

論 文

[2122] T形RC梁の塑性回転性能

正会員 ○梁川 幸盛 (三重大学大学院)

同 畑中 重光 (三重大学工学部)

同 谷川 恭雄 (名古屋大学工学部)

1. はじめに

曲げを受けるRC梁の塑性回転能力を増大し、曲げ靱性（エネルギー吸収能力）を確保する方法については既に多くの知見が得られている。既往の研究[1][2]の多くは、長方形断面を有するRC梁に関するものであるが、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。そこで、スラブの影響をも含めた梁の塑性変形挙動を調べるために、T形梁の実験が行われているが、既往の実験的研究の多くは、せん断破壊する梁を対象としており、曲げ靱性に及ぼすスラブの効果の解明を目的としたものはほとんど見られない。

本研究では、まず、曲げ・せん断を受けるT形RC梁の塑性ヒンジ領域の挙動および塑性ヒンジ領域の広がりに及ぼすスラブ幅およびスラブ位置の影響を実験的に調べ、次に、得られた実験結果と解析結果とを比較・検討し、T形梁の塑性変形能の解析方法について考察する。また、長方形梁に対する既往の塑性ヒンジモデル[2][3]のT形RC梁への適用性についても検討する。

2. 実験方法

2. 1 実験の概要

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。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)、およびあら筋ピッチ(S)を取り上げ、これらの諸要因がRC梁の塑性ヒンジの性能におよぼす影響を調べた。なお、試験体はすべて曲げ破壊がせん断破壊に先行するように設計した。

角柱体は、梁のあ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1軸圧縮実験によって測定した。

| 試験体名 | スラブ位置 | スラブ幅B | あら筋ピッチS [cm] | 引張鉄筋比P t (%) | 複筋比γ |
|------|-------|-------|--------------|-----------------|------|
| 05N1 | 無 | 0 | 5.0 | 2.12 | 0.40 |
| 10N1 | | | 10.0 | | |
| 15N1 | 圧縮側 | 2b | 15.0 | 2.12 (1.06)* | 0.57 |
| 10C2 | | | 10.0 | | |
| 10C3 | 引張側 | 3b | | 2.12 (0.71)* | 0.76 |
| 05T2 | | | 5.0 | 2.50 | 0.34 |
| 10T2 | 引張側 | 2b | 10.0 | | |
| 05T3 | | | 5.0 | 2.88 | 0.29 |
| 10T3 | | | 10.0 | | |

(注)b:梁幅(ウェブ厚), *:圧縮側スラブ幅を梁幅とした場合の値

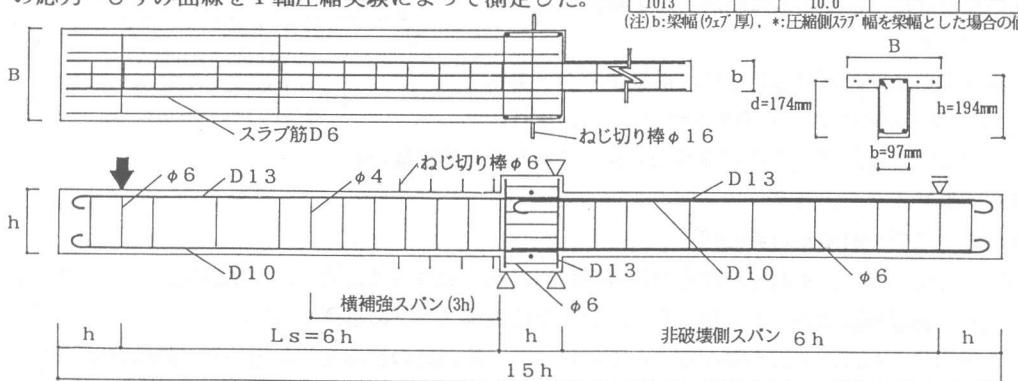


図-1 T形RC梁の配筋図の例 (10T3)

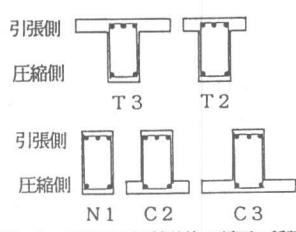


図-2 T形RC梁試験体の断面の種類

2. 2 試験体の製作

T形RC梁試験体の配筋図の一例を図-1に、断面の種類を図-2に示す。T形RC梁の断面寸法は、梁幅(b)および梁せい(h)を、それぞれ9.7cmおよび19.4cmとし、スラブ幅(B)が、 b 、 $2b$ 、 $3b$ 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）。曲率測定区間には、あらかじめ曲率測定用の鋼棒を配置し、コンクリートを打設した。なお、載荷点近傍には、あばら筋を密に配置した。また、非破壊側スパンの引張側および圧縮側には、異形鉄筋D10を2本ずつ余分に配置した。

角柱体の寸法は、すべて $b \times b \times 2b$ (b :梁幅)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. 3 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。曲率およびたわみの測定対象区間は、柱型側面より2.5cmの領域を第0区間とし、これより10cm毎に第1、第2、第3区間とした。曲率測定用の変位計は、各区間の境界にあらかじめセットした2本の鋼棒に固定し、たわみ測定用の変位計は、柱型と常に直角をなす鋼製アングルに固定した。

角柱体の載荷試験については、供試体の上下端部の1cmを除く区間をひずみ測定区間とし、毎分約1×

10^{-3} のひずみ速度で、縦ひずみが 20×10^{-3} に至るまで継続載荷した。

3. 実験結果とその考察

3. 1 荷重-材端たわみ曲線

図-4a)～c)に、それぞれ荷重(P)-部材角(Δ/L_s)曲線（ここに、 Δ ：部材変位、 L_s ：部材長）に及ぼすあばら筋間隔、引張側スラブ、および圧縮側スラブの影響を示す。

同図a)によれば、あばら筋が密になるに従って、終局時の材端変位が増加し、延性的な破壊となる。

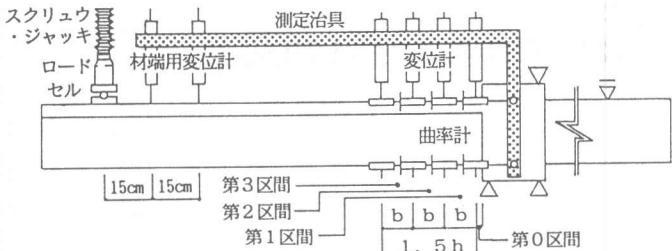
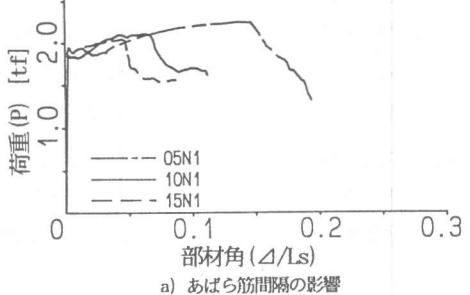
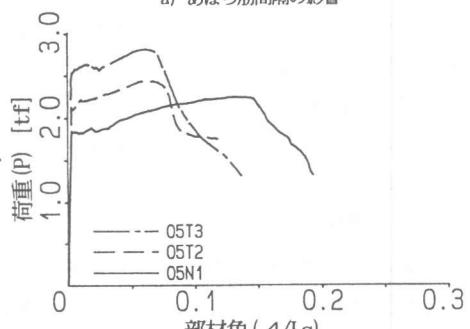


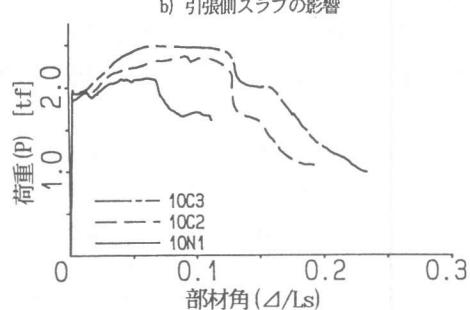
図-3 T形RC梁の載荷および測定方法



a) あばら筋間隔の影響



b) 引張側スラブの影響



c) 圧縮側スラブの影響

図-4 荷重-材端たわみ曲線

同図b)によれば、引張側スラブ幅の増加に伴って、降伏荷重および最大荷重は大きくなるが、終局時の材端変位が減少し、曲線形状も脆性的になる傾向にある。

同図c)によれば、圧縮側スラブを設けることによって降伏後も荷重は上がり続け、最大荷重が大きくなる。また、スラブ幅の増加に伴って終局時の材端変位が増加し、延性的な破壊となる。

3. 2 変位の各成分の取り扱い

実験により得られた変位の値は、曲げによる回転成分に加え、せん断によるずれ成分、鉄筋の抜け出し成分の和であると考えることができる。本研究では、実験によって得られた変位を以下に述べるように分解した。

(1) 曲げ回転成分

曲げ回転による変位は、各区間に取り付けた曲率計の実測値を積分することによって求められる。ただし、第0区間の実測曲率からは、鉄筋の抜け出し成分を取り除くものとする。

(2) 鉄筋の抜け出し成分

第0区間(図-3参照)の曲率の測定データは、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区間の曲げによる曲率は、第1区間の曲率と等しいものと仮定し、残りを鉄筋の引き抜けによるものとした。

(3) せん断成分

各区間の測定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、変位のせん断成分と考えることができる。回転による変位は各区間の曲率計の実測値から直接求められるので、せん断成分のみを取り出すことができる。

(4) 成分分解

材端変位および最大モーメント断面から1h(ここに、h:梁せい)区間の変位を成分分解した一例をそれぞれ図-5a)およびb)に示す。ここで、縦軸は変位の成分比、横軸は曲率(ϕ)と有効梁せい(d)をかけたものである。これらの図によれば、1h区間の変位に比べ材端変位では、せん断成分による変位は小さくなるが、他の成分同士の比率に大きな変化はない。したがって、材端変位では鉄筋の抜け出しを含む曲げ成分が卓越し、せん断変形成分は小さいといえる。

3. 3 各区間のモーメント-曲率曲線

図-6に、各測定区間のモーメント指数(M/bd^2) - 曲率指数($d \cdot \phi$)曲線(以下、 $M-\phi$ 曲線と呼ぶ)を示す(ただし、各測定区間の曲げモーメントは、当該区間の曲げモーメントの最大値を用いて表してある)。これらの図によれば、第0区間の曲率は抜け出しの影響によって、他の区間

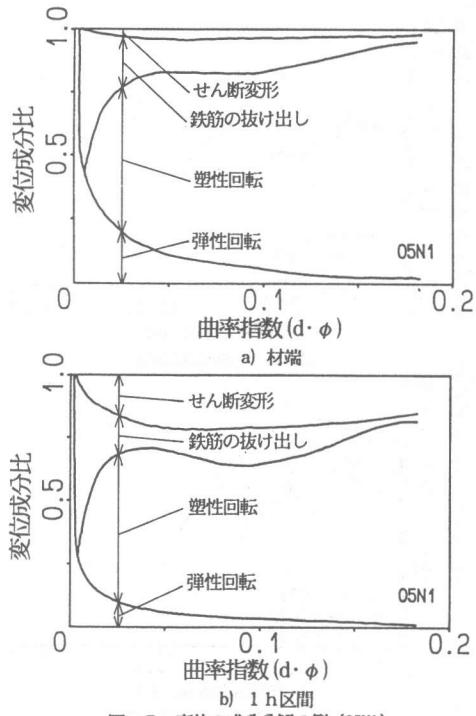


図-5 変位の成分分解の例(05N1)

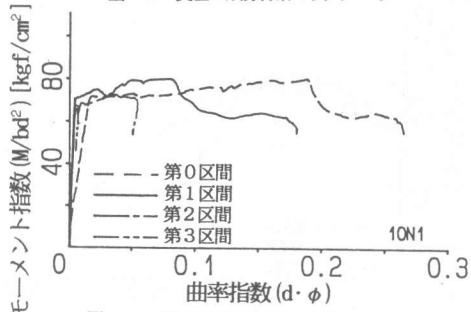


図-6 各測定区間のモーメント-曲率曲線

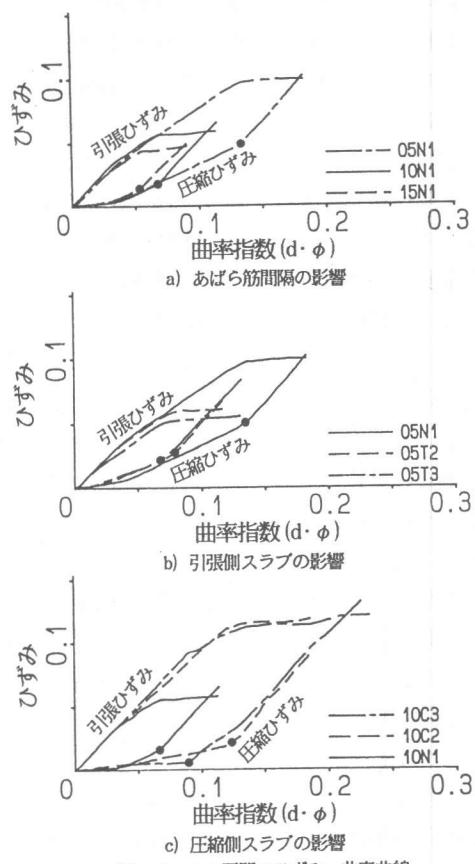
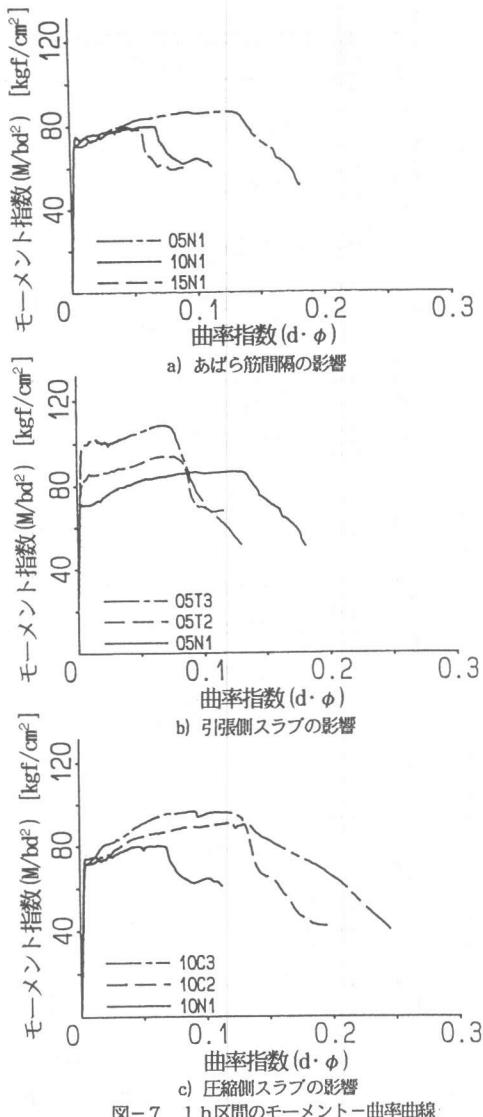


図-8 1 h 区間のひずみ-曲率曲線

よりかなり大きく、また、第3区間の曲率は極めて小さくほぼ弾性回転と見なせる。ゆえに、以下のM- ϕ 曲線の考察は第1・2区間の(1 h区間)平均曲率を用いて行うものとする。

3. 4 1 h 区間のモーメント-曲率曲線

図-7 a)～c)に、柱型側面から1 h区間のM- ϕ 曲線を示す。これらの図によれば、あら筋間隔およびスラブ位置・幅がM- ϕ 曲線に及ぼす影響は、上述のP- δ 曲線の場合とほぼ同様である。すなわち、部材全体の挙動は最大モーメント断面から1 h程度の区間の変形能力に支配されるといえる。

3. 5 1 h 区間のひずみ-曲率曲線

図-8 a)～c)に、柱型側面から1 h区間の圧縮ひずみ(ε_c)・引張ひずみ(ε_t)-曲率指数($d \cdot \phi$)曲線を示す。これらの図によれば、圧縮ひずみが急激に増加する時点(図中の●印)があり、M- ϕ 曲線のモーメント低下開始時とほぼ一致している。この時点は、目視によれば、ほぼ圧縮筋が座屈した時点と考えられる。また、圧縮ひずみの増加の割合が変わる時点までは、曲率の増加に伴い引張ひずみも増加するが、それ以後、引張ひずみはほとんど増加しない。すなわち、曲率の増加は圧縮ひずみによって進行する。同図c)によれば、圧縮側スラブは、圧縮ひずみを小さくするとともに圧縮筋の座屈による耐力低下の抑制に非常に大きな効果がある。

4. 塑性回転性能の解析

ここでは、弾性および塑性を含めた曲げによる回転成分について考察する。

4. 1 解析プログラムの概要

図-2のような断面を想定し、平面保持の仮定の下に断面内の力の釣合から、塑性ヒンジ領域に適用するモーメント(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と圧縮縁ひずみより、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。このとき、中立軸位置の変化にともない、梁幅がウェブ厚(b)とフランジ幅(B)に変化するのでこの点を考慮する。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。

4. 2 解析に用いたパラメータ

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。なお、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[4]。

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tri-linear型とし、各鉄筋の1軸引張試験結果に基づいて定量化した(表-2参照)。ここで、圧縮鉄筋の座屈時のひずみ(ϵ_b)は、便宜上、 20×10^{-3} の一定と仮定し、座屈後の応力低下の程度(θ_b)は、別シリーズの実験結果[5]に対するシミュレーションの結果を参考にして表-2に示すように仮定した。

4. 3 実験結果との比較

(1) $M-\phi$ 曲線におよぼす各種要因の影響

図-11a)およびb)は、それぞれ、あばら筋間隔および圧縮側スラブ幅が異なる梁について1h区間の $M-\phi$ 曲線の実測値と解析値を比較したものである。ここで、図中の解析曲線上に示した○印は、引張鉄筋のひずみが戻り始める点を[6][7]、また、●印は圧縮鉄筋の座屈開始点を表している。同図b)によれば、圧縮側のスラブ幅が大きくなるに従い、 $M-\phi$ 曲線の解析値は実測値をかなり上回る傾向がみられる。

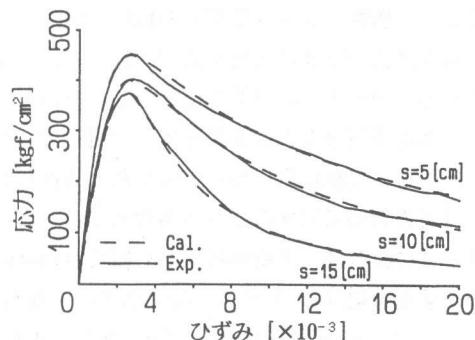


図-9 コンクリートの応力—ひずみ曲線

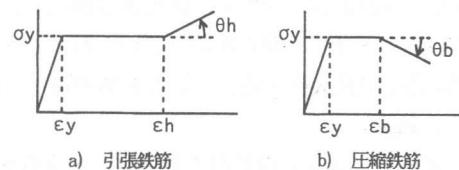


図-10 鉄筋の応力—ひずみ曲線

表-2 解析に用いた鉄筋のパラメータ

| 降伏点強度 σ_y [kgf/cm ²] | ヤング係数 E_i [kgf/cm ²] ($\times 10^6$) | ひずみ硬化 開始ひずみ ϵ_h ($\times 10^{-6}$) | ひずみ硬化 の傾き θ_h [kgf/cm ²] ($\times 10^6$) | 座屈開始 ひずみ ϵ_b ($\times 10^{-6}$) | 座屈時の 傾き θ_b [kgf/cm ²] ($\times 10^6$) |
|---|---|--|---|---|---|
| 3800 | 2.01 | 14000 | 0.02 | 20000 | 0.02 |

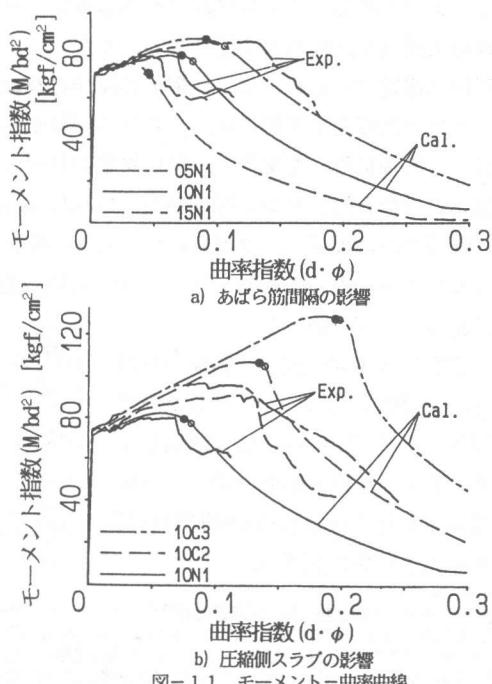


図-11 モーメント—曲率曲線

(2) 塑性ヒンジ等価長さ (eLp) の評価

材端変位の実験値と解析値が一致するような塑性ヒンジの長さ（塑性ヒンジ等価長さ (eLp)）を求める。図-12は材端変位として、それぞれ曲げ変形のみを用いた場合、および鉄筋の抜け出しとせん断成分を含む変位を用いた場合のeLpの値を決定するプロセスの例を示したものである。

すべての実験結果について得られた塑性ヒンジ等価長さ (eLp) の値を表-3に示す。なお、表中には長方形梁に対する既往の各種ヒンジモデル [2] [3] を用いて決定したeLpの値も併示してある。表-3によれば、本解析結果から得られたeLpの値は、曲げ回転のみによる変位に対し 0.8h~1.2h、全変位に対し 1.0h~1.6hである。すなわち、鉄筋の抜け出しによる回転変位は、eLpに換算して、およそ 0.2h~0.4hと評価できる。また、他の研究者による既往の塑性ヒンジモデルによる計算値は、いずれも上記の値に比べ、若干小さくなる傾向がある。これは、適用した圧縮部コンクリートの応力-ひずみ曲線の表示精度（既往の研究の多くでは、梁の圧縮部と同一寸法の供試体の応力-ひずみ関係を用いているわけではない）、実験値と解析値の比較対象範囲（既往の研究の多くは最大耐力点まで）などの相違も一因と考えられる。

5. 結論

本研究によって得られた結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 引張側スラブ幅の増加に伴って、降伏荷重および最大荷重は大きくなるが、終局時の材端変位が減少し、破壊も脆的になる傾向にある。
- 圧縮側スラブを設けることによって降伏後も荷重は上がり続け、最大荷重が大きくなる。また、スラブ幅の増加に伴って終局時の材端変位が増加し、延性的な破壊となる。
- M-φ曲線に関する本解析結果は、梁の最大モーメント断面から 1 h 区間で平均したM-φ曲線の実験値に比較的よく適合する。ただし、より正確に推定するためには、圧縮筋の座屈に及ぼすスラブの影響を定量的に明らかにする必要がある。
- 本実験に供したT形RC梁の材端のP-Δ関係より求めた塑性ヒンジ等価長さ (eLp) は、曲げ回転成分のみの評価によれば、0.8h~1.2hの範囲、全変位を用いた評価によれば、1.0h~1.6hの範囲にあることがわかった。

【謝辞】本研究に際し、御助力を得た、伊藤暁君(三重大4年)および菅原淳一君(三重大4年)に深謝致します。なお、本研究費の一部は、平成元年度文部省科研費・奨励研究(A)によったことを付記する。

[引用文献]

- コンクリート構造物の韌性評価研究委員会：コンクリート構造物の韌性とその評価法に関するコロキウム, 1988.3, II-264 pp.
- R. Park and T. Paulay : Reinforced Concrete Structures, Chap. 6, John Wiley & Sons, 1975, 769 pp.
- 小阪・谷川・畠中・三輪：鉄筋コンクリート梁部材の塑性ヒンジモデル、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、1987, pp. 247-252.
- 小阪・谷川・畠中・三輪：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.
- 小阪・谷川・畠中・三輪：鉄筋コンクリート梁の塑性ヒンジに関する研究、セメント技術年報、第40巻、1986, pp. 580-583.
- 鈴木・中塚・阿波野：RC梁部材断面の終局限界点とその特性、セメント技術年報、1982, pp. 470-473.
- 小柳・六郷・岩瀬：RCばかりの曲げ破壊過程と曲げ韌性に及ぼす材料特性の影響、土木学会論文集、第348号、V-1、1984, pp. 153-162.

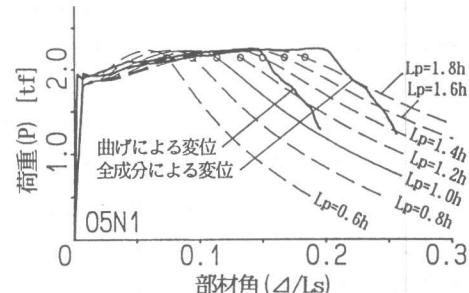


図-12 塑性ヒンジ等価長さ (eLp) の評価の例 (05N1)

表-3 塑性ヒンジ等価長さ (eLp)

| MODEL 試験体 | Exp. 全成分 | eLp 曲げ成分 | BAKER | | | CORLEY | | | MATTOCK | | | SAWYER | | | Authors | |
|--------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|--------|-----|-----|---------|-----|-----|--------|-------|--|---------|--|
| | | | eLp | eLp | eLp | eLp | eLp | eLp | eLp | eLp | eLp | Lp | Lm | | | |
| 15N1 | 1.6h | 1.2h | 1.03h | | | | | | | | | 0.66h | 1.34h | | | |
| 10N1 | 1.3h | 1.0h | 0.96h | | | | | | | | | | | | | |
| 10C2 | 1.2h | 0.8h | 0.74h | | | | | | | | | | | | | |
| 10C3 | 1.0h | 0.6h | 0.61h | | | | | | | | | 0.98h | 0.86h | | | |
| 10T2 | 1.4h | 1.0h | 1.00h | 0.91h | 0.75h | 0.67h | | | | | | | | | | |
| 10T3 | 1.3h | 1.0h | 1.10h | | | | | | | | | | | | | |
| 05N1 | 1.6h | 1.0h | 0.77h | | | | | | | | | | | | | |
| 05T2 | 1.3h | 0.8h | 0.83h | | | | | | | | | 1.22h | 0.51h | | | |
| 05T3 | 1.4h | 0.8h | 0.89h | | | | | | | | | | | | | |

(注) h:梁せい、Lp:破壊領域の長さ、Lm:実測による平均曲率が計算曲率と対応する測定長さ
eLp:塑性ヒンジ等価長さ