

# 耐震性能設計に向けて

Towards Seismic Performance-Design

井 合 進 (いあい すすむ)  
 京都大学教授 防災研究所

菅 野 高 弘 (すがの たかひろ)  
 港湾空港技術研究所 構造振動研究室長

一 井 康 二 (いちい こうじ)  
 港湾空港技術研究所 主任研究官

## 1. はじめに

土構造物や基礎構造物などをはじめとする地盤工学にかかわりの深い構造物の耐震設計では、震度法に代表される擬似静的極限釣合いに基づく従来の耐震設計法の限界を改善することをねらって、耐震性能を考慮した設計体系の導入の試みが各方面で行われている<sup>1),2)</sup>。この設計体系では、土や地盤が変形するという力学的特徴を考慮して、これらの構造物が地震時に示す変形形態と変形程度に着目する点に地盤工学的な特徴がある。現在、その設計体系は発展途上にあるともいえ、基礎的概念の共通認識、用語の統一などの基本的事項をはじめとして、解決すべき課題も多々残されているようである。本稿では、既往の地震事例に見られる土構造物や基礎の挙動に関して、その力学的ならびに機能上の特徴を再検討し、それらを踏まえて耐震性能を考慮した新たな設計体系の構築を試みた。

## 2. 土構造物・基礎の地震被害例とその特徴

土構造物や基礎の地震被害例には種々のものがあるが、その一例として、直杭式栈橋の地震被害例を図-1に示す。1995年兵庫県南部地震における神戸港高浜栈橋の被害である。直杭式栈橋の標準的な設計では、床版に加わる地震時慣性力を杭頭部に擬似静的に作用させ、地中埋設部への地盤反力を考慮して、杭に加わる曲げモーメントの算定などを行う。地震による地盤変位による作用を無視するという点で、多くの杭基礎の設計とも共通する。1995年兵庫県南部地震では、地中部にゆるい沖積砂層が存在していたこともあって、標準的な設計で想定しているものとは異なり、杭埋設部に対して地盤変位が新たな外力として作用する被害が発生した。

この事例からも理解されたとおり、地盤・構造物系の地震被害は、地盤条件によりその被害形態が著しく異なることが多い。また、土構造物や基礎の地震被害において、工学的観点ないし設計実務上の観点から地震被害とされるのは、著しい変形であって、崩壊ではないことが多い。したがって、このような構造物の耐震設計においては、力の極限釣合いに基づく従来の設計法よりも、構造物の変位や限界応力状態に基づいて構造物の耐震性能を規定する設計法が適している。

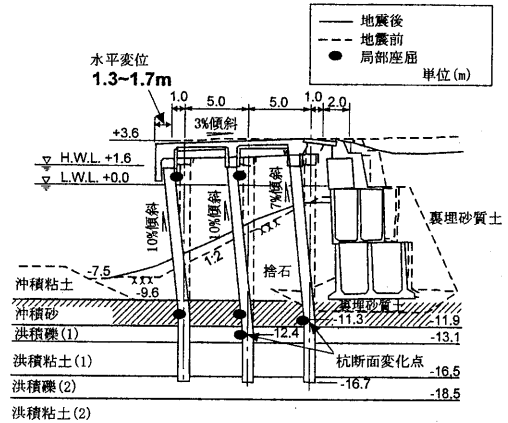


図-1 1995年兵庫県南部地震における神戸港高浜栈橋の被害

また、構造物の機能面から見た場合には、個々の構造物としての機能に着目するだけでなく、並列システムとして機能する構造物系か、直列システムとして機能する構造物系かについて、大局的な特徴を把握しておくことも重要である。例えば、港湾の岸壁などでは、ある岸壁が被害を受けて使用困難になっても、それに隣接する岸壁の機能が維持されていれば、港湾全体としての物流機能が停止することはない。これは、高架橋で連続する道路や鉄道などの系において、一部区間の地震被害が物流全体系に著しい影響を与えるような直列システム群とは、対照的である。耐震性能設計における性能の規定においては、構造物の機能をこのような大局的なシステムとの関連で性格付けすることも重要である。

## 3. 耐震性能設計の流れ

以上のとりまとめから明らかとなっており、土構造物や基礎の耐震設計においては、設計における主要な評価対象として、地盤および構造物基礎の変形とこれに伴う構造物の変形および応力状態を設計パラメーターとして考慮した設計法の導入が必要である。その際に、設計地震動強さのレベルを適切に定義し、そのレベルに応じた許容被害程度を明確に規定する必要がある。設計地震動強さとしては、以下のような2段階レベルの地震動を設計参照レベルとして導入することが多い：

レベル1地震動 (L1)：構造物の設計供用期間中に1

～2度発生する確率を有する地震動

レベル2地震動(L2)：構造物の設計供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度を有する地震動

L1およびL2の両者を用いる2段階設計法は、1) L1に対して設計で規定したレベルの使用性を確保し、2) L2に対する被害形態および被害程度を明確化することをねらっている。この2段階設計法は、L2に対する被害程度規準を満たすのみではL1に対する使用性を確保できない場合、ないしはL1に対する設計のみではL2に対する耐震性能が確保できないなどの状況が想定される場合に有用であり、世界の中では地震活動度が中ないし高レベルの地域がこれに該当する。我が国もこのような高レベルの地震活動度の地域に属していると考えられる。特に注意したい点として、L2のように強地震動に対する設計のみでは、これより低いレベルのL1地震動に対する耐震性能照査において、L2に対するものよりも厳しく設定したL1に対する被害程度規準が、自動的に満たされる保証がない点がある。

許容被害程度は、対象施設の利用形態・構造物システム全体としての機能確保などの諸条件を踏まえて規定し、表一に示すように、あらかじめ構造被害と機能被害に分けて検討しておき、最終段階でこれらを総合的に判断して許容被害程度を設定することにより、許容被害程度の意味づけにおける混乱が避けられるものと考えられる。同表における構造被害は被災した構造物の本格復旧に要する費用・労力に直接関係するもので、地震による直接被害とよばれる。機能被害は、本格ないし応急復旧に要する時間や費用に関係するもので、地震による間接被害ともよばれる。構造物の本来の機能のほか、人命・財産の保全、震災復興拠点、危険物取扱い施設の安全確保などが該当する施設もある。これらの機能を果たす施設の場合には、表一に示すものに追加する独立した検討項目の形で、これら該当機能に関する許容被害レベルを考慮しておき、最終段階でこれらすべてを総合的に判断して許容被害程度を設定することが適当である。

これらの設計地震動レベルおよび許容被害レベルに基づいて、対象構造物に要求される耐震性能のレベルは、表二に定義した耐震性能グレードS, A, B, Cにより規定することが適当と考えられる。耐震性能設計においては、構造物を、これらの耐震性能グレードの要件を満たすように設計するのである。

耐震性能設計における主な手順は図一に示すとおりである。

1) 耐震性能グレードS, A, B, Cの選定：まず第一段階として、表一、二を参照し、設計対象施設の利用形態・港湾全体としての機能確保などの諸条件を踏まえて許容被害程度を考慮して、対象構造物に適した耐震性能グレードを選定する。これとは別に、構造物の重要度に基づいて耐震性能グレードを選定してもよい。構造物の重要度は、設計基準類に示されていることが多い。

利用形態・構造物システム全体としての機能確保などの諸条件によっては、必要に応じて、耐震性能グレード

表一 耐震性能設計における許容被害程度\*

許容被害程度	構造被害(直接被害)	機能被害(間接被害)
被害程度Ⅰ：使用可能	無被害ないし軽微な被害	機能維持ないし軽微な機能低下
被害程度Ⅱ：補修可能	限定被害**	短時間の機能停止***
被害程度Ⅲ：非崩壊限界	著しい被害(崩壊はしない)	長期間の機能停止ないし機能喪失
被害程度Ⅳ：崩壊****	機能喪失	機能喪失

\* 人命や財産の保全、震災復興ないし緊急防火拠点、有害物や危険物取扱いなどの機能を果たす施設の場合には、上表に示す一般的な項目に加え、これらの施設特有の機能の観点からの許容被害程度を考慮すべきである。

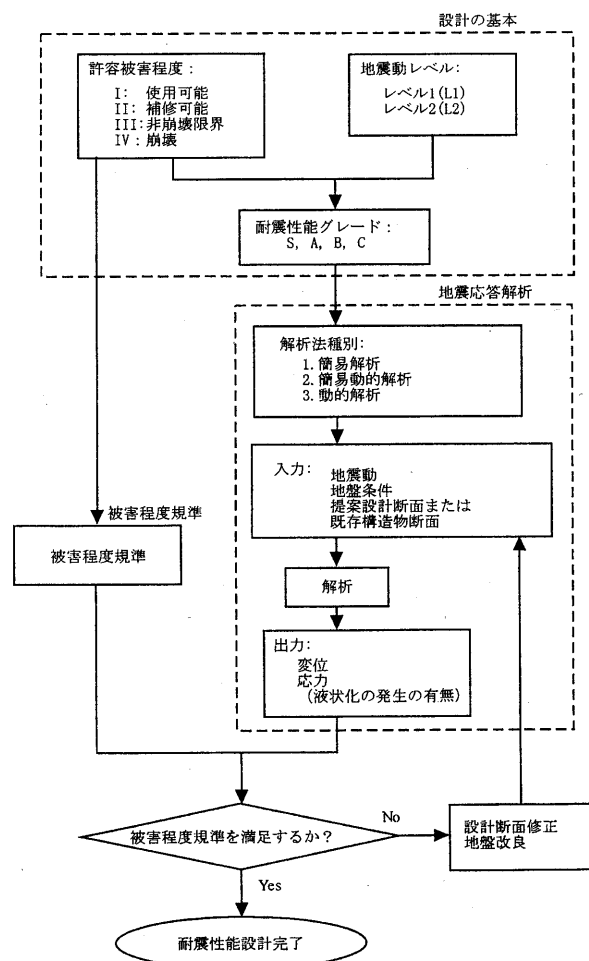
\*\* 限定された塑性応答ないし残留変位。

\*\*\* 短期間の応急復旧完了までの機能喪失。

\*\*\*\* 構造物崩壊時の周辺への影響は著しくない。

表二 耐震性能グレードS, A, B, C

耐震性能グレード	設計地震動	
	レベル1(L1)	レベル2(L2)
グレードS	被害程度Ⅰ：使用可能	被害程度Ⅰ：使用可能
グレードA	被害程度Ⅰ：使用可能	被害程度Ⅱ：補修可能
グレードB	被害程度Ⅰ：使用可能	被害程度Ⅲ：非崩壊限界
グレードC	被害程度Ⅱ：補修可能	被害程度Ⅳ：崩壊



図一 耐震性能設計の流れ

S, A, B, C 以外の耐震性能を導入してもよい。一般に、直列システムとして機能を果たす構造物系の場合には、グレード A ないし B にグレードをそろえた設計が適当な場合が多いと思われるのに対して、並列システムの場合には、グレード S や C のような性能レベルのものも適宜導入していくことにより、全体として合理的な設計が可能となるものと思われる。

2) 被害程度規準の設定：許容被害程度を変位，極限応力状態，塑性率などの工学的パラメーターにより規定する。これについては、「4. 被害程度規準」において解説する。

3) 耐震性能照査：耐震性能照査は構造物の地震応答解析結果として得られる工学的パラメーターと先に設定した被害程度規準との比較により行う。仮に解析結果が被害程度規準を満たさない場合には、原設計断面ないし既存構造物を改良する。液状化対策としての地盤改良も、この段階で必要となる。

#### 4. 被害程度規準

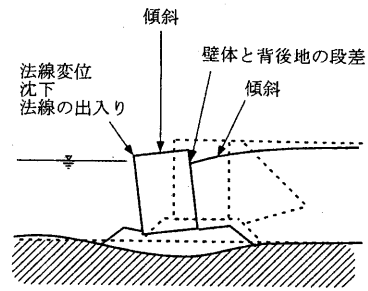
前章で述べたとおり，耐震性能設計においては，許容被害程度を，対象構造物の地震応答特性を考慮して，変位，限界状態応力，ひずみ，塑性率などの工学的パラメーターにより規定する。これを被害程度規準という。被害程度規準は，前章に示した表—1 に基づいて，対象施設の利用形態・構造物群全体としての機能確保などの諸条件も考慮しつつ，主に設計に関して高度の知識・技術を有する専門家が主体となって設定するのがよいであろう。例えば，重力式岸壁の被害程度規準の設定においては，図—3 に示すような照査項目を設定し，それぞれの項目について，被害程度 I～IV までを設定することとなる。

#### 5. 耐震性能照査における解析法種別

耐震性能照査型設計における地震応答解析では，土構造物や基礎の地震時挙動を評価し，その結果があらかじめ設定した被害程度規準を満たすか否かについて照査することを目的とする。解析法の選定においては，それぞれの耐震性能照査に適した解析法を選定する必要があり，一般に，耐震性能グレードが高い施設には高度の解析手法が必要となる。

地震危険度解析，表層地盤の地震応答／液状化解析および土構造物や基礎の地震応答解析には種々のものがある。これらの解析法は，例えば港湾構造物の場合，その難易度および解析能力によって以下のように大別される。

- 1) 簡易解析：滑動限界または弾性応答限界の概略評価，および構造物の残留変位の概略オーダーの評価に適した解析
- 2) 簡易動的解析：より広い適用性があり信頼性もより高い。あらかじめ想定した被害形態のもとでの変位，応力，塑性率，ひずみの評価が可能解析
- 3) 動的解析：最も高度。地震時に発生する被害形態および被害程度の評価が可能解析



図—3 重力式岸壁の照査項目の例

表—3 耐震性能グレードに応じた解析法種別

解析法種別	耐震性能グレード			
	Grade C	Grade B	Grade A	Grade S
簡易解析				
簡易動的解析				
動的解析				
凡例：				
	標準的設計ないし設計の最終段階に用いる			
	概略設計ないし世界でも地震活動が低く設計地震動が小さい場合に用いる			

各耐震性能グレードに対して最も適切と見られる解析法種別を表—3 に示した。この表においては，耐震性能グレードが高い構造物ほど高度の解析法が必要になるということを基本としている。同表に示すとおり，より難易度の低い解析法も，概略設計段階などでは用いることができる。

解析法の例としては，重力式岸壁の場合には，簡易解析では震度法，簡易動的解析では剛体滑動解析または簡易算定チャート，動的解析では非線形有限要素法，などがある。

#### 6. おわりに

土構造物や基礎の耐震性能設計は，力の極限釣合いに基づく既往の設計法の限界を改善することをねらったものである。このため，設計における主要な評価対象として，地盤および構造物基礎の変形とこれに伴う構造物の変形および応力状態を設計パラメーターとした新たな設計体系を示した。この体系では，許容被害程度の設定において，構造被害と機能被害とをあらかじめ分けた形で検討した上で最終的に総合的な被害程度を設定する点，種々の解析法種別を耐震性能グレードなどに関連づけて選定する点，など，土構造物や基礎の耐震設計に適すると思われる要点を盛りこんだ点に特徴がある。

#### 参 考 文 献

- 1) SEAOC: Performance based seismic engineering of buildings, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, 1995.
- 2) PIANC: Seismic design guidelines for port structures, Balkema, 474p., 2001.

(原稿受理 2002.10.30)