

報告

圧縮型ルートパイルの設計手段について

荷重の処理法と設計手段の考察

Foundation load treatment and design criteria for Compression micro-piling with 'Reticulated Root Pile (RRP)'

谷山 慎吾 (たにやま しんご)

エスティーエンジニアリング株式会社 代表取締役

e-mail: taniyama@st-eng.co.jp

菅原 匡孝 (すがわら まさのり)

エスティーエンジニアリング株式会社 技術部長

キーワード：圧縮型ルートパイル，補強土，検討基準面，基礎荷重，斜面すべり荷重

1. はじめに

軟弱地盤上に構造物を構築する場合，置換工法や各種の地盤改良工法が多用される。一方，玉石や巨礫混じり層や大きな機械を持ち込めない狭隘地施工では，高価だが小型のアンカーマシンで確実に施工できて基礎荷重や斜面すべり荷重などへの対策が可能な小口径パイルを縦打ちして，パイルと内包する土に圧縮力を生じさせて効果をもたらす補強土工法（以下，「圧縮型ルートパイル工法」と呼ぶ）が有効である。

圧縮型ルートパイル工法は，1983 年に国内実績と共に三木らから論文報告¹⁾（以下，「初期論文」と呼ぶ。）があり，その後 1986 年に土質工学会より補強土工法「土質基礎工学ライブラリー29」²⁾（以下，「ライブラリー29」と呼ぶ。）の初刊が発行され，設計法を含め

た紹介がされている。このライブラリー29は，2001 年に第 8 刷まで増刷されるほどの多くの販売実績を誇るが，現在は絶版となっている。さらに，1995 年には産業技術サービスセンター発行の「斜面・盛土 補強土工法技術総覧」³⁾（以下，「技術総覧」と呼ぶ。）でも紹介され，設計計算例などが記載されている。初期論文から 40 年が経過した。当初は斜面すべり対策の圧縮型ルートパイルだったが，近年は各種構造物の基礎工にも発展し，補強土壁などの重量物も支持するようになっている。また，他にも現場計測での検証⁴⁾やメカニズムについての研究⁵⁾が進められている。

本報告では，このような圧縮型ルートパイル設計時の荷重の扱い方を紹介すると共に，設計手法を紹介した 3 つの既往文献^{1)~3)}を用いた設計例の一覧を示し，それらの差異について詳述する。

2. 設計荷重と設計手法の紹介

滑り土塊が中抜けを生じない延長方向に削孔径 d の 7 倍以下での小ピッチで 2 列配置したルートパイルの施工例を図-1 に示す。なお，各列パイルが実線と破線なのは千鳥配置のためである。ここで，削孔間隔 $7d$ は鋼管による抑止杭の最大打設間隔の $8d$ より小さい⁶⁾ため中抜けはしないとして考える。基礎底面には鉛直力 N ，水平力 H ，転倒モーメント M が生じており，軟弱層の最も深い位置の検討基準面は下の支持地盤上に設定され，照査する荷重は式(1)と式(2)となる。

$$N_0 = N + P_r \cdot \sin \alpha + W \quad (1)$$

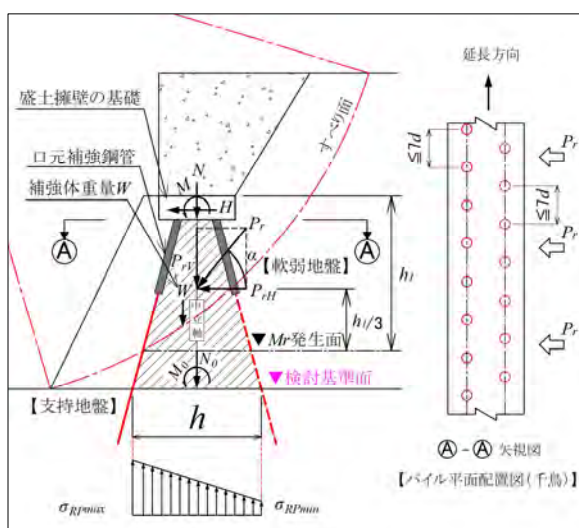


図-1 盛土の基礎荷重と斜面すべり荷重を重ねた設計例

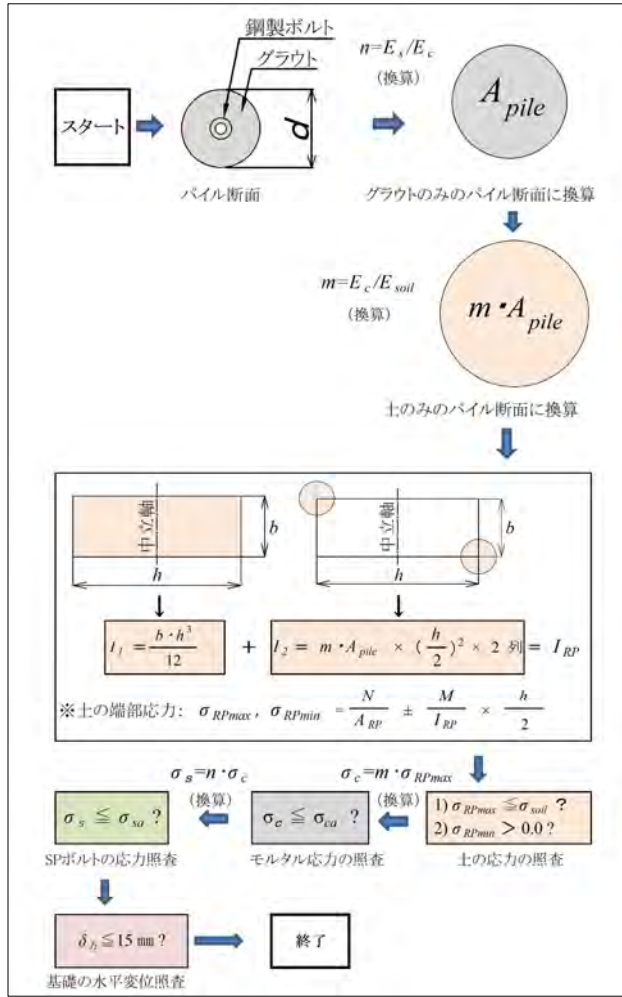


図-2 「単位幅 b に 2 列配置した検討基準面の照査フロー

$$M_0 = M + P_r \cdot \cos \alpha \cdot \frac{h_1}{3} \quad (2)$$

W は小ピッチで打設したパイロットと内包する土から構成された補強体^{注1)}（以下、「補強体」とよぶ。）の重量である。水平力 H は、基礎底面で杭体のせん断照査、また擁壁工指針で求められる杭頭の水平変位照査を実施する。また、斜面すべり面に発生する P_r の水平分力 P_{H1} による地中での杭体のせん断照査も実施する。

図-2 のフローに従って照査する。まず、パイロット断面を式(3)、式(4)にて土の等価断面積に変換する。

$$A_{pile} = n \cdot A_s + (A_c - A_s) = (n-1) \cdot A_s + A_c \quad (3)$$

ここで、

A_{pile} : パイロット断面を全てグラウトとした等価断面積

n : ボルトとグラウトの弾性係数比
 $n = E_s / E_c$

A_c : パイロット断面積 $A_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ d : パイロット直径

A_s : ボルトの断面積

$$A_{RP} = m \cdot A_{pile} \times 2 + b \cdot h \quad (4)$$

ここで、

A_{RP} : パイロットと補強体断面を全て土とした等価断面積

m : グラウトと土の弾性係数比

$$m = E_c / E_{soil}$$

b : パイロット打設延長方向の単位幅

h : 検討基準面におけるパイロット打設幅

次に、検討基準面での全てを土に換算した中立軸に対する断面二次モーメントを式(5)で求める。

$$I_{RP} = m \cdot A_{pile} \times \left(\frac{h}{2} \right)^2 \times 2 + \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (5)$$

次に、土の最大および最小圧縮応力度を式(6)で求め、検討基準面で土の許容圧縮応力度以下であるか式(7)で照査する。

$$\sigma_{RPmax}, \sigma_{RPmin} = \frac{N}{A_{RP}} \pm \frac{M}{I_{RP}} \times \frac{h}{2} \quad (6)$$

$$\sigma_{RPmax} \leq \sigma_{soil} \quad (7)$$

ここで、

σ_{RPmax} : 検討基準面最端部での土の最大圧縮応力度

σ_{soil} : 検討基準面での土の許容圧縮応力度

図-2 に示す如く式(8)、式(9)でグラウトおよびボルトが許容応力度以下かを照査する。

$$\sigma_c = m \cdot \sigma_{RPmax} \leq \sigma_{ca} \quad (8)$$

$$\sigma_s = n \cdot \sigma_c \leq \sigma_{sa} \quad (9)$$

ここで、

σ_{ca} : グラウトの許容圧縮応力度

σ_{sa} : ボルトの許容圧縮応力度

最後に水平変位の照査を行う。杭頭に配置される口元補強管は 2m~5m の接続のない 1 本物の汎用鋼管を採用し、軟弱な表層地盤での杭体の座屈防止と共に、せん断パイプとして水平変位を抑制する。また周辺地山のバネ乗数を使って水平変位の照査ができる。 N 値が比較的低い表層でもルートパイロット工の打設本数はある程度密であり、指針の要求性能を満足できる。

以上のごとく、ルートパイロット工法の設計は極めて簡

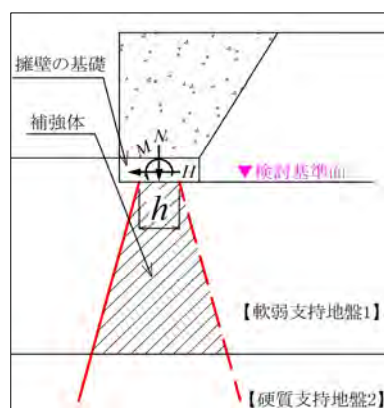


図-3 同一断面で、斜面すべり荷重を外して基礎荷重のみを分割設計した事例

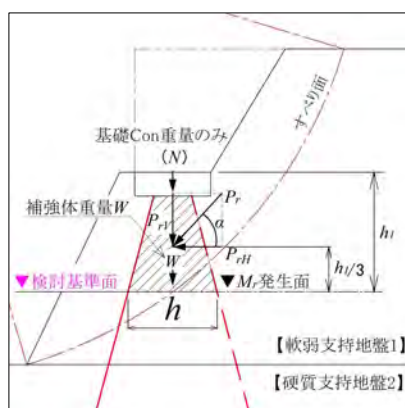


図-4 同一断面で、基礎荷重を外して斜面すべり荷重のみを分割設計した事例

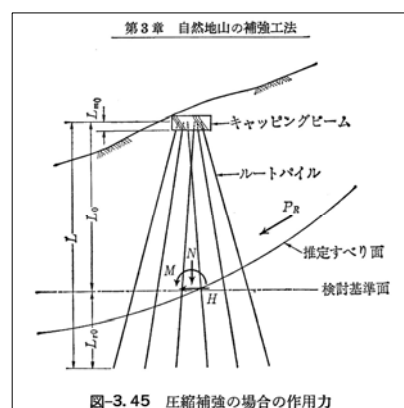


図-3.45 圧縮補強の場合の作用力

図-5 ライブラリー²⁹⁾の検討基準面 (図-3.45)

単であり、土とグラウトとボルトの弾性係数比を使って、まるでクラックの生じない鉄筋コンクリート躯体を設計するのと同じ手法で目的を達成できる。

この技術は1945年の終戦時にイタリアのナポリ港を修復するために Fondedile (フォンデダイル) 社の技術者 Ferdinando Lizzi (フェルデナンド リッチー) が考案したもので、コンピューターもない時代に土質技術者の知識と感性を結集した工法だった。同社は1952年にルートパイル工法の特許、また1969年には網状ルートパイル (Reticulated Root Pile, RRP) 工法の特許を取得し、イタリアから欧州を経て世界各国で採用されるようになった。

3. 設計荷重の扱いと既往文献の設計式の差異について

3.1 設計荷重の扱いについて

設計荷重の扱いについて、大きく荷重条件と照査を行う検討基準面位置の2点が懸念材料として挙げられる。以下に、それらについて記載する。最近のルートパイルの設計で、図-1のように上部工からの「基礎荷重」と「斜面すべり荷重」を重ねて設計せず、同一断面に生じる個別荷重として分けて設計し、照査結果を加算せずに個別計算書としている事例を見かける。また、ルートパイルで補強体があるにも関わらず、「基礎荷重」の検討基準面が常に基礎底面となっている事例も見かける。これらの設計荷重の事例について、図-3と図-4を使って説明する。

図-3は、図-1で示した基礎荷重 (N , H , M) の

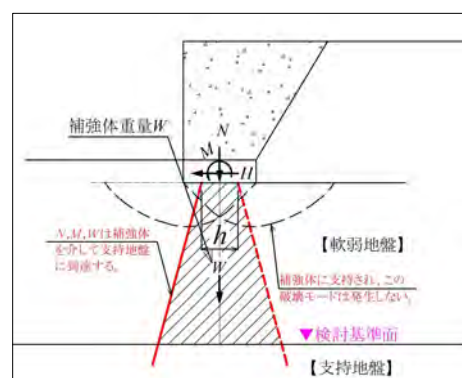


図-6 基礎荷重のみを補強体で支持する場合の検討基準面の位置について

みを斜面すべり荷重 (P_r) を外して計算書を作成した事例の荷重状態図であり、検討基準面は常に基礎底面としている。

また、図-4は、図-1で示した斜面すべり荷重 (P_r) のみで設計を行い、それ以外の外力は基礎コンクリートのみの重量 (N) とハッチングした補強体の重量 W のみで、上部構造物の荷重は考慮せずに設計した事例の荷重図である。

図-5は初期論文¹⁾とライブラリー²⁹⁾に添付された圧縮型ルートパイルの断面図であるが、技術総覧³⁾や他のどの書籍や論文にも基礎荷重の「検討基準面」の設定位置や荷重の扱い方の資料が見当たらない。しかしながら、斜面すべり荷重については想定すべり線が基礎中心部を通過する場所を検討基準面としていると思われる。

図-3の検討基準面の位置について更に説明する。図-6は、基礎荷重と補強体重量が小ピッチで打設したパイルと内包する土から構成された補強体内での荷

重の伝達を示した模式図であり，図-3 と同じ荷重状態である。基礎底面には N ， H ， M の基礎荷重が発生しており，この内の鉛直力 N と転倒モーメント M および補強体重量 W は，小ピッチで密に打設したパイルと内包する土からなる補強体を介して下の支持地盤まで伝達される。

従って，図-3 では検討基準面が基礎底面であり補強体の最上部で照査を行っているが，図-6 のように補強体を構築した軟弱層の最も深い定着層の上側に「検討基準面」を設定して補強体内の軟弱地盤，グラウト，およびボルトが許容圧縮応力度以下であることを照査するのが安全であると思われる。なお，著者は常に安全側を考え，荷重は図-1 のように重ねて設計し，補強体の最も深い位置を検討基準面として軟弱地盤，グラウト，ボルトが許容圧縮応力度以下であるかの照査を行い，更にパイル軸力と必要定着長を求めるようにしている。

3.2 それぞれの設計式から算出されるルートパイル軸力の差異について

ルートパイルに関する設計式については，初期に設計事例が紹介されている論文が幾つかある¹⁾³⁾。ここでは，これらの設計手法を紹介し，それらの差異について比較する。ここで，それぞれの論文で記号や添え字が異なる場合があるが，原著になるべく忠実となるように配慮すると共に，比較の表-2 も含めて単位は SI 系ではなく原著と同じの CGS 系で統一する。

(1) 1983 年の初期論文¹⁾

この初期論文¹⁾には図-5 と同じ断面図が付いており，式(14)の A_R をルートパイルの等価換算断面積と記しており，ルートパイルにかかる軸力は $A_R \cdot \sigma_R$ と計算される。以下，同論文から抜粋した式を記載する。

$$\sigma_R = m \cdot \sigma_{RRP} \quad (10)$$

$$m = \frac{E_R}{E_{RRP}} \quad (11)$$

ここで，

$$\begin{aligned} \sigma_R &: \text{ルートパイル応力} \\ E_R &: \text{ルートパイルの設計上の弾性係数} \\ E_{RRP} &: \text{RRP の設計上の弾性係数} \end{aligned}$$

$$\sigma_s = n \cdot \sigma_R \quad (12)$$

$$n = \frac{E_s}{E_m} \quad (13)$$

ここで，

$$\begin{aligned} \sigma_s &: \text{スチール応力} \\ E_s &: \text{スチール弾性係数} \\ E_m &: \text{モルタルの設計上の弾性係数} \end{aligned}$$

RRP を補強体と考える必要条件の一つとして，ルートパイルと検討基準面以下の地山の必要定着長が下記のように示されている。

$$L_r > \frac{A_R \cdot \sigma_R}{l_R \cdot \tau_{ra}} \quad (14)$$

ここで，

$$\begin{aligned} L_r &: \text{ルートパイルと検討基準面以下の地山の必要定着長} \\ A_R &: \text{ルートパイルの等価換算断面積} \\ l_R &: \text{ルートパイルの周長} \\ \tau_{ra} &: \text{ルートパイルと検討基準面以下の地山との許容付着応力} \end{aligned}$$

(2) ライブラリー 29²⁾ (1986 年に初版発行)

この書籍は 2001 年に地盤工学会より第 8 刷まで増刷されている。現在は絶版だが，図-5 が添付されており内容は初期論文¹⁾ とほぼ同じである。しかしながら，ルートパイルと検討基準面以下の地山の必要定着長の式が他の 2 つの計算例¹⁾³⁾ と異なる。以下に，(1) 1983 年の初期論文¹⁾ と同様に式を記載していく。

$$A_{RRP} = m A_{pile} S_2 + b h \quad (15)$$

$$A_{pile} = (n-1) \cdot A_s + A_c \quad (16)$$

ここで

$$\begin{aligned} A_{RRP} &: \text{検討基準面における，RRP 補強体の等価換算断面積} \\ A_{pile} &: \text{ルートパイル 1 本の等価換算断面積} \\ S_2 &: \text{検討基準面内に含まれるルートパイルの本数 (本)} \end{aligned}$$

注入材と芯材に作用する圧縮応力度の検討は下記の式にて示される。

$$\sigma_R = m \sigma_{RRP} < \sigma_{ca} \quad (17)$$

$$\sigma_{sc} = n \sigma_R < \sigma_{sa} \quad (18)$$

ここで，

$$\begin{aligned} \sigma_{RRP} &: \text{ルートパイルに作用する圧縮応力度} \\ \sigma_R &: \text{注入材に作用する圧縮応力度} \\ \sigma_{ca} &: \text{注入材の許容圧縮応力度} \end{aligned}$$

σ_{sc} : 芯材に作用する圧縮応力度

σ_{sa} : 芯材の許容圧縮応力度

ルートパイルの必要長さの検討として，検討基準面より下側にある必要付着長は下記のように示されている。

$$L_{r0} = \frac{A_c \sigma_R}{\pi D \tau_{r0} 10^2} \cdot F_{sp} \quad (19)$$

ここで，

L_{r0} : ルートパイルの必要付着長(m)

A_c : ルートパイルの断面積(cm²)

D : ルートパイルの直径(cm)

τ_{r0} : ルートパイルと地山の付着応力度(kgf/cm²)

F_{sp} : ルートパイルと地山の付着に対する安全率

(3)技術総覧³⁾ (1995 年発行)

技術総覧³⁾の pp.486-488 に圧縮補強材による設計法の記載がある。概念は初期論文と同じだが，添え字等の表記が異なっている点と式が端折られている点があるが，設計計算例にその詳細が記載されているため，その点を含めて以下に示す。なお，ここでも検討基準面を基礎底面としている。まず，ルートパイルのモルタル等価換算断面積 A_{pile} は，

$$A_{pile} = (n-1) \cdot A_s + A_c \quad (20)$$

次に補強土体の土等価換算断面積 A_{ERP} は，

$$A_{ERP} = m \cdot A_{pile} \cdot S + b \cdot h \quad (21)$$

パイルのモルタル部にかかる最大圧縮応力度は，

$$\sigma_{cmax} = m \cdot \sigma_{ERPmax} \leq \sigma_{ca} \quad (22)$$

パイルの必要長さは，検討基準面より下側にある支持地盤でのパイルの周面摩擦抵抗によって決定される。

$$L_{r0} = \frac{R_{pmax}}{\pi \cdot d_c \cdot \tau_{r0a}} \quad (23)$$

ここで，

L_{r0} : 支持地盤でのパイルの必要付着長(cm)

d_c : パイルの直径(cm)

τ_{r0a} : 地山とパイルの許容付着応力度(kgf/cm²)

R_{pmax} : ルートパイルにかかる最大圧縮力

ルートパイルにかかる最大圧縮力 R_{pmax} は，以下の式で表される。

$$R_{pmax} = A_{pile} \cdot m \cdot \sigma_{ERPmax} \quad (24)$$

従って(23)式は次式となる。

$$L_{r0} = \frac{A_{pile} \cdot \sigma_{cmax}}{\pi \cdot d_c \cdot \tau_{r0a}} \quad (25)$$

(4)前記3文献のパイル軸力の比較

(1)～(3)の文献は，それぞれの式の記号が統一されていないが，計算の流れは2章で説明した内容と同じである。これらの文献に対して，斜面すべり荷重はないが計算の流れが詳細に記載されている技術総覧³⁾の設計荷重と設計諸元（表-1，図-7～8）を当てはめてルートパイル軸力と必要定着長の算出を行ったのが表-2である。軸力算出において，文献1)，3)が等価換算断面積 A_R ， A_{pile} を採用しているのに対し，文献2)ではパイル断面積 A_c を採用したため，パイル軸力が半分以下となっている。その結果，必要定着長も文献1)，3)に比べ，文献2)では半分以下となった。

ライブラリー29²⁾では，安全率 F_{ϕ} が3にて試算例が提示されているが，本報の執筆時点のルートパイルの定着安全率は，地盤工学会の「地山補強土工法設計・施工マニュアル（2011 年発行）」⁸⁾の引抜けに対する安全率を援用しており，常時=2.0，地震時=1.25である。従って，ライブラリー29²⁾を用いてルートパイル軸力を計算すると常時安全率は常に1.0を下回り必要定着長も同様となる。

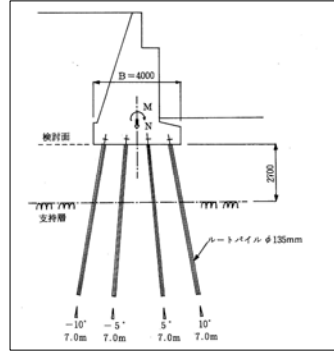
4. まとめ

本報告では，ルートパイル設計時の荷重の扱い方や設計手法について，3つの既往文献1)～3)を用いた設計例の一覧を示し，それらの差異について詳述した。

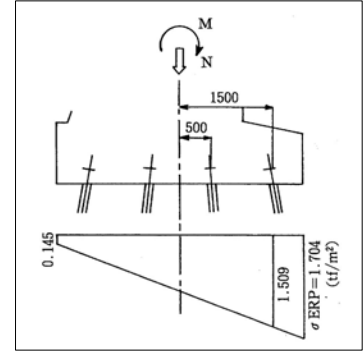
土とグラウトとボルトの弾性係数比を利用して等価換算断面積を算出して設計する方法であるが，ライブラリー29では，ルートパイルの等価換算断面積ではなくルートパイルの断面積を用いていることから他の文献よりも軸力および必要定着長が半分以下の値となっている。ルートパイルの設計概念から考えると等価換算断面積を使用することが正しいと考えられる。ライブラリー29は既に絶版本ではあるが，ルートパイルの設計法として公式なものが存在しないため，国内では利用されている事例が多い。常時の定着安全率が1.0以下，地震時の定着安全率が0.63以下となるので設計時は注意する必要がある。

表一 技術総覧 3) の設計荷重と設計諸元

橋台形状	
L=11.8m	B=4.0m
底盤の作用外力（常時）	
N=536 (tf/基)	
中立軸を中心とする作用モーメント	
M=284.08 (t・m/基)	
パイル形状	
削孔径φ	135mm
鉄筋	D38



図一 技術総覧 3) の補強材配置図 (図 62)



図二 技術総覧 3) の橋台底盤の応力図 (図 63)

本表の拡大A3版、次ページに添付

表二 3つの文献による軸力試算の結果

	初期論文 ¹⁾	ライブラリー ²⁾	技術総覧 ³⁾
パイル断面構成	D38芯材: $A_s = 11.40\text{cm}^2$ φ135: $A_c = \pi \cdot (13.5)^2 / 4 = 143.139\text{cm}^2$	D38芯材: $A_s = 11.40\text{cm}^2$ φ135: $A_c = \pi \cdot (13.5)^2 / 4 = 143.139\text{cm}^2$	D38芯材: $A_s = 11.40\text{cm}^2$ φ135: $A_c = \pi \cdot (13.5)^2 / 4 = 143.139\text{cm}^2$
パイル断面のグラウト等価面積	$A_R = (n-1) \cdot A_s + A_c$ $= (15-1) \cdot 11.40 + 143.139$ $= 302.739\text{cm}^2$	$A_{pile} = (n-1) \cdot A_s + A_c$ $= (15-1) \cdot 11.40 + 143.139$ $= 302.739\text{cm}^2$	$A_{pile} = (n-1) \cdot A_s + A_c$ $= (15-1) \cdot 11.40 + 143.139$ $= 302.739\text{cm}^2$
全て土に換算した補強体等価面積	$A_{RRP} = m \cdot A_R \cdot S + b \cdot h$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times 44 + 11.8 \times 4.0$ $= 580.02\text{m}^2$	$A_{RRP} = m \cdot A_{pile} \cdot S + b \cdot h$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times 44 + 11.8 \times 4.0$ $= 580.02\text{m}^2$	$A_{ERP} = m \cdot A_{pile} \cdot S + b \cdot h$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times 44 + 11.8 \times 4.0$ $= 580.02\text{m}^2$
全て土に換算した断面二次モーメント	$I_{RRP} = m \cdot A_R \cdot \Sigma x^2 + \frac{b \cdot h^3}{12}$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times (0.5^2 \times 22 + 1.5^2 \times 22) \times 2 + 11.8 \times 4.0^3 / 12 = 1394.98(\text{m}^4)$	$I_{RRP} = m \cdot A_{pile} \cdot \Sigma x^2 + \frac{b \cdot h^3}{12}$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times (0.5^2 \times 22 + 1.5^2 \times 22) \times 2 + 11.8 \times 4.0^3 / 12 = 1394.98(\text{m}^4)$	$I_{ERP} = m \cdot A_{pile} \cdot \Sigma x^2 + \frac{b \cdot h^3}{12}$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times (0.5^2 \times 22 + 1.5^2 \times 22) \times 2 + 11.8 \times 4.0^3 / 12 = 1394.98(\text{m}^4)$
圧縮荷重: N	536.0 ton	536.0 ton	536.0 ton
転倒モーメント: M	284.08 ton・m	284.08 ton・m	284.08 ton・m
全て土に換算した検討断面での土の圧縮応力	$\sigma_{RRP} = \frac{N}{A_{RRP}} \pm \frac{M}{I_{RRP}} \cdot y$ $= \frac{536.0}{580.02} \pm \frac{284.08}{1394.98} \times 1.5$ $= 1.230\text{t/m}^2, 0.619\text{t/m}^2$	$\sigma_{RRPmax} = \frac{N}{A_{RRP}} \pm \frac{M}{I_{RRP}} \cdot y$ $= \frac{536.0}{580.02} \pm \frac{284.08}{1394.98} \times 1.5$ $= 1.230\text{t/m}^2, 0.619\text{t/m}^2$	$\sigma_{ERPmax} = \frac{N}{A_{ERP}} \pm \frac{M}{I_{ERP}} \cdot X_{max}$ $= \frac{536.0}{580.02} \pm \frac{284.08}{1394.98} \times 1.5$ $= 1.230\text{t/m}^2, 0.619\text{t/m}^2$
ルートパイル軸力	$\sigma_R = m \cdot \sigma_{RRP}$ $= 400 \times 1.230 = 492.0\text{t/m}^2$ $R_{pmax} = A_R \cdot \sigma_R = 302.739 \cdot 10^{-4} \times \sigma_R$ $= 0.0302739 \times 492.0 = 14.89(\text{ton/杭})$	$\sigma_R = m \cdot \sigma_{RRPmax}$ $= 400 \times 1.230 = 492.0\text{t/m}^2$ $R_{pmax} = A_c \cdot \sigma_R = 143.149 \cdot 10^{-4} \times \sigma_R$ $= 0.0143139 \times 492.0 = 7.04(\text{ton/杭})$	$\sigma_{max} = m \cdot \sigma_{ERPmax}$ $= 400 \times 1.230 = 492.0\text{t/m}^2$ $R_{pmax} = A_{pile} \cdot \sigma_{max} = 302.739 \cdot 10^{-4} \times \sigma_{max}$ $= 0.0302739 \times 492.0 = 14.89(\text{ton/杭})$
検討基準面以下の地山との必要定着長: 技術総覧 ³⁾ の計算例から $\tau_{so} = 3.6 \text{ kgf/cm}^2$: 【砂質土、N=50に定着と想定】	SF=3.0 $L_r > \frac{A_R \cdot \sigma_R}{l_r \cdot \tau_{so}} = \frac{14890}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.2}$ $> 293\text{cm} \rightarrow 2.93\text{m}$	$L_{ro} > \frac{A_c \cdot \sigma_R \cdot F_{sp}}{\pi D \tau_{so} 10^2} = \frac{7040}{\pi \times 13.5 \times 3.6 \times 10^2}$ $> 1.38\text{m}$	$L_{ro} > \frac{A_{pile} \cdot \sigma_{max}}{\pi \cdot d_c \cdot \tau_{so}} = \frac{14890}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.2}$ $> 293\text{cm} \rightarrow 2.93\text{m}$
	SF=2.0 $L_r > \frac{A_R \cdot \sigma_R}{l_r \cdot \tau_{so}} = \frac{14890}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.8}$ $> 195\text{cm} \rightarrow 1.95\text{m}$	$L_{ro} > \frac{A_c \cdot \sigma_R \cdot F_{sp}}{\pi D \tau_{so} 10^2} = \frac{7040}{\pi \times 13.5 \times 3.6 \times 10^2}$ $> 0.92\text{m}$	$L_{ro} > \frac{A_{pile} \cdot \sigma_{max}}{\pi \cdot d_c \cdot \tau_{so}} = \frac{14890}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.8}$ $> 195\text{cm} \rightarrow 1.95\text{m}$

注1) 文献 1), 2)では RRP 補強体, 文献 3)では補強土体と記載されているが, 本報では「補強体」とした。

参考文献

- 1) 三木五三郎・坂下五男・児玉秀文: 網状ルートパイル(R.R.P.)工法の日本における実施例, 土と基礎, Vol.31, No.9, pp.35-40, 1983.
- 2) 地盤工学会補強土工法編集委員会編: 土質基礎工学ライブラリー29 補強土工法, pp.402-416, 2001. (初刊, 土質工学会: 1986)
- 3) 斜面・盛土補強土工法技術総覧: 産業技術サービスセンター, pp.486-488, 1995.
- 4) 大谷義則・坂元龍司・吉岡敦: 地山補強土工法による橋台基礎の現場計測, 第39回地盤工学研究発表会, pp.1509-1510, 2004.
- 5) 加村晃良・風間基樹・河井正・金鍾官: 縦打ち補強土工法を

適用した実大試験盛土の力学挙動と補強効果, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.249-267, 2018.

- 6) 先端建設技術センター・民間14社, 小口径鋼管を用いた斜面補強システム共同研究グループ: 小口径鋼管を用いた組杭抑止杭工法技術資料, p.33, 2003.
- 7) Luzzi F. (1983). The reticolo di pali radice (reticulated root piles) for the improvement of soil resistance. Physical aspects and design approaches. VIII ECSMFE, Helsinki 1983, Improvement of ground, pp.521-524.
- 8) 地盤工学会 地盤設計・施工基準委員会 WG5 地山補強土工法編: 地山補強土工法設計・施工マニュアル, p.95, 2011.

(原稿受理 2023.12.07)

表－2 3つの文献による軸力試算の結果

		初期論文 ¹⁾	ライブラリー29 ²⁾	技術総覧 ³⁾
パイル断面構成		D38芯材： $A_s = 11.40\text{cm}^2$ $\phi 135 : A_c = \pi \cdot (13.5)^2 / 4 = 143.139\text{cm}^2$	D38芯材： $A_s = 11.40\text{cm}^2$ $\phi 135 : A_c = \pi \cdot (13.5)^2 / 4 = 143.139\text{cm}^2$	D38芯材： $A_s = 11.40\text{cm}^2$ $\phi 135 : A_c = \pi \cdot (13.5)^2 / 4 = 143.139\text{cm}^2$
パイル断面の グラウト等価面積		$A_R = (n-1) \cdot A_s + A_c$ $= (15-1) \times 11.400 + 143.139$ $= 302.739\text{cm}^2$	$A_{pile} = (n-1) \cdot A_s + A_c$ $= (15-1) \times 11.400 + 143.139$ $= 302.739\text{cm}^2$	$A_{pile} = (n-1) \cdot A_s + A_c$ $= (15-1) \times 11.400 + 143.139$ $= 302.739\text{cm}^2$
全て土に換算した 補強体等価面積		$A_{RRP} = m \cdot A_R \cdot S + b \cdot h$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times 44 + 11.8 \times 4.0$ $= 580.02\text{m}^2$	$A_{RRP} = m \cdot A_{pile} \cdot S_2 + b \cdot h$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times 44 + 11.8 \times 4.0$ $= 580.02\text{m}^2$	$A_{ERP} = m \cdot A_{pile} \cdot S + b \cdot h$ $= 400 \times 302.739 \cdot 10^{-4} \times 44 + 11.8 \times 4.0$ $= 580.02\text{m}^2$
全て土に換算した 断面二次モーメント		$I_{RRP} = m \cdot A_R \cdot \Sigma x^2 + \frac{b \cdot h^3}{12}$ $= 400 \times 302.739 \times 10^{-4} \times (0.5^2 \times 22 + 1.5^2 \times 22) \times 2$ $+ 11.8 \times 4.0^3 / 12 = 1394.98(\text{m}^4)$	$I_{RRP} = m \cdot A_{pile} \cdot \Sigma x^2 + \frac{b \cdot h^3}{12}$ $= 400 \times 302.739 \times 10^{-4} \times (0.5^2 \times 22 + 1.5^2 \times 22) \times 2$ $+ 11.8 \times 4.0^3 / 12 = 1394.98(\text{m}^4)$	$I_{ERP} = m \cdot A_{pile} \cdot \Sigma x_i^2 + \frac{b \cdot h^3}{12}$ $= 400 \times 302.739 \times 10^{-4} \times (0.5^2 \times 22 + 1.5^2 \times 22) \times 2$ $+ 11.8 \times 4.0^3 / 12 = 1394.98(\text{m}^4)$
圧縮荷重： N		536.0 ton	536.0 ton	536.0 ton
転倒モーメント： M		284.08 ton・m	284.08 ton・m	284.08 ton・m
全て土に換算した 検討断面での 土の圧縮応力		$\sigma_{RRP} = \frac{N}{A_{RRP}} \pm \frac{M}{I_{RRP}} \cdot y$ $= \frac{536.0}{580.02} \pm \frac{284.08}{1394.98} \times 1.5$ $= 1.230\text{t/m}^2, 0.619\text{t/m}^2$	$\sigma_{RRPmax} = \frac{N}{A_{RRP}} \pm \frac{M}{I_{RRP}} \cdot y$ $= \frac{536.0}{580.02} \pm \frac{284.08}{1394.98} \times 1.5$ $= 1.230\text{t/m}^2, 0.619\text{t/m}^2$	$\sigma_{ERPmax} = \frac{N}{A_{ERP}} \pm \frac{M}{I_{ERP}} \times X_{max}$ $= \frac{536.0}{580.02} \pm \frac{284.08}{1394.98} \times 1.5$ $= 1.230\text{t/m}^2, 0.619\text{t/m}^2$
ルートパイル軸力		$\sigma_R = m \cdot \sigma_{RRP}$ $= 400 \times 1.230 = 492.0\text{t/m}^2$ $R_{pmax} = A_R \cdot \sigma_R = 302.739 \times 10^{-4} \times \sigma_R$ $= 0.0302739 \times 492.0 = \mathbf{14.89}(\text{ton/杭})$	$\sigma_R = m \cdot \sigma_{RRPmax}$ $= 400 \times 1.230 = 492.0\text{t/m}^2$ $R_{pmax} = A_c \cdot \sigma_R = 143.149 \times 10^{-4} \times \sigma_R$ $= 0.0143139 \times 492.0 = \mathbf{7.04}(\text{ton/杭})$	$\sigma_{Cmax} = m \cdot \sigma_{ERPmax}$ $= 400 \times 1.230 = 492.0\text{t/m}^2$ $R_{pmax} = A_{pile} \cdot \sigma_{Cmax} = 302.739 \times 10^{-4} \times \sigma_{Cmax}$ $= 0.0302739 \times 492.0 = \mathbf{14.89}(\text{ton/杭})$
検討基準面以下の地山と の必要定着長： 技術総覧 ³⁾ の計算例から $\tau_{ro} = 3.6\text{kgf/cm}^2$ ：【砂 質土、 $N=50$ に定着と想 定】	SF=3.0	$L_r > \frac{A_R \cdot \sigma_R}{l_R \cdot \tau_{ro}} = \frac{14890\text{ (kgf/杭)}}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.2}$ $> 293\text{cm} \rightarrow \mathbf{2.93m}$	$L_{ro} > \frac{A_c \cdot \sigma_R \cdot F_{sp}}{\pi D \tau_{ro} 10^2} = \frac{7040\text{ (kgf/杭)} \times 3.0}{\pi \times 13.5 \times 3.6 \times 10^2}$ $> \mathbf{1.38m}$	$L_{ro} > \frac{A_{pile} \cdot \sigma_{Cmax}}{\pi \cdot dc \cdot \tau_{roa}} = \frac{14890\text{ (kgf/杭)}}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.2}$ $> 293\text{cm} \rightarrow \mathbf{2.93m}$
	SF=2.0	$L_r > \frac{A_R \cdot \sigma_R}{l_R \cdot \tau_{ro}} = \frac{14890\text{ (kgf/杭)}}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.8}$ $> 195\text{cm} \rightarrow \mathbf{1.95m}$	$L_{ro} > \frac{A_c \cdot \sigma_R \cdot F_{sp}}{\pi D \tau_{ro} 10^2} = \frac{7040\text{ (kgf/杭)} \times 2.0}{\pi \times 13.5 \times 3.6 \times 10^2}$ $> \mathbf{0.92m}$	$L_{ro} > \frac{A_{pile} \cdot \sigma_{Cmax}}{\pi \cdot dc \cdot \tau_{roa}} = \frac{14890\text{ (kgf/杭)}}{\pi \times 13.5\text{cm} \times 1.8}$ $> 195\text{cm} \rightarrow \mathbf{1.95m}$

参考文献

- 1) 三木五三郎・坂下五男・児玉秀文：網状ルートパイル(R. R. P.) 工法の日本における実施例，土と基礎，Vol. 31，No. 9，pp. 35-40，1983.
- 2) 地盤工学会補強土工法編集委員会編：土質基礎工学ライブラリー29 補強土工法，pp.402-416，2001. (初刊，土質工学会：1986)
- 3) 斜面・盛土 補強土工法技術総覧：産業技術サービスセンター，pp.486-488，1995.