

1 1 . 構造物基礎における地盤災害と耐震設計

11.1 はじめに

濃尾地震や関東地震によって構造物に対する近代的な耐震設計の必要性が認識されるようになって以来、数々の地震被害の経験とともに土木構造物の耐震設計法は改良されてきた。基礎構造物に限れば、新潟地震における昭和大桥の落橋を契機として、砂質地盤の液化化に対する検討が行われるようになった。また、鉄道関係では、宮城県沖地震による鉄道構造物の被害を教訓として、基礎の設計に地震時の地盤変位を考慮する応答変位法が導入された。兵庫県南部地震によって、埋立地などの若齢地盤における構造物の基礎はその多数が損傷を受けた。この教訓を生かすべく様々な設計基準において、構造物基礎を対象とした設計方法の改訂が行われた。例えば、道路関係では、①内陸直下型地震を想定した地震動（タイプII地震動）の導入、②地震時保有水平耐力法に基づく基礎構造物の耐震設計、および③地震時に流動化する地盤における基礎の安定に対する検討が主なものとして挙げられよう¹⁾。以下では、特に②および③に関わる設計手法について、各種の基準類における取り扱いを比較するものである。

11.2 部材の非線形性を考慮した基礎の耐震設計

表11.2.1は各種基準類における基礎設計法の比較を示している。ほとんどの設計基準においてレベル2地震動を考慮し、その際の設計計算には部材の非線形性を考慮した解析手法が用いられている。一例として道路橋示方書¹⁾における杭基礎を対象とした計算手法について示す。まず、杭基礎は、フーチングを剛体とし、杭頭がフーチングに剛結されたラーメン構造としてモデル化される(図11.2.1)。また、地盤は地盤バネとして表現され、その特性は、軸方向、水平方向ともにバイリニアの弾塑性挙動を示すものとしてモデル化される(図11.2.2)。杭体の曲げモーメント～曲率関係は、バイリニアもしくはトリリニア型とする(図11.2.3)。この解析モデルに所定の外力を加え、得られた水平震度～水平変位関係から図11.2.4に示すように、応答塑性率を計算する。この応答塑性率と変位量によって基礎の安定性を照査する。今回取り上げたほとんどの設計基準類では同様の計算手法が用いられているが、基礎の設計全体の流れ中でみれば、その位置付けは異なっている。そこで、以下では各基準類における基礎設計法の特徴について述べる。

①「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」¹⁾

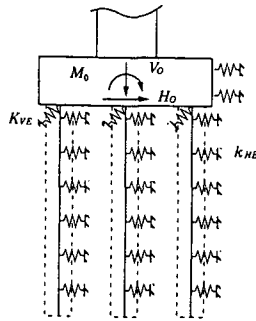
- ・適用対象の基礎形式は、杭基礎、ケーソン基礎、鋼管矢板基礎および地中連続壁基礎である。
- ・レベル1地震動に対しては震度法、レベル2地震動に対しては地震時保有水平耐力法を用いる。
- ・死荷重および慣性力の作用時における基礎の断面力、地盤反力度、変位を算出する。
- ・安定性の照査について、橋脚基部が塑性ヒンジの場合は基礎が降伏しないこと。一方、基礎に非線形性が生じる場合は基礎の応答塑性率が制限値以下となること。また、基礎に生じる変位により橋の安全性が損なわれないこと。

②「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案)」²⁾

- ・適用対象の基礎形式は、直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎、鋼管矢板井筒基礎および連壁井筒基礎。
- ・設計地震動における地盤や基礎の応答値を算出する。
- ・レベル1地震動に対しては、構造物の剛性は線形とし、動的解析によって応答値を求める。レベル2地震動に対しては、構造物の非線形性を考慮した動的解析によって応答値を求める。なお、地盤が軟弱な場合の深い基礎については応答変位法を適用する。
- ・動的解析で算定された上部構造物の慣性力を支えることができるように基礎構造物を設計するが、その降伏強度が上部工のそれより低い場合は、基礎の非線形性を考慮した動的解析により安全性を検討する。
- ・地盤が軟弱で地震時の地盤変位等を無視

表 11.2.1 各種基準類における基礎設計法の比較

基準類	基礎設計法	
	レベル1地震動	レベル2地震動
「道路橋」 ¹⁾	震度法	保有水平耐力法
「鉄道構造物」 ²⁾	動的解析	動的解析、応答変位法 (部材の非線形性考慮)
「港湾施設」 ³⁾	保有水平耐力法 簡便法、弾塑性解析	保有水平耐力法 簡便法、弾塑性解析
「水道施設」 ⁴⁾	震度法	保有水平耐力法
「下水道施設」 ⁵⁾	震度法 応答変位法、変位法	震度法 応答変位法、変位法
「建築指針」 ⁶⁾	震度法	



K_{VE} : 地震時保有水平耐力法に用いる杭の軸方向バネ定数
 K_{HE} : 地震時保有水平耐力法に用いる水平方向地盤反力係数

図 11.2.1 杭基礎の解析モデル¹⁾

できない地盤については応答変位法を用いる。

- ・基礎の安定照査は基礎の応答塑性率、最大応答変位量・残留変位量、部材の損傷レベルを指標にする。
- ・応答値の算定方法は、非線形スペクトル法、基礎を支持バネに置換する解析法、地盤と基礎及び上部構造物の一体解析法および応答変位法から選定して行う。

③「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾

- ・基礎地盤や背後地盤が液状化により大変形をおこさないことが前提条件であり、周辺地盤に大変形が生じることが想定される場合には、あらかじめ必要な対策を施す必要がある。
- ・通常岸壁はレベル1地震動のみ、耐震強化岸壁はレベル1地震動およびレベル2地震動を考慮する。
- ・照査方法はレベル1地震動、レベル2地震動ともに簡便法、弾塑性解析、動的応答解析のいずれかを用いる。
- ・照査の指標は、破壊形態、保有耐力、最大・残留変位、杭の支持力とする。

④「水道施設耐震工法指針・解説」⁴⁾

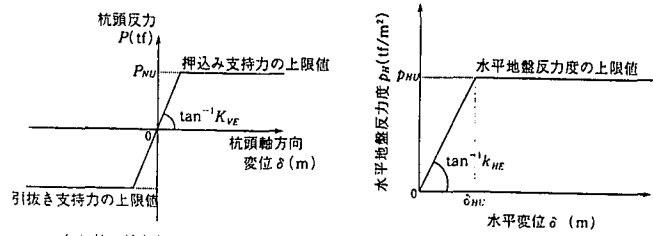
- ・レベル1地震動に対する基礎の耐震設計は震度法による。
- ・レベル2地震動に対する基礎の耐震設計は、レベル1地震動で決定された断面に対して、地震時保有水平耐力法を用いて行う。(レベル2地震動に対する基礎の耐震設計は、地震動を除いては道路橋示方書に準拠)
- ・安定性の照査には、基礎地盤の地盤反力・せん断抵抗、基礎の変位、部材応力を指標として用いる。

⑤「下水道施設の耐震対策指針と解説」⁵⁾

- ・土木構造物として処理場、ポンプ場施設の設備等(汚泥焼却炉、変圧器等の重要設備)の基礎構造物を対象とする。建築物は別途、建築基準に準拠する。
- ・水槽構造物の基礎については、震度法に基づき弾性床土上の梁として杭頭固定条件で検討する。一方、塔状構造物の基礎については、変位法により杭反力および変位量を算出する。
- ・レベル1地震動に対しては許容応力、レベル2地震動に対しては限界状態により基礎の照査を行う。

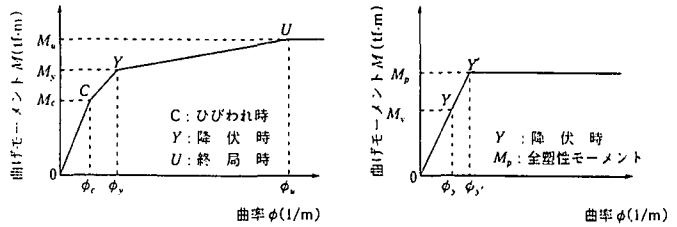
⑥「建築基礎構造設計指針」⁶⁾

- ・標準水平加速度 200gal を用いた震度法により許容応力度で照査する。
- ・許容応力度設計以外にも、地盤と基礎および構造物の組み合わせによって適切な方法で破壊強度設計を



(a) 杭の軸方向の抵抗特性 (b) 杭周辺地盤及びフーチング前面地盤の水平抵抗特性

図 11.2.2 杭の抵抗特性¹⁾



(a) 場所打ち杭、PHC 杭・RC 杭 (b) 鋼管杭

図 11.2.3 杭体の曲げモーメント～曲率関係¹⁾

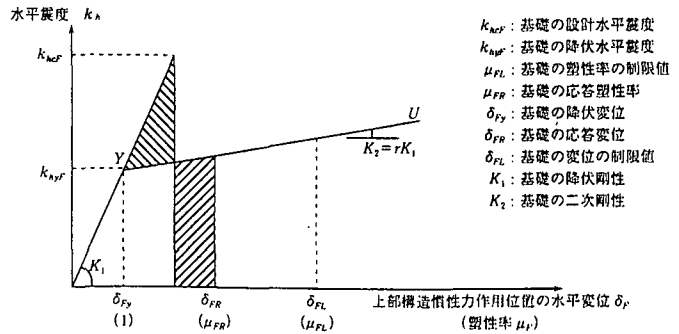


図 11.2.4 水平震度～水平変位関係¹⁾

実施することが推奨されている。また、必要に応じて地盤と構造物の相互作用を考慮した地震応答解析等による検討の追加も推奨されている。

- ・上部構造の部材が許容応力度に達する以前に、基礎構造の部材や地盤が先に許容値に達することがないように配慮する。

11.3 地盤の側方流動の影響を受ける基礎の耐震設計

表 11.3.1 は各種基準類における液状化による地盤の側方流動に対する考え方の比較を示している。阪神・淡路大震災では、埋立地に立地してる構造物の基礎に被害が認められた。特に、護岸の近傍等、周辺地盤において側方流動現象が生じたと考えられる基礎には比較的重度の損傷が見つかった。現在までのところ、地盤の流動化によって基礎構造物が被る損傷のメカニズムや特性については解明されておらず、その影響評価方法についても研究途上である。

①「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」¹⁾

兵庫県南部地震による被災事例より、次の 2 条件のいずれにも該当する場合に流動化の影響を考慮するものとされている。すなわち、1) 臨海部において、背後地盤と前面の水底との高低差が 5m 以上ある護岸によって形成された水際線から 100m 以内の範囲にある地盤、および 2) 液状化すると判定される層厚 5m 以上の砂質土層があり、かつ、当該土層が水際線から水平方向

に連続的に存在する地盤である。また、側方流動の影響は図 11.3.1 に示すように水平力として基礎に与える。ただし、この時、構造物の重量に起因する慣性力は同時に考慮しない。すなわち、地震の主要動と地盤の側方流動が生じる時刻歴は一致しないと仮定している。なお、液状化が生じる場合も同様の考え方に基づいている。したがって、1) 側方流動の発生を仮定したケース、2) 液状化のみの発生を仮定したケースおよび 3) いずれも生じないと仮定したケースそれぞれについて耐震設計を行い、基礎に対してもっとも厳しい条件を設計に用いる。

②「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案)」²⁾

本基準では、原則として水際線背後地盤または地表面が傾斜している地盤で、液状化すると判定された地盤は側方流動の影響を考慮する。ただし、1) 設計想定地震に対して護岸が安定である場合、2) 液状化指数が 15 以上の地盤が設計対象となる構造物付近まで連続しない場合、および 3) 側方流動による地盤変位量と側方流動を考慮する層厚の比が 1/100 以下の場合には側方流動の影響を考慮しなくてもよい。また、側方流動の影響は、それによる地盤変位量を地盤ばねを介して構造物に作用させることにより考慮する(図 11.3.2)。ただし、液状化によって地盤ばねが著しく低下することを考慮しなく

表 11.3.1 液状化による地盤の側方流動に対する考え方の比較

基準類	側方流動の考え方
「道路橋」 ¹⁾	直接的に側方流動力を作用
「鉄道構造物」 ²⁾	地盤変位量を地盤ばねを介して側方流動力として作用
「港湾施設」 ³⁾	側方流動を防止する対策を実施
「水道施設」 ⁴⁾	直接的に側方流動力を作用 地盤変位量を地盤ばねを介して側方流動力として作用
「下水道施設」 ⁵⁾	直接的に側方流動力を作用
「建築指針」 ⁶⁾	液状化時は地盤の横方向地盤反力係数を低減

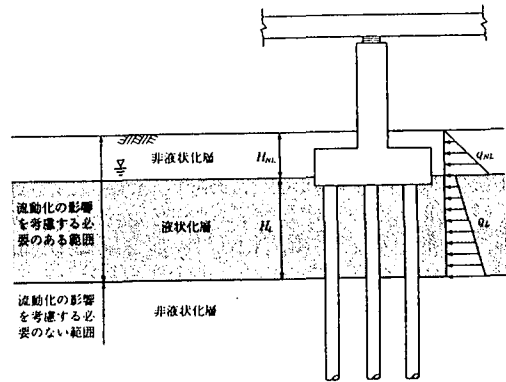


図 11.3.1 側方流動力の算定モデル例

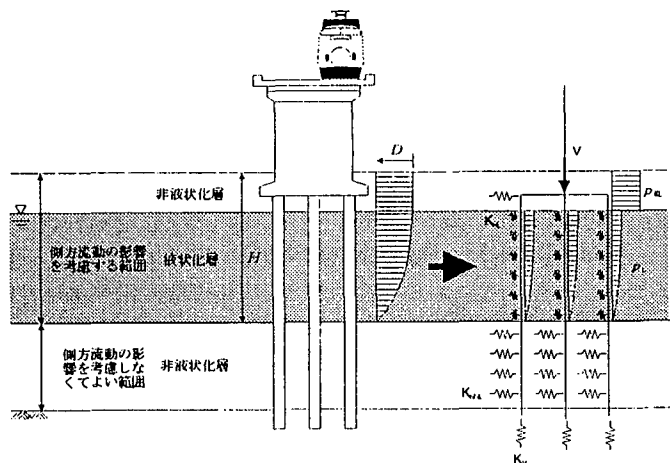


図 11.3.2 側方流動による地盤変位量

てはならない(当面は1/1000)。なお、設計にあたっては、まず、液状化による影響を考慮した耐震性能の照査を行い、この後、その結果から得られる損傷程度を踏まえて側方流動を考慮した耐震性能の照査を行う。

③「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾

基礎地盤や背後地盤が液状化により大変形をおこさないことが前提条件であり、周辺地盤に大変形が生じることが想定される場合には、あらかじめ必要な対策を施す必要がある。

④「水道施設耐震工法指針・解説」⁴⁾

水道施設のうち、建物、橋梁および各種プラント施設の基礎について、液状化による側方流動の可能性のある地盤に建設する場合、側方流動の影響を考慮して基礎構造の耐震設計を行う。側方流動の影響は、基礎に外力(非液状化層:常時の受働土圧、液状化層:土圧係数0.3)を作用させることで考慮する(図11.3.3)。ただし、護岸線からの距離の影響を考慮して土圧は低減される(図11.3.4)。また、側方流動による地中の変位が精度高く予測できる場合は、基礎構造~地盤バネ系モデルに地盤変位を入力する計算手法を用いることができる(図11.3.5)。

⑤「下水道施設の耐震対策指針と解説」⁵⁾

液状化に伴う側方流動が生じると判断された場合は、護岸の強化対策、地中連続壁等による応力遮断、地盤の強化対策による側方流動の防止策を講じることを原則とする。ただし、防止策をとることが著しく困難な場合は、側方流動圧を考慮して基礎の設計を行う。側方流動に対する杭基礎の照査は、側方流動圧を杭体に作用させ、液状化層の地盤反力は期待せず、杭頭部は固定条件で実施する。その際、慣性力等による地震力は考慮しない(図11.3.6)。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996年12月.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案), 1998年11月.
- 3) (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999年4月.
- 4) (社)日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説, 1997年3月.
- 5) (社)日本下水道協会:下水道施設の耐震対策指針と解説, 1997年8月.
- 6) (社)日本建築学会:建築基礎構造設計指針, 昭和63年3月.

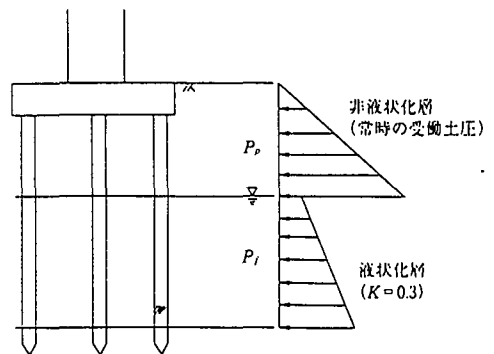


図 11.3.3 側方流動による外力

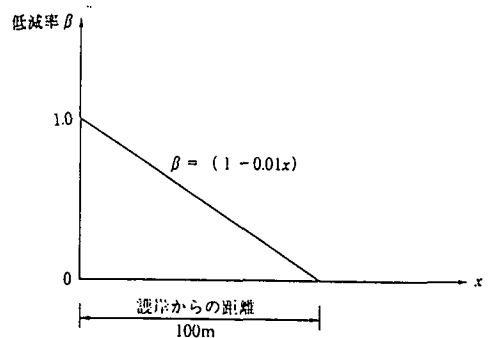


図 11.3.4 護岸からの距離による土圧の低減

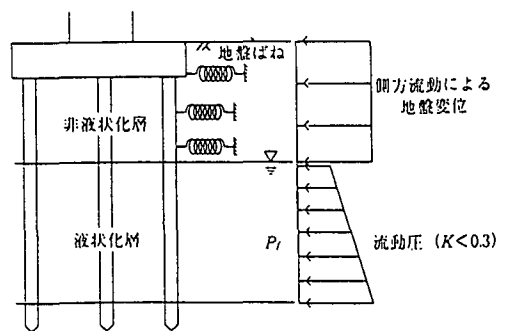


図 11.3.5 側方流動に対する耐震計算モデル

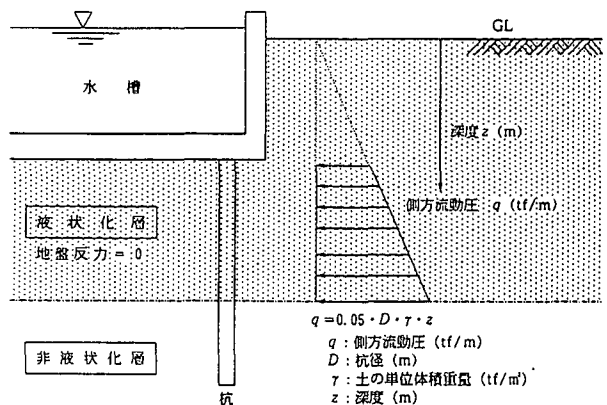


図 11.3.6 側方流動圧のモデル