

論文

[2047] 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

正会員 畑中 重光 (三重大学建築学科)

正会員○梁川 幸盛 (㈱構造計画研究所)

正会員 吉田 徳雄 (三重大学大学院)

正会員 小池狭千朗 (愛知工業大学建築学科)

1. はじめに

RC梁部材の塑性変形挙動については、既に多くの知見が得られている[1]。しかし、それらは主に長方形断面をもつ梁についての実験結果および解析結果であり、他の部材と一体となって挙動する実構造物中の梁の挙動とは異なると考えられる。そこで、梁の挙動に対して影響の最も大きい部材の一つであるスラブの効果을明らかにするため、T形の断面を持つ梁についての研究が行われてきた。しかし、それらは主にせん断性能に関する研究であり、曲げ塑性変形挙動に関する研究は少ない。

本研究の目的は、引張側および圧縮側にスラブを持つRC梁の曲げ塑性変形挙動を明らかにするとともに、その推定方法を提案することである。そのため、まず、T形RC梁の曲げせん断載荷実験を行い、実験結果と解析結果を比較・考察する。次に、主筋の抜け出し、せん断変形および曲げ回転変形の特徴をまとめ、材端変位を推定する方法を提案する。

2. 実験方法

T形RC梁の曲げ・せん断載荷実験、および梁の曲げ圧縮部を模擬したコンクリート角柱体の1軸圧縮実験を併せて行った。

2.1 実験の概要と試験体の製作

T形RC梁の実験要因として、表-1に示すように、スラブ位置、スラブ幅(B)、およびあばら筋ピッチ(S)を取り上げた。配筋図の一例を図-1に、断面の種類を図-2に示す。T形梁はスラブ幅(B)が、 $1b \sim 7b$ (b:梁幅)の5種類の試験体を製作した(ここで、 $B=b$ の場合は、長方形断面を表す)。

角柱体は、梁のあばら筋と対応するように帯筋ピッチを変化させ、梁の塑性変形解析に使用するコンクリートの応力-ひずみ曲線をアクチュエーター方式の試験機によって測定した。寸法は、すべて $b \times b \times 2b$ とし、打ち込み方向は梁と同様に横打ちとした。なお、梁と同様の拘束条件となるように曲率測定用の鋼棒を埋め込んだ。

2.2 載荷および測定方法

梁試験体の載荷方法およびロードセル、変位計の取り付け要領を図-3に示す。曲率および変位の測定対象区間は、柱型側面より $b/4$ を第0区間とし、これより b 毎に第1～第3区間とした。

角柱体の圧縮試験については、供試体の上下端部の12mmを除く区間をひずみ測定区間とし、毎分平均 1×10^{-3} のひずみ速度で、縦ひずみが 25×10^{-3} に至るまで継続載荷した。

3. 実験結果とその考察

図-4(a)～(d)に第1および第2区間、すなわち $1h$ (ここに、 h :梁せい、 $h=2b$)区間のモーメン

ト指数(M/bd^2) - 曲率指数曲線($d \cdot \phi$)を、**図-5 a)~d)**に1 h区間の縁ひずみ - 曲率指数曲線を、**図-6 a)~d)**に材端変位(Δ)を構成する変位成分の比を示す。ここでは、実験によって得られた変位を以下に述べるような3つの成分に分解した。

1) せん断成分

第3区間端において、実測の変位と鉄筋の抜け出しを含めた回転による変位との差を求め、これを変位のせん断成分と考えた。回転による変位は各区間の曲率計の実測値を積分することによって求められるので、せん断成分のみを取り出すことができる。

2) 鉄筋の抜け出し成分

第0区間の引張側縁ひずみは、回転成分と鉄筋の抜け出し成分の和であると考えられる。しかし、実験データから両者を明確に分離することができないため、ここでは、第0区間の曲げによる引張側縁ひずみは、第1区間の引張側縁ひずみと等しいものと仮定し、残りを鉄筋の抜け出しによるものとした。

3) 曲げ回転成分

測定された変位より上記の2成分を引いた残りを曲げ回転成分とした。

3.1 あばら筋の効果

図-4 a)によれば、あばら筋ピッチにかかわらずモーメントが急激に落ちる挙動がみられる。これは、それ以後、モーメントが下がり続けることがないこと、および**図-5 a)**では、ほぼこの点で圧縮縁ひずみ曲線の角度が変化していることから、圧縮側鉄筋の座屈による耐力低下と考えられる。また、同図よりあばら筋は、圧縮側鉄筋の座屈を高ひずみ域にまで引き延ばす働きがあることがわかる。あばら筋はせん断補強に有効であるが、**図-6 a), b)**によれば、全変形に占めるせん断変形成分の比率に及ぼすあばら筋間隔の影響は小さいことがわかる。

3.2 圧縮側スラブ(Cシリーズ)の効果

実験中の目視によれば、変形が大きくなるとスラブだけが梁より先に座屈に似た破壊挙動を示

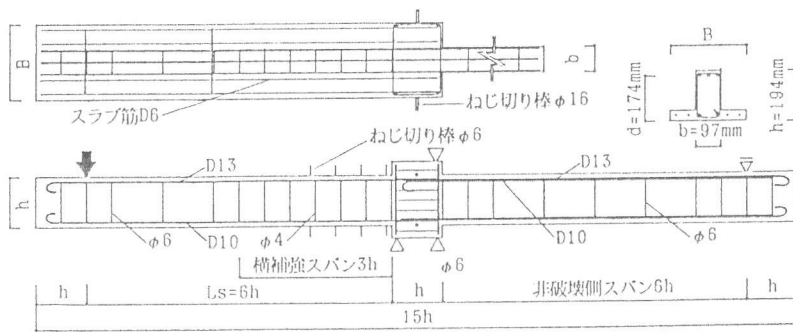


図-1 T形RC梁試験体の寸法および配筋図の例(10C3)

表-1 T形RC梁の荷重実験の概要

試験体名	スラブ位置	スラブ幅B	あばら筋		引張鉄筋比 P_t [%]	複筋比 γ	
			ピッチ S	あばら筋比 P_s [%]			
10N1	なし N	b	b	0.80%	6.67	2.1	0.3
05N1		b/2	0.53%	13.3			
03N1		b/3	0.27%	20.0			
10C2	圧縮側 C	2b	b	0.27%	6.67	2.1	0.5
10C3		3b					0.7
10C5		5b					1.0
10C7	7b	1.3					
05T5	引張側 T	5b	b/2	0.80%	20.0	3.5	0.2
05T7		7b	4.2	0.1			
03T5		5b	b/3	0.53%	13.3	3.5	0.2
03T7		7b	4.2	0.1			

[注] **: スラブ筋を引張鉄筋に含めて考えた場合の値、
*: $\sigma_c = 2 \cdot A_s \cdot \sigma_s / (2 \cdot S \cdot b)$ ここで1/2は円形を角形に換算するため

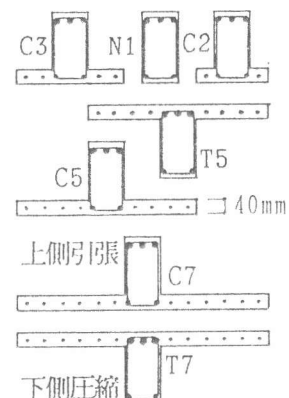


図-2 T形RC梁試験体の断面の種類

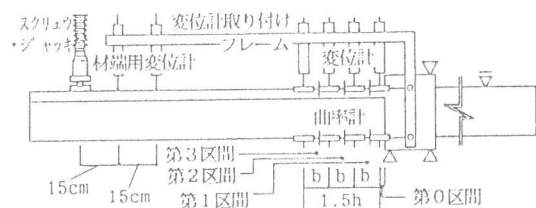


図-3 T形RC梁の荷重および測定方法

す。図-4 b)および図-5 b)によれば、圧縮側のスラブ幅が梁幅の2倍より大きくなると、スラブ幅の違いが梁の塑性変形挙動に及ぼす影響はほとんどみられない(ただし、試験体10C7は、引張筋が破断した)。したがって、本実験の範囲では、圧縮側スラブの有効幅は梁幅の2倍ということができる。この傾向は、荷重-変位曲線においても同様に認められた。また、実験中の目視によれば、圧縮側スラブが存在すると、やや破壊領域が広がる傾向が見られるが、これは主に引張側破壊域の広がりであり圧縮破壊域が広がるわけではないことが確認された。

さらに、図-4 b)および5 b)において、モーメントが急激に低下する点の圧縮縁ひずみ(ϵ_b)を比較すると、圧縮側にスラブを持つ梁では、長方形断面の梁に比べて ϵ_b の値が約2倍になる。すなわち、圧縮側スラブによる圧縮筋の座屈抑止効果は、あばら筋ピッチが同じ場合、長方形梁よ

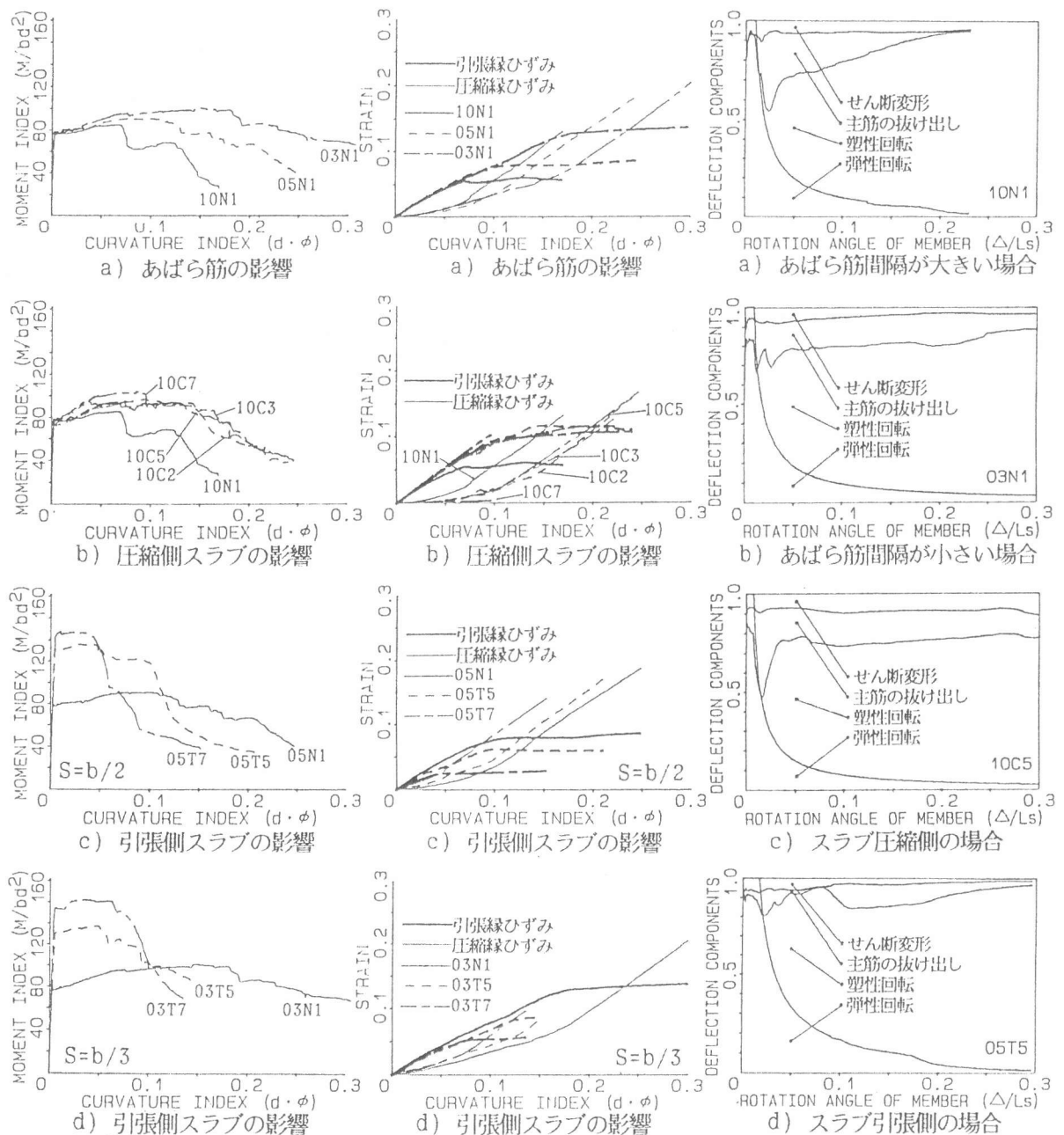


図-4 1h区間のモーメント
指数-曲率指数曲線

図-5 1h区間の縁ひずみ
-曲率指数曲線

図-6
材端変位(Δ)の成分分解図

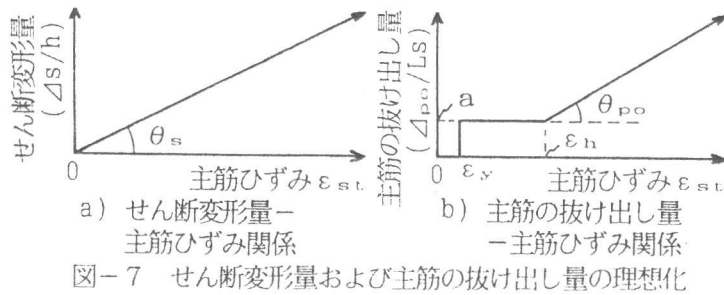


図-7 せん断変形量および主筋の抜け出し量の理想化

りかなり大きいことがわかる。

図-6 a)~c)によれば、圧縮側にスラブが存在しても、変形成分の比率はあまり変わらない。

3.3 引張側スラブ(Tシリーズ)の効果

図-4 c), d)によれば、引張側スラブの影響は、降伏モードにおいて顕著に見られる。実験の際の目視によれば、どの曲率レベルでも梁とスラブの一体性はほとんど失われておらず、引張側のスラブ、すなわちスラブ筋は全断面有効としてよいと考えられる。図-5 c), d)によれば、引張側スラブを増せば、曲率の小さい領域でコンクリートが圧壊に至ることがわかる。図-4 c), d)と考え合わせると、引張側スラブの効果は主筋比を大きくした場合に等しいといえる。図-6 d)によれば、引張側にスラブが存在すると、変位が小さい時点での主筋の抜け出し成分比が小さくなる。せん断変形成分も若干小さくなるが、全体的にみて長方形断面の梁と成分比が大きく変わるものではない。

4. せん断変形量および主筋の抜け出し量の推定式の提案

4.1 数式化の方法

実験データによれば、材端におけるせん断変形量(Δ_s)はほぼ引張主筋ひずみに比例し、主筋ひずみが戻りはじめる点(SR点[2])までであれば図-7 a)のように直線関係であるとして理想化できる。ここで、図の縦軸は Δ_s を梁せい(h)で無次元化した値である。一方、主筋の抜け出しによる材端変位(Δ_{po})は、SR点までであれば図-7 b)のように理想化できる。ここで、図の縦軸は Δ_{po} を梁スパン(Ls)で無次元化した値である。また、 ϵ_y は主筋の降伏ひずみ、 ϵ_h は主筋のひずみ硬化開始ひずみである。

4.2 せん断変形量および主筋の抜け出し量の推定式

実験結果に基づき、図-7中のパラメータ θ_s , θ_{po} , およびaを以下のように定量化した。

$$\theta_s = 1.0 + 0.5(C-1)$$

$$\theta_{po} = 1.2 \cdot \sigma_L \cdot P_t + 0.22(C-1)$$

$$a = 0.016 - 0.0002 \cdot \sigma_L - 0.3 \cdot P_t - 0.0013(C-1)$$

ここで、C=圧縮側スラブ幅(B)/梁幅(b)、ただし、 $C \geq 2$ のときは $C=2$ 。Ptは無名数。

たとえば、 $\Delta_s/h = \theta_s \cdot \epsilon_{st}$ として算出する(ϵ_{st} :引張側の主筋ひずみ)。

なお、あばら筋の効果は、拘束力(表-1中の側圧 σ_L [kgf/cm²])に換算して取り扱っている。図-8 a), b)に実験値と推定式による計算値との比較例を示す。

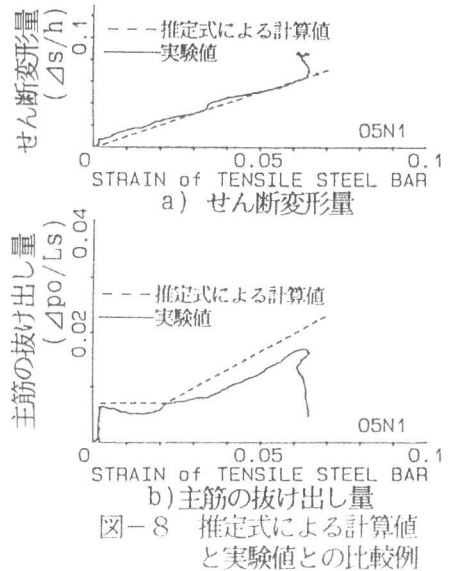


図-8 推定式による計算値と実験値との比較例

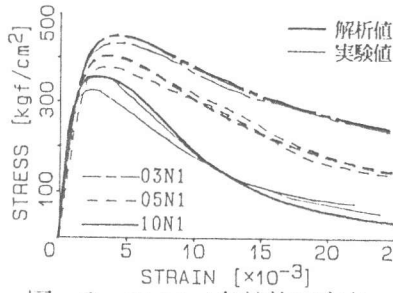


表-2 解析に用いた鉄筋のパラメータ

鉄筋の種類	Ei	fy	Eh	εh	fu	εu
引張鉄筋 (D13)	2.01	3600	1.140	22000	5300	250000
圧縮鉄筋 (D10)	2.05	4200	0.763	22000	6700	240000
スラブ筋 (D6)	2.10	4400	1.145	11000	6100	240000

(注) Ei:ヤング係数(×10⁶) [kgf/cm²], fy:降伏強度 [kgf/cm²], Eh:ひずみ硬化開始時の傾き(×10⁴) [kgf/cm²], εh:ひずみ硬化開始時ひずみ(×10⁻⁶), fu:破断強度 [kgf/cm²], εu:破断ひずみ(×10⁻⁶)

表-3 圧縮鉄筋の座屈に関するパラメータ

試験体	εb	Eb
10N1	16000	-5.0
05シ-ズ	24000	
03シ-ズ	32000	
Cシ-ズ	30000	

(注) εb:座屈時ひずみ(×10⁻⁶), Eb:座屈後剛性(×10⁴) [kgf/cm²]

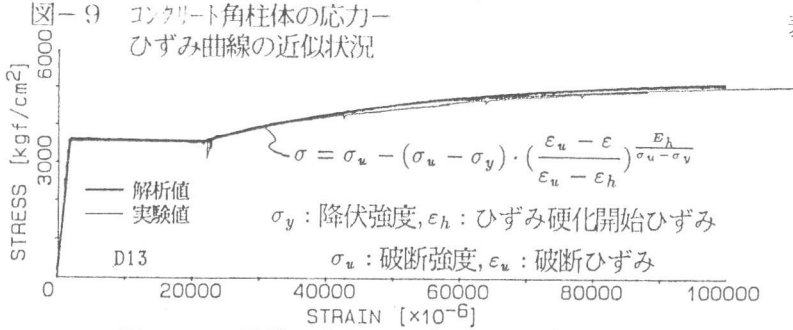


表-4 塑性ヒンジ等価長さ(eLp)

Name	T1	Lm	eLp
10N1	3.5	1.4	2.0
05N1	4.8	1.4	2.0
03N1	5.6	1.4	2.0
10C2	3.6	1.2	2.0
10C3	3.9	1.2	2.0
10C5	3.7	1.2	2.0
10C7	3.8	---	---
05T5	5.1	1.2	1.5
05T7	4.5	1.0	1.5
03T5	5.4	1.2	1.5
03T7	5.4	1.2	1.5

(注) Lm:曲率対応測定長, T1:タフネス値 [kgf/cm²], Lm, eLpは、ともに梁せい(h)に対する比

5. 材端変位の解析

5.1 断面解析プログラムの概要

図-2のような断面に対し、平面保持の仮定の下に断面内の力の釣合から、モーメント(M)-曲率(φ)関係を求める。以下にその断面解析の手順を述べる。

- ①中立軸位置を仮定する。
- ②仮定した中立軸位置および圧縮縁ひずみより、各部のひずみを求める。
- ③各ひずみからそれぞれの合力を求める。
- ④各合力が釣り合わないときは①の処理に再び戻り、釣り合えばモーメントと曲率を計算する。

5.2 解析パラメータ

圧縮部コンクリートの応力(σ)-ひずみ(ε)関係は、図-9に示すように角柱体の1軸圧縮試験から得られたσ-ε関係を数式近似して用いた。表示式として、応力上昇域では Popovics式を、下降域では修正Popovics式を使用した[3]。

引張鉄筋および圧縮鉄筋の応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化を考慮した図-10のような曲線とし、各鉄筋の1軸引張試験結果に基づいて定量化した(表-2)。圧縮鉄筋の座屈時ひずみ(εb)および座屈後の剛性(Eb)は、筆者らの別の研究[4]に基づき、表-3のように仮定した。

5.3 解析結果と実験結果の比較

部材の変形量を求めるには、断面内の塑性曲率を積分する領域(塑性ヒンジ等価長さ(eLp))を決定する必要がある。ここでは、3節の処理で抽出した弾塑性曲げ回転による材端変位と解析で得られる材端変位が一致するようなeLpの値を調べた。

eLpの決定プロセスの一例を図-11に示す。全ての試験体について得られたeLpの値を表-4にまとめた。また、参考値として圧縮部のコンクリートのタフネス値(T1:コンクリートの応力-ひずみ曲線とひずみ軸とで囲まれる面積でひずみが15×10⁻³における値)および解析値に一致するための曲率の測定長さ(Lm)も掲載してある。

表-4によれば、eLpの値は、あばら筋ピッチにかかわらず長方形断面および圧縮側スラブを有する断面の場合 eLp=2.0h、引張側スラブを有する断面の場合 eLp=1.5h程度である。ただし、入力した圧縮筋の座屈開始ひずみεb(表-3参照)にはコンクリートの靱性の影響が反映されている。

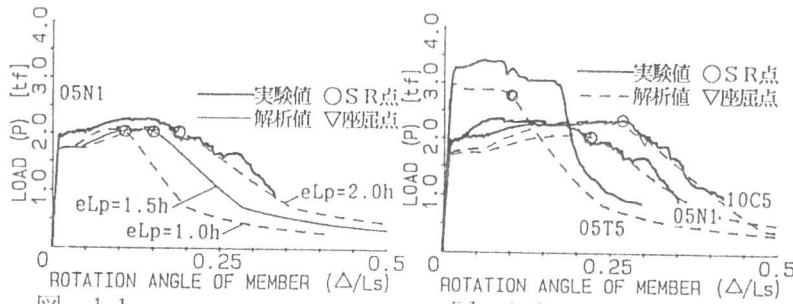


図-1 1

塑性ヒンジ等価長さ(eL_p)の評価

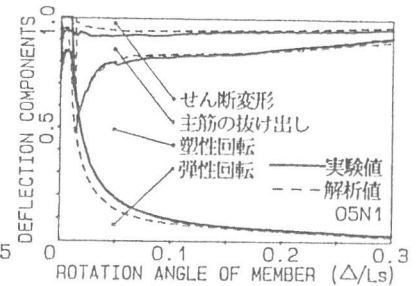
図-1 2

荷重-部材角曲線の推定状況

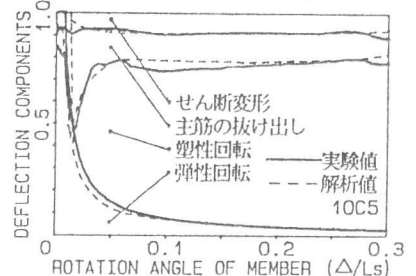
以上より、安全側の評価をするのであれば、スラブ位置に関わらず、 $eL_p=1.5h$ としても良いと考えられる。

5. 3 材端変位の推定

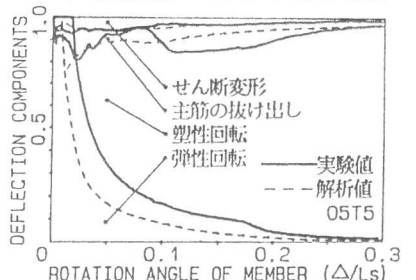
表-4に示した eL_p の値、3節で提案したスラブの有効幅、4節で提案した主筋の抜け出し量およびせん断変形量の推定式を用い、3節の実験結果について解析を行った。図-1 2に荷重-部材角曲線の比較例を、図-1 3 a), b), c)に変位成分の比較例を示す。全試験体を通じて比較的良い推定値が得られたといえる。



a) 長方形断面の場合



b) 圧縮側にスラブがある場合



c) 引張側にスラブがある場合

図-1 3

材端変位の成分比の推定状況

6. まとめ

本研究によって得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 圧縮側スラブの幅が梁幅の2倍より大きくなると、断面のモーメント-曲率曲線に及ぼすスラブ幅の違いの影響はほとんどみられない。したがって、梁幅の2倍を圧縮側スラブの有効幅の最大値と見なすことができる。
- 2) 引張側スラブは、スラブ幅が梁幅の7倍までであれば、どの曲率レベルであっても、ほぼ全断面有効としてよいと考えられる。
- 3) スラブは、圧縮・引張のどちら側にあっても、変形成分の比率に大きな影響を及ぼさない。
- 4) 曲げ破壊する長方形およびT形RC梁の材端変位の推定モデルを構築し、せん断変形成分、主筋の抜け出し成分、および曲げ回転成分の各推定式を提案した。

ただし、たとえ曲げ破壊先行型の梁であっても本実験のパラメータの範囲(表-1参照、せん断応力度はおよそ $10 \sim 17$ [kgf/cm²])を越える場合に対する提案式の適用性については、今後さらに詳しい検討が必要である。

[謝辞] 本研究に際し、御助力を得た、谷川恭雄先生(名古屋大学教授)、近藤洋右君(三重大学院生)、高柳拓君(三重大学卒業生)に深謝致します。

[参考文献]

- [1] コンクリート構造物の靱性評価研究委員会: 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, 1988. 3, II-264. pp.
- [2] 鈴木計夫・中塚侑ほか: プレストレス鉄筋コンクリート(PRC)曲げ部材断面の終局域特性について——算定式と算例による考察——, セメント技術年報, 1978, pp. 436-439.
- [3] 小坂義夫・谷川恭雄・畑中重光・三輪隆治: RC梁部材の塑性ヒンジ部におけるコンクリートの応力-ひずみ関係, コンクリート工学年次講演会論文集, 第8巻, 1986, pp. 545-548.
- [4] 畑中重光・梁川幸盛・吉田徳雄: RC梁の終局域における圧縮筋の座屈に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, 印刷中