

さくさく JAWS 工法の開発

実工事への適用に向けた性能検証

DEVELOPMENT OF SAKUSAKU JAWS CONSTRUCTION METHOD

Performance verification for application to actual construction

田中 孝*¹, 関根 一郎*², 下坂 賢二*³ 田中 宏典*³

Takashi TANAKA Ichiro SEKINE, Kenji SHIMOSAKA and Hirofumi TANAKA

Typical construction methods for constructing underground spaces by non-excavation methods include mountain tunnel construction methods and shield tunnel construction methods. The underpass method, which is based on the propulsion method, is used for constructing a tunnel for grade separation at the bottom of roads and railways, which has a relatively short extension. Prior techniques of the underpass construction method would often involve, construction under conditions of shallow depth and relatively low groundwater pressure, and there are few records of construction in deep areas exceeding 10 m. At our company, construction of the Joban New Line Rokuchō Station is an example of construction of the outer shell precedent type non-excavation tunnel construction technology in the deep section, and a square steel pipe with a joint is connected to construct the station body directly under an existing sewer. A rectangular temporary skeleton was built, but there were problems with the strength, quality, and workability of the square steel pipe joint.

In this report, the development process and construction method of the crispy JAWS method (JAWS: Joint All Water Shutting), which solved the problems identified in the construction of Rokuchō Station on the Joban New Line and made it possible to construct an underground space in deep regions. An overview and various performance confirmation tests conducted for application to actual construction are described.

Keywords : JAWS Joint, Square Element, Outer Shell Precedent, Non-dig Tunnel, Jacking Method
 JAWS 継手, 角形エレメント, 外殻先行, 非開削トンネル, 推進工法

1. はじめに

非開削により地下空間を構築する代表的な工法には、山岳トンネル工法やシールドトンネル工法などがある。比較的延長が短く道路や鉄道の下部に立体交差用トンネルを構築する工法として推進工法を基本としたアンダーパス工法が用いられている。アンダーパス工法の先行技術としては浅深度で地下水圧が比較的小さい条件下での施工が多く、10mを超える深層部での施工実績は少ない。当社においては、深層部における外殻先行型の非開削トンネル構築技術の施工実績としてつくばエクスプレス六町駅工事があり、既設下水道管（中川汚水幹線φ6600mm）直下に駅本体を構築するために継手付きの角形鋼管を連結して矩形の仮設躯体を形成したが、2.2で後述する本体利用化、長距離化などへ対応するには、角形鋼管継手部の強度や品質、および施工性などに課題があった。

本報告では、つくばエクスプレス六町駅工事で明らかとなった課題を解決し、深層部での地下空間構築を可能とした「さくさく JAWS 工法」(JAWS : Joint All Water Shutting の略称)の開発経緯と工法概要、実工事への適用に向けて実施した各種性能確認試験について述べる。

2. 開発経緯

2.1 深層部における外殻先行型非開削トンネル構築技術の実績

トンネルを構築する際に、トンネル外殻部を継手が付いた小断面の函体を連結して地中に設置することでトンネル外殻部の覆工体を先行して構築し、覆工体内部を掘削してトンネルを形成する技術が外殻先行型非開削トンネル構築技術である。当社の施工実績とし

ては、つくばエクスプレス六町駅工事で、図 1 に示すように既設下水道管（中川汚水幹線φ6600mm）の直下に、駅躯体の一部を構築するために適用されている。本工事では、□850mm×850mmの継手付き角形鋼管（図 2 参照）を推進工法にて連結して設置し、外寸幅 17.85m×高さ 10.01m の 3 連ボックス形状で、仮設外殻躯体を駅躯体の外周部に先行して構築している（図 3 参照）。

土被りは約 20m で、対象地盤は沖積層の粘性土と砂質土の互層である。施工延長は 14.3m で、68 本の角形鋼管で仮設外殻躯体が構成されている。

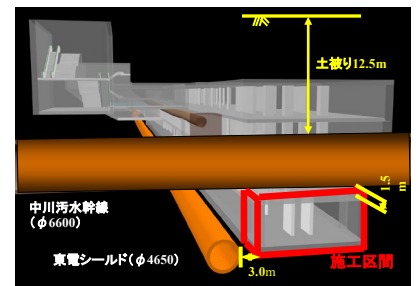


図 1 つくばエクスプレス六町駅工事概要

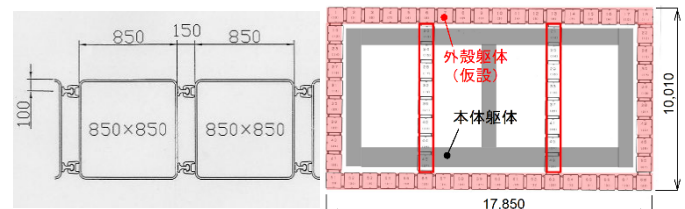


図 2 角形鋼管断面

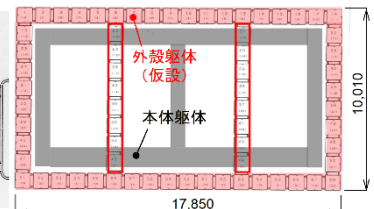


図 3 仮設外殻躯体断面

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

*2 戸田建設株式会社技術開発センター 博士 (工学)

*3 戸田建設株式会社技術開発センター

Technology Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng

Technology Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng

Technology Development Center, TODA CORPORATION

2.2 施工結果を踏まえた課題

角形鋼管を連結する継手はフランジ外面から 100mm 内側に配置されている。また、継手が嵌合した際のクリアランスは 4mm である (図 4 参照)。継手の引張強度は鋼管一般部の 85% の強度であった。この角形鋼管を用いた仮設土留め構造体の施工を踏まえた主な課題は、以下の 4 項目であった。

- ① 角形鋼管 (鋼殻エレメント) の本体利用化
- ② 長距離化への対応
- ③ 継手施工品質の向上
- ④ 閉合部施工の改善

これらの課題に対して、以下の改善が求められた。

- ① 継手部強度の向上
- ② 推進時継手抵抗力の低減
- ③ 継手内の洗浄とモルタル充填性の確保
- ④ 施工誤差吸収性の向上

継手単体の引張強度と図 5 に示すように継手部の有効高さが小さいため、継手部の曲げ耐力が鋼管一般部の約 60% であり、不合理な構造となっている。一方、継手内のクリアランスが小さいため、推進の施工誤差や蛇行による競りが発生して推進時の継手抵抗が大きくなる他、継手内の洗浄とその確認が確実に行えない、さらに、施工誤差が蓄積する閉合部の誤差を吸収できなくなる可能性があった。

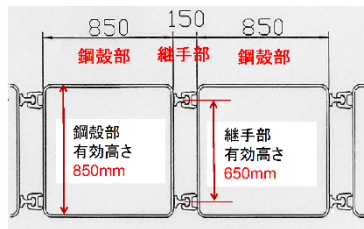


図 5 角形鋼管の有効高さ

3. さくさく JAWS 工法の概要

3.1 継手および角形エレメントの概要

JAWS 継手を図 6 に、JAWS 継手を配置した角形エレメントを図 7 に示す。本継手は前記課題に対応するために開発した継手で雌側の凹継手と雄側の凸継手から構成されている。本継手の特徴を以下に示す。

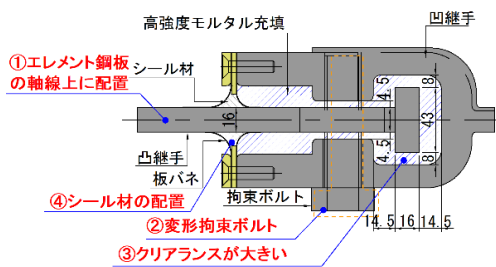


図 6 JAWS 継手

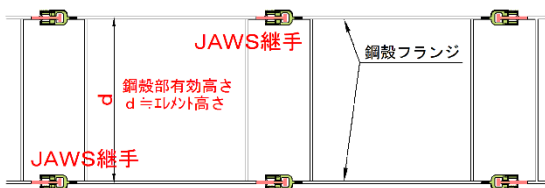


図 7 JAWS 継手を配置した角形エレメント

- ① 角形エレメント鋼板軸線上に継手を配置
- ② 変形拘束ボルトの配置
- ③ 大きな継手内クリアランス
- ④ 板バネとシーラ材の配置

角形エレメントフランジの鋼板軸線上に配置することで、継手部の有効高さを最大限に確保でき、かつ、変形拘束ボルトを凹継手に配置することで、継手部に引張力が作用した際に凹継手の開きを抑制できて継手強度が向上するため、継手部は SS400 の鋼板 16mm 相当の強度になる。また、継手内のクリアランスを大きくすることで、継手競りによる推進時の抵抗を低減して長距離施工を可能すると共に、継手内の洗浄とモルタル充填性を高めて継手部品質の向上、さらに、推進嵌合時の誤差吸収性を高めて閉合部における施工性の改善を図った。

3.2 工法概要

JAWS 継手を配置した角形エレメントを用いてトンネル外殻部を先行して構築する非開削トンネル技術がさくさく JAWS 工法になる。図 8 に示すように推進工法にて 1 本目となる基準エレメントを施工後、継手を嵌合しながら順次後続エレメントを施工し、エレメント間の土砂を掘削排土して継手内の洗浄、モルタル充填を行い、コンクリートをエレメント内に打設して構造体とする。エレメントが閉合され外殻躯体の構築が完了後、内部掘削と内面仕上げを行いトンネル (地下空間) が完成となる。

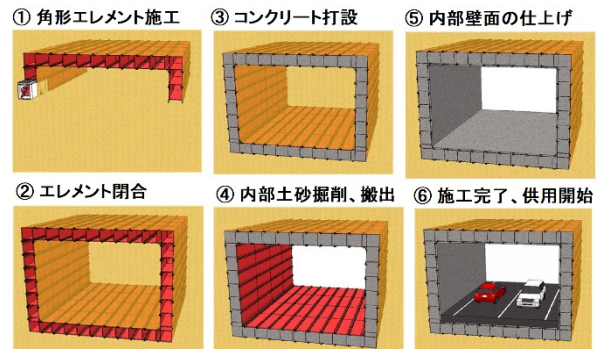


図 8 さくさく JAWS 工法施工手順

4. 実工事への適用

相鉄新横浜線羽沢横浜国大駅付近から東急東横線日吉駅までの延長約 10km の連絡線を整備する相鉄・東急直通線 (整備主体: (独) 鉄道・運輸機構) のうち、新綱島駅 (仮称) の日吉側端部約 35m と延長約 1,065m のシールドトンネル (往復) が当社の施工範囲である。新綱島駅端部は非開削工法が選定されており、トンネル断面は図 9 に示すように内空幅 19.2m、高さ 14.6m の馬

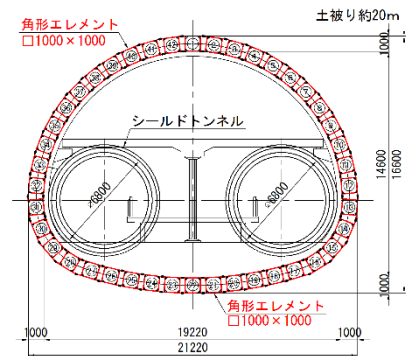


図 9 新綱島駅非開削部トンネル断面

蹄形の形状である。り、つくばエクスプレス六町駅工事と同様の継手が付いた角形鋼管を連結してトンネル外殻部を先行構築する計画であったが、施工性および品質においてさくさく JAWS 工法が優位と発注者が判断して設計変更となった。

新網島駅非開削部の施工条件を下記に示す。

- 作用水圧：0.2~0.35MPa
- 対象土層：上総層群泥岩層、砂層、泥岩と砂の互層
- 函 体：断面 □1,000mm×1,000mm, 施工本数 42 本
- 函体継手：JAWS 継手

5. 適用に向けた検証事項

さくさく JAWS 工法の実工事に適用するにあたり、以下の3つ事項に関する性能を検証する必要があった。

- ①止水性能（耐水圧）
- ②構造性能（保有耐力）
- ③施工性（精度および品質）

止水性能については、JAWS 継手と坑口止水装置が対象となる。推進完了後エレメント間の土砂掘削から JAWS 継手内へのモルタル充填までの間、凹継手端部の板バネによって止水を図り、角形エレメント推進時は地下水や加泥材等の坑口部からの流出を坑口止水装置によって防止する必要がある。最大 0.35MPa の水圧が作用する深層部でさくさく JAWS 工法を適用するためには従来の推進工法に比べ高い止水性能が必要であった。

構造性能については、角形エレメント内にコンクリートを充填して本体利用とするために、引張部材となる JAWS 継手は常時および地震時の作用荷重に対して安全性を確保できる強度性能が必要となる。

施工性に関しては、角形エレメントを連結してトンネル外殻部の覆工体を形成するためには角形エレメントを閉合させる必要があり、高い施工精度を確保しなければならない。また、角形エレメントを本体利用するためには、モルタルを充填して一体化を図った継手が所定の強度を有しているかを確認しておく必要があった。

上記の止水、構造および施工に関する要求性能に対し、JAWS 継手と角形エレメントに関して、(独) 鉄道・運輸機構の指導と協力を得ながら実施した各種性能確認試験の項目と目的を表 1 に示す。これらの性能確認試験の内、ここでは JAWS 継手の性能に関連する継手止水性能確認試験、継手単体引張試験、連結エレメント載荷試験および推進精度確認試験の概要と結果を以下に述べる。

表 1 各種性能確認試験一覧表

試験項目	試験目的	試験状況
止水性能	継手止水性能確認試験	凸継手嵌合時の止水性能の確認
	継手部推進坑口止水装置試験	坑口止水装置の耐久性と止水性能の実証
	角形エレメント推進坑口止水装置試験	継手付きエレメントに対する坑口止水装置の止水性能の実証
	開口蓋止水試験	開口蓋の止水性能と変形特性の確認
構造性能	単体エレメント載荷試験	施工時の強度性能と変形性能の確認
	継手単体引張試験	継手の引張性能の確認
	連結エレメント載荷試験	完成時における強度性能の確認
施工性	継手部充填材注入試験	凸継手嵌合後の凹継手内モルタル充填性の確認
	推進精度確認試験	推進時精度とねじれ修正装置の機能の確認
	推進機引抜き試験	推進機駆動部引抜きの施工性確認

6. 止水性能確認試験

6.1 継手止水性能確認試験

JAWS 継手は凹継手先端の板バネとシール材によって止水性が確保される。継手止水性能確認試験は、角形エレメント推進時の蛇行に伴う凸継手の嵌合状態とシール材の状況を想定して以下の5ケース(図 10 参照)とした。設定水圧は最大水圧 0.35MPa に対して安全率 1.2 を考慮し、0.45MPa とした。

- a) 通常の嵌合状態(偏心量 0mm, 嵌合角度 0°)
- b) 偏心した嵌合状態(偏心量 4.5mm, 嵌合角度 0°)
- c) 角度のついた嵌合状態(偏心量 6.0mm, 嵌合角度 1.6°)
- d) シール材が逸脱した状態(偏心量 6.0mm, 嵌合角度 1.6°)
- e) シール材を使用しない状態(偏心量 6.0mm, 嵌合角度 1.6°)

なお、試験ケース d は凸継手が嵌合していく中でシール材が板バネに薄く残った状態を想定したケースであり、一方、ケース e は全くシール材が無くなった状態を想定したケースである。

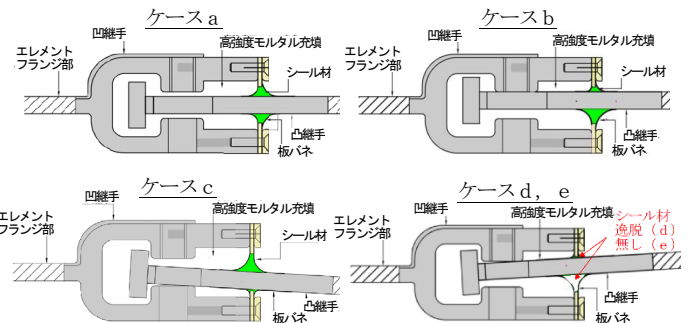


図 10 継手止水性能試験ケース

試験装置の概要を図 11 に示す。長さ 1.1m の凹継手と凸継手を嵌合させた状態で両端を妻板で閉塞し、止水処理をした上で、加圧室に模擬地盤を充填した上で注水加圧した。模擬地盤は現地の土総層群砂質泥岩層(Ksm 層)の砂層部分の粒径加積曲線を参考に、三河砂の 7~9 号と笠岡粘土を 65 : 15 : 15 : 5 の割合で混合して作製した。

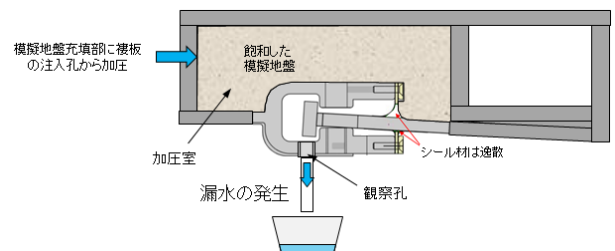


図 11 継手止水性能試験装置の概要

6.2 試験方法

試験手順を以下に示す。

- ①シール材を板バネ間に設置(ケース a~c) もしくは板バネと凸継手の接触面にシール材を塗布(ケース d)
- ②凸継手をスライドさせ嵌合後、凸継手に所定の偏心および角度を付与
- ③妻板等の試験治具設置後、注水加圧室に模擬地盤を充填

- ④加圧水供給装置を作動させ、水圧を 0.1MPa に上昇させ、10 分間保持
- ⑤漏水がなければさらに水圧を 0.1MPa 上げ、0.45MPa まで昇圧漏水が生じた場合は漏水量を測定
- ⑥0.45MPa まで昇圧後漏水が生じた場合は 10 分間の漏水量の変化を観察

6.3 試験結果と評価

ケース a から c については、0.45MPa まで昇圧したが漏水なく、良好な止水性能が確認された。ケース d は、0.45MPa まで昇圧後 40 分間は漏水が確認されなかったが、その後漏水が生じて最大 120cc/10 分の漏水量が確認された。ケース e は 0.1MPa 毎の昇圧段階で漏水が確認され、0.4MPa 時に最大 963cc/10 分の漏水が生じ、0.45MPa においては初期が 802cc/10 分 (0.08L/分) で、その後は減少傾向で 1 時間後には 302cc/10 分 (0.03L/分) となった。加圧グラフを図 12 に、ケース e の 0.45MPa 昇圧後の漏水量の変化を図 13 に、試験状況を写真 1 に示す。

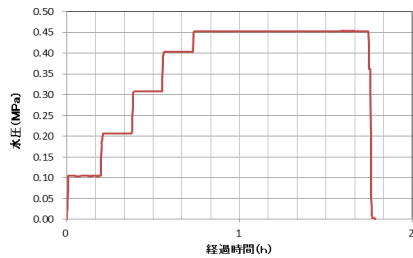


図 12 加圧グラフ

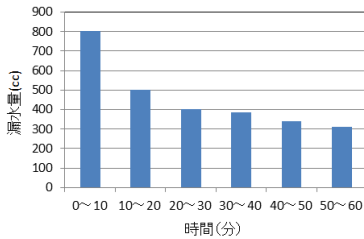


図 13 0.45MPa 昇圧後漏水量変化



写真 1 止水性能試験状況

止水条件が最も厳しいケース e においては、漏水量が最大 963cc/10 分 (0.10L/分) であったが、0.45MPa 昇圧後の漏水量は減少傾向であり、300cc/10 分 (0.03L/分) 以下に低下すると推測される。施工延長 34.5m で換算すると継手 1 ヶ所当たり 1L/分未満であり、角形エレメント内での施工 (エレメント間土砂掘削や継手内のモルタル充填など) に支障をきたす漏水量ではないことから、本工事で要求される止水性能を満足すると判断した。

7. 構造性能確認試験

7.1 継手単体引張試験

(1) 試験概要

JAWS 継手は凹継手に凸継手が嵌合後、拘束ボルトを設置し、凹継手内の空隙部にモルタルを充填して一体化することで構造部材として機能する。凹継手の材質は鋳鋼の SCW480、凸継手の材質は溶接構造用圧延鋼材の SM490Y、モルタルの設計強度は 50N/mm² である。拘束ボルトは引張力作用時の凹継手の開きを抑制し、継手強度の向上を図るため、凹継手長 1.1m/本当たり 4 本を配置している。

継手単体引張試験は長さ 550mm の継手供試体を用いて、実施工での凸継手の嵌合状態と拘束ボルトの有無を想定して、試験ケースは以下の 3 ケースとした (図 14 参照)。

- a) 偏心した嵌合状態 (偏心量 4.5mm, 拘束ボルトあり, モルタル充填あり)
- b) 拘束ボルト無しの状態 (偏心量 0mm, 拘束ボルトなし, モルタル充填あり)
- c) 斜め嵌合状態 (偏心量 0mm, 拘束ボルトなし, モルタル充填なし)

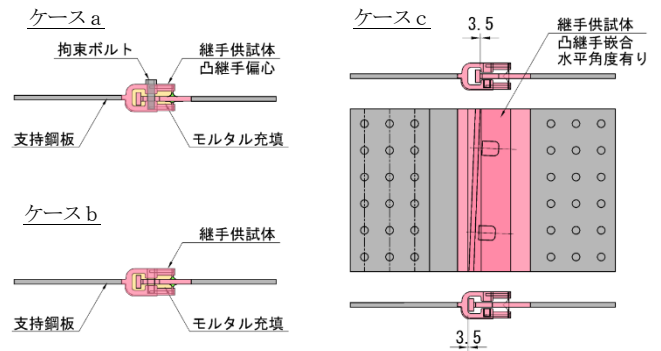


図 14 継手単体引張試験ケース

ケース a と b は完成時、ケース c は施工時を想定した試験である。ケース a は偏心して継手が嵌合した状態、ケース b は施工誤差等により拘束ボルトが配置できなかった場合、ケース c は施工時に既設函体から離れる方向に蛇行が生じて凸継手の端部のみが凹継手と接触し引張力が作用した場合を想定した場合である。試験では引張力に対する荷重方向の変位、凹継手の開き量および継手と拘束ボルトのひずみ量を計測する。継手単体引張試験装置を図 15 に示す。

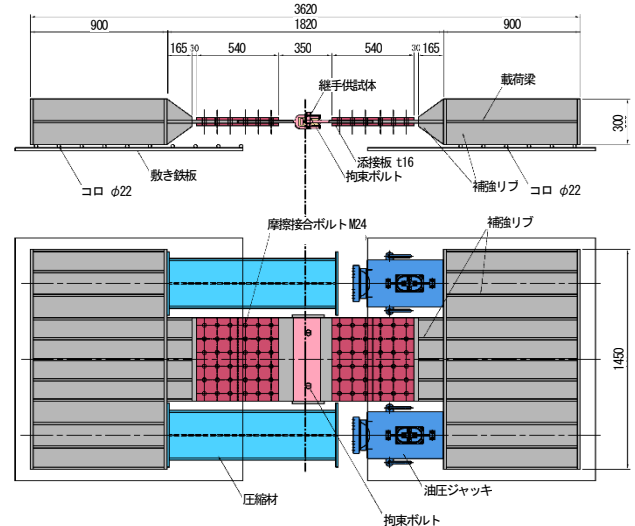


図 15 継手単体引張試験装置

(2) 試験方法

継手単体引張試験の試験手順を以下に示す。

- ①継手嵌合前に凹継手と凸継手の供試体の所定位置に計測器 (ひずみ計) を設置
- ②継手間のクリアランスが計画位置になるように嵌合

- ③拘束ボルトを挿入し締め付け軸力を導入
- ④モルタルを充填し発現強度が 50N/mm² 以上となるまで養生 (ケース c を除く)
- ⑤継手供試体の両側に配置した油圧ジャッキ (2,000kN/台) を伸長させて引張力を作用
- ⑥許容引張強度相当の約 8 割の荷重を作用させて荷重を 0kN まで除去
- ⑦再度載荷を作用させ、部材の降伏荷重および終局耐力まで載荷

(3) 試験結果と評価

1) ケース a

凸継手を偏心させた状態で実施したケース a の試験結果を表 2 に示す。また、荷重と継手間の変位量の関係を図 16 に示す。荷重は破壊に至るまで作用させた。破壊形態は凸継手先端溶接部の破断であった。荷重の増加に伴い凹継手隅角部のひずみと凹継手の開き量が増大したものの、拘束ボルトによる変形抑制に機能していたことが確認された。最大荷重 Pmax は 2,626kN、降伏荷重 Py (凹継手隅角部のひずみが降伏ひずみに達した時の荷重) は 2,033kN であった。降伏時の継手間の変位は 1.573mm、最大荷重時の変位は 5.873mm であった。一方、拘束ボルトの最大軸力 Nmax は 366.3kN/本で、拘束ボルトの引張強度 366.5kN/本付近まで達したが、ボルトの抜け出しや破断は生じなかった。

表 2 継手単体引張試験結果_ケース a

荷重	試験結果	試験条件	備考
凹継手降伏時荷重	Py	2,033 kN	拘束ボルト ⇒ 有り 設計耐力上必要な荷重 781kN
最大引張荷重	Pmax	2,626 kN	終局状態：凸継手先端溶接部破断
最大荷重時凸継手ひずみ	ε	13,000μ以上	モルタル充填 ⇒ 有り
拘束ボルト最大軸力	Nmax	366 kN	凸継手偏心 ボルト仕様：M24 10.9

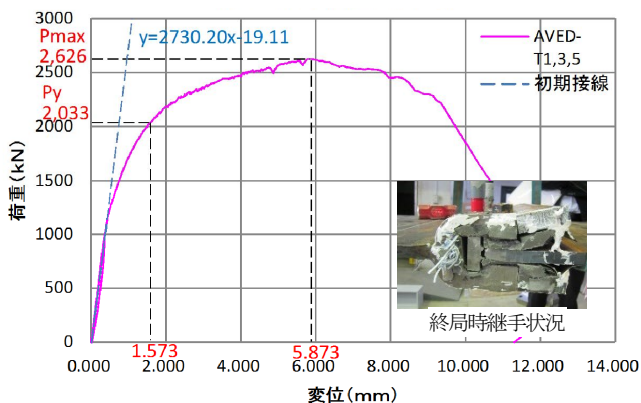


図 16 荷重-継手間変位曲線_ケース a

2) ケース b

凸継手は正規の位置に嵌合させ、拘束ボルトが無い状態で実施したケース b の試験結果を表 3 に、荷重と継手間の変位量の関係を図 17 に示す。荷重の増加と共に凹継手の開き量が増大し、荷重がピークを迎えた後、荷重増加が期待できない状態で試験を終了した。最大荷重 Pmax は 834kN、凹継手隅角部降伏時の荷重 Py は 616kN であった。降伏時の継手間の変位は 0.83mm、最大荷重時の変位は 2.10mm であった。

拘束ボルトで締結したケース a と比較すると、最大荷重は約 32%、降伏時荷重は 30% であり、拘束ボルトの効果が大きいことが確認できた。

表 3 継手単体引張試験結果_ケース b

荷重	試験結果	試験条件	備考
凹継手降伏時荷重	Py	616 kN	拘束ボルト ⇒ 無し モルタル充填 ⇒ 有り
最大引張荷重	Pmax	834 kN	終局状態：凹継手目開き拡大

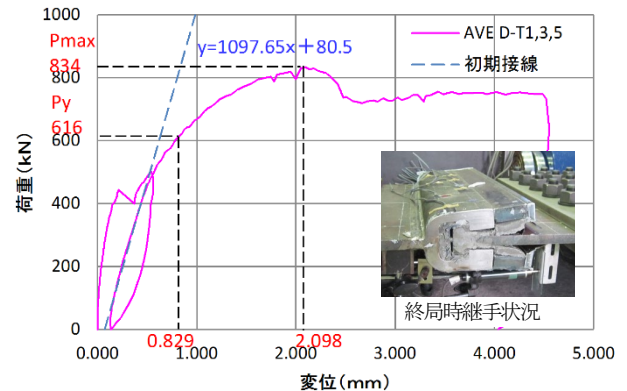


図 17 荷重-継手間変位曲線_ケース b

3) ケース c

凸継手の長さを試験体幅方向に変化 (短く) させ、凸継手の端部のみが凹継手に接触する状態で実施したケース c の試験結果を表 4 に示す。荷重の増加と共に凹継手の開き量が増大すると共に凹継手端部のひずみが増大し、破断 (引裂き) したところで試験を終了した。最大荷重 Pmax は 1,607kN、凹継手隅角部降伏時の荷重 Py は 301kN であった。降伏時の継手間の変位は 1.41mm、最大荷重時の変位は 11.20mm であった。

表 4 継手単体引張試験結果_ケース c

荷重	試験結果	試験条件	備考
凹継手降伏時荷重	Py	301 kN	拘束ボルト ⇒ 無し モルタル充填 ⇒ 無し
最大引張荷重	Pmax	1,607 kN	凸継手端部接触 終局状態：凹継手破断

4) 試験結果評価

継手単体引張試験のケース a では、降伏荷重は設計必要耐力 780kN を越える 2,033kN であり、必要耐力を満足することを確認した。

拘束ボルトが無い状態を想定したケース b では、降伏荷重が 616kN であり、設計必要耐力を満足しない結果であり、拘束ボルトの必要性が確認された。

施工時を対象としたケース c では、継手 2 箇所当たりの引張強度 (301kN×2 箇所=602kN) が既設函体の滑動荷重 (約 400kN) を上回り、継手が損傷する前に函体が滑動することが確認された。よって、施工時の継手の安全性は確保されると判断した。

以上より、継手に拘束ボルトを配置することで完成時安全性が確保され、また、施工時においても継手の損傷は回避できることから、新綱島駅非開削部に JAWS 継手を採用した際に、継手の安

全性が確保できることが確認された。

7.2 連結エレメント載荷試験

(1) 試験概要

試験を行う供試体は、実物大 (□1,000mm×1,000mm×奥行 0.55m) とし、継手部は実際の継手を使用する。強度試験に先立ち、鋼殻エレメントを嵌合させ、継手内部にグラウト材 (モルタル)、エレメント鋼殻内にコンクリートを打設し完成時を想定した覆工供試体を製作した。

試験は、上記製作した覆工供試体を用いて載荷試験を実施し、継手嵌合部の強度性能を確認するとともに、変位特性を把握し設計時に設定した覆工体剛性の妥当性を評価する。継手嵌合部の強度が設計耐力 P_u (理論値: SS400, 厚 $t16\text{mm}$ の相当, $P_u=1,770\text{kN}$) を満足するかを確認するため、覆工試験体にはひずみゲージ等のセンサーを取り付け、載荷に伴う鋼殻およびコンクリート部のひずみの変化を把握する。載荷試験の概要を図 18 に示す。

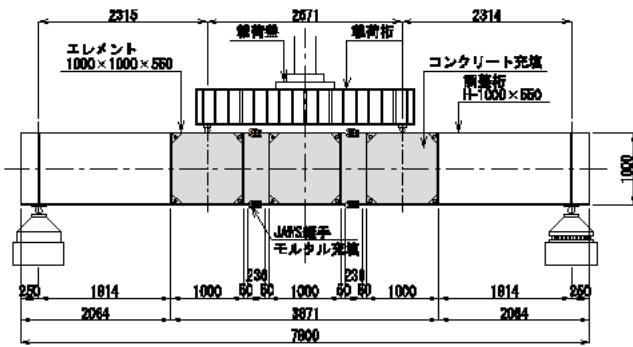


図 18 連結エレメント載荷試験概要

(2) 試験方法

供試体は、実際の施工手順を再現して作製した。載荷試験前に採取したテストピースにより一軸圧縮試験を実施して所定の強度が発現していることを確認してから載荷試験を実施した。

載荷方法は、四点曲げ載荷とした。初期載荷で載荷治具と供試体との取り合いや出力データを確認し、ひび割れ発生まで載荷を行い、ひび割れ発生状況を確認した後、一度除荷し、再度載荷を行い終局状態まで連続して載荷する。供試体が降伏し荷重の増加が鈍化するまで「一定荷重ピッチ」で計測し、その後「一定変位ピッチ」に計測を切り替える。載荷時には供試体の変位、継手、鋼殻およびコンクリートのひずみを計測すると共に、ひび割れ状況をスケッチした。

(3) 試験結果と評価

1) 載荷試験結果

載荷試験の破壊形態は引張側継手位置でのボルト破断 (ネジ山折損引抜け, 写真 2 参照) であった。最大荷重 P_{max} は $1,945\text{kN}$ 、最大荷重時でのボルト軸力 P_b は 329kN であった。鋼殻部位および中空コンクリート部では弾性域の状態であった。最大荷重値での各部位の最大値を表 5 に、載荷試験状況を写真 3 に示す。

また、荷重-継手部鉛直変位曲線と荷重-継手部ひずみ曲線を図 19 と図 20 に示す。

表 5 最大荷重作用時各部位最大値

位置	E J L L ブロック	引張縁側	圧縮縁側		
最大荷重 KN	中央変位 mm	ボルト軸力 KN	継手ひずみ μ	鋼殻ひずみ μ	コンクリートひずみ μ
1945	21.19	329	-7238	1319	-656



写真 2 ボルト引抜け状況



写真 3 載荷試験状況

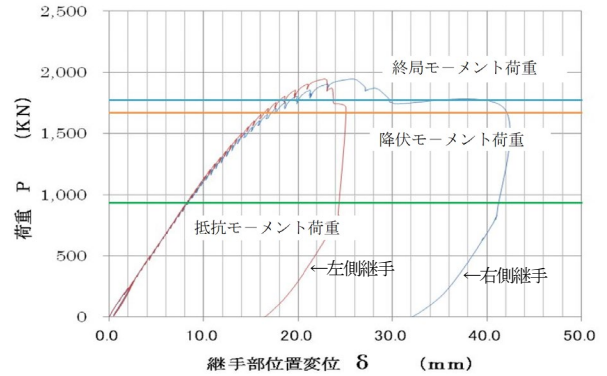


図 19 荷重-継手部鉛直変位曲線

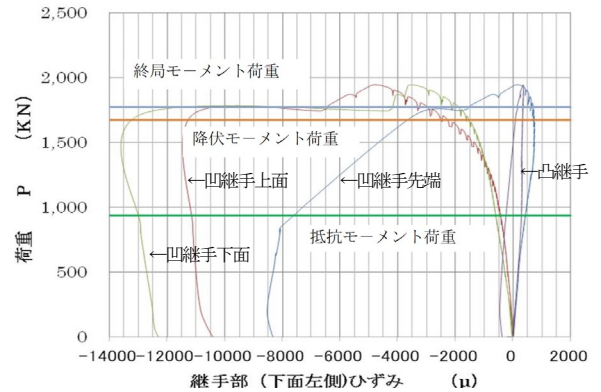


図 20 荷重-継手部ひずみ曲線

2) ひび割れ観察結果

ひび割れ発生状況を写真 4 に示す。ひび割れは、継手部に集中して発生した。ひび割れ発生荷重 P_c は 290kN であった。



写真 4 ひび割れ発生状況

3) 試験結果の評価

載荷試験での破壊形態は引張側継手位置でのボルト破断であり、最大荷重は終局モーメント荷重の理論値 $P_u=1770kN$ を上回る結果であった。

終局モーメント荷重の理論値より試験結果が上回ったことより、JAWS 継手は設計耐力を満足したことが確認できたことから、JAWS 継手の耐力を SS400、厚さ $t=16mm$ 相当と評価して非開削部の設計を行うことができると判断した。

8. 施工性確認試験

新網島駅非開削部のトンネルは馬蹄形状であり、角形エレメントを 42 本連結してトンネル外殻部構築する。基準エレメント施工後、後続エレメントを順次継手を連結し、最後に閉合エレメントを施工することから、個々の角形エレメントの精度確保が重要となる。掘進時の精度を維持するため、掘進機には方向修正ジャッキの他、ローリング抑制用の可動ソリが装備されている。角形エレメントの施工位置によってエレメントの回転角度（傾き）が異なり、発進時の姿勢を維持した状態で推進できるのか、また、ローリングした際に修正が可能なのか確認する必要がある。

8.1 掘進精度確認試験

掘進精度確認試験では、試験ヤードに鋼矢板で仕切って現地地盤（上総層群砂層と泥岩層）を模擬した土層（図 21、図 22 参照）を作製し、ライナープレートで発進立坑を設け、実物大の掘進機（写真 5 参照）と JAWS 継手を配置した角形エレメント（写真 6 参照）を用いて推進を行い、以下の 2 種類の試験を実施した。

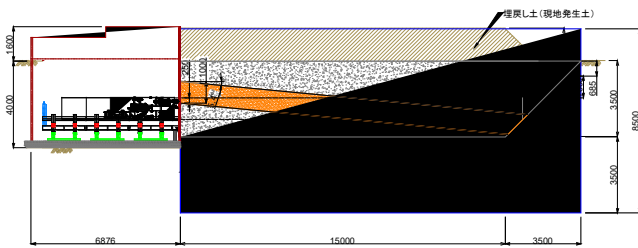


図 21 掘進精度確認試験用模擬土層縦断面図

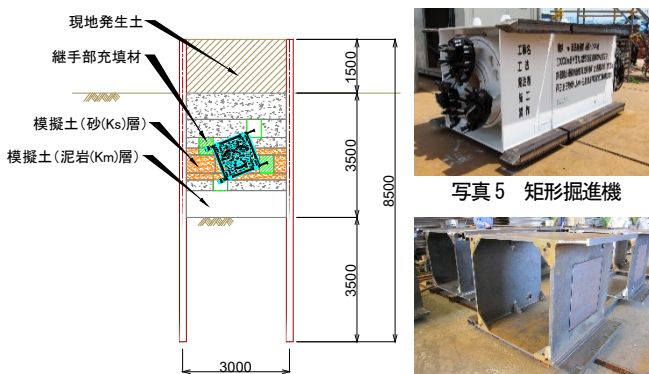


図 22 模擬土層断面図



写真 5 矩形掘進機



写真 6 角形エレメント

①掘進精度確認試験

矩形掘進機を水平の状態から 22.5 度傾けた状態で発進させ、傾

いた状態を維持して掘進する。掘進時の精度確保は方向修正ジャッキやローリング修正ジャッキ（油圧ソリ）等によって行い、偏心量 $\pm 10mm$ 以内の精度を確保した推進が可能であることを検証する。

②掘進修正装置確認試験

掘進機の発進時の姿勢条件として、水平位置からの発進とし、ローリング修正ジャッキを使用して掘進を行い強制的にローリングさせ、再度水平位置に修正させることで、姿勢制御が可能であることを検証する。

8.2 試験方法

掘進精度確認試験およびの試験方法を以下に示す。

(1) 掘進条件

掘進距離：エレメント 1.1m/本 \times 12 本（延長 13.2m）

掘進速度：20mm/min

(2) 掘進手順

1) 掘進精度確認試験

- ①掘進機を水平位置から反時計回りに 22.5 度傾けた状態で発進架台に設置する。
- ②上記掘進速度にて掘進を開始する。1 本目のエレメント掘進完了までを初期掘進とする。
- ③2～12 本目のエレメントの掘進が完了するまで 22.5 度傾けた状態を維持して掘進する。
- ④ローリングや蛇行が生じた場合は、方向修正ジャッキや油圧ソリを使用して修正する。

2) 掘進修正装置確認試験

- ①掘進機を水平状態で掘進を開始する。
- ②1 本目のエレメントの掘進が完了したら、掘進方向左側のローリング修正ジャッキを作動させ、時計回りに掘進機をローリングさせる。
- ③掘進機がローリング生じ始めたら掘進方向左側のローリング修正ジャッキを収納し、ローリング修正作業に移る。
- ④右側のローリング修正ジャッキを徐々に作動させて反時計回りにローリングを修正させる。
- ⑤掘進機がローリング修正され水平状態に戻った時点で右側のローリング修正ジャッキを収納し、水平状態を維持しつつ 12 本目のエレメントまで掘進を行う。

(3) 管理項目

本試験での管理項目を表 6 に示す。

表 6 掘進精度確認試験管理項目

確認項目	確認・計測内容	許容値・その他	測定頻度
掘進性能	推力	最終計画推力 871kN	550mm 掘進時
	カッター圧力	装備能力 13.8MPa	掘進完了時に記録
	掘進速度	—	
	掘削土量	—	
掘進制御	掘進精度 (水平、鉛直)	水平： $\pm 10mm$ 以内 鉛直： $\pm 10mm$ 以内	550mm 掘進時 掘進完了時に記録
	掘進機の姿勢 (ローリング、ピッチング)	—	550mm 掘進時 掘進完了時に記録
	エレメントの姿勢 (水平、鉛直)	水平： $\pm 10mm$ 以内 鉛直： $\pm 10mm$ 以内	エレメント 1 本掘進完了ごとに記録
周辺地盤への影響	地盤変状（レベル）	—	エレメント 1 本掘進完了ごとに測量して記録

8.3 試験結果と評価

試験においては、前記管理項目に示すように掘削性能やローリングジャッキの作動性他についてもデータを取得しているが、ここでは掘進精度と姿勢制御に関する結果とその評価について述べる。

(1) 掘進精度確認試験結果

1) 掘進精度と掘進機の姿勢

掘進距離に対する掘進機の鉛直偏心量は、計画線形に対して、 $-2\text{mm} \sim +1\text{mm}$ であった。一方、掘進機の水平偏心量は、計画線形に対して $\pm 0\text{mm} \sim -4\text{mm}$ の偏心量であった。

掘進機のローリング修正ジャッキは、2本目のエレメントが400mm掘進後に使用を開始し、12本目のエレメント掘進終了時まで使用し続けた。掘進機のローリングは、掘進方向右側へ最大 0.2° のローリングが生じた。

2) エレメントの姿勢

エレメント掘進完了時のエレメントの鉛直偏心量と水平偏心量を図23、図24に示す。エレメントの鉛直偏心量は $-1.0\text{mm} \sim +2.0\text{mm}$ 、水平偏心量は $-3.0\text{mm} \sim \pm 0.0\text{mm}$ であった。

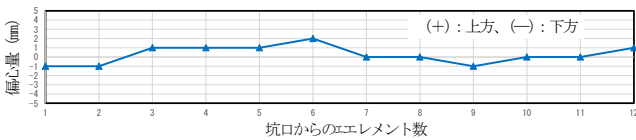


図23 エレメント鉛直偏心量 (掘進完了時)

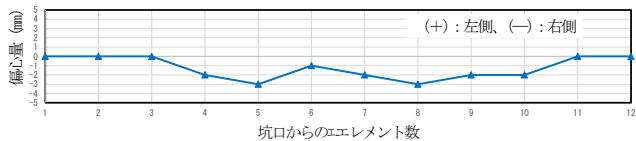


図24 エレメント水平偏心量 (掘進完了時)

(2) 掘進修正装置確認試験結果

1) 掘進精度と掘進機の姿勢

掘進距離に対する掘進機の鉛直偏心量は、計画線形に対して、 $-4\text{mm} \sim +2\text{mm}$ であった。一方、掘進機の水平偏心量は、計画線形に対して右方向へ $\pm 0\text{mm} \sim -3\text{mm}$ であった。

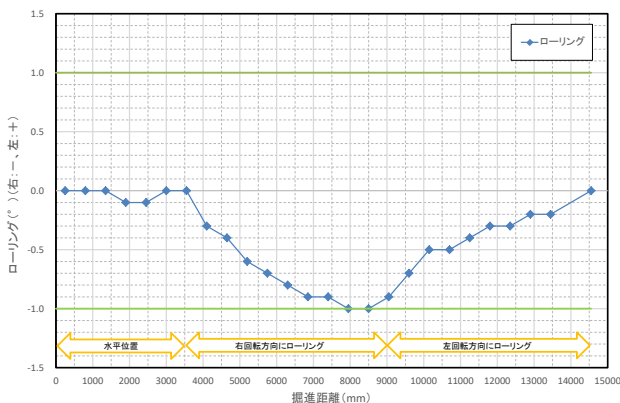


図25 掘進距離に対する掘進機のローリング値

エレメント1~3本目 (掘進距離0~3550mm)の区間では、掘進機のローリングが $-0.1 \sim \pm 0^\circ$ であり水平位置が維持されている。エレメント4~8本目 (掘進距離3550~9050mm)の区間では

ローリング修正ジャッキの使用により強制的に右回転方向にローリングさせたため、 $\pm 0 \sim -1.0^\circ$ までローリングした。9~13本目のエレメント (掘進距離9050~14550mm)では強制的に左回転方向にローリングさせたため、 $-1.0 \sim \pm 0^\circ$ までローリングし水平位置まで掘進機の姿勢が戻ったことが確認できた (図25参照)。

2) エレメントの姿勢

エレメント掘進完了時のエレメントの鉛直偏心量は $-3.0\text{mm} \sim +2.0\text{mm}$ 、水平偏心量は右方向へ $-4.0\text{mm} \sim \pm 0.0\text{mm}$ であった。

エレメント掘進完了時のエレメントのローリングは、掘進機のローリングに追従する形で変化しており、4本目のエレメント掘進 (掘進距離3550mm)時から右方向にローリングし、8本目掘進完了 (掘進距離9050mm)時に最大値である 0.8° までローリングした。9本目のエレメント掘進 (掘進距離9050mm)時から掘進機が左方向にローリングを開始したことに合わせて右方向のローリングが修正されはじめ、13本目エレメント掘進完了 (掘進距離14550mm)時で右方向に -0.25° までローリングが修正された。

(3) 試験結果評価

角型エレメント推進工の掘進精度および掘進修正装置に関する確認試験を実施したことにより、以下の結論が得られた。

- ① 22.5° 傾斜した状態で掘進した場合でも方向修正ジャッキやローリング修正ジャッキを使用して掘進することで、掘進機とエレメントは、偏心量において $\pm 10\text{mm}$ の精度を確保しながら掘進することができる。また、掘進機とエレメントのピッチング、ローリングにおいても $\pm 1.0^\circ$ 以内の姿勢を確保しながら掘進することができる。
- ②ローリング修正ジャッキ (油圧ソリ)を使用することで、模擬土層内で掘進機を強制的に右方向に -1.0° までローリングさせ、さらに逆方向にローリングさせることにより掘進機を水平状態まで修正することができる。

以上より、角型エレメントが傾いた状態の施工においても、方向修正ジャッキとローリング修正ジャッキの併用により姿勢を保持し、高い精度で掘進が可能で実施工への適用が可能と判断した。

9. おわりに

さくさく JAWS 工法は (独) 鉄道・運輸機構東京支社発注の網島トンネル他工事で採用され、止水性能、構造性能、施工性に関わる各種試験を実施して性能を評価して実施工に至った。基準エレメントから順次後続エレメントを施工し、閉合エレメントも円滑に閉合することができた。内部掘削と妻壁構築も本年10月には完了する予定で、内面仕上げおよび内部構築を経て非開削部駅空間が完成する。今後、実施工で得られた各種データを基に技術・積算資料を整備し、適用拡大を図って行く予定である。

謝辞

さくさく JAWS 工法の開発および施工に関わった社内外の関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤川博樹・長谷川利晴・大野友和・田中孝：駅非開削部の大断面馬蹄形トンネルを角型エレメント推進工法により施工、相鉄・東急直通線 網島トンネル、トンネルと地下、vol50, No7, pp.47-55, 2019.7