

コンクリート実験

1. 目的

- (1) 「コンクリート工学」、および「コンクリート構造」の講義で学んだことを実験によって体験し、より深い知識を得る。
- (2) コンクリートの物性を知るために用いられている種々の試験装置の原理、操作法を学び、得られた結果について正確な判断を下すことを習得する。
- (3) 実験より得られた結果をまとめ、レポートを作成する方法を学ぶ。
- (4) セメント系材料を主材料として、所定の性能を有する中で最も軽いミニカヌーの製作を競う。本競技を通じ、ミニカヌーの形状を工夫し、使用した材料の特長を活かすことにより、独自性および創造性の向上を試みる。

2. 実験項目

実験は以下の 5 項目に分け、実施する。ただし、実験項目 について、カヌー作製は「 曲げ試験用 RC はりの作製」と同じ回に、また、カヌー型枠の作製と競技はそれぞれ 1 回ずつ実施日を設けることにする。

配合設計

コンクリートの破壊、非破壊試験

曲げ試験用 RC はりの作製

RC はりの曲げ試験

ミニカヌーコンペティション（カヌー型枠作製、カヌー作製、競技）

3. 実験の準備

実験当日に必要な材料等は、実験を行う週の水曜日の午後に、地下実験室にて各班ごとで準備すること。ただし、準備した材料は他の作業の邪魔にならない場所に静置すること。ここで、準備の必要な実験は、項目 、 である。

なお、これらの準備作業を開始する前に、必ず各インストラクターの許可を受けること（使用手順を知らないと非常に危険な器具もある）。また、事前の準備作業を怠った場合には、実験を実施することができないものとする。

4. 注意事項

(1) 教科書

新土木実験指導書 [コンクリート編] （村田二郎編、技報堂版）

以下の本についても、参考書として適宜用いることが望ましい。

- ・コンクリート材料 （大即信明、宮里心一著、朝倉書店）
- ・土木材料実験指導書 （土木学会編、平成 15 年版）
- ・新建設材料実験 （岡田清編、（社）日本材料学会）
- ・土木材料 （長滝・村田・菊川共著、共立出版）
- ・大学土木 鉄筋コンクリート工学 （町田・関・丸山・檜貝共著、オーム社）
- ・土木学会 コンクリート標準示方書 （構造性能照査編、施工編、2002 年制定版）
- ・コンクリート構造の基礎 （二羽淳一郎著、数理工学社）

(2) 試問について

毎週、実験を開始する前に集合場所において、前試問を行う。前試問では、返答の際に予習ノート（地盤工学実験とは別のノートを用意すること）および計算機のみを使用することを許可する。このとき、実験内容に関する予習が十分でないと判断された場合には、実験を開始することができない。また、前試問時には、必ず「コンクリート工学」、および「コンクリート構造」の講義で使用する教材も持参すること。

(3) レポート提出

レポートは、A 4 用紙を用いて次頁の「レポートの書き方」にしたがって作成し、実験を行った翌週木曜日の 17:00 までに、三木助手(緑が丘 1 号館 512 号室)まで提出すること。

(4) 評価

出席およびレポート提出の確認は厳しく行い、1回でも欠席した場合、あるいはレポート未定出の場合は不可とする（単位は与えない）。採点は、前試問、実験への取り組み態度、後試問、およびレポート内容を総合的な評価に基づくものとする。ただし、出席とレポート提出は単位取得に必須である。配点は以下のとおり。

実験項目 ～ ：試問 + 取り組み態度：5点、レポート：15点

実験項目 ：試問 + 取り組み態度：5点、競技：10点、プレゼン：10点、強度：5点

(5) 質問の受付

実験・レポートについての質問は、大即、二羽、西田、三木にて順次受け付ける。

コンクリート実験 質問・連絡先

大即研助手 西田 nishida@ide.titech.ac.jp

大岡山南 6 号館 216 号室 03-3734-2594

二羽研助手 三木 mikitomo@cv.titech.ac.jp

緑が丘 1 号館 512 号室 03-5734-2584

「レポートの書き方」

- ・レポートは、A4用紙に、手書きあるいはワープロ（推奨）を用いて作成すること。
特に、手書きにて作成する場合は、読み手の立場になって丁寧に書くこと。
- ・レポートには必ず表紙をつけること。この際、表紙のレイアウトは下の例を参考にする。
- ・内容の構成は、例えば次のようにすると良い。

1．目的

2．実験手順（特に前試問で問われたことは、必ず復習すること）

3．結果

4．考察

5．感想

このとき、「2．実験手順」については、教科書や配布資料の丸写しにならないように注意すること。また「3．実験結果」では、生データ、図表、グラフは他の人が作ったものをコピーしたものを使うのではなく、面倒がらずに自分で書くこと。「5．感想」は、来年度以降の本実験の参考にするので、必ず記述してください。

表紙例
A4 縦

コンクリート実験レポート

配合設計

実験日：2000年4月28日（金）
インストラクター：○○○○

1 班 98-2657-5

なまえ

注意事項

以下の項目は、表紙に
必ず記入すること

← 実験項目

← 実験実施日

← 実験指導担当者名

← 班、学籍番号

← 名前

配合設計

1. 目的

実験で鉄筋コンクリートはりを作製する際に必要となる、セメント水比（C/W）～圧縮強度（ f_c' ）の関係式を求めることを目的とする。ここでは、セメント水比の異なる3種類のコンクリートの配合設計を行い、設計した配合に基づいて実際にコンクリートを練り混ぜ、各種供試体を作製する。作製した供試体は、次の破壊・非破壊試験に用いる。

2. 材料物性および配合条件

使用材料の物性（細骨材、粗骨材についての詳細は別紙参照）

- (1) セメント：早強ポルトランドセメント 密度 3.14 g/cm^3
- (2) 細骨材：表乾密度 2.65 g/cm^3 、F.M. 2.58、吸水率 1.55 %、単位容積質量 1.76 kg/l 、実績率 67.2 %、絶乾密度 2.61 g/cm^3
- (3) 粗骨材：表乾密度 2.63 g/cm^3 、F.M. 6.94、吸水率 0.67 %、単位容積質量 1.59 kg/l 、実績率 60.7 %、絶乾密度 2.61 g/cm^3
- (4) 混和剤：フローリック S（AE 減水剤）
密度 1.1 g/cm^3 、セメント 1 kg に対して 2.2 g（原液）を使用
（実験では、質量 5 倍希釈でセメント 1 kg に対して 11.0 g を使用）
フローリック AE 100（AE 剤）
密度 1.0 g/cm^3 、セメント 1 kg に対して 0.07 g（原液）を使用
（実験では、質量 100 倍希釈でセメント 1 kg に対して 7.0 g を使用）

配合条件

- (1) セメント水比： 1.5, 2.0, 2.5
- (2) スランプ： $8 \pm 2.5 \text{ (cm)}$
- (3) 空気量： $4 \pm 1 \text{ (%)}$
- (4) 単位水量： まず、セメント水比 = 2.0 の場合の設計を行い、その際に算出された値を他のセメント水比の場合においても用いる。

3. 実験方法

- (1) 2. および より示方配合を決定する。
- (2) 細骨材および粗骨材の表面水率を求め、示方配合から現場配合を計算する。
- (3) 型枠を準備し、各材料を計量する。
- (4) 練混ぜ（事前に捨て練り 15 l を行う） $\times 3$ ケース¹
- (5) スランプ、空気量を測定し、配合条件を満足すれば²、コンクリートを型枠に打込む。

1：作製供試体は各ケースにつき、
 $\phi 10 \times 20 \text{ (cm)} \times 3$ 本
 $\phi 15 \times 20 \text{ (cm)} \times 2$ 本
である。

2：配合条件を満たさない場合は示方配合を修正し、再度練り混ぜを行う。

コンクリートの破壊・非破壊試験

1. 目 的

前回作製したコンクリート供試体の破壊試験を行うことにより、それらの強度特性および変形特性を理解する。また、コンクリート構造物の維持管理の重要性が叫ばれる中で、コンクリートの非破壊試験法に対する関心も高まってきている。そこで、破壊試験を行う前に非破壊試験を実施し、基本的な非破壊試験の概略とそれらの意味づけを理解する。

2. 実験項目および方法

実験項目

(1) 破壊試験

- (a) 一軸圧縮試験・・・・・・・・・・圧縮強度、弾性係数
- (b) 割裂引張試験・・・・・・・・・・引張強度

(2) 非破壊試験

- (a) 超音波パルス試験・・・・・・・・・・超音波伝播速度、弾性係数
- (b) シュミット・ハンマー試験・・・・・・・・圧縮強度の推定

方 法

(1) 破壊試験

(a) 一軸圧縮試験

実験 で作製した円柱供試体 ($\phi 10 \times 20$ (cm)) の端面を研磨し、圧縮試験時の変形を測定するために、コンプレッソメータを設置する。圧縮試験装置を用いて荷重を加え、そのときの荷重とコンクリートに生じたひずみからコンクリートの弾性係数を求め、さらに最大荷重から一軸圧縮強度を求める。

(b) 割裂引張試験

圧縮試験装置を用いて、実験 で作製した円柱供試体 ($\phi 15 \times 20$ (cm)) に荷重を加え、ひび割れ発生時の荷重から、コンクリートの割裂引張強度を求める。

(2) 非破壊試験

(a) 超音波パルス試験

実験 で作製した円柱供試体 ($\phi 10 \times 20$ (cm)) の超音波伝播速度を測定する。理論式から動弾性係数を算出し、破壊試験により得られる値と比較する。また超音波伝播速度と圧縮強度などとの相関性についても検討する。

(b) シュミット・ハンマー試験

実験 で作製した円柱供試体 ($\phi 10 \times 20$ (cm)) に対して試験を行い、その圧縮強度を推定する。

曲げ試験用 R C はりの作製

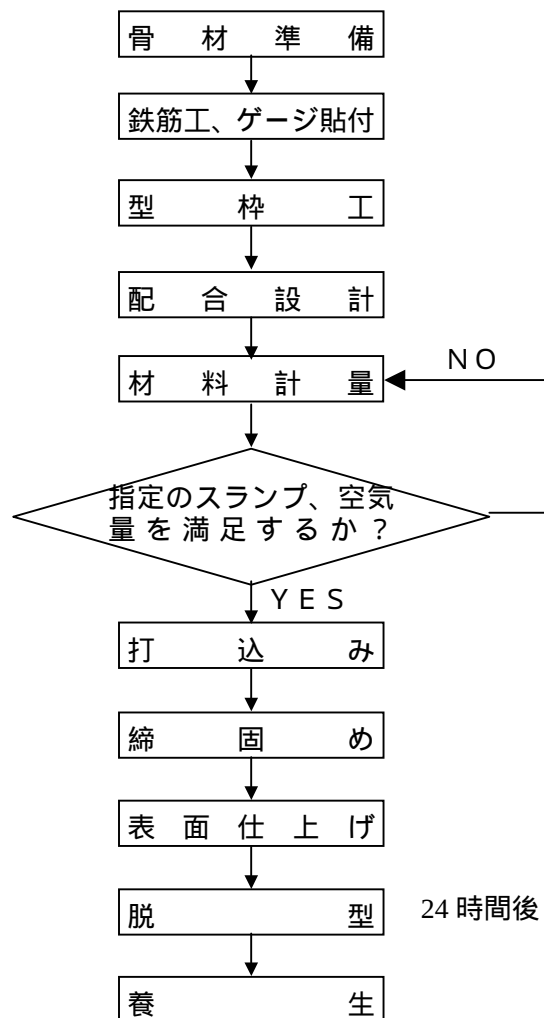
1. 目 的

「配合設計」で学んだことを応用して、与えられた設計基準強度を満足するようなコンクリートの配合設計を行い、鉄筋コンクリート（R C）はりを作製する。R C はりの作製にあたり、コンクリート工学の「施工」分野、つまり鉄筋工、型枠工、配合設計、打込み、締固め、表面仕上げ、および養生などの各作業を実際に行っていく。このことにより、それぞれの作業のなす役割を十分に理解することを主眼とする。

2. 方 法

設計基準強度は、30 (MPa)とし、前回の実験で得られたセメント水比～圧縮強度関係を用いて、配合設計を行う。その際、スランブ、空気量については実験 と同一とする。なお、設計基準強度の割り増し係数は $\alpha = 1.1$ とする。

作業の流れは以下のとおり。



RC はりの曲げ試験

1. 目的

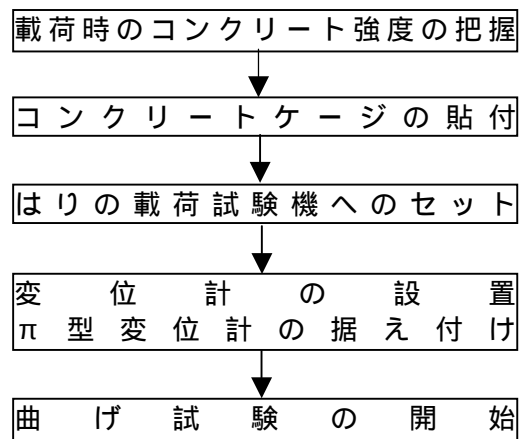
前回に作製した RC はりの曲げ試験を行い、実際の RC はりの曲げ破壊過程を観察することにより、講義で学んだ RC はりの力学性状についての理解を深める。すなわち、曲げひび割れの発生、曲げひび割れ幅の拡大、ひび割れの進展、曲げ剛性の変化、主鉄筋の降伏、さらには破壊に至るプロセスを観察し、理論的な検討を加え、実現象との対応を考察する。

なお、理論計算により、

- (1) 曲げひび割れ発生時のモーメントおよび荷重
- (2) 鉄筋降伏時のモーメントおよび荷重
- (3) 曲げ破壊時のモーメントおよび荷重
- (4) 荷重とたわみの関係

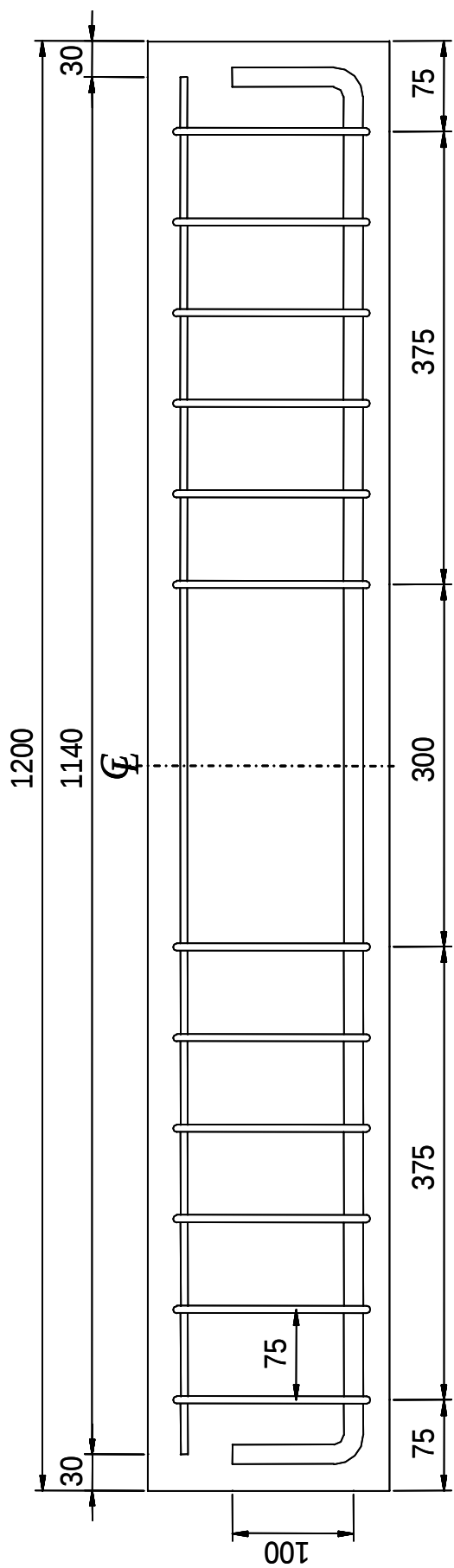
をあらかじめ計算しておくこと。

2. 方法

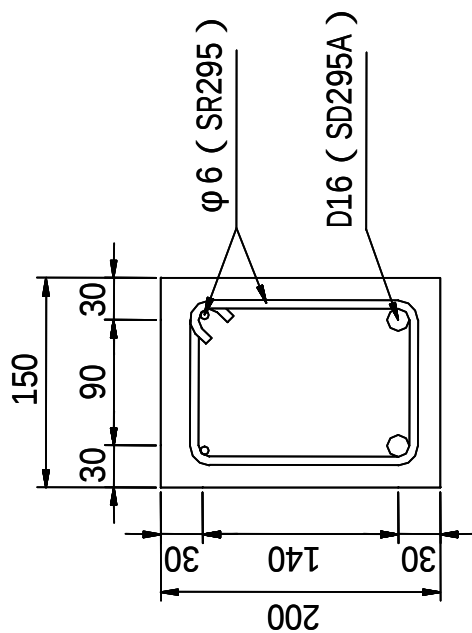


【参考】 使用する鉄筋の物理的性質は下表の通りである。

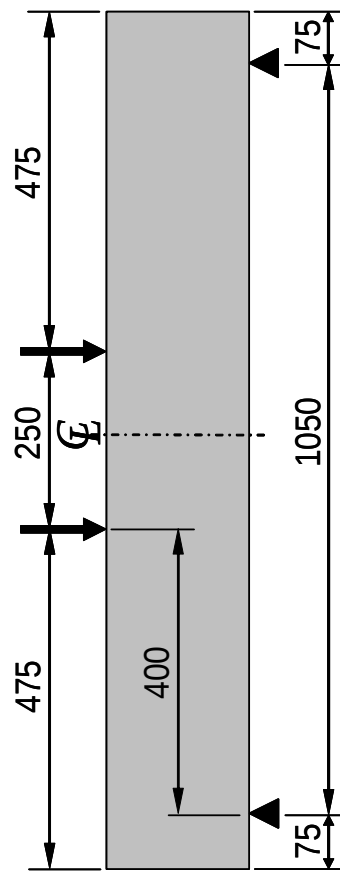
	主鉄筋 D16 (SD295A)	組立鉄筋 φ 6 (SR295)	スターラップ φ 6 (SR295)
断面積 (mm ²)	198.6	28.3	28.3
降伏強度 (N/mm ²)	358	343	343
弾性係数 (kN/mm ²)	200	200	200



側面図



断面図



載荷位置

単位:mm

曲げ試験用RCはりの配筋図

鉄筋コンクリート(RC)はりの曲げ挙動

1. 曲げを受ける RC はりの力学挙動

RC はりに、曲げモーメント M が作用している場合を考える。はりのように十分に細長い部材では、曲げによる変形に対して平面保持の仮定により、近似することができ、したがって軸方向のひずみは断面内で直線分布する。軸方向の鉄筋比 $p = A_s / (b d)$ が釣合鉄筋比 p_b よりも小さい場合、断面の応力状態は作用する曲げモーメントの大きさに応じて図 - 1 のように変化する。

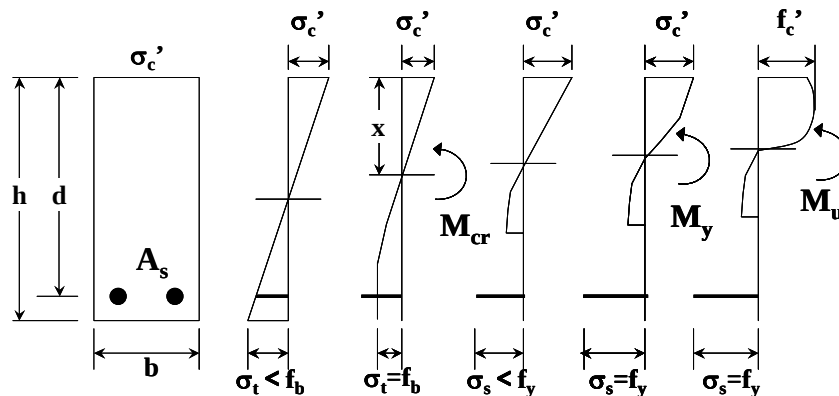


図 - 1 断面の応力状態の変化

引張縁のコンクリート応力（曲げ応力） σ_t がコンクリートの曲げ強度 f_b よりも小さく、鉄筋とコンクリートが弾性的に挙動する段階（曲げひび割れ発生前）。

引張縁応力 σ_t がコンクリートの曲げ強度 f_b に達し、曲げひび割れが発生する段階。このときの曲げモーメントを曲げひび割れ発生モーメント M_{cr} という。

曲げひび割れ発生後、コンクリートの引張抵抗がほとんど消失し、引張力の大部分が鉄筋で受け持たれる段階。ただし、鉄筋の応力は降伏強度 f_y 以下で弾性範囲内であり、圧縮側のコンクリートも概ね弾性範囲にある。

鉄筋の引張応力が降伏強度 f_y に達した段階。このときの曲げモーメントを降伏曲げモーメント M_y という。圧縮側のコンクリートもほぼ弾性範囲にあると考えて良い。

鉄筋の引張応力は f_y のまま、塑性ひずみが著しく増加し、中立軸が断面圧縮縁に向かって上昇する段階。これに伴い、圧縮縁のコンクリートひずみはその終局ひずみに ϵ'_{cu} に達し、最終的に、最大曲げモーメント M_u を示す。

2. 曲げひび割れ発生モーメント M_{cr}

ひび割れ発生前の状態では、コンクリートは圧縮および引張の両方に対して同じ弾性係数 E_c を持つ弾性体であると仮定してよい。そして、コンクリートの引張縁応力 σ_t が、コンクリートの曲げ強度 f_b に達したときに曲げひび割れが発生すると仮定してよい。図 - 2 にはり断面を示す。

コンクリートの曲げ強度 f_b と引張強度 f_t は、圧縮強度と以下の関係があるとされている。

$$f_b = 0.46 f'_c{}^{2/3} \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad f_t = 0.27 f'_c{}^{2/3} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

鉄筋の影響を無視すると、引張縁応力 σ_t は、

$$\sigma = \frac{M}{I} y_t$$

また、中立軸の位置 y_c と断面 2 次モーメント I は、

$$y_t = y_c = \frac{h}{2}, \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

したがって、 $\sigma_t = f_b$ 、 $M = M_{cr}$ とすれば、

$$M_{cr} = \frac{f_b I}{h/2}$$

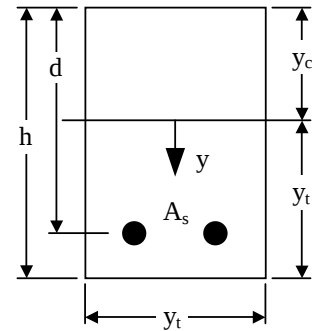


図 - 2 はり断面

3. 降伏曲げモーメント M_y

鉄筋コンクリートはり、一般に引張鉄筋が降伏した後、圧縮縁コンクリートの圧壊により破壊に至るように設計される（曲げ引張破壊）。降伏曲げモーメント M_y は以下の仮定により求めることができる。

コンクリートの引張抵抗を無視する。

圧縮側のコンクリートは弾性体である。

図-3に鉄筋降伏時の応力とひずみの分布を示す。コンクリートの圧縮合力は、

$$C' = \frac{1}{2} b x \sigma'_c$$

鉄筋の引張合力は、

$$T_s = A_s f_y$$

軸方向力の釣合条件 $C' - T_s = 0$ より、

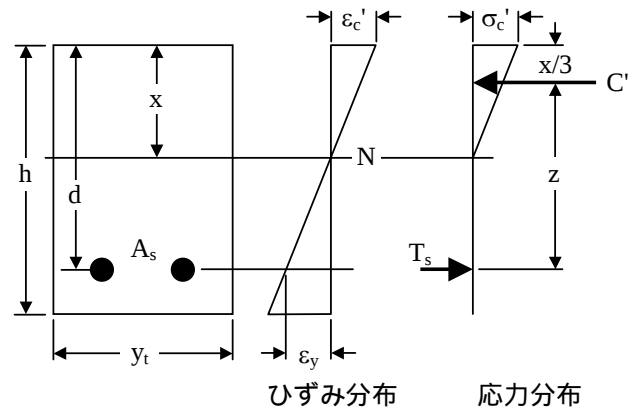


図 - 3 鉄筋降伏時のひずみと応力分布

$$\frac{1}{2} b x \sigma'_c = \frac{1}{2} b x E_c \varepsilon'_c = A_s f_y = A_s E_s \varepsilon_y, \quad \text{また} \quad \varepsilon_y = \frac{d-x}{x} \varepsilon'_c$$

よって、

$$x = \frac{n A_s}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 b d}{n A_s}} \right) \quad \text{ただし、} \quad n = E_s / E_c \quad (\text{弾性係数比}) \text{である。}$$

したがって、降伏曲げモーメント M_y は、

$$M_y = T_s z = A_s f_y \left(d - \frac{x}{3} \right)$$

4. 終局曲げモーメント M_u

鉄筋コンクリートはり断面の終局曲げモーメント M_u の計算は、以下のような仮定に基づいて行ってよい。

平面保持。

コンクリートの引張抵抗は無視。

圧縮縁のコンクリートひずみが終局ひずみ ε'_{cu} に達したときを破壊（＝終局）とする。

コンクリートの応力 - ひずみ関係には適当なものを使用する。

鉄筋は完全弾塑性体とする。

図 - 4 に破壊時の応力とひずみの分布を示す。

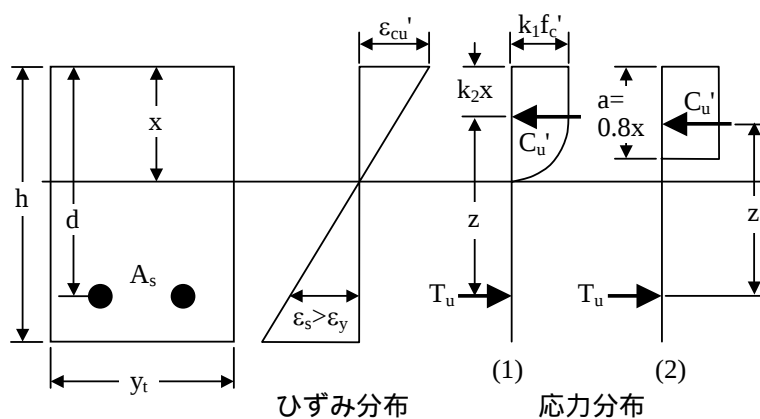


図 - 4 終局状態のひずみと応力分布

コンクリートの応力 - ひずみ関係として、例えば、土木学会コンクリート標準示方書には以下の式が与えられている（図 - 5）。

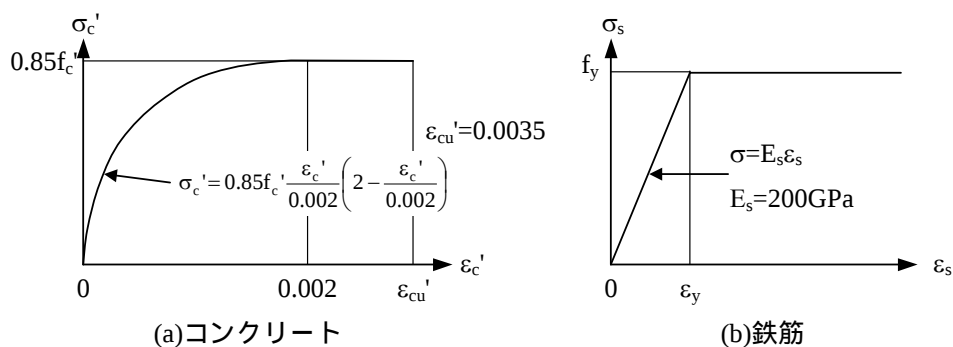


図 - 5 コンクリートと鉄筋の応力 - ひずみ曲線

$0 \leq \varepsilon'_c \leq 0.002$ のとき

$$\sigma'_c = 0.85f'_c \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \right)$$

$0.002 < \varepsilon'_c \leq \varepsilon'_{cu} = 0.0035$ のとき

$$\sigma'_c = 0.85f'_c$$

鉄筋は完全弾塑性体と仮定することから、

$0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$ のとき $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$

$\varepsilon_y < \varepsilon_s$ のとき $\sigma_s = f_y$

コンクリートの曲げ圧縮合力 C'_u を求め、引張合力 T_u との釣合から、破壊時の中立軸位置 x が求まる。さらに中立軸周りの断面一次モーメントを求めると、圧縮合力の作用位置が定まり、終局曲げモーメント M_u が計算できる。

以上は、圧縮合力の評価に、コンクリートの応力 - ひずみ関係を用いる厳密な方法である。これに代わる簡易な方法として、圧縮合力の評価に「等価応力ブロック」を用いる方法がある。

これは図 - 4 の(2)に示すものであり、圧縮側のコンクリートの応力分布を長方形分布に置き換えるものである。圧縮合力は、

$$C'_u = 0.85f'_c \times 0.8x \times b = 0.68f'_c b x$$

となり、引張合力が $T_u = A_s f_y$ であることから、 x が求まり、圧縮合力の作用位置も簡易に求められるので、終局曲げモーメント M_u も簡易に計算できるのである。

5. たわみの計算

図 - 6 に示す載荷条件での RC はりのスパン中央のたわみ δ は以下のように与えられる。

$$\delta = \frac{\left(\frac{L^2}{16} - \frac{a^2}{12} \right) P a}{E_c I_e}$$

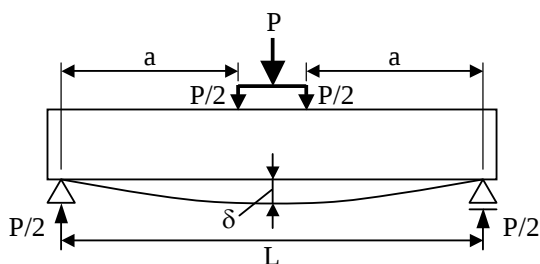


図 - 6 RC はりの載荷条件

曲げ変形を計算する場合も、応力計算時の仮定、すなわち平面保持の仮定を行ってよい。ただし、断面の応力や耐荷力を算定する場合は、その断面のみの値が必要であったのに対して、RC はりの曲げ変形を計算する場合は、ひび割れ発生断面とひび割れが発生していない断面の平均的な剛性が必要となる。平均的な断面剛性 $E_c I_e$ については、様々な提案がなされているが、ここにはその代表例である。Branson の等価剛性を示す。

$$I_e = \left[\left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right\} I_{cr} \right] \leq I_g$$

ただし、 M_{cr} ：断面のひび割れ発生モーメント

M_{max} ：たわみ計算時の曲げモーメントの最大値

$I_g = -\frac{b}{3} (y_t^3 + y_c^3) + n A_s (d - y_c)^2$ ：全断面有効とした場合の断面 2 次モーメント

$I_{cr} = \frac{b x^3}{3} + n A_s (d - x)^2$ ：ひび割れ発生後の断面 2 次モーメント

以上

- ミニカヌーの作製

1. 目 的

セメント系材料を主材料としたミニカヌー（以下カヌーとする）を製作する。使用するセメント系材料は、汎用のものから最新のものまで、自由に選定してよい。本競技を通じ、使用材料の特性を把握することに加え、カヌーの形状を工夫し、使用した材料の特長を活かすことにより、受講生の独自性および創造性の向上を試みる。

2. カヌー作製に関する規定

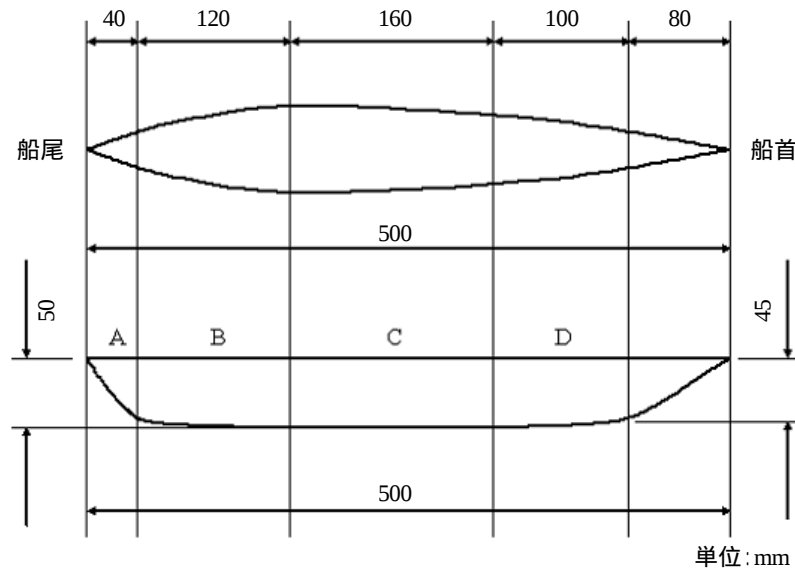
カヌーは、以下の規定に従い、製作する。

1. セメント系材料を主材料として使用すること。また、各班で練り混ぜた材料を、型枠などを使用して整形し、カヌーを製作する。
2. カヌーの長さは $50\text{ cm} \pm 5\text{ cm}$ とし、幅は 25 cm 以下とする。深さには制限を設けない。
3. 使用材料は以下の条件に従い選定する。

主材料：セメント系材料（コンクリート、モルタル、あるいはセメントペースト）とする。

補強材：主材料の補強として機能するものであって、それがカヌーの主構造となってはならない。補強材の主材料に対する割合は、カヌー全体の質量に対し 10 パーセント以下とする。補強材の形状は、棒材、短繊維、またはネット状（シート状のものは不可）等とする。また、補強材は、主材料で完全に被覆する。補強材によりカヌーを被覆してはならない。ただし、補強目的でない防水材等の使用は可能とする。

4. 各班のコンセプトに基づく名前をつけること。また、カヌー本体に塗装などを施してもよい。



カヌー設計図

- ミニカヌーコンペティション

1. 目的

セメント系材料を主材料としたミニカヌー（以下カヌーとする）のうち、軽量で所定の性能を有するものを競う。また、製作コンセプトに基づくプレゼンテーションを行い、使用材料の特長や製作に際して工夫した点などを発表する。

2. 評価方法

以下の3部門に対してそれぞれ評価する。

性能・施工部門

上記の規定のもと、可能な限り軽量で、より重い載荷質量に耐えうるカヌーを製作した班を優勝とする。採点は以下の方法で行う。

$$\text{得点} = \frac{\text{載荷質量}}{\text{カヌーの質量}} \times 100$$

直径 10 cm の筒状の容器（載荷面は直径 10 cm の円形）に重りを入れ、順次載荷していく。

最初に浸水したときの質量を載荷質量とする。

最終的な得点は 1 位 10 点、2 位 8 点、3 位 6 点、4 位 5 点、5 位 4 点とする。

設計部門

ミニカヌーの製作コンセプトに関するプレゼンテーションを行う。担当教員、TA、および各班（自分の範囲外を対象とする）が採点し（教員 2 点、TA、各班それぞれ 1 点）優勝を決める。

プレゼンでは、各班の製作するカヌーの構造の工夫、材料の工夫、および施工時の工夫をまとめ、発表する。各班、発表時間は 5 分。同時に、その内容を A3 縦（カラー印刷を推奨）のパネルにまとめる。プレゼン、およびパネルでは、以下の項目について、写真や図などを用いてわかりやすく説明すること。

- ・カヌーの構造の工夫
船体の形状、設計図、補強材、浮力計算の結果等
- ・使用材料の工夫
船体の主材料、配合表、補強材、防水材について
- ・施工時の工夫

型枠、補強材の配置、コンクリート打設や脱型の様子

最終的な得点は 1 位 10 点、2 位 8 点、3 位 6 点、4 位 5 点、5 位 4 点とする。

材料強度部門

φ5×10 cm の円柱供試体を作成し、圧縮強度を測定する。最も強度の高い材料と作成したチームを優勝とする。最終的な得点は 1 位 5 点、2 位 4 点、3 位 3 点、4 位 2 点、5 位 1 点とする。