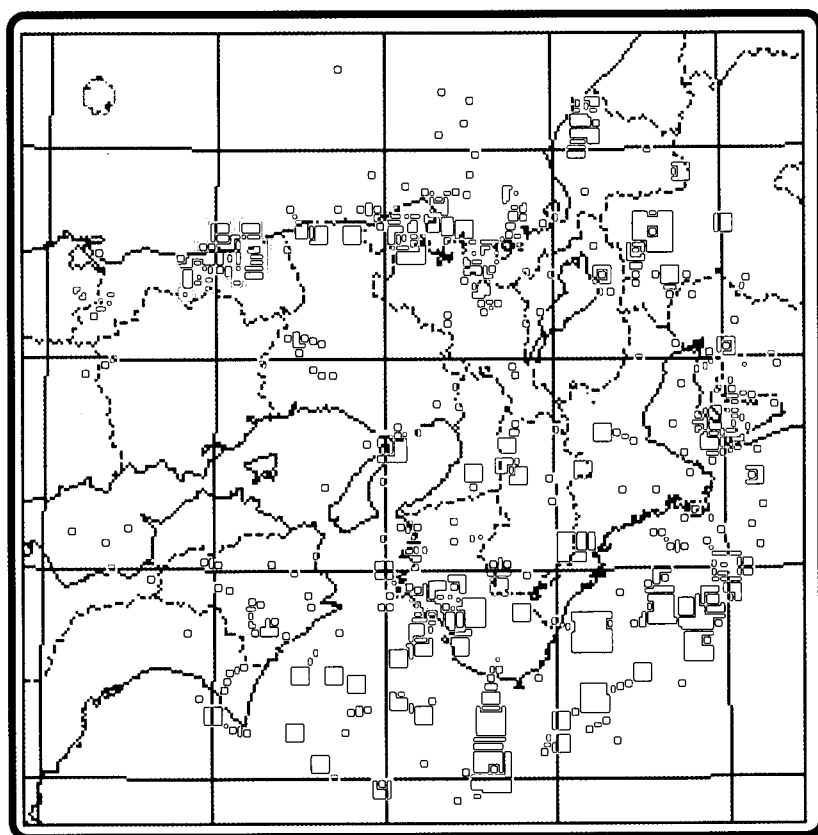


実務者のための耐震設計入門



1998年7月27日(月)～29日(水)

土木学会

全 体 目 次

序

本書の位置づけ

第1章 断層を想定した強震動の予測

第2章 ものの揺れ方

第3章 地盤の振動・動的物性

第4章 地上構造物(橋梁)の耐震設計法

第5章 地上構造物の非線形動的解析法

第6章 地中構造物の耐震設計法

第7章 耐震設計のあるべき姿と今後の方向

特別セミナー1：構造物の破壊の予測

2：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

登 録	平成 ¹⁰ 年 9 月 10 日
番 号	第 46164 号
社 団 法 人	土 木 学 会
附 属	土 木 図 書 館

序

土木学会は阪神・淡路大震災の甚大な被害を鑑みて学識者からなる「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、土木建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次にわたる提言をとりまとめた。その構造設計面における骨子は、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、そして建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。

さらに土木学会は、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。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ており、その一つが、土木学会は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、ということであった。

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てこれまで手薄であった技術の具体的な普及活動に努めることとなり、上記特別委員会の提案を受けてこのセミナーを企画・開催することとなった。

このセミナーは、若手技術者に、耐震設計技術の本質的な理解を目指して研鑽する場を提供することを意図している。今後は、大きな地震力を想定して損傷過程における建造物の耐震性能を評価し設計することが求められることから、実務者においても、耐震設計基準のコンセプトと背景をよく理解し、建造物や基礎の「非線形」「動的」挙動に対するセンスを養い、それを設計に生かすことが必要となるからである。そのため、このセミナーは基本原理と本質を出来るだけ判りやすく解説することとした。それによって、「地震動」「揺れ易さ」「動的挙動」「相互作用」「非線形」「損傷過程」等々を記述する“ことば”と“イメージ”を受講者に提供し、受講者がそれを我が物にして使いこなしていくことを期待している。

一方、実務的には、明日から使える技術の向上も大切である。そのため、3日間で可能な限り体系的な講習を行うことも意図した。セミナーの内容に一貫性を欠くところが有るとすれば、二兎を追うことの難しさ故である。

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、研究機関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、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。中には「教育」に不慣れな方がおられるかもしれないが、これだけの講師陣に接するだけでも受講者には有意義と確信している。

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、建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、全国一律の耐震設計基準を定めてその適用を良しとしているのは、力学原理と社会・経済的合理性に反した社会慣行と云えるのではなかろうか。少なくとも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建造物に要求する耐震性能を決定していくシステムを整え、設計業務の受託者が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創造的に傾注し地域に見合った

構造物を設計していくべきであろう。

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、日々の業務を遅しくこなしながら、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10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

本書の位置づけ

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。

本書の構成は講義の順と同様で、地震動そのもの、ものの揺れ方の基礎を理解していただいた後、地盤・地上構造物・地中構造物と、設計実務に直結した解析法や設計法を解説し、最後に耐震設計のあるべき姿と今後の方向を述べている。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、職場に戻って実務に直面されたとき、このテキストの内容が諸兄のお役に立てば幸いである。

各章に記述された要旨は、次の通りである。

第1章 断層を想定した強震動の予測

従来、設計実務者にとって「地震動」とは、技術基準に規定された設計震度や応答スペクトル、動的解析を行う場合の地震動波形であり、地表面や設計基盤面での値として与えられてきた。しかし、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、活断層からの地震動発生と伝播の過程とその特徴の理解を抜きにして、地震動の設定を行うのは適当でない。

本章では、この問題に的を絞り、地震動発生のメカニズムとその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。

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細かく解説する。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、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、地盤の非線形性、液状化・流動化、土構造物の振動などを解説する。また、地盤そのものの耐震設計、つまり液状化・流動化と土構造物の振動に関しては、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4章 地上構造物(橋梁)の耐震設計法

土木学会の「第二次提言」では、構造物の損傷過程に立ち入って耐震設計を行うこと、地震動、地盤、構造物との相互作用など不確実で未解明な点を課題として残す現実を正視すること、技術的・経済的限界を踏まえた社会的合意形成などの必要性を示している。

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5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，市販の汎用動的解析プログラムを使って，橋梁等の非線形動的解析を設計実務として行う場合に有用と考えられる，解析方法，構造のモデル化，非線形性のモデル化などの重要事項を，解析例をまじえて解説する。

第6章 地中構造物の耐震設計法

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。

したがって，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7章 耐震設計のあるべき姿と今後の方向

本章では，阪神・淡路大震災などの状況を振り返って，被害状況やその分析から得られた教訓を整理し，既存構造物の耐震診断・補強の重要性を指摘する。また，より広い視点から合理的な耐震設計のあり方について提案するとともに，その確立に向けての課題と対処方法を提示する。

以上の7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おわかりいただくように意図した。さらに，「構造物の破壊の予測」と「設計実務における動的解析の正しい適用と判断」という2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。内容については，今回の企画が初めてということもあってわかりにくいところが多々あることと感じている。諸兄から忌憚のないご意見・ご質問をお受けし，よりよいセミナーにしていきたいと考えている。

平成10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

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 おわりに	1-22
付録	1-23
参考文献	1-25

【執筆者】

香川 敬生 [(財)大阪土質試験所 技術5部] ----- 1.1-1.5.4, 1.6
澤田 純男 [京都大学防災研究所 地震災害研究部門] ----- 1.5.5

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	2-1
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	2-12
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	
2.5 構造物の弾塑性応答	2-18
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 弾塑性応答スペクトル	
2.6 おわりに	2-24

【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	
3.3	地盤の非線形応答特性	3- 6
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	
3.4	地盤の液状化・流動化	3-13
3.4.1	液状化のメカニズムと流動化現象	
3.4.2	液状化・流動化による被害	
3.4.3	液状化・流動化に影響する諸因子	
3.4.4	液状化の予測	
3.4.5	液状化が構造物に及ぼす影響	
3.4.6	液状化予測のための地質調査・試験	
3.5	土構造物の振動	3-34

【執筆者】

木全 宏之	[清水建設(株) 土木本部 設計第一部]	-----	3.1, 3.2, 3.3, 3.5
諏訪 朝夫	[基礎地盤コンサルタント(株) 東京支社 技術部]	-----	3.4

第4章 地上構造物(橋梁)の耐震設計法

4.1	はじめに	4 - 1
4.2	橋梁構造物に対する耐震設計	4 - 2
4.2.1	耐震設計の目的と役割	
4.2.2	耐震設計において確保すべき目標性能	
4.2.3	耐震設計に用いられる設計法の概念	
4.2.4	耐震設計の流れ	
4.3	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	4 - 8
4.3.1	地震時における橋梁パフォーマンス	
4.3.2	橋脚の材料特性に着目した地震時パフォーマンス	
4.3.3	基礎～地盤の地震時パフォーマンス	
4.3.4	橋梁の耐震性を高める付加的構造	
4.4	計算方法と照査方法	4 - 15
4.4.1	耐震設計の方法	
4.4.2	弾性体の耐震計算方法	
4.4.3	弾塑性体の耐震計算方法	
4.5	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	4 - 23
4.5.1	レベル1およびレベル2耐震設計の目的	
4.5.2	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	
4.5.3	レベル2を超える地震動に対する構造物の耐震性能	
4.6	おわりに	4 - 26

【執筆者】

森 敦	〔日本技術開発(株) 環境防災事業部〕	-----	4.1, 4.2, 4.5, 4.6
工藤 浩史	〔北海道開発コンサルタント(株) 研究開発部〕	-----	4.3.1, 4.3.2, 4.3.3
鈴木 直人	〔(株)建設技術研究所 大阪支社 道路本部〕	-----	4.3.4, 4.4

第5章 地上構造物の非線形動的解析法

5.1 動的解析法	5-1
5.1.1 はじめに	
5.1.2 モード解析法	
5.1.3 応答スペクトル法	
5.1.4 直接積分法	
5.1.5 各解析法の適用範囲	
5.1.6 直接積分法の数値解析法 — Newmark- β 法	
5.2 構造物のモデル化	5-5
5.2.1 モデル化の基本方針	
5.2.2 上部構造のモデル化	
5.2.3 下部構造のモデル化	
5.3 非線形履歴モデル	5-10
5.3.1 非線形について	
5.3.2 非線形材料の履歴モデル	
5.3.3 動解用非線形モデルの設定及び適用例	
5.4 動的解析例	5-16
5.4.1 解析対象橋脚	
5.4.2 基本的解析条件	
5.4.3 解析ケース	
5.4.4 解析結果	
5.4.5 まとめ	

【執筆者】

柳原純夫 [(株) 奥村組 本社土木本部]	-----5.2, 5.4
孫 利民 [(株) 大林組 技術研究所]	-----5.1, 5.3

第6章 地中構造物の耐震設計法

6.1	はじめに	6- 1
6.2	横断方向の耐震設計法	6- 2
6.2.1	基本方針	
6.2.2	耐震設計フロー	
6.2.3	解析手法の種類と分類	
6.2.4	静的解析法	
6.2.5	動的解析法	
6.3	縦断方向の耐震設計法	6-19
6.3.1	基本方針	
6.3.2	耐震設計フロー	
6.3.3	解析手法の種類と分類	
6.3.4	応答変位法（狭義）	
6.3.5	動的解析法	
6.3.6	可撓継手を設けた場合の検討	
6.4	地震時安全性の照査	6-36
6.5	今後の課題	6-37
	付録：現行の設計指針・基準	6-39

【執筆者】

橘 義規 [㈱オリエンタルコンサルタンツ 東京事業本部] ---- 6.1, 6.3

渡辺 和明 [大成建設㈱土木本部土木設計第二部陸上設計室] ---- 6.2, 6.4, 6.5, 付録

第7章 耐震設計のあるべき姿と今後の方向

7.1 はじめに	7-1
7.2 既往の被害からわかっていること	7-2
7.2.1 耐震設計の意義について	7-2
7.2.2 耐震診断・補強の重要性	7-5
7.2.3 兵庫県南部地震における高架橋の挙動と被災状況	7-6
7.3 耐震設計のあり方	7-13
7.3.1 構造設計の定義、耐震設計の目的	7-13
7.3.2 耐震設計の目標とその達成のための方策	7-14
7.3.3 耐震設計基準のあり方と技術者の姿勢	7-14
7.3.4 地震防災対策上の耐震設計の位置づけ	7-15
7.4 合理的な耐震設計法の確立に向けて	7-16
7.4.1 社会基盤施設への要求耐震性能	7-16
7.4.2 構造エレメントと構造システムの保有耐震性能	7-18
7.4.3 構造システム挙動を考えに入れたときの保有耐震性能	7-20
7.4.4 構造システムの挙動を考えた構造計画	7-24
7.4.5 構造システムの挙動を理解した次世代の耐震設計	7-25
7.5 おわりに	7-27

【執筆者】

阿部 雅人 [東京大学 工学部 土木工学科] 7.2.3, 7.4

佐伯 光昭 [日本技術開発(株) 環境防災事業部] 7.1, 7.2.1, 7.2.2, 7.3, 7.5