

## 道路橋基礎構造物の耐震設計

(株)サンユウシビルエンジニアリング／東京都市大学 吉川研究室

基礎とは、建物など上部構造を支え地盤に定着する構造物のことです。①直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎など形式による分類、②鋼管杭、PHC杭など材料による分類、③打ち込み、場所打ちなど工法による分類などがあり、地盤条件、支持構造条件や経済性から適切な形式と形状を選定する。

本論では、図 1.1 に示すような一般的な道路橋の杭基礎に着目し、基礎形式の選定や設計上の留意点を述べると共に、杭基礎の耐震設計事例(荷重漸増解析)を示すものである。

## 目 次

1. 基礎形式の種別と特徴.....	1
2. 基礎構造物の耐荷機構と選定.....	2
2.1. 基礎形式の選定.....	2
2.2. 基礎構造物の耐荷機構.....	3
2.3. 耐震性能規程.....	4
3. 杭基礎の構造設計の手法（道路橋示方書）.....	5
3.1. 設計の流れとポイント.....	5
3.2. 設計計算上の留意点.....	6
4. 耐震設計事例(杭基礎).....	11
4.1. 設計条件.....	11
4.2. 照査の結果.....	17
5. 参考文献.....	24
6. 解析ソフト.....	24

### 【本書の使い方】

本書は、①若手の技術者、②橋梁基礎専門外の方を対象に、「ある程度の水準の成果物を如何に早く仕上げるか」に着目して作成した「橋梁基礎設計のガイドブック」です。よって「専門的な内容や技術的背景」は最小限に留め、「検索性」を重点において記述している。実務においては、本論で参照している「道示」等のページに書かれている内容を理解したうえで、実施することを望みます。

## 1. 基礎形式の種別と特徴

道路橋構造物で構築される基礎の形式は、①直接基礎、②杭基礎、③ケーソン基礎、④鋼管矢板井筒基礎、⑤地中連続壁基礎のように、5種類に分類できる。これら5形式は、①直接基礎を浅い基礎、②～⑤を深い基礎のように大別できる。表 1.1 にこれらの基礎形式の分類と使用頻度、特徴を一覧化し、さらに、比較的多く採用される3つの基礎を図1.1に模式的に図化した。

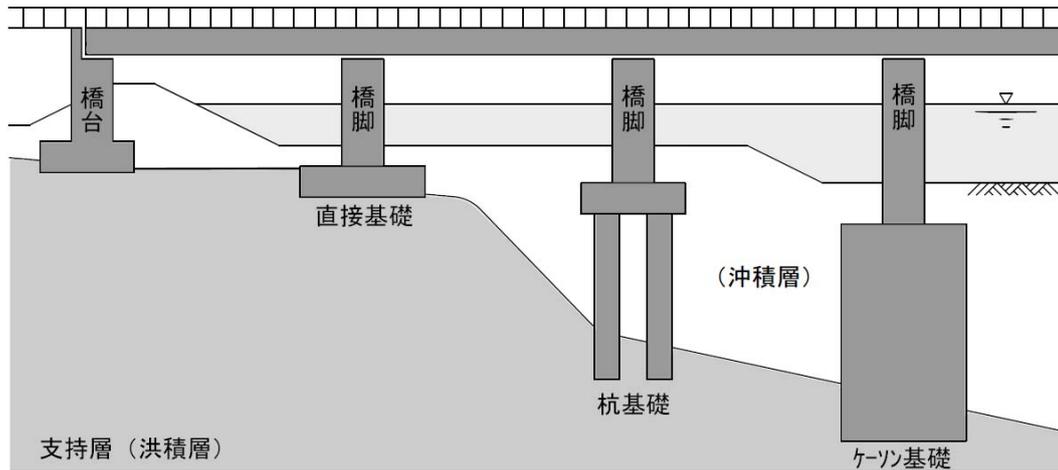


図 1.1 模式図

表 1.1 特徴と使用頻度

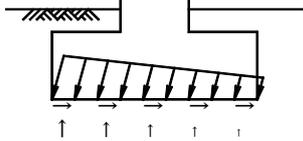
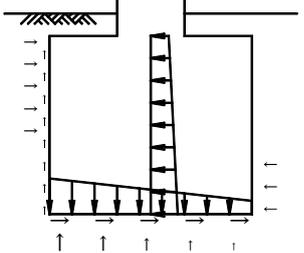
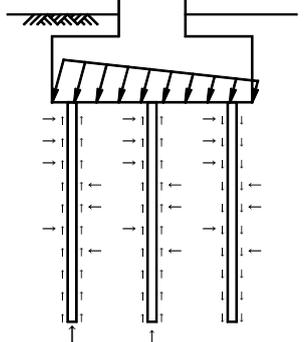
大分類	小分類	使用頻度	特徴
①直接基礎	フーチング基礎	◎	良好な支持地盤が浅い所に存在する場合に用いる基礎。地盤改良を伴う場合もある。
	べた基礎	△	
②杭基礎	既製杭	◎	支持層が深い場合に用いられる基礎。支持方式によって、支持杭と摩擦杭に区分される。 ※深礎杭の耐荷機構はケーソン基礎に似ている。
	場所打ち杭	◎	
	深礎杭	○	
③ケーソン基礎	オープンケーソン	○	掘削方法や沈設方法の違いから、直接基礎等とは区分される。
	ニューマチックケーソン	○	
	設置ケーソン	△	
④鋼管矢板井筒基礎		△	鋼管矢板を筒状に組んだ基礎。 ※耐荷機構はケーソン基礎に似ている。
⑤地中連続壁基礎		△	※耐荷機構はケーソン基礎に似ている。



## 2.2. 基礎構造物の耐荷機構

基礎の設計を行う際のポイントは、①各種部材は健全である、②底版(フーチングなど)は剛体である、という仮定のもとに外力を算定し、安定計算を行う。次に安定計算で用いた外力に対する断面力や応力を算定し、許容値もしくは耐力以内であるかを照査する。

表 2.2 耐荷機構と主な照査項目

		直接基礎	ケーソン基礎	杭基礎	
設計モデル					
基礎の剛性評価		剛体	弾(塑)性体	弾(塑)性体	
地盤抵抗	許容値	<ul style="list-style-type: none"> <li>底面の摩擦力</li> <li>地盤の圧縮強度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>底面の摩擦力</li> <li>地盤の圧縮強度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭周面摩擦力</li> <li>先端支持力</li> </ul>	
	抵抗モデル	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎底面鉛直バネ(kv)</li> <li>基礎底面水平バネ(ks)</li> <li>基礎前面水平バネ(kH) 他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭軸方向バネ(鉛直)</li> <li>水平方向地盤バネ</li> </ul>	
レベル1地震動	安定計算	鉛直力(偏心量含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤反力度 [kN/m<sup>2</sup>]</li> <li>極限支持力 [kN]</li> <li>転倒 [m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉛直支持力度 [kN/m<sup>2</sup>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>押込力 [kN/本]</li> <li>引抜力 [kN/本]</li> </ul>
		水平力	<ul style="list-style-type: none"> <li>滑動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎底面のせん断抵抗力[kN]</li> <li>設計地盤面変位 [mm]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計地盤面変位 [mm]</li> </ul>
	断面計算	各種応力度	<ul style="list-style-type: none"> <li>フーチング [N/mm<sup>2</sup>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>頂版 [N/mm<sup>2</sup>]</li> <li>側壁・隔壁 [N/mm<sup>2</sup>] 他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フーチング[N/mm<sup>2</sup>]</li> <li>杭体 [N/mm<sup>2</sup>]</li> <li>杭頭結合 [N/mm<sup>2</sup>]</li> </ul>
レベル2地震動	安定計算	鉛直力(偏心量含む)	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎底面の浮上り面積</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>押込力 [kN/本]</li> <li>引抜力 [kN/本]</li> <li>回転角 [rad]</li> </ul>
		水平力(部材含む)	---	<ul style="list-style-type: none"> <li>周面地盤の前面塑性率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(水平変位 [mm])</li> </ul>
	断面計算	各種耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>フーチング [kNm, kN]</li> <li>※外力は道示IVp289</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>側壁 [kNm, kN] 他</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フーチング [kNm, kN]</li> <li>杭体 [kNm, kN]</li> <li>杭頭結合 [kNm, kN]</li> </ul>

## 2.3. 耐震性能規程

橋の耐震性能としては、橋全体系の挙動を踏まえて、以下の3つの性能が定義されている。

表 2.3 耐震性能と観点 (道示Vp7,p8, p9 要約)

設計地震動		A種の橋	B種の橋														
対象となる橋		右記以外の橋	防災計画上の位置付けや利用状況等からとくに重要な橋 (高速道路、一般国道など)														
レベル1地震動		<p align="center"><b>【耐震性能1】</b></p> <p align="center">地震によって橋としての健全性を損なわない性能</p> <table border="1"> <tr> <td>安全性</td> <td>落橋に対する安全性を確保する</td> </tr> <tr> <td>供用性</td> <td>地震前と同じ橋としての機能を確保する</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">修復性</td> <td>【短期】機能回復のための修復を必要としない</td> </tr> <tr> <td>【長期】軽微な修復でよい</td> </tr> </table>		安全性	落橋に対する安全性を確保する	供用性	地震前と同じ橋としての機能を確保する	修復性	【短期】機能回復のための修復を必要としない	【長期】軽微な修復でよい							
安全性	落橋に対する安全性を確保する																
供用性	地震前と同じ橋としての機能を確保する																
修復性	【短期】機能回復のための修復を必要としない																
	【長期】軽微な修復でよい																
レベル2地震動	タイプ I (プレート境界型大規模地震)	<p align="center"><b>【耐震性能3】</b></p> <p align="center">地震による損傷が橋としての致命的とならない性能</p> <table border="1"> <tr> <td>安全性</td> <td>【耐震性能1】と同じ</td> </tr> <tr> <td>供用性</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">修復性</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>---</td> </tr> </table>	安全性	【耐震性能1】と同じ	供用性	---	修復性	---	---	<p align="center"><b>【耐震性能2】</b></p> <p align="center">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</p> <table border="1"> <tr> <td>安全性</td> <td>【耐震性能1】と同じ</td> </tr> <tr> <td>供用性</td> <td>地震後橋としての機能を速やかに回復できる</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">修復性</td> <td>【短期】機能回復のため修復が応急修復で対応できる</td> </tr> <tr> <td>【長期】より容易に恒久復旧を行うことが可能である</td> </tr> </table>	安全性	【耐震性能1】と同じ	供用性	地震後橋としての機能を速やかに回復できる	修復性	【短期】機能回復のため修復が応急修復で対応できる	【長期】より容易に恒久復旧を行うことが可能である
	安全性	【耐震性能1】と同じ															
供用性	---																
修復性	---																
	---																
安全性	【耐震性能1】と同じ																
供用性	地震後橋としての機能を速やかに回復できる																
修復性	【短期】機能回復のため修復が応急修復で対応できる																
	【長期】より容易に恒久復旧を行うことが可能である																
	タイプ II (内陸直下型大規模地震)	<table border="1"> <tr> <td>安全性</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>供用性</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>修復性</td> <td>---</td> </tr> </table>	安全性	---	供用性	---	修復性	---	<table border="1"> <tr> <td>安全性</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>供用性</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>修復性</td> <td>---</td> </tr> </table>	安全性	---	供用性	---	修復性	---		
安全性	---																
供用性	---																
修復性	---																
安全性	---																
供用性	---																
修復性	---																

表 2.4 限界状態の組合せ例 (道示Vp37, p42 要約)

塑性化を慮する部材 限界状態	橋脚、橋脚と上部構造、免震支承と橋脚	基礎
基礎	副次的な塑性化にとどまる限界の状態	復旧に支障となるような過大な変形や損傷が生じない限界の状態
フーチング	力学的特性が弾性域を超えない限界の状態	

### 3. 杭基礎の構造設計の手法 (道路橋示方書)

比較的良く用いられる杭基礎(橋脚)の構造設計手法を取り上げ、設計上の留意点を紹介する。

#### 3.1. 設計の流れとポイント

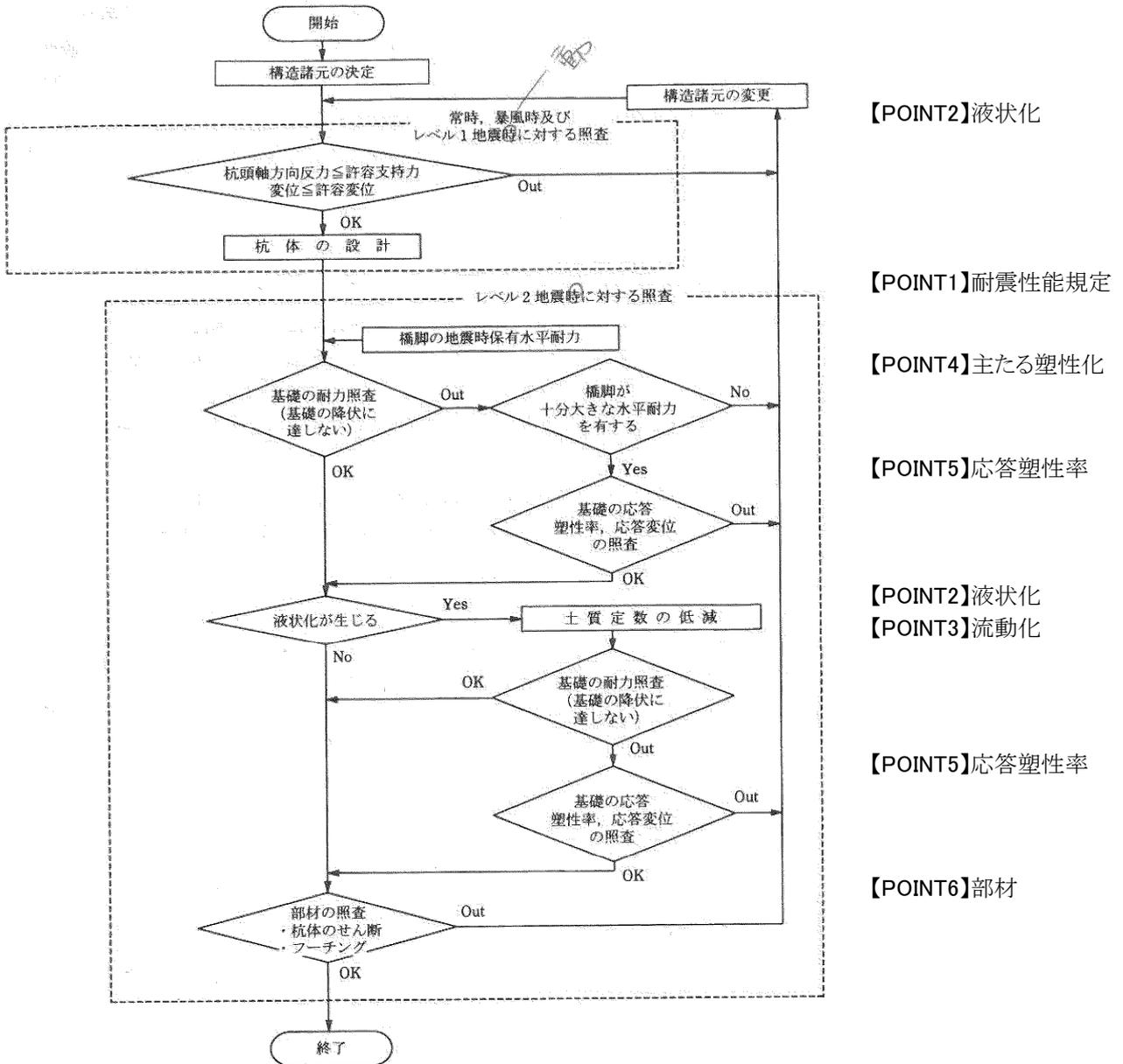


図 3.1 橋脚の杭基礎の設計計算フロー (道示IV350より)

### 3.2. 設計計算上の留意点

#### 【POINT1】耐震性能規定

- (1) 基礎の降伏をどの時点とするか(耐震性能規定)を定義するのが一番重要なことである。  
道示で定義されている杭基礎の降伏は、次のいずれかに達する状態と定義している。(道示Vp217)
  - ①全ての杭において杭体が降伏する。
  - ②一列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值に達する。
- (2) 杭頭結合条件  
レベル1地震動の照査 : 剛結 と ヒンジ の厳しい方で決める。(道示IVp388)  
レベル2地震動の照査 : 剛結。(道示Vp214)  
※フーチングの配筋のしやすさなどに配慮して、杭径が ①細径はA結合、②太径はB結合 とする場合が多い。
- (3) 杭先端条件  
有限長( $1 < \beta L < 3$ )、半無限長( $\beta L \geq 3$ )にかかわらず、概ね先端ヒンジと考えれば良い。(道示IVp376)  
※杭長は、 $3/\beta$ が望ましいが、最近は変位法で計算するので絶対確保では無い。
- (4) 橋脚の地震時保有水平耐力法  
橋脚の設計を地震時保有水平耐力法で行う場合は、基部の終局耐力相当の震度を算定し基礎に載荷すれば良い。ただ、近年は橋脚の設計を非線形時刻歴応答解析で照査する機会が多いが、その際は下図のフローにより、橋脚の震度を算定すると良い。

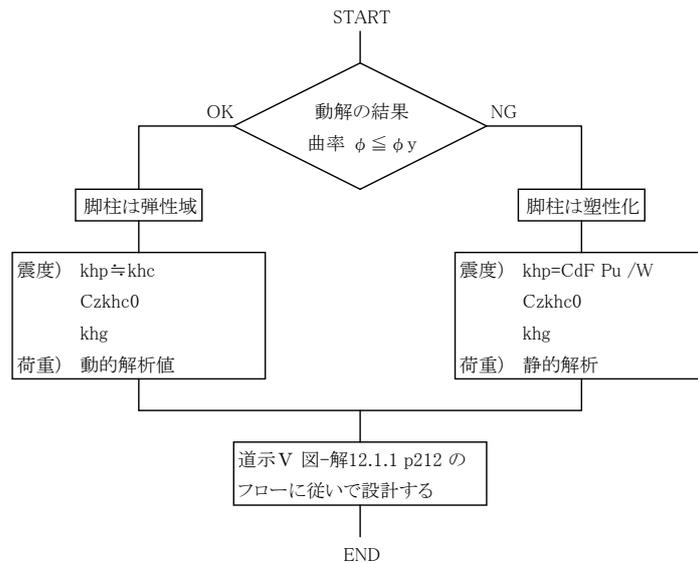


図 3.2 動的解析を用いる場合の基礎の設計フロー

## 【POINT2】液状化

- (1) 粘性土とシルト質土  
液状化は砂質土の間隙水圧上昇により起こる現象だが、ごく軟弱な粘性土とシルト質土も液状化と同じく土質定数の低減の対象となる。(道示Vp120)
- (2) 低減係数  
地盤反力係数、地盤反力係数の上限値(受働土圧)および最大周面摩擦力度という3つの土質定数に低減係数DEを乗じて評価する。(道示Vp125～126)  
なお、低減係数は、タイプⅠ、タイプⅡそれぞれで算定されるが、算定値に対して小さい値を用いる事が多い。
- (3) 耐震設計上土質定数を零あるいは低減させる土層は、土かぶり圧は考慮して、受働土圧に上限を算定する。(道示Vp126)
- (4) 耐震設計上土質定数を零の場合は、道示Vp29 図-解 4.6.3 の趣旨を理解すること。
- (5) 固有周期算出時の橋梁モデル  
設計地震力を少なめに評価する可能性があるため、固有周期算定時は土質定数の低減は見込まない。(道示Vp55～57)
- (6) レベル2地震動に対する液状化時の照査  
レベル2地震動の照査は、非液状化時と液状化時の両者の耐震性能照査を行う。(道示Vp119)  
これは、「橋脚基礎の照査手順」に示すとおり、
  - ・非液状化時：基礎は降伏させない(主たる塑性化は生じさせない)
  - ・液状化時：基礎は降伏させても良いが、応答塑性率を許容値以内に入れると要求性能が異なるからである。
- (7) 経済設計  
液状化時は地盤定数の低減などにより、降伏するケースが多いが、下図の様な模式図をイメージすると経済設計が行える。

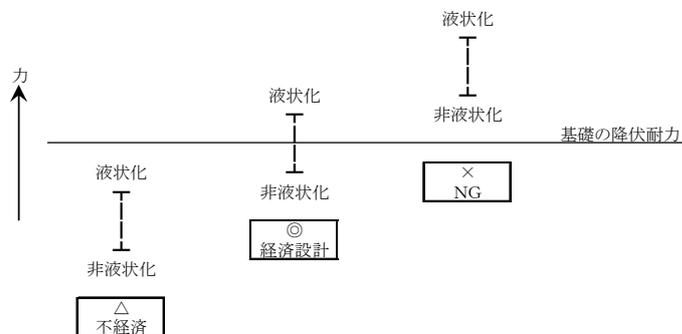


図 3.3 経済設計のポイント

- (8) レベル1地震動に対する液状化時の照査  
レベル1地震動の照査は、概ね液状化時のみの耐震性能照査で良い。  
これは、レベル2地震動とは異なり要求性能に差は無いので、低減係数DEにより減じられた、許容支持力、地盤反力係数で照査すれば、安全側の設計を行えるからである。
- (9) 橋台  
橋台基礎は、①液状化が生じてない場合の被災例が少ない、②抗土圧構造物で背面土圧の影響が支配的なので落橋に至る可能性が低い、などの理由により液状化の場合のみレベル2地震動の照査対象とする。(道示Vp105)  
ただし、橋長 25m 以内の単径間の橋は、省略して良い。(道示Vp106)
- (10) フーチングの前面抵抗  
直接基礎、レベル1地震動照査時の杭基礎、レベル2地震動照査時で液状化する地盤などは、考慮しないのが一般的である。

【POINT3】流動化

- (1) 臨海部において、①水際線からの距離が 100m 以内、②水底との高低差が 5m 以上、のいずれかの条件を満たす場合のみ考慮する。
- (2) 地震発生→液状化発生→液状化進展→流動化 というプロセスで起こる現象といわれているので、流動化の影響と慣性力は同時に考慮しなくて良い。(道示 Vp129)

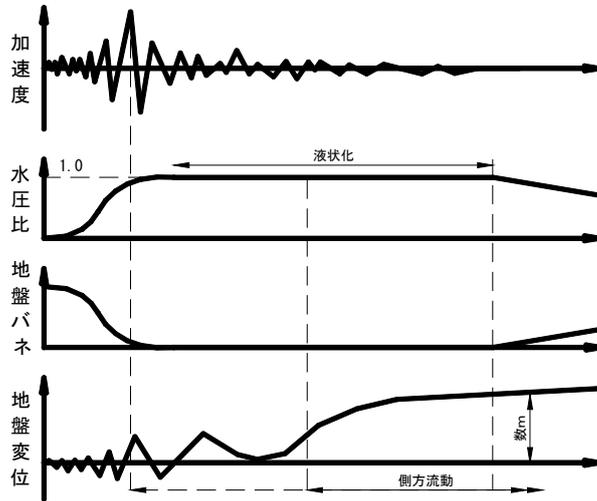


図 3.4 地震動と流動化のプロセス

- (3) 道路橋構造物では、いわゆる「土圧法」にて照査を行う。(道示 Vp130)  
 ※港湾構造物や河川構造物などは、応答変位法や地盤のFEM解析を推奨している。

【POINT4】主たる塑性化

- (1) 基礎の補修は困難なため、主たる塑性化は橋脚基部とする。(道示 Vp34、103 など)
- (2) 大きな余裕があるとは、 $1.5 \times \text{脚柱慣性力} \leq \text{脚柱耐力}$  で判断すればよい。(道示 Vp105)

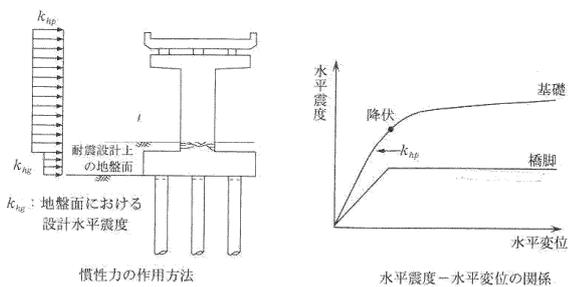


図 3.5 橋脚基部が主たる塑性化の場合

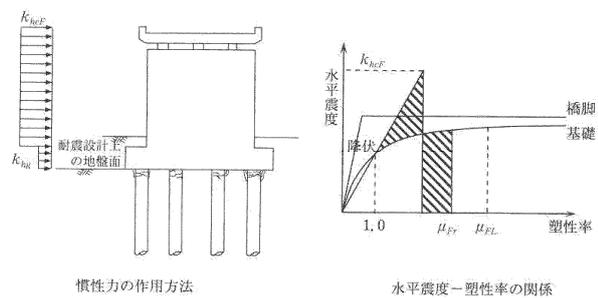


図 3.6 基礎が主たる塑性化の場合

【POINT5】 応答塑性率の照査

道路橋の橋脚基礎は、修復性の問題(施工性やコストの問題)で、レベル2地震動に対してでも「副次的な塑性化」ということで、降伏させないのを基本としているが、①壁式橋脚のように曲げ耐力が大きい場合や、②液状化が生じる場合などの場合でも塑性化させないのは合理的な設計とはいえない。

よって、上記の①②のような場合は「応答塑性率の照査」を行い、制限値以内に入っていれば良いとしている。

(1) エネルギー一定則

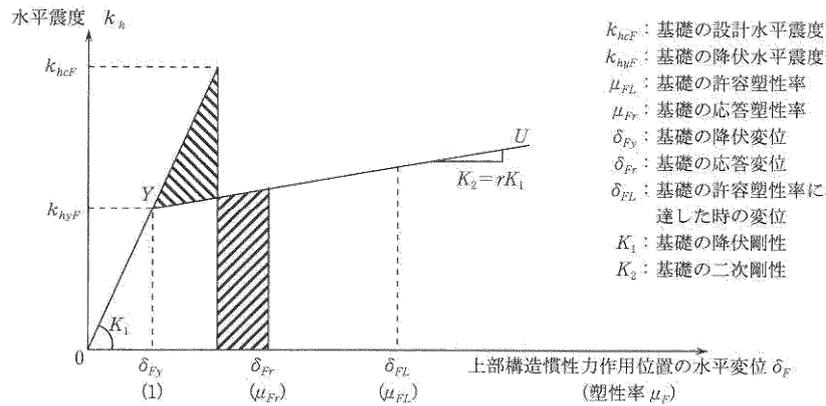


図 3.7 基礎の応答塑性率の算定法 (道示 Vp219 より)

(2) 代表的な許容塑性率

表 3.1 代表的な応答塑性率

	許容塑性率	出展先
橋脚杭基礎	4	道示 Vp220
橋脚ケーソン基礎	$\mu\alpha = 1 + \frac{\delta u - \delta y}{\alpha \delta y}$	道示 Vp220 道示 Vp150
橋台基礎	3	道示 Vp228 他

【POINT6】 部材

(1) 杭体の非線形モデル

代表的な杭体の曲げモーメント-曲率関係を下図に示す。

表 3.2 杭体の曲げモーメント-曲率関係(道示IVp412より)

非線形モデル	①鉄筋コンクリート (場所打ち杭・PHC杭、ケーソン基礎他)	②鋼材(鋼管杭、鋼管ソイルセメント杭他)
	<p>曲げモーメント M (kN·m)</p> <p>曲率 <math>\phi</math> (1/m)</p> <p>C: ひびわれ発生時 Y: 降伏時 U: 終局時</p>	<p>曲げモーメント M (kN·m)</p> <p>曲率 <math>\phi</math> (1/m)</p> <p>Y: 降伏点 Mp: 全塑性モーメント</p>
軸力	押込み側 : 死荷重 引抜き側 : ゼロ	死荷重

(2) フーチングの断面計算の有効幅

表 3.3 フーチングの設計断面(道示IVp225~より)

		レベル1(震度法)		レベル2(保耐法)	
		有効幅(以下)	全幅	有効幅(以下)	全幅
曲げ	上側引張	●	—	●	—
	下側引張	●	—	—	●
せん断	—	—	●	—	●
	●	—	—	—	●

上側引張	$b=tc+d \leq B$  道路橋示方書IV(P225)	$b=tc+1.5d \leq B$  道路橋示方書IV(P226)※
	$b=tc+2d \leq B$  道路橋示方書IV(P225)	$b=B$  道路橋示方書IV(P225)※
せん断	 左同	左同

①デープビームの割増

下側引張 : 割増係数  $C_{dc}$  が支配的であるため、せん断補強筋はほとんど効かない。(Cds が小さいため)  
 上側引張 : せん断補強筋も多少効く。

②せん断補強筋の制限値

$\rho_w < 0.3\%$  D25-2本/m(500)@250 以上に出来ない。

③H8道示から大幅に改訂されているので、注意が必要。

#### 4. 耐震設計事例（杭基礎）

前述の内容を踏まえて、道示に準拠した道路橋橋脚基礎（場所打ち杭）の耐震設計事例を紹介する。ここでは、橋脚本体（レベル1、レベル2地震動）とフーチング（レベル1）の設計が完了し、第Ⅲ種地盤を対象とした杭体の耐震設計事例を提示するものである。

なお、フーチング（レベル2地震動）の設計は割愛するが、レベル1地震動で外形を決めればレベル2地震動では主鉄筋、せん断補強筋の鉄筋径を1～2ランク上げれば入る場合が多く、その点に留意すればスムーズな設計ができるであろう。

##### 4.1. 設計条件

###### (1) 耐震設計上の条件

- ①重量度区分： B種の橋 ∴耐震性能1、耐震性能2
- ②地域区分： A地域
- ③地盤種別： Ⅲ種地盤
- ④各種設計震度

表 4.1 各種設計震度

		橋軸方向	直角方向	備考	
レベル1地震	Czkh	0.30	0.30	道示 Vp83～より	
レベル2地震	固有周期	T [sec]	1.18	1.04	固有周期の計算より
	地域補正係数	Cz	1.00	1.00	道示 Vp19～より
	タイプ1	Czkhc0	1.00	1.00	道示 Vp89～より
	タイプ2		1.50	1.50	//
	タイプ1	khG	0.40	0.40	//
	タイプ2		0.60	0.60	//
	基礎照査用震度	khp	0.68	1.49	道示 Vp102より
	脚柱照査用震度	CsCzkhc0	0.49	0.60	脚柱の設計より
	上部工分担重量	Wu [kN]	6,330	4,740	//
	脚柱重量	Wp [kN]	3,393	3,393	//
	等価重量	W [kN]	8,027	6,437	//
脚柱耐力	Pu [kN]	4,957	8,722	//	
耐力の判定		耐力に余裕がない	耐力に余裕がある		

###### (2) 形式、材料強度

表 4.2 形式、材料強度

①上部構造形式	5径間連続鋼版桁橋	---
②支承条件	地震時水平反力分散支承（橋軸、直角共に）	---
③橋脚形式	RC造T型橋脚	$\sigma_{ck} = 24$ [N/mm <sup>2</sup> ] SD345
④基礎形式	場所打ち杭	$\sigma_{28} = 30$ [N/mm <sup>2</sup> ]※ SD345

※場所打ち杭の  $\sigma_{ck}$  は水中コンクリートとして取り扱う（道示IVp150より）

(3) 基礎形式と土質条件

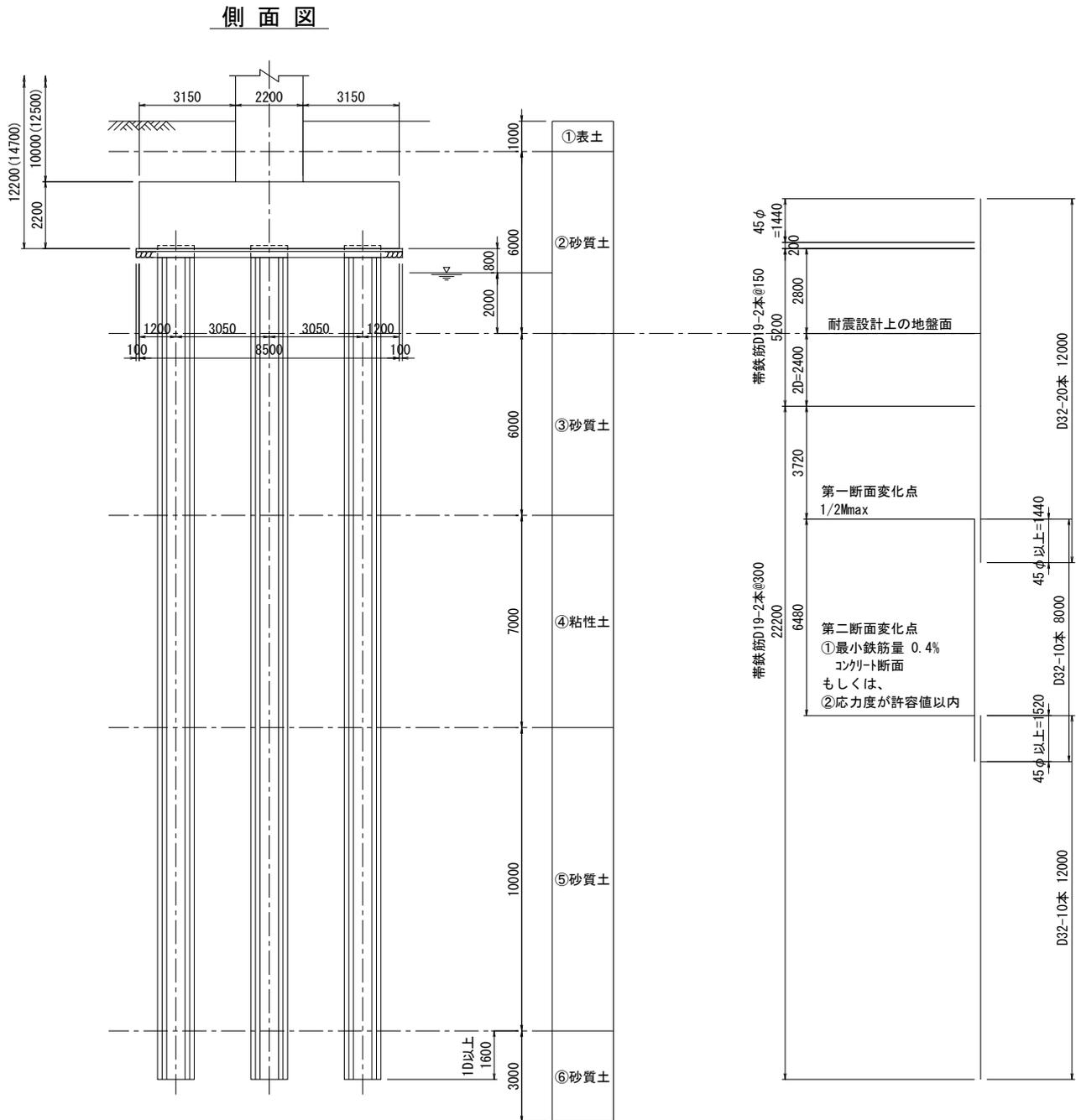


図 4.1 設計対象基礎(その1)

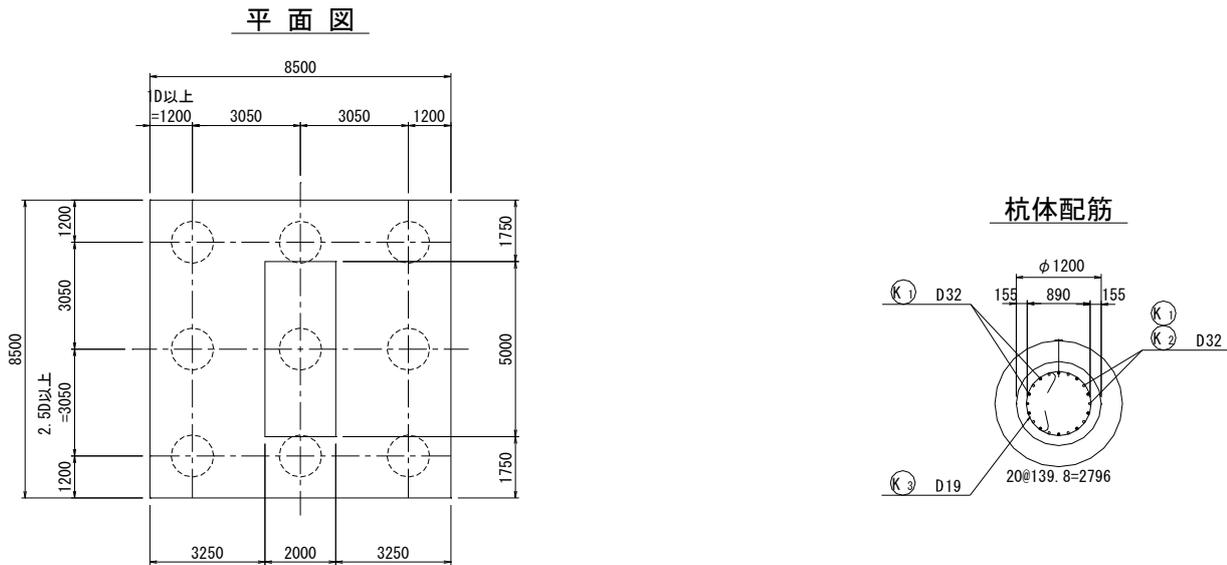


図 4.2 設計対象基礎(その2)

**【解説】****●杭長の決め方**

通常は支持層に1D程度以上貫入させた長さに対して 500mm 単位で切り上げる。なお、PHC杭のような既製杭は、製品の長さ(5m 以上 1m 単位)で決める場合もある。

**●杭頭結合**

レベル2地震時の場合は「杭頭剛結」という仮定で荷重漸増解析を行うので、①定着長の確保(道示IVp398 の構造細目)、②杭頭結合部の耐力 $\geq$ 杭体の耐力 が重要となる。

**●軸方向鉄筋(場所打ち杭)**

①かぶり :  $120(\text{道示IVp419}) + D19(\text{帯鉄筋径}) + D32(\text{軸方向鉄筋径})/2 = 155 \text{ mm}$  以上とする。

②鉄筋の空き :  $3\phi = 96$  もしくは 100mm 以上が望ましい。

③本数 : 放射状に配置するため4の倍数が望ましい。(4の倍数が無理ならば、偶数が良い。)

③鉄筋径 : D22(最低径)~D35 までを用いることが多い。

※D51 を用いる場合も希にあるが、かぶりが厚くなりすぎないので D38 程度のほうが有利となることが多い。

**●軸方向鉄筋の断面変化(場所打ち杭)**

① $1/2M_{max}$  以深、②施工から決まる最小断面もしくは応力度許容値以内の順で決める事が基本だが、施工性に配慮して、定着の鉄筋が使えらる長さ、等を意識して決めるとより良い。(杭基礎便覧 p201 などを参考にする)

※レベル2地震時は、杭頭部に大きな曲げが発生するので、杭頭付近の断面はレベル2地震時で決まる場合が多い。

※一方、地中部曲げはそれほど大きくなりないので、レベル1地震時などで決めれば概ね問題は無い。

※場所打ち杭の場合は、施工上の制約からイモ継ぎ(ラップ位置を千鳥にしない事)とする場合が多い。

**●帯鉄筋の断面変化(場所打ち杭)**

場所打ち杭の場合、道示IVp418 の細目を満たすように決めるが、本計算例のようにレベル2地震時においてせん断耐力が欠落する事が多いので、径を上げる場合が多い。範囲は、「耐震設計上の地盤面から杭径の2倍程度の範囲まで補強するのがよい」(道示IVp423)で「フーチング下面」とならない場合があることに注意する。

**●帯鉄筋の加工方法(場所打ち杭)**

本計算例では、半円フックを用いているが、施工的な配慮で「フレア溶接」を用いる場合も多い。

**●平面配置**

杭基礎の場合のフーチングサイズは、最小縁端距離と最小中心間隔でコントロールされる場合が多い。(道示IVp352 より)

※フーチングを平行四辺形にする場合もこの規程を満たすよう注意する。

※支持力が厳しい場合は、中心間隔をひろげると有効となる場合が多い。

※フーチングは剛体判定を根拠に剛体として計算するので、中抜きする場合は何処を抜いても良いが、定性的に荷重が大きい脚柱直下の杭を抜くのは望ましく無い。

## ①水平抵抗

	平均 N値	粘着力 C [kN/m <sup>2</sup> ]	内部摩 擦角φ [度]	単位体 積重量 γ [kN/m <sup>3</sup> ]	低減係数		層厚 [m]	周面摩擦力 F [kN]		水平方向地盤反力係数 kH [kN/m <sup>3</sup> ]			水平方向地盤反力係数の上限値 pHu [kN/m <sup>2</sup> ]				土被圧 [kN/m <sup>2</sup> ]	受働土 圧係数 Kep	受働土 圧強度 [kN/m <sup>2</sup> ]			
					レベ/1地盤	レベ/2地盤		常時	レベ/1地盤 液状化時	レベ/2地盤 液状化時	常時	非液状化 1列目	非液状化 2列目以降	液状化 1列目	液状化 2列目以降	ηpαp				1列目	2列目以降	
①表土	-	-	-	18	対象外	対象外	1.0	-	-	-	-	-	-	-	0.0	-	-					
②砂質土	5	0	23	18	対象外	対象外	3.2	75.4	25.1	0.0	6,370	6,370	0	2,542	485.8	242.9	0.0	0.0	75.6	2,528	191.1	
																						1/3
③砂質土	8	0	25	9	2/3	1/3	6.0	904.8	602.6	301.3	15,302	30,604	20,382	10,191	759.6	379.8	253.0	126.5	108.0	2,767	298.8	
④粘性土	6	36	0	8	1	1	7.0	1583.4	1583.4	1583.4	11476	22,952	22,952	22,952	1139.5	569.7	379.4	189.7	162.0	1,000	448.3	
⑤砂質土	14	0	29	9	1	1	10.0	2638.9	2638.9	2638.9	26778	53,556	53,556	53,556	2614.2	1307.1	2614.2	1307.1	308.0	3,339	1028.4	
																						1
⑥砂質土	50	0	40	10	1	1	1.6	1206.4	1206.4	1206.4	95635	191,270	191,270	191,270	4694.5	2347.2	4694.5	2347.2	308.0	5,996	1846.8	
																						1
							27.4	6597.4	6119.2	5730.0												

注1. 本計算例では、橋軸方向、直角方向共に同じ杭配置であるため、群杭効果(ηpαp)が同じであるため1方向分の計算となっているが、杭配置が異なる場合はそれぞれ算定すること。

注2. 低減係数は0でも土被圧は変わらないので、受働抵抗算定時は非液状化の算定値に対して低減係数(DE)を乗じてkH、pHuを算定している。

杭の特性値(換算載荷幅算出) β = 0.194641 [m<sup>-1</sup>]

②鉛直抵抗

	先端支持力 R	周面摩擦 Pu	極限支持力 Ru	Ws	W	許容押込み力		許容引抜き力		押込支持力の上限値		引抜支持力の上限値	
						安全率	Ra	安全率	Ra	Rpu	min(Ru, Rpu)	Ppu	min(Pu+W, Ppu)
常時	3,393	6,597	9,990	281	458	3	3,059	6	1,558	---	---	---	---
地震時 非液化化時	3,393	6,597	9,990	281	458	2	4,677	3	2,658	28,552	9,990	5,480	5,480
レベル1地震 液化化時	3,393	6,119	9,512	281	458	2	4,438	3	2,498	---	---	---	---
レベル2地震 //	3,393	5,730	9,123	281	458	---	---	---	---	28,552	9,123	5,480	5,480

杭軸方向鉛直バネ定数  $K_V = a \cdot (A_p \cdot E_p) / (L) = 575,634$  [kN/m] ※補正係数 $a$ は、道示IVp374より工法によって変わる。(周面摩擦力の考慮分だと理解すればよい。)

注1.  $R = q_d \cdot A_p = 3000 \cdot \pi / 4 \cdot 1.2000^2$  ※杭先端支持力の  $q_d = 3000$  [kN/m<sup>2</sup>]は、道示IVp358よりで、杭種・工法によって変わる。

注2.  $W_s, W$ は、杭体重の補正のために用いる値で、「場所打ち杭」のように杭体重を無視できない杭の場合に見込む。

$W_s$  : 杭で置き換えられる部分の土の有効重量[kN]  $W_s = A_p \cdot \Sigma(\gamma_i \cdot L_i)$

注3. 許容支持力

極限支持力  $R_u = q_d \cdot A_p + U \cdot \Sigma(L_i \cdot f_i)$

許容押込み力  $R_a = \gamma / n \cdot (R_u - W_s) + W_s - W$  ※設計の現場では、「載荷試験を行うことが少ない」ので  $\gamma = 1.0$  とすればよい。(道示IVp355より)

許容引抜き力  $P_a = 1 / n \cdot P_u + W$  ※常時においては引抜き力が生じないように設計するのがよい。(道示IVp364より)

注4. レベル2地震時に於いては、極限支持力(安全率=1.0)を上限値とするため、地盤の塑性化より早く杭体が軸圧縮力等により降伏する場合がある。よって地盤から決まる支持力と杭体から決まる支持力の下限値を用いる。

場所打ち杭の場合  $R_{pu} = 0.85 \cdot \sigma_{ck} \cdot A_c + \sigma_y \cdot A_s$  ,  $P_{pu} = \sigma_y \cdot A_s$

注5. その他

①圧密沈下の恐れがあるような地盤では、「負の周面摩擦力」を考慮して検討する。(道示IVp364より)

②杭間隔が規程の2.5D以下にする場合などは、「群杭効果」を考慮して検討する。(道示IVp369)

(4) 作用荷重

①常時、レベル1地震時

表 4.3 フーチング底面における作用外力(レベル1地震時)

		Vo [kN]	Ho [kN]	Mo [kNm]	設計水平 震度
常時	上部工死荷重	9,700	0	0	
	橋脚躯体	3,393	0	0	
	フーチング	3,895	0	0	
	上載土砂	2,205	0	0	
	合計	19,193	0	0	
レベル1 (橋軸方向)	上部工死荷重	7,100	1,930	23,545	0.30
	橋脚躯体	3,393	1,018	8,174	
	フーチング	3,895	1,169	1,285	
	上載土砂	2,205	0	0	
	合計	16,593	4,116	33,004	
レベル1 (直角方向)	上部工死荷重	7,100	1,420	20,873	0.30
	橋脚躯体	3,393	1,018	8,174	
	フーチング	3,895	1,169	1,285	
	上載土砂	2,205	0	0	
	合計	16,593	3,606	30,332	

②レベル2地震時

表 4.4 フーチング底面における作用外力(レベル2地震時)

		Vo [kN]	領域①			領域②			作用位置 [m]
			Ho [kN]	Mo [kNm]	設計水平 震度	Ho [kN]	Mo [kNm]	設計水平 震度	
レベル2 (橋軸方向)	上部工死荷重	7,100	4,304	52,514	0.68	4,304	52,514	0.68	12.200
	橋脚躯体	3,393	2,307	18,527		2,307	18,527		8.030
	フーチング	3,895	1,059	1,165	0.272	2,337	2,571	0.60	1.100
	上載土砂	2,205	0	0	-	0	0	-	-
	合計	16,593	7,671	72,206		8,949	73,612		
レベル2 (直角方向)	上部工死荷重	7,100	7,063	103,820	1.49	7,063	103,820	1.49	14.700
	橋脚躯体	3,393	5,056	40,596		5,056	40,596		8.030
	フーチング	3,895	2,321	2,554	0.596	2,337	2,571	0.60	1.100
	上載土砂	2,205	0	0	-	0	0	-	-
	合計	16,593	14,440	146,970		14,455	146,987		

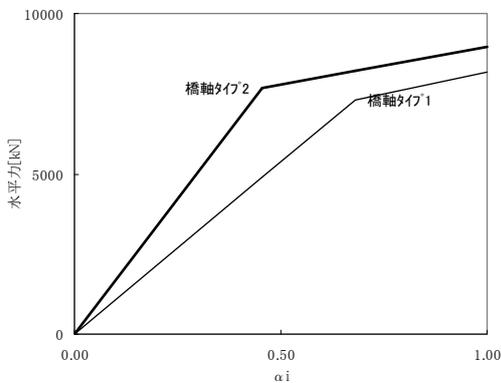


図 4.3 荷重ステップと水平力(橋軸方向)

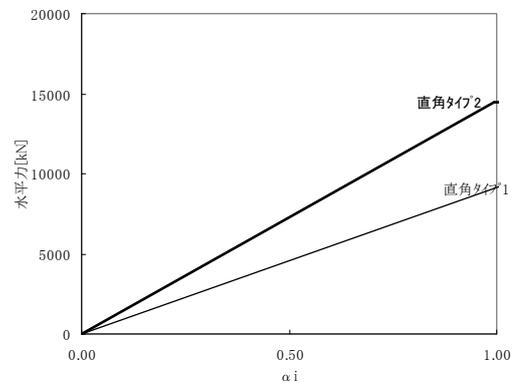


図 4.4 荷重ステップと水平力(直角方向)

※上図のとおり、タイプ II の方が明らかに不利なため、タイプ II のみで検討を行う。

## 4.2. 照査の結果

## (1) 常時、レベル1地震時

表 4.5 結果一覧表(常時、レベル1地震時)

	常 時			暴風時, レベル1地震時		
	荷重名称	常時		荷重名称	地震時	
安定計算	V <sub>o</sub>	kN	19193.0	V <sub>o</sub>	kN	16593.0
	H <sub>xo</sub>	kN	0.0	H <sub>xo</sub>	kN	0.0
	M <sub>yo</sub>	kN.m	0.0	M <sub>yo</sub>	kN.m	0.0
	H <sub>yo</sub>	kN	0.0	H <sub>yo</sub>	kN	4116.0
	M <sub>xo</sub>	kN.m	0.0	M <sub>xo</sub>	kN.m	33004.0
	変位	mm	0.00 ≤ 15.00 OK	変位	mm	10.14 ≤ 15.00 OK
	最大反力	kN	2132.6 ≤ 3059.0 OK	最大反力	kN	4038.3 ≤ 4438.0 OK
	最小反力	kN	2132.6 ≥ 0.0 OK	最小反力	kN	-350.9 ≥ -2498.0 OK
	PH	kN	0.0	PH	kN	457.3
	MT	kN.m	0.0	MT	kN.m	795.2
	M <sub>m</sub>	kN.m	0.0	M <sub>m</sub>	kN.m	1051.5
杭体応力度	曲げ応力度			せん断応力度		
	荷重名称	地震時		荷重名称	地震時	
	σ <sub>c</sub>	N/mm <sup>2</sup>	8.88 ≤ 12.00 OK (第1断面)	τ, τ <sub>a1</sub>	N/mm <sup>2</sup>	0.461 ≤ 0.502 OK (第1断面)
σ <sub>s</sub>	N/mm <sup>2</sup>	252.41 ≤ 300.00 OK (第1断面)				

## (2) レベル2地震時

表 4.6 結果一覧表(レベル2地震時)

			橋軸方向		直角方向	
			(1)杭	(2)杭	(1)杭	(2)杭
水平震度			0.68		1.303 < 1.49	
基礎の耐力照査	最大曲げモーメント	Mmax kN.m	1,149	1,053	1,577	1,387
	降伏曲げモーメント	My kN.m	2,201	1,618	2,201	1,618
	判定		Mmax < My	Mmax < My	Mmax < My	Mmax < My
			降伏していない杭がある OK		降伏していない杭がある OK	
	杭頭最大鉛直反力	PN kN	6,400		9,990	
	押込み支持力の上限値	PNu kN	9,990		9,990	
	判定		PN < PNu		PN = PNu	
応答塑性率の照査	基礎の応答塑性率		---		基礎は $k_{hy}F = 1.303$ で降伏に達したが、 $k_{hc}F \leq k_{hy}F(1.000 \leq 1.303)$ より、基礎の降伏が生じるが基礎本体あるいは基礎周辺地盤に塑性化が生ずることにより減衰の影響が大きくなるので、基礎の損傷はそれ以上は進展しないと判断される。	
	基礎の塑性率の制限値		---			
	判定		---			
	基礎の応答変位		---			
変位の照査	フーチングの回転角	$\alpha F_o$ rad	---		0.0051	
	回転角の制限値の目安	$\alpha F_{oa}$ rad	---		0.02	
	判定		---		$\alpha F_o \leq \alpha F_{oa}$ OK	
せん断力の照査	杭基礎のせん断力	S kN	8948		12624	
	杭基礎のせん断耐力	Ps kN	14,476		14,476	
	コンクリート負担分	Sc kN	4,859		4,859	
	帯鉄筋負担分	Ss kN	9,617		9,617	
	判定		$S \leq Ps$ OK		$S \leq Ps$ OK	

表 4.7 結果一覧表(レベル2地震時 液状化時)

			橋軸方向		直角方向	
			(1)杭	(2)杭	(1)杭	(2)杭
水平震度			0.484 < 0.68		0.568 < 1.49	
基礎の耐力照査	最大曲げモーメント	Mmax kN.m	2,201	1,713	2,201	1,705
	降伏曲げモーメント	My kN.m	2,201	1,618	2,201	1,618
	判定		$M_{max} \geq My$	$M_{max} \geq My$	$M_{max} \geq My$	$M_{max} \geq My$
			全ての杭が降伏した降伏		全ての杭が降伏した降伏	
	杭頭最大鉛直反力	PN kN	5,613		5,852	
	押込み支持力の上限値	PNu kN	9,123		9,123	
	判定		PN < PNu		PN < PNu	
		押込力の上限値に達しないOK		押込力の上限値に達しないOK		
応答塑性率の照査	基礎の応答塑性率		2.577		2.023	
	基礎の塑性率の制限値		4		4	
	判定		$\mu Fr \leq \mu FL$ OK		$\mu Fr \leq \mu FL$ OK	
		基礎の応答変位		0.167		0.1475
変位の照査	フーチングの回転角	$\alpha Fo$ rad	0.003		0.0031	
	回転角の制限値の目安	$\alpha Foa$ rad	0.02		0.02	
	判定		$\alpha Fo \leq \alpha Foa$ OK		$\alpha Fo \leq \alpha Foa$ OK	
杭基礎のせん断力		S kN	8413		7945	
せん断力の照査	杭基礎のせん断耐力	Ps kN	14,476		14,476	
	コンクリート負担分	Sc kN	4,859		4,859	
	帯鉄筋負担分	Ss kN	9,617		9,617	
	判定		$S \leq Ps$ OK		$S \leq Ps$ OK	

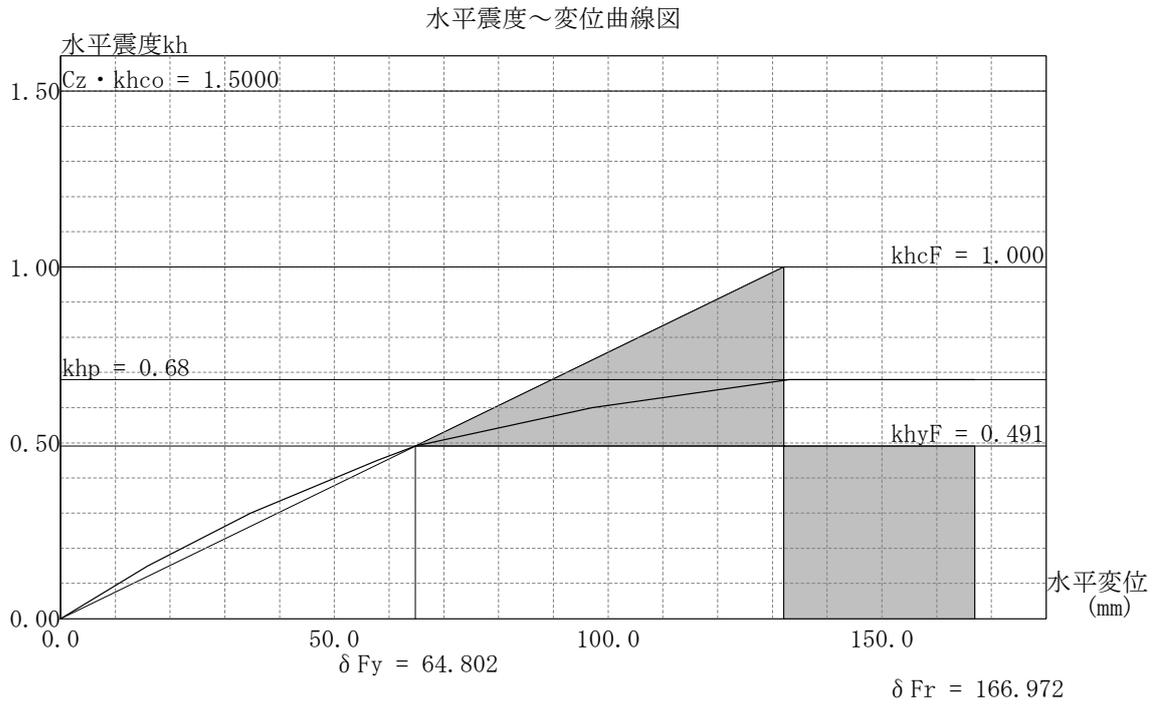


図 4.5 kh- $\delta$  曲線(橋軸方向 液状化時)

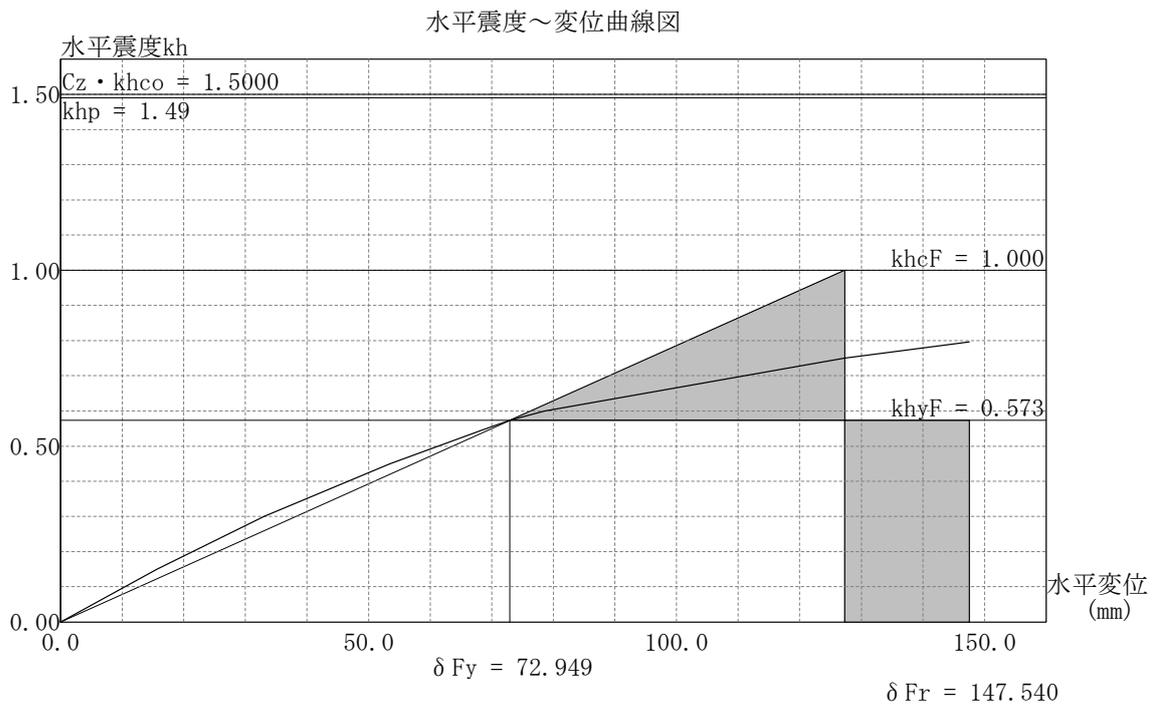


図 4.6 kh- $\delta$  曲線(直角方向 液状化時)

(3) 非線形のモデル化と計算結果(レベル2地震時)

杭基礎の地震時保有水平耐力法は、下図のようなモデルに対して地震動を「荷重漸増載荷」している。そこで、以上に示した計算結果に対して各非線形モデルがどの状態になっているか紹介する。

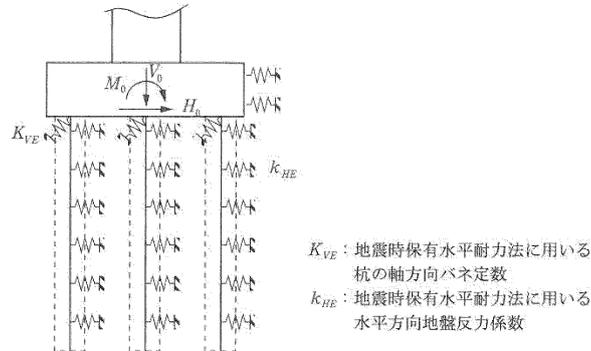
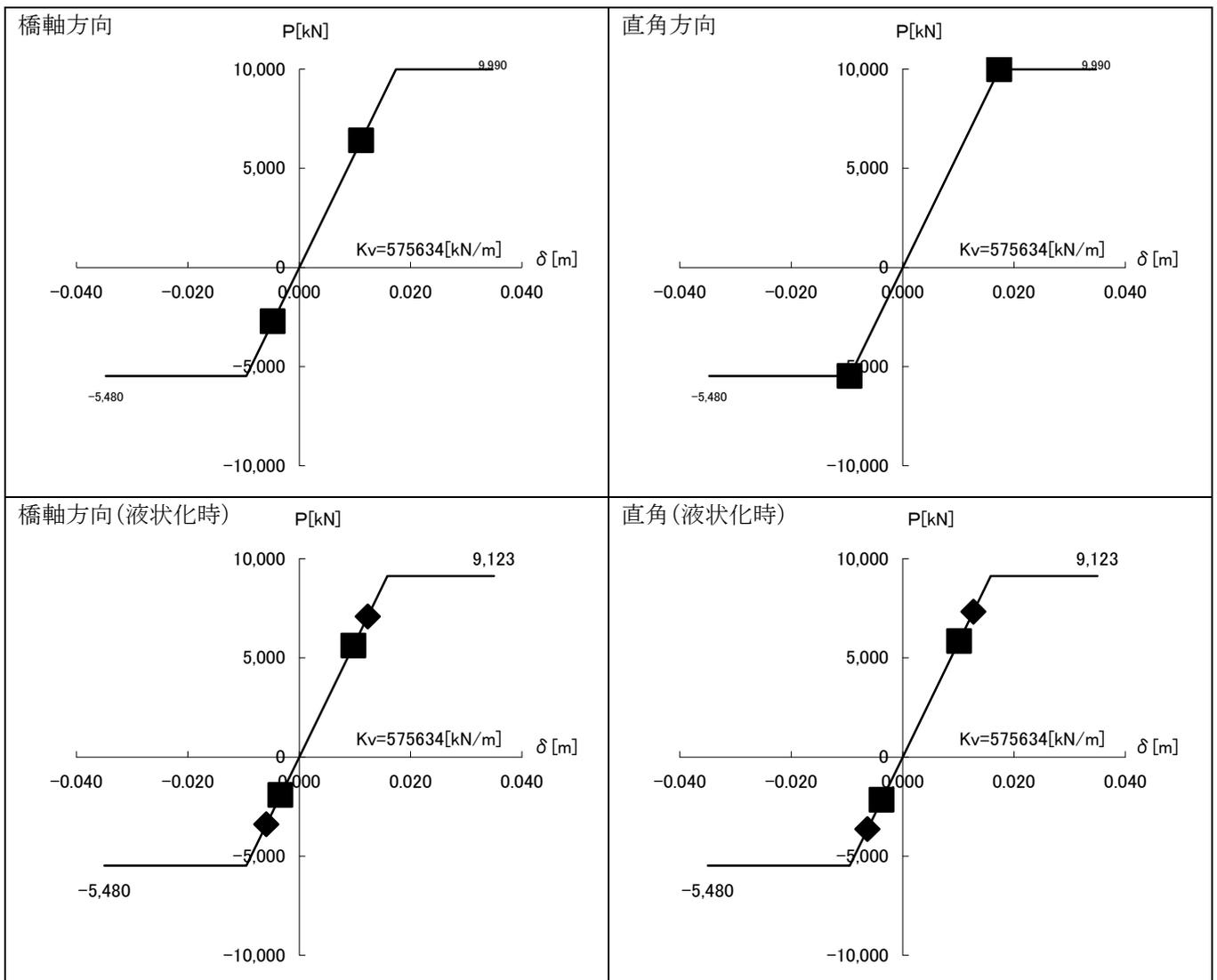


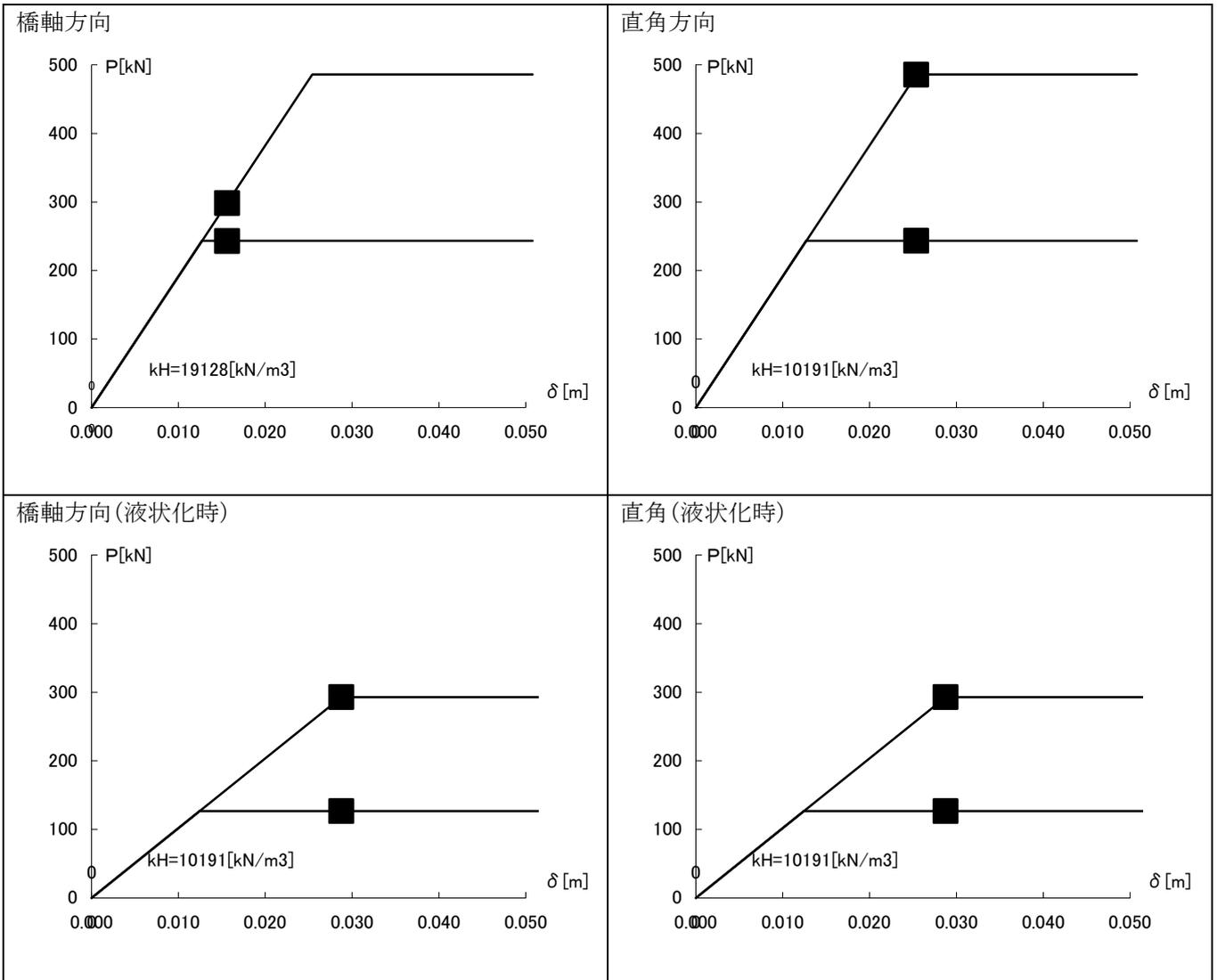
図 4.7 杭基礎のモデル

①杭軸方向バネ(KVE)の非線形モデル : P支持力(kN) と  $\delta$  降伏変位(m)



凡例 ■: 照査荷重時(表 4.7、4.8 の値) ◆: 応答変位時

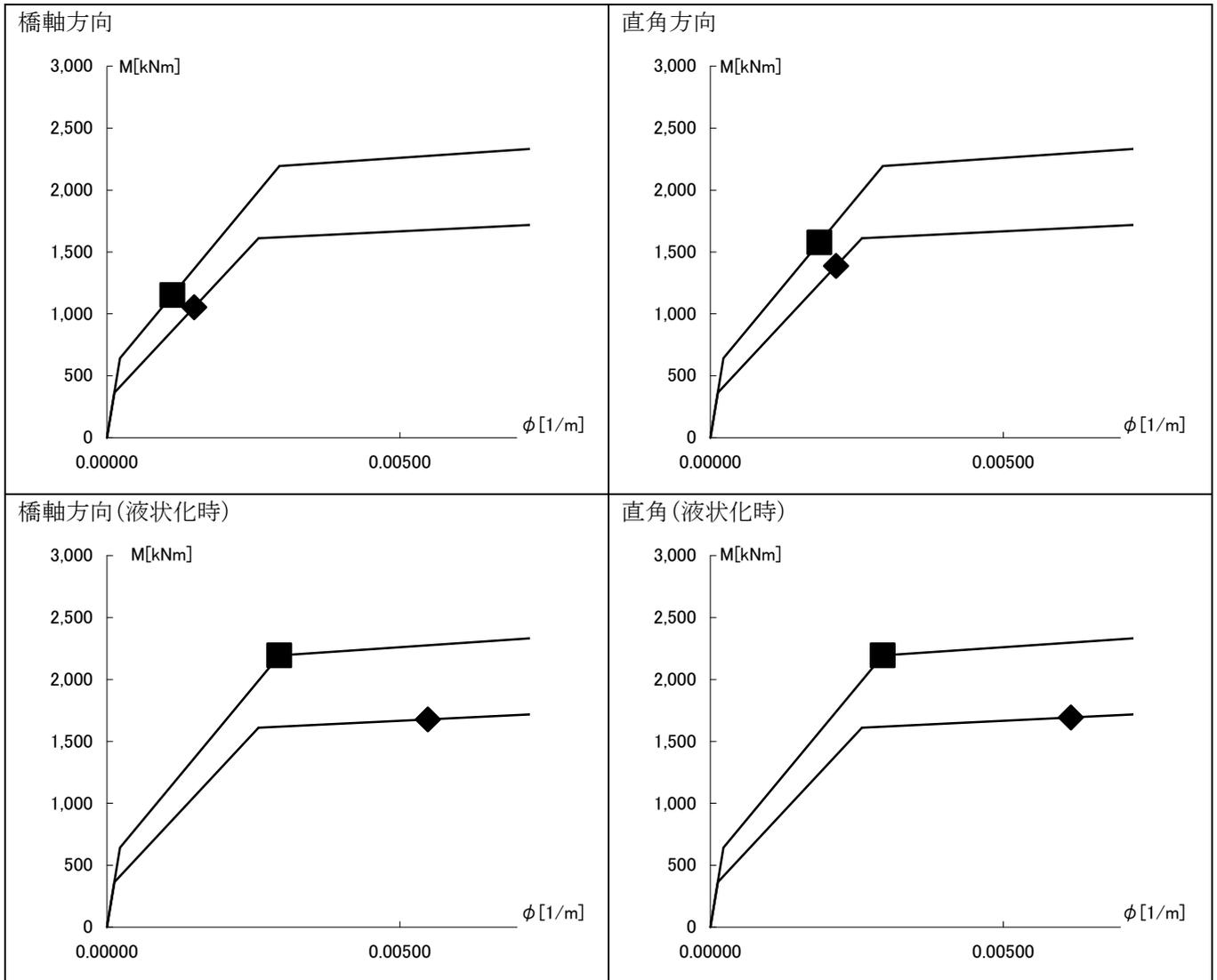
②水平方向地盤反力係数の非線形モデル : P 受働土圧(kN/m<sup>2</sup>) と δ 降伏変位(m)



凡例 ■: 照査荷重時(表 4.7、4.8 の値) で、値が大きい方が「押し込み側1列目杭」、小さい方が「2列目以降の杭」

- 注1. 1列目(押し込み側)は受働土圧が大きい方
- 注2. 杭体を概ね 500mm 間隔にて上図のようなモデルを設定している。  
※上図は、降伏しやすい最浅層を示す。(ただし  $kH \neq 0$ )

③杭体の非線形モデル : M 曲げモーメント(kNm) と  $\phi$  曲率(1/m)



凡例 : 照査荷重時(表 4.7、4.8 の値) で、■: 押し込み側杭、◆: 引抜き側杭

- 注1. 1列目(押し込み側)は曲げモーメントが大きい方
- 注2. 杭体を概ね 500mm 間隔にて上図のようなモデルを設定している。  
※上図は、最も厳しい杭頭部を示す。
- 注3. 場所打ち杭はトリニアモデル( $M_c \sim M_y \sim M_u$ )で表現する。

## 5. 参考文献

- |     |                   |           |                            |
|-----|-------------------|-----------|----------------------------|
| [1] | 道路橋示方書・同解説(Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ) | (平成14年3月) | 社団法人 日本道路協会 (本文中は道示と略す)    |
| [2] | 道路橋示方書・同解説(Ⅳ、Ⅴ)   | (平成8年12月) | 社団法人 日本道路協会 (本文中はH8道示と略す)  |
| [3] | 道路橋の耐震設計に関する資料    | (平成9年3月)  | 社団法人 日本道路協会)               |
| [4] | 杭基礎設計便覧           | (平成18年度)  | 社団法人 日本道路協会(本文中は杭基礎便覧と略す)) |

## 6. 解析ソフト

基礎の設計計算 (Ver.7, 株式会社 フォーラムエイト )