

## 6. 共通実験技術に関する調査

### 6.1 背景と目的

実大三次元震動破壊実験施設で行われることが予定されている実験には実大規模の橋梁、建築物、タンク、電力施設、地盤・基礎・地中構造物などがある。このような実験における特徴は、試験体が大規模であること、立体的な三次元挙動を明らかにすること、破壊現象を対象にしていること、などが挙げられる。

試験体が大規模であることにより、計測データの点数が膨大となり、大量のデータの転送とその処理の高度な技術が要求される。三次元破壊挙動を追跡するためには、従来のこれまでに確立している一次元、二次元の構造の震動挙動の把握技術に対して、格段に高度で効果的な挙動追跡手法と内部状態把握手法の開発が不可欠である。この開発の成否が実験の効率を大きく左右する。また、弾性挙動の計測に比べ破壊挙動の計測には多くの難点がある。

すなわち、微小変形から大変形、更に破壊に至る挙動までの広い範囲の変化に対して、計測精度を同程度のレベルに維持するにはこれまでの計測技術の利用では不十分であり、高度な計測技術の開発が重要な課題である。また破壊挙動に対するセンサーの健全性と信頼性の確保も重要な課題である。

振動台上で構造物を振動させながら破壊させる実験では、弾性実験や大きな破壊を伴わない実験と比べて振動台の制御方法に大きな差がある。構造物が振動台上で破壊していく過程では、構造物の振動特性が加振ごとに変化していく。したがって初期の健全な状態で設定した入力では不十分で、構造系のパラメータが変化していくことを想定して、試験体と振動台の相互作用を考慮した加振方法を決めなければならない。このような加振方法の検討は破壊実験には不可欠であり、これの良否が実験の成否を左右するものである。

また、試験体の寸法、費用等の制約から、実大規模の完全な試験体に対する破壊実験を常に行えるとは限らない。そのような場合は、部分要素試験体に対して、数値実験と振動台実験を統合したハイブリッド実験が必要であり、この実験技術の確立が重要な課題である。

さらに、実大規模の破壊実験を実施するにあたっては、安全の確保および周辺環境への配慮が不可欠であり、これらに関する技術開発も必要となる。

本章では、このような実験における共通実験技術について、その課題を抽出し、研究・開発をいかに進めるべきかについてまとめている。以下、6.2節では既往の振動実験設備の現状についてまとめている。6.3節では6.2節でまとめた現状を踏まえ、実大三次元震動破壊実験における共通実験技術の研究課題についてまとめている。6.4節では6.3節の議論に基づき、個別技術の開発研究についてまとめている。

## 6.2 既往の実験技術の現状

本節では、振動実験で必要となる加振装置(振動台を含む)、計測機器、データ処理技術、制御技術等について既往の実験技術の現状を述べ、実大三次元震動破壊実験におけるこれらの技術の適用性について考察する。

### 6.2.1 振動実験

#### (1) 実大構造物の振動実験

実大構造物を対象としたあるいはできるだけ規模を近づけた実験は、主に建築構造物について行われており、この多くは最上部付近での起振機による加振実験か、外部のアクチュエーターを用いた仮動的載荷試験である。振動台加振による実大建物振動実験としては、科学技術庁防災科学技術研究所が低層鉄骨造プレハブ住宅の実物大プロトタイプについて、2次部材(外壁や間仕切り壁等の非構造部材)の破壊までを対象とした実験<sup>1)</sup>や(財)原子力発電機構多度津試験所の振動台での木造建物の破壊実験等<sup>2)</sup>、一部行われ始めている。図-6.2.1に実大建物振動実験のイメージを示す。

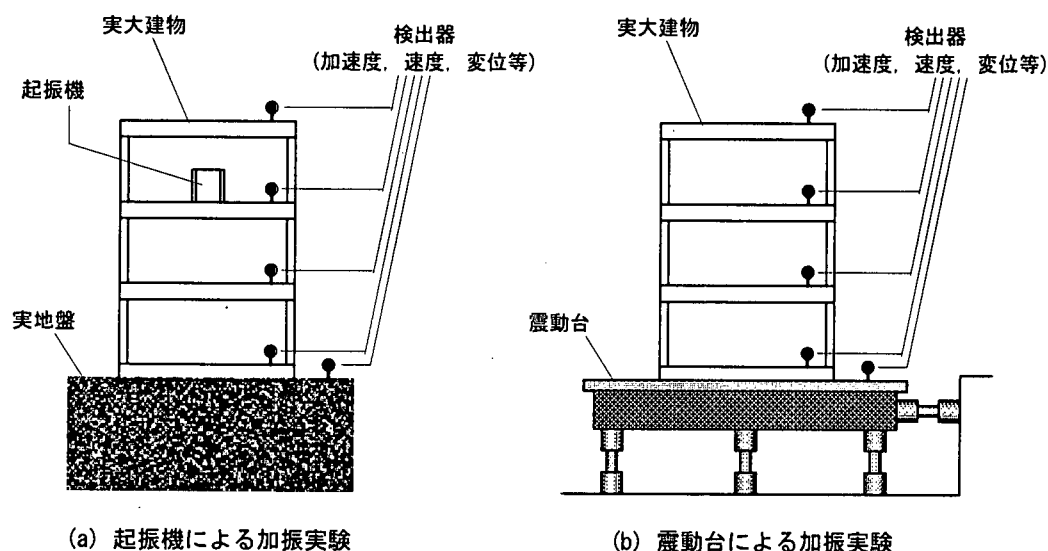


図-6.2.1 実大構造物の振動実験例 (建築建物の例)

#### (2) 模型実験

縮小スケール構造物模型の振動台加振実験は、新技術(免振・制振)や新手法(損傷同定手法等)の妥当性の検討や、地盤-建物系の動的相互作用の現象解明等を主な目的として盛んに行なわれている。線形(弾性)範囲内での実験では、例えば図-6.2.2のように、建物・基礎にアルミ、鉄、アクリル等を用い、地盤にはシリコンゴム等を用いるといったように、相似則に見合う剛性、単位体積重量を実現するために代替材料による試験体模型を用いることがあるが<sup>3)</sup>、非線形や破壊の領域まで踏み込む実験となると、代替材料を見つけて出すこと自体が困難となる。一方、RCや鉄骨の縮小模型実験(建物、ダム、高速道路等)

も数多く行なわれており、破壊までを対象としている実験も多いが、この場合もスケール効果に関する配慮が必要であり、実大構造物との比較検討が望まれる場合も多い。

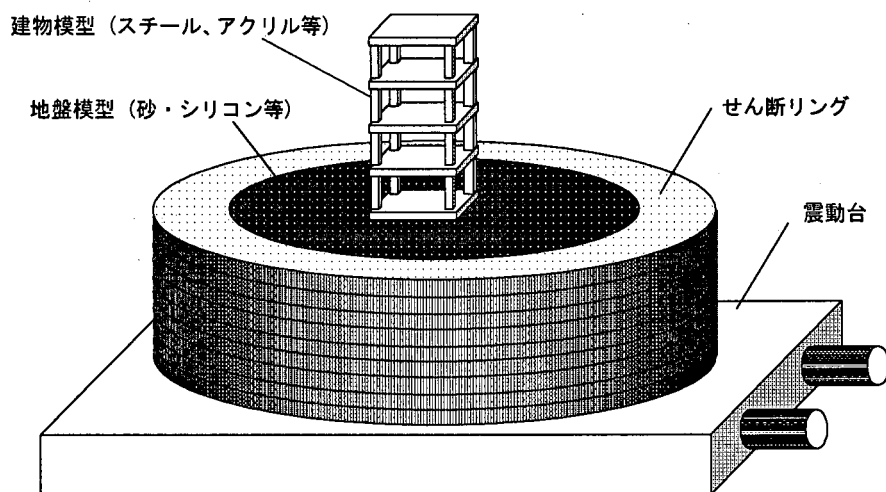


図-6.2.2 代替材料による模型実験例<sup>2)</sup> (地盤-建物系の動的相互作用実験の例)

### (3) 部材・要素実験

部材レベルでの部分振動実験は、接合部の耐久試験やダンパーの性能試験等、メーカー等でもよく行なわれ、破壊に至る挙動を追跡する場合も多い。要素実験により部分要素の振動特性を十分把握し、この結果を数値解析等に反映して全体挙動を予測することが、行なわれている。しかし、全体挙動の中で部分要素が大変形・破壊に至ることを想定した場合、どのような荷重パターン(軸方向、せん断方向、曲げ方向)をどのような時間変化で受け、これにより部分要素の振動特性がどのように変化し、これが全体挙動にどのように影響を与えるのかといった、非線形の動的相互作用の検討が必要な場合も出てくるので、この場合は、全体系による検証実験や実時間のハイブリッド実験等が必要になる。

### (4) 地盤の振動実験

地盤の震動挙動把握に関しては、地表面加振試験、PS検層試験、発破試験等、実フィールドにおける振動特性試験が実務レベルの地盤調査で一般的に行なわれているが、地盤の振動破壊挙動を追跡する実験は実フィールドでは殆ど行なわれていない。発破を震源とする方法、大型振動台を振動源とする方法も考えられるが、発破では加振力が小さいこと、振動台利用では、周辺への振動影響が大きいことなどが理由と考えられる。ただし、我が国最大規模の振動台のある(財)原子力発電機構多度津試験所のフィールドでは、振動台施設を加振機に見立て、実際の地盤をねじれ加力して塑性領域までの実験を行った例がある<sup>4)</sup>。

振動台上での実大地盤破壊挙動の実験としては、せん断土槽を用いた液状化試験や流動試験等が行なわれている。これらは、せん断土槽の制約から、加振方向は水平方向のみに

限られる。また、境界条件等により、厳密には実際の地盤を忠実に表現することは難しい。

縮小スケール地盤の実験としては、遠心載荷装置による地滑り実験などが行なわれているが、相似則に見合う粒子の地盤の作成が難しく、実地盤の挙動をどの程度表現しているかについても検証が必要である。

#### (5) その他

その他、振動台の実大振動実験としては、家具の転倒実験や非構造部材の耐久試験等がよく行なわれる。家具の転倒実験については、人形（通常のマネキンを使用）を日常あり得る設定で配置し、地震で転倒した家具が人体に与える影響を追跡している例もある<sup>5)</sup>。

### 6.2.2 振動台加振技術

#### (1) 振動台の規模

表-6.2.1に国内の主な大規模多軸振動台を一覧する。最大のもので、15m四方(2軸)であり、小規模な木造住宅やプレハブ住宅であれば震動実験ができる。3軸の振動台としては、建設省土木研究所の8m四方のものが現状では最大である。

#### (2) 加振技術

振動台上の試験体が剛体もしくは弾性体の場合は、試験体の慣性力や振動特性を考慮して、テーブルが目的の挙動を示すよう入力を調節する技術が確立している。しかし、試験体の非線形性が強い場合、時々刻々と振動特性が変化していくので、剛体や弾性体の時のようにあらかじめ入力を規定しておくことはできない。従って、従来の非線形試験体の振動実験は、試験体規模を振動台規模の半分以下程度にとどめ、試験体挙動が振動台挙動に影響を与えないものとして実験を行なってきた。この場合、振動台は己の持つ性能を限界までフルに発揮することはできない。近年では、動的に試験体の振動特性をリアルタイムで監視しながら（フィードバック）加振制御を行なう試みも研究され始めている<sup>6),7)</sup>。しかし、実用運営されている施設は殆どないのが現状である。

### 6.2.3 計測技術

#### (1) 検出器

振動のピックアップ(検出器)としては、加速度計、速度計、変位計、歪ゲージ等が用いられる。一般には加速度計が採用される場合が多い。加速度計には圧電型、歪ゲージ型、サーボ型等があるが、破壊や衝撃を対象とする場合は、歪ゲージ型加速度計は適切でない。変位計には、接触型のものと非接触型のものがあるが、非接触型のレーザー変位計では、40~50 cm程度離れた場所から計測できる。いずれの検出器も、大変形や破壊まで考慮されたものは殆ど無く、破壊実験に対してロバストであるとはいえない。

表-6.2.1 国内における主な大規模振動台諸元

No (完成時期順)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
設置機関	科学技術庁 防災技術 研究所	三菱電機	川崎重工業 技術研究所	NUPEC 多岐津工学 試験所	IHI	三菱重工業 高砂研究所	日立製作所 機械研究所	奥村組	運輸省 港湾研究所	熊谷組	鹿島建設	間組	東急建設	五洋建設	京都大学 防災研究所	建設省 土木研究所
最大積載重量	4.90MN	0.39MN	0.29MN	9.81MN	0.34MN	0.98MN	0.20MN	0.59MN	0.59MN	0.69MN	0.49MN	0.78MN	0.29MN	0.59MN	0.15MN	2.94MN
加振方向	X	X,Z	X,Z	X,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z	X,Y,Z
テーパー寸法	15m×14.5m	4m×4m	3.5m×3.5m	15m×15m	4.5m×4.5m	6m×6m	4m×4m	4m×4m	3.4m×3.4m	5m×5m	5m×5m	6m×4m	4m×4m	φ5.9m	5m×3m	8m×8m
最大変位	X方向	±100mm	±75mm	±200mm	±100mm	±50mm	±150mm	±125mm	±200mm	±80mm	±200mm	±300mm	±500mm	±200mm	±300mm	±600mm
	Y方向	/	/	/	±100mm	±50mm	±75mm	±125mm	/	±260mm	±200mm	±150mm	±200mm	±300mm	±250mm	±600mm
	Z方向	/	±37.5mm	±100mm	±67mm	±40mm	±75mm	±75mm	±100mm	±50mm	±100mm	±100mm	±100mm	±100mm	±200mm	±300mm
最大速度	X方向	±75cm/s	±40cm/s	±75cm/s	±75cm/s	-	±100cm/s	±100cm/s	±40cm/s	±60cm/s	±100cm/s	±115cm/s	-	±75cm/s	±150cm/s	±200cm/s
	Y方向	/	/	/	±75cm/s	-	±80cm/s	±100cm/s	/	±150cm/s	±100cm/s	±60cm/s	-	±100cm/s	±150cm/s	±200cm/s
	Z方向	/	±70cm/s	±20cm/s	±37.5cm/s	±50cm/s	±50cm/s	±50cm/s	±20cm/s	±50cm/s	±50cm/s	±50cm/s	-	±50cm/s	±150cm/s	±100cm/s
最大加速度	X方向	±0.55G	±2.5G	±1.0G	±1.84G	±2.0G	±2.0G	±1.0G	±0.8G	±3.0G	±2.0G	±1.0G	±1.0G	±1.0G	±1.0G	±2.0G
	Y方向	/	/	/	±1.5G	±2.0G	±2.0G	±1.0G	/	±1.0G	±2.0G	±3.0G	±1.0G	±0.5G	±1.0G	±2.0G
	Z方向	/	±1.25G	±0.5G	±0.92G	±1.0G	±2.0G	±0.5G	±1.5G	±1.0G	±2.0G	±1.0G	±1.8G	±1.0G	±1.0G	±1.0G
使用周波数	DC~50Hz	DC~30Hz	DC~50Hz	DC~30Hz	DC~50Hz	DC~50Hz	DC~30Hz	DC~70Hz	DC~50Hz	DC~70Hz	DC~60Hz	DC~50Hz	DC~50Hz	DC~70Hz	DC~50Hz	DC~50Hz
計測点数	256ch	64ch	64ch	300ch	96ch	-	64ch	64ch	30ch以上	96ch	144ch	96ch	64ch	96ch	64ch	256ch
完成時期	1970年	1980年	1980年	1982年	1982年	1983年	1984年	1985年	1988年	1988年	1990年	1991年	1992年	1993年	1996年	1997年
メーカー	三菱	三菱	川崎重工業	三菱,IHI 日立	MTS	三菱	日立	日立	三菱	MTS,三菱	MTS	三菱	三菱	日立	日立	日立
備考	X方向の振幅 ±220に改造 (1989年)					Y方向の振 幅±300に 改造 (1994年)			水中2次元 振動台					水中3次元 振動台		6自由度

※ 原子力発電機公開資料より抜粋・加筆  
ゼネコンについては、30ton以上のみ

/: 該当しないもの  
-: 不明なもの

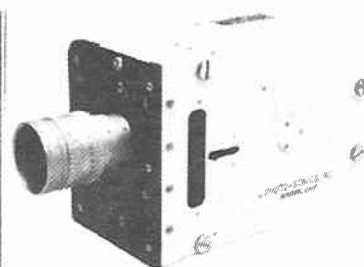
## (2) A/D (アナログ/デジタル) 変換

近年では殆どがデジタル波形収録であり、分解能やサンプリング振動数は、A/D変換機の性能やディスク容量および対象としたい現象を考慮して妥当なものが選ばれる。近年のA/D変換機は、10000Hz以上の振動数を取り扱う音響の分野でも活用できるよう設計されている。地震動の分野では通常30Hz辺り以下までを対象としているので、サンプリング振動数については、現状でも十分な変換能力を有していると考えられる。一方、分解能については10~18bitのものが多く普及しているが、解像度が小さい場合は、レンジを十分大きくとると微振動の表現が粗くなってしまうので、レンジの設定が難しい。チャンネル数については、1chから、多いものだと300chのものもある。A/D変換処理速度やバッファ容量、ホストコンピュータとの転送速度等から上限が決まってくる。

## (3) 画像による計測

破壊実験や家具の転倒実験等では、従来からビデオ撮影等に基づく分析が多い。検出器の変位追従性能の限界や、検出器とA/D変換機をつなぐコードの影響などが主な理由と思われる。画像による計測では、試験体の破壊挙動に関係無く遠隔から映像を取得することができるので、破壊挙動に対してロバストであり、挙動への影響も与えない。一方で、画像の自動処理技術が十分に普及していないといった背景から、スロー再生等の映像目視による定性的な分析が多くなりがちであり、波形解析等の従来の振動分析技術が十分に発揮されていないケースも多い。

通常のビデオカメラは、毎秒30コマ(0.03秒刻み)程度であり、土木・建築分野でも一般に通常のビデオカメラが用いられている。一方、高速度カメラは、毎秒1000コマ(0.001秒刻み)のものもあり、自動車安全実験やスポーツ工学等、多くの分野で使われている(図-6.2.3)。土木工学分野では、運輸省港湾技術研究所地盤改良研究室の遠心載荷装置にパルスデータカメラを取り付けた実験例等がある<sup>8)</sup>。



↑自動車安全実験に数多く使われている米国フォトソニックス1PL<sup>9)</sup>  
(500コマ/秒)

←高速度カメラによる  
自動機械不具合チェックシステム<sup>8)</sup>

図-6.2.3 高速度ビデオカメラの活用例

## 6.2.4 計算機活用技術

### (1) オンライン実験

A/D変換されたデジタル波形を直接計算機に取り込み、その場で波形分析を行ったり、計算機から加振制御を行なうことは、近年の計算機技術を持ってすればそれほど難しいことではなく、このようなオンライン実験はかなり一般的技術となっている。オンライン実験の最大の利点は、直接計算機に計測時点の波形データが転送され、リアルタイムに計算機を活用できることから、応用範囲が広いことである。時々刻々収録される波形をそのまま表示するだけでも、リアルタイムモニタリングとなるが、CG(Computer Graphics)と組み合わせて各地点の波形をCG上の変位成分に変換することにより、リアルタイム挙動把握も可能となる。さらに、加振制御系と連動させることにより、リアルタイム解析結果を加振へフィードバックする実時間ハイブリッド実験等も可能となる。

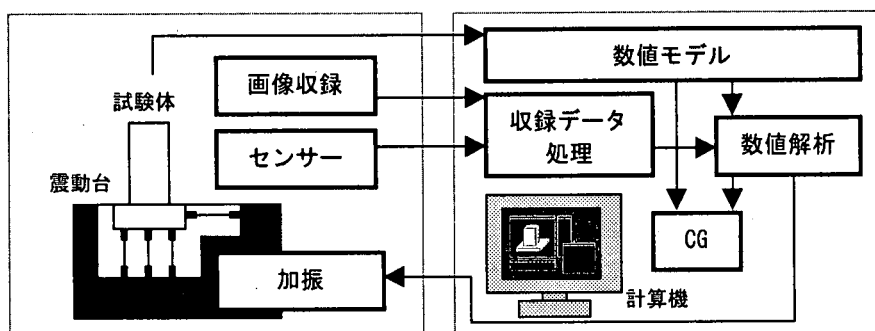


図-6.2.4 オンライン実験のイメージ

### (2) リアルタイムモニタリング

複数の波形を計算機画面上に表示し、時間とともに流していくリアルタイムモニタリングは、汎用システムが市販されており、多くの実験で採用されている。CGと組み合わせたリアルタイム挙動把握については、試験体及び計測点位置が決定しないとモデルが組み立てられないため、汎用システムとしてはまだ発表されていない。しかし、オフラインで波形データに基づき数値モデルの挙動を再現するシステムは既に存在しており、技術的には十分に実現可能な段階にある。

### (3) ハイブリッド実験

実験により求められた部分要素の振動特性を数値解析に取り込み、全体構造の挙動をシミュレートするハイブリッド実験は古くから行なわれている。また、この解析結果をさらに実験にフィードバックする試みも幾つかの事例がある。しかし、部分要素が強い非線形性を持ち、これが全体挙動に大きな影響を与えると考えられる場合、実時間で解析し結果を加振制御にフィードバックする必要があるが、このような実時間ハイブリッド実験の試みは数少ない。建設省土木研究所の三次元大型振動台実験施設では、平成9年度より基礎的な実時間ハイブリッド実験に取り組んでいる<sup>10)</sup>。

### 6.3 研究すべき課題の整理と抽出

実大三次元震動破壊実験は、一次元、二次元の実験や、小規模実験、弾性範囲内の実験と比べると、個々の実験が非常に過酷な条件の組み合わせとなっている。このような条件下の実験を、確実に、安全に、経済的に行い、実験施設の能力を最大限に引き出すためには、従来からの実験・計測技術の延長線上では限界があり、新たな、かつ、実大三次元震動破壊実験に見合った実験・計測技術の開発が必要となる。

ここでは、実大三次元震動破壊実験を念頭におき、「大規模(実大)、三次元、震動破壊」のキーワードに対して、「本当に必要な実験を、確実に、安全に、経済的に」実験を行なうといったスローガンに基づき、研究開発すべき実験・計測技術について検討し、課題の抽出を行なう。

#### 6.3.1 必要な実験技術

実大三次元震動破壊実験で新たに開発が必要となる各種実験技術について検討を行なった。その結果を以下に示す。

##### (1) 試験体の設計・製作技術

実大試験体の破壊実験を確実に、安全に、経済的に行うための試験体の設計・製作技術が必要である。実験の確実性が基本観点に置かれるが、安全性の観点も不可欠である。また、試験体の復元再利用、多目的利用等、経済性への配慮も必要となる。

試験体の設計・製作技術は、対象物毎に特有であるため、共通技術を対象とする本章からは除外することとするが、本FSでは前章までに、鉄道車両走行(地上構造物等)、地盤作成技術(地盤・基礎・地中構造物)、震災対策用人体ダミーの開発(人間工学)等の実験技術課題が挙げられている。

##### (2) 計測・測定技術

実大スケール三次元実験では、自由度が膨大となるため、この把握のためには多数地点の計測が必要になる。これに伴い、大量データの一括処理を行う抜本的な手法の開発が必要となる。また、破壊現象の追跡を目的とするため、大変形に追随し、かつ、変位を捉えられるような計測システムが必要となる。破壊に対してロバストな計測とするためには、非接触の計測技術についての検討が必要である。また、ソリッドな三次元構造では、その内部挙動の把握方法が大きな課題となる。

##### (3) モニタリングおよび実験支援情報システム技術

三次元挙動は、奥行き方向への次元が加わることにより、単なるVTR映像や目視では挙動把握が非常に難しくなる点で、一次元、二次元とは大きく異なる。大規模三次元実験では、計測点数が膨大となり、計測データの品質管理やデータ処理の効率向上が切実な問題となる。特に、実大三次元震動破壊実験では、実スケール構造物の破壊実験という高額か



つ一発勝負の実験であることから失敗は許されない上に、時系列現象である「震動」を対象とすることから、加振中の常時挙動モニタリングは必要不可欠となる。リアルタイムに三次元挙動を把握するためには、三次元CG(Computer Graphics)技術を最大限に活用したリアルタイムモニタリングシステムの構築が必須である。また、将来的には、このリアルタイムCGによる計測技術と構造解析技術との融合により、様々な機能拡張を行い、実大破壊実験シミュレータとして活用範囲を広げていくべきである。

#### (4) 高精度でロバストな加振技術

震動台の性能限界に近い実大規模の構造物を載せて、しかも破壊に近い状態を再現する場合、試験体の非線形応答に伴う震動台への攪乱、いわゆる震動台と試験体との動的相互作用により震動台の動きが乱される可能性がある。これを回避し、目的の震動台挙動を精度よく再現するためには、加振中の試験体挙動を監視し、振動性状の変化に合わせて動的に入力波形を補償する技術が必要である。

#### (5) ハイブリッド実験技術

実験目的、実験対象構造物等に応じて、実験上着目する部分要素のみを試験体とし、それ以外の部分の挙動については数値計算により再現するといったハイブリッド実験手法を採用することにより、より大規模な構造物についても震動実験が可能となる。実大三次元震動破壊実験施設においても、試験体規模には限りがあり、より大規模な構造物挙動の解明のためにはハイブリッド実験手法等の採用が不可欠である。部分要素が強い非線形性を有し、これが全体系の挙動に大きな影響を与えることが予想される場合、数値計算をリアルタイムに行い、加振制御にフィードバックする必要がある。これは、(3)における計測技術と構造解析技術との融合、及び、(4)の高精度でロバストな加振技術、また、計算機の数値演算能力にも大きく左右される。

#### (6) 安全技術

実大、破壊の実験を実施するためには、安全性が確実に確保されていなければならない。この問題は、既に必要な安全対策は実大三次元震動破壊実験施設の建設で満足されていることが前提である。その上で、基本的には(1)の試験体設計・製作で十分考慮されているとともに、震動台まわりの適切な防護処置等に対応されるべきものであり、各々の実験においてクリアすべき問題である。ただし、上で述べた(3)のモニタリング技術、(4)の加振技術においても、安全性向上を支援するような配慮がなされるべきである。

#### (7) 周辺環境影響軽減技術

実大三次元震動実験は、これまでに経験したこともないきわめて大きな加振力を作用させることになるが、この力は反力としてそのまま震動台基礎地盤に波動として伝達されることになる。この波動(振動)の周期は、1Hz程度から数十Hzになると考えられるが、や

や低周波の振動はあまり減衰せず、周辺の住環境や工場、研究施設の精密機器に影響を与える可能性がある。このような波動の伝播や振動減衰のメカニズムはこれまで十分に研究されてはならず、対策方法の開発と合わせて解析のおよび実験的な研究が必要となる。実験的な研究は既存の大規模振動台を用いることが考えられる。

### 6.3.2 共通技術としての研究課題の抽出

ここまでの議論により、「大規模(実大)、三次元、震動破壊」のキーワードを持つ実大三次元震動破壊実験において、「本当に必要な実験を、確実に、安全に、経済的に」行なうために必要な技術的キーワードとして、以下のものが挙げられる。

- 1) 大量データ高速処理 : 実大三次元で自由度が膨大となることから必要となる技術
- 2) 三次元挙動把握 : 実時間かつ高精度な三次元挙動把握技術
- 3) 変位・変形挙動把握 : 破壊挙動の把握のために不可欠な変位・変形計測技術
- 4) 破壊挙動追跡技術 : 破壊に対してロバストな計測技術
- 5) 構造解析技術 : ハイブリッド実験やフィードバック制御で必要な技術
- 6) 高精度ロバスト加振技術 : 震動台性能を十分に発揮し試験体を高精度かつロバストに加振する技術

これらの技術的キーワードを考慮し、汎用実験技術としての必要と思われる研究課題を以下に示す4つのテーマにまとめて抽出した。表-6.3.1には、研究課題と技術的キーワードとの関係を示している。

1. リアルタイムCGによる可視化と実験支援技術の開発
2. 実大三次元震動破壊実験における破壊挙動追跡技術の開発
3. 試験体と振動台の動的相互作用を考慮した実験法に関する研究
4. 数値実験と振動台実験を結合した実験技術の開発

表-6.3.1 研究課題と技術的キーワードとの関係

課題分類	分析支援技術	破壊挙動計測技術	高精度・ロバスト加振技術	高度応用技術
課題名	リアルタイムCGによる可視化と実験支援技術の開発	実大三次元震動破壊実験における破壊挙動追跡技術の開発	試験体と震動台の動的相互作用を考慮した実験法に関する研究	数値実験と震動台実験を結合した実験技術の開発
技術的キーワード	大量データ高速処理技術	○	○	●
	三次元挙動把握技術	○	○	
	変位、変形把握技術	○	○	
	破壊挙動追跡技術	△	○	●
	構造解析技術	△		●
	実大構造物の高精度・ロバスト加振技術			●

- 課題の成果として向上する技術
- △ 支援など間接的に貢献する技術
- 課題達成のために精度向上が必要な技術

各研究課題の具体的内容は6.4節で示すこととし、ここでは、技術的キーワードの側面から解決手法及び研究課題との関連について説明を行なう。

(1) 大量データ高速処理

計算機の処理速度自身の向上も望まれるが、課題分類「破壊挙動計測技術」の研究により、計測手法の発想の転換(例えば画像収録を主体として計測点数を減らす等)を行い、また、課題分類「分析支援技術」の研究によりソフト支援の面から高速化をはかる。

(2) 三次元挙動把握

課題分類「分析支援技術」の研究により、操作性の良い三次元リアルタイムCGを開発し、複雑な三次元挙動の把握に計算機技術を活用する。また、課題分類「破壊挙動計測技術」との連携で、複数点からの映像を用いたステレオ画像処理等の導入についても検討する。

(3) 変位・変形挙動把握

課題分類「分析支援技術」の研究では、加速度、速度等からの変位計算や幾何学的補間による計測点以外の点の変位計算を行ない、三次元リアルタイムCGを用いた挙動把握しやすい表現方法に関して検討し、システム開発を行なう。

課題分類「破壊挙動計測技術」の研究では、直接的な変位、変形計測手法、破壊に対してロバストな計測手法等を検討する。画像収録を主体とした変位・変形収録手法に関して、三次元リアルタイムCGと連携をはかる形で検討を行なう。

#### (4) 破壊挙動追跡技術

課題分類「破壊挙動計測技術」の研究により、AE（アコースティックエミッション）や光ファイバー歪計測技術を用いた破壊開始の瞬間及び位置の検出や、画像収録を主体とした破壊挙動追跡技術を開発する。これらは、三次元リアルタイムCGとの連携をはかる。

#### (5) 構造解析技術

課題分類「分析支援技術」の研究により、各種構造解析手法をライブラリとして共通仕様で導入できる統一的な枠組みを構築し、課題分類「高精度加振技術」や「高度応用技術」の研究で必要となる構造解析手法を組み込んでいく。

#### (6) 高精度・ロバスト加振技術

課題分類「高精度・ロバスト加振技術」にて検討を行なう。構造解析技術と組み合わせることにより、課題分類「高度応用技術」の研究で、ハイブリッド実験を実時間で行う手法を検討する。

### 6.4 研究課題および内容

前節までの議論を受け、緊急性を要する課題を抽出し、以下の4つの大項目に区分した。

1. リアルタイムCGによる可視化と実験支援技術の開発
2. 実大三次元震動破壊実験における破壊挙動追跡技術の開発
3. 試験体と振動台の動的相互作用を考慮した実験法に関する研究
4. 数値実験と振動台実験を結合した実験技術の開発

なお、試験体設計・製作技術等、各対象物毎に検討を要する課題については、各対象物の章に委ねることとし、本章では、実大三次元震動破壊実験における共通(汎用)技術に焦点を絞って課題抽出を行っている。

各テーマの概略および小項目を次項以降示す。

#### 6.4.1 リアルタイムCGによる可視化と実験支援技術の開発

##### (1) 目的と必要性

三次元挙動は、平面の二次元に奥行き方向への次元が加わることにより、単なるVTR映像や目視では挙動把握が非常に難しくなる点で、一次元、二次元とは大きく異なる。また、大規模三次元実験では、計測点数が膨大となり、計測データの品質管理や迅速処理の効率向上が切実な問題となる。特に、実大三次元震動破壊実験は、実スケール構造物の破壊実験という高額かつ一発勝負の実験であることから失敗は許されない上に、時系列現象である「震動」を対象とすることから、加振中の常時挙動モニタリングは必要不可欠となる。リアルタイムに三次元挙動を把握するためには、三次元CG(Computer Graphics)技術を最大限に活用したリアルタイムモニタリングシステムの構築が必須である。

将来的には、このリアルタイムCGによる計測技術と構造解析技術との融合により、様々

な機能拡張を行い、活用範囲を広げていくべきである。しかし、あらかじめ全ての計測技術や構造解析技術を実装することはコスト的に限界があり、また、計測技術や構造解析技術自体も進化しつづけている。従って、新たな要素技術が必要となった時点でplug-in形式のように容易に導入できるような、柔軟な情報システムの枠組み設計が重要となる。

ここでは、実大三次元震動実験に必要な、安全性、確実性、効率性の確保と、実験施設の活用範囲や機能拡張性の向上を目的とし、震動台および試験体のリアルタイムCGモニタリングを中心とした一連の震動実験支援情報システムについて検討を行なう。

## (2) 研究の内容・方法

本課題では前述の目的を達成するために以下の調査・研究を行う。

### 1) 三次元CGを用いた試験体応答のリアルタイム表示

あらかじめ振動台および試験体の三次元数値モデルを作成しておき、計測された時系列データに基づいて幾何学的関係等から全体の動きを補間し、三次元CGを用いて計算機上で可視化を行うシステムを構築する。任意の視点からの表示、平面・側面・断面表示、補助線表示、着色、計測点位置の波形表示等、三次元挙動をリアルタイムに把握するために必要な表示方法、機能、ユーザーインターフェイスについて検討を行う。

### 2) plug-in方式による統合型実験・解析システムのフレームワークの設計

小項目1)を中心とする統合型実験・解析システム(バーチャル振動台)のフレームワークの設計を行なう。オブジェクト指向分析手法を用いて、実験技術、構造解析技術等、要素技術のタイプ毎にデータ構造やシステム構造の分析を行い、plug-in形式で導入が行えるようなインターフェイスを設計する。設計したシステムの妥当性の検証を行うため、現時点で導入可能な要素技術を例にプロトタイプ of 構築を行う。また、今後導入すべき要素技術について知識整理を行う。

## (3) 期待される効果

ここで構築される情報システムは、複雑な三次元挙動に対する強力な把握支援ツール群であるため、データエラーや危険挙動の早期検出と迅速対応が可能となり、実大三次元震動破壊実験における安全性、確実性は格段に向上する。さらに、統合的なフレームワーク設計は、実大三次元震動破壊実験システムに様々な構造解析技術を柔軟に取り込むことを可能とし、システムの適用範囲や活用可能性を大幅に向上させるものである。

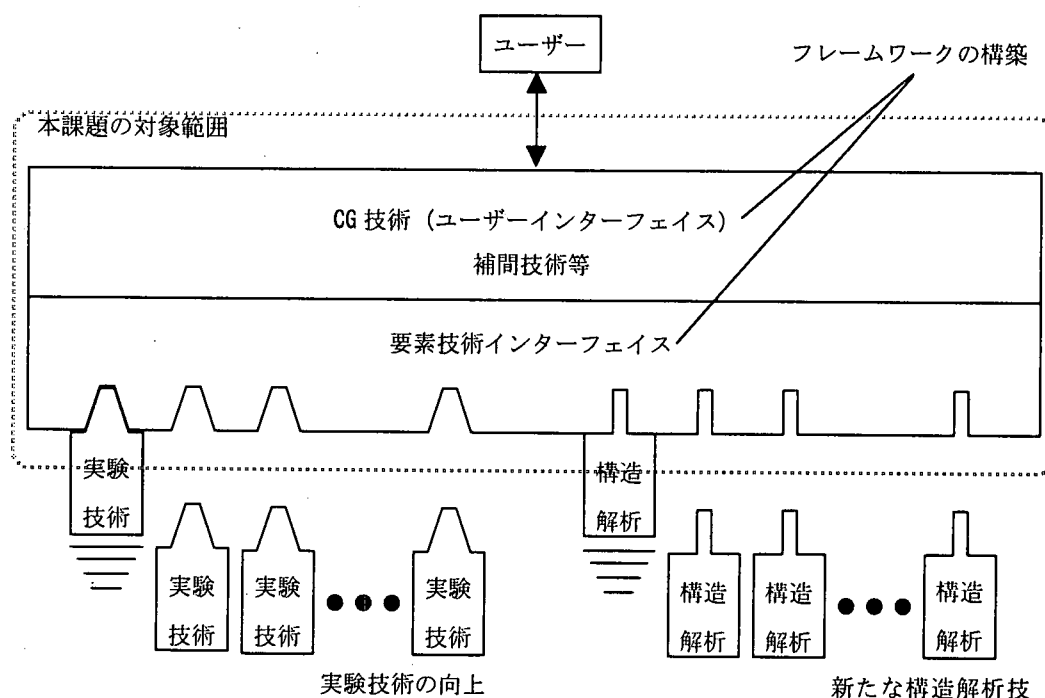


図-6.4.1 plug-inシステムの概念図

## 6.4.2 実大三次元震動破壊実験における破壊挙動追跡技術の開発

### (1) 目的と必要性

実大震動破壊実験においては、実物大の各種試験体の破壊過程を追跡し試験体内部の状況まで把握することが実験を行う一つの大きな目的となる。これまでも各種の振動実験が実施されているが、相似則や試験体寸法の問題から破壊挙動の把握に重点をおいたものは、数例に留まっているのが現状である。そのため、振動実験の計測装置は、動歪みをベースとした計測システムで加速度および変位を測定することが多く、破壊過程の追跡と試験体内部状況の把握の方法および装置は、今後開発して行くべき課題と云える。

特に、実大試験体で破壊がどこから始まり、どのように進行するか、またどのような破壊モード形となるかを解明することが、破壊後の状態を考慮した設計への移行や防災システムの構築に重要なデータを提供することになるとともに、またこれらをリアルタイムに行うことにより、振動台制御に重要な情報を与えることになる。そのような観点から、本研究課題では、映像化による計測・解析と破壊時の放出エネルギーの計測・解析を不可欠な技術として検討を行い、破壊過程における計測解析技術の確立を目指す。

### (2) 研究の内容・方法

前項に挙げた2項目の研究内容と方法を示す。

#### 1) 映像化による計測・解析技術

画像収録等による非接触計測・解析システムの構築を検討する。具体的には、破壊前か

ら破壊後に至るまでの実大試験体の挙動をビジュアルに捉える画像収録の基本機能に加え、以下の2項目の機能充足を図る。

- ① 実大試験体の挙動（加速度、速度、変位）を画像解析から導き出す。
- ② 実大試験体の破壊モード形を画像解析から導き出す。

このために、ハード面では画像センサー技術の広範囲映像再現技術、即ち一つの画像センサーでの広範囲の映像化とそれに伴う高精度化を、ソフト面では、画像の三次元化技術の向上を検討する。その際、変位精度および周波数追従性が良く、非接触型計測として普及しつつあるレーザー式変位センサー技術を画像解析技術の座標基準点設定として組み込むことを併せて検討する。

## 2) 破壊時の放出エネルギーの計測・解析技術

材料が破壊する時のエネルギーを捉え、破壊位置の同定および破壊進行状態等の内部状況を把握するための計測・解析技術として、歪みゲージに比べ、数少ないセンサーの設置で応力集中部、破壊点を検知する特徴を有する AE技術と光ファイバー技術の検討を行う。

AE技術は、各種材料、岩盤、土質地盤にまで適用され、静的載荷状況下で破壊検知にその有用性が確認されている。これを動的載荷状況下で、AE震源の移動、および多震源化における波の同定技術および複合材料の波の識別技術の検討を行い、破壊の位置および進行状況把握を行うための測定・解析システムとして構築する。

光ファイバー技術に対しては、現存する各種センサーシステムでの性能比較検討を実施し、動的挙動への追従性が良くラインセンサーとして埋め込み可能なものを選定、改良を行い、計測システムを構築する。更に、試験体に有限要素法ソリッドメッシュ寸法に併せてラインセンサーとして埋め込むことにより、試験体の破壊現象をメッシュ寸法に対応した平均的現象として捉え、解析とリアルタイムに対比する同定システムを開発し、試験体内部破壊過程の追跡技術として適用する。

## (3) 期待される効果

非接触タイプに位置づけられる映像センサー技術と変位センサー技術を組み合わせることにより、実大試験体の震動挙動とそれに伴う破壊過程を高精度に捉え、三次元的な再現が可能となる。また、できるだけ少ない数のAEセンサー信号を用いての破壊震源の同定技術と、有る程度の長さを有するラインセンサーの平均歪みからの破壊の同定解析技術との組み合わせで震動中の試験体内部破壊進行をリアルタイムに追跡することが可能となる。

### 6.4.3 試験体と振動台の動的相互作用を考慮した実験法に関する研究

#### (1) 目的と必要性

実大三次元震動破壊実験施設のような超大型の振動台においても、振動台単体、剛体あるいは弾性体の試験体を乗せた状態で所定の性能を発揮することは、現代の発達した制御技術を駆使すればほぼ可能と思われる。しかし、振動台の性能限界に近い実大規模の構造

物を乗せ、しかも破壊に近い状態を再現するとなれば、試験体の非線形応答に伴う振動台への攪乱いわゆる振動台との動的な相互作用により振動台の動きが乱される可能性がある。

今日、時々刻々変化する試験体の性状変化に伴う振動台との動的な相互作用を補償・制御する技術は多くの試みがなされているが、まだ完全な解決策は見つけられていない。そのため、現状では試験体と振動台との動的な相互作用の結果として震動台に予期したエネルギーが十分供給されず、試験体の破壊実験が困難となる場合のあることが予想され、何らかの現実的な解決策を講じておく必要がある。

そこで本研究課題では、実大三次元震動破壊実験施設を用いて、今後実施が検討されている実験課題案を整理し、その実現のために実験者側から要求される振動台の性能の再整理、建設される振動台の性能との比較による破壊実験を行う場合の問題点の把握、振動台と試験体の動的相互作用を可能な限り低減出来る、現実的な加振制御方法の検討を行うものとする。

## (2) 研究の内容・方法

本課題では前述の目的を達成するために以下の調査・研究を行う。

### 1) 実験者側からの振動台に求める性能に関する整理

実大三次元震動破壊実験施設を使って実施が考えられている計画について、その目的・内容、試験体の規模、測定すべき項目、要求加振能力、安全対策さらに実験後のデータ処理等に関する要求性能などを整理し、振動台に求める諸性能を整理する。

### 2) 振動台の振動特性の把握と震動破壊実験への影響に関する検討

前項の整理結果と建設される振動台の諸特性の比較検討を行い、各実験の実現性について検証を行い、必要があれば個々の実験計画案の修正などを行う。

また振動台の限界に近い大きな試験体を用いた破壊領域までの実験を計画通り遂行するためには、試験体の非線形化に伴う振動台と時々刻々変化する動的な相互作用の影響について数学モデルを用いたシミュレーション解析と小型の模型を用いた振動台実験の組み合わせなどにより現状の制御方法の有効性、限界あるいは問題点を検討し、今後の現実的な解決方法について検討を行う必要がある。

### 3) 動的相互作用を考慮した振動台加振方法の検討

前述のように、加振中に試験体の非線形化により振動特性が変化する場合は振動台との動的相互作用性状が加振の継続時間に沿って変化する事になる。これまで、一般に用いられている振動台と試験体の動的相互作用を補正する手法は試験体の振動特性が時間軸に沿って不変である場合を想定して組み立てられてきた。また近年時間軸に沿って変化する動的相互作用特性をリアルタイムで把握・補正しようとする試みもあるがまだ成功した例は殆どみられない。



動的相互作用特性が時間軸に沿って変化する場合、時間軸に関して不変と仮定して評価した相互作用特性を用いて補正した加振波形は、加振中に試験体の特性が変化した時点でその威力を失い、むしろ悪影響をおよぼすこともありうる。試験体には期待した加振エネルギーが与えられず、試験体を破壊させられない場合やまたその逆の事態も予想される。現状では前述のように、この問題を完全に克服する事は難しいが、前項での解析と実験を相互に組み合わせた検討結果に基づき、近似的に試験体の破壊に十分なエネルギーを付与出来るような現実的な動的相互作用特性を補正する方法について検討する。

### (3) 期待される効果

実大三次元震動破壊実験施設の主要な目的の一つである、実大規模の構造物や土構造物のように加振実験中に試験体の塑性化などにより振動性状が急激に変化するような構造物を対象とした実験においても、試験体と振動台の動的な相互作用を的確に評価し、その影響を最小限に抑えるような加振実験手法を開発することにより、試験体の破壊に必要なエネルギーを十分供給出来るような加振実験が可能となる。

## 6.4.4 数値実験と振動台実験を結合した実験技術の開発

### (1) 目的と必要性

近年、大規模の振動台が建設・計画されているが、すべての実験において大規模な構造物全体系の供試体を用いた実験を行うことは不合理かつ不経済であり、実験目的、実験対象構造物などに応じて、実験上着目する部分のみを供試体とし、それ以外の部分の挙動については数値計算により再現し、両者を結合するハイブリッド実験が有効である。ハイブリッド実験のアイデアについては昭和40年代に提唱され、現在までに種々の実験が行われてきているが、実験装置の制約等から長時間かつ振動台を用いたハイブリッド実験の事例は極めて限定されており、また、その実験技術も汎用的に確立されたものではない。

以上のような状況を踏まえて、本研究は、効率的な大規模実験を実施するために必要とされる数値実験と振動台実験を結合したハイブリッド実験技術の確立を図ることを目的とするものである。

### (2) 研究の内容・方法

本課題では前述の目的を達成するために以下の調査・研究を行う。

#### 1) 実時間ハイブリッド実験技術の確立・検証

実大三次元震動破壊実験施設の完成に先立って、建設省土木研究所振動実験施設の実時間ハイブリッド振動実験装置等で橋梁基礎構造等の各種ハイブリッド振動実験を十分に行っておき、実大三次元震動実験破壊施設では、相応する全体系試験体を作成し震動実験を行なう。これらの2つの実験結果を比較することにより、ハイブリッド実験の有効性を検討し、制御技術、実験手法の確立をはかる。汎用的な実験技術を開発するために、実験対

象構造物は、地盤－基礎－上部構造物系とし、線形領域および非線形領域の両者について実験を行う。

## 2) 実大三次元震動破壊実験施設における実時間ハイブリッド実験の検討

前項で確立した技術を活かし、実大三次元震動破壊実験施設の性能を十分に発揮するような実時間ハイブリッド実験について企画・検討を行う。実大三次元震動破壊実験施設の実時間ハイブリッド実験で可能となる実験内容、そのために整備すべき数値解析法、上部加振のための反力フレーム・アクチュエータの仕様設計等を主な検討項目とする。

### (3) 期待される効果

着目したい部分要素のみの試験体を作成し、他の部分を数値モデルとすることにより、試験体作成の大幅なコスト低減が期待される。また、数値モデルとした部分は変更が容易であるため、経済的かつ効果的なパラメータスタディが可能となる。実大三次元震動破壊実験施設の性能を十分に活用することにより、大きな部分要素についても、大縮尺で精度の高い実験が可能となる。

#### 参考文献 (6章)

- 1) 中村いずみ、小山雅人、中田信治、他：低層鉄骨造住宅の実大振動実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)B-2、pp. 1019-1026、1998年9月
- 2) 柴田 碧、渡部 丹、川上昭二：原子力発電施設耐震信頼性実証試験用入力地震動の解説映画作成のための木造住宅の振動試験について、地震工学振興会ニュース、No124、pp. 47-51、1992年5月
- 3) 例えば、今岡克也、徳武茂隆、青山邦男、福和伸夫：シリコン地盤模型による構造物-地盤系の相互作用実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)B-2、pp. 421-424、1995年4月
- 4) 中央電力研究所：軟質地盤上の大型基礎の動的挙動に関する実証研究(その5) 起振時における基礎・周辺地盤の振動レベルの評価、電力中央研究所報告383022
- 5) 北原昭男、藤原悌三、北浦かほる、山崎かおる、松村夏子：地震時の室内空間における家具の振動性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)B-2、pp. 79-80、1998年9月
- 6) 小長井一男、片桐俊彦、勝川藤太、鈴木猛康：地盤と構造物の相互作用を反映させる振動台の実時間制御手法、第24回地震工学研究発表会講演論文集、第1分冊、pp. 569-572、1997年7月
- 7) 小長井一男、野上仁昭、勝川藤太、鈴木猛康、三神厚：構造物とその基礎の相互作用を反映させる振動台の制御、土木学会論文集、No. 598/I-44、pp. 203-210、1998年7月
- 8) <http://www.dango.ne.jp/anfowld/IntroPI.html>
- 9) <http://www.dango.ne.jp/anfowld/TopicHistries.html>
- 10) 田村敬一、小林寛：部分模型で全体の動きを再現—三次元大型振動台による実時間ハイブリッド振動実験—、土木学会誌、Vol. 83、pp. 13-15、1998年1月