

## 序 章 建物の地震被害と耐震の歴史

### 1. はじめに

今日、我国には世界に誇り得る立派な耐震規定がある。このことは1995年兵庫県南部地震の激震に見舞われた際、旧耐震規定の下で作られた一部建物が崩壊し、また木造家屋の倒壊によって多くの犠牲者を出したものの、1981年に制定された新耐震設計法の下で設計・施工された建築構造物は大きな被害から免れたことで実証された。

しかし、このような耐震規定が突如として生まれた訳ではない。ここに至るまでには、研究の進展あるいは耐震技術の開発だけでなく、幾度となく繰返された地震被害から得た教訓の積み重ねと、多くの犠牲の上に築き上げられたものであることを理解しなければならない。

我国の耐震設計の歴史は、百年以上も前の1891年（明治24年）の濃尾地震から始まったと考えることが出来る。つまりこの地震は、耐震を学問と捉える鎗矢的地震となっている。本章では、それ以降の地震被害と耐震規定の変遷をたどりながら、現在の耐震規定に至るの足取りを概観する。

### 2. 地震被害と耐震設計法の変遷

#### (1) 年 表

明治24年10月28日 濃尾地震 (M8.4)<sup>1</sup>

(1891年) 建物全壊 142,177 半壊 80,184

死者 7,273人 山崩れ, 地滑り 1万余

震災予防調査会（文部省）設立（1923年まで続く）。

耐震構造への本格的な調査研究スタート。

木造の耐震化、レンガ造の耐震化構法が示された。

日本の近代的構造物の耐震化への幕開け。

1906年 サンフランシスコ地震 (M8.3)

日本から佐野利器、大森房吉、中村達太郎博士が現地調査。

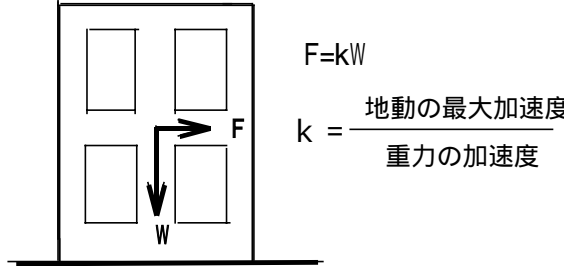
---

<sup>1</sup> 飯田 淑事；国際防災の10年シンポジウムー濃尾地震から100年、今防災を考える、地震工学振興会ニュース No.120, Sept., 1991. この地震を英語では "Mino - Owari Earthquake" という。

鉄骨造、鉄筋コンクリート造のラーメン構造は耐震的に優れていると報告。  
日本でもS造、RC造の建築物を建設されるようになる。

大正4年 佐野利器「家屋耐震構造論」発表。耐震設計法として「震度法」提案。  
(1915年)

建物に作用する地震時の水平力Fを、建物自重Wに係数(震度)を乗じて  
定める考え方を提示。



大正11年 内藤多仲「架構建築耐震構造論」発表。

(1922年) 水平力に対する架構の応力計算法(たわみ角法)紹介。

外国の模倣でない、我国独自の構造法を提示。「耐震壁」の考案。

日本興業銀行(7階建)の設計例の提示と実践。震度  $k = 1/15 = 0.067$ 採用。

骨組を鉄骨鉄筋コンクリート造とし、鉄筋コンクリートの耐震壁を配置。

大正12年9月1日 関東大震災(M7.9)

(1923年) 家屋全壊 128,266 半壊 126,233 焼失家屋 447,128

死者 99,331人 不明 43,476人

東京での最大変位・加速度(那須信次推定) 34~49cm、318gal。

欧米直輸入の構法による建物(レンガ造)に被害続出。

日本独自の耐震構造の必要性が叫ばれた。

内藤多仲設計の「日本興業銀行」無被害。

大正13年 市街地建築物法に「耐震規定」制定(世界初の耐震規定)。<sup>2</sup>

(1924年) 佐野提案の「震度」採用、 $k = 0.1$ 。<sup>3</sup>

許容応力度 Steel : 1,400 kgf / cm<sup>2</sup>(長期・短期共)。

<sup>2</sup> 当時の六大都市を対象とした耐震規定。大橋雄二：建築基準法の構造計算規定及びその荷重組合せと長期・短期概念の成立過程、日本建築学会論文報告集 No.424, 1991年6月。

<sup>3</sup> 震度0.1の設定のいきさつについては、久田俊彦編著；「地震と建築」、鹿島出版会、p49、1974年、に北沢五郎博士の談話記事がある。

建築物への筋違、壁の配置を義務付け（剛構造を指向）。

大正14年 地震研究所設立。

(1925年)

昭和2年～数年間 柔剛論争

(1927年) 地震に対する建築物の安全性確保の考え方に関する大論争。

柔構造論者の論点（真島健三郎他）：振動論に基づいた動的検討を行うべし。

建物を柔に作ったほうが地震時の共振を避けやすく有利。

剛構造論者の論点（佐野利器、武藤清他）：地震動は複雑であり、振動論に頼っては耐震安全性の確保は不可能。

複雑煩瑣で不明確な問題は建物を剛にして避けるべき。

柔剛論争は新しい耐震理論を展開した棚橋 諒の論文(1935年)で決着。<sup>4</sup>

昭和15年から昭和21年までの地震（戦時中、終戦直後の地震被害）

戦時中の地震被害の実体は当時公表されず、また終戦直後の社会的混乱のため、地震被害の教訓は耐震に生かされることはなかった。この間の主な被害地震は以下の通り。<sup>5</sup>

昭和18年9月10日 鳥取地震（M7.4）

家屋全壊 7,485 半壊 6,158 死者 1,083人

昭和19年12月7日 東南海地震（M8.0）

家屋全壊 26,130 半壊 46,950 死者 998人（津波の犠牲）

昭和20年1月13日 三河地震（M7.1）

家屋全壊 5,539 半壊 11,706 死者 1,961人

昭和21年12月21日 南海地震（M8.1）

家屋全壊 11,591 半壊 23,487 死者 1,330人 不明 102人

昭和23年6月28日 福井地震（M7.3）

(1948年) 家屋倒壊 35,420 半壊 11,449

---

<sup>4</sup> 棚橋 諒：「地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見」建築雑誌、第599号、1935年5月。

<sup>5</sup> これら4地震のうち、鳥取、東南海、南海の地震被害の様子は、梅村 魁：「震害に教えられて」、技報堂出版、1994年、に調査体験を交えた詳しい記述がある。

死者 3,895人 焼失 3,691

震度法に対する反省の芽生え、動的解析の必要性が叫ばれた。

耐震壁の有効性の再確認。

非線形振動理論、リミットデザイン(終局強度設計法)、強震計の設置、

電子計算機の活用、振動実験等の研究が開始。

#### 昭和25年 建築基準法制定

震度を0.2(16m以下)、許容応力度を従来の2倍とし、長期・短期に区別。

短期許容応力度の制定。鋼では降伏点強度、コンクリートは圧縮強度の

2/3。

建物の終局強度を意識した設計法を指向。

建物高さ31m(100尺)に制限。木造の耐震規定制定。

#### 1956年 第1回世界地震工学会議(その後4年毎に開催)

地震学と耐震工学の研究者の世界的交流。

#### 昭和39年6月16日 新潟地震(M7.5)

(1964年) 家屋全壊 1,960 半壊 6,640

死者 26人

砂質地盤の流動化現象(クイックサンド現象)。

地盤の耐震についての重要性を認識。

石油プラントの耐震性に問題提起。

#### 昭和43年7月9日 十勝沖地震(M7.9)

(1968年) 家屋全壊 673 半壊 3,004

死者 49人 不明 3人

新しいRC造建物に被害続出、RC造の短柱のせん断破壊。構造技術者に衝撃。

1971年建築基準法施行令、鉄筋コンクリート計算基準改訂(柱のフープ筋を密に配筋)。

#### 昭和43年 36階建霞が関ビルの完成(高さ147m)。

(1968年) 我が国最初の超高層ビル。電子計算機を用いた地震応答のシミュレーション計算。

「振動解析」と「耐震設計」を融合させた動的設計法に基づく最初の実

設計。

1971年 サンフェルナンド地震 (M6.6)

死者 58名 被害 2億4千万ドル

鉄筋コンクリート造に顕著な被害。

鉄筋コンクリート構造に対する反省が噴出。

昭和53年6月12日 宮城県沖地震 (M7.4)

(1978年) 家屋全壊 1,367 半壊 6,123

死者 27人

鉄筋コンクリートに被害(柱のせん断力に対する耐力・靱性不足。

腰壁・垂れ壁による短柱のせん断破壊、ねじれに対する考慮不足。

ブロック塀の被害1万4千件以上(18名死亡)、杭の被害例が顕著。

造成地(緑ヶ丘)での建物被害に注目。

昭和56年 建築基準法施行令改正、「新耐震設計法」に移行。

(1981年) 1972年から5ヶ年計画で「建設技術総合プロジェクト」を実施し、新耐震設計法をまとめた。

「震度法」 建物の振動特性に応じた地震力算定。

動的設計法の考え方を反映。従来の耐力型設計に靱性型設計を加味。

高さ60m以下の建物については、標準せん断力係数を0.2とした許容応力

度設計法に基づく1次設計のほか、2次設計では標準せん断力係数を1.0

として保有水平耐力の検定を行う。

1985年 メキシコ地震 (M8.1)<sup>6</sup>

死者4,000人以上。

被害建物 1132棟(全壊566棟)。被害総額 約50億ドル。

震源から400km以上離れたメキシコ市で被害が顕著。

地形・地盤条件が地震被害に関係。

平成7年1月17日 兵庫県南部地震 (M7.2)

(1995年) 家屋全壊 106,247 半壊 130,334

死者 6,432人 負傷者 38,495人

---

<sup>6</sup> 1985年メキシコ地震災害調査概要報告、建築雑誌 Vol. 101, No.1250,1986年9月号。

近代都市を襲った未曾有の大地震。

最大加速度（神戸海洋気象台）NS 818gal，EW 617gal，UD 332gal。

野島断層の変位 水平1.8m 上下1.3m。

被害総額（約） 兵庫9兆9,268億円、大阪2,880億円、京都27億円。

木造家屋（老巧家屋）の倒壊による死者多数(約5,000人)。

中層鉄筋コンクリート造の中間階の層破壊（1981年以前の旧耐震規準の設計）。

新耐震設計法で設計された建物の被害は小。

液化化によって引き起こされた地盤の側方流動による杭の被害。

土木構造物（高速道路橋の倒壊）、その他被害甚大。

平成12年 新建築基準法施行。建築基準法施行令改正。

(2000年) 性能規定へ移行。

耐震安全性の検証ルートの多様化。

損傷限界、安全限界に対する限界耐力計算の導入。

建物と地盤の動的相互作用効果の導入。

## (2) 時代区分

以上の耐震設計の変遷過程を時代区分すれば、図1のようにまとめる事ができる。この図から分かるように、耐震設計は20年～30年毎に大きく変化していて、1981年から2000年の期間はわずか19年と短く、変化が早くなっているのが注目される。

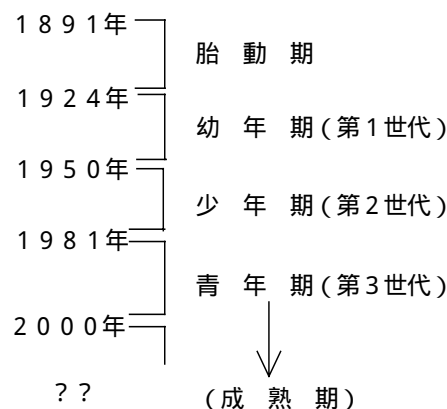


図1 耐震設計法の変遷の時代区分

### 3. 耐震の全体像の理解のために

制振装置の開発、免震工法の普及、建物の耐震設計を行うための大規模解析等々、耐震産業は今や巨大産業にまで成長している。このように巨大化した耐震の全体像を端的に理解する事は容易でない。以下には、耐震設計の枠組みを理解する上で鍵となるいくつかの基本的視点を整理しておく。

#### (1) 耐震技術と耐震思想

「耐震設計」を荷車にたとえるならば、この巨大な荷車を推進してきたのは、図2に示すように、「耐震技術」と「耐震思想」の両輪である。ややもすると、耐震は耐震技術そのものと理解され、耐震思想の役割は埋没し勝ちであるが、両者は耐震設計を進める上で不可分の関係にあって、両者の歯車が噛み合っ初めて耐震設計が機能し前進することを認識する必要がある。

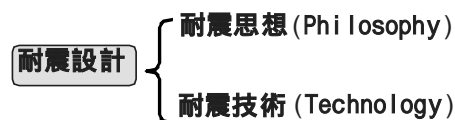


図2 耐震設計を支える車の両輪

「耐震思想」は、たとえばごく稀に起こる大地震に対して、建物被害をどの程度許容して設計すべきか、というように設計の基本理念（哲学）を形作る役割を担っている。この「耐震思想」の役割は、耐震工学が巨大になればなるほど大きくなることは言うまでもない。

これに対して、免震工法の開発、鉄筋の配筋、高強度コンクリートの開発など、建物の耐震性能を技術的に向上させるのが「耐震技術」の役割である。「耐震思想」がいくら高邁なものであっても、それを実現するための「耐震技術」の裏付けが無ければ「絵に描いた餅」でしかなく、また「耐震技術」だけで設計が進められるものでもない。「耐震思想」と「耐震技術」は、まさに耐震設計を推進する上で不可分の関係にある。

「耐震思想」と「耐震技術」に関しては、以下の命題が今後の課題として残されている。

- ・ 予測が難しい将来の地震動に対してどの程度の強さの地震動を想定して耐震設計を行うべきか。
- ・ 最大地震動に対してどの程度の塑性変形（損傷）を許容してよいか。
- ・ 建物周辺の地形、地盤構造などの局所的影響をどのように耐震設計に取り込んでゆくのかが。

- ・ 経年に伴う老朽化建物の耐震性能を如何に向上させるか。

## (2) 耐震設計に対する制約

「耐震技術」が日々進歩しているのと同様、耐震を取り巻く環境も時代と共に変化し、耐震に関する一般市民の考え方が変化する。つまり、設計行為そのものは、図3に示すように、その時代の技術・経済・社会の制約の中で成り立っているものであって、個々の状況が変われば、耐震設計の内容も当然影響を受けて変化することになる。たとえば、今回の建築基準法改正の背景には様々な要因があるが、その一つに、国際協調と規制緩和という「社会的要因」が大きく影響している。

この例に見るように、耐震設計はどのようにあるべきか、あるいは耐震規定をどのように変えるかは、単に「耐震技術」だけの問題ではない。耐震設計をより豊かなものにするためには、「耐震技術」の進歩はもとより、耐震に対する人々の認識「耐震思想」の進化も重要である。耐震が一層豊かなものになるためには、建築技術の向上に加えて、社会が成熟し耐震に対する社会の関心が大きくなることが不可欠となる。

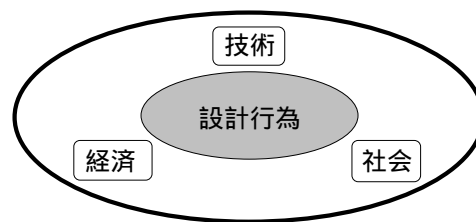


図3 設計行為の枠組み

## 参考書

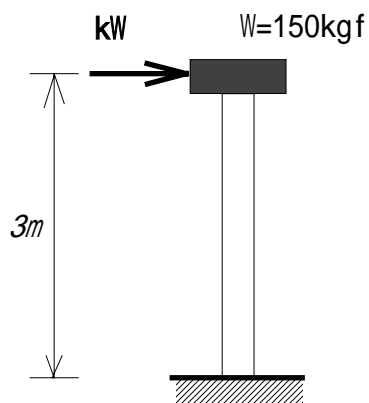
- (1) 久田俊彦編著：「地震と建築」、鹿島出版会、
- (2) 梅村 魁著：「震害に教えられて」、技報堂出版
- (3) 大橋雄二著：「日本建築構造基準変遷史」、日本建築センター

前世紀(20世紀)の自然災害の犠牲者の数 約400万人  
約半分の200万人は地震災害による死者

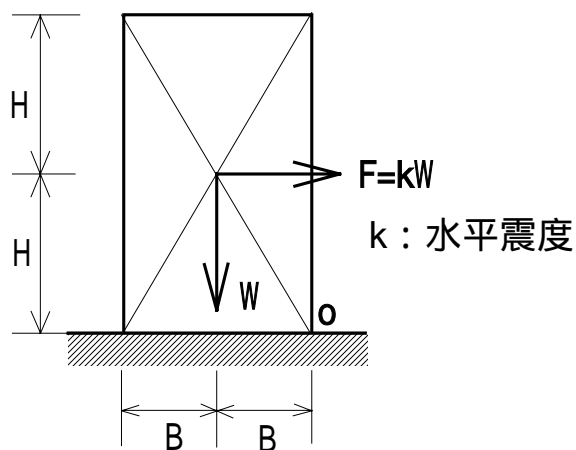
## 練習問題

1. 長さ 3 m の片持ち梁の先端に  $W = 150\text{kgf}$  の荷重が載っているものとする。水平震度を  $k = 0.1$  とし、部材の許容曲げ応力度を  $f_b = 1,000\text{kgf/cm}^2$  とした時の部材の必要断面を求めよ。ただし、部材断面は正方形とする。

さらに、水平震度と許容曲げ応力度をそれぞれ 2 倍に引き上げたときの部材断面を求めよ。



2. 図に示すような重さ  $W$  で  $2B \times 2H$  の剛体に、水平力  $F$  を増加させて行くと、ある水平力でこの剛体は  $O$  点を中心に回転する。この時の水平力を震度  $k$  で表わし、 $k$  と剛体の寸法との関係 (West の式) を示せ。



3. 震度法の問題点について、考えるところを記せ。

# 第 1 章 振動解析プロローグ ( Prologue )

## 1.1 動的解析と外乱

### ( 1 ) 静的解析と動的解析

静的解析：建物の自重など、静的荷重に対して構造物に生ずる応力と変形を求める構造計算。

動的解析：地震動や風圧力などの動的荷重(時変化する荷重)に対して構造物の応力、加速度、速度、変位、塑性率などの時刻歴応答を求める。<sup>1</sup>

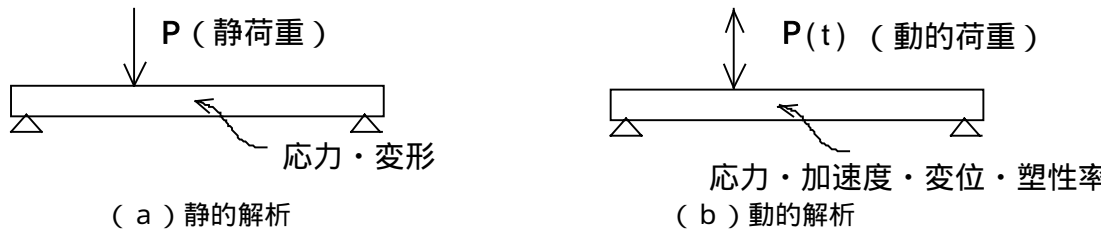
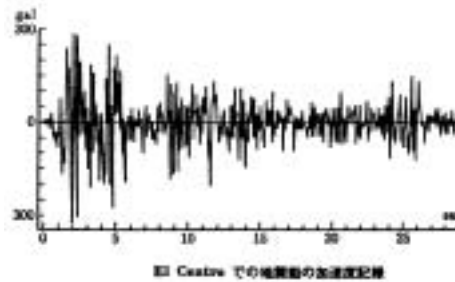
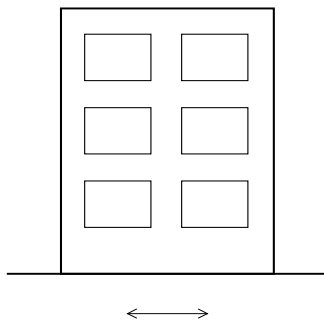


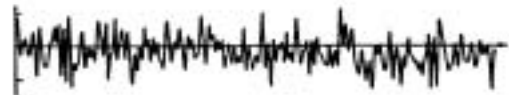
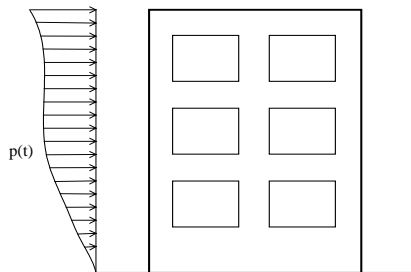
図1.1 静的解析と動的解析

### ( 2 ) 外乱の種類

動的荷重(外乱)：

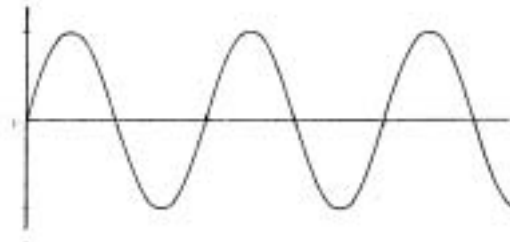
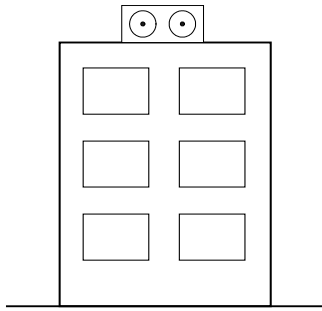


( a ) 地震動

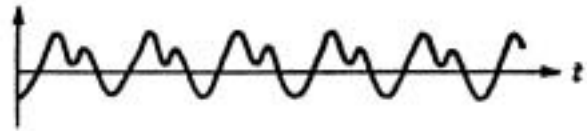
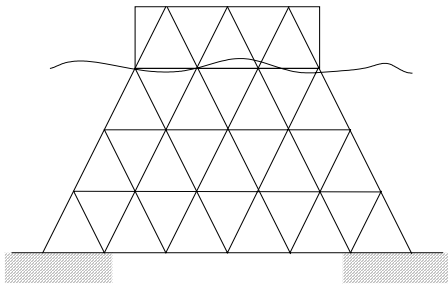


( b ) 風圧力

<sup>1</sup> 動的解析 (Dynamic Analysis)。または、 応答解析(Response Analysis)という。



(c) 起振機実験



(d) 波浪(水圧)

図1.2 外乱の例

### (3) 外乱の分類

#### 分類 1 :

- ・ 自然外乱 . . . . .地震, 風, 波浪など
- ・ 人工的外乱 . . . . .交通, 建設工事, 工場, 地中爆破などからの振動

#### 分類 2 :

- ・ 周期的外乱 (Periodic loading)
- ・ 非周期的外乱 (Nonperiodic loading)

#### 分類 3 :

- ・ 確定的外乱 (Deterministic loading)
- ・ 確率的外乱 (Probabilistic loading)<sup>2</sup>

#### 分類 4 :

- ・ 継続時間の短い外乱 (Short duration loading)
- ・ 継続時間が長い外乱 (Long duration loading)

<sup>2</sup>ある時刻における外乱の値が予め(先験的に)定まっているとき、その外乱は確定的であるという。これに対し、ある時刻の外乱が確率論的にしか予見できない時、その外乱を確率的外乱という。したがって、外乱が確定的か確率的であるかは、時刻歴波形が複雑か否かで分類されるのではない。

## 1.2 構造物の振動モデル

構造物の振動モデルを作成するに際しの基本的考え方をまとめれば、以下の通りとなる。

### (1) 離散化

構造物は一般に、梁・柱・スラブ・壁など、極めて多くの部材から構成されていて、いずれも質量が分布した連続体である。しかし、そのような部材あるいは構造物を忠実に解析することは多大の労力を伴うため、多くの場合、分布する質量をある点に集中させた、質点系モデルに置換して解析する。そのような質点への置換を離散化とよび、作られたモデルを質点系モデルまたは離散化モデルとよぶ。

連続体 → 質点系

(離散化)

連続体(分布質量系) Distributed Mass System

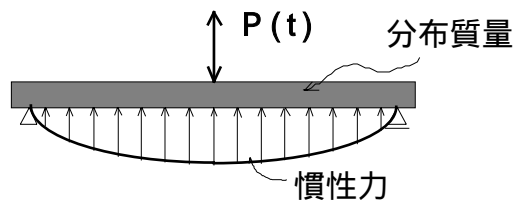


図1.3(a)

振動方程式：偏微分方程式  
(解析が難しい)

質点系(集中質量系) Lumped Mass System

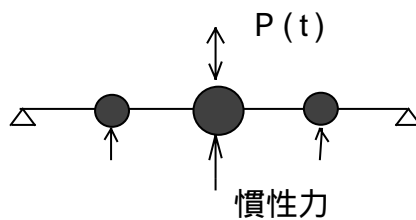


図1.3(b)

振動方程式：常微分方程式  
(解析が容易)

### (2) モデル化の方法

- Finite Element Method (有限要素法) の利用
- 工学的判断 (経験) による方法

### (3) モデルが具えるべき要件

- 解析が容易であること
- 元の構造物が持つ振動性状が忠実に反映されていること

### 1.3 地震応答解析の手順

地震応答解析は構造物が弾性範囲にある場合と、弾塑性領域にある場合の両者について、様々な地震動入力を想定して実施する。

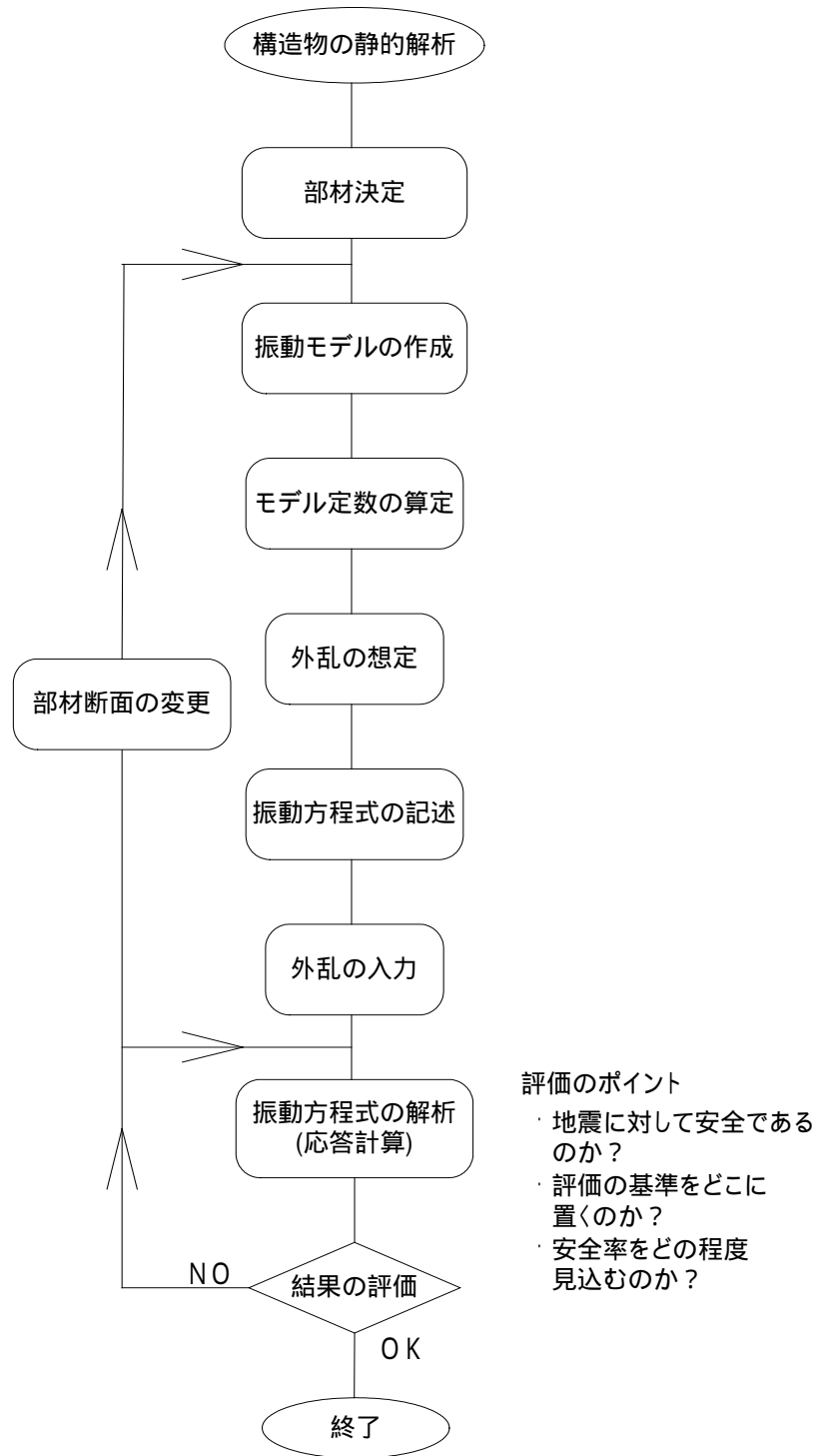


図1.4 動的解析の手順

#### 1.4 単位について

物理量	工学単位	国際単位系 S I	工学単位 S I
力・重量	Kgf (慣用としてKgと表記)	N(Newton)	1 Kgf = 9.8N
質量	Kgf・sec <sup>2</sup> /m (慣用 Kgsec <sup>2</sup> /m)	Kg	1 Kgf・sec <sup>2</sup> /m = 9.8Kg
剛性 (バネ定数)	Kgf/m (慣用 Kg/m)	N/m	1 Kgf/m = 9.8N/m
応力	Kgf /m <sup>2</sup> (慣用 Kg/m <sup>2</sup> )	Pa(Pascal) = N/m <sup>2</sup>	1 Kgf/m <sup>2</sup> = 9.8Pa
仕事・ エネルギー	Kgf・m	J(Joule) = N・m	1 Kgf・m = 9.8J
モーメント	Kgf・m	N・m	1 Kgf・m = 9.8Nm

#### 注釈

(1) 1Nとは、質量 1 kgの物体に 1 m/sec<sup>2</sup>の加速度を生じさせるために必要な力。したがっ

て、 $1N = 1Kg \cdot 1m/sec^2 = 1Kg \cdot m/sec^2$ 。

(2) kgfは、Kilogram force または ㌦が ㍻重 と読む。

(3) 応力度をSI単位で表現するときは、N/mm<sup>2</sup>またはMN/m<sup>2</sup> (MPa) を用いる。

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098\text{MN/m}^2$$

(4) 力の単位としてダイン (dynまたはdyne) を用いる場合がある。

$$1 \text{ dyn} = 10^{-5}\text{N}$$

(5) S Iは、International System の略。

(6) 計量法の改正 1993年11月 (1999年9月より施行)

(7) 単位の呼称

			10 <sup>0</sup> (Uni)	
10 <sup>-1</sup> (Deci)	d		10 <sup>1</sup> (Deca)	da
10 <sup>-2</sup> (Centi)	c		10 <sup>2</sup> (Hecto)	h
10 <sup>-3</sup> (Milli)	m		10 <sup>3</sup> (Kilo)	k
10 <sup>-6</sup> (Micro)	μ		10 <sup>6</sup> (Mega)	M
10 <sup>-9</sup> (Nano)	n		10 <sup>9</sup> (Giga)	G
10 <sup>-12</sup> (Pico)	p		10 <sup>12</sup> (Tera)	T
10 <sup>-15</sup> (Femto)	f		10 <sup>15</sup> (Peta)	P
10 <sup>-18</sup> (Atto)	a		10 <sup>18</sup> (Exa)	E

## 練習問題

1. 降伏応力度（短期）が $4,000\text{kgf/cm}^2$ の鉄筋がある。この許容応力度をS I 単位（ $\text{N/mm}^2$ または $\text{MPa}$ ）で表わせ。
2. 工学単位で密度 $\gamma_s = 1.7\text{tf/m}^3$ の土があるとする。この土の質量密度をS I 単位で表わせ。
3. 1981年制定の新耐震設計法における地震荷重は、地震動に対する建物の応答性状を反映して定められた。新耐震設計法で用いられている、振動特性係数（ $R_s$ ）、せん断力係数の高さ方向の分布（ $A_s$ 分布）、構造特性係数（ $D_s$ ）と建物の振動との関連について論ぜよ。
4. ある人の体重を体重計で量ったときに60キログラムの目盛りを示したとする。そのときSI 単位ではこの人の質量は60 k g であると表現する。この人の体重をSI 単位と工学単位で表せ。