

특집

|| ACI 318 Code 주요 개정내용 분석 ||

스트럿-타이모델과 전단 및 비틀림 관련 개정 - Associate with Strut-Tie Model and Shear/Torsion -



김상철*
Kim, Sang Chel



이정윤**
Lee, Jung Yoon

1. ACI 318-02 규준의 Strut-and-tie 모델 설계법

1.1 Strut-and-tie 모델의 추가배경

ACI 318-02 규준¹⁾에서는 Strut-&Tie 모델(이하, STM)을 이용한 부재의 응력교란구역에 대한 전단설계법을 Appendix A에 기술하였다. Appendix A는 CEB-FIP Model Codes 1990, Canadian Code, AASHTO 및 German Code DIN 1045-1을 반영하여 작성되었다. Ritter²⁾와 Morsch³⁾가 사인장균열이 발생한 철근 콘크리트 보의 힘의 흐름을 콘크리트의 대각선 압축대와 철근의 수직 및 하부인장재로 구성된 트러스모델에 의하여 설명한 후에 트러스모델은 많은 연구자에 의하여 발전되었다.

STM은 소성이론과 힘의 평형조건을 이용한 트러스모델의 일종으로 부재의 응력교란구역의 전단설계에 효율적인 설계법이다. <그림 1>은 Kani의 전단스팬비를 변수로 한 철근 콘크리트 보의 실험결과⁴⁾를 STM과 Collins 등⁵⁾의 트러스모델로 해석한 결과를 비교하고 있다. <그림 1>에서 트러스모델은 전단스팬비가 2.5 이하일 때 보의 전단내력을 과소 평가하지만, STM은 전단스팬비가 2.5 이하인 보의 전단내력을 매우 정확하게 예측하여 응력교란구역에서는 STM이 매우 효율적인 설계법임을 알 수 있다. 또한 현행 설계법에서 사용되고 있는 응력교란구역의 설계법은 힘의 흐름을 정확히 파악할 수 없고, 실험적 결과에 근거한 반경험식으로 실험의 적용범위를 벗어날 경우에 응력교란구역의 거동을 정확히 평가할 수 없다.

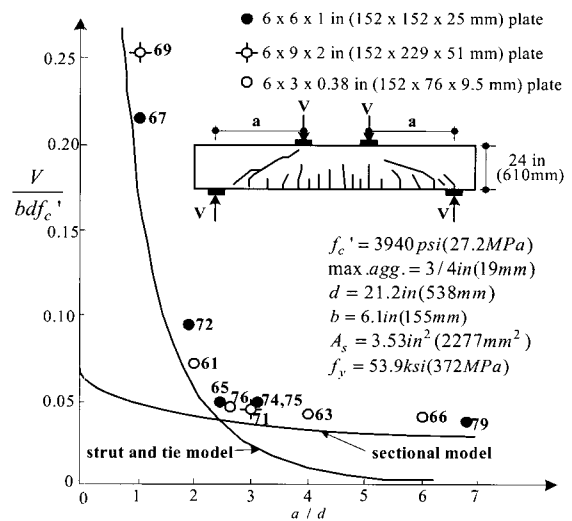


그림 1. 철근 콘크리트 보의 전단실험결과와 STM 및 트러스모델에 의한 결과의 비교⁵⁾

1.1.1 B구역 및 D구역

철근 콘크리트 구조물은 응력과 부재의 기하학적인 형태에 따라서 아래와 같이 B-구역과 D-구역으로 구분할 수 있다.

● B구역(응력균일구역)

: 힘이론의 평면유지의 법칙(Bernoulli's law)을 적용할 수 있는 부재영역으로 변형률분포가 선형이다.

● D구역(응력교란구역)

: 부재의 기하학적 형태 또는 하중의 급격한 변화에 의하여 하중이나 부재의 형태가 불연속적(discontinuity)인 구역으로 평

* 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

면유지의 법칙이 위배되어 변형률분포가 비선형인 응력교란 (disturbed)구역이다. D구역에 해당하는 부재는 <그림 2>와 같이 깊은 보, 코벨, 엔드 팀, 집중하중 작용점 등⁶⁾이 있다.

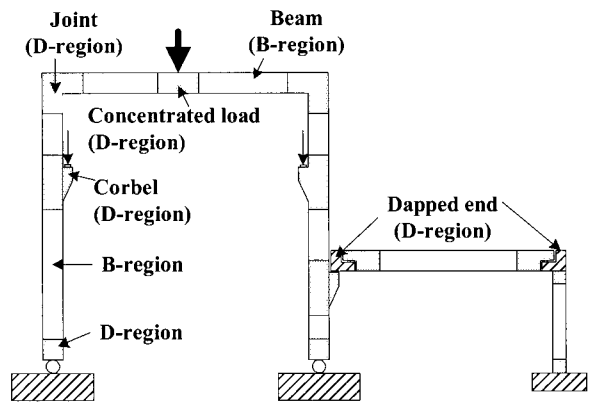


그림 2. B와 D구역⁶⁾

철근 콘크리트 구조물에는 일반적으로 D영역과 B영역이 혼재하는 경우가 많으며, ACI 318-02 기준에서는 하중의 불연속 또는 부재의 기하학적 형태의 불연속이 발생한 지점에서 단면의 높이(h) 또는 단면의 유효높이(d)까지의 영역을 D구역으로 간주한다. 두 개의 D-구역이 겹치거나 만났을 경우에는 두 개의 D-구역을 한 개의 D-구역으로 보고 설계할 수 있으며, 이러한 D-구역의 길이-높이 비의 최대값은 2이다. 따라서 D-구역의 스트럿과 타이는 이루는 최소각은 26.5° 이지만 ACI 기준에서는 25° 로 간주한다.

1.1.2 Strut-and-tie 모델의 구성요소

STM은 스트럿과 타이 및 절점으로 이루어진 트러스모델로 각 구성요소의 특징은 아래와 같다.

● 스트럿(strut) - 스트럿은 STM의 압축재를 말한다. 스트럿의 형태는 힘의 분포에 의하여 프리즘(prismatic), 아치(arch), 부채모양(fan-shape), 병모양(bottle-shape) 스트럿으로 이상화한다. 스트럿 양쪽 면에서의 절점영역 강도의 차이 또는 양쪽 면의 다른 지압길이 때문에 스트럿의 유효압축강도(f_{cu})가 서로 다를 경우에는 스트럿의 폭을 일정하게 감소시킬 수 있다. 병모양 스트럿은 <그림 3>과 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 있으며, 균열 제어 철근이 횡방향 인장에 저항하기 위하여 배근된다. 구속 횡방향 철근량은 압축력축에 대하여 1:2의 비로 기울어진 압축대로 구성된 스트럿-타이 모델에 의하여 계산할 수 있다. 병모양 스트럿의 단면적은 스트럿 양 쪽 끝 단면적 중에 작은 값을 택한다.

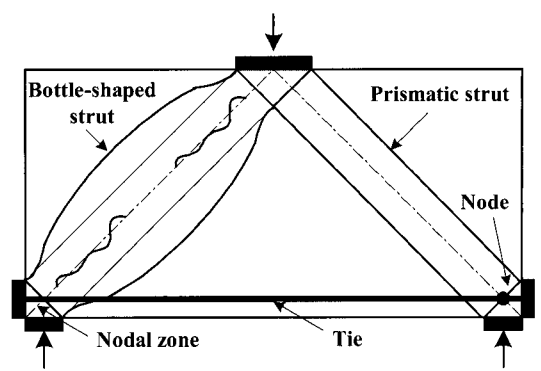


그림 3. STM의 구성요소

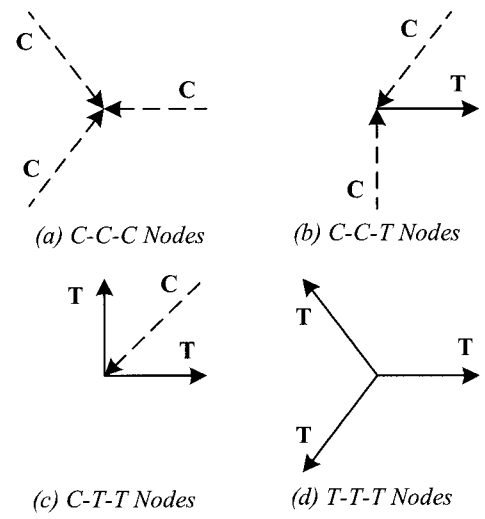


그림 4. 절점의 종류

● 타이(tie) - 타이는 STM의 인장재를 말한다. 타이는 철근, 프리스트레싱 철근, 철근 주위의 콘크리트로 구성된다. 철근 주변 콘크리트는 스트럿과 타이에 작용하는 힘이 정착되기 위한 영역을 포함한다. 설계에서는 타이 안에 있는 콘크리트는 타이에 작용하는 축력을 저항하지 않는다고 가정하지만, 실제로 주변 콘크리트는 사용하중 시에 철근의 인장변형을 감소시킨다.

● 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 4>와 같이 C-C-C(세 개의 압축력 작용), C-C-T(두 개의 압축력과 한 개의 인장력작용), C-T-T(한 개의 압축력과 두 개의 인장력작용), T-T-T(세 개의 인장력작용)으로 구별된다.

● 절점 영역(nodal zone) - 절점영역은 STM에서 하중이 전달될 수 있는 절점주위의 콘크리트의 체적을 말한다. 수압정적 응력(hydrostatic stress)을 받는 절점영역의 면은 스트럿과 타

이의 축에 수직한다. C-C-C절점 영역의 면에 작용하는 응력이 동일할 경우에 절점영역면의 폭의 비($w_{n1}:w_{n2}:w_{n3}$)와 힘의 비($C_1:C_2:C_3$)는 비례한다. C-C-T절점의 타이가 절점을 지나 절점의 한쪽 끝에 평판에 의하여 정착된 경우에 타이가 정착된 평판의 크기에 의하여 발생한 지압응력이 스트럿의 응력과 동일해야 한다. 타이에 작용하는 힘은 평판, 직선 정착길이, 갈고리 철근에 의하여 정착될 수 있다.

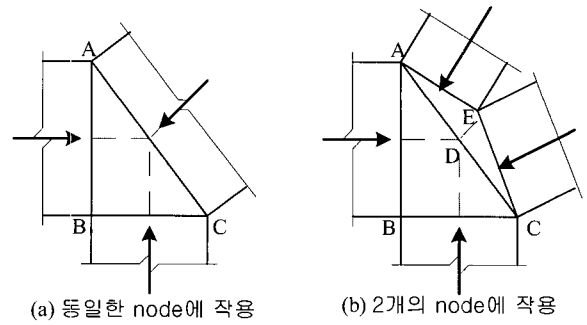


그림 5. 절점영역의 합력

1.2 Strut-and-tie 모델의 설계과정

STM에 의하여 철근콘크리트 부재를 설계하기 위해서는 다음 항목을 결정해야 한다.

- ① STM의 기하학적인 형태 (부재의 D영역을 결정하고, 영역 내에서 힘의 흐름에 기초하여 압축재, 인장재 및 절점을 배치)
- ② 작용하는 하중에 근거하여 각 압축재, 인장재에 작용하는 축력
- ③ 콘크리트의 유효압축강도와 하중계수를 계산하고 스트럿의 형태와 강도
- ④ 절점영역의 분포와 강도
- ⑤ 인장재의 형태, 강도, 필요 단면적 및 정착법
- ⑥ 철근의 배근

ACI 318-02규준에서는 STM의 기하학적인 형태를 정할 때에 아래의 조건을 만족하도록 하고 있다.

- ① D구역의 STM은 모든 하중을 지점 또는 인접한 B-구역에 전달할 수 있으며, 아래의 순서에 의하여 설계한다.
 - (a) 부재의 B구역과 D구역을 구별하여 정한다.
 - (b) D-구역 경계면의 합력을 계산한다.
 - (c) D-구역의 하중경로에 따라서 스트럿과 타이를 정하고, 스트럿과 타이에 작용하는 힘을 계산한다. 이 때 스트럿과 타이의 축은 각각 압축과 인장응력장의 축과 일치하도록 한다.
 - (d) 스트럿과 절점영역의 유효폭은 작용하는 하중과 유효콘크리트 응력을 고려하여 결정한다. 타이에 배근되는 철근은 철근강도를 계산하여 정하며, 철근은 절점영역에서 정착되도록 한다.

STM은 강도한계상태에 근거하며, 설계자는 규준의 사용성에 적합하게 설계하여야 한다. 깊은 보 또는 이와 유사한 보의 처짐은 STM을 해석하기 위한 탄성이론을 사용하여 계산할 수 있다.

② STM에 작용하는 하중과 반력은 평형을 이룬다. 반력과 스트럿 및 타이의 힘은 정적평형을 이루며 평형조건만을 이용하여 구할 수 있다.

③ 트러스의 형태를 결정할 때 스트럿, 타이, 절점구역, 지지구역의 치수가 고려되어야 한다.

스트럿-타이 모델을 구성하는 스트럿, 타이, 절점영역은 일정한 폭을 가지며, 트러스의 형태를 결정할 때 고려되어야 한다. <그림 5(a)>는 절점과 절점영역을 나타낸다. 수직력과 수평력은 경사 스트럿의 힘과 평형을 이룬다. 만약 모든 세 방향의 응력이 동일하다면 수압정적절점 영역으로 구분되며 스트럿의 폭은 스트럿에 작용하는 힘에 비례한다. <그림 5(b)>와 같이 세 힘 이상이 2차원 구조물의 절점영역에 작용할 경우에는 그 중에 세 힘이 교차하도록 조절하는 것이 일반적이다. 따라서 <그림 5(b)>의 A-E, C-E면에 작용하는 스트럿의 힘은 A-C면에 작용하는 1개의 힘으로 대체할 수 있으며, 이 힘은 절점 D를 통과한다. 설계에서는 두 스트럿에 작용하는 힘을 절점 D에 작용하는 하나의 힘으로 변경하여 스트럿-타이 모델을 해석할 수 있다. 또한 부재 축에 수직인 방향의 지점의 폭이 부재의 폭보다 작을 경우에는 절점면의 수직방향으로 발생하는 쪼갬균열을 억제하기 위하여 횡방향 철근을 배근해야 한다.

④ 타이는 스트럿 또는 타이를 가로지를 수 있지만, 스트럿은 서로를 통과하거나 중복될 수 없다. 스트럿은 단지 절점에서 교차하거나 겹칠 수 있으며, 스트럿이 중복될 경우에 스트럿의 응력도 중복되어야 한다.

⑤ 한 절점에서의 스트럿과 타이가 이루는 각도는 25° 이하가 될 수 없다. 한 절점에서의 스트럿과 타이가 이루는 각도는 균열 발생을 감소시키고, 거의 같은 방향에서 발생하는 스트럿길이의 축소와 타이길이의 늘어남에 의한 부적합을 피하기 위하여 충분한 각도를 이루어야 한다. ACI 318-02 규준에서는 스트럿과 타이가 이루는 각도를 최소 25°로 제한한다.

⑥ 스트럿과 타이 및 절점영역의 설계는 다음 식에 근거한다.

$$\phi F_n \geq F_u \quad (1)$$

여기서, F_u 는 계수하중에 의하여 스트럿, 타이, 또는 절점영역의 한 면에 작용하는 힘이다. F_n 는 스트럿, 타이, 또는 절점영역의 공칭강도이며, ϕ 는 강도저감계수이다. 몇 개의 하중이 존재할 경우에는 각각의 하중에 대하여 내력을 검토해야 한다. ACI 318-02 규준에서는 STM의 강도저감계수를 0.75로 규정한다.

1.3 스트럿의 설계

주근이 없는 스트럿의 공칭 압축강도(F_{ns})는 식(2)에 의하여 계산되는 스트럿 양 쪽 끝의 값 중 작은 값을 택해야 한다.

$$F_{ns} = f_{cu} A_c \quad (2)$$

여기서, A_c 는 스트럿의 한 쪽 끝의 단면적이다. A_c 를 계산하기 위하여 사용되는 스트럿의 폭(w_s)은 양쪽 끝 스트럿에 수직한 쪽 중에서 작은 값을 택한다. 깊은 보와 같은 2차원 구조물에서 스트럿의 두께는 그 부재의 폭이 된다. f_{cu} 는 다음 (a), (b)중 작은 값이다.

- (a) 스트럿 콘크리트의 유효압축강도
- (b) 절점영역 콘크리트의 유효압축강도

1.3.1 콘크리트의 유효압축강도

스트럿 콘크리트의 유효압축강도는 식 (3)에서 계산된다.

$$f_{cu} = 0.85\beta_s f'_c \quad (3)$$

여기서 강도저감계수(β_s)는 다음과 같다.

- ① 단면이 일정한 스트럿 $\beta_s = 1.0$
 β_s 값은 보 또는 기둥 압축영역의 직사각형 응력블록과 동일한 스트럿에 적용한다.
- ② 스트럿의 중간부위의 폭이 절점부위의 폭보다 큰 스트럿 (병모양 스트럿)

- (a) 3.2항을 만족하는 철근이 있는 경우 $\beta_s = 0.75$
- (b) 3.2항을 만족하는 철근이 없는 경우 $\beta_s = 0.60\lambda$

여기서 λ 는 ACI 318-02의 11.7.4.3에 의하여 주어진다.

β_s 값은 <그림 3>과 같은 병 모양 스트럿에 적용한다. 스트럿에서 압축력의 내부 수평퍼짐(internal lateral spread)은 <그림 3>과 같이 스트럿의 양끝에서 스트럿 축과 평행하게 쪼개짐을 유발한다. 쪼개지는 힘에 저항하기 위하여 배근된 철근은 균열폭을 억제하고, 스트럿의 축하중 저항력을 증대시키며, 힘을 재분배시킨다. (b)의 β_s 값은 경량 콘크리트에 대한 수정계수 λ 를 포함하여 횡방향 철근이 없는 스트럿의 강도가 축방향 균열을 유발하는 하중보다 작지 않게 한다.

- ③ 인장부재 또는 부재의 인장 플랜지의 스트럿 $\beta_s = 0.40$

β_s 값은 보, 박스거더, 벽 인장플랜지의 축방향 또는 횡방향 철근을 설계하기 위하여 사용된 STM의 압축스트럿에 적용된다. 이와 같은 스트럿에서는 인장 영역에 발생한 균열을 통하여 압축

력을 전달해야 하기 때문에 β_s 값이 낮다.

- ④ 모든 다른 경우 $\beta_s = 0.60$

부재의 스트럿이 위의 ①, ②, ③의 경우에 해당되지 않을 경우에 β_s 값은 0.6이다. 평행한 경사 균열이 보의 웨브를 몇 개의 경사 스트럿으로 나누는 보의 웨브 압축장에서의 스트럿, 균열이 스트럿 안을 가로지를 수 있는 스트럿이 이 경우에 해당된다. 0.6의 β_s 값은 철근이 없는 병모양 스트럿과 인장부재 스트럿 β_s 값 다음으로 낮은 값이다.

1.3.2 병모양 스트럿의 최소철근

병모양 스트럿에서 0.75의 β_s 값이 사용될 경우에 스트럿의 압축력 퍼짐에 의하여 발생하는 횡방향 인장력에 저항하기 위하여 철근이 스트럿의 축을 가로질러 배근되어야 한다. ACI 318-02 규준에서는 스트럿의 압축력은 스트럿의 축에 대하여 2:1(축방향:횡방향)의 비로 퍼진다고 가정한다.

콘크리트 압축강도(f_{cu})가 422 kgf/cm^2 (6,000 psi) 이하일 경우에 다음 식을 만족하는 철근이 스트럿 축에 가로질러 배근되어야 한다.

$$\sum \frac{A_{si}}{bs_i} \sin \gamma_i \geq 0.003 \quad (4)$$

여기서 b 는 단면의 폭이며 스트럿을 가로지르는 i 번째 층에서의 철근의 총 면적(A_{si})은 스트럿 축에 대하여 각도 γ_i 이며, 간격 s_i 로 배근된다. 식(4)에서 요구된 철근은 스트럿 축에 대하여 γ_1 과 γ_2 각도로 직교하는 2방향, 또는 스트럿 축에 γ 각도를 이루는 1방향으로 놓여진다. 만약 철근이 1방향으로 배근될 경우에 γ 는 40° 이상이 되어야 한다.

식(4)에서 요구되는 철근은 <그림 3>의 STM에서 보여지는 것과 같이 스트럿 압축력의 퍼짐에 의하여 발생하는 콘크리트 인장력과 관련되어 있다. <그림 6>은 균열이 발생한 스트럿을 가로지른 2열의 철근을 나타낸다. 만약 균열에 따라 전단미끌림 없이 균열이 벌어질 경우에 철근은 스트럿에 수직하게 아래의 응력(σ_1)이 발생한다.

$$\sigma_1 = \frac{A_{s1} f_{s1}}{bs_1} \sin \gamma_1 \quad (5)$$

계산의 간편성을 위하여 식(4)는 응력이 아닌 철근비로 나타낸다. <그림 6>에서 아래첨자 1과 2는 수직철근과 수평철근을 가리키며, 설계에서는 철근비를 수직철근비와 수평철근비를 합하여 계산한다. 만약 이와 같은 보강이 제공되지 않는 경우에는 $\beta_s = 0.60\lambda$ 를 사용하여 f_{cu} 값을 계산한다. 식(4)에서 요구된

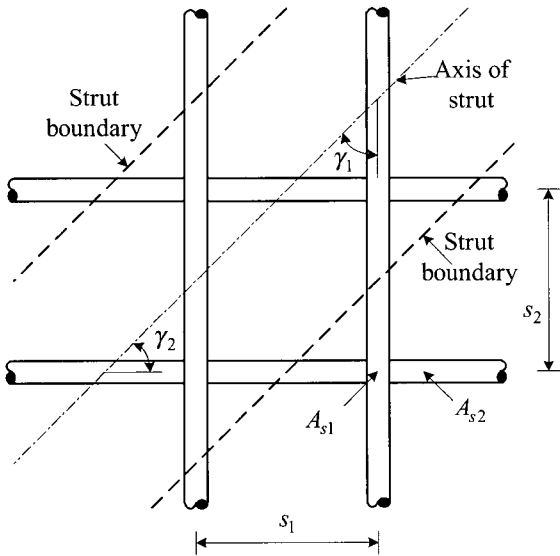


그림 6. 스트럿 철근

구속보강은 파일 캡과 같은 3차원 구조물에 배근하기 어렵다.

1.3.3 스트럿의 압축철근

압축철근은 스트럿의 강도를 증가시킬 수 있다. 압축철근은 스트럿 내에서 스트럿의 축에 평행하게 배근된다. 또한 띠철근 또는 나선형철근으로 구속되며 잘 정착되어야 한다. 이러한 경우에 축방향으로 보강된 스트럿의 강도는 식(6)에 의하여 계산한다.

$$F_{ns} = f_{cu}A_c + A_s'f_s' \quad (6)$$

식(6)의 스트럿의 철근응력 f_s' 은 스트럿이 압괴할 때 스트럿의 변형률로부터 계산할 수 있다. SD 40 이하 철근의 f_s' 을 f_y 로 간주할 수 있다.

1.3.4 스트럿의 폭

스트럿의 폭(w_s)은 타이의 폭(w_t)과 가력점 또는 지지판의 폭(l_b)에 의하여 결정된다.

$$w_s = w_t \cot \theta + l_b \sin \theta \quad (7)$$

여기서 θ 는 스트럿과 부재의 인장재 사이의 각도이다.(그림 7)

1.4 타이의 설계

타이의 공칭강도(F_{nt})는 식(8)에 의하여 계산한다.

$$F_{nt} = A_{st}f_y + A_{ps}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (8)$$

여기서 A_{st} 는 타이 안에 있는 프리스트레스 되지 않은 철근의 단면적, A_{ps} 는 타이 안에 있는 프리스트레스가 가해진 철근의 단면적, f_y 는 프리스트레스 되지 않은 철근의 항복강도, f_{se} 는 프리스트레스 철근의 응력손실 후의 유효응력, Δf_p 는 계수 하중에 의한 프리스트레싱 텐던의 응력증가이다. $(f_{se} + \Delta f_p)$ 는 텐던의 항복강도(f_{py})를 넘지 않아야 하고 A_{ps} 는 프리스트레스 되지 않은 철근의 경우 '0'이다.

식(7)에서, Δf_p 는 부착된 프리스트레스 철근에 대해서는 413 MPa, 부착되지 않은 프리스트레스 철근에 대해서는 68.9 MPa를 사용할 수 있으며 Δf_p 값은 해석에 의하여 조절할 수 있다.

1.4.1 타이의 유효 폭

철근의 축은 STM의 타이의 축과 일치하여야 한다. 절점영역의 크기를 계산하기 위하여 사용된 타이의 중심 콘크리트의 유효 폭(w_t)을 설계함에 있어서 가정되는 타이의 유효폭은 타이 철근의 분포에 따라 다음 제약 조건 안에서 변할 수 있다.

① 타이 안의 철근이 1 층일 경우에 타이의 유효폭(w_t)은 <그림 7(a)>와 같이 타이의 철근 지름과 철근 표면에서 피복 콘크리트까지의 거리의 두 배를 합한 값이다.

$$w_t = 2 \times \bar{y} \quad (9)$$

여기서 \bar{y} 는 철근의 도심이다.

② 타이의 폭의 실제 상한 값($w_{t,max}$)은 수압정적 절점영역의 폭에 상응하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$w_{t,max} = F_{nt}/f_{cu} \quad (10)$$

여기서 f_{cu} 는 1.3.1절에 주어진 절점영역의 적용 가능한 유효 압축강도이다. 만약 타이의 폭이 ①에서 계산된 값보다 클 경우에 타이의 철근은 <그림 7(b)>와 같이 타이의 폭과 두께에 일정하게 배근되어야 한다.

1.4.2 타이 철근의 정착

타이 철근은 구조설계규준에서 정하는 기계식정착, 포스트 텐션 정착, 표준 갈고리, 또는 정착길이를 확보한 직선철근에 의하여 정착되어야 한다.

① 절점영역에는 절점의 한 면과 다른 면에서 타이 힘의 차이가 발생할 수 있다.

② 한 쪽 타이를 정착하는 절점영역에서 타이에 작용하는 부착력은 <그림 7>과 같이 타이 내의 철근의 도심이 확장절점영역

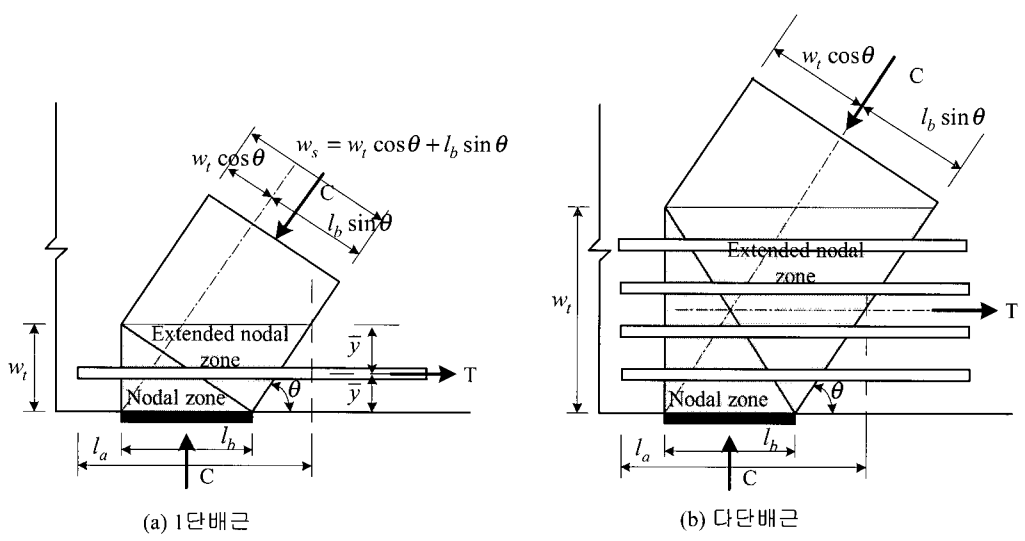


그림 7. 타이의 유효폭과 확장절점영역

(extended nodal zone)을 지나 부재 경간으로 들어가는 점에서 발생한다(정착길이는 확장절점영역을 지나 부재 경간으로 들어가는 점에서 시작한다).

③ 2개 이상의 타이를 정착하고 있는 절점영역에서 각 방향에 작용하는 타이의 힘은 그 타이의 철근 도심이 확장절점영역을 벗어나는 점에서 발생한다.

④ ③에서 요구되는 횡방향 철근은 ACI 318-02 규준의 12.13항에 의하여 정착되어야 한다.

1.5 절점영역의 설계

절점영역의 공칭 강도(F_{nm})는 식(11)에 의하여 계산된다.

$$F_{nm} = f_{cu} A_n \quad (11)$$

여기서, f_{cu} 는 1.5.1에 주어진 절점영역의 콘크리트의 유효압축강도이며, 절점영역의 면적(A_n)은 ① 또는 ②이다.

① F_u 가 작용하는 절점영역면의 면적으로 F_u 의 작용선에 대하여 수직한다.

② 절점영역을 가로지르는 한 단면의 면적이다. 이 단면은 작용하는 합력의 작용선에 대하여 수직한다.

한 절점에 만나는 모든 스트럿의 응력이 동일할 경우에 수압정적 절점영역이 사용될 수 있다. 수압정적 절점영역의 면은 스트럿의 축에 수직하며 절점영역면의 폭은 스트럿에 작용하는 힘에 비례한다.

스트럿과 타이에 작용하는 주응력은 스트럿과 타이의 축에 평행하게 작용한다고 가정하고, 이 축에 수직한 면에 응력이 주응력이 되며 위의 ①에 의하여 A_n 을 계산한다. <그림 7(b)>와 같

이 절점영역면이 스트럿의 축에 직각이 아닌 경우에 절점영역면에는 전단응력과 연직응력이 작용한다. 이러한 응력은 일반적으로 스트럿의 단면적 A_c 에 작용하는 수직응력(주압축)과 대치할 수 있으며, ①과 같이 스트럿의 축과 수직한 면적을 사용한다.

분리된 절점영역을 통과하는 단면에 대한 응력에 대하여 위의 ②가 사용된다. 이 경우에 응력은 절점영역에 작용하는 합력에 수직한 최소단면적에 대하여 검토되어야 한다. 절점영역의 설계는 위의 ①과 ②중에서 큰 응력에 의하여 결정된다.

1.5.1 절점영역의 유효압축강도

구속보강근이 절점영역에 배근되어 있지 않고 구속효과가 실험과 해석에 의하여 제공되지 않을 경우에 스트럿-타이에 작용하는 힘에 의하여 절점영역에 의하여 발생하는 힘에 대한 유효압축응력은 식(12)에 의하여 계산한다.

$$f_{cu} = 0.85 \beta_n f'_c \quad (12)$$

여기서 β_n 은 절점영역의 콘크리트 유효압축강도에 대한 타이의 정착이 미치는 영향을 고려한 계수로 다음과 같다.

- ① 스트럿 또는 지압면적으로 둘러싸인 절점영역 $\beta_n = 1.0$
 - ② 한 개의 타이에 의하여 정착된 절점영역 $\beta_n = 0.80$
 - ③ 두 개이상의 타이에 의하여 정착된 절점영역 $\beta_n = 0.60$
- 위의 ①-③의 값은 각각 C-C-C, C-C-T, C-T-T(또는 T-T-T) 절점영역에 상응한다. β_n 값은

타이의 인장변형률과 스트럿의 압축변형률의 부적합에 의하여 유발되는 절점영역의 교란(disruption)의 증가를 반영한다.

2. ACI 318-02의 전단과 비틀림 관련 개정비교

2.1 ACI 규정에서의 전단 및 비틀림에 관한 주요 개정 내용 및 비교

전단과 비틀림에 있어 기존의 ACI 318 규정과의 큰 차이점 발생은 고강도 콘크리트의 활용과 부록 편에 스트럿-타이모델을 게재함으로써 종래의 엄격히 제한되었던 요소가 다소 완화되었다는 것이 큰 특징이다. 먼저 전단에 있어서 기존에는 일반강도 범위의 콘크리트만을 대상으로 하였으나 점차적으로 고강도 콘크리트의 사용 범위가 넓어짐에 따라 규정을 설정하기 위해 실험을 수행한 결과 갑작스런 전단파괴가 발생되지 않도록 하기 위해서는 콘크리트 강도가 상승할수록 최소 전단철근량도 증가되어야 하는 것으로 나타났다. 따라서 최소 전단철근량의 산정에 있어서도 기존의 식과는 달리 콘크리트 강도가 포함되도록 하였으며 그 값이 기존의 최소 전단철근량보다는 적어도 커야한다고 규정하였다. 그 이외에는 전단설계에 대해 뚜렷하게 변동된 사항은 나타나지 않고 있다.

전단과 마찬가지로 비틀림에 있어서도 고강도 콘크리트의 영향을 고려하여 최소 전단철근량에 콘크리트 강도를 함수로 포함함으로써 콘크리트 강도가 증가할수록 최소 철근량이 증가하도록 규정하였다. ACI 해설서에 따르면 비록 고강도 콘크리트 보에 대해 충분한 비틀림시험을 수행한 것은 아니지만 앞서 최소 전단철근량의 식과 일치되도록 하기 위해 비틀림에 대한 횡방향 폐합스터립의 최소 비틀림철근량의 식을 변경하였다고 기술하고 있다. 특기할 사항으로는 비틀림에 있어 속이 비어있는 중공단면이 중실단면보다 비틀림이 더 크게 작용되므로 식에 대입하는 단면적(A_g 와 A_{cp})의 사용을 명확하게 규정함으로써 계산결과가 보다 구조적으로 안정적인 값이 되도록 유도하고 있다.

깊은 보의 경우는 앞서 스트럿-타이모델을 규정에 추가함으로써 전의 규준에 비해 규정이 보다 간단해졌음을 알 수 있다. 그러나 기존의 규정과 개정된 것과의 큰 차이점은 전단강도 V_n 을 취하는데 있어서 기존에는 l_n/d 의 크기에 따라 두 가지로 분류하여 사용하도록 하였으나 개정된 규정에서는 한 가지 식만을 제안하고 있다. 특히, 수평과 수직 전단철근량의 규정에 있어서는 기존과 서로 정반대로 규정하고 있는데, 이는 실험을 수행한 결과 수직전단철근이 수평전단철근보다 훨씬 효율적인 것으로 나타나 기존과 정반대로 규정하였다고 기술하고 있다. 또한, 최대철근의 간격도 기존의 45.7 cm에서 30.5 cm로 간격 폭을 줄임으로써 철근에 의한 균열의 폭 제한을 전보다 엄격하게 하고자 하는 의

도가 보인다.

브래킷과 내민받침에 대한 전단설계에 있어서는 전단 공간에 대한 깊이의 비 a/d 가 1.0 이하, V_u 보다 크지 않는 수평 인장력 N_{uc} 를 받는 부재로 국한하였지만, 개정 ACI 318-02에서는 a/d 의 범위를 2.0 이하로 확장하고 스트럿-타이모델의 사용을 허용하고 있다. 또한, 강도감소계수에 있어 종래에는 $\phi = 0.85$ 를 적용하였으나 개정된 규정에서는 브래킷과 내민받침의 거동이 주로 전단에 의해 지배받는 것에 주안점을 두어 설계에 있어 $\phi = 0.85$ 로 통일하였다.

다음 <표 1>은 기존의 ACI 318-95, 99와 개정된 ACI 318-02의 구조설계기준을 비교하여 나타낸 것이다.

2.2 국내 콘크리트 구조설계기준과 개정 ACI 기준과의 비교

2003년에 개정된 콘크리트 구조설계기준은 과거의 CGS단위에서 SI단위로 변경된 것이 큰 특징이다. 따라서 과거에 사용된 전단 및 비틀림과 관련된 식이 불가피하게 단위가 바뀔에 따라 일부 변경되었다. 실질적으로 개정된 국내 콘크리트 구조설계기준은 ACI 318-95의 내용으로 이루어져 있기 때문에 국내 규정과 개정된 ACI 318-02와의 비교는 앞서 표에서 나타난 ACI 318-95와 -02와의 비교와 동일하다. 그러나 개정된 ACI 318-02에서는 과거의 ACI기준과 동일하게 그대로 미영단위계를 사용하고 있으므로 국내 기준과의 식의 값은 서로 상이하게 나타나고 있다. □

참고문헌

1. ACI Committee 318-02, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318-02/ACI 318R-02)," American Concrete Institute, Detroit, 2002, pp.443
2. Ritter, W., "Die bauweise hennebique, Schweizerische Bauzeitung," Vol.33, No.7, 1899, pp.59~61.
3. Morsch, E., "Der Eisenbetonbau, Seine Anwendung und Theorie," 1th Edition, Im Selbstverlag der Firma, Neustadt, 1902, pp.118.
4. Kani, M.W., Huggins, M.W. and Wittkopp, R.R., "Kani on shear in reinforced concrete," Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1979.
5. Collins, M.P. and Mitchell, D., "Prestressed concrete structures," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1991.
6. Schlaich, J., Schafer, I. and Jennewein, M., "Towards a consistent design of structural concrete," J. Prestressed Concrete Inst., Vol.32, No.3, 1987, pp.74~150.

표 1. ACI 318-95, 99와 개정된 ACI 318-02 기준의 비교

ACI 318-95	ACI 318-99	ACI 318-02	비고
11.1 전단강도 11.1.2.1 ACI 318-99와 동일	11.1 전단강도 11.1.2.1 $\sqrt{f_c}$ 에 대한 규정	11.1 전단강도 11.1.2.1 항목의 내용변경 "3배보다 크지 않으면서 $f_c/5,000$ 배 만큼 최소복부철근이 배치된.." 항목 삭제 R11.1.2.1 항목 추가	고강도 콘크리트의 사용에 대한 장애요소 제거
11.1.4 "For deep flexural members, brackets and corbels.."	11.1.4 "For deep flexural members, brackets and corbels.."	11.1.4 "For deep beams, brackets and corbels.."로 변경	
11.3 철근콘크리트 부재에서 콘크리트에 의한 전단강도 11.3.3 항목 없음	11.3.3 항목추가 "원형단면의 경우 V_c 를 계산하기 위해 사용되는 면적은 직경과 콘크리트 단면의 유효길이의 곱으로 한다. 콘크리트 단면 직경의 0.8배를 유효높이로 해도 좋다."	11.3.3 좌동	
11.5 전단철근에 의한 전단강도 11.5.1 (c)항 없음	11.5.1(c) 나선철근, 원형띠철근(circular ties) 또는 후프(hoopes)	11.5.1 (c) 좌동	
11.5.1.2 (d) 나선철근	11.5.1.2(d) 삭제	11.5.1.2(d) 좌동	
11.5.5.3의 식 $A_v = 50b_w \frac{s}{f_y}$	11.5.5.3의 식 $A_v = 50b_w \frac{s}{f_y}$	11.5.5.3의 식 변경 $A_v = 0.75\sqrt{f_c} b_w \frac{s}{f_y}$ 그러나 $(50b_w s)/f_y$ 보다 작지 않아야 한다.	R11.5.5.3 해설 추가 (고강도 콘크리트의 사용을 제한하는 요소 제거)
11.5.6.3 경사스터럽이 전단철근으로 사용되는 경우 $V_s = \frac{A_v f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}{s}$	11.5.6.3의 내용 11.5.6.4로 변경 원형띠철근, 후프, 혹은 나선철근의 전단보강에 대해 언급	좌동	
11.6 비틀림 설계 R11.6의 마지막 절에 참고문헌 11.21의 결과로 표기	11.6 비틀림 설계 R11.6의 마지막 절에 참고문헌 11.24의 결과로 표기	11.6 비틀림 설계 R11.6의 마지막 절에 참고문헌 11.27과 11.28의 결과로 변경	
ACI 318-99와 동일	11.6.1 비틀림이 고려되지 않아도 되는 경우의 계수비틀림모멘트값 T_u (a) 프리스트레싱되지 않은 부재에서 식 (a)를 만족하는 경우 (b) 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 식(b)를 만족하는 경우	11.6.1 비틀림이 고려되지 않아도 되는 경우(threshold torsion)에서 (c)항목 추가 (c) 축방향 인장이나 압축력을 받는 프리스트레싱되지 않은 부재 $T_u < \phi \sqrt{f_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{4A_g \sqrt{f_c}}}$	11.6.1, R11.6.1, 11.6.1.1, 11.6.1.2, 11.6.2.2로의 변경은 중공(hollow) 단면인 경우 중실(solid)인 경우보다 비틀림이 더 크게 작용되기 때문임 (R11.6.1에 자세한 내용 참조)
"	11.6.2 계수비틀림모멘트의 계산 (T_u) (a) 프리스트레싱되지 않은 부재의 경우 (b) 프리스트레스트 부재의 경우	11.6.2 계수비틀림모멘트의 계산 11.6.2.2(c) 항목추가 (c) 축방향 인장이나 압축력을 받는 프리스트레싱되지 않은 부재의 최대 계수비틀림모멘트 T_u $\phi 4 \sqrt{f_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{4A_g \sqrt{f_c}}}$ 중공단면에서 A_{cp} 는 11.6.2.2의 A_g 와 대체되지 않음좌동	중공단면에서 A_{cp} 와 A_g 단면적으로 대체하지 못하도록 규정함으로써 재분배(redistribution)이후 비틀림 우력값이 기존보다 상승하게 되고 따라서 보다 구조적으로 안전하게 됨
"	R11.6.3.7의 내용 설명보완 (Fig. R11.6.3.6(a) 추가)	좌동	
"	11.6.3.10, R11.6.3.10에서 "tendon"의 어휘사용	11.6.3.10, R11.6.3.10에서 tendon 대신에 모두 "prestressing steel"로 교체사용	
"	11.6.5 최소비틀림 철근량 11.6.5.2 횡방향 폐쇄스터럽의 최소면적 $(A_v + 2A_t) = \frac{50b_w s}{f_{yw}}$ 11.6.5.3 종방향 비틀림 최소철근량 $A_{t, \min} = \frac{5\sqrt{f_c} A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) \rho_w \frac{f_{yw}}{f_{yt}}$ A_t/s 는 $25b_w/f_{yw}$ 이상이어야 한다	11.6.5.2 횡방향 폐쇄스터럽의 최소면적 $(A_v + 2A_t) = 0.75\sqrt{f_c} \frac{b_w s}{f_{yw}}$ 단, 이 값은 $(50b_w s)/f_{yw}$ 보다 작지 않아야 한다 11.6.5.3 좌동	고강도 콘크리트의 사용 가능성을 제한하는 제약 부분 제거
"	11.8 "Special provisions for deep flexural members"의 절 제목사용 내용 중 "truss bars" 사용	11.8 "Deep beams"로 제목 변경 내용 중 truss bars로 사용한 부분은 "bent-up bar"로 용어 변경	
"	11.8.2 "단순지지 깊은 보(deep flexural members)의 전단설계는 식 11-1과 11-2를 사용한다"	11.8.2의 내용변경 "Deep beam의 설계는 10.7.1에서 인정하는 비선형해석이나 부록 A에 따른다"	

표 1. ACI 318-95, 99와 개정된 ACI 318-02 기준의 비교

ACI 318-95	ACI 318-99	ACI 318-02	비고
"	11.8.3 "연속 deep flexural members 전단설계는 11.1에서 11.5까지, 11.8.5에 따르거나 평형과 강도조건을 만족하는 방법을 사용한다. 모든 경우에 있어 11.8.4, 11.8.9 및 11.8.10을 만족하여야 한다."	11.8.3의 내용 삭제	
ACI 318-99와 동일	11.8.4 깊은 보(deep flexural beam)의 전단강도 V_n 은 다음보다 크지 않아야 한다. - $l_n/d < 2$ 일 때 $8\sqrt{f_c}b_wd$ - $2 < l_n/d < 5$ 일 때 $\frac{2}{3}\left(10 + \frac{l_n}{d}\right)\sqrt{f_c}b_wd$	11.8.3 깊은 보(deep beam)의 전단강도 V_n 은 $10\sqrt{f_c}b_wd$ 를 초과하지 않아야 한다.	95와 99 code에서는 최대활동 전단강도에 대해 규정되어 있음. 실험결과를 재분석한 결과 이 강도의 한계는 보의 지지부의 분쇄로 인해 보가 파괴되는 시험치를 나타냄
"	11.8.5 전단에 대해 위험단면의 위치는 등분포하중이 작용할 경우에는 지점에서 $0.5l_n$ 의 위치에, 집중하중의 경우는 $0.5a$ 이며 d 보다는 크지 않아야 한다.	내용삭제	
"	11.8.6 과 11.8.7 V_c 에 대한 규정 식 11-28과 식 11-29 사용	내용삭제	
"	11.8.8 계수전단력 V_u 가 ϕV_c 를 초과하는 경우의 V_c 계산	내용삭제	
"	11.8.9 수직전단철근의 단면적 A_v 는 $0.0015b_w s$ 보다 적지 않아야 하며 s 는 $d/5$ 나 18"를 초과하지 않아야 한다.	11.8.4 다음으로 대체됨 "시간에 대해 수직인 전단철근의 단면적 A_v 는 $0.0025b_w s$ 보다 적지 않아야 하며 s 는 $d/5$ 나 12"를 초과하지 않아야 한다."	
"	11.8.10 수평전단철근의 단면적 A_{vh} 는 $0.0025b_w s_2$ 보다 적지 않아야 하며 s_2 는 $d/3$ 혹은 18"를 초과하지 않아야 한다.	11.8.5 다음으로 대체됨 "시간에 평행한 방향의 전단철근 단면적 A_{vh} 는 $0.0015b_w s_2$ 보다 적지 않아야 하며 s_2 는 $d/5$ 혹은 12"를 초과하지 않아야 한다."	
"	11.8.11 "11.8.5에서 규정한 위험단면에서 요구되는 전단철근은 시간 전체에 적용한다."	내용삭제	
"		11.8.6 새로운 문장 적용 "11.8.4와 11.8.5에 규정한 최소 수직, 수평 철근 대신에 A.3.3을 만족하는 철근을 사용하고자 하는 경우에는 허가를 받아야 한다."	
ACI 318-99와 동일	11.9 브래킷과 내민받침에 대한 특수규정 "본 규정은 a/d 가 1보다 크지 않고, V_u 보다 크지 않는 수평 인장력 N_{uc} 를 받는 경우에만 적용한다"	11.9 브래킷과 내민받침에 대한 특수규정 ACI 318-99에 다음을 추가 적용 " a/d 가 2보다 적을 때에는 부록 A를 사용해도 무방하다."	Strut-tie 모델 부록 A에 삽입
"	11.9.3.1 강도감소계수 $\phi = 0.85$ 적용	11.9.3.1 강도감소계수 $\phi = 0.75$ 적용	R11.9.3.1 강도감소계수의 변경 설명
"	11.10 벽체에 대한 특수규정 11.10.1 벽체의 전단에 대한 일반사항 설명	11.10 벽체에 대한 특수규정 11.10.1 ACI318-99에 추가하여 "수평전단력에 있어서 높이가 길이에 대해 2배를 초과하지 않는 경우 부록 A와 11.10.9.2-11.10.9.5에 따라 벽체를 설계하여도 무방하다."	Strut-tie 모델 부록 A에 삽입
"	11.12 슬래브와 기초(footing)의 특수규정 11.12.3 슬래브와 기초의 전단보강은 철근(bar)이나 wire로 11.12.3.1과 11.12.3.2의 규정에 따라 적용가능	11.12 슬래브와 기초(footing)의 특수규정 11.12.3 ACI318-99이외에 single-, multiple-leg 스테럽 (유효깊이 d 는 6in 이상, 전단철근 직경의 16배 이상)의 추가 적용	Punching shear에 대한 안정성 확보 목적
"		11.12.3.3과 11.12.3.4 새로 추가	
"	11.12.4.6 및 11.12.4.9 " ϕ 는 휨에 대한 강도감소계수"	11.12.4.6 및 11.12.4.9 용어에 대한 수정 " ϕ 는 인장에 의해 제어되는(tension-controlled) 부재에 대한 강도감소계수"	
"	11.12.6.2 편심으로 인한 모멘트전달로 발생하는 전단응력 계산 - 전단보강이 없는 부재 - 전단보강철근(전단머리보강은 제외)이 있는 부재에 대한 식	11.12.6.2의 마지막 부분에 다음 추가 "기둥을 둘러싼 스테럽의 최외측에서 $d/2$ 만큼 떨어진 위험단면에서의 계수전단력과 모멘트로 인해 발생하는 전단응력은 $2\sqrt{f_c}$ 를 초과하지 않아야 한다"	
"	R11.12.6.2 : 11.12.6.2에 대한 해설	R11.12.6.2의 마지막에 다음사항 추가 "전단보강이 되었을 때 위험단면의 형상은 일반적으로 다각형(그림 11.12.3(d)와 (e))이다. 각 단면별 전단응력 계산 식은 참고문헌 11.58을 참조할 것"	