論文 一定軸力ならびに水平力を受ける RC 柱の破壊影響領域に関する解析 的研究

水谷 圭吾*1・水野 英二*2・畑中 重光*3

要旨:RC 柱基部周辺に生ずる破壊領域は,ファイバー法では柱基部近傍の「分割要素長さ」 によって左右される.本研究では, FEAP を用いて,柱基部からある一定領域に対して材料 強度を変化させた RC 柱のプッシュオーバー解析を実施し,材料強度変化領域が RC 柱の耐 力変化率に与える影響について解析的に調べ,RC 柱の「破壊影響領域」の検討を行った. キーワード:破壊影響領域,RC 柱,塑性ヒンジ長さ,敏感度解析,ファイバー解析

1.はじめに

近年,鉄筋コンクリート(RC)柱のポストピ ーク挙動解析が精力的に行われており,ポスト ピーク領域での破壊形態は実験的ならびに解析 的に解明されつつある¹⁾.

これまでに,筆者らは,一定軸力ならびに水 平力を受ける RC 柱のポストピーク挙動解析を 通して,コンクリートの応力-ひずみ関係にひ ずみ軟化型の構成モデルを用いた有限要素解析 結果(特に,荷重-変形関係)が分割要素長さ に依存しないような解析方法を考案した²⁾.し かし,研究で用いた解析法がファイバー解析法 であるために,RC 柱基部周辺に生ずる破壊領 域は柱基部近傍の「分割要素長さ」によって大 きく左右され,「分割要素長さ」に依存しない 破壊領域の特定は困難であった.

それゆえ,本研究では,有限要素法プログラ ム FEAP³⁾を用いて,柱基部からある一定領域 に対してコンクリート強度を変化させた RC 柱 のプッシュオーバー(一方向載荷)解析を実施 し,コンクリート強度変化領域が RC 柱の耐力 変化率に与える影響について解析的に調べ,RC 柱の「破壊影響領域」の検討を行った.

2.RC 柱の塑性ヒンジ長さおよび破壊域に関 する既往の研究成果 「コンクリート構造物の靭性設計手法に関す るシンポジウム - コンファインド(横拘束)コ ンクリートの利用 - 」⁴⁾によれば,実験で得ら れる柱やはり部材の破壊領域を塑性ヒンジ領域 と考え,これは引張側主筋の降伏領域,圧縮側 コンクリートの破壊領域,または圧縮側主筋の 座屈長さにほぼ相当するとしている.文献 4) によれば,この塑性ヒンジ長 L_p は,せん断スパ ン比,鉄筋比,軸力比,横補強間隔,などの要 因によって変化するが,おおよそ $0.5 \sim 1.5 D(D)$: 柱幅)になる.

また,星限ら^{5),6)}は,大型RC供試体(断面: 1200 mm×1200 mm)の正負交番載荷実験を基 に塑性ヒンジ長について考察し,軸方向鉄筋の 座屈長さ(解析値)と実験で得られる塑性ヒン ジ長との相関性について考察している.座屈長 さが長くなれば,塑性ヒンジ長さも長くなる傾 向にあると報告している.さらに,実験から得 られた塑性曲率分布によれば,従来の矩形ブロ ック型よりも三角形ブロック型の方が妥当であ るとしており,塑性ヒンジ長はおよそ 0.8 D と なっている.

一方,道路橋示方書 V 耐震設計編⁷⁾の鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法によれば,塑性ヒンジ長さ L_pと柱幅 D との比(L_p/D)は,せん断スパン比 S と関係付けられている.すなわち,

^{*1} 名古屋工業大学大学院 工学研究科 社会工学専攻(正会員)

^{*2} 中部大学教授 工学部土木工学科 Ph.D.(正会員)

^{*3} 三重大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)



表 - 1 材料諸強度⁸⁾

	供試体 N	供試体 H	
コンクリート強度	37.1 MPa	65.7 MPa	
主鉄筋	SD345 D13	USD685 D13	
主鉄筋比	1.25 %	1.25 %	
主鉄筋降伏強度	399 MPa	795 MPa	
主鉄筋引張強度	587 MPa	998 MPa	
帯鉄筋	SD295A	SD490	
	D6 @40mm	D6 @40mm	
帯鉄筋降伏強度	335 MPa	571 MPa	
面積帯鉄筋比	0.372 %	0.372 %	

USD:高強度鉄筋コンクリート用棒鋼

(1)

 $L_r/D = 0.2 S - 0.1$

ここで,S = 柱高さ h/柱幅 Dである.しかし, せん断スパン比S = 3以上の曲げ破壊型 RC 柱の 塑性ヒンジ長 L_p は, 0.5 D に留められている.

3.破壊影響領域解析

本章では,有限要素法プログラム FEAP による RC 柱の解析結果を考察することにより,RC 柱基部近傍の破壊影響領域の特定を試みる.

3.1 破壊影響領域

本研究で定義する「破壊影響領域」とは,ポ スト領域を含む RC 柱の荷重 - 変形曲線に影響 を及ぼす柱基部周辺の領域を意味する.それゆ え,本章では,RC 柱基部から柱高さ方向のあ る一定領域に対してコンクリート強度を変化さ せることにより RC 柱の耐荷力特性を解析的に 求め,コンクリート強度の変化領域と最大耐荷 力の変化率との関係を考察し,「破壊影響領 域」を特定することを試みる.

破壊影響領域の長さの要因として 軸力比 P/P_y , せん断スパン比 S,鉄筋比 $_a$,強度比(コンク リートー軸圧縮強度 f_c ,に対する主鉄筋降伏強度

,または帯鉄筋降伏強度, との比),などを 考え,以下の節では,これら要因を組み合わせ た解析ケースに対する変形挙動解析を通して, 破壊影響領域を考察する.

3.2 RC 供試体の概要

解析対象となる供試体は,普通強度材料から 成る供試体 N と高強度材料から成る供試体 H の2供試体⁸⁾である.供試体の断面形状および 寸法を図-1,各供試体の材料諸強度を表-1 に示す.部材断面は450 mm×450 mm,主鉄筋 比は1.25%である.

変位制御

(H)

図-2 解析モデル

·定軸力

h

(P)

3.3 解析モデル

図 - 2 に示すように,一定軸力(P)が作用す る鉄筋コンクリート柱に対して,プッシュオー バー(一方向載荷)解析を有限要素法プログラ ム FEAP により行った.

本解析で用いた構成モデルは,主鉄筋部分に は水野が開発した修正二曲面モデル⁹⁾の一軸応 力-ひずみ関係を,コンクリート部分にはひず み軟化型の一軸応力-ひずみ関係²⁾を採用した. コンクリートのヤング係数については,日本建 築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準による 関係式¹⁰⁾を用いて算定した.計算に用いたコ ンクリートのヤング係数および一軸圧縮応力に 伴うピークひずみを表-2 に示す.さらに,鉄 筋のヤング係数は207 GPaを用いた.

本解析で対象となった RC 柱は,次節で説明 するようにせん断スパン比 S が 4~7 であり, 弾性変形に対する曲げの影響が 97 %以上と大き いため,せん断による変形への影響は無視した.

3.4 解析ケース

ここで紹介する全解析ケースとも要素長さは 9 cm に設定した.9 cm のコンクリート要素に 対するひずみ軟化型応力-ひずみ関係における "限界ひずみ"は文献2)に示す式によって算 定した.なお,要素長9 cm を用いた破壊影響 領域解析の妥当性については,要素長さを15 cm

表-2 ヤング係数とピークひずみ

表 - 3 解析ケース1(H供試体およびN供試体)

コンクリート強度増加率(%)

軸力比 P / P_v

H供試体 0.12m

 $(m = 0, \sim, 7)$

せん断スパン比 S 要素数

5

20

25

供試体	ヤング係数 (MPa)	ピークひずみ(%)
Н	40,571	0.324
Ν	30,487	0.243

表-4 解析ケース2(H供試体)

		主鉄筋降伏	コンクリート	コンクリ
		強度 v	圧縮強度 fc'	ート強度
	_	(MPa)	(MPa)	増加率(%
2 6 1 定 3 4	2	235.0	100.0	
	6	399.0	65.7	
	12	795.0	65.7	10,
	22	795.0	37.1	20
	32	795.0	25.0	20,
	40	795.0	20.0	30,
主鉄筋		0.3125,0.	625, 1.25,	40
比 (%)	2.5, 3.	75, 5.0	чо,
帯鉄筋 比([®])	0.093, 0.	186, 0.372,	50	
	< ЯЛ 0/\	0.744, 1.	116, 1.488,	
ւե (%)		1.860		



図-3 分割モデル(せん断スパン比5の場合)

および 6 cm に設定した破壊影響領域の解析を 実施し検証した.

解析ケース1:せん断スパン比および軸力比の 影響

本解析では,H供試体およびN供試体に対し て,表-3に示すように,(1)せん断スパン比(*S* = 4,5,6,7の4ケース)および(2)軸力比(H供 試体では*P/P_y* = 0.0, 0.12, 0.24, 0.36, 0.48, 0.60, 0.72, 0.84の8ケース;N供試体では*P/P_y* = 0.0, 0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.55, 0.66, 0.77, 0.88の9ケ ース)を変動させた解析ケースを設定した.基 部からある一定領域に対して設定するコンクリ ート強度の増加率も併せた解析ケースを表-3 に示す.H供試体の全解析ケースは160ケース, N供試体の全解析ケースは180ケースである. 解析ケース2:強度比および鉄筋比の影響

強度比および鉄筋比(主鉄筋比および帯鉄筋 比)の影響度を考察するために,ここでは,H 供試体を対象に,軸力比を12%,せん断スパン 比を5に固定し,(1)強度比を2~40,(2)基本 となる主鉄筋比(1.25%)を0.25倍(0.3125%), 0.5倍(0.625%),2倍(2.5%),3倍(3.75%), および4倍(5.0%),(3)基本となる帯鉄筋比 (0.372%)を0.25倍(0.093%),0.5倍(0.186%), 2 倍(0.744 %), 3 倍(1.116 %), および 4 倍 (1.860 %)と変動させた, 95 解析ケースを設 定した.解析ケースを表 - 4 に示す.

3.5 分割モデルならびに解析概要

一例として, せん断スパン比(S = 5)の場合の分割モデルを図-3に示す.基本となる解析(図-3a)は, 全要素(この解析では, 25 要素)のコンクリート強度が均一の場合である.図-3bに示すように, 柱基部の要素から上部のN要素目までのコンクリート強度を一定割合だけ増加(一定割合の増加率をそれぞれ,10%,20%,30%,40%,50%と設定)させることにより, プッシュオーバー解析を行った.

4.解析結果および考察

4.1 破壊影響領域の解析的な定義

せん断スパン比:5,軸力比:0.12 *P*_y, コンク リート強度増加率:50%に対する解析結果(H 供試体)の一例を図-4 に示す.図から分かる ように,基部からある柱高さまでコンクリート 強度を一定割合だけ増加させた RC 柱の耐力は 基本供試体の耐力 *H*₀に比べて増加する.柱基 部から1,2,3 要素目までそれぞれ強度増加させ た解析結果では,荷重-変形曲線(耐力および



(日供試体)

ポストピーク曲線)に違いが認められるが,4 要素目までの解析結果~8 要素目までの解析結 果では荷重 変形曲線間には大きな変化が認め られない.

図 - 5 には,基部から N 要素目までコンクリ ート強度増を設定した RC 柱の耐力 H_Nの耐力変 化率 を%表示してある.ここでは,耐力変化 率 を次式で定義する.

$$= (H_N - H_{N-1})/(H_{N-1} - H_0)$$
(2)

図から分かるように,この供試体では基部か ら5~6要素までのコンクリート強度増加で RC 柱の耐力の変化率は定常的となることが分かる. このことは,本例題の H 供試体では5~6要素 目以上の要素に対してコンクリート強度を増加 させた場合,定常的な耐力増加(2~3%程度の 増加)はあるものの荷重-変形挙動に大きな変 化がないことを意味する.よって,本例題の H



供試体に対しては柱基部から 4~5 要素目まで の領域, すなわち, 0.8 D~1.0 D(Dは柱幅; 一 要素長は 0.2 D)までを「破壊影響領域」と定 義した.

耐力変化率抽出点の違い,分割長さの違い, およびコンクリートの強度増加の違いによる破 壊影響領域を検討した結果,ほぼ同一の変化点 が解析的に定義できることが分かった.ここで は,その詳細については割愛する.これ以降の 考察では,要素長さ9 cm,コンクリート強度増 加率 50%に基づく結果を示す.

4.2 解析ケース1(軸力比およびスパン比 による影響)の考察

軸力比を 0.0 P_y~1.0 P_yの間で変化させた破壊 影響領域の解析結果を供試体およびスパン比ご とに整理すると,図-6 および図-7 のように なる.

図から分かるように,軸力比が増加するに従

い破壊影響領域は増加する傾向にあるが,スパ ン比が4,5 および6の場合(図-6 および図-7)には,軸力比が0.0 *P*_y~0.20 *P*_yの間で減少し, その後増加する.軸力比が大きくなるに従い, またスパン比が大きくなるほど影響領域は長く なる傾向がある.これは従来の「塑性ヒンジ領 域の長さ」の傾向と一致する⁴⁾.

H 供試体および N 供試体の違いにより,数値 的に多少傾向が異なっているが,この原因は強 度比(コンクリートー軸圧縮強度 f_c'に対する主 鉄筋降伏強度 ,との比)の違い,またはコン クリート構成モデルに用いられる限界ひずみの 違い(すなわち,帯鉄筋比による拘束効果の違 い)などが考えられる.

4.3 解析ケース2(強度比および鉄筋比に よる影響)の考察

表 - 4 に示すように, H 供試体(せん断スパン比:5,軸力比:0.12 P,)を対象に,

- (1) 主鉄筋比を 1.25 %に固定して,主鉄筋降伏
 強度とコンクリート強度との強度比を 2~40
 の広範囲で設定した破壊影響解析
- (2) 主鉄筋降伏強度 、とコンクリート圧縮強度 f_e'との強度比を 12 に固定して,主鉄筋比を 0.3 %~5 %の範囲で設定した破壊影響解析
- (3) 上記(2)と同様に,強度比 、fc'を 12 に固定して,帯筋比を 0.093 %~1.860 %の範囲で設定した破壊影響解析

を行った.

上記(1) および(2) による解析をまとめた 結果を図 - 8 に示す.図中の横軸は,主鉄筋比 と強度比(主鉄筋の降伏強度/コンクリートー 軸圧縮強度)との積で整理してある.図から分 かるように,(主鉄筋比×強度比)の値が大き くなると多少の低減があるが,概ね一定の傾向 を示しており,鉄筋比および強度比にはそれ程 影響を受けないことが分かる.

一方,上記(3) による解析をまとめた結果を 図-9 に示す.図中の横軸は,帯鉄筋比と強度 比(帯鉄筋の降伏強度/コンクリートー軸圧縮 強度)との積で整理してある.図から分かるよ



図 - 8 (主鉄筋比×強度比)と破壊影響領域



図 - 9 (帯鉄筋比×強度比) と破壊影響領域

うに,帯鉄筋比も本研究で定義する「破壊影響 領域」には影響しないように思われる.

4.4 コンクリートおよび鉄筋の損傷状況

H供試体(軸力比 12 %; せん断スパン比 5) のコンクリートおよび主鉄筋の損傷状況を図 -10 および図 - 11 に示す.図中には,本研究結 果から得られた破壊影響領域(0.86 D)が示さ れている.ピーク耐荷力(変位:30 mm~40 mm) 時点で,コンクリートの損傷(圧壊領域)は0.43 D 近傍まで生じている.一方,鉄筋の降伏状況 図から,最外縁の鉄筋(図中の左側)がおよそ 0.8 D の領域で引張降伏していることが分かる.

以上のことを踏まえれば,本研究で定義した 「破壊影響領域」とコンクリートの圧壊領域お よび鉄筋の引張降伏領域とは何らかの関連があ ることが理解できる.

5.まとめ

本研究で採用したような断面(図-1)を有 し,曲げ破壊が卓越する RC 柱に対する解析結 果をまとめると以下のようである.

1) 破壊影響領域の要因として,軸力比,せん断





スパン比,強度比,主鉄筋比,および帯鉄筋 比を採り挙げ,破壊影響領域を解析的に検証 した.その結果,強度比,主鉄筋比,および 帯鉄筋比の要因は破壊影響領域には大きく左 右しないことが分かった.

- 高強度および普通強度材料からなる RC 柱は, 強度比などの要因が同じであれば,破壊影響 領域は,軸力比およびせん断スパン比の関数 として表現できると思われる.
- 3) コンクリートの圧壊状況および主鉄筋の降伏 状況を調べた結果、「破壊影響領域」と関連 があることが分かった。
- 4) 既往の研究結果と比較して,本研究から得られた「破壊影響領域」は,従来の塑性ヒンジ長さと何らかの関連があることが推測される.
 謝辞:中部大学総合工学研究所補助金(第6部門B),ハイテクリサーチ研究費(文部科学省)

ならびに平成 14-15 年度文部科学省科学研究費 補助金(基盤研究 C,研究代表者:水野英二) を受けたことを付記し,ここに謝意を表します. 参考文献

- 中村光,野口博,田邊忠顕:コンクリート構 造物のポストピーク挙動解析研究委員会報告, コンクリート工学年次論文報告集,Vol.23,1,
 61-66,2001.
 2)水野英二,松村寿男,畑中重光:繰り返し載
 - 水野英二,松村寿男,畑中重光:繰り返し載 荷を受ける鉄筋コンクリート柱のポストピー ク挙動解析,コンクリート工学論文集,第13 巻3号,pp.47-60,2002.
 - 3) Zienkiewicz, O.C.: The Finite Element Method, Third Ed., (吉織雅夫、山田嘉昭監訳「マト リックス有限要素法」), 培風館, pp.672-796, 1984.
 - 4) 日本コンクリート工学協会編:コンクリート 構造物の靭性設計手法に関するシンポジウム
 - コンファインド(横拘束)コンクリートの 利用 -,2001.
 - 5) 星隈順一,運上茂樹,川島一彦,長屋和宏: 載荷繰返し特性と塑性曲率分布特性に着目し た曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変 形性能とその評価法,構造工学論文集,Vol. 44A, pp. 877-888, 1998.
 - 6) 星隈順一,長屋和宏,運上茂樹:鉄筋コンク リート橋脚の塑性曲率分布と塑性ヒンジ長, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1461-1468, 2000.
 - 7)(社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編・同解説,1996年12月.
 - 8) 足立幸郎,運上茂樹,長屋和宏,林昌弘:高 軸力下における高強度 RC 部材の変形性能に 関する実験的検討,コンクリート工学年次論 文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 169-174, 1999.
 - 水野英二ら:鋼素材に対する修正二曲面モデ ルの一般定式化,構造工学論文集,土木学会, Vol.40A, pp.235-248, 1994.
 - 10) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算 規準」, 1999.