

鉄筋コンクリート構造の基本と部材の設計

永坂具也・柳沢学 編著

彰国社

本書の使い方

本書は4章から構成されています。第1章は鉄筋コンクリート構造の概要を紹介したものであり、鉄筋とコンクリートとが相互にどのようなしくみで協力することが期待される構造なのか、基本的に大切なことは何か、梁、柱、床などの部材の鉄筋が、実際の建築物では、通常どのように配筋されるもののかなどが示されています。第2章では、曲げモーメント、せん断力、軸方向力などの部材に生じる力と抵抗のしくみが解説され、断面あるいは部材としての耐力を見積もる推算式が紹介されています。第3章では、まず、許容応力度設計法の概念および現行法規の下での許容応力度計算の位置づけを概説し、その後の3章の大半は、建築物が受けると考えられる力にはどのようなものがあり、それらをどのように見積もることができるかについて解説しています。第4章が本書の主題であり、最も一般的なラーメン構造からなる鉄筋コンクリート構造建築物の構成部材である梁、柱、床スラブ、耐震壁、基礎の各々について、設計応力に対してどのような考え方で所要の鉄筋の量と配置を決定することができるかが示され、例題を通じて体得されるものとしています。

大学学部での鉄筋コンクリート構造の必要最小限の履修範囲としては第1章の学習後すぐに第4章に入ることで十分ではないかと思います。第2章は、第4章の学習において提示された考え方や設計式の背景をもっとよく知りたい、あるいは、部材の終局的な抵抗までを学びたいと考える際に、必要に応じて参照していただければと思います。他方、第3章は荷重・外力についての記述が大半となっていますが、その重要性の割に、建築系大学学部の構造分野のカリキュラムにおいては荷重・外力だけで1科目を組み込むことが時間的に難しく、鉄筋コンクリート構造や鉄骨構造等の各種構造の授業の中で概説されることが多いと思われたことから本書にも含めたものであり、荷重・外力の概要だけでなく、建築物の構造計算実務においても通用するような主要な荷重・外力のモデル化、および、その算定方法までを記述しています。当面の目標にかかわらず、ぜひ、活用していただきたいと思います。巻末には付録として、梁、柱断面の主筋を手計算で算定するための計算図表、および、計算問題を扱う第3章2節、第4章に関連する演習問題を用意しました。付録の最後には、各演習問題について、本文中の例題と同程度の丁寧な解答・解説を示しています。以上の付録は、本書のみで部材の設計演習が完結できるようにしたものです。

〔執筆分担〕

- 1章 永坂 具也
- 2章 2.1～2.3, 2.5 永坂 具也
- 2.4 柳 沢 学
- 3章 永坂 具也
- 4章 4.1～4.5 永坂 具也
- 4.6～4.8 柳 沢 学

デザイン＝水野哲也 (Watermark)

はじめに

本書は、鉄筋コンクリート構造を初めて学ぶ、あるいは、もう一度基礎的なことから再学習したいと思う読者を対象とし、鉄筋コンクリート構造の基本を知り、部材の抵抗のしくみを理解した上で、設計応力の与えられた部材の設計ができるようになることを目標としています。

昨今の大学教育では、学生が何を学び、何を身につけることができたかをはっきりさせようとするあまり、教師には、学習目標に到達するためのすべてを授業時間内に直接的に伝えることが求められているように感じられます。ともすると、学生にとっては専門学校での学習のようになり、履修学生の学習意欲を鼓舞するようなエピソードや事例を紹介したり、教師の体験を話したりする時間が奪われているよう感じておりました。本書は、教師が授業を通じて学生のモチベーションを上げるような話に少しでも多くの時間を割けるように、教師からは要点を伝えられただけで、学生が本書のみの自習によって意欲的に学習目標に到達できるような教科書にしたいと念じ、平易でわかりやすく、省略をしない記述に努めました。とはいえ、著者らの浅学非才のゆえの間違い、勘違いがまったくないとも申せません。お気づきの場合には忌憚のないご教示をいただきたいと思います。

なお、本書の主題とする部材の設計については、基本的に、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説2010／日本建築学会」に準拠しています。ただし、せん断設計については1999年版までの同規準・解説を踏襲するものとし、損傷制御のための短期の設計は本書では扱わないものとししました。

終わりに、付録に示した梁、柱の断面計算図表は、昭和女子大学助教の横須賀洋平氏によるものであり、ご協力に深甚の謝意を表します。

編集、出版に当たっては、彰国社編集本部の皆様、特に直接担当いただいた鷹村暢子氏には再三の無理を聞き入れていただき、おかげさまで、お願いしてから短期間での出版が実現しました。ここに、衷心より御礼申し上げます。

2012年9月 著者

1章

鉄筋コンクリート構造の概説 7

- 1.1 鉄筋コンクリート構造とは 8
- 1.2 鉄筋によるコンクリートの補強とは 8
 - (1)鉄筋によるコンクリート部材の補強／(2)鉄筋とコンクリートの協働作用
- 1.3 鉄筋に対するコンクリートの所要のかぶり厚さ 12
 - (1)必要かぶり厚さに対する施工誤差を除く影響因子／(2)施工誤差等

2章

部材の受ける力と抵抗 15

- 2.1 鉄筋とコンクリートの力学特性 16
 - 2.1.1 鉄筋 16
 - 2.1.2 コンクリート 18
- 2.2 曲げモーメントに対する抵抗 19
 - 2.2.1 曲げモーメントと曲げ変形 19
 - (1)鉄筋コンクリート断面の曲げ変形／(2)曲げ抵抗を力学的に検討するための前提条件／(3)断面に特定の変形を与える曲げモーメントを求める計算手順
 - 2.2.2 梁断面の曲げ変形性状と断面の応力状態 21
 - 2.2.3 梁の曲げ耐力の算定式 24
 - (1)曲げひび割れモーメント／(2)曲げ終局強度
- 2.3 曲げモーメントと軸方向力に対する抵抗 25
 - 2.3.1 柱断面の曲げ変形性状と断面の応力状態 25
 - 2.3.2 柱の曲げ耐力の評価式 27
 - (1)曲げひび割れモーメント／(2)曲げ終局強度
- 2.4 せん断力に対する抵抗 29
 - 2.4.1 概説 29

- 2.4.2 抵抗のしくみ 30
 - (1)せん断力によって発生するひび割れおよびせん断破壊／(2)せん断応力／(3)部材のせん断抵抗と抵抗機構／(4)コンクリートのせん断応力度と負担力／(5)せん断補強筋の負担力
 - 2.4.3 部材のせん断ひび割れとせん断耐力 37
 - (1)せん断ひび割れ耐力とせん断ひび割れ耐力式／(2)部材のせん断耐力とせん断耐力式
 - 2.4.4 柱と梁の接合部のせん断抵抗 42
 - (1)柱梁接合部の作用せん断力／(2)柱梁接合部のせん断耐力
 - 2.4.5 耐震壁のせん断抵抗…45
 - (1)耐震壁の変形・破壊性状／(2)耐震壁の水平剛性／(3)耐震壁単体の抵抗／(4)耐震壁単体のせん断耐力
- 2.5 鉄筋とコンクリートとの相対的なずれに対する抵抗 51
- 2.5.1 ずれ抵抗と付着力 51
 - 2.5.2 異形鉄筋のずれ抵抗のしくみ 53
 - 2.5.3 抵抗要因と付着割裂強度 54

3章

設計法と荷重・外力 59

- 3.1 構造安全性の確認と許容応力度設計法 60
 - (1)許容応力度計算／(2)時刻歴応答解析(動的振動解析)／(3)限界耐力計算／(4)保有水平耐力計算／(5)許容応力度等計算
- 3.2 建築物の受ける荷重・外力* 62
 - 3.2.1 種類と概説 62
 - (1)固定荷重／(2)積載荷重／(3)積雪荷重／(4)風圧力／(5)地震力／(6)その他の力
 - 3.2.2 分類 65

- 3.2.3 部材に作用する荷重とその伝達 65
 - (1)鉛直荷重／(2)水平荷重
- 3.2.4 荷重・外力の算定法 67
 - (1)固定荷重／(2)積載荷重／(3)積雪荷重／(4)風圧力／(5)地震力
- 3.2.5 荷重・外力の組合せ 75
- 3章例題 3.1 76／3.2 77／3.3 78

4章

許容応力度設計法に基づく部材の設計 79

- 4.1 材料の選定と許容応力度 80
 - 4.1.1 コンクリートと鉄筋の選定 80
 - (1)コンクリート／(2)鉄筋
 - 4.1.2 材料の定数 81
 - 4.1.3 許容応力度 82
 - (1)コンクリート／(2)鉄筋／(3)鉄筋のコンクリートに対する付着
 - 4.1例題 4.1-1・4.1-2・4.1-3 85
- 4.2 梁* 86
 - 4.2.1 曲げモーメントに対する設計 86
 - (1)基本仮定／(2)ヤング係数比／(3)長方形断面の梁の許容曲げモーメント／(4)T形断面の梁の許容曲げモーメント／(5)引張鉄筋比と許容曲げモーメントの関係／(6)梁の構造規定／(7)主筋の配筋設計
 - 4.2.2 せん断力に対する設計 101
 - (1)設計用せん断力／(2)梁の許容せん断力／(3)あばら筋に関わる計算外の構造規定／(4)あばら筋の算定手順
 - 4.2例題 4.2-1 89／4.2-2 92／4.2-3 93
 - 4.2-4 99／4.2-5 106
- 4.3 柱* 109
 - 4.3.1 軸方向力と曲げモーメントに対する設計 109

- (1)許容軸方向力／(2)断面算定／(3)柱の構造規定／(4)主筋の配筋設計
- 4.3.2 せん断力に対する設計 117
 - (1)設計用せん断力／(2)柱の許容せん断力／(3)帯筋に関わる計算外の構造規定／(4)帯筋の算定手順
- 4.3例題 4.3-1 115／4.3-2 122
- 4.4 床スラブ* 124
 - 4.4.1 概説 124
 - 4.4.2 床スラブに作用する荷重と応力、変形 125
 - (1)荷重／(2)曲げモーメント／(3)せん断力／(4)変形
 - 4.4.3 スラブの設計 129
 - (1)曲げモーメントに対する設計／(2)せん断力に対する設計／(3)スラブの設計、配筋上の留意点
 - 4.4.4 地震時において床スラブに生じる面内せん断力 135
 - (1)地震時に1層ラーメン架構の床スラブに生じるせん断力／(2)地震時に一般階の床スラブに生じるせん断力
 - 4.4例題 4.4-1 132
- 4.5 鉄筋の付着・継手・定着の設計* 137
 - 4.5.1 付着 137
 - (1)付着の検定式／(2)付着について検定する断面／(3)有効付着長さ／(4)標準フック／(5)付着に関する計算外の構造規定
 - 4.5.2 重ね継手 144
 - (1)継手の概説／(2)重ね継手の重ね長さの検定／(3)重ね継手を設ける場合の計算外の留意事項
 - 4.5.3 定着 146
 - (1)定着の検定式／(2)定着について検定する断面／(3)定着長さ／(4)定着に関する計算外の構造規定
 - 4.5例題 4.5-1 141／4.5-2 146／4.5-3 149

4.6	柱と梁の接合部*	150
4.6.1	許容せん断力	150
4.6.2	短期設計用せん断力	151
4.6.3	接合部の設計	152
4.6	例題	4.6-1 152
4.7	耐震壁*	154
4.7.1	許容せん断力	154
	(1)無開口耐震壁の場合／(2)開口をもつ耐震壁の場合	
4.7.2	開口のある耐震壁の開口周囲の補強	156
	(1)開口隅角部斜張力／(2)開口隅角部縁張力／(3)開口補強筋の算定	
4.7.3	耐震壁の設計	158
	(1)耐震壁の設計に関わる構造規定／(2)設計手順	
4.7	例題	4.7-1 160／4.7-2 162
4.8	基礎*	164
4.8.1	概説	164
4.8.2	直接基礎	164
	(1)基礎の種類／(2)基礎スラブに作用する力と接地圧／(3)基礎スラブの算定／(4)パンチングシェアーの検討／(5)モーメントの処理	
4.8.3	杭基礎	170
	(1)基礎スラブの設計応力／(2)杭によるパンチングシェアー	
4.8	例題	4.8-1 171

3.2	建築物の受ける荷重・外力	178
4.2	梁	179

4.3	柱	181
4.4	床スラブ	182
4.5	鉄筋の付着・継手・定着の設計	183
4.6	柱と梁の接合部	184
4.7	耐震壁	185
4.8	基礎	186

付図1(a)	$F_c=21$ 長期
付図1(b)	$F_c=21$ 短期
付図2(a)	$F_c=24$ 長期
付図2(b)	$F_c=24$ 短期
付図3(a)	$F_c=27$ 長期
付図3(b)	$F_c=27$ 短期
付図4(a)	$F_c=30$ 長期
付図4(b)	$F_c=30$ 短期

付図5(a)	$F_c=21$ 長期(1)
付図5(b)	$F_c=21$ 長期(2)
付図5(c)	$F_c=21$ 短期(1)
付図5(d)	$F_c=21$ 短期(2)
付図6(a)	$F_c=24$ 長期(1)
付図6(b)	$F_c=24$ 長期(2)
付図6(c)	$F_c=24$ 短期
付図7(a)	$F_c=27$ 長期(1)
付図7(b)	$F_c=27$ 長期(2)
付図7(c)	$F_c=27$ 短期
付図8(a)	$F_c=30$ 長期(1)
付図8(b)	$F_c=30$ 長期(2)
付図8(c)	$F_c=30$ 短期

4. 許容応力度設計法に基づく部材の設計

本章では、一般的な鉄筋コンクリート造建築物（基本的にはラーメン構造）を構成する構造部材の設計法を、『鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』日本建築学会編（以下 RC 規準と略記）に準拠して解説します。ただし本章のせん断設計においては、構造の終局時に急激な脆性破壊が生じることを避けるための終局強度的な考え方を採用しています。

4.1 材料の選定と許容応力度

4.1.1 コンクリートと鉄筋の選定

(1) コンクリート

使用するコンクリートは、適正な品質確保を目指して規定している『建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事』日本建築学会編に従って製造されることが求められています。使用できるコンクリートには、表 4.1-1 に示すような普通コンクリートと軽量コンクリートの 2 種類があり、軽量コンクリートはさらに、粗骨材のみに軽量骨材を用いた 1 種と細骨材にも軽量骨材を用いた 2 種とに分類されます。設計時ではコンクリートの強度は不明なので、設計上の基準として用いる圧縮強度は設計基準強度と呼ばれ、 F_c と表示されます。この設計基準強度は設計者が選定するものですが、構造物が設計荷重を受け始めると考えられる材令 4 週において、JASS 5 に従って使用するコンクリートに確実に得られる強度としなければなりません。RC 規準では、 F_c の値はいずれのコンクリートを用いる場合にも 18N/mm^2 以上とされています。また、設計式の適用範囲の確認された強度の上限としては、普通コンクリートでは 60N/mm^2 、軽量コンクリートでは 1 種で 36N/mm^2 、2 種で 27N/mm^2 とされています。

(2) 鉄筋

鉄筋には、表 4.1-2 のような JIS 規格に適合した棒鋼、または鉄線の径が 6mm 以上の溶接金網を用いることができます。ただし、溶接金網はスラブの補強筋として、あるいは、軽微な補強用に用いられるのが一般です。ここで、鉄筋の種類として示された記号の最初の英字 SR、SD は、それぞれ、鉄筋が丸鋼（Round Bar）、異形棒鋼（Deformed Bar）であることを意味し、続く 3 桁の数値は、規格降伏強度（規格品として確保される降伏強度の下限値）を N/mm^2 の単位で示したものです。たとえば、SR235 は規格降伏強度が 235N/mm^2 の丸鋼、SD345 は規格降伏強度が 345N/mm^2 の異形棒鋼（異形鉄筋）を表しています。

なお、一般に用いられる異形鉄筋 1 本当たりの断面積と周長および最外径の一覧を、表 4.1-3 として示しておきます。

表 4.1-1 コンクリートの種類⁴⁻¹⁾

コンクリートの種類		使用する骨材	
		粗骨材	細骨材
普通コンクリート		砂利、碎石、高炉スラグ碎石	砂、砕砂、スラグ砂
軽量 コンクリート	1 種	人工軽量骨材	砂、砕砂、スラグ砂
	2 種	人工軽量骨材	人工軽量骨材またはこの一部を砂、 砕砂、スラグ砂で置き換えたもの

〔注〕 コンクリートの設計基準強度 F_c はコンクリートの種類によらず、 18N/mm^2 以上とする。

表 4.1-2 鉄筋の種類⁴⁻¹⁾

JIS 規格番号	名称	区分、種類の記号	
JIS G 3112	鉄筋コンクリート用 棒鋼	丸鋼	SR235
			SR295
		異形棒鋼 (異形鉄筋)	SD295A
			SD295B
			SD345
			SD390
			SD490
JIS G 3551	溶 接 金 網		

表 4.1-3 異形棒鋼(異形鉄筋)の断面積と周長および最外径⁴⁻³⁾

呼び名	D10	D13	D16	D19	D22	D25	D29	D32	D35	D38	D41
断面積 (mm ²)	71	127	199	287	387	507	642	794	957	1140	1340
周長 (mm)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
最外径 (mm)	11	14	18	21	25	28	33	36	40	43	46

4.1.2 材料の定数

RC 規準による鉄筋とコンクリートのヤング係数、ポアソン比、線膨張係数を、表 4.1-4 に示します。この場合のコンクリートのヤング係数は、短期的な載荷による応力度とひずみ度に関係づける比例定数として示したものであり、コンクリートの圧縮強度と単位体積重量 γ によって定まる実験式によっています。この単位体積重量 γ には、表 4.1-5 に示すコンクリートの値を代入すればよく、この値は実験的にも十分に適合性が認められるものです。また、同表中に示された鉄筋コンクリートの重量は、元々、構造体の重量を概算的

に求めるために示されたもので、コンクリートの単位体積重量に鉄筋分として 1kN/m³ を加算したものです。RC 部材に含まれる鉄筋の割合が多ければ、当然、その単位重量は大きくなるはずですが、極端に過密な鉄筋量で補強しない限りは許される概算値といえます。

表 4.1-4 材料の定数 ⁴⁻¹⁾			
材料	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	線膨張係数 (1/°C)
鉄筋	2.05×10 ⁵	-	1×10 ⁻⁵
コンクリート	3.35×10 ⁴ ×(γ/24) ² ×(F _c /60) ^{1/3}	0.2	1×10 ⁻⁵

〔注〕γ :コンクリートの単位体積重量 (kN/m³)， F_c:コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

表 4.1-5 コンクリートと鉄筋コンクリートの単位体積重量 ⁴⁻¹⁾				
コンクリートの種類		F _c の範囲	コンクリートの重量 (kN/m ³)	鉄筋コンクリートの重量 (kN/m ³)
普通コンクリート		F _c ≤36	23	24
		36<F _c ≤48	23.5	24.5
		48<F _c ≤60	24	25
軽量コンクリート	1 種	F _c ≤27	19	20
		27<F _c ≤36	21	22
	2 種	F _c ≤27	17	18

〔注〕 F_c :コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

4. 1. 3 許容応力度

許容応力度は許容応力度設計法の根幹となるもので、構造の長期的、短期的な安全性を確保することを目指して定められたものであり、材料に許容する応力度を意味します。実際には荷重・外力の不確定性、構造耐力に至るまでのコンクリートのひび割れ・部材の塑性化による応力の再配分、さらには部材・断面および配筋の寸法誤差等によって、求められる応力度は現実に生じる応力度に直接対応するものではないことに留意した上で、材料強度のバラツキを考慮して、許容応力度は材料強度を安全率で低減したものとされます。

長期の設計応力に対して用いる長期許容応力度は、荷重が長期間継続し、常時作用する荷重であることを考慮して、建築物の長期間にわたる使用性能を損なわないことを目標に定められています。一方、短期の設計応力に対して用いる短期許容応力度は、主として、稀に発生する地震力に備えて、構造・部材の損傷を修復可能な範囲に留めることを目指して定められています。

(1) コンクリート

RC 規準によるコンクリートの許容応力度は、表 4.1-6 のように、設計基準強度としての圧縮強度 F_c に基づいて定められています。まず、部材の設計上、コンクリートに引張耐力を期待してはならないものとして、許容引張応力度は規定されてはいません。ただし、曲げモーメントとせん断力を受けて材軸と傾きをもって生じる引張応力については、それが高じると斜めひび割れを発生して部材のせん断剛性が低下するばかりでなく、せん断補強筋が少ない場合には脆性的な破壊を生じやすいため、許容せん断応力度としては、以下のような意図から規定されています。すなわち、長期の応力に対しては部材のせん断ひび割れの発生を防ぐことを目指して、短期の応力に対してはせん断補強筋比（後述）が RC 規準による下限値を下回る 0.1 %の部材であってもせん断破壊に至らないことを目安に許容せん断応力度が定められています。また、軽量コンクリートについては、梁、柱の実験結果に基づいて普通コンクリートの場合の 0.9 倍に低減されています。

表 4.1-6 コンクリートの許容応力度 (N/mm ²) ⁴⁻¹⁾						
コンクリートの種類	長 期			短 期		
	圧縮	引張	せん断	圧縮	引張	せん断
普通コンクリート	$\frac{1}{3}F_c$	—	$\left(\frac{1}{30}F_c\right)$ かつ $\left(0.49 + \frac{1}{100}F_c\right)$ 以下	長期に 対する	—	長期に 対する
軽量コンクリート 1 種および 2 種			普通コンクリートに対する値の 0.9 倍	値の 2 倍		値の 1.5 倍

〔注〕 F_c :コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

(2) 鉄筋

鉄筋の許容応力度は、RC 規準によって表 4.1-7 のように示すことができます。

表 4.1-7 鉄筋の許容応力度 (N/mm ²) ⁴⁻¹⁾				
鉄筋の種類	長期		短期	
	引張および圧縮	せん断補強	引張および圧縮	せん断補強
SR235	155	155	235	235
SR295	155	195	295	295
SD295A および B	195	195	295	295
SD345	215(*195)	195	345	345
SD390	215(*195)	195	390	390
SD490	215(*195)	195	490	390
溶接金網	195	195	**295	295

〔注〕*D29 以上の太さの鉄筋に対しては()内の数値とする。 **スラブ筋として引張鉄筋に用いる場合に限る。

長期許容応力度は、長期荷重の下でコンクリートのひび割れ幅を 0.3 mm 以内に抑えることを基本的な要求として、これに相当する鉄筋の引張応力度を限定する意味から定められたものです。他方、短期許容応力度は規格降伏強度に等しくされています。これは、鉄筋が降伏しても降伏強度を保持して十分なひずみ能力がある上にさらなる強度的な余裕もあること、鉄筋の降伏ひずみは通常の使用範囲のコンクリートの圧縮強度時のひずみと大略同程度と考えられることなどから、引張・圧縮のいずれにも降伏強度まで十分に期待できるとしたものです。なお、同表中、せん断補強とあるのは、鉄筋をせん断補強筋として用いる場合の軸方向応力度に対する許容値を示したものです。

(3) 鉄筋のコンクリートに対する付着

RC 規準では、曲げ材の補強筋としては異形鉄筋のみの使用を認めており、鉄筋のコンクリートに対する許容付着応力度は表 4.1-8 のように定めています。基本的には、鉄筋のかぶり厚さが設計かぶり厚さ以上ある条件の下で、横補強筋のない場合の許容値を定めたものです。異形鉄筋の付着は一般に周囲のコンクリートの割裂によって低下し、その割裂強度はコンクリートの強度、当該鉄筋のかぶり厚さと鉄筋間のあき、横補強筋量に関係します。したがって、付着割裂破壊に対する終局的な安全性は短期許容応力度を満足することによって保証されるものではないことに注意する必要があります (2.5 参照)。

	長 期		短 期
	上端筋	その他の鉄筋	
異形鉄筋	$\frac{1}{15}F_c$ かつ $\left(0.9 + \frac{2}{75}F_c\right)$ 以下	$\frac{1}{10}F_c$ かつ $\left(1.35 + \frac{1}{25}F_c\right)$ 以下	長期に対する値の 1.5 倍
丸 鋼	$\frac{4}{100}F_c$ かつ 0.9以下	$\frac{6}{100}F_c$ かつ 1.35以下	

【注】 1) 上端筋とは曲げモーメントを受ける材において、その鉄筋の下に 300mm 以上のコンクリートが打ち込まれる場合の水平鉄筋を表す。
2) F_c はコンクリートの設計基準強度 (N/mm²) を表す。
3) 異形鉄筋で、鉄筋までのコンクリートのかぶり厚さが鉄筋の径の 1.5 倍未満の場合には、許容付着応力度はこの表の値に「かぶり厚さ/(鉄筋径の 1.5 倍)」を乗じた値とする。

例題 4.1-1

設計基準強度 F_c が 24N/mm² の普通コンクリートのヤング係数 E を算出なさい。

【解答・解説】

表 4.1-5 より $F_c=24\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートの単位体積重量 γ は 23kN/m³ とされるので、この γ と F_c の値を表 4.1-4 に与えられる式に代入して、
 $E = 3.35 \times 10^4 \times (23/24)^2 \times (24/60)^{1/3} = 2.27 \times 10^4 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

例題 4.1-2

設計基準強度 F_c が 24N/mm² の普通コンクリートを用いる場合の短期許容せん断応力度 f_s を求めなさい。

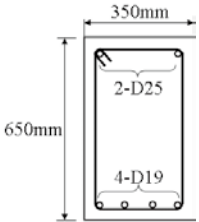
【解答・解説】

表 4.1-6 より、
 $f_s = \min(F_c/30, 0.49 + F_c/100) \times 1.5 = \min(24/30, 0.49 + 24/100) \times 1.5 = \min(0.8, 0.73) \times 1.5 = 0.73 \times 1.5 = 1.10 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

コンクリートの許容せん断応力度は、2通りの算定式による値のうちのより小さな値を採用することになりますが、ここで両者の値が一致する F_c を求めてみると、
 $F_c/30 = 0.49 + F_c/100 \quad \therefore F_c = 21 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
よってコンクリートの許容せん断応力度は、 F_c が 21N/mm² 以下では前者の $F_c/30$ によって決定され、21N/mm² より大きい場合には後者の式によって決定されることになります。

例題 4.1-3

例図 4.1-1 の断面を有する梁において、 $F_c = 24\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートを用いるとして、D25 と D19 の長期許容付着応力度 f_a を求めなさい。



例図 4.1-1

【解答・解説】

D25 は上端筋となることに注意して、表 4.1-8 より、
 $f_a = \min(F_c/15, 0.9 + 2F_c/75) = \min(24/15, 0.9 + 2 \times 24/75) = \min(1.6, 1.54) = 1.54 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

D19 はその他の鉄筋となることから、

$$f_a = \min(F_c/10, 1.35 + F_c/25) = \min(24/10, 1.35 + 24/25) = \min(2.4, 2.31) \\ = 2.31(\text{N/mm}^2)$$

許容付着応力度も、2通りの算定式による値のうちのより小さな値を採ることになります
が、ここで両者の値が一致する F_c を求めてみると、

$$\text{上端筋では、} \quad F_c/15 = 0.9 + 2F_c/75 \quad \therefore F_c = 22.5(\text{N/mm}^2)$$

$$\text{その他の鉄筋では、} \quad F_c/10 = 1.35 + F_c/25 \quad \therefore F_c = 22.5(\text{N/mm}^2)$$

よって、許容付着応力度は、 F_c が 22.5N/mm^2 以下では前者の $F_c/15$ または $F_c/10$ によって
決定され、 22.5N/mm^2 より大きい場合には後者の式によって決定されることになります。

4.2 梁

*4.2 に関する演習問題が巻末にあります

4.2.1 曲げモーメントに対する設計

鉄筋コンクリート断面の鉄筋とコンクリートに生じる応力度のいずれもが、各々に定め
られた許容応力度以下となる条件で、受けることのできる最大限の曲げモーメントを**許容
曲げモーメント** (M_A) といいます。断面に所要の曲げ補強筋量は、基本的には、応力計算に
よって算定された各部断面の**設計用曲げモーメント** (M_D) がこの許容曲げモーメント以下と
なる条件を満足するように算定されます。よって、梁の正負最大曲げモーメントを受ける
部分においてこの条件を満足するための必要最低限の鉄筋量が配筋されるとすれば、設計
用曲げモーメントにおいてほぼ許容曲げモーメントに達していることになります。

(1) 基本仮定

許容応力度設計法において、鉄筋コンクリート部材の断面に垂直な力に対する抵抗は、
以下のような仮定に基づいて算定されます。

①コンクリートの引張耐力は無視する。

②材料に生じる力と変形は比例する（フックの法則の成立）。

③変形前に平面であった RC 断面は変形後も平面を保持する（平面保持の成立）。

④コンクリートに対する鉄筋のヤング係数比は、コンクリートの種類（普通・軽量）に
よらず、荷重の長期・短期の別なく同一とし、コンクリートの設計基準強度 F_c に応じ
て、表 4.2-1 に示す値とする。

⑤算定断面に垂直な材軸方向と傾き θ をなすように配される鉄筋については、その断面
積に $\cos \theta$ を乗じたものを**有効断面積**と見なす。

表 4.2-1 コンクリートに対する鉄筋のヤング係数比⁴⁻¹⁾

コンクリートの設計基準強度 F_c (N/mm ²)	ヤング係数比 n
$F_c \leq 27$	15
$27 < F_c \leq 36$	13
$36 < F_c \leq 48$	11
$48 < F_c \leq 60$	9

仮定①は、コンクリートの引張耐力は圧縮強度の 1/10 程度で、乾燥収縮ひずみが拘束さ
れるとひび割れを生じる程に小さいので、設計上は無視するとしたものです。

仮定②は、鉄筋については、短期の許容応力度と同等とされる降伏強度まではほぼ正確
に成立します。他方、コンクリートについては、短期許容圧縮応力度程度までの応力範囲
では非線形性も少ないので、これを無視してもよいとしたものです。

仮定③は、**2.2.1** でも示したように、均質の断面で認められる平面保持が鉄筋とコンク
リートとの複合断面においても成立するとしたものであり、実験的にもほぼ認められるも
の です。これによって、仮定②、③と併せて、コンクリートの圧縮応力度は中立軸からの
距離に比例することになります。さらに、この仮定によって鉄筋のひずみは断面内の中立
軸から等距離にあるコンクリートと同等となり、仮定④でヤング係数比を定めることによ
り、次項で示すように鉄筋の応力度がコンクリートの応力度に関係づけられます。

仮定⑤は、算定断面に垂直に配されない鉄筋について、算定断面に垂直な方向の抵抗を
考える上で有効な断面積を示したものです。すなわち、傾斜鉄筋の材軸方向の負担力を P
とすれば、算定断面に垂直な方向の P の分力は、以下のように表されます（図 4.2-1 参照）。

$$P \cos \theta = (\sigma \cdot a) \cos \theta = \sigma (a \cos \theta)$$

$$\therefore P \cos \theta = \sigma \cdot a_e, \quad a_e = a \cos \theta, \quad a_e: \text{有効断面積}$$

σ : 鉄筋の材軸に垂直な断面に生じる応力度

a : 鉄筋の材軸に垂直な断面積

たとえば、許容引張応力度が f_t の鉄筋の算定断面に
垂直な方向の許容引張力は、 $f_t(a \cdot \cos \theta)$ となります。

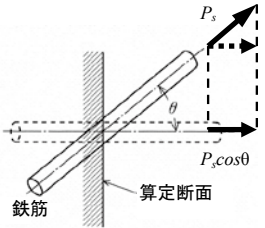


図 4.2-1 算定断面に垂直に配されない鉄筋

(2) ヤング係数比

鉄筋とコンクリートの各々について、フックの法則が成立する、すなわち、力とそれによ
って生じる変形が比例関係にあるとすれば、

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad \sigma_c = E_c \varepsilon_c$$

σ_s : 鉄筋の応力度, ε_s : 鉄筋のひずみ度, E_s : 鉄筋のヤング係数,

σ_c : コンクリートの応力度, ε_c : コンクリートのひずみ度,

E_c : コンクリートのヤング係数
 いま、対象とする断面内の鉄筋とコンクリートが同一のひずみを生じると仮定すれば、
 $\epsilon_s = \epsilon_c = \epsilon$ とすることができるので、
 $\sigma_s = E_s \times \epsilon = (E_s \times \epsilon) \times (E_c / E_s) = (E_c / E_s) \times (E_s \times \epsilon) = (E_c / E_s) \times \sigma_s$
 ここで、 $E_s / E_c = n$ と表せば、

$\sigma_s = n \cdot \sigma_c$ 式 4.2-1
 n すなわちコンクリートのヤング係数に対する鉄筋のヤング係数の比の値をヤング係数比といい、鉄筋とコンクリートが同一のひずみを生じるならば、鉄筋の応力度はコンクリートの応力度のヤング係数比倍となります。一般に n の値は 10 以上になるので、上式は、コンクリートよりも変形しにくい鉄筋はそれだけ大きな力を負担できることを示しています。

さらに、図 4.2-2 に示すような RC 断面に作用する力を P 、その断面積を a として、前記と同様、鉄筋、コンクリートについてそれぞれ下付き添え字 s, c をつけて表せば、

$$P = P_s + P_c, \quad a = a_s + a_c,$$

$$P_s = \sigma_s \cdot a_s = (n \cdot \sigma_c) \cdot a_s = n \cdot \sigma_c \cdot a_s$$

ここで、 $n \cdot a_s = a_e$ とおけば、

$$P_s = \sigma_c \cdot a_e$$
式 4.2-2

上式は、鉄筋に作用する力 P_s がコンクリートの応力度 σ_c に a_e を乗じて得られることを示すので、 a_e は鉄筋の断面積をコンクリートに置き換えた等価断面積を表すといえます。すなわち、鉄筋の断面積はコンクリートに置き換えると、本来の断面積のヤング係数比 (n) 倍に値することを意味します。

他方、

$$P_c = \sigma_c \cdot a_c \quad \therefore P = \sigma_c (n \cdot a_s + a_c) = \sigma_c (n \cdot a_e + a_c) = \sigma_c \{n \cdot a_e + (a - a_e)\}$$

$$\therefore P = \sigma_c \{a + (n-1) \cdot a_e\}$$
式 4.2-3

よって、式 4.2-3 の $\{ \}$ 内は前記と同様な意味から、RC 断面をコンクリートに置き換えた等価断面積を表しています。JIS 規格にしたがって工業製品化される鉄筋の断面積の合計 a_s は、使用する鉄筋 1 本の断面積が径に応じて与えられており（前出 表 4.1.3 参照）、容易に計算することができます。すなわち、式 4.2-3 の $\{ \}$ 内は RC 断面の等価断面積を計算の便を考慮した形式で表されています。

以上に示したような意味を持つヤング係数比を RC 規準では、許容応力度設計法に基づいて部材の配筋を決定する（この行為は通称、断面算定と呼ばれる）際には、長期載荷時のコンクリートのクリープを考慮した上で、コンクリートの種類、荷重の長期・短期の別によらず、前出 表 4.2-1 のように定めています。

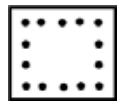


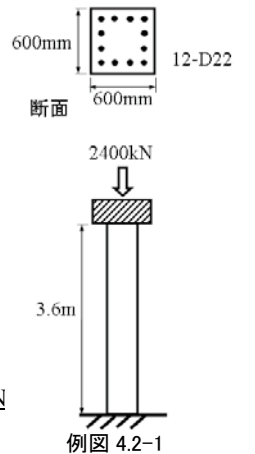
図 4.2-2 RC 断面の例

例題 4.2-1

例図 4.2-1 に示すように、鉄筋コンクリート柱が材軸方向に一様に圧縮されたとき、鉄筋とコンクリートに生じる力の合力 P_c はそれぞれ何 kN になりますか。

さらに、この柱の材軸方向の縮み量 δ は全体で何 mm になりますか。

ただし、鉄筋のヤング係数は $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とし、コンクリートに対するヤング係数比を 15 とします。



【解答・解説】

12-D22 の鉄筋断面積 a_s は表 4.1-3 から 4644 mm^2 と計算されるので、式 4.2-3 から σ_c を求めると P_s 、 P_c 、 δ が次々に求められます。

$$\sigma_c = \frac{2400 \times 10^3 \text{ N}}{600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} + (15 - 1) \times 4644 \text{ mm}^2} = 5.65 \text{ N/mm}^2$$

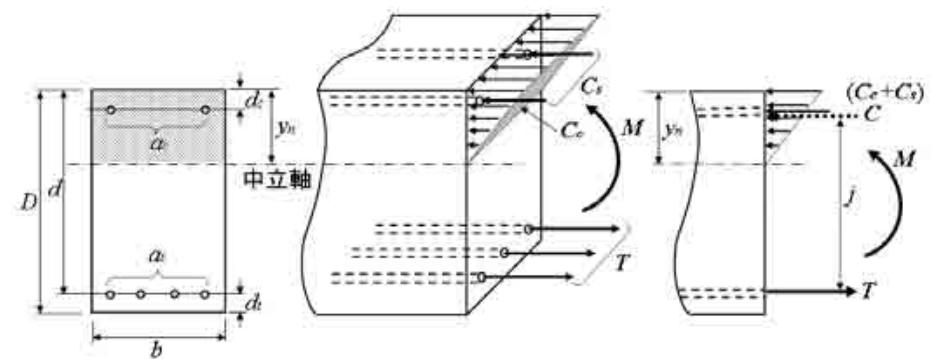
$$P_s = (5.65 \text{ N/mm}^2 \times 15) \times 4644 \text{ mm}^2 = 394000 \text{ N} = 394 \text{ kN}$$

$$P_c = 5.65 \text{ N/mm}^2 \times (600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} - 4644 \text{ mm}^2) = 2010000 \text{ N} = 2010 \text{ kN}$$

$$\delta = \{(5.65 \text{ N/mm}^2 \times 15) / (2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2)\} \times 3.6 \times 10^3 \text{ mm} = 1.49 \text{ mm}$$

(3) 長方形断面の梁の許容曲げモーメント

図 4.2-3(a) に示すような長方形断面の RC 梁が下側引張の曲げモーメント M を受けると、断面に生じる力は基本仮定によって同図(b)あるいは(c)のように分布すると考えられます。



(a) 梁断面 (b) 断面に生じる力 (c) 断面に生じる力と合力

図 4.2-3 曲げモーメントを受ける長方形梁断面に生じる力