論文 鉄筋の動的特性が RC 造純フレーム構造の応答に与える影響

真田 靖士^{*1}·中埜 良昭^{*2}

要旨:本研究では RC 構造を構成する材料の動的な物理性状が建物全体の応答に与える影響を 解明することを目的とする。本稿ではとくに鉄筋の歪速度による強度増大効果に着目し,これ を合理的に評価し得る部材モデルを構築するとともに,本モデルを導入したフレーム解析プロ グラムを開発した。本解析プログラムを用いて,過去に実施された RC 柱の動的実験を解析し, 部材モデルの妥当性を確認した。続いて,6 層の RC 造純フレーム建物の外柱を含む半スパン をモデル化した平面フレームを対象に,地震応答解析を行った結果の一例を示し,鉄筋の動的 特性が建物の応答に与える効果などを示した。

キーワード:鉄筋コンクリート,鉄筋, 歪速度, 地震応答解析, ファイバーモデル

1. はじめに

従来から指摘されてきたように,地震動を受 ける構造物の応答は時間軸に依存する動的問題 であるため,仮に構造物の性能のみに着目した 場合であっても静的な力学的性能を把握するだ けでは不十分であり,動的な効果を考慮してこ れを評価する必要がある。このような観点から 構造物の動的性能を題材とする研究は、古くは 20 世紀半ばに報告され¹⁾,現在に至るまで既に 数多く実施されている^{例えば 2),3)}。しかしながら, その多くがいわゆる構造要素,すなわち部材, さらにはその材料を対象とする実験研究であり, 構造物全体を対象とする研究はその数が遥かに 少ないのが現状である。その希少な例として、 細矢らによる研究⁴⁾が近年報告されているが,単 一の試験体に対する実験が中心の研究であり, 定量的な議論、実務への応用には未だ至ってい ない。

一方,近年の数値計算機技術の目覚ましい発 達に伴い,従来から用いられてきた部材単位の 応答性状に基づくマクロな解析モデルだけでな く,部材を構成する材料単位の力学的性状に基 づく比較的ミクロなモデルを用いたフレーム解 析が現実的な存在となっている。部材の応答を 材料レベルで評価することにより,従来のモデ ルでは取扱が困難であった現象を扱うことも可 能となり,解析対象がより広範になるとともに 部材あるいは構造物の応答をより厳密に評価で きるようになった。

以上のような背景から、本研究では RC 構造を 構成する材料の動的な力学的特性が建物全体の 応答や性能に与える影響を解明することを目的 とする。本稿ではとくに鉄筋の動的な特性,具 体的には歪速度による強度増大性能に着目して 検討する。既往の研究に基づいて鉄筋の動的特 性を考慮した部材モデルを構築するとともに、 本モデルを導入したフレーム解析プログラムを 開発する。併せて,過去に実施された RC 部材の 動的性能に着目した部材実験を解析し、実験結 果を再現することによりモデルの妥当性を検証 する。続いて、上記の解析プログラムを用いて、 6層のRC造純フレーム建物の外柱を含む半スパ ンを切り出した平面フレームを対象に地震応答 解析を行った結果の一例を示す。鉄筋の動的特 性がフレームを構成する各部材,フレーム全体 の応答,破壊メカニズムなどに与える影響につ いて検討し,加えて,これら動的な効果を評価 する手法について考察する。

- *1 東京大学 生産技術研究所助手 博(工) (正会員)
- *2 東京大学 生産技術研究所助教授 工博 (正会員)

2. 鉄筋の動的特性を考慮した部材モデル

2.1 ファイバーモデル

本研究では,鉄筋の歪速度による強度上昇を フレーム解析プログラム内で合理的に評価する ため,比較的マクロに,且つ,材料の力学的性 状に基づいて部材の応答を評価するファイバー モデルを用いて,柱,梁をモデル化する。本モ デルの詳細および動的な効果を考慮しない場合 の妥当性については文献 5)を参照されたい(た だし,本研究では部材軸方向の柔性分布として パラボラ分布を仮定した)。また,本モデルを非 線形増分解析に用いる場合,部材両端に異なる 不釣合軸力が発生する問題が生じるため,文献 6)による方法を用いてこれを解除している。

2.2 鉄筋の歪速度による強度上昇を考慮し た履歴特性モデル

従来から指摘されているように,RC部材の材 料である鉄筋とコンクリートは,動的な載荷に より準静的な場合とは異なる性質を示す^{レビューの} ^{例として7)~9)}。とくに鉄筋では降伏点以降の強度に, コンクリートでは圧縮,引張強度,スケルトン カーブに大きく影響し,一般にこれらは歪速度 との相関が強いと考えられている。

そこで,本研究では既往の研究成果に基づい て,材料の動的な特性を考慮した部材のモデル 化を行う。ただし,本研究では主に曲げ破壊型 の部材を対象とするため,コンクリートの動的 性状が部材の応答に与える影響は比較的小さい と考え,鉄筋のみについて動的な性能を評価す ることとした。鋼材の歪速度による強度上昇を 評価するモデルには過去様々な評価式が提案さ れているが^{例えば10)-12)},評価精度のよいモデルを 一概に判断することは困難であることから,本 研究では比較的サンプル数が多く,且つ,鋼材 の中でも鉄筋を対象とする材料試験に基づく回 帰式である式(1)¹¹⁾を用いることとした。

| | >
$$10^{2} \mu / \text{sec } \mathcal{O}$$

d $y = (0.05 \log | |+0.90)_{s} y$
| | $10^{2} \mu / \text{sec } \mathcal{O}$
d $y = s y$ (1)

ここに, : 歪速度, _d, _y: 動的載荷時の降伏 強度, _s, ^x: 準静的載荷時の降伏強度である。

鉄筋の履歴特性モデルはバウシンガー効果を 考慮した Bilinear Modelを基準とし,以下に示す ように評価した(図-1,引張側について記述)。

弾性剛性は準静的の場合と等しいと仮定す る。降伏点を式(1)により定義し,現ステ ップの応力度がこれを上回るときルール に移動する。

降伏後の剛性は弾性時の 1/1000 と仮定する。 降伏後は歪度増分により履歴モデル上の位 置を判断し,増分歪度が正のとき現ステップ の応力度は歪度と瞬間の歪速度から式(2) により評価する。増分歪度が負のときはルー ル に移動する。

除荷剛性は弾性剛性と等しいと仮定する。現 ステップの歪度が除荷時歪度を上回るとき はルール に,軟化開始歪度を下回るときは ルール にそれぞれ移動する。

軟化域では負側の最大点(降伏していない場 合は降伏点)を指向する。最大点(あるいは 降伏点)到達後はルール 以降を準用する。 再除荷の場合はルール 以降を準用する。

i= d y+(E_s/1000)(i - d y) (2)
 ここに, i:現ステップの応力度,E_s:弾性
 係数, i:現ステップの歪度,d y:動的載荷時の降伏歪度である。



ここに, u:除荷時歪度, B:軟化開始歪度, t:負側の目標歪度, :軟化点の定義(本研 究では =0.5 と仮定した)である。

図 - 1 鉄筋の履歴特性モデル

2.3 解析モデルの検証

前節までに示した解析モデルを用い,過去に 実施された材料の動的性能に着目した RC 柱の 静的および動的加力実験¹¹⁾を解析し,モデルの 妥当性について検討する。

実験で用いられた試験体の諸元を表 - 1 に文 献 11)より転載して示す。本実験では 2 つの同一 試験体に対し 2 種類の加力方法(静的と動的) が計画された。加力スケジュールを図 - 2 に示 す。静的加力では図 - 2 中の \tilde{V} が 0.01 cm/sec, 動的加力では 10 cm/sec(実験結果による主筋の 歪速度は概ね $10^5 \mu$ /sec 以内)となるように制御 された。試験体詳細,材料試験結果,加力装置, 計測方法などについては同文献を参照されたい。

表 - 1 試験体諸元 (文献 11)より転載)

試験体名	SSC-5	SDC-5
項目	静的加力	動的加力
柱幅[b]x柱成[D] (mm)	250 x 250	
柱高さ[h] (mm)	650	
主筋 [SD345]	16-D16	
Pg (%)	5.094	
Pt (%)	1.592	
フーフ 筋 [SD295A]	4-D6 @50	
Pw (%)	1.024	
シ7スパン比 (M/QD)	1.30	
軸力[N] (tf)	5.2 (1	n =0. 023)
せん断余裕度*	1.	31
目標平均層間変形速度 (cm/sec)	0.01	10.0

* 田け町刀: 建築センダー式 [式(b-3e)] っによる計算値 せん断耐力: 終局強度型耐震設計指針のA法による計算値 材料強度:静的載荷材料試験値



図 - 2 加力スケジュール(文献 11)より転載)

実験結果より,静的加力,動的加力ともに, 試験体は曲げ降伏(図-2より,1回目の+1/50 サイクル)先行型のせん断破壊(図-2より, ±1/25 サイクル以降)であった。また,表-1 から,本試験体は比較的せん断スパン比が小さ いため,試験体性能に与えるせん断挙動の影響 は大きい。よって,本章で対象とするような曲 げ挙動を扱う解析モデルの検証実験として,本 実験のすべての加力過程を適用することは不適 当である判断し,曲げ降伏後に部材耐力が低下 し始めるまで,すなわち±1/50 サイクル(図-2)までを比較対象とした。

また,上記と同一の理由により,試験体をモ デル化する際に非線形のせん断バネを配置した。 せん断バネの復元力特性モデルは原点指向型モ デルとし,ひび割れによる非線形性のみを考慮 した。ただし,ひび割れ後のせん断剛性は静的 加力実験の結果に基づいて評価することとし、 具体的には,はじめに静的実験の試験体をせん 断バネの2次剛性をパラメータとして解析し, 実験と解析から得られる曲げ降伏時の降伏変形 が一致するようにこれを決定した。図 - 3 (a) には,静的実験のせん断力と変形角の関係を, 以上の条件下における解析結果と比較して示す。 ただし,同図中の曲げ降伏点について,解析で は初めて曲げ降伏した点と定義したが,実験で は同一の定義による降伏点が不明であったため、 文献 11)に記載の正側と負側の曲げ降伏耐力の 平均値に対応する履歴曲線上の点である。

図 - 3(b)に静的解析と同じモデルを用い て動的実験を解析した結果を示す。解析結果は 実験より得られた最大耐力(解析:正側386.5kN, 負側380.8kN,実験:正側386.3kN,負側358.4kN) をとくに正側で精度よく評価しており(負側の 約5%の誤差は入手できた実験データのみから 原因を特定することが困難と判断した),静的実 験に対する最大耐力増大率(解析:正側1.13倍, 負側1.13倍,実験:正側1.12倍,負側1.13倍) もよく再現している。曲げ降伏点がやや大きく 異なるのは前述した降伏点の定義の違いに起因 するもので,本稿では紙面の都合上割愛したが 文献 11)中のグラフ上のアナログデータと目視 により比較する限り大きく異なってはいない。 履歴形状に着目すると,静的,動的実験の解析 ともに,仮定したせん断に対する履歴モデルの 特性から曲げ降伏後のスリップ性状を評価でき ていない。しかし,以下の解析では曲げ部材の みを対象とすることから,本モデルにより部材 の動的性能を概ね評価可能であると判断する。



3. 解析対象フレーム

3.1 研究対象建物および解析対象フレーム 本研究で対象とする建物は文献 13)の設計例 として記載された6層のRC造建物である(以下, 研究対象建物)。図 - 4にその基準階伏図を示す。 その他詳細については同文献を参照されたい。 解析対象とするフレームは,研究対象建物から Y₁通りフレーム内 X₁-X₂スパンの外側半スパン (図 - 4の太枠部分)を切り出した図 - 5(a) に示す平面フレームである(以下,解析対象フ レーム)。解析対象としてフレームを部分的に切 り出した理由については次節にて詳述する。



3.2 モデル化方法

図 - 5 (b)に解析対象フレームのモデル化 方法を図示する。柱,梁を前章で検証した解析 モデルによりモデル化した。ここで,本モデル 化方法と関連して解析対象フレームの選定理由 を解説する。ファイバーモデルでは部材せいの 方向に物理的な長さを考慮して部材をモデル化 するため,RC部材の塑性域での軸方向変形を評 価することが可能となる⁵⁾。とくに梁はその両端 が柱により拘束されているため,伸びに伴って 軸力が生じ,結果,曲げ耐力の増大を始めとす る諸々の効果が評価されることとなる。本来こ れらの現象は評価されて然るべきであるが,本 研究では対象を材料の動的効果に限定して現象 をよりわかりやすく記述するため,梁の伸びに 起因する一連の現象が生じないように部分的に 切り出したフレームを解析対象とした。図 - 6 に部材断面のファイバー要素の配置方法を示す。 その他,スラブのモデル化は行わず,柱梁接合 部は剛域とし,各階の質量は柱梁接合部の節点 に集中させ,1階柱脚は固定端として扱った。

 鉄筋を端部と中央にまとめる かぶり要素
 コア 3 分割
 3 分割
 サカ
 鉄筋要素 設計断面 コンクリート要素
 かぶり要素とコア要素の履歴特性は同一と仮定した
 図 - 6 ファイバー要素の配置方法

3.3 Pushover 解析による性能評価

外力分布として設計時と同様に震度逆三角形 分布を仮定し, Pushover 解析を行い,解析対象 フレームの静的な性能を評価した。図-7にフ レームの正,負それぞれの方向(図-5(b)) のベースシア係数と全体変形角の関係を,その 破壊過程とともに示す。解析対象フレームは建 物最外縁半スパンであり,柱に変動軸力が作用 するため,加力方向により性能が大きく異なる。



4. 鉄筋の動的特性がフレームの動的応答に 与える影響

4.1 解析方法

前章の解析対象フレームについて地震応答解 析を行った。鉄筋の動的特性がフレームの応答 結果に与える影響を示すため,これを考慮する 解析と考慮しない解析の2通りの解析を行った。 数値積分法には平均加速度法を用い,積分時間 刻みは0.002秒とした。減衰は瞬間剛性比例型と し,弾性1次モード(固有値解析より得られた1 次固有周期:0.54sec)に対して3%を仮定した。

4.2 入力地震動

本稿では紙面の都合上,1995年兵庫県南部地 震のJR 鷹取駅の記録(NS成分,30~40秒)¹⁴⁾ を最大速度75cm/secに基準化して入力した場合 の結果のみを報告する。

4.3 解析結果

図 - 8に鉄筋の動的特性を考慮する場合と考 慮しない場合のそれぞれについて,各階の応答 変位の時刻歴を示す。動的特性を考慮する解析 では,最大応答変位が考慮しない解析に比べて わずかに小さい。これは鉄筋の歪速度による強 度上昇により建物の耐力が増大したためである。 また,建物は全解析区間を通じて概ね1次モー ドで振動している。



図 - 9には鉄筋の動的特性を考慮する場合に ついて,各階梁の接合部側(図-5)の危険断 面における上端筋の歪速度の時刻歴を,各階の 直下階に対する相対速度(各階の層間変位の増 加率に相当)の時刻歴と比較して示す。ただし, 同図中の歪速度は比較のため圧縮側を正とした。 解析から得られた各階の引張側(負側)最大歪 速度は 0.07~0.10 1/sec であった。この歪速度に 対応する式(1)から得られる鉄筋の強度増大 率は 1.14~1.15 であり, 鉄筋の動的特性を考慮 する解析から得られた各階梁の最大曲げ耐力の 考慮しない解析結果に対する比とほぼ一致した。 この値は梁に作用するせん断力の増大率,柱に 作用する変動軸力の増大率とも一致する。一方, ・・・・・・

・・

・・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・
・

・

・

・

・

・
・

・

・

・
・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・

・
・

・

・

・

・

・

・

・ 層間変位増加率の時刻歴波形と近似している。 この結果は,本解析例のように梁降伏機構を形 成する系の1次モードが卓越する場合には,梁 の耐力, せん断力, 柱の変動軸力の増大率が振 動する系の応答速度などから推定し得る可能性 を示唆している。また,1階柱には,梁同様の曲 げ耐力増大,梁からの変動軸力増大などの効果 により 鉄筋の動的特性を考慮することで約1.12 倍の最大せん断力が作用する結果となった。



6. まとめ

鉄筋の歪速度による強度増大効果に着目し, これを合理的に評価し得る部材モデルを用いて フレーム解析プログラムを開発した。過去に実 施された RC 柱の動的実験を解析的に再現する ことにより本研究で用いた部材モデルの妥当性 を検証した。6層の RC 造純フレーム建物の解析 例を示し,鉄筋の強度上昇が建物の応答に与え る影響,その評価法の実現性について指摘した。 謝辞

本研究では,解析モデル検証のため引用した RC 部材実験の結果を㈱奥村組技術研究所細矢博博士 よりデジタルデータとして提供いただきました。 ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 勝田千利:高速荷重に對する鐵筋コンクリート材の耐力に關する研究,建築學會大會論文集,pp.210-218,1940.4
- 2) 竹田仁一, 立川博之: 高速荷重をうける鉄筋 コンクリート梁の力学的諸性質,日本建築学 会論文報告集号外, p.314, 1967.10
- Bertero, V. V., Rea, D., Mahin, S. and Atalay, M. B.: Rate of Loading Effects on Uncracked and Repaired Reinforced Concrete Members, Proceedings, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, pp.1461-1470, Apr. 1974
- 4) 細矢博,北嶋圭二,小駒勲,中埜良昭,岡田 恒男:地震時に鉄筋コンクリート造建築物の 部材に生じるひずみ速度とその影響に関する 研究,日本建築学会構造系論文集,No.499, pp.77-83,1997.9
- 5) 真田靖士,壁谷澤寿海:梁の軸方向変形を考 慮した鉄筋コンクリート造建物の応答に関す る研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.37-42,1998.6
- 6) Li, K. and Kubo, T.: Reviewing the Multi-Spring Model and Fiber Model,第10回日本地震工学 シンポジウム, Vol.2, pp.2369-2374, 1998.11
- 7) 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
- Krawinkler, H.: State-of-the Art Report Scale Effects in Static and Dynamic Model Testing of Structures, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol., pp.865-876, Aug. 1988
- Fu, H. C., Erki, M. A. and Seckin, M.: Review of Effects of Loading Rate on Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.12, pp.3660-3679, Dec. 1991
- 10) 藤本盛久,難波恒夫,中込忠男,佐々木聡: 地震力を受ける単一山形鋼筋かいの高速引張 実験地震時の衝撃的過荷重による鋼筋かいの 破断に関する実験的研究その1,日本建築学会 構造系論文報告集,No.389,pp.32-41,1988.7
 11) 細矢博,岡田恒男,北川良和,中埜良昭,隈
- 細矢博,岡田恒男,北川良和,中埜良昭,隈 澤文俊:ひずみ速度の影響を考慮したファイ バーモデルによる鉄筋コンクリート部材の断 面解析,日本建築学会構造系論文集,No.482, pp.83-92,1996.4
- 12) Yamada, S., Yamaguchi, M. and Wada, A .: Study Experimental on the Hysteresis Characteristic of the Low Yield Strength Steel Considered Strain Rate Dependence, in Proceedings of the Fourth Forum on Implications of Recent Earthquakes on Seismic Risk, pp.181-188, May 2002
- 13) 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,1990.11
- 14) 中村豊,上半文昭,井上英司:1995年兵庫県 南部地震の地震動記録波形と分析(),JR地 震情報 No.23d,財団法人鉄道総合技術研究所 ユレダス開発推進部,1996.3