

オンライン・システムによる2層1スパン 鉄骨骨組の地震応答解析

Earthquake Response Analysis of a 1-bay 2-story Steel
Frame by Computer Actuator On-line System

田中 尚*・高梨 晃一**・宇田川 邦明**・紺野 浩**

Hisashi TANAKA, Koichi TAKANASHI, Kuniaki UDAGAWA and Hiroshi KONNO

1. 序

筆者らはこれまで、電算機・試験機オンラインシステムによって、1層1スパンの鉄骨骨組の弾塑性地震応答解析を行ってきた^{1,2)}。そこでは、はり、あるいは柱のみが塑性状態となり、他の部材は弾性または剛体であるような特別な場合に限られていた。実際の構造物では、はり、柱部材がともに塑性状態になることが多い、これらの部材を結合する接合部の弾塑性挙動が骨組全体におよぼす影響も無視できない。それに、層数が複数になると、地震応答における層間の相互作用が重要になってくる。そこで本研究では、これらの研究の手はじめとして、2層1スパンの骨組をそのままオンラインシステムによって解析しようと試みた。当面の目的としては、

1) 多層骨組の応答解析(多自由度系の応答解析)にもオンラインシステムが適用できることを確かめること。

2) いろいろな柱はり接合を有する骨組の応答を調べる端緒として、全溶接の接合部を有する骨組の解析を行うこと。

2. 解析の方法

(i) オンライン・システムの概要

本システムについては、すでに発表してあるので^{1,3)} 次下、その概要を簡単に説明する。地震動をうける構造物の弾塑性応答を求めるには、刻々変化する復元力をどのように評価するかが問題であり、一般には、数式モデルを仮定して計算している。しかし、モデル化の精度の問題でそれが困難な場合もある。本システムでは、復元力特性の数式モデル化を行わずに、応答計算と平行して、解析を行おうとしている試験体骨組へ直接載荷して真の復元力特性を評価し、それを直ちに計算に取り込んで解析を継続していく。すなわち、図-1に示すような解析の流れとなる。

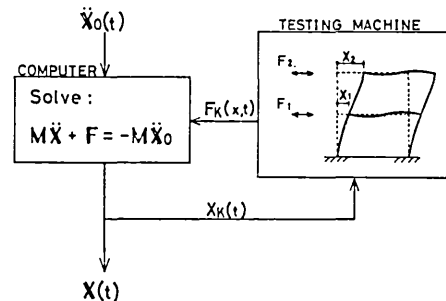


Fig. 1 Block Diagram of System

多層骨組の第K層の振動方程式は、速度減衰がない場合、次式で表される。

$$M_k \ddot{x}_k^i + F_k^i = -M_k \ddot{x}_0^i \quad (1)$$

\ddot{x}_k^i , x_k^i はそれぞれK層の応答加速度、変位であり、 M_k , F_k^i はK層の質量、復元力、 \ddot{x}_0 は地動の加速度である。添字の i は、増分計算において、時間刻みを dt としたとき、時刻 $t = i \cdot dt$ における値を表している。一方、同じ時刻における応答加速度は、中央差分法によれば、最も簡単な場合、次式で表される。

$$\ddot{x}_k^i = (x_k^{i+1} - 2x_k^i + x_k^{i-1}) / (dt)^2 \quad (2)$$

いま、 $t = i \cdot dt$ において、方程式(1)を解くことを考える。このとき、すでに x_k^{i-1} , x_k^i は分かっているので、 x_k^i を試験体骨組に作用させることによって、その時の復元力 F_k^i を知ることができる。その値を式(1)に代入し、式(2)と連立に解けば、 $t = (i+1) dt$ における応答変位 x_k^{i+1} が求められる。以下、この手順を繰り返す。

(ii) 載荷装置

試験体骨組の各層に与える所定の水平変位は、計算機によって制御される電気油圧式のアクチュエータ2台によった。各層の反力は、ロードセルによって測定し、各層の復元力とした。

(iii) 制御方法

中央差分法により振動方程式を解いて得られる各層の応答変位 x_k^i ($K=1, 2$) を、実状に近い変位経路に沿って、しかも精度よく試験体骨組に与えるためには、載荷装置を制御する上で若干の工夫が必要である。こ

* 東京大学生産技術研究所 所長

** // 第5部

研究速報

では、次のように制御した。いま、 $(i-1)$ ステップの応答変位 x_1^{i-1}, x_2^{i-1} から i ステップの変位 x_1^i, x_2^i まで試験体骨組を変形させるに要する変位増分 $\delta x_1^i, \delta x_2^i$ とする。 $\delta x_1^i, \delta x_2^i$ の値が大きければ、これらをいくつかに分割して、分割した微小変位量を試験体骨組の第1層、第2層に同時に与え、徐々に目標値に近づけていく。 $|\delta x_1^i| > |\delta x_2^i|$ であれば、 $|\delta x_2^i / \delta x_1^i| = \beta_1 (\beta_1 < 1)$ を計算しておき、目標値までの距離に応じて、第1層に与える1回分の出力量 $\delta_1^{ij} (j \leq 15)$ とし、その β_1 倍を第2層に与える1回分の出力量 δ_2^{ij} とした。このようにして与えられた変位が次の範囲内であれば、十分な精度が得られたとして次のステップに進んだ。

$$\left. \begin{aligned} |\delta_k^{ij} / x_k^i| &\leq 1/200 : |x_k^i| \leq 0.4 \text{ cm のとき} \\ |\delta_k x^{ij}| &< 0.002 \text{ cm} : |x_k^i| > 0.4 \text{ cm のとき} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

各ステップにおける所定の制御が終了した後、十分、アクチュエータが安定するのを待って(約2秒)、ロードセルによる荷重の検出を行った。復元力は、0.4秒間に40個のデータを検出し、その平均値とした。

さきに述べた中央差分法を用いると、第1ステップの計算が実行できないのと、微小な変形時には、復元力 F_k^i の測定に誤差が入り易いとの理由で、解析開始から、第2層の水平変位が3mmを越えるまでの間は、後述する予備実験において求めた剛性を用いて、計算機内だけで線形加速度法による応答計算を行っている。もちろん、その結果の応答変位は、試験体骨組に与える。

3. 試験体骨組

解析に用いた試験体骨組は、図-2に示す2層1スパンの鉄骨骨組である。柱はSM50のH-150×150×7×10、はりは、SS41のH-200×100×5.5×8で全溶接接合である。パネル部は、9mmのダブルプレートで補強してある。面外の崩壊を防ぐため、同一骨組を2体、70cm離して平行に配置し、つなぎばりで繋結してある。各層の変位は、はり中央にピン接合した加力ビームを介して与えられる。

4. 解析の経過

(i) 初期剛性の測定

オンラインシステムによる解析に先だち、試験体骨組を静的に加力し、初期剛性を測定した。すなわち、

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 31.37, & -14.76 \\ -14.76, & 10.84 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

F_1, F_2 は1, 2層の復元力 (ton), X_1, X_2 は1, 2層の水平変位 (cm) である。この値は、オンライン解析初期の線形加速度法による応答計算に用いる。

(ii) 想定質量と固有周期

オンラインシステムによる振動解析では、任意の質量を仮定することができる(試験体骨組に重量はのせていない)。本解析では、骨組のはり上端に等分布荷重を想定し、その荷重による静的曲げモーメントと、震度0.2としたときの等価水平荷重による曲げモーメントの和を考える。それが、1層はり端部において、ちょうど降伏

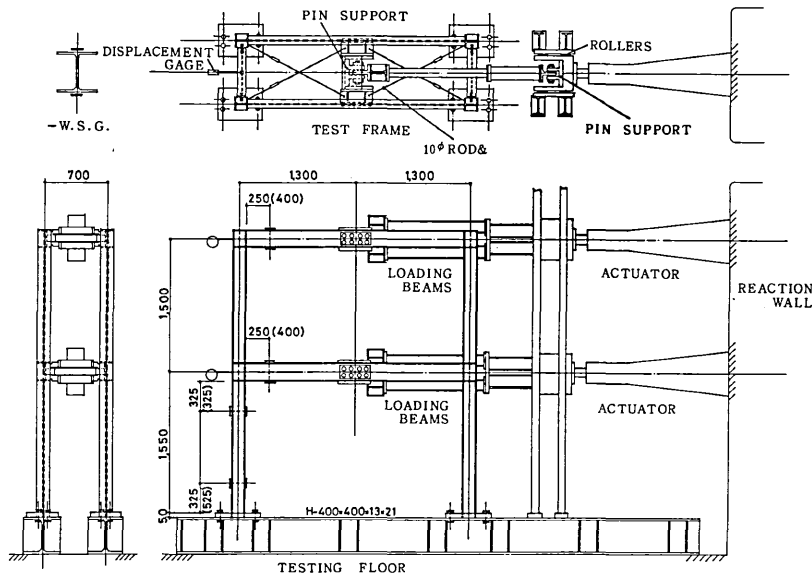


Fig. 2 General View of Test Setup

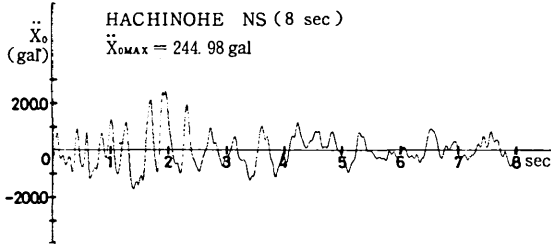
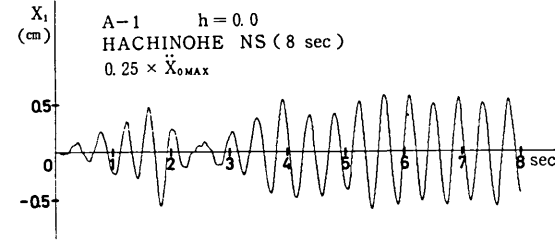
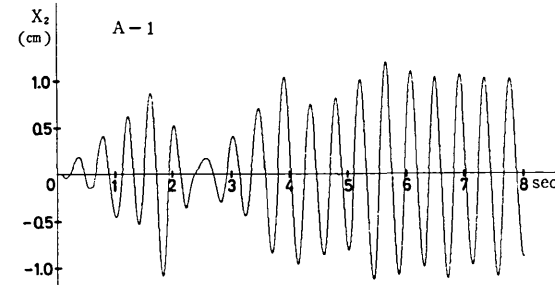


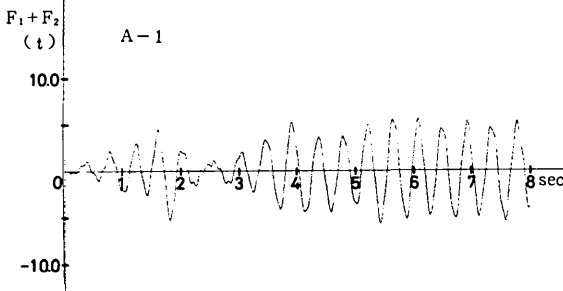
Fig. 3 Acceleration of Ground Motion



(a)



(b)



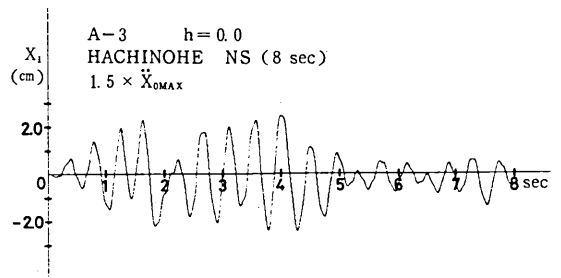
(c)

Fig. 4 Time Histories of Responses (Run A-1)

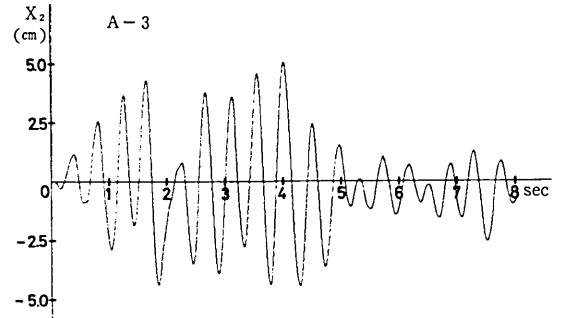
モーメントに等しくなったときの重量を計算して、想定質量とした。1, 2層の重量を等しいとすれば、質量は、 $M_1 = M_2 = 0.01453 t \text{ sec}^2 / \text{cm}$ である。固有周期は、1次、2次それぞれ $T_1 = 0.428 \text{ sec}$, $T_2 = 0.121 \text{ sec}$ となる。

(iii) 入力地震波

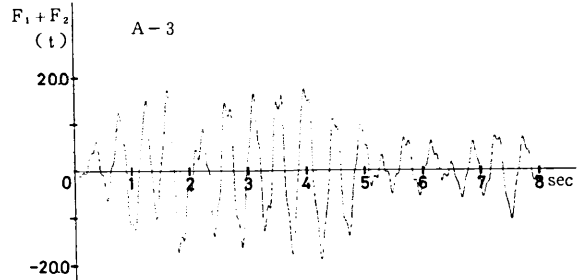
解析に用いた入力地震波は、1968年十勝沖地震の八



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Time Histories of Responses (Run A-3)

戸における本震NS成分の記録波のうち、最大加速度 ($X_{0MAX} = 244.98 \text{ gal}$) 付近8秒間である。(図-3) 解析は入力波の最大加速度の大きさを変えて次の3通り行っている。

$$\left. \begin{aligned} \text{Run A-1 } A_1 &= 0.25 X_{0MAX} = 0.18 \alpha_Y \\ \text{Run A-2 } A_2 &= 1.0 X_{0MAX} = 0.72 \alpha_Y \\ \text{Run A-3 } A_3 &= 1.5 X_{0MAX} = 1.1 \alpha_Y \end{aligned} \right\} (5)$$

α_Y は降伏加速度で、1次モードで静的に変形させたときの弾性限界ベースシアを全質量で除した値である。

(iv) 解析の実行およびデータの集録

図-2の骨組を、さきに述べた質量を想定して解析した。時間刻みは、 $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ とした。応答の解析結果(水平変位、速度、加速度)およびサンプルされた復元力、柱、はりの主要部の歪度、材端のたわみ角は磁気テープに集録した。

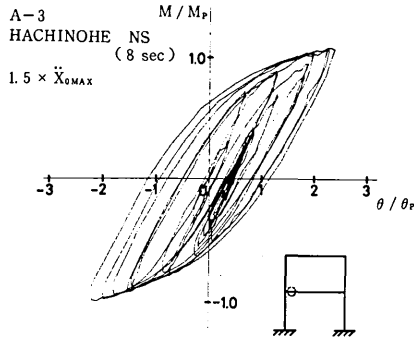


Fig. 6 Moment vs Rotation Curve at Lower Beam (Run A-3)

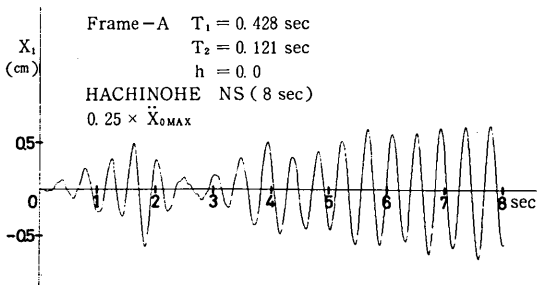


Fig. 7 Time History of Calculated Response Displacement at Lower Level

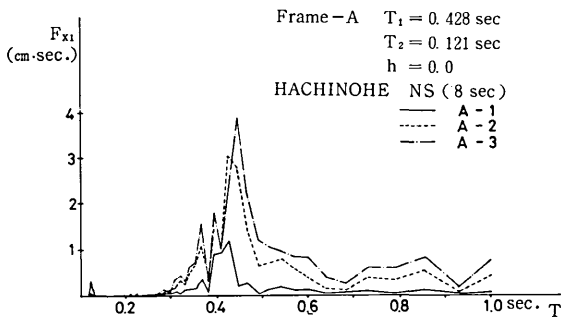


Fig. 8 Fourier Spectrum of Response Displacement at Lower Level

5. 解析結果

オンライン解析の結果の一部を図-4以下に示す。図4(a), (b)は1, 2層の応答変位 X_1, X_2 , 図(c)は復元力 F_1, F_2 の和, すなわちベースシアアの時刻歴を示している。図-5はRun A-3における同様の応答量を示している。Run A-1は弾性応答であるが, Run A-3では骨組の一部が塑性化している。図-6に示した1層はりの材端モーメント-材端回転角関係の測定結果によれば, Run A-3のとき, 最大塑性率 $\theta_{MAX} / \theta_p = 2.6$ 程度となっている。 θ_p ははりの全塑性モーメント M_p に対応する弾性回転角である。局部座屈, 横座屈による耐力低下は生

じていない。

6. 結果の考察

オンラインシステムによる解析の妥当性をみるために, 試験体骨組の初期剛性すなわち式(4)だけを用いて応答解析を行った。Run A-1と同じ入力地震波を用いたときの1層の応答変位を図-7に示す。これと図4(a)の X_1 と比較すると, 両者は6秒付近まではよく一致しているが, それ以後には若干の差が生ずる。位相にも多少の差が認められる。しかし, 現在のところ, その理由については結論が出ていない。

入力波の大きさによる応答性状のちがいは, 図-8の X_1 のスペクトル図によって分かる。Run A-1, A-2では1次の固有周期 $T_1 = 0.428$ sec 付近に大きなピークがあり, 2次の固有周期 $T_2 = 0.121$ sec 付近にもピークが見られるが小さい。ほとんど, 1次のモードで振動している。Run A-3では, 最大ピークの生ずる周期が若干 T_1 より右へずれていて, 塑性化によって見かけの周期が伸びていることが分かる。

7. 結 び

数年来続けてきた1層骨組(1自由度系)のオンライン解析を発展させ, 2層骨組(2自由度系)のオンライン解析を行って, 多自由度系についても十分, 本解析法が適用できることを確めた。しかし, 多自由度になると所定の変位量を試験体骨組に与える際, その精度の確保に困難さが増すので, 個々の試験体骨組の剛性と関連させて, 試験機制御の方法に若干の工夫が必要である。

謝 辞

本研究は, 文部省科学研究費「電算機-試験機オンラインシステムによる骨組の弾塑性応答解析」によるものである。関係者各位に謝意を表する。

(1978年1月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 高梨, 宇田川, 関, 岡田, 田中「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)」日本建築学会論文報告集 第229号 昭和50年3月
- 2) 宇田川, 高梨, 田中「同上(その2 はり崩壊型1層1スパン鋼製フレーム)」同 第266号, 昭和53年4月(予定)
- 3) 田中 尚「構造物非線形振動解析のための小型電算機-試験機オンラインシステム」生産研究 27巻, 12号, 昭和50年12月