



산수허브

SANSU HUB

산수허브 콘크리트구조설계 실무

제 1 편

철근콘크리트 보의 휨설계

강도설계법(KDS 14) · 한계상태설계법(KDS 24 14 21)

예제 RC-B1 · RC-B2

산수허브 SansuHub

토목구조물의 설계 · 건설기술 개발

2026년 6월

개정 이력 · Revision History

이 교재는 「산수허브 콘크리트구조설계 실무」 시리즈로서 아래 연혁에 따라 제·개정됩니다.

판 (차수)	주요 내용	발행 연월
초판 (제정)	최초 발행 — KDS 14 · KDS 24 설계기준 반영	2026. 6

적용 주요 설계기준

기준 번호	기준명
KDS 14 20 20	콘크리트구조 휨 및 압축 설계기준
KDS 14 20 26	콘크리트구조 피로 설계기준
KDS 14 20 30	콘크리트구조 사용성 설계기준
KDS 14 20 80	콘크리트 내진설계기준
KDS 24 14 21	콘크리트교 설계기준(한계상태설계법)

※ 표기된 기준은 발행 시점의 최신 개정판을 적용하며, 실제 설계 시 최신 개정 내용을 반드시 확인한다.

머리말

이 책은 철근콘크리트 보의 휨설계를 처음 배우는 사람도 차근차근 따라올 수 있도록 만든 설계실무서입니다.

어려운 수식을 외우기보다 ‘왜 그렇게 계산하는지’를 그림과 함께 이해하는 데 초점을 맞추었습니다.

제1장에서 휨의 기본 원리를 익힌 뒤, 제2장에서는 강도설계법(KDS 14)으로, 제3장에서는 한계상태설계법(KDS 24 14 21)으로 휨강도·처짐·균열·최소철근량을 설계법별로 정리합니다. 각 장은 같은 단면을 다루는 대표예제(RC-B1·RC-B2)로 마무리하여 두 방법을 곧바로 비교할 수 있게 하였습니다. 제4장에서는 두 방법을 종합 비교하고, 피로·지진(극단상황) 한계상태를 보충으로 다룹니다.

설계기준의 구체적인 조항을 사용할 때에는 해당 문단 아래 오른쪽에 [근거]로 기준·조항 번호를 표기하였습니다. 또한 예제 풀이에서는 단계 설명과 산식을 분리하고 산식을 한 줄에 하나씩 적어, 손으로 따라 계산하기 쉽게 구성하였습니다.

이 책의 모든 강도 계산은 산수허브 계산도구의 Calcpad 예제와 동일한 식을 사용하므로, 원리를 익힌 뒤 계산도구로 값을 바꿔 가며 연습할 수 있습니다.

목차

제1장 휨설계의 기초 개념

1.1 보가 힘을 받으면 무슨 일이 일어날까

보 위에 하중이 실리면 보는 아래로 처지면서 휘어집니다. 이렇게 휘어지는 작용을 휨(굽힘)이라 하고, 휨의 세기를 나타내는 양을 휨모멘트라고 합니다.

보의 단면을 들여다보면, 힘을 받을 때 위쪽(압축연단)은 짓눌려 짧아지고 아래쪽은 늘어납니다. 즉 단면 위부분에는 누르는 힘(압축력)이, 아랫부분에는 잡아당기는 힘(인장력)이 생깁니다. 그리고 압축과 인장의 경계, 즉 늘지도 줄지도 않는 선을 중립축이라고 합니다.

콘크리트는 누르는 힘에는 매우 강하지만 잡아당기는 힘에는 약해 쉽게 갈라집니다(보통 압축강도의 약 1/10). 그래서 인장이 생기는 단면 아래쪽에 철근을 넣어 인장력을 대신 받게 합니다. 이렇게 ‘압축은 콘크리트가, 인장은 철근이’ 분담하도록 만든 것이 철근콘크리트의 기본 아이디어입니다.

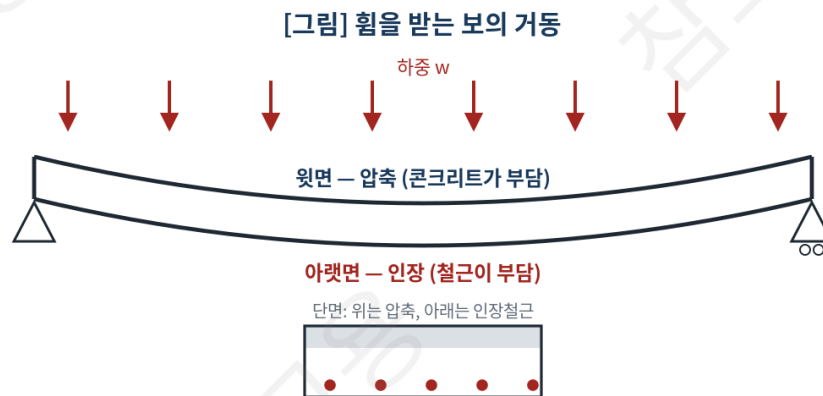


그림 1-1. 힘을 받는 보: 윗면은 압축, 아랫면은 인장(철근 배치)

1.2 설계의 두 가지 약속: 평형과 적합

단면의 휨강도를 계산할 때는 두 가지 기본 약속(가정)을 사용합니다. 이 두 약속이 모든 휨 계산의 출발점입니다.

① 힘의 평형조건

단면에 작용하는 압축력의 합 C 와 인장력의 합 T 는 크기가 같아야 합니다. 그래야 단면이 한쪽으로 밀리지 않고 균형을 이룹니다.

$$C = T$$

② 변형률의 적합조건 (평면보존)

힘을 받기 전 평평했던 단면은 흰 뒤에도 평평함을 유지한다고 봅니다(평면보존의 가정). 그래서 변형률은 단면 깊이에 따라 직선으로 분포합니다. 압축연단에서 가장 크고, 중립축에서 0이 되며, 그 아래 인장측에서는 반대 방향으로 다시 커집니다.

이 ‘직선 분포’ 덕분에 단면 어느 위치의 변형률이든 중립축까지의 거리에 비례해 간단히 구할 수 있습니다. 이것이 뒤에서 철근의 변형률을 계산하는 근거가 됩니다.

1.3 콘크리트의 변형률과 등가직사각형 응력블록

실험에 따르면 콘크리트가 압축으로 부서지기 직전의 최대 변형률은 약 0.0033입니다. 이를 극한변형률 ϵ_{cu} = 0.0033 이라 하고, 단면이 ‘한계에 도달한 순간’ 으로 보아 설계의 출발점으로 삼습니다.

이때 콘크리트의 실제 압축응력 분포는 위로 볼록한 곡선이라 그대로 쓰기 번거롭습니다. 그래서 KDS는 같은 크기의 압축력을 같은 위치에 내는 ‘직사각형 응력블록’ 으로 바꿔 계산합니다. 블록의 응력은 $0.85 \cdot f_{ck}$ 로 일정하다고 보고, 깊이는 $a = \beta_1 \cdot c$ 로 둡니다. 여기서 c 는 중립축 깊이, β_1 은 깊이계수입니다(보통강도 $f_{ck} \leq 40\text{MPa}$ 에서 $\beta_1 = 0.80$).

[근거] KDS 14 20 20 (4.1.1) 등가직사각형 응력블록

이렇게 단순화하면 압축합력 C 의 크기와 작용 위치를 쉽게 구할 수 있어, 손계산으로도 휨강도를 깔끔하게 정리할 수 있습니다.

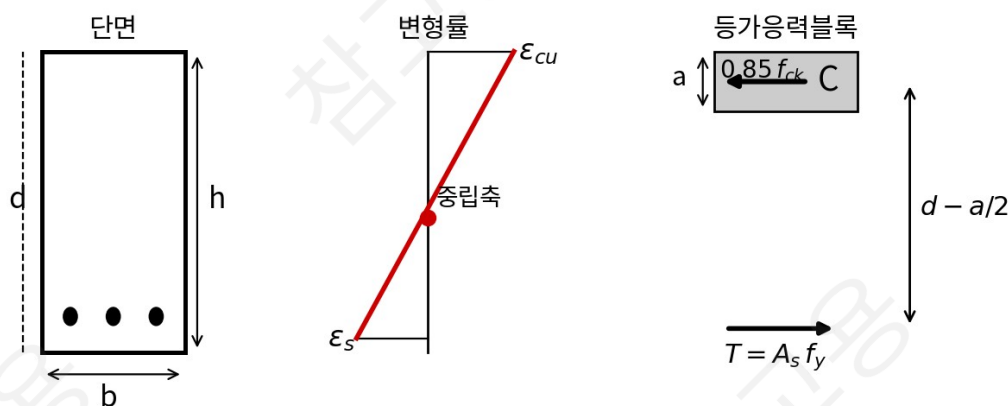


그림 1-2. 변형률 분포(직선)와 등가직사각형 응력블록, 압축합력 C 와 인장합력 T

기호	의미	표준값(보통강도)
ϵ_{cu}	콘크리트 극한변형률	0.0033
$0.85 \cdot f_{ck}$	등가응력블록의 압축응력	-

β_1	응력블록 깊이계수	0.80 ($f_{ck} \leq 40\text{MPa}$)
$a = \beta_1 \cdot c$	등가응력블록 깊이	-

제2장 강도설계법에 의한 휨 부재 설계 (KDS 14)

이 장에서는 인장철근만 배치한 직사각형 보(단철근보)를 강도설계법(KDS 14)으로 설계합니다. 휨강도를 구한 뒤, 같은 부재에 대해 처짐·균열(사용성)과 최소철근량까지 차례로 검토하고, 대표예제 RC-B1로 마무리합니다.

2.1 휨강도

(1) 등가응력블록 깊이 a 와 중립축 c

휨의 평형조건 $C = T$ 를 적용합니다. 압축합력 C 는 응력블록의 응력($0.85 \cdot f_{ck}$)에 블록 면적($b \cdot a$)을 곱한 값이고, 인장합력 T 는 철근이 항복했다고 보아 $A_s \cdot f_y$ 입니다.

$$0.85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_y$$
$$a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot b) , \quad c = a / \beta_1$$

(근거) KDS 14 20 20 (4.1.1)

(2) 공칭휨강도 M_n

압축합력 C 와 인장합력 T 는 크기가 같고 방향이 반대인 ‘짜힘(우력)’을 이룹니다. 짜힘이 만드는 모멘트가 곧 단면의 휨강도이며, 두 힘 사이의 거리(팔길이)는 $(d - a/2)$ 입니다. 여기서 $d = h - d_1$ 은 유효깊이입니다.

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2)$$

(3) 강도감소계수 ϕ 와 단면의 거동

계산한 공칭강도에 1보다 작은 강도감소계수 ϕ 를 곱해 설계강도로 씁니다. ϕ 는 최외단 인장철근의 변형률 ϵ_t 에 따라 달라집니다. ϵ_t 가 크면 철근이 먼저 항복하는 연성파괴(인장지배, $\phi=0.85$), 작으면 콘크리트가 갑자기 부서지는 취성파괴(압축지배, $\phi=0.65$)입니다. 보는 보통 인장지배가 되도록 설계합니다.

$$\epsilon_t = \epsilon_{cu} \cdot (d - c) / c$$

(근거) KDS 14 20 20 (4.1.2) 강도감소계수

거동 구분	조건 (ϵ_t)	강도감소계수 ϕ
인장지배	$\epsilon_t \geq 0.005$	0.85
변화구간	$0.002 < \epsilon_t < 0.005$	0.65~0.85 (선형보간)
압축지배	$\epsilon_t \leq 0.002$	0.65

[그림] 인장철근 변형률 ϵ_t 에 따른 강도감소계수 ϕ

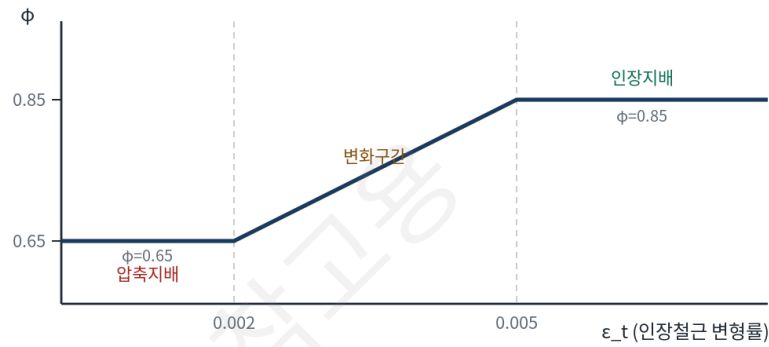


그림 2-1. 인장철근 변형률 ϵ_t 에 따른 강도감소계수 ϕ 의 변화

(4) 설계휨강도와 안전성 검토

설계휨강도 ϕM_n 이 소요휨모멘트 M_u 이상이면 단면은 안전합니다. 안전 여유는 안전율 SF로 가능합니다.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (\text{안전}), \quad SF = \phi M_n / M_u$$

2.2 처짐 검토 [KDS 14 20 30]

사용성 검토는 계수하중이 아니라 평상시(사용)하중 $D + L$ 을 그대로 사용합니다. 처짐 검토는 (1) 최소두께 이상이면 계산 생략, (2) 그렇지 않으면 균열을 반영한 즉시처짐 계산, (3) 장기처짐을 더한 총처짐을 허용처짐과 비교하는 순서로 진행합니다.

[그림] 사용한계상태: 처짐과 균열

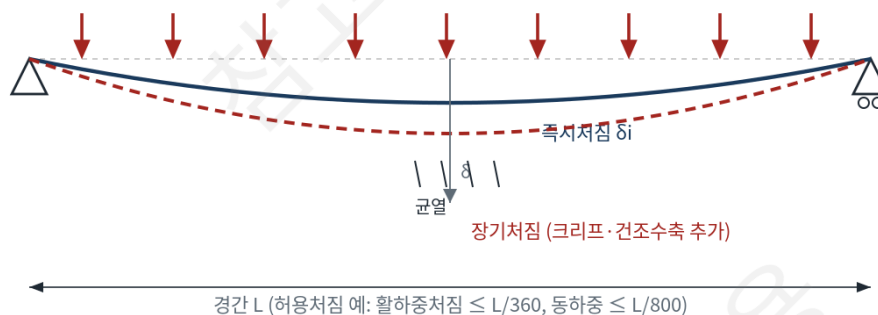


그림 2-2. 사용성 검토: 즉시처짐·장기처짐과 균열

(가) 처짐 계산을 생략할 수 있는 최소두께 — 보통중량콘크리트·SD400($f_y=400\text{MPa}$) 기준

부재 종류	단순지지	1단 연속	양단 연속	캔틸레버
1방향 슬래브	$\ell/20$	$\ell/24$	$\ell/28$	$\ell/10$
보·리브 슬래브	$\ell/16$	$\ell/18.5$	$\ell/21$	$\ell/8$

경량콘크리트는 $(1.65 - 0.00031\gamma_c)$ 를 곱하되 1.09 이상, f_y 가 400MPa가 아니면 $(0.43 + f_y/700)$ 을 곱해 보정합니다.

(나) 즉시처짐 — 유효단면2차모멘트 I_e (Branson 식)

$$I_e = (M_{cr}/M_a)^3 \cdot I_g + [1 - (M_{cr}/M_a)^3] \cdot I_{cr} \leq I_g$$

$$M_{cr} = f_r \cdot I_g / y_t, \quad f_r = 0.63 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

M_a 는 사용하중 최대 휨모멘트, y_t 는 도심에서 인장연단까지 거리, λ 는 경량콘크리트계수(보통종량 1.0)입니다. M_a 가 작으면 $I_e \approx I_g$, 크면 $I_e \approx I_{cr}$ 에 가까워집니다.

(다) 장기처짐 — 크리프·건조수축에 의한 추가 처짐

$$\lambda_{\Delta} = \xi / (1 + 50 \cdot \rho'), \quad \text{총처짐} = \text{즉시처짐} + \lambda_{\Delta} \cdot (\text{지속하중 즉시처짐})$$

지속하중 재하기간	시간경과계수 ξ
3개월	1.0
6개월	1.2
12개월	1.4
5년 이상	2.0

(라) 허용처짐 — 부재 용도별 한도

부재 형태	고려하는 처짐	허용처짐
비구조요소 없는 평지붕	활하중 즉시처짐	$\ell/180$
비구조요소 없는 바닥	활하중 즉시처짐	$\ell/360$
비구조요소 있는 지붕·바닥(손상우려 있음)	부착 후 발생 총처짐	$\ell/480$
비구조요소 있는 지붕·바닥(손상우려 없음)	부착 후 발생 총처짐	$\ell/240$

차량 등 동하중을 받는 교량은 더 엄격하여, 활하중+충격 처짐을 단순·연속경간 $\ell/800$ (보행자 위주 $\ell/1,000$), 캔틸레버 길이/300(보행자 고려 375) 이하로 제한합니다.

[근거] KDS 14 20 30 (4.2) 처짐·#4.2-1, #4.2-2

2.3 균열 검토 [KDS 14 20 30]

콘크리트는 인장에 약해 사용 중에도 가는 균열이 생깁니다. 폭이 너무 벌어지면 미관이 나쁘고 빗물·염분이 스며 철근이 부식됩니다. KDS 14 20 30은 휨 설계기준 등 다른 규정을 만족하면 일반적인 경우 균열 검토가 된 것으로 보지만, 수밀성·미관이 중요한 구조는 노출환경별 허용균열폭 이내인지 직접 검토합니다.

$$\text{설계 균열폭 } w_d \leq \text{허용 균열폭 } w_a$$

강재 종류	건조 환경	습윤 환경	부식성 환경	고부식성 환경
일반 철근	0.4mm와 0.006c 중 큰 값	0.3mm와 0.005c 중 큰 값	0.3mm와 0.004c 중 큰 값	0.3mm와 0.0035c 중 큰 값
긴장재(PS강)	0.2mm와 0.005c 중 큰 값	0.2mm와 0.004c 중 큰 값	—	—

c는 최외단 철근 표면에서 콘크리트 표면까지의 최소 피복두께(mm)입니다. 균열을 줄이려면 ① 지름이 작은 철근을 ② 좁은 간격으로 분산 배치하고 ③ 피복두께를 적정 유지하며 ④ 온도·건조수축용 철근을 함께 둡니다.

[근거] KDS 14 20 30 (4.1) · 부록 표 4.1-1

2.4 최소철근량 (강도설계법)

철근이 너무 적으면 균열 순간 콘크리트가 받던 인장력이 철근으로 옮겨 오면서 곧바로 항복·파단해 예고 없이 무너질 수 있다(취성파괴). 이를 막기 위해 다음 두 식으로 구한 값 중 큰 값을 최소철근량 $A_{s,min}$ 으로 한다.

$$A_{s,min1} = 0.25 \cdot \sqrt{f_{ck}/f_y} \cdot b \cdot d, \quad A_{s,min2} = 1.4/f_y \cdot b \cdot d, \quad A_{s,min} = \max(A_{s,min1}, A_{s,min2})$$

다만 해석상 계산철근량 $A_{s,cal}$ 의 4/3 이상을 배치하면 위 규정을 적용하지 않을 수 있다. 이 예외를 반영하면, 최소철근 검토에서 만족해야 할 소요철근량 $A_{s,req}$ 는 ‘계산철근량의 4/3’과 ‘최소철근량’ 중 작은 값이 된다.

$$A_{s,req} = \min((4/3) \cdot A_{s,cal}, A_{s,min})$$

즉 배치 철근량 A_s 가 $A_{s,req}$ 이상이면 최소철근 조건을 만족한 것으로 본다.

[근거] KDS 14 20 20 (4.2.2) 최소철근량

2.5 대표예제 RC-B1 (강도설계법)

폭 $b = 500\text{mm}$, 높이 $h = 600\text{mm}$, $d_1 = 60\text{mm}$ 인 보에 계수휨모멘트 $M_u = 250 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 가 작용한다.

$f_{ck} = 27\text{MPa}$, $f_y = 400\text{MPa}$ 이며, 인장철근은 한 단에 중심간격(CTC) $s = 100\text{mm}$ 를 고정값으로 배근한다(측면 피복 $c_s = 40\text{mm}$). 필요한 철근을 설계하라.

[1단계] 계수휨모멘트 · 유효깊이

$$M_u = 250 \text{ kN}\cdot\text{m}, \quad d = h - d_1 = 600 - 60 = 540 \text{ mm}$$

[2단계] 계산철근량 $A_{s,cal}$ 산정

인장지배($\varphi = 0.85$)를 가정하고 평형·모멘트식을 정리하면, 소요강도계수 R_n 으로부터 계산철근비 ρ_{cal} 과 계산철근량 $A_{s,cal}$ 을 구한다.

$$R_n = M_u / (\varphi \cdot b \cdot d^2), \quad \rho_{cal} = (0.85 \cdot f_{ck} / f_y) \cdot [1 - \sqrt{1 - 2 \cdot R_n / (0.85 \cdot f_{ck})}]$$

$$R_n = 250 \times 10^6 / (0.85 \times 500 \times 540^2) = 2.02 \text{ MPa}$$

$$\rho_{cal} = (0.85 \times 27 / 400) \cdot [1 - \sqrt{1 - 2 \times 2.02 / (0.85 \times 27)}] = 0.00529$$

$$A_{s,cal} = \rho_{cal} \cdot b \cdot d = 0.00529 \times 500 \times 540 = 1,428 \text{ mm}^2$$

[3단계] 사용철근 결정 (배근간격 → 직경)

배근간격 s 가 고정값이므로 한 단에 들어가는 철근 개수 n 은 정해진다(내림). 따라서 필요한 철근량은 개수가 아니라 철근 직경을 키워 맞춘다 — 1본당 소요단면적 이상인 표준 직경을 고른다.

$$n = [(b - 2 \cdot c_s) / s] + 1 = [4.2] + 1 = 5 \text{ 개 (간격 } 100\text{mm 고정 시 한 단에 들어가는 철근 수)}$$

$$1 \text{ 본 소요단면적} = A_{s,cal} / n = 1,428 / 5 = 286 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{이 이상인 표준 직경 } D19 \text{ (1 본 } 286.5 \text{ mm}^2) \text{ 선택}$$

$$\text{사용철근량 } A_s = 5 \times 286.5 = 1,433 \text{ mm}^2 \quad (5-D19)$$

[4단계] 최소철근비 검토 (2.4)

$$A_{s,min1} = 0.25 \sqrt{27 / 400} \cdot b \cdot d = 877 \text{ mm}^2, \quad A_{s,min2} = 1.4 / 400 \cdot b \cdot d = 945 \text{ mm}^2, \quad A_{s,min} = 945 \text{ mm}^2$$

$$(4/3) \cdot A_{s,cal} = (4/3) \times 1,428 = 1,904 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,req} = \min((4/3) \cdot A_{s,cal}, A_{s,min}) = \min(1,904, 945) = 945 \text{ mm}^2$$

$$A_s = 1,433 \text{ mm}^2 \geq A_{s,req} = 945 \text{ mm}^2 \quad (\text{또한 } \geq A_{s,cal} = 1,428) \rightarrow \text{만족}$$

[5단계] 설계휨강도 확인

$$a = (A_s \cdot f_y) / (0.85 \cdot f_{ck} \cdot b) = (1,433 \times 400) / (0.85 \times 27 \times 500) = 50.0 \text{ mm}$$

$$c = a / \beta_1 = 62.5 \text{ mm} , \quad \varepsilon_t = 0.0033 \times (540 - 62.5) / 62.5 = 0.0252 \geq 0.005 \rightarrow \text{인장지배}$$

($\varphi=0.85$) 가정 확인

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) = 1,433 \times 400 \times (540 - 25.0) = 295.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\varphi M_n = 0.85 \times 295.2 = 250.9 \text{ kN}\cdot\text{m} \geq M_u = 250 \text{ kN}\cdot\text{m} \rightarrow \text{O.K.} \quad (SF = 1.00)$$

결론: 배근간격 100mm로부터 5-D19($A_s = 1,433 \text{ mm}^2$)를 결정하였고, 최소철근량과 설계휨강도를 모두 만족한다(여유가 작으므로 더 큰 여유가 필요하면 직경을 한 단계 키운다). 처짐·균열은 사용하중·경간이 주어지면 2.2·2.3 절차로 검토한다.

제3장 한계상태설계법에 의한 휨 부재 설계 (KDS 24 14 21)

이 장에서는 교량 설계에 쓰이는 한계상태설계법(KDS 24 14 21)으로 같은 휨 부재를 설계합니다.

강도설계법과의 차이를 먼저 살펴본 뒤, 극한한계상태(휨강도)·사용한계상태(처짐·균열)·최소철근량을 정리하고 대표예제 RC-B2로 마무리합니다.

3.1 강도설계법과의 차이

두 방법 모두 ‘안전을 위해 강도에 여유를 둔다’ 는 점은 같습니다. 다른 점은 그 여유를 주는 위치입니다. 강도설계법은 계산을 마친 뒤 마지막에 강도감소계수 ϕ 를 곱하고, 한계상태설계법은 계산 전에 재료강도를 재료계수(ϕ_c, ϕ_s)로 미리 줄여 ‘설계강도’ 를 만든 뒤 곧바로 계산합니다. 또한 한계상태설계법은 극한·사용·피로·극단상황의 여러 한계상태를 종류별로 나누어 검토합니다. 이 가운데 극한·사용한계상태는 이 장에서, 피로·극단상황한계상태는 제4장에서 다룹니다.

(근거) KDS 24 14 21 (3.1) 재료의 설계값·한계상태의 구분

구분	강도설계법 (KDS 14)	한계상태설계법 (KDS 24)
안전여유 위치	마지막에 ϕ (강도감소계수)	처음에 재료계수(ϕ_c, ϕ_s)
콘크리트 강도	$0.85 \cdot f_{ck}$ 사용	$f_{cd} = 0.85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck}$
철근 강도	f_y 사용	$f_{yd} = \phi_s \cdot f_{yk}$
강도 비교	$\phi M_n \geq M_u$	$M_{Rd} \geq M_{Ed}$

3.2 극한한계상태(ULS): 휨강도

먼저 설계압축강도 f_{cd} 와 설계항복강도 f_{yd} 를 구합니다. 그다음 강도설계법과 똑같이 평형식으로 a 를 구하고 설계휨강도 M_{Rd} 를 계산합니다. 다만 $0.85 \cdot f_{ck}$ 대신 f_{cd} 를, f_y 대신 f_{yd} 를 사용하며, ϕ 를 따로 곱하지 않으므로 $M_{Rd} \geq M_{Ed}$ 인지 바로 비교합니다.

$$f_{cd} = 0.85 \cdot \phi_c \cdot f_{ck}, \quad f_{yd} = \phi_s \cdot f_{yk}$$
$$a = (A_s \cdot f_{yd}) / (f_{cd} \cdot b), \quad M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - a/2)$$

(근거) KDS 24 14 21 (4.1.1) 휨강도(극한한계상태)

3.3 사용한계상태(SLS): 처짐과 균열

사용한계상태 검토는 강도설계법(2.2.2.3)과 계산 방법이 사실상 같습니다. 다만 계수하중이 아니라 사용한계상태 하중조합(하중계수 ≈ 1.0)을 사용한다는 점이 다릅니다.

3.3.1 처짐 — 사용한계 하중조합, I_e ·장기처짐

사용한계상태 하중조합으로 구한 휨모멘트를 M_a 로 하여, 유효단면2차모멘트 I_e 로 즉시처짐을 구하고 장기처짐계수 λ_{Δ} 로 장기처짐을 더합니다(식·표는 2.2와 동일). 총처짐이 부재 용도별 허용처짐($\ell/180 \sim \ell/480$) 이내여야 합니다.

$$I_e = (M_{cr}/M_a)^3 \cdot I_g + [1 - (M_{cr}/M_a)^3] \cdot I_{cr}, \quad \lambda_{\Delta} = \xi / (1 + 50 \cdot \rho')$$

[근거] KDS 24 14 21 (4.2) · KDS 24 12 11 사용한계 하중조합

3.3.2 균열 — 허용균열폭

사용한계상태 하중조합에 의한 설계균열폭 w_d 가 노출환경별 허용균열폭 w_a (일반철근 0.3~0.4mm 수준) 이내인지 검토합니다. 허용값과 계산 개념은 2.3과 동일합니다.

$$\text{설계 균열폭 } w_d \leq \text{허용 균열폭 } w_a$$

[근거] KDS 24 14 21 (4.2) 사용성· 허용균열폭

3.4 최소철근량 (한계상태설계법)

한계상태설계법은 균열모멘트를 이용해 최소철근량을 산정합니다. 균열이 생기는 순간에도 단면이 견디도록, 균열모멘트 M_{cr} 을 설계항복강도와 팔길이로 나눈 값을 최소철근량으로 합니다.

$$A_{s,min} = M_{cr} / (f_{yd} \cdot z)$$

여기서 z 는 내부 팔길이($\approx 0.9d$)입니다. 강도설계법의 두 식(2.4) 방식과 산식은 다르지만, 균열 직후의 취성파괴를 막는다는 목적은 같습니다.

[근거] KDS 24 14 21 (4.1.1.2(7)) 최소철근량

3.5 대표예제 RC-B2 (한계상태설계법)

예제 RC-B1 과 같은 단면($b=500, h=600, d_1=60, f_{ck}=27, f_{yk}=400, \text{배근간격 } s=100\text{mm}(\text{고정}), \text{측면 피복 } c_s=40\text{mm}$)에 설계휨모멘트 $M_{Ed} = 250 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 가 작용할 때 필요한 철근을 설계하라.

[1단계] 설계재료강도

$$f_{cd} = 0.85 \times 0.65 \times 27 = 14.92 \text{ MPa}, \quad f_{yd} = 0.90 \times 400 = 360 \text{ MPa}$$

[2단계] 계산철근량 $A_{s,cal}$ 산정 (ϕ 없이 재료계수 적용)

$$R_n = M_{Ed} / (b \cdot d^2), \quad \rho_{cal} = (f_{cd} / f_{yd}) \cdot [1 - \sqrt{1 - 2 \cdot R_n / f_{cd}}]$$

$$R_n = 250 \times 10^6 / (500 \times 540^2) = 1.71 \text{ MPa}$$

$$\rho_{cal} = (14.92/360) \cdot [1 - \sqrt{(1 - 2 \times 1.71/14.92)}] = 0.00507$$

$$A_{s,cal} = \rho_{cal} \cdot b \cdot d = 0.00507 \times 500 \times 540 = 1,369 \text{ mm}^2$$

[3단계] 사용철근 결정 (배근간격 → 직경)

$$n = [(500 - 80)/100] + 1 = [4.2] + 1 = 5 \text{ 개}, \quad 1 \text{ 본 소요단면적} = 1,369/5 = 274 \text{ mm}^2 \\ \rightarrow D19 (286.5 \text{ mm}^2)$$

$$\text{사용철근량 } A_s = 5 \times 286.5 = 1,433 \text{ mm}^2 \quad (5-D19)$$

[4단계] 최소철근량 검토 (3.4)

$$f_r = 0.63\sqrt{27} = 3.27 \text{ MPa}, \quad I_g = b \cdot h^3/12 = 9.00 \times 10^9 \text{ mm}^4, \quad y_t = h/2 = 300 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = f_r \cdot I_g / y_t = 98.1 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad z \approx 0.9d = 486 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = M_{cr} / (f_{yd} \cdot z) = 98.1 \times 10^6 / (360 \times 486) = 561 \text{ mm}^2 \rightarrow A_s = 1,433 \geq 561 \text{ 만족}$$

[5단계] 설계휨강도 확인

$$a = (A_s \cdot f_{yd}) / (f_{cd} \cdot b) = (1,433 \times 360) / (14.92 \times 500) = 69.2 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - a/2) = 1,433 \times 360 \times (540 - 34.6) = 260.7 \text{ kN} \cdot \text{m} \geq M_{Ed} = 250 \rightarrow O.K. \\ (SF = 1.04)$$

결론: 강도설계법(RC-B1, $\phi M_n = 250.9$)과 한계상태설계법(RC-B2, $M_{Rd} = 260.7$)은 같은 5-D19 단면에서 거의 같은 안전율을 보인다. 처짐·균열(SLS)은 사용한계 하중조합으로 3.3 절차에 따라 검토한다.

제4장 종합 비교 및 그 밖의 한계상태

4.1 강도설계법과 한계상태설계법 종합 비교

아래는 같은 단면을 두 방법으로 푼 예제 RC-B1·RC-B2의 강도 검토 결과입니다. 안전여유를 주는 위치만 다를 뿐 결과는 거의 같습니다.

항목	강도설계법(RC-B1)	한계상태설계법(RC-B2)
설계휨강도	$\phi M_n = 250.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{Rd} = 260.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$
소요휨모멘트	$M_u = 250 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M_{Ed} = 250 \text{ kN}\cdot\text{m}$
안전율 SF	1.00	1.04
판정	O.K.	O.K.

4.2 피로한계상태(FLS)

교량 위 차량처럼 하중이 수없이 반복되면 정적강도보다 낮은 힘에서도 손상이 쌓여 파괴됩니다(피로). 보·슬래브는 힘·전단에 대해 피로를 검토하며, 반복하중에 의한 철근 응력범위(최대 - 최소)가 피로 허용 응력범위 이내이면 됩니다. 반복 횟수가 적은 일반 건축물에서는 보통 생략하나 교량은 반드시 검토합니다.

$$\text{철근 응력범위 } \Delta f_s \leq \text{피로 허용 응력범위}$$

[근거] KDS 14 20 26 (4.1) 피로에 대한 검토

4.3 극단상황한계상태: 지진

극단상황한계상태는 지진·충돌·세굴 등 드물지만 위험한 사건에 대한 검토로, 연쇄붕괴 방지를 목표로 합니다.

특히 지진은 반복·역전 하중이므로 강도뿐 아니라 연성이 중요합니다. 소성힌지 구간에 후프철근(폐쇄형 횡철근)을 조밀하게 배치해 심부 콘크리트를 횡구속하면 큰 변형에도 견딥니다.

[그림] 극단상황한계상태(지진): 횡구속과 소성힌지

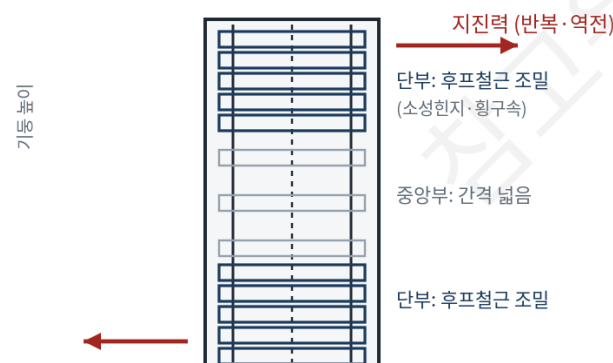


그림 4-1. 지진에 대비한 기둥의 횡구속: 단부(소성힌지)에 후프철근 조밀 배치

(근거) KDS 14 20 80 (4) 콘크리트 내진설계·KDS 17 10 00 내진설계 일반

부록 · 주요 기호

기호	의미
b, h, d	단면 폭, 전체 높이, 유효깊이($= h - d_1$)
$A_s, A_{s,cal}$	사용(배치)철근량, 계산철근량(힘모멘트로부터)
$A_{s,min}, A_{s,req}$	최소철근량 $= \max(A_{s,min1}, A_{s,min2})$, 최소철근 소요량 $= \min((4/3) \cdot A_{s,cal}, A_{s,min})$
$f_{ck}, f_y(f_{yk})$	콘크리트 기준압축강도, 철근 기준항복강도
a, c	등가응력블록 깊이, 중립축 깊이
$\epsilon_{cu}, \epsilon_t$	콘크리트 극한변형률(0.0033), 최외단 인장철근 변형률
β_1	등가응력블록 깊이계수(보통강도 0.80)
ϕ	강도감소계수(강도설계법)
ϕ_c, ϕ_s	콘크리트·철근 재료계수(한계상태설계법)
f_{cd}, f_{yd}	설계압축강도, 설계항복강도(한계상태설계법)
$M_n, \phi M_n$	공칭휨강도, 설계휨강도(강도설계법)
M_{Rd}, M_{Ed}	설계휨강도, 설계휨모멘트(한계상태설계법)
I_e, I_g, I_{cr}	유효·전체·균열 단면2차모멘트
M_{cr}, w_d, w_a	균열모멘트, 설계·허용 균열폭
M_a, f_r, y_t	사용하중 최대 휨모멘트, 콘크리트 파괴계수, 도심~인장연단 거리
z, λ	내부 팔길이($\approx 0.9d$), 경량콘크리트계수
$\lambda_{\Delta}, \xi, \rho'$	장기처짐계수, 시간경과계수, 압축철근비

※ 주요 근거기준: KDS 14 20 20(휨·압축), 14 20 26(피로), 14 20 30(사용성), 14 20 80(내진), KDS 24 14 21(콘크리트교 한계상태설계). 본 교재의 강도 계산은 산수허브 계산도구의 Calcpad 예제(RC-B1, RC-B2)와 동일한 식을 사용합니다.



산수허브
SANSU HUB

산수허브 콘크리트구조설계 실무 · 제1편

철근콘크리트 보의 휨설계

발행일 2026년 6월 | 저자·발행 산수허브(SansuHub)

분야 토목구조물의 설계 · 건설기술 개발

© 2026 SansuHub. All rights reserved.

이 책의 저작권은 산수허브에 있습니다. 저작권법에 따라 보호받는 저작물이므로, 발행자의 사전 서면 동의 없이 이 책의 전부 또는 일부를 무단으로 복제·전재·배포·전송할 수 없습니다.

본 교재는 KDS 설계기준에 근거하여 작성되었으나, 실제 설계 적용 시에는 최신 개정 기준과 현장 조건을 반드시 확인하여야 합니다.