# 論文 鉄筋コンクリート柱の動的付着特性の影響に関する解析的研究

# 栗山 昌之\*1・野口 博\*2・柏崎 隆志\*3

要旨:過大地震力を受けた RC 部材の動的挙動を把握するにはコンクリートや鉄筋の動的 作用を考慮した材料特性に加えて、コンクリートと鉄筋間の動的付着特性の解明が必要で ある。本研究では、動的付着実験と既往の研究とを比較・検討し、FEM 解析で用いる動的 付着特性モデルの提案を行った。更に、提案した付着モデルを基に、せん断破壊型 RC 柱 の動的 FEM 解析を行い、ひずみ速度の影響による最大耐力の増大を追跡できること、地震 時において破壊モードが変化する可能性があることなどの知見を得ることができた。 キーワード:ひずみ速度、動的、付着特性、有限要素解析、鉄筋コンクリート柱

1. はじめに

地震国日本では、構造物のより確かな安全性 が求められている。近年、過大地震力(ひずみ 速度10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup>μ/sec)を考慮した動的実験が行わ れ、ひずみ速度の上昇に伴う強度上昇などの動 的材料特性についても定量化されつつある。し かし、解析的研究は少なく、地震時の動的特性 に与えるひずみ速度の影響については、耐力や 剛性の増大だけでなく破壊モードの変化が生じ ることで設計上問題となる。

そこで、本研究では動的 FEM プログラム開 発の一環として行われた動的付着実験結果につ いて既往の研究と比較・検討し、FEM 解析で用 いる動的付着特性モデルの開発を行った。更に、 開発したモデルを用いて、RC 柱の FEM 解析を 行い、モデルの検証を行うと共に、耐力及び破 壊性状に及ぼすひずみ速度の影響を解析的に検 討した。

#### 2. 動的付着特性のモデル化

#### 2.1 実験結果及び既往の研究の比較

動的 FEM プログラム開発の一環として行われた動的付着実験<sup>1)2)</sup>及び既往の実験<sup>3)4)</sup>の試

験体諸元を表-1 に、付着応力-すべり関係を 図-1 に示す。付着応力-すべり関係からコン クリート強度と鉄筋直径の影響を無くすために、 既往の研究<sup>3)</sup>を参考にして付着応力をコンクリ ート強度(σ<sub>B</sub>)の 2/3 乗で、すべりを鉄筋直径 (d) で除することで無次元化した。当研究室で 行われた田崎らの実験<sup>1)</sup>のひずみ速度は 10<sup>1</sup>~ 10<sup>4</sup> µ/sec 程度の 6 種類とした。石本・島ら<sup>3)</sup> は 10<sup>1</sup>~10<sup>3</sup> µ/sec 程度の 6 種類であり、遠藤・ 青柳ら<sup>4)</sup> は静的で  $10^1 \mu$ /sec、動的で  $10^4 \mu$ /sec 程度の2種類である。当研究室で行われた田崎 らの実験及び石本・島らの実験では、ひずみ速 度に関係なく初期剛性は一定であるが、遠藤・ 青柳らの実験では、ひずみ速度の違いにより初 期剛性が変化している。図-1 から分かるよう に、異形鉄筋のふしによる機械的な抵抗作用に より、ひずみ速度が大きいほど同一すべり時に おける付着応力は大きくなっている。この事か ら、鉄筋コンクリート構造物の変形挙動に付着 作用が大きく影響する場合には、付着特性にひ ずみ速度の影響を考慮する必要がある。

\*1 オリエンタル建設(株) 工修(正会員) 前千葉大学大学院自然科学研究科博士前期課程 \*2 千葉大学教授 工学部デザイン工学科(建築系) 工博(正会員) \*3 千葉大学助手 工学部デザイン工学科(建築系) 工修(正会員)







#### 2.2 付着特性のモデル化

田崎らの実験および既往の研究から得られた 結果を総合して、鉄筋とコンクリート間の付着 特性のモデル化(トリリニア型)を行った。今 回提案した付着特性のモデル化を図-2 に示す。 最大付着応力  $\tau_{max}/\sigma_{b}^{2/3}$  は、静的(10<sup>1</sup>  $\mu$ /sec) で 1.0 倍、動的(10<sup>4</sup>μ/sec)で 1.7 倍程度である。 最大付着応力時のすべり量は、0.025/d程度とし た。これは、既往の研究3)のモデル化(最大す べり量 Smax: 0.025/d) を考慮した値である。初 期剛性は、遠藤・青柳らの実験では静的と動的 で違いが見られるが、田崎らの実験及び石本・ 島らの実験では、10<sup>1</sup> µ /sec 以上では、大きな差 が見られなかったため、今回のモデル化では静 的、動的に関係なく、初期剛性は8000、第2剛 性は初期剛性の 1/20 とした。また、付着破壊も しくは鉄筋降伏後は、付着応力が低下すること が既往の研究 5)で認められているため、最大付 着応力もしくは鉄筋降伏に到達した場合、付着 応力を半減させた( $\tau_{max}/2$ )。その後の剛性は零 とした。

#### 3. せん断破壊型 RC 柱の FEM 解析

#### 3.1 解析概要

細矢ら<sup>6)</sup> によるせん断破壊型 RC 柱部材の静 的並びに動的繰り返し加力実験試験体を解析対 象とした。試験体諸元を表-2、試験体形状を図 -3 に示す。なお、材料特性などの詳細は文献<sup>6)</sup> を参照されたい。試験体は、横補強筋比の異な る4種類の配筋モデルからなり、各モデルとも 静的加力用1体と動的加力用1体ずつの計8体 である。

	表-2	解析対象	試験体諸元	ċ
--	-----	------	-------	---

試験体タイプ		せん断破壊型							
***	静的	SSC-2	SSC-3	SSC-4	SSC-5				
<b>武驶冲留</b> 方	動的	SDC-2	SDC-3	SDC-4	SDC-5				
b×D (mm)		250×250							
h (mm)		650							
柱主筋 [SD295S	5]	12-D16	D16 16-D16						
Pg (%)		3.821	5.094						
Pt (%)		1.274	1.592						
フープ筋 [SD295.	A]	2-D6@50 3-D6@504-D6@50							
Pw (%)		0.512 0.768 1.024							
シアスパン比 (M/G	(D)	1.30							
せん断余裕率		0.92	0.76	0.81	0.85				
軸力 (kN):一定軸	לו	N=51.0 ( $\eta = 0.03$ )							
■限亦形清度(am/aca)	静的	0.01							
「「「「」」「「」」、「」」」」「」」、「」」、「」」、「」」、「」」、「」」	動的	10.0							





3.2 試験体のモデル化

解析には、汎用 FEM 解析プログラム DIANA (Ver.7.2)を用いた。ひずみ速度(ċ)の計算 は、ユーザーサプライドサブルーチン内で求め られた各要素の各積分点での等価一軸ひずみか らひずみ速度を計算し、以下に示す各上昇式か ら新しい応力と接線剛性を計算させた。

(1) コンクリート:8節点平面応力要素を用い た。応カーひずみ関係を図-5 に示す。コンク リートの材料特性に及ぼすひずみ速度の影響と しては当研究室で行われた松本らの実験<sup>70</sup>及び 既往の文献調査<sup>6)8)9)</sup>から、圧縮強度の上昇、 弾性係数の上昇、引張強度の上昇が認められる。 そこで、各上昇率とひずみ速度の関係は文献の 関係式に準拠し、圧縮強度〔式(1)〕、弾性係数 〔式(2)〕、引張強度〔式(3)〕にひずみ速度の影 響を考慮した。最大圧縮応力以降については、 研究者間により報告が様々であり、未だ不明な 点が多いことから、圧縮強度時ひずみ、圧壊時 のひずみは、ひずみ速度によらず静的の場合と 等しくなるように設定した。 (2)鉄筋:柱主筋には1次元線材要素とし、 フープ筋には埋め込み型鉄筋要素(独立自由 度を持たない要素)を用いた。図-6にひず み速度の影響を考慮した鉄筋の履歴特性を示 す。降伏強度の上昇率とひずみ速度との関係 は文献の関係式に準拠し、降伏強度〔式(4)〕 にひずみ速度の影響を考慮した。弾性係数は、 既往の研究結果を基にひずみ速度の変動に影響されず一定とした。

(3) 付着:鉄筋とコンクリート間の付着特性に は、4 節点のボンドリンク要素を用いた。付着 応カーすべり関係には、前述したトリリニアモ デルを用いた。表-3 にボンドリンク定数を示 す。

$_{d}\sigma_{B}/_{s}\sigma_{B} = 0.066\log(\dot{\varepsilon}) + 0.93$	式(1)
$_{d}f_{t}/_{s}f_{t} = 0.106\log(\dot{\varepsilon}) + 0.89$	式(2)
$_{d}E_{c}/_{s}E_{c} = 0.022\log(\dot{\varepsilon}) + 0.97$	式(3)
$_{d}f_{y}/_{s}f_{y} = 0.050\log(\dot{\epsilon}) + 0.90$	式(4)

表-3 ポンドリンク定数

	初期剛性 (MPa)	2次 <b>削性</b> (MPa)	第1折れ点 (MPa)	最大付着強度 (MPa)
静的(0.01cm/sec)	785	39	3.8	4.6
動的(10.0cm/sec)	785	39	8.2	8.8

3.3 加力方法

柱脚をピン・ローラー支持として、定軸力導 入後、柱頭を軸方向変形可能なローラー支持と し、柱脚に変位を与え変位制御の単調載荷解析 を行った。また、設定ひずみ速度は、実験と同 様に平均層間変形速度が静的で 0.01 (cm/sec)、 動的で 10.0 (cm/sec) として、加力スケジュー ルが正弦波になるように時間を制御して解析を 行った。

#### 3.4 解析結果

#### 3.4.1 層せん断カー層間変位関係

実験結果と解析結果の層せん断力ー層間変形 関係を図-7 に示す。付着ひび割れが卓越した せん断破壊型の SDC-2、SDC-3 は、剛性及び耐 力が実験と良好な対応を示したが、その他の試 験体(せん断破壊型)は、耐力は実験値と対応 したが、剛性を高めに評価した。本解析プログ ラムから、付着を考慮することで付着ひび割れ が卓越したせん断破壊型に対して最大耐力を追 跡することができることが分かる。

#### 3.4.2 動的加力時のひずみ速度

SDC-3の鉄筋とコンクリート間の付着を考慮 した場合を例に、コンクリート及び柱主筋、フ ープ筋について解析結果から得られたひずみ速 度一層間変位関係を図-8 に示す。ひずみ速度 は、軸方向ひずみの1秒あたりの変化量として 求めた。コンクリート(圧縮縁柱端)及び柱主 筋に生じるひずみ速度は、層せん断力がピーク に近づくにつれてひずみ速度は低下し、実験時 の柱主筋の最大ひずみ速度は約 7.0×10<sup>4</sup> µ/sec で解析と同様の傾向を示した。一方、フープ筋 はひずみ速度が上昇する傾向を示した。これは、 コンクリートのせん断ひび割れ発生及び進展に 伴う剛性低下によってフープ筋のひずみ量が増 大することが要因に考えられる。更に、最大耐 力近傍のひずみ速度は、地震時に生じるとされ るひずみ速度 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup>(μ/sec)を越えており、実 験結果と同レベルのひずみ速度の値を示した。 本解析における動的加力時のひずみ速度は、最 大耐力や破壊性状に影響を与えるレベルである といえる。





-256-

				1	医大耐力	Qtu(kN)				圧縮強度	E.	筋	実験
試験体	加力方法	実験値	上昇率	解析値 完全付着	上昇率	解析値 付着考慮	上昇率	(B)/(A)	(C)/(A)	σ <sub>e</sub>	Pg	Pw	破壊 形式
		(A)		(B)		(C)				(MPa)	(%)	(%)	
SSC-2	静的	232		236		232		1.02	1.00	31.7	3.82	0.51	FS
SDC-2	動的	295	1.27	305	1.29	297	1.28	1.03	1.01	34.3	5.02	0.51	BFS
SSC-3	静的	257		256		257		1.00	1.00	35.4	5.00	0.51	S
SDC-3	動的	303	<u>1.</u> 18	305	1.19	298	1.16	1.01	0.98	35.0	5.05	0.51	BFS
SSC-4	静的	311		305		296		0.98	0.95	34.7	5.09	0.77	FS
SDC-4	動的	359	<u>1.</u> 15	380	1.25	361	1.22	1.06	1.01	34.7	0.00	0.77	FS
SSC-5	静的	345		342		320		0.99	0.93	35.3	5.09	1.02	FS
SDC-5	動的	388	1.13	423	1.23	392	1.23	1.09	1.01	35.3	5.05	1.02	FS

# 表-4 最大耐力の実験値と解析値の比較

【破壊形式】

FS:曲げ降伏先行型のせん断破壊 BFS:付着ひび割れが卓越したせん断破壊 S:せん断破壊

#### 3.4.3 最大耐力に及ぼすひずみ速度の影響

最大耐力の実験値と FEM 解析値との関係を **表-4**及び、**図-9**に示す。コンクリートの静的 圧縮強度の差が大きく、見かけ上最大耐力の増 大率が大きくなっていると考えられる SSC-2、 SDC-2 を除くと、動的加力の最大耐力は静的加 力に比べ実験で1.13~1.18 倍、完全付着解析で 1.19~1.25 倍、鉄筋とコンクリート間の付着特 性を考慮した解析で1.16~1.23 倍に増大し、こ の増大率は横補強筋比の違いによって異なる。 最大耐力の増大率は、完全付着に比べて付着を 考慮した方がやや実験に近い値を示した。

#### 3.4.4 付着特性に及ぼすひずみ速度の影響

既往の研究で、柱主筋とコンクリートとの付 着強度に影響を与えるひずみ速度は、柱部材中 央部近傍のひずみ速度と考えられ、この部位で のひずみ速度は、柱部材端部でのひずみ速度と 同等かもしくはそれ以下である。そのため、柱 部材中央部の最大付着耐力の解析値及び終局強 度型耐震設計指針<sup>11)</sup>の付着強度式による計算 値を表-5 に、付着耐力一層間変位関係を図-10 に示す。終局強度型耐震設計指針の付着強度 式では、動的加力時の付着耐力の増大率は圧縮 強度の平方根に対応するため、地震時のひずみ 速度 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> µ/sec の場合、付着耐力の増大率 は最大でも 1.1 倍程度と考えることが出来る。 また、安達の研究<sup>12)</sup>によれば、静的加力に対



## 図-9 最大耐力の実験値と解析値の関係

表-5 付着耐力の計算値と解析値の比較



する動的載荷での部材の付着耐力の上昇率は 1.06 倍であると報告されている。しかし、今回 の解析では、付着耐力の上昇率は柱部材中央部 で1.72~1.81 倍と既往の研究よりも大きい値を 示した。この原因として、コンクリートや鉄筋 の要素は逐一ひずみ速度を計算して応力を増大 させているのに対して、ボンドリンク要素はひ ずみ速度が一定の値で計算させているために逐 一応力の値が変化しないためと考えられる。

### 3.4.5 破壊モードに及ぼすひずみ速度の影響

静的加力に対する動的加力でのせん断耐力と 付着耐力の関係の模式図を図ー11に示す。本研 究での付着耐力の上昇率は既往の研究と大きく 異なる結果を示したため、終局強度型耐震設計 指針の付着強度式による計算値を用いた。動的 加力時の付着耐力の増大率は圧縮強度の平方根 に対応するため、地震時のひずみ速度 103~105 μ/sec の場合、付着耐力の増大率は最大でも1.1 倍程度と考えることが出来る。したがって、地 震時程度のひずみ速度では横補強筋比が小さく アーチ機構が卓越する場合、せん断耐力は最大 で 1.25 倍程度の上昇するのに対し、付着耐力は 1.1 倍程度の上昇に過ぎず、静的加力では付着 耐力がせん断耐力を上回っていても、動的加力 では付着耐力がせん断耐力を下回る場合があり、 せん断破壊型から付着割裂型へ破壊モードが移 行する可能性があるといえる。

#### 4. まとめ

1)提案した動的付着特性モデルにより、付着 ひび割れが卓越したせん断破壊型に対して耐力 や剛性を追跡することができることを確認でき た。

2)静的加力に比べて動的加力時の最大耐力の 増大率は、完全付着で1.19~1.25倍に、付着を 考慮した場合1.16~1.23倍に増大し、その増大 率は横補強筋量によって異なる。

3) せん断耐力及び付着耐力増大率の関係から 破壊モードが変化する可能性があることを指摘



図-11 せん断耐力と付着耐力の関係(模式図) した。

今後は、せん断破壊型に対応できるように DIANA 用のユーザーサプライドサブルーチン を見直す必要がある。また、ひずみ速度が逐一 変化したときに対応のできる付着特性の解析プ ログラムを開発し、付着耐力及び付着割裂破壊 に及ぼすひずみ速度の影響を検討する必要があ る。

#### 「参考文献」

1) 田崎遼子:鉄筋とコンクリートの動的付着特性に 関する研究,千葉大学博士前期課程(修士)論文, 2000 2) 野口博, 柏崎隆志: 鉄筋とコンクリートの 動的付着特性に関する研究,日本建築学会大会学術 講演梗概集, pp.625-626, 2000.9 3) 石本陽一, 島 弘:鉄筋とコンクリートの付着応カ-すべり関係に 及ぼす載荷速度の影響, コンクリート工学年次論文 報告集, Vol.15, No.2, pp.129-134, 1993 4) 遠藤 達也、青柳征夫:鉄筋コンクリートの動的せん断伝 達特性および動的付着特性に関する実験的研究、電 力中央研究所報告・研究報告 U88005, 1988.10 5) 森田司郎ほか:鋼とコンクリートの付着に関する基 礎的実験,日本建築学会論文報告集, No.139, pp.1-10, 1967.9 6) 細矢博:鉄筋コンクリート柱部材の耐力 と破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究, 奥村組特定研究報告,No.8,1996.4 7)松本賢,櫻 井輝雄、柏崎隆志、野口博:ひずみ速度の影響を考 慮した鉄筋コンクリート構成則モデルの開発(その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.675-678, 2000.9 8) 小谷俊介:鉄筋コンクリー トにおける載荷速度の影響、コンクリート工学、 Vol.21, No.11, pp.23-34, 1983.11 9) 岩井哲, 若林 寛:鉄筋コンクリート長柱の挙動に及ぼす載荷速度 の影響,第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.357-360, 1985 10) 倉本洋,南宏一: 靱性を考慮 ンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.3, 1988 11) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局 強度型耐震設計指針・同解説, 1990 12) 副島武雄, 安達洋,中西三和,奥田明久,阿久澤真子:鉄筋コ ンクリート造柱の最大耐力に及ぼす載荷速度の影響 に関する研究(その1,その2),日本建築学会大会 学術講演梗概集, pp.409-412, 1995.8