한국에 소개할 때 지나치게 자의적이라는 비판을 들었는데, 필자 생각으로는 유럽과 우리의 설계관행의 차이 때문이 아닌가 생각한다. 유럽에서는 감독관의 허용하에 공인된 이론은 자유롭게 설계에 반영되며, 설계사의 경험과 직관을 매우 존중하는데 반해 우리의 경우는 시방서의 조항에 보다 많이 얽매어 있다. 필자는 그의 연구소에서 1년간 연구할 기회가 있었는데 이 기간의 노신사가 겪은 연필로 몇시간이고 설계를 위한 Sketch를 거듭하는 것을 보고 강한 인상을 받았다. 그는 예술과 기술이 잘 융화된 남부 독일의 기술자적인 전통을 잘 계승하고 있는 것으로 생각된다.

이즈음의 Beton u. Stahlbetonbau, Bauingenieur, Structural Engineering International (IABSE의 Journal)등에는 심심찮게 Schlaich교수의 60서 생일을 축하하는 논문들이 눈에 띄는데 이번호에는 그중에서 Beton u. Stahlbetonbau 94년 10월호(89 Jahrgang, Heft 10)에 실린 Dietger Weischede의 논문을 번역하여 실기로 한다. 저자인 Dietger Weischede는 전술한 CEB-

Bulletine 150의 저자로 당시에는 Schlaich와 같이 설계회사를 운영하였는데, 이즈음은 독립하여 Weischede und Partner란 설계회사를 운영하는 설계 기술자로, 1983년에 Stuttgart대학에서 박사 학위를 받았다.

## 2. Strut-and-Tie Model로 무엇을 할 수 있는가?

STM으로 무엇을 할 수 있는가? 만약에 전문가들에게 이런 물음을 던진다면 대체로 비슷한 수의 다음과 같은 대답들을 얻을 수 있을 것이다.

STM은 부재설계에만 적합하다든지 ;

STM은 철근 콘크리트 부재의 설계에서만 사용해야 한다든지 ;

STM은 배근상재를 위한 보조방법으로써만 쓸모가 있다든지 ;

또는 심지어는 그것은 강의에서나 의미가 있다고 할 수 있을 것이다

그런데 만약에 STM이 위에 든 설계 단계외에도 사용할 수 있는가를 묻는다면 모든 이들이 골똘히 생각해 봐야 할 것이다.

몇몇 사람들에게 STM은 곧바로 배후적인 말이다. 이것은 STM을 좋은 교수법으로 사용하는 사람들에게는 가장 사실에 가까운 것으로 생각한다. 왜냐하면 그들에게 이 방법은 모든 설계 단계에서 좋은 도구가 되기 때문이다. 그들에게는 단지 한번 배운 것을 언제나 사용할 수 있다는 확신이 모자랄 뿐이다.

Model이란 실제로 일어나는 일을 해명하고 그 자신과 다른 사람들을 납득시키기 위해 필요한 것이다. 좋은 모델은 항상 동시에 그 분야의 지식의 상태를 반영하며, 계속하여 제한없이 발전될 수 있어야 한다. 마치 나쁜 모델이 막다른 골목과 같은 것과는 정반대인 것이다.

STM은 부재의 힘의 흐름을 기술하므로 역학적 모델이라 할 수 있다. 그 기원은 Hennebique, Ritter[1]와 Mörsch[2]로 소급할 수 있는데, 100년 전에 그들은 트러스유사법을 철근콘크리트 설계에 사용하였다.

그 이후에 사람들은 실무에서 STM을 오랫동안

학문적인 보증 없이 써 왔다. 과제가 정말 어려울 때는 책상 아래 숨겨서 남몰래 썼다.

그러는 사이에 STM의 작업들이 공개되었고 마침내는 CEB-Model-Code[3]이나 Eurocode EC2 [4]에 포함되게 되었다.

그래서 우리는 STM의 학문적인 배경이 되는 스위스의 Thürlimann의 Zürich학파[5], 덴마크, 스웨덴 그리고 독일에서 이룩된 Plasticity Theory의 이론적 설명을 빌지 않고서도 STM을 사용할 수 있게 되었다.

### 3. Schlaich학파가 한 일

Stuttgart대학의 Massivbau Institut(현재는 Tragwerksentwurf und -konstruktion Institut)에서 80년대의 초입에 Jörg Schlaich는 STM을 실무에서 사용하기 위한 방법론을 만들기 위한 과업을 시작했다. 이에 따라 1982년에 CEB-Bulletine 150이 '철근 콘크리트 구조의 합리적인 설계와 배관을 위한 실용적인 방법'이란 제목으로 발간되었다. 그리고 Beton-Kalender에 정기적으로 '철근 콘크리트 구조의 배관'으로 한 Chapter를 할애받게 되었다.(최근 판은 1993년 판[1]에 수록되어 있다.<sup>1)</sup>)

그 사이에는 STM의 학문적인 결함을 배우려는 Schlaich와 그의 동료, 제자들의 일련의 작업들이 있었다 :

Weischede[8]에 이어서 Jennewein[9]이 부재 Model의 일반적인 방법을 제시했는데 이는 힘의 발생지(예를 들어서 하중의 재하점)에서 목직지(예를 들어서 지점)까지의 힘의 흐름을 따르는 소위 Load Path Method로 알려져 있다.

Reinke[10], Baumann[11], Sundermann[12], Reineck[13]의 박사 학위논문들은 STM의 학문적인 기초적 연구로서 기여할만 하고, Jennewein과 Schäfer[14]의 보고서와 Hottmann[18]의 학위 논문은 일반적인 경우와 특별한 경우의 Model 구성의 실례를 보여 주었다. M.Schlaich[15], Rückert[16], Sundemann[17]은 STM의 방법을

컴퓨터에 적용하여 혹은 CAD Programm[12,15]으로, 혹은 최적설계 프로그램으로 발전시켰다. 최근에 Ruth [17]는 접촉면에서의 재료 거동을 해석하기 위해 톱니모형을 사용하며 STM의 방법을 적용하여서 이론적인 연구에도 역시 이 방법이 유용함을 보였다.

### 4. STM의 의미

많은 사람들(컴퓨터광 뿐만 아니라)이 컴퓨터 시대에 STM작업은 지배적이 될 수 없지 않느냐고 묻는다. 그러나 이 물음은 STM과 컴퓨터는 전혀 경쟁상대가 아니라는 사실을 간과하고 있다.

STM이란 말의 이번에는 소위 'STM에 의한 작업'이 진행되는 과정이 있는데, 이는 이성적인, 그리고 합리적인 과정으로 뒷받침되는 정신적인 프로세스를 뜻한다. 이 프로세스는 어떤 상태를 하나의 힘의 흐름으로 변화시키고, 이것이 모순 없이 힘의 근원에서 출구까지 이어지게 한다. 이를 통해서 완결적이고 논리적인 사고 작업을 낳게 된다. 더구나 이것은 이해하기 쉽다! 여기에 STM의 깊은 의미가 있다. 이런 의미에서 컴퓨터는 단지 보조 수단일 수 있다. 당연히—전술한 학위논문들이 보여 준 바와 같이—매우 가치 있는 보조 수단이다.

물론 STM은 단지 이런 정신적인 과정을 시각적으로 나타낸 것이다. STM은 부재와 사고 작업 사이의 틈을 메운 것이다. 즉 이상화된 역학적 모델을 모델의 구성요소인 뼈대요소와 질점으로 구상화하여 현실적인 구조로 만드는 것이다.

### 5. STM의 효과적인 사용

STM으로 작업한다는 것은 단계적이고 체계적이며 합리적으로 나아가겠다는 것이다 :

우선 부재를 D와 B 구간으로 나눈다(D-구역은 기하학적인 혹은 하중에 의한 불연속점 근처이며 B-구역은 보의 휘영역에서 보는 바와 같이 단면의 평면 유지의 가정이 성립하는 곳이다) 이 때 영역의 크기는 St. Venant의 원리에 따라 정해진다.

이렇게 구분된 영역 각각은 외력과 내력을 받게

1) Beton Kalender에 정기적으로 실린다는 것은 공인된 이론이 되었다는 의미가 있다.

되고 STM으로 모델링 할 수 있다.

모델의 뼈대요소와 절점은 힘을 부담할 수 있게 설계된다.

여러 번의 작업과정에서 그 결과는 점점 정밀해진다.

시종일관 이런 원칙을 지킨다면 실수는 쉽게 피할 수 있다. 예를 들어서 2개의 과제를 다뤄보자 :

[7]에는 교량상판의 양 측면에 cable이 정착된 경우를 다뤘다. 이 경우에 슬래브는 평면응력 상태가 된다(그림 3) 여기에 소개된 바와 같이 나쁜 해는 횡 방향으로 일체인 강성이 큰 강재 보가 있는 것처럼 생각하는, '가장 안전측을 고집하는 자'들의 제안으로 슬래브의 압축력은 모아서 부재의 끝단이 지지하게 된다.

이러한 해의 力系는 2개의 지점을 가진 보가 된다.(그림 4) 부재의 강성을 고려하면 다음의 사실을 알 수 있다. 강성이 크지 않은 보는 평면응력 상태에서와는 달리 지간에서 휨을 받아서 휘게 되므로 지간에 작용할 하중은 줄어들고 부재의 갯쪽에 모이게 된다. 그러나 이 때 하중의 분포를 알 수 없으므로 슬래브의 단부가 이러한 집중력을 견딜 수 있는지 알 수 없다.<sup>(2)</sup>

이런 일은 STM을 합리적으로 사용하면 있을 수 없다!

우선 전체 부재를 D-와 B-구간으로 나눈다. cable장력의 도입으로 D-구간이 생기는데 이 구간의 STM은 시공을 고려하여, 역학적 모델로 나타내면 그림 5와 같이 된다. 이것은 단계적으로 좀더 정밀한 모델로 구성할 수 있다.([7]참조)

두번째 예는 부재축이 지간에서 구부러진 보이다.(그림 6) 이 예는 계단에서 자주 발생하는 것인데 부재축을 따라서 작용하는 인장력과 압축력의 방향이 변해서 생기는 힘이 서로 평형을 이루면 거의 아무 문제가 없다. 경험이 많은 기술자는 이러한 사실을 알고 이에 대해서는 더 이상 고려하지 않는다.

그는 아마도 부재가 T형 보일 때에도 적어도 다른 부분의 파괴 이전에 이 부분이 먼저 파괴될 것으로는 생각하지 않을 것이다. 그러나 그런 경우는 아마도 발생할 수 있을 것이다. 왜냐하면 이 경우에 압축력과 인장력의 방향이 변해서 생기는 힘

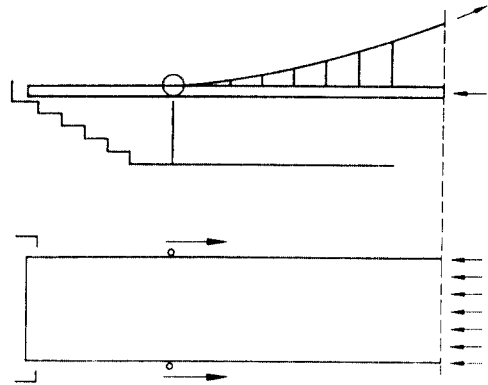


그림 3 슬래브의 양단에 Cable이 정착된 교량의 예

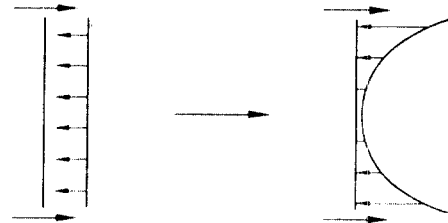


그림 4 '나쁜' 해의 역학계

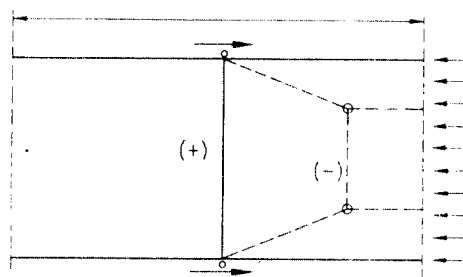
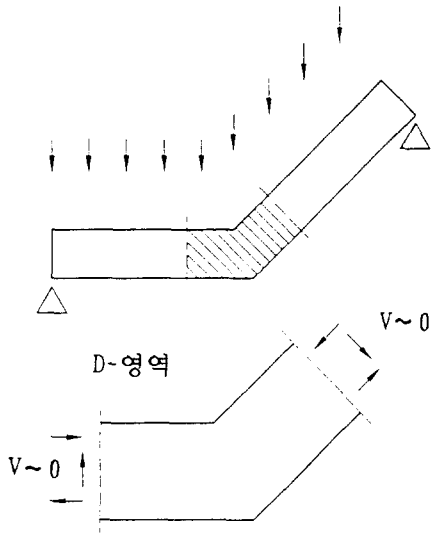


그림 5 정착부의 Strut-and-Tie Model

은 직접 평형을 이루지 못하기 때문이다.

그러면 어떤 일이 일어나는가? 압축력의 방향이 변해서 생긴 힘은 꺾어진 곳의 flange를 아래로

2) 이 문제는 단면법이 가진 결함이다. 이에 대해서는 J. McGregor가 잘 지적한 바 있다.[역2]



Strut-and-Tie Model

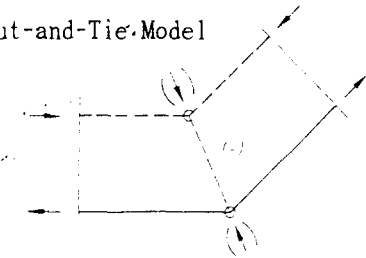


그림 6 부재축이 구부러진 부재의 D-영역과 Strut and-Tie Model

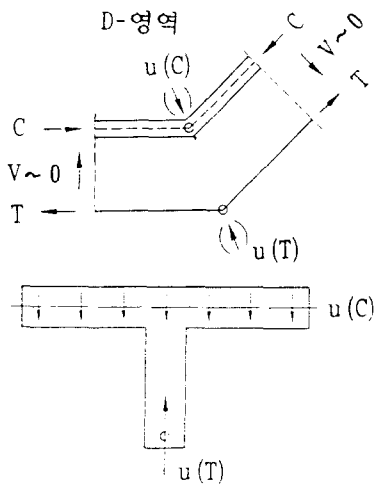
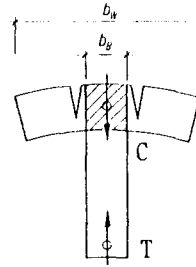


그림 7 부재축이 구부러진 T-형 보의 D-영역

단면



평면

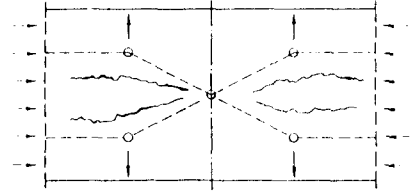
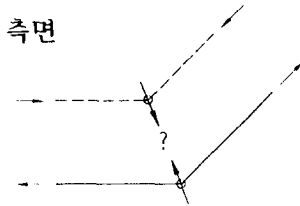


그림 8 T-형 보 플랜지의 균열

측면



단면

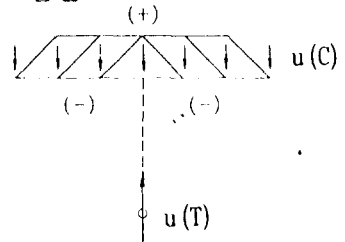


그림 9 완전한 Strut-and-Tie Model로 부터 해를 얻을 수 있다.

누르게 된다(그림 8)

만약에 이곳에 횡 철근이 배근되지 않았거나 시공배근(무엇을 위한 시공배근인가?)만 하였다면 flange에 길이 방향으로 균열이 발생하고 flange 날개가 아래로 휘게 되며 이에 따라 압축력을 받기 위한 유효폭이 줄어들 것이다. 압축력은 이에 따라 북부에 집중된다. 압축력을 받을 것으로 기

대했던 부재폭이  $b_B$ 에서  $b_W$ 로 줄어들게 된다. 그 결과로 압축 응력은 증가하고 마침내 단면 파괴에 이른다 ; 당연히 부재는 정확하게, 또 경제적으로 설계되었으므로 우리가 기대한 것 보다 작은 하중에서 이런 일이 일어난다.

운 좋게도 이제까지는 이런 손상 경우가 알려지진 않았다.

그러나 이런 손상은 일반적으로 일어날 수가 있다. 특히 설계자가 '통상적'으로 이 문제를 처리한다면 그러하다. 이를 개선하기 위해서는 각 해를 새롭게 꼼꼼히 살펴보는데 익숙해야 한다. 왜냐하면 많은 경우에 과제는 첫눈에는 문제가 없어 보이나 실제로 그렇지 않은 경우가 많기 때문이다. STM으로 차근차근 작업하는 것은 이때 큰 도움이 된다 ; 왜냐하면 STM은 설계자가 힘의 흐름을 지나치게 단순하게 처리하는 것을 확실히 피하게 하기 때문이다.

위의 예에서는 그림 9에 보인 바와 같이 flange 상부에 충분한 횡방향 철근을 배근해야 한다. STM은 그 이유를 자명하게 보여 준다.

### Reference

1. Ritter, W.: Die Bauweise Hennebique. Schweizer Bauzeitung 17, 1899.
2. Mörsch, E.: Der Eisenbetonbau - Seine Theorie und Anwendung. 3. Auflage. Stuttgart: Verlag von Konrad Wittwer, 1908.
3. CEB Model-Code for Concrete Structures, 1978.
4. Eurocode EC 2: 또는 이의 설계보조자료인, DAfStB-Heft 425 참조, Berlin: Beuth-Verlag, 1992.
5. Thürlimann, B., Marti, P., Pralong, J., Ritz, P., und Zimmerli, B.: Vorlesung zum Fortbildungskurs für Bauingenieure. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1983.
6. Schlaich, J., und Weischede, D.: Ein praktisches Verfahren zum methodischen Bemessen und Konstruieren im Stahlbetonbau. CEB-Bulletin d'Information 150, 1982.
7. Schlaich, J., und Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. Beton-Kalender Teil II. Berlin: W. Ernst & Sohn, 1993.
8. Weischede, D.: Untersuchungen zum methodischen Konstruieren im Stahlbetonbau. Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1983.
9. Jennewein, M.: Ein Beitrag zum Verständnis der Lastabtragung und des Tragverhaltens von Stahlbetontragwerken. Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1989.
10. Reinke, H.: Zum Ansatz der Betonzugfestigkeit bei der Stahlbetonbemessung. Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1986.
11. Baumann, P.: Die Druckfelder bei der Stahlbetonbemessung mit Stabwerkmodellen. Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1988.
12. Sundermann, H.: Tragfähigkeit und Verformungsverhalten von D-Bereichen. Untersuchungen mit Stabwerkmodellen. Dissertation, Institut für Tragwerksentwurf und -konstruktion, Universität Stuttgart, 1994.
13. Reineck, K.-H.: Ein mechanisches Modell für den Querkraftbereich von Stahlbetonteilen. Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1990.
14. Jennewein, M., und Schäfer, K.: Standardisierte Nachweise von häufigen D-Bereichen, DAfStB-Heft 430. Berlin: Beuth-Verlag, 1992.
15. Schlaich, M.: Computerunterstützte Bemessung von Stahlbetonscheiben mit Fachwerkmodellen. Dissertation, Professur für Informatik, ETH Zürich, 1989.
16. Rückert, K.: Entwicklung eines CAD-Programmsystems zur Bemessung von Stahlbetontragwerken mit Stabwerkmodellen. Dissertation, Institut für Tragwerksentwurf und -konstruktion, Universität Stuttgart, 1992.
17. Ruth, J.: Werkstoffverhalten in Grenzflächenbereichen der Tragelemente von Bauwerken. Dissertation, Institut für

Tragwerksentwurf und -konstruktion, Universität Stuttgart, 1993.

18. Hottmann, H. U.: Bemessen von Stahlbetonbalken und -scheiben mit Öffnungen, Dissertation in Vorbereitung, Institut für Tragwerksentwurf und -konstruktion, Uni-

versität Stuttgart.

- [역 1] Schlaich, S. and J. : Erneuerbare Energien nutzen, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1991.  
 [역 2] James MacGregor, : Dimensioning and Detailing . IABSE Colloquim , Stuttgart, 1991. □

## 도서보급안내

### 철근콘크리트 구조설계 매뉴얼

-건축 구조설계 도표집-

본 도표집은 극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트구조 설계를 위한 보조도서로서 도표 또는 그림을 이용하여 설계를 쉽고 빠르게 할 수 있도록 집필하였다. 설계과정에서 반복되는 계산을 함축하여 계산과정을 단축시켜 설계 실무에 도움을 주고자 하였다.

극한강도 설계공식에 근거되어 설계 도표를 작성하였으며, 도표 작성의 근거를 밝히고 사용범을 설명하였다. 또한 설계예제를 통하여 적용실례를 보여 주어 활용성을 높이고자 하였다.

본 도표집은 모두 3권으로 구성되어 각각 다음 부재 설계를 내용으로 한다.

보급가 : 37,000원(회원은 10% 할인)

#### 제 1 권 보, 브라켓, 기초의 설계

- 1) 단단장방형보
- 2) 복단장방형보
- 3) T형보
- 4) 브라켓, 전단마찰 부재
- 5) 장방형기초

#### 제 2 권 기둥, 벽체의 설계

- 1) 기둥 : 장방형 및 원형단면
- 2) 벽체

#### 제 3 권 슬래브의 설계

- 1) 일방향 슬래브
- 2) 이방향 슬래브 : 직접설계법, 등가관조법

문의처 : 한국콘크리트학회 사무국(545-0199, 543-1916)

### 철근콘크리트 구조설계매뉴얼

건축구조 설계 예제 및 도표집

제 1 권 보·브라켓·기초의 설계



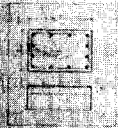
1995

한국콘크리트학회

### 철근콘크리트 구조설계매뉴얼

건축구조 설계 예제 및 도표집

제 2 권 기둥·벽체의 설계



1995

한국콘크리트학회

### 철근콘크리트 구조설계매뉴얼

건축구조 설계 예제 및 도표집

제 3 권 슬래브의 설계



1995

한국콘크리트학회