



산수허브

SANSU HUB

산수허브 콘크리트구조설계 실무

제 5 편

내구성 설계

강도설계법(KDS 14 20 40·50) · 한계상태설계법(KDS 24 14 21)

예제 DC-1 · DC-2 (해양 교각) · DC-3 (교량 바닥판)

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 40	콘크리트구조 내구성 설계기준
KDS 14 20 50	콘크리트구조 철근상세 설계기준
KDS 14 20 01	콘크리트구조 설계(강도설계법) 일반사항
KDS 24 14 21	콘크리트교 설계기준(한계상태설계법)
KCS 14 20 10	일반콘크리트(배합 요구조건)
KCS 14 20 44	해양콘크리트

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

머리말

이 책은 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계를 처음 배우는 사람도 차근차근 따라올 수 있도록 만든 설계실무 교재입니다. 구조물은 완공 뒤 수십 년에서 수백 년 동안 빗물·염분·이산화탄소·동결융해·황산염의 공격을 받으므로, 강도뿐 아니라 ‘오래 견디는 능력’을 함께 설계해야 합니다.

제1장에서 내구성과 철근 부식의 원리를 익힌 뒤, 제2장에서는 강도설계법(KDS 14 20 40·14 20 50)으로 노출등급·최소강도·피복·배합을 ‘처방적’으로 결정합니다. 제3장에서는 한계상태설계법(KDS 24 14 21)으로 공칭피복과 내구수명을 ‘성능적’으로 검증하고, 제4장에서 두 방법을 비교하며 열화 메커니즘을 보충으로 다룹니다.

설계기준의 구체적인 조항을 사용할 때에는 해당 문단 아래 오른쪽에 [근거]로 기준·조항 번호를 표기하였습니다. 예제는 단계별로 노출등급부터 피복·배합까지 결정 과정을 따라가도록 구성하였습니다.

목차

제1장 내구성의 기초 개념

1.1 내구성이란

내구성(Durability)은 구조물이 설계 공용기간 동안 빗물·염분·이산화탄소·동결융해·황산염 등 외부 환경의 공격을 받으면서도 안전성·사용성·미관을 잃지 않고 버티는 능력입니다. 아무리 강도가 충분해도 철근이 녹고 콘크리트가 갈라지면 구조물은 제 기능을 잃으므로, 내구성은 강도와 더불어 설계의 핵심 축입니다.

1.2 철근 부식 — 내구성이 무너지는 대표 경로

콘크리트 내부는 강알칼리성(pH 12~13)이어서 철근 표면에 얇은 산화피막(부동태피막)이 생겨 부식을 막습니다. 그런데 공기 중 이산화탄소가 침투하는 탄산화나 바닷물·제빙화학제의 염화물이 침투하면 알칼리도가 낮아지거나 피막이 깨져 철근이 녹기 시작합니다. 철근이 녹으면 부피가 약 2.5배로 팽창해 주변 콘크리트를 밀어내고, 결국 균열·박리로 이어집니다.

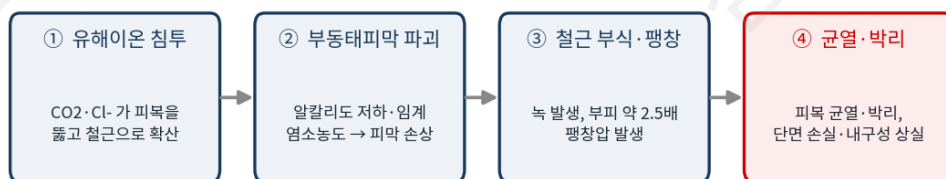


그림 1-1. 철근 부식이 구조물을 망가뜨리는 과정

1.3 피복두께의 역할

피복두께(c)는 철근 표면에서 콘크리트 최외면까지의 최단 거리입니다. 피복은 유해 이온(CO2·Cl-)을 철근으로부터 물리적으로 차단하는 가장 기본적이고 강력한 수단으로, 두꺼울수록 이온이 철근에 도달하는 데 더 오랜 시간이 걸려 내구수명이 길어집니다. 다만 지나치게 두꺼우면 균열폭이 커질 수 있어 적정 두께를 둡니다.



피복이 두꺼울수록 유해이온이 철근에 도달하는 시간이 길어진다

그림 1-2. 피복두께의 정의와 유해이온 침투

제2장 강도설계법에 의한 내구성 설계 (KDS 14 20 40 · 14 20 50)

강도설계법은 구조물이 놓이는 환경을 ‘노출등급’ 으로 분류하고, 그 등급에 맞는 최소 강도·피복·배합을 표에서 찾아 적용하는 처방적(prescriptive) 방식입니다. 노출등급 결정 → 최소 설계기준강도 → 최소 피복두께 → 배합 요구의 순서로 진행하고, 대표예제 DC-1로 마무리합니다.

2.1 노출 범주와 등급

책임구조기술자는 부재가 예측되는 노출 정도를 고려하여 KDS 14 20 40 표 4.1-1에 따라 노출등급을 정합니다. 노출 요인의 종류에 따라 다음과 같이 분류합니다.

범주	대상 열화	노출등급 (가혹도 ↑)
EC	탄산화	EC1 · EC2 · EC3 · EC4
ES	해양(염화물)	ES1(대기) · ES2(수중) · ES3(간만대) · ES4(비말대)
ED	제설(염화물)	ED1 · ED2 · ED3
EF	동결융해	EF1 · EF2 · EF3 · EF4
EA	황산염·화학적 침식	EA1 · EA2 · EA3
E0	해당 없음(일반)	부식·침식 위험이 없는 환경

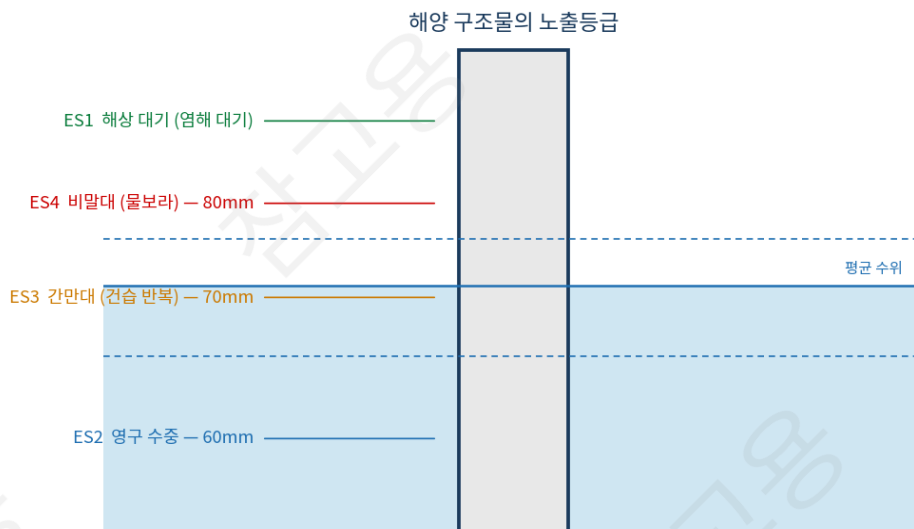


그림 2-1. 해양 구조물의 노출등급(ES1 대기 · ES2 수중 · ES3 간만대 · ES4 비말대)

[근거] KDS 14 20 40 (4.1.3) 표4.1-1 노출 범주 및 등급

2.2 내구성 요구조건

노출등급이 정해지면 ① 최소 설계기준압축강도 f_{ck} , ② 최소 피복두께, ③ 배합(물-결합재비 W/B, 연행공기량, 염화물 함유량)을 확보해야 합니다. 환경이 가혹할수록 더 강하고 치밀한 콘크리트가 필요합니다 — 강도가 높을수록 조직이 치밀해져 유해 이온의 침투 속도가 느려지기 때문입니다.

대표 노출등급	최소 f_{ck}	비고
E0 · EC1	21 MPa	일반·약한 탄산화
EC2 ~ EC4	24 ~ 27 MPa	탄산화 진행
ES1 · ES2 (해양 대기·수중)	30 MPa	염화물 노출
ES3 · ES4 (간만대·비말대)	35 MPa	가장 가혹한 염해

정확한 등급별 값은 KDS 14 20 40 표 4.1-3을 따르며, 동결융해(EF)·황산염(EA) 등급도 동일한 원리로 강도가 상향됩니다. 배합의 최대 W/B·최소 연행공기량·최대 염화물량은 KCS 14 20 10의 노출등급별 요구를 만족해야 합니다.

(근거) KDS 14 20 40 (4.1.4) 표 4.1-3 최소 설계기준압축강도 / KCS 14 20 10 배합

2.3 최소 피복두께

최소 피복두께는 부재 종류와 노출 조건에 따라 KDS 14 20 50에서 규정합니다. 프리스트레스하지 않는 현장치기콘크리트의 일반 최소 피복은 다음과 같습니다.

조건	최소 피복
수중에서 치는 콘크리트	100 mm
흙에 접하여 친 후 영구히 흙에 묻힘	75 mm
흙·옥외 공기에 직접 노출 (D19 이상)	50 mm
흙·옥외 공기에 직접 노출 (D16 이하)	40 mm
옥외·흙 비접촉 — 슬래브·벽체·장선 (D35 이하)	20 mm
옥외·흙 비접촉 — 보·기둥	40 mm

$f_{ck} \geq 40$ MPa 인 보·기둥은 위 값에서 10 mm 저감할 수 있습니다. 또한 해수·물보라·제빙화학제 등 염화물에 노출되는 ES 환경에서는 다음의 추가 피복을 확보해야 합니다(특수환경).

ES 환경 (현장치기)	최소 피복
--------------	-------

벽체 · 슬래브	50 mm
그 밖의 모든 부재 — ES1 · ES2	60 mm
그 밖의 모든 부재 — ES3	70 mm
그 밖의 모든 부재 — ES4 (비말대)	80 mm

[근거] KDS 14 20 50 (4.3.1 일반· 4.3.6 특수환경 ES)

2.4 대표예제 DC-1 (해양 비말대 교각, 강도설계법)

해수 물보라가 직접 닿는 비말대에 놓인 철근콘크리트 교각(보·기둥류)에 대해, 내구성을 확보하기 위한 최소 설계기준강도·피복 배합 요구를 결정하라.

[1단계] 노출등급 결정

해수 물보라가 직접 닿는 비말대 → 노출범주 ES, 노출등급 ES4 (가장 가혹)

탄산화(EC)·동결융해(EF)도 동시에 작용할 수 있으나, 피복 강도 요구가 가장 큰 ES4 가 지배한다.

[2단계] 최소 설계기준압축강도

ES3 · ES4 → $f_{ck} \geq 35 \text{ MPa}$ (표 4.1-3)

[3단계] 최소 피복두께

보·기둥류 + ES4 → 특수환경 추가피복 80 mm (4.3.6)

일반 옥외노출 피복 50 mm 보다 크므로 → 피복 80 mm 가 지배

[4단계] 배합 요구조건

KCS 14 20 10에 따라 최대 물-결합재비(예: $W/B \leq 0.40$), 최소 연행공기량, 최대 염화물량을 만족

결론: 해양 비말대(ES4) 교각은 $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$, 피복두께 80 mm, $W/B \leq 0.40$ 등으로 설계한다.

가혹한 환경일수록 강도·피복·배합을 모두 강화하여 유해 이온의 침투를 늦춘다.

제3장 한계상태설계법에 의한 내구성 설계 (KDS 24 14 21)

교량 설계의 한계상태설계법은 처방적 규정에 더하여, 설계 공용기간 동안 내구성이 실제로 유지되는지를 계산으로 증명하는 성능적(performance-based) 검증을 요구합니다. 강도설계법과의 차이를 살펴본 뒤 대표예제 DC-2로 마무리합니다.

3.1 강도설계법과의 차이 — 처방적 vs 성능적

① 접근 방식: 강도설계법은 표에서 등급을 찾아 대입하는 처방적 방식이고, 한계상태설계법은 ‘설계수명 동안 내구성이 유지되는가’를 계산으로 증명하는 성능적 방식을 추가합니다. ② 안전 여유: 강도설계법은 경험적 단일 안전율을, 한계상태설계법은 하중·재료 불확실성을 구분하는 부분안전계수를 사용합니다. ③ 설계수명: 한계상태설계법은 발주자가 목표 내구수명(예: 100년)을 명시하고 설계자가 그 달성 여부를 검증합니다.

3.2 공칭 피복두께와 내구성 한계상태

한계상태설계법은 시공 오차를 명시적으로 반영한 공칭 피복두께를 사용합니다. 최소 피복 c_{min} (부착·환경 요구 중 큰 값)에 시공 허용오차 Δc_{dev} 를 더해 공칭 피복 c_{nom} 을 정합니다.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

내구성 한계상태는 ‘열화 전선이 철근에 도달하는 시점’을 설계수명과 비교하여 정의합니다. 탄산화는 침투깊이 $k \cdot \sqrt{t}$ 가 피복에 도달하는 시점이, 염해는 Fick 확산으로 철근 위치의 염소이온 농도가 임계값에 도달하는 시점이 설계수명 이상이어야 합니다.

[근거] KDS 24 14 21 / KDS 14 20 01 (9.1, 9.2) 내구성 한계상태 설계수명

3.3 대표예제 DC-2 (해양 비말대 교각, 한계상태설계법)

예제 DC-1과 같은 해양 비말대 교각을 설계수명 100년의 한계상태설계법으로 검토하라.

[1단계] 노출(환경)등급

해양 비말대 → ES4 (강도설계법과 동일)

[2단계] 공칭 피복두께

환경 최소피복 $c_{min} = 80 \text{ mm}$ (ES4), 시공 허용오차 $\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 80 + 10 = 90 \text{ mm}$$

[3단계] 내구성 성능 검증 (염해, 개념)

표면 염소이온 농도 C_s 와 확산계수 D 로 Fick 확산 해석 → 철근 위치(피복 90 mm)의 염소이온 농도가 임계농도(약 $0.4 \sim 0.6 \text{ kg/m}^3$)에 도달하는 시간 ≥ 100 년 확인

결론: 공칭 피복 90 mm. 처방적 80 mm에 시공 여유 10 mm를 더하고, 성능적으로 내구수명(≥ 100 년)이 달성되는지 계산으로 확인한다는 점이 강도설계법과 다르다.

3.4 대표예제 DC-3 (교량 바닥판 — 아스콘 포장 + 교면방수)

제설제를 사용하는 도로 교량의 철근콘크리트 바닥판에서, 상부에 아스콘 포장($\approx 80 \text{ mm}$)과 교면방수를 둔 경우와 두지 않은 경우(노출 콘크리트 바닥판)로 나누어 상부 철근의 피복두께를 비교하라. 설계수명 100 년, 한계상태설계법(KDS 24 14 21).

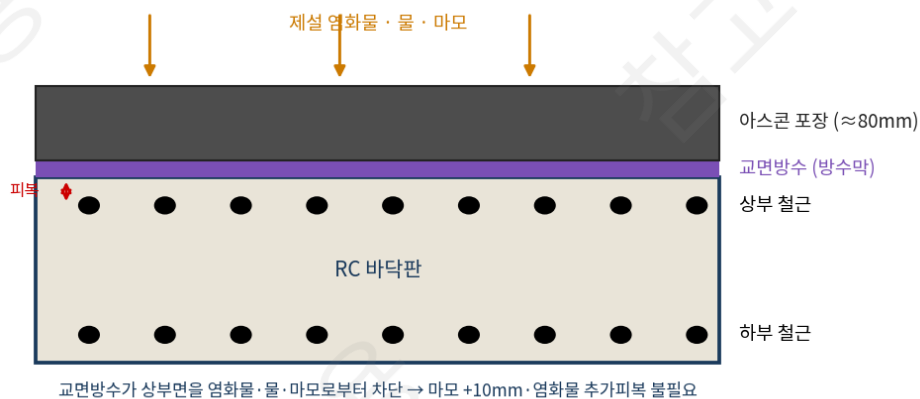


그림 3-2. 교량 바닥판 단면 — 아스콘 포장·교면방수·상하부 철근과 피복

[1단계] 바닥판 상·하면의 노출 조건

상부면: 아스콘 포장 + 교면방수 → 제설 염화물·물·마모가 콘크리트에 직접 닿지 않음(보호). 무방수면

제설 염화물 직접 노출 → ED 등급.

하부면: 교량 하부 옥외 대기 노출 → 탄산화 EC 등급(해상 교량이면 ES 등급).

[2단계] 무방수 노출 바닥판의 상부 피복 (비교용)

제설 염화물 직접 노출 → ED2 가정. 내구성 최소피복 $c_{min,dur}(ED2, \text{표 4.4-4 대표}) \approx 40 \text{ mm}$

염화물 고부식성 추가 $\Delta c_{dur,\gamma}(ED2) = 10 \text{ mm}$ [4.4.4.2(5)] + 노출 바닥판 마모 대비 +10 mm [4.4.4.2(12)]

$c_{min} = 40 + 10 + 10 = 60 \text{ mm}$, $c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 60 + 10 = 70 \text{ mm}$

[3단계] 아스콘 포장 + 교면방수 바닥판의 상부 피복

교면방수가 제설 염화물·물·마모를 차단 → 상부면을 보호된 환경(탄산화EC4 수준)으로 본다.

$$c_{min,dur}(EC4, \text{표} 4.4-4 \text{ 대표}) \approx 30 \text{ mm}$$

제설 염화물 직접 노출이 아니므로 $\Delta c_{dur,\gamma}$ 불필요, 마모 대비 +10 mm 불필요[4.4.4.2(12)는 '방수처리하지 않은' 바닥판에만 적용]

$$c_{min} = 30 \text{ mm}, \quad c_{nom} = 30 + \Delta c_{dev} = 30 + 10 = 40 \text{ mm}$$

[4단계] 비교 및 결론

구분	무방수 노출 바닥판	아스콘 + 교면방수
상부 노출등급	ED2 (제설 염화물 직접)	EC4 수준 (방수로 보호)
염화물 추가 $\Delta c_{dur,\gamma}$	10 mm	불필요
마모 대비 (4.4.4.2(12))	+10 mm	불필요
상부 공칭피복 c_{nom}	70 mm	40 mm

결론: 아스콘 포장과 교면방수는 바닥판 상부를 제설 염화물·물·마모로부터 차단하여, 마모 대비 피복 증가 (+10 mm)와 염화물 추가피복($\Delta c_{dur,\gamma}$)을 생략할 수 있어 상부 피복이 70 mm → 40 mm 로 약 30 mm 줄어든다. 다만 방수가 손상되면 보호 효과가 사라져 급격히 열화하므로, 방수 품질 확보와 주기적 점검·재포장이 내구성 유지의 전제다. 바닥판 하부 철근은 옥외 대기(EC)·해상(ES) 노출등급으로 별도 산정한다.

(근거) KDS 24 14 21 (4.4.4.1 공칭피복·4.4.4.2(5),(12)) 바닥판·방수 피복

제4장 종합 비교 및 보충

4.1 강도설계법과 한계상태설계법의 내구성 설계 비교

아래는 두 방법의 내구성 설계 방식 차이입니다. 결과(피복·강도)는 비슷하게 수렴하지만, 안전을 확보하는 철학이 다릅니다.

항목	강도설계법(처방적)	한계상태설계법(성능적)
접근 방식	표에서 등급→최소값 대입	내구수명을 계산으로 검증
안전 여유	경험적 단일 안전율	부분안전계수
설계수명	기준에 내재(명시 안 함)	발주자가 명시(예: 100년)
피복	최소 피복(표)	공칭피복 = 최소 + 시공오차
적용	건축 구조물 등 일반	교량 등 장수명 토목구조물

4.2 내구성 저하 메커니즘

① 탄산화: 공기 중 CO₂가 시멘트 수화물과 반응해 pH를 낮춰 부동태피막을 무력화한다(깊이 $\approx k \cdot \sqrt{t}$). ② 염화물: 해수·제빙화학제의 Cl⁻가 확산(Fick)해 임계농도 이상 쌓이면 피막이 깨진다. ③ 동결융해(EF): 공극 속 수분이 얼며 팽창해 콘크리트를 파괴하므로 연행공기로 완화한다. ④ 황산염(EA): 황산염이 시멘트와 반응해 에트린자이트를 만들며 팽창시킨다. ⑤ 알칼리골재반응(ASR): 골재와 시멘트 알칼리가 반응해 팽창 균열을 일으킨다.

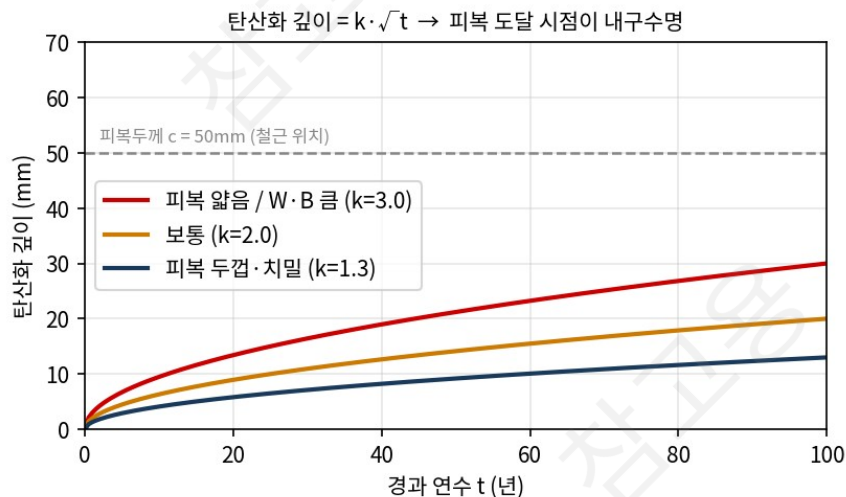


그림 4-1. 탄산화 깊이 = $k \cdot \sqrt{t}$ — 피복 도달 시점이 내구수명

(근거) KDS 14 20 40 부록(내구성 평가) / KCS 14 20 44 해양콘크리트

4.3 내구성 설계 절차 요약

노출등급 결정 → 최소 강도·피복·배합 처방(강도설계법) → (한계상태) 공칭피복 산정·성능 검증 → 시공 품질관리(피복 확보·양생)의 순서로 진행합니다. 설계만으로 끝나지 않고 시공에서 피복과 다짐·양생이 지켜져야 내구성이 실제로 확보됩니다.

부록 · 주요 기호 및 용어

기호 · 용어	의미
EC · ES · ED · EF · EA · E0	노출 범주 — 탄산화·해양염화물·제설염화물·동결융해·황산염·일반
f_{ck}	콘크리트 설계기준압축강도(노출등급별 최소값)
C, C_{min} , C_{nom}	피복두께, 최소 피복두께, 공칭 피복두께
ΔC_{dev}	시공 허용오차(공칭피복 산정 시 가산)
W/B	물·결합재비 (낮을수록 치밀·내구성 ↑)
k	탄산화 속도계수 (탄산화 깊이 = $k \cdot \sqrt{t}$)
C_s , C_{cr} , D	표면 염소이온 농도, 임계 염소이온 농도, 확산계수
부동태피막	강알칼리 환경에서 철근 표면에 생기는 부식 방지 산화막
처방적 / 성능적	표 대입 방식 / 내구수명 계산 검증 방식

※ 주요 근거기준: KDS 14 20 40(내구성), KDS 14 20 50(철근상세·피복), KDS 14 20 01(설계 일반·내구성 한계상태), KDS 24 14 21(콘크리트교 한계상태설계), KCS 14 20 10(일반콘크리트 배합), KCS 14 20 44(해양콘크리트).



산수허브 콘크리트구조설계 실무 · 제5편

내구성 설계

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.