

# 建築基礎構造設計指針の改定と 今後の課題について

芝浦工業大学 建築学部  
土方 勝一郎

## <本日の講演内容>

日本建築学会『建築基礎構造設計指針』の改定版が2019年11月に刊行された。(以下、**新基礎指針**と呼ぶ)

本日は『**新基礎指針**』の内容の内、主に杭基礎構造の耐震関係の規定に焦点を当てて説明する。

また、今後の課題として鋼管杭の2次設計法の確立について説明する。

# 建築基礎構造設計指針の改定 について

# 新基礎指針の主な改定ポイント

## ＜新基礎指針(前回改定から18年が経過)の主な改定点＞

- ①基礎構造に対してレベル2荷重に対する性能設計を行うことを基本方針として示した。
- ②これまで不明瞭な部分があった、安全性の検証に用いる設計用限界値とその要求性能を可能な限り明確にした。また、建物の重要度を考慮した基礎構造の性能グレード(安全性のレベル)を提案した。
- ③レベル2荷重に対する設計法の具体化のため、地震荷重と地震時地盤変位を定めた。また、杭基礎の解析法として群杭フレームモデルを提案した。

# 基礎構造に対する2次設計の必要性

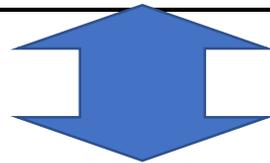
建築分野では上部構造(建物)に対しては、建築基準法上2次設計の規定がある。

## ○1981：新耐震設計法

層せん断力係数 $C_0=1.0$  (300~400gal入力に相当)に対する「保有水平耐力計算」の導入

## ○2000：限界耐力計算法

稀に発生する地震(レベル1)、極めて稀に発生する地震(レベル2)に対する疑似動的な計算方法が示された



基礎構造に対しては、建築基準法上2次設計の規定がない。

## ○建設省告示第1347号第2項(平成12年5月23日)

「基礎構造は許容応力度計算を行えばよい」と記述がある

# 基礎構造に対する2次設計の必要性

## <従来の考え方>

基礎の被害は直接的に人命には影響しないと考えられてきた

→基礎が傾くことで、人命に直接影響した例はない。

1964年の新潟地震では液状化により多くの建物が傾斜したり、中には転倒したものもあったが、人命に直接影響したものは無いと言われている。



液状化に伴う建物の転倒

# 基礎構造に対する2次設計の必要性

## < 2次設計の必要性 >

### ① 資産保護

→過去の地震被害から、基礎構造の修復・修繕は困難を伴う上に、多額の費用が必要となるケースが多いことが分かって来た。

### ② B C P (事業継続性)

→地震後も継続して使用することを求められる官民の重要な建物が存在し、B C P (事業継続性)の観点から、極めて稀に発生する地震(レベル2)への対応が望まれるようになってきた。



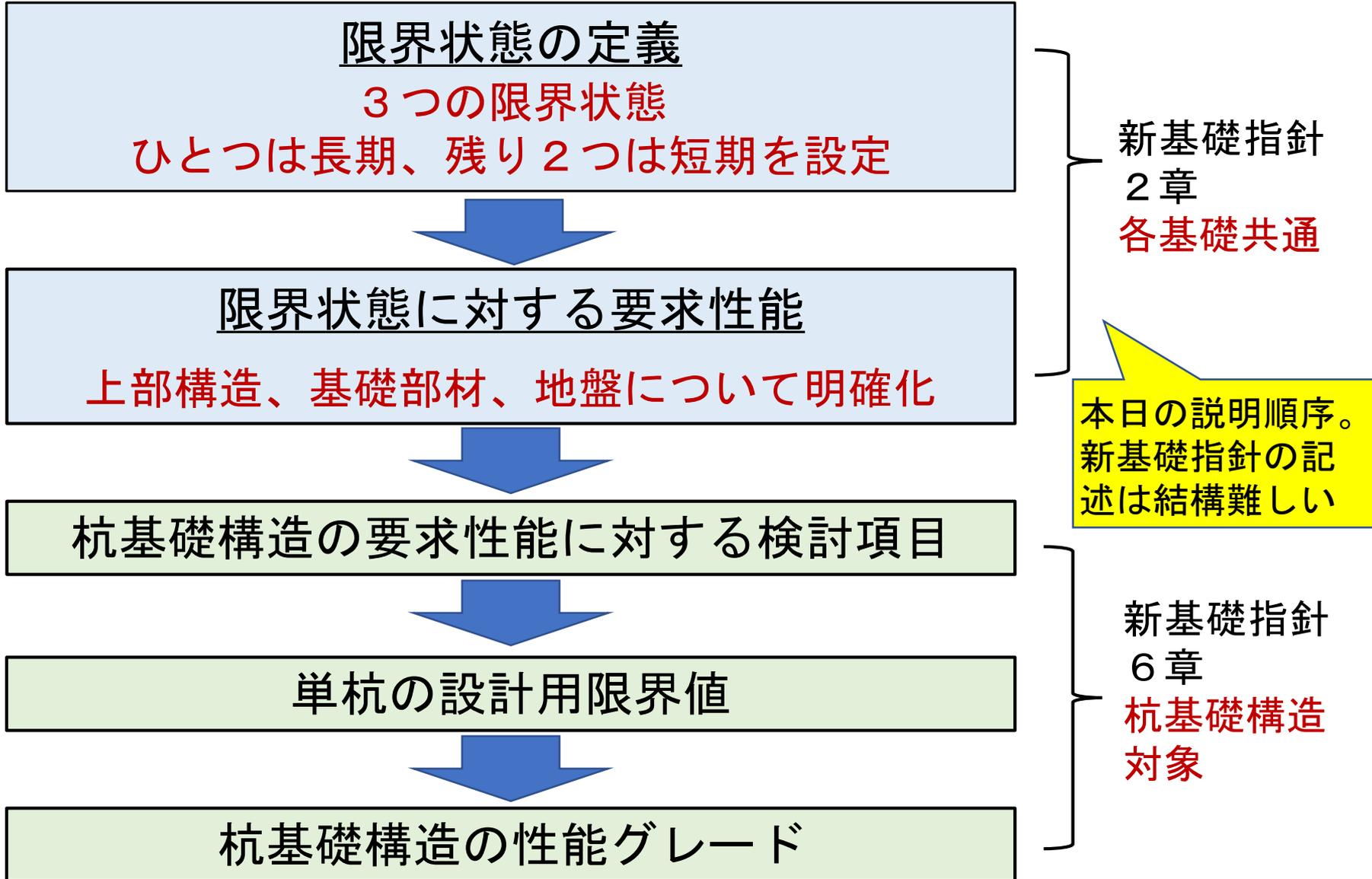
## < 2次設計に必要な項目 >

- ① 限界状態の定義
- ② 限界状態に対応した要求性能
- ③ 要求性能を満足するための検討項目
- ④ クラス分類
- ⑤ 2次設計の計算方法

## 主要な改定内容①

設計限界値と要求性能、性能グレード

# 新基礎指針の限界状態の定義～性能グレード



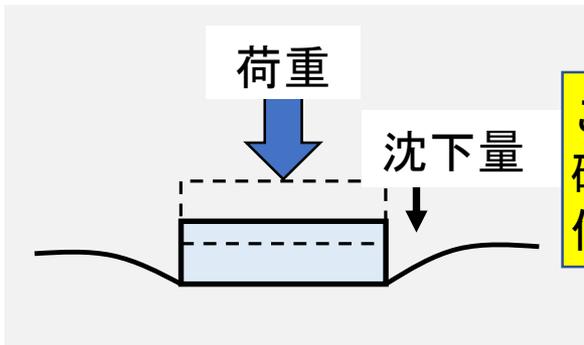
# 限界状態の定義（基礎構造共通）

長期に対して1つ、短期に対して2つの限界状態を設定  
→各基礎形式共通。性能設計に対応するため。

限界状態	基礎指針の定義
使用限界状態	地盤・基礎部材の沈下・変形が原因で、上部構造に <b>使用性の不備</b> が生じ始める状態
損傷限界状態	地盤・基礎部材の沈下・変形が原因で、上部構造あるいは基礎部材に <b>補修・補強が必要</b> となり始める状態
終局限界状態	地盤・基礎部材の破壊・変形により上部構造を支持できなくなり始める状態、あるいは基礎部材の <b>補修・補強が極めて困難</b> となり始める状態

（新基礎指針2.3節 本文）

# 限界状態の定義 (基礎構造共通)



地盤の特性から設定される限界

降伏支持力

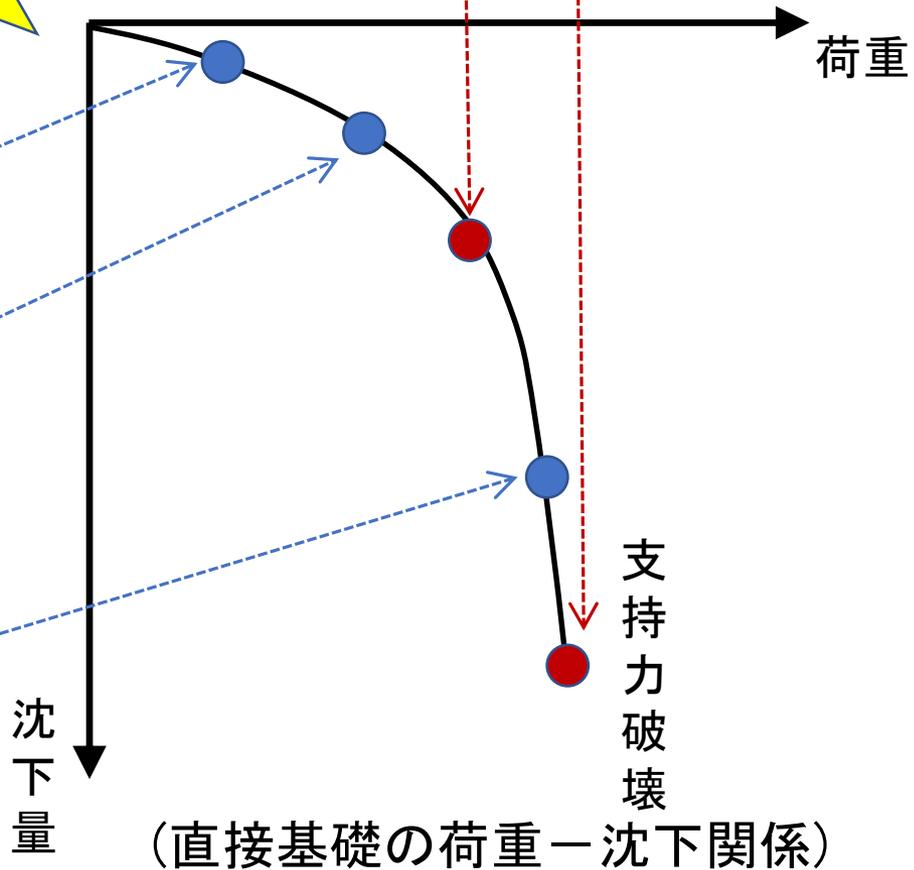
極限支持力

上部構造・基礎部材への影響から設定される限界

使用限界状態 (長期)

損傷限界状態 (短期)  
この限界値以下なら補修・補強は必要なく継続使用できる。

終局限界状態 (短期)  
この限界値以下なら上部構造の倒壊等の重大な損傷は生じないが、補修・補強は必要となる。



# 限界状態に対応する要求性能(基礎構造共通)

上部構造、基礎部材、地盤それぞれに要求性能を明確化  
→各基礎共通

限界状態	要求性能		
	上部構造に対する影響	基礎部材	地盤
使用限界状態	使用性・耐久性に支障が生じない	耐久性に限界が生じない。有害なひび割れが生じない	使用上有害な沈下・変形が生じない
損傷限界状態	過大な傾斜あるいは構造上の補修・補強を必要とするような損傷を生じない	構造上の補修・補強を必要とするような損傷が生じない	過大な沈下・残留変形が生じない
終局限界状態	転倒・崩壊しない	脆性的な破壊を生じない。また、変形性能の限界に達して、耐力低減を生じない	地盤(改良地盤)が鉛直支持力を喪失しない

(新基礎指針2.4節 本文表2.1)

# 杭基礎構造の要求性能に対する検討項目

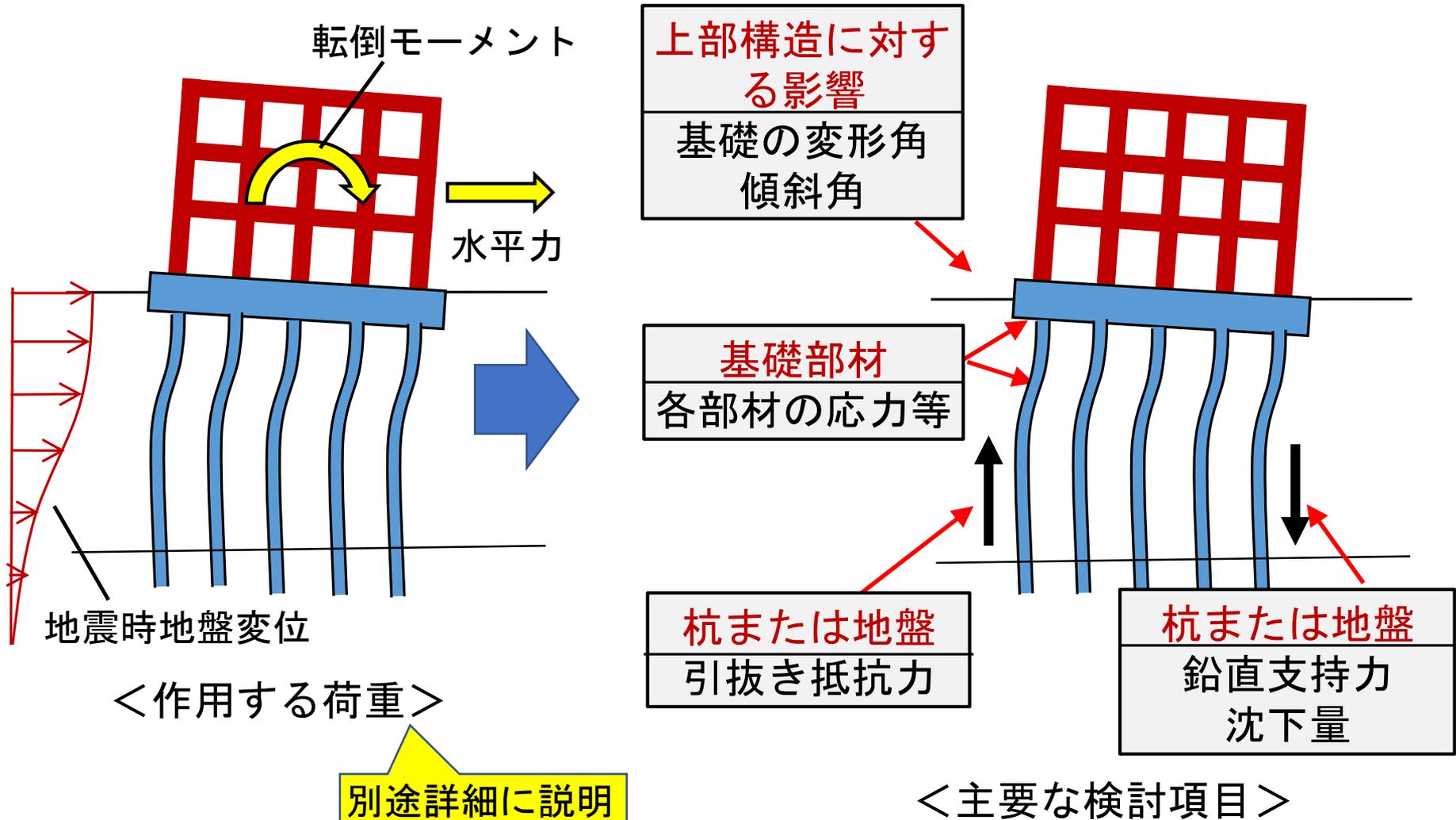
杭基礎構造に関しては、以下のような要求性能に対応する検討項目を設定した。

要求性能のレベル	検討項目		
	上部構造に対する影響	基礎部材	杭または地盤
使用限界状態	基礎の変形角、傾斜角	各部材の応力 または ひび割れ幅	鉛直支持力, 沈下量 引抜き抵抗力, (引抜き量)
損傷限界状態	基礎の変形角、傾斜角	各部材の応力	鉛直支持力, 沈下量 引抜き抵抗力, (引抜き量) 液状化, (地盤沈下量)
終局限界状態	(基礎の変形角、傾斜角)	各部材の応力 または 塑性変形量	鉛直支持力, (沈下量) 引抜き抵抗力, (引抜き量) 液状化, (地盤沈下量)

( ) 内の項目については必要に応じて検討する

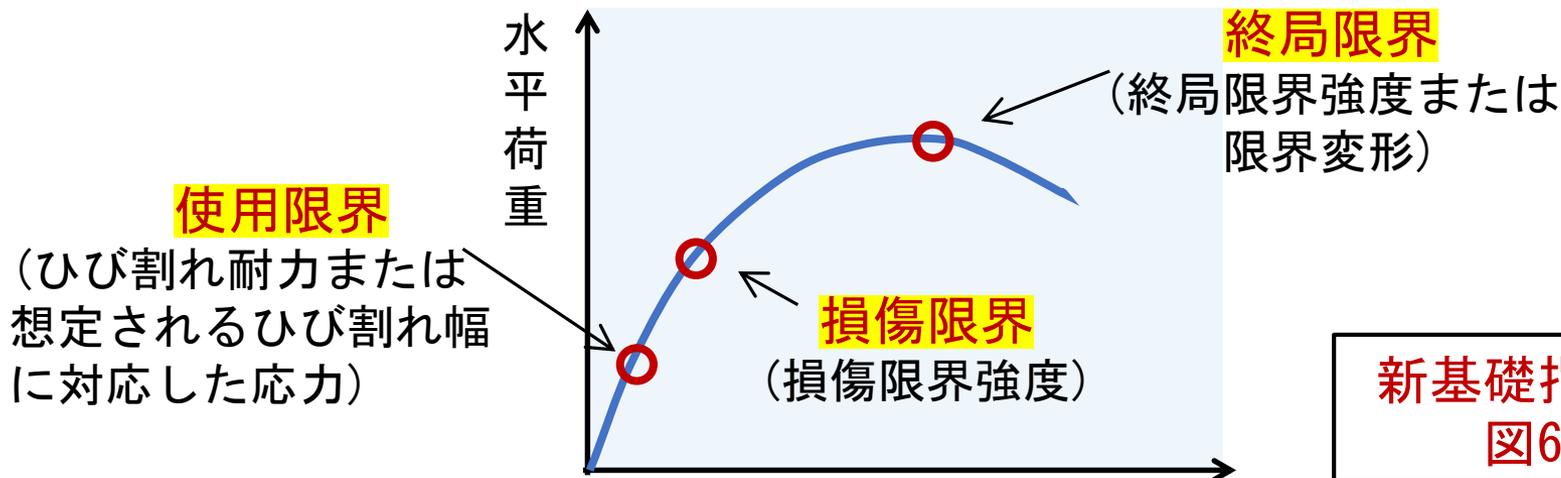
(新基礎指針6.1節 表6.1.1)

# 杭基礎構造の要求性能に対する検討項目



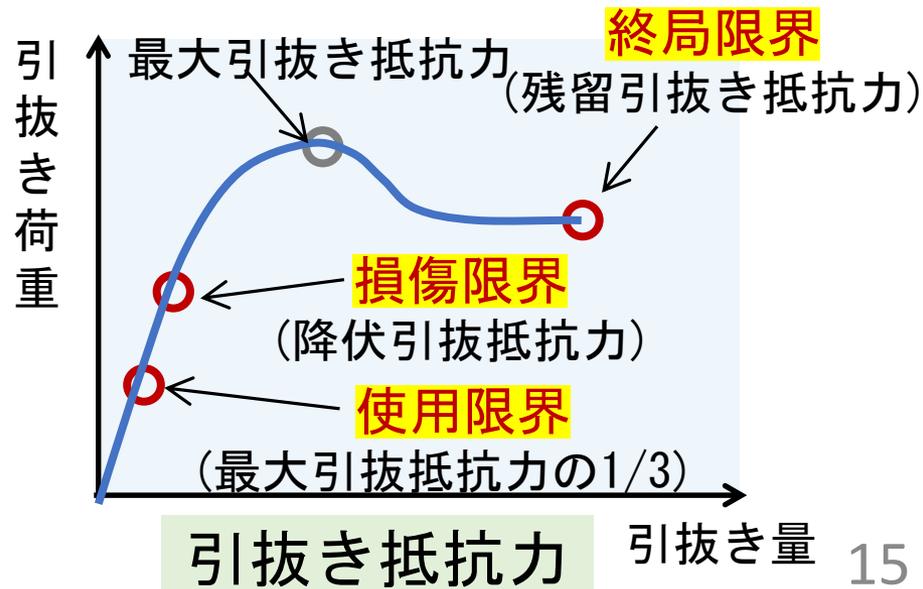
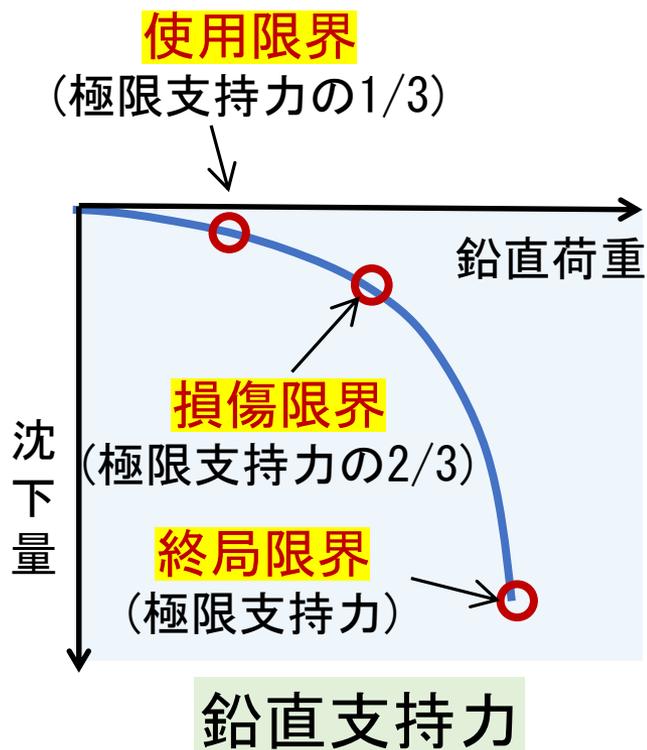
前ページに示す基礎構造の要求性能(基礎構造共通)を杭基礎構造に適用した場合の検討項目は本図に示すようになる。

# 単杭の設計用限界値

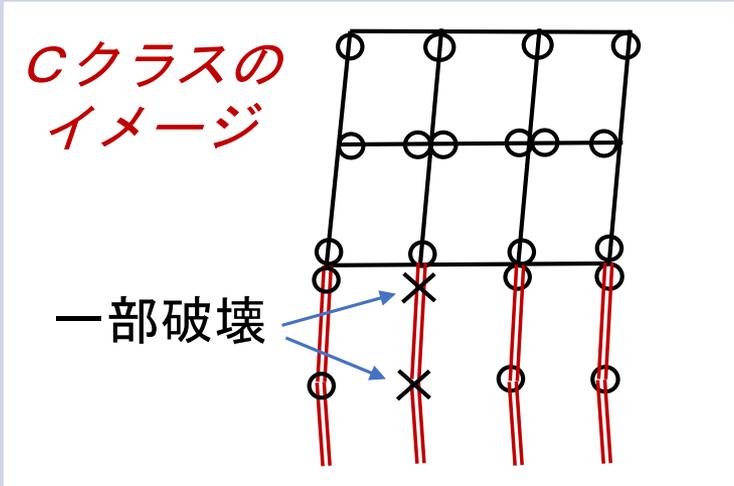


杭体

水平変位



# 杭基礎構造の性能グレード

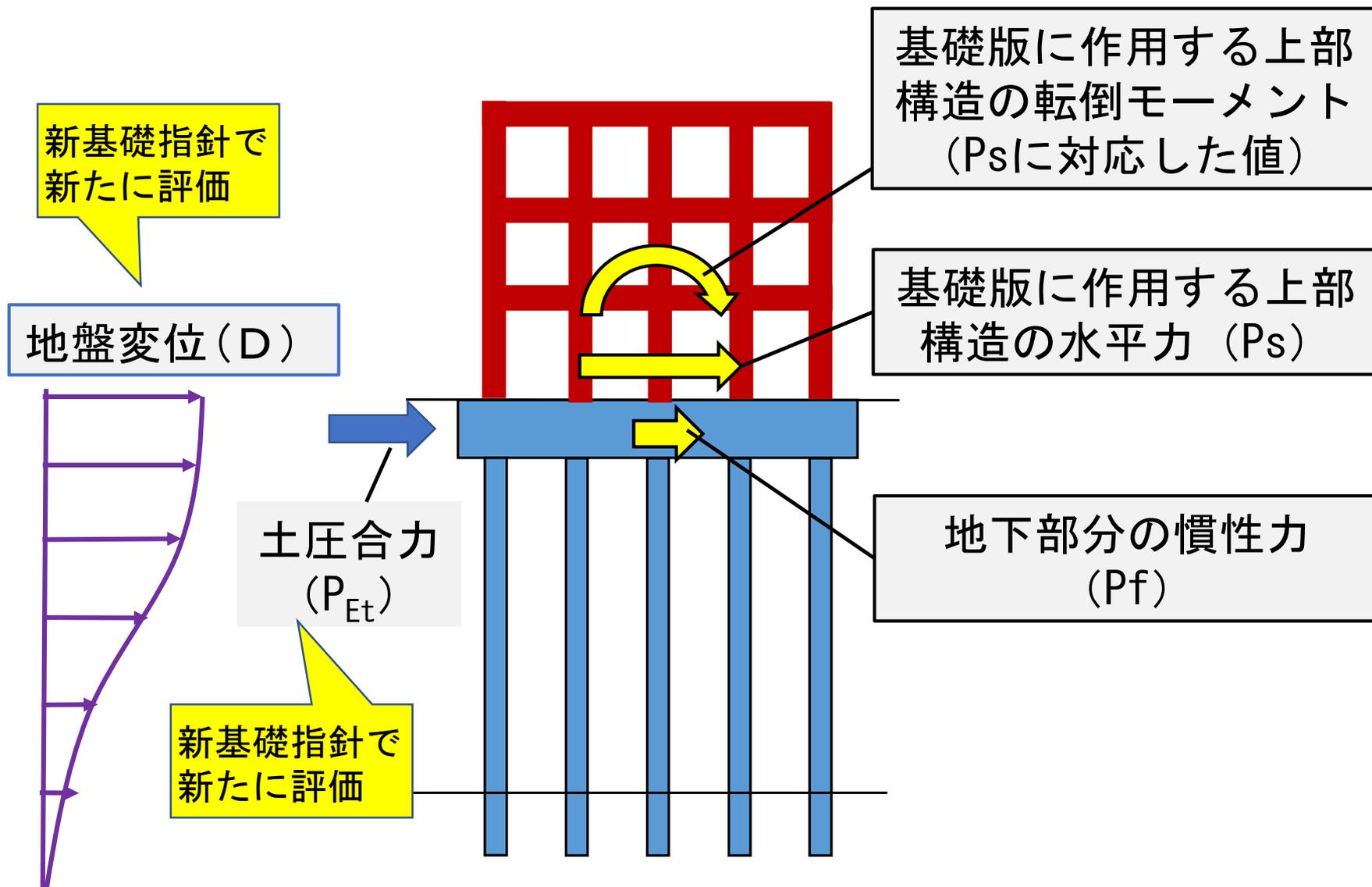
性能グレード	レベル1荷重	レベル2荷重	位置づけ
Sクラス	損傷限界以内	損傷限界以内	レベル2地震が来ても、修復なしに継続使用可能。 →官民の重要建物を想定。
Aクラス	損傷限界以内	終局限界以内	レベル2地震で倒壊はしないが、修復が必要。
Cクラス	損傷限界以内	一部終局限界を超えることを許容	

新基礎指針ではSとAのみ定義されCクラスを定めることは出来なかった。今後の重要な課題と認識

## 主要な改定内容②

### 設計用地震荷重

# 杭基礎構造に考慮する各種荷重



# 杭基礎構造に考慮する上部構造の水平荷重 $P_s$

## レベル2 荷重

### (1) 保有耐力計算に基づく方法

必要保有水平耐力に対応する地震荷重 $P_s$ と $P_s$ に対応する転倒モーメントを基礎版に作用させる。

#### ・ $Q_{un}$ (必要保有水平耐力)

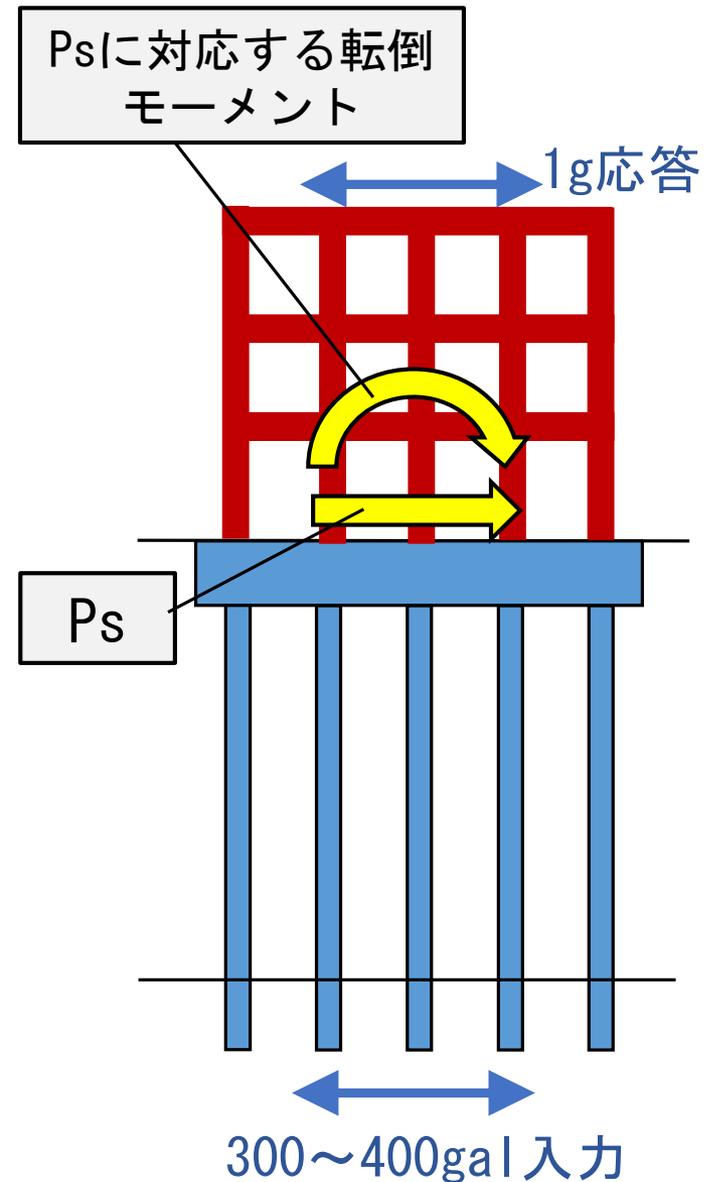
$$P_s = D_s \times F_{es} \times Z \times R_t \times C_0 (=1.0) \\ \times \text{地上部分の全重量} \\ \doteq D_s \times \text{地上部分の全重量}$$

$D_s$  : 構造特性係数     $F_{es}$  : 形状係数  
あるいは

#### ・ $Q_u$ (保有水平耐力) ( $\geq Q_{un}$ )

### (2) 限界耐力計算に基づく方法

動的な応答解析を行わず「極まれ地震動(時刻歴波形)」に対する建物応答を求める簡略法で評価。



# 杭基礎構造に考慮する地盤変位 D

## レベル2 荷重

レベル2地震動に対応する地盤変位を計算する。計算方法は以下の2種。

### (1) 応答スペクトル法

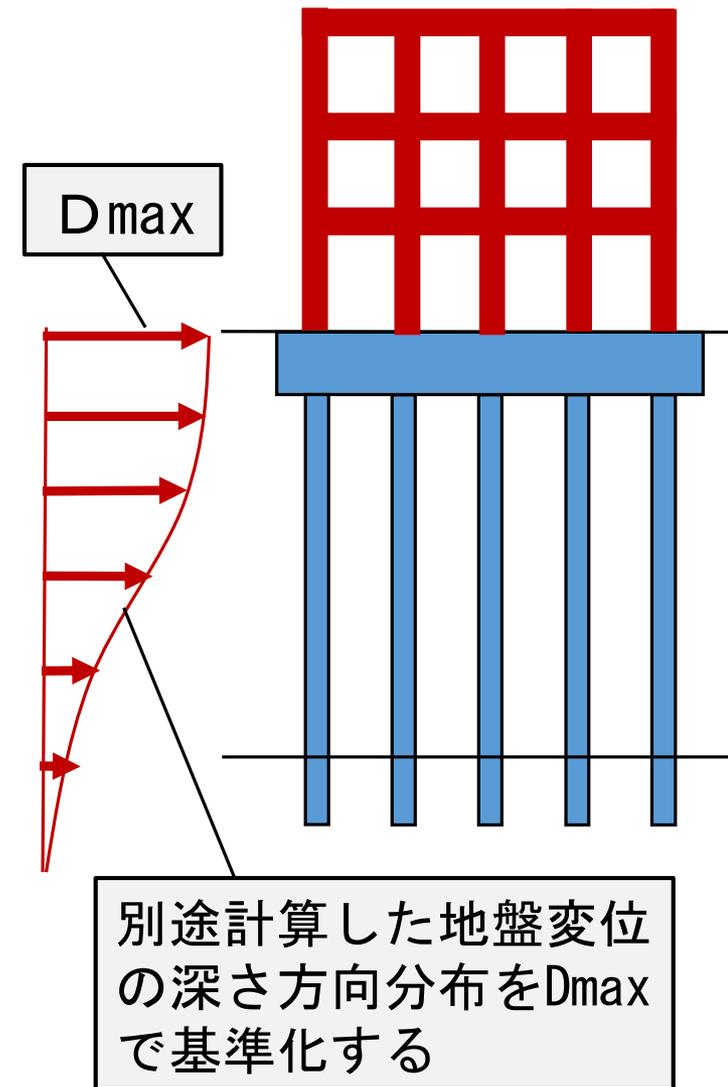
「極まれ地震」の応答スペクトルに基づき「応答スペクトル法」による簡略式で評価。  
→**応答計算を行わない簡略式**

〈地盤変位 (Dmax) を設定する方法〉

- ・ 地震荷重を地表で設定  
：保有水平耐力計算にレベルを合わせる
- ・ 地震荷重を工学的基盤位置で設定  
：限界耐力計算にレベルを合わせる

### (2) 重複反射理論

工学的基盤で設定された「極まれ地震動(時刻歴波形)」に基づき重複反射理論に基づき計算。

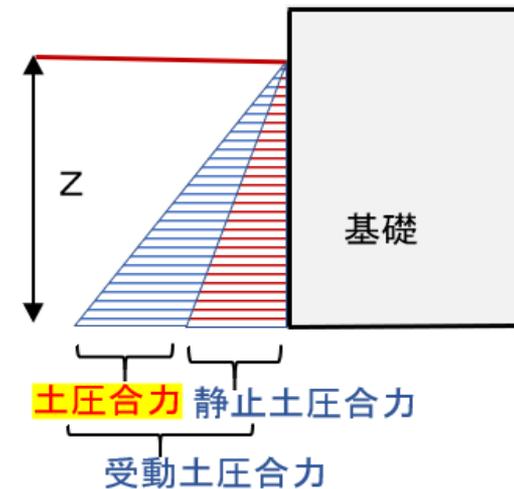
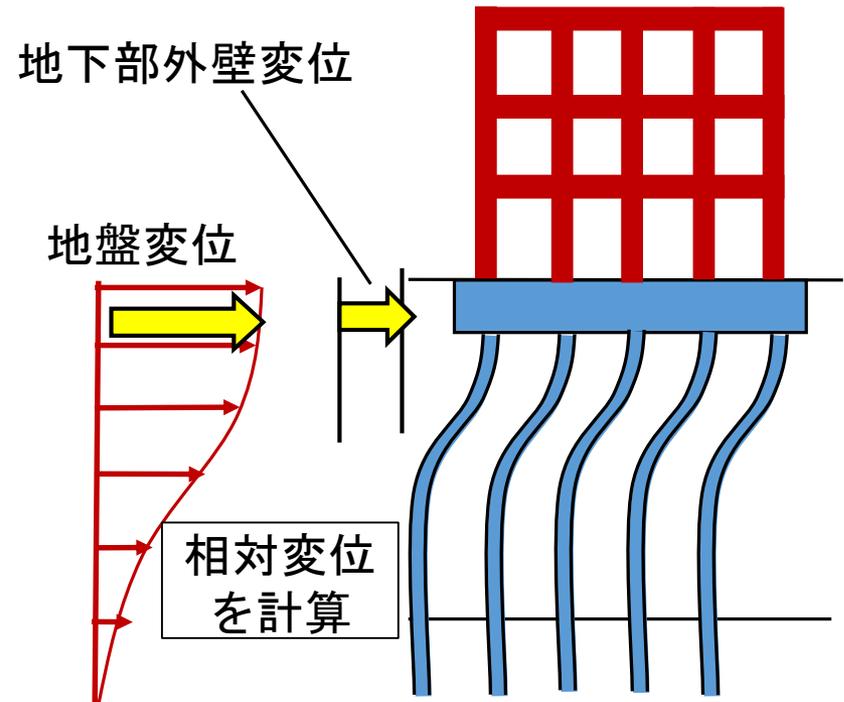
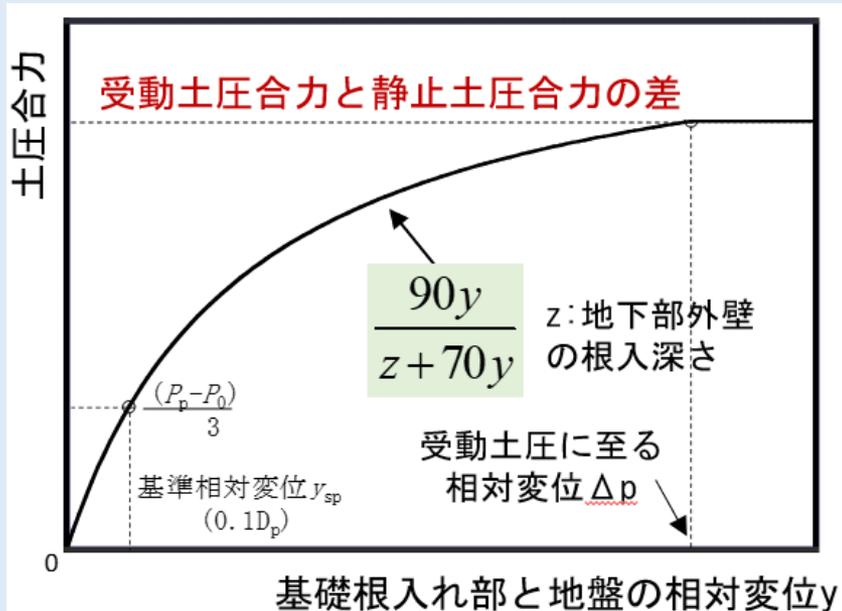


# 杭基礎構造に考慮する土圧合力

## レベル2 荷重

基礎と地盤の相対変位 (y) から土圧合力ばねで評価

- 相対変位 (y)
- =地盤変位 (レベル2)
- 地下部外壁地盤変位 (レベル2)



# 荷重の組み合わせ

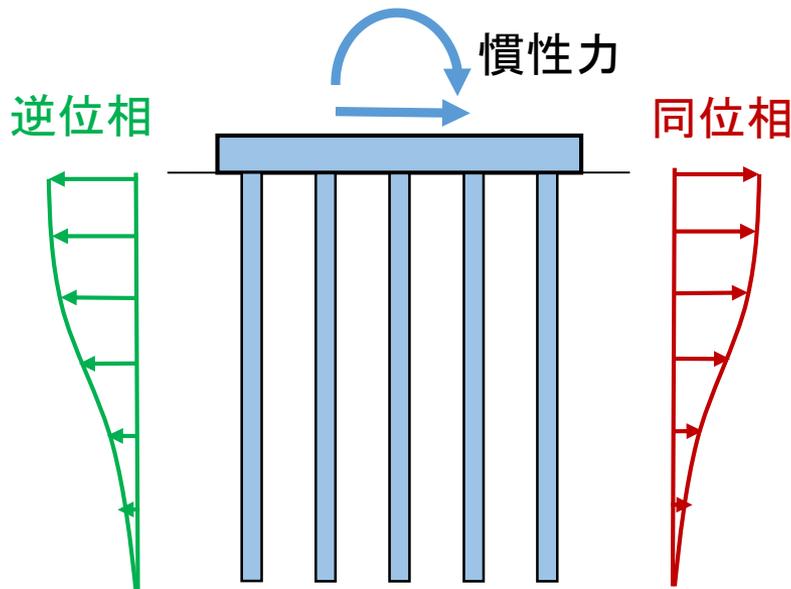
## <荷重の組み合わせに関する従来の方法>

上部構造慣性力と地盤変位を別々に作用させて杭応力を求め、2乗和平方 (SRSS) または、単純和する方法を採用。



## <群杭フレームモデルの計算 (新基礎指針)>

上部構造慣性力と地盤変位を同時に作用させるため、両者の組み合わせ方法を定めた。



慣性力と地盤変位は同位相か  
逆位相か？

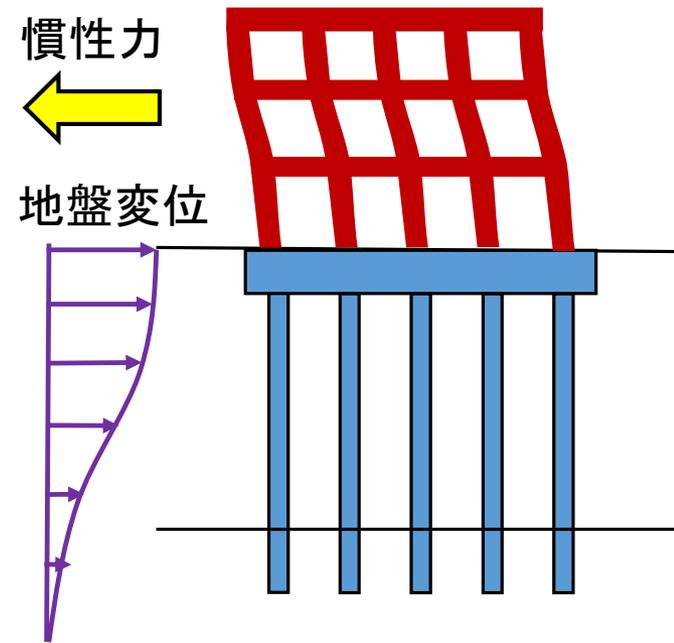
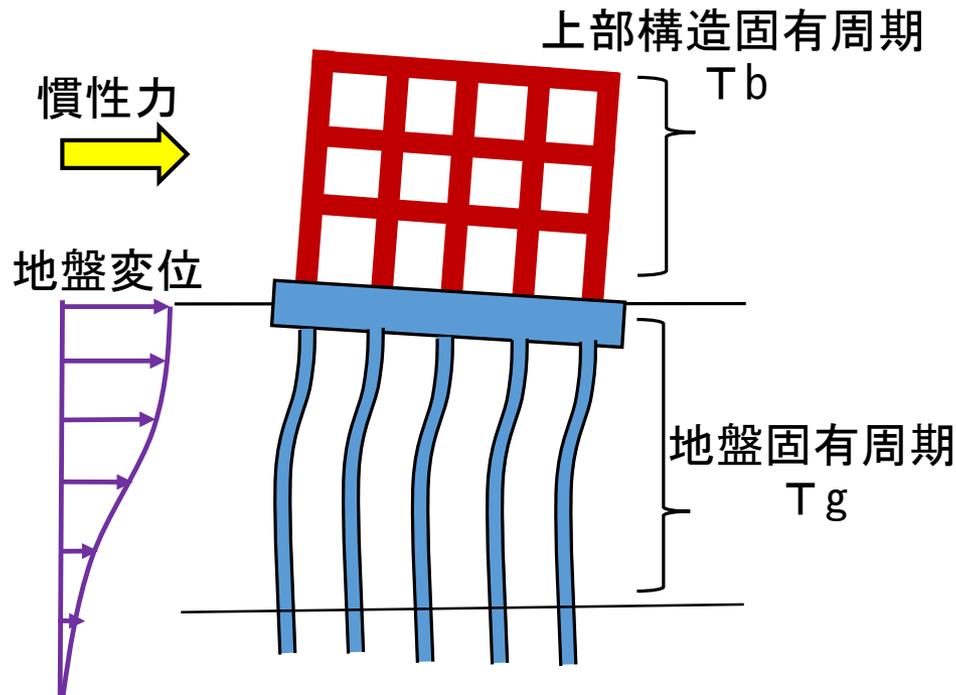
両者の比率は1 : 1で良いか？



新基礎指針では $T_b$  (上部構造の固有周期) と  $T_g$  (地盤の固有周期) の比率で規定

→過去の実験、解析に基づく

# 荷重の組み合わせ



$$\underline{(T_b/T_g < 1)}$$

- ・ 上部構造が硬く、地盤の振動モードが卓越する
- ・ 慣性力と地盤変位は概ね同位相で作用する

$$\underline{(T_b/T_g > 1)}$$

- ・ 上部構造が柔らかく、上部構造の振動モードが卓越する
- ・ 慣性力と地盤変位の最大値は一致することが少ない

# 荷重の組み合わせ

表 1 新基礎指針の荷重の組み合わせ

周期関係	低減係数	慣性力と地盤変位の位相
$T_b / T_g < 1$	$\alpha_1 = \beta_1 = \beta_2 = 1$	上部構造慣性力と地盤変位は同方向で杭に載荷
$T_b / T_g \doteq 1$	〈地盤変位が卓越〉 $\alpha_1 = \beta_2 = 1, 0.5 < \beta_1 < 1$	上部構造慣性力と地盤変位は同方向及び逆方向で杭に載荷し、各深度で大きい方を採用
	〈慣性力が卓越〉 $\beta_1 = 1, 0.5 < \alpha_1 = \beta_2 < 1$	
$T_b / T_g > 1$	〈地盤変位が卓越〉 $\alpha_1 = \beta_2 = 1, \beta_1 = 0.5$	杭に載荷し、各深度で大きい方を採用
	〈慣性力が卓越〉 $\beta_1 = 1, \alpha_1 = \beta_2 = 0.5$	

$\alpha_1$  = 杭曲げモーメント最大時の地盤変位/地盤変位の最大値

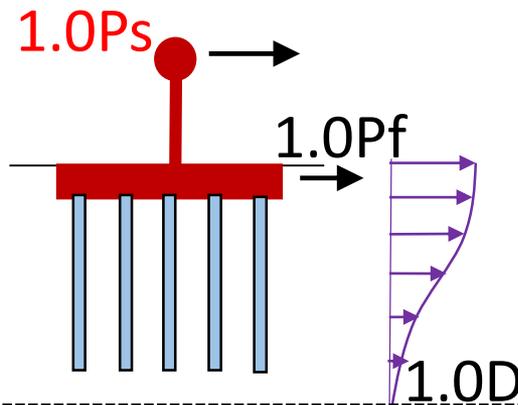
$\beta_1$  = 杭曲げモーメント最大時の上部構造慣性力/上部構造慣性力の最大値

$\beta_2$  = 杭曲げモーメント最大時の基礎部慣性力/基礎部慣性力の最大値

$(T_b/T_g < 1)$

慣性力と地盤変位は概ね同位相

慣性力と地盤変位は同方向で杭に作用させる

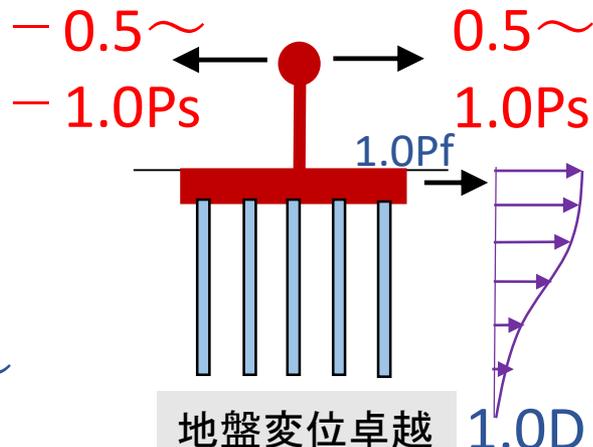
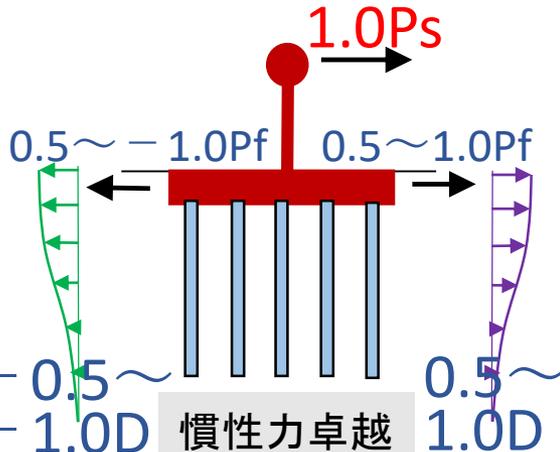


Ps : 上部構造慣性力  
Pf : 基礎部慣性力  
D : 地盤変位  
Tb : 上部構造の固有周期  
Tg : 地盤の固有周期

$(T_b/T_g \doteq 1)$

慣性力と地盤変位のどちらかが卓越

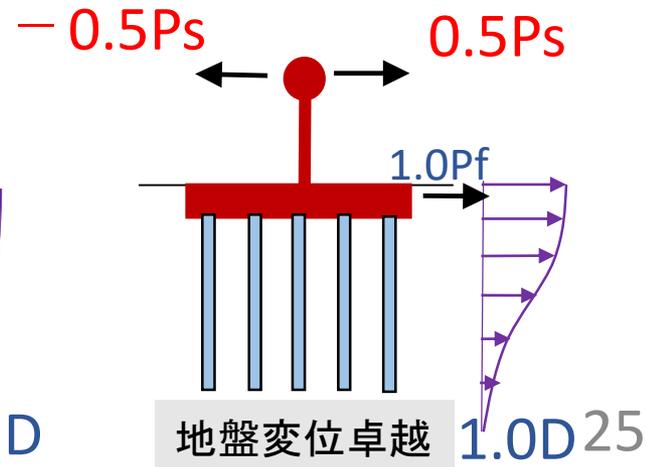
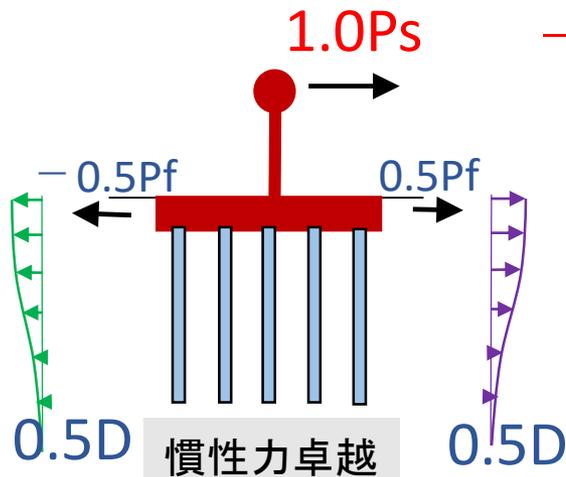
慣性力と地盤変位は両方向で杭に作用させる  
片方を0.5~1.0倍に低減



$(T_b/T_g > 1)$

慣性力と地盤変位の最大値が一致することは少ない

慣性力と地盤変位は両方向で杭に作用させる  
片方を0.5倍に低減



## 主要な改定内容③

杭基礎を対象とした解析法

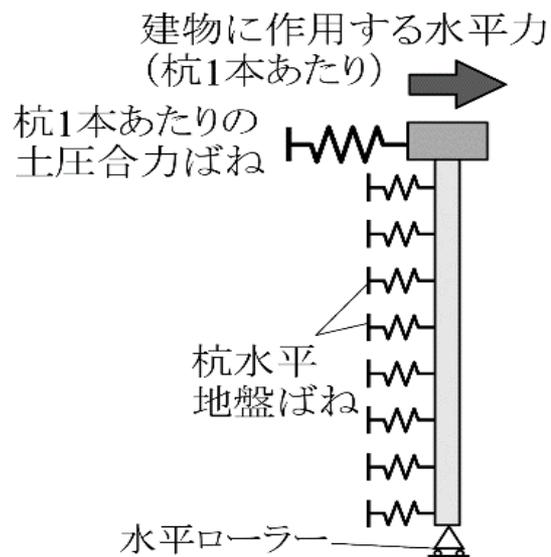
# 杭基礎の応力計算方法

レベル  
1 荷重

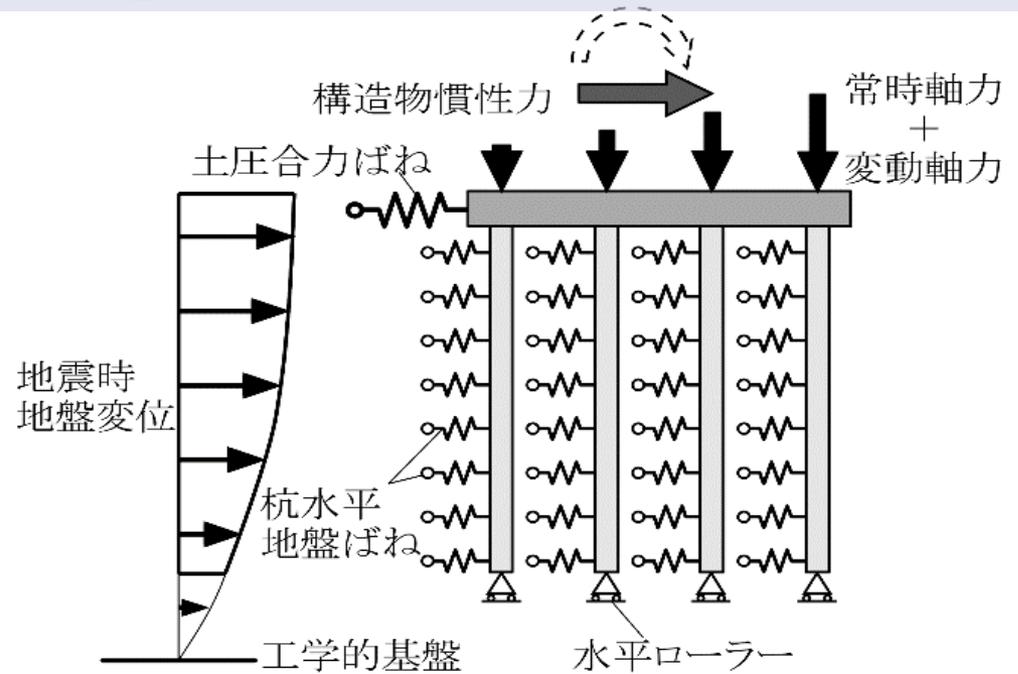
**単杭モデル**あるいは**群杭フレームモデル**により応力評価を行う。地盤変位が小さいとみなせる地盤条件では、地盤変位を考慮しなくてもよい。

レベル  
2 荷重

群杭と基礎梁からなる**群杭フレームモデル**により応力評価を行うことを原則とする。ただし、アスペクト比の小さい建物で、かつ杭間隔が大きいケースでは、**単杭モデル**による杭応力評価法を用いてもよい。



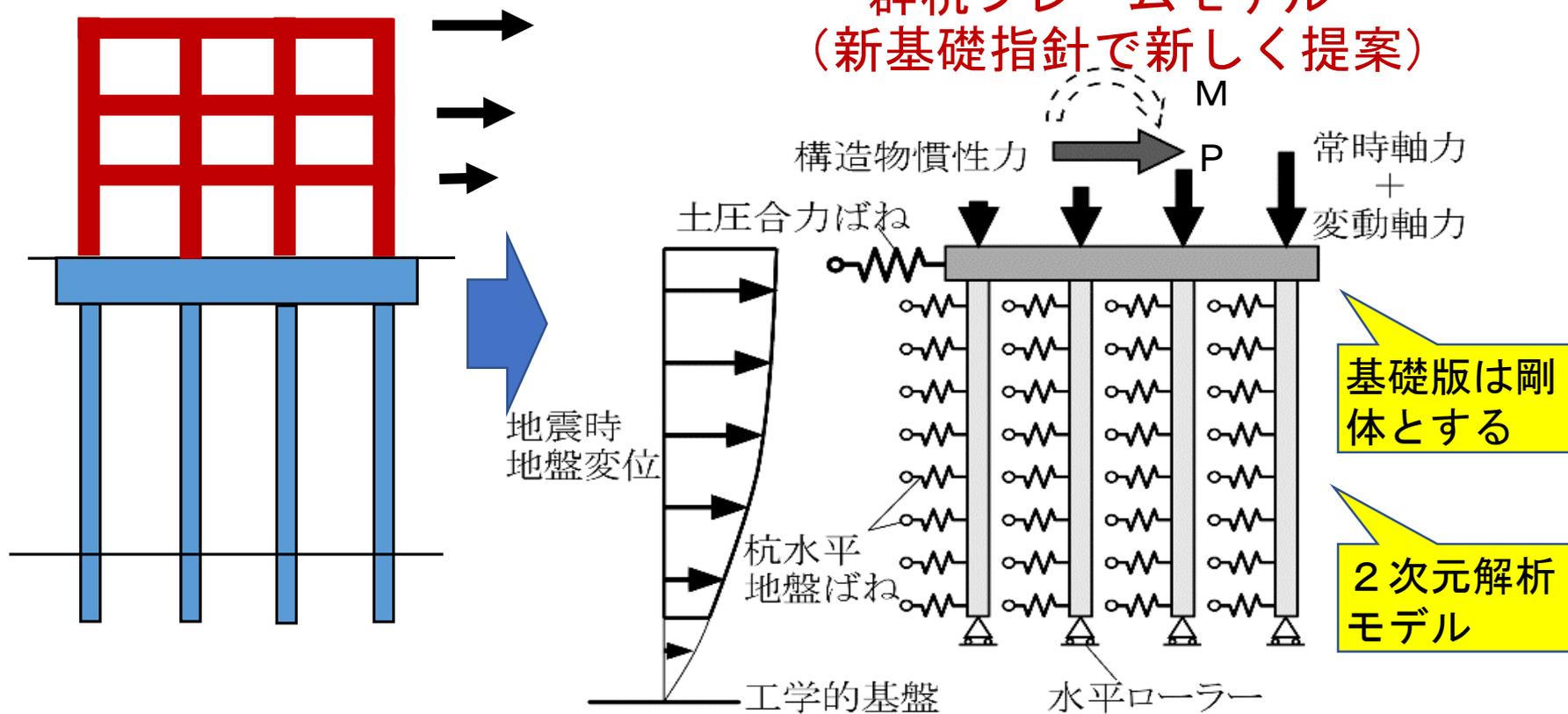
**単杭モデル**



**群杭フレームモデル**

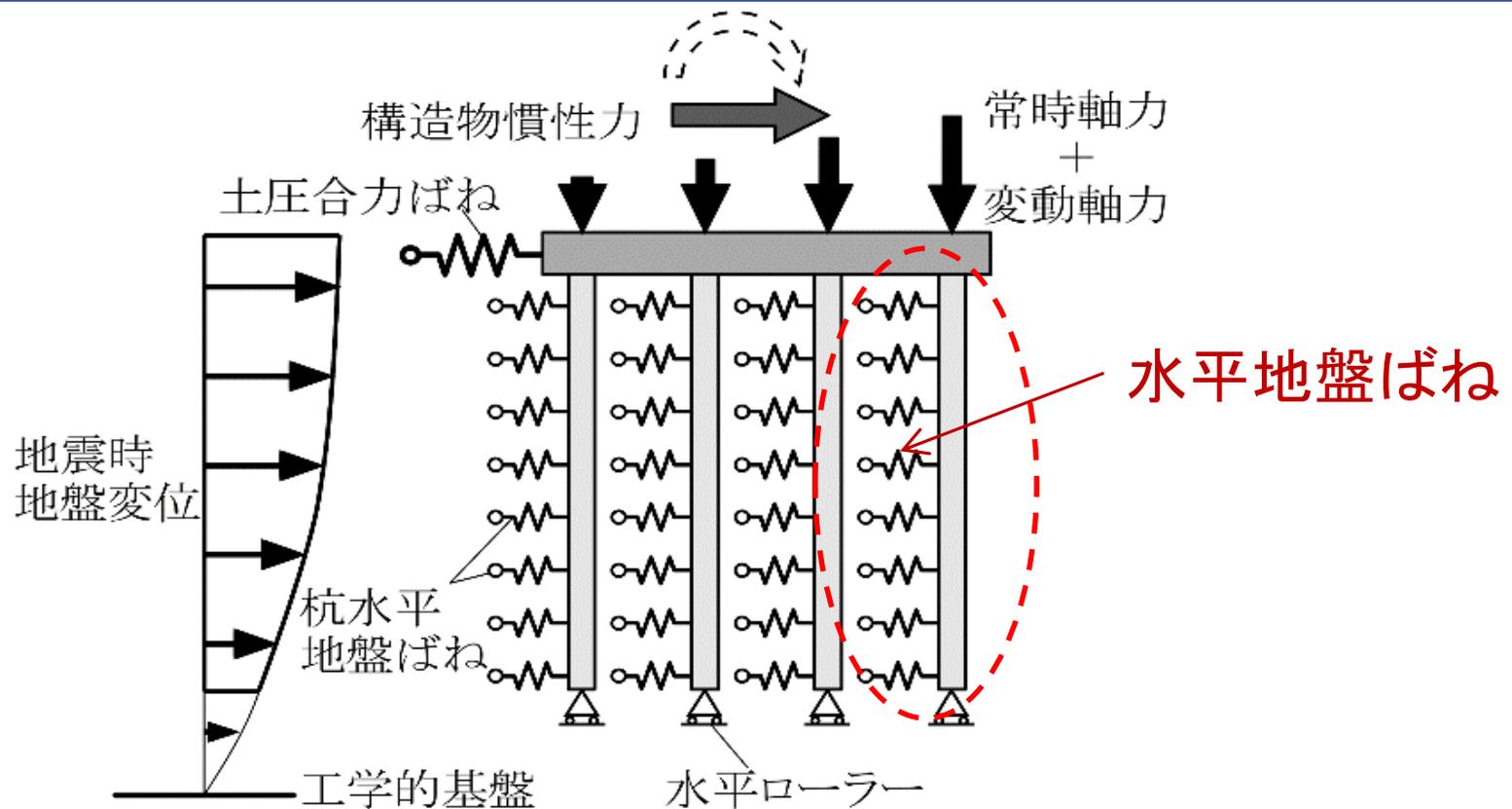
# 群杭フレームモデルの考え方

## 群杭フレームモデル (新基礎指針で新しく提案)



- ①地震動を等価な地震荷重に置き換えた静的解析モデル。
- ②杭の一行を取り出して、2次元モデル(列杭モデル)として評価。
- ③地盤と杭体は非線形として、増分解析を行う。
- ④基礎梁は原則として剛とする。

## 群杭フレームモデルの考え方 (2)



- ⑤ 杭周地盤を等価な**水平地盤ばね**に置換する。
- ⑥ 杭先端は**水平ローラー条件**として杭先端の沈下は許さない。
- ⑦ 水平地盤ばねを介して地盤変位を入力する（応答変位法）
- ⑧ 地下室がある場合や根入れが深い場合は、**土圧合力ばね**を設定する。

# 杭基礎の2次設計法に関する 今後の課題

# 杭基礎の2次設計法に関する3つの課題

## <新基礎指針2019>

- ① 鋼管杭のM- $\phi$ 関係と限界値が「付録」で示された。
- ② 2次設計法のための解析手法（群杭フレームモデル）が示された。



## <今後の課題>

- ① 鋼管杭のM- $\phi$ 関係について、現在見直し作業が実施されており、正規の検討はそれまで待つ必要がある。
- ② 群杭フレームモデルは示されたが、具体的な解析コードは整備されていない。
- ③ 群杭フレームモデルを使用し2次設計を行う場合の具体的なクライテリアと検討方法が示されていない。また、2次設計の効果が把握できていない。

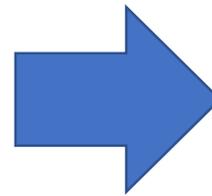
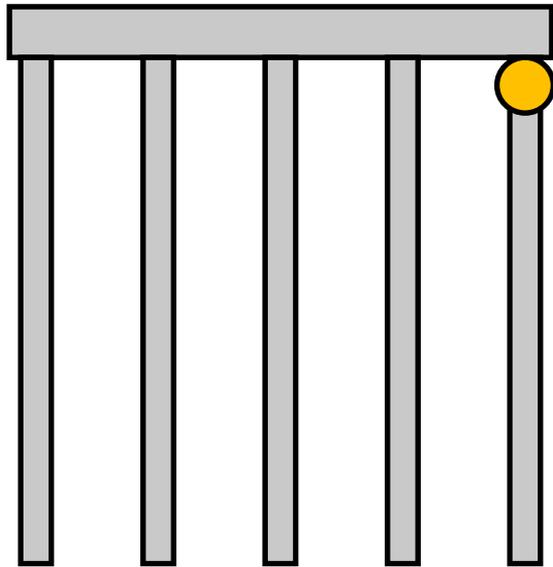
# 鋼管杭の2次設計法のイメージ

## <限界耐力評価>

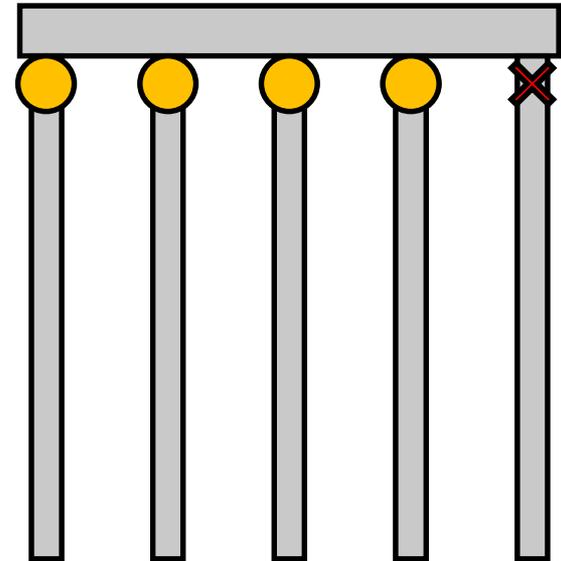
群杭内の1本が限界耐力に達した時点で終局とする。

## <限界変形評価>

群杭内に複数の塑性ヒンジが形成され、限界値に達した時点で終局とする



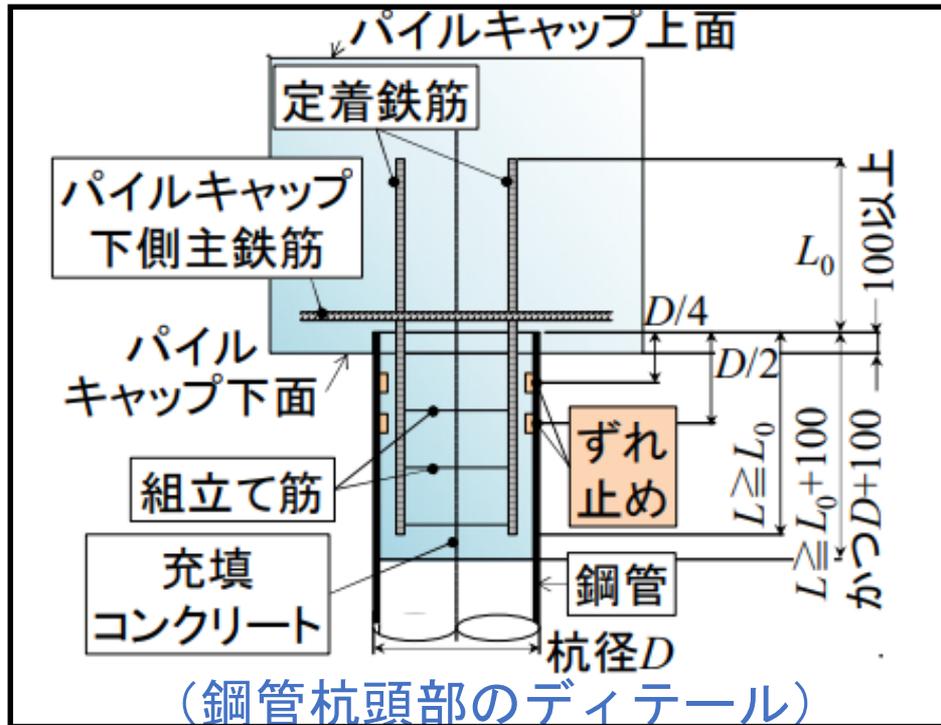
群杭内に複数の塑性ヒンジが形成されることで耐力増加が期待できる。



● : 塑性ヒンジ    × : 限界変形

合理的な2次設計のイメージ

# ①鋼管杭のM-φ関係

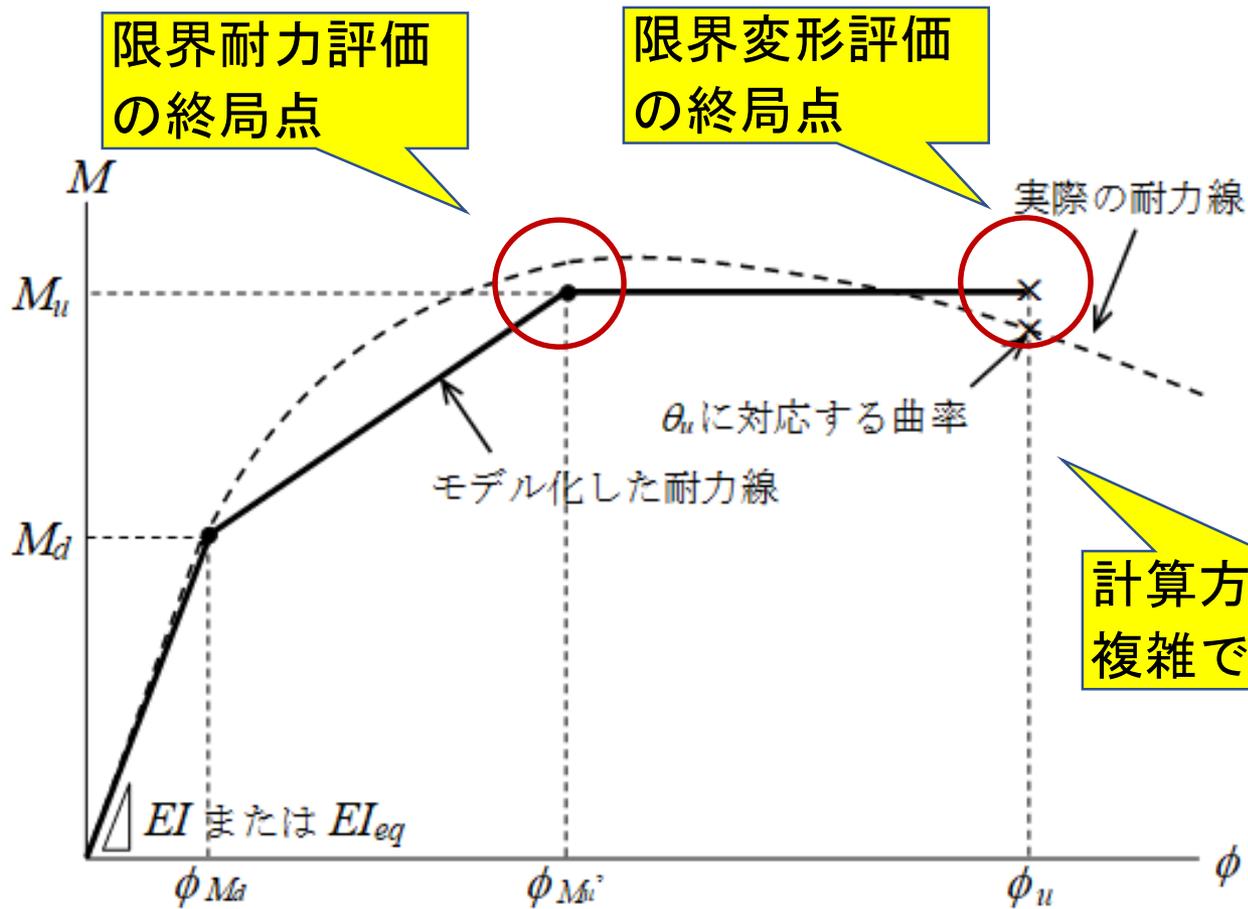


## 杭頭部

鋼管杭に鉄筋を溶接しRC基礎梁と緊結する。  
杭頭部の鋼管内にコンクリートを充填し、内部にずれ止め(突起)を設け鋼管と充填コンクリートの一体化を図る。

新基礎指針では、**鋼管杭頭部**(コンクリート充填部)と**一般部**(非充填部)の終局耐力及び塑性変形能力の評価法を示した。  
(付録「鋼管杭の保有性能」)

現在、建築学会で「**基礎部材の強度と変形性能**」(2021年秋に発刊予定)をまとめており、評価式を見直す予定。



計算方法は結構複雑で難しい

新基礎指針では「杭頭部」と「一般部」について、トリリニアタイプのM- $\phi$ 関係を設定。



計算ソフトの作成、配布等

## ②群杭フレームモデルの計算コード

新基礎指針の群杭フレームモデルを、使用するにはハードルが存在する。

- 結構、技術的に難しい内容を含んでいる。
- 現時点では群杭フレームモデルを組み入れた市販のソフトはない。

土方研究室では、既往の群杭載荷実験をシミュレートするプログラム（EASY-PILE）を作成していた。

新基礎指針に対応するよう改良し、群杭EASY-PILEを完成させた。（JSCC内に委員会を設置）  
→「鋼管杭基礎の二次設計法確立に向けた研究小委員会」

2020. 04から公開開始

希望者は(hijikata@shibaura-it.ac.jp) まで連絡をお願いします

# ③具体的な2次設計手順の検討

## <定めるべきクライテリアと検討手順>

- ①各杭のM- $\phi$ 関係の変形（曲率）により限界値を設定する場合、どの時点をもって許容限界とするか？
  - ・ 1本の杭が限界変形に達した時点を終了にする
  - ・ それ以前の段階で終了にする
  - ・ 1本の杭が限界変形に達した時点を越えて終了を定める
- ②杭軸力を考慮した各杭のM- $\phi$ 関係を設定方法はどうか？  
（増分解析では杭軸力が順次増加して行くが、この影響は直接考慮できないので、間接的に評価する必要がある）
  - 以下に計算方法の案を示す。
- ③群杭フレームモデルで増分解析を行う場合、基礎版の回転拘束条件はどうか
  - ・ 回転自由    ・ 回転拘束
- ④杭頭接合条件はどうか？
  - ・ 剛接    ・ 回転を考慮
  - 等々

JSCC内委員会で検討中

# 具体的な計算例(計算条件)

設計荷重を越えて限界まで载荷  
杭頭剛接合、基礎版回転拘束条件

水平力



地盤変位

GL

<表層地盤>

砂質土地盤

単位体積質量 : 1.8 [ton/m<sup>3</sup>]

ポアソン比 : 0.33

せん断波速度 : 100 [m/s]

内部摩擦角 : 21.3 [°]

<支持層地盤>

砂質土地盤

単位体積質量 : 1.8 [ton/m<sup>3</sup>]

ポアソン比 : 0.33

せん断波速度 : 300 [m/s]

内部摩擦角 : 46.6 [°]

杭番号

1

2

3

4

5

L

L

L

L

31.2[m]

4.8[m]

# 解析ケース

- ・ 鋼管杭の杭径、鋼管厚を3ケース設定する。
- ・ 設計荷重を越えて増分解析を実施し、限界耐力評価と限界変形評価の違いを把握する。

## ＜鋼管杭の共通諸元＞

杭長	36[m]
鋼材降伏応力度	357.5[N/mm <sup>2</sup> ]
ヤング係数	205000[N/mm <sup>2</sup> ]

## ＜各ケースの杭諸元＞

ケース	杭径 [mm]	杭間隔 [m]	鋼管厚[mm]				
			杭1	杭2	杭3	杭4	杭5
1	1200	4.8	20	20	20	20	20
2	600	2.4	20	20	20	20	20
3	600	2.4	10	10	10	10	10

# 検討用建物荷重

## <ケース1の建物諸元>

建物層数	8 [層]
建物1層の平米あたりの重量	1.39[ton/m <sup>2</sup> ]
建物面積	576[m <sup>2</sup> ]
C <sub>0</sub>	1
D <sub>s</sub>	0.5
転倒Mを算定するアーム長	21[m]

## <各ケースの建物荷重>

ケース	常時軸力[kN]	水平荷重[kN]	転倒モーメント[kNm]
1	2510	6000	130000
2	1255	3000	65000
3	627.5	1500	32500

(鋼管杭の断面積に比例して荷重を調整)

# 杭軸力の評価法(試案)

建物転倒モーメント ( $M_s$ : 設計荷重) に対応した杭軸力 ( $N_i$ ) を①式から設定

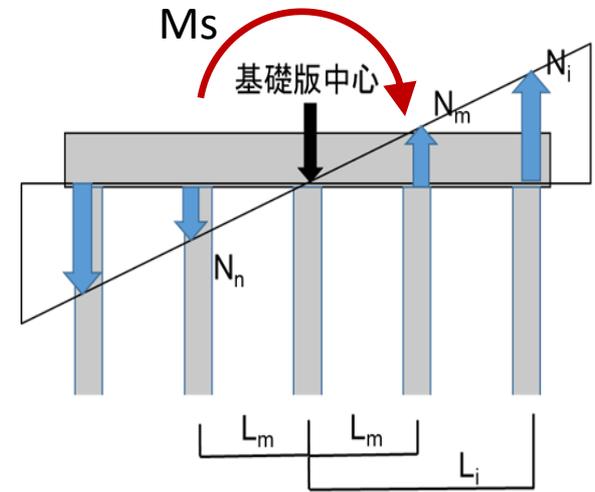
杭軸力  $N$  に対応する各杭の  $M-\phi$  関係 (固定値) を設定

この  $M-\phi$  関係を用いて基礎版回転拘束で増分解析を実施し、最終段階の杭頭モーメント ( $m_i$ ) を計算する。②式から杭軸力 ( $N^*$ ) を再計算する。

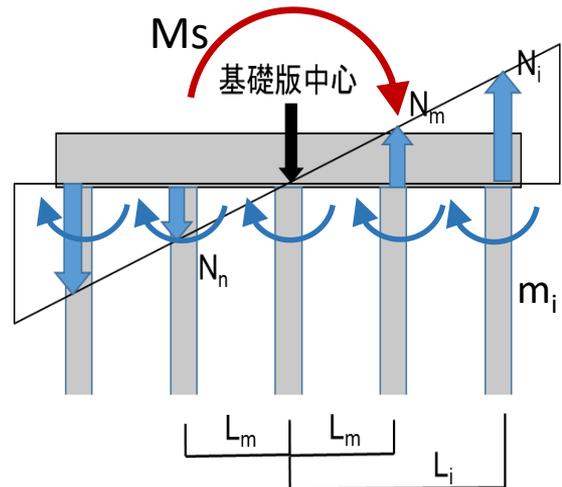
2段階の繰り返し計算

$N^*$  に対応する各杭の  $M^*-\phi$  関係を再設定する

再度、増分解析を実施する。

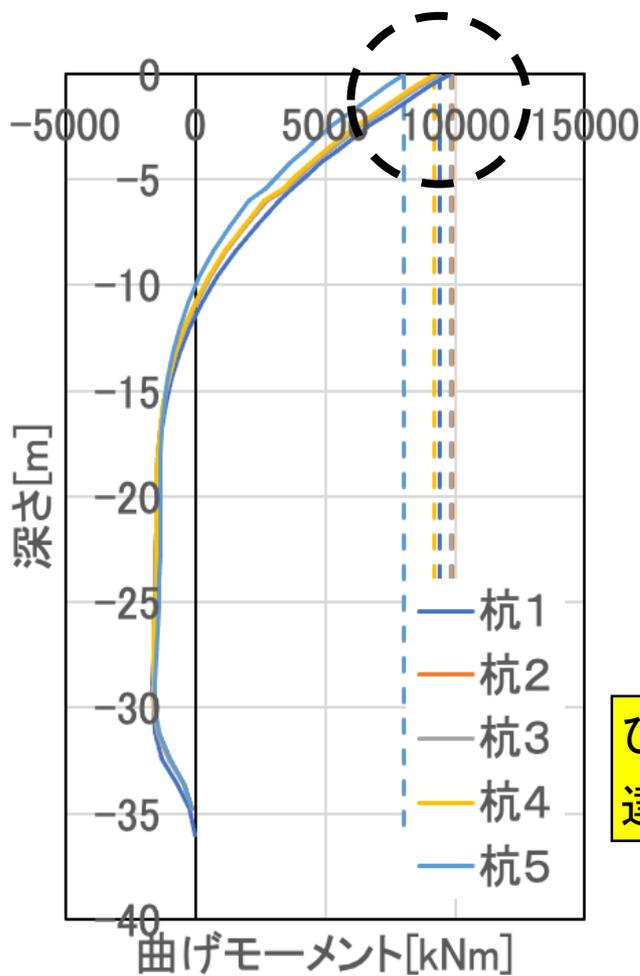


$$M_s = \sum N_i \times L_i \quad \cdots \textcircled{1}$$



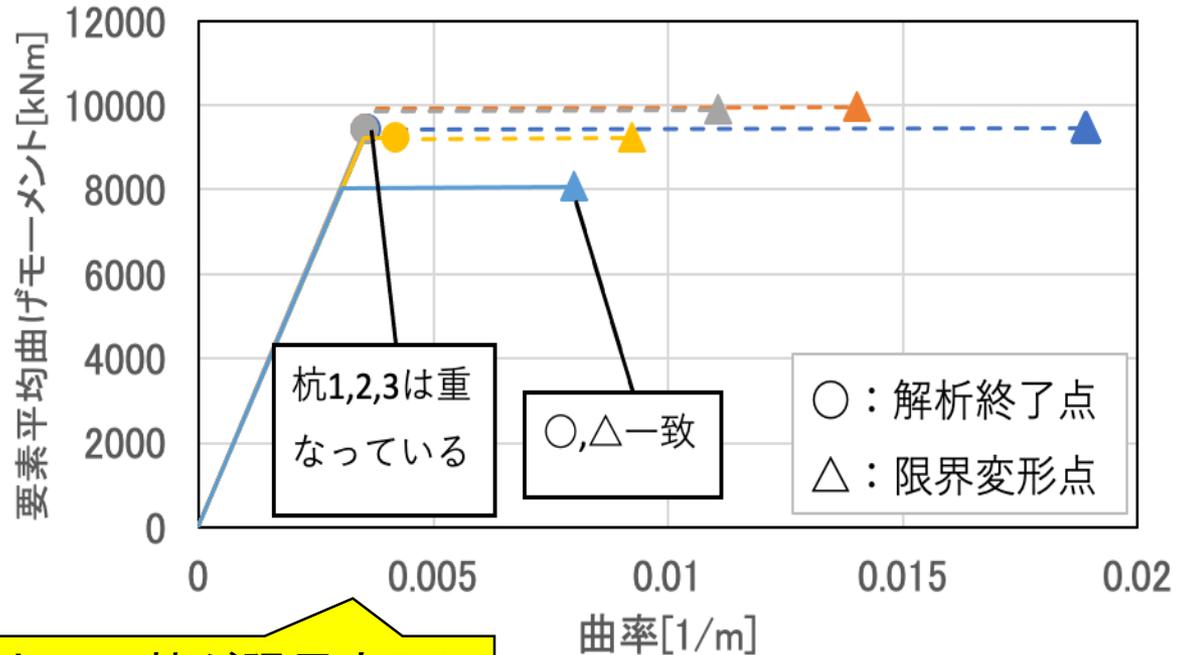
$$M_s + \sum m_i = \sum N_i^* \times L_i \quad \cdots \textcircled{2}$$

# (ケース1)の解析結果



ヒンジ：杭

— 杭1 — 杭2 — 杭3 — 杭4 — 杭5



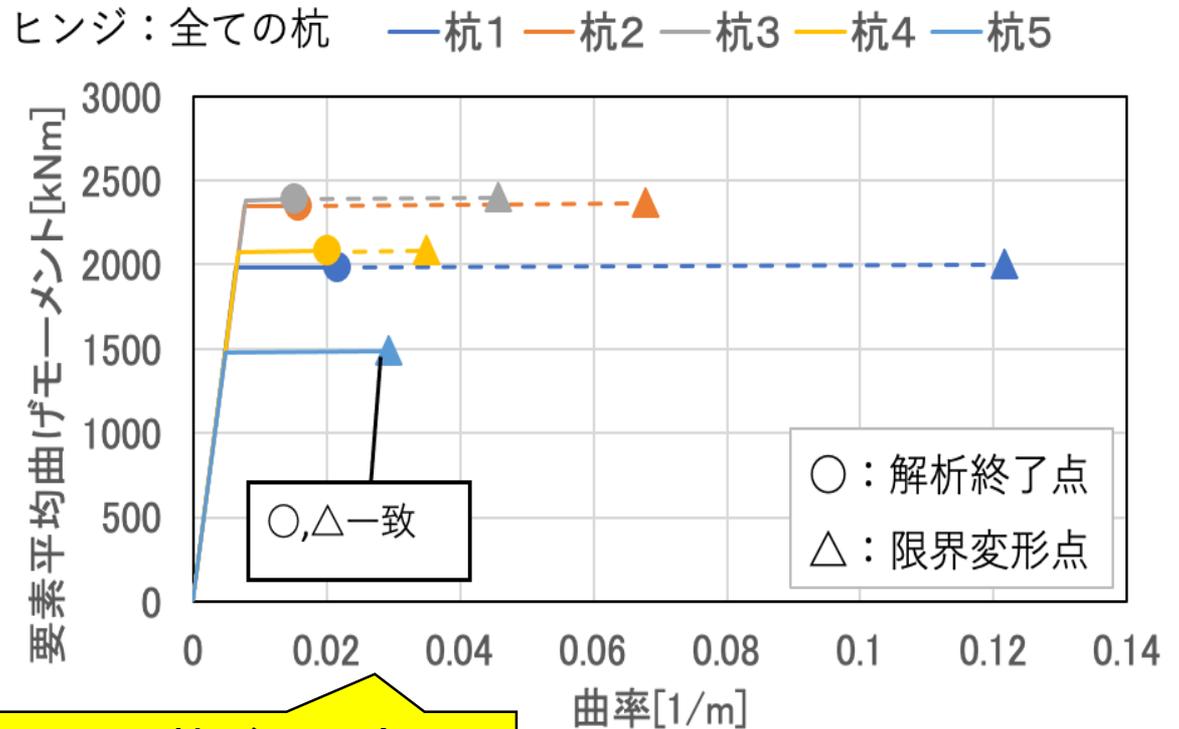
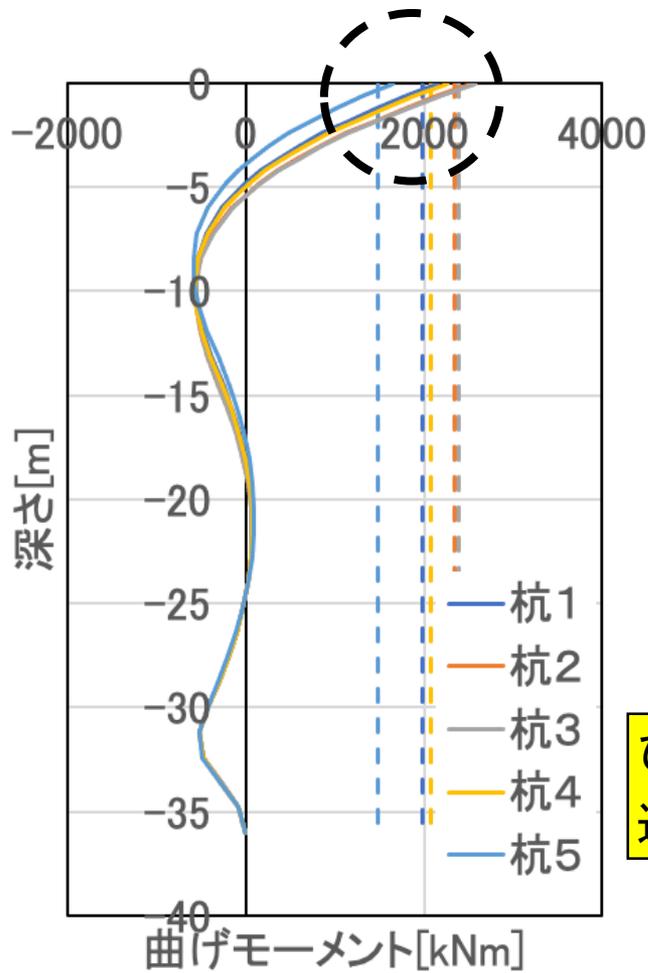
ひとつの杭が限界変形に達した時を終了とした

杭頭M- $\phi$ 関係

杭頭のモーメントが最も大きく、杭頭にヒンジが発生する。杭5のみ変形が大きい。

※波線は全塑性モーメント

# (ケース2)の解析結果



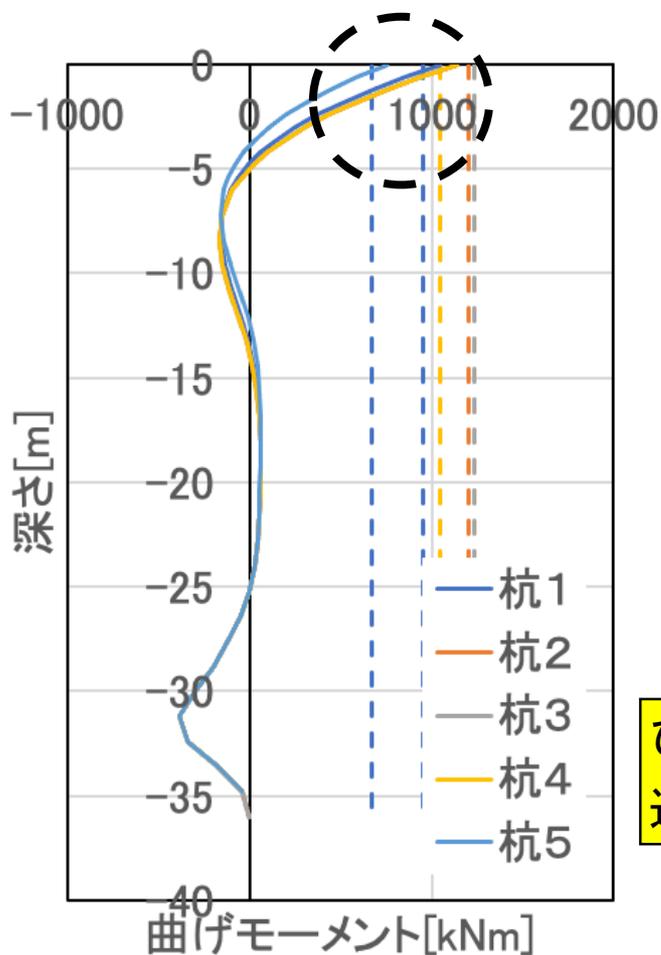
ひとつの杭が限界変形に達した時を終了とした

杭頭M- $\phi$ 関係

杭頭にヒンジが発生し、全ての杭で変形が進んでいる。

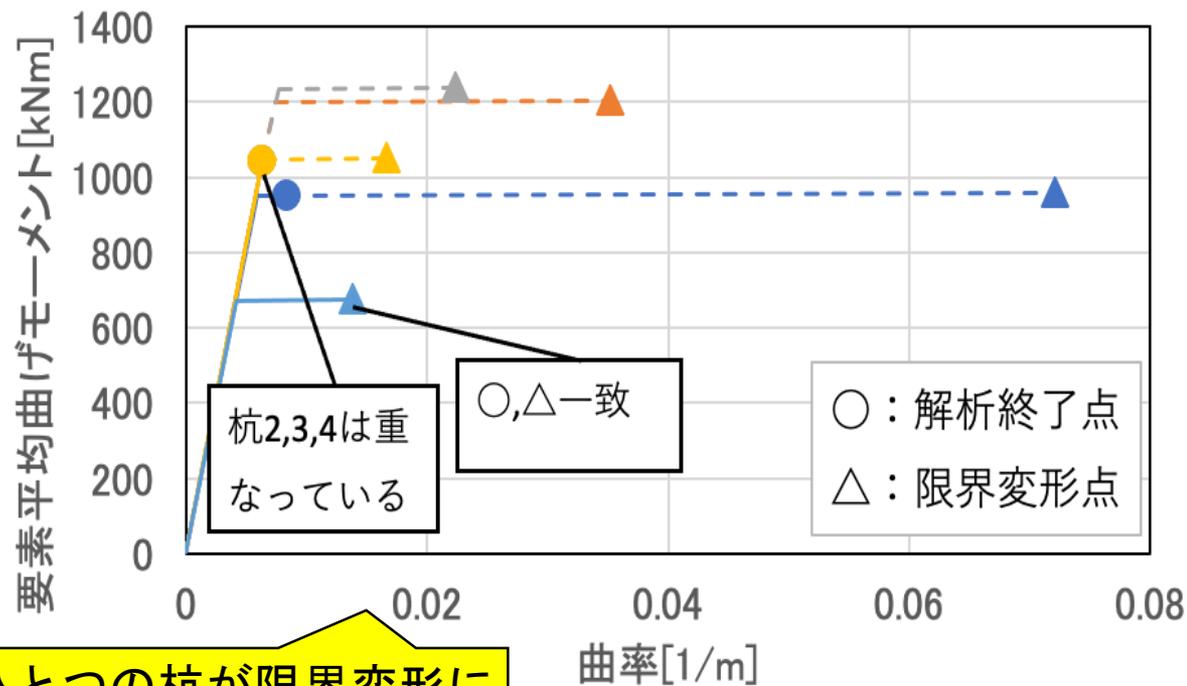
※波線は全塑性モーメント

# (ケース3)の解析結果



※波線は全塑性モーメント

ヒンジ：杭1,5 — 杭1 — 杭2 — 杭3 — 杭4 — 杭5

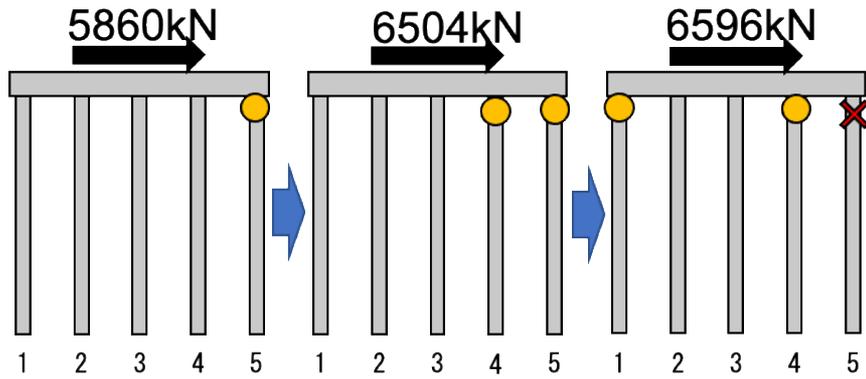


ひとつの杭が限界変形に達した時を終了とした

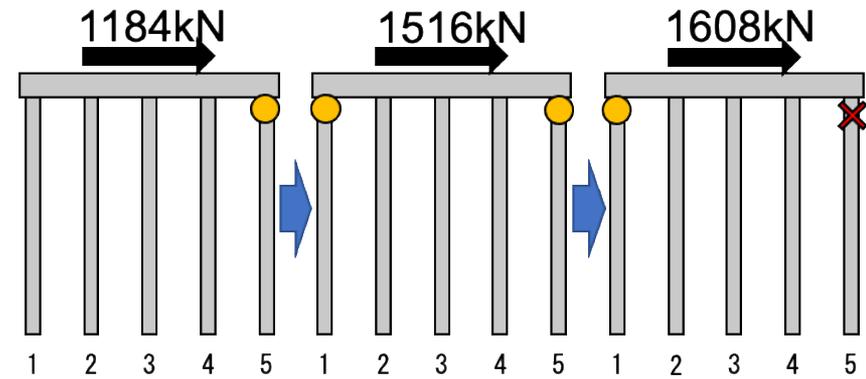
杭頭M- $\phi$ 関係

杭頭のモーメントが最も大きく、杭頭にヒンジが発生する。杭5のみ変形が大きい。

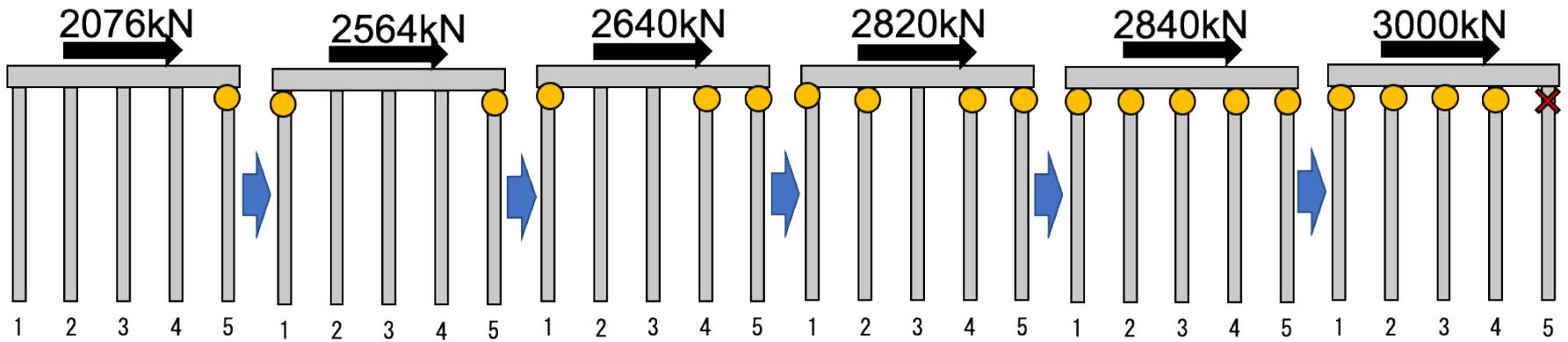
# ヒンジ形成の確認



<ケース1>

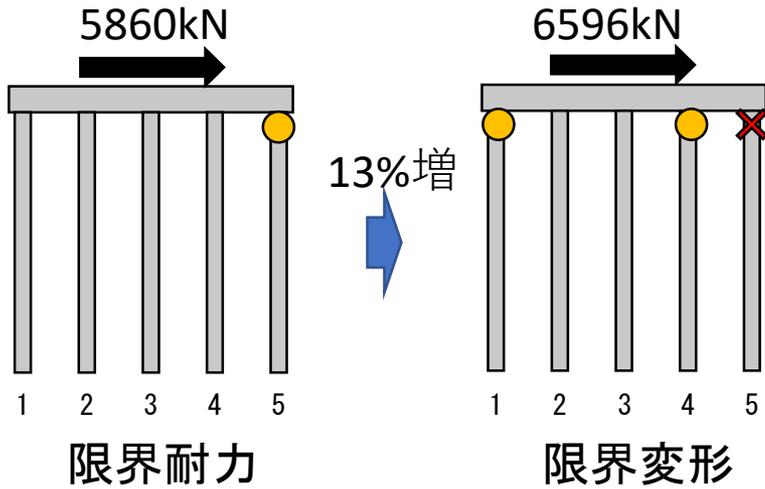


<ケース3>

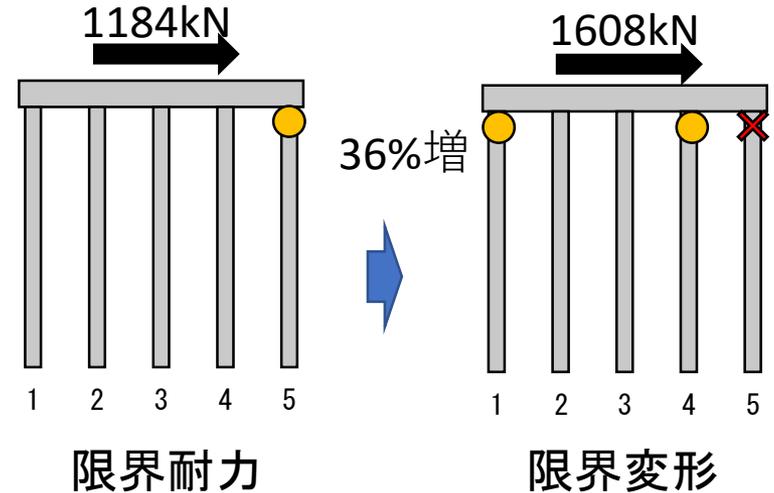


<ケース2>

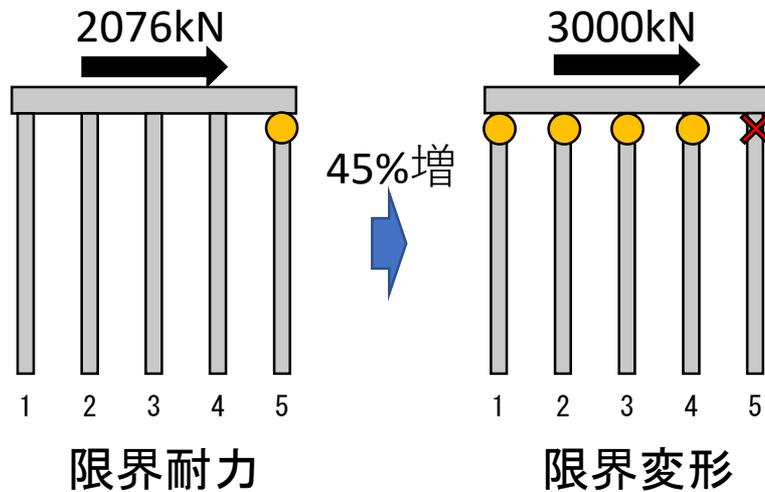
# 基礎版耐力の増加の確認



<ケース1>



<ケース3>



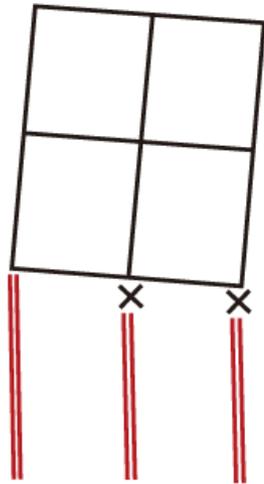
<ケース2>

ケース	耐力増加率
1	13%
2	45%
3	36%

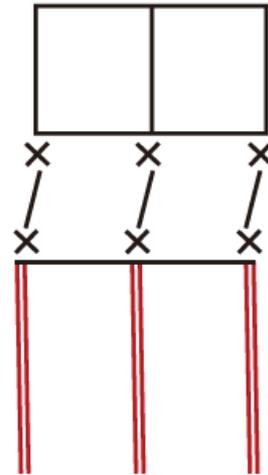
ひとつの杭が限界変形に達した時を終了とした

## 2次設計法の裏の解題

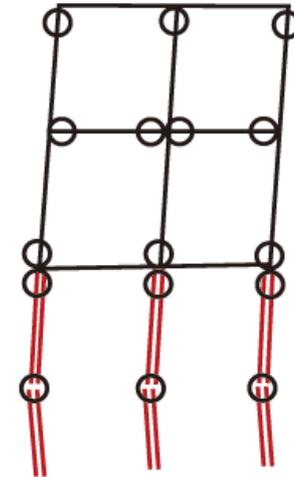
→上部構造と基礎構造をバランスさせた基礎構造の性能を検討する必要がある。



①基礎破壊先行型



②上部構造破壊先行型



③バランス型

- ①上部構造が健全で基礎破壊が先行することは好ましくない。
- ②現状、設計者は基礎が十分な耐力を有し上部構造の破壊が先行するモードを好ましいと考えている。
- ③上部構造と基礎構造がバランスした崩壊メカニズム等について研究し、経済的な杭基礎構造を志向する必要がある。

## <まとめ>

1. 新基礎指針で杭基礎構造の2次設計法が示された。
2. 本方法を用いることで、より性能に優れた杭基礎構造を実現できる。
3. 鋼管杭を対象に試算したところ、終局を変形限界で評価すると杭頭に複数のヒンジが発生し、合理化の可能性がある。
4. ただし今後検討を蓄積し手法を確立し、効果を見極める必要がある。また、何らかの形で公的なオーソライズも視野に入れる必要がある。

ご清聴ありがとうございました。