

論文

[2044] RC梁の終局域における圧縮筋の座屈に関する一考察

正会員 畑中重光(三重大学建築学科)

同 梁川幸盛(㈱構造計画研究所)

同 ○吉田徳雄(三重大学大学院)

1. はじめに

曲げ破壊するRC複筋梁の終局域における変形能力は、圧縮部コンクリートの靱性ととともに圧縮筋の座屈性状の影響を受ける。また、実構造物では、梁はスラブと一体となって挙動するため、その塑性変形能は梁単体の場合とはかなり異なるものと考えられる。そのため、筆者らは既報[1]において、曲げせん断を受けるT形RC梁の塑性変形挙動におよぼすスラブ幅およびスラブ位置の影響を実験的に調べた。

本研究の目的は、スラブの影響も考慮したRC梁の塑性変形解析の精度を向上させることにある。本報では、RC部材、特にRC梁内の圧縮筋の座屈挙動を定量的に捉えるために、その座屈開始時ひずみおよび座屈後の応力低下勾配について検討した。

2. 事例解析

解析に用いたパラメータを表-1に、コンクリートおよび圧縮筋の応力-ひずみ関係を図-1(a)および(b)に示す。圧縮筋の応力-ひずみ曲線は、図に示すようなバイリニア型とし、座屈開始時ひずみ ϵ_b と座屈後の応力低下勾配 E_b を変化させた。なお、解析方法は別報[2]と同じである。すなわち、平面保持および鉄筋とコンクリートの完全付着を仮定し、引張鉄筋のひずみ硬化も考慮した。図-2(a)~(d)に解析結果の例を示す。なお、図中の①~③は、表-1中の E_b に対応する。

図(a)は、圧縮筋の座屈開始時ひずみ ϵ_b の影響を示したものである。図によれば、圧縮筋の座屈開始時期は、モーメント低下時期に直接反映されている。なお、図中のSR点(●)とは、引張鉄筋のひずみが戻り始める点を示す。

図(b)は、あばら筋ピッチ S の影響を示したものである。図によれば、あばら筋ピッチの減少にともない断面の靱性が増大するが、圧縮筋の座屈によって生じる耐力低下量は、あばら筋ピッチに拘らずほぼ等しい。

図(c)は、圧縮鉄筋比 P_c の影響を示したものである。圧縮筋の増加にともない延性的な破壊性状を示すが、座屈に伴う耐力低下量は比例的に増大する。

図(d)は、引張鉄筋比 P_t の影響を示したものである。引張筋の増加にともない、最大耐力は増

表-1 事例解析に用いたパラメータ

あばら筋ピッチ S/b	引張鉄筋比 P_t [%]	圧縮鉄筋比 P_c [%]	座屈時ひずみ ϵ_b	座屈後の剛性 E_b [kgf/cm ²]
∞	1	0	10×10^{-3}	① 0.01×10^{-6}
1	2	0.4	20×10^{-3}	② 0.1×10^{-6}
0.5	3	0.8	30×10^{-3}	③ 1.0×10^{-6}

注] S : あばら筋ピッチ, b : 梁幅, アンダーラインを付けた値は、他の要因を変動させたときの採用値

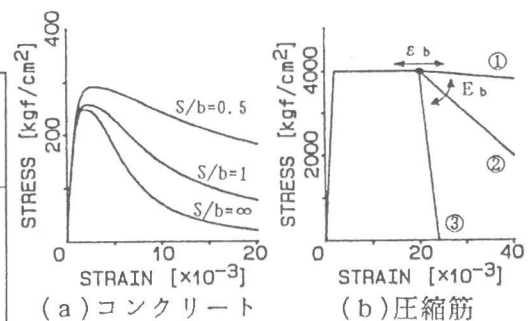
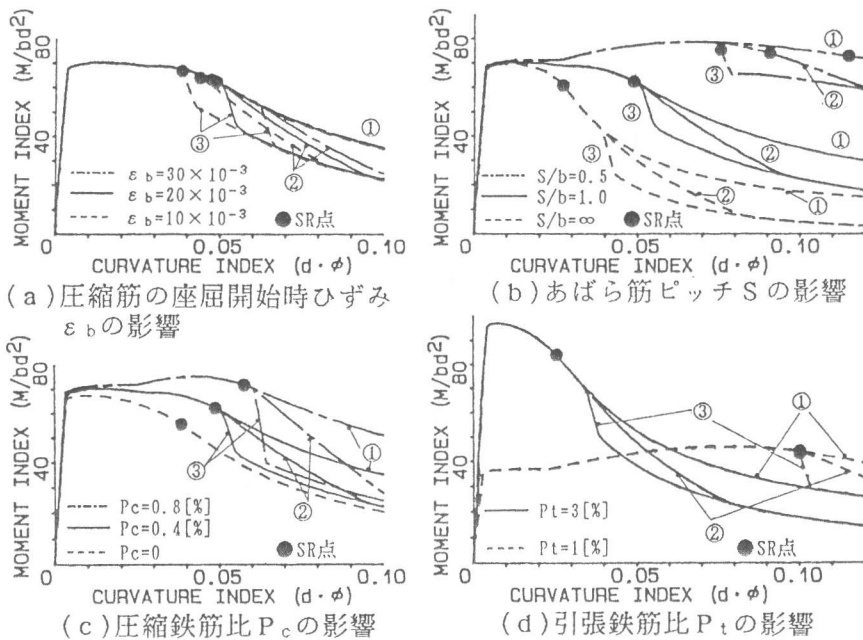


図-1 応力-ひずみ関係



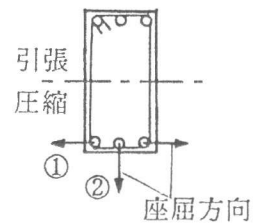
(a) 圧縮筋の座屈開始時ひずみ ϵ_b の影響

(b) あばら筋ピッチ S の影響

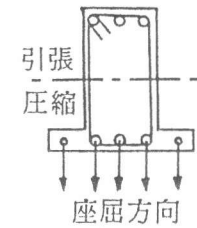
(c) 圧縮鉄筋比 P_c の影響

(d) 引張鉄筋比 P_t の影響

図-2 圧縮筋の座屈に関する事例解析結果



(a) 長方形断面



(b) スラブ付き

図-3 圧縮筋の座屈方向

加するが、脆性的な破壊性状を示す。また、圧縮筋の座屈に伴う耐力低下量は、引張鉄筋比に拘らずほぼ等しい。

3. 圧縮筋の座屈性状について

実験時の観察によれば、一方向曲げを受ける RC 複筋梁の圧縮筋の座屈方向は、およそ図-3のように分類できる。梁の変形のみを考慮すると、圧縮筋は梁の内部に向かって座屈し易いと考えられる。しかし、コンクリートの存在およびその圧縮膨張によって圧縮筋の内部方向への座屈ははばまれる。したがって、長方形断面(図(a))の場合には、圧縮筋の位置によって側方にはらみ出す(①)ものと、下方にはらみ出す(②)ものに分類される。その程度はあばら筋による圧縮筋の座屈止め効果およびコンクリートの圧縮膨張抑止効果に依存する。②の場合は両側にあるコンクリートの拘束効果によって、側方への座屈ははばまれ、座屈は①よりも遅延されると考えられる。

一方、T形断面(図(b))の場合も②と同様、スラブの存在によって圧縮筋の側方への座屈ははばまれ、やむなく圧縮筋は圧縮縁方向へはらむことになる。

以上より、圧縮筋の座屈挙動、即ち、座屈開始時ひずみ(ϵ_b)および座屈後剛性(E_b)は、あばら筋を含むコンファインドコンクリートの特性に加えて、圧縮筋の位置やスラブの拘束の影響をも受けるものと推察される。

4. 圧縮筋の座屈挙動に関する既往の実験データと本実験データとの比較

ここでは、表-2に示す小柳・六郷の研究[3]、および鈴木・中塚の研究[4]を取り上げ、これらの実験データおよび本実験データ[1, 2]と、鈴木・中塚による圧縮筋の座屈開始時ひずみ推定式による計算値とを比較、検討する。

図-4に、既往の研究および本研究による実験結果[1, 2]と、鈴木・中塚の提案式による計算値(横軸)の比較を示す。図によれば、鈴木・中塚の提案式は、同じ中心軸圧縮単調載荷実験結果である小柳・六郷の実験結果をかなり安全側で推定している。これは、小柳・六郷の試験体ではかぶ

表-2 既往の研究

研究者	供試体	载荷方法	要因	かぶり	ひずみ測定長	推定式
小柳・六郷	□15×40 [cm]	中心軸圧縮 単調载荷	軸方向鉄筋径(D10, D16, D22) 横補強筋間隔(S:3~18cm)	9 mm	試験区間全域	—
鈴木・中塚	φ20×50 [cm]	中心軸圧縮 単調载荷	軸方向鉄筋径(φ:13~32mm) 円形フープ筋径(φ4, D6, D10) フープ筋間隔(S:3.2~50cm)	なし	試験区間全域	・主筋座屈長 ・座屈時軸 ひずみ

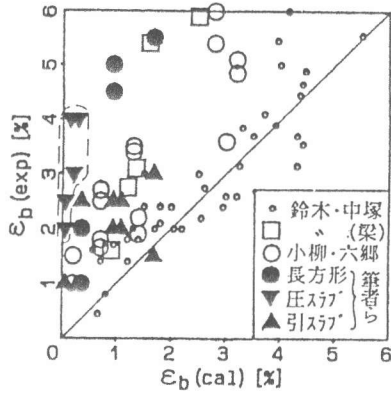


図-4 鈴木・中塚式による計算値と実験値の比較

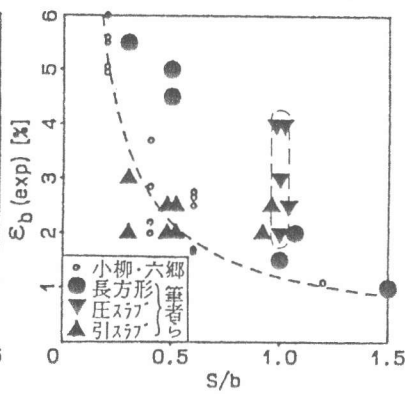


図-5 小柳・六郷による実験結果と筆者らによる実験結果の比較

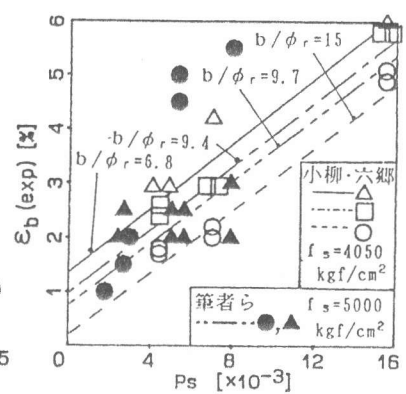


図-6 ε_bにおよぼすP_sの影響

りを有しているため、主筋の座屈時期が遅延されたこと、および、座屈開始時点の判定基準の相違なども一因と考えられる。

また、同図には、筆者らが行ったT形RC梁の曲げせん断実験結果、および鈴木・中塚によるPRC梁の曲げせん断実験結果と、同提案式による推定値との比較が示してある。図によれば、梁の実験に関しては、いずれの場合も提案式はかなり安全側の値を与えるといえる。

図-5に、小柳・六郷による実験結果と、筆者らの実験結果との比較を示す。図によれば、スラブが圧縮側にあるT形梁の実験結果(□部)を除き、両実験結果はほぼ同様な傾向にある。

5. RC梁部材内の圧縮筋座屈時ひずみの推定式

既往の実験結果によれば、RC部材内の圧縮主筋の座屈開始時のひずみは、主筋径 ϕ_r 、コンクリートの破壊域長さ(ここでは、断面辺長 b または梁成の半分 $b=h/2$ と考える)、並びにあばら筋の径 ϕ_s 、断面積 A_s 、降伏強度 f_s 、ピッチ S の影響を受ける。すなわち、主筋の細長比によって無拘束状態の圧縮筋の座屈開始時ひずみが決定し、あばら筋による横拘束力の大きさによって座屈開始時ひずみが遅延するとされている。ここでは、既往の研究[4]を参考に、RC梁部材内の圧縮筋の座屈開始時ひずみ ϵ_b の推定式の作成を行う。

図-6に、圧縮筋の座屈開始時ひずみ ϵ_b におよぼすあばら筋の断面積比 P_s (定義は表-3参照)の影響を示す。図によれば、 P_s の増加にともない ϵ_b は増加している。また、同じ P_s のレベルについて見てみると、 b/ϕ_r の減少にともない ϵ_b は増加する傾向にある。さらに、あばら筋による拘束力 $f_s \cdot P_s$ が大きいほど主筋の座屈止め効果は大きく、図中の近似直線の傾きは f_s に依存すると考えられるが、ここでは f_s については2種類のデータしかないこと、および f_s の変化にともなう ϵ_b の顕著な変化は見受けられないことから、 ϵ_b におよぼす f_s の影響は $f_s=4050 \sim 5000$

表-3 RC梁内の圧縮筋の座屈開始時ひずみの推定式

$\epsilon_b = \epsilon_{b0}(\phi_r, b) + \epsilon_{bc}(\phi_s, A_s, f_s, S)$	
ϵ_{b0} : 無拘束状態の ϵ_b	ϵ_{bc} : あばら筋の拘束効果による増分
$\frac{b}{\phi_r} < 15$ のとき、 $\epsilon_{b0} = -0.12 \cdot \frac{b}{\phi_r} + 2.0$ [%]	$\epsilon_{bc} = k(f_s) \cdot P_s$, $P_s = \frac{2 \cdot A_s}{S \cdot b}$
$\frac{b}{\phi_r} \geq 15$ のとき、 $\epsilon_{b0} = 0.2$ [%]	f_s が4000~5000[kgf/cm ²]において $k(f_s) = 300$

注] ϕ_r :主筋径, b :断面辺長または梁成の半分, ϕ_s :あばら筋径, A_s :あばら筋断面積
 f_s :あばら筋降伏強度, S :あばら筋ピッチ

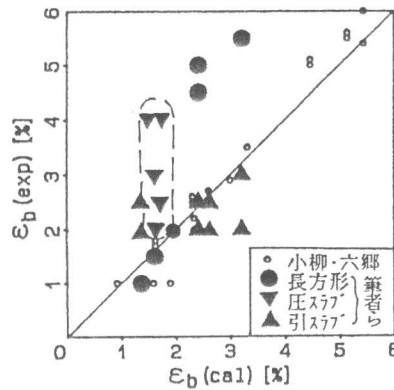
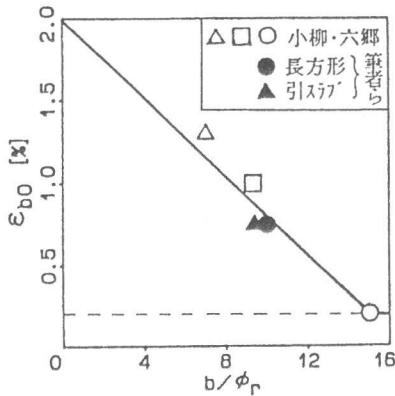


図-7 ϵ_{b0} におよぼす b/ϕ_r の影響 図-8 提案式による計算値と実験値の比較

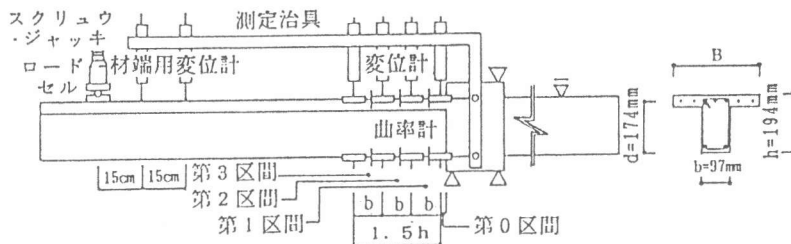


図-9 載荷および測定方法

[kgf/cm²]の範囲では一定であるとした。

図-7に、あばら筋が配してない場合の主筋の座屈開始時ひずみ ϵ_{b0} におよぼす b/ϕ_r の影響を示す。ここで、 ϵ_{b0} は、図-6において $P_s = 0$ の時の ϵ_b の値である。 ϵ_{b0} は b/ϕ_r の増加に伴い減少している。また、 ϵ_{b0} の下限値は既往の研究[4]で提案されているとおり0.2[%]としてよいといえる。

以上より、表-3に示すような圧縮筋の座屈開始時ひずみの推定式が得られた。図-8に、本式の推定精度を示す。図中には圧縮側にスラブを持つ場合の値(○部)も比較しているが、この場合の実験値は計算値をかなり上回っており、圧縮側スラブによる影響は別途考慮する必要がある。

6. 圧縮筋の座屈後の剛性

筆者らの既往の実験結果[1, 2]を用いて、RC梁部材内の圧縮筋の座屈後の剛性を推定する。ここでは、圧縮筋の座屈は最大モーメント断面からほぼ1h(h:梁成、図-9における第1および第2区間)の区間内で発生するという仮定に基づき、実験で得られた1h区間のモーメント指数

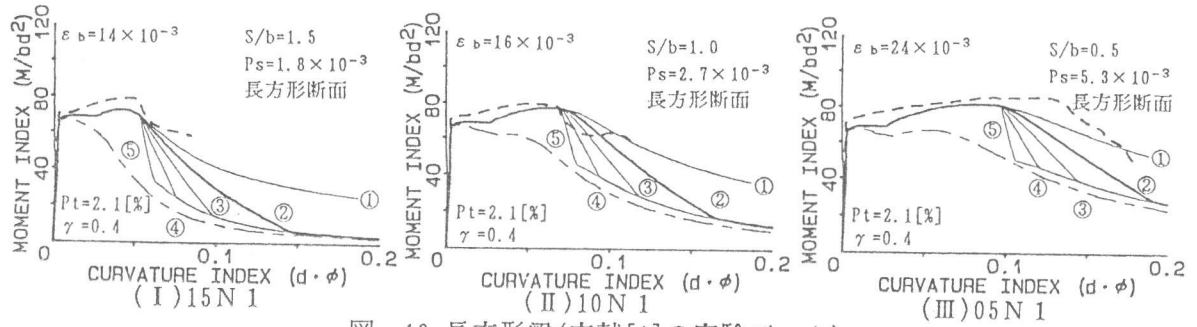


図-10 長方形梁(文献[1]の実験データ)

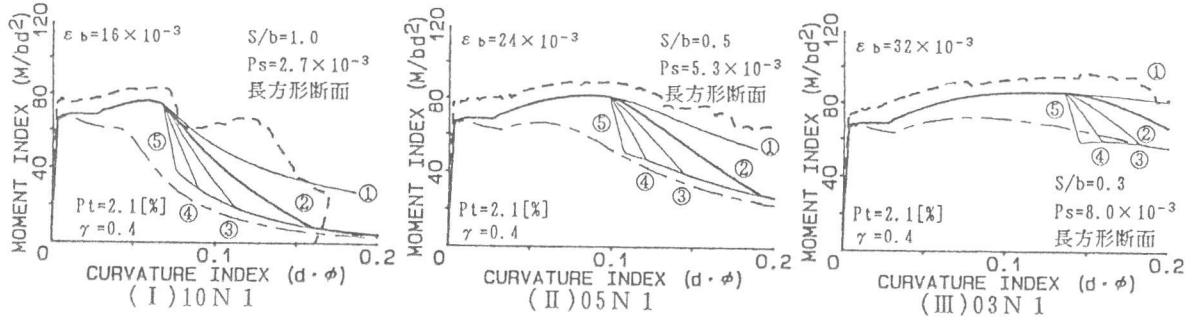


図-11 長方形梁(文献[2]の実験データ)

表-4 図-10~15中の記号の意味

No	$E_b (\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2)$
①	-0.01
②	-0.05
③	-0.1
④	-0.2
⑤	-0.4

注] $\gamma = P_c/P_t$
 P_c : 圧縮鉄筋比
 P_t : 引張鉄筋比

(M/bd^2) -曲率指数 $(d \cdot \phi)$ 曲線の平均値と、解析による曲線とを比較する。

図-10, 11および12, 13は、それぞれ長方形断面および引張側にスラブを有するT形梁の比較例である。

ここで解析では、圧縮筋の座屈開始時ひずみとして表-3の推定式による値を用い、座屈後の剛性 E_b を2節の事例解析と同様に変化させてある(表-4参照)。また、スラブ付きの場合の解析はスラブを全断面有効、すなわち全スラブ筋を有効とし、実験値の曲率は最大モーメント断面から1h区間(h:梁高)の平均値とした。図によれば、解析値は実験値のモーメント低下開始点を比較的よく推定しているといえる。また、圧縮筋座屈後の剛性 E_b をあばら筋のピッチに係わらず $E_b = -0.05 \times 10^6 \text{ [kgf/cm}^2]$ とすると、モーメント低下域を安全側で比較的よく近似することができるといえる。

図-14および15は、圧縮側にスラブが付いた場合のT形RC梁断面の $M/bd^2 - d \cdot \phi$ 曲線の実験

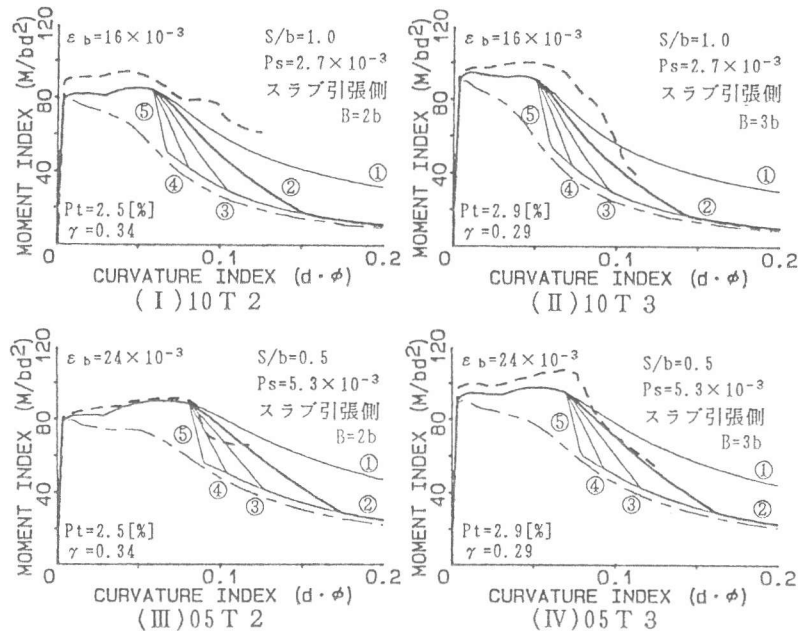


図-12 T形梁(スラブ引張側:文献[1]の実験データ)

値と解析値との比較を示したものである。解析は、別報[2]の研究結果に基づきスラブの有効幅を $2b$ と設定して行った。図によれば、圧縮筋の座屈開始時ひずみを長方形梁に対する推定値のおよそ2倍に設定すると、モーメント低下開始点を比較的よく近似することができる。また、圧縮筋座屈後の剛性を長方形断面やスラブ引張側に有するT形断面の場合と同様、 $E_b = -0.05 \times 10^6$ [kgf/cm²]とすると、モーメント低下域を安全側で比較的よく近似することができるといえる。

7. まとめ

本研究は、以下のようにまとめられる。

- 1) RC梁部材内の圧縮筋の座屈開始時ひずみの推定式を提案した。
- 2) RC梁部材内の圧縮筋の座屈後の剛性を推定した。
- 3) 圧縮側スラブによる圧縮筋の座屈止め効果を定量的に示した。

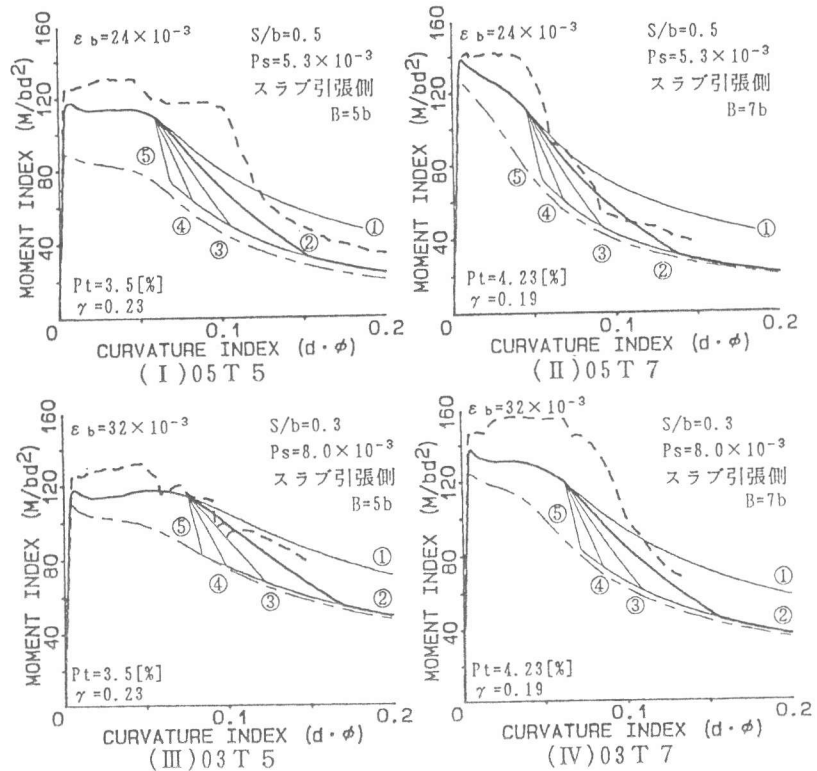


図-13 T形梁(スラブ引張側:文献[2]の実験データ)

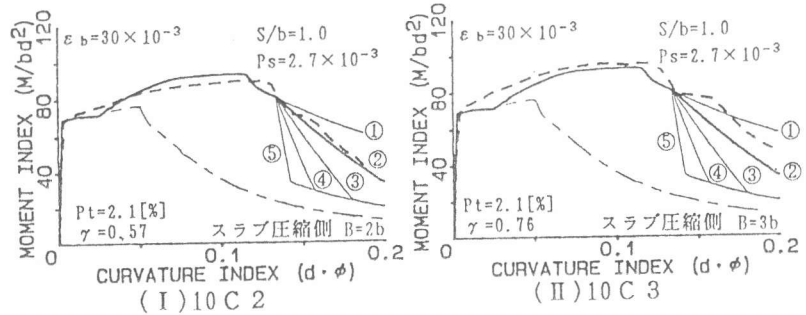


図-14 T形梁(スラブ圧縮側:文献[1]の実験データ)

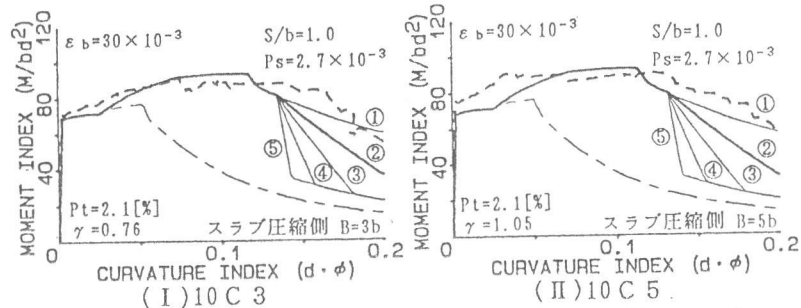


図-15 T形梁(スラブ圧縮側:文献[2]の実験データ)

参考文献

- [1] 梁川幸盛, 畑中重光, 谷川恭雄: T形RC梁の塑性回転性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, pp. 725-730, 1990.
- [2] 畑中重光, 梁川幸盛, 吉田徳雄, 小池狭千朗: スラブの効果を受けるRC梁の塑性変形挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, 1991. (印刷中)
- [3] 小柳 治, 六郷恵哲, 山本智志, 近藤吉信: 圧縮を受けるコンクリート中の鉄筋の座屈性状, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 502-503, 1989. 10.
- [4] 鈴木計夫, 中塚 侑, 井上和正: 円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの応力・ひずみ特性および同コンクリート内に配筋された圧縮軸筋の座屈性状, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集, pp. II 21-II 32, 1988. 3.