

H型鋼を用いた鉄骨鉄筋コンクリート部材の 曲げ変形性状に関する実験的研究

若林 実・南 宏一・古村 勝寛

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ELASTO-PLASTIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MEMBERS USING AN ENCASED H-SECTION SUBJECTED TO COMBINED BENDING AND AXIAL FORCE

By Minoru WAKABAYASHI, Koichi MINAMI and Katsuhiro KOMURA

Synopsis

A fundamental investigation was planned and made both experimentally and theoretically to obtain information on moment-curvature relationships of composite members under combined bending moment and axial force.

The cross section (21 cm×21 cm) adopted for the test specimens was composed of an encased H-section with nominal reinforcement. The experiments were carried out on four test specimens.

As for the theoretical analysis, the moment-curvature-axial force ($M-\Phi-N$) curves were derived from the geometrical relationships of the member cross section and stress-strain relationships of the materials, steel and concrete.

Thus, $M-\Phi-N$ curves obtained for the composite members studied turned out to be in good agreement with the results.

1. 序

鉄骨鉄筋コンクリート構造の建物が我国に始めて導入された時期は大正時代にまでさかのぼることができるが戦後になって若林、高田をはじめとする鉄骨鉄筋コンクリート部材に関する組織的、系統的な研究¹⁾が行なわれ、その研究成果をもとにして現行の鉄骨鉄筋コンクリート構造の設計規準が確立された。以来、大規模な中高層以上の建物の構造形式として本構造が採用されてきたが、最近とくに注目を集めている超高層建物の低層部における構造形式としても、もっぱら本構造が採用されており、重要な構造法の一つとなっている。

一方、現行の構造設計法はいわゆる許容応力度設計法と称されるもので、部材の剛比に基づく応力計算がその基本になっており、変形の問題についてはほとんど論議されていない。しかしながら、近年塑性設計法の合理性を主張する声が強くなり、日本建築学会から鋼構造塑性設計規準案が提案されたことにもみられるように、現在は塑性設計法への過渡期であると考えられるが、建物の高層化とあいまって耐震性の問題はもとより仕上げ構造の設計の上からも、変形性状、変形能力が重要な要素となってくる。しかしながら本構造の変形性状に関しては、軸力のないはり部材についてはほとんど解明されているのに比して、柱部材の変形性状には不明な点が多く、特に繰返し荷重をうける柱部材の変形性状に関しては数多くの課題が残されている。

本論文ではその基礎的な研究として、単調荷重をうける一定軸力の下における曲げモーメント-曲率関係を実験的に求め、あわせて理論的な解析を試みた結果を報告する。

2. 実 験

2.1 実験計画

本実験では載荷軸力の大きさによって部材の最大耐力, その時の回転角, および塑性域での耐力低下の割合がどのように変化するかを比較検討するために, 次の 4 種類の軸力を選定した。

- (a) 軸力なし……………はり (SRC0N-M)
- (b) 中心圧縮柱耐力²⁾ の 20% の軸力……………最大耐力時に引張側フランジのみが降伏する領域。
(SRC 2 N-M)
- (c) 中心圧縮柱耐力の 40% の軸力……………最大耐力時に圧縮側, 引張側フランジがともに降伏する領域。
(SRC 4 N-M)
- (d) 中心圧縮柱耐力の 60% の軸力……………最大耐力時に圧縮側フランジのみが降伏する領域。
(SRC 6 N-M)

実験に用いた試験体の断面構成はすべて同一で, その形状, 寸法は Fig. 1 に示す。主材鉄骨は H-150×100×6×9 とし, 少量の鉄筋 4-D10 ϕ とともに, コンクリート断面 21 cm×21 cm の中に収めている。試験体のうち中央の 63 cm の区間を試験部分とし, 両端部は剛体とみなせるよう断面を大きくするとともに, この部分でのせん断破壊を防ぐために鉄筋で補強してある。

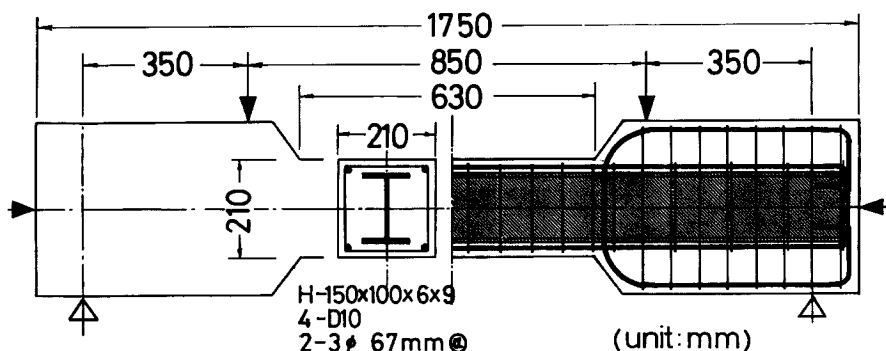


Fig. 1 Test specimen.

2.2 試験体の材料, および製作

セメントは宇部普通ポルトランドセメントを使用し, 砂は 2.5 mm 以下, 砂利は 10.0 mm 以下のもので, いずれも表面乾燥, 内部飽和状態で使用した。配合は全試験体ともに重量比で, セメント:砂:砂利=1:2.27:2.58, 水セメント比は 65% とし, スランプは 21.0~22.7 cm である。型枠はベニヤ合板 ($t=12$ mm) を用いた組立式で, 脱水を防止するためにグリースを, また剥離剤としてモーターオイルを型枠に塗付した。コンクリートの混練は 110 l 可搬傾胴型ミキサーを用いて行ない, 混練後いったん練舟に移して練り直し, 均等化を計った。コンクリートの打設はすべて縦打ちで行ない, 締め固めは“つき棒”によった。打設後はぬれむしろ, およびビニールで覆って養生し, 打設 3 日後に脱型したがその後もぬれむしろ, およびビニールで覆い実験直前まで実験室内で空中養生した。実験時のコンクリート材齢は 28 日~41 日である。

試験体に使用した鉄骨は SS 41 材で, フランジ, およびウェブから引張試験片各 2 個を作製し, 材料試験に供した。一方, コンクリートの標準圧縮供試体を各試験体について 3 個ずつ採取し, 試験体と同様の状態で養生した後, 本実験直後に圧縮試験を行なった。Table 1 はそれらの試験結果の平均値を示したものである。なお, 鉄筋は異形鉄筋の SD 35 材で, 用いた鉄筋と同一の束から無作為に計 10 本の試験片を切り取り引張試験を行なった結果, 平均降伏応力度 r_{σ_y} は 3 676 kg/cm² であった。

Table 1 Mechanical properties of material.

Test Specimen		Yield Point σ_y (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Elongation (%)	Compressive Strength of Concrete Cylinder F_c (kg/cm ²)
SRC 0 N-M	Flange	3046	4604	23.1	215
	Web	3081	4584	22.2	
SRC 2 N-M	Flange	3123	4472	24.6	269
SRC 4 N-M	Web	3128	4337	27.1	295
SRC 6 N-M					275

2.3 載荷装置

載荷装置の概略を Fig. 2, および Photo. 1 に示す。軸力は PC 鋼棒を反力として 100 t 手動式オイルジャッキによって載荷し、軸力の大きさの測定はロードセルによった。一方、漸増曲げモーメントはアムスラー型長柱試験機を用いて与えた。試験体の支重点、および載荷点はすべてピンローラとし、対称に変形するよう考慮した。

2.4 測定

測定装置の概略を Fig. 3, および Photo. 2 に示す。試験体の回転中心にて測定枠を単純支持し、この測定枠に取付けた3個のダイヤルゲージ DG 1, DG 2, DG 3 によって材軸のたわみを測定し、一方、コンクリートの圧縮縁、および引張縁のひずみ度をダイヤルゲージ DG 4, DG 5 (検長 50 cm) によって求めた。また圧縮側、および引張側鉄筋のひずみ度をダイヤルゲージ DG 6, DG 7 (検長 30cm) によって測定するとともに、中央断面のコンクリートの圧縮縁、および引張縁、鉄筋、および鉄骨のフランジとウェブに貼付した検長 15 mm の W.S.G. によってもそれぞれの材軸方向のひずみ度を測定し、参考値として用いた。

さて、ダイヤルゲージ DG 1, DG 2, および DG 3 によって測定された材軸のたわみをそれぞれ δ_1, δ_2 , および δ_3 とし、試験部分のたわみ曲線を円弧の一部と仮定すれば、試験部分の曲率 ϕ は (Fig. 4 参照)

$$\phi = \delta_3 - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \rho (1 - \cos \theta) \div \frac{\rho \theta^2}{2}$$

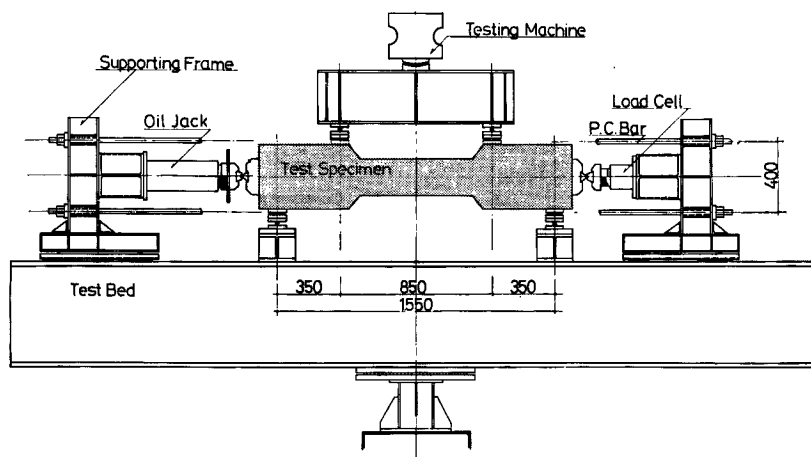


Fig. 2 Experimental apparatus.

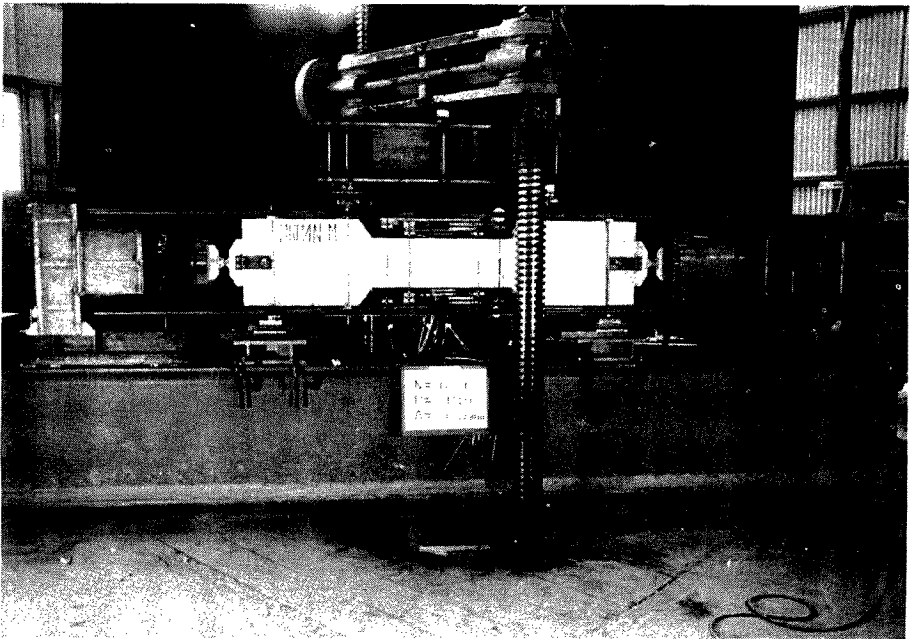


Photo. 1 Experimental set-up.

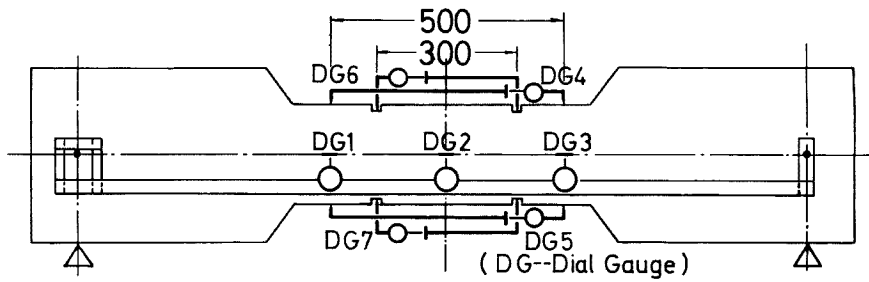


Fig. 3 Measurements.

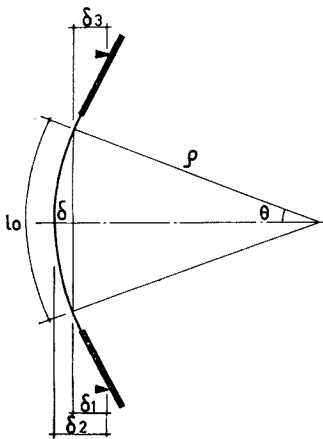


Fig. 4 Curvature.

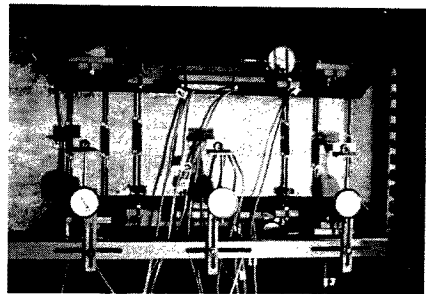


Photo. 2 Measurements.

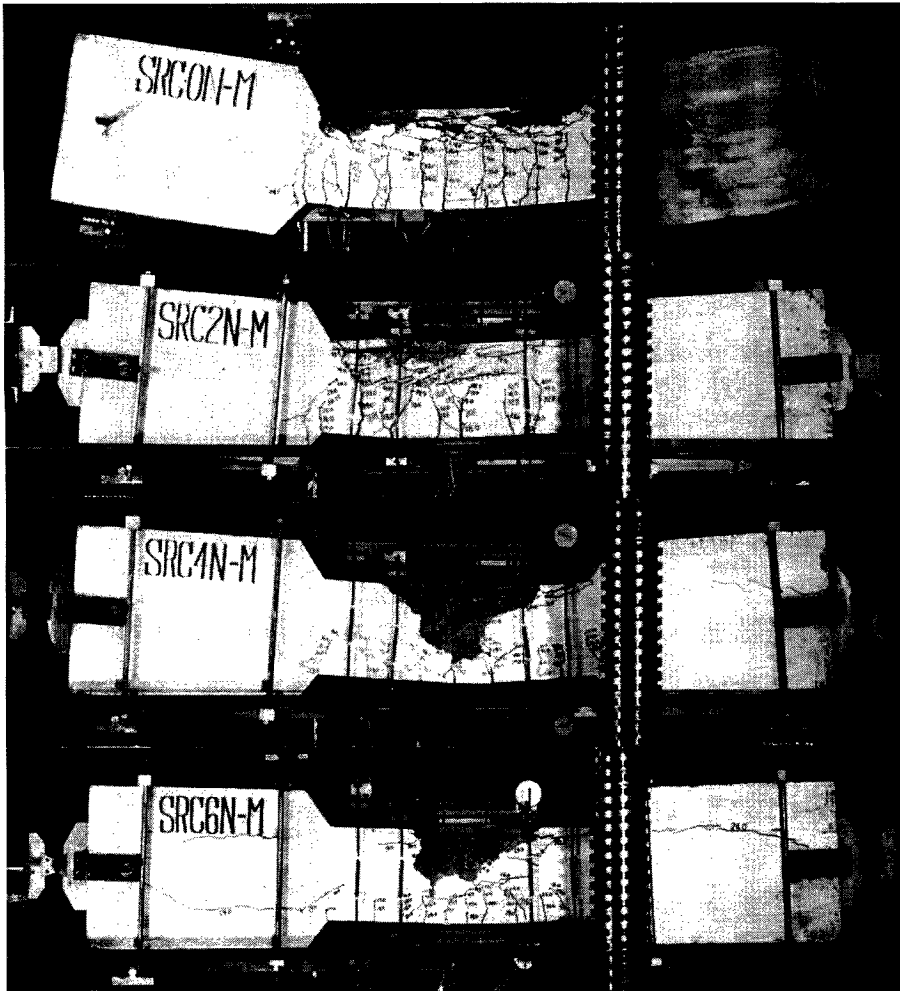


Photo. 3 Test specimens after failure.

と求められ、一方近似的に $\theta = \frac{l_0}{2\rho}$ の関係から曲率 Φ は、たわみ δ の関数として

$$\Phi \equiv \frac{8\delta}{l_0^2}$$

として求められる。ここで、 l_0 は検長であり本実験では 50 cm をとった。

一方ダイヤルゲージ DG 4, および DG 5 によって測定されたコンクリートの圧縮縁, および引張縁のひずみ度を δ_4 , および δ_5 とすれば, 中立軸比 k は一般に次式で与えられる。

$$k = \frac{\delta_4}{\delta_4 + \delta_5}$$

2.5 実験結果

試験体の破壊状況を Photo. 3 に示す。初亀裂発生にはじまる亀裂の発生, 進行状況, および破壊にいたるまでの挙動は既応の研究によるものによく類似している^{3), 4)}。即ち初亀裂は SRC 2 N-M を除いては試験

体中央部付近で発見され、また初期の亀裂間隔は比較的あらく試験部間 (63 cm) に 6~10 本発生している。当然のことではあるが初亀裂の発生時期は軸力の大きいもの程遅く、SRC 6 N-M では最大耐力に近い荷重で発生している。その後、荷重の増大とともに、亀裂はその巾を増しながら、ほぼまっすぐに進展し、やがてそのうちの中央部の数本の亀裂巾が急激に増大しはじめるがその本数は軸力が大きくなるにしたがって逆に少なく、SRC 0 N-M では 7~8 本、SRC 6 N-M では 1~2 本である。そしてその他の亀裂は進展を止めるか、またはその巾が小さくなる傾向を示す。最大耐力直前になると突然材の中央部の圧縮側コンクリートに材軸に沿う亀裂が発生し、その巾、および長さは急速に増大し、やがてこの部分より外側のコンクリートが剥離して最大耐力にいたるという傾向を示した。最大耐力後、さらに加力してゆくとコンクリートが圧壊、剥離している領域が広がり、また亀裂の深さを増すとともに、中央部の数本の引張側亀裂巾がますます増大し、部材の変形の大部分はこの付近で生じていることになる。

軸力の大きい SRC 6 N-M では、載荷の最終段階で鉄骨がわずかに横座屈して、試験体側面のコンクリートが薄片状に剥離し、また圧縮側鉄筋は全試験体ともに最終段階で座屈現象を生じた。なお SRC 6 N-M では、載荷の初期に試験体両端部に材軸方向の亀裂が発生したが、その進展度は非常にゆるやかで、やがて停止してしまっただけで試験部分の変形状に影響を与えるにはいたっていないと考えられる。

Fig. 5 は実験で求めた曲げモーメントと曲率の関係を示したものである。図の縦軸には曲げモーメントに関する量を、横軸には曲率に関する量をとっている。

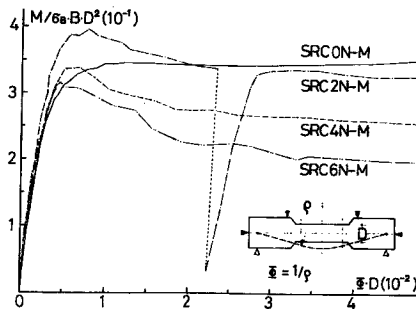


Fig. 5 Test results.

3. 理 論

鉄筋コンクリート、あるいは鉄骨鉄筋コンクリート部材の変形状について検討する場合、コンクリートの応力度—ひずみ度曲線の形をどのように定めるかが一つの重要な問題であるが、しかし曲げ、および軸力の組合せ応力状態の下での応力度—ひずみ度関係、および部材として打ち込まれたコンクリートの応力度—ひずみ度関係（特に塑性域での応力度—ひずみ度関係）については不明な点が多く、色々な提案がなされている^{5)~8)}。本論文では、解析 (1) では若林の研究^{5), 6)} にしたがってコンクリートの応力度—ひずみ度曲線は 2 次のパラボラ（弾塑性部分）と下降直線（塑性部分）とから成るものとし、コンクリート強度 σ_B はシリンダー強度 F_c の w 倍、下降直線のこう配を表わす定数を ν とする。解析 (2) では、フープ等の拘束効果などによりコンクリートの塑性ひずみが伸びることを考慮して、2 次のパラボラ（弾塑性部分）と応力が一定な塑性部分とからなるものとし、圧縮側フランジから外側のコンクリートを控除する。なおコンクリート強度は解析 (1) と同様 $\sigma_B = wF_c$ とする。

次に鉄筋はその断面が重心に集まったものと考え、鉄骨はフランジ、およびウェブの断面がそれぞれの厚さの中心に集まったものと考えことにする。

3.1 仮 定

式の誘導にあたって、次の仮定を設ける。

- a) 平面保持の仮定が成り立つものとする。
 b) コンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線は次の2通りの取扱いをする。

解析 (1)

$\sigma-\epsilon$ 曲線は2次のパラボラ（弾塑性部分）と下降直線（塑性部分）とから成るものとする。この下降直線のこう配 ν は中立軸比の大きさによって変化すると考えられるが、ここでは一定とし $\nu=1-0.25\kappa$ とする。またコンクリート強度 σ_B は $\sigma_B=0.75 F_c$ ($w=0.75$)、最大応力度時のひずみ ϵ_B は $\epsilon_B=2\%$ とする（シリンダー圧縮試験結果による）。したがって圧縮縁ひずみ度が10%に達した時に応力度が零になり、ひずみが10%以上に達した部分は圧壊したものとみなす。ただし軸力のないはりについては $\sigma_B=F_c$ とし、塑性部分の応力度は一定とする ($\nu=1.0$)。

解析 (2)

圧縮側フランジから外側のコンクリートを控除し、解析(1)のはりと相似な $\sigma-\epsilon$ 曲線とする。またコンクリート強度 σ_B は解析 (1) と同様 $\sigma_B=0.75 F_c$ とする。（Fig. 6 (a) 参照）

- c) コンクリートの引張応力度は無視する。
 d) 鋼材の $\sigma-\epsilon$ 曲線は完全弾塑性とし、ひずみ硬化の影響は無視する。（Fig. 6 (b) 参照）
 e) ひずみの戻りを無視する。
 f) 鋼材の座屈などによる不安定現象は無視する。

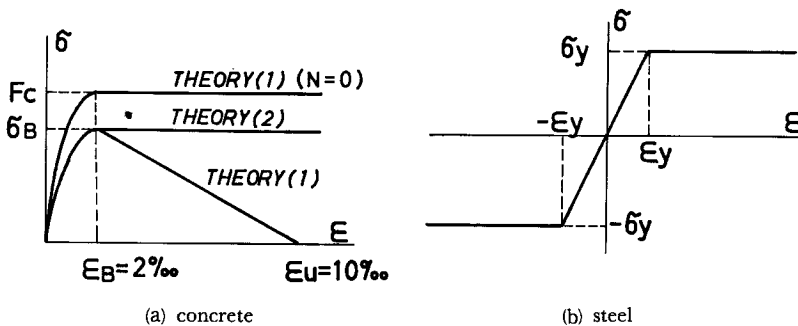


Fig. 6 Stress-strain relation.

3.2 理論式の誘導

コンクリート、鉄骨フランジ、およびウェブ、鉄筋のそれぞれの応力状態は、中立軸の位置、および圧縮縁のコンクリートのひずみによって種々の状態に場合分けされる。理論式の誘導の手順として、まずこれらの応力によって軸方向力、および曲げモーメントをコンクリート、鉄骨フランジおよびウェブ、鉄筋とそれぞれ別個に求め、平面保持の仮定および判別式を考慮することにより、部材断面全体の軸方向力、および部材断面の重心軸（材軸）に関する曲げモーメントの釣合式を合成することができる。すなわち釣合式は一般に次式で与えられることになる。

$$\frac{C}{\sigma_B b D} = \frac{1}{\sigma_B B D} (c C_0 + c C_1 + f C + w C + r C) = \phi_0 + \phi_2 + \phi_4 + \phi_6 + \phi_8$$

$$\frac{M}{\sigma_B B D^2} = \frac{1}{\sigma_B B D^2} (c M_0 + c M_1 + f M + w M + r M) = \phi_1 + \phi_3 + \phi_5 + \phi_7 + \phi_9$$

ここで $\phi_0 \sim \phi_9$ は中立軸比 k 、圧縮縁のコンクリートのひずみ度 ϵ_c の関数となっている。以下ではこれらの $\phi_0 \sim \phi_9$ の形を求めることにする。

なお、解析 (1) の軸力がない場合、および解析 (2) は、解析 (1) の特別な場合であり、解析 (1) から比較的簡単に誘導できるのでここでは省略し、解析 (1) の一般形を求めることにする。

A) コンクリート

コンクリートのストレスブロックは中立軸の位置によって次の 2 つの場合に大別される。

1] $0 \leq k \leq 1$ の場合

2] $1 \leq k$ の場合

さらに 1], および 2] は圧縮縁のコンクリートのひずみ度により Fig. 7, および Fig. 8 に示すように場合分けされる。

1], および 2] の場合の釣合式の一般形は次式で与えられる。

1] の場合 (Fig. 7 (2) 参照)

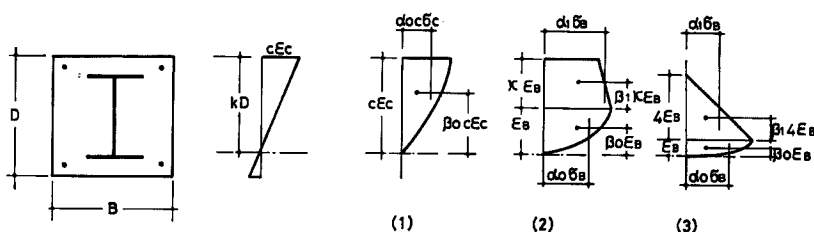


Fig. 7 Stress distribution.

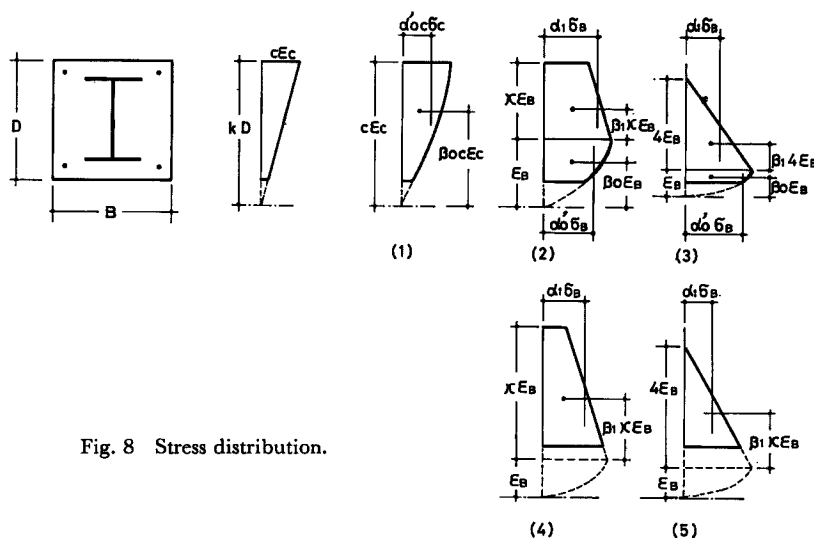


Fig. 8 Stress distribution.

$$\begin{aligned}
 {}_cC_0 + {}_cC_1 &= \alpha_0 \sigma_B B \frac{k}{1+\kappa} D + \alpha_1 \sigma_B B \frac{\kappa k}{1+\kappa} D = \alpha_0 \sigma_B B k D \frac{1+\alpha' \kappa}{1+\kappa} \\
 {}_cM_0 + {}_cM_1 &= \alpha_0 \sigma_B B \frac{kD}{1+\kappa} \left\{ \frac{\beta_0 k}{1+\kappa} - \left(k - \frac{1}{2} \right) \right\} D + \alpha_1 \sigma_B B \frac{\kappa k D}{1+\kappa} \left\{ \frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} k - \left(k - \frac{1}{2} \right) \right\} D \\
 &= \frac{1}{2} \alpha_0 \sigma_B B k D^2 \frac{1+\alpha' \kappa}{1+\kappa} - \alpha_0 \sigma_B B k^2 D^2 \frac{(1+\kappa-\beta_0) - (1-\beta_1) \alpha' \kappa^2}{(1+\kappa)^2}
 \end{aligned}$$

2] の場合 (Fig. 8 (2) 参照)

$${}_cC_0 + {}_cC_1 = \alpha'_0 \sigma_B B \left(\frac{k}{1+\kappa} - k + 1 \right) D + \alpha_1 \sigma_B B \frac{\kappa}{1+\kappa} k D = \alpha_0 \sigma_B B k D \frac{1+\alpha' \kappa}{1+\kappa}$$

ただし

$$\alpha_0 = \alpha'_0 \frac{k - (1+\kappa)(k-1)}{k} \quad \text{である。}$$

$$\begin{aligned}
 {}_cM_0 + {}_cM_1 &= \alpha_0 \sigma_B \frac{k}{1+\kappa} D \left\{ \frac{\beta_0 k}{1+\kappa} - \left(k - \frac{1}{2} \right) \right\} D + \alpha_1 \sigma_B B \frac{\kappa D}{1+\kappa} \left\{ \frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} k - \left(k - \frac{1}{2} \right) \right\} D \\
 &= \frac{1}{2} \alpha_0 \sigma_B B k D^2 \frac{1+\alpha' \kappa}{1+\kappa} - \alpha_0 \sigma_B B k^2 D^2 \frac{(1+\kappa-\beta_0) + (1-\beta_1) \alpha' \kappa^2}{1+\kappa}
 \end{aligned}$$

これらの一般式を参考にしてそれぞれの場合の $\phi_0 \sim \phi_3$ を求めると次のようになる。

1] (1) の場合 (Fig. 7 (1) 参照)

判別式； $0 \leq k \leq 1$ かつ ${}_c\varepsilon_c \leq \varepsilon_B$

$$\alpha_0 = -\frac{1-\frac{1}{3}\varepsilon}{2-\varepsilon}, \quad \beta_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{8-3\varepsilon}{3-\varepsilon}, \quad \phi_0 = \alpha_0 k, \quad \phi_1 = \alpha_0 k \left(\beta_0 k - k + \frac{1}{2} \right), \quad \phi_2 = \phi_3 = 0 \quad (\kappa=0)$$

1] (2) の場合 (Fig. 7 (2) 参照)

判別式； $0 \leq k \leq 1$ かつ $\varepsilon_B \leq {}_c\varepsilon_c \leq 5 \varepsilon_B$

$$\begin{aligned}
 \kappa &= \frac{{}_c\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - 1, \quad \nu = 1 - 0.25\kappa, \quad \alpha_0 = \frac{2}{3}, \quad \beta_0 = \frac{5}{8}, \quad \alpha_1 = \frac{1+\nu}{2}, \quad \beta_1 = \frac{1+2\nu}{3(1+\nu)}, \quad \phi_0 = \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa}, \\
 \phi_1 &= \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa} \left(\frac{\beta_0 k}{1+\kappa} - k + \frac{1}{2} \right), \quad \phi_2 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa}, \quad \phi_3 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa} \left(\frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} \cdot k - k + \frac{1}{2} \right)
 \end{aligned}$$

1] (3) の場合 (Fig. 7 (3) 参照)

判別式； $0 \leq k \leq 1$ かつ $5 \varepsilon_B \leq {}_c\varepsilon_c$

$$\begin{aligned}
 \kappa &= \frac{{}_c\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - 1, \quad \alpha_0 = \frac{2}{3}, \quad \beta_0 = \frac{5}{8}, \quad \alpha_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\kappa} = \frac{2}{\kappa}, \quad \beta_1 = \frac{4}{3\kappa}, \quad \phi_0 = \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa}, \\
 \phi_1 &= \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa} \left(\frac{\beta_0 k}{1+\kappa} - k + \frac{1}{2} \right), \quad \phi_2 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa}, \quad \phi_3 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa} \left(\frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} \cdot k - k + \frac{1}{2} \right)
 \end{aligned}$$

2] (1) の場合 (Fig. 8 (1) 参照)

判別式； $1 \leq k$ かつ ${}_c\varepsilon_c \leq \varepsilon_B$

$$\begin{aligned}
 k_i &= 1 - \frac{1}{k}, \quad \alpha_0 = \frac{(1-k_i^3) - \frac{1}{3}\varepsilon(1-k_i^3)}{k(1-k_i)(2-\varepsilon)} = \frac{(1-k_i^3) - \frac{1}{3}\varepsilon(1-k_i^3)}{(2-\varepsilon)}, \\
 \beta_0 &= \frac{1}{4} \cdot \frac{8(1-k_i^3) - 3\varepsilon(1-k_i^4)}{3(1-k_i^2) - \varepsilon(1-k_i^3)}, \quad \phi_0 = \alpha_0 k, \quad \phi_1 = \alpha_0 k \left(\beta_0 k - k + \frac{1}{2} \right), \quad \phi_2 = \phi_3 = 0
 \end{aligned}$$

2] (2) の場合 (Fig. 8 (2) 参照)

判別式； $1 \leq k \leq \frac{1+\kappa}{\kappa}$ かつ $\varepsilon_B \leq {}_c\varepsilon_c \leq 5 \varepsilon_B$

$$\begin{aligned}
 k_i &= (1+\kappa) \left(1 - \frac{1}{k} \right), \quad \kappa = \frac{{}_c\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - 1, \quad \nu = 1 - 0.25\kappa, \quad \alpha_0 = (1-k_i^2) - \frac{1}{3}(1-k_i^3), \\
 \beta_0 &= \frac{1}{4} \cdot \frac{8(1-k_i^3) - 3(1-k_i^4)}{3(1-k_i^2) - (1-k_i^3)}, \quad \alpha_1 = \frac{1+\nu}{2}, \quad \beta_1 = \frac{1+\nu}{3(1+\nu)}, \quad \phi_0 = \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa}, \\
 \phi_1 &= \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa} \left(\frac{\beta_0 k}{1+\kappa} - k + \frac{1}{2} \right), \quad \phi_2 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa}, \quad \phi_3 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa} \left(\frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} \cdot k - k + \frac{1}{2} \right)
 \end{aligned}$$

2] (3) の場合 (Fig. 8 (3) 参照)

判別式； $1 \leq k \leq \frac{1+\kappa}{\kappa}$, かつ $5 \varepsilon_B \leq {}_c\varepsilon_c$

$$k_i = (1+\kappa) \left(1 - \frac{1}{k} \right), \quad \kappa = \frac{{}_c\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - 1, \quad \alpha_0 = (1-k_i^2) - \frac{1}{3}(1-k_i^3), \quad \beta_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{8(1-k_i^3) - 3(1-k_i^4)}{3(1-k_i^2) - (1-k_i^3)},$$

$$\alpha_1 = \frac{2}{\kappa}, \beta_1 = \frac{4}{3\kappa}, \phi_0 = \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa}, \phi_1 = \frac{\alpha_0 k}{1+\kappa} \left(\frac{\beta_0 k}{1+\kappa} - k + \frac{1}{2} \right), \phi_2 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa},$$

$$\phi_3 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa} \left(\frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} k - k + \frac{1}{2} \right)$$

2] (4) の場合 (Fig. 8 (4) 参照)

判別式; $\frac{1+\kappa}{\kappa} \leq k$ かつ $\varepsilon_B \leq \varepsilon_c \leq 5 \varepsilon_B$

$$k_i = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) - \frac{1}{\kappa}, \kappa = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - 1, \nu = 1 - 0.25 \kappa, \alpha_1 = \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \left\{1 - \frac{1}{2}(1-\nu)(1+k_i)\right\},$$

$$\beta_1 = \frac{\frac{1}{2}(1-k_i^3) - \frac{1}{3}(1-\nu)(1-k_i^3)}{(1-k_i) - \frac{1}{2}(1-\nu)(1-k_i^2)}, \phi_0 = \phi_1 = 0, \phi_2 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa}, \phi_3 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa} \left(\frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} k - k + \frac{1}{2} \right)$$

2] (5) の場合 (Fig. 8 (5) 参照)

判別式; $\frac{1+\kappa}{\kappa} \leq k$ かつ $5 \varepsilon_B \leq \varepsilon_c$

$$k_i = \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) - \frac{1}{\kappa}, \kappa = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_B} - 1, \alpha_1 = \frac{1+\kappa}{\kappa} \cdot k \left(\frac{5k}{1+\kappa} - k + 1 \right) \cdot \frac{1}{2} \left\{1 - \frac{(1+\kappa)}{\kappa} \left(1 - \frac{1}{k}\right) + \frac{1}{\kappa}\right\},$$

$$\beta_1 = \frac{1}{6} \frac{(1-k_i^3) - \frac{2}{3}(1-k_i^3)}{3(1-k_i^2)}, \phi_0 = \phi_1 = 0, \phi_2 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa}, \phi_3 = \frac{\alpha_1 \kappa k}{1+\kappa} \left(\frac{1+\beta_1 \kappa}{1+\kappa} k - k + \frac{1}{2} \right)$$

B) 鉄骨フランジ

フランジの応力分布は中立軸の位置により次の 3 つの場合に大別される。

- 1] $d_{c1} \leq k \leq 1 - d_{t1}$ の場合
- 2] $1 - d_{t1} \leq k$ の場合
- 3] $0 \leq k \leq d_{c1}$ の場合

さらに 1], 2], および 3] は圧縮縁のコンクリートのひずみ度によって Fig. 9, Fig. 10, および Fig. 11 に示すように場合分けされる。

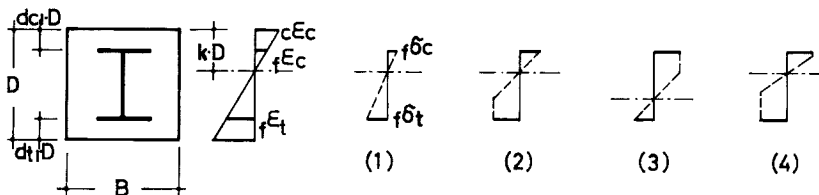


Fig. 9 Stress distribution, flange, Case 1.

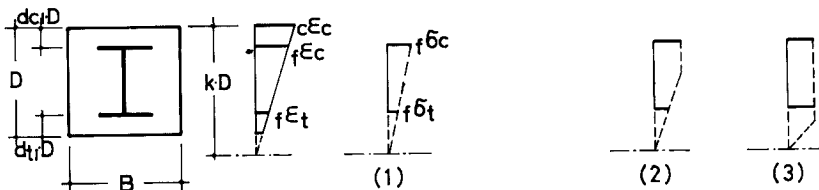


Fig. 10 Stress distribution, flange, Case 2.

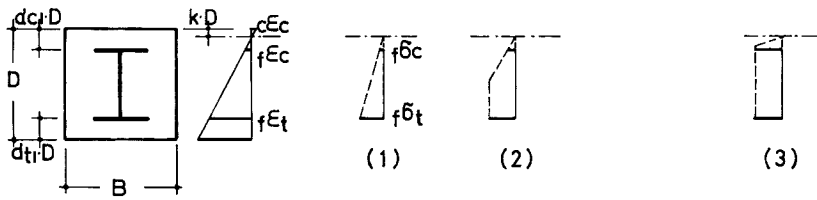


Fig. 11 Stress distribution, flange, Case 3.

1], 2], および 3] の釣合式の一般形は次式で与えられる。

1] の場合

$${}_fC = {}_fA_c{}_f\sigma_c - {}_fA_t{}_f\sigma_t, \quad \text{ここで } {}_fA_c = {}_fA_t = {}_fA \text{ とすれば}$$

$${}_fP = \frac{{}_fA}{BD} \text{ とおいて}$$

$${}_fC = {}_fPBD({}_f\sigma_c - {}_f\sigma_t)$$

さらに

$${}_fk_c = \frac{{}_f\sigma_c}{{}_f\sigma_y}, \quad {}_fk_t = \frac{{}_f\sigma_t}{{}_f\sigma_y}, \quad {}_f\mu = \frac{{}_fP \cdot {}_f\sigma_y}{\sigma_B} \text{ とおけば}$$

$${}_fC = \sigma_B BD {}_f\mu ({}_fk_c - {}_fk_t)$$

$${}_fM = \sigma_B BD^2 {}_f\mu \{ {}_fk_c(0.5 - d_{c1}) + {}_fk_t(0.5 - d_{t1}) \}$$

が一般式である。

ここで

$$\lambda_1 = \frac{{}_f\epsilon_y}{c\epsilon_c} \text{ とすれば}$$

$${}_fk_c = \frac{{}_f\sigma_c}{{}_f\sigma_y} = \frac{{}_f\epsilon_c}{{}_f\epsilon_y} = \frac{c\epsilon_c}{{}_f\epsilon_y} \cdot \frac{(k - d_{c1})}{k} = \frac{(k - d_{c1})}{\lambda_1 k}$$

$${}_fk_t = \frac{{}_f\sigma_t}{{}_f\sigma_y} = \frac{{}_f\epsilon_t}{{}_f\epsilon_y} = \frac{c\epsilon_c}{{}_f\epsilon_y} \cdot \frac{(1 - k - d_{t1})}{k} = \frac{(1 - k - d_{t1})}{\lambda_1 k}$$

2] の場合

1] の場合と同様に一般式は次式で与えられる。

$${}_fC = \sigma_B BD {}_f\mu ({}_fk_c + {}_fk_t)$$

$${}_fM = \sigma_B BD^2 {}_f\mu \{ {}_fk_c(0.5 - d_{c1}) - {}_fk_t(0.5 - d_{t1}) \}$$

ここで

$${}_fk_c = \frac{k - d_{c1}}{\lambda_1 k}, \quad {}_fk_t = \frac{k - 1 + d_{t1}}{\lambda_1 k}$$

3] の場合

1] の場合と同様に一般式は次式で与えられる。

$${}_fC = \sigma_B BD {}_f\mu (-{}_fk_c - {}_fk_t)$$

$${}_fM = \sigma_B BD^2 {}_f\mu \{ -{}_fk_c(0.5 - d_{c1}) + {}_fk_t(0.5 - d_{t1}) \}$$

ここで

$${}_fk_c = \frac{(d_{c1} - k)}{\lambda_1 k}, \quad {}_fk_t = \frac{1 - k - d_{t1}}{\lambda_1 k}$$

これらの一般式を参考にしてそれぞれの場合の ϕ_4 および ϕ_5 を求めると次のようになる。

1] (1) の場合 (Fig. 9 (1) 参照)

$$\text{判別式 ; } \frac{k - d_{c1}}{\lambda_1 k} < 1 \text{ かつ } \frac{1 - k - d_{t1}}{\lambda_1 k} < 1 \text{ すなわち } (1 - \lambda_1)k < d_{c1} \text{ かつ } (1 - d_{t1}) < (1 + \lambda_1)k$$

$$(i) \quad 1-\lambda_1 \leq 0 \quad \text{かつ} \quad k > \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_1}$$

$$(ii) \quad 1-\lambda_1 > 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_1} < k < \frac{d_{c1}}{1-\lambda_1}$$

$$\phi_4 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} (2k - d_{c1} + d_{t1} - 1)$$

$$\phi_5 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} \{ (k - d_{c1})(0.5 - d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})(0.5 - d_{t1}) \}$$

1] (2) の場合 (Fig. 9 (2) 参照)

$$\text{判別式 ; } (i) \quad 1-\lambda_1 \leq 0 \quad \text{かつ} \quad k \leq \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_1} \quad (ii) \quad 1-\lambda_1 < 0 \quad \text{かつ} \quad k < \frac{d_{c1}}{1-\lambda_1} \quad \text{かつ} \quad k \leq \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_1}$$

$$\phi_4 = f\mu \left\{ \frac{(k - d_{c1})}{\lambda_1 k} - 1 \right\} = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} (k - d_{c1} - \lambda_1 k)$$

$$\phi_5 = f\mu \left\{ \frac{(k - d_{c1})(0.5 - d_{t1})}{\lambda_1 k} + 0.5 - d_{t1} \right\}$$

1] (3) の場合 (Fig. 9 (3) 参照)

$$\text{判別式 ; } 1-\lambda_1 > 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{d_{c1}}{1-\lambda_1} \leq k$$

$$\phi_4 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} \{ \lambda_1 k - (1 - k - d_{t1}) \}$$

$$\phi_5 = f\mu \left\{ 0.5 - d_{c1} + \frac{(1 - k - d_{t1})(0.5 - d_{t1})}{\lambda_1 k} \right\}$$

1] (4) の場合 (Fig. 9 (4) 参照)

$$\text{判別式 ; } 1-\lambda_1 > 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{d_{c1}}{1-\lambda_1} \leq k \leq \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_1}$$

$$\phi_4 = 0$$

$$\phi_5 = f\mu (1 - d_{c1} - d_{t1})$$

2] (1) の場合 (Fig. 10 (1) 参照)

$$\text{判別式 ; } (i) \quad 1-\lambda_1 \leq 0 \quad (ii) \quad 1-\lambda_1 > 0 \quad \text{かつ} \quad k < \frac{d_{c1}}{1-\lambda_1} \quad \text{かつ} \quad k < \frac{1-d_{t1}}{1-\lambda_1}$$

$$\phi_4 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} (2k - d_{c1} + d_{t1} - 1)$$

$$\phi_5 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} \{ (k - d_{c1})(0.5 - d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})(0.5 - d_{t1}) \}$$

2] (2) の場合 (Fig. 10 (2) 参照)

$$\text{判別式 ; } 1-\lambda_1 > 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{d_{c1}}{1-\lambda_1} \leq k < \frac{1-d_{t1}}{1-\lambda_1}$$

$$\phi_4 = f\mu \left\{ 1 - \frac{1 - k - d_{t1}}{\lambda_1 k} \right\}$$

$$\phi_5 = f\mu \left\{ 0.5 - d_{c1} + \frac{(1 - k - d_{t1})(0.5 - d_{t1})}{\lambda_1 k} \right\}$$

2] (3) の場合 (Fig. 10 (3) 参照)

$$\text{判別式； } 1 - \lambda_1 > 0 \text{ かつ } \frac{d_{c1}}{1 - \lambda_1} \leq k \text{ かつ } \frac{1 - d_{t1}}{1 - \lambda_1} \leq k$$

$$\phi_4 = 2$$

$$\phi_5 = f\mu(d_{t1} - d_{c1})$$

3] (1) の場合 (Fig. 11 (1) 参照)

$$\text{判別式； } \frac{d_{c1}}{1 + \lambda_1} < k \text{ かつ } \frac{1 - d_{t1}}{1 + \lambda_1} < k$$

$$\phi_4 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} (2k - d_{c1} + d_{t1} - 1)$$

$$\phi_5 = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} \{ (k - d_{c1})(0.5 - d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})(0.5 - d_{t1}) \}$$

3] (2) の場合 (Fig. 10 (2) 参照)

$$\text{判別式； } \frac{d_{c1}}{1 + \lambda_1} < k \leq \frac{1 - d_{t1}}{1 + \lambda_1}$$

$$\phi_4 = f\mu \left\{ \frac{k - d_{c1}}{\lambda_1 k} - 1 \right\} = \frac{f\mu}{\lambda_1 k} (k - d_{c1} - \lambda_1 k)$$

$$\phi_5 = f\mu \left\{ \frac{(k - d_{c1})(0.5 - d_{c1})}{\lambda_1 k} + 0.5 - d_{t1} \right\}$$

3] (3) の場合 (Fig. 10 (3) 参照)

$$\text{判別式； } k \leq \frac{d_{c1}}{1 + \lambda_1} \text{ かつ } k \leq \frac{1 - d_{t1}}{1 + \lambda_1}$$

$$\phi_4 = -2$$

$$\phi_5 = f\mu(d_{c1} - d_{t1})$$

C) 鉄骨ウェブ

中立軸の位置、および圧縮縁のコンクリートのひずみ度によって場合分けされる応力分布はフランジとまったく同じで、それらを Fig. 12, Fig. 13 および Fig. 14 に示す。

なお当然のことではあるが判別式も同一式で表わされる。次にフランジにならって 1], 2], および 3] の場合の一般式を求め、その後でそれぞれの場合の ϕ_6, ϕ_7 を求めることにする。

1] $d_{c1} \leq k \leq 1 - d_{t1}$ の場合

2] $1 - d_{t1} \leq k$ の場合

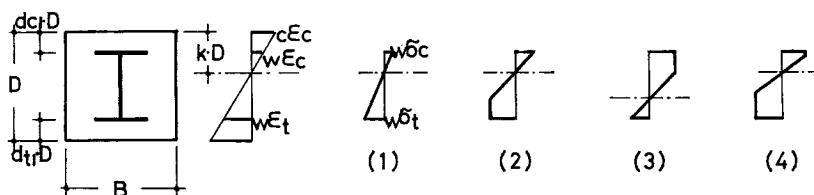


Fig. 12 Stress distribution, web, Case 1.

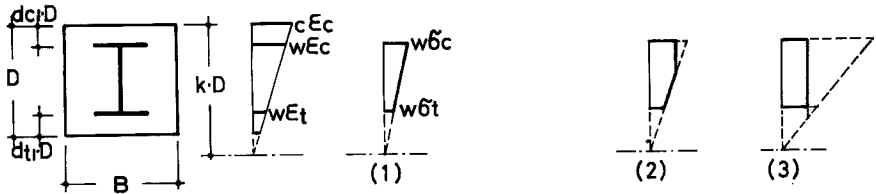


Fig. 13 Stress distribution, web, Case 2.

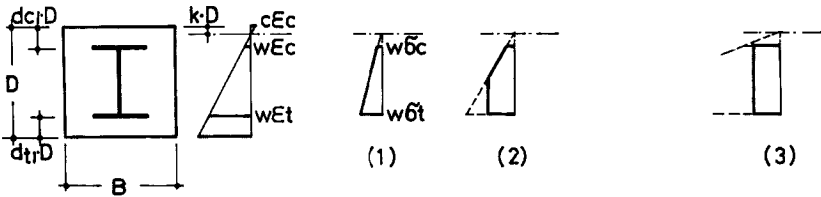


Fig. 14 Stress distribution, web, Case 3.

3] $0 \leq k \leq d_{c1}$ の場合

1] の場合

$$wC = w t_1 B D w \bar{\sigma}_c \cdot \frac{1}{2} \cdot (k - d_{c1}) - w t_1 B D (w \bar{\sigma}_c - w \sigma_y) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(k - \frac{w \epsilon_y}{\epsilon_c} k - d_{c1} \right) \\ - w t_1 B D w \bar{\sigma}_t \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - k - d_{t1}) + w t_1 B D (w \bar{\sigma}_t - w \sigma_y) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - k - \frac{w \epsilon_y}{\epsilon_c} k - d_{t1} \right)$$

ここで

$$w k_c = \frac{w \bar{\sigma}_c}{w \sigma_y}, w k_t = \frac{w \bar{\sigma}_t}{w \sigma_y}, w \bar{k}_c = \frac{w \bar{\sigma}_c}{w \sigma_y} - 1, w \bar{k}_t = \frac{w \bar{\sigma}_t}{w \sigma_y} - 1$$

$$\lambda_3 = \frac{w \epsilon_y}{\epsilon_c}, w \mu = \frac{w t_1 \cdot w \sigma_y}{\sigma_B} \text{ とすれば}$$

$$wC = w t_1 \cdot w \sigma_y B D w k_c \cdot \frac{1}{2} \cdot (k - d_{c1}) - w t_1 \cdot w \sigma_y B D w \bar{k}_c \cdot \frac{1}{2} \cdot (k - \lambda_3 k - d_{c1}) \\ - w t_1 w \sigma_y B D w k_t \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - k - d_{t1}) + w t_1 w \sigma_y B D w \bar{k}_t \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1}) \\ = \sigma_B B D \frac{w \mu}{2} [\{ w k_c (k - d_{c1}) - w k_t (1 - k - d_{t1}) \} - \{ w \bar{k}_c (k - \lambda_3 k - d_{c1}) - w \bar{k}_t (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1}) \}] \\ wM = \sigma_B B D^2 \frac{w \mu}{2} \left[w k_c (k - d_{c1}) \left\{ \frac{1}{2} - d_{c1} - \frac{1}{3} (k - d_{c1}) \right\} + w k_t (1 - k - d_{t1}) \left\{ \frac{1}{2} - d_{t1} - \frac{1}{3} (1 - k - d_{t1}) \right\} \right. \\ \left. - w \bar{k}_c (k - \lambda_3 k - d_{c1}) \left\{ \frac{1}{2} - d_{c1} - \frac{1}{3} (k - \lambda_3 k - d_{c1}) \right\} - w \bar{k}_t (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1}) \cdot \left\{ \frac{1}{2} - d_{t1} - \frac{1}{3} (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1}) \right\} \right] \\ = \sigma_B B D^2 \frac{w \mu}{12} \{ w k_c (k - d_{c1}) (3 - 2k - 4d_{c1}) + w k_t (1 - k - d_{t1}) (1 + 2k - 4d_{t1}) - w \bar{k}_c (k - \lambda_3 k - d_{c1}) \\ (3 - 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{c1}) - w \bar{k}_t (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1}) (1 + 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{t1}) \}$$

ここで

$$w k_c = \frac{w \sigma_c}{w \sigma_y} = \frac{w \epsilon_c}{w \epsilon_y} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_y}, w \bar{k}_c = \frac{w \epsilon_c}{\epsilon_y} - 1 = \frac{k - d_{c1}}{\lambda_3 k}$$

$${}_w k_t = \frac{{}_w \sigma_t}{{}_w \sigma_y} = \frac{{}_w \varepsilon_t}{{}_w \varepsilon_y} = \frac{{}_c \varepsilon_c}{{}_c \varepsilon_c} \cdot \frac{{}_w \varepsilon_t}{{}_c \varepsilon_c} = \frac{1-k-d_{t1}}{\lambda_3 k}$$

$${}_w \bar{k}_c = \frac{k-d_{c1}}{\lambda_3 k} - 1 = \frac{k-\lambda_3 k-d_{c1}}{\lambda_3 k}$$

$${}_w \bar{k}_t = \frac{1-k-d_{t1}}{\lambda_3 k} - 1 = \frac{1-k-\lambda_3 k-d_{t1}}{\lambda_3 k}$$

2] の場合の一般式

1] と同様にして一般式は次式で与えられる。

$${}_w C = \sigma_B B D \frac{w \mu}{2} \{ {}_w k_c (k-d_{c1}) - {}_w \bar{k}_c (k-\lambda_3 k-d_{c1}) + {}_w k_t (1-k-d_{t1}) - {}_w \bar{k}_t (1-k-\lambda_3 k-d_{t1}) \}$$

$$\begin{aligned} {}_w M = \sigma_B B D^3 \frac{w \mu}{12} \{ & {}_w k_c (k-d_{c1}) (3-2k-4d_{c1}) - {}_w k_t (1-k-d_{t1}) (1+2k-4d_{t1}) \\ & - {}_w \bar{k}_c (k-\lambda_3 k-d_{c1}) (3-2k+2\lambda_3 k-4d_{c1}) + {}_w \bar{k}_t (1-k+\lambda_3 k-d_{t1}) (1+2k-2\lambda_3 k-4d_{t1}) \} \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} {}_w k_c &= \frac{k-d_{c1}}{\lambda_3 k}, & {}_w k_t &= \frac{k-1-d_{t1}}{\lambda_3 k} \\ {}_w \bar{k}_c &= \frac{k-\lambda_3 k-d_{c1}}{\lambda_3 k}, & {}_w \bar{k}_t &= \frac{k-\lambda_3 k-1+d_{t1}}{\lambda_3 k} \end{aligned}$$

3] の場合の一般式

$${}_w C = \sigma_B B D \frac{w \mu}{2} \{ -{}_w k_c (k-d_{c1}) + {}_w \bar{k}_c (k+\lambda_3 k-d_{c1}) - {}_w k_t (1-k-d_{t1}) + {}_w \bar{k}_t (1-k-\lambda_3 k-d_{t1}) \}$$

$$\begin{aligned} {}_w M = \sigma_B B D^3 \frac{w \mu}{12} \{ & -{}_w k_c (k-d_{c1}) (3-2k-4d_{c1}) + {}_w k_t (1-k-d_{t1}) (1+2k-4d_{t1}) \\ & + {}_w \bar{k}_c (k+\lambda_3 k-d_{c1}) (3-2k-2\lambda_3 k-4d_{c1}) - {}_w \bar{k}_t (1-k-\lambda_3 k-d_{t1}) (1+2k+2\lambda_3 k-4d_{t1}) \} \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} {}_w k_c &= \frac{d_{c1}-k}{\lambda_3 k}, & {}_w k_t &= \frac{1-k-d_{t1}}{\lambda_3 k} \\ {}_w \bar{k}_c &= \frac{k+\lambda_3 k-d_{c1}}{\lambda_3 k}, & {}_w \bar{k}_t &= \frac{1-k-\lambda_3 k-d_{t1}}{\lambda_3 k} \end{aligned}$$

1] (1) の場合 (Fig. 12 (1) 参照)

$$\text{判別式; (i) } 1-\lambda_3 \leq 0 \text{ かつ } \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_3} < k \quad \text{(ii) } 1-\lambda_3 > 0 \text{ かつ } \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_3} < k < \frac{d_{c1}}{1-\lambda_3}$$

$${}_w \phi = \frac{w \mu}{2 \lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 - (1-k-d_{t1})^2 \}$$

$${}_w \phi_7 = \frac{w \mu}{12 \lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 (3-2k-4d_{c1}) + (1-k-d_{t1})^2 (1+2k-4d_{t1}) \}$$

1] (2) の場合 (Fig. 12 (2) 参照)

$$\text{判別式; (i) } 1-\lambda_3 \leq 0 \text{ かつ } k \leq \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_3} \quad \text{(ii) } 1-\lambda_3 > 0 \text{ かつ } k < \frac{d_{t1}}{1-\lambda_3} \text{ かつ } k \leq \frac{1-d_{c1}}{1+\lambda_3}$$

$${}_w \phi = \frac{w \mu}{2 \lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 - (1-k-d_{t1})^2 + (1-k-\lambda_3 k-d_{t1})^2 \}$$

$$\begin{aligned} {}_w \phi_7 = \frac{w \mu}{12 \lambda_3 k} \{ & (k-d_{c1})^2 (3-2k-4d_{c1}) + (1-k-d_{t1})^2 (1+2k-4d_{t1}) \\ & - (1-k-\lambda_3 k-d_{t1})^2 (1+2k+2\lambda_3 k-4d_{t1}) \} \end{aligned}$$

1] (3) の場合 (Fig. 12 (3) 参照)

判別式 ; $1 - \lambda_3 > 0$ か $\frac{d_{c1}}{1 - \lambda_3} \leq k$ か $\frac{1 - d_{t1}}{1 + \lambda_3} < k$

$$\phi_6 = \frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2 - (1 - k - d_{t1})^2 - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2\}$$

$$\phi_7 = \frac{w\mu}{12\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2(3 - 2k - 4d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})^2(1 + 2k - 4d_{t1}) - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2(3 - 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{c1})\}$$

1] (4) の場合 (Fig. 12 (4) 参照)

判別式 ; $1 - \lambda_3 > 0$ か $\frac{d_{c1}}{1 - \lambda_3} \leq k \leq \frac{1 - d_{t1}}{1 + \lambda_3}$

$$\phi_6 = \frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2 - (1 - k - d_{t1})^2 - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2 + (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1})^2\}$$

$$\phi_8 = \frac{1}{12\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2(3 - 2k - 4d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})^2(1 + 2k - 4d_{t1}) - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2(3 - 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{c1}) - (1 - k - \lambda_3 k - d_{t1})^2(1 + 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{t1})\}$$

2] (1) の場合 (Fig. 13 (1) 参照)

判別式 ; (i) $1 - \lambda_3 \leq 0$ (ii) $1 - \lambda_3 > 0$ か $k < \frac{d_{c1}}{1 - \lambda_3}$ か $k < \frac{1 - d_{t1}}{1 - \lambda_3}$

$$\phi_6 = -\frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2 - (1 - k - d_{t1})^2\}$$

$$\phi_7 = -\frac{w\mu}{12\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2(3 - 2k - 4) + (1 - k - d_{t1})^2(1 + 2k - 4d_{t1})\}$$

2] (2) の場合 (Fig. 13 (2) 参照)

判別式 ; $1 - \lambda_3 > 0$ か $\frac{d_{c1}}{1 - \lambda_3} \leq k < \frac{1 - d_{t1}}{1 - \lambda_3}$

$$\phi_6 = \frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2 - (1 - k - d_{t1})^2 - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2\}$$

$$\phi_7 = \frac{w\mu}{12\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2(3 - 2k - 4d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})^2(1 + 2k - 4d_{t1}) - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2(3 - 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{c1})\}$$

2] (3) の場合 (Fig. 13 (3) 参照)

判別式 ; $1 - \lambda_3 > 0$ か $\frac{d_{c1}}{1 - \lambda_3} \leq k$ か $\frac{1 - d_{t1}}{1 - \lambda_3} \leq k$

$$\phi_6 = -\frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2 - (1 - k - d_{t1})^2 - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2 + (1 - k + \lambda_3 k - d_{t1})^2\}$$

$$\phi_7 = \frac{w\mu}{12\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2(3 - 2k - 4d_{c1}) + (1 - k - d_{t1})^2(1 + 2k - 4d_{t1}) - (k - \lambda_3 k - d_{c1})^2(3 - 2k + 2\lambda_3 k - 4d_{c1}) - (1 - k + \lambda_3 k - d_{t1})^2 + (1 + 2k - 2\lambda_3 k - 4d_{t1})\}$$

3] (1) の場合 (Fig. 14 (1) 参照)

判別式 ; $\frac{d_{c1}}{1 + \lambda_3} < k$ か $\frac{1 - d_{t1}}{1 + \lambda_3} < k$

$$\phi_6 = \frac{1}{2\lambda_3 k} \{(k - d_{c1})^2 - (1 - k - d_{t1})^2\}$$

$$\phi_7 = \frac{1}{12\lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 (3-2k-4d_{c1}) + (1-k-d_{t1})^2 (1+2k-4d_{t1}) \}$$

3] (2) の場合 (Fig. 14 (2) 参照)

$$\text{判別式 ; } \frac{d_{c1}}{1+\lambda_3} < k \leq \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_3}$$

$$\phi_6 = -\frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 - (1-k-d_{t1})^2 + (1-k-\lambda_3 k-d_{t1})^2 \}$$

$$\phi_7 = \frac{w\mu}{12\lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 (3-2k-4d_{c1}) + (1-k-d_{t1})^2 (1+2k-4d_{t1}) - (1-k-\lambda_3 k-d_{t1})^2 (1+2k+2\lambda_3 k-4d_{t1}) \}$$

3] (3) の場合 (Fig. 14 (3) 参照)

$$\text{判別式 ; } k \leq \frac{d_{c1}}{1+\lambda_3} \text{ かつ } k \leq \frac{1-d_{t1}}{1+\lambda_3}$$

$$\phi_6 = -\frac{w\mu}{2\lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 - (1-k-d_{t1})^2 - (k+\lambda_3 k-d_{c1})^2 + (1-k-\lambda_3 k-d_{t1})^2 \}$$

$$\phi_7 = \frac{1}{12\lambda_3 k} \{ (k-d_{c1})^2 (3-2k-4d_{c1}) + (1-k-d_{t1})^2 (1+2k-4d_{t1}) - (k+\lambda_3 k-d_{c1})^2 (3-2k-2\lambda_3 k-4d_{c1}) + (1-k-\lambda_3 k-d_{t1})^2 (1+2k+2\lambda_3 k-4d_{t1}) \}$$

D) 鉄筋

鉄筋については鉄骨フランジとまったく同一の取扱いができ、 $d_{c1} \rightarrow d_{c2}$, $f_{ey} \rightarrow r_{ey}$, $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$, $f_t \mu \rightarrow r_t \mu$ のように置換すればよい。

以上、A) B) C), および D) で求められた各式のうち判別式を満足するものを選択してつり合い式に代入しその連立方程式を解けばよい。本論文では、京都大学大型計算機 FACOM 230-60 を用い試索法による数値計算で解を求めている。

4. 結果, および検討

4.1 最大耐力 (M_u)

実験, および理論解析で求めた最大耐力値を Table 2 に示す。表中の解析値 $T M_u$ は解析 (1) によるもので、また SRC0N-M については $\epsilon_c = 4\%$ の時の値を採用している。最大耐力の大きさは、既応の研究結果^{5), 6)}と同様、解析値と理論値はよく一致しており、また軸力の増大にともなう最大耐力の変化も、一般に認められている傾向を強く示している。したがって $M-N$ interaction curve によく一致しているものと考えられる。

4.2 曲げモーメント-曲率関係, および曲げモーメント-中立軸比関係 ($M-\phi$ 曲線, $M-k$ 曲線)

Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17, および Fig. 18 は実験, および解析で求められた曲げモーメント-曲率, 中立軸比関係を各試験体ごとに比較したものである。軸力のない SRC0N-M では塑性域での耐力低下は認め

Table 2 Theoretical predictions and experimental results.

Test Specimen	Ultimate Strength of Short Column N_0 (t)	Axial Force N (t)	Ratio N/N_0 (%)	Ultimate Moment			Curvature at Ultimate Moment		
				Experiment $E M_u$ (tm)	Theory (1) $T M_u$ (tm)	Ratio $T M_u / E M_u$	Experiment $E \phi D$ (10^{-4})	Theory (1) $T \phi D$ (10^{-4})	Ratio $T \phi D / E \phi D$
SRC0N-M	—	—	—	6.91	6.92	1.00	146	155	1.06
SRC2N-M	165	30	18.2	7.40	7.40	1.00	79	72	0.91
SRC4N-M	172	60	34.9	6.91	7.15	1.03	68	65	0.97
SRC6N-M	163	90	54.1	6.03	5.39	0.89	45	45	1.00

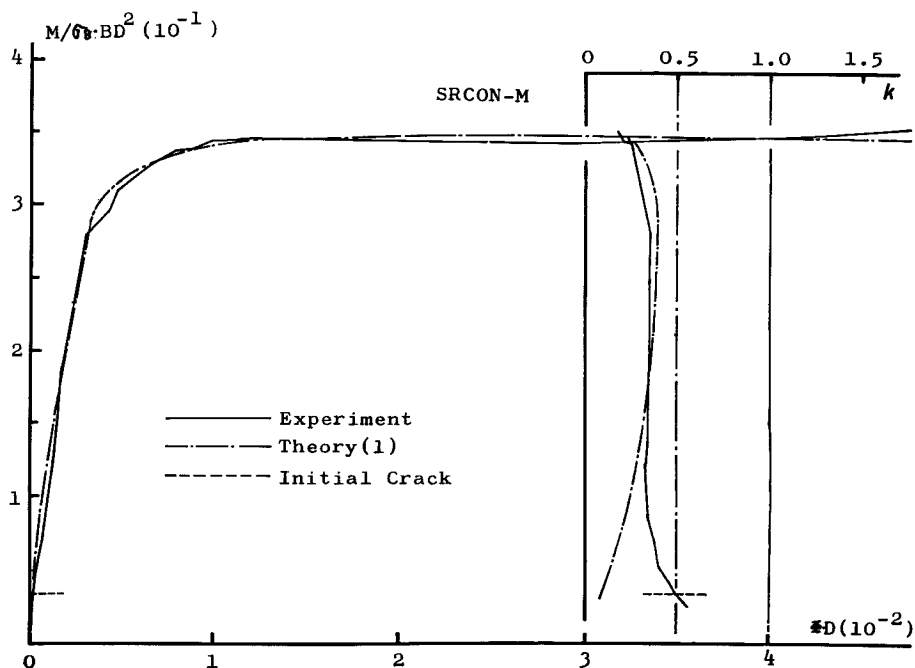


Fig. 15 Bending moment vs. curvature, SRC0N-M.

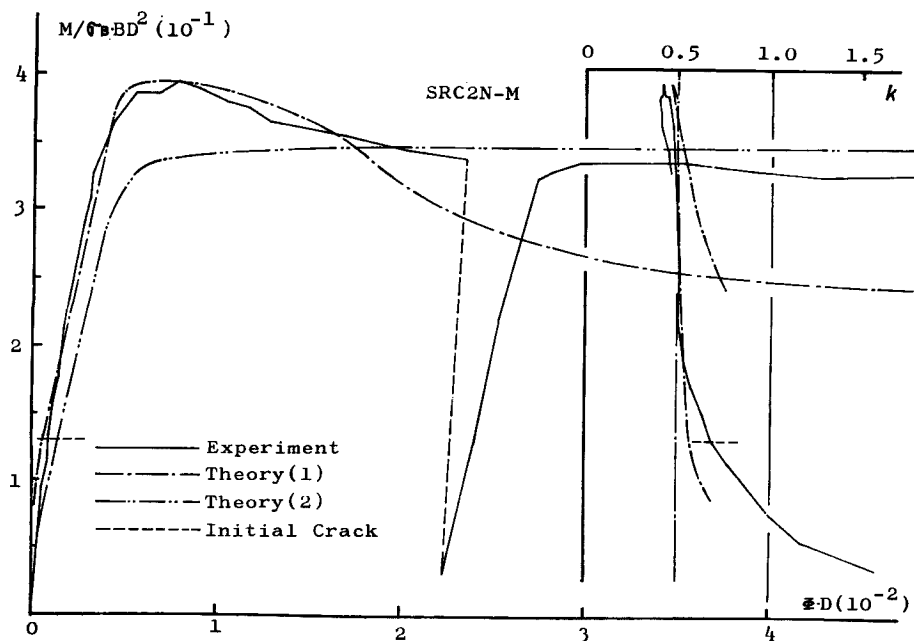


Fig. 16 Bending moment vs. curvature, SRC 2N-M.

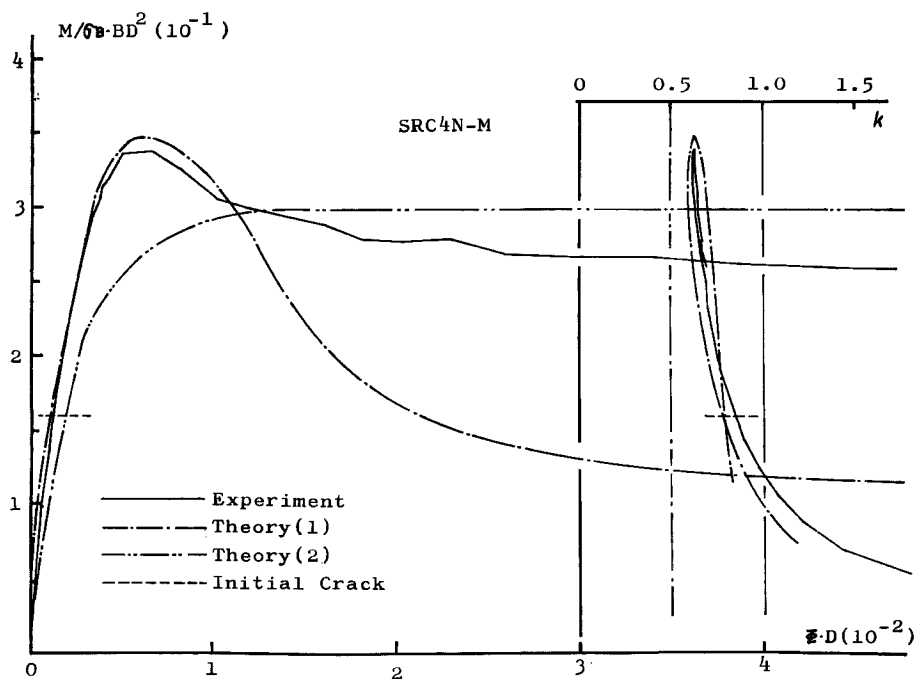


Fig. 17 Bending moment vs. curvature, SRC 4N-M.

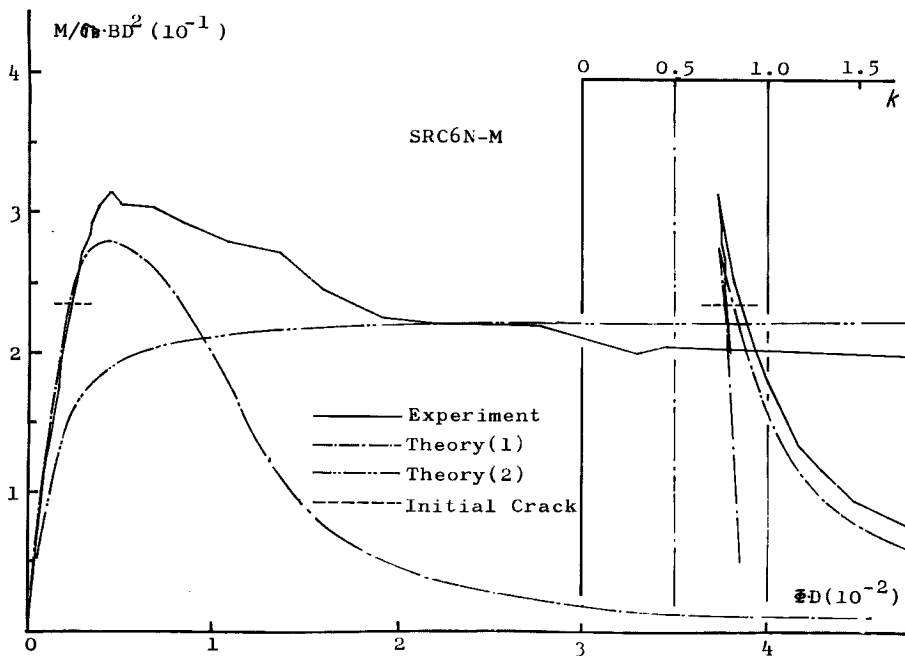


Fig. 18 Bending moment vs. curvature, SRC 6N-M.

られず、逆にわずかではあるが耐力が増大する傾向にあり、軸力のあるものとは、はっきりと異なった性状を示した。また、軸力のある SRC 2 N-M, SRC 4 N-M, SRC 6 N-M では載荷軸力が大きいもの程耐力付近の平坦な部分がせまくなり、耐力直後の耐力低下の割合がわずかではあるが、大きいという傾向を示している。しかし耐力低下率そのものはそれ程大きくはなく、SRC 6 N-M においてもねばり強い破壊性状を示した。最大耐力時の曲率の 5 倍の曲率まで変形した時の強度を、最大耐力を 1 として比較してみると SRC 0 N-M で 1.07, SRC 2 N-M で 0.83, SRC 4 N-M で 0.79, SRC 6 N-M で 0.71 程度である。解析(1)による $M-\phi$ 曲線は、弾塑性域で実験曲線の傾向をよくとらえ、最大耐力時の曲率の 2 倍程度までは、十分な精度で追跡しうるものと考えられる。しかし、それ以後の性状については解析(1)では追跡が不可能である。このことは仮定したコンクリートのストレスブロックの形が塑性域で実情にそぐわなかったためと考えられ、フープ等の有効な拘束効果を考慮したコンクリートのストレスブロックを仮定するのが妥当であると思われる。解析(2)が塑性域での部材の変形性状を比較的よく追跡しているのには意味深いものがある。

一方、 $M-k$ 曲線は実験曲線、理論曲線ともに比較的よく一致した傾向を示しているが、特に耐力前後での中立軸比の変化については興味深いものがある。なお、SRC 0 N-M において、載荷の初期に実験曲線と理論曲線が逆の傾向を示しているのは、解析ではコンクリートの引張抵抗を無視していることに起因するものと考えられる。

5. 結 語

本研究では実施した試験体の数が少なく、またその断面構成も一種類であったので、一般論として拡張することには疑問があるが、以下の事実が認められた。

- 1) 鉄骨鉄筋コンクリート部材の一定軸力の下における曲げモーメントー曲率関係は若林の研究^{5), 6)}に基づく終局強さ式により、耐力時の変形量のおよそ 2 倍程度までは十分よい精度で解析が可能である。また最大耐力の大きさについては、本実験においても非常によく一致している。
- 2) 最大耐力時の部材の曲率は、軸力の大きさにもよるが、軸力のない“はり”に比して約 1/2 以下にもなり、回転能力の低下の傾向が著しい。
- 3) 塑性域での部材の靱性は、鉄骨が充腹型であったせいもあるが、フープ等の拘束によって、コンクリートの圧壊ひずみが伸びることにより確保され、SRC 6 N-M においてもそれ程急激な耐力の低下は認められず、最大耐力時の 5 倍の曲率まで変形した後も、最大耐力の約 70% の強度を保っている。
- 4) 部材の変形性状を大変形時まで解析するためには、フープ等の拘束効果を考慮したコンクリートのストレスブロックを仮定しなければならないが、同時にその仮定の妥当性を実験的にも、理論的にも確かめる必要性が痛感される。

謝 辞

本実験は、若林研究室の諸兄、とくに三谷勲、小城修、岡本晴仁、高枝新伍、木村信也、山口清士、山口猛、市村達朗、高木信芳、山本春樹、そして宮本一雄の諸氏の惜しみない協力によってなされたものであることをここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 若林 実・高田周三・斎藤 光：鉄骨鉄筋コンクリート構造，構造学体系 19 巻，pp. 32-54.
- 2) 横尾義貫・若林 実・末永保美・宮村篤典：H 形鋼を用いた鉄骨コンクリートに関する研究 (No. 3 中心圧縮力をうける柱の研究)，日本建築学会論文報告集，第 134 号，昭 42. 4，pp. 20-23.
- 3) 横尾義貫・若林 実・末永保美・宮村篤典：H 形鋼を用いた鉄骨コンクリートに関する研究 (No. 4 曲げと軸方向力をうける柱 (一方向偏心の場合) 実験について)，(日本建築学会論文報告集，第 115 号，昭 42. 5，pp. 20-25.

- 4) 池田昭男：鉄筋コンクリート柱の塑性率，および軸圧縮力の限界値について，日本建築学会大会梗概集，昭 43. 10, pp. 769-770.
- 5) 若林 実：鉄骨鉄筋コンクリートに関する研究，東京大学生産技術研究所報告，第 6 巻，第 2 号，昭 32. 12, pp. 7-9, pp. 15-17.
- 6) 横尾義貫・若林 実・末永保美・宮村篤典：H 形鋼を用いた鉄骨コンクリートに関する研究 (No. 4, -2 曲げと軸方向力をうける柱の研究 (一方偏心の場合) 終局強さ式について)，日本建築学会論文報告集，第 136 号，昭 42. 6, pp. 1-7.
- 7) 坂 静雄：鉄筋コンクリート梁の撓みに関する材料力学的研究，建築学会論文集，第 12 号，昭 14. 1, pp. 1-10.
- 8) Hognestad, E., N. W. Hanson and D. McHenry: Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, Journal of A. C. I., Vol. 27, No. 4, December, 1955, pp. 455-479.

記 号

- κ ; コンクリートの塑性部分のひずみ度と弾塑性部分のひずみ度との比
 F_c ; コンクリートのシリンダー強度
 σ_B ; コンクリートの圧縮強度 ($\sigma_B = wF_c$)
 α_0 ; コンクリートの弾塑性部分の平均応力度と σ_B との比
 α_1 ; コンクリートの塑性部分の平均応力度と σ_B との比
 $\alpha' = \alpha'/\alpha_0$
 β_0, β_1 ; コンクリートの弾塑性部分ならびに塑性部分の面積の重心を表わす定数
 B, D ; 部材の巾ならびに部材せい
 d_{c1}, d_{t1} ; 圧縮側ならびに引張側フランジのかぶり厚と D との比
 d_{c2}, d_{t2} ; 圧縮側ならびに引張側鉄筋のかぶり厚と D との比
 k ; 中立軸比
 ν ; コンクリートの塑性部分の応力低下の割合を表わす定数
 A_c, A_t ; 圧縮側ならびに引張側鋼材の断面積
 $p_c = A_c/BD$ 圧縮側の鋼材比
 $p_t = A_t/BD$ 引張側の鋼材比
 σ_y ; 鋼材の降伏応力度
 ε_y ; 鋼材が降伏する時のひずみ度
 ε_c ; 圧縮縁のコンクリートのひずみ度
 $\varepsilon_c, \varepsilon_t$; 圧縮側ならびに引張側の鋼材のひずみ度
 σ_c, σ_t ; 圧縮側ならびに引張側の鋼材の応力度
 $\lambda_1 = f\varepsilon_y/\varepsilon_c$
 $\lambda_2 = r\varepsilon_y/\varepsilon_c$
 $\lambda_3 = w\varepsilon_y/\varepsilon_c$
 $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_c/\varepsilon_B$
 C ; 圧縮合力
 M ; 部材断面の重心軸 (材軸) に関する曲げモーメント
 cC_0 ; コンクリートの弾塑性部分の圧縮合力
 cC_1 ; コンクリートの塑性部分の圧縮合力
 cM_0 ; コンクリートの弾塑性部分の材軸に関する曲げモーメント
 cM_1 ; コンクリートの塑性部分の材軸に関する曲げモーメント

添 字

- c ; コンクリート f ; フランジ w ; ウェブ r ; 鉄 筋