

## 命を守る地震防災・地震工学 ～過去から未来へ～

名古屋大学大学院環境学研究科 福和伸夫

### 1. はじめに

本連載では、建築学会賞を受賞した論文の周辺について、研究動向をできるだけ平易に報告することが趣旨と聞いた。連載第一回のため、模範にするものが無く、趣旨に則っているか不安であるが、可能な限り分りやすく報告したい。

受賞論文は、5部構成となっていたが、本稿ではこれを再編し、構造物-地盤系のダイナミクスと耐震設計、堆積平野の地盤構造と強震動、地震工学研究と都市防災、の3部構成とし、各々の側面から報告を試みる。

まず、最初に本研究に関わる社会的背景を整理しておく。筆者が大学院を修了した1980年頃は、原子力発電施設の耐震研究が最も精力的に行われていた時期である。特に構造物と地盤との動的相互作用や強震動に関しては、ジェネコン各社が壮絶な研究競争をしていた。各社には同世代の研究者が大量採用され、ジェネコン技研の研究力が人・設備の両面で大学のそれを凌駕していた。この時期は、有限要素法や境界要素法などの解析コードが次々と開発され、コンピュータ能力の向上も相まって、構造物-地盤系の地震応答解析が耐震設計に根付き始めた時でもある。これらの研究成果は、その後続く臨海部の超高層建物、免震・制震(振)建物の実現に大きく寄与した。

しかし、一般建物は、原子力発電施設とは異なり、より軟弱な地盤に建設される。このため、表層地盤の応答増幅や杭基礎の動的相互作用などの研究などが盛んになった。一方、1995年兵庫県南部地震では、甚大な被害の中、震災の帯の中での新耐震・中低層RC建物の被害が微少に留まった。このことから、一般建物の耐震性の把握度が不十分であるとの指摘がされ、性能設計を指向する建築界のニーズもあり、建物の耐震性能把握の必要性が高まった。

一方、超高層建物や免震建物の設計では、固

有周期を長周期化して地震動の卓越周期域を避けることが前提になる。このため、やや長周期域の地震動特性の把握が重要となる。特に、免震・制震建物では、振動性状を人為的に制御するため、入力すべき地震動の特性と、建物の固有周期・減衰の把握が設計上の鍵となる。

免震・制震の早生期に経験した兵庫県南部地震での揺れは、設計用地震動の既成概念を揺さぶるものであった。東西に帯状に現れた「震災の帯」は、震源断層の破壊過程や堆積平野の深部地盤構造が、強震動生成に強く関与することを明らかにし、震災後、強震動研究が精力的に行われることになった。一方、超高層建物では、その減衰性能の改善のため、制震装置の設置が積極的に行われるようになった。

地震防災の観点では、兵庫県南部地震での甚大な被害を受け、既存不適格建物の耐震化と、発災時の危機管理能力向上のための総合化研究・ソフト研究の必要性が叫ばれた。近年の情報・通信分野での成果を受けて、防災情報システム研究は急進展したが、耐震化は遅滞していた。しかし、最近の中央防災会議での東海・東南海・南海地震に関する調査を受けて、耐震化の推進と地域コミュニティ再生の重要性が再認識された。このためには、徹底的な意識啓発と社会との協働が不可欠であり、地域防災力向上のための実践的研究が期待されている。

### 2. 構造物-地盤系のダイナミクスと耐震設計

構造物-地盤系の応答解析は、骨組を主とする上部構造-基礎系と、半無限連続体である地盤との動的な相互作用問題であり、理論解析が最も多用される研究分野である。その原点は、1900年代初頭のLambや妹澤克雄らの研究に遡る。我が国では、小堀鐸二や田治見宏らが、基礎のインピーダンス解析を中心に研究を進め、海外でも、Reissnerによる剛基礎のイン

ピーダンス解析を出発点に解析的研究が進められた。一方、有限要素法の普及と共に、1970年代を中心に、無限境界の開発が進められた。さらに、1980年代に入って、境界要素法が導入され、動的サブストラクチャー法の普及も相まって、解析法の百花繚乱の時代を迎えた。

1980年代は、原子力発電施設の耐震設計合理化のために、動的相互作用研究が最も推進された時期でもある。理論解析法の開発に加え、ブロック基礎を用いた起振機実験、シリコン模型地盤を用いた振動台実験が、精力的に実施された。ただし、原子力発電施設は、岩盤上にマット基礎で支持されるため、直接基礎を対象とした線形弾性理論の研究が中心であった。

一方、1980年代後半から、埋立地の火力発電施設や臨海部の超高層建物など、軟弱地盤でも地震応答解析を必要とする建物が増えてきた。このため、表層地盤物性の把握、地盤の塑性化・液状化を考慮した応答解析、群杭で支持した建物の地震時挙動の解明などの研究が推進された。その結果、主たる解析法は、従来の主流であった線形弾性範囲の周波数応答解析から非線形時刻歴応答解析にシフトした。

この間に構築された様々な解析法は、サブストラクチャリング時の系の分割の仕方、時空間の場の取り扱い、連立偏微分方程式の代数方程式への変換過程の違い(図1)として整理でき、解析行為の構造分析(図2)から解析の位置づけも明確になる。なお、相互作用研究のレビューについては、「第6回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム」(2001年)での井口道雄の報告や本会出版の「入門・建物と地盤との動的相互作用」に良くまとめられている。

相互作用研究が一区切り付いた1993年に、釧路沖地震が発生し、その後、兵庫県南部地震まで、大地震が続発した。釧路沖地震では、釧路地方気象台での敷地内地盤と建物基礎上の強震記録の差が話題となり、相互作用効果が原因の一つとして取り上げられた。兵庫県南部地震では、直接基礎で支持された中層建物の基礎浮上りによる地震力軽減や、基礎の根入れによる入力損失などが話題となった。これに加え、

特に、震災の帯の中における中低層RC建物の被害率の低さが注目された。これらは、「第5回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム～近年の大地震の教訓と相互作用の設計への展開～」(1998年)や建築学会大会PD「地震動と地震荷重を繋ぐ」(2002年)での中心課題にもなった。

一般建物の耐震設計では、動的相互作用の影響の大きさに拘らず、その考慮は殆どされていない。主たる原因は、相互作用解析法の難解さと、一般建物での実証データの少なさに有る。相互作用効果の簡易評価法については、WolfやGazetasらの成果が有り、限界耐力計算法(限耐法と略す)で、相互作用効果や表層地盤の増幅効果が初めて考慮された。限耐法は、設計法を現象に近づけた点で画期的なものであるが、簡易法故に限界もあり、適用限界を明確にする必要性が指摘されている。

性能規定型の設計法の導入と共に、耐震性能の明示の議論も活発になってきた。一方で、兵庫県南部地震において、一般建物での設計時想定耐力と実耐力との乖離が明らかになり、耐震性能の把握度が十分ではないことも明確になった。一般建物の場合、2次部材や動的相互作用の影響が大きく、かつ、上部構造が不整形になるため、解析のみでの耐震性能把握は困難である。このため、強震・微動観測に基づく振動挙動の解明が必要となる。「第2回及び第3回強震データの活用に関するシンポジウム」(2000年、2002年)では、一般建物の強震観測の必要性が強調されている。

従来の強震観測や微動観測は、超高層建物や原子力発電施設などを中心に実施されてきた。減衰評価小委員会では、これらの記録を収集し、建築物の固有振動特性を固有周期と減衰定数の形で体系的に整理し、「建築物の減衰」を出版している。近年急増している免震建物や制震(振)建物では、建物の周期や減衰特性を人為的にコントロールしており、実建物の固有振動特性の把握度が設計を左右する。特に、超高層建物などの低減衰長周期構造物では共振による応答増幅を避けることが設計の基本で

あり、入力（地盤を含む）と建物の周期の隔離や、建物の減衰能向上が極めて重要となる。

一方、軟弱地盤上の中低層建物は動的相互作用の影響を強く受ける。地下逸散減衰による減衰効果は現行の耐震設計の余力とも考えられ、観測に基づく地震力低減効果の定量的な把握が、安易な入力低減を戒めることにも繋がる。

さらに、一般住宅に至っては、構造躯体に比べ、2次部材の寄与が支配的であり、大きな余力となっている。住宅では、交通振動などの環境振動問題から耐震安全性まで広い振幅範囲での検討が必要とされる。2次部材の寄与については、解析的検討は困難であり、実験・実測に基づいて、振動特性の振幅依存性と2次部材との関係を分析することが必要になっている。

### 3. 堆積平野の地盤構造と強震動

耐震設計の基本は、建物の耐震性能の把握と、建物に作用する地震力の評価にある。地震力は、強震動が建物に入力し、建物が振動応答した結果、慣性力として建物に作用する。このため、その理解には、建物 - 地盤系の振動挙動に加え、強震動の把握が必要となる。しかし、大多数の建物では、耐震設計用の地震荷重として、法規定で定められた静的地震荷重や応答スペクトルを利用しており、設計上は、強震動の特性を十分に考慮していない。

一般建物の場合には、固有周期が概ね1秒以下であるため、短周期の地震動特性が重要となる。この周期域に影響を及ぼすのは、比較的浅い地盤であり、建物基礎の支持基盤（工学的基盤）以浅の表層地盤が重要となる。これに対し、超高層建物や免震建物では、固有周期が数秒になるため、岩盤（地震基盤）までのより深い地盤構造が揺れに参与する。大都市が立地する大規模平野では地下数kmにも及ぶ。さらに、超高層建物のように低減衰の長周期構造物では、揺れの継続時間も重要な因子となる。このため、堆積盆地の3次元構造による波動のトラップ効果の把握が鍵となる。

兵庫県南部地震では、「震災の帯」形成に、震源断層の破壊過程や、深さ1kmにも及ぶ基

盤段差、表層地盤の特性が深く関与した。震源のアスペリティサイズ・ディレクティビティ効果とパルス周期の関係、基盤段差による波動の増幅的干渉、表層地盤による地震動増幅と液状化による加速度低減などである。

震災を受けて設置された政府地震調査研究推進本部を中心に、この9年間、様々な調査研究が実施されてきた。全国の主要98断層に対する活断層調査とその長期評価、主要な堆積平野での大規模地下構造調査、平成16年度を目標とした「全国を概観する地震動予測地図」作りなどである。一方で、発災時における防災部局の初動体制確立や、強震動特性把握のため、大規模な強震観測ネットも整備された。

これらの調査結果は、建物の地震荷重を考える上で極めて重要であり、調査結果を総合化して建築設計に還元できる形に変換する必要がある。ただし、地盤や強震動の問題は地域性が大きいため、主要な平野毎に地元研究者が中心になって研究を実施する必要がある。現状は、関東平野では東京大学地震研究所と東京工業大学のグループが、大阪平野では京都大学のグループが中心になって研究を実施している。濃尾平野でも、筆者ら中心となって、図3のように地盤モデル作りを行っている。

濃尾平野は、関東・大阪両平野に比べ、データ量が不足しているため、既存データを最大限活用できる環境整備が重要となる。様々な強震観測機関との協働によるスーパー強震観測ネットの構築、膨大な数の微動観測の実施、愛知県の濃尾平野地下構造調査との連携・協力、地元設計者や地震・地質・探査・強震動研究者との協働による地震動策定プロジェクトなどである。モデル化に当たっては、まず、浅い地盤に関してボーリングデータのデータベース化とGIS化を図った。深い地盤に関しては、既存の各種探査結果をデータ特性に応じてコンパイルし、強震・微動観測記録を用いてキャリブレーションした上で、信頼に足るモデルを総合的に組み立てた。現在、このモデルは、国や県・市が進める地震被害予測において、震度予測のための基礎データとして活用されている。

#### 4. 地震工学研究と都市防災

耐震工学や地震防災は、大地震から人命・財産を守る建物作り、都市・社会作りを目的としている。しかし、研究の高度化と共に研究課題が細分化され、本来の目的である地震災害軽減への道筋が見えにくくなっている。

一方で、今世紀前半には、宮城県沖・東海・東南海・南海の巨大地震が確実に発生すると言われ、その前後には内陸直下での地殻内地震も懸念されている。中央防災会議の調査によればこれらの地震の被害総量は我が国の国家予算規模となる。早急に抜本的な被害軽減策を図らなければ国の存亡にも関わってくる。

このため、従来型の研究に加え、防災力向上を主目的とした研究の推進が望まれている。個別成果を総合化するシステム化研究、俯瞰的立場でかつ戦略的に災害軽減策を練る文理融合型の減災研究、さらには、意識啓発・人材育成など社会と直結した実践型研究などである。

元来、建築構造では、構造計算や構造解析など、専ら計算のための道具として計算機を利用してきた。しかし、1980年代から人工知能やエキスパートシステムが提唱され、1990年代にはワークステーションやパソコンの低価格化、インターネット環境による通信の高速化・大容量化、端末のモバイル化、GPS利用技術等が急進展し、地理情報システム(GIS)利用や自律分散型システム環境が常識化した。

地震防災分野においても、兵庫県南部地震において、普及し始めていた携帯電話、電子メール、GISが大活躍し、震災後、情報システムの重要性が叫ばれた。特に、危機管理の側面からリアルタイム地震防災システムが着目された。現在では、気象庁によるナウキャスト地震情報が実用化段階に達している。今後は、Web上でGISを利用し、携帯端末から様々なデータを検索・送受信するのが一般的となり、日常時、発災時、復旧・復興時のあらゆる時間局面で活用できる双方向災害情報システムに育っていくと思われる。ここで重要になるのが、コンテンツである。システムの派手さとは逆に、地震工

学・地震防災に関わる知識の構造化と、データの質・量の確保という、極めて地道かつ知的な作業が必要となる。筆者らも「安震君」や「安心ステーション」を始め多数の災害情報システムを構築してきたが、今は、知識とデータの構築がメインテーマとなっている。

システム化と同時に必要なのは防災力向上のための戦略作りである。そのためには、人文・社会系や理学系の研究者との協働が不可欠である。協働の実効性を高めるには、共通の言葉と信頼関係の形成が必要となる。名古屋大学では、2001年4月に建築学教室が中心となって、理・工・文が連携した環境学研究科を設立、連携プロジェクト研究として安全安心プロジェクトを開始した。その中で「ヒト」・「コト」・「モノ」の三極を用いた問題構造の分析を通して、多分野の研究者の協働や、地域との協働が始まった。2003年4月には実践の場としての災害対策室も設置され、地域防災の拠点作りが始まっている。

地域の防災力を本当に上げるには、住民一人一人の防災行動に結びつけなければならない。このためには、人作り・仕組み作り・道具作りが必要となる。専門家と市民、そして両者を繋ぐ媒介者のそれぞれに応じた集い・学習・実践の場作り、協働のための連携の仕組み作り、実践の際に必要な道具作りなどである。草の根のボトムアップ型の防災行動は、トップダウン型システムを補完し、安全の冗長性を高める。住民の意識啓発により、専門家の技術的助言も受け入れてもらいやすくなる。図4は、地域での人材育成・意識啓発のための実践と道具作りの一例である。

#### 5. まとめ

本稿では、建物-地盤系の振動挙動の理解と、建築物の耐震安全性向上、さらには、地域の地震防災力向上のための試みについて、周辺動向を概説した。筆者の浅学のため、偏った報告となっていることをお許し頂きたい。地震災害により不幸になる人を一人でも減らすため、微力ながら全力を尽くしていきたい。

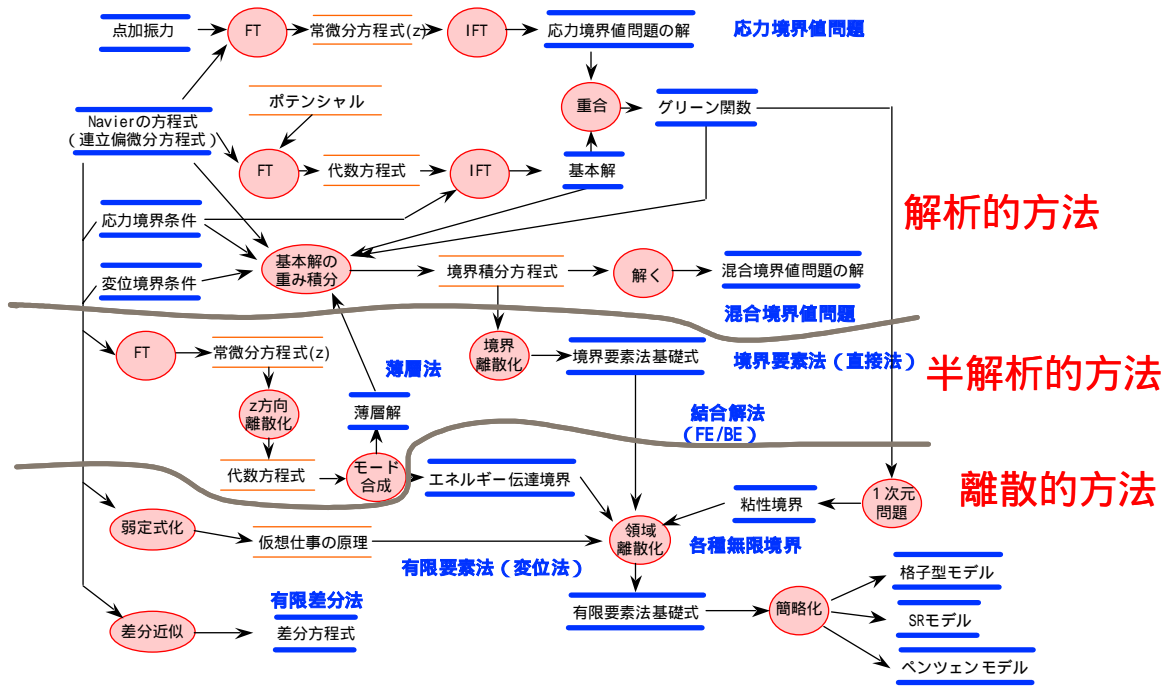


図1 偏微分方程式の変換過程による構造物 - 地盤系の振動解析法の整理

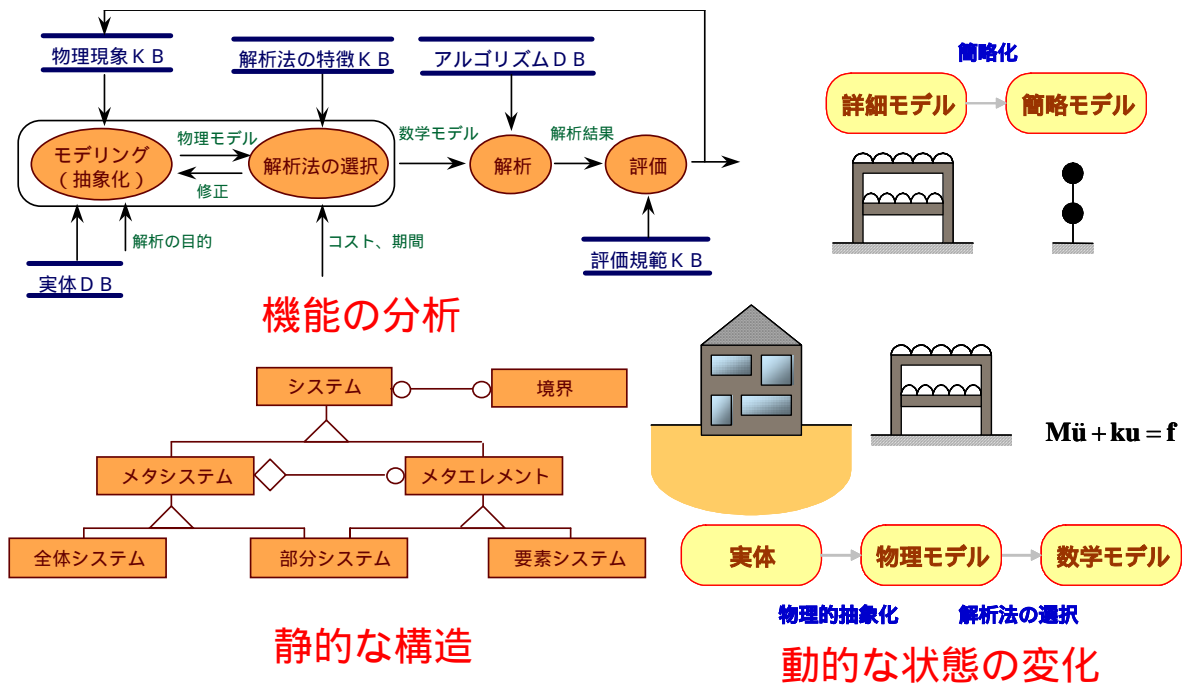


図2 振動解析行為の構造分析

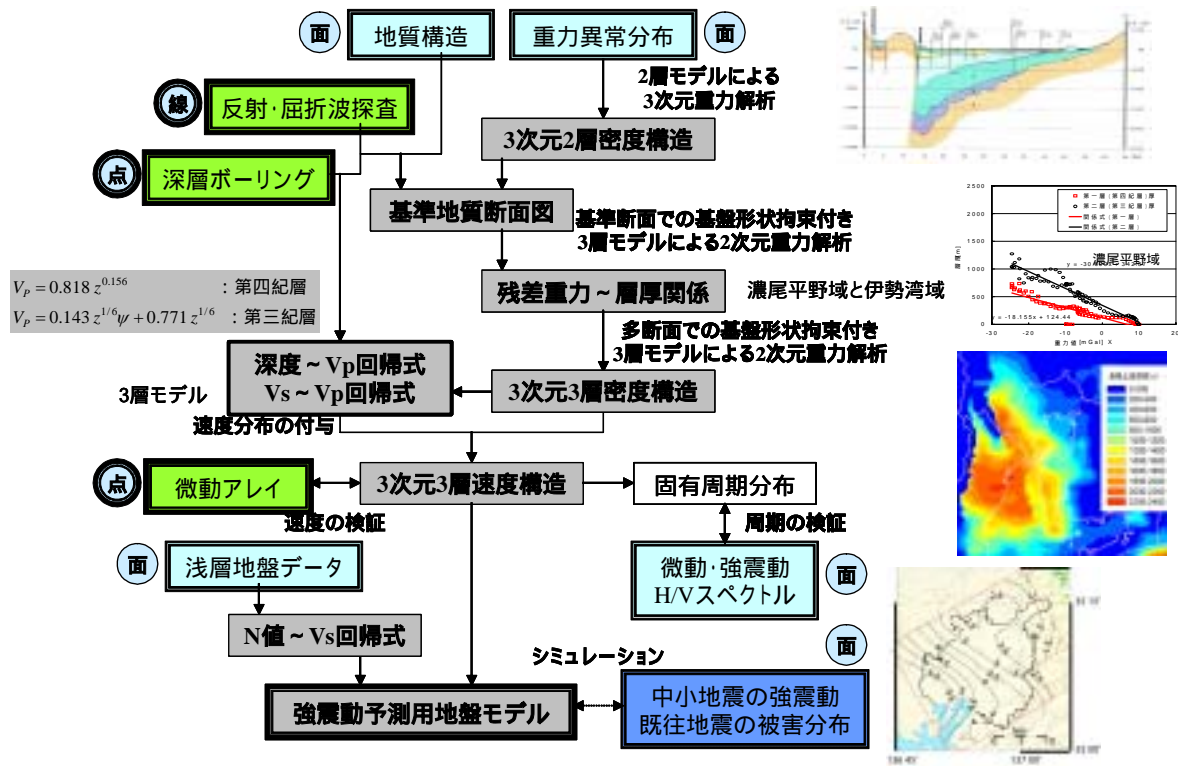


図3 濃尾平野における堆積平野の地盤モデル作成のフロー



図4 防災力向上のための人材育成・意識啓発の実践と道具作りの一例