

構造物の耐震設計と動的解析算法

Algorithm of Structural Dynamics in Aseismic Design

高瀬啓元* Takase Hiromoto

建設業務におけるコンピュータの利用は、超高層ビルの動的解析に始まり適用面を広げてきたが、今でも技術計算の典型はやはり動的解析関係になる。動的解析は、耐震設計のプロセス中で設計案の安全性をチェックし、設計改良へとフィードバックさせる。一方、建設に至った構造物から振動実験や地震観測データを得、解析法にフィードバックさせてきた。このような機能を果たす動的解析の算法は幾つかの要件を満たすべきである。この点で筆者なりの分析を行ない、原子炉関係の実例(H T G R炉心実験解析)で裏づけにする。特に重視されるのは、フィードバックの効く効率的算法であることで、この限りでは自由な理論仮定と大胆な数値仮定が許される。

1 緒言

鹿島建設株式会社が建設業におけるコンピュータの利用に着目したのが昭和37年、最初のコンピュータHIPAC 101が導入されたのが38年であるから、既に十数年を経たことになる。この間、業務の進展に伴い、HIPAC 103, HITAC 5020, HITAC 8500としだいに大規模となり、52年には超大形機HITAC M180の導入に至った。このコンピュータの大形化の要因としては、超高層ビルの建設を契機として発展し、業務の拡大とともに利用面も広がったことがあげられる。これまでに鹿島建設株式会で開発されたアプリケーション・プログラムは、技術計算分野で技術レベルが高く、かつ利用性の高いものだけでも2,000種に及んでいる。主なものとして、超高層ビル、原子炉の耐震解析、P C橋梁、R C建家、鉄骨建家の構造解析、大規模地下発電所建設に当たっての岩盤の応力解析、また熱・音・風・波の現象解析などがある。近年、技術計算の規模はますます大型化する傾向にあり、新しい解析手法を開発する必要も多く、コンピュータの高度利用を前提とした精密解析が不可欠となってきた。本稿の発表を機会に、耐震設計のための動的解析算法の要件をまとめながら、最近の実例について紹介したい。

2 建設業務とコンピュータ

本題に入る前提として、建設業務のプロセスに沿ってコンピュータがどのように利用されているかを整理し、紹介する。

2.1 建設業務のプロセス

建設工事の計画から完了までを次の4段階に分類できる。

(1) 計画段階

工事の目的を明確にし、経済的で合理的な仕様を決める。

(2) 調査段階

計画の合理化及び設計施工業務に必要な資料を得るための事項を調査する。

(3) 設計段階

工事仕様にに基づき、調査資料を参考に施工条件を考慮して経済的で安全な構造物を設計する。

(4) 施工段階

工事仕様、設計図に基づき安全に施工する。

2.2 建設業の業務形態

建設業務のプロセスのどの部分を担当するかによって、業務形態を分類することができる。

(1) 施工

企業者側が計画、調査、設計を担当し、建設業は施工だけを担当する。

(2) 設計施工

建設業が仕様調査結果に基づき設計、及び施工を担当する。

(3) 調査設計施工

更に調査業務をも含めて担当する。

(4) 一括受注(ターンキー)

企業者側は計画の前段階の企画業務だけを担当し、建設業が計画から施工までの一連の業務を担当する。

以上は単なる請負業から建設業務が広がってきたことを示すが、これ以外に設計だけとか調査だけで施工に至らないケースは多く、これらも独立の業務形態と考えるべきである。

2.3 建設業務のプロセスとコンピュータの利用

計画、調査、設計、施工の各プロセスで特徴あるコンピュータの利用が行なわれている。建設業務の拡大過程で利用が必然的に広がった。超高層ビルの耐震解析は設計施工業務への適用であり、最近では計画段階での採算計算なども必要な計算である。各段階へ広がった主な利用をまとめてみると次に述べるようになる。

(1) 計画段階での利用：各種フィージビリティスタディ

(2) 調査段階での利用：設計図書調査、現地調査、環境調査

(3) 設計段階での利用：設計計算、耐震解析、構造解析

(4) 施工段階での利用：施工計画、施工管理、施工技術

以下の章では、耐震解析関係のコンピュータ利用に問題を絞りたい。

3 構造物の動的設計(参考文献1)より多数引用)

地震国日本に超高層ビルの建築を可能にしたのは、コンピュータをフルに活用した「動的解析法」による耐震設計が確立されたことによる。すなわち、試設計した建物に対して仮想の地震波を入力として加え、その応答をコンピュータによって検討しこれを設計にフィードバックして、必要があれば

* 鹿島建設株式会社電子計算センター

修正を加え改善するという、いわゆる「動的設計法」が最も信頼できる方法であることが確認されている。この動的設計法は、その後、超高層ビルだけでなく、原子力発電所、橋梁、地下構造物、水中構造物、タワーなど、次々と他の構造物へと応用され、更に構造物だけでなく、内部の設備機器(エレベーター、通信機器、コンピュータなど)の耐震化にまで発展した。このような動的設計法が信頼を得た理由の一つとして、完成後のフィードバックがある。工事中の振動実験や、竣工後の地震観測のデータをコンピュータによる解析で再現し、耐震性を実証したり、今後の動的設計、解析法の改善に資するよう心がけてきた。このような使用に耐える動的解析プログラムは、それなりの要件があると思われる。

4 動的解析算法の要件

解析対象物、諸条件、解析目的などを調査検討して、新しく解析算法を開発することになると、理論解析、数値解析及びコーディング、数値実験といった手順で進められる。良い解析法の要件としては、次に述べる三拍子がそろっているべきであろう。

- (1) 物理仮定段階の良さ(明解な仮定に基づく理論式の誘導)
- (2) 数値仮定段階の良さ(適切な数値近似を導入した効率の良い有限算法)
- (3) 目的結果の妥当さ(現象と合致し説得力を持つこと)

これらの要件の特にどれを重視するかによって同じくコンピュータを利用して多少タイプの異なる解析法に分かれると思われる。

(1) 物理仮定(が少ないこと)重視型

応用数学などから導かれたきれいな(仮定の少ない)理論式を差分などの数値近似で解く型で、当初のコンピュータ利用に多かった。

(2) 数値仮定(が少ないこと)重視型

数値近似なく解けるような理論式を、適当な物理仮定で導く型である。これはコンピュータの利用を前提とした解析法で、初期のFEM(Finite Element Method)はこの型である。

(3) 目的重視型(算法効率重視型)

理論でも数値でも仮定はどんどん採り入れ、適当な計算効率でよく合う結果を目的とするものである。このためには、仮定の確かさよりは手直しの効く方法であることのほうが必要で数値実験によるフィードバックを経て完成してゆく。

筆者の最近の好みは(3)に示したタイプである。シミュレーション解析なら、実測と合えばよいというものでもないであろうが、また合わなくてはだめなものである。投入できる開発コスト、使用コンピュータ、演算時間なりの算法を工夫し、それなりの収かくをあげたいものである。こんな好みで開発したプログラムCOLLAN2-Vについて次章から説明する。

5 HTGR(高温ガス炉)炉心の耐震性に関する第2次 R&D(Research and Development)

この研究は、武藤構造力学研究所が電源開発株式会社から依頼された一連の研究の一つで、昭和50年鹿島建設株式会社技術研究所の電気油圧式振動台を用いた実験を中心に行なわれた。

実験の模様を図1に示す。詳しくは参考文献2), 3)を参照されたい。

この実験のシミュレーション解析が次章からの話題である。

5.1 HTGRの概要

HTGR(High Temperature Gas-Cooled Reactor)は、

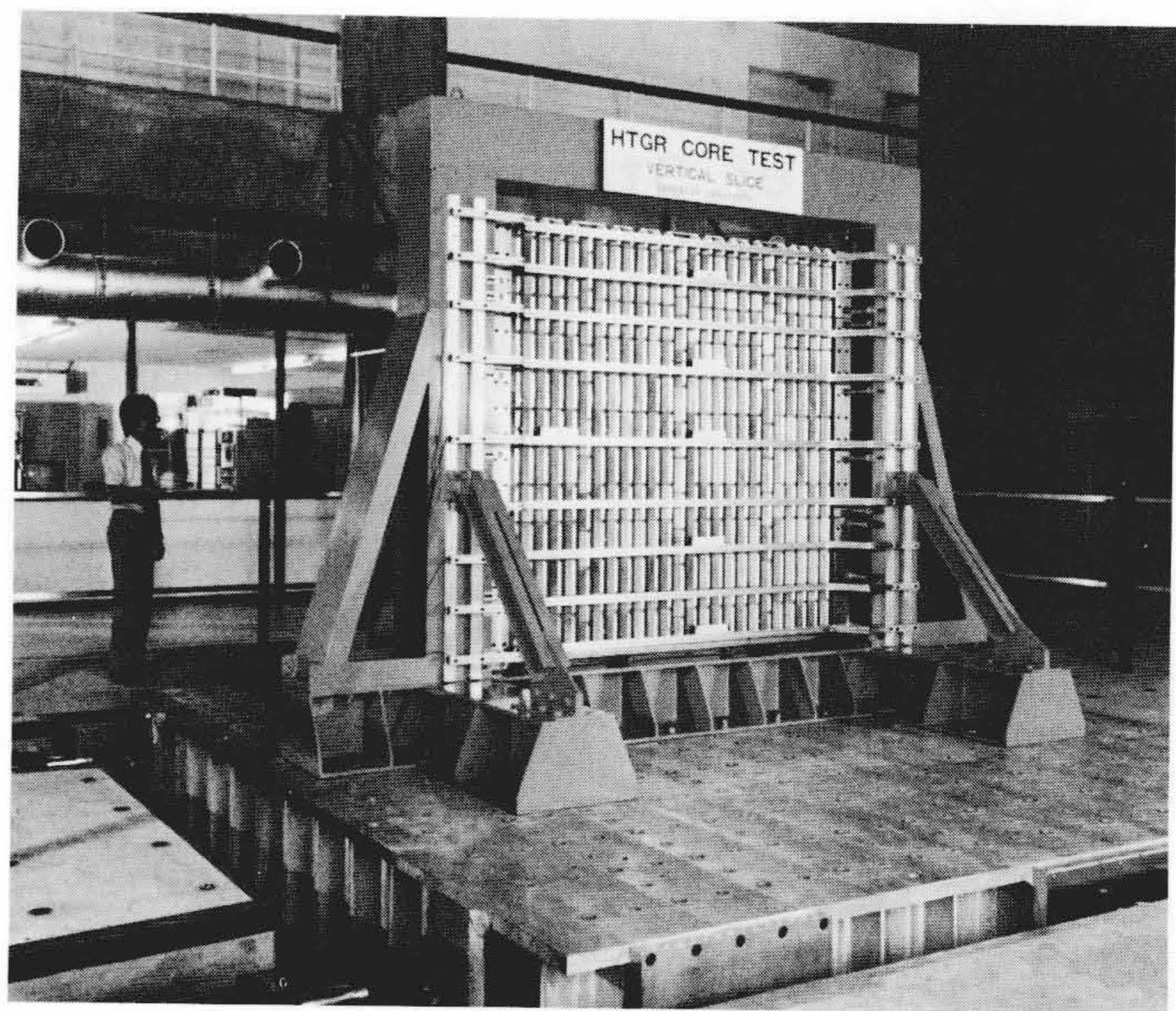


図1 振動台上の炉心模型 HTGR炉心の耐震性に関する第2次研究は、このような実験装置で行なわれた。この実験をコンピュータで再現することが本稿の主題である。

米国ゼネラルアトムック社(GA社)で開発された原子炉である。燃料はトリウム、減速材はグラファイト(黒鉛)であり、冷却材はヘリウムガスで高温蒸気を利用できる。その炉心は図2に示すように、プレストレスト・コンクリート圧力容器(PCRV)と呼ばれる厚いコンクリートの圧力容器に格納され、中心に六角形燃料グラファイトブロックが収められ、その回りはグラファイトのリフレクタなどで囲まれている。110万kW(e)級では六角形ブロックは約8,000個あり、各ブロックは約4mmのギャップをもって配列され、それが垂直方向に12~13段にダウエルピンによって積み重ねられている。したがって、グラファイトの地震時の挙動は衝突と回転を含んだ複雑なものとなり、耐震性について各種の検討が行なわれたわけである。

5.2 垂直断面振動実験

1975年度は炉心の縮尺垂直断面実験を行なった。図3に実験装置の概要を示す。

(1) 支持フレーム

PCRVを模する支持フレームは、剛な鋼製の構造体である。

(2) ブロック

1/3グラファイトブロック325個(1個0.8kg)をローラを介して支持板の上に0.8mmのギャップをもって25カラム13層に積み重ねた。

(3) リフレクタ

グラファイトのリフレクタはスピゴット(サイドサポートスプリング)でフレームに弾性支持した。

(4) 振動台

鹿島建設株式会社技術研究所の電気油圧式振動台(米国、MTS社製、水平、垂直同時加振型振動台)を用いた。最大水平変位±150mm、最大水平加速度1.2gで0.01~30Hzまでの振動数範囲で加振できる。

(5) 入力波

振動台への入力波は定常サイン波のほか、ランダム波としてエルセントロ、タフト、人工地震波などである。

ランダム波は相似則を考慮して、 $1/\sqrt{5}$ 時間軸、 $1/3$ の変位振幅とした(加速度で一致)。

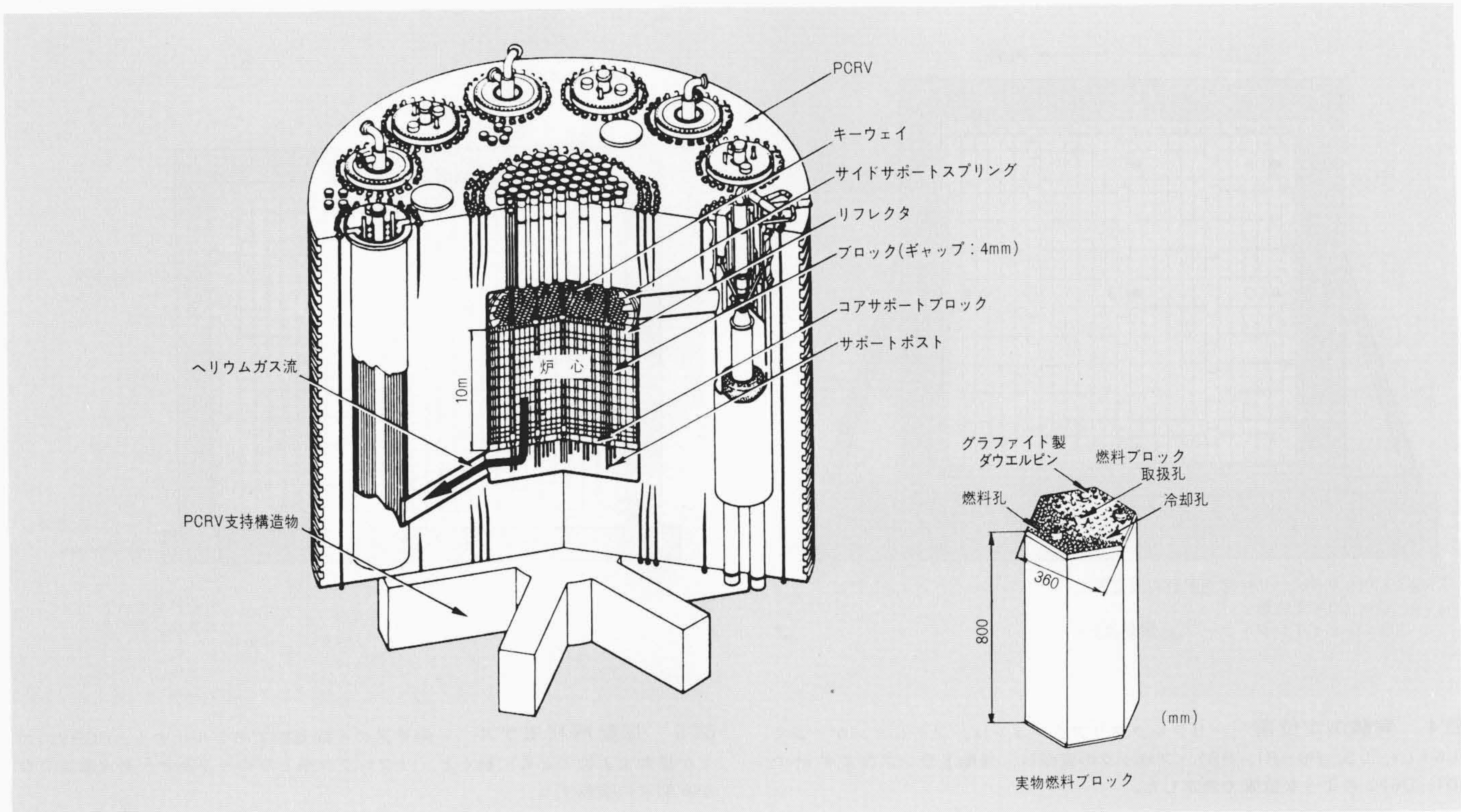


図2 HTGR概要 HTGRは、米国GA社で開発された原子炉である。プレストレスト・コンクリート圧力容器の中に多数のグラファイトブロックが収められている。

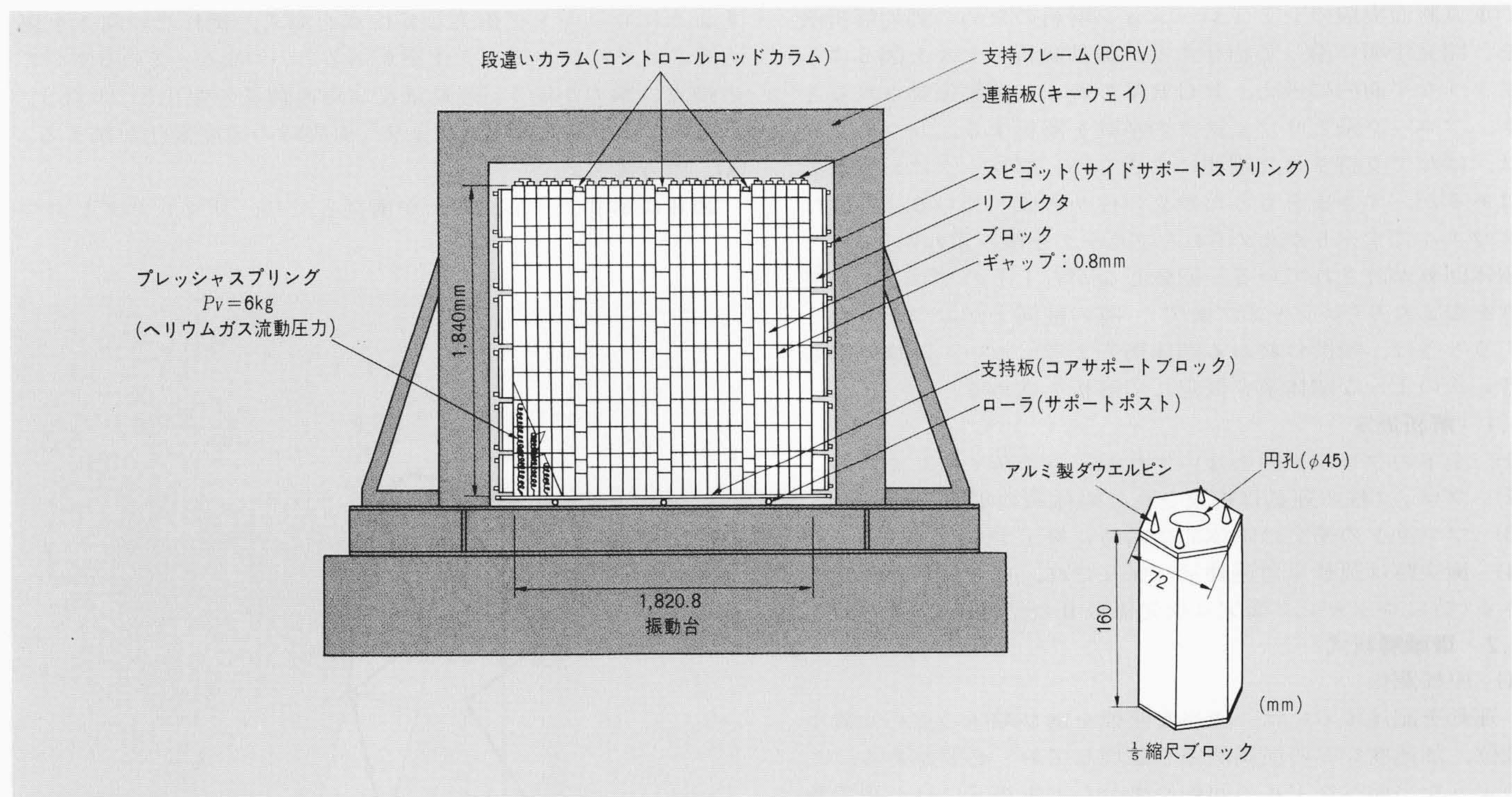


図3 振動実験装置 HTGR炉心の垂直断面を模した装置で、325個のブロックを0.8mmのギャップで25カラム13層に積み重ねてある。

5.3 測定結果

スピゴットの中央にはり付けたストレインゲージによるリフレクタリアクション(図4のL6～L1, LS及びR6～R1, RS)と、差動トランス型変位計による支持フレームに対するブロックの相対変位(図4のD1～D6)を主な測定項目とし、ほか

に振動台の加速度、速度、変位及び支持フレームの加速度を記録した。これらの測定値から、共振性、振動モード、リアクション分布、ランピング性向、衝撃力のパターンなど興味ある結果が得られた。

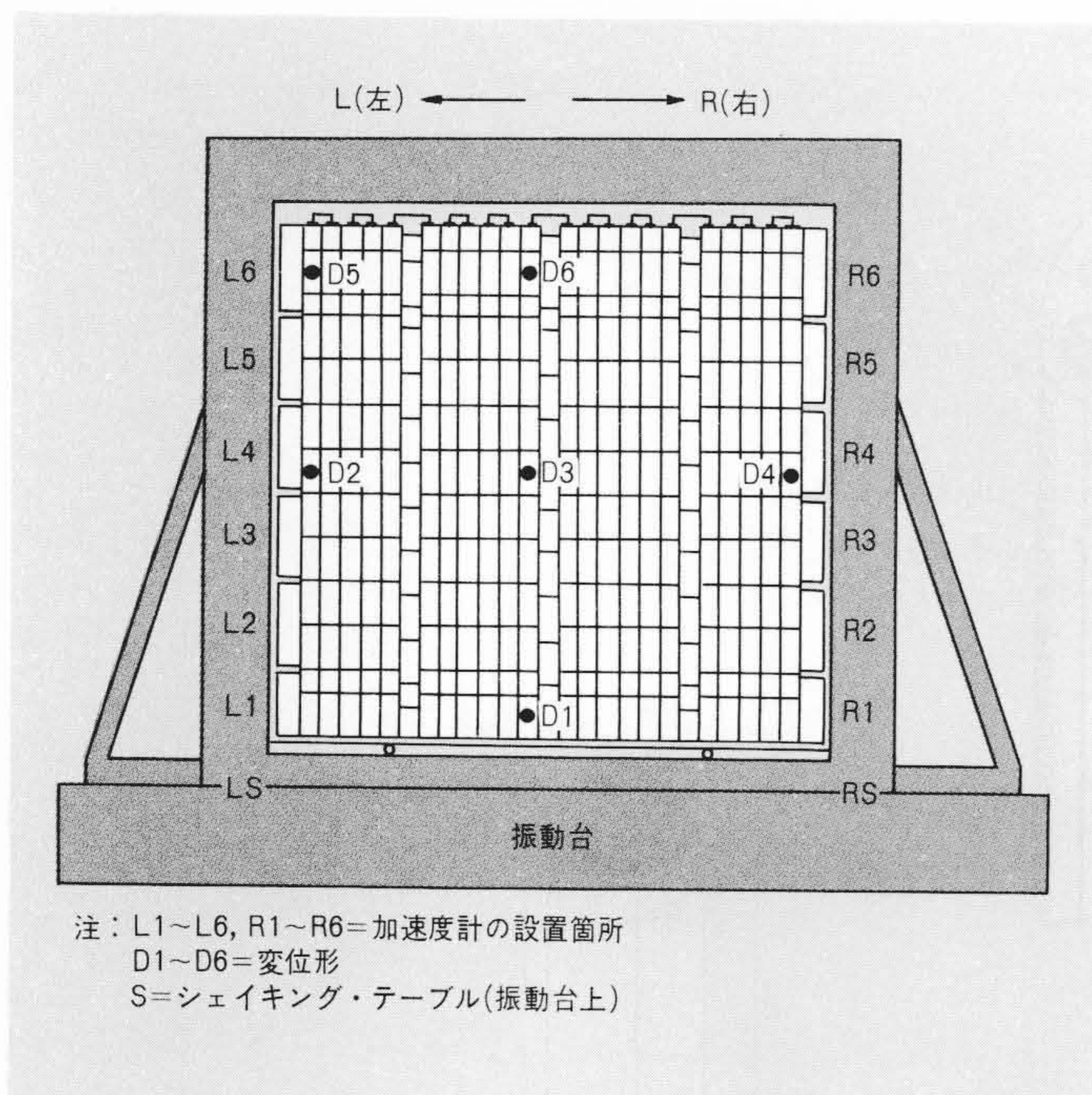


図4 実験測定位置 リフレクタリアクションは、ストレインゲージで(L6～L1, LS, R6～R1, RS), ブロックの変位は、差動トランス型変位計で(D1～D6)このような位置で測定した。

6 垂直断面振動解析コードCOLLAN2-V

垂直断面実験のシミュレーション解析のための動的解析法を、開発手順に沿って紹介する。振動解析モデルを図5に示すような平面内に考え、PCR Vのわくが強制振動されるとき、ブロック系とリフレクタの挙動を解析する。リフレクタは、ばねで支持された剛体にすぎない。ブロックはわずかではあるが、すきまをもった独立の柱から成っている。各柱はダウエルですべりが止められたブロックを積み重ねたもので、剛体回転が許されている。回転しながら上下のブロックが接点を変えたり(ロッキング衝突)、隣の柱同士がぶつかったりするときは、瞬間に終わる剛体衝突と考えたい。計算効率も考え次のような剛体系を仮定して解析を進める。

6.1 解析仮定

- (1) 上下のブロック同士はいずれか一方の角で接している。
- (2) ブロック柱の運動は拘束された剛体系の平面運動による。
- (3) ブロックの衝突は剛体的に瞬時に終了する。
- (4) 衝突時は運動量角運動量が保存され、反発係数が仮定できる(特にロッキング衝突は反発係数0の塑性衝突とする)。

6.2 理論解析式

(1) 座標関係

運動を記述するには、適当な座標を選び剛体の重心位置や変位、加速度などの従属関係を整理しておく必要がある。このような平面ベクトルの回転や微分などを扱うには、複素数表示にしておく式が見やすくなりコーディングも楽になる。ここでは図6に示すような、接点を結ぶベクトルを考えて、剛体振子のような働きをさせた。

(2) 運動方程式

このような剛体ベクトルで拘束された剛体の運動は、多重剛体振子が逆さになっているような系で、ラグランジェの運動方程式などを利用して求まる。外力は重力を含む地動加速度だけである。

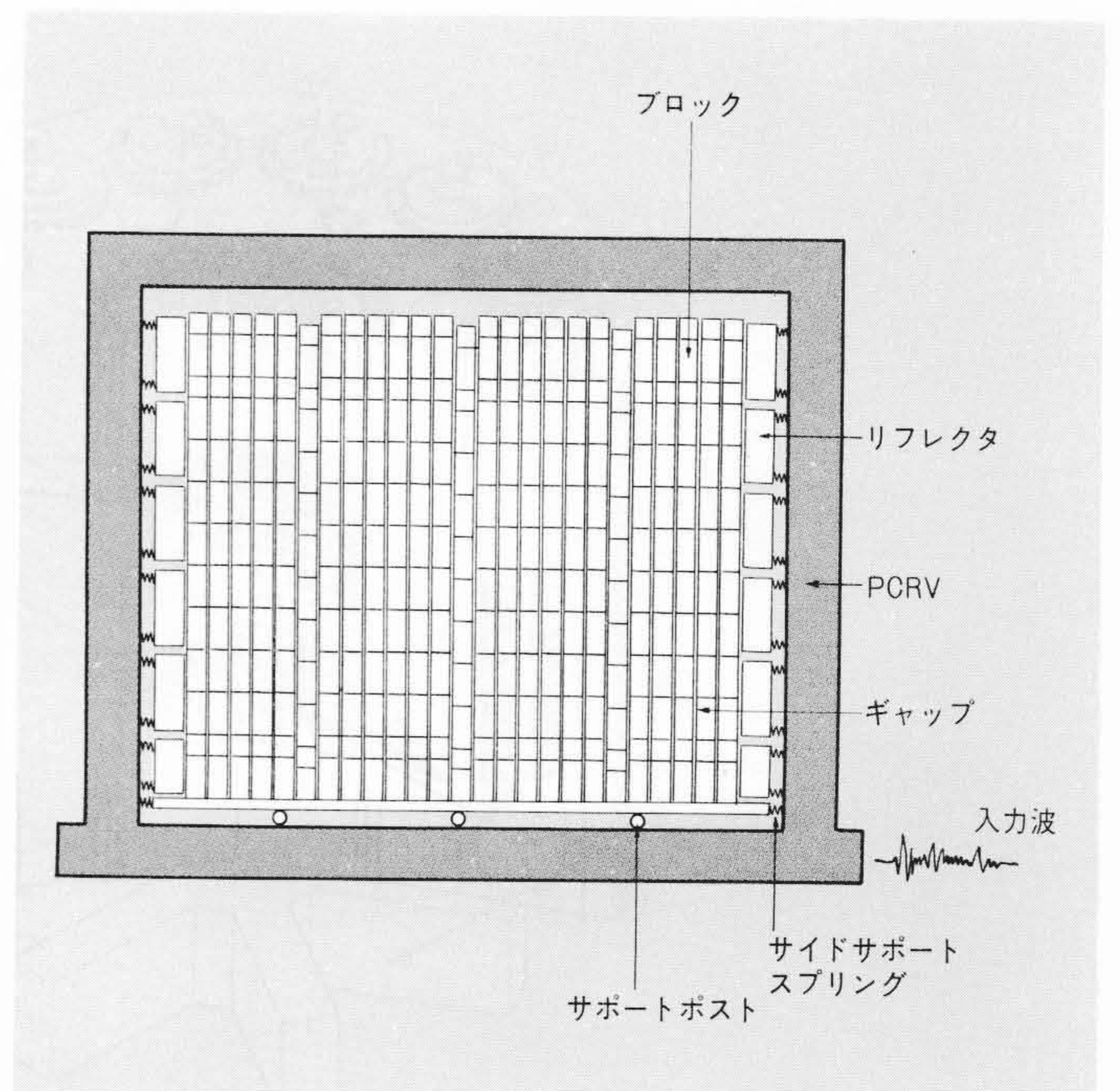


図5 振動解析モデル 剛体系の平面運動でモデル化する。PCR Vのわくが振動台入力とともに動くと、リフレクタ系とブロック系とが時々衝突しながら別々に振動する。

(3) ロッキング衝突式

逆さの振子は当然倒れようとするが、倒れる前に図7に示すようにロッキング衝突して接点を変え、倒れたい向きを変える。いずれかの接点で衝突があると、つながっているすべての接点に撃力が働き、運動量及び角運動量の変化とつり合う。

このような撃力方程式により、衝突時の速度変化が求まる。

(4) 側方衝突式

図8に示すように柱同士が衝突したり、リフレクタとぶつ

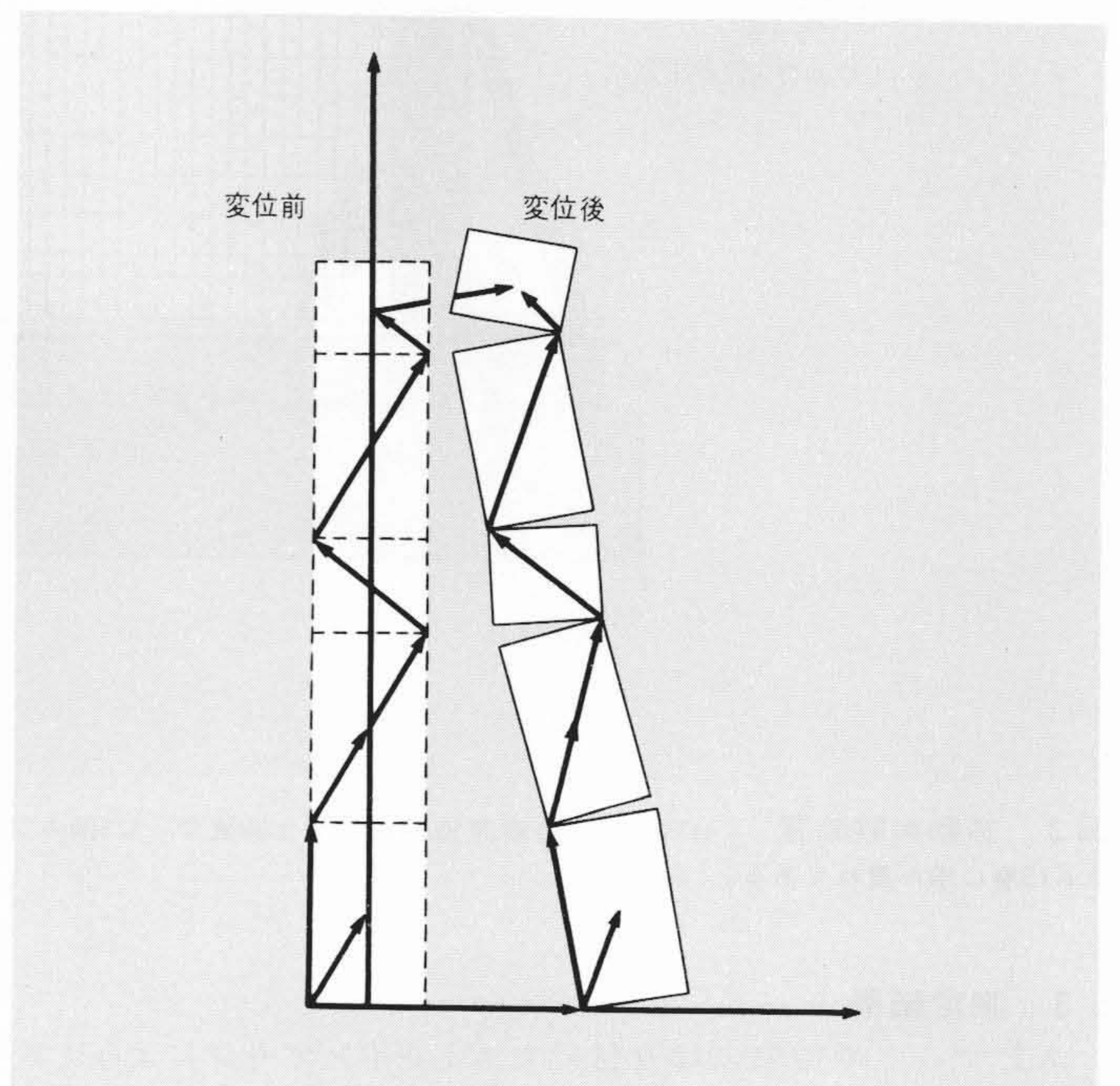


図6 座標関係のベクトル標示 上下のブロックは、左右いずれかの接点でつながっているものとする。ブロックの運動は、接点をつなぐ剛なベクトルの回転で決まる。

かったりする場合で、水平に撃力が作用、及び反作用するものと仮定し、衝突場所が分かればすべての接点の撃力と速度変化がスカラ倍を除いて決まる。更に、衝突点の相対速度変化についての反発係数の仮定を入れて大きさが決まるわけである。

以上述べたようにして解析式の準備ができると、数値計算法の構築に移る。

6.3 数値計算法

このような非線形振動は、時刻歴を追跡する直接法によらずなくてはならない。運動方程式を小時刻きざみで積分し、衝突などの各種変化を判定し、方程式の変更、速度変化などの処理を行ない、また積分を続けるわけである。動的算法の要点は、運動方程式の積分法と衝突時の処理で計算効率をあげたいところである。我々の常識は線形な方程式、少なくとも微小変形では線形になるような方程式(例えば、振子のような)があるが、この系は常識から少し外れた系で、解法上の常識も切り替える必要がある。

6.3.1 運動方程式の積分法

運動方程式を近似展開してみると、加速度一定の項が支配的である。線形方程式では、きざみが粗いと数値的不安定を生ずるおそれがあるが、この式ならば落体の式のようなもので安定している。そこで、計算効率を高める簡便な方法として、オイラー法を改良した前進形の解法を新しく考えた。そのチェックは、Runge Kutta法で実証した。

6.3.2 衝突時の処理法

各ステップで側方とロッキングによる衝突を判定し、速度変化を求め、方程式を入れ換える。衝突のうちロッキングは振幅角の減少とともに見掛け上の周期が幾らでも小さくなるという性質をもっている(線形方程式では一定の周期となる)。このため、正確に衝突時刻を計算し、きざみも要求だけ細かくしていくと、実際にはいつまで計算しても時間が進まなくなってしまう。このような解析式に基づいているので、それ

を補うような数値計算法が必要となる。例えば、二つの接点でつながる状態も考えることができよう。本法ではあくまで片方の接点で立ち、きざみ幅も細かくしないという近似的方法によった。このような大胆な仮定もあって、 3×25 ブロックのモデルの3,000ステップの計算をHITAC M-180で1時間程で終わる見込みがついた(非線形のため、かなりばらつく)。

6.4 数値実験

数値計算法の確定や解析式のチェックのため、多数の条件で数値実験を行なった。解析対象も単体のブロック、1本の柱、並列したものと多種あり、外乱も各種サイン波、ランダム波、重力だけの初期値問題といろいろある。これらを解析式や近似式を変えながら数値実験し評価する作業はこのような解析法を新たに作りだす上で必須のプロセスである。

7 実験のシミュレーション結果

実験に対する解析の一例として、エルセントロ波 $0.5g$ 入力の場合を示す。ブロック柱間のギャップ $0.8mm$ 、反発係数 0.90 、サイドサポートスプリングのばね定数 $4,000kg/cm$ 、同減衰定数 0.40 、時間きざみ $1/1,000s$ である。図9に解析値と実験値の比較を示す。ブロックの変位やリフレタリアクションが実験値とほぼ一致し、COLLAN2-Vによりこのような現象が十分にシミュレートできることを示している。全体の挙動をCOM(Computer Output Microfilming)によりアニメーション化した。その一部を図10に示す。

このような表現をすることは分かりやすく興味深いばかりでなく、解析上、設計上の発見を促すものである。

8 結 言

建設業務のコンピュータ利用のうち、動的解析に絞って算法の特徴などについて紹介した。強いて結論づければ、

(1) 動的算法は目的に合致することを第一とした効率的なものでなくてはならない。

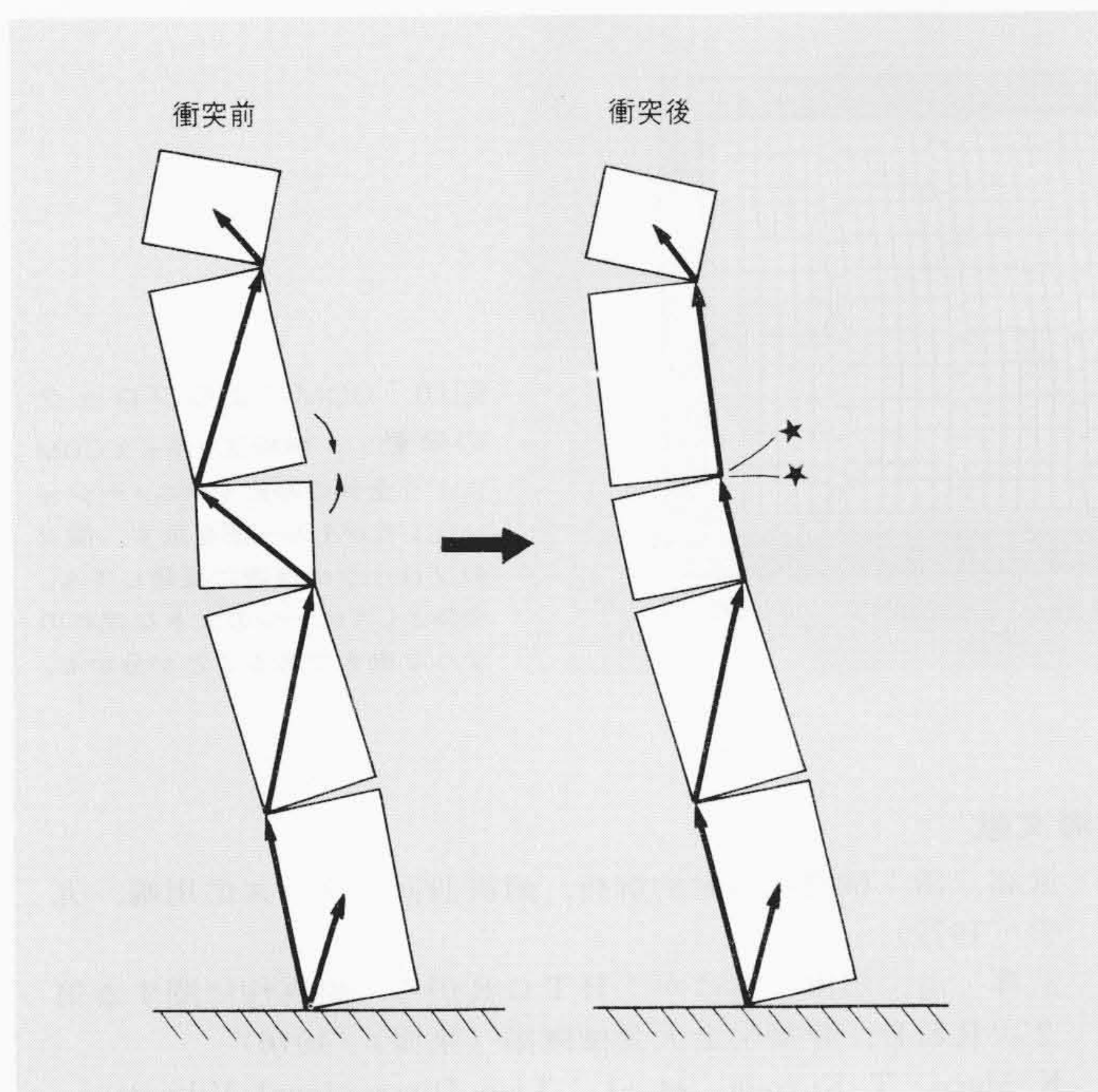


図7 上下隣接ブロックのロッキング衝突 ブロックの柱は振動中しばしば接点を変える。このロッキング衝突のとき、運動量は保存されるが速度と運動方程式を変える。

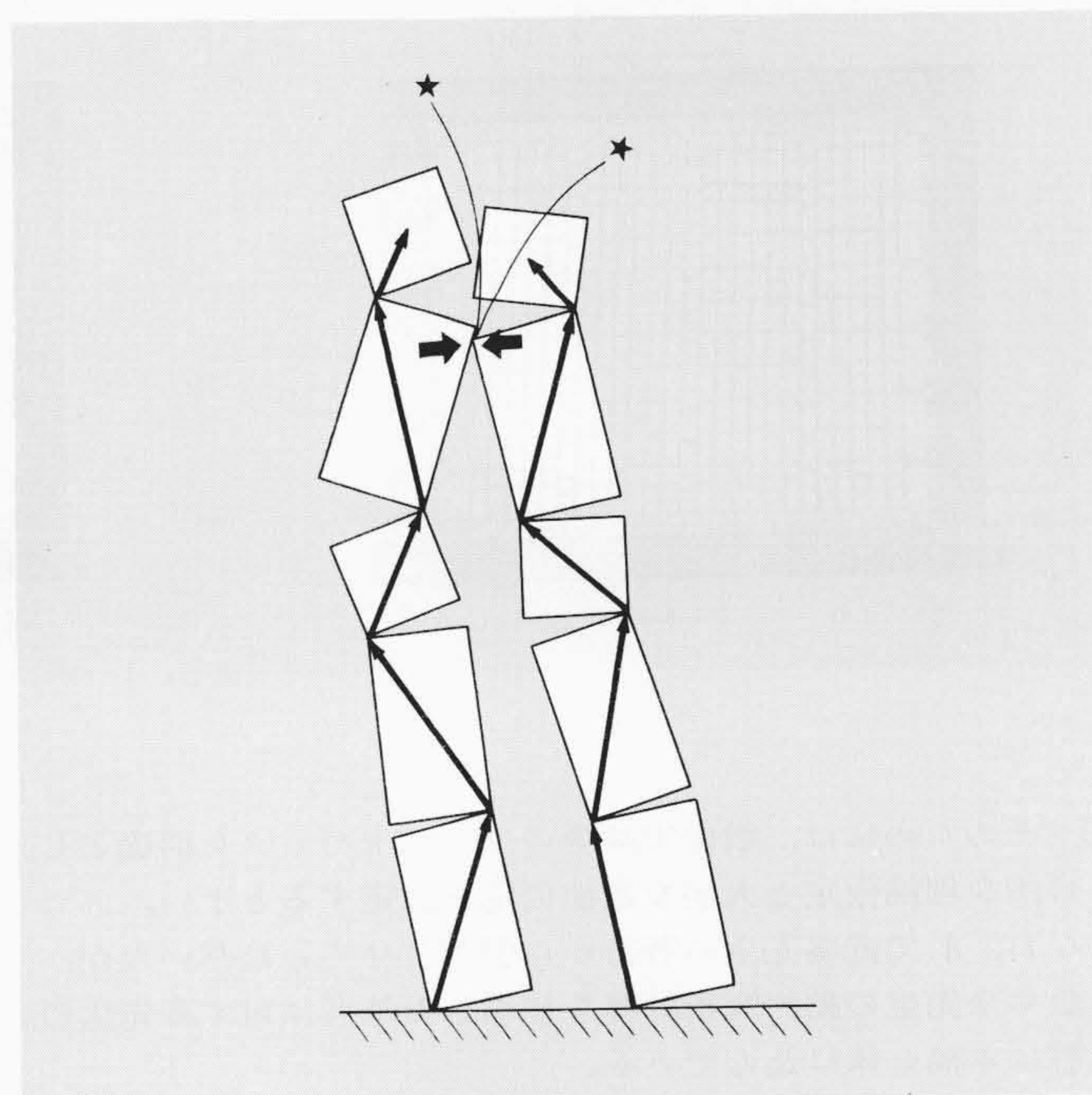
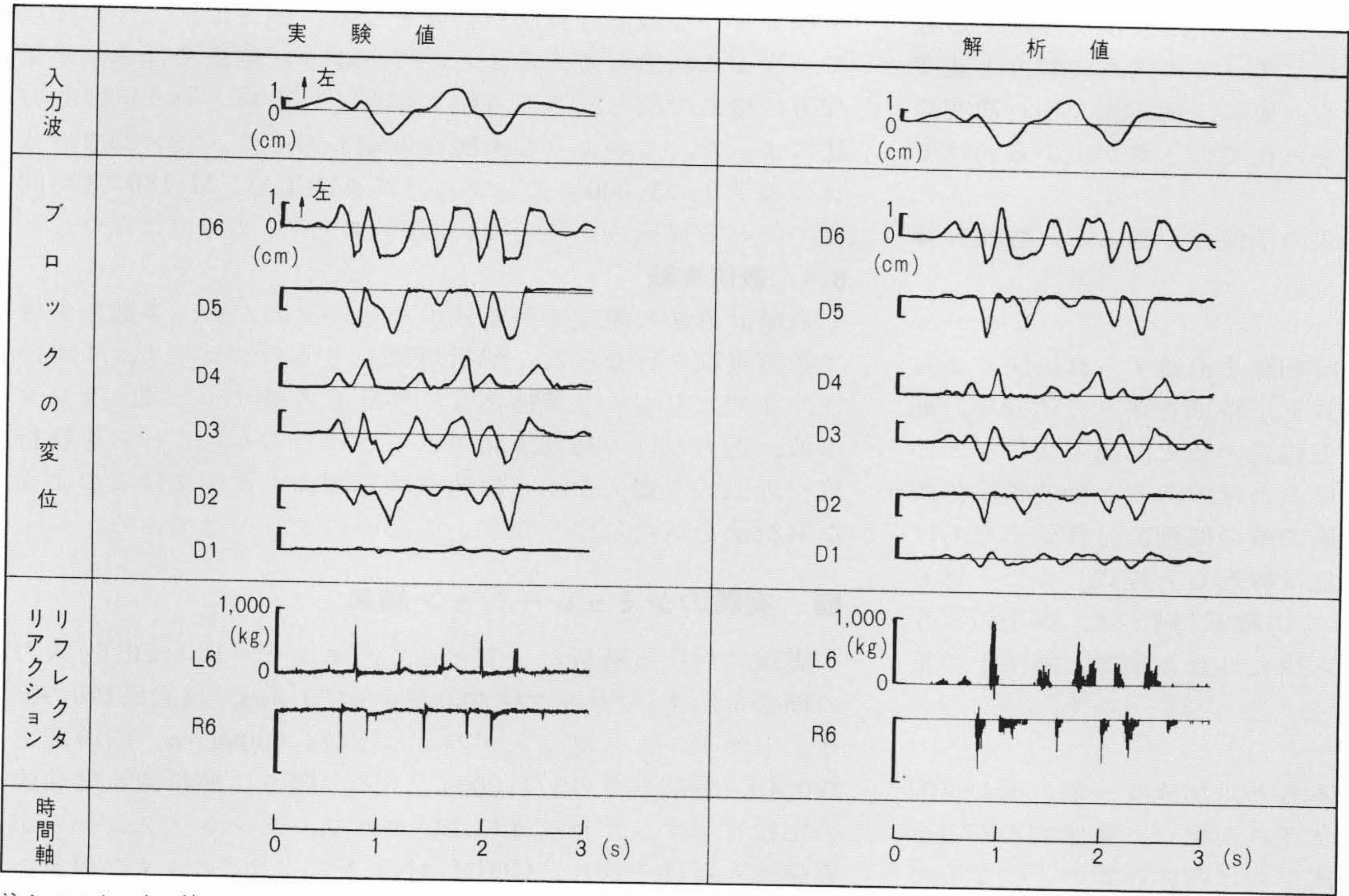


図8 側方のブロック柱同士の水平衝突 わずかなギャップで林立しているブロック柱同士は、振動中しばしば衝突し、運動量を交換するが運動方程式は変わらない。



注：エルセントロ波 0.5gレベル

図9 解析値と実験値の比較
ブロックの変位やリフレクタクションが実験値とほぼ一致し、このような現象がコンピュータで十分シミュレートできることが分かる。

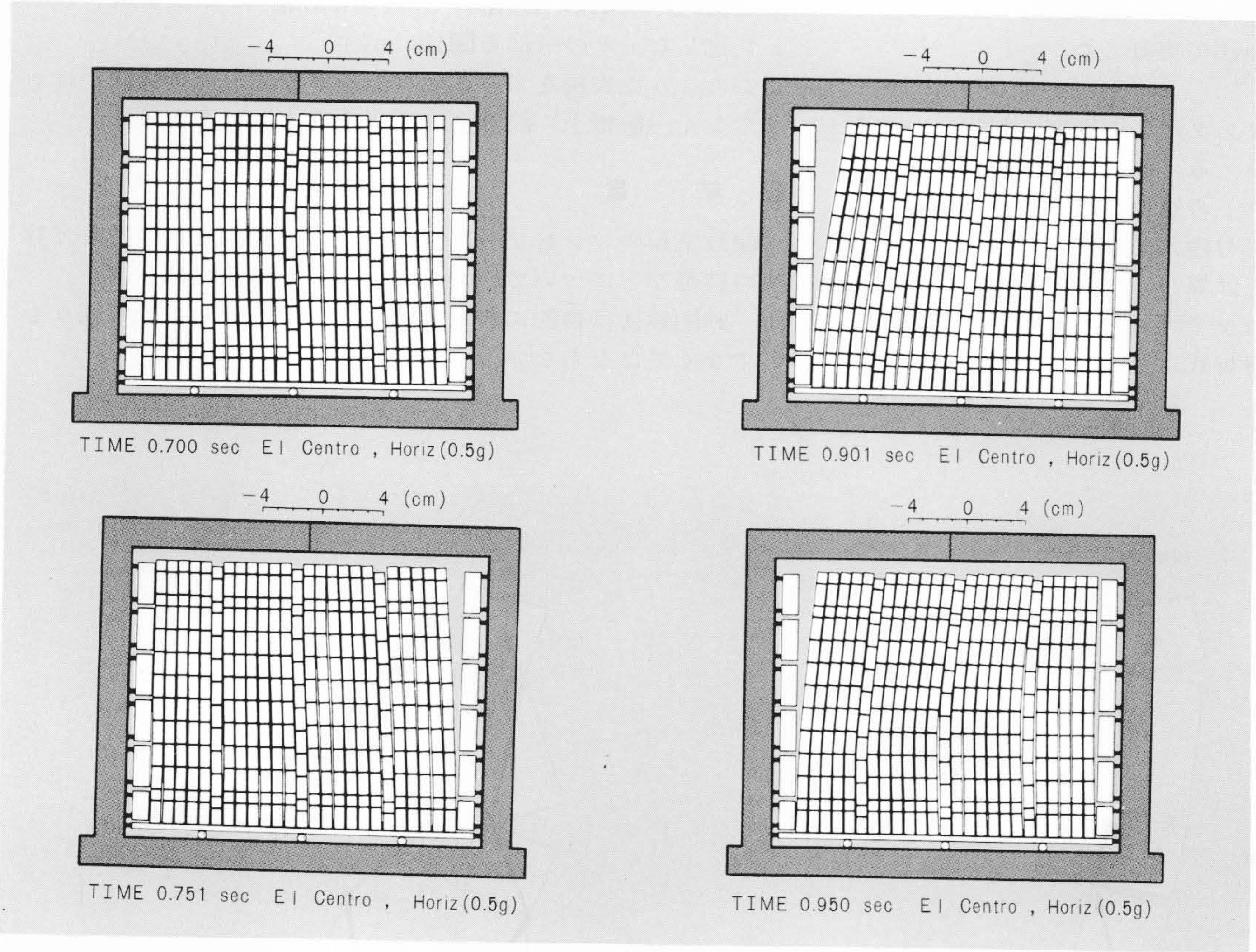


図10 COMによるブロックの挙動
解析値を使ってCOMにより全体の挙動をアニメーション化した但那の一部を示す。個々のブロックは複雑に反発しても、全体としては一つの大きな流れのような動きであることが分かる。

(2) そのためには、数値実験等のフィードバックを前提として自由な理論仮定と大胆な数値仮定を設定するとよい。

なお、3.で武藤先生の著書から引用させていただいたが、十数年来先生の動的解析計算を担当した筆者に対する先生の影響は本稿全体に及んでいる。

HTGR炉心研究に関しては、電源開発株式会社及び武藤構造力学研究所に属する成果を多数引用させていただいた。併せて感謝する次第である。

参考文献

- 1) 武藤 清：構造物の動的解析，耐震設計シリーズ応用編，丸善（1977）
- 2) 武藤 清，黒田 孝ほか：HTGR炉心の耐震性に関する第2次R&D，建築学会大会梗概集（東海）（1976）
- 3) K. Muto, T. Kuroda, et al. : Two-Dimensional Vibration Test and Simulation Analysis for a Vertical Slice Model of HTGR Core, Proc. of 4th SMRT, 1977, San Francisco