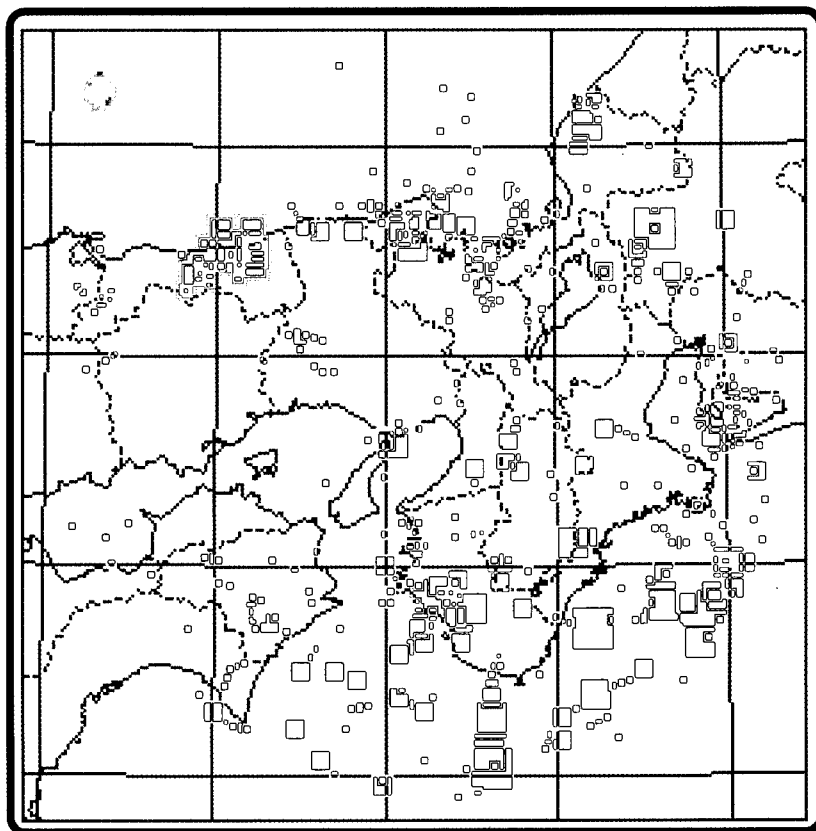


平成11年度

# 実務者のための耐震設計入門



土木学会

登 録	平成11年7月7日
番 号	第 47122 号
社団 法人	土 木 学 会
附 属	土 木 図 書 館

# 全 体 目 次

序

概説

第 1 章 断層を想定した強震動の予測と設計地震動

第 2 章 ものの揺れ方

第 3 章 地盤の振動・動的物性

第 4 章 地盤の液状化・流動化

第 5 章 地上構造物の耐震設計法

第 6 章 地上構造物の非線形動的解析法

第 7 章 地中構造物の耐震設計法

第 8 章 耐震設計のあるべき姿と今後の課題

特別セミナー A : 構造物の破壊の予測

B : 構造システムとしての挙動を考慮した耐震設計

C : 設計実務における動的解析の正しい適用と判断

土木学会 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」全文

土木学会 地震工学委員会 地震防災技術普及小委員会 委員名簿

## 序

土木学会は阪神・淡路大震災の直後に大学関係者を主体とした「耐震基準等基本問題検討会議（平成7年3月～8年3月）」を設置し、土木構造物の耐震基準の見直し等、耐震設計の今後の方向について基本方針を検討して2次にわたる提言を公表した。提言の構造設計面の骨子は、希ではあるが極めて強い地震動であるレベル2地震動を設計に考慮すること、そして構造物の損傷過程にまで立ち入って耐震性能を照査すること、である。

ついで土木学会は、民間技術者を主体とした「阪神・淡路大震災対応技術特別研究委員会（平成7年11月～9年4月）」を設け、実務技術者の視点から耐震設計の高度化を進める上での技術的な課題を検討した。この委員会はアンケートやパネル討論会の結果に基づいて多くの提案をとりまとめ、その一つとして、土木学会が実務技術者に最新の耐震設計を系統的に学ぶ機会を提供すべきであると提言した。

このような状況の中で、土木学会の常置委員会の一つである地震工学委員会が、地震防災技術普及小委員会を新設し、上記特別委員会の提案を受けてこのセミナーを企画・開催することになった。

このセミナーは、実務的技術と共に基本原理と本質を出来るだけ判りやすく解説し、受講者に耐震設計の本質を理解してもらうことを意図している。実務者においても、今後は耐震設計基準のコンセプトと背景をよく理解し、構造物や基礎の「非線形」で「動的」な挙動を見通すセンスを養い、それを設計に生かすことが求められるからである。このセミナーの受講によって「地震動」「揺れ易さ」「動的応答」「相互作用」「非線形」「損傷過程」等々の“ことば”と“イメージ”を我が物とし、使いこなせるようになっていただきたいと願っている。

セミナーの講師陣は受講者の身近な先輩に当たる大学、コンサルタント、建設会社の第一線で活躍されている方々である。ボランティアでお引き受けいただき、初回であった平成10年度には小委員会と打ち合わせながらセミナーのテキストを書き起こしていただいた。今回は昨年の経験をふまえて内容の修正追加をお願いし、更にセミナーの目的に添ったテキストにしている。

さて、地震荷重は地域ごとの活断層の分布と地盤・地質条件に依存した極めて地域性の高い荷重である。また、構造物に要求される安全性の水準も地域に依存する諸条件によって変化する。したがって、耐震設計に全国一律一定の方法は本来的にないといえるであろう。例えば地域のインフラストラクチャーについては、費用負担者であり受益者である地域住民が費用対効果を判断して構造物に要求する耐震性能を決定すれば、設計業務の受託者は地震荷重の設定から耐震構造計画までも含めてその能力を傾注し地域の要求性能に見合った構造物を設計できる。これは、やや遠い未来のことかもしれない。しかし、このセミナーに参加された方には、日々の業務の傍ら、耐震設計のあるべき姿、将来像を展望して研鑽を積んでいただきたいと願っている。

平成11年7月

土木学会地震工学委員会

地震防災技術普及小委員会 委員長 後藤洋三

## 概 説

耐震設計とはなんだろうか？ 設計スペクトルから設計震度を読みとり，骨組みで表した構造物モデルに水平力として作用させ，得られた断面力に抵抗できる部材断面を定めることだろうか？ それは耐震設計作業の一部でしかない．耐震設計の目的は，対象とする施設や設備が，大地震を受けても，要求される水準の機能を確保できるように対策を講じることである．私たちは，そのために，将来の地震動を推測し，地盤や構造物の破壊過程を推測し，所定の機能を確保しようとする．しかし，自然の力を正しく推測することは困難であり，自然地盤の複雑さや材料の非線形特性の不確かさも地震時挙動の推定を困難にする．さらに，システムチックな震後対応の採用により，要求水準を下げることも可能である．したがって，耐震設計は，工学的意志決定問題なのである．

そこで，私たちは，地震動がどのように発生し，どのように伝播するのか．ものが揺れるとはどういうことか．地盤はどのように揺れ，地上構造物や地中構造物はどう揺れるのかを知らねばならない．さらに，設計実務者としては，現時点で望ましいとされる設計の考え方や解析方法と，それらの限界も，知らねばならない．

本セミナーでは，それに必要な地震動，ものの揺れ方の基礎，設計実務に直結した解析法や設計法，耐震設計のあるべき姿と今後の課題と，順に解説する．しかし，ここで示す設計方法や解析方法は，実現象をある仮定の下にモデル化したり，実用性を重んじて簡略化して扱っているため，必ず誤差を含んでおり，適用を誤ると計算結果は実現象と大きく乖離することを併せて知っていただきたい．

なお，本書は，セミナーでの講義の理解を深めると共に，受講者が職場に戻った後も，実務遂行中に講義を思い出しながら参考にしていただけることを願って，講師の方々が書きおろしたものである．どの章も内容が盛り沢山でレベルも高く，一読しただけでは理解し難いと思われるが，セミナー終了後，みなさんが職場に戻って実務に直面されたとき，この内容の豊富さとレベルの高さが，きっと役に立つものと信じている．

各章に記述された内容は，次の通りである．

### 第1章 断層を想定した強震動の予測と設計地震動

土木学会の「第二次提言」が示したように，これからの耐震設計では活断層の存在を無視することはできず，耐震上有意な断層が想定されたならば，それに基づく地震動予測が求められる．本章では，この問題に重点を置いて，予測手法を紹介すると共に，兵庫県南部地震を例にして，実際の地震動予測の流れと課題を示す．

また，設計基準に示される設計地震動の位置づけと，設計スペクトルや動的解析を行う場合の地震動波形などとの関係を解説する．

### 第2章 ものの揺れ方

本章では，橋梁にしろ地盤にしろ，何かものが揺れるときの挙動を，どう捕らえて数式や図に表していくか，そのための基本的な事項を具体的に解説する．自由度とは何か，減

衰とは何か、応答スペクトルとは、運動方程式とは、モードとは、そしてレベル2地震動に対して不可避な弾塑性応答とは……。これらの「揺れ」を捕らえるコツを知りさえすれば、耐震設計や動的解析結果の解釈が、ずっとわかりやすくなる。

### 第3章 地盤の振動・動的物性

地震が発生し、その揺れが対象構造物に近づくとき、まず周辺地盤が振動する。本章では、地盤が連続体として挙動する範囲で、その地盤の振動に着目して、地表面と基盤での地震動の違いと地盤の非線形性を中心に、地盤の震動と動的物性に関する基本事項を紹介する。

### 第4章 地盤の液状化・流動化

緩い飽和砂質土地盤では、強震時に液状化が生じる可能性がある。本章では、液状化・流動化についての基本的な事項について理解を深めていただくために、液状化のメカニズムと流動化現象、被害、現象を左右する因子、予測方法とそれに必要な土質調査・試験について解説する。また、レベル2地震動を踏まえた新しい耐震設計法を紹介する。

### 第5章 地上構造物の耐震設計法

「第二次提言」では、耐震設計に反映すべき最新の知見が示され、新たに研究開発の必要性が認められた課題と解決に向けた提案がなされた。この新しい耐震設計の考え方と基本的に同様な方針を有する各種構造物の設計基準の改訂が行われてきている。

本章では、これを踏まえ、橋梁構造に的を絞り、耐震設計の目的や概念、地震時挙動や耐震性を高める構造・留意点、計算法と照査法、レベル1地震動とレベル2地震動に対する耐震設計法の基本的な考え方など、動的挙動と耐震設計の本質を解説する。

### 第6章 地上構造物の非線形動的解析法

設計実務において、非線形動的解析を実施する必要性が増大している。非線形動的解析を合理的に実施するには、適切な精度を有する解析モデルの作成、解析目的に合致した非線形モデルの選定、技術基準の本質的な理解や解釈などが必要である。

本章では、土木の地上構造物として最も多い橋梁を対象に、設計実務者が、解析方法の選定、モデルの作成、解析の実施、結果の見極めという一連の作業を行う際に重要と考えられる事項を、解析事例をまじえて解説する。

### 第7章 地中構造物の耐震設計法

「第二次提言」では、地中構造物に対しても2種類の地震動レベルに対して保有すべき耐震性能を照査することが求められ、設計基準の改訂が行われている。

地中構造物の地震時挙動は、周辺地盤との相互作用の結果として決定されるため、地上構造物の設計法とは異なったものとなっている。地中構造物には、埋設管のような小断面のものから地下鉄駅舎のような大断面のものがあり、トンネルのような線状のものや駐車場のように箱形のものもある。しかし、その地震時挙動の基本的なメカニズムは共通しており、耐震設計の基本は同じであるため、本章では、主として大断面の構造物を対象とし、

鉛直面内の地盤変位分布の影響を受ける横断面の問題と、水平面内の変位分布の影響を受ける線状構造物の長手（縦断方向）の問題に分けて解説する。

## 第8章 耐震設計のあるべき姿と今後の課題

阪神・淡路大震災の重大かつ深刻な被災状況を教訓にして、再び同じ悲惨な事態が生じないよう、各種構造物の設計基準が改訂されてきているが、あるべき姿と重ねると、今後の課題も数多く残っている。

本章では、既往地震での被害と耐震設計規定の関係や、阪神・淡路大震災における被害の特徴を概説し、得られた反省や教訓を整理する。ついで、これらを踏まえた耐震設計のあるべき姿を、最近の社会資本整備や公共事業のあり方に関する議論を勘案しながら、提案する。そして、それらの達成に向けての課題と方策を論及する。

本セミナーの受講者は、以上の8つの章を追って行くことにより、設計実務に必要な基礎と、実務の現状と、これから進むべき方向を知ることができる。さらに、以下の3つの特別セミナーの主旨を理解することにより、活きた耐震設計が可能になるであろう。

特別セミナーA「構造物の破壊の予測」では、「第二次提言」が求めた損傷過程に立ち入った検討が未だ不十分であるが、開発中の「応用要素法」を用いることにより、構造物の破壊現象を把握でき、効率的な地震災害軽減が可能になることを説いている。

特別セミナーB「構造システムとしての挙動を考慮した耐震設計」では、設計断面力に対して個々の部材の耐力を定める方法では、損傷過程に立ち入った地震時挙動の評価を誤る可能性があり、構造物全体を1つのシステムとしてとらえてこそ、地震動レベルと発生頻度や、トータルコスト、望ましい耐力バランスなどを考慮した設計が可能になると説く。

特別セミナーC「設計実務における動的解析の正しい適用と判断」では、動的解析を正しく適用し、効率的に設計に反映させて行くために必要な事項を、具体的に解説する。

平成11年7月

土木学会地震工学委員会

地震防災技術普及小委員会第1WG主査 田中 努

# 第1章 断層を想定した強震動の予測と設計地震動

1.1 はじめに	1-1
1.2 地震現象の考え方	1-1
1.3 兵庫県南部地震の地震動	1-2
1.3.1 右横ずれ断層運動による地震動	
1.3.2 断層面を破壊が進行したことによる地震動の方位特性	
1.3.3 堆積層構造による地震動の局所的な増幅	
1.4 地震動の評価手法	1-6
1.4.1 地震動の距離減衰式	
1.4.2 経験的グリーン関数合成法	
1.4.3 波動の時間変化と周波数特性	
1.4.4 統計的グリーン関数合成法	
1.4.5 ハイブリッド法	
1.5 地震動予測に必要な情報と予測事例	1-14
1.5.1 震源断層モデルの設定	
1.5.2 地盤調査と地盤モデルの設定	
1.5.3 強震観測の必要性	
1.5.4 モデルの不確定性と予測地震動のばらつき	
1.5.5 断層を想定した強震動予測事例	
1.6 設計地震動について	1-22
1.6.1 土木学会提言とレベル1,2地震動	
1.6.2 設計基準に示される設計地震動	
1.6.3 土木施設の耐震設計への適用	
1.7 おわりに	1-25
付録	1-26
参考文献	1-28

## 【執筆者】

香川 敬生 [(財)大阪土質試験所 技術コンサルタント部]	---	1.1-1.5.4, 1.7
澤田 純男 [京都大学防災研究所 地震災害研究部門]	-----	1.5.5
友永 則雄 [(株)建設技術研究所 東京支社]	-----	1.6



## 第2章 ものの揺れ方

2.1	はじめに	2-1
2.2	ものの揺れ方をどう解析するか	
2.2.1	振動モデル	
2.2.2	揺れを起こすもの	
2.3	1自由度系の線形応答	2-4
2.3.1	1質点系の振動	
2.3.2	自由振動と減衰	
2.3.3	調和入力に対する応答	
2.3.4	地震応答スペクトル	
2.4	多自由度系の線形応答	2-13
2.4.1	運動方程式	
2.4.2	多自由度系の非減衰自由振動	
2.4.3	モード解析法	
2.4.4	減衰マトリクス	
2.4.5	例題	
2.5	構造物の弾塑性応答	2-21
2.5.1	弾塑性復元力特性	
2.5.2	地震に対する弾塑性応答	
2.5.3	弾性応答と弾塑性応答の比較	
2.5.4	弾塑性応答スペクトル	
2.6	おわりに	2-26

### 【執筆者】

五十嵐 晃 [京都大学大学院工学研究科] 2.1~2.3

室野 剛隆 [(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部] 2.4~2.6

## 第3章 地盤の振動・動的物性

3.1 はじめに	3- 1
3.2 基盤と地表面の地震動	3- 1
3.2.1 地震基盤	
3.2.2 地盤内での波の伝播	
3.2.3 地盤の固有周期と地震動増幅	
3.3 地盤の非線形応答特性	3-10
3.3.1 地盤のせん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性	
3.3.2 地盤の非線形モデル	
3.3.3 地盤の非線形動的解析事例	
3.4 おわりに	3-20
付録：レベル2地震動に対する岸壁・護岸の耐震設計の考え方	3-22

### 【執筆者】

木全 宏之 [清水建設(株) 土木本部 設計第一部]

## 第4章 地盤の液状化・流動化

4.1	はじめに	4- 1
4.2	液状化のメカニズムと流動化現象	4- 1
4.3	液状化・流動化による被害	4- 4
4.4	液状化・流動化に影響する諸因子	4- 6
4.5	液状化の予測	4- 9
4.5.1	液状化の予測方法の種類と利用上の留意点	4- 9
4.5.2	地形・地質，液状化履歴による概略な予測	4- 9
4.5.3	N値，粒度などによる簡易な予測	4- 9
4.5.4	液状化試験や地震応答解析などによる詳細な予測	4-16
4.6	液状化が構造物に及ぼす影響	4-18
4.7	液状化予測のための地質調査・試験	4-20
4.8	おわりに	4-24

### 【執筆者】

諏訪 朝夫 [基礎地盤コンサルタンツ（株）関東支社 技術部]

## 第5章 地上構造物の耐震設計法

5.1	はじめに	5-1
5.2	橋梁構造物に対する耐震設計	5-1
5.2.1	耐震設計の目的と役割	
5.2.2	耐震設計において確保すべき目標性能	
5.2.3	耐震設計に用いられる設計法の概念	
5.2.4	耐震設計の流れ	
5.3	橋梁構造物の地震時パフォーマンスと耐震設計で配慮すべき事項	5-10
5.3.1	地震時における橋梁パフォーマンス	
5.3.2	橋梁の材料特性に着目した地震時パフォーマンス	
5.3.3	基礎～地盤の地震時パフォーマンス	
5.3.4	橋梁の耐震性能を高める構造	
5.4	計算方法と照査方法	5-18
5.4.1	耐震設計の方法	
5.4.2	弾性体の耐震計算方法	
5.4.3	弾塑性体の耐震計算方法	
5.5	レベル1地震動およびレベル2地震動に対する耐震設計法	5-26
5.5.1	レベル1およびレベル2耐震設計の目的	
5.5.2	レベル1およびレベル2耐震設計に用いる計算方法と照査方法	
5.5.3	レベル2を超える地震動に対する構造物の耐震性能	
5.6	おわりに	5-29
	参考文献	5-29

### 【執筆者】

森 敦 [日本技術開発(株) 環境防災事業部] -----5.1, 5.2, 5.5, 5.6  
工藤 浩史 [北海道開発コンサルタント(株) 研究開発部] -----5.3.1, 5.3.2, 5.3.3  
鈴木 直人 [(株)建設技術研究所 大阪支社 道路本部] -----5.3.4, 5.4

## 第6章 地上構造物（橋梁）の非線形動的解析法

6.1	耐震設計と動的解析	6-1
6.1.1	耐震設計における動的解析の位置付け	
6.1.2	動的解析法	
6.1.3	動的解析の地震入力	
6.2	耐震設計における非線形動的解析	6-8
6.2.1	構造物のモデル化	
6.2.2	非線形材料モデル	
6.2.3	動的解析の実施手順のまとめ	
6.3	動的解析例及び解析結果の解釈	6-15
6.3.1	T型単柱橋脚	
6.3.2	ラーメン橋脚	

### 【執筆者】

柳原純夫 [(株) 奥村組 本社土木本部] -----6.2.1, 6.3  
孫 利民 [(株) 大林組 技術研究所] -----6.1, 6.2.2-3

## 第7章 地中構造物の耐震設計法

7.1	はじめに	7-1
7.2	横断方向の耐震設計法	7-2
7.2.1	基本方針	
7.2.2	耐震設計フロー	
7.2.3	解析手法の種類と分類	
7.2.4	静的解析法	
7.2.5	動的解析法	
7.3	縦断方向の耐震設計法	7-19
7.3.1	基本方針	
7.3.2	耐震設計フロー	
7.3.3	解析手法の種類と分類	
7.3.4	応答変位法（狭義）	
7.3.5	動的解析法	
7.3.6	可撓継手を設けた場合の検討	
7.4	その他の地中構造物	7-36
7.4.1	LNG地下タンクの基本構造	
7.4.2	耐震設計フロー	
7.4.3	耐震解析手法	
7.5	地震時安全性の照査	7-42
7.6	今後の課題	7-43
	付録：現行の設計指針・基準	7-45

### 【執筆者】

橘 義規 [(株)オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部] ---- 7.1, 7.3, 7.5, 7.6  
渡辺 和明 [大成建設(株)土木設計第二部 地下タンク設計室] ---- 7.2, 7.4, 7.6, 付録

## 第8章 耐震設計のあるべき姿と今後の課題

8.1	はじめに	8-1
8.2	既往の被害から得られた教訓	8-1
8.2.1	構造物の被害と耐震設計規定との関連	
8.2.2	兵庫県南部地震での被害の特徴と原因	
8.2.3	過去の震害状況から得られた反省と教訓	
8.3	耐震設計のあるべき姿	8-9
8.3.1	社会資本整備の立場から	
8.3.2	災害軽減の立場から	
8.3.3	技術論的立場から	
8.4	今後の課題と対処方策	8-13
8.4.1	耐震安全性および震後機能の確保水準に関する社会的合意形成	
8.4.2	被害想定および耐震性向上対策に想定する地震動の大きさについて	
8.4.3	地震災害軽減のための迅速な耐震補強事業の展開	
8.4.4	仮想現実(Virtual Reality)から脱却した高い精度の耐震設計の確立	
8.4.5	技術力・品質の向上について	
8.5	おわりに	8-20

### 【執筆者】

佐伯 光昭 [日本技術開発(株) 環境防災事業部]