部分的に実験を取り入れた静的弾塑性実験解析システムの開発

A HYBRID AND PARALLEL STATIC ELASTO-PLASTIC STRESS ANALYSIS COMBINED WITH PARTIAL ACTUAL EXPERIMENT

市橋重勝(1) 和田 章(2) 西尾博人(3) 軍司雅弘(4)
ICHIHASHI Shigekatu , WADA Akira , NISHIO Hiroto and GUNJI Masahiro

SUMMARY

It is necessary to evaluate the model about the material characters with acting forces for each members in the structures when the structural behaviors for the structures would be required by using the structural analysis. However, it is quite difficult to evaluate such models for each members exactly. In this paper, the object and summary about a developed hybrid structral analisis system by using two computer systems and effective loading system with actual experiments partially for members, that material characters would not be evaluated, are described. The static structural analysis was performed for the steel plane frames which had 2 spans and 3 floors for the example to consider the verification of this system by using this system. Secondly, the method used in this system and the procedure to evaluate the external forces to act the plane frame are described.Lastly, the reasonable results and considerations for the complex behaviors of steel frames gotton by using this system are discribed.

Key Words: Plane Steel Frame,Load-Displacement Relationship,On Line Experiment
Nonlinear Structural Analysis,Stepping Motor

1. 序

骨組の構造解析を行う場合、部材に生じる様々な力学的性質を数学的モデルに置換する必要がある。しかし、軸力変動の大きな柱や複雑な接合部等の部分も含めて構造物全体の力学的性質を正しく数学的モデルに置換することは難しい。モデル化できたとしても非常に複雑なモデルを仮定しなければならないこともある。また、従来、部材実験に行う際に用いられていた荷重条件は、その大きさ・分布・載荷履歴ともに構造物全体の挙動と関係づけることは難しく、周囲の部材より生じる複雑な部材の挙動を再現したものにすることはできなかった。本研究ではこのように数学的モデルに置換しにくい部材の力学的性質を実際の実験結果より求め、それを構造解析を行っているコンピュータに取り込み、実験と構造解析の双方の境界部分の力の釣合と変位の適合を満足させるように制御しながら、骨組全体の構造解析と実験を同時に行う実験解析システムの開発を行った。実験と解析を組み合わせたオンライン実験は数多く[1),2)]行われているが、単純な構造物を対象としている場合が多い。ここでは、図－1に示すような3層2スパンの鋼構造骨組を例題に、静的解析であるが部分構造法[3)]を用いて、実験を行う部材（以後、実験部材という）を軸力変動の大きな左側の柱として、3台の電動ジャッキを用いてシステムの検証を行った。

2. 実験解析システムの概要

図－2に実験解析システムの流れを示す。実験部材の各荷重ステップ毎の3×3の剛性マトリックスを評価することはできない。そのため実験部材には弾性の剛性マトリックスを用い、与えられた荷重に対し構造物全体の構造解析[4)]を行い、変位と材端力を求め、3台の電動ジャッキにより実験部材柱頭部分に水平変位、回転角と鉛直方向力を与え、その時に生じる柱頭部分の水平力と曲げモーメン

（1）（株）構造計画研究所 〒164 東京都 中野区 本町4-38-13
（2）東京工業大学工業材料研究所 教授（3）大成建設（株）構造設計部（4）日本工業大学研究生

トをロードセルにより測定し、その値を用いて構造物全体の解析に用いた荷重との差を修正荷重として、再び構造解析を行い修正変位を求める。これを繰り返し、修正変位がほぼ零になるまで収束計算を行う。収束が終了後、次の荷重ステップに進む。ここで、鉛直方向については、構造解析より求まった鉛直変位を実験部材に与え、その時の鉛直方向の力を測定して構造解析に反映すべきであるが鉛直方向の変位は変形が微小で制御が難しいため、鉛直方向の力を実験部材にそのまま与えることにした。

3. システムの構成

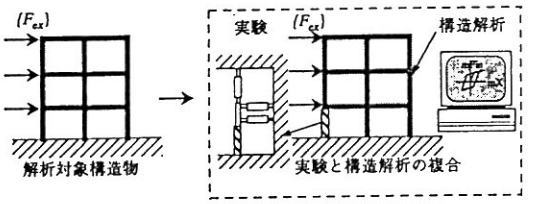
実験解析システムの構成を図－3に示す。実験解析システムは構造解析用と計測・制御用の２台のコンピュータと加力装置から構成される。使用する加力装置は、構造解析で求まった節点の変位を実験部材に正確に与えるものでなければならない。従来から多く使用されている油圧式ジャッキでは高精度の変位制御は難しい。ここでは、パルス信号が入力されるごとに正確に一定角度づつ回転し、その角度の誤差の累積が無いステッピング・モーターを加力源とした電動ジャッキを３台制作し、用いた。

4. 実験解析システムのプログラム

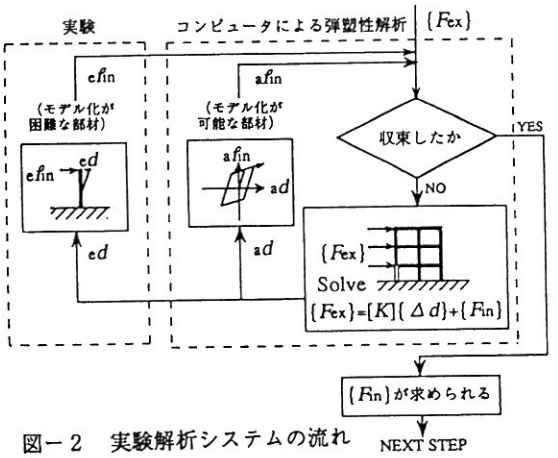
実験解析システムで使用するプログラムのフロー・チャートを図－4に示す。右側は構造解析用プログラムのフロー・チャート、左側は計測・制御用プログラムのフロー．チャートである。図中の太線はRS232Cによるデータの通信を示す。構造解析用コンピュータから送信するデータは解析結果である実験部材柱頭の変位データと実験制御コマンドである。このことにより試験体の測定や各種データの送受信を全て自動で行うことができる。計測・制御用コンピュータから送信されるデータは実験部材柱頭の反力データである。

5. 解析手法

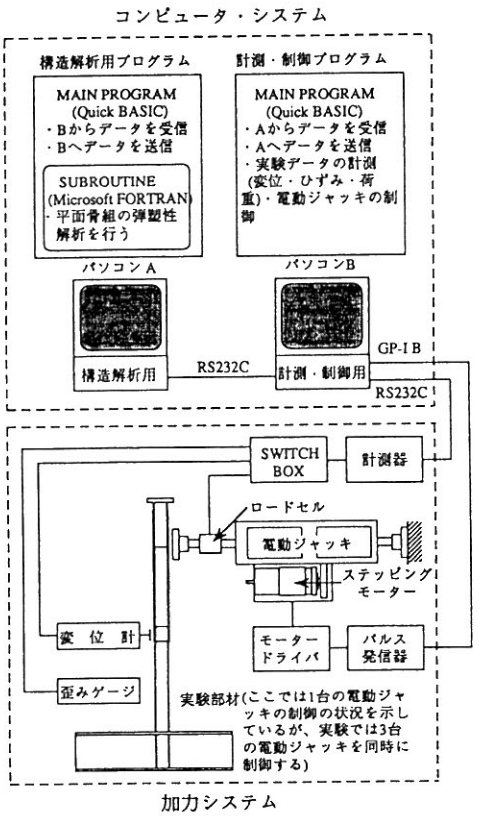
ここで用いるシステムでは、材端力が実験より求められる部材と構造解析から求められる部材から全体構造が構成される。正しく非線形解析を行うためには、各部材間の力の釣合、変形の適合、境界条件を満足させながら実験解析を進めなければならない。境界部分の節点におい



図－１　実験解析システムの概念図



図－２　実験解析システムの流れ



図－３　実験解析システムの構成

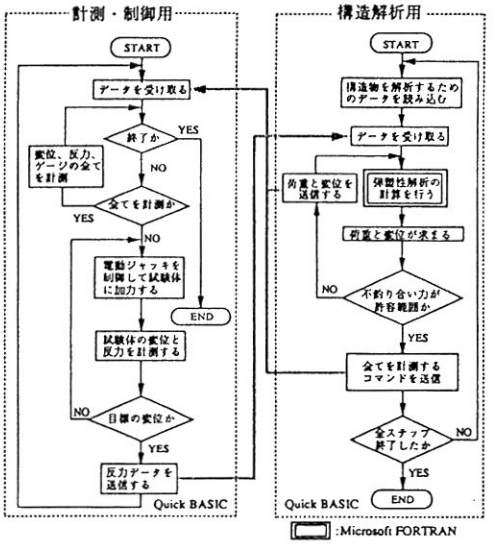
て実験部材の材端力と解析より求まる部材の材端力の総和が零になるまで実験と解析の間でデータの送受信を繰り返し、電動ジャッキを制御することによって収束計算を行なう。実験部材に与える変位を求める場合、実験部材を含めた骨組の構造解析を行う必要があるが、塑性化した実験部材の剛性を個材剛性マトリックスの形で取り出すことはできないので、この部材の剛性マトリックスを仮定しなければならない。仮定する剛性マトリックスが実験部材の剛性よりも低いと全体剛性も過小評価することになるため修正変位を過大に評価してしまうことになる。ここでは必ず高目の剛性を評価するため実験部材の仮定個材剛性マトリックスとして、初期の弾性個材剛性マトリックスを用いることとした。

6．実験解析対象構造物と試験体

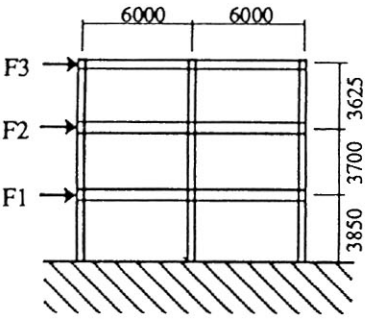
実験解析の対象構造物として、図－5に示すような3層2スパンの純ラーメン鋼構造骨組を用いた。実験部材として骨組の左側1階の柱を取り出した。実験部材の形状を図－6に示す。実験部材の縮尺は加力装置の性能、大きさ等を考慮して実大の1/10とし、構造解析を行う解析モデルも実験部材とスケールを合わせ実大の1/10とした。システムの検証を行うことを目的とするため、対象とする構造物は構造解析によってもその挙動をある程度明らかにできる鋼構造骨組とした。実験部材の上部に、電動ジャッキで載荷するための部分（載荷部分）を設けた。載荷部分は、加力を行っても変形が生じにくいようにするため、フランジにカバー・プレートを溶接し載荷部分の剛性を高めた。実験装置と実験部材を写真－1に示す。実験部材の柱頭に軸力、せん断力、曲げモーメントが自由な組み合わせで与えられるように電動ジャッキを3台（水平2台、鉛直1台）取付けた。電動ジャッキは重量が約80kgと重いため、実験部材とロードセルに不要な力が作用しないように、4本の柔らかいバネで支持し、宙に浮いた状態にした。

7．外力データ

このシステムでは任意の外力または変位に対して解析を行うことができることから、以下に示す方法であらかじめ計算した時々刻々変化する地震動による水平力を載荷することにした。
(1)フレーム・モデルに水平力を静的に作用させ、

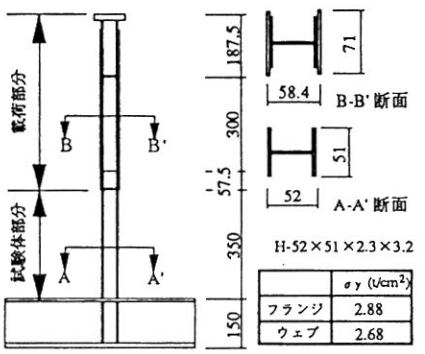


図－4　システム全体のフロー・チャート



柱	H-520×510×23×32
梁(1,2層)	H-700×300×12.5×19
梁(3層)	H-650×300×12.5×19

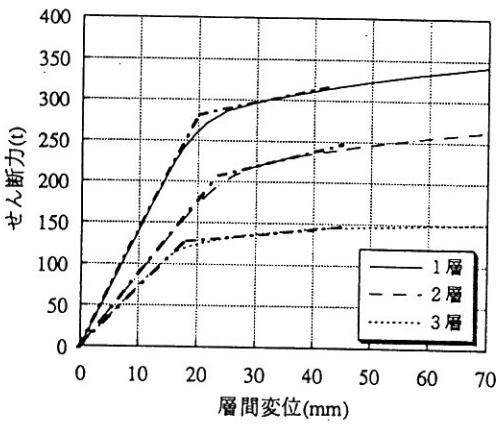
図－5　解析モデル



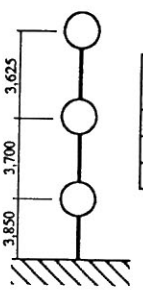
図－6　実験部材

図－7に示すように各層の層せん断力－層間変位関係を求める。(2)フレーム・モデルを図－8に示すバネ・マス系のモデルに置き換える。(3)このモデルを用いて、El Centro 1940 NS成分の地震動を入力し振動解析を行う。尚、入力は最大加速度を450cm/s^{2}に拡大している。(4)その結果得られた各層の層せん断力から上の層の層せん断力を引くことにより各床位置に与える水平力の時刻歴を求める。

この水平力の時刻歴を用いて荷重制御実験を行った。同じ方法で各床位置の変位の時刻歴を求め変位制御の実験も行った。尚、実験解析は実大の1/10の縮小モデルを用いているため地震外力は相似則に従い、荷重制御では1/100、変位制御では1/10にした。各層に与える外力データ（荷重制御）を図－9に示す。応答解析に用いた時間刻みに合わせて0.01秒刻みで実験解析を進めた。使用した外力データは初期の値の小さな部分は省略し、1.2から5秒までの約380個を用いた。

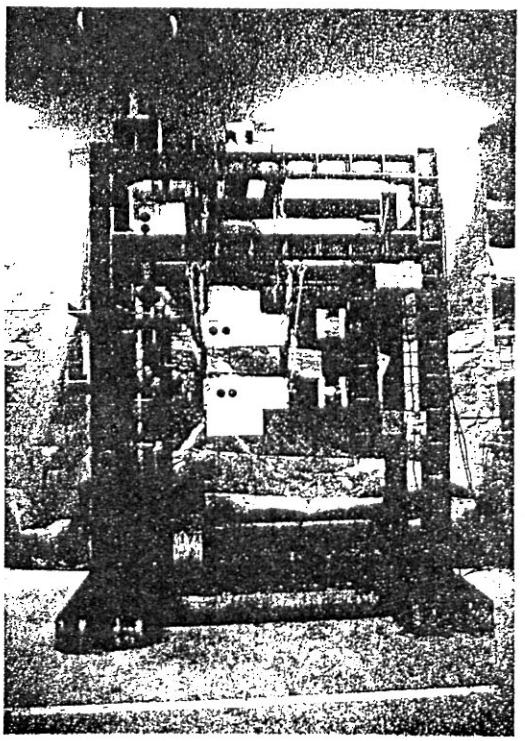


図－７　骨組の層せん断力－層間変位関係

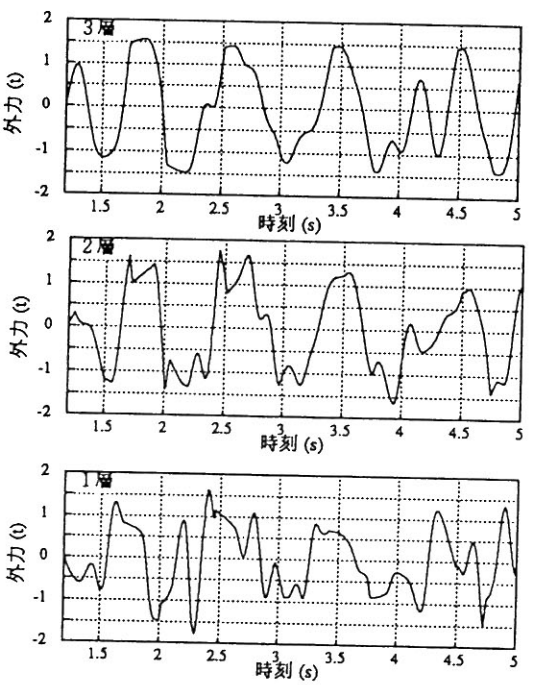


層	質量 (t)	一次剛性 (t/cm)	二次剛性 (t/cm)	曲げ剛性 (t-cm²)	降伏せん断力 (t)
3	209.76	72.83	10.71	6.98×10^{11}	129
2	272.04	87.90	11.89	6.98×10^{11}	129
1	272.04	139.26	11.84	6.98×10^{11}	129

図－８　バネ・マス系モデル



写真－１　加力フレームと実験部材

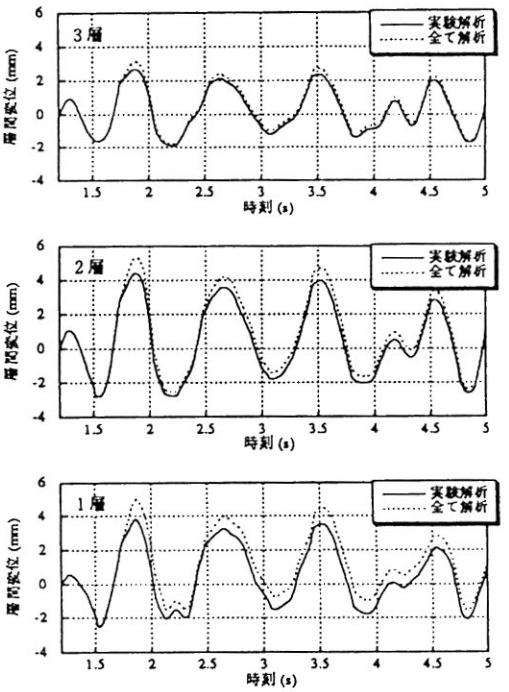


図－９　各層に与える外力（荷重制御）

8．実験解析の結果と考察

8.1　層間変位と層せん断力の時刻歴

図－10に荷重制御による各層の層間変位の時刻歴を示し、図－11に変位制御による各層の層せん断力の時刻歴を示す。実線が実験解析の結果であり、点線は全て解析だけで得た結果である。荷重制御において全部材が弾性範囲内であるt=1.7秒まで両者の結果は一致している。一部の部材が降伏すると全て解析だけで得られた層間変位の時刻歴に比べ実験解析結果のそれは小さくなっている。この原因は、解析モデルに用いた降伏後の二次勾配が実験部材に用いた鋼材の応力－歪関係より低目の設定であったことによると考られる。変位制御では、実験解析の結果得られた層せん断力の時刻歴は全て解析だけで求めた結果とほぼ一致している。変位制御と荷重制御の結果を比較すると変位制御による実験解析結果と全て解析だけの結果の差は荷重制御の場合に比べ小さい。この理由として骨組が塑性化しているため、変位制御での変位の変化によるせん断力への影響は荷重制御での荷重の変化による変位への影響より小さいからであると考えられる。



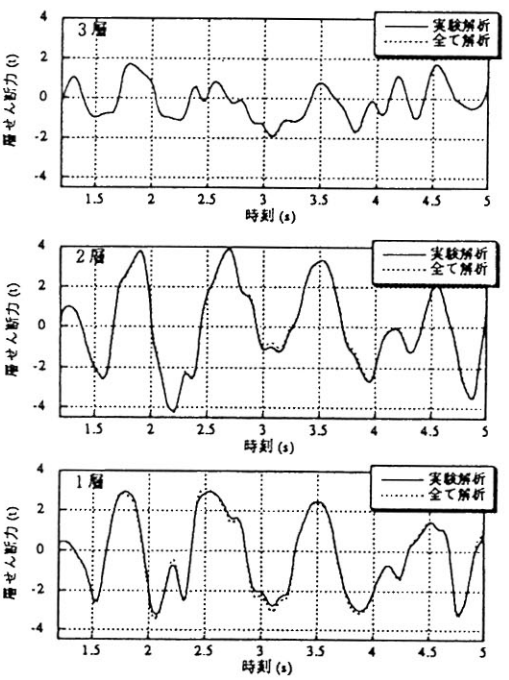
図－１０　層間変位の時刻歴（荷重制御）

8.2　層せん断力－層間変位関係

層せん断力－層間変位関係に関し、図－12に荷重制御の結果を示し、図－13に変位制御の結果を示す。実線は実験解析の結果であり、点線は全て解析だけの結果である。両者を比べると8.1で述べたように、ここでも実験解析の方が全て解析だけで解析した時より層間変位が小さい。また、実験解析と全て解析だけの結果の差異を比べると荷重制御に比べ変位制御の方が小さい。この理由も8.1で述べた理由と同じであると考えられる。

8.3　試験体部分のモーメントの反曲点位置の時刻歴

荷重制御により得られた実験部材に生じた曲げモーメントの反曲点位置の時刻歴を図－14に示す。実線は、実験解析の結果であり、点線は全て解析だけで求めたものである。破線は外力分布を一定とした静的解析の曲げモーメントの反曲点位置を示す。破線で示すように外力分布が一定の場合の反曲点位置は骨組が弾性から塑性に入った後もほぼ一定であるが、実験解析の結



図－１１　層せん断力の時刻歴（変位制御）

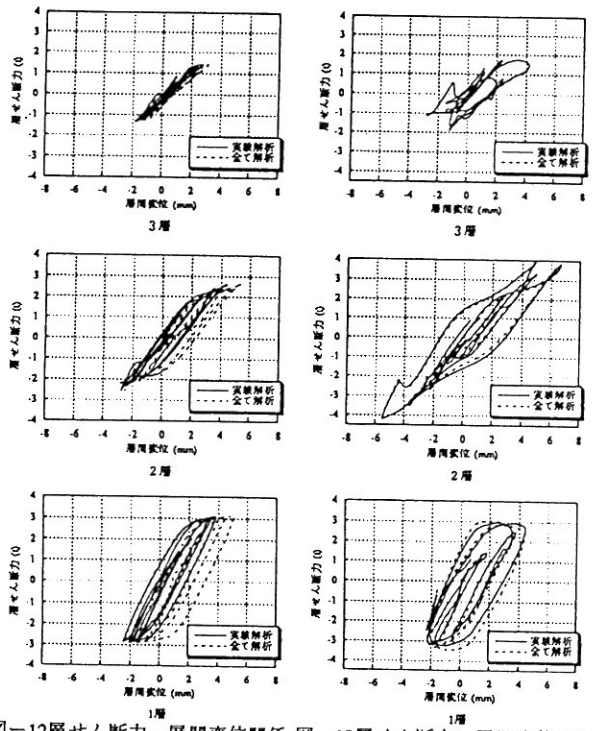
果に示すように、外力分布が複雑に変化すると、図－14に示すように反曲点の位置も複雑に変化することがわかる。このように反曲点位置が変化する複雑な挙動に対しても、その影響を考慮して骨組全体の実験解析が可能であることがわかる。

8.4　試験体部分の軸力－せん断力関係

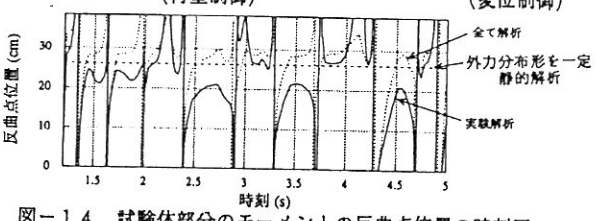
図－15に荷重制御により得られた実験部材の軸力とせん断力の関係を示す。実線は実験解析の結果であり、点線は全て解析だけで求めたものである。破線は外力分布を一定とした静的解析の軸力とせん断力の関係を示す。従来から行われている柱の部材実験においては、軸力を制御して加力を行なう場合、この直線を目標にするような制御しかできないが、この実験解析では、複雑に変化する軸力とせん断力を実験部材に与えることができることがわかる。

9. まとめ

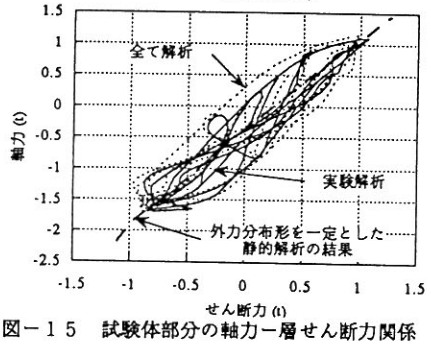
力学的性質のモデル化が難しい部材はその性質を実験により求め、これをその他の数学的モデルで組立てられた構造解析の中に取り込み、双方の境界部分の力の釣合と変形の適合を満足させるようにしながら非線形構造解析を進めるシステムの開発を行った。構造解析用と実験を制御する計測・制御用の２台のコンピュータとステッピングモーターを加力源にした３台の電動ジャッキを有する加力装置を組み合わて３層２スパンの鋼構造骨組を例題にシステムの検証を行った。この論文によって、このシステムの有用性を示すことができたと考える。今後、電動ジャッキを高速に制御できるように改良する必要があるが、実験を行なう必要のあるいくつかの部材を並列的に実験し、他の部分の構造解析と組み合わせることにより、骨組全体を一つの大きな実験部材としなくても、骨組全体の挙動を調べることのできるシステムに発展できると考える。



図－12層せん断力－層間変位関係　図－13層せん断力－層間変位関係



図－１４　試験体部分のモーメントの反曲点位置の時刻歴



図－１５　試験体部分の軸力－層せん断力関係
(荷重制御)

参考文献

1)　伯野元彦,四俵正俊:計算機により制御されたはりの動的破壊実験,土木学会論文報告集, No.171, pp.1-9,1969、2)　高梨晃一,宇田川邦明,関松太郎,岡田恒男,田中　尚:電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析,日本建築学会論文報告集, No.229, pp.77-83, 1980、3)　中島正愛,石田雅利,安藤和博:サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法,日本建築学会構造系論文報告集, No.417, pp. 107-117,1990、4)　藤本盛久,和田　章,白方和彦,小杉　立:筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性解析に関する研究,日本建築学会論文報告集, No.209, pp. 41-51,1973

［謝辞］東京工業大学教授・林静雄先生、同大学助手・香取慶一氏ならびに神奈川大学助手・向秀元氏には、本研究全般に渡る御教示に対し深謝致します。また、電動ジャッキの製作に関してTHK株式会社・根岸浩氏に感謝の意を表します。