

# 보-기둥 접합부의 배근상세를 위한 Strut-and-Tie Model

## Application of 'Strut-and-Tie' Model for the Detailing of Beam-Column Joints

강 원 호  
Kang, Won-Ho

### ABSTRACT

Beam-column joints of the skeleton structure can be classified as geometrical D-region, where the assumption of Bernoulli is not applicable. For the detailing of D-region in concrete structure, 'Strut-and-Tie' Model is a very powerful tool, which has been widely used by practical engineers. This paper shows how the methodology of Strut-and-Tie Model can be applied for the various cases of beam-column joints. We can find this mechanical model does not give only an appropriate answer to the given problem but also a better insight to the structural behavior of beam-column joints.

keywords : beam(supports); column(supports); connections; strut-and-tie model(mechanical models); reinforced concrete; reinforcing steels; detailing

### 1. 머릿말

철근콘크리트 뼈대구조계에서 집중력이 작용하거나 부재의 기하형상이 바뀌는 구간은 Bernoulli의 가정이 성립하지 않으므로 따로 취급하여야 한다. (뼈대구조계에서 Bernoulli의 가정이 성립하는 구간을 B-구간, 성립하지 않는 구간을 D-구간으로 분류할 수 있다.) 일반적인 평면구조에서 D-구간의 응력분포는 평면응력 내지 평면변형의 가정으로 구할 수 있다. D-구간에서 발생하는 인장응력에 대하여 인장 주응력도에 따라서 배근하면 이상적일 수 있지만 많은 경우에 이는 불가능하며 꼭 필요한 것도 아니다. 주응력도를 따라서 힘의 흐름을 단순화하고 필요한 철근의 양을 계산하는 방법으로 Strut-and-Tie Model의 방법이 있다. 이 방법은 D-구간에서의 역학적인 현상을 단순화한 것으로 종래

의 실험에 근거한 배근의 단점을 극복할 수 있다. 이 방법은 기술자들 사이에 일찍부터 사용되어 왔었는데, 최근에는 독일의 Stuttgart대학의 연구진에 의해 그 방법론이 정리되고 여러가지의 중요한 경우에 대하여 배근상세가 연구되었다.<sup>1)2)3)</sup> 보-기둥 연결부는 기하형상이 불연속인 구간으로 기하적인 D-구간으로 분류할 수 있다. 이 구간에서는 구조역학으로 구한 내력만으로는 배근의 상세를 결정할 수 없다. 본 연구에서는 보-기둥 연결 D-구간의 몇가지 경우에 대하여 Strut-and-Tie Model을 구성하는 예를 보이고자 한다.

### 2. Strut-and-Tie Model

#### 2.1. Strut과 Tie

부재내의 응력분포는 주응력도로 나타낼 수 있는데, 균열이 인장 주응력에 수직하게 발생한다면 철근 콘크리트 부재가 제 기능을 발휘하기 위해서는 균열발생후의 인장 주응력을 철근이 부담하여야 한다. 실제로 철근의 배치는 매우 제한적인 기하형상

정희원, 동아대학교 토목공학과 부교수

을 가지고, 철근의 강성에 따라서 내부의 응력의 분포는 탄성상태의 응력분포와는 달라지므로 철근의 양과 배치를 결정하기 위해서는 여러번의 반복 계산을 거쳐야 한다. 설계의 과정중 배근상세를 정하기 위해서는 많은 경우에 이러한 복잡한 반복 계산보다는 단순화한 응력의 흐름을 가정하는 것이 공학적으로 의미가 있다.

압축력의 흐름은 마치 콘크리트의 요소가 균일한 압축응력을 갖는 것처럼 단순화할 수 있는데 이를 Strut로 하고, 철근요소는 배치된 기하형상에 따라 인당력을 부담하는 Tie로 하여 내부의 흐름에 따라 이들의 耐荷 System을 구성한 것을 Strut-and-Tie Model이라 한다.

## 2.2.Strut-and-Tie Model의 구성

### · Load Path Method

많은 경우에 모든 주응력선을 따라서 Strut와 Tie의 배치를 결정하는 것은 불가능할 뿐 아니라, 실제의 철근배치를 고려하면 합당하지도 않다. 인장 주응력의 분포로부터 철근이 필요한 위치를 알 수 있으며, 힘의 흐름은 부재내 단면에서의 힘의 합력의 평형을 생각하여 단순화하여 구한다. 그림 1과 같이 편심하중이 작용하는 기둥의 경우를 예를 들면, 집중하중 근처의 D-구간은 Saint-Venant의 정리에 따라서 국부적인 응력분포가 생기며, 약 b 만큼 떨어진 곳 부터는 B-구간이 된다. B-구간의 응력은 집중력의 등가력과 모멘트에 의한 것으로 그림 1a와 같이 등가의 합력들로 나타낼 수 있다. 각 합력점에서의 주응력선을 연결하면 집중력과 집중력, 모멘트에 의한 압축력과 인장력을 연결하는 Load Path가 만들어지며 이들 힘의 흐름이 방향을 바꿀때 평형을 유지하기 위한 연결력이 발생한다. 이들 연결력의 위치는 단면내 응력분포로 정할 수 있는데, 그 크기는 Load Path를 직선으로 단순화 했을때 각 절점에서의 평형관계로 구할 수 있다. (그림1b)

### · Model 구성의 기준

Strut-and-Tie Model은 많은 부분이 기술자의 직관에 달려있다. Tie, 즉 철근의 배치는 시공과 정착을 고려해서 결정해야 한다. 좋은 Model인지 혹은 나쁜 Model인지는 최소일의 개념으로 검증할 수 있다. 그림 2의 a)Model이 b)보다 좋은 이유는 Tie force의 내부일의 차이로 설명이 가능하다.

$$\sum T_i \cdot l_i = \min$$

Tie의 배치에 있어서 정착에 유의해야 한다. 그림 3의 a)와 달리 b)와 같이 수평철근이 정착되지 않

은 경우에는 不安定한 모델이 된다. 서로 다른 단면의 힘이 연결될 때 그 경사각이  $45^\circ \pm 15^\circ$  를 넘 어설 때는 힘은 단순히 최소일의 개념에 따른 경로를 택하지는 않는다. 이는 보의 전단문제에서 익히 알고 있는 바와 같다.

### · Node

Strut와 Tie, Strut와 Strut, Tie와 Tie등이 만나는 점은 힘이 집중되는 곳으로 예를들어 그림 4와 같이 실제의 응력상태를 이상화 시킨것이다. Strut와 Strut가 만나는 Singular point로써의 Node는 집중하중 도입부에 특히 자주 발생하는데 그림 5와 같이 국부적인 D-구간이 발생하여 Node의 위치가 정해진다. Strut와 Tie의 Node는 예를 들면 부착정착의 경우에 정착길이에 걸쳐서 콘크리트에 발생하는 경사압축력과 철근의 인장력이 만나는 곳이다.

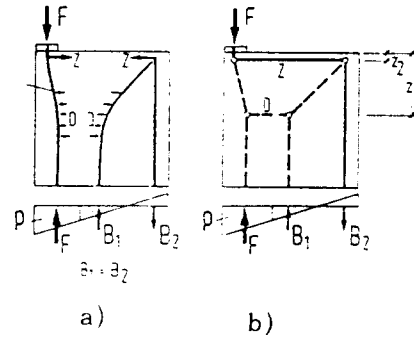


그림1. Load Path Method

- a) Load Path 와 연결력
- b) Strut and Tie Model

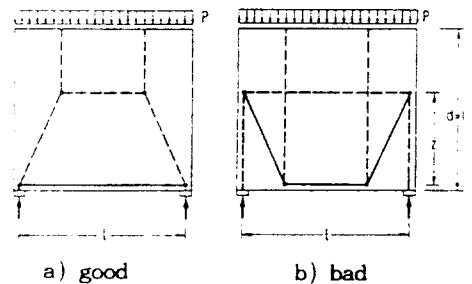


그림2. 2개의 서로 다른 Strut and Tie Model

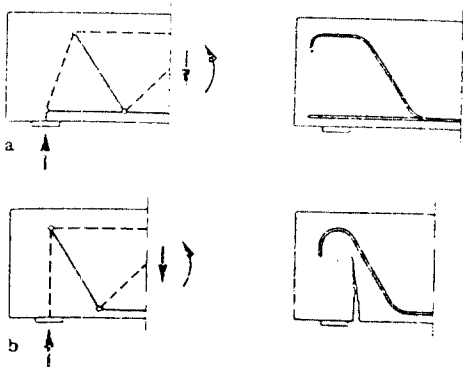


그림3. Tie의 정착

- a) 수평철근의 정착
- b) 정착되지 않은 수평철근(불안정)

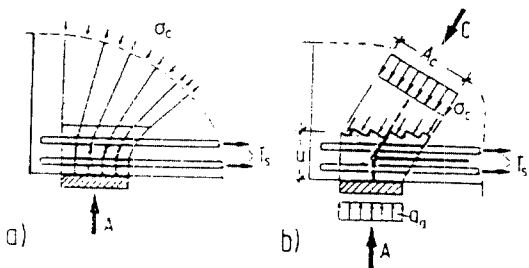


그림4. Strut-Strut-Tie Node

- a) 실제 응력 상태
- b) 이상화된 Node

### 3. 보-기둥 연결부

#### 3.1. 일반적인 문제

보-기둥 연결부는 기하적인 D-구간으로 정의될 수 있다. Saint-Venant 정리에 따라 대략 보와 기둥 치수만큼 안쪽 코너에서 떨어진 곳까지의 변형은 Bernoulli의 가정을 따르지 않는다. 그림 5에서 보는 바와 같이 D-구간의 응력은 순수한 휨 모멘트를 받는 경우와 같지 않다. 이러한 2축응력상태는 평면응력 또는 평면 변형문제로 이해하거나, 휨 무제가 아니라 전단문제로 이해하는 것이 필요하다. 즉 Jennewein이 지적한 바와 같이 Girder의 모멘트는 Column에 전단력처럼 작용한다.<sup>4)</sup>(그림 6a) 단순화하면(그림 6b)와 같이 전단변형하여 라멘의 모멘트는 배분된다.

#### 3.2. (-)모멘트를 받는 보-기둥 연결부

같은 크기의 보-기둥이 (-)Moment를 받을 때 모서리의 특징을 고려하지 않으면 그림 7a와 같이 Strut-Tie가 형성된다. 실제의 응력상태를 고려하여 그림 7b와 같은 Strut-and-Tie Model을 얻을 수 있다. 따라서 그림 7c와 같이 배근한다. 보 단면부의 힘의 흐름은 그림 7d와 같으므로 구부린 철근을

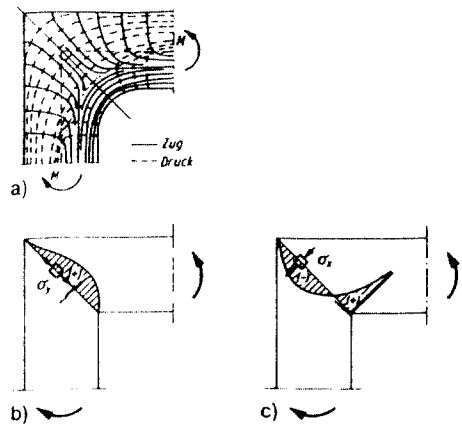


그림5. 모서리의 응력분포(탄성해석)

- a) 주응력도
- b)  $\sigma_y$  응력분포
- c)  $\sigma_x$  응력분포

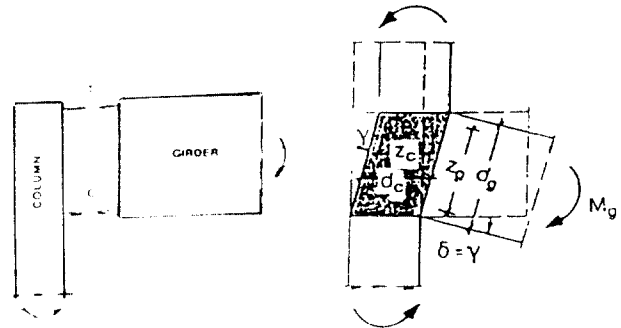


그림6. 보-기둥 연결부의 내력은 전단력이 작용하는 것으로 이해할 수 있다.

따라서 횡방향 철근을 배근해야 한다. 모서리의 특성을 고려하여 시공배근하면 그림 7e와 같다. 보가 기둥보다 큰 경우에는 앞서와 같은 배근은 그림 8a와 같은 경사균열을 일으킨다. 이는 그림 8b의 Strut and Tie Model이 문제가 있음을 말한다. 즉 사압축력의 경사가 지나치게 낮은 경우는 전단력을 받는 부재에서와 같이 힘의 흐름이 실제와 같지 않다. 보다 현실에 가까운 모델로 그림 8c의 전단 Truss가 포함된 Strut and Tie Model을 생각할 수 있다. 그림 8d로 배근할 수 있는데, 횡방향으로 힘이 분배되게 여러개의 Stirrup 또는 Loop를 배치해야 안전하다. 압축력이 추가로 연결부에 작용할 때는 concrete strut의 경사가 완만해 질수 있다. 이는 축력을 받는 전단 truss와 같은 거동을 하기 때문이다. 이때의 Strut-and-Tie Model은 그림 9a와 같다. 전단철근의 양은 크게 줄어들어 경우에 따라서는 시공배근으로 만족할 수 있다.(그림 9b)

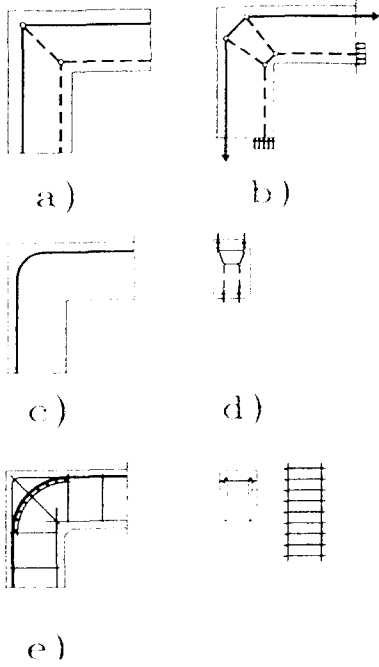


그림7. (-)모멘트를 받는 라멘모서리  
 a) 간단한 Strut-and-Tie Model  
 b) 모서리의 특징을 고려한 STM  
 c) 이에 따른 배근  
 d) 단면내 힘의 흐름  
 e) 배근

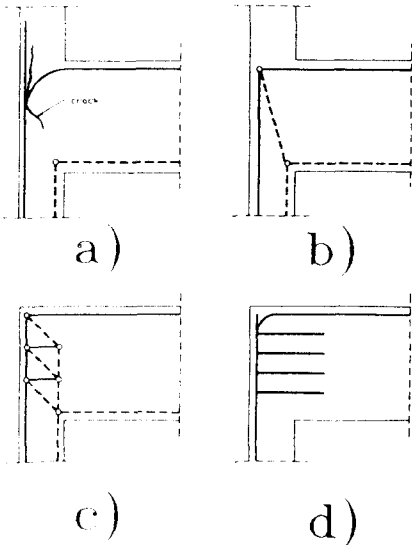


그림8. 보의 높이가 큰 경우  
 a) 균열의 발생  
 b) 간단한 STM  
 c) 전단 Truss를 이용한 STM  
 d) 배근

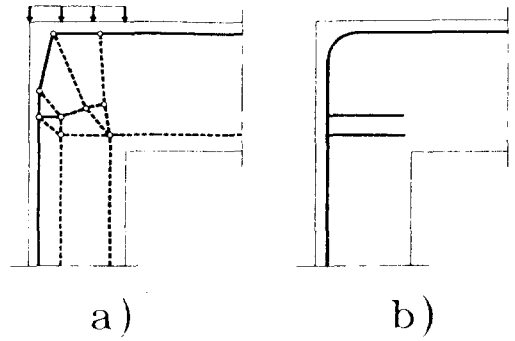


그림9. 압축력이 작용할 때의 Strut-and-Tie Model  
 a) STM  
 b) 배근에

### 3.3. (+)모멘트를 받는 보-기둥 연결부

매우 작은 모멘트를 받는 경우에는 그림 10a의 모델이 가능하다. 모서리부의 응력을 고려하면(그림5) 기둥축에 45° 방향의 응력에 대해 배근하는 것이 필요함을 알 수 있다. 압축력이 모서리에서 둔각으로 연결되면 그에 수직되는 인장응력은 경사 방향의 Stirrup을 배근하여 받을 수 있다.(그림 10b) 이러한 모델에 따라서 배근하면 그림 10c 또는 10d의 배근이 가능하다. 보다 큰 모멘트에 대해서는 X방향의 인장력을 서로 교차하는 보와 기둥의 철근이 부담하는 것은 불가능하다. 따라서 안쪽 모서리를 가로질러 철근을 배근해야 하며 이에 따른 Strut-and-Tie Model은 그림 11a와 같다. 이를 Loop 또는 Stirrup으로 배근하면 그림 11b,c의 배근이 가능하다. 여러가지 다른 배근의 라멘 모서리 실험<sup>5)</sup>은 이들 배근의 차이를 명백히 나타내고 있다.(그림12) 어떠한 경우에도 (X)와 같은 배근은 바람직하지 않다. 이 경우 철근은 정확히 필요한 방향에 반대되게 배근되었다.

부재의 두께가 다른 경우에는 그림 6a에서와 같이 전단력이 작용하는 것으로 이해하여 그림 13a의 전단 Truss Model을 구성할 수 있다. 단순히 Load-path의 개념으로 Strut and-Tie Model을 구성하면 단순화된 Model이 얻어진다. Load Path의 방향이 꺾이면서 발생하는 연결력은 많은 경우에 Self-equilibrated path를 가진다.(Schlaich는 P.C 보의 지점부에서 이를 발견하고 힘의 소용돌이라 했다.<sup>6)</sup> 그림 12a에서 경사하게 배치한 철근은 이러한 힘을 받는 것으로 이해할 수 있다. 그림 13a의 내부모서리에서도 같은 힘이 발생한다. 경사 지게 배근하거나 직교배근할 때의 Strut-and-Tie Model은 그림 13b,c와 같다. 현실적으로는 그림13d의 배근이 가능하다.

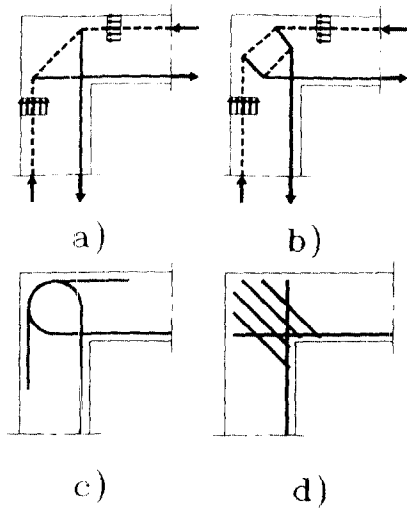


그림10. (+)모멘트를 받는 라멘 모서리

- a) 간단한 STM
- b) 경사 인장력을 고려한 STM
- c) 이에 따른 배근 1
- d) 이에 따른 배근 2

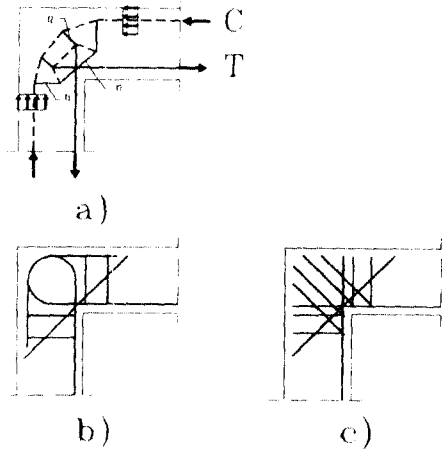


그림11. 모서리부 인장력을 고려한 배근

- a) STM
- b) 이에 따른 배근 1
- c) 이에 따른 배근 2

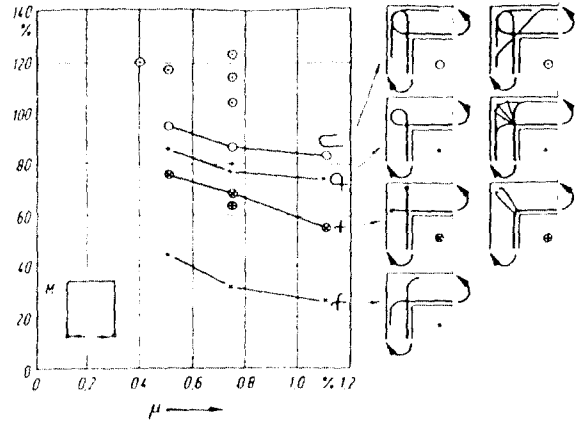


그림12. 서로 다른 배근에 대한 강도 실험

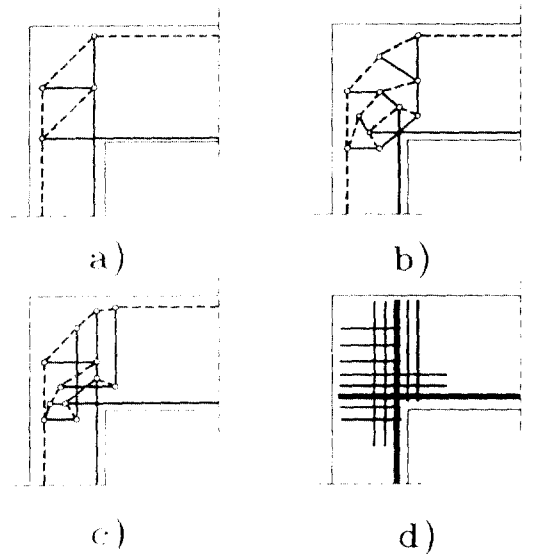


그림13. 높이가 큰 보와 기둥 연결부

- a) 전단 Truss가 있는 STM
- b) 경사 배근시의 STM
- c) 직교 배근시의 STM
- d) c)에 따른 배근

### 3.4. Rahmen 모서리

라멘 모서리의 한 예로 축력, 전단력과 모멘트가 작용하는 경우를 생각하면 이에 대한 간단한 Strut and Tie Model은 그림 14a와 같다. 실제 응력 상태에 보다 적합하게 STM을 구성하면, 경사배근이 가능하다면 그림14b, 직교배근이라면 그림14c의 STM을 구성할 수 있다. 이에 대하여 배근상세를 결정하면 그림 14b와 같이 배근할 수 있다. 같은 개념은 T형 보-기둥 연결부와 +형 보-기둥 연결부에 서도 같이 적용된다.

- 5) Nilsson, I., "Reinforced concrete corners and joints subjected to bending moment", Design of coners and joints in frame structures, States Institute for Byggnadsforskning, Stockholm, 1973
- 6) Schlaich, J., Schaefer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete", Journal of PCI, V32, No. 3, May-June, 1987

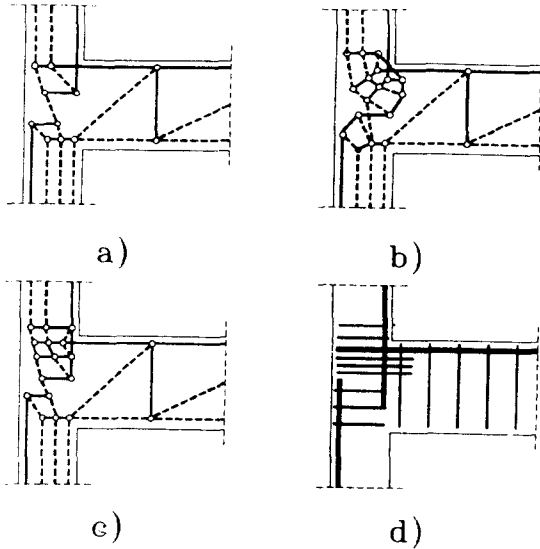


그림14. 축력, 전단력, 모멘트를 받는 보-기둥 연결부

- a) 간단한 STM
- b) 경사 배근을 고려한 STM
- c) 직교 배근을 고려한 STM
- d) 배근예

#### 4. 맺음말

배근상세는 종래 기술자의 경험에만 의존하거나, 실험에 의하여 결정되었다. 다양한 경우의 배근상세에 대하여 Strut-and-Tie Model은 구조거동에 대하여 좋은 통찰력을 주는 것을 Beam Column Joint의 예를 통해 보였다. 많은 경우에 Beam Column Joint의 문제는 단순화하여 전단문제로 이해하는 것이 이의 해결에 도움이 되며 힘의 흐름을 고려하여 배근하면 유리한 결과를 주는 것을 보였다.

#### <참고문헌>

- 1) Schlaich, J. and Weischede, D., "Zum methodischen Bemessen und Konstruieren", CEB Heft 150, 1982
- 2) Schlaich, J. and Schaefer, K., "The Design of Structural Concrete", IABSE Workshop, New Delhi, 1993
- 3) Schlaich, J. and Schaefer, K., "Konstruieren im Stahlbetonbau", Beton-Kalender, 1993
- 4) Jennewein, M. and Schaefer, K., "Standardisierte Nachweise von haeufigen D-Bereichen", Final