

論文 軽量骨材コンクリートを用いたT形RC梁の曲げ破壊挙動と塑性ヒンジモデル

岸 圭介*1・畑中 重光*2・大澤 潤*3・小池 狭千朗*4

要旨：軽量コンクリートを用いたT形RC梁の曲げせん断実験を行った。その結果、普通コンクリートを用いた場合に得られた変位の推定式は、若干の修正により軽量コンクリート梁にもほぼ適用可能であること、塑性ヒンジ等価長さ(elp)は普通骨材を用いた場合より低下する傾向のあることを明らかにし、これらを数式表示した。

キーワード：軽量コンクリート、スラブ有効幅、曲げ、靱性、T形断面、塑性ヒンジ

1 はじめに

筆者らは既報[1],[2]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及ぼすスラブの有効幅、スラブ位置および材長の影響を実験的に調べ、圧縮および引張側スラブの有効幅(Be)、塑性ヒンジ等価長さ(elp)を定量的に明らかにすると共に、せん断変形および鉄筋の抜け出しによる材端変位の推定式を提案した。また既報[3]において、高強度コンクリートを用いた同様の実験を行い、これらの推定式は高強度コンクリートを用いた場合にも、若干の修正を行えばほぼ適用可能であることがわかった。これらの知見を踏まえ、さらに広範囲の種類コンクリートを用いた場合に対する推定式の適用性を検討するため、本研究では、軽量コンクリートを用いたT形RC梁について、既報[3]と同様な実験並びに解析を行うものである。

2 実験概要

軽量コンクリート1種を用いて、T形RC梁の曲げ・せん断実験を行うとともに、梁の曲げ圧縮部を模擬したコンクリート角柱体の一軸圧縮実験を併せて行った。

2.1 実験要因と試験体の製作

表-1に実験概要を示す。T形RC梁の実験要因として、コンクリート強度、あばら筋間隔、スラブ位置、スラブ幅、材長を取り上げた。断面の種類を図-1に、配筋図の一例(スラブ引張側、 $B=3b$)を図-2に示す。T形梁として、スラブ幅(B)が $b(=h/2)$, $3b$, $5b$ (b :梁幅)の3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)。軽量コンクリート1種の粗骨材には、人工軽量

表-1 実験概要

試験体名	Fc (kgf/cm ²)	横補強筋			位置 (N)	幅 B	材長 Ls	引張鉄筋比 Pt (%)	複筋比 γ
		S (cm)	Pw (%)	σ_L (kgf/cm ²)					
H05N14	350	5.0	0.53	13.3	なし (N)	b	4.5h	2.11	0.38
H05N13							3h		
N03N14							4.5h		
N05N14							3h		
N03N13							4.5h		
N05N13							3h		
N05C34		3.0	0.80	20.0	なし (N)	b	4.5h	2.82	0.72
N05C54							3h		
N03T33							4.5h		
N03T53							3h		
N03T34							4.5h		
N05T54							3h		

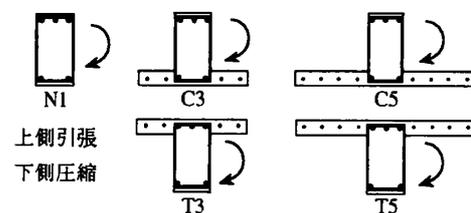


図-1 断面の種類



*1 旭化成工業、工修 (正会員) *2 三重大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)
*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 *4 愛知工業大学助教授 建築学科、工修 (正会員)

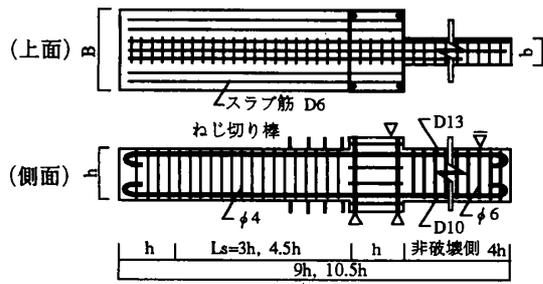


図-2 配筋図の一例 (NO5T33)

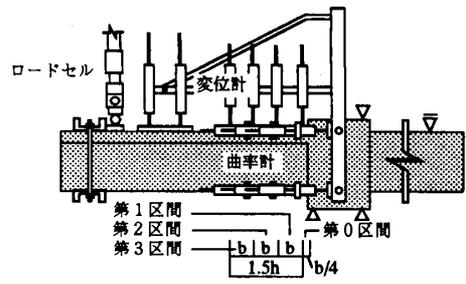


図-3 荷重および測定方法

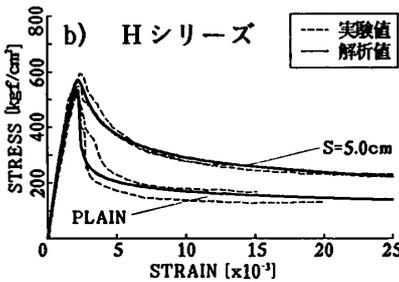
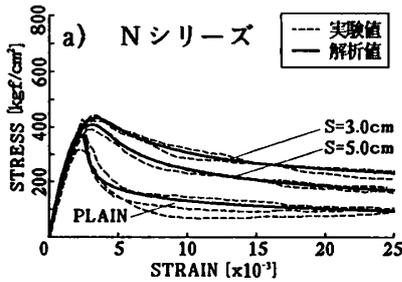


図-4 軽量コンクリート角柱体の応力-ひずみ関係

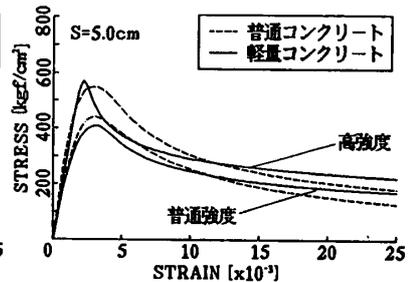


図-5 粗骨材種類の影響

骨材(メサライト:絶乾比重1.25、吸水率29.6%、粗粒率6.28)を、細骨材として町屋川産の川砂を用いた。また使用鉄筋の性質は、既報[1]で用いたものと同一である。

角柱体は、梁のあばら筋ピッチ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-ひずみ曲線を測定した。角柱体の寸法は、梁の圧縮部を模擬するため、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 荷重および測定方法

梁試験体の荷重および測定方法を図-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、これより長さ b ごとに第1~第3区間とした。

角柱体の圧縮試験では、供試体の上下端部の16mmを除く区間をひずみ測定区間とし、毎分およそ 2×10^{-3} のひずみ速度で、縦ひずみが 25×10^{-3} に至るまで継続荷重した。荷重にはアクチュエータ方式の試験機を用いた。

3 実験結果とその考察

考察の対象とする実験結果は、原則として、軽量コンクリートを用いた本実験によるものであるが、比較の為、適宜、普通コンクリートを用いた既報[2],[3]の結果も併せて考察する。

3.1 角柱体の一軸圧縮実験

図-4 a), b)に、角柱体の一軸圧縮実験から得られた応力-ひずみ関係の実験値と解析値を、図-5に、粗骨材種類の異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線の比較を示す。なお、図-4の解析値は、次節の変形解析に使用するものである。図-5によれば、強度の差はあまり大きくないが、軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりも靱性が低下する。これは、軽量コンクリートでは、あばら筋の拘束効果が普通コンクリートに比べて小さいためである。また、靱性低下の度合いは高強度の場合の方が大きい。

3.2 梁の曲げ・せん断実験

図-6 a)~f)に、第1区間と第2区間のモーメント指数(M/bd^2)—曲率指数($d \cdot \phi$) (以下、モーメ

ントー曲率)関係の平均値、すなわち1 h区間のモーメントー曲率関係におよぼす各要因の影響を示す。図には示していないが、図-6の傾向は、部材全体の荷重ー材端変位関係とほぼ同様である。また、以下、特にモーメント低下開始点(座屈点)に注目して考察する。

同図a)に、あばら筋間隔の影響を示す。図によれば、普通コンクリート梁と同様に、あばら筋間隔が密になると若干ではあるが靱性が増加し、モーメント低下開始点が高曲率域に移行する。

同図b)に、圧縮側スラブの影響を示す。図によれば、圧縮側スラブ幅が $b \sim 5b$ の間で変化してもモーメントー曲率関係にそれほど影響はみられない。一方、普通コンクリート梁の場合には、圧縮側スラブの有効幅はおよそ $B=2b$ であった。

同図c)に、引張側スラブの影響を示す。図によれば、引張側スラブ幅の増加に伴い降伏および最大モーメントが増加し、破壊はより脆性的となる。また、より低曲率域でコンクリートの圧壊に至っている。これらのことから、軽量コンクリートを用いた場合でも、普通コンクリート梁と同様に、釣合い鉄筋比以下であれば、引張側スラブの有効幅は全幅有効、すなわち、引張側のすべてのスラブ筋は有効に働くものと推測される。

同図d)に、材長(せん断スパン比)の影響を示す。図によれば、材長の減少に伴って、モーメント低下開始点が低曲率域に移行する。これは、材長の減少、つまりモーメント勾配の増加に伴う破壊の集中化によるものであり、その傾向は、普通コンクリート梁の場合とほぼ同じである。

同図e)に、コンクリート強度の影響を示す。図によれば、コンクリート強度が増大すると、モーメント低下開始点が低曲率域に移行し、破壊がかなり脆性的となっている。この結果は、普通コンクリートを用いた場合(高強度ほど高靱性)[3]とは異なる。これは、図-5に示したように、軽量コンクリートは普通コンクリートと比べて、骨材自身の強度が弱いために、同程度のあばら筋を配置しても横拘束力による圧縮強度や靱性の増加が小さいこと、また高強度($F_c=550\text{kgf/cm}^2$ レベル)になるとピーク点以降の応力低下がはげしいためと考えられる。

同図f)に、コンクリート種類の影響を示す。図によれば、軽量コンクリートを用いた場合は、普通コンクリートを用いた場合と比べて、モーメント低下開始点(座屈点)がわずかではあるが低曲率域に移行している。これは、圧縮部靱性の影響によるものと思われる。

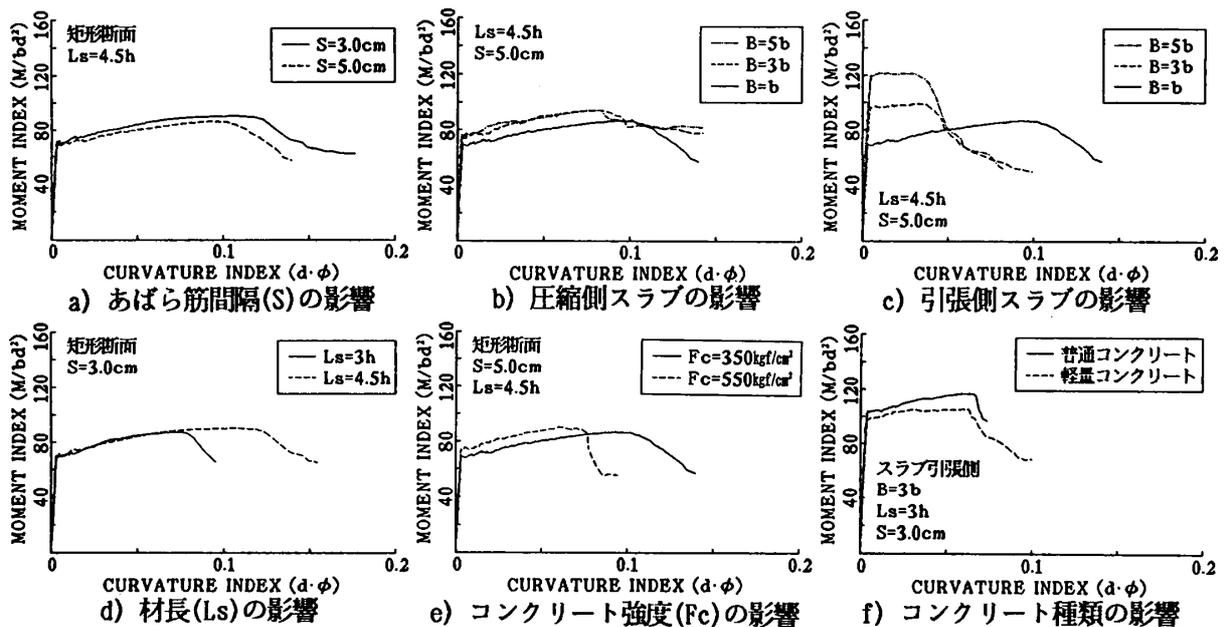


図-6 1 h区間のモーメントー曲率関係に及ぼす各種要因の影響

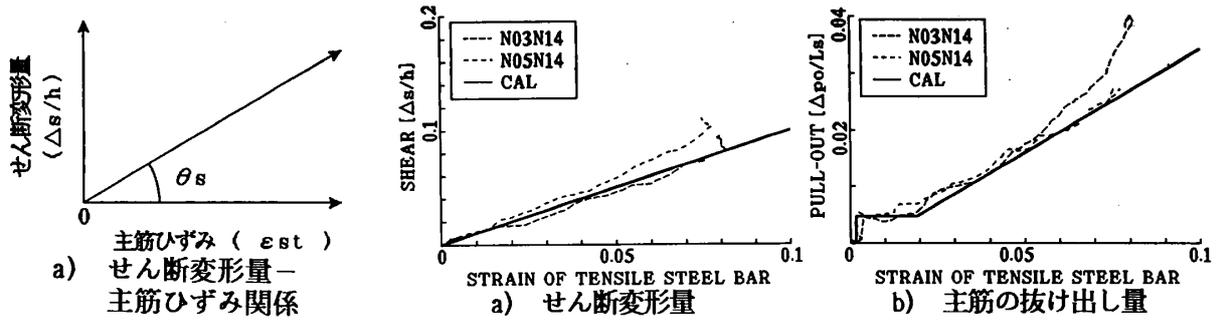


図-8 解析値[2]と実験値の近似状況の一例

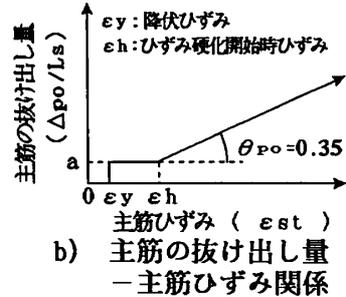


図-7 せん断変形量および
抜け出し変形量の理想化

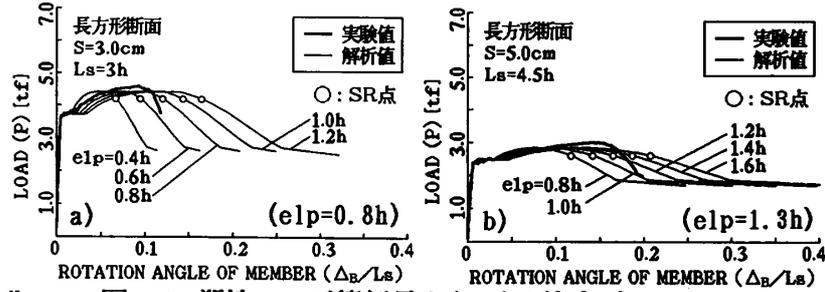


図-9 塑性ヒンジ等価長さ(elp)の決定プロセス

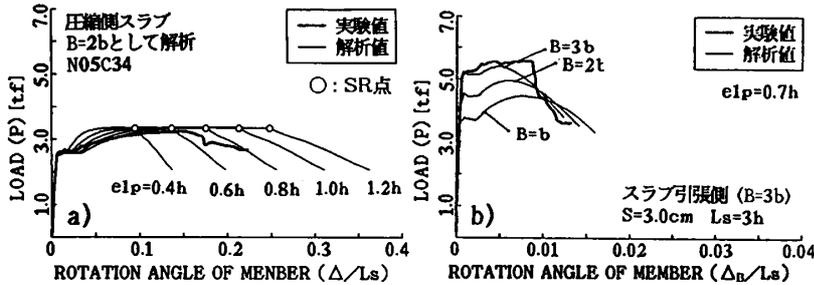


図-10 スラブ有効幅(Be)の決定プロセス

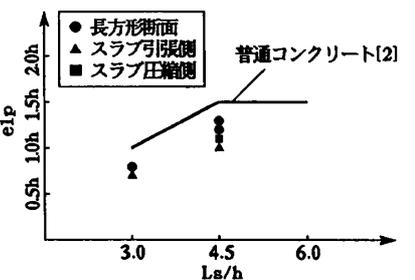


図-11 elpとせん断スパン比の関係

表-2 推定式

スラブ有効幅	圧縮側	・普通コンクリート $B_e = B$ ($b \leq B \leq 2b$)、 $2b$ ($B > 2b$) ・軽量コンクリート $B_e = B$	式(1)
	引張側	$B_e = \epsilon_{st} \cdot ((B-b) / \epsilon_y) + b$ ($0 \leq \epsilon_{st} \leq \epsilon_y$)、 B ($\epsilon_{st} > \epsilon_y$)	式(2)
塑性ヒンジ等価長さ	普通コンクリート	$elp = \begin{cases} Ls/3 & (Ls < 4.5h) \\ 1.5h & (Ls \geq 4.5h) \end{cases}$	式(3)
	軽量コンクリート	$elp = \begin{cases} Ls/3 - 0.3h & (Ls < 4.5h) \\ 1.2h & (Ls \geq 4.5h) \end{cases}$	
せん断変形量		$\theta_s = -0.4 \cdot Ls/h + 2.8$ ($Ls \leq 4.5h$)、 1 ($Ls > 4.5h$)	式(4)
引張主筋抜け出し量	・長方形、引張側スラブの梁について	$a = \begin{cases} -0.25 \cdot Pt + 0.01 & (Pt \leq 0.012) \\ 0 & (Pt > 0.012) \end{cases}$	式(5)
	・圧縮側スラブの梁について	$a = \begin{cases} 0.07 & (Pt \leq 0.012) \\ -0.25 \cdot Pt + 0.01 & (0.012 < Pt \leq 0.04) \\ 0 & (Pt > 0.04) \end{cases}$	
ひずみ比		$k = 0.4 \cdot (Ls/3h) + 0.2$	式(6)

(注) B:スラブ幅、b:梁幅、Ls:材長、 ϵ_{st} :引張主筋ひずみ、 ϵ_y :降伏ひずみ、Pt:引張鉄筋比(無名数)
但し、適用範囲はLs ≥ 3h

4 塑性変形挙動の推定式の検討

筆者らは既報[1],[2]において、部材の変形量を、曲げ変形量、せん断変形量および主筋の抜け出し量に分解し、それぞれの変形量についての推定式を提案してきた。本研究では、軽量コンクリートを用いた場合への拡張を行う。なお各変形量の抽出方法は、既報[1]と同様である。

4.1 せん断変形量および主筋の抜け出し変形量

図-7 a), b)に推定モデルの概要を示す。図のようにせん断変形量、および主筋の抜け出し量を1

h区間の引張主筋ひずみの関数として与えられるものとして数式化した。本実験において既提案の推定式中の係数を調べた結果、図-8 a), b)に示すように、軽量コンクリートを用いることによる大きな影響はみられなかった。よって普通コンクリートを用いた場合に得られた提案式[2]は、軽量コンクリートにおいてもほぼ適用可能であると思われる。但し、本モデルでは終局域まで含めた推定を目的としており、降伏点以前の変形量の推定には別途、検討が必要である[4]。

4.2 スラブの有効幅(Be)および塑性ヒンジ等価長さ(elp)

部材の塑性変形量を推定する際には、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。図-9 a), b)に、塑性ヒンジ等価長さ(elp)の決定プロセスの一例を示す。図のように、曲げ変形のみ抽出処理した実験値に一致する塑性ヒンジ等価長さを求める。なお、決定の際には図中のSR点(引張主筋ひずみが戻り始める点)を終局指標点として考慮した。断面解析(解析法は既報[1]と同様)に使用する圧縮部コンクリートの応力-ひずみ関係には、3.1項で記した高さ-辺長比が2の角柱体より得られたデータを数式近似して用いた(図-4)。

また、スラブ付きRC梁については、塑性ヒンジ等価長さ(elp)を求める際にスラブの有効幅を決定することが必要となる。図-10 a), b)に、スラブ有効幅の決定プロセスを示す。同図a)によれば、圧縮側スラブ有効幅を $Be=2b$ (普通コンクリートと同様)とすると、約 $elp=0.4h$ (h:梁成)となり、材長が同じ長方形断面の梁(図-9 b))と比べて、著しく小さくなる。スラブが圧縮側に存在することによってこのような著しいelp値の低下が生じると考えることは、これまでの研究結果および梁の破壊状況から判断して妥当ではない。また図-6 b)の実験結果からも、軽量コンクリートを用いた場合の圧縮側スラブ有効幅は、 $Be=b$ (b:梁幅)であると考えるのが妥当であろう。図-10 b)によれば、引張側スラブについては、高強度コンクリートおよび軽量コンクリートを用いた場合においても、普通コンクリートと同様に全幅有効とすると、降伏耐力を比較的良く近似できることがわかる。

すべての試験体について、塑性ヒンジ等価長さ(elp)の検討を行った結果、図-11の関係が得られた。なお図中には、普通コンクリートを用いた場合の推定式(文献[2]参照。但し、入力データにミスがあったため、式を修正してある)も併示した。図によれば、軽量コンクリートを用いた場合には、塑性ヒンジ等価長さ(elp)は低下する傾向があることがわかる。以上の結果より、軽量コンクリートを含めた塑性変形挙動の推定式を表-2にまとめて示す。なお、軽量コンクリートを用いることによる影響が見られなかったものについては、既報[2]による推定式を再掲してある。

表-3 各モデルによる塑性ヒンジ等価長さ(elp)

b (cm)	h (cm)	d (cm)	S (cm)	Ls (cm)	塑性ヒンジ等価長さ (elp)				
					Baker	Corley	Mattock	Sawyer	本研究
9.7	19.4	17.4	5.0	58.2	9.9	13.1	11.6	8.7	19.4
				87.3	10.9	15.4	13.1	10.9	29.1
				116.4	11.8	17.6	14.5	13.1	29.1

注) b: 梁幅、h: 梁成、d: 有効成、S: ピッチ、Ls: 材長

5 塑性ヒンジモデルの比較

筆者らは、既報[1]~[3]および本報において普通コンクリート、高強度コンクリートおよび軽量コンクリートを用いたRC梁の塑性ヒンジ等価長さ(elp)の推定

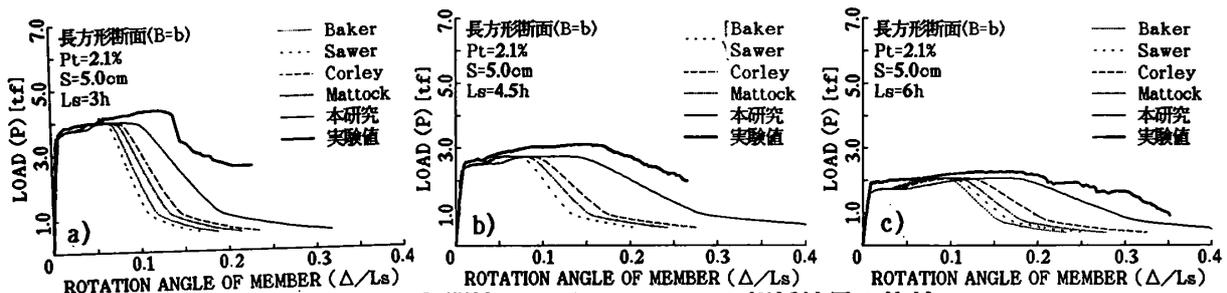


図-12 各塑性ヒンジモデルによる解析結果の比較

式を提案してきた。しかし提案式で得られるelp値は、他の研究者の値と比較して大きい値となる傾向がある[5]～[8]。ここでは、本モデルの位置付けを明らかにしておくために、各モデルを使用した解析を行うと共に、モデル間の相違について検討する。

ここでは、解析の対象に普通コンクリートを用いた試験体[1],[2]を用いた。解析方法は本論文と同様とし、せん断変形・主筋の抜け出し変形は本研究のモデルを用いて推定した(表-2)。解析断面の詳細と各モデルによるelpの値を表-3に、解析結果を図-12に示す。各モデルの詳細については、文献[5]～[8]等で紹介されているので参照されたい。図によれば、既往の各モデルを適用して得られる変形量の差はそれほど大きくないが[5]、いずれも終局域の変形量をかなり過小評価していることがわかる。この一つの理由としては、elp値決定の際の終局指標点が挙げられる。つまり既往のモデルでは最大耐力点を終局点としているのに対して、本モデルでは最大耐力点以後のSR点を終局点としている。その結果、elp値は既往のモデルと比べて大きくなるものと思われる。各モデルとも、使用する際の目的、状況に応じて、使い分ける必要があるといえよう。

6 まとめ

- 1) 軽量コンクリートを用いたRC梁の曲げ終局域における圧縮側スラブの有効幅(Be)は、ほぼ梁幅(b)、すなわち、 $Be=b$ (普通コンクリート梁では梁幅のほぼ2倍で $Be=2b$)とみなせる(図-6b)および図-10a)。
- 2) 本研究のパラメータの範囲では、軽量コンクリートを用いたRC梁の引張側スラブ(軸方向スラブ筋)は、曲げ変形に対して、降伏以降であれば、どの曲率レベルにおいても全断面有効であるといえる(図-6c)および図-10b)。
- 3) 既報[2]で得られた、曲げ破壊する長方形断面およびT形断面RC梁のせん断変形量および主筋の抜け出し量の推定式は、終局域までを含めて全体としてみれば、軽量コンクリート用いた場合でも簡易式として充分適用できるといえる(図-8a)およびb)。
- 4) 軽量コンクリートRC梁の塑性ヒンジ等価長さ(elp)を検討した結果、普通コンクリートRC梁の場合と比べて、若干小さくなる傾向を示すことが分かった(図-9および図-11)。
- 5) 普通コンクリート梁の塑性変形挙動の推定式[2]を、軽量コンクリート梁も含めた推定式に拡張した(表-2)。
- 6) 筆者らの提案式を含む既往の各塑性ヒンジモデルの比較・検討を行い、各モデルの適用時の留意事項を示した(図-12および表-3)。

【謝辞】 本研究に際し、御助力を得た中塚信先生(大阪大学)、福西輝正君(大林組)、畑中研究室の諸氏(三重大学)に深謝致します。なお、本研究費の一部は平成3・4年度、日本住宅総合センター調査・研究助成金によったことを付記する。

【参考文献】

- [1] 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、第13回コンクリート工学年次論文報告集、1991, No. 2, pp. 293-298
- [2] 吉田徳雄・畑中重光・上田英明・小池狭千朗:スラブ付きRC梁の塑性変形挙動に及ぼす材長の影響、第14回コンクリート工学年次論文報告集、1992, No. 2, pp. 173-178
- [3] 岸圭介・上田英明・安藤昌仁・畑中重光:高強度コンクリートを用いたT形RC梁の曲げ破壊挙動、第16回コンクリート工学年次論文報告集、1994, No. 2, pp. 347-352
- [4] 上田英明・畑中重光・岸圭介・小池狭千朗:T形断面RC梁のスラブ有効幅について、第15回コンクリート工学年次論文報告集、1992, No. 2, pp. 331-336
- [5] 梁川幸盛・畑中重光・小池狭千朗:鉄筋コンクリート梁部材の塑性ヒンジモデルに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C構造II、1989, pp. 387-388
- [6] Park・Paulay, Reinforced Concrete Structures, Chap. 6, John Wiley & Sons, 769 pp.
- [7] 小柳治:コンクリート部材の塑性ヒンジについて:コンクリート工学、Vol. 15, No. 5, 1977, pp. 1-10
- [8] 建築耐震設計における保有耐力と変形性能、日本建築学会、1990