

招待論文

ハイブリッド実験の発展と将来

DEVELOPMENT AND FUTURE PROSPECT OF HYBRID EXPERIMENTS

家村浩和*

By Hirokazu IEMURA

1. はじめに

わが国の土木分野においても、限界状態設計法導入の必要性が認識され始めている。特に重要な構造物の設計にあたっては、使用性限界状態のみならず、終局限界状態における信頼性を確認しておくことが望ましい。この目的を達成するには、塑性域から終局状態に至る構造物の複雑な挙動の解明が必要条件であり、各種の実験や数値解析が幅広く実施されている。こうした実験や数値解析を進めていくうえで、常に問題となる事項は、実験を参考にして定めた数値解析モデルが、はたしてどれだけの精度を有しているかということに対する疑問である。複雑な物性を有する地盤や土構造物の静的あるいは動的な挙動の解明においても同様の疑問が常につきまとう。

この疑問を解決していく1つのアプローチとして、最近、ハイブリッド実験という手法が考案された。この手法は、数学的に解明困難な、あるいはモデル化が非常に複雑な要素の諸特性を、実験結果より検出し、これをオンラインで計算機内に送り込み、全体系の数値解析を進めようとするものである。すなわち、今まで個別に実施されてきた実験と数値計算とを混合して同時に進めようとするものである。

このハイブリッド実験の考え方は、最初アナログ計算機と実験とをオンラインで結ぶシステムとして、伯野ら¹⁾によって提案開発された。しかし最近におけるマイクロコンピュータの革命的な発達や²⁾、アナログ量とデジタル量の高速変換技術の進歩に伴って³⁾、デジタル計算機と実験との混合システムに変化してきている。

デジタル計算機は、演算速度や精度、記憶容量さらに判定や制御において非常に優れており、この結果、ハイブリッド実験の考え方は、きわめて汎用性のあるものとなるに至った。近年におけるロボット革命⁴⁾もこの例外ではない。

ハイブリッド実験は、日本で生まれ日本で発達した、ユニークな実験・計算技法であり、その応用範囲は際限なく広い。著者は、計算機のソフトやハードに精通している者ではないが、ハイブリッド実験システムの開発に取り組んできた者の1人として、その歴史や現状さらには将来について、いささか独断的ではあるが、ご紹介する次第である。

2. ハイブリッド実験の考え方と歴史

(1) ハイブリッド実験とは

ハイブリッドという言葉の語源は、辞書によると動植物の雑種あるいは品種改良に対する総称であったらしいが、現在では多くの分野で、いろいろな意味に用いられている。最近流行のハイブリッドダイアナ時計、応力法と変形法を組み合わせたハイブリッド有限要素法、鋼とコンクリートを用いたハイブリッド構造などである。

本稿では、ソフトな数値解析プログラム内に、複雑・未知な要素の特性を実験より取り出すハードなサブルーチンを含めたものを、ハイブリッド実験と定義することにする。類似のよび方として、オンラインリアルタイム実験、アメリカ合衆国で用いられている Pseudo-Dynamic Tests (仮動的実験) などといった用語もあるが、後述するように、載荷速度や構造物モデルの形状、規模が異なっているのみであり、ハイブリッド実験の一部を構成していると考えられる。

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室
(〒606 京都市左京区吉田本町)

(2) アナログ計算機によるハイブリッド実験手法の創造

a) はりのハイブリッド実験

ハイブリッド実験手法の考え方を創造し、そのシステムを最初に開発したのは、伯野らである。彼らの論文「計算機により制御されたはりの動的破壊実験」¹⁾は、この分野を切り開いた研究成果として、特筆に値する。

同論文の中で、ハイブリッド実験に関する基礎的な考え方が、次のように述べられている。「実物大の実験には、巨大な装置とばく大な費用が必要である。そこで、あらかじめ適当な仮定により、大地震を受けた構造物の振動を計算しておき、それを目安としてどの部材が壊れるかを知ってその破壊する部材のみを取り出して、構造部材としての境界条件を与えて、構造物が振動してその一部が破壊するのと同じような状況を再現しようというわけである。」この考え方は、発表後15年以上を経た今日においても、実物-模型-数値解析の相互関係の理解にあたって、卓抜した見識であり、今後の実験手法のほとんどがこの方向をめざすものと考えられる。

同論文において紹介されたハイブリッド実験は、比較的簡単なシステムであるが、この種の実験手法のさきかげとなったものであり、以下にその概要を示す。

一般に、質量 m 、粘性係数 c 、履歴復元力特性 $R(x, t)$ なる1自由度構造物が $\ddot{z}(t)$ なる地盤加速度を受けたときの運動方程式は、周知の次式となる。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + R(x, t) = -m\ddot{z}(t) \dots \dots \dots (1)$$

構造部材の塑性域における複雑な履歴復元力特性を、精度よくモデル化することが困難であるので、伯野らは、これを油圧サーボ試験機より取り出し、式(1)を解くアナログ計算機の回路内にオンラインで組み込んだ。図-1にその概略図を示すが、システムをスタートさせれば、自動的に変位出力 x が算出され、サーボ試験機を所定の位置 x にまで動かすことができる。復元力 $R(x, t)$ は力計アンプを介してアナログ計算機内に取り

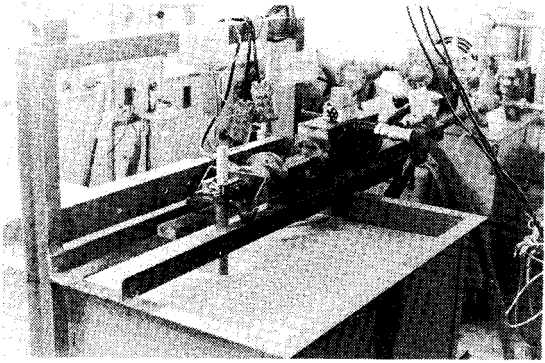


写真-1 砂層中の杭模型とサーボ弁⁵⁾

込まれ、式(1)が解かれる。アナログ計算機では、すべての変数が電圧の変化として処理される。同実験の供試体としては、一端固定の曲げ鋼材が用いられ、非線形応答時における振動周期の増大、応答倍率の減少といった一般的な傾向のみならず、非定常不規則応答時の履歴形状などに関しても興味ある結果が得られている。

b) 砂層中杭模型のハイブリッド実験

伯野ら^{5), 6)}は、上記のアナログ計算機-油圧サーボ試験機システムに、砂層中の杭模型頂点における変位-復元力の関係を取り込む実験を行った(写真-1参照)。その結果、乾燥砂や飽和砂中の杭の振動時に発生する地盤反力とその不規則地震応答に関する興味ある資料を得た。

望月⁷⁾は、同様のシステムを、杭上部構造物連成系の振動解析に応用している。

c) 液状化地盤のハイブリッド実験

片田と伯野^{8), 9)}は、上記の実験システムを、液状化地盤の変位-復元力関係を検出する振動三軸試験装置とアナログ計算機との組合せに発展させた。この実験システムにより、液状化地盤の不規則地震応答と、液状化の過程を、非常に精度よく説明できるようになった。

d) アナログ計算機の短所

アナログ計算機では、すべての変数が電圧の変化として処理されるために、実験装置との間に特別なインターフェイスを必要とせず、ハイブリッド実験システムを、比較的簡単に構成できる。しかしながら、伯野らが当初から指摘しているように¹⁾、アナログ計算機は次の短所を有している。

i) 演算にあたって1~2%程度の誤差は避けられないし、演算時間が2~3分以上となると精度はさらに落ちる。このため継続時間が長くなる実験は、ほとんど不可能である。

ii) 偏微分方程式を解くなどの複雑な計算が困難であるばかりでなく、各種の境界条件を与えるこ

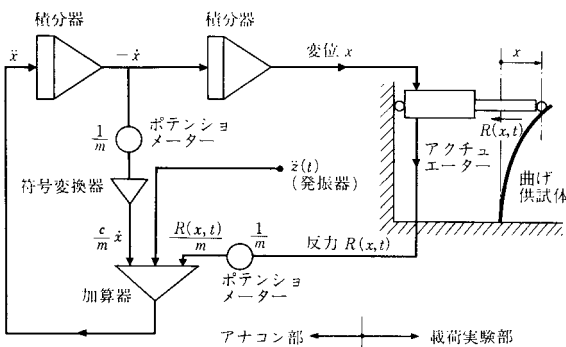


図-1 アナコンによるはりのハイブリッド実験システム¹⁾

とが不可能に近いので、実験は比較的単純なシステムに限られる。

iii) 各種の判定や制御が困難であるから、システムに汎用性がない。

以上の問題点は、後述のようにシステム制御機としてデジタル計算機を採用することにより、ほとんど解消される。

(3) マイクロコンピュータとインターフェイスの発達

最近における電子計算機とデジタル情報処理技術の発達には、革命的な側面さえ感じられる^{2),10)}。著者は、これらすべてについて展望する知識を持ち合わせていないので、中小規模の実験に適したマイクロコンピュータ(最近では、パーソナルコンピュータともいわれているが、ここでは以下簡単にマイコンという)とその周辺機器の発達について概略を述べる。

a) マイコンの発達

マイコンとは、そのCPU (Central Processing Unit, 中央処理装置) が1個のチップ(=1個のLSI, Large Scale Integration, 大規模集積回路)あるいは数個のチップからなる超小型の計算機のことである。1970年代前半から中頃にかけて、8ビット型の(2進数の8桁を並列処理できる)CPUが開発され、爆発的なマイコン時代を迎えた。著者も1970年代後半から、数年間この8ビットマイコンをハイブリッド実験に利用してきた。しかし1980年代に入って16ビット型のCPUを有するマイコンが市販されるようになり、RAM (Random Access Memory, 読み書き自由記憶素子)の飛躍的な増大と相まって、現在では、いわゆるミニコンピュータ(小型計算機)と、性能面ではほとんど区別で

きない程度にまで発達してきている。

b) インターフェイスと周辺機器の発達

最近のマイコンの構成を図-2に示した。同図中点線で囲った部分は、一般によく見掛けるマイコンである。ハイブリッド実験のためには、点線外の部分、とりわけ計測のための入力(Input)部および制御のための出力(Output)部が必要となってくる。こうしたIO機器を介して数値データを、ハードな実験装置とやり取りするためには、GP-IB (General Purpose Interface Bus) 付きのマイコン(計測用のマイコン)が非常に便利である。このGP-IBとは、1975年に国際規格となった、コンピュータとIOデバイス間のデータを、並列形式で出入させる共通信号路のことであり、i) 最高30台程度までの各種機器と接続できる、ii) 各種機器の反応速度の差をコントロールする必要がない、などの利点がある。

AD変換器の原理は、外部入力電圧と基準電圧とを比較し、その結果を2のn乗分割してデジタル化するものである。たとえば、±10Vの入力電圧を12ビットのデジタル量に変換すると、-10Vが0, 0Vが2048, +10Vが4095という数字に対応することになる。またサンプリング周波数もkHz程度であれば簡単にこなせるようになってきている。DA変換器は、AD変換器と逆で、ほぼ同様の原理により、デジタル量を出力電圧に変換させている。したがってAD, DA変換器を選定するにあたっては、利用する電圧の範囲、必要とされる分解能やサンプリング周波数に注意する必要がある。

RS 232 Cは、データを音響カプラーなどを通して大型計算機などに直列形式で転送するInterfaceであるが、最近ではプリンター、プロッターにも接続されている。その他、大量のデータを一時的に記憶させるための固定ディスク、長期保存させておくためのデジタルデータレコーダーなども利用され始めている。また最近のマイコンは、その演算速度のみならず、プリンター、プロッターなど周辺機器の実行速度も向上しており、超大量のメモリー、超高速の演算速度を必要としないかぎり、大型計算機の手助けを借りなくても、ほとんどローカルで、安価に(電気代、用紙代のみで)実験目的をほぼ達成できるようになってきつつある。

(4) 実験室の自動化

マイコンと周辺機器の発達により、それまで手作業に頼ってきた実験は、大きく自動化されることになった³⁾。多点におけるデータの自動計測や、変位あるいは反力制御による高度な載荷順序の採用、あるいはリアルタイムでのデー

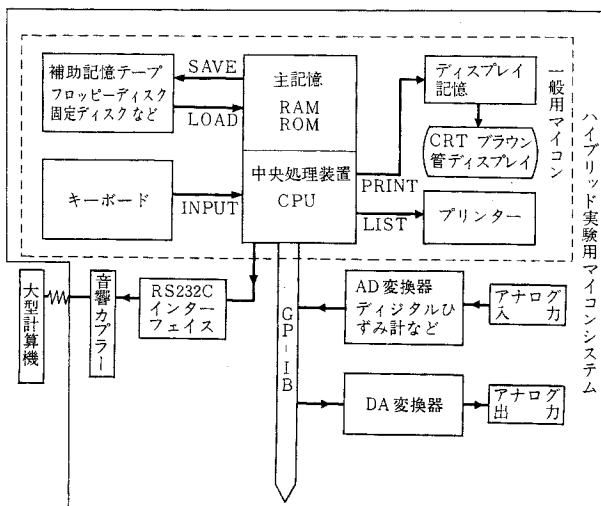


図-2 ハイブリッド実験用マイコンシステム

タ処理と結果の判定などにより、実験手法ひいては実験内容そのもののレベルが飛躍的に向上してきている。この実験室の自動化は、OA (Office Automation), FA (Factory Automation) と同様に、LA (Laboratory Automation) とよばれている¹⁰⁾。自動計測・自動制御の技法は、実験室のみに限らず、工事現場や河川、交通などの制御システムに幅広く用いられているが、ここでは、LAのみに限ってその例を若干紹介する。

丹羽・渡辺ら^{11)~13)}は、薄肉断面である鋼箱桁の不安定現象を包含する弾塑性大変形問題を解明するため、図一3に示すような自動実験システムを開発した。このシステムは、大別して、サーボ型加力機、データ自動計測部およびマイコンによるデジタル制御部より構成されている。実験にあたっては、供試体の初期不整や載荷中の座屈状況などの多点変位の同時自動計測と、繰り返し載荷の荷重レベルの自動制御などにマイコンを利用している。その結果、初期変位・残留変形が、繰り返し荷重下での終局耐力に及ぼす影響に関する貴重な資料を得ている。

実験室の自動化は、構造工学分野のみでなく、土質工学の分野においても進んでいる。圧密試験など長時間を要する実験では、自動化の利点がきわめて大きい。赤井・大西ら¹⁴⁾は、 K_0 圧密後の粘土の単調あるいは繰り返し載荷試験に、自動実験システムを導入している。このシステムでは、自動計測はもちろん、応力やひずみあるいはそれらの速度の制御など、任意の載荷パターンで実験

を進められるようになっている。

上記のほか、材料実験など多くの分野において、実験室の自動化が進んでいる¹⁵⁾。またこれらに伴って、計測機器のデジタル化も急ピッチで進んでいる。近い将来、計測機器のほとんどは、GP-IBに直結できる型式になるものと考えられる。

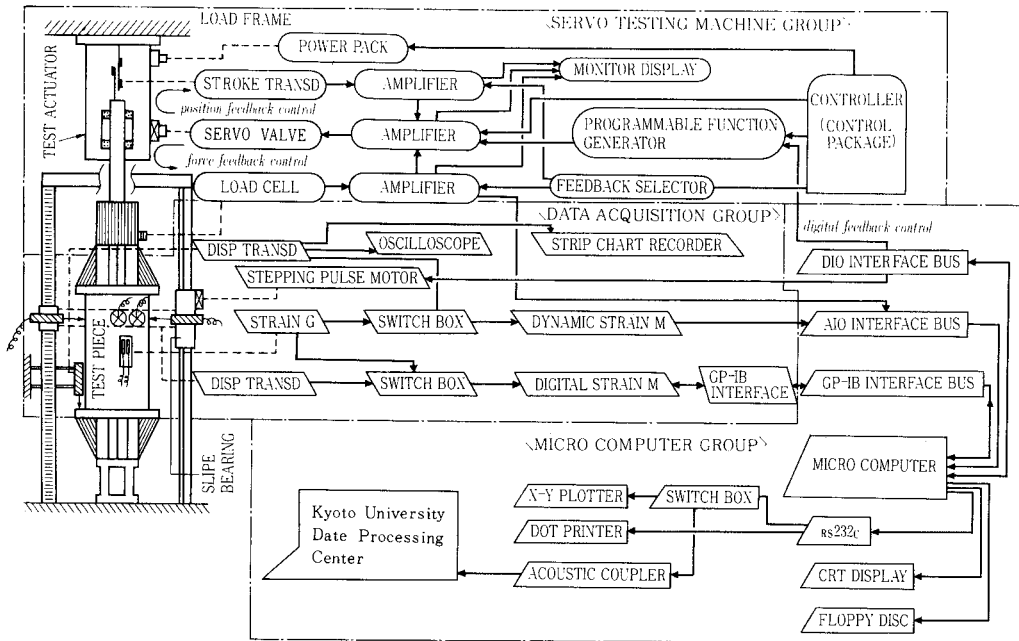
マイコンを利用した実験の自動計測・制御システムは、本稿の主題であるハイブリッド実験のシステムと、見掛け上ほとんど同一の構成となっており、ハードな意味での差は全くない。しかし、自動計測・制御システムが、実験目的を計算機を用いて合理的に達成しようとするのに対し、ハイブリッド実験は、計算機内での数値計算に、実験結果を直接オンラインで取り込んでいくもので、ソフトな意味で、両者の基礎的な考え方は全く異なっていることを注意しておきたい。

3. デジタル計算機を用いたハイブリッド実験システムの現状

本章では、デジタル計算機と実験装置を組み合わせたハイブリッドシステムによる過去の実験事例や、現在進められている研究例について、その目的、構成、特徴などの概略を紹介する。

(1) 高梨・岡田らによる研究

高梨ら^{16)~18)}は、アナログコンピュータを用いた伯野らのハイブリッド実験システムを発展させ、ミニコンピュータと電気油圧式アクチュエーターをオンラインで



図一3 丹羽・渡辺らによる自動計測・制御システム¹²⁾

結合して、構造物あるいは構造物材の弾塑性地震応答解析を行うシステムを開発した。このシステムの目的は、i) 構造物または部材の復元力特性の数式モデルの妥当性を調べ、ii) 容易に数式表現できないような複雑な復元力特性を有する構造物の地震応答を知ることである。

図-4は、高梨らの論文¹⁸⁾中に示されたものであるが、ハイブリッドシステムの構成を知るうえで便利である。すなわち、通常の数値解析では、部材端のモーメント-回転角係を比較的単純なバイリニアなどの履歴モデルで仮定し、構造物の地震応答計算をstep-by-stepの積分により実施している。この流れが点線で囲んだ左側(a)のComputer Analysisの部分である。一方、右側(b)のHybrid Analysisの部分では、アクチュエーターより検出される1層および2層の復元力特性 F_1, F_2 を計算機の地震応答解析プログラム内に取り込みながら、応答変位 x_1, x_2 を算出し、これをアクチュエーターにフィードバックしている。このシステムにより、2層構造物モデルの、地震時における履歴復元力特性と、応答とを同時に精度よく評価できるようになった。計算機内での地震応答計算にあたっては、各時刻における剛性マトリックスの正確な評価が困難なので、各層の運動方程式を、中央差分法により解いている。

高梨らは、このシステムを用いて、高力ボルト摩擦接合部にすべりが生ずる多層骨組の地震応答解析などを実施している^{19), 20)}。

岡田らは、高梨と同様のハイブリッド実験手法を、鉄

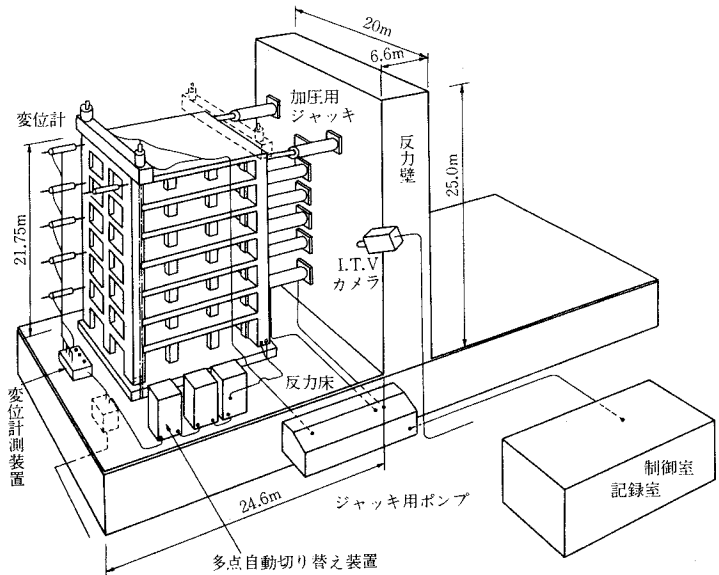


図-5 RC造7階建て建物の実験風景²⁷⁾

筋コンクリート骨組に適用した研究成果を数多く発表している^{21)~25)}。

(2) 建築研究所における仮動的実験システム

建築研究所は、高梨、岡田らの研究成果を踏まえて、鉄筋コンクリート造の実物大7層供試体の、地震応答載荷実験システムを開発し、塑性域における力学的挙動の解明に関する研究を進めた²⁶⁾。このプロジェクトは、「大型実験システム利用による日米共同耐震実験研究」として推進されたものである²⁷⁾。その目的は、部材レベルにおける各種の実験結果や、縮小模型による振動台実験結果、あるいは既存の解析プログラムによる数値計算結果などの妥当性を、実物実験との比較より検討しようとするところにある。この実験システム中の載荷実験装置部と供試体を図-5に示すが、その規模は実に壮大である。

この実物大供試体による実験は、

実際の構造物が実地震応答時に示すであろう動的挙動を、コンピュータの力を借りて算出し、その結果を実地震動の数倍の時間をかけて再現する間に、構造物各部に発生する複雑な力学的特性を計測しようとするものである^{28), 29)}。こうしたことから、この実験は、仮動的実験(英語ではPseudo-Dynamic Tests)とよばれている。本稿でいうハイブリッド実験とは、構造物材あるいは要素自体の静的・動的な特性のみならず、それらの境界条件をも、計算機により

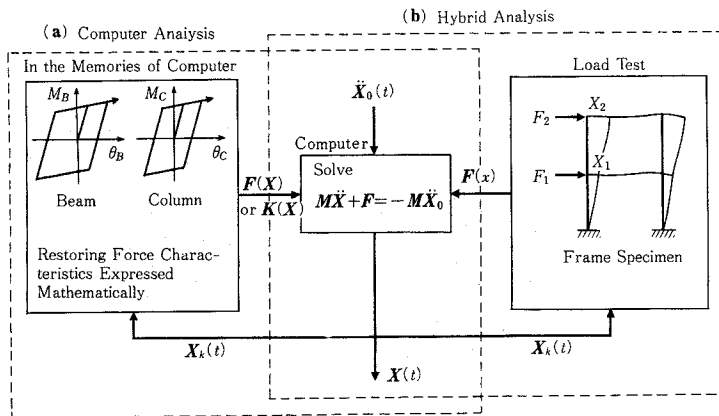


図-4 数値解析とハイブリッド実験の差¹⁸⁾

制御しようとするものであるから、部材の境界条件を実物大の供試体ですべて満足させようとする仮動的実験は、ハイブリッド実験手法の一部であると位置づけることができる。

この仮動的実験の供試体規模は壮大であるが、地震応答計算にあたっては、一次振動モードのみに注目した1自由度解析が実施された。その理由は、高次振動成分を含んだ載荷では、各層間に逆位相の加力を行う必要があるが、これにはアクチュエーターの性能上の問題点があったことなどである。しかし、実地震動による実構造物の動的応答を、できるだけ精度よく評価するという立場からは、7層すべての自由度を考慮した解析がなされるべきである。鉄筋コンクリート構造に続いて実施された鉄骨構造の仮動的実験では、すべての自由度を取り入れた応答計算が採用された。

鉄筋コンクリート構造の実験では、載荷試験後の供試体を修復し、その効果を判定するための再載荷実験も実施されている。これらの成果および、日米共同研究による他の成果は、第8回世界地震工学会議のセッション9.6 US-JAPAN Co-operative Research Programs: Test of Reinforced Concrete Structures³⁰⁾において発表されている。

(3) 山田・家村らによる研究

山田・家村ら^{31)~33)}は、鉄筋コンクリート曲げ部材のハイブリッド実験システムを、昭和56年に開発し、以来種々の地震応答載荷実験を実施してきている。このシステムの基礎的な構成は、高梨・岡田らのそれとほぼ同一であるが、計算機として一般に市販されている8ビットマイコンを利用した点において、大学の研究室レベルにおける実験のハイブリッド化あるいは自動計測・自動制御化に新しい道を拓くものであった。すなわち、一般のマイコンシステムに、数十万円程度のAD-DA変換機を追加することにより、ハイブリッド実験システムにおける、計測・演算・制御部分を構成できるようになった。

このハイブリッド実験システムを利用して、山田・家村らは、通常の軸力が作用している場合あるいはない場合のRC柱模型の曲げせん断地震応答載荷実験を実施し、累積履歴エネルギー吸収量が、構造部材の損傷度を示すよい指標であることなどを指摘している^{34)~36)}。また処女載荷実験により損傷を被った部材を、エポキシ樹脂の注入、主鉄筋の添接あるいは、鋼板の接着などの手法により補修・補強した後、処女部材と同一の再載荷実験を実施し、修復工法の効果などに関する検討を実施している^{37), 38)}。図-6(a)は、処女載荷時の変位と復元力の履歴特性であり、同図(b)は、複鉄筋コンクリートの片側の主鉄筋を添接補強した後、処女載荷と全く同一

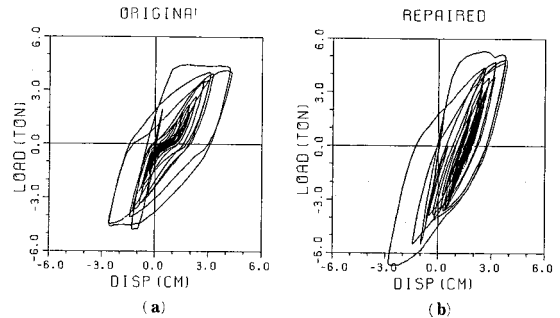


図-6 RC部材の処女載荷と修復再載荷実験の履歴ループ

のハイブリッド実験を実施した場合の履歴復元力特性である。修復により負側の降伏強度が増大し、非対称な復元力特性となっているが、修復効果は十分であると判断される。

山田・家村らは、最近16ビットマイコンによるハイブリッド実験システムを開発した。このシステムを用いて変動軸力下での横拘束RC柱の曲げ地震応答実験を実施している。このシステムの構成を図-7に示したが、マイコンにより、曲げ荷重を変位制御で、変動軸力を反力制御で、供試体に作用させている。16ビットマイコンは、図-2に示したような機能を有し、写真-2にみられるように、実験結果を刻々とCRT上に表示することができる。すなわち、自動計測、自動制御、自動図化を含んだ立体的なハイブリッドシステムで、HYLSER (Hybrid Loading System of Earthquake Response) と称されている。

(4) 片田・伯野らによる研究

片田・伯野ら^{39)~41)}は、アナコンによる液状化地盤の地震応答実験を、マイコンを用いたシステムに改良し、層状地盤全体系の地震応答解析と液状化実験装置とを組合せた、より高度な手法によるハイブリッド実験システムへと発展させた。



写真-2 HYLSERにおける16ビットマイコンシステム

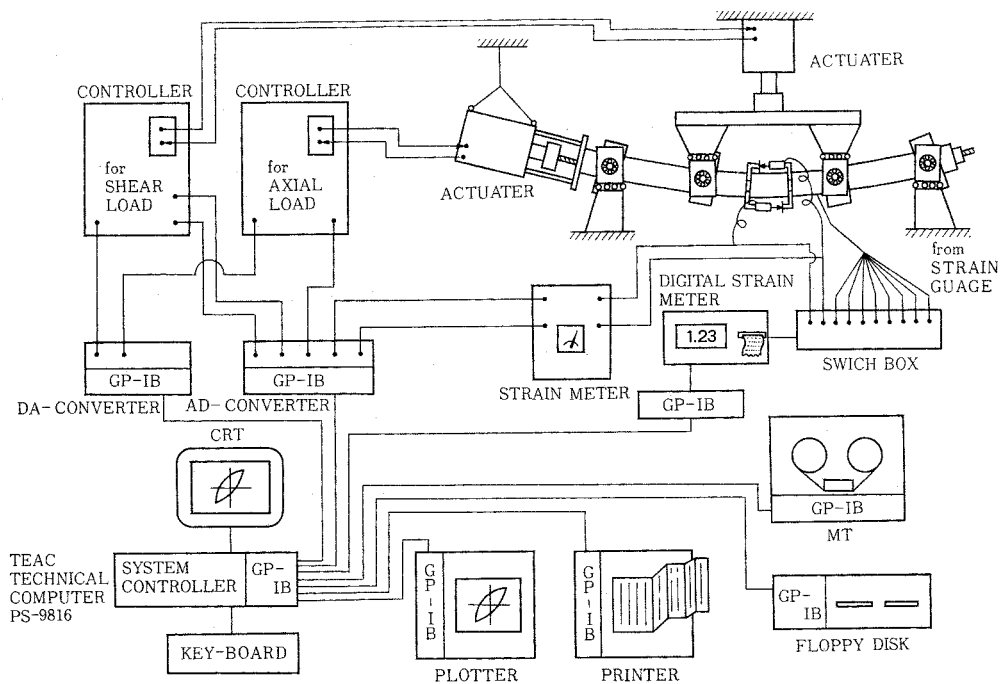


図-7 HYLSEERによる変動軸力下での曲げ破壊実験システム

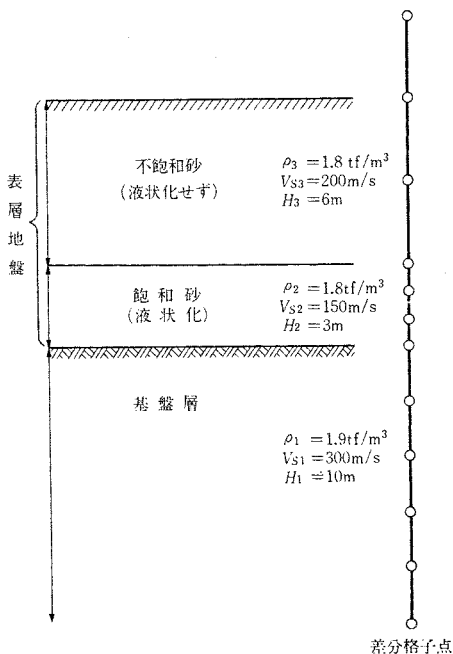


図-8 地震応答解析に用いた地盤モデル⁴¹⁾

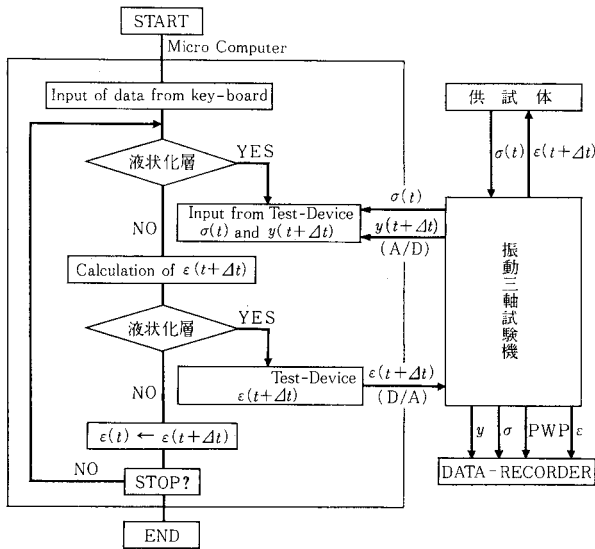
地震応答を評価しようとする全体系は、図-8に示した層状地盤であるが、液状化層外の地盤の応答は、バイリニア型復元力特性仮定した非線形波動方程式の差分による数値解析を進める⁴¹⁾。一方液状化層に関しては、マ

アイコンにより算出された境界条件を振動三軸試験機に与えて復元力特性を検出し、これを全体系の応答計算に持ち込むという、文字どおりのハイブリッド実験となっている(図-9参照)。この実験システムの完成により、伯野が15年前に提案した理想的なハイブリッド実験システムが、ほぼ実現されたといっても過言ではない。

4. ハイブリッド実験の将来

ハイブリッド実験システムの現状として、地震応答解析に関する研究例を紹介したが、このシステムは他のいろいろな実験に応用可能である。ハイブリッド実験の基本的な考え方は、図-10に示したように、あくまでコンピュータソフトと実験装置との有機的な結合にある。こうした考え方からすると、今後のほとんどすべての実験は、多少の差はあっても、コンピュータによる自動計測・自動制御方式を採用していくものと考えられる。しかしながら、本稿で特に強調しているハイブリッド実験とは、コンピュータで計算できる要素と、実験からのみその特性が明らかとなる要素とを巧みに結合させ、同時に解析しようとするものである。議論が若干乱暴となるが、土木工学の各分野における、ハイブリッド実験の将来について述べると次のようである。

まず構造解析の分野では、構造物全体の中で、特に大きな弾塑性挙動を示す要素、応力集中を発生する局部、特別に高い信頼性を有するべき部材、などの力学的特性の

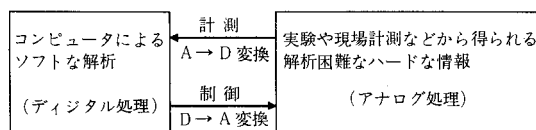


図—9 液化化多層地盤のハイブリッド実験システム⁴¹⁾

実験的な検証と、全体系の挙動の追求といった問題に対して、非常に有力な手法である。具体的には、地震時における高力ボルト接合部の挙動、橋梁支承部の挙動、原子力発電所における原子力容器の挙動さらには、応力集中部を有するシェル構造の座屈変形問題の解明などである。

材料力学の分野でも、この種の実験はきわめて大きな力を発揮するものと考えられる。著者らは、複合構造の一種である鉄筋コンクリート部材の地震時応答特性の解明に、このシステムを利用している。ハイブリッド実験の考え方をさらに徹底すれば、コンクリートや鉄筋の応力-ひずみ関係を実験より検出し、その結果をコンピュータ内で積分して、RCやSRC構造の力学的特性を算出するといったユニークな手法も考えられる。

地盤解析の分野では、著者はこの分野を専門としないが、ハイブリッド実験手法の採用により、現場-実験-解析を結びつける総合的な研究が可能になるのではないだろうか？ 伯野・片田らによる液化化問題はもとより、圧密問題、せん断すべり破壊問題、透水問題などへの応用が考えられる。また最近用いられているFEM解析中のジョイント要素などを実験システムで置換し、その他の部分はコンピュータで解析するなどといったことも将来実施されるかもしれない。特に地盤工学の分野では、実験



図—10 ハードな情報とソフトな解析のキャッチボール

結果のみならず、現場計測データと計算機とのハイブリッドな利用が有効な解析手法になってくるものと予想される。

その他、解析がきわめて困難な非定常流体中における構造物の動的応答問題などに対しても、ハイブリッド実験手法が利用できるかもしれない。著者の貧弱な知識では、ハイブリッド実験手法の将来を十分見通すことはできない。読者の方々の多くの意見と討議をお願いする次第である。

なお、実験システムに限らず、現場データとコンピュータとのハイブリッドシステムに関しては、交通、洪水などの管制システムをはじめ、災害時の避難・救援戦略のリアルタイム処理など、多方面ですでに実施されていたり、計画されているが、この方面については、紙面数の都合もあり、割愛させて頂くことにした。

5. あとがき

著者は、マイコンの専門家でもなく、またハイブリッド実験を創造した者でもない。しかし、この実験手法のいわば生みの親とでもいふべき伯野教授から、強い推薦を頂いたので、この種の実験の開発にかかわってきた者の1人として、非才を省みず投稿した次第である。

本稿で紹介したハイブリッド実験の手法と技術は、全世界の中で、日本が最も進んでいる研究分野の1つであるといえる。事実、第8回世界地震工学会議の会場で、ポポフ教授が、「パークレイでもこのシステムを作ったからみてほしい」といわれており、また中国やユーゴスラビアなどからの問合せも多い。日本で生まれ育った技術が、世界の各地で用いられるようになるよう努力したいと考えている。

一方、この実験システムに関する、ややいじわるな意見として、「ハイブリッド実験といっても、それはしよせん一道具、一手法に過ぎない」といったものがある。しかし、計算のための道具にすぎないコンピュータが切り開いた現在の世界をみれば、その批判に対する答えはおのずと明らかである。ハイブリッド実験は、その汎用性のため、限らない発展性を有している。

著者は、ハイブリッド解析プログラムの中に潜んでいた小さな1匹の虫のために、数か月かけて作製した供試体を一瞬のうちに崩されたなどの苦い経験を有している。しかし、いったんシステムが完成すると、これほど強力で、便利で、楽な実験はほかにないといえる。コンピュータがすべてを実行してくれるので、われわれはただ実験をみておればよいのである。しかし、システムの構成を考え開発するのは、あくまで人間の知恵と汗である。本稿が、この方面に興味ある方々の参考となり、独

自の新しいシステムを開発されるための一助となれば幸いである。

謝 辞：本稿をとりまとめるに際して，東京大学地震研究所 伯野元彦教授と京都大学防災研究所 土岐憲三教授とから，ご指導とご支援を頂きました。京都大学工学部 山田善一教授からは，日頃より実験システムの開発にあたって全般的なご指導を頂いております。同渡辺英一助教授，大西有三助教授との実験に関する討議は，システムの開発と本稿のとりまとめに，大いに役立ちました。マイコンに関する記述部分では，日本コンピューターコンサルタンツ代表取締役岸本英明氏や著者の所属する耐震工学研究室の皆様との討議が有益でした。本稿中の写真や図数枚は，参考文献中より引用させて頂きました。お世話になった以上の各氏に，紙面を借りて深謝する次第であります。

参 考 文 献

- 1) 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，pp.1~9，1969-11.
- 2) 石田晴久：マイコンの現状と動向，第7回電算機利用に関するシンポジウム講演概要，土木学会電算機利用委員会，pp.125~139，1982-10.
- 3) 江川幸一・磯部俊夫：マイコンによるデータ計測，培風館，昭和59年6月.
- 4) 長谷川幸雄：ロボット技術の動向と将来，第7回電算機利用に関するシンポジウム講演概要，土木学会電算機利用委員会，pp.145~150，1982-10.
- 5) 伯野元彦・横山功一・佐藤安一郎：模型杭基礎の復元力特性に関するオンライン・リアルタイム実験，土木学会論文報告集，No. 200，pp.85~90，1972-4.
- 6) Hakuno, M.: Hybrid Failure Test on A Structural Member, Proc. of 5th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.1, pp.799~802, June 1973.
- 7) 望月利男：くい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(その1)，日本建築学会論文報告集，No.318，pp.63~71，1975-5.
- 8) 片田敏行・伯野元彦：オンライン実験による液状化地盤の非線形振動解析，土木学会論文報告集，No.318，pp.21~28，1982-2.
- 9) Katada, T. and Hakuno, M.: Online Experimental Analysis of Surface Ground in Liquefaction Process, Third International Earthquake Microzonation Conference, Seattle, June 1982.
- 10) パネルディスカッション「土木工学におけるマイコンの利用」，第7回電算機利用に関するシンポジウム講演概要，土木学会電算機利用委員会，pp.140~144，1982-10.
- 11) 渡辺英一：サーボ試験機による鋼桁筋のオンライン反復大変形試験に関する研究，昭和57年科学研究費補助金(試験研究(2))研究成果報告集，昭和58年3月.
- 12) Niwa, Y., Watanabe, E. and Isami, H.: Automated Structural Testing Using Microcomputer System, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, No. 332, pp.145~158, April 1983.
- 13) 渡辺英一・勇 秀憲：構造物のオンライン座屈実験へのマイコンの応用，経営科学セミナー資料，昭和58年6月.
- 14) Akai, K., Ohnishi, Y. and Konishi, S.: Static and Cyclic Triaxial Loading Tests of K_0 -consolidated Clay, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, Vol. XLV, Part 2, pp.108~125, April 1983.
- 15) マイコンを利用した材料の設計・加工・評価に関する講習会，日本材料学会関西支部，昭和57年3月.
- 16) 高梨晃一・宇田川邦明・関松太郎・岡田恒雄・田中 尚：電算機一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，No.229，pp.77~83，1975-3.
- 17) 宇田川邦明・高梨晃一・田中 尚：電算機一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2)はり崩壊型一層一スパン鋼フレーム，日本建築学会論文報告集，No.268，pp.49~59，1978-6.
- 18) 高梨晃一・宇田川邦明・田中 尚：電算機一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3)2層鉄骨フレームの解析例，日本建築学会論文報告集，No.288，pp.115~125，1980-2.
- 19) 谷口英武・高梨晃一・田中 尚・田中淳夫：電算機一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4)高力ボルト摩擦接合部にすべりが生ずる骨組の地震応答解析例，日本建築学会論文報告集，No.291，pp.33~43，1980-5.
- 20) 谷口英武・高梨晃一・田中 尚：電算機一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5)高力ボルト摩擦接合部にすべりが生ずる多層骨組の地震応答解析例，日本建築学会論文報告集，No.295，pp.71~83，1980-9.
- 21) 岡田恒雄・関松太郎：電算機一アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その1)目的および方法論，日本建築学会論文報告集，No.275，pp.25~31，1979-1.
- 22) 岡田恒雄・関松太郎：電算機一アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その2)オンライン応答実験-1，日本建築学会論文報告集，No.279，pp.77~84，1979-5.
- 23) 関松太郎・岡田恒雄：電算機一アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その3)オンライン応答実験-2，日本建築学会論文報告集，No.280，pp.79~89，1979-6.
- 24) 岡田恒雄・関松太郎：電算機一アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その4)地震応答特性の検討，日本建築学会論文報告集，No.282，pp.57~64，1979-8.
- 25) 岡田恒雄・関松太郎：電算機一アクチュエーターオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その5)等価線形化法による検討および結論，日本建築学会論文報告集，No.284，pp.79~84，1979-10.
- 26) 岡本 伸：仮動的実物大耐震実験システムの開発，建設

- 省建築研究所秋季講演会梗概集, pp. 259~286, 昭和54年11月.
- 27) 日米共同大型耐震実験研究国内委員会：大型実験施設利用による日米共同耐震実験研究, 季刊カラム, No. 80, 昭和56年3月.
- 28) 上之蘭隆志・岡本 伸・北川良知・中田慎介・芳村 学：鉄筋コンクリート造実大7層試験体の耐震性に関する研究(その1 実験概要および実験結果), 第6回日本地震工学シンポジウム論文集, 昭和57年12月.
- 29) 芳村 学・上之蘭隆志・黒瀬行信・坪崎裕幸：鉄筋コンクリート造実物大7層試験体の耐震性に関する研究(その2 試験体の力学的挙動に関する考察), 日本地震工学シンポジウム論文集, 昭和57年12月.
- 30) U.S.-JAPAN Co-operative Research Programs: Tests of Reinforced Concrete Structures, Session 9.6, Proc. of 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, pp. 593~706, July 1984.
- 31) Iemura, H.: Earthquake Failure Criteria of Deteriorating Hysteretic Structures, Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, pp. 81~88, Sept. 1980.
- 32) Yamada, Y. and Iemura, H.: Hybrid Analysis on Earthquake Response of Deteriorating Hysteretic Structures, Proceeding of Sino-American Symposium on Bridge and Structural Engineering, Part 1, pp. 4-13-1~4-13-14, Sept. 1982.
- 33) 山田善一・家村浩和・中西伸二・四方敏明：マイクロコンピュータによるRC構造物のハイブリッド地震応答実験, 第7回電算機利用に関するシンポジウム講演概要, 土木学会計算機利用委員会, pp. 77~80, 昭和57年10月.
- 34) Iemura, H., Kato, T. and Kawatani, Y.: Hybrid Experiment on Earthquake Response of Original and Repaired RC Members, Proceedings, of the Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 825~832, December 1982.
- 35) 山田善一・家村浩和・西村一郎：履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価, 第17回地震工学研究発表会講演概要, pp. 231~234, 1984-7.
- 36) Iemura, H.: Hybrid Experiment on Earthquake Failure Criteria of Reinforced Concrete Structures, Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, pp. 103~110, July 1984.
- 37) 山田善一・家村浩和：強震動による劣化履歴構造物の損傷度判定と修復法に関する研究, 第19回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 217~218, 1982-11.
- 38) 山田善一・家村浩和・水元義久・伊津野和行：鉄筋コンクリート柱模型の修復・補強と地震応答再載荷実験, 第21回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 93~96, 1984-10.
- 39) 片田敏行・板谷裕二・阿部幸樹・勝田博敏：マイコンを用いたプログラム制御オンライン実験方法により得られる液状化砂の非線形復元力特性の解析, 第19回土質工学研究発表会, 土質工学会, 1984-6.
- 40) Katada, T. and Hakuno, M.: Nonlinear Analysis of Surface Ground Motion by Digital Controlled On-line Experimental Method, Proc. of World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, pp. 1033~1040, July 1984.
- 41) 片田敏行：飽和砂層を含む多層地盤の実復元力を用いた非線形波動解析, 土木学会論文報告集, 昭和60年4月(登載決定).

(1985.2.12・受付)