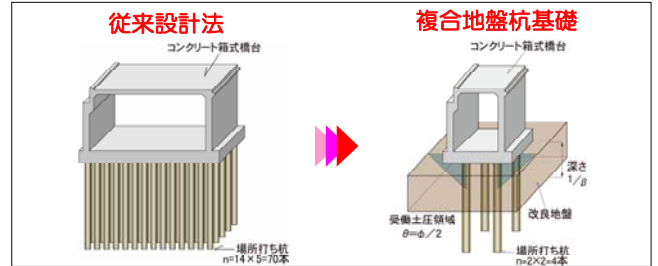


## 杭と地盤改良を併用した複合地盤杭基礎 による橋梁基礎の合理化技術

独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所  
寒地地盤チーム 富澤 幸一  
○ 江川 拓也

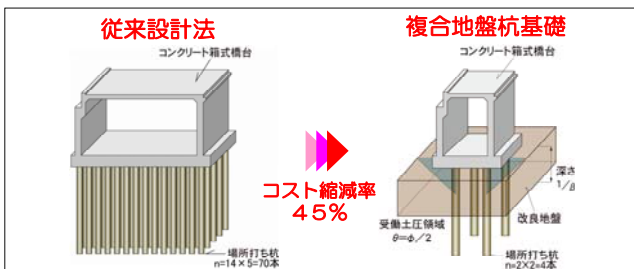
## 複合地盤杭基礎とは



軟弱地盤や液状化地盤に施工される杭の周辺に、固結工法・載荷重工法・サンドコンパクションパイル工法による複合地盤を形成し、地盤改良により増加したせん断強度を杭の水平抵抗・支持力に反映する設計・施工法。

コンセプト ▶▶ 建設コスト縮減・耐震性向上  
下部構造・基礎構造の合理化。水平力が支配的な条件で有利。

## 建設コスト縮減効果



【北海道での採用実績】 H15~H24 ▶▶ 20現場以上  
建設コストが大幅に削減 15~45% (平均30%)

【北海道外での採用実績】

- ▶ 有明沿岸道路 ▶ 軟弱地盤対策
- ▶ 阪神高速道路 ▶ 液状化対策
- ▶ 韓国 ソウル ▶ 沖積粘性土対策

## 基本設計法1 (改良強度)

設計前提： 杭基礎の設計法

改良地盤を(複合)地盤 = 反力体

固結工法による地盤改良強度  $q_u = 200 \sim 500 \text{ kN/m}^2$

改良地盤剛性は、粘性土地盤の約100倍程度

杭剛性は、場所打ち杭  $2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

鋼管杭  $2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$

と極めて大きい。

改良体は基礎の代用とはならない

改良地盤(複合地盤) ▶▶ 地盤として材料試験・数値解析

## 基本設計法2 (改良範囲)

地盤改良領域の設定

杭の水平抵抗領域

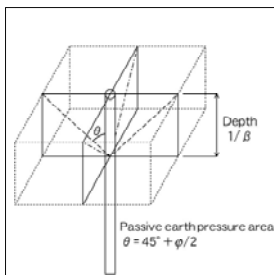
工学的根拠

- モール・クーロンの破壊規準
- 杭と地盤の極限平衡状態の釣り合い
- <さび理論の受動土圧領域

杭の特性長  $1/\beta$  以上

受動土圧領域  $\theta = 45^\circ + \phi/2$

着底が望ましい(境界部のせん断)



杭周辺の地盤改良領域  
(3次元四角形領域)

## 基本設計法3 (水平地盤反力の設計)

杭の水平方向地盤反力係数  $k_H = \frac{1}{0.3} \alpha E \cdot \left( \frac{\sqrt{D/\beta}}{0.3} \right)^{-3/4}$

### ① 固結工法

$$E = E_p \cdot a_p + \alpha \cdot E_0 (1 - a_p)$$

$$E_p = 100q_u$$

$E_p$ : 改良柱体の変形係数

$E_0$ : 原地盤の変形係数

深層混合処理工法における  
複合地盤せん断強度の算定式

$$S = S_p \cdot a_p + \alpha \cdot S_0 (1 - a_p)$$

$S_p$ : 改良柱体のせん断強度

$S_0$ : 原地盤のせん断強度

$a_p$ : 地盤改良率

地盤改良強度と  
変形係数の関係

### 基本設計法3 (水平地盤反力の設計)

#### ② 載荷重工法 (プレロード・真空圧密工法)

$$E = E_0 \cdot S/S_0$$

$E_0$ : 原地盤の変形係数  
 $S/S_0$ : 圧密によるせん断強度増加比

泥炭性軟弱地盤の圧密後のせん断強度  $S$  の算定式  
 $S = S_0 + \Delta S$   
 $S_0$ : 原地盤のせん断強度  
 $\Delta S$ : 圧密による増加せん断強度

孔内水平載荷試験などで変形係数を再照査することが望ましい

#### ③ サンドコンパクションパイル工法

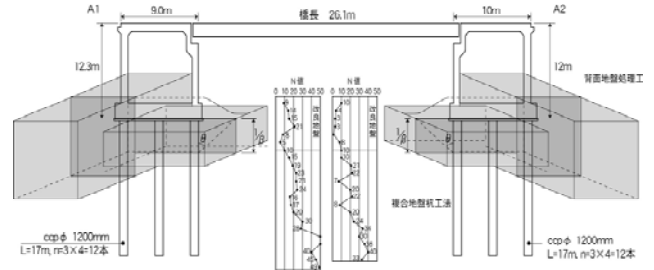
$$k_H = k_s \cdot a_s + k_c (1 - a_s)$$

$k_s$ : 砂杭の水平方向地盤反力係数  
 $k_c$ : 原地盤水平方向地盤反力係数  
 $a_s$ : 砂杭の置換率

$k_s, k_c$ :  $N$ 値 および  $E$  から算定 (砂杭の  $N$  値: 10~15程度)

直接的に水平方向地盤反力係数  $k_H$  の算定が可能

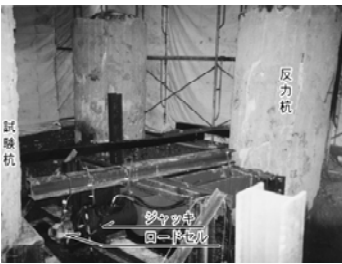
### 現場載荷試験による設計法の検証



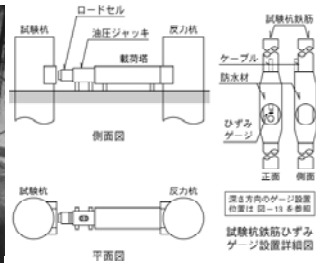
複合地盤杭基礎を採用した橋梁一般図・土質柱状図・地盤改良形状

固結工法による地盤改良強度  $q_u = 200 \text{ kN/m}^2$   
 改良率 = 78.5%

### 杭の水平載荷試験 (地盤工学会基準)



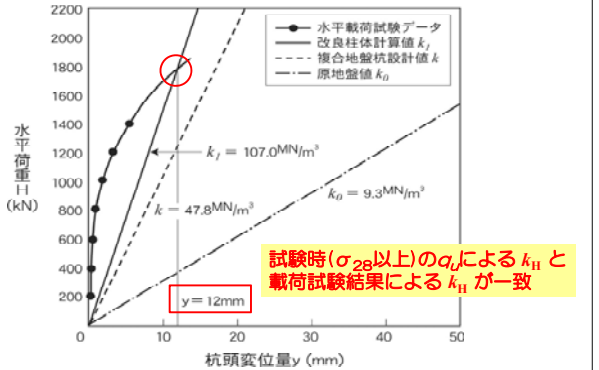
試験状況



試験装置の概要

杭頭水平荷重  $H$  ~ 杭頭変位置  $y$  関係から  
 杭の水平方向地盤反力係数  $k_H$  を評価

### 杭の水平載荷試験結果 $H \sim y$ 関係

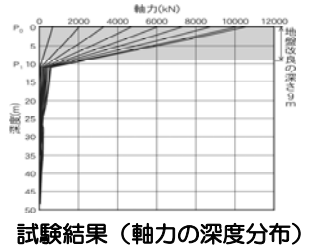


提案設計法の妥当性が検証された (弾性地盤反力法が成立)

### 杭の鉛直載荷試験 (地盤工学会基準)



試験状況



試験結果 (軸力の深度分布)

杭頭に作用させた軸力 (鉛直荷重) が改良地盤内で大きく減少  
 改良地盤内で周面摩擦力が発現

周面摩擦力  $f$  の算定式  $f = c (= S)$

$c$ : 複合地盤の粘着力 (固結工法の場合はせん断強度  $S (=q_u/2)$  と同等)

### 技術的懸案

- 懸案1. 基礎の施工管理はどうするのか?
- 懸案2. 杭変位で固化改良体は損傷しないか?
- 懸案3. 地震時の慣性力で挙動に問題はないか?

ただ水平抵抗が改善されれば良いのではない

<道路橋が定める要求性能・限界状態の確保>

- > 常時・L1地震時 基礎が健全性を損なわず弾性挙動
- > L2地震時 許容塑性率確保・動的解析による照査

### 懸案1. 施工管理は？



#### 施工カルテ策定

<施工手順>

- ① 地盤改良：変動係数低減管理=50%→30%
  - ・羽根切り回数 300→450回/m
  - ・一軸圧縮試験 回数増加
  - ・三軸圧縮試験 設計値検証
  - 均一性=並列ばね確保
- ② 杭施工（改良体の損傷回避）
  - ・全周回転方式場所打ち杭
  - ・鋼管ソイルセメント杭・プレローリング杭
  - 改良体と杭の接合確保



例) CDM工法

\*施工カルテに記載\*

- ・施工管理
- ・メンテナンス
- ・地震後の検証

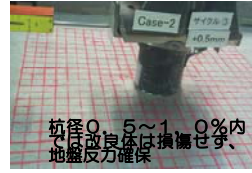
### 懸案2. 杭変位による改良体の損傷は？



#### 杭地盤反力照査・杭許容水平変位の低減

実大規模実験：杭の静的力学挙動・改良体の健全性評価

杭径10cm、改良体強度 $q_u=200\text{kN/m}^2$ 相当で載荷試験実施



>常時・L1地震時

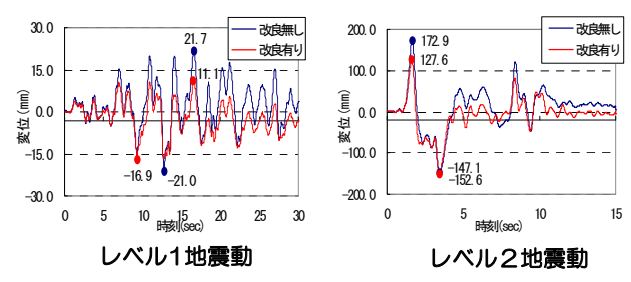
- ▶杭の水平地盤反力の照査=複合地盤の弾性限界を確保
- ▶杭の許容水平変位=杭径0.5%（通常1%）

改良体が損傷せず杭の弾性地盤反力法が成立

### 懸案3. 大規模地震時の耐震性は？



#### 動的非線形FEM解析



レベル1～ 改良無 21.7mm 改良有 11.1mm **-50%**  
 レベル2～ 改良無 172.9mm 改良有 127.6mm **-30%**

### 懸案3. 大規模地震時の耐震性は？



#### 遠心力模型実験



レベル2加振後の状況 = 健全

- ・杭は周辺地盤とほぼ一体化した動的挙動
- ・改良体の杭変形抑制効果 = 耐震性の向上

大規模地震に対し杭・改良体は損傷せず健全性を確保

### 詳細はガイドライン参照



寒地土研HPから無償ダウンロード可能

#### 設計施工法ガイドライン

#### 北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン

これまでの研究成果を反映し、土木研究所 寒地土木研究所より技術検討委員会の協議および関係機関への意見照会を経て、平成22年4月に設計施工法に関するガイドラインを策定。



本設計施工法の採用を御検討される場合は、

予備設計段階から協議・対応させていただきます。

寒地土木研究所 <http://www.ceri.go.jp/>

技術相談窓口

寒地技術推進室 TEL : 011-590-4050

FAX : 011-590-4048

MAIL : [gijutusoudan@ceri.go.jp](mailto:gijutusoudan@ceri.go.jp)

#### 複合地盤杭基礎

平成18年「北海道開発局長賞」受賞

平成21年「地盤工学会技術開発賞」受賞

平成22年「全建賞」受賞