

論文 鉄筋コンクリート柱のひずみ速度の影響に関する解析的研究

鈴木 晶子^{*1}・野口 博^{*2}

要旨：RC 柱の耐力や変形および破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響を検討するために、動的地震を対象とするコンクリートおよび鉄筋の動的な材料モデルを提案し、せん断破壊型 RC 柱の簡易動的 FEM 解析を行った。提案した動的な材料モデルを用いた簡易動的 FEM 解析により、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、最大耐力増大率の差から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、動的な材料強度、有限要素解析、破壊モード、鉄筋コンクリート柱

1.はじめに

近年、動的な材料実験の蓄積からひずみ速度の上昇に伴う強度上昇などの動的な材料特性については定量化されつつあり、部材実験も静的実験や疑似動的実験に比べその数ははるかに少ないが、振動台による動的な実験などは行われるようになってきた。しかし、解析的研究は少なく、地震時の動的な特性に与えるひずみ速度の影響については研究者間でその評価が異なり、未だ不明な点が多いのが実状である。

そこで、本研究では、鉄筋コンクリート(RC)構造物の動的な挙動を有限要素(FEM)解析により追跡するに当たり、従来までの静的な外力下における材料モデルに、動的な材料実験に基づくひずみ速度の影響を考慮することで簡易動的解析と位置づけ、動的な地震を対象とするコンクリート及び鉄筋の材料モデルの開発を行った。また、RC 柱の簡易動的 FEM 解析を行いモデルの検証を行うと共に、耐力及び変形、破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響を検討した。

2.ひずみ速度の影響を考慮した材料特性のモデル化

本研究で使用したプログラムにおいては、ひずみ速度入力法及び、逐一ひずみ速度算出法

の2種類の方法によりひずみ速度を設定し、それぞれの材料特性にひずみ速度を考慮する方法を採った。

2.1 ひずみ速度入力法

ひずみ速度入力法は、直接入力したひずみ速度から静的な材料強度に対する動的な材料強度上昇率(DIF; Dynamic Increase Factor)を計算し、ひずみ速度の影響を考慮する方法である。

2.2 逐一ひずみ速度算出法

逐一ひずみ速度算出法では、部材に与える変位の単位時間当たりのひずみ増分量であるひずみ速度を図 1 に示すように一定であるとした。

2.2.1 変位増分と時間増分の関係

実験加力スケジュールの層間変形の時刻歴において、図 2 に示すように、連続する正負の振幅値のピークを結んだ傾きを平均層間変形速度(\bar{V})と定義し、平均層間変形速度が一定となるように変位増分($\Delta \delta$)と時間増分(Δt)を与える。

2.2.2 ひずみとひずみ速度との関係

ひずみとひずみ速度との関係を式(1)に示す。

$$k \dot{\epsilon}_i = \Delta_k \epsilon_i / \Delta t_i = \frac{k \epsilon_i - k \epsilon_{(i-1)}}{t_i - t_{(i-1)}} \quad \dots \dots \text{式 (1)}$$

$\Delta_k \epsilon_i$: k 要素の(i-1)~i ステップ間のひずみの変化量($\Delta \epsilon$)

*1(株)久米設計 構造設計部 工修(正会員)

*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)

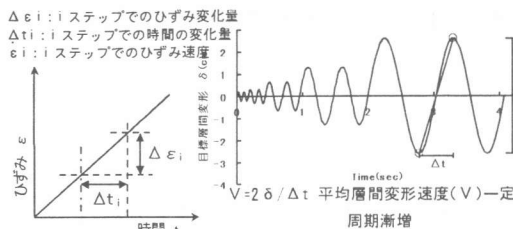


図1 ひずみ増分

時間関係

$\Delta_k t_i$: (i-1)~i ステップ間の時間の変化量(Δt)
 t_i : i ステップ時刻

$k \dot{\epsilon}_i$: k 要素の i ステップのひずみ速度
 ひずみ $k \epsilon_i$ は、各要素毎に異なるので単位時間当たりのひずみの変化量 $\Delta_k \epsilon_i$ も同様に異なる。従って、ひずみ速度 $k \dot{\epsilon}_i$ も各要素毎に異なり各要素毎に静的強度に対する上昇率 DIF を求め考慮する。

2.3 コンクリートのモデル化

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既往の文献調査から、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。図3にひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。各上昇率とひずみ速度の関係は文献^[1,2,3,4,5]の関係式に準拠し、圧縮強度、弾性係数、引張強度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^[6,7,8,9]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。また、コンクリートの繰り返し履歴モデルは文献^[10]と同様とした。

2.4 鉄筋のモデル化

図4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^[1,3,5,11,12]の関係式に準拠し、降伏強度、降伏ひずみ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。

3.1 要素レベルによる検証解析

コンクリート円柱実験試験体を1要素でモデル化し、逐一ひずみ速度算出法によりひずみ速

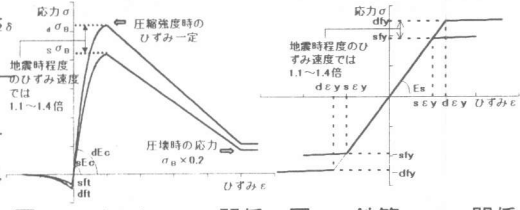


図3 コンクリートσ-ε関係

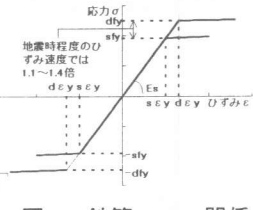


図4 鉄筋σ-ε関係

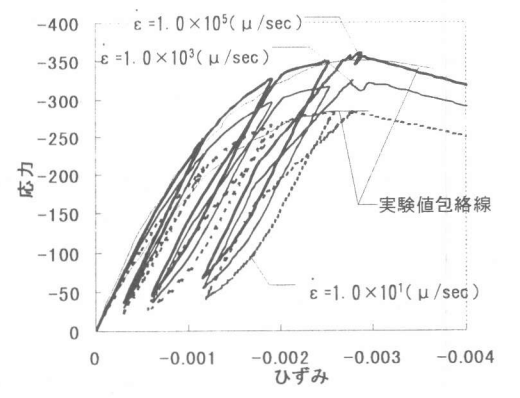


図5 応力-ひずみ関係 $\sigma_B=283(\text{kgf/cm}^2)$
 野口式により最大圧縮応力低減

度の影響を考慮した繰り返し履歴モデルにより変位制御で検証解析を行った。図5に、コンクリートの応力-ひずみ関係を示す。図中の実験値は岩井ら^[6]により行われた繰り返し圧縮荷重実験の包絡線である。剛性、耐力ともに実験値と良い対応を示しており、図3に示した材料特性を用いることにより、圧縮強度の増大や剛性の増大などのひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの動的な材料特性を表現できることが分かった。

4.鉄筋コンクリート柱部材試験体の解析

4.1 実験概要

細谷ら^[1]により行われた RC 柱部材の静的繰り返し並びに動的な水平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1に示す。材料特性、試験体形状などの詳細は文献^[1]を参照されたい。試験体は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。

4.2 試験体のモデル化及び解析手法

表 1 試験体諸元

試験体タイプ	せん断破壊型				
	静的	SSC-2	SSC-3	SSC-4	SSC-5
試験体記号	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	1.042		
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 (tf) (一定軸力)	N=5.2 (η=0.03)				
層間変形速度 (cm/sec)	静的	0.01			
	動的	10.00			

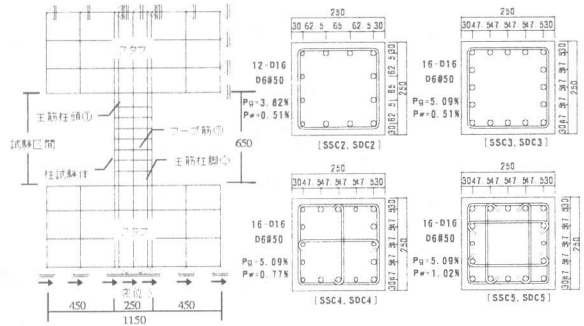


図 6 要素分割図

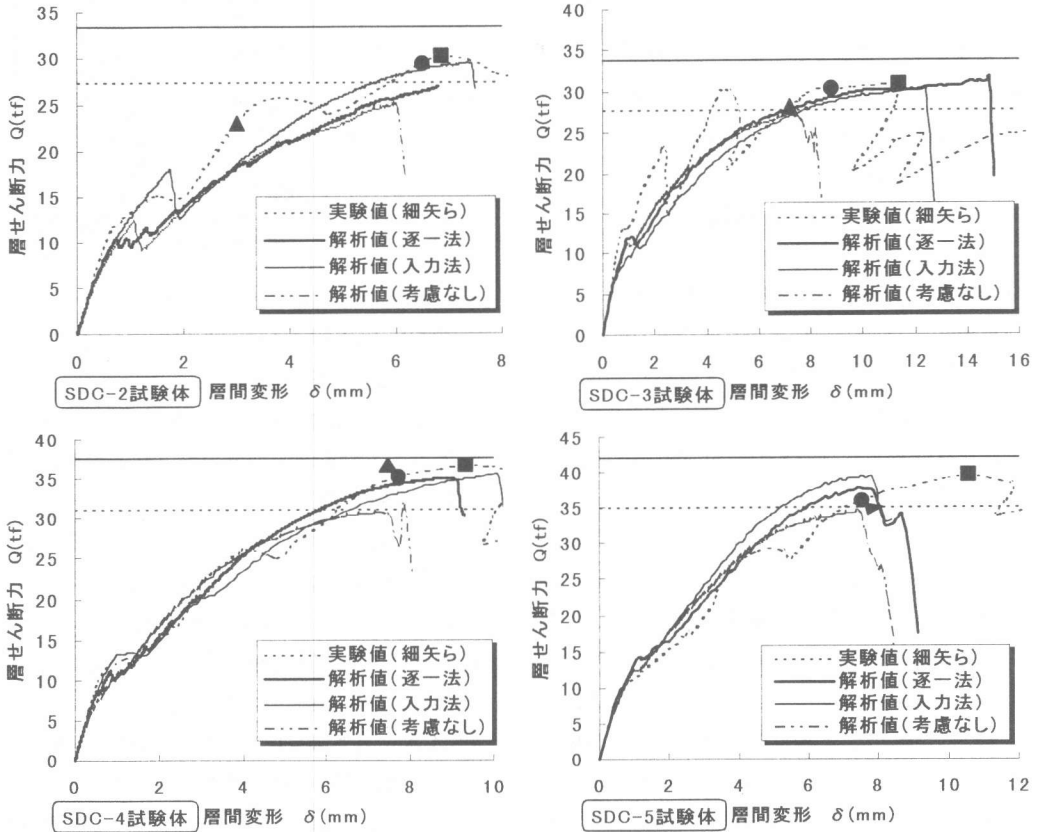


図 7 層せん断力－層間変形関係（動的加力試験体）

— 倉本・南式（ひずみ速度の影響を考慮した動的材料強度により計算）
 倉本・南式（静的材料強度により計算）

■：実験最大耐力
 ●：実験柱主筋降伏
 ▲：実験フープ筋降伏

図 6 に試験体の要素分割を示す。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、ひずみ速度入力法の場合 $1.0 \times 10^1 (\mu/sec)$ ：静的、 $1.0 \times 10^5 (\mu/sec)$ ：動的のひずみ速度を、逐一ひずみ速度算出法の場合は、実験と同様に平均層間変形速度 $\bar{v} = 0.01(cm/sec)$ ：静的、 $10.0(cm/sec)$ ：動的で一定

となるように変位増分($\Delta \delta$)と時間増分(Δt)を与えた。なお、収束計算は従来までと同様の手法を用いている。

4.3 解析結果の検討

4.3.1 層せん断力－層間変形関係

図 7 に動的加力時の層せん断力－層間変形関係を示す。ひずみ速度入力法、及び逐一算出法によりひずみ速度の影響を考慮した場合と考

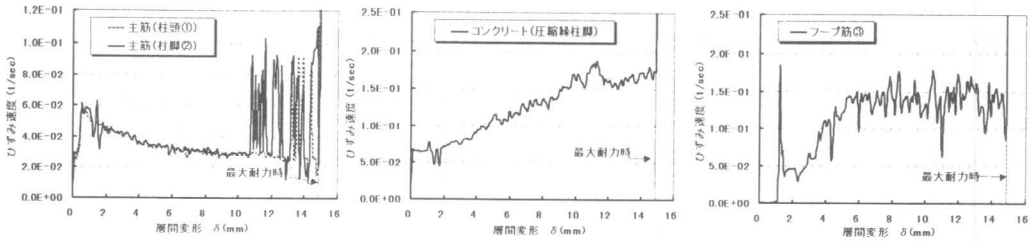


図8 FEM解析によるひずみ速度－層間変形関係

慮しない場合の解析結果を比較した。静的加力の場合、従来型のモデルでも剛性、耐力ともに実験と良い対応を示すが、動的加力時はひずみ速度の影響を考慮した場合の方が実験値と良い対応を示し、ひずみ速度の影響による最大耐力の上昇を追跡できることが分かる。

4.3.2 動的加力時のひずみ速度

SDC-3を例に図6に対応する位置の柱主筋、フープ筋、コンクリートについて解析結果（逐一算出法）から得られた層間変形－ひずみ速度関係を図8に示す。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、実験と同様の傾向を示した。また、主筋が降伏する直前の変形時から、ひずみ速度が大きく揺れ始め、変動が著しくなっている。一方、コンクリート(圧縮縁柱端)とフープ筋の層間変形－ひずみ速度関係をみると、ひずみ速度は上昇する傾向を示した。コンクリートの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、柱主筋は $1.92 \times 10^4 \sim 7.25 \times 10^5 (\mu/\text{sec})$ 、フープ筋は $5.82 \times 10^4 \sim 1.47 \times 10^5 (\mu/\text{sec})$ 、コンクリートは $4.67 \times 10^4 \sim 1.88 \times 10^5 (\mu/\text{sec})$ で、地震時に生じるとされるひずみ速度 $10^3 \sim 10^5 (\mu/\text{sec})$ と対応しており実験結果と同レベルのひずみ速度の値を示した。更に、動的加力時の場合、ひずみ速度の影響を受けコンクリート圧縮強度は1.16～1.36倍、フープ筋降伏強度は1.10～1.15倍の上昇率を示した。また、既往の研究^[1,13]では、 $10^4 (\mu/\text{sec})$ 程度のひずみ速度の場合、静的に比べ曲げ耐力やせん断耐力は約10%～25%

上昇し、破壊モードは変化する可能性がある」と指摘されていることから、本解析の動的加力時におけるひず

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。

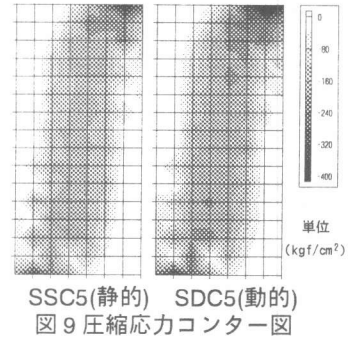
4.3.3 圧縮応力分布図

図9に、SSC5、SDC5を例に最大耐力時の圧縮応力分布図を示す。どの試験体も静的加力時に比べ、動的加力の方がストラットの応力は増大し、柱中央付近よりも柱端部の方が応力の増大率が大きい、その形成角度、幅に違いはみられなかった。また、静的と動的を比べ、解析のひび割れ進展状況に若干の差は見られるが大きな違いは認められなかった。

4.3.4 最大耐力に及ぼすひずみ速度の影響

(1)最大耐力の実験値と解析値の比較

最大耐力の実験値と解析値との関係を表2及び、図10に示す。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SSC2、SDC2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、ひずみ速度の影響を考慮した解析で1.10～1.17倍に増大し、この増大率は鉄筋比の違いによって異なる。また、ひずみ速度の影響を考慮した材料モデルを用いて解析した場合の最大耐力の増大率が実験の増大率とほぼ等しいことから、本研究において開発した材料モデル



SSC5(静的) SDC5(動的)
図9 圧縮応力コンター図

表 2 最大耐力の実験値と FEM 解析値の関係

試験体	加力方法	最大耐力 $Q_{tu}(tf)$						圧縮強度			配筋		
		実験値 (A)	上昇率	解析値ひずみ速度考慮 (B)	上昇率	解析値ひずみ速度考慮なし (C)	上昇率	(A)/(B)	(A)/(C)	(B)/(C)	σ_B (kgf/cm ²)	Pg (%)	Pw (%)
SSC-2	静的	23.70		22.90		23.96		1.03	0.99	0.96	323.0		
SDC-2	動的	30.10	1.27	26.90	1.17	25.10	1.05	1.12	1.20	1.07	350.0	3.821	0.512
SSC-3	静的	26.20		27.12		28.31		0.97	0.93	0.96	361.0		
SDC-3	動的	30.90	1.18	31.82	1.17	27.18	0.96	0.97	1.14	1.17	357.0	5.094	0.512
SSC-4	静的	31.70		31.94		31.54		0.99	1.01	1.01	354.0		
SDC-4	動的	36.60	1.15	35.10	1.10	30.85	0.98	1.04	1.19	1.14	354.0	5.094	0.768
SSC-5	静的	35.20		33.48		34.29		1.05	1.03	0.98	360.0		
SDC-5	動的	39.60	1.13	37.71	1.13	34.33	1.00	1.05	1.15	1.10	360.0	5.094	1.024

は、ひずみ速度の影響により増大する最大耐力を算出できることが分かった。一方、ひずみ速度の影響を考慮していない従来のモデルにより解析した場合、実験値に比べ最大耐力を 14~20% 低く評価し、かつ、ひずみ速度の影響を考慮した場合に比較して約 12% 過小評価する結果となった。

(2) 最大耐力増大率の検討

図 11 に、倉本・南式から得たせん断耐力の計算値においてアーチ機構とトラス機構が負担するせん断力と、実験及び FEM 解析の最大耐力を示す。なお、動的加力試験の値は 4.3.2 で得た材料強度上昇率により割り増しした強度で計算した。図 12 には FEM 解析結果から得られた動的 material 強度上昇率と最大耐力増大率の関係を示す。フープ筋比が増大するとトラス機構による負担せん断力が増大し、フープ筋比が減少するとアーチ機構による負担せん断力が増大するが、この相対関係において、トラス機構が支配的になると、せん断耐力は主としてフープ筋により負担されるため、せん断耐力の増大率はフープ筋の降伏強度上昇率 1.05~1.19 に近づくと予測される。また、これと同様にアーチ機構が支配的になると、せん断力はコンクリートにより負担されるため、せん断耐力の増大率はストラットの強度上昇率に対応し 1.16~1.29 に近づくと予測できる。一方、曲げ耐力の増大率について、細矢^[1]は、同レベルのひずみ速度 $10^4 \sim 10^5 (\mu/sec)$ では、釣り合い軸力比以下では降伏耐力は 1.2~1.4 倍、最大耐力は 1.1~1.15 倍増大するのに対し、釣り合い軸力比以上では降伏耐力は 1.2~1.4 倍、最大耐力は 1.15

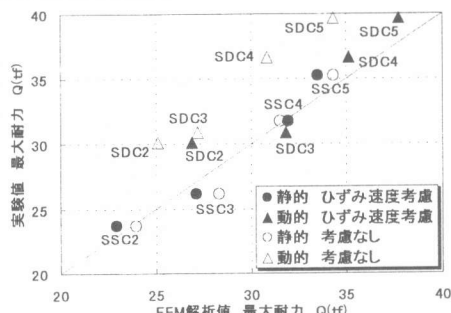


図 10 最大耐力の実験値と FEM 解析値の関係

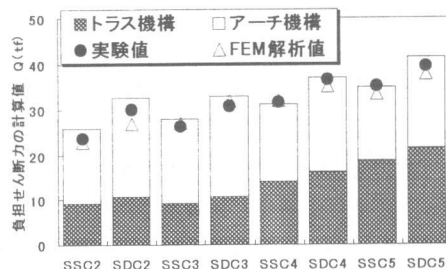


図 11 アーチ機構とトラス機構による負担せん断力

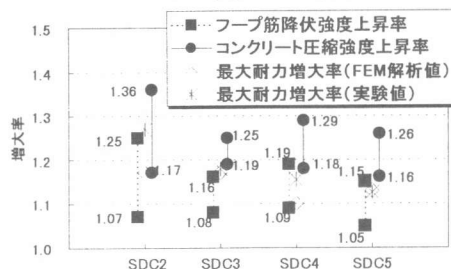


図 12 最大耐力の増大率と動的強度上昇率の関係

~1.3 倍に増大するとしている。また、せん断耐力の増大率は軸力の有無によらずほぼ同等としている。以上の結果から、ひずみ速度の影響による最大耐力の増大と破壊モードの変化について考察し、図 13 にその関係を示す。トラス機構が卓越し、かつ釣り合い軸力比以上の軸力の場合、曲げ耐力は 1.3 倍増大するのに対し、

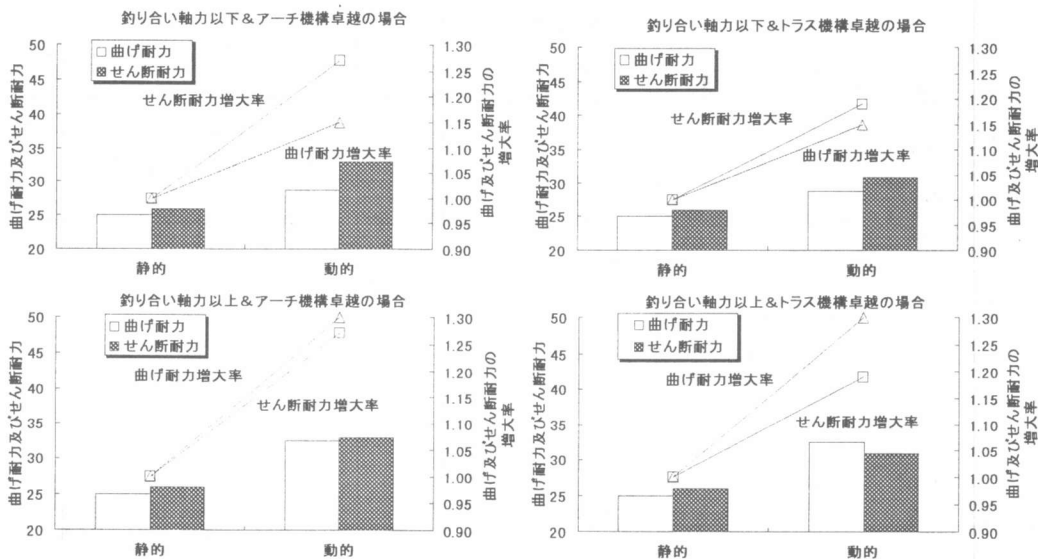


図 13 最大耐力増大率と破壊モードの関係

せん断耐力は 1.19 倍の増大に留まる。この場合、静的荷重時にはせん断耐力が上回っているが、地震時には曲げ耐力がせん断耐力を上回る逆転現象が生じ、破壊モードが変化する可能性があると考えられる。静的荷重時にせん断耐力が曲げ耐力を上回る場合は、地震時における破壊モードが曲げからせん断破壊型に変化する可能性は少ないが、高軸力でかつトラス機構が卓越する場合には、破壊モードが変化する可能性が大きくなるといえる。従って、RC 部材の曲げ破壊型を保証するには、ひずみ速度の影響による耐力上昇分を考慮して、静的に算定するせん断耐力は曲げ耐力に対して 19%以上の余裕度を確保すべきであると考えられる。

5.まとめ

本研究においては、ひずみ速度の影響について以下の結果を得ることが出来た。

- (1)提案した動的材料モデルにより、ひずみ速度の影響による最大耐力の増大を追跡できた。
- (2)最大耐力は、静的加力に比べ動的加力時は 1.1~1.17 倍に増大し、その増大率は補強筋量により差が見られる。
- (3)曲げ耐力とせん断耐力の動的耐力増大率の関係から破壊モードが変化する可能性を指摘

できた。また、静的せん断耐力は曲げ耐力に対し約 19%以上の余裕度確保が必要である。

(4)FEM 解析によるひび割れ進展状況は、静的加力と動的加力で若干の違いはあるが、定量的な違いは生じなかった。

今後、ひび割れ進展状況などの詳細検討を重ね、更に解析モデルを洗練する必要がある。また、付着特性に及ぼすひずみ速度の影響も考慮し、付着耐力や付着劣破壊性状に対するひずみ速度の影響についても検討する必要がある。

【参考文献】

- 【1】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. 【2】藤本盛久：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その 5)、建築学会大会、pp.753-754,昭和 63 年 10 月. 【3】岩井哲：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. 【4】中村和行：鉄筋コンクリート構造物の挙動における載荷速度の影響に関する研究(その 1,その 2)、建築学会大会、pp.787-790,1997.9. 【5】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. 【6】岩井哲：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第 314 号、pp.102-111,昭和 57 年 4 月. 【7】Piotr Moncarz and Helmut Krawinkler: Material Simulation in Dynamic Model Studies of Steel and Reinforced Concrete Structures, Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, pp.175-182, September, 1980. 【8】竹田仁一：高速圧縮、引張および曲げをうける各種コンクリートの力学的性質、日本建築学会論文報告集、第 777 号、pp.1-6,1962.10. 【9】D. Watstein: Effect of Straining Rate on the Compressive Strength and Elastic Properties of Concrete, Vol.49, pp.729-744, April, 1953. 【10】野崎幸男・楨田敦：繰り返し構成則を用いた鉄筋コンクリート部材の有限要素解析(その 1,その 2)、建築学会大会、pp.807-810,1997.9. 【11】藤本盛久：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱の実験的研究(その 10)、建築学会大会、pp.887-888,1980.10. 【12】最上達雄：高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力と変形に関する実験的研究(その 1,その 2)、建築学会大会、pp.1579-1582,1978.9. 【13】野村祥一：鉄筋コンクリート柱の挙動に及ぼす載荷速度の影響(その 1,その 2)、建築学会大会、pp.411-414,1986.8.