

## 9回 耐震設計：

### 9回 耐震設計：構造物の安全性を照査する

#### 1. 耐震設計とは

##### (1) 設計照査：壊れるか/壊れないか？

耐震設計(seismic design)は、どのようにしてなされるのか。これは、簡単に言うと、‘構造物が、地震に対して壊れないように設計すること’であり、工学的には、‘構造物が、設定した設計地震動に対して、所定の耐震性能を有するように設計すること’のようにまとめることができる。

このため、耐震設計の照査に際しては、設計地震動による地震荷重(seismic load)、および構造物の耐力/靱性の両者を算定し、設計照査（OKかNGか）は、単純に下式のように定められる。

- ・地震荷重 < 構造物の耐力/靱性 ⇒ OK (1a)
- ・地震荷重 > 構造物の耐力/靱性 ⇒ NG (不可) (1b)

地震荷重と構造物の耐力/靱性の計算は種々の手法があり、実際の設計照査は単純ではないが、原則的に式(1)によってなされる、と言ってよい。設計地震動による地震荷重と構造物の耐震性能の両者の相対的な関係によって決定するとも言え、耐震設計の基本的な考え方であろう。スポーツ（例えば、アメリカンフットボール）で喩えれば、地震荷重が攻撃(offense)、耐震性能が防御(defense)であり、防御が勝れば、その構造物は壊れない。

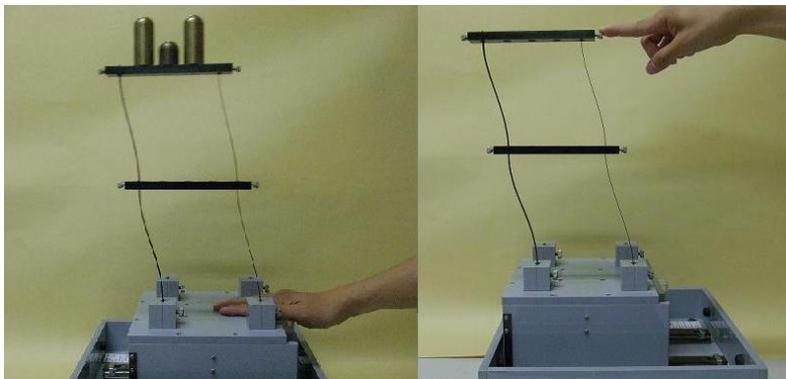


写真1 左：動的応答、右：等価な地震荷重に置換

これは、写真1のような単純な事例で考えると分かり易い。写真左は、基礎から地震波が入力して（手の動きが地震動である）、これに上部構造物が‘動的に応答’している。一方、右写真は、左写真と等価な水平荷重を‘静的に’負荷している。従って、右写真で言えば、質点位置にて押している力が地震荷重であり、構造物(2層ラーメン構造)が耐えられれば、式(1a)が成立し、耐震安全性が照査されていることになる（教材模型なので、壊れない範囲にて模擬実験している）。

また、構造物の耐力/靱性は、対象構造物の構造諸元、断面諸元、使用材料の特性、などに基づいて計算され、一方、設計地震動は、対象構造物の建設サイトに対して設定される。地震発生を人為的に防ぐことはできないが、耐震性能は、高耐震化など人類の叡智により対

## 9回 耐震設計：

処することができることを付記したい。

### (2) 設計安全率

ここで大切なことは、両者のバランスが重要である。例えば、安全率を、

$$\text{安全率} = \frac{\text{地震荷重}}{\text{耐震性能}} \quad (2)$$

のように定義すると、式(1)に倣って、以下のように照査される。

$$\text{安全率} > 1: OK, \quad \text{安全率} < 1: NG \quad (3)$$

さらに、設計照査の結果がOKであっても、次のことを勘案することが必要である。

- ・安全率が大きい：過大設計⇒建設コストが上がる。不経済な設計。
- ・安全率が小さい：ギリギリの設計⇒想定外の過大荷重にて、簡単に壊れてしまう

言換えると、設計する構造物の耐力/靱性を上げれば安全であるが、建設コストが上がり、経済性を損なう。一方、耐震基準がギリギリの場合、万が一の事態に心配である（余裕がない）。構造物の目的と設計条件を勘案した適度な安全率を設定し、被災リスクを最小限にすることが重要である。

### (3) 耐震設計に関する基本用語

このような設計地震動と耐震性能に加えて、耐震設計の合理的具体的な実施に際しては、公的な基準が必要となり、これを総称して耐震基準(design criteria)と呼ぶ。土木構造物の場合、構造物毎に設計示方書または設計指針が定められ、建築建屋の場合、建築基準法および付随する諸規定が準備されている。このように、耐震設計を理解するには多くの要素技術が必要であるが、関係する基本用語を以下のように整理した。

表1 耐震設計に関する基本用語

地震荷重 (seismic load)	地震によって作用する動的応答を静的荷重にて変換したもの
設計荷重	設計に用いる荷重。性能設計では、多段階にて設定される。
耐震性能 (seismic performance)	地震時における、構造物/部材の発揮する能力、または遂行し得る能力
性能規定 (performance criterion)	構造物の要求される性能とそのレベルを規定すること
仕様規定 (specification-based)	構造物の形状、寸法、使用材料などを技術基準の中で規定すること
要求性能 (performance requirement)	構造物が具備すべき(必要とする)性能。発注者によって決定される。
構造性能 (structural performance)	構造物の保有している(達成した)性能。形状寸法、断面諸元、使用材料、施工の程度により実現される性能である。
照査 (verification)	構造物が所要の性能を満足しているか判定を行うための行為
耐震基準 (design criteria)	耐震設計に際して、具体的に規定した公的な基準 (事業者、構造物毎に設定される)

## 2. 性能照査型耐震設計

さて、以上のように耐震設計の基本的な考え方を示したが、実際に用いられる設計手法は単純ではなく、その手法は様々である。前世紀より、欧米諸国からの提案/実践により、下記のような手法が挙げられる。

- ① 震度法/修正震度法
- ② 応答変位法
- ③ 動的応答解析法
- ④ 応答スペクトル法

(これらの解析手法は専門的になるので、関連図書にて学習していただきたい)。これまで実践経過と大小多くの被災経験を通して、現在では、性能設計(performance-based design)が主流となり、我が国にて定着していると言える。ここでは、以下に、設計地震動、耐震性能を示し、性能設計の概要を伝えたい。

### (1) 性能設計法とは

構造物の建設に際しては、その建設目的と建設地点の環境によって、発注者または使用者の要求する性能(performance)がある。一方、構造物は、その構造形状、使用材料の仕様、施工具合によって、特有の構造性能を有する(ここで言う性能とは、耐荷力にとどまらず、安全性、使用性、美観、(貯蔵物の)遮蔽性など、構造物本来の特性、期待される機能を表す)。

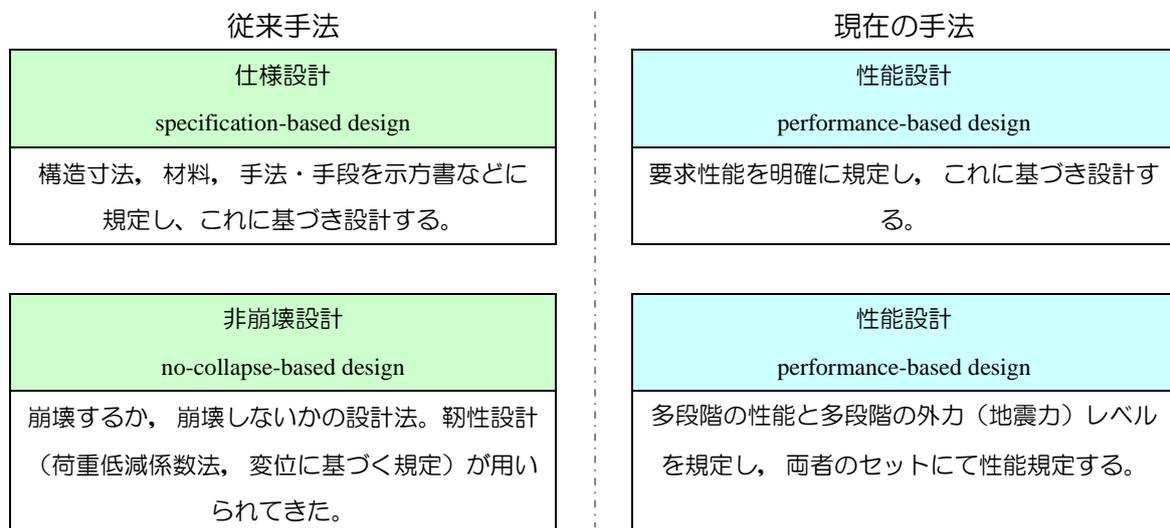


図1 性能設計法と従来手法との比較

そして、性能設計(performance-based design)とは、これらの‘要求性能’と‘構造性能’とを対比する、性能レベルにて設計照査するものである。すなわち、構造性能が要求性能を上回ることにより、設計照査が達成される。あるいは、発注者の求める要求性能をもとに、目標性能を策定し、建造物が設計/施工される、と捉えてもよい。この場合、前出の式(1)に倣って、

## 9回 耐震設計：

下記のように記述できる。

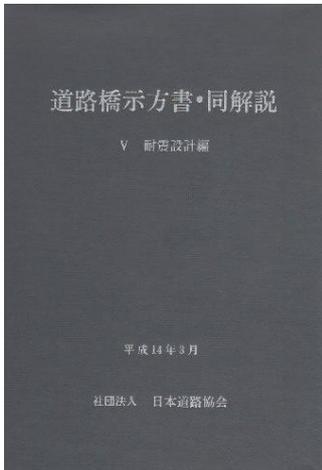
- ・要求性能<構造性能 ⇒ OK (4a)
- ・要求性能>構造性能 ⇒ NG (不可) (4b)

性能設計は performance-based design を邦訳したものであるが、土木、建築分野など分野によって呼称はことなり、性能規定型設計法、性能照査型設計法、性能明示型設計法、性能指向型設計法、などの名称がある。

### 3. 土木構造物の耐震設計法

土木構造物の場合、通例、構造物毎/事業体毎に策定され、示方書、指針、ガイドラインのように呼ばれる。ここでは、代表的な示方書として、道路橋示方書・同解説、および鉄道構造物等設計標準・同解説があり、その概要を順次記述したい。

以下に、各々表紙画像を示した。



道路橋示方書・同解説(日本道路協会編)

鉄道構造物等設計標準・同解説(鉄道総合技術研究所)

#### (1) 道路橋示方書・同解説 (道路協会)

道路構造物を対象とした耐震設計は、「道路橋示方書」[1]としてまとめられ、我国における代表的設計示方書としてよく知られている。

ここでは、本示方書の基本方針は以下のとおり（耐震設計の基本方針'を要約）。

『橋は、地震後において避難路、輸送路、社会活動の基幹路など、重要な役割が期待される。従って、その耐震設計に際しては、地震時における安全性はもとより、橋の重要度に応じて、供用性、修復性の性能を充分確保することが重要である』。このため、道路橋示方書は、性能規定型の技術基準書を目指し、橋の耐震性能、設計地震動および重要度の分類を明記している。

- ・設計地震動：レベル1地震動、レベル2地震動（タイプⅠ：プレート境界型の大規模地震動、タイプⅡ：内陸直下型を想定した地震動）

9回 耐震設計：

・ 耐震性能の区分と定義：

耐震性能 1：地震によって橋としての健全性を損なわない性能

耐震性能 2：地震による損傷が限定的で、機能が短期間で回復でき、補強を必要としない。

耐震性能 3：地震による損傷が橋として致命的とならない性能

以上のような分類と定義のもと、道路橋に対する性能マトリックスは、表 3 と表 4 のようにまとめられる。表 3 は、3 つの耐震性能と 3 つの限界状態（安全性、供用性、修復性）との対応関係を示したものである（ただし、表中における、‘落橋に対する安全性’は、耐震性能 3 に対するものと理解するべきであろう）。表 4 は、設計地震動と耐震性能との関連を示した性能マトリックスで、橋の重要度（A 種、B 種）に応じて記述されることが、本示方書の特徴である。

表 2 設計地震動の分類（道路橋示方書[1]）

設計地震動	定義
レベル 1 地震動	期間中に発生する確率が高い地震動
レベル 2 地震動	供用期間中に発生する確率は低いが、大きな強度を持つ地震動
	タイプ I：プレート境界型の大規模地震動、 タイプ II：内陸直下型を想定した地震動

表 3 道路橋示方書における性能マトリックス（道路橋示方書[1]）

設計地震動	A 種の橋 重要度が標準的な橋	B 種の橋 重要度の高い橋
レベル 1 地震動	耐震性能 1 地震によって橋としての健全性を損なわない性能	
レベル 2 地震動	耐震性能 3 地震による損傷が橋として致命的 とならない性能	耐震性能 2 地震による損傷が限定的なものに とどまり、橋としての機能の回復が 速やかに行い得る性能
タイプ I の地震動		
タイプ II の地震動		

(2) 鉄道構造物等設計標準・同解説（鉄道総合技術研究所）[2]

鉄道構造物の設計に関しては、「鉄道構造物等設計標準・同解説」（以降、鉄道標準と呼ぶ）にまとめられ、従前より構造形式別に 10 冊が編集/刊行されている。

鉄道標準 耐震設計[2]においては、設計地震動と耐震性能を以下のように規定している。

・ 設計想定地震動

L1 地震動：設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動

L2 地震動：設計耐用期間内に発生する確率は低いが、非常に強い地震動

9回 耐震設計：

・耐震性能

耐震性能Ⅰ：地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない

耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる

耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体が崩壊しない

これらの組合せを性能マトリックスによって整理すると、表4のようになる。とくに、L2地震動のような大規模地震では、構造物の損傷を認めるものとし、重要構造物に対して耐震性能Ⅱ、その他の構造物に対して耐震性能Ⅲを満足する旨、補記されている。

表4 鉄道標準[2]における耐震性能マトリックス

		耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
L1地震動	設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動	○		
L2地震動	設計耐用期間内に発生する確率は低いが、非常に強い地震動		○ 重要度の高い構造物	
				○ その他の構造物

4. 建築建屋の耐震設計法

建築物の耐震設計の方法についても、建築基準法を基本として、各種施行令、告示などの耐震安全性に係る法令、学会などによる各種規定、指針、ガイドラインが用意されている。

これらの法令・指針等は、過去の地震被害を教訓とし、段階的に改善が実施され今日に至っている。現在の建築基準法の耐震設計の基本的な考え方は、表5に示す通り、建物の耐用期間内に稀に起こりうる中地震と、極めて稀に起こりうる大地震の二つのレベルの地震動を想定し、中地震に対しては「損傷を防ぐ」、大地震に対しては「人命を守る」ことを耐震性能の目標とし、これに対応した各種の耐震設計法が定められている。

表5 地震動のレベルと耐震目標および設計法

地震動のレベル	耐震目標	代表的な設計法
中地震（レベル1）	建物の損傷を防ぐ 「仕上げなどの損傷が生じて、柱や梁などの骨組み（構造体）は、軽微なひび割れ程度に収める」	許容応力度設計法 （一次設計）
大地震（レベル2）	人命を損なわない 「構造体にひび割れや一部の損壊が発生しても、人命に影響を及ぼす柱の崩壊や建物の倒壊などを生じさせない」	保有水平耐力設計法 （二次設計）

9回 耐震設計：

建築基準法・同施行令は 1950 年に制定された。ここでの耐震設計は、定められた地震荷重で部材に作用する応力が、部材の短期許容応力度以内であることを確かめることとしている。この許容応力度設計の基本的な考え方は、現在でも引き継がれているが、表 6 に示すように耐震設計法は、過去の地震被害を教訓として、段階的に改善・改正がなされている。

代表的な改正として、大地震時の安全性の確認を目的とする「保有水平耐力設計」などの考え方が採用された 1981 年 6 月の改正があげられる。現在、これ以降の建物について、いわゆる「新耐震基準」の建物として扱われている。なお、新耐震基準以降も兵庫県南部地震などを経験し、法令・指針等は継続的に改善され、現在に至っている。

表 6 過去の地震被害と耐震設計法の変遷

年	地震名（マグニチュード）	特徴
1923 年	関東地震（7.9）	揺れ被害、火災被害、津波被害
<b>1924 年</b>	<b>市街地建築法改正</b>	<b>地震力 <math>K=0.1</math> とした設計法の導入</b>
1944 年	東南海地震（7.9）	津波被害
1946 年	南海地震（8.0）	津波被害
1948 年	福井地震（7.1）	揺れ被害
<b>1950 年</b>	<b>建築基準法制定</b>	<b>許容応力度設計法（<math>K=0.2</math>）の導入</b>
1964 年	新潟地震（7.5）	液状化被害、津波被害
1968 年	十勝沖地震（7.9）	鉄筋コンクリート柱のせん断破壊
<b>1971 年</b>	<b>建築基準法施行令改正</b>	<b>鉄筋コンクリート柱の帯筋間隔の厳格化</b>
<b>1977 年</b>	<b>耐震診断基準・改修指針制定</b>	<b>既存建物の耐震性の評価および改修の方法</b>
1978 年	宮城県沖地震（7.4）	ブロック塀の倒壊、液状化被害
<b>1981 年</b>	<b>建築基準法改正</b>	<b>保有水平耐力設計など大地震時の検討を導入</b>
1983 年	日本海中部地震（7.7）	津波被害、液状化被害
1993 年	北海道南西沖地震（7.8）	津波被害、火災被害
1995 年	兵庫県南部地震（7.3）	ピロティ建物の倒壊、溶接不良部の損傷、旧耐震基準建物の被害
<b>2000 年</b>	<b>建築基準法改正</b>	<b>性能規定の考え方の導入（限界耐力設計法）</b>
<b>2001 年</b>	<b>住宅品質確保促進法制定</b>	<b>耐震等級 1～3 の指針が公表</b>
2001 年	芸予地震（6.7）	揺れ被害
2004 年	新潟県中越地震（7.5）	揺れ被害、地盤変状による被害
2007 年	新潟県中越沖地震（6.8）	揺れ被害
2011 年	東北地方太平洋沖地震（9.0）	連動方広域大規模地震、津波被害、液状化被害、長周期地震動

[1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、平成 14 年 3 月

[2] 鉄道総合技術研究所 編：鉄道構造物等標準設計・同解説 耐震設計、丸善、平成 11 年 10 月