

建築構造物の動的性状と解析

学びやすい構造設計

日本建築学会 関東支部

御案内

本書の著作権・出版権は日本建築学会にあります。本書より著書・論文等への引用・転載にあたっては必ず本会の許諾を得てください。

コピーも私的利用の範囲を超えることは法律で禁じられています。

一般社団法人 日本建築学会

序

日本建築学会関東支部では、1963年以來、会員をはじめ建築構造に関心のある方々のために、構造設計や計算の技法の普及をめざして、「構造計算のすすめ方」シリーズを刊行し、講習会を開催してきました。そして2002年からはさらに発展した形で、「学びやすい構造設計シリーズ」を刊行してきました。

わが国の建築物の構造設計において、地震に対する安全性を確保することは特に重要であり、地震による振動現象を踏まえた耐震設計法が震災経験を積みながら発展してきました。また超高層建築物や免震構造建築物では、直接的に地震時の振動応答挙動評価により安全性を確認する動的設計が行われてきています。最近では多くの汎用的な振動解析プログラムが普及し、パーソナルコンピュータで比較的手軽に大規模な構造物の地震応答解析が行えるようになってきました。しかし一方で正確な振動解析の知識がなくても、複雑な構造物の地震応答解析を行うことができるため、解析仮定の誤りによる不適切な計算結果を受け入れてしまう危険性や、コンピュータで処理された多量の情報を設計者が十分に理解できない可能性も生じます。

従来動的解析関係の教材としては振動理論や解析手法を教えるものが多くありますが、実際の設計においてどのように建物のモデル化を行い、そのモデルの特性を踏まえてどのような判断を行うかといった実務的な情報を伝えるものはほとんどありませんでした。

本テキストでは構造設計時の解析に必要な仮定事項や工学的判断によるモデル化の考え方を理解し、建築構造物の動的性状および地震応答解析結果を評価する方法について記述しています。解析原理や数値解析手法の説明は簡単にして、具体的な振動モデルを用いた動的解析事例を基に、実務的な知識が身につけられる内容としています。本テキストが、建築構造物の動的設計を志す学生や実務者の皆様方に役立つことを期待しております。

最期に、このテキストの編集・執筆にあられた関東支部講習会用テキスト作成委員会委員および執筆者の皆様方のご尽力に感謝いたします。

2014年2月25日

日本建築学会関東支部
支部長 安達 俊夫

建築構造物の動的性状と解析 作成関係委員

講習会用構造テキスト作成委員会

委員長 安達 俊夫

幹事 塩原 等 竹内 徹

委員 梅國 章 河合 直人 喜々津仁密 斎藤 公男

坂本 功 田村 和夫 寺本 隆幸 南 宏一

建築構造物の動的性状と解析 執筆ワーキンググループ

主査 田村 和夫

幹事 石井 正人 広瀬 景一

委員 青野 英志 大石 昌 倉内 信幸 鈴木 芳隆

寺本 隆幸

協力委員 大越 俊男 小幡 学

執筆者

はじめに 田村 和夫 (千葉工業大学), 寺本 隆幸 (東京理科大学)

1. 振動応答解析の基本事項

大越 俊男 (東京工芸大学), 田村 和夫 (前掲), 寺本 隆幸 (前掲)

2. 振動方程式と解析手法

石井 正人 (日建設計), 田村 和夫 (前掲), 寺本 隆幸 (前掲)

3. 各種振動解析モデルの特徴

田村 和夫 (前掲), 寺本 隆幸 (前掲)

4. 非線形特性のモデル化

青野 英志 (大成建設), 田村 和夫 (前掲)

5. 入力地震動と各種のスペクトル

大石 昌 (久米設計)

6. 応答値と評価

石井 正人 (前掲), 田村 和夫 (前掲), 寺本 隆幸 (前掲)

7. 振動解析モデルと応答評価

大石 昌 (前掲), 倉内 信幸 (梓設計), 鈴木 芳隆 (小堀鐸二研究所)

寺本 隆幸 (前掲), 広瀬 景一 (清水建設)

8. 各種の振動モデルと解析例

青野 英志 (前掲), 大石 昌 (前掲), 鈴木 芳隆 (前掲)

広瀬 景一 (前掲)

付録 石井 正人 (前掲), 寺本 隆幸 (前掲)

全体監修 寺本 隆幸 (前掲)

建築構造物の動的性状と解析

— 学びやすい構造設計 —

目 次

はじめに

1. 振動応答解析の基本事項

1.1	振動解析の歴史	1
1.1.1	振動解析	1
1.1.2	地震と耐震構造	2
1.1.3	家屋耐震並耐風構造の出版	3
1.1.4	電子計算機の出現	3
1.1.5	初期超高層ビルの振動解析	5
1.1.6	初期超高層ビルの振動解析モデル	6
1.1.7	初期超高層ビルの構造形式	6
1.1.8	初期鉄筋コンクリート造の超高層ビル	8
1.1.9	応力解析と時刻歴応答解析	8
1.2	設計用入力地震動の歴史	11
1.2.1	初期超高層ビルの設計用地震入力	11
1.2.2	速度評価の採用	13
1.2.3	目標応答スペクトルによる模擬地震動	14
1.2.4	断層モデルを用いた模擬地震動	15
1.3	振動応答解析の目的	16
1.3.1	耐震設計と振動応答解析	16
1.3.2	設計用入力地震動	17
1.3.3	振動解析モデルの作成と応答解析結果の判断	18
1.4	振動応答解析関連の用語と記号	20
1.4.1	用語と索引	20
1.4.2	記号	21
第1章	参考文献	22

2. 振動方程式と解析手法

2.1	振動応答解析の理解のために	23
2.1.1	建築構造と振動応答解析	23
2.1.2	静的な解析モデル	25
2.1.3	振動応答解析モデル	26

2.2	建物のモデル化と振動方程式	30
2.2.1	振動応答解析モデルの種類	30
2.2.2	立体骨組モデルにおける節点自由度	31
2.3	振動モード	34
2.3.1	多自由度系 1 方向モデルのモード	34
2.3.2	せん断棒モデル(連続体)の振動モード	35
2.3.3	曲げ棒モデル(連続体)の振動モード	37
2.4	減衰の設定	39
2.4.1	剛性比例型・レーリー型減衰	39
2.4.2	各次モード型減衰	41
2.5	応答解析手法	43
2.5.1	直接積分法	43
2.5.2	モード重合法	45
2.5.3	応答解析モデルの選択	47
2.6	応答スペクトル法	48

3. 各種振動解析モデルの特徴

3.1	質量分布	52
3.1.1	せん断棒モデル(連続体)M1	52
3.1.2	曲げ棒モデル(連続体)M2	52
3.1.3	質点系モデル(離散系)M3	52
3.2	水平剛性評価	53
3.2.1	等価せん断型モデル S1	53
3.2.2	曲げせん断型モデル S2	54
3.2.3	曲げせん断棒モデル S3	56
3.2.4	疑似立体モデル S4	58
3.2.5	部材レベル立体骨組モデル S5	59
3.3	質点配置	60
3.3.1	直列質点系モデル A1	60
3.3.2	並列質点系モデル A2	60
3.3.3	ツインタワー質点系モデル A3	61
3.3.4	任意質点系モデル A4	61
3.4	振動自由度	62
3.4.1	1 方向振動モデル F1	62
3.4.2	2 方向振動モデル F2	63
3.4.3	捩れ振動モデル F3	64

3.5 減衰	65
3.5.1 剛性比例型減衰モデル(初期剛性比例・瞬間剛性比例) D1	65
3.5.2 質量比例型減衰モデル D2	66
3.5.3 レーリー型 (Rayleigh) 減衰モデル D3	66
3.5.4 各部減衰モデル D4	67
3.5.5 減衰タイプの比較	67
3.5.6 減衰定数の設計値と実測値	68
3.6 建物－基礎－地盤の動的相互作用効果を考慮したモデル	69
3.6.1 スウェイ・ロッキングバネモデル I1	70
3.6.2 建物－杭－地盤連成系モデル I2	71
第3章 参考文献	71

4. 非線形特性のモデル化

4.1 骨組モデルにおける非線形特性のモデル化	73
4.1.1 一方向バネモデル	73
4.1.2 材端剛塑性バネモデル	73
4.1.3 マルチスプリングモデル	74
4.1.4 ファイバーモデル	75
4.1.5 マルチせん断バネモデル	75
4.1.6 壁エレメントモデル	76
4.2 復元力特性	77
4.2.1 Normal タイプ	77
4.2.2 原点指向タイプ	77
4.2.3 スリップタイプ	77
4.2.4 非線形弾性タイプ	78
4.2.5 Degrading タイプ	78

5. 入力地震動と各種のスペクトル

5.1 設計に用いられる入力地震動	79
5.2 各種のスペクトル	81
5.2.1 フーリエスペクトル	81
5.2.2 応答スペクトル	82
5.2.3 エネルギースペクトル	87
第5章 参考文献	89

6. 応答値と評価

6.1 各時刻における応答性状	91
-----------------	----

6.1.1	建物モデル	91
6.1.2	変位の時刻歴応答	92
6.1.3	相対変位・層せん断力の時刻歴応答	93
6.2	最大応答値を使用する場合の留意事項	95
6.3	各種の地震応答指標と解析モデル	96
6.3.1	各種の地震応答指標	96
6.3.2	地震応答指標と解析モデル	96
6.4	各種構造物のエネルギー応答	97
6.4.1	構造物におけるエネルギー配分	97
6.4.2	各種構造物のエネルギー応答	98

7. 振動解析モデルと応答評価

7.1	モデル建物の概要と検討用地震波	103
7.1.1	部材リスト	103
7.1.2	構造図	105
7.1.3	建物重量と層せん断力	108
7.1.4	剛性評価	108
7.1.5	検討用地震波	109
7.1.6	水平荷重時応力解析結果	110
7.1.7	質量・剛性・減衰マトリクス	116
7.2	等価せん断型モデルの弾性応答解析	122
7.2.1	解析モデル概要	122
7.2.2	固有値解析結果	123
7.2.3	最大応答値	123
7.3	曲げせん断型モデルの弾性応答解析	125
7.3.1	解析モデル概要	125
7.3.2	固有値解析結果	127
7.3.3	最大応答値	127
7.4	曲げせん棒モデルの弾性応答解析	129
7.4.1	解析モデル概要	129
7.4.2	固有値解析結果	130
7.4.3	最大応答値	130
7.5	部材レベルの立体骨組モデル	132
7.5.1	固有値解析結果	132
7.5.2	弾性応答解析	132
7.5.3	弾塑性応答解析	135

7.6	等価せん断型モデルと曲げせん断棒モデルによる弾塑性応答解析	139
7.6.1	部材の復元力特性	139
7.6.2	静的弾塑性解析による荷重変形曲線	139
7.6.3	振動解析モデルの復元力特性	140
7.6.4	応答解析結果	144
7.7	減衰評価の影響	148
7.7.1	解析パラメータ	148
7.7.2	減衰定数の影響	148
7.7.3	減衰タイプの影響	150
7.8	P- Δ 効果の影響	152
7.8.1	簡易なP- Δ 効果の考慮	152
7.8.2	地震応答解析によるP- Δ 効果の影響把握	153
7.9	平面骨組モデルによる各種解析手法の比較	157
7.9.1	2次元平面骨組	157
7.9.2	固有値解析	157
7.9.3	モード重合法による解析	158
7.9.4	SRSS (スペクトルモーダル) による応答解析	161
7.9.5	等価せん断型モデル	162
7.9.6	曲げせん断棒モデル	163
7.9.7	2次元平面フレームモデル, 等価せん断型モデル, 曲げせん断棒モデルの比較	165
7.9.8	減衰特性の影響	167
7.9.9	曲げせん断棒モデルと他のモデルの弾塑性応答比較	169
7.10	数値解析上の留意点	172
7.10.1	層間変形の定義	172
7.10.2	構造減衰の設定	173
7.10.3	解析結果の検証	178

8. 各種の振動モデルと解析例

8.1	RC造モデル	179
8.1.1	RC造モデルの概要	179
8.1.2	RC造モデルの地震応答解析条件	181
8.1.3	RC造モデルの地震応答解析	181
8.2	制振構造モデル	183
8.2.1	建物概要	183
8.2.2	伏図・軸組図	183

8.2.3	仮定荷重	185
8.2.4	部材断面	186
8.2.5	振動モデルと制振ダンパーの諸元	186
8.2.6	解析モデル概要	187
8.2.7	固有値解析結果	190
8.2.8	静的荷重増分解析結果	191
8.2.9	時刻歴応答解析結果	192
8.2.10	まとめ	196
8.3	偏心建物モデル	197
8.3.1	建物概要	197
8.3.2	伏図・軸組図	197
8.3.3	仮定荷重	200
8.3.4	部材断面	200
8.3.5	解析モデル概要	200
8.3.6	固有値解析結果	202
8.3.7	時刻歴応答解析結果	205
8.3.8	まとめ	210
8.4	建物・基礎・地盤連成系振動モデル	211
8.4.1	はじめに	211
8.4.2	建物概要	211
8.4.3	解析モデル概要	212
8.4.4	解析結果	215
8.5	上下動の評価	217
8.5.1	はじめに	217
8.5.2	建物概要	217
8.5.3	検討方法	218
8.5.4	質点系モデル	219
8.5.5	フレームモデル	221
8.5.6	上下動の評価の注意点	226
第8章	参考文献	226
付録1	固有値公式	227
付録2	1質点系の振動関係諸量と単位	229
付録3	重力式による固有周期略算	230
付録4	振動モデルと質量の設定	231
付4.1	立体骨組モデルにおける質量の設定	231

付 4.2	立体骨組モデルの自由度と質量の設定例	232
付 4.3	質点系モデルにおける自由度と質量の設定	234
付 4.4	要素剛性と全体剛性への組み込み	236
付録 5	モード重合法	238
付 5.1	多自由度系 1 方向モデルのモード解析	238
付 5.2	刺激係数 β と刺激関数 $\beta\{u\}$ の意味	239
付 5.3	有効質量と等価高さ	241
付 5.4	多方向自由度を有するモデルのモード解析	242
付 5.5	モード解析例	244
付録 6	鋼構造超高層建物の耐震設計パラメータ	250
付 6.1	1 次固有周期	250
付 6.2	一般超高層建物の 1 次固有周期	252
付 6.3	ベースシャーと 1 次固有周期	252
付 6.4	変形制限と必要剛性	253
付 6.5	各パラメータの関係	254
付 6.6	ケーススタディ	255
付 6.7	まとめ	256
付録 6	参考文献	256
付録 7	制振構造の簡易振動解析モデル	257
付 7.1	制振構造の骨組の特徴とモデル化	257
付 7.2	制振構造における簡易振動モデル設定時の注意点	259
付 7.3	新たな簡易振動モデルの設定法	260
付 7.4	構造減衰の設定	265
付録 7	参考文献	265
付録 8	中間層免震建物の減衰設定とモード評価	266
付 8.1	対象建物モデル	267
付 8.2	構造減衰の設定	268
付 8.3	時刻歴解析による構造減衰の評価	271
付 8.4	複素固有値解析による応答性状の把握	272
付録 8	参考文献	274

はじめに

建築構造物の振動応答解析については、1930年代には振動理論自体は確立されていたようであり、1935年に刊行された佐野利器・武藤清による「家屋耐震並台風構造」では、構造物のモデル化や連続体の固有周期解析、正弦波応答などが解説されている。しかし、ランダム振動としての地震動に対しての数値の解析を行うことは不可能であった。

1940年に米国カリフォルニア州のEl Centroで地震による加速度記録観測値が得られ、それ以後に地震波を用いた振動応答解析を行うことが可能になった。初期の振動解析は、振動方程式と電気回路方程式との相似性を利用したアナログコンピュータによる解析が行われた。霞が関ビル（36階建て、1965年着工、1968年竣工）の初期の振動応答解析は、5質点モデルをアナログコンピュータ(SERAC)により解析することから始まったとされている。これを踏まえて、1960年代よりコンピュータの利用により超高層建物の振動応答解析が始まった。

この間に、振動解析理論については多治見宏の「建築振動学」（コロナ社）、柴田明徳の「最新耐震構造解析」（森北出版）などが教材として使用されてきた。しかし、これらは振動現象を理解し、解析プログラムを作成する基礎となる振動理論に関する教材である。また、振動解析プログラムを開発するうえでは、大崎順彦の「地震動のスペクトル解析入門」（鹿島出版会）もよく利用されていた。

霞が関ビルの構造設計においては、日本初の超高層ビルとして振動応答解析が行われ、いわゆる動的設計という言葉が導入された。以来、現在に至るまで、振動応答解析による動的設計により、数多くの超高層建物や制振・免震構造建物が設計されてきている。

これらの建物についての振動応答解析に関連したモデル化や実務的な対応については、日本建築学会論文集・技術報告集や各種雑誌の技術報告資料として個々の事例が報告されている。しかし、振動応答解析手法・対象構造物のモデル化・減衰の考え方などを体系的かつ設計技術的に説明する資料は多くない。

本書は、構造設計を行う実務者が振動応答解析に取り組む際に役立つように、振動応答解析の実務的参考書となることを目的としている。本書では、振動応答解析理論自体は他の教材で学んだものとして、実務的に対象構造物をどのようにモデル化して解析し、応答結果をどのように評価するかを記述している。振動解析理論と無関係にこの種の実務書をつくることは難しいので、最低限の解析理論には触れているが、あくまでも実構造物をどのようにモデル化して振動応答解析を行うかを理解してもらうことを主眼としている。

本書の内容は、第1章には、振動応答解析の歴史と解析の目的、振動応答解析関連の用語と索引

を示している。特に「1.4 振動応答解析関連の用語と記号」は、解析ソフトにおいて異なる名称が与えられていることもあるので、本書で定義した用語を普及させたいと考えている。また、用語を使用している章・節・項を示して、索引的な役割も持たせている。

第2章から第4章は、解析手法と各種の解析モデルについて解説している。解析内容を理解して、適切な解析モデルを選定するうえでの役に立てたいと考えている。第5章は、振動応答解析にはどうしても必要な、入力地震動と地震動の特性を表すスペクトルについて解説している。

第6章は、振動応答解析結果を評価するための考え方と注意事項を述べている。また、エネルギー応答についても計算例を示している。

第7章と第8章は、振動解析を理解するうえでの助けとなることを意図して、代表的な振動解析モデルに対しての応答解析結果例を示している。また、同じ解析対象を異なるモデルで解析することにより、解析モデルの特徴を検討している。

付録として、基礎的な公式などを示した付録1~3を載せている。付録3の重力式は実用式として便利な式であるが、掲載されている例が少ないので掲載した。付録4~8は、やや専門的ではあるが、より深く振動応答解析を理解するうえで役立つであろうと考えて掲載した。

また、第1章の振動解析の歴史については、安達守弘・大越俊男・小幡学・田村和夫・寺本隆幸・長橋純男・和田章の諸氏の参加と資料提供を得て、初期超高層解析に関する歴史談義の会を開催して、執筆に当たったの参考とさせていただいた。ここに記して感謝の意を表する。