

論文

[2044] プレストレストコンクリート部材の曲げ破壊性状

正会員 中野 清司 (東京電機大学工学部)

正会員 ○立花 正彦 (東京電機大学工学部)

正会員 栗田 康平 (東京電機大学大学院)

1. はじめに

建築物の安全性検討の設計法は静的設計法から動的設計法へ、許容応力度設計から限界状態設計へと移行しつつあり、また、構造形式も従来の構造、鉄筋コンクリート（以下RCと略記）造、プレストレストコンクリート（以下PCと略記）造、鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと略記）造及び鉄骨造の他に、これら構造部材さらに新材料などを新たに組み合わせた合理的な構造形式が開発、工夫されつつある。

このような状況下で建築物の耐震安全性を考える場合、各種構造部材において同一の思想による耐力の算定及び変形能力の評価法などの確立が不可欠となる。

コンクリート系部材断面の最大曲げ強度の算定式の一つに累加強度式がある。この累加強度式は断面の構成材料が塑性材料であり、かつ、部材断面を構成する各部分が力の釣合いと降伏条件を満たしていれば、それぞれの各部分の終局曲げ強度を累加して求めた終局曲げ強度が真の終局曲げ強度に等しいか、または小さいものであるという考え方よりなる。この累加強度式による算定方法は力の釣合いと変形の適合条件より求める終局強度式より簡単であり、実用的であり、この累加強度式は合成部材の一つであるSRC部材に広く採用されている。

PC部材の曲げ強度は一般に終局強度式により算定し、また、曲げモーメント～曲率の変形についても数値解析によるものが多く、実用的とはいえない面もある。一方、PC部材では部材のみの強度及び変形についてのみ着目したものが多く、柱軸力等の外力が作用した場合のPC部材の曲げ強度式についての検討は理論的にも実験的にもほとんどなされていない。しかし、柱軸力等を考慮した曲げ強度式が確立されれば、PC構造の設計の自由度が拡大するものと考えられる。

本報告はPC部材に累加曲げ強度式を適用し、さらに、この累加曲げ強度式のもつ性質を利用して、比較的簡単に曲げモーメント～曲率（以下M～ ϕ と略記）性状を把握しようとするものである。

2. 曲げモーメント～曲率関係のモデル化

PC部材のM～ ϕ 関係を各素材の応力・歪度関係及び平面保持の仮定より求めた精算値の一例を図1に示す。

PC部材のM～ ϕ 関係はこの図に示される曲げひび割れ発生（B）点、曲げ降伏（Y）点及び曲げ最大強度（M）点の各点を直線で結ぶ3つの折れ線にて近似することができるものと考えられる。

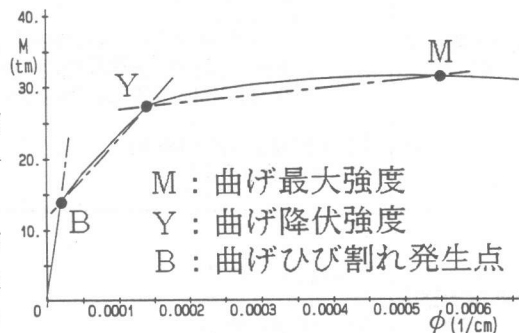


図1 PC部材の曲げモーメント～曲率関係のモデル化

3. 各折点の強度と曲率

1) 曲げひび割れ発生(B)点

曲げひび割れ発生強度 (M_{cr}) は学会規準により推定し、また、このB点の曲率 (ϕ_{cr}) は、曲げひび割れ発生前の曲げ剛性 (EI) と M_{cr} を用いて推定する。これら計算式を表1中に示す。

2) 曲げ最大強度 (M) 点

曲げ最大強度 (M_m) は、一般化累加強度式より求めるとするが、PC部材にこの強度式を適用する場合の問題点として次の2点が考えられる。

a) PC鋼材の降伏状況

PC鋼材は通常5000~6000 μ 程度で降伏歪に達するが、緊張力導入時に3000~3500 μ 程度の引張歪を負担している。このことより、引張側となるPC鋼材は新たに2000~2500 μ 程度の引張歪で降伏歪に達することになる。この程度の歪は通常RC及びSRC部材の主筋及び鉄骨の降伏歪とほぼ同程度であることから、引張側となるPC鋼材は最大曲げ耐力時には引張降伏歪に達しているものと考えられる。

一方、圧縮側のPC鋼材は緊張力導入時に3000~3500 μ 程度の引張歪を負担しており、このPC鋼材が圧縮降伏歪に達するまでには8000~9500 μ 程度の圧縮歪を負担する必要がある。コンクリートの圧縮歪 (3000~4000 μ) との関係性を考慮すれば、圧縮となるPC鋼材は最大曲げ耐力時には圧縮降伏歪には達していないものと考えられる。

以上より、最大曲げ耐力時のPC鋼材については引張側で降伏歪に達し、圧縮側となる場合には応力をゼロとする。

表1 曲げモーメント~曲率の特異点

	曲げモーメント	曲率
曲げひび割れ (B点)	$M_{cr} = \left(\eta \frac{P_e}{A_c} + \frac{5}{3} \cdot c \sigma_t \right) Z_e$ <p> P_e: プレストレス力 η: プレストレス有効率 A_c: 全断面積 Z_e: 鋼材を考慮した断面係数 $c \sigma_t$: コンクリートの引張強度 </p>	$\phi_{cr} = \frac{M_{cr}}{pc(EI)}$ <p> $pc(EI) = cE \{ cI + (n-1)pI \}$ pI: PC鋼材の断面2次モーメント cI: コンクリート全断面の断面2次モーメント pE: PC鋼材のヤング係数 cE: コンクリートのヤング係数 n: ヤング係数比 ($= pE/cE$) </p>
曲げ降伏点 (Y点)	<p>[$\phi_y(a)$の時]</p> $M_y = M_{cr} + (\phi_y - \phi_{cr}) \cdot \alpha_1 \cdot pc(EI)$ $\alpha_1 = (rcI + n \cdot pI) / \{ cI + n(rI + pI) \}$ $rcI = bxn^3/3 + n \cdot ac(xn - dc)^2 + nat(d - xn)^2$ $xn = -n(1 + \gamma)pt + \sqrt{(n(1 + \gamma)pt)^2 + 2n(\gamma dc + 1)pt}$ $= -2npt\sqrt{(2npt)^2 + 2n(dc + 1)pt} \quad (\gamma = 0)$ $cI = b d^3 / 12 \text{ (コンクリート全断面の断面2次モーメント)}$ <p>[$\phi_y(b)$及び$\phi_y(c)$の時]</p> $M_y = \phi_y \cdot pc(EI)$	<p>[$xn \leq d$の時]</p> $\phi_y = \min [\phi_y(a), \phi_y(b)]$ $\phi_y(a) = sE'y / (d - xn)$ $\phi_y(b) = cE'u / xn$ $sE'y = sE\gamma - sE_g$ $cE'u = cE\epsilon_u - cE_g$ <p> $sE\gamma$: PC鋼材の降伏点の歪値 sE_g: プレストレス力導入時のPC鋼材の歪値 cE_g: プレストレス力導入時のコンクリートの歪値 </p> <p>[$xn > d$の時]</p> $\phi_y = \phi_y(c) = cE't / (D - xn)$ $cE't = cE't + cE_g$
曲げ最大強度 (M点)	<p>図4及び表2参照</p> <p>図5及び表3参照</p> <p>xn: 表2及び3の強度式より算出する</p>	$\phi_m = \epsilon'_m / xn$ $xn = D/2 - M'u$ <p> $D/2$: 圧縮縁より柱軸力が作用している点 $\epsilon'_m = \epsilon_m - cE_e$ ϵ_m: 曲げ最大強度時のコンクリート縁圧縮歪 $cE_e = Pg / (b \cdot xn \cdot cE)$ 中立軸より圧縮側のみでプレストレス力を負担するものとして算出した平均歪値 </p>

b) プレストレスト力の取り扱い

プレストレスト力を導入することは内力として釣り合っている状態であるので、PC部材断面の構成する各部分、具体的にはコンクリートが圧縮力を、PC鋼材が引張力をそれぞれ負担していることとなる。このことにより構成する各部分の柱軸力と終局曲げモーメント (N-M) 関係の耐力の原点を負担プレストレスト量づつ平行移動すればよいことになる。

上記a及びbの結果をふまえて、図2(a)に示すPC部材断面の累加耐力を求める。つまり、図2(b)及び(c)に示すコンクリート部分とPC鋼材部分により構成され、それぞれ構成部分の応力分布及び耐力線 (N-M関係) を図3(a)及び(b)に示す。同3図中に示すPpsは緊張力による移動を示す。PC鋼材の耐力線上のⒶ点はPC鋼材の偏心による曲げモーメントを示す。図3(b)に示す鋼材のN-M関係Ⓐ~ⒸはPC鋼材が引張降伏と圧縮降伏することとして求めたものであるが、PC部材では圧縮側では降伏しないと考えるので、PC鋼材のN-M関係は図3中のⒶ~Ⓒのみとなる。

これら耐力線より一般化累加曲げ強度を求めると図4中の実線の包絡線IJKLMとなる。なお、IJKL'M'はPC部材の圧縮降伏を考慮した場合となる。このPC部材断面の強度式 (Mu) を一般的な式で示せば表2の通りである。

通常PC部材ははり部材として使われていることが多く、表2中の累加による曲げ終局耐力式において柱軸力ゼロの時ははり部材に相当する。

本式と同表中に示す学会式の曲げ破壊耐力実用式とを比較すると全く同一の式となる。

これは、一般化累加強度式の耐力線上の強度は、各構成部分の剛塑性解析による中立軸位置を一致させた時の強度を表しているためである。一般化累加強度式を柱軸力で微分すれば、N-M関係の接線勾配を示すことになる。例え

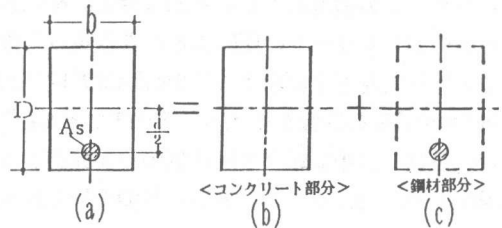


図2 PC部材断面の累加方法

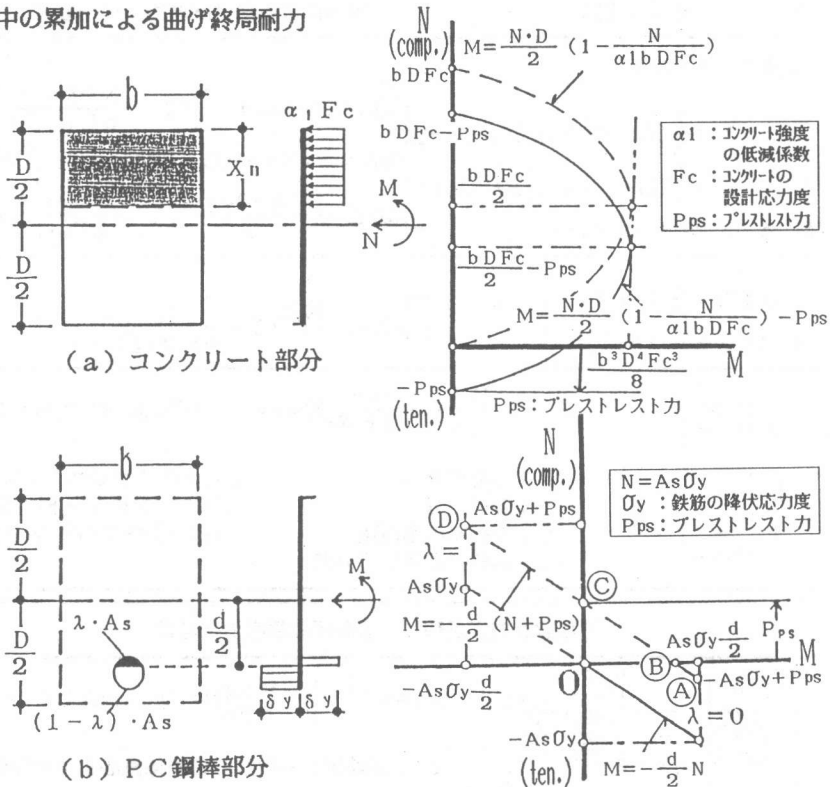


図3 コンクリート部材及びPC鋼材部分の曲げモーメント～軸力の相関関係

ば表2中に示すI K間の強度式でみると

$$M' = \left(\frac{1}{2} - \frac{N}{b D F_c} \right) D$$

となり、この値は柱軸力の作用点のコンクリート断面の図心より剛塑性解析による中立軸位置までの距離を示すことを意味する。つまり、一般化累加強度式は剛塑性解析による中立軸位置を順にならべた関係である。図5及び表3にはPC鋼材が断面の上下2ヶ所に配置された時の強度を示す。

この曲げ最大強度時の曲率 ϕ_m は上記一般化累加強度式の性質つまり、この強度式を柱軸力にて微分した値がコンクリート断面の図心から中立軸位置までの距離を表しているから、この強度式より中立軸位置 x_n を求め、圧縮側最外縁のコンクリートの圧縮歪 ϵ_m を仮定して推定する。この計算式を表1に示す。この $c \epsilon_m$ はプレストレス量(Pg)、柱軸力(N_0)等の影響が考えられるので、 ϵ_m よりPg及び N_0 (ϵ_g 及び ϵ_0 :中立軸より圧縮側のみが負担するものとして算出した平均歪値)の影響をとりのぞいた歪量($c \epsilon'_m$)が

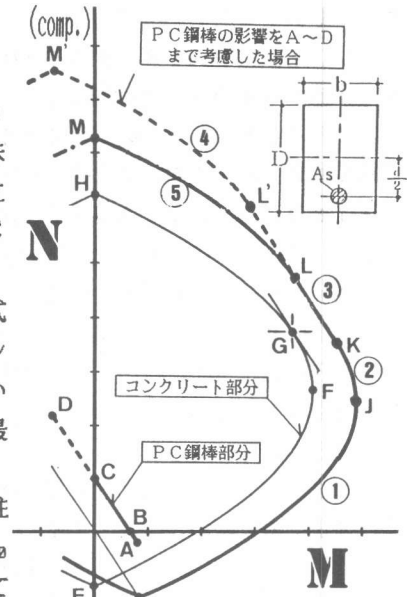
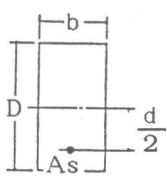


図4 単筋の曲げモーメント～軸力関係の累加強度

表2 単筋のPC部材の累加強度の一般式

各点:	軸力の範囲	累加による曲げ終局耐力の一般式
I点:	$N = -A_s \sigma_y$	
K点:	$N = \frac{1}{2}(D+d) b \alpha_1 F_c - A_s \sigma_y$	① $M = (N + A_s \sigma_y) \frac{D}{2} \left(1 - \frac{N + A_s \sigma_y}{b D \alpha_1 F_c} \right) + A_s \sigma_y \frac{d}{2}$
L'点:	$N = \frac{1}{2}(D+d) b \alpha_1 F_c + A_s \sigma_y$	② $M = -\left(N - \frac{1}{2}(D+d) b \alpha_1 F_c \right) \frac{d}{2} + \frac{1}{8}(D^2 - d^2) b F_c$
M'点:	$N = b D \alpha_1 F_c + A_s \sigma_y$	③ $M_2 = \frac{D(N - A_s \sigma_y)}{2} \left(1 - \frac{N - A_s \sigma_y}{b D \alpha_1 F_c} \right) + A_s \sigma_y \frac{d}{2}$
L点:	$N = \frac{1}{2}(D+d) b \alpha_1 F_c$	
M点:	$N = b D \alpha_1 F_c$	④ $M_2 = \frac{N D}{2} \left(1 - \frac{N}{b D \alpha_1 F_c} \right)$



$$M_u = \left(\frac{D+d}{2} - \frac{A_s \sigma_y}{2 b F_c} \right) A_s \sigma_y \quad (\text{③式において } N=0 \text{ を代入})$$

D: 部材のせい
 b: 部材の幅
 A_s: 緊張材の断面積
 δ_y: 緊張材の降伏応力度
 P_{ps}: 導入プレストレス力
 F_c: コンクリートの設計基準強度
 d: (緊張材の偏心距離) × 2

PC設計施工規準による曲げ破壊耐力実用式

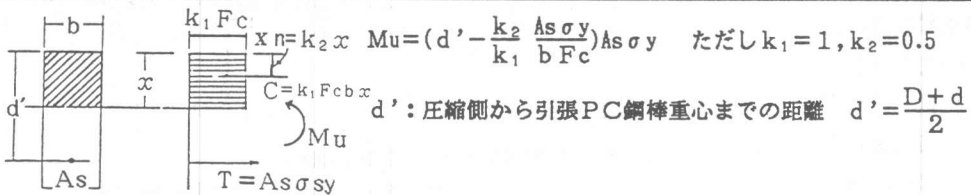


表3 2段配筋のPC部材の累加強度の一般式

各点:	軸力の範囲	累加による曲げ終局耐力
A点:	$N = -2As\sigma_y$	
G点:	$N = \frac{b}{2}(D-d)\alpha_1 F_c - 2As\sigma_y$	① $M = \frac{D}{2}(N + 2As\sigma_y) \left(1 - \frac{N + 2As\sigma_y}{bD\alpha_1 F_c}\right)$
H点:	$N = \frac{b}{2}(D-d)\alpha_1 F_c$	② $M = \frac{b}{8}(D^2 - d^2)\alpha_1 F_c + (As\sigma_y + \frac{N}{2} - \frac{b}{4}(D-d)\alpha_1 F_c)d$
I点:	$N = \frac{b}{2}(D+d)\alpha_1 F_c$	③ $M = \frac{ND}{2} \left(1 - \frac{N}{bD\alpha_1 F_c}\right) + As\sigma_y d$
J点:	$N = \frac{b}{2}(D+d)\alpha_1 F_c + 2As\sigma_y$	④ $M = \frac{b}{8}(D^2 - d^2)\alpha_1 F_c + (As\sigma_y - \frac{N}{2} + \frac{b}{4}(D+d)\alpha_1 F_c)d$
K点:	$N = bD\alpha_1 F_c + 2As\sigma_y$	⑤ $M = \frac{N - 2As\sigma_y}{2} \left(1 - \frac{N - 2As\sigma_y}{bD\alpha_1 F_c}\right) D$

H'点:	$N = \frac{b}{2}(D-d)\alpha_1 F_c - As\sigma_y$	⑥ $M = \frac{D(N + As\sigma_y)}{2} \left(1 - \frac{N + As\sigma_y}{bD\alpha_1 F_c}\right) + \frac{As\sigma_y d}{2}$
I'点:	$N = \frac{b}{2}(D+d)\alpha_1 F_c - As\sigma_y$	⑦ $M = \frac{b}{8}(D^2 - d^2)\alpha_1 F_c + (As\sigma_y - \frac{N + 2As\sigma_y}{2} - \frac{b}{4}(D+d)\alpha_1 F_c)d$
E点:	$N = \frac{b}{2}(D+d)\alpha_1 F_c$	⑧ $M = \frac{ND}{2} \left(1 - \frac{N}{bD\alpha_1 F_c}\right)$
F点:	$N = bD\alpha_1 F_c$	

曲げモーメントの作用によって生じた歪量と考慮して算出する。
但し表1中では σ_0 の影響は考慮されていない。

3) 曲げ降伏(Y)点

曲げ降伏曲率(ϕ_y)は柱軸力の影響により x_n の条件にて図6に示すように

- a) PC鋼材が引張降伏歪($s\epsilon_y$)に達した時
- b) コンクリートの圧縮縁歪がシリンドーの最大強度時の歪値(ϵ_u)に達した時

c) コンクリートの引張縁歪が引張強度時の歪値に達した時の3つの場合が考えられる。曲げ最大強度より求めた中立軸より曲げ降伏曲率 ϕ_y を推定する。

曲げ降伏強度(M_y)は ϕ_y の求め方により表1中の式にて求める。 $\phi_y(a)$ の時には曲げひび割れ後の曲げ剛性の低下が大きく影響することを考慮し、また $\phi_y(b)$ 及び $\phi_y(c)$ の時には軸力の影響により曲げひび割れ発生後の剛性低下の影響が少ないことから弾性剛性により求める。これら耐力(M_y)と曲率(ϕ_y)の推定式は表1に示す通りである。

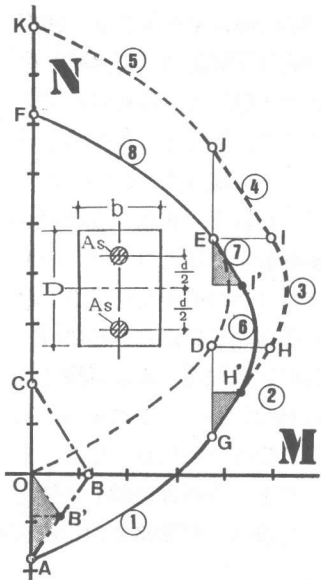


図5 2段配筋の曲げモーメント～軸力関係の累加強度

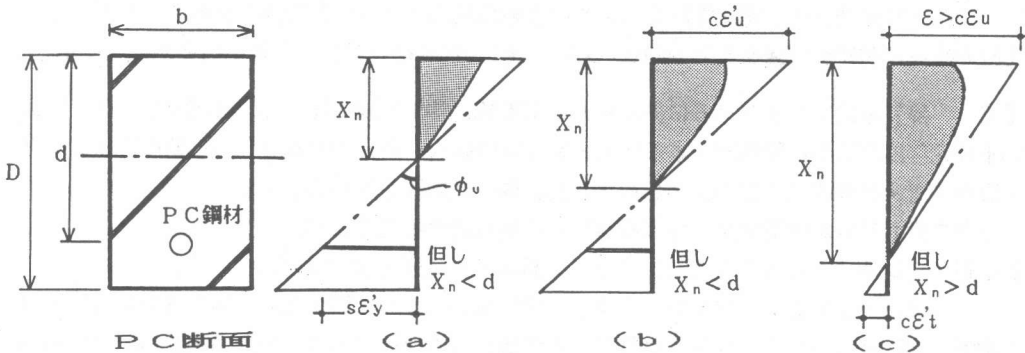


図6 曲げ降伏時の曲率の求め方

4) 精算値及び実験との比較

既往の実験値及びこの試験体の各素材の応力・歪度関係を用いて平面保持の仮定により数値計算した精算値と本計算値との比較を図7(a), (b)に示す。

図7(a)より中立軸位置は、プレストレス量により若干相違するが、本プレストレス量の範囲では、本計算値とほぼ一致している。

また、図7(b)より、本計算値の曲げモーメント～曲率関係は実験値及び精算値ともほぼ一致しているものと考えられる。ここで、 ϵ_n はシンダラーの最大歪 ($c\epsilon_u$) との倍率 n 倍で表されるものとし、精算値におけるコンクリートブロックの最大モーメントとなる時の最外縁の歪値は $c\epsilon_u$ の約2倍程度 (本計算例では $\epsilon_m=4000\mu$) となるから、ここでは $n=2.0$ とした。

なお、今後は柱軸力が作用した場合の実験値との比較検討を行い、適用性について考えて行く必要がある。

5) まとめ

プレストレスコンクリート部材に一般化累加曲げ強度式を適用する時の問題点を明らかにし、これら累加強度式が剛塑性解析による中立軸位置順にならべた関係にあることを利用して比較的簡単に曲げ最大強度までの曲げモーメントと曲率関係を把握できることが明らかになった。

【謝 辞】 本論文をまとめるにあたり、東京電機大学大学院生 林 渉・瀬尾卓也各氏、同大学平成元年度卒研生日野剛志・本多和人・望月満伸各氏、同大学平成2年度卒研生久根口一基・坂井宣之・渡部雄二各氏の協力を得ました。各位に感謝の意を表します。

【参考文献】 1) 日本建築学会：地震荷重時と建築構造の耐震性，1976

2) 中野・立花他「プレストレスコンクリート部材の累加最大曲げ耐力について」

(社) プレストレスコンクリート技術協会第28回研究発表会講演梗概集，1988.11

3) 中野・立花他「プレストレスはりの変形性能」日本建築学会大会学術講演梗概集，1985.10

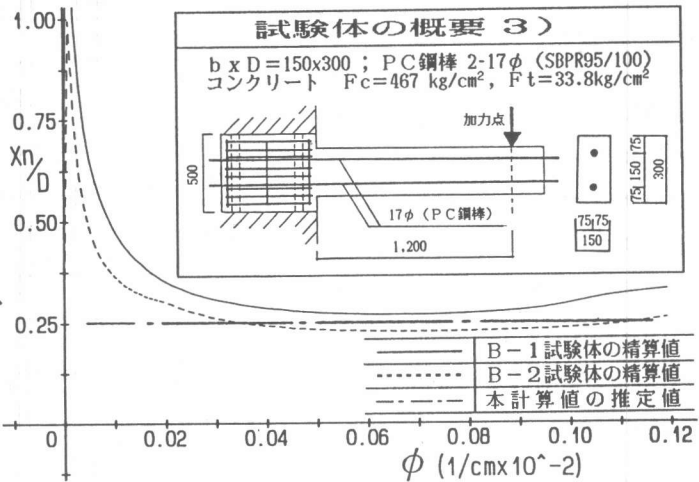


図7(a) 中立軸位置の精算値と推定値の比較

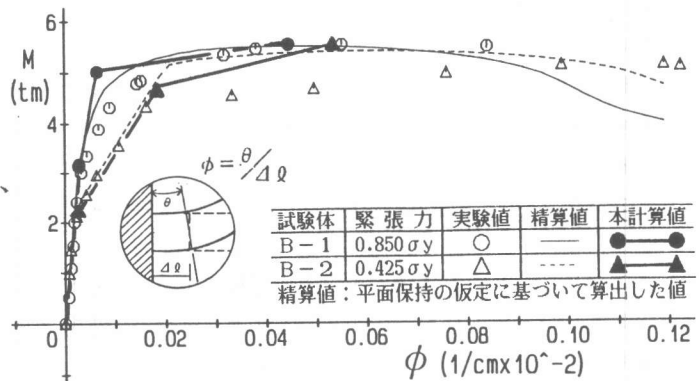


図7(b) 曲げモーメント～曲率関係の精算値と推定値の比較