

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 $10^3 \sim 10^5 \mu/\text{sec}$ ）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^{1) 2)} 及び既往の実験^{3) 4)} 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³⁾を参考にして付着応力をコンクリート強度 (σ_B) 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¹⁾ のひずみ速度は $10^1 \sim 10^4 \mu/\text{sec}$ 程度の 6 種類とした。石本・島ら³⁾ は $10^1 \sim 10^3 \mu/\text{sec}$ 程度の 6 種類であり、遠藤・青柳ら⁴⁾ は静的で $10^1 \mu/\text{sec}$ 、動的で $10^4 \mu/\text{sec}$ 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)

表-1 実験試験体諸元

	田崎らの実験 ¹⁾	石本・島らの実験 ³⁾	遠藤・青柳らの実験 ⁴⁾
試験体寸法	300mm×300mm ×600mm	300mm×300mm ×600mm	(D13):91mm×91mm×540mm (D19):133mm×133mm×720mm
試験体本数	18体 (6×3=18体)	6体 (6×1=6体)	12体 (6×2=12体)
鉄筋	D19 SD40	D19 SD35	D13 SD35 D19 SD35
コンクリート強度 (σ_b)	19.5 (MPa)	25.0 (MPa)	39.2 (MPa)
載荷方法	片引き載荷	片引き載荷	両引き載荷

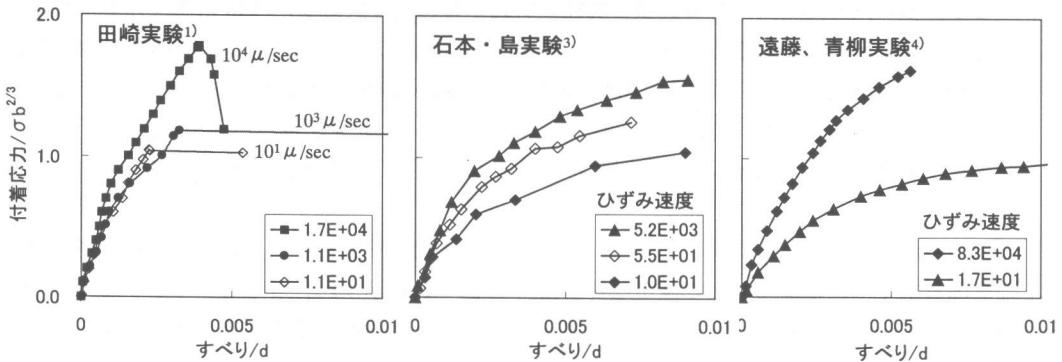
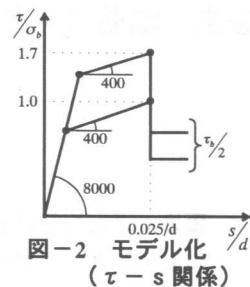


図-1 付着応力 - すべり関係の実験結果

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 ($10^1 \mu/sec$) で 1.0 倍、動的 ($10^4 \mu/sec$) 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 $s_{max} : 0.025/d$ ）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、 $10^1 \mu/sec$ 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⁶⁾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⁶⁾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

試験体番号	せん断破壊型				
	静的	SSC-2	SSC-3	SSC-4	SSC-5
動的	SDC-2	SDC-3	SDC-4	SDC-5	
b×D (mm)	250×250				
h (mm)	650				
柱主筋 [SD295S]	12-D16	16-D16			
Pg (%)	3.821	5.094			
Pt (%)	1.274	1.592			
フープ筋 [SD295A]	2-D6@50	3-D6@50	4-D6@50		
Pw (%)	0.512	0.768	1.024		
シアスパン比 (M/QD)	1.30				
せん断余裕率	0.92	0.76	0.81	0.85	
軸力 (kN):一定軸力	$N=51.0$ ($\eta=0.03$)				
層間変形速度 (cm/sec)	静的	0.01			
	動的	10.0			

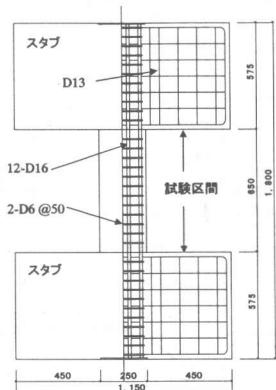


図-3 試験体詳細図

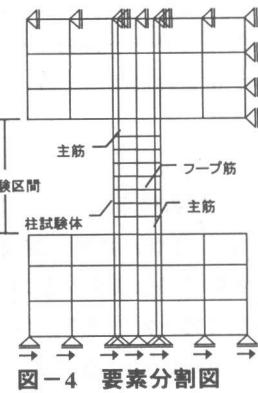
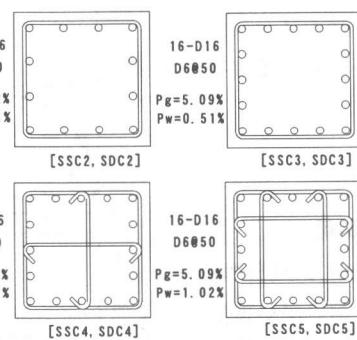


図-4 要素分割図

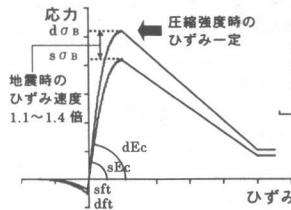


図-5 コンクリート

$\sigma - \epsilon$ 関係

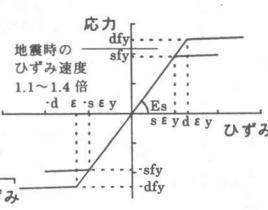


図-6 鉄筋

$\sigma - \epsilon$ 関係

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 ($\dot{\epsilon}$) 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。応力-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⁷⁾及び既往の文献調査^{6) 8) 9)}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、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。付着応力-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。

$$d\sigma_B / s\sigma_B = 0.066 \log(\dot{\epsilon}) + 0.93 \quad \text{式(1)}$$

$$d f_t / s f_t = 0.106 \log(\dot{\epsilon}) + 0.89 \quad \text{式(2)}$$

$$d E_c / s E_c = 0.022 \log(\dot{\epsilon}) + 0.97 \quad \text{式(3)}$$

$$d f_y / s f_y = 0.050 \log(\dot{\epsilon}) + 0.90 \quad \text{式(4)}$$

表-3 ボンドリンク定数

	初期剛性 (MPa)	2次剛性 (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 層せん断力-層間変位関係

実験結果と解析結果の層せん断力-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事が分かる。

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-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 $7.0 \times 10^4 \mu/\text{sec}$ 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 $10^3 \sim 10^5 (\mu/\text{sec})$ 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。

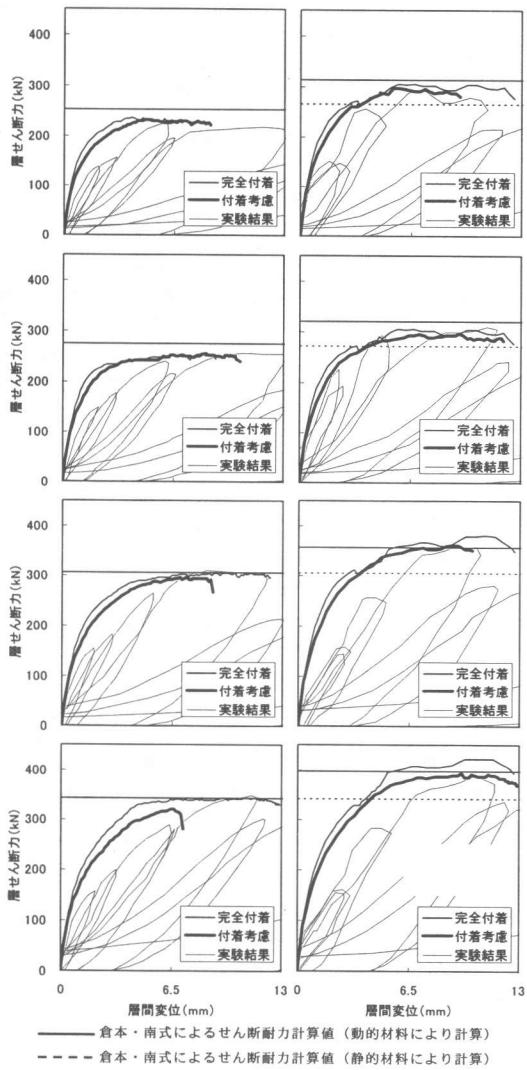


図-7 層せん断力-層間変位関係

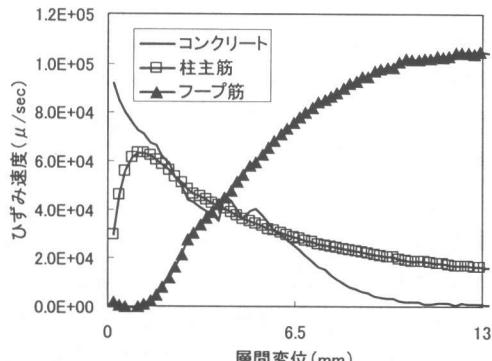


図-8 ひずみ速度-層間変位関係

表-4 最大耐力の実験値と解析値の比較

試験体	加力方法	最大耐力 Q_{tu} (kN)						圧縮強度 σ_b (MPa)	配筋		実験 破壊 形式	
		実験値 (A)	上昇率 (B)	解析値 完全付着 (C)	上昇率 (B)	解析値 付着考慮 (C)	上昇率 (B)/(A)	(C)/(A)				
SSC-2	静的	232		236		232		1.02	1.00	31.7	FS	
SDC-2	動的	295	1.27	305	1.29	297	1.28	1.03	1.01	34.3	BFS	
SSC-3	静的	257		256		257		1.00	1.00	35.4	S	
SDC-3	動的	303	1.18	305	1.19	298	1.16	1.01	0.98	35.0	BFS	
SSC-4	静的	311		305		296		0.98	0.95	34.7	FS	
SDC-4	動的	359	1.15	380	1.25	361	1.22	1.06	1.01	34.7	FS	
SSC-5	静的	345		342		320		0.99	0.93	35.3	FS	
SDC-5	動的	388	1.13	423	1.23	392	1.23	1.09	1.01	35.3	FS	

【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¹¹⁾の付着強度式による計算値を表-5に、付着耐力-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 $10^4\sim 10^5 \mu/\text{sec}$ 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¹²⁾によれば、静的加力に対

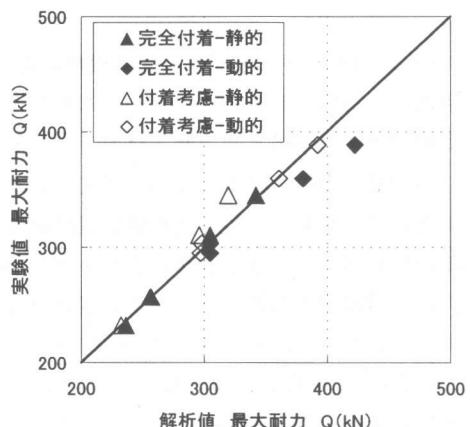


図-9 最大耐力の実験値と解析値の関係

表-5 付着耐力の計算値と解析値の比較

試験体	付着耐力 Q_b (kN)			
	計算値		解析値	
	(A)	上昇率	(B)	上昇率
SSC-2	152		171	
SDC-2	173	1.14	327	1.91
SSC-3	155		163	
SDC-3	169	1.09	294	1.81
SSC-4	205		189	
SDC-4	224	1.09	328	1.74
SSC-5	213		191	
SDC-5	232	1.09	329	1.72

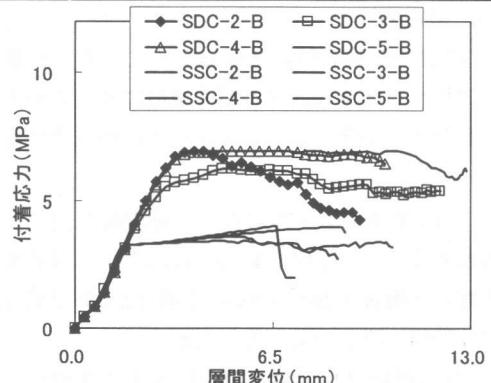


図-10 付着応力-すべり関係

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-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 $10^3 \sim 10^5 \mu/\text{sec}$ 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

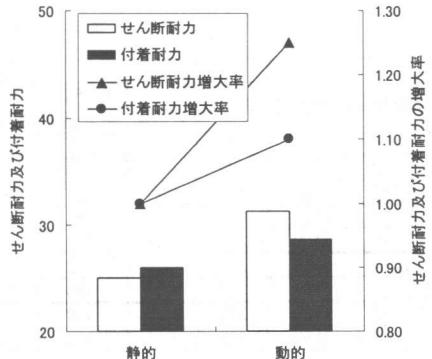


図-11 せん断耐力と付着耐力の関係(模式図)

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) 田崎達子：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力－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：韌性を考慮した鉄筋コンクリート部材の実用せん断設計式、コ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