

拡張型鋼管を用いた低層建築物の地盤補強工法

Method of Construction to Reinforce Foundations for Low-Rise Buildings Using Expansion-type Steel Pipes

内藤 康夫
Yasuo Naitou

黒柳 信之
Nobuyuki Kuroyanagi

松原 茂雄
Shigeo Matsubara

要 旨

軟弱な地盤においては、地盤の強さや、硬い地盤（以降、支持層と記す）の深さなどから基礎様式が選択されるが、その支持層が深くなれば深くなるほど建設コストは増大する。そこで、筆者らは地盤が硬くなれば、杭（くい）との摩擦力が増大するという土質力学的原理を応用し、支持層に到達しなくても、摩擦力のみで十分に低層建築物を支持できる拡張型鋼管を用いた地盤補強工法を開発した。

この拡張型鋼管は直径 $\phi 36$ mmを地中で $\phi 54$ mmに拡張させることにより、周辺の地盤を締め固め、地盤の強度を増大させるもので、この開発した杭の摩擦力の指標となる周面摩擦係数は一般的に使われている鋼管杭と比較して1.8倍から4倍の値が得られ実用性があることを確認した。

Abstract

In soft ground, a basic style of construction is often selected depending on the strength of the ground and depth of hard ground (referred to as the support layer). The deeper the support layer is, the higher the construction costs are. We have developed a method of construction which reinforces foundations by using expansion steel, in the form of pipes that can support low-rise buildings by only friction force expansion. We applied soil mechanics principles, in which frictional force increases in the state where soil becomes stiff.

We confirmed that when this extension-type steel with a diameter of $\phi 38$ is extended up to $\phi 54$ in the ground, the peripheral surface coefficient of friction becomes between 1.8 and 4 times that of a general steel pipe pile.

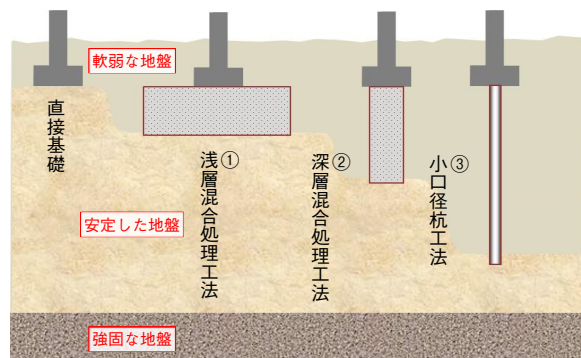
1. はじめに

建築物の荷重はそれを支える基礎によって、地盤に伝達される。基礎の役割は、この建築物の荷重を安全に地盤に伝えること、および地震時や暴風時に生じる水平力に抵抗し、力を安全に地盤に伝えることである。ところが、近年は良質な宅地の確保が困難となっており、これまで放置されていた軟弱地盤も宅地化されていることや建築物の性能向上による荷重の増加から、表層地盤に荷重を伝える形式の基礎では建築物を安定して建てることのできないケースが増えてきている。そのため、有害な沈下が起こらないようにする対策として、地盤に固化材を混ぜて固める方法や鋼管を打ち込んで強固な地盤に建築物の荷重を伝達させる方法で地盤補強が行われている。しかし、10 mを超えるような深部まで軟弱な地盤では、深く地盤補強を行うことによる多大な施工費用を消費者が負担しなければならないことが課題となっている。

そこで筆者らは、地盤へ貫入後に体積を増加させることのできる拡張型鋼管を用いて、鋼管と周面地盤との摩擦力を向上させる技術開発に取り組み、支持地盤に頼ることなく、軟弱な地盤においても低層建築物を安全に支える地盤補強工法を開発し、(一財)日本建築総合試験所（以降、GBRCと記す）において、建築技術性能証明を取得した。

2. 地盤補強工法の概要と問題点

旧建設省告示第1347号では、地盤の許容応力度と直接基礎との関係を示しており、低層建築物を安全に建築するために求められる地盤の許容応力度は $20 \text{ kN/m}^2 \sim 30 \text{ kN/m}^2$ 以上（基礎の形状によって変わり、べた基礎では 20 kN/m^2 、布基礎では 30 kN/m^2 ）とされている。しかし、直接基礎では必要な地盤の許容応力度を確保することができない軟弱地盤も存在しており、このような地盤において、地盤を強くするために行われるものが地盤補強である。低層建築物で主に採用されている各種地盤補強工法を第1図に示す。



低層建築物では「安定した地盤」以深を「支持層」と評価

第1図 低層建築物の地盤補強工法

Fig. 1 Ground reinforcement method for low-rise buildings

なお、第1図に示した②および③の工法には補強体のみで必要な許容応力度を得る設計手法と、補強体および直接基礎下部の地盤を複合して許容応力度を得る設計手法があり、後者の設計手法を用いたものはパイルド・ラフト工法と呼ばれている。

2.1 浅層混合処理工法

地盤面から2 m程度までの表層地盤部分が軟弱で直接基礎で対応できない場合、セメント系固化材と現地盤土を混合攪拌（かくはん）し、セメントの化学反応および重機による転圧・締め固めにより地盤を補強する工法である。表層地盤改良とも呼ばれる。

【問題点】

セメント系固化材と現地盤土を混合攪拌して造られるため、攪拌むらやセメントの化学反応を阻害する成分が土壌に含まれている場合に、固化不良を起こす危険性がある。

2.2 深層混合処理工法

地盤面2 m以深から8 m程度までの地盤が軟弱で直接基礎または浅層混合処理工法で対応できない場合、現地盤土とセメント系固化材を混合攪拌することにより、柱状の改良体（一般的な径は400 mm～600 mm程度）を築造する工法である。柱状地盤改良とも呼ばれる。固化材に水を加えスラリー状にしたセメントミルクを用いる湿式工法と、粉体の状態で用いる乾式工法があり、現状、湿式工法が主流となっている。

【問題点】

浅層地盤補強工法と同様に、混合する現土の性質によって、強度発現が阻害される場合や攪拌のむらに起因する補強体欠損の危険性がある。

2.3 小口径杭工法

地盤面から8 m以深の地盤が軟弱な場合、建築現場で築造する補強体ではなく、既成の杭体（小口径の木杭、コンクリートパイル、鋼管などがあるが、ここでは最も広く用いられている鋼管について記載）を強固な地盤まで回転埋設させる工法である。鋼管径は114.3 mm、139.8 mm、165.2 mmが多く採用されており、鋼管本体の先端部に支持力と施工性の向上の目的でスクリー状の部位が取り付けられている場合が多い。なお、鋼管径48.6 mmの細径鋼管を用いてパイルド・ラフト工法として許容応力度を評価している工法もある。

【問題点】

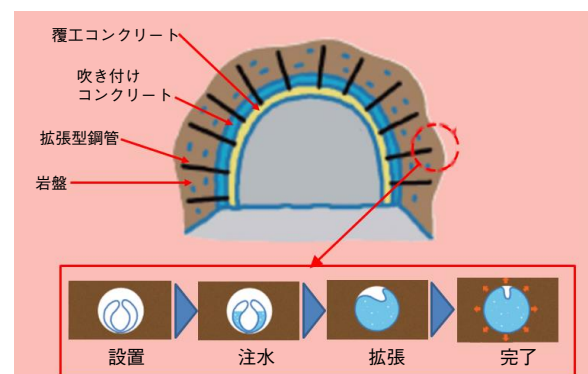
10 m以上の深い深度にある強固な地盤まで届く鋼管を用いるため、工事の費用や工数が過大になる。

3. 拡張型鋼管を用いた地盤補強技術

従来の地盤補強工法での課題を解決するために、以下に示す観点で技術開発を行った。

- 現場で補強体を築造することによる品質のばらつきを抑えるため、工場生産された規格品を用いた地盤補強工法とする。
- 杭状補強体と周面地盤との摩擦力を高めることで、深い深度まで軟弱地盤が続いている地盤においても、施工費用と工数を抑えることができる。

そこで、着目したのが、トンネル工事による緩んだ地山に拘束力を与えるために使用される支保部材の「RPEロックボルト」（以降、拡張型鋼管と記す）である。この拡張型鋼管は第2図に示すように、トンネル孔壁の崩落を拡張型鋼管の引き抜き力で抵抗することから、地盤補強に活用することで高い摩擦力を期待できる。



第2図 トンネル工事での運用例

Fig. 2 Example use in tunnel construction

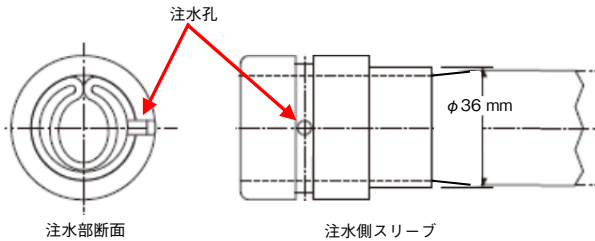
3.1 拡張型鋼管について

拡張型鋼管は、ハート型に折り畳まれた異形管と、異形管の両端の密封および注水のためのスリーブ（注水側スリーブにはφ2 mmの注水孔が設けられている）で構成されており、異形管の形状は外径φ54 mm、肉厚2 mmの丸管の一部を凹形状にして、外径φ36 mm程度に折り畳んだ断面形状を有している（第3図）。拡張型鋼管は工場にて厳格な工程管理の下に組み立てられており、工程を以下に示す。

- ① 異形管の両端をスリーブの内径と等しいφ33 mmに絞り加工を施す。
- ② 異形管の両端をスリーブに圧入するとともに、異形管をスリーブの内側に押し広げて密着させる。
- ③ 水密性と接合強度を確保するためにスリーブと異形管をCO₂アーク溶接で接合する。

なお、拡張する際には、注水側スリーブに加圧用シー

ルヘッドを接続して、20 MPaの高圧水を注入することで異形管とする前の外径φ54 mmまで拡張することができる。



第3図 拡張型鋼管のイメージ
Fig. 3 Image of expansion steel

3.2 支持力発現のメカニズム

鋼管周囲の摩擦力は主に鋼管と地盤との摩擦係数と、その深さの静止土圧 σ_0 によって決定する。この σ_0 は (1) 式で表される。

$$\sigma_0 = K_0 \cdot \gamma \cdot z \dots\dots\dots (1)$$

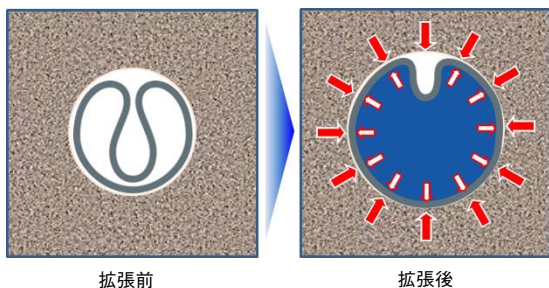
K_0 : 静止土圧係数

γ : 土の比重

z : 深度

K_0 は静止土圧係数と呼ばれるものであり、砂質土においては密度、粘性土においては圧密度（最終の圧密に対する現在の密度の割合）と相関があり、密度および圧密度が高いほど、静止土圧係数も高くなる。

拡張型鋼管が地盤中で拡張する際に、拡張型鋼管と地盤との状況は第4図のようになっており、砂質土の場合は締め固めによって、密度が増大し、粘性土の場合は、圧密度が高くなる。すなわち、静止土圧係数が増大することになるため、摩擦力が増大すると考えられる。



第4図 摩擦力向上のイメージ
Fig. 4 Image of the frictional force improvement

なお、静止土圧係数は近傍の掘削などによる外的な干渉を受けなければ、変化しないことから、拡張型鋼管の

拡張によって、増大した摩擦力はいつまでも維持されるため、経年変化による減少を考慮する必要は無いと考えられる。

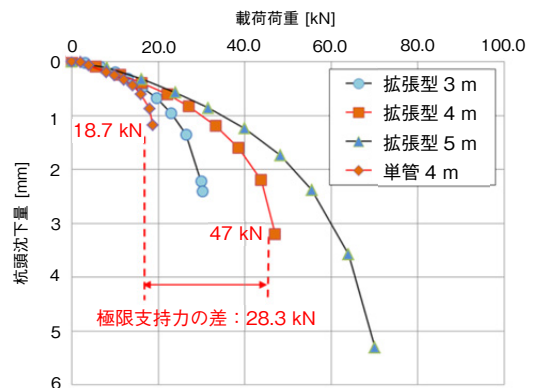
4. 拡張型鋼管の性能検証

地盤補強工法の性能確認は、補強体や地盤に直接荷重をかけて載荷面の変位を計測する鉛直載荷試験で行われるが、拡張型鋼管についてもその有効性を検証するために鉛直載荷試験を行った。検証項目を以下に示す。

- 拡張による地盤の締め固め効果の検証
- 設計式を確立するため、さまざまな地盤での性能検証

4.1 拡張による地盤の締め固め効果の確認

拡張型鋼管の鉛直載荷試験は、地盤工学会基準の「杭の押し込み試験方法 (JGS1811-2002)」に基づいて実施した。試験地盤は、拡張による締め固め効果を確認できるように砂質土地盤とし、鋼管先端が強固な地盤に接することで、周面摩擦の向上が判別できなくなることを避けるために、地盤面から6 m程度までが一般的な軟弱な地盤とした。周面摩擦力の向上効果を確認するために、異形状に加工する前と同径・同長の鋼管（以降、単管と記す）と拡張型鋼管の比較を行った。また、拡張型鋼管の長さによる影響を考慮して、拡張型鋼管は3 m、4 m、5 mの3パターンで比較を行った。載荷荷重と鉛直方向の変位の関係を第5図に示す。



第5図 鉛直載荷試験の結果
Fig. 5 Results of vertical loading test

ここで、グラフ中の最終点以降は荷重が上がらずに変位が進行していく状態（極限支持力を超えた状態）である。4 mの拡張型鋼管の極限支持力が47.0 kN/m²であったのに対して、4 mの単管は18.7 kN/m²であり、拡張型鋼管は単管の2.5倍以上と非常に高い性能を発揮した。また、鋼管の先端部分の地盤強度が大きく変わらない状況にも

かわらず、鋼管長を長くすることによって極限支持力が段階的に増加していくことから、拡張によって締め固まった地盤と拡張型鋼管との周面摩擦は接触する面積に相当して向上することを確認した。

4.2 支持力設計に用いる摩擦係数の設定

杭状地盤補強工法の極限支持力は(2)式から求められる。 α_{sw} 、 β_{sw} 、 γ_{sw} は支持力係数と呼ばれるもので、地盤補強工法によって値が異なる。

$$R_u = \alpha_{sw} \overline{N}' A_p + (\beta_{sw} \overline{N}'_s L_s + \gamma_{sw} \overline{N}'_c L_c) \phi \quad \dots \dots (2)$$

R_u : 杭状補強体の極限鉛直支持力 [kN]

α_{sw} : 先端支持力係数

β_{sw} : 砂質土の周面摩擦係数

γ_{sw} : 粘性土の周面摩擦係数

A_p : 杭先端の有効断面積 [m²]

ϕ : 周長 [m]

L_s : 杭状補強体が砂質土に接する長さ [m]

L_c : 杭状補強体が粘性土に接する長さ [m]

\overline{N}' : 杭状補強体先端部分の平均換算N値

\overline{N}'_s : 杭状補強体が砂質土に接する
平均換算N値

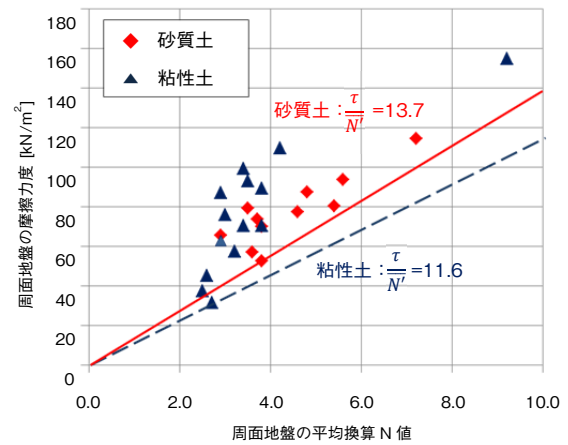
\overline{N}'_c : 杭状補強体が粘性土に接する
平均換算N値

周面摩擦係数 (β_{sw} 、 γ_{sw}) が大きい工法であれば、摩擦力を主体とした支持力設計が可能な地盤補強工法であるといえる。なお、一般的な地盤補強工法の周面摩擦係数は砂質土では3.3、粘性土では6.25であり、これらの係数の確立が地盤補強工法として実用化するために必要になる。なお、周面摩擦係数を決定するには、地盤の強さと併せて砂質土か粘性土のどちらの土質が主体の地盤であるかが重要になる。そこで、砂質土を主体とする4箇所と粘性土を主体とする5箇所の計9箇所合計53本の載荷試験を行った。

試験結果をまとめて第6図に示す。ここで、縦軸は鋼管周面の単位面積当たりに得られた摩擦力度 τ で、横軸は鋼管周面全体の平均換算N値 (地盤の硬さを示す指標) である。

試験結果の極限鉛直支持力から周面摩擦係数 (β_{sw} 、 γ_{sw}) を求めると砂質土では $\beta_{sw}=13.7$ 、粘性土では $\gamma_{sw}=11.6$ となり、一般的な地盤補強工法の周面摩擦係数に比べて砂質土で4倍、粘性土で1.8倍と非常に高い性能を示した。特に、砂質土において高い周面摩擦係数となったことから、拡張による地盤の締め固め効果が摩擦力の向上に大きく影響しているものと考えられる。なお、地盤は常にばらつきを考慮しなければならないため、周面摩擦係数は、どんな地盤条件においても安全な支持力設計が可能にな

るように試験結果の最小値と原点を結ぶ線から求めた。



第6図 鉛直載荷試験結果のまとめ

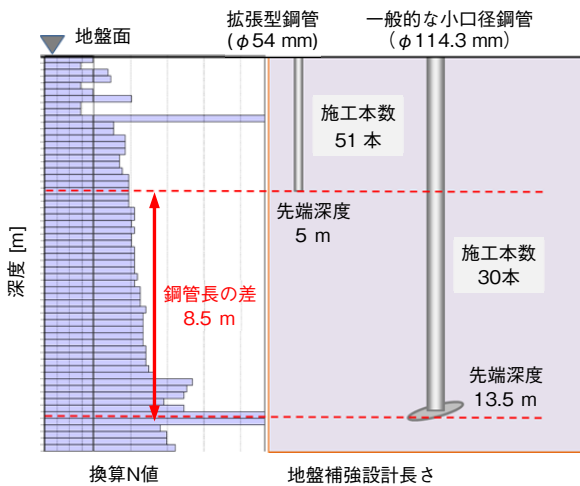
Fig. 6 Summary of the plumb loading test result

5. 実例による効果検証

上記の検討結果や、品質管理基準、設計施工要領をまとめ、GBRCにて建築技術性能証明を取得した。これにより、実際の低層建築物において、拡張型鋼管を用いた地盤補強工法を採用することができる。その効果について検証を行った。第7図に実際に施工した拡張型鋼管の施工長さとして、比較として設計した一般的な小口径鋼管を用いた場合の施工長さを示す。一般的な小口径鋼管は周面摩擦力が期待できないため、換算N値が10以上の層が2m以上連続している安定的な支持層まで鋼管先端を到達させる必要がある。そのため、1本当たり支持力が大きくなり本数は少なくてすむが、鋼管長は長くなる。一方、拡張型鋼管は周面摩擦力が期待できるため、1本当たりの支持力が小さくなり本数が増える代わりに、鋼管長は5mで設計が可能となり、総施工長さを短くすることができる。第7図に建築面積46m²の2階建て住宅での実例を示す。

施工長さとして本数をかけた総施工長さは一般的な小口径鋼管が405 m (ϕ 114.3 mm, 板厚4.5 mm) であるのに対し、拡張型鋼管は255 m (ϕ 54 mm, 板厚2.0 mm) であることから、施工の省力化が図れている。また、使用した鋼材の重量を比較すると、一般的な小口径鋼管を採用した場合は約4800 kgの鋼材が必要になるのに対して、拡張型鋼管では約620 kgの鋼材で施工が可能となり、施工費もほぼ半減させることができた。この実例以外の地盤においても検証を行ったが、地盤面から10m以上の深さまで軟弱な地盤において、摩擦力を高めた地盤補強工法が施工工数および使用材料の省力化によって、トータル

の施工費用の削減効果があることを確認した。



第7図 施工長さの比較

Fig. 7 Comparison of the construction length

6. まとめ

従来の地盤補強工法が抱える課題を解決し、安定した施工品質と深部まで軟弱な地盤においても高い支持力性能を発揮することができる地盤補強工法を開発した。さらに、従来工法と比較したメリットとして、使用材料を抑えることによる環境負荷低減や建て替え時に簡便な方法で撤去ができることなどが考えられる。

今後は、これらメリットを生かすための検証およびさらなる支持力性能の向上を目指し、実物件での運用および載荷試験を進めていく予定である。

今回、鋼管の拡張による摩擦力への影響を検証するための試験について広島大学名誉教授富永晃司様に多大な御協力を賜りましたことを記して、深甚の謝意を表します。

参考文献

- [1] 小規模建築物基礎設計指針, 日本建築学会, 2008.2.
- [2] 建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, 2003.2.
- [3] 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 地盤工学会, 2002.5.
- [4] 黒柳信之 他, “拡張型鋼管による住宅基礎地盤補強の適用に関する基礎的研究, 建築学会大会梗概集 (北海道),” 2013.9.
- [5] 内藤康夫 他, “拡張型鋼管による住宅基礎地盤補強の適用に関する基礎的研究 (その2: 砂質土における現場実験),” 建築学会大会梗概集 (近畿), 2014.9.
- [6] 橋高敏晴 他, “湧水のある山岳トンネル岩盤中での鋼管拡張型ロックボルトの耐久性,” 材料と環境, 第56巻, 第10号,

2007.

- [7] 内藤康夫 他, “拡張型鋼管を用いた地盤補強工法の開発,” (一財) 日本建築総合試験所, vol.40, no.3, pp.1-7, 2015.

執筆者紹介



内藤 康夫 Yasuo Naitou
パナホーム (株) 技術部
Engineering Div., PanaHome Corp.



黒柳 信之 Nobuyuki Kuroyanagi
パナホーム (株) 技術部
Engineering Div., PanaHome Corp.



松原 茂雄 Shigeo Matsubara
日新製鋼 (株) 商品開発部
Marketing & Products Development Dept.,
Nisshin Steel Co., Ltd.
工学博士