

高耐力脚部補強工の開発

Development of new type foot piling using steel pipe with dents

神谷信毅¹・古家義信²・木梨秀雄³・居相好信⁴

Nobuki Koya, Yoshinobu Furuya, Hideo Kinashi and Yoshinobu Iai

¹正会員 工修 株式会社大林組生産技術本部トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:koya.nobuki@obayashi.co.jp

²正会員 工修 大林・熊谷・フジタ第二東名島田JV工事事務所 (〒426-0085 静岡県藤枝市助宗450)

³正会員 博士(工) 株式会社大林組生産技術本部トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴正会員 株式会社大林組生産技術本部トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

Foot piling is one of the effective methods to stabilize tunnel face. This paper will describe that development of new type foot piling using steel pipe with dents. Some drilling tests have been performed in various angle conditions, and evaluated drilling applicability. Pull out tests have been also carried out to evaluate the bond properties of foot bolt. Results of measurements have been evaluated by FEM analysis.

Key Words : *tunnel auxiliary method, foot pile, steel pipe, drilling test, pull out test*

1. はじめに

わが国に NATM が導入されて数十年が経過した現在、NATM は山岳トンネルの標準工法として定着した。

NATM の導入以来、わが国の複雑な地質・地形の構造や新東名・名神高速道路に代表されるような大断面化などを背景とし、天端安定対策、鏡面安定対策、脚部安定対策などの各種補助工法が開発され、発展してきた。

補助工法は元来、NATM の概念で重要視する地山自身の支保能力が不足するような場合にそれを補おうとするものであったが、大断面トンネルの施工の合理化や沈下抑制などの周辺環境保全といった観点から、補助的な工法という位置付けよりも、重要度の高い主体的な工法として、設計段階から積極的に取り入れられるようになってきているのが現状である。

補助工法で使用される材料は、鋼管やロックボルトといった鋼材、鏡ボルトなどで使用されるグラスファイバーなど様々である。また、産業廃棄物にならないような材料を補助工法の材料として採用するなど、使用する材料に関する技術開発も活発に行われている。

これらの中で鋼管は、鋼管自体の剛性と注入材との相乗効果により、先受工などとして高い補強効果を発揮するものであり、長尺鋼管先受工などとして採用実績は非常に多い。しかしながら、鋼管と注入材との付着力は決して高くなく、フットボルトや鏡ボルトのように引き抜きや押し抜きに対する抵抗力を求められるような場合には、鋼管の打設本数を増やす必要があり、昨今の鋼材価格高騰や環境負荷低減などの観点から見ると、有効な手段ではないと言える。

そこで、鋼管成型時に段加工を施すことにより付着力を高めた高耐力脚部補強工を開発し、実際のトンネル現場において打設・注入試験、引抜試験を実施して、その施工性や効果について確認を行った。また、引抜試験で得られた付着耐力を用いて、フットパイルをシミュレートした数値解析を実施し、効果の検証も試みた。

本報告はこれらの結果について報告するものである。

2. 高耐力脚部補強工の概要

高耐力脚部補強工は、通常山岳トンネルの補助工法として使用される鋼管（以下、直鋼管）の成型時に、深さ約8mmの段を凹型に加工（以下、段付き鋼管）することにより、充填材（あるいは注入材）と鋼管との付着力を向上させ、補強効果を高めたものである。段付き鋼管の形状を写真-1、高耐力脚部補強工のシステムを写真-2に示す。

段を加工することにより、内径が小さくなるため（約86mm）、ビットツールズ（インナービット、アウタービット）を通常のものから変更し、製作した。図-1にビットシステムの概略寸法図を示す。また、段があることによる排泥性等の阻害を防止するため、段を鋼管に対して斜め加工することとした。



写真-1 段付き鋼管

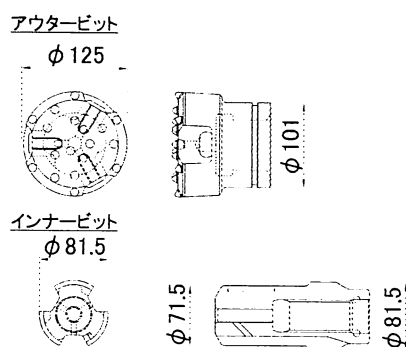


図-1 ビットシステム寸法図

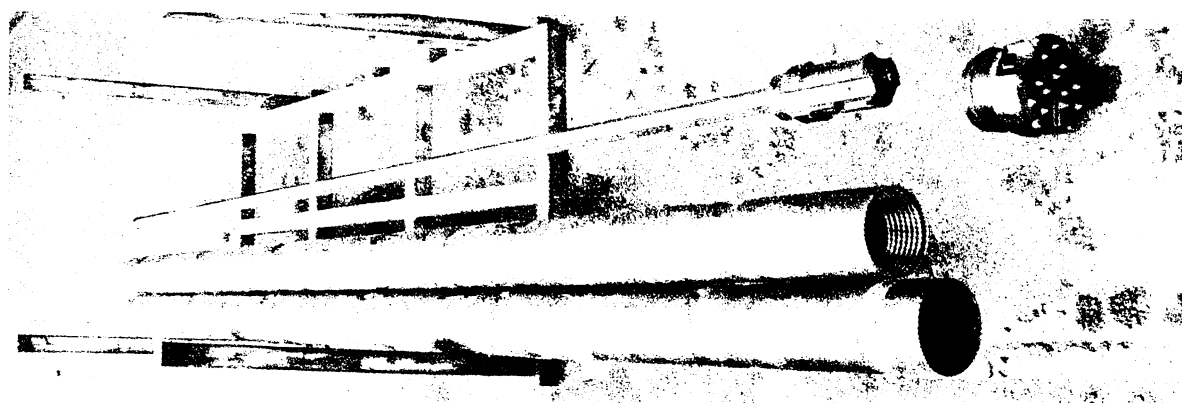


写真-2 高耐力脚部補強工 システム

3. 削孔・注入試験

(1) 試験方法

段付き鋼管の削孔及び注入の施工性を確認するため、実際のトンネル施工現場において試験施工を実施した。試験箇所地質は新第三紀の泥岩が主体であり、潜在的な亀裂を多数有し、スレーキング性のある比較的脆弱な地山であった。

試験は表-1 に示すケースで実施した。

表-1 削孔・注入試験ケース

	角度	鋼管長さ
下向き打設	90°	3m
	60°	3m
水平～上向き打設	水平	6m
	上向 4°	6m
	上向 8°	6m

a) 削孔試験

削孔にはドリルジャンボを使用し、ノミ下がり（削孔時間測定）や排泥状況（目視）、その他トラブルの有無について確認を行い、カメラやビデオで状況を記録した。

なお、下向きの削孔時にはコンプレッサーを用いてエア削孔を行い、スライムの排出を行った。

b) 注入試験

削孔完了後、鋼管外側クリアランスをウェスで間詰し、鋼管口元にインサートホースおよび注入プレートカバーを取り付け、MAI ポンプにてドライモルタルを注入した。モルタルはテーブルフロー値 200±20 (mm) とし、事前に練り水量を調整した。

注入完了後、経過時間をおき（約2時間）、鋼管打設箇所を掘削して鋼管打設状況とともに注入状況を確認した。注入箇所にフェノールフタレイン溶液を鋼管周辺に噴霧し、注入材を着色して観察した。特に溝部周辺の注入材充填状況、スライム残存の有無に着目した。

(2) 試験結果

a) 下向き削孔・注入

下向き削孔時の削孔時間測定結果を表-2 に示す。鋼管に段があることによって、特に削孔に支障をきたすような現象は認められなかった。

下向きの削孔状況を写真-3、削孔後の鋼管内の状況を写真-4 に示す。鋼管内の状況を確認したところ、段にスライムが溜まるような現象は認められず、削孔上の問題が無いことを確認できた。

写真-5 に注入後の鋼管周囲の状況を示す。写真に示すとおり、鋼管の周囲にモルタルが充填されており、注入上の問題が無いことを確認できた。

表-2 削孔時間測定結果

削孔角度 深度	削孔時間 (sec)			平均 削孔速度 (cm/sec)
	0～ 1m	1～ 2m	2～ 3m	
下向き 90°	81	91	65	1.27
下向き 60°	55	59	48	1.85

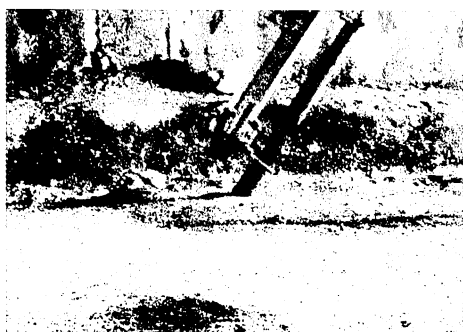


写真-3 削孔状況（下向き60°）



写真-4 削孔後の鋼管内状況

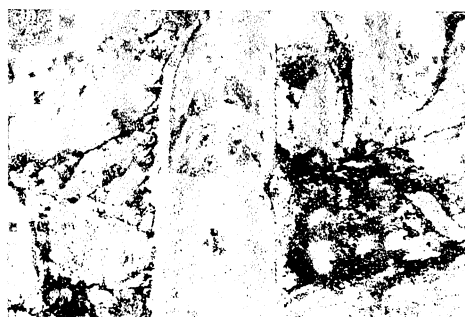


写真-5 注入確認（下向き90°）

b) 水平～上向き削孔・注入

水平削孔時の削孔時間測定結果を表-3 に示す。下向き削孔と同様、鋼管に段があることによって、特に削孔に支障をきたすような現象は認められなかった。

水平及び上向きの削孔状況をそれぞれ写真-6、写真-7 に示す。

写真-8 に注入後の鋼管周囲の状況を示す。写真に示すとおり、鋼管の周囲にモルタルが充填されており、下向きの場合と同様、注入上の問題が無いことを確認できた。

表-3 削孔時間測定結果

削孔角度 深度	削孔時間 (sec)		平均 削孔速度 (cm/sec)
	0～ 3m	3～ 6m	
水平	160	380	1.11
上向き 4°	160	187	1.73
上向き 8°	166	308	1.28

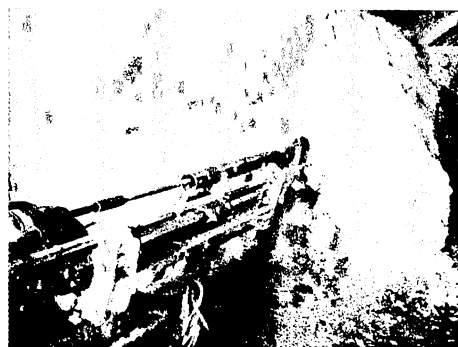


写真-6 削孔状況（水平0°）



写真-7 削孔状況（上向き8°）



写真-8 注入確認（上向き8°）

4. 引抜試験

(1) 試験方法

段付き鋼管の付着特性を調べることを目的とし、前述の削孔・注入試験と同一のトンネル現場において引抜試験を実施した。また、比較のため、直鋼管の引抜試験も実施した。

まず、吹付面から所定の深さまで削孔し、次に各孔に引抜試験用鋼管（直鋼管 3 本、段付鋼管 3 本）を挿入した。その後、ドライモルタルを注入し、1 日経過後、引抜試験およびテストピースの圧縮強度試験を実施した。

図-2 に示すように、荷重はセンターホールジャッキ（500kN）で載荷し、荷重計で計測した。また、鋼管に設置した 5 箇所のひずみゲージにより、作用軸力を計測した。試験は直鋼管、段付き鋼管ともに 3 本とし、定着長は 50cm とした。なお、ひずみと軸力の関係は予め較正している。写真-9 に引抜試験状況を示す。

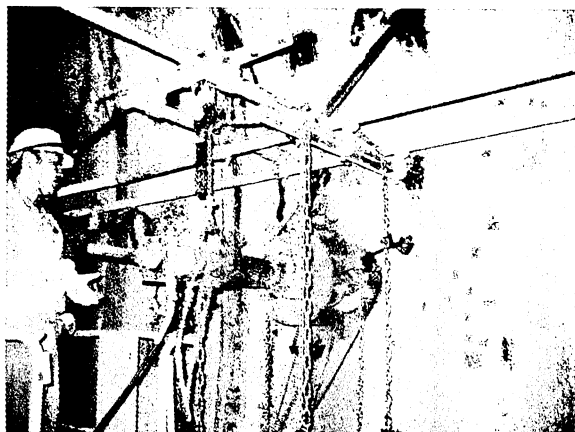


写真-9 引抜試験状況

(2) 試験結果

a) 引抜荷重－変位

引抜試験時の引抜荷重－変位関係を図-3 に示す。直鋼管の場合、10～20kN で引抜荷重はピークを迎え、その後ほぼ一定の荷重で引抜けた。一方、段付き鋼管の場合、40～100kN までは荷重－変位関係は線形で、その後変位量とともに引抜荷重は漸増し、変位量が 20mm 付近より荷重は漸減あるいは一定となった。

このように、直鋼管と段付き鋼管の引抜特性は大きく異なることがわかる。なお、段付き鋼管の試験結果に大きなバラツキが生じているが、段の部分に充填されるモルタルの充填性や強度の微妙な差に左右されたものと考ええる。

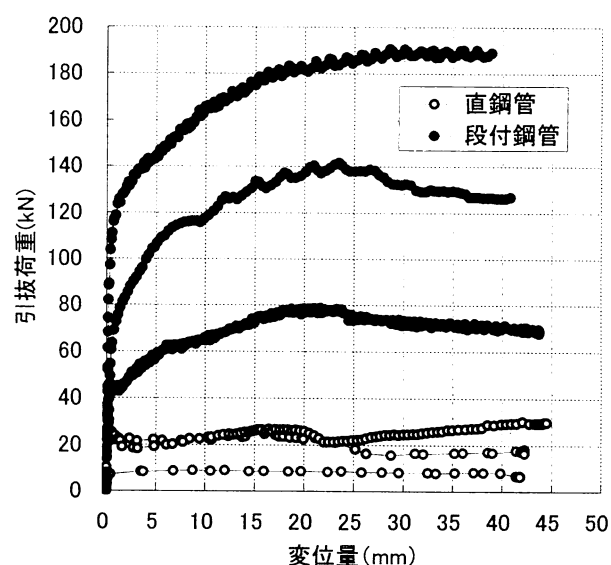


図-3 引抜荷重－変位関係

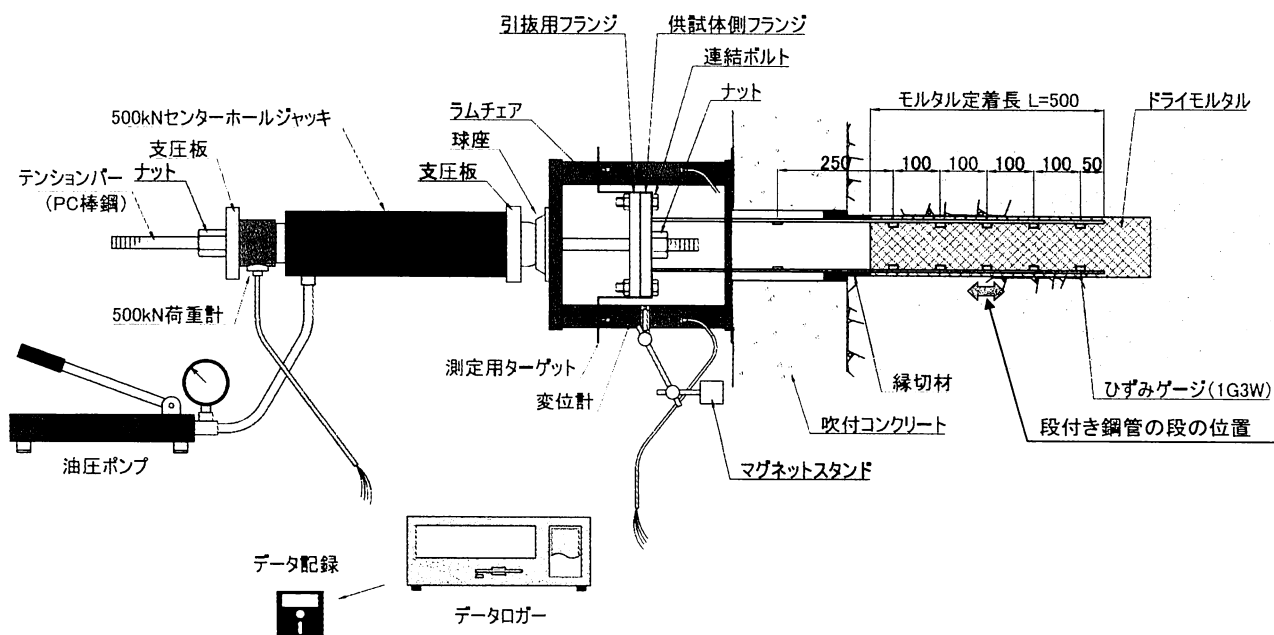


図-2 引抜試験概要図

b) 軸力分布

引抜試験時に測定した軸力分布を図-4～5に示す。横軸に定着口元からの距離 (mm)，縦軸に軸力 (kN) を示す。なお、凡例は引抜荷重 (kN) である。

軸力は、引抜荷重の増加に伴ってより先端側へと伝達し、増大する。直鋼管の軸力分布 (図-4) がほぼ直線的であるのに対し、段付き鋼管の軸力分布 (図-5) は段の部分に境に不連続となっているのが特徴的である。これは、直鋼管と段付き鋼管で軸力の伝達機構が大きく異なることを示している。

段付き鋼管の引抜試験結果やその形状より、軸力伝達のメカニズムを図-6のように推察した。鋼管を引抜く力に対しては、鋼管と定着材との付着力が抵抗する。これに加え、段付き鋼管の場合は、段の部分の分力が鋼管を拘束しようとする力 (図の上下方向) として作用する。さらに、定着材の凸部 (図の●部) を乗り越えようとする力が抵抗力として加わり、結果的に直鋼管に比べて大きな付着力が得られたと考える。

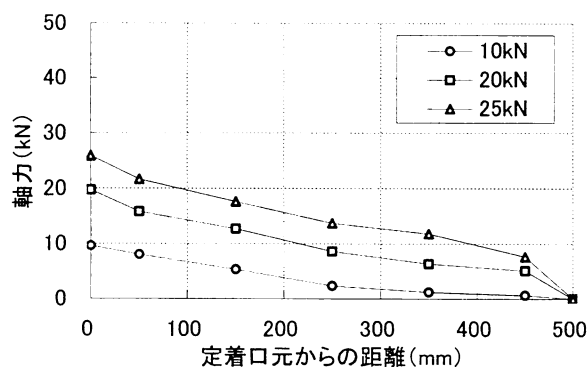


図-4 軸力分布の例 (直鋼管)

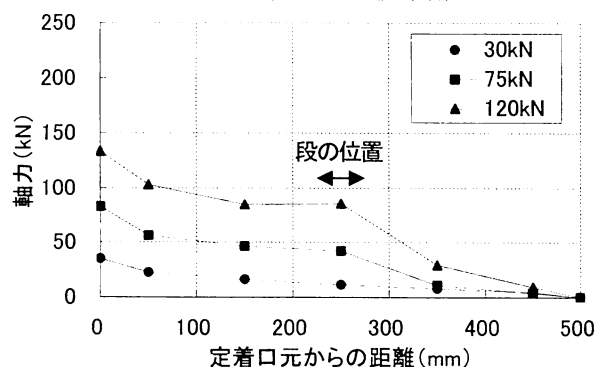


図-5 軸力分布の例 (段付き鋼管)

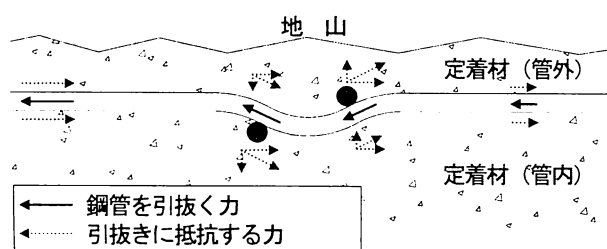


図-6 段付き鋼管の軸力伝達メカニズム

c) 付着特性の評価

各ひずみゲージの両側 100mm 間を 1 つの区間とした場合に、各区間の付着力を S_{bond} とする。この付着力 S_{bond} は、鋼管の周囲に作用する単位長さ当たりのせん断抵抗力であり、次式で求めた。

$$S_{bond} = \frac{P_i - P_{i-1}}{\ell} \quad (4-1)$$

ここで、 P_i は i 番目の位置での軸力で、 ℓ は区間長である。

引抜荷重と付着力 S_{bond} の関係 (例) を図-7 に示す。引抜荷重の増加とともに付着力も増加するが、最大値を迎えた後に減少する。この最大値をその区間の付着耐力 S_{bond} とする。

試験ケース毎の付着耐力を表-4に示す。段付き鋼管のばらつきが大きいのが、平均すると直鋼管に比べ、約 7 倍の付着耐力があることがわかる。

表-4のように得られた付着耐力 S_{bond} と定着材の一軸圧縮強度の関係を整理すると図-8のようになる。図には本実験結果の他、既往のデータ¹⁾も併記した。段付き鋼管を除くと、定着材の一軸圧縮強度と付着耐力は、ほぼ比例関係にあることが認められる。一方、段付き鋼管は他の材料に比べて、付着耐力が大幅に高いことが読み取れる。

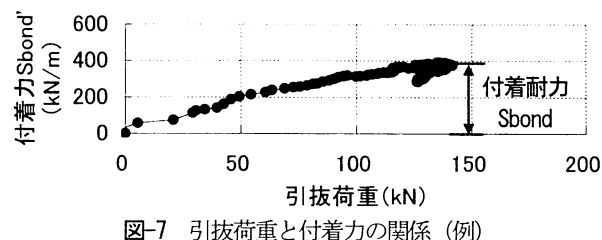


図-7 引抜荷重と付着力の関係 (例)

表-4 付着耐力

単位: kN/m			
試験ケース	付着耐力	平均	
直	No.1	8~32	21.7
	No.2	9~66	39.3
	No.3	18~62	44.4
段付き	No.1	182~397	275.7
	No.2	61~433	295.6
	No.3	56~254	160.9
			244.1

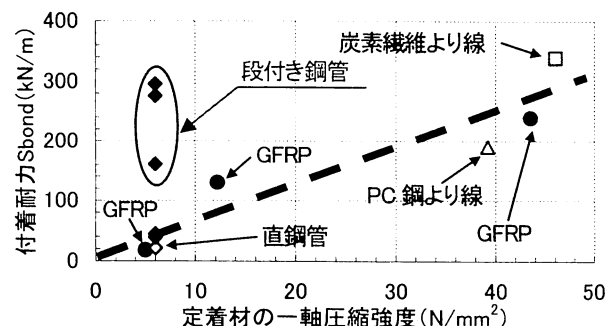


図-8 定着材の一軸圧縮強度と付着耐力の関係

5. 数値解析による効果検証

段付き鋼管の効果確認のため、上記のように現場での引抜試験を実施したが、フットパイルとして使用した場合に作用する押込みに対する効果を検証するため、図-9に示すようなモデルでFLACによる数値解析を実施した。

沈下の卓越する軟弱な地山を想定して、地山の弾性係数 $E=10\text{N/mm}$ 、側圧係数 $K_0=0.5$ とし、上載荷重 P_v を $10\sim 60\text{kN/m}$ (10kN/m 刻み) と変化させて、軸力や脚部沈下量について検討を行った。フットパイルは引抜試験で得られた付着耐力を有する鋼管 ($\phi 114.3\text{mm}$, $t=6\text{mm}$) 相当のパイル要素とした。

図-10～11に直鋼管と段付き鋼管の軸力分布を示す。なお、凡例は上載荷重 P_v を示す。直鋼管の場合（図-10）、上載荷重 P_v が 30kN/m を超えると軸力分布が直線状となり、鋼管全長にわたり付着切れが生じていることがわかる。一方、段付き鋼管の場合（図-11）は上載荷重 P_v が 30kN/m を超えると一部に付着切れが生じるものの、全長にわたる付着切れは認められない。

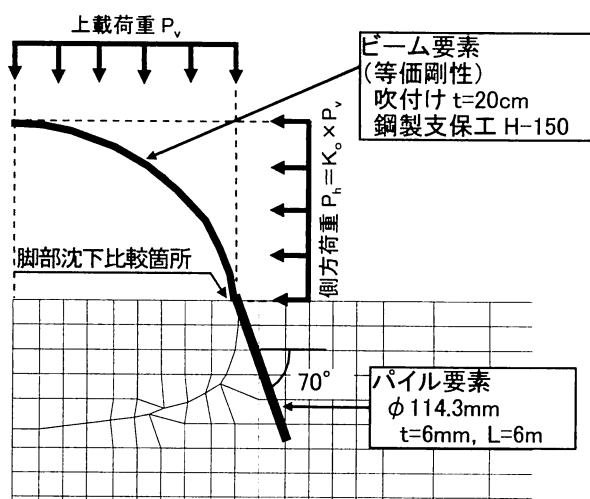


図-9 解析モデル

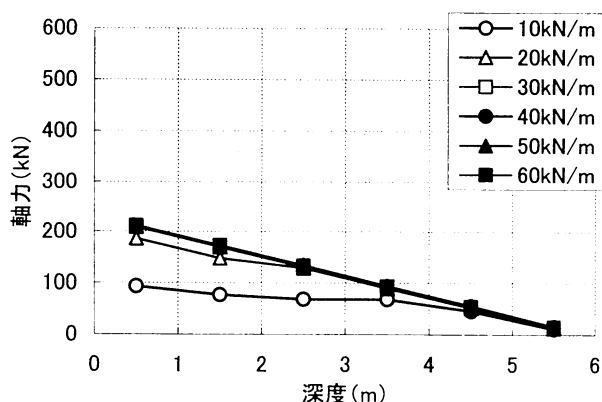


図-10 軸力分布図（直鋼管）

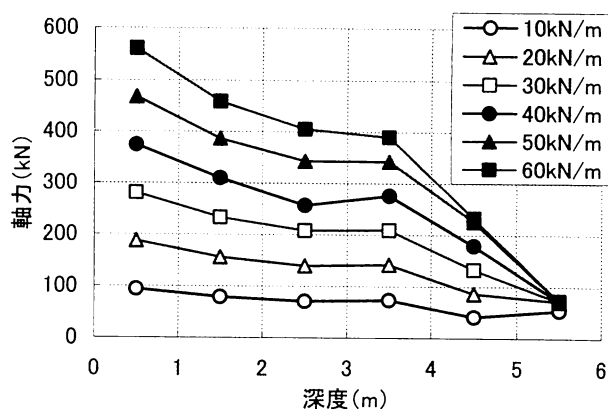


図-11 軸力分布図（段付き鋼管）

図-12に脚部沈下量の比較を示す。横軸に上載荷重、縦軸に脚部沈下量を示す。上載荷重 P_v が 20kN/m までは、直鋼管も段付き鋼管もほぼ同様の沈下を示すが、 30kN/m 以上のケースでは荷重の増加とともに沈下量の差が広がり、 60kN/m のケースでは段付き鋼管は直鋼管に比べ約 68mm （約 33% ）の沈下抑制効果があることがわかる。

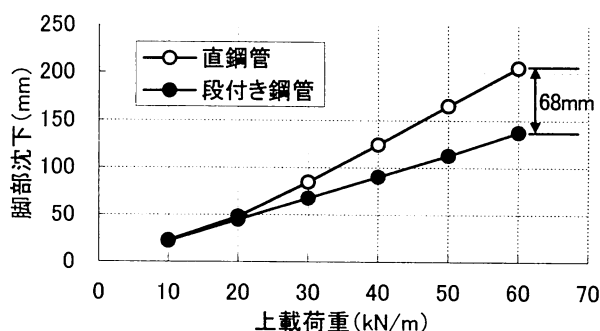


図-12 脚部沈下量の比較

6. おわりに

段付き鋼管を使用した高耐力脚部補強工について、現場での削孔・注入試験、引抜試験及び数値解析により、その施工性や効果について検証を行った。現場での施工性は通常の鋼管と同等であり、特に問題はない。また、付着力が大幅に向上することから、脚部補強工に加えて、鏡面補強工への適用も可能と考える。

今後は、実際の現場での沈下抑制効果の検証や掘削ステップを考慮した数値解析等を実施することにより、高耐力脚部補強工の効果のメカニズムを更に解明していく必要があると考える。

参考文献

- 1) 木梨秀雄, 白旗秀樹, 加藤健治, 居相好信, 松田安則, 羽馬徹: 不良地山における長尺鏡ボルト工法の開発, トンネル工学研究論文・報告集第13巻, pp.185～188, 2003.