

12 条 曲げ材の断面算定における基本仮定

〔下線部は改定箇所を示す。~~二重取消線~~は削除した部分を示す〕

【本文案】(変更なし)

鉄筋コンクリート材の曲げモーメントに対する断面算定は、通常の場合、次の仮定に基づいて行う。

- (1) コンクリートの引張応力は無視する。
- (2) 曲げ材の各平面断面は材のわん曲後も平面を保ち、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。
- (3) コンクリートに対する鉄筋のヤング係数比 n は、コンクリートの種類、荷重の長期・短期にかかわらず同一とし、コンクリートの設計基準強度 F_c に応じて、表 12.1 に示す値とする。

表 12.1 コンクリートに対する鉄筋のヤング係数比

コンクリート設計基準強度 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

- (4) 算定断面に対して直交しない鉄筋については、その断面積に $\cos \theta$ を乗じたものを有効断面積と見なす〔図 12.1 参照〕。

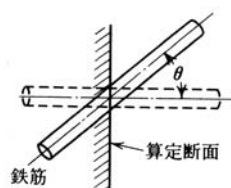


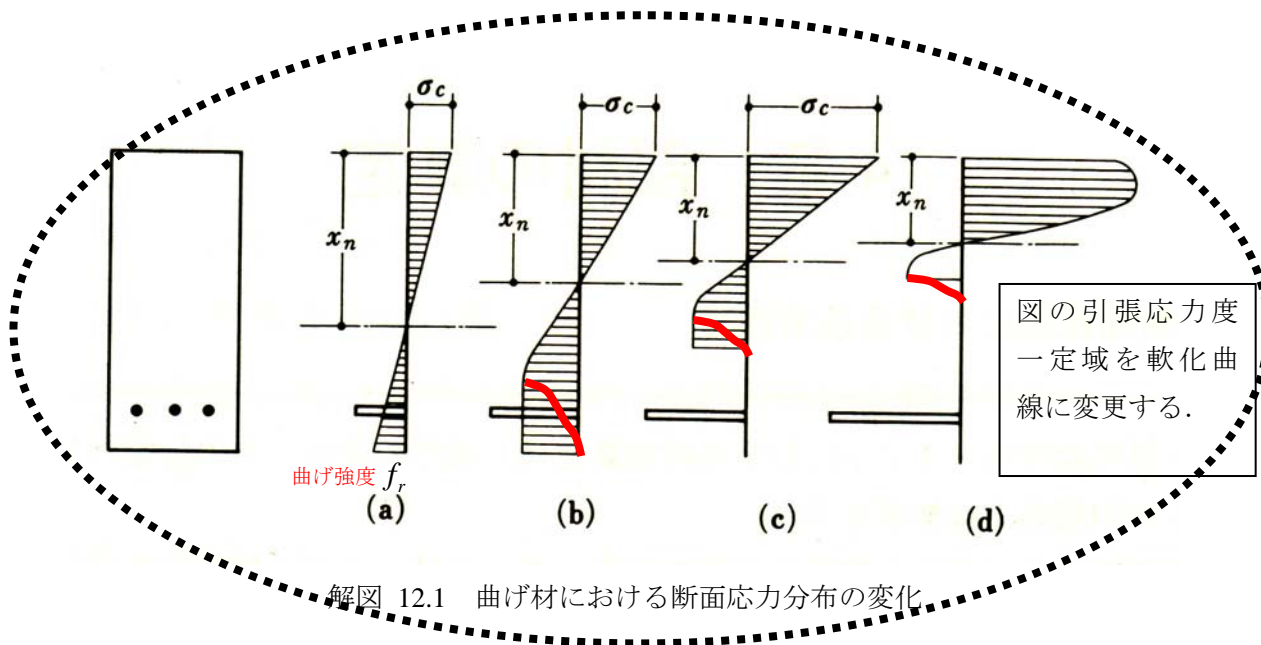
図 12.1 算定断面に直交しない鉄筋

【解説案】

(1) コンクリートは引張に対する抵抗力が小さく、圧縮強度の 1/10～1/13 程度の曲げ引張強度しか示さない。鉄筋コンクリートはこのようなコンクリートの弱点を補うために、断面の引張応力の働く部分に鉄筋を入れて補強し、引張応力は鉄筋に、圧縮応力はコンクリートに負担させるようにした、いわゆる複合構造である。

解図 12.1 は、曲げ材を例にとって破壊に至るまでの断面の応力分布の変化を示したものである。同図 (a) では引張縁でひび割れが生じる直前の応力分布を示している。コンクリートに生じる応

力が極めて小さく、応力とひずみとはほぼ正比例関係にあり、引張側コンクリートも引張応力を弾性的に負担する。荷重がこれよりも増大すれば、引張縁でひび割れが生じて同図 (b) のような応力分布に至り、これは、コンクリート引張縁ひずみが $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ 程度に達するまでの場合であるが、特に大気中でコンクリートが乾燥して収縮応力を生じている場合には引張縁ひずみが



解図 12.1 曲げ材における断面応力分布の変化

~~$1 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 程度までの場合となる。このときは、まだ引張側コンクリートに曲げひび割れが発生しないが、ほぼひび割れの発生する直前の状態にあり、応力分布は圧縮側は弾性、引張側は弾塑性となる仮定できる。本規準 1999 年版では引張応力が一定の領域が存在する図が描かれていたが、近年、破壊力学を用いたひび割れ領域の応力伝達状況が次第に明らかになってきた。その結果、ひび割れ幅が 0.2 mm 程度以下であれば引張応力が伝達されると考えるほうが妥当であることが分かってきた。これを本条で考察している連続体の力学にあてはめると、歪がひび割れ歪を越えた後も、引張応力が伝達されることになる。ただし、歪が大きくなるに従って伝達される応力は徐々に減り、やがて伝達される応力は 0 となる。つまり、ひび割れが入ると、引張側が塑性化し歪軟化が進行すると考えられる。そこで、同図 (c) (d) も同じ理由により、引張応力一定領域の代わりに歪軟化域があるを考慮した応力分布に修正した。さらに荷重を増すと、引張縁ひずみがコンクリートの曲げ引張破断ひずみを超えてひび割れが発生し、同図 (c) に示すように圧縮側コンクリートは弾性応力分布を示すが、引張側コンクリートの一部は応力を負担しなくなる無効となる。同図 (d) は断面の終局耐力時の応力分布を示したもので、大多数の曲げ材では引張側鉄筋が降伏することにより破壊が誘発され、圧縮側コンクリートの領域が狭くなり、コンクリートが圧縮破壊して崩壊に至る。ただし、上記のように応力分布が線形弾性とみなせる範囲の最終状態をひび割れ発生と定義するか、多少引張側の応力が歪軟化し引張縁歪が所定の値に到達した時点をもってひび割れ発生と定義するかは解析の目的により使い分けが必要られるようである。例えば、8 条に示す曲げひび割れモーメントの計算で用いる曲げ引張強度 (見かけの引張強度) は、後者の考え方に基づいた値と考えられる。~~

このように作用荷重の大きさによって断面の応力分布も変化するが、短期許容圧縮応力度が

2/3 F_c 程度の断面の弾性設計には解図 12.1 (c) の状態を対象とする。この場合、圧縮側コンクリートの応力分布は完全弾性と仮定するとともに、引張側コンクリートの負担する引張応力は計算結果に及ぼす影響は小さいので、便宜上これを無視する。なお、破壊耐力をもとにして終局強度設計を行うときには、同図 (d) の応力分布を用いる。この場合、引張側コンクリートの効果を無視することは、弾性設計の場合と同じである。

(2) 断面のひずみ分布は平面保持を仮定して求める。すなわち、材軸と直角な断面は、応力を受ける前に平面であったものは変形後も平面を保つとする。この仮定はせん断変形を考慮に入れると成立しないが、実用上の目的からはこれを用いて差し支えない。

(3) RC 断面の弾性設計を行う場合、平面保持の仮定から鉄筋の配置されている位置でのコンクリートと鉄筋のひずみは等しいことから、コンクリートの応力度（引張側においては仮定の引張応力度）および鉄筋の応力度は、その位置でのコンクリートのひずみ（すなわち、鉄筋のひずみ）に、それぞれのヤング係数 E_c 、 E_s を乗じれば求めることができる。したがって、コンクリートの応力度 σ_c とその位置での鉄筋の応力度 σ_s との関係は、ヤング係数比 n を以下のように定義すれば

$$\sigma_s = n\sigma_c \quad \text{解(12.1)}$$

$$n = E_s / E_c \quad \text{解(12.2)}$$

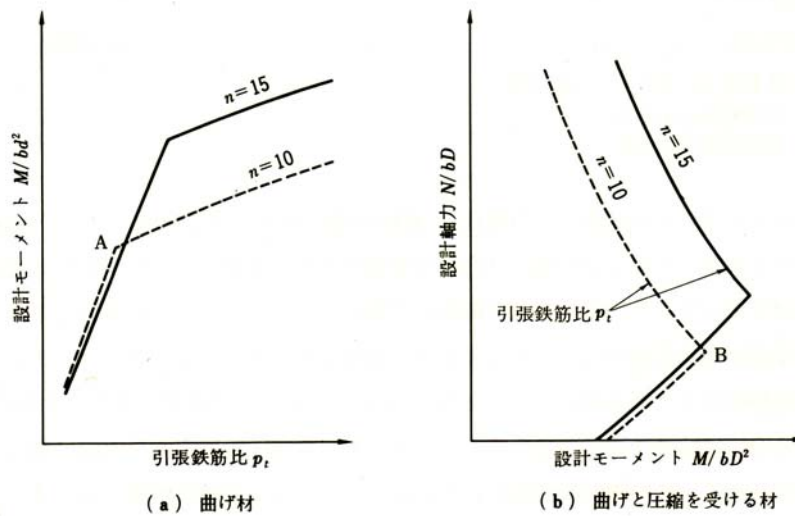
で表される。

断面設計用のヤング係数比の設定に当たっては、1) コンクリート強度の大きさ、および、作用応力の大きさによってコンクリートのヤング係数（セカントモジュラス）が変化すること、2) コンクリートはクリープによって見掛け上ヤング係数が小さくなること、3) 軽量コンクリートのヤング係数は、同じ圧縮強度の普通コンクリートのそれよりも小さいことなどを考える必要がある。断面設計用ヤング係数比は、コンクリートの種類、強度、長期短期の応力別にクリープを考慮してそれぞれ規定するという考え方もある。

しかし、コンクリートのクリープ理論に基づく断面応力解析結果は純弾性に基づく解析結果と著しく異なるので、クリープによるコンクリートや鉄筋の応力変化を考慮することなく、単にクリープによるヤング係数比の増加だけに着目してこれを大きく規定するのは、理論的にも実際設計上も不都合が生じる^{1),2)}。解図 12.2 (a) および (b) は実際設計上の不都合を説明図に描いたものである。すなわち、解図 12.2 (a) の曲げ材においては、設計曲げモーメントが A 点以下の場合には、ヤング係数比の大きさによる必要鉄筋比の差はほとんどないが、A 点以上になると、同じ設計モーメントに対してヤング係数比を大きくとるほうが著しく少ない鉄筋比ですむことになる。ヤング係数比が小さい点線の設計図表による場合には、実際の設計においては A 点以上の設計モーメントに対しては圧縮鉄筋比を大きくしてつり合い鉄筋比（A 点の鉄筋比）を増大させ、つり合い鉄筋比以下の鉄筋比でおさまるようにするのが通常である。このようにすることによって、引張鉄筋比はヤング係数比の大小には関係なくほぼ同じ量となるけれども、圧縮鉄筋比はヤング係数比の小さい場合のほうが大きくなり、結果的には必要鉄筋量はヤング係数比を大きくとるほ

うが少なくなる。同じ設計モーメントに対して引張鉄筋または圧縮鉄筋が少なくてすむことは、圧縮側コンクリートの圧縮応力負担が大きくなり、弾性およびクリープ変形も大きくなって、この意味で危険側の設計となる。曲げと圧縮を受ける断面においても、解図 12.2 (b) からわかるように、B 点以上の軸力の作用する場合には、同じ鉄筋比の断面に対してヤング係数比を大きくとるほうが許容曲げモーメントが大きくなり、危険側となる。

このようになるのは、コンクリートのクリープによるひずみ増加だけを考慮してヤング係数比を大きく規定し、クリープによってコンクリートおよび鉄筋の応力が純弾性の場合から変化していくことを合わせ考えていないためである。



解図 12.2 ヤング係数比の相違による断面計算図表の変化説明図

一例として、幅 b 、有効せい d 、引張鉄筋比 $p_t = 1\%$ 、複筋比 $\gamma = 0.4$ 、圧縮鉄筋位置 $d_c = 0.1$ の長方形断面に曲げモーメント $M/bd^2 = 1.5 \text{ N/mm}^2$ が作用するときの純弾性およびクリープの影響を考慮した時の断面応力計算結果を解表 12.1 に示す。純弾性応力計算に用いたヤング係数比は $n = 10$ と仮定した。また、クリープを考慮した時の断面応力計算には、コンクリートのクリープを考慮した等価ヤング係数比を純弾性応力計算式（常用設計式）に適用することによって近似的に計算できることから^{1),3)}、クリープを考慮したヤング係数比を $n = 15$ と仮定した。解表 12.1 からわかるように、断面各部の応力は、次のように変化する。

コンクリートの圧縮縁応力・クリープによって大幅に減少する。

圧縮鉄筋応力・クリープによって大幅に増加する。

引張鉄筋応力・クリープによりわずかに増加する。

解表 12.1 弾性およびクリープ後の曲げ材断面応力比較の一例

($p_t=1\%$, $\gamma=0.4$, $d_{cl}=0.1$, $M/bd^2=1.5 \text{ N/mm}^2$ の長方形断面)

項 目	弾性の場合 ($n=10$)	クリープを考慮した場合 ($n=15$)	クリープによる増減
$x_{n1}=x_n/d$	0.337	0.386	増 大
σ_c (N/mm ²)	8.56	7.20	減 少
σ_{sc} (N/mm ²)	60.2	80.0	増 大
σ_{st} (N/mm ²)	168.4	171.0	やや増大

 σ_c : 圧縮縁コンクリートの応力度 σ_{sc} : 圧縮鉄筋の応力度 σ_{st} : 引張鉄筋の応力度

このようなクリープによる断面応力の変化は、曲げと軸力とを受ける断面においても同様である。したがって、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度を変えることなく、クリープを考慮して単にヤング係数比だけを増大すると、設計された断面に設計応力が作用したときの断面応力は、クリープ後にそれぞれの許容応力度以内に納まるにすぎず、載荷当初においては、特にコンクリート圧縮縁応力がその許容値をはるかに上回ることになり、コンクリートの応力負担を大きくする結果となる。すなわち、結果的には純弾性設計の場合のコンクリートの許容圧縮応力度を大幅に増大することと同等になるのであって、危険側の設計を行っていることになる。純弾性の場合もクリープ後もコンクリートの圧縮縁応力は、ある一定値すなわち許容圧縮応力度を超えてはならないとする立場に立つのが断面の弾性設計の基本であり、このような立場からは解図 12.2 に示した点線と実線との不利となるほう（鉄筋比が大きくなるほう）をとるべきであり、したがって、実際の設計にはクリープを考慮しないヤング係数比を用いるのが妥当である。

実際のコンクリートのヤング係数は 5 条に規定したようにコンクリート強度および単位体積重量によって変化する。5 条の規定値はコンクリートの純弾性的性質をもとにしたヤング係数実験値であって、これからヤング係数比計算式を求めると次のようになる。

$$n = \frac{20.5}{3.35 \times \left(\frac{\gamma}{24}\right) \times \left(\frac{F_c}{60}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad \text{解(12.3)}$$

 γ : コンクリートの単位容積重量 (kN/m³) F_c : コンクリート設計基準強度 (N/mm²)

普通コンクリート ($\gamma=23 \text{ kN/m}^3$) を例にとると、鉄筋コンクリート造のコンクリートによく使用されるコンクリート設計基準強度 $F_c=18\sim 27 \text{ N/mm}^2$ の範囲では、ヤング係数比は $n=10.2\sim 8.9$ の範囲にあり、本規準での規定値 $n=15$ よりも小さい。これはクリープによってコンクリート圧縮縁応力が減少することから、純弾性の場合にはコンクリートの長期許容圧縮応力度を従来の慣用値 $F_c/3$ よりも多少増加させてもクリープによる早急な緩和によって不都合は生じないであろうことを踏まえて、弾性であれば旧 ACI 規準 (1963) で採用していた許容値に近い値で

ある 0.4 程度に引き上げても差し支えないという基本的考え方に立ち、規定値としては従来の慣用値 $F_c/3$ を採用する代わりに、ヤング係数比を、解(12.3)式で求められる純弾性計算値とクリープを考慮してこれを 2 倍した見掛けのヤング係数比との平均値をもって、断面設計用ヤング係数比とすることにした。すなわち、ヤング係数比を純弾性の場合の値の 1.5 倍とすることによって、純弾性の場合にコンクリートの長期許容圧縮応力度を慣用値 $F_c/3$ から 0.4 に引き上げたのと同等の結果を得るようにしたものである。こうすると、 $n=15.3\sim 13.4$ となるが、計算の便宜も考えて $F_c=18\sim 27\text{ N/mm}^2$ の範囲では一率に $n=15$ を採用することにした。また、コンクリートが高強度になっても F_c が 60 N/mm^2 程度までならクリープ特性は普通強度コンクリートと比べて極端には変わらないと考えられる⁴⁾⁵⁾ので、 $F_c=27\text{ N/mm}^2$ を超える場合にも同じ方針でヤング係数比を決めることとした。この場合には、もととなる純弾性時のヤング係数比を実状に合わせた値として解(12.3)式より求め、断面設計用としてはおおよそその 1.5 倍の値を目安として、コンクリート強度に応じて簡略化した値を採用している。

短期応力に対しては、コンクリートの許容圧縮応力度として長期の値の 2 倍が規定されており、したがって、コンクリートのヤング係数（セカントモジュラス）は厳密にいつて長期応力における場合よりもやや小さくなる。しかし、これに対応してヤング係数比を長期応力に対する値よりも大きくとつてもそれほど意味をもつものではなく、取扱いの簡単化を考慮して、長期応力に対する値と同一とした。

軽量コンクリートのヤング係数は普通コンクリートのそれよりも小さい。しかし、前述のようにヤング係数比を大きくとることは、同じ許容応力度を用いているにもかかわらず、必要鉄筋量が著しく少なくてすむ場合が起こる。特に、鉄筋量が少なくなることは、断面の破壊耐力の低下にもつながるので問題である。同じコンクリート強度、同じ許容応力度であるにもかかわらず、軽量コンクリートのほうが普通コンクリートを使用するときよりも鉄筋量が少なくなるという矛盾は弾性設計の一つの欠陥であって、軽量コンクリートといえどもこれと同じ強度の普通コンクリートの場合と同じ断面が設計されてしかるべきである。この意味から断面設計用ヤング係数比としては、普通コンクリートと同じ値を採用することにした。

- 1) 坂 静雄・鉄筋コンクリートの研究、産業図書（昭 29.12）。
- 2) 六車 熙・RC 造におけるコンクリートの許容圧縮応力度とヤング係数比、カラム、No.37, pp.45~48（昭 45.10）。
- 3) 六車・富永・矢田貝・鉄筋コンクリート曲げ材のクリープ応力に及ぼす引張側コンクリートの影響、昭和 44 年度日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系）、pp.849~850（昭 44.8）。
- 4) 日本コンクリート工学協会・コンクリート便覧第 2 版。
- 5) 長滝重義・米倉亜州夫・コンクリートの乾燥収縮およびクリープの機構に関する考察、コンクリート工学、Vol.20, No.12, pp.85~95（昭 57.12）。