看板を支持する層状地盤における杭基礎構造の設計・施工例

豊橋技術科学大学　学生会員　○高木　翔太
豊橋技術科学大学　国際会員　　三浦　均也
豊橋技術科学大学　国際会員　　松田　達也

1. はじめに

現在の看板や交通標識の建設においては，重力式の基礎構造が広く採用されている（写真-1）。しかし，この重力式基礎には施工・構造面においていくつかの課題が存在し，これらの課題を解決することが急務となっている。本研究で対象とする杭基礎の場合，これまでは Chang の公式によって算出される必要杭長が長くなってしまうために，支持基盤がかなり深い場合を除けば，コスト比較により採用された例は少ないのが現状である。そこで本研究では，重力式基礎が抱える問題を解決するとともに Chang の公式に変わる合理的な杭長決定方法を含む看板の設計・施工法を開発した。本稿では提案する杭基礎の設計・施工法を説明し，これまでに施工した直立式看板の事例を紹介する。

写真-1 直立式看板（左）　　片持ち式交通標識（右）

2. 看板のための既往の基礎構造

2.1 重力式基礎

重力式基礎は大きく，直接基礎と躯体基礎に分けられる。直接基礎では基礎本体の自重と地盤からの底面反力によって看板に作用する風荷重に抵抗する。一方，躯体基礎は躯体の側面に作用する地盤反力も合わせて，風荷重に抵抗する。

写真-2 は直接基礎の建設過程の一例を示している [1)]。まず基本的な工程として，バックホーによる掘削、砕石・基礎コンクリートの打設、鉄筋の組込み、コンクリートの打設，アンカーボルトによる支柱の取付，を行う。この事例では，例外的にコンクリート打設の際に型枠を用いず，建物の基礎側面までコンクリートを打設している。

次に，施工面の問題を列挙する。 (1) 掘削工、型枠工、鉄筋工、埋戻し工、水替え工が必要： これら多様な工程が必要になるが，近年は職人の高齢化・不足により特に型枠工，鉄筋工が困難になっている。また，地下水が浅い場合の水替え工は施工費を上昇させる一因ともなっている。 (2) 工期の長期化： (1) に挙げた工程に加えて，コンクリートの養生に長期間を要するため，通常は１か月以上の工期を要する。 (3) 広い工事占有面積： 掘削面積に加え，掘削のための重機，建設資材の搬入車両，コンクリートの運搬車両により占有面積が広くなり，交通規制が複数日に及ぶ場合も少なくない。

Design and construction method of pile foundation for signboard on stratified ground: Shota TAKAGI, Kinya MIURA, and Tatsuya MATSUDA (Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology)

バックホーによる掘削

砕石の敷設・基礎コンクリートの打設

鉄筋の組込み

コンクリートの打設・ボルトによる取付

写真-2 看板のための既往の直接基礎の施工例 [1)]

【構造面の問題】 (1) 支柱取り付け部の耐久性低下： 支柱基部の基礎へのフランジ結合部分ではアンカーボルトやナットを使用するが，これらの腐食が長期的に耐久性を低下させる。 (2) 地盤掘削による地盤の剛性・強度の低下： 地盤掘削により地盤が緩むため，これによる鉛直支持力の低下や，躯体基礎における水平支持力の低下が避けられない。また，埋戻し土の沈下も問題になる。 (3) コンクリートの大量使用： 多量の現地発生土が生じるためその処理に少なくない費用を要する。加えて，セメントの生成時における二酸化炭素の発生など，環境問題にも影響する。

2.2 杭基礎

既往の横荷重の受ける杭基礎の設計では，弾性床上の梁と見なしてたわみ挙動を解析している。いわゆる Chang の公式は，地盤を均質，杭長を無限大と仮定することで，この枠組みで誘導された簡易な計算式である。以下は，たわみδを求めるための支配方程式（微分方程式）と特性方程式，対応する 4 個の特性値と基本解である。さらに，それらを一次結合した一般解を示している。

$$-EI\frac{d^4\delta}{dz^4} = p = Dk\delta \quad \Rightarrow \delta = e^{\lambda z} \quad \Rightarrow -EI\lambda^4 = Dk$$

$$\Rightarrow \lambda = \beta + i\beta,\ \ \beta - i\beta,\ \ -\beta + i\beta,\ \ -\beta - i\beta \quad \because \beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \tag{2.1}$$

$$\therefore \delta = (a\cos\beta z + b\sin\beta z)e^{-\beta z} + (c\cos\beta z + d\sin\beta z)e^{\beta z}$$

ここで，δは深さ z の関数であるたわみ量で，D, EI, k はそれぞれ杭の外寸法，曲げ剛性，地盤反力係数である。βは波数（特性値）であり，波長は $2\pi/\beta$ となる。杭長を無限大と仮定すると，一般解において発散する後半の項は省かれることになり，以下の公式が得られる。

$$\delta = (a\cos\beta z + b\sin\beta z)e^{-\beta z} \tag{2.2}$$

無限長杭の仮定によって，一般解では 4 個あった未定定数は a, b の 2

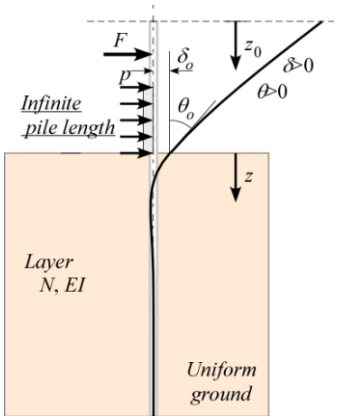


図-1 Chang の公式

個になるので，杭頭の載荷条件（せん断力と曲げモーメント）のみにより残りの未定定数が決定される。得られたたわみ挙動を保証するためには，半波長以上の杭長が必要であると考えるのが基本であり，通常，必要杭長 L は次式で計算される。

$$L = \pi / \beta \tag{2.3}$$

この必要杭長については，一般的には長すぎると考えられていて，半波長の 3 分の 2 程度でよいとの議論がある [2,3,4]。波長から杭長を求めることの基本的な問題は，杭の曲げ剛性 EI が大きくなると式(2.1)が示すように波数 β は小さくなることは明らかで，結果的に式(2.3)で計算される必要杭長は長くなる。すなわち，他の条件が同じであれば，杭の曲げ剛性を安全側に大きくとると，必要杭長がむしろ長くなるという矛盾を含んでいる。加えて，Chang の公式では，地盤の層構造を適切に考慮することができないという根本的な問題も有している。

3. 提案する看板のための杭基礎の概要

前節では看板のように横荷重（風荷重）を受ける既往の杭基礎の問題点を説明した。本研究では，これらの問題点を解決するために，以下に示すような３つの技術を用いた独自の構造・設計法を提案する。

① 重複反射法による杭のたわみ挙動解析 [3)]： この開発したたわみ挙動解析によって，地盤の層構造を考慮して，有限長の杭のたわみ挙動を計算することが可能となる。Chang の公式の問題点を克服し，杭のたわみ量に基づいて，合理的かつ経済的に必要杭長を決定することが可能になる。

② 看板，交通標識に最適な支柱と杭の結合構造： コンクリートの圧縮強度で看板支柱を支持する結合構造で，既往の基礎におけるアンカーボルトの腐食による耐久性の低下を防ぐことが可能になる。

③ 柱状地盤改良を利用した杭の打設： 地盤掘削による地盤の支持力（地盤反力）の低下を地盤改良によって解消することが可能になる。これにより，型枠工，鉄筋工，水替え工などの工程が不要になり，現地発生土を最小に抑えることも可能になる。

以下では，①と②について説明し，③については後節の施工例において説明する。

3.1 重複反射法

重複反射法は複数の層の境界で透過・反射する波動を解析するもので（図-2），この手法を杭の波動解析に適用した。地盤の層構造は，複数の均質で，厚さが一様な層によってモデル化した。これらを串刺しにする杭は地層境界に合わせて複数のセグメントに分割する。杭頭の荷重条件に加えて，その地層の境界ではたわみ δ，たわみ角 θ，曲げモーメント M，せん断力 Q がそれぞれ連続で，有限長杭の先端では M=0，Q=0 である，というのが境界条件になる。

均質な地層内では Chang の公式の誘導過程と同じ式(2.1)によって杭のたわみ挙動を記述できる。特性値 β が依存している地盤反力係数 k は図-3 に示すように杭の変位量に伴って減少するが，実験により定められた以下の経験式によって，許容変位量 δ_a=1cm に対応する弾性係数 k を用いる（図-3）。変位が標準値 1cm の時の地盤反力係数 k は，以下に示すように N 値および外径 D の関数である。

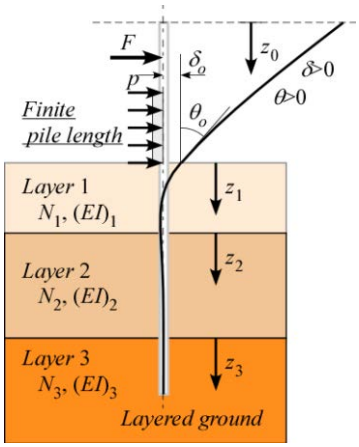


図-2 重複反射法

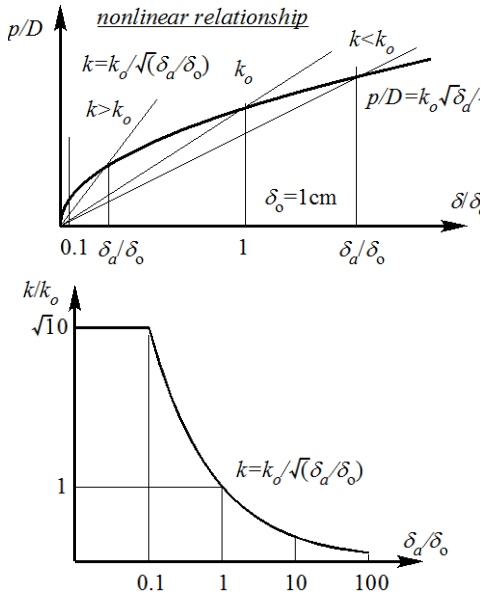


図-3 地盤反力係数

$$p/D = k\delta;\quad k = \frac{k_o}{\sqrt{\delta_a/\delta_o}} = k_o \quad \because\ \delta_a = \delta_o = 1\text{cm} \tag{3.1}$$

$$k_o = \alpha \cdot E_o \cdot D^{-3/4},\quad \alpha = 0.2,\quad E_o = 28N$$

式(2.1)に含まれる未知数 a, b, c, d を用いると以下の 4×4 のマトリックスによってたわみ挙動を記述できる。各層ごとのマトリックスを境界条件を満たすように連結して解くことによって，許容杭頭変位に対応する必要杭長は，杭長を変化させた繰り返し計算によって算出する。詳細は参考文献を参照していただきたい[4)]。

$$\begin{Bmatrix} Q \\ M \\ \theta \\ \delta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\beta^3 EIe^{-\beta z}(\cos\beta z - \sin\beta z) & 2\beta^3 EIe^{-\beta z}(\cos\beta z + \sin\beta z) & 2\beta^3 EIe^{\beta z}(-\cos\beta z - \sin\beta z) & 2\beta^3 EIe^{\beta z}(\cos\beta z - \sin\beta z) \\ 2\beta^2 EIe^{-\beta z}(\sin\beta z) & 2\beta^2 EIe^{-\beta z}(-\cos\beta z) & 2\beta^2 EIe^{\beta z}(-\sin\beta z) & 2\beta^2 EIe^{\beta z}(\cos\beta z) \\ -\beta e^{-\beta z}(-\cos\beta z - \sin\beta z) & -\beta e^{-\beta z}(\cos\beta z - \sin\beta z) & -\beta e^{\beta z}(\cos\beta z - \sin\beta z) & -\beta e^{\beta z}(\cos\beta z + \sin\beta z) \\ e^{-\beta z}\cos\beta z & e^{-\beta z}\sin\beta z & e^{\beta z}\cos\beta z & e^{\beta z}\sin\beta z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

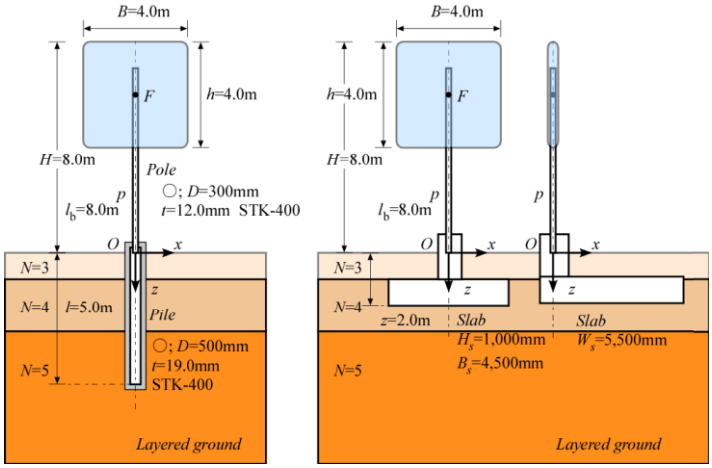
（試設計による基礎の比較）　表示板寸法 4m×4m の看板を，図−4 に示す地盤条件において支持する場合について既往の直接基礎と提案する杭基礎で試設計して比較する。表示板にかかる全風荷重は Fw=15.77kN，支柱にかかる全風荷重は Fw=0.79kN と算出され，杭頭における水平荷重は Q_h=16.56kN，曲げモーメントは M_h=96.21kNm であった。両者における試算の結果を図−4 に模式的に示している。

提案する杭基礎では，円形鋼管を用いると，杭の外径 D=500mm，厚さ t=19.0mm，改良体直径 D=700mm，杭長 L=5.0m と算出された。Chang の公式によって算出される必要杭長は，平均した N 値 4 を用いて算出すると L=10.5m となり，重複反射法の場合の 2 倍以上の長さになる。一方，重力式基礎の場合，直接基礎のコンクリートスラブは，幅 W_s=5.0m，奥行 B_s=4.5m，厚さ H_s=1.0m で体積が 24.75m^3 であった。

提案する杭基礎では，セメントモルタル注入量に相当する柱状改良体の約 1m 程度の部分が現地発生土に相当し，約 0.4m^3 程度と試算される。一方，重力式基礎の現地発生土はコンクリートスラブの容積に相当する 25m^3 程度と推定される。

3.2 支柱−杭の結合構造

写真−3 は，開発した支柱-杭の結合構造の施工直後の状態を示している。コンクリートが固化するまでの間は，ボルトの支圧力だけで風荷重を受ける看板を支持することを設計条件としている。したがって，杭の打設から支柱の取り付けまでには，杭の周囲の改良体が原地盤に相当する剛性を発揮するまでの２・３日空けるとしても，杭の施工から完成までの工程は４日程度である。一方，既往の直接基礎では，支柱を固定するためのアンカーボルトが強度を発揮するためにスラブのコンクリートが固化するのを待つ必要があるために，工期が１か月以上となる。



図−4 杭基礎･重力式基礎の比較

写真−3 支柱−杭結合構造

写真-4 施工現場全景

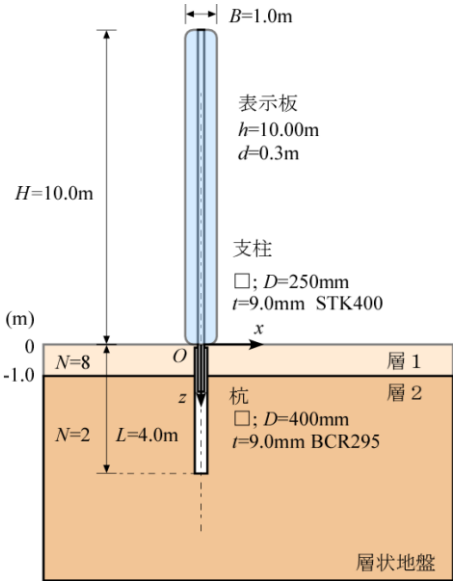


図-5 看板・地盤概要

4. 設計法と設計例

4.1 設計手順

設計手順は以下のようである。

(1) 地盤調査を行い，地盤の地層構造をモデル化する

(2) 看板の仕様から，風荷重や看板・支柱の重量など，基礎に加わる荷重を算出する

(3) 風荷重に耐えるように，支柱の断面を許容応力度法によって決定する

(4) 決定した支柱の断面と支柱-杭結合構造から，杭の断面を決定する

(5) 杭頭でのたわみ量を許容変位 1cm 以下になる杭長を決定する

4.2 看板概要と仕様（写真-4，図-5）

看板の建設位置は静岡県浜松市である。表示板は高さ h=10m，幅 B=1.0m，厚さ d=0.3m である。設計結果を列挙すると, 支柱は角形鋼管(STK-400), 外径 D=250mm, 肉厚 t=9.0mm, 高さ 10.0m, 杭は角形鋼管(BCR-295), 外径 D=400mm，肉厚 t=9.0mm，杭長は L=4.0m となった。設計計算の例を説明する。

4.3 風荷重

看板全体にかかる風荷重を建築基準 [2)]によって算出する。静岡県浜松市は地域区分(2)に属し，この区分の基準風速 32m/s を用いて風荷重を計算する。この看板の場合，図-5 に示すように，地上部分に出ているのは表示板のみであるので，支柱には風荷重が作用しない。風荷重 F_w(kN) の算出方法は以下のようである。

$$F_w = A_w \times p_w = 10.0 \times 0.974 = 9.74\ \mathrm{kN}$$
$$p_w = C_f \times q = 1.006 \times 0.968 = 0.974\ \mathrm{kN/m^2} \qquad (4.1)$$

ここで，A_w(m^2)は看板面の投影面積，p_w(kN/m^2)は風圧力，q(kN/m^2)は速度圧である。速度圧 q には土地の利用形態分類，看板の形状等が加味されて，基本的には基準速度の２剰に比例する値である。風荷重の算定に適用される規則等は参考文献 [7)] に取りまとめられている通りである。

4.4 支柱断面の決定と断面力の照査

風荷重と看板の自重(2.45kN)から支柱基部における断面力は，せん断力 Q_h=9.74kN，曲げモーメント M_h=48.70kNm，軸力 F=8.97kN と算出された。曲げ圧縮応力度$\sigma_c+\sigma_b$の許容応力度σ_aに対して動員される断面応力を 0.5 程度（安全率 2）に抑えることを目標に，外径 D=250mm に対して肉厚 t を繰返し計算において変化させて，最終的に肉厚 t=9.0mm と決定した。この場合の杭の断面特性は，断面積 A_s=84.67cm^2，断面二次モーメント I=8093cm^4，断面係数 Z=647.5cm^3 であった。応力度の照査は以下のようである。

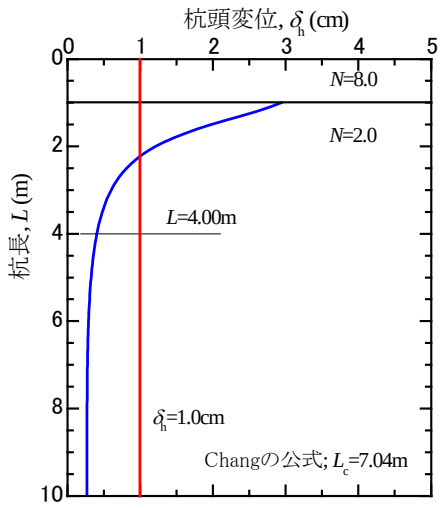


図-6 杭長の決定（マスターカーブ）

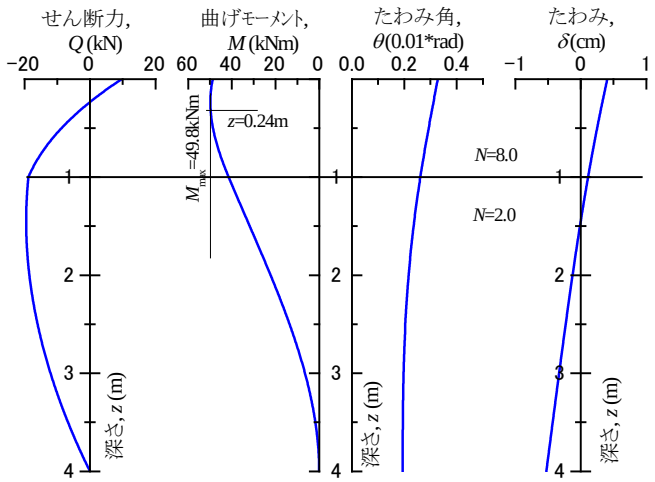


図-7 杭のたわみ挙動

$$\sigma_c = F / A_s = (8.97\times1000)/(84.67\times100) = 1.06\ \mathrm{N/mm^2}$$
$$\sigma_b = M_h / Z = (48.7\times1000)/(8093\times10000) = 75.3\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (4.2)$$
$$\sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b = 1.06/43.9 + 75.3/235 = 0.024 + 0.320 = 0.344$$

圧縮，曲げそれぞれに対する許容応力度 f_c, f_b は，座屈を考慮して短期荷重に対するものを用いた（参考文献[7]参照）。応力の許容値に対する動員率が示すように，支柱の場合は圧縮力に比べて曲げモーメントの貢献が大きいことが明らかである。ここでは省略するが，別途せん断力に対する照査，最大圧縮応力に対する照査も実施し，許容値に対して十分な余裕があることを確認した。

4.5 杭の断面と長さの決定と断面力の照査

支柱－杭結合構造から，杭の外径は支柱外径より 150-200mm 大きいのを標準としていて，このケースでは，杭の外径を D=400mm，肉厚を支柱と同じ t=9mm とした。モデル化した地盤条件（図-5）に基づいて，繰り返し計算によって杭長と杭頭変位の関係を求めた結果を図-6 に示している。このマスターカーブによると杭頭の許容変位 δ_h=1cm を満たすには杭長は L=2.3m で十分であるが，地盤の上部には厚さ 1m 程度の比較的固い盛土層（N=8）があるが，表土は長期の信頼性が低いこと，看板高さの半分が 5m であることを考慮して，このケースでは杭長を L=4.0m と決定した。このとき，杭頭変位は δ_h=0.41cm (<1.0cm)と計算された。参考のために Chang の公式では，N 値 8 の均質地盤を仮定すると必要杭長は L=7.04m，深さ 4m までの平均 N 値 5 を用いた場合の必要杭長は L=7.92m となり，重複反射法により求めた杭長の 3 倍以上，決定した杭長の 2 倍程度であることが分かる。

杭長決定後，改めてせん断力 Q，曲げモーメント M，たわみ角 θ，たわみ量 δ の杭長全体にわたる分布を計算した（図-7）。これによる曲げモーメントは深さ z=0.24m で最大値になる。このとき，曲げモーメント M_m=49.8(kN)，Q_m=0(N)，軸力 F=9.22(kN)であった。杭の断面特性は，単面積 A_s=138.0mm^2，断面二次モーメント I=34790cm^4，断面係数 Z=1739cm^3 であるので。応力度の照査は以下のようになる。

$$\sigma_c = F / A_s = (9.22\times1000)/(138\times100) = 0.67\ \mathrm{N/mm^2}$$
$$\sigma_b = M_h / Z = (49.8\times1000)/(1739\times1000) = 28.7\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (4.3)$$
$$\sigma_c / f_c + \sigma_b / f_b = 0.67/266 + 28.7/295 = 0.0025 + 0.097 = 0.100$$

圧縮，曲げそれぞれに対する許容応力度 f_c, f_b は，座屈を考慮して短期荷重に対するものを用いた（参考文献[7]参照）。応力の許容値に対する動員率は 10%程度で，かなり余裕のある結果になっている。このことは支柱－杭結合構造により，杭の外径は支柱の外径よりも一回り大きくなっていることにも原因がある。先に示したように提案する重複反射法を用いることによって，許容杭頭変位に対応した杭長を決定することができ，

オーガーによる地盤の掘削　　現地発生土（上部 1m 程度）の搬出　　セメントの注入撹拌

写真-5　柱状地盤改良体の造成

改良体への杭の立て込み　　杭上部の中掘り（1.5m）　　支柱底板プレートの設置

写真-6　杭の立て込み

既往の Chang の公式で求められる必要杭長よりも格段に短い杭長を採用することができるので，結果的には経済的な材料費と施工費が提言できることになる。

杭の鉛直支持力に対する照査も通常の方法で実施したが，周面摩擦力を無視して先端支持力のみを考慮した場合でも，軸力の極限支持力に対する動員率は 10%以下であった。詳細は割愛する。

5. 施工法と施工例

5.1 柱状改良体の構築　（写真-5）

杭は，柱状の地盤改良体の中に立て込まれるが，これは市街地での看板の建設においては杭の打ち込みによる振動や騒音は避けなければならないので，この地盤改良による工法を選択した。ほとんどの場合，柱状改良体の剛性が原地盤の剛性を上回るが，地盤改良体は杭と地盤の密着を良くして地盤反力を適切に発揮させることを期待している。したがって，上で説明した設計（重複反射法）においては，地盤反力の算定に地盤改良体の強度を考慮していない。

(1) 測量による位置決定： 掘削する位置を出す。側溝等が近くにある場合，掘削円の中心は改良体半径+20cm 程度離れた位置とする。 (2) 基礎鋼管の天端部の空堀（1m 程度）： 注入するセメントと水の容積に相当する上部 1m 程度の土を取り除く。改良体は現地土にセメントと水を混ぜることによって作製されるため，現地発生土は，小型(2t)トラック 1 台で十分運べる量であった。 (3) オーガーによる地盤の掘削と練返し: セメントは水に溶いた状態で注入するが,均等に混ざるようにオーガーにより複数回注入前に練り返す。 (4) セメントの混合・撹拌（ソイルモルタルの造成）： セメント注入後も均等に混合するようにオーガーにより繰り返して撹拌する。

5.2 杭の立て建込み　（写真-6）

(1) 杭の立て込み： 改良体が硬化し始める前に，速やかに開始する。 (2) 鋼管内の空堀：支柱 - 杭一体構造の結合部分の空間を確保する。空堀はオーガーによって行い，上部約 1.5m 程度とする。支柱結合部分は標準で 1.5m としている。 (3) 支柱鋼管固定プレートおよび縦鉄筋の設置： 杭内に立て込む支柱の姿勢を保つようにプレートを杭内に設置する，鉄筋はガイドであるのに加えて，杭と支柱の間に充填するコンクリートの圧縮強度を十分に発揮するために用いている。

支柱の立て込み　　周辺の整備後

写真-7 支柱の立て込み

写真-8 完成写真

5.3 支柱の立て込み （写真-7）

(1) 支柱の立て込み： 支柱と看板が一体となっている場合には，改良体の強度・剛性が原地盤を上回るまで２・３日置くことになる。しかし，この施工例のように，支柱下部にフランジ結合を有していて，看板を後日取り付ける場合には，柱状改良体造成と同日に支柱の立て込みが可能になる。 (2) 姿勢の調節： ボルトによって支柱の姿勢を調整し，緊結する。 (3) コンクリート打設： 支柱と杭の隙間にコンクリートを充填する。長期的にはコンクリートの圧縮強度で看板にかかる荷重に耐えるように設計されている。

6. まとめ

既往の重力式基礎構造の問題点を解決するために看板や交通標識のための杭基礎構造の設計・施工法を開発した。この工法は，次に示す３つの技術に基づいている ① 許容杭頭変位に対して，地盤の層構造を考慮して合理的に必要杭長を決定できる，「重複反射法による杭のたわみ挙動解析法」， ② 腐食に対して弱点となるアンカーボルト・ナットを使用せず，さらに工期短縮を可能にする，「支柱－杭の結合構造」，③ 杭打設時の振動や騒音を避け，地盤の反力を十分に発揮させることが可能な，「地盤の柱状改良工法」。

本報告では，上記の 3 つの技術により，現在広く使われている重力式基礎や杭基礎の設計における Chang の公式が抱える問題点を解決できることを説明した。写真-8 に完成状態を示した施工事例では，朝 8 時から作業を開始し午後 3 時には支柱の取付までの工程を完了した。看板の上部構造の取り付けは約一か月後に 4 時間程度で終了した。このことからも，提案する工法は工期の大幅な短縮を可能にすることが明らかである。

紹介した施工事例以外に，現在ではもう 1 例の施工実績がある。また，実施工に先立って 2 例の試験施工とそれらについての試験載荷を実施しているが [8)]，今後も，種々の適用条件と設計・施工法を検討する。

参考文献

1) 株式会社コヤマ (2011)；http://signs-koyama.cocolog-nifty.com/blog/2011/10/post-dd46.html
2) 建築基礎構造設計指針 6.6 節；日本建築学会 (2001), pp. 262-296.
3) 右城猛(2006)；鋼矢板を用いた自立式土留め工の設計，四国地方整備局研修資料
4) 三浦均也，松田達也，羽柴慶太，KEODUANGCHITH (2014)；風荷重を受ける看板・交通標識を支持する杭基礎の重複反射法を用いた設計法，第 23 回調査・設計・施工技術報告会，地盤工学会中部支部
5) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
6) 道路標識設置基準・同解説；日本道路協会 (1987)
7) JFE スチール株式会社 (2013)；鋼構造設計便覧, http://www.jfe-steel.co.jp/products/building/binran/binran.pdf
8) 三浦均也，高木翔太，ケオドゥンチット・ソムチット，松田達也 (2014)；水平荷重を受ける支柱 - 杭一体構造の設計・施工法とその載荷試験，第 59 回地盤工学シンポジウム，地盤工学会