

論文 柱基部におけるコンクリートの圧縮破壊領域に関する実験的研究

立松 博*¹・中村 光*²・檜貝 勇*³

要旨：RC部材の終局時に至る変形挙動を精度よく評価するためには、破壊が局所化する領域の挙動を明らかにしておく必要がある。そこで本研究ではRC柱部材基部の曲げ圧縮部における破壊挙動を把握するために、せん断スパン比、断面高さおよび断面幅を変化させた鉄筋コンクリート部材の曲げ圧縮破壊試験を行い、破壊領域長さならびに破壊領域内の局所的な挙動を実験的に検討することで、圧縮破壊する柱基部コンクリートの局所化進展挙動ならびに各種要因が圧縮破壊領域長さに及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：局所化挙動、破壊領域長さ、曲げ圧縮破壊

1. はじめに

コンクリート部材が破壊に至る場合、実際に観察される破壊は、構造物全体に及ぼすある特定の領域に集中する傾向を示す。この破壊が集中する領域いわゆる局所化領域は構造物の挙動に大きな影響を及ぼし、特に最大荷重以降の変形挙動は、局所化領域の挙動にほとんど支配されていると考えられる。そのため、破壊領域内の挙動に対する各種要因の影響を把握し、その領域と領域内の局所的挙動を正確に知ることが、RC構造のポストピーク挙動を明らかにするために非常に重要となる。著者らは、一軸圧縮応力下におけるコンクリートの圧縮破壊領域ならびに局所化領域内の挙動に関して研究を行ってきたが[1]、実際の構造物にはひずみ勾配が生じているためひずみ勾配が存在する下で圧縮破壊挙動を評価する必要があると考えられる。

そこで本研究ではせん断スパン比、断面高さおよび断面幅を変化させた曲げ圧縮破壊するコンクリート柱部材を模擬したRCはりの曲げ破壊試験を行い、部材任意断面高さでの軸方向ひずみ分布を測定することより、柱基部コンクリートの圧縮破壊領域および破壊領域内の局所化挙動を実験的に調べ、各種要因が破壊領域内の挙動と破壊領域長さに及ぼす影響について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1ならびに図-1に実験を行ったRCはりの形状および寸法の概要を示す。実験要因は、モーメント勾配が及ぼす影響としてせん断スパン長さ（はり幅 $B=15\text{cm}$ 、有効高さ $d=15\text{cm}$ を一定にし、せん断スパン長さを $6d(S-6)$ 、 $8d(SdY)$ および $10d(S-10)$ に変化させた3種類）、断面の寸法が及ぼす影響として有効高さ（はり幅 $B=15\text{cm}$ 、せん断スパン比 $a/d=8$ を一定にし有効高さを $d=10\text{cm}(d-10)$ 、 $d=15\text{cm}(SdY)$ および $d=20\text{cm}(d-20)$ に変化させた3種類）、およびはり幅（有効高さ $d=15\text{cm}$ 、せん断スパン比 $a/d=8$ を一定にし $B=15\text{cm}(SdY)$ 、 $B=25\text{cm}(Y-25)$ および $B=35\text{cm}(Y-35)$ に変化させた3種類）を取り上げた。また引張鉄筋は、コンクリートの圧壊時の有

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

表-1 供試体諸元

供試体名	断面 B×d(h)(cm)	せん断スパン長 (cm)	せん断スパン比 (a/d)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	PC鋼材 呼び名(mm)×本数
SdY	15×15(20)	120	8	183	φ 22×2
S-6	15×15(20)	90	6	159	φ 22×2
S-10	15×15(20)	150	10	155	φ 22×2
d-10	15×10(15)	80	8	153	φ 25×1
d-20	15×20(25)	160	8	147	φ 25×2
Y-25	25×15(20)	120	8	140	φ 22×3
Y-35	35×15(20)	120	8	156	φ 25×2, φ 32×1

S:せん断スパン長シリーズ、d:有効高さシリーズ、Y:はり幅シリーズ

有効高さに対する中立軸高さの影響を除くため引張鉄筋比を3.3%と全て一定とした。

図-1 に実験に用いたRCはりの配筋図を示す。はり供試体は、中央部の断面せい(高さ)を高くした柱型付きはりとし、非測定スパン側にはせん断破壊防止のためにせん断補強筋を配置した。また本研究では橋脚基部のコンクリートの圧縮破壊挙動のみに注目するために、引張鉄筋が降伏しないように、全ての供試体を曲げ圧縮破壊するように設計した。

コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用し、橋脚基部(曲げ圧縮部)におけるブリージングの影響をなるべく少なくするため、スランプを5cmとし供試体は全て逆打ち(打ち込み面をRC部材引張応力部に置換)とした。なお主筋は高周波熱処理を施した異型PC鋼棒(降伏強度 $f_y=10400\text{kgf/cm}^2$, B種1号)を使用した。

2.2 実験方法

供試体の荷重方法および測定方法を図-2 に示す。供試体は測定する側のせん断スパン(柱型の端部から支点まで)が $6d\sim 10d$ (d :有効高さ)の柱型付き単純はりとし、柱型中央部に集中荷重した。荷重は、一方向繰り返し荷重とし、供試体の破壊が終局状態に至るまで行った。

局所ひずみは、はり断面中心に断面上部より2.5cm、6.0cm、9.0cmの高さで柱型部分より $3d$ の区間で測定した。局所ひずみの測定は弾性係数 $E=4.80\times 10^4(\text{kgf/cm}^2)$ である異型に加工した一辺1cmのアクリル製角棒に5cmの間隔でひずみゲージを張り付けたものをコンクリート内部に配置して行った。ここでアクリル製角棒を用いたのは、弾性係数がコンクリートに比べて十分に小さく、コンクリートの変形を拘束しないと考えたためである。また曲率測定は、PC鋼棒に柱型端部より10cmの間隔でひずみを計測することにより行った。

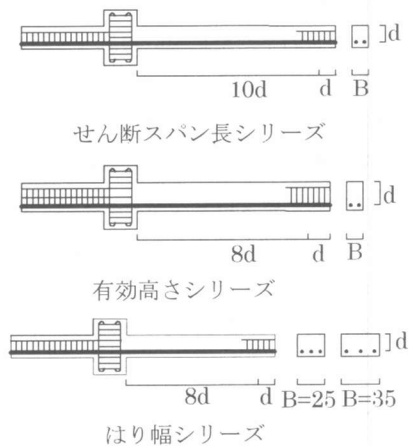


図-1 RCはりの概要

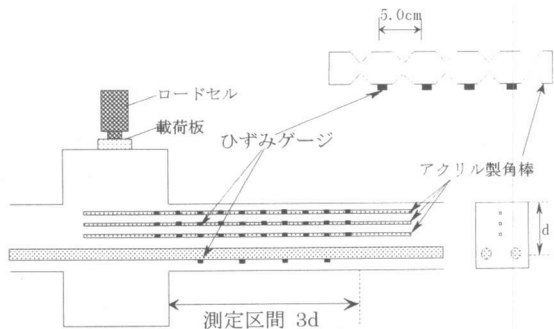


図-2 荷重および測定方法

3. 実験結果および考察

3. 1 ひずみの局所化挙動

実験で得られたひずみの局所化挙動は、供試体諸元によらず基本的には同一とみなされたため、ここでは、供試体 SdY (B=15cm、d=15cm、a/d=8) について得られた結果に基づき考察を行う。

図-3(a)に荷重が最大荷重以前の70%、80%、90%および最大時での断面上部より2.5cmの高さのアクリル製角棒により測定した軸方向ひずみ分布を示す。ひずみ分布の傾きにより判定すると最大荷重の80%付近程度の荷重レベルからひずみの局所化がはじまり、その後局所化する領域が徐々に広がっていき最終的に一定値に収束する傾向が見られる。一方、図-3(b)に荷重が最大荷重以後90%、80%および70%に低下した時点での軸方向ひずみ分布を示すが、最大荷重以降では最大荷重時に形成された局所化領域は広がることはなくある一定の領域内で著しくひずみが進展することが分かる。また局所化領域外のひずみはほとんど増加せずひずみの戻り現象も現れることが分かる。

図-4(a)、(b)、(c)に断面上部より2.5cm、6.0cm、9.0cmの位置での最大荷重以降におけるひずみ分布の変化を示す。これらによると最大荷重時に断面上部で明確に局所化挙動が現れ、最大荷重以降は断面内部に局所化挙動が徐々に進行していくことが分かる。またその破壊領域長さとしては図-4に示すように断面内部においても断面上部とほぼ同様とみなすことができる。この

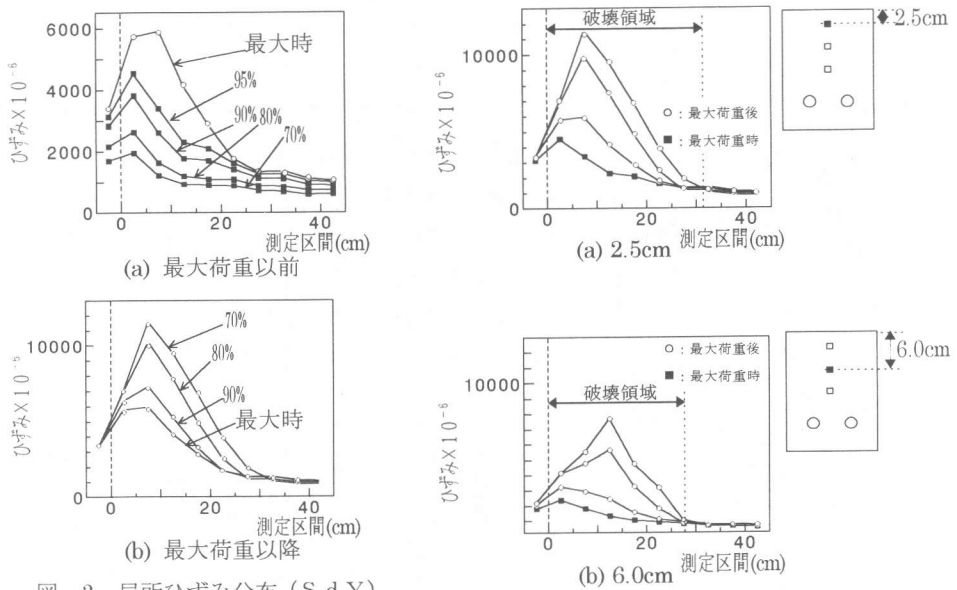


図-3 局所ひずみ分布 (S d Y)

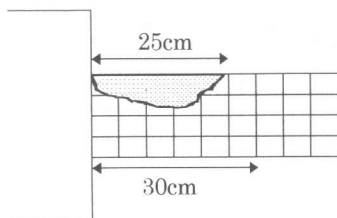


図-5 供試体破壊状況 (S d Y)

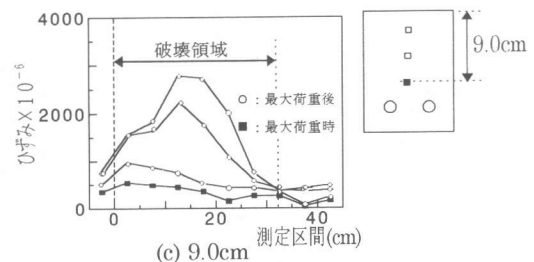


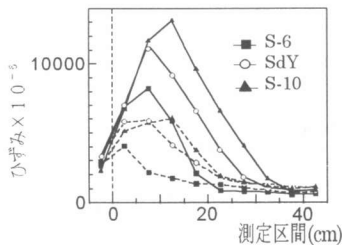
図-4 局所ひずみ分布 (S d Y)

ことより断面上部で形成された破壊領域はそのまま断面中央部まで同じ長さを持って進展していくことが分かる。なお、本研究ではひずみの進展する領域とひずみの戻り現象が見られる領域を求め、ひずみの進展する領域を破壊領域長さとして定義した。

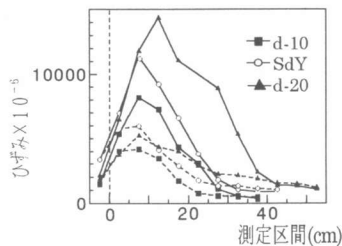
図-5 にひずみ分布測定区間の破壊状況を示す。最終的に断面上部のコンクリートが剥離するが、その領域は約 25cm であった。一方内部のひずみ分布より得られた破壊領域長さは約 30cm である。このことから目視による破壊領域長さはひずみ分布より得られる破壊領域長さより短めに評価する可能性があり注意が必要であると考えられる。

3. 2 破壊領域長さ

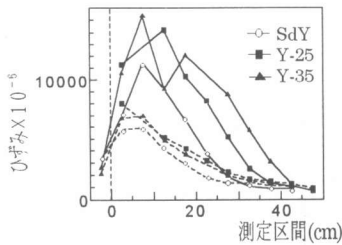
図-6(a), (b), (c) に各種要因に対して得られた最大荷重時(破線)および終局状態(実線)での局所ひずみ分布を、図-7 にひずみ分布より算定した各要因に対する破壊領域長さの変化を示す。図-6(a)および図-7(a)をみればせん断スパン比(a/d)が大きくなるにつれて破壊領域長さは大きくなる様子がわかり、明らかにせん断スパン比(今回のシリーズのような断面が一定の場合にはモーメント勾配)が破壊領域長さに影響を及ぼすことがわかる。またこのシリーズにおいては、いずれの場合も最大モーメントの約 80%程度の高さのモーメントを受ける領域まで破壊に至る結果であった。このことより、断面が一定でせん断スパン比のみが異なる供試体では破壊領域長さはモーメント勾配に大きく依存しているといえる。ただし、有効高さ、断面幅シリーズの結果ではせん断スパン比と同様に破壊領域長さが最大モーメントの約 80%の領域まで広がる傾向は見出せなかった。そのためこれらの要因に対してはモーメント勾配以外の影響に依存する可能性があると考えられる。一方図-6(b)および図-7(b)の有効高さの影響をみれば、有効高さが大きくなるにつれて破壊領域長さが長くなる傾向を示す。図-6(c)および図-7(c)の断面幅に対しても、断面幅が大きくなるほど破壊領域長さが長くなる結果となった。したがって今回検討した範囲内の寸法に対しては断面寸法が大きくなるほど破壊領域が大きくなると言える。ただし、実構



(a) せん断スパン長の影響



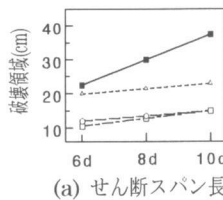
(b) 有効高さの影響



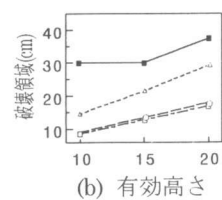
(c) はり幅の影響

図-6 各種要因による破壊領域長さの比較

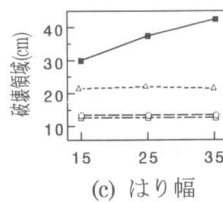
断スパン比と同様に破壊領域長さが最大モーメントの約 80%の領域まで広がる傾向は見出せなかった。そのためこれらの要因に対してはモーメント勾配以外の影響に依存する可能性があると考えられる。一方図-6(b)および図-7(b)の有効高さの影響をみれば、有効高さが大きくなるにつれて破壊領域長さが長くなる傾向を示す。図-6(c)および図-7(c)の断面幅に対しても、断面幅が大きくなるほど破壊領域長さが長くなる結果となった。したがって今回検討した範囲内の寸法に対しては断面寸法が大きくなるほど破壊領域が大きくなると言える。ただし、実構



(a) せん断スパン長



(b) 有効高さ



(c) はり幅

■ : Exp
△ : Baker
○ : Mattoe
□ : Sawyer

図-7 破壊モデルと実験値の比較

造物レベルの寸法まで、今回の実験結果から得られた傾向を示すとは思われないため、今後より大きな部材に対して検討を行う必要があると考えている。

図-7(a)、(b)、(c)に本実験で得られた破壊領域長さや既往の塑性ヒンジ等価長さに対する提案モデル (Baker、Mattock および Sawyer) [2]の各要因に対する比較を示す。既往の提案モデルは、各要因に対していずれも本実験値を過少評価していることがわかる。これについては、今回の実験が曲げ圧縮破壊形態であることならびに本研究では、破壊領域長さを軸方向ひずみの実測値より決定しているのに対し、既往のモデルが解析的に得られた塑性ヒンジ等価長さであることが挙げられる[3]。したがって定義が異なる既往のモデルと、破壊領域長さの比較を直接することができないと考えられるが、過去の提案モデルと明らかに異なっていることは、断面幅の影響である。図-7(c)においては、どのモデルにおいてもはり幅の影響を評価していないが、今回の実験でははり幅に応じて破壊領域が長くなる傾向を示している。このような違いが生じた理由については実験結果が少ないことから不明であるが今後検討していく必要があると考えられる。

4. 解析への展開

4. 1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

RC部材の終局時の解析を行う場合、どのような応力-ひずみ関係を用いればよいか問題になるが、本来応力-ひずみ関係に用いるひずみの定義は、破壊領域長さに対して平均化された量に基づく必要があり、任意の寸法を有する圧縮供試体の全長により平均化した量を用いることは必ずしも適当でないと考えられる。そのため曲げ圧縮部に相当するコンクリートの応力-ひずみ関係をどのようなものを用いればよいか問題となる。図-8は、本研究室で行った直径(D)、高さ(H)を変化させた円柱供試体の一軸圧縮試験より得られた供試体高さや破壊領域内の単位体積あたりに吸収されたエネルギー (g_f) との関係を表したものである。ここで吸収されたエネルギー (g_f) は、荷重変位関係の軟化領域で囲む面積で表されるエネルギーがすべて測定された局所化領域で吸収されると仮定して求めたものである。図-8によれば g_f/f_c の値は、供試体形状・寸法によらずほぼ破壊領域内で一定になることが示されている。そこで図-9に示す応力-ひずみ関係を破壊領域内で平均化した応力-ひずみ関係として、その曲げ部材への適応を以下で検討することにした。

4. 2 荷重-曲率曲線

図-10は供試体 SdY の柱型端部より 7.5cm、17.5cm、27.5cm および 37.5cm の位置において得られた曲率と荷重の関係を示したものである (以下 $V-\phi$ 曲線)。なお、ここでの曲率はPC鋼棒と断面上部より 2.5cm の高さの亚克力製角棒により得られたひずみ勾配の値を用いた。ま

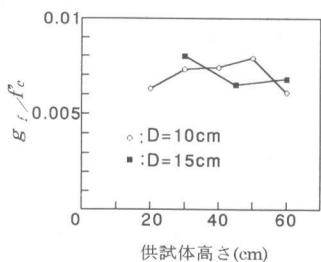


図-8 破壊エネルギー

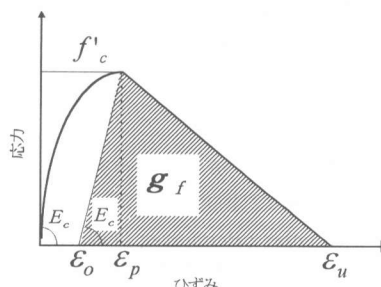


図-9 応力-ひずみ曲線

た実線は解析的 ($g_t/f_c=0.0063$) に求められた $V-\phi$ 曲線である。実験曲線と解析曲線を比較すると、解析値は最大荷重以降において破壊領域区間の平均的な挙動を示していることがわかる。このことより今回示した応力-ひずみ関係を用いれば破壊領域内の平均的な挙動を模擬できると考えられる。

4.3 荷重-変位曲線

次に部材の曲率分布を破壊領域内で一定であり、それ以外の領域では直線的に変化すると仮定して、荷重-変位曲線の算定を試みた。図-11 に実験値 (黒丸)、今回の実験で得た破壊領域長さをそのまま用いた解析結果 (実線)、ならびに破壊領域長さとして先に示した各モデルの塑性ヒンジ等価長さを適用して得られた解析結果 (破線) 示す。図によれば、実験より得た破壊領域長さをを用いた解析結果は、概ね実験結果を評価し得るが、実験値より小さい破壊領域を示す Mattock、Sawyer の塑性ヒンジ等価長さモデルの解析値は実験値よりかなり小さな変位となっている。

以上のことより、RC部材のポストピーク挙動を正確に評価し得るためにはコンクリートの応力-ひずみ曲線ならびに破壊領域長さが相互に関係し合っている適切な値を用いることが必要になると言える。

5. 結論

柱基部に生じるコンクリートの破壊領域長さや破壊の局所化挙動について実験的に検討した結果、以下のような結果を得た。

- (1) 軸方向の破壊領域は、最大荷重前約 80%より発生しはじめ最大荷重時まで徐々に広がる傾向を示す。一方最大荷重以降では破壊領域は広がらず領域内で破壊が進行していく傾向を示すことが明らかになった。
- (2) 断面高さ方向の局所化挙動に対しては、断面上部で形成された破壊領域が、そのまま断面中央部まで同じ範囲で局所化する傾向を示す。
- (3) 破壊領域長さは断面が一定の場合モーメント勾配の影響を受け最大モーメントの 80%付近まで広がる。また今回の実験においては、破壊領域長さは断面幅を大きくすることにより長くなる傾向を示した。

[参考文献]

- [1]平井 圭, 中村 光, 檜貝 勇 : 一軸圧縮応力下のコンクリートに対する破壊領域及び破壊エネルギーの推定、山梨大学修士論文、1996
- [2]R.Park and T.Paulay : Reinforced Concrete Structures, Chap.6, Jhon Wiley & Sons, 1975
- [3]梁川 幸盛, 畑中 重光, 谷川 恭雄: T型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、No.2、pp.565-570、1990

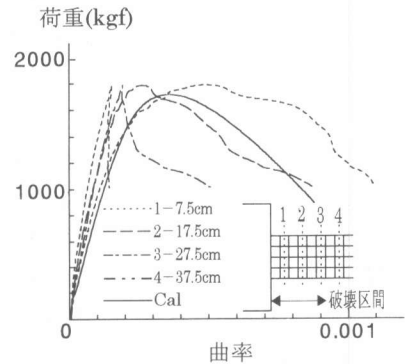


図-10 荷重-曲率曲線 (SdY)

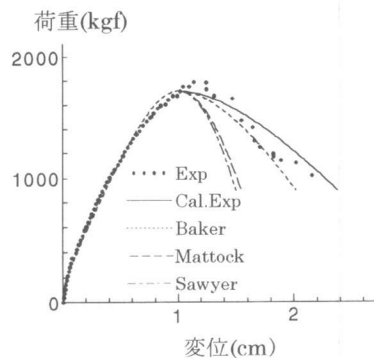


図-11 荷重-変位曲線 (SdY)