

実建造物の振動挙動解明に向けた振動実測の高度化に関する研究

名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻博士前期課程2年

福和研究室 浜田 栄太

1. 序論

耐震設計法が性能規定化され、限界耐力計算法により建物・地盤の動的挙動を考慮することもできるようになった。また、さらに高度な建物と地盤の動的相互作用などの構造解析手法を状況に応じて活用できる。しかしそのベースにあるのは、地震動入力とそれに対する建造物の応答の正確な理解、それに基づく建築物の耐震性能の適切な把握である。現状では地震入力も、建造物の振動特性も不明点が多く残されている。この解決のためには、地震時挙動の観測や各種振動実験による実建造物の適切な振動挙動把握が第一に必要である。

このような背景から、本論で詳細に扱う振動実測の高度化とは、計測の計画、測定機材、データ処理、分析、結果の評価、多数の結果の蓄積・整理・データベース化、知見の一般化と利用など、振動実測に関わる一連の過程のトータルな改善をさしている。これらの一部のみを力を入れても、全体の流れが落ちなく適切に扱われない限り、実建造物の振動特性の正確な把握は困難である。

まず、観測計画に関しては、建設段階を追った連続観測を導入し、超高密度観測や地盤条件、基礎構造、上部構造の特徴、増築による変化などに着目した複数の建物の比較も含め、少数の建物の観測から系統的に最大限の特性を分離して抽出・検討することのできる一連の観測を検討している。これを戦略的強震観測・振動実験と呼んでいる。同時に、建物の特徴に応じた計測目的の設定、計測機材、計測方法、分析方法などについて、不適切な手続きによる失敗例なども交えて整理し、成果を一般的に利用する際の基礎を構築する。以上を「**通接地条件**」として、多様な構造特性や個別性を持つ建物について、振動特性把握に必要な一連の方法を客観的に整理し、一般的手順（振動特性検討用観測レシピ）を構築することが本論の目的である。

2. 振動実測の目的・手法・成果

2.1 振動実測の検討過程

表1に、名古屋大学で行われてきた振動実測と得られた成果を示す。これらは建物振動の分野における課題の検討をもとに継続して実施してきたものである。観測点が簡易なものから高密度なもの

まであり、簡易な計測では多くの建物を対象として傾向を捉え、高密度な計測では対象建物を絞って詳細な検討を行っている。高密度な計測の場合、個々の建物の特徴に応じて動的相互作用や立体振動が観測出来るように発展させていることが分かる。このような、一連の観測手法には様々な工夫により得られる知見もさまざまである。建物の振動挙動を把握するために、観測手法と得られる成果を整理していくことは、今後同様の検討を行うために非常に重要な事であると考えられる。

2.2 戦略的振動実測の提案

観測機器や分析手法の発展により、個々の建物の特性に応じた観測態勢が整理されてきた。表1より、1993～2000年にかけて、建物の振動挙動に及ぼす各種要因が整理されており、その結果にもとづいて少数の建物で統計的な成果を得るための一連の観測プログラムに発展した。図1に示すように、建設中の連続計測も含めて、地盤、基礎、上部構造の特徴や変化による振動挙動の差異を観測することで、多数の建物を観測するに匹敵する成果が得られると考えられる。これを戦略的観測プログラムと呼んでいる。

2.3 地震観測手法の変遷とDB化

観測計画を実施するためには、目的に応じた観測システム2次部材の効果

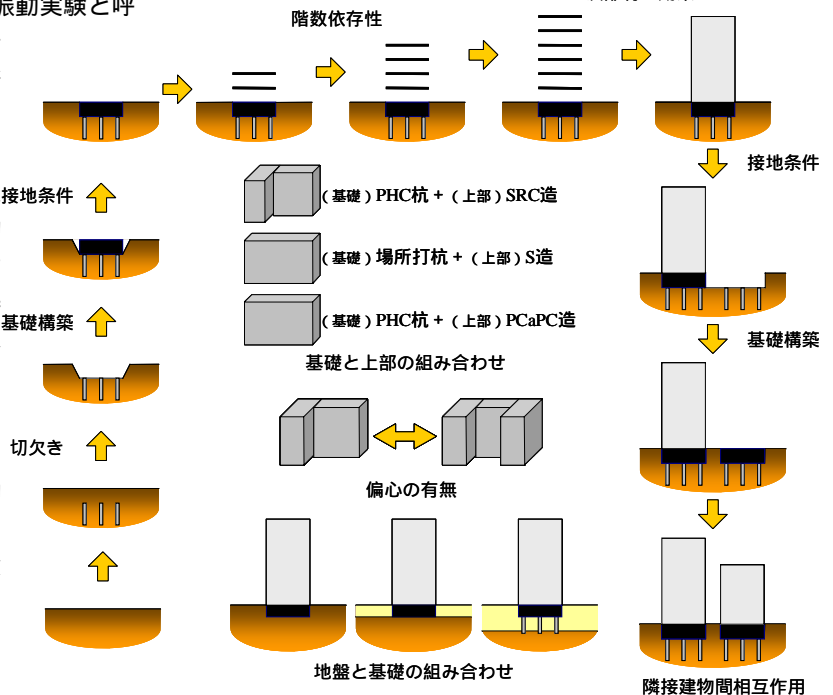


図1 戦略的観測プログラム

テムの構築が不可欠である。表1で、いくつかの先駆的な観測システムの利用が行われている。1996年には地震計のネットワーク接続が行われた。これは当時としては画期的であり、高速、多点同時データ転送やメンテナンスを実現している。強震観測機器も高度化しており、1999年から導入した機器では以下のような特徴がある。

- 高分解能及びセンサー感度の向上
- 大容量フラッシュメモリによるデータ容量の向上とデータ保持信頼性の向上
- トリガ設定条件の詳細化
- データ転送速度の向上
- センサー、収録機が一体の耐候性きょう体による設置電源選択の拡充(AC100V, DC12V)による設置自由度の向上
- 刻時精度の向上

これらを生かし、地震計による微動計測、トリガレベルを下げ多数の地震記録を蓄積する、建設現場での観測、トリガ設定の工夫による継続時間の長い記録などが可能となり、観測の充実が大きく貢献している。大量の記録の整理が適切に行われることが有効な活用には必須であり波形を整理しデータベース化していくことが、記録の利用者にも、計測者本人にも非常に重要である。本研究室では、観測記録を建物や地盤のデータとあわせ、Webデータベースを構築している(図2)。



図2 Webデータベース

3 失敗から学ぶ振動実測

3.1 振動実測の目的と計画

振動実測において、観測目的と観測計画は非常に重要である。計画の立案は、本計測や分析を常に意識しながら行う必要がある。表2に失敗事例と、その影響および改善策について示す。基本的には全て計画に当たるが、

表2 目的と計画での失敗

失敗事例	影響	改善策
計測時人の流れ	観測の実施	仮計測によるシミュレーション綿密な計画
計測スケジュール		
観測点の不備	観測記録の分析、検討 振動特性評価	
配線	センサーと収録機が接続できない	図面を使用した配線計画 配線長さの検討

表4 分析、DBでの失敗

失敗事例	影響	改善策
1自由度による減衰評価	達成うなり振動の場合減衰を過大評価	多自由度を考慮
伝達関数評価(風や回転入力)	推定評価結果が水平入力とは異なる	風の影響把握 地盤条件や交通振動
観測記録が整理されていない	後の検討に使えない どのような検討を行ったか分からない	データベース化

特に表2に示すように、計測時の人の流れ、スケジュール、観測点と配線計画を立案することが必要である。

3.2 観測方法

表3に観測での失敗事例を示す。計測計画を入念に行い、本計測を始められる状況になったとしても、本番では予期せぬ事態が数多く存在する。また機材に適切な波形を取得するための設定も多く存在し、これらは波形の処理に関わってくる。センサーの設置方法なども重要である。それらの影響や対処のための方法を表3に示す。計測シートやイベントシートに、計測状況を整理し、また写真として残すことが可能なものについてはできるだけ残すなどの処置も重要である。もし観測規模が大きい場合は、別途予備計測などの簡易な計測を行うことが必要になる。

3.3 分析とデータベース化

表4に分析、DBでの失敗を示す。得られた記録の分析にあたり、対象と目的に応じた分析が必要である。その例として減衰評価について述べる。減衰定数の適切な評価は非常に難しく、多くの場合過大評価となる。図3に、S造10階建物とPCaPC造7階建物を対象として、減衰評価を行った結果を示す。どちらの建物も並進とねじれの近接固有値が確認されている。これらに1自由度RD法と2自由度RD法を適用した。両者の推定減衰定数を比較すると、1自由度RD法が過大評価している様子がわかる。このことから、分析手法を適切に選択する

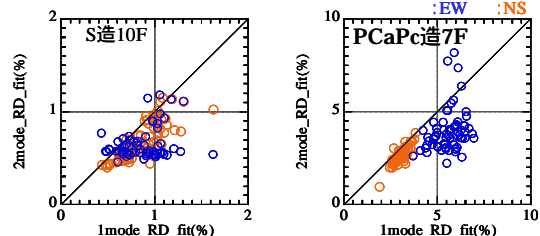


図3 S造とPCaPC建物の2自由度と1自由度RD法の減衰定数の比較

表3 観測方法の失敗

失敗事例	影響	改善策	失敗事例	影響	改善策	失敗事例	影響	改善策
記録時間が短い	データの抽出しアンサンプル平均	建物に応じた記録長さの設定	センサーの風よけ、雨よけ	雨、風による振動記録波形の乱れ	カバーをかける	起動トリガーを建物に設定	地盤の初動が観測出来ない 初動以外の部分の分析	起動トリガーを地盤に設定 停止トリガーを建物に設定
サンプリング振動数の設定	分析可能な周波数範囲 データ容量	対象となる振動数の設定の計画	センサーの観測可能な応答レベル	記録波形の信頼性	他の計器との比較			
最大レンジ記入	波形のビット落ち 波形の振り切れ	大きすぎず、小さすぎない設定	観測点	振動特性把握 データ容量	仮計測	起動トリガーの地震計故障	観測できない 波形が得られない	建物頂部でもトリガー設定を行う
センサーの設置	人がさわる 部材振動 波形の方位性	設置状況を写真にする	地震記録が消去される	データが得られない	LANによる即時回収	建設現場の振動でトリガーがかかる	地震計データ保存容量が大きくなる	上下成分はトリガーを使用しない 設定
配線	人に絡まる 電気ノイズ	人、ケーブル同士を絡まないようにする	地震記録が途中で切れる	短い波形の処理 他の観測点との比較が困難	即時回収 データ容量の向上	トリガーレベルを下げすぎた	環境振動ばかりを観測してしまう 風によってすぐにトリガーがかかってしまう	データ容量の向上 即時地震波形の回収 大きいレベルの波形は保存する 設定
センサーが正常に働いているかのチェックミス	波形の信頼性	クランプチェック	工事現場内で観測	工事振動の観測 ノイズの多い波形	時間外の観測	地盤と建物の同期	地盤波形と建物の波形長さが異なる 同じ長さの波形に補正すると短くなる 地盤波形と建物の波形長さが異なる	同期の必要性 長めに観測できる 設定の必要性
アンプの設定のチェック	波形変換時に必要な パラメータの確認	アンプ設定を資料として残す	低減衰構造物に対して通常のトリガー設定	後続波が観測出来ない	プレ、ポストトリガーの独立した設定			
風、人、交通振動の影響	振動挙動の違い 記録波形の乱れ 計測時状況の把握	イベントシートの記入	停止トリガーを地盤に設定	建物の後続波が観測出来ない 後続波以外の分析	停止トリガーを建物に設定	地震計での微動計測	応答レベルが低い 部分は観測できない	固有モード成分などの応答レベルの大きい部分を評価対象

必要がある。また先にも述べた波形の DB 化と建物情報の整理は、適切な利用のため重要なことである。

4 現在の振動実測と得られる成果の実例

ここでは、ここまで述べてきた振動実測の高度化を反映した最近の観測事例とそこから得られる成果について、固有周期、減衰定数をもとに示す。図は既往の研究における結果と研究室で計測された中低層建物を加えた結果を示している。

4.1 振動実測手法に基づく成果

図 4,5 は常時微動計測における軒高と周期、減衰定数の関係である。SRC 造 10 階建物(新 1 号館)と S 造 10 階建物(IB 電子情報館)、S 造 47 階建物(豊田ビル)、S 造 43 階建物(牛島ビル)は建設段階の観測を行っている。まず既往の常時微動の結果の検討を行う。RC、S 造ともに、軒高の増加に伴い周期が伸びる。減衰定数は、RC 造では軒高の増加が地下逸散減衰の現象を示している。本件で加えた中低層建物も調和的な傾向である。S 造は概ね 2%以下に分布している。建設段階で計測を行った新 1 号館、IB 電子情報館、豊田ビル、牛島ビルも、このような傾向に調和的であり、建設段階での計測が、複数の建物棟数を観測するに匹敵する成果が中低層および高層建物で得られた。

4.2 分析手法の改善

図 5 の豊田ビルの分析に RD 法と 2 自由度 RD 法を比較したものを示す。豊田ビルは x,y 方向の連成うなりが確認されたため、1 自由度で評価したものは推定が乱れている。このような結果から、手法の選択を適切に行うことは、分析を適切に行うために非常に重要であると考えられる。

5 建物振動性状把握のための観測手順の整理

建物振動挙動把握のために必要な方法の整理に基づき構築した観測手順を図 6 に示す。計測計画に始まり、対象建物をまず図面などから把握することが必要である。複雑な振動挙動によっては必要な成果が得られない場合もある。また観測規模が大きいほど失敗は許されないため、予備計測などであらかじめ成果が得られるか検討を行うなどが必要と思われる。

6 まとめ

振動実測における、成果を一般的に利用する際の基礎を構築した。その知見に基づき多様な構造特性や個別性を持つ建物について、振動特性把握に必要な一連の方法を客観的に整理し、一般的手順(振動特性検討用観測レシピ)を構築した。今後の知見の蓄積により、この手順をさらに高度化するようまとめていくことが重要になる。

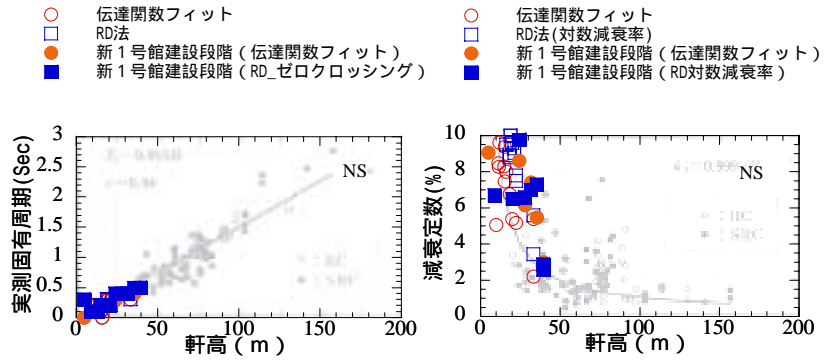


図 4 RC,SRC 造の軒高と固有周期、減衰定数の関係

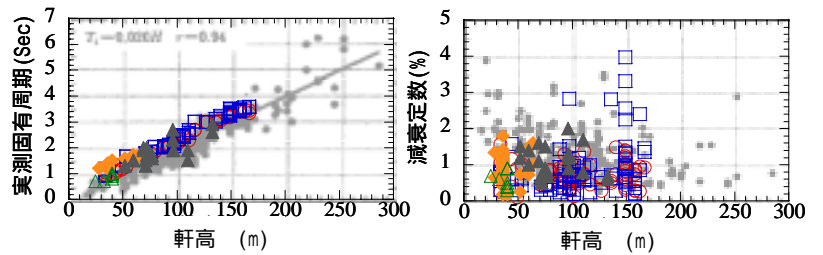


図 5 S 造の軒高と固有周期、減衰定数の関係

豊田ビル(2自由度RD) 豊田ビル(RD)
牛島ビル(2自由度RD) IB電子情報館(RD)
名古屋市内超高層(RD)

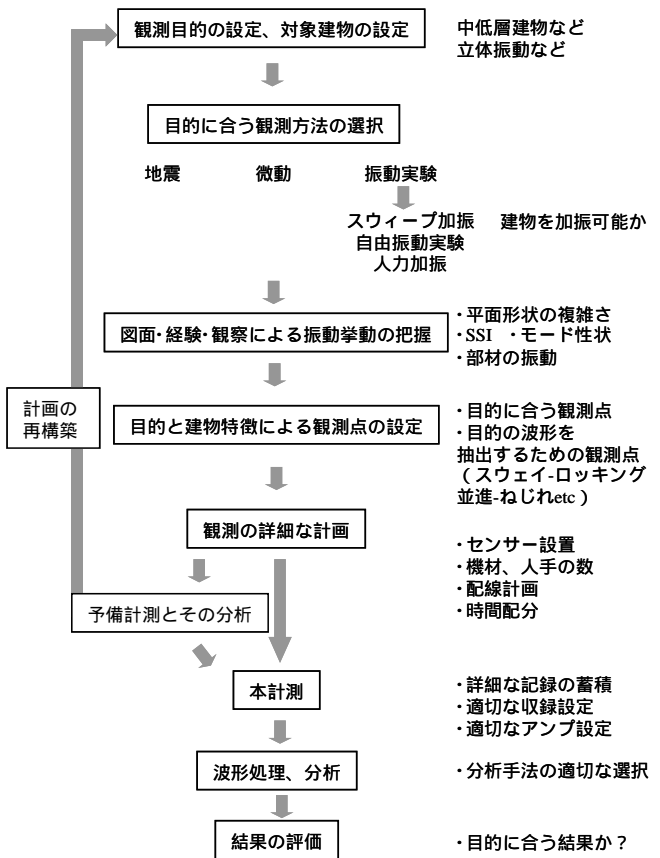


図 6 観測手順