

ハイブリッド地震応答解析へのニューラルネットワークの応用

Neural Network Model in Hybrid Earthquake Response Simulation

大 井 謙 一*・カルロス ザバラ*・高 梨 晃 一*
Kenichi OHI, Carlos A. ZAVALA and Koichi TAKANASHI

1. はじめに

電算機-試験機オンライン地震応答実験法¹⁾は、生研の耐震構造学研究グループ (ERS) が世界に先駆けて実用化した、構造模型に対する載荷実験と電算機による地震応答解析を結合させた地震応答シミュレーション手法で、擬似動の実験とも呼ばれ各方面で利用されている。

この実験手法の利用形態として、当初からその可能性が指摘されているものに、「部分構造実験によるハイブリッド解析」がある。これは、解析対象の構造物のうち最も非線形性が大きく現れると予想される部分、ないし挙動が未知の部分のみを取り出して物理的な模型試験体を作成して載荷実験を行う。構造物の残余の部分は数学モデルとして解析を行い、コンピュータ内で両者を結合させて構造物全体の地震応答シミュレーションを行う。これは、特に大規模構造物の場合に実大全体模型の載荷実験が困難であることから考案された利用形態である。

しかしながら、このような部分構造ハイブリッド解析の適用例はきわめて少なく、一般的な方法論も完成されているとは言えない。その理由の一つは、部分構造実験における載荷の非可逆性のため、適用骨組モデルや数値解析手法の自由度が狭まるという困難があるからである。

本稿は、このような困難を克服して解析手法の自由度を高めるため、教師信号に対する学習機能と優れた追従性を有するニューラルネットワークを介して、部分構造実験と全体構造解析とを結合するという「ニューロ部分構造ハイブリッド解析手法」を提案するものである。

2. 部分構造ハイブリッド解析の問題点

例題として、図2に示すような1個の柱部材と1個のはり部材を剛接して得られる平面骨組モデルを考える。柱脚は固定支持、一方のはり端はピンローラ支持であり、柱とはりの節点に集中慣性質量 m (水平方向) をおき、さらに鉛直荷重 P を作用させる。地震入力として水平1方向の地動加速度記録 \ddot{x}_g を用いて骨組の地震応答を求める。はり部材に関しては弾性挙動を仮定し通常の弾性はり要素を用いるが、柱部材に関しては未知の非線形挙動をとるので、模型試験体に対する載荷実験から復元力を測定するものとする。

柱はり節点の外力 Q_{ex} , P_{ex} , M_{ex} と、内力 M_{c1} , M_{c2} , M_b , N_c (柱軸力) との釣合式は、微小変位の範囲内で下記ようになる。

$$Q_{ex} = -(M_{c1} + M_{c2})/H \tag{1}$$

$$P_{ex} = N_c - (M_b/L) \tag{2}$$

$$M_{ex} = -M_{c2} + M_b \tag{3}$$

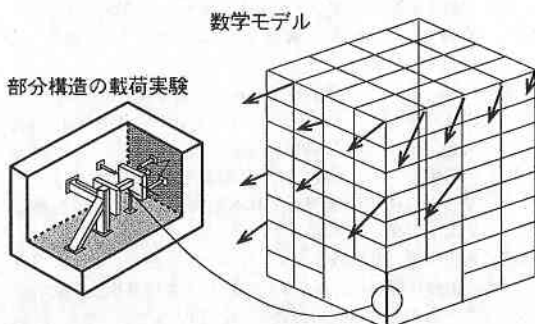


図1 部分構造実験によるハイブリッド解析

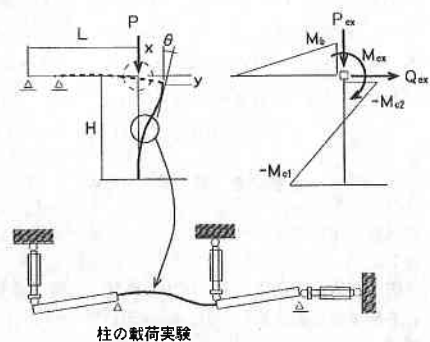


図2 平面骨組のハイブリッド解析

*東京大学生産技術研究所 第5部

ハイブリッド解析では、各時点 $t = i\Delta t$ で、次式が満足されるように、節点の変位 $x^{(i)}$, $y^{(i)}$, $\theta^{(i)}$ の解を求めていくことになる。

$$Q_{ex}^{(i)} = -m(\ddot{x}^{(i)} + \ddot{x}_g^{(i)}) \quad (4)$$

$$P_{ex}^{(i)} = P \quad (\text{const.}) \quad (5)$$

$$M_{ex}^{(i)} = 0 \quad (\text{const.}) \quad (6)$$

今 i ステップまでの載荷が完了して柱の復元力が測定された場合、節点外力 $Q_{ex}^{(i)}$, $P_{ex}^{(i)}$, $M_{ex}^{(i)}$ が評価できる。(4)式により相対加速度 $\ddot{x}^{(i)}$ が評価できるので、explicit な数値積分法 (中央差分法, $\beta = 0$ の Newmark β 法) を用いれば、 Δt 経過後の変位 $x^{(i+1)}$ が決定できる。一方(5)式と(6)式に関しては、柱の非線形挙動により一般に $P_{ex}^{(i)} \neq P$, $M_{ex}^{(i)} \neq 0$ となるが、弾塑性範囲の載荷実験では載荷のやり直しができないので、この不釣合力を次のステップで解消するようなアルゴリズムが通常用いられる。すなわち、

$$-P_{ex}^{(i)} + P = \Delta N_c - (\Delta M_b / L) \quad (7)$$

$$-M_{ex}^{(i)} = -\Delta M_{c2} + \Delta M_b \quad (8)$$

の両式が成立するように、 $y^{(i+1)}$, $\theta^{(i+1)}$ を決定することが要請される。

純粋数値解析では、(7)(8)式の中の復元力増分を弾塑性剛性マトリクスと変位増分の積で表現し、変位増分に関して解くことによって、これがなされる。ハイブリッド解析では、1) 測定誤差を含む載荷実験データから剛性を精度よく評価することが難しいこと、2) 1組の復元力増分の測定量から弾塑性剛性マトリクスのすべての要素を同定することができないこと、などの問題点がある。

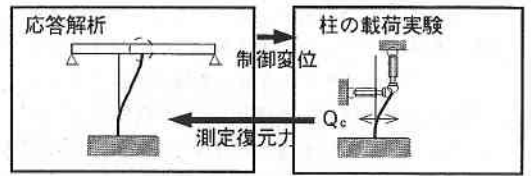
いずれにしても、ある時点までに完了した載荷実験から得られる情報をもとに、未載荷の多軸復元力を予測・外挿するテクニックが必要であり、本稿では、ここにニューラルネットワークの学習機能と教師信号に対する追従性を利用しようとするものである。

3. ハイブリッド地震応答解析の定式化

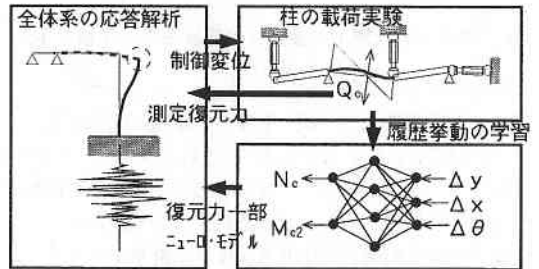
ニューラルネットワークの適用度によって、部分構造ハイブリッド解析の分類を試み、図3に示している。

(1) 非ニューロ・ハイブリッド解析 (通常のオンライン実験)

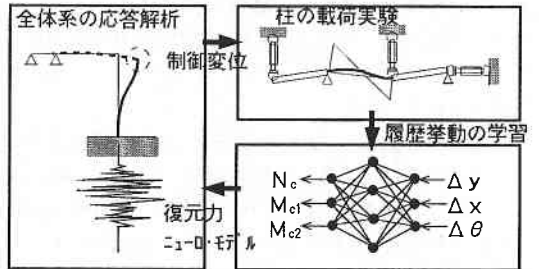
特殊な骨組モデルを想定することによって、前節の例題に現れたような外力拘束を受ける自由度を恣意的に駆逐し、変位拘束を受ける自由度に置き換える。実験を遂行するには、振動自由度の変位 (前節の x) のみを評価することにより実行する。explicit な数値積分法を用いれば、復元力の外挿をすることなく、現在の測定復元



(1) 非ニューロ・ハイブリッド解析



(2) セミ・ニューロ部分構造ハイブリッド解析



(3) 完全ニューロ部分構造ハイブリッド解析

図3 ニューラルネットワークの適用度による部分構造ハイブリッド解析の分類

力を用いて次ステップの変位が決定できる。

(2) セミ・ニューロ部分構造ハイブリッド解析

振動自由度の変位 (前節の x) に関しては、測定復元力を用いて explicit な数値積分法で決定する。一方、外力拘束を受ける自由度の変位 (前節の y , θ) に関しては、関与する復元力 (前節の M_{c2} , N_c) を出力として含むようなニューラルネットワークモデルによる予測子を作成し、ネットワークの出力を利用したイテレーションを伴う収斂計算により、次ステップでの不釣合力を解消するような変位増分を決定する。なおネットワークには現在までに測定された復元力データを教師データとして部分構造の履歴挙動を学習させておく。

また同一試験体に対する別の載荷実験データが利用できる場合にはあらかじめネットワークに学習させておくのもよい方法である。

(3) 完全ニューロ部分構造ハイブリッド解析

振動自由度、外力拘束を受ける自由度に関わりなく、部分構造模型のすべての復元力 (前節の M_{c1} , M_{c2} , N_c)

研 究 速 報

を出力とするようなニューラルネットワークモデルによる予測子を構築しておく。次ステップの変位を決定するために、あらゆるイテレーションを伴う計算が許容できる。振動自由度の変位（前節の x ）の数値積分に関しても、イテレーションや復元力外挿を必要とする数値積分法（ $\beta \neq 0$ の Newmark β 法や Runge-Kutta-Gill 法など）が必要とあれば利用できる。

4. 複合応力状態下の鋼部材の履歴挙動の学習と予測

構造物の履歴挙動に対するニューラルネットワークモデルの適用性については、単軸履歴挙動に関して文献2)などで研究されている。ここで目指しているニューロ部分構造ハイブリッド解析では、2節のような最も簡単な例題についても、たとえば変動軸力と変動曲げのような、弾塑性範囲で相関を有する多軸履歴挙動をモデル化する必要がある。本節では、変動軸力と1軸曲げを受けるH形鋼部材の繰返し載荷実験結果³⁾を教師信号として、階層型ニューラルネットワークモデルの適用性を検討する。

ここで用いた階層型ニューラルネットワークの概要は以下のとおりである。

出力数：2変数（軸力、曲げモーメント{本実験では部材の一端はピン支持し、他端に曲げを加えている}

入力数：10変数{軸変形，材端回転角（剛体回転を除く，以下同様），最新の反転時軸変形，最新の反転時材端回転角，過去の最大軸変形とその時の軸力，過去の最大材端回転角とその時の曲げモーメント，最新の変形ゼロクロス時の軸力，最新の材端回転ゼロクロス時の曲げモーメント}

層数：入力層（10ユニット），中間層2層（各20ユニット），出力層（2ユニット）

ユニット間の結合は，最も一般的に用いられている次の形を用いる⁴⁾。

$$x_i = \text{sg}(\sum W_{ij}y_j - T_i) \tag{9}$$

- ここで、 x_j ：ある層のユニット i の出力
- $\text{sg}(\cdot)$ ：シグモイド関数， $\text{sg}(t) = 1 / \{1 + \exp(-t)\}$
- W_{ij} ：ユニット i とユニット j の結合度を表す重み
- y_j ：直前層のユニット j の出力
- T_i ：ユニット i のしきい値

繰返し載荷実験データは，各ステップ間が約2000分の1ラジアン回転増分に相当する離散データであるが，各ステップのデータを教師信号として，誤差逆伝播則によってネットワーク特性（重み係数と閾値）を改善し，前回までに得られているネットワーク特性と新たに得られたネットワーク特性の平均を新しいネットワーク特性としている。すなわち，

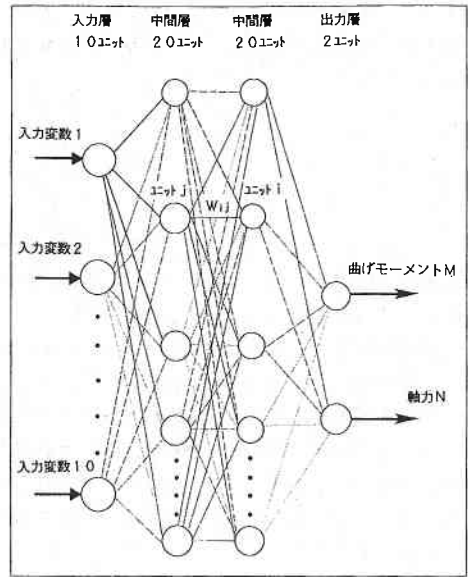


図4 階層型ニューラルネットワーク

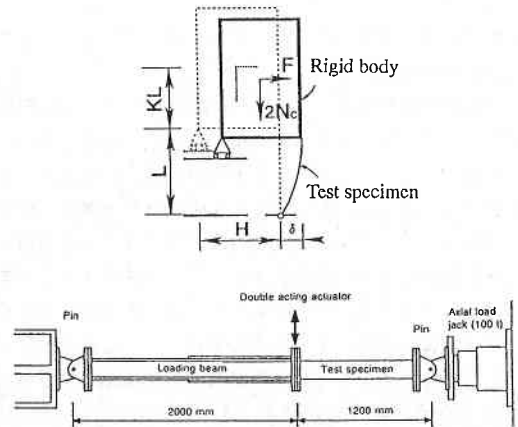


図5 教師データに用いる載荷実験の概要

$$W^{(i+1)} = \alpha W_{\text{opt}}^{(i)} + (1-\alpha) W^{(i)} \tag{10}$$

としたとき、 $\alpha=0.5$ を設定している。ここで、 $W^{(i)}$ ： i ステップの復元力予測に用いるネットワーク特性， $W_{\text{opt}}^{(i)}$ ： i ステップまでの教師データとの誤差の逆伝播則により， i ステップまでの誤差エネルギーを最急降下させたネットワーク特性，である。

図6は以上のようにしてネットワークによって予測された軸力-軸変位関係，軸力-モーメント関係，モーメント-回転角関係，をそれぞれ実線で，教師データを点線で表したものである。このように，相関を有する多軸履歴挙動も，ニューラルネットワークモデルで学習と予測

を繰り返すことによって、良好に追跡できることが判明した。

6. 結 び

骨組解析モデルの一部の復元力情報を、物理的な模型試験体の載荷実験から測定し、残余の部分数学モデルとして地震応答シミュレーションを実行するという「部分構造ハイブリッド解析」において、載荷の非可逆性に起因する問題点を指摘した。これを克服するために、解析と同時にされる載荷実験から得られる情報をニューラルネットワークに学習させながら、応答解析を行うという「ニューロ部分構造ハイブリッド地震応答シミュレーション」の可能性について考察した。

本手法の適用性の予備調査として、鋼柱の多軸履歴挙動の既往の実験結果に対して、ニューラルネットワークモデルによる学習と予測を試みた。その結果、実験結果に対する良好な追従性が確認され、本手法を多軸履歴挙動を伴う部分構造を含むハイブリッド解析に応用することの妥当性が確認された。

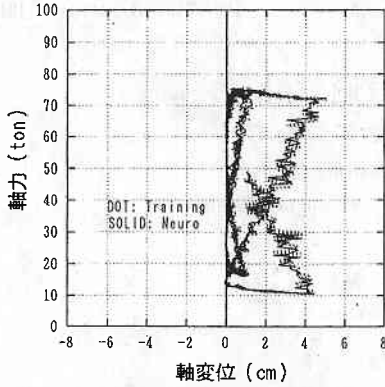
今後、各種の骨組モデルに本手法を適用してハイブリッド解析を実行する予定である。

謝 辞

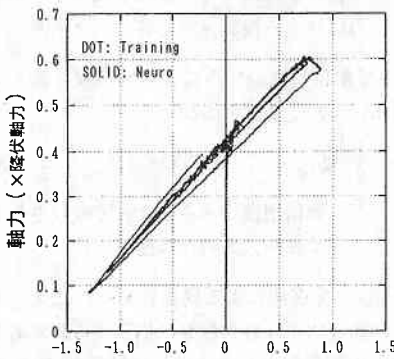
本研究は、平成4年度文部省科学研究費補助金・試験研究B「大規模架構を対象としたインテリジェント部分構造実験システムの開発」(研究代表者：大井謙一、NO. 04555138)の一部である。(1993年5月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 高梨, 宇田川, 関, 岡田, 田中:「電算機-実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)」, 日本建築学会論文報告書, 第229号, 1975年3月。
- 2) 山本広祐:「ニューラルネットワークによる履歴挙動のモデリングについて」, 第42回応用力学連合講演予稿集, 1992年。
- 3) ザバラ, 高梨, 大井他:「変動軸力と1軸曲げを受けるH型鋼材のインテリジェント載荷実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 講演番号21540, 1992年8月。
- 4) 矢川元基編:「ニューラルネットワーク—計算力学・応用力学への応用—」, 培風館, 1992年5月。

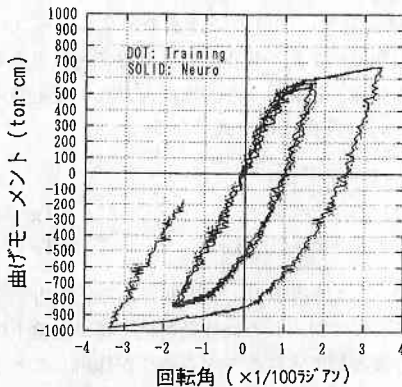


(1) 軸力-軸変位関係



曲げモーメント (×無軸力時の全塑性モーメント)

(2) 軸力-曲げモーメント関係



(3) 曲げモーメント-回転角関係

図6 鋼部材の多軸履歴挙動に対するニューラルネットワークモデルの追従性