

建築物のための改良地盤の設計 及び品質管理指針

「セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法」に
おける算定式の妥当性について

平井弘義 ● 応地研(株)

はじめに

建築基準法の改正が行われ、国土交通省告示1113号¹⁾において、セメント系固化材を用いた改良地盤に関する規定が設けられた。また、告示1113号に基づき、改訂版「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—²⁾(以下、改良指針と呼ぶ)においては、改良地盤の設計法が示された。

しかしながら、改良指針および改良指針に関連した刊行物³⁾に掲げられている一部の算定式の妥当性について疑問点が以前から指摘されており⁴⁾、今回、改良指針における算定式の妥当性を改めて検討してみる。

木村他³⁾による改良地盤の算定式

改良指針が刊行される以前に、木村他³⁾によって新基準法に基づく基礎設計の検討例が提示された。

この論文においては許容鉛直支持力度 q_{a1} を求める際、次式を採用している。

$$q_{a1} = 1/F_s \cdot \{q_a \cdot A_b + \sum (\tau_{di} \cdot h_i) L_s\} / A_f - w_b \quad (1)$$

ここに、 A_f ：基礎スラブの底面積、 A_b ：改良地盤の底面積、 τ_{di} ：改良地盤周面に作用する極限周面摩擦力度、 h_i ：層厚、 L_s ：改良地盤の外周の長さ、 F_s ：安全率、 w_b ：改良地盤の単位面積当りの重量である。下部地盤における極限鉛直支持力度 q_d は以下ようになる。

$$q_d = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B_u N_\gamma + \gamma_2 D_f' N_q \quad (2)$$

ここに、 α 、 β ：形状係数、 c ：下部地盤の粘着力、 γ_1 ：下部地盤の単位体積重量、 γ_2 ：下部地盤より上方にある地盤の平均単位体積重量、 D_f' ：地盤面から下部地盤までの深さ、 B_u ：改良地盤の底面の最小幅、 N_c 、 N_γ 、 N_q ：支持力係数である。

また、改良地盤上の基礎底面における許容鉛直支持力度 q_{a2} は以下の式を採用している。

$$q_{a2} = n \cdot (R_u / F_s - W_p) / A_f \quad (3)$$

ここに、 W_p ：単体である改良体の重量であり、 n ：改良体の本数である。改良体の極限鉛直支持力 R_u は次のように与えられる。

$$R_u = R_{pu} + \psi \cdot \sum \tau_{di} \cdot h_i \quad (4)$$

ここに、 ψ ：改良体の周長であり、 R_{pu} は次のように与えられている。

$$\text{砂質土の場合：} R_{pu} = 75 \cdot \bar{N} \cdot A_p \text{ (kN)} \quad (5)$$

$$\text{粘性土の場合：} R_{pu} = 6 \cdot c \cdot A_p \text{ (kN)} \quad (6)$$

ここに、 \bar{N} ：改良体先端部における N 値の平均値、 A_p ：改良体の先端有効断面積である。

ここで、式(1)と式(3)は、 $F_s=1$ の場合に相当する極限支持力における力の釣合条件式を理論的に満足しておらず、許容鉛直支持力度として、力学的に採用されるものではないと考えられる。一方、上記の式(1)と式(3)において、自重 w_b および W_p の項を省略すると、以下で述べる改良指針において示される算定式になる。

改良指針²⁾における算定式

以下では、改良指針における算定式を指針式と略し、他と識別するために下指標 g を付加し、 q_{a1g} および q_{a2g} とする。指針式においては、改良地盤の許容鉛直支持力度 q_{a1} および q_{a2} を求める際、次式を採用している。

$$q_{a1g} = 1/F_s \cdot \{q_a \cdot A_b + \sum (\tau_{di} \cdot h_i) L_s\} / A_f \quad (7)$$

$$q_{a2g} = 1/F_s \cdot (n \cdot R_{ug}) / A_f \quad (8)$$

ここに、下部地盤における極限鉛直支持力度 q_d は以下のようにになる。

$$q_d = i_c \alpha c N_c + i_\gamma \beta \gamma_1 B_u N_\gamma + i_q \gamma_2 D_f' N_q \quad (9)$$

ここに、 i_c 、 i_γ 、 i_q ：傾斜係数である。また、改良体の極限鉛直支持力 R_{ug} は次のように与えられる。

$$R_{ug} = R_{pug} + \psi \cdot \sum \tau_{di} \cdot h_i \quad (10)$$

ここに、 R_{pug} は次のように与えられている。

$$\text{砂質土の場合：} R_{pug} = 75 \cdot \bar{N} \cdot A_p \text{ (kN)} \quad (11)$$

$$\text{粘性土の場合：} R_{pug} = 6 \cdot c \cdot A_p \text{ (kN)} \quad (12)$$

平井等⁴⁾によって提案された

許容鉛直支持力 q_{a1} および q_{a2} の算定式

改良地盤の許容応力度と沈下量に関して、平井等⁴⁾は改良地盤を一般的な多層地盤としてモデル化し、算定法を提案した。提示された許容鉛直支持力度式を提案式と略し、他と区別するために下指標 p を付加し、 q_{a1p} および q_{a2p} とする。今回、地下水位の影響および改良地盤底面直下以外の下部土質層の影響がない場合について検討する。

まず、平成13年告示1113号第2表(1)において示されているように、地盤の許容応力度は極限支持力度を安全率 γ で除して与えられる。そのような考え方に従って、多層地盤の許容応力度が提案された⁵⁾。そこで同様な考え方を採用して、まず、力の釣合条件式から改良地盤上の基礎スラブ底面における極限支持力度を求める。次に、許容鉛直支持力度 q_{a1} を求める際、改良地盤上の基礎スラブ底面における極限支持力度を安全率 F_s で割り、改良地盤上の基礎スラブ底面における許容鉛直支持力度 q_{a1} とすると次のようになる。

$$q_{a1p} = 1/F_s \cdot \{ (q_a - u_b) \cdot A_p + \sum (\tau_{ai} \cdot h_i) L_s \} / A_f \quad (13)$$

ここに、極限支持力度

$$q_a = i_c \alpha c N_c + i_\gamma \beta \gamma_1 B_b N_\gamma + i_q \gamma_2 D_f^2 N_q \quad (14)$$

である。

また、許容鉛直支持力度 q_{a2p} に関しては、 q_{a1p} の算定と同様にして、次のように与えられる。

$$q_{a2p} = 1/F_s \{ n(R_{rup} - W_p) \} / A_f \quad (15)$$

ここに、改良体の極限鉛直支持力 R_{rup} は次のようになる。

$$R_{rup} = R_{rup} + \psi \cdot \sum \tau_{ai} \cdot h_i \quad (16)$$

$$\text{砂質土の場合: } R_{rup} = 75 \cdot \bar{N} \cdot A_p (kN) \quad (17)$$

$$\text{粘性土の場合: } R_{rup} = \left\{ 6 \cdot c + \sum_{m=1}^{k-1} \gamma_m H_m \right\} \cdot A_p (kN) \quad (18)$$

ここに、改良地盤の底面は第 k 層直上にあるものとし、式(18)において、右辺の括弧の中の第2項は第1層から第 $(k-1)$ 層までの総和として単位面積当たりの重量を示し⁴⁾、この第2項は抑え荷重に対応するもの⁶⁾である。また、式(18)は山口による表示式^{7), 8)}と同様であり、改良指針における式(12)とは相違する。

さて、式(7)によって与えられる指針式における許容鉛直支持力度 q_{a1} に関しては、自重項が含まれておらず、 $F_s=1$ の場合に相当する極限支持力において、力の釣合条件式を満足していない。

一方、式(13)によって示された q_{a1} の提案式においては、自重項が考慮されており、極限支持力における力の釣合条件式を満足し、山口による杭の支持力式⁶⁾と同様な形を呈している。また、杭の許容支持力における自

重の取り扱い方法については、道路橋示方書⁹⁾および関連図書¹⁰⁾に明解に記述されており、改良地盤の許容鉛直支持力度に関しても同様の方法が適用できるので、上記式(13)~(18)を導くことができる。

次に、式(15)で示される許容鉛直支持力度 q_{a2p} について考える。まず、砂質土について、式(16)に式(17)を代入し、

$$75 \cdot \bar{N} \cdot A_p \gg W_p \quad (19)$$

と仮定すれば、式(15)は次のようになる。

$$q_{a2p} = 1/F_s \{ n(75 \cdot \bar{N} \cdot A_p + \psi \cdot \sum \tau_{ai} \cdot h_i) \} / A_f \quad (20)$$

一方、粘性土について、式(16)に式(18)を代入し、

$$\left\{ \sum_{m=1}^{k-1} \gamma_m H_m \right\} \cdot A_p \approx W_p \quad (21)$$

と仮定すれば、式(15)は次のようになる。

$$q_{a2p} = 1/F_s \{ n(6 \cdot c \cdot A_p + \psi \cdot \sum \tau_{ai} \cdot h_i) \} / A_f \quad (22)$$

ここで、山口の支持力式⁶⁾に従って考察すると、まず、砂質土については式(19)が仮定されるならば、式(15)は式(20)となり、式(10)と式(11)を用いた指針式(8)と同じ形となる。次に、粘性土については、式(21)が仮定されるならば、式(15)は式(22)となり、式(10)と式(12)を用いた指針式(8)と同じ形となる。

しかし、砂質土について式(19)が仮定されるのは、改良体を支持杭的に使用しうる場合が考えられるが、摩擦杭的に用いられる場合には、式(19)は一般的には適用されないと考えられる。一方、改良体を支持杭的あるいは摩擦杭的に取り扱う場合において、改良前後で重量の変化は少ないので、式(21)の仮定は改良体のような場合には、近似式として妥当性⁶⁾があると考えられる。

ゆえに、許容鉛直支持力度 q_{a2} の算定式に関しては、式(15)~式(18)によって与えられる q_{a2p} を用いることが一般的であると考えられる。

指針式と提案式に関する妥当性の検討

上記において示された指針式と提案式に関して、それぞれの妥当性を検討する。

検討例1

まず q_{a1} と q_{a2} に関して、指針式(7)と式(8)および提案式(13)と(15)を取り上げる。図1は改良地盤内にある改良体が一本の場合を示している。いま、下部地盤を粘性土地盤として $\phi = \phi_u = 0$ と仮定し、また $i_c = i_\gamma = i_q = 1.0$ として改良地盤の許容鉛直支持力度を算定する場合について考察する。改良地盤の底面を円形と仮定すれば $\alpha = 1.2$ となり、 $N_c = 5.1$ 、 $N_\gamma = 0.0$ 、 $N_q = 1.0$ であるから、式(9)~(12)より次式をうる。

$$q_d = 6 \cdot c + \gamma_2 D_f' \quad (23)$$

$$\begin{aligned} R_{ug} &= R_{pug} + \phi \cdot \sum \tau_{di} \cdot h_i \\ &= 6 \cdot c \cdot A_p + \phi \cdot c \cdot D_f' \end{aligned} \quad (24)$$

ゆえに、式 (7) と (8) は次のようになる。

$$\begin{aligned} q_{a1g} &= 1/F_s \{ q_d \cdot A_b + \sum (\tau_{di} \cdot h_i) L_s \} / A_f \\ &= 1/F_s \{ (6c + \gamma_2 D_f') A_b + c D_f' L_s \} / A_f \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} q_{a2g} &= 1/F_s (n \cdot R_{ug}) / A_f \\ &= 1/F_s (6c A_p + \phi \cdot c \cdot D_f') / A_f \end{aligned} \quad (26)$$

いま、 $A_b = A_p$ 、 $L_s = \phi$ であるから

$$q_{a1g} \neq q_{a2g} \quad (27)$$

となり、極限支持力における力の釣合条件式を満足しているならば、改良体は一本であるため、 q_{a1g} は q_{a2g} と本来等しくならなければならない。しかし、先に述べたように、指針式 (7) は極限支持力における力の釣合条件式を満足していないために、式 (27) に示されるような不合理な結果が得られた。

一方、提案式 (13) ~ (18) を用いれば、 $\gamma_2 D_f' \approx w_b$ と仮定できるので、次のようになる。

$$\begin{aligned} q_{a1p} &= 1/F_s \{ (q_d - w_b) \cdot A_b + \sum (\tau_{di} \cdot h_i) L_s \} / A_f \\ &= 1/F_s \{ 6c A_b + c D_f' L_s \} / A_f \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} q_{a2p} &= 1/F_s \{ n \cdot (R_{up} - W_p) \} / A_f \\ &= 1/F_s (6c A_p + \phi \cdot c \cdot D_f') / A_f \end{aligned} \quad (29)$$

ゆえに、式 (28) と (29) より次式をうる。

$$q_{a1p} = q_{a2p} \quad (30)$$

式 (30) の結果は妥当性のあるものであると考えられる。なぜなら、式 (28) および (29) によって与えられる許容鉛直支持力度は、極限支持力における力の釣合条件から導かれており、それゆえ、改良体が一本であるならば、式 (28) および (29) は同一の式に帰着しなければならないからである。

検討例2

図1に示すように、下部地盤を軟弱な粘性土地盤として $c = c_u = 0$ 、 $\phi = \phi_u = 0$ と仮定し、また $i_c = i_\gamma = i_q = 1.0$ として改良地盤の許容鉛直支持力度を算定する場合について考察する。検討例1の結果を用いれば、式 (25) と式 (26) より次式をうる。

$$q_{a1g} = 1/F_s \{ \gamma_2 D_f' A_b \} / A_f \quad (31)$$

$$q_{a2g} = 0 \quad (32)$$

式 (31) は釣合条件式を満足していないため、零とならず、しかるに、式 (32) は釣合条件式を満足しているので、零になる。

一方、検討例1の結果を用いて、式 (28) と式 (29) より次のようになる。

$$q_{a1p} = q_{a2p} = 0 \quad (33)$$

式 (33) の結果は、力学的に適切なものである。すな

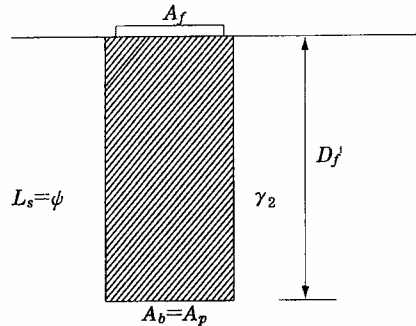


図1 改良地盤内にある改良体が一本の場合

わち、式 (33) は下部地盤が液体状を呈する $c = 0$ 、 $\phi = 0$ であるような場合、下部地盤は排土圧力 (土の浮力ともいえる) までの載荷圧に耐えることができることを意味している¹¹⁾。今回の場合、排土圧力と改良地盤の重量はほぼ等しいと仮定されるので、式 (33) は下部地盤が改良地盤そのものの自重までは耐えることができることを示している。

まとめ

改良地盤における許容鉛直支持力度式の妥当性を検証し、次のようなことがわかった。

①指針式 (7) および (8) は極限支持力における力の釣合条件を満足しておらず、そのため改良地盤の許容鉛直支持力度式として用いることができないと考えられる。さらに具体的な検討例1と2からも、指針式は、極限支持力における力の釣合条件を満足していないため、力学的妥当性のある結果を与えないことが分かった。

②一方、平成13年告示1113号において示されている内容に従うと、極限支持力における力の釣合条件から式 (13) および (15) の提案式が導かれた。さらに、提案式は検討例1と2からも分かるように、力学的妥当性を有する改良地盤の許容鉛直支持力度式であることが明らかとなった。

(ひらい ひろよし)

【参考文献】

- 1) 国土交通省告示第1113号：官報，号外第196号，pp.4-5，2001
- 2) 日本建築センター：改訂版「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」—セメント系固材を用いた深層・浅層混合処理工法，2002
- 3) 木村他：地盤改良の検討例，建築技術，No.626，pp.116~122，2002年3月号
- 4) 平井弘義・亀井健史：改良地盤の許容応力度と沈下量の算定法，第48回地盤工学シンポジウム，平成15年度論文集，地盤工学会，pp.37-44，2003
- 5) 平井弘義・亀井健史：サウンディング試験を用いた地盤の許容応力度の算定法に関する一提案，日本建築学会構造系論文集，第557号，pp.113-120，2002年7月
- 6) 山口柏樹：土質力学 (第3版)，技報堂出版，pp.280-282，1984
- 7) 山口柏樹：土質力学 (第1版)，技報堂出版，pp.286-291，1969
- 8) 山口柏樹：土質力学 (第3版)，技報堂出版，pp.262-266，1984
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編・IV 下部構造編，pp.353-363，2002
- 10) 矢作權・五十嵐功・田中英明：5訂新版よくわかる杭基礎の設計，山海堂，pp.52-53，2003
- 11) 山口柏樹：土質力学 (第3版)，技報堂出版，pp.260-261，1984