

低土被り条件における角型鋼管推進中の 切羽影響評価方法の検討

石原 匠¹・仲山 貴司²

¹正会員 東海旅客鉄道株式会社 建設工事事務部 (〒450-6101 愛知県名古屋市中村区名駅 1-1-4)
E-mail: takumi.ishihara@jr-central.co.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-0004 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

供用中の鉄道直下における低土被りでのボックスカルバートの構築にあたっては、都市部等の線路の間合い時間が限られている条件において、角型鋼管を用いた非開削工法が有効な工法である。一方で、非開削工法を採用する場合、低土被り部を掘削することなく施工するため、土被り部および切羽面の地盤のゆるみ状態や支障物の有無を調査することも重要となる。そこで、本研究では、この調査を効率的に広範囲で実施することを目的に、模型実験および実現場での計測を通して、角型鋼管近傍の弾性波トモグラフィー探査の適用性を検証した。

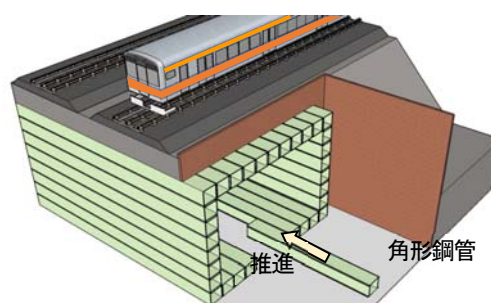
Key Words: undaer pass, tunnel face stability, ground arch, elastic wave tomography method

1. はじめに

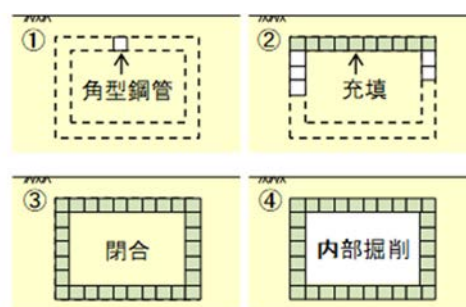
現在、踏切除去や河川改修等を目的として、鉄道直下を低土被りで横断するボックスカルバートが数多く新設されている。ボックスカルバートの施工においては、営業中の列車への影響を最小限にすることが重要になるため、角型鋼管を連続的に掘進・接合して構築するような特殊トンネル工法(図-1)が採用されるとともに、地表からの探査により土被り部および切羽位置の地盤の緩み状況や支障物の有無の把握も合わせて実施されている¹⁾。

特殊トンネル工法については、既に様々な施工法が確立されており、これら施工法の種類や特徴をまとめた土木学会のライブラリー¹⁾が発刊されるに至っている。一方で、地表からの探査方法としては、鉄筋棒等を用いた貫入試験や地中レーダー探査(電磁波探査)が主流であり、その他の物理探査の公開事例としては、補助工法である薬液注入の効果確認に弾性波探査の適用²⁾などが見られるに留まっている。

本研究では、他の物理探査もボックスカルバート施工時の要注意箇所抽出方法として活用できれば、より効率的に探査できる可能性があると考え、角型鋼管近傍での適用性を検証している。本報告では、この基礎的研究として、模型実験において周辺地盤の影響が少ないといった利点があるベンダーエレメント³⁾を用いた弾性波トモ



a) 鳥瞰図



①～② : 角型鋼管を連続的に推進・接合・充填
③～④ : 角型鋼管が閉合後に内部掘削

b) 施工順序

図-1 施工法の例

グラフィー探査を試行するとともに、角型鋼管施工中の実現場で地表面探査を試行した結果を紹介する。

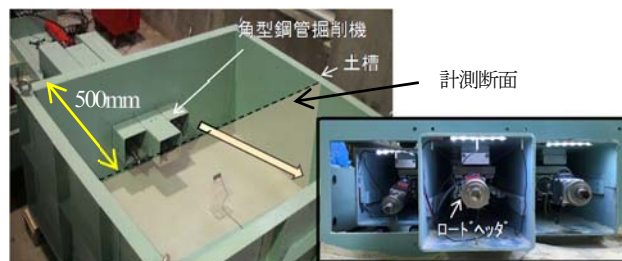
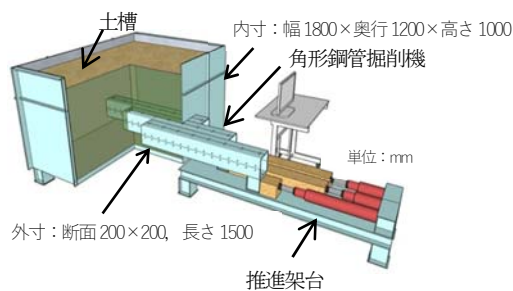


図-2 使用した試験機

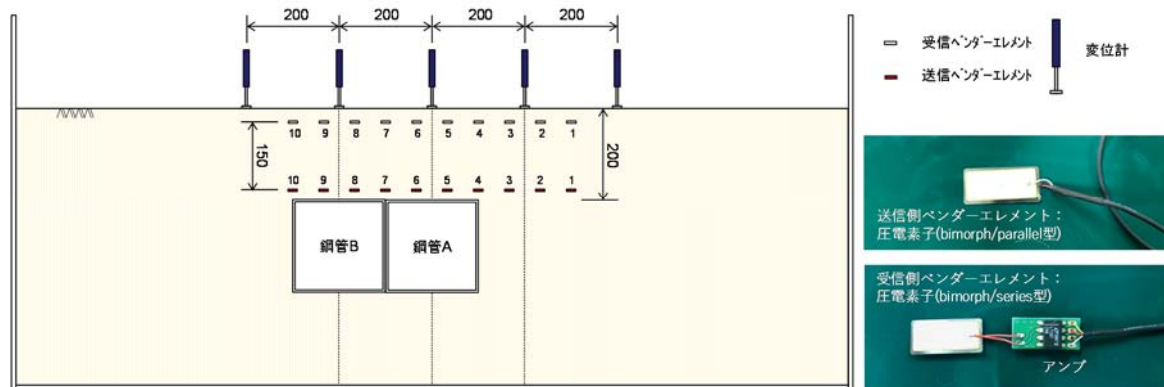


図-3 計測器の配置

2. 模型実験への適用

(1) 実験方法

a) 使用した試験機

模型実験における弾性波探査の適用は既往の研究でも見られ、トンネル掘削を簡易に模擬する降下床実験において地盤の緩み領域や応力状態を推定するために利用された事例⁴⁾などがある。

一方、著者らは、これまで降下床実験のほか、実現場を模擬した角形鋼管掘削機による掘削を土槽内の模擬地盤に対して実施してきた⁵⁾。図-2に試験装置の概要図および写真を示す。試験装置は3本の角形鋼管掘削機（実際の約 1/4 スケール）、推進架台および土槽からなり、刃口での掘削と角形鋼管の推進を繰り返しながら、最大 1.2m まで掘進することができる仕様となっている。また、人力掘削を模擬するため、自由断面が掘削可能なロードヘッドを先端に配置している。なお、この姿勢はジャイロ計（3 軸）と加速度計（3 軸）の相互補完により把握し、駆動アクチュエータ類のモータドライバはマイコンボードを介してパソコンでの制御としている。

この実験は降下床実験に比べてばらつきが大きいものの、現場に近い施工過程を同一地盤で繰り返し再現できるという利点があり、降下床実験と現場検証との中間的な位置づけで活用している。ただし、地盤内挙動については、実現場と同様に土圧計や変位計、傾斜計等を埋設する方法しかなく、得られるデータ数量に限られるという課題があった。

本研究においてはこの角形鋼管掘削機を使用し、掘削中において弾性波トモグラフィー探査を試行した。

b) 実験ケース

本報告では、表-1の2ケースの推進パターンを実施した結果を示す。Case1 は実際の施工過程を模擬して並列した角形鋼管を1本ずつ推進させたものである。一方、Case2 は比較のため、2本同時に角形鋼管を推進させたものである。なお、1掘進長は最初のみ 50mm、その後は 100mm (=0.5D, D: 角形鋼管高さ) を目標とした。

表-1 実験ケース

ケース	推進パターン	
Case1	STEP1	鋼管 A を単独で 1050mm 推進
	STEP2	鋼管 B を単独で 550mm 推進
Case2	STEP1	鋼管 A, B を同時に 550mm 推進

土槽内の模擬地盤は、いずれのケースも土被り 200mm (1.0D) とし、含水比を 1.0% に調整した珪砂 7 号を使用して相対密度 80% で締め固めたものとした。著者らがこれまでに実施した同様の実験⁵⁾において、1掘進長を 1.0D とした場合に地表面陥没が生じることを確認している条件であり、実現場では、補助工法の併用の検討が必要となる厳しい条件下を想定したものである。

トンネルの掘削を降下床実験では、図-4のような地盤挙動が生じることが知られている⁶⁾。地表面変位は掘削位置直上を最大とした沈下分布を描き、この際の地盤内は、降下床と同一の移動を呈す Zone-I と Zone-I に追従して移動する Zone-II、および Zone-II の外側にあって移動し

ない Zone-III に分かれる。以降では、今回の実験結果において同様の挙動が確認できるかを検証した。

c) 計測方法

掘進開始の 500mm 離れた位置に計測断面を設けた。

図-3 に計測器の配置を示す。地表面変位計測とともに、送信および受信のベンダーエレメントを地盤中に設置して、弾性波の送受信を行った。

送受信の仕様を表-2 に示す。なお、送信側の振幅は±30V としているが、地盤が低拘束圧下のために地盤を伝搬する弾性波の振幅は数 mmV まで低下する。この微弱な弾性波を受信するため、図-3 に示すように専用アンプをベンダーエレメント近傍に接続した。

表-2 弾性波の送受信の仕様

送信側	波形	P 波, 正弦波 (1 波)
	周波数	±10kHz
	振幅	±30V
受信側	サンプリングレート	100kHz
	測定時間	0.02 秒

(2) 実験結果

a) 地表面変位

図-5 に鋼管横断方向の地表面変位量を示す。いずれのケースも鋼管 A 直上付近に偏りはあるが、図-4 と同様の沈下分布となっていることがわかる。ただし、最終的な沈下量は分割掘削を行った Case1 の方が小さいはずであるが、実験結果では Case1 の方が大きい結果となった。

これは、図-5 の Case1 の結果には鋼管 A が計測断面を通過後の後続沈下の影響も含まれるためである。そこで、後続沈下の影響を除いた Case1 と Case2 の沈下量を比較するため、先行沈下の傾向を図-6 に整理した。図の横軸の-500mm は掘進開始時点、0mm は刃口が計測断面に到達した時点を示している。また、Case1 の②、③の変位量は鋼管 B の推進開始時を初期値 (0mm) として示した。

この結果から、先行沈下は切羽前方 0.5D~1D から生じはじめ、分割掘削を行った Case1 のほうが沈下量が小さい結果が得られていることがわかる。

b) 弾性波トモグラフィー結果

測定した弾性波の初動を整理のうえ、トモグラフィー解析を実施し、計測断面内の初期状態 (掘削前) からの弾性波速度分布の変化を式(1)のように比率で整理した。

$$\alpha = V_p / V_{p0} \quad \dots (1)$$

ここに、 α : 変化率、 V_{p0} : 初期状態 (掘削前) の P 波速度、 V_p : 着目時点の P 波速度

なお、1 回に測定した弾性波は 100 波であるが、ノイズに紛れる程度まで振幅が低下し初動の判読が困難なものについては除外し、トモグラフィー解析を実施した。

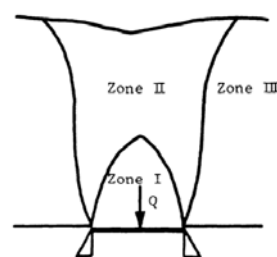
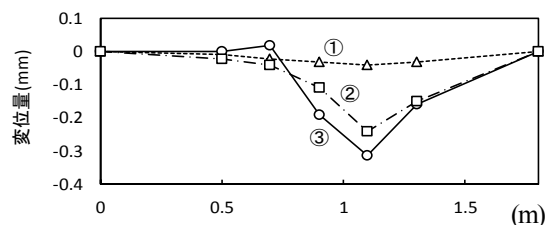
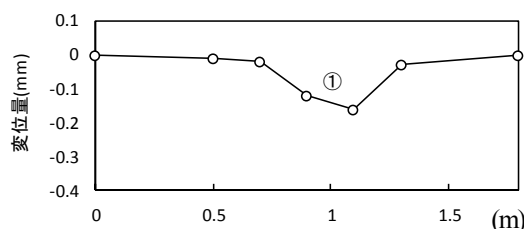


図-4 降下床実験における地盤内挙動と地表面変位⁶⁾



①鋼管 A550mm 推進時 ②鋼管 A1050mm 推進時 ③鋼管 B550mm 推進時

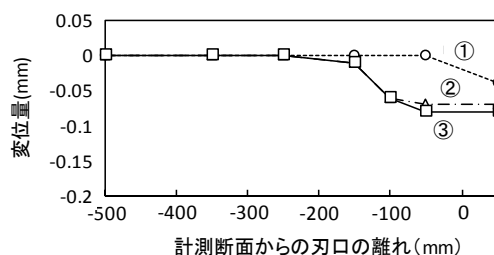
a) Case1



①鋼管 A, B 同時に 550mm 推進時

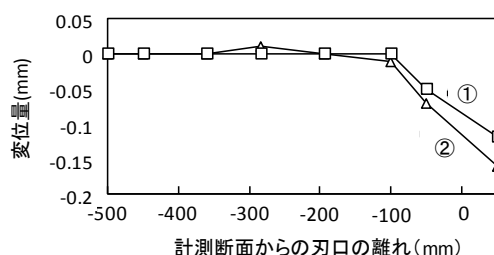
b) Case2

図-5 鋼管横断方向の地表面変位



①鋼管 A 推進時(A 直上) ②鋼管 B 推進時(A 直上) ③鋼管 B 推進時(B 直上)

a) Case1



①鋼管 A, B 推進時(A 直上) ②鋼管 A, B 推進時(B 直上)

b) Case2

図-6 計測断面からの刃口の離れと地表面変位の関係

また、トモグラフィ解析によるセル数は63とした。

各鋼管が計測断面を50mm通過したときのトモグラフィ解析結果を図-7に示す。

Case1においては、変化率 α が1以上（地盤が締ったと推定される箇所）と1以下（地盤が緩んだと推定される箇所）が混在する結果となり、鋼管 A550mm 推進時には、鋼管 A 直上に緩み（図中①）があり、それを囲むように締め（図中②）が確認できる。さらに、鋼管 B550mm 推進時には、同様の分布が鋼管 B 直上に移動するとともに（図中①、②）、その外周にも緩みがある（図中③）。このように、Case1 では図-4 の Zone-I の発生に近い反応がみられることがわかる。

一方、Case2 においては変化率 α が1以下となり、鋼管 B 直上から地表面に流れる緩み（図中①）があるが、明確に図-4 の Zone-I のような反応がみられない。通常、図-4 の Zone-I の高さは鋼管幅と同程度であり、実際に Zone-I が発生していなかったと可能性が示唆される結果である。

以上の結果から、模型実験においては弾性波トモグラフィ探査は、角形鋼管掘進中の緩みの分布を捉えている可能性が示唆された。そのため、本研究ではこの深度化を進める前段として、実現場においても同程度の緩みが確認できるかについて検証した。

3. 実現場への適用

(1) 実施方法

地表面弾性波探査を用いて、模型実験と同様に角形鋼管通過時の弾性波トモグラフィ探査を実施した。現場は、鉄道が複数線通過する盛土下において、角形鋼管を用いたけん引工法でボックスカルバートを施工している現場である（図-8）。地表面から上床版までの土被り厚さは約 0.4m である。図-9 に示すように上床の角形鋼管の推進期間中に、相対比較のため2回の計測を実施した。1回目の計測から2回目の計測の間に、図中の B2~B4 の角形鋼管と B2'~B4' の角形鋼管が推進した。

(2) 測定結果

1 回目の計測で得られた弾性波速度分布および地盤柱状図を図-10に示す。角形鋼管を推進した地盤は、N 値が 10 程度の軟弱地盤が表層に位置する地層を有しており、同じ深さの範囲（図中①の範囲）で弾性波速度が遅い分布がみられている。また、地表に弾性波速度の速い箇所（図中②の箇所）が点在していることがわかる。周辺地盤に比べ、局所的に弾性波速度が速い条件として考えられる理由は、コンクリートがら等の固い支障物が混在している場合や粗骨材等の骨格粒子のみで噛み合っ

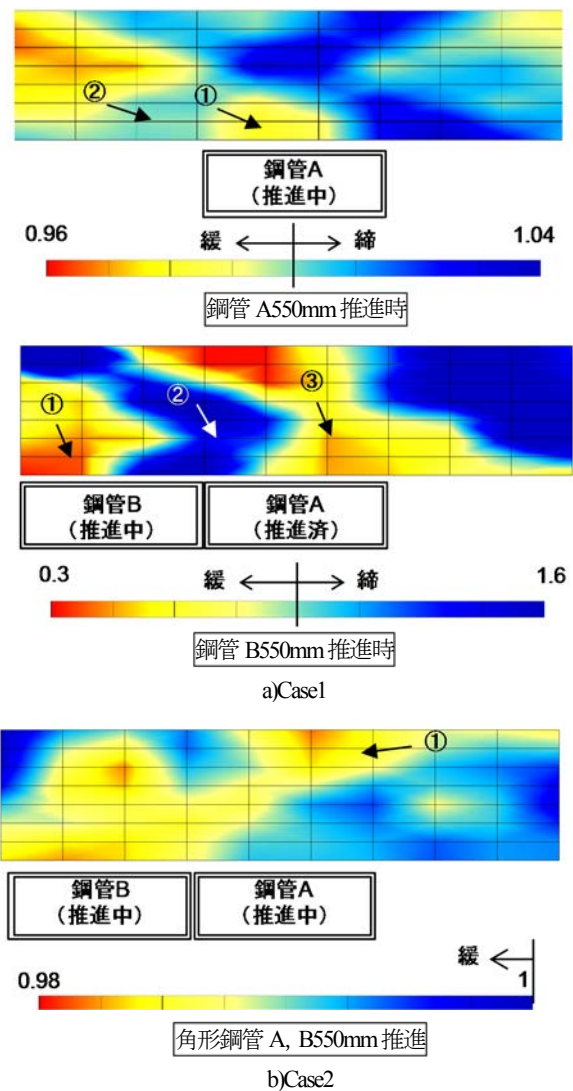


図-7 トモグラフィ解析結果

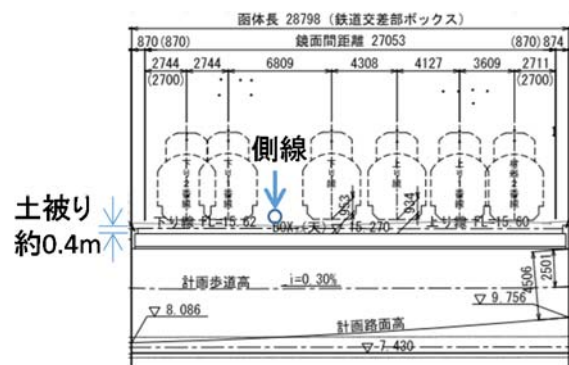


図-8 現場概要図

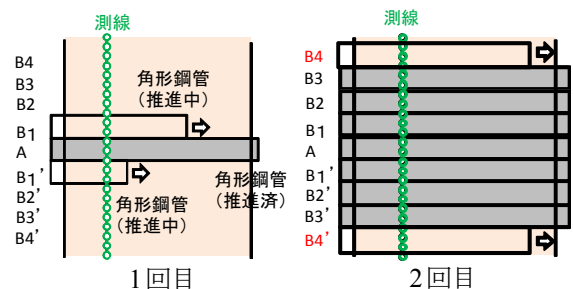


図-9 計測位置図（平面図）

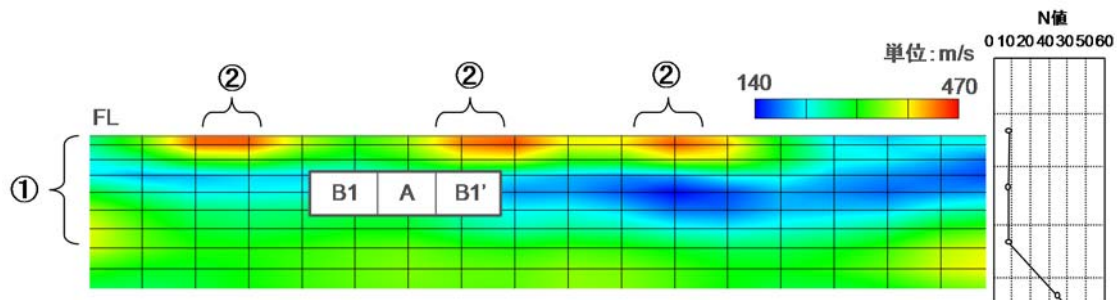


図-10 計測結果 (1回目の弾性波速度)

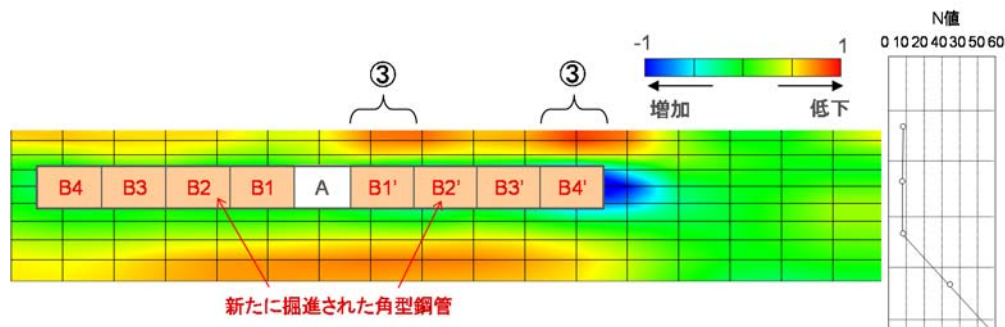


図-11 計測結果 (1回目と2回目の比率)

いる場合に見受けられる。当該箇所は、支障物は確認されていないことから、軌道保守によってバラスト等の充填が行われた、または細粒分が逸走していたなど、いずれにしても骨格粒子のみが噛み合っている状態であり、比較的沈下しやすい状態にあるものと推定された。

図-11には、弾性波速度の1回目と2回目の比率を式(1)で整理した結果を示す。この結果、計測の1回目と2回目の間で推進した角型鋼管直上で弾性波速度の低下がみられ、特に、図-10の②で示した箇所のうち、2箇所で大いなる緩みの反応(図-11の③)が確認された。

以上より、実現場においても模型実験と同様に緩みの反応がみられ、角型鋼管掘進時の評価に利用できる可能性が示唆された。

4. おわりに

本研究では、弾性波トモグラフィー探査の角型鋼管近傍のゆるみ状態や支障物の有無への適用性を探る基礎的研究として、模型実験および実現場で測定を実施した。この結果、角型鋼管近傍においても弾性波トモグラフィー

一探索でこれらを捉えることができる可能性が示唆される結果が得られた。

今後は、測定結果の密度や応力等の物理的な指標との関係性について、深度化した検証を進めるとともに、測定方法についても改良を進め、検証事例を増やしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) (公社) 土木学会：トンネル・ライブラリー 特殊トンネル工法一道路や鉄道との立体交差トンネル、2019。
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所：注入の設計施工マニュアル、2011。
- 3) 地盤工学会：地盤工学会基準「ベンダーエレメント法による土のせん断弾性波速度測定方法」、2013。
- 4) 福王翔，桑野玲子：ベンダーエレメント法を用いた弾性波測定による模型地盤内応力の推定，生産研究，Vol.64，No.4，pp.623-627，2012。
- 5) 石原匠，仲山貴司，西岡英俊：線路下カルバート構築における小断面掘削時の地盤への影響評価，第24回地下空間シンポジウム，2018。
- 6) 村山朔郎：砂層内局部沈下部にかかる鉛直土圧，京都大学防災研究所年報，Vol.11，pp.123-138，1968。

STUDY ON FACE STABILITY DURING SHALLOW OVERBURDEN UNDER PASS TUNNEL EXCAVATION

Takumi ISHIHARA and Takashi NAKAYAMA

In the construction of box culverts under the railway, the non-open tunneling method using steel pipes is an effective way to ensure the safety of rail services. However, it is also important to investigate obstacles and loose conditions in the ground. In this study, the elastic wave tomography method used in the investigation of mountain tunnel was applied to this construction site. First, it was applied to the indoor test which reproduced the site. Second, it was applied to construction sites. As a result, it was confirmed that it is possible to grasp the loose area around the steel pipe.