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

(その 1: システムの内容)

正 会 員	高	梨	晃	— ^{*1}
同	宇	田	川	邦 明 ^{*2}
同	関		松	太 郎 ^{*3}
同	岡	田	恒	男 ^{*4}
同	田	中		尚 ^{*5}

§1 序

構造物の地震動による弾塑性応答を調べるには、通常構造物の復元力特性を数式でモデル化し、計算機により数値解析を行っている。構造物の復元力特性をモデル化するには、その構成要素である部材の力学的特性を正確に把握する必要があり、そのため部材の復元力特性に関する研究が現在までに多くなされ、静的な外力に対しては相当な知識がある。しかし地震のように不規則に変動し、しかも繰り返し作用する外力に対する部材の特性については未だ十分な資料が得られていないのが現状である。

このため、筆者らは現在まで構造物の部材のうちでは、柱に注目し繰り返し載荷時の復元力特性について実験的研究^{1)~4)}を続け、荷重変形関係を骨組の振動解析に必要な数式モデルに表わすことができるか、またその関係が座屈などの不安定現象によってどのような影響をうけるかを明らかにして来た。しかしながら実部材の復元力特性は複雑で、それをそのまま計算に用いることは困難であるから、できるだけ簡単で、しかも特性を失わないモデル化が必要であり、そのためいろいろな試みがなされているが⁵⁾、単純化されたモデルを用いた応答解析の結果が、果して実際の応答をどの程度表現し得るかどうかは未だ確かめられていない。そして構造体の性質によっては、簡単なモデル化による応答計算では、実際の応答と大きく異なる結果になることも十分予想される。

数式モデルによる応答の妥当性を確かめる手段の一つに構造物を直接振動台に設置して振動実験を行う方法がある。これは振動台の大きさや加振の動力に制約がある

から試験体は小型模型になる場合が多く、相似則を満足させる試験体の製作や測定技術などに制約が生じ、実験がかなり困難であることはよく知られている。またこれを解決するためには、できるだけ大きな振動台の作製が要求されているが⁶⁾、経済的理由などで実現には困難であるのが現状である。

そこで筆者らは部材実験で求めたモデル化された復元力特性がどこまで建物の応答計算に適応できるかを検討するために、また同時に復元力特性の数式モデル化ではどうしても説明できないような構造物の実際の応答過程をできるだけ忠実に追跡できる方法として、振動台実験における難点を補い骨組の実挙動に即して振動解析を行うため、入出力データ解析処理装置（小型計算機および周辺機器）と動的破壊試験装置をオンラインで結んだ実験システム⁷⁾を開発した。これは文献 7), 9)~11)にも記してあるように振動解析のとき、通常行なうような骨組の復元力特性のモデル化は一切行わず、計算システムの中に骨組あるいは部材の加力実験を組み込み、計算機によるコントロールによって計算と実験とを同時に遂行し、刻々変化する復元力特性をその都度計算の中にとり込んで骨組の応答を計算しようとする計算機と試験機をオンラインで結んだシステムである。そしてこのシステムを用いて鉄骨造および鉄筋コンクリート造建物の地震応答解析を行った⁸⁾。

このシステムは Analogue 計算機と小型加振機をオンラインで結んで片持ばりの実験を行った伯野博士等の試み⁹⁾を参考にして開発されたものであるが、Digital 計算機と電気油圧式 Actuator とをオンラインで結合することにより、伯野博士等の試みをさらに発展させることができた。また、本システムと同様なシステムを用いて、クイ—上部構造連成系構造物の振動特性を求める試みが最近なされたことが報告されている^{10), 11)}。文献 7)

*1 東京大学・生産技術研究所 助教授 工博

*2 同 助手 工修 *3 同 助手

*4 同 助教授 工博 *5 同 教授 工博

(昭和 49 年 12 月 4 日日本稿受理。討論期限昭和 50 年 6 月末日)

においても既に述べた様にこのシステムは振動台による振動実験の難点を補う方法としても今後十分期待できる方法であると思われるので、今回はそのオンラインシステムの詳細について報告する。なお、本システムを用いた解析例の結果については別に報告する予定である。

§2 電算機—試験機オンラインシステムの特徴

今回開発したシステムの特徴は次のようである。

1. 想定した骨組の振動実験を行わなくてもその骨組の1部あるいはそれを構成する弾塑性部材の加力実験を行うことにより想定骨組の実際の応答結果が得られる。したがって復元力を知るための試験体としては、実物に近い断面のものが使用でき、その崩壊に到る過程は実物のそれとほぼ同じものが再現できる。
2. 試験体は部材または骨組の1部であるから、それらの弾塑性性状に関する詳細なデータが得られる。
3. 鉛直荷重により部材に作用する軸力やモーメントを適当に調整することによって種々の骨組を想定出来る。
4. 骨組全体とそれを構成する部材または骨組の1部の挙動が一对一で対応付けられ、両者の崩壊への過程が関連付けられる。
5. 実地震のような短い時間、即ち実時間で実験を行う必要がなく、適当な時間刻みによる step by step の計算を行うことによって崩壊に到る過程がゆっくり観察出来、諸機器によるデータの収集も容易である。幸いなことに建物の地震応答程度の速度では応力—歪関係が静的試験によるものとほとんど差がないことが報告¹²⁾されているので、実験での時間軸の拡大は解析精度にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

§3 計算機と動的破壊試験装置をオンラインで結んだシステム

3.1 はじめに

構造物が地動を受け、その応答量を step by step に計算する場合の振動方程式は、その建物の速度に比例する減衰および質量を一定とすると下式のようなになる。

$$m\Delta\ddot{x}^{(i)} + c\Delta\dot{x}^{(i)} + k^{(i)}\Delta x^{(i)} = -m\Delta\ddot{x}_0^{(i)} \dots\dots(1)$$

ここに m : 質量マトリックス

c : 減衰マトリックス

$k^{(i)}$: i ステップの建物の剛性マトリックス

$\Delta x^{(i)}$: i ステップの応答変位増分マトリックス

$\Delta\ddot{x}_0^{(i)}$: ステップの地動加速度増分マトリックス

式(1)において m および c を一定と仮定したので応答計算の各ステップで常にそれらの量は変らないが、弾塑性骨組の剛性 $k^{(i)}$ は時間と共に刻々変化する量である。従ってこの変化する剛性が正確に把握出来なければ地震動を受けた骨組の応答量も正確に得ることは出来ない。そこでこの刻々変化する骨組の剛性 $k^{(i)}$ をできる

だけ骨組の実際の挙動に即して求め、構造物の弾塑性応答を調べるシステムを開発した。

筆者らの採用した方法は、骨組を想定して応答計算を行う際に、あるステップの骨組あるいは部材の変形状態を動的破壊試験装置上の試験体に再現して、応答変位と測定された反力により骨組あるいは部材剛性を求め、その値から想定骨組の剛性を計算して次のステップの入力に対する応答計算に用いるもので、この操作を時間間隔をこまかく分割して step by step で繰り返し計算する方法である。応答計算、剛性の算出、実験の制御はすべて Digital 計算機で行われ、計算機から実験システムへの情報の伝達は D/A 変換機を通じ、実験システムで得られた部材の反力、変位等の測定結果の情報の計算機への伝達は A/D 変換機を通じて行われる。これらもすべて計算機によって制御される。なおこのシステムで使用した機器は次のようなものである。

1) Digital 計算機 (HITAC 10II)

使用言語はアセンブラ語で 12 kW の記憶装置を有する。

2) 磁気ドラム

64 kW の記憶装置を有する。

3) D/A 変換機

チャンネル数 4, Sample Time 1 ms 以上, Sample Size は任意, ± 2.5 V 出力

4) A/D 変換機

チャンネル数 16, Sample Time 1 ms 以上, Sample Size は任意, ± 10.0 V 入力。

5) Actuator および制御機 (島津製作所製)

外部入力, 内部出力自由, Actuator の変位および荷重制御可能, 最大容量変位 ± 150 mm, 荷重 ± 30 t

6) 荷重検出機

Load Cell, Load Amp, 最大 30 t

7) 変位検出機

差動トランス, 差動変圧機, 変位計 ± 25 mm, ± 10 mm, ± 1.0 V 出力

8) 記録計

X-Y レコーダー, ビジグラフ およびデータレコーダー

このシステムを用いて多層多スパン骨組を解析するような場合には、多くの加力装置が必要であるが、現在は Actuator が 2 機であるので、この範囲で実験可能な骨組のうちで代表的な 2 つの建物 (はりの剛性無限大の左右同一の柱を有する一層一スパンの柱崩壊型の建物とはり崩壊型の一層一スパンの建物) を例にとってシステムの内容を説明する。なお、この場合剛性 $k^{(i)}$ を得るための試験体としては、想定した骨組自体かあるいはそれを構成する弾塑性部材かのどちらでもよいが、ここでは実

験装置および試験体製作の容易な後者を選んで実験することにする。

3.2 骨組の剛性と部材（試験体）の剛性

実験で求まる部材の剛性を直接用いる振動方程式 (1) を作成して応答計算してもよいが、あらかじめ部材の剛性をもとに骨組の剛性を求めておき、振動方程式は骨組の座標系で作成しておいた方がプログラム作成上都合がよいのでまず、それらの剛性の間の関係を求めておく。

i) はりの剛性無限大の柱崩壊型

はりの剛性無限大である柱崩壊型の構造物を Fig. 3-1 に示す。これは応答計算中一定と仮定する柱軸力 N が作用し、ある時刻 (i ステップ) までの柱頭の応答変位が $x^{(i)}$ であることを示している。まず、この時の柱の変形状態を実験装置上に取り出すことを考える。このような構造物では柱に生じる反曲点は弾塑性挙動を通じて常に柱材の中央であると仮定し、そこで柱材の $1/2$ の部材を取り出してその時刻における骨組の変形状態をその取り出した部材に実験的に再現する。現在設置されている実験装置による再現方法は Fig. 3-2 に示すような 2 種類である。すなわち Fig. 3-2(a) に示すよう

Fig. 3-1 Rigid Frame

Fig. 3-2 Experimental Model

にピン、ローラーで支持された試験体 AB に柱軸力 N を加え、試験体のピン支持端と剛に接続している剛な曲げアーム AD の D 端に荷重 $P^{(i)}$ を作用して式 (2) で示される変位 $x_L^{(i)}(DD')$

$$x_L^{(i)} = \frac{x^{(i)}}{2} \frac{L}{l} \dots\dots\dots (2)$$

を生じさせ、柱部材の $1/2$ を再現してその時刻までの柱頭の応答変位 $x^{(i)}$ の $1/2$ が $CB = \frac{x^{(i)}}{2}$ となるようにする場合と、Fig 3-2(b) に示すように試験体 AC を単純ばり形式に支持し、柱軸力 N を加えて試験体中央の変位 BB' がその時刻までの応答変位 $x^{(i)}$ の $1/2$ になるように集中荷重 $p^{(i)}$ を加え柱部材の $1/2$ (AB' あるいは $B'C$) を再現する場合である。ただし、図中の $Q^{(i)}$, $Q_s^{(i)}$ はそれぞれ骨組および部材（試験体）の i ステップ時のせん断力であり、 l は試験体長、 L は曲げアーム長である。また上記のように 2 種類の実験装置を用意しているのは、曲げ荷重軸以外の軸に関する試験体端部の境界条件を変化させることが可能であること、柱軸力 N によるいわゆる $N \cdot \Delta$ 効果を考慮した場合としない場合の試験体の荷重—変位関係の比較が出来ること、および材料の相違による試験体形状と実験装置の適否等に依るためであるが、他の加力方法をこのシステムに組み込むことは勿論可能である。

Fig. 3-3 Shearing Force-Deflection Curve of a Specimen

この2つの場合の i ステップでの試験体の剛性 $k_s^{(i)}$ とその時の骨組の $1/2$ の剛性 $k^{(i)}$ の関係を求めると Fig. 3-3 を参照して次のようになる。Fig. 3-2(a) の場合 i ステップでの荷重増分を $\Delta P^{(i)}$ 、試験体のせん断力増分を $\Delta Q_s^{(i)}$ とし、その時の応答変位増分を $\Delta x^{(i)}$ とすると $k_s^{(i)}$ は次式になる。

$$k_s^{(i)} = \frac{2 \Delta Q_s^{(i)}}{\Delta x^{(i)}} = \frac{2 L \Delta P^{(i)}}{l \Delta x^{(i)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

骨組の $1/2$ の剛性 $k^{(i)}$ と $k_s^{(i)}$ の関係は柱軸力 N による $N \cdot \Delta$ 効果を考慮して式 (4) となり、骨組のせん断力 $Q^{(i)}$ は式 (5) になる。

$$k^{(i)} = \frac{1}{2} k_s^{(i)} - \frac{N}{2l} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q^{(i)} = \sum_i k^{(i)} \Delta x^{(i)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、Fig. 3-2(b) の場合には、試験体のせん断力の増分 $\Delta Q_s^{(i)}$ は骨組のせん断力の増分 $\Delta Q^{(i)}$ と等しくなり $k_s^{(i)}$, $k^{(i)}$ は式 (6), (7) になる。実験の性質上この時の $\Delta Q_s^{(i)}$ には $N \cdot \Delta$ 効果が含まれた値になっている。

$$k_s^{(i)} = \frac{2 \Delta Q_s^{(i)}}{\Delta x^{(i)}} = \frac{2 \Delta Q^{(i)}}{\Delta x^{(i)}} = \frac{\Delta P^{(i)}}{\Delta x^{(i)}} \quad \dots\dots (6)$$

$$k^{(i)} = \frac{1}{2} k_s^{(i)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、式 (4) の誘導に際して A 点の部材回転角を θ とした場合、 $\cos \theta \cong 1$, $\sin \theta \cong \theta$ とした。

ii) 柱弾性のはり崩壊型

柱弾性のはり崩壊型の骨組の例を Fig. 3-4 に示す。

Fig. 3-4 Frame

この骨組はスパン $2l$, 階高 H の均等骨組の途中階を想定し近似したもので、床面に集中すると考える質量 m をさらに柱頭に集中させ、上下のはり部材を同一にしたものである。

これにより上下のはり

りは同一の弾塑性挙動を示すことになる。なお、応答中柱部材は常に弾性挙動を示すものとする。この場合応答計算と並行して行うはり部材の実験は Fig. 3-2 に示される実験モデルに於て軸力の N を 0 にすれば得られる。Fig. 3-2(b) の単純ばり形式のモデルを用いたはりの実験で得られる曲げモーメント回転角の関係を Fig. 3-5 に示す。骨組のはりの変形状態を実験装置上に再現する方法は応答計算で求めたある時刻までの骨組の節点回転角 $\theta^{(i)}$ をもとに式 (8) で示される $\delta^{(i)}$ が

$$\delta^{(i)} = l \theta^{(i)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

試験体中央の変位 (Fig. 3-2(b) の BB') になるように集中荷重 $P^{(i)}$ を加えればよい。この時の試験体の曲げ剛性 $k_B^{(i)}$ と式 (1) の振動方程式に用いる骨組の剛性

Fig. 3-5 Moment-Rotation Curve of a Specimen

$k^{(i)}$ は、 i ステップでの曲げモーメント増分を $\Delta M^{(i)}$ 、回転角増分を $\Delta \theta^{(i)}$ とすると Fig. 3-5 を参照して次のようになる。

$$k_B^{(i)} = \frac{\Delta M^{(i)}}{\Delta \theta^{(i)}} = \frac{\Delta P^{(i)} l / 2}{\Delta \delta^{(i)} / l} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$k^{(i)} = \frac{12 EI_c}{H^3} \frac{1}{1 + 6 EI_c / H k_B^{(i)}} - \frac{N}{H} \quad \dots\dots (10)$$

ここで、 E および I_c はそれぞれ柱材のヤング係数、断面 2 次モーメントである。

3.3 計算機と試験機をオンラインで結んだシステムの制御流れ図

振動方程式 (1) の i ステップでの $k^{(i)}$ の値を部材実験をもとに求めるわけであるが、その求める方法自体にも幾つかの方法が考えられる。今回用いたシステムでは $k^{(i)}$ の値として前のステップ ($i-1$ ステップ) で得られた剛性 $k^{(i-1)}$ を用いることにした。なお、第 1 ステップの計算の際には第 0 ステップの剛性は未知であるのであらかじめ何等かの方法で、例えば、静的な実験で求めた値が初期剛性 $k^{(0)}$ として用いられる。

D/A , A/D 変換機の制御と建物の応答計算を行う Digital 計算機を中心としたコントロールシステムと部材の実験を行う Actuator 制御機を中心とした動的試験装置とのオンラインの概略の流れ図を Fig. 3-2(a) の実験タイプを例にとって Fig. 3-6 に示す。

まず、Closed Loop に入る前に部材 (試験体) の初期剛性 $k^{(0)}$ 、質量 m 、減衰係数 C 、柱軸力 N 等想定構造物の性質および変位、荷重レンジ等各種機器の作動条件、 D/A A/D 変換機の Sample Time, Sample Size 等のシステム制御の諸量を、また、応答計算に必要な入力加速度増分 $\Delta \ddot{x}_0^{(i)}$ 、そのデータ数等を計算機に記憶させる。さらに諸機器の 0 点のずれの確認とそのずれの量を機器の初期値として記憶させる。一方、実験システムでは Actuator 制御機により荷重制御された Actuator No. 1 により部材 (試験体) に柱軸力 N を作用させる。Closed Loop の第 1 ステップは最初に読み込んだ各

Fig. 3-6 Block Diagram of a Computer-Dynamic Testing System

初期値および加速度増分, $4\ddot{x}_0^{(i)}$ を用いて式 (1) の振動計算を行い骨組の柱頭の応答変位, $4x^{(i)}$ を求める。この値を $1/2$ にして部材 (試験体) に与える変位に換算し (Fig. 3-2(a) の BC に相当), さらに L/l を乗じて実験システムの変位制御を行う Actuator No. 2 の変位量 $4x_L^{(i)}$ に換算する, そしてこの量を Actuator 制御機の No. 2 に入力すればよい。しかしこの Actuator 制御機の入力は Analogue 量で与える必要があるので途中に D/A 変換機を設けて Digital 量 $4x_L^{(i)}$ を計算機の制御により Analogue 量に変換する。このようにして最初のステップの骨組の変形状態が部材 (試験体) に再現される。この時, Actuator No. 2 に接続した Load Cell およびその Amp. により荷重点 (Fig. 3-2(a) の点 D) の反力 $P^{(i)}$ が Analogue 量として検出される。D/A 変換と同様にこの Analogue 量を計算機の制御により A/D 変換機を通して Digital 量に変換して計算機に記憶させる。この Digital 化された反力 $P^{(i)}$ を基に試験体のせん断力 $Q_S^{(i)}$ およびせん断力増分 $4Q_S^{(i)}$ を

$i=1$ として下式で求める。

$$Q_S^{(i)} = \frac{P^{(i)}L}{l} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$4Q_S^{(i)} = Q_S^{(i)} - Q_S^{(i-1)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし, 第 1 ステップの時は $Q_S^{(1)} = 4Q_S^{(1)}$ で $Q_S^{(0)} = 0$ である。この部材のせん断力増分 $4Q_S^{(i)}$ と振動計算で求まっている応答変位増分 $4x^{(i)}$ から式 (3) を用いてそのステップ間における試験体の剛性 $k_s^{(i)}$ が求まる。さらに式 (4) を用いて骨組の剛性 $k^{(i)}$ が求まる。これで第 1 ステップが終了第 2 ステップの応答計算に必要な骨組の剛性が準備出来たことになる。第 2 ステップ以後はこの Closed Loop の繰り返しを行うことになる。例えば, 第 i ステップは第 $(i-1)$ ステップで求めた骨組の剛性 $k^{(i-1)}$ と入力加速度増分 $4\ddot{x}_0^{(i)}$ および第 $(i-1)$ ステップまでの各応答値 $x^{(i-1)}$, $\dot{x}^{(i-1)}$, $\ddot{x}^{(i-1)}$ を用いて式 (1) を解き第 i ステップの応答変位増分 $4x^{(i)}$ を求める。ここで Actuator No. 2 に与える量 $x_L^{(i)}$ は式 (13) で表わされる第 i ステップまでの Total 量を

$$x_L^{(i)} = \frac{L}{l} \sum_i \frac{\Delta x^{(i)}}{2} \dots \dots \dots (13)$$

用いる。また、その変位量 $x_L^{(i)}$ に応じた荷重反力 $P^{(i)}$ が計算機に知らされ、その時点の、Total の試験体のせん断力 $Q_S^{(i)}$ が式 (11) を用いて計算される。そして式 (12) を用いてせん断力増分 $\Delta Q_S^{(i)}$ が求まり、さきに求まっている $\Delta x^{(i)}$ と式 (3), (4) を用いて第 i ステップの骨組の剛性 $k^{(i)}$ が決まる。なお、あるステップで応答計算の結果部材に除荷が生じた場合には骨組の剛性を初期剛性 $k^{(0)}$ に置き変えて応答計算のやり直しを行ってそのステップの応答変位増分を求め実験システムへの情報を送る。

Fig. 3-2(b) に示すような実験のタイプも上記の制御流れ図をほとんど変更することなく用いることが出来る。流れ図を変更する点は D/A 変換機を通して実験システムへ送る量 $x_L^{(i)}$ を試験体中央の変位と考え $L=l$ として計算した値 $\sum_i (\Delta x^{(i)}/2)$ で与えることと、 A/D 変換機を通して戻ってくる反力 $P^{(i)}$ が部材 (試験体) のせん断力 $Q_S^{(i)}$ (この場合部材のせん断力と骨組のせん断力 $Q^{(i)}$ は等しい) の2倍になっているので $Q_S^{(i)} = P^{(i)}/2$ として求め式 (6), (7) を用いて骨組の剛性 $k^{(i)}$ を求めるだけである。

また、3.2 の (ii) で示したような柱弾性は崩壊型の建物の応答解析でも上記の制御流れ図を、柱頭の応答変位から節点の回転角を計算し試験体中央の変位に換算する図を加えることによってそのまま利用出来る。試験体中央に与えるべき量 $\delta^{(i)}$ は振動計算で求めた i ステップまでの柱頭の各応答変位増分 $\Delta x^{(i)}$ から式 (14), (15) を用いて節点の回転角 $\theta^{(i)}$ を計算し、その値を式 (8)

$$\Delta \theta^{(i)} = \frac{2}{(Hk_B^{(i)}/3EI_C) + 2} \frac{\Delta x^{(i)}}{H} \dots \dots \dots (14)$$

$$\theta^{(i)} = \sum_i \Delta \theta^{(i)} \dots \dots \dots (15)$$

に代入して求めればよい。その $\delta^{(i)}$ を $x_L^{(i)}$ と見做して、 D/A 変換して Actuator 制御機に与える。そして i ステップでの試験体の曲げ剛性 $k_B^{(i)}$ と式 (1) に必要な骨組の剛性 $k^{(i)}$ は A/D 変換機を通して戻ってくる反力 $P^{(i)}$ をもとに式 (16), (17) を用いてはり材端のモーメント増分 $\Delta M^{(i)}$ を求め、その値と先きに求まっ

$$M^{(i)} = \frac{l}{2} P^{(i)} \dots \dots \dots (16)$$

$$\Delta M^{(i)} = M^{(i)} - M^{(i-1)} \dots \dots \dots (17)$$

ている節点の回転角増分 $\Delta \theta^{(i)}$ から式 (9), (10) を用いて求めることになる。

§4 ま と め

計算機と試験機をオンラインで結んだシステムによる構造物の応答解析方法を柱あるいははり崩壊型の一層一層スパン建物を例にとり示した。ここに示した内容はオ

ンラインシステムによる解析の基本的な流れのみであり、このシステムによる実際の応答解析には D/A , A/D 変換機の Sample Time, Sample Size 等の最適値の問題、あるいは Actuator を中心とした試験体の不安定さ等による剛性計算のテクニック等多々問題がある。この辺の取扱いについては実際に行った応答解析例の結果を報告する時に詳しく述べることにする。

謝 辞

本研究は昭和 46 年度から東京大学生産技術研究所において3ヵ年計画で行われた臨時事業計画「都市における災害の防除に関する研究」の一環として行われたもので、試験機、ミニコンピュータおよび実験装置はすべてこの事業費で購入されたものである。コンピュータのシステムの開発には東京大学生産技術研究所助手重信恒雄氏が協同研究者として参加し、東京大学生産技術研究所教授久保慶三郎、同紫田碧の両氏をはじめ上記臨時事業計画グループのメンバー各位からは有益な御助言と終始変らぬ御援助を得た。ここに厚く感謝の意を表する。また、試験台の製作には大成建設、日本鋼管、太陽テント、東京鉄骨橋梁、中央ビルト工業各社、加力装置については島津製作所の協力を、周辺機器の制御等コンピュータシステムの開発は日立ミニコン、システム部の協力を得て行われた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 田中, 高梨, 宇田川: 繰返し載荷をうける鋼構造の部材。生産研究 25 巻 2 号, 1973.2.
- 2) 岡田, 関, 伊藤: 鉄筋コンクリート部材の復元力特性。生産研究 25 巻 2 号, 1973.2.
- 3) 重信, 田中: 繰返し軸力を受ける鋼部材の復元力特性に関する研究。生産研究 26 巻 2 号, 1974.2.
- 4) 宇田川, 高梨, 田中: 繰返し載荷を受ける鋼製柱の曲げ振れ崩壊。日本建築学会大会学術講演梗概集昭和 49 年 10 月
- 5) たとえば
M. Wakabayashi: Studies on Damping and Energy Absorption of Structures, Introductory Report of IA-BSE Symposium, Lisbon 1973
Takeda, Sozen, Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970
- 6) Final Report and Proceedings of a workshop on Simulation of Earthquake Effects on Structures, San Francisco, September 7-9, 1973
- 7) 久保, 岡田, 川股: 都市構造物の耐震強度の調査研究, 生産研究 24 巻 3 号, 1972.3.
- 8) 高梨, 宇田川, 関, 田中: 電算機一試験機オンラインシステムによる構造物の地震時崩壊の解析, 生産研究 26 巻 11 号, 1974.11.
- 9) 伯野元彦, 四俣正俊, 原 司: 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, 1969-11.
- 10) 田沼辰雄, 望月利男, 長嶋文雄: クイア上部構造物連成系の振動特性に関するオンライン・リアルタイム実験について, 災害科学総合シンポジウム講演論文集, 第 11 回 1974 名古屋
- 11) 望月利男, 長嶋文雄: クイア上部構造物連成系の振動特性に関する オンライン・リアルタイム実験について, 日本建築学会大会学術講演梗概集昭和 49 年 10 月
- 12) R.D. Hanson: Post-Elastic Response of Mild Steel Structure, Proc. 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, 1970.

NON-LINEAR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF STRUCTURES BY A COMPUTER-ACTUATOR ON-LINE SYSTEM

(Part 1 Detail of the System)

by KOICHI TAKANASHI*¹, KUNIAKI UDAGAWA*²,
MATSUTARO SEKI*³, TSUNEO OKADA*⁴ and
HISASHI TANAKA*⁵ Members of A.I.J

Non-linear hysteresis loops such as bi-linear, tri-linear, Ramberg-Osgood type function etc. have been widely adopted as analytical models for the earthquake response analysis of structures, while the necessity to adopt more realistic analytical models which can represent the stiffness and strength deterioration of the structure during earthquake has been strongly recognized. However, it has been also recognized that a simplified analytical model could not represent the real non-linearity of the structure which depends much upon a lot of uncertain factors such as non-linearity of materials, local failure, loss of stability, etc..

The objective of this research project is to analyse the non-linear earthquake response of structures without assuming the non-linearity of the structure or structural members but with directly using the real behavior of the structure or structural members obtained from the on-line dynamic failure test. For this purpose an on-line system for non-linear earthquake response analysis of structures has been developed at the Institute of Industrial Science, University of Tokyo. The system consists of a digital computer and hydraulic actuators which are directly connected through a *A/D* converter and a *D/A* converter.

This paper is mostly concerned with the detail of the procedure for the response analysis using this on-line system and less with the result of the analysis. The non-linear differential equation which expresses the non-linear earthquake response of the structure was analysed by this on-line system with a piece-wise linear method. The structural stiffness at each step required for the analysis was input directly into the computer from the experiment of structure or structural members which was performed in parallel with the analysis. Predicted deformation of the structure or structural members by the analysis at each step was given again to the specimens by the hydraulic actuators and the stiffness anticipated by the experiment was taken into account for the analysis at next step. This procedure was repeated step by step until the response of the structure was terminated. The experiment was also controlled by the digital computer through the *D/A* converter and the *A/D* converter corresponding to a cumulative displacement at each step of the analysis.

In short, the non-linear earthquake response of structures was analysed by means of the on-line system composed of a digital computer and a dynamic testing machine. The first trial was carried out on the steel frame buildings and the reinforced concrete buildings, details of which would be reported later.

*1 Associate Professor, Inst. of Indu. Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.,

*2 Research Associate, Inst. of Indu. Sci., Univ. of Tokyo, MS. Eng.,

*3 Research Associate, Inst. of Indu. Sci., Univ. of Tokyo,

*4 Associate Professor, Inst. of Indu. Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.,

*5 Professor, Inst. of Indu. Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.,

U.D.C. 624.071.3.014.27 : 624.078

ON THE STRENGTH AND STIFFNESS OF BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS IN STEEL SQUARE-TUBE COLUMNS (Part II)

—Experimental Research on the Behavior of Steel

Square-Tube Connections Subjected to Lateral Force—

by Dr. TAKEKAZU TAGUCHI, Prof. of Yokohama National Univ. and AKIRA SASAGAWA, Lecturer of Yokohama National Univ. and TSUIUO MINOSHIMA, Graduate Student of Yokohama National Univ. Members of A.I.J.

In the previous paper, we have reported about the shearing stress distribution of beam-to-column connections in steel square-tube columns considering the variation of shearing stress distribution in wall thickness.

In this paper, we compare the theoretical values which we have solved in the previous paper with experimental values.

In this experiment three specimens are tested, which have same wideflange-beam and three types of columns. Those width of tube wall are equal and the width-to-thickness ratios of them are different.

Those specimens are loaded to be subjected to bending, shear and thrust in their connections.

In consequence of experimental research, theoretical values of the shearing stress distribution on the boundaries of the cross section approximate experimental them.

U.D.C. 624.071.3.014.2 : 539.384

POST-BUCKLING BEHAVIOR OF SHORT STEEL COLUMNS

by Dr. BEN KATO, Prof. Univ. of Tokyo, Dr. HIROSHI AKIYAMA, Assoc. Prof. Univ. of Tokyo and KEIHIKO INOUE, Shimizu Construction Co. Ltd., Members of A.I.J.

As for the post-buckling behavior of the steel columns, Paris's method is available. But Paris's theory does not cover the case of short columns. By taking account of strain hardening and accumulation of plastic strain on the centroidal axis of column, an analytical method suitable for predicting short column behavior was developed.

Through comparison with test results, the proposed method was verified to be sufficient enough to complement Paris's method.

U.D.C. 681.3 : 624.042.7

NON-LINEAR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF STRUCTURES BY A COMPUTER-ACTUATOR ON-LINE SYSTEM

(Part 1 Detail of the System)

(See Page 83)

by KOICHI TAKANASHI^{*1}, KUNIAKI UDAGAWA^{*2}, MATSUTARO SEKI^{*3}, TSUNEO OKADA^{*4} and HISASHI TANAKA^{*5}, Members of A.I.J.