

施工性向上を目指した ダクティルセグメントの開発とその実用化

佐藤 宏志¹・向野 勝彦¹・今野 勉²・辻本 和則²・小泉 淳³

¹正会員 (株)クボタ素形材技術部 東京本社 (〒103-8310 東京都中央区日本橋室町 3-1-3)

²正会員 (株)クボタ素形材技術部 恩加島工場 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 7-1-22)

³正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

シールド工事のコスト縮減や施工時の安全性の向上のために、施工の自動化・省力化、長距離掘進、高速施工、二次覆工の省略、内面の平滑化などが求められている。従来使用されてきたダクティルセグメントは、継手構造がボルト式であることから、これらの工法改良への対応には限界があった。本論文は、ダクティルセグメントを対象に、そのボルトに代わる新しい継手構造の開発とその実用化に関して述べたものである。楔の原理を応用した新しい継手構造を持つセグメントは、継手性能がボルト式継手と比べて高い性能を有しながら、セグメントのワンパス組立てが可能となった。さらに、試験施工において、セグメントの組立て時間を大幅に短縮し、セグメントの自動組立てや組立てにおける省力が可能であることの目処が立った。

Key Words: shield tunnel, ductile segment, automated rapid erection of segment, joint structure

1. まえがき

シールド工事のコストや工期に大きなウエイトを占めるものの一つとして、セグメント自体のコストやセグメントの組立てが挙げられる。そのため、近年のシールド工事のコスト縮減や合理化への対策はセグメントに集中している。

セグメントの組立て作業は、断面が小さなトンネルでは狭隘な場所でのやりにくい作業となり、大断面トンネルでは高所のややもすると危険性の高い作業であった。また、一方で、総合的なコスト縮減の観点からは、長距離掘進、高速施工、工期短縮あるいは二次覆工の省略などに対する要求も多い。

これらの問題を解決するためにセグメント組立ての自動化を目指して各種の開発が行われてきた。しかしながら、継手構造がボルト方式の場合には、セグメントの位置決めやボルト・ナットのハンドリングおよび締結を自動化するために多大なコストがかかったり、完全な自動化が図られない場合が多かった。

近年これらの課題を解決するためにコンクリートセグメント（以下 RC セグメントと呼ぶ）を中心に各種の新しいセグメントが開発され紹介されている¹⁾。これらの

大半はボルトに代わる新しい継手構造をもったセグメントであり、継手の組立て作業性の改善や組立てのスピードアップを意図したものが多く、その中でも新しい継手構造の原理として楔による締結方式や嵌合式による締結方式が多く見られる。

しかしながら、このようなコンセプトで開発されたセグメントは、その組立ての自動化の観点からみると、作業の動きが複雑であったり、付属装置や後作業が必要であったりして自動化のメリットが十分だせない場合が多い。この原因はセグメントの組立てのための位置決めから継手の締結完了までの作業が数段階にわたることによる場合が多い。

従来のダクティルセグメントの継手構造であるセグメント継手およびリング継手はともにボルト継手であり、特にリング継手は継手面の変形性能がよい反面ボルト数が多く、必ずしも施工性がよいものではなかった。また、セグメントの内面に予めコンクリートを打設する場合においてもボルトボックスがあるために、内面の平滑なトンネルを構築する場合のネックとなっていた。ダクティルセグメントは、その材質がダクティル鋳鉄であるため割れや欠けについての心配がないことから、RC セグメントに比べてセグメント組立て時のハンドリングがラフ

でよいという特長がある。

本研究は、ダクタイルセグメントについてその特性を十分勘案しながら、従来のボルト継手に比べて高い性能を有し、かつ施工性を格段に向上させることのできる継手構造の開発とその実用化について述べたものである。セグメント継手はトンネル軸方向挿入の楔式継手構造を（以下楔式継手と呼ぶ）、リング継手はトンネル軸方向挿入のピン継手構造を（以下ピン継手と呼ぶ）採用している。セグメント組立てのコンセプトはエレクターによる旋回と位置決め後にシールドジャッキでセグメントをトンネル軸方向に押し込むことにより瞬時に締結が完了する点にある。

図-1はこの新しいダクタイルセグメントの概念図を示したものである。なお、このセグメントの組立てはセグメントをトンネル軸方向にスライドさせるだけで行われることから、「ASセグメント（Axial Slide Segment）」と名付けた。

本研究ではまず、セグメント継手およびリング継手の要素試験からその基本特性を把握し^{2), 3)}、次にそれらによって締結された供試体による継手曲げ試験⁴⁾およびせん断試験を行い、継手の強度と剛性を求めた。

これらの力学的特性は、各種の構造試験結果との比較を行い、ボルト継手の場合と同様な設計法が適用できるか否かを検討している。

一方、セグメントの組立て方式については、セグメントの位置決めを行った後に、セグメント継手の楔を打ち込む方式も検討したが⁵⁾、その場合にはセグメントの組立作業や組立時間が増えることが予想されたので、継手部材のハンドリングが不要のように、楔をセグメントに内蔵しておく方式（以下先付け方式と呼ぶ）を採用することにした。その場合に最も重要なことは、シールドジャッキでセグメントを押し込むのと同時に楔に締結力を導入し、それを保持することであった。この方式を追求していくと、実際の工業製品としてはセグメントや楔の製造上の寸法精度を考慮する必要があり、原理とは別に工夫が必要なることがわかった。それらを解決するための基本理論の構築、構造の決定と使用部材の形状寸法および材料の選定を行い、その基本性能の確認試験を平行して実施した⁶⁾。

さらに、セグメント継手とリング継手を実物大のセグメントに取り付け、実際のセグメント組立てと同様にジャッキでトンネル軸方向に押し込む「模擬組立て実験」を実施し、セグメント継手に所定の締結力が導入できることを明らかにして⁷⁾、実用化できることを確認した。

これらの各種試験を行った後に、実際のシールドトンネルの工事現場において、試験施工を3例行い^{8)~11)}、

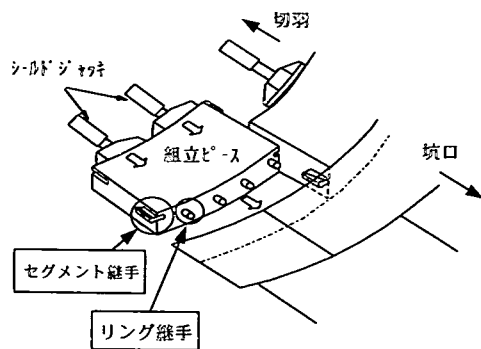


図-1 施工性向上を目指したダクタイルセグメントの概念図

セグメントの組立てが想定どおりに実施でき、継手構造の機能や性能が所定のとおりにあることを確認している。

2. セグメント継手の構造とその基本性能

(1) セグメント継手の構造

セグメント継手の基本原理はすでにRCセグメントで実用化されている楔式とした¹²⁾。楔式継手の特長は①構造がシンプルである②楔の原理から継手に必要な締結力が簡単に算出できる③楔は鋳造または鍛造により製造可能であり、楔が挿入されるセグメント側についても製造上の制約が特になくことなどである。

セグメント継手の基本構造を図-2に、セグメント継手部のテーパ孔と楔の詳細を、図-3、図-4に示す。原理的にはセグメント継手とリング継手が交差する部分にトンネル軸方向に先広がりテーパ孔を設け、隣接するセグメントのセグメント継手面同志を突き合わせた状態でテーパ孔に楔を打ち込むものである。

楔の形状は概ね図-4に示すとおりであるが、そのテーパは既往の研究結果¹³⁾から1/20とした。1/20のテーパを採用した理由は比較的小きな挿入力により所定の締結力が得られ、挿入後に楔が抜け出しにくいことによる。楔のウエップ部の厚さと長さとの積で与えられる断面積を従来のボルトの断面積と等価と考えた。

表-1はセグメント、楔および高張力ボルトの材料を示したものである。楔の材質はボルトの材質である高張力鋼と同程度の強度が得られるオーステンパーダクタイル鋳鉄である。オーステンパーダクタイル鋳鉄の特長は高強度であると同時に伸びが8%以上にあることである。なお、オーステンパーダクタイル鋳鉄の許容応力度は示

表-1 セグメント、楔、高張力ボルトの材料の機械的性質と許容応力度

使用区分	規格	材質記号	引張強さ (N/mm ²)	耐力 (N/mm ²)	伸び %	許容応力度 (N/mm ²)
セグメント	球状黒鉛鑄鉄 3種	FCD500	500 以上	320 以上	7 以上	190
楔	オーステンパー 球状黒鉛鑄鉄	FCD900A	900 以上	600 以上	8 以上	200
ボルト		8.8	830 以上	660 以上		290

方書等に規定されていないが¹⁴⁾、楔に作用する荷重が必ずしも均一でないと思われ、楔の形状から応力集中しやすいと予想されることなどから安全をみて降伏点の約1/3とした。

(2) 楔の挿入試験²⁾

楔のウェッジ部の厚さ15mm、長さ150mmの供試体を使用し、テーパ孔をもったブロックに楔を挿入する試験を行った。図-5にその結果を示すが、その挙動は以下のとおりであった。

①挿入力に比例する締結力が発生し、挿入力と締結力との関係は式(1)で表せた。

$$P = \frac{F}{2} (\mu + \tan \theta) \quad (1)$$

ここに、

P：楔に発生する締結力 (N)

F：楔の挿入力 (N)

μ ：ダクタイル鑄鉄同志の摩擦係数

$\tan \theta$ ：楔のテーパ (θ =度)

である。

- ②楔の挿入力と締結力との間に $P/F = 2.3$ という関係が得られ、この供試体において許容応力の80%の締結力を発生させる挿入力は約150kNであることがわかった。この関係を大きく支配したのはテーパ孔と楔との間の摩擦係数であり、結果から逆算すると $\mu = 0.17$ であった。この値は一般的に言われる鑄鉄どおしの摩擦係数約0.2¹⁵⁾よりやや小さかったが、その理由はテーパ孔が機械加工された面であることによると考えられる。
- ③挿入力を除荷しても締結力が保持された。

(3) 楔の引張試験

供試体に楔を挿入した後、図-6に示す試験装置により引張試験を行った。結果を図-7に示す。最大試験荷重は許容応力の発生荷重相当であり、5回の繰り返し試験の後、破壊まで載荷を行った。試験における楔の挙動は以下のとおりであった。

①引張荷重と楔のウェッジ部に発生するひずみとの関

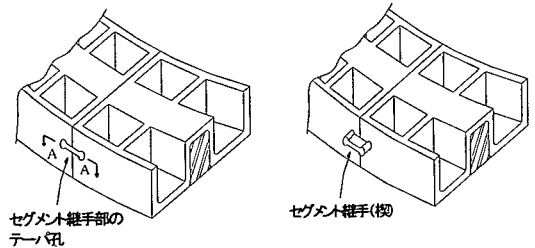


図-2 セグメント継手の基本概念図

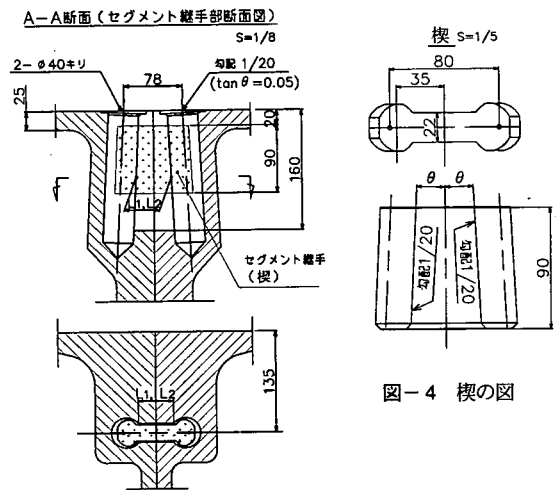


図-3 セグメント継手部のテーパ孔図と楔の嵌合模式図

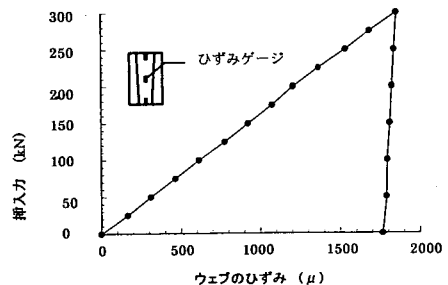


図-5 楔の挿入試験の結果

係は、締結力を導入したボルトと同様であった。すなわち、引張荷重を与えると概ね導入した締結力に見合う引張荷重までは楔にひずみは発生しない。その後、許容応力度相当の荷重まではほぼ線線的にひずみが増加した。許容応力度相当の荷重におけるひずみ量は計算値 235μ にほぼ等しかった。

②破壊は楔の付け根部分で発生し、その荷重は 1.75 MN であった。これは、許容応力度の発生荷重の約 4 倍であったが、材料の全強に対しては約 85% であり、引張荷重が偏ったり、応力集中があったものと考えられる。

(4) セグメント継手への締結力の導入とその制御方法

a) セグメントの組立て方式

セグメント継手として楔式継手を採用した場合には、その組立てには下記のようないくつかの問題点がある。

- ① 坑口側は既設リングが存在するためリング継手面側からの楔の挿入はできない。
- ② したがって、複数の楔の挿入はすべて切羽側から行う必要があり、特に坑口側の楔は挿入距離がセグメント幅ほどの長さになる。
- ③ この組立て方式は狭隘な切羽の作業に適さず、自動組立てが複雑になり、また、継手部品が切羽側と坑口側とで別々のものが必要となる。

b) 楔の先付け方式の課題

複数の楔を切羽側から挿入する場合の問題点を解決する方法として、楔を予めセグメントに取り付けておく方法が考えられる。図-8はその概念図の一例を示したものである。

この方式は坑口側では既設セグメントに取り付けた楔にセグメントのテーパ孔を挿入し、切羽側ではセグメントに取り付けた楔を既設セグメントのテーパ孔に挿入する方法になる。

しかしながら、この方式でも楔を各々の場所に固定すると次の問題が発生する。

図-3に示したセグメント継手部のテーパ孔図と楔の嵌合模式図において、2つのテーパ孔の嵌合部の距離 L_1 と楔のウェーブ部の幅 L_2 にはそれぞれ工業的な寸法のバラツキがある。例えば機械加工されるテーパ孔は片側で $\pm 0.4\text{ mm}$ 、鋳造の鋳放し品である楔は $\pm 0.5\text{ mm}$ の精度である。これは、テーパ孔と楔が嵌合する正規の幅寸法を L とすれば、テーパ孔では $L_1 = L \pm 0.8\text{ mm}$ 、楔では $L_2 = L \pm 0.5\text{ mm}$ のバラツキが発生することを意味する。テーパ孔と楔の組み合わせのうち嵌合可能な最も極端なケースは $L_1 + 0.8$ と $L_2 - 0.5$ および $L_1 - 0.8$ と $L_2 + 0.5$ の場合である。テーパ孔と楔のテーパは $1/10$ であるから、正規の嵌合位置に

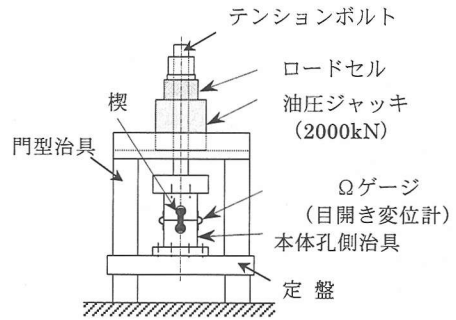


図-6 楔の引張試験装置の図

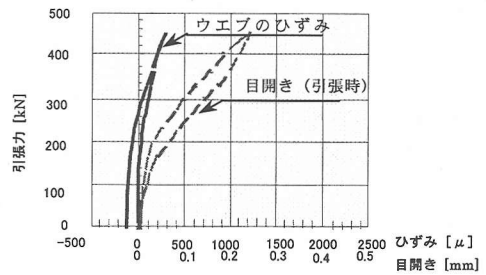


図-7 楔の引張試験の結果

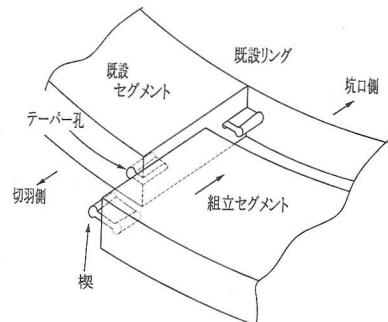


図-8 楔を先付けしたセグメントの概念図

対して前者ではテーパ孔の手前側 13 mm 、後者ではテーパ孔の先広がり側 13 mm の位置で適正な嵌合が行われることになる。もし楔を一定の位置に固定した場合は各々の寸法の組み合わせにより、楔に過度な締結力が導入されて楔が破壊したり、逆に楔にまったく締結力が導入されないということが予想されるので、楔が上記の $\pm 13\text{ mm}$ の範囲で動く構造にしておけばよい。

c) 楔の可動方式の考案

楔の可動方式の考え方を図-8の坑口側の継手により説明する。

- ① 図-8の楔を先付けしたセグメントの概念図において、楔を最初にセットしておく位置は既設セグメントの正規の位置に対して 13 mm 既設リング継手板から離れる方向であり、テーパ孔の先広がり側である。

② セグメントのテーパ孔を楔に挿入するに従い、楔は緩む方向に後退する。

③ この場合に楔が緩みすぎないように一定の反力を与えれば楔に締結力が導入されることになる。

図-9はこの方式を図示したものである。

この反力を発生させる部材を「バックアップ材」と呼ぶ。

d) バックアップ材の開発とその性能試験

バックアップ材の原理は円筒座屈にある¹⁷⁾。すなわち、円筒部材を軸方向に圧縮した場合、ほぼ一定の圧縮荷重で軸方向に大きな変位が発生するという特性がある。

バックアップ材を楔の後端部に取り付けて締結を行う方式の開発は以下のフローによって行った。

- ① 楔に必要な締結力の算定
- ② 必要な締結力とバックアップ材に生じる反力との関係を求める
- ③ テーパー孔と楔の寸法とのバラツキの設定およびそれによる楔の移動距離の設定、すなわちバックアップ材の変形できる長さの設定
- ④ バックアップ材の各部の寸法をパラメーターとして、反力と変形特性とを実験的に求めて、形状寸法を決定する。

e) 楔の締結力とバックアップ材の反力との関係

図-10 はバックアップ材を取り付けた楔の締結時に働く力の釣り合いを示したものである。

力の釣り合いから楔に発生する締結力とバックアップ材の反力との関係を求めると以下ようになる。

$$P_{\epsilon} = N (\cos \theta - \mu \sin \theta) \text{ より}$$

$$P_{\epsilon} = \frac{P \cdot (\cos^2 \theta - \mu^2 \sin^2 \theta)}{(1 + \mu^2) \sin 2\theta} \quad (2)$$

ここに、

- P_{ϵ} : 楔に発生する締結力 (N)
- F : 楔の挿入力 (N)
- P : バックアップ材の反力 (N)
- N : 楔の垂直抗力 (N)
- μ : 楔とテーパ孔との摩擦係数
- θ : 楔のテーパ角 ($\theta = \text{度}$)

この式(2)は楔の締結力 P_{ϵ} とバックアップ材の反力 P とが比例することを表し、 $\mu = 0.17$, $\theta = 0.05$ を与えれば、両者の関係は概ね

$$P_{\epsilon} = 9.8 P$$

となる。

楔のウェーブ部の厚さ 15 mm、長さ 150 mm の供試体では許容応力度の 80% の締結力を与えるためにはバックアップ材の反力は約 37 kN となる。すなわち、

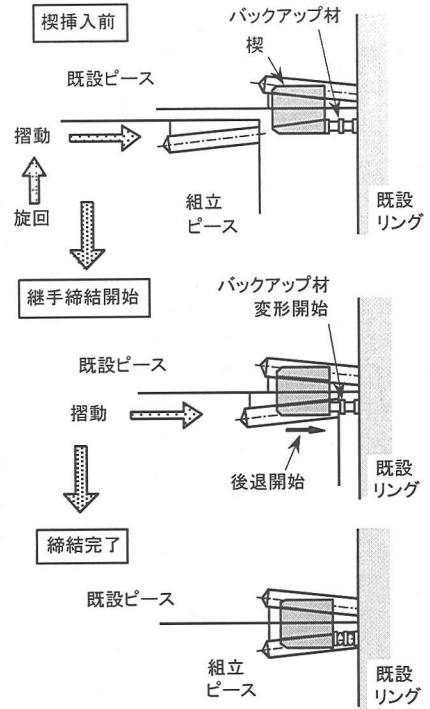


図-9 バックアップ材による楔への締結力の導入図

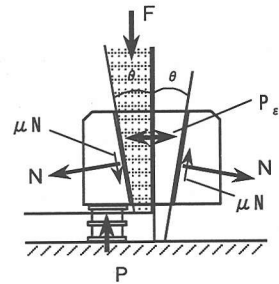


図-10 楔の締結時の力の釣り合い図

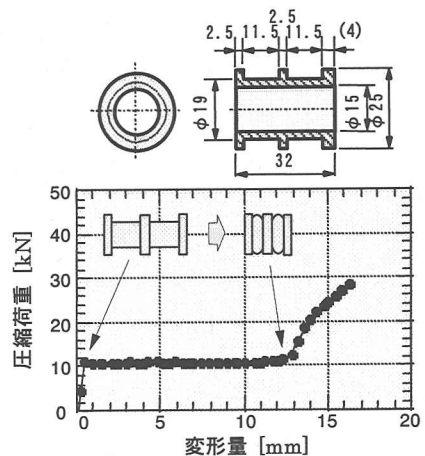


図-11 バックアップ材の変形特性の一例

楔の断面積 : $A = 1.5 \times 15 = 22.5 \text{ cm}^2$

必要締結力 : $P \varepsilon = \sigma_m \times 0.8 \times A$
 $= 360 \text{ kN}$

バックアップ材の反力 : $P = \frac{P \varepsilon}{9.8}$
 $= 37 \text{ kN}$

f) バックアップ材の形状寸法, 材質とその性能

バックアップ材の形状寸法は外径, 内径, 肉厚, 長さ, つばの数などをパラメーターとして, 圧縮荷重と圧縮変形量との関係を実験的に求めた. なお, 材料は変形性能に富み耐久性に優れたアルミニウム材 (例えば JIS H 4000, 5052) を用いることとした.

図-11 はバックアップ材の 1 例を示したものである. このバックアップ材は圧縮荷重約 10 kN で, 変形量が約 13 mm であり, これを用いれば約 100 kN の締結力を発生させ, 可動範囲が約 13 mm の楔に適用できる. この手順で圧縮荷重 20 kN, 30 kN, 36 kN の性能のものについて開発を行った.

3. リング継手の構造と基本性能

(1) リング継手の構造と締結機構

リング継手は, シールドジャッキの押し込み力によりセグメント継手と同時に組立てが終了し, 継手性能がボルト継手のそれと同等以上であることが基本である. その方式はいわゆるトンネル軸方向挿入のピン継手である.

図-12 は, このピン継手の切羽側の断面, 図-13 は坑口側の断面, 図-14 は締結状態の断面を示したものである.

表-2 はピン継手を構成する部品の材料を示したものである. 各部の構成と締結時の挙動と機能および特長は以下のとおりである.

- ① 切羽側はリング継手面から 70 mm の深さのくぼみに 6 ないし 8 本のスリットのあるスリーブがナットで取り付けられる.
- ② 坑口側はハウジングがリング継手面から約 60 mm 突出しリング継手板に設けた 30 mm のくぼみに取り付けられる. ハウジングの外径はくぼみの内径より 3 mm 小さく, せん断力を受けた場合に調芯機能を発揮する. また, ハウジング先端は面取りすることにより位置決めと挿入とをスムーズにする.
- ③ ハウジングの内部は先広がりの空洞を構成する. ハウジングの中にはウエッジが格納されているが, ハウジングの取り付けボルトとは完全に分離されている. したがってウエッジはハウジング内で半径方向に自由に動く

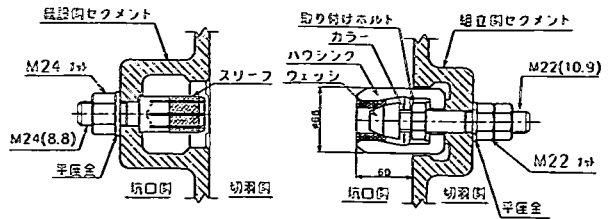


図-12 ピン継手の切羽側断面図

図-13 ピン継手の坑口側断面図

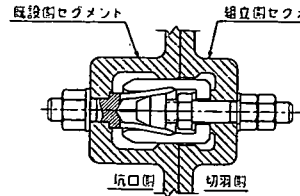


図-14 ピン継手の締結完了時の断面図

表-2 リング継手の構成部品の材料表

品名	材質	強度区分
ハウジング	FCD 600	4 種
ハウジング取り付けボルト	SCM 435	8.8
同上ナット		8
同上ワッシャー		22H
スリーブ	SCM 435	10.9
スリーブ用ナット		10
同上ワッシャー		22H

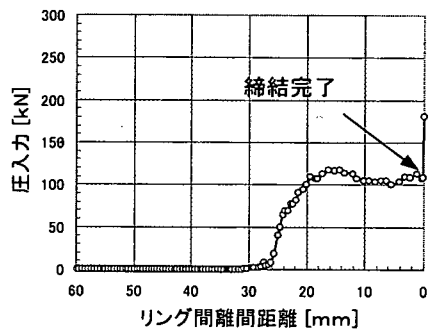


図-15 ピン継手の圧入試験結果

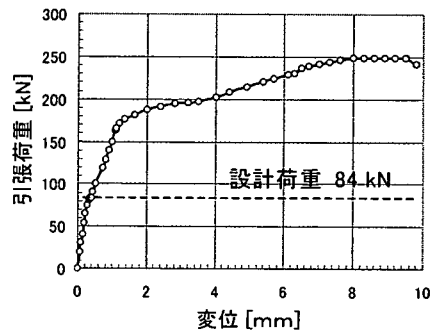


図-16 ピン継手の引張試験結果

ことができる。これにより、スリーブとハウジングの軸心とのずれ、スリーブの肉厚、ウエッジの外径、およびハウジングの内径の各寸法精度のばらつきを吸収する。

④ ウエッジの後端にはカラーが装着されており、このカラーはスリーブの挿入力により圧縮力を受ける。カラーは前述したセグメント継手のバックアップ材に相当するもので、一定荷重で座屈変形しスリーブの肉厚、ウエッジの外径、およびハウジングの内径の寸法誤差を吸収する。これにより 6 ないし 8 枚のスリーブに均等な塑性変形を発生させ、過度な挿入力や不完全な締結を抑制できる。

⑤ 締結は次のような手順で行われる。

- ・ハウジング先端が切羽側のくぼみに挿入される。
- ・さらにハウジングを挿入するとスリーブがウエッジ先端により押し広げられながらハウジング内面とウエッジ外面に沿いながら挿入される。
- ・この挿入時点でスリーブは塑性変形する。
- ・さらに挿入を続けるとスリーブ先端が若干内径側に變形して締結を完了する。

(2) リング継手の基本性能試験

基本性能試験に用いた供試体の形状寸法は図-12、図-13 に示すとおりであるが、継手の引張強度はM 22、8.8 のボルトに相当する。

a) 圧入試験

切羽側と坑口側の両継手を対向させ、坑口側の継手の後方から圧縮荷重を与え、両継手面が完全に接触するまで圧入を行う。締結が完了した状態を図-14 に、試験結果を図-15 に示す。これらの図から、スリーブがウエッジによって押し広げられる時点では圧入力はほとんどなく、スリーブがハウジングとウエッジの間に挿入され塑性変形が生じる時点から圧入力は上昇することがわかる。その後はほぼ一定の圧入力となりその荷重は約 120 kN であった。この圧入荷重はシールドジャッキの装備推力の約 5% である。

b) 引張試験

図-16 は締結が完了した両継手を治具を介して試験機により引張試験を行った結果を示したものである。この図から以下のことがわかる。

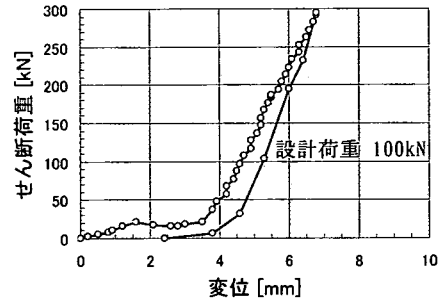


図-17 ピン継手のせん断試験結果

① 引張荷重と変位との関係は設計荷重の約 2 倍の 170 kN までは直線的であった。このときの目開き量は約 1.7 mm であり、セグメント幅 1200 mm の約 1.5% に相当する。

② 設計荷重 84 kN における継手面の目開き量は約 0.3 mm であり、止水性を十分満足できるものと判断できる。また、10 回の繰り返し載荷後に除荷しても目開き量に変化はなく、緩みが生じないと判断できた。

③ さらに荷重を加え引張載荷した結果、設計荷重の約 3 倍の 254 kN でハウジング取り付けボルトが破断した。

c) せん断試験

図-17 は締結後の継手にせん断荷重を載荷した結果を示したものである。図から以下のことがわかる。なお、載荷は設計荷重の約 3 倍の 300 kN で終了し、破断までは行っていない。

① せん断荷重の載荷の初期にはハウジングとセグメント本体とのクリアランス 3 mm に相当するせん断方向の変位が見られ、その後直線的に挙動した。

② せん断ばねのばね定数は 89 MN/m となった。

4. 継手の強度と剛性

継手部の断面力の算定には、はりばねモデル計算法を用いることが一般的になりつつある。このため、セグメント継手を回転ばねにモデル化するときのばね定数およびリング継手をせん断ばねにモデル化するときのばね定数を把握する必要がある。

表-3 継手曲げ試験の試験ケースの一覧表

軸力 (kN)	正曲げ				負曲げ			
	N=-1000	N=0	N=100	N=300	N=-1000	N=0	N=100	N=300
曲げモーメント (kN・m)	327	152	134	99	260	86	68	33
載荷荷重 (kN)	622	289	256	189	496	163	129	63

本セグメントについても、これらのばね定数を求めるとともに継手部の強度を確認することを目的として、セグメント継手部の曲げ試験およびリング継手部のせん断試験を行った。これらのばね定数を用いて、継手の設計法の検討も行った。

(1) セグメント継手の曲げ試験

a) 試験方法

セグメント継手の曲げ試験は、図-18、図-19 および図-20 のとおりで、セグメント本体を直線部材でモデル化して、両端可動支持で鉛直方向に2点荷重し、供試体両端部に治具を設置して軸圧縮力および軸引張力が導入できるような試験方法を採用した。楔に導入する締結力は楔の材料の許容応力度として定めた 200 N/mm^2 の約80%の応力度に相当する荷重とした。

試験ケースは表-3に示すとおりで軸力の有無をパラメーターとして設定した。測定項目は載荷荷重と継手部の目開き量である。また、軸引張力 100 kN を導入した状態で破壊まで載荷した。

b) 試験結果

① 継手の回転ばね定数

図-21 および図-22 は継手の曲げモーメントと回転角との関係を示したものである。図中の接線勾配が回転ばね定数を表し、それらをまとめると表-4に示すとおりとなった。軸圧縮力 1 MN を導入した場合は、圧縮領域と曲げ引張領域の2つに分けて回転ばね定数を求めた。

$K\theta_2$ の値は軸力の大きさに関係なくほぼ一定の値であった。また、正曲げと負曲げで回転ばね定数に約6倍ほどの差が生じたのは、図-18の供試体の図で示したように正曲げを重視してセグメント桁高方向の楔位置を決定したためである。

5.(1)b) で述べる回転ばね定数の計算法によれば、本試験条件による正曲げの回転ばね定数は $60.5 \text{ MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ であり、実験値は概ね計算値に近似している。

② 継手の曲げ強度

軸引張力 100 kN を導入した状態で破壊まで載荷したが、破壊位置は楔の首に近い部位で、破壊荷重は計算値にほぼ近似し設計荷重の約5倍であった。

表-4 セグメント継手の回転ばね定数の一覧表

単位: $\text{MN}\cdot\text{m}/\text{rad}$

軸力 (kN)	正曲げ		負曲げ	
	$K\theta_1$	$K\theta_2$	$K\theta_1$	$K\theta_2$
-1000	688	67.4	211	11.5
0	-	63.8	-	14.7
100	-	87.5	-	15.8
300	-	64.6	-	15.6

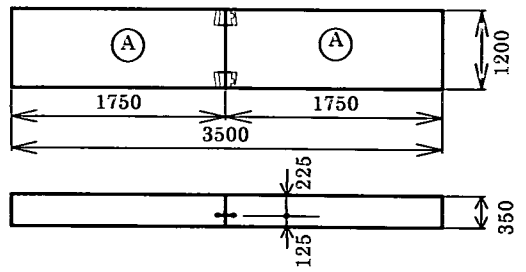


図-18 セグメント継手曲げ試験の供試体図

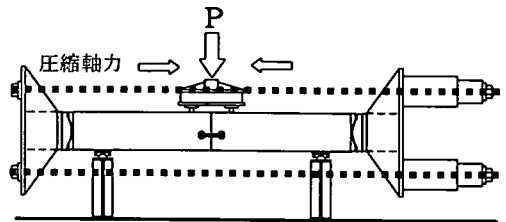


図-19 圧縮軸力導入継手曲げ試験の要領図

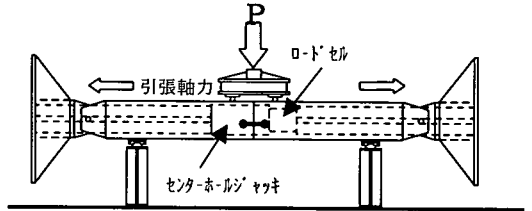


図-20 引張軸力導入継手曲げ試験の要領図

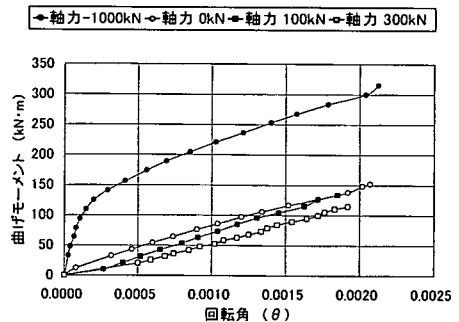


図-21 継手正曲げ試験の曲げモーメントと回転角との関係図

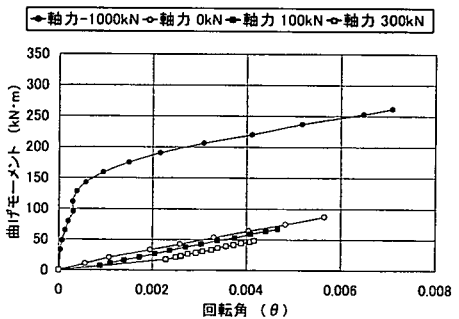


図-22 継手負曲げ試験の曲げモーメントと回転角との関係図

(2) リング継手のせん断試験

a) 試験方法

リング継手のせん断試験は図-23 に示す直線ばり状の供試体と図-24 に示すように、4 個のリング継手で締結された 3 つの供試体の両端を固定し、中央部のセグメントを押し抜く方法で行った。ピン継手 4 本に対する載荷荷重は M22, 8.8 のボルトの許容せん断荷重の 2 倍に相当する 608 kN (1 本あたり 152 kN) とした。

b) 試験結果

リング継手のせん断試験における継手の荷重と相対変位量との関係を図-25 に示す。載荷直後はスリーブとハウジングの取り付けボルトの締め付け力による摩擦抵抗力が発生し、その後約 2 mm の滑りが生じた。さらに荷重を増加させると、継手板の支圧状態となり、荷重と継手のせん断変位量との関係には、全体としていわゆるトリリニアアの挙動を示した。第 2 領域の約 2 mm の滑り距離はハウジング外径である 66 mm とハウジングが取り付けられているセグメント内径である 69 mm との差とほぼ一致した。図-25 に各領域のせん断ばね定数を算出した結果を示す。

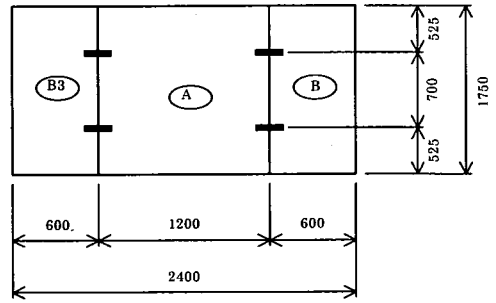


図-23 リング継手のせん断試験供試体図

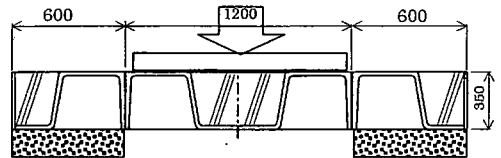


図-24 リング継手のせん断試験要領図

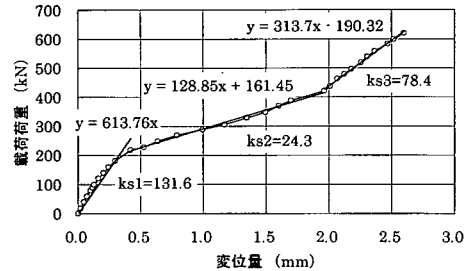


図-25 リング継手せん断試験の荷重と変位の関係図 (せん断ばね定数の単位は MN/m)

5. 継手の設計法の検討

(1) セグメント継手の設計

a) 楔式継手の強度計算

楔式継手の挙動はボルト継手の挙動とほぼ同じと考え、図-26 に示すようにセグメントの縁端部を回転中心としたモデルを用いて、ボルトの応力度を算出する方法と同様に¹⁷⁾ 楔の応力度を算出することとした。したがって、楔に必要な断面の算出はボルトの断面を楔の断面に置き換え、楔のウエップ部の厚さと長さの積により求めることとした。

なお、楔のウエップ部の厚さ t と長さ l は任意に決定できるが、楔のウエップ部の厚さを優先的に決める方が効率的である。その理由は楔のウエップ部の厚さはセグメントのテーパ孔とスリットの機械加工上の制約および楔の材料であるオーステンパーダクタイル鋳鉄の熱処理上の制約があるからである。

b) セグメント継手部の剛性の評価

① 楔式継手部の剛性

継手部の剛性はボルト式継手に対する村上-小泉理論¹⁸⁾ に準拠して算出する。

この場合、継手板を図-27 に示すような有効幅を持つ格子ばりと考え、式(3)、式(4)によって、継手板の水平ばりの有効幅 be_1 と鉛直ばりの有効幅 be_2 を

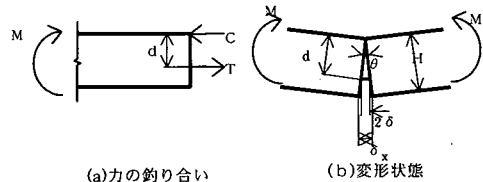


図-26 セグメント継手の正曲げに対する力の釣り合いと変形状態

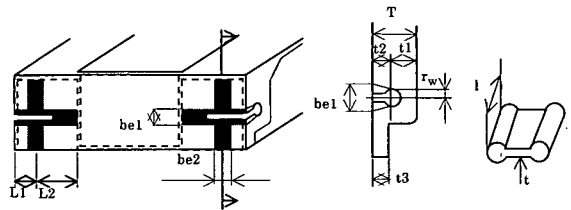


図-27 セグメント継手板の有効幅のモデル

求める。

$$be_1 = \left(rw + \frac{t}{6} \right) \times 2 \quad (3)$$

$$be_2 = l + \frac{t}{6} \times 2 \quad (4)$$

ここに l は楔の長さ、 rw はセグメントのテーパ孔

の半径、 t_2 は楔がテーパ孔に接触する位置からセグメント継手面までの距離である。

次に継手板の水平方向のはりと鉛直方向のはりの曲げ剛性を求めた上でそれぞれの方向のたわみを求める。両方のはりの格子点のたわみは等しいとし、この格子ばりを解き、求めたたわみ量に楔自身の伸び量を加え、継手部の総変位量を求める。

この総変位量と力の釣り合いから求まる継手部の引張力とから継手 1ヶ所あたりの引張ばね定数 K を算定する。この場合に相対する継手板の間で変形が 2 倍になることを考慮する。

② 回転ばね定数の計算

正曲げに対する回転ばね定数 K_θ (+) は以下のとおりで式 (5) により求める。

図-28 に示す正曲げに対する力の釣り合いと変形状態から、 $M=T \cdot d$ 、 $2\delta=d \cdot \theta$ となる。

一方、 $T=K \cdot \delta$ なので

$$M=K \cdot \frac{d^2}{2} \cdot \theta$$

$$K_\theta (+) = \frac{M}{\theta} = \frac{K \cdot d^2}{2} \quad (5)$$

となる。ここに、 M は継手部の曲げモーメント、 T は楔に働く引張力、 d はセグメント縁端部から楔の中心までの距離、 2δ は楔部の目開き量、 θ は継手部の回転角、 K は継手部と楔の引張剛性を表すばね定数を表す。

(2) リング継手の設計法

リング継手の設計はボルト方式の継手と同様にトンネル軸方向の引張強度とそれに直角な方向のせん断強度に対して行う。

引張強度については、リング継手の引張試験において、ハウジング取り付けボルトが破断したことから、ボルトと同じ材料で同じサイズのものをハウジング取り付けボルトとして用いることが基本となる。なお、地震時の継手部の引張性能は従来のボルト方式の継手と同等である。

リング継手のせん断挙動はハウジングの一面せん断の挙動そのものである。ハウジングのせん断強度はせん断方向の肉厚がスリーブの圧入力で決定されるため、必要なせん断強度の約 2 倍の強度を有しており、せん断力に対しては安全な設計となっている。

6. セグメントの組立て試験

(1) 実物大セグメントによる室内での組立て試験

a) 組立て試験の方法

直線ばり状の供試体による組立て試験⁵⁾に引き続き実

物大のセグメントを用いた室内での組立て試験を行った。使用した実物大セグメントの供試体を図-28 に、組立て試験の要領図を図-29 に示す。この組立て試験は実際の現場におけるセグメントの組立てを想定し、図-30 および図-31 に示すように、シールドジャッキに相当するジャッキ 5 台とエレクターに相当する姿勢制御用ジャッキ 6 台を用いた。なお、この実物大セグメントは地下鉄単線シールド用のものであり、その仕様は以下

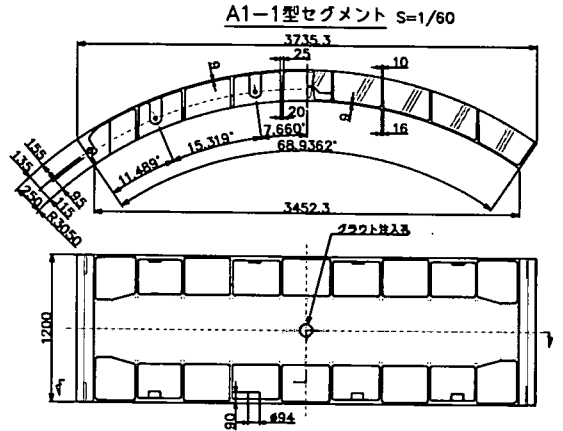


図-28 セグメントの組立て試験の供試体図

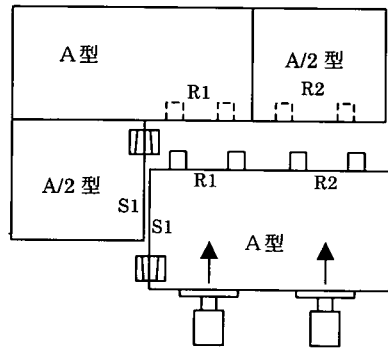


図-29 セグメントの組立て試験の要領図

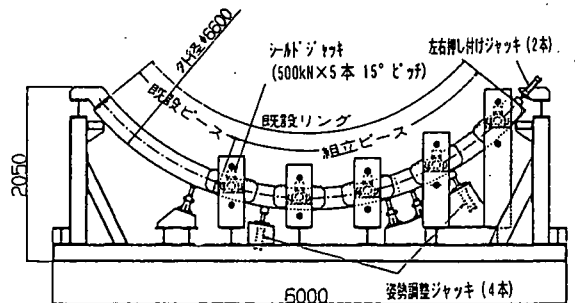


図-30 セグメントの組立て試験装置の図

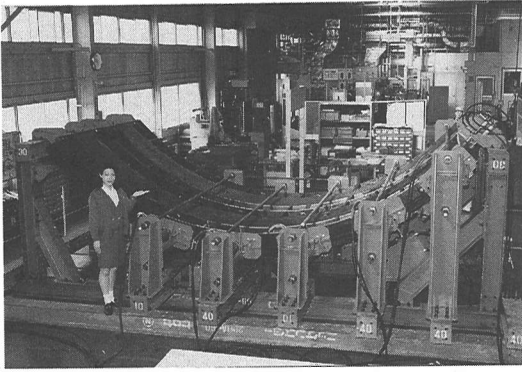


図-31 セグメントの組立て試験装置の写真

のとおりである。

セグメント：外径 6600 mm，桁高 250 mm，
幅 1100 mm，材質 FCD-500
楔：厚さ 22 mm，長さ 86 mm，材質 FCD-900A
バックアップ材の反力：30 kN
ピン継手：M22，8.8 相当，材質 SCM435 他

この組立て試験は，両継手の締結時の挙動やセグメント継手の締結力の導入状況を把握するものである。

b) 組立て試験の結果

組立て試験で得られた主な結果は以下のとおりである。

- ① 既設セグメントに対してセグメント間の間隔が約 3 mm，リング間隔が約 50 mm，目違い量が約 3 mm であってもシールドジャッキを用いてセグメントをトンネル軸方向に押し込むだけで組立てが可能であることを確認した。
- ② セグメントの組立てに必要なシールドジャッキの推力は約 1.2 MN であり，これは装備推力の約 15% であった。
- ③ セグメント組立て後の隣接するセグメントとの目開き量は 0.1～0.2 mm 程度であり，トンネル出来形や止水性の観点からみて十分小さな値であった。
- ④ 楔への締結力の導入状況を図-32 に示す。楔の締結力は締結終了となる約 50 mm 前から発生し，終了の約 10 mm 前で締結力がほぼ一定になる。締結完了時点の締結力は坑口側で平均約 338 kN，切羽側で平均約 273 kN あった。これは楔の許容応力に対してそれぞれ 89% と 72% であり，概ね目標どおりの締結力が導入された。切羽側の締結力が目標値に対して約 10% 不足したが，押し込み条件が 4 台のジャッキで微妙に異なったためと考えられる。その後，この試験装置を用いて各種のジャッキパターンとその場合の締結力のバラツキを確認した。その結果当該セグメント継手に近い 2 つのジャッキのみで締結を行い，リング継手面の間隔が約 5 mm まで接近した段階からすべてのジャッキを作動させる方

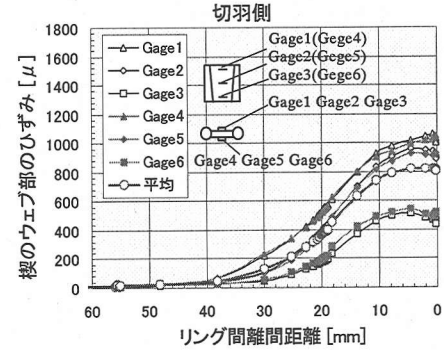
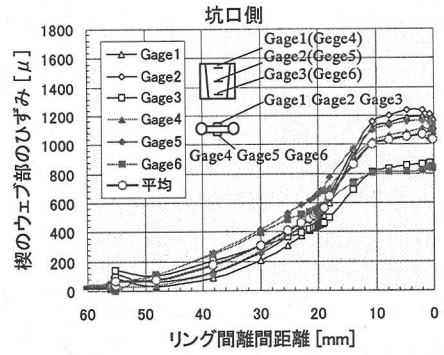


図-32 実大セグメントの楔への締結力導入状況

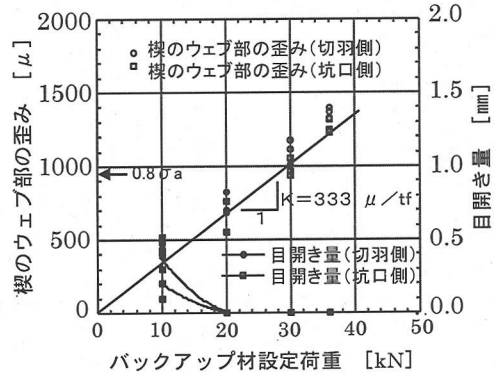


図-33 バックアップ材の反力設定荷重と楔の締結力と継手面の目開き量との関係

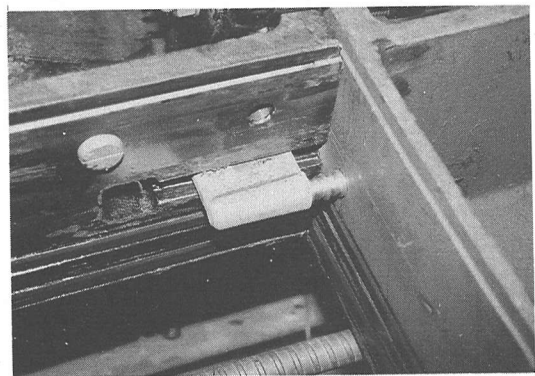


図-34 楔を締結後のバックアップ材の状況写真

法が最もバラツキの少ない方法であることを見出した。バラツキが発生しても所定の締結力が発生するように設定値を予め高めにしておく（この場合は 10%）ことも必要である。また締結完了後の状態で 1 週間放置したが締結力の低下は約 5% 程度であった。

⑤ 楔に各種のバックアップ材を装着したセグメント組立て試験において、楔に発生した締結力は図-33 に示すとおりになった。これから以下の結果を得た。

- ・各種バックアップ材の反力と締結力とは比例する。
- ・反力 20 kN 以下では継手面に目開きを生じる。
- ・反力約 30 kN で楔材料の許容応力度の 80% 相当の締結力が発生する。

なお、図-34 は締結終了後のバックアップ材の状況を示したものである。バックアップ材が楔の移動に伴い反力を受けて座屈した状況がわかる。

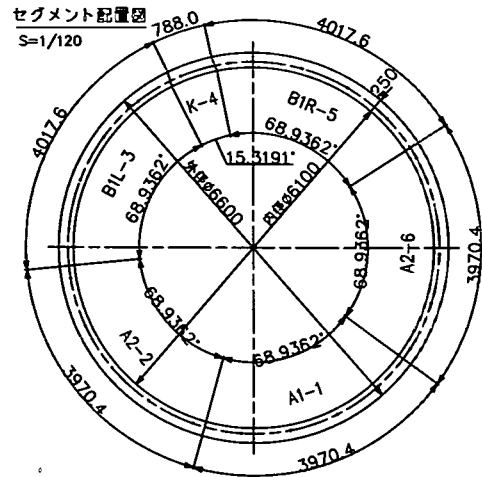


図-35 試験施工に用いたセグメントの一般図

(2) 実際の現場での試験施工

これまでに数例の試験施工事例（3 件，合計 110 リング）があるが^{8), 9), 10), 11)}，ここではそのうち代表的なものについて述べる。

この試験施工では同じ工区で施工されたボルト方式の継手をもつダクトイルセグメントについても各種の計測を行い，本研究で述べている新しいセグメントとの比較も行った。

a) 試験施工の概要

試験施工の概要は以下のとおりである。

- ① 工事名称：営団 7 号線麻布台 B 線工区土木工事
 - ② 工事場所：東京都港区麻布十番～同区六本木
 - ③ 施工時期：1997 年 11 月
 - ④ 工法：泥水式シールド工法
 - ⑤ 土被り：約 31 m，土質：上総層群，細砂主体
 - ⑥ 線形：平面 R=320 m，縦断 上り 2.4%
 - ⑦ セグメント：ダクトイルセグメント，6 分割
 外径：6600 mm，桁高：250 mm，幅：1100 mm
 リング数：標準 11，異型 11，調整 2，合計 24 リング
- 図-35 にセグメントの一般図を示す。

⑧ シールドマシン仕様

- マシン外径：6750 mm
- シールドジャッキ推力：2000 kN×24 本，
- 組立て時の推力：450 kN/本

b) 試験施工の結果

① セグメントの組立て

セグメントの組立てはすべて手動で行われたが，エレクターの操作，セグメントの位置決め，シールドジャッキによる押し込みなどスムーズに行われた。

セグメントの組立て時のシールドジャッキ推力は切羽

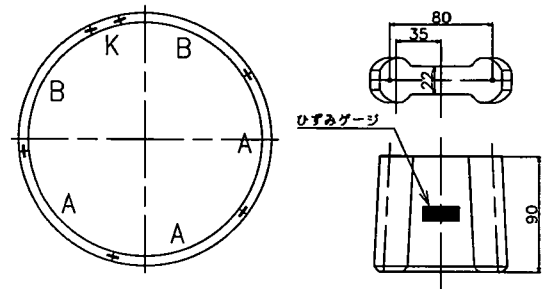


図-36 楔のひずみ計測要領図

の安定のため，セグメント 1 ピースあたり 1.8 MN に設定されたが，これはセグメントの組立てに必要な推力の約 1.3 倍であり，組立てのために推力を増加する必要はなかった。

② セグメント継手への締結力の導入と保持

各セグメント間の楔には図-36 に示すようにひずみゲージを貼付し，8 リング目でひずみ計測を実施した。この計測はセグメント組立て後も約 3 ヶ月間継続し，経時変化を調べた。

セグメントの組立て直後に楔のウエップ部に導入された締結応力度は 8 個所の平均値が 185 N/mm^2 となっており，目標値である楔の許容応力度の 80% である 160 N/mm^2 を上回った。また，図-37 は楔のウエップ部に発生した応力度の 45 日間の経時変化を示したものである。組立て直後に約 5～6%，その後約 1 ヶ月の間にさらに約 5% の低下を見たが，それ以後の低下は見られず，合計の低下率は約 11% で安定したと判断できる。このことから，楔の締結力の設定値はバラツキと締結後の若干の低下および増し締めができないことなどを考慮すると，その目標値の約 20% 増し程度とすることが望ましいものと考えられる。

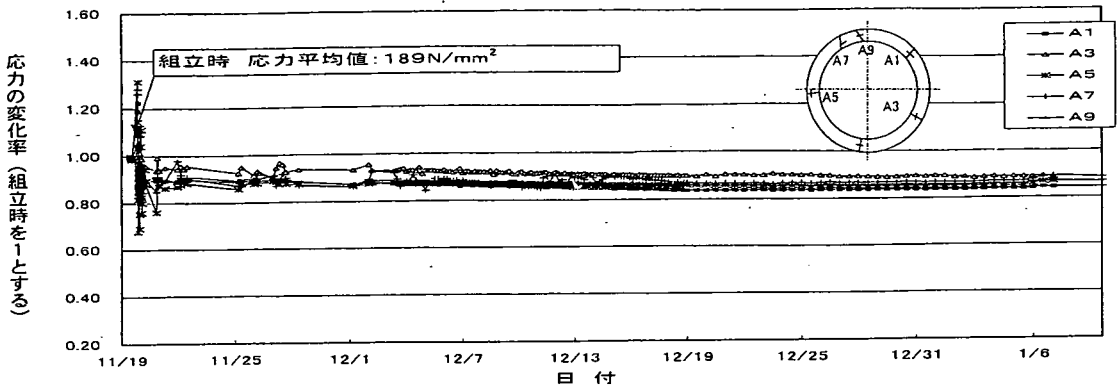


図-37 楔に発生したひずみの経時変化

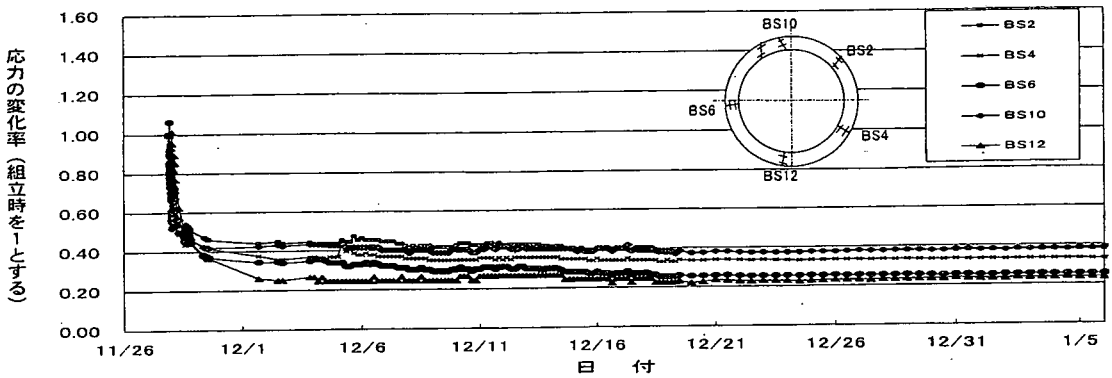


図-38 セグメント継ぎボルトに発生したひずみの経時変化

一方ボルト方式の継手における状況を図-38 に示すが、ボルトに発生した応力度の低下率は約65%であり、その後増し締めが行われた。

③ セグメントの組立て時間

試験施工に用いたセグメント 24 リングのうち、調整セグメントを除く 22 リングおよびボルト方式の継手をもつセグメント 3 リングの組立て時間の測定を行った。

評価の対象とした本セグメントの組立て時間は、平均約 25 分であり、ボルト方式のそれの 37 分に対して 12 分 (約 32%) の短縮であった。セグメントの位置決めと継手の締結作業がボルト方式のセグメントより短縮されたためである。

なお、セグメント組立て作業員はボルト方式のセグメントでは 4 人であったのに対して本セグメントでは 3 人でよく、工数の面でも効率的であった。

④ セグメントリングの出来形

図-39 はトンネルの真円度 (設計内径と実測内径との差) の計測結果を示したものである。本セグメントの真円度は約 2 mm 程度のつぶれを示し、良好な結果であった。

これは、楔に所定の締結力が確実に導入されたこと、セグメントの組立て時にセグメント継手面がメタルタッチ

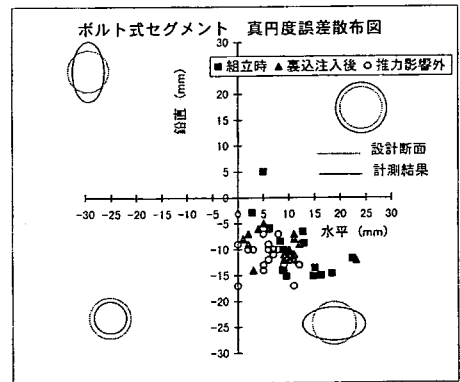
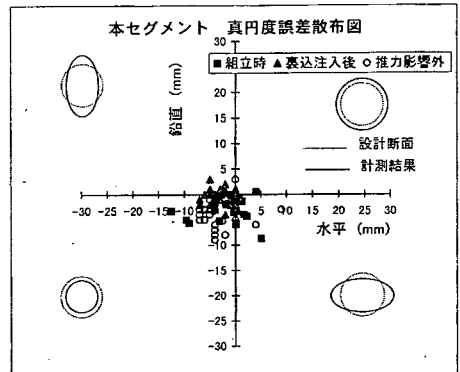


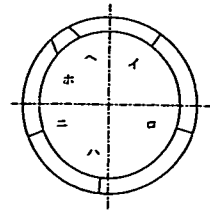
図-39 セグメントの設計内径と実測内径との差

してセグメント 1 ピースずつがプロフィールを形成していることによると考えられる。

このことは図-40 に示すセグメント継手間の目開き量の測定結果からもわかる。

⑤ 継手面からの漏水

この工区での地下水圧は約 0.2 MPa であったが、セグメント継手およびリング継手ともに漏水は認められなかった。



7. まとめ

本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) セグメント継手としての楔式継手は所定の締結力の導入、制御および保持がバックアップ材を使用することにより可能である。
- (2) リング継手としてのピン継手は従来のボルト継手と比べてそれ以上のせん断強度および引張強度を有する。
- (3) 上記 2 点から両継手ともボルトに代わる継手として十分実用できる。
- (4) これらの継手構造を内蔵したダクタイルセグメントはシールドジャッキでトンネル軸方向へ押し込むだけでその組立てが完了できる。
- (5) 実際の現場での試験施工においても、計画したとおりのセグメント組立てが可能で、セグメント継手およびリング継手が所定の継手性能を有すること、セグメント組立て時間がボルト方式の継手をもつセグメントに比べて大幅に短縮できること、およびセグメントの出来形がボルト方式のセグメントより良好なことを確認した。
- (6) 継手の設計は従来のはりばねモデルと同様な設計法で行うことができること、セグメント継手についてはボルトの断面積を楔に置き換えればよいことを確認した。

8. あとがき

本研究の結果ダクタイルセグメントの施工性と安全性の向上を目指して開発した本セグメントの実用化は達成されたものと思われる。

このセグメントが実際の現場でスムーズに組立てができたことから、組立ての全自動化の目処がついた。その前提として、セグメントの位置決めシステムの構築と有効なジャッキパターンの設定が必要となるが、これが実現できれば切羽での困難な作業や、高所作業から解放される。

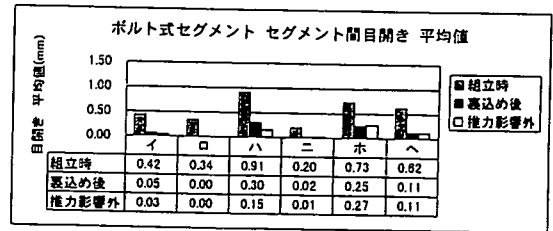
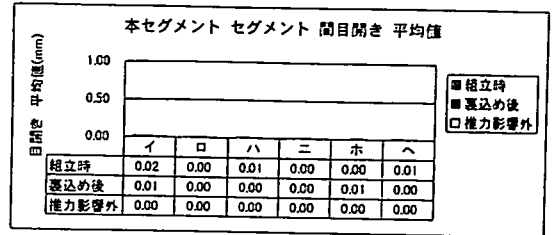


図-40 セグメント間の目開き量の計測結果

セグメントの組立て時間が従来のボルト継手のセグメントに比べ大幅に短縮できたことから、セグメントの高速施工とそれによる工期の短縮が期待できる。また、それらは長距離掘進にもつながる。

ボルトボックスが不用になったため、セグメントの内面に工場でコンクリートを打設したセグメントを製作すれば、そのまま内面が平滑な二次覆工省略形のトンネルが完成する。

結果として、シールド工事の総合的なコスト縮減も期待できる。

今後はこれらの課題を解決して、広汎な実用化のためにさらに研究を進めて行きたいと考えている。

謝辞：本研究を進めるにあたり、種々ご指導・ご助言をいただいた早稲田大学・村上 博智名誉教授および帝都高速度交通営団・渡邊 健元建設本部長に厚く御礼申し上げます。また、試験施工にあたり実際的なご指導をいただいた帝都高速度交通営団・矢萩秀一建設本部長（元 7 号線白金工事事務所長）および前田建設工業（株）土木本部土木部・北川滋樹部長に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小泉 淳：セグメントの新技術，(株)土木工学社，pp. i ~xi，2000.2.
- 2) 石川 幸彦，渡邊 健，佐藤 宏志，宮武 順一，石井 悟：ダクタイルセグメント用トンネル軸方向挿入型継手構造の開発（その1），土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，pp. 1236 ~1237，1995.
- 3) 石川 幸彦，渡邊 健，辻本 和則，宮武 順一，吉野彰一：自動アジャストメントの開発，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，pp. 270~271，1996.
- 4) 石川 幸彦，渡邊 健，鬼橋 保祐，青木 敏行，豊富俊文：ダクタイルセグメント用ASジョイント（トンネル軸方向挿入型継手）の開発（その2）—継手曲げ試験—，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，pp. 280~281，1996.
- 5) 石川 幸彦，渡邊 健，向野 勝彦，奥山 恵昭，佐藤宏志：ASジョイントセグメントの施工試験，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，pp. 278~279，1996.
- 6) 中島 誠三，秋山 真次，八坂 光洋，佐藤 宏志，向野 勝彦：トンネル軸方向挿入型ダクタイルセグメントの開発，トンネル工学研究論文・報告集，第8巻，pp. 40~41，1998.
- 7) 石川 幸彦，渡邊 健，松井 芳彦，辻本 和則，佐藤 宏志：ASセグメントの実物大組立試験，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，pp. 240~241，1997.
- 8) 中島 誠三，渡邊 健，八坂 光洋，佐藤 宏志，辻本 和則ASセグメントの試験施工（その1）組立，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，pp. 284~285，1998.
- 9) 中島 誠三，渡邊 健，八坂 光洋，今野 勉，青木 敏行：ASセグメントの試験施工（その2）計測，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，pp. 286~287，1998.
- 10) (財)先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書，ASセグメント工法，pp.81~88，2000.
- 11) 庄司 功，深海 仁司，酒本 博，佐藤 宏志，青木 敏行：ASセグメントの急曲線施工，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，pp. 260~261，2000.
- 12) 喜田 吉夫，小泉 淳，納見 誠一，山田 幸男：ジョイントセグメントの実施工，トンネル工学研究発表会 論文・報告集，第3巻，報告（28），p. 283，1993.
- 13) 坂口 良孝，松井 芳彦，茂木 徳次郎：ジョイント式継手セグメントの実施工，トンネル工学研究発表会 論文・報告集，第1巻，pp. 113~115，1991.
- 14) 土木学会：トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説，p. 60，p. 67，1996.
- 15) 小栗 富士雄：機械設計図表便覧 新版，p. 24~24，1969.
- 16) 広瀬 光治，浅沼 博，横川 昌彦：厚肉円筒の圧縮座屈現象，塑性加工春季講演会講演論文集，pp. 601~604，1988.
- 17) 土木学会：トンネル標準指方書「シールド工法編」・同解説，pp. 84~85，1996.
- 18) 村上 博智，小泉 淳：シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について，土木学会論文報告集，第296号，pp. 56~69，1980.

(2002. 4. 4 受付)

DEVELOPMENT AND PRACTICAL RESEARCH FOR DUCTILE SEGMENT WHICH HAS HIGH PERFORMANCE IN CONSTRUCTION AND COST

Hiroshi SATO, Katsuhiko MUKUNO, Tsutomu IMANO,
Kazunori TSUJIMOTO and Atsushi KOIZUMI

Recently the requirement of the improvement for the productivity, safety and the cost in the shield tunnel construction are increasing. The ways of the improvement are automated and rapid erection of segment or long distance construction with one machine and omission of secondary lining. We have also developed and practical researched the ductile segment without bolt joint. The purpose of this R&D is to realize automated and rapid erection of the ductile segment. We developed the new joints for ductile segment and we have several test constructed by the ductile segment with the new joints. This paper is described about the process and the result for these R&D.