

鋼材およびコンクリートの塑性的性質を考慮した 合成げたの耐荷力の評価に関する研究

菊田 征勇*・川口 直能**・大平 忠之***

Study on the estimation of Ultimate Capacity of Composite beam considering plastic properties of the structural materials

By Yukio Kikuta and Naotaka Kawaguchi and Tadayuki Ohira

Synopsis: This paper summarizes some findings made by theoretical and experimental study on the ultimate phenomenon of composite beams subjected to pure bending.

Within the limits of this study it was found that the properties and size of cross section in steel beam appear more sensitively on the ultimate resisting moment and deformability rather than the rate of reinforcement in floor slab.

要旨：この研究は純曲げを受ける合成げたの終局状態に関する理論および実験の両面から得られた2, 3の知見をまとめたものである。本研究の範囲内では、終局モーメントと変形能力に与える影響は床板の補強の程度よりもむしろ鋼げたの材質や鋼げたの断面寸法のほうが顕著であることが明らかとなった。

1. はじめに

この研究は合成げたの終局限界状態設計法の基礎資料を得る目的で実施している一連の研究のうち、主として曲げに関する終局限界状態を扱ったものである。

鉄筋コンクリート床版をずれ止めによって鋼げたと合成したいわゆる合成げたの歴史は古く、基礎研究が開始されてから40年、また実用に供されてからはおよそ30年が経過している。この間、検討の主な着眼点は一体化を図るためのずれ止めと、他の合成構造への応用であり、主に弾性設計の立場からの発展は目ざましいものがあつたように思われる。

一方、鋼構造の分野ではいわゆる塑性設計法が検討さ

れ、一部にはその成果が取入れられている。また鉄筋コンクリート構造の分野では従来の許容応力度設計法を生かしながら、終局状態も考慮し得る限界状態設計法が各国で採用され、わが国でもこれに移行する準備が進められている。合成げたの設計についてもこの限界状態設計が採用される機運にあり、とくに終局限界状態や疲労限界状態などを検討するために、耐荷力や破壊に至る挙動、じん性あるいは疲労性状などの解明が急がれている。

この点に注目して本研究では曲げを受ける合成げたについて終局モーメント、終局曲率などを理論および実験の両面から検討し、合成げたの終局限界状態設計の、とくに強度と変形に関する基礎資料を得ることを目的とした。

理論計算に際しては、脆性材料であるコンクリートと延性材料である鉄筋および鋼げたとの複合構造では、材料の性質の違いがいわゆる弾性範囲よりもむしろ破壊に近い状態で顕著に現われるので、コンクリートについては最大応力度近傍の挙動を比較的良く表現できる応力-ひずみ曲線を選択し、鋼材についてはひずみ硬化領域を

*工学部土木工学科 教授

Professor, Civil Engineering Division

**工学部土木工学科 助教授 工学博士

Associate Professor, Civil Engineering Division,
Dr. of Engineering

***工学部土木工学科 技術職員

Assistant, Civil Engineering Division

含めた応力—ひずみ曲線を仮定した。これは、従来耐荷力のみに重点を置いたために無視されてきたひずみ条件を明確にするためであり、これによって終局限界状態設計における重要な因子のひとつである部材の変形能力を明らかにする意義もあるからである。

さらに若干の実験を行ないひびわれ性状、曲率の変化なども含めて合成げたが曲げを受ける場合の破壊に至る挙動を明らかにし、合わせて理論の妥当性に関し検討を行なった。

2. 従来の研究の概要

合成げたの終局強度に関する研究はおもに諸外国で活発に行なわれその代表的なものをあげれば、I. M. Viest, C. P. Siess¹⁾ は1953年に圧縮を受け持つコンクリートと引張を受け持つ鋼げたとを完全塑性状態と仮定してその極限耐力を求める式を提案している。また、1965年に P. R. Barnard²⁾ は応力ブロック形状と終局曲げ耐力の研究を発表している。イギリスの Imperial College の J. C. Chapman³⁾⁴⁾ は1963年以後、終局強度についての実験を数多く行ない実験結果および理論解析を発表している。これらの実験結果を参考にしてイギリスでは1965年に合成げたの終局強度に関する規定を設けた。

わが国での研究報告を調べてみると、1967年に倉田、正道⁵⁾ は合成げた橋の塑性設計を弾性設計と比較検討し発表している。また1972年、奥村、佐々木、佐藤の単純合成げたの強度の研究⁶⁾、前田、井汲の継続合成げたの弾塑性曲げ性状と曲げ耐荷力の解析的および実験的研究⁷⁾などがあげられる。

これらの研究はいずれも耐荷力のみに重点をおいているため、部材の変形能力が無視されがちであった。また耐力の面からみてもせん断耐力、ねじり耐力、疲労性状などは検討が遅れていると思われる。しかし、これらの問題点があるにもかかわらず1977年以降合成げたの終局強度については、筆者らの調査した範囲ではあまり活発に研究がなされていない。

3. 曲げ耐力と曲率の計算

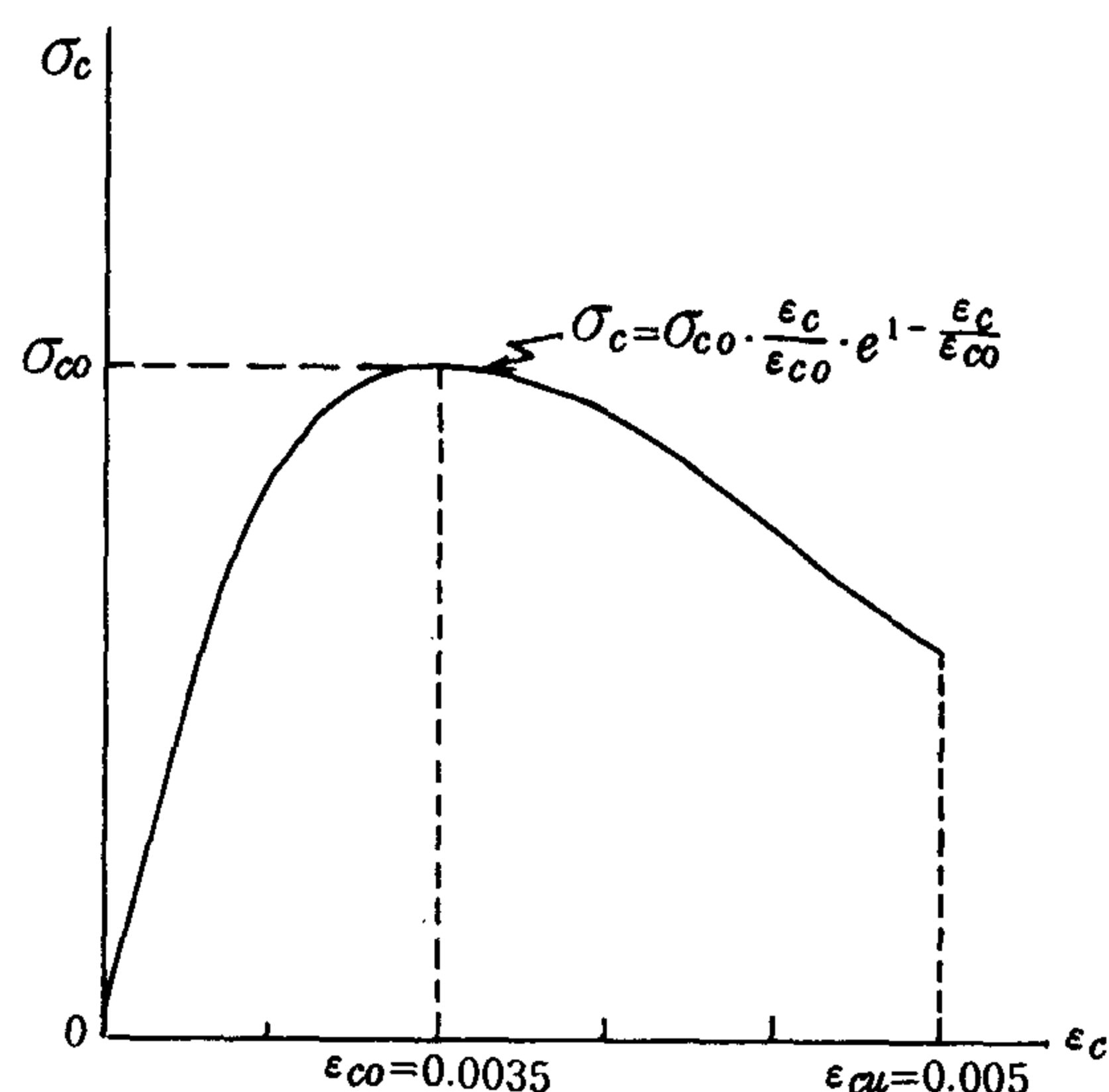
(1) 計算仮定

合成げたの曲げ耐力および曲率を算出するに当たって次の仮定を設けて計算式を導いた。

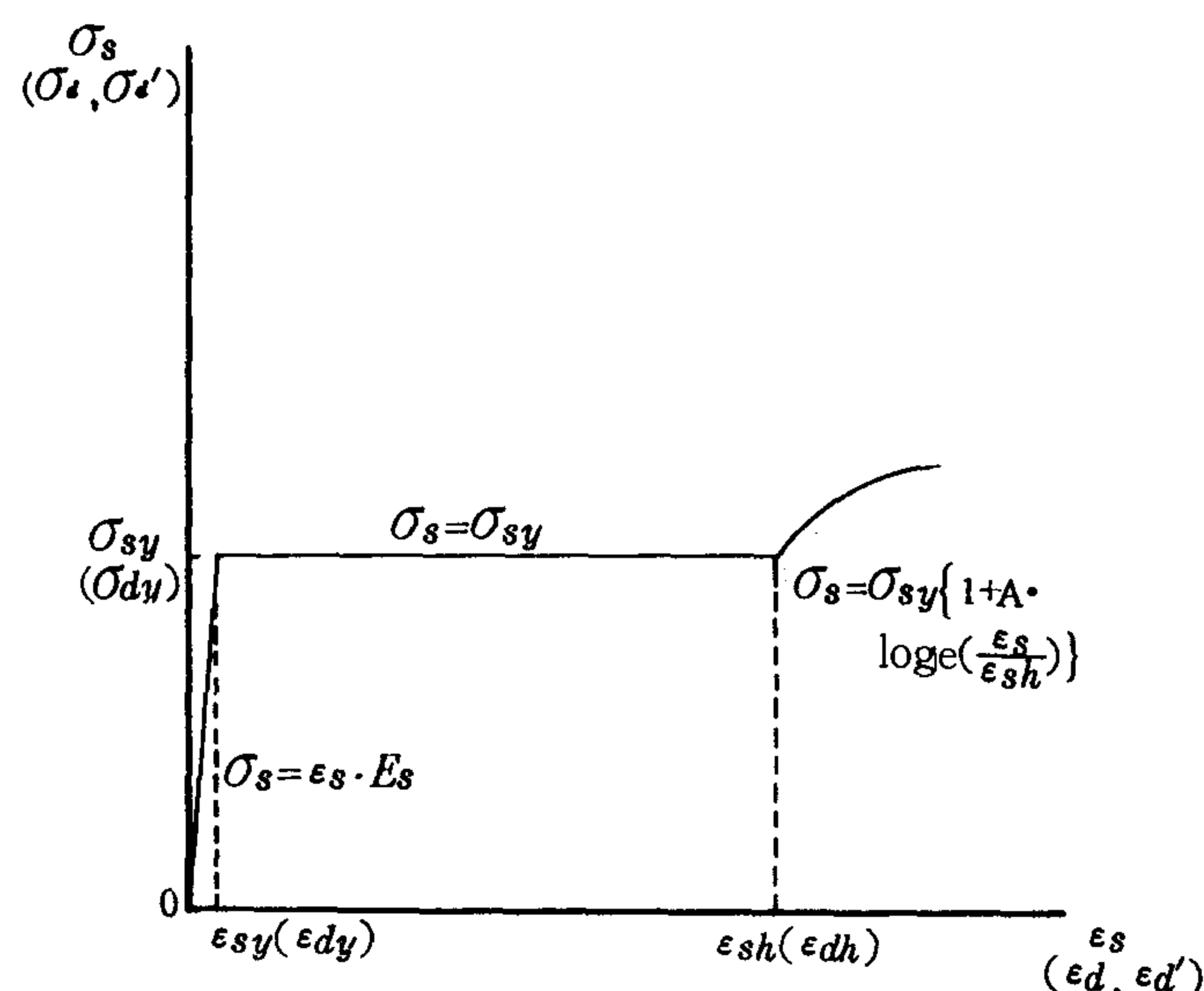
(a) 鋼材とコンクリートは一体変形し平面保持の法則が成立する。

(b) コンクリートの引張力を無視する。

(c) コンクリートの応力—ひずみ曲線は式(1)にしたがう。(図1. a)



(a) コンクリート



(b) 鋼材および鉄筋

図 1 材料の応力—ひずみ曲線の仮定

$$\sigma_c = \sigma_{co} \cdot \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \cdot e^{1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}} \quad (1)$$

(d) 鋼材の応力—ひずみ曲線は式(2)にしたがう。(図1. b)

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} & \text{のとき } \sigma_s = \epsilon_s \cdot E_s \\ \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} & \text{のとき } \sigma_s = \sigma_{sy} \\ \epsilon_{sh} \leq \epsilon_s & \text{のとき } \sigma_s = \sigma_{sy} \left(1 + A \log_e \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{sh}} \right) \end{array} \right\} (2)$$

ここに、 $A = 0.2 \sim 0.4$ (実験定数)

(e) 合成げたは床版上縁の圧縮ひずみが曲げ圧縮破壊ひずみ ($\epsilon_{cu} = 0.5\%$) に達したときに破壊するものとする。

仮定(a), (b)は一般に用いられている仮定である。床版と鋼げたとの接合が不適切であったり、また破壊に近い状態では、とくに微小区間でひずみは直接分布しないと考えられるが現在実用に供されているジベルおよびその接合方法は少なくとも曲げに対しては一体性が保証されることが実験等より明らかになっており、さらに、ある区間の平均とみなせばひずみは直接分布するとの立場をとった。

仮定(c)については次のとおりである。すなわち、曲げ圧縮を受けるコンクリートの応力とひずみの関係式については従来より多くの式が提案され、ひずみ勾配、ひずみ速度、鉄筋などによる補強の方法等によって応力とひずみの関係や破壊するときのひずみが異なることが報告されている。ここでは、最大応力度近傍の挙動を評価するうえでは指数関数または高次放物線によるものが適当であるとの従来からの提案に従った。

一方、鋼材については明確な降伏点をもつものを対象とした。この場合、従来は完全弾性と完全塑性とに分けて表現される場合が多いが破壊近傍のひずみ条件を明確にするためにはひずみ硬化領域も検討する必要があるもので鋼材の応力—ひずみ曲線は式(2)のように仮定した。

また、仮定(e)については極限ひずみが従来の一軸試験にみられる圧縮破壊ひずみより増加する傾向にある点から推定した。

(2) 終局モーメントおよび曲率の計算

前項の仮定に従い終局時のひずみ分布と応力分布を示せば図2, 3のとおりである。このときの終局モーメントと曲率は中立軸位置の変化に従い次のように計算される。

(a) 中立軸が鋼にある場合

まず圧縮側の合力を求めれば次のようになる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{コンクリートの合力} & C_c = b_c \cdot k \cdot d \cdot \sigma_{co} \cdot C_{fc} \\ \text{上段鉄筋の合力} & C_d' = A_s' \cdot \sigma_{dy} = A_s' \cdot \sigma_d' \\ & \text{(塑性領域)} \\ \text{下段鉄筋の合力} & C_d = A_s \cdot E \cdot \epsilon_d = A_s \cdot \sigma_d \\ & \text{(弾性領域)} \\ \text{上フランジの合力} & C_f = b_{sy} \cdot \sigma_{sy} \cdot f a_{2c} \cdot C_{fc} \\ & \text{(弾性領域)} \\ \text{腹板の合力} & C_w = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w a_{2c} \cdot C_{fc} \\ & \text{(弾性領域)} \end{array} \right\} (3)$$

したがって全圧縮力は

$$C = C_c + C_d' + C_d + C_f + C_w \quad (4)$$

となる。

次に引張側の合力は

$$\left. \begin{array}{ll} \text{腹板の合力 1} & T_{w1} = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_1 a_{2t} \cdot C_{ft} \\ & \text{(弾性領域)} \\ \text{腹板の合力 2} & T_{w2} = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_2 a_{2t} \cdot C_{ft} \\ & \text{(塑性領域)} \\ \text{腹板の合力 3} & T_{w3} = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_3 a_{2t} \cdot C_{ft} \\ & \text{(硬化領域)} \\ \text{下フランジの合力} & T_f = b_{sf} \cdot \sigma_{sy} \cdot f a_{2t} \cdot C_{ft} \\ & \text{(硬化領域)} \end{array} \right\} (5)$$

したがって全引張力は

$$T = T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_f \quad (6)$$

となる。

力のつり合い条件 $C = T$ より中立軸係数 k は次式で表わせる。

$$k = \frac{1}{C_{fc}} \left\{ - \left[p' \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d'}{\sigma_{dy}} + p \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dy}} + \frac{1}{b_c \cdot d \cdot \sigma_{co}} (C_f + C_w) \right] + \frac{1}{b_c \cdot d \cdot \sigma_{co}} (T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_f) \right\} \quad (7)$$

よって抵抗モーメント $\frac{Mr}{b_c \cdot d^2 \cdot \sigma_{co}}$ および曲率 $\phi \cdot d$ は次式で計算される。

$$\begin{aligned} \frac{Mr}{b_c \cdot d^2 \cdot \sigma_{co}} &= k^2 \cdot C_{mc} + p' \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d'}{\sigma_{dy}} \left(k - \frac{d'}{d} \right) \\ &+ p \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dy}} (k - 1) + \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{f a_{2c}}{d} \right)^2 \cdot f C_{mc} \\ &+ \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \cdot \left(\frac{w a_{2c}}{d} \right)^2 \cdot w C_{mc} + \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left\{ \left(\frac{w_1 a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot w_1 C_{mt} \right. \\ &+ \left(\frac{w_2 a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot w_2 C_{mt} + \left(\frac{w_3 a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot w_3 C_{mt} \left. \right\} \\ &+ \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{f a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot f C_{mt} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\phi \cdot d = \frac{\epsilon_c}{k} \quad (9)$$

(b) 中立軸がコンクリート部にある場合

まず圧縮側の合力を求めれば次のようになる。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{コンクリートの合力} & C_c = b_c \cdot k \cdot d \cdot \sigma_{co} \cdot C_{fc} \\ \text{上段鉄筋の合力} & C_d' = A_s' \cdot \sigma_{dy} = A_s' \cdot \sigma_d' \\ & \text{(塑性領域)} \\ \text{下段鉄筋の合力} & C_d = A_s \cdot E \cdot \epsilon_d = A_s \cdot \sigma_d \\ & \text{(弾性領域)} \end{array} \right\} (10)$$

したがって全圧縮力は

$$C = C_c + C_d' + C_d \quad (11)$$

となる。

次に引張側の合力は

$$\left. \begin{array}{ll} \text{上フランジの合力} & T_{uf} = b_{sf} \cdot \sigma_{sy} \cdot u_f a_{2t} \cdot C_{ft} \\ & \text{(弾性領域)} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{腹板の合力 1} \quad T_{w1} &= b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_1 a_{2t} \cdot w_1 C_{ft} \\
 &\quad (\text{弾性領域}) \\
 \text{腹板の合力 2} \quad T_{w2} &= b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_2 a_{2t} \cdot w_2 C_{ft} \\
 &\quad (\text{塑性領域}) \\
 \text{腹板の合力 3} \quad T_{w3} &= b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_3 a_{2t} \cdot w_3 C_{ft} \\
 &\quad (\text{硬化領域}) \\
 \text{下フランジの合力} \quad T_{1f} &= b_{sf} \cdot \sigma_{sy} \cdot 1f a_{2t} \cdot 1f C_{ft} \\
 &\quad (\text{硬化領域})
 \end{aligned} \right\} (12)$$

したがって全引張力は

$$T = T_{uf} + T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{1f} \quad (13)$$

となる。

前項と同様に力のつり合い条件より中立軸係数は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{1}{c C_{fc}} \left\{ - \left(p' \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dy}} + p' \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dy}} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{b_c \cdot d \cdot \sigma_{co}} (T_{uf} + T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{1f}) \right\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

よって抵抗モーメント $\frac{Mr}{b_c \cdot d^2 \cdot \sigma_{co}}$ および曲率 $\phi \cdot d$ は次のように算定できる。

$$\begin{aligned}
 \frac{Mr}{b_c \cdot d^2 \cdot \sigma_{co}} &= k^2 \cdot c C_{mc} + p' \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d'}{\sigma_{dy}} \left(k - \frac{d'}{d} \right) \\
 &\quad + p' \cdot \beta_y \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dy}} (k-1) + \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{uf a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot uf C_{mt} \\
 &\quad + \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left\{ \left(\frac{w_1 a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot w_1 C_{mt} + \left(\frac{w_2 a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot w_2 C_{mt} \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{w_3 a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot w_3 C_{mt} \right\} + \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{1f a_{2t}}{d} \right)^2 \cdot 1f C_{mt} \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\phi \cdot d = \frac{\epsilon_c}{k} \quad (16)$$

なお式(3)~(16)に含まれる圧縮力、引張力およびモーメントに関する積分項は仮定した応力-ひずみ曲線について積分を実施すれば次の通りである。

1) 中立軸が鋼にある場合の積分項

圧縮側コンクリートに関する積分項 $c C_{fc}$, $c C_{mc}$ は式(1)より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned}
 C_c &= b_c \int_{(k-k_1)d}^{kd} \sigma_c \cdot dy = b_c \cdot k \cdot d \cdot \sigma_{co} \cdot c C_{fc} \\
 c C_{fc} &= \frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_c} \left\{ e^{1-\frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{co}}} \left(\frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{co}} + 1 \right) - e^{1-\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} + 1 \right) \right\} \quad (17)
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 C_c \cdot y_0 &= b_c \int_{(k-k_1)d_1}^{kd} \sigma_c \cdot y \cdot dy = b_c (k \cdot d)^2 \cdot \sigma_{co} \cdot c C_{mc} \\
 &\quad (18)
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 c C_{mc} &= \left(\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_c} \right)^2 \left\{ e^{1-\frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{co}}} \left[\left(\frac{\epsilon_{c1}}{\epsilon_{co}} + 1 \right)^2 + 1 \right] - e^{1-\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}} \left[\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} + 1 \right)^2 + 1 \right] \right\} \quad (18)
 \end{aligned} \right\}$$

また、圧縮側鋼げたの弾性領域に関する積分項 $f C_{fc}$, $w C_{fc}$, $f C_{mc}$, $w C_{mc}$ は式(2.a)より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned}
 C_f &= b_{sf} \int_{fa_{1c}}^{fa_{2c}} \sigma_s \cdot dy = b_{sf} \cdot \sigma_{sy} \cdot f a_{2c} \cdot f C_{fc} \\
 f C_{fc} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_{sy}}{f \epsilon_{2c}} \left(\frac{f \epsilon_{2c}}{\epsilon_{sy}} - \frac{f \epsilon_{1c}}{\epsilon_{sy}} \right) \\
 C_w &= b_w \int_0^{wa_{2c}} \sigma_s \cdot dy = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w a_{2c} \cdot w C_{fc} \\
 w C_{fc} &= \frac{1}{2}
 \end{aligned} \right\} (19)$$

$$\left. \begin{aligned}
 C_f \cdot y_0 &= b_{sf} \int_{fa_{1c}}^{fa_{2c}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\
 &= \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{f a_{2c}}{d} \right) \cdot f C_{mc} \\
 f C_{mc} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_{sy}}{f \epsilon_{2c}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{f \epsilon_{2c}}{\epsilon_{sy}} \right)^3 - \left(\frac{f \epsilon_{1c}}{\epsilon_{sy}} \right)^3 \right\} \\
 C_w \cdot y_0 &= b_w \int_0^{wa_{2c}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\
 &= \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{w a_{2c}}{d} \right) \cdot w C_{mc} \\
 w C_{mc} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\epsilon_{sy}}{w \epsilon_{2c}}
 \end{aligned} \right\} (20)$$

次に、引張側鋼げたの弾性領域に関する積分項 $w_1 C_{ft}$, $w_1 C_{mt}$ は式(2.a)より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned}
 T_{w1} &= b_w \int_0^{w_1 a_{2t}} \sigma_s \cdot dy = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_1 a_{2t} \cdot w_1 C_{ft} \\
 w_1 C_{ft} &= \frac{1}{2}
 \end{aligned} \right\} (21)$$

$$\left. \begin{aligned}
 T_{w1} \cdot y_0 &= b_w \int_0^{w_1 a_{2t}} \sigma_s \cdot y \cdot dy = \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{w_1 a_{2t}}{d} \right) \cdot w_1 C_{ft} \\
 w_1 C_{mt} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\epsilon_{sy}}{w_1 \epsilon_{2t}}
 \end{aligned} \right\} (22)$$

また、引張側鋼げたの塑性領域に関する積分項 $w_2 C_{ft}$, $w_2 C_{mt}$ は式(2.b)より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned}
 T_{w2} &= b_w \int_{w_2 a_{1t}}^{w_2 a_{2t}} \sigma_s \cdot dy = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w_2 a_{2t} \cdot w_2 C_{ft} \\
 w_2 C_{ft} &= \frac{\epsilon_{sy}}{w_2 \epsilon_{2t}} \left(\frac{w_2 \epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} - \frac{w_2 \epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)
 \end{aligned} \right\} (23)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{w2} \cdot y_0 &= b_w \int_{w2a_{1t}}^{w2a_{2t}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{w2a_{2t}}{d} \right) \cdot w2C_{mt} \\ w2C_{mt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_{sy}}{w2\epsilon_{2t}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{w2\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 - \left(\frac{w2\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} (24)$$

同様に、引張側鋼げたの硬化領域に関する積分項 $w3C_{ft} \cdot fC_{ft}$, $w3C_{mt} \cdot fC_{mt}$ は式 (2・c) より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned} T_{w3} &= b_w \int_{w3a_{1t}}^{w3a_{2t}} \sigma_s \cdot dy = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w3a_{2t} \cdot w3C_{ft} \\ w3C_{ft} &= \left(\frac{\epsilon_{sy}}{w3\epsilon_{2t}} \right) \left\{ \frac{w3\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} (1 + A \log_e w3\epsilon_{2t} \right. \\ &\quad \left. - A - A \log_e \epsilon_{sh}) - \frac{w3\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} (1 + A \log_e w3\epsilon_{1t} \right. \\ &\quad \left. - A - A \log_e \epsilon_{sh}) \right\} \\ T_f &= b_{sf} \int_{fa_{1t}}^{fa_{2t}} \sigma_s \cdot dy = b_{sf} \cdot \sigma_{sy} \cdot fa_{2t} \cdot fC_{ft} \\ fC_{ft} &= \left(\frac{\epsilon_{sy}}{f\epsilon_{2t}} \right) \left\{ \frac{f\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} (1 + A \log_e f\epsilon_{2t} \right. \\ &\quad \left. - A - A \log_e \epsilon_{sh}) - \frac{f\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} (1 + A \log_e f\epsilon_{1t} \right. \\ &\quad \left. - A - A \log_e \epsilon_{sh}) \right\} \end{aligned} \right\} (25)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{w3} \cdot y_0 &= b_w \int_{w3a_{1t}}^{w3a_{2t}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{w3a_{2t}}{d} \right) \cdot w3C_{mt} \\ w3C_{mt} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\epsilon_{sy}}{w3\epsilon_{2t}} \right)^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{w3\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \left(1 + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. A \log_e w3\epsilon_{2t} - \frac{A}{2} - A \log_e \epsilon_{sh} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left(\frac{w3\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \left(1 + A \log_e w3\epsilon_{1t} - \frac{A}{2} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - A \log_e \epsilon_{sh} \right) \right] \right\} \\ T_f \cdot y_0 &= b_{sf} \int_{fa_{1t}}^{fa_{2t}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{fa_{2t}}{d} \right) \cdot fC_{mt} \\ fC_{mt} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\epsilon_{sy}}{f\epsilon_{2t}} \right)^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{f\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \left(1 + A \log_e f\epsilon_{2t} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{A}{2} - A \log_e \epsilon_{sh} \right) - \left(\frac{f\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \left(1 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. A \log_e f\epsilon_{1t} - \frac{A}{2} - A \log_e \epsilon_{sh} \right) \right] \right\} \end{aligned} \right\} (26)$$

2) 中立軸がコンクリート部にある場合の積分項
圧縮側コンクリートに関する積分項 cC_{fc} , cC_{mc} は式

(1)より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned} C_c &= b_c \int_0^{kd} \sigma_c \cdot dy = b_c \cdot k \cdot d \cdot \sigma_{co} \cdot cC_{fc} \\ cC_{fc} &= \frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_c} \left\{ e - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} + 1 \right) e^{1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}} \right\} \end{aligned} \right\} (27)$$

$$\left. \begin{aligned} C_c \cdot y_0 &= b_c \int_0^{kd} \sigma_c \cdot y \cdot dy \\ &= b_c \cdot (k \cdot d)^2 \cdot \sigma_{co} \cdot cC_{mc} \\ cC_{mc} &= \left(\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_c} \right)^2 \left\{ 2e - \left[\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} + 1 \right)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 1 \right] e^{1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}} \right\} \end{aligned} \right\} (28)$$

次に、引張側鋼げたの弾性領域に関する積分項 ufC_{ft} , $w1C_{ft}$, ufC_{mt} , $w1C_{mt}$ は式 (2・a) より次のように算出される。

$$\left. \begin{aligned} T_{uf} &= b_{sf} \int_{ufa_{1t}}^{ufa_{2t}} \sigma_s \cdot dy = b_{sf} \cdot \sigma_{sy} \cdot ufa_{2t} \cdot ufC_{ft} \\ ufC_{ft} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_{sy}}{uf\epsilon_{2t}} \left\{ \left(\frac{uf\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 - \left(\frac{uf\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \right\} \\ T_{w1} &= b_w \int_{w1a_{1t}}^{w1a_{2t}} \sigma_s \cdot dy = b_w \cdot \sigma_{sy} \cdot w1a_{2t} \cdot w1C_{ft} \\ w1C_{ft} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_{sy}}{w1\epsilon_{2t}} \left\{ \left(\frac{w1\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 - \left(\frac{w1\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} (29)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{uf} \cdot y_0 &= b_{sf} \int_{ufa_{1t}}^{ufa_{2t}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b_{sf}}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{ufa_{2t}}{d} \right) \cdot ufC_{mt} \\ ufC_{mt} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_{sy}}{uf\epsilon_{2t}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{uf\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^3 - \left(\frac{uf\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^3 \right\} \\ T_{w1} \cdot y_0 &= b_w \int_{w1a_{1t}}^{w1a_{2t}} \sigma_s \cdot y \cdot dy \\ &= \frac{b_w}{b_c} \cdot \frac{\sigma_{sy}}{\sigma_{co}} \left(\frac{w1a_{2t}}{d} \right) \cdot w1C_{mt} \\ w1C_{mt} &= \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_{sy}}{w1\epsilon_{2t}} \right)^2 \left\{ \left(\frac{w1\epsilon_{2t}}{\epsilon_{sy}} \right)^3 - \left(\frac{w1\epsilon_{1t}}{\epsilon_{sy}} \right)^3 \right\} \end{aligned} \right\} (30)$$

さらに、引張側鋼げたの塑性領域に関する積分項 $w2C_{ft}$, $w2C_{mt}$ は式 (23) (24) と同様に算出し、硬化領域に関する積分項 $w3C_{ft} \cdot fC_{ft}$, $w3C_{mt} \cdot fC_{mt}$ は式 (25) (26) と同様に算出される。

なお、実際の数値計算に際しては、繰返し試算または図式解法による。すなわち、任意の k を仮定しひずみ状態に応じ式(7)または(8)への代入を繰返すことによって、力の条件およびひずみ条件の双方を満足する中立軸係数 k を求め、式(8), (9)または(15), (16)に代入することによ

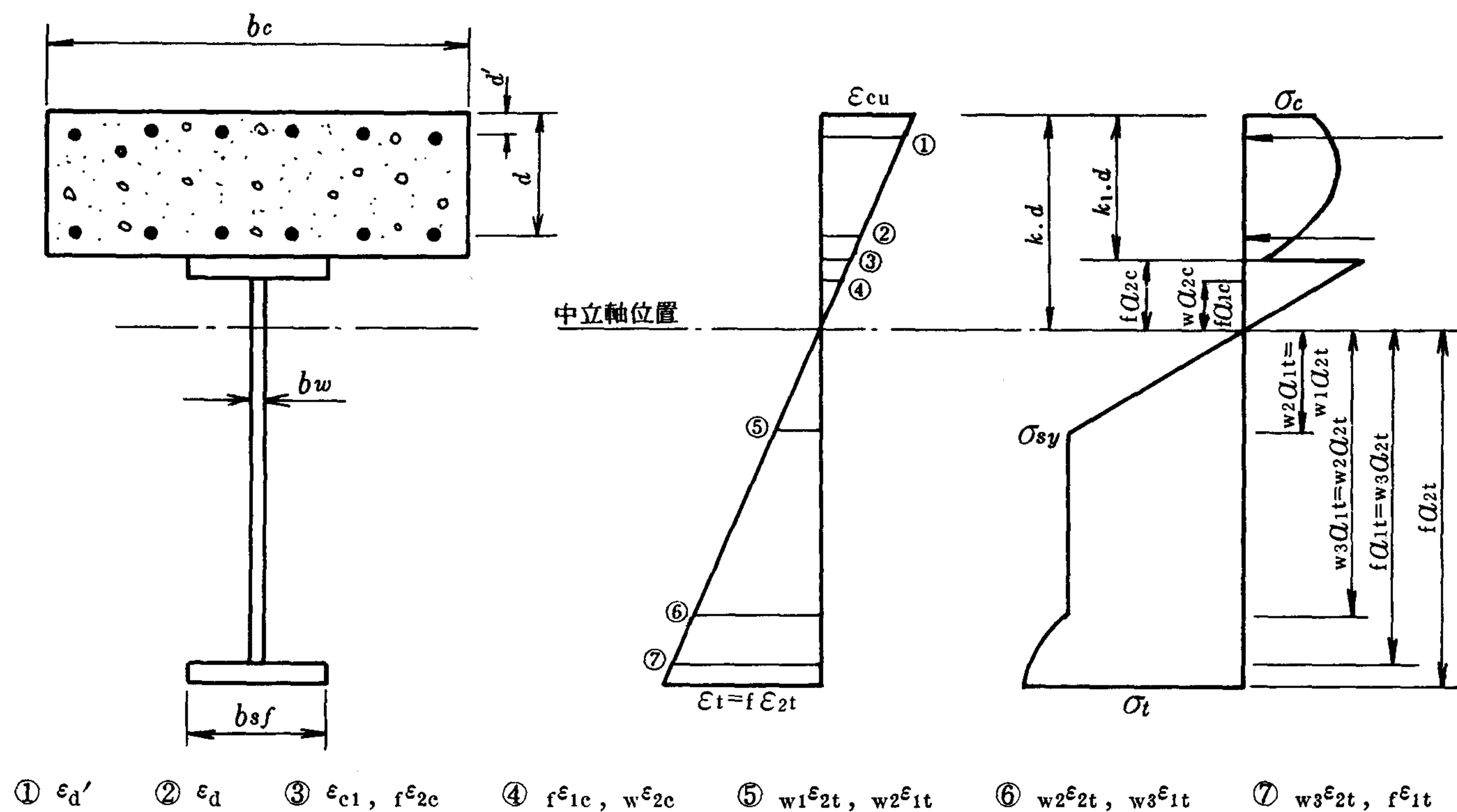


図2 破壊時のひずみおよび応力分布の仮定 (中立軸が鋼にある場合)

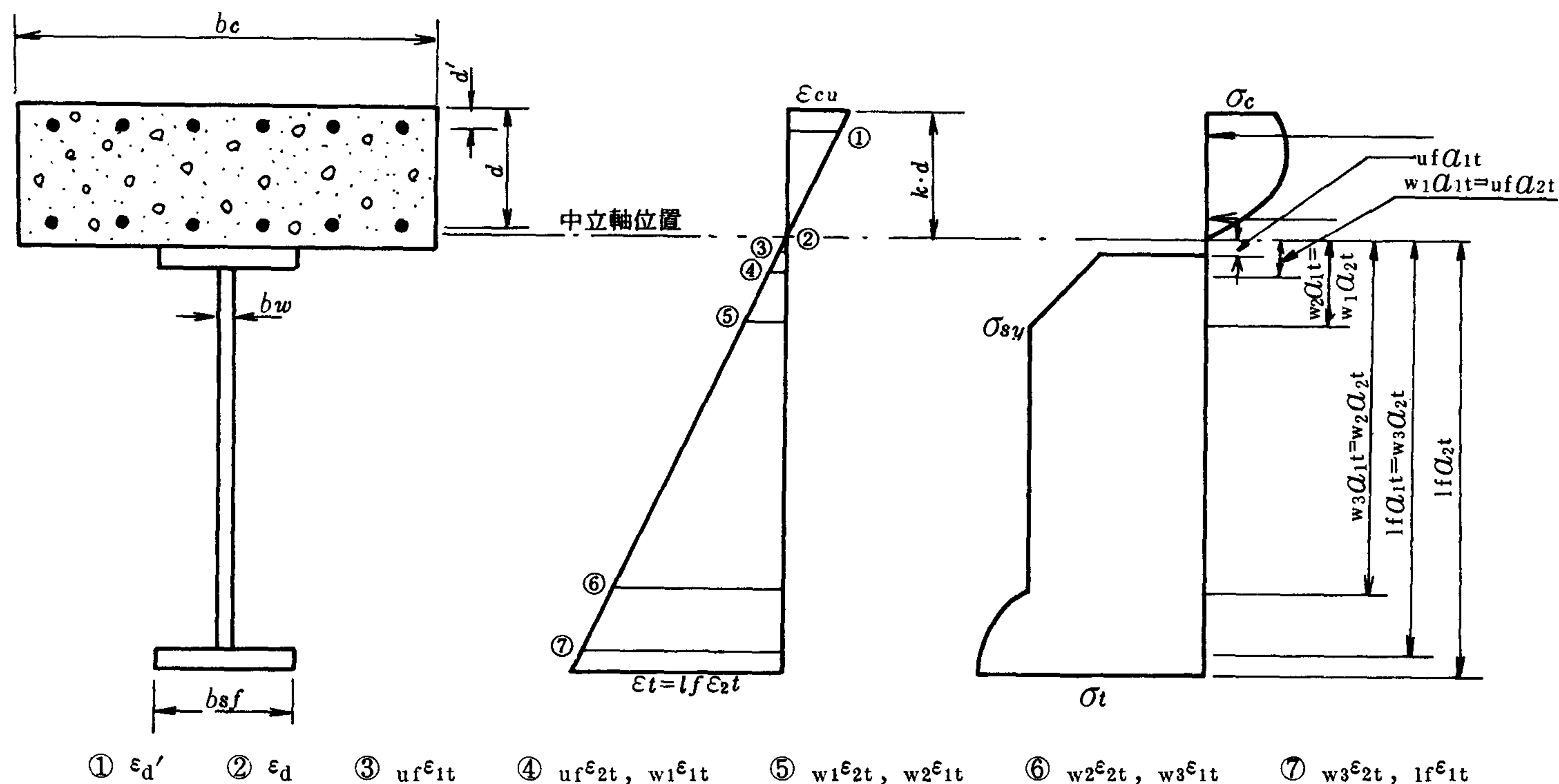


図3 破壊時のひずみおよび応力分布の仮定 (中立軸がコンクリートにある場合)

て終局抵抗モーメントおよび曲率が算出できる。

(3) 数値計算結果

合成げたの耐力や変形能力などに影響を与える因子とその程度を検討するために前節の計算式に基づいた数値計算を実施した。終局時の中立軸係数、抵抗曲げモーメント、曲率の変化の様子は図4～図9に示されている。

以下に項目別にその傾向を述べる。なお、計算に用いた諸数値は、実用に供されている合成げた断面なども参

考にして以下のとおりとした。

$$\sigma_{co}=28\text{MPa}, \epsilon_{co}=3500 \times 10^{-6}, \epsilon_{cu}=5000 \times 10^{-6},$$

$$p\beta_y=p'\beta_y'=0 \sim 0.3 \quad (0.01 \text{ 間隔})$$

$$\sigma_{dy}=294\text{MPa}, \epsilon_{dy}=1430 \times 10^{-6}, \epsilon_{dh}=20000$$

$$\times 10^{-6}, \sigma_{sy}=324\text{MPa}, \epsilon_{sy}=1570 \times 10^{-6},$$

$$\epsilon_{sh}=20000 \times 10^{-6}, A=0.3, E=206\text{GPa},$$

$$d'/d=0.26, h_c/d=1.26$$

$$t_f/d=0.10 \sim 0.14 \quad (0.01 \text{ 間隔})$$

$$h_s/d=3.5\sim 3.9 \quad (0.1 \text{ 間隔})$$

$$b_{su}/b_c=0.20\sim 0.24 \quad (0.01 \text{ 間隔})$$

$$t_w/b_c=0.005\sim 0.009 \quad (0.001 \text{ 間隔})$$

1) 終局時の中立軸係数

鋼げたの材質をパラメータにとり、終局時の中立軸係数と床版の力学的鉄筋比との関係を図4に示した。また鋼げたの断面寸法を変えたときの中立軸の変化の様子を図5に示した。図4, 5よりおおむね次の傾向が認められる。

(ア) 床版の力学的鉄筋比が増加すると、中立軸係数は減少する。すなわち中立軸位置は上昇し、終局時には鋼げた全体が引張となる可能性がある。しかし、変化の程度は鉄筋コンクリート単体の場合に比べて少なく、合成げたにおいては、鋼げたの性質の方が

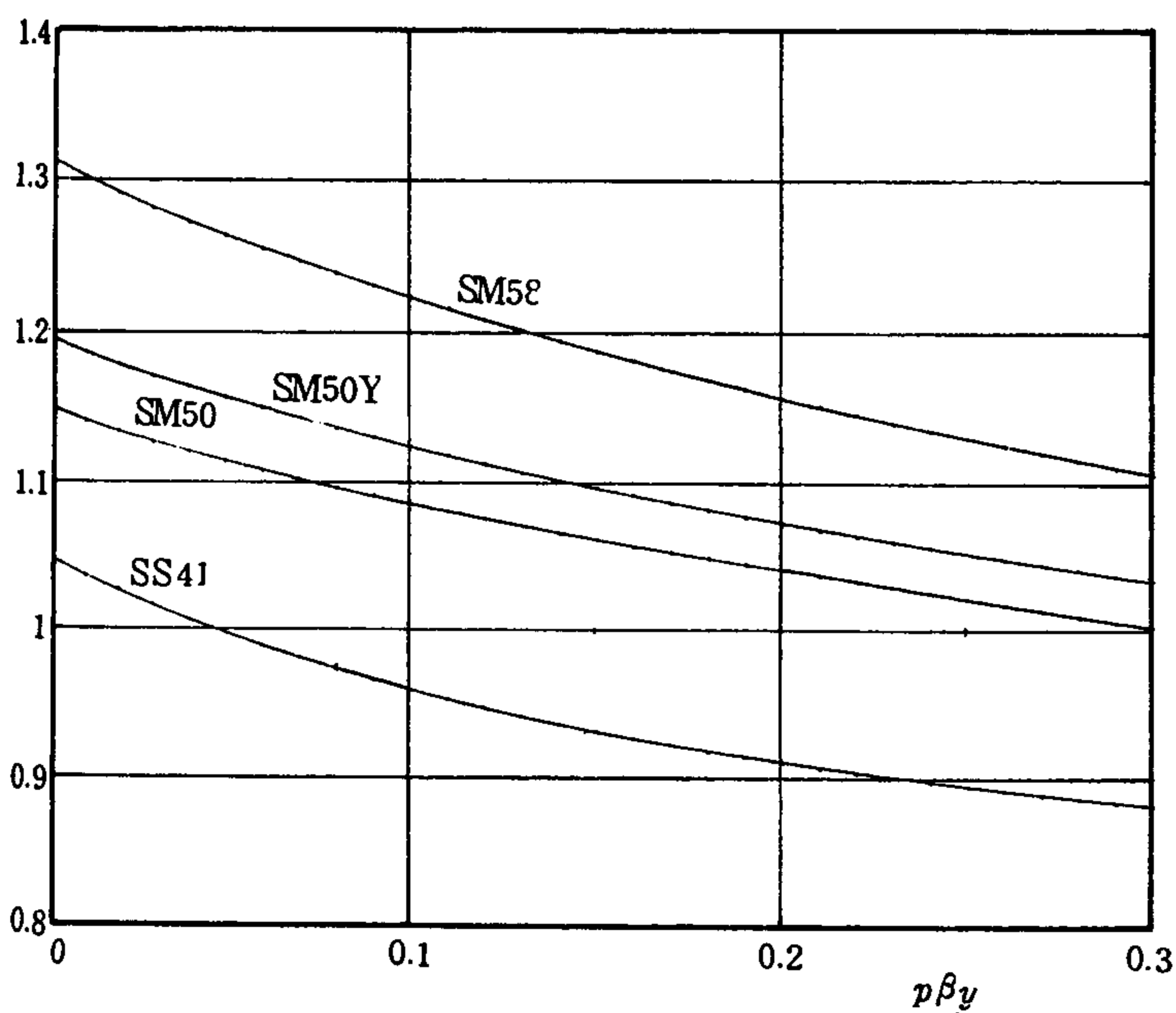


図4 終局時の中立軸係数と床版の鉄筋比との関係

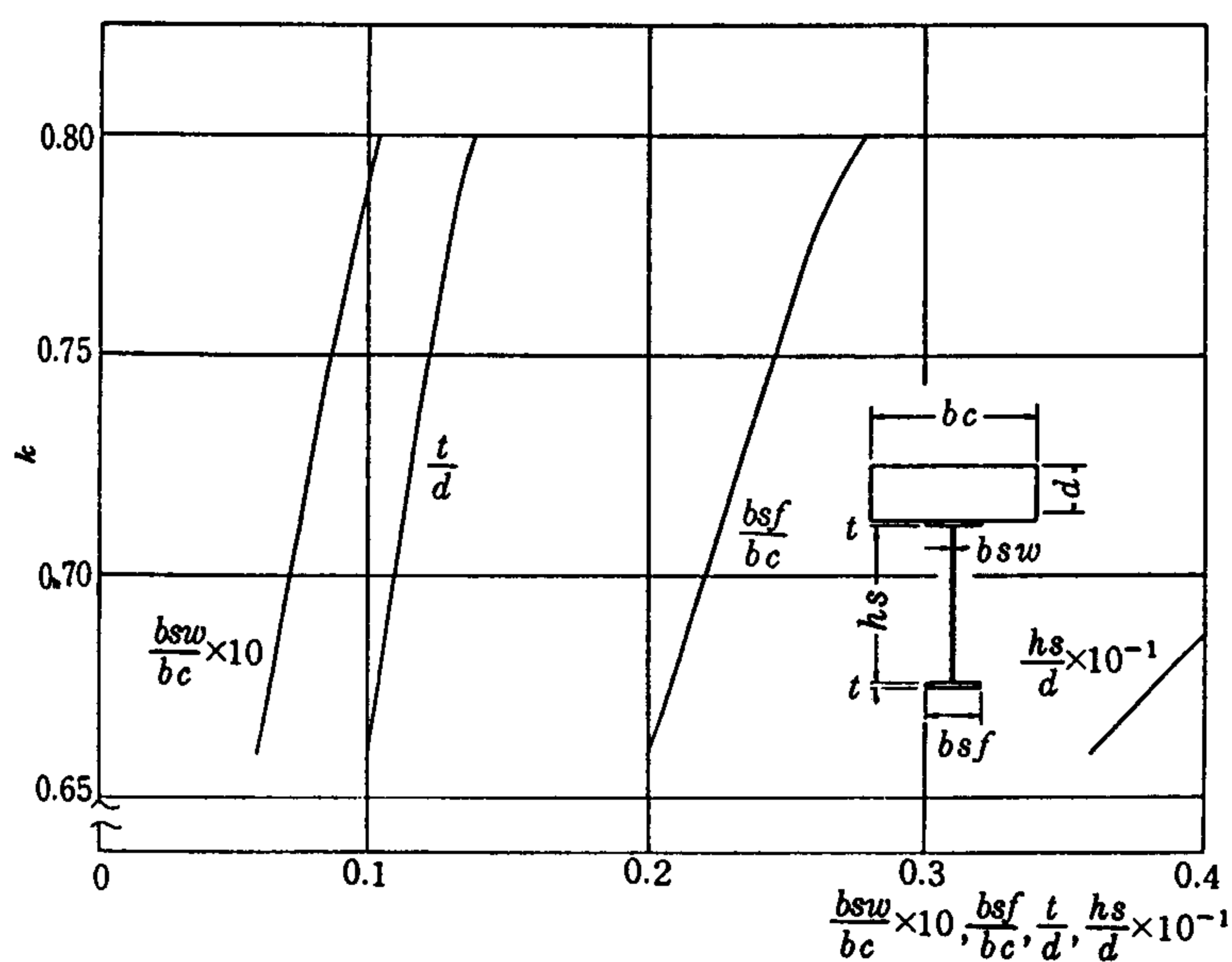


図5 終局時の中立軸係数と断面寸法との関係

より大きな影響を与える可能性が示唆される。

(イ) 鋼げたの材質および断面寸法が増加すると中立軸係数は増加する。すなわち、高品質の鋼げたを採用したり、あるいは鋼げたのフランジ幅、フランジ厚さ、腹部幅、全高さなどを増加させると終局時の中立軸の位置は下がる。

2) 終局モーメント

前項と同様に鋼げたの材質をパラメータにとり終局時の抵抗モーメントと床版の力学的鉄筋比との関係を図6に、また鋼げたの断面寸法の変化に従う抵抗モーメントの変化を図7に示した。図6, 7よりおおむね次の傾向が認められる。

(ア) 床版の力学的鉄筋比の増加に従い終局モーメントはほぼ直線的に増加するが、その程度は小さくむしろ鋼げたの材質を増加させた方が終局モーメントの増分は大きい。

たとえば、SS-41 と SM-58 とでは後者の方が5割程度終局モーメントは増加する。

(イ) 鋼げたのフランジ幅、厚さ、腹部厚さ、全高さな

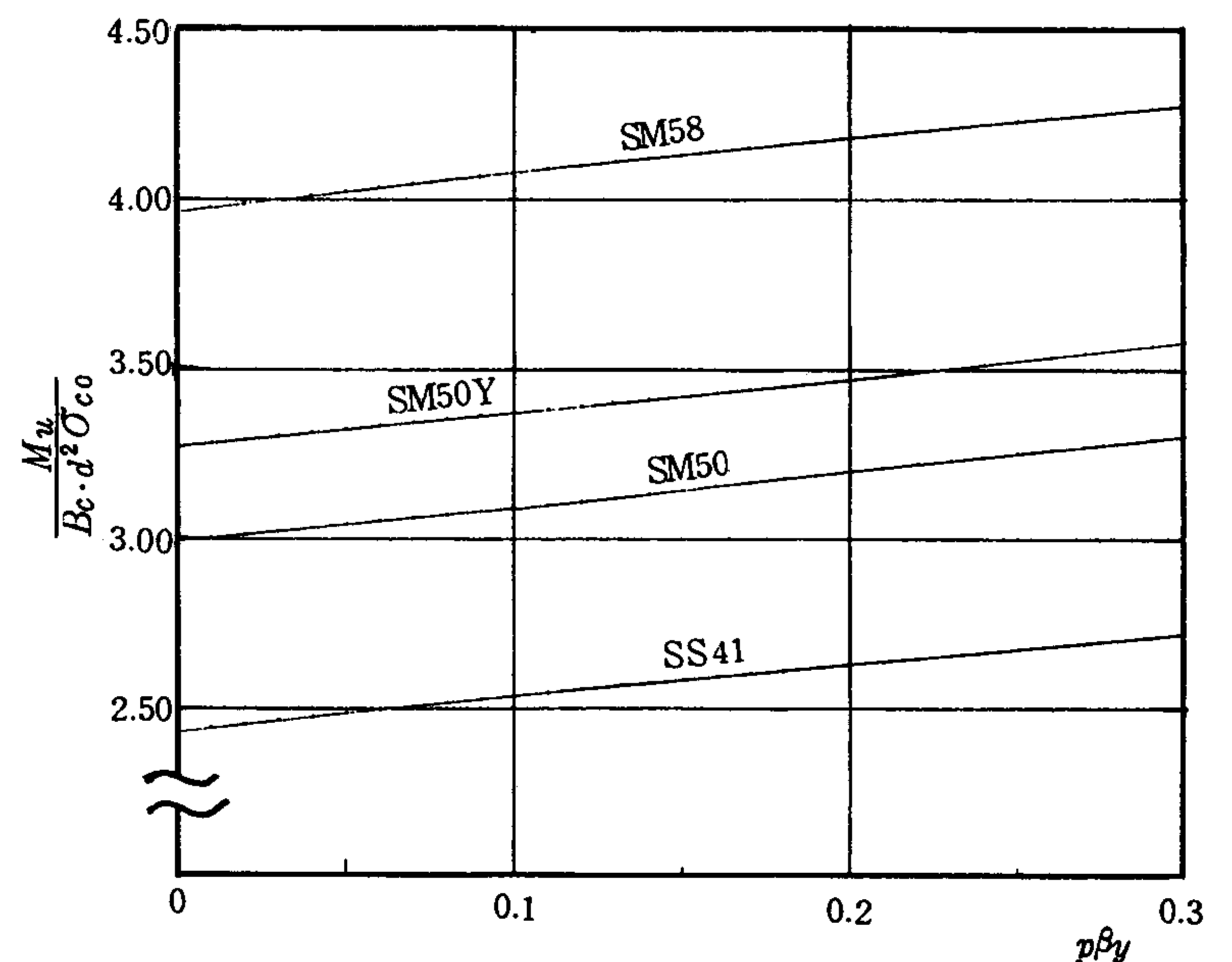


図6 終局時のモーメントと床版の力学的鉄筋比との関係

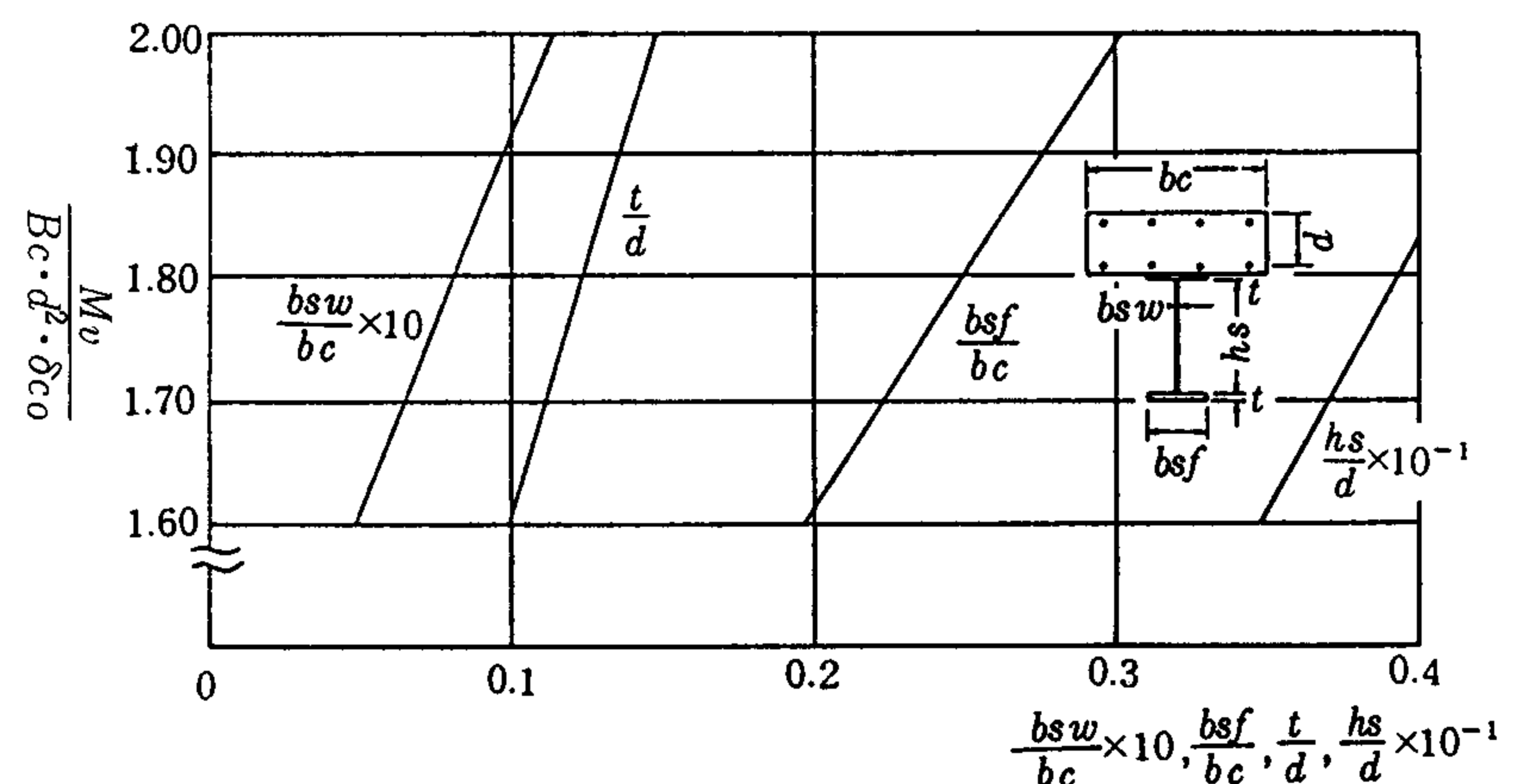


図7 終局モーメントと断面寸法との関係

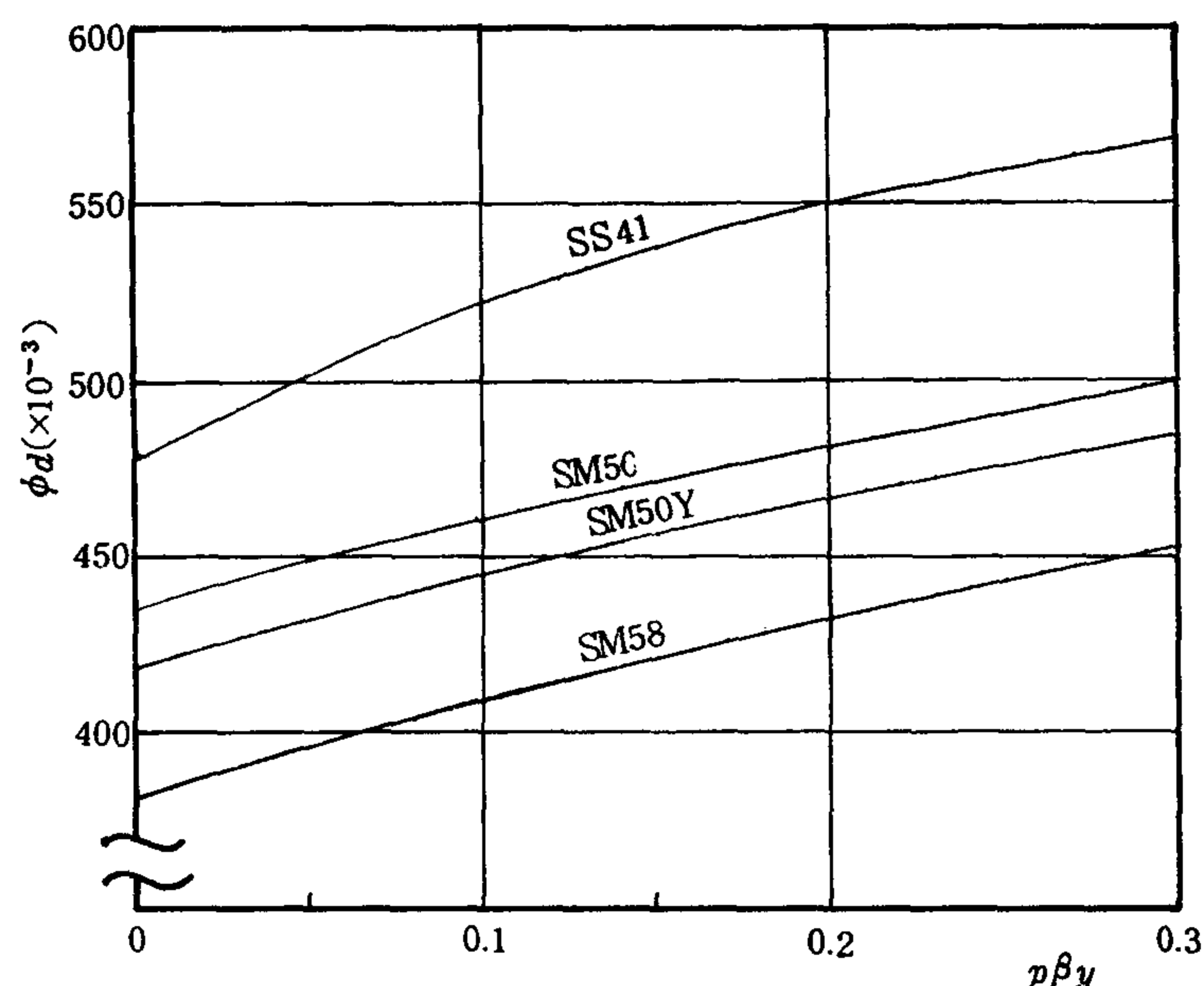


図 8 終局時の曲率と床版の力学的鉄筋比との関係

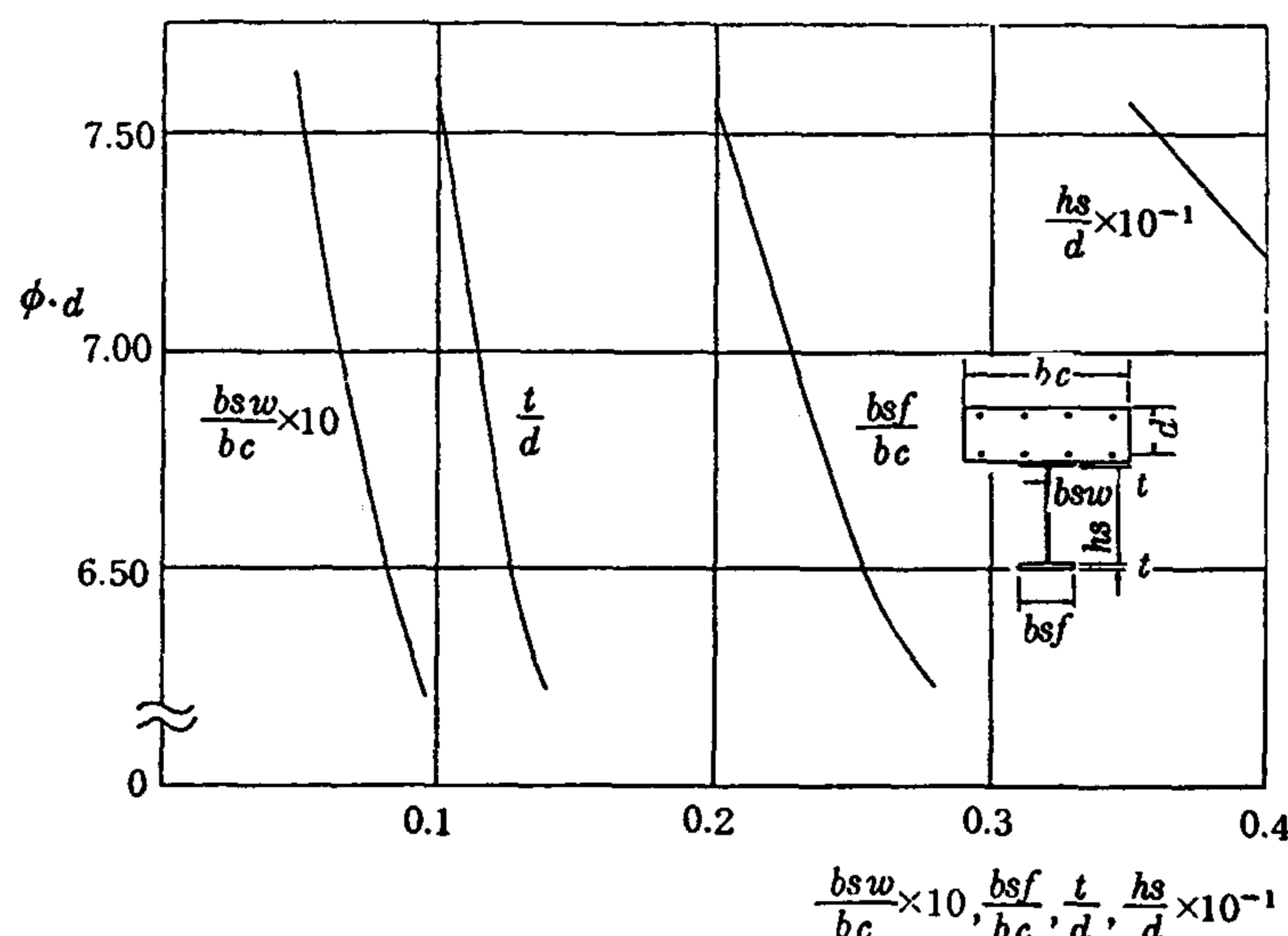


図 9 終局時の曲率と断面寸法との関係

どを増加させると抵抗モーメントは増加し、その傾向は腹板厚さを変化させた場合に顕著である。

3) 終曲時の曲率

前項と同様に床版の力学的鉄筋比にしたがう終局曲率の変化の様子を図 8 に、また断面形状の変化によるものを図 9 に示した。同図からおおむね次の傾向が認められる。

(ア) 平面保持則を用いた計算であるので、中立軸係数の場合と逆の傾向が得られることになる。すなわち、床版の力学的鉄筋比を増加させると、終局曲率は増加するがその傾向は鉄筋コンクリート単体の場合と比較して少ない。

(イ) 鋼げたの材質を増加させたり、フランジの幅、厚さ、腹部の厚さなど、断面を増加させると終局時の曲率は減少する。

4) まとめ

以上の計算結果をまとめれば合成げたの終局時の挙動

に関し、おおむね次の傾向が得られている。すなわち、合成げたの終局モーメントや終局曲率に影響を与える要因としては、床版の力学的鉄筋比、つまり床版コンクリートの材質、断面寸法、補強鉄筋量およびその材質、さらに鋼げたの断面寸法と材質であるが影響の程度は床版の力学的鉄筋比よりもむしろ鋼げたの諸性質の方が著しい。強度の立場からみれば、合成げたの耐荷力を増大させるには床版コンクリートの力学的鉄筋比を増し、鋼げたの材質および断面寸法を増せば良いが変形能力の立場からみれば鋼げたの材質と断面寸法の増加は終局曲率の減少すなわち変形能力やじん性の低下となるので、たとえば設計に関してはこの点に注意する必要がある。

なお、鋼げたの断面寸法例の計算については本例は実用に供されている断面すべてを網羅して計算を実施していないので今後さらに検討する必要があると考える。

4. 曲げ耐力に関する実験

(1) 試験体

実験に用いた合成げたを図10に示す。けたにはH形鋼を用い、支点部分および載荷点部分には腹板の座屈を防止するための補剛材を取り付けた。床版には図11に示すように厚さ 120 mm、幅 750 mm で格子状に配筋した鉄筋コンクリート床版を用いた。また、鋼げたとコンクリート床版とのずれを防止するためのずれ止めには、D 16 (SD-30)・長さ 80 mm の異形鉄筋を用い、せん断力分

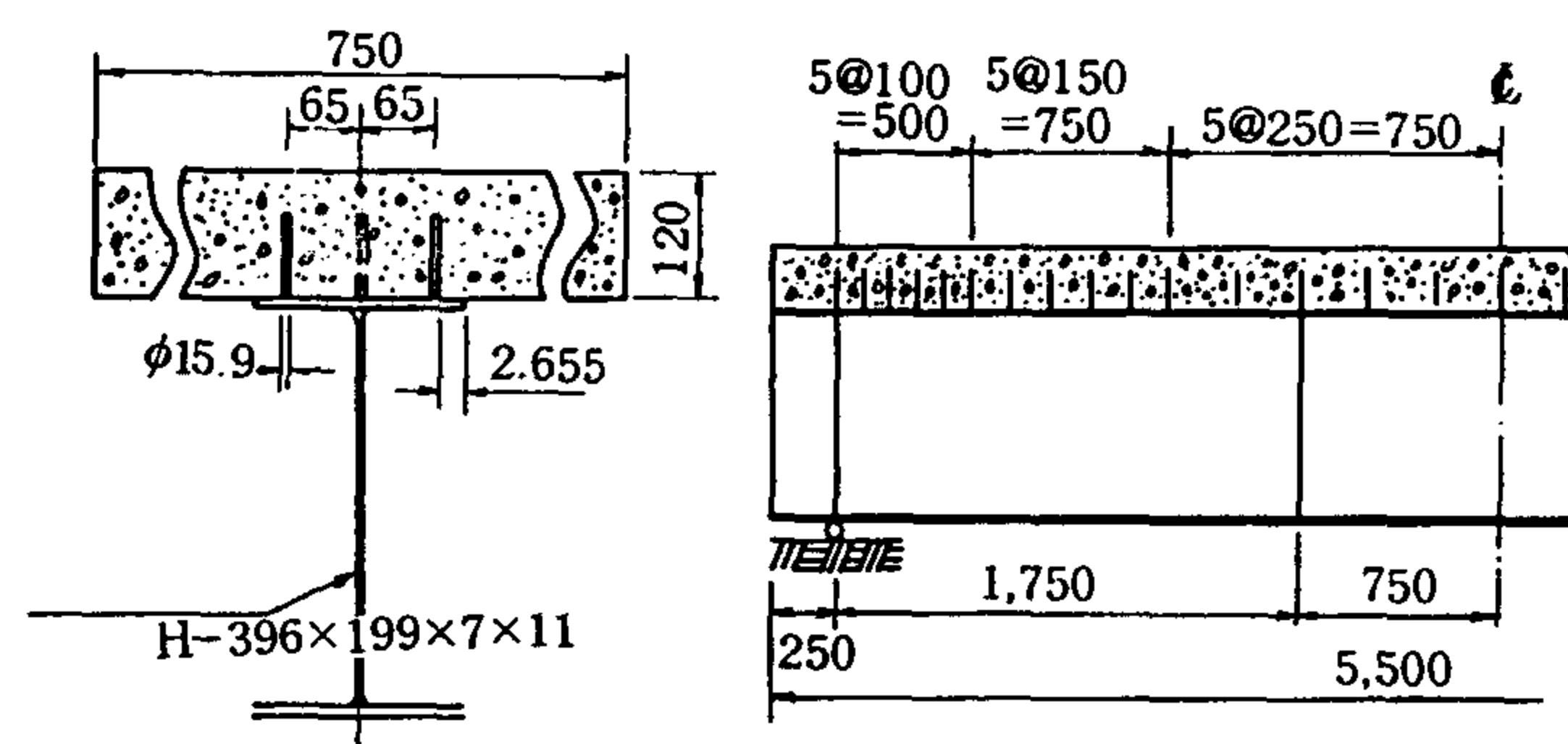


図10 試験体

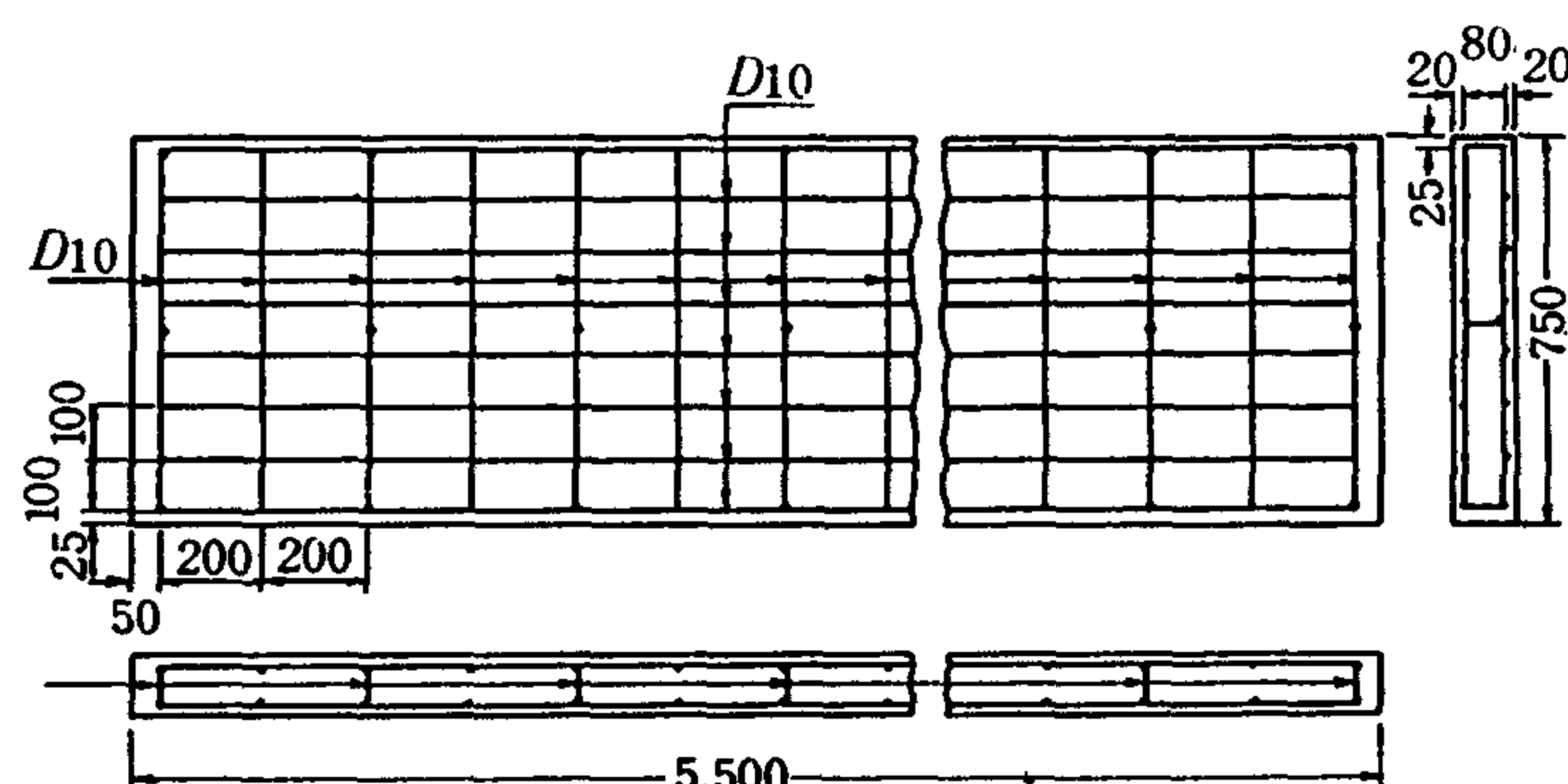


図11 床版の配筋図

表 1 断面の寸法

コンクリート床版		鉄 筋 断面積	かぶり	上フランジ		腹 板		下フランジ		コーナ 直 径
幅	高 さ			幅	厚 さ	幅	高 さ	幅	厚 さ	
75.0	12.0	7133	2.0	19.9	1.1	0.7	37.4	19.9	1.1	1.6

布にしたがって支点から 50 cm までを 3 列 10 cm 間隔・50 cm から 125 cm までを 3 列 15 cm 間隔・125 cm からセンターまでを 3 列 25 cm 間隔で配置した。なお、各断面の寸法は表 1 のとおりである。

(2) 載荷方法および測定項目

載荷試験に用いた載荷装置を図12、図13に示す。荷重は載荷用はりを用いてスパン 5 m、純曲げ区間 1.5 m の 2 点対称集中荷重とした。荷重位置は、支点から 1.75 m の所とし、荷重の大きさは、 $P=0$ tf から 20 tf までを 4 tf きざみで、それ以上は 2 tf きざみで破壊まで載荷した。

つぎに測定項目は下記の通りである。

1) コンクリート床版：コンクリート床版のひずみについてはゲージ長さ 70 mm のワイヤストレインゲージを使用して測定した。測定箇所は図14に示すとおり、中央断面のコンクリート床版上面と下面にそれぞれ 2 箇所ずつ計 4 箇所測定した。

2) 鉄筋：鉄筋のひずみについてはゲージ長さ 5 mm のワイヤストレインゲージを使用して測定した。測定箇所は図14に示すとおり、格子状に 2 層配置した鉄筋の上下主鉄筋にそれぞれ 2 箇所ずつ計 4 箇所測定した。

3) 鋼げた：鋼げたのひずみについてはゲージ長さ 5 mm のワイヤストレインゲージを使用して測定した。測定箇所は図14に示すとおり、上フランジ下面・腹板中央・下フランジ下面にそれぞれ 2 箇所ずつ計 6 箇所測定した。

4) たわみ：たわみについてはストローク 30 mm、感度 1/100 mm のダイヤルゲージを使用した。測定箇所は

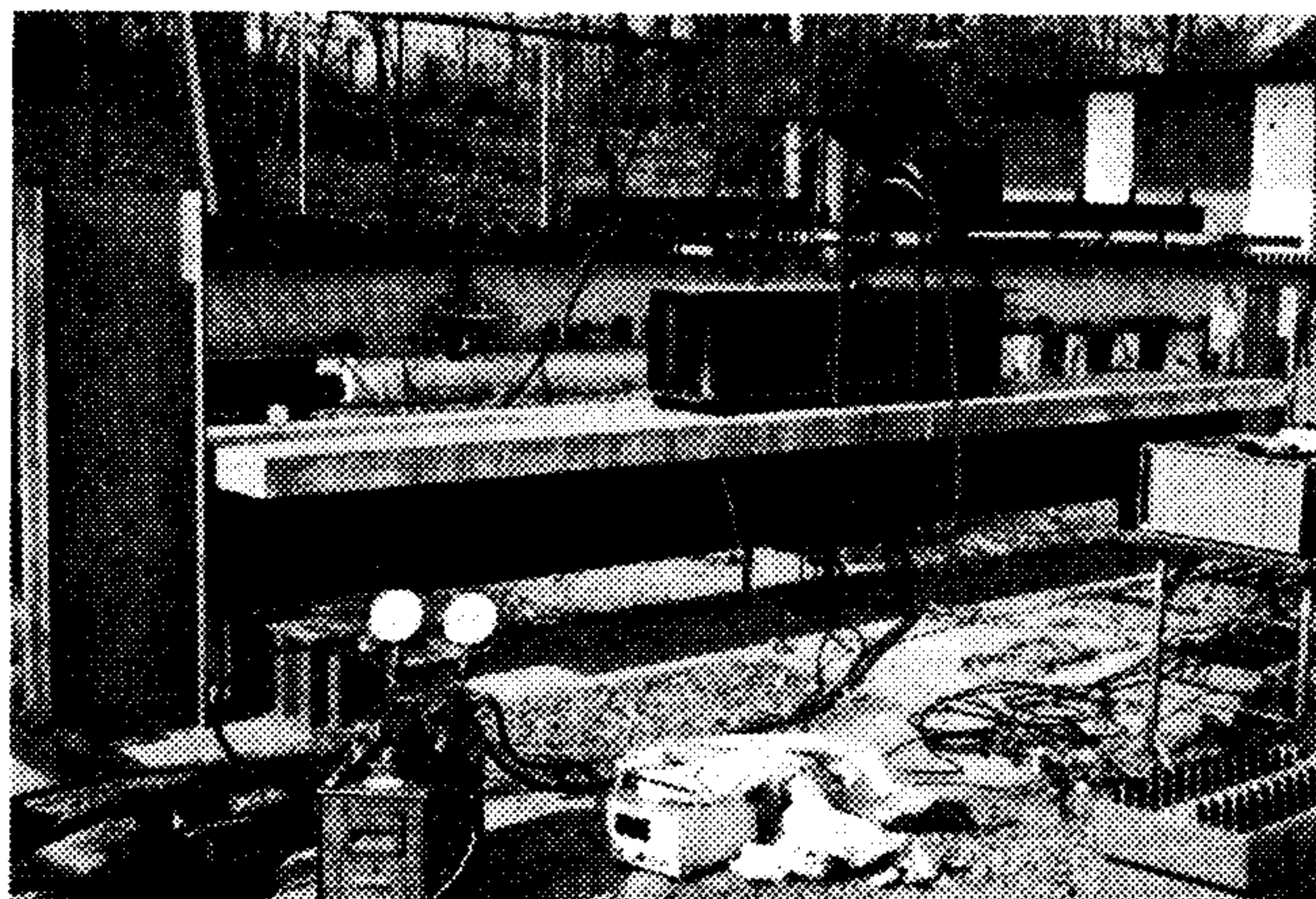


図12

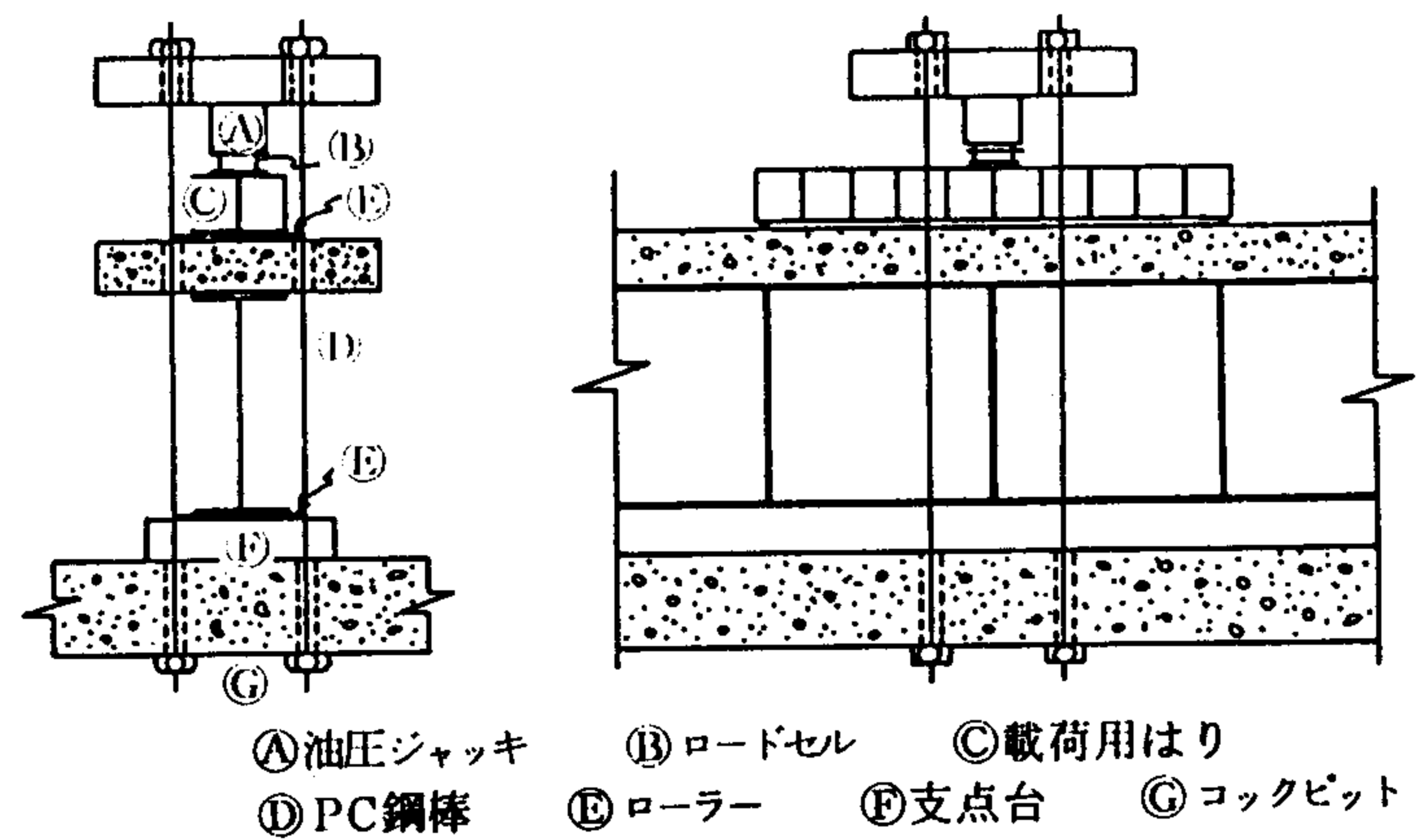


図13 載荷装置

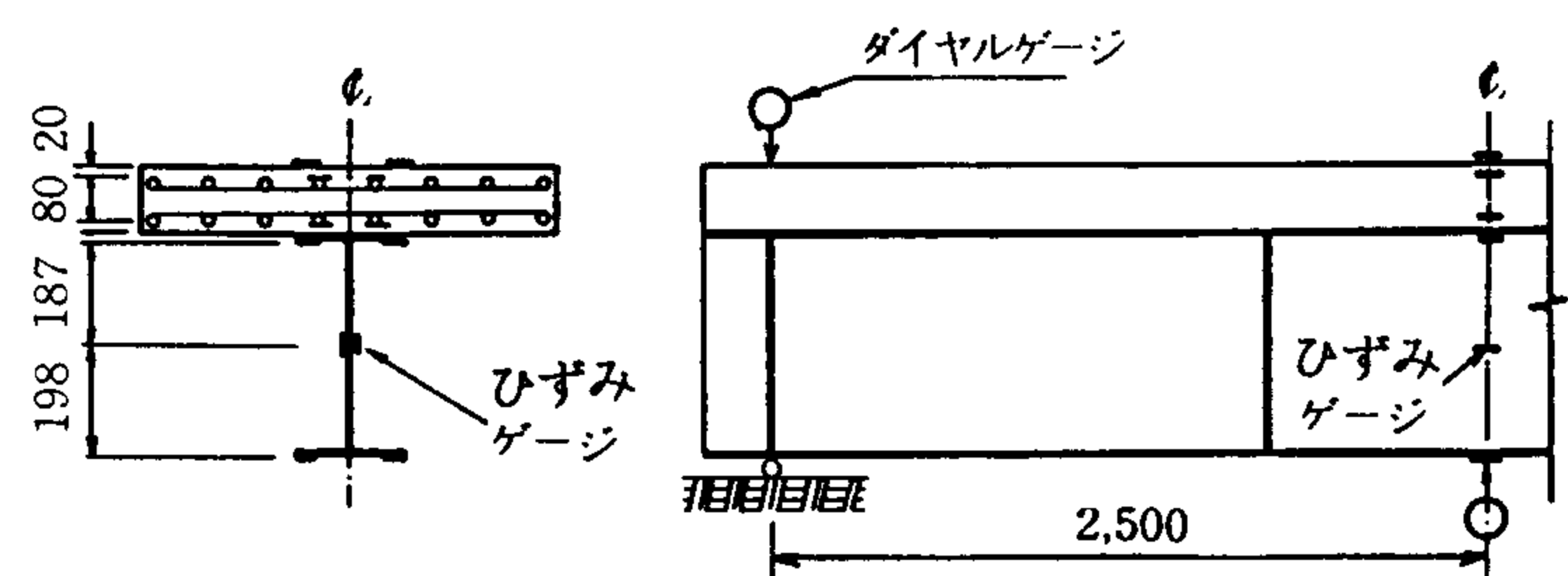


図14 ひずみおよびたわみ測定位置

表 2 材料の品質

	コン クリ ート	上・下 フラン ジ (SS41)	腹 板 (SS41)	鉄 筋 (S D -30)
σ_{co} (M.Pa)	28			
ϵ_{co} ($\times 10^{-6}$)	2000			
ϵ_{cu} ($\times 10^{-6}$)	5000			
σ_{sy}, σ_{dy} (M.Pa)		294	369	378
$\epsilon_{sy}, \epsilon_{dy}$ ($\times 10^{-6}$)		1430	1790	1833
$\epsilon_{sh}, \epsilon_{dh}$ ($\times 10^{-6}$)		20000	20000	2700
A		0.33	0.24	0.35

図14に示すとおり、中央断面のけた下面で測定した。また、両支点には支点沈下測定用にダイヤルゲージを配置した。なお、使用した材料の材質試験結果を表 2 にまとめた。

5. 実験結果の概要と理論の検証

試験体が破壊に至る様子は次のとおりであり、また、

3章で提案した計算式の妥当性を検証するために本試験体の材質と寸法に基づく計算値を求め図15～18に実験値と共に示した。

以下に項目別にその概要について述べる。

(1) 破壊に至る挙動

荷重の増加に伴い、鋼げた下面が降伏するまでたわみはほぼ直線的に増加する。鋼げたの下面が降伏したのちは、たわみの増分は大きくなり、コンクリート床版の上面、下面などにひびわれの発生が認められた。やがてひびわれは、床版内部へと進展し、床版上面の一部に圧壊による剝離が観測された。最後はコンクリート床版のかなり内部まで圧壊し、これが最大耐力時に相当した。さらに、載荷を加えても耐力は増加せず、鋼げたの崩壊と鉄筋の座屈が観測された。

(2) ひずみ性状

図15に中央断面のひずみ分布図を示し、図16から図18に中央断面各測点のモーメント・ひずみ曲線を示した。ひずみ分布はコンクリート床版と鋼げた接合部分に多少の乱れがみられるもののほぼ平面保持が保たれている。また、スラブ下面と上フランジ、下フランジのひずみははじめはそれぞれ圧縮、引張ひずみであるが294 KN・m付近で下フランジのひずみが降伏ひずみに達し、その後、中立軸の位置がしだいに上昇し、上フランジとスラブ下面のひずみが圧縮ひずみから引張ひずみへと移行していくことがわかる。また、同図に示したとおり計算曲線はおおむねひずみ性状の変化を良く表現できるように思われる。

(3) たわみ性状

図19に支間中央のモーメント・たわみ曲線を示した。たわみ量はモーメントが294 KN・m付近までは、ほぼ一定に増えつつけているが下フランジが降伏することによりモーメントの増分に比較してたわみ量の増分が大きくなることわかる。

(4) 破壊モーメント

いずれの試験体も断面中央のコンクリート床版が圧壊することにより破壊した。その時のモーメント・中立軸・曲率を表3に示した。いずれの値も実験値と計算値とを比較するとモーメントで1%，中立軸で4%，曲率で5%の相違が見られる程度で良い一致が認められる。

6. 結 論

単純合成げたが曲げを受ける場合の挙動について理論と実験の両面から検討を加えた。今後の設計法が限界状態設計へ移行する点に注目し、従来無視されることの多かったひずみ条件を明確にするために、材料の塑性的挙

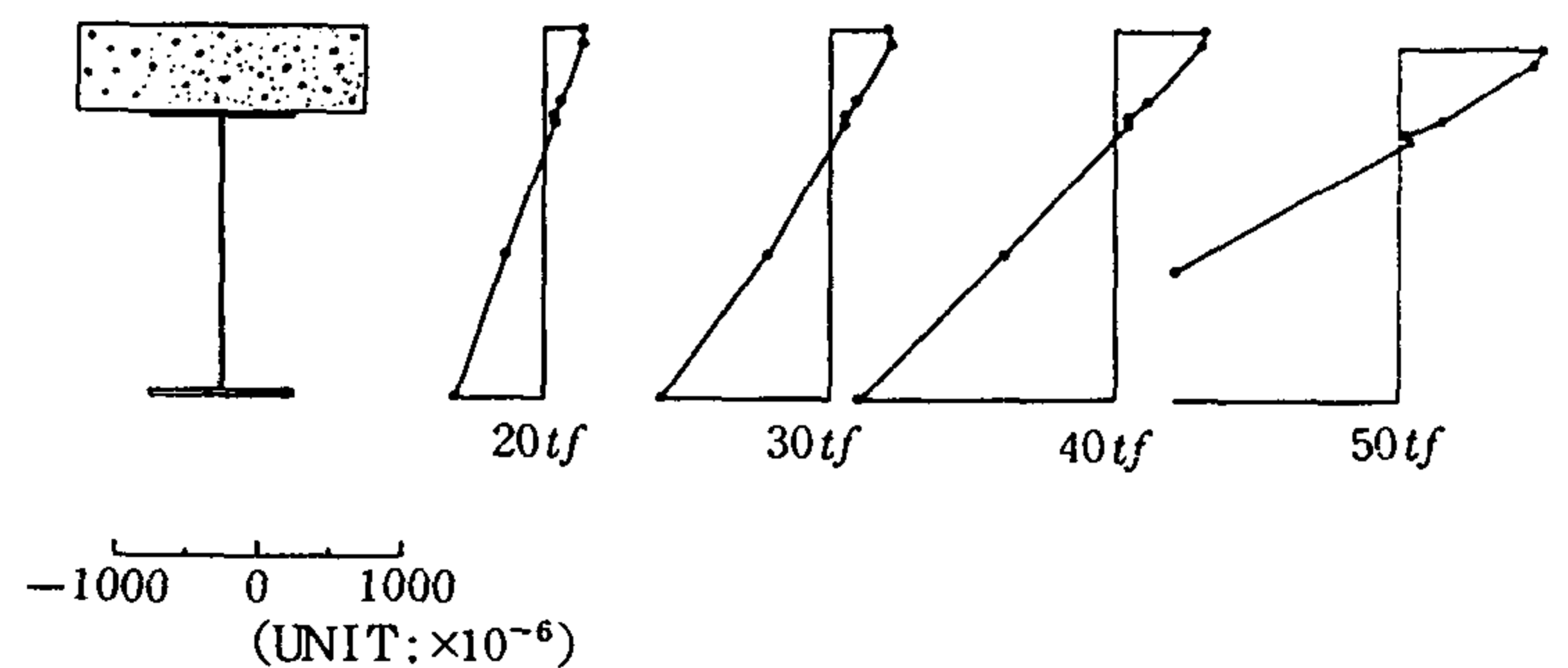


図15 合成げた中央前面のひずみ分布測定例

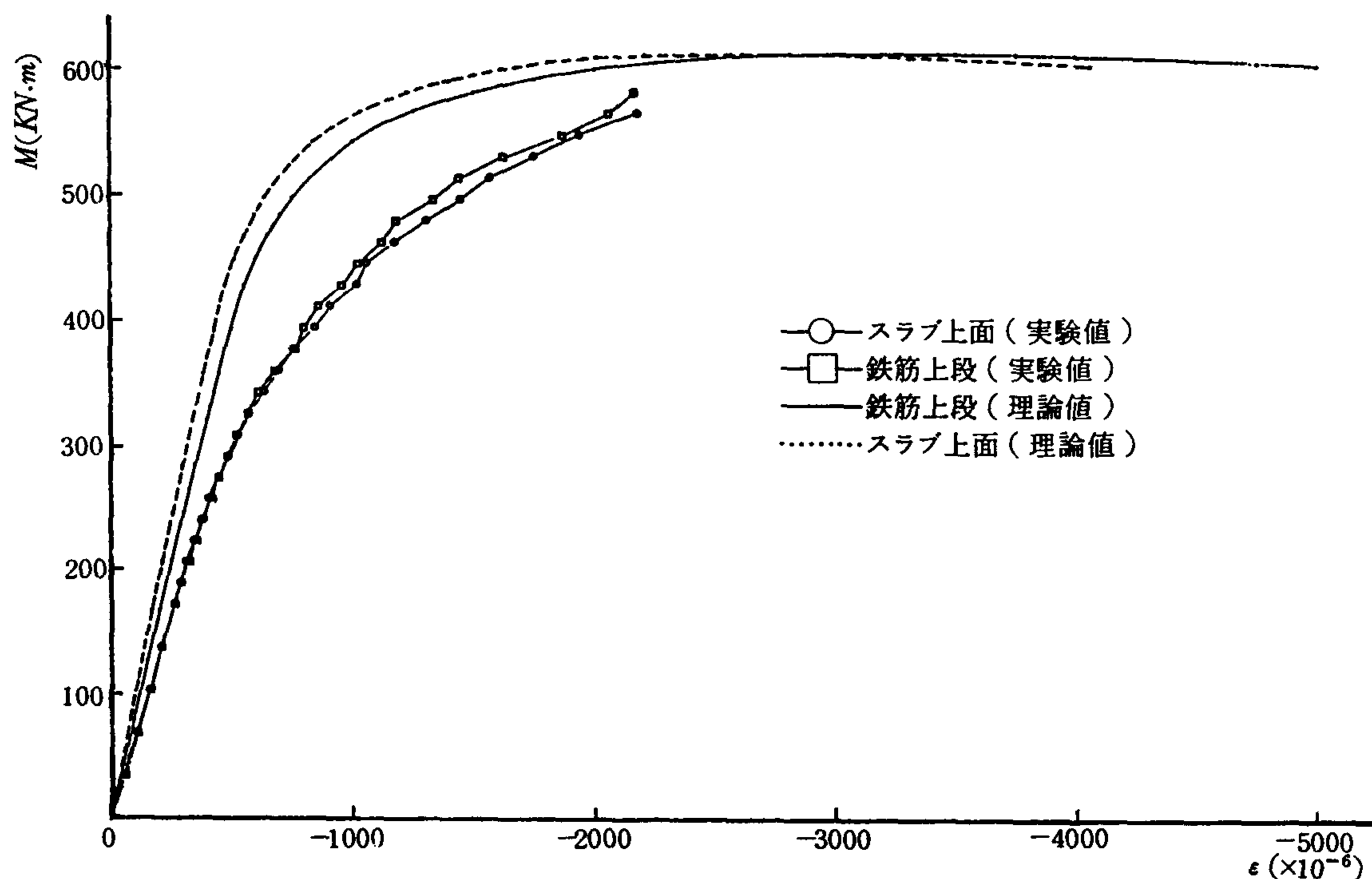


図16 上部のモーメント・ひずみ曲線

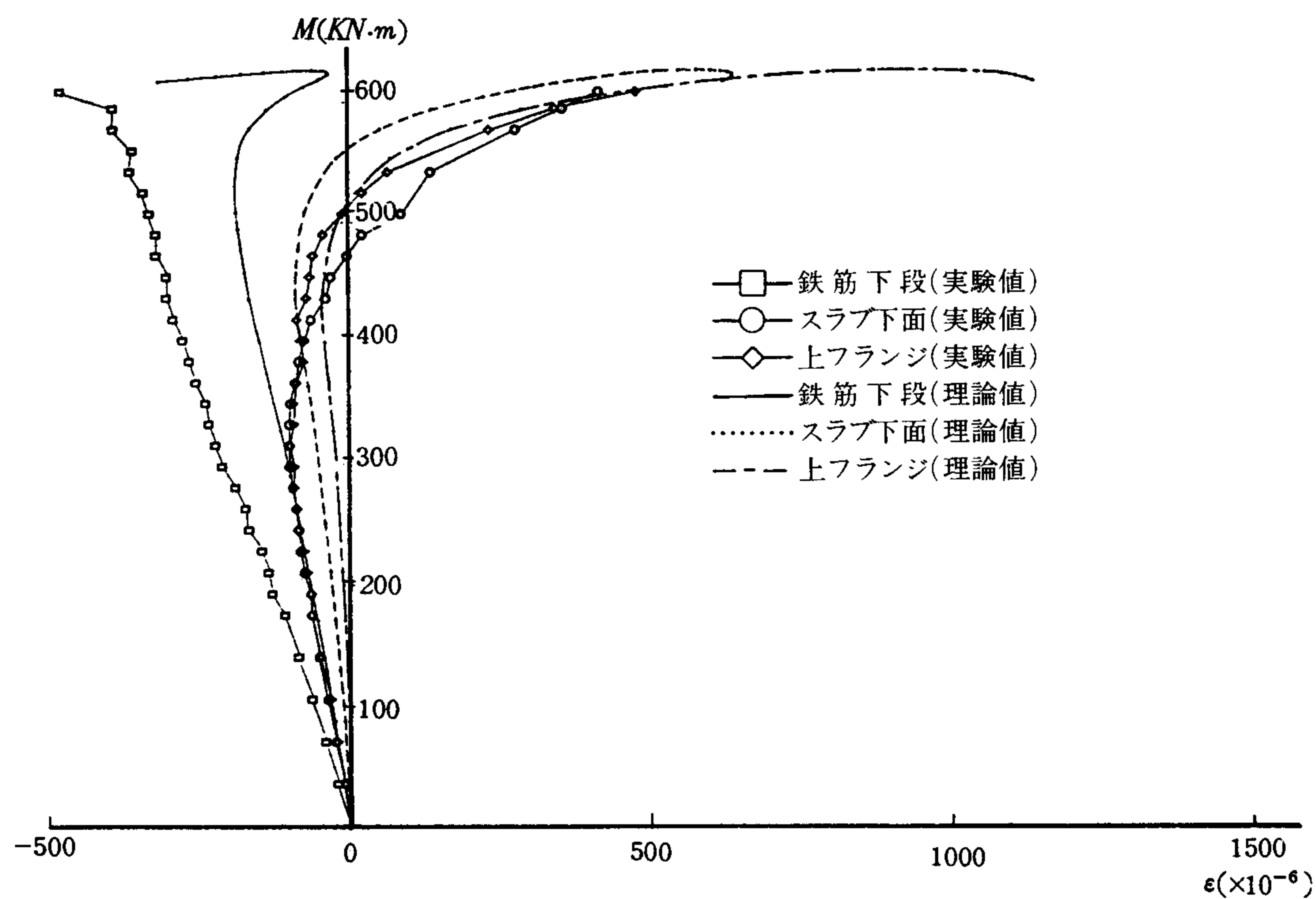


図17 床版および鋼げたの接合部付近のモーメント・ひずみ曲線

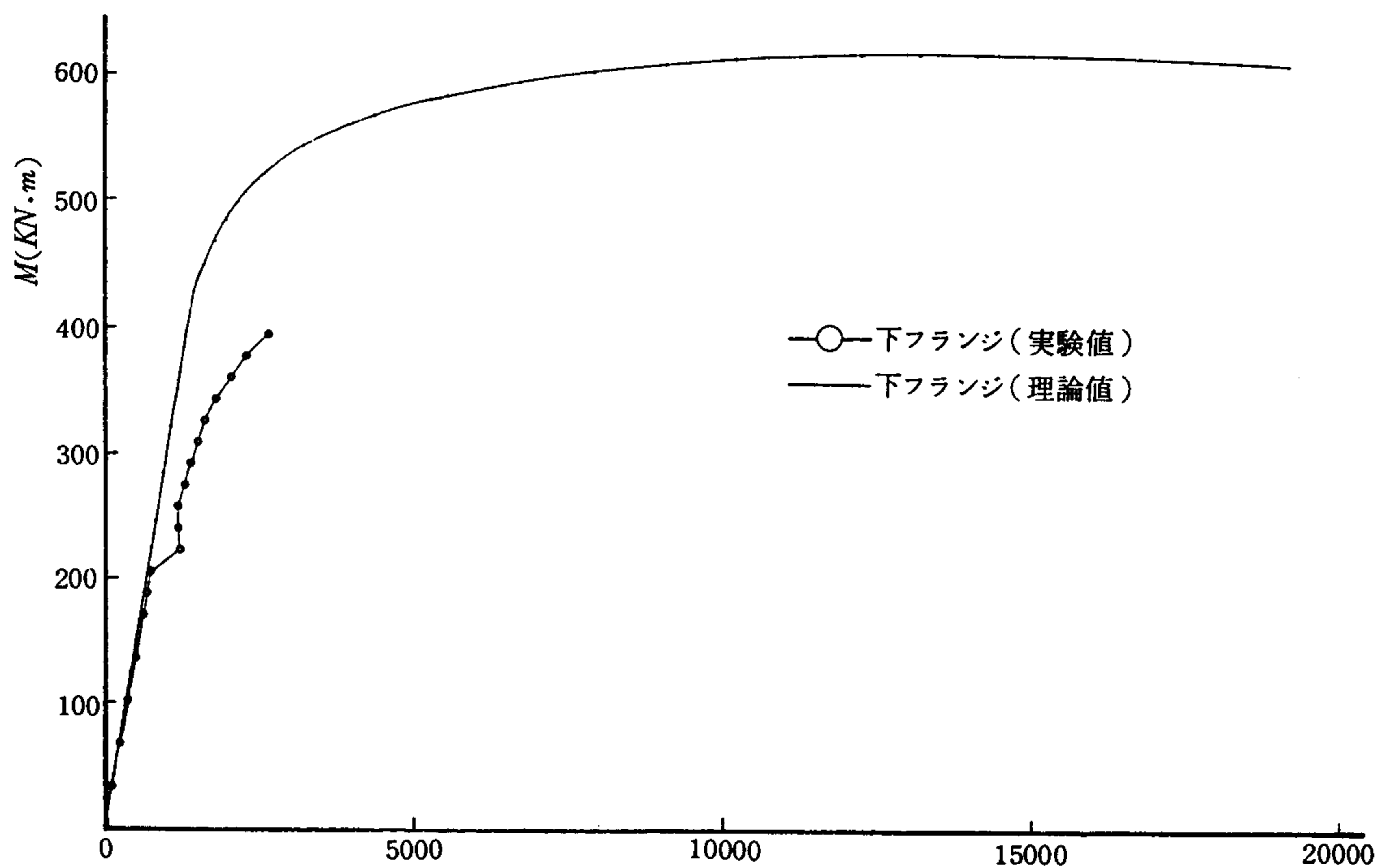


図18 下部のモーメント・ひずみ曲線

表 3 終局時のモーメント・中立軸・曲率

	実験値	計算値	実験値／ 計算値
モーメント ($\text{KN}\cdot\text{m}$)	597	605	0.99
中立軸 (cm)	11.1	10.7	1.04
曲率 ($\times 10^{-4}/\text{cm}$)	446	469	0.95

動も考慮した点に特徴がある。本研究の範囲内で明確となった点を列挙すれば次のとおりである。

- (ア) 材料の塑性的性質を考慮した終局モーメントおよび曲率を算定する計算式を式(7)～(9), 式(14)～(16)に示したとおり提案し, これが実験結果と比較的良好一致することを確認した。
- (イ) 合成げたの終局モーメントに影響を与える要因は床版の性質よりもむしろ鋼げたの材質と断面寸法である。すなわち, 床版の力学的鉄筋比を大きくとるより, 鋼げたの降伏点または断面寸法 (特に腹板厚) を大きくする方が大きな耐力を得られる。

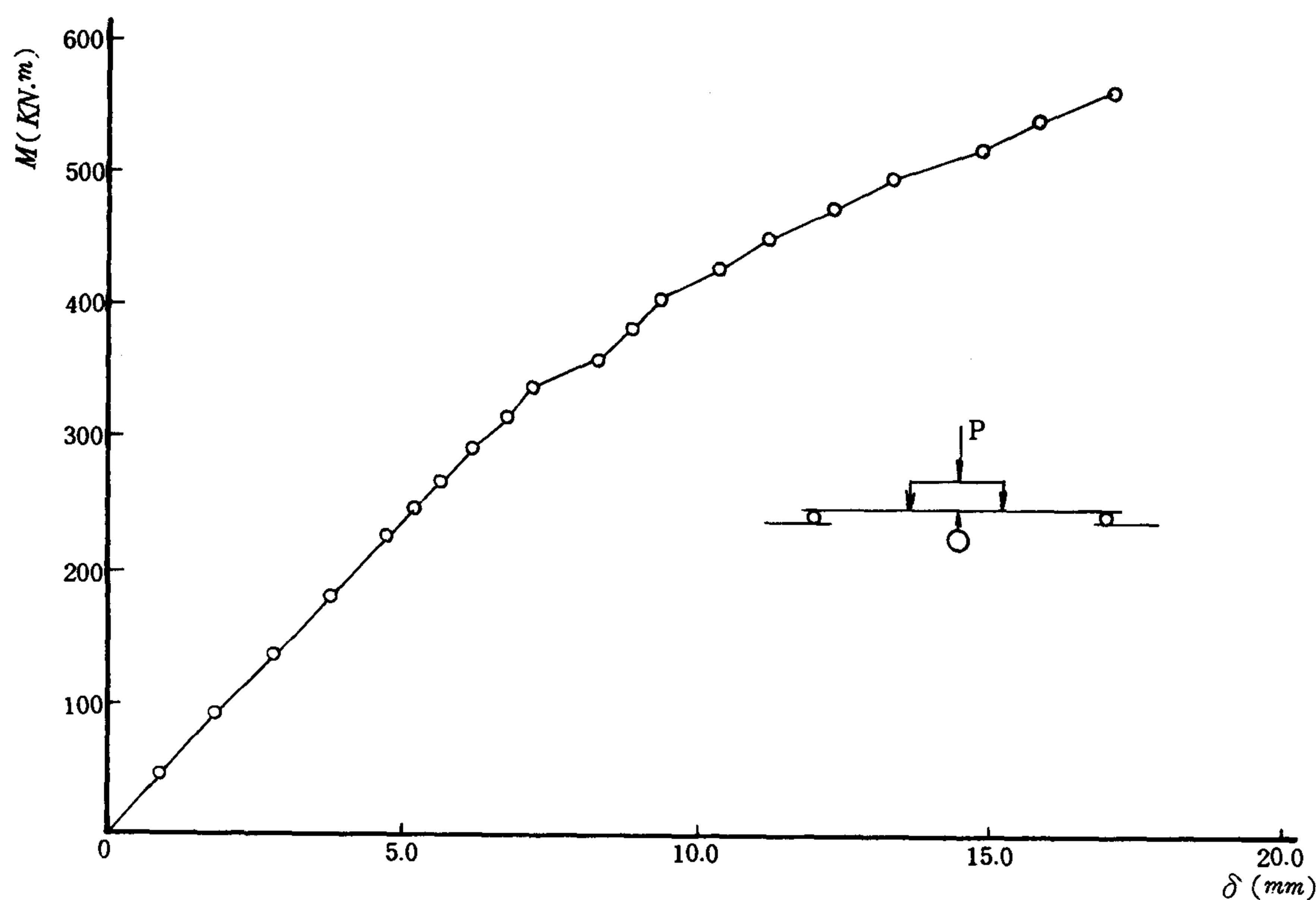


図19 合成げた中央断面のモーメントとたわみの関係

(ウ) 一方、終局時の曲率は力学的鉄筋比を増すことにより増加するが、鋼げたの降伏点または断面形状を大きくすることにより逆に減少する傾向にあり設計の際にはこの点に注意する必要がある。すなわち、単に強度の面に注目すれば鋼げたの材質の向上と断面寸法の増大を図ればより大きな終局抵抗モーメントを有する断面が得られるが、これは逆にじん性の低下を招く恐れがあり、強度と変形能力の双方を満足する適切な鋼げた断面の選択については今後の設計上の検討課題である。

使用記号

M : 曲げモーメント
 M_r : 抵抗モーメント
 C_c : コンクリートの全圧縮力
 C_d' : 上段鉄筋の全圧縮力
 C_d : 下段鉄筋の全圧縮力
 C_f : フランジの全圧縮力
 C_w : 腹板の全圧縮力
 T_{w1} : 腹板の弾性全引張力
 T_{w2} : 腹板の塑性全引張力
 T_{w3} : 腹板の硬化領域における全引張力
 T_f : フランジの全引張力
 T_{uf} : 上フランジの全引張力
 T_{lf} : 下フランジの全引張力
 k : 中立軸係数

k_1 : コンクリートの圧縮係数
 ϕ : 断面の曲率
 A_s : 下段鉄筋断面積
 A_s' : 上段鉄筋断面積
 b_c : コンクリート床版の幅
 d : 有効高さ
 d' : コンクリート床版上面から上段鉄筋図心までの距離
 t : フランジの厚さ
 b_{sf} : フランジの幅
 h_s : 腹板の高さ
 b_w : 腹板の厚さ
 y_o : 各合力の作用点から中立軸までの距離
 σ_c : コンクリートの圧縮応力
 σ_{co} : コンクリートの最大圧縮応力
 ϵ_c : コンクリートの圧縮ひずみ
 ϵ_{co} : σ_{co} に相当するコンクリートのひずみ
 ϵ_{cu} : コンクリートの圧縮破壊ひずみ
 σ_s : 鋼材の引張および圧縮応力
 σ_{sy} : 鋼材の引張および圧縮降伏点応力
 σ_d : 下段鉄筋の圧縮応力
 σ_d' : 上段鉄筋の圧縮応力
 σ_{dy} : 鉄筋の圧縮降伏点応力
 ϵ_s : 鋼材の引張および圧縮ひずみ
 ϵ_{sy} : 鋼材の引張および圧縮降伏点ひずみ
 ϵ_{sh} : 鋼材の引張および圧縮ひずみ硬化点のひずみ

ϵ_d : 下段鉄筋の圧縮ひずみ
 ϵ_d' : 上段鉄筋の圧縮ひずみ
 ϵ_{dy} : 鉄筋の圧縮降伏点ひずみ
 ϵ_{dh} : 鉄筋の圧縮ひずみ硬化点のひずみ
 cC_{fc} , cC_{mc} : 中立軸に関するコンクリートのそれぞれ圧縮力係数, モーメント係数
 ϵ_{c1} : コンクリート床版下面の圧縮ひずみ
 fC_{fc} , fC_{mc} : 中立軸に関するフランジのそれぞれ圧縮力係数, モーメント係数
 fa_{2c} : 中立軸からフランジの弾性圧縮領域までの長さ
 $f\epsilon_{2c}$: fa_{2c} に対するフランジのひずみ
 wC_{fc} , wC_{mc} : 中立軸に関する腹板のそれぞれ圧縮力係数, モーメント係数
 wa_{2c} : 中立軸から腹板の弾性圧縮領域までの長さ
 $w\epsilon_{2c}$: wa_{2c} に対する腹板のひずみ
 w_1C_{ft} , w_1C_{mt} : 中立軸に関する腹板の弾性領域のそれぞれ引張力係数, モーメント係数
 w_1a_{2t} : 中立軸から腹板の弾性引張領域までの長さ
 $w_1\epsilon_{2t}$: w_1a_{2t} に対する腹板のひずみ
 w_2C_{ft} , w_2C_{mt} : 中立軸に関する腹板の塑性領域のそれぞれ引張力係数, モーメント係数
 w_2a_{2t} : 中立軸から腹板の塑性引張領域までの長さ
 $w_2\epsilon_{2t}$: w_2a_{2t} に対する腹板のひずみ
 w_3C_{ft} , w_3C_{mt} : 中立軸に関する腹板の硬化領域のそれぞれ引張力係数, モーメント係数
 w_3a_{2t} : 中立軸から腹板の硬化引張領域までの長さ
 $w_3\epsilon_{2t}$: w_3a_{2t} に対する腹板のひずみ
 fC_{ft} , fC_{mt} : 中立軸に関する腹板の硬化領域のそれぞれ引張力係数, モーメント係数
 f_2a_t : 中立軸からフランジの硬化引張領域までの長さ
 $f\epsilon_{2t}$: f_2a_t に対するフランジのひずみ

ufC_{ft} , ufC_{mt} : 中立軸に関する上フランジの弾性領域のそれぞれ引張力係数, モーメント係数
 ufa_{2t} : 中立軸から上フランジの弾性引張領域までの長さ
 $uf\epsilon_{2t}$: ufa_{2t} に対する上フランジのひずみ
 lfC_{ft} , lfC_{mt} : 中立軸に関する下フランジの硬化領域のそれぞれ引張力係数, モーメント係数
 lfa_{2t} : 中立軸から下フランジの硬化引張領域までの長さ
 $lf\epsilon_{2t}$: lfa_{2t} に対する下フランジのひずみ
 $p\beta_y$: 力学的鉄筋比 (材料の品質を考慮した鉄筋比)

$$p = \frac{A_s}{b_c \cdot d}, \quad p' = \frac{A_s'}{b_c \cdot d}, \quad \beta_y = \frac{\sigma_{dy}}{\sigma_{co}}$$

謝辞 本研究に対して数多くの助言ならびに御指導下さいました高田清美専任講師, 小野勇技術職員, 小笠原清技術職員に対して深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) I. M. Viest, C. P. Siess, J. H. Appleton and N. M. Newmark: Studies of Slab and Beam Highway Bridges-Part III-Small Scale Test of Shear Connectors and Composite Beam, Bulletin 396, 1952. University of Illinois Engineering experiment Station.
- 2) P. R. Barnard: A Series of Test on Simply Supported, Jour. of A. C. I, April 1965.
- 3) J. C. Chapman and S. Balakrishnan: Experiments on Composite Beams. The Structural Engineer, Vol. 42, No. 11, 1964.
- 4) L. C. P. Yam and J. C. Chapman: The Inelastic Behaviour of Simply Supported Composite Beam of Steel and Concrete, Proc. of Institution of Civil Engineers, Dec. 1968.
- 5) 倉田宗章・正道博昭: 合成げた橋の塑性実験—弾性設計との比較—, 土木学会誌, 32—10, 1967.
- 6) 奥村敏恵・佐々木貴一・佐藤政勝: スタッロジベルを用いた合成桁に関する実験的研究, 土木学会第27回年次学術講演会講演集, 1972.
- 7) 前田幸雄・井汲久: 2 径間連続曲線合成桁の実験的研究, 土木学会第27・28回年次学術講演会講演集, 1972・1973.