

概 説

耐震設計では、地震による構造物の振動や破壊の進展、地盤の振動や液状化、構造物と地盤の相互作用といった複雑な現象を取り扱う。それらの予測に当たり、動的解析や非線形解析、液状化解析などの様々な解析手法が駆使されるが、単に解析プログラムを使うことができれば、すなわち耐震設計ができる訳ではない。それぞれの現象をきちんと理解し、目的に応じて適切に予測手法を使い分けるとともに、得られた計算結果が妥当であるかを判断しなければならない。また、実務では動的な現象である地震応答を静的な力の釣り合いの問題として扱う場合や、基準・指針類に基づき各種の簡易評価式を用いる場合も多いが、設計対象とする構造物に適用してよいかを見極める必要がある。

本書は、主に比較的経験が浅い技術者が実務に携わるに際し、耐震設計の体系的かつ本質的な理解を得ることを目的としている。本書の基礎編に当たる「実務に役立つ耐震設計入門-2022年改訂版-」では、耐震設計の体系および基準変遷、ものの揺れ方、耐震構造計画、土木構造物の耐震設計の基礎知識、地盤の動的性質と地盤振動、地震時の地盤応答と応答解析の基礎知識といったテーマを扱った。本書では実践編として、1. 地震動の特性と設計地震動の評価、2. 地盤の液状化・側方流動の評価・解析法、3. 地中構造物の耐震設計法、4. 地上構造物の耐震設計法、5. 基礎の耐震設計法、6. 既設構造物の耐震診断・耐震補強をテーマに、さらに設計的に踏み込んだ内容を扱う。各章の執筆は第一線で活躍する技術者・研究者が担当し、過去の被害事例、耐震設計の基本的な考え方、代表的な評価手法、実務上の留意点などについて解説する。今回の改訂では、耐震設計の本質をさらに理解しやすいよう内容を一部見直し、また最新の基準・指針類や研究成果に基づく知見を反映するなど、より実務に役立てていただけるよう配慮した。

地震工学委員会地震防災技術普及小委員会では、毎年、「土木学会による実務者のための耐震設計入門」のセミナーを基礎編と実践編の2回に分けて実施している。このうち、実践編では本書の執筆担当者による講義を予定しているので、ご参加いただき耐震設計への理解をより一層深めていただけると幸いである。

2024年10月

公益社団法人土木学会 地震工学委員会

地震防災技術普及小委員会 第1WG主査 黒田 武大

第1章 地震動の特性と設計地震動の評価

[担当：倉橋 奨]

地震動は、震源断層や伝播経路、表層の地盤特性などの様々な影響を受けて、建造物の建設地点へと到達する。本章では、これらの地震動の特性に触れた上で、耐震設計のインプットとなる設計地震動について、その種類や作成方法、実務において設計地震動を選定する際の留意点などを解説する。今回の改訂では、最新の基準・指針類を反映するとともに、近年発生した地震による地震動についての解説を加えている。

第2章 地盤の液状化・側方流動の評価・解析法

[担当：福武 毅芳]

地震により地盤が液状化すると、地盤自体の応答が変化するのは勿論、地盤上あるいは地盤中に設置された建造物の応答にも影響を及ぼす。最近では、液状化が発生するか否かを考える従来の液状化判定に加え、液状化時の地盤や建造物の挙動を予測し、設計や対策工の検討に活用する機会も増えている。本章では、液状化現象について述べた上で、液状化の判定方法、地盤変形や側方流動に関する予測式、有効応力解析などによる詳細な予測手法、対策工法などを解説する。

第3章 地中建造物の耐震設計法

[担当：梅林 福太郎・鋤田 泰子]

本章では、トンネルや埋設管路、地下駐車場などの地中建造物の耐震設計を扱う。地中建造物は地震時に周囲の地盤と互いに影響し合いながら応答するが、耐震設計ではその相互作用をいかに考慮するかがポイントとなる。本章では、地中建造物の被害事例や耐震設計の基本的な考え方について解説し、検討事例を紹介する。また、水道やガスなどのインフラが被災した場合に影響範囲を限定し、早期に復旧させるためのシステムとしての地震対策についても解説する。

第4章 地上建造物の耐震設計法

[担当：栗林 健太郎]

本章では、橋梁をはじめとする地上建造物の耐震設計を扱う。主に橋梁を念頭に、耐震設計の基本的な考え方、鉄筋コンクリート構造および鋼構造の照査方法、免震構造・制震構造の考え方などについて解説するが、より普遍的な内容を盛り込むことで、橋梁以外の様々な地上建造物にも対応できるよう配慮している。今回の改訂では一部構成を見直すとともに、基準・指針類に記載の式や値が決められた背景や実務における留意点についての解説を加えている。

第5章 基礎の耐震設計法

[担当：黒田 武大]

本章では、構造物の基礎を対象に、特徴的な被害事例、耐震設計の基本的な考え方、代表的な評価手法などを解説し、具体的な検討事例を紹介する。今回の改訂では内容を一新し、基礎の耐震設計の本質を理解する上で重要な基礎と地盤の相互作用や動的解析に関する説明を充実するとともに、静的解析に関しては適用上の留意点について事例を交えて解説した。また、筆者が実務でよく直面するが、載っている教科書類が意外に少ないと思われる内容についても触れるようにした。

第6章 既設構造物の耐震診断・耐震補強

[担当：久末 賢一・佐々木 智大]

既設構造物の耐震補強では、多くの候補の中から対象構造物を絞り込み、各々の制約条件に合った補強方法を適切に選定する必要がある。本章では、耐震診断・耐震補強の基本的な考え方を解説し、橋脚などの上部構造物、基礎・地中構造物、付帯構造物について、過去の被害状況や具体的な耐震補強事例を紹介する。今回の改訂では、ロックンク橋脚を有する橋梁の耐震補強、地下水位低下工法、付帯構造物の耐震補強などに関する記載を追加した。

目次

第1章 地震動の特性と設計地震動の評価

1.1	はじめに	1
1.2	地震と地震動の特性	2
1.2.1	地震の種類	2
1.2.2	地震と地震動	3
1.2.3	震源特性と地震動への影響	4
1.2.4	伝播経路特性と地震動への影響	6
1.2.5	サイト特性と地震動への影響	8
1.3	近年発生した地震による地震動	11
1.3.1	内陸型地震	11
1.3.2	海溝型地震	12
1.4	設計地震動の種類	17
1.4.1	観測波	17
1.4.2	模擬波	18
1.4.3	サイト波	19
1.5	既往の耐震基準における設計地震動の取り扱い	21
1.5.1	道路橋示方書・同解説V耐震設計編	21
1.5.2	鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計	22
1.5.3	港湾の施設の技術上の基準・同解説	24
1.6	設計地震動の作成方法	26
1.6.1	地震動の時刻歴領域と振動数領域	26
1.6.2	模擬波（スペクトル適合波）の作成方法	27
1.6.3	サイト波の作成方法	29
1.6.4	設計地震動の作成フロー	31
1.7	設計地震動の留意点	32
1.7.1	地震動の最大値	32
1.7.2	地震動の位相特性	33
1.7.3	海溝型地震と内陸型地震	34
1.7.4	地震と観測地震動	34
1.7.5	地盤の影響の評価	35
1.7.6	スペクトルの振幅調整における収束条件	35
1.7.7	今後想定される地震動	35
1.8	設計地震動の課題	35
1.8.1	観測波	35

1.8.2 模擬波	35
1.8.3 サイト波	36
1.9 まとめ	36
参考文献.....	36

第2章 地盤の液状化・側方流動の評価・解析法

2.1 はじめに	39
2.2 砂質土の液状化と応力～ひずみ関係	39
2.3 種々の液状化判定法（評価法）.....	42
2.4 F_L 値をもとに判定を行う方法（ F_L 法）	43
2.5 簡易判定法による過剰間隙水圧や沈下量の推定	46
2.5.1 過剰間隙水圧比の推定	46
2.5.2 沈下の推定法	47
2.6 液状化の詳細評価法	49
2.6.1 地盤の動的解析	49
2.6.2 液状化予測事例	60
2.6.3 有効応力解析による種々の解析事例	62
2.7 地盤の液状化に伴う残留変形と流動（側方流動）.....	64
2.7.1 液状化後の砂質土の特性	66
2.7.2 側方流動予測法	67
2.7.3 杭基礎に及ぼす影響と設計法	70
2.8 液状化・流動化対策	73
2.8.1 最近の液状化および流動化対策工法の特徴	74
2.8.2 表層地盤改良 —液状化を許容した基礎—	75
2.8.3 大きな地盤変形に対する対策	77
2.8.4 基礎に対する工夫と構造体としての対策	81
2.8.5 補足	81
2.9 おわりに	82
付録1 地盤と構造物の動的相互作用と解析モデル.....	83
付録2 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（3.11地震）における関連事項.....	86
参考文献.....	91

第3章 地中構造物の耐震設計法

3.1 はじめに	95
3.2 過去の被害事例	96
3.2.1 横断方向の被害事例	96
3.2.2 縦断方向の被害事例	97
3.3 地中構造物の地震時挙動と留意点	99

3.3.1	地震時挙動	99
3.3.2	耐震設計における留意点	99
3.3.3	耐震設計において注意を要する箇所	100
3.4	横断方向の耐震設計方法	100
3.4.1	耐震解析手法の種類と特徴	100
3.4.2	耐震設計の手順	109
3.4.3	耐震設計事例	111
3.4.4	耐震安全性の照査	118
3.4.5	耐震対策	120
3.4.6	地中立体構造物の計算例	120
3.5	縦断方向の耐震設計方法	123
3.5.1	基本方針	123
3.5.2	耐震解析手法の種類と特徴	123
3.5.3	耐震設計の手順	134
3.5.4	動的解析による計算事例	136
3.5.5	耐震安全性の照査	144
3.5.6	耐震対策	144
3.6	システムとしての地震対策	147
3.6.1	地中構造物の地震対策の歴史	147
3.6.2	システムの地震対策の考え方	148
3.6.3	システムにおける地震対策事例	149
3.7	今後の課題	151
	参考文献	151

第4章 地上構造物の耐震設計法

4.1	はじめに	155
4.2	地上構造物の耐震設計の特徴	155
4.2.1	地上構造物（橋梁）の耐震設計法の変遷と現状	155
4.2.2	耐震設計の特徴	156
4.2.3	静的照査法と動的照査法	157
4.2.4	実務における静的照査法の留意点	157
4.2.5	実務における動的照査法の留意点	160
4.3	耐震性能の設定と照査基準値	169
4.3.1	レベル1地震動とレベル2地震動	169
4.3.2	“壊れ方”をあらかじめ想定した設計	169
4.3.3	鉄筋コンクリート構造物の耐震性能	172
4.3.4	鋼構造物の耐震性能	179
4.4	構造物の耐震性を確保するためのアプローチ	179
4.4.1	部材耐力の向上	180

4.4.2	じん性の向上	181
4.4.3	地震力の軽減	182
4.4.4	フェイルセーフ	186
4.4.5	機能確保への配慮	187
4.5	まとめ	188
	参考文献	189

第5章 基礎の耐震設計法

5.1	はじめに	191
5.2	基礎の耐震設計の特徴	191
5.2.1	基礎形式と被害形態	191
5.2.2	基礎と地盤の相互作用	192
5.2.3	基礎と上部構造の相互作用	195
5.2.4	補修・復旧の難しさ	196
5.2.5	基礎地盤の安定性	197
5.3	基礎の耐震設計	198
5.3.1	耐震設計の流れ	198
5.3.2	耐震構造計画	198
5.3.3	要求性能および限界状態	199
5.3.4	照査項目および限界値	199
5.3.5	耐震設計に用いる解析モデル	202
5.3.6	動的解析による方法	202
5.3.7	静的解析による方法	209
5.3.8	部材の非線形モデル	219
5.3.9	地盤ばねの非線形モデル	221
5.3.10	群杭効果を考慮した地盤ばね	221
5.4	検討事例	225
5.4.1	検討概要	225
5.4.2	対象構造物および地盤条件	225
5.4.3	解析モデルの作成	226
5.4.4	入力地震動	230
5.4.5	固有値解析および Rayleigh 減衰の設定	230
5.4.6	動的解析による検討	231
5.4.7	静的解析による検討	237
5.4.8	解析結果の確認ポイント	239
5.5	まとめ	241
	基礎の耐震メモ	
①	地中応力算定の基本問題	205
②	基礎地盤の安定性評価	208

③ 慣性力と地盤変位の影響について	218
④ 基礎の特性値 β と地盤反力係数	224
⑤ 地盤の非線形特性の表現方法	229
⑥ 強制変位入力の方法	239
参考文献	241

第6章 既設構造物の耐震診断・耐震補強

6.1 耐震診断と耐震補強の計画と実施	245
6.1.1 耐震補強の目的	245
6.1.2 耐震診断・耐震補強の手順	245
6.1.3 耐震要求性能の設定	246
6.1.4 耐震診断・耐震補強における意思決定	247
6.1.5 地震リスク評価（確率論的リスク評価）	248
6.1.6 耐震性能の設定と対策立案	249
参考文献	252
6.2 上部構造物・橋脚の耐震補強	252
6.2.1 構造物の破壊と補強の概要	252
6.2.2 耐震診断の方法	254
6.2.3 耐震補強の考え方	256
6.2.4 耐震補強工法の種類	259
6.2.5 トラス橋（阪神高速：港大橋）の耐震補強	260
6.2.6 プレストレストコンクリート橋（NEXCO 東日本：永井川橋）の耐震補強	266
6.2.7 ロッキング橋脚で支持された橋梁の耐震補強	270
参考文献	287
6.3 基礎・地中構造物等の耐震補強方法	290
6.3.1 基礎構造物の耐震補強	290
6.3.2 地中構造物の耐震補強	296
6.3.3 斜面・土構造物の耐震補強	300
6.3.4 護岸の耐震補強	303
参考文献	307
6.4 付帯構造物の耐震補強	308
6.4.1 付帯構造物の損傷事例	308
6.4.2 付帯構造物の耐震照査法	312
6.4.3 付帯構造物の耐震補強の事例	321
6.4.4 まとめ	327
参考文献	327