

PC梁の等価塑性ヒンジ長さと同長さを用いる荷重-変形関係推定法における課題

大阪大学大学院	正会員	○巽 英明
大阪工業大学	正会員 工博	中塚 侑
(株)ピーエス三菱	正会員	寒川 勝彦
オリエンタル建設(株)	正会員	浅川 弘一

1. はじめに

近年、構造設計法は変形もクライテリアとする性能評価型設計法が目指されている。その性能評価型設計には部材の荷重-変形関係を材料損傷と関連付けて推定することが必要となる。

一方、荷重-変形関係推定法としては、変形が弾性変形、せん断変形、ならびに柱梁接合部と梁引張側塑性ヒンジ領域からの鉄筋の抜け出しによる付加変形の四つの成分和としてとらえるマクロモデル的な手法^{1,2)}や、等価塑性ヒンジ長さ(以下 Leq と略記)と断面解析とをペアで用いる簡便な等価塑性ヒンジ法などがある。なお同法は、部材端部に生じる塑性ヒンジ領域の塑性変形量、すなわち圧縮塑性域と引張鋼材降伏域とで引き起こされる部材の塑性変形量を、部材端部に長さ Leq の塑性変形集中域を仮定して等価に評価しようとするもので、上述の塑性ヒンジ領域とは全く異なる概念である。

本研究はPC梁部材の Leq に及ぼす、梁接合形式(一体型・圧着型)、鋼材の付着特性などの影響を明らかにすると同時に Leq 法による荷重-変形関係推定について考察するものである。

2. RC部材における等価塑性ヒンジ長さ

等価塑性ヒンジ法は図-1に示すように、部材塑性変形及び塑性回転が長さ Leq の等価塑性ヒンジ部分に平均塑性(非線形)曲率が集中して生じると考える方法である。この Leq は、実験あるいは解析で得られた部材の曲率分布、载荷点たわみと回転角などから導かれる。すなわち、部材の载荷点たわみの測定値と、ある検長での曲率測定値あるいは曲率解析値を用いたモールの定理によって誘導される次式などから求められる。

$$\delta - \delta_e = \delta_p = \theta_p (L - L_{eq}/2) = \phi_p (L - L_{eq}/2)L_{eq}$$

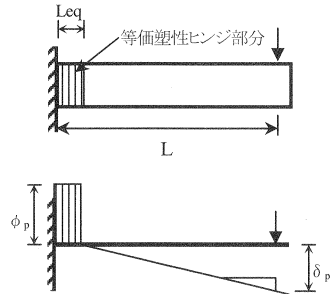


図-1 等価塑性ヒンジ長さの概念

2.1 Leq についての既往の提案式

表-1は Leq に関する既往提案式の例をまとめたものである。同表によれば Leq はシアスパン、部材せい、主筋径などの影響を受けるとされるが、RC部材の Leq の目安としては0.5D程度になっている。

表-1 既提案の等価塑性ヒンジ長さ

	等価塑性ヒンジ長さ(Leq)	備考
W.G.Corley	$Leq=(1+0.638L/d^{3/2})(d/2)$	RC梁の単純曲げ試験での中央たわみが、中央(d/2)区間での平均曲率との比からLeq式を誘導。L/dの増加によって大となるが、通常のRC部材では0.5d~0.7d程度。
M.J.N.Priestley	$Leq=0.08L+0.022d_f y$ ここで、L:柱フェイスから载荷点位置までの距離 db, fy(Mpa):主筋の直径および降伏強度(MPa)	梁の斜めひび割れによる応力シフト、ならびに接合部への鋼材降伏領域の進展を考慮。 通常の寸法をもつ梁、柱では $Leq \approx 0.5D_c$ (D:断面せい)
道路橋示方書・同解説V 耐震設計編	$Leq=0.2L-0.1D$ 但し、 $0.1 \leq Leq \leq 0.5D$ D:断面高さ(m) L:橋脚基部から上部構造慣性力の作用位置までの距離(m)	
土木学会標準示方書	$Leq=(0.5+0.05L/d)d$ d:断面有効せい、L:シアスパン ・最大モーメント時変形: $\delta_{mo} = \delta_{mb} + \delta_{mp} + \delta_{ml}$ δ_{mb} : 塑性ヒンジ部以外の曲げ変形、 δ_{mp} : 塑性ヒンジ部の曲げ変形による変位($\theta_{mp}(L-0.5Leq)$)、 ・終局変位 $\delta_n = Leq \theta_n$	軸方向筋の抜け出しによる変形の付加量: $\theta_{mi}(130\theta_{mp}-0.47)\theta_{yi}$ 、 θ_{yi} : 部材降伏時の抜け出しによる回転角($\angle S_y/(d-x_y)$)、 $\angle S_y$: 抜け出し量($\alpha \cdot \epsilon_y(6+3500\epsilon_y)\phi/(fcd)^{2/3}$)、 α : 引張鉄筋の径と間隔に関する係数、 ϕ : 鉄筋径)、 xy: 中立軸深さ

2.2 RC断面解析によるLeqの算出例

図-2は、日本建築学会「鉄筋コンクリート建造物の耐震性能評価指針(案)」²⁾の巻末に示された評価例において、図-3(a)に示す600×1000の断面で鉄筋比(p_t)のみが異なる各種断面について解析したLeqの算定例で、解析にあたっては図-3に示す材料特性等を仮定した。また、梁部材としてのLeqを求めるため、柱梁接合部からの主筋抜け出しによる付加変形は考慮せず、同指針案における「ひずみシフトによる危険断面での梁主筋抜け出し量 ΔS_s 」のみに基づく梁の回転変形を、平面保持を仮定した危険断面の曲げ解析から得られる曲率 ϕ で除すことによって求めた。同図によると、いずれの p_t の場合でも、引張鉄筋降伏以降部材角Rの増加に伴いLeqは漸減し、約0.5Dに収束する傾向を示した。この結果は、表-1のRC部材に対する既往提案式の結果や、後述の図-5に示す一体型PC梁の実験結果と一致している。

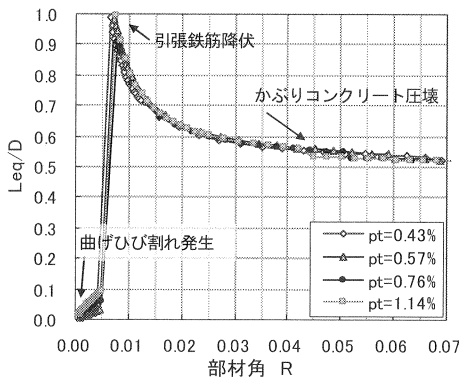


図-2 評価例梁断面のLeq算出結果

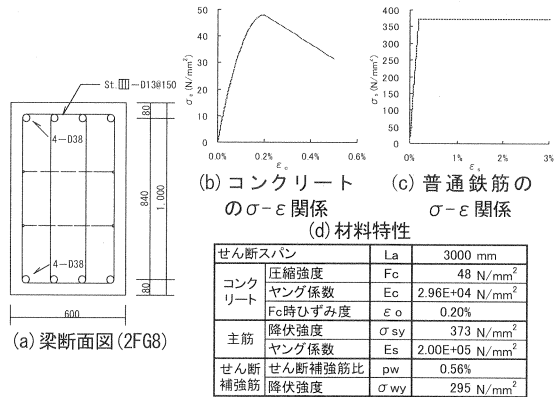


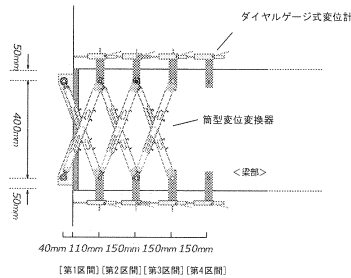
図-3 設定梁の概要

3. 既往のPC梁実験における等価塑性ヒンジ長さ

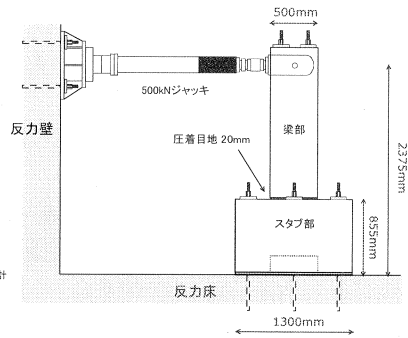
本節では、接合方法・シアスパン比・横補強筋量・鋼材種・鋼材係数をパラメータとした片持ちPC梁の載荷実験^{3,4)}におけるLeqについて検討する。試験体の載荷・測定方法の概要および試験体名称を図-4に示す。図-5は実験結果から得られた部材端部(第1測定区間(D/4))の回転角を用いて算出したLeqの結果をまとめて示したものである。同図中の‘柱側鋼材の抜け出し控除’として示した結果は、2.2節のRC梁の解析結果との対応をみるため、実験データにおいてスタブからの鋼材抜け出しによる変形を除いた変形実験値(梁の塑性変形のみ)とD/4検長での平均曲率測定値を用いて求めたものである。

同図によると、一体型試験体(MBシリーズ)では、抜け出し変形控除の場合のLeqは、部材角Rの増加に伴って漸減し、約0.5Dに収束する傾向が見られた。

また、控除しない場合のLeqは約0.4Dと控除する場合に比べ若干小さい値を示したが、これは、図-4(b)に示される第1測定区間での曲率が、抜け出し変形による影響を控除しないため、控除する場合に比べ大きくなったことに起因



(b) 測定器具取り付け概要



(a) 載荷方法

M	A	3	-	02	D	2
鋼材係数: qsp=0.1,0.2,0.3,0.6,0.8						
PC鋼材種類 (R:丸形,D:異形)						
横補強筋量: Pw=0.2,0.4,0.6,0.8(%)						
シアスパン比: a/D=2.3,5						
柱・梁接合形式 (A:圧着型, B:一体型)						
M: 単調載荷						

(c) 試験体名称

図-4 実験概要

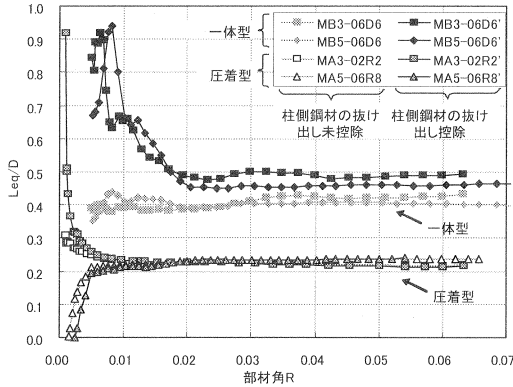


図-5 圧着型・一体型 PC 梁の Leq

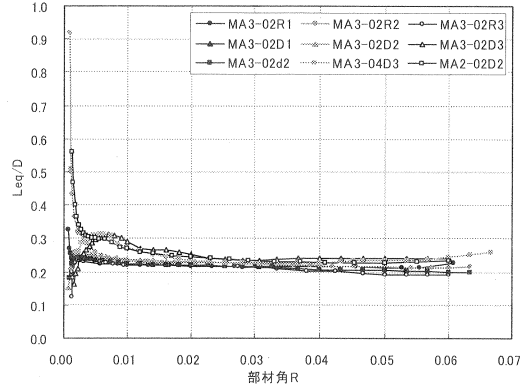


図-6 圧着型 PC 梁における付着・鋼材量の違い

する結果と推定される。

圧着型試験体(MAシリーズ)では、いずれの試験体でも Leq は $0.25D$ 程度で、柱からの鋼材抜け出し変形の控除が Leq におよぼす影響は見られなかった。これは、第1測定区間での曲率におよぼす柱からの鋼材抜け出し変形の影響率が小さいためと考えられる。図-6は同様の実験を主に鋼材種・鋼材係数をパラメータとして行った実験結果から得られたものである。同図によると、鋼材の付着力・鋼材量に関わらず、 Leq の収束値はほぼ同じ値を示し、図-5の結果と同様に、 $0.25D$ 程度であった。

MBシリーズにおいて、抜け出し変形が Leq におよぼす影響は高々 $0.1D$ 程度と余り大きくないこと、また MAシリーズでは Leq におよぼす抜け出し変形の影響が見られないなど、以上に示された結果は、 Leq を用いた荷重-変形関係推定法において部材の変形を、 Leq を用いて算出する梁の変形と柱からの鋼材抜け出し変形とに独立して扱えることを示唆している。

4. Leq を用いる荷重-変形関係推定における課題

前節までで、 Leq を用いて荷重-変形関係推定を行う場合、 Leq は、一体型PC梁の場合では $0.5D$ 程度、圧着型の場合には $0.25D$ 程度であること、梁部材変形の算定には、 Leq 部分における梁の変形と柱からの鋼材抜け出し変形とを独立して扱えることなどが示されたが、本節では、等価塑性ヒンジ法による荷重-変形関係推定における課題・問題点について考える。

4.1 曲げモーメント-曲率関係および荷重-塑性回転角関係の推定における課題

図-7は3節で示したPC梁の曲げモーメント-第1区間平均曲率関係の実験結果と、以下の3種のひずみ適合係数(F値)を用いたときの、同じ断面の曲げ解析によるM- ϕ 関係を比較したものである。①平面保持仮定(F=1.0)、②実験値を良好に近似する時のF値、③鋼材降伏点を実験値と一致させた時のF値。なお、F値は曲げを受ける断面において、鋼材位置コンクリートひずみ増分に対する鋼材ひずみ増分の比を、また図中の印(□■▲)は鋼材降伏点を表す。図-7によれば、鋼材降伏時をはじめとするM- ϕ 関係は、従来から指摘されているように、F値によって大きく変動するので、実験結果を良好に

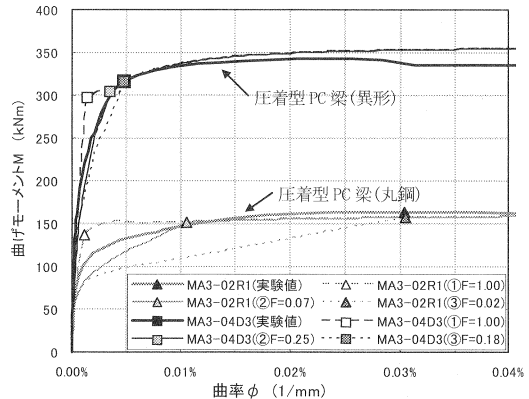


図-7 断面解析におけるF値の影響

追跡するためにはF値の定量化が不可欠である。

図-8は図-7に示した解析M- ϕ 関係の ϕ に、圧着型PC梁のLeq収束値である0.25Dを乗じて求めた荷重P-塑性回転角 θ_p 関係と対応する実験結果とを比較したものである。同図によると当然の結果であるが、M- ϕ 関係が良好に近似出来ておれば、P- θ_p 関係の実験結果も良好に近似出来る事が分かる。

4.2 柱からの鋼材抜け出しによる変形を含む荷重-変形関係の推定での課題

図-9は実験結果と良好な近似を示したP- θ_p 関係(図-8の細実線)に、弾性変形と柱からの鋼材抜け出し変形を累加した推定荷重-変形関係と対応する実験結果とを比較したものである。鋼材の抜け出し変形に関係する付着応力-すべり関係としては剛塑性型で、以下の2種の鋼材付着強度 τ (単位はN/mm²)を仮定した。①鋼材降伏点を実験値と一致させる時の τ 、②実験値を良好に近似する時の τ 。図-9によれば、特に丸鋼の場合、 τ の変化が荷重-変形関係に大きく影響するため、適切な τ の推定が不可欠である事が分かる。すなわち、荷重-変形関係の推定には梁断面解析および柱梁接合部内梁主筋の付着特性の適切な評価が必要である。

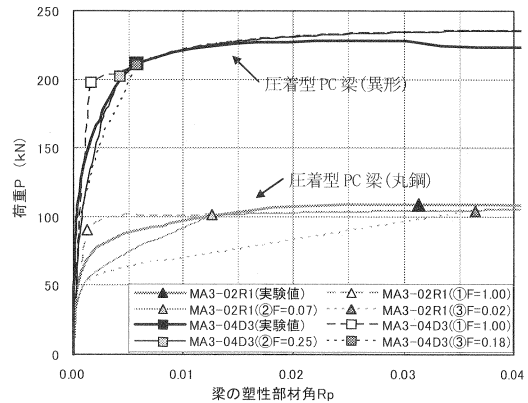


図-8 LeqによるP- θ_p 関係推定

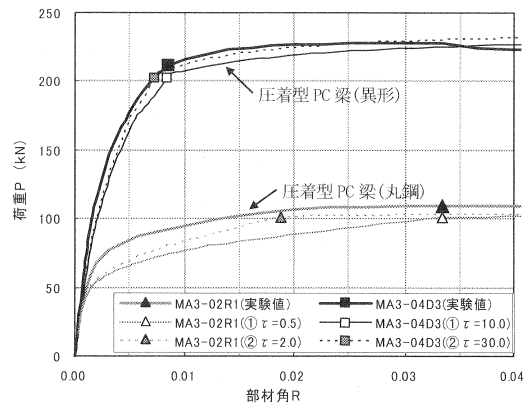


図-9 圧着型PC梁のP- δ 関係推定結果

5. まとめ

1. 日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)」に示されるマクロモデル的変形推定法から得られたLeqは約0.5D(D:梁せい)で、通常のRC部材に対する既往式によって推定されるLeq値(約0.5D)とほぼ同じであった。
2. 接合形式が一体型のPC梁のLeqは、RC梁と同様、0.5D程度であった。これに対し、圧着型PC梁のLeqは鋼材の付着特性にかかわらず、約0.25Dであった。また、柱からの引張鋼材抜け出しに起因する変形がLeqに与える影響はほとんど見られないため、Leqを用いる部材の変形推定は、梁の変形と柱からの鋼材抜け出し変形とを独立して扱うことによって算出できる。
3. Leqを用いる荷重-変形関係推定では、梁断面解析および柱梁接合部内梁主筋の付着特性の適切な評価が必要・不可欠である。

参考文献

- 1) 中塚 信他：PC構造の性能評価型設計法に向けての取り組み，プレストレストコンクリート建築特集，Vol. 47, No. 4, pp. 20-48, 2005
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説，2004
- 3) 阿波野昌幸，中塚 信，他2名：圧着型および一体型PC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，1997. 10
- 4) 中川明徳，中塚信，大西広朗：圧着型PC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25, No. 2, 2003