

内面平滑セグメントの構造性能 A STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF "BOLT-BOXLESS FLAT SEGMENT"

岩藤正彦* 市野道明** 吉成寿男*** 木村定雄*** 原園誠****

Masahiko IWAHUSHI, Michiaki ICHINO, Hisao YOSHINARI, Sadao KIMURA and Makoto HARAZONO

In order to reduce the construction cost of a shield tunneling, it is required to develop the rational segment structure. We have studied and developed "bolt-boxless Flat Segment" which has no exposed metal connectors in the internal surface of the lined area. By applying this segment to shield tunnel, it will be possible to omit secondary linings. This paper describes the concept of bolt-boxless Flat Segment and estimates flexural and shear rigidity of joint based on the result of segment loading test. From the test results, it is confirmed that flexural rigidity is different in response to the shape of joints and the numbers of metal connectors.

Keywords : Shield tunnel, Joint of segment, Segment loading test

1. はじめに

シールド工法は、周辺地盤や近接構造物に与える影響が比較的小さいことから、都市部のトンネル構築工法として急速に発展した。しかしながら、工事費が比較的高いことから、近年その経済化が望まれており、特に全工事費に占める割合が高いセグメントを合理化することが急務とされている。セグメントの合理化を図るためには、①セグメント製造の合理化、②継手金物(締結装置)の簡略化、③セグメント組立の高速化に適した継手構造の合理化、④構造部材としない二次覆工の省略および継手金物の防食処理の省略などを総合して検討することが肝要であると考えられる。

これらを念頭におき、筆者らは、その内面が平滑となるセグメント(以下、内面平滑セグメントと呼ぶ)を研究開発している。内面平滑セグメントはRC平板形セグメントを基本とした板構造であり、継手金物を簡略化またはそれをセグメントの断面内に収納することによりセグメント内外の表面が平滑で、かつ金物類が露出しない継手構造であるため、二次覆工の省略に適したセグメントである。

本論文では内面平滑セグメントのうち、対象となる地盤が軟弱な場合にも対応できる継手構造、すなわちセグメント継手の曲げ剛性が高く、リング間のせん断力の伝達を小さくできる継手構造について検討した結果について述べたものである。

* フェロー 佐藤工業(株) 中央技術研究所
** 正会員 佐藤工業(株) 技術本部土木技術部
*** 正会員 同上
**** 正会員 佐藤工業(株) 技術本部土木設計部

2. 内面平滑セグメントの継手の特徴

2.1 セグメント継手

セグメント継手は、直線くさび式の締結装置(コッター¹⁾)を用い、くさび(以下H形コッターと呼ぶ)をトンネル軸方向から挿入することにより締結効果を得るものとした。図1はその概要を示したものであり、継手金物が部材断面内に収まるものである。また継手面の突合せ方式および継手面あたりの金物数は適用土質に応じて選定できるものとした。この継手の特徴は引張部材となる締結装置が継手の断面高さの任意の位置に設置することが可能となる点にある。すなわち、断面の中心に締結装置を配せば、継手が受ける正負の曲げモーメントに対して同じ抵抗力を付与することができ、また正負の曲げモーメントの大きさに応じた有効高さの設定も可能となる。さらに、締結装置としてコッターを用いているため、継手面に高い初期締付け力(H形コッターに耐力の75~85%のプレストレスを導入)を与えることができ、高力ボルトの引張接合指針に準じた設計²⁾が可能となる。このことは、セグメント継手としての大きな特徴であり、継手面の目開きの抑止やシール材の締付け効果の向上に対しても有効である。

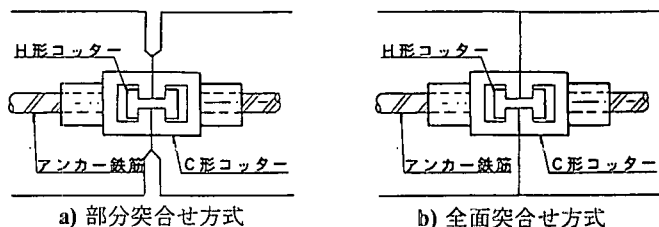


図1 セグメント継手の概要

2.2 リング継手の構造および特徴

リング継手は継手金物を省略し、継手面を突合せることのみでリング間のせん断力の伝達を可能にする Tongue and groove type の突合せ方式を採用した。Tongue and groove type は欧州諸国において古くから考えられている突合せ方式であり、その突合せ面の形状は幾つか提案されている³⁾。今回はその中から、凹凸の表面形状の継手面を帯状で嵌合させるほぞ(帯状ほぞ)と、一つのセグメントのリング継手一面あたり3~4箇所に円錐状の凹凸を設け、それらを嵌合させる円形ほぞの2種類(図2参照)について検討した。前者は「アー 스트リップ」を設置した位置でせん断力を伝達する機構であり、「アー ストリップ」材の圧縮特性等により継手面のずれせん断に対する剛性を評価することが可能である⁴⁾。後者についても前者と同様の考え方によりせん断剛性を評価するものとした。両者の違いは Tongue and groove の形状の違いのみであるが、これによりせん断剛性およびせん断耐力は若干異なる⁷⁾。一方、ジャッキ推力を受ける支圧面の考え方も両者は異なる。帯状ほぞは凸部の頂部および凹部の底部で、円形ほぞは凹凸部以外の平坦部で推力の伝達を行う構造である。以上のように、帯状ほぞと円形ほぞの構造的特徴は異なるが、セグメントの製造性、組立精度および組立作業の効率を考慮して両者から選択できるものとした。

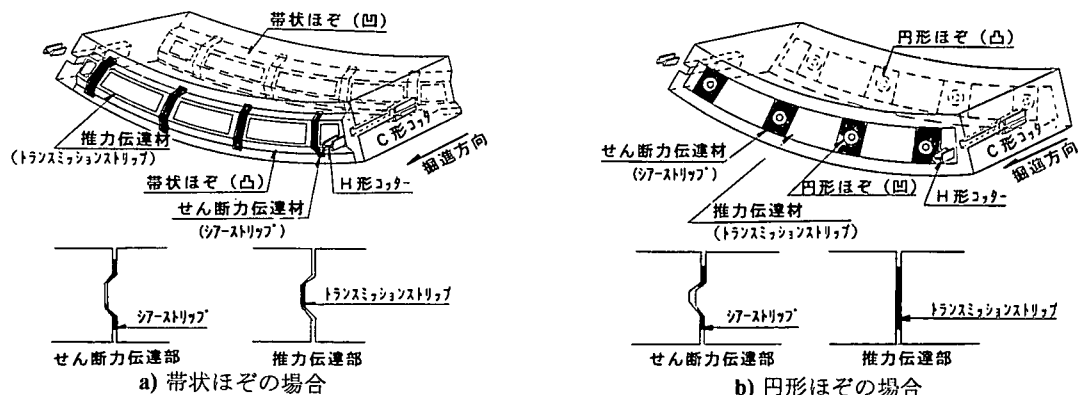


図2 リング継手の概要

3. セグメントの継手の構造性能

3.1 セグメント継手の曲げ試験

継手面の突合せ方式および継手一つ当たりのコッター数が継手部の曲げ剛性に与える影響を把握するために、セグメント継手の曲げ試験を行った。図3および表1は試験概要および計測項目を示したものである。また図4はコッター金物の配置を示したものであり、金物一つをシングルコッター、金物二つをダブルコッターと呼ぶこととする。試験は突合せ方式(部分突合せ, 全面突合せ), コッター金物の数(シングル, ダブル), 導入する軸力(導入軸力: 0, 20, 40, 60tf)をパラメータとした計16ケースについて行った。なお, 全面突合せ方式の供試体は部分突合せ方式の供試体の曲げ圧縮側となる隙間に高強度無収縮モルタルを充填して作成した。また, H形コッターの初期締付け力はそのウェブ部分の平均引張応力度が降伏点の50~60%程度となるようにした。

表1 計測項目

計測項目	計測機器
曲げ載荷荷重	ロードセル
コンクリートのひずみ	ひずみゲージ
鉄筋のひずみ	ひずみゲージ
H形コッターのひずみ	ひずみゲージ
たわみ	高感度変位計
目開き	π 型ゲージ
導入軸力	ひずみゲージ
ひび割れ	目視

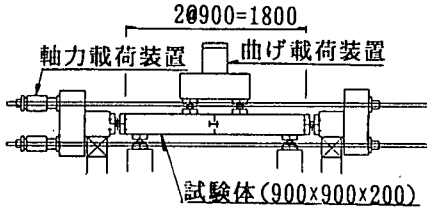


図3 継手曲げ試験の概要

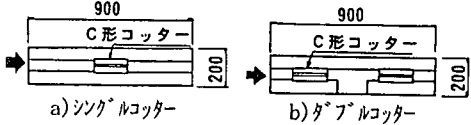


図4 コッター金物配置図

3.2 試験結果

曲げモーメントと継手面の開口角の関係を図5に示す。これより, 今回行った試験の中では全面突合せ方式でダブルコッターの場合が最も曲げ耐力を有することがわかる。また, 図中の $k_{\theta 1}$, $k_{\theta 2}$, $k_{\theta 3}$ は継手部の見かけ上の回転ばね定数(開口角から求めた回転ばね定数)を表わし, 実験値を3つの区間に分けて直線近似して求めたものである。なお, $k_{\theta 2}$, $k_{\theta 3}$ は破壊試験のケース(導入軸力40tfのケース)のみ求めた。区間Iは作用す

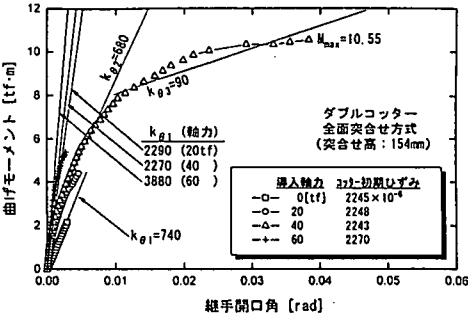
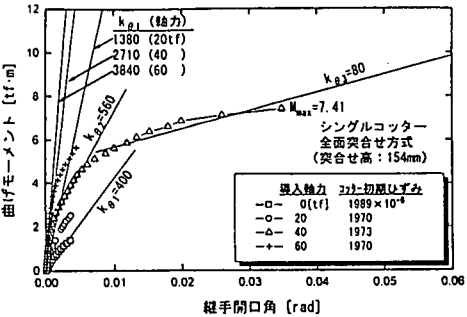
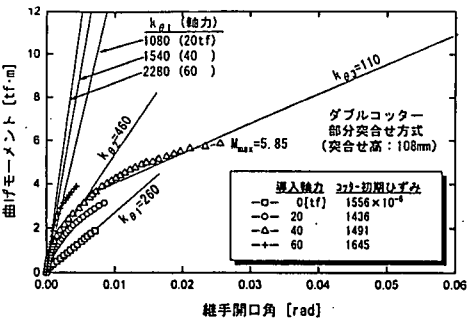
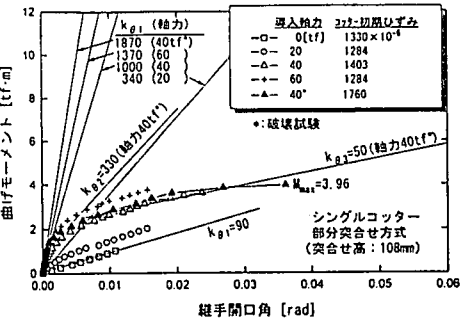


図5 曲げモーメントと継手開口角の関係図

る曲げモーメントが小さい領域であり、導入された軸力により継手面が全断面圧縮状態となる区間である（導入軸力が0の場合は载荷の初期段階）。区間ⅢはH形コッターに生じる引張りひずみが急激に増加し始めた以降の領域である。区間Ⅱはそれら両区間の遷移領域である。 $k_{\theta 1}$ 、 $k_{\theta 2}$ 、 $k_{\theta 3}$ の値は、導入軸力が大きく、コッター金物の組数が1組より2組であるほど、さらには部分突合せ方式に比べて全面突合せ方式の方が大きな値となる傾向にある。

3.3 セグメント継手の曲げ剛性の評価方法

従来多用されてきた直ボルト式の締結装置は、人力により締付けるため、その締付け効果（プレストレスの効果）は小さく、これを実験的に把握することはできなかったようである⁹⁾。本試験で用いた直線くさび式の締結装置（コッター）は簡易な機械でH形コッターを挿入するだけで高い締付け効果を付与することができ、この効果は少なからず継手の曲げ剛性に影響を与えるものと考えられる。さらにまた、継手の曲げ剛性は見かけ上の回転ばね定数（ k_{θ} ）で評価される場合が多く、この k_{θ} は導入軸力、コッター金物の組数および継手面の突合せ方式の影響も受ける。図5から見かけ上の回転ばね定数は曲げモーメントの増加に伴って変化することがわかる。見かけ上の回転ばね定数は、断面力算定（はりーばね計算モデル）に用いる回転ばね定数とは異なるものである。すなわち、見かけ上の回転ばね定数は継手開口角から求めるものであるが、断面力算定に用いる回転ばね定数は継手面に作用する曲げモーメントとその面の不連続性（部材回転角差）によって定まる剛性を意味しており、継手の突合せ方式、形状寸法および締結方法によって一義的に定まる定数と考えられる。ここでは、荷重偏心率（ $m=M/(Nh)$ ）の概念^{4), 6)}を導入し、これを指標として曲げモーメントの増加に伴う見かけ上の回転ばね定数の変化を調べてみる。その結果が図6である。図6から m が0.4程度までは導入軸力の大きさに応じて k_{θ} の値は異なるが、 m が0.4より大きい場合には導入軸力の大きさにかかわらず、それらは同程度の値となっている。次に、先に述べた要因のうち、これまでに明らかにされていない、導入軸力や初期締付け力の大きさが見かけ上の回転ばね定数に与える影響について考察する。まず曲げモーメントの増加とともに、

A：引張縁の応力が零となる段階、B：H形コッターの中心位置で応力が零となる段階、C：H形コッターの初期締付けによるプレストレス以上に引張応力が発生する段階に着目して曲げ剛性の評価方法を考える。図7はAおよびBの段階における応力分布を示したものであり、このときの曲げモーメント M_A および M_B は応力とひずみとの関係が線形であると仮定するとそれぞれ以下の式で与えられる。

$$M_A = N \cdot (h/6) + N \cdot e_0 \quad (1)$$

$$M_B = N \cdot (h/2 - d/3) + N \cdot e_0 = N \cdot (2/3 \cdot d) \quad (2)$$

ここで、 N は導入軸力、 h は突合せ高さ、 d は有効高さ、 e_0 は導入軸力の初期偏心量である。次に、導入軸力を40tfとして曲げ载荷を行ったときのH形コッターウェブのひずみを図8に示す。縦軸は鉛直荷重により生じる曲げモーメントであり、導入軸力の初期偏心による曲げモーメントは含まない。突合せ高さが大きく、コッター金物の組数が多いほど、ひずみが急増し始める時の曲

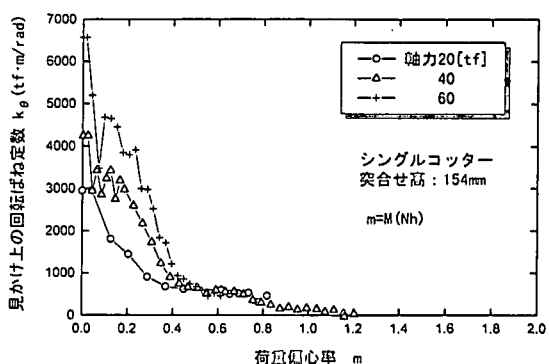


図6 見かけ上の回転ばね定数と荷重偏心率の関係

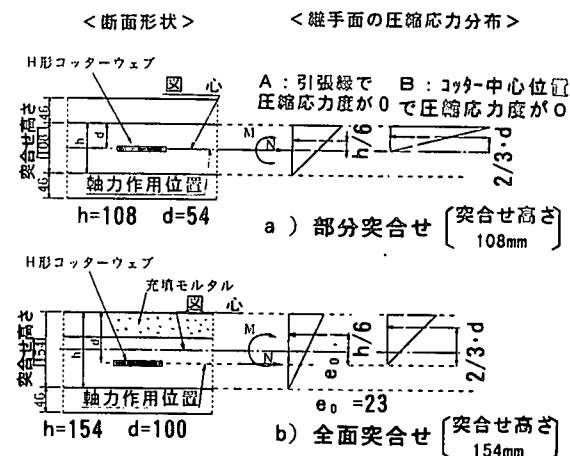


図7 継手面形状と応力分布

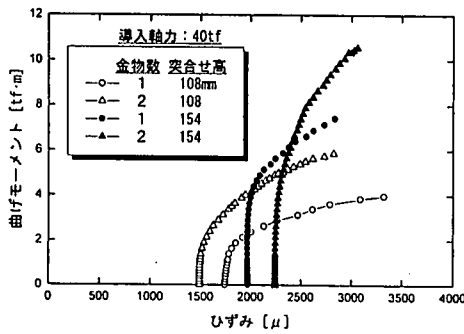


図8 曲げモーメントとH形コッターひずみの関係

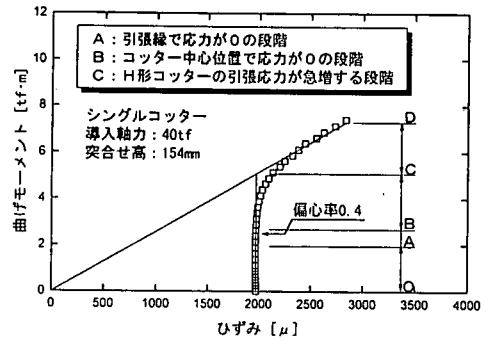


図9 曲げモーメントとH形コッターひずみの関係

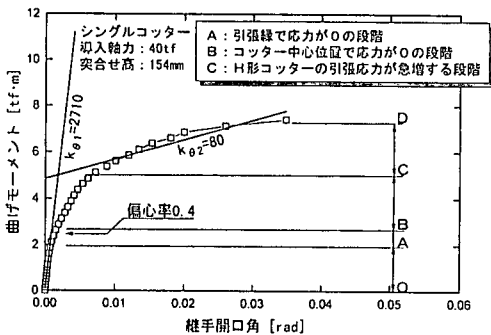


図10 曲げモーメントとH形コッターひずみの関係

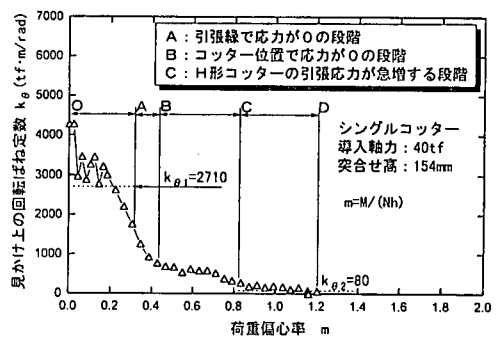


図11 見かけ上の回転ばね定数と荷重偏心率の関係

表2 セグメント継手の曲げ剛性の評価 結果一覧表

領域の区分		O～A	A～B	B	B～C	C以降
曲げ剛性に与える 主な影響要因		← 導入軸力の影響が顕著な領域 →			← 締結装置の影響が顕著な領域 → ← 締付け効果あり →	← 締付け効果無し →
概 要	応力状態と 目開き状態	全圧縮状態 (Aの段階で引張縁 の応力が0) 目開きなし	突合せ高さ内に引 張が生じ、目開きが 発生する段階	目開きが進展し、H 形コッターに引張力 が作用し始める段階	引張力は増加するが、 コッターの初期締付け 力を下回るため、目開 きの増加が小さい段 階	引張力がさらに増加 し、コッターの初期締 付け力を上回り、目開 きが増加する段階
	見かけ上の回 転ばね定数 (k_{θ})の変化	k_{θ} はばらつきが大 きいがほぼ一定値 となる	曲げモーメントの増加と ともに、 k_{θ} は四割に低 下する	k_{θ} はほぼ一定値と なる	締付け効果の残存 により、 k_{θ} はほぼ 一定となる	締付け効果がなくな り、 k_{θ} は低下する
荷重偏心率 (m)		$0 \leq m \leq 0.17$	$0.17 \leq m \leq 0.33$	$m=0.33$	$0.33 \leq m \leq 0.74$	$0.74 \leq m$
部分突合せ: $h=108\text{mm}$ $d=54\text{mm}$ 金物数: 2個 初期締付けひずみ: 1491μ 導入軸力: $N=40\text{tf}$						
見かけ上の回転ばね 定数 k_{θ} (tfm/rad)		1540	1540 → 770	770	770 → 110	110 →
荷重偏心率 (m)		$0 \leq m \leq 0.32$	$0.32 \leq m \leq 0.44$	$m=0.44$	$0.44 \leq m \leq 0.82$	$0.82 \leq m$
全面突合せ: $h=154\text{mm}$ $d=100\text{mm}$ 金物数: 1個 初期締付けひずみ: 1970μ 導入軸力: $N=40\text{tf}$ 初期偏心量: $e=23\text{mm}$						
見かけ上の回転ばね 定数 k_{θ} (tfm/rad)		2710	2710 → 680	680	680 → 80	80 →

げモーメントが大きいことが分かる。図9はソグコッターの場合で全面突合せ(突合せ高さ154mm)のケースのみを抽出したものである。図中のC点はH形コッターの締付け効果が得られる限界⁷⁾を示している。図10および図11は曲げモーメントと開口角との関係および見かけ上の回転ばね定数と荷重偏心率との関係を示したものである。領域OAでは継手が全断面圧縮状態にあり、中立軸の位置は変化しない。またコッターは中立軸近傍に配置されているため、H形コッターの中心位置では、曲げモーメントの増加に伴うコッターのひずみの変化量は微小である。したがって、この領域ではコッター金物数や締付け効果が見かけ上の回転ばね定数に与える影響は小さく、突合せ高さや導入軸力の影響が顕著となる。領域ABでは圧縮域が減少し始めるため、見かけ上の回転ばね定数は大きく低下する。H形コッターの中心位置ではひずみに変化が生じるが、締付け効果が十分に残存しているためコッターのひずみはほとんど変化しない。また見かけ上の回転ばね定数がほぼ一定となりだす荷重偏心率0.4の段階はBの段階と概ね一致する。領域BCではH形コッターの中心位置に引張りひずみが生じるが、コッターには締付け効果が残存しひずみの変化量は小さい。この領域の見かけ上の回転ばね定数は、次の領域CDと比較して若干高い値となる。領域CDでは締付け効果がなくなり、H形コッターのひずみは急増する。その際、見かけの回転ばね定数は小さな値となり、継手はヒンジ的挙動を示す。これらの状況をまとめて示したのが表2である。

4. リング継手の構造性能

4.1 リング継手の構造性能

リング継手のせん断試験は図12に示す2面せん断試験であり、リング継手半径方向の基本的なせん断伝達機構を把握するために行ったものである。計測項目は表3に示したとおりである。図13は試験に用いた供試体の継手面の形状を示したものである。シアーストリップ材は厚さ3mmの合成ゴムであり、トランスミッションストリップ材は厚さ3mmの硬質繊維板とした。試験はほぞの形状(帯状、円形)、導入軸力(5, 20, 40tf)をパラメータとした計6ケースについて行った。

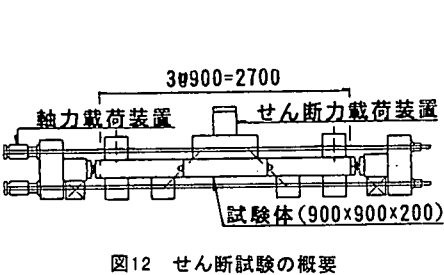


図12 せん断試験の概要

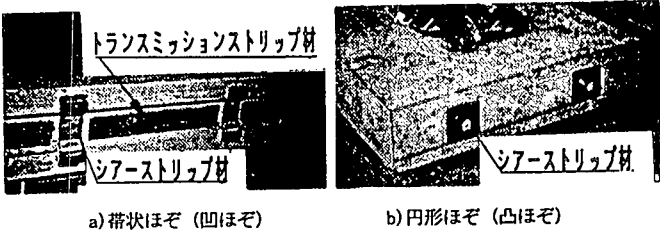
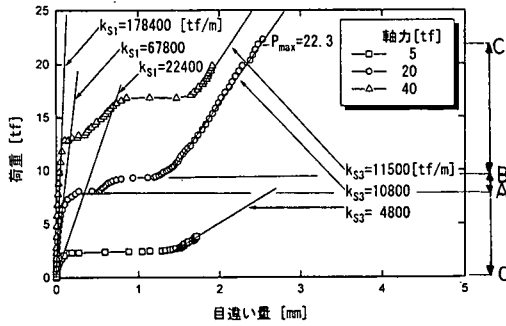


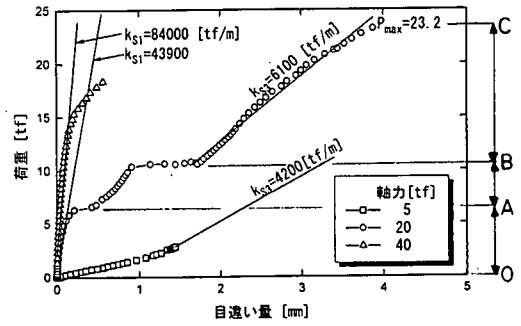
図13 リング継手の突合せ形状

4.2 リング継手のせん断剛性

一継手面あたりの荷重(せん断力)と目違い量の関係を図14に示す。荷重と目違い量の関係は、継手面の摩擦および拘束力(導入軸力)により目違い量が微小な領域(領域OA)、せん断力が摩擦抵抗力を上回りすべりが生じる領域(領域AB)、凹と凸の嵌合によって継手面が拘束され、シアーストリップ材が圧縮される領域(領域B以降)の3つの領域に分けて考えられる。図14中の k_{s1} 、 k_{s3} は継手の見かけ上のせん断ばね定数(せん断力を目違い量で除したもの)であり、領域OAおよび領域B以降における実験値を直線近似して求めたものである。領域OAでは、帯状ほぞおよび円形ほぞの両者ともに導入軸力が大きいほど k_{s1} は大きな値となる。また導入軸力が同じ場合の両者を比較すると、円形ほぞに比べて帯状ほぞの方が k_{s1} は大きな値となる。これは、トシ



a) 帯状ほぞ



b) 円形ほぞ

図14 1継手面当たりの載荷量と継手目違い量の関係

ミッションストリップの有無により摩擦抵抗に差があるためと考えられる。領域BCを見ると、帯状ほぞの k_{S3} の値が円形ほぞのそれの1.8倍程度となっている(導入軸力20tfの場合)。この領域のせん断剛性がシアストリップ材の圧縮特性に依存していること^{a)}を合わせ考えると、せん断剛性の差は、円形ほぞの凹凸の斜辺部が曲面形状であるため、せん断力の作用方向に対して有効に働く斜辺の面積が帯状ほぞのそれと比べて小さいためと考えられる。

凹の顎部における荷重とコンクリートのせん断引張ひずみおよびせん断補強筋のひずみの関係を図15に示す。この図は帯状ほぞの場合であり、円形ほぞの場合もこれと同様の結果を得ている。図14および図15から凹の顎部のせん断破壊は次のように進行するものと考えられる。せん断力が継手面の摩擦抵抗を上回る段階で継手面がすべり出し、コンクリートの引張ひずみおよびせん断補強筋のひずみが増加し始める(領域OA)。せん断力が凹の顎部のコンクリートのせん断強度を上回り、せん断補強筋の効果が顕著となる(領域AB)。せん断補強筋の先端のコンクリートが脱落して破壊する(領域BC)。図16に帯状ほぞおよび円形ほぞのせん断耐力と破壊形状を示す。せん断耐力はせん断伝達部(シアストリップ設置位置)1箇所あたりの値であり、両者のせん断耐力は概ね同じであった。

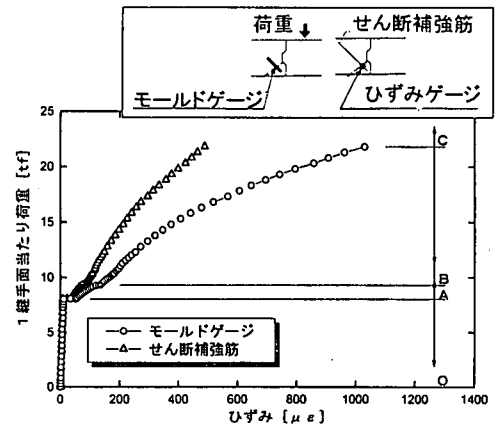
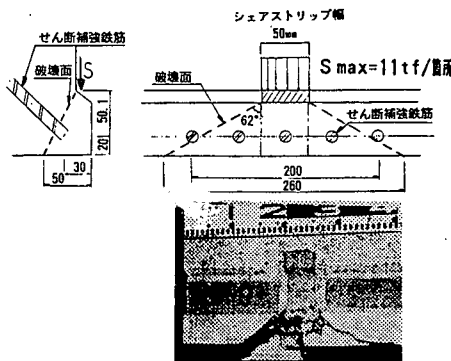


図15 1継手面当たりのひずみと荷重の関係
(帯状ほぞ、軸力20tf)

a) 帯状ほぞ



b) 円形ほぞ

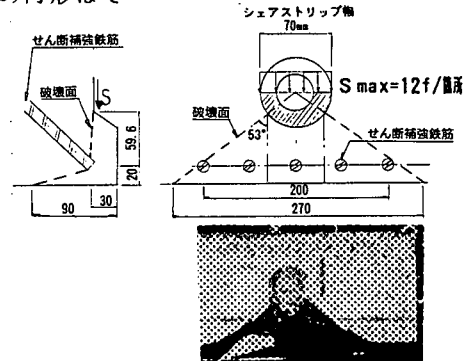


図16 ほぞのせん断耐力と破壊形状

5. おわりに

本論分は内面平滑セグメントのうち、軟弱地盤にも対応できるタイプの継手構造の考え方について述べるとともに、試験から確認した継手構造の性能について述べた。ここで得られた知見を挙げると以下のとおりである。

- (1) セグメント継手の見かけ上の回転ばね定数は、導入する軸力、継手面の突合せ方式および継手面あたりの締結装置(コッター金物)の数に応じて異なる。
- (2) 導入する軸力の影響とコッターの締付け力による影響とを分離して、セグメント継手の曲げ挙動を評価することができる。
- (3) リング継手のせん断剛性および耐力は、凹凸の形状にかかわらず、ほぼ同じである。

ここで述べたセグメント継手やリング継手の構造は、すでに実用化されている継手構造を応用し発展させたものであるが、止水機構等、継手構造の詳細な仕様をさらに熟考することが必要であると考えている。今後は、セグメント組立等の施工性、地震時や不等沈下時に対する構造性を考慮して、リング間の締結方法等、さらに継手構造の合理化を検討する予定である。最後に本研究開発を進めるにあたり、東京都立大学 山本稔名誉教授からご指導をいただいた。ここに謝意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) たとえば、松井ほか：コッター式継手の基礎実験，トンネル工学研究発表会論文報告集，Vol. 2，1992. 10.
- 2) 日本鋼構造協会：橋梁用高力ボルト引張接合設計指針(案)，1993. 2.
- 3) たとえば、K. Szechy：The art of tunnelling. AKA DEMIAI KADO, BUDAPEST, 1966.
- 4) たとえば、林ほか：ガス導管シールドトンネル用セグメントの開発，トンネル工学研究論文報告集，Vol. 5，1995. 11.
- 5) たとえば、小山，松本，稲垣：シールドセグメント継手試験と継手ばね定数の検討，トンネル工学学研究発表会論文報告集，Vol. 4，1994. 11.
- 6) 西岡ほか：CONNEX SYSTEMのセグメント設計手法について，土木学会年次学術講演会，Ⅲ-619，1995. 9
- 7) 村上，小泉：シールド工事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，No. 296，1980. 4.
- 8) 平出，福島：ホゾ付きセグメントの性能確認実験，トンネルと地下，Vol. 25，No. 10，1994. 10.