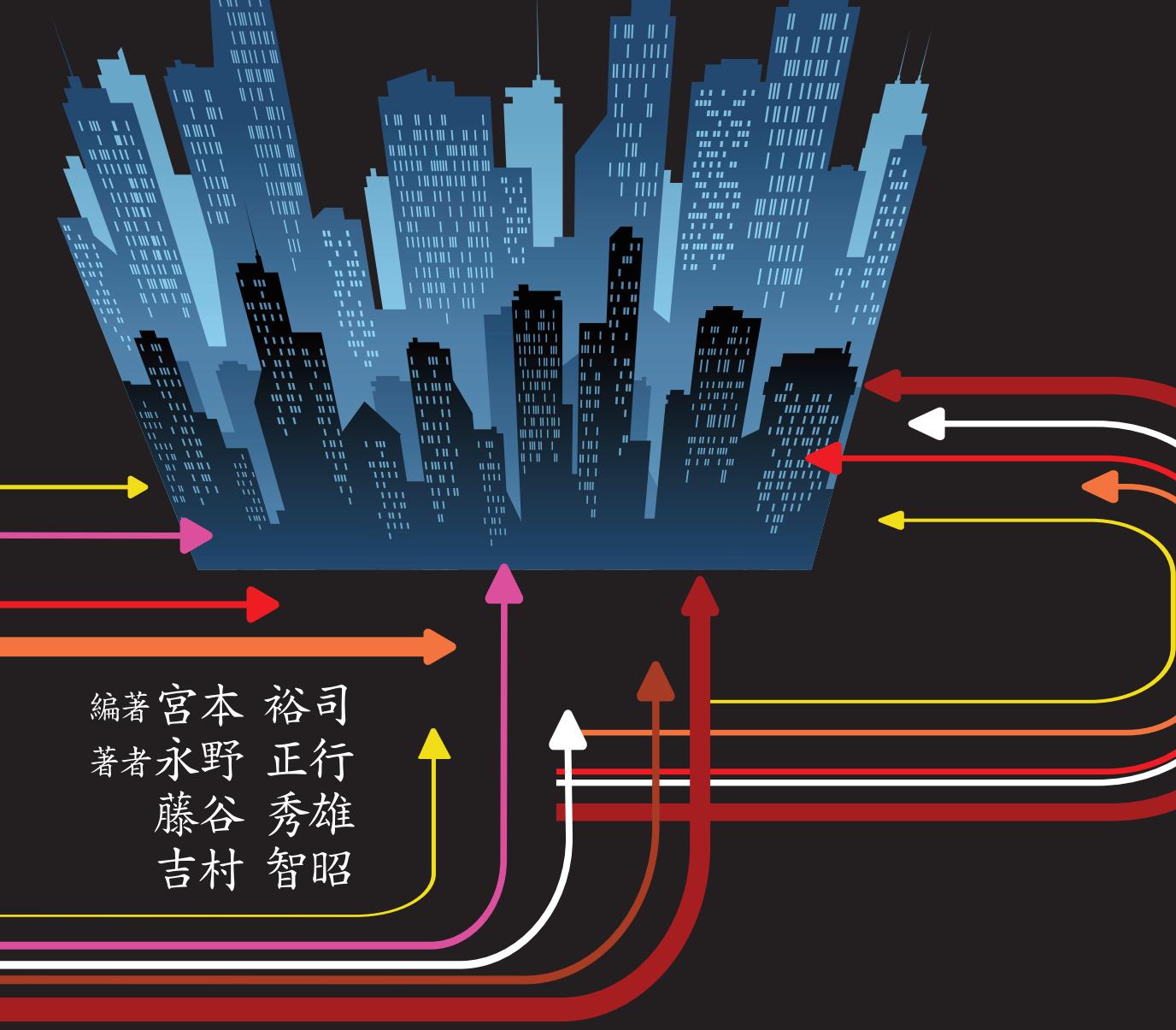


建築振動を学ぶ

—地震から免震・制震まで—



編著 宮本 裕司
著者 永野 正行
藤谷 秀雄
吉村 智昭

理工図書

建築振動を学ぶ

—地震から免震・制震まで—

編著 宮本 裕司

著者 永野 正行

藤谷 秀雄

吉村 智昭

理工図書

まえがき

本書は、建築振動を初めて学ぼうと考えている学生の皆さんや、もう一度初歩から勉強を始めようとしている建築構造にかかわる実務者の皆さんに向けて書かれたものである。建築の構造を勉強するなかで、建築振動を理解することは大変難しいという固定観念は根強く、道半ばで挫折した先輩たちが多くいる。その理由の1つとして、耐震や免震や制震についての専門書や解説書は世の中に多く出ている。しかし、建築振動論の基礎を学んで建物の揺れを理解し、耐震・免震・制震構造の原理と応用までを身につけたいと立志している初学者向けの書物が、建築構造の他の分野にくらべて少ないことが挙げられる。このようなことから、本書では、日頃の大学での授業の中で聞く学生たちの意見を反映させて、建築振動の基礎理論を丹念に説明することとした。そして、耐震・免震・制震構造や地震防災・減災にかかわる最新のトピックも含めて、できるだけわかりやすく記述するように心がけた。

建築の耐震設計では、地震を受けた時の建物の振動を応答解析により求め、その揺れの大きさに応じて建物が安全かどうかの判断を行う。その際に、設計用として設定した入力地震動に対して、地盤がどのように揺れ、その地盤の揺れが建物をどのように揺らすかを、いかに正確に応答解析で求めるかが要求される。さらに、今では多く建設されている免震建物や制震建物では、それぞれの装置を力学モデルに置き換えて建物の振動モデルに組み込んで応答解析を行い、大地震時での建物の揺れを制御する最適な構造設計を行うことが必要となる。このように、地震動入力時の建物の振動を考えて行う動的設計では、建築振動で学ぶすべての知識が必要となると言っても過言ではない。内陸直下型と海溝型の異なるタイプの地震によっておこった1995年阪神淡路大震災や2011年東日本大震災での建物被害や、建物の揺れを記録した幾つかの地震波形を分析することによっても、このことは確認できる。震源から伝播してきた地震動のもつ動特性と、1つ1つの建物が立地する地盤、さらに建物のもつ振動性状が相互に影響しあって激しく揺すられ、被害が大きくなつたことが明らかとなっている。

そして、2つの大震災は、我々に多くの教訓と課題を残している。阪神淡路大震災は、これまでの耐震設計を見直す機会を与え、設計用入力地震動の設定において、深部地盤での增幅効果や表層地盤での非線形挙動を取り入れた地震動評価法を高度化させた。また、構造性能に基づく性能評価設計法や既存建物の耐震改修を促進させた。さらに、地域・都市の地震防災を住民自らで考える土壤を養成した。特に、1980年代後半から開発が進み、実用化され始めた免震・制震技術が阪神淡路大震災を契機として一段と研究が進み、多くの建物に取り入れられるようになった。

まさにそのような時に東日本大震災が発生した。この地震で被害を受けた建物の数は非常

に多く、広範囲にわたった。しかし地震規模のわりに致命的となる構造被害を受けた建物の数はそれほど多くなかった。免震・制震構造についても応答低減効果を発揮し、一応の機能を果たしたとされている。しかし、長周期成分を含む地震動が、震源から遠く離れた東京や大阪の超高層建物と共振して長時間にわたり大きく揺らした。また未曾有の津波被害を目の当たりにして、地震対策で考える想定地震を最大級のものにすべしとの考えのもと、南海トラフ海溝型巨大地震や都市域での内陸直下型地震に対する防災、減災への対策が緊急に必要とされている。建物の構造設計においても、建築振動を応用したより高度な耐震・免震・制震構造への期待感が高まっているのが現状である。

以上のことを考えると、建築振動の知識を習得した多くの構造設計者が、来る巨大地震に備えて地震被害を軽減する建物の設計を行い、地震に強いまちや都市づくりに力を発揮していくことが必要とされている。本書がその役割の一助となればと願うところである。

最後に、本書の執筆分担を快くお受けいただいた、藤谷秀雄先生（神戸大学教授）、永野正行先生（東京理科大学教授）、吉村智昭先生（大阪大学准教授）に心より感謝を致します。また、理工図書株式会社の谷内宏之氏には本書の企画から出版まで大変ご尽力をいただいた。ここに記して、お礼を申し上げる。

宮本裕司（大阪大学教授）

2014年1月

本書の構成

本書では、「建築振動」の基礎的な知識を学び、理解を深めることを目的として、地震の発生から地盤増幅と建物応答、また免震・制震構造までの建物の耐震設計において建築振動がかかわる一連の内容を記述している。そのため、地震の発生から地盤の揺れ、さらに建物へ入力する地震動と建物の揺れの関係、その揺れを応答解析によって計算する方法、また建物応答を低減させる免震構造や制震構造の原理と効果を習得できる。

各章の内容は次の通りである。

第1章では、建築振動を学ぶにあたり、地震被害と建物振動のかかわりと、建物の振動モデルについて概説する。第2章では地震による地震動の発生、伝播から地盤の揺れについて学ぶ。第3章、第4章では建築振動の基礎を理解するため、1質点系モデルの振動性状を学ぶ。第5章では、地震動入力時の建物応答の考え方と応答解析の計算法を理解する。第6章、第7章では、建物の地震応答の理解を深めるため、入力地震動と1質点系モデルの応答の関係を学ぶ。第8章では建物の振動モデルを2質点系、多質点系やねじれ振動を考慮したモデルに拡張して、地震時の応答性状を理解する。第9章では建物の地震応答を制御する免震・制震構造の原理と応答低減について学ぶ。第10章では、地震動が入力して建物が振動する際に生じる地盤と建物間の相互作用現象を、第11章では表層地盤における地震動増幅の計算法とその增幅特性を理解する。最後の第12章では、地震防災・減災において建築振動がかかわる地盤の揺れと建物被害について説明を加える。

本書の執筆にあたっては、宮本裕司が全体編集と第1章、第12章、吉村智昭が第2章～第4章、永野正行が第5章～第7章、第10章、第11章、藤谷秀雄が第8章、第9章を分担した。

目 次

まえがき

本書の構成

| | |
|---------------------------|----|
| 第1章 建築振動を学ぶ | 5 |
| 1.1 地震と建物被害 | 5 |
| 1.2 建築振動と振動モデル | 8 |
| | |
| 第2章 地震による地盤と建物の揺れ | 11 |
| 2.1 地震による地盤の揺れ | 11 |
| 2.1.1 プレートテクトニクス | 11 |
| 2.1.2 海溝型地震 | 13 |
| 2.1.3 内陸型地震 | 15 |
| 2.1.4 地震の揺れの特徴 | 17 |
| 2.1.5 地震波の種類 | 18 |
| 2.1.6 地盤增幅 | 19 |
| 2.2 時刻歴波形の概念 | 20 |
| 2.2.1 地面の揺れの時刻歴波形 | 21 |
| 2.2.2 建物の揺れの時刻歴波形 | 21 |
| 2.2.3 関数形による波形と離散データによる波形 | 22 |
| 2.2.4 変位波形、速度波形、加速度波形 | 23 |
| 2.3 建物の応答 | 24 |
| | |
| 第3章 1質点系モデルの振動 | 27 |
| 3.1 建物のモデル化 | 27 |
| 3.2 非減衰の振動方程式 | 29 |
| 3.2.1 慣性力とダランベールの原理 | 29 |
| 3.2.2 1質点系の釣り合い式 | 30 |
| 3.3 振動方程式を解く | 31 |
| 3.4 複素関数を用いた解法 | 35 |
| 3.4.1 複素数の極形式 | 35 |
| 3.4.2 複素数を用いた単振動の式 | 36 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.4.3 複素関数を用いた解法 | 38 |
| 第4章 減衰を考慮した1質点系モデルの振動 | |
| 4.1 減衰とは | 41 |
| 4.2 減衰を考慮した1質点系の運動方程式 | 42 |
| 4.3 運動方程式を解く | 42 |
| 4.4 減衰定数と振動形状 | 43 |
| 4.5 減衰振動の固有円振動数, 固有振動数, 固有周期 | 45 |
| 4.6 初期条件を与えた振動 | 46 |
| 4.7 減衰定数の効果 | 47 |
| 4.8 減衰による振幅の減少率 | 47 |
| 第5章 1質点系モデルの地震応答 | |
| 5.1 入力地震動 | 49 |
| 5.2 地震応答時の運動方程式 | 50 |
| 5.3 直接積分法による応答計算 | 52 |
| 5.4 地震動が入力した時の応答特性 | 56 |
| 5.5 応答スペクトル | 58 |
| 第6章 1質点系モデルの調和地動入力時の応答 | |
| 6.1 調和地動 | 65 |
| 6.2 調和地動入力時の建物応答 | 66 |
| 6.3 調和地動入力時の過渡応答と最大応答値 | 69 |
| 第7章 1質点系モデルの周波数応答解析 | |
| 7.1 調和振動 | 73 |
| 7.2 複素表現による建物の地震応答と伝達関数 | 74 |
| 7.3 伝達関数とその特徴 | 76 |
| 7.4 フーリエ変換とフーリエスペクトル | 77 |
| 7.5 周波数応答解析 | 80 |
| 第8章 多質点系モデルの振動 | |
| 8.1 2質点（2自由度）系 | 83 |
| 8.1.1 2質点（2自由度）系の自由振動 | 83 |
| 8.1.2 2質点（2自由度）系の自由振動の解（固有モード） | 84 |
| 8.2 多質点（多自由度）系 | 86 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 8.2.1 多質点系の自由振動 | 86 |
| 8.2.2 多質点系の自由振動の解（固有モード） | 87 |
| 8.2.3 固有モードの直交性と展開定理 | 87 |
| 8.2.4 固有モードの重ね合わせによる自由振動解 | 90 |
| 8.2.5 多質点系の減衰自由振動 | 92 |
| 8.2.6 多質点系の強制振動 | 93 |
| 8.2.7 固有値の計算 | 95 |
| 8.3 ねじれ振動 | 95 |
| 8.3.1 ねじれ振動の特徴と諸元 | 95 |
| 8.3.2 ねじれを考慮した非減衰自由振動 | 97 |
| 第9章 免震構造・制震構造 | 101 |
| 9.1 振動制御構造の考え方 | 101 |
| 9.2 免震構造 | 103 |
| 9.2.1 免震支承 | 105 |
| 9.2.2 ダンパー | 105 |
| 9.2.3 免震建物の応答 | 106 |
| 9.3 制震構造 | 108 |
| 9.3.1 制震構造の制御方法 | 108 |
| 9.3.2 制御力の作用方法 | 108 |
| 9.3.3 制震建物の応答 | 111 |
| 第10章 地盤と建物の相互作用と連成応答 | 113 |
| 10.1 地盤と建物の相互作用とは | 113 |
| 10.2 スウェイ・ロッキングモデル | 114 |
| 10.3 地盤ばねと地盤減衰 | 115 |
| 10.4 2層地盤の地盤ばね | 117 |
| 10.5 地盤の影響を考慮した運動方程式 | 119 |
| 10.6 地盤の影響による建物の動特性の変化 | 120 |
| 10.7 地盤との相互作用が建物応答に与える影響 | 122 |
| 第11章 地震動の地盤増幅 | 125 |
| 11.1 必要となる地盤物性と地盤調査 | 125 |
| 11.2 地盤の運動方程式 | 126 |
| 11.3 波動を表現する式 | 127 |
| 11.4 地表面での波動の反射 | 128 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 11.5 地層境界での波動の透過と反射..... | 129 |
| 11.6 2層地盤の地震動の増幅..... | 131 |
| 11.7 地盤増幅特性..... | 134 |
| 第12章 建築振動と地震防災・減災..... 137 | |
| 12.1 2つの大震災と防災・減災..... | 137 |
| 12.2 地震被害想定..... | 139 |
| 12.3 地盤の揺れと建物被害..... | 140 |
| 12.4 長周期地震動と超高層の揺れ..... | 140 |
| 付録..... 145 | |
| 付録-1 過去の被害地震と耐震設計とのかかわり..... | 145 |
| 付録-2 反復法(Stodola法)による固有値の計算..... | 148 |
| 付録-3 コーンモデルによる2層地盤の水平地盤ばねの誘導方法..... | 152 |
| 索引..... 156 | |

第1章 建築振動を学ぶ

本章では、建築振動を学ぶにあたって、建物の揺れと地震被害のかかわりや、建物の揺れを振動モデルでシミュレーションする際の考え方の大略を理解する。そして、地震に強い建物を設計するために、建築振動が果たす役割について考える。

1.1 地震と建物被害

地震に強い建物を設計するためには、「建物が地震でどのように揺れるのか」を理解するとともに、「建物の揺れを振動解析によりシミュレーション」し、その揺れの大きさに対して「建物の安全性を確保する」ことが必要となる。建築振動を学ぶ大きな目的は、建物の振動現象の理解と振動解析についての知識と能力を養うことである。

地震時の建物の揺れは大変複雑で、入力する地震動、建設地点の地盤条件、建物の振動性状によって異なってくる。図1-1は、地震の発生によって建物が揺れるまでの関係を示している。地中深い岩盤での地震断層の破壊によって発生した地震波が、硬質な洪積地盤を伝播し、建物が建設されている沖積層や埋立地に達して表層地盤を揺らし、その揺れが地震動として建物の基礎に入射して建物を揺らす。その際に、建設地点の地盤が硬いか軟らかいか、軟らかい地盤が浅いか深いかによって地盤の揺れ方は異なり、それによって建物が揺れる大きさや揺れ方も異なってくる。また、沖積層や埋立地が軟弱な地盤であれば、揺れの大きさによって地盤の性状が変化する。地下水位が高い砂地盤であれ

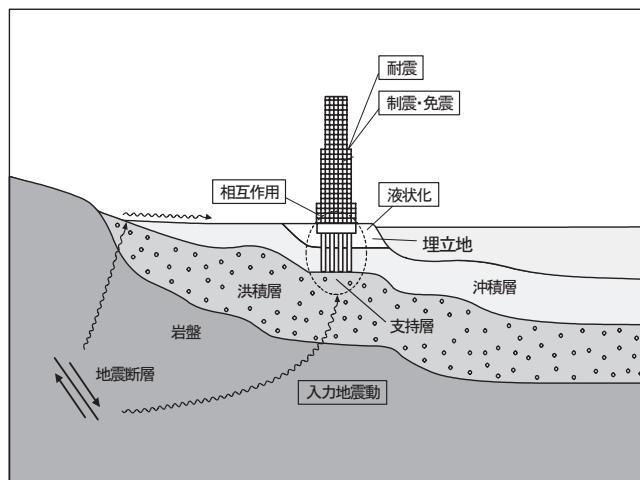


図1-1 地震発生と地盤、建物の揺れ

ば液状化が発生し、建物へ入力する地震動の性状も大きく変わる。地盤の液状化が発生すれば基礎構造が被害を受け建物を支える支持力を失い、建物が不同沈下することもある。

建物の揺れは、建物のもっている振動性状すなわち建物が低いのか高いのか、構造形式として柱が多いのか筋かいや壁が多いのか、耐震構造なのか免震構造か制震構造かによっても異なってくる。このように、震源から広がった地震波は、深部地盤での波動伝播と表層地盤での增幅特性の影響を受けて建物に入力し、建物が固有にもっている振動性状と相互に影響して建物を揺らす。このことは、1995年兵庫県南部地震と2011年東北地方太平洋沖地震によって発生した2つの大震災での建物被害を分析することによっても確認できる。

もう少し詳しく2つの大震災での建物被害をみてみる。図1-2に、兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震において各地点の地表面で観測された速度波形を示す。兵庫県南部地震の記録は、神戸海洋気象台（JMA 神戸）とJR鷹取駅で観測された波形である¹⁾。都市直下の活断層が動いた内陸型地震であったため、地盤の大きな揺れは約10秒間と短かったが、その波形は大振幅で2～3波のパルス状のものであり、建物にはごく短時間に衝撃的な外力が作用した。それにより、多くの中低層の建物は壊滅的な被害を受けた（写真1-1）。在来の木造住宅も多数倒壊して炎上し、多くの犠牲者を出した。また、人工島の埋立地では大きな揺れによって液状化が発生し、多くの杭基礎が破壊された。

一方、東北地方太平洋沖地震は、東北地方の太平洋沖を震源とする海溝型巨大地震であった。図1-2に宮城県築館と大阪府此花で観測された波形を示すが、この地震による地盤の揺れは3分以上も続いた²⁾。全壊した建物は限られていたが、構造的な被害を受けた建物は数え切れず、被害は広範囲にわたった。また、震源から離れた首都圏に建つ超高層建物（写真1-2）では、建物の固有周期と関東平野で増幅した長周期地震動が共振して長い時間大きく揺れた。さらに震源から遠く離れた此花地点に近

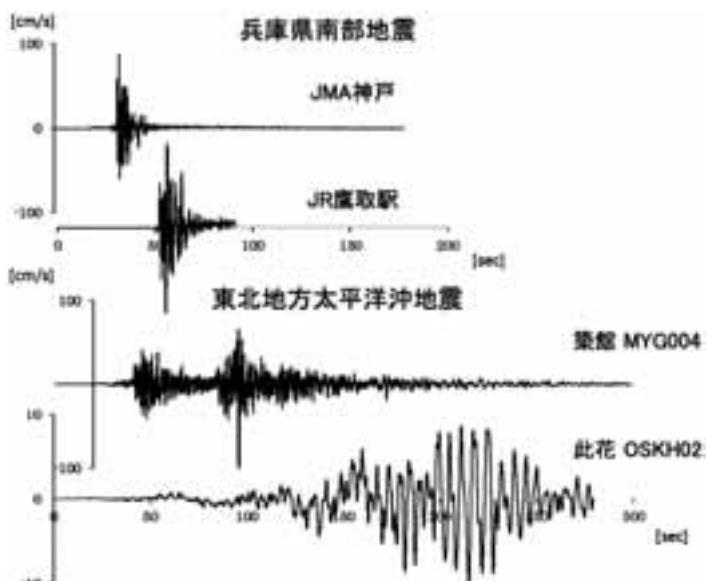


図1-2 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震の地表での速度波形



写真1-1 兵庫県南部地震での建物被害



写真1-2 東北地方太平洋沖地震で大きく揺れた新宿の超高層建物群

い大阪湾岸部の埋立地に建つ高さ256m（55階建て）の超高層建物では、軟らかい深い堆積層の地盤で地震動がさらに増幅して、図1-3に示すように10分近い長い間も大振幅で揺れた³⁾。このような長周期で長い継続時間の大きな揺れによって、超高層建物では内装材の破損や家具・什器の移動や転倒、エレベータの停止や閉じ込めが発生した。また、東京湾岸の埋立地の地盤では、継続時間の長い揺れによって大規模な液状化が発生し、多くの戸建て住宅が不同沈下し、インフラストラクチャーは破壊し、ガス、水道、電気などのライフラインも寸断された。

このように2つの大震災による建物の被害は、地震断層の異なるメカニズムによって発生した地震波が伝播して表層地盤を揺らし、その地盤に建っている建物の振動性状と相互に影響して発生したものであった。

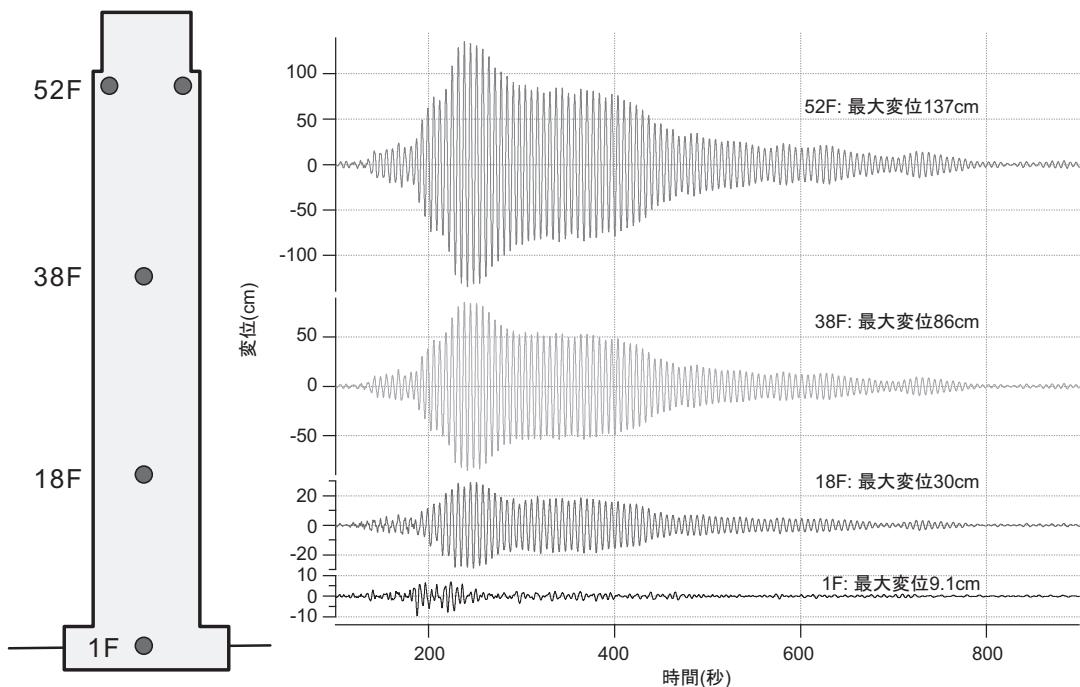


図1-3 東北地方太平洋沖地震での大阪湾岸超高層建物の応答変位波形

1.2 建築振動と振動モデル

建物の耐震設計や地震応答をシミュレーションする際には、振動解析が行われる。振動解析では、建物の架構を数理モデルに置き換えた振動モデルを用いて地震時の揺れを計算する。図1-4は伝統木造建築、図1-5は高層建物の架構を示している。建物の構造は非常に複雑で、多数の柱や梁の部材と壁から構成されている。また、建物の重量は各部材の配置によって建物内に分布している。このような建物の振動現象を考えるためにには、設計図面にできるだけ忠実な振動モデルを作成する必要がある。しかし、建物の基本的な振動性状は、各層ごとに重量を集中させた質点と、柱、壁をバネと減衰モデルに置換した簡略な質点系モデルという振動モデルを用いて求めることもできる。この振動モデルのモデル化を適切にかつ効率的に行うためには、建物が振動する形すなわち振動モードを予測することが必要となり、建築振動についての知識と能力が効果を発揮する。また、免震構造や制震構造の設計では、入力地震動のもつ動特性を理解して、建物の応答が低減するように配置した免震・制震装置を力学モデルとして組み込んだ振動モデルを用いて地震応答解析が行われる。そして、建物の耐震設計は、設計用地震動レベルに応じて設定した設計目標とする限界応答値以下となるように柱や壁や免震・制震装置を配置して、最適な剛性と減衰を建物に与えることである。このように地震に強い建物を設計するためには、建物の振動現象をよく理解して適切に振動モデルを作成して応答解析を行い、合理的な構造設計をすることが重要となる。

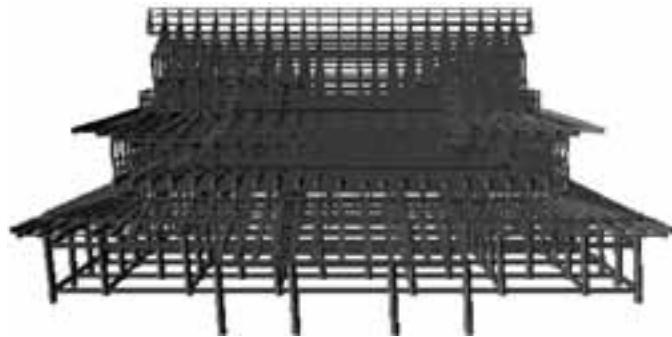


図1-4 伝統木造建築の架構

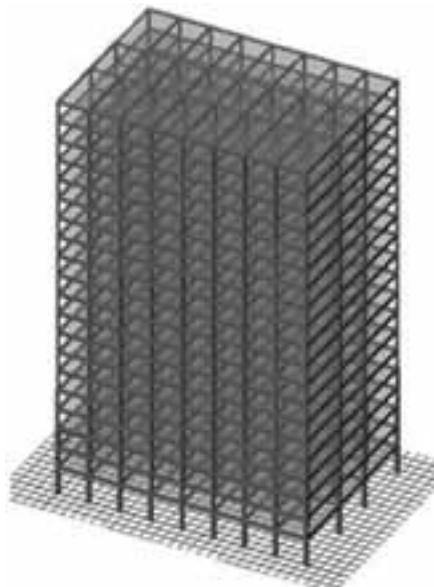


図1-5 高層建物の架構

参考文献

- 1) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会: 1995年
兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996.3.
- 2) 防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net)
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 3) 鹿嶋俊英, 小山信, 大川出: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測
記録, 建築研究資料 No.135号, 2012.3.

第2章 地震による地盤と建物の揺れ

本章では、振動解析に入る前の基礎知識として、地震発生のメカニズムや、海溝型地震および内陸型地震によって生じる地盤の揺れについて学ぶ。また、地震の揺れを表す時刻歴波形の概念と、地震時の建物応答について説明する。

2.1 地震による地盤の揺れ

建物の耐震設計では、地震の時に建物が建つ地面がどのように揺れるかを把握しておくことが重要である。地震の源はプレートテクトニクスであり、被害地震として海溝型地震と内陸型地震の2つのタイプがある。地震のタイプにより、地面の揺れ方が異なり、また、地表付近の地盤構造により地震動が増幅され、建物の被害に大きな影響を与える。なお、付録-1に過去の被害地震と耐震設計とのかかわりをまとめておく。

2.1.1 プレートテクトニクス

地震とは、地下の断層面を境に岩盤が相対的にすべり、その時に発生する弾性波が地震波として地盤内を伝わる現象である（図2-1）。地震の規模が大きいほど、断層面積やすべり量も大きい。地震を発生させる原動力は、突きつめるとマントル対流である。図2-2に日本と太平洋を含む地球の断面を模式的に示す。地球は球殻構造をしており、コア（内核、外核）の外側はマントルと呼ばれる岩盤である。その上をプレートと呼ばれる薄い地殻が覆っている。プレートの厚さは、陸の部分では30～60km程度、海の部分では5～7km程度である。マントルは何千万年という時間のオーダーでみると、あたかも液体のように対流している。プレートは、マントルの湧き上がり地点である海嶺で生まれ、マントル対流に引きずられて地球表面を移動し、大陸のプレートとぶつかる部分でその下に潜り込んでいる。このようなプレートの運動を説明する理論をプレートテクトニクスという。

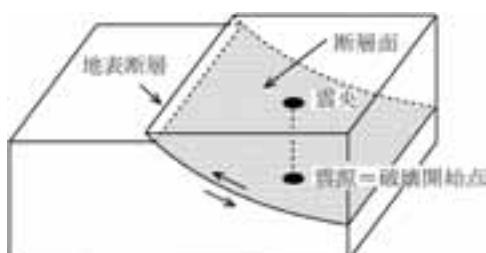


図2-1 地震と断層面



図2-2 地球の断面とマントル対流

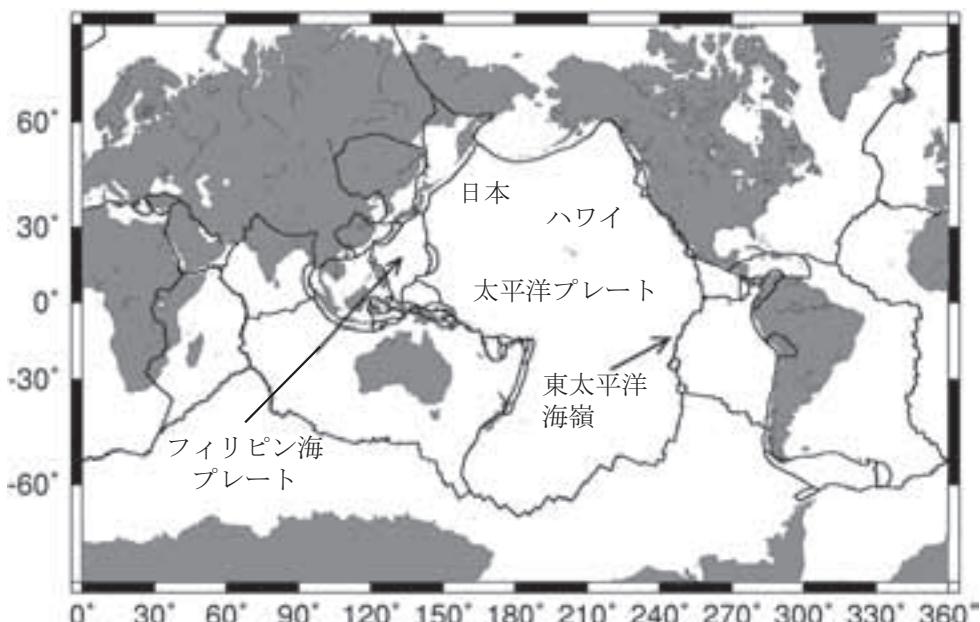
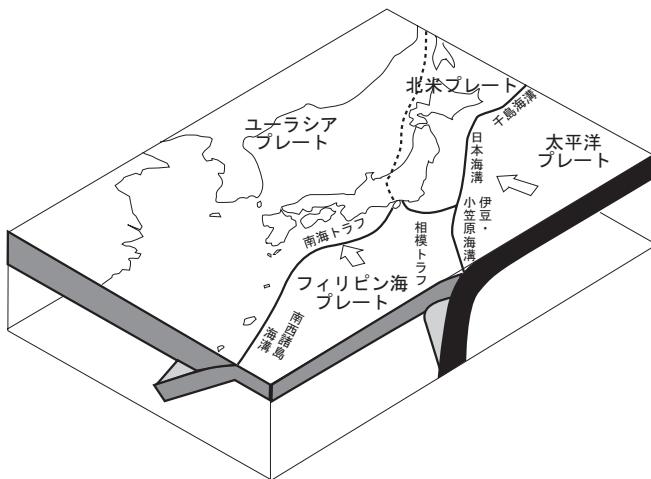


図2-3 地球上のプレート（太線はプレート境界）

図2-3に世界のプレートを示す。東太平洋海嶺で生まれた太平洋プレートは北西方向に移動し、日本列島に達してその下に潜り込んでいる。移動速度は日本列島付近で年間10cm程度である。また、日本の南にはフィリピン海プレートという小さなプレートがあり、これも日本列島の下に潜り込んでいる。移動速度は年間5cm程度である。

図2-4は日本列島周辺のプレートである。東から西に進んできた太平洋プレートは、東北地方の東側や北海道の南側に潜り込んでいる。沈み込みの開始のラインは深い溝になっており、日本海溝、千島海溝と呼ばれる。同様にフィリピン海プレートは北西に進んで西南日本の下に潜り込んでおり、沈み込み開始の溝は南海トラフと呼ばれる。

図2-4 日本周辺のプレート¹⁾

2.1.2 海溝型地震

海のプレートが陸のプレートの下に沈み込む部分では、海溝型地震が発生する。日本海溝では2011年東北地方太平洋沖地震がおこった。図2-5に震源域の範囲とその鉛直断面を示す。陸のプレートと海のプレートは通常時は固着しており、海のプレートの沈み込みとともに陸のプレートが引きずられて変形し、歪みが蓄積する。あるとき歪みに耐えきれなくなり、陸のプレートが跳ね上がる現象が海溝型地震である。海溝型地震は、規模がマグニチュード^{注1)} $M 8 \sim 9$ の巨大地震となることがある。東北地方太平洋沖地震は、 $M 8$ 級の地震が発生すると考えられていた震源域が多数連動して $M_w 9.0$ の規模となった地震である。そのほか、日本海溝では、建築基準法施行令の改正につながった被害地震がおこっている。1968年十勝沖地震 ($M_J 7.9$) は、鉄筋コンクリート造の柱のせん断補強を強化した1971年の改正につながり、1978年宮城県沖地震 ($M_J 7.4$) は一次設計、二次設計の概念を導入した1981年の大改正（新耐震基準）の契機となった。

南海トラフ沿いでも、100年から150年間隔で繰り返し海溝型地震が発生している。図2-6に示すように、震源域の場所により、東から東海地震、東南海地震、南海地震と名付けられている。歴史記録によれば、西暦684年の白鳳地震までさかのぼることができる。表2-1に示すように、直近500年だけでも、明応地震（1498年）、慶長地震（1605年）、宝永地震（1707年）、安政東海地震（1854年12月23日）、安政南海地震（1854年12月24日）、昭和東南海地震（1944年）、昭和南海地震（1946年）がおこっている。

注1 マグニチュードとは、地震の規模を表す指標であり、地震の発するエネルギーの対数となっている。 M と表記され、1増えるとエネルギーは約32倍、2増えると1000倍になる。マグニチュードにはいくつか定義があり、日本では気象庁マグニチュード M_J が用いられている。単に M といった場合 M_J を指していることが多い。 M_J は周期5秒以下の成分の振幅で定義されており、8を超えると頭打ちになる傾向がある。エネルギーに比例して頭打ちしないモーメントマグニチュード M_w もある。東北地方太平洋沖地震は $M_w 9.0$ である。

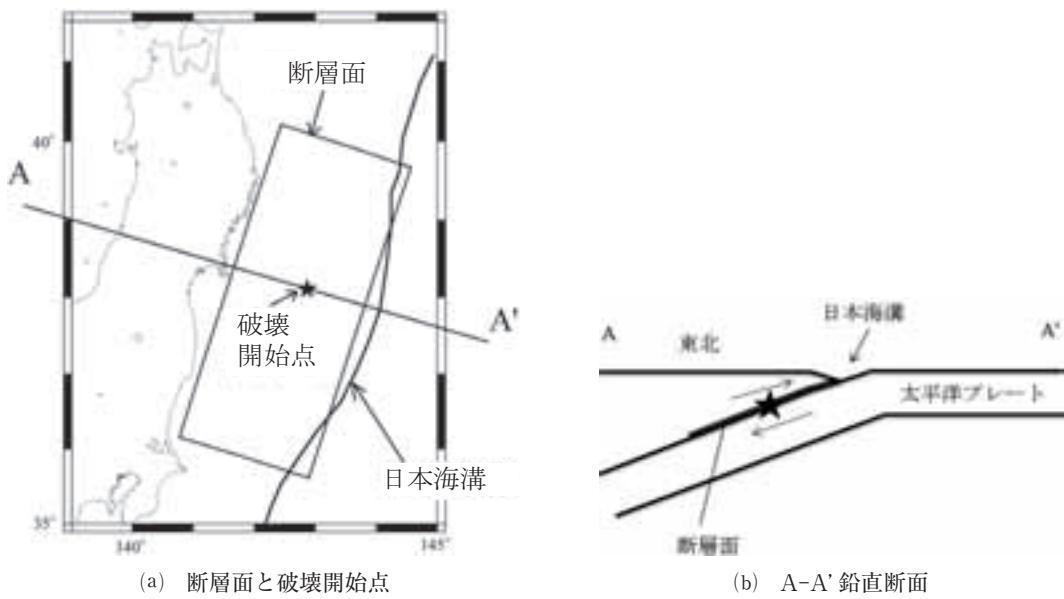


図2-5 2011年東北地方太平洋沖地震の震源

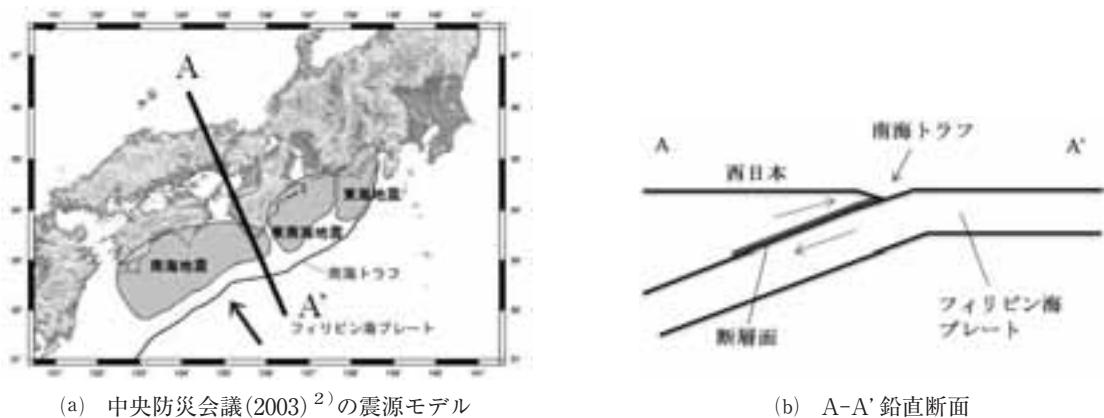


図2-6 南海トラフ沿いの海溝型地震の震源

表2-1 最近500年の南海トラフ沿い地震

| | 南海 | 東南海 | 東海 | 発生間隔(年) |
|---------|------|------|----|---------|
| 明応地震 | | 1498 | | 107 |
| 慶長地震 | 1605 | | | 102 |
| 宝永地震 | 1707 | | | 147 |
| 安政東南海地震 | 1854 | 1854 | | 90 |
| 安政南海地震 | | | | |
| 昭和東南海地震 | 1946 | 1944 | | |
| 昭和南海地震 | | | | |

明応地震は東海・東南海地震が同時に発生しており、南海地震も同時におこった可能性が指摘されている。慶長地震は南海・東南海地震が同時に発生し、宝永地震は、東海・東南海・南海の3領域が同時に破壊した。また、安政東海地震（東南海と東海の部分を含む）の32時間後に安政南海地震が発生している。昭和東南海地震と昭和南海地震も2年の間隔でおこっている。このように、南海トラフ沿いの地震は、同時に、あるいはごく短い時間をおいて連動して発生することが多い。

昭和東南海地震、昭和南海地震から年数が経過し、今世紀中にも南海トラフ沿い巨大地震が発生することが危惧されている。特に震源域が面する太平洋岸には、大阪平野、濃尾平野、関東平野などの人口、産業、都市の密集地域があり、地震がおこれば大きな被害が予想される。南海トラフ沿い巨大地震の防災対策は国家的な重要課題となっている。

海溝型地震では、**長周期地震動**（周期1～2秒以上）により、超高層ビルなどの長周期構造物が被害を受ける可能性がある。地震動には、小刻みに揺れる短周期成分の波と、ゆっくり揺れる長周期成分の波が含まれている。短周期成分の波の振幅はほぼ距離に反比例して小さくなる。一方、長周期成分の波は減衰しにくく、遠くまで伝わっていく性質がある。また、規模の大きい地震ほど震源から発せられる長周期成分が多く含まれている。海溝型地震では震源域が陸から離れているため、後述する内陸型地震と比べて短周期成分は小さくなるが、長周期成分が大きくなる。さらに、ここ数十年の間、都市開発が進み、超高層ビルや石油タンク、長大橋などの大規模構造物が多数建設された。構造物はそれぞれ揺れやすい周期（固有周期）をもっている。固有周期が長い大規模構造物に長周期地震動が入力すると、揺れの振幅が大きくなる**共振**という現象が生じる。超高層ビルでは、柱、梁の主要構造が健全であっても天井、間仕切り壁、設備、エレベータなどで被害が生じるおそれがある。

また、海溝型地震では津波が発生することが多く、規模が大きい地震では東北地方太平洋沖地震のように甚大な被害をもたらす。

2.1.3 内陸型地震

海のプレートが陸のプレートの下に沈み込むことにより、陸のプレート内にも圧縮応力が生じている。この応力により**内陸型地震**が発生する。何万年、何十万年のオーダーでみると、内陸型地震が同じ場所で繰り返しあり、地殻内で弱面となっている。これが地表に現れ、線状の変動地形と認められる部分が**活断層**と呼ばれる。図2-7は全国の主要な活断層を示したものである。主要なものだけでも100あまりが確認できている。

内陸型地震の例として、1995年兵庫県南部地震が挙げられる。図2-8は神戸・大阪周辺の活断層を示したものである。兵庫県南部地震は六甲・淡路島断層帯でおこった地震である。図2-9に兵庫県南部地震の断層面⁴⁾を示す。断層面はほぼ鉛直で、深さ方向16km、長さ60kmの大きさで、最大3mのすべりを生じた断層であった。

内陸型地震の特徴は、都市直下でおこると大きな被害をもたらすことである。震源から近いため大きな揺れとなり、周期1～2秒以下の短周期成分の波が多く、中低層ビルや木造家屋に被害をもたらす。



図2-7 全国の陸域の主要な活断層³⁾

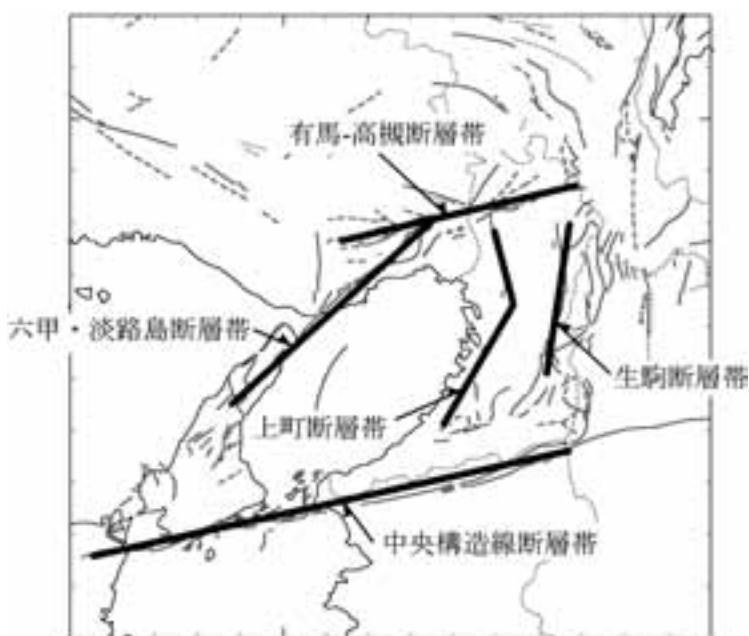


図2-8 神戸・大阪周辺の活断層

索引

【あ】

- 安政東海地震 13
安政南海地震 13
位相角 45
位相差 73
1質点系 55
一般化減衰係数 92
一般化剛性 88
一般化質量 88
運動の第一法則 29
運動の第二法則 29
運動方程式 30
液状化 6
N値 126
エネルギースペクトル 60
El Centro 波 49
鉛直入射 19
応答スペクトル 56
応答倍率 70

【か】

- 海溝型巨大地震（海溝型地震） 6
海嶺 11
回転慣性モーメント 97
回転地盤ばね（ロッキングばね） 114
回転半径 97
解放工学的基盤 133
カイン 23
ガウス平面 35
過減衰 43
下降波 128
加速度応答 50
加速度応答スペクトル 58
加速度波形 20
活断層 6
可動質量 108

- 過度応答 70
加法定理 32
ガル 23
慣性系 29
慣性の相互作用 113
慣性力 29
擬似速度応答スペクトル 60
規準化 68
基礎固定条件 113
基礎入力動 113
基盤 131
境界条件 128
共振 6
強震観測 137
共振曲線 76
強震計 49
共振現象 67
共役複素数 39
虚部 35
慶長地震 13
K-NET 苫小牧波 61
減衰振動 43
限界耐力計算法 117
減衰 8
減衰定数 25
減衰マトリックス 92
減衰力 42
減災 137
工学的基盤 20
工学的基盤波 20
広義の減衰係数 92
広義の剛性 88
広義の質量 88
剛心に対するねじれ剛性 97
剛心 95
剛性 8
剛性比例型減衰 92

剛性マトリックス 83
 高速フーリエ変換 79
 剛体 27
 コーンモデル 117
 告示波 133
 固有値 85
 固有円振動数 31
 固有周期 6
 固有振動数 33
 固有ベクトル 85
 固有モード 84
 転がり支承 105

【さ】

最大加速度応答 56
 最大速度応答 56
 最大値 56
 最大変位応答 56
 サンプリングデータ 49
 JMA 神戸波 61
 時間増分法 52
 時間領域 78
 刺激関数 94
 刺激係数 94
 時刻歴応答解析 77
 時刻歴波形 11
 地震基盤 20
 地震基盤波 20
 地震断層 5
 地震動 5
 地震防災 137
 実体波 18
 質点系モデル 8
 実部 35
 質量比例型減衰 92
 質量マトリックス 83
 地盤応答 81
 地盤減衰 114
 地盤增幅（地盤增幅率） 19
 地盤と建物の相互作用 113
 自由振動 25
 重心に対するねじれ剛性 97

柔軟マトリックス 84
 周波数応答解析 73
 周波数応答解析法 52
 周波数応答関数 133
 周波数領域 78
 上昇波 128
 上部構造 101
 昭和南海地震 13
 昭和東南海地震 13
 初期位相 22
 震源特性 139
 震災の帶 140
 新耐震基準 13
 振動解析 5
 振動数依存性 115
 振動数領域 78
 振動制御構造 101
 振動方程式 29
 振動モード 8
 振幅 13
 人力加振 25
 水平地盤ばね（スウェイばね） 114
 スウェイ・ロッキングモデル（SR モデル） 114
 スウェイ変形 114
 スウェイ率 122
 ステップ数 49
 スネルの法則 18
 すべり支承 105
 制御力 108
 制震改修 141
 制震構造 6
 静的地盤ばね 115
 積層ゴム支承 105
 絶対加速度 50
 絶対変位 50
 線形加速度法 54
 センター波 49
 せん断型質点系 83
 せん断波 18
 せん断変形 18
 層間変形角 61
 相対座標系 29

相対変位 21
 増幅 6
 増幅特性 70
 増幅倍率（増幅率） 76
 増幅率 76
 速度応答 50
 速度応答スペクトル 58
 速度波形 6

【た】

台形則 54
 耐震構造 6
 卓越周期（卓越振動数） 24
 卓越振動数 24
 多質点系モデル 54
 多層地盤 117
 ダッシュポット 41
 Taft 波 49
 ダランベール（D'Alembert）の原理 30
 単振動 33
 ダンパー 103
 弾力半径 97
 千島海溝 12
 地層境界 128
 地表面 6

中央防災会議 139

中間階免震 103

沖積層 5

長周期地震動 6

長周期長時間地震動 103

調和振動 66

調和地動 65

直接積分法 52

直交性 87

定常状態 66

定常振動 70

テイラーライフ展開 152

展開定理 89

伝達関数 76

転倒モーメント 105

東海地震 13

透過係数 130

透過波 129
 動的インピーダンス（動的地盤ばね） 115
 東南海地震 13
 東北地方太平洋沖地震 6
 十勝沖地震 13
 特性方程式 38
 トリバタイト応答スペクトル 60

【な】

ナイキスト振動数 78
 内陸型地震 6
 南海地震 13
 南海トラフ 12
 Nigam-Jennings 法 52
 日本海溝 12
 Newmark の β 法 52
 入力地震動 19
 入力損失 113
 入力の相互作用 113
 ネイビア数 35
 ねじれ振動 83
 ねじれ変形 95
 粘性減衰係数 41

【は】

派数 71
 八戸波 49
 波動インピーダンス比 130
 波動伝播特性 140
 パルス性地震動 104
 反射係数 130
 反射波 129
 反復法 95
 半無限均質地盤 116
 被害想定 137
 PS 検層 126
 兵庫県南部地震 6
 標準貫入試験 126
 表層地盤 5
 表面波 18
 フィリピン海プレート 12
 フーリエ位相スペクトル 79

フーリエ逆変換 77
 フーリエ振幅スペクトル 60
 フーリエスペクトル 79
 フーリエ変換 77
 付加質量 108
 復元力 30
 複素関数 35
 複素数 35
 複素フーリエ係数 78
 複素平面 35
 プレート 11
 プレートテクトニクス 11
 平均加速度法 54
 ヘルスモニタリング 81
 变位応答 50
 变位応答スペクトル 59
 变位波形 20
 偏心距離 95
 偏心率 97
 宝永地震 13
 包絡形 46

【ま】

マグニチュード 13
 マントル（マントル対流） 11
 宮城県沖地震 13
 無質量剛基礎 116
 明応地震 13
 免震構造 8
 免震支承 103
 免震層 60
 模擬地震動 49
 門型ラーメン 27

【や】

4分の1波長則 134

【ら】

ラブ波 19
 離散化 49
 離散データ 22
 離散フーリエ変換 79

流体系ダンパー 105
 履歴系（弾塑性系）ダンパー 105
 臨界減衰 43
 連成応答 113
 レイリーの商 151
 レイリー波 19
 レイリー型減衰 92
 連続条件 129
 ロッキング変形 104
 ロッキング率 122

著者略歴

宮本 裕司（みやもと ゆうじ）（執筆者代表，第1章，第12章）

1979年 京都大学工学部建築学科卒業

1979年 鹿島建設技術研究所研究員

1987年 鹿島建設（株）小堀研究室研究員

1990年 カリフォルニア大学デーヴィス校客員研究員

2005年 鹿島建設（株）小堀研究室地震地盤研究グループ長・上席研究員

2008年 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻・建築工学部門教授

現在に至る 博士（工学）

主な著書 入門・建物と地盤との動的相互作用（共著），日本建築学会

建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計（共著），日本建築学会

長周期地震動と建築物の耐震性（共著），日本建築学会

永野 正行（ながの まさゆき）（第5章，第6章，第7章，第10章，第11章，付録-3）

1988年 早稲田大学大学院理工学研究科修了

1988年 鹿島建設（株）小堀研究室

2008年 東京理科大学理工学部建築学科教授

現在に至る 博士（工学）

主な著書 入門・建物と地盤との動的相互作用（共著），日本建築学会

建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計（共著），日本建築学会

長周期地震動と建築物の耐震性（共著），日本建築学会

大振幅地震動と建築物の耐震性評価（共著），日本建築学会

長周期地震動と超高層建物の対応策（共著），日本建築学会

藤谷 秀雄（ふじたに ひでお）（第8章，第9章，付録-2）

1983年 神戸大学工学部建築学科卒業

1988年 神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了

1988年 建設省建築研究所第三研究部研究員

1998年 メリーランド大学客員研究員

2003年 神戸大学工学部建設学科（建築系）助教授

2007年 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻教授

現在に至る 工学博士

主な著書 建築構造における性能指向型設計法のコンセプト（共著），技報堂出版

建築構造物の振動制御入門（共著），日本建築学会

やさしくわかる建物振動制御（共著），日本建築学会

吉村 智昭（よしむら ちあき）（第2章，第3章，第4章，付録-1）

1993年 京都大学工学研究科建築学第二専攻修了

1993年 大成建設（株）エンジニアリング本部原子力部係員

1998年 大成建設（株）技術本部技術研究所主任

2000年 カーネギー・メロン大学客員研究員

2005年 大成建設（株）技術センター建築技術研究所課長

2012年 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻・建築工学部門准教授

現在に至る 博士（工学）

主な著書 長周期地震動と建築物の耐震性（共著），日本建築学会

最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法（共著），日本建築学会

産業界におけるコンピュータ・シミュレーション（共著），アドバンスソフト出版事業部

建築振動を学ぶ —地震から免震・制震まで—

2014年3月25日 初版第1刷発行
2020年4月7日 初版第3刷発行

検印省略

編著 宮本 裕司
著者 永野 正行
藤谷 秀雄
吉村 智昭

発行者 柴山斐呂子

発行所 ━━━━━━
〒102-0082 東京都千代田区一番町27-2
電話 03(3230)0221(代表)
FAX 03(3262)8247
振替口座 00180-3-36087 番
<http://www.rikohtosh.co.jp>

©宮本裕司 2014年 Printed in Japan

ISBN978-4-8446-0824-0

印刷・製本 丸井工文社

*本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上の例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャナやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも著作権法違反です。

ISBN978-4-8446-0824-0

C3052 ¥2800E



9784844608240

定価（本体 2800 円+税）

建築

振動工学／建築振動



1923052028008

