

10

鉄筋コンクリート梁の
曲げ・せん断実験方法

鉄筋コンクリート梁（以下、RC 梁と略記）は、一般に曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントなどの外力を受けるが、ねじりが問題になる梁部材は比較的少ないため、RC 梁の実験としてはもっぱら曲げ実験および曲げ・せん断実験が行われている。本章では、大学・高専における構造材料実験として実施できる程度の比較的小型の RC 梁の実験方法について説明する。

10.1 実験目的

本章における実験目的は、RC 梁の製作過程と載荷実験過程における体験を積むこと、ならびに講義で学習した RC 理論と実験結果とを比較検討し、RC 梁の力学性状についての理解を深めることにある。

10.2 実験計画

(1) 実験要因

(a) 概要

大学・高専の構造材料実験として行うには、単純梁による載荷方法が比較的簡単であり、また装置と試験体が自作できるため、ここでは、3等分点2点集中載荷方法を採用し、5体の RC 梁の曲げせん断実験を計画する。図 10.1 に載荷方法を示す。

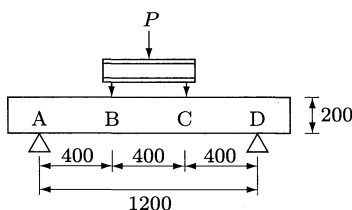


図 10.1 載荷方法（単位：mm）

図 10.1 の BC 区間は、純曲げスパンといわれ、一定の曲げモーメントだけが作用し、せん断力が作用しないスパンである。また AB および CD 区間は、せん断スパンといわれ、曲げモーメントとせん断力が同時に作用するスパンである。

(b) 実験要因の決定

この実験では、梁断面、主筋比、コンクリート強度などを一定とし、あばら筋比だけを 0 から約 0.57 % の範囲で 5 段階に変えることにする。スパンは図 10.1 に示すように 1200 mm とし、5 体の試験体を用いて曲げ・せん断試験を行う。

あばら筋比 (p_w) は $p_w = a_w/bd$ [%] から求められる。梁の引張主筋としては 3 本の D13 筋を使用する。引張主筋比 (p_t) は 1.87 % となり、この鉄筋量の梁ではまず鉄筋が降伏し、次いで終局時にコンクリートが圧壊する。圧縮主筋には 2 本の D10 筋を使用する。実験の概要を表 10.1 に示す。

[注] 当初の計画のとおり、あばら筋比 $p_w = 0 \sim 0.30\%$ の梁をせん断破壊させ、最もあばら筋量の多い $p_w = 0.57\%$ の梁を曲げ破壊させるためには、使用するコンクリートの強度と主筋の降伏点の組合せに下記のような制限があるので注意する必要がある。すなわち、降伏点が $340 \sim 400 \text{ N/mm}^2$ 程度の引張主筋を使用する場合に、コンクリートの調合のミスなどで、コンクリート強度が $13 \sim 15 \text{ N/mm}^2$ 程度の値になると、0.57 % のあばら筋比の梁でも、せん断破壊することがある。逆に 34 N/mm^2 程度の高強度コンクリートの場合に降伏点の低い主筋を使用すると、あばら筋比の低い試験体、たとえば、 $p_w = 0.30\%$ の試験体でも曲げ破壊を起こす。都合により試験体個数を減らす場合は、あばら筋比が 0.06%、0.30% の試験体の順で減らしていくとよい。

(2) 試験体の形状・寸法と配筋

あばら筋比とあばら筋の間隔は表 10.1 に示す値とするが、一般に使用されている鉄筋の直径についてはばらつきがあるため、使用する鉄筋の径を正確に測定したのちに、表 10.1 中の値を書きなおす。図 10.2 に試験体の断面、スパンおよび配筋を示す。

(3) 使用材料

主筋には、降伏点が $300 \sim 350 \text{ N/mm}^2$ 程度の鉄筋を使用する。あばら筋に使用する $\phi 3$ の鉄線としては、市販のなまし直線（番線）を利用するとよい。これらの番線の降伏点は、 $200 \sim 300 \text{ N/mm}^2$ の範囲にあるものが多い。あばら筋に使用するもう一つの $\phi 6$ 筋にはいろいろな品種のものがあるが、なるべく降伏点が 300 N/mm^2 程度のものを使用する。

コンクリートの圧縮強度が試験時に $21 \sim 24 \text{ N/mm}^2$ 程度となるように、コンクリートの調合を決定する（第 6 章参照）。所要コンクリート量は、梁および円柱供試体の体

表 10.1 実験の概要

試験体名	予測される破壊	梁全長 [mm]	試験スパン [mm]	主筋		主筋断面積	
				引張側	圧縮側	引張側 a_t [mm ²]	圧縮側 a_c [mm ²]
I	せん断破壊	1700	1200	3-D 13	2-D 10	381	142
II	せん断破壊	1700	1200	3-D 13	2-D 10	381	142
III	せん断破壊	1700	1200	3-D 13	2-D 10	381	142
IV	せん断破壊	1700	1200	3-D 13	2-D 10	381	142
V	曲げ破壊	1700	1200	3-D 13	2-D 10	381	142

試験体名	主筋比		せん断スパン比 a/d	あばら筋の種類	あばら筋断面積 a_w [mm ²]	あばら筋間隔 S [mm]	あばら筋比 p_w [%]
	引張主筋比 p_t [%]	圧縮主筋比 p_c [%]					
I	1.87	0.70	2.35	—	—	—	—
II	1.87	0.70	2.35	$\phi 3$	14.1	200	0.06
III	1.87	0.70	2.35	$\phi 6$	47.5	200	0.20
IV	1.87	0.70	2.35	$\phi 6$	47.5	130	0.30
V	1.87	0.70	2.35	$\phi 6$	47.5	70	0.57

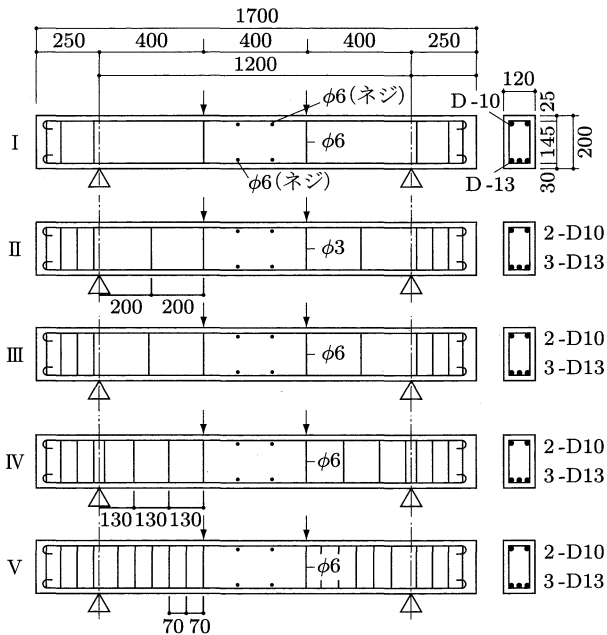


図 10.2 試験体の断面、スパンおよび配筋図 (単位: mm)

積にコンクリートのスランプや空気量の測定に必要な量を加算した合計量を 10 % 程度割り増した量とする。

10.3 試験体の製作

(1) 型枠の製作

型枠の製作には、厚めの合板（厚さ 18 mm 程度）を使用する。型枠の一例を図 10.3 に示す。なお、合板にたる木を固定する場合には、釘くぎを使用すると抜けやすいため、めっきした木ねじなどを使うと、緩みが少なく便利である。各部品が完成したら、型枠の内側に、はく離剤（マシンオイルでもよい）を塗布し、また型枠の側面と底板の突合せ面およびその他の突合せ面などには、水もれ防止のために、グリスを塗布する。

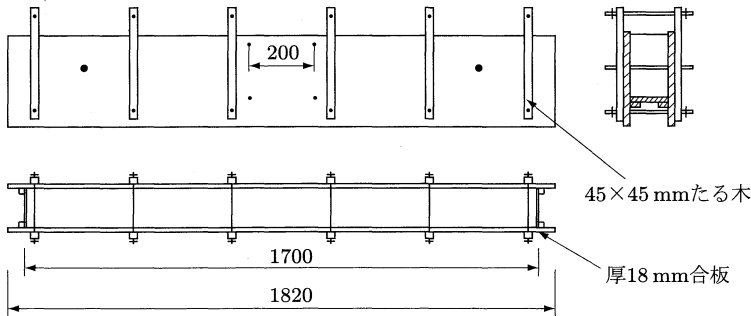


図 10.3 型枠の設計（単位：mm）

(2) 鉄筋の加工と組立て

(a) 鉄筋の加工

主筋とあばら筋の加工図を図 10.4 に示す。主筋用の鉄筋とあばら筋を切断する際、引張試験用の鉄筋を数本ずつ準備しておく。あばら筋の折曲げ器具の一例を図 10.5 に示す。この器具を使用すると、経験のない者でも精度よくあばら筋を加工することができる。

(b) 鉄筋の組立て

あばら筋と主筋との緊結には、結束線（焼なまし鉄線）を使用して、ハッカー、ペンチなどで結束する。結束線はねじり過ぎると切断しやすいので、注意が必要である。

型枠の準備後、結束した鉄筋を設計寸法どおりになるように型枠内へ注意深く配置する。とくに、引張主筋のかぶり厚さは、スペーサを用いたり、型枠側面や、型枠を

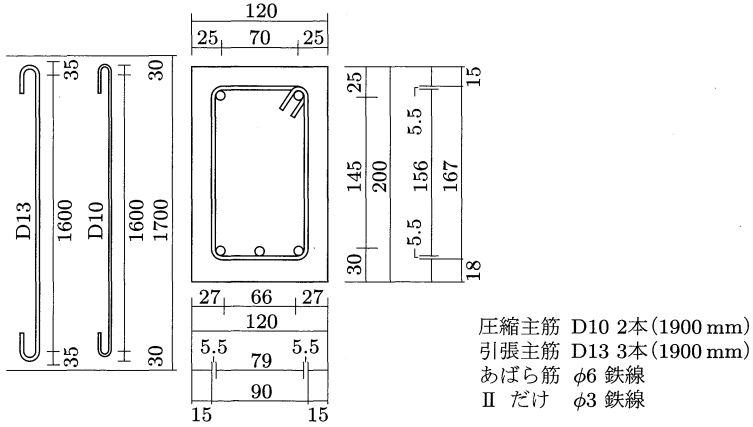


図 10.4 鉄筋の加工図 (単位: mm)

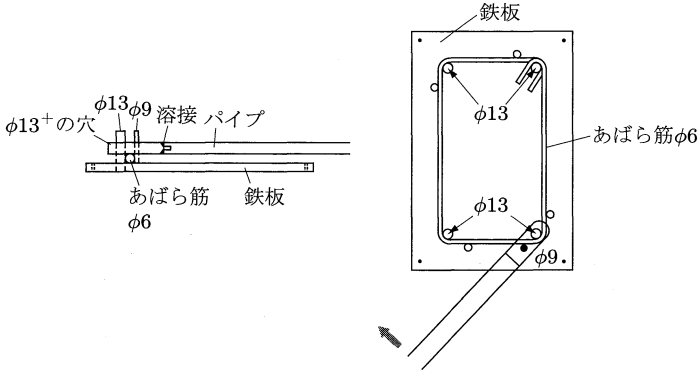


図 10.5 あばら筋の折曲げ器具

締めつけるためのボルトから吊り下げるなどして、コンクリートの打込みに際しても所定の寸法が保持されるように、十分に注意する。

(3) コンクリートの打込み

梁型枠にコンクリートを打ち込む前に、円柱供試体用の型枠を6個以上用意し、またスランプ試験と空気量試験用の器具を準備する。打込みに際しては、パイプレータや突き棒を利用して、豆板などができないように十分に締め固める。

打込み終了後は、使用した道具類を清掃するとともに、こてで梁の上面をならし、平滑にする。打込みから1~3時間(コンクリートのスランプおよび温度によって異なる)後、コンクリートが凝結し始める際に、こてで押えてコンクリートの表面を平滑にする。最後に試験体の番号を区別できるように名札をつけておく。

(4) 養生

コンクリート打込み後は、シートなどでコンクリートの表面をおおい、水分の蒸発を防ぐとともに、必要に応じて散水する。型枠を脱型するには、最低1週間程度の養生期間をおくのが望ましい。脱型後は、番号を試験体に記載するとともに、当初の計画に従って、所定材齢まで養生を行う。円柱供試体も、脱型後は梁試験体と同じ条件で養生を行う。

10.4 使用材料の力学的性質に関する試験

梁試験体に使用する主筋とあばら筋の降伏点、引張強度、応力-ひずみ関係、ヤング係数、伸び率などを調べる。また、梁試験体のコンクリートの打込みと同時に製作し、同一条件で養生しておいた円柱供試体の強度試験を行い、コンクリートの圧縮強度、引張強度、およびヤング係数を求める。

10.5 RC 梁の耐力と変形の計算

載荷実験を行う前に、RC理論に従って以下の各項目に関する計算値を求めておく。なお、各種耐力とたわみの計算方法は、10.9節に示してある。

- i) 曲げ耐力
- ii) 曲げによる中央点の弾性たわみ
- iii) せん断耐力

10.6 載荷準備

(1) 試験体の準備

所定材齢まで養生を行った試験体を作業ヤードへ運搬し、下記の順序に従って試験体の載荷のための準備を行う。

- i) 試験体の上下面に不整やねじれがあると、支点や荷重点に線荷重を均等にかけることができないため、石こうとセメントを混ぜて練ったペーストを塗って整形するか、研磨用カップ形ダイヤモンドホイールを取り付けたディスクグラインダーなどで整形する。
- ii) 梁試験体に、乾燥収縮などによるひび割れがみられる場合は、載荷後のひび割れと区別するために、前もって記録しておく。

- iii) 試験体の長さ，幅，高さなどの寸法を測定する。
- iv) 試験体表面にワイヤーストレインゲージを貼付する場合は，貼付位置をサンドペーパーで研磨し，アセトンで清浄にしたのち，その位置にゲージの寸法より少し大き目に切ったガムテープを貼っておく(2.2節のゲージの貼り方参照)。
- v) 石こうを水で溶いたもの，または屋内用の白色水性エマルジョンペイント(つや消し)を水で薄く溶いたものを試験体に塗布し，発生したひび割れが発見しやすいようにする。この場合，ii)で記録したひび割れが区別できるように工夫する。
- vi) 試験体の支点，荷重点，中央部に鉛筆やサインペンなどで定規を使って寸法線を引く。さらに試験体の両側面に，縦・横に一定間隔で碁盤目状に線を引き，縦方向，横方向にそれぞれ番地を付ける。このようにしておけば，ひび割れの記録が容易となり，せん断ひび割れ発生後の試験体の側面のずれを観察するのにも役立つ。
- vii) ワイヤーストレインゲージ貼付位置にあらかじめ貼っておいたガムテープを外し，その面に付着しているガムテープの接着剤やごみなどを拭き取って清浄にしたのち，ストレインゲージを貼付する。

(2) 載荷装置の準備

梁試験体の両支点は単純支持とし，3等分点2点集中載荷とする。荷重点および支点の摩擦はRC梁の力学性状にかなりの影響を与えることが知られているため，両支点ともテフロンシートやローラを用いて，支点の摩擦を減らすように心がける必要がある。

曲げ装置のうち，載荷ベッドの長さが不足する場合は，I形鋼，H形鋼などの曲げ試験用ベッドを既設のベッドに固定して利用するとよい。

試験機の荷重容量に対して試験体の耐力が小さすぎると，荷重の読み取り誤差が大きくなるため，そのような場合には適当なロードセル(2.2節参照)を用いて荷重を検出する。

(3) 各種計測装置の準備

(a) たわみの測定

梁試験体のスパン中央部と両荷重点のたわみをダイアルゲージ(DG)などで測定する。曲げベッドの剛性が高い場合でも，試験体と支点との間のギャップやへこみなどが生じる恐れがあるので，梁試験体の両支点上で梁せいの中央部の点を直線で結んだ基準線からの垂直変位量が測定できるようなたわみ計測用フレームを使用することが

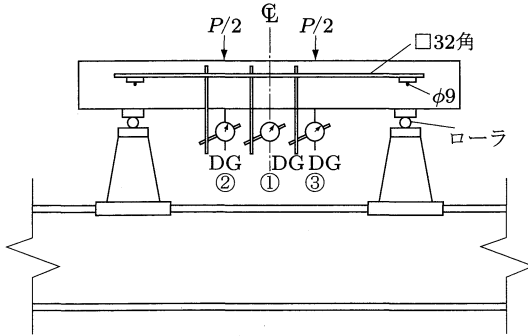


図 10.6 たわみの測定装置

望ましい (図 10.6 参照).

(b) 曲率の測定

曲げスパン内の一定区間 (l') の曲率 (φ) は、梁の上部と下部の埋込み鉄筋間の材軸方向変形量 $\Delta l'_c$ と $\Delta l'_t$ を、コンタクトゲージ、変位計、ストレインゲージなどを使って計測し、平均圧縮ひずみ (ε_c) と平均引張ひずみ (ε_t) を用いて次の式で求められる (図 10.7 参照).

$$\varphi = \frac{1}{\rho} = \frac{|\varepsilon_c| + |\varepsilon_t|}{h} \tag{10.1}$$

ここに、 ρ : 曲率半径、 h : 上下の変形測定間距離.

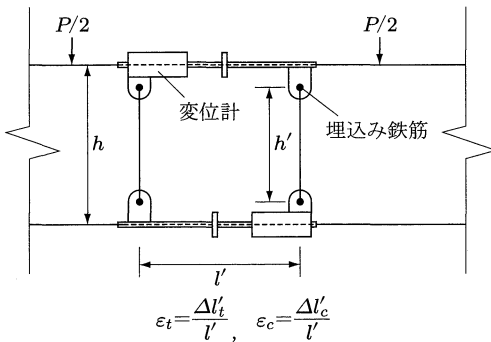


図 10.7 曲率の測定

(c) ひずみの測定

梁試験体のコンクリート断面の曲率および鉄筋のひずみの測定方法には、ワイヤーストレインゲージによる方法 (写真 10.1 参照) と、コンタクトゲージによる方法とがある。コンクリートの表面に貼付するワイヤーストレインゲージの長さやコンタク

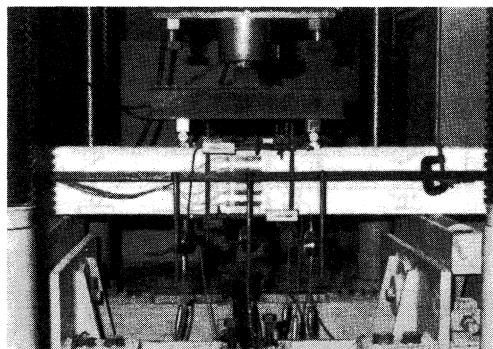


写真 10.1 RC 梁の載荷および測定装置

トポイントの間隔は、骨材の最大寸法を考慮して、あまり短いものは使わないようにする。

(d) ひび割れ幅の測定

ひび割れ幅の測定には、一般に、20倍から100倍の倍率をもつひび割れ幅測定用測微鏡を用いる。倍率100倍の測微鏡では、10 μm 程度のひび割れ幅までを正確に読み取れるが、ひび割れ幅が0.5 mm 以上の場合は、倍率20倍の測微鏡の方が使いやすい。測定に際しては、梁試験体の側面に測微鏡を密着させ、照明をつけて読み取りを行う。

以上、試験体、載荷装置、各種計測装置などの準備が完了したら、試験体を注意深く載荷装置にセットし、必要な計測装置を取り付けて、測定のための準備を行う。写真10.1に、載荷準備の完了したときの状況を示す。

10.7 載荷実験

載荷の方法は、単調漸増静載荷とし、各荷重段階ごとの荷重の増加量は、曲げひび割れの発見までは最大荷重の1/30~1/40程度（たとえば最大荷重が100 kNであれば、約3.3~2.5 kN）とする。これは初ひび割れの発生荷重をできるだけ正確に測定するためである。ひび割れ発生後の荷重の増加量は、最大荷重の約1/20程度でよいが、せん断初ひび割れの発生が予測される荷重段階では、曲げひび割れの場合と同様に、小さい荷重増分で載荷する。すなわち、毎分2~3 kN程度のゆっくりとした速度とし、急速載荷しないように十分注意する。

10.8 実験結果と考察

実験結果と計算結果のうち、作表できるものは表にし、また図面化できるものは図を作成して結果の検討を行う。

(a) 使用材料の力学的性質に関する試験結果

1) 鉄筋の引張強度試験結果 $\phi 3, \phi 6, D10$ および $D13$ 筋の引張強度試験を行った結果を記録する。鉄筋の応力-ひずみ関係の図を描き、ヤング係数、伸び率、降伏点、引張強度などについて考察する。

2) コンクリートの各種強度試験結果 コンクリート円柱供試体の応力-ひずみ関係の図を描き、また圧縮強度 (F_c)、圧縮強度の $1/3$ の応力点におけるセカントモデュラス (E_c)、割裂引張強度、曲げ強度などについて考察する。

(b) 梁試験体に関する実験結果の一覧

梁の曲げ初ひび割れ荷重、せん断初ひび割れ荷重、終局せん断耐力、終局曲げ耐力、破壊形式などの実測結果と計算結果を記録する。一覧表の参考例を、表 10.2 に示す。

表 10.2 実測結果の一覧

試験体名	引張主筋比 p_t [%]	圧縮主筋比 p_c [%]	あばら筋比 p_w [%]	あばら筋の降伏点 σ_{wy} [N/mm^2]	曲げ初ひび割れ時			せん断初ひび割れ荷重 [kN]		終局せん断耐力 [kN]	終局曲げ耐力時			破壊形式
					荷重 [kN]	モーメント [kN-m]	曲率 $\times 10^4$ /mm	曲げせん断ひび割れ	せん断ひび割れ		荷重 [kN]	モーメント [kN-m]	曲率 $\times 10^4$ /mm	
I	実験値	1.87	0.70	0										
	計算値													
II	実験値	1.87	0.70	0.06										
	計算値													
III	実験値	1.87	0.70	0.20										
	計算値													
IV	実験値	1.87	0.70	0.30										
	計算値													
V	実験値	1.87	0.70	0.57										
	計算値													

(c) 荷重-たわみ関係

縦軸に荷重、横軸にスパン中央部の実測たわみの値をとって、I~Vの試験体について、荷重-たわみ曲線を描く。各試験体の荷重-たわみ曲線の初期勾配、曲げ剛性の変化と、曲げひび割れ、せん断ひび割れとの関係を調べるとともに、あばら筋比とそれらとの関係を調べる。さらに計算から求めた荷重-たわみ曲線を実測値に重ねて

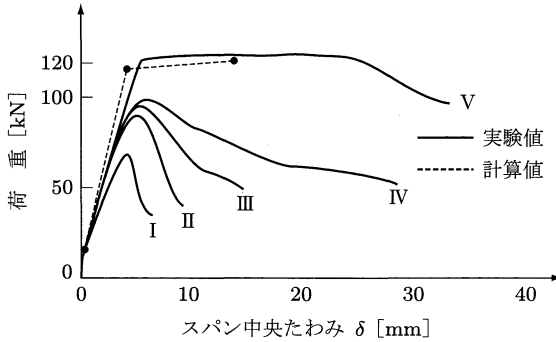


図 10.8 荷重-たわみ曲線の一例

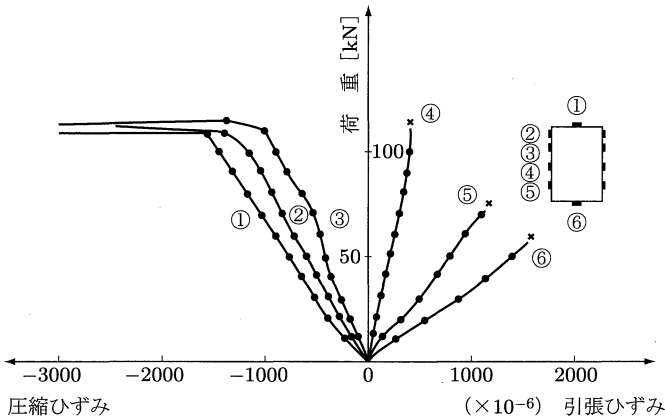


図 10.9 荷重-ひずみ関係の一例

記入し、計算値と実測値を比較検討し、両者の関係を報告する。図 10.8 に荷重-たわみ曲線の一例を示す。

(d) 荷重-ひずみ関係

梁のスパン中央部の側面に貼付したワイヤーストレインゲージによる軸方向ひずみの測定結果を図示する。縦軸に荷重、横軸にひずみの測定値をとり、各荷重段階ごとにひずみをプロットする。図 10.9 に荷重-ひずみ関係の一例を示す。荷重の増加とともに、各点のひずみがどのように変化するかを考察する。

(e) 断面のひずみ分布

梁の側面と上下面の軸方向ひずみの分布を各荷重段階ごとに描き、平面保持の仮定が成立するかどうかを検討する。これらの一例を図 10.10 に示す。

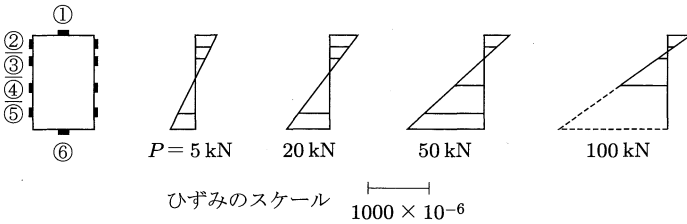


図 10.10 断面のひずみ分布の一例

(f) 曲げモーメント-曲率関係

曲げで破壊する梁試験体Vについて、純曲げスパン内の曲率をひずみの実測値を用いて求め、曲げモーメント-曲率関係の図を描く。たわみで梁の変形を表示する代わりに、曲げで破壊する梁については断面の曲率で論じることが多いため、曲げモーメント-曲率関係の実験値と計算値を比較・考察する。実験結果の一例を図 10.11 に示す。

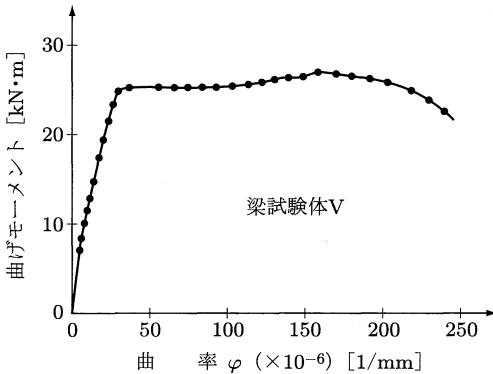


図 10.11 モーメント-曲率関係の一例

(g) 荷重-曲げひび割れ幅関係

曲げで破壊する梁試験体Vについて、引張主筋位置のコンクリートの曲げひび割れ間隔の実測値および計算値と主筋ひずみとの関係について考察する。今回の梁Vは引張主筋比が低く、引張主筋が降伏すると、ひび割れ幅が急増するため、それらの関係をよく考察する。

(h) ひび割れ発生状況および破壊状況

実験中にノートに記録したひび割れの進展状況と梁側面にトレースした結果を整理してひび割れパターンを図示する。実験終了後の梁は完全に壊れ、ひび割れが無数に入ってしまうため、降伏荷重前後のひび割れパターンと実験終了後に記録した破壊後

のひび割れパターンを区別して図示した方が好ましい。とくにせん断で破壊した梁については、あばら筋比が異なるとせん断破壊の破壊形式と破壊に至る状況が大きく異なるので、各あばら筋ごとにこれらの点を比較・考察する。図10.12に実験終了後のひび割れパターンの例を示す。

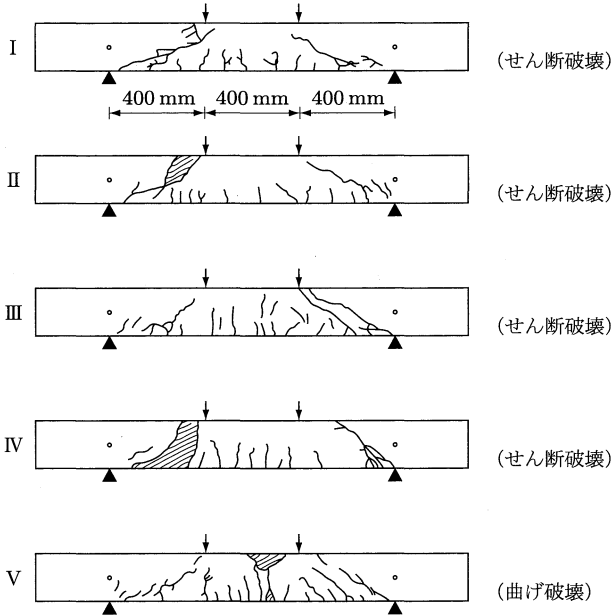


図 10.12 梁のひび割れパターンの一例

(i) 剛性変化

この節の(c)項で図示した荷重-たわみ関係、あるいは(f)項で求めた曲げモーメント-曲率関係を参考にして、曲げ剛性の変化とせん断ひび割れの発生による剛性の変化を調べ、考察する。ここでいう剛性とは荷重-たわみ曲線、あるいは曲げモーメント-曲率関係における曲線の勾配のことである。一般に、曲げ初ひび割れが梁に発生すると、曲線はやや折れ曲がり、さらに載荷してせん断ひび割れが発生すると剛性がさらに低下する。梁の引張主筋が降伏すると、梁の剛性は急激に低下するので、これらの点について考察する。

10.9 参考資料

(1) 曲げ耐力の算定式

(a) 曲げひび割れ発生モーメント

梁の引張縁の応力がコンクリートの引張強度(または、曲げ強度)に達したとき、曲げひび割れが発生する。以下の計算に使用する記号を次に示しておく(図 10.13 参照)。

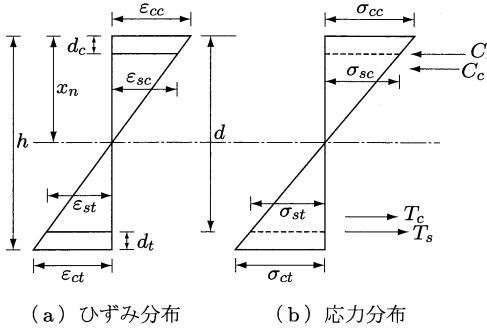


図 10.13 曲げひび割れ発生時のひずみ分布と応力分布(三角形分布)

E_c : コンクリートのヤング係数, E_s : 主筋のヤング係数, a_c : 圧縮主筋の断面積, a_t : 引張主筋の断面積, σ_{ct} : コンクリートの引張強度, ϕ : 曲率, $\varepsilon_{ct} = \sigma_{ct}/E_c$, $n = E_s/E_c$.

ただし、主筋によるコンクリートの断面欠損は無視する。

実験によれば、コンクリートの曲げ強度(σ_b)は引張強度(σ_{ct})の1.5倍程度であるため、曲げひび割れ発生モーメントを計算する場合には、 σ_{ct} の代わりに σ_b を用いることが多い。

平面保持の仮定から

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{ct} \cdot \frac{x_n}{h - x_n}, \quad \sigma_{cc} = \sigma_{ct} \cdot \frac{x_n}{h - x_n} \quad (10.2)$$

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{ct} \cdot \frac{x_n - d_c}{h - x_n}, \quad \sigma_{sc} = \sigma_{ct} n \cdot \frac{x_n - d_c}{h - x_n} \quad (10.3)$$

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{ct} \cdot \frac{h - d_t - x_n}{h - x_n}, \quad \sigma_{st} = \sigma_{ct} n \cdot \frac{h - d_t - x_n}{h - x_n} \quad (10.4)$$

コンクリートの圧縮合力 $C_c = 0.5x_n b \sigma_{cc} = 0.5x_n^2 b \sigma_{cc} / (h - x_n)$

鉄筋の圧縮力 $C_s = \sigma_{sc} a_c = n(x_n - d_c) a_c \sigma_{ct} / (h - x_n)$

コンクリートの引張合力 $T_c = 0.5(h - x_n) b \sigma_{ct}$

鉄筋の引張力 $T_s = \sigma_{st} a_t = n(h - d_t - x_n) a_t \sigma_{ct} / (h - x_n)$

釣合条件、すなわち圧縮合力=引張合力より

$$C_c + C_s = T_c + T_s \quad (10.5)$$

各合力を式 (10.5) に代入し, x_n について整理すると,

$$(2bh + 2a_c n + 2a_t n) \cdot x_n - \{bh^2 + 2d_c a_c n + 2(h - d_t) a_t n\} = 0 \quad (10.6)$$

$$x_n = \frac{bh^2 + 2d_c a_c n + 2(h - d_t) a_t n}{2(bh + a_c n + a_t n)} \quad (10.7)$$

曲げひび割れ発生モーメント M_c は, 中立軸に関する各合力による曲げモーメントの和として求めると

$$\begin{aligned} M_c &= \frac{2}{3} x_n C_c + (x_n - d_c) C_s + \frac{2}{3} (h - x_n) T_c + (h - d_t - x_n) T_s \\ &= \frac{\sigma_{ct} \cdot x_n}{h - x_n} \left\{ \frac{1}{3} b x_n^2 + n a_c \frac{(x_n - d_c)^2}{x_n} \right. \\ &\quad \left. + n a_t \cdot \frac{(h - d_t - x_n)^2}{x_n} + \frac{1}{3} \cdot \frac{b(h - x_n)^3}{x_n} \right\} \end{aligned} \quad (10.8)$$

また, 曲げひび割れ発生曲率は, 式 (10.1) に各ひずみを代入して,

$$\varphi = \frac{1}{\rho_c} = \frac{(\varepsilon_{ct} + \varepsilon_{cc})}{h} \quad (10.9)$$

(b) 降伏曲げモーメント

RC 梁の降伏曲げモーメントは, 引張主筋が降伏点に達したときの曲げモーメントである. したがって, 上記 (a) の曲げひび割れ発生モーメントと同様, 断面の釣合条件を満足するようにして算定式を導くことができる. ただし, 算定式は, コンクリートの応力分布や圧縮鉄筋のひずみ状態などの仮定によって異なるため, 詳細は RC 構造の教科書などに譲ることとし, ここでは釣合鉄筋比以下の RC 梁の曲げ降伏モーメント (M_y) の略算式を示しておく.

$$M_y = \frac{7}{8} a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (10.10)$$

ここに, σ_y : 引張主筋の降伏強度, d : 梁の有効せい ($= h - d_t$).

(c) 終局曲げモーメント

RC 梁の終局曲げモーメントは, 一般に, 圧縮縁のコンクリートが終局ひずみ (ブレンコンクリートの場合, $\varepsilon_{cc} = 0.003$ 程度) に達したときの曲げモーメントと定義される. 降伏曲げモーメントの場合と同様, 釣合鉄筋比以下の RC 梁に対する終局曲げモーメントの略算式を以下に示す.

$$M_u = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (10.11)$$

(2) たわみの計算方法

たわみ (y), 曲げモーメント (M), 曲げ剛性 (EI), 曲率 (φ), 曲率半径 (ρ), 梁の圧縮縁ひずみ (ε_{cc}) および中立軸せい (x_n) の間には, 次のような関係がある.

$$-\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = \varphi = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{cc}}{x_n} = \frac{\varepsilon_{cc} + \varepsilon_{st}}{d} = \frac{\varepsilon_{cc} + \varepsilon_{ct}}{h} \quad (10.12)$$

鉄筋コンクリート部材では、曲げひび割れ発生以降、 EI の値が変化するため、たわみは容易に計算できない。一般には、耐力算定の際に求まる ε_{cc} と x_n の値から $1/\rho$ を求め、式 (10.12) の関係を使って、たわみ y は次の式を積分することによって求められる。

$$-\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{\rho} \quad (10.13)$$

式 (10.13) を積分する代わりに、モールの定理を利用して、 $1/\rho$ 図を書き、この $1/\rho$ の分布を荷重とみなして、モーメント図を作れば、これがたわみ図になる。以下これらの方法を利用した計算手順を、終局曲げモーメント時のたわみについて示す。

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{M_c l}{3M_u} \\ x_2 &= \frac{M_y l}{3M_u} - x_1 \\ x_3 &= \frac{l}{3} - (x_1 + x_2) \end{aligned}$$

$w_1 \sim w_6$ は、図 10.14 の $1/\rho$ の分布荷重に示す部分の荷重とする。反力 R は、

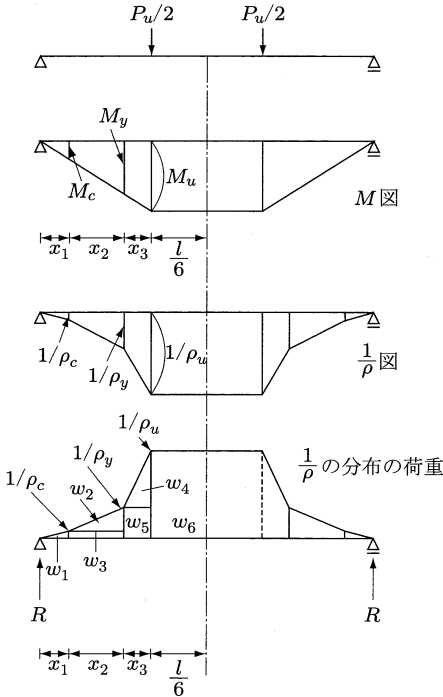
$$\begin{aligned} R &= w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 \\ &= \frac{1}{2} x_1 \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{2} x_2 \left(\frac{1}{\rho_y} - \frac{1}{\rho_c} \right) + x_2 \frac{1}{\rho_c} \\ &\quad + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_u} + \frac{1}{\rho_y} \right) \cdot x_3 + x_3 \frac{1}{\rho_y} + \frac{l}{6} \cdot \frac{1}{\rho_u} \end{aligned} \quad (10.14)$$

梁の中央部のたわみは、この点の曲げモーメントである下式によって求められる。

$$\begin{aligned} y &= R \frac{l}{2} - \frac{1}{2} x_1 \frac{1}{\rho_c} \left(\frac{l}{2} - \frac{2}{3} x_1 \right) \\ &\quad - \frac{1}{2} x_2 \left(\frac{1}{\rho_y} - \frac{1}{\rho_c} \right) \left(\frac{x_2}{3} + x_3 + \frac{l}{6} \right) \\ &\quad - x_2 \frac{1}{\rho_c} \left(\frac{x_2}{2} + x_3 + \frac{l}{6} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_u} - \frac{1}{\rho_y} \right) x_3 \left(\frac{x_3}{3} + \frac{l}{6} \right) \\ &\quad - x_3 \frac{1}{\rho_y} \left(\frac{x_3}{2} + \frac{l}{6} \right) - \frac{l}{6} \cdot \frac{1}{\rho_u} \cdot \frac{l}{12} \end{aligned} \quad (10.15)$$

(3) セン断耐力の算定式

せん断破壊については、メカニズムが不明なため、一般化された耐力の算定式が見出されていない。参考として、RC 規準式のもとになった荒川らの実験式を示す。以下に示す式の記号は次のとおりである。



曲げ初ひび割れ時の曲げモーメント M_c
 曲げ初ひび割れ時の曲率 $1/\rho_c$
 引張主筋降伏時の曲げモーメント M_y
 引張主筋降伏時の曲率 $1/\rho_y$
 終局時の曲げモーメント M_u
 終局時の曲率 $1/\rho_u$

図 10.14 たわみの計算方法

Q_c : せん断初ひび割れ発生耐力 [N], Q_u : 終局せん断耐力 [N], b : 梁せい [mm],
 d : 梁の有効せい [mm], F_c : コンクリートの圧縮強度 [N/mm²], p_t : 引張主筋比 [%],
 $M/(Q \cdot d) = d/a$ に等しい, $j = 0.875d$, k_p, k_u, k_c : 引張主筋比と梁の寸法で決まる
 係数 (図 10.15 (a) と (b) 参照), p_w : あばら筋比, w_{sy} : あばら筋の降伏点 [N/mm²].

(a) せん断初ひび割れ発生時のせん断耐力式

$\frac{M}{Qd} < 3 \left(\frac{a}{d} < 3 \right)$ の場合 (実験式) :

$$Q_c = bjk_c(49 + F_c) \times \frac{0.17}{(a/d) + 3.4} \tag{10.16}$$

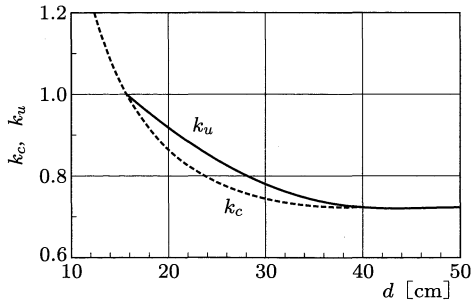
$\frac{M}{Qd} \geq 3 \left(\frac{a}{d} \geq 3 \right)$ の場合 (実験下限式) :

$$Q_c = bjk_c(49 + F_c) \times 0.014 \tag{10.17}$$

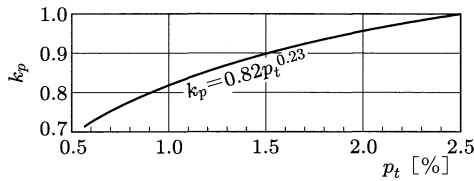
ただし, $d = 17 \text{ cm}$ では $k_c = 0.92$.

(b) 終局せん断耐力式

$\frac{M}{Qd} < 3 \left(\frac{a}{d} < 3 \right)$ の場合 (実験式) :



(a) k_c, k_u の値



(b) k_p の値

図 10.15 k_c, k_u および k_p の値

$$Q_u = bj \left\{ k_u k_p (17.6 + F_c) \times \frac{0.115}{(a/d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot w \sigma_y} \right\} \quad (10.18)$$

$\frac{M}{Qd} \geq 3$ ($\frac{a}{d} \geq 3$) の場合 (実験下限式) :

$$Q_u = bj \{ k_u k_p (17.6 + F_c) \times 0.0295 + 0.85 \sqrt{p_w \cdot w \sigma_y} \} \quad (10.19)$$

ただし, $d = 17 \text{ cm}$ では $k_u = 0.97, k_p = 0.82 p_t^{0.23}$.

2点集中載荷単純梁では, $P_c = 2Q_c, P_u = 2Q_u$ となる.

演習問題

1. 曲げ材における平面保持の仮定について説明せよ.
2. RC 梁の曲げ破壊には, 2つの破壊形式があるが, そのおのおのについて説明せよ.
3. RC 梁のせん断破壊形式について説明せよ.
4. RC 梁におけるあばら筋の役割について説明せよ.
5. RC 梁の曲げ・せん断実験におけるひび割れの発生および伸展の状況について説明せよ.